

การเตรียมผังคอมโพสิทของยางธรรมชาติและซิลิกาด้วยการอบแห้งแบบพ่นฝอย

นายปรัชญา ไสภานนท์

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

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 Graduate School.

PREPARATION OF NATURAL RUBBER/SILICA COMPOSITE POWDER BY SPRAY
DRYING

Mr. Prachaya Sopanon

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 2011

Copyright of Chulalongkorn University

ปรัชญา โสภานนท์ : การเตรียมผงคอมโพสิตของยางธรรมชาติและซิลิกาด้วยการอบแห้งแบบพ่นฝอย. (PREPARATION OF NATURAL RUBBER/SILICA COMPOSITE POWDER BY SPRAY DRYING) อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ.ดร.อภิรักษ์ สุทธิธรรวัช, 86 หน้า.

ผงยางธรรมชาติถูกใช้อย่างกว้างขวางในการเป็นตัวเติมในอุตสาหกรรมพอลิเมอร์ เนื่องจากคุณสมบัติทางกลของยางธรรมชาติที่มีค่าความยืดหยุ่นสูง พอลิเมอร์ที่ผสมกับยางธรรมชาติจะถูกปรับปรุงคุณสมบัติต่างๆ ได้แก่ ความอ่อนตัว การทนต่อแรงกระแทก และนอกเหนือไปจากนั้นยังเป็นการลดค่าความเป็นผลึกให้กับพอลิเมอร์อีกด้วย ผงยางธรรมชาติสามารถเตรียมได้จากการอบแห้ง โดยเทคนิคการอบแห้งที่นิยมคือการอบแห้งแบบพ่นฝอย การอบแห้งแบบพ่นฝอยมีคุณสมบัติที่โดดเด่นในด้านของการควบคุมขนาดของอนุภาคที่สังเคราะห์และง่ายต่อการขยายไปสู่การผลิตในระดับอุตสาหกรรม แต่อย่างไรก็ตามผงยางธรรมชาตินั้นไม่สามารถเตรียมได้โดยตรง เนื่องจากคุณสมบัติในการยึดเกาะติดกันของอนุภาคยางธรรมชาติทำให้จำเป็นต้องห่อหุ้มอนุภาคของยางธรรมชาติ โดยในงานวิจัยนี้จะใช้กระบวนการห่อหุ้มยางธรรมชาติด้วยซิลิกาที่เตรียมจากเทคนิคโซล - เจล โดยจะควบคุมความเข้มข้นของของแข็งรวมของสารผสมไว้ที่ 20 เปอร์เซ็นต์ หลังจากนั้นจึงป้อนสารผสมเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยเพื่อสังเคราะห์ผงคอมโพสิตของยางธรรมชาติและซิลิกา โดยจะทำการศึกษาหาสภาวะของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่เหมาะสมในการเตรียมผงคอมโพสิต และผงที่ได้จะถูกนำไปวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ ได้แก่ ปริมาณของซิลิกา ลักษณะรูปร่างสัณฐาน และขนาดของอนุภาคของผงคอมโพสิต หลังจากนั้นผงคอมโพสิตที่ได้จะถูกนำไปตัดเม็ดพลาสติกด้วยการผสมกับพอลิแลคติกแอซิดด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ ก่อนนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานหนาเพื่อใช้ทดสอบคุณสมบัติทางกลต่างๆ อาทิ ค่าการรองรับแรงกระแทก ค่าความเค้นสูงสุด และค่าการยืดตัว ณ จุดขาด โดยพบว่าที่ความเข้มข้นของของแข็งรวมของสารผสมที่ 20 เปอร์เซ็นต์นี้สามารถเตรียมผงคอมโพสิตของยางธรรมชาติและซิลิกาได้และผงคอมโพสิตที่ได้นี้สามารถใช้เพิ่มค่าการรองรับแรงกระแทกให้กับพอลิเมอร์ได้อีกด้วย

ภาควิชา.....วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา.....วิศวกรรมเคมี..... ลายมือชื่อ อ.ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา.....2554.....

547026521: MAJOR CHEMICAL ENGINEERING

KEYWORDS: NATURAL RUBBER/SILICA COMPOSITE POWDER/ SPRAY DRYING

PRACHAYA SOPANON: PREPARATION OF NATURAL RUBBER/SILICA COMPOSITE POWDER BY SPRAY DRYING. ADVISOR: ASST. PROF. APINAN SOOTTITANTAWAT, D.Eng., 86 pp.

Natural rubber powder (NRP) is widely used as an additive in polymer industries because of its mechanical properties with high tensile modulus. It gives improvements of ductility, impact strength and also the decrease of crystallization of polymer blended with NRP. NRP was successfully prepared by spray drying method. The advantages of spray drying method were able to control the particle size with of ease of scaling up. However, NRP could not be directly produced due to inherit properties of rubber that were adhered together. Therefore, the coating or encapsulation of rubber particle by sol-gel method was reported to produce NRP. In addition to the spray drying, the sol-gel process was used to encapsulate rubber particle with silica (SiO_2). The sol was prepared and mixed with the pre-vulcanized latex suspension. The solid content of the mixture was controlled at 20 wt%. Then, the mixture was fed through the spray dryer. The appropriate conditions of the spray drying and the mixing ratio between SiO_2 and rubber particle to prepare the non-agglomerated NRP were investigated. The amount of SiO_2 , morphology, size and size distribution of rubber particle were investigated by using TGA, SEM-EDX and laser light scattering technique, respectively. Thereafter, the obtained composite powder was blended with polylactide (PLA) by twin screw extruder. Their mechanical properties as impact value, tensile strength and elongation at break were measured by impact tester and universal testing machine. At the feed solid content at 20 wt%, NRP encapsulated with silica was successfully prepared by spray drying. Composite powder from this process could improve impact value of polymer.

Department:Chemical Engineering..... Student's Signature.....

Field of Study:Chemical Engineering..... Advisor's Signature.....

Academic Year: ...2011.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงเป็นอย่างดี ได้รับความช่วยเหลือจาก ผศ.ดร.อภิรักษ์ สุทธิธรรมากร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ หลักที่ได้กรุณาให้คำแนะนำเพื่อแก้ไขปัญหาและวิเคราะห์งานวิจัยจนสำเร็จเป็นอย่างดี ขอขอบคุณ รศ.ดร.ธวัชชัย ชรินพานิชกุล ประธานกรรมการ ผศ.ดร.อนงค์นาฏ สมหวังธนโรจน์ ผศ.ดร.วรงค์ ปวรอาจารย์ และ ดร.วิยงค์ กังวานสุขุมมงคล กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ได้รับความช่วยเหลือตั้งแต่การตรวจสอบโครงร่างวิทยานิพนธ์ ให้คำปรึกษาแนะนำตลอดจนแก้ไขเพิ่มเติมส่วนที่บกพร่องของงานวิจัยนี้

ขอขอบคุณครอบครัวที่คอยให้การสนับสนุน และเป็นกำลังใจให้ ขอขอบคุณ พี่ๆ และเพื่อนๆ ทุกคนในศูนย์เชี่ยวชาญเทคโนโลยีอนาคต ที่ให้ความช่วยเหลือในด้านข้อมูลในการทำวิจัย ข้อคิดเห็นต่างๆ และกำลังใจที่มอบให้อย่างต่างเนื่องเสมอมา รวมถึง คุณภูษณิศรา ภัทรโชติเศวต ที่ให้ความช่วยเหลือดำเนินการด้านการเงินในการซื้ออุปกรณ์ และค่าใช้จ่ายในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณศูนย์เชี่ยวชาญเทคโนโลยีอนาคตไทยและห้องปฏิบัติการพอลิเมอร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย รวมถึงพี่ๆ ในห้องปฏิบัติการ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง คุณกฤษชัย กาญจนประภากุล สำหรับการอำนวยความสะดวกในด้านสถานที่ และอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และทุนจุฬาฯ 100 ปี ประจำปีการศึกษา 2554 ที่มอบทุนการศึกษาและค่าใช้จ่ายในการศึกษาและการทำวิจัยตลอดการเรียนในระดับปริญญาโท

จึงขอกล่าวนามและแสดงความขอบคุณไว้ ณ ที่นี้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ญ
สารบัญภาพ	ฎ
บทที่	
1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย	3
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 ยางธรรมชาติ	5
2.1.1 โครงสร้างและสมบัติของยางธรรมชาติ	7
2.1.2 น้ำยางข้นชนิดพรีวัลคาไนซ์	8
2.2 เทคนิคโซล-เจล	11
2.2.1 เทคนิคโซล-เจลในการเตรียมผงซิลิกา	11
2.2.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาในเทคนิคโซล-เจล.....	12
2.3 เทคนิคการกักเก็บสารสำคัญ	13
2.4 กระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย.....	14
2.4.1 การทำให้สายป้อนเป็นละอองฝอย	16
2.4.2 การสัมผัสของละอองฝอยกับอากาศ	17
2.4.3 การระเหยของละอองฝอย	20
2.4.4 การแยกผลิตภัณฑ์แห้งจากอากาศ	20
2.4.5 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย	20
2.5 ผงคอมโพสิตของยางธรรมชาติและซิลิกา	21

2.6	บทความวิจัยที่เกี่ยวข้อง	22
2.6.1	การเตรียมและการนำผงยางไปใช้ปรับปรุงคุณสมบัติของพอลิเมอร์	22
2.6.2	การเตรียมผงซิลิกาด้วยเทคนิคโซล-เจล จากโซเดียมซิลิเกต	23
2.6.3	การห่อหุ้มสารสำคัญด้วยซิลิกา	24
2.6.4	การเตรียมผงคอมโพสิตของยางกับสารชนิดต่างๆ	25
3	วิธีการดำเนินงานวิจัย	26
3.1	วัตถุประสงค์และสารเคมี	26
3.2	วิธีการทดลอง	26
3.2.1	การเตรียมผงคอมโพสิตของยางธรรมชาติและซิลิกา	26
3.2.2	การเตรียมเม็ดพลาสติกและชิ้นงานหนาที่ผสมระหว่าง PLA กับผงคอมโพสิต	28
3.3	การทดสอบสมบัติต่างๆ	31
3.3.1	การวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างพื้นฐานของอนุภาค	31
3.3.2	การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของขนาดอนุภาค	32
3.3.3	การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนและปริมาณของซิลิกาในอนุภาค	32
3.3.4	การวิเคราะห์สมบัติทางกลของอนุภาค	33
4	ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ข้อมูล	35
4.1	การศึกษาสภาวะการอบแห้งแบบพ่นฝอยในการเตรียมผงคอมโพสิต	35
4.1.1	ความเข้มข้นของสายป้อน	35
4.1.1.1	ผลต่อลักษณะพื้นฐานของอนุภาค	35
4.1.1.2	ผลต่อขนาดและการกระจายตัวของขนาดอนุภาค	38
4.1.1.3	ผลต่อสมบัติทางความร้อนและปริมาณซิลิกาในอนุภาค	39
4.1.1.4	ผลต่อการห่อหุ้มอนุภาคยางธรรมชาติด้วยอนุภาคซิลิกา	45
4.1.2	อัตราเร็วของสายป้อน	48
4.1.2.1	ผลต่อลักษณะพื้นฐานของอนุภาค	48
4.1.2.2	ผลต่อขนาดและการกระจายตัวของขนาดอนุภาค	50
4.1.2.3	ผลต่อสมบัติทางความร้อนและปริมาณซิลิกาในอนุภาค	53

บทที่	หน้า
4.1.2.4 ผลต่อการห่อหุ้มอนุภาคยางธรรมชาติด้วยอนุภาคซิลิกา	54
4.1.3 อุณหภูมิอากาศขาเข้า.....	56
4.1.3.1 ผลต่อลักษณะพื้นฐานของอนุภาค.....	56
4.1.3.2 ผลต่อขนาดและการกระจายตัวของขนาดอนุภาค	58
4.1.3.3 ผลต่อสมบัติทางความร้อนและปริมาณซิลิกาในอนุภาค	59
4.1.3.4 ผลต่อการห่อหุ้มอนุภาคยางธรรมชาติด้วยอนุภาคซิลิกา	60
4.2 การศึกษาผลด้านการเติมผงคอมโพสิตในพอลิแลคติกแอซิด	62
4.2.1 ผลต่อลักษณะพื้นฐานและการกระจายตัวของผงคอมโพสิต.....	62
4.2.2 ผลต่อสมบัติทางความร้อน	65
4.2.3 ผลต่อสมบัติทางกล.....	67
4.2.3.1 ผลต่อสมบัติการรับแรงกระแทก	67
4.2.3.2 ผลต่อสมบัติการรับแรงดึง	69
5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	74
รายการอ้างอิง.....	75
ภาคผนวก.....	79
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	86

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 องค์ประกอบของน้ำยางสดและน้ำยางที่ผ่านกระบวนการอบแห้ง	6
2.2 สูตรผสมเคมีของน้ำยางชั้นพีวีแอลคาโนซีในระบบกำมะถัน	10
2.3 สูตรผสมเคมีของน้ำยางชั้นพีวีแอลคาโนซีในระบบเพอร์ออกไซด์	10
3.1 ส่วนผสมของสารผสมที่อัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกาต่างๆ	27
3.2 คุณสมบัติอากาศขาออกในการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อุณหภูมิอากาศขาเข้าต่างๆ	27
4.1 อัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกาที่แท้จริงในผงคอมโพสิต	44
4.2 ปริมาณของธาตุที่บริเวณผิวชั้นนอกของอนุภาคที่อัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกาต่างๆ	45
4.3 ผลของอัตราสายป้อนต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคผงคอมโพสิตที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 160°C.....	52
4.4 ผลของอัตราสายป้อนต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคผงคอมโพสิตที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อัตราสายป้อน 9 mL/min.....	58
4.5 ผลของการเติมผงคอมโพสิตที่เตรียมจากค่าอัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกาต่างๆใน PLA ต่อค่าคุณสมบัติทางความร้อนต่างๆ	66
4.6 ผลของการเติมผงคอมโพสิตที่มีอัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกา 2:1 ที่มีค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคต่างกันต่อค่า Young's Modulus ของ PLA	70
4.7 ผลของการเติมผงคอมโพสิตที่มีอัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกา 2:1 ที่มีความสามารถในการห่อหุ้มยางธรรมชาติด้วยซิลิกาต่างกันตามอุณหภูมิอากาศขาเข้าต่อค่า Young's Modulus ของ PLA.....	71
ก .1 ค่าการรับแรงกระแทกของชิ้นงาน PLA ที่ผสมกับผงคอมโพสิตที่มีอัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกา 2:1 ที่มีความสามารถในการห่อหุ้มอนุภาคยางธรรมชาติด้วยซิลิกาต่างกันตามอุณหภูมิอากาศขาเข้า	80
ก .2 ค่าการรับแรงดึงของชิ้นงาน PLA ที่ผสมกับผงคอมโพสิตที่มีอัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกา 2:1 ที่มีความสามารถในการห่อหุ้มอนุภาคยางธรรมชาติด้วยซิลิกาต่างกันตามอุณหภูมิอากาศขาเข้า	81
ก .3 ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของชิ้นงาน PLA ที่ผสมกับผงคอมโพสิตที่มีอัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกา 2:1 ที่มีความสามารถในการห่อหุ้มอนุภาคยางธรรมชาติด้วยซิลิกาต่างกันตามอุณหภูมิอากาศขาเข้า	82

ตารางที่	หน้า
ก .4 ค่าการรับแรงกระทำของชิ้นงาน PLA ที่ผสมกับผงคอมโพสิตที่มีอัตราส่วนโดยมวลของ ยางธรรมชาติต่อซิลิกา 2:1 ที่มีขนาดเฉลี่ยของอนุภาคต่างกัน 83	
ก .5 ค่าการรับแรงดึงของชิ้นงาน PLA ที่ผสมกับผงคอมโพสิตที่มีอัตราส่วนโดยมวลของยาง ธรรมชาติต่อซิลิกา 2:1 ที่มีขนาดเฉลี่ยของอนุภาคต่างกัน 84	
ก .6 ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของชิ้นงาน PLA ที่ผสมกับผงคอมโพสิตที่มีอัตราส่วนโดยมวล ของยางธรรมชาติต่อซิลิกา 2:1 ที่มีขนาดเฉลี่ยของอนุภาคต่างกัน 85	

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1	โครงสร้างของอนุภาคยางในน้ำยางธรรมชาติ 6
2.2	โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ..... 7
2.3	ชนิดของไมโครแคปซูล 13
2.4	ส่วนประกอบต่างๆของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย 14
2.5	รูปทรงของผลิตภัณฑ์แบบต่างๆที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย 15
2.6	หัวฉีดแบบหมุน 16
2.7	หัวฉีดแบบแรงดัน 17
2.8	หัวฉีดแบบสองของไหล 17
2.9	การไหลผ่านทางเดียวกัน..... 18
2.10	การไหลผ่านสวนทางกัน..... 19
2.11	การไหลแบบผสม 19
2.12	กลไกการเกิดผงคอมโพสิตของยางธรรมชาติและซิลิกา 21
3.1	เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย..... 28
3.2	เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ 29
3.3	เครื่องขึ้นรูปแบบอัด 29
3.4	ขนาดของชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D256 30
3.5	ขนาดของชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D638 Type I 30
3.6	เครื่อง กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด..... 31
3.7	เครื่อง Laser Diffraction Analyzer 32
3.8	เครื่อง Thermogravimetric Analyzer 33
3.9	เครื่องวัดแรงกระแทก 34
3.10	เครื่องทดสอบเนกประสงค์ 34
4.1	ลักษณะพื้นฐานของอนุภาค (a) ยางธรรมชาติ และ (b) ซิลิกา ที่ผ่านเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สภาวะอุณหภูมิอากาศขาเข้าที่ 160°C อัตราการป้อนสาร 9 mL/min 36
4.2	ลักษณะพื้นฐานของอนุภาคผงคอมโพสิตของยางธรรมชาติและซิลิกาที่ผ่านเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สภาวะอุณหภูมิอากาศขาเข้าที่ 160°C อัตราการป้อนสาร 9 mL/min ที่ อัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกา (a) 0.25:1, (b) 0.5:1, (c) 1:1, (d) 2:1 , (e) 6:1 และ (f) 10:1 ที่กำลังขยาย 6000 เท่า 37

ภาพที่	หน้า
4.3 ผลของอัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติและซิลิกาต่อการกระจายตัวของขนาดของอนุภาคผงคอมโพสิตที่เตรียมจากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อัตราสายป้อน 9 mL/min อุณหภูมิอากาศขาเข้า 160°C.....	38
4.4 ผลของอัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติและซิลิกาต่อค่าเฉลี่ยทางเรขาคณิตของเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคผงคอมโพสิตที่เตรียมจากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่เตรียมจากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อัตราสายป้อน 9 mL/min อุณหภูมิอากาศขาเข้า 160°C	39
4.5 สมบัติทางความร้อนของผงซิลิกาที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สภาวะอุณหภูมิอากาศขาเข้าที่ 160°C อัตราการป้อนสาร 9 mL/min	40
4.6 สมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สภาวะอุณหภูมิอากาศขาเข้าที่ 160°C อัตราการป้อนสาร 9 mL/min	40
4.7 สมบัติทางความร้อนของผงคอมโพสิตที่เตรียมจากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อัตราสายป้อน 9 mL/min อุณหภูมิอากาศขาเข้า 160°C ที่อัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกาที่ 0.5:1	41
4.8 สมบัติทางความร้อนของผงคอมโพสิตที่เตรียมจากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อัตราสายป้อน 9 mL/min อุณหภูมิอากาศขาเข้า 160°C ที่อัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกาที่ 2:1	42
4.9 สมบัติทางความร้อนของผงคอมโพสิตที่เตรียมจากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อัตราสายป้อน 9 mL/min อุณหภูมิอากาศขาเข้า 160°C ที่อัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกาที่ 10:1	43
4.10 ผลต่ออัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกาต่อสมบัติทางความร้อนของผงคอมโพสิตที่เตรียมจากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อัตราสายป้อน 9 mL/min อุณหภูมิอากาศขาเข้า 160°C.....	44
4.11 แผนภาพแสดงการวิเคราะห์ธาตุ Si และ C ตามลำดับบนผิวอนุภาคผงคอมโพสิตที่อัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกา (a) 0.25:1, (b) 1:1, (c) 2:1, (d) 6:1 และ (e) 10:1.....	47
4.12 ลักษณะพื้นฐานของอนุภาคผงคอมโพสิตของยางธรรมชาติและซิลิกาที่ผ่านเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สภาวะอุณหภูมิอากาศขาเข้าที่ 160°C ที่อัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกา 2:1 ที่อัตราการป้อนสาร (a) 7, (b) 9, (c) 11 และ (d) 13 mL/min	49

ภาพที่	หน้า
4.13 การกระจายตัวของขนาดของอนุภาคผงคอมโพสิตที่อัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกาที่ 0.25:1 อุณหภูมิอากาศขาเข้า 160°C	50
4.14 การกระจายตัวของขนาดของอนุภาคผงคอมโพสิตที่อัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกาที่ 0.5:1 อุณหภูมิอากาศขาเข้า 160°C	51
4.15 การกระจายตัวของขนาดของอนุภาคผงคอมโพสิตที่อัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกาที่ 1:1 อุณหภูมิอากาศขาเข้า 160°C	51
4.16 การกระจายตัวของขนาดของอนุภาคผงคอมโพสิตที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกาที่ 2:1 อุณหภูมิอากาศขาเข้า 160°C	52
4.17 ผลของอัตราสายป้อนต่อสมบัติทางความร้อนของผงคอมโพสิตที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกาที่ 2:1 อุณหภูมิอากาศขาเข้า 160°C	53
4.18 แผนภาพแสดงการวิเคราะห์ธาตุ Si และ C ตามลำดับบนผิวอนุภาคผงคอมโพสิตของยางธรรมชาติและซิลิกาที่ผ่านเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สภาวะอุณหภูมิอากาศขาเข้าที่ 160°C ที่อัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกา 2:1 ที่อัตราการป้อนสาร (a) 7, (b) 9, (c) 11 และ (d) 13 mL/min	55
4.19 ลักษณะพื้นฐานของอนุภาคผงคอมโพสิตของยางธรรมชาติและซิลิกาที่ผ่านเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สภาวะอัตราการป้อนสารที่ 9 mL/min อัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกา 2:1 ที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า (a) 120 (b) 140 (c) 160 และ (d) 180°C ที่กำลังขยาย 6000 เท่า	57
4.20 การกระจายตัวของขนาดของอนุภาคผงคอมโพสิตที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกาที่ 2:1 อัตราสายป้อน 9 mL/min	58
4.21 ผลของอัตราสายป้อนต่อสมบัติทางความร้อนของผงคอมโพสิตที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกาที่ 2:1 อัตราสายป้อน 9 mL/min	59
4.22 แผนภาพแสดงการวิเคราะห์ธาตุ Si และ C ตามลำดับบนผิวอนุภาคผงคอมโพสิตที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกาที่ 2:1 อัตราสายป้อน 9 mL/min ที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า (a) 120, (b) 140, (c) 160 และ (d) 180°C	61

ภาพที่	หน้า
4. 23 ลักษณะสัณฐานของชิ้นงานหนา (a) PLA (b) PLA+0.5:1 NR-Silica (c) PLA+1:1 NR-Silica และ (d) PLA+2:1 NR-Silica ที่กำลังขยาย 1000 เท่า.....	63
4.24 แผนภาพแสดงการวิเคราะห์ธาตุ Si บนชิ้นงานหนา (a) PLA+0.5:1 NR-Silica (b) PLA+1:1 NR-Silica และ (c) PLA+2:1 NR-Silica ที่กำลังขยาย 1000 เท่า.....	64
4.25 ผลของการเติมผงคอมโพสิตที่เตรียมจากค่าอัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกาต่างๆใน PLA ต่อการถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ	66
4.26 ผลของการเติมผงคอมโพสิตที่มีค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคต่างกัน ที่อัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกา 2:1 ต่อค่าการรับแรงกระแทก	68
4.27 ผลของการเติมผงคอมโพสิตที่มีอัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกา 2:1 ที่มีความสามารถในการห่อหุ้มอนุภาคยางธรรมชาติด้วยซิลิกาต่างกันตามอุณหภูมิอากาศขาเข้าต่อค่าการรับแรงกระแทก	68
4.28 ผลของการเติมผงคอมโพสิตที่มีอัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกา 2:1 ที่มีค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาค (a) 6.93 μm , (b) 7.65 μm , (c) 8.15 μm และ (d) 8.28 μm ต่อความค่าความเค้นและความเครียดของ PLA	70
4.29 ผลของการเติมผงคอมโพสิตที่มีอัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกา 2:1 ที่มีความสามารถในการห่อหุ้มอนุภาคยางธรรมชาติด้วยซิลิกาต่างกันตามค่าอุณหภูมิอากาศขาเข้าที่ (a) 120°C , (b) 140°C, (c) 160°C และ (d) 180°C ต่อความค่าความเค้นและความเครียด	71
4.30 ผลของการเติมผงคอมโพสิตที่มีขนาดเฉลี่ยของอนุภาคต่างกัน ที่มีอัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกา 2:1 ต่อค่าความความเค้นสูงสุด	72
4.31 ผลของการเติมผงคอมโพสิตที่มีขนาดเฉลี่ยของอนุภาคต่างกัน ที่มีอัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกา 2:1 ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด	72
4.32 ผลของการเติมผงคอมโพสิตที่มีอัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกา 2:1 ที่มีความสามารถในการห่อหุ้มอนุภาคยางธรรมชาติด้วยซิลิกาต่างกันตามอุณหภูมิอากาศขาเข้าต่อค่าความเค้นสูงสุด	73
4.33 ผลของการเติมผงคอมโพสิตที่มีความสมบูรณ์ในการห่อหุ้มอนุภาคยางธรรมชาติต่างกันที่มีอัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกา 2:1 ต่อค่าการยืดตัว ณ จุดขาด.....	73

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ในปัจจุบันประเทศไทยเป็นประเทศกำลังพัฒนาซึ่งสินค้าส่งออกหลักๆของประเทศคือผลิตภัณฑ์จากเกษตรกรรม โดยยางธรรมชาติจัดเป็นสินค้าเกษตรกรรมส่งออกที่สำคัญนำรายได้เข้าประเทศกว่า 296,000 ล้านบาทในปี 2553 และกว่า 388,000 ล้านบาทในปี 2554 โดยมีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อยๆ [1] ซึ่งยางธรรมชาตินี้โดยแรกเริ่มจะอยู่ในสภาพของน้ำยางข้นก่อนถูกแปรรูปเป็นยางแผ่นเพื่อจะนำไปใช้งานในด้านต่างๆ ด้วยคุณสมบัติเด่นของยางธรรมชาตินั่นคือมีค่าความยืดหยุ่น (elasticity) สูงและยังมีสมบัติด้านการเหนียวติดกัน (tack) จึงเป็นที่นิยมในการนำยางธรรมชาติไปใช้ในอุตสาหกรรมผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบ (assemble) [2] และยังใช้เป็นส่วนผสมในการปรับปรุงคุณสมบัติของวัสดุหรือพอลิเมอร์ในด้านการลดความแข็ง [3,4] แต่ยางแผ่นนั้นมีข้อจำกัดในการใช้งานในการเป็นสารตัวเติมเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของพอลิเมอร์ เพราะว่าขนาดของสารตัวเติมที่ใช้ควรอยู่ในระดับไมโครเมตรและมีขนาดที่สม่ำเสมอจึงจำเป็นที่จะต้องทำให้ยางอยู่ในลักษณะของผง [3] ในการผลิตผงยางจากนั้นเนื่องจากความสามารถในการเหนียวติดกันของยางธรรมชาตินี้ทำให้จำเป็นต้องเคลือบหรือหุ้ม (coating) โมเลกุลของยางธรรมชาติเสียก่อน ซึ่งในอดีตการบดยางถูกนำมาใช้แก้ปัญหาแต่การบดยางนั้นมีข้อดีอยู่ในการควบคุมคุณภาพและขนาดอนุภาคของยางธรรมชาติ ทำให้มีการผลิตยางสังเคราะห์ซึ่งมีคุณสมบัติใกล้เคียงกับยางธรรมชาติและพร้อมแก่การแปรรูปมาใช้งานแทนยางธรรมชาติ โดยต่อมาเทคโนโลยีการกักเก็บสารสำคัญ (encapsulation) ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหการเกาะติดกันของยางธรรมชาติ [17]

เทคโนโลยีการกักเก็บสารสำคัญถูกนำมาใช้ช่วยแก้ปัญหาด้านคุณสมบัติที่เหนียวเกาะติดกันของยางที่ทำให้ไม่สามารถทำให้เป็นผงโดยตรงได้ โดยเทคโนโลยีการกักเก็บสารสำคัญนั้นอาศัยหลักการที่นำสารห่อหุ้ม (shell) มากักเก็บสารสำคัญ (core) เพื่อที่จะใช้ยืดอายุการใช้งานควบคุมการปลดปล่อย หรือช่วยลดการเกาะติดกันของสารสำคัญนั้นๆ โดยเทคนิคการกักเก็บสารสำคัญนี้สามารถทำได้อย่างหลากหลายในปัจจุบัน จากการศึกษพบว่าเทคโนโลยีการกักเก็บสารสำคัญในปัจจุบันได้แก่เทคนิค โซล -เจล (sol-gel) และโคอะเซอร์เวชัน (coaservation) โดย

เทคนิคโคอะเซอร์เวชันนั้นอาศัยการใช้ตัวทำละลาย ทำได้โดยการนำอนุภาคไปกระจายตัวในสารละลายพอลิเมอร์แล้วแยกวัฏภาคของพอลิเมอร์นั้นออกจากตัวทำละลาย [5] ส่วนเทคนิค โซล-เจล นั้นจะอาศัยการจับกลุ่มของอนุภาคเป็นของแข็งแขวนลอยที่เรียกว่าโซล โดยโซลเกิดจากการนำสารตั้งต้น (precursor) มาทำปฏิกิริยากับน้ำและตัวตัวเร่งปฏิกิริยา เมื่อโซลรวมตัวกันเป็นร่างแหอย่างไม่เป็นระเบียบจะกลายเป็นของแข็งที่เรียกว่าเจลซึ่งการแยกเจลออกมานั้นทำได้โดยการนำเจลที่ได้ไปผ่านกระบวนการอบแห้ง [6] โดยในงานวิจัยนี้จะนำเทคนิค โซล -เจล มาประยุกต์ใช้เป็นหลัก

จากการศึกษาพบว่ากระบวนการอบแห้งที่ได้มีการใช้ในการสังเคราะห์ผงยางธรรมชาตินั้นคือกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย (spray drying) [3,7] กระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยนั้นอาศัยหลักการป้อนสารละลายผ่านหัวฉีด (nozzle) โดยสารละลายจะถูกพ่นจากหัวฉีดผ่านอากาศร้อนที่มีอุณหภูมิสูงพอที่จะทำให้ตัวทำละลายถูกระเหยออกเหลือเป็นผงของสารที่เราต้องการ โดยผงที่ได้จะถูกลำเลียงต่อไปยังไซโคลนเพื่อคัดกรองขนาดต่อไป ซึ่งกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยนี้มีคุณสมบัติโดดเด่นหลายประการ อาทิความสามารถในการควบคุมขนาดของอนุภาค การทำให้อนุภาคที่ได้เป็นอนุภาคทรงกลม และเป็นกระบวนการที่สามารถทำการขยายกระบวนการไปสู่การผลิตระดับอุตสาหกรรมได้ง่าย [8,9]

ซิลิกาเป็นสารห่อหุ้มที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน [22-24] มีคุณสมบัติเด่นได้แก่คุณสมบัติในการเป็นเกราะป้องกันทั้งจากกายภาพและเคมีจากสิ่งแวดล้อม และการเพิ่มความเสถียรให้กับอนุภาคที่ถูกกักเก็บ [23] ซึ่งถือเป็นตัวเลือกที่น่าสนใจในการนำมาใช้ห่อหุ้มอนุภาคของยางธรรมชาติ

ในงานวิจัยนี้จึงศึกษาการเตรียมผงคอมโพสิตของยางธรรมชาติและซิลิกาด้วยกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยจะนำกระบวนการ โซล -เจล มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการเกาะติดกันของอนุภาคยางธรรมชาติ โดยมีสมมติฐานว่าจะให้อนุภาคของซิลิกาเป็นตัวห่อหุ้มอนุภาคของยางธรรมชาติไว้ โดยนอกเหนือจากการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดผงยางและลักษณะของผงยางที่ได้แล้ว ยังได้มีการนำผงยางธรรมชาตินี้ไปทดสอบสมบัติการใช้งานในด้านการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลให้กับพอลิเมอร์ ด้วยการนำไปผสมกับพอลิแลคติกแอซิด เพื่อตัดเป็นเม็ดพลาสติก ก่อนนำไปขึ้นรูปเป็นชิ้นงานหนาเพื่อทดสอบสมบัติทางกลต่างๆอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษาการเตรียมผงคอมโพสิตของยางธรรมชาติและซิลิกาด้วยการอบแห้งแบบพ่นฝอย และการนำผงคอมโพสิตไปใช้เป็นตัวเติมในพอลิแลคติกแอซิด โดยจะแบ่งหัวข้อเป็น 2 หัวข้อ ดังนี้

1.2.1 เพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลกระทบต่อในการสังเคราะห์ผงคอมโพสิตของยางธรรมชาติและซิลิกาด้วยกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย

1.2.2 สามารถอธิบายได้ว่าปัจจัยต่างๆในการอบแห้งแบบพ่นฝอยส่งผลต่อการปรับปรุงคุณสมบัติของพอลิเมอร์ด้วยการเติมผงคอมโพสิตอย่างไร

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

ในการกระบวนการสังเคราะห์ผงคอมโพสิตของยางธรรมชาติและซิลิกาจากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยนี้จะควบคุมความเข้มข้นรวมของของแข็งอยู่ที่ 20% โดยน้ำหนัก โดยตัวแปรที่ศึกษาในส่วนของกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย ได้แก่

1.3.1 อิทธิพลของอุณหภูมิของอากาศขาเข้าในช่วง 120, 140, 160 และ 180 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วสายป้อน 7 มิลลิเมตรต่อวินาที อัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกา ที่ 2:1

1.3.2 อิทธิพลของอุณหภูมิของอากาศขาเข้าในช่วง 120, 140, 160 และ 180 องศาเซลเซียส ที่ความเร็วสายป้อน 7 มิลลิเมตรต่อวินาที อัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกา ที่ 2:1

1.3.3 ความเร็วของสายป้อนในช่วง 7, 9, 11 และ 13 มิลลิเมตรต่อวินาที ที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 160 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกาที่ 2:1

โดยโดยตัวแปรที่ศึกษาในส่วนนี้ ได้แก่

- ลักษณะรูปร่างสัณฐานของอนุภาคผงคอมโพสิต
- การกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงคอมโพสิต
- คุณสมบัติทางความร้อนและปริมาณของซิลิกาที่มีในผงคอมโพสิต

- การห่อหุ้มของอนุภาคยางธรรมชาติด้วยอนุภาคซิลิกาในผงคอมโพสิต

นอกจากนี้ยังได้ศึกษาอิทธิพลของการเติมผงคอมโพสิตของยางธรรมชาติและซิลิกาใน พอลิแลคติกแอซิด (PLA) โดยพิจารณาจากสมบัติทางกลต่างๆ ได้แก่

- การกระจายตัวของขนาดอนุภาคผงคอมโพสิตในเนื้อพอลิเมอร์
- ค่าการรองรับแรงกระแทก (impact strength)
- ค่าความเค้นสูงสุด (tensile strength)
- ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break)
- คุณสมบัติทางความร้อน

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัยนี้ คือการทราบสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมผงคอมโพสิตของยางธรรมชาติและซิลิกาจากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยในระดับห้องปฏิบัติการ โดย ทราบอัตราส่วนผสมโดยมวลที่เหมาะสมของยางธรรมชาติต่อซิลิกาเพื่อที่จะควบคุมขนาดของอนุภาคได้ตามที่ต้องการ สามารถนำผงที่ได้ไปใช้เป็นสารตัวเติมเพื่อเพิ่มความสามารถในการรับแรงกระแทก ให้กับพอลิเมอร์ได้ และสามารถนำไปศึกษาต่อเพื่อขยายกระบวนการผลิตสู่ระดับอุตสาหกรรม ซึ่งนับเป็นการเพิ่มมูลค่าเพิ่มให้กับยางธรรมชาติอีกด้วย

บทที่ 2

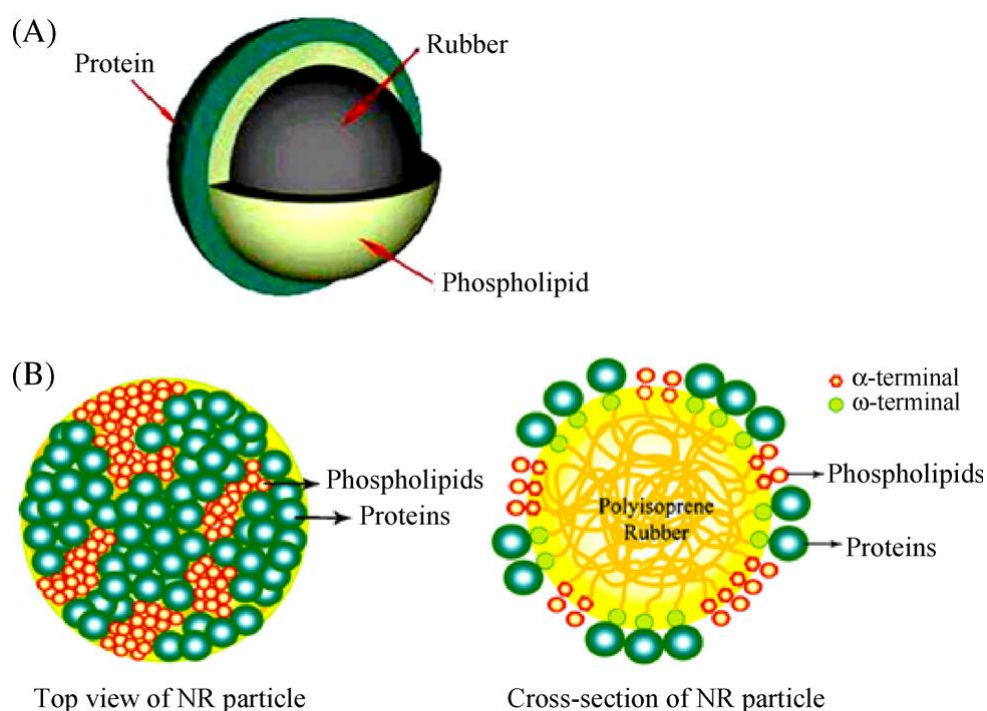
ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ยางธรรมชาติ (Natural Rubber) [2,15,16]

ยางธรรมชาติส่วนมากที่ปลูกในประเทศไทยเป็นต้นยางพาราสายพันธุ์ Hevea Brazilliensis ซึ่งมีต้นกำเนิดจากกลุ่มแม่น้ำอเมซอนในทวีปอเมริกาใต้ โดยน้ำยางสดที่กรีดยังจากต้นมีลักษณะสีขาวขุ่นและมีเนื้อยางแห้ง (dry rubber) ประมาณ 36% แขนงลอยอยู่ในน้ำ โดยมีองค์ประกอบโดยประมาณ ดังตารางที่ 2.1 ซึ่งอนุภาคของเนื้อยางที่แขวนลอยอยู่นี้จะถูกหุ้มด้วยชั้นไขมันและชั้นโปรตีนตามลำดับดังภาพที่ 2.1 โดยมีขนาดอนุภาคอยู่ในช่วง 0.05 ถึง 3 ไมครอน ซึ่งมีขนาดเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.25 ถึง 0.8 ไมครอนเมตรโดยประมาณ มีค่า pH ที่ประมาณ 6 ถึง 7 และค่าความหนาแน่นประมาณ 0.975 ถึง 0.980 กรัมต่อมิลลิเมตร, น้ำยางที่ได้จะถูกนำไปผ่านกระบวนการปั่นเหวี่ยง (centrifugation) เพื่อทำน้ำยางข้น (concentrated latex) โดยมีเนื้อยางแห้งประมาณ 60% ซึ่งในน้ำยางจะมีองค์ประกอบที่สามารถถูกสลายโดยสารอินทรีย์ซึ่งเป็นสาเหตุของกลิ่นเหม็นเน่า เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ (carbondioxide) มีเทน (methane) และแก๊สที่มีไนโตรเจน (nitrogen) เป็นองค์ประกอบอยู่ จึงมีการแก้ไขโดยการเติมแอมโมเนีย (ammonia) ลงไปในน้ำยางเพื่อที่จะรักษาสภาพของน้ำยางข้นให้เก็บไว้ได้นาน ทำให้มีการแบ่งชนิดน้ำยางตามปริมาณแอมโมเนีย ที่ได้แก่ น้ำยางชนิดแอมโมเนียสูง (high ammonia latex) ที่มีปริมาณแอมโมเนีย 0.7% โดยน้ำหนัก และชนิดแอมโมเนียต่ำ (low ammonia latex) ที่มีปริมาณแอมโมเนีย 0.2% โดยน้ำหนัก น้ำยางข้นส่วนหนึ่งจะถูกส่งออกสู่ตลาดต่างประเทศ ส่วนที่เหลือจะถูกนำไปใช้ในอุตสาหกรรมผลิตผลิตภัณฑ์ที่บางและกำจัดน้ำออกได้ง่าย เช่น ถุงมือยาง ลูกโป่ง และฟองน้ำที่นอน เป็นต้น

ตารางที่ 2.1 องค์ประกอบของน้ำยางสดและน้ำยางที่ผ่านกระบวนการอบแห้ง [15]

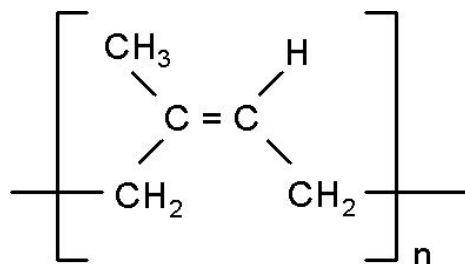
ส่วนประกอบ	น้ำยางสด	ยางที่ผ่านกระบวนการอบแห้ง
เนื้อยางธรรมชาติ	36.0	93.7
โปรตีนและกรดอะมิโน	1.4	2.2
ไขมันที่มีคุณสมบัติเป็นกลาง	1.0	2.4
ไขมันเชิงประกอบ	0.6	2.4
คาร์โบไฮเดรต	1.6	0.4
สารอินทรีย์	0.5	0.2
สารอื่นๆ	0.4	0.1
น้ำ	58.5	-



ภาพที่ 2.1 โครงสร้างของอนุภาคยางในน้ำยางธรรมชาติ [16]

2.1.1 โครงสร้างและสมบัติของยางธรรมชาติ [2,15]

ยางธรรมชาติมีชื่อทางเคมีคือ cis-1,4-polyisoprene นั่นคือมีไอโซพรีน (C_5H_8)_n ดังภาพที่ 2.2 โดยมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ในช่วง 100,000 ถึง 1,000,000 เนื่องจากส่วนประกอบของยางธรรมชาติเป็นไฮโดรคาร์บอนที่ไม่มีขั้ว ดังนั้นยางจึงละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว เช่น เบนซีน (benzene) เฮกเซน (hexane) เป็นต้น โดยทั่วไปยางธรรมชาติมีโครงสร้างการจัดเรียงตัวของโมเลกุลแบบอสัณฐาน (amorphous) แต่ในบางสภาวะโมเลกุลของยางสามารถจัดเรียงตัวค่อนข้างเป็นระเบียบที่อุณหภูมิต่ำหรือเมื่อถูกยืด จึงสามารถเกิดผลึก (crystallize) ได้ การเกิดผลึกเนื่องจากอุณหภูมิต่ำ (low temperature crystallization) จะทำให้ยางแข็งมากขึ้น แต่ถ้าอุณหภูมิต่ำขึ้นยางก็จะอ่อนลงและกลับสู่สภาพเดิม ในขณะที่การเกิดผลึกเนื่องจากการยืดตัว (strain induced crystallization) ทำให้ยางมีสมบัติเชิงกลดี นั่นคือยางจะมีความทนต่อแรงดึง (tensile strength) ความทนต่อการฉีกขาด (tear resistance) และความต้านทานต่อการขัดถู (abrasion resistance) สูง



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างทางเคมีของยางธรรมชาติ [2]

ลักษณะเด่นอีกอย่างของยางธรรมชาติคือ ความยืดหยุ่น (elasticity) ยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่นสูง เมื่อแรงภายนอกที่มากระทำกับมันหมดไป ยางก็จะกลับคืนสู่รูปร่างและขนาดเดิม (หรือใกล้เคียง) อย่างรวดเร็ว ยางธรรมชาติยังมีสมบัติดีในด้านการเหนียวติดกัน (tack) ซึ่งเป็นสมบัติสำคัญของการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องอาศัยการประกอบ (assemble) ชิ้นส่วนต่างๆ เข้าด้วยกัน เช่น ยางรถยนต์ เป็นต้น

อย่างไรก็ตาม ยางดิบตามลำพังจะมีขีดจำกัดในการใช้งาน เนื่องจากมีสมบัติเชิงกลต่ำ และลักษณะทางกายภาพจะไม่เสถียรขึ้นอยู่กับการเปลี่ยนแปลงแปลงอุณหภูมิมาก กล่าวคือยางจะอ่อนนุ่มและเหนียวเหนอะหนะเมื่อร้อน แต่จะแข็งเปราะเมื่ออุณหภูมิต่ำ ด้วยเหตุนี้การใช้

ประโยชน์จากยางจำเป็นต้องมีการผสมยางกับสารเคมีต่างๆ เช่น กำมะถัน ผงเขม่าดำ และสารตัวเร่งต่างๆ เป็นต้น หลังจากการบดผสม ยางผสมหรือยางคอมพาวด์ (compound latex) ที่ได้จะถูกนำไปขึ้นรูปในแม่พิมพ์ภายใต้ความร้อนและความดัน กระบวนการนี้เรียกว่าวัลคาไนเซชัน (vulcanization) ยางที่ผ่านการขึ้นรูปนี้จะถูกเรียกว่า ยางสุกหรือยางคงรูป (vulcanized latex) ซึ่งสมบัติของยางคงภาพที่ได้นี้จะเสถียร ไม่เปลี่ยนแปลงตามอุณหภูมิมากนัก และมีสมบัติเชิงกลดีขึ้น

แม้ว่ายางธรรมชาติจะมีสมบัติที่ดีเหมาะ สำหรับการผลิตผลิตภัณฑ์ยางต่างๆ มากมาย แต่ยางธรรมชาติก็มีข้อเสียหลักคือ การเสื่อมสภาพเร็วภายใต้แสงแดด ออกซิเจน (oxygen) โอโซน (ozone) และความร้อน เนื่องจากโมเลกุลของยางธรรมชาติมีพันธะคู่ (double bond) อยู่มาก ทำให้ยางว่องไวต่อการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนและโอโซนโดยมีแสงแดดและความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ดังนั้นในระหว่างการผลิตผลิตภัณฑ์จึงต้องมีการเติมสารเคมีบางชนิด ซึ่งเป็นสารในกลุ่มของสารป้องกันการเสื่อม (antidegradants) เพื่อยืดอายุการใช้งาน นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังมีประสิทธิภาพการทนต่อสารละลายไม่มีขี้ น้ำมันและสารเคมีต่ำ จึงไม่สามารถใช้ในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องสัมผัสกับต่างๆ ดังกล่าว

2.1.2 น้ำยางชั้นชนิดพรีวัลคาไนซ์ (pre-vulcanized latex) [10]

น้ำยางพรีวัลคาไนซ์ คือน้ำยางที่ถูกวัลคาไนซ์ในสถานะของเหลวและขึ้นรูปเป็นยางวัลคาไนซ์ได้โดยไม่ต้องให้ความร้อนอีก การพรีวัลคาไนซ์ (pre-vulcanization) เป็นกระบวนการที่นำน้ำยางวัลคาไนซ์มาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ ซึ่งค่าน้ำยางพรีวัลคาไนซ์และน้ำยางวัลคาไนซ์สามารถนำมาใช้แทนกันได้ โดยน้ำยางพรีวัลคาไนซ์มีสถานะเป็นของไหลและมีลักษณะทั่วไปเหมือนเดิม การวัลคาไนซ์จะเกิดในอนุภาคน้ำยางแต่ละอนุภาคโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะของการกระจายตัวของอนุภาคน้ำยาง

ในปี พ.ศ. 2464 ได้เริ่มมีการใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดอินทรีย์ (organic accelerator) ซึ่งนำไปสู่การพัฒนา น้ำยางธรรมชาติพรีวัลคาไนซ์ ต่อมาในปี พ.ศ. 2466 น้ำยางคอมพาวด์พรีวัลคาไนซ์ได้รับการพัฒนาขึ้นเป็นครั้งแรกโดย Schidrowoitz ทำได้โดยการเติมกำมะถัน ซิงก์ออกไซด์ และสารตัวเร่งปฏิกิริยาลงไปเพื่อรักษาสภาพน้ำยางและให้ความร้อนแก่ของผสมภายใต้สภาวะที่เหมาะสม

การทำพรีวัลคาไนซ์นั้นเริ่มแรกจะให้ความร้อนแก่น้ำยางคอมพาวด์ที่เหนือจุดเดือดของน้ำ (boiling point) ในตู้อบความดัน (pressure chamber) แต่ต่อมาเนื่องจากมีการใช้สารตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีความว่องไวสูงเป็นพิเศษ (ultra-accelerator) จึงทำให้การทำน้ำยางพรีวัลคาไนซ์สามารถทำได้ภายใต้ความดันบรรยากาศที่อุณหภูมิต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส ซึ่งวิธีนี้ได้รับการพัฒนาต่อมาและสามารถจะทำพรีวัลคาไนซ์ได้โดยใช้อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส โดยใช้เวลาเพียง 1 ชั่วโมง

เนื่องด้วยความต้องการน้ำยางพรีวัลคาไนซ์มีเพิ่มขึ้น ทำให้มีความพยายามที่จะพัฒนาน้ำยางพรีวัลคาไนซ์เกรดต่างๆให้เหมาะสมกับความต้องการในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ มากขึ้นด้วยเช่นกัน ในเบื้องต้นได้มีการผลิตน้ำยางพรีวัลคาไนซ์ขึ้นมา 3 เกรดด้วยกันคือ เกรดที่ให้ค่าโมดูลัสสูง ปานกลาง และต่ำ

2.1.2.1 ขั้นตอนการผลิตน้ำยางชั้นชนิดพรีวัลคาไนซ์ [10]

ขั้นตอนการผลิตน้ำยางชั้นพรีวัลคาไนซ์ทำได้ดังนี้

- 2.1.2.1.1 เติมสารรักษาสภาพน้ำยางลงในน้ำยางชั้นและถ่ายน้ำยางไปยังเหล็กกล้าไร้สนิมที่มีการกวนตลอดเวลา
- 2.1.2.1.2 ให้ความร้อนกับน้ำยางในถังที่อุณหภูมิ 32 ถึง 38 องศาเซลเซียส แล้วเติมดิสเพอซันของซิงก์ออกไซด์ กำมะถัน และสารตัวเร่งปฏิกิริยาลงในน้ำยาง
- 2.1.2.1.3 ให้ความร้อนกับน้ำยางคอมพาวด์ที่อุณหภูมิ 70 ถึง 80 องศาเซลเซียส กวนน้ำยางคอมพาวด์ตลอดเวลา และรักษาอุณหภูมิของน้ำยางคอมพาวด์ให้อยู่ในช่วง 70 ถึง 80 องศาเซลเซียส โดยเวลาและอุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับระบบการวัลคาไนซ์ที่ใช้และระดับการเชื่อมโยงของพันธะที่ต้องการ
- 2.1.2.1.4 ลดอุณหภูมิของน้ำยางคอมพาวด์ลงมาที่ 30 องศาเซลเซียส โดยการหล่อเย็นและนำน้ำยางคอมพาวด์ออกมาจากถัง เก็บไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 2.1.2.1.5 นำน้ำยางไปปั่นหมุนเหวี่ยงเพื่อแยกเอาส่วนที่ไม่ทำปฏิกิริยาการวัลคาไนซ์ออก เติมสารต้านออกซิเดชันลงไป แล้วนำน้ำยางที่ได้ไปทดสอบและบรรจุต่อไป

โดยสูตรผสมเคมีของน้ำยางชั้นพีวีแอลคาไนซ์ที่นิยมใช้มีอยู่สองระบบคือระบบกำมะถันดัง
ตารางที่ 2.2 และระบบเพอร์ออกไซด์ดังตารางที่ 2.3 ตามลำดับ

ตารางที่ 2.2 สูตรผสมเคมีของน้ำยางชั้นพีวีแอลคาไนซ์ในระบบกำมะถัน [10]

สูตรผสมเคมี	ปริมาณ (phr)
น้ำยางชั้นชนิดแอมโมเนียสูง (HA)	167
สารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (ความเข้มข้นร้อยละ 10)	2.6
สารละลายโพแทสเซียมลอเรต (ความเข้มข้นร้อยละ 20)	1.3
ดิสเพนเซอร์ของกำมะถัน (ความเข้มข้นร้อยละ 60)	2.0
ดิสเพนเซอร์ของซิงก์ไดเอทิลไดไทโอคาร์บาเมต (ความเข้มข้นร้อยละ 10)	0.8
ดิสเพนเซอร์ของซิงก์ออกไซด์ (ความเข้มข้นร้อยละ 50)	0.4

ปัจจุบันสูตรผสมเคมีตามตารางที่ 2.2 นี้เป็นที่นิยมใช้ในการผลิตน้ำยางพีวีแอลคาไนซ์มาก
ที่สุด การใช้สารให้กำมะถันประเภทไทูรัม (thiuram-type sulfur donor) จะให้ค่าความทนต่อ
แรงดึงสูง และสมบัติหลังการบ่มเร่งด้วยความร้อนที่ดีกว่าน้ำยางพีวีแอลคาไนซ์จากสูตรผสมเคมีอื่น

ตารางที่ 2.3 สูตรผสมเคมีของน้ำยางชั้นพีวีแอลคาไนซ์ในระบบเพอร์ออกไซด์ [10]

สูตรผสมเคมี	ปริมาณ (phr)
น้ำยางชั้นชนิดแอมโมเนียสูง (HA)	167
สารละลายโพแทสเซียมลอเรต (ความเข้มข้นร้อยละ 20)	1.2
เทอร์บิวทิล ไฮโดรเพอร์ออกไซด์ (สารออกฤทธิ์ร้อยละ 70)	0.65
สารละลายฟรักโทส (ความเข้มข้นร้อยละ 20)	2.66
น้ำ	33.8

การวัลคาไนซ์ในระบบเพอร์ออกไซด์ โมเลกุลเพอร์ออกไซด์และอนุมูลอิสระที่เกิดจากการ
แตกตัวของสารเพอร์ออกไซด์จะแพร่กระจายจากผิวภาคของของเหลวไปสู่ผิวภาคของยางได้ ซึ่ง
แสดงให้เห็นว่าอนุภาคของยางที่ถูกพีวีแอลคาไนซ์ด้วยเพอร์ออกไซด์จะเกิดการวัลคาไนซ์อย่าง

สม่ำเสมอและทำให้เกิดการเชื่อมโยงพันธะสูงที่บริเวณผิวของอนุภาคยาง ขณะที่จุดตรงกลางของอนุภาคจะมีความหนาแน่นของการเชื่อมโยงพันธะต่ำ ทำให้สมบัติเชิงกลของน้ำยางพรีวัลคาไนซ์ในระบบเพอร์ออกไซด์ต่ำกว่าน้ำยางพรีวัลคาไนซ์ในระบบกำมะถัน

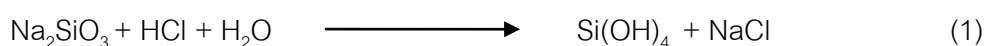
2.2 เทคนิคโซล-เจล (sol-gel technology) [6]

เทคนิค โซล -เจล เป็นเทคนิคเคมีเปียก (wet chemical technique) กระบวนการหนึ่งที่นิยมใช้ในการสังเคราะห์วัสดุนาโน โดยการเปลี่ยนสถานะจากของเหลวที่เรียกว่าโซล (sol) ส่วนมากอยู่ในรูปของสารแขวนลอยที่มีขนาดอนุภาคประมาณ 0.1-1 ไมครอน เป็นของแข็งที่เรียกว่า (gel) โดยการนำสารละลายต่าง ๆ มาทำปฏิกิริยา สารประกอบที่เกิดขึ้นจะอยู่ในลักษณะของโซล เมื่อโซลเกาะตัวกันเป็นร่างแหอย่างไม่เป็นระเบียบจะทำให้เกิดเป็นเจล ในกระบวนการผลิตทั้งจากสภาวะที่เป็นโซลและเจล เมื่อเข้าสู่กระบวนการทำให้แห้ง หรือเผาที่อุณหภูมิต่ำจะได้ผลิตภัณฑ์ในรูปแบบต่าง ๆ เช่น เส้นใย (fiber) แอโรเจล (aerogel) ซีโรเจล (xerogel) อนุภาคผง (powder) และการเคลือบฟิล์ม (coating film) สำหรับใช้เป็นวัสดุพิเศษสำหรับอุตสาหกรรมอื่น ๆ ต่อไป ปฏิกิริยาที่สำคัญในการกระบวนการ โซล -เจล มี 3 ปฏิกิริยา คือ ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) การควบแน่นด้วยน้ำ (water condensation) และการควบแน่นด้วยแอลกอฮอล์ (alcohol condensation) โดยปัจจัยสำคัญที่มีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา คือ pH ตัวเร่งปฏิกิริยา อัตราส่วนของน้ำและโลหะ และอุณหภูมิ ดังนั้นการควบคุมปัจจัยเหล่านี้ในสภาวะที่ต่างกันจึงทำให้เกิดเป็นโซลและเจลที่มีสมบัติและโครงสร้างต่างกัน

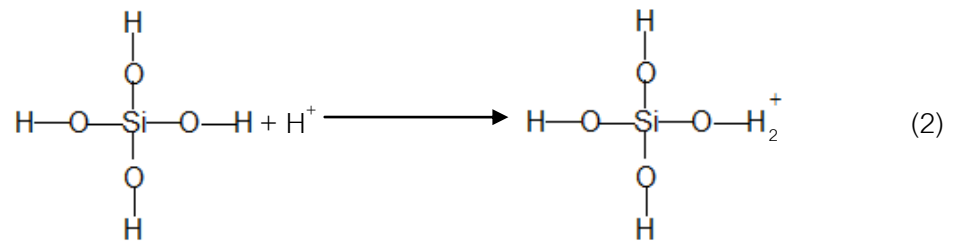
2.2.1 เทคนิคโซล-เจลในการเตรียมผงซิลิกา [11,12]

กระบวนการ โซล -เจล ที่ใช้ในการเตรียมผงซิลิกานั้นเริ่มจากการสร้างอนุภาคคอลลอยด์ขึ้นมา โดยอนุภาคคอลลอยด์ส่วนใหญ่สามารถเตรียมได้จากเกลืออนินทรีย์ของโลหะ เช่น โซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) หรือสารประกอบแอลกอฮอล์ เช่น เตตระเอทิลอซิซิลิเกต (TEOS) โดยสำหรับในวิทยานิพนธ์นี้จะประยุกต์ใช้การเตรียมอนุภาคคอลลอยด์จากโซเดียมซิลิเกต โดยกระบวนการเกิดปฏิกิริยาเป็นดังนี้

1. ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) โดยมีกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา



2. ปฏิกิริยาควบแน่น (condensation)



โดยจะพบว่าอนุภาคจะเคลื่อนที่เข้าหากันมากขึ้นด้วยการจับกันของหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ของอนุภาคหนึ่งกับไฮโดรเจนไอออน (H^+) ของอีกอนุภาคหนึ่งเกิดเป็นน้ำขึ้น และจะจับตัวกันจนกลายเป็นเจลหรือโครงร่างแหของซิลิกอนไฮดรอกไซด์ ($\text{Si}(\text{OH})_4$) ในที่สุด โดยเรียกพันธะ ซิลิกอน-ออกซิเจน-ซิลิกอน (-Si-O-Si-) นี้ว่าซิลอกเซน (siloxane) โดยเมื่อเจลของซิลิกอนไฮดรอกไซด์ถูกอบแห้งเพื่อนำน้ำออก จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นผงซิลิกา (SiO_2) ในที่สุด

2.2.2 ตัวเร่งปฏิกิริยาในเทคนิคซิล-เจล [11]

ตัวเร่งปฏิกิริยาในกระบวนการ ซิล -เจล มีอยู่ 2 ประเภทหลักด้วยกัน คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดและตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส

2.2.2.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรด

ปฏิกิริยาควบแน่นภายใต้ตัวเร่งที่เป็นกรดจะเกิดช้ากว่าปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและจะเริ่มเมื่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเกิดเกือบสมบูรณ์ ถ้ามีปริมาณน้ำมากจะยิ่งทำให้ช่วงระหว่างปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและปฏิกิริยาควบแน่นห่างกันมากขึ้น แต่ถ้ามีปริมาณน้ำน้อยปฏิกิริยาทั้งสองจะเกิดขึ้นในระยะเวลาใกล้เคียงกันทำให้ไม่สามารถแยกออกได้ โดยพอลิเมอร์ที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดกรดจะเป็นพอลิเมอร์เส้นตรง

2.2.2.1 ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบส

ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสภายใต้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเบสนั้นจะเกิดช้ากว่าปฏิกิริยาควบแน่นเนื่องจากการแตกตัวอย่างรวดเร็วของน้ำกลายเป็นไฮดรอกซิลไอออน ก่อนที่ไฮดรอกซิลไอออนจะรวมตัวกับอะตอมของซิลิกอน โดยพอลิเมอร์ที่ได้จากการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดเบสจะเป็นพอลิเมอร์สาขา

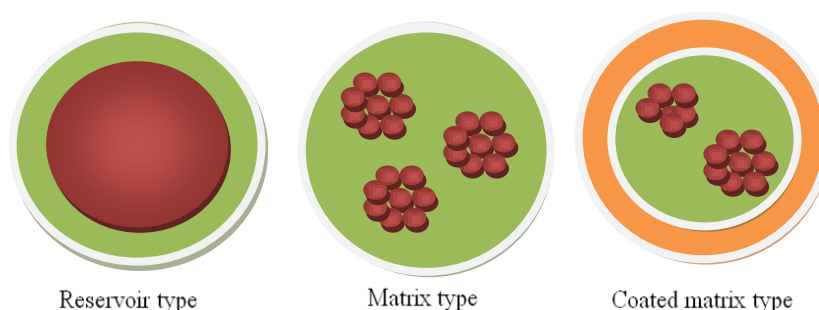
2.3 เทคโนโลยีการกักเก็บสารสำคัญ (encapsulation) [14]

เทคโนโลยีการกักเก็บสาร เป็นกระบวนการที่สารหรือส่วนผสมของสารสำคัญถูกห่อหุ้มด้วยสารชนิดอื่น โดยสารสำคัญที่ถูกห่อหุ้ม (coated) หรือถูกยัดจับไว้ (entrapped) ส่วนใหญ่จะเป็นของเหลว แต่ในบางครั้งอาจเป็นอนุภาคของแข็งหรือก๊าซ ซึ่งสารสำคัญนี้จะถูกเรียกว่า core material หรือ internal phase ส่วนสารที่นำมาห่อหุ้มนั้นจะถูกเรียกว่า wall material, carrier, membrane, shell หรือ coating material เป็นต้น โดยสามารถแบ่งชนิดของไมโครแคปซูลโดยคร่าวๆ ออกเป็น 3 ชนิดได้แก่

2.3.1 แบบ single core หรือ reservoir type เป็นรูปแบบของไมโครแคปซูลที่ได้จากการกักเก็บสารโดยใช้เทคนิคโคอะเซอร์เวชัน (coacervation)

2.3.2 แบบ multi-core หรือ matrix type เป็นรูปแบบของไมโครแคปซูลของสารให้กลิ่นรสส่วนใหญ่ที่ผลิตในระดับอุตสาหกรรม โดยใช้เทคนิคการอบแห้งแบบพ่นฝอย (spray drying) การอบแห้งแบบเยือกแข็ง (spray chilling) การอบแห้งแบบหล่อเย็น (spray cooling) และเอ็กซ์ทรูชัน (extrusion) ในการกักเก็บสาร

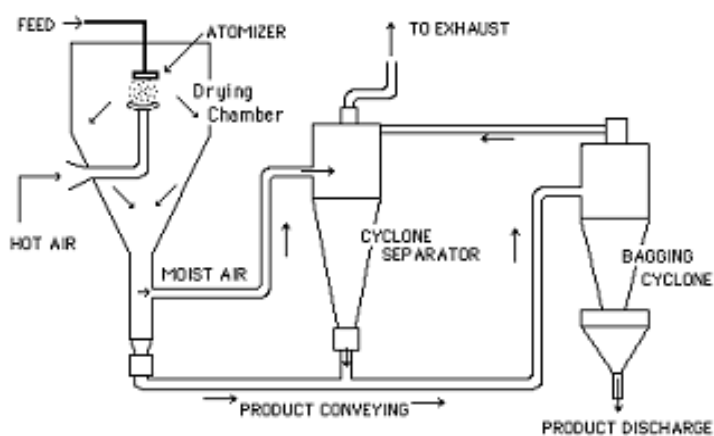
2.3.3 แบบ coated matrix type เป็นไมโครแคปซูลแบบ matrix type ที่มีการห่อหุ้มผิวครั้งที่สองโดยใช้เทคนิคฟลูอิดไดซ์เบด (fluidized bed) หรือการปั่นเหวี่ยง (centrifugal) เป็นการผสมผสานรูปแบบ reservoir type และ matrix type เข้าด้วยกัน ไมโครแคปซูลของสารให้กลิ่นรสรูปแบบนี้ทำให้สามารถควบคุมการปลดปล่อยสารโดยให้กลิ่นรสในสภาวะที่ต้องการได้



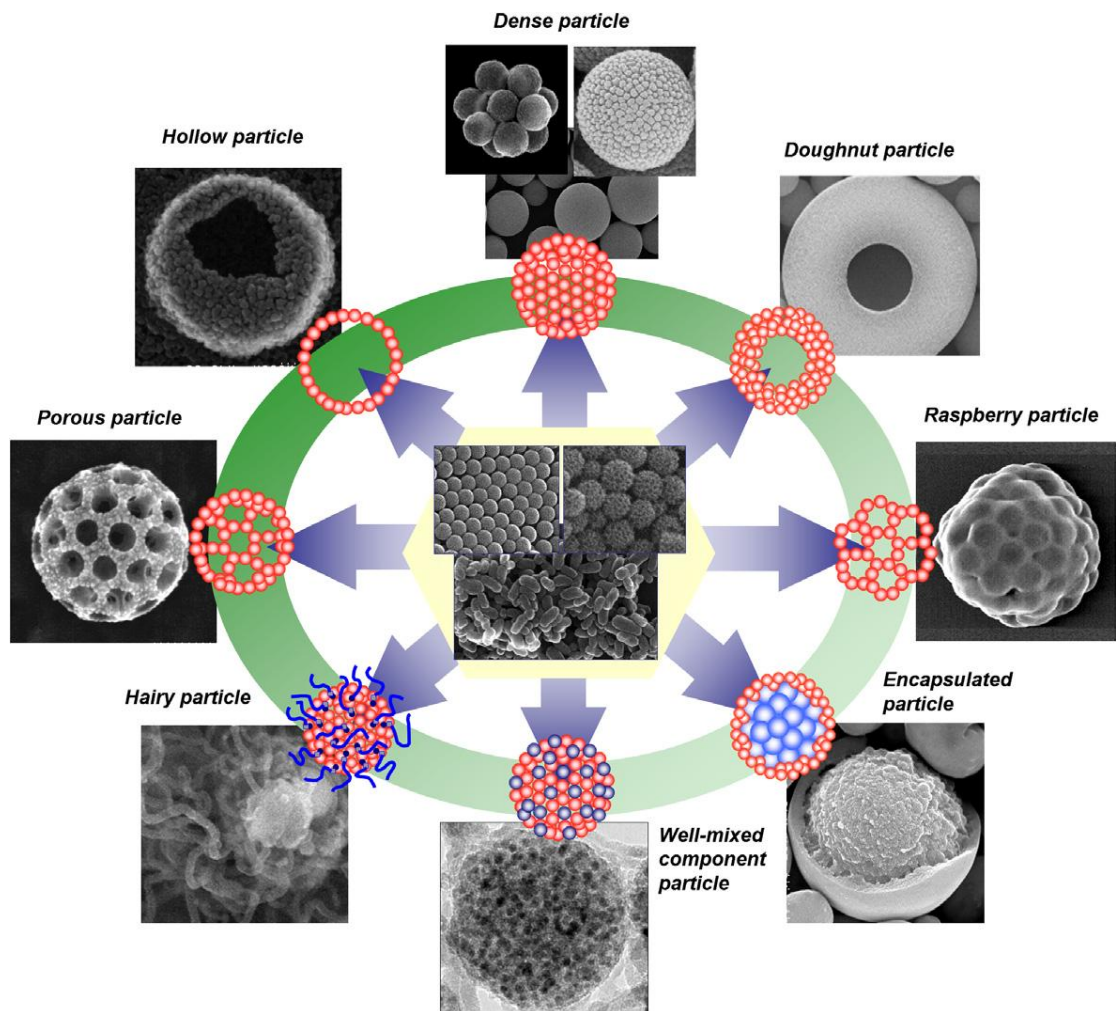
ภาพที่ 2.3 ชนิดของไมโครแคปซูล

2.4 กระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย (Spray Drying) [8,9]

กระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย คือ กระบวนการที่ใช้อุปกรณ์ที่เรียกว่าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย (spray dryer) ที่มีส่วนประกอบต่างๆดังภาพที่ 2.4 โดยเริ่มจากการที่อากาศจะถูกดูดผ่าน filter และผ่านตัวให้ความร้อน จากนั้นจึงเข้าสู่ห้องอบแห้ง (drying chamber) ส่วนสารที่ใช้ป้อน (feed) ควรจะมีลักษณะเป็นของเหลว โดยสารละลายของเหลวจะถูกดูดโดยปั๊มผ่านหัวฉีด (nozzel) ทำให้เกิดละอองฝอยภายในห้องอบและจุดสัมผัสกับอากาศร้อนทำให้เกิดการระเหยของน้ำอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิระเปาะเปียกเล็กน้อย จะได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นผงตกลงสู่ด้านล่างของห้องอบแห้งและถูกส่งต่อไปแยกขนาดอนุภาคด้วยเครื่องไซโคลน (cyclone) จนได้ผลิตภัณฑ์สุดท้าย โดยกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยนี้มีข้อดีหลายประการ อาทิ ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะเป็นอนุภาคทรงกลมที่มีลักษณะเฉพาะตัวดังภาพที่ 2.5 มีการรักษาภาพของผลิตภัณฑ์ได้อย่างทั่วถึง สามารถควบคุมขนาดขนาดการกระจายตัวของอนุภาคได้หากทราบสภาวะที่เหมาะสม และมีทั้งขนาดปฏิบัติการในห้องทดลองไปจนถึงขนาดที่ใช้ผลิตในระดับอุตสาหกรรม โดยกระบวนการต่างๆในการอบแห้งแบบพ่นฝอยแบ่งออกเป็น 4 กระบวนการหลักๆดังนี้



ภาพที่ 2.4 ส่วนประกอบต่างๆของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย [18]



ภาพที่ 2.5 รูปทรงของผลิตภัณฑ์แบบต่างๆที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย [31]

2.4.1 การทำให้สายป้อนเป็นละอองฝอย (atomization of feed)

กระบวนการนี้ทำให้สายป้อนเป็นละอองฝอยโดยใช้หัวฉีด ซึ่งถือว่าเป็นส่วนประกอบที่สำคัญที่สุดของกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยลักษณะของหัวฉีดมี 3 ชนิด คือ

2.4.1.1 หัวฉีดแบบหมุน (rotary atomizer)

หัวฉีดชนิดนี้จะป้อนสารให้ไหลลงบนจานหมุนซึ่งมีลักษณะดังภาพที่ 3 ซึ่งใกล้กับจุดศูนย์กลางโดยจานหมุนจะมีความเร็วรอบสูงประมาณ 5,000 ถึง 10,000 รอบต่อนาที และสารจะถูกเหวี่ยงออกด้านข้างกระจายเป็นละอองโดยขนาดเฉลี่ย 30 ถึง 120 มิลลิเมตร ซึ่งขนาดเฉลี่ยนี้จะแปรผันโดยตรงกับอัตราการไหลของสายป้อน ความหนืด และแปรผกผันกับอัตราการหมุนและเส้นผ่านศูนย์กลางของจานหมุน



ภาพที่ 2.6 หัวฉีดแบบหมุน [19]

2.4.1.2 หัวฉีดแบบแรงดัน (pressure nozzles atomizer)

หัวฉีดชนิดนี้วิธีจะป้อนสารไหลผ่านออร์ฟิซ (orifice) ภายใต้ความดันสูง มีลักษณะดังภาพที่ 4 โดยทำให้ของเหลวที่ออกมาจากหัวฉีดเป็นฝอยโดยไม่ใช้อากาศ อนุภาคที่ได้จะมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 120 ถึง 250 มิลลิเมตร โดยขนาดอนุภาคจะแปรผันโดยตรงกับอัตราการไหลของสายป้อนกับความหนืดและแปรผกผันกับ ความดัน

2.4.1.2 หัวฉีดแบบสองของไหล (two-fluid nozzle atomizer ,pneumatic nozzle atomizer)

หัวฉีดชนิดนี้จะทำให้สายป้อนและอากาศจะไหลผ่านหัวฉีดซึ่งจะทำให้สายป้อนแตกเป็นละอองฝอยเนื่องจากการไหลผ่านของอากาศด้วยความเร็วสูงภายในหัวฉีด มีลักษณะดังภาพที่ 5 การปรับอัตราการไหลของอากาศจะช่วยในการกระจายเป็นละอองของสายป้อน โดยวิธีนี้นิยมใช้กับสายป้อนที่มีความหนืดสูง แต่วิธีนี้จะมีค่าดำเนินการที่สูงและให้ผลผลิตที่ต่ำ



ภาพที่ 2.7 หัวฉีดแบบแรงดัน [19]



ภาพที่ 2.8 หัวฉีดแบบสองของไหล [20]

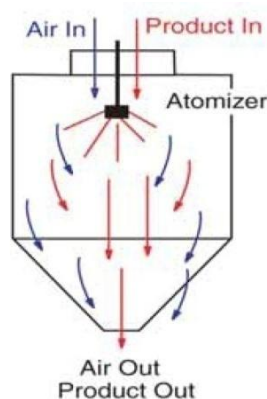
2.4.2 การสัมผัสของละอองฝอยกับอากาศ (atomization of feed)

การสัมผัสระหว่างละอองหยดของเหลวกับอากาศร้อน ในขั้นตอนนี้อุณหภูมิของสารจะสัมผัสกับอากาศร้อนเพื่อให้น้ำรับความร้อนจากอากาศร้อนทำให้เกิดการระเหยน้ำออกไป โดย

การกำหนดทิศทางของการเคลื่อนที่ของอากาศร้อนเป็นสิ่งสำคัญที่ต้องคำนึงถึง ถ้าทิศทางการไหลของอากาศเหมาะสมก็จะทำให้การถ่ายโอนความร้อนเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วทั้งนี้ก็ต้องขึ้นกับจุดประสงค์ของการอบแห้ง ลักษณะของอาหารที่ต้องการอบแห้งภาพและลักษณะของผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ การสัมผัสระหว่างอนุภาคกับอากาศร้อนแบ่งได้ 3 แบบคือ

2.4.2.1 การไหลผ่านทางเดียวกัน (co-current flow)

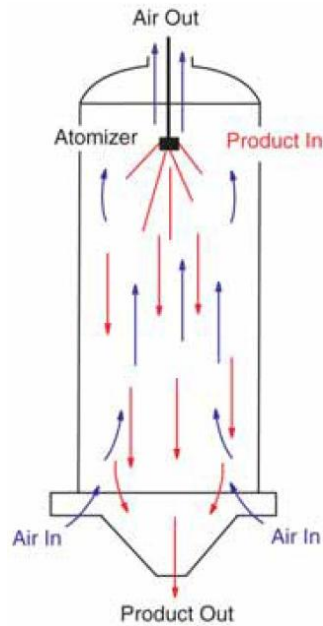
การไหลไปในทิศทางเดียวกันนี้ สารจะถูกพ่นออกไปในทิศทางเดียวกันกับอากาศร้อนที่ไหลเข้ามีลักษณะการไหลดังภาพที่ 6 โดยวิธีนี้เหมาะสำหรับสารที่ไม่ทนต่อความร้อน เนื่องจากมีการระเหยของน้ำเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในเวลาอันสั้น อุณหภูมิของผลิตภัณฑ์จะต่ำกว่าอุณหภูมิของอากาศร้อนขาออกทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความหนาแน่นต่ำ



ภาพที่ 2.9 การไหลผ่านทางเดียวกัน [21]

2.4.2.2 การไหลผ่านสวนทางกัน (counter-current flow)

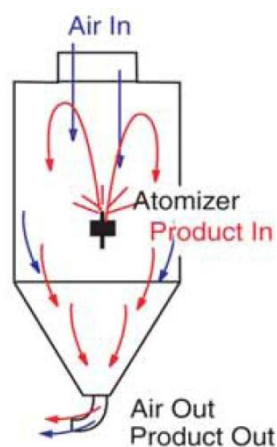
การไหลสวนทางกันนี้ สารที่ถูกพ่นและอากาศร้อนไหลในทิศทางตรงกันข้ามมีลักษณะการไหลดังภาพที่ 7 โดยเริ่มจากอนุภาคของสารที่มีอุณหภูมิต่ำเมื่อได้รับความร้อนจะมีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆจนกระทั่งเท่ากับอุณหภูมิของอากาศร้อน ลักษณะนี้จะมีการถ่ายโอนความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพเหมาะกับสารที่ทนต่อความร้อนสูงและต้องการความร้อนมาก



ภาพที่ 2.10 การไหลผ่านสวนทางกัน [21]

2.4.2.3 การไหลผ่านแบบผสม (mixed flow)

เป็นการผสมกันระหว่างแบบการไหลผ่านทางเดียวกันและการไหลสวนทางกัน มีลักษณะการไหลดังภาพที่ 8 โดยการไหลรูปแบบนี้อากาศขาเข้าจะเข้าที่ด้านบนของเครื่อง ส่วนหัวฉีดจะติดตั้งที่ด้านล่างของเครื่อง รูปแบบการถ่ายเทความร้อนจะเหมือนกันแบบไหลสวนทางกัน ดังนั้นจึงไม่เหมาะกับสารที่ไม่ทนต่อความร้อน



ภาพที่ 2.11 การไหลแบบผสม [21]

2.4.3 การระเหยของละอองฝอย

เมื่อละอองของอนุภาคสัมผัสกับอากาศแห้งร้อน จะเกิดการระเหยขึ้นที่ชั้นไออิมตัวบริเวณผิวของละอองอย่างรวดเร็ว โดยอุณหภูมิที่ผิวของละอองอนุภาคจะมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิกระเปาะเปียกของน้ำเพียงเล็กน้อย อากาศแห้งจะแพร่สู่ชั้นผิวของละอองซึ่งอยู่ในสภาวะอิมตัว ในช่วงนี้จึงเป็นช่วงที่อัตราการระเหยคงที่ จนกระทั่งความชื้นต่ำไม่มีการแพร่สู่ผิวของละออง ทำให้ผิวของละอองเป็นชั้นแห้งหนาขึ้นตามเวลา ช่วงนี้อัตราการระเหยจะลดลง

2.4.4 ขั้นตอนการแยกผลิตภัณฑ์แห้งจากอากาศ

การแยกผลิตภัณฑ์ที่ได้จากอากาศนั้น โดยทั่วไปนิยมใช้ไซโคลนเป็นตัวคัดแยกขนาดของอนุภาคโดยผลิตภัณฑ์จะตกลงสู่ด้านล่างของไซโคลน ส่วนลมที่ออกจากด้านบนของไซโคลนนั้นจะผ่านไปยังตัวกรองขั้นสุดท้ายทั้งนี้อาจเป็นตัวดูดซับ (scrubber) หรือผ้ากรอง (bag filter) ซึ่งขึ้นอยู่กับปริมาณผงที่มี และประสิทธิภาพในการรีไซเคิล

2.4.5 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย

การปรับเปลี่ยนตัวแปรต่างๆทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ตามต้องการ ได้แก่

2.4.5.1 ลักษณะของสายป้อน โดยถ้าสายป้อนมีความหนืดสูงจะทำให้ได้ละอองที่มีขนาดใหญ่ขึ้น ที่สภาวะของหัวฉีด เดียวกัน ถ้ามีความหนืดมากจะทำผลิตภัณฑ์ที่ได้ให้มีลักษณะคล้ายเส้นด้าย

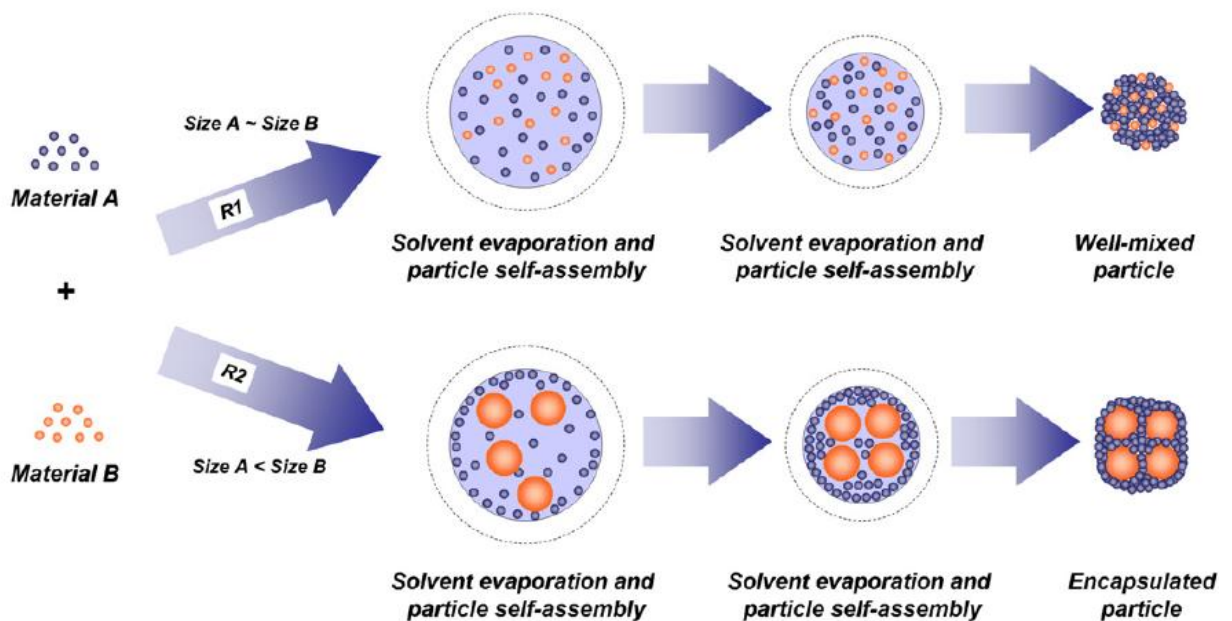
2.4.5.2 อัตราการไหลของสายป้อน โดยที่ถ้าอัตราการไหลของสายป้อนสูงจะทำให้ได้ละอองที่ได้มีความหนาแน่นมากขึ้นและมีขนาดใหญ่ขึ้นเนื่องละอองของสารมีเวลาสัมผัสอากาศร้อนน้อยลง

2.4.5.3 อัตราไหลของอากาศขาเข้า โดยที่ถ้าอัตราการไหลของอากาศขาเข้าลดลงจะทำให้เวลาที่ละอองของอนุภาคที่อยู่ในห้องอบแห้งนานขึ้นและจะสัมผัสกับอากาศร้อนนานกว่าเดิม จึงทำให้ความชื้นถูกนำออกจากละอองของอนุภาคได้มากขึ้น

2.4.5.4 อุณหภูมิของอากาศขาเข้า โดยการเพิ่มอุณหภูมิของอากาศขาเข้าทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในการระเหย และทำให้ความหนาแน่นจำเพาะ (bulk density) ลดลง เนื่องจากเป็นการเพิ่มความพรุนและการแตกหักของอนุภาค

2.5 ผงคอมโพสิตของยางธรรมชาติและซิลิกา (NR-silica composite powder)

การเกิดผงคอมโพสิตของยางธรรมชาติและซิลิกานั้นมีจุดประสงค์เพื่อให้อนุภาคของซิลิกาสามารถห่อหุ้มอนุภาคของยางธรรมชาติด้วยกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย เพื่อป้องกันการเกาะติดกันของอนุภาคยางธรรมชาติ โดยอาศัยความต่างกันของขนาดอนุภาค โดยอนุภาคของซิลิกานั้นมีขนาดอยู่ในระดับนาโนเมตร และอนุภาคของยางธรรมชาตินั้นมีขนาดประมาณ 0.1-2.0 μm [16] โดยมีกลไกในการเกิดผงคอมโพสิตแสดงดังภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 กลไกการเกิดผงคอมโพสิตของยางธรรมชาติและซิลิกา [31]

2.6 บทความวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Literature Reviews)

2.6.1 การเตรียมและการนำผงยางไปใช้ปรับปรุงคุณสมบัติของพอลิเมอร์

ในอดีตนั้นได้มีการแก้ไขการยึดเกาะติดกันของยางธรรมชาติด้วยกระบวนการต่างๆ อาทิ งานวิจัยของศิริชัยวัฒน์และคณะในปี 1996 [17] ได้ทำการเตรียมผงธรรมชาติด้วยวิธีการตกตะกอน (precipitation) เพื่อนำมาใช้ควบคุมการปลดปล่อยของปุ๋ยยูเรียโดยใช้ยางธรรมชาติซึ่งผ่านการวัลคาไนซ์ในระบบเปอร์ออกไซด์โดยนำน้ำยางธรรมชาติผสมผงยูเรียไปตกตะกอนในสารละลายกรดอะซีติกเข้มข้น 90% เพื่อเตรียมเป็นแคปซูล ก่อนที่จะนำแคปซูลไปจุ่มด้วยโซเดียมแอลจีเนต (sodium alginate) โดยพบว่าแคปซูลของยางธรรมชาตินี้สามารถยืดอายุของปุ๋ยยูเรียจาก 3 วัน เป็น 30 วัน ได้ จากงานวิจัยนี้ทำให้ทราบว่าสารประเภทแอลจีเนตสามารถช่วยลดการเกาะติดกันของยางธรรมชาติได้ ในปี 2002 สิทธิบัตรของยุโรปหมายเลข 1,262,510 [7] ได้กล่าวถึงการเตรียมผงยางสังเคราะห์จากน้ำยางที่ผ่านการวัลคาไนซ์แล้ว โดยใช้ น้ำยางชนิดบิวทาไดอีนผสมกับสไตรีนที่มีความเข้มข้นของของแข็งรวมของสายป้อนไว้ที่ 45% โดยนำหนักผสมเข้ากับสารไตรเมทิลออลโพรเพนไตรอะคริเลต (trimethylol propane triacrylate) ผ่านเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย ซึ่งใช้ค่าอุณหภูมิอากาศเข้าในช่วง 140 ถึง 160 องศาเซลเซียส โดยผงยางที่ได้มีขนาดเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 00 ไมโครเมตร ในปี 2007 Dong และคณะ [25] ได้ทำการเตรียมผงยางสังเคราะห์จากน้ำยางชนิดอะคริเลต (acrylate latex) ที่มีความเข้มข้นของของแข็งรวม 55% โดยน้ำหนัก โดยใช้ซีเดียมมอนต์มอริลโลไนต์ (sodium montmorillonite) เป็นสารห่อหุ้ม โดยผสมในอัตราส่วนยางต่อซีเดียมมอนต์มอริลโลไนต์เท่ากับ 7:3 ก่อนนำไปผ่านกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อุณหภูมิ 60°C โดยต่อมาได้มีการนำผงยางมาใช้ในการปรับปรุงสมบัติของพอลิเมอร์ อาทิ ในปี 2009 แซ่ฮุ่ยและคณะ [3] ได้ทำการวิจัยถึงการนำผงยางธรรมชาติมาผสมกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) เพื่อสังเคราะห์เป็นเทอร์โมพลาสติกจากยางธรรมชาติ (thermoplastic natural rubber หรือ TPNR) โดยในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกจากยางธรรมชาตินี้ได้ทำกาดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูงผสมกับยางธรรมชาติ โดยนำน้ำยางธรรมชาติชนิดความเข้มข้นของแอมโมเนียสูงไปผ่านการวัลคาไนซ์ในระบบซัลเฟอร์ เพื่อเตรียมเป็นน้ำยางพรีวัลคาไนซ์ จากนั้นนำน้ำยางพรีวัลคาไนซ์ที่ได้ไปเข้ากระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอย โดยควบคุมอุณหภูมิของอากาศเข้าไว้ที่ 160 องศาเซลเซียส และมีค่าอุณหภูมิของอากาศออกอยู่ที่ 90 องศาเซลเซียส ใช้หัวฉีดชนิดแบบแรงดัน โดยขนาดของแรงดันที่ใช้คือ 200 กิโลปาสคาล โดยผงยางที่ได้มีลักษณะเป็นทรงกลมขรุขระและยึดติดกัน โดยผลการทดลองพบว่าที่อัตราส่วนของผงยางธรรมชาติต่อพอลิเอทิลีนที่ 9 ต่อ 1 โดยน้ำหนัก จะสามารถสังเคราะห์เทอร์โมพลาสติกที่ได้มีความยืดหยุ่น ความนุ่ม และความทนต่อแรงดึงสูงที่สุด ซึ่งจะเห็นได้ว่ายาง

ธรรมชาติมีสมบัติเด่นด้านการเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับพอลิเมอร์ เช่นเดียวกัน ในปี 2011 งานวิจัยของ Bitinis และคณะ [4] ได้นำยางธรรมชาติมาปรับปรุงสมบัติของพอลิแลคติกแอซิด โดยได้ผสมยางธรรมชาติเข้าไปในพอลิแลคติกแอซิดด้วยขนาดหยด (droplet size) 1.1 ถึง 2.0 ไมโครเมตร ก่อนนำไปขึ้นรูป โดยพบว่าค่าความอ่อน (ductility) ของพอลิเมอร์ที่ได้นั้นเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ก่อนการเติมยางธรรมชาติเข้าไป และค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break) เพิ่มขึ้นจาก 5% เป็น 200% ด้วยการเติมยางธรรมชาติเข้าไปเพียง 10% โดยน้ำหนัก ซึ่งงานวิจัยเหล่านี้ได้แสดงถึงความสามารถของยางธรรมชาติในการเพิ่มความยืดหยุ่นให้กับพอลิเมอร์ได้

2.6.2 การเตรียมผงซิลิกาด้วยเทคนิคโซล-เจล จากโซเดียมซิลิเกต

การเตรียมผงซิลิกาด้วยเทคนิค โซล -เจล จากการใช้โซเดียมซิลิเกตเป็นสารตั้งต้นนั้นเป็นกระบวนการที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอดีตจนถึงปัจจุบัน อาทิ ในงานวิจัยของ บุญญานุรักษ์และคณะ ในปี 2001 [11] ได้เตรียมผงซิลิกาจากโซเดียมซิลิเกตที่มีฤทธิ์เป็นด่าง มีความเข้มข้น 7% โดยมวลต่อปริมาตร โดยได้ศึกษาอิทธิพลของตัวเร่งปฏิกิริยาที่มีผลต่อปฏิกิริยา โซล -เจล ซึ่งพบว่าถ้าปริมาณของโซเดียมซิลิเกตมาก กรดมาก น้ำน้อย อัตราการเกิดปฏิกิริยาทั้งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสและปฏิกิริยาควบแน่นจะเร็วทั้งคู่ทำให้เวลาในการเกิดเจลเร็ว แต่ถ้าหากปริมาณของโซเดียมซิลิเกตมาก กรดน้อย น้ำมาก อัตราการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสจะเร็ว ส่วนปฏิกิริยาควบแน่นจะช้า ส่งผลให้เวลาการเกิดเจลช้า ซึ่งนับเป็นองค์ความรู้สำคัญที่นำมาใช้ในงานวิจัยนี้เนื่องจากการอบแห้งแบบพ่นฝอยนั้นจำเป็นต้องผสมให้สารในสายป้อนเป็นของเหลว ดังนั้นในการเตรียมสารผสมระหว่างน้ำยางธรรมชาติกับซิลิกานั้น ต้องเติมในขณะที่สารผสมเป็นโซลนั้นคือจำเป็นต้องควบคุมเวลาในการเกิดเจลให้ช้า นอกเหนือจากนี้ยังมีงานวิจัยของ Zawrah และคณะในปี 2009 [12] โดยได้เตรียมผงซิลิกาจากโซเดียมซิลิเกต โดยได้เตรียมสารละลายโซเดียมซิลิเกตที่ปริมาณของซิลิกาอยู่คิดเป็นร้อยละ 24.9 โดยน้ำหนัก โดยมีอัตราส่วนของซิลิกาต่อโซเดียมออกไซด์ (Na_2O) เท่ากับ 1.2 และใช้กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 2.5% เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยปั่นกวนด้วยความเร็ว 2,500 rpm ที่อุณหภูมิ 60°C จนเกิดเจลสีขุ่น ก่อนนำไปเผาในอากาศ (calcine) ที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะได้ผงซิลิกาที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยประมาณ 25 นาโนเมตร และงานวิจัยของ Pradip และคณะในปีเดียวกัน [13] ได้ทำการเตรียมผงซิลิกาจากโซเดียมซิลิเกตที่ความเข้มข้นของซิลิกา 24% โดยมวล และใช้กรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 8% เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยได้ผสมโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 4% ลงไปสำหรับควบคุมปฏิกิริยาพอลิเมไรเซชันระหว่างโซเดียมซิลิเกตกับกรดซัลฟิวริก ซึ่งซัลฟิวริกได้ถูกเติมลงไปด้วยอัตราเร็ว 200

มิลลิลิตรต่อนาที ปั่นกวนสารด้วยความเร็ว 500 rpm จนกระทั่งค่า pH ของสารละลายเท่ากับ 7 จึงเพิ่มอนุภาคน้ำจากอนุภาคน้ำห้องเป็น 60 องศาเซลเซียสและคงสถานะนี้ไว้เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ก่อนนำไปเข้าเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 180 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิอากาศขาออก 98 องศาเซลเซียส โดยได้มีการปรับปรุงพื้นผิวของผงซิลิกาด้วยกระบวนการชะ ซึ่งสารที่ใช้ในการปรับปรุงพื้นผิวในการวิจัยได้แก่ เฮกเซน (hexane) ไตรเมทิลคลอโรโรไซแลน (trimethylchlorosilane, TMCS) และเอทานอล (ethanol) ก่อนนำผงซิลิกาที่ผ่านการปรับปรุงพื้นผิวไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR ซึ่งพบว่า มีพีคของหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) อยู่ที่ค่าความยาวคลื่นประมาณ $3,540\text{ cm}^{-1}$ พีคของหมู่ซิลิโอสัน (-Si-O-Si-) อยู่ที่ค่าความยาวคลื่นประมาณ $1,200\text{ cm}^{-1}$ และพีคของหมู่เมทิล (-CH₃) อยู่ที่ค่าความยาวคลื่นประมาณ $1,260$ และ 850 cm^{-1} ซึ่งข้อมูลในงานวิจัยนี้สามารถไปใช้ประโยชน์ในการอ้างอิงถึงหมู่เมทิลในผงยางธรรมชาติได้

2.6.3 การห่อหุ้มสารสำคัญด้วยซิลิกา

ในปัจจุบันได้มีงานวิจัยที่นำซิลิกามาใช้ห่อหุ้มสารสำคัญมากมาย อาทิ ในปี 2011 Pon-On และคณะ [22] ได้นำซิลิกามาใช้ห่อหุ้มสารแม่เหล็ก (CoFe_2O_4) ในการเตรียมแม่เหล็กโดยใช้สารไฮดรอกซีอะพาไทต์ (hydroxyapatite) เป็นแม่พิมพ์ (template) โดยใช้เตตระเอทิลอซิเลท (TEOS) เป็นสารตั้งต้น ในการสังเคราะห์ซิลิกา โดยนำสารผสมไปผ่านกระบวนการแขวนลอย (suspension) โดยนำผงที่ได้ไปผ่านกระบวนการปั่นเหวี่ยง (centrifuge) และอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส โดยผงที่ได้มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยอยู่ที่ 50 นาโนเมตร หรือในงานวิจัยของ Shiquan และคณะ [23] ในปีเดียวกันได้นำซิลิกามาใช้ในการห่อหุ้มควันตัมดอท (quantum dots) โดยได้กล่าวถึงคุณสมบัติเด่นของซิลิกาเมื่อเป็นสารห่อหุ้มได้แก่ คุณสมบัติในการเป็นเกราะป้องกันทั้งจากกายภาพและเคมีจากสิ่งแวดล้อม และการเพิ่มความเสถียรให้กับอนุภาคที่ถูกกักเก็บ โดยในงานนี้ได้ใช้กระบวนการเตรียมไมโครอิมัลชันแบบสองขั้นตอน (two-step microemulsion) ในการเตรียมอนุภาค โดยใช้ เตตระเอทิลอซิเลท (TEOS) เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ซิลิกา ซึ่งอนุภาคที่ได้มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอยู่ในช่วง 30 ถึง 150 นาโนเมตร ต่อมาในปี 2012 Jungho และคณะ [24] ได้ทำการนำซิลิกามาไปกักเก็บอุปกรณ์เปล่งแสงอินทรีย์ (organic light emitting diodes, OLEDs) โดยมีจุดประสงค์ให้เกิดเป็นตัวกีดขวางจากสารคอมโพสิทระหว่างสารอินทรีย์กับสารอนินทรีย์ (organic/inorganic hybrid barrier) เพื่อป้องกันการไหลผ่านของแก๊ส ซึ่งในงานวิจัยได้ใช้เทคนิคการใช้รังสียูวีเหนี่ยวนำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (UV-induced polymerization) ในกระบวนการ โซล-เจล โดยพบว่าอนุภาคที่ได้มีค่าการซึม

ผ่านของแก๊สเท่ากับ 0.68 กรัม ต่อ ตารางเมตร -วัน โดยจากงานวิจัยที่กล่าวมาได้แสดงถึงความสามารถในการกักเก็บสารสำคัญของซิลิกาได้เป็นอย่างดี

2.6.4 การเตรียมผงคอมโพสิตของยางกับสารชนิดต่างๆ

การเตรียมผงคอมโพสิตของยางกับสารชนิดต่างๆนั้นเป็นการปรับปรุงคุณสมบัติของยาง โดยมีงานวิจัยต่างๆที่ได้กล่าวถึงไว้ อาทิ ในปี 2005 Wang และคณะ [26] ได้เตรียมผงคอมโพสิตระหว่างยางธรรมชาติกับท่อคาร์บอนนาโน (carbon nanotubes) โดยใช้ น้ำยางธรรมชาติที่มีความเข้มข้นของของแข็งรวม 60% โดยน้ำหนัก และใช้ท่อคาร์บอนนาโนที่ผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์โดยใช้กรดไฮโดรฟลูออริกผสมกับ 10% โดยน้ำหนักของโซเดียมโดเดซิลเบนซีนซัลโฟเนต (sodium dodecylbenzene sulfonate) ผสมสารทั้งหมดให้เป็นเนื้อเดียวกันก่อนนำไปเข้ากระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อุณหภูมิอากาศขาเข้าเท่ากับ 190 องศาเซลเซียส โดยพบว่าผงยางที่ได้มีท่อคาร์บอนนาโนมีการกระจายตัวอยู่อย่างสม่ำเสมอและมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 2 ถึง 5 ไมโครเมตร ต่อมาในปี 2006 Wang และคณะ [27] ได้เตรียมฟิล์มคอมโพสิตระหว่างยางสังเคราะห์ชนิดซิลิโคน (silicone rubber) กับออร์แกโนฟิลิกมอนต์มอริลโลไนต์ (organophilic montmorillonite, OMMT) ซึ่งเป็นการเตรียมฟิล์มคอมโพสิตของสารอนินทรีย์และสารอินทรีย์ (inorganic-organic composite material) โดยได้ศึกษาอิทธิพลในการเติม OMMT ในช่วงปริมาณ 0-20% โดยน้ำหนักเข้าไปในน้ำยางสังเคราะห์ชนิดซิลิโคนนี้ ซึ่งในการผสมกันนี้ใช้แอลคอกซิลซิลิโคน (alkoxyl silicane) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ทิ้งไว้ในแม่พิมพ์รูปดัมเบลล์ (dumbbell mold) ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 วัน โดยพบว่าที่การเติม OMMT 10% นั้นฟิล์มคอมโพสิตที่ได้จะมีคุณสมบัติทางกลที่ดีที่สุด และในปี 2006 นี้ Zhou และคณะ [28] ได้เตรียมผงคอมโพสิตระหว่างยางสังเคราะห์ชนิดบิวทาไดอีนผสมกับสไตรีนกับท่อคาร์บอนนาโน โดยน้ำยาง ที่ใช้เป็นน้ำยางสังเคราะห์ชนิดบิวทาไดอีนผสมกับสไตรีนมีความเข้มข้นรวมของของแข็งเท่ากับ 44.9% โดยน้ำหนัก และใช้ท่อคาร์บอนนาโนที่เตรียมจากกระบวนการเคลือบโดยไอเชิงเคมี (chemical deposition process) โดยใช้กรดไฮโดรฟลูออริกและกรดไนตริก นอกจากนี้ยังควบคุมความเข้มข้นของของแข็งรวมของสารละลายผสมระหว่างน้ำยางกับท่อคาร์บอนนาโนไว้ที่ 10% โดยน้ำหนัก ก่อนนำไปเข้ากระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อุณหภูมิขาเข้าเท่ากับ 180 องศาเซลเซียส โดยผงยางที่ได้มีขนาดเฉลี่ยของอนุภาคน้อยกว่า 10 ไมโครเมตรและพบว่าการเติมท่อคาร์บอนนาโนเข้าไปในยางนั้นเป็นการเพิ่มอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (glass transition temperature) ของผงยางที่ได้อีกด้วย

บทที่ 3

วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 วัตถุดิบและสารเคมี

3.1.1 นำยางธรรมชาติชนิดพรีวัลคาไนซ์ (pre-vulcanized natural rubber latex) ที่มีความเข้มข้นของเนื้อยาง 60 เปอร์เซ็นต์ บริษัทไทยรับเบอร์ลาเท็กซ์ จำกัด

3.1.2 สารละลายโซเดียมซัลไฟด์ที่มีความเข้มข้นของซัลไฟด์ 13 เปอร์เซ็นต์ บริษัท Fluka Chemical (Germany)

3.1.3 เม็ดพอลิเมอร์พอลิแลคติกแอซิดเกรด 2002D บริษัท Nature Works (United States)

3.2 วิธีการทดลอง

3.2.1 การเตรียมผงคอมโพสิตของยางธรรมชาติและซัลไฟด์

3.2.1.1 ชั่งสารละลายโซเดียมซัลไฟด์ลงในปีกเกอร์

3.2.1.2 เติมน้ำกลั่นลงในปีกเกอร์โดยปริมาณของน้ำกลั่นที่เติมนั้น จะคำนวณเพื่อการเติมนำยางธรรมชาติที่อัตราส่วนต่างๆแล้วค่าความเข้มข้นรวมของของแข็งยังอยู่ที่ 20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก

3.2.1.3 เติมน้ำยางลงเพื่อให้อัตราส่วนโดยมวลของยางต่อซัลไฟด์ตั้งแต่ 0.25:1 ถึง 10:1 โดยตัวอย่างการคำนวณดังตารางที่ 3.1

3.2.1.4 ปั่นกวนทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 นาที

3.2.1.5 นำสารละลายที่ได้ไปทำการอบแห้งแบบพ่นฝอยในเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย รุ่น BUCHI B-190 (Switzerland) ดังภาพที่ 3.1 ที่สภาวะต่างๆดังนี้

3.2.1.5.1 อุณหภูมิอากาศเข้าของอากาศที่ 120, 140, 160 และ 180 องศาเซลเซียส โดยค่าอุณหภูมิอากาศขาออกแสดงดังตารางที่ 3.2

3.2.1.5.2 อัตราการป้อนสารที่ 7, 9, 11 และ 13 มิลลิลิตรต่อนาที

3.2.1.6 เก็บตัวอย่างผงยางธรรมชาติที่ได้ เพื่อนำไปวิเคราะห์สมบัติต่างๆต่อไป

ตารางที่ 3.1 ตัวอย่างการคำนวณส่วนผสมของสารผสมที่อัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกาต่างๆ

อัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกา	น้ำยาง (g)	Na ₂ SiO ₃ (g)	น้ำกลั่น (g)
0.25:1	4.16	37.30	36.03
0.5:1	8.33	37.30	44.47
1:1	8.33	18.65	30.50
2:1	16.67	18.65	47.18

ตารางที่ 3.2 อุณหภูมิอากาศออกในการอบแห้งแบบแผ่นฝอยที่อุณหภูมิอากาศเข้าต่างๆ

อุณหภูมิอากาศเข้า (°C)	อุณหภูมิอากาศออก(°C)
120	80
140	95
160	110
180	125



ภาพที่ 3.1 เครื่องอบแห้งแบบฟืนฝอยบริษัทBuchi (Switzerland) รุ่น B-190

3.2.2 การเตรียมเม็ดพลาสติกผสมระหว่าง PLA กับผงยางคอมโพสิต

3.2.2.1 นำผงคอมโพสิตของยางธรรมชาติและซิลิกาที่เตรียมได้จากการอบแห้งแบบฟ้นฝอยไปผสมกับพอลิแลคติกแอซิด ซึ่งปริมาณของผงคอมโพสิตที่ผสมเข้าไปคิดเป็นปริมาณร้อยละ 5 ของสารทั้งหมด ก่อนทำการตัดเม็ดพลาสติกด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ (twin screw extruder) ดังภาพที่ 3.2 ที่อุณหภูมิการขึ้นรูป 145°C ถึง 195°C ที่อัตราหมุนของสกรู 45 รอบต่อนาที

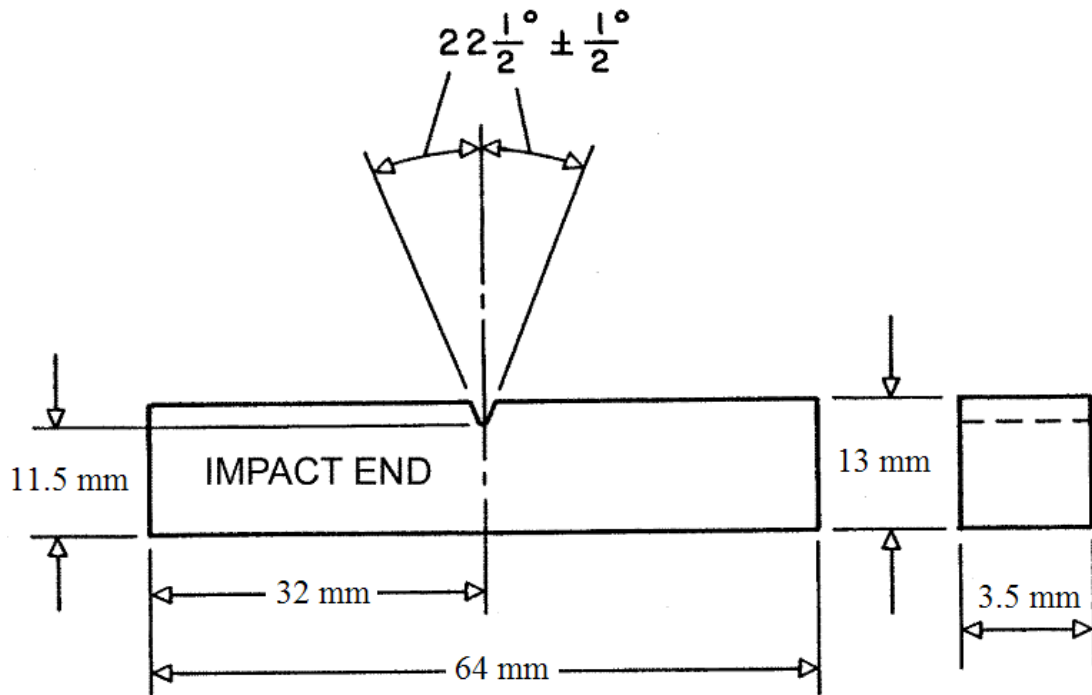
3.2.2.2 นำเม็ดพลาสติกที่ได้ไปทำการขึ้นรูปเป็นชิ้นงานด้วยเครื่องขึ้นรูปแบบอัด (compression molding machine) ดังภาพที่ 3.3 ด้วยการให้ความร้อนก่อน (pre-heat) ที่อุณหภูมิ 155°C ก่อนเป็นเวลา 4 นาที แล้วทำการอัดด้วยความดัน 50 bar เป็นเวลา 3 นาที โดยขนาดของชิ้นงานที่ขึ้นมีสองลักษณะคือตามมาตรฐาน ASTM D256 สำหรับนำไปทดสอบการรับแรงกระแทก และตามมาตรฐาน ASTM D638 Type I สำหรับนำไปทดสอบแรงดึงดังภาพที่ 3.4 และ 3.5



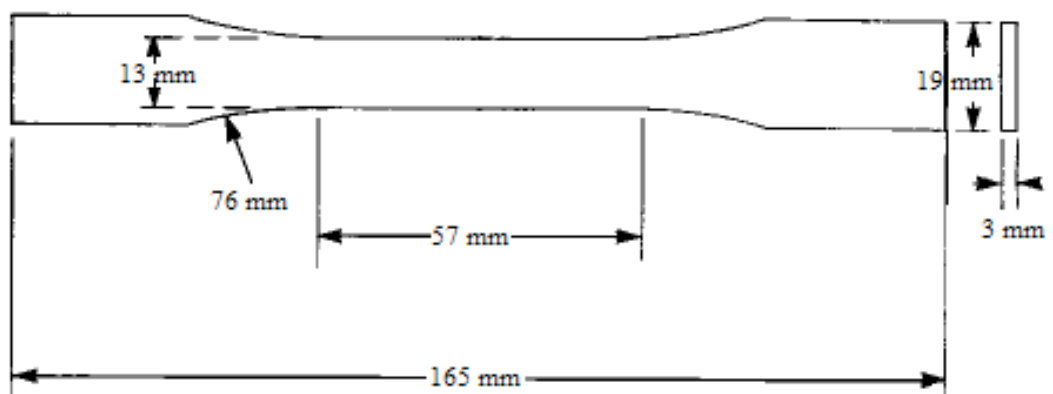
ภาพที่ 3.2 เครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่ บริษัท Labtech (United Kingdom) รุ่น LTE 20-40



ภาพที่ 3.3 เครื่องขึ้นรูปแบบอัด บริษัท Labtech (United Kingdom)



ภาพที่ 3.4 ขนาดของชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D256



ภาพที่ 3.5 ขนาดของชิ้นงานตามมาตรฐาน ASTM D638 Type I

3.3 การทดสอบสมบัติต่างๆ

3.3.1 การวิเคราะห์ลักษณะรูปร่างพื้นฐานและปริมาณธาตุที่ผิวของอนุภาค

การ วิเคราะห์ลักษณะรูปร่างพื้นฐานของผงคอมโพสิตด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) ดังภาพที่ 3.6 โดยการนำตัวอย่างที่ต้องการวัดไปวางไปวางบนแท่น (stub) ก่อนทำการฉาบผิวหน้าด้วยทอง เพื่อให้ตัวอย่างสามารถนำไฟฟ้าได้ โดยยังสามารถวิเคราะห์ปริมาณธาตุที่อยู่บริเวณผิวของอนุภาคและที่ความลึก 1 ไมโครเมตรจากผิวอนุภาค [29] ได้โดยการใช้เทคนิค Energy dispersive X-Ray spectroscopy หรือ EDX



ภาพที่ 3.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดบริษัท JEOL (Japan) รุ่น JSM 5800-LV

3.3.2 การวิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของขนาดอนุภาค

การ วิเคราะห์ขนาดและการกระจายตัวของอนุภาคผงคอมโพสิตด้วยเทคนิคการกระเจิงแสง (laser light scattering method) ด้วยเครื่อง Laser Diffraction Analyzer ดังภาพที่ 3.7 โดยใช้ น้ำเป็นตัวทำละลาย มีการปั่นกวนสารด้วยอัตราเร็วใบพัด 25 rpm ตลอดเวลาและทำการใช้คลื่นเสียง สั่นให้อนุภาคแตกตัวออกจากกัน(sonicate) เป็นเวลา 1 นาทีก่อนทำการวิเคราะห์



ภาพที่ 3.7 เครื่อง Laser Diffraction Analyzer บริษัท Malvern (England) รุ่น Mastersizer 2000

3.3.3 การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนและปริมาณของซิลิกาในอนุภาค

การ วิเคราะห์ปริมาณของซิลิกาในผงคอมโพสิตด้วยเทคนิค thermal gravimetric analysis (TGA) ด้วยเครื่อง Thermogravimetric Analyzer ดังภาพที่ 3.8 โดยการให้ความร้อนที่ อัตรา $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ และป้อนแก๊สออกซิเจนด้วยอัตราเร็ว $40\text{ mL}/\text{min}$ โดยช่วงอุณหภูมิในการ วิเคราะห์คือ $25\text{-}800^{\circ}\text{C}$



ภาพที่ 3.8 เครื่อง Thermogravimetric Analyzer บริษัท Mettler Toledo (Thailand) รุ่น TG/DC1

3.3.4 การวิเคราะห์สมบัติทางกลของอนุภาค

การวิเคราะห์สมบัติทางกลต่างๆของชิ้นงานหนาที่ขึ้นรูปจากเม็ดพลาสติกที่ผสมระหว่างพอลิแลคติกแอซิดที่และคอมโพสิตด้วยเครื่องวัดแรงกระแทก (Impact Tester) และเครื่องทดสอบอเนกประสงค์ (universal testing machine) ดังภาพที่ 3.9 และ 3.10 ตามลำดับ โดยใช้มาตรฐาน ASTM D256 โดยใช้ตุ้มน้ำหนักขนาด 30 kgf-cm ในการวัดแรงกระแทก และใช้มาตรฐาน ASTM D638 ด้วย load cell ขนาด 30kN และอัตราเร็วในการดึง 5 mm/min ในการวัดแรงดึง



ภาพที่ 3.9 เครื่องวัดแรงกระแทก



ภาพที่ 3.10 เครื่องทดสอบแรงดึงประสงค์ บริษัท Instron (Thailand)

บทที่ 4

ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ข้อมูล

จากการทดลองที่แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ศึกษาสภาวะต่างๆของกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยในการเตรียมผงคอมโพสิตของยางธรรมชาติและซิลิกา และส่วนที่ศึกษาการเติมผงคอมโพสิตของยางธรรมชาติและซิลิกาในพอลิแลคติกแอซิด ในบทที่ 4 นี้ จะรายงานผลการศึกษาออกเป็น 2 ส่วนเช่นกัน ซึ่งผลการทดลองในแต่ละส่วน จะแสดงดังต่อไปนี้

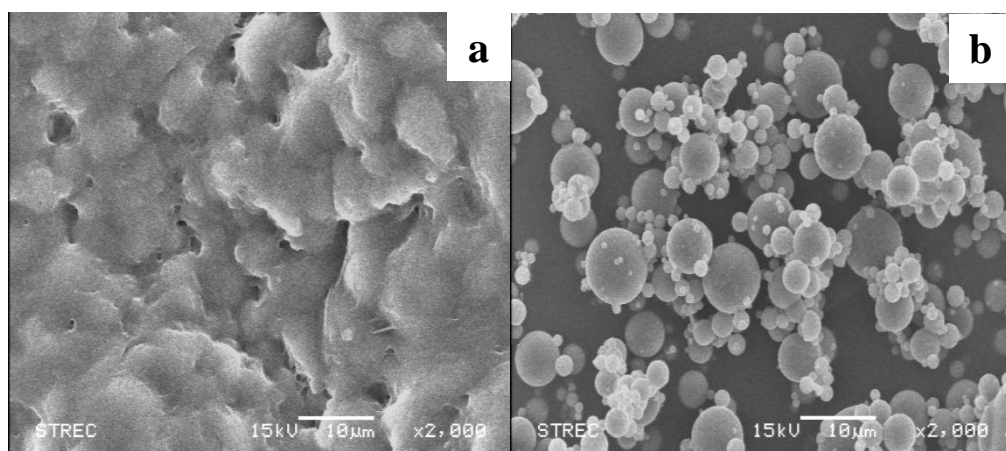
4.1 การศึกษาสภาวะการอบแห้งแบบพ่นฝอยในการเตรียมผงคอมโพสิต

4.1.1 ความเข้มข้นสายป้อนหรืออัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกา (Dry Basis)

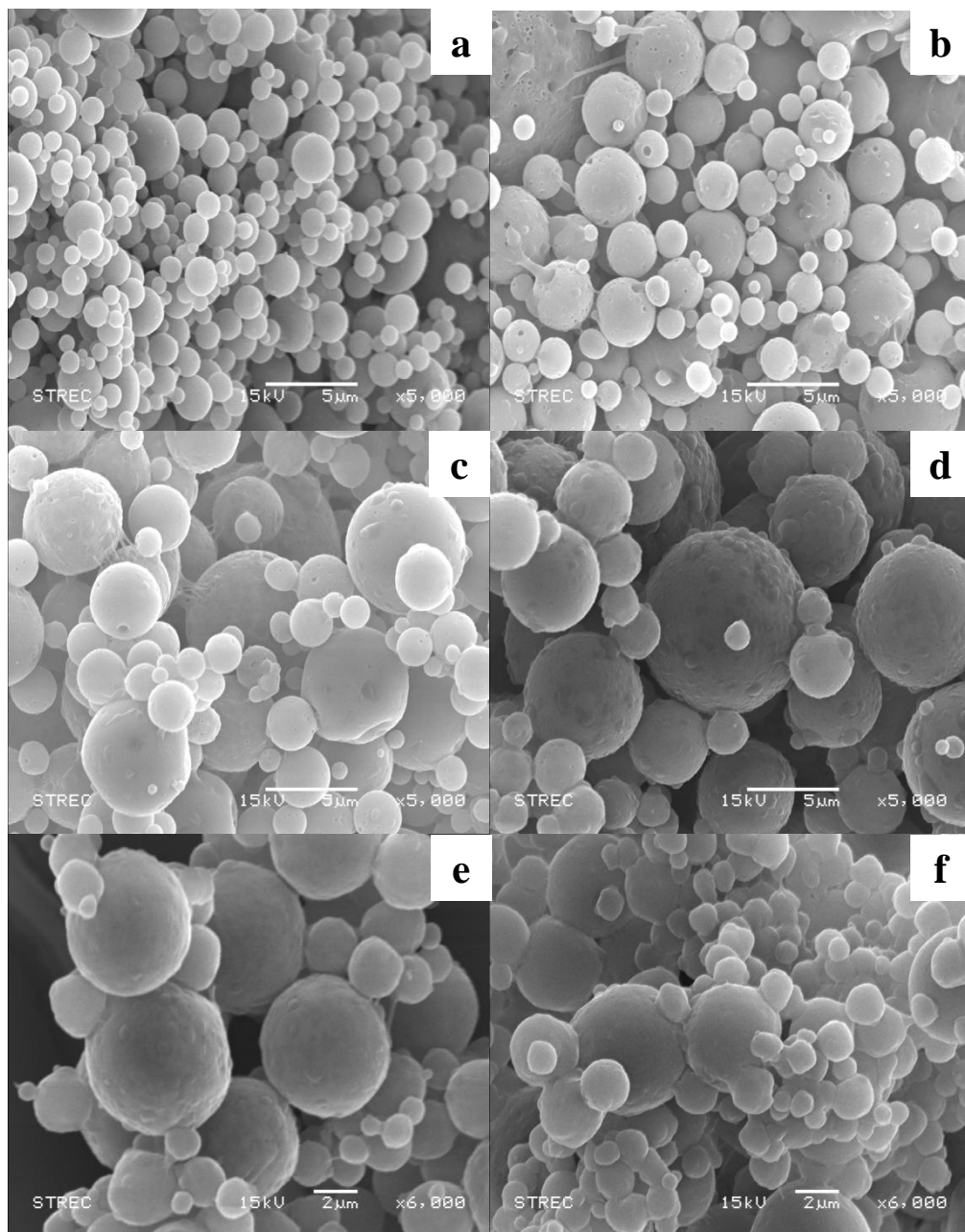
ในส่วนนี้จะทำการควบคุมอุณหภูมิอากาศขาเข้าและอัตราการป้อนสารให้คงที่ที่ 160°C และ 9 mL/min ตามลำดับ เพื่อดูอิทธิพลของความเข้มข้นสายป้อนต่อคุณภาพของผงคอมโพสิต

4.1.1.1 ผลต่อลักษณะพื้นฐานของอนุภาค

อนุภาคยางธรรมชาติและอนุภาคซิลิกาเมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดนั้น พบว่าลักษณะพื้นฐานของยางธรรมชาตินั้นมีลักษณะเป็นของแข็งผิวขรุขระเป็นเนื้อเดียวกัน ส่วนซิลิกานั้นมีลักษณะพื้นฐานของอนุภาคเป็นทรงกลม (spherical shape) ผิวเรียบยึดเกาะติดกัน ดังแสดงในภาพที่ 4.1 ส่วนอนุภาคผงคอมโพสิตของยางธรรมชาติและซิลิกาพบว่าลักษณะพื้นฐานของอนุภาคนั้นมีลักษณะพื้นฐานกลม ยึดเกาะติดกันดังแสดงในภาพที่ 4.2 จากรูปเป็นอนุภาคที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อุณหภูมิอากาศขาเข้า 160°C และอัตราการป้อนสาร 9 mL/min โดยพบว่าการเกาะตัวของอนุภาคนั้นจะมากขึ้นที่อัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกามากขึ้นตามไปด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่อัตราส่วน โดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกาเนื่องมาจากปริมาณของซิลิกาที่เข้าไปห่อหุ้มอนุภาคของยางธรรมชาติมีค่าลดลงส่งผลให้อนุภาคของยางธรรมชาติเกาะกันมากขึ้น ทำให้อนุภาคผงคอมโพสิตมีขนาดใหญ่ขึ้นอย่างเห็นได้ชัดในรูป 4.2f



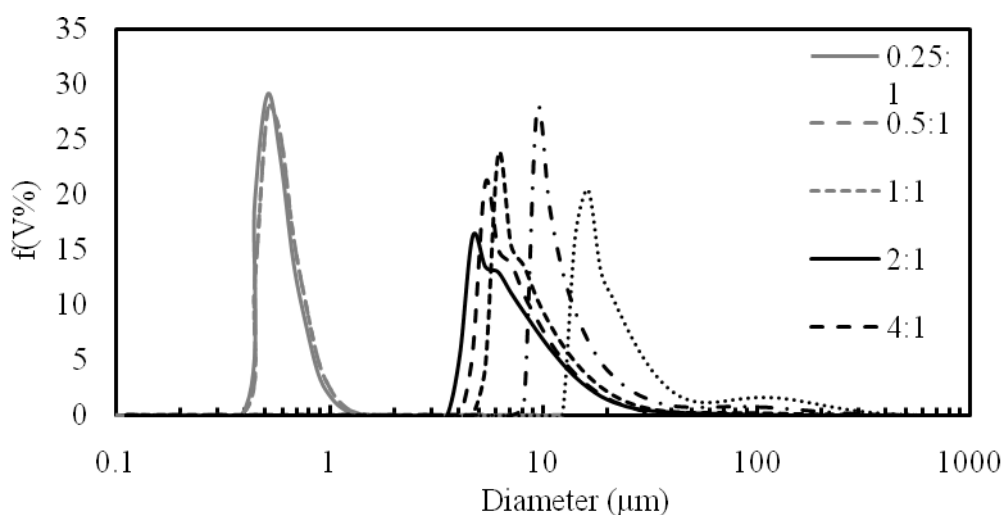
ภาพที่ 4.1 ลักษณะสัณฐานของอนุภาค (a) ยางธรรมชาติ และ (b) ซิลิกา ที่ผ่านเครื่องอบแห้งแบบฟลวยที่สภาวะอุณหภูมิอากาศเข้าที่ 160°C อัตราการป้อนสาร 9 mL/min



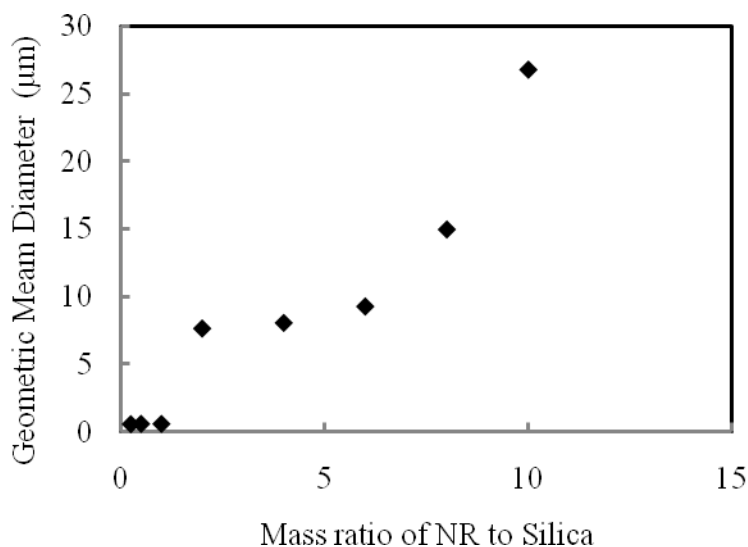
ภาพที่ 4.2 ลักษณะสัณฐานของอนุภาคผงคอมโพสิตของยางธรรมชาติและซิลิกาที่ผ่านเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สภาวะอุณหภูมิอากาศขาเข้าที่ 160°C อัตราการป้อนสาร 9 mL/min ที่อัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกา (a) 0.25:1, (b) 0.5:1, (c) 1:1, (d) 2:1, (e) 6:1 และ (f) 10:1 ที่กำลังขยาย 6000 เท่า

4.1.1.2 ผลต่อขนาดและการกระจายตัวของขนาดอนุภาค

ขนาดของอนุภาคเฉลี่ยและเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยที่อัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกาต่างๆแสดงในภาพที่ 4.3 และ 4.4 ตามลำดับ โดยจากภาพที่ 4.3 พบว่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคเป็นการกระจายตัวแบบระฆังคว่ำ (log normal distribution) เมื่ออัตราส่วนโดยมวลของยางต่อซิลิกามีค่าเพิ่มขึ้น การกระจายตัวของขนาดอนุภาคจะมีแนวโน้มเลื่อนไปทางขวา ซึ่งแสดงถึงการที่อนุภาคขนาดใหญ่มีจำนวนเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสาเหตุมาจากการยึดเกาะของอนุภาคยางธรรมชาติ โดยที่อัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกาที่ 2:1 ถึง 6:1 จะมีการกระจายตัวของขนาดอนุภาคอยู่ในแนวโน้มเดียวกัน อย่างไรก็ตามการกระจายตัวของขนาดอนุภาคในช่วงอัตราส่วนที่ 0.25:1 ถึง 1:1 นี้มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับการกระจายตัวของขนาดอนุภาคในช่วงอัตราส่วนอื่น ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่าในช่วงอัตราส่วนนี้ อนุภาคของซิลิกาสามารถห่อหุ้มอนุภาคยางธรรมชาติได้อย่างสมบูรณ์ โดยที่ช่วงอัตราส่วนที่ 2:1 ถึง 6:1 มีความแตกต่างของการกระจายตัวของขนาดอนุภาคเพียงเล็กน้อยซึ่งหมายความว่าเวลาที่ปริมาณของซิลิกาสูงลงนั้นทำให้ไม่สามารถห่อหุ้มอนุภาคยางธรรมชาติได้อย่างสมบูรณ์ ส่งผลให้อนุภาคยางธรรมชาติบางส่วนมีแนวโน้มที่จะยึดเกาะติดกัน และตั้งแต่อัตราส่วนที่ 8:1 เป็นต้นไปนั้นอนุภาคของซิลิกามีปริมาณไม่เพียงพอในการห่อหุ้มอนุภาคยางธรรมชาติ ส่งผลให้เกิดการยึดเกาะติดกันของอนุภาคยางธรรมชาติอย่างเห็นได้ชัด ซึ่งเป็นผลทำให้ค่าเฉลี่ยทางเรขาคณิตของเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคมีค่าสูงขึ้นดังแสดงในภาพที่ 4.4



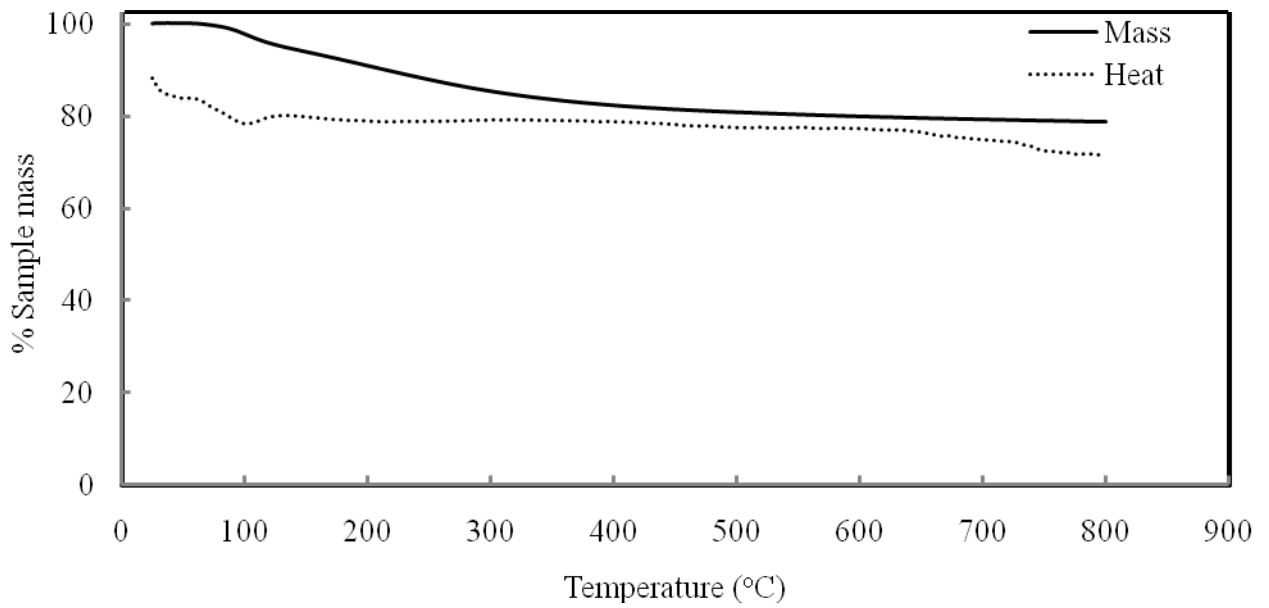
ภาพที่ 4.3 ผลของอัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติและซิลิกาต่อการกระจายตัวของขนาดของอนุภาคผงคอมโพสิตที่เตรียมจากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อัตราสายป้อน 9 mL/min อุณหภูมิอากาศเข้า 160°C



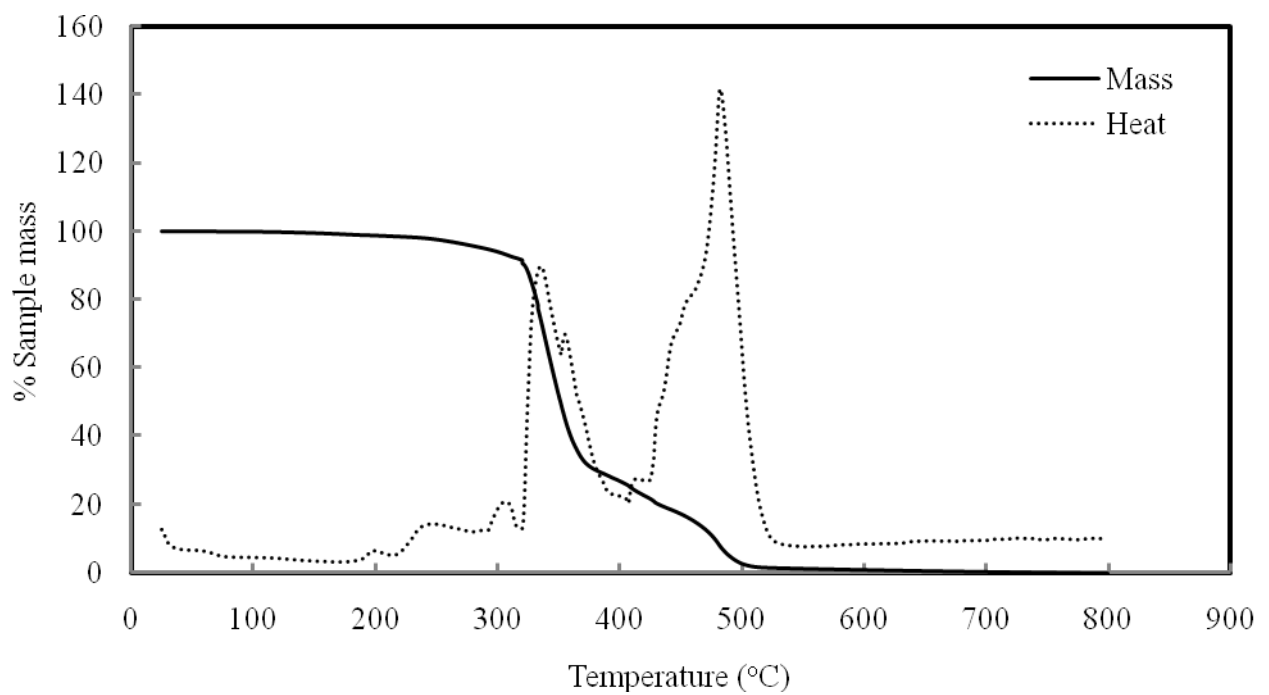
ภาพที่ 4.4 ผลของอัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติและซิลิกาต่อค่าเฉลี่ยทางเรขาคณิตของเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคผงคอมโพสิตที่เตรียมจากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่เตรียมจากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อัตราสายป้อน 9 mL/min อุณหภูมิอากาศขาเข้า 160°C

4.1.1.3 ผลต่อสมบัติทางความร้อนและปริมาณซิลิกาในอนุภาค

สมบัติทางความร้อนของผงซิลิกาและยางธรรมชาติที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สภาวะอุณหภูมิอากาศขาเข้าที่ 160°C อัตราการป้อนสาร 9 mL/min แสดงในภาพที่ 4.5 และ 4.6 ตามลำดับ ซึ่งแสดงข้อมูลอยู่ในรูปของค่าของมวลสูญเสียที่อุณหภูมิต่างๆจากเครื่อง Thermogravimetric Analyzer โดยพบว่า ซิลิกามีอัตราการมีอัตรามวลสูญเสียที่น้อยมากในช่วงอุณหภูมิต่ำกว่า 800°C โดยจากค่าสัญญาณการถ่ายเทพลังงานพบว่ามีสูญเสียมวลเนื่องจากความชื้นที่ 100°C เท่านั้น ส่วนยางธรรมชาติมีค่าสัญญาณการถ่ายเทพลังงานขึ้นไปที่อุณหภูมิประมาณ 330°C และ 490°C แสดงถึงการที่มีอัตรามวลสูญเสียเกิดขึ้น 2 ช่วง ก่อนที่ยางธรรมชาติจะสูญเสียไปทั้งหมด

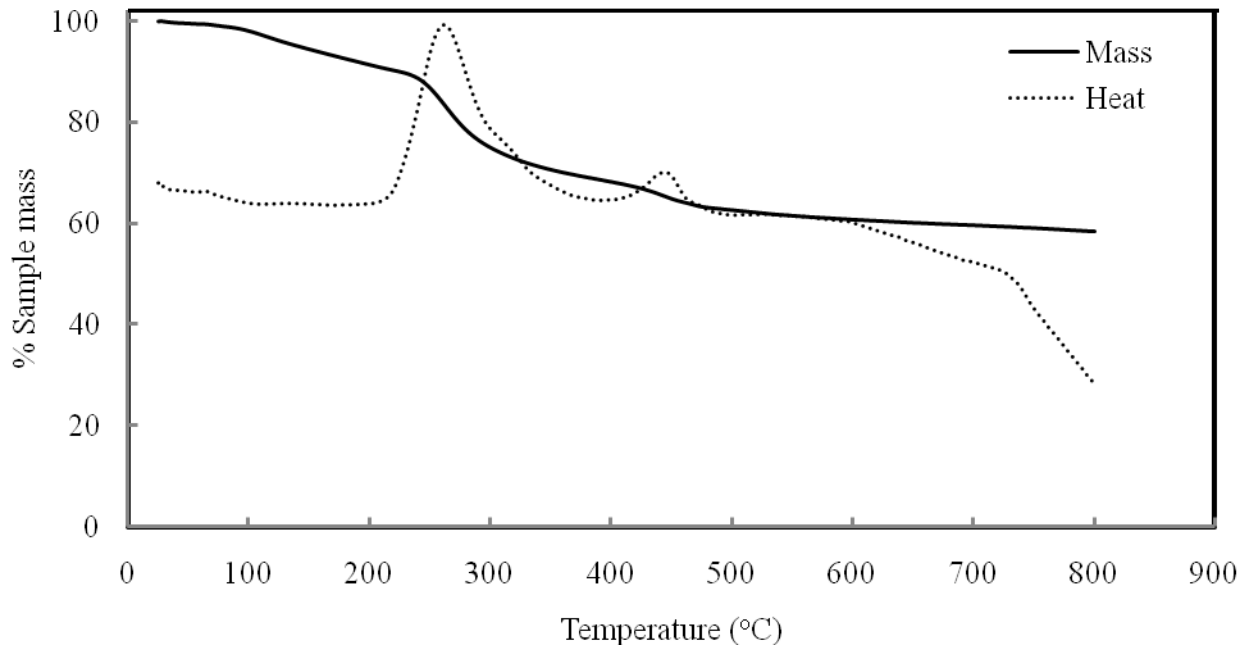


ภาพที่ 4.5 สมบัติทางความร้อนของผงซิลิกาที่เตรียมจากการอบแห้งแบบฟลวยที่อัตราสาย
ป้อน 9 mL/min อุณหภูมิอากาศเข้า 160°C

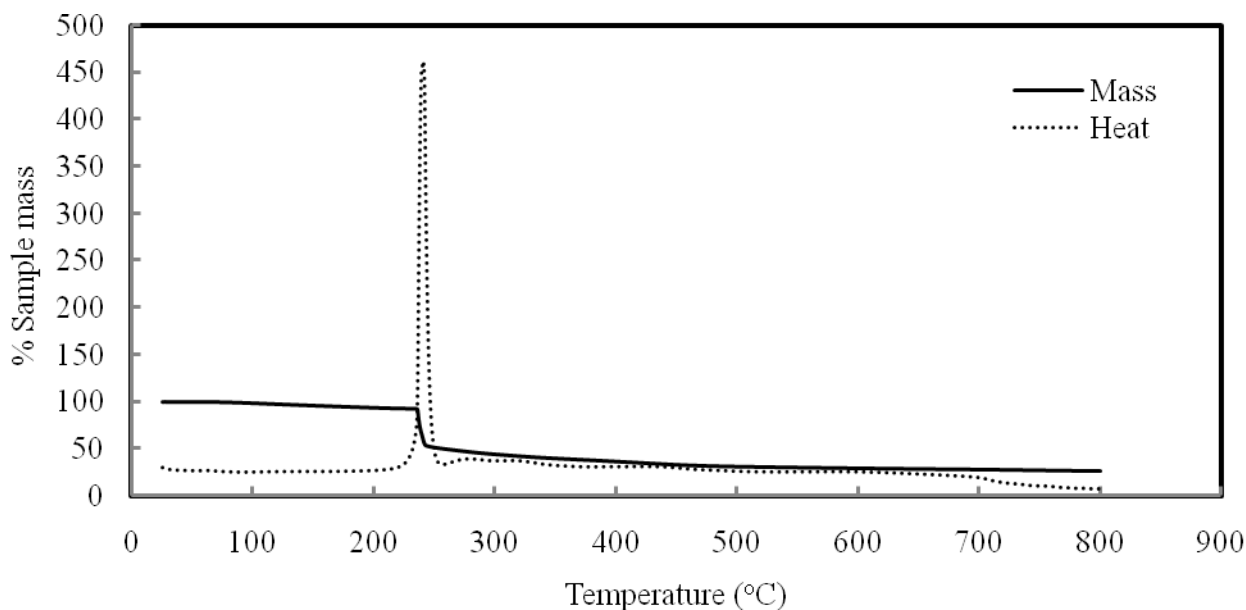


ภาพที่ 4.6 สมบัติทางความร้อนของยางธรรมชาติที่เตรียมจากการอบแห้งแบบฟลวยที่อัตรา
สายป้อน 9 mL/min อุณหภูมิอากาศเข้า 160°C

ผลของอัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกาต่อสมบัติทางความร้อนและปริมาณซิลิกาในอนุภาคคอมโพสิตแสดงในภาพที่ 4.7-4.10 ซึ่งพบว่าที่อัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกาที่ 0.5:1 ค่าสัญญาณการถ่ายเทพลังงานแสดงให้เห็นถึงการสูญเสียมวลเนื่องจากยางธรรมชาติที่อุณหภูมิประมาณ 260°C และ 450°C

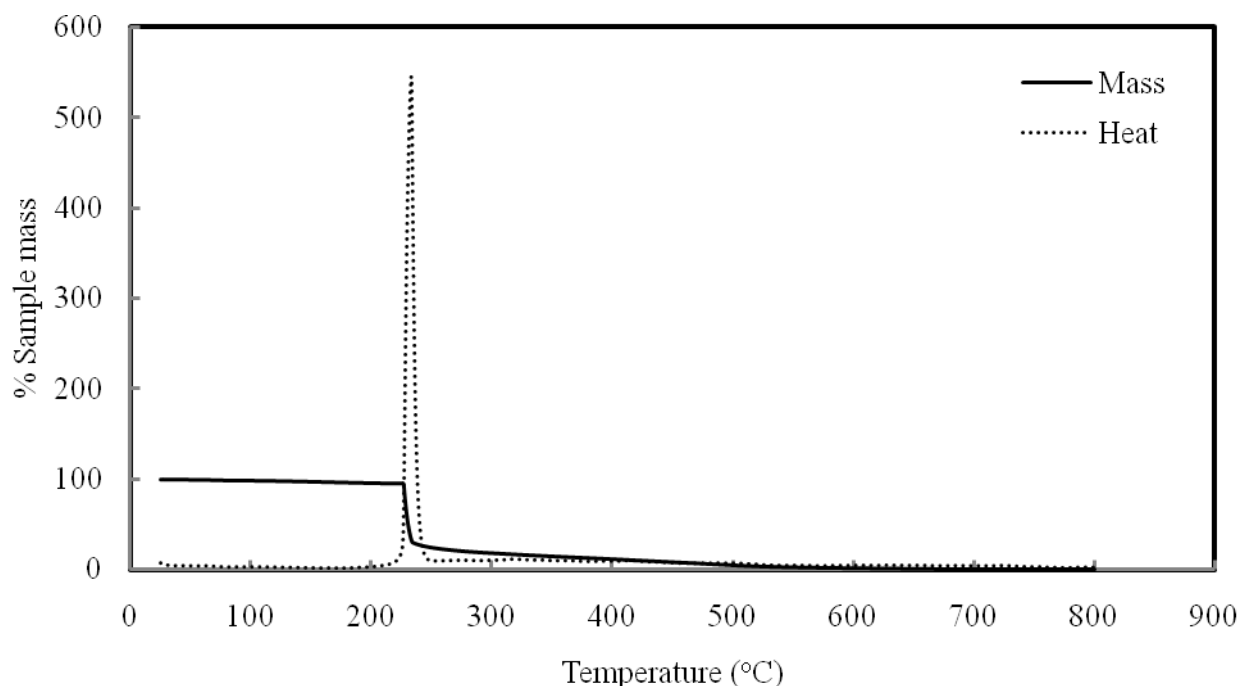


ภาพที่ 4.7 สมบัติทางความร้อนของผงคอมโพสิตที่เตรียมจากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อัตราสายป้อน 9 mL/min อุณหภูมิอากาศเข้า 160°C ที่อัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกาที่ 0.5:1



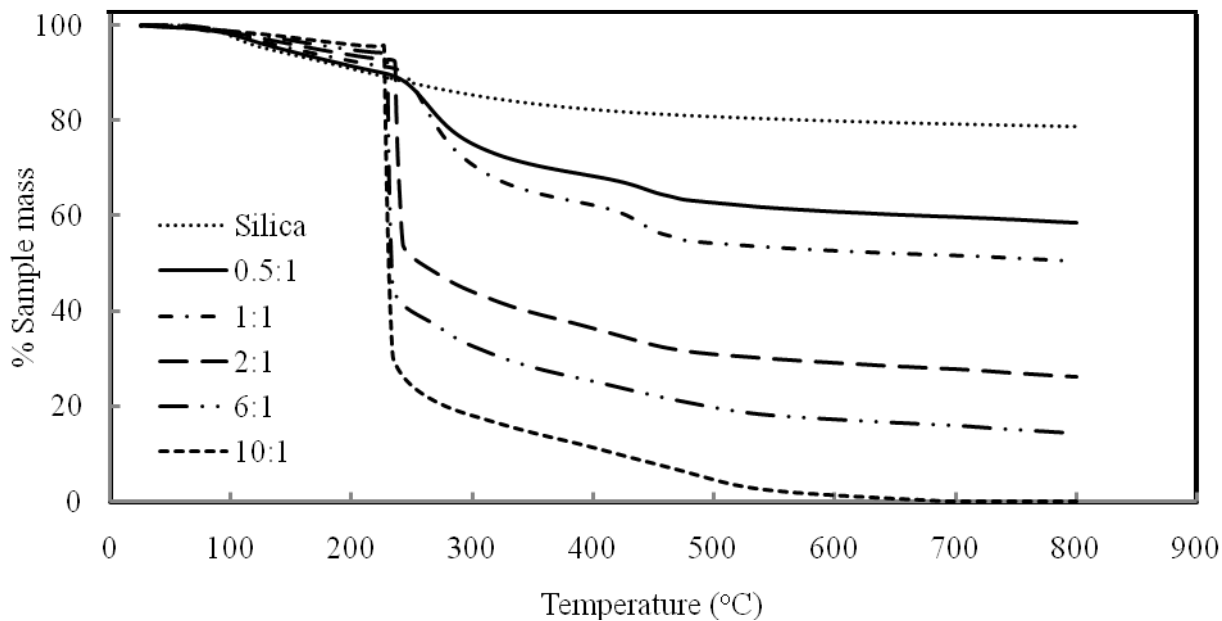
ภาพที่ 4.8 สมบัติทางความร้อนของผงคอมพอสิตที่เตรียมจากการอบแห้งแบบฟลวยที่อัตรา
สายป้อน 9 mL/min อุณหภูมิอากาศเข้า 160°C ที่อัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกา
ที่ 2:1

ส่วนที่อัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกาที่ 2:1 นั้นค่าสัญญาณการถ่ายเท
พลังงานแสดงให้เห็นถึงการสูญเสียมวลเนื่องจากยางธรรมชาติที่อุณหภูมิประมาณ 230°C เพียง
ค่าเดียว ซึ่งเมื่อเทียบกับที่อัตราส่วนที่ 10:1 ดังภาพที่ 4.9 นั้น การสูญเสียมวลเนื่องจากยาง
ธรรมชาติจะอยู่ที่อุณหภูมิประมาณ 220°C ซึ่งจะเห็นได้ว่ายังอัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติ
ต่อซิลิกามีค่ามากขึ้นเท่าไร การสูญเสียมวลเนื่องจากยางธรรมชาติจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำลงเพียง
เท่านั้น ทั้งนี้มาจากการที่ปริมาณซิลิกาตกลงส่งผลให้อุณหภูมิจุดหลอมเหลวของผงคอมพอสิตมีค่า
ลดลง



ภาพที่ 4.9 สมบัติทางความร้อนของผงคอมโพลีที่เตรียมจากการอบแห้งแบบฟุ้งฝอยที่อัตรา
สายป้อน 9 mL/min อุณหภูมิอากาศเข้า 160°C ที่อัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกา
ที่ 10:1

โดยเมื่อนำอัตราการสูญเสียมวลของผงคอมโพลีที่อุณหภูมิต่างๆมาเปรียบเทียบกับดัง
ภาพที่ 4.10 และวิเคราะห์ปริมาณซิลิกาที่เหลืออยู่เพื่อหาอัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกา
ที่แท้จริงในตารางที่ 4.1 พบว่าปริมาณซิลิกาที่เหลืออยู่มีค่าลดลงตามอัตราส่วนโดยมวลของ
ยางธรรมชาติต่อซิลิกา และมีค่าเข้าใกล้ 0 ที่อัตราส่วน 10:1 ซึ่งอัตราส่วนโดยมวลของยาง
ธรรมชาติต่อซิลิกาที่แท้จริงที่คำนวณได้นั้นมีค่าใกล้เคียงกับค่าอัตราส่วนโดยมวลของยาง
ธรรมชาติต่อซิลิกาที่ใช้ในการออกแบบการทดลอง



ภาพที่ 4.10 ผลต่ออัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกาต่อสมบัติทางความร้อนของผงคอมโพสิตที่เตรียมจากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อัตราสายป้อน 9 mL/min อุณหภูมิอากาศเข้า 160°C

ตารางที่ 4.1 อัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกาที่แท้จริงในผงคอมโพสิตที่เตรียมจากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อัตราสายป้อน 9 mL/min อุณหภูมิอากาศเข้า 160°C

NR-Silica mass ratio from theory	NR-Silica mass ratio from calculation
0.5:1	0.71
1:1	0.98
2:1	2.81
6:1	6.03
10:1	~infinite

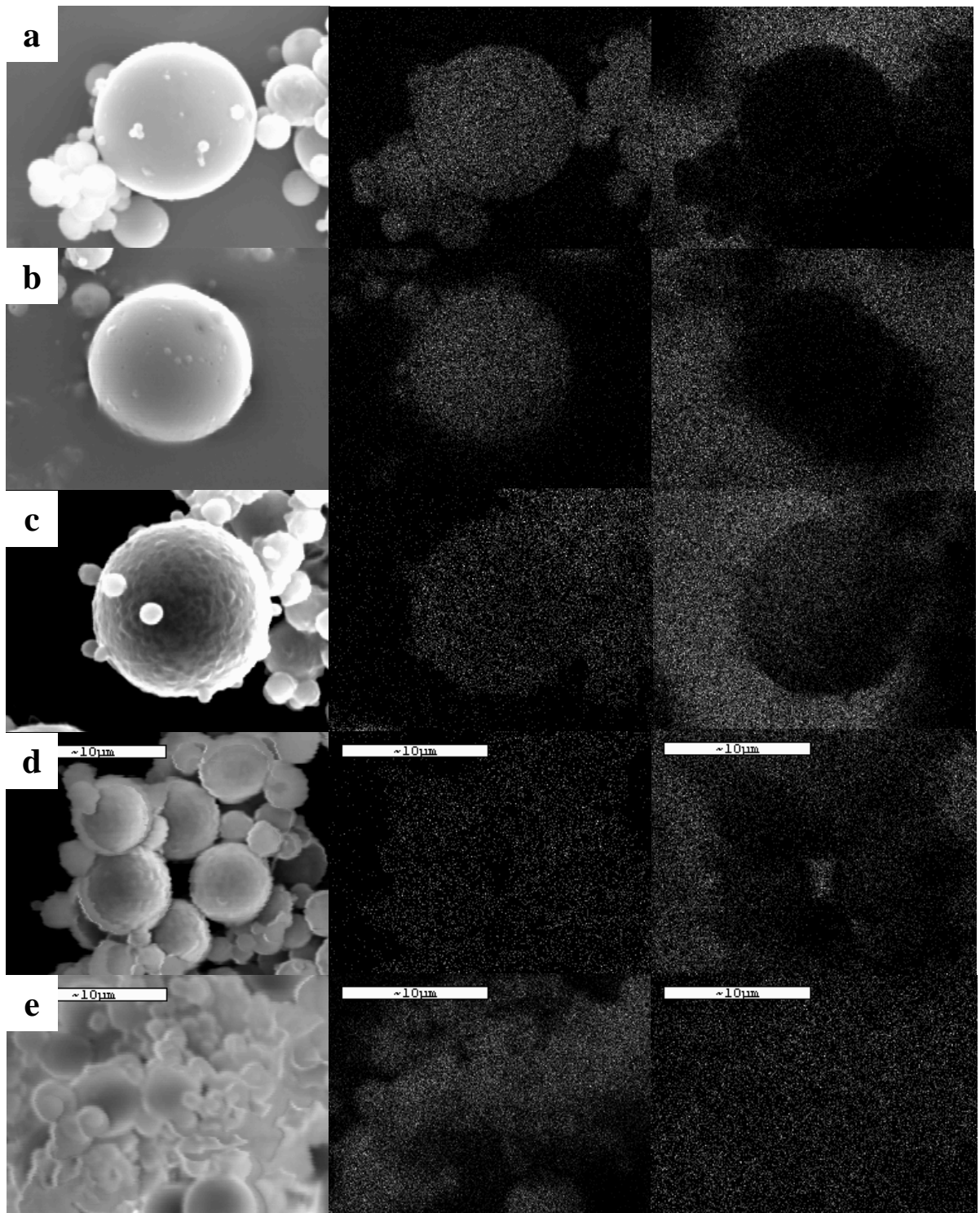
4.1.1.4 ผลต่อการห่อหุ้มอนุภาคยางธรรมชาติด้วยอนุภาคซิลิกา

การวิเคราะห์ผลในด้านการห่อหุ้มอนุภาคยางธรรมชาติด้วยอนุภาคซิลิกานี้ อาศัยการใช้เทคนิค Energy dispersive X-Ray spectroscopy (EDX) ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.2 โดยพบว่าเมื่ออัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกาเพิ่มขึ้น ปริมาณของธาตุซิลิกอนมีค่าลดลง ซึ่งบ่งบอกถึงปริมาณของซิลิกาที่บริเวณผิวชั้นนอกมีปริมาณลดลง ที่ช่วงอัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกาที่ 0.25:1 ถึง 1:1 อัตราส่วนปริมาณธาตุ C/Si มีค่าต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับที่อัตราส่วนอื่น ซึ่งแสดงถึงการที่อนุภาคของซิลิกาสามารถห่อหุ้มอนุภาคยางธรรมชาติได้เป็นส่วนมาก โดยที่อัตราส่วนที่ 2:1 ถึง 6:1 นั้นค่าอัตราส่วนปริมาณธาตุ C/Si เพิ่มขึ้น เพราะการเกาะติดกันของอนุภาคยางธรรมชาติเนื่องจากปริมาณของซิลิกาที่ไปห่อหุ้มอนุภาคยางธรรมชาติมีปริมาณน้อยลง และที่อัตราส่วนที่มากกว่า 6:1 อัตราส่วนปริมาณธาตุ C/Si มีค่าสูงกว่าที่อัตราส่วนอื่นอย่างมีนัยสำคัญ แสดงถึงปริมาณอนุภาคซิลิกอนที่น้อยจนเริ่มไม่สามารถห่อหุ้มอนุภาคยางธรรมชาติไว้ได้

ตารางที่ 4.2 ปริมาณของธาตุที่บริเวณผิวชั้นนอกของอนุภาคที่อัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกาต่างๆ

NR-Silica mass ratio	% Element				C/Si ratio
	C	Si	O	Na	
0.25:1	13.14	28.11	44.77	13.98	0.47
0.5:1	17.29	24.00	45.38	13.33	0.72
1:1	29.47	18.07	42.39	10.07	1.63
2:1	56.10	9.28	29.03	5.59	6.04
4:1	65.27	5.38	25.49	3.40	12.13
6:1	71.33	5.14	20.39	2.78	13.88
8:1	75.58	3.53	18.64	1.99	21.41
10:1	76.36	3.59	17.45	2.29	21.27

โดยเมื่อทำการทำแผนภาพ (mapping) แสดงธาตุ C และ Si บนพื้นผิวของผงคอมโพสิต พบว่าอนุภาคยางธรรมชาติถูกห่อหุ้มไว้ด้วยอนุภาคของซิลิกาจริง โดยที่อัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกามากขึ้น ความสามารถในการห่อหุ้มอนุภาคยางธรรมชาติด้วยอนุภาคของซิลิกามีค่าลดลงดังแสดงในภาพที่ 4.11



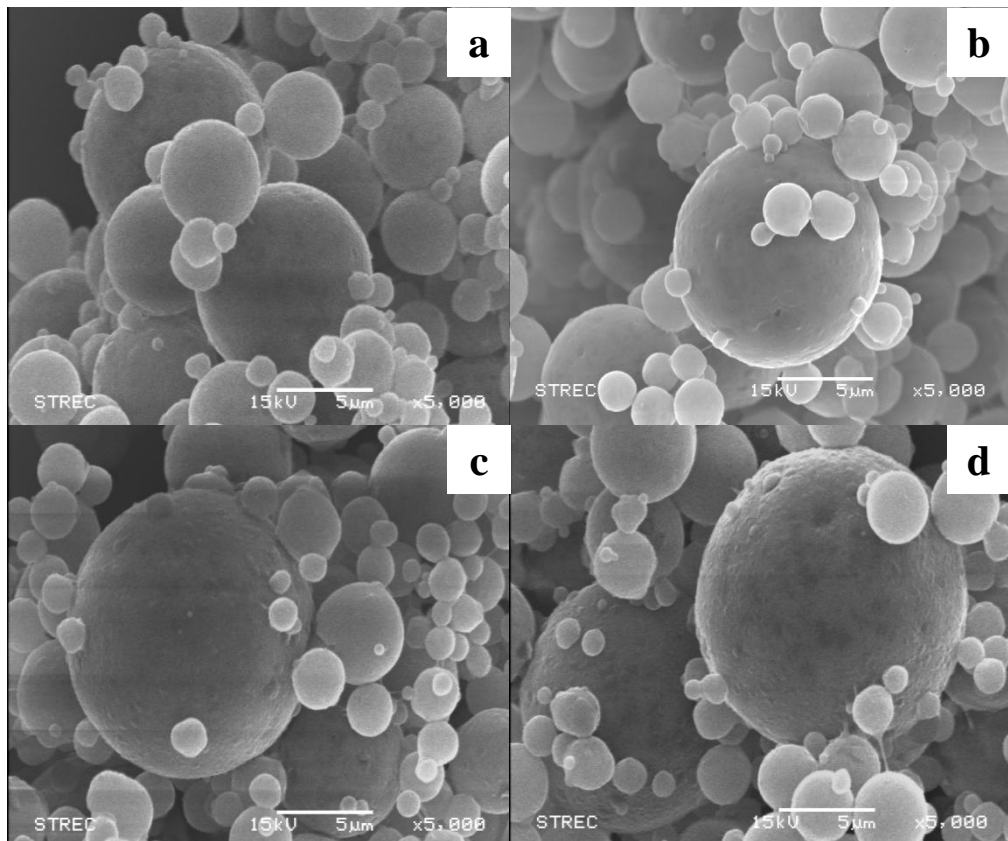
ภาพที่ 4.11 แผนภาพแสดงการวิเคราะห์ธาตุ Si และ C ตามลำดับบนผิวอนุภาคผงคอมโพสิตที่อัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกา (a) 0.25:1, (b) 1:1, (c) 2:1, (d) 6:1 และ (e) 10:1

4.1.2 อัตราเร็วของสายป้อน

ในส่วนนี้จะทำการควบคุมอุณหภูมิอากาศเข้าและอัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกาให้คงที่ที่ 160°C และ 2:1 ตามลำดับ เพื่อดูอิทธิพลของอัตราเร็วของสายป้อนต่อคุณภาพของผงคอมโพสิต

4.1.2.1 ผลต่อลักษณะพื้นฐานของอนุภาค

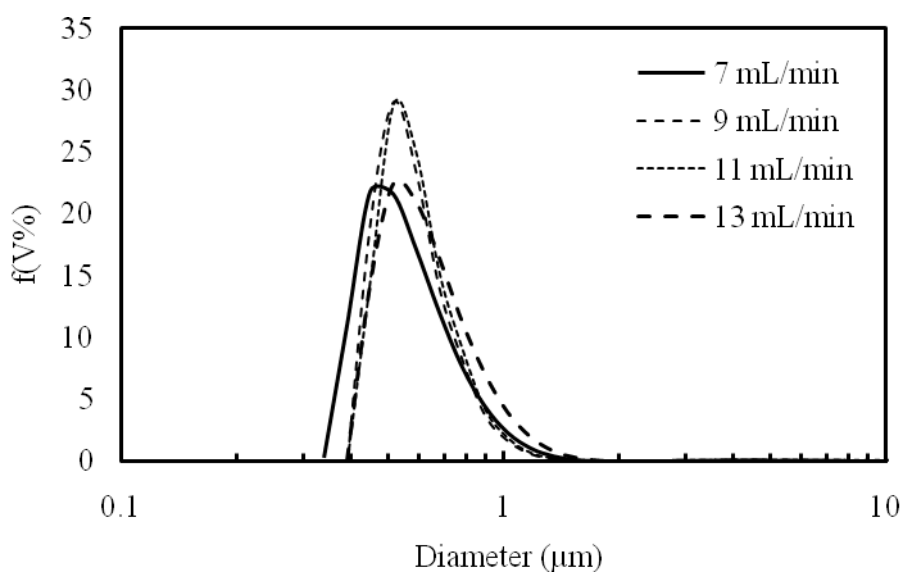
อนุภาคผงคอมโพสิตของยางธรรมชาติและซิลิกา เมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดนั้น พบว่าลักษณะพื้นฐานของอนุภาคนั้นมีลักษณะพื้นฐานกลม (Spherical shape) ยึดเกาะติดกันดังแสดงในภาพที่ 4.12 จากรูปเป็นอนุภาคที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อุณหภูมิอากาศเข้า 160°C และอัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกาที่ 2:1 โดยพบว่าการเกาะตัวของอนุภาคนั้นจะมากขึ้นที่อัตราเร็วสายป้อนที่สูงขึ้น เนื่องมาจากเมื่ออัตราการป้อนสารสูง ทำให้ระยะเวลาที่ละอองฝอยสัมผัสกับความร้อนลดลง ทำให้การระเหยตัวทำละลายในระบบที่มีอัตราการป้อนสารสูงไม่ดีเท่าในระบบที่อัตราการป้อนสารต่ำ สารที่ได้จึงมีการเกาะตัวเกิดขึ้นมากกว่า



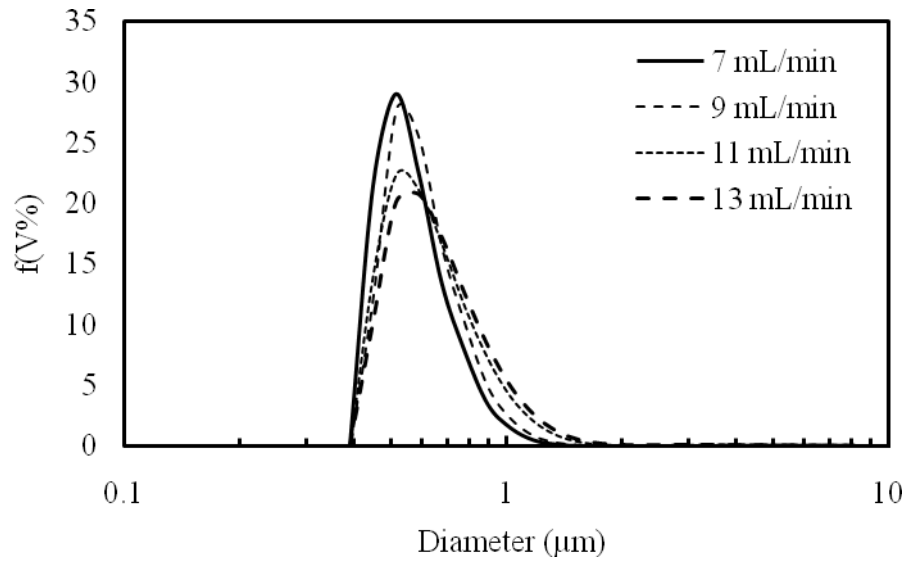
ภาพที่ 4.12 ลักษณะพื้นฐานของอนุภาคผงคอมโพสิตของยางธรรมชาติและซิลิกาที่ผ่านเครื่องอบแห้งแบบฟุ้งฝอยที่สภาวะอุณหภูมิอากาศขาเข้าที่ 160°C ที่อัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกา 2:1 ที่อัตราการป้อนสาร (a) 7, (b) 9, (c) 11 และ (d) 13 mL/min

4.1.2.2 ผลต่อขนาดและการกระจายตัวของขนาดอนุภาค

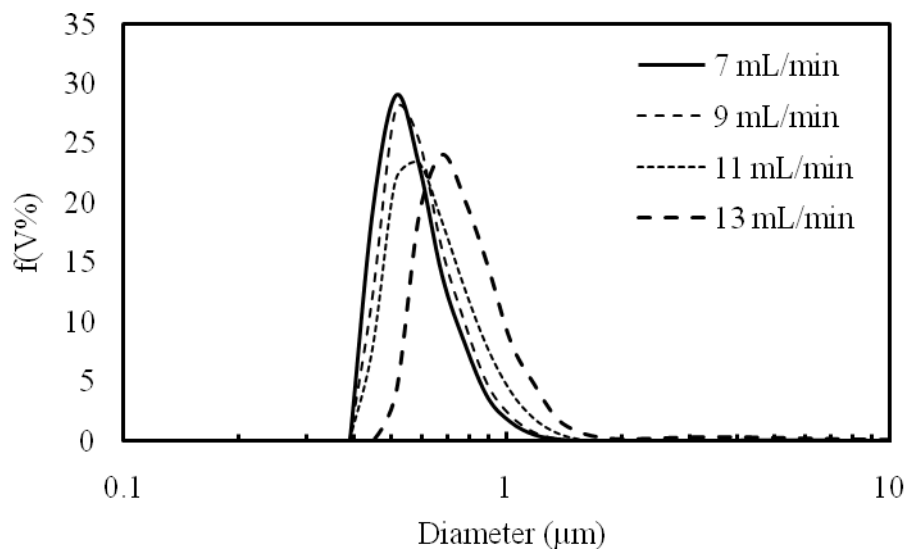
ขนาดของอนุภาคเฉลี่ยและเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยที่อัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกาต่างๆแสดงในภาพที่ 4.13 ถึง 4.16 ตามลำดับ พบว่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคเป็นการกระจายตัวแบบระฆังคว่ำ (log normal distribution) เมื่ออัตราเร็วสายป้อนมีค่าเพิ่มขึ้น การกระจายตัวของขนาดอนุภาคจะมีแนวโน้มเลื่อนไปทางขวาซึ่งแสดงถึงการที่อนุภาคขนาดใหญ่มีจำนวนเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสาเหตุมาจาก เนื่องมาจากเมื่ออัตราการป้อนสารสูง ทำให้ระยะเวลาที่ละอองฝอยสัมผัสกับความร้อนลดลง ทำให้การระเหยตัวทำละลายในระบบที่มีอัตราการป้อนสารสูงไม่ดีเท่าในระบบที่อัตราการป้อนสารต่ำ ผลลัพธ์ที่ได้จึงมีการเกาะตัวเกิดขึ้นมากกว่า ส่งผลให้ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคมีแนวโน้มสูงขึ้นดังตารางที่ 4.3 โดยผลของอัตราเร็วของสายป้อนนี้จะเห็นผลชัดเจนขึ้นที่อัตราส่วนโดยมวลของยางต่อซิลิกาที่สูงขึ้น เนื่องจากมีอนุภาคยางธรรมชาติมากขึ้น จึงมีการเกาะติดกันมากขึ้นตามไปด้วย



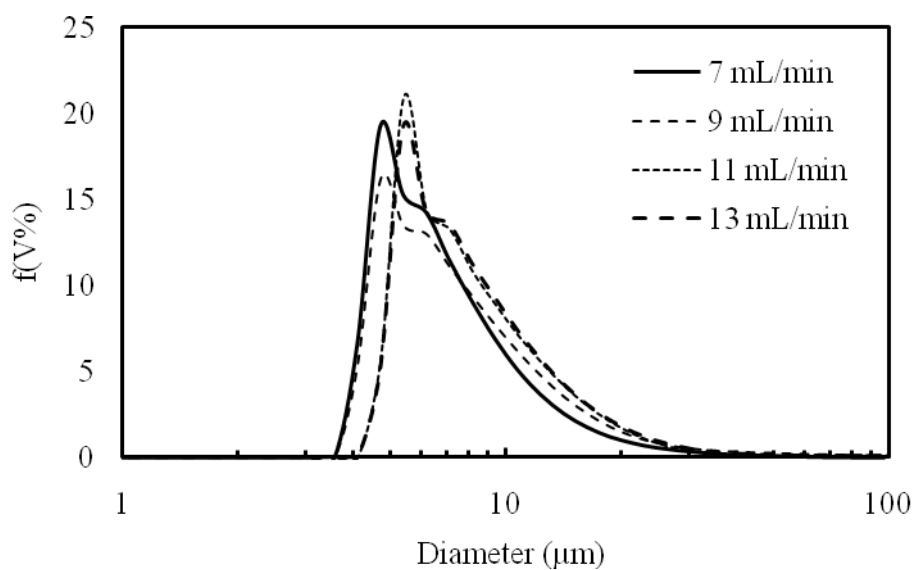
ภาพที่ 4.13 การกระจายตัวของขนาดของอนุภาคผงคอมโพสิตที่อัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกาที่ 0.25:1 อุณหภูมิอากาศเข้า 160°C



ภาพที่ 4.14 การกระจายตัวของขนาดของอนุภาคผงคอมโพสิตที่อัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกาที่ 0.5:1 อุณหภูมิอากาศเข้า 160°C



ภาพที่ 4.15 การกระจายตัวของขนาดของอนุภาคผงคอมโพสิตที่อัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกาที่ 1:1 อุณหภูมิอากาศเข้า 160°C



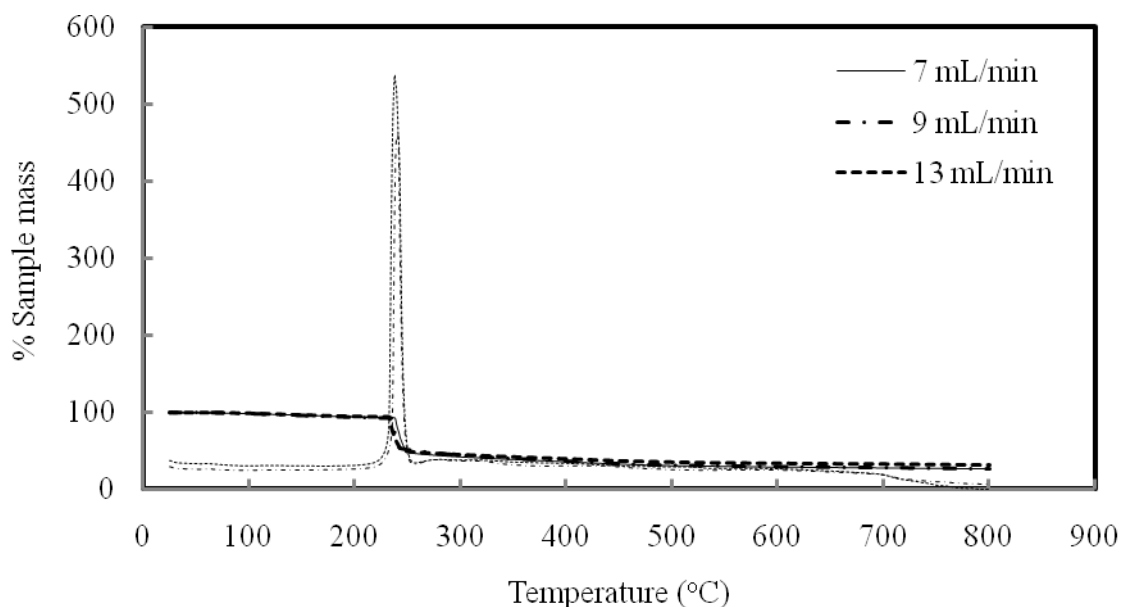
ภาพที่ 4.16 การกระจายตัวของขนาดของอนุภาคผงคอมโพสิตที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกาที่ 2:1 อุณหภูมิอากาศเข้า 160°C

ตารางที่ 4.3 ผลของอัตราสายป้อนต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคผงคอมโพสิตที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อุณหภูมิอากาศเข้า 160°C

NR-SiO ₂ mass ratio	Geometric Mean Diameter (μm) at feed rate			
	7 mL/min	9 mL/min	11 mL/min	13 mL/min
0.25:1	0.56	0.58	0.59	0.63
0.5:1	0.57	0.60	0.63	0.57
1:1	0.58	0.60	0.65	0.79
2:1	6.93	7.65	8.15	8.28

4.1.2.3 ผลต่อสมบัติทางความร้อนและปริมาณซิลิกาในอนุภาค

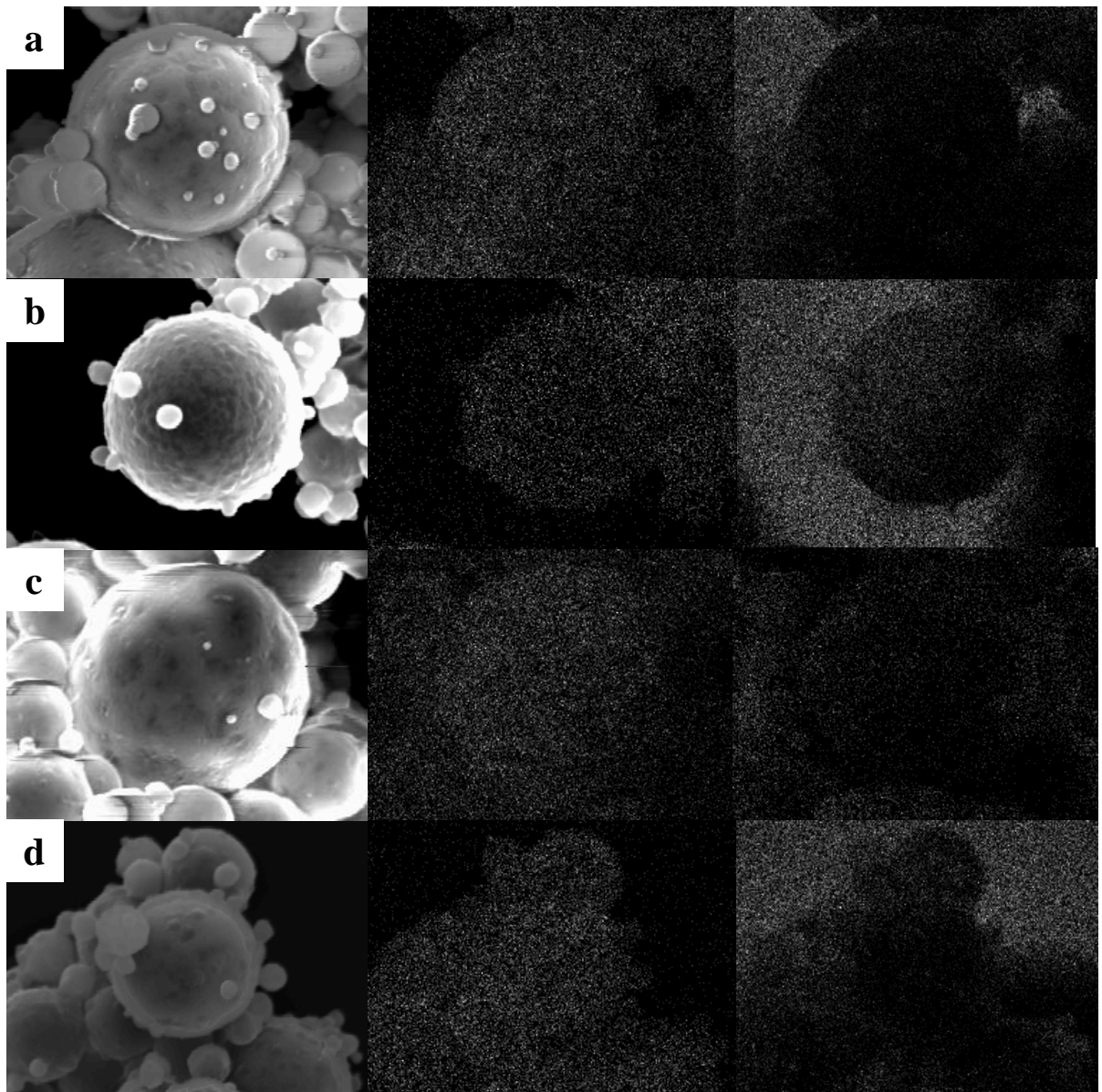
สมบัติทางความร้อนของผงซิลิกาและยางธรรมชาติที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สภาวะอุณหภูมิอากาศเข้าที่ 160°C อัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกาที่ 2:1 แสดงในภาพที่ 4.18 ซึ่งแสดงข้อมูลอยู่ในรูปของค่าของมวลสูญเสียที่อุณหภูมิต่างๆจากเครื่อง Thermogravimetric Analyzer โดยพบว่า ที่อัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกาที่ 2:1 นั้นค่าสัญญาณการถ่ายเทพลังงานแสดงให้เห็นถึงการสูญเสียมวลเนื่องจากยางธรรมชาติที่อุณหภูมิประมาณ 230°C โดยเมื่อเปลี่ยนอัตราสายป้อนแล้วค่าสัญญาณการถ่ายเทพลังงานและค่าของมวลสูญเสียที่อุณหภูมิต่างๆมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ซึ่งหมายความว่าอัตราสายป้อนนั้นไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติทางความร้อนและปริมาณซิลิกาในอนุภาค



ภาพที่ 4.17 ผลของอัตราสายป้อนต่อสมบัติทางความร้อนของผงคอมโพสิตที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกาที่ 2:1 อุณหภูมิอากาศเข้า 160°C

4.1.2.4 ผลต่อการห่อหุ้มอนุภาคยางธรรมชาติด้วยอนุภาคซิลิกา

การวิเคราะห์ผลในด้านการห่อหุ้มอนุภาคยางธรรมชาติด้วยอนุภาคซิลิกานี้ อาศัยการใช้เทคนิค Energy dispersive X-Ray spectroscopy (EDX) เมื่อทำการทำแผนภาพ (mapping) แสดงธาตุ C และ Si บนพื้นผิวของผงคอมโพสิต พบว่าอนุภาคยางธรรมชาติถูกห่อหุ้มไว้ด้วยอนุภาคของซิลิกา โดยพบว่าการเปลี่ยนค่าอัตราสายป้อนนั้นไม่ส่งผลต่อการห่อหุ้มอนุภาคยางธรรมชาติด้วยอนุภาคซิลิกาในผงคอมโพสิต



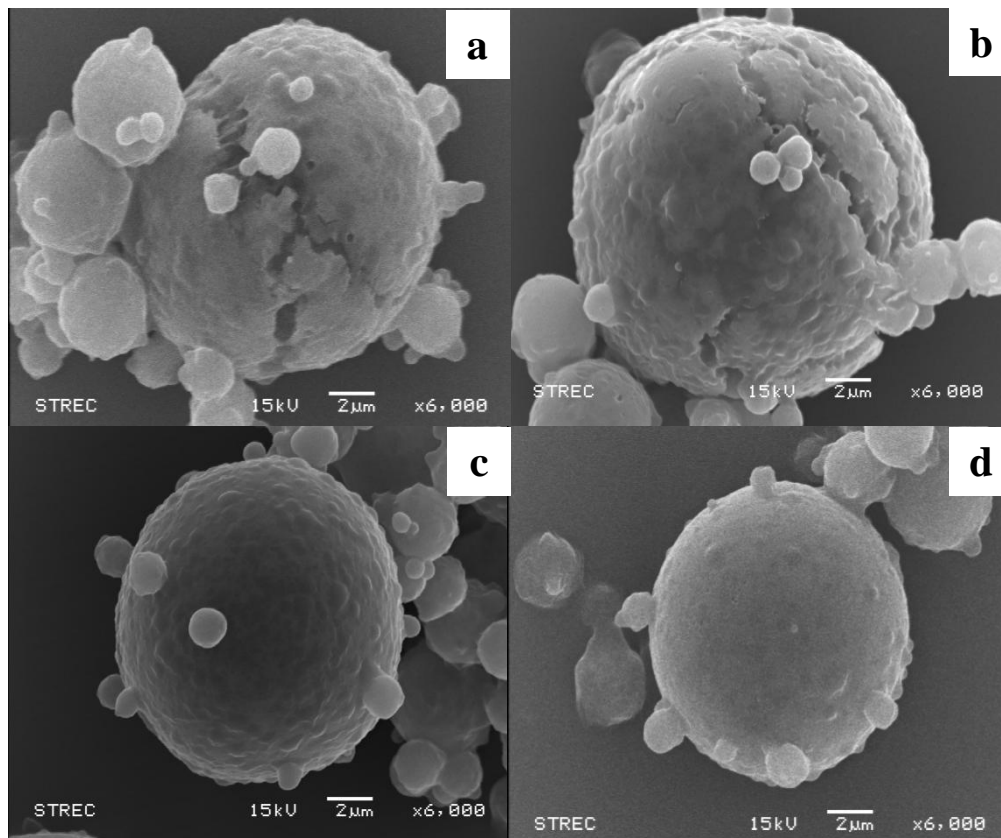
ภาพที่ 4.18 แผนภาพแสดงการวิเคราะห์ธาตุ Si และ C ตามลำดับบนผิวอนุภาคผงคอมโพสิตของยางธรรมชาติและซิลิกาที่ผ่านเครื่องอบแห้งแบบฟลวยที่สภาวะอุณหภูมิอากาศขาเข้าที่ 160°C ที่อัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกา 2:1 ที่อัตราการป้อนสาร (a) 7, (b) 9, (c) 11 และ (d) 13 mL/min

4.1.3 อุณหภูมิอากาศขาเข้า

ในส่วนนี้จะทำการควบคุมอัตราเร็วสายป้อนและอัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกาให้คงที่ที่ 7 mL/min และ 2:1 ตามลำดับ เพื่อดูอิทธิพลของอุณหภูมิอากาศขาเข้าต่อคุณภาพของผงคอมโพสิต

4.1.3.1 ผลต่อลักษณะพื้นฐานของอนุภาค

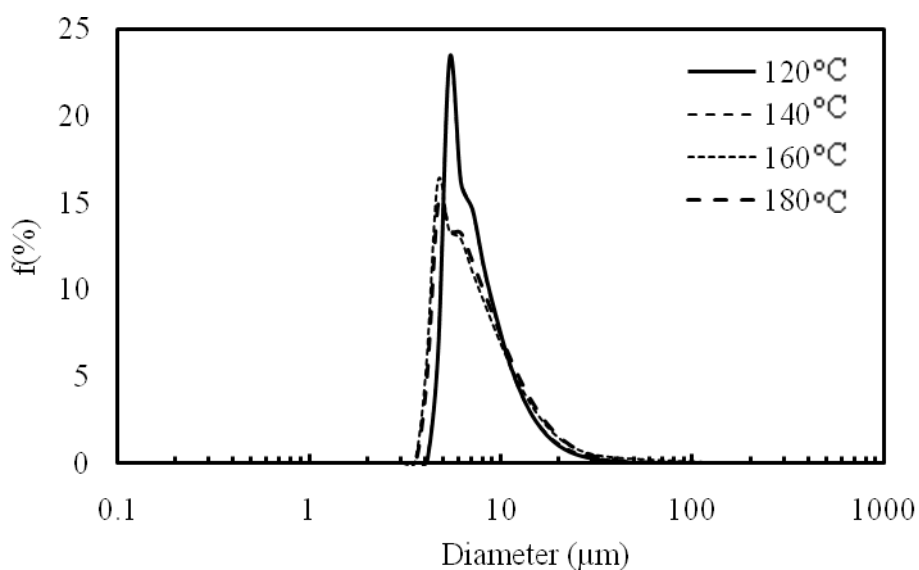
อนุภาคผงคอมโพสิตของยางธรรมชาติและซิลิกา เมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดนั้น พบว่าลักษณะพื้นฐานของอนุภาคนั้นมีลักษณะพื้นฐานกลม (Spherical shape) ยึดเกาะติดกันดังแสดงในภาพที่ 4.19 จากรูปเป็นอนุภาคที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อัตราการป้อนสาร 9 mL/min และอัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกาที่ 2:1 โดยพบว่าขนาดอนุภาคนั้นจะไม่เปลี่ยนแปลงที่อุณหภูมิอากาศขาเข้าที่สูงขึ้น แต่จะพบว่ามีบริเวณผิวของอนุภาคบางส่วนที่อุณหภูมิอากาศขาเข้าต่ำนั้นจะเกิดการแตกหัก (cracking) โดยสามารถอธิบายการแตกหักนี้ได้ว่าเกิดจากการที่ชั้นตอนอบแห้งของซิลิกาเจลนั้นเกิดไม่สมบูรณ์เนื่องจากอุณหภูมิลดต่ำเกินไป ทำให้การถ่ายเทความร้อนไปยังซิลิกาเจลนั้นไม่พอเพียง



ภาพที่ 4.19 ลักษณะพื้นฐานของอนุภาคผงคอมโพสิตของยางธรรมชาติและซิลิกาที่ผ่านเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สภาวะอัตราการป้อนสารที่ 9 mL/min อัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกา 2:1 ที่อุณหภูมิอากาศเข้า (a) 120 (b) 140 (c) 160 และ (d) 180°C ที่กำลังขยาย 6000 เท่า

4.1.3.2 ผลต่อขนาดและการกระจายตัวของขนาดอนุภาค

ขนาดของอนุภาคเฉลี่ยและเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยที่อัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกาต่างๆแสดงในภาพที่ 4.20 และตารางที่ 4.4 พบว่าการกระจายตัวของขนาดอนุภาคเป็นการกระจายตัวแบบระฆังคว่ำ (log normal distribution) เมื่อเปลี่ยนแปลงค่าของอุณหภูมิอากาศขาเข้าแล้ว เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคไม่เกิดการเปลี่ยนแปลง



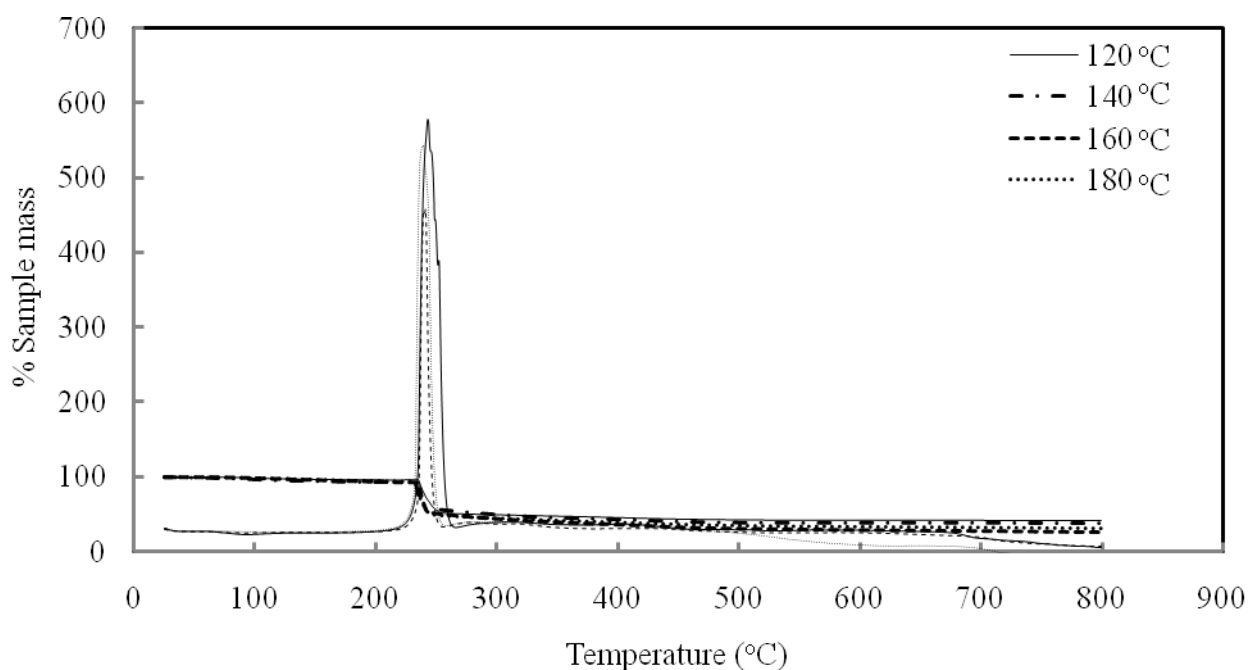
ภาพที่ 4.20 การกระจายตัวของขนาดของอนุภาคผงคอมโพสิตที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกาที่ 2:1 อัตราสายป้อน 9 mL/min

ตารางที่ 4.4 ผลของอัตราสายป้อนต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคผงคอมโพสิตที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อัตราสายป้อน 9 mL/min

NR-SiO ₂ mass ratio	Geometric Mean Diameter (μm) at inlet air temperature (°C)			
	120	140	160	180
2:1	7.53	7.66	7.65	7.68

4.1.3.3 ผลต่อสมบัติทางความร้อนและปริมาณซิลิกาในอนุภาค

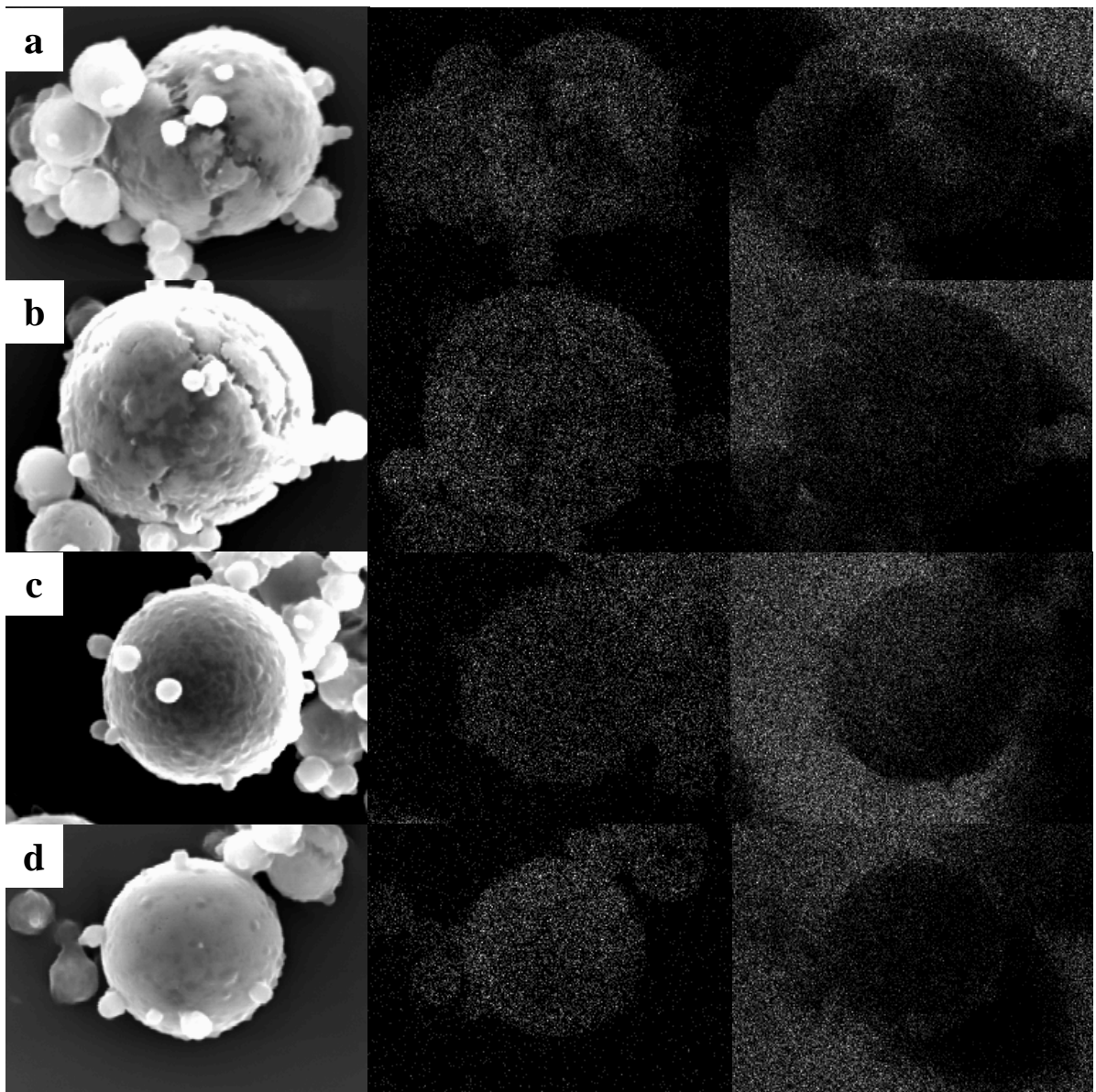
สมบัติทางความร้อนของผงซิลิกาและยางธรรมชาติที่ได้จากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่สภาวะอัตราสายป้อน 9 mL/min อัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกาที่ 2:1 แสดงในภาพที่ 4.21 ซึ่งแสดงข้อมูลอยู่ในรูปของค่าของมวลสูญเสียที่อุณหภูมิต่างๆจากเครื่อง Thermogravimetric Analyzer โดยพบว่า ที่อัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกาที่ 2:1 นั้นค่าสัญญาณการถ่ายเทพลังงานแสดงให้เห็นถึงการสูญเสียมวลเนื่องจากยางธรรมชาติที่อุณหภูมิประมาณ 230°C โดยเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิอากาศขาเข้าแล้วค่าสัญญาณการถ่ายเทพลังงานและค่าของมวลสูญเสียที่อุณหภูมิต่างๆมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย ซึ่งหมายความว่าอุณหภูมิอากาศเข้านั้นไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติทางความร้อนและปริมาณซิลิกาในอนุภาค



ภาพที่ 4.21 ผลของอัตราสายป้อนต่อสมบัติทางความร้อนของผงคอมโพสิตที่ได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกาที่ 2:1 อัตราสายป้อน 9 mL/min

4.1.3.4 ผลต่อการห่อหุ้มอนุภาคยางธรรมชาติด้วยอนุภาคซิลิกา

การวิเคราะห์ผลในด้านการห่อหุ้มอนุภาคยางธรรมชาติด้วยอนุภาคซิลิกานี้ อาศัยการใช้เทคนิค Energy dispersive X-Ray spectroscopy (EDX) เมื่อทำการทำแผนภาพ (mapping) แสดงธาตุ C และ Si บนพื้นผิวของผงคอมโพสิต พบว่าอนุภาคยางธรรมชาติถูกห่อหุ้มไว้ด้วยอนุภาคของซิลิกา โดยพบว่าที่อุณหภูมิอากาศเข้ายิ่งมากจะทำให้การห่อหุ้มอนุภาคยางธรรมชาติด้วยอนุภาคซิลิกาดียิ่งขึ้นดังแสดงในภาพที่ 4.22 ทั้งนี้อธิบายได้จากการที่อุณหภูมิอากาศเข้ามีค่าสูงทำให้ขั้นตอนการอบแห้งของซิลิกาเจลเกิดได้อย่างสมบูรณ์ แต่การที่อุณหภูมิอากาศเข้าต่ำนั้นอาจทำให้กระบวนการอบแห้งของซิลิกาเจลเกิดไม่สมบูรณ์ เนื่องจากความร้อนที่ถ่ายเทจากอากาศร้อนไปยังซิลิกาเจลไม่พอเพียง ส่งผลให้เกิดรอยแตกที่ผิวของซิลิกาในผงคอมโพสิต



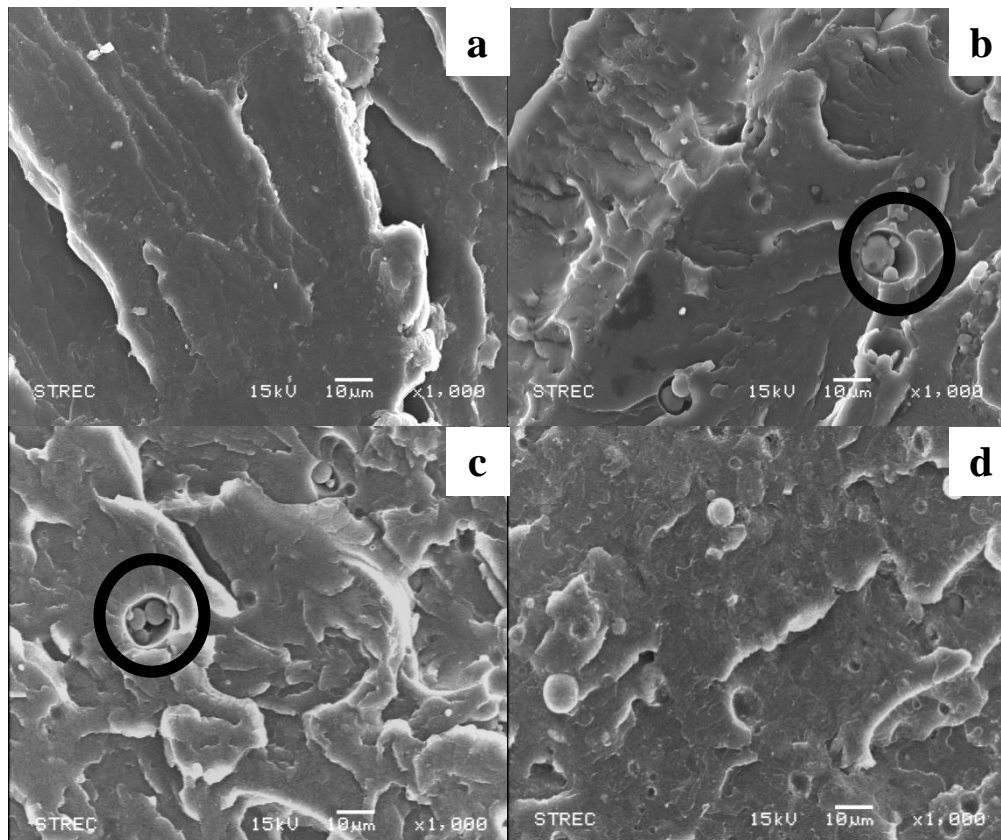
ภาพที่ 4.22 แผนภาพแสดงการวิเคราะห์ธาตุ Si และ C ตามลำดับบนผิวอนุภาคผงคอมโพสิตที่ได้จากการอบแห้งแบบฟุ้งฝอยที่อัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกาที่ 2:1 อัตราสายป้อน 9 mL/min ที่อุณหภูมิอากาศเข้า (a) 120, (b) 140, (c) 160 และ (d) 180°C

4.2 การศึกษาผลด้านการเติมผงคอมโพสิตในพอลิแลคติกแอซิด

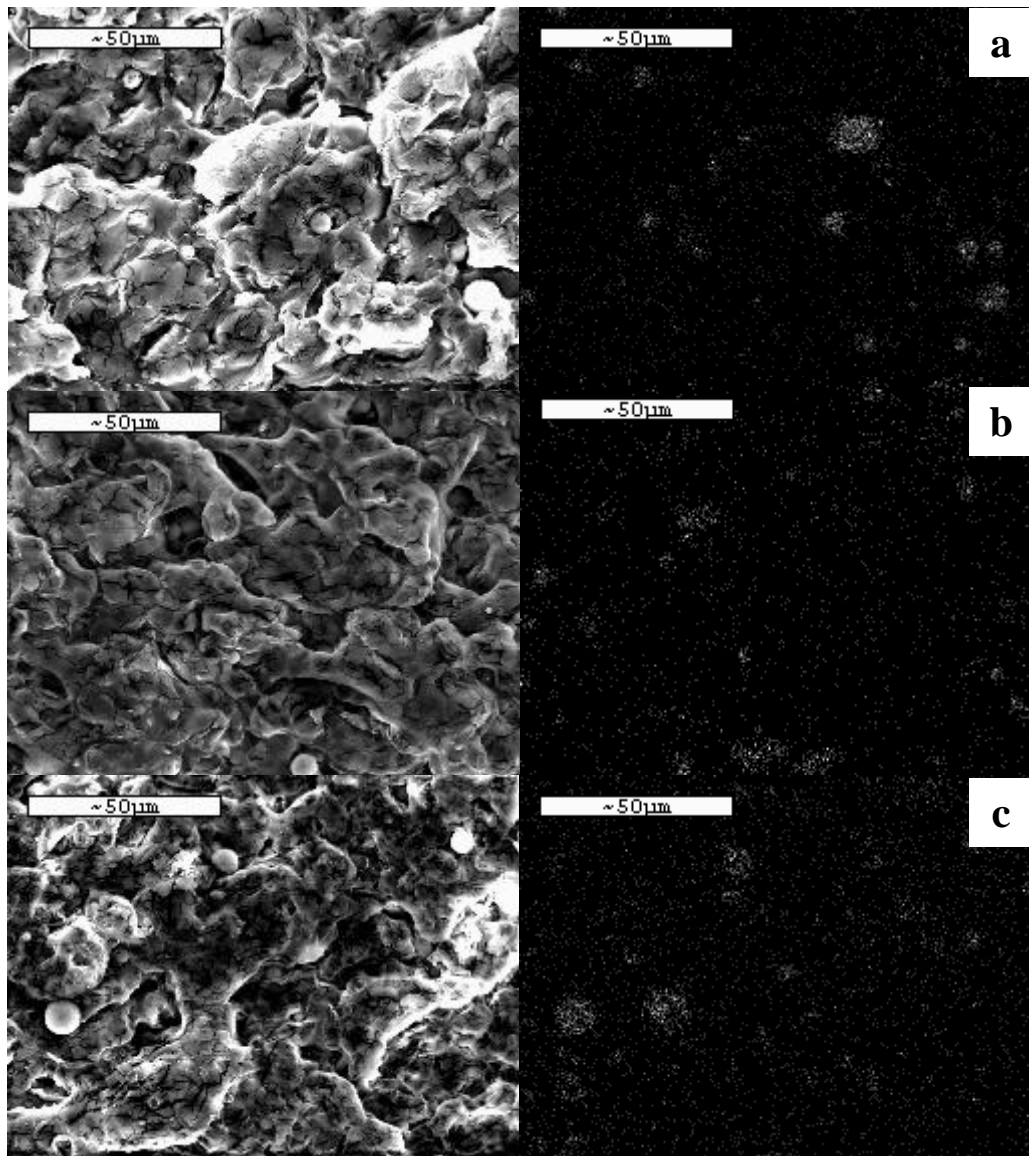
ในส่วนนี้จะทำการเติมผงคอมโพสิตที่เตรียมได้การอบแห้งแบบพ่นฝอยเข้าไปในพอลิแลคติกแอซิด (PLA) โดยการตัดเม็ดพลาสติกก้อนขึ้นรูปเป็นชิ้นงานหนา เพื่อศึกษาและนำผลที่ได้มาอธิบายถึงปัจจัยที่มีผลในการเสริมแรงของผงคอมโพสิต

4.2.1 ผลต่อลักษณะสัญญาณและการกระจายตัวของผงคอมโพสิต

ชิ้นงานหนาที่ผสมระหว่าง PLA และผงคอมโพสิตเมื่อนำไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดนั้น พบว่ามีการกระจายตัวของผงคอมโพสิตอยู่ในเนื้อ PLA ดังแสดงในภาพที่ 4.23 โดยอนุภาคผงคอมโพสิตที่กระจายตัวอยู่ในชิ้นงานมีขนาดไม่สม่ำเสมอ เมื่อทำการวิเคราะห์ธาตุบนพื้นผิวของชิ้นงานหนา โดยการทำแผนภาพ (mapping) แสดงธาตุ Si บนพื้นผิวของผงคอมโพสิตด้วยเทคนิค Energy dispersive X-Ray spectroscopy (EDX) ดังแสดงในภาพที่ 4.23 พบว่ามีการกระจายตัวของซิลิกาที่แสดงถึงการกระจายตัวของผงคอมโพสิตในเนื้อ PLA และพบว่ามีผงคอมโพสิตบางส่วนที่มีการยึดเกาะติดกันฝังตัวอยู่ในเนื้อ PLA ด้วย



ภาพที่ 4.23 ลักษณะสัณฐานของชิ้นงานหนา (a) PLA (b) PLA+0.5:1_NR:Silica (c) PLA+1:1_NR:Silica และ (d) PLA+2:1_NR:Silica ที่กำลังขยาย 1000 เท่า



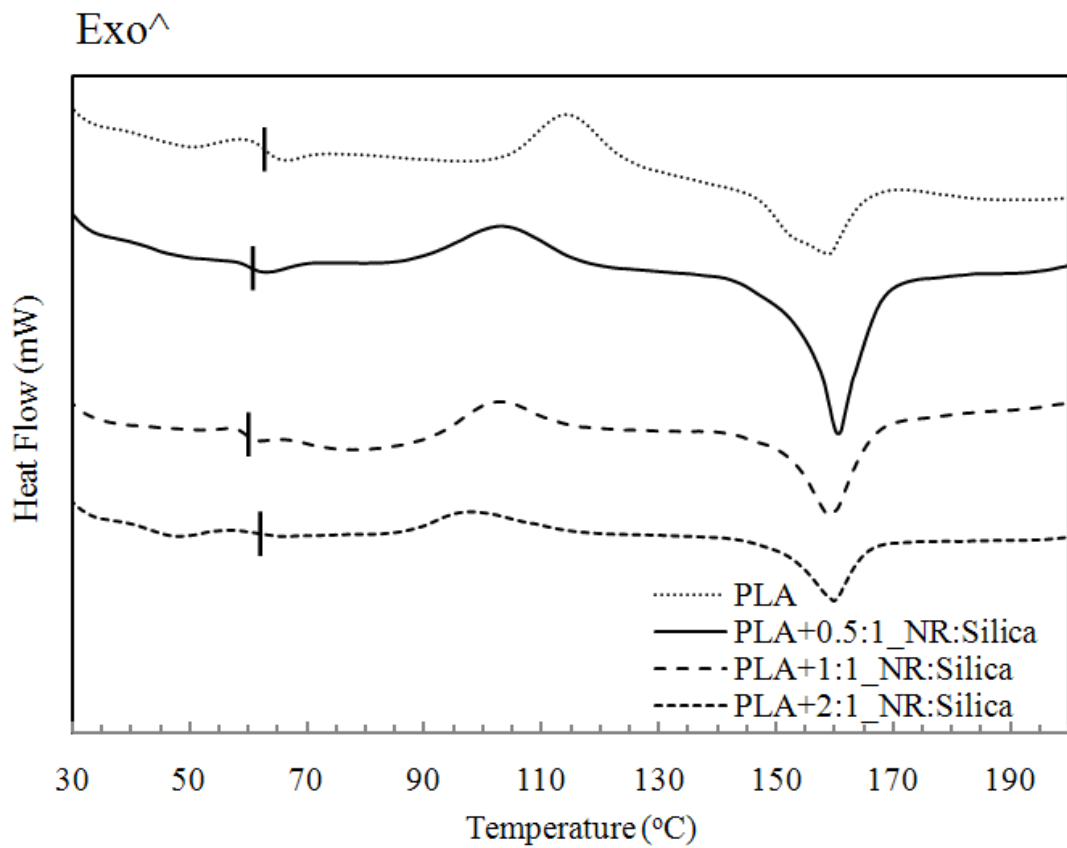
ภาพที่ 4.24 แผนภาพแสดงการวิเคราะห์ธาตุ Si บนชิ้นงานหนา (a) PLA+0.5:1_NR:Silica (b) PLA+1:1_NR:Silica และ (c) PLA+2:1_NR:Silica ที่กำลังขยาย 1000 เท่า

4.2.2.2 ผลต่อสมบัติทางความร้อน

สมบัติทางความร้อนของของชิ้นงานหนาที่ขึ้นรูปจากเม็ดพลาสติกที่หลอมจาก PLA ผสมกับผงคอมโพสิตที่เตรียมจากอัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกาต่างๆ ซึ่งวิเคราะห์จากเครื่อง Differential Scanning Calorimeter แสดงผลในรูปของสัญญาณการถ่ายเทความร้อนที่เข้าออกชิ้นงาน แสดงดังภาพที่ 4.25 และแสดงคุณสมบัติทางความร้อนต่างๆดังตารางที่ 4.5 โดยพบว่าในชิ้นงาน PLA บริสุทธิ์นั้นมีค่าอุณหภูมิการเปลี่ยนสถานะคล้ายแก้ว (T_g) อยู่ที่ประมาณ 63°C ซึ่งเมื่อผสมผงคอมโพสิตเข้าไปแล้วพบว่าไม่ได้ส่งผลกระทบต่อค่า T_g นี้ ทั้งนี้เนื่องมาจากการที่ผงคอมโพสิตไม่ได้เกิดปฏิกิริยา (interaction) กับ PLA แต่เมื่อพิจารณาถึงอุณหภูมิการเกิดผลึกของให้ความร้อน (T_{cc}) พบว่าค่า T_{cc} ของชิ้นงาน PLA บริสุทธิ์ซึ่งมีค่าประมาณ 114.5°C มีแนวโน้มลดลงเมื่อเติมผงคอมโพสิตที่มีปริมาณเนื้อยางเพิ่มมากขึ้น ทั้งนี้แสดงถึงการแสดงคุณสมบัติการเป็นสารช่วยให้เกิดผลึก (nucleating agent) ของยางธรรมชาติ และยังพบว่าค่าอุณหภูมิหลอมเหลว (T_m) ของชิ้นงาน PLA บริสุทธิ์ซึ่งมีค่าประมาณ 159°C และค่าไม่เปลี่ยนแปลงในชิ้นงานหนาที่มีการเติมผงคอมโพสิต นอกเหนือจากนี้เมื่อพิจารณาถึงค่าเปอร์เซ็นต์การเกิดผลึก (X_c) ซึ่งหาได้จากสมการ

$$X_c (\%) = (\Delta H_m / \Delta H_m^*) \times 100 \quad (4.1)$$

ซึ่งค่า ΔH_m^* คือพลังงานในการหลอมเหลวของผลึกทั้งหมดของ PLA ซึ่งมีค่าประมาณ 135 J/g [30] พบว่าปริมาณของผลึกในชิ้นงานที่มีการเติมผงคอมโพสิตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับปริมาณของผลึกในชิ้นงาน PLA บริสุทธิ์ซึ่งมีค่าประมาณ 17.62% และพบว่าปริมาณของผลึกมีค่าลดลงตามปริมาณยางธรรมชาติที่เพิ่มขึ้นในผงคอมโพสิต ทั้งนี้แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการเป็นสารช่วยให้เกิดผลึกของซิลิกา และความสามารถในการขัดขวางการเกิดผลึกของ PLA ด้วยยางธรรมชาติ ซึ่งจากการวิเคราะห์ทำให้สรุปได้ว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของยางธรรมชาติในผงคอมโพสิตนั้นจะทำให้ PLA เริ่มเกิดผลึกได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่า PLA บริสุทธิ์ และปริมาณผลึกที่ได้นั้นสูงกว่าปริมาณผลึกของ PLA บริสุทธิ์ แต่ปริมาณของผลึกที่ได้จะมีค่าลดลงเมื่อปริมาณของยางธรรมชาติในผงคอมโพสิตเพิ่มขึ้น



ภาพที่ 4.25 ผลของการเติมผงคอมโพสิตที่เตรียมจากค่าอัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกาต่างๆใน PLA ต่อการถ่ายเทความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ

ตารางที่ 4.5 ผลของการเติมผงคอมโพสิตที่เตรียมจากค่าอัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกาต่างๆใน PLA ต่อค่าคุณสมบัติทางความร้อนต่างๆ

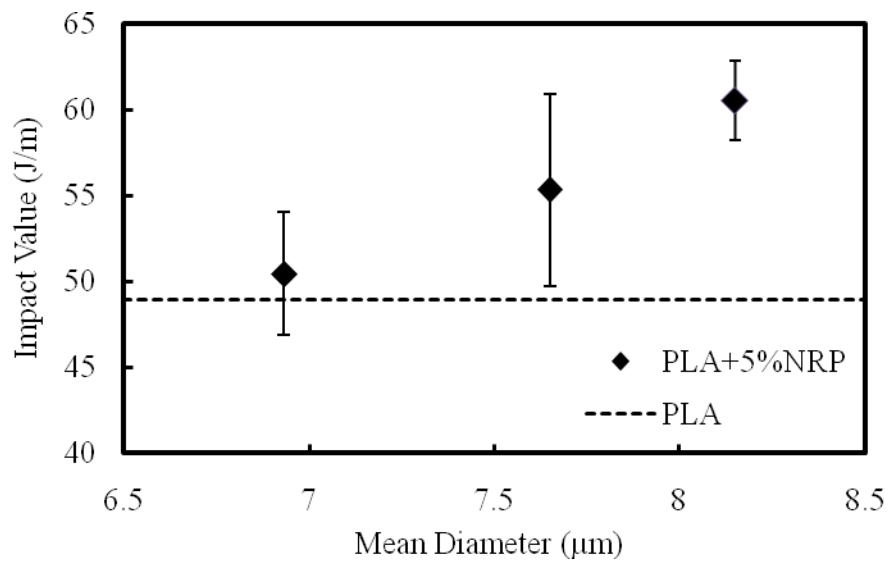
NR-SiO ₂ mass ratio	Thermal Properties					
	T _g (°C)	T _{cc} (°C)	T _m (°C)	ΔH _c (J/g)	ΔH _m (J/g)	X _c (%)
PLA	63	114.6	159	21.21	23.79	17.62
0.5:1	62	103	160.5	13.54	32.24	23.88
1:1	62	102.5	159.2	19.89	31.87	23.61
2:1	63	97.7	159.8	17.29	25.06	18.56

4.2.3 ผลต่อสมบัติทางกล

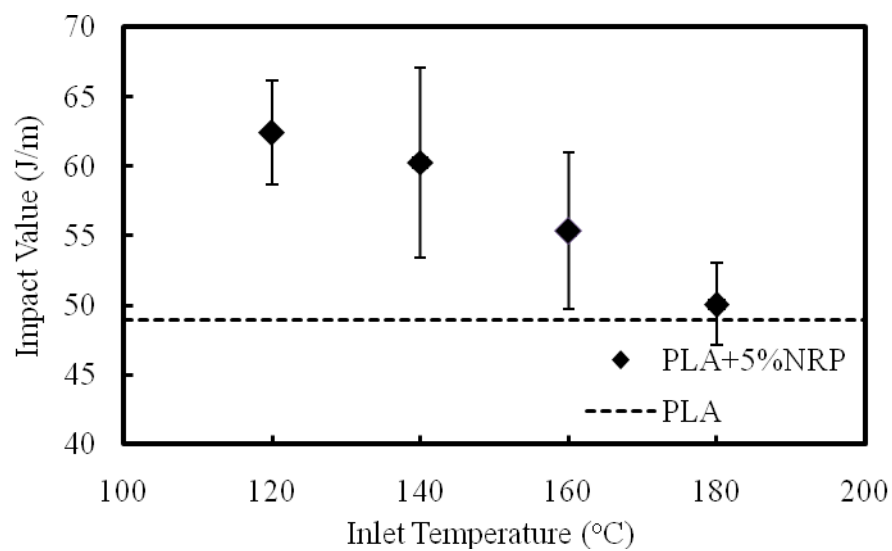
4.2.3.1 ผลต่อสมบัติการรับแรงกระแทก

เมื่อนำชิ้นงานหนาไปทำการวัดสมบัติการรับแรงกระแทกด้วยเครื่อง Impact Tester ได้ผลดังภาพที่ 4.26-4.27 โดยพิจารณาจากปัจจัยในด้านของค่าเฉลี่ยของอนุภาคและความสามารถในการห่อหุ้มยางธรรมชาติด้วยซิลิกาของผงคอมโพสิตที่ใช้เติมเข้าไป พบว่าชิ้นงานหนาที่ขึ้นรูปจากเม็ดพลาสติกที่ผสมระหว่าง PLA กับผงคอมโพสิตที่เตรียมจากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่มีค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคที่สูงกว่าจะมีแนวโน้มในการรับแรงกระแทกได้มากกว่า ทั้งนี้เนื่องจากการที่มีค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคสูงนั้นแสดงถึงการที่มีอนุภาคขนาดใหญ่กระจายตัวอยู่มากกว่า ซึ่งอนุภาคที่มีขนาดใหญ่กว่านั้นจะมีพื้นที่ผิวมากตามไปด้วย ส่งผลให้การกระจายแรงในเนื้อชิ้นงานไปยังอนุภาคของยางธรรมชาติที่มีคุณสมบัติเป็นตัวดูดซับแรงกระแทกที่ดีขึ้น

นอกเหนือจากนี้ยังพบว่า ชิ้นงานหนาที่ขึ้นรูปจากเม็ดพลาสติกที่ผสมระหว่าง PLA กับผงคอมโพสิตที่เตรียมจากการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่มีความสมบูรณ์ในการห่อหุ้มอนุภาคยางธรรมชาติแตกต่างกันตามอุณหภูมิอากาศเข้านั้นจะส่งผลต่อค่าการรับแรงกระแทก โดยพบว่าผงคอมโพสิตที่อนุภาคยางธรรมชาติถูกห่อหุ้มอย่างสมบูรณ์ด้วยอนุภาคซิลิกานั้นจะเตรียมได้จากการอบแห้งแบบพ่นฝอยมีค่าอุณหภูมิอากาศเข้าสูงกว่า 160°C ค่าการรับแรงกระแทกของชิ้นงาน PLA ที่ผสมกับผงคอมโพสิตชนิดนี้จะมีค่าต่ำกว่าชิ้นงาน PLA ที่ผสมผงคอมโพสิตที่อนุภาคยางธรรมชาติไม่ได้ถูกห่อหุ้มอย่างสมบูรณ์หรือเตรียมจากกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อุณหภูมิอากาศเข้าต่ำกว่า 160°C ทั้งนี้อธิบายได้ด้วยการที่การที่อนุภาคซิลิกาซึ่งมีความแข็งแรงสูงห่อหุ้มอนุภาคยางธรรมชาติ ทำให้อิทธิพลในการดูดซับแรงกระแทกของอนุภาคยางธรรมชาติในผงคอมโพสิตนั้นไม่แสดงออกอย่างเต็มที่ แต่ในผงคอมโพสิตที่อนุภาคซิลิกาไม่ได้ห่อหุ้มอนุภาคยางธรรมชาติทั้งหมดนั้น อนุภาคยางธรรมชาติจึงสามารถแสดงอิทธิพลในการดูดซับแรงกระแทกได้ดีขึ้น ส่งผลให้ผงคอมโพสิตนั้นสามารถรองรับแรงกระแทกได้ดีขึ้นตามไปด้วย



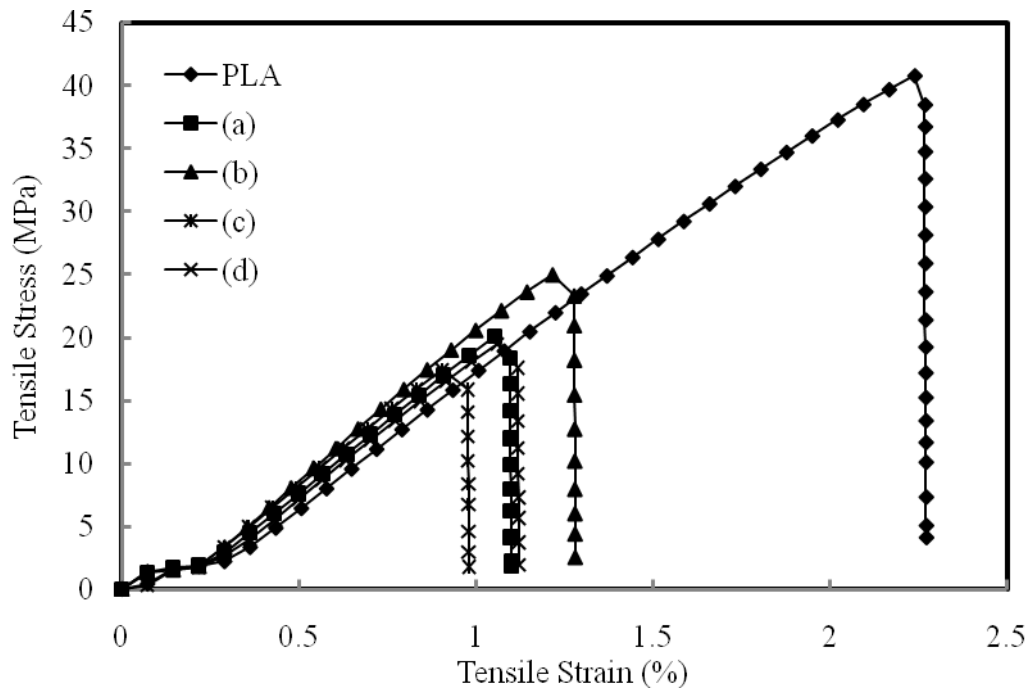
ภาพที่ 4.26 ผลของการเติมผงคอมโพสิตที่มีค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคต่างกัน ที่อัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกา 2:1 ต่อค่าการรับแรงกระแทก



ภาพที่ 4.27 ผลของการเติมผงคอมโพสิตที่อัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกา 2:1 ที่มีความสามารถในการห่อหุ้มอนุภาคยางธรรมชาติด้วยซิลิกาต่างกันตามอุณหภูมิอากาศเข้าต่อค่าการรับแรงกระแทก

4.2.3.2 ผลต่อสมบัติการรับแรงดึง

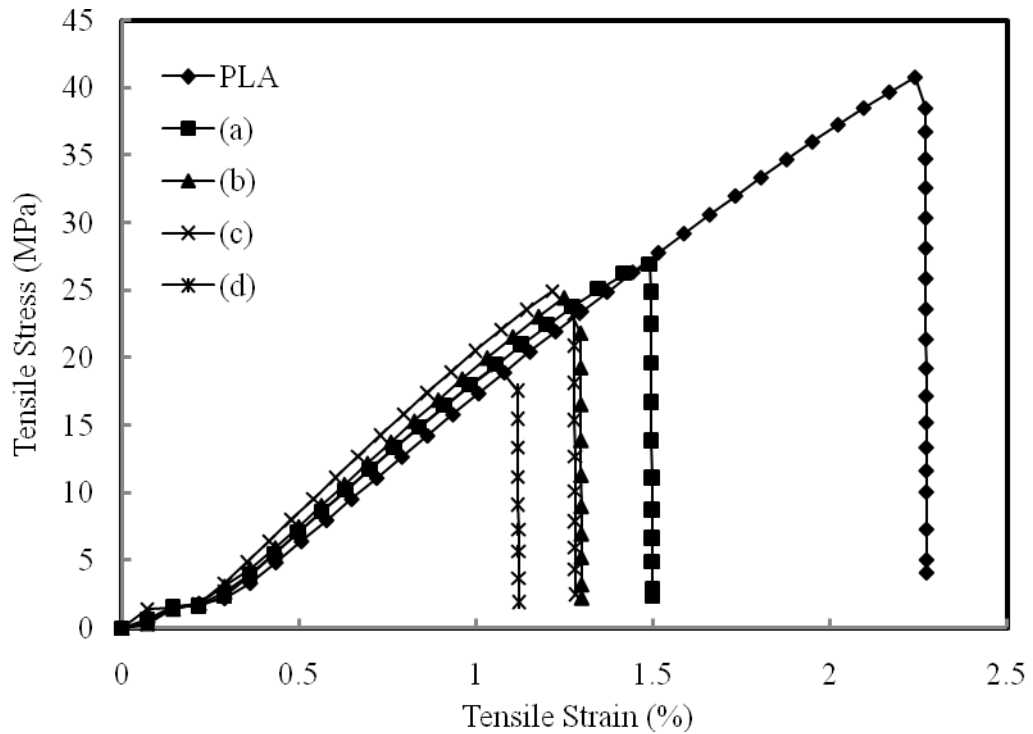
เมื่อนำชิ้นงานหนาไปทำการวัดสมบัติการรับแรงดึงด้วยเครื่อง Universal Testing Machine ได้ผลอยู่ในรูปกราฟความเค้น - ความเครียด (stress-strain curve) ดังภาพที่ 4.28-4.29 ค่ายังก์มอดุลัสดังตารางที่ 4.6-4.7 ค่าความเค้นสูงสุด (tensile strength) ดังภาพที่ 4.30-4.31 และค่าการยืดตัว ณ จุดขาด (elongation at break) ดังภาพที่ 4.32-4.33 โดยพิจารณาจากปัจจัยในด้านของค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคและความสามารถในการห่อหุ้มยางธรรมชาติด้วยซิลิกาของผงคอมโพสิตที่ใช้เติมเข้าไป โดยพบว่าชิ้นงานหนาที่ขึ้นรูปจากเม็ดพลาสติกที่ผสมระหว่าง PLA กับผงคอมโพสิตที่เตรียมจากการอบแห้งแบบพ่นฝอยนี้เมื่อนำไปทดสอบแรงดึงจะเสียรูปก่อนชิ้นงานหนาที่ขึ้นรูปจาก PLA บริสุทธิ์ โดยพบว่าชิ้นงาน PLA ที่ผสมผงคอมโพสิตนั้นมีค่ายังก์มอดุลัสที่สูงกว่าค่ายังก์มอดุลัสของชิ้นงาน PLA บริสุทธิ์ ซึ่งมีค่าประมาณ 1820.71 MPa แสดงถึงความสามารถในการเพิ่มความแข็งแรงให้กับ PLA ด้วยผงคอมโพสิต แต่พบว่าค่ายังก์มอดุลัสที่สูงขึ้นนี้ไม่ได้ขึ้นกับค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคและความสามารถในการห่อหุ้มยางธรรมชาติด้วยซิลิกาที่ต่างกันตามอุณหภูมิอากาศเข้าในการอบแห้งแบบพ่นฝอย นอกเหนือจากนี้ยังพบว่าค่าความเค้นสูงสุดและค่าการยืดตัว ณ จุดขาด ของชิ้นงาน PLA ที่ผสมผงคอมโพสิตนั้นมีค่าต่ำกว่าชิ้นงาน PLA บริสุทธิ์ โดยค่าความเค้นสูงสุด และค่าการยืดตัว ณ จุดขาด ในชิ้นงาน PLA บริสุทธิ์นั้นมีค่าประมาณ 45 MPa และ 2.75% ส่วนค่าความเค้นสูงสุดและค่าการยืดตัว ณ จุดขาด ในชิ้นงาน PLA ที่ผสมผงคอมโพสิตนั้นมีค่าอยู่ในช่วง 17-25 MPa และ 0.8-1.3% ตามลำดับ ซึ่งพบว่าค่าความเค้นสูงสุดและค่าการยืดตัว ณ จุดขาด ที่ลดลงนี้ไม่ได้ขึ้นกับค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคและความสามารถในการห่อหุ้มยางธรรมชาติด้วยซิลิกาที่ต่างกันตามอุณหภูมิอากาศเข้าในการอบแห้งแบบพ่นฝอยแต่อย่างใด โดยอธิบายการที่ชิ้นงาน PLA ที่ผสมผงคอมโพสิตนี้มีค่าความเค้นสูงสุด และค่าการยืดตัว ณ จุดขาด ลดลงได้จากการที่ในชิ้นงาน PLA ที่ผสมผงคอมโพสิตนั้นมีการกระจายตัวของผงคอมโพสิตบางส่วนที่ยังมีการยึดเกาะติดกันอยู่ซึ่งสามารถสังเกตได้จากภาพที่ 4.23 โดยการกระจายตัวของอนุภาคที่ยังมีการยึดเกาะกันอยู่ส่งผลให้เกิดตำหนิ (defect) ในชิ้นงานเมื่อนำไปรับแรงดึง และการเพิ่มเฟสของยางเข้ามาในเนื้อพอลิเมอร์นั้นเสมือนเป็นการเพิ่มจุดรวมความเค้น (stress concentrator) ซึ่งส่งผลให้เกิดช่องว่างที่เกิดจากการสลายพันธะของยางขณะทำการทดสอบการรับแรงดึง [32] โดยการที่ชิ้นงานที่ผสมผงคอมโพสิตมีค่ายังก์มอดุลัส ค่าความเค้นสูงสุดและค่าการยืดตัว ณ จุดขาดไม่เท่ากันนั้นอธิบายได้จากการปริมาณตำหนิในชิ้นงานที่มีไม่เท่ากัน โดยในชิ้นงานที่มีตำหนิมากจะส่งผลให้ค่ายังก์มอดุลัส ค่าความเค้นสูงสุดและค่าการยืดตัว ณ จุดขาด ต่ำกว่าในชิ้นงานที่มีตำหนิน้อย



ภาพที่ 4.28 ผลของการเติมผงคอมโพสิตที่มีอัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกา 2:1 ที่มีค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาค (a) 6.93 μm , (b) 7.65 μm , (c) 8.15 μm และ (d) 8.28 μm ต่อความเค้นและความเครียดของ PLA

ตารางที่ 4.6 ผลของการเติมผงคอมโพสิตที่มีอัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกา 2:1 ที่มีค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคต่างกันต่อค่า Young's Modulus ของ PLA

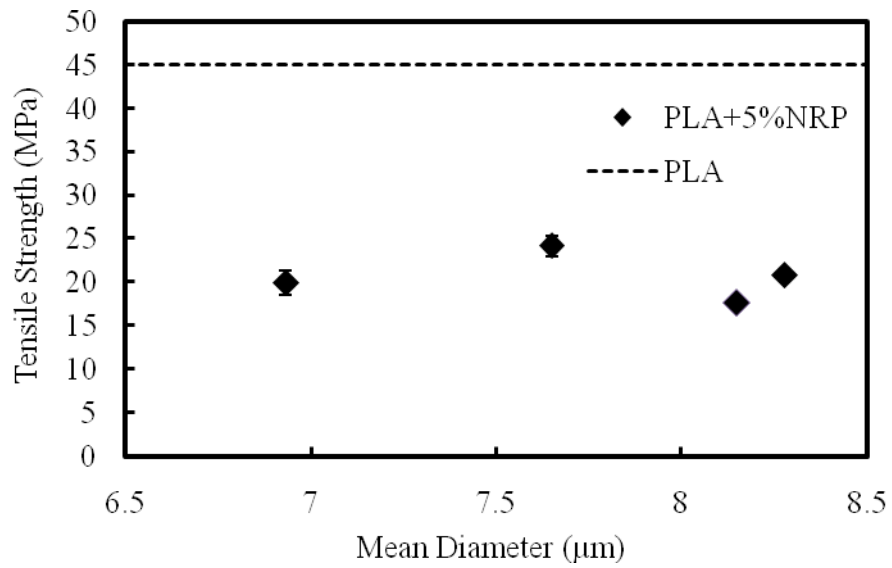
Mean Diameter (μm)	Young's Modulus (MPa)
PLA	1820.71
6.93	1906.47
7.65	2051.79
8.15	1924.84
8.28	1828.64



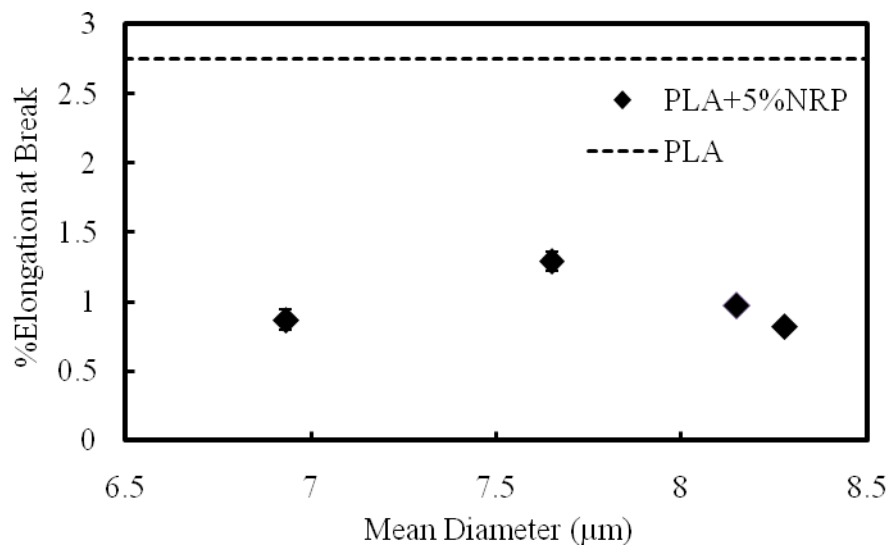
ภาพที่ 4.29 ผลของการเติมผงคอมโพสิตที่มีอัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซีลิกา 2:1 ที่มีความสามารถในการห่อหุ้มอนุภาคยางธรรมชาติด้วยซีลิกาต่างกันตามค่าอุณหภูมิอากาศขาเข้า ที่ (a) 120°C , (b) 140°C, (c) 160°C และ (d) 180°C ต่อความค่าความเค้นและความเครียด

ตารางที่ 4.7 ผลของการเติมผงคอมโพสิตที่มีอัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซีลิกา 2:1 ที่มีค่าความสามารถในการห่อหุ้มยางธรรมชาติด้วยซีลิกาต่างกันตามอุณหภูมิอากาศขาเข้าต่อค่า Young's Modulus ของ PLA

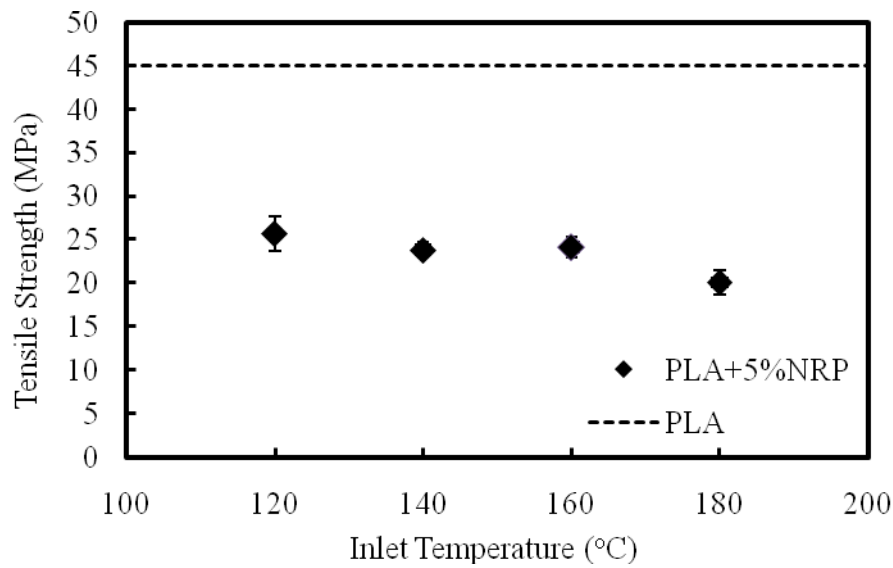
Inlet Air Temperature (°C)	Young's Modulus (MPa)
PLA	1820.71
120	1851.40
140	1957.25
160	2051.79
180	1928.46



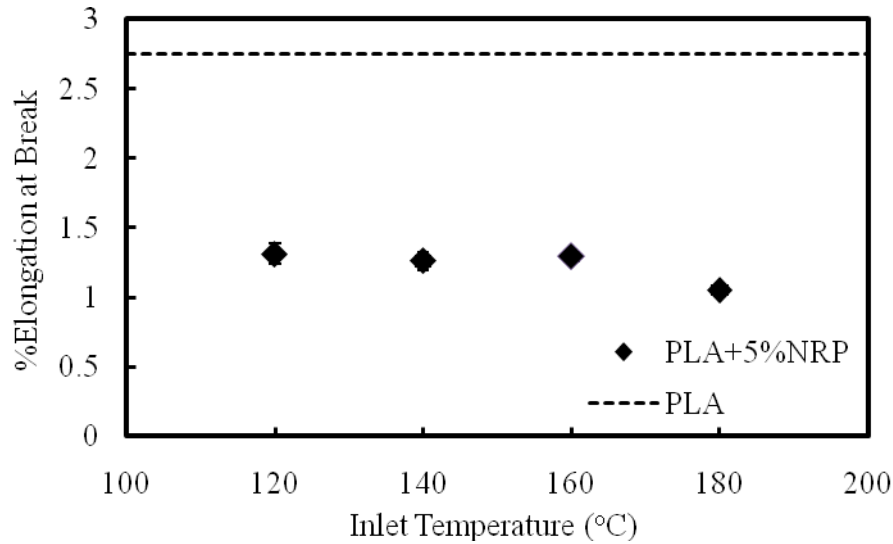
ภาพที่ 4.30 ผลของการเติมผงคอมโพสิตที่มีขนาดเฉลี่ยของอนุภาคต่างกัน ที่มีอัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกา 2:1 ต่อค่าความความเค้นสูงสุด



ภาพที่ 4.31 ผลของการเติมผงคอมโพสิตที่มีขนาดเฉลี่ยของอนุภาคต่างกัน ที่มีอัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกา 2:1 ค่าการยืดตัว ณ จุดขาด



ภาพที่ 4.32 ผลของการเติมผงคอมโพสิตที่มีอัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซีลิกา 2:1 ที่มีความสามารถในการห่อหุ้มอนุภาคยางธรรมชาติด้วยซีลิกาต่างกันตามอุณหภูมิอากาศเข้าต่อค่าความเค้นสูงสุด



ภาพที่ 4.33 ผลของการเติมผงคอมโพสิตที่มีความสมบูรณ์ในการห่อหุ้มอนุภาคยางธรรมชาติต่างกัน ที่มีอัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซีลิกา 2:1 ต่อค่าการยืดตัว ณ จุดขาด

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

สภาวะในการอบแห้งแบบพ่นฝอย คือ ความเข้มข้นของสายป้อน อัตราเร็วของสายป้อน และ อุณหภูมิอากาศเข้า สามารถสังเคราะห์ผงคอมโพสิตของยางธรรมชาติและซิลิกาที่มีรูปร่างของอนุภาคเป็นทรงกลมได้ซึ่งเมื่อพิจารณาปัจจัยต่างๆ สามารถสรุปผลการศึกษาดังนี้

1. เมื่ออัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกามีค่าสูงขึ้น อนุภาคผงคอมโพสิตจะมีแนวโน้มเกาะติดกันมากขึ้นและค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคสูงขึ้น
2. เมื่ออัตราเร็วของสายป้อนสูงขึ้น อนุภาคผงคอมโพสิตจะมีค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคสูงขึ้น
3. เมื่ออุณหภูมิอากาศเข้าสูงขึ้น อนุภาคผงคอมโพสิตจะมีค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคไม่เปลี่ยนแปลง และความสามารถในการห่อหุ้มอนุภาคยางธรรมชาติด้วยซิลิกาจะดีขึ้น
4. ค่าการรับแรงกระแทกของชิ้นงาน PLA ที่ผสมกับผงคอมโพสิต จะมีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีความสัมพันธ์แปรผันตรงกับค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคและแปรผกผันกับความสามารถในการห่อหุ้มอนุภาคยางธรรมชาติด้วยซิลิกา
5. ค่าการรับแรงดึงของชิ้นงาน PLA ที่ผสมกับผงคอมโพสิต จะมีค่าลดลง โดยไม่ได้มีความสัมพันธ์กับค่าเฉลี่ยของขนาดอนุภาคและความสามารถในการห่อหุ้มอนุภาคยางธรรมชาติด้วยซิลิกา

5.2 ข้อเสนอแนะ

อาจมีการเพิ่มปริมาณของผงคอมโพสิตที่ใช้ผสมกับ PLA เพื่อทำให้เห็นอิทธิพลจากการเติมผงคอมโพสิตต่อคุณสมบัติทางกลมากขึ้น หรืออาจเปลี่ยนชนิดของพอลิเมอร์ที่ใช้ในการวิจัย เพื่อใช้ยืนยันถึงความสามารถในการปรับปรุงคุณสมบัติทางกลของพอลิเมอร์ด้วยผงคอมโพสิต

รายการอ้างอิง

- [1] สถาบันวิจัยยาง . กรมวิชาการเกษตร , สถิติการส่งออกยางธรรมชาติ [Online]. Available from: <http://www.rubberthai.com/rubberthai> [2012, February 15]
- [2] พงษ์ธร แซ่อูย. ชนิดของยางและการใช้งาน, ศูนย์วิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมยางไทย [Online]. Available from: <http://www.rubbercenter.org/files/technologys.pdf> [2012, February 15]
- [3] Pongdhorn Sae-Oui, et al., Properties and recyclability of thermoplastic elastomer prepared from natural rubber powder (NRP) and high density polyethylene (HDPE), Journal of Polymer Testing 29 (2010) : 346–351.
- [4] N. Bitinis, et al., Structure and properties of polylactide/natural rubber blends, Journal of Materials Chemistry and Physics (2010).
- [5] ฉันทรา พูลศรี , เทคนิคไมโครเอนแคปซูเลชัน , สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย [Online]. Available from: <http://opac.tistr.or.th/Multimedia/STJN/4904/4904-11.pdf> [2012, February 15]
- [6] พัชรินทร์ วรรณกุล, Sol-Gel เทคโนโลยีสังเคราะห์ซิลิกาจากขาน้อย, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ [Online]. Available from: <http://www.tpa.or.th/publisher/images/abstract/abstech131.pdf> [2012, February 15]
- [7] Qiao, Jinliang, et al., Full Vulcanized Powdered Rubber with Controllable Particle Diameter, Preparing Method and Uses thereof, in European Patent and Trademark Office Granted Patent (2000).
- [8] Frederick J. Francis, Dryer Technology and Engineering, Wiley Encyclopedia of food Science and Technology 1 (2000) : 524.
- [9] K. Mosters, Spray Drying Handbook. 2nded. George Gadwin Limited, 1976.
- [10] ชินรัตน์ ลากพูลธนะอนันต์. น้ำยางชั้นพรีวัลคาไนซ์. ศูนย์วิจัยและพัฒนาอุตสาหกรรมยางไทย [Online]. Available from: <http://www.rubbercenter.org/files/prevulcanized.pdf> [2012, February 15]
- [11] ดอท บุญญานุรักษ์ . เครื่องกรองน้ำชนิดที่ใช้แผ่นเยื่อซิลิกาสำหรับชนบท . วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต , ภาควิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์

มหาวิทยาลัย , 2001.

- [12] M.F. Zawrah, et al., Facile and Economic Synthesis of Silica Nanoparticles, Journal of Ovonic Research 5 (2009) : 129-133.
- [13] Pradip B. Sarawade, Preparation of hydrophobic mesoporous silica powder with a high specific surface area by surface modification of a wet-gel slurry and spray-drying, Journal of Powder Technology 197 (2010) : 288-294.
- [14] Nicolaas Jan Zuidam, et al., Encapsulation Technologies for Active Food Ingredients and Food Processing. Springer Science & Business Media, 2010.
- [15] Sakdapipanich, J., Natural Rubber of Technology. 1 ed. Bangkok: Technobiz communications Co., Ltd. 108, 2010.
- [16] Kanjanee Nawamawat, et al., Surface nanostructure of Hevea brasiliensis natural rubber latex particles, Journal of Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects 390 (2011) : 157-166
- [17] ชะวะณี ศิริชัยวัฒน์, การศึกษาการเตรียมปุ๋ยยูเรียควบคุมการปลดปล่อยโดยใช้น้ำยางธรรมชาติ, วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต , ภาควิชาเคมี บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล, 1996.
- [18] Malvern, Spray Drying and Atomization Overview [Online]. Available from: <http://www.malvern.com/ProcessEng/processes/spraydrying/overview.htm> [2012, February 15]
- [19] GEA Process Engineer Inc., Spray Drying Technology [Online]. Available from: http://www.niroinc.com/technologies/spray_drying_tech.asp [2012, February 15]
- [20] GEA Process Engineer Inc., Spray Drying Technology [Online]. Available from: http://www.niroinc.com/food_chemical/production_minor_spray_dryer.asp [2012, February 15]
- [21] M. C. Gohel, Spray Drying: A review [Online]. Available from: <http://www.pharmainfo.net/reviews/spray-drying-review> [2012, February 15]

- [22] Pon-On, et al., Encapsulation of magnetic CoFe_2O_4 in SiO_2 nanocomposites using hydroxyapatite as templates: A drug delivery system, Journal of Materials Chemistry and Physics 131 (2011) : 485–494.
- [23] Shiquan, et al., Silica encapsulation of highly luminescent hydrophobic quantum dots by two-step microemulsion method, Journal of Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects (2011).
- [24] Jungho, et al., Silica nanoparticle-embedded sol–gel organic/inorganic hybrid nanocomposite for transparent OLED encapsulation, Journal of Organic Electronics 13 (2012) : 53-57.
- [25] W. Dong, et al., Process for preparing a nylon-6/clay/acrylate rubber nanocomposite with high toughness and stiffness, Journal of Polymer International 56 (2007) : 870-874.
- [26] J.D Wang, et al., Preparation and Mechanical Properties of Natural Rubber Powder Modified by Carbon Nanotubes, Journal of Wiley InterScience, (2005).
- [27] J. Wang, et al., Preparation and Characteristics of a Novel Silicone Rubber Nanocomposite Based on Organophilic Montmorillonite, Journal of High Performance Polymers 18 (2006) : 325.
- [28] X. Zhou, et al., Preparation and properties of the powder SBR composites filled with CNTs by spray drying process, Journal of Materials Letters 60 (2006) : 3769-3775.
- [29] Skoof, et al., Principles of Instrumental Analysis. 6th ed. Thomson Reuters, 2007.
- [30] ณัฐนิช มณีชวขจร. การพัฒนาความเหนียวของฟิล์มเป่าพอลิแลคติก แอซิดโดยการเติมยางธรรมชาติอีพอกไซด์ที่มีหมู่คาร์บอกซิล. วิทยานิพนธ์ ปริญญาโทมหาบัณฑิต , ภาควิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์
- [31] Asep Bayu Dani Nandiyanto, et al., Progress in developing spray-drying methods for the production of controlled morphology particles: From the nanometer to submicrometer size ranges, Journal of Advanced Powder Technology 22 (2011) : 1-19.

- [32] M. Kowalczyk, et al., Mechanisms of plastic deformation in biodegradable polylactide/poly(1,4-cis-isoprene) blends. Journal of Applied Polymer Science 124 (2012) : 4579-4589.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

ข้อมูลการวัดคุณสมบัติทางกลของชิ้นงาน PLA ที่ผสมผงคอมโพสิต

ตารางที่ ก.1 ค่าการรับแรงกระแทกของชิ้นงาน PLA ที่ผสมกับผงคอมโพสิตที่มีอัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกา 2:1 ที่มีความสามารถในการห่อหุ้มอนุภาคยางธรรมชาติด้วยซิลิกา ต่างกันตามอุณหภูมิอากาศขาเข้า

No.	Impact Value (J/m)			
	Inlet air temperature (°C)			
	120	140	160	180
1	64.14	66.11	55.39	47.75
2	65.12	61.2	40.26	41.19
3	47.75	69.08	45.87	59.25
4	69.08	71.07	70.07	52.5
5	66.11	33.83	65.12	49.65
Avg.	62.44	60.26	55.34	50.07
SD.	3.76	6.81	5.61	2.95

ตารางที่ ก. 2 ค่าการรับแรงดึงของชิ้นงาน PLA ที่ผสมกับผงคอมโพสิตที่มีอัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกา 2:1 ที่มีความสามารถในการหล่อขึ้นรูปอนุภาคยางธรรมชาติด้วยซิลิกาต่างกัน ตามอนุกรมวิธานอากาศเข้า

No.	Tensile Strength (MPa)			
	Inlet air temperature (°C)			
	120	140	160	180
1	27.8	21.05	26.3	23.99
2	17.94	26.89	24.95	16.61
3	29.32	23.37	24.47	17.63
4	26.05	24.06	19.44	22.1
5	27.39	23.75	25.67	19.99
Avg.	25.70	23.82	24.17	20.06
SD.	4.49	2.08	2.73	3.06

ตารางที่ ก. 3 ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของชิ้นงาน PLA ที่ผสมกับผงคอมโพสิตที่มีอัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกา 2:1 ที่มีความสามารถในการห่อหุ้มอนุภาคยางธรรมชาติด้วยซิลิกา ต่างกันตามอุณหภูมิอากาศเข้า

No.	Elongation at break (mm)			
	Inlet air temperature (°C)			
	120	140	160	180
1	1.75	1.19	1.68	1.51
2	1.14	1.72	1.47	1.03
3	1.81	1.44	1.49	1.01
4	1.52	1.50	1.29	1.36
5	1.54	1.64	1.51	1.28
Avg.	1.55	1.45	1.49	1.21
SD.	0.32	0.22	0.16	0.21

ตารางที่ ก.4 ค่าการรับแรงกระแทกของชิ้นงาน PLA ที่ผสมกับผงคอมโพสิตที่มีอัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกา 2:1 ที่มีขนาดเฉลี่ยของอนุภาคต่างกัน

No.	Impact Value (J/m)		
	Mean Diameter (μm)		
	6.93	7.65	8.15
1	59.25	55.39	68.07
2	37.49	40.26	55.25
3	52.51	45.87	62.11
4	53.46	70.07	56.23
5	49.65	65.12	61.12
Avg.	50.472	55.34	60.556
SD.	3.60	5.61	2.30

ตารางที่ ก. 5 ค่าการรับแรงดึงของชิ้นงาน PLA ที่ผสมกับผงคอมโพสิตที่มีอัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกา 2:1 ที่มีขนาดเฉลี่ยของอนุภาคต่างกัน

No.	Tensile Strength (MPa)			
	Mean Diameter (μm)			
	6.93	7.65	8.15	8.28
1	16.41	26.3	16.41	21.95
2	22.32	24.95	18.90	20.77
3	17.64	24.47	17.42	20.15
4	24.10	19.44	17.68	20.57
5	19.20	25.67	17.81	20.80
Avg.	19.93	24.17	17.64	20.85
SD.	3.21	2.73	0.89	0.67

ตารางที่ ก.6 ค่าการยืดตัว ณ จุดขาดของชิ้นงาน PLA ที่ผสมกับผงคอมโพสิตที่มีอัตราส่วนโดยมวลของยางธรรมชาติต่อซิลิกา 2:1 ที่มีขนาดเฉลี่ยของอนุภาคต่างกัน

No.	Elongation at break (mm)			
	Mean Diameter (μm)			
	6.93	7.65	8.15	8.28
1	0.68	1.68	1.08	1.00
2	1.07	1.47	1.24	0.99
3	0.81	1.49	1.12	0.91
4	1.03	1.29	1.05	0.92
5	0.88	1.51	1.11	0.82
Avg.	0.89	1.49	1.12	0.94
SD.	0.16	0.16	0.08	0.07

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายปรัชญา ไสภานนท์ เกิดเมื่อวันที่ 13 กรกฎาคม พ.ศ. 2532 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร เข้าศึกษาระดับชั้นมัธยมศึกษาที่โรงเรียนบดินทรเดชา (สิงห์ สิงหเสนี) ๒ สำเร็จการศึกษา วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2553 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยในปีการศึกษา 2554

โดยได้ตีพิมพ์งานวิจัยในหัวข้อ THE PREPARATION OF NATURAL RUBBER POWDER VIA SPRAY DRYING ในวารสาร Pure and Applied Chemistry International Conference (PACCON 2012)