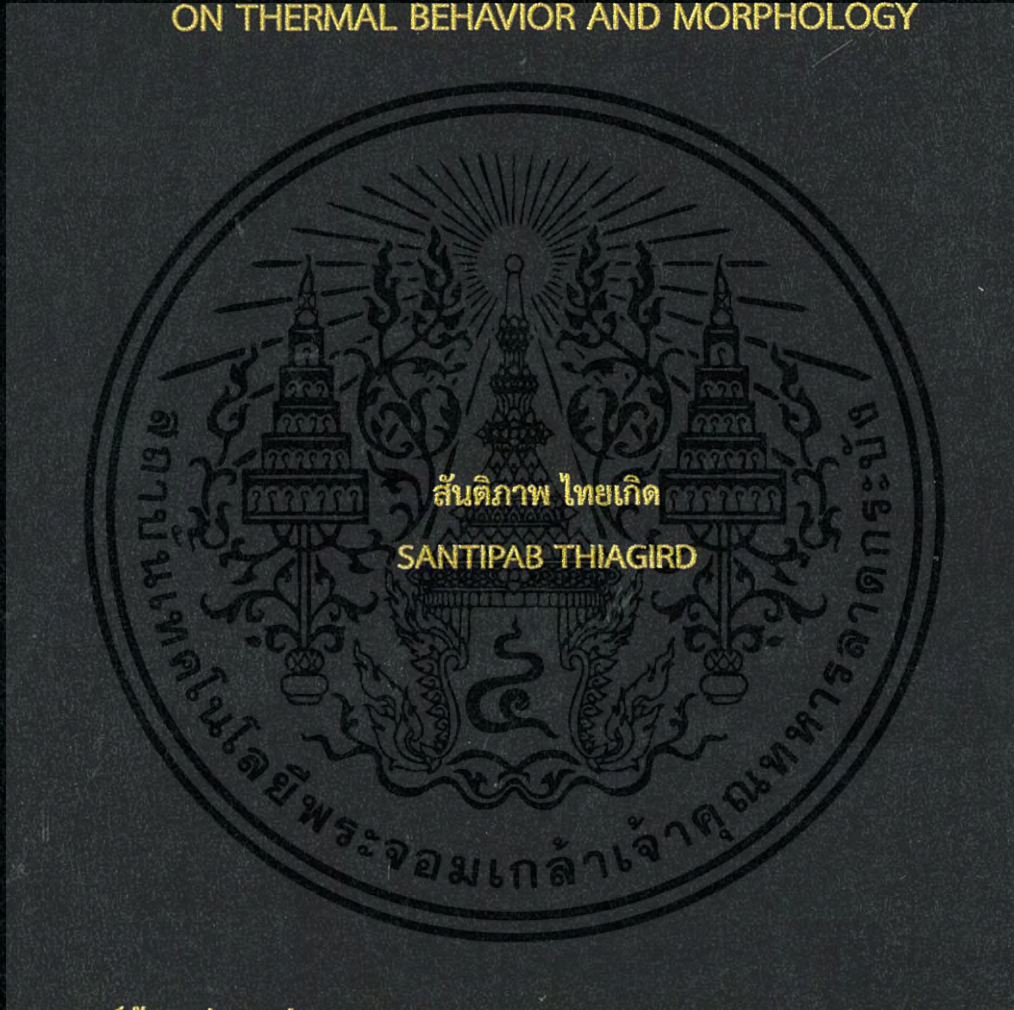


อิทธิพลขององค์ประกอบของวัสดุรูพรุนต่อ
พฤติกรรมทางความร้อนและสัณฐานวิทยา

EFFECT OF COMPOSITIONS OF POROUS MATERIALS
ON THERMAL BEHAVIOR AND MORPHOLOGY



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ. 2559

KMITL-2016-EN-M-220-209

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

อิทธิพลขององค์ประกอบของวัสดุรูพรุนต่อ
พฤติกรรมทางความร้อนและสัณฐานวิทยา

EFFECT OF COMPOSITIONS OF POROUS MATERIALS
ON THERMAL BEHAVIOR AND MORPHOLOGY



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิศวกรรมเคมี

คณะวิศวกรรมศาสตร์

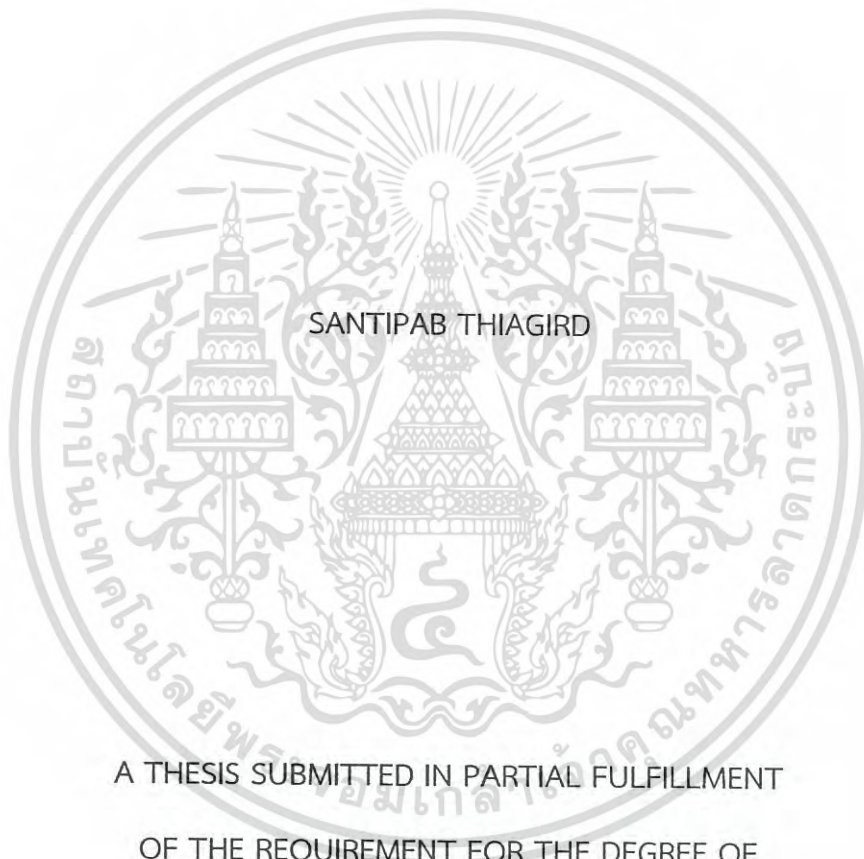
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

พ.ศ.2559

KMITL-2016-EN-M-220-209

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

EFFECT OF COMPOSITIONS OF POROUS MATERIALS
ON THERMAL BEHAVIOR AND MORPHOLOGY



A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENT FOR THE DEGREE OF
MASTER OF ENGINEERING IN CHEMICAL ENGINEERING
FACULTY OF ENGINEERING

KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

2016

KMITL-2016-EN-M-220-209

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้





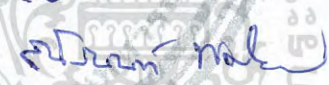

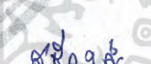


COPYRIGHT 2016

FACULTY OF ENGINEERING

เอกสารนี้ King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คณะวิศวกรรมศาสตร์
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ใบรับรองวิทยานิพนธ์

หัวข้อวิทยานิพนธ์ อธิพจน์ขององค์ประกอบของวัสดุพอรุนต่อพฤติกรรมทางความร้อนและสัณฐานวิทยา
Thesis Title Effect of Compositions of Porous Materials on Thermal Behavior and Morphology
นักศึกษา นายสันติภาพ ไทยเกิด
รหัสประจำตัว 58601271
ปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชา วิศวกรรมเคมี
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผศ.ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์
หมายเลขวิทยานิพนธ์ KMITL-2016-EN-M-220-209

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์		ลายมือชื่อ
ผศ.ดร.จันทวัฒน์	ไชยชนะวงศ์	
ผศ.ดร.อภิรักษ์	นัมคณิสสรณ์	
ดร.ณัฐนนท์	ไพบุลย์ศิลป์	
ผศ.ดร.ธีรพร	สุธีวงศ์	 
ผศ.ดร.สุรัตน์	อารีรัตน์	 

วัน / เดือน / ปี ที่สอบ วันพฤหัสบดีที่ 15 ธันวาคม พ.ศ. 2559 เวลา 14.00-16.00 น.
สถานที่สอบ ณ อาคาร A ชั้น 5 ห้องประชุม 4

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
KING MONGKUT'S INSTITUTE OF TECHNOLOGY LADKRABANG

คณะวิศวกรรมศาสตร์ รับรองแล้ว



(รองศาสตราจารย์ ดร. คมสัน มาลีสี)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้
วันที่ 15 ธันวาคม พ.ศ. 2559

หัวข้อวิทยานิพนธ์

อิทธิพลขององค์ประกอบของวัสดุรูพรุนต่อ
พฤติกรรมทางความร้อนและสัญญาณวิทยา

นักศึกษา

นายสันติภาพ ไทยเกิด

รหัสประจำตัว

58601271

ปริญญา

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชา

วิศวกรรมเคมี

ปีการศึกษา

2559

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ผศ.ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้สนใจศึกษาอิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงปริมาณขององค์ประกอบเพื่อสร้างวัสดุที่มีรูพรุนต่อโครงสร้างทางสัญญาณวิทยาและพฤติกรรมทางความร้อนในการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน โดยในงานวิจัยทดลองเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำและอัตราส่วนปริมาณอนุภาคพอลิเมอไรเซชันขนาดใหญ่ต่อขนาดเล็ก จากผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำที่ผสมเข้าไปที่สัดส่วน 0-80% โดยน้ำหนัก พบว่าน้ำมีอิทธิพลหลักสองอย่าง อย่างแรก คือทำหน้าที่คงสภาพรูพรุนภายในโครงสร้างวัสดุซึ่งเป็นตัวกำหนดขนาดของรูพรุนภายในวัสดุและความแข็งที่เกิดขึ้น เนื่องจากน้ำที่ผสมเข้าไปทำหน้าที่ขัดขวางการเชื่อมติดกันของมอนอเมอร์ที่เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน โดยกลไกในการเกิดรูพรุนภายในวัสดุนั้นมีลักษณะคล้ายกระบวนการเผาผนึก (Sintering) ที่พบมากในกระบวนการผลิตของโลหะหรือเซรามิก และปริมาณรูพรุนที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อความแข็งของวัสดุในเชิงลดลง อิทธิพลที่สอง คือ ทำหน้าที่กักเก็บความร้อนจากปฏิกิริยาซึ่งสังเกตได้จากโปรไฟล์ของอุณหภูมิ ซึ่งผลจากการเพิ่มปริมาณของน้ำที่เด่นชัดคือ ทำให้อุณหภูมิสูงสุดของปฏิกิริยามีค่าลดลง และยังพบอีกว่าเวลาที่เกิดปฏิกิริยาล่าช้าขึ้น เพราะน้ำทำหน้าที่กักเก็บความร้อนที่ออกมาจากปฏิกิริยาทำให้อุณหภูมิของวัสดุโดยรวมลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำ ทำให้วัสดุต้องใช้เวลามากขึ้นเพื่อเพิ่มอุณหภูมิให้ถึงอุณหภูมิที่สารริเริ่มแตกตัวให้อนุมูลอิสระสำหรับการเริ่มต้นของปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันได้ เมื่อวิเคราะห์อิทธิพลของปริมาณสัดส่วนอนุภาคขนาดใหญ่ต่อเล็กพบว่า ปริมาณของอนุภาคขนาดต่างๆจะส่งผลซึ่งกันและกัน ในเทอมของ Packing density โดยเมื่อนำไปวิเคราะห์โดยวิธีทางสถิติ ด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จากโปรแกรม Minitab 17 พบว่าขนาดอนุภาคพอลิเมอไรเซชันทั้งเล็กและใหญ่ส่งผลต่อสมบัติต่างๆที่วัดค่าเพื่อการวิเคราะห์อย่างมีนัยสำคัญทั้งคู่ โดยเมื่อเพิ่มปริมาณสัดส่วนอนุภาคพอลิเมอไรเซชันขนาดใหญ่จะส่งผลให้วัสดุมีความแข็ง ขนาดรูพรุน ปริมาณรูพรุนเพิ่มขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณสัดส่วนอนุภาคขนาดเล็กจะส่งผลในเชิงตรงกันข้าม

Thesis Title	Effect of Compositions of Porous Materials on Thermal Behavior and Morphology
Student	Mr. Santipab Thaigird
Student ID.	58601271
Degree	Master of Engineering
Program	Chemical Engineering
Year	2559
Thesis Advisor	Asst. Prof. Dr. Surat Areerat

Abstract

In this research aims to study on effect of water on morphology and behavior of heat of polymerization reaction from casting porous material. The experimental was vary quantity of water that mixed into monomer for casting porous material from 0 to 80% of water and ratio of polymer bead size. After analyzing the morphology of material, it was found that how porous were created in material. The porous in material were created by the water that obstructs the monomer particle to completely fuse while polymerization process. When increasing amount of water, it rises the porosity in material. The effect of water on heat of polymerization was analyzed by changing of temperature during reaction occur and calculate in term of heat of appearance, ΔH_{app} . The result shown that the heat of polymerization decrease as amount of water owing to water absorb the generated heat from the polymerization reaction. Thus, increase amount of water affect to delay time of polymerization reaction. The effect of ration of polymer bead size was analyze by statistical method, ANOVA by using Minitab 17. The result shown the main effect and significant level of polymer bead size factor to responses. The main effect of the large size polymer bead shown that when increasing amount of large bead size will rise porosity, pore size and hardness. And in contrast of the effect for the small polymer bead size.

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความกรุณาจากอาจารย์ที่ปรึกษา ผศ.ดร.สุรัตน์ อารีรัตน์ ในการทำวิทยานิพนธ์ ที่คอยให้คำปรึกษา ให้ความรู้เกี่ยวกับทฤษฎีต่างๆทั้งในเรื่องของพื้นฐานเกี่ยวกับพอลิเมอร์ รวมไปถึงความรู้เกี่ยวกับขั้นตอนในกระบวนการผลิต ซึ่งมีประโยชน์อย่างมากในการสร้างแรงบันดาลใจในการทำวิทยานิพนธ์ชิ้นนี้ อีกทั้งยังให้ความรู้เกี่ยวกับทฤษฎีต่างๆที่ใช้ในการแก้ไขปัญหา นอกเหนือจากเรื่องของปฏิกิริยาพอลิเมอร์เซชัน และชี้แนะแนวทางในการทำวิทยานิพนธ์นี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณคณะกรรมการแผนการสอบวิทยานิพนธ์ทุกท่าน ที่ให้คำปรึกษาชี้แนะแนวทางในการแก้ไขโครงร่างวิทยานิพนธ์ จนในที่สุดทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลงได้

ขอขอบคุณพี่ในห้องวิจัย Supercritical Fluid และเพื่อนๆ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่คอยเป็นกำลังใจให้เสมอมา เป็นที่ปรึกษา และให้คำชี้แนะที่ดีทั้งในเรื่องของการทดลอง และทฤษฎี รวมถึงการใช้เครื่องมือต่างๆ ทำให้งานวิจัยชิ้นนี้ประสบความสำเร็จได้ด้วยดี

สุดท้ายนี้ข้าพเจ้าขอขอบคุณความดีอันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอมอบให้บิดา และมารดา ผู้ซึ่งอุปการะเลี้ยงดู ส่งเสียข้าพเจ้าจนใช้ชีวิตมาได้ทุกวันนี้ ผู้ซึ่งเป็นครูคนแรกของชีวิต ตลอดจนครูบาอาจารย์ที่เคารพรักทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ ถ่ายทอดประสบการณ์ให้แก่ข้าพเจ้า

สันติภาพ ไทยเกิด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VII
สารบัญรูป.....	VIII

บทที่ 1 บทนำ.....	1
-------------------	---

1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของงานวิจัย.....	2
1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน.....	3
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3

บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
--	---

2.1 พอลิเมอร์.....	4
2.2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน.....	5
2.2.1 ขั้นตอนการริเริ่ม.....	5
2.2.2 ขั้นตอนการเติบโตของสายโซ่.....	5
2.2.3 ขั้นตอนการสิ้นสุดของปฏิกิริยา.....	5

2.3 โครงสร้างพอลิเมอร์.....	6
2.3.1 การจำแนกตามการหมุนฟังก์ชันหรือระดับของการพอลิเมอร์ไรเซชัน.....	6
2.3.2 การจำแนกตามลักษณะโครงสร้างทางกายภาพ.....	8
2.3.3 การจำแนกตามปฏิกิริยาเคมี.....	9

2.4 ความร้อนของปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน.....	15
2.4.1 การวัดความร้อนของปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันจากกราฟโพรไฟล์ของอุณหภูมิ.....	15
2.4.2 การวัดความร้อนของปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันด้วยการคำนวณจากหมู่ฟังก์ชัน.....	16

2.5 กระบวนการเผาไหม้ของโลหะ.....	18
2.5.1 กลไกพื้นฐานของการเกิดการเผาไหม้.....	18

2.5.2 ตัวแปรสำคัญในกระบวนการเผาไหม้.....	20
--	----

สารบัญ (ต่อ)

2.6 ปริมาณรูพรุนภายในวัสดุ.....	21
2.7 ความแข็งของวัสดุ.....	22
2.8 การตรวจโครงสร้างร่างแหของวัสดุ.....	23
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25
บทที่ 3 สารเคมี อุปกรณ์ และ วิธีการทดลอง.....	26
3.1 วัสดุและสารเคมี.....	26
3.2 อุปกรณ์การทดลองและเครื่องมือในการวิเคราะห์.....	26
3.3 ขั้นตอนการทดลอง.....	28
3.3.1 การผสมสารสำหรับสร้างวัสดุรูพรุน.....	28
3.3.2 การใช้ซอฟต์แวร์ Datalogger เพื่อแสดงผลและบันทึกข้อมูล.....	29
3.3.3 การเตรียมตัวอย่างชิ้นงานในการวัดปริมาณรูพรุน.....	34
3.3.4 ขั้นตอนการตรวจสอบโครงสร้างร่างแหวัสดุรูพรุนด้วยมาตรฐาน ASTM 2765.....	34
3.3.5 ขั้นตอนการวัดความแข็งของวัสดุ.....	35
บทที่ 4 ผลการทดลองและการวิเคราะห์.....	36
4.1 การตรวจสอบปริมาณเจลของการเกิดโครงสร้างแบบร่างแห.....	36
4.2 อิทธิพลของน้ำต่อพฤติกรรมทางความร้อน.....	36
4.2.1 อิทธิพลของปริมาณน้ำจากการวิเคราะห์ด้วยกราฟโปรไฟล์ของ อุณหภูมิ.....	36
4.2.2 การคำนวณปริมาณความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน.....	38
4.3 อิทธิพลของน้ำต่อสัณฐานวิทยาของวัสดุรูพรุน.....	41
4.3.1 อิทธิพลของน้ำต่อสัณฐานวิทยาของวัสดุรูพรุนวิเคราะห์ด้วย SEM.....	41
4.3.2 อิทธิพลของน้ำต่อขนาดของรูพรุน.....	46
4.3.3 อิทธิพลของน้ำต่อปริมาณรูพรุนและความแข็งของวัสดุ.....	48
4.4 อิทธิพลของสัดส่วนขนาดอนุภาคพอลิเมอร์ต่อพฤติกรรมทางความร้อน.....	50
4.4.1 อิทธิพลของสัดส่วนขนาดอนุภาคพอลิเมอร์จากการวิเคราะห์ด้วย กราฟโปรไฟล์ของอุณหภูมิและผลการคำนวณทางสถิติ.....	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา เว้นแต่ต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญ (ต่อ)

4.5 อิทธิพลของสัดส่วนขนาดอนุภาคพอลิเมอร์ต่อสัณฐานวิทยาของวัสดุรูปพรุน.....	52
4.5.1 อิทธิพลของสัดส่วนขนาดอนุภาคพอลิเมอร์ต่อสัณฐานวิทยาของวัสดุรูปพรุนวิเคราะห์ด้วย SEM.....	52
4.5.2 อิทธิพลของสัดส่วนขนาดอนุภาคพอลิเมอร์ต่อขนาดของรูพรุนภายในวัสดุ.....	56
4.5.3 อิทธิพลของสัดส่วนขนาดอนุภาคพอลิเมอร์ต่อปริมาณรูพรุนและความแข็งของวัสดุ.....	58
บทที่ 5 สรุปผลการศึกษา.....	62
5.1 สรุปผลอิทธิพลของปริมาณน้ำต่อพฤติกรรมทางความร้อน.....	62
5.2 สรุปผลอิทธิพลของปริมาณน้ำต่อโครงสร้างสัณฐานวิทยา.....	62
5.3 สรุปผลอิทธิพลของสัดส่วนขนาดอนุภาคต่อพฤติกรรมทางความร้อน.....	63
5.4 สรุปผลอิทธิพลของสัดส่วนขนาดอนุภาคต่อโครงสร้างสัณฐานวิทยา.....	63
5.5 ข้อเสนอแนะ.....	64
เอกสารอ้างอิง.....	65
ภาคผนวก.....	67
ภาคผนวก ก.....	68
ภาคผนวก ข.....	73
ประวัติผู้เขียน.....	76

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 เส้นผ่านศูนย์กลางสมมูลและค่านิยามต่างๆ.....	36
4.1 แสดงค่าความร้อนปรากฏจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันที่ปริมาณของน้ำที่ผสมแตกต่างกัน.....	40
4.2 แสดงค่าความร้อนจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันจากการทดลองเทียบกับงานวิจัยของ Roy.....	41
4.3 สัญลักษณ์ที่ใช้แทนการผสมอนุภาคที่ขนาดต่างๆ.....	50
ข.1 แสดงค่า S_R -Value ที่ได้จากงานวิจัยของ Sudipta Roy.....	74



สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 ตัวอย่างปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของเอทิลีนมอนอเมอร์.....	4
2.2 กลไกในการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน.....	5
2.3 ขั้นตอนต่างๆในการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันจากการสังเกตด้วยกราฟโพรไฟล์ ของอุณหภูมิ.....	6
2.4 แสดงตัวอย่างของหมู่ฟังก์ชันเดี่ยวของกรดคาร์บอกซิลิก.....	7
2.5 แสดงตัวอย่างหมู่ฟังก์ชันคู่ของเอทิลีน.....	7
2.6 แสดงตัวอย่างหมู่ฟังก์ชันสามหมู่ของการเกิดไตรเมทิลฟีนอล.....	7
2.7 ตัวอย่างโครงสร้างพอลิเมอร์แบบเส้นตรง.....	8
2.8 ตัวอย่างโครงสร้างพอลิเมอร์แบบกิ่งก้าน.....	8
2.9 ตัวอย่างโครงสร้างพอลิเมอร์แบบร่างแห.....	9
2.10 ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบเติมของ Ethyl benzoate.....	10
2.11 การเกิดพอลิเมอร์แบบไฮโมพอลิเมอร์ไรเซชัน.....	11
2.12 การเกิดพอลิเมอร์แบบโคพอลิเมอร์ไรเซชันแบบสุ่ม.....	11
2.13 การเกิดพอลิเมอร์แบบโคพอลิเมอร์ไรเซชันแบบสลับกัน.....	11
2.14 การเกิดพอลิเมอร์แบบบล็อกโคพอลิเมอร์ไรเซชัน.....	11
2.15 การเกิดโคพอลิเมอร์แบบกิ่งก้าน.....	12
2.16 กลไกการแตกตัวให้อนุมูลอิสระในขั้นตอนเริ่มต้น.....	13
2.17 กลไกการเติบโตของสายโซ่.....	13
2.18 กลไกการถ่ายเทสายโซ่.....	13
2.19 กลไกการตัดสายโซ่.....	14
2.20 ปฏิกิริยา ionic ของพอลิไอโซบิวทิลีน.....	14
2.21 แบบจำลองโครงสร้างของมอนอเมอร์และตำแหน่งที่ใช้ในการคำนวณ.....	17
2.22 ตัวอย่างการคำนวณค่าพลังงานความร้อนด้วย S_R -Value.....	17
2.23 กลไกของการเผาผลาญในโลหะ.....	18
2.24 การเกิดคอขวดระหว่างการเผาผลาญของทองแดง.....	19
2.25 แผนภาพแสดงถึงการเติมเต็มพื้นที่ว่างด้วยมุมแหลมของอนุภาคโลหะ.....	20
2.26 หลักการของการทดสอบความแข็งแบบ Shore ด้วย Durometer.....	23
3.1 อุปกรณ์สร้างวัสดุพูนและการต่อสัญญาณเพื่อรับและเก็บข้อมูลอุณหภูมิ.....	26
3.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด.....	26

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
3.3 เครื่อง Differential Scanning Calorimetry.....	27
3.4 เครื่องวัดความหนาแน่นและปริมาตรชิ้นงาน.....	27
3.5 เครื่องวัดความแข็งของวัสดุ.....	27
3.6 ชุดอุปกรณ์การ Reflux ทหารดับของการพอลิเมอไรเซชัน.....	28
3.7 หน้าต่างของโปรแกรม AI Utility 3.4.....	29
3.8 โปรแกรม AI Utility 3.4 เชื่อมต่อเข้ากับ Datalogger.....	30
3.9 หน้าต่างแสดงการสแกนและเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์และ Datalogger.....	30
3.10 การตั้งค่าเทอร์โมคัปเปิลเสร็จสมบูรณ์.....	31
3.11 หน้าต่างของโปรแกรม OD04 2.7.....	31
3.12 การตั้งค่าชื่อไฟล์บันทึกและเลือกรุ่นของ Datalogger.....	32
3.13 การตั้งค่าในส่วนของการบันทึกข้อมูลโปรแกรม OD04 2.7.....	32
3.14 การตั้งค่าหน่วยและชนิดของเทอร์โมคัปเปิลที่ทำการวัด.....	33
3.15 หน้าจอแสดงผล.....	33
3.16 แสดงตำแหน่งในการวัดความแข็งของวัสดุ.....	35
3.17 แสดงรูปแบบการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคด้วยนิยามต่างๆ.....	36
4.1 กราฟโปรไฟล์ของอุณหภูมิของการขึ้นรูปวัสดุรูปทรงที่ได้จากทดลองเมื่อนำข้อมูลอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นขณะทำปฏิกิริยาไปพล็อตกราฟเทียบ.....	36
4.2 อุณหภูมิสูงสุดขณะเกิดปฏิกิริยาในการขึ้นรูปวัสดุรูปทรงเทียบกับปริมาณน้ำ.....	37
4.3 อิทธิพลของน้ำที่เกิดขึ้นเมื่อผสมลงในวัสดุมากเกินไปทำให้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาเริ่มต้นช้าลง.....	38
4.4 เทอร์โมแกรมการวัดสมบัติทางความร้อนของวัสดุรูปทรงที่ได้จาก DSC.....	39
4.5 กราฟแสดงฟังก์ชันค่า C_p ที่ได้จากเทอร์โมแกรมมีแนวโน้มคงที่.....	39
4.6 ทิศทางการลดลงของความร้อนสัมพันธ์กับอุณหภูมิสูงสุดขณะเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน.....	41
4.7 ภาพ SEM สัณฐานวิทยาของวัสดุที่ไม่ผสมน้ำที่กำลังขยายต่างๆ.....	42
4.8 ภาพ SEM สัณฐานวิทยาของวัสดุรูปทรงที่กำลังขยาย 50 เท่า ในปริมาณน้ำต่างๆ.....	43
4.9 ภาพ SEM สัณฐานวิทยาของวัสดุรูปทรงที่กำลังขยาย 100 เท่า ในปริมาณน้ำต่างๆ.....	44
4.10 ภาพ SEM สัณฐานวิทยาของวัสดุรูปทรงที่กำลังขยาย 500 เท่า ในปริมาณน้ำต่างๆ.....	45
4.11 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนภายในวัสดุที่ปริมาณน้ำต่างๆ.....	47
4.12 ปริมาณของรูพรุนเมื่อเทียบที่ปริมาณน้ำต่างๆ.....	48
4.13 ความแข็งของวัสดุรูปทรงที่ปริมาณน้ำต่างๆ.....	49
4.14 กราฟแสดงโปรไฟล์ของอุณหภูมิของวัสดุที่สัดส่วนขนาดอนุภาคต่างกัน.....	50

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา IX จะต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.15 กราฟแสดงอุณหภูมิสูงสุดจากปฏิกิริยาพอลิเมอร์เซชันที่ปริมาณรูพรุนต่างๆ.....	51
4.16 ผลการคำนวณเชิงสถิติด้วย ANOVA ของปริมาณรูพรุนที่มีอิทธิพลต่ออุณหภูมิของปฏิกิริยาสูงสุดที่เกิดขึ้น.....	52
4.17 ภาพ SEM สัณฐานวิทยาของวัสดุที่สัดส่วนอนุภาคใหญ่ต่ออนุภาคเล็กต่างๆ ที่กำลังขยาย 50 เท่า.....	53
4.18 ภาพ SEM สัณฐานวิทยาของวัสดุที่สัดส่วนอนุภาคใหญ่ต่ออนุภาคเล็กต่างๆ ที่กำลังขยาย 100 เท่า.....	54
4.19 ภาพ SEM สัณฐานวิทยาของวัสดุที่สัดส่วนอนุภาคใหญ่ต่ออนุภาคเล็กต่างๆ ที่กำลังขยาย 500 เท่า.....	55
4.20 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนภายในวัสดุที่สัดส่วนของอนุภาคเม็ดใหญ่ต่อเม็ดเล็กต่างๆ.....	56
4.21 แสดงอัตราส่วนของขนาดอนุภาคต่อช่องว่างที่เกิดภายใน.....	57
4.22 ผลการวิเคราะห์เชิงสถิติของขนาดอนุภาคต่อขนาดรูพรุน.....	57
4.23 อิทธิพลของขนาดอนุภาคต่อขนาดรูพรุนภายในวัสดุจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab.....	58
4.24 ปริมาณรูพรุนภายในวัสดุที่สัดส่วนขนาดอนุภาคต่างๆ.....	58
4.25 ผลการวิเคราะห์เชิงสถิติของขนาดอนุภาคต่อปริมาณรูพรุน.....	59
4.26 อิทธิพลของขนาดอนุภาคต่อปริมาณรูพรุนภายในวัสดุจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab.....	59
4.27 ความแข็งของวัสดุบริเวณต่างๆที่สัดส่วนขนาดอนุภาคพอลิเมอร์ต่างๆ.....	60
4.28 แสดงอิทธิพลของปริมาณอนุภาคขนาดเล็กและใหญ่ต่อความแข็งที่บริเวณต่างๆ.....	61
ก.1 การเปิดภาพไมโครกราฟด้วยโปรแกรม Image J.....	69
ก.2 การกำหนดสเกลให้โปรแกรม Image J.....	70
ก.3 การตั้งค่าสเกลให้โปรแกรม Image J.....	71
ก.4 การวัดขนาดของรูพรุน.....	72
ก.5 การวิเคราะห์ภาพไมโครกราฟ.....	72

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันพอลิเมอร์ถูกนำมาใช้งานในอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากวัสดุที่ทำด้วยพลาสติกพอลิเมอร์นั้น สามารถนำไปใช้ในงานที่เฉพาะทางได้หลากหลายทั้งในงานอุตสาหกรรม การกลั่น เคมีภัณฑ์ การก่อสร้าง การกรอง และอื่นๆ ในขณะที่ความเป็นไปได้ของพลาสติกพอลิเมอร์สามารถสร้างได้อย่างไม่มีขีดจำกัด [1] ซึ่งตอบสนองในแง่ของเศรษฐศาสตร์ในกระบวนการผลิตต่างๆ และคุณสมบัติที่หลากหลายของพอลิเมอร์เมื่อนำมาขึ้นรูปเป็นพลาสติก ทำให้พอลิเมอร์เป็นวัสดุที่มีการใช้งานเพื่อตอบสนองต่องานเฉพาะทางด้านต่างๆได้อย่างไม่มีที่สิ้นสุด พลาสติกนั้นไม่ได้มีแค่พอลิเมอร์ที่มีขนาดโมเลกุลที่ใหญ่อย่างเดียวเท่านั้นแต่ยังรวมถึง เส้นใยพอลิเมอร์ ยาง หรือ สารเคลือบผิวต่างๆ ซึ่งทั้งหมดที่กล่าวมาล้วนแต่กำเนิดมาจากสารที่มีมวลโมเลกุลต่ำหรือที่รู้จักทั่วไปว่า “มอนอเมอร์” เป็นสารโมเลกุลเดี่ยวซึ่งเมื่อเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันจะทำให้เกิดการเชื่อมต่อพันธะระหว่างโมเลกุล กลายเป็นสายโซ่โมเลกุลยาวขึ้นที่เรียกว่า “พอลิเมอร์” ด้วยกระบวนการ “พอลิเมอไรเซชัน”

กระบวนการพอลิเมอไรเซชันถือเป็นกระบวนการสำคัญในการผลิตพอลิเมอร์ โดยปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการพอลิเมอไรเซชันที่สำคัญคือ อุณหภูมิ เนื่องจากเป็นกระบวนการพอลิเมอไรเซชันเป็นปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบคายความร้อนจึงทำให้การเผ่าสังเกตและบันทึกค่าของอุณหภูมิที่ดำเนินไปในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันมีความสำคัญ เพราะปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันมีการคายความร้อนเกิดขึ้นในช่วงของขั้นตอนการเติบโตของสายโซ่ในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันซึ่งจะปลดปล่อยความร้อนออกมาอย่างรวดเร็วทำให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นอย่างมาก หากไม่มีการสังเกตและบันทึกข้อมูลอาจทำให้เกิดเหตุการณ์ร้ายแรงเช่น อุณหภูมิของปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันเพิ่มขึ้นขึ้นต่อเนื่องโดยที่ไม่มีการระบายความร้อนออกทำให้เกิดความร้อนสะสมภายในเครื่องปฏิกรณ์ จนอาจนำไปสู่สถานการณ์ที่อาจทำให้สูญเสียทั้งชีวิตและทรัพย์สิน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงศึกษาถึงการเปลี่ยนแปลงสัดส่วนขององค์ประกอบต่างๆต่อโปรไฟล์ของอุณหภูมิระหว่างการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน และสร้างวัสดุที่โครงสร้างรูพรุนและมีความแข็งแรง

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาอิทธิพลของการปรับเปลี่ยนสัดส่วนองค์ประกอบของสารเคมีที่ใช้ในการขึ้นรูปวัสดุที่มีรูพรุนต่อพฤติกรรมทางความร้อนและทางสัณฐานวิทยาของวัสดุรูพรุน ซึ่งขั้นตอนในการสร้างวัสดุนั้น ทำโดยการผสมเม็ดอนุภาคพอลิเมอร์ (Polymer bead) สไตรีนมอนอเมอร์ (Styrene monomer) น้ำ และ สารแตกตัวให้อนุมูลอิสระ (Initiator) ซึ่งดำเนินการในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบ Bulk Polymerization ในงานวิจัยได้สนใจศึกษาการเปลี่ยนแปลงของพฤติกรรมทางความร้อนจากโปรไฟล์ของอุณหภูมิระหว่างเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันซึ่งมีการเก็บข้อมูลและแสดงผลอย่างต่อเนื่องในเวลาเดียวกันกับเวลาที่เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันภายในเครื่องปฏิกรณ์ ด้วยการใช้เครื่องมือเก็บข้อมูลเรียกว่า Datalogger ซึ่งสามารถนำไปใช้เก็บข้อมูลในกระบวนการผลิตได้จริงและมีประสิทธิภาพ เมื่อปรับเปลี่ยนสัดส่วนในการผสมน้ำในการขึ้นรูปวัสดุเพื่อหาความสัมพันธ์ของปริมาณน้ำที่ผสมกับความแข็งแรง ปริมาตรรูพรุน ขนาดรูพรุน อุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

และปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน ซึ่งความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันจะนำไปคำนวณแล้วนำมาเปรียบเทียบกับการคำนวณพลังงานความร้อนของปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันด้วยหมู่ฟังก์ชันของมอนอเมอร์ที่นำมาเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน เพื่อตรวจสอบถึงวิธีการคำนวณความร้อนที่ได้จากกราฟโพรไฟล์ของอุณหภูมิ นอกจากนี้ยังช่วยให้สามารถใช้วิธีการคำนวณความร้อนของปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันด้วยหมู่ฟังก์ชันนี้สามารถทำนายความร้อนที่จะเกิดขึ้นหากมีการเปลี่ยนชนิดของมอนอเมอร์ที่ใช้ในการทดลองในอนาคตต่อไปได้ และในเชิงปฏิบัติสามารถนำไปหาอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันได้เพื่อเป็นแนวทางในการตั้งค่าการควบคุมภาวะของเครื่องปฏิกรณ์ให้มีความปลอดภัยก่อนที่จะดำเนินการได้

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

- 1.2.1 เพื่อศึกษาหาอิทธิพลของปริมาณน้ำต่อพฤติกรรมทางความร้อนและสัณฐานวิทยา
- 1.2.2 เพื่อศึกษาหาอิทธิพลของการปรับเปลี่ยนสัดส่วนขนาดของอนุภาคพอลิเมอร์ ต่อพฤติกรรมทางความร้อนและสัณฐานวิทยา
- 1.2.3 เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำกับสมบัติของวัสดุรูปทรงที่สร้างขึ้น
- 1.2.4 เพื่อหาปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นของปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบ Bulk
- 1.2.5 เพื่อสร้างวัสดุรูปทรงที่มีความแข็งแรง
- 1.2.6 เพื่อศึกษาหลักการในการเกิดรูปทรงภายในวัสดุ

1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 ศึกษาการปรับเปลี่ยนสัดส่วนองค์ประกอบที่ใช้ในการผสมคือ น้ำ ที่ปริมาณ 0 25 31 40 50 57 และ 80% โดยน้ำหนัก
- 1.3.2 ศึกษาการปรับเปลี่ยนสัดส่วนขนาดที่ใช้ในการผสมคือ ปริมาณผงอนุภาคพอลิเมอร์ขนาดใหญ่ : ขนาดเล็ก ในอัตราส่วน 11:22 11:33 22:11 22:22 33:11 และ 33:22
- 1.3.3 คำนวณหาค่าพลังงานความร้อนจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันด้วยวิธีการคำนวณจากกราฟโพรไฟล์ของอุณหภูมิเปรียบเทียบกับวิธีการคำนวณด้วยหมู่ฟังก์ชัน
- 1.3.4 ศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนสัดส่วนองค์ประกอบต่อพฤติกรรมทางความร้อนระหว่างเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของวัสดุรูปทรง
- 1.3.5 ศึกษาผลของการปรับเปลี่ยนสัดส่วนองค์ประกอบต่อโครงสร้างทางสัณฐานวิทยา

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

1.4 ขั้นตอนการดำเนินงาน

- 1.4.1 ออกแบบและติดตั้งเครื่องมือที่ใช้ในการวัดและเก็บบันทึกข้อมูลระหว่างเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน
- 1.4.2 ออกแบบการทดลองและดำเนินการทดลองตามขั้นตอน
- 1.4.3 ปรับเปลี่ยนปริมาณน้ำที่ใช้ผสมในการสร้างวัสดุรูปทรงแปดหน้า
- 1.4.4 นำวัสดุรูปทรงแปดหน้าที่ทำไปวิเคราะห์ตรวจสอบหาค่าความจุความร้อน ระดับของการพอลิเมอไรเซชัน ปริมาณรูปทรงแปดหน้าในวัสดุ ความแข็ง เป็นต้น
- 1.4.5 คำนวณหาความร้อนจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันทั้งการคำนวณด้วยกราฟและการกระจายตัวของหมู่ฟังก์ชัน
- 1.4.6 วิเคราะห์ลักษณะสัณฐานวิทยาของวัสดุด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)
- 1.4.7 เปรียบเทียบปริมาณความร้อนที่คำนวณได้
- 1.4.8 วิเคราะห์หาอิทธิพลของปริมาณน้ำและสัดส่วนขนาดอนุภาคพอลิเมอร์ต่อพฤติกรรมทางความร้อนและสัณฐานวิทยา
- 1.4.9 สรุปผลการทดลอง

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 สามารถสร้างวัสดุที่มีความแข็งแรงและมีรูปทรงแปดหน้าได้
- 1.5.2 สามารถนำวิธีการเก็บข้อมูลด้วย Datalogger ไปใช้ในงานอุตสาหกรรมจริงได้ เพื่อช่วยสังเกตและบันทึกข้อมูลอุณหภูมิระหว่างเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันได้ ซึ่งสามารถนำข้อมูลดังกล่าวมาวิเคราะห์ได้ในภายหลัง
- 1.5.3 สามารถเข้าใจถึงกลไกในการเกิดรูปทรงแปดหน้าในวัสดุ ซึ่งสามารถนำไปต่อยอดสู่การพัฒนาคุณสมบัติบางประการของรูปทรงแปดหน้าให้ตรงกับงานหรืออุตสาหกรรมที่ต้องการใช้งานวัสดุรูปทรงแปดหน้าได้
- 1.5.4 สามารถใช้การคำนวณความร้อนที่เกิดขึ้นทำนายความร้อนของระบบและอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นได้ ซึ่งจะนำไปสู่การออกแบบเครื่องปฏิกรณ์หรือตัวแปรที่ใช้ในการควบคุมปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันได้

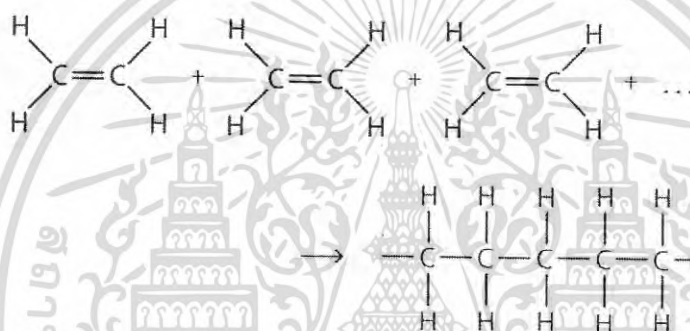
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 พอลิเมอร์ [1-5]

พอลิเมอร์ (Polymer) คือสารที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ซึ่งเกิดจากการเกิดพันธะเชื่อมโยงจากโมเลกุลเดี่ยวที่เรียกว่า “มอนอเมอร์ (Monomer)” ซ้ำๆ กันจนกลายเป็นสายโซ่ยาวด้วยปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันดังแสดงในรูปที่ 2.1 พอลิเมอร์ที่ได้จากปฏิกิริยาจะแบ่งได้เป็นสองแบบคือ เทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์ และ เทอร์โมเซตติงพอลิเมอร์



รูปที่ 2.1 ตัวอย่างปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของเอทิลีนมอนอเมอร์

- **เทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์ (Thermoplastic Polymer)**

เกิดจากมอนอเมอร์เชื่อมต่อกันเป็นสายโซ่ตรงหรือกึ่งก้าน ซึ่งพอลิเมอร์ชนิดนี้สามารถหลอมนำกลับมาใช้ใหม่หรือหล่อขึ้นรูปเพื่อเปลี่ยนรูปร่างหรือโครงสร้างได้อีกครั้ง สามารถละลายในตัวทำละลายได้ แต่ไม่เหมาะกับการใช้งานที่อุณหภูมิสูงเนื่องจากพันธะการเชื่อมของโมเลกุลไม่แข็งแรงพอจึงสามารถละลายตัวที่อุณหภูมิสูงได้ พอลิเมอร์ในกลุ่มนี้ได้แก่ พอลิไวนิล พอลิโพรพิลีน และ อนุพันธ์ของเซลลูโลส เป็นต้น

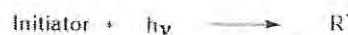
- **เทอร์โมเซตติงพอลิเมอร์ (Thermosetting Polymer)**

เป็นพอลิเมอร์ที่ไม่สามารถนำมาขึ้นรูปใหม่ได้ซึ่งเกิดจากมอนอเมอร์เชื่อมต่อกันเป็นเครือข่ายร่างแห พอลิเมอร์ชนิดนี้ไม่สามารถละลายในตัวทำละลายได้แต่สามารถทนอุณหภูมิได้สูง พอลิเมอร์ในกลุ่มนี้ได้แก่ ฟีนอล-ฟอर्मัลดีไฮด์ ยูเรีย-แอลดีไฮด์ และ ซิลิโคน เป็นต้น

2.2 กลไกการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน [4-8]

ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน คือ ปฏิกิริยาการเกิดพันธะวาเลนซ์ระหว่างทปแกอิกอิอิอก โมเลกุลหน่วยเล็กที่เรียกว่า มอนอเมอร์ เชื่อมต่อกันเป็นโมเลกุลสายโซ่ยาวเรียกว่า พอลิเมอร์ โดย กระบวนการเกิดปฏิกิริยาสามารถแบ่งเป็นกลไกการเกิดได้ 3 ขั้นตอนดังแสดงแสดงในรูปที่ 2.2

Initiation



Propagation



Termination

combination



disproportionation



รูปที่ 2.2 กลไกในการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน [9]

2.2.1 ขั้นตอนการเริ่ม (Initiation Step)

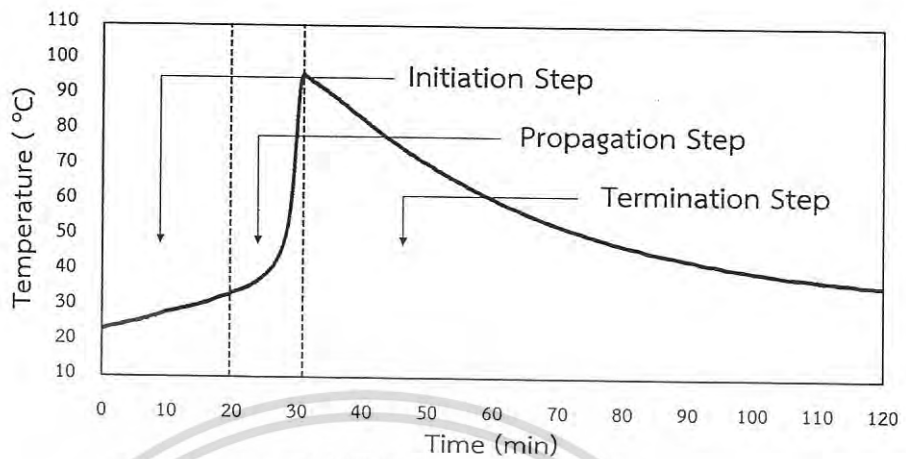
ในขั้นตอนนี้เมื่อสารที่ทำหน้าที่เป็นตัวริเริ่ม (Initiator) ได้รับพลังงานหรือ อุณหภูมิที่พอเหมาะจะเกิดการแตกตัวให้อิออนอิสระซึ่งจะทำให้เกิดประจุอิสระขึ้น จากนั้นประจุอิสระจะถ่ายเทต่อไปยังมอนอเมอร์เพื่อทำให้มอนอเมอร์เกิดพันธะสำหรับการ เชื่อมต่อกับมอนอเมอร์อีกโมเลกุลเกิดเป็นสายโซ่ต่อกันไปเรื่อยๆ

2.2.2 ขั้นตอนการเติบโตของสายโซ่ (Propagation Step)

ในขั้นตอนนี้มอนอเมอร์จะเริ่มเชื่อมต่อกันด้วยจำนวนที่มากขึ้นอย่างรวดเร็วเกิดเป็นสายโซ่ยาว ในขั้นตอนนี้จะมีการปลดปล่อยความร้อนออกมาด้วย เนื่องจากการเชื่อมพันธะของแต่ละโมเลกุลนั้นจำเป็นที่จะต้องมีการคายพลังงานออกมาเพื่อให้ โมเลกุลเข้ามาใกล้กันได้มากที่สุดที่จะเกิดพันธะได้ ดังนั้นในช่วงของการเติบโตของสายโซ่นี้ จะมีการคายพลังงานออกมามากทำให้อุณหภูมิของปฏิกิริยามีการเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว

2.2.3 ขั้นตอนการสิ้นสุดของปฏิกิริยา (Termination Step)

ขั้นตอนนี้เป็นการหยุดการเติบโตของสายโซ่ทำให้มอนอเมอร์ไม่สามารถ เชื่อมต่อกันได้อีก โดยขั้นตอนนี้อาจทำให้เกิดได้หลายประการเช่น สารแตกตัวให้ประจุ อิสระไม่เพียงพอสำหรับการต่อสายโซ่ที่ยาวขึ้น การใส่สารที่ไปยับยั้งการถ่ายเทของประจุ อิสระ มอนอเมอร์ที่ใช้ทำในปฏิกิริยาหมดทำให้ไม่มีโมเลกุลมาเชื่อมต่อกันได้อีก เป็นต้น เมื่อสายโซ่หยุดการเติบโตจึงไม่มีการปลดปล่อยพลังงานออกมา แต่ภายในโมเลกุลเองก็ยังมี ความร้อนสะสมอยู่ด้วยอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาจึงลดลงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ขั้นตอนต่างๆในการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันจากการสังเคราะห์ด้วยกราฟโปรไฟล์ของอุณหภูมิ

2.3 โครงสร้างของพอลิเมอไร [4-5,10]

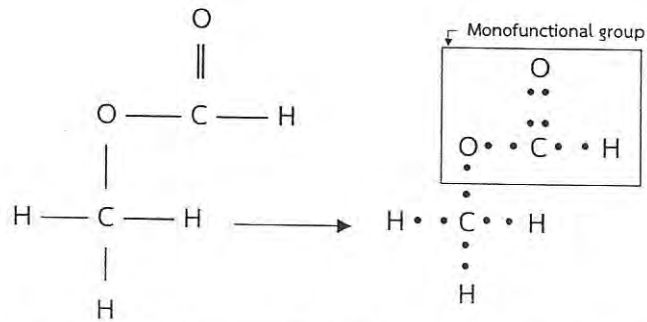
โครงสร้างของพอลิเมอไรสามารถจำแนกได้ 3 แบบตามลักษณะทางเคมีและกายภาพดังนี้

2.3.1 การจำแนกตามหมู่ฟังก์ชันหรือระดับของการพอลิเมอไรเซชัน

หมู่ฟังก์ชันของมอนอเมอร์หรือระดับของการพอลิเมอไรเซชันเป็นตัวกำหนดว่าพอลิเมอไรจะเป็นชนิดไหนในขั้นตอนสุดท้ายซึ่งเกิดการรวมตัวกันของมอนอเมอร์ จำนวนของพันธะที่เกิดปฏิกิริยาขึ้นหรือหมู่ที่หลงเหลือซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาได้นั้นจะเป็นตัวกำหนดว่ามอนอเมอร์จะมีหมู่ฟังก์ชันในการเกิดปฏิกิริยาแบบ เดี่ยว- คู่- สาม- หรือ เกิดได้หลายหมู่ฟังก์ชัน

- หมู่ฟังก์ชันเดียวในการเกิดปฏิกิริยาหรือมีหมู่ฟังก์ชันเพียงหมู่เดียว (Monofunctional or unifunctional)

เมื่อหมู่ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้หนึ่งกลุ่มอยู่ในโมเลกุลของมอนอเมอร์จะเรียกว่าเป็น หมู่ฟังก์ชันเดียว แต่อย่างไรก็ตามหมู่ฟังก์ชันเดียวนั้นไม่สามารถนำไปสู่การเชื่อมต่อของสายโซ่ในช่วงของการเติบโตของสายโซ่ได้ดังตัวอย่างเช่น ในมอนอเมอร์กรดคาร์บอกซิลิก CH_3COOH หมู่ฟังก์ชัน $-\text{COOH}$ ถือเป็นหมู่ฟังก์ชันเดียว



รูปที่ 2.4 แสดงตัวอย่างของหมู่ฟังก์ชันเดี่ยวของกรดคาร์บอกซิลิก [5]

• หมู่ฟังก์ชันคู่ในการเกิดปฏิกิริยา (Bifunctional)

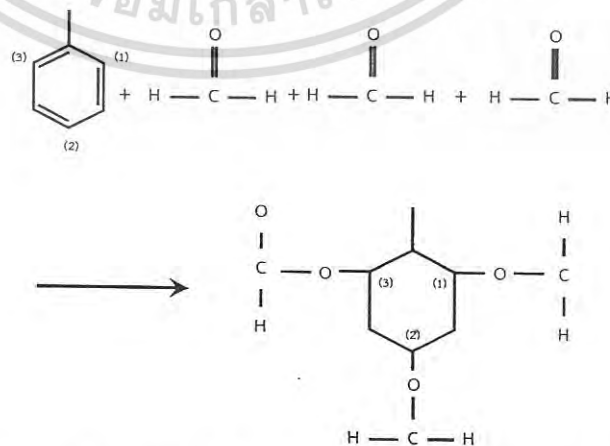
เมื่อมีหมู่ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาปรากฏอยู่ในโมเลกุลของมอนอเมอร์สองกลุ่มจะเรียกว่าเป็น หมู่ฟังก์ชันคู่ในการเกิดปฏิกิริยา บ่อยครั้งที่ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันจะเกิดขึ้นกับหมู่ฟังก์ชันคู่ เมื่อปฏิกิริยาเกิดขึ้นพันธะคู่จะแตกตัวออกเพื่อเชื่อมต่อกับพันธะกับโมเลกุลของมอนอเมอร์ข้างเคียง แสดงได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 แสดงตัวอย่างหมู่ฟังก์ชันคู่ของเอทิลีน [5]

• หมู่ฟังก์ชันสามหมู่ในการเกิดปฏิกิริยา (Trifunctional)

คือ มอนอเมอร์ที่มีหมู่ซึ่งสามารถเกิดปฏิกิริยาได้สามกลุ่ม อาจเกิดจากการผสมรวมกันของหมู่ฟังก์ชันแบบเดี่ยวผสมกับหมู่ฟังก์ชันแบบคู่ในโครงสร้างของมอนอเมอร์ดังตัวอย่างในการพิจารณาปฏิกิริยาของฟีนอลและฟอร์มอลดีไฮด์เกิดเป็นไตรเมทิลฟีนอล



รูปที่ 2.6 แสดงตัวอย่างหมู่ฟังก์ชันสามหมู่ของการเกิดไตรเมทิลฟีนอล [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

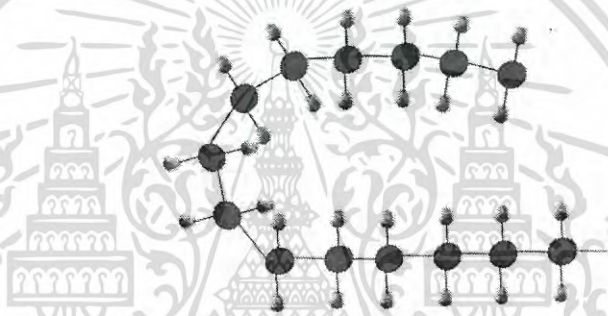
จากภาพตัวอย่างโมเลกุลของพอร์มอลดีไฮด์บรรจุหมู่ฟังก์ชันในการเกิดปฏิกิริยาไว้สามกลุ่มในรูปของกลุ่มไฮดรอกซิล -OH ซึ่งกลุ่มที่เกิดปฏิกิริยานี้ได้เชื่อมต่อกับตำแหน่งที่ 1 2 และ 3 ในโครงสร้างของพีนอล

2.3.2 การจำแนกตามลักษณะโครงสร้างทางกายภาพ

โครงสร้างของพอลิเมอร์ทางกายภาพสามารถแบ่งออกเป็น 3 แบบได้แก่

- โครงสร้างแบบโซ่ตรง (Linear Polymer)

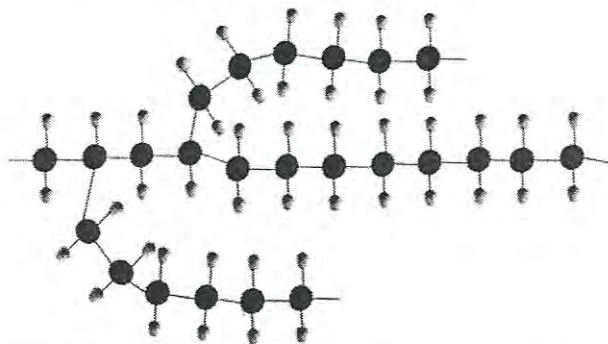
เกิดจากมอนอเมอร์ที่มีพันธะที่สามารถเชื่อมต่อกันได้ 2 หมู่ฟังก์ชัน โดยทั่วไปจะเป็นพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติกยกเว้นโครงสร้างที่มีมวลโมเลกุลหรือน้ำหนักโมเลกุลที่สูงมาก



รูปที่ 2.7 ตัวอย่างโครงสร้างพอลิเมอร์แบบเส้นตรง

- โครงสร้างแบบกิ่งก้าน (Branched-chain Polymer)

เมื่อมอนอเมอร์ที่เกิดการเชื่อมพันธะกันกลายเป็นสายโซ่หลัก มอนอเมอร์ส่วนหนึ่งอาจเกิดพันธะกับโมเลกุลบางส่วนของโซ่หลักที่สามารถเกิดพันธะได้สามตำแหน่งแล้วแตกออกมาเชื่อมพันธะกับมอนอเมอร์โมเลกุลอื่นๆแยกออกมาเหตุการณ์ดังกล่าวทำให้การเกิดสายโซ่ที่ต่อแยกออกมาจากสายโซ่หลักเรียกว่า กิ่งก้านพอลิเมอร์ ซึ่งลักษณะการเกิดดังกล่าวทำให้ลักษณะทางกายภาพบางอย่างเปลี่ยนแปลง เช่น ความสามารถในการละลายในตัวทำละลายลดลง จุดอ่อนตัวสูงขึ้น และยังลดคุณสมบัติของเทอร์โมพลาสติกอีกด้วย

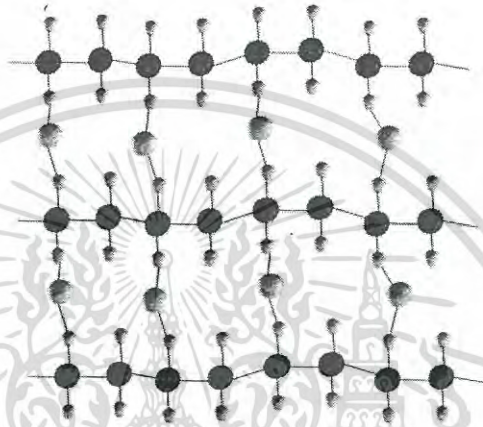


รูปที่ 2.8 ตัวอย่างโครงสร้างพอลิเมอร์แบบกิ่งก้าน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับครูเชิงวิชาชีพเพื่อใช้ในการสอนนักเรียนไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- โครงสร้างพอลิเมอร์แบบร่างแห (Cross-linked Polymer)

โครงสร้างพอลิเมอร์ชนิดนี้จะเกิดจากมอนอเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันสองและสามกลุ่มเท่านั้นที่จะสามารถเกิดพันธะแบบร่างแหได้ โครงสร้างชนิดนี้จะให้สมบัติที่มีความยืดหยุ่นเนื่องจากการเกิดสายโซ่เชื่อมต่อกันระหว่างโซ่ตรงเป็นสามมิติ พอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างชนิดนี้จะเป็นพอลิเมอร์ประเภทเทอร์โมพลาสติกที่สามารถทนต่อแรงทางกลและอุณหภูมิได้สูง



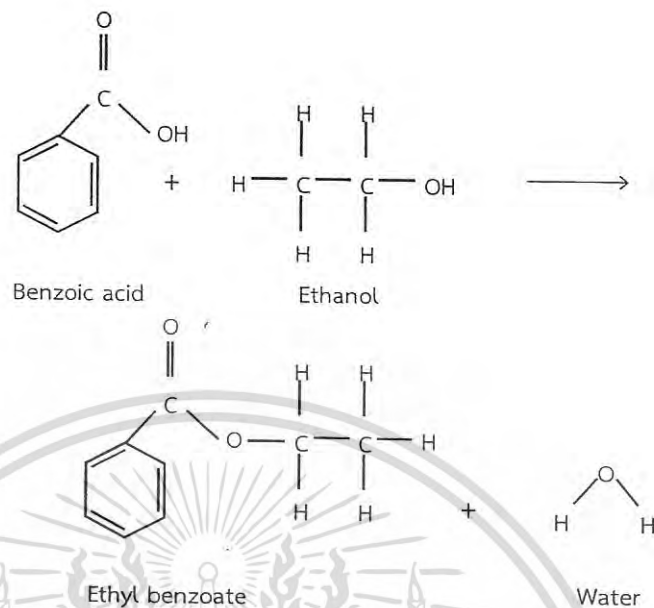
รูปที่ 2.9 ตัวอย่างโครงสร้างพอลิเมอร์แบบร่างแห

2.3.3 การจำแนกตามปฏิกิริยาเคมี

การจำแนกพอลิเมอร์ตามปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบ Bulk polymerization นั้นจะขึ้นกับมอนอเมอร์ที่ใช้เกิดปฏิกิริยาเคมี มีลักษณะหมู่ฟังก์ชันหรือการเชื่อมต่อกันเป็นแบบใดเพื่อกลายเป็นพอลิเมอร์ ซึ่งสามารถแบ่งกระบวนการเกิดปฏิกิริยาได้ 2 แบบ คือ

- ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบควบแน่น (Polycondensation Reaction)

เป็นปฏิกิริยาที่มอนอเมอร์เกิดปฏิกิริยาโดยการขจัดโมเลกุลขนาดเล็กออกจากโมเลกุล เช่น H_2O , NH_3 , CH_2O และ $NaCl$ การเติบโตที่ไม่แน่นอนสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งสองข้างของสายโซ่ ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบควบแน่นจะเสร็จสิ้นก็ต่อเมื่อหนึ่งในโมเลกุลที่เกิดปฏิกิริยาถูกใช้จนหมด โดยทั่วไปแล้วมอนอเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันคู่ต่างกันจะสามารถเกิดปฏิกิริยาได้ ตัวอย่างที่เห็นได้บ่อยคือปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบควบแน่นของปฏิกิริยาการเกิดเอสเทอร์ (Esterification Reaction) ในการทำปฏิกิริยาของกรดเบนโซอิก (Benzoic acid) กับเอทานอล (Ethanol) ภายใต้ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันแบบควบแน่นเพื่อให้ได้สารเอทิลเบนโซเอต (Ethyl benzoate) โดยการขจัดน้ำออก 1 โมเลกุล ซึ่งพอลิเมอร์ที่ได้หลังจากเกิดปฏิกิริยานี้ (ในที่นี้คือ เอทิลเบนโซเอต) จะเรียกว่าเป็นพอลิเมอร์แบบควบแน่น



รูปที่ 2.10 ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเติมของ Ethyl benzoate

- ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเติม (Addition Reaction)

ปฏิกิริยานี้เกิดขึ้นจากการรวมตัวกันอย่างรวดเร็วของสายโซ่และขจัดโมเลกุลขนาดเล็กออกจากสายโซ่ ซึ่งปฏิกิริยาส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นระหว่างโมเลกุลที่มีพันธะคู่และสามหรือสารประกอบที่เป็นวง โดยปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเติมจะมีทั้งหมด 3 ขั้นตอน คือ

i. Step Reactions

ii. Chain Reactions

iii. Ionic Reactions

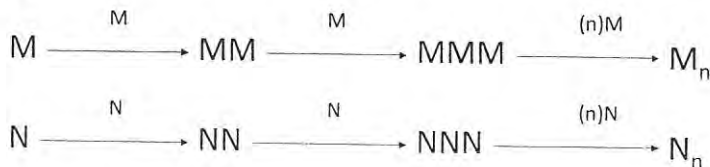
i. Step Reactions ในขั้นตอนนี้พันธะพาย (π -bond) ได้ถูกทำลายลงและพันธะซิกมา (σ -bond) ใหม่สองพันธะจะเกิดแทนที่ขึ้นมา ซึ่งพันธะที่เป็นอิเล็กโทรฟิลิก (Electrophilic) จากปฏิกิริยาแบบเติมจะต้องมีพันธะคู่หรือพันธะสาม

ii. Chain Reactions ในขั้นตอนนี้จะป็นรูปแบบในขั้นตอนเดียวและส่วนที่เหลือในเวลาถัดมา ซึ่งสายโซ่เกิดขึ้นมาด้วย 3 ขั้นตอนคือ การริเริ่ม (Initiation Step) การเติบโตของสายโซ่ (Propagation Step) และ การตัดสายโซ่ (Termination Step)

- ความแตกต่างของสายโซ่ในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเติมเมื่อพิจารณาให้ “M” และ “N” คือมอนอเมอร์ที่ต่างกันสองชนิด ชนิดของสายโซ่ในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแบบเติมนั้นสามารถแบ่งได้ดังนี้

1. โฮโมพอลิเมอร์ไรเซชัน (Homopolymerization)

คือพอลิเมอร์ที่มีมอนอเมอร์ M หรือ N เพียงชนิดเดียวปรากฏอยู่ในสายโซ่เท่านั้น



รูปที่ 2.11 การเกิดพอลิเมอร์แบบโฮโมพอลิเมอร์ไรเซชัน

2. โคพอลิเมอร์ (Copolymerization)

คือพอลิเมอร์ที่มีโมเลกุลของมอนอเมอร์ M และ N ปรากฏอยู่ด้วยกันในสายโซ่ แบ่งย่อยเป็น 2 ชนิดตามการจัดเรียงตัวของมอนอเมอร์คือ

การจัดเรียงแบบสุ่ม



รูปที่ 2.12 การเกิดพอลิเมอร์แบบโคพอลิเมอร์ไรเซชันแบบสุ่ม

การจัดเรียงแบบสลับกัน



รูปที่ 2.13 การเกิดพอลิเมอร์แบบโคพอลิเมอร์ไรเซชันแบบสลับกัน

3. บล็อกโคพอลิเมอร์ไรเซชัน (Block Copolymerization)

การจัดเรียงตัวของพอลิเมอร์ชนิดนี้ เป็นการจัดเรียงแบบสลับไปมาระหว่างกลุ่มของมอนอเมอร์ชนิดเดียวกัน ซึ่งกลุ่มของมอนอเมอร์ประกอบด้วยมอนอเมอร์ตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไป โดยผลสุดท้ายจะได้พอลิเมอร์ที่มีสายโซ่เป็นเส้นตรง

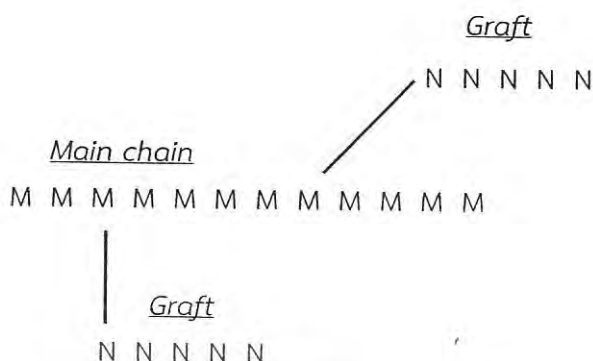


รูปที่ 2.14 การเกิดพอลิเมอร์แบบบล็อกโคพอลิเมอร์ไรเซชัน

4. การพอลิเมอร์ไรเซชันแบบกิ่งก้าน (Graft Copolymerization)

พอลิเมอร์ชนิดนี้จะประกอบด้วยสายโซ่ของมอนอเมอร์ชนิดเดียวเป็นสายโซ่หลักและสายโซ่ของพอลิเมอร์อีกชนิดจะมาเชื่อมพันระอออกจากสายโซ่หลักเป็นกิ่งก้าน จากการแผ่รังสี β หรือ รังสี X หรือกลุ่มที่ไวต่อการทำปฏิกิริยาเคมีโดยรังสีหรืออนุมูลอิสระดังกล่าวจะเกิดปฏิกิริยากับสายโซ่หลักหรือเกิดกับกิ่งก้านที่แยกออกมาอีกได้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



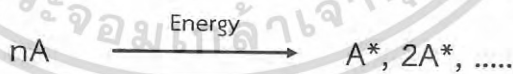
รูปที่ 2.15 การเกิดโคพอลิเมอร์แบบกิ่งก้าน

โดยกลไกในการเกิดปฏิกิริยาสามารถอธิบายได้ดังนี้
กำหนดให้

- A คือ แหล่งกำเนิดอนุมูลอิสระ
- B คือ โมเลกุลของมอนอเมอร์
- * คือ อนุมูลอิสระที่พร้อมเกิดพันธะ
- $B_m B_n$ คือ การเติบโตของสายโซ่โมเลกุลของมอนอเมอร์ที่มีความยาว 'm' และ 'n' หน่วยโมเลกุล
- X คือ สารละลายอื่นๆ สิ่งเจือปน ฯลฯ

1. กลไกในขั้นตอนการเริ่มต้น (Initiation)

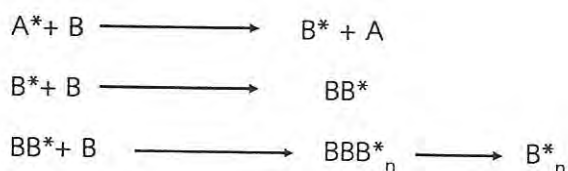
เป็นขั้นตอนในการเริ่มต้นการแตกตัวของอนุมูลอิสระ ซึ่งสัมพันธ์กับพลังงานที่ใส่เข้าไปเพื่อทำการแตกตัวหรือสร้างพันธะสำหรับการเกิดปฏิกิริยา พลังงานที่ใส่ไปนั้นเป็นพลังงานความร้อนจากการแผ่รังสีไม่ว่าจะเป็นรังสีอัลฟา (α -ray) เบต้า (β -ray) หรือ แกมมา (γ -ray) แต่อย่างไรก็ตามหากมีการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา พลังงานที่ต้องการใช้ในการแตกตัวหรือสร้างพันธะจะลดต่ำลง



รูปที่ 2.16 กลไกการแตกตัวให้อนุมูลอิสระในขั้นตอนเริ่มต้น

2. กลไกในขั้นตอนการเติบโตของสายโซ่ (Propagation)

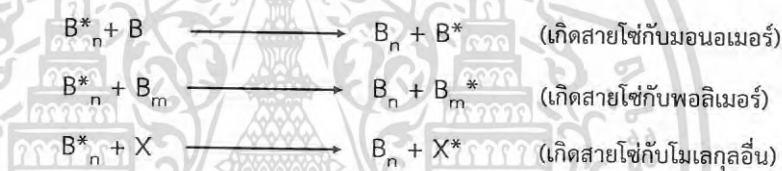
ในขั้นตอนนี้มอนอเมอร์ที่มีอนุมูลอิสระจะทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์ที่ยังไม่ถูกกระตุ้นให้มีอนุมูลอิสระด้วยพลังงานกระตุ้นที่ต่ำ ทำให้มีความเป็นไปได้มากที่จะเกิดปฏิกิริยาระหว่างมอนอเมอร์ทั้งชนิดเดียวกันและต่างชนิด ส่งผลให้ในขั้นตอนนี้ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว กลไกในขั้นตอนนี้เป็นการกำหนดระดับของการพอลิเมอร์ไรเซชัน



รูปที่ 2.17 กลไกการเติบโตของสายโซ่

3. กลไกในการถ่ายเทสายโซ่ (Chain Transfer Reaction)

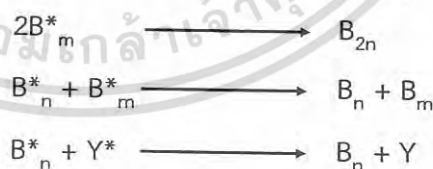
ปฏิกิริยานี้เป็นกลไกที่เกิดต่อเนื่องมาจากขั้นตอนการเติบโตของสายโซ่อนุมูลอิสระหนึ่งอะตอมที่ปลายของสายโซ่หลายสายได้เกิดพันธะใหม่กับโมเลกุลของมอนอเมอร์หรือสายโซ่ใกล้เคียง เกิดเป็นสายโซ่ยาวหรือเกิดเป็นกิ่งก้านในกลไกนี้เป็นตัวบ่งบอกระดับของปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันและอัตราในการเกิดกิ่งก้านของพอลิเมอร์ ในการเกิดสายโซ่กิ่งก้านมักจะเกิดที่อุณหภูมิสูงโดยปฏิกิริยาจะเกิดที่มอนอเมอร์เป็นกลุ่มหลายๆตัวจากสายโซ่ที่ไม่เกิดปฏิกิริยาแล้ว ซึ่งความยาวจะขึ้นอยู่กับจำนวนมอนอเมอร์ที่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้



รูปที่ 2.18 กลไกการถ่ายเทสายโซ่

4. กลไกในขั้นตอนการตัดสายโซ่ (Chain Termination)

สายโซ่จะไม่มี การเชื่อมพันธะต่อกันจากการที่อนุมูลอิสระไม่เพียงพอต่อการเกิดปฏิกิริยาที่ปลายของสายโซ่ หรือ จากการที่สายโซ่เจอกับสิ่งเจือปนต่างๆ หรือเกิดปฏิกิริยากับผนังของเครื่องปฏิกรณ์

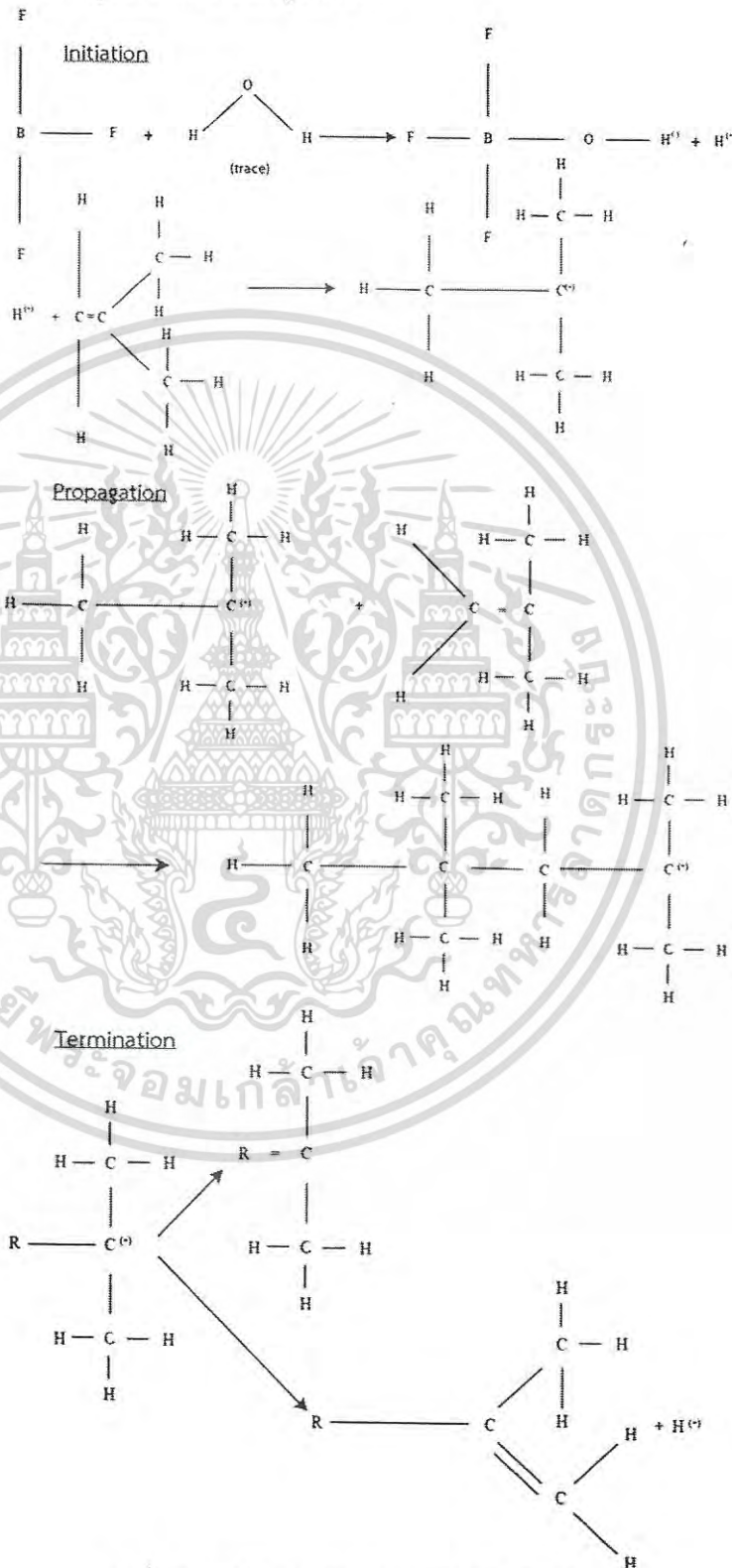


รูปที่ 2.19 กลไกการตัดสายโซ่

iii. Ionic Reaction ขั้นตอนนี้มีความคล้ายกับ chain reaction ที่เกิดปฏิกิริยาดำเนินไปโดยอนุมูลอิสระ แต่ในปฏิกิริยานี้ได้ใช้ อิเล็กตรอน หรือ โปรตอน ซึ่งเป็นสารที่มีประจุบวก และลบ อาจจะนำเอาตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมมาใช้ด้วยโดยทั่วไปแล้วจะใช้น้ำที่ปริมาณน้อยๆ ซึ่งมีส่วนสำคัญในการเกิดไอออนในเซชัน เนื่องจากปฏิกิริยาไม่สามารถเกิดได้ที่สภาวะแห้ง ตัวอย่าง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของ ionic addition reaction ในการเตรียมพอลิไอโซบิวทิลีนด้วยตัวเร่งโบรอนฟลูออไรด์แสดงได้ดังรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.20 ปฏิกิริยา ionic ของพอลิไอโซบิวทิลีน [5]

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.4 ความร้อนของปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน [11-14]

จากหัวข้อที่ 2.1-2.3 ได้แสดงให้เห็นถึงนิยามของพอลิเมอร์ ชนิดของโครงสร้าง และกลไกในการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน จะพบว่าเมื่อปฏิกิริยาดำเนินไปจนถึงช่วงการเติบโตของสายโซ่มอนอเมอร์แต่ละโมเลกุลจะเกิดพันธะเชื่อมต่อกันเป็นสายโซ่ยาว ซึ่งเมื่อมีการเกิดพันธะกันนั้นมอนอเมอร์จำเป็นที่จะต้องปล่อยพลังงานออกมาบางส่วนเพื่อทำให้อิเล็กตรอนมีระยะห่างที่เหมาะสมจึงจะเกิดการเชื่อมพันธะได้ พลังงานที่ปล่อยออกมาระหว่างการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันนั้นเรียกว่า “ความร้อนของปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (Heat of Polymerization Reaction)” ซึ่งโดยส่วนมาก พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจะเป็นแบบคายพลังงาน (Exothermic Reaction)

2.4.1 การวัดความร้อนของปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันจากการทดลอง

ในงานวิจัยได้มีการวัดความร้อนทางอ้อมที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันโดยการสังเกตจากการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิที่เวลาต่างๆ ดังแสดงในหัวข้อที่ 2.2 ดังนั้นในการคำนวณความร้อนจากกราฟสามารถคำนวณได้ โดยอาศัยสมมติฐานที่ว่า “ความร้อนจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันที่เกิดขึ้นถูกถ่ายเทไปยังวัสดุโดยรวม ทำให้เมื่อเกิดความร้อนขึ้น อุณหภูมิของวัสดุจึงเกิดการเปลี่ยนแปลง” ซึ่งสามารถอธิบายได้จากสมการทางเทอร์โมไดนามิกส์

$$\Delta H_{appearance} = \sum_{i=1}^n H \quad (2.1)$$

จากสมการที่ 2.1 จะเห็นได้ว่าพลังงานความร้อนที่คำนวณได้จากกราฟเป็นความร้อนปรากฏของปฏิกิริยา (Heat Appearance of Reaction) มีค่าเท่ากับผลรวมของความร้อนที่เกิดขึ้นในแต่ละวัสดุ (n) สำหรับในงานวิจัยมีอยู่สองชนิดคือ น้ำ และ สไตรีนมอนอเมอร์ การวัดปริมาณความร้อนสามารถทำได้จากผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ DSC โดยนำข้อมูลที่ได้มาพล็อตระหว่างพลังงานกับเวลา คำนวณพื้นที่ใต้กราฟนี้แล้วนำไปพล็อตกับอุณหภูมิจะได้เส้นสมการความจุความร้อนจำเพาะที่ขึ้นกับอุณหภูมิ $C_p(T)$ และนำไปคำนวณหาปริมาณความร้อนด้วยสมการทางเทอร์โมไดนามิกส์จากสมการที่ 2.2 เอนทัลปีของสารแต่ละชนิดสามารถหาได้โดยการหาอนุพันธ์เทียบกับอุณหภูมิที่สามารถหาได้จากกราฟ, โพรไฟล์ของอุณหภูมิ

$$\left(\frac{dH}{dT}\right)_p = C_p \quad (2.2)$$

$$dH = C_p dT \quad (2.3)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\int_0^{H_{rxn}} dH = \sum \int_{T_{start}}^{T_{max}} C_p(T) dT \quad (2.4)$$

$$\Delta H_{rxnapp} = \Delta H_{rxnno H_2O} + \Delta H_{H_2O} \quad (2.5)$$

$$\Delta H_{rxnno H_2O} = m_{pm} c_{ppm} \Delta T \quad (2.6)$$

$$\Delta H_{H_2O} = m_{H_2O} c_{pH_2O} \Delta T \quad (2.7)$$

โดยที่	
ΔH_{rxnapp}	คือ ความร้อนจากปฏิกิริยาที่วัดได้จากการทดลอง (J/g _{composite})
$\Delta H_{rxnno H_2O}$	คือ ความร้อนจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันกรณีไม่ผสมน้ำ (J/g _{polymer})
ΔH_{H_2O}	คือ ความร้อนสัมผัสที่ของน้ำ (J/g _{H₂O})
m_{pm}	คือ มวลของพอลิเมอร์ (g)
m_{H_2O}	คือ มวลของน้ำ (g)
c_{ppm}	คือ ค่าความจุความร้อนของพอลิเมอร์ (J/g ^{องศาเซลเซียส})
c_{pH_2O}	คือ ค่าความจุความร้อนของน้ำ (J/g ^{องศาเซลเซียส})
T_{start}	คือ อุณหภูมิเริ่มต้น (องศาเซลเซียส)
T_{max}	คือ อุณหภูมิสูงสุดที่เกิดปฏิกิริยา (องศาเซลเซียส)

2.4.2 การวัดความร้อนของปฏิกิริยาด้วยการคำนวณจากหมู่ฟังก์ชัน [15-16]

ความร้อนของปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันนั้นนอกจากจะหาได้จากวิธีข้างต้นแล้วในปัจจุบันวิธีการวัดปริมาณความร้อนได้พัฒนาไปอย่างมาก สำหรับวิธีที่ยกมาอธิบายและใช้ในการคำนวณความร้อนของปฏิกิริยาเพื่อเปรียบเทียบและยืนยันผลการวิจัยนี้ คือวิธีการคำนวณความร้อนของปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันจากหมู่ฟังก์ชัน ในการเกิดปฏิกิริยาของมอนอเมอร์ โดยทฤษฎีนี้มีพื้นฐานในการคำนวณคือ การปลดปล่อยความร้อนระหว่างการเกิดปฏิกิริยานั้นเกิดจากการที่มอนอเมอร์ปล่อยพลังงานออกมาก่อนที่จะเกิดพันธะ ซึ่งเกิด

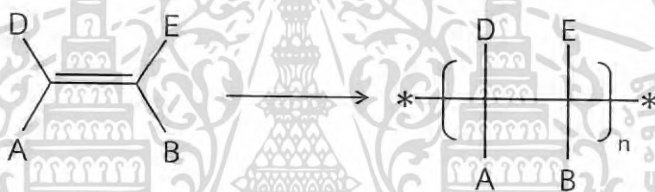
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูาตใหนำไปเผยแพร่ชยงนด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากพลังงานภายใน (Internal Energy U) ดังนั้นความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาสามารถคำนวณจากสมการทางเทอร์โมไดนามิกส์ในเทอมของพลังงานภายในดังสมการที่ 2.8

$$\Delta H = U + P\Delta V \quad (2.8)$$

ซึ่งเมื่อในกระบวนการไม่มีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรนั้นจะทำให้เทอมที่สองทางซ้ายมือมีค่าเท่ากับ 0 ทำให้พลังงานความร้อนจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันมีค่าเท่ากับพลังงานภายในของสารที่นำมาเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน

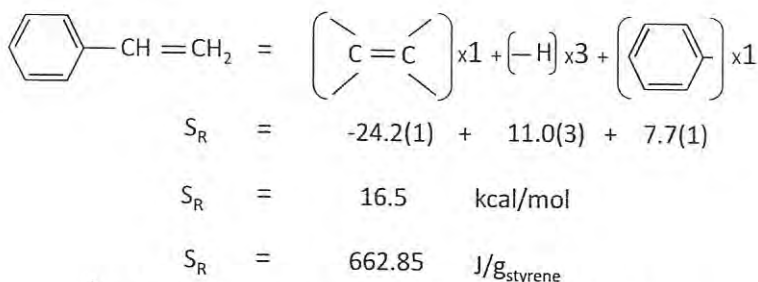
ในการคำนวณพลังงานภายในนั้นถูกคำนวณจากองค์ประกอบต่างๆในโมเลกุลของมอนอเมอร์ซึ่งในงานวิจัยของ Sudipta Roy ได้ทำการคำนวณค่าต่างๆของหมู่ฟังก์ชันในโครงสร้างโดยครอบคลุมมอนอเมอร์หลายชนิดเช่น โอลิฟินที่มีพันธะคู่หรือพันธะที่ไม่อิ่มตัวต่างๆ กรดคาร์บอกซิลิกและอนุพันธ์ ในเทอมของค่า S_R -Value โดยพิจารณาถึงรูปแบบโครงสร้างของมอนอเมอร์ในปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน



รูปที่ 2.21 แบบจำลองโครงสร้างของมอนอเมอร์และตำแหน่งที่ใช้ในการคำนวณ

พิจารณาการกำหนดค่า S_R ในแต่ละส่วนของมอนอเมอร์ดังนี้

โดยกำหนดให้ ตำแหน่ง $-A$ เป็นค่า S_R^1 $-B$ เป็นค่า S_R^2 $-D$ เป็นค่า S_R^3 $-E$ เป็นค่า S_R^4 และ พันธะคู่เป็นค่า S_R^5 ตามลำดับ ซึ่งปริมาณพลังงานความร้อนจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันในรูปเครื่องหมายลบสำหรับปฏิกิริยานี้คือ $(S_R^1 + S_R^2 + S_R^3 + S_R^4 + S_R^5)$ โดยที่ค่า S_R ของตำแหน่งโครงสร้างและอะตอมต่างๆจะแสดงไว้ในภาคผนวก ค. ซึ่งสามารถคำนวณค่าปริมาณพลังงานความร้อนได้ดังวิธีการคิดที่ได้แสดงไว้ด้านบน สำหรับในงานวิจัยนี้ใช้มอนอเมอร์ในการเกิดปฏิกิริยา คือ สไตรีนมอนอเมอร์ ดังนั้นตัวอย่างในการคำนวณโดยแสดงเป็นค่าตัวเลขค่าพลังงานความร้อนจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของสไตรีนมอนอเมอร์ซึ่งจะนำไปเปรียบเทียบกับผลการคำนวณพลังงานความร้อนจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันที่คำนวณในหัวข้อ 2.4.1 ในภายหลัง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ โดยตัวอย่างการคำนวณค่าพลังงานความร้อนด้วย S_R -Value ประโยชน์ด้านการคำนวณ ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.5 กระบวนการเผาผนึกของโลหะ [17-18]

การเผาผนึกคือกระบวนการที่ทำให้ผงของโลหะที่รวมกันแน่นหนาเปลี่ยนสภาพเป็นของแข็งที่สามารถเชื่อมติดกันได้ที่อุณหภูมิต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมเหลวของโลหะ ระหว่างการเผาผนึกจะเกิดพันธะเชื่อมถึงกันโดยการแพร่และกลไกการถ่ายเทระหว่างอะตอม ผลที่ได้จากการเผาผนึกคือวัสดุพรุนที่มีความแข็งแรง

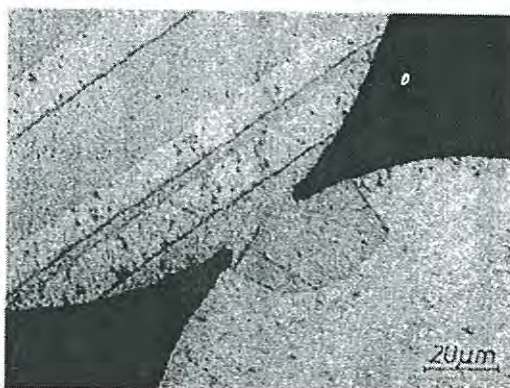
2.5.1 กลไกพื้นฐานของการเกิดการเผาผนึก

กลไกการเกิดการเผาผนึกของโลหะมีด้วยกันหลายรูปแบบตามโครงสร้างและส่วนผสม ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงกลไกการเผาผนึกที่เกิดขึ้นในของแข็งสำหรับวัสดุเนื้อเดียว (Solid State Sintering of Homogeneous Material) คือการเกิดการเผาผนึกของโลหะเพียงชนิดเดียวซึ่งมีความคล้ายคลึงกับกลไกในการเกิดรูพรุนของงานวิจัยชิ้นนี้

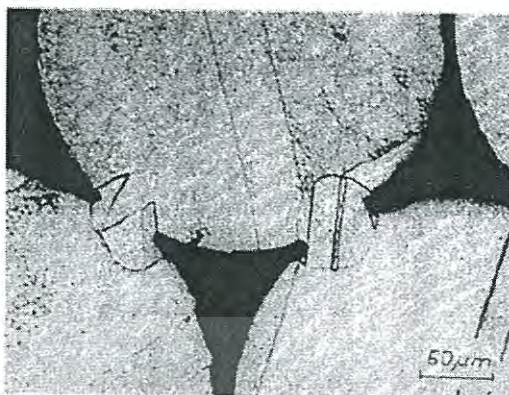
การเผาผนึกของวัสดุเนื้อเดียวเกิดขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของช่องว่างระหว่างอนุภาค โดยกระบวนการเผาผนึกจะเกิดขึ้นสองขั้นตอนแตกต่างกัน ขั้นตอนแรกคือสถานะเริ่มต้นที่อนุภาคเกิดการเชื่อมต่อกัน (จากการเกิดแบบ Neck Formation) ระหว่างพื้นที่ว่างของอนุภาค ขั้นตอนที่สองคือการเกิดรูพรุนและการหดตัวของรูพรุน ซึ่งทั้งสองขั้นตอนนั้นมวลอนุภาคที่ทำการเผาผนึกจะหดตัวและในสถานะแรกระยะจุดศูนย์กลางระหว่างพื้นที่ว่างของอนุภาคลดลง และในขั้นตอนสุดท้ายรูพรุนทั้งหมดจะหดตัวลง ดังรูปที่ 2.23



รูปที่ 2.23 กลไกของการเผาผนึกในโลหะ A) การเผาผนึกในขั้นตอนแรก B) การเผาผนึกในขั้นตอนสุดท้าย [18]



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



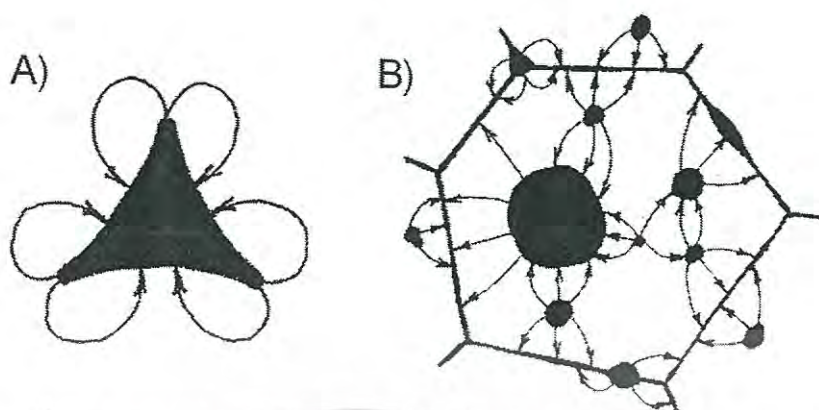
รูปที่ 2.24 การเกิดคอขวดระหว่างการเผาผนึกของทองแดง [18]

พันธะระหว่างอนุภาคต้องการการถ่ายเทของวัสดุจากข้างในมายังจุดหรือพื้นที่ที่สัมผัสกับอีกอนุภาคหนึ่ง รูปพรุนที่รูปร่างกลมและการหดตัวของรูปพรุน ต้องการการถ่ายเทวัสดุจากปริมาตรที่ควมแน่นจนถึงพื้นผิวของรูปพรุนและมุมที่ผิวรูปพรุนจากอ่อนไปจุดที่แหลม

ในส่วนของ การเกิดปฏิกิริยาที่ของเหลวนั้นกลไกการถ่ายเทที่แตกต่างกัน 5 ชนิดสามารถเกิดขึ้นได้ในการเผาผนึก

- การแพร่ของปริมาตร
- การแพร่ของของเกรน
- การแพร่ของพื้นผิว
- การไหลแบบหนืดและพลาสติก (เกิดจากแรงตัวผิวหรือแรงเฉือนภายใน)
- การระเหยหรือการควมแน่นของอะตอมบนพื้นผิว

กลไกที่มีอิทธิพลมากที่สุดระหว่างปฏิกิริยาการเผาผนึก การเติบโตของคอขวด การเปลี่ยนแปลงของอนุภาคทรงกลมระหว่างเกิดปฏิกิริยานั้นสามารถสรุปได้ว่า ในขั้นตอนแรกของการเผาผนึกการแพร่ของปริมาตรคือกลไกที่มีความเด่นชัดมากที่สุดสำหรับอนุภาคของโลหะทรงกลม และรองลงมาคือการไหลแบบหนืดของอนุภาคแก้ว และในขั้นตอนแรกนั้นการแพร่ของปริมาตรไม่ได้โดดเด่นแค่อนุภาคโลหะทรงกลมอย่างเดียวเท่านั้น รูปร่างอื่นๆและผงโลหะที่ถูกอัดแน่นก็มีผลโดดเด่นเช่นเดียวกัน ในขั้นตอนสุดท้ายของการเผาผนึก การแพร่ของปริมาตรก็ยังเป็นกลไกที่มีนัยสำคัญอย่างไม่ต้องสงสัย ในการอธิบายปรากฏการณ์ของรูปพรุนรูปร่างกลม รูปที่ 2.25 แสดงให้เห็นพื้นที่ว่างสามารถถูกเติมเต็มด้วยอนุภาคจากโลหะจากมุมแหลมเปลี่ยนเป็นแบบแบนบางของพื้นผิวรูปพรุนได้อย่างไร



รูปที่ 2.25 แผนภาพแสดงถึงการเติมเต็มพื้นที่ว่างด้วยมุมแหลมของอนุภาคโลหะ

- A) การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของมุมแหลมกลายเป็นแผ่นเรียบ และ
 B) จากรูพรุนขนาดเล็กไปถึงรูพรุนขนาดใหญ่ที่อยู่ใกล้และขอบเกรน

2.5.2 ตัวแปรสำคัญในกระบวนการเผาผนึก

ในกระบวนการเผาผนึก ตัวแปรที่มีความสำคัญในกระบวนการได้แก่

- อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในกระบวนการ
- โครงสร้างรูปร่างเรขาคณิตของผงอนุภาค
- องค์ประกอบหรือชนิดต่างๆในผงโลหะผสม
- ความหนาแน่นของผงโลหะที่อัดกัน
- องค์ประกอบของบรรยากาศในเตาหลอมปฏิบัติการเผาผนึก

อุณหภูมิ และ เวลาที่ใช้ในกระบวนการ

อุณหภูมิของการเผาผนึกยิ่งสูงมากเท่าไรเวลาที่ใช้ในกระบวนการเพื่อที่จะได้ระดับของพันธะที่เชื่อมกันในผงโลหะตามที่ต้องการก็ยิ่งสั้นลงเท่านั้น แต่ในทางปฏิบัตินั้นการอุณหภูมิสูงมากอาจจะทำให้ได้ประสิทธิภาพในการผลิตที่ดี แต่ก็ทำให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายเยอะในการดำเนินงานรวมถึงการซ่อมบำรุงเตาหลอม ตัวอย่างเช่นในกรณีของการเผาผนึกเหล็กที่เวลา 15-60 นาที อาจจะต้องใช้อุณหภูมิถึง 1120 – 1150 องศาเซลเซียส เลยทีเดียว

โครงสร้างรูปร่างของเรขาคณิตของผงอนุภาค

ในการกระบวนการเผาผนึกนั้นผงอนุภาคที่ละเอียดหรือมีรูพรุนภายในสูง (มีพื้นผิวจำเพาะสูง) จะเกิดการเผาผนึกได้เร็วกว่าผงอนุภาคที่พื้นผิวไม่เรียบ แต่อย่างไรก็ตามผงอนุภาคที่เรียบก็ยากแก่การทำให้แน่นกว่าผงอนุภาคที่พื้นผิวไม่เรียบ ซึ่งอนุภาคผิวเรียบจะต้องมีการหดตัวที่มากกว่าอนุภาคผิวไม่เรียบ

องค์ประกอบหรือชนิดต่างๆในผงโลหะผสม

องค์ประกอบของผงโลหะผสมถูกเลือกและปริมาณสัดส่วนจากคุณสมบัติทางกายภาพที่ต้องการของผลิตภัณฑ์และเพื่อควบคุมขนาดหรือมิติที่เปลี่ยนแปลงระหว่างกลไกการเผาผนึก ตัวอย่างเช่นการเผาผนึกในกระบวนการผลิตโลหะผสม (Alloy) ที่อุณหภูมิช่วง 1120 – 1150 องศาเซลเซียส จะเกิดขึ้นค่อนข้างช้า (ยกเว้นเหล็กและคาร์บอน) และการรวมกันเป็นเนื้อเดียวของโลหะจะไม่สามารถทำได้ แต่หากผสมผงโลหะที่สามารถกลายเป็นของเหลวได้ที่อุณหภูมิในการเผาผนึก (เช่น ผงทองแดงผสมกับเหล็ก) จะสามารถเกิดพันธะขึ้นระหว่างอนุภาคทำให้กลายเป็นสารเนื้อเดียวได้และยังช่วยเร่งกระบวนการเผาผนึกให้เร็วขึ้นอีกด้วย

ความหนาแน่นของผงโลหะที่อัดกัน

ความหนาแน่นของผงโลหะที่อัดกันยิ่งมาก พื้นที่สัมผัสทั้งหมดระหว่างอนุภาคก็มีค่ามากขึ้นตามไปด้วย และยังช่วยให้ประสิทธิภาพของการเชื่อมพันธะและโลหะผสมในระหว่างกระบวนการเผาผนึกดีขึ้น นอกจากนี้ในกระบวนการนี้ยังสามารถทำให้เพิ่มขึ้นได้โดยการรบกวนผลึกแบบแลกทิสเนื่องจากการเสียรูปแบบพลาสติกระหว่างการเกิดกระบวนการอัดแน่นได้

องค์ประกอบของบรรยากาศในเตาหลอมปฏิบัติการเผาผนึก

ภายในเตาหลอมจำเป็นที่จะต้องบรรจุก๊าซลงไปเพื่อป้องกันปฏิกิริยาอื่นที่ไม่ต้องการที่อาจจะเกิดขึ้นในระหว่างการเกิดปฏิกิริยา เช่น เพื่อป้องกันการเกิดออกซิเดชันของผลิตภัณฑ์และลดการเกิดสารออกไซด์ตกค้างให้น้อยที่สุด หรือ เพื่อป้องกันการเกิด ดีคาร์บอนไนเซชัน (Decarbonization) ของวัสดุที่มีคาร์บอนเป็นส่วนผสมและป้องกันการเกิดคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) ของวัสดุที่ไม่มีคาร์บอน ซึ่งก๊าซส่วนใหญ่ที่ใช้ก็คือ H_2 N_2 CH_4 CO และ CO_2

2.6 ปริมาณรูพรุนภายในวัสดุ [19-21]

ในการคำนวณรูพรุนภายในวัสดุจะใช้วิธีการวัดปริมาตรของเหลวที่วัสดุสามารถดูดซึมเข้าไปได้เทียบกับปริมาตรของตัวอย่าง ซึ่งการคำนวณที่ใช้นั้นเป็นการวัดปริมาตรรูพรุนของวัสดุทางอ้อมโดยใช้น้ำเป็นสารสำหรับให้วัสดุดูดซึม เนื่องจากวัสดุพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันที่เข้ากันได้กับน้ำคือ พอลิเมทิลเมธาอะคริเลต และสมการที่ใช้เป็นไปดังสมการที่ 2.9

$$P = \frac{(m - m_0)}{\rho_{water} V_{sample}} \quad (2.9)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โดยที่

P	คือ ปริมาณรุกรานของวัสดุ (%)
m_0, m	คือ มวลของก่อนและหลังนำไปแช่น้ำ (g)
ρ_{water}	คือ ความหนาแน่นของน้ำที่ใช้แช่ (g/cm^3)
V_{sample}	คือ ปริมาตรของตัวอย่าง (cm^3)

2.7 ความแข็งของวัสดุ [22-23]

ความแข็ง คือ คุณสมบัติของวัสดุที่สามารถต้านทนหรือทนต่อการเสียรูปพลาสติก โดยปกติเกิดจากการทำให้เป็นรอยจากการกด อย่างไรก็ตามความแข็งอาจรวมถึง ความต้านทานต่อการตัด การขีด และการดัด

การวัดค่าความแข็งนั้น ต้องเข้าใจก่อนว่าความแข็งไม่ใช่คุณสมบัติเนื้อแท้ของวัสดุที่กำหนดได้ด้วยความจำกัดความที่แน่นอนบนหน่วยพื้นฐานของมวล ความยาว และเวลา ค่าคุณสมบัติความแข็งคือผลของการวัดที่ผู้ทำการทดสอบกำหนด ซึ่งความแข็งของวัสดุได้ถูกประเมินมาอย่างยาวนาน โดยความต้านทานต่อการขีดและการดัดตัวอย่างเช่น วัสดุ B ขีดวัสดุ C เป็นรอยแต่ไม่สามารถขีดวัสดุ A เป็นรอย ในทางกลับกันวัสดุ A ขีดวัสดุ B เป็นรอยเล็กน้อยแต่ขีดวัสดุ C ได้เป็นรอยอย่างมาก

การทดสอบความแข็งโดยการเปรียบเทียบมีข้อจำกัดในการใช้งานและไม่สามารถให้ข้อมูลตัวเลขที่แม่นยำหรือกำหนดสเกลเฉพาะสำหรับวัสดุและโลหะสมัยใหม่ วิธีโดยปกติทั่วไปเพื่อหาค่าความแข็งคือ การวัดจากความลึกหรือพื้นที่ของรอยกดที่เหลือทิ้งไว้จากหัวกดที่มีรูปร่าง ภาระ (Load) และเวลาที่เจาะจง วิธีมาตรฐานหลัก 3 มาตรฐานสำหรับการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความแข็งและขนาดของรอยกด คือ ร็อคเวลล์ บริเนลล์ และวิกเกอร์ แต่ยังมีวิธีวัดโดยใช้สเกลอื่น ๆ นอกเหนือจากมาตรฐานทั้งที่ยอมรับกัน ซึ่งวิธีการวัดนี้ก็ได้นำมาใช้ในงานวิจัยนี้เช่นกัน คือ การทดสอบความแข็งแบบ Shore (Shore Hardness Test)

- การทดสอบความแข็งแบบ Shore

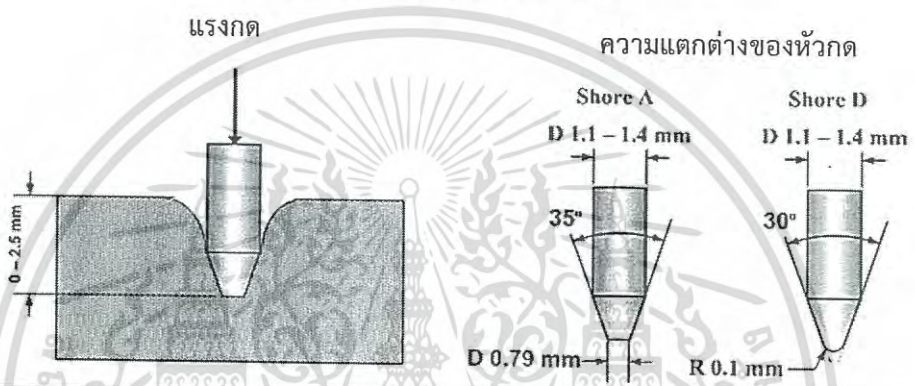
สำหรับการทดสอบความแข็งด้วย Shore นั้นมีด้วยกัน 2 วิธีคือ Shore Sclerocscope และ Durometer ในงานวิจัยนี้ใช้การทดสอบด้วย Durometer เพราะวัสดุในงานวิจัยไม่แข็งถึงขนาดที่จะต้องใช้ Sclerocscope ซึ่งเป็นการวัดความแข็งในเทอมของความยืดหยุ่นของวัสดุ ทดสอบโดยปล่อยหัวค้อนปลายเพชร แต่ Durometer นั้นเป็นการทดสอบด้วยการใช้หัวชุกกดแข็ง สปริงที่ได้ปรับค่าอย่างถูกต้อง ความลึกของหัวกด และแผ่นกด หัวกดจะถูกติดตั้งตรงกลางของฐานกดและมีระยะยึดตัว 2.5 มม. จากผิวของฐาน ตำแหน่งระยะยึดตัวเต็มที่เข็มชี้แสดงค่าศูนย์ เมื่อหัวกดถูกกดจนกระทั่งแนบติดผิวหน้าฐานกด ตัวบ่งชี้แสดงค่า 100 ดังนั้นทุกๆจุดของ Shore จะมีค่าเท่ากับระยะกด 0.0025 มม.

โดย การทดสอบความแข็งของพลาสติกส่วนมาก จะวัดด้วยการทดสอบนี้หรือการทดสอบ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ความแข็งรีอคเวลล์ ทั้งสองวิธีวัดความต้านทานของพลาสติกต่อรอยกด ทั้งสองสเกลให้ค่าความแข็งตามหลักการที่ไม่เกี่ยวข้องกับคุณสมบัติและคุณลักษณะพื้นฐาน ความแข็ง Shore A หรือ D เป็นวิธีที่นิยมใช้สำหรับยาง อีลาสโตเมอร์ และใช้กับพลาสติกอ่อน เช่น พอลิเอทิลีน ฟลูออโรพอลิเมอร์ และไนลิล Shore A ใช้สำหรับยางอ่อน ในขณะที่ Shore D ใช้สำหรับยางที่แข็งกว่า ความแข็ง Shore A ค่าความแข็งสัมพันธ์ของวัสดุยืดหยุ่น เช่น ยางหรือพลาสติกอ่อน แต่ในงานวิจัยวัสดุพูนที่สังเคราะห์ขึ้นได้นั้นมีความแข็งพอสมควรจึงเลือกใช้สเกลที่เหมาะสมอย่าง Shore D Durometer

Durometer hardness test



เครื่องทดสอบ - Shore Durometer Type A and D

Durometer	แผ่นกด (Indenting foot)	ภาระที่ใช้ (กรัม)
Type A	แท่งเหล็กชุบแข็ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.1 มม. - 1.4 มม. ปลายรูปกรวย มุม 35 องศา ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.79 มม.	822
Type D	แท่งเหล็กชุบแข็ง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.1 มม. - 1.4 มม. ปลายรูปกรวย มุม 30 องศา รัศมีปลาย 0.1 มม.	4,550

รูปที่ 2.26 หลักการของการทดสอบความแข็งแบบ Shore ด้วย Durometer [22]

2.8 การตรวจสอบโครงสร้างร่างแหของวัสดุ [24]

หลังจากที่ขึ้นรูปวัสดุพูนเสร็จแล้ว เมื่อสัมผัสกับผิวของวัสดุพบว่าเนื้อของวัสดุค่อนข้างที่จะมีความแข็งสูง จึงเกิดข้อสันนิษฐานว่าโครงสร้างของมอนอเมอร์ที่เกิดการพอลิเมอไรเซชันอาจจะเป็นโครงสร้างแบบร่างแหซึ่งให้ความแข็งแรงสูง ดังนั้นเพื่อพิสูจน์ว่าความแข็งที่เกิดขึ้นมาจากโครงสร้างแบบร่างแหระหว่างการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันหรือไม่นั้นจึงได้ตรวจสอบโดย การ Reflux สารด้วยการต้มใน Xylene ตามมาตรฐานการวัดระดับของการพอลิเมอไรเซชัน ASTM 2765 การตรวจสอบปริมาณการเกิดโครงสร้างแบบร่างแหนั้น ตรวจสอบโดยการวัดปริมาณเจลที่เกิดจากโครงสร้างร่างแหภายในวัสดุหลังจากการสกัดด้วยตัวทำละลายเช่น เดคาไฮโดรแนฟทาลิน (Decahydronaphthalene) หรือ ซิลิน (Xylene) โดยมีทฤษฎีในการคำนวณดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\% \text{ Extract} = \frac{(\text{น้ำหนักของสารที่หายไประหว่างการสกัด})}{(\text{น้ำหนักเริ่มต้นของสาร-น้ำหนักของสารเพิ่มเนื้อ})} \times 100 \quad (2.10)$$

หรือสามารถเขียนเป็นตัวย่อได้ดังนี้

$$\% \text{ Extract} = \frac{(W_0 - W_1)}{(W_0 - W_F)} \times 100 \quad (2.11)$$

เมื่อ

W_0 คือ น้ำหนักของสารและตะแกรงก่อนทำการสกัด

W_1 คือ น้ำหนักของสารและตะแกรงหลังทำการสกัด

W_F คือ น้ำหนักของสารเพิ่มเนื้อ (Filler)

ในกรณีที่สารที่นำมาทดสอบไม่มีสารเพิ่มเนื้อดังเช่นในงานวิจัยนี้ สมการที่ 2.11 จะลดรูปลงเหลือ

$$\% \text{ Extract} = \frac{(W_0 - W_1)}{W_0} \times 100 \quad (2.12)$$

และปริมาณของเจลที่หลงเหลือจากการสกัดหาได้จากสมการที่ 2.13

$$\text{ปริมาณเจล} = 100 - \% \text{ Extract} \quad (2.13)$$

2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยของ S. Roy [15] ได้ศึกษาการคำนวณหาพลังงานความร้อนของปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันด้วยวิธีการคำนวณจากการกระจายตัวของหมู่ฟังก์ชันภายในโมเลกุลของมอนอเมอร์ เนื่องจากในปัจจุบันปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันได้มีการพัฒนามอนอเมอร์ที่ใช้ในการสร้างพอลิเมอร์หลากหลายชนิดมากขึ้น ดังนั้นการที่สามารถทำนายความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาได้อย่างแม่นยำนั้น ทำให้ผู้ควบคุมการผลิตสามารถควบคุมให้กระบวนการดำเนินได้อย่างราบรื่น หรือควบคุมสมบัติของพอลิเมอร์ให้ได้ตามที่ต้องการ ดังนั้น Roy จึงได้ศึกษาถึงความร้อนของปฏิกิริยาด้วยหมู่ฟังก์ชันภายในโมเลกุลมอนอเมอร์ โดยมีทฤษฎีพื้นฐานจากการเชื่อมพันธะกันของอิเล็กตรอนจำเป็นที่จะต้องลดค่าระดับพลังงานลงมาเพื่อเกิดพันธะ ในขณะที่เองก็จะปล่อยความร้อนออกมาซึ่งความร้อนที่เกิดขึ้นมาเทียบกับสมการทางเทอร์โมไดนามิกส์แล้วจะได้ว่า พลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นหรือเอนทัลปีมาจากการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายในโมเลกุลของมอนอเมอร์ โดยค่าที่ใช้ในการบ่งบอกถึงปริมาณความร้อนคือค่า S_R -Value ซึ่งเป็นตัวแปรที่กำหนดขึ้นมาเพื่อแทนถึงความร้อนจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของกลุ่มที่เฉพาะเจาะจงภายในมอนอเมอร์ทำให้พลังงานความร้อนจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันที่มีความแตกต่างกันเมื่อมอนอเมอร์เป็นคนละชนิดกัน โดยค่า S_R นั้นเป็นค่าที่ได้มาจากความสัมพันธ์ของความร้อนจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันจากระบบพอลิเมอร์จำนวนมากมายซึ่งได้จากทฤษฎีและการทดลอง นำมาทำให้เป็นรูปอย่างง่ายซึ่งสามารถใช้ในการคำนวณได้สะดวก โดยค่า S_R นี้สามารถใช้ได้กับพอลิเมอร์สองชนิดคือ สารประกอบโอเลฟินที่มีพันธะคู่หรือพันธะไม่อิ่มตัวต่างๆ กับ กรดคาร์บอกซิลิกและอนุพันธ์

งานวิจัยของ F. Hernández-Sánchez [26] ได้ศึกษาการหาค่าความจุความร้อนจำเพาะของพอลิเมอร์โดยใช้เครื่อง DSC ซึ่งสามารถวัดค่าต่างๆได้อย่างรวดเร็วเช่น ค่าความจุความร้อน ค่าพลังงานที่ใช้ในการหลอมเหลว อุณหภูมิที่จุดหลอมเหลว เป็นต้น แต่ความแม่นยำในการวัดนั้นถูกจำกัดโดยการเทียบความสูงของพีคที่ได้จากตัวอย่างที่ศึกษากับสารอ้างอิง ซึ่งเทคนิคที่ใช้ในงานวิจัยชิ้นนี้นั้นได้เสนอวิธีการตรวจวัดด้วย DSC ที่มีความรวดเร็วและแม่นยำสูงเนื่องจากศึกษาถึงพื้นที่ของพีคที่ได้จากการวัด ซึ่งสะดวกกว่าการวัดความต่างของความสูงพีคตัวอย่างและอ้างอิง และที่สำคัญวิธีที่ใช้ในงานวิจัยชิ้นนี้ไม่จำเป็นต้องใช้สารอ้างอิงในการทดสอบ โดยการทดลองได้ใช้วิธีการอ้างอิงจากสัญญาณเริ่มต้นของเทอร์โมแกรม ซึ่งเป็นการสะท้อนการตอบสนองของสัญญาณในช่วงรอยต่อของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ สารตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบจะดำเนินการภายใต้ภาวะอุณหภูมิคงที่และตรวจจับเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นไปจากเดิม 1 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองพบว่าความแม่นยำในการวัดค่าความจุความร้อนขึ้นกับการตั้งค่าในการสอบเทียบของสารอ้างอิงที่ใช้ในเครื่อง DSC เช่น อินเดียม ตะกั่ว หรือ ดีบุก เป็นต้น ซึ่งสารอ้างอิงที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับช่วงของอุณหภูมิที่จะใช้ในการทดลอง

บทที่ 3

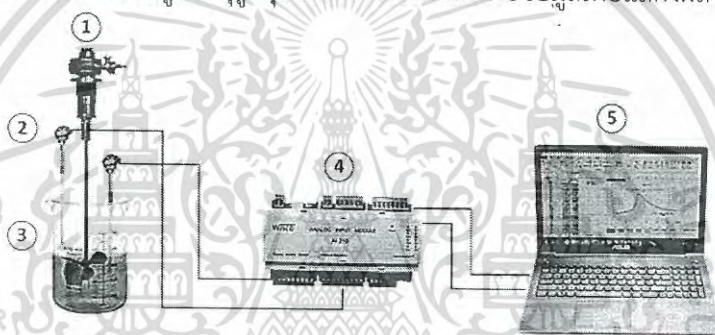
สารเคมี อุปกรณ์ และ วิธีการทดลอง

3.1 วัสดุและสารเคมี

1. พอลิเมทิลเมทาคริเลต (Polymethylmethacrylate, PMMA) แบบผง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคตั้งแต่ 20-200 ไมครอน
2. สไตรีนมอนอเมอร์ (Styrene Monomer) จาก
3. น้ำกลั่น

3.2 อุปกรณ์การทดลองและเครื่องมือในการวิเคราะห์

1. ชุดอุปกรณ์ในการขึ้นรูปวัสดุพูนและทำการวัดและเก็บข้อมูลเพื่อแสดงผล



รูปที่ 3.1 อุปกรณ์สร้างวัสดุพูนและการต่อสัญญาณเพื่อรับและเก็บข้อมูลอุณหภูมิ

1. เครื่องปั่นกวน 2. เทอร์โมคัปเปิลชนิด K 3. แม่พิมพ์หรือแม่แบบ
4. Datalogger และ 5. คอมพิวเตอร์

2. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) จากบริษัท ZEISS รุ่น MA10



รูปที่ 3.2 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

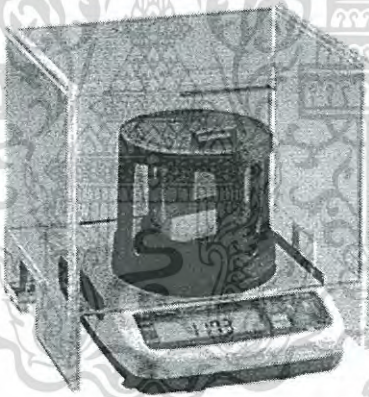
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. เครื่อง Differential Scanning Calorimetry (DSC) จากบริษัท METTLER TOREDO วิเคราะห์ตัวอย่างในช่วงอุณหภูมิ 50-200 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการเพิ่มอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส/นาที



รูปที่ 3.3 เครื่อง Differential Scanning Calorimetry

4. เครื่อง Electronics Densimeter จากบริษัท Alfa Mirage รุ่น MD 200S



รูปที่ 3.4 เครื่องวัดความหนาแน่นและปริมาตรชิ้นงาน

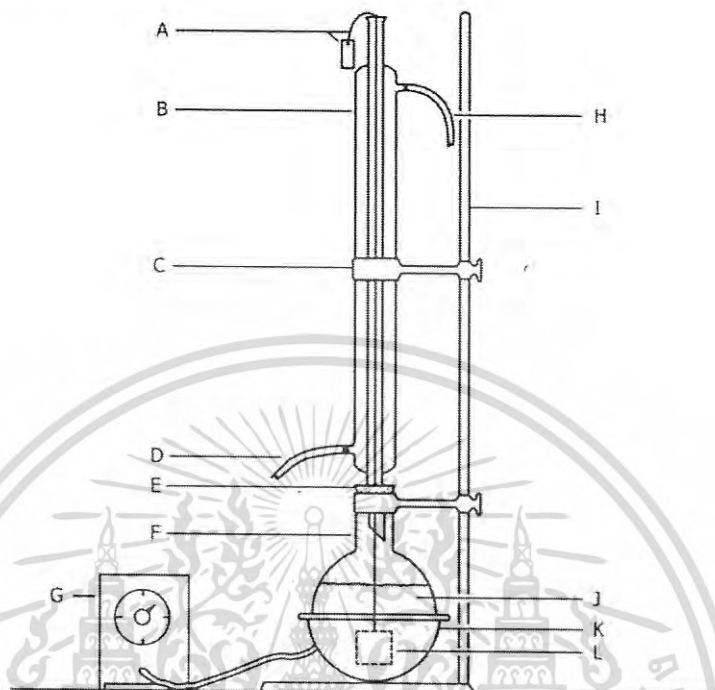
5. เครื่อง Durometer สำหรับวัดความแข็ง (Shored D scale hardness test)



รูปที่ 3.5 เครื่องวัดความแข็งของวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

6. ชุดการทดลองหาระดับการพอลิเมอไรเซชัน



รูปที่ 3.6 ชุดอุปกรณ์การ Reflux หาระดับของการพอลิเมอไรเซชัน

A – ป้ายชื่อของสารที่ใช้ทดลอง, B – เครื่องควบแน่น, C – ที่จับเครื่องควบแน่น, D – สายน้ำสำหรับการควบแน่นขาเข้า, E – จุกปิดขวดกั้นกลม, F – ขวดกั้นกลม, G – หม้อแปลงปรับแรงดันไฟฟ้า, H – สายน้ำสำหรับการควบแน่นขาออก, I – ขาตั้ง, J – สารที่นำมาใช้สกัด, K – เตาให้ความร้อน, L – ตะแกรงกรองขนาด 120 mesh สำหรับบรรจุตัวอย่าง

3.3 ขั้นตอนการทดลอง

3.3.1 ขั้นตอนในการผสม


1. ผสมผงอนุภาค PMMA ขนาดเล็กกับน้ำกลั่นที่ปริมาณต่างๆดังนี้ 0, 25, 31, 50, 57 and 80 wt% ในบีกเกอร์ดังแสดงได้ในรูปที่ 3.1 และนำไปปั่นจนเป็นระยะเวลาประมาณ 30 นาที
2. หลังจาก 30 นาที ผสมผงอนุภาค PMMA ขนาดใหญ่ในภาชนะที่ใช้เป็นแม่พิมพ์กับสไตรีนมอนอเมอร์และนำไปปั่นจนเป็นเวลา 90 วินาที
3. เทผง PMMA ที่ผสมน้ำกลั่นในข้อ 1 ลงในข้อ 2 และปั่นจนอย่างรวดเร็วเป็นเวลาประมาณ 20 วินาที
4. จุ่มเทอร์โมคัปเปิลซึ่งต่อกับ Datalogger ในตำแหน่งตรงกลางของแม่พิมพ์เพื่อ

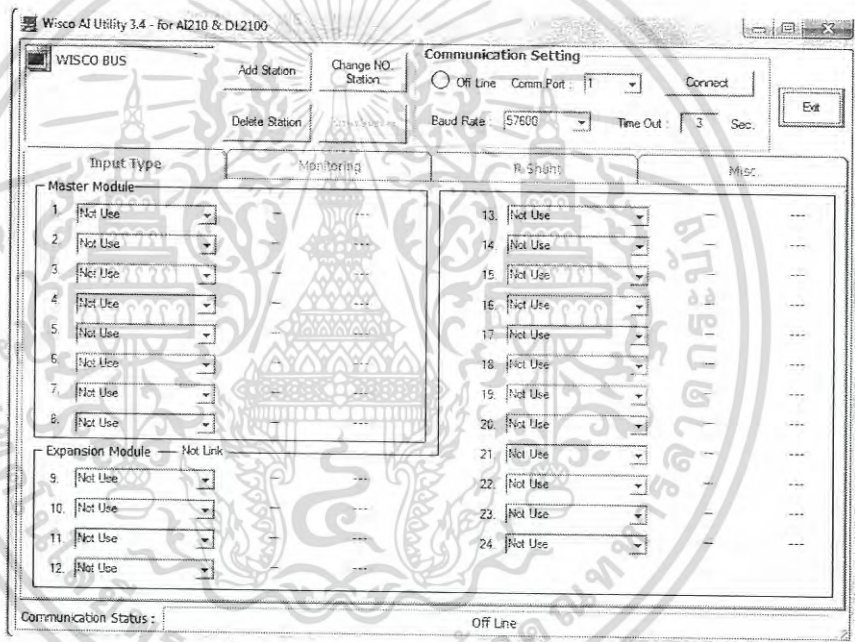
เก็บข้อมูลอุณหภูมิในการดำเนินไปของปฏิกิริยาและนำไปวิเคราะห์ผลของปริมาณน้ำต่อไป

3.3.2 การใช้ซอฟต์แวร์สำหรับ Datalogger เพื่อแสดงผลและบันทึกข้อมูล

ในการใช้ Datalogger นั้นจำเป็นที่จะต้องมียซอฟต์แวร์เพื่อรับข้อมูล และแปลงสัญญาณข้อมูลที่ได้จาก Datalogger บนจอคอมพิวเตอร์และบันทึกเป็นไฟล์นามสกุล .txt ซึ่งไฟล์ข้อมูลนั้นจะนำมาวิเคราะห์ต่อยด้วยโปรแกรม Microsoft Excel ส่วนซอฟต์แวร์ที่จะแสดงผลนั้นมีสองโปรแกรมที่ต่อเนื่องกันคือ AI Utility 3.4 และ OD04 2.7

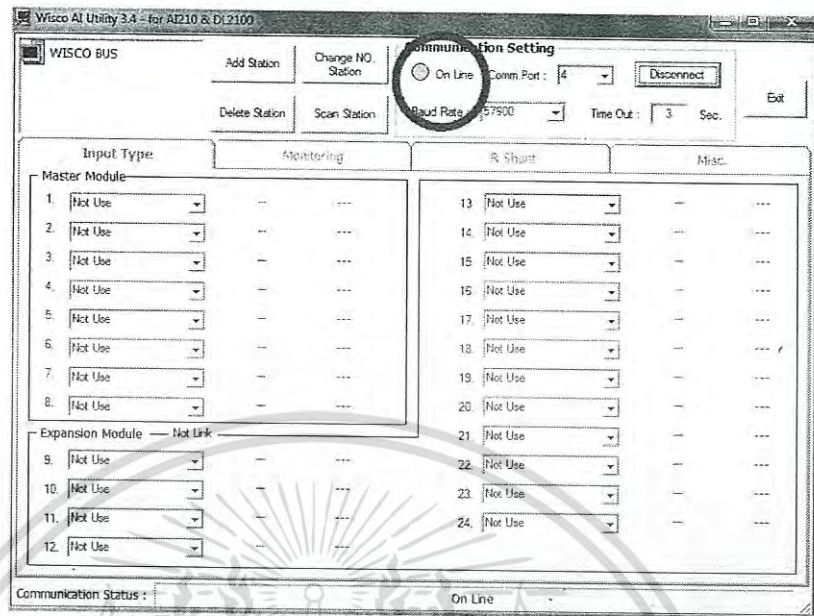
- การใช้งานโปรแกรม AI Utility 3.4

1. เปิดโปรแกรม AI Utility 3.4  จะพบหน้าต่างโปรแกรมลักษณะดังรูปที่ 3.6



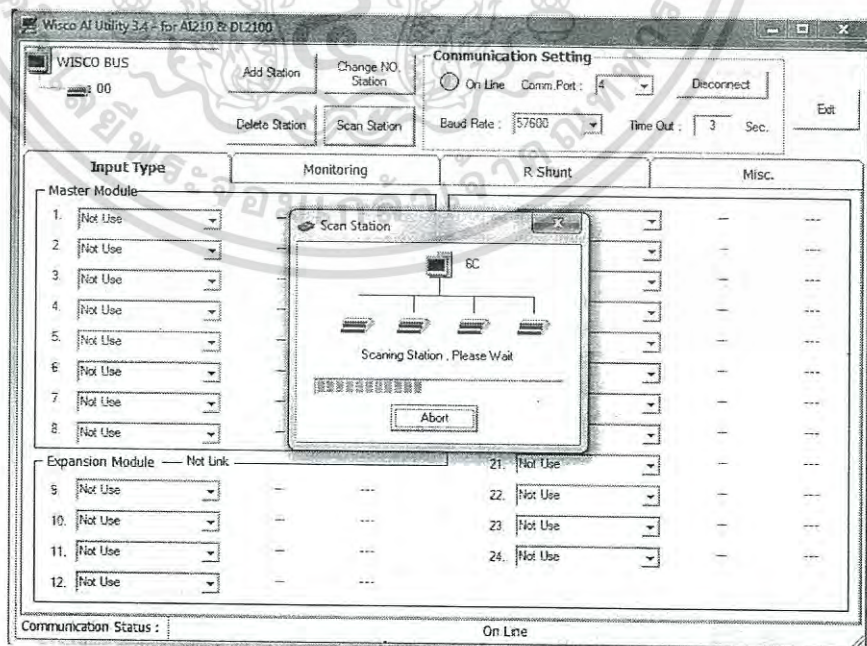
รูปที่ 3.7 หน้าต่างของโปรแกรม AI Utility 3.4

2. จะสังเกตเห็นว่าตอนนี้โปรแกรมกำลัง offline อยู่โดยสังเกตได้จากวงกลมที่ช่อง Communication Setting เป็นสีเทา ให้ทำการเชื่อมต่อ Datalogger เข้ากับคอมพิวเตอร์และเลือกช่อง Comm. Port ให้ตรงกับช่องที่ต่อ Datalogger กับคอมพิวเตอร์ เมื่อทำการเลือกแล้วให้กด Connect จะสังเกตเห็นว่าวงกลม offline ได้เปลี่ยนเป็นสีเขียวและเปลี่ยนเป็นคำว่า online ดังรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.8 โปรแกรม AI Utility 3.4 เชื่อมต่อเข้ากับ Datalogger

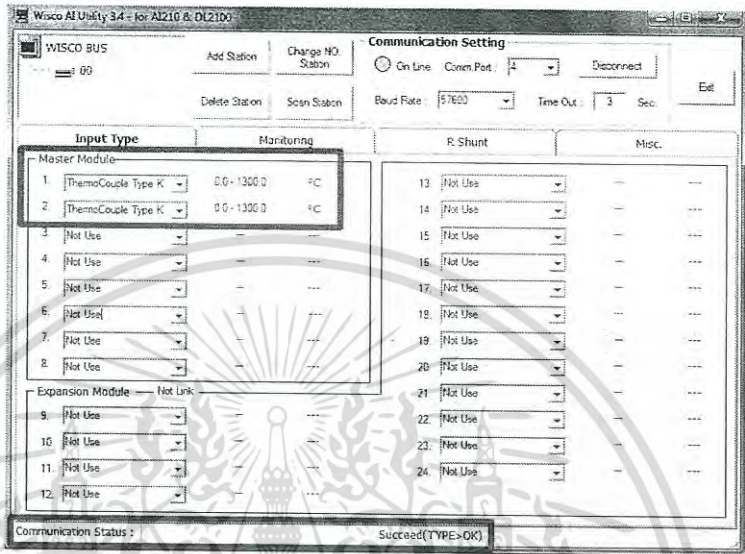
3. เมื่อโปรแกรมออนไลน์แล้วในช่องถัดมาทางซ้าย ให้กด Scan Station เพื่อเชื่อมต่อโปรแกรมเข้ากับ Master Module ของ Datalogger รอสักครู่ จะสังเกตเห็นว่าช่องแสดงผล Station ได้คำว่า WISCO BUS นั้น จะขึ้น Station 00 และที่ช่อง Master Module ในแถบ Input Type ให้เลือก channel ที่ทำการเชื่อมต่อกับเทอร์โมคัปเปิลไว้ จากนั้นทำการเลือกชนิด (Type) ของเทอร์โมคัปเปิล ให้ตรงกับที่ใช้ซึ่งในที่นี้คือ เทอร์โมคัปเปิลชนิด K



รูปที่ 3.9 หน้าต่างแสดงการสแกนและเชื่อมต่อคอมพิวเตอร์และ Datalogger

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. เมื่อเซตค่าของเทอร์โมคัปเปิลแล้ว แถบ Communication Status ด้านล่างจะขึ้น Succeed(TYPE>OK) ถือเป็นการเสร็จการตั้งค่าโดยใช้โปรแกรม จากนั้นให้ปิดโปรแกรม AI Utility 3.4 นี้ไปและเปิดโปรแกรม OD04 2.7

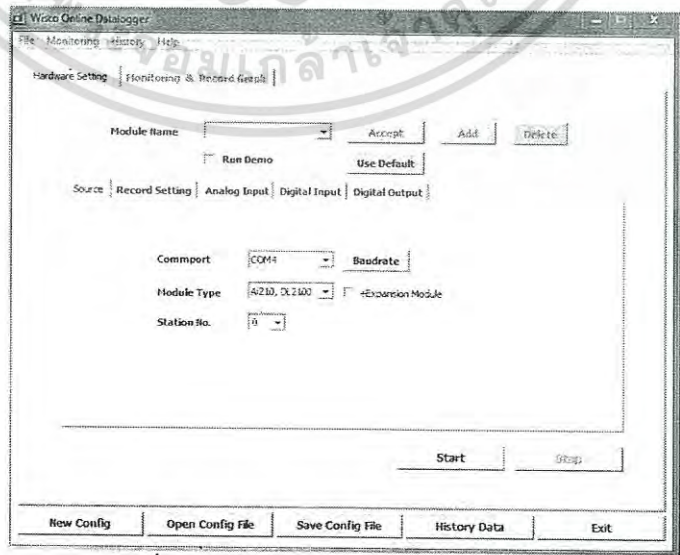


รูปที่ 3.10 การตั้งค่าเทอร์โมคัปเปิลเสร็จสมบูรณ์

• การใช้งานโปรแกรม OD04 2.7

1. เมื่อทำการเชื่อมต่อ Datalogger เข้ากับคอมพิวเตอร์ด้วยโปรแกรม AI

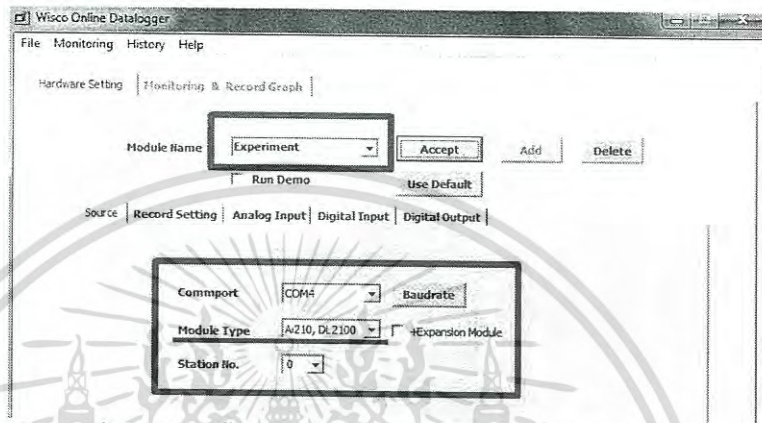
Utility 3.4 แล้วให้เปิดโปรแกรม OD04 2.7 ซึ่งโปรแกรมนี้มีไว้เพื่อใช้ในการบันทึกและแสดงข้อมูลที่ได้จาก Datalogger ผ่านหน้าจอคอมพิวเตอร์ ซึ่งหน้าตาของโปรแกรมมีลักษณะดังรูปที่ 3.8



รูปที่ 3.11 หน้าต่างของโปรแกรม OD04 2.7

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

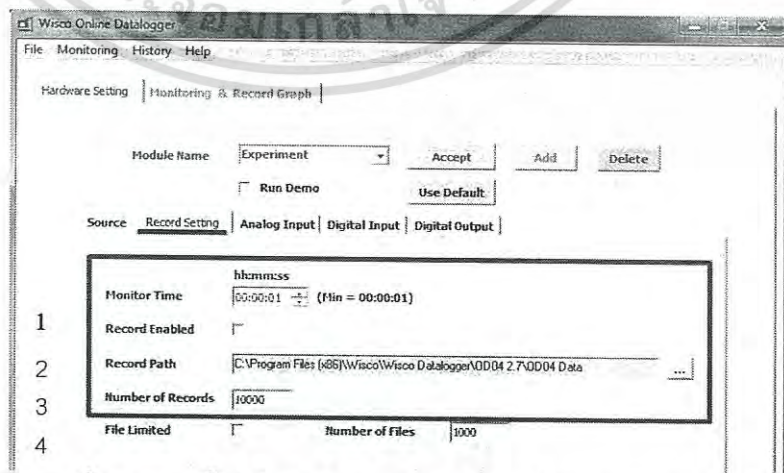
2. เมื่อเปิดโปรแกรมแล้วให้ตั้งชื่อไฟล์ที่จะทำการบันทึกในช่องที่ 1 กด Add จากนั้นในแถบ Source ให้เลือกชนิดรุ่นของ Datalogger และเลือก Station ที่เชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ซึ่งได้มาจากโปรแกรม AI Utility 3.4 และกด Accept เพื่อยืนยันข้อมูล



รูปที่ 3.12 การตั้งค่าชื่อไฟล์บันทึกและเลือกรุ่นของ Datalogger

3. กดไปที่แถบของ Record Setting เพื่อตั้งค่าในการบันทึกโดยมีรายละเอียดการตั้งค่าดังนี้

- ช่องที่ 1 คือความถี่หรือระยะห่างของเวลาที่ต้องการเก็บข้อมูล (น้อยสุดคือ 1 วินาที, 00:00:01)
 - ช่องที่ 2 คือ ช่องที่จะกดเมื่อต้องการบันทึกข้อมูล
 - ช่องที่ 3 คือ โพลเดอร์ที่ต้องการจะเก็บข้อมูล
 - ช่องที่ 4 คือ จำนวนข้อมูลสูงสุดที่ต้องการเก็บบันทึกในแต่ละครั้ง
- เมื่อตั้งค่าในส่วนนี้เรียบร้อยแล้วให้กด Accept เพื่อยืนยันการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 3.13 การตั้งค่าในส่วนของการบันทึกข้อมูลโปรแกรม OD04 2.7

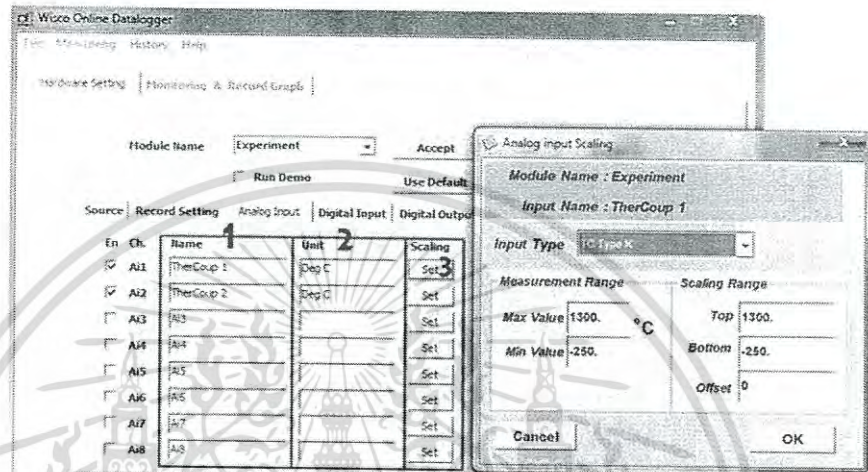
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. กดไปที่แถบ Analog Input เพื่อตั้งค่าเกี่ยวกับเครื่องมือวัดโดยทำการเลือกเครื่องหมายถูกหน้าช่อง Ai ที่ทำการต่อเครื่องมือวัดไว้

ช่องที่ 1 คือ ชื่อของเครื่องมือวัด

ช่องที่ 2 คือ หน่วยในการวัด

ช่องที่ 3 คือ ชนิดของเครื่องมือวัด

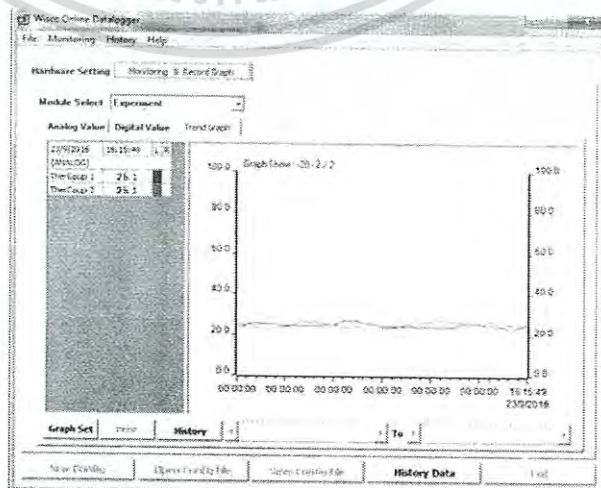


รูปที่ 3.14 การตั้งค่าหน่วยและชนิดของเทอร์โมคัปเปิลที่ทำการวัด

เราสามารถตั้งค่าแถบสีที่จะใช้แสดงผลในกราฟขณะทำการทดลองได้จากแถบสีทางด้านขวามือ ซึ่งสามารถเลือกสีที่แตกต่างกันได้ในกรณีที่มีการใช้เครื่องมือวัดมากกว่า 1 เครื่องมือ

5. ในส่วน ของแถบ Digital Input และ Digital Output ให้เลือกเครื่องหมายหน้าช่องออกให้หมด (เนื่องจากข้อมูลที่รับมาจาก Datalogger เป็นข้อมูลแบบ Analog)

6. เมื่อตั้งค่าเสร็จเรียบร้อยแล้วพร้อมกด Start จะพบหน้าต่างแสดงผลดังนี้



รูปที่ 3.15 หน้าจอแสดงผล

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3.3.3 การเตรียมตัวอย่างชิ้นงานในการวัดปริมาณรูพรุน

มีขั้นตอนในการเตรียมการดังนี้ขั้นตอนดังนี้

1. อบชิ้นงานที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 48 ชั่วโมง เพื่อให้แน่ใจว่าไม่มีปริมาณน้ำหลงเหลืออยู่ในโครงสร้างรูพรุนของวัสดุ
2. นำชิ้นงานที่ได้หลังจากการอบไปชั่งน้ำหนักจะได้ค่ามวลเริ่มต้น (m_0) จากนั้นนำไปแช่ในน้ำที่อุณหภูมิห้องนานประมาณ 4-5 วัน แล้วนำมาชั่งน้ำหนักอีกครั้งจะได้ค่ามวลวัสดุที่มีน้ำ (m)
3. วัดปริมาตรของวัสดุ (V) จากเครื่อง Electronics Densimeter
4. คำนวณหาปริมาณรูพรุน (P) จากสมการที่ 2.9

$$P = \frac{(m - m_0)}{\rho_{\text{water}} V_{\text{sample}}} \quad (2.9) \quad (1)$$

เมื่อกำหนดหาปริมาณรูพรุนภายในวัสดุได้แล้ว จึงนำไปพล็อตกับปริมาณ สัดส่วนขององค์ประกอบต่างๆ เพื่อเปรียบเทียบปริมาณรูพรุนภายในวัสดุ

3.3.4 ขั้นตอนการตรวจสอบโครงสร้างร่างแหด้วยมาตรฐาน ASTM 2765

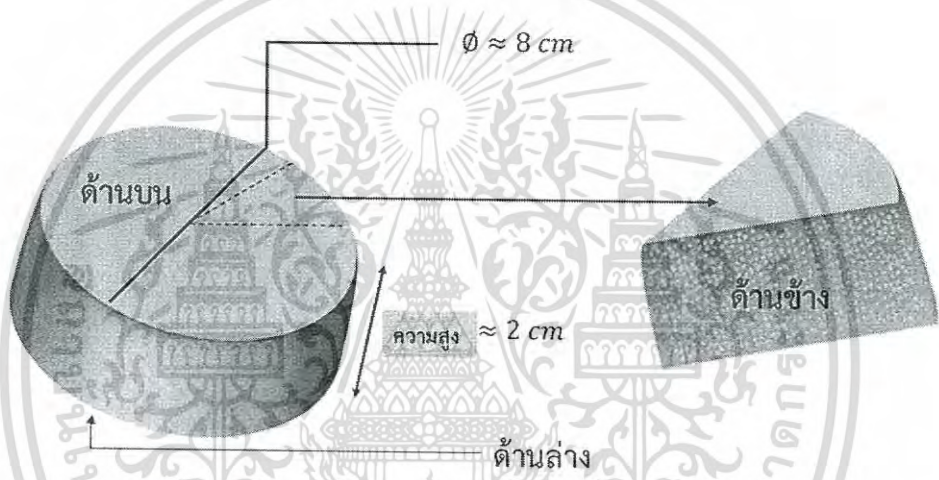
1. เตรียมตัวอย่างที่จะทำการสกัดและตะแกรงที่ใส่ตัวอย่างด้วยตะแกรง 120-Mesh ขนาด 80x40 มิลลิเมตร ทำการหาตัวอย่างและนำไปชั่งน้ำหนักจะได้ น้ำหนักของสารและ ตะแกรงก่อนทำการสกัด (W_0)
2. เติมน้ำ Xylene ลงในขวดก้นกลมให้ท่วมสารตัวอย่างและอาจใส่สารป้องกันการ ออกซิไดซ์ลงไปในตัวทำละลายได้ประมาณ 1% (ปริมาณของตัวทำละลายที่เพียงพอคือ 350 มิลลิลิตรในขวดปริมาณ 500 มิลลิลิตร หรือ 1000 มิลลิลิตรในขวดขนาด 2000 มิลลิลิตร)
3. จากนั้นต้ม Xylene จนเดือดและสามารถสังเกตการผสมของสารที่เกิดเนื่องจากการเดือดได้ดี ให้ตัวทำละลายหยดจากคอนเดนเซอร์ประมาณ 20-40 หยดต่อนาที ถือว่า สามารถเริ่มการทดลองได้ โดยทำการ Reflux ด้วย Xylene นาน 12 ชั่วโมง
4. หลังจากครบ 12 ชั่วโมงให้เอาตัวอย่างพร้อมตะแกรงออกมา และรีบนำไปอบที่ อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ในเตาอบแบบสุญญากาศ (710 mmHg) เพื่อป้องกันการเกิด ออกซิเดชันกับตัวอย่าง ประมาณ 15 นาทีและนำออกจากเตาอบนำไปชั่งน้ำหนักจะได้ น้ำหนักของตัวอย่างกับตะแกรงหลังการสกัด (W_1)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. ทำการคำนวณหาปริมาณเจลที่เหลือจากการสกัดด้วยสมการที่ 2.13 และ Xylene ที่เหลือจากการสกัดสามารถใช้ซ้ำต่อไปเรื่อยๆ จนสารมีสีเข้มขึ้นจึงค่อยเปลี่ยนสารใหม่

3.3.5 ขั้นตอนการวัดความแข็งของวัสดุ

ในการวัดความแข็งของวัสดุผู้วิจัยได้ทำการวัด 3 ตำแหน่งคือ ด้านบน ด้านข้าง และด้านล่างของวัสดุ ซึ่งจะทำการวัดในแต่ละตำแหน่ง 3 ครั้ง ซึ่งตำแหน่งในการวัดสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 3.16 การวัดโดยกดให้หัวเข็มแนบไปกับพื้นผิวของวัสดุ ออกแรงกดและเก็บบันทึกค่าความแข็งที่วัดได้จากหน้าปัด



รูปที่ 3.16 แสดงตำแหน่งในการวัดความแข็งของวัสดุ

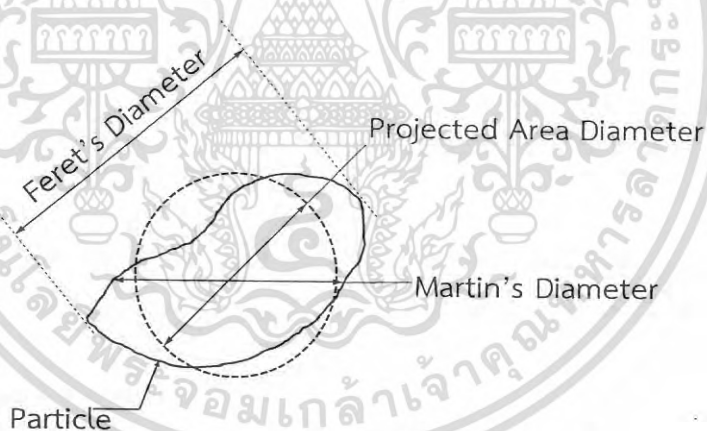
3.3.6 การวัดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุน [28-30]

ในการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุน จะอ้างอิงนิยามในการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนของอนุภาคเดี่ยว โดยนิยามในการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางนิยมนำมาใช้ในรูปของตัวแปร “เส้นผ่านศูนย์กลางสมมูล (Equivalent diameter, D_e)” ซึ่งมีนิยามในการวัดมากมาย ดังแสดงได้ดังตารางที่ 3.1

สำหรับในงานวิจัยชิ้นนี้ได้ใช้วิธีการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางสมมูลเชิงพื้นที่ภาพฉาย โดยผู้วิจัยดำเนินการวัดหาขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนจากภาพ SEM ด้วยโปรแกรม Image J โดยลากเส้นตรงผ่านตรงกลางรูพรุนให้อยู่ในจุดกึ่งกลางของรูพรุน และวัดเทียบให้ความสูงหรือความยาวของเส้นที่ได้เฉลี่ย โดยคาดคะเนให้รูพรุนมีลักษณะเป็นวงกลมแล้วลากเส้นเพื่อหาขนาดรูพรุน ในหลายๆตำแหน่งเพื่อนำมาหาเป็นค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนดังแสดงในรูปที่ 3.17

ตารางที่ 3.1 เส้นผ่านศูนย์กลางสมมูลและคำนิยามต่างๆ

เส้นผ่านศูนย์กลางสมมูล	นิยาม
เส้นผ่านศูนย์กลางสมมูลเชิงพื้นที่ภาพฉาย (Equivalent projected area diameter, d_o)	เส้นผ่านศูนย์กลางของวงกลมที่มีพื้นที่ภาพฉายเท่ากับวัสดุเมื่อวางอยู่ในตำแหน่งที่เสถียรที่สุด
เส้นผ่านศูนย์กลางสมมูลเชิงปริมาตร (Equivalent volume diameter, d_v)	เส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลมที่มีปริมาตรเท่ากับวัสดุ
เส้นผ่านศูนย์กลางสมมูลเชิงพื้นที่ผิว (Equivalent surface area diameter, d_s)	เส้นผ่านศูนย์กลางของทรงกลมที่มีพื้นที่ผิวเท่ากับวัสดุ
เส้นผ่านศูนย์กลางสมมูลเชิงขนาดลอดผ่านตะแกรง (Equivalent sieve diameter, d_A)	ความกว้างของสี่เหลี่ยมที่เล็กที่สุดที่วัสดุจะผ่านได้



รูปที่ 3.17 แสดงรูปแบบการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางอนุภาคด้วยนิยามต่างๆ [29]

บทที่ 4

ผลการทดลองและการวิเคราะห์

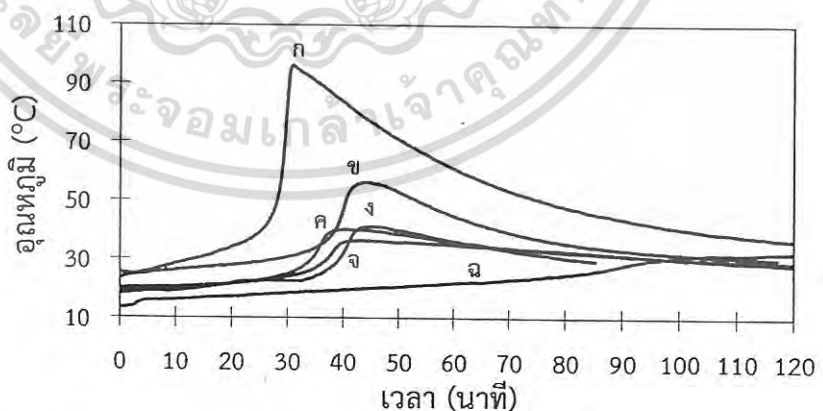
4.1 การตรวจสอบปริมาณเจลของการเกิดโครงสร้างแบบร่างแห

จากการตรวจสอบระดับของการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของวัสดุทุกการทดลองที่หล่อออกมา พบว่าไม่มีเจลหลงเหลืออยู่ภายในตะแกรงทุกการทดลอง ซึ่งเมื่อนำมาคำนวณปริมาณเจลตามสมการที่ 2.13 ผลการคำนวณที่ได้พบว่ามีปริมาณเจลหลงเหลือหลังจากการสกัดเท่ากับศูนย์ แสดงถึงวัสดุที่ขึ้นรูปนั้นไม่ได้เป็นโครงสร้างพอลิเมอร์แบบร่างแห (Crosslinked structure)

4.2 อิทธิพลของน้ำต่อพฤติกรรมทางความร้อน

4.2.1 อิทธิพลของปริมาณน้ำจากการวิเคราะห์ด้วยกราฟโปรไฟล์ของอุณหภูมิ

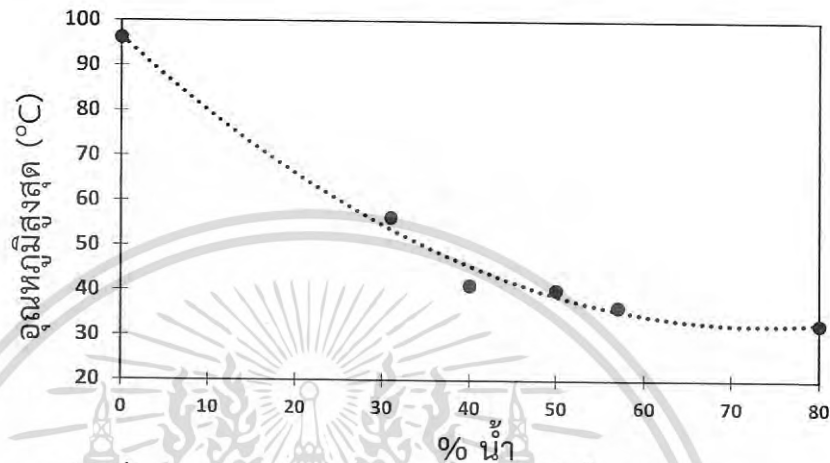
จากกราฟโปรไฟล์ของอุณหภูมิที่แสดงในรูปที่ 4.1 พบว่าอุณหภูมิของปฏิกิริยาจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นจนถึงจุดหนึ่ง ซึ่งเป็นจุดที่สารริเริ่มแตกตัวให้อนุโมลอิสระ ซึ่งนำไปสู่การทำปฏิกิริยาแตกพันธะของมอนอเมอร์เพื่อกระตุ้นให้เกิดการเชื่อมสายโซ่เกิดเป็นพอลิเมอร์ ทำให้เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้อุณหภูมิของปฏิกิริยามีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ในช่วงนี้แสดงถึงการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันในขั้นตอนการเติบโตของสายโซ่ซึ่งมีการปลดปล่อยความร้อนออกมาสู่ระบบ



รูปที่ 4.1 กราฟโปรไฟล์ของอุณหภูมิของการขึ้นรูปวัสดุที่ได้จากทดลองที่ปริมาณของน้ำ ก.) 0 ข.) 31 ค.) 40 ง.) 50 จ.) 57 และ ฉ.) 80 wt%

เมื่อนำข้อมูลอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นขณะทำปฏิกิริยาไปพล็อตกราฟเทียบกับปริมาณของน้ำที่ผสมลงไปดังแสดงในรูปที่ 4.2 พบว่าอุณหภูมิที่วัดได้จากเทอร์โมคอปูลเป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ทางการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

โมคป์เปิลมีแนวโน้มลดลงเป็นแบบเอกโพแนนเชียล และสามารถสังเกตถึงการเปลี่ยนแปลงของการลดลงได้ที่ปริมาณของน้ำตั้งแต่ 40% ขึ้นไป อุณหภูมิสูงสุดของปฏิกิริยามีแนวโน้มที่จะลดลงเพียงเล็กน้อย

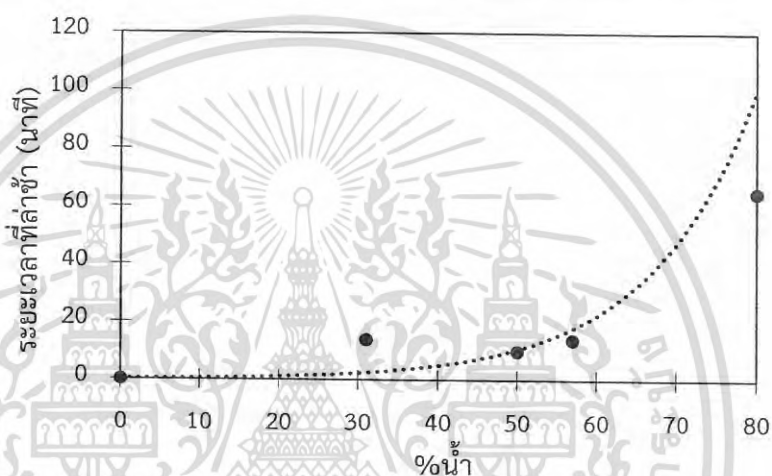


รูปที่ 4.2 อุณหภูมิสูงสุดขณะเกิดปฏิกิริยาในการขึ้นรูปวัสดุพอรูนเทียบกับปริมาณน้ำ

โดยมีข้อสันนิษฐานของการที่อุณหภูมิสูงสุดลดลงเพียงเล็กน้อยคือ “น้ำที่อยู่ในวัสดุได้ทำหน้าที่กักเก็บความร้อนขณะเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน” จากการที่มอนอเมอร์ที่ผสมลงไปในการหล่อวัสดุ สำหรับการเกิดปฏิกิริยานั้นมีปริมาณเท่ากันทุกการทดลอง จึงส่งผลให้ปริมาณความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันมีค่าคงที่ ซึ่งการเพิ่มปริมาณของน้ำที่ผสมลงไปในการหล่อวัสดุนั้น ทำให้ในช่วงแรกปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยามีปริมาณมากกว่าสัดส่วนของน้ำ ที่จะสามารถกักเก็บความร้อนเอาไว้ได้ทั้งหมด ทำให้มีความร้อนส่วนที่ยังไม่ได้ถูกกักเก็บเหลืออยู่ อุณหภูมิสูงสุดของปฏิกิริยาจึงลดลงและเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว แต่เมื่อปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นทำให้น้ำสามารถกักเก็บความร้อนได้มากเนื่องจากมวลที่เพิ่มขึ้นของน้ำ สามารถสังเกตได้ที่ปริมาณของน้ำมากกว่า 40% เป็นต้นไปนั้นมีการลดลงอย่างช้าๆ เนื่องจากปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นถูกน้ำดูดซับไปทั้งหมดแล้วส่วนใหญ่เหลือแต่ปริมาณความร้อนจากปฏิกิริยาเพียงบางส่วนเท่านั้น ทำให้ปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลให้อุณหภูมิสูงสุดของปฏิกิริยาลดลงอย่างฉับพลันอีก แต่จากกราฟโปรไฟล์ของอุณหภูมิสามารถสังเกตเห็นอิทธิพลของปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นไปมากซึ่งก็คือ การล่าช้าของการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันเมื่อเทียบกับการเกิดปฏิกิริยาในกรณีที่ไม่ผสมน้ำ ดังแสดงได้ในรูปที่ 4.3

จากรูปที่ 4.3 ปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นตั้งแต่ 30% นั้นส่งผลให้เวลาที่เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันล่าช้าลง และที่ปริมาณของน้ำ 80% สังเกตได้ว่าเวลา

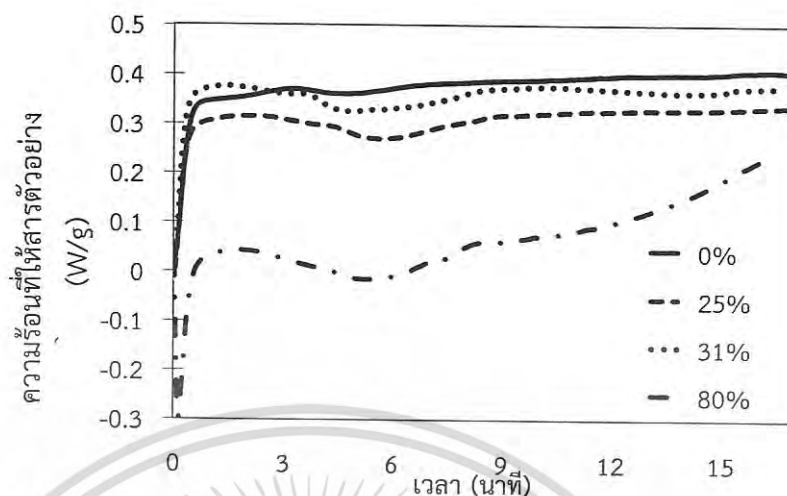
เริ่มต้นของการเกิดปฏิกิริยาล่าช้าไปถึง 60 นาที ทั้งนี้เป็นเพราะเมื่อปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นมีผลต่อเนื่องสอดคล้องกับข้อสันนิษฐานในตอนต้น เมื่อน้ำดูดซับความร้อนเข้าไป ทำให้อุณหภูมิสูงสุดและอุณหภูมิของวัสดุโดยรวมทั้งหมดนั้นลดลงด้วย ส่งผลให้อุณหภูมิหรือความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไม่เพียงพอต่อการแตกตัวของสารริเริ่ม เพื่อสร้างอนุมูลอิสระในการใช้ทำปฏิกิริยากับมอนอเมอร์สำหรับการเกิดปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่องและเพียงพอต่อมอนอเมอร์ที่เหลือ วัสดุจึงต้องใช้เวลาเพิ่มขึ้นเพื่อสะสมความร้อนให้เพียงพอสำหรับการแตกตัวให้อนุมูลอิสระของสารริเริ่ม



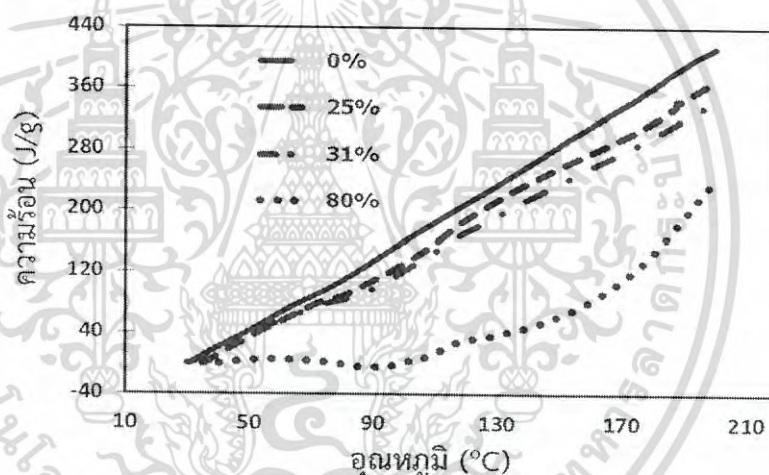
รูปที่ 4.3 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณน้ำในปฏิกิริยากับระยะเวลาที่ทำให้ปฏิกิริยาล่าช้า

4.2.2 การคำนวณปริมาณความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน

การคำนวณปริมาณความร้อนจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันสามารถวิเคราะห์ได้จากกราฟเทอร์โมแกรมที่ได้จากเครื่องมือ DSC ซึ่งพล็อตระหว่างอัตราการให้พลังงานความร้อนต่อน้ำหนัก (W/g) และ เวลา (นาที) ดังรูปที่ 4.4 และข้อมูลของการวัดที่ได้จากเทอร์โมแกรมสามารถนำมาหาพื้นที่ใต้กราฟซึ่งจะได้ค่าพื้นที่อยู่ในหน่วยของ (J/L_{olymer}) หลังจากนั้นนำพื้นที่ใต้กราฟที่ได้มาพล็อตกับอุณหภูมิเพื่อหาค่าความจุความร้อนจำเพาะดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.4 เทอร์โมแกรมการวัดสมบัติทางความร้อนของวัสดุพูนที่ได้จาก DSC



รูปที่ 4.5 กราฟแสดงฟังก์ชันค่า C_p ที่ได้จากเทอร์โมแกรม

ค่าความชันที่คำนวณได้จากกราฟที่ 4.5 แสดงถึงฟังก์ชันของค่าความจุความร้อนจำเพาะของวัสดุ (Heat of capacity, C_p) ที่เป็นฟังก์ชันกับอุณหภูมิ $C_p(T)$ มีหน่วยเป็น $J/g \text{ } ^\circ C$ เมื่อได้ฟังก์ชันของความจุความร้อนที่ขึ้นกับอุณหภูมิแล้ว นำไปอินทิเกรตตามสมการที่ 2.4 เมื่อทำการอินทิเกรตหาปริมาณความร้อนทั้งในเทอมของพอลิเมอร์และน้ำแล้วจะได้สมการที่ 2.5 ปริมาณความร้อนของปฏิกิริยาที่ไม่มีน้ำและความร้อนของน้ำที่เพิ่มขึ้นจากความร้อนสัมผัส (Sensible Heat) สามารถหาได้จากสมการที่ 2.6 และ 2.7 ตามลำดับ

จากข้อมูลในการวิเคราะห์ค่าความจุความร้อนที่ได้ข้างต้น สามารถคำนวณหาค่าความจุความร้อนของวัสดุที่ไม่ผสมน้ำ สำหรับใช้ในการคำนวณสมการที่ 6 มีค่าเท่ากับ $2.46 J/g \text{ } ^\circ C$ หรือ 61.92 cal/mol K ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Kurbatov [25] ซึ่งมีค่าเท่ากับ 56.31 cal/mol K ช่วงของอุณหภูมิที่ใช้ในการ

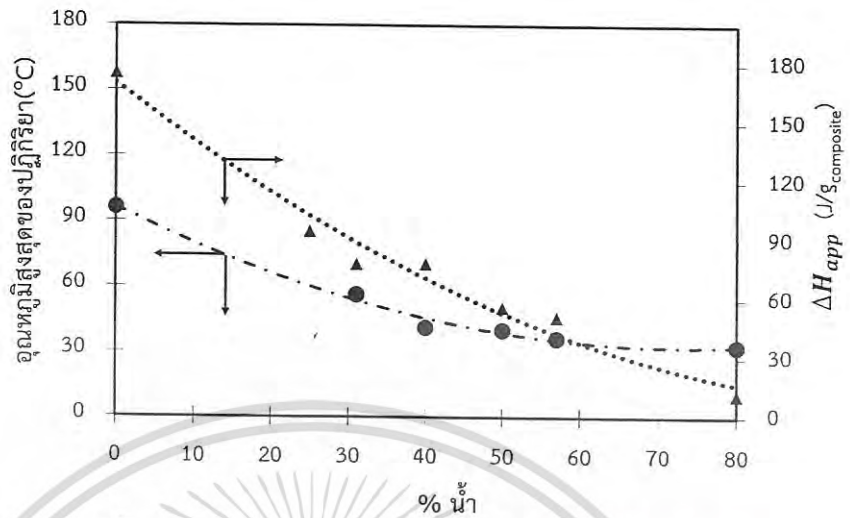
คำนวณคือ อุณหภูมิในขณะที่เริ่มเกิดปฏิกิริยา และอุณหภูมิสูงสุดของการเกิดปฏิกิริยาที่ได้จากกราฟโปรไฟล์ของอุณหภูมิ ค่าความร้อนที่ได้จากการคำนวณเป็นค่าความร้อนที่ใช้ข้อมูลจากกราฟ ดังนั้นค่าของความร้อนที่แสดงในการคำนวณจึงเป็นค่าความร้อนปรากฏของปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน (Heat Spearance of Polymerization Reaction, $\Delta H_{rxn,app}$) แสดงในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 แสดงค่าความร้อนปรากฏจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันที่ปริมาณของน้ำที่ผสมแตกต่างกัน

% น้ำ	ΔH_{app} (J/g composite)
0	175.26
25	94.81
31	78.19
40	78.36
50	56.23
57	51.19
80	11.61

จากตารางที่ 4.1 สามารถสังเกตได้ว่าเมื่อปริมาณของน้ำที่ผสมมีปริมาณเพิ่มขึ้น ความร้อนที่ได้จากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันมีค่าลดลง ซึ่งมีความสอดคล้องกับข้อสันนิษฐานในหัวข้อที่ 4.2.1 อธิพลของปริมาณน้ำจากการวิเคราะห์ด้วยกราฟโปรไฟล์ของอุณหภูมิ คือ “น้ำที่อยู่ในวัสดุได้ทำหน้าที่กักเก็บความร้อนขณะเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน” เมื่อนำค่าความร้อนปรากฏจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันที่คำนวณได้มาพล็อตเปรียบเทียบกับอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นในปฏิกิริยาพบว่ามีความโน้มในการลดลงเป็นไปในทิศทางเดียวกัน ดังแสดงได้ในรูปที่ 4.6

ผลของการคำนวณพลังงานความร้อนจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของสไตรีนมอนอเมอร์เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับวิธีการคำนวณแบบการกระจายตัวของหมู่ฟังก์ชันจากงานวิจัยของ Roy พบว่าค่าความร้อนที่ได้มีค่าใกล้เคียงกันมาก ดังแสดงในตารางที่ 4.2 ค่าเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดเมื่อเทียบค่าที่ได้จากการทดลองและงานวิจัยของ Roy มีค่าเพียง 0.84 % แสดงถึงผลจากการคำนวณด้วยวิธีวัดจากความร้อนปรากฏสามารถเชื่อถือได้



รูปที่ 4.6 ทิศทางการลดลงของความร้อนสัมพันธ์กับอุณหภูมิสูงสุดขณะเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน

ตารางที่ 4.2 แสดงค่าความร้อนจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันจากการทดลองเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Roy

ΔH_{app} (J/g _{styrene})	ΔH_{Roy} (J/g _{styrene})	% Error
657.24	662.85	0.84

4.3 อิทธิพลของน้ำต่อสัณฐานวิทยาของวัสดุพรุน

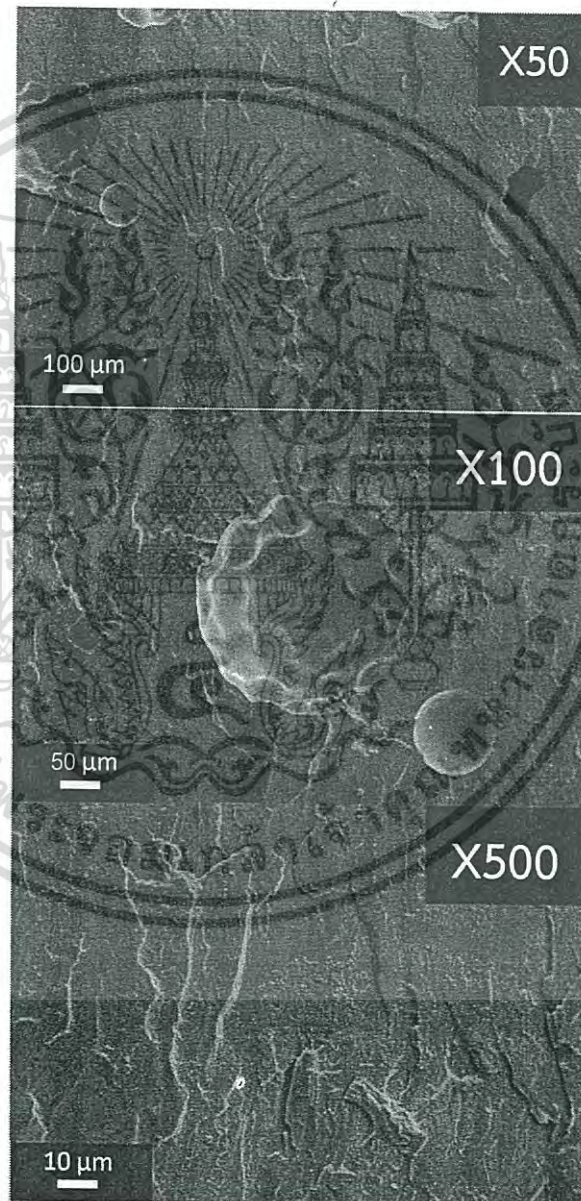
4.3.1 อิทธิพลของน้ำต่อสัณฐานวิทยาของวัสดุพรุนวิเคราะห์ด้วย SEM

เมื่อวิเคราะห์โครงสร้างสัณฐานวิทยาภายในของเนื้อวัสดุด้วยภาพจาก SEM พบว่ารูพรุนที่เกิดขึ้นภายในโครงสร้างของวัสดุ เกิดจากมอนอเมอร์ที่เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันห่อหุ้มอนุภาคพอลิเมอร์ เกิดการเชื่อมติดกันอย่างไม่สนิททำให้เกิดช่องว่างเป็นรูพรุนขึ้น โดยสามารถแสดงภาพสัณฐานวิทยาของวัสดุที่ผสมน้ำปริมาณ 0 25 31 40 50 57 และ 80% ดังรูปที่ 4.7-4.10

จากการทดลองที่ไม่มีการผสมน้ำลงไปดังรูปที่ 4.7 พบว่าเมื่อไม่มีการผสมน้ำลงไปในการขึ้นรูป มอนอเมอร์จะเชื่อมติดกันอย่างสนิททำให้ไม่มีช่องว่างหรือรูพรุนเกิดขึ้นภายใน เนื่องจากไม่มีสารใดๆขัดขวางการเชื่อมติดกันของมอนอเมอร์ โดยหลุมสีดำที่เห็นในภาพ คือฟองอากาศที่เกิดขึ้นจากการปั่นกวนในขั้นตอนสุดท้าย โดยจะเห็นการเกิดรูพรุนขึ้นในวัสดุเมื่อน้ำเข้ามาเป็นส่วนผสม จากรูปที่ 4.8-4.10

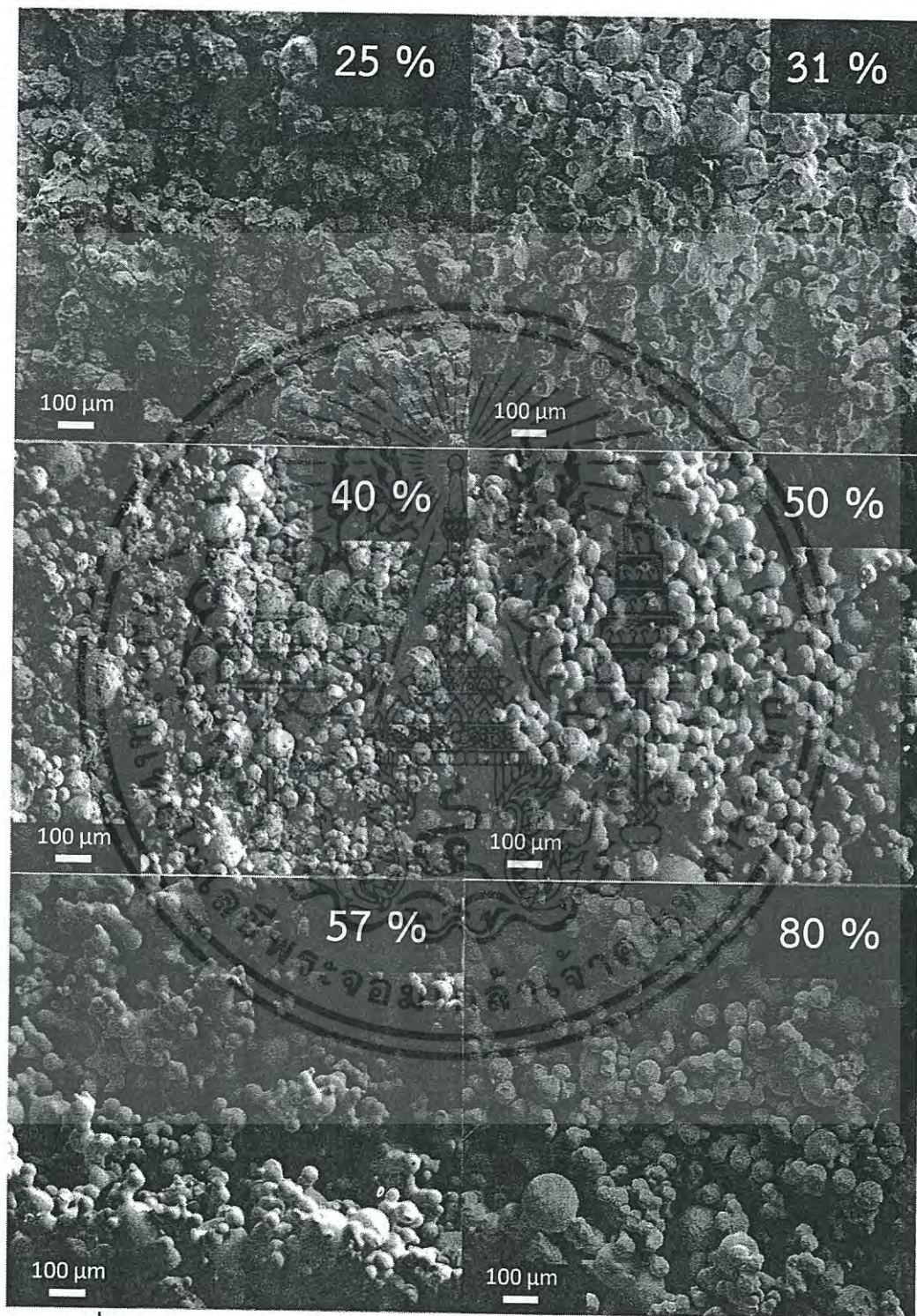
เมื่อพิจารณาปริมาณของน้ำที่ผสม 25% พบว่ามีรูพรุนเกิดขึ้นเล็กน้อยจาก

กำลังขยายที่ 50 เท่า และเมื่อขยายกำลังไปที่ 100 เท่า พบว่าอนุภาคทรงกลมแต่ละอนุภาคเชื่อมติดกันเข้าด้วยมอนอเมอร์และมอนอเมอร์ที่ห่อหุ้มอนุภาคก็อาจจะเกิดปฏิกิริยาเล็กน้อยกับอนุภาคพอลิเมอร์ที่บริเวณพื้นผิวทำให้มอนอเมอร์เชื่อมติดกับอนุภาคสังเกตได้จากกำลังขยายที่เพิ่มขึ้นเป็น 500 เท่า และในปริมาณน้ำที่ผสม 31% พบว่ามีลักษณะสัณฐานวิทยาคล้ายวัสดุที่ปริมาณน้ำ 25% โดยจะสังเกตเห็นการเชื่อมติดกันของมอนอเมอร์ได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้นที่กำลังขยาย 100 และ 500 เท่า



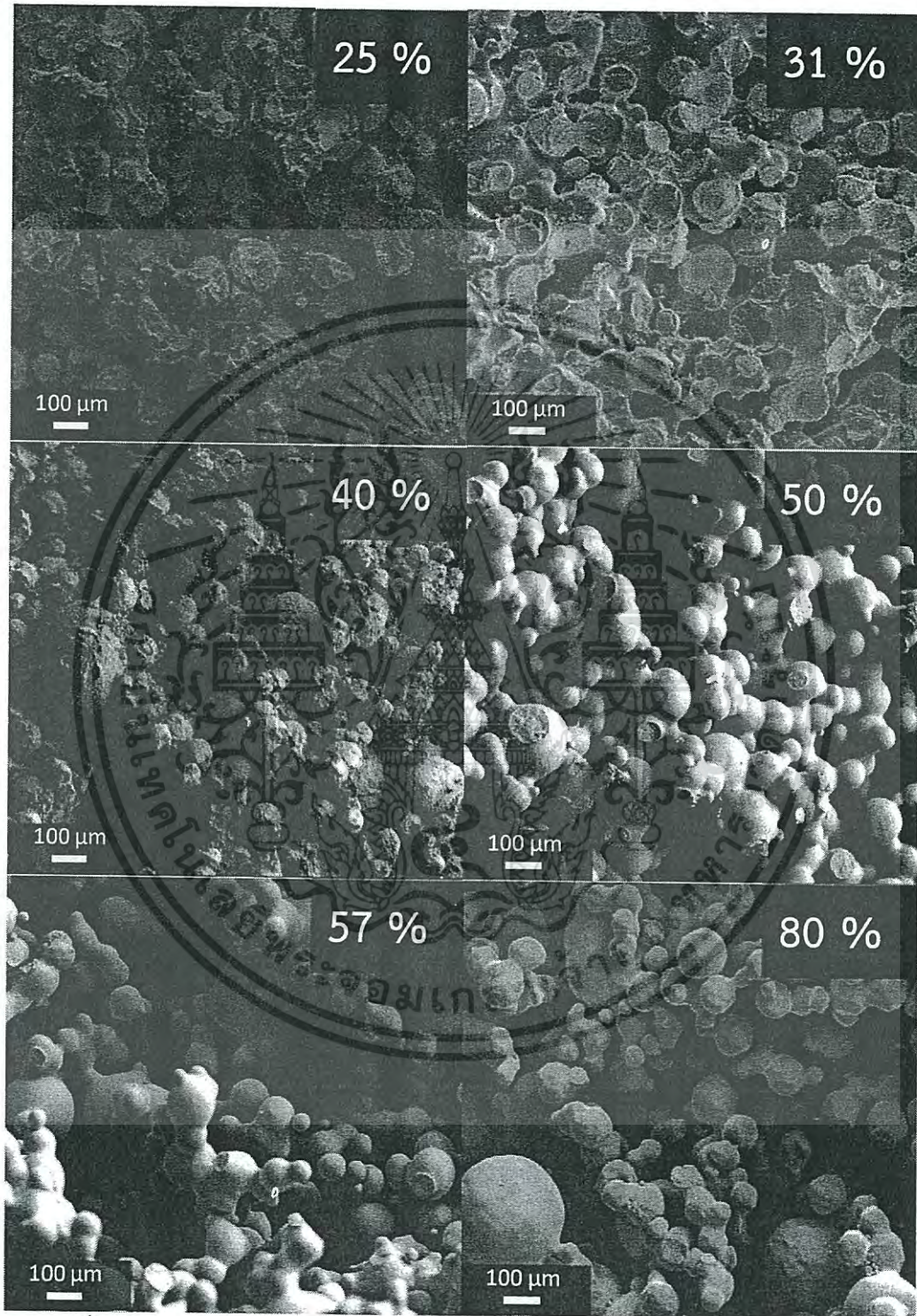
รูปที่ 4.7 ภาพ SEM สัณฐานวิทยาของวัสดุที่ไม่ผสมน้ำที่กำลังขยายต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ภาพ SEM สัณฐานวิทยาของวัสดุรูปทรงที่กำลังขยาย 50 เท่า ในปริมาณน้ำต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.9 ภาพ SEM สัณฐานวิทยาของวัสดุรูปทรงที่กำลังขยาย 100 เท่า ในปริมาณน้ำต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



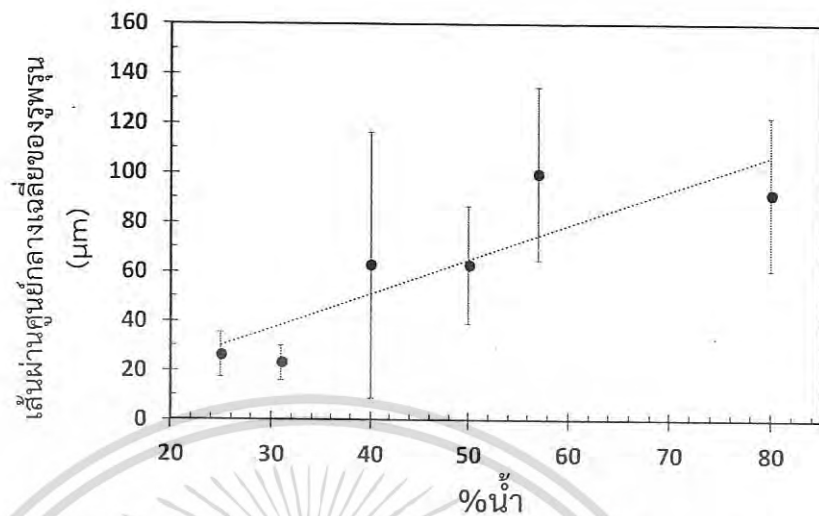
รูปที่ 4.10 ภาพ SEM สัณฐานวิทยาของวัสดุพูนที่กำลังขยาย 500 เท่า ในปริมาณน้ำต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

แต่ในการผสมน้ำตั้งแต่ 40% เป็นต้นไป พบว่าการเชื่อมติดกันของมอนอเมอร์กับอนุภาค PMMA มีแนวโน้มที่จะเชื่อมติดกันลดลง แสดงดังรูปที่ 4.7-4.10 โดยเมื่อพิจารณาการเชื่อมติดกันในแต่ละกำลังการขยาย พบว่าเมื่อปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นการเชื่อมติดกันของมอนอเมอร์กับอนุภาคจะเริ่มเล็กลงและเห็นรูปทรงของอนุภาคพอลิเมอร์ชัดเจนมากขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณน้ำที่ใส่เพียง 25-31% จากภาพกำลังการขยายที่ 100 เท่า สามารถสังเกตเห็นการเชื่อมติดกันของมอนอเมอร์และอนุภาคเพื่อสร้างรูพรุนได้เพียงเล็กน้อย อนุภาค PMMA ขนาดใหญ่ไม่สามารถสังเกตเห็นมอนอเมอร์ที่เกิดปฏิกิริยาและท่อหุ้มพื้นผิวมอนอเมอร์ได้อย่างชัดเจน เนื่องมาจากปริมาณของน้ำที่ผสมเข้าไปเยอะมากเกินไปกว่าปริมาณของมอนอเมอร์ที่ผสมลงไปมาก ทำให้มอนอเมอร์ผสมลงไปนั้นถูกเจือจางจนเกิดการกระจายตัวออกไป ทำให้ปฏิกิริยาพอลิเมอร์เกิดขึ้นระหว่างมอนอเมอร์เกิดได้ยากขึ้น และไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากอิทธิพลของน้ำต่ออุณหภูมิ ดังสังเกตได้จากกราฟโปรไฟล์ของอุณหภูมิที่ปริมาณน้ำ 50% เวลาในการเกิดปฏิกิริยานั้นมีความล่าช้า และที่ปริมาณน้ำ 80% เวลาในการเริ่มเกิดปฏิกิริยาล่าช้ามากขึ้น ประมาณหนึ่งชั่วโมงครึ่งเมื่อเทียบกับการหล่อวัสดุโดยไม่ผสมน้ำ ซึ่งภาพทางสัณฐานวิทยานี้ได้ช่วยยืนยันข้อสันนิษฐานที่น้ำมีอิทธิพลต่อปฏิกิริยาได้อย่างมีสอดคล้อง โดยเมื่อพิจารณาภาพสัณฐานวิทยาของปริมาณน้ำ 40% เป็นต้นไปที่กำลังขยาย 500 สามารถสังเกตเห็นรูปทรงกลมของอนุภาคพอลิเมอร์ได้อย่างชัดเจน เนื่องจากมอนอเมอร์มีการกระจายตัวกันมากทำให้มอนอเมอร์ที่เกิดปฏิกิริยามีจำนวนน้อยลง ประกอบกับการที่มอนอเมอร์ไม่สามารถจับตัวกันเป็นกลุ่มใหญ่ได้ ทำให้มอนอเมอร์ที่ท่อหุ้มอนุภาคพอลิเมอร์ขนาดใหญ่มีมอนอเมอร์ไม่เพียงพอต่อการเชื่อมกับอนุภาคพอลิเมอร์ขนาดเล็กได้

4.3.2 อิทธิพลของน้ำต่อขนาดของรูพรุน

อิทธิพลของน้ำที่ส่งผลต่อขนาดของรูพรุนสามารถวิเคราะห์ด้วยภาพสัณฐานวิทยาจาก SEM ด้วยการใช้โปรแกรม Image J โดยวิธีในการตั้งค่าและวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางจากรูปสามารถศึกษาได้จาก ภาคผนวก ข. ผลการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุน และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแสดงไว้ในรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนภายในวัสดุที่ปริมาณน้ำต่างๆ

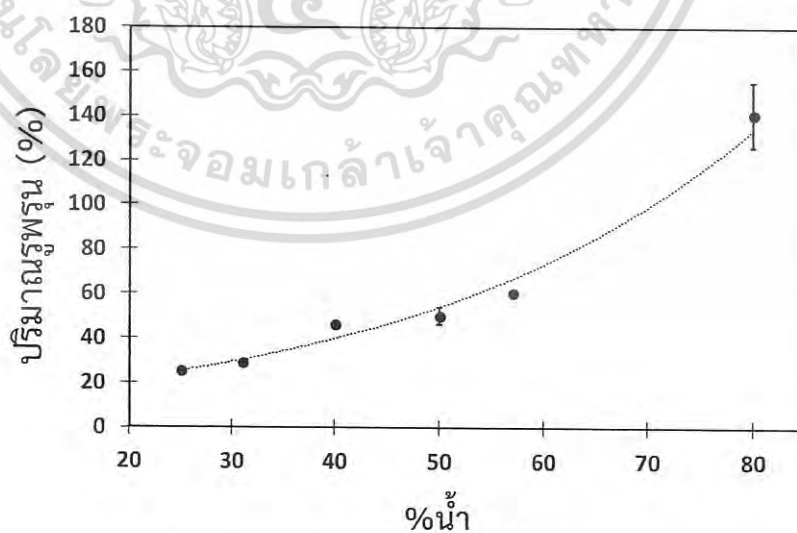
จากรูปที่ 4.11 สังเกตได้ว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างใกล้เคียงกันเมื่อปริมาณน้ำมากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาถึงความแตกต่างของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนภายใน หรือ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานพบว่า ที่ปริมาณน้ำ 25 -30% เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนที่วัดได้มีการกระจายตัวของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนค่อนข้างน้อย คืออยู่ในช่วง 20-40 ไมโครเมตร ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ได้จึงมีค่าไม่มาก ซึ่งสังเกตได้จากภาพสัณฐานวิทยาในรูปที่ 4.8 และ 4.9 รูพรุนที่เกิดขึ้นนั้นมีขนาดที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากสัณฐานวิทยาของวัสดุมีลักษณะที่คล้ายกัน และเมื่อพิจารณาที่ปริมาณน้ำ 40-50% ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยเพิ่มขึ้นมากกว่าที่ปริมาณน้ำ 25-31% ประมาณ 1.5 เท่า และเมื่อพิจารณาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานร่วมด้วยแล้ว พบว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของวัสดุรูพรุนภายในมีความแตกต่างกันอย่างมาก แสดงถึงการเกิดรูพรุนภายในมีขนาดและปริมาณที่แตกต่างกันสูง เนื่องจากรูพรุนที่เกิดขึ้นนั้นเป็นผลจากการที่น้ำเข้าไปขัดขวางการเชื่อมติดกันของมอนอเมอร์ดังที่อธิบายในหัวข้ออิทธิพลของน้ำที่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยา ทำให้เกิดช่องว่างหรือรูพรุนภายในวัสดุมากขึ้นและอาจจะเป็นการบ่งบอกได้ถึงช่วงที่วัสดุกำลังถึงช่วงรอยต่อหรือ Transition แต่ที่ปริมาณน้ำ 57% ขึ้นไปขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนเฉลี่ยมีค่าประมาณ 100 ไมโครเมตร ซึ่งมีความแตกต่างของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนภายในวัสดุที่มากเหมือนกับที่ปริมาณน้ำ 40-50% เมื่อพิจารณาควบคู่กับภาพสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 50-500 เท่า พบว่ารูพรุนขนาดใหญ่เกิดจากมอนอเมอร์ที่เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันซึ่งเชื่อมติดกับอนุภาคพอลิเมอร์ไม่มากพอ และไม่เชื่อมต่อกับอนุภาครอบข้างทำให้ที่เกิดขึ้นไม่ได้เกิดจากช่องว่างระหว่างอนุภาคที่ถูก

มอนอเมอร์ห่อหุ้ม แต่เกิดจากการที่อนุภาคไม่เชื่อมติดกันและมีระยะห่างของพื้นผิวอนุภาคที่มีขนาดต่างกัน มากกว่าที่จะเกิดจากการเชื่อมติดกันของสไตรีนมอนอเมอร์จากการที่ปริมาณน้ำที่มากเกินไปส่งผลให้มอนอเมอร์กระจายตัวในน้ำทำให้อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นจึงมีขนาดเฉลี่ยใหญ่และมีการกระจายตัวของรูพรุนอย่างมาก

4.3.3 อิทธิพลของน้ำต่อปริมาณรูพรุนและความแข็งของวัสดุ

● ปริมาตรรูพรุนภายในวัสดุ

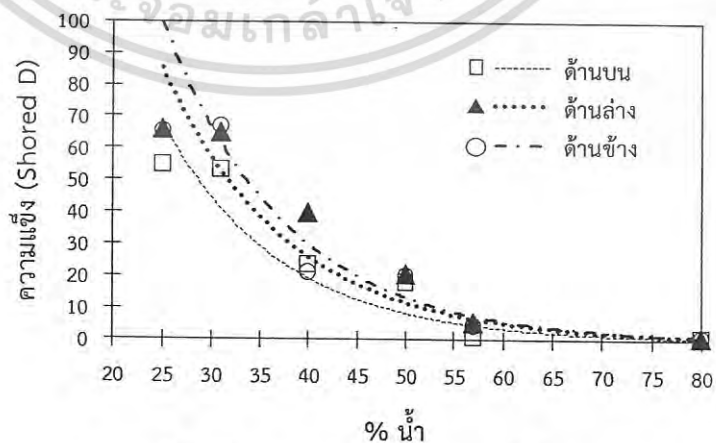
เมื่อวิเคราะห์ปริมาณของรูพรุนด้วยวิธีการดูดซึมน้ำในหัวข้อ 3.3.3 พบว่าปริมาณของรูพรุนที่วัดได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณน้ำที่ผสมมากขึ้นตามลำดับ ดังแสดงได้ในรูปที่ 4.12 สามารถวิเคราะห์ผลของน้ำที่ผสมเข้าไปได้ ซึ่งนอกจากน้ำจะช่วยคงสภาพของความเป็นรูพรุนภายในของวัสดุแล้ว การเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำ ทำให้มีน้ำแทรกตัวเข้าไปแทนที่มอนอเมอร์ในรูพรุนได้เยอะ และเมื่อน้ำที่ผสมลงไปมากขึ้นทำให้มอนอเมอร์กระจายตัว ทำให้มอนอเมอร์ไม่สามารถเคลือบพื้นผิวของอนุภาค PMMA ได้หมด จึงไม่เชื่อมติดกันเป็นโครงสร้างรูปแบบโพรงได้ ซึ่งช่องว่างระหว่างรูพรุนค่อยๆ ขยายตัวกว้างมากขึ้นดังผลที่ได้จากการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนภายในเฉลี่ย จนเมื่อมีปริมาณน้ำที่ผสมกับวัสดุมากเกินไปทำให้มอนอเมอร์ไม่สามารถเกิดการเชื่อมติดกันได้ ปริมาณของรูพรุนจึงเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว



รูปที่ 4.12 ปริมาณของรูพรุนเมื่อเทียบกับปริมาณน้ำต่างๆ

● ความแข็งของวัสดุ

แต่ในขณะที่เดียวกันเมื่อนำวัสดุมาวัดความแข็งด้วยเครื่องมือ Durometer โดยสเกลที่ใช้ในการวัดคือ Shored D พบว่าความแข็งของวัสดุส่งผลตรงกันข้ามกับปริมาณของรูพรุนเมื่อปริมาณน้ำที่ผสมเพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.13 เนื่องจากความแข็งแรงที่เกิดขึ้นของวัสดุนั้น เกิดมาจากสไตรีนมอนอเมอร์ที่เกิดปฏิกิริยาพอลิเมไรเซชันซึ่งมีคุณสมบัติทำให้วัสดุมีความแข็ง แต่เมื่อผสมน้ำในปริมาณที่มาก ทำให้มอนอเมอร์ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้นความแข็งของวัสดุจึงลดลง โดยความแข็งที่ปริมาณน้ำ 0% คือปริมาณที่แข็งที่สุดของวัสดุ ซึ่งมีความแข็งมากที่สุดของสเกลในการวัด (สเกลในการวัดเริ่มตั้งแต่ อ่อนสุดจนถึงแข็งสุด เป็น 0-100) แต่ที่ปริมาณน้ำ 0% นั้นไม่มีรูพรุนเกิดขึ้นภายในวัสดุทำให้ความแข็งที่เกิดขึ้นมาค่าสูงสุด เมื่อผสมน้ำลงไปในการหล่อและปริมาณน้ำเพิ่มขึ้น รูพรุนที่เกิดขึ้นจึงส่งผลต่อขนาดรูพรุนภายใน ดังแสดงได้ที่ปริมาณน้ำ 25-31% พบว่าความแข็งลดลงจากวัสดุที่ถูกหล่อโดยไม่มีส่วนผสมน้ำประมาณ 30% และที่ปริมาณน้ำเพิ่มมากขึ้นเป็น 40-50% ความแข็งของวัสดุมีการลดลงอย่างมาก ประมาณ 80% ซึ่งเป็นผลมาจากรูพรุนภายในโครงสร้างของวัสดุซึ่งเห็นได้อย่างชัดเจนในรูปทางสัณฐานวิทยา และที่ปริมาณน้ำ มากกว่า 57% เป็นต้นไป ความแข็งของวัสดุมีค่าลดลงเกือบเป็น 0 เมื่อสัมผัสผิวของวัสดุที่ผสมน้ำในปริมาณ 57% ขึ้นไปนี้ จะพบว่าเนื้อของวัสดุหลุดออกมาจากโครงสร้างเป็นลักษณะผง สอดคล้องกับรูปโครงสร้างทางสัณฐานวิทยาซึ่งสามารถเห็นได้ว่าอนุภาคพอลิเมอร์ไม่ได้เชื่อมต่อกับแต่ละอนุภาคด้วยมอนอเมอร์ที่เป็นโครงสร้างแบบโพรง ดังนั้นค่าความแข็งที่วัดได้จากวัสดุที่ผสมน้ำตั้งแต่ 57% เป็นต้นไปจึงมีค่าน้อยมาก



รูปที่ 4.13 ความแข็งของวัสดุรูพรุนที่ปริมาณน้ำต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.4 อิทธิพลของสัดส่วนขนาดผงพอลิเมอร์ต่อพฤติกรรมทางความร้อน

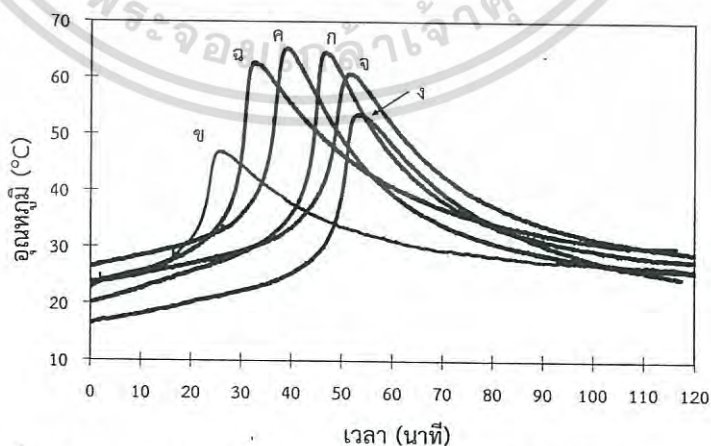
สำหรับการหลอมวัสดุโดยการปรับเปลี่ยนสัดส่วนของขนาดเม็ดอนุภาคพอลิเมอร์นั้น ได้ทำการทดลองโดยปรับเปลี่ยนอนุภาคขนาดใหญ่ (L) และ อนุภาคขนาดเล็ก (S) โดยมีอัตราส่วนต่างๆกัน ซึ่งจากหัวข้อนี้เป็นต้นไปจะกำหนดชื่อโค้ดสัญลักษณ์ของแต่ละสัดส่วนตามตารางที่ 4.3 เพื่อความสะดวกในการกล่าวถึงต่อไป

ตารางที่ 4.3 สัญลักษณ์อัตราส่วนที่ใช้แทนการผสมอนุภาคที่ขนาดต่างๆ

อัตราส่วนโดยน้ำหนัก		สัญลักษณ์
อนุภาคใหญ่	อนุภาคเล็ก	
L	S	
11	22	L11S22
11	33	L11S33
22	11	L22S11
22	22	L22S22
33	11	L33S11
33	22	L33S22

4.4.1 อิทธิพลของสัดส่วนขนาดของอนุภาคจากการวิเคราะห์ด้วยกราฟโปรไฟล์ของอุณหภูมิและผลการคำนวณทางสถิติ

อิทธิพลของสัดส่วนในการผสมอนุภาคที่ขนาดต่างกันแสดงได้ดังรูปที่ 4.14

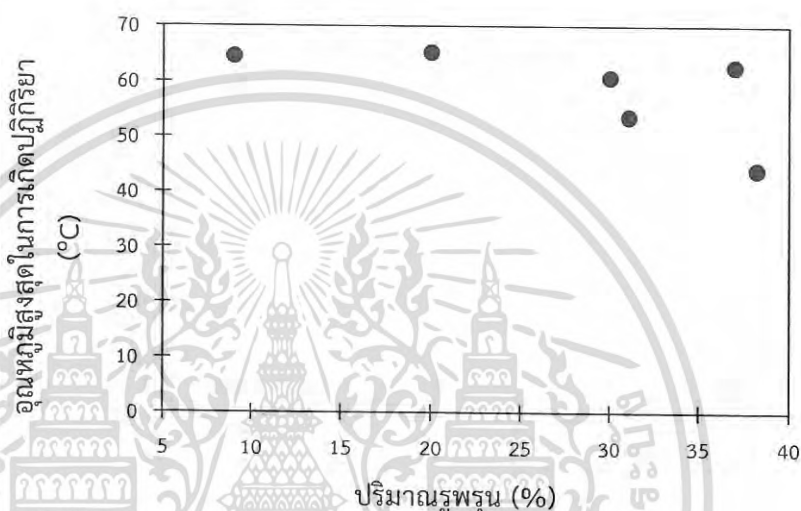


รูปที่ 4.14 กราฟแสดงโปรไฟล์ของอุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของวัสดุที่สัดส่วนและขนาดอนุภาคต่างกัน

ก.) L11S22 ข.) L11S33 ค.) L22S11 ง.) L22S22 จ.) L33S11 ฉ.) L33S22

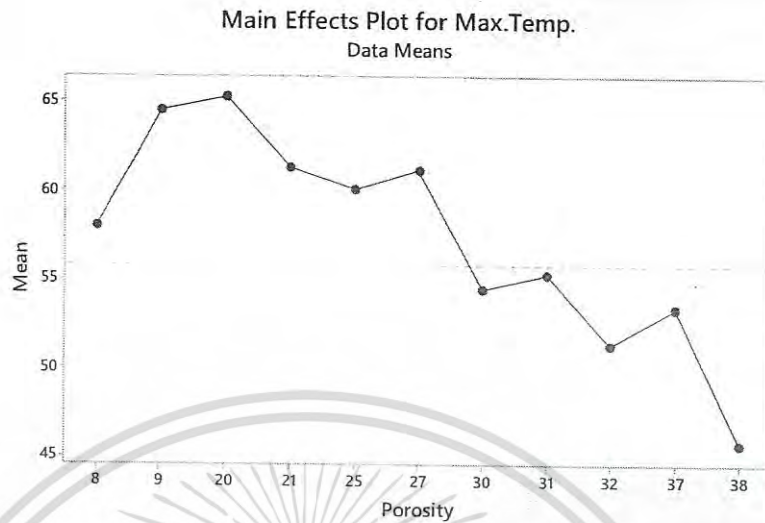
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากรูปที่ 4.14 พบว่าข้อมูลที่ได้นั้นยังไม่สามารถเห็นผลของสัดส่วนขนาดอนุภาคใหญ่และเล็กได้อย่างชัดเจน ซึ่งผู้วิจัยได้นำข้อมูลอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันมาพล็อตเทียบกับปริมาณรูพรุนภายในวัสดุเนื่องจากอิทธิพลของสัดส่วนขนาดอนุภาค PMMA ส่งผลโดยตรงกับปริมาณรูพรุนทำให้สามารถอธิบายอิทธิพลต่ออุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นได้ดีมากขึ้น ดังแสดงได้ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 กราฟแสดงอุณหภูมิสูงสุดจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันที่ปริมาณรูพรุนต่างๆ

จากรูปที่ 4.15 พบว่าเมื่อปริมาณรูพรุนภายในวัสดุเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้อุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาลดลง เนื่องจากรูพรุนที่เกิดขึ้นภายในวัสดุเกิดจากการที่น้ำแทรกตัวเข้าไปอยู่ในช่องว่างระหว่างอนุภาค แทนที่ของมอนอเมอร์ทำให้ที่วัสดุมีปริมาณรูพรุนมากนั้นหมายถึงการที่มีน้ำแทรกตัวอยู่มากนั่นเอง ซึ่งเมื่อเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน ความร้อนจากปฏิกิริยาจะถูกถ่ายเทไปยังวัสดุโดยรวม ดังนั้นเมื่อความร้อนถูกถ่ายเททำให้ที่ปริมาณรูพรุนน้อย (มีน้ำแทรกตัวระหว่างช่องว่างอนุภาคน้อย) ให้ความร้อนที่สูญเสียหรือถูกน้ำดูดซับไปน้อยลงเมื่อเทียบกับที่มีปริมาณรูพรุนมาก ให้อุณหภูมิที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาสูงสุดมีค่าที่สูงเมื่อเทียบกับสัดส่วนขนาดอนุภาคของวัสดุที่มีปริมาณรูพรุนมาก และเมื่อนำข้อมูลจากการทดลองมาวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติหรือ ANOVA ด้วยโปรแกรม Minitab 17 ดังรูปที่ 4.16 โดยทำการพล็อตเพื่อหาอิทธิพลของปริมาณรูพรุนต่ออุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยา พบว่าแนวโน้มที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ที่ได้กล่าวไปในข้างต้น



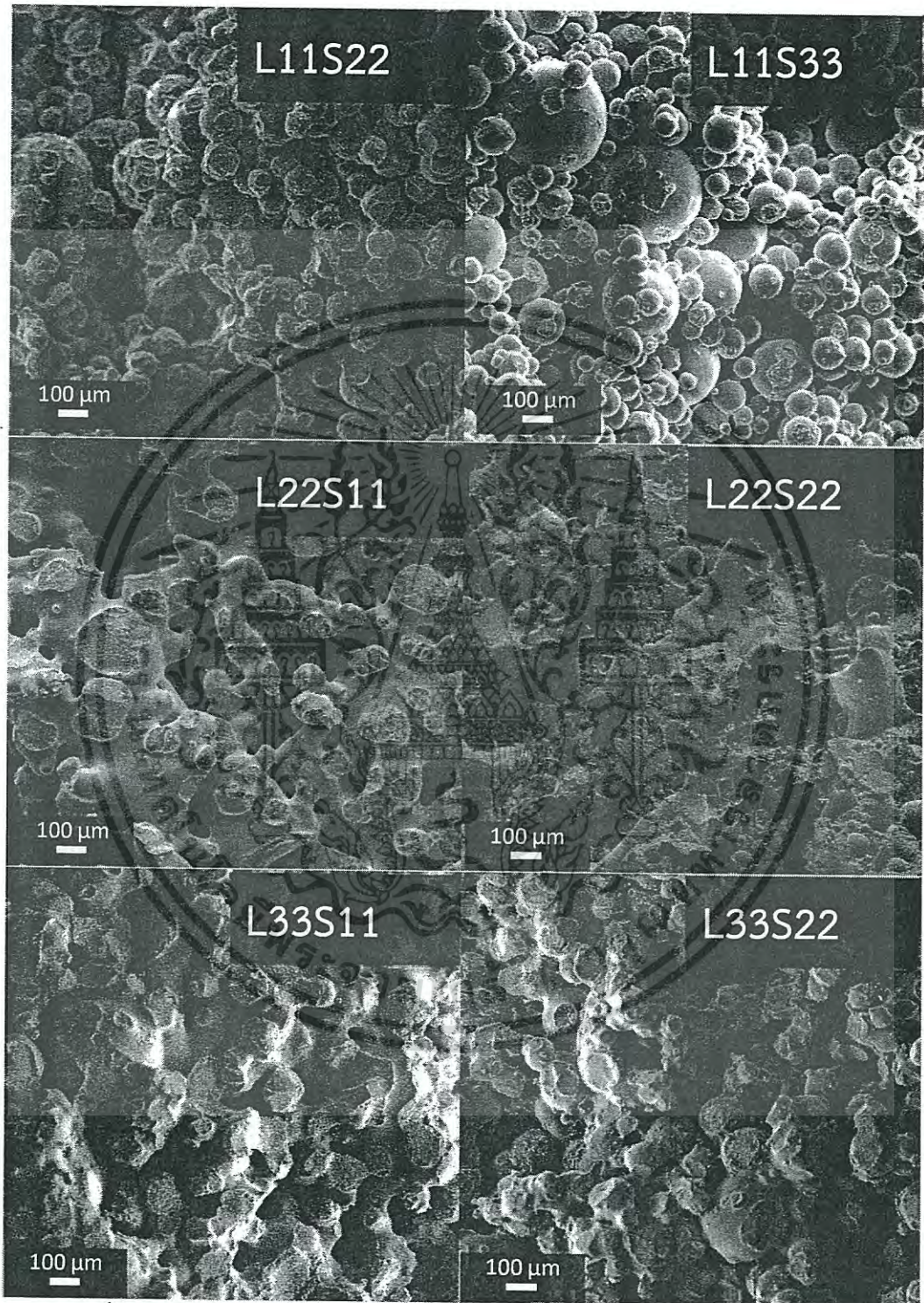
รูปที่ 4.16 ผลการคำนวณเชิงสถิติด้วย ANOVA ของปริมาณรูพรุนที่มีอิทธิพลต่ออุณหภูมิของปฏิกิริยาสูงสุดที่เกิดขึ้น

4.5 อิทธิพลของสัดส่วนขนาดอนุภาคพอลิเมอร์ต่อสัณฐานวิทยาของวัสดุรูพรุน

4.5.1 อิทธิพลของสัดส่วนขนาดอนุภาคพอลิเมอร์ต่อสัณฐานวิทยาของวัสดุรูพรุนวิเคราะห์ด้วย SEM

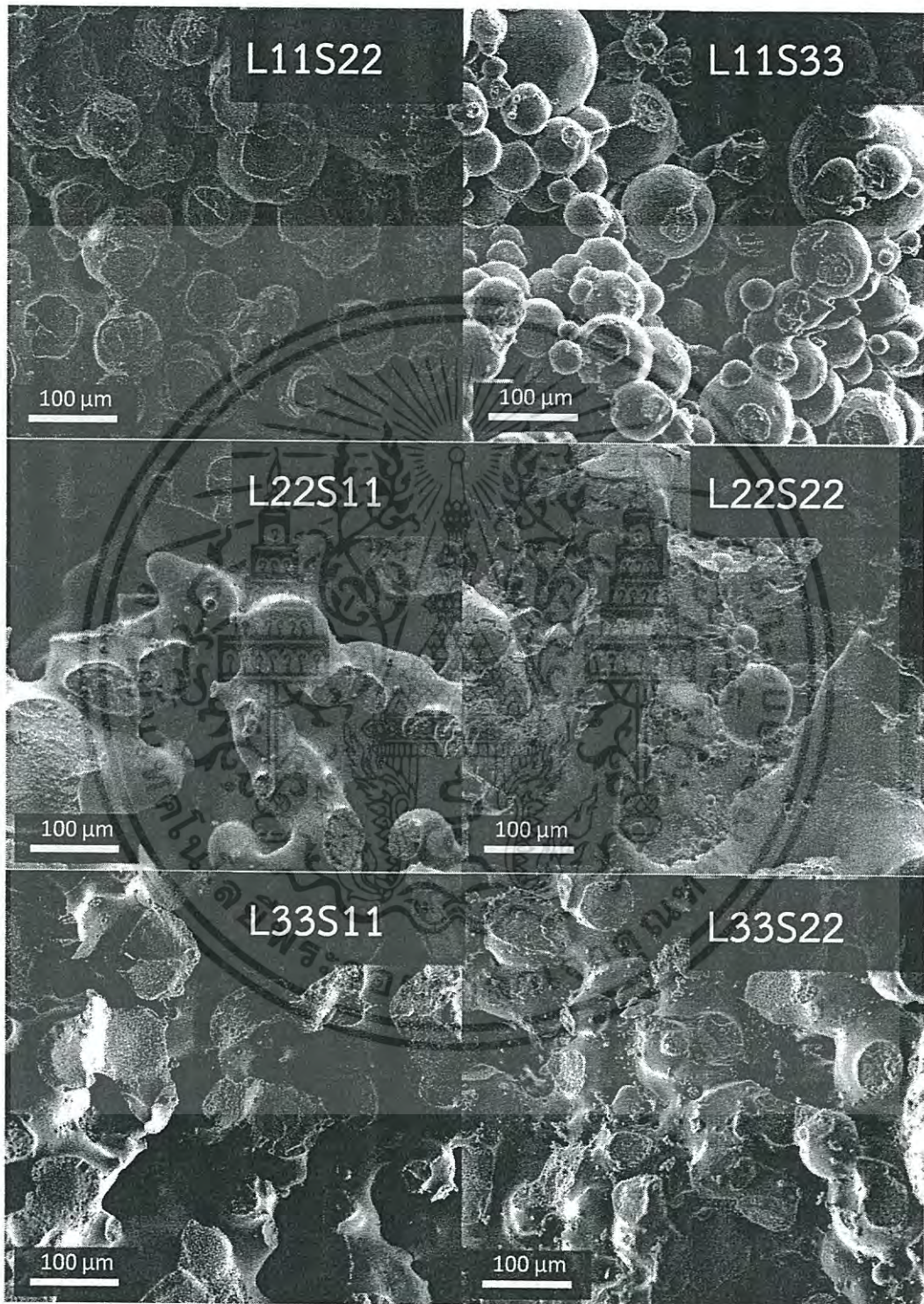
ภาพสัณฐานวิทยาของวัสดุที่มีสัดส่วนในการผสมอนุภาคพอลิเมอร์ขนาดใหญ่ต่อขนาดเล็กต่างกันแสดงได้ดังรูปที่ 4.17-4.19 แสดงสัณฐานวิทยาของวัสดุรูพรุนที่สัดส่วนต่างๆของอนุภาคใหญ่ต่อเล็กที่กำลังขยาย 50 100 และ 500 เท่าตามลำดับ

จากภาพสัณฐานวิทยาที่กำลังขยาย 50 เท่า พบว่าที่ปริมาณอนุภาคขนาดเล็กมีสัดส่วนมากกว่าอนุภาคใหญ่ 3 เท่า จะไม่สามารถเห็นลักษณะสัณฐานที่มีความเป็นรูพรุนภายในวัสดุ ดังจะเห็นได้ที่สัดส่วน L11S33 สามารถสังเกตเห็นอนุภาคขนาดเล็กได้อย่างชัดเจนและที่บริเวณผิวของอนุภาคไม่สามารถสังเกตเห็นการเชื่อมติดกันระหว่างอนุภาคด้วยมอนอเมอร์ได้อย่างชัดเจน แต่เมื่อปริมาณอนุภาคขนาดใหญ่มีสัดส่วนต่ออนุภาคขนาดเล็กเพิ่มมากขึ้น จะสามารถสังเกตเห็นการเชื่อมติดกันระหว่างอนุภาคได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น เช่นที่สัดส่วน L22S11, L33S11 และ L33S22 ซึ่งมีการยึดติดระหว่างอนุภาคมอนอเมอร์ชัดเจนเมื่อพิจารณาที่กำลังขยาย 100 เท่า



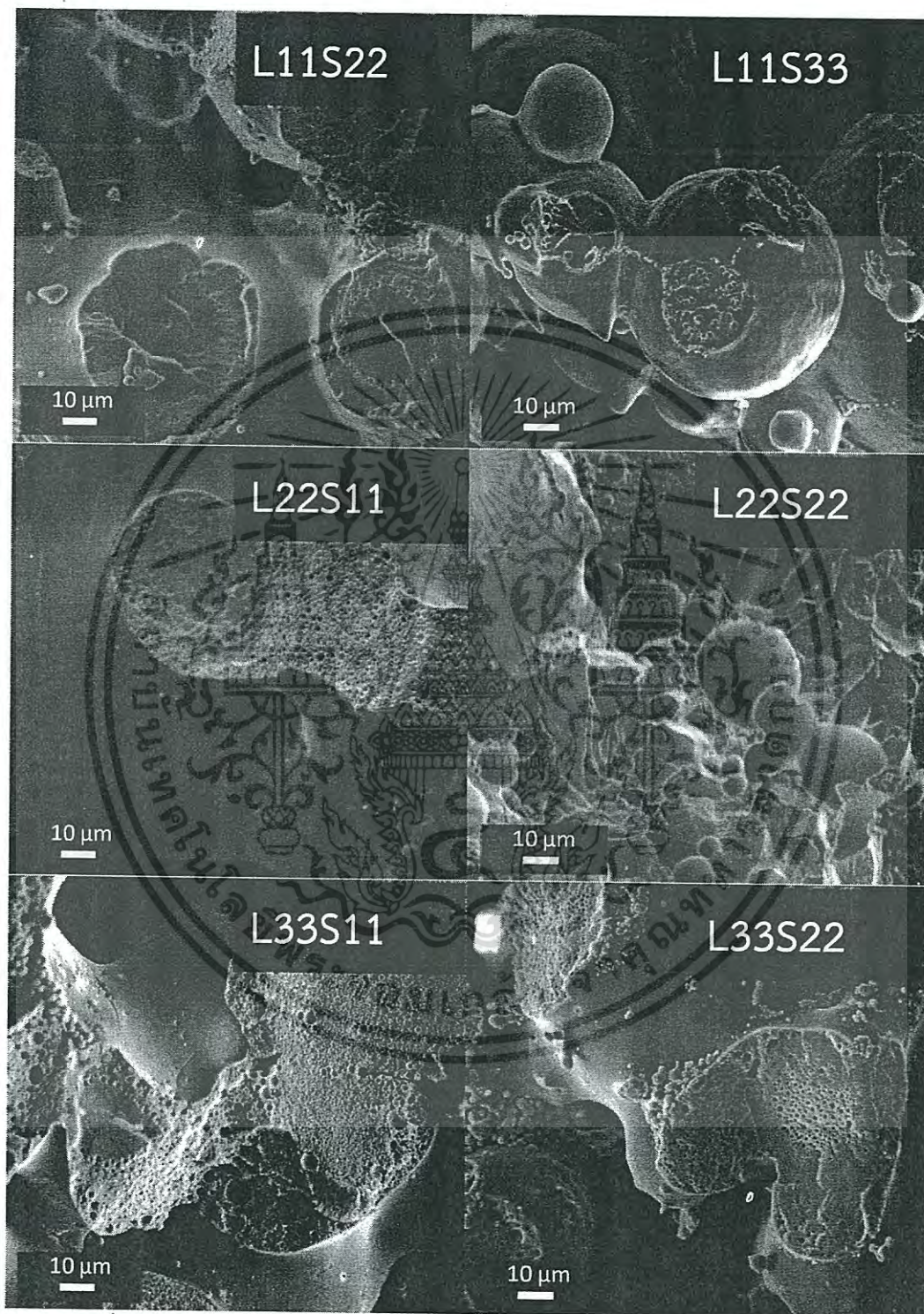
รูปที่ 4.17 ภาพ SEM สัณฐานวิทยาของวัสดุที่สัดส่วนอนุภาคใหญ่ต่ออนุภาคเล็กต่างๆ
ที่กำลังขยาย 50 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 ภาพ SEM สัณฐานวิทยาของวัสดุที่สัดส่วนอนุภาคใหญ่ต่ออนุภาคเล็กต่างๆ
ที่กำลังขยาย 100 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



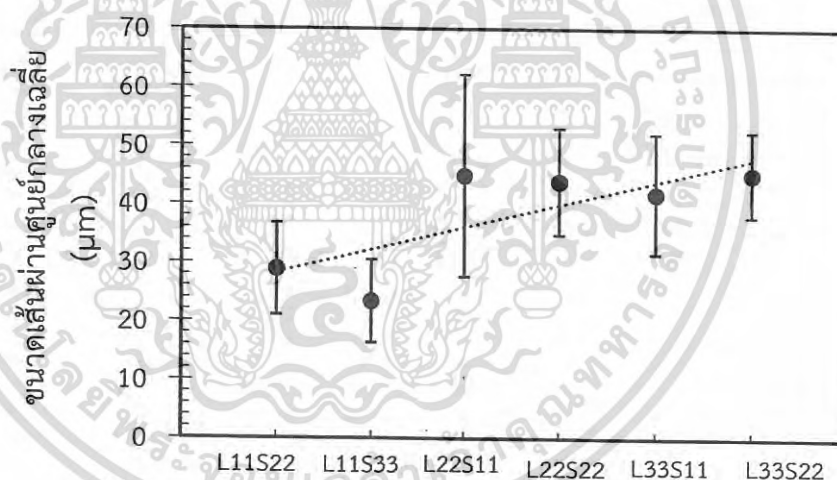
รูปที่ 4.19 ภาพ SEM สัณฐานวิทยาของวัสดุที่สัดส่วนอนุภาคใหญ่ต่ออนุภาคเล็กต่างๆ
ที่กำลังขยาย 500 เท่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ดังนั้นที่ปริมาณของอนุภาคขนาดใหญ่จะส่งผลต่อความสามารถในการสร้างรูพรุนภายในวัสดุมากกว่าการเพิ่มปริมาณอนุภาคขนาดเล็ก เพราะอนุภาคขนาดใหญ่จะส่งผลต่อการเชื่อมติดกันระหว่างอนุภาคด้วยสไตรีนมอนอเมอร์ได้ดีกว่า ดังแสดงในภาพสัณฐานวิทยา

4.5.2 อิทธิพลของสัดส่วนขนาดอนุภาคพอลิเมอร์ต่อขนาดของรูพรุนภายในวัสดุ

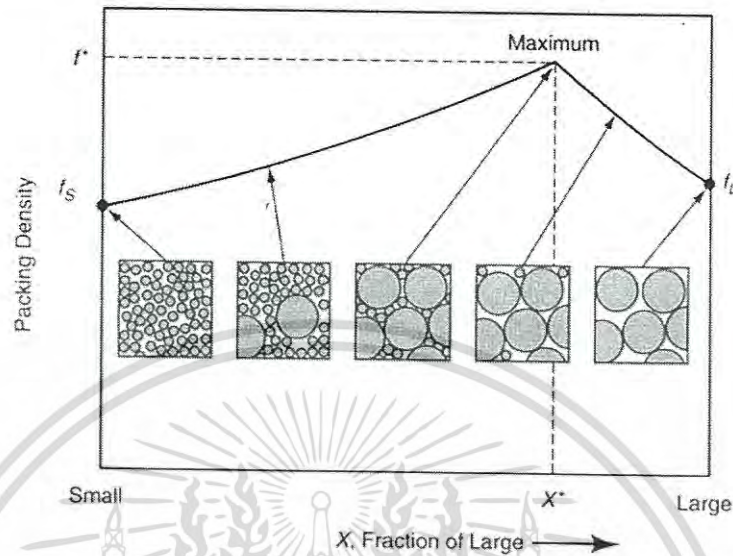
อิทธิพลของสัดส่วนอนุภาคใหญ่และเล็กสามารถวิเคราะห์เบื้องต้นได้จากภาพสัณฐานวิทยา และสามารถวัดขนาดรูพรุนได้ด้วยโปรแกรม Image J โดยผลของการวัดสามารถแสดงได้ในรูปที่ 2.20 จะสังเกตเห็นได้ว่าที่สัดส่วนของปริมาณอนุภาคขนาดเล็กมากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยมีค่าประมาณ 20-30 ไมโครเมตร ซึ่งมีขนาดน้อยกว่าเมื่อเทียบกับสัดส่วนที่มีปริมาณอนุภาคขนาดใหญ่เท่ากันหรือเยอะกว่า โดยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 40-50 ไมโครเมตรและมีการกระจายตัวหรือส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่กว้างกว่ามากเมื่อเทียบกับเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยที่ขนาดอนุภาคเล็กเยอะกว่า



รูปที่ 4.20 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนภายในวัสดุที่สัดส่วนของอนุภาคเม็ดใหญ่ต่อเม็ดเล็กต่างๆ

สาเหตุของขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนเฉลี่ยแตกต่างกันเกิดจากเมื่ออนุภาคทรงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกันมาผสมรวมกันจะเกิดช่องว่างระหว่างอนุภาคขึ้น ซึ่งเมื่อพิจารณาในพื้นที่จำกัดค่าหนึ่งจะพบว่าช่องว่างที่เกิดขึ้นจะสัมพันธ์กับค่าความหนาแน่นของการบรรจุ (Packing Density) [27] ดังแสดงได้ในรูปที่ 4.21 สังเกตได้ว่าในส่วนที่มีเพียงแค่อนุภาคขนาดเล็กนั้น (กล่องสี่เหลี่ยมด้านซ้ายสุด) ช่องว่างที่เกิดขึ้นภายในจะแคบและขนาดเล็ก และในส่วนที่มีเพียงแค

อนุภาคขนาดขนาดใหญ่ (กล่อ่งสี่เหลี่ยมด้านขวาสุด) ขนาดของช่องว่างภายในที่เกิดขึ้นมีขนาดที่ใหญ่และกว้างกว่า เมื่อเทียบกับช่องว่างของอนุภาคขนาดเล็ก



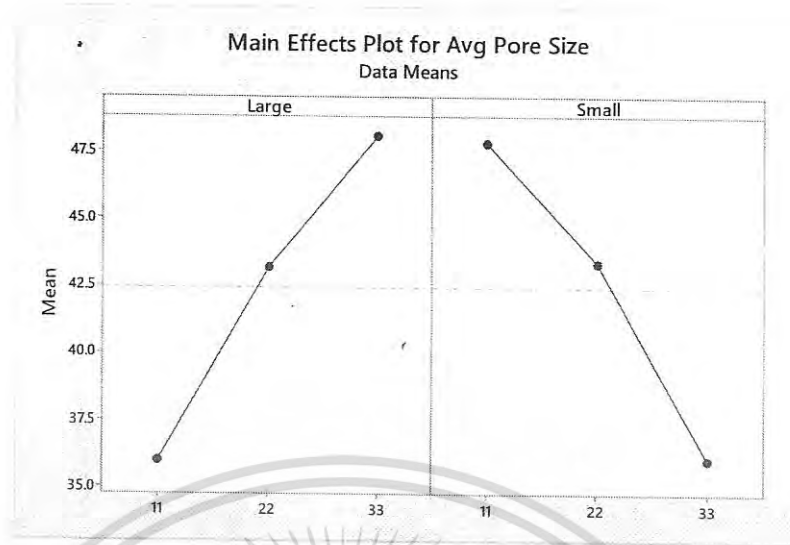
รูปที่ 4.21 แสดงอัตราส่วนของขนาดอนุภาคต่อช่องว่างที่เกิดขึ้นภายใน [26]

ซึ่งเมื่อผสมอนุภาคขนาดเล็กและใหญ่เข้าไปในสัดส่วนที่ต่างกัน จะพบว่าส่งผลต่อปริมาณความหนาแน่นของการบรรจุจัดรูป และการวิเคราะห์ทางสถิติด้วย ANOVA ดังแสดงในรูปที่ 4.22 พบว่าให้ผลเป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยพิจารณาจากค่า P-value ที่มีค่าน้อยกว่า 0.05 โดยปัจจัยที่ส่งผลคือ ขนาดอนุภาคใหญ่และขนาดอนุภาคเล็ก และเมื่อนำมาพล็อตหาอิทธิพลของขนาดอนุภาคทั้งใหญ่และเล็ก ดังแสดงในรูปที่ 4.23 พบว่าที่ปริมาณอนุภาคขนาดใหญ่มากขึ้นรูปทรงที่ได้จะมีขนาดใหญ่และทางตรงกันข้าม การเพิ่มขึ้นของปริมาณอนุภาคขนาดเล็กรูปทรงที่ได้จะมีขนาดเล็ก ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้จากการคำนวณในการทดลองและผลการวิเคราะห์ด้วย Packing density

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	8	1283.1	160.39	4.98	0.014
Linear	4	868.2	217.05	6.74	0.009
L	2	443.5	221.77	6.89	0.015
S	2	424.7	212.33	6.59	0.017
2-Way Interactions	4	414.9	103.72	3.22	0.067
L*S	4	414.9	103.72	3.22	0.067
Error	9	289.8	32.20		
Total	17	1572.9			

รูปที่ 4.22 ผลการวิเคราะห์เชิงสถิติของขนาดอนุภาคต่อขนาดรูปทรง

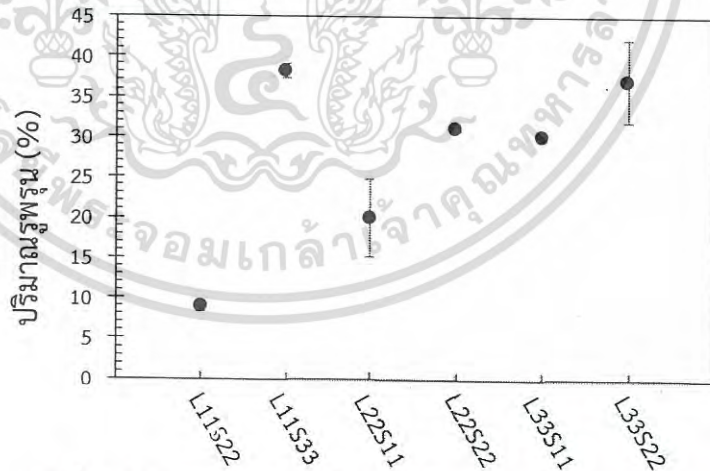


รูปที่ 4.23 อิทธิพลของขนาดอนุภาคต่อขนาดรูพรุนภายในวัสดุจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab

4.5.3 อิทธิพลของสัดส่วนขนาดอนุภาคพอลิเมอร์ต่อปริมาณรูพรุนและความแข็งของวัสดุ

● ปริมาณรูพรุนภายในวัสดุ

ผลของการวิเคราะห์ปริมาณของรูพรุนด้วยวิธีการดูดซึมของสารละลายในหัวข้อ 3.3.3 แสดงดังรูปที่ 4.24



รูปที่ 4.24 ปริมาณรูพรุนภายในวัสดุที่สัดส่วนขนาดอนุภาคต่างๆ

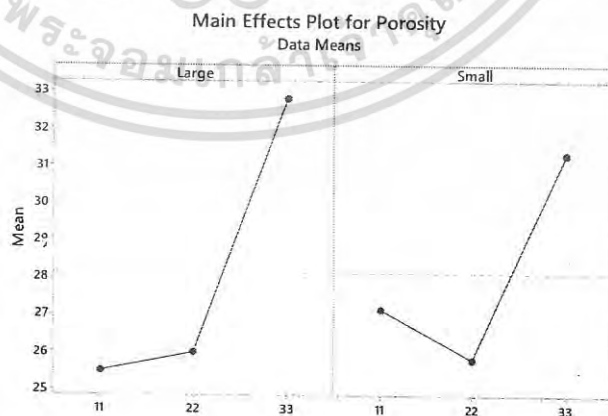
พบว่าปริมาณรูพรุนที่วัดได้มีค่าตั้งแต่ 20 จนถึง 40% โดยที่ปริมาณของอนุภาคขนาดใหญ่มีมากกว่าอนุภาคขนาดเล็ก รูพรุนที่ได้จะอยู่ในช่วง 30-35% แต่ที่ปริมาณของขนาดอนุภาคเล็กที่ผสมมีสัดส่วนมากกว่าอนุภาคขนาดใหญ่ กลับให้ผลของปริมาณรูพรุนที่แตกต่างมาก ที่สัดส่วน L11S22 พบว่าปริมาณรูพรุนที่วัดได้มี

ค่าประมาณ 10% แต่ที่สัดส่วน L11S33 พบว่าปริมาณรูพรุนที่วัดได้มีค่า 40% เป็นเพราะในตอนแรกมีปริมาณของอนุภาคขนาดเล็กมีมากกว่าขนาดเล็กประมาณ 1 เท่า (L11S22) ความหนาแน่นของการบรรจุมีค่ามาก ทำให้ช่องว่างที่เกิดขึ้นภายในวัสดุมีปริมาณที่น้อย รูพรุนที่เกิดขึ้นจากการเชื่อมติดกันของมอนอเมอร์จึงไปดบังช่องว่างเหล่านั้นจึงทำให้ปริมาณรูพรุนที่วัดได้มีค่าน้อย และเมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคขนาดเล็กมากขึ้นเป็น 3 เท่า (L11S33) ค่าความหนาแน่นของการบรรจุมีค่าลดลงทำให้เกิดช่องว่างมากขึ้น มอนอเมอร์ที่เกิดปฏิกิริยาและทำหน้าที่เชื่อมติดระหว่างอนุภาคจะเชื่อมอนุภาคขนาดเล็กเอาไว้เป็นส่วนใหญ่ดังแสดงในรูปที่ 4.17-4.19 และเมื่อนำไปวิเคราะห์ผลด้วยวิธีทางสถิติพบว่าปัจจัยที่ส่งผลต่อปริมาณของรูพรุนคือ สัดส่วนขนาดอนุภาคขนาดใหญ่และขนาดเล็ก จากการวิเคราะห์ด้วยค่า P-value น้อยกว่า 0.05 และเมื่อนำไปพล็อตหาอิทธิพลของขนาดอนุภาคต่อปริมาณรูพรุนดังรูปที่ 4.26 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณเม็ดอนุภาคขนาดใหญ่และขนาดเล็กจะส่งผลให้ปริมาณรูพรุนเพิ่มมากขึ้น ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ด้วย ANOVA นี้สอดคล้องกับข้อสันนิษฐานที่กล่าวข้างต้น

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	8	1303.78	162.972	244.46	0.000
Linear	4	300.22	75.056	112.58	0.000
L	2	201.44	100.722	151.08	0.000
S	2	98.78	49.389	74.08	0.000
2-Way Interactions	4	1003.56	250.889	376.33	0.000
L*S	4	1003.56	250.889	376.33	0.000
Error	9	6.00	0.667		
Total	17	1309.78			

รูปที่ 4.25 ผลการวิเคราะห์เชิงสถิติของขนาดอนุภาคต่อปริมาณรูพรุน

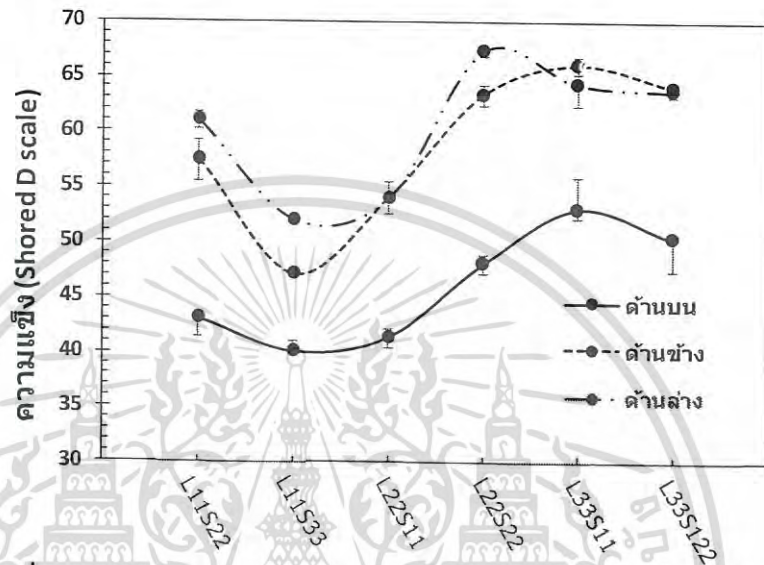


รูปที่ 4.26 อิทธิพลของขนาดอนุภาคต่อปริมาณรูพรุนภายในวัสดุจากการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Minitab

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

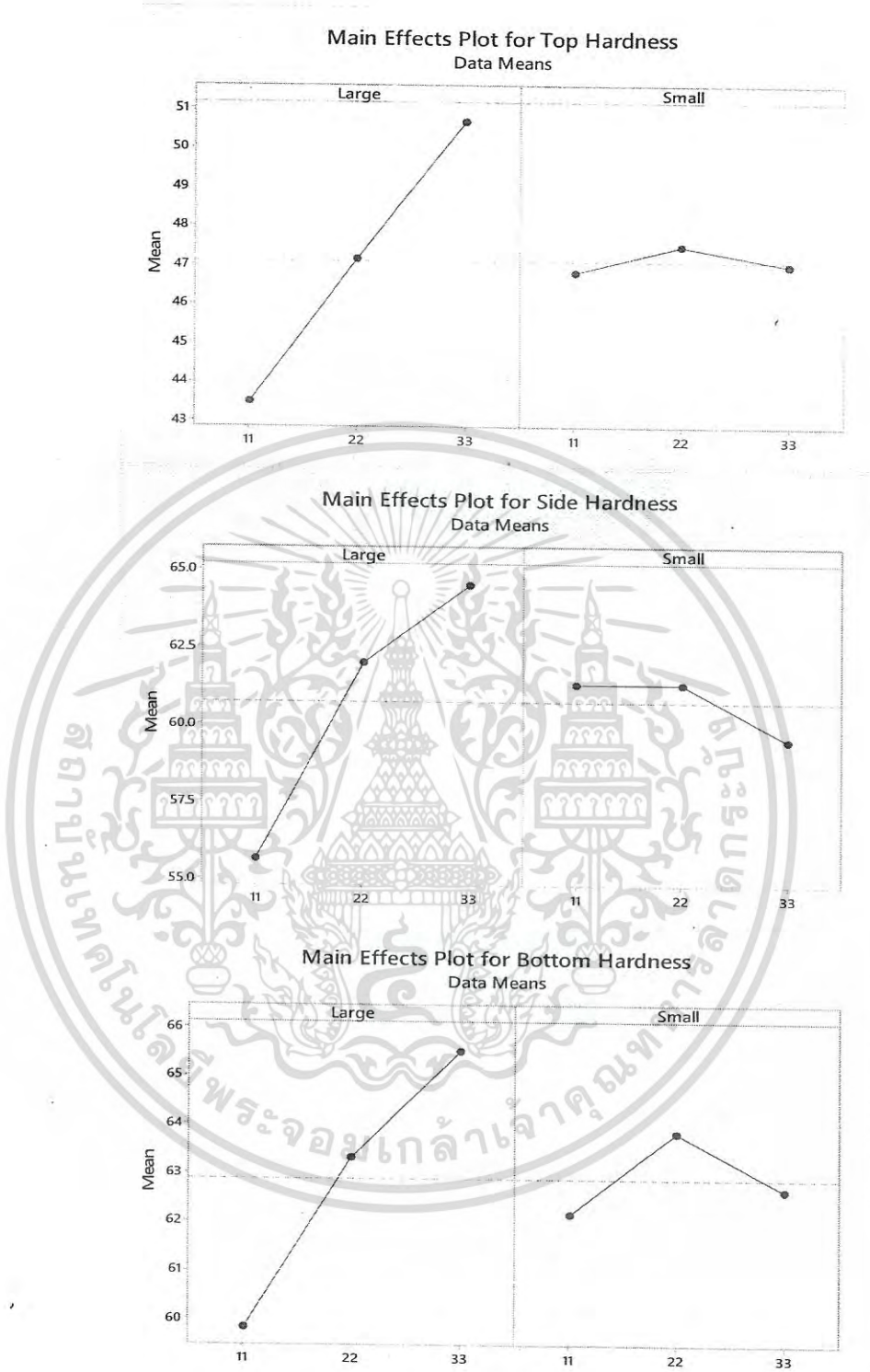
● ความแข็งของวัสดุ

เมื่อนำวัสดุรูปทรงแปดเหลี่ยมมาวัดความแข็งด้วยเครื่องมือ Durometer ในหน่วยการวัด Shored D scale ที่ตำแหน่งต่างๆกันดังนี้ ด้านบน, ด้านข้าง และด้านล่างของวัสดุพบว่าความแข็งที่วัดได้มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังรูปที่ 4.27



รูปที่ 4.27 ความแข็งของวัสดุบริเวณต่างๆที่สัดส่วนขนาดอนุภาคพอลิเมอร์ต่างๆ

จากรูป 4.24 สามารถแบ่งการวิเคราะห์ความแข็งเป็น 2 ส่วน คือ ที่สัดส่วนขนาดอนุภาคใหญ่น้อยกว่าขนาดอนุภาคเล็ก (L11S22, L11S33) และที่สัดส่วนตรงกันข้าม (L22S11, L22S22, L33S11, L33S22) พบว่าในส่วนที่ขนาดอนุภาคใหญ่น้อยกว่าขนาดอนุภาคเล็กนั้น ความแข็งมีแนวโน้มลดลงเมื่อขนาดอนุภาคเล็กมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ซึ่งให้ผลแบบเดียวกันเมื่อสัดส่วนอนุภาคขนาดใหญ่มีมากขึ้น และปริมาณอนุภาคขนาดเล็กมากขึ้นเช่นกัน และในส่วนของด้านที่วัดความแข็งพบว่า ความแข็ง ณ บริเวณด้านบน ซึ่งพื้นผิวไม่ติดกับผนังของแม่พิมพ์มีความแข็งที่น้อยกว่าเมื่อเทียบกับด้านอื่นๆ และที่ด้านข้างและด้านล่างมีความแข็งที่ใกล้เคียงกัน สาเหตุเนื่องมาจากในการหล่อด้านล่างและด้านข้างของวัสดุที่ถูกเทลงไปจะถูกทับและกดอัดกันด้วยแรงโน้มถ่วงทำให้อนุภาคพอลิเมอร์มีการชิดตัวกันมากกว่าเมื่อเทียบกับด้านบน เพราะด้านบนไม่มีแรงกระทำในลักษณะแรงกดลงบนผิวหน้าทำให้ที่พื้นผิวด้านบนของวัสดุอัดตัวกันได้น้อย ความแข็งที่วัดได้จึงมีค่าต่ำกว่าด้านล่างและด้านข้าง เมื่อนำมาวิเคราะห์หาอิทธิพลของขนาดอนุภาคต่อความแข็งที่ตำแหน่งต่างๆดังรูปที่ 4.28 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณอนุภาคขนาดใหญ่ความแข็งที่วัดได้มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ซึ่งปริมาณอนุภาคขนาดเล็กส่งผลต่อความความแข็งค่อนข้างน้อย



รูปที่ 4.28 แสดงอิทธิพลของปริมาณอนุภาคขนาดเล็กและใหญ่ต่อความแข็งที่บริเวณต่างๆ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สรุปผลการศึกษา

5.1 สรุปผลอิทธิพลของปริมาณน้ำต่อพฤติกรรมทางความร้อน

งานวิจัยชิ้นนี้ได้ศึกษาการขึ้นรูปวัสดุรูปทรงแปดเหลี่ยมด้วยการผสมพอลิเมอร์และมอนอเมอร์โดยมีน้ำเป็นส่วนผสม พบว่าอิทธิพลของน้ำที่ส่งผลต่อที่พฤติกรรมทางความร้อนที่พบมีด้วยกันสองประการ

อิทธิพลประการแรกคือ ส่งผลต่ออุณหภูมิสูงสุดที่เกิดขึ้นของปฏิกิริยาสังเกตได้จากกราฟโปรไฟล์ของอุณหภูมิขณะเกิดปฏิกิริยามีค่าลดลง และลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงปริมาณของน้ำที่ผสม 40% ขึ้นไปอุณหภูมิสูงสุดที่เกิดปฏิกิริยาเริ่มลดลงทีละน้อย เนื่องมาจากน้ำทำหน้าที่เป็นสารดูดซับความร้อนขณะเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชัน ทำให้เมื่อปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นความร้อนจึงถูกกักเก็บไว้ที่น้ำได้เยอะ อุณหภูมิสูงสุดที่เกิดปฏิกิริยาโดยรวมของทั้งวัสดุจึงลดลง เมื่อนำกราฟโปรไฟล์ของอุณหภูมิไปวิเคราะห์ความร้อนปรากฏที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันด้วยสมการทางเทอร์โมไดนามิกส์ เทียบกับการคำนวณความร้อนจากปฏิกิริยาด้วยการคำนวณจากหมู่ฟังก์ชันของมอนอเมอร์โดย Sudipta Roy พบว่าปริมาณความร้อนที่คำนวณได้มีค่าใกล้เคียงกันมาก แสดงถึงการคำนวณปริมาณความร้อนของวัสดุมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ และเมื่อวิเคราะห์ถึงปริมาณน้ำที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความร้อนปรากฏที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยามีค่าลดลงเนื่องจากมวลของน้ำที่เพิ่มขึ้นสามารถกักเก็บความร้อนได้ดีมากขึ้น

อิทธิพลประการที่สองคือ ส่งผลต่อเวลาในการเริ่มปฏิกิริยาในขั้นตอนเดบิตโตของสายโซ่ข้าง เมื่อเทียบกับเวลาในการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุที่ไม่ผสมน้ำ ซึ่งสังเกตได้จากกราฟโปรไฟล์อุณหภูมิที่ปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นเวลาในการเกิดปฏิกิริยาข้างและที่ปริมาณน้ำ 80% ปฏิกิริยาเกิดช้าลงไปกว่าหนึ่งชั่วโมงครึ่ง เนื่องจากน้ำกักเก็บความร้อนไว้จนความร้อนภายในวัสดุขณะเกิดปฏิกิริยาไม่เพียงพอที่ทำให้สารริเริ่มแตกตัวให้อนุมูลอิสระสำหรับถ่ายเทไปยังมอนอเมอร์ เพื่อทำปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันในขั้นตอนการเดบิตโตของสายโซ่

5.2 สรุปผลอิทธิพลของปริมาณน้ำต่อโครงสร้างสัณฐานวิทยา

เมื่อพิจารณาภาพ SEM พบว่าน้ำประพุดิตัวคล้ายกับสารที่คงสภาพความเป็นรูปทรงภายในของวัสดุ เนื่องจากน้ำเป็นสารขจัดขวางไม่ให้มอนอเมอร์เกิดการเชื่อมติดกันอย่างสมบูรณ์ ซึ่งเมื่อปริมาณน้ำเพิ่มมากขึ้นปริมาณรูปทรงภายในวัสดุรวมถึงขนาดของรูปทรงเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยปริมาณรูปทรงที่เกิดขึ้นเพิ่มขึ้นเป็นแบบเอกโพแนนเชียล ตั้งแต่ 30% จนถึง 140% สาเหตุของการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของปริมาณรูปทรงมาจากเมื่อปริมาณน้ำมากขึ้นน้ำจะเข้าไปแทรกระหว่างอนุภาคพอลิเมอร์มากขึ้นจนมอนอเมอร์ไม่สามารถเกาะติดกับเม็ดอนุภาคพอลิเมอร์ได้ทำให้ระยะห่างระหว่างเม็ด

อนุภาคพอลิเมอร์ห่างมากขึ้นส่งผลให้มีปริมาณรูพรุนเพิ่มมากขึ้นนั่นเอง และขนาดรูพรุนที่วัดได้เมื่อปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นก็เป็นเหตุผลเช่นเดียวกัน

ในส่วนของความแข็งซึ่งวัดในระบบ Shored D scale พบว่าความแข็งของวัสดุจะลดลงอย่างมากเมื่อปริมาณน้ำที่ผสมเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากความแข็งของวัสดุเกิดจากมอนอเมอร์ที่เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน ทำให้เมื่อปริมาณน้ำที่ผสมเข้าไปเพิ่มมากขึ้นมอนอเมอร์จึงเกิดปฏิกิริยาได้น้อยลงดังที่สรุปการอภิปรายไว้ข้างต้นทำให้วัสดุมีความแข็งที่ลดลง โดยความแข็งที่ลดลงจะลดลงอย่างรวดเร็วที่ปริมาณน้ำในวัสดุเพิ่มมาตั้งแต่ 40% เป็นต้นไป

5.3 สรุปผลอิทธิพลของสัดส่วนขนาดอนุภาคต่อพฤติกรรมทางความร้อน

จากผลของการวิเคราะห์อิทธิพลของสัดส่วนขนาดของอนุภาคที่ผสมแตกต่างกันต่อกราฟโปรไฟล์ของอุณหภูมิ พบว่าขนาดอนุภาคทั้งขนาดใหญ่และขนาดเล็กส่งผลต่อกราฟโปรไฟล์ของอุณหภูมิอย่างไม่มีนัยสำคัญ ซึ่งวิเคราะห์ได้จากผลการวิเคราะห์เชิงสถิติด้วย ANOVA แต่อัตราการของทั้งสองอนุภาคมีแนวโน้มที่จะส่งผลเล็กน้อย โดยที่ปริมาณของเมื่อสัดส่วนของปริมาณอนุภาคขนาดเล็กมากกว่าขนาดใหญ่ 3 เท่า ส่งผลให้อุณหภูมิสูงสุดของปฏิกิริยามีค่าลดลงซึ่งอาจเกิดจากการปั่นกวานไม่สามารถกระจายตัวสารริเริ่มให้ทั่วถึง ทำให้สารริเริ่มแตกตัวให้อนุมูลอิสระไม่สมบูรณ์ ทำให้การเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันระหว่างสไตรีนมอนอเมอร์และที่ผิวของอนุภาคขนาดเล็กเกิดความร้อนขึ้นน้อยลง เนื่องจากปริมาณรูพรุนที่เกิดขึ้นภายในวัสดุมีน้อยทำให้มีน้ำเข้าไปแทรกตัวได้น้อย ความร้อนที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันจึงถ่ายเทไปยังน้ำลดลง ส่งผลให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นที่ปริมาณรูพรุนน้อย

5.4 สรุปผลอิทธิพลของสัดส่วนขนาดอนุภาคต่อโครงสร้างพื้นฐานวิทยา

อิทธิพลของสัดส่วนอนุภาคขนาดใหญ่และเล็กต่อสัณฐานวิทยานั้น ในส่วนของอิทธิพลต่อโครงสร้างภายในรูพรุนจากภาพสัณฐานวิทยา พบว่าที่สัดส่วนปริมาณของอนุภาคขนาดใหญ่เท่ากับหรือมากกว่าอนุภาคขนาดเล็ก โครงสร้างรูพรุนภายในสามารถเห็นการเชื่อมติดกันของมอนอเมอร์ได้ดีกว่าที่สัดส่วนอนุภาคขนาดเล็กเยอะกว่าขนาดใหญ่ ซึ่งอนุภาคขนาดใหญ่เป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้มอนอเมอร์เกิดปฏิกิริยาและห่อหุ้มกับอนุภาคพอลิเมอร์เพื่อสร้างโครงร่างรูพรุนขึ้นภายใน

ในส่วนของอิทธิพลต่อขนาดรูพรุนเฉลี่ยภายในวัสดุ พบว่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนที่เกิดขึ้นอยู่ระหว่าง 20-50 ไมโครเมตร โดยที่สัดส่วนปริมาณอนุภาคขนาดเล็กมากกว่าขนาดใหญ่ รูพรุนจะมีขนาดเล็กประมาณ 20-30 ไมโครเมตร และมีการกระจายตัวของรูพรุนน้อย แต่ที่สัดส่วนอนุภาคขนาดใหญ่มากกว่า ขนาดรูพรุนเฉลี่ยจะอยู่ที่ประมาณ 40-50 ไมโครเมตร ขนาดของรูพรุนที่ต่างกันนั้นเกิดจากความหนาแน่นของการบรรจุซึ่งเกิดจากสัดส่วนของอนุภาคที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางต่างกันมาผสมกัน จะเกิดช่องว่างภายในระหว่างอนุภาคไม่เท่ากัน ซึ่งสอดคล้องกับการคำนวณทางสถิติด้วย

ANOVA พบว่าทั้งขนาดอนุภาคเล็กและใหญ่ส่งผลต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของรูพรุนอย่างมีนัยสำคัญ

และสุดท้ายอิทธิพลของสัดส่วนต่อปริมาณรูพรุนภายในวัสดุและความแข็ง พบว่าที่สัดส่วนปริมาณอนุภาคขนาดใหญ่มากกว่าอนุภาคขนาดเล็ก ปริมาตรรูพรุนที่วัดได้มีแนวโน้มที่สูง ประมาณ 30-40% เมื่อเปรียบเทียบกับที่สัดส่วนอนุภาคขนาดใหญ่ต่ำ แต่อย่างไรก็ตามพบว่าที่ปริมาณของอนุภาคขนาดเล็กสูงคือที่สัดส่วน GP11AP33 พบว่าความปริมาตรรูพรุนที่วัดได้มีค่าสูง เพราะความหนาแน่นของการบรรจุมีค่าน้อยทำให้มีช่องว่างระหว่างอนุภาคมากขึ้น รูพรุนที่เกิดขึ้นภายในจึงมีปริมาณมาก และเมื่อนำวัสดุไปวัดความแข็งในหน่วยของ Shored D ที่ตำแหน่งต่างๆกัน พบว่าที่ตำแหน่งด้านล่างและด้านข้างของวัสดุมีความแข็งที่มากกว่าด้านบน ซึ่งเกิดจากอนุภาคที่อยู่ด้านล่างมีแรงกดทับ ทำให้มีแรงอัดและอนุภาคเกิดการชิดตัวกันมากกว่าด้านบนซึ่งไม่มีแรงมากกดทับ และที่สัดส่วนของปริมาณอนุภาคขนาดใหญ่มากกว่าส่งผลให้ความแข็งที่เกิดขึ้นมีค่ามากกว่าที่สัดส่วนอนุภาคขนาดเล็ก สอดคล้องกับการคำนวณในเชิงสถิติ

5.5 ข้อเสนอแนะ

1. ในงานวิจัยนี้ศึกษาการปรับเปลี่ยนสัดส่วนของน้ำและขนาดของอนุภาคที่ผสมลงในการขึ้นรูป ซึ่งในทางปฏิบัติแล้วยังมีอีกหลายตัวแปรที่สามารถทำการศึกษาเพิ่มเติมได้ เพื่อให้วัสดุรูพรุนมีคุณสมบัติตามที่ต้องการ ไม่ว่าจะเป็นขนาดรูพรุน ความแข็ง เป็นต้น ดังนั้นหากสามารถทดลองโดยการปรับเปลี่ยนตัวแปรอื่นๆเพิ่มขึ้นไปจะสามารถทำนายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรแต่ละตัวกับคุณสมบัติที่ได้จากการหล่อวัสดุที่ครบถ้วนหลายมิติมากขึ้น

2. งานวิจัยนี้ได้ใช้ น้ำ เป็นสารสำหรับคงสภาพความเป็นรูพรุน สามารถเติมสารเคมีบางชนิดผสมเข้าไปเพื่อให้มีคุณสมบัติต่างๆ น่าจะทำให้รูพรุนภายในมีหมู่ฟังก์ชันที่สามารถนำไปใช้งานในอุตสาหกรรมได้หลากหลายมากขึ้น

3. ในงานวิจัยชิ้นนี้ยังไม่สามารถสรุปถึงปริมาณน้ำที่เหมาะสมที่สุดในการทดลองครั้งนี้ได้ เนื่องจากการนำวัสดุรูพรุนนี้ไปประยุกต์ใช้นั้นจำเป็นต้องคำนึงถึงคุณลักษณะของสารที่จะนำผ่านรูพรุน เช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคที่ไหลผ่านรูพรุน เป็นต้น แต่ผู้วิจัยสามารถแนะนำได้คือที่ปริมาณน้ำ 25-31% วัสดุมีความแข็งที่มากพอสำหรับรับแรงดันได้ในระดับหนึ่งแต่ในเรื่องของเส้นผ่านศูนย์กลางรูพรุนนั้นจำเป็นต้องศึกษาเพิ่มเติมเพื่อหาภาวะที่เหมาะสมสำหรับงานแต่ละชนิดนั้นๆ

เอกสารอ้างอิง

- [1] Birley W., Haworth B., Batchelor J., "Physics of Plastics : Processing, Properties and Materials Engineering". Hanser, 1992.
- [2] Carraher C.E., "Introduction to Polymer Chemistry 2nd". CRC Press, 12 January 2010.
- [3] F. Ullmann. "Encyclopedia of Industrial Chemistry", Wiley VCH, 1999-2012.
- [4] Kirk R. E., Othmer D. F., "Encyclopedia of Chemical Technology", John Wiley and Sons, 1999-2012.
- [5] Mangala S., "Lecture 36-37 Introduction to Polymerization Technology", NPTEL.
- [6] Goto A., Sato K., Tsujii Y., Fukuda T., Moad G., Rizzardo E. and Thang S.H., "Mechanism and Kinetics of RAFT-Based Living Radical Polymerizations of Styrene and Methyl Methacrylate". *Macromolecules*, 2001, Vol.34, pp. 402-408
- [7] Matyjaszewski K., "Controlled Radical Polymerization". *American Chemical Society*, Vol.685, 8 January 1998.
- [8] Mishra M. K., Yagci Y., *Handbook of Vinyl Polymers : Radical Polymerization, Process, and Technology 2nd*. CRC Press, 2008
- [9] Ravve A., (2006). "Light-Associated Reactions of Synthetic Polymers". Springer Science+Business Media, LLC. ISBN 0-387-31803-8.
- [10] Dotson N. A., Galván R., Lawrence R. L., and M. Tirrell, "Polymerization Process Modeling". New York: VCH Publishers, 1996.
- [11] Franklin J.L., "Prediction of Heat and Free Energies of Organic Compounds". *Industrial and engineering chemistry*, May 1949, Vol 41 No.5, pp. 1070-1076
- [12] Van Keevelen D.W., Chermis H.A.G. "Estimation of the free enthalpy (Gibbs free energy) of formation of organic compounds from group contributions". *Chemical Engineering Science*, 6 May 1951, pp. 66-80.
- [13] Domalski E.S. and Hearing E.D., "Estimation of the Thermodynamic of Hydrocarbons at 298.15 K". *Physical Chemistry*, Vol.17 No. 4, 1998.
- [14] Rihani D.N. and Doriaswamy L.K., "Estimation of Heat of Formation of Organic Compounds". *Ind. Eng. Chem. Fundamental* 4, 1965, pp. 17-21.
- [15] Sudipta R., "Calculation of heat of polymerization: group-contribution method". *Polymer Bulletin* 40, 1999, pp. 229-236.
- [16] Grikina O.Y., Stepanov N.F., Tatevskii V.M. and Yarovoi S.S., "Calculation of The Entropy of Polymerization and Copolymerization Constants by The Structural-

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Element Contribution Method”. *Polymer Science U.S.S.R.*, Vol. 13, Issue 3, 1971, pp. 653-677
- [17] De Jonghe L.C. and Rahaman M.N.. “Sintering of Ceramics”. *Handbook of advanced ceramics*, Elsevier Inc., 2003, pp. 187-264.
- [18] “Production of Sintered Component”. *Höganäs Handbook of Sintered Components*, Höganäs AB, December 2013, pp. 68-115.
- [19] Zhu Y.S., Xiao S.Y., Li M.X., Chang Z., Wang F.X., Gao J. and Wu Y.P., “Natural macromolecule based carboxymethyl cellulose as a gel polymer electrolyte with adjustable porosity for lithium ion batteries”. *Journal of Power Sources*, Vol. 288, 2015, pp. 368-375.
- [20] Arora P. and Zhang Z.J.. “Battery Separators”. *Chem. Rev.*, Vol. 104, 2004, p. 4419-4462.
- [21] Huang X.. “Separator technologies for lithium-ion battery”. *J Solid State Electrochem*, Vol. 15, 2011, pp. 649-662.
- [22] Gordon England : Independent Metallurgist and Consultant to the Thermal Spray Coating Industry, “Hardness Testing”. [Online]. Available : <http://www.gordonengland.co.uk/hardness>
- [23] CALCE and the University of Maryland, “Material Hardness”. [Online] Available : http://www.calce.umd.edu/TSFA/Hardness_ad_.html
- [24] “Standard Test Method for Determination of Gel Content and Swell Ratio of Crosslinked Ethylene Plastics : ASTM 2765”. *American Society for Testing and Materials (ASTM International)*.
- [25] Kurbatov V.Ya., “Specific heats of liquids. III. Specific heat of hydrocarbons with several noncondensed rings”, *Zhur. Obshch. Khim.*, , Vol. 20, 1950, pp. 1139-1144.
- [26] Hernández-Sánchez F., “Heat Capacity Measurement in Polymers Using a Differential Scanning Calorimeter: Area Measurement Method”, *Journal of Applied Polymer Science*, DOI 10.1002/app.26418, 5 June 2007, pp. 3562-3567.
- [27] German R.M. and Park S.J., “Handbook of Mathematical Relations in Particulate Materials Processing”, *John Wiley & Sons*, 2008.
- [28] Food network solution, “Equivalent diameter”. [Online] Available : <http://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/4189>.
- [29] Yang W.C., “Handbook of Fluidization and Fluid-Particle Systems”, *Marcel Dekker, Inc.*, 2003.
- [30] Olson E., “Particle Shape Factors and Their Use in Image Analysis-Part 1: Theory”, *Journal of GXP Compliance*, Vol. 15, Summer 2011.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

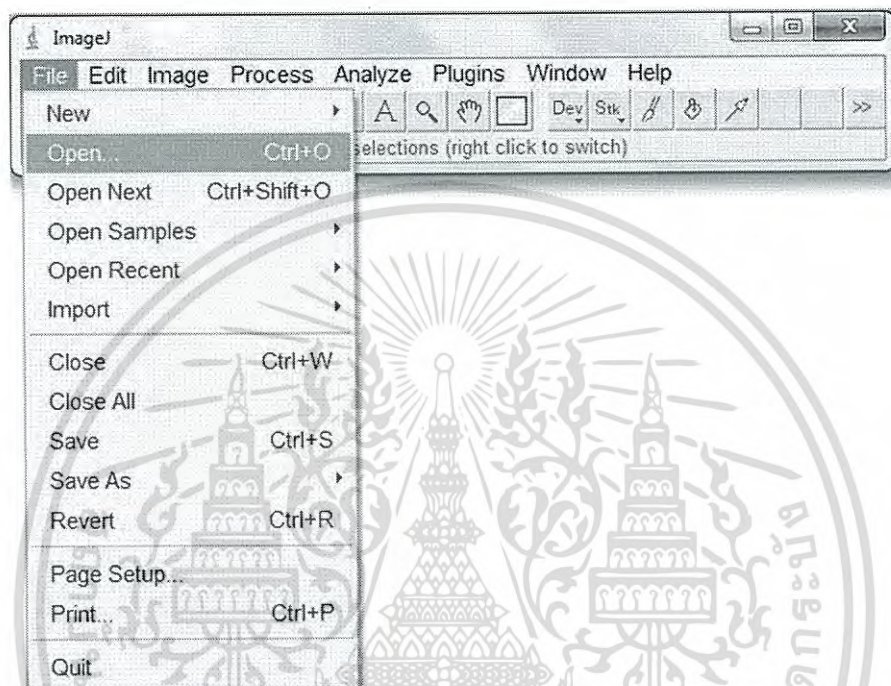


เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของวัสดุที่จะทำการวัดค่าคือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนที่เกิดขึ้นภายในวัสดุ

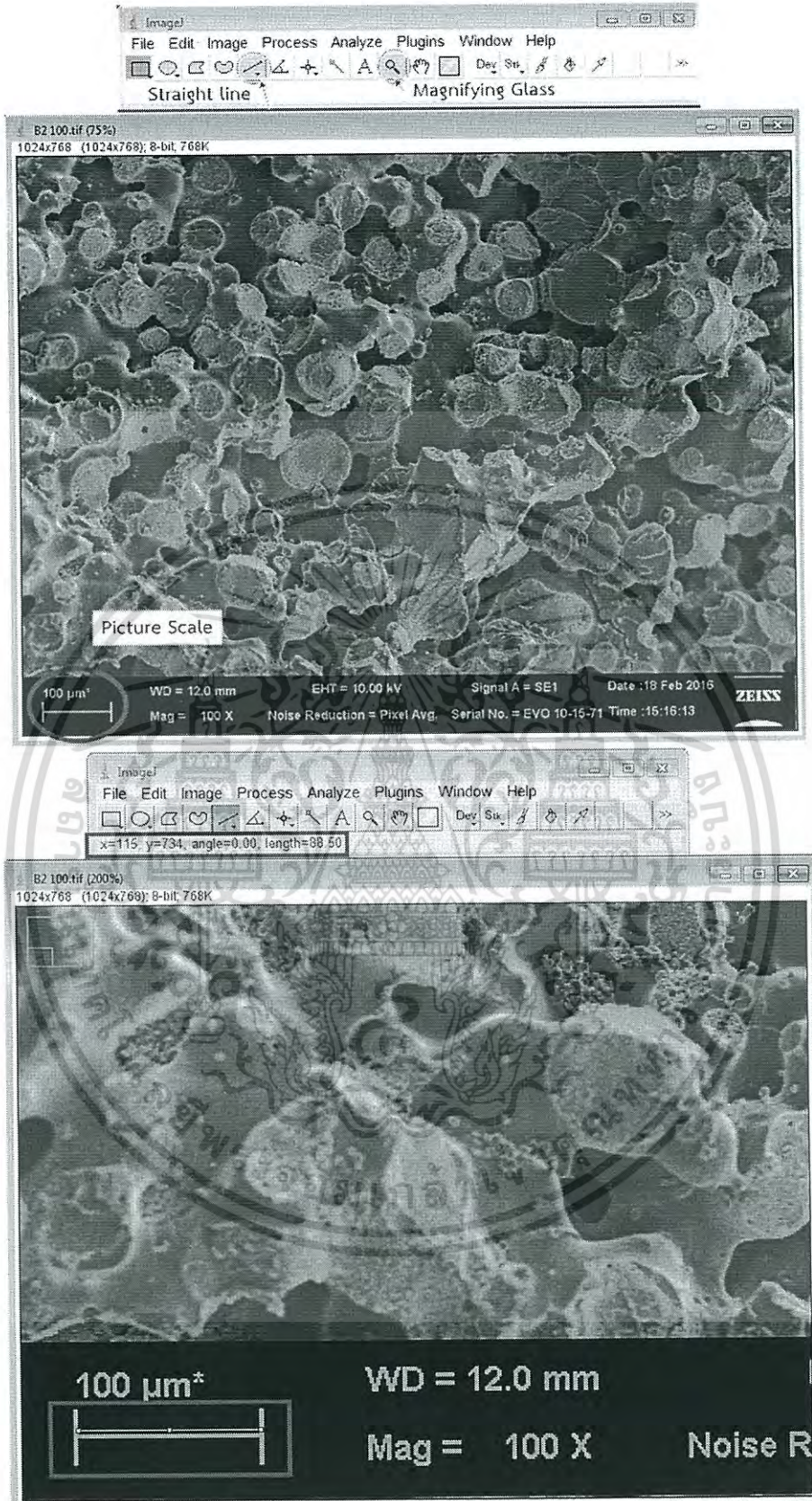
ก.1 การวิเคราะห์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางที่เกิดขึ้นภายในรูพรุนวัสดุ

1. เปิดโปรแกรม Image J จากนั้นเลือกภาพไมโครกราฟที่ต้องการวิเคราะห์ด้วยการเข้าไปที่ File ต่อด้วย Open และเลือกรูปที่ต้องการวิเคราะห์ ดังรูปที่ ก.1 (หมายเหตุ ภาพที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM จะเรียกว่าภาพ “ไมโครกราฟ”)



รูปที่ ก.1 การเปิดภาพไมโครกราฟด้วยโปรแกรม ImageJ

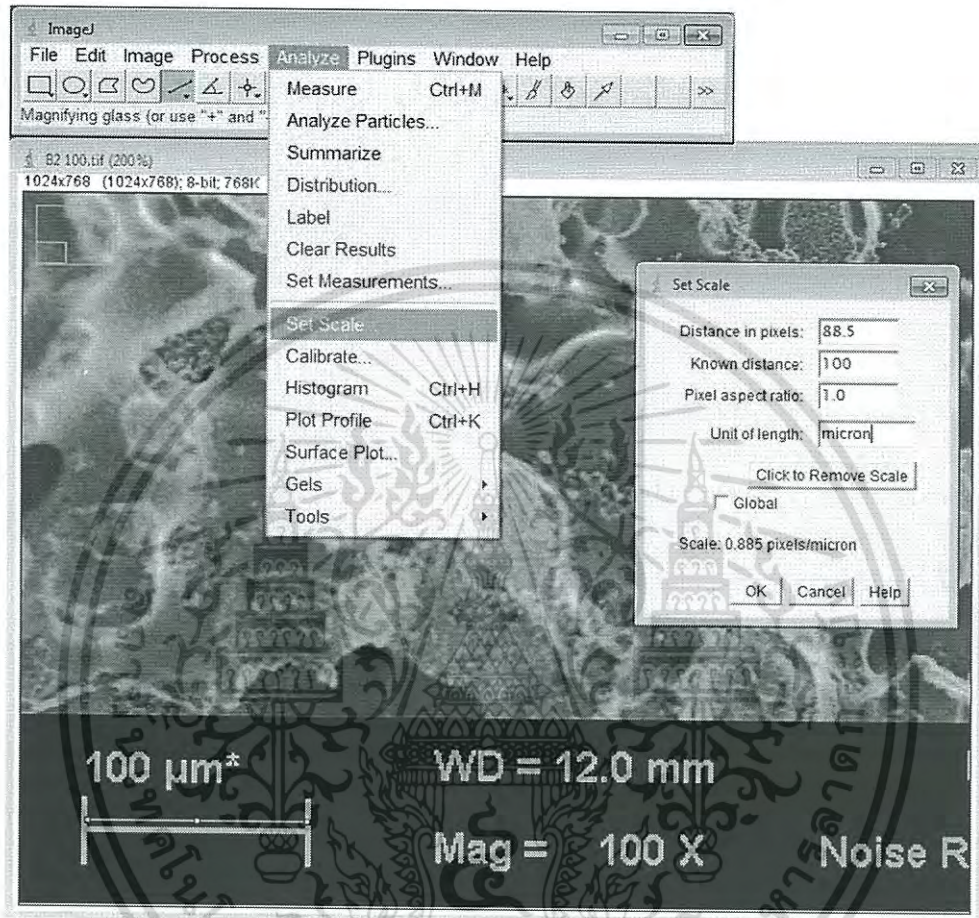
2. จากนั้นให้ทำการ Set Scale เพื่อเทียบอัตราส่วนของขนาดภาพกับขนาดของจริง โดยเริ่มจากเครื่องมือแว่นขยาย หรือ Magnifying Glass เพื่อทำการขยายภาพ และเลือกเครื่องมือเส้นตรง หรือ Straight line บนแถบเครื่องมือ ดังรูปที่ ก.2 แล้วลากเส้นตรงทับลงบนแถบสเกลบนภาพไมโครกราฟบริเวณมุมซ้ายล่าง โดยให้ลากให้เป็นเส้นตรงคือมีค่า angle = 0.00 สังเกตได้จากบริเวณแถบเครื่องมือ



รูปที่ ก.2 การกำหนดสเกลให้โปรแกรม Image J

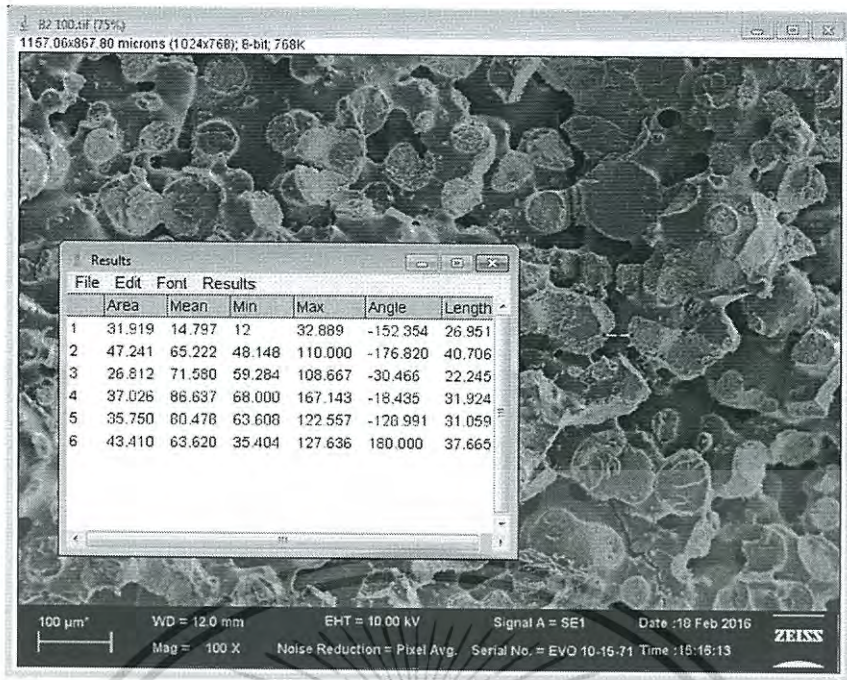
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. จากนั้นไปที่เมนู Analyze และเลือก Set Scale จะมีแถบเมนูขึ้นมาตามรูปที่ ก.3 และมี length = 88.50 นั้นหมายถึงถ้าโปรแกรมอ่านค่าความยาวได้ 88.50 จะมีความยาวเท่ากับ 100 μm จากนั้นให้เช็คค่าตามที่กล่าวมา และเช็คค่าตรงช่องหน่วยของความยาวหรือ Unit of length ว่า micron ซึ่งเป็นชื่อย่อของหน่วย micrometer (μm) นั่นเอง จากนั้นกด OK



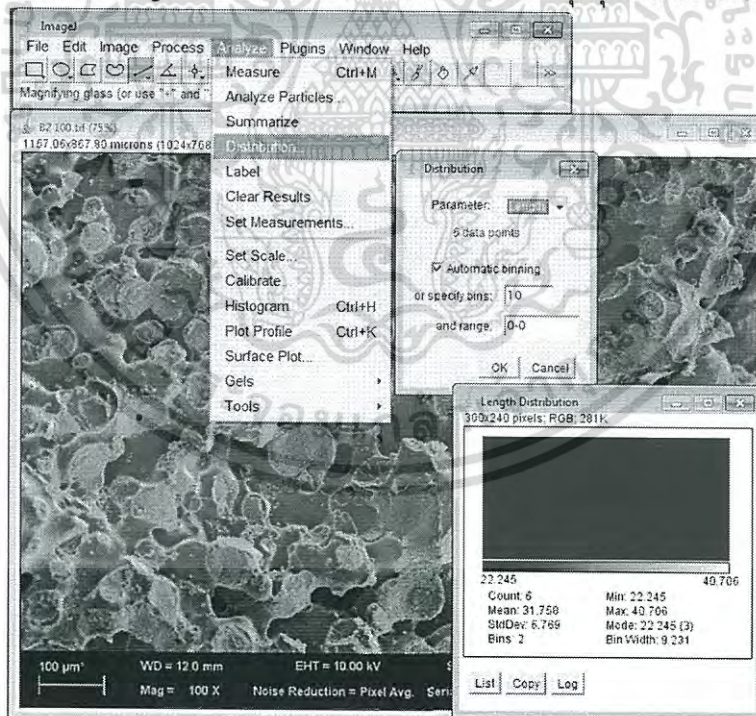
รูปที่ ก.3 การตั้งค่าสเกลให้โปรแกรม Image J

4. เลือกเครื่องมือเส้นตรงอีกครั้งหนึ่ง และลากเส้นลงบนบนรูปพรุน จากนั้นไปที่แถบเครื่องมือ โดยเลือก Analyze และคลิก Measure (หรืออาจจะใช้คีย์ลัดโดยการกดปุ่ม Ctrl+M) ซึ่งโปรแกรมจะบันทึกขนาดของเส้นตรงที่ได้ลากไว้ที่คอลัมน์ Length ดังรูปที่ ก.4



รูปที่ ก.4 การวัดขนาดของรูพรุน

5. ทำการวัดขนาดรูพรุนซ้ำเพื่อหาการกระจายตัวและค่าเฉลี่ยของรูพรุน จากนั้นไปที่แถบเครื่องมือเลือก Analyze และคลิกที่ Distribution จะมีหน้าต่างปรากฏดังรูปที่ ก.5 จากนั้นกำหนดช่อง Parameter เป็น Length กด OK และจะได้ค่าเฉลี่ยของขนาดรูพรุนเป็น 31.758 μm



รูปที่ ก.5 การวิเคราะห์ภาพไมโครกราฟ







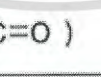
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



ภาคผนวก ข
ค่า S_R -Value ในงานวิจัยของ Sudipta Roy

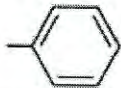
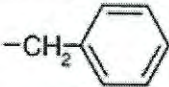
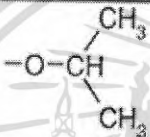
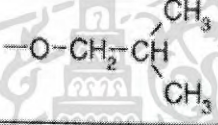
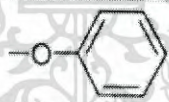
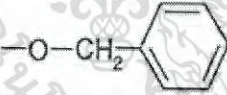

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 แสดงค่า S_R -Value ที่ได้จากงานวิจัยของ Sudipta Roy

Monomer Units	S_R Value
	-24.2
	-0.7
-OH	7.9
	12.9
-C≡N	9.5
-F	15.8
-Cl	8.3
-H	11.0
-CH ₃	11.3
-CH ₃ (in the same C with -CH ₃)	2.6
-CH ₃ (in the same C with -CH ₂ -CH ₃)	3.6
-CH ₃ (in the same C with )	2.9
-CH ₃ (in the same C with -Cl)	10.1
-CH ₃ (in the same C with -C≡N)	6.2
-CH ₃ (in the same C with )	-10.3
-CH ₃ (alpha to )	6.0
-CH ₃ (cis to -CH ₃)	10.1
-CH ₃ (trans to -CH ₃)	9.6
-CH ₂ -CH ₃	11.2
-CH ₂ -CH ₃ (alpha to )	1.8
-CH ₂ -CH ₂ -CH ₃	11.1
-CH ₂ -CH ₂ -CH ₂ -CH ₃	11.0
-CH ₂ -CH ₂ -CH ₂ -CH ₂ -CH ₃	11.0
-CH ₂ -CH ₂ -CH ₂ -CH ₂ -CH ₂ -CH ₃	11.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข.1 แสดงค่า S_R -Value ที่ได้จากงานวิจัยของ Sudipta Roy (ต่อ)

	7.7
	1.5
$-O-CH_3$	10.6
$-O-CH_2-CH_3$	10.7
$-O-CH_2-CH_2-CH_3$	10.8
$-O-CH_2-CH_2-CH_2-CH_3$	10.9
$-O-CH_2-CH_2-CH_2-CH_2-CH_3$	10.9
$-O-CH_2-CH_2-CH_2-CH_2-CH_2-CH_3$	10.9
	11.2
	11.2
$-O-CH=CH_2$	19.4
	9.2
	10.3
	9.1
$-O-CH_2-CH_2-OH$	8.9
$-O-CH_2-CH(OH)-CH_3$	9.0

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-นามสกุล นายสันติภาพ ไทยเกิด
วัน เดือน ปีเกิด 18 มิถุนายน 2536
ที่อยู่ 180/125 หมู่บ้านไกรวงษ์ 2 ม.5 ต.บ้านฉาง อ.บ้านฉาง จ.ระยอง
21130

ประวัติการศึกษา

- พ.ศ. 2551 - 2553 มัธยมศึกษาตอนปลาย สาขาวิชาวิทยาศาสตร์-คณิตศาสตร์
โรงเรียนบ้านฉางกาญจนกุลวิทยา จ.ระยอง
- พ.ศ. 2554 - 2557 วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ผลงานประสบการณ์ การประกวดแข่งขัน หรือบทความทางวิชาการที่ได้รับการตีพิมพ์

- พ.ศ. 2555 รางวัลชมเชย การแข่งขันพัฒนากระบวนการผลิต บริษัท ไทยยูเนี่ยน
โพรเซ่น โปรดักส์
- พ.ศ. 2556 ฝึกงานต่างประเทศ ณ ห้องแลปปฏิบัติการพอลิเมอร์ มหาวิทยาลัย
มากาตะ ประเทศญี่ปุ่น
- พ.ศ. 2556 ฝึกงานภาคฤดูร้อน ณ บริษัท แกรนด์สยาม คอมโพสิต จำกัด
- พ.ศ. 2557 งานประชุมวิชาการวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย
ครั้งที่ 24 ภาควิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบัน
เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จังหวัดเชียงใหม่
ระหว่างวันที่ 18-19 ธันวาคม 2557 ในหัวข้อเรื่อง “การศึกษา
ความสามารถในการเป็นโพลีเมอร์ของเส้นใยเชิงเดี่ยวโพลีโพรพิลีน
ด้วยคาร์บอนไดออกไซด์เหนือวิกฤต”

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้