



การศึกษาการเตรียมและการดูตีม้าของไฮโดรฟลิค-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล



โดย
นางสาวณัชชา พลอยเอี่ยม

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

การศึกษาการเตรียมและการดูดซึมน้ำของไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญามหาบัณฑิต

ภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

ปีการศึกษา 2563

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร

STUDY ON PREPARATION AND ABSORPTION OF HYDROPHILIC-HYDROPHOBIC
HYDROGELS



A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for Master of Engineering (POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING)

Department of MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

Graduate School, Silpakorn University

Academic Year 2020

Copyright of Graduate School, Silpakorn University

หัวข้อ การศึกษาการเตรียมและการดูดซึมน้ำของไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก
ไฮโดรเจล
โดย ณิชชา พลอยเอี่ยม
สาขาวิชา วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผนก ก แบบ ก 2 ระดับปริญญา
มหาบัณฑิต
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วันชัย เลิศวิจิตรจรัส

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร ได้รับพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
ตามหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(รองศาสตราจารย์ ดร.จุไรรัตน์ นันทานิช)

พิจารณาเห็นชอบโดย

..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุศรินทร์ เหมชะปะบุตร)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันชัย เลิศวิจิตรจรัส)

..... ผู้ทรงคุณวุฒิภายนอก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อดิศักดิ์ จตุรพิริย์)

61402208 : วิทยาการและวิศวกรรมพอลิเมอร์ แผน ก แบบ ก 2 ระดับปริญญาโท

นางสาว ณัชชา พลอยเอี่ยม: การศึกษาการเตรียมและการดูดซึมน้ำของไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วันชัย เลิศวิจิตรจรัส

ไฮโดรเจลเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างแบบสามมิติที่เตรียมขึ้นจากพอลิเมอร์ประเภทไฮโดรฟิลิกจึงมีความสามารถในการดูดซึมน้ำและกักเก็บน้ำในปริมาณมาก วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการพัฒนาวัสดุไฮโดรเจลรูพรุนที่มีความยืดหยุ่นโดยใช้กระบวนการ bi-continuous high internal phase emulsion (HIPE) โดยมีเฟสภายในที่ชอบน้ำคือพอลิอะคริลิกแอซิด, poly(AA) ในขณะที่เฟสภายนอกเป็นแบบไม่ชอบน้ำคือวัสดุอีลาสโตเมอร์ที่ผ่านการเชื่อมขวางจากยางธรรมชาติ (NR), ยางสไตรีนบิวตะไดอิน (SBR) หรือ ยางบิวตะไดอิน (BR) ทำการศึกษาอิทธิพลของชนิดของสารเสถียรอิมัลชัน (IGEPAL CO-890, TWEEN80 และ Span80) ที่มีต่อร้อยละผลผลิตและสัณฐานวิทยาของวัสดุไฮโดรเจลที่เตรียมได้ และศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นของสารเสถียรอิมัลชัน (5-20%w/v ของปริมาตรอิมัลชัน) ที่เหมาะสมต่อการเตรียมไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล ผลการศึกษา Span80 เป็นสารเสถียรอิมัลชันทำให้ไฮโดรเจลที่เตรียมได้มีร้อยละผลผลิตมากที่สุดและมีขนาดรูพรุนเล็กที่สุด เมื่อนำสารเสถียรอิมัลชันมาปรับความเข้มข้นที่ใช้ในการเสถียรพบว่าความเข้มข้นของ Span80 ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับใช้เตรียม poly(AA/SBR) hydrogel, poly(AA/BR) hydrogel, และ poly(AA/NR) hydrogel คือ 10%, 15%, และ 15% w/v ตามลำดับ อิทธิพลความเข้มข้นของสารเสถียรอิมัลชันส่งผลต่อความสามารถในการดูดซึมน้ำโดยพบว่า ค่าการดูดซึมน้ำที่สภาวะสมดุลของ poly(AA/SBR) hydrogel คือ 404% ในขณะที่เปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำที่สภาวะสมดุลของ poly(AA/BR) hydrogel และ poly(AA/NR) hydrogel อยู่ที่ 194% และ 291% ตามลำดับ มอดูลัสของความต้านทานต่อการกดอัดที่ 50% strain ของ poly(AA/SBR) hydrogel มีค่าเท่ากับ 1.14 MPa ในขณะที่ค่าดังกล่าวของ poly(AA/BR) hydrogel และ poly(AA/NR) hydrogel มีค่า 0.16 และ 3.16 MPa ตามลำดับ ในขณะที่ poly(AA/SBR) hydrogel สามารถคืนตัวกลับได้มากที่สุด 100 เปอร์เซ็นต์ หลังจากการนำแรงกดออก นอกจากนี้ยังพบว่าไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจลที่เตรียมได้หลังจากผ่านกระบวนการดูดซึมน้ำและการทำแห้งสามารถพบว่ามีวัสดุไฮโดรเจลแบบ bi-continuous poly(AA/SBR) hydrogel ที่สังเคราะห์ขึ้นมีเสถียรภาพของรูพรุนที่ดีกว่า poly(AA) hydrogel แบบรูพรุนที่เตรียมจากเทคนิค HIPE แบบปกติ

61402208 : Major (POLYMER SCIENCE AND ENGINEERING)

MISS NATCHA PLOYEAM : STUDY ON PREPARATION AND ABSORPTION OF HYDROPHILIC-HYDROPHOBIC HYDROGELS THESIS ADVISOR : ASSISTANT PROFESSOR WANCHAI LERDWIJITJARUD, Ph.D.

The hydrogel is a three-dimensional structure material made from hydrophilic polymers. Hydrogel, therefore, can absorb and contain a lot of water. The primary aim of the present work is to develop the elastic porous hydrogel by using a bi-continuous high internal phase emulsion (HIPE) process. The hydrophilic internal phase of synthesized bi-continuous is poly(acrylic acid), P(AA). The hydrophobic external phase is a crosslinked elastomer. The elastomer was selected from natural rubber (NR), styrene-butadiene rubber (SBR), or butadiene rubber (BR). The influence of surfactant type, e.g. GEPAL CO-890, TWEEN80, and Span80, on yield and morphology of prepared hydrogel was examined. Then, study on the appropriate surfactant's concentration (5-20%w/v) for prepare hydrogel. The use of Span80 as an emulsifier illustrated the highest yield and the smallest pore-size hydrogel. The optimum concentrations of Span80 used for prepare poly(AA/SBR) hydrogel, poly(AA/BR) hydrogel, and poly(AA/NR) hydrogel were 10%, 15%, and 15%w/v of total emulsion system, respectively. The equilibrium water absorption value of poly(AA/SBR) hydrogel was 404%. The water-absorption percentages at the equilibrium of poly(AA/BR) hydrogel and poly(AA/NR) hydrogel were 194% and 291%, respectively. The compressive modulus at 50% strain of poly(AA/SBR) hydrogel was 1.14 MPa, while those of poly(AA/BR) hydrogel and poly(AA/NR) hydrogel were 0.16 and 3.16 MPa, respectively. The poly(AA/SBR) hydrogel showed a hundred percent dimensional recovery after releasing of compressive load. After three cycles of water absorption-drying process, the synthesized bi-continuous poly(AA/SBR) hydrogel revealed more dimensional stability than that of the porous poly(AA) hydrogel prepared form normal HIPE technique.

กิตติกรรมประกาศ

การที่วิทยานิพนธ์เล่มนี้สามารถสำเร็จลุล่วงได้นั้นทางผู้วิจัยขอขอบพระคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร สำหรับทุนสนับสนุนนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยศิลปากร โดยกรร นำเสนอผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ ในที่ประชุมวิชาการระดับชาติและนานาชาติ ประจำปีงบประมาณ 2563

ขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันชัย เลิศวิจิตรจรัส อาจารย์ที่ปรึกษางานวิจัยที่คอยให้คำปรึกษา ซึ่งแนะนำพร้อมทั้งให้ความช่วยเหลืออย่างดีในระหว่างการทำงานวิจัยมาโดยตลอด

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. บุชรินทร์ เหมชะปะบุตร และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. อดิศักดิ์ จตุรพิริย์ ที่กรุณามาเป็นประธานและกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์นี้ รวมทั้งร่วมพิจารณา และตรวจสอบข้อบกพร่องในงานวิจัยพร้อมทั้งให้ข้อเสนอแนะในการแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ช่วยให้งานวิจัยมีความสมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนและบ่มเพาะความรู้ ความเข้าใจใน วิชาการต่าง ๆ และภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร สำหรับทุนสนับสนุนงานวิจัยในระหว่างการทำงานวิจัย

ขอขอบพระคุณ คุณพินิจ เจียนพิลึก นักวิทยาศาสตร์ประจำภาควิชา คุณไพโรจน์ ตั้งสุขธวัช วิศวกรประจำภาควิชา รวมทั้งบุคลากรประจำภาควิชาวิทยาการและวิศวกรรมวัสดุทุกท่านที่ได้ให้การช่วยเหลือในการดำเนินงานต่าง ๆ ตลอดงานวิจัยที่ผ่านมา และขอขอบพระคุณภาควิชา เทคโนโลยีชีวภาพที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือตลอดการทำงานวิจัย

สุดท้ายขอขอบพระคุณครอบครัว เพื่อนๆ และเพื่อนนักศึกษาปริญญาโท ที่คอยให้ความช่วยเหลือและช่วยสอนการใช้เครื่องมือต่าง ๆ ตลอดจนให้คำปรึกษาด้านต่าง ๆ ตลอดการทำงานวิจัยที่ผ่านมา

ณัชชา พลอยเอี่ยม

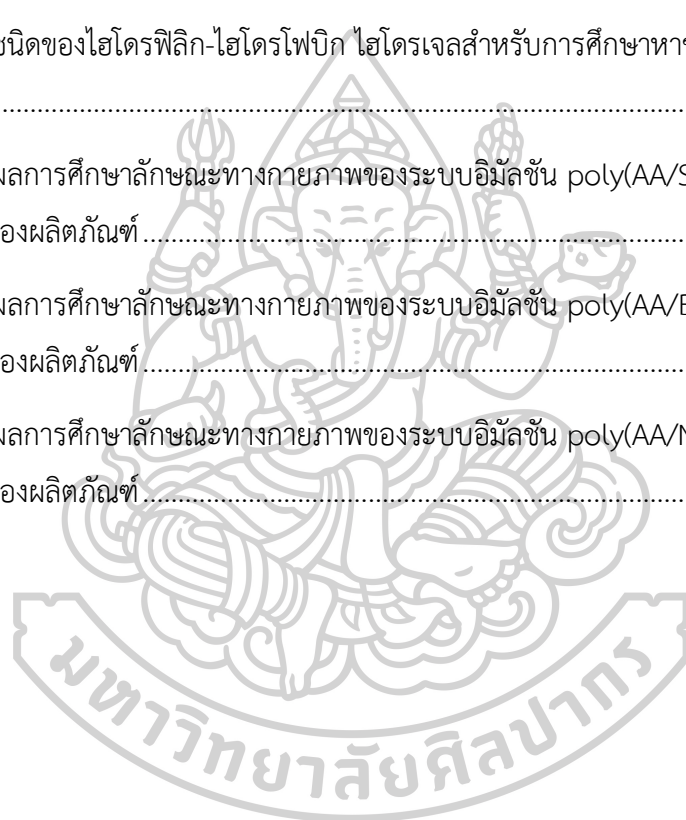
สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฌ
สารบัญภาพ.....	1
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย.....	2
1.3 กรอบแนวคิดของงานวิจัย.....	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 ไฮโดรเจล.....	4
2.2 High Internal Phase Emulsion polymerization.....	4
2.3 Hydrophilic-lipophilic balance.....	7
2.4 ยาง.....	8
2.5 พอลิอะคริลิกแอซิด.....	11
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	12
บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย.....	20
3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย.....	20
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย.....	21
3.3 ดัชนีอักษรย่อ.....	21

3.4 การหาชนิดและปริมาณสารเสถียรอิมัลชันที่เหมาะสมสำหรับใช้เตรียมไฮโดรฟิลิก-ไฮโดร-	23
โพบิก ไฮโดรเจล	23
3.5 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโพบิก ไฮโดรเจล	26
3.6 การทดสอบความสามารถในการดูดซึมน้ำของไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโพบิก ไฮโดรเจล	26
3.7 การทดสอบความต้านทานต่อการกดอัดของไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโพบิก ไฮโดรเจล	27
3.8 การทดสอบการดูดซึมน้ำซ้ำของไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโพบิก ไฮโดรเจล.....	27
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	28
4.1 การศึกษาหาชนิดและปริมาณสารเสถียรอิมัลชันที่เหมาะสมสำหรับใช้เตรียมไฮโดรฟิลิก-	
ไฮโดรโพบิก ไฮโดรเจล.....	29
4.2 การศึกษาหาปริมาณสารเสถียรอิมัลชันที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโพบิก	
ไฮโดรเจล.....	40
4.3 การทดสอบความสามารถในการดูดซึมน้ำของไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโพบิก ไฮโดรเจล	50
4.4 การทดสอบความต้านทานการกดอัดของไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโพบิก ไฮโดรเจล.....	56
4.5 การศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซึมน้ำซ้ำได้ระหว่างไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโพบิก	
ไฮโดรเจล และพอลิอะคริลิกไฮโดรเจล	62
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ	65
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	65
5.2 ข้อเสนอแนะ	66
ภาคผนวก.....	67
ภาคผนวก ก ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลของไฮโดรโพบิกพอลิเมอร์.....	68
รายการอ้างอิง	71
ประวัติผู้เขียน.....	75

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบสมบัติระหว่างยาง NR และ BR	10
ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบสมบัติระหว่างยาง NR และ ยาง SBR.....	11
ตารางที่ 3.1 แสดงสัดส่วนและความเข้มข้นขององค์ประกอบในการเตรียมอิมัลชัน	23
ตารางที่ 3.2 ชนิดของไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจลสำหรับการศึกษาหาชนิดของสารเสถียร- อิมัลชัน.....	25
ตารางที่ 4.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของระบบอิมัลชัน poly(AA/SBR) hydrogels และ ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์.....	30
ตารางที่ 4.2 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของระบบอิมัลชัน poly(AA/BR) hydrogels และ ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์.....	30
ตารางที่ 4.3 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของระบบอิมัลชัน poly(AA/NR) hydrogels และ ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์.....	31

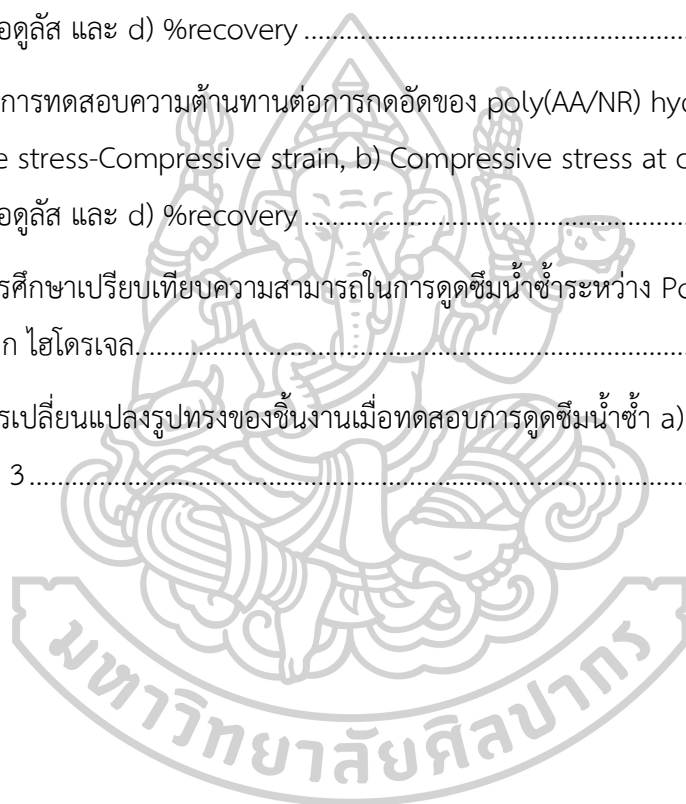


สารบัญภาพ

	หน้า
รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการเตรียมพอลิเมอร์ด้วยระบบ polyHIPE	5
รูปที่ 2.2 a) รูปแบบของ w/o ของระบบ polyHIPE และ b) คือลักษณะของรูพรุนที่เกิดขึ้นในไฮโดรเจล.....	6
รูปที่ 2.3 แบบจำลองของ bicontinuous polyHIPE.....	6
รูปที่ 2.4 ช่วงของค่า HLB ของสารเสถียรอิมัลชัน (surfactant) ที่เหมาะสมต่อการเสถียรอิมัลชันในระบบต่าง ๆ	8
รูปที่ 2.5 โครงสร้างของ cis-1,4-polyisoprene.....	9
รูปที่ 2.6 โครงสร้างของ polybutadiene และไอโซเมอร์ของ polybutadiene a) Cis-1,4-form b) Trans-1,4-form และ c) 1,2-form.....	9
รูปที่ 2.7 โครงสร้างของ Styrene-Butadiene Rubber	11
รูปที่ 2.8 โครงสร้างของ poly(acrylic acid).....	12
รูปที่ 2.9 a) P(AAm/MBAM) ไฮโดรเจล และ b) P(AAm/MBAM/S/DVB).....	13
รูปที่ 2.10 รูปแบบโครงสร้างของ a) P(AAm/MBAM) ไฮโดรเจล และ b) P(AAm/MBAM/S/DVB)	13
รูปที่ 2.11 a) ไฮโดรเจลที่เตรียมจากพอลิสไตรีน และ b) ไฮโดรเจลที่เตรียมจากพอลิสไตรีนและยางบิวตะไดอิน.....	16
รูปที่ 2.12 กราฟ stress-strain ของพอลิสไตรีนร่วมกับยางบิวตะไดอินที่มีปริมาณต่างกัน.....	16
รูปที่ 2.13 การกระจายตัวของขนาดรูพรุนของ poly(styrene-co-divinylbenzene)HIPEs ที่มีปริมาณสารเสถียรอิมัลชันต่างกัน	17
รูปที่ 2.14 การกระจายตัวของขนาดความหนารูพรุนของ poly(styrene-co-divinylbenzene)HIPEs ที่มีปริมาณสารเสถียรอิมัลชันต่างกัน	18
รูปที่ 2.15 สมบัติเชิงกลของ poly(styrene-co-divinylbenzene) HIPEs ที่มีปริมาณสารเสถียรอิมัลชันต่างกัน.....	19

รูปที่ 4.1 โครงสร้างทางเคมีของสารเสถียรอิมัลชัน a) IGEPAL CO-890 , b) TWEEN80และ c) Span80	32
รูปที่ 4.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ a) และ b) poly(AA/SBR) hydrogels, c) และ d) poly(AA/BR) hydrogels, e) และ f) poly(AA/NR) hydrogels.....	34
รูปที่ 4.3 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ a) Porous SBR, b) Porous BR และ c) Porous NR.....	34
รูปที่ 4.4 แบบจำลองเปรียบเทียบความแตกต่างของโครงสร้างไฮโดรเจลระหว่างระบบ a) polyHIPE และ b) bicontinuous polyHIPE.....	35
รูปที่ 4.5 กลไกการเกิด a) ปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันใน internal phase และ ปฏิกิริยาเชื่อมขวางใน external phase ของไฮโดรโฟบิกพอลิเมอร์ b) SBR, c) BR และ d) NR	36
รูปที่ 4.6 เส้นสเปกตรัม FTIR ของ SBR/Span-10%, SBR และ poly(acrylic acid).....	37
รูปที่ 4.7 เส้นสเปกตรัม FTIR ของ BR/Span-10%, BR และ poly(acrylic acid).....	38
รูปที่ 4.8 เส้นสเปกตรัม FTIR ของ NR/Span-10%, NR และ poly(acrylic acid)	39
รูปที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงขนาด droplet ที่ถูกเสถียรด้วย Span80 ในระบบอิมัลชัน a) poly(AA/SBR) hydrogels, b) poly(AA/BR) hydrogels และ c) poly(AA/NR) hydrogels	41
รูปที่ 4.10 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ a) และ b) SBR/Span-5%, c) และ d) SBR/Span-10%, e) และ f) SBR/Span-15%, g) และ h) SBR/Span-20%	44
รูปที่ 4.11 แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงของ droplet เมื่อความเข้มข้นของสารเสถียรอิมัลชัน a) SBR/Span-5%, b) SBR/Span-10%, c) SBR/Span-15% และ d) SBR/Span-20%.....	45
รูปที่ 4.12 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ a) และ b) BR/Span-5%, c) และ d) BR/Span-10%, e) และ f) BR/Span-15%, g) และ h) BR/Span-20%	47
รูปที่ 4.13 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ a) และ b) NR/Span-5%, c) และ d) NR/Span-10% e) และ f) NR/Span-15%, g) และ h) NR/Span-20%,.....	49
รูปที่ 4.14 การดูดซึมน้ำเทียบกับเวลาของ a) poly(AA/SBR) hydrogels,และ c) poly(AA/NR) hydrogels.....	51
รูปที่ 4.15 แบบจำลองพฤติกรรมดูดซึมน้ำของไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล a) ช่วงแรกของการดูดซึมน้ำ และ b) การดูดซึมน้ำเมื่อถึงจุดอิ่มตัว	52

รูปที่ 4.16 แบบจำลองโครงสร้างของ poly(AA/NR) hydrogels ที่ส่งผลต่อการดูดซึมน้ำ โดย a) ก่อนถึงจุดอิ่มตัวของ การดูดซึมน้ำ และ b) เมื่อถึงจุดอิ่มตัวของ การดูดซึมน้ำ	55
รูปที่ 4.17 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการกดอัดของ poly(AA/SBR) hydrogels โดย a) กราฟ Compressive stress-Compressive strain, b) Compressive stress at compressive strain 50%, c) ค่ามอดูลัส และ d) %recovery	56
รูปที่ 4.18 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการกดอัดของ poly(AA/BR) hydrogels โดย a) กราฟ Compressive stress-Compressive strain, b) Compressive stress at compressive strain 50%, c) ค่ามอดูลัส และ d) %recovery	60
รูปที่ 4.19 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการกดอัดของ poly(AA/NR) hydrogels โดย a) กราฟ Compressive stress-Compressive strain, b) Compressive stress at compressive strain 50%, c) ค่ามอดูลัส และ d) %recovery	61
รูปที่ 4.20 การศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซึมน้ำซ้ำระหว่าง Porous AA และไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล.....	63
รูปที่ 4.21 การเปลี่ยนแปลงรูปทรงของชิ้นงานเมื่อทดสอบการดูดซึมน้ำซ้ำ a) รอบที่ 1, b) รอบที่ 2 และ c) รอบที่ 3.....	64



บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ไฮโดรเจลเป็นวัสดุที่มีลักษณะเป็นโครงร่างตาข่าย 3 มิติ ที่เตรียมได้จากไฮโดรฟิลิกพอลิเมอร์ จึงทำให้ไฮโดรเจลเป็นวัสดุที่มีความสามารถในการดูดซับ ดูดซึมและกักเก็บน้ำไว้ได้เพราะโครงร่างตาข่ายที่เกิดจากการเชื่อมขวางของพอลิเมอร์ทำให้ไฮโดรเจลสามารถบวมตัวและกักเก็บน้ำได้เมื่อดูดซับน้ำ จากความสามารถดังกล่าวจึงมีการนำไฮโดรเจลไปใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางในงานที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับและดูดซับน้ำทั้งงานด้านเกษตรกรรม การแยกสาร รวมทั้งนำไปผลิตเป็นเนื้อเยื่อเทียมในร่างกายมนุษย์ [1] แต่ไฮโดรเจลโดยทั่วไปมักมีข้อจำกัดทางโครงสร้างที่ส่งผลต่อความสามารถในการกักเก็บน้ำทั้งพื้นที่ผิวที่มีอย่างจำกัดก็ส่งผลต่อปริมาณน้ำที่สามารถกักเก็บได้ อีกทั้งไฮโดรเจลโดยส่วนใหญ่ยังเกิดการแตกเมื่อบวมตัวและกักเก็บน้ำไว้ปริมาณมาก [2] ดังนั้นการศึกษาเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับและกักเก็บน้ำของวัสดุไฮโดรเจลจึงเป็นไปเพื่อเพิ่มพื้นที่ในการกักเก็บน้ำให้มากขึ้นพร้อมกับเพิ่มความเสถียรของไฮโดรเจลเพื่อป้องกันการแตกของไฮโดรเจลในขณะใช้งาน

การเพิ่มพื้นที่ผิวของไฮโดรเจลสามารถกระทำการปรับปรุงโครงสร้างของไฮโดรเจลให้มีลักษณะเป็นรูพรุน โดยสามารถเตรียมผ่านเทคนิคที่เรียกว่า High Internal Phase Emulsion polymerization (HIPE) เป็นเทคนิคหนึ่งในระบบการสังเคราะห์แบบอิมัลชัน ประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ internal phase คือ ส่วนที่เป็นช่องว่างของรูพรุนซึ่งมีมากกว่า 74% เมื่อเทียบกับปริมาณทั้งหมด ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ไฮโดรเจลที่เตรียมได้มีพื้นที่ผิวมากขึ้นทำให้มีความสามารถในการดูดซับและกักเก็บน้ำมากขึ้น อีกส่วนหนึ่ง external phase คือส่วนที่เป็นไฮโดรฟิลิกพอลิเมอร์ทำหน้าที่เป็นโครงร่างของไฮโดรเจล [2] ถึงแม้รูพรุนที่เกิดขึ้นแล้วถูกล้อมด้วยโครงร่างของไฮโดรฟิลิกพอลิเมอร์จะช่วยให้ไฮโดรเจลมีพื้นที่ผิวในการกักเก็บน้ำมากขึ้นแต่ไฮโดรฟิลิกพอลิเมอร์ที่นำมาเตรียมวัสดุไฮโดรเจลมักขาดความยืดหยุ่นทางโครงสร้าง ดังนั้นเมื่อไฮโดรเจลกักเก็บน้ำไว้ในโครงสร้างมากๆก็ยังสามารถแตกออกได้นั้นจะส่งผลต่อความไม่เสถียรของไฮโดรเจลขณะใช้งาน

การเพิ่มความเสถียรทางโครงสร้างของวัสดุไฮโดรเจลสามารถอาศัยหลักการเพิ่มความยืดหยุ่นทางโครงสร้างของไฮโดรเจลซึ่งทำได้หลายเทคนิค เช่น การเตรียมไฮโดรเจลโดยอาศัยเทคนิคการเชื่อมขวางเชิงกายภาพ (physical crosslink) และการเตรียมโดยเทคนิค interpenetrating polymeric networks (IPN) [3] วิธีที่กล่าวมานั้นมีหลักการคล้ายกันคือ อาศัยการเตรียมไฮโดรเจลให้มีโครงสร้างร่วมกันของพอลิเมอร์ที่มีสมบัติต่างกันกล่าวคือ เพิ่มความยืดหยุ่นของไฮโดรเจลโดยการ

เพิ่มโครงสร้างของพอลิเมอร์อีกชนิดที่มีความยืดหยุ่นสูงกว่าเพื่อเสริมความยืดหยุ่นของไฮโดรฟิลิกไฮโดรเจลที่มีอยู่เดิม โดยพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูงมักเป็นไฮโดรโฟบิกพอลิเมอร์จึงถือเป็นการเตรียมไฮโดรเจลที่มีโครงสร้างร่วมกันระหว่างไฮโดรฟิลิกและไฮโดรโฟบิกพอลิเมอร์ที่มีลักษณะคล้ายกับการเตรียมแบบอิมัลชัน ลักษณะดังกล่าวจึงสามารถเตรียมได้ด้วยเทคนิค bicontinuous polyHIPE [4] ระบบ HIPE ดังกล่าวนี้อาจสามารถเตรียมพอลิเมอร์ที่มีสมบัติความเป็นไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิกร่วมกันได้โดยเรียกพอลิเมอร์ลักษณะนี้ว่า bicontinuous polymer การเตรียมด้วยระบบ bicontinuous polyHIPE เกิดกระบวนการพอลิเมอไรเซชันเป็นพอลิเมอร์ทั้งสองเฟสที่มีขั้วต่างกันทำให้พอลิเมอร์ที่เตรียมได้มีสองสมบัติร่วมกันระหว่างความเป็นไฮโดรฟิลิกและไฮโดรโฟบิก

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการเสนอแนวทางการเตรียมและการศึกษาการดูดซึมน้ำของไฮโดรเจลที่ถูกเตรียมจากพอลิเมอร์ที่มีขั้วต่างกันเป็นไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล ผ่านเทคนิค bicontinuous polyHIPE ที่เตรียมได้จากพอลิเมอร์ที่มีสมบัติต่างกันระหว่างพอลิเมอร์ที่มีความสามารถในการดูดซึมน้ำได้มากอย่างพอลิอะคริลิกแอซิดเป็นไฮโดรฟิลิกพอลิเมอร์ และพอลิเมอร์ที่มีความยืดหยุ่นสูงอย่างวัสดุอีลาสโตเมอร์เป็นไฮโดรโฟบิกพอลิเมอร์เพื่อให้ได้เป็นไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล ที่มีความสามารถในการดูดซึมน้ำและมีความเสถียรควบคู่กัน โดยศึกษาจากวัสดุอีลาสโตเมอร์ 3 ชนิด ได้แก่ ยางสไตรีน-บิวตะไดอิน (Styrene-Butadiene Rubber, SBR) ยางบิวตะไดอิน (Butadiene Rubber, BR) และยางธรรมชาติ (Natural Rubber, NR) โดยทำการศึกษาดังแต่การเลือกสารเสถียรอิมัลชันที่เหมาะสมสำหรับระบบอิมัลชันแต่ละระบบที่ทำการศึกษาและอิทธิพลของปริมาณสารเสถียรอิมัลชันที่ใช้ในการเตรียมในแต่ละระบบอิมัลชันในแง่ของความสามารถในการดูดซึมน้ำและสมบัติเชิงกล

1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.2.1 เพื่อศึกษาการเตรียมไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล โดยมีพอลิอะคริลิกแอซิดเป็นไฮโดรฟิลิกพอลิเมอร์และมีวัสดุอีลาสโตเมอร์เป็นไฮโดรโฟบิกพอลิเมอร์

1.2.2 เพื่อศึกษาสัณฐานวิทยา การดูดซึมน้ำและความต้านทานต่อการก่อดักของไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล ที่เตรียมได้

1.3 กรอบแนวคิดของงานวิจัย

ไฮโดรเจลถูกใช้อย่างแพร่หลายในงานที่ต้องการการดูดซึมและกักเก็บน้ำ เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีความสามารถในการดูดซึมน้ำได้เพราะเตรียมได้จากไฮโดรฟิลิกพอลิเมอร์ แต่การใช้งานยังมีข้อจำกัดในแง่ของพื้นที่ผิวในการดูดซึมน้ำและความเสถียรทางรูปทรงขณะใช้งาน ดังนั้นการศึกษาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซึมน้ำและเพื่อการใช้งานที่กว้างขวางขึ้นจึงเป็นไปเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสและปรับปรุงสมบัติเชิงกลโดยอาศัยการเตรียมไฮโดรเจลที่มีโครงสร้างรูพรุนและมีความยืดหยุ่นมากขึ้น ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาการเตรียมไฮโดรเจลที่มีสมบัติดังกล่าวผ่านเทคนิค bicontinuous polyHIPE เป็นระบบอิมัลชันแบบ w/o เพื่อให้ได้ไฮโดรเจลที่มีโครงสร้างรูพรุนและมีความยืดหยุ่นสูงโดยอาศัยการมีโครงสร้างร่วมกันของพอลิเมอร์ 2 ชนิด คือ พอลิอะคริลิกแอซิด (PAA) ซึ่งเป็นไฮโดรฟิลิกพอลิเมอร์ โดยในงานวิจัยนี้แบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ตอน ได้แก่

ตอนที่ 1 ศึกษาการเตรียมไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล จากวัสดุอิลาสโตเมอร์ 3 ชนิด (SBR, BR และ NR) โดยศึกษาชนิดของสารเสถียรอิมัลชันที่เหมาะสมสำหรับแต่ละระบบอิมัลชัน

ตอนที่ 2 ศึกษาปริมาณสารเสถียรอิมัลชันเหมาะสมต่อการเตรียมไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล สำหรับแต่ละระบบอิมัลชัน

ตอนที่ 3 พิสูจน์เอกลักษณ์ของไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล ที่เตรียมจากวัสดุอิลาสโตเมอร์ต่างชนิดกัน (SBR, BR และ NR) ทั้งความสามารถในการดูดซึมน้ำและความต้านทานต่อการกดอัด



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ไฮโดรเจล

ไฮโดรเจล (hydrogel) คือ วัสดุที่เตรียมจากไฮโดรฟิลิกพอลิเมอร์ (hydrophilic polymer) มีลักษณะเป็นโครงร่างตาข่าย 3 มิติ ถูกเตรียมจากการเชื่อมขวางสายโซ่พอลิเมอร์จึงเป็นผลทำให้สามารถดูดซับน้ำและกักเก็บน้ำไว้ในโครงสร้างได้เป็นจำนวนมาก เนื่องจากโครงร่างตาข่ายที่สามารถบวมตัวในน้ำได้ การสังเคราะห์ไฮโดรเจลสามารถสังเคราะห์ได้โดยระบบการสังเคราะห์แบบอิมัลชัน (emulsion polymerization) โดยจะต้องเตรียมจากไฮโดรฟิลิกมอนอเมอร์ที่อาจมีมอนอเมอร์เพียงชนิดเดียวหรือสองชนิดก็ได้แต่ในโครงสร้างจะต้องมีการเชื่อมขวาง (crosslinking) [1] เกิดขึ้น การเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของไฮโดรเจลสามารถแบ่งตามชนิดของการเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นได้ คือการเชื่อมขวางเชิงกายภาพ (physical crosslink) และการเชื่อมขวางเชิงเคมี (chemical crosslink) ซึ่งโดยทั่วไปแล้วไฮโดรเจลที่ผ่านการสังเคราะห์ด้วยระบบอิมัลชันมักมีการเชื่อมขวางแบบเชิงเคมีทำให้มีข้อเสียคือมีสมบัติเชิงกลต่ำมีความเปราะแตกหักง่าย เนื่องจากขาดความยืดหยุ่นซึ่งเป็นผลมาจากไม่มีความสามารถในการดูดซับพลังงานจากแรงภายนอกที่มากระทำทำให้เสียรูปร่าง

ไฮโดรฟิลิกมอนอเมอร์ที่ถูกเตรียมเป็นไฮโดรเจลจะมีหมู่ฟังก์ชันที่มีขั้ว ได้แก่ $-NH_2$, $-COOH$, $-OH$, $-CONH_2$, $-CONH$ และ $-SO_3H$ เช่น พอลิเมอร์พวก 2-Hydroxyethyl methacrylate (HEMA), Poly(2-hydroxyethyl methacrylate) (PHEMA) หรือเป็นพอลิเมอร์แบบสังเคราะห์ร่วมกัน (copolymer) เช่น acrylamide/acrylic acid copolymer เป็นต้น [5] ทั้งนี้พอลิเมอร์สังเคราะห์ร่วมสามารถเป็นได้ทั้งไฮโดรฟิลิกพอลิเมอร์หรือไฮโดรโฟบิกพอลิเมอร์ก็ได้ ด้วยเหตุนี้จึงเป็นผลให้ไฮโดรเจลที่เตรียมได้เป็นวัสดุที่มีความสามารถในการดูดซับน้ำได้ในปริมาณมากและถูกนำไปใช้งานได้หลากหลาย เช่น วัสดุกักเก็บยาในเชิงเภสัชกรรม (drug delivery), วัสดุสำหรับแยกสาร (separation) และเนื้อเยื่อเทียม (tissue engineering) เป็นต้น

2.2 High Internal Phase Emulsion polymerization

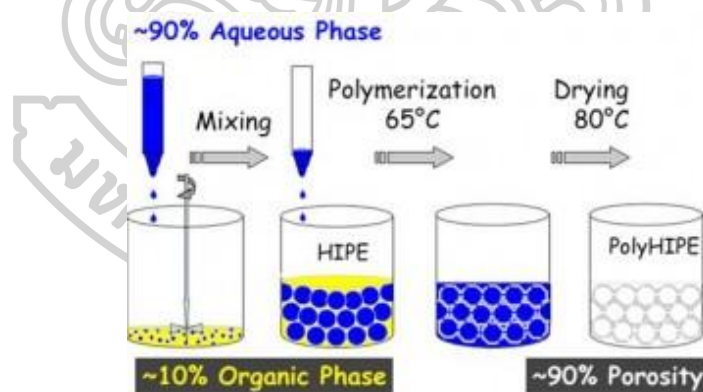
การสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบ High Internal Phase Emulsion polymerization (PolyHIPE) เป็นการสังเคราะห์รูปแบบหนึ่งของกระบวนการสังเคราะห์แบบอิมัลชันที่สามารถเตรียมพอลิเมอร์ให้มีโครงสร้างรูพรุนได้ ในระบบการสังเคราะห์จะประกอบด้วย 2 เฟสที่มีความ

ไม่เข้ากัน ได้แก่ internal phase ซึ่งเป็นส่วนของรูพรุน และ external phase เป็นส่วนรักษาโครงร่างของไฮโดรเจลจึงเป็นส่วนที่เกิดการเชื่อมขวาง (crosslink) แบ่งได้เป็น 2 แบบ ได้แก่

- ระบบ o/w (oil in water) นั่นคือ internal phase คือ น้ำมันหรือสารละลายที่ไม่มีขี้ส่วน external phase คือ ส่วนของพอลิเมอร์ที่มีขี้

- ระบบ w/o (water in oil) นั่นคือ internal phase คือ น้ำหรือสารละลายที่มีขี้ ส่วน external phase คือ ส่วนของพอลิเมอร์ที่ไม่มีขี้

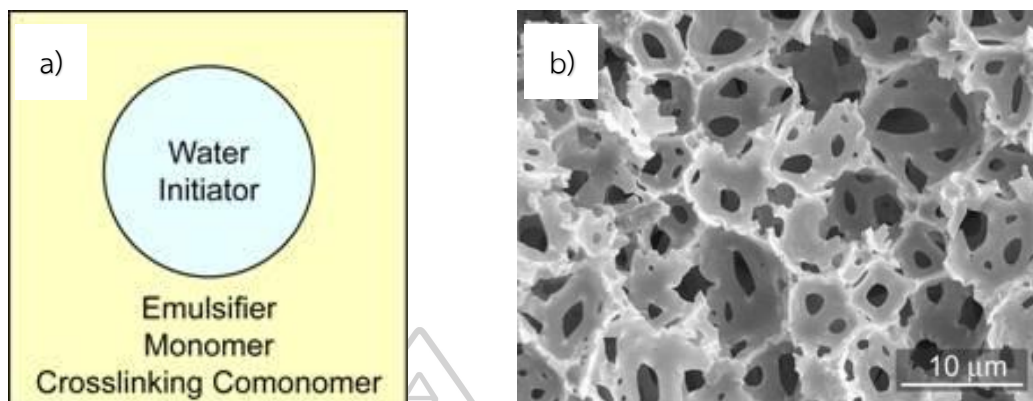
สำหรับระบบ polyHIPE มีข้อกำหนด คือ internal phase จะต้องมีความมากกว่า 74% จนถึงประมาณ 90% เทียบกับปริมาณรวม [6] พอลิเมอร์ที่สังเคราะห์ได้จะมีลักษณะโครงสร้างที่ต่างจากพอลิเมอร์แบบดั้งเดิมคือลักษณะที่เป็นรูพรุนที่เคยเป็นที่อยู่ของ internal phase ถูกกำจัดออกหลังจากสังเคราะห์เรียบร้อยแล้วและโครงร่างตาข่ายแบบสามมิติของพอลิเมอร์เกิดขึ้นจากส่วนของ external phase องค์ประกอบที่สำคัญสำหรับการสังเคราะห์แบบ polyHIPE คือ สาร-เสถียรอิมัลชัน (surfactant) มอนอเมอร์ มอนอเมอร์สังเคราะห์ร่วม (co-monomer) ตัวทำละลายและตัวริเริ่มปฏิกิริยา (initiator) [4] ในการสังเคราะห์โดยทั่วไปจะทำการหยด internal phase ลงไปใน external phase อย่างช้า ๆ ในขณะที่เกี่ยวกับการปั่นกวนตลอดเวลาดังแสดงในรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการเตรียมพอลิเมอร์ด้วยระบบ polyHIPE [4]

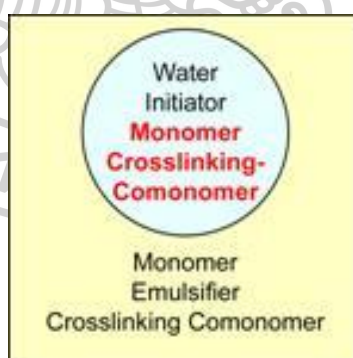
เมื่อหยดเสริจอิมัลชันที่เกิดขึ้นควรที่จะเสถียรอย่างน้อย 1 ชั่วโมงหลังจากหยุดปั่นกวนและนำไปพอลิเมอไรเซชันที่อุณหภูมิต่าง ๆ (ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิการแตกตัวของตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่เลือกใช้) โดยไม่มีการปั่นกวนเพื่อให้เกิดการ curing พอลิเมอร์ที่ได้จะมีลักษณะคล้ายเจลและต้องทำการล้างตัวทำละลายออกด้วยตัวทำละลายที่เหมาะสมด้วยการสกัดด้วยซอกเลต (soxhlet extraction) และนำไปอบเพื่อไล่สารละลายที่ใช้ในการสกัดออก รูพรุนที่เกิดขึ้นเป็นส่วนของ internal phase

ที่หยดลงไปเป็นหยดอิมัลชันในระหว่างการเตรียมอิมัลชันและรูพรุนจะถูกล้อมรอบด้วยส่วนที่เป็น external phase แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 a) รูปแบบของ w/o ของระบบ polyHIPE และ b) คือลักษณะของรูพรุนที่เกิดขึ้นในไฮโดรเจล [6]

นอกจากนี้ระบบการสังเคราะห์ HIPE ยังสามารถใช้ในการเตรียม bicontinuous polymer คือพอลิเมอร์ที่มีขั้วต่างกัน 2 ชนิดโดยที่ชนิดหนึ่งอยู่ในรูพรุนและอีกชนิดหนึ่งอยู่ด้านนอกรูพรุนแต่ยังคงเป็นระบบอิมัลชันอยู่ เราเรียกระบบเช่นนี้ว่า bicontinuous polyHIPE ระบบนี้จะเกิดกระบวนการพอลิเมอไรเซชันของพอลิเมอร์ทั้ง internal phase และ external phase พร้อมกันดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 แบบจำลองของ bicontinuous polyHIPE [6]

รูปแบบของ bicontinuous polyHIPE ที่แสดงดังรูปที่ 2.3 เป็นการเตรียมด้วยระบบอิมัลชันแบบ w/o ดังนั้นพอลิเมอร์ที่ได้จะมีลักษณะเป็นส่วนของไฮโดรฟิลิกพอลิเมอร์ล้อมรอบด้วยโครงสร้างของไฮโดรโฟบิกพอลิเมอร์ ด้วยเหตุนี้ส่งผลให้ bicontinuous polyHIPE ดังกล่าวจึงมีสมบัติร่วมกัน

ระหว่างความเป็นไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ส่งผลมีความสามารถทั้งดูดซึมสารที่มีขี้และสามารถกักเก็บสารไว้ในโครงสร้างเนื่องจากส่วนของไฮโดรโฟบิกพอลิเมอร์เป็นตัวการในการสร้างเส้นทางคดเคี้ยวในการแพร่ออกของสารส่งผลให้สารสามารถแพร่ออกจาก bicontinuous polyHIPE ได้ยากกว่าไฮโดรเจลทั่วไป ด้วยความสามารถดังกล่าวจึงสามารถนำไปใช้ในงานที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมการปลดปล่อยสาร (control release) อีกทั้งยังมีความสามารถในการแยกสาร (separation) ที่มีขี้ต่างกันออกจากกันได้เพราะมีสมบัติเป็นไฮโดรเจลที่มีสองขี้ที่ตรงข้ามกัน

2.3 Hydrophilic-lipophilic balance

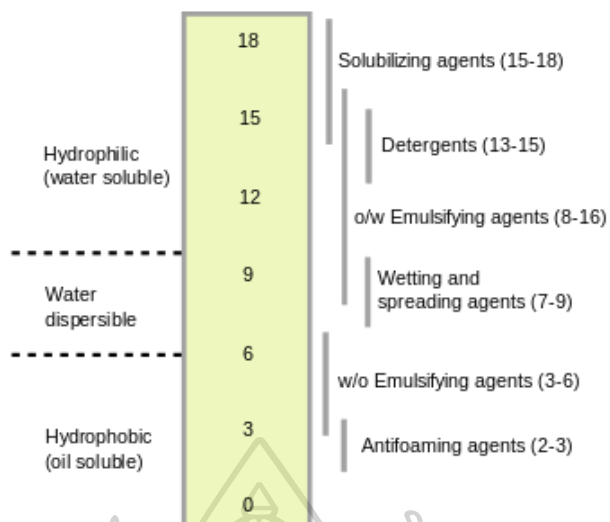
ค่า Hydrophilic-lipophilic balance (HLB) คือค่าที่แสดงสัดส่วนความเป็นไฮโดรฟิลิก (hydrophilic) กับค่าลิโปฟิลิก (lipophilic) ของสารเสถียรอิมัลชัน (surfactant) เนื่องจากสารเสถียรอิมัลชันเป็นสารที่มีทั้งส่วนที่มีขี้ (hydrophilic) เรียกว่าส่วนหัวและส่วนที่เป็นไฮโดรโฟบิก (hydrophobic) เรียกว่าส่วนหาง เรียกสมบัติดังกล่าวว่า amphiphilic อยู่ร่วมกันในโครงสร้างเพื่อให้สามารถเสถียรระบบที่องค์ประกอบมีขี้ต่างกันให้เกิดเป็นอิมัลชันได้ [7] ค่า HLB มีค่ามากที่สุดที่ 20 โดยสามารถคำนวณได้จากสมการของ Griffin ดังสมการต่อไปนี้

$$HLB = 20 * M_h / M$$

โดยที่ M_h แทน น้ำหนักโมเลกุลของส่วนที่เป็นไฮโดรฟิลิกในโครงสร้าง

M แทน น้ำหนักโมเลกุลของสารทั้งหมด

ค่า HLB ที่คำนวณได้เป็นตัวแปรหนึ่งที่ทำให้พิจารณาได้ถึงความสามารถในการละลายของสารเสถียรอิมัลชันในตัวทำละลายจึงถูกนำไปพิจารณาในการเลือกใช้สำหรับระบบอิมัลชันต่าง ๆ สำหรับสารเสถียรอิมัลชันที่มีค่า HLB มากกว่า 10 จะเหมาะสำหรับระบบอิมัลชันแบบ O/W ในขณะที่สารเสถียรอิมัลชันที่มีค่า HLB น้อยกว่า 10 จะเหมาะสำหรับระบบอิมัลชันแบบ W/O [8] ดังนั้นสำหรับระบบการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบอิมัลชันจำเป็นที่จะต้องใส่สารเสถียรอิมัลชันในระบบโดยสามารถเลือกชนิดของสารเสถียรอิมัลชันตามระบบที่ต้องการเตรียมเนื่องจากสารเสถียรอิมัลชันแต่ละชนิดจะมีค่า HLB ต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 ช่วงของค่า HLB ของสารเสถียรอิมัลชัน (surfactant) ที่เหมาะสมต่อการเสถียรอิมัลชันในระบบต่าง ๆ [7]

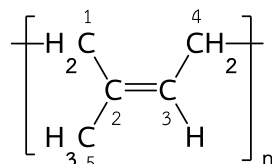
2.4 ยาง

ยางเป็นวัสดุประเภทอีลาสโตเมอร์ (elastomer) ซึ่งแสดงสมบัติทั้งความเป็นอีลาสติก (elastic) และ วิสคอส (viscose) นั่นคือแสดงสมบัติความเป็นวิสโคอีลาสติก (viscoelastic) ดังนั้นสมบัติของยางสามารถพิจารณาได้ทั้งในเชิงสมบัติ static physical ได้แก่ ความแข็ง (hardness) และค่า stress-strain โดยยางจะมี %strain ได้ถึง 500-600% [9] สมบัติการทนต่อการขาด (tear) ความทนทานต่อการกดอัด (compression) และการคืบ (creep) เป็นต้น สมบัติทางไดนามิกที่เกี่ยวข้องกับความเป็นวิสโคอีลาสติกของยางถือเป็นสมบัติเด่นของยาง เพราะเนื่องจากสมบัติวิสโคอีลาสติกของยางทำให้ยางมีความสามารถในการคืนรูปได้เองเมื่อถูกแรงภายนอกกระทำแล้วมีการเสีรูปร่าง เนื่องจากยางสามารถดูดซับพลังงานจากแรงกระทำภายนอกได้ถึงแม้ว่าจะจะมีการคืนรูปไม่ถึง 100% ก็ตาม ด้วยความสามารถดังกล่าวจึงทำให้ยางมีความยืดหยุ่นและสามารถรับแรงได้มากโดยไม่เกิดการแตกหัก และมีความอ่อนนุ่มที่อุณหภูมิห้องเนื่องจากมี glass temperature ต่ำว่า -60°C ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของยางด้วย ยางสามารถแบ่งออกได้เป็นยางธรรมชาติและยางสังเคราะห์ซึ่งเป็นอีลาสโตเมอร์เช่นเดียวกัน

2.4.1 ยางธรรมชาติ (natural rubber : NR)

ยางธรรมชาติได้มาจากส่วนของเปลือกไม้ของต้นยางในรูปของลาเทกซ์ (latex) และนำมารักษาสภาพไม่ให้เน่าเสียด้วยการเติมสารเคมี เช่น แอมโมเนีย เป็นต้น หรือเก็บอยู่ในรูปของยางแผ่นด้วยการใส่สารเคมีเพื่อให้เกิดการตกตะกอน โครงสร้างทางเคมีประมาณ 100% ของยางคือ

cis-1,4-polyisoprene ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ซึ่งมีการจัดเรียงอย่างเป็นระเบียบสูงทำให้สามารถเกิดผลึกได้เองที่อุณหภูมิต่ำและเนื่องจากมีอุณหภูมิการตกผลึกต่ำทำให้มีความแข็งเกร็ง (stiffness) ที่อุณหภูมิต่ำจึงสังเกตเห็นยางมีความยืดหยุ่นที่อุณหภูมิต่ำ

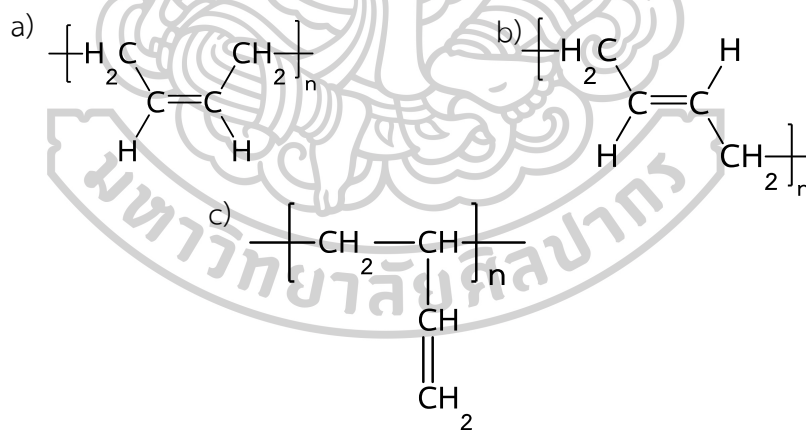


รูปที่ 2.5 โครงสร้างของ cis-1,4-polyisoprene [9]

ยางธรรมชาติจะมีความยืดหยุ่นสูง ทนต่อการขีดถู มีค่า tensile strength สูง และทนต่อการดัดและน้ำ

2.4.2 ยางบิวตะไดอีน (butadiene rubber, polybutadiene : BR)

เป็นยางประเภทสังเคราะห์โดยผ่านการสังเคราะห์แบบวิธีสารละลาย (solution polymerization) โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาประเภท ziegler-natta ที่เหมาะสม [9, 10] ดังนั้นโครงสร้างของยางบิวตะไดอีนก็จะขึ้นอยู่กับชนิดตัวเร่งปฏิกิริยาที่นำมาใช้ด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 โครงสร้างของ polybutadiene และไอโซเมอร์ของ polybutadiene a) Cis-1,4-form b) Trans-1,4-form และ c) 1,2-form [9]

เมื่อเปรียบเทียบสมบัติของยางบิวตะไดอีนและยางธรรมชาติในแง่ของสมบัติเชิงกลและความสามารถในการทนต่อสารเคมีเป็นไปดังตารางที่ 2.1

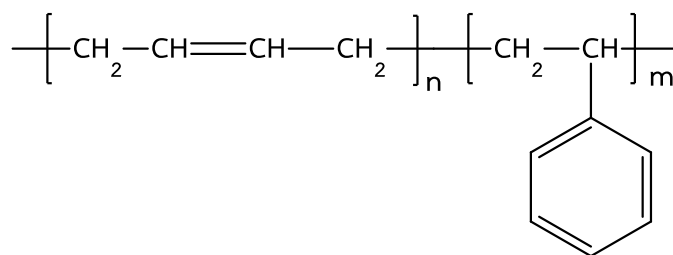
ตารางที่ 2.1 การเปรียบเทียบสมบัติระหว่างยาง NR และ BR [9]

5 = excellent, 4 = very good, 3 = good, 2 = fair, 1 = poor

	Butadiene rubber BR	Natural rubber NR
Hardness, IRH	40-80	30-90
Tensile strength at break, N/mm ²	7-21	7-28
Elongation at break, %	100-600	100-700
Operating temperature range		
- maximum, °C	80	80
- minimum, °C	-70	-50
Elasticity	5	5
Electrical properties	4	4
Resistance:		
- weather and ozone	1-2	1-2
- acids	2-3	2-3
- alkalis	2-3	2-3
- water	3	5
- abrasion	4-5	4-5
- flame	1	1
- radiation	2-3	2-3
Gas permeability	3	3
Adherence	4	4
Tack to the metal	5	5

2.4.3 ยางสไตรีน-บิวตะไดอิน (Styrene-Butadiene Rubber : SBR)

เป็นยางสังเคราะห์ที่เกิดจากการสังเคราะห์ร่วมกัน (copolymerization) ระหว่าง Styrene และ Butadiene โดยเป็นการสังเคราะห์แบบสุ่ม (random) และเป็นการสังเคราะห์แบบอิมัลชัน (emulsion polymerization) โดยมีส่วนของ Styrene 10-25% [11] ความยืดหยุ่นของยาง SBR ขึ้นอยู่กับปริมาณของสไตรีนในโครงสร้าง สำหรับโครงสร้างของยาง SBR แสดงในรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 โครงสร้างของ Styrene-Butadiene Rubber [11]

ยาง SBR เป็นยางที่ถูกสังเคราะห์มาเพื่อใช้แทนยางธรรมชาติเนื่องจากมีต้นทุนที่ถูกกว่า มีความยืดหยุ่นสูงและทนทานต่อการขาดคุณสมบัติของยาง SBR เปรียบเทียบกับยาง NR แสดงในตารางที่

2.2

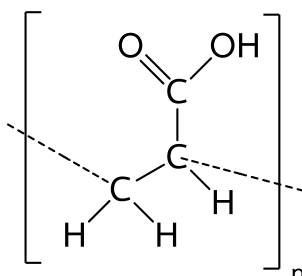
ตารางที่ 2.2 การเปรียบเทียบสมบัติระหว่างยาง NR และ ยาง SBR [9]

	Styrene butadiene rubber SBR	Natural rubber NR
Hardness, IRH	40-90	30-90
Tensile strength at break, N/mm ²	7-25	7-28
Elongation at break, %	100-600	100-700
Operating temperature range		
- maximum, °C	100	80
- minimum, °C	-45	-55
Elasticity	5	5
Resistance:		
- weather and ozone	1-2	1-2
- abrasion	4	4-5
- radiation	2-3	2-3

2.5 พอลิอะคริลิกแอซิด

พอลิอะคริลิกแอซิด (poly(acrylic acid) : PAA) คือพอลิเมอร์ประเภทไอออนิกพอลิเมอร์ (ionic polymer) ที่ถูกสังเคราะห์ด้วยระบบ free radical polymerization เป็นพอลิเมอร์ที่สามารถละลายน้ำได้เนื่องจากมีขั้ว (hydrophilic) และเมื่อละลายน้ำจะมีลักษณะเป็นเจลที่สามารถ

ดูดซึมและกักเก็บน้ำได้เป็นจำนวนมาก ด้วยเหตุนี้จึงถูกนำไปใช้งานในเชิงเกษตรกรรม เครื่องสำอาง และอุตสาหกรรมสี [12] โครงสร้างทางเคมีของ PAA แสดงดังรูปที่ 2.8

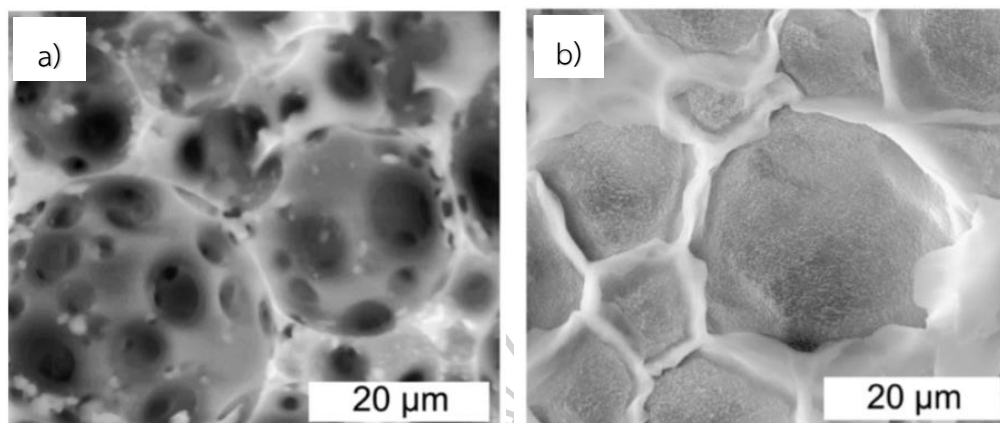


รูปที่ 2.8 โครงสร้างของ poly(acrylic acid) [13]

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

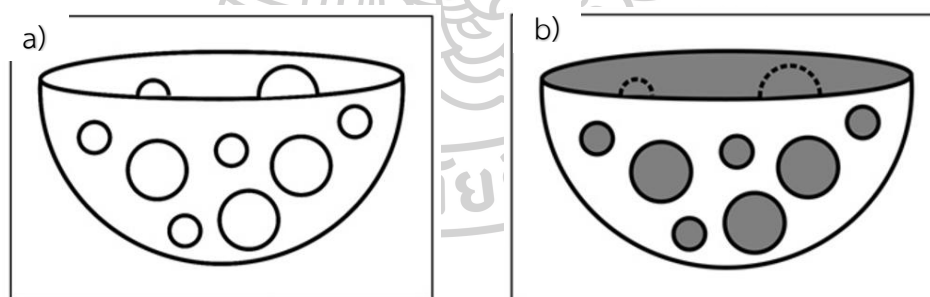
สำหรับการศึกษาไฮโดรเจลที่ใช้การสังเคราะห์แบบ bicontinuous polyHIPE เช่น การศึกษาของ Tamar Gliti และคณะ [14] คณะผู้วิจัยได้ทำการสังเคราะห์ไฮโดรเจลที่เกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันทั้งสองเฟสร่วมกันระหว่าง internal phase และ external phase พอลิเมอร์ที่ได้ทำการศึกษาสำหรับ internal phase เป็นการสังเคราะห์ร่วมกันระหว่าง acrylamide กับ N,N-methylenebisacrylamide (AAm/MBAM) เป็นไฮโดรฟิลิกพอลิเมอร์ ในขณะที่ external phase เป็นการสังเคราะห์ร่วมกันระหว่าง Styrene กับ Divinylbenzene (S/DVB) เป็นไฮโดรโฟบิกพอลิเมอร์ งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษามวลของปริมาณองค์ประกอบในไฮโดรเจลและการเกิดกระบวนการริเริ่มปฏิกิริยา (initiation) ระหว่าง 2 เฟส ผลการศึกษาพบว่าไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ได้สามารถแบ่งเป็น 2 ส่วน ส่วนแรกเป็นโครงร่างของไฮโดรเจลที่เกิดจาก P(S/DVB) ที่เกิดการสังเคราะห์ขึ้นใน external phase อีกส่วนคือส่วนที่เป็นรูพรุนซึ่งเกิดจาก P(AAm/MBAM) ที่เกิดการสังเคราะห์ใน internal phase จากผลการศึกษาทางสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM พบว่ารูพรุนของไฮโดรเจลจะถูกเติมเต็มด้วยพอลิเมอร์ P(AAm/MBAM) โดยสามารถเห็นได้จากการเปรียบเทียบ SEM micrograph ที่ได้จากไฮโดรเจลที่ไม่มีการเติม AAm/MBAM

มอนอเมอร์ลงใน internal phase (HI-0) และ ไฮโดรเจลที่มีการเติม AAm/MBAM มอนอเมอร์ใน internal phase ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 a) P(AAm/MBAM) ไฮโดรเจล และ b) P(AAm/MBAM/S/DVB) [14]

จากรูปพบว่าไฮโดรเจลที่ไม่มีการเติม AAm/MBAM ใน internal phase จะปรากฏโครงสร้างที่มีรูพรุนและเมื่อสังเคราะห์โดยเติม AAm/MBAM ลงใน internal phase แล้วเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันร่วมกันจะปรากฏ P(AAm/MBAM) เติมเต็มรูพรุนที่เคยปรากฏอยู่ก่อนหน้า โครงสร้างลักษณะแบบนี้สามารถสันนิษฐานได้ว่าไฮโดรเจล P(AAm/MBAM) เกิดการเคลือบไปบนโครงร่างของ P(S/DVB) ดังแสดงในรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 รูปแบบโครงสร้างของ a) P(AAm/MBAM) ไฮโดรเจล และ b) P(AAm/MBAM/S/DVB)

[14]

ลักษณะโครงสร้างดังกล่าวสามารถพิจารณาได้จากความแตกต่างของความหนาแน่นของไฮโดรเจลในกรณีที่เป็นช่องว่างรูพรุนและกรณีที่มี P(AAm/MBAM) ในรูพรุนโดยพบว่ากรณีที่มีพอลิเมอร์ในรูพรุนนั้นจะทำให้ความหนาแน่นของไฮโดรเจลเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของไฮโดรฟิลิกพอลิเมอร์เพิ่มขึ้น ปริมาณของไฮโดรฟิลิกพอลิเมอร์ที่เพิ่มขึ้นนอกจากจะส่งผลต่อความหนาแน่นของไฮโดร-

เจลแล้วยังส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของไฮโดรเจลด้วย เนื่องจากไฮโดรเจลที่มีปริมาณ AAm มากจะมีสมบัติเชิงกลที่ต่ำซึ่งมีสาเหตุมาจากโครงสร้างที่มีความเสถียรต่ำ ความเสถียรต่ำที่เกิดขึ้นนี้เป็นเพราะโครงสร้าง AAm บางส่วนที่อยู่ใน internal phase แทรกตัวเข้าไปใน external phase ส่งผลให้โครงสร้างของ P(S/DVB) มีความแข็งแรงลดลง ปัญหานี้สามารถแก้ไขได้โดยการทำ pre-polymerization ของ P(AAm) ก่อนเพื่อให้สารละลายใน internal phase มีความหนืดใกล้เคียงกับค่าความหนืดของ external phase การปรับปรุงให้ความหนืดของสารละลายทั้งสองเฟสมีค่าเท่ากันเป็นปัจจัยหนึ่งที่จะช่วยเพิ่มความเสถียรของระบบอิมัลชัน เมื่ออิมัลชันมีความเสถียรการเพิ่มปริมาณไฮโดรฟิลิกพอลิเมอร์ใน internal phase สามารถทำได้มากขึ้นโดยที่โครงสร้างของไฮโดรฟิลิกพอลิเมอร์ไม่เกิดการแทรกตัวเข้าไปในโครงสร้างของ P(S/DVB) ซึ่งเป็นผลให้โครงสร้างของไฮโดรเจลไม่พังทลายเมื่อได้รับความร้อน

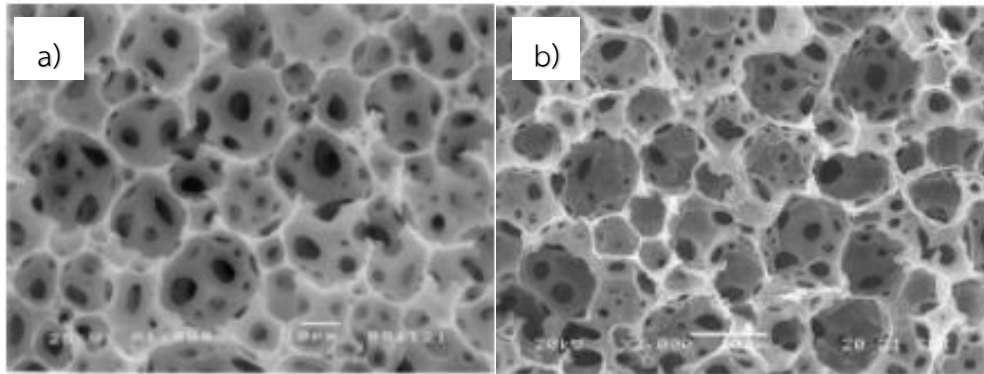
ความสามารถของ bicontinuous polyHIPE ในแง่ของการดูดซึมและควบคุมการปลดปล่อยสารได้ถูกศึกษาโดย Gilti และ Silverstein [15] คณะผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบระหว่างไฮโดรเจลที่เกิดพอลิเมอร์เซชันเพียงเฟสเดียว นั่นคือ P(AAm/MBAM) และเปรียบเทียบกับไฮโดรเจลที่เกิดพอลิเมอร์เซชันทั้งสองเฟสเป็น bicontinuous polyHIPE ของ P(AAm/MBAM/S/DVB) โดยได้ศึกษาความสามารถในการดูดซึมและการปลดปล่อยสารสีคือ Eosin Y ซึ่งเป็นสารละลายที่มีความเป็นไฮโดรฟิลิก จากการศึกษาในแง่ของการดูดซึมสารสีพบว่าไฮโดรเจลที่มีความเป็นไฮโดรฟิลิกสูง นั่นคือ P(AAm/MBAM) จะมีความสามารถในการดูดซึมสารสีได้ดีและสามารถดูดซึมได้ในปริมาณมาก เนื่องจากมีข้อเช่นเดียวกับสารสีที่ใช้ทดสอบและความสามารถในการดูดซึมนี้อาจจะมากขึ้นเมื่อปริมาณมอนอเมอร์ AAm เพิ่มมากขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากความเป็นไฮโดรฟิลิกของไฮโดรเจลมากขึ้น ในขณะที่ไฮโดรเจล P(AAm/MBAM/S/DVB) จะมีสมบัติเป็นทั้งไฮโดรฟิลิกและไฮโดรโฟบิกที่เกิดเนื่องมาจากส่วนของ external phase ที่เป็น P(S/DVB) เป็นผลให้ความเป็นไฮโดรฟิลิกของไฮโดรเจลลดลงทำให้ความสามารถในการดูดซึมสารสีลดลงเพราะมีข้อต่างกัน ทั้งนี้อัตราในการดูดซึมสารสีในแต่ละช่วงเวลาพบว่ามีอัตราต่างกันโดยในช่วงแรกของการดูดซึมจะมีอัตราการดูดซึมสูง เป็นผลมาจากการกระทำแบบคาปิลลารี (capillary action) การกระทำที่เกิดดังกล่าวเกิดจากความสามารถในการเปียกผิวของไฮโดรเจลซึ่งเป็นสมบัติไฮโดรฟิลิกจึงทำให้ช่วงแรกสามารถดูดซึมสารสีได้มากเมื่อเทียบกับเวลา เมื่อถึงจุดอิ่มตัวของการดูดซึมซึ่งเป็นจุดที่โครงสร้างของไฮโดรฟิลิกพอลิเมอร์บวมตัวเต็มรูพรุนอัตราการดูดซึมจะค่อยๆลดลงจนเริ่มคงที่ เมื่อพิจารณาในแง่ของการปลดปล่อยสารสีออกจากโครงสร้างของไฮโดรเจลพบว่าไฮโดรเจล P(AAm/MBAM/S/DVB) จะมีความสามารถในการ

ปลดปล่อยสารออกมาได้ช้ากว่าไฮโดรเจล P(AAm/MBAM) ถึง 25 เท่า (250 ชั่วโมงและ 10 ชั่วโมงตามลำดับ) ทั้งนี้เป็นผลมาจากส่วนของพอลิเมอร์ซึ่งเป็นไฮโดรโฟบิกใน external phase จะเป็นส่วนในสร้างเส้นทางคดเคี้ยวในการเคลื่อนที่ออกของสารซึ่งเส้นทางที่คดเคี้ยวนี้ในหลักการแพร่จะเพิ่มความยากในการเคลื่อนที่ทำให้สารถูกปลดปล่อยออกมาช้ากว่า

ความสามารถในการดูดซึมและกักเก็บน้ำของไฮโดรเจลที่มีสมบัติร่วมกันระหว่างความเป็นไฮโดรฟิลิกและไฮโดรโฟบิกหรืออาจเรียกสมบัติเช่นนี้ว่า amphiphilic ยังถูกศึกษาโดย Nuttida Srirachya และคณะ [16] แอมฟิฟิลิกไฮโดรเจลที่ทำการศึกษากถูกเตรียมจากพอลิเมอร์ 2 ชนิด ได้แก่ เซลลูโลสและยางธรรมชาติ ทั้งนี้การเตรียมด้วยยางธรรมชาติมีเป้าหมายเพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงกลของเซลลูโลสไฮโดรเจลที่มีสมบัติเชิงกลและความยืดหยุ่นต่ำจึงนำมาสังเคราะห์ร่วมกับยางที่มีสมบัติเชิงกลสูงและที่สำคัญคือมีความยืดหยุ่นสูง ยางธรรมชาติที่นำมาศึกษาซึ่งพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างยางธรรมชาติที่ไม่ผ่านการวัลคาไนซ์ (NR) และยางธรรมชาติที่ผ่านการวัลคาไนซ์ (VNR) ด้วย Benzoyl Peroxide (BPO) ถึงความสามารถในการเสริมสมบัติเชิงกลของไฮโดรเจลจากผลการศึกษาความสามารถในการกักเก็บน้ำพบว่าไฮโดรเจลที่เตรียมได้มีความสามารถในการกักเก็บน้ำลดลงเมื่อเทียบกับเซลลูโลสไฮโดรเจลทั้งนี้เป็นผลมาจากความเป็นไฮโดรฟิลิกที่ลดลงส่งผลให้ความเป็นขั้วลดลงความสามารถในการกักเก็บน้ำจึงลดลง แต่ในแง่ของสมบัติเชิงกลกลับมีผลที่ดีกว่าเซลลูโลสไฮโดรเจลทั้งไฮโดรเจลที่ถูกเตรียมจาก NR และ VNR อย่างไรก็ตามยาง VNR จะให้ผลที่ดีกว่าทั้งค่า strength at break และ extensibility เมื่อพิจารณาค่า G' ของ VNR พบว่ามีค่ามากกว่า NR และพิจารณาที่ค่า $\tan\delta$ ของไฮโดรเจลที่ถูกเตรียมด้วย VNR พบว่ามีค่าเท่ากับ 1 ที่ %strain มากกว่าของ NR แสดงให้เห็นว่าไฮโดรเจลที่ถูกเตรียมด้วยยาง VNR มีสมบัติวิสโคอิลาสติก (viscoelastic) มากกว่าไฮโดรเจลที่เตรียมจากยางที่ไม่ผ่านการวัลคาไนซ์

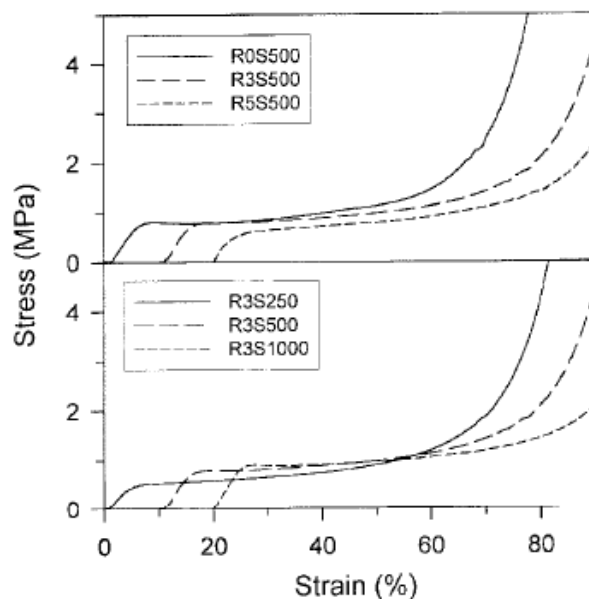
นอกจากนี้ยังพบการศึกษาเกี่ยวกับไฮโดรเจลโดยการนำยางบิวตะไดอิน (BR) มาสังเคราะห์ไฮโดรเจลด้วยระบบการสังเคราะห์แบบ HIPE เพื่อให้ได้โฟมพอลิเมอร์ที่มีรูพรุนซึ่งถูกศึกษาโดย Ji Sun Choi และคณะ [17] ในการสังเคราะห์จะเตรียมระบบอิมัลชันโดยแบ่งออกเป็น 2 เฟส ได้แก่ internal phase ซึ่งมีน้ำเป็นองค์ประกอบ ในขณะที่ external phase จะประกอบไปด้วยยางบิวตะไดอินและสไตรีนมอนอเมอร์ ระบบนี้ถูกเสถียรด้วย span80 และใช้ตัวริเริ่มปฏิกิริยาเป็นโพแทสเซียมเปอร์ซัลเฟต (KPS) ทำการสังเคราะห์ผ่านระบบ HIPE โดยศึกษาผลของความเข้มข้นของยางในสารละลายสไตรีนต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาและสมบัติเชิงกลด้านความกดอัด (compression) จากผลการศึกษาพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของยางมีผลทำให้ขนาดของ

รูพรุนเล็กลงเป็นผลเนื่องจากความหนืดของ external phase ที่มากขึ้นจึงทำให้ขนาดของรูพรุนเล็กลง ดังแสดงในรูปที่ 2.11



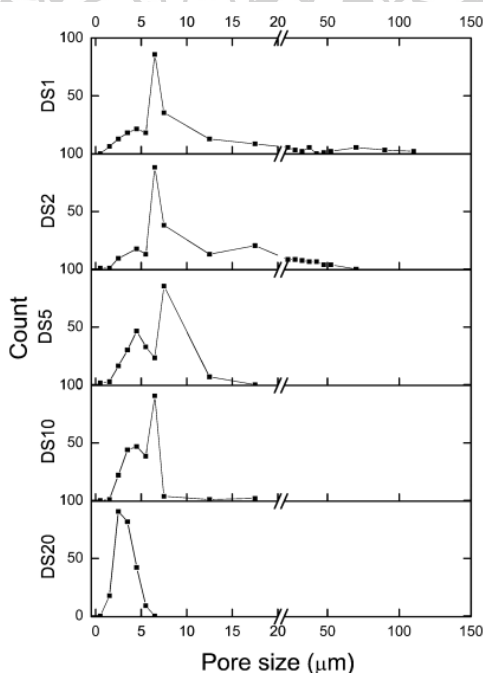
รูปที่ 2.11 a) ไฮโดรเจลที่เตรียมจากพอลิเอทิลีนไดอะครีเลต และ b) ไฮโดรเจลที่เตรียมจากพอลิเอทิลีนไดอะครีเลตและยางบิวตะไดอิน [17]

และจากการศึกษาสมบัติเกี่ยวกับการกดอัด (compression property) ผ่านกราฟความสัมพันธ์ stress-strain โดยพิจารณาค่าที่เกี่ยวข้อง 2 ค่า crush strength และมอดูลัส พบว่าเมื่อความเข้มข้นของยางมีค่ามากกว่า 5% จะเป็นผลทำให้ค่ามอดูลัสของโฟมลดลง ในขณะที่ความเข้มข้นที่เหมาะสมของยางจะมีค่าน้อยกว่า 5% โดยจะมีค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้น (R0S500-R5S500) เมื่อรูพรุนมีความละเอียดมากขึ้น (finer microcellular) แต่ crush strength ลดลง ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 กราฟ stress-strain ของพอลิเอทิลีนไดอะครีเลตร่วมกับยางบิวตะไดอินที่มีปริมาณต่างกัน [17]

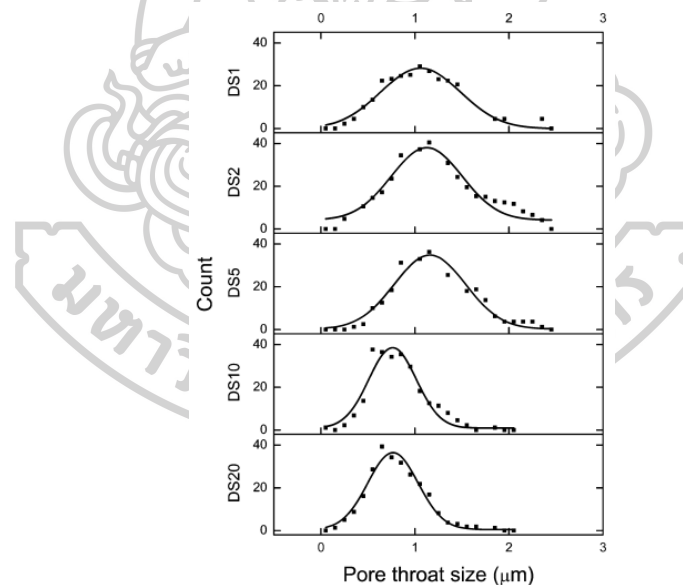
เนื่องจากโครงสร้างรูพรุนเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของวัสดุรูพรุนการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อโครงสร้างและขนาดของรูพรุนจึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจ นอกเหนือจากความเข้มข้นของพอลิเมอร์ใน internal phase และความหนืดของ external phase จะมีผลต่อโครงสร้างรูพรุนแล้วยังพบว่าปริมาณของสารเสถียรอิมัลชันก็เป็นอีกปัจจัยที่ส่งผลต่อโครงสร้างรูพรุนเช่นกัน ดังการศึกษาของ Ling L. C. Wong และคณะ [18] ที่ได้ทำการศึกษาค่าผลของปริมาณของสารเสถียรอิมัลชันที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลของ poly(styrene-co-divinylbenzene)HIPES ซึ่งเตรียมผ่านเทคนิค polyHIPE และเป็นระบบอิมัลชันแบบ w/o ที่มี internal phase 80% โดยปริมาตร จากการศึกษาพบว่าปริมาณสารเสถียรอิมัลชันส่งผลให้ขนาดของรูพรุนเปลี่ยนแปลง โดยเมื่อศึกษาผ่านเทคนิคการวัดพื้นที่ผิวและความเป็นรูพรุน (BET) พบว่าการเพิ่มปริมาณสารเสถียรอิมัลชันจากระบบ DS1 ไปเป็น DS2 เป็นเหตุให้ขนาดของรูพรุนเล็กลงจึงส่งผลให้พื้นที่ผิวของ poly(styrene-co-divinylbenzene)HIPES เพิ่มขึ้นดังรูปที่ 2.13



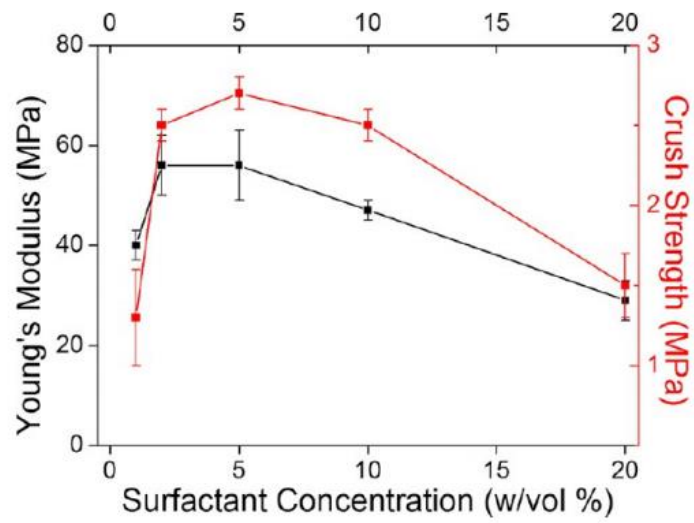
รูปที่ 2.13 การกระจายตัวของขนาดรูพรุนของ poly(styrene-co-divinylbenzene)HIPES ที่มีปริมาณสารเสถียรอิมัลชันต่างกัน [18]

จากผล BET แสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณสารเสถียรอิมัลชันมากขึ้น (DS1-DS20) ขนาดของรูพรุนมีค่าลดลงอีกทั้งในบางความเข้มข้นยังมีการกระจายตัวของรูพรุน 2 ค่า (bimodal distribution) ขนาดของรูพรุนที่เล็กลงประกอบกับจำนวนรูพรุนที่เพิ่มขึ้นนี้เป็นผลให้ช่องว่างรอยต่อระหว่างรูพรุน

น้อยลงหรือความหนาของผนังรูพรุนน้อยลงดังแสดงในรูปที่ 2.14 พบว่าผนังของรูพรุนที่เล็กลง ร่วมกับการกระจายตัวของขนาดรูพรุนที่มากกว่าหนึ่งค่าเป็นเหตุให้สมบัติเชิงกลของ poly(styrene-co-divinylbenzene)HIPes ลดลงในแง่ของค่ามอดูลัสและ crush strength ดังแสดงในรูปที่ 2.15 ทั้งนี้ก็เพราะผนังของรูพรุนที่หนาน้อยลงจะส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงของ poly(styrene-co-divinylbenzene)HIPes ลดลง อีกทั้งที่ผนังของรูพรุนยังเกิดจากการรวมตัวของรูพรุนขนาดเล็ก และขนาดใหญ่เชื่อมกันจึงทำให้การรับแรงทำได้แย่งค่ามอดูลัสจึงต่ำลง อีกทั้งการกระจายตัวของรูพรุนที่มีหลายค่ายังส่งผลให้แต่ละบริเวณในโครงสร้างของ poly(styrene-co-divinylbenzene)HIPes รับแรงไม่เท่ากัน การกระจายแรงจึงไม่สม่ำเสมอส่งผลให้ค่ามอดูลัส และ crush strength ลดลงเมื่อปริมาณสารเสถียรอิมัลชันมากขึ้นและลดลงมากที่สุดที่ปริมาณสารเสถียรอิมัลชันสูงสุด (DS20) เนื่องจากรูพรุนสูญเสียความเป็นรูพรุนเชื่อมต่อกัน (connecting pores) ดังนั้นเมื่อ poly(styrene-co-divinylbenzene)HIPes ได้รับแรงแรงดังกล่าวจะไม่ถูกถ่ายโอนไปยังรูพรุนอื่นๆเพราะรูพรุนไม่เชื่อมต่อกัน เมื่อไม่เกิดการกระจายแรงความสามารถในการรับแรงของไฮโดรเจลจึงลดลงค่ามอดูลัสและ crush strength จึงลดลงตามลำดับ



รูปที่ 2.14 การกระจายตัวของขนาดความหนารูพรุนของ poly(styrene-co-divinylbenzene)HIPes ที่มีปริมาณสารเสถียรอิมัลชันต่างกัน [18]



รูปที่ 2.15 สมบัติเชิงกลของ poly(styrene-co-divinylbenzene) HIPEs ที่มีปริมาณสารเสถียรอิมัลชันต่างกัน [18]



บทที่ 3 วิธีการดำเนินงานวิจัย

3.1 สารเคมีที่ใช้ในงานวิจัย

- ยางธรรมชาติ (Natural Rubber : NR) เกรด 1502 ของบริษัท BSTE, เป็นไฮโดรโฟบิกพอลิเมอร์
- ยางบิวตะไดอิน (Butadiene Rubber : BR) เกรด 1502, ของบริษัท BSTE เป็นไฮโดรโฟบิกพอลิเมอร์
- ยางสไตรีน-บิวตะไดอิน (Styrene-Butadiene Rubber : SBR) เกรด 1502, ของบริษัท BSTE เป็นไฮโดรโฟบิกพอลิเมอร์
- อะคริลิกแอซิด (acrylic acid: AA) เกรดการสังเคราะห์, บริษัท Loba Chemie, ประเทศอินเดีย เป็นไฮโดรฟิลิกมอนอเมอร์
- N,N'-Methylenebis-acrylamide (MBA) เกรดห้องปฏิบัติการ, บริษัท Acros Organics, ประเทศเบลเยียม เป็นมอนอเมอร์สังเคราะห์ร่วมของไฮโดรฟิลิกพอลิเมอร์
- Benzoyl peroxide (BPO) เกรดการสังเคราะห์, บริษัท Merck, ประเทศเยอรมนี เป็นสารเชื่อมขวางสำหรับไฮโดรโฟบิกพอลิเมอร์
- ammonium persulfate (APS) เกรดการวิเคราะห์, บริษัท KEMAUS, ประเทศออสเตรเลีย เป็นสารริเริ่มปฏิกิริยาสำหรับเฟสน้ำ
- โทลูอีน (toluene) เกรดการวิเคราะห์, บริษัท ACI Labscan, ประเทศไทย เป็นตัวทำละลายยาง
- Polyoxyethylene (40) nonylphenyl ether (IGEPAL CO-890) เกรดสังเคราะห์, บริษัท SIGMA-ALDRICH, ประเทศสหรัฐอเมริกา
- polyoxyethylene (80) sorbitan monooleate (TWEEN80) เกรดสังเคราะห์, บริษัท QRèC, ประเทศนิวซีแลนด์
- sorbitan monooleate (Span 80) เกรดสังเคราะห์, บริษัท SIGMA-ALDRICH, ประเทศสหรัฐอเมริกา
- อะซีโตน ความบริสุทธิ์ 96%
- น้ำปราศจากไอออน (DI water)

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

- เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (Fourier-transform infrared spectrometer, FTIR) รุ่น Vertex70, บริษัท BRUKER, ประเทศเยอรมนี
- กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy, SEM) รุ่น MX-2000, บริษัท CamScan, ประเทศแคนาดา
- กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical Microscope, OM) รุ่น B-600MET, บริษัท OPTIKA, ประเทศอิตาลี
- เครื่องทดสอบเชิงกลแบบทั่วไป (Universal testing machine) รุ่น 5969, บริษัท Instron Engineering Corporation, ประเทศสหรัฐอเมริกา
- เครื่องทำแห้งตัวอย่าง ณ อุณหภูมิลด (Freeze drier) รุ่น CoolSafe 55-4 Pro, บริษัท LABOGENE, ประเทศเดนมาร์ก
- ตู้อบสูญญากาศ (Vacuum oven) รุ่น VO200, บริษัท Memmert, ประเทศเยอรมนี

3.3 ดัชนีอักษรย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาคาร์เตรียมไฮโดรฟลิค-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล โดยศึกษาไฮโดร-โฟบิกพอลิเมอร์จากยางต่างชนิดกันทั้งหมด 3 ชนิด อีกทั้งในการเตรียมไฮโดรฟลิค-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล จากยางแต่ละชนิดยังมีการปรับเปลี่ยนปริมาณสารเสถียรอิมัลชันที่ใช้ในการเตรียมด้วย ดังนั้นเพื่อให้เข้าใจความหมายของตัวอย่างที่ทำการศึกษาลงขอแสดงรายละเอียดเกี่ยวกับอักษรย่อที่ใช้ดังต่อไปนี้

- Elastomer Type/Surfactant Type-Percentage of Surfactant

Elastomer Type ประกอบด้วย

SBR หมายถึง ไฮโดรเจลที่เตรียมโดยใช้ Styrene-Butadiene Rubber

เป็นไฮโดรโฟบิกพอลิเมอร์ใน external phase

BR หมายถึง ไฮโดรเจลที่เตรียมโดยใช้ Butadiene Rubber เป็น

ไฮโดรโฟบิกพอลิเมอร์ใน external phase

NR หมายถึง ไฮโดรเจลที่เตรียมโดยใช้ Natural Rubber เป็นไฮโดร-

โฟบิกพอลิเมอร์ใน external phase

Surfactant Type ประกอบด้วย

IGEPAL หมายถึง ไฮโดรเจลที่เตรียมโดยใช้ IGEPAL CO-890 เป็นสารเสถียรอิมัลชัน

TWEEN หมายถึง ไฮโดรเจลที่เตรียมโดยใช้ TWEEN80 เป็นสารเสถียรอิมัลชัน

Span หมายถึง ไฮโดรเจลที่เตรียมโดยใช้ Span80 เป็นสารเสถียรอิมัลชัน

Percentage of Surfactant ประกอบด้วย

5% หมายถึง ไฮโดรเจลที่เตรียมโดยใช้สารเสถียรอิมัลชันความเข้มข้น 5% โดยมวลต่อปริมาตรเทียบกับปริมาณอิมัลชันทั้งหมด

10% หมายถึง ไฮโดรเจลที่เตรียมโดยใช้สารเสถียรอิมัลชันความเข้มข้น 10% โดยมวลต่อปริมาตรของอิมัลชันทั้งหมด

15% หมายถึง ไฮโดรเจลที่เตรียมโดยใช้สารเสถียรอิมัลชันความเข้มข้น 15% โดยมวลต่อปริมาตรของอิมัลชันทั้งหมด

20% หมายถึง ไฮโดรเจลที่เตรียมโดยใช้สารเสถียรอิมัลชันความเข้มข้น 20% โดยมวลต่อปริมาตรของอิมัลชันทั้งหมด

ตัวอย่างเช่น

- SBR/Span-10% หมายถึง ไฮโดรเจลที่เตรียมโดยมี Styrene-Butadiene Rubber เป็นไฮโดรฟิสิกพอลิเมอร์ใน external phase และใช้ Span80 เป็นสารเสถียรอิมัลชันในความเข้มข้น 10% โดยมวลต่อปริมาตรรวมของอิมัลชันทั้งหมด
- Porous SBR หมายถึง SBR ที่มีรูพรุนซึ่งเตรียมด้วยเทคนิค HIPE โดยใช้ Span80 เป็นสารเสถียรอิมัลชันที่ความเข้มข้น 10% โดยมวลต่อปริมาตรของอิมัลชันทั้งหมด
- Porous BR หมายถึง BR ที่มีรูพรุนซึ่งเตรียมด้วยเทคนิค HIPE โดยใช้ Span80 เป็นสารเสถียรอิมัลชันที่ความเข้มข้น 10% โดยมวลต่อปริมาตรของอิมัลชันทั้งหมด
- Porous NR หมายถึง SBR ที่มีรูพรุนซึ่งเตรียมด้วยเทคนิค HIPE โดยใช้ Span80 เป็นสารเสถียรอิมัลชันที่ความเข้มข้น 5% โดยมวลต่อปริมาตรของอิมัลชันทั้งหมด

3.4 การหาชนิดและปริมาณสารเสถียรอิมัลชันที่เหมาะสมสำหรับใช้เตรียมไฮโดรฟลิค-ไฮโดร- โปก ไฮโดรเจล

3.4.1 การหาชนิดสารเสถียรอิมัลชันที่เหมาะสมสำหรับใช้เตรียมไฮโดรฟลิค-ไฮโดรโปก ไฮโดรเจล

ในงานวิจัยนี้การเตรียมอิมัลชันประกอบด้วย 2 เฟส นั่นคือ internal phase คิดเป็น 75%v/v ของปริมาตรอิมัลชันทั้งหมด เป็นส่วนของไฮโดรฟลิคพอลิเมอร์ เตรียมได้จากสารละลาย อะคริลิกแอซิด (AA) ในขณะที่อีกเฟสคือ external phase คิดเป็น 25%v/v ของปริมาตรอิมัลชัน ทั้งหมด เป็นส่วนของไฮโดรโปกพอลิเมอร์เตรียมได้จากสารละลายยางแต่ละชนิด (SBR, BR และ NR) สำหรับสัดส่วนปริมาณขององค์ประกอบแต่ละเฟสแสดงดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงสัดส่วนและความเข้มข้นขององค์ประกอบในการเตรียมอิมัลชัน

เฟส	Internal phase (75%v/v)
External phase (25%v/v)	<ul style="list-style-type: none"> - สารละลายยาง (ความเข้มข้น 3%w/v) - BPO ความเข้มข้น 3%w/v เทียบกับ ปริมาตรอิมัลชัน
Internal phase (75%v/v)	<ul style="list-style-type: none"> - อะคริลิกแอซิด มอนอเมอร์ เทียบอัตราส่วน น้ำหนักอะคริลิกแอซิด มอนอเมอร์ : น้ำหนักยาง เป็น 1:1 - MBA ความเข้มข้น 14.58%w/w เทียบกับ ปริมาณอะคริลิกแอซิด มอนอเมอร์ - APS ความเข้มข้น 1%w/v ของปริมาตร อิมัลชัน - น้ำ DI

ทำการศึกษาโดยปรับเปลี่ยนสารเสถียรอิมัลชัน 3 ชนิด ได้แก่ IGEPAL CO-890, TWEEN80 และ Sapan80 โดย IGEPAL CO-890 และ TWEEN80 จะละลายใน internal phase แต่ Span80 จะละลายใน external phase โดยใช้ความเข้มข้นของสารเสถียรอิมัลชันคงที่ที่ 10 %w/v ของ ปริมาตรอิมัลชัน

สำหรับการศึกษาเริ่มจากการเตรียมสารละลายยางที่มีความเข้มข้น 3%w/v โดยนำยาง ก้อนปริมาณ 3 กรัม ละลายในตัวทำละลายโทลูอีนโดยค่อยๆละลายเทสารละลายโทลูอีนละลายยาง ก้อนที่อุณหภูมิห้องจนยางละลายเป็นสารละลายยางจากนั้นจึงปรับให้มีปริมาตรรวมเป็น 100

มิลลิลิตร แล้วนำมาเตรียมสารละลาย external phase (ในที่นี้พิจารณาการเตรียมอิมัลชัน ปริมาตร 20 มิลลิลิตร) โดยนำสารละลายยางความเข้มข้น 3%w/v ปริมาตร 5 มิลลิลิตร (ปริมาณยาง 0.15 กรัม) ละลายกับ BPO จำนวน 0.6 กรัม ที่อุณหภูมิห้องจนเป็นเนื้อเดียวกัน ในขณะเดียวกันก็เตรียมสารละลาย internal phase โดยนำอะคริลิกแอซิดมอนอเมอร์ จำนวน 0.15 กรัม ละลายในน้ำ DI จำนวน 14.85 กรัม แล้วละลาย MBA จำนวน 0.022 กรัม ตามด้วย APS จำนวน 0.2 กรัม ละลายเข้าด้วยกันและทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง สำหรับสารละลาย internal phase เตรียมได้ทั้งหมด 2 แบบ คือ

- การเตรียมแบบไม่มี pre-polymerization สำหรับตรวจสอบความสามารถในการเสถียร-อิมัลชันทางกายภาพ

- การเตรียมแบบ pre-polymerization โดยนำสารละลาย internal phase ที่เตรียมได้ไปให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 30 นาที เพื่อการตรวจสอบความสามารถในการเสถียรอิมัลชันจากร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ (%yield) ตรวจสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยา

ทั้ง 2 แบบถูกนำมาเตรียมอิมัลชันด้วยวิธีเดียวกันโดยหยดสารละลาย internal phase ลงในสารละลาย external phase พร้อมกับกวนด้วยอัตราเร็วคงที่ที่อุณหภูมิห้อง เมื่อหยดเสร็จทำการกวนต่อเนื่องเป็นเวลา 1 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้องและนำไปสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 80 °C สำหรับการตรวจสอบทางกายภาพทำเมื่อเวลาการสังเคราะห์ผ่านไปแล้ว 2 ชั่วโมง โดยใช้การสังเกตการแยกชั้นของอิมัลชัน ส่วนการพิจารณา %yield ทำเมื่อการสังเคราะห์เสร็จสิ้น (24 ชั่วโมง) แล้วนำไฮโดรฟลิค-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล ไปสกัดตัวทำละลายออกด้วยการสกัดด้วยซอกเลต (soxhlet extraction) โดยใช้อะซิโตนเป็นตัวทำละลายที่อุณหภูมิ 80 °C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไฮโดรฟลิค-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล ที่ได้ไปอบด้วยตู้อบสุญญากาศที่อุณหภูมิ 50 °C จนน้ำหนักคงที่แล้วนำไปหาน้ำหนักแห้งเพื่อพิจารณาร้อยละผลได้ (%yield) ดังสมการ

$$\%yield = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง (g)}}{\text{น้ำหนักของมอนอเมอร์ (g)}} \times 100$$

ชนิดของไฮโดรฟลิค-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล ที่เตรียมได้แสดงดังตาราง 3.2

ตารางที่ 3.2 ชนิดของไฮโดรฟลิค-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจลสำหรับการศึกษาหาชนิดของสารเสถียร-อิมัลชัน

ไฮโดรโฟบิกพอลิเมอร์	ตัวอย่าง
SBR	SBR/IGEPAL-10%
	SBR/TWEEN-10%
	SBR/Span-10%
BR	BR/IGEPAL-10%
	BR/TWEEN-10%
	BR/Span-10%
NR	NR/IGEPAL-10%
	NR/TWEEN-10%
	NR/Span-10%

3.4.2 การเตรียมไฮโดรฟลิค-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล เพื่อศึกษาความเข้มข้นสารเสถียร-อิมัลชันที่เหมาะสม

ในการศึกษาปริมาณสารเสถียรอิมัลชันจะพิจารณาชนิดของสารเสถียรอิมัลชันที่เหมาะสมต่อไฮโดรฟลิค-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล ของยางแต่ละชนิดที่ได้จากข้อ 3.4.1 โดยการศึกษาจะพิจารณาที่ความเข้มข้น 5%, 10%, 15% และ 20% w/v เทียบกับปริมาตรอิมัลชันทั้งหมด สัดส่วนขององค์ประกอบแต่ละเฟสยังคงเป็นไปตามตารางที่ 3.1 และความเข้มข้นของสารละลายยางเช่นเดิมมีขั้นตอนการเตรียมไฮโดรฟลิค-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล เช่นเดียวกับ 3.4.1 เพียงแต่ทำการปรับความเข้มข้นของสารเสถียรอิมัลชันที่ใช้เป็น 5%w/v, 15%w/v และ 20%w/v โดยใช้สารละลาย internal phase ที่ผ่านการ pre-polymerization ทั้งนี้ยังมีการเตรียมยางที่มีรูพรุนเมื่อให้เป็นตัวอย่างเปรียบเทียบอย่าง Porous SBR, Porous BR และ Porous NR ที่ถูกเตรียมด้วยการปรับเปลี่ยน internal phase เป็นน้ำ DI แทนสารละลาย internal phase โดยมี Span80 เป็นสารเสถียรอิมัลชันที่ความเข้มข้น 10%w/v เทียบกับปริมาตรอิมัลชันทั้งหมด

3.5 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของไฮโดรฟลิค-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล

3.5.1 การพิสูจน์เอกลักษณ์เชิงโครงสร้างเคมีของไฮโดรฟลิค-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล

ในการพิสูจน์เอกลักษณ์เชิงโครงสร้างทางเคมีจะอาศัยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) โดยนำไฮโดรฟลิค-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล บดกับ KBr จากนั้นทำไปอัดเป็นแผ่นและทดสอบด้วยเครื่อง FTIR ใช้โหมด TR ในช่วงเลขคลื่น $400-4000\text{ cm}^{-1}$ ที่ความละเอียด 4 cm^{-1}

3.5.2 การทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy

ทำการเตรียมตัวอย่างไฮโดรฟลิค-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจลที่ผ่านการสกัดด้วยซอกเลต (soxhlet extraction) โดยใช้ น้ำ DI ไปทำการทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งตัวอย่าง ณ อุณหภูมิวิกฤตเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปเคลือบด้วยแพลตินัมและทดสอบลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยเครื่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดโดยใช้กำลังขยาย 1000 และ 5000 เท่า ที่ 5.0kV

3.5.3 การทดสอบการหาขนาดของหยดอิมัลชันด้วยเทคนิค Optical microscopy

นำอิมัลชันที่เตรียมได้จากการกวนแล้ว 1 ชั่วโมง หยดลงบนกระจกสไลด์และเกลี่ยให้บางและโปร่งแสงแล้วนำไปส่องโดยไม่ต้องปิดด้วยแผ่นปิดสไลด์ การส่องที่กำลังขยาย 20 และ 50 เท่า เมื่อได้บริเวณที่เห็นหยดอิมัลชันชัดเจนจึงทำการถ่ายรูปหยดอิมัลชัน จากนั้นนำรูปที่ได้มาวัดขนาดของหยดอิมัลชันด้วยโปรแกรม Image Analyzer โดยจะพิจารณาการวัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหยดอิมัลชันโดยมีจำนวนหยดอิมัลชันอย่างน้อย 50 หยด

3.6 การทดสอบความสามารถในการดูดซึมน้ำของไฮโดรฟลิค-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล

นำไฮโดรฟลิค-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจลที่ผ่านการสกัดตัวทำละลายออกด้วยน้ำ DI ด้วยวิธีการสกัดด้วยซอกเลต (soxhlet extraction) มาอบที่อุณหภูมิ $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ด้วยตู้อบสูญญากาศจนอุณหภูมิคงที่ จากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักชิ้นงานแห้งและทำการดูดซึมน้ำเพื่อหาความสามารถในการดูดซึมน้ำ (%absorption) ดังสมการ

$$\% \text{absorption} = \frac{\text{น้ำหนักชิ้นงานเปียก (กรัม)} - \text{น้ำหนักชิ้นงานแห้ง (กรัม)}}{\text{น้ำหนักชิ้นงานแห้ง (กรัม)}}$$

สำหรับการทดสอบดูดซึมน้ำเริ่มโดยนำชิ้นงานตัวอย่างจุ่มลงไปใต้น้ำ DI แล้วทำการจับเวลาครั้งที่ 1 30 นาที จากนั้นนำชิ้นงานมาซับให้แห้งแล้วทำการชั่งน้ำหนักได้เป็นน้ำหนักชิ้นงานเปียก

หลังจากนั้นนำไปแช่น้ำต่ออีก 30 นาทีแล้วจึงนำมาชั่งน้ำหนักเป็นรอบที่ 2 แล้วจึงเว้นเวลาการแช่น้ำ เป็น 1 ชั่วโมง 2 ชั่วโมง 3 ชั่วโมง 6 ชั่วโมง 12 ชั่วโมง 24 ชั่วโมง และ 7 วัน จากนั้นนำข้อมูลมา สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง %absorption กับเวลา

3.7 การทดสอบความต้านทานต่อการกดอัดของไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล

การทดสอบสมบัติเชิงกลของไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล จะพิจารณาสมบัติของความต้านทานการกดอัด (compression strength) ของไฮโดรเจล โดยนำตัวอย่างไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจลที่ผ่านการดูดซึมน้ำแล้ว 12 ชั่วโมง มาทำการทดสอบ สำหรับชิ้นงานที่ใช้ทดสอบมีรูปทรงเป็นทรงกระบอกที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร และสูง 18 มิลลิเมตร นำมาทดสอบด้วยเครื่อง Instron 5969 โหมดกดอัด (compression mode) ด้วย load 50kN กดอัดด้วยอัตรา 1 มิลลิเมตรต่อนาที ที่ 50%strain จากนั้นหลังการทดสอบได้ทำการวัดความสูงของชิ้นงานหลังจากถูกกดอัดที่เวลา 0 นาที 10 นาที และ 60 นาที เพื่อนำมาหาความสามารถในการคืนตัว (%recovery) ดังสมการ

$$\% \text{ recovery} = 100\% - \left[\left(\frac{\text{ความสูงชิ้นงานเริ่มต้น (mm)} - \text{ความสูงชิ้นงานหลังกดอัด (mm)}}{\text{ความสูงชิ้นงานเริ่มต้น (mm)}} \right) \times 100\% \right]$$

3.8 การทดสอบการดูดซึมน้ำซ้ำของไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล

การทดสอบการดูดซึมน้ำซ้ำของไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล ทำโดยนำไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล ที่เตรียมได้มาชั่งน้ำหนักแห้งแล้วนำไปแช่น้ำ DI เป็นเวลา 3 วัน จากนั้นจึงนำไปชั่งน้ำหนักเปียกแล้วคำนวณหา %adsorption นำไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล ตัวอย่างเดิมไปอบให้แห้งจนน้ำหนักคงที่แล้วนำมาทดสอบดูดซึมน้ำซ้ำเช่นเดิมให้ครบ 3 รอบ ทำเช่นเดียวกันกับอะคริลิกแอซิดไฮโดรเจล ที่เตรียมด้วยเทคนิค HIPE แล้วทำการบันทึกลักษณะรูปทรงของไฮโดรเจลก่อนอบและหลังอบแห้งพร้อมกับเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซึมน้ำ

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการเตรียมและความสามารถในการดูดซับน้ำของไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล ที่เตรียมได้จากไฮโดรโฟบิกพอลิเมอร์ต่างกัน 3 ชนิด ได้แก่ SBR, BR และ NR ร่วมกับไฮโดรฟิลิกพอลิเมอร์เพียงชนิดเดียวคือ พอลิอะคริลิกแอซิด ผ่านระบบการสังเคราะห์พอลิเมอร์แบบอิมัลชันที่เสริมโครงสร้างความเป็นรูพรุนด้วยเทคนิค bicontinuous polyHIPE เป็นระบบอิมัลชันแบบ w/o ในการเตรียมได้ทำการศึกษานิตของสารเสถียรอิมัลชันที่เหมาะสมกับระบบอิมัลชันที่มีไฮโดรโฟบิกพอลิเมอร์ต่างกันทั้งหมด 3 ชนิด คือ IGEPAL CO-890, TWEEN80 และ Span80 ที่ความเข้มข้นเท่ากัน เมื่อทราบชนิดสารเสถียรอิมัลชันที่เหมาะสมต่ออิมัลชันแต่ละระบบแล้วยังศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารเสถียรอิมัลชันที่ส่งผลต่อสมบัติของไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล ในแง่ของความสามารถในการดูดซับน้ำและสมบัติเชิงกลด้านการกดอัด โดยแบ่งขั้นตอนในการศึกษาเป็น 3 ตอนดังนี้

ตอนที่ 1 ทำการศึกษาการเตรียมไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล จากยาง 3 ชนิด (SBR, BR, NR) โดยศึกษาหาชนิดของสารเสถียรอิมัลชันที่เหมาะสมต่อการเตรียมไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล ที่ใช้อย่างต่างชนิดกัน

ตอนที่ 2 ทำการศึกษาหาปริมาณสารเสถียรอิมัลชันเหมาะสมต่อการเตรียมไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล ที่ใช้อย่างต่างชนิดกัน

ตอนที่ 3 ทำการพิสูจน์เอกลักษณ์รวมทั้งศึกษาความสามารถในการดูดซับน้ำและความต้านทานต่อการกดอัดของไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล ที่เตรียมจากยางต่างชนิดกัน (SBR, BR และ NR)



4.1 การศึกษาหาชนิดและปริมาณสารเสถียรอิมัลชันที่เหมาะสมสำหรับใช้เตรียมไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล

จากการศึกษาการเตรียมไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล จากยาง 3 ชนิด นั่นคือ SBR, BR และ NR โดยพิจารณาสารเสถียรอิมัลชัน 3 ชนิด ได้แก่ IGEPAL CO-890, TWEEN80 และ Span80 ที่ความเข้มข้นเท่ากัน (10%w/v ของอิมัลชัน) เนื่องจากในระบบอิมัลชันความเสถียรของอิมัลชันส่งผลโดยตรงกับการสังเคราะห์พอลิเมอร์เพราะอิมัลชันที่มีความเสถียรมากจะมีโอกาสสูงในการเตรียมที่ไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจลได้สำเร็จ ปัจจัยสำคัญสำหรับการเสถียรอิมัลชันคือ สารเสถียรอิมัลชันต้องทำหน้าที่ให้การลดแรงตึงผิวระหว่างเฟส 2 เฟสที่มีขั้วต่างกัน ดังนั้นสมบัติของสารเสถียรอิมัลชันคือความสามารถในการเข้ากันได้กับทั้งสองเฟสเพื่อให้ทั้งสองเฟสอยู่ร่วมกันเป็นเนื้อเดียวกันได้ ดังนั้นในแต่ละระบบอิมัลชันที่มีองค์ประกอบทั้งสองเฟสแตกต่างกันออกไปก็จำเป็นต้องเลือกสารเสถียรอิมัลชันที่มีความเหมาะสม สำหรับงานวิจัยนี้พิจารณาความสามารถในการเสถียรอิมัลชันทั้งก่อนและหลังกระบวนการสังเคราะห์โดยอาศัยการตรวจสอบทางกายภาพจากการสังเกตการแยกชั้นของอิมัลชันเมื่อถูกทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันไป 2 ชั่วโมง และหลังจากการทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันแล้วเสร็จได้ทำการหาร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ (%yield) ของไฮโดรเจลที่เกิดขึ้น พร้อมกับการพิสูจน์เอกลักษณ์เพื่อยืนยันลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM และโครงสร้างเชิงเคมีด้วยเทคนิค FTIR

4.1.1 การศึกษาความสามารถในการเสถียรอิมัลชันของสารเสถียรอิมัลชันโดยอาศัยลักษณะทางกายภาพและร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

ผลการศึกษาความสามารถในการเสถียรอิมัลชันของสารเสถียรอิมัลชันทั้ง 3 ชนิด ที่ทำการพิจารณาทั้งการแยกชั้นของอิมัลชันและร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์ของระบบอิมัลชันที่เตรียมจากยางต่างชนิดกัน แสดงดังตารางที่ 4.1, 4.2 และ 4.3

ตารางที่ 4.1 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของระบบอิมัลชัน poly(AA/SBR) hydrogels และ ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

ชนิดอิมัลชัน	ผลการสังเกตอิมัลชันหลังทำปฏิกิริยา พอลิเมอร์เซชัน 2 ชั่วโมง	ร้อยละผลได้ของ ผลิตภัณฑ์ (%yield)
SBR/IGEPAL-10%		22±6
SBR/TWEEN-10%		24±14
SBR/Span-10%		63±4

ตารางที่ 4.2 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของระบบอิมัลชัน poly(AA/BR) hydrogels และ ร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

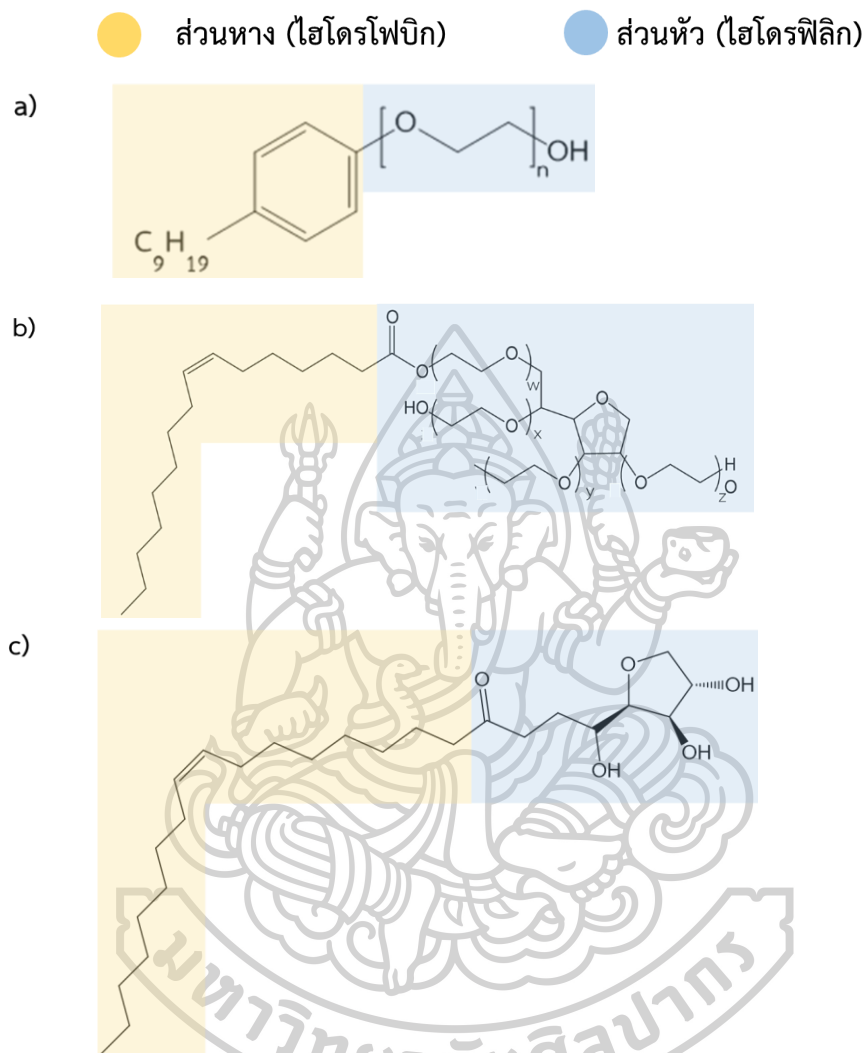
ชนิดอิมัลชัน	ผลการสังเกตอิมัลชันหลังทำปฏิกิริยา พอลิเมอร์เซชัน 2 ชั่วโมง	ร้อยละผลได้ของ ผลิตภัณฑ์ (%yield)
BR/IGEPAL-10%		38±7
BR/TWEEN-10%		36±14
BR/Span-10%		86±6

ตารางที่ 4.3 ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของระบบอิมัลชัน poly(AA/NR) hydrogels และร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์

ชนิดอิมัลชัน	ผลการสังเกตอิมัลชันหลังทำปฏิกิริยา พอลิเมอไรเซชัน 2 ชั่วโมง	ร้อยละผลได้ของ ผลิตภัณฑ์ (%yield)
NR/IGEPAL-10%		42±7
NR/TWEEN-10%		42±10
NR/Span-10%		63±13

เนื่องจากระบบอิมัลชันนี้เป็นแบบ w/o โดยที่ external phase เป็นส่วนของไฮโดรโฟบิกพอลิเมอร์ (SBR, BR และ NR) ในขณะที่ internal phase เป็นไฮโดรฟิลิกพอลิเมอร์ (poly(acrylic acid)) สำหรับระบบอิมัลชันที่มียาง SBR เป็นไฮโดรโฟบิกพอลิเมอร์พบว่า อิมัลชันที่เตรียมสามารถเสถียรได้ดีเมื่อใช้ Span80 เป็นสารเสถียรอิมัลชัน ทั้งกรณีระหว่างและหลังกระบวนการพอลิเมอไรเซชันเพราะเกิดการแยกชั้นของอิมัลชันน้อยที่สุดและมี %yield สูงสุด รองลงมา คือ IGEPAL CO-890 และ TWEEN80 ที่มีความสามารถในการเสถียรใกล้เคียงกันเมื่อพิจารณา %yield เนื่องจากสารเสถียรอิมัลชันทั้งสามชนิดนี้มีความสามารถในการละลายและการดูดซับที่รอยต่อระหว่าง 2 เฟสได้ต่างกัน สำหรับความสามารถในการละลายได้ดีสำหรับระบบอิมัลชันที่มีองค์ประกอบมีขั้วต่างกันสามารถเลือกใช้สารเสถียรอิมัลชันโดยพิจารณาจากค่า HLB โดย Span80, TWEEN80 และ IGEPAL CO-890 จะมีค่า HLB เป็น 4.3, 13 และ 19 ตามลำดับ [19] ซึ่งจะเห็นได้ว่าในระบบอิมัลชันของงานวิจัยนี้สารเสถียรอิมัลชันที่มีค่า HLB ต่ำจะสามารถเสถียรระบบอิมัลชันนี้ได้ดีที่สุดเนื่องจากระบบนี้เป็นระบบ w/o ซึ่งการเกิดอิมัลชันนั้นหยดของ internal phase ที่เป็นไฮโดรฟิลิกพอลิเมอร์จะต้องกระจายตัวและถูกห่อหุ้มล้อมใน external phase ที่เป็นไฮโดรโฟบิกพอลิเมอร์ ดังนั้นส่วนหางของสารเสถียรอิมัลชันที่เป็นส่วนของไฮโดรโฟบิกจะมีบทบาทสำคัญมากกว่าส่วนที่เป็นส่วนหัวอย่างไฮโดรฟิลิก เพราะหยดถูกล้อมไปด้วยเฟสที่เป็นไฮโดรโฟบิกดังนั้นสารเสถียรอิมัลชันที่จะละลายได้ดีในระบบนี้จึงต้องมีค่า HLB ต่ำ คือ Span80 อีกทั้งเมื่อพิจารณา

โครงสร้างของ Span80 จะสังเกตเห็นว่าส่วนหัวของโครงสร้างมีความกะกะทางโครงสร้างน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับสารเสถียรอิมัลชันที่เหลือดังแสดงในรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 โครงสร้างทางเคมีของสารเสถียรอิมัลชัน a) IGEPAL CO-890 , b) TWEEN80 และ c) Span80

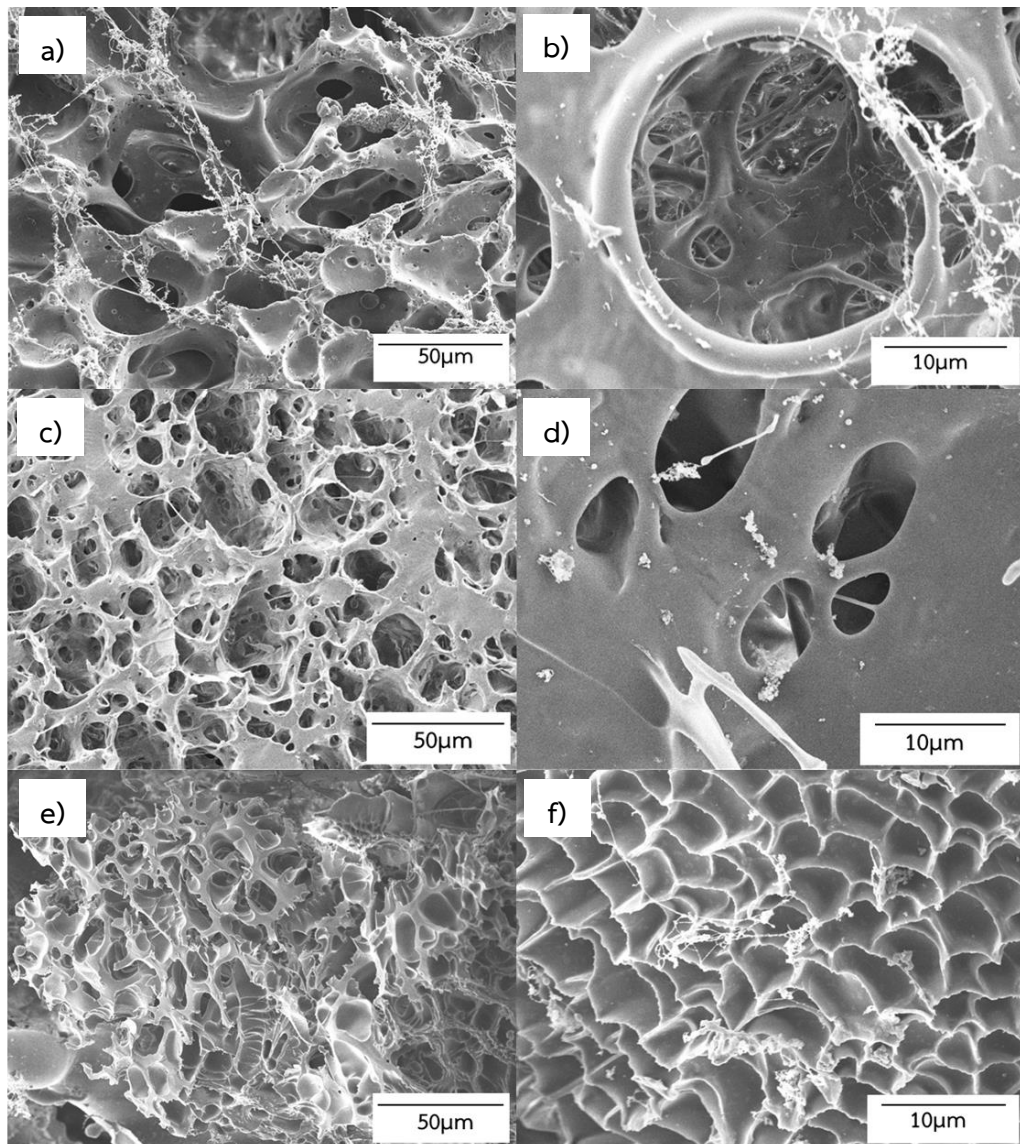
ลักษณะโครงสร้างส่วนหัวที่มีความกะกะน้อยนี้ส่งผลให้ Span80 สามารถวางตัวที่รอยต่อระหว่างเฟสได้ดีกว่าสารเสถียรอิมัลชันชนิดอื่นเนื่องจากสามารถจัดเรียงตัวได้เรียงชิดติดกันง่ายกว่าสารเสถียรอิมัลชันที่มีส่วนหัวกะกะ และโครงสร้างส่วนหัวที่มีความกะกะนี้ก็เป็นที่เหตุให้ความสามารถในการเสถียรอิมัลชันของ TWEEN80 มีค่าใกล้เคียงกับ IGEPAL CO-890 ทั้งที่มีค่า HLB ต่ำกว่า เพราะเมื่อพิจารณาโครงสร้างระหว่าง IGEPAL และ TWEEN80 จะพบว่าส่วนของไฮโดรฟิลิกซึ่งเป็นส่วนหัวของสารเสถียรอิมัลชันทั้งสองมีความกะกะทางโครงสร้างไม่เท่ากัน จาก

โครงสร้างในรูป 4.1 พบว่า TWEEN80 จะมีส่วนหัวที่เป็นโครงสร้างใหญ่ขึ้นเป็นสาเหตุให้เกิดความเกะกะในการจัดเรียงตัวของโมเลกุล [20, 21] บริเวณ interface มากกว่าของ IGEPAL CO-890 เพราะหากมีความ-เกะกะทางโครงสร้างมากจะทำให้ระหว่างการจัดเรียงตัวจะทำให้เกิดช่องว่างระหว่างโมเลกุลของ TWEEN80 เป็นเหตุให้ความสามารถในการลดแรงตึงผิวแยกว่าและทำให้เกิดการรวมตัวกับหยดข้างเคียงจนกลายเป็นหยดขนาดใหญ่และเกิดการแยกชั้นระหว่างสองเฟสได้ แต่อย่างไรก็ตาม IGEPAL ก็ยังมีข้อเสียเปรียบในแง่ของความสามารถในการละลายระหว่างสองเฟสที่แยกว่า TWEEN80 (เพราะมีค่า HLB สูงกว่า) ดังนั้นถึงแม้ว่าจะมีโครงสร้างที่เกะกะน้อยกว่า TWEEN80 ก็ตาม จึงทำให้ระบบอิมัลชันที่ถูกเสถียรด้วยสารเสถียรอิมัลชันสองชนิดนี้มีความเสถียรใกล้เคียงกัน

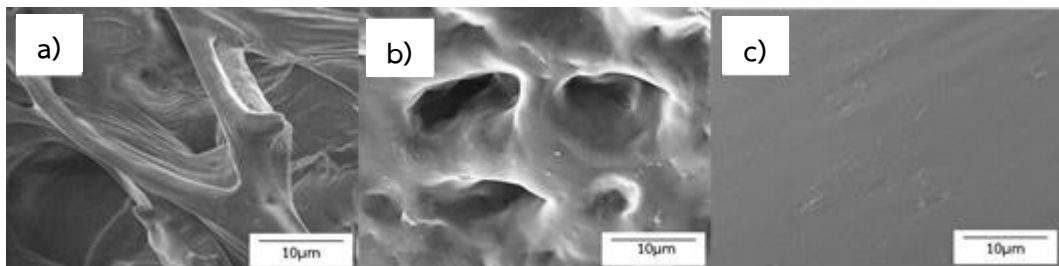
สำหรับระบบอิมัลชันที่มี BR และ NR เป็นไฮโดรโฟบิกพอลิเมอร์ก็สามารถถูกเสถียรได้ดีด้วย Span80 เช่นกัน ในขณะที่ความสามารถในการเสถียรของ IGEPAL และ TWEEN80 ยังคงใกล้เคียงกันซึ่งมีแนวโน้มคล้ายคลึงกับกรณีของ SBR นั่นแสดงให้เห็นได้ว่านอกเหนือจากความสามารถในการละลายระหว่างสองเฟสของสารเสถียรอิมัลชันที่ถูกพิจารณาจากค่า HLB อีกปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการเสถียรอิมัลชันของสารเสถียรอิมัลชันคือความสามารถในการจัดเรียงตัวของโมเลกุลบริเวณรอยต่อระหว่างเฟส (interface) ซึ่งเป็นผลมาจากโครงสร้างโมเลกุลด้วย เนื่องจากความเกะกะของโครงสร้างส่วนหัวนำมาซึ่งการลดความสามารถในการดูดซับของโมเลกุลสารเสถียรอิมัลชันบริเวณรอยต่อส่งผลให้สารเสถียรอิมัลชันมีความสามารถในการลดแรงตึงผิวแยลง การรวมตัวของหยดจึงมากขึ้นแล้วเกิดการแยกชั้นของอิมัลชันในที่สุด ดังนั้นการศึกษาชนิดของสารเสถียรอิมัลชันที่เหมาะสมต่อการเตรียมไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจลที่มี SBR, BR และ NR เป็นไฮโดรโฟบิกถูกเสถียรอย่างเหมาะสมโดย Span80 เนื่องมาจากเกิดการแยกชั้นน้อยที่สุดในระหว่างปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันและเมื่อผ่านปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันเรียบร้อยแล้วไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจลที่ถูกเสถียรด้วย Span80 ก็มี %yield มากที่สุด

4.1.2 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล

การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล ผ่านเทคนิค SEM ได้ผลดังรูปที่ 4.2

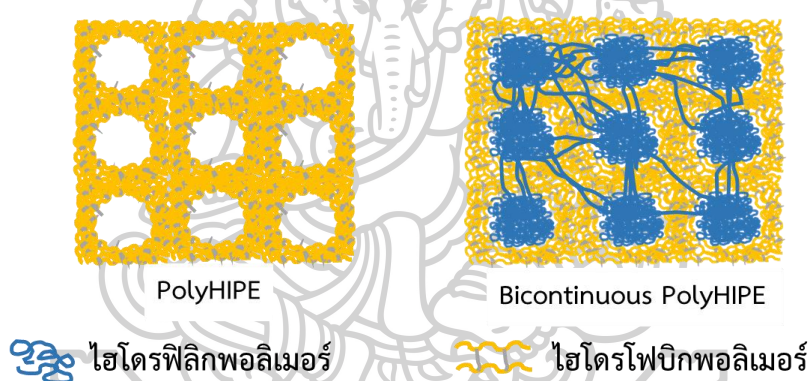


รูปที่ 4.2 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ a) และ b) poly(AA/SBR) hydrogels, c) และ d) poly(AA/BR) hydrogels, e) และ f) poly(AA/NR) hydrogels



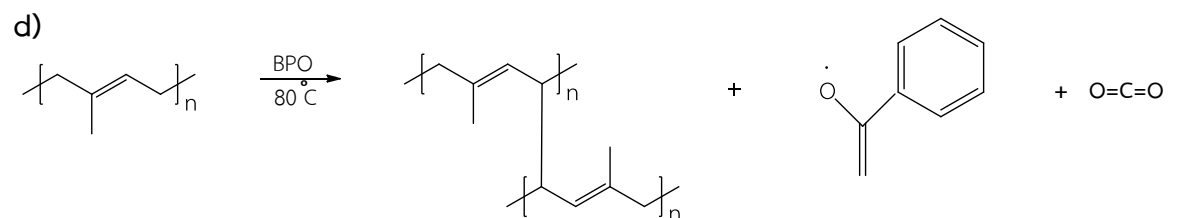
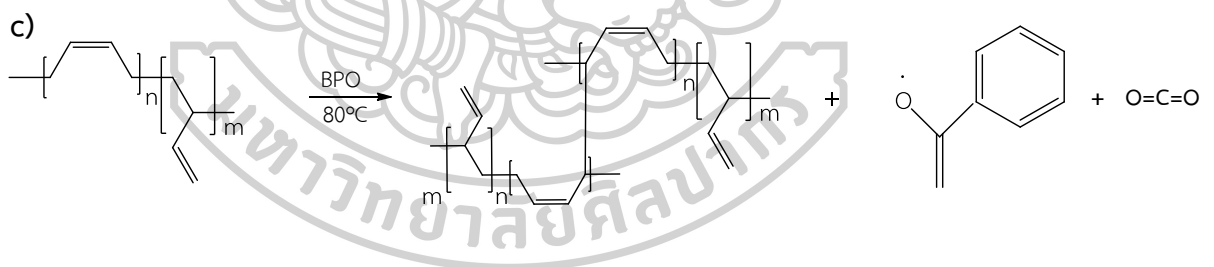
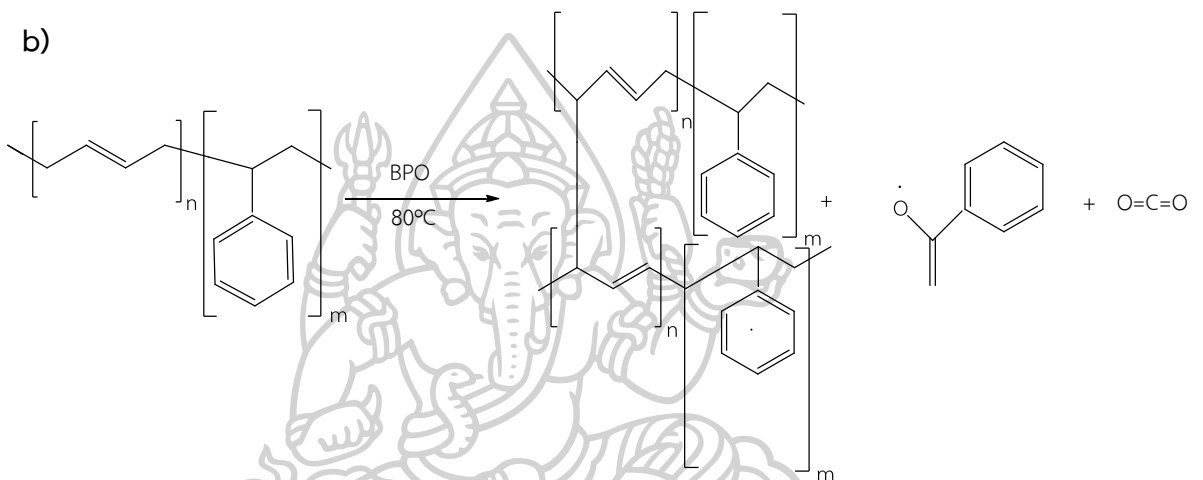
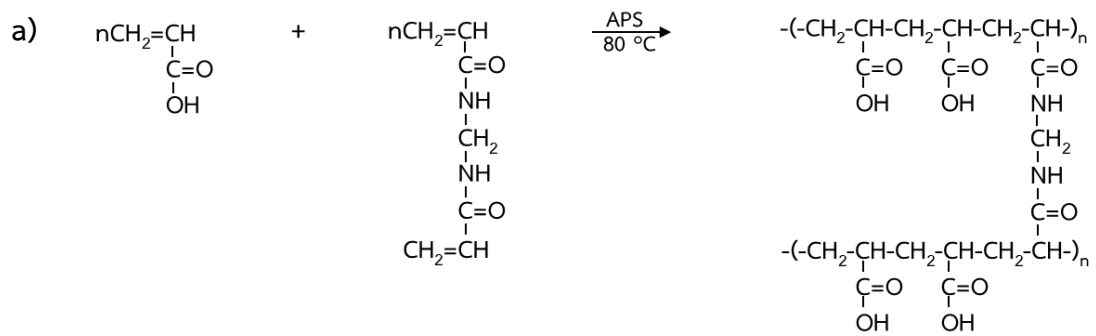
รูปที่ 4.3 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ a) Porous SBR, b) Porous BR และ c) Porous NR

เมื่อพิจารณาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล ที่ถูกเตรียมด้วยไฮโดรโฟบิกพอลิเมอร์ต่างชนิดกันดังรูปที่ 4.2 พบว่าประกอบด้วยโครงสร้าง 2 ลักษณะด้วยกัน คือโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นโครงร่างของรูพรุนและโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นเส้นใยอยู่ร่วมกันเพราะเมื่อเปรียบเทียบโครงสร้างของไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจลดังรูป 4.2 กับโครงสร้างของโครงสร้างของไฮโดรโฟบิกพอลิเมอร์ที่ถูกเตรียมด้วยเทคนิค HIPE ดังรูป 4.3 พบว่าลักษณะที่โครงร่างรูพรุนดังกล่าวนี้เป็นโครงสร้างส่วนของไฮโดรโฟบิกพอลิเมอร์ นั้นแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างที่เป็นเส้นใยคือส่วนของไฮโดรฟิลิกพอลิเมอร์ คือ poly(acrylic acid) กล่าวได้ว่าการเตรียมไฮโดรโฟบิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล โดยใช้ไฮโดรโฟบิกพอลิเมอร์ต่างชนิดกันผ่านเทคนิค bicontinuous polyHIPE ทำให้ได้ไฮโดรเจลที่ลักษณะโครงสร้างสองแบบร่วมกันโดย โดยสามารถจำลองการปรากฏร่วมกันระหว่าง 2 โครงสร้างพอลิเมอร์ในไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล ได้ดังรูปที่ 4.4



รูปที่ 4.4 แบบจำลองเปรียบเทียบความแตกต่างของโครงสร้างไฮโดรเจลระหว่างระบบ a) polyHIPE และ b) bicontinuous polyHIPE

จากการปรากฏลักษณะ 2 โครงสร้างร่วมกันของไฮโดรฟิลิกพอลิเมอร์ (เส้นใย) และไฮโดรโฟบิกพอลิเมอร์ (โครงร่างรูพรุน) เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันใน internal phase นั่นคือกระบวนการพอลิเมอไรเซชันของ acrylic acid (AA) ร่วมกับพอลิเมอร์สังเคราะห์ร่วมอย่าง N,N'-Methylene Bisacrylamide (MBA) โดยมี APS เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาเนื่องจากสามารถละลายในตัวทำละลายที่มีขี้ผึ้งได้ ทั้งคู่เป็นพอลิเมอร์ที่มีขี้ผึ้งทั้งคู่จึงเป็นส่วนของไฮโดรฟิลิกพอลิเมอร์ที่ปรากฏโครงสร้างเป็นเส้นใย ในขณะที่ external phase เกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางของยางแต่ละชนิดด้วย BPO เป็นส่วนของไฮโดรโฟบิกพอลิเมอร์ ดังแสดงปฏิกิริยาการเกิดในแต่ละเฟสในรูปที่ 4.5



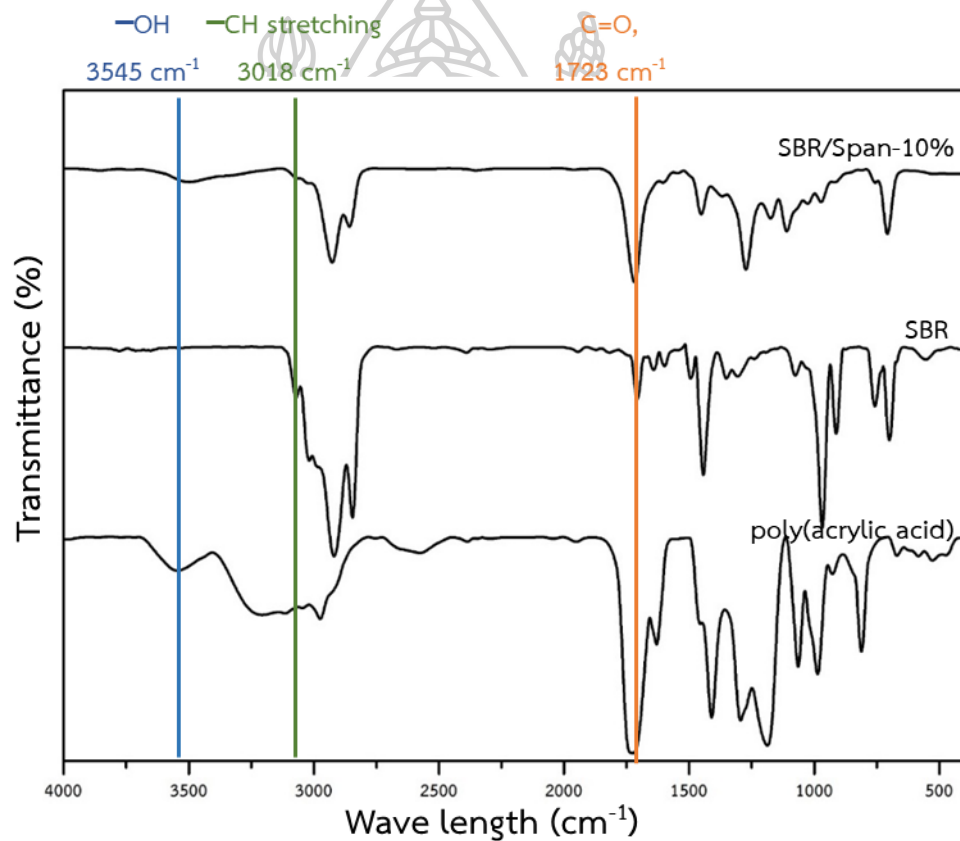
รูปที่ 4.5 กลไกการเกิด a) ปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันใน internal phase และ ปฏิกิริยาเชื่อมขวางใน external phase ของไฮโดรโฟบิกพอลิเมอร์ b) SBR, c) BR และ d) NR

ปฏิกิริยาเคมีของทั้งสองเฟสนี้สามารถเกิดขึ้นพร้อมกันได้เนื่องจากตัวริเริ่มปฏิกิริยาทั้งใน internal phase และ external phase สามารถแตกตัวที่อุณหภูมิการสังเคราะห์เดียวกันคือ 75-80 °C ทำให้ได้ไฮโดรเจลที่มีลักษณะโครงสร้างสองแบบร่วมกันส่งผลให้มีเอกลักษณ์เชิงเคมีร่วมกันด้วย ดังผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างเชิงเคมีด้วยเทคนิค FTIR

4.1.3 การศึกษาโครงสร้างทางเคมีของไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล

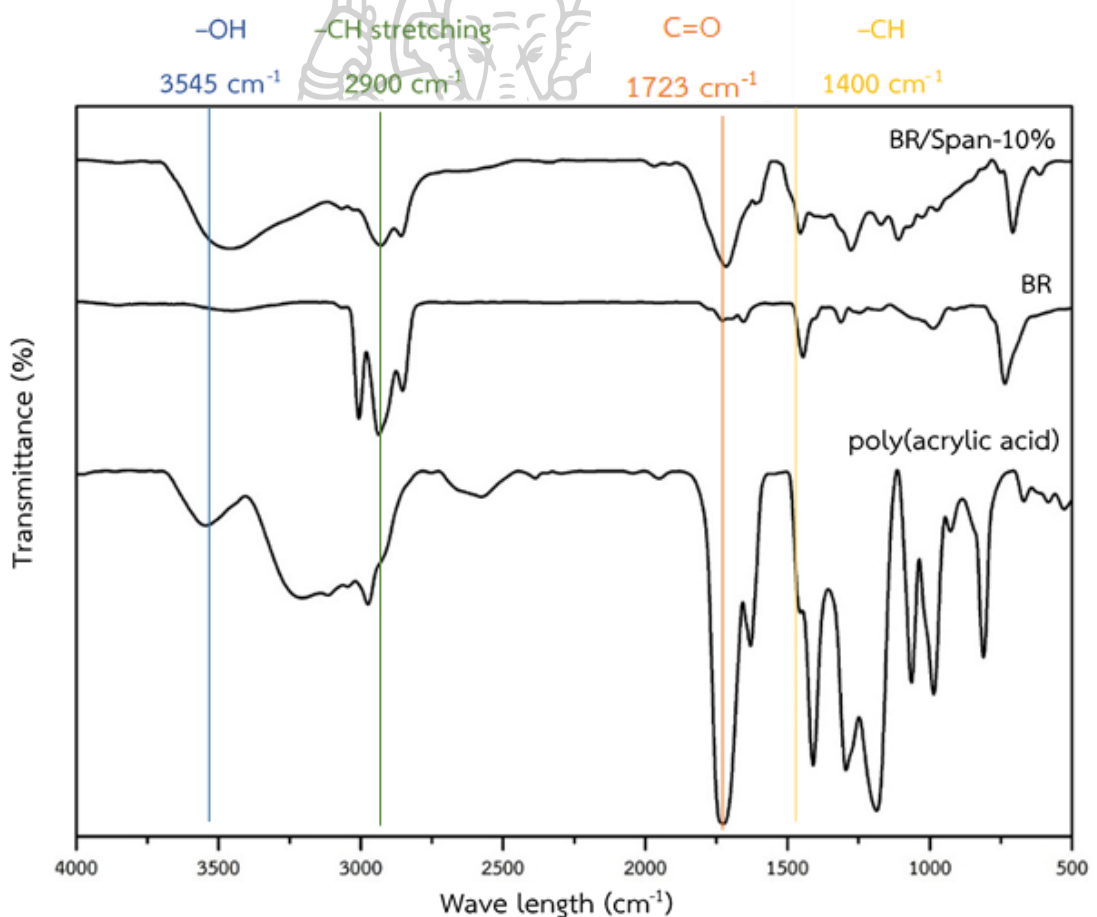
สำหรับการศึกษาปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแต่ละเฟสของไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล

สามารถพิจารณาจากกราฟ FTIR ดังแสดงในรูปที่ 4.6



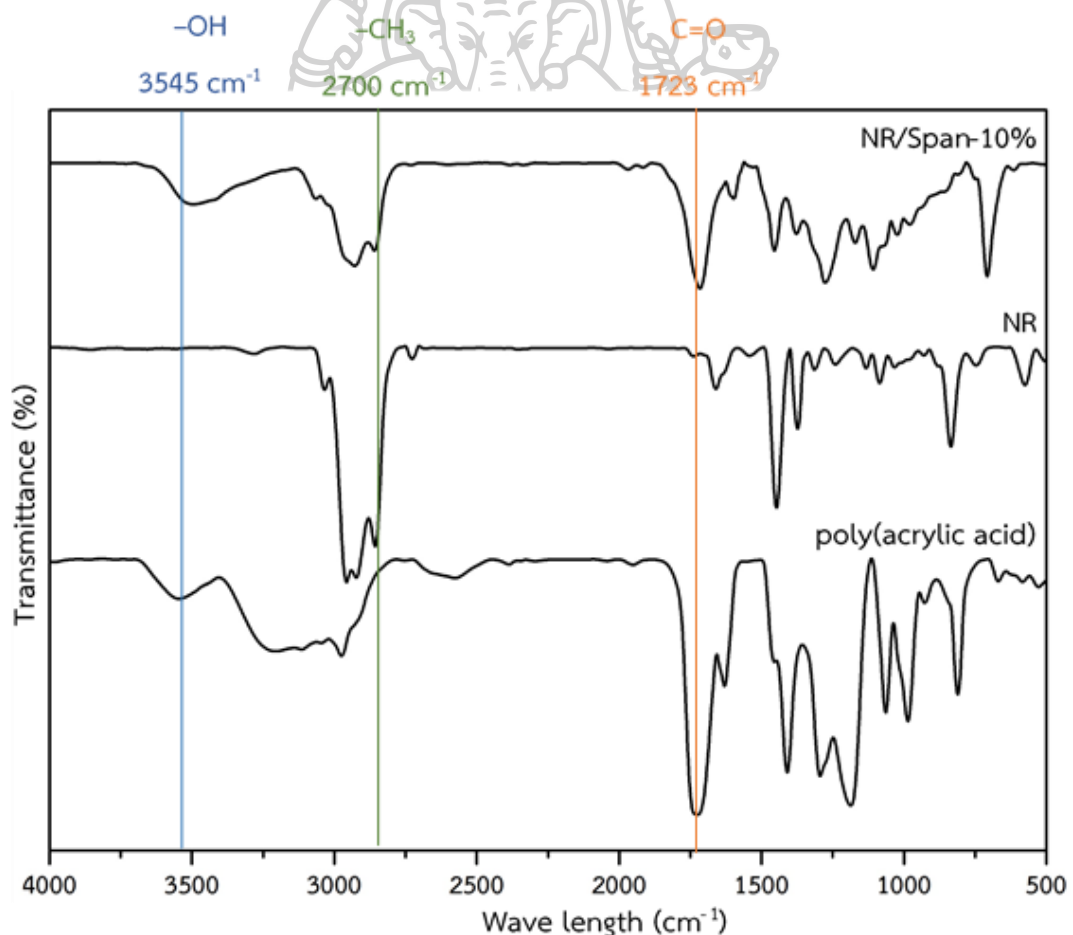
รูปที่ 4.6 เส้นสเปกตรัม FTIR ของ SBR/Span-10%, SBR และ poly(acrylic acid)

พิจารณาผลการตรวจสอบเอกลักษณ์ทางโครงสร้างเชิงเคมีของ SBR/Span-10% ไฮโดรเจล ดังรูปที่ 4.6 พบว่า ปรากฏโครงสร้างทางเคมีร่วมกันระหว่างโครงสร้างของ SBR และ poly(acrylic acid) แสดงให้เห็นได้จากการปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 1723 cm^{-1} 3545 cm^{-1} และ 3018 cm^{-1} สำหรับที่ตำแหน่ง 1723 cm^{-1} และ 3545 cm^{-1} แสดงเอกลักษณ์การสั่นของ C=O และ -OH ตามลำดับซึ่งเป็นองค์ประกอบของหมู่คาร์บอกซิลิกที่เป็นหมู่ฟังก์ชันของ poly(acrylic acid) [22] ในขณะที่พีคที่ตำแหน่ง 3018 cm^{-1} เป็นการแสดงเอกลักษณ์ของการสั่นของ -CH ที่อยู่ในวงอะโรมาติกของสไตรีน [23] จากผลของลักษณะทางสัณฐานวิทยาและผลการวิเคราะห์โครงสร้างเชิงเคมีของ SBR/Span-10% แสดงให้เห็นได้ว่าไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิกไฮโดรเจลดังกล่าวปรากฏโครงสร้างเชิงเคมีที่มีลักษณะร่วมกันระหว่าง SBR และ poly(acrylic acid) สอดคล้องกับผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาดังที่กล่าวมาข้างต้น



รูปที่ 4.7 เส้นสเปกตรัม FTIR ของ BR/Span-10%, BR และ poly(acrylic acid)

สำหรับเอกลักษณ์ทางโครงสร้างเชิงเคมีของ BR/Span-10% ที่แสดงดังรูปที่ 4.7 พบว่า ปรากฏเอกลักษณ์ร่วมกันระหว่างเอกลักษณ์เชิงเคมีของ BR และ poly(acrylic acid) เช่นกัน โดยปรากฏพีคสำคัญที่เป็นเอกลักษณ์ของ poly(acrylic acid) คือตำแหน่ง 1723 cm^{-1} และ 3545 cm^{-1} ตามลำดับเช่นเดียวกันกับของ SBR/Span-10% พีคแสดงเอกลักษณ์ของ BR คือที่ตำแหน่ง 2900 cm^{-1} และที่ 1400 cm^{-1} แสดงการสั่นในระนาบของ $-\text{CH}$ ของ $\text{CH}_2=\text{CH}$ ที่ปรากฏในโครงสร้างของ BR [24] ทั้งนี้พีคดังกล่าวของ BR/Span-10% มีความเข้มของเส้นสเปกตรัมลดลงเมื่อเทียบกับ BR เนื่องจากปริมาณพันธะคู่ของ $\text{CH}_2=\text{CH}$ ในโครงสร้างของ BR เพราะเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางในระหว่างกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน ผลการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า BR/Span-10% ที่เตรียมได้ปรากฏโครงสร้างเชิงเคมีสองลักษณะร่วมกันเช่นเดียวกับผลของลักษณะทางสัณฐานวิทยาตามที่กล่าวมาข้างต้น



รูปที่ 4.8 เส้นสเปกตรัม FTIR ของ NR/Span-10%, NR และ poly(acrylic acid)

พิจารณาเอกลักษณ์โครงสร้างทางเคมีของ NR/Span-10% ดังรูปที่ 4.8 ปรากฏเอกลักษณ์เชิงเคมีร่วมกันระหว่าง NR และ poly(acrylic acid) ที่ตำแหน่งเดียวกันกับกรณี SBR/Span-10% และ BR/Span-10% แต่ที่ต่างคือพีคเอกลักษณ์ของ NR คือพีคตำแหน่ง 2700 cm^{-1} ที่แสดงเอกลักษณ์ของการสั่นของ CH_3 ที่ติดกับ $\text{C}=\text{C}$ ในโครงสร้างของ NR [25] ซึ่งที่ตำแหน่งดังกล่าวนี้มีความเข้มของพีคลดลงเมื่อเทียบกับพีคของ NR เพราะกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า poly(AA/NR) hydrogels ที่เตรียมได้ปรากฏเอกลักษณ์ของโครงสร้างเชิงเคมีร่วมกันของพอลิเมอร์สองชนิดเช่นเดียวกับผลของลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่กล่าวมาก่อนหน้านี้

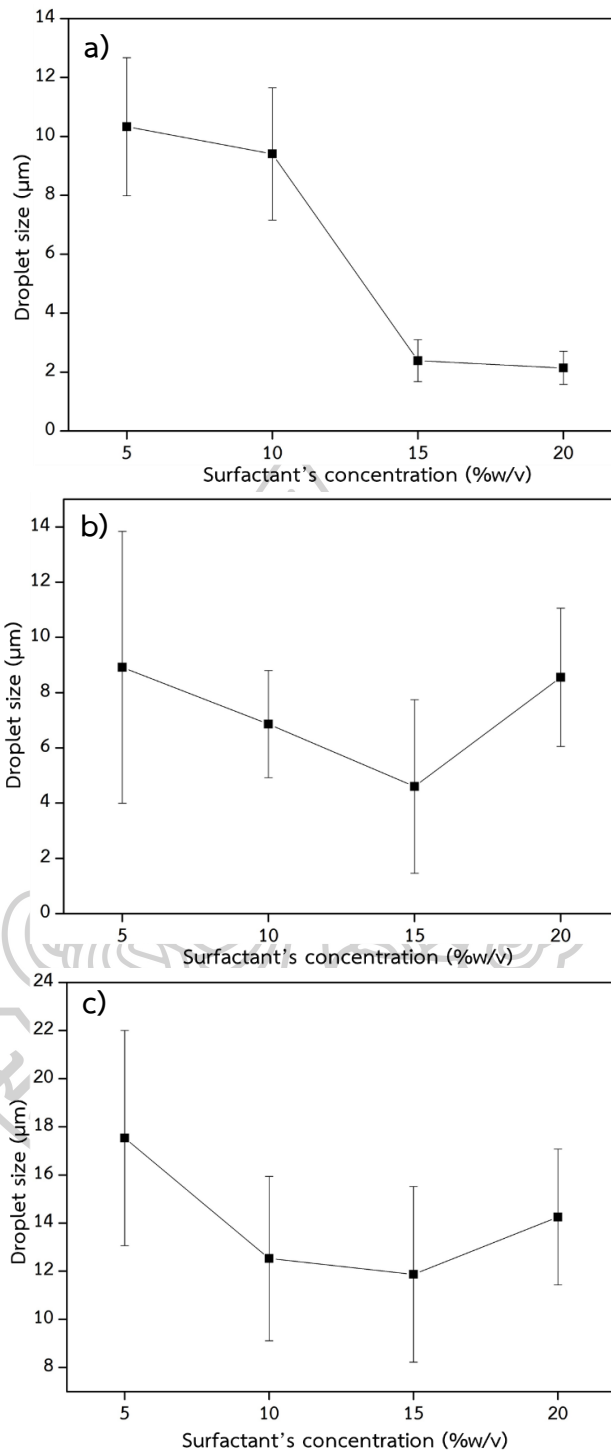
จากผลการศึกษาพบว่าสามารถเตรียมไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล ที่มีลักษณะเป็นสองโครงสร้างที่มีสมบัติและมีลักษณะเชิงเคมีต่างกันให้อยู่ร่วมกันได้ผ่านการเตรียมด้วยเทคนิค bicontinuous polyHIPE โดยใช้สารเสถียรอิมัลชันคือ Span80 ทั้งในกรณีที่ไฮโดรโฟบิกพอลิเมอร์เป็น SBR, BR และ NR จึงสามารถนำไปศึกษาต่อในแง่ของอิทธิพลของความเข้มข้นของสารเสถียรอิมัลชัน

4.2 การศึกษาหาปริมาณสารเสถียรอิมัลชันที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล

จากผลการศึกษาในข้อ 4.1 ทำให้ทราบว่าสารเสถียรอิมัลชันที่เหมาะสมต่อการเตรียมไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล สำหรับระบบที่เตรียมจากไฮโดรโฟบิกพอลิเมอร์ทั้ง 3 ชนิด คือ Span80 ต่อมาจึงทำการศึกษาหาปริมาณ Span80 ที่เหมาะสมโดยปรับเปลี่ยนความเข้มข้นในช่วง 5-20%w/v เทียบกับปริมาตรของอิมัลชันทั้งหมด และทำการพิจารณาผลด้วยการทดสอบขนาดของหยดอิมัลชันของอิมัลชันที่ผ่านการกวนแล้ว 1 ชั่วโมง และพิจารณาผลของลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM ดังนี้

4.2.1 การทดสอบขนาดของหยดอิมัลชันด้วยเทคนิค optical microscopy

สำหรับการทดสอบผลของความเข้มข้นของสารเสถียรอิมัลชันต่อขนาดของหยดอิมัลชันที่ผ่านการกวนแล้ว 1 ชั่วโมง ถูกนำมาทดสอบด้วยเทคนิค optical microscopy จากนั้นทำการวัดขนาดของหยดอิมัลชันได้ผลดังนี้



รูปที่ 4.9 การเปลี่ยนแปลงขนาด droplet ที่ถูกเสถียรด้วย Span80 ในระบบอิมัลชัน
a) poly(AA/SBR) hydrogels, b) poly(AA/BR) hydrogels และ c) poly(AA/NR) hydrogels

เมื่อพิจารณาผลของปริมาณสารเสถียรอิมัลชันต่อขนาดของ droplet สำหรับ poly(AA/SBR) hydrogels ดังรูปที่ 4.9a พบว่าขนาดของ droplet มีค่าอยู่ในช่วง 2-15 ไมโครเมตร โดยขนาดของ droplet มีค่าลดลงเมื่อปริมาณของสารเสถียรอิมัลชันมากขึ้น ที่เป็นเช่นนี้ เนื่องมาจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณสารเสถียรอิมัลชันส่งผลให้ปรากฏโมเลกุลของสารเสถียรอิมัลชันที่ดูดซับระหว่างเฟสมากขึ้นและล้อมรอบ droplet มากขึ้นเป็นผลให้ความหนืดระหว่างเฟส (interface) มากขึ้นและทำให้ความตึงผิวระหว่างเฟสลดลง เหตุการณ์ดังกล่าวเป็นผลให้ขนาดของ droplet จึงลดลงทั้งสองเฟสจึงเข้ากันได้มากขึ้น [18, 26] และสังเกตได้ว่าขนาดของ droplet จะลดลงได้มากในช่วงความเข้มข้น 10-15%w/v และลดลงอย่างต่อเนื่อง จากผลการทดลอง แสดงให้เห็นได้ว่าความเข้มข้นของสารเสถียรอิมัลชันในช่วง 10-15%w/v เป็นช่วงความเข้มข้นเริ่มต้นที่สามารถเสถียรอิมัลชันระบบดังกล่าวได้เนื่องจากเป็นช่วงเปลี่ยนขนาด droplet ได้มาก (จากความเข้มข้นของกราฟ) ทำให้เห็นได้ชัดว่าสำหรับการเตรียมระบบอิมัลชันของ poly(AA/SBR) hydrogels สามารถใช้สารเสถียรอิมัลชันในช่วงดังกล่าวได้

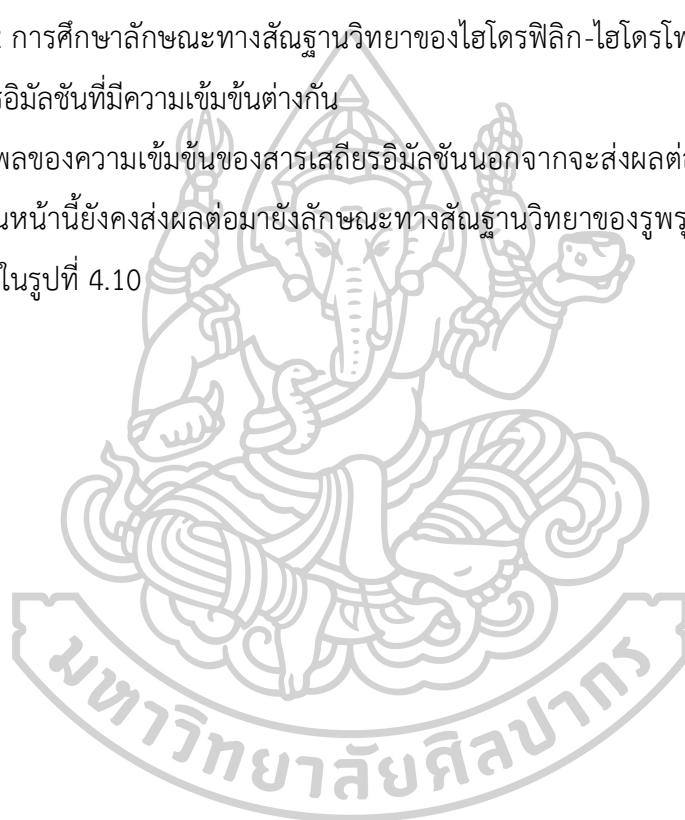
ระบบ poly(AA/BR) hydrogels ได้ผลการศึกษาดังรูปที่ 4.9b พบว่า แนวโน้มของขนาด droplet ลดลงเมื่อความเข้มข้นของสารเสถียรอิมัลชันมากขึ้นเช่นเดียวกับผลของ poly(AA/SBR) hydrogels ซึ่งเป็นผลมาจากโมเลกุลของสารเสถียรอิมัลชันล้อมรอบ droplet มากขึ้น และขนาดของ droplet จะลดลงอย่างชัดเจนในช่วง 10-15%w/v และขนาดของ droplet ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อความเข้มข้นมากกว่าช่วงนี้ เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของสารเสถียรอิมัลชันส่งผลให้ความหนืดของระบบอิมัลชันเพิ่มขึ้นและเป็นเหตุให้ความหนืดบริเวณระหว่างเฟสเพิ่มขึ้นแล้วทำให้ความเสถียรของอิมัลชันลดลง เพราะถึงแม้ว่าการเพิ่มความเข้มข้นของสารเสถียรอิมัลชันจะส่งผลให้ขนาดของ droplet ลดลงแต่การเพิ่มขึ้นของ droplet ก็ส่งผลให้ droplet มารวมตัวกันได้มากขึ้น ด้วยจึงพบว่าขนาดของ droplet ใหญ่ขึ้นแสดงให้เห็นว่าอิมัลชันมีความเสถียรลดลง [27] จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าช่วงความเข้มข้น 10-15%w/v เหมาะสมสำหรับการเตรียม poly(AA/BR) hydrogels ช่วงความเข้มข้นดังกล่าวยังเหมาะสมต่อการเตรียม poly(AA/NR) hydrogels ด้วยเช่นกันดังแสดงในรูปที่ 4.9c

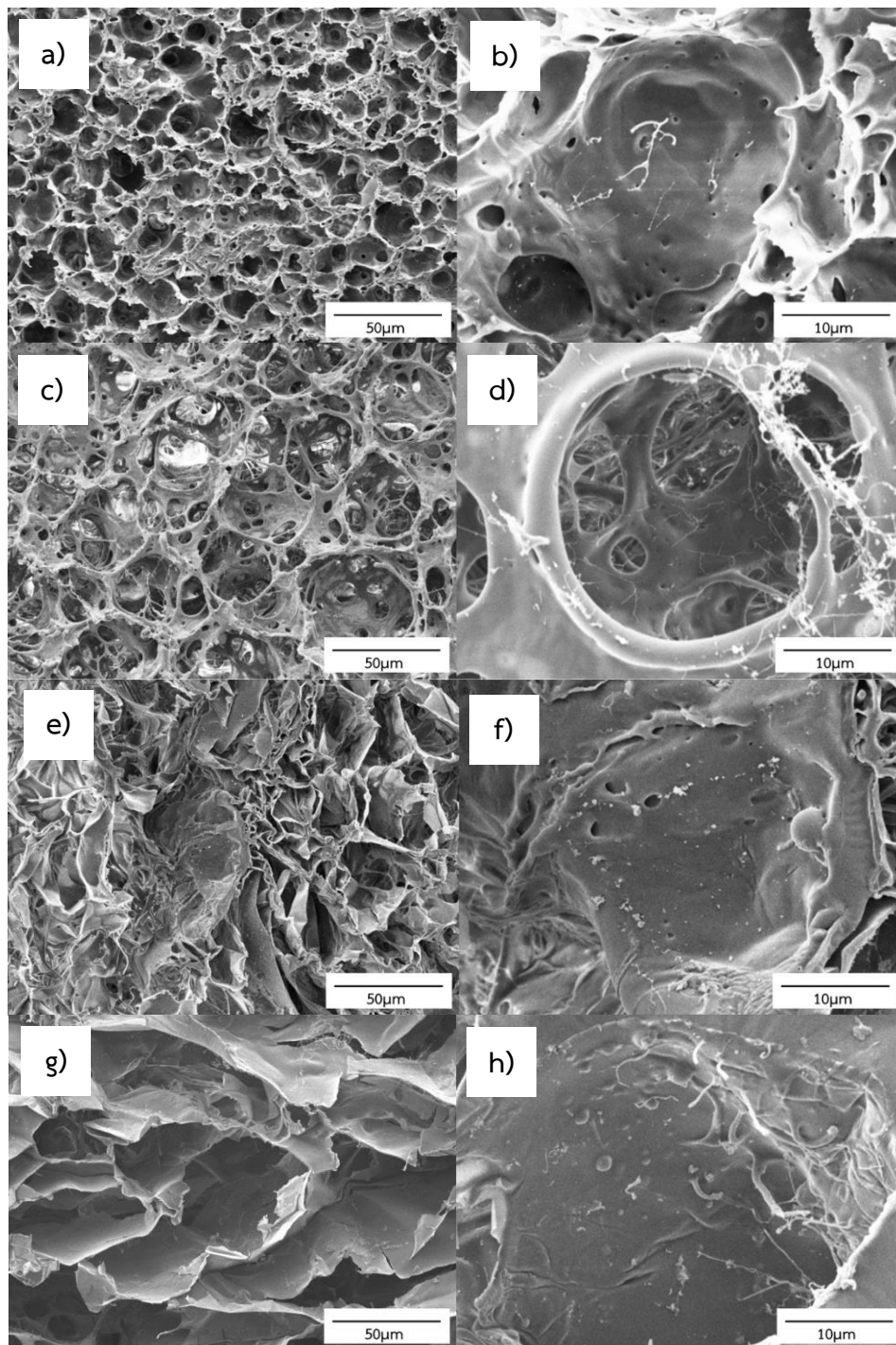
ผลการศึกษาอิทธิพลของความเข้มข้นสารเสถียรอิมัลชันโดยพิจารณาในช่วงก่อนกระบวนการพอลิเมอไรเซชันผ่านการศึกษาขนาดของ droplet แสดงให้เห็นว่าอิทธิพลของความเข้มข้นสารเสถียรอิมัลชันส่งผลต่อความเสถียรของแต่ละระบบอิมัลชันต่างกัน อย่างเช่นระบบอิมัลชันที่มี SBR เป็นไฮโดรโฟบิกพอลิเมอร์มีช่วงความเข้มข้นของสารเสถียรอิมัลชันเริ่มต้นที่สามารถเสถียรอิมัลชันคือ 10-15%w/v และมีขนาด droplet ลดลงเรื่อย ๆ เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น ในขณะที่

อีก 2 ระบบ ที่มี BR และ NR เป็นไฮโดรโฟบิกพอลิเมอร์ไม่ควรใช้สารเสถียรอิมัลชันเกินช่วง 10-15%w/v แนวโน้มที่ต่างจากกรณีของ SBR ทั้งนี้เป็นความหนืดของแต่ละระบบอิมัลชันเปลี่ยนไปเมื่อชนิดของไฮโดรโฟบิกพอลิเมอร์เปลี่ยนไปเป็นผลให้พฤติกรรมกลการเสถียรของสารเสถียรอิมัลชันเปลี่ยนไป [17, 28] อิทธิพลของความเข้มข้นสารเสถียรอิมัลชันที่ส่งผลต่อความเสถียรของอิมัลชันส่งผลให้เห็นชัดเจนเมื่อพิจารณาที่ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล หลังกระบวนการพอลิเมอไรเซชัน

4.2.2 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล ที่เตรียมโดยสารเสถียรอิมัลชันที่มีความเข้มข้นต่างกัน

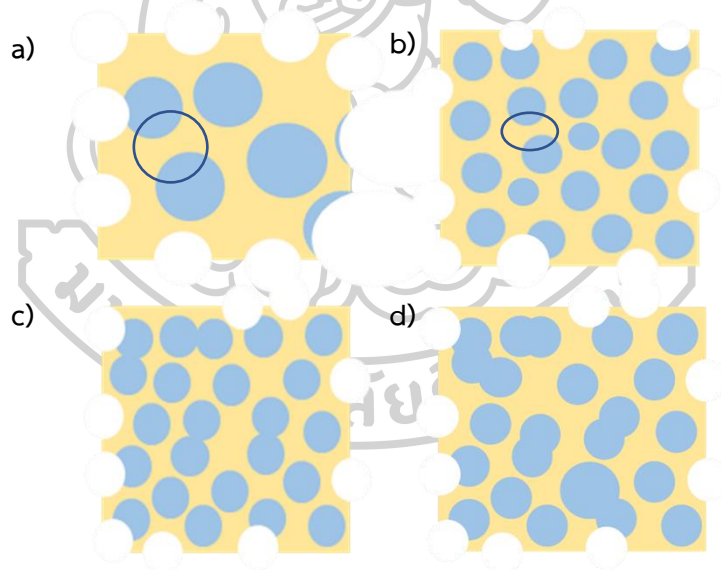
อิทธิพลของความเข้มข้นของสารเสถียรอิมัลชันนอกจากจะส่งผลต่อขนาดของหยดอิมัลชันดังที่กล่าวก่อนหน้านี้อย่างคงส่งผลต่อมายังลักษณะทางสัณฐานวิทยาของรูพรุนที่ได้ศึกษาจากเทคนิค SEM ดังแสดงในรูปที่ 4.10





รูปที่ 4.10 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ a) และ b) SBR/Span-5%, c) และ d) SBR/Span-10%, e) และ f) SBR/Span-15%, g) และ h) SBR/Span-20%

จากผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ poly(AA/SBR) hydrogels ที่ถูกเสถียรด้วย Span80 ที่ความเข้มข้นต่างกัน พบว่าผนังรูพรุนและรูปร่างของรูพรุนจะแตกต่างกันเมื่อปริมาณของสารเสถียรอิมัลชันต่างกัน สังเกตได้ว่าผนังของรูพรุนจะมีบางลงเมื่อความเข้มข้นของสารเสถียรอิมัลชันมากขึ้น อีกทั้งรูปร่างของรูพรุนจะเปลี่ยนจากทรงกลมเป็นไร้รูปร่าง (irregular) มากขึ้น และช่วงความเข้มข้นสูง ๆ (15-20%w/v) พบว่าโครงสร้างของรูพรุนเริ่มพังมากขึ้น (สังเกตได้จากโครงสร้างที่ยับย่นของรูพรุนและเริ่มมีรอยต่อของแต่ละรูพรุน) ซึ่งลักษณะดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความเสถียรทางโครงสร้างที่ลดลง สามารถกล่าวได้ว่าความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารเสถียรอิมัลชันที่ยังคงเสถียรโครงสร้างของรูพรุนได้คือที่ความเข้มข้นมากที่สุด 10%w/v เพราะเมื่อมากกว่า 10%w/v แล้วโครงสร้างของรูพรุนจะเสียไป ที่เป็นเช่นนี้เป็นผลเนื่องมาจากความบางของผนังรูพรุนเมื่อความเข้มข้นของสารเสถียรอิมัลชันมากขึ้น เพราะการเพิ่มขึ้นดังกล่าวจะส่งผลให้โมเลกุลของสารเสถียรอิมัลชันล้อมรอบ droplet มากขึ้นส่งผลให้แรงดึงผิวระหว่างสองเฟสลดลงขนาดของ droplet จึงลดลง และเมื่อขนาดของ droplet ลดลงจะทำให้จำนวน droplet มากขึ้น ดังนั้นเมื่อผ่านกระบวนการสังเคราะห์จนเกิดเป็นรูพรุนแล้วจึงทำให้จำนวนของรูพรุนมากขึ้นส่งผลให้ผนังของรูพรุนบางลง [26] ดังแสดงในแบบจำลองในรูปที่ 4.11

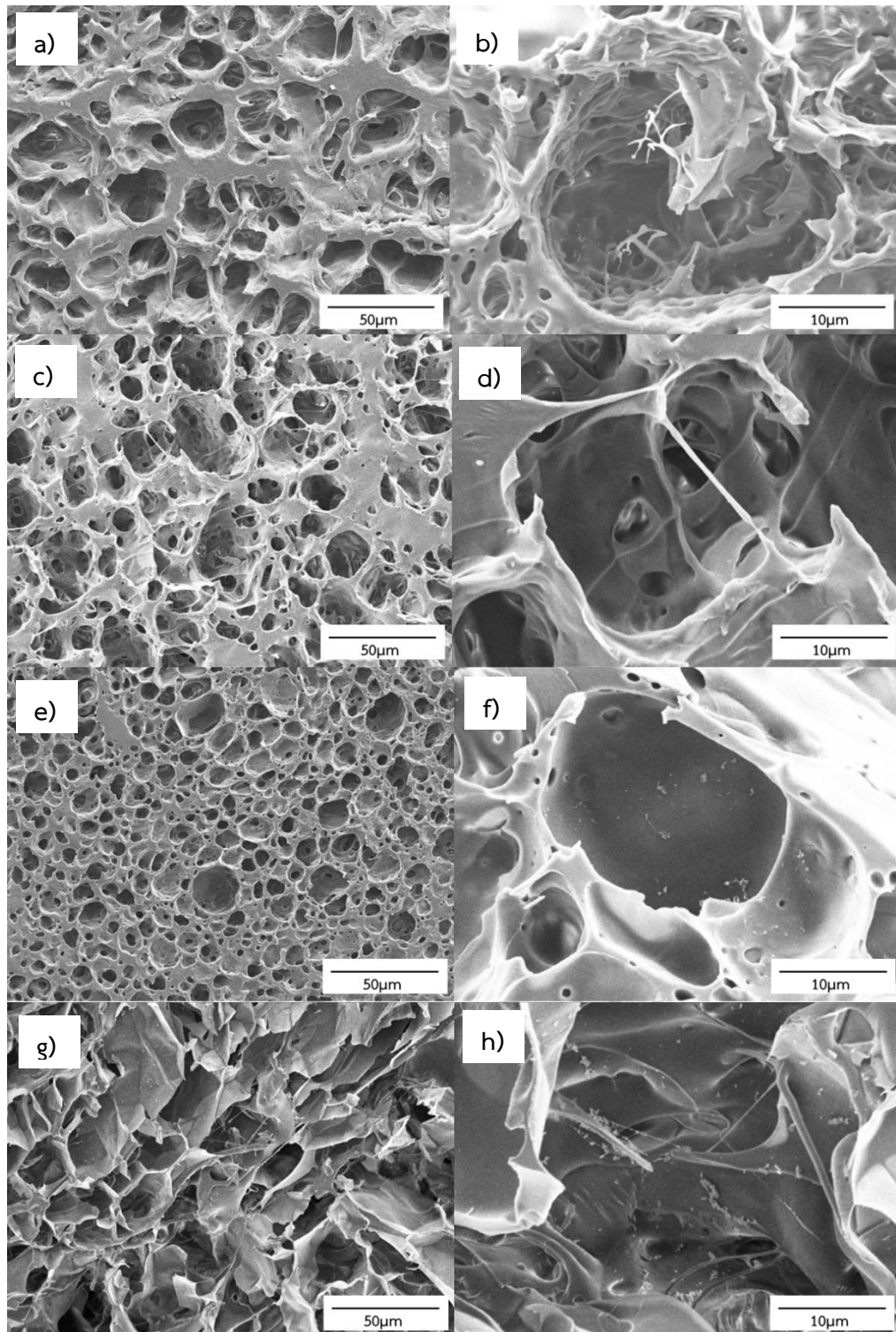


รูปที่ 4.11 แบบจำลองการเปลี่ยนแปลงของ droplet เมื่อความเข้มข้นของสารเสถียรอิมัลชัน
a) SBR/Span-5%, b) SBR/Span-10%, c) SBR/Span-15% และ d) SBR/Span-20%

เมื่อความเข้มข้นของสารเสถียรอิมัลชันมากขึ้นจะส่งผลให้การจัดเรียงตัวของโมเลกุลของสารเสถียรอิมัลชันเปลี่ยนแปลงไป การเพิ่มความเข้มข้นของสารเสถียรอิมัลชันที่มากเกินไปจุด critical micelle concentration (cmc) ส่งผลให้การจัดเรียงรูปแบบการจัดเรียงตัวของโมเลกุล

สารเสถียรอิมัลชันเปลี่ยนเป็น cylindrical bilayer นั้นทำให้รูปทรงของไมเซลล์เปลี่ยนจากทรงกลมเป็นรูปทรงหลายเหลี่ยมมากขึ้น [29] อีกทั้งระบบอิมัลชันในงานวิจัยนี้เป็นระบบ w/o อิมัลชันเมื่อเกิดเป็นไมเซลล์แล้วจะได้ไมเซลล์เป็นแบบ invert micelle [29] การจัดเรียงโมเลกุลของสาร-เสถียรอิมัลชันของไมเซลล์ลักษณะนี้ส่วนไฮโดรฟิลิกของสารเสถียรอิมัลชันจะหันเข้าด้านในเพื่อล้อมรอบหยดของ internal phase และส่วนไฮโดรโฟบิกหันออกทางด้านนอก ทั้งนี้การจัดเรียงตัวของโมเลกุลรอบหยด internal phase ดังกล่าวนั้นส่งผลต่อรูปร่างรูพรุนเพราะที่ความเข้มข้นต่ำ ๆ โมเลกุลของสารเสถียรอิมัลชันยังคงจัดเรียงตัวโดยรอบหยด internal phase แบบเรียงชิดติดกันจึงทำให้รูปทรงของไมเซลล์ปรากฏเป็นทรงกลม แต่เมื่อความเข้มข้นของสารเสถียรอิมัลชันสูงขึ้น (15-20%w/v) มีโมเลกุลของสารเสถียรอิมัลชันมากขึ้นจนอาจทำให้การจัดเรียงตัวไม่เพียงแต่เรียงชิดติดกันแต่มีการซ้อนทับกันมากขึ้นทำให้เกิดแรงผลักระหว่างกันจึงทำให้รูปแบบการจัดเรียงตัวเปลี่ยนไปเป็นแบบ cylindrical bilayer จนเมื่อผ่านกระบวนการสังเคราะห์เรียบร้อยแล้วก็ส่งผลให้รูปทรงของรูพรุนเปลี่ยนตามรูปทรงไมเซลล์ไปด้วย [30] รวมทั้งจำนวน droplet มากขึ้นทำให้ความเป็นรูพรุนมากขึ้นด้วยและเมื่อจำนวนรูพรุนมากขึ้นแต่ปริมาตรของไฮโดรเจลยังคงเท่าเดิมก็ส่งผลให้ผนังของรูพรุนบางลงดังรูปที่ 4.11 ผนังของรูพรุนที่บางลงนี้ก็เป็นที่เหตุให้ความแข็งแรงของรูพรุนลดลง ดังนั้นไฮโดรเจลที่ถูกพรีดตายแล้วเมื่อโมเลกุลน้ำออกไปบางส่วนจึงมีโครงสร้างที่ล้มลงดังสังเกตได้จากรูป 4.10e และ 4.10g

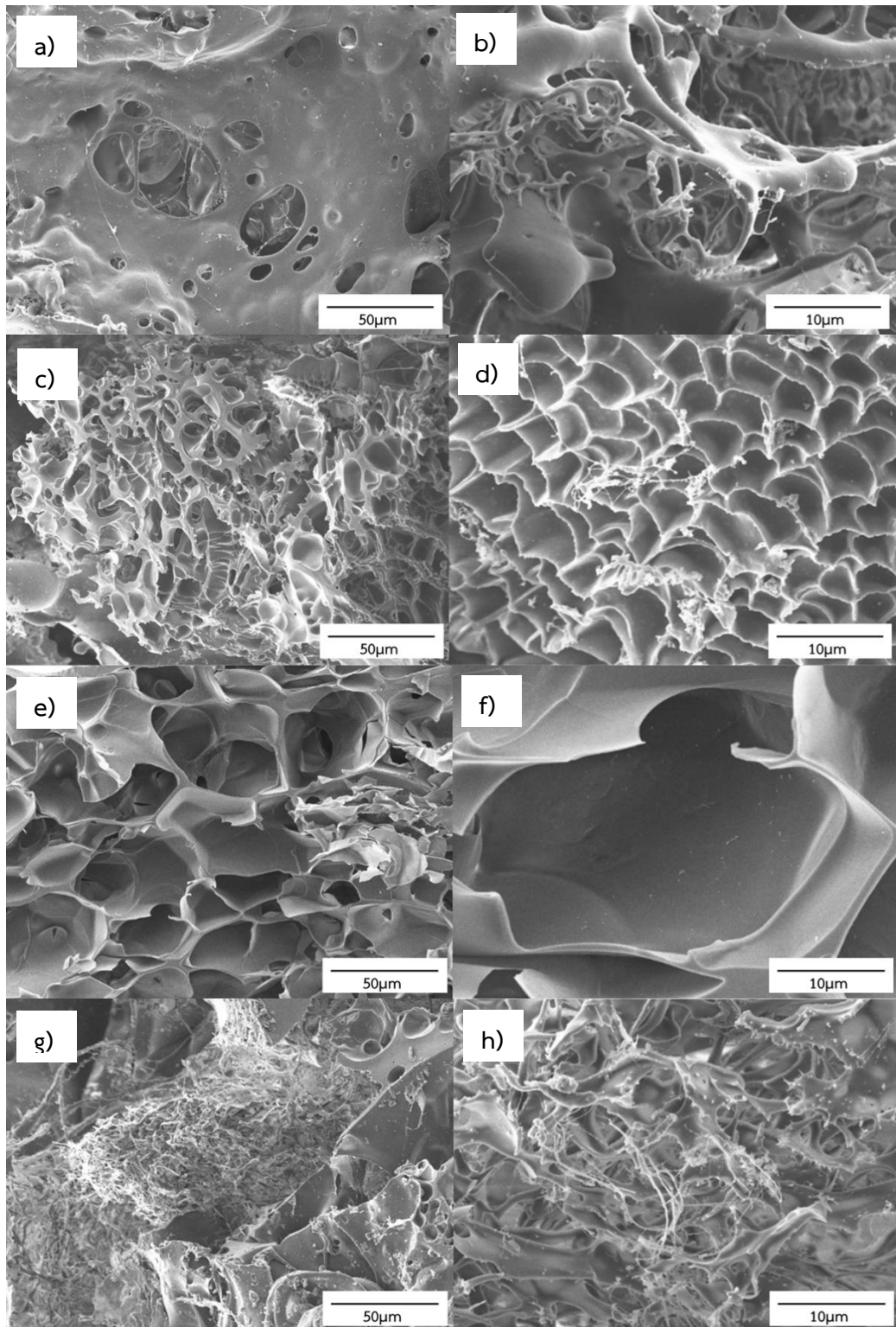
เมื่อพิจารณาโครงสร้างของ Poly(AA/BR) hydrogels พบว่าในช่วงความเข้มข้น 10-15 %w/v 4.12c) ยังสามารถรักษารูปทรงของรูพรุนแบบทรงกลมได้ แต่เมื่อความเข้มข้นของสาร-เสถียรอิมัลชันมากกว่า 15%w/v ส่งผลให้รูพรุนมีรูปทรงเปลี่ยนเป็นแบบไร้รูปทรง (irregular) ดังแสดงในรูปที่ 4.12



รูปที่ 4.12 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ a) และ b) BR/Span-5%, c) และ d) BR/Span-10%
e) และ f) BR/Span-15%, g) และ h) BR/Span-20%

ปรากฏการณ์ดังกล่าวต่างจาก Poly(AA/SBR) hydrogels ตรงที่ Poly(AA/BR) hydrogels สามารถเสถียรได้มากที่สุดที่ 15%w/v ในขณะที่สำหรับ Poly(AA/SBR) hydrogels กลับมีความเสถียรทางโครงสร้างต่ำลงที่ความเข้มข้นเดียวกัน ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะทั้งสองระบบมี hydrophobic polymer ต่างชนิดกันทำให้มีสมบัติด้านความหนืดต่างกันและความหนืดที่ต่างกันนี้ส่งผลต่อการจัดเรียงตัวของโมเลกุลสารเสถียรอิมัลชันที่ต่างกัน แต่ส่วนที่คล้ายกันคือทั้งสองระบบมีช่วงของคือ 10-15%w/v เหมือนกัน ดังนั้นเมื่อความเข้มข้นมากกว่า 15%w/v จึงเป็นเหตุให้มีจำนวนโมเลกุลล้อมรอบมากเกินไปพร้อมกับ droplet ที่มากขึ้นก็นำมาซึ่งการรวมตัวกันระหว่างหยดข้างเคียงมากขึ้นขนาดของ droplet จึงใหญ่ขึ้น (ดังรูปที่ 4.11) และมีรูปแบบการจัดเรียงตัวของโมเลกุลสารเสถียรอิมัลชันเปลี่ยนไปเป็นเหตุให้มีรูปร่างของไมเซลล์เปลี่ยนไปและส่งผลต่อมายังรูปร่างของรูพรุนโดยที่เริ่มเปลี่ยนแปลงที่ความเข้มข้นมากกว่า 15%w/v และยังเป็นจุดเริ่มต้นของความเสถียรของรูพรุนที่ลดลง

เมื่อพิจารณาโครงสร้างของ Poly(AA/NR) hydrogels พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารเสถียรอิมัลชันเพิ่มขึ้นส่งผลให้ขนาดของรูพรุนและรูปร่างของรูพรุนเปลี่ยนแปลงเช่นกัน สังเกตได้จากเมื่อความเข้มข้นเพิ่มจาก 5 %w/v ไปยัง 15%w/v ขนาดของรูพรุนมีขนาดเล็กลงอย่างเห็นได้ชัดดังแสดงในรูปที่ 4.13 แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นมากกว่า 15%w/v กลับส่งผลให้ขนาดของรูพรุนขยายใหญ่ขึ้นประกอบกับรูปร่างของรูพรุนที่เปลี่ยนจากทรงกลมเป็นรูปร่างมากขึ้นแต่ยังคงมีลักษณะเป็นรูพรุนแบบเชื่อมต่อกัน (connecting pore) ดังแสดงในรูป 4.13e และ 4.13f โครงสร้างดังกล่าวจะเริ่มเปลี่ยนแปลงเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นดังรูป 4.13g และ 4.13h จากผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าช่วงความเข้มข้นที่เหมาะสมสำหรับเตรียม Poly(AA/NR) hydrogels คือ 5-15%w/v ที่ยังคงความเสถียรของโครงสร้างไว้ได้ ที่เป็นเช่นนี้เป็นผลมาจากการเพิ่มความเข้มข้นของสารเสถียรอิมัลชันที่ส่งผลให้ผนังของรูพรุนบางลงดังที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ ส่งผลให้โครงสร้างของรูพรุนมีความเสถียรลดลงดังนั้นเมื่อนำ Poly(AA/NR) hydrogels ที่ผ่านกระบวนการพรีเดายน์ที่ทำให้โครงสร้างของ poly(acrylic acid) หดตัวลงเมื่อถูกทำให้แห้งแล้วจึงส่งผลให้โครงสร้างของรูพรุนมีความเสถียรลดลงด้วยเช่นกัน

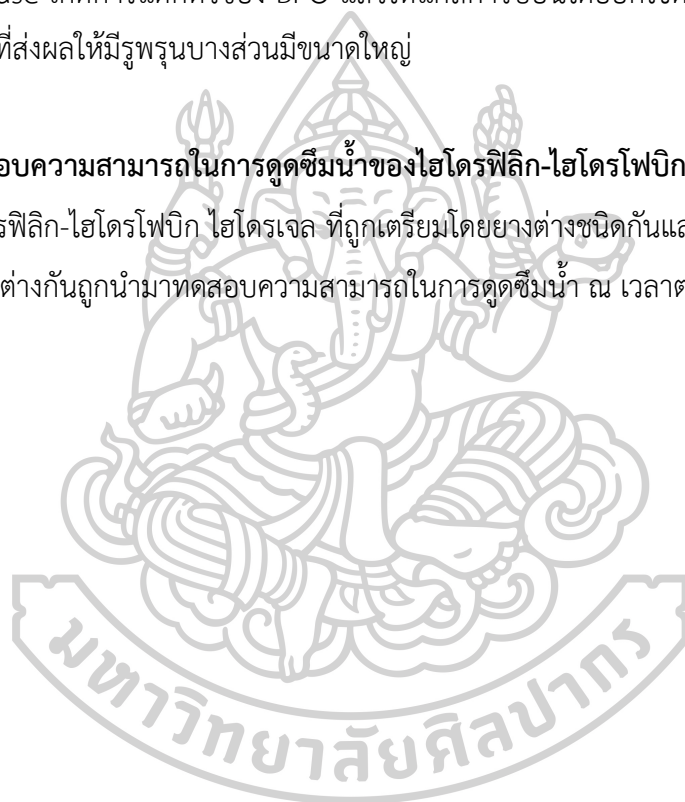


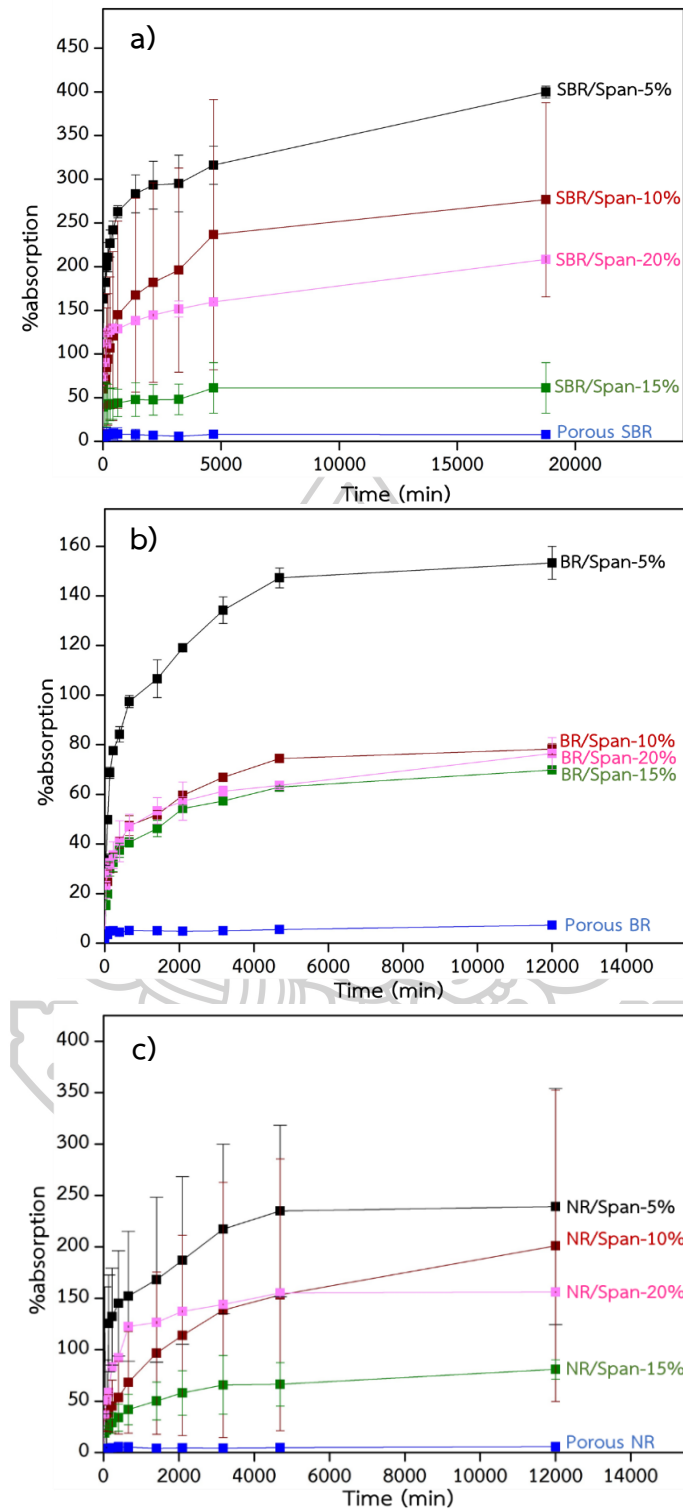
รูปที่ 4.13 ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ a) และ b) NR/Span-5%, c) และ d) NR/Span-10%, e) และ f) NR/Span-15%, g) และ h) NR/Span-20%

จากการศึกษาอิทธิพลของปริมาณสารเสถียรอิมัลชันที่ใช้ในการสังเคราะห์เป็นไฮโดรฟลิค-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล พบว่าปริมาณของสารเสถียรอิมัลชันส่งผลต่อขนาดของหยดอิมัลชันที่พิจารณาก่อนการสังเคราะห์และยังคงส่งผลต่อขนาด รูปร่างและความเสถียรของรูพรุนที่ได้หลังจากการสังเคราะห์ดังที่กล่าวมาข้างต้น ทั้งนี้ยังพบว่ามี การกระจายตัวของขนาดรูพรุนค่อนข้างมากที่เป็นเช่นนี้ส่วนหนึ่งเป็นผลมาจากอิทธิพลของอุณหภูมิเพราะการพิจารณาขนาดของหยดอิมัลชันเป็นการศึกษาที่อุณหภูมิห้องในขณะที่การศึกษารูพรุนเป็นการศึกษาหลังจากปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันที่อุณหภูมิ 80°C เมื่อถึงอุณหภูมิพอลิเมอไรเซชันย่อมเกิดการแตกตัวของตัวริเริ่มปฏิกิริยาซึ่งใน external phase เกิดการแตกตัวของ BPO แล้วให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา [31] ซึ่งนับเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลให้มีรูพรุนบางส่วนมีขนาดใหญ่

4.3 การทดสอบความสามารถในการดูดซึมน้ำของไฮโดรฟลิค-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล

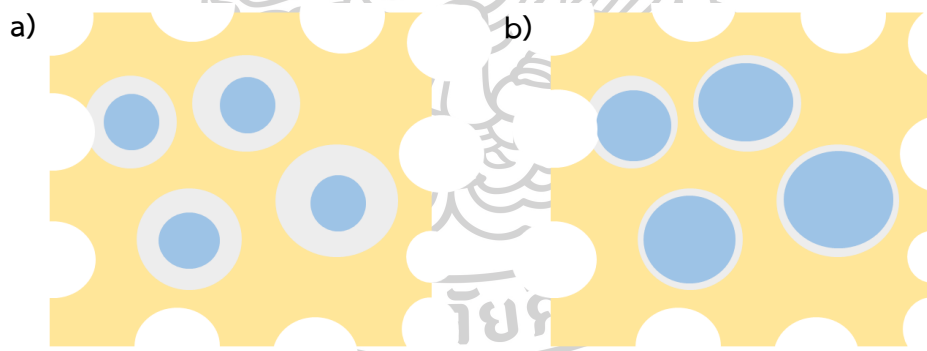
ไฮโดรฟลิค-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล ที่ถูกเตรียมโดยต่างชนิดกันและความเข้มข้นของสารเสถียรอิมัลชันต่างกันถูกนำมาทดสอบความสามารถในการดูดซึมน้ำ ณ เวลาต่าง ๆ





รูปที่ 4.14 การดูดซึมน้ำเทียบกับเวลาของ a) poly(AA/SBR) hydrogels, b) poly(AA/BR) hydrogels และ c) poly(AA/NR) hydrogels

เมื่อพิจารณาผลการดูดซึมน้ำของ poly(AA/SBR) hydrogels ดังรูปที่ 4.14a พบว่ามีความสามารถในการดูดซึมน้ำมากกว่า Porous SBR ทั้งนี้เป็นผลมาจากความเป็นไฮโดรฟิลิกที่มีในโครงสร้างของ poly(AA/SBR) hydrogels จึงมีความสามารถในการดูดซึมน้ำได้ ในขณะที่ Porous SBR มีสมบัติเป็นไฮโดรโฟบิกพอลิเมอร์ซึ่งไม่มีขั้วจึงไม่สามารถดูดซึมน้ำได้ ผลการศึกษานี้สามารถสังเกตได้จากเส้นกราฟแสดงการดูดซึมน้ำที่ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา จากผลการเปรียบเทียบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล ที่เตรียมได้สามารถเพิ่มความสามารถในการดูดซึมน้ำได้เมื่อเทียบกับระบบที่เป็นไฮโดรโฟบิกพอลิเมอร์เพียงชนิดเดียว สำหรับพฤติกรรมในการดูดซึมน้ำของ poly(AA/SBR) hydrogels เมื่อเทียบตามช่วงเวลาพบว่ามีอัตราการดูดซึมน้ำเร็วในช่วงแรก (น้อยกว่า 5000 นาที) เป็นผลมาจากการกระทำแบบคาบิลลารีที่เกี่ยวข้องกับความสามารถในการเปียกผิวของไฮโดรเจล และหลังจาก 5000 นาที พบว่าอัตราการดูดซึมน้ำของ poly(AA/SBR) hydrogels เริ่มลดลงเป็นผลมาจากข้อจำกัดในแง่ของโครงสร้างรูพรุนที่เมื่อไฮโดรฟิลิกพอลิเมอร์เริ่มดูดซึมน้ำแล้วจะบวมตัวอยู่ภายในรูพรุนของไฮโดรโฟบิกพอลิเมอร์ที่มีรูปทรงคงตัว ซึ่งนั่นเป็นสิ่งที่ควบคุมการดูดซึมน้ำของไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล ที่เมื่อไฮโดรฟิลิกพอลิเมอร์ดูดซึมน้ำจนบวมตัวได้ขนาดหนึ่งจนเต็มรูพรุนอัตราการดูดซึมน้ำจึงลดลงดังแสดงแบบจำลองรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 แบบจำลองพฤติกรรมในการดูดซึมน้ำของไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล a) ช่วงแรกของการดูดซึมน้ำ และ b) การดูดซึมน้ำเมื่อถึงจุดอิ่มตัว

อิทธิพลของความเข้มข้นของสารเสถียรอิมัลชันแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนในช่วงแรกของการดูดซึมน้ำโดยพบว่า SBR/Span-5% มีความสามารถในการดูดซึมน้ำมากที่สุด รองลงมาคือ SBR/Span-20%, SBR/Span-10% และ SBR/Span-15% เป็นผลเนื่องมาจากลักษณะโครงสร้างของรูพรุนที่ต่างกันซึ่งโครงสร้างรูพรุนเป็นปัจจัยส่วนหนึ่งที่ควบคุมความสามารถในการดูดซึมน้ำของไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล ดังนั้น poly(AA/SBR) hydrogels ที่มีโครงสร้างรูพรุนต่างกันอันเนื่องมาจากถูกเตรียมด้วยความเข้มข้นของสารเสถียรอิมัลชันต่างกันจึงมี

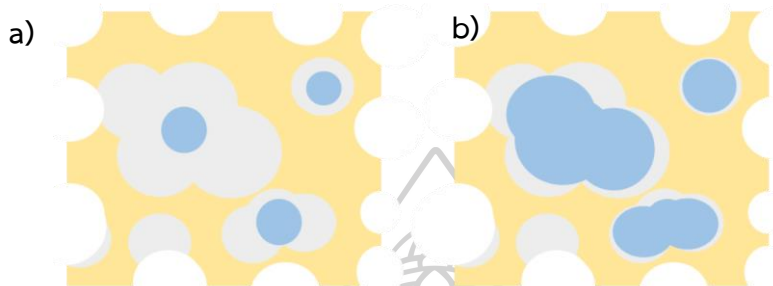
ความสามารถในการดูดซึมน้ำต่างกัน โดยรูพรุนที่มีขนาดใหญ่จะมีความสามารถดูดซึมน้ำได้รวดเร็วกว่ารูพรุนที่มีขนาดเล็กเพราะมีพื้นที่ว่างสำหรับรองรับการบวมตัวของไฮโดรฟิลิกพอลิเมอร์ขณะดูดซึมน้ำได้มากกว่ากรณีรูพรุนขนาดเล็ก อีกทั้งการกระจายตัวของรูพรุนที่มีความสม่ำเสมอ ความเสถียรของโครงสร้างและการเชื่อมกันของรูพรุน (connecting pore) จะส่งผลให้การดูดซึมน้ำเกิดได้ดีขึ้น [30] เนื่องจากรูพรุนที่มีการกระจายตัวของขนาดอย่างสม่ำเสมอจะส่งผลต่อการดูดซึมน้ำของไฮโดรฟิลิกพอลิเมอร์ที่จัดเรียงตัวอยู่ในรูพรุนแต่ละรูให้มีความสามารถในการดูดซึมน้ำใกล้เคียงกัน สำหรับ SBR/Span-5% ปรากฏโครงสร้างรูพรุนแบบ connecting pore ที่มีขนาดใหญ่และมีการกระจายตัวของขนาดรูพรุนที่สม่ำเสมอกว่าที่ความเข้มข้นอื่น ๆ อีกทั้งรูปร่างของรูพรุนที่เป็นทรงกลมที่มีความเสถียรทางโครงสร้างจึงเป็นเหตุให้มีความสามารถในการดูดซึมน้ำสูงที่สุด รองลงมาคือ SBR/Span-20% ที่มีลักษณะเด่นคือรูพรุนมีขนาดใหญ่และกระจายตัวของรูพรุนอย่างสม่ำเสมอ แต่มีความเสถียรทางโครงสร้างต่ำกว่าจึงมีความสามารถในการดูดซึมน้ำต่ำกว่า ในขณะที่ SBR/Span-10% ก็ปรากฏโครงสร้างรูพรุนแบบ connecting pore และมีความเสถียรทางโครงสร้างเช่นกันเพียงแต่มีการกระจายตัวของขนาดรูพรุนไม่สม่ำเสมอเมื่อเทียบกับอีกสองความเข้มข้นก่อนหน้า จึงมีความสามารถในการดูดซึมน้ำต่ำกว่า และสุดท้ายคือ SBR/Span-15% ที่มีความเสถียรทางโครงสร้างต่ำจนเกิดปรากฏการณ์ปากของรูพรุนปิดทับกันส่งผลให้มีพื้นที่ในการรองรับการบวมตัวของไฮโดรฟิลิกพอลิเมอร์ได้น้อยจึงมีความสามารถในการดูดซึมน้ำต่ำที่สุด

เมื่อพิจารณาความสามารถในการดูดซึมน้ำของ poly(AA/BR) hydrogels ที่ความเข้มข้นของสารเสถียรอิมัลชันต่างกันดังรูปที่ 4.14b พบว่าเมื่อความเข้มข้นของสารเสถียรอิมัลชันเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซึมน้ำของ poly(AA/BR) hydrogels กลับลดลง โดยที่ความเข้มข้นของสารเสถียรอิมัลชันต่ำ ๆ อย่าง BR/Span-5% ปรากฏว่ามีความสามารถในการดูดซึมน้ำมากที่สุด รองลงมาคือ BR/Span-15%, BR/Span-10% และ BR/Span-20% ความสามารถในการดูดซึมน้ำต่ำที่สุดแต่ยังมากกว่า Porous BR เนื่องจากมีสมบัติความเป็นไฮโดรฟิลิกซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในการช่วยยืนยันได้ว่า poly(AA/BR) hydrogels มีสมบัติร่วมกันระหว่างความเป็นไฮโดรฟิลิกและไฮโดรโฟบิก แนวโน้มการดูดซึมน้ำที่เกิดขึ้นนี้เป็นผลมาจากการมีโครงสร้างรูพรุนที่ต่างกันซึ่งเป็นผลต่อเนื่องมาจากการเสถียรด้วยสารเสถียรอิมัลชันที่ความเข้มข้นต่างกันส่งผลให้โครงสร้างรูพรุนและมีความเสถียรทางโครงสร้างต่างกันจึงมีพื้นที่ว่างสำหรับการรองรับการบวมตัวของไฮโดรฟิลิกพอลิเมอร์ขณะดูดซึมน้ำได้ต่างกัน ดังที่กล่าวมาแล้วในกรณีของ poly(AA/SBR) hydrogels นั่นคือโครงสร้างที่มีขนาดของรูพรุนใหญ่กว่าย่อมเหลือพื้นที่ว่างในการรองรับการบวมตัวของรูพรุนได้มากกว่า ไฮโดรฟิลิกพอลิเมอร์จึงบวมตัวได้มากกว่าเป็นเหตุให้ดูดซึมน้ำได้มากกว่ากรณีที่มีรูพรุนขนาดเล็ก [15] ดังนั้นโครงสร้างของ BR/Span-5% ที่มีขนาดของรูพรุนใหญ่ที่สุดและมีการกระจายตัวของขนาดค่อนข้างสม่ำเสมอที่ความเข้มข้นอื่น ๆ จึงเป็นเหตุให้มีพื้นที่รองรับการบวม-

ตัวของไฮโดรฟิลิกพอลิเมอร์มากที่สุดส่งผลให้มีความสามารถในการดูดซึมน้ำมากที่สุด กรณีนี้ตรงข้ามกับ BR/Span-20% ที่มีขนาดของรูพรุนเล็กที่สุดจึงมีพื้นที่รองรับการบวมตัวของไฮโดรฟิลิกพอลิเมอร์น้อยที่สุดประกอบกับการมีความเสถียรทางโครงสร้างต่ำทำให้มีบางส่วนของรูพรุนถูกปิด จึงมีพื้นที่ในการรองรับการบวมตัวของไฮโดรฟิลิกพอลิเมอร์ลดลง เช่นเดียวกับผลของ poly(AA/SBR) hydrogels ที่ความเข้มข้นของสารเสถียรอิมัลชันสูง ๆ ส่งผลให้มีความสามารถในการดูดซึมน้ำต่ำสุด สำหรับ BR/Span-15% และ BR/Span-10% ที่มีความสามารถในการดูดซึมน้ำเป็นอันดับที่สองและสามนั้นเป็นเพราะขนาดของรูพรุนที่เล็กลงมาประกอบกับการกระจายตัวของขนาดรูพรุนที่ไม่สม่ำเสมอเมื่อเทียบกับ BR/Span-5% จึงมีความสามารถในการดูดซึมน้ำแยกแยะเมื่อพิจารณาพฤติกรรมการดูดซึมน้ำของ poly(AA/BR) hydrogels ตามเวลาพบว่าแต่ละความเข้มข้นของสารเสถียรอิมัลชันมีพฤติกรรมคล้ายกันนั่นคือ อัตราการดูดซึมจะมีค่ามากในช่วงแรกแล้วค่อยๆลดลงเมื่อเวลาผ่านไป 5000 นาที เช่นเดียวกันโดยที่ช่วงแรกเป็นผลเนื่องมาจากการกระทำคาпилลารี (capillary action) แล้วเข้าสู่ช่วงการดูดซึมคงที่ก็เนื่องมาจากความอึดตัวในการบวมตัวของไฮโดรฟิลิกพอลิเมอร์ในรูพรุนแต่ด้วยข้อแตกต่างของโครงสร้างรูพรุนต่างกันส่งผลที่เวลาดังกล่าวแต่ละตัวอย่างมี %absorption ต่างกัน

เมื่อพิจารณาความสามารถในการดูดซึมน้ำของ poly(AA/NR) hydrogels ที่เตรียมโดยใช้สารเสถียรอิมัลชันความเข้มข้นต่างกันดังรูปที่ 14.4c พบว่าในช่วงแรกของการดูดซึมน้ำสำหรับทุก ๆ ความเข้มข้นของสารเสถียรอิมัลชัน poly(AA/NR) hydrogels จะมีอัตราการดูดซึมน้ำอย่างรวดเร็วจนถึง 5000 นาที ทั้งนี้เป็นผลเนื่องจากการกระทำคาпилลารีที่เกี่ยวข้องกับความสามารถการเปียกของ poly(AA/NR) hydrogels เช่นเดียวกับอีกสองระบบก่อนหน้านี้ และช่วงนี้เป็นช่วงที่แสดงให้เห็นอิทธิพลความเข้มข้นของสารเสถียรอิมัลชันอย่างชัดเจน โดยพบว่า NR/Span-5% มีความสามารถในการดูดซึมน้ำมากที่สุดรองลงมาคือ NR/Span-10% และ NR/Span-20% ที่มีความสามารถในการดูดซึมน้ำใกล้เคียงกันในขณะที่ NR/Span-15% มีความสามารถในการดูดซึมน้ำต่ำที่สุด และเมื่อไฮโดรฟิลิกดูดซึมน้ำจนถึงจุดอึดตัวที่ 5000 นาที จะพบว่าอัตราการดูดซึมน้ำลดลง ความสามารถในการดูดซึมน้ำที่ต่างกันนี้ก็เกิดมาจากโครงสร้างที่ต่างกันเนื่องมาจากอิทธิพลความเข้มข้นของสารเสถียรอิมัลชันโดย NR/Span-5% และ NR/Span-10% เป็นช่วงความเข้มข้นที่ยังคงรักษาความเป็นรูพรุนของ poly(AA/NR) hydrogels ไว้ได้ดังนั้นการมีโครงสร้างรูพรุนที่เป็นแบบ connecting pore มีขนาดใหญ่และมีพื้นที่รองรับการบวมตัวของไฮโดรฟิลิกพอลิเมอร์ได้มากจึงนำมาซึ่งความสามารถในการดูดซึมน้ำได้สูง สำหรับ NR/Span-20% ที่ถึงแม้จะมีความเสถียรทางโครงสร้างต่ำและความเป็นรูพรุนที่น้อยลงแต่ความเสถียรที่น้อยลงนี้เกิดจากการรวมตัวกันของหยดอิมัลชันหลาย ๆ หยดรวมกันจนปรากฏเป็นรูขนาดใหญ่ใน poly(AA/NR) hydrogels จึงเป็นเหตุให้ไฮโดรฟิลิกพอลิเมอร์สามารถบวมตัวมากกว่ากรณี NR/Span-15% ที่ยังมีโครงสร้างรูพรุนควบคุม

การบวมตัวของไฮโดรฟิลิกพอลิเมอร์อยู่จึงเป็นเหตุให้ NR/Span-20% มีความสามารถในการดูดซึมน้ำได้มากกว่าถึงแม้ว่าจะมีโครงสร้างรูพรุนเสถียรน้อยกว่าก็ตามดังแสดงตามแบบจำลองในรูปที่ 4.16 ทั้งนี้ poly(AA/NR) hydrogels ยังแสดงความเป็นไฮโดรฟิลิกมากขึ้นกว่าระบบของ Porous NR เนื่องจากสามารถดูดซึมน้ำได้มากขึ้นเมื่อเทียบตามเวลาในขณะที่ Porous NR มีอัตราการดูดซึมน้ำคงที่เนื่องมาจากการมีสมบัติการเป็นไฮโดรโฟบิกเพียงอย่างเดียว

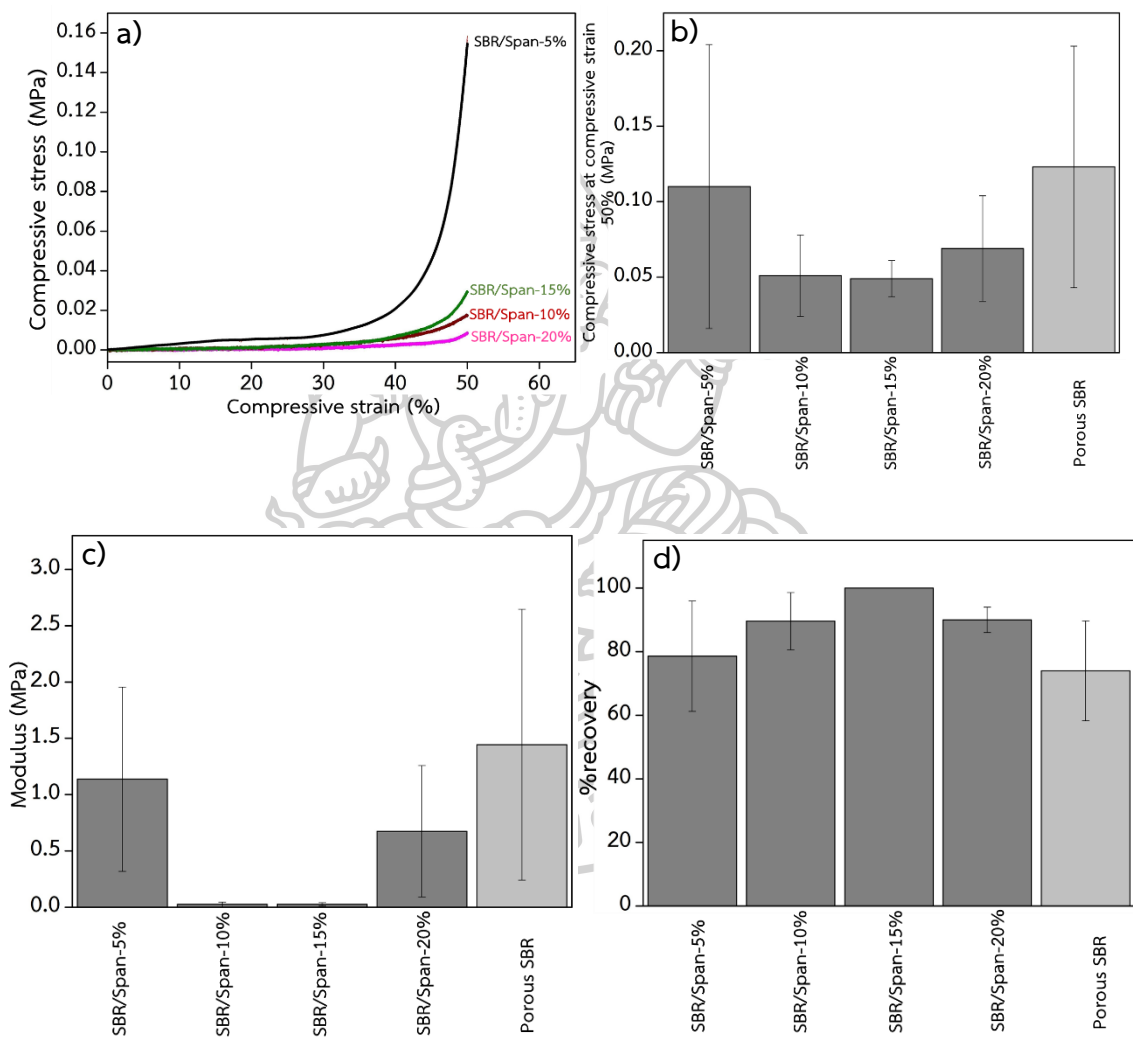


รูปที่ 4.16 แบบจำลองโครงสร้างของ poly(AA/NR) hydrogels ที่ส่งผลต่อการดูดซึมน้ำ โดย a) ก่อนถึงจุดอิ่มตัวของการดูดซึมน้ำ และ b) เมื่อถึงจุดอิ่มตัวของการดูดซึมน้ำ

เมื่อพิจารณาความสามารถในการดูดซึมน้ำของไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล ที่ถูกเตรียมด้วยยางต่างชนิดกัน (SBR, BR และ NR) จะพบว่ามีช่วงเวลาที่ไฮโดรฟิลิกพอลิเมอร์ถึงจุดอิ่มตัวในการดูดซึมน้ำใกล้เคียงกันที่ 5000 นาที เนื่องจากถูกเตรียมด้วยไฮโดรฟิลิกพอลิเมอร์อย่างอะคริลิก-แอสซิด ที่ศึกษาที่ความเข้มข้นคงที่ตลอดการศึกษาทำให้ไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล ถึงจุดอิ่มตัวของการดูดซึมน้ำใกล้เคียงกัน แต่ความสามารถในการดูดซึมน้ำ (%absorption) ยังคงต่างกันเนื่องจากผลของโครงสร้างที่ต่างกันอันเนื่องมาจากความเข้มข้นของสารเสถียรอิมัลชันที่ต่างกัน โดยพบว่า SBR/Span-5% มีความสามารถในการดูดซึมน้ำมากที่สุดนั่นคือสามารถดูดซึมน้ำได้ถึง 400% ในขณะที่ระบบ Poly(AA/BR) hydrogels มีความสามารถดูดซึมน้ำสูงสุดที่ 153% นั่นคือ BR/Span-5% และระบบ Poly(AA/NR) hydrogels สามารถดูดซึมน้ำสูงสุดที่ 240% โดย NR/Span-5% จะสังเกตเห็นว่าไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจลแต่ละระบบจะมีความสามารถในการดูดซึมน้ำได้ดีที่โครงสร้างรูพรุนมีขนาดใหญ่ด้วยเหตุผลดังที่กล่าวมาแล้ว ทั้งนี้วัสดุโพลีเมอร์ต่างชนิดกันก็นำมาซึ่งความหนืดที่ต่างกันเป็นผลให้มีโครงสร้างรูพรุนต่างกันจึงทำให้มีความสามารถในการดูดซึมน้ำต่างกัน

4.4 การทดสอบความต้านทานการกดอัดของไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล

การพิจารณาสมบัติเชิงกลของไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจลผ่านการให้แรงกดอัดเพื่อศึกษาพฤติกรรมที่ตอบสนองต่อแรงกดผ่านกราฟ stress-strain, compressive modulus และความสามารถในการคืนตัวกลับเมื่อนำแรงออก (%recovery) โดยได้ผลการศึกษาของแต่ละไฮโดรโฟบิกพอลิเมอร์ต่าง ๆ ดังนี้



รูปที่ 4.17 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการกดอัดของ poly(AA/SBR) hydrogels โดย a) กราฟ Compressive stress-Compressive strain, b) Compressive stress at compressive strain 50%, c) ค่ามอดูลัส และ d) %recovery

เมื่อพิจารณาพฤติกรรมของ poly(AA/SBR) hydrogels ที่ตอบสนองต่อแรงกดอัดตั้งรูปที่ 4.17a พบว่าในช่วง %strain ต่ำ ๆ poly(AA/SBR) hydrogels มีค่า compressive stress ต่ำเพราะยังถูกกดอัดได้ไม่มาก จนถึงจุดเปลี่ยนของกราฟที่ 30-40%strain พบว่าเส้นกราฟมีการเปลี่ยนแปลงแบบมีแนวโน้มของ compressive stress เพิ่มขึ้นแสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมการรับแรงของ poly(AA/SBR) hydrogels เกิดการเปลี่ยนแปลงที่ช่วง %strain นี้ โดยพบว่ามีความสามารถในการรับแรงมากขึ้นอย่างฉับพลันในทุก poly(AA/SBR) hydrogels ที่ถูกเสถียรด้วยสารเสถียรอิมัลชันความเข้มข้นต่างกันและมีแนวโน้มเช่นนี้จนถึง 50% strain ในช่วง 30-50%strain นี้เองที่แสดงให้เห็นถึงอิทธิพลของความเข้มข้นสารเสถียรอิมัลชันที่ส่งผลต่อความสามารถในการรับแรงของ poly(AA/SBR) hydrogels ซึ่งแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนจากการพิจารณาค่า compressive stress at break ดังแสดงในรูปที่ 4.17b พบว่า SBR/Span-5% มีค่า compressive stress at break มากที่สุดในขณะที่ SBR/Span-10%, SBR/Span-15% และ SBR/Span-20% มีค่าแตกต่างกันไม่มากนัก ผลการศึกษาดังกล่าวยังสอดคล้องกันกับแนวโน้มค่ามอดูลัสที่แสดงดังรูปที่ 4.17c ด้วยเช่นกัน ทั้งนี้ปัจจัยที่ส่งผลต่อสมบัติเชิงกลก็ประกอบด้วยปัจจัยทางโครงสร้างและความสามารถในการดูดซึมน้ำที่ต่างกันของ poly(AA/SBR) hydrogels ที่ถูกเสถียรด้วยสารเสถียรอิมัลชันความเข้มข้นต่างกัน เนื่องจาก SBR/Span-5% เป็น poly(AA/SBR) hydrogels ที่มีความสามารถในการดูดซึมน้ำมากที่สุดทำให้มีความหนาแน่นของไฮโดรเจลขณะเปียกมากกว่าตัวอย่างอื่นๆเพราะมีปริมาณน้ำในโครงสร้างมากกว่า สำหรับการทดสอบสมบัติเชิงกลเป็นการทดสอบตัวอย่างไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล ที่ผ่านการดูดซึมน้ำมาแล้วดังนั้นยังมีปริมาณน้ำในโครงสร้างมากไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล ยังมีความหนาแน่นมากเมื่อถูกกดอัดจึงมีความสามารถในการรับแรงมากกว่าโครงสร้างที่มีปริมาณน้ำน้อยกว่า ดังนั้น SBR/Span-5% จึงมีค่า compressive stress at 50%strain และมอดูลัสสูงที่สุด อีกทั้งการมีโครงสร้างรูพรุนที่มีความเสถียรนั้นคือ มีลักษณะของ connecting pore และรูพรุนที่เป็นทรงกลมที่นำมาซึ่งความสามารถในการกระจายแรงที่ดี [18, 26] รวมกับความหนาของผนังรูพรุนที่หนากว่าเหล่านี้ล้วนเป็นปัจจัยทางด้านโครงสร้างที่ช่วยเสริมให้ SBR/Span-5% มีความสามารถในการรับแรงที่ดี [32] ในขณะที่ SBR/Span-10% และ SBR/Span-15% มีความสามารถในการดูดซึมน้ำใกล้เคียงกันดังรูปที่ 4.14a แต่ยังมีรูพรุนแบบไร้รูปร่างมากขึ้นอีกทั้งผนังของรูพรุนที่บางกว่าจึงมีความสามารถในการรับแรงได้ต่ำกว่า SBR/Span-5% สำหรับ SBR/Span-20% ที่ถึงแม้จะมีความสามารถในการดูดซึมน้ำดีกว่าย่อมมีความหนาแน่นขณะทดสอบมากกว่าแต่ยังมีปัจจัยทางโครงสร้างที่ต่ำกว่าตัวอย่างอื่น ๆ เพราะ SBR/Span-20%

ปรากฏโครงสร้างรูพรุนที่ไม่เสถียรและไม่ทนต่อแรงกระทำแม้กระทั่งการทำแห้ง นั่นจึงเป็นเหตุที่ SBR/Span-20% มีความสามารถในการต้านทานแรงกดอัดใกล้เคียงกับ SBR/Span-10% และ SBR/Span-15%

จากปัจจัยด้านความหนาแน่นของ poly(AA/SBR) hydrogels ที่เกิดจากความสามารถในการดูดซับน้ำที่ส่งผลให้ poly(AA/SBR) hydrogels มีความสามารถในการต้านทานการกดอัดสูงทั้งค่า compressive stress at 50% strain และค่ามอดูลัส ความหนาแน่นที่เกิดขึ้นนี้ก็เป็นปัจจัยหนึ่ง ที่ช่วยให้ poly(AA/SBR) hydrogels มีสมบัติเชิงกลใกล้เคียงกับ Porous SBR เนื่องจากการมีพอลิเมอร์ 2 ชนิด ที่มีโครงสร้างต่างกันอยู่ใน poly(AA/SBR) hydrogels [15] โดยที่มีโครงสร้างไฮโดรฟิลิกพอลิเมอร์ที่มีความเปราะมากกว่าอยู่ด้วยอาจจะทำให้สมบัติเชิงกลของไฮโดรโฟบิกพอลิเมอร์แย่งแต่ได้รับการเสริมด้วยความหนาแน่นจึงเป็นปัจจัยหนึ่ง ที่ช่วยให้ poly(AA/SBR) hydrogels มีสมบัติเชิงกลดีเทียบเท่ากับระบบที่มีไฮโดรโฟบิกพอลิเมอร์อย่างเดียว

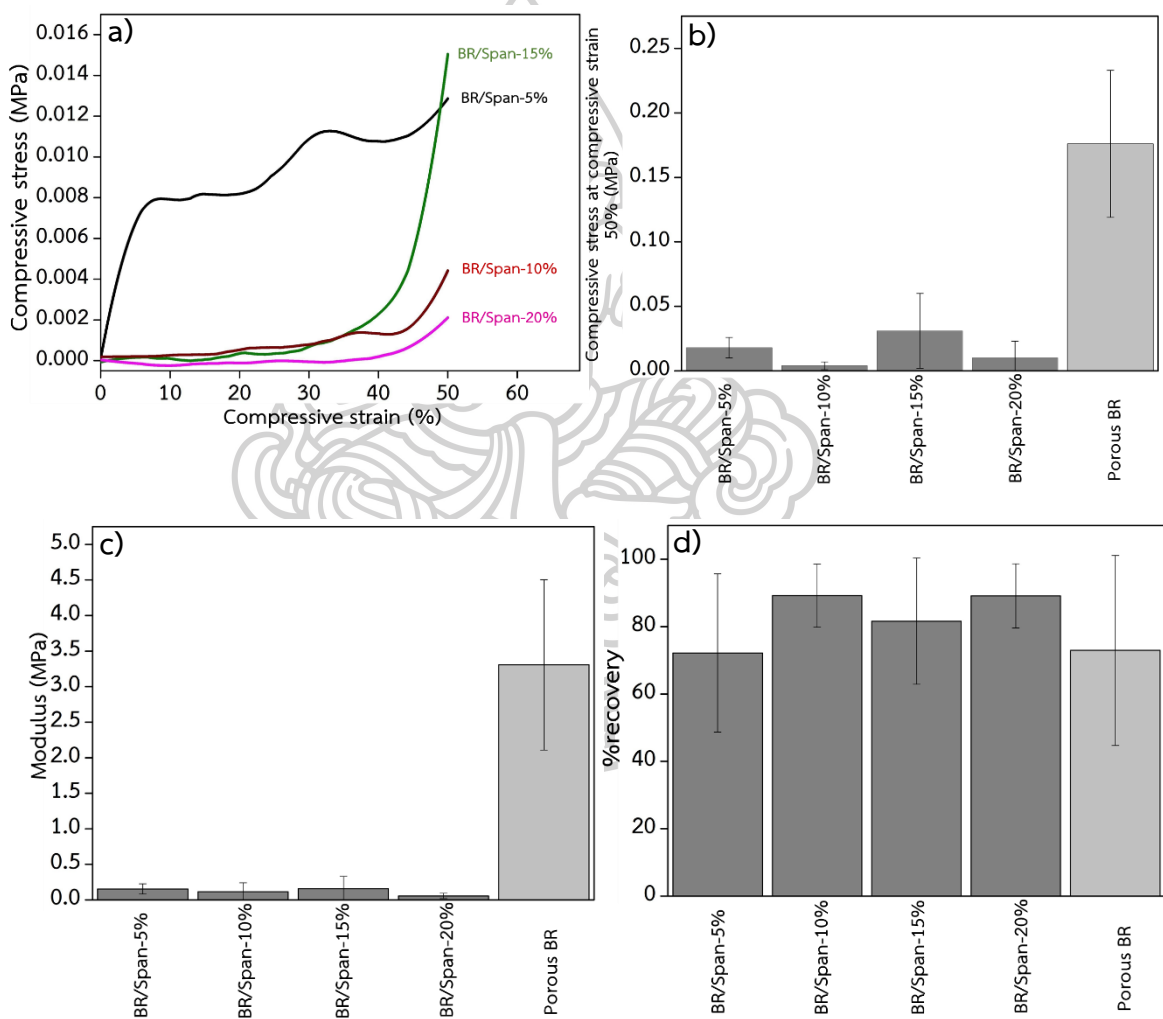
เนื่องจากในงานวิจัยนี้ศึกษาการเตรียมไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล โดยมีงานที่ผ่านการเชื่อมขวางเป็นไฮโดรโฟบิกพอลิเมอร์ การเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นนี้ทำให้ไฮโดรโฟบิกพอลิเมอร์มีความสามารถในการคืนตัวกลับได้ [33] ดังนั้นจึงเป็นการเสริมให้ไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล มีความสามารถในการคืนตัวกลับด้วยเช่นกันดังแสดงผลการศึกษาของ poly(AA/SBR) hydrogels ใน 1 ชั่วโมงหลังจากเอาแรงกดออกดังแสดงในรูป 4.17d พบว่า poly(AA/SBR) hydrogels คืนตัวกลับมายังรูปทรงเดิมได้โดย poly(AA/SBR) hydrogels ที่ถูกเสถียรด้วยสารเสถียรอิมัลชันความเข้มข้นต่างกันก็มีความสามารถในการคืนตัวกลับได้ต่างกันโดยพิจารณาจากค่า %recovery พบว่า SBR/Span-15% มี %recovery มากที่สุด คือสามารถคืนตัวกลับได้ 100% รองลงมาคือ SBR/Span-10% ที่มีค่าใกล้เคียงกับ SBR/Span-20% ในขณะที่ SBR/Span-5% ที่มี %recovery ต่ำที่สุด จะเห็นได้ว่าแนวโน้มค่า %recovery ตรงกันข้ามกับค่า compressive stress at 50% stain และมอดูลัสสำหรับ SBR/Span-5% ก็เพราะโครงสร้างรูพรุนที่ต่างกันโดยโครงสร้างรูพรุนที่มีความเป็น connecting pore และเป็นทรงกลมที่มีความสามารถในการกระจายแรงได้ดีก็นำมาซึ่งการเคลื่อนที่ของสายโซ่พอลิเมอร์ที่มากกว่า ดังนั้น SBR/Span-5% ที่มีโครงสร้างที่สามารถกระจายแรงกระทำได้ดีจึงทำให้สายโซ่ของไฮโดรโฟบิกพอลิเมอร์เคลื่อนห่างจากกันได้มากกว่าโครงสร้างอื่น ๆ เมื่อนำแรงออกจึงต้องใช้เวลาในการคืนตัวกลับนานกว่าโครงสร้างอื่น อย่าง SBR/Span-15% ที่มีสมบัติเชิงกลกว่ามากเพราะโครงสร้างสามารถกระจายแรงได้น้อยกว่าสายโซ่ไฮโดรโฟบิกพอลิเมอร์เคลื่อนห่างกันน้อยกว่าจึงคืนตัวกลับได้ง่ายกว่า อย่างไรก็ตามความสามารถในการคืนตัวกลับของ SBR/Span-10% ยังมากกว่า Porous SBR (ที่เปรียบเทียบกับกัน

เพราะมีเสถียรด้วยสารเสถียรอิมัลชัน 10%w/v เท่ากัน) เนื่องจาก Porous SBR ประกอบด้วยโครงสร้างของไฮโดรโพลีเมอร์เพียงโครงสร้างเดียวที่แต่ละสายโซ่เชื่อมกันด้วยโมเลกุลของสารเชื่อมขวาง การเชื่อมขวางที่เกิดขึ้นไม่ได้เกิดกับทุก ๆ สายโซ่เพราะยังคงมีพันธะคู่ของหน่วยซ้ำในโครงสร้างสไตรีนและบิวตะไดอินหลงเหลืออยู่ในโครงสร้างของ poly(AA/SBR) hydrogels ดังแสดงในผลการทดสอบ FTIR ดังนั้นเมื่อได้รับแรงแล้วจึงมีบางส่วนของสายโซ่เคลื่อนผ่านกันส่งผลให้ %recovery มีค่าต่ำ

สมบัติเชิงกลของ poly(AA/BR) hydrogels ที่เตรียมโดยใช้สารเสถียรอิมัลชันที่มีความเข้มข้นต่างกันแสดงดังรูปที่ 4.18a พบว่าในช่วง %strain ต่ำ poly(AA/BR) hydrogels ที่ถูกเสถียรด้วยสารเสถียรอิมัลชันที่มีความเข้มข้นต่างกันมีพฤติกรรมการตอบสนองต่อแรงกระทำคล้ายกันนั่นคือมีความสามารถในการต้านทานการกดอัดต่ำจนถึงจุดเปลี่ยนของกราฟที่ 40%strain พบว่าเส้นกราฟมีการเปลี่ยนแปลงแสดงให้เห็นว่าพฤติกรรมการรับแรงของ poly(AA/BR) hydrogels เกิดการเปลี่ยนแปลงที่ %strain นี้ อย่างไรก็ตามจะสังเกตได้ว่า BR/Span-5% มีพฤติกรรมการตอบสนองต่างจากตัวอย่างอื่นเป็นเพราะในช่วงที่ %strain เพิ่มขึ้นเพราะชิ้นงาน BR/Span-5% ที่ถูกกดจนชิ้นงานเกิดการเอียง ปรากฏการณ์ดังกล่าวทำให้พื้นที่หน้าตัดของชิ้นงานเปลี่ยนอย่างฉับพลันทำให้พฤติกรรมการตอบสนองต่อแรงกดต่างจากตัวอย่างอื่น ๆ ในช่วง 40-50%strain แสดงให้เห็นอิทธิพลความเข้มข้นของสารเสถียรอิมัลชันอย่างชัดเจนดังแสดงด้วยค่า compressive stress at compressive strain 50% ดังรูปที่ 4.18b ซึ่งมีแนวโน้มเช่นเดียวกับค่ามอดูลัสในรูปที่ 4.18c จากผลดังกล่าวทำให้ทราบว่า BR/Span-15% มีความสามารถในการต้านทานการกดอัดมากที่สุด รองลงมาคือ BR/Span-5%, BR/Span-10% และ BR/Span-20% ที่มีความสามารถในการต้านทานการกดอัดใกล้เคียงกันเพราะมีค่า compressive stress at 50%strain และค่ามอดูลัสแตกต่างกันไม่มากนัก เป็นผลมาจากความสามารถในการดูดซึมน้ำและปัจจัยทางโครงสร้างดังที่กล่าวมาแล้วในกรณีของ poly(AA/SBR) hydrogels ก่อนหน้านี้ นั่นคือ การมีโครงสร้างรูพรุนที่มีรูปทรงกลม เป็น connecting pore ที่มีความเสถียรทางโครงสร้างสูง ประกอบกับการมีความสามารถในการดูดซึมน้ำได้ดีจึงทำให้มีความหนาแน่นมาก เหล่านี้ส่งผลให้ BR/Span-15% ต้านทานการกดอัดสูงที่สุดในขณะที่ BR/Span-5% ถึงแม้จะมีความสามารถในการดูดซึมน้ำสูงที่สุดแล้วเป็นเหตุให้มีความหนาแน่นมากที่สุดแต่ยังมีโครงสร้างที่มีความเสถียรน้อยกว่าซึ่งเป็นเหตุผลเดียวกันกับ BR/Span-10% และ BR/Span-20% เช่นกัน เมื่อเปรียบเทียบกับ Porous BR พบว่า Poly(AA/BR) hydrogels มีความต้านทานการกดอัดต่ำกว่าเนื่องจากมีโครงสร้างรวมกันจึงทำให้สมบัติเชิงกลแย่ง อีกรทั้ง poly(AA/BR) hydrogels ยังมี

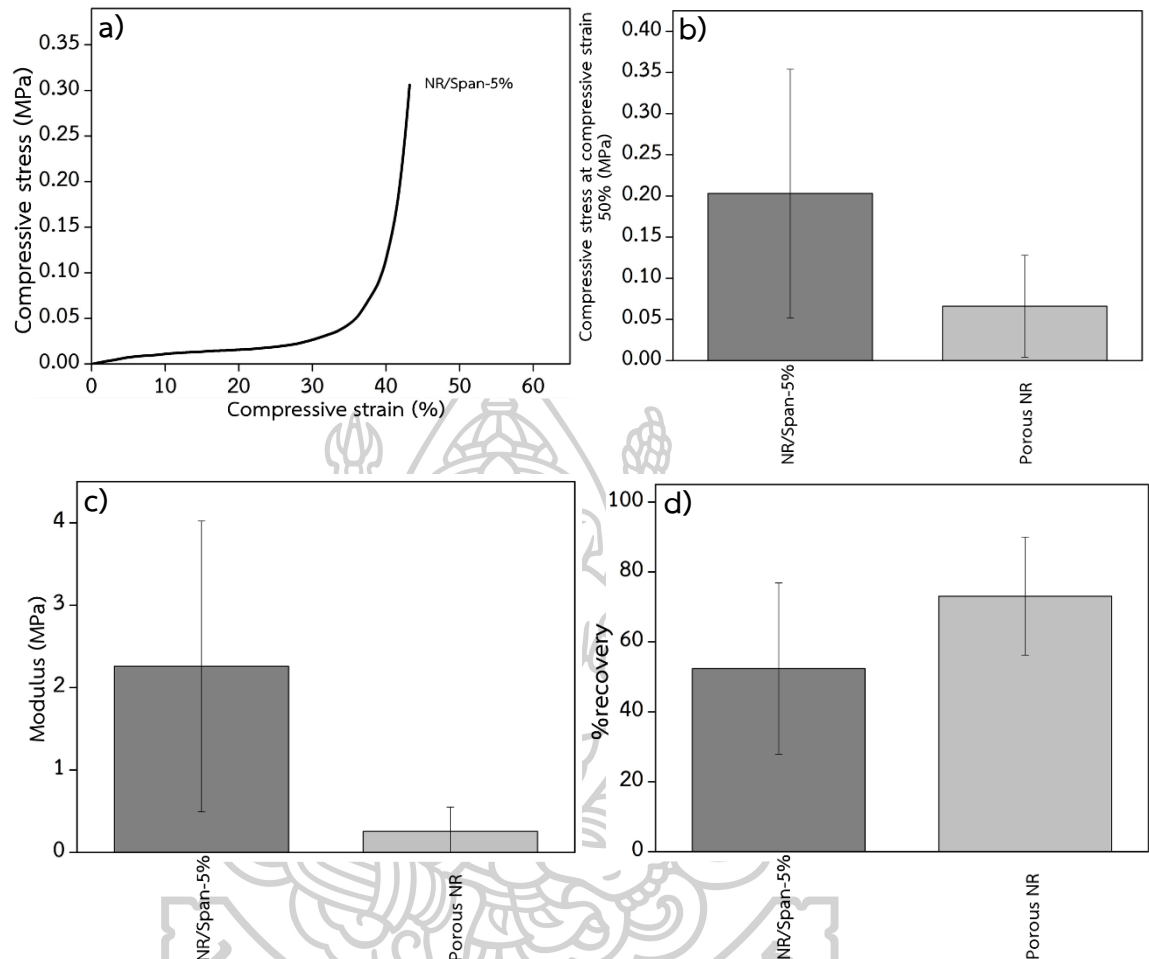
ความสามารถในการดูดซึมน้ำต่ำจึงอาจส่งเสริมสมบัติเชิงกลได้ไม่มากนักเมื่อเทียบกับกรณีของ poly(AA/SBR) hydrogels ดังนั้น poly(AA/BR) hydrogels จึงขาดปัจจัยที่เสริมสมบัติเชิงกลก็คือ ความหนาแน่นทำให้มีสมบัติเชิงกลน้อยกว่า Porous BR

เมื่อเวลาผ่านไป 1 ชั่วโมง BR/Span-10% และ BR/Span-20% มี %recovery สูงสุด รองลงมาคือ BR/Span-15% และ BR/Span-5% มี %recovery ต่ำที่สุด ดังรูปที่ 14.8d แต่ยังสามารถคืนตัวกลับมากกว่า Porous BR ที่เป็นไฮโดรโพลิเมอร์เพียงอย่างเดียว มีเหตุผลเช่นเดียวกันกับกรณี Poly(AA/SBR) hydrogels ที่กล่าวมาแล้วก่อนหน้านี้



รูปที่ 14.18 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการกดอัดของ poly(AA/BR) hydrogels โดย a) กราฟ Compressive stress-Compressive strain, b) Compressive stress at compressive strain 50%, c) ค่ามอดูลัส และ d) %recovery

สำหรับสมบัติเชิงกลของ poly(AA/NR) hydrogels สามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 4.19



รูปที่ 4.19 ผลการทดสอบความต้านทานต่อการกดอัดของ poly(AA/NR) hydrogels โดย a) กราฟ Compressive stress-Compressive strain, b) Compressive stress at compressive strain 50%, c) ค่ามอดูลัส และ d) %recovery

เมื่อพิจารณาพฤติกรรมการตอบสนองต่อแรงกดของ NR/Span-5% ดังแสดงในรูปที่ 4.19a พบว่ามีพฤติกรรมการตอบสนองคล้ายกับกรณีของ poly(AA/SBR) hydrogels และ poly(AA/BR) hydrogels นั่นคือในช่วง %strain ต่ำ ๆ NR/Span-5% สามารถรับแรงได้น้อยเพราะยังถูกกดลงมาได้น้อยและเมื่อถูกกดมากขึ้นที่ %strain มากขึ้น เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่า compressive stress at 50%strain ในรูปที่ 4.19b พบว่า NR/Span-5% มีค่าสูงกว่า Porous NR อยู่หลายเท่า นั่นแสดงให้เห็นว่าการมีสองโครงสร้างและมีโครงสร้างหนึ่งที่สามารถดูดซึมน้ำได้จะเป็นการช่วยเพิ่ม

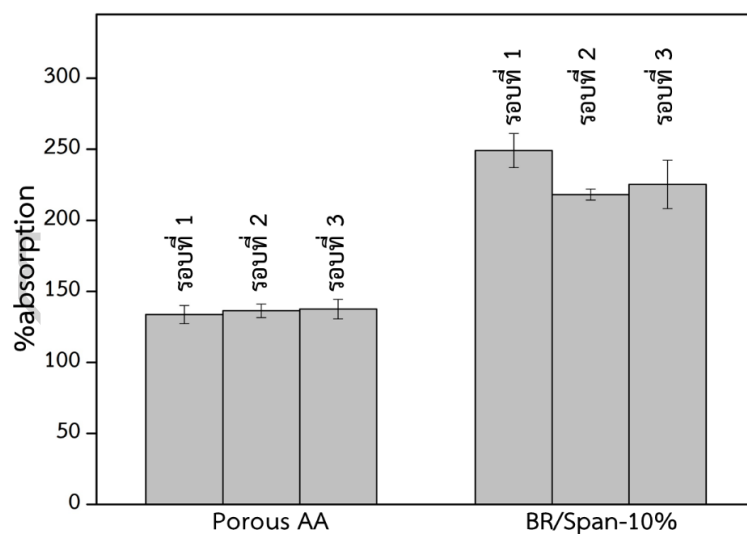
ความหนาแน่นให้กับโครงสร้างของ poly(AA/NR) hydrogels และความหนาแน่นที่เกิดขึ้นนี้ก็ช่วยเสริมให้ poly(AA/NR) hydrogels สามารถรับแรงได้มากขึ้นเมื่อเทียบกับการมีโครงสร้างพอลิเมอร์เพียงชนิดเดียวอย่าง Porous NR ซึ่งก็สอดคล้องกับค่ามอดูลัสที่แสดงในรูปที่ 4.19c เช่นกัน ทั้งนี้ความสามารถในการคืนตัวกลับของ NR/Span-5% และ Porous NR พบว่ามีค่าแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญนั้นแสดงให้เห็นว่าการมีสองโครงสร้างร่วมกันที่เกิดใน poly(AA/NR) hydrogels ไม่ได้ส่งผลให้สมบัติของยาง BR แย่ลงเพราะความสามารถในการคืนตัวกลับของยาง BR ที่ผ่านการเชื่อมขวางแล้วยังเป็นเช่นเดิม อย่างไรก็ตามสำหรับ poly(AA/NR) hydrogels ได้ทำการทดสอบสมบัติเชิงกล 2 ตัวอย่างนั่นคือ NR/Span-5% และ Porous NR เนื่องจาก NR/Span-10%, NR/Span-15% และ NR/Span-20% ไม่สามารถเตรียมตัวอย่างที่มีรูปทรงแบบทรงกระบอกได้ เพราะในการสังเคราะห์แต่ละครั้งได้ปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับ NR/Span-5% และ Porous NR

เมื่อพิจารณาข้อมูลทางสถิติแล้วพบว่าในแต่ละความเข้มข้นยังมีการเบี่ยงเบนของข้อมูลค่อนข้างมาก ทั้งนี้เป็นเพราะไฮโดรเจลที่เตรียมได้มีบางส่วนของบางชิ้นงานขาดความสม่ำเสมอทางรูปทรงซึ่งเป็นอิทธิพลมาจากสภาวะการสังเคราะห์เนื่องจากระหว่างกระบวนการสังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 80°C เกิดการแตกตัวของสารเชื่อมขวางใน external phase อย่าง BPO การแตกตัวนี้เกิดผลิตภัณฑ์ข้างเคียงคือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นตัวแปรที่ก่อให้เกิดฟองแก๊สที่คอยปะทุด้านข้างของภาชนะส่งผลให้รูปทรงของไฮโดรเจลที่เตรียมได้ไม่เป็นไปตามรูปทรงของภาชนะได้อย่างสมบูรณ์ และเมื่อนำมาทดสอบสมบัติเชิงกลความสมบูรณ์ของรูปทรงที่ต่างกันนี้จึงทำให้เกิดการเบี่ยงเบนของค่าการทดสอบที่ได้

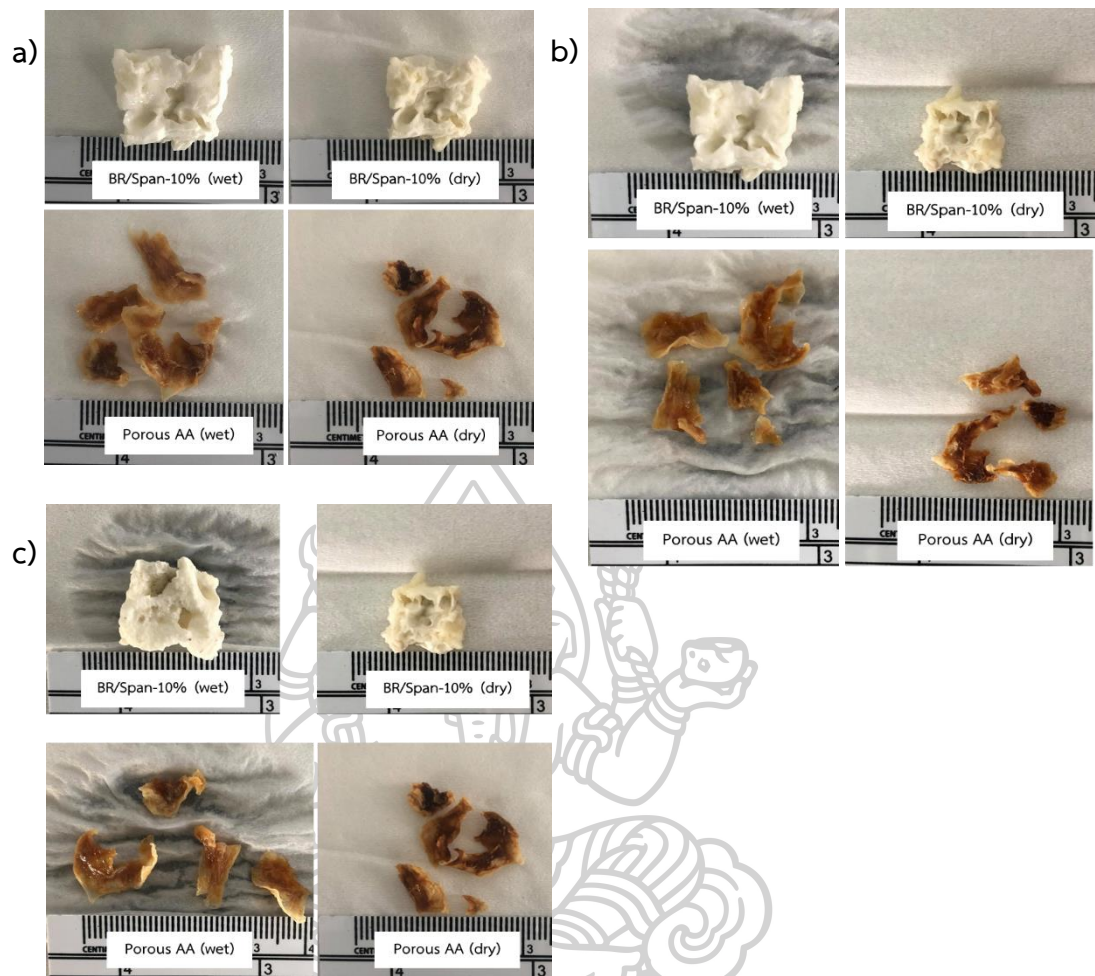
4.5 การศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซึมน้ำซ้ำได้ระหว่างไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล และพอลิอะคริลิกไฮโดรเจล

การศึกษาเปรียบเทียบการนำมาใช้งานซ้ำระหว่างไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล ซึ่งในการเปรียบเทียบได้เลือก poly(AA/BR) hydrogels เพื่อเปรียบเทียบกับพอลิอะคริลิกแอซิดไฮโดรเจล (Porous AA) ที่ถูกเตรียมโดยใช้เทคนิค HIPE ทั่วไป นำมาดูดซึมน้ำซ้ำ 3 รอบ แต่ละรอบใช้เวลา 3 วัน จากนั้นนำไปอบและดูดซึมน้ำรอบถัดไป ผลแสดงดังรูปที่ 4.20 และ 4.21 จากผลการศึกษาพบว่า Porous AA มีความสามารถในการดูดซึมน้ำต่ำกว่า BR/Span-10% ในทุก ๆ รอบของการดูดซึมน้ำ ดังรูปที่ 4.20 ที่เป็นเช่นนี้เป็นผลมาจากความเสถียรทางโครงสร้างที่แยกแยะของ Porous AA หลังจากอบแห้งนั่นคือ สังเกตเห็นรูปทรงของชิ้นงานที่เสีรูปทรงไปหลังจากการอบแห้งดังรูปที่ 4.21 ผลจากการเสีรูปทรงส่งผลให้พื้นที่ผิวในการดูดซึมน้ำของ Porous AA ลดลง

ทำให้มีความสามารถในการดูดซึมน้ำน้อยกว่า BR/Span-10% ที่เตรียมด้วยพอลิอะคริลิกแอซิดปริมาณเท่ากันแต่มีโครงสร้างรูพรุนของยาง BR ช่วยรักษาให้ชิ้นงานคงรูปตลอดตั้งแต่อบแห้งและนำมาดูดซึมน้ำจึงสังเกตเห็นว่ารูปทรงของ BR/Span-10% คงรูปตลอดการศึกษา รูปทรงที่คงรูปนี้ช่วยให้ BR/Span-10% มีพื้นที่ผิวในการดูดซึมน้ำยังคงคงที่ส่งผลให้มีความสามารถในการดูดซึมน้ำมากกว่า แต่เมื่อเปรียบเทียบผลการดูดซึมน้ำระหว่าง Porous AA ด้วยตัวเอง หรือ BR/Span-10% ด้วยตัวเอง พบว่ามีความสามารถในการดูดซึมน้ำใกล้เคียงกันในแต่ละรอบ สำหรับ Porous AA ความเสถียรทางโครงสร้างเสียตั้งแต่อบรอบแรกดังนั้นพื้นที่ผิวในการดูดซึมน้ำจึงน้อยตั้งแต่รอบแรกของการดูดซึมน้ำแล้ว ในขณะที่ BR/Span-10% ก็มีพื้นที่ผิวดูดซึมน้ำคงที่ตั้งแต่รอบแรกที่ยังมากกว่า Porous AA เพราะมีโครงสร้างรูพรุนของยาง BR คอยรักษารูปทรงไว้ได้ ผลการศึกษาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มโครงสร้างที่มีความยืดหยุ่นและแข็งกว่าอะคริลิกแอซิดพอลิเมอร์เป็นการเสริมความสามารถในการดูดซึมน้ำให้แก่ไฮโดรเจลมากขึ้นโดยสามารถเพิ่มความสามารถในการใช้ซ้ำโดยที่ยังมีรูปทรงคงเดิมได้โดยมีความสามารถในการดูดซึมน้ำเท่าเดิม



รูปที่ 4.20 การศึกษาเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซึมน้ำซ้ำระหว่าง Porous AA และ ไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล



รูปที่ 4.21 การเปลี่ยนแปลงรูปร่างของชิ้นงานเมื่อทดสอบการดูดซึมน้ำเข้า a) รอบที่ 1, b) รอบที่ 2 และ c) รอบที่ 3

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การศึกษาการเตรียมไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจล ซึ่งเตรียมขึ้นจากวัสดุซิลิกาโตนเมออร์ต่างชนิดกัน ได้แก่ SBR, BR และ NR โดยมี พอลิอะคริลิก แอซิด เป็นไฮโดรฟิลิกพอลิเมอร์ สามารถเตรียมได้จากเทคนิค bicontinuous polyHIPE จากการปรับเปลี่ยนชนิดของสารเสถียรอิมัลชัน ได้แก่ IGEPAL CO-890, TWEEN80 และ Span80 พบว่า Span80 เป็นสารเสถียรอิมัลชันที่เหมาะสมที่สุด เนื่องจากให้อิมัลชันที่มีความเสถียรโดยไม่เกิดการแยกชั้นของเฟสเมื่อผ่านกระบวนการสังเคราะห์และได้ไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจลที่มีร้อยละผลได้ของผลิตภัณฑ์สูงสุด ทั้งนี้ น่าจะเป็นผลมาจากความสามารถในการละลายได้ดีในระบบที่มีขั้วต่างกันซึ่งพิจารณาจากค่า HLB จากผลการทดสอบสัณฐานวิทยาพบว่า ไฮโดรเจลที่เตรียมได้มีพอลิอะคริลิกแอซิดที่มีลักษณะคล้ายเส้นใยจัดเรียงตัวอยู่ในโครงสร้างรูพรุนของไฮโดร-โฟบิกพอลิเมอร์ และ การหาหมู่ฟังก์ชันทางเคมีจากเทคนิค FTIR แสดงให้เห็นว่า ไฮโดรเจลที่เตรียมได้ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันของไฮโดรฟิลิกพอลิเมอร์และไฮโดรโฟบิกพอลิเมอร์ร่วมกัน

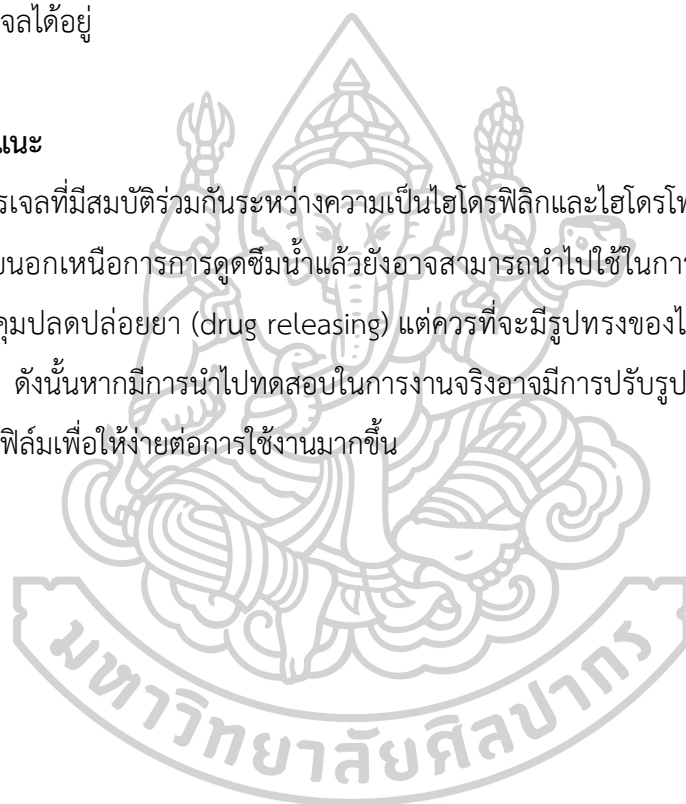
การศึกษาหาความเข้มข้นของ Span80 ที่เหมาะสมสำหรับการเตรียมไฮโดรเจล พบว่า ไฮโดรเจลทั้งสามระบบ ได้แก่ poly(SBR/AA), poly(BR/AA) และ poly(NR/AA) สามารถเสถียรได้โดยใช้ความเข้มข้นของ Span80 ในช่วง 10-15% โดยน้ำหนักเทียบกับปริมาตรรวมของระบบอิมัลชัน ไฮโดรเจลที่เตรียมได้มีโครงสร้างของรูพรุนทรงกลมและมีการกระจายตัวของขนาดอย่างสม่ำเสมอ แต่เมื่อความเข้มข้นของสารเสถียรอิมัลชันมากขึ้นส่งผลให้รูพรุนของรูพรุนกลายเป็นแบบไร้รูปร่าง (irregular) และมีการกระจายตัวของขนาดไม่สม่ำเสมอ

เมื่อพิจารณาอิทธิพลของขนาดของรูพรุนที่มีต่อความสามารถในการดูดซึมน้ำของไฮโดรเจล พบว่า รูพรุนขนาดใหญ่ซึ่งเกิดขึ้นเมื่อเสถียรโดยใช้ความเข้มข้นของสารเสถียรอิมัลชันต่ำนั้นมีความสามารถในการดูดซึมน้ำได้มากที่สุด โดยที่สภาวะสมดุลพบว่าไฮโดรเจลชนิด SBR/Span-5% สามารถดูดซึมน้ำได้มากถึง 400% ไฮโดรเจลชนิด NR/Span-5% สามารถดูดซึมน้ำได้ 239% และ BR/Span-5% สามารถดูดซึมน้ำได้ 153% ความเข้มข้นของสารเสถียรอิมัลชันที่ต่างกันยังส่งผลต่อความสามารถในการต้านทานการกัดอัดของไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจลด้วย ซึ่งพบว่าไฮโดรเจลที่มีผนังรูพรุนหนาจะมีความสามารถในการต้านทานการกัดอัดได้ดี ไฮโดรเจลที่เตรียมโดยใช้ SBR เป็นไฮโดรโฟบิกพอลิเมอร์มีความต้านทาน

ต่อการกดอัดมากที่สุด โดย ค่ามอดูลัสของความต้านทานการกดอัดของ SBR/Span-5% มีค่าเท่ากับ 1.14 MPa ค่ามอดูลัสของความต้านทานการกดอัดของ BR/Span-15% มีค่าเท่ากับ 0.16 MPa และ ค่ามอดูลัสของความต้านทานการกดอัดของ NR/Span-5% มีค่าเท่ากับ 2.26 MPa เมื่อพิจารณาความสามารถในการคืนตัวกลับหลังจากได้รับการกดอัดพบว่า SBR/Span-15% สามารถคืนตัวกลับได้โดยสมบูรณ์ ในขณะที่ BR/Span-20% และ NR/Span-5% สามารถคืนตัวกลับได้ 89% และ 52% ตามลำดับ จากความสามารถในการคืนตัวกลับได้ส่งผลให้ไฮโดรฟิลิก-ไฮโดรโฟบิก ไฮโดรเจลที่เตรียมได้มีความสามารถในการดูดซึมน้ำเข้าได้ถึงสามรอบโดยที่ยังคงความเสถียรของรูปร่างไฮโดรเจลได้อยู่

5.2 ข้อเสนอแนะ

ไฮโดรเจลที่มีสมบัติร่วมกันระหว่างความเป็นไฮโดรฟิลิกและไฮโดรโฟบิกสามารถนำไปใช้งานได้หลากหลายนอกเหนือจากการดูดซึมน้ำแล้วยังอาจสามารถนำไปใช้ในการแยกสาร (separation) และการควบคุมปลดปล่อยยา (drug releasing) แต่ควรที่จะมีรูปร่างของไฮโดรเจลที่เหมาะสมต่อการใช้งาน ดังนั้นหากมีการนำไปทดสอบในงานจริงอาจมีการปรับรูปร่างซึ่งอาจเป็นแบบทรงกลม หรือเป็นฟิล์มเพื่อให้ง่ายต่อการใช้งานมากขึ้น

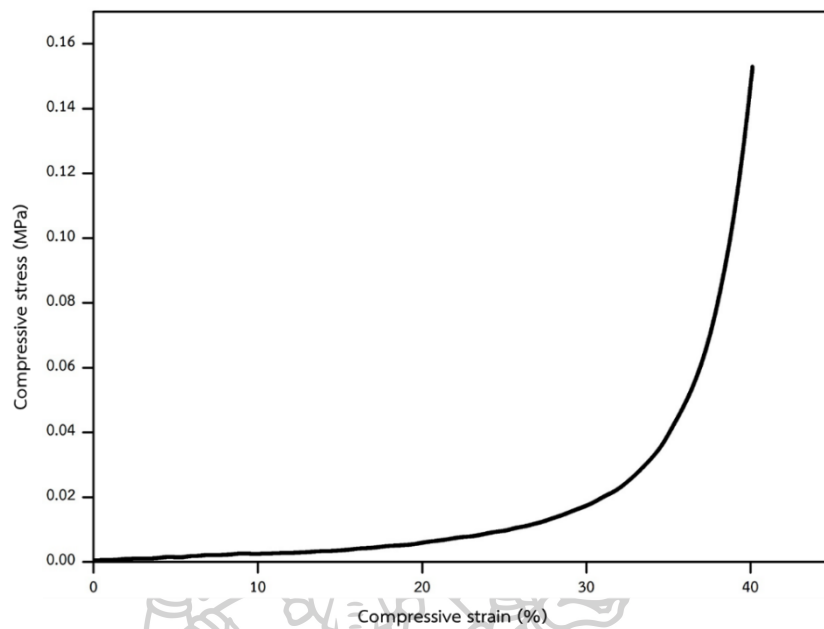




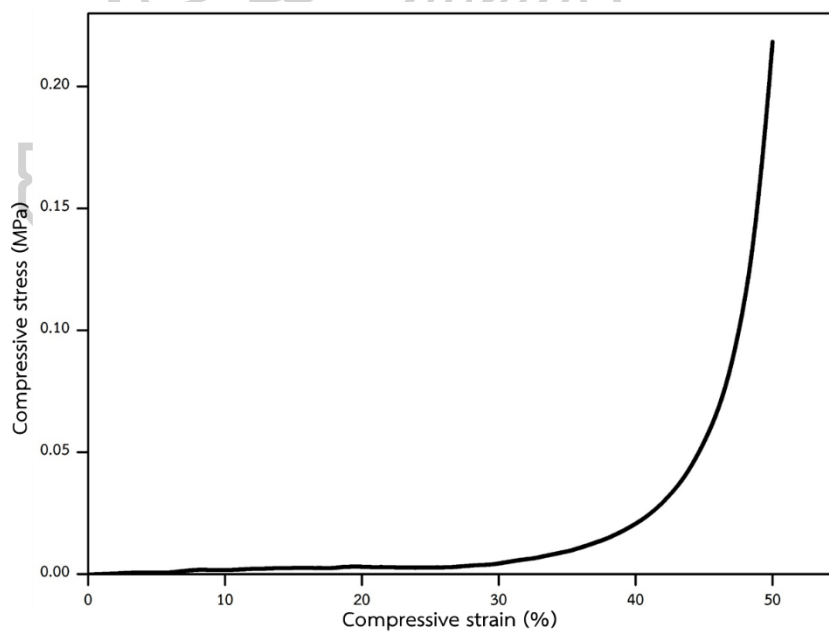


ภาคผนวก ก
ผลการศึกษามัธยมศึกษาของไฮโดรฟอบิกพอลิเมอร์

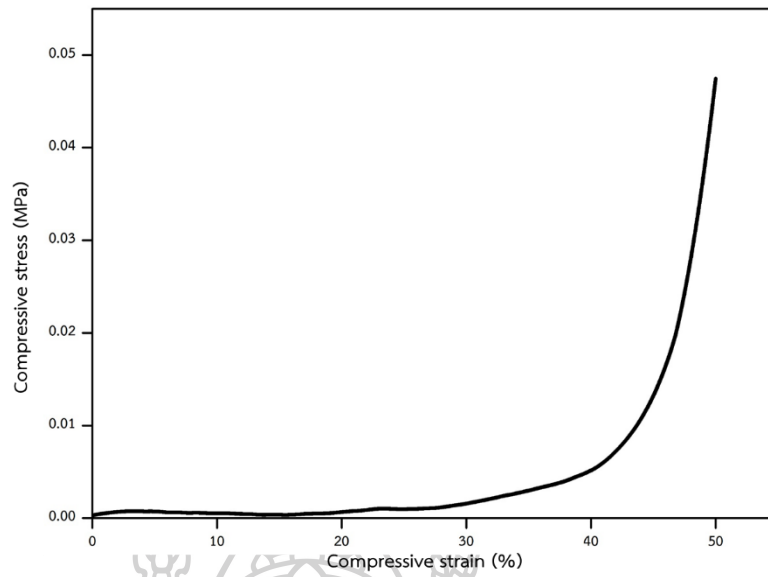
ภาคผนวก ก ผลการศึกษาสมบัติเชิงกลของไฮโดรโฟบิกพอลิเมอร์



รูปผนวก ก.1 กราฟ compressive stress-strain ของ Porous SBR



รูปผนวก ก.2 กราฟ compressive stress-strain ของ Porous BR



รูปผนวก ก.3 กราฟ compressive stress-strain ของ Porous NR



รายการอ้างอิง

- [1] Enas M Ahmed. (2015). "Hydrogel: Preparation, characterization, and applications: A review." **Journal of Advanced Research** 6, 2: 105-121.
- [2] Tao Zhang, Rajashekharayya A Sanguramath, Sima Israel, and Michael S Silverstein. (2019). "Emulsion templating: porous polymers and beyond." **Macromolecules** 52, 15: 5445-5479.
- [3] Jianyu Xu, Xin Liu, Xiuyan Ren, and Guanghui Gao. (2018). "The role of chemical and physical crosslinking in different deformation stages of hybrid hydrogels." **European Polymer Journal** 100, 86-95.
- [4] Michael S Silverstein. (2014). "PolyHIPEs: Recent advances in emulsion-templated porous polymers." **Progress in Polymer Science** 39, 1: 199-234.
- [5] Morteza Bahram, Naimeh Mohseni, and Mehdi Moghtader. (2016). **An introduction to hydrogels and some recent applications**. IntechOpen
- [6] Michael S Silverstein and Neil R Cameron. (2002). "PolyHIPEs—porous polymers from high internal phase emulsions." **Encyclopedia of Polymer science and Technology**
- [7] Wikipedia. **Hydrophilic-lipophilic balance**. เข้าถึงเมื่อ 10 June 2019. เข้าถึงได้จาก https://en.wikipedia.org/wiki/Hydrophilic-lipophilic_balance
- [8] JV Boyd, C Parkinson, and Ph Sherman. (1972). "Factors affecting emulsion stability, and the HLB concept." **Journal of Colloid and Interface Science** 41, 2: 359-370.
- [9] Ronald J Schaefer. (2010). "Mechanical properties of rubber." **Harris' Shock and Vibration Handbook, Sixth edition, A. Piersol, T. Paez (Eds), McGraw-Hill Companies Inc** 33.1-33.188.
- [10] Oscar Vernáez, Sylvie Dageou, Bruno Grassl, and Alejandro J Müller. (2015). "Degradation of styrene butadiene rubber (SBR) in anaerobic conditions." **Polymer Degradation and Stability** 111, 159-168.
- [11] polymerdatabase.com. **SBR - Styrene Butadiene Rubber**. เข้าถึงเมื่อ 15 June 2019. เข้าถึงได้จาก <http://polymerdatabase.com/Elastomers/SBR.html>

- [12] Ranran Zhang, Yun Zhu, Shengmiao Zhang, and Jianding Chen. (Year). Porous Poly (Acrylic Acid) from High Internal Phase Emulsion: Effects of Emulsification Parameters on Porous Structure. in **MATEC Web of Conferences**. EDP Sciences.
- [13] Peter Krajnc, Dejan Štefanec, and Irena Pulko. (2005). "Acrylic acid "reversed" PolyHIPEs." **Macromolecular Rapid Communications** 26, 16: 1289-1293.
- [14] Tamar Gitli and Michael S Silverstein. (2008). "Bicontinuous hydrogel–hydrophobic polymer systems through emulsion templated simultaneous polymerizations." **Soft Matter** 4, 12: 2475-2485.
- [15] Tamar Gitli and Michael S Silverstein. (2011). "Emulsion templated bicontinuous hydrophobic-hydrophilic polymers: loading and release." **Polymer** 52, 1: 107-115.
- [16] Nuttida Srirachya, Kanoktip Boonkerd, Lisa Nakajima, and Takaomi Kobayashi¹. (2018). "Bio-composite hydrogels of cellulose and vulcanized natural rubber with nanointerconnected layers for reinforced water-retaining materials." **Polymer Bulletin** 1-20.
- [17] Ji Sun Choi, Byoung Chul Chun, and Seong Jae Lee. (2003). "Effect of rubber on microcellular structures from high internal phase emulsion polymerization." **Macromolecular Research** 11, 2: 104-109.
- [18] Ling LC Wong, Pedro M Baiz Villafranca, Angelika Menner, and Alexander Bismarck. (2013). "Hierarchical polymerized high internal phase emulsions synthesized from surfactant-stabilized emulsion templates." **Langmuir** 29, 20: 5952-5961.
- [19] A Imhof and DJ Pine. (1997). "Stability of nonaqueous emulsions." **Journal of Colloid and Interface Science** 192, 2: 368-374.
- [20] Paola Posocco, A Perazzo, V Preziosi, Erik Laurini, Sabrina Pricl, and SJRA Guido. (2016). "Interfacial tension of oil/water emulsions with mixed non-ionic surfactants: comparison between experiments and molecular simulations." **RSC Advances** 6, 6: 4723-4729.
- [21] Jerzy Kizling and Bengt Kronberg. (1990). "On the formation and stability of concentrated water-in-oil emulsions, aphrons." **Colloids and Surfaces** 50, 131-140.

- [22] M Todica, R Stefan, CV Pop, and L Olar. (2015). "IR and Raman investigation of some poly (acrylic) acid gels in aqueous and neutralized state." **Acta Physica Polonica A** 128, 1: 128-135.
- [23] AS Orlov, SA Kiselev, EA Kiseleva, AV Budeeva, and VI Mashukov. (2013). "Determination of styrene-butadiene rubber composition by attenuated total internal reflection infrared spectroscopy." **Journal of Applied Spectroscopy** 80, 1: 47-53.
- [24] John L Binder. (1963). "The infrared spectra and structures of polybutadienes." **Journal of Polymer Science Part A: General Papers** 1, 1: 47-58.
- [25] Dongmei Chen, Huafeng Shao, Wei Yao, and Baochen Huang. (2013). "Fourier transform infrared spectral analysis of polyisoprene of a different microstructure." **International Journal of Polymer Science** 2013,
- [26] Yongkang Wang, Umair Azhar, Jinxuan He, Huiying Chen, Jianzhi Zhao, Ai-Min Pang, and Bing Geng. (2019). "A facile fabrication of porous fluoro-polymer with excellent mechanical properties based on high internal phase emulsion templating using PLA as co-stabilizer." **RSC Advances** 9, 69: 40513-40522.
- [27] Michele Mattei, Georgios M Kontogeorgis, and Rafiqul Gani. (2013). "Modeling of the critical micelle concentration (CMC) of nonionic surfactants with an extended group-contribution method." **Industrial & Engineering Chemistry Research** 52, 34: 12236-12246.
- [28] Chan Ik Park, Wan-Gu Cho, and Seong Jae Lee. (2003). "Emulsion stability of cosmetic creams based on water-in-oil high internal phase emulsions." **Korea-Australia Rheology Journal** 15, 3: 125-130.
- [29] Rashmi Mandavi. (2011). "Kinetic studies of some esters and amides in presence of micelles ". (Master's thesis) Department of Chemistry, Pt. Ravishankar Shukla University.
- [30] Kristen Rohm, Ica Manas-Zloczower, and Donald Feke. (2019). "Poly (HIPE) morphology, crosslink density, and mechanical properties influenced by surfactant concentration and composition." **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects** 583, 123913.
- [31] Shang-Hao Liu, Hung-Yi Hou, and Chi-Min Shu. (2015). "Thermal hazard

evaluation of the autocatalytic reaction of benzoyl peroxide using DSC and TAM III." *Thermochimica Acta* 605, 68-76.

- [32] K. Rohm, OhioLINK Electronic Theses, Dissertations Center, and Case Western Reserve University School of Graduate Studies. Chemical Engineering. (2019). **Influence of Emulsion Stability on Poly(HIPE) Morphology and Mechanical Properties**. Case Western Reserve University School of Graduate Studies: 81.
- [33] AN Gent. (1962). "Relaxation processes in vulcanized rubber. I. Relation among stress relaxation, creep, recovery, and hysteresis." *Journal of Applied Polymer Science* 6, 22: 433-441.



ประวัติผู้เขียน

ชื่อ-สกุล	ณัชชา พลอยเอี่ยม
วัน เดือน ปี เกิด	28 เมษายน 2539
สถานที่เกิด	จ. นครสวรรค์
วุฒิการศึกษา	พ.ศ. 2557-2560 วิศวกรรมศาสตร์ (วศ.บ.) ปีโตรเคมีและวัสดุพอลิเมอร์
ที่อยู่ปัจจุบัน	150/1 ม.6 ต. โกรกพระ อ. โกรกพระ จ.นครสวรรค์
ผลงานตีพิมพ์	Natcha Ployeam, Wanchai Lerdwijtjarud Influence of Surfactant on a Preparation of Poly(acrylic acid)/Styrene-Butadiene-Rubber Hybrid Material via High Internal Phase Emulsion Technique Proceeding in Pure and Applied Chemistry International Conference 2020, Bangkok, THAILAND

