



## โครงการการวิจัย GB-A\_61\_022\_23\_03

สำนักงานคณะกรรมการนโยบายวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและนวัตกรรมแห่งชาติ

การพัฒนาพอลิเมอร์ดูดซึมน้ำมากสำหรับพืชผลทางเกษตรและต้านภัยแล้ง

Development of superabsorbent polymer for agricultural crops and drought resistance

รองศาสตราจารย์ ดร. ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ

นางสาว นลพรรณ ดิศพัฒน์

ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์

หัวหน้าโครงการ

นักวิจัยโครงการ

ศาสตราจารย์กิตติคุณ ดร. สุธา เกียรติกำจรวงศ์

สำนักบริหารวิจัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ที่ปรึกษาโครงการ

คณะวิทยาศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2561

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์ เนื่องจากได้รับการสนับสนุน ความร่วมมือ และการเอื้อเฟื้อจากหลายฝ่าย คณะผู้วิจัยขอขอบคุณในการสนับสนุนและความร่วมมือของทุกฝ่ายมา ดังนี้

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และสำนักงานคณะกรรมการนโยบายวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและนวัตกรรมแห่งชาติ (สวทช.) คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบคุณภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ทำวิจัย และเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการ ที่ช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกต่าง ๆ

ขอขอบคุณท่านที่ปรึกษาโครงการวิจัย ศาสตราจารย์กิตติคุณ ดร.สุดา เกียรติกำจรวงศ์ ที่กรุณารับเป็นที่ปรึกษาให้แก่คณะผู้วิจัย รวมทั้งสละเวลาให้คำแนะนำแนวทางการทำวิจัย และชี้แนะการแก้ปัญหาในแต่ละขั้นตอน รวมทั้งให้การสนับสนุนชุดอุปกรณ์สำหรับการทำวิจัย

ขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สีหนาท ประสงค์สุข และสมาชิกจากหน่วยปฏิบัติการวิจัยการใช้ประโยชน์จากชีวมวลพืช ภาควิชาพฤกษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ ที่ให้คำปรึกษาในด้านการทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพ

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ฝ่ายทดสอบ และผู้เกี่ยวข้องทุกท่าน ที่ไม่ได้กล่าวนามไว้ ณ ที่นี้ ที่อำนวยความสะดวก ให้บริการการทดสอบที่ดีเสมอมา ตลอดจนเจ้าหน้าที่ฝ่ายอื่น ๆ สำหรับการประสานงานด้านเอกสารต่าง ๆ คณะผู้วิจัยขอขอบคุณทุกท่านไว้ ณ ที่นี้ด้วย

งานวิจัยฉบับนี้มีประโยชน์อยู่ไม่น้อย จึงขอมอบความดีทั้งหมดให้แก่ บิดา มารดา อาจารย์ผู้วางรากฐานการศึกษา และประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้แก่คณะผู้วิจัย สำหรับข้อบกพร่องต่าง ๆ ที่อาจจะเกิดขึ้น คณะผู้วิจัยขอน้อมรับผิดเพียงแต่ผู้เดียว

คณะผู้วิจัย  
มีนาคม 2562

## บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ ทางคณะวิจัยได้สังเคราะห์พอลิเมอร์ดูดซึมน้ำมากจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปรกราฟต์พอลิโพแทสเซียมอะคริเลต ที่มีความสามารถดูดซึมน้ำได้มาก ยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย และย่อยสลายทางชีวภาพได้ โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

การดัดแปรผิวแป้งมันสำปะหลังด้วยสารดัดแปรซิงก์ออกไซด์/เทตระเอทิลอโทซิลิเกต ผ่านปฏิกิริยาโซล-เจลภายใต้ภาวะที่เป็นกรด ณ อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อเพิ่มความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียให้แก่แป้งมันสำปะหลัง ยืนยันโครงสร้างของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ และนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ของธาตุซิลิกอนในตัวอย่างสถานะของแข็ง วิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรโดยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่เชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์การกระจายสเปกตรัมของธาตุด้วยเอ็กซ์เรย์ และศึกษาองค์ประกอบของสารดัดแปรผิวด้วยเทคนิคเอกซ์เรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี แป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่ใช้สารดัดแปรในสัดส่วนซิงก์ออกไซด์ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และเทตระเอทิลอโทซิลิเกตร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนัก ให้ประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียสูงที่สุด

นำแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่ให้ประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียสูงที่สุดมากราฟต์ด้วยสารตั้งต้นโพแทสเซียมอะคริเลต เพื่อสังเคราะห์พอลิเมอร์ดูดซึมน้ำมากผ่านกระบวนการกราฟต์โคพอลิเมอร์เซชัน วิเคราะห์โครงสร้างของพอลิเมอร์ดูดซึมน้ำมากที่ผ่านการกราฟต์ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี และนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ของธาตุคาร์บอนในตัวอย่างสถานะของแข็ง ศึกษาสมบัติการดูดซึมน้ำ แป้งมันสำปะหลังดัดแปรต่อกรดอะคริโมนอเมอร์ในสัดส่วน 1 ต่อ 3 ให้ค่าการดูดซึมน้ำ  $201 \pm 4 \text{ g g}^{-1}$  ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับพอลิเมอร์ดูดซึมน้ำมากที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังกราฟต์ด้วยสารตั้งต้นโพแทสเซียมอะคริเลตให้ค่าดูดซึมน้ำ  $185 \pm 15 \text{ g g}^{-1}$  แสดงให้เห็นว่า สารดัดแปรบนผิวของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรไม่ได้ขัดขวางการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ดูดซึมน้ำมาก

สุดท้าย นำกราฟต์โคพอลิเมอร์ของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรกราฟต์พอลิโพแทสเซียมอะคริเลตมาทดสอบการย่อยสลายทางชีวภาพด้วยเอนไซม์  $\alpha$ -อะไมเลส ผลการทดสอบที่ได้ยืนยันได้ว่า สารดัดแปรผิวไม่ขัดขวางการย่อยสลายทางชีวภาพของพอลิเมอร์ดูดซึมน้ำมาก

## Abstract

In this research, the superabsorbent polymers (SAP) were synthesized from modified cassava starch by grafting with potassium acrylate monomer in order to enhance the antibacterial property and biodegradation. The research was divided into three parts as follows.

The starch was modified by zinc oxide (ZnO) and tetraethyl orthosilicate (TEOS) via a sol-gel reaction under acidic condition at ambient temperature for 24 h to enhance the antibacterial property of the starch. Fourier transform infrared spectroscopy, X-ray diffraction and  $^{29}\text{Si}$  solid-state nuclear magnetic resonance were used to confirm the structure of the modified starch. The morphology of the modified starch was characterized by scanning electron microscopy. The composition of modifier on starch surface was analyzed using X-ray diffraction and X-ray photoelectron spectroscopy. The modified starch with 5 %wt ZnO and 0.5 %wt TEOS showed the maximum antibacterial activity.

This modified starch with the maximum antibacterial activity was then grafted by potassium acrylate monomer to synthesize modified starch-g-potassium acrylate copolymer via graft copolymerization. The structure of SAP was examined by Fourier transform infrared spectroscopy and  $^{13}\text{C}$  solid-state nuclear magnetic resonance. The modified starch-to-acrylic acid monomer ratio of 1:3 gave the starch graft copolymer that demonstrated high water absorbency ( $201 \pm 4 \text{ g g}^{-1}$ ). This value was similar to that of the neat starch grafted acrylate SAP ( $185 \pm 15 \text{ g g}^{-1}$ ). Accordingly, the modifier on the modified starch surface did not affect the swelling of starch SAP.

Finally, the biodegradation by  $\alpha$ -amylase of modified starch-grafted-potassium acrylate copolymer was investigated. The result indicated that the modifier did not obstruct biodegradation property of SAP.

## สารบัญเรื่อง

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก
บทคัดย่อภาษาไทย	ข
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค
สารบัญเรื่อง	ง
สารบัญตาราง	ช
สารบัญภาพ	ซ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	ญ
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์โครงการ	3
1.3 ขอบเขตการวิจัย	3
1.4 ทฤษฎี สมมุติฐาน และกรอบแนวคิดของโครงการวิจัย	4
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	7
บทที่ 2 วิธีการดำเนินงานวิจัย	8
2.1 วัสดุดิบ สารเคมี และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	8
2.2 การดัดแปรแป้งมันสำปะหลังโดยใช้นาโนซิงก์ออกไซด์ (ZnO)/เททระเอทอกซีไฮดรอกไซด์ (TEOS)	10
2.3 การสังเคราะห์ SAP จากแป้งมันสำปะหลังดัดแปรกราฟต์พอลิอะคริเลต	10
2.4 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของแป้งมันสำปะหลังดัดแปร และ SAP	12
2.5 ศึกษาฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรีย (antibacterial activity) ของแป้งมันสำปะหลังดัดแปร	14
2.6 ทดสอบค่าการดูดซึมน้ำของ SAP	15
2.7 ทดสอบค่าการดูดซึมน้ำภายใต้ภาวะแรงกด (absorbency under load, AUL)	16
1.93 กิโลพาสคัล	
2.8 ศึกษาความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวาง (crosslink density; $\nu$ ) ของ SAP	16
2.9 ศึกษาผลการย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradation) ของ SAP ด้วยเอนไซม์อะไมเลส	17
บทที่ 3 ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง	18
3.1 ผลการดัดแปรแป้งมันสำปะหลังโดยใช้ ZnO/TEOS	18

3.1.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของแป้งมันสำปะหลัง	18
3.1.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบสารของแป้งมันสำปะหลังตัดแปรด้วยเทคนิค TGA	18
3.1.3 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของแป้งมันสำปะหลังตัดแปรโดยเทคนิค FTIR	19
3.1.4 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของแป้งมันสำปะหลังตัดแปรด้วยเทคนิค XRD	20
3.1.5 การวิเคราะห์โครงสร้างของแป้งมันสำปะหลังตัดแปรด้วย <sup>29</sup> Si solid-state NMR	21
3.1.6 ผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาและผิวของแป้งมันสำปะหลังตัดแปร	21
3.1.7 การวิเคราะห์ชนิดพันธะทางเคมีและธาตุองค์ประกอบผิวด้วย XPS	24
3.1.8 ผลการทดสอบฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรีย (antibacterial activity) ของแป้งมันสำปะหลังตัดแปร	27
3.2 ผลการสังเคราะห์ SAP จากแป้งมันสำปะหลังตัดแปรกราฟต์พอลิเมอร์อะคริเลต	28
3.2.1 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของ SAP ด้วยเทคนิค FTIR	28
3.2.2 การวิเคราะห์โครงสร้างของ SAP ด้วย <sup>13</sup> C solid-state NMR	28
3.2.3 ผลของวิธีการสะเทินต่อค่าการดูดซึมน้ำของ SAP	30
3.2.4 ผลของปริมาณสารเชื่อมขวาง (MBA) ต่อค่าการดูดซึมน้ำของ SAP	32
3.2.5 ผลของอัตราส่วนของแป้งมันสำปะหลังต่อกรดอะคริลิกมอนอเมอร์ ต่อค่าการดูดซึมน้ำ และความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวาง (crosslink density; $\nu$ ) ของ SAP	33
3.2.6 ผลของสารละลายเกลือ NaCl 0.9 %w ต่อค่าการดูดซึมน้ำของ SAP	33
3.2.7 ผลของแรงกดต่อค่าการดูดซึมน้ำของ SAP	34
3.2.8 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ SAP ด้วยเทคนิค SEM	34
3.2.9 ผลการย่อยสลายทางชีวภาพของ SAP ด้วยเอนไซม์ $\alpha$ -amylase	36
บทที่ 4 สรุปผลการวิจัย	39
4.1 สรุปผลการทดลอง	39
4.2 ข้อเสนอแนะ	40
4.3 ประโยชน์ในทางประยุกต์ของผลงานวิจัยที่ได้	40
เอกสารอ้างอิง	41
ประวัตินักวิจัย และคณะ	48
หัวหน้าโครงการ	48
นักวิจัย	59



## สารบัญตาราง

		หน้า
ตารางที่ 1.1	ค่าการดูดซึมน้ำของ SAP จากสารตั้งต้นอะคริลาไมด์/อะคริลิกแอซิด	5
ตารางที่ 2.1	อัตราส่วนของสารที่ใช้ในการดัดแปรแป้งมันสำปะหลังด้วย ZnO/TEOS	10
ตารางที่ 2.2	อัตราส่วนขององค์ประกอบต่าง ๆ สำหรับการสังเคราะห์ SAP จากแป้งมันสำปะหลังดัดแปรกราฟต์พอลิอะคริเลต	14
ตารางที่ 3.1	การวัดค่าการกระจายตัวขนาดอนุภาคของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยเทคนิค PSD	23
ตารางที่ 3.2	การวิเคราะห์ปริมาณธาตุชนิดต่าง ๆ ที่เป็นองค์ประกอบของแป้งมันสำปะหลังก่อนและหลังดัดแปรด้วยเทคนิค EDX	24
ตารางที่ 3.3	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบผิวและร้อยละการกราฟต์ของแป้งมันสำปะหลังและแป้งมันสำปะหลังดัดแปร จาก XPS สเปกตรัม	26
ตารางที่ 3.4	ผลการทดสอบความสามารถในการต้านเชื้อแบคทีเรียของแป้งมันสำปะหลังดัดแปร	27
ตารางที่ 3.5	ผลการทดสอบค่าความหนาแน่นการเชื่อมขวาง และการดูดซึมน้ำของ SAP จากแป้งมันสำปะหลังดัดแปรกราฟต์พอลิอะคริเลต	31
ตารางที่ 3.6	ผลการทดสอบการสลายตัวทางชีวภาพของ SAP	37



## สารบัญญภาพ

		หน้า
รูปที่ 1.1	โครงสร้างของสาร organosilanes	3
รูปที่ 1.2	ลักษณะทางกายภาพด้านขนาดและสีก่อนและหลังการดูดซึมน้ำของ SAP	4
รูปที่ 1.3	โครงสร้างของสารที่มีความชอบน้ำ	4
รูปที่ 1.4	โครงสร้างอะไมโลส (amylose) และอะไมโลเพกติน (amylopectin) ที่เป็นโครงสร้างหลักของแป้ง	6
รูปที่ 2.1	ชุดอุปกรณ์สำหรับการสังเคราะห์ SAP	9
รูปที่ 2.2	ปฏิกิริยาในการเตรียม SAP จากแป้งมันสำปะหลังตัดแปรกราฟต์พอลิอะคริเลต	12
รูปที่ 2.3	อุปกรณ์สำหรับทดสอบค่าการดูดซึมน้ำ	15
รูปที่ 2.4	อุปกรณ์สำหรับทดสอบค่าการดูดซึมน้ำภายใต้ภาวะที่มีแรงกด	16
รูปที่ 3.1	เทอร์โมแกรม TGA แป้งมันสำปะหลังตัดแปรโดยใช้ ZnO/TEOS	18
รูปที่ 3.2	อินฟราเรดสเปกตรัมของแป้งมันสำปะหลังตัดแปรโดย ZnO/TEOS	19
รูปที่ 3.3	รูปแบบสัญญาณ XRD ของ (a) แป้งมันสำปะหลัง (b) SiO <sub>2</sub> (c) ZnO และ (d) แป้งมันสำปะหลังตัดแปร	20
รูปที่ 3.4	<sup>29</sup> Si NMR สเปกตรัมของแป้งมันสำปะหลังตัดแปร	21
รูปที่ 3.5	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (a) ZnO (กำลังขยาย 100,000 เท่า) (b) Starch (c) MS-Z1 (d) MS-Z5 (e) MS-Z10 และ (f) MS-Z20 (กำลังขยาย 500 เท่า)	22
รูปที่ 3.6	กราฟการกระจายตัวของ (a) starch (b) MS-Z1 (c) MS-Z5 (d) MS-Z10 (e) MS-Z20	23
รูปที่ 3.7	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่เชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (a) MS-Z1 (b) MS-Z5 (c) MS-Z10 (d) MS-Z20 ผลการ mapping ของธาตุ Si บนผิวของ (a') MS-Z1 (b') MS-Z5 (c') MS-Z10 (d') MS-Z20 และผลการ mapping ของธาตุ Zn บนผิวของ (a'') MS-Z1 (b'') MS-Z5 (c'') MS-Z10 (d'') MS-Z20	24
รูปที่ 3.8	XPS สเปกตรัมแบบ wide scan ของ (a) แป้งมันสำปะหลัง และ (b) แป้งมันสำปะหลังตัดแปร XPS สเปกตรัมของแป้งมันสำปะหลัง (c) C1s และ แป้งมันสำปะหลังตัดแปร (d) C1s (e) Si2p และ (f) Zn2P <sup>3/2</sup>	25
รูปที่ 3.9	ปฏิกิริยาที่นำเสนอในการเตรียมแป้งมันสำปะหลังตัดแปรด้วย ZnO/TEOS	26

รูปที่ 3.10	อินฟราเรดสเปกตรัมของ SAP	29
รูปที่ 3.11	<sup>13</sup> C NMR สเปกตรัมของ (a) แป้งมันสำปะหลัง (b) แป้งมันสำปะหลังตัดแปรร และ SAP ที่เตรียมจาก (c) แป้งมันสำปะหลังกราฟต์พอลิอะคริเลต (d) แป้งมันสำปะหลังตัดแปรรกราฟต์พอลิอะคริเลต และ (e) พอลิอะคริเลต	30
รูปที่ 3.12	กลไกการบวมตัวของ SAP ไม่ที่ผ่านการสะเทิน และผ่านการสะเทิน	32
รูปที่ 3.13	ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยาย 500x ของ SAP (a) No.10 (b) No.11 (c) No.12 (d) No.13 (e) No.14 (f) No.15 (g) No.16 และ (f) SAP-A	36
รูปที่ 3.14	กลไกการย่อยสลายทางชีวภาพของด้วยเอนไซม์ $\alpha$ -amylase ของโครงสร้างแป้งใน SAP (Hamdi & Ponchel, 1999; Li et al., 2011; Van der Maarel et al., 2002)	38

## คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

SAP	Superabsorbent polymer	พอลิเมอร์ดูดซึมน้ำมาก
TEOS	Tetraethoxysilane	เททระเอทอกซีไซเลน
ZnO	Zinc oxide	ซิงก์ออกไซด์
SiO <sub>2</sub>	Silica	ซิลิกา
KOH	Potassium hydroxide	โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์
MBA	<i>N,N'</i> -Methylenebisacrylamide	เอ็น, เอ็น-เมทิลีนบิสอะคริลาไมด์
APS	Ammonium persulfate	แอมโมเนียมเพอร์ซัลเฟต
HCl	Hydrochloric acid	กรดไฮโดรคลอริก
AA	Acrylic acid	กรดอะคริลิก
KA	Potassium acrylate	โพแทสเซียมอะคริเลต
PKA	Poly(potassium acrylate)	พอลิโพแทสเซียมอะคริเลต
St	Cassava starch	แป้งมันสำปะหลัง
MS	Modified starch	แป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วย ZnO/TEOS
WA	Water absorbency in DI water	ค่าการดูดซึมน้ำในน้ำปราศจากไอออน
WA <sub>NaCl</sub>	Water absorbency in NaCl 0.9% w	ค่าการดูดซึมน้ำในสารละลายโซเดียม คลอไรด์ร้อยละ 0.9 โดยน้ำหนัก
WA <sub>UL</sub>	Water absorbency under load	ค่าการดูดซึมน้ำภายใต้ภาวะที่มีแรงกด
<b>v</b>	Crosslink density	ความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวาง
SAP-A	Commercial superabsorbent polymer	พอลิเมอร์ดูดซึมน้ำมากเชิงพาณิชย์

CHN	CHN elemental analysis	วิเคราะห์ปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจนและไนโตรเจน
FTIR	Fourier transform infrared spectroscopy	ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี
TGA	Thermogravimetric analysis	การวิเคราะห์ทางความร้อนด้วยการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก
XRD	X-ray diffraction	การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์
SEM-EDXS	Scanning electron microscopy - energy dispersive x-ray spectroscopy	เทคนิคกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่เชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์การกระจายสเปกตรัมของธาตุด้วยพลังงานของเอ็กซ์เรย์
PSD	Particle size distribution	การกระจายขนาดอนุภาค
NMR	Nuclear magnetic resonance	นิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์
XPS	X-ray photoelectron spectroscopy	เอ็กซ์เรย์โฟโตอิเล็กตรอนสเปกโทรสโกปี

# บทที่ 1

## บทนำ

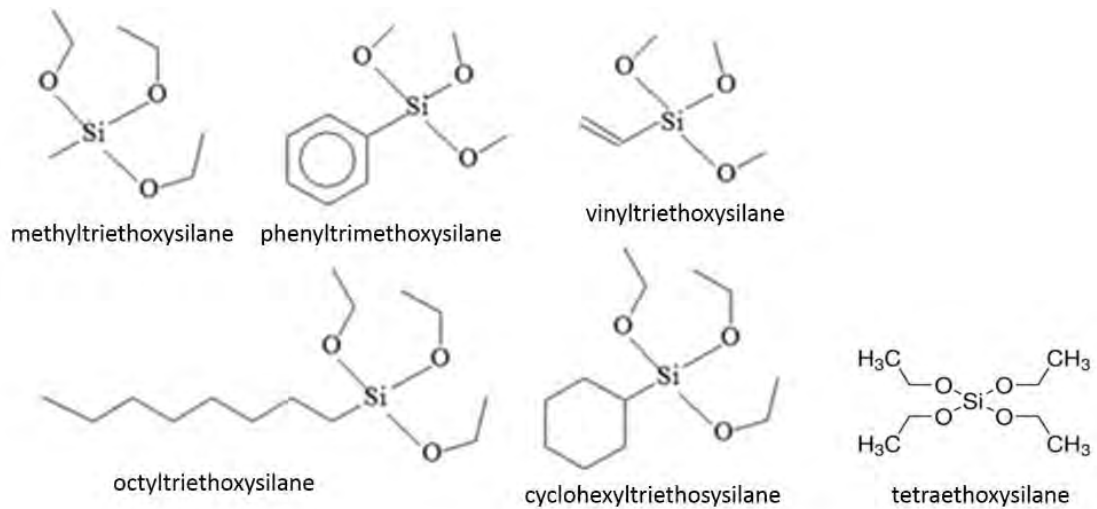
### 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ภาวะภัยแล้งอันเนื่องมาจากสภาพอากาศที่แปรปรวน ส่วนใหญ่เกิดจากฝนแล้งและฝนทิ้งช่วง ปริมาณน้ำฝนน้อยกว่าปกติหรือฝนไม่ตกต้องตามฤดูกาล ส่งผลให้สิ่งแวดล้อมและระบบนิเวศเปลี่ยนแปลงไป ระดับน้ำใต้ดินและปริมาณน้ำในแม่น้ำลำคลองลดลง รวมทั้งปริมาณน้ำในเขื่อนมีไม่เพียงพอต่อความต้องการ หลายทศวรรษที่ผ่านมาประเทศไทยเผชิญกับปัญหาภัยแล้ง มีผลกระทบอย่างยิ่งต่อภาคเกษตรกรรม พื้นดินเพาะปลูกขาดความชุ่มชื้น พืชขาดน้ำ พืชผลที่เก็บเกี่ยวได้มีปริมาณลดลง ส่งผลต่อเนื่องในด้านเศรษฐกิจและอุตสาหกรรม แนวทางการแก้ไขคือ ทำการแจกจ่ายน้ำ มีการอนุญาตให้ขุดเจาะใช้น้ำใต้ดิน โดยวิธีการดังกล่าวเป็นการแก้ไขปัญหาลเฉพาะหน้า ไม่สามารถแก้ไขปัญหาลภัยแล้งในพื้นที่เกษตรกรรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ปัจจุบันมีผลิตภัณฑ์หนึ่งในหลายประเทศสนใจนำมาพัฒนาเพื่อใช้แก้ไขปรับปรุงพื้นดินในภาวะขาดแคลนน้ำอย่างแพร่หลาย คือการใช้พอลิเมอร์ดูดซึมน้ำมาก (superabsorbent polymer: SAP) เป็นตัวควบคุมการกักเก็บและปลดปล่อยน้ำในภาวะภัยแล้ง พอลิเมอร์ประเภทนี้เป็นสารหนึ่งในกลุ่มไฮโดรเจลที่มีลักษณะเป็นโครงร่างตาข่าย เกิดจากการรวมตัวกันของพอลิเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำ เช่น หมู่  $-OH$ ,  $-COOH$ ,  $-CONH-$ ,  $NH_2$ ,  $-SO_3H$  ภายในโครงสร้างของ SAP มีการเชื่อมขวางกันอย่างหลวม ๆ ระหว่างสายโซ่พอลิเมอร์ด้วยพันธะโคเวเลนต์ พันธะไฮโดรเจน หรืออันตรกิริยาระหว่างหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ในสายโซ่ เมื่อโมเลกุลรวมตัวกันและขดตัวอยู่จะทำให้โครงสร้างโดยรวมเกิดเป็นรูพรุนและร่องขนาดเล็ก ๆ จำนวนมาก ทำให้ SAP มีสมบัติในด้าน การดูดซึมน้ำและคายน้ำหรือของเหลวทางชีวภาพ รวมทั้งสามารถกักเก็บของเหลวไว้ภายในรูพรุนและร่องขนาดเล็กได้ (วารุณี ตานันต์ และ สายันต์ แสงสุวรรณ, 2557)

สารตั้งต้นที่นำมาสังเคราะห์ SAP ส่วนใหญ่อยู่ในกลุ่มอะคริลิกแอซิดและอะคริลาไมด์ (Candido et al., 2012; Mignon et al., 2015) เนื่องจากสารกลุ่มนี้มีหมู่ฟังก์ชันที่มีความชอบน้ำสูง ค่าการดูดซึมน้ำของพอลิเมอร์ระหว่างอะคริลิกแอซิดกับอะคริลาไมด์มีค่ากว่า 450 เท่าของพอลิเมอร์แห้ง ซึ่งมีความสามารถเพียงพอต่อการนำไปใช้แก้ไขปัญหาลภาวะภัยแล้งได้ อย่างไรก็ตาม มีปัจจัยหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อการดูดซึมน้ำของ SAP เช่น ชนิดและอัตราส่วนของสารตั้งต้น (Nesrinne and Djamel, 2017) ปริมาณของสารริเริ่มปฏิกิริยา (Li et al., 2004) ความมีขี้วของพอลิเมอร์ (Chen et al., 2004) ความหนาแน่นของการเชื่อมขวาง (Lira et al., 2009) และชนิดของสารเติมแต่ง (Nakason et al., 2010) การเพิ่มความมีขี้วของอะคริลิกแอซิดมอนอเมอร์ให้เกิดเป็นโซ่เดี่ยวหรือโพแทสเซียมอะคริเลตก่อนนำไปสังเคราะห์ SAP จะช่วยเพิ่มค่าการดูดซึมน้ำได้ เนื่องจากเกิดปฏิกิริยาไอออนเนชันในพอลิเมอร์มากขึ้น เมื่อใช้โซ่เดี่ยวอะคริเลตเป็นสารตั้งต้นให้ค่าการดูดซึมน้ำ 650 กรัมต่อกรัมพอลิเมอร์แห้ง ในขณะที่การใช้โพแทสเซียมอะคริเลตเป็นสารตั้งต้นให้ค่าการดูดซึมน้ำเพียงแค่ 420 กรัมต่อกรัมพอลิเมอร์แห้ง (Lu et al., 2003; Sadeghi and Hosseinzadeh, 2008) นอกจากนี้ การเพิ่มปริมาณสารเชื่อมขวางในโครงสร้างของ SAP ส่งผลให้ SAP มีโครงสร้างที่แข็งและเปราะ

มากขึ้น ความยืดหยุ่นลดลงทำให้ยากต่อการย่อยสลายได้เองในธรรมชาติ ดังนั้นการสังเคราะห์ SAP ร่วมกับสารอินทรีย์ธรรมชาติ เช่น ไคโตซาน (chitosan) (Rokhade et al., 2007; Ahmed et al., 2009) เซลลูโลส (cellulose) (Cai and Kim, 2009; Angadi et al., 2010) แอลจีเนต (alginate) (Shi et al., 2006; Mahou and Wandrey, 2010) และแป้ง (starch) (Elvira et al., 2002; Murthy et al., 2006; Reis et al., 2008; Soleimani and Sadeghi, 2012) ถือเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายในธรรมชาติของพอลิเมอร์และมีความเป็นมิตรสิ่งแวดล้อม การนำแป้งมันสำปะหลังซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันชอบน้ำมาสังเคราะห์ SAP จากสารตั้งต้นอะคริลิกแอซิด/อะคริลาไมด์ (Kiatkamjornwong et al., 2000) ช่วยเพิ่มค่าการดูดซึมน้ำได้มากถึง 1,000 เท่าของน้ำหนักพอลิเมอร์แห้ง แต่ด้วยข้อจำกัดของแป้งที่มีความทนต่อแบคทีเรียและจุลินทรีย์ในดินต่ำ ส่งผลให้พอลิเมอร์เกิดการสลายตัวเร็วเกินไป อายุการใช้งานจึงสั้นลงเมื่อเทียบกับพอลิเมอร์ดูดซึมน้ำมากจากสารปิโตรเคมีเพียงชนิดเดียว

ในงานวิจัยนี้ ทางคณะผู้วิจัยต้องการสังเคราะห์ SAP ที่มีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โครงสร้างของ SAP สามารถทนทานต่อแรงกดอัดของพื้นดินได้ดี และย่อยสลายได้ในระยะเวลาที่ต้องการ (ประมาณ 3 ปี) เมื่อเกิดการย่อยสลายแล้วได้ผลิตผลพลอยที่เป็นสารอาหารสำคัญให้แก่พืชได้ต่อไป งานวิจัยนี้ใช้สารตั้งต้นอะคริเลตกราฟต์แป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่มีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย และสามารถเพิ่มความแข็งแรงให้แก่ SAP ได้ จึงสนใจใช้สารออร์แกนอซิลเลนเป็นสารตั้งต้นในการเตรียมสารประกอบซิลิกา (Chaichua et al., 2009; Watcharakul et al., 2011; Poompradub et al., 2014; Theppradit et al., 2014; Sittiphan et al., 2014; Barrera et al., 2016) (แสดงดังรูปที่ 1.1) และเลือกใช้สารออร์แกนอซิลเลนชนิด tetraethyl orthosilicate (TEOS) และซิงก์ออกไซด์ (ZnO) เป็นสารดัดแปรผิวแป้งมันสำปะหลัง ซึ่ง ZnO มีความสามารถในการยับยั้งแบคทีเรีย (antibacterial agent) ได้สูงถึง 99.5% (Hadavand et al., 2015) และไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม (Pullagurala et al., 2018) ในขณะที่โครงสร้างของ TEOS ประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ที่มีความชอบน้ำ และเพิ่มความแข็งแรงให้กับโครงสร้างของ SAP ได้อีกทางหนึ่ง (Qu and He, 2013) ทางคณะผู้วิจัยคาดหวังว่า งานวิจัยชิ้นนี้สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ที่สามารถนำไปแก้ไขปัญหาการปลูกพืชในภาวะภัยแล้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ เนื่องจากเจล SAP เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีประสิทธิภาพในการดูดซึมน้ำสูง ช่วยเพิ่มความชุ่มชื้นในแก่ดิน และเพิ่มอัตราการรอดตาย และส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช



รูปที่ 1.1 โครงสร้างของสารออร์แกโนไซเลน (Barrera et al., 2016)

## 1.2 วัตถุประสงค์โครงการ

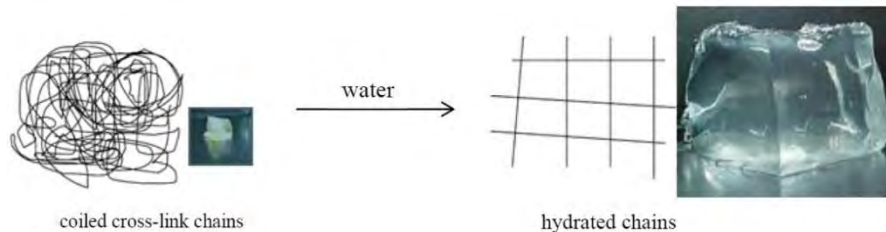
- 1.2.1 ศึกษาการดัดแปรโครงสร้างของแป้งมันสำปะหลัง พืสุจน์เอกลักษณ์และศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแป้งดัดแปรที่ได้
- 1.2.2 สังเคราะห์ SAP จากแป้งมันสำปะหลังดัดแปรกราฟต์พอลิอะคริเลต พืสุจน์เอกลักษณ์ และศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ SAP ที่เตรียมได้
- 1.2.3 ทดสอบสมบัติการดูดซึมน้ำและสมบัติเชิงกลของ SAP ที่เตรียมได้ ตลอดจนทดสอบการสลายตัวทางชีวภาพ

## 1.3 ขอบเขตการวิจัย

- 1.3.1 ดัดแปรแป้งมันสำปะหลังโดยใช้ ZnO/TEOS ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของแป้งมันสำปะหลังต่อ ZnO ต่อ TEOS เท่ากับ 100:20:2, 100:10:1, 100:5:0.5 และ 100:1:0.1
- 1.3.2 พืสุจน์เอกลักษณ์โดยวิเคราะห์ชนิดและจำนวนธาตุองค์ประกอบ วิเคราะห์ชนิดพันธะทางเคมี และศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแป้งมันสำปะหลังดัดแปร
- 1.3.3 หามภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ SAP จากแป้งมันสำปะหลังดัดแปรกราฟต์พอลิอะคริเลต โดยศึกษาผลของการสะเทินของกรดอะคริลิก และผลของอัตราส่วนระหว่างแป้งมันสำปะหลังดัดแปรกับสารตั้งต้นอะคริเลต (2:1 1:1 และ 2:1 โดยน้ำหนัก)
- 1.3.4 พืสุจน์เอกลักษณ์ของ SAP ที่เตรียมได้ด้วยการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันและลักษณะทางสัณฐานวิทยา ทดสอบสมบัติการดูดซึมน้ำของ SAP ที่เตรียมได้ ตลอดจนทดสอบการสลายตัวทางชีวภาพด้วยสารละลายอะไมเลส
- 1.3.5 เปรียบเทียบค่าการดูดซึมน้ำของ SAP ที่เตรียมได้กับ SAP ที่มีขายในเชิงพาณิชย์

## 1.4 ทฤษฎี สมมุติฐาน และกรอบแนวคิดของโครงการวิจัย

SAP คือ พอลิเมอร์เชื่อมขวางและมีโครงร่างตาข่ายสามมิติที่มีการเชื่อมขวางกันอย่างหลวม ๆ (Kiatkamjornwong, 2007) มีความชอบน้ำ สามารถดูดซึม เก็บกักน้ำ และปล่อยน้ำได้อย่างต่ำ 10 เท่าขึ้นไป ของน้ำหนักสารแห้ง โดยยังคงสภาพที่เป็นโครงสร้างสามมิติไว้ได้ (Hoffman, 2012) แสดงดังรูปที่ 1.2 และสามารถปลดปล่อยของเหลวออกมาได้ภายใต้ภาวะที่มีความดันออสโมซิส จึงมีการนำ SAP มาใช้ในงานด้านต่าง ๆ อย่างกว้างขวาง เช่น การเกษตร การกำจัดน้ำเสีย ด้านอนามัยส่วนบุคคล เช่น ผ้าอนามัย ผ้าอ้อมทารก



รูปที่ 1.2 ลักษณะทางกายภาพด้านขนาดและสีก่อนและหลังการดูดซึมน้ำของ SAP (Elliott et al., 2004; Guilherme et al., 2005)



รูปที่ 1.3 โครงสร้างของสารที่มีความชอบน้ำ

โครงร่างของสารไวนิลมอนอเมอร์ที่มีหมู่ฟังก์ชันชอบน้ำที่นิยมนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ SAP แสดงดังรูปที่ 1.3 เช่น อะคริลิกแอซิด อะคริลาไมด์ ((Candido et al., 2012; Mignon et al., 2015) อิทาโคนิกแอซิด 2-ไฮดรอกซีเอทิลเมทาคริเลต (Dobic et al., 2012) เอ็น-ไอโซโพรพิลอะคริลาไมด์ (Dutta and Dhara, 2015) พอลิเอทิลีนไกลคอล (Singh et al., 2009) และพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Khan et al., 2016) ผลของชนิด อัตราส่วนของสารตั้งต้น และปริมาณของสารเชื่อมขวางต่อค่าการดูดซึมน้ำ แสดงในตารางที่ 1.1 (Kazanskii and Dubrovskii, 1992) ค่าการดูดซึมน้ำของ SAP จากสารตั้งต้นของอะคริลิกและอะคริลาไมด์ โดยใช้เอ็น, เอ็น-เมทิลีนบิสอะคริลาไมด์เป็นสารเชื่อมขวางซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันชอบน้ำอยู่ จะเห็นได้ว่าสัดส่วนของอะคริลิกต่ออะคริลาไมด์ วิธีการสังเคราะห์ และปริมาณสารเชื่อมขวางที่เปลี่ยนไปส่งผลต่อค่าการดูดซึมน้ำของ SAP

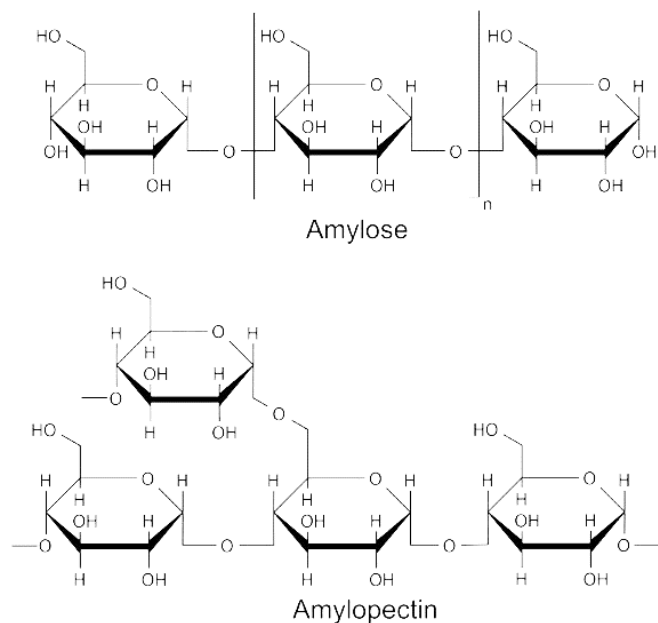


การนำแป้งมันสำปะหลังซึ่งมีหมู่ฟังก์ชันชอบน้ำมาสังเคราะห์ร่วมกับ SAP ฐานปิโตรเลียม เป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับวัตถุดิบจากธรรมชาติ และได้ผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากยิ่งขึ้น เนื่องจากแป้งมันสำปะหลังถือว่าเป็นสินค้าเกษตรกรรมที่มีมากในประเทศไทย มีลักษณะเป็นผงสีขาว เมื่อทำให้สุกจะเหนียวหนืดและใส ภายใต้โครงสร้างที่มีหมู่ไฮดรอกซิลหลายหมู่ ประกอบด้วยโครงสร้างของอะไมโลส (amylose) และอะไมโลเพกติน (amylopectin) (รูปที่ 1.4) พอลิเมอร์ชนิดนี้มีสมบัติในการบวมน้ำ แต่ไม่ละลายน้ำ และสามารถกักเก็บน้ำไว้ในโครงสร้างพอลิเมอร์ ทำให้แป้งสามารถดูดซึมน้ำได้พอสมควร

**ตารางที่ 1.1** ค่าการดูดซึมน้ำของ SAP จากสารตั้งต้นอะคริลาไมด์/อะคริลิกแอซิด (Kazanskii and Dubrovskii, 1992)

Chemicals			Water absorbency, g g <sup>-1</sup>
Acrylamide, %wt	N'-N' methylenebisacrylamide, %wt	Acrylic acid, mol%	
6.7	0.66	-	76
6.7	2.6	-	36
6.7	14.0	-	22
5.0	2.66	-	35
5.0	2.66	2.4 <sup>a</sup>	276
3.0	1.33	-	111
15.0	1.33	-	12, 3
15.0	1.25	40 <sup>b</sup>	100
15.0	2.5	40 <sup>b</sup>	80
10.0	0.01	5.0 <sup>a</sup>	10,000 <sup>c</sup> ; 230 <sup>d</sup>
10.0	0.02	5.0 <sup>a</sup>	6,700 <sup>c</sup> ; 160 <sup>d</sup>
10.0	0.05	5.0 <sup>a</sup>	3,300 <sup>c</sup> ; 57 <sup>d</sup>

<sup>a</sup>copolymerization , <sup>b</sup>hydrolysis, <sup>c</sup>Water absorbency (V V<sup>-1</sup>) in water <sup>d</sup>Water absorbency (V V<sup>-1</sup>) in 0.15 N aqueous NaCl



**รูปที่ 1.4** โครงสร้างอะไมโลส (amylose) และอะไมโลเพกติน (amylopectin) ที่เป็นโครงสร้างหลักของแป้ง

เนื่องจากแป้งเป็นวัสดุธรรมชาติซึ่งสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่ายด้วยกระบวนการเมทาบอลิซึมของแบคทีเรีย ยีสต์ และเห็ด จึงไม่เหมาะสมที่จะนำแป้งมันสำปะหลังมาใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อผลิตเป็นไฮโดรเจลโดยตรงที่ใช้ในทางการแพทย์ เนื่องจากอายุการใช้งานของ SAP มักสั้นลง จึงจำเป็นต้องมีการดัดแปรโครงสร้างของแป้งเพื่อเพิ่มความแข็งแรงและทนทานต่อการย่อยสลายให้เหมาะสมต่ออายุการใช้งาน แป้งดัดแปร (modified starch) สามารถแบ่งกลุ่มตาม Bemiller (1997) เสนอไว้มี 3 รูปแบบ ดังนี้ (<http://digi.library.tu.ac.th/thesis/st/0377/03CHAPTER2.pdf>)

- 1) การดัดแปรทางเคมี (chemical modification) เป็นการเปลี่ยนแปลงสมบัติของแป้ง โดยให้แป้งทำปฏิกิริยากับสารเคมี เช่น
  - การเกิดอนุพันธ์ (derivatization) โดยการแทนที่สารในโมเลกุลเดี่ยวของแป้งหรือการแทนที่โมเลกุลที่มีหมู่ฟังก์ชันมากกว่า 1 หมู่
  - การลดขนาดโมเลกุลแป้งด้วยกรด (acid thinning)
  - การเกิดเดกซ์ทรีโนเซชัน (dextrinization) เป็นการลดขนาดโมเลกุลหรือการเปลี่ยนการจัดเกาะ โดยใช้ความร้อนกับกรด
  - การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) ทำให้เกิดการฟอกสีและลดขนาดโมเลกุลโดยปฏิกิริยาออกซิเดชัน

- 2) การดัดแปรทางกายภาพ (physical modification) เป็นการเปลี่ยนสมบัติของแป้งโดยใช้ความร้อนหรือแรงกล แป้งได้ดังนี้
- การทำให้เกิดเจลาทีไนเซชัน (gelatinization) เป็นการให้ความร้อนจนผ่านขั้นตอนการเกิดเจลาทีไนเซชันแล้วทำให้แห้งทันที ทำให้แป้งชนิดนี้สามารถละลายในน้ำเย็นได้
  - การทำแป้งละลายน้ำเย็น (granular-cold-water-soluble-starch: GCWSS) เป็นการแปรรูป จนได้แป้งที่ละลายในน้ำเย็นโดยไม่ต้องผ่านขั้นตอนการเกิดเจลาทีไนซ์
  - การลดขนาดเม็ดแป้งโดยการบดด้วยลูกบอล (ball milling treatment)
- 3) การดัดแปรทางเทคโนโลยีชีวภาพ (biotechnology modification) เป็นการเปลี่ยนแปลงสมบัติของแป้งโดยใช้การเปลี่ยนแปลงทางพันธุกรรม

นอกจากนี้ การเติมสารเติมแต่งเพื่อเพิ่มอายุการใช้งานและประสิทธิภาพของ SAP เช่น คาร์บอนนาโนทิวบ์ (Hezaveh and Muhamad, 2013) โลหะ และโลหะออกไซด์ (Servant et al., 2013) แร่ดิน (Santiago et al., 2007; Zheng and Wang, 2008; Seetapan et al., 2015) และซิลิกา (Yang et al., 2013) เพื่อเตรียมเป็นซูเปอร์แอบซอร์เบนต์คอมโพสิต (superabsorbent polymer composite, SAPC) สามารถเพิ่มค่าการดูดซึมน้ำ ทนทานต่อสภาพแวดล้อม และยืดอายุการใช้งานให้ยาวนานยิ่งขึ้น สารเติมแต่งกลุ่มนี้ เป็นสารชนิดอนินทรีย์ที่มีโครงสร้างแข็งแรงและมีสมบัติชอบน้ำ สามารถเกิดพันธะทางกายภาพ พันธะทางเคมี และการเชื่อมขวางกับ SAP ได้ ตลอดจนสารเหล่านี้ มีธาตุออกซิเจนเป็นองค์ประกอบหลักทางเคมีซึ่งสามารถเพิ่มอัตราการหายใจของรากพืชได้ดีอีกด้วย ([http://natres.psu.ac.th/Department/Plant Science/510111web/book/book%20content.htm/chapter04/Agri\\_04.htm](http://natres.psu.ac.th/Department/Plant Science/510111web/book/book%20content.htm/chapter04/Agri_04.htm))

### 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

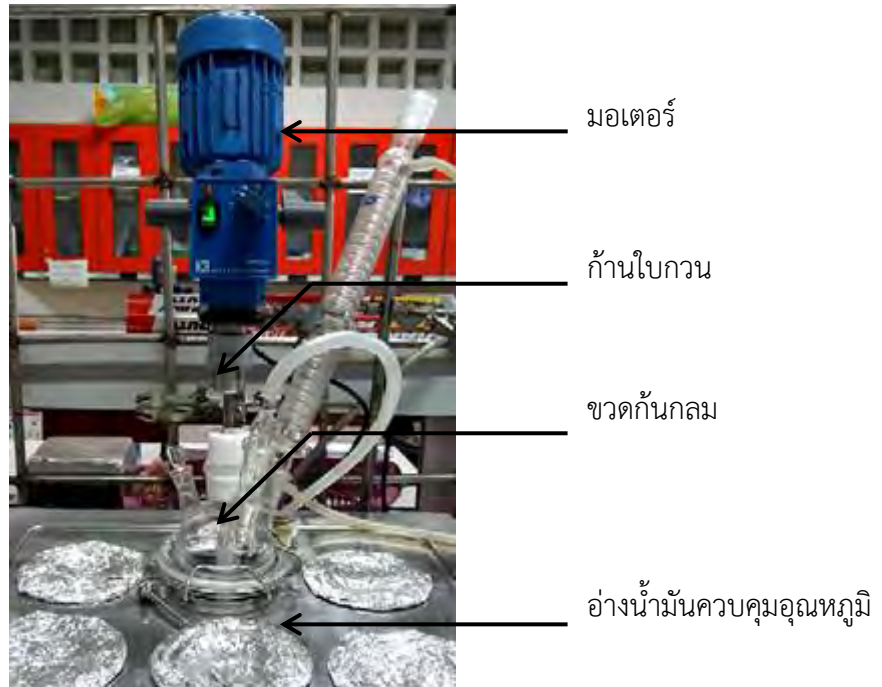
สามารถสังเคราะห์ SAP จากแป้งมันสำปะหลังดัดแปรกราฟต์พอลิเมอร์อะคริเลต ที่สามารถทนทานต่อสภาพแวดล้อมในดินได้ดี ไม่เป็นพิษต่อดินและพันธ์พืชที่ใช้ปลูก มีอายุการใช้งานที่นานตลอดจนสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ดี

## บทที่ 2

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

#### 2.1 วัตถุดิบ สารเคมี และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

- กรดอะคริลิก (acrylic acid monomer) เกรดเชิงพาณิชย์ (99.97%) บริษัท ไทยมิตซูซุสเปเซียลตี เคมีคอล จำกัด ราชอาณาจักรไทย
- โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (potassium hydroxide: KOH) เกรดเชิงวิเคราะห์ บริษัท เอแจ็กซ์ เครีอัฐ ออสเตรเลีย
- เอ็น, เอ็น-เมทิลีนบิสอะคริลาไมด์ (*N, N'* - methylene bisacrylamide: MBA) เกรดเชิงวิเคราะห์ บริษัท ซิกมา-อัลดริช ประเทศสหรัฐอเมริกา
- แอมโมเนียมเพอร์ซัลเฟต (ammonium persulfate: APS) เกรดเชิงวิเคราะห์ บริษัท เอแจ็กซ์ เครีอัฐ ออสเตรเลีย
- แป้งมันสำปะหลัง บริษัท ไทยวา จำกัด (มหาชน) ราชอาณาจักรไทย
- นาโนซิงก์ออกไซด์ (nano-zinc oxide: ZnO) เกรดเชิงพาณิชย์ บริษัท นาโน แมททีเรียลส์ เทคโนโลยี จำกัด ราชอาณาจักรไทย
- เทตระเอทอซิลิไซด์ (tetraethyl orthosilicate: TEOS) เกรดเชิงวิเคราะห์ บริษัท ซิกมา-อัลดริช ประเทศสหรัฐอเมริกา
- ไอโซโพรพานอล (isopropanol) เกรดเชิงวิเคราะห์ บริษัท คิวเร็กซ์ ประเทศนิวซีแลนด์
- เอทานอล (ethanol) เกรดเชิงวิเคราะห์ บริษัท คิวเร็กซ์ ประเทศนิวซีแลนด์
- แอซีโตน (acetone) เกรดเชิงพาณิชย์ บริษัท เซนพอยด์ ราชอาณาจักรไทย
- กรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid, HCl) เกรดเชิงวิเคราะห์ ความเข้มข้นร้อยละ 36 โดยน้ำหนัก จากบริษัท เอแจ็กซ์ เครีอัฐ ออสเตรเลีย
- น้ำปราศจากไอออน (deionized water)
- แก๊สไนโตรเจน ความบริสุทธิ์ 99.99% บริษัท ไทย-เจแปนแก๊ส จำกัด ราชอาณาจักรไทย
- ชุดอุปกรณ์สำหรับการสังเคราะห์ SAP (รูปที่ 2.1)
- ตู้อบลร้อน (FD 115, Binder GmbH & Co. KG, สหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี)
- เครื่องชั่งหยาบ (Mettler PB3002-S, Mettler-Toledo, Inc., สมาพันธรัฐสวิส)
- เครื่องชั่งอย่างละเอียด (Ohaus Adventurer AX224, OHAUS Corporation, ประเทศสหรัฐอเมริกา)
- อุปกรณ์และเครื่องแก้วต่าง ๆ เช่น ปีกเกอร์ กระจกตวง แท่งแก้วคนสาร
- กระดาษกรองเบอร์ 5 บริษัท วอดแมน จำกัด



รูปที่ 2.1 ชุดอุปกรณ์สำหรับการสังเคราะห์ SAP

- อ่างส่งคลื่นความถี่สูง (sonicator bath: S10H, Zealway (Xiamen) Instrument Inc., ประเทศสหรัฐอเมริกา)
- ชุดกรองต่อเครื่องดูดสุญญากาศ (vacuum filtration set: WJ-20, Sibata Scientific Technology Ltd., ประเทศญี่ปุ่น)
- เครื่องกวนผสมสารละลาย (overhead stirrer: RW 20.n, IKA Works, Inc., สหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี)
- เครื่องกวนสารละลาย (magnetic stirrer: C-MAG HS 7, IKA Works, Inc., สหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี)
- เครื่องบดพอลิเมอร์ (Sharp เครื่องปั่นอเนกประสงค์ ขนาด 400 วัตต์ รุ่น EM-ICE, Sharp Corporation, ราชอาณาจักรไทย)
- ตะแกรง (sieve) ขนาด 100 mesh ทำจากแผ่นอะลูมิเนียมซึ่งในกระบอกเหล็กกล้าไร้สนิมทรงกระบอก

## 2.2 การดัดแปรแป้งมันสำปะหลังด้วยนาโนซิงก์ออกไซด์ (ZnO)/เทตระเอทอกซีไซเลน (TEOS)

ตารางที่ 2.1 แสดงอัตราส่วนของสารที่ใช้ในการดัดแปรแป้งมันสำปะหลังโดยซิงก์ออกไซด์ (ZnO) และเทตระเอทอกซีไซเลน (TEOS) นำ ZnO กระจายตัวในไอโซโพรพานอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 17 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ภายใต้อ่างส่งคลื่นความถี่สูง (sonicator bath) เป็นเวลา 15 นาที เติมน้ำ TEOS และผสมต่ออีก 5 นาที นำสารผสมของ ZnO/TEOS ที่ได้ ผสมลงในแป้งมันสำปะหลังที่กระจายตัวอยู่ในไอโซโพรพานอลที่ความเข้มข้นร้อยละ 33 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ตามด้วยกรดไฮโดรคลอริก (ความเข้มข้นร้อยละ 36 โดยน้ำหนัก) ปริมาณร้อยละ 20 โดยปริมาตรต่อน้ำหนักของ ZnO เพื่อเร่งการเกิดปฏิกิริยาไซล-เจล กวนผสมสารต่อไปโดยใช้เครื่องกวนสารแบบแท่งแม่เหล็ก (magnetic stirrer) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง สุดท้ายนำแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่เตรียมได้มาล้างด้วยเอทานอลและน้ำปราศจากไอออน กรอง และอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตัวแปรที่ศึกษาในขั้นตอนนี้คือ อัตราส่วนโดยน้ำหนักของแป้งมันสำปะหลังต่อ ZnO ต่อ TEOS คือ 100:20:2 (MS-Z20), 100:10:1 (MS-Z10), 100:5:0.5 (MS-Z5) และ 100:1:0.1 (MS-Z1) ตามลำดับ โดยให้อัตราส่วนของ TEOS คงตัวที่ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักของ ZnO เพื่อช่วยให้อนุภาค ZnO กระจายตัวบนผิวของแป้งได้ดีและเสถียร

ตารางที่ 2.1 อัตราส่วนของสารที่ใช้ในการดัดแปรแป้งมันสำปะหลัง

Chemicals	Sample code			
	MS-Z20	MS-Z10	MS-Z5	MS-Z1
Cassava starch (g)	100.00	100.00	100.00	100.00
Zinc oxide: ZnO (g)	20.00	10.00	5.00	1.00
Tetraethyl orthosilicate: TEOS (g)	2.00	1.00	0.50	0.10
Isopropanol (cm <sup>3</sup> ) <sup>a</sup>	300.00	300.00	300.00	300.00
Isopropanol (cm <sup>3</sup> ) <sup>b</sup>	120.00	60.00	30.00	6.00
Deionized water (cm <sup>3</sup> ) <sup>c</sup>	100.00	100.00	100.00	100.00
Hydrochloric acid (cm <sup>3</sup> ) <sup>d</sup>	4.00	2.00	1.00	0.20

Remark: MS represented "Modified starch", After "-" was the amount of ZnO for modified starch

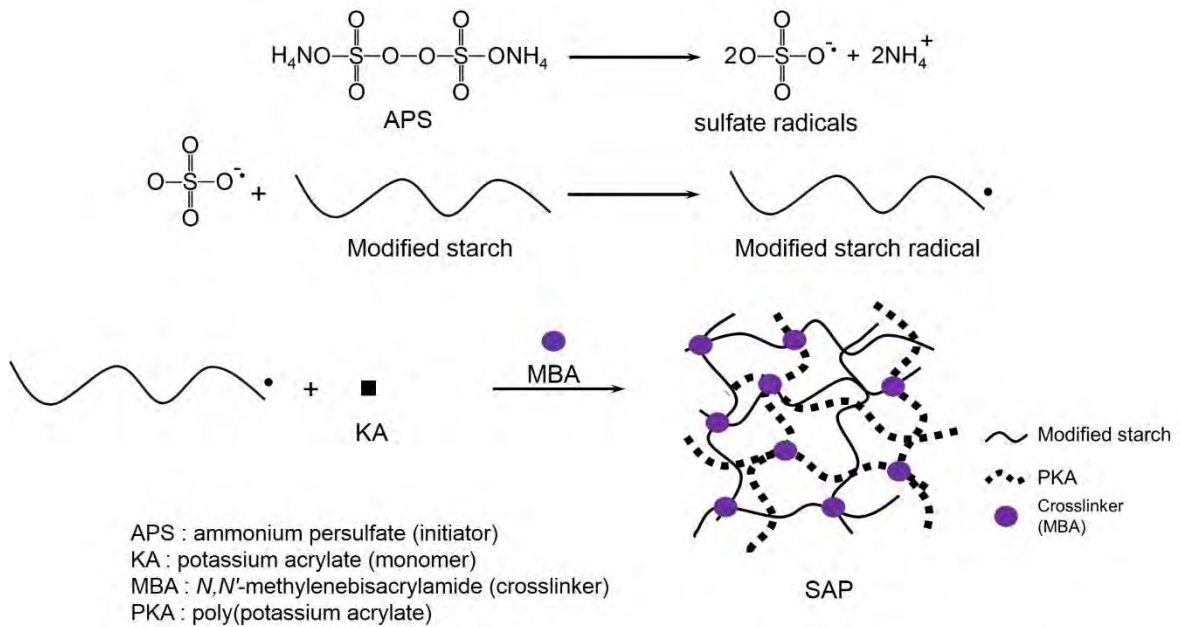
<sup>a</sup>3-fold based on Starch <sup>b</sup>6-fold based on ZnO <sup>c</sup>1-fold based on Starch <sup>d</sup>20 %v/w of ZnO

## 2.3 การสังเคราะห์ SAP จากแป้งมันสำปะหลังตัดแปรรูปกราฟต์พอลิอะคริเลต

ตารางที่ 2.2 แสดงอัตราส่วนขององค์ประกอบต่าง ๆ สำหรับการสังเคราะห์ SAP จากแป้งมันสำปะหลังตัดแปรรูปกราฟต์พอลิเมอร์อะคริเลต (ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักแป้งมันสำปะหลังต่อกรดอะคริลิกมอนอเมอร์เท่ากับ 2:1, 1:1, 1:2 และ 1:3) โดยเริ่มจากทำการเจลาไทไนซ์ (gelatinization) แป้งมันสำปะหลังตัดแปรรูป ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักในน้ำปราศจากไอออน กวนแป้งมันสำปะหลังตัดแปรรูปให้กระจายที่ความเร็วรอบ 140 รอบต่อนาที ในขวดก้นกลม ที่ติดตั้งอยู่กับเครื่องกวนสารละลายในอ่างน้ำมันมีอุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน เป็นเวลา 45 นาที แป้งมันสำปะหลังตัดแปรรูปได้เปลี่ยนรูปเป็นของเหลวหนืด แล้วจึงลดอุณหภูมิลงมาที่ 45 องศาเซลเซียส

เริ่มการสังเคราะห์ SAP โดยให้ความร้อนแก่เจลแป้งมันสำปะหลังตัดแปรรูปอีกครั้งจนอุณหภูมิคงตัวที่ 65 องศาเซลเซียส เติมตัวริเริ่มปฏิกิริยาแอมโมเนียมเพอร์ซัลเฟต (APS) ร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนักของแป้งมันสำปะหลังตัดแปรรูป กวนผสมต่อไปอีก 10 นาที เติมสารละลายมอนอเมอร์ที่เตรียมจากกรดอะคริลิกมอนอเมอร์ ความเข้มข้นร้อยละ 25 โดยปริมาตรในน้ำปราศจากไอออน ผ่านการสะเทิน (neutralization) ด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ร้อยละ 75 โดยโมลของกรดอะคริลิกมอนอเมอร์ และสารเชื่อมขวาง เอ็น, เอ็น'-เมทิลีนบิสอะคริลาไมด์ (MBA) (ร้อยละ 0.05, 0.10, 0.30 และ 0.50 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ รวมของกรดอะคริลิกมอนอเมอร์กับแป้งมันสำปะหลัง) กวนผสมที่ความเร็วรอบ 250 รอบต่อนาที สังเกตการดำเนินไปของปฏิกิริยาจนกระทั่งเกิดเป็นเจล นำเจลของ SAP ที่สังเคราะห์ได้ไปตกตะกอนด้วยเอซีโตนจนกระทั่งผลิตภัณฑ์ที่ได้เปลี่ยนเป็นของแข็ง ตัด SAP เป็นชิ้นเล็ก ๆ ประมาณ 0.5 – 1 เซนติเมตร นำไปอบที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส จนกระทั่งน้ำหนักของ SAP คงตัว บดเม็ดพอลิเมอร์ที่ผ่านการอบแห้งให้มีขนาดเล็กลง โดยใช้เครื่องบด ปฏิกิริยาการเตรียม SAP จากแป้งมันสำปะหลังตัดแปรรูปกราฟต์พอลิเมอร์อะคริเลต แสดงในรูปที่ 2.2

นอกจากนี้ได้เปรียบเทียบผลของวิธีการสะเทินกรดอะคริลิกมอนอเมอร์ก่อนหรือหลังการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันต่อค่าการดูดซึมน้ำของ SAP โดยกระบวนการสะเทินกรดอะคริลิกมอนอเมอร์ก่อนการทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน คือการสะเทินกรดอะคริลิกมอนอเมอร์ด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เพื่อให้ได้โพแทสเซียมอะคริเลต ก่อนนำสารละลายนี้ไปสังเคราะห์ SAP ส่วนกระบวนการสะเทินหลังเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน คือการนำเจล SAP ที่ผ่านการพอลิเมอไรซ์แล้วมาแช่ในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1 โมลาร์ เรียกกระบวนการนี้ว่า การเกิดสะพอนิฟิเคชัน (saponification) ของพอลิเมอร์



รูปที่ 2.2 ปฏิกิริยาในการเตรียม SAP ของแป้งมันสำปะหลังตัดแปรรูปกราฟต์พอลิเมอร์อะคริเลต

## 2.4 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของแป้งมันสำปะหลังตัดแปรรูป และ SAP

วิเคราะห์ปริมาณธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน ที่เป็นองค์ประกอบของแป้งมันสำปะหลังด้วยเทคนิค CHN elemental analysis (CHN analyzer; PerkinElmer รุ่น 2499 Series II ประเทศสหรัฐอเมริกา) ซึ่งแป้งมันสำปะหลังปริมาณ 5-6 มิลลิกรัม ในภาชนะปิด วิเคราะห์ที่อุณหภูมิ 1000 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศแก๊สฮีเลียม เกิดไพโรไลซิส (pyrolysis) แก๊สผสมถูกแยกโดยผ่านคอลัมน์และเข้าสู่ตัวตรวจวัดแก๊ส

ทดสอบปริมาณอะไมโลส (amylose) ในโครงสร้างของแป้งมันสำปะหลังด้วยวิธีทดสอบตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม แป้งข้าวเหนียว มาตรฐานเลขที่ มอก. 639-2529

วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของแป้งมันสำปะหลังตัดแปรรูปและ SAP ด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR); PerkinElmer รุ่น Spectrum One) โดยบดตัวอย่างกับ KBr ที่อบแห้งสนิท วิเคราะห์ที่ความละเอียด (resolution) 4 เซนติเมตร<sup>-1</sup> จำนวน 64 สแกน

วิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบสารของแป้งมันสำปะหลังตัดแปรรูปโดยอาศัยสมบัติทางความร้อน (Thermogravimetric analysis (TGA); NETZSCH รุ่น TG 209 F3 Tarsus สหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี) ซึ่งสารตัวอย่างประมาณ 12 มิลลิกรัม บรรจุใส่ภาชนะอลูมิเนียม ทดสอบที่อุณหภูมิตั้งแต่ 35 ถึง 900 องศาเซลเซียส อัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน



วิเคราะห์โครงสร้างของแป้งดัดแปรด้วยเทคนิค X-ray diffraction (XRD; Bruker AXS Inc., Germany รุ่น Model D8 Advance สหพันธ์สาธารณรัฐเยอรมนี) ใช้รังสี  $\text{CuK}\alpha$  ความต่างศักย์ 40 กิโลโวลต์ กระแสไฟฟ้า 40 มิลลิแอมแปร์ ความยาวคลื่น 0.15406 นาโนเมตร ที่ลำดับการเลี้ยวเบน ( $n$ ) เท่ากับ 1 วิเคราะห์มุมในช่วง 5 ถึง 40 องศา และอัตราการตรวจวัด 1.2 องศาต่อนาที

ศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่เชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์การกระจายสเปกตรัมของธาตุด้วยพลังงานรังสีเอกซ์ (scanning electron microscopy - energy dispersive x-ray spectroscopy (SEM-EDX); JEOL รุ่น JSM-6480LV และ Oxford รุ่น 7573 ประเทศญี่ปุ่น) การวิเคราะห์  $\text{ZnO}$  ใช้ความต่างศักย์ 10 กิโลโวลต์ กำลังขยาย 100,000 เท่า ในขณะที่การวิเคราะห์แป้งมันสำปะหลังก่อนและหลังการดัดแปรใช้ความต่างศักย์ 15 กิโลโวลต์ กำลังขยาย 500 เท่า

วัดการกระจายตัวของขนาดอนุภาคแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยเครื่อง Laser particle size distribution analyzer (PSD; Malvern Panalytical รุ่น Mastersizer 3000 สหราชอาณาจักร) โดยอาศัยหลักการกระเจิงของแสงเลเซอร์ (laser light scattering) ส่องผ่านไปยังอนุภาคสารแขวนลอยที่อยู่ในตัวกลางที่เป็นของเหลวมีความโปร่งใส และมีค่าดัชนีหักเหแตกต่างจากอนุภาค ซึ่งแป้งมันสำปะหลังดัดแปร (ค่าดัชนีหักเห 1.50) 1 กรัม กระจายอนุภาคในน้ำ (ค่าดัชนีหักเห 1.33) กวนสารแขวนลอยตลอดช่วงเวลากการวัด

วิเคราะห์โครงสร้างของแป้งมันสำปะหลังดัดแปร และ SAP ด้วยเทคนิคนิวเคลียร์แมกเนติกเรโซแนนซ์ (solid state  $^{29}\text{Si}$  NMR,  $^{13}\text{C}$  NMR spectrometer, Bruker AVANCE III HD (Ascend 400 WB, ประเทศสหรัฐอเมริกา)) บรรจุตัวอย่างลงในหลอดทดสอบ วัดสัญญาณ free induction decay (FID) ที่เกิดจากการคายพลังงานจากนิวเคลียสของธาตุ  $^{29}\text{Si}$  และ  $^{13}\text{C}$  ที่ภาวะกระตุ้นด้วยความถี่คลื่นวิทยุ 79.49 และ 100.64 เมกะเฮิร์ตซ์ ตามลำดับ

วิเคราะห์ชนิดพันธะทางเคมี และปริมาณธาตุองค์ประกอบบนผิวแป้งมันสำปะหลังดัดแปรลึกลงไปประมาณ 5 นาโนเมตร ด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีของอนุภาคอิเล็กตรอนที่ถูกปลดปล่อยด้วยเทคนิครังสีเอกซ์ (X-ray photoelectron spectroscopy: XPS; Kratos รุ่น Axis ultra DLD สหราชอาณาจักร) ภายใต้ความดัน  $10^{-7}$  พาสคัล โดยใช้  $\text{AlK}\alpha$  เป็นแหล่งกำเนิดรังสีเอกซ์ (100 วัตต์)

ตารางที่ 2.2 อัตราส่วนขององค์ประกอบต่าง ๆ สำหรับการสังเคราะห์ SAP จากแป้งมันสำปะหลังดัดแปร กราฟต์พอลิเมอร์อะคริเลต

No.	St <sup>a</sup> (g)	MS <sup>b</sup> (g)	AA <sup>c</sup> (g)	KOH <sup>d</sup> (% mol AA)	MBA <sup>e</sup> (% w)	APS <sup>f</sup> (% w)
1	15	-	15	-	0.05	0.15
2	15	-	15	spon <sup>g</sup>	0.05	0.15
3	15	-	15	75	0.05	0.15
4	15	-	15	75	0.10	0.15
5	15	-	15	75	0.30	0.15
6	15	-	15	75	0.50	0.15
7	20	-	10	75	0.10	0.15
8	10	-	20	75	0.10	0.15
9	7	-	21	75	0.10	0.15
10	-	20	10	75	0.10	0.15
11	-	15	15	75	0.10	0.15
12	-	10	20	75	0.10	0.15
13	-	7	21	75	0.10	0.15
14	-	7	21	75	0.10	0.15
15	-	7	21	75	0.10	0.15
16	-	-	30	75	0.10	0.15

<sup>a</sup>Starch (10 %w) <sup>b</sup>Modified starch (10 %w) <sup>c</sup>Acrylic acid <sup>d</sup>Potassium hydroxide <sup>e</sup>N,N'-Methylenebisacrylamide (% total weight of Starch and AA) <sup>f</sup>Ammonium persulfate (% weight of starch) <sup>g</sup>Saponification

**Remark:** No.1 – 13 were for the gelatinized starch concentration of 10 %w, No.14 was for the gelatinized starch concentration of 5 %w and No.15 was for the gelatinized starch concentration of 20 %w

## 2.5 การศึกษาฤทธิ์การต้านเชื้อแบคทีเรีย (antibacterial activity) ของแป้งมันสำปะหลังดัดแปร

ทดสอบความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแป้งมันสำปะหลังดัดแปร ตามมาตรฐาน ASTM E2149: standard test method for determining the antimicrobial activity of immobilized antimicrobial agents under dynamic contact conditions เลือกศึกษาฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรีย 2 ชนิดคือ แบคทีเรียแกรมบวกชนิด *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*, ATCC 6538) และแบคทีเรียแกรมลบชนิด *Escherichia coli* (*E. coli*, ATCC 25922) มีวิธีการทดสอบดังนี้

เตรียมสารแขวนลอยเชื้อแบคทีเรียสำหรับทดสอบในสารละลายบัฟเฟอร์ 0.3 mM KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> ซึ่งจำนวนเชื้อทดสอบตั้งต้นประมาณ 1.5 - 3.0 × 10<sup>5</sup> โคโลนีต่อมิลลิลิตร (CFU/ml) ปริมาณ 50 ± 0.5 มิลลิลิตร ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมสารตัวอย่าง (แป้งมันสำปะหลังตัดแปร) 1.0 ± 0.1 กรัม ลงในขวดรูปชมพู่ และเขย่าสารแขวนลอยในขวดรูปชมพู่ด้วยความถี่ 100 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 37 ± 0.5°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ± 5 นาที หลังจากนั้น เจือจางสารแขวนลอยที่ได้มีความเข้มข้นลดลงเป็นลำดับครั้งละ 10 เท่า (serial dilution) ถ่ายเชื้อลงสู่จานอาหารเลี้ยงเชื้อในจานเพาะเชื้อ (Petri dish) เกลี่ยให้ทั่วจานอาหาร บ่มจานเพาะเชื้อไว้ในตู้บ่มเพาะเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนับจำนวนโคโลนีของเชื้อแบคทีเรียหลังการทดสอบ คำนวณร้อยละการลดลง ของเชื้อแบคทีเรีย (reduction (%)) ในสารตัวอย่าง ดังสมการที่ (2.1)

$$reduction (\%) = \frac{B-A}{B} \times 100 \quad (2.1)$$

โดย A คือ ค่าเฉลี่ยจำนวนโคโลนีในสารตัวอย่างที่เวลาทดสอบ 1 ชั่วโมง หน่วยโคโลนีต่อมิลลิลิตร  
B คือ ค่าเฉลี่ยจำนวนโคโลนีในสารควบคุมที่เวลาทดสอบ 1 ชั่วโมง หน่วยโคโลนีต่อมิลลิลิตร

## 2.6 การทดสอบค่าการดูดซึมน้ำของ SAP

ชั่ง SAP ที่สังเคราะห์ได้ 0.1 กรัม ใส่ในบีกเกอร์บรรจุน้ำปราศจากไอออน ปริมาตร 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร ตั้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้ SAP บวมน้ำเต็มที่ จนถึงจุดสมดุล กรองโดยใช้ตะแกรงสแตนเลสขนาด 100 เมช (mesh) ซึ่งในทรงกระบอก ตั้งไว้เป็นเวลา 2 ชั่วโมง (รูปที่ 2.4) นำ SAP ที่ได้ไปชั่งน้ำหนัก และคำนวณหาค่าการดูดซึมน้ำ ดังสมการที่ (2.2)

$$\text{ค่าการดูดซึมน้ำ (g g}^{-1}\text{)} = \frac{\text{น้ำหนักพอลิเมอร์หลังการดูดซึมน้ำ - น้ำหนักพอลิเมอร์แห้ง}}{\text{น้ำหนักพอลิเมอร์แห้ง}} \quad (2.2)$$

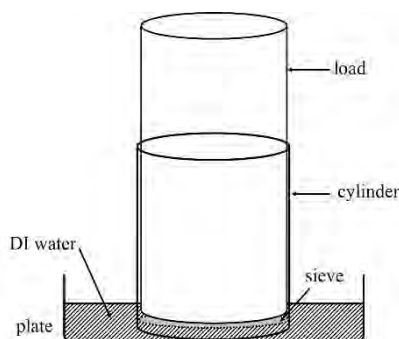


รูปที่ 2.3 อุปกรณ์สำหรับทดสอบค่าการดูดซึมน้ำ

นอกจากนี้ได้ทดสอบความสามารถในการดูดซึมของ SAP ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 0.9 โดยน้ำหนัก ทดสอบตามวิธีและคำนวณค่าการดูดซึมน้ำตามวิธีข้างต้น โดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ร้อยละ 0.9 โดยน้ำหนัก แทนน้ำปราศจากไอออน

## 2.7 การทดสอบค่าการดูดซึมน้ำภายใต้แรงกด (water absorbency under load, $WA_{UL}$ ) 1.93 kPa

ชั่ง SAP 0.16 กรัม กระจายพอลิเมอร์บนแผ่นตะแกรงรูขนาด 100 เมช ที่ซึ่งในทรงกระบอก สแตนเลสมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 1 นิ้ว แล้ววางตุ้มน้ำหนัก (1.93 กิโลพาสคัล) กดทับบนพอลิเมอร์ จึงนำไปวางใน ถาดที่เติมน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 2.4 คำนวณหาค่าการดูดซึมน้ำจากสมการที่ (2.2)



รูปที่ 2.4 อุปกรณ์สำหรับทดสอบค่าการดูดซึมน้ำภายใต้แรงกด

## 2.8 การศึกษาความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวาง (crosslink density; $\nu$ ) ของ SAP

การหาค่าความหนาแน่นของ SAP ( $\rho_s$ ) โดยใช้ขวดพิกโนมิเตอร์ขนาดปริมาตร 50 ลูกบาศก์ เซนติเมตร เติมหีสเปทลงในขวดพิกโนมิเตอร์ที่แห้งจนเต็มขวด ปิดฝาให้สนิท เช็ดขวดให้แห้ง และชั่งน้ำหนัก ( $w_p$ ) เทเฮสปเทนออก ล้างขวดพิกโนมิเตอร์ให้สะอาดและทำให้แห้ง บรรจุ SAP ลงในขวดประมาณ 2 กรัม บันทึกน้ำหนัก SAP ที่แน่นอน ( $w_s$ ) และเติมหีสเปทจนเต็มขวดอีกครั้ง ปิดฝาให้สนิทและชั่งน้ำหนัก ( $w_h$ ) และ นำค่าที่ได้มาคำนวณหาความหนาแน่น ตามสมการที่ (2.3) โดยเฮสปเทนมีค่าความหนาแน่น 0.6838 กรัมต่อ ลูกบาศก์เซนติเมตร

$$\rho_s = \frac{w_s \times 0.6838}{w_s + w_p - w_h} \quad (2.3)$$

การหาค่าน้ำหนักของน้ำในพอลิเมอร์ที่บวมน้ำ ( $w_l$ ) ชั่ง SAP 0.10 กรัม บันทึกน้ำหนัก SAP ที่แน่นอน ( $w_1$ ) นำ SAP ใส่ในบีกเกอร์ที่บรรจุน้ำปราศจากไอออน ปริมาตร 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร ตั้งไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้ SAP บวมน้ำเต็มที่ กรองโดยใช้ตะแกรงสแตนเลสขนาด 100 เมช (mesh) ตั้งไว้เป็นเวลาอีก 2 ชั่วโมง นำเจล SAP บวมน้ำเต็มที่ไปชั่งน้ำหนัก ( $w_2$ ) และคำนวณหาน้ำหนักของน้ำในพอลิเมอร์ที่บวมน้ำ ดังสมการที่ (2.4)

$$w_l = w_2 - w_1 \quad (2.4)$$

นำค่า  $\rho_s$  และ  $w_1$  มาคำนวณหาความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวาง ( $v$ ) ตามสมการของ Flory and Rehner ดังสมการที่ (2.5)

$$v = -\frac{1}{2V_w} \frac{\ln(1-v_r)+v_r+\chi v_r^2}{v_r^{1/3}-v_r/2} \quad (2.5)$$

โดย  $v_r = (w_1/\rho_s)/[(w_1/\rho_s)+(w_1/\rho_w)]$

$\rho_s$  = ความหนาแน่นของ SAP แห่ง

$\rho_w$  = ความหนาแน่นของน้ำ

$V_w$  = ปริมาตรต่อโมลของน้ำ (18.062 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อโมล)

$\chi$  = ค่าพารามิเตอร์แห่งการละลายระหว่างพอลิเมอร์กับน้ำ (solubility parameter)

$$\chi = \frac{1}{2} + \frac{v_r}{3} \quad (\text{Xue et al., 2001; Tomar et al., 2007})$$

## 2.9 การศึกษาการย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradation) ของ SAP ด้วยเอนไซม์อะไมเลส

ชั่ง SAP 0.05 กรัม แช่ในน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 20 ลูกบาศก์เซนติเมตร เติมสารละลายเอนไซม์อะไมเลส (ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยปริมาตร) ปริมาณ 2 ลูกบาศก์เซนติเมตร พร้อมทั้งเขย่าสารผสมเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 40 °C ด้วยเครื่อง incubator shaker เมื่อครบกำหนดเวลานำของเหลวที่ได้ไปทดสอบหาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (reducing sugar) โดยใช้สารละลายเบเนดิกต์ (Benedict's solution) และทดสอบปริมาณแป้งที่คงเหลือ ด้วยสารละลายไอโอดีน เปรียบเทียบกับตัวควบคุม (control) โดยใช้เจล SAP แช่ในน้ำปราศจากไอออนแทนสารละลายเอนไซม์อะไมเลส

### บทที่ 3

#### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

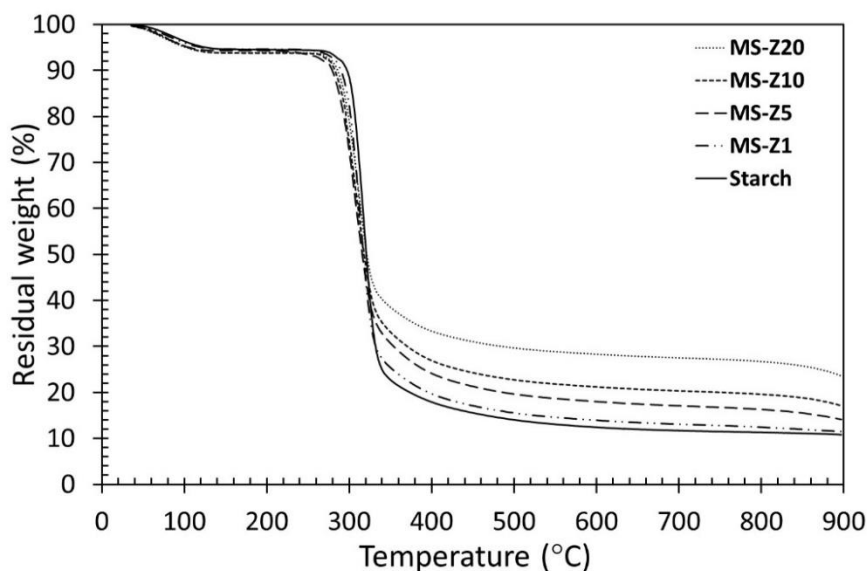
##### 3.1 ผลการดัดแปรแป้งมันสำปะหลังโดยใช้ ZnO/TEOS

###### 3.1.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบของแป้งมันสำปะหลัง

การวิเคราะห์องค์ประกอบของแป้งมันสำปะหลังด้วยเทคนิค CHN พบว่า แป้งมันสำปะหลังประกอบด้วยอะตอมของธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจนร้อยละ 42.06, 7.35, 0.06 โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ การทดสอบตามมาตรฐาน มอก. 639-2529 พบว่าแป้งมันสำปะหลังมีปริมาณอะไมโลส (amylose) ร้อยละ 32.97 โดยน้ำหนัก

###### 3.1.2 ผลการวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบสารของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยเทคนิค TGA

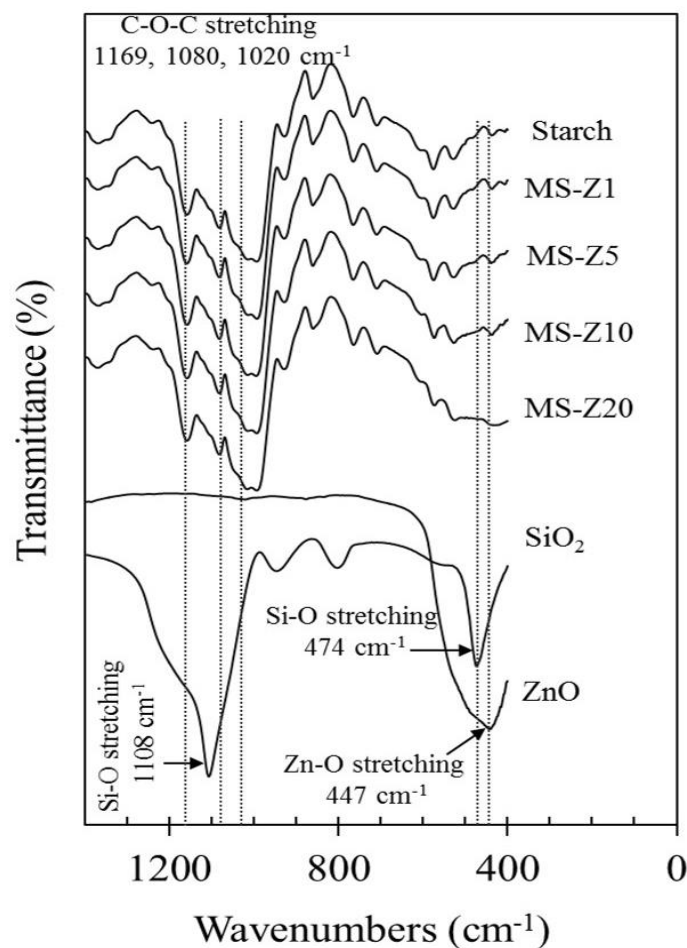
รูปที่ 3.1 แสดงเทอร์โมแกรมของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยเทคนิค TGA พบว่าแป้งมันสำปะหลังก่อนและหลังการดัดแปรแสดงการสลายตัว 2 ช่วง โดยช่วงแรกที่อุณหภูมิ 60 – 100 °C แสดงการระเหยของความชื้นในแป้งมันสำปะหลัง ในปริมาณร้อยละ 5 – 6 ช่วงที่สองที่อุณหภูมิ 280 – 340 °C เป็นช่วงการสลายตัวของแป้งมันสำปะหลัง (Qiao et al., 2016) โดยแป้งมันสำปะหลังก่อนการดัดแปรสลายตัวไปร้อยละ 85 โดยน้ำหนัก ส่วนน้ำหนักที่คงเหลือคือเถ้า ร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ในขณะที่การสลายตัวของแป้งมันสำปะหลังดัดแปร (MS-Z1 MS-Z5 MS-Z10 และ MS-Z20) มีปริมาณของสารคงเหลือเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณสารดัดแปรเพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำหนักที่คงเหลือแสดงถึงปริมาณของเป็นสารอนินทรีย์คงเหลือในสารดัดแปร



รูปที่ 3.1 เทอร์โมแกรม TGA แป้งมันสำปะหลังดัดแปรโดยใช้ ZnO/TEOS

### 3.1.3 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรโดยเทคนิค FTIR

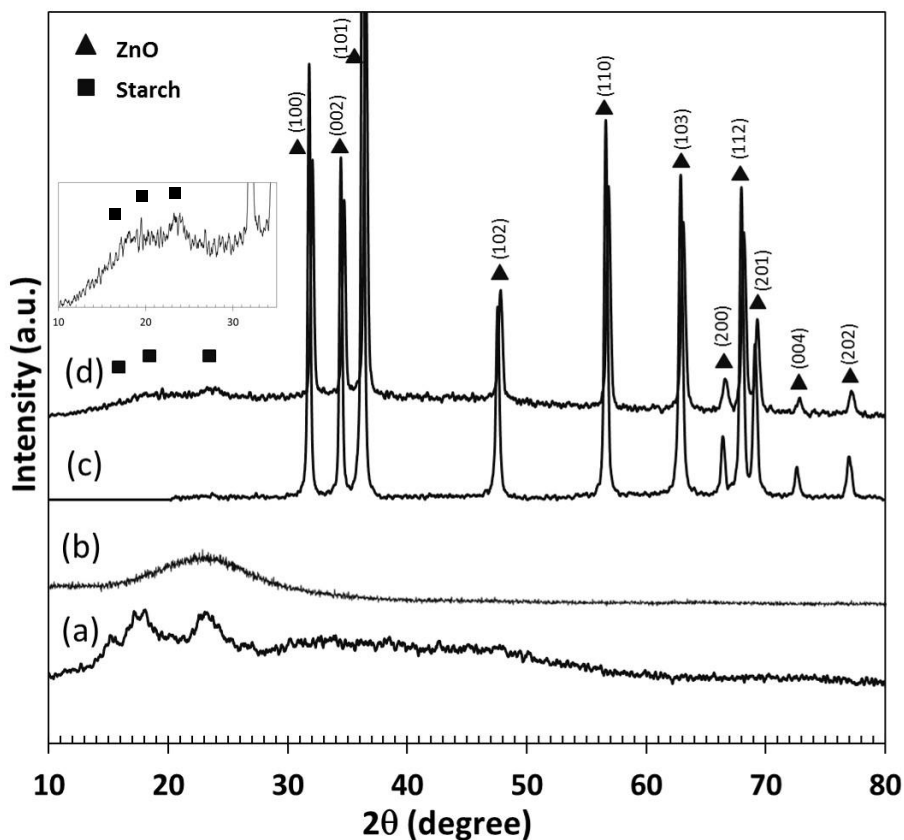
รูปที่ 3.2 แสดงผลการวิเคราะห์อินฟราเรดสเปกตรัมของแป้งมันสำปะหลังก่อนและหลังดัดแปรโดยเทคนิค FTIR พบสเปกตรัมที่แสดงโครงสร้างของแป้งมันสำปะหลังที่ตำแหน่งเลขคลื่นประมาณ 3500-3200  $\text{cm}^{-1}$  แสดงถึง O-H stretching vibration พีกที่ตำแหน่ง 2930 และ 2880  $\text{cm}^{-1}$  แสดงถึง C-H stretching ของหมู่  $\text{CH}_2$  และที่ตำแหน่งเลขคลื่นประมาณ 1160, 1080 และ 1020  $\text{cm}^{-1}$  แสดงลักษณะพีกแบบทริปเลต (triplet peak) ซึ่งเป็นเอกลักษณ์ของ C-O stretching vibration ในหมู่ฟังก์ชัน C-O-C (Zou et al., 2012) ในขณะที่แป้งมันสำปะหลังการดัดแปรยังคงแสดงตำแหน่งสัญญาณของแป้งมันสำปะหลัง ดังที่กล่าวมาแล้วข้างต้น แต่พบพีกของ Zn-O stretching vibration ที่ตำแหน่งเลขคลื่นประมาณ 447  $\text{cm}^{-1}$  (Bai et al., 2011) ซึ่งพีกที่ตำแหน่งนี้ มีพื้นที่ใต้พีกเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของสารดัดแปรเพิ่มขึ้น ส่วนสัญญาณการดูดกลืนคลื่นของ Si-O stretching ที่ตำแหน่ง 1108  $\text{cm}^{-1}$  พบในสเปกตรัมของแป้งมันสำปะหลังดัดแปร ซึ่งซ้อนทับกับพีกของ C-O-C stretching ในโครงสร้างของแป้งมันสำปะหลังดัดแปร แม้ว่าสารดัดแปรผิว TEOS ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์  $\text{SiO}_2$  ใช้ในปริมาณน้อยมากก็ตามเมื่อเทียบกับ ZnO



รูปที่ 3.2 อินฟราเรดสเปกตรัมของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรโดย ZnO/TEOS เมื่อเทียบกับสารตั้งต้น

### 3.1.4 ผลการวิเคราะห์โครงสร้างของแป้งมันสำปะหลังตัดแปรด้วยเทคนิค XRD

รูปที่ 3.3 แสดงรูปแบบสัญญาณ XRD ของแป้งมันสำปะหลังก่อนและหลังตัดแปร รวมทั้งสารอ้างอิง  $\text{SiO}_2$  และ ZnO พบว่าแป้งมันสำปะหลังปรากฏพีกที่ตำแหน่ง  $2\theta$  มีค่า  $15^\circ$ ,  $17^\circ$ ,  $18^\circ$  และ  $23^\circ$  แสดงโครงสร้างกึ่งผลึก (semi-crystalline) ของแป้งมันสำปะหลัง (Kaewtatip and Tanrattanakul, 2008) ในขณะที่พีกของสารอ้างอิง  $\text{SiO}_2$  มีลักษณะกว้าง (broad peaks) ปรากฏสัญญาณในช่วง  $15^\circ \leq 2\theta \leq 30^\circ$  แสดงว่า  $\text{SiO}_2$  มีโครงสร้างผลึกแบบอสัณฐาน (amorphous) (Chen et al., 2017) โดยตำแหน่งสูงสุดของพีกอยู่ที่  $2\theta$  มีค่า  $23^\circ$  สัญญาณอ้างอิง ZnO ปรากฏบริเวณ  $30^\circ \leq 2\theta \leq 80^\circ$  แสดงลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ hexagonal wurtzite (Ansari et al., 2012) รูปแบบสัญญาณของแป้งมันสำปะหลังตัดแปรพบรูปแบบพีกของ ZnO ปรากฏร่วมกับพีกที่มีลักษณะกว้าง 2 พีก ที่ตำแหน่ง  $2\theta$  มีค่า  $18^\circ$  และ  $23^\circ$  (รูปแทรกในรูปที่ 3.3) ทั้งนี้เนื่องจากเกิดการซ้อนทับกันของพีกแป้งมันสำปะหลังกับ  $\text{SiO}_2$  แต่อย่างไรก็ตามผลการทดลองที่ได้ยังไม่สามารถสรุปได้ว่า  $\text{SiO}_2$  ปรากฏอยู่ในโครงสร้างของแป้งมันสำปะหลังตัดแปรหรือไม่ ผู้วิจัยจึงทำการยืนยันด้วยเทคนิคอื่นต่อไป

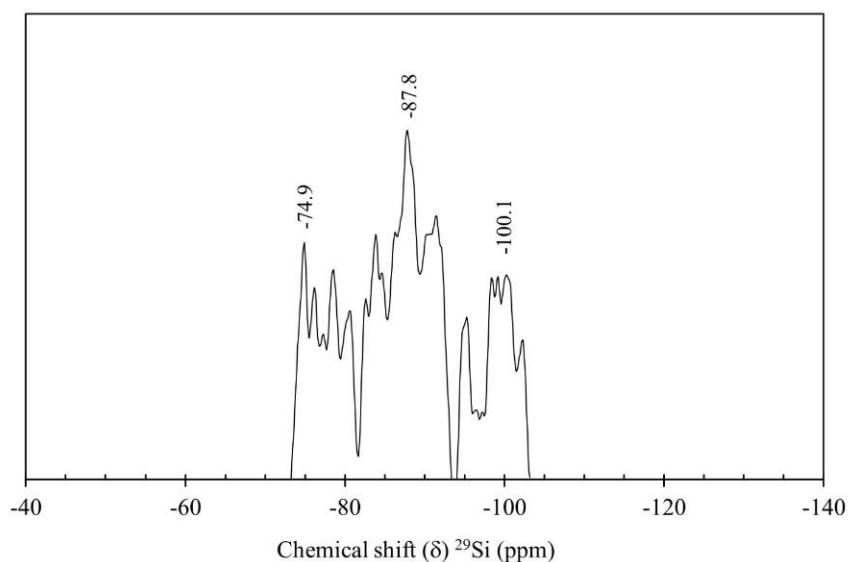


รูปที่ 3.3 รูปแบบสัญญาณ XRD ของ (a) แป้งมันสำปะหลัง (b)  $\text{SiO}_2$  (c) ZnO และ (d) แป้งมันสำปะหลังตัดแปร



### 3.1.5 การวิเคราะห์โครงสร้างของแป้งมันสำปะหลังตัดแปรด้วย $^{29}\text{Si}$ solid-state NMR

รูปที่ 3.4 แสดง  $^{29}\text{Si}$  NMR สเปกตรัมของแป้งมันสำปะหลังตัดแปรที่ตำแหน่ง -74.9 -87.8 และ -100.1 ppm ซึ่งโดยปกติ  $^{29}\text{Si}$  NMR สเปกตรัมของ silanol groups จะตรวจพบได้ 3 พีค ที่ตำแหน่ง -90 (Q2) -100 (Q3) และ -110 ppm (Q4) บ่งบอกถึงลักษณะของหมู่ silanol ที่เกิดการแทนที่ด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) จำนวน 2 หมู่ (HO-Si-OH) 1 หมู่ (HO-Si-O(Si)) และไม่มีหมู่ไฮดรอกซิลเลย ((Si)O-Si-O(Si)) ตามลำดับ แต่เมื่อแป้งมันสำปะหลังผ่านการตัดแปรด้วย  $\text{ZnO}/\text{SiO}_2$  แล้ว  $^{29}\text{Si}$  NMR สเปกตรัมเกิดการ shift มาทางด้าน down field มากขึ้น แสดงถึง Si เกิดอิทธิพลการบดบังจากสารโดยรอบมากขึ้น เนื่องจากมุมบิดระหว่างพันธะที่เปลี่ยนแปลงไปจากการแทนที่ของอะตอมอื่นในหมู่ silanol (Si-O-Si) (Kotecha et al., 2006) นอกจากนี้ สเปกตรัมมีลักษณะเป็นพีคฐานกว้างและมีไหล่พีค เนื่องจากเกิดการทับซ้อนกันของพีคจากองค์ประกอบหลายชนิด ทั้งหมู่ silanol ปกติ และการเกิดพันธะของ Si-O กับอะตอมอื่นในหลายรูปแบบ (Susanna et al., 2015) จึงเป็นไปได้ว่า Si สร้างพันธะกับผิวของแป้งและ ZnO ซึ่งทำการพิสูจน์ในวิธีอื่นต่อไป

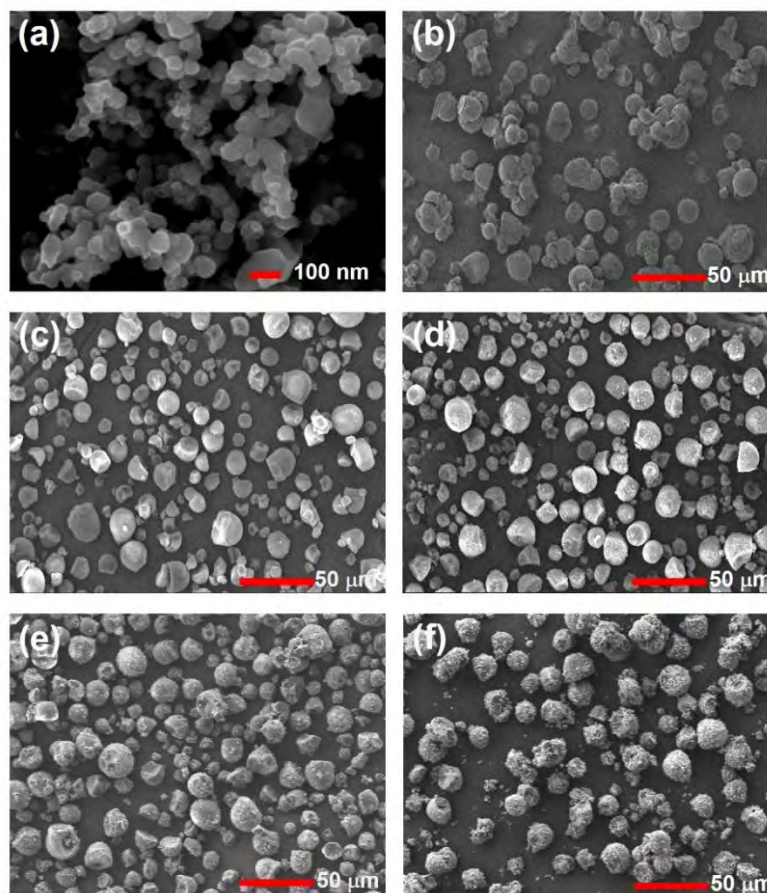


รูปที่ 3.4  $^{29}\text{Si}$  NMR สเปกตรัมของแป้งมันสำปะหลังตัดแปร

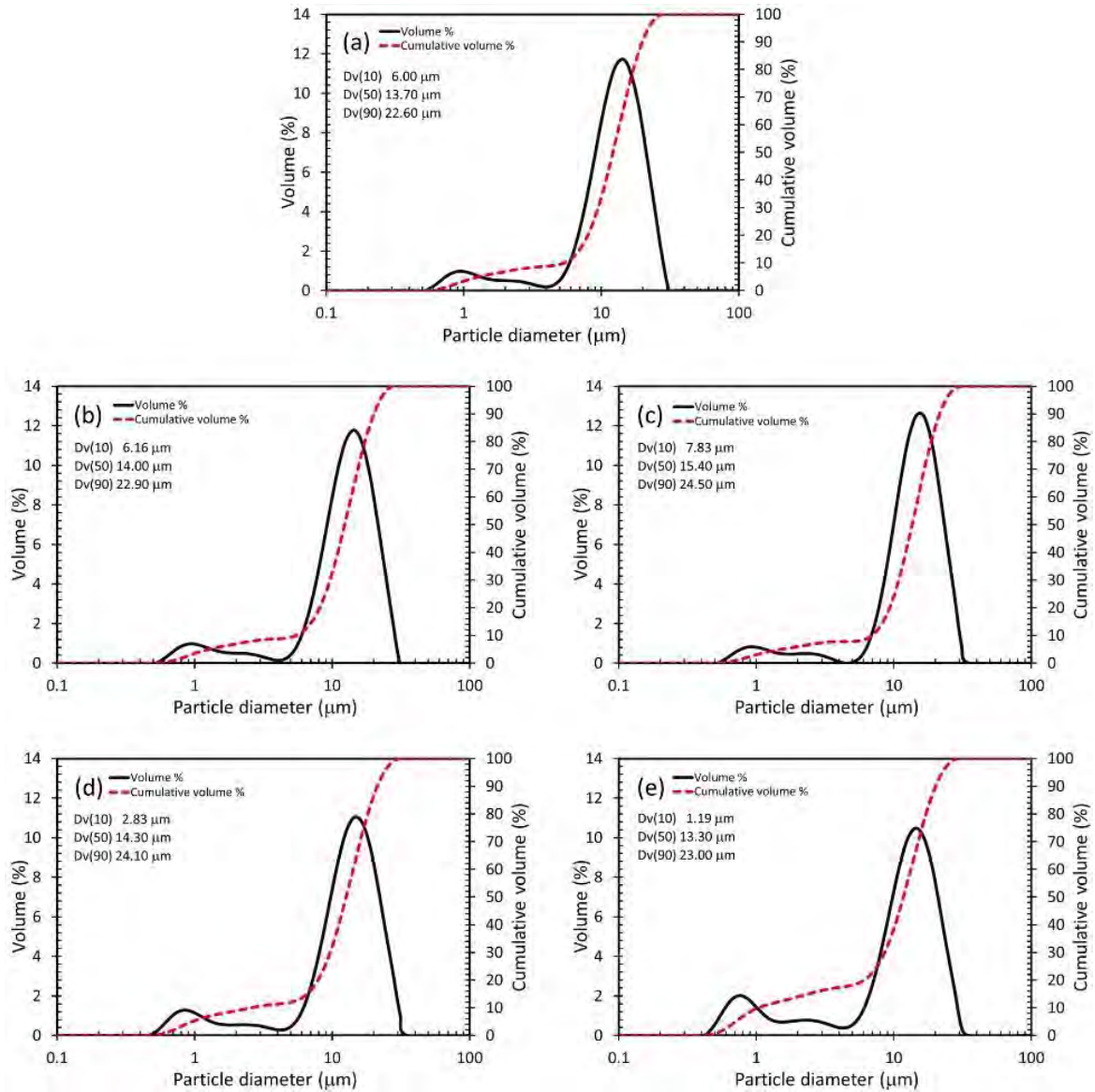
### 3.1.6 ผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาและผิวของแป้งมันสำปะหลังตัดแปร

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาขององค์ประกอบต่าง ๆ ในแป้งมันสำปะหลังก่อนและหลังการตัดแปรวิเคราะห์ด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด แสดงดังรูปที่ 3.5 พบว่า ZnO (อั้งอิง) มีโครงสร้างผลึกแบบ hexagonal ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้จากเทคนิค XRD ขนาดอนุภาคของ ZnO ประมาณ 20 - 40 นาโนเมตร อนุภาค ZnO ส่วนใหญ่มีการเกาะกลุ่มกันเป็นก้อน (รูปที่ 3.5(a)) แป้งมันสำปะหลังมีลักษณะทางสัณฐานวิทยาเป็นทรงกลม ผิวเรียบ และมีรอยบุ๋ม ขนาดอนุภาคเฉลี่ย

ประมาณ 6-23 ไมโครเมตร เมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแป้งมันสำปะหลังตัดแปร พบว่ามีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกับแป้งมันสำปะหลังก่อนการตัดแปร (ตารางที่ 3.1) แต่ผิวมีความขรุขระเพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากการมีอนุภาคของ ZnO และ SiO<sub>2</sub> เกาะอยู่บริเวณผิวของเม็ดแป้งมันสำปะหลัง และความขรุขระบนผิวเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของสารตัดแปรเพิ่มขึ้น ผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ปริมาณองค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิค EDXS ที่แสดงให้เห็นว่า ปริมาณของธาตุ Zn เพิ่มขึ้น โดยสัดส่วนของธาตุ Si เกือบคงตัว ดังแสดงในตารางที่ 3.2 นอกจากนี้การวิเคราะห์การกระจายตัวของธาตุนบนผิวของแป้งมันสำปะหลังตัดแปรโดยเทคนิค EDX (รูปที่ 3.6) แสดงการกระจายตัวของอะตอม Zn และ Si บนผิวของแป้งมันสำปะหลัง เกิดขึ้นได้ดีในทุก ๆ อัตราส่วนของสารตัดแปร การกระจายตัวของ Zn มีความหนาแน่นมากกว่า Si ตามอัตราส่วนของสารตัดแปรที่ใช้



รูปที่ 3.5 ภาพถ่ายจากเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (a) ZnO (กำลังขยาย 100,000 เท่า) (b) Starch (c) MS-Z1 (d) MS-Z5 (e) MS-Z10 และ (f) MS-Z20 (กำลังขยาย 500 เท่า)



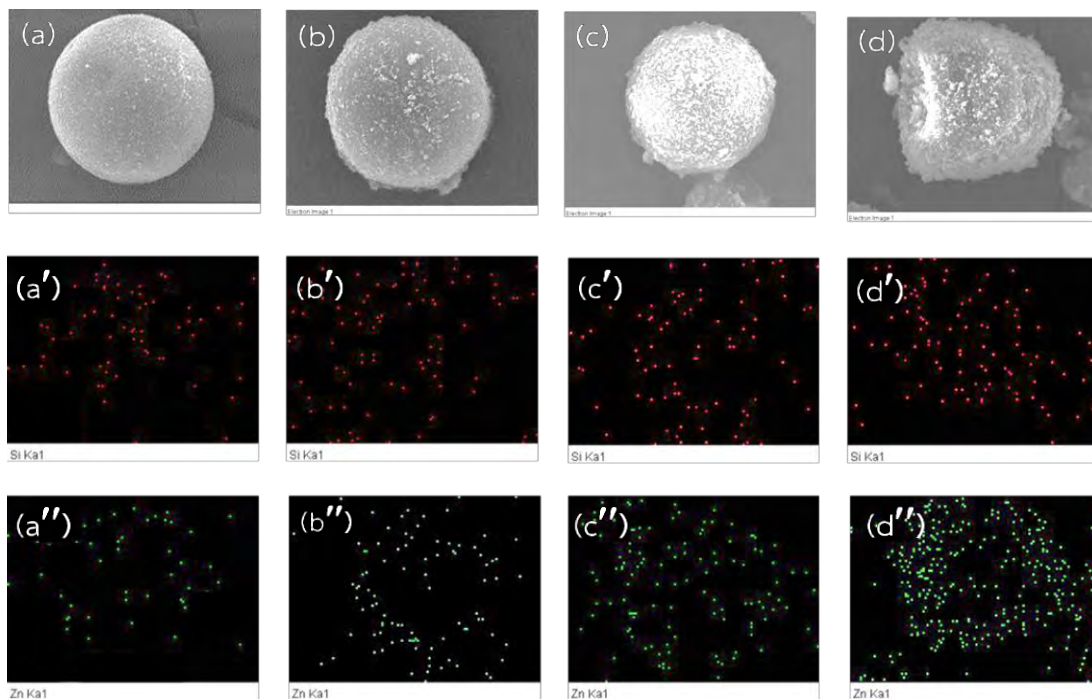
รูปที่ 3.6 กราฟการกระจายตัวของ (a) Starch (b) MS-Z1 (c) MS-Z5 (d) MS-Z10 (e) MS-Z20

ตารางที่ 3.1 การวัดค่าการกระจายตัวขนาดอนุภาคของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยเทคนิค PSD

Volume density	Particle size				
	Starch (μm)	MS-Z1 (μm)	MS-Z5 (μm)	MS-Z10 (μm)	MS-Z20 (μm)
Dv(10)	6.00	6.16	7.83	2.89	1.19
Dv(50)	13.70	14.00	15.40	14.30	13.30
Dv(90)	22.60	22.90	24.5	24.10	23.00

ตารางที่ 3.2 ปริมาณธาตุชนิดที่เป็นองค์ประกอบของแป้งมันสำปะหลังก่อนและหลังการตัดแปรรีโเคราะห์ด้วยเทคนิค EDX

Element (w/w)	Starch	MS-Z1	MS-Z5	MS-Z10	MS-Z20
C	53.73	44.59	41.50	58.14	53.29
O	46.27	53.74	55.88	28.16	27.13
Si	-	0.31	0.26	0.23	0.32
Zn	-	1.36	2.36	13.47	19.26
Totals	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00



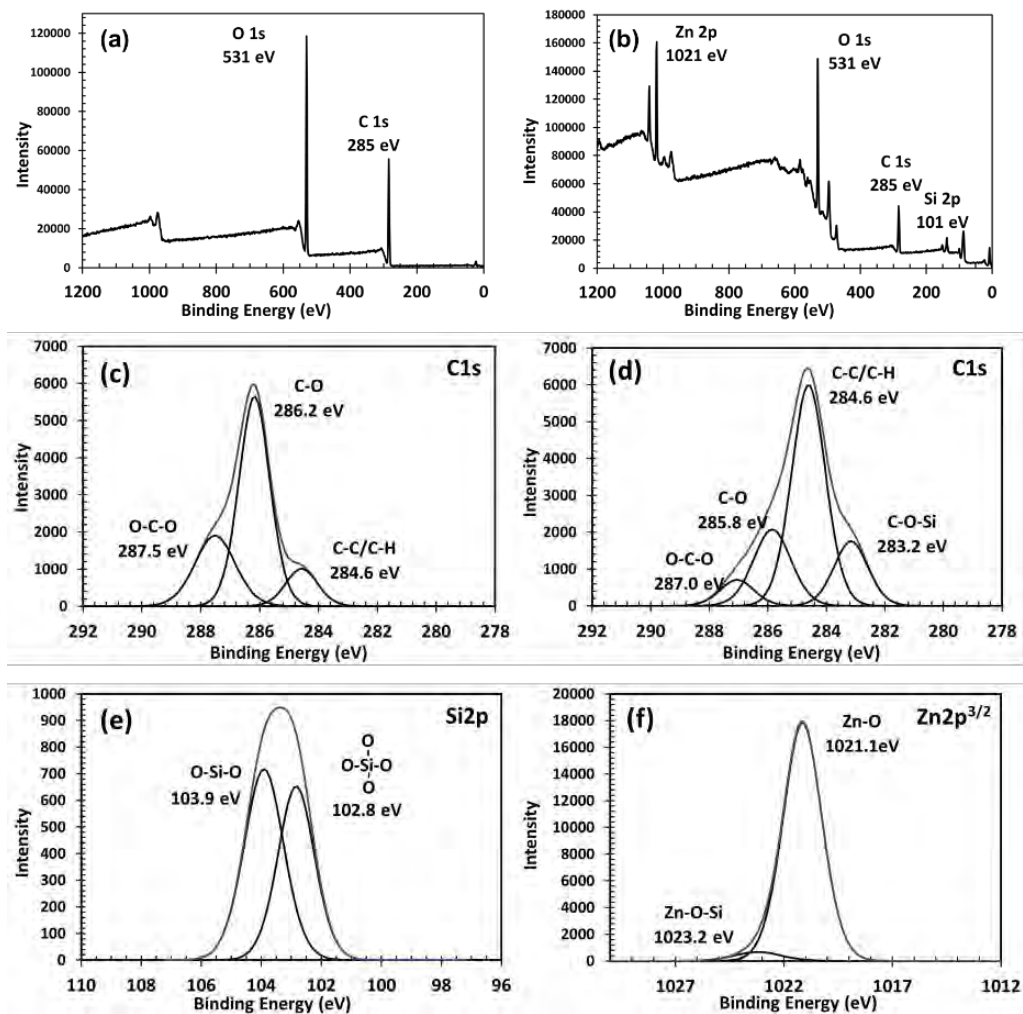
รูปที่ 3.7 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่เชื่อมต่อกับอุปกรณ์วิเคราะห์ธาตุเชิงพลังงาน (a) MS-Z1 (b) MS-Z5 (c) MS-Z10 (d) MS-Z20 ผลการ mapping ของธาตุ Si บนผิวของ (a') MS-Z1 (b') MS-Z5 (c') MS-Z10 (d') MS-Z20 และผลการ mapping ของธาตุ Zn บนผิวของ (a'') MS-Z1 (b'') MS-Z5 (c'') MS-Z10 (d'') MS-Z20

### 3.1.7 การวิเคราะห์ชนิดพันธะทางเคมีและธาตุองค์ประกอบบนผิวด้วย XPS

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุด้วยเทคนิค XPS แสดงในรูปที่ 3.8 แสดงสเปกตรัม C1s ของแป้งมันสำปะหลัง ที่ตำแหน่งพลังงานยึดเหนี่ยว 284.6, 286.2 และ 287.5 eV ระบุถึงคาร์บอนในพันธะ C-C/C-H, C-O (alcohol) และ O-C-O (ester) ตามลำดับ (Kumar et al., 2014) ส่วนสเปกตรัม C1s ของแป้งมันสำปะหลังตัดแปรรีโเคราะห์ พบพีกที่พลังงานยึดเหนี่ยว 284.6, 285.8 และ 287.0 eV และพีกที่ตำแหน่งพลังงานยึดเหนี่ยว 283.2 eV เพิ่มขึ้นมา ซึ่งตรงกับพันธะ C-O-Si (Tang et al., 2009; Chen

et al., 2017) ซึ่งสอดคล้องกับสเปกตรัมของ Si2p พบพีกที่พลังงานยึดเหนี่ยว 102.8 และ 103.9 eV ตรงกับลักษณะของอะตอมซิลิกาในพันธะ SiO<sub>4</sub><sup>4-</sup> และ SiO<sub>2</sub> ตามลำดับ (Hu et al., 2015) โดยพันธะ SiO<sub>4</sub><sup>4-</sup> แสดงถึงซิลิกาเกิดการสร้างพันธะกับอะตอมอื่น ซึ่งยืนยันได้จากสเปกตรัมของ Zn2p<sup>3/2</sup> พบพีกที่ตำแหน่งพลังงานยึดเหนี่ยว 1021.1 และ 1023.2 eV บ่งบอกลักษณะพันธะของ Zn-O ในโครงสร้างผลึกแบบ wurtzite ของ ZnO และ Zn-O-Si ในโครงสร้างของ Zn<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> (Tu et al., 2017)

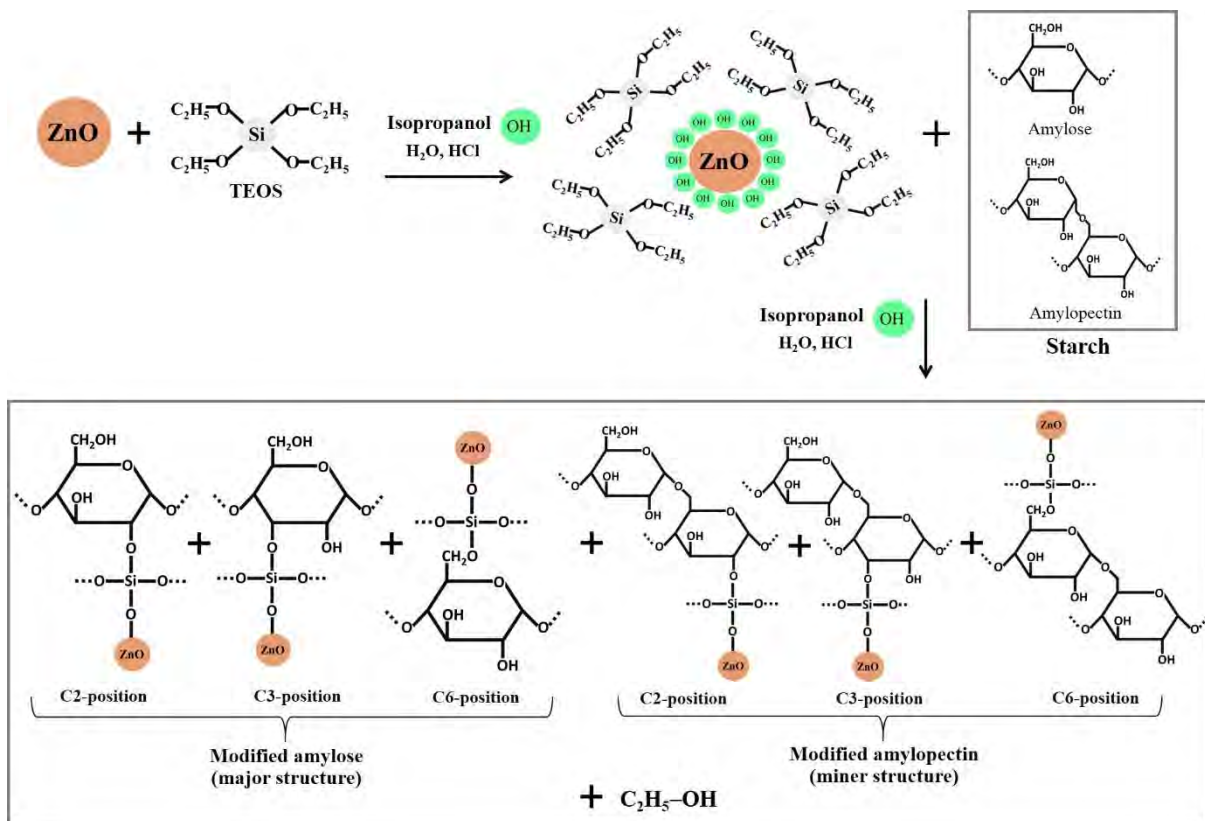
นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบผิวในตาราง สามารถคำนวณหาร้อยละการกราฟต์ได้ 16.4 % จากองค์ประกอบของ C-O-Si (%) (Wongthong et al., 2014) จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลข้างต้น สามารถสรุปได้ว่าแป้งมันสำปะหลังสามารถดัดแปรผิวด้วยสารดัดแปร ZnO/TEOS ได้ TEOS ทำหน้าที่เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ SiO<sub>2</sub> ที่ช่วยกระจายอนุภาคของ ZnO บนผิวแป้งมันสำปะหลังดัดแปร โดย TEOS สร้างพันธะเชื่อมระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของแป้งมันสำปะหลังกับ ZnO (-C-O-Si-O-Zn-) ดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.8 XPS สเปกตรัมแบบ wide scan ของ (a) แป้งมันสำปะหลัง และ (b) แป้งมันสำปะหลังดัดแปร XPS สเปกตรัมของแป้งมันสำปะหลัง (c) C1s และแป้งมันสำปะหลังดัดแปร (d) C1s (e) Si2p และ (f) Zn2P<sup>3/2</sup>

ตารางที่ 3.3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบผิวและร้อยละการกราฟต์ของแป้งมันสำปะหลังและแป้งมันสำปะหลังดัดแปร จาก XPS สเปกตรัม

	Composition (%)				Grafting content (%)
	O-C-O	C-O	C-C/C-H	C-O-Si	
Starch	27.0	61.6	11.4	-	-
Modified starch	6.6	21.3	55.7	16.4	16.4



รูปที่ 3.9 ปฏิกิริยาที่นำเสนอในการเตรียมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วย ZnO/TEOS

### 3.1.8 ผลการทดสอบฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรีย (antibacterial activity) ของแป้งมันสำปะหลังดัดแปร

ผลทดสอบความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแป้งมันสำปะหลังดัดแปร โดยเลือกศึกษาฤทธิ์ต้านเชื้อของแบคทีเรีย 2 ชนิดคือ แบคทีเรียแกรมบวกชนิด *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*, ATCC 6538) และแบคทีเรียแกรมลบชนิด *Escherichia coli* (*E. coli*, ATCC 25922) ดังแสดงในตารางที่ 3.3 พบว่า แป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่ใช้ ZnO 5 %w ร่วมกับ TEOS 0.5 %w (MS-Z5) มีความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียสูงที่สุด แต่อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณสารดัดแปรเพิ่มขึ้นความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียลดลง เนื่องจากสารดัดแปรเกิดการรวมตัวและเกาะอยู่รวมกันเป็นกลุ่มบนผิวของของแป้งมันสำปะหลัง (ดังแสดงในรูปที่ 3.7) ส่งผลให้โอกาสการสัมผัสกันระหว่างสารดัดแปรกับผนังเซลล์ของเชื้อแบคทีเรียลดลง ประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อของสารดัดแปรจึงลดลง นอกจากนี้ความสามารถในการยับยั้งเชื้อ *E.coli* สูงกว่า *S.aureus* เนื่องจาก *S.aureus* มีผนังเซลล์ที่หนากว่า จึงถูกทำลายได้ยากกว่า (Wisutiratanamane et al., 2017) จากผลการทดสอบข้างต้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้แป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่ใช้ ZnO 5% ร่วมกับ TEOS 0.5 %w (MS-Z5) ในการศึกษาการสังเคราะห์ SAP ต่อไป

ตารางที่ 3.4 ผลการทดสอบความสามารถในการต้านเชื้อแบคทีเรียของแป้งมันสำปะหลังดัดแปร

Sample code	ZnO (% w)	TEOS (% w)	<i>S.aureus</i> ATCC 6538			<i>E.coli</i> ATCC 25922		
			average value (CFU/ml)		Reduction <sup>b</sup> (%)	average value (CFU/ml)		Reduction <sup>b</sup> (%)
			at 0 h	at 1 h		at 0 h	at 1 h	
Starch <sup>a</sup>	-	-	1.95x10 <sup>5</sup>	2.22x10 <sup>5</sup>	0.00	2.76 x10 <sup>5</sup>	2.58x10 <sup>5</sup>	0.00
MS-Z1	1	0.1	1.95x10 <sup>5</sup>	1.53x10 <sup>5</sup>	31.18	2.76 x10 <sup>5</sup>	3.93x10 <sup>2</sup>	99.85
MS-Z5	5	0.5	1.95x10 <sup>5</sup>	8.47x10 <sup>4</sup>	61.92	2.76 x10 <sup>5</sup>	2.73x10 <sup>2</sup>	99.89
MS-Z10	10	1.0	1.95x10 <sup>5</sup>	1.04x10 <sup>5</sup>	53.22	2.76 x10 <sup>5</sup>	2.97x10 <sup>2</sup>	99.89
MS-Z20	20	2.0	1.95x10 <sup>5</sup>	1.19x10 <sup>5</sup>	46.07	2.76 x10 <sup>5</sup>	1.15x10 <sup>4</sup>	95.56

<sup>a</sup>control, <sup>b</sup>with respect to starch (control)

### 3.2 ผลการสังเคราะห์ SAP จากแป้งมันสำปะหลังดัดแปรกราฟต์พอลิอะคริเลต

ผู้วิจัยศึกษาภาวะการเตรียม SAP จากแป้งมันสำปะหลังดัดแปร โดยใช้แป้งมันสำปะหลังดัดแปร ชนิด MS-Z5 ที่มีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียสูงที่สุดที่ได้จากหัวข้อ 3.1 เพื่อเตรียมผลิตภัณฑ์ SAP ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ในขณะเดียวกันยังคงความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย และศึกษาสมบัติการดูดซึมน้ำภายใต้ภาวะต่าง ๆ เช่น ทดสอบค่าการดูดซึมน้ำในสารละลายเกลือ และทดสอบความสามารถในการดูดซึมน้ำภายใต้ภาวะที่มีแรงกด รวมทั้งตรวจสอบสมบัติความแข็งแรงและความหนาแน่นของ SAP

#### 3.2.1 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของ SAP ด้วยเทคนิค FTIR

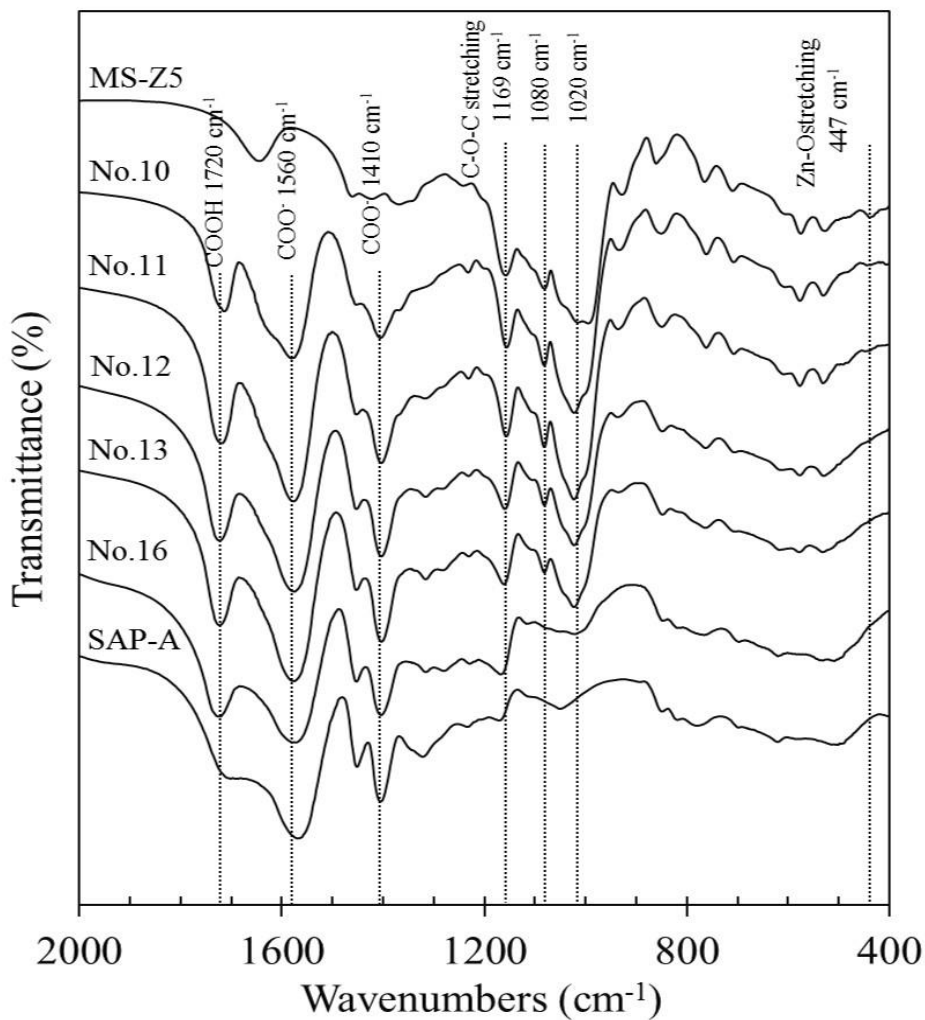
รูปที่ 3.10 ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของ SAP ที่สังเคราะห์ภายใต้อัตราส่วนต่าง ๆ ระหว่างแป้งมันสำปะหลังดัดแปร (MS-Z5) ต่อกรดอะคริลิกมอนอเมอร์ ด้วยเทคนิค FTIR พบว่า SAP No.10-13 ปรากฏสัญญาณการดูดกลืนคลื่นที่เป็นเอกลักษณ์ของพันธะ C-O stretching ในหมู่ฟังก์ชัน C-O-C บนโครงสร้างของแป้งมันสำปะหลัง ที่ตำแหน่งเลขคลื่นประมาณ 1015 – 1023, 1081 – 1082 และ 1156 – 1161  $\text{cm}^{-1}$  (Zou et al., 2012) นอกจากนี้พบพีกเอกลักษณ์ของพอลิอะคริเลต ที่ตำแหน่ง 1400 – 1450 และ 1570 – 1580  $\text{cm}^{-1}$  แสดงถึงพันธะ  $\text{COO}^-$  symmetric และ  $\text{COO}^-$  asymmetric stretching ในหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิเลต และพีกของพันธะ C=O stretching ของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลที่ตำแหน่ง 1700 – 1725  $\text{cm}^{-1}$  (Irani et al., 2015) นอกจากนี้ยังพบพีกที่แสดงถึงพันธะ C-O stretching ของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลบนโครงสร้างของพอลิอะคริเลต ที่ตำแหน่งเลขคลื่นประมาณ 1168 – 1170  $\text{cm}^{-1}$  (Lu and Lin, 2003) ซึ่งปรากฏซ้อนทับกับพีกของ C-O stretching ในโครงสร้างของแป้งมันสำปะหลัง แสดงให้เห็นว่า SAP สามารถสังเคราะห์จากแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่กราฟต์ด้วยกรดอะคริลิกมอนอเมอร์ได้

#### 3.2.2 การวิเคราะห์โครงสร้างของ SAP ด้วย $^{13}\text{C}$ solid-state NMR

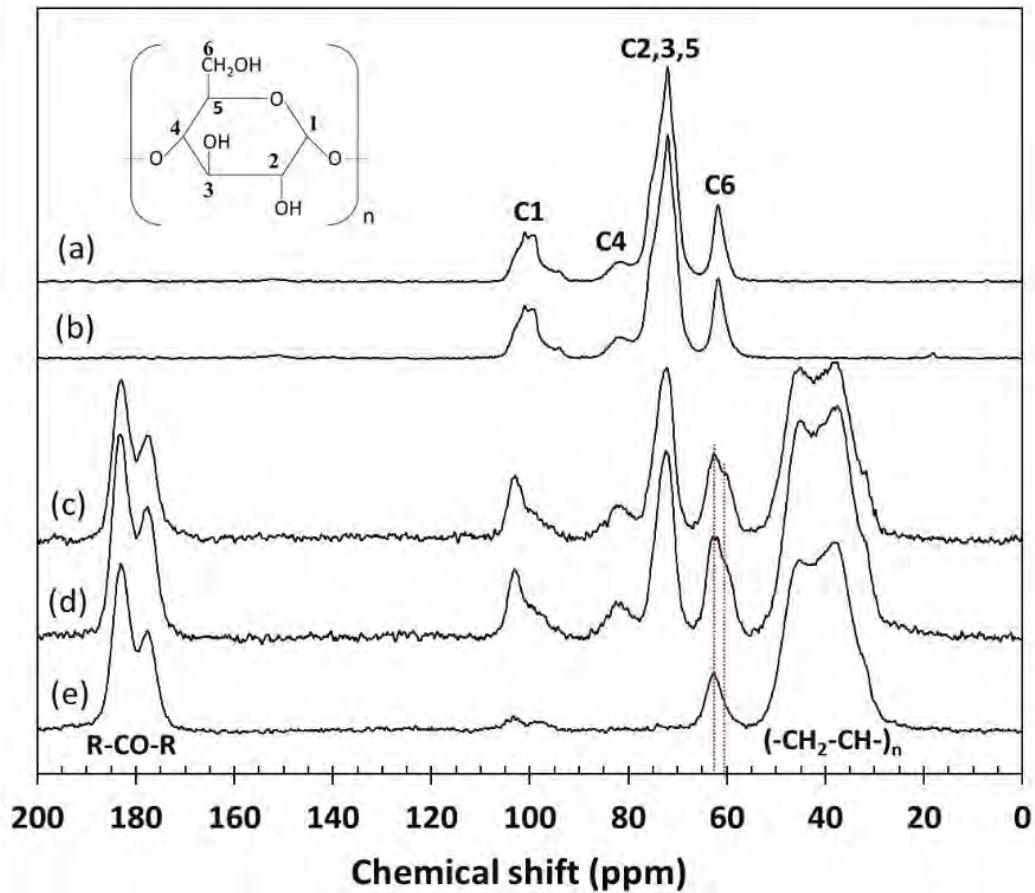
รูปที่ 3.11 แสดง  $^{13}\text{C}$  NMR สเปกตรัมของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรและ SAP ที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปรกราฟต์พอลิอะคริเลต ที่สเปกตรัมของแป้งมันสำปะหลังและแป้งมันสำปะหลังดัดแปร ((a) และ (b)) แสดงพีกออกเป็น 4 ตำแหน่ง ได้แก่ 101.0 และ 81.3 ppm สอดคล้องกับตำแหน่งของคาร์บอนในโครงสร้างของแป้งมันสำปะหลังที่ C1 และ C4 พีกที่อยู่ในช่วง 66-78 ppm แสดงถึงคาร์บอนที่ตำแหน่ง C2, C3 และ C5 และพีกที่ตำแหน่ง 61.8 ppm เป็นพีกของคาร์บอน C6 ในหมู่ฟังก์ชัน  $\text{CH}_2\text{OH}$  ตามลำดับ นอกจากนี้ สเปกตรัมของ SAP ที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังหรือแป้งมันสำปะหลังดัดแปรกราฟต์พอลิอะคริเลต ((c) หรือ (d)) ปรากฏพีกเพิ่มขึ้นที่ตำแหน่ง 183.0 และ 177.6 ppm บ่งบอกถึงลักษณะคาร์บอนในหมู่คาร์บอนิลของพอลิคาร์บอกซิเลต และพีกที่ตำแหน่งช่วง 28-53 ppm ตรงกับลักษณะของคาร์บอน  $-(\text{CH}_2-\text{CH})_n$  ในสายโซ่ของพอลิอะคริเลต อีกทั้งพบพีกที่มีลักษณะ



ฐานกว้างในช่วง 57-67 ppm ใกล้กับตำแหน่งพีกของคาร์บอน C6 ในโครงสร้างของแป้งมันสำปะหลัง หรือแป้งมันสำปะหลังดัดแปร และพีกมีลักษณะเหมือนหัวไหล่ (shoulder peak) แสดงว่า หมู่ไฮดรอกซิลบางส่วนบนคาร์บอน C6 เกิดปฏิกิริยาการกราฟต์กับสารพอลิอะคริเลต จึงสามารถสรุปได้ว่า SAP ที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังซึ่งเป็นโซ่หลัก (main chain) เกิดการกราฟต์ที่ตำแหน่งคาร์บอน C6 ของแป้งมันสำปะหลังหรือแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วยพอลิอะคริเลต (Zou et al., 2012; Zhang et al., 2014; Zhang et al., 2015)



รูปที่ 3.10 อินฟราเรดสเปกตรัมของ SAP



รูปที่ 3.11  $^{13}\text{C}$  NMR สเปกตรัมของ (a) แป้งมันสำปะหลัง (b) แป้งมันสำปะหลังดัดแปร และ SAP ที่เตรียมจาก (c) แป้งมันสำปะหลังกราฟต์พอลิอะคริเลต (d) แป้งมันสำปะหลังดัดแปรกราฟต์พอลิอะคริเลต และ (e) พอลิอะคริเลต

### 3.2.3 ผลของวิธีการสะเทินต่อค่าการดูดซึมน้ำของ SAP

ผลของการสะเทินกรดอะคริลิกมอนอเมอร์ต่อค่าการดูดซึมน้ำในการสังเคราะห์ SAP แสดงในตารางที่ 3.5 (No.1 – No.3) ภายใต้อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างแป้งมันสำปะหลังต่อกรดอะคริลิกมอนอเมอร์ 1:1 ปริมาณสารเชื่อมขวาง MBA ร้อยละ 0.05 โดยน้ำหนักรวมของแป้งมันสำปะหลังและกรดอะคริลิกมอนอเมอร์ และปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยา APS ร้อยละ 1.5 โดยโมลของกรดอะคริลิกมอนอเมอร์ ในกรณีที่กรดอะคริลิกมอนอเมอร์ไม่ทำการสะเทิน (No.1) SAP ที่สังเคราะห์ได้มีค่าการดูดซึมน้ำต่ำกว่า SAP ที่ผ่านการสะเทิน (No.2 และ No.3) เนื่องจากปฏิกิริยาการสะเทินช่วยเพิ่มความมีขั้วของสายโซ่พอลิเมอร์ จากการแตกตัวเป็นไอออนของหมู่คาร์บอกซิลเกิดเป็นคาร์บอกซิเลตได้ดีกว่า จึงเกิดแรงเหนี่ยวนำโมเลกุลของน้ำเข้ามาในโครงสร้างของ SAP ได้ดีกว่า ดังแสดงในรูปที่ 3.12

เมื่อเปรียบเทียบผลของการเกิดปฏิกิริยาการสะเทินด้วยสารละลาย KOH ก่อนและหลัง การเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของ SAP (No.3 และ No.2) พบว่าทั้งสองวิธีให้ค่าการดูดซึมน้ำที่ใกล้เคียง

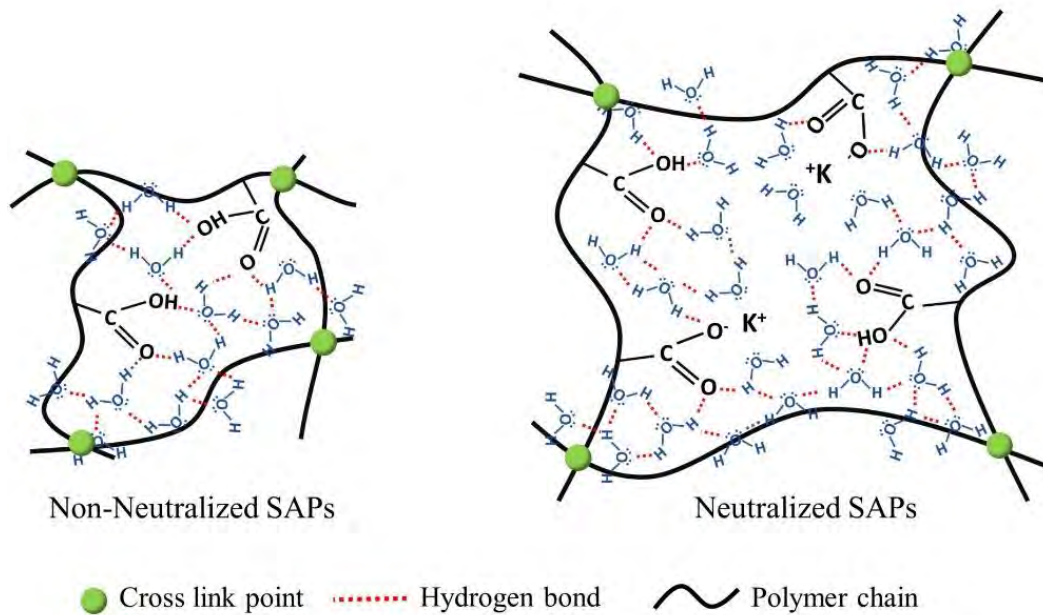
กัน แต่อย่างไรก็ตามวิธีการสะเทินหลังการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน แสดงค่า S.D. ที่สูงกว่า เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาการสะเทินหลังการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันของ SAP คือการนำก้อนเจล ไปแช่ในสารละลาย KOH ส่งผลให้เกิดการสัมผัสและถ่ายโอนประจุระหว่างสารละลาย KOH กับเจลพอลิเมอร์เป็นไปได้อย่างมาก ทำให้การถ่ายโอนประจุเป็นไปอย่างไม่ทั่วถึง ในขณะที่การสะเทินสารละลาย กรดอะคริลิกมอนอเมอร์ก่อนทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชัน สามารถทำได้โดยมีประสิทธิภาพมากกว่า ค่า S.D. จึงต่ำกว่า ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงเลือกใช้วิธีการสะเทินสารละลายกรดอะคริลิกมอนอเมอร์ ก่อนการทำปฏิกิริยาพอลิเมอไรเซชันในการศึกษาตัวแปรอื่น ๆ ต่อไป

**ตารางที่ 3.5** ผลการทดสอบค่าความหนาแน่นการเชื่อมขวาง และการดูดซึมน้ำของ SAP จากแป้งมันสำปะหลังตัดแปรรูปฟอสฟอริเคต

No.	St <sup>a</sup> (g)	MS <sup>b</sup> (g)	AA <sup>c</sup> (g)	KOH <sup>d</sup> (% mol AA)	MBA <sup>e</sup> (% w)	APS <sup>f</sup> (% w)	$\nu_s$ (mol/cm <sup>3</sup> )	WA <sup>h</sup> (g g <sup>-1</sup> )	WA <sub>NaCl</sub> <sup>i</sup> (g g <sup>-1</sup> )	WA <sub>UL</sub> <sup>j</sup> (g g <sup>-1</sup> )
1	15	-	15	-	0.05	0.15	$2.50 \times 10^{-7}$	23 ± 9	25 ± 3	6 ± 1
2	15	-	15	Spon <sup>k</sup>	0.05	0.15	$3.47 \times 10^{-11}$	146 ± 38	34 ± 4	20 ± 3
3	15	-	15	75	0.05	0.15	$1.65 \times 10^{-11}$	145 ± 3	36 ± 3	12 ± 1
4	15	-	15	75	0.10	0.15	$1.71 \times 10^{-11}$	168 ± 5	34 ± 3	12 ± 1
5	15	-	15	75	0.30	0.15	$5.69 \times 10^{-11}$	116 ± 6	35 ± 3	19 ± 2
6	15	-	15	75	0.50	0.15	$6.06 \times 10^{-11}$	92 ± 8	36 ± 2	23 ± 2
7	20	-	10	75	0.10	0.15	$2.72 \times 10^{-10}$	77 ± 4	26 ± 1	8 ± 1
8	10	-	20	75	0.10	0.15	$7.88 \times 10^{-12}$	179 ± 15	45 ± 4	21 ± 2
9	7	-	21	75	0.10	0.15	$6.16 \times 10^{-12}$	185 ± 15	47 ± 4	23 ± 2
10	-	20	10	75	0.10	0.15	$3.45 \times 10^{-10}$	72 ± 4	30 ± 1	10 ± 1
11	-	15	15	75	0.10	0.15	$2.35 \times 10^{-11}$	155 ± 3	34 ± 2	12 ± 2
12	-	10	20	75	0.10	0.15	$6.40 \times 10^{-12}$	180 ± 8	44 ± 2	21 ± 2
13	-	7	21	75	0.10	0.15	$4.81 \times 10^{-12}$	201 ± 4	43 ± 2	24 ± 2
14	-	7	21	75	0.10	0.15	$6.41 \times 10^{-12}$	238 ± 15	39 ± 2	14 ± 1
15	-	7	21	75	0.10	0.15	$5.55 \times 10^{-12}$	196 ± 3	45 ± 1	27 ± 3
16	-	-	30	75	0.10	0.15	$4.07 \times 10^{-13}$	354 ± 12	70 ± 1	29 ± 1

<sup>a</sup>Starch (10 %w) <sup>b</sup>Modified starch (10 %w) <sup>c</sup>Acrylic acid <sup>d</sup>Potassium hydroxide <sup>e</sup>N,N'-Methylenebisacrylamide (% total weight of Starch and AA) <sup>f</sup>Ammonium persulfate (% weight of starch) <sup>g</sup>Crosslink density <sup>h</sup>Water absorbency in DI water <sup>i</sup>Water absorbency in NaCl 0.9 %w <sup>j</sup>Water absorbency under load 1.93 kPa <sup>k</sup>Saponification

**Remark:** No.1 – 13 were the gelatinized starch with a concentration of 10 %w, No.14 was the gelatinized starch with a concentration of 5 %w and No.15 was the gelatinized starch with a concentration of 20 %w



รูปที่ 3.12 กลไกการบวมน้ำของ SAP ไม่ที่ผ่านการสะเทิน และผ่านการสะเทิน

### 3.2.4 ผลของปริมาณสารเชื่อมขวาง (MBA) ต่อค่าการดูดซึมน้ำของ SAP

การศึกษาผลของปริมาณสารเชื่อมขวางชนิด MBA (ร้อยละ 0.05 0.10 0.30 และ 0.50 โดยน้ำหนักรวมของแป้งมันสำปะหลังและกรดอะคริลิกมอนอเมอร์) ต่อค่าการดูดซึมน้ำ ภายใต้ภาวะในการสังเคราะห์ SAP อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างแป้งมันสำปะหลังต่อกรดอะคริลิกมอนอเมอร์ 1:1 ทำการสะเทินกรดอะคริลิกมอนอเมอร์ด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ร้อยละ 75 โดยโมลของกรดอะคริลิกมอนอเมอร์ ปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยา APS ที่ปริมาณร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนักของแป้งมันสำปะหลัง (No.3 – No.6 ดังตารางที่ 3.5) พบว่า ค่าการดูดซึมน้ำของ SAP มีค่าสูงขึ้น เมื่อปริมาณ MBA เพิ่มขึ้น และค่าการดูดซึมน้ำของ SAP มีค่าสูงสุด ( $168 \pm 5 \text{ g g}^{-1}$ ) ที่ปริมาณ MBA เท่ากับร้อยละ 0.10 โดยน้ำหนักรวมของแป้งมันสำปะหลังและกรดอะคริลิกมอนอเมอร์ (No.4) ค่าการดูดซึมน้ำจะมีแนวโน้มลดลง เมื่อใช้ปริมาณ MBA มากกว่าร้อยละ 0.10 โดยน้ำหนักรวมของแป้งมันสำปะหลังและกรดอะคริลิกมอนอเมอร์ เนื่องจากปริมาณสารเชื่อมขวาง MBA ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้พอลิเมอร์เกิดเป็นโครงร่างตาข่ายที่แข็งแรงมากขึ้น มีความยืดหยุ่นลดลง พื้นที่ในการขยายตัวเพื่อกักเก็บน้ำไว้ในโครงสร้างเจลจึงลดลง

### 3.2.5 ผลของอัตราส่วนระหว่างแป้งมันสำปะหลังต่อกรดอะคริลิกมอนอเมอร์ ต่อค่าการดูดซึมน้ำและความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวาง (crosslink density; $v$ ) ของ SAP

การศึกษาผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างแป้งมันสำปะหลังต่อกรดอะคริลิกมอนอเมอร์ ที่อัตราส่วนเท่ากับ 2:1 1:1 1:2 และ 1:3 (ตารางที่ 3.5 No.7, 4, 8, และ 9 ตามลำดับ) ต่อค่าการดูดซึมน้ำของ SAP ที่เตรียมจากการสะเทินกรดอะคริลิกมอนอเมอร์ด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ที่ร้อยละ 75 โดยโมลของกรดอะคริลิกมอนอเมอร์ ปริมาณสารเชื่อมขวางชนิด MBA ร้อยละ 0.10 โดยน้ำหนักรวมของแป้งมันสำปะหลังและกรดอะคริลิกมอนอเมอร์ ปริมาณตัวริเริ่มปฏิกิริยา APS ที่ปริมาณร้อยละ 1.5 โดยน้ำหนักของแป้งมันสำปะหลัง พบว่าอัตราส่วนของกรดอะคริลิกมอนอเมอร์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำสูงขึ้น ผลที่ได้สอดคล้องกับค่า  $v$  ของ SAP ที่ลดลง เนื่องจากการเพิ่มปริมาณของกรดอะคริลิกมอนอเมอร์ ช่วยเพิ่มความถี่ของ SAP โดยค่าการดูดซึมน้ำของ SAP ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างแป้งมันสำปะหลังต่อกรดอะคริลิกมอนอเมอร์เท่ากับ 1:3 ให้ค่าสูงที่สุด (No. 9) เท่ากับ  $201 \pm 4 \text{ g g}^{-1}$

นอกจากนี้ เมื่อเปรียบเทียบผลของค่าการดูดซึมน้ำและค่า  $v$  ของ SAP ที่เติมแป้งมันสำปะหลัง (No.4, 7 – 9) หรือแป้งมันสำปะหลังดัดแปร (No.10 – 13) พบว่าค่าการดูดซึมน้ำและค่า  $v$  ของ SAP ทั้งสองชนิดที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างแป้งมันสำปะหลังต่อกรดอะคริลิกมอนอเมอร์ที่เท่ากัน มีค่าใกล้เคียงกัน แสดงให้เห็นว่าการมีสารดัดแปร ( $\text{ZnO/SiO}_2$ ) บนผิวของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรไม่ขัดขวางการบวมน้ำ และการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมขวางในโครงสร้างของ SAP

แม้ว่าการเพิ่มปริมาณของกรดอะคริลิกมอนอเมอร์ จะช่วยเพิ่มค่าการดูดซึมน้ำได้ แต่ในงานวิจัยนี้ต้องการสังเคราะห์ SAP ที่มีสมบัติเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพ (biopolymer) จึงเลือกศึกษาผลของอัตราส่วนของแป้งมันสำปะหลังต่อกรดอะคริลิกมอนอเมอร์ไม่สูงกว่า 1:3 จากผลการทดลอง (ตารางที่ 3.5) แสดงให้เห็นแล้วว่าค่าการดูดซึมน้ำของ SAP มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เมื่ออัตราส่วนของกรดอะคริลิกมอนอเมอร์เพิ่มขึ้น

### 3.2.6 ผลของสารละลายเกลือ NaCl 0.9% w ต่อค่าการดูดซึมน้ำของ SAP

ผลของสารละลายเกลือ NaCl 0.9% w ต่อความสามารถในการดูดซึมน้ำของ SAP ทุกประเภท แสดงในตารางที่ 3.5 พบว่าในทุก ๆ การทดลอง ค่าการดูดซึมน้ำในสารละลายเกลือ NaCl ( $W_{\text{NaCl}}$ ) ของ SAP มีค่าลดลงร้อยละประมาณ 60 – 80 เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการดูดซึมน้ำของ SAP ในน้ำปราศจากไอออน (WA) เนื่องจากความเข้มข้นของปริมาณไอออนในสารละลายเกลือที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความแตกต่างของแรงดันออสโมซิสระหว่างเจล SAP ขณะบวมน้ำกับสารละลายเกลือลดลง ค่า  $W_{\text{NaCl}}$  ของ SAP ที่เติมแป้งมันสำปะหลัง (No.1 – 9) และ SAP ที่เติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปร (No.10 – 15) มีค่าใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 25 – 45  $\text{g g}^{-1}$  ดังนั้น ผลของการมีสารดัดแปร ( $\text{ZnO/SiO}_2$ ) บนผิวของแป้งมันสำปะหลังดัดแปร ไม่ส่งผลต่อค่าการดูดซึมน้ำสารละลายเกลือของ SAP

### 3.2.7 ผลของแรงกดต่อค่าการดูดซึมน้ำของ SAP

ความสามารถในการดูดซึมน้ำภายใต้ภาวะแรงกด 1.93 กิโลพาสคัล ( $WA_{UL}$ ) ของ SAP แสดงในตารางที่ 3.5 พบว่าในทุกภาวะการทดลอง ค่า  $WA_{UL}$  ของ SAP มีค่าลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับความสามารถในการดูดซึมน้ำภายใต้บรรยากาศปกติ (WA) เนื่องจากน้ำหนักที่กดทับลงบนเจลพอลิเมอร์ส่งผลให้สายโซ่พอลิเมอร์เคลื่อนตัวได้ยากขึ้น การบวมตัวของเจลพอลิเมอร์เป็นไปได้น้อย แต่อย่างไรก็ตามเมื่อศึกษาปริมาณสารเชื่อมขวาง MBA ใน SAP (No.3 – 6) พบว่าค่า  $WA_{UL}$  มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณ MBA เพิ่มขึ้น ค่า crosslink density มีค่าเพิ่มขึ้น แสดงถึงโครงสร้างของ SAP มีการเชื่อมขวางมากขึ้น จึงสามารถต้านทานการรับแรงกดได้ดีขึ้น ถ้าพิจารณาในกรณีที่ใช้แป้งมันสำปะหลัง หรือ แป้งมันสำปะหลังดัดแปรใน SAP มากขึ้น (No.4, No.7 – 9 หรือ No.10-13) โดยปริมาณสารเชื่อมขวาง MBA คงที่ (ร้อยละ 0.10 โดยน้ำหนักรวมของแป้งมันสำปะหลังและกรดอะคริลิกมอนอเมอร์) พบว่าค่า  $WA_{UL}$  ของ SAP มีค่าลดลง เนื่องจากการมีแป้งมันสำปะหลัง หรือแป้งมันสำปะหลังดัดแปร ทำให้โครงสร้างของ SAP มีความแข็งแรงลดลง สังเกตได้จากการปรากฏรูพรุนในโครงสร้างของ SAP ที่เพิ่มขึ้น (อธิบายในหัวข้อ 3.2.7)

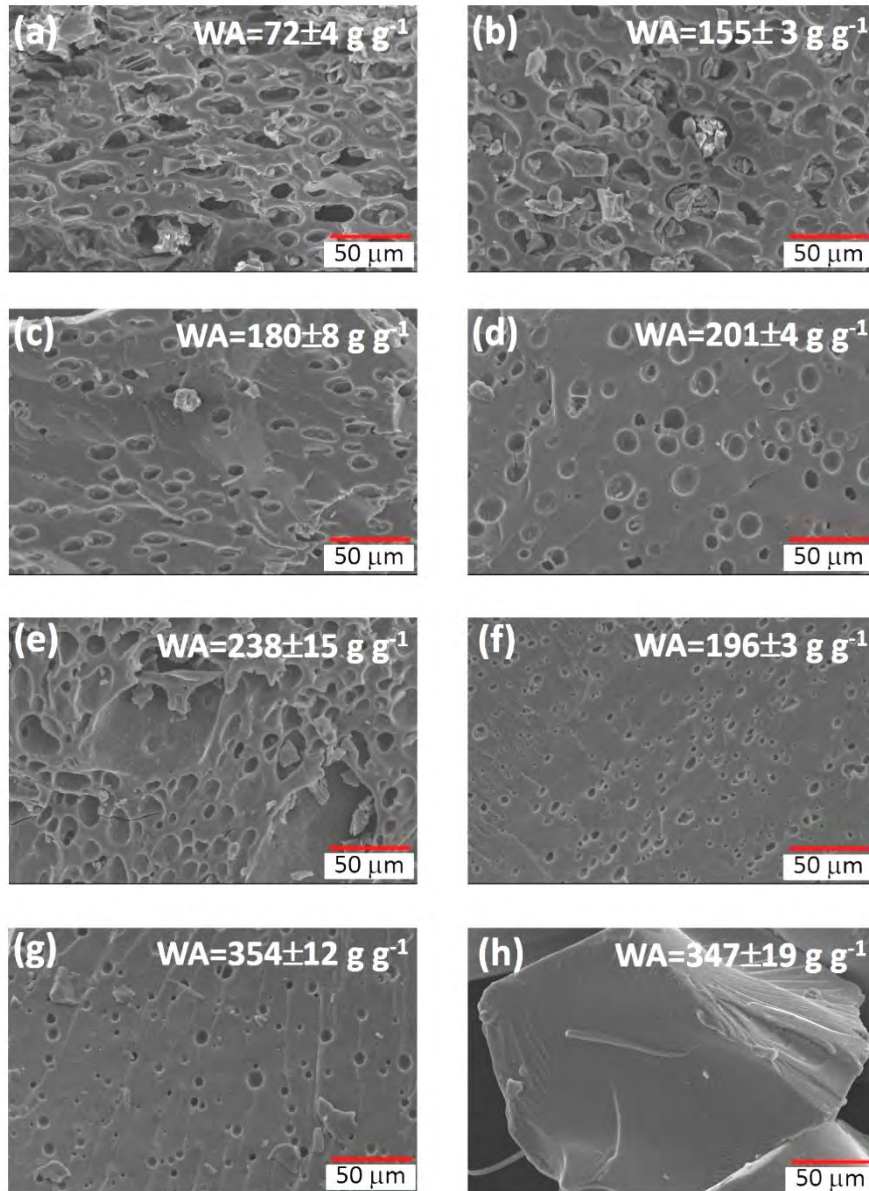
### 3.2.8 การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ SAP ด้วยเทคนิค SEM

รูปที่ 3.13 แสดงผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ SAP ด้วยภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เมื่อเปรียบเทียบอัตราส่วนโดยน้ำหนักระหว่างแป้งมันสำปะหลังดัดแปรต่อกรดอะคริลิกมอนอเมอร์ที่อัตราส่วน 2:1, 1:1, 1:2 และ 1:3 (รูปที่ 3.13a) – (d) พบว่า SAP ที่มีอัตราส่วนของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรในปริมาณมากจะแสดงให้เห็นความเป็นรูพรุนภายในโครงสร้างของ SAP สูง และรูพรุนมีขนาดใหญ่กว่า SAP ที่มีอัตราส่วนของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรน้อย เนื่องจากรูพรุนใน SAP เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการทำให้แห้ง ดังนั้น SAP ที่มีอัตราส่วนของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรมาก ให้ค่าการดูดซึมน้ำต่ำ มีความสามารถในการกักเก็บน้ำต่ำ จึงถูกกำจัดน้ำออกจากโครงสร้างเจล SAP ผ่านกระบวนการทำให้แห้งได้เร็ว เกิดเป็นรูพรุนขนาดใหญ่จำนวนมาก ในขณะที่ SAP ที่มีอัตราส่วนของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรน้อย ในกระบวนการกำจัดน้ำออกจากโครงสร้างเจล SAP จะเกิดขึ้นอย่างช้า ๆ SAP จึงมีรูพรุนขนาดเล็ก

เมื่อเปรียบเทียบผลของความเข้มข้นแป้งมันสำปะหลังดัดแปร (No.14 – 15) ในกระบวนการเกิดเจล (gelatinization) ต่อลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ SAP พบว่า SAP ภายใต้ภาวะการเตรียมเจลแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่มีความเข้มข้นต่ำ เกิดรูพรุนจำนวนมาก และรูพรุนมีขนาดใหญ่กว่า SAP ที่เตรียมจากเจลแป้งมันสำปะหลังที่มีความเข้มข้นสูง (รูปที่ 3.13(e) – (f)) เนื่องจากในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของ SAP น้ำจะแทรกตัวเข้าไปอยู่ในโครงสร้างของเจล SAP ส่งผลให้ที่ความเข้มข้นของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรต่ำ จะมีปริมาณน้ำที่แทรกตัวอยู่ในโครงสร้างของเจล SAP

มาก เมื่อนำมาตกตะกอน น้ำจะถูกกำจัดออกจากโครงสร้างของ SAP ทันที ทำให้ SAP เกิดรูพรุนขนาดใหญ่ ส่งผลให้ค่าดูดซึมน้ำสูง โดยรูพรุนจำนวนมากที่เกิดขึ้น ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซึมน้ำ แต่อย่างไรก็ตาม ด้วยรูพรุนจำนวนมากเหล่านี้ ส่งผลให้โครงสร้างของ SAP มีความแข็งแรงลดลง ยืนยันได้จากค่า  $WA_{UL}$  ของ SAP No.14 (ตารางที่ 3.5) มีค่าการดูดซึมน้ำต่ำกว่า No.15

ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ SPAs ที่ไม่เติมแป้งมันสำปะหลัง แสดงดังรูปที่ 3.13(g) พบว่าโครงสร้างของ SAP ที่ไม่เติมแป้งมันสำปะหลัง มีรูพรุนต่ำ และรูพรุนขนาดเล็กกว่า SAP ที่เติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปร (รูปที่ 3.13(a) - (f)) ส่งผลให้ SAP ที่ไม่เติมแป้งมันสำปะหลัง เมื่อดูดซึมน้ำเข้าไปในโครงสร้างจนถึงภาวะอิ่มตัวแล้ว สามารถการกักเก็บน้ำไว้ในโครงสร้างของ SAP ได้ดี ค่าการดูดซึมน้ำจึงสูง เมื่อเปรียบเทียบกับ SAP เติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ ประสิทธิภาพในการกักเก็บน้ำไว้ในโครงสร้างต่ำ ค่าการดูดซึมน้ำจึงต่ำไปด้วย นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบลักษณะทางสัณฐานวิทยาของ SAP เซิงพาณิชย์ (SAP-A แสดงในรูปที่ 3.13(h)) พบว่า SAP-A ไม่แสดงสมบัติความเป็นรูพรุน และมีลักษณะเนื้อแน่นกว่า SAP ทุกชนิดที่เตรียมได้ และผลการพิสูจน์หมู่ฟังก์ชันของ SAP-A (รูปที่ 3.10 ไม่ปรากฏหมู่ฟังก์ชันที่เป็นองค์ประกอบสำคัญของแป้ง แต่ปรากฏหมู่ฟังก์ชันเฉพาะของหมู่อะคริเลต มีค่าการดูดซึมน้ำใกล้เคียงกับ SPAs ที่ไม่เติมแป้งมันสำปะหลังที่เตรียมได้ เท่ากับ  $347 \pm 19 \text{ g g}^{-1}$  ทั้งนี้เนื่องจากอิทธิพลของชนิดและอัตราส่วนของสารตั้งต้นที่ต่างกัน (Nesrinne and Djamel, 2017) ความมีขั้วของพอลิเมอร์ (Chen et al., 2004) ความหนาแน่นของการเชื่อมขวาง (Lira et al., 2009) ปริมาณและชนิดของสารริเริ่มปฏิกิริยาที่ต่างกัน (Li et al., 2004) รวมถึงการเติมสารเติมแต่งอื่น ๆ (Nakason et al., 2010)



รูปที่ 3.13 ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดกำลังขยาย 500x ของ SAP (a) No.10 (b) No.11 (c) No.12 (d) No.13 (e) No.14 (f) No.15 (g) No.16 และ (f) SAP-A

### 3.2.9 ผลการย่อยสลายทางชีวภาพของ SAP ด้วยเอนไซม์ $\alpha$ -amylase

นำ SAP ที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์  $\alpha$ -amylase ที่ผลิตจากแบคทีเรีย *Bacillus licheniformis* (พบได้ในสภาพแวดล้อมทั่วไปในดิน) มาทดสอบผลการสลายตัวทางชีวภาพของ SAP ด้วยสารละลายเบนเนดิกต์ (Benedict's test) และสารละลายไอโอดีน (iodine test) ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 3.6 โดยสารละลายเบนเนดิกต์จะเกิดเป็นตะกอนสีแดงของ cuprous oxide ในกรณีที่พบน้ำตาลรีดิวซ์ (reducing sugar) แสดงว่าแบคทีเรียเกิดการย่อยด้วยเอนไซม์  $\alpha$ -amylase แต่หากไม่พบน้ำตาลรีดิวซ์ ผลที่ได้จะคงมีสีฟ้าของสารละลายเบนเนดิกต์ไว้ นอกจากนี้ผลการทดสอบแบคทีเรียที่คงเหลือใน



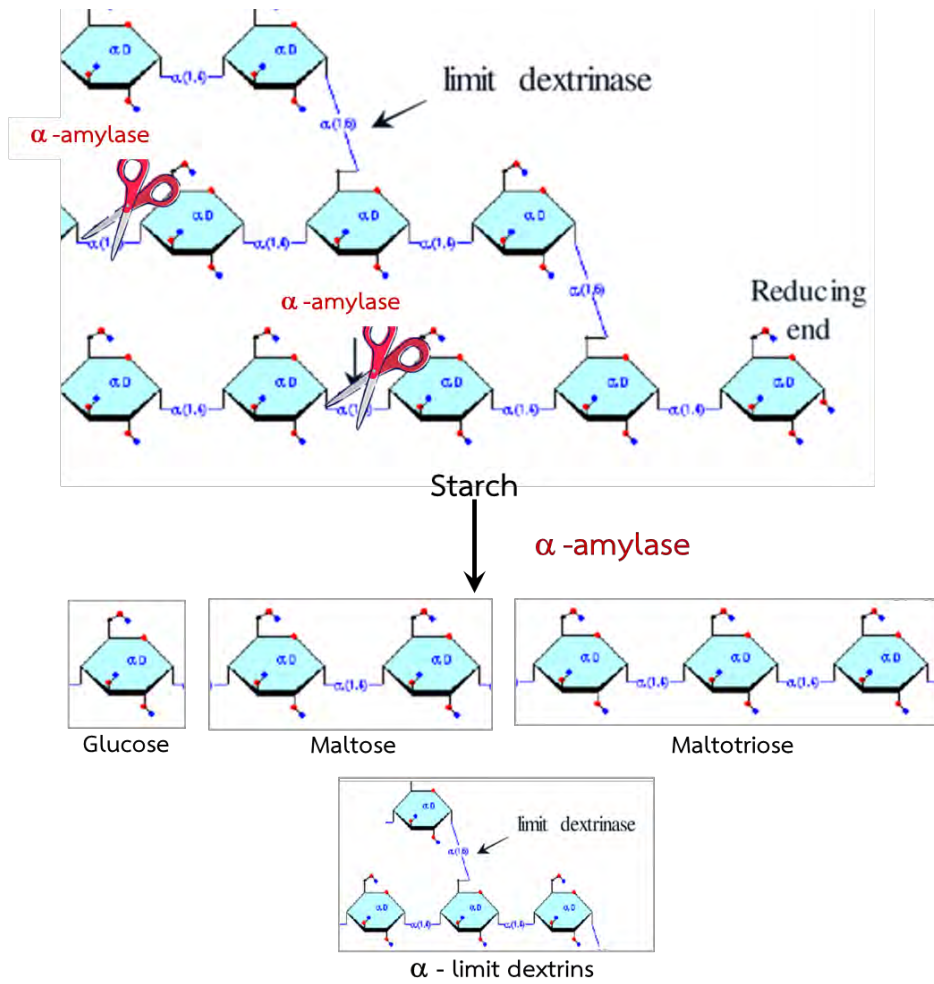
SAP หลังการย่อย สามารถทดสอบได้ด้วยสารละลายไอโอดีน ผลที่ได้คือสารละลายไอโอดีนจะเปลี่ยนสีจากสีเหลืองเป็นสีน้ำเงิน

จากผลการทดลองพบว่า SAP ที่เติมแป้งมันสำปะหลัง (No.4) และ SAP ที่เติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปร (No.11) หลังผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์  $\alpha$ -amylase แล้ว นำมาทดสอบด้วยสารละลายเบนดิคต์ ให้ผลเปลี่ยนสีของสารละลายเบนดิคต์จากสีฟ้าเกิดเป็นตะกอนสีส้ม แสดงว่าพบน้ำตาลรีดิวซ์จากการสลายตัวของแป้ง ในขณะที่เดียวกันผลการทดสอบด้วยสารละลายไอโอดีน พบว่าเกิดการเปลี่ยนสีจากสีเหลืองเป็นสีน้ำเงิน แสดงว่ายังมีแป้งคงเหลืออยู่ใน SAP เมื่อเปรียบเทียบผลของสารละลายไอโอดีนของ SAP ที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์  $\alpha$ -amylase แล้ว กับ SAP ตัวควบคุม พบว่า SAP ที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์มีสีน้ำเงินอ่อนกว่า SAP ตัวควบคุม ทั้งในกรณีของ SAP ที่เติมแป้งมันสำปะหลัง และ SAP ที่เติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปร แสดงให้เห็นว่าแป้งที่คงเหลือใน SAP มีปริมาณลดลง ส่วน SAP ที่ไม่เติมแป้งมันสำปะหลัง (No.16) และ SAP-A พบว่าให้ผลการทดสอบเป็นลบในทั้งสองการทดสอบ คือเกิดการย่อยสลายภายใต้เอนไซม์  $\alpha$ -amylase ได้ยาก ซึ่ง Hamdi & Ponchel, 1999; Li et al., 2011; Van der Maarel et al., 2002 ได้กล่าวไว้ว่า  $\alpha$ -amylase มีความเฉพาะเจาะจงในการสลายพันธะไกลโคซิดิกที่ตำแหน่ง  $\alpha$ -1,4 ในโครงสร้างของแป้ง ได้ผลิตภัณฑ์เป็นหน่วยซ้ำของกลูโคส 1 – 6 หน่วยซ้ำ และโครงสร้างยังคงรูปเดิม คือ  $\alpha$ -configuration ดังแสดงในรูปที่ 3.14 จึงสรุปได้ว่า SAP ที่มีแป้งมันสำปะหลัง สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายทางชีวภาพภายใต้เอนไซม์  $\alpha$ -amylase ได้ อีกทั้ง ในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่า SAP ที่เติมแป้งมันสำปะหลังดัดแปร ที่มีประสิทธิภาพในการต้านเชื้อแบคทีเรียดังที่กล่าวมาแล้วในหัวข้อ 3.1.8 ยังคงประสิทธิภาพการย่อยสลายทางชีวภาพได้ ตลอดจนสารดัดแปร ZnO/TEOS ไม่มีอิทธิพลในการขัดขวางการย่อยสลายทางชีวภาพของ SAP

### ตารางที่ 3.6 ผลการทดสอบการสลายตัวทางชีวภาพของ SAP

Sample	Benedict's test		Iodine test	
	control	test	control	test
Starch	blue solution	red precipitate	dark blue gel	blue gel
MS-Z5	blue solution	orange precipitate	dark blue gel	blue gel
No.4 <sup>a</sup>	blue solution	light orange precipitate	dark blue gel	blue gel
No.11 <sup>b</sup>	blue solution	light orange precipitate	dark blue gel	blue gel
No.16 <sup>c</sup>	blue solution	blue solution	yellow gel	yellow gel
SAP-A <sup>d</sup>	blue solution	blue solution	yellow gel	yellow gel

<sup>a</sup>SAP with starch, <sup>b</sup>SAP with modified starch, <sup>c</sup>SAP without starch and <sup>d</sup>commercial SAP



รูปที่ 3.14 กลไกการย่อยสลายทางชีวภาพของด้วยเอนไซม์  $\alpha$ -amylase ของโครงสร้างแป้งใน SAP (Hamdi & Ponchel, 1999; Li et al., 2011; Van der Maarel et al., 2002)

## บทที่ 4

### สรุปผลการวิจัย

#### 4.1 สรุปผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ สามารถเตรียมแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วย ZnO/SiO<sub>2</sub> ได้สำเร็จ ด้วยวิธีโซลเจล (sol-gel method) แป้งมันสำปะหลังหลังการดัดแปรที่มีผิวที่ขรุขระมากขึ้นเมื่อปริมาณของสารดัดแปร ZnO (ปริมาณ 1-20 %w) และ TEOS (ปริมาณ 0.1-20 %w) ผลการทดสอบการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของแป้งมันสำปะหลังดัดแปร พบว่าแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่ปริมาณสารดัดแปร ZnO 5 %w และ TEOS 0.5 %w (MS-Z5) ให้ผลการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียชนิด *Escherichia coli* และชนิด *Staphylococcus aureus* สูงที่สุด โดยมีร้อยละการลดลงของเชื้อเท่ากับ 99.89 และ 61.92 ตามลำดับ นำ MS-Z5 ที่เตรียมได้มาสังเคราะห์กราฟต์โคพอลิเมอร์ของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรกราฟต์กรดอะคริลิกมอนอเมอร์ที่ไม่สะเทินและสะเทินด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 75 โดยโมลของกรดอะคริลิกมอนอเมอร์ เพื่อเตรียมเป็น SAP และศึกษาผลของสารดัดแปรต่อค่าการดูดซึมน้ำ และการย่อยสลายทางชีวภาพของ SAP พบว่า SAP ที่เตรียมได้เกิดการกราฟต์ด้วยพอลิโพแทสเซียมอะคริเลตที่ตำแหน่งคาร์บอนอะตอม C6 บนโครงสร้างของแป้งมันสำปะหลังดัดแปร โดยผลของอัตราส่วนของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำของ SAP ลดลง เนื่องจากโครงสร้างของ SAP มีรูพรุนมากขึ้น โดยที่อัตราส่วนของแป้งมันสำปะหลังดัดแปรต่อกรดอะคริลิกมอนอเมอร์ 1 ต่อ 3 ให้ค่าการดูดซึมน้ำสูงสุด ( $201 \pm 4 \text{ g g}^{-1}$ ) เมื่อเปรียบเทียบกับค่าการดูดซึมน้ำในน้ำปราศจากไอออน ในสารละลายเกลือ และภายใต้ภาวะที่มีแรงกด รวมถึงค่าความหนาแน่นของพันธะเชื่อมขวางของ SAP ที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังกราฟต์พอลิโพแทสเซียมอะคริเลต กับแป้งมันสำปะหลังดัดแปรกราฟต์พอลิโพแทสเซียมอะคริเลต พบว่า SAP ทั้ง 2 ประเภทให้ค่าใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ SAP ทั้ง 2 ประเภทที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์อะไมเลสแล้ว นำมาทดสอบด้วยสารละลายเบนเดกต์และสารละลายไอโอดีน พบว่า SAP ที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปรที่มีประสิทธิภาพในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียกราฟต์พอลิโพแทสเซียมอะคริเลต ยังคงความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพด้วยเอนไซม์อะไมเลสได้ จึงสรุปได้ว่าสารดัดแปรผิว ZnO/TEOS บนโครงสร้างของแป้งมันสำปะหลัง ไม่มีอิทธิพลต่อค่าการดูดซึมน้ำ การบวมตัว ไม่มีอิทธิพลต่อการเชื่อมขวาง และไม่ขัดขวางการย่อยสลายทางชีวภาพของ SAP ดังนั้น SAP ที่สังเคราะห์ได้ในงานวิจัยนี้ น่าจะนำไปประยุกต์ในด้านการเกษตร ในการแก้ไขปัญหาการปลูกพืชในภาวะภัยแล้งในดินร่วนปนทรายได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

## 4.2 ข้อเสนอแนะ

- 4.2.1 ศึกษาผลการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของ SAP โดยวิธีวัดความขุ่น (turbidity method) ของสารตัวอย่าง ทุก ๆ 2 ชั่วโมง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ซึ่งความขุ่นที่เพิ่มขึ้น เสนอให้เห็นว่า มีจำนวนของเซลล์แบคทีเรียเพิ่มขึ้น (Noppakundilokrat et al., 2013)
- 4.2.2 ศึกษาการทดสอบความเป็นพิษของ SAP ที่สังเคราะห์ได้จากแป้งมันสำปะหลังดัดแปรกราฟต์พอลิอะคริเลต ต่อการเจริญเติบโตของพืชที่ไวต่อพิษสารเคมี (พืชตระกูลถั่ว ข้าว) เนื่องจากมี ZnO เป็นองค์ประกอบ โดยนำ SAP ที่สังเคราะห์ได้ผสมกับดินไปใช้ปลูกพืชชนิดนั้น ๆ พร้อมกับศึกษาผลิตภัณฑ์ทางเกษตรที่มีคุณภาพทั้งด้านราคาและโภชนาการ
- 4.2.3 ศึกษาผลของ ZnO ในโครงสร้างของ SAP ต่อการสลายตัวของโครงสร้าง SAP เมื่ออยู่ในภาวะที่มีแสงหรือรังสี เนื่องจาก ZnO เป็นสาร photocatalyst
- 4.2.4 ศึกษาผลขององค์ประกอบในดินชนิดต่าง ๆ โดยนำ SAP ที่สังเคราะห์ได้จากแป้งมันสำปะหลังดัดแปรกราฟต์พอลิอะคริเลต ไปทดสอบการปลูกพืชร่วมกับดินชนิดต่าง ๆ และติดตามการเจริญเติบโตของพืช

## 4.3 การประยุกต์ผลงานวิจัยที่ได้

จากข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้ สามารถนำไปใช้ประโยชน์ด้านเกษตรกรรมดังนี้ ผลิตภัณฑ์ SAP ที่เตรียมจากแป้งมันสำปะหลังดัดแปรด้วย ZnO/TEOS กราฟต์ด้วยพอลิโพแทสเซียมอะคริเลต มีความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียและการย่อยสลายทางชีวภาพ และนำไปใช้ปลูกพืชร่วมกับดินได้หลายชนิด โดยเฉพาะอย่างยิ่งดินร่วนปนทราย เพื่อเพิ่มความสามารถในการกักเก็บน้ำ ความชุ่มชื้นให้แก่ดิน ส่งผลให้พืชเจริญเติบโตได้ดี และได้ผลิตภัณฑ์ทางเกษตรที่มีคุณภาพทั้งด้านราคาและโภชนาการ

## เอกสารอ้างอิง

- “แป้งตัดแปรรูป”[ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: <http://digi.library.tu.ac.th/thesis/st/0377/03 CHAPTER 2.pdf>
- “ดินและพืช”[ออนไลน์]. เข้าถึงได้จาก: [http://natres.psu.ac.th/Department/plantscience/510-111web/book/book%20content.htm/chapter04/Agri\\_04.htm](http://natres.psu.ac.th/Department/plantscience/510-111web/book/book%20content.htm/chapter04/Agri_04.htm)
- วารุณี ตานันต์, & สายันต์ แสงสุวรรณ. พอลิเมอร์ดูดซับน้ำได้มาก: การสังเคราะห์ การวิเคราะห์และการประยุกต์ใช้. *Journal of Science and Technology, Ubon Ratchathani University*, 16(2), 63-81.
- Ahmed, A. A. K., Naik, H. B., & Sherigara, B. S. (2009). Synthesis and characterization of chitosan-based pH-sensitive semi-interpenetrating network microspheres for controlled release of diclofenac sodium. *Carbohydrate Research*, 344(5), 699-706.
- Angadi, S. C., Manjeshwar, L. S., & Aminabhavi, T. M. (2010). Interpenetrating polymer network blend microspheres of chitosan and hydroxyethyl cellulose for controlled release of isoniazid. *International Journal of Biological Macromolecules*, 47(2), 171-179.
- Ansari, M. A., Khan, H. M., Khan, A. A., Sultan, A., & Azam, A. (2012). Synthesis and characterization of the antibacterial potential of ZnO nanoparticles against extended-spectrum  $\beta$ -lactamases-producing *Escherichia coli* and *Klebsiella pneumoniae* isolated from a tertiary care hospital of North India. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 94(2), 467-477.
- Bai, S., Hu, J., Li, D., Luo, R., Chen, A., & Liu, C. C. (2011). Quantum-sized ZnO nanoparticles: synthesis, characterization and sensing properties for NO<sub>2</sub>. *Journal of Materials Chemistry*, 21(33), 12288-12294.
- Barrera, E. G., Livotto, P. R., & dos Santos, J. H. (2016). Hybrid silica bearing different organosilanes produced by the modified Stöber method. *Powder Technology*, 301, 486-492.
- Cai, Z., & Kim, J. (2009). Cellulose–chitosan interpenetrating polymer network for electro-active paper actuator. *Journal of Applied Polymer Science*, 114(1), 288-297.
- Cândido, J. D. S., Leitao, R. C., Ricardo, N. M., Feitosa, J. P., Muniz, E. C., & Rodrigues, F. H. (2012). Hydrogels composite of poly(acrylamide-co-acrylate) and rice husk ash. I. Synthesis and characterization. *Journal of Applied Polymer Science*, 123(2), 879-887.

- Chaichua, B., Prasassarakich, P., & Poompradub, S. (2009). In situ silica reinforcement of natural rubber by sol-gel process via rubber solution. *Journal of Sol-Gel Science and Technology*, 52(2), 219-227.
- Chen, X. P., Shan, G. R., Huang, J., Huang, Z. M., & Weng, Z. X. (2004). Synthesis and properties of acrylic-based superabsorbent. *Journal of Applied Polymer Science*, 92(1), 619-624.
- Chen, L., Wang, Y., Fei, P., Jin, W., Xiong, H., & Wang, Z. (2017). Enhancing the performance of starch-based wood adhesive by silane coupling agent (KH570). *International journal of biological macromolecules*, 104, 137-144.
- Chen, Y., Ding, H., & Sun, S. (2017). Preparation and characterization of ZnO nanoparticles supported on amorphous SiO<sub>2</sub>. *Nanomaterials*, 7(8), 217.
- Deng, T. S., Zhang, Q. F., Zhang, J. Y., Shen, X., Zhu, K. T., & Wu, J. L. (2009). One-step synthesis of highly monodisperse hybrid silica spheres in aqueous solution. *Journal of Colloid and Interface Science*, 329(2), 292-299.
- Dobić, S. N., Filipović, J. M., & Tomić, S. L. (2012). Synthesis and characterization of poly (2-hydroxyethyl methacrylate/itaconic acid/poly(ethylene glycol) dimethacrylate) hydrogels. *Chemical Engineering Journal*, 179, 372-380.
- Dutta, S., & Dhara, D. (2015). Effect of preparation temperature on salt-induced deswelling and pattern formation in poly(N-isopropylacrylamide) hydrogels. *Polymer*, 76, 62-69.
- Elliott, M. (2004). Superabsorbent polymers. *Product development scientist for SAP. BASF Aktiengesellschaft ss*, 13.
- Elvira, C., Mano, J. F., San Roman, J., & Reis, R. L. (2002). Starch-based biodegradable hydrogels with potential biomedical applications as drug delivery systems. *Biomaterials*, 23(9), 1955-1966.
- Guilherme, M. R., Reis, A. V., Takahashi, S. H., Rubira, A. F., Feitosa, J. P., & Muniz, E. C. (2005). Synthesis of a novel superabsorbent hydrogel by copolymerization of acrylamide and cashew gum modified with glycidyl methacrylate. *Carbohydrate Polymers*, 61(4), 464-471.
- Hadavand, B. S., Ataefard, M., & Bafghi, H. F. (2015). Preparation of modified nano ZnO/polyester/TGIC powder coating nanocomposite and evaluation of its antibacterial activity. *Composites Part B: Engineering*, 82, 190-195.
- Hamdi, G., & Ponchel, G. (1999). Enzymatic degradation of epichlorohydrin crosslinked starch microspheres by  $\alpha$ -amylase. *Pharmaceutical research*, 16(6), 867-875.

- Hezaveh, H., & Muhamad, I. I. (2013). Effect of MgO nanofillers on burst release reduction from hydrogel nanocomposites. *Journal of Materials Science: Materials in Medicine*, 24(6), 1443-1453.
- Hoffman, A. S. (2012). Hydrogels for biomedical applications. *Advanced Drug Delivery Reviews*, 64, 18-23.
- Hu, J., Zhong, Z., Zhang, F., Xing, W., Low, Z. X., & Fan, Y. (2015). Coating of ZnO nanoparticles onto the inner pore channel surface of SiC foam to fabricate a novel antibacterial air filter material. *Ceramics International*, 41(5), 7080-7090.
- Irani, M., Ismail, H., Ahmad, Z., & Fan, M. (2015). Synthesis of linear low-density polyethylene-g-poly (acrylic acid)-co-starch/organo-montmorillonite hydrogel composite as an adsorbent for removal of Pb (II) from aqueous solutions. *Journal of Environmental Sciences*, 27, 9-20.
- Kaewtatip, K., & Tanrattanakul, V. (2008). Preparation of cassava starch grafted with polystyrene by suspension polymerization. *Carbohydrate Polymers*, 73(4), 647-655.
- Kazanskii, K. S., & Dubrovskii, S. A. (1992). Chemistry and physics of "agricultural" hydrogels. In *Polyelectrolytes hydrogels chromatographic materials* (pp. 97-133). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Khan, M. J., Zhang, J., & Guo, Q. (2016). Covalent/crystallite cross-linked co-network hydrogels: An efficient and simple strategy for mechanically strong and tough hydrogels. *Chemical Engineering Journal*, 301, 92-102.
- Kiatkamjornwong, S., Chomsaksakul, W., & Sonsuk, M. (2000). Radiation modification of water absorption of cassava starch by acrylic acid/acrylamide. *Radiation Physics and Chemistry*, 59(4), 413-427.
- Kiatkamjornwong, S. (2007). Superabsorbent polymers and superabsorbent polymer composites. *ScienceAsia*, 33(s1), 39.
- Kumar, R., Rashid, J., & Barakat, M. A. (2014). Synthesis and characterization of a starch–AlOOH–FeS<sub>2</sub> nanocomposite for the adsorption of congo red dye from aqueous solution. *RSC advances*, 4(72), 38334-38340.
- Li, A., Wang, A., & Chen, J. (2004). Studies on poly (acrylic acid)/attapulgit superabsorbent composite. I. Synthesis and characterization. *Journal of Applied Polymer Science*, 92(3), 1596-1603.

- Li, M. C., Lee, J. K., & Cho, U. R. (2012). Synthesis, characterization, and enzymatic degradation of starch-grafted poly (methyl methacrylate) copolymer films. *Journal of Applied Polymer Science*, 125(1), 405-414.
- Lira, L. M., Martins, K. A., & de Torresi, S. I. C. (2009). Structural parameters of polyacrylamide hydrogels obtained by the Equilibrium Swelling Theory. *European Polymer Journal*, 45(4), 1232-1238.
- Liu, G., Huang, Z. H., & Kang, F. (2012). Preparation of ZnO/SiO<sub>2</sub> gel composites and their performance of H<sub>2</sub>S removal at room temperature. *Journal of Hazardous Materials*, 215, 166-172.
- Lu, S., Duan, M., & Lin, S. (2003). Synthesis of superabsorbent starch-graft-poly (potassium acrylate-co-acrylamide) and its properties. *Journal of Applied Polymer Science*, 88(6), 1536-1542.
- Mahou, R., & Wandrey, C. (2010). Alginate– Poly (ethylene glycol) hybrid microspheres with adjustable physical properties. *Macromolecules*, 43(3), 1371-1378.
- Mignon, A., Graulus, G. J., Snoeck, D., Martins, J., De Belie, N., Dubruel, P., & Van Vlierberghe, S. (2015). pH-sensitive superabsorbent polymers: a potential candidate material for self-healing concrete. *Journal of Materials Science*, 50(2), 970-979.
- Murthy, P. K., Mohan, Y. M., Sreeramulu, J., & Raju, K. M. (2006). Semi-IPNs of starch and poly (acrylamide-co-sodium methacrylate): Preparation, swelling and diffusion characteristics evaluation. *Reactive and Functional Polymers*, 66(12), 1482-1493.
- Nakason, C., Wohmang, T., Kaesaman, A., & Kiatkamjornwong, S. (2010). Preparation of cassava starch-graft-polyacrylamide superabsorbents and associated composites by reactive blending. *Carbohydrate Polymers*, 81(2), 348-357.
- Nesrinne, S., & Djamel, A. (2017). Synthesis, characterization and rheological behavior of pH sensitive poly (acrylamide-co-acrylic acid) hydrogels. *Arabian Journal of Chemistry*, 10(4), 539-547.
- Noppakundilokrat, S., Sonjaipanich, K., Thongchul, N., & Kiatkamjornwong, S. (2013). Syntheses, characterization, and antibacterial activity of chitosan grafted hydrogels and associated mica-containing nanocomposite hydrogels. *Journal of Applied Polymer Science*, 127(6), 4927-4938.



- Poompradub, S., Thirakulrati, M., & Prasassarakich, P. (2014). In situ generated silica in natural rubber latex via the sol–gel technique and properties of the silica rubber composites. *Materials Chemistry and Physics*, 144(1-2), 122-131.
- Pullagurala, V. L. R., Adisa, I. O., Rawat, S., Kim, B., Barrios, A. C., Medina-Velo, I. A., ... & Gardea-Torresdey, J. L. (2018). Finding the conditions for the beneficial use of ZnO nanoparticles towards plants-A review. *Environmental pollution*.
- Qiao, D., Liu, H., Yu, L., Bao, X., Simon, G. P., Petinakis, E., & Chen, L. (2016). Preparation and characterization of slow-release fertilizer encapsulated by starch-based superabsorbent polymer. *Carbohydrate Polymers*, 147, 146-154.
- Qu, J., & He, L. (2013). Synthesis and properties of silane-fluoroacrylate grafted starch. *Carbohydrate Polymers*, 98(1), 1056-1064.
- Reis, A. V., Guilherme, M. R., Moia, T. A., Mattoso, L. H., Muniz, E. C., & Tambourgi, E. B. (2008). Synthesis and characterization of a starch-modified hydrogel as potential carrier for drug delivery system. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 46(7), 2567-2574.
- Rokhade, A. P., Patil, S. A., & Aminabhavi, T. M. (2007). Synthesis and characterization of semi-interpenetrating polymer network microspheres of acrylamide grafted dextran and chitosan for controlled release of acyclovir. *Carbohydrate Polymers*, 67(4), 605-613.
- Sadeghi, M., & Hosseinzadeh, H. (2008). Synthesis and swelling behavior of starch-poly (sodium acrylate-co-acrylamide) superabsorbent hydrogel. *Turkish Journal of Chemistry*, 32(3), 375-388.
- Santiago, F., Mucientes, A. E., Osorio, M., & Rivera, C. (2007). Preparation of composites and nanocomposites based on bentonite and poly (sodium acrylate). Effect of amount of bentonite on the swelling behaviour. *European Polymer Journal*, 43(1), 1-9.
- Seetapan, N., Anasuwan, N., & Kiatkamjornwong, S. (2015). Superabsorbent polymer nanocomposites with surfactant-or acid-modified Ca-montmorillonite: synthesis and water absorbency. *Journal of Polymer Research*, 22(3), 31.
- Servant, A., Methven, L., Williams, R. P., & Kostarelos, K. (2013). Electroresponsive polymer–carbon nanotube hydrogel hybrids for pulsatile drug delivery in vivo. *Advanced Healthcare Materials*, 2(6), 806-811.

- Shi, J., Alves, N. M., & Mano, J. F. (2006). Drug release of pH/temperature-responsive calcium alginate/poly(N-isopropylacrylamide) semiIPN beads. *Macromolecular Bioscience*, 6(5), 358-363.
- Singh, T. R. R., McCarron, P. A., Woolfson, A. D., & Donnelly, R. F. (2009). Investigation of swelling and network parameters of poly (ethylene glycol)-crosslinked poly (methyl vinyl ether-co-maleic acid) hydrogels. *European Polymer Journal*, 45(4), 1239-1249.
- Sittiphan, T., Prasassarakich, P., & Poompradub, S. (2014). Styrene grafted natural rubber reinforced by in situ silica generated via sol-gel technique. *Materials Science and Engineering: B*, 181, 39-45.
- Soleimani, F., & Sadeghi, M. (2012). Synthesis of pH-sensitive hydrogel based on Starch-Polyacrylate Superabsorbent. *Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology*, 3(2A), 310.
- Tang, H., Xiong, H., Tang, S., & Zou, P. (2009). A starch-based biodegradable film modified by nano silicon dioxide. *Journal of Applied Polymer Science*, 113(1), 34-40.
- Theppradit, T., Prasassarakich, P., & Poompradub, S. (2014). Surface modification of silica particles and its effects on cure and mechanical properties of the natural rubber composites. *Materials Chemistry and Physics*, 148(3), 940-948.
- Tomar, R. S., Gupta, I., Singhal, R., & Nagpal, A. K. (2007). Synthesis of poly (acrylamide-co-acrylic acid) based superabsorbent hydrogels: Study of network parameters and swelling behaviour. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 46(5), 481-488.
- Tu, N., Kien, N. D. T., Huy, P. T., & Nguyen, D. H. (2017). Effect of substrate temperature on structural and optical properties of ZnO nanostructures grown by thermal evaporation method. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, 85, 174-179.
- Van Der Maarel, M. J., Van der Veen, B., Uitdehaag, J. C., Leemhuis, H., & Dijkhuizen, L. (2002). Properties and applications of starch-converting enzymes of the  $\alpha$ -amylase family. *Journal of biotechnology*, 94(2), 137-155.
- Watcharakul, N., Poompradub, S., & Prasassarakich, P. (2011). In situ silica reinforcement of methyl methacrylate grafted natural rubber by sol-gel process. *Journal of Sol-gel Science and Technology*, 58(2), 407-418.
- Wisutiratanamane, A., Poochinda, K., & Poompradub, S. (2017). Low-temperature particle synthesis of titania/silica/natural rubber composites for antibacterial properties. *Advanced Powder Technology*, 28(4), 1263-1269.

- Wongthong, P., Nakason, C., Pan, Q., Rempel, G. L., & Kiatkamjornwong, S. (2014). Styrene-assisted grafting of maleic anhydride onto deproteinized natural rubber. *European Polymer Journal*, *59*, 144-155.
- Xue, W., Champ, S., & Huglin, M. B. (2001). Network and swelling parameters of chemically crosslinked thermoreversible hydrogels. *Polymer*, *42*(8), 3665-3669.
- Yang, J., Han, C. R., Duan, J. F., Xu, F., & Sun, R. C. (2013). In situ grafting silica nanoparticles reinforced nanocomposite hydrogels. *Nanoscale*, *5*(22), 10858-10863.
- Zhang, Z., Chen, P., Du, X., Xue, Z., Chen, S., & Yang, B. (2014). Effects of amylose content on property and microstructure of starch-graft-sodium acrylate copolymer. *Carbohydrate polymers*, *102*, 453-459.
- Zhang, Y. N., Cui, J. Y., & Xu, S. A. (2015). Effects of chain structures of corn starches on starch-based superabsorbent polymers. *Starch-Stärke*, *67*(11-12), 949-957.
- Zheng, Y., & Wang, A. (2008). Study on superabsorbent composites. XVIII. Preparation, characterization, and property evaluation of poly (acrylic acid-co-acrylamide)/organomontmorillonite/sodium humate superabsorbent composites. *Journal of Applied Polymer Science*, *108*(1), 211-219.
- Zou, W., Yu, L., Liu, X., Chen, L., Zhang, X., Qiao, D., & Zhang, R. (2012). Effects of amylose/amylopectin ratio on starch-based superabsorbent polymers. *Carbohydrate polymers*, *87*(2), 1583-1588.

## ประวัตินักวิจัย และคณะ

### หัวหน้าโครงการ



รองศาสตราจารย์ ดร. ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ  
(Assoc. Prof. Dr. Sirilux Poompradub)  
ภาควิชาเคมีเทคนิค  
คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 1. ข้อมูลส่วนตัว

ชื่อ-นามสกุล                      ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ  
สถานที่ทำงาน                    ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถนนพญาไท เขต  
ปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330  
โทรศัพท์                      0-2218-7518                      โทรสาร                      0-2255-5831  
E-mail:                      sirilux.p@chula.ac.th  
สถานที่ทำงาน                    คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ  
10330

### 2. ประวัติการศึกษา

คุณวุฒิ	ปี พ.ศ. ที่จบ	ชื่อสถานศึกษา	ประเทศ
วท.บ. (เคมี)	2541	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	ไทย
วท.ม. (เคมี)	2544	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	ไทย
D. Eng (Polymer Chemistry)	2548	มหาวิทยาลัยเกียวโต	ญี่ปุ่น

### 3. ประวัติการทำงาน

ต.ค. 2548 – มิ.ย. 2551                      อาจารย์ระดับ 5 ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์  
มหาวิทยาลัย  
ต.ค. 2548 - พ.ค. 2549                      ผู้ช่วยหัวหน้าห้องวิจัยยาง  
ต.ค. 2548 - พ.ค. 2549                      ผู้ช่วยหัวหน้าห้องปฏิบัติการ Physical Laboratory  
พ.ศ. 2548 – ปัจจุบัน                      ได้รับการแต่งตั้งเป็น Reviewer พิจารณาบทความวิจัยตีพิมพ์ในวารสาร  
ระดับนานาชาติ  
มี.ค. 2549 - พ.ค. 2549                      รักษาการแทนประสานงานตารางสอน/ตารางสอบ  
มิ.ย. 2549 – ปัจจุบัน                      หัวหน้าห้องวิจัยยาง

มิ.ย. 2549 – ปัจจุบัน	หัวหน้าห้องปฏิบัติการ Physical Laboratory
พ.ศ. 2549 - ปัจจุบัน	สมาชิกสมาคมโพลิเมอร์แห่งประเทศไทย
มิ.ย. 2551 – มิ.ย. 2557	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ A-4 ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ส.ค. 2551 – ต.ค 2556	ผู้ประสานงานจัดสอบ ภาควิชาเคมีเทคนิค
พ.ศ. 2551 – ต.ค 2556	กรรมการจัดสอบประจำคณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2555 – ปัจจุบัน	ผู้ประสานงานฝ่ายวิจัยและบริการวิชาการ ภาควิชาเคมีเทคนิค
พ.ศ. 2555 – ปัจจุบัน	กรรมการบริหารหลักสูตรวิทยาศาสตร์ดุซงกีบัณฑิตและหลักสูตรวิทยาศา ศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
มิ.ย. 2557 - ปัจจุบัน	รองศาสตราจารย์ A-3 ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย
พ.ศ. 2557 - 2559	กองบรรณาธิการของวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัย เทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี (Science and Technology RMUTT Journal)
พ.ศ. 2558 – 2560	กรรมการบริหารหลักสูตรวิทยาศาสตรดุซงกีบัณฑิต สาขาวิชาปิโตรเคมีและ วิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ และหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชา ปิโตรเคมีและวิทยาศาสตร์พอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย
1 ก.ย. 2559 – 31 มี.ค. 2561	Part-time Senior Fellow at the Center for Rubber Science and Technology, Kyoto Institute of Technology, Kyoto, Japan

#### 4. งานวิจัย

- พอลิเมอร์นาโนคอมพอสิต
- Rubber Science and Technology
- การสังเคราะห์ซิลิกาโดยปฏิกิริยาโซล-เจลในยางธรรมชาติ
- การวิเคราะห์โครงสร้างของยางธรรมชาติภายใต้แรงดึงโดยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ที่มุมกว้าง (Wide angle X-ray diffraction: WAXD)
- การสังเคราะห์เชื้อเพลิงแข็งจากยางล้อรถยนต์ที่เหลือใช้
- ยางรีไซเคิล

## 5. ทุนวิจัย

- ทุนพัฒนาอาจารย์ใหม่ปีที่ 1 กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปี 2549 – 2550
- ทุนทำวิจัยระยะสั้น TJTTP-OECF ณ Kyoto Institute of Technology ประเทศญี่ปุ่น ปี 2549
- ทุนพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย และสำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา ประจำปีงบประมาณ 2550
- ทุนโครงการวิจัยขนาดเล็กเรื่องยางพารา (Small Projects on Rubber, SPR) ประจำปีงบประมาณ 2550
- ทุนพัฒนาอาจารย์ใหม่ปีที่ 2 กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปี 2550 – 2552
- ทุนสนับสนุนโครงการวิจัยจากบริษัท Toyo Tire & Rubber Co., Ltd ประเทศญี่ปุ่น ประจำปีงบประมาณ 2551-2556
- ทุนโครงการวิจัยขนาดเล็กเรื่องยางพารา (Small Projects on Rubber, SPR) ประจำปีงบประมาณ 2551
- ทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีงบประมาณ 2551
- ทุนอุดหนุนการวิจัยระดับปริญญาตรี กองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน ประจำปีงบประมาณ 2551
- ทุนอุดหนุนการวิจัยระดับปริญญาตรี โครงการปรับปรุงกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมด้วยเทคโนโลยีสะอาด เครือข่ายความร่วมมือระหว่างจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยและศูนย์เทคโนโลยีโลหะวัสดุแห่งชาติ ประจำปี 2551
- ทุนโครงการวิจัยขนาดเล็กเรื่องยางพารา (Small Projects on Rubber, SPR) ประจำปีงบประมาณ 2552
- ทุนอุดหนุนการวิจัยระดับปริญญาตรี กองทุนเพื่อส่งเสริมการอนุรักษ์พลังงาน ประจำปีงบประมาณ 2552
- ทุนโครงการวิจัยขนาดเล็กเรื่องยางพารา (Small Projects on Rubber, SPR) ประจำปีงบประมาณ 2553
- ทุนโครงการวิจัยขนาดกลางเรื่องยางพารา (Medium-size Projects on Rubber, MPR) ประจำปีงบประมาณ 2553
- ทุนวิจัยมหาบัณฑิต สกว. – สถาบันการศึกษา (Window II) ประจำปีงบประมาณ 2553
- ทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิต จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ปีงบประมาณ 2553
- ทุนโครงการวิจัยขนาดเล็กเรื่องยางพารา (Small Projects on Rubber, SPR) ประจำปีงบประมาณ 2554
- ทุนรัฐบาลญี่ปุ่น (The Japan International Cooperation Agency under the International Cooperation Program of the Government of Japan: JICA) เพื่ออบรมหลักสูตร “Base for

Catalytic Technology and High Efficient Process for Production of New biodiesel”  
ภายใต้โครงการ “ Development of New Biodiesel Synthesis in Thailand” 17 สิงหาคม -  
17 กันยายน 2554

- ทูลพัฒนาศักยภาพในการทำงานวิจัยของอาจารย์รุ่นใหม่ สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย สำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา และจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ประจำปีงบประมาณ 2554
- ทูล 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช รุ่นที่ 14 (1/2554)
- ทูลสนับสนุนโครงการวิจัยจากบริษัทไออาร์พีซี จำกัด (มหาชน) ประจำปีงบประมาณ 2554
- ทูลสนับสนุนโครงการวิจัยจากบริษัทไออาร์พีซี จำกัด (มหาชน) ประจำปีงบประมาณ 2556
- ทูลยุทธศาสตร์การวิจัยเชิงลึก จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ประจำปีงบประมาณ 2556
- ทูลอุดหนุนการวิจัยจากทุนเพิ่มศักยภาพส่วนงานในด้านการวิจัย กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช ประจำปีงบประมาณ 2558
- ทูลสนับสนุนและส่งเสริมโครงการขับเคลื่อนการวิจัย (STAR) กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช ประจำปีงบประมาณ 2558
- ทูลสนับสนุนโครงการวิจัยจากบริษัท Givaudan Singapore Pte Ltd ประจำปีงบประมาณ 2559
- ทูลสนับสนุนและส่งเสริมโครงการขับเคลื่อนการวิจัย (STAR) กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช ประจำปีงบประมาณ 2560
- เงินอุดหนุนการวิจัยจากรัฐบาล ประจำปีงบประมาณ 2561
- ทูลสนับสนุนโครงการวิจัยจากบริษัท เค.เอ. เอ็นจิเนียริงเวิร์ค ประจำปีงบประมาณ 2561

## 6. งานวิจัย

1. T. Tuntulani, **S. Poompradub**, P. Thavornyutikarn, N. Jaiboon, V. Ruangpornvisuti, N. Chaichit, Z. Asfari and J. Vicens, “Aza crown ether calix[4]arenes containing cation and anion binding sites: effects of metal ions towards anion binding ability” *Tetrahedron Lett.*, **42**, 5541-5544 (2001).
2. T. Tuntulani, P. Thavornyutikarn, **S. Poompradub**, N. Jaiboon, V. Ruangpornvisuti, N. Chaichit, Z. Asfari and J. Vicens, “Synthesis of tripodal aza crown ether calix[4]arenes and their supramolecular chemistry with transition, alkali metal ions and anions” *Tetrahedron*, **58**, 10277-10285 (2002).
3. M. Tosaka, S. Murakami, **S. Poompradub**, S. Kohjiya, Y. Ikeda, S. Toki, I. Sics and B. S. Hsiao, “Orientation and crystallization of natural rubber network as revealed by WAXD using synchrotron radiation” *Macromolecules*, **37** (9), 3299-3309 (2004).

4. **S. Poompradub**, M. Tosaka, S. Kohjiya, Y. Ikeda, S. Toki, I. Sics and B. S. Hsiao, "Lattice deformation of strain-induced crystallites in carbon-filled natural rubber" *Chem. Lett.*, **33** (3), 220-221 (2004).
5. M. Tosaka, S. Kohjiya, S. Murakami, **S. Poompradub**, Y. Ikeda, S. Toki, I. Sics and B. S. Hsiao, "Effect of network-chain length on strain-induced crystallization of NR and IR vulcanizates" *Rubber Chem. Technol.*, **77** (4), 711-723 (2004).
6. S. Toki, I. Sics, B. S. Hsiao, S. Murakami, M. Tosaka, **S. Poompradub**, S. Kohjiya and Y. Ikeda, "Structural developments in synthetic rubbers during uniaxial deformation by *in situ* synchrotron X-ray diffraction" *J. Polym. Sci.: Part B: Polym. Phys.*, **42**, 956-964 (2004).
7. S. Toki, I. Sics, S. Ran, L. Liu, B. S. Hsiao, S. Murakami, M. Tosaka, S. Kohjiya, **S. Poompradub**, Y. Ikeda and A. H. Tsou, "Strain-induced molecular orientation and crystallization in natural and synthetic rubbers under uniaxial deformation by *in-situ* synchrotron X-ray study" *Rubber Chem. Technol.*, **77** (2), 317-335 (2004).
8. **S. Poompradub**, M. Tosaka, S. Kohjiya, Y. Ikeda, S. Toki, I. Sics and B. S. Hsiao, "Mechanism of strain-induced crystallization in filled and unfilled natural rubber vulcanizates" *J. Appl. Phys.* **97**, 103529/1-103529/9 (2005).
9. **S. Poompradub**, S. Kohjiya and Y. Ikeda, "Natural rubber/*in situ* silica nano-composite of a high silica content" *Chem. Lett.* **34**, 672-673 (2005).
10. S. Toki, I. Sics, B. S. Hsiao, M. Tosaka, **S. Poompradub**, Y. Ikeda and S. Kohjiya, "Probing the nature of strain-induced crystallization of polyisoprene rubber by combined thermomechanical and *in situ* X-ray diffraction techniques" *Macromolecules*, **38** (16), 7064-7073 (2005).
11. Y. Ikeda, A. Kato, J. Shimanuki, S. Kohjiya, M. Tosaka, **S. Poompradub**, S. Toki and B. S. Hsiao "Nano-Structural Elucidation In Carbon Black Loaded NR Vulcanizate By 3D-TEM And In Situ WAXD Measurements" *Rubber Chem. Technol.*, **80** (2), 251-264 (2007).
12. Y. Ikeda, **S. Poompradub**, Y. Morita and S. Kohjiya, "Preparation of high performance nanocomposite elastomer: effect of reaction conditions on *in situ* silica generation of high content in natural rubber" *J. Sol-Gel Sci. Technol.*, **45**, 299-306 (2008).
13. **S. Poompradub**, B. Chaichua, C. Kanchanaamporn, T. Boosalee, P. Prasassarakich, "Synthesis of Silica in Natural Rubber Solution via Sol-Gel Reaction" *KGK-Kaut. Gummi Kunst.*, **4**, 152-155 (2008).



14. **S. Poompradub**, Y. Ikeda, Y. Kokubo, T. Shiono “Cuttlebone as reinforcing filler for natural rubber” *Eur. Polym. J.*, **44**, 4157-4164 (2008).
15. B. Chaichua, P. Prasassarakich, **S. Poompradub** “In situ silica reinforcement of natural rubber by sol–gel process via rubber solution” *J. Sol-Gel Sci. Techn.* **52**, 219-227 (2009).
16. T. Sittiphan, P. Prasassarakich, **S. Poompradub** “In situ silica filled styrene grafted natural rubber by the sol-gel process” *Adv. Mat. Res.* **93-94**, 525-528 (2010).
17. P. Thaicharoen, P. Thamyongkit, **S. Poompradub** “Thiosalicylic acid as a devulcanizing agent for mechano-chemical devulcanization” *Korean J. Chem. Eng.*, **27**(4), 1177-1183 (2010).
18. P. Klungsuwan, **S. Poompradub** “Smart green composite: Effect of cuttlebone particle on the mechanical properties of NR vulcanizates” *Adv. Mat. Res.* **150-151**, 547-550 (2011).
19. **S. Poompradub**, T. Luthikaviboon, S. Linpoo, R. Rojanathanes, P. Prasassarakich “Improving oxidation stability and mechanical properties of natural rubber vulcanizates filled with calcium carbonate modified by gallic acid” *Polym. Bull.* **66**, 965-977 (2011).
20. N. Watcharakul, **S. Poompradub**, P. Prasassarakich “In situ silica reinforcement of methyl methacrylate grafted natural rubber by sol-gel process” *J. Sol-Gel Sci. Techn.* **58**, 407-418 (2011).
21. S. Mahapram, **S. Poompradub**, “Preparation of natural rubber (NR) latex/low density polyethylene (LDPE) blown film and its properties” *Polym. Test.* **30**, 716–725 (2011).
22. S. Phadungphatthanakoon, **S. Poompradub**, S. P. Wanichwecharungruang, “Increasing the thermal storage capacity of a phase change material by encapsulation: Preparation and application in natural rubber” *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **3**, 3691-3696 (2011).
23. P. Suramane, **S. Poompradub**, R. Rojanathanes, P. Thamyongkit, “Effects of Reaction Parameters in Catalysis of Glycerol Oxidation by Citrate-Stabilized Gold Nanoparticles” *Catal. Lett.*, **141**, 1677-1684 (2011).
24. N. Rungpin, S. Pavasupree, P. Prasassarakich, **S. Poompradub**, “Preparation of calcium carbonate from Thai Golden Apple Snail shells by hydrothermal process as reinforcing filler for poly(vinyl chloride)” *Journal of Srinakharinwirot University*, **3**, 139-147 (2011).
25. P. Klungsuwan, A. Jarerat, **S. Poompradub**, "Mechanical properties and biodegradability of cuttlebone/NR composites" *J. Polym. Environ.*, **21**, 766-779 (2013).

26. S. Nuntang, **S. Poompradub**, S. Butnark, T. Yokoi, T. Tatsumi, C. Ngamcharussrivichai, “Novel mesoporous composites based on natural rubber and hexagonal mesoporous silica: Synthesis and characterization” *Mater. Chem. Phys.* **143 (3)**, 1199-1208 (2014).
27. T. Sittiphan, P. Prasassarakich, **S. Poompradub**, “Styrene grafted natural rubber reinforced by in situ silica generated via sol-gel technique” *Mater. Sci. Eng. B-Adv.*, **181**, 39-45 (2014).
28. **S. Poompradub**, M. Thirakulrati, P. Prasassarakich, “In situ generated silica in natural rubber latex via the sol-gel technique and properties of the silica rubber composites” *Mater. Chem. Phys.* **144**, 122-131 (2014).
29. W. Dechatiwong Na Ayutthaya, **S. Poompradub**, “Thermal and mechanical properties of poly(lactic acid)/natural rubber blend using epoxidized natural rubber and poly(methyl methacrylate) as co-compatibilizers” *Macromol. Res.*, **22(7)**, 686-692 (2014).
30. S. Nuntang, **S. Poompradub**, S. Butnark, T. Yokoi, T. Tatsumi, C. Ngamcharussrivichai, “Organosulfonic acid-functionalized mesoporous composites based on natural rubber and hexagonal mesoporous silica” *Mater. Chem. Phys.* **147**, 583-593 (2014).
31. T. Jaiphuephae, K. Poochinda, **S. Poompradub**, “Yield optimization of spray-dried natural rubber and properties of its silica-filled composite” *Adv. Polym. Technol.* **33(4)**, 21423 (1-6) (2014).
32. T. Theppradit, P. Prasassarakich, **S. Poompradub**, “Surface modification of silica particles and its effects on cure and mechanical properties of the natural rubber composites” *Mater. Chem. Phys.* **148**, 940-948 (2014).
33. N. Rungpin, S. Pavasupree, P. Prasassarakich, **S. Poompradub**, “Production of nano-calcium carbonate from shells of the freshwater channeled applesnail, *Pomacea canaliculata*, by hydrothermal treatment and its application with polyvinyl chloride” *Polym. Comps.* **36**, 1620–1628 (2015).
34. A. Tunlert, P. Prasassarakich, **S. Poompradub**, “Effect of modified silica particles with phenyltriethoxysilane on mechanical and thermal properties of natural rubber composites” *Macromol. Symp.* **354**, 62–68 (2015).
35. T. Witinuntakit, **S. Poompradub**, “Preparation of dichlorocarbene modified butadiene rubber and its thermal properties” *Macromol. Symp.* **354**, 111–117 (2015).

36. A. Gros, M. Tosaka, B. Huneau, E. Verron, **S. Poompradub**, K. Senoo, “Dominating factor of strain-induced crystallization in natural rubber” *Polymer* **76**, 230-236 (2015).
37. A. Tunlert, P. Prasassarakich, **S. Poompradub**, “Antidegradation and reinforcement effects of phenyltrimethoxysilane or N-[3-(trimethoxysilyl)propyl]aniline-modified silica particles in natural rubber composites” *Mater. Chem. Phys.* **173**, 78–88 (2016).
38. T. Chongcharoenchaikul, P. Thamyongkit, **S. Poompradub**, “Synthesis, characterization and properties of a bio-based poly(glycerol azelate) polyester” *Mater. Chem. Phys.* **177**, 485-495 (2016).
39. K. Ongwongsakul, G.L. Rempel, **S. Poompradub**, N. Hinchiranan, “Comparative behavior of in situ silica generation in saturated rubbers: EPDM and hydrogenated natural rubber” *J. Appl. Polym. Sci.* **134**, 44748 (2017).
40. A. Wisutiratanamane, K. Poochinda, **S. Poompradub**, “Low-temperature particle synthesis of titania/silica/natural rubber composites for antibacterial properties” *Adv. Powder Technol.* **28**, 1263-1269 (2017).
41. P. Wipatkrut, **S. Poompradub**, “Exfoliation approach for preparing high conductive reduced graphite oxide and its application in natural rubber composites” *Mater. Sci. Eng. B* **218**, 74–83 (2017).
42. T. Witinuntakit, S. Kiatkamjornwong, **S. Poompradub** “Dichlorocarbene modified butadiene rubber (DCBR): Preparation, kinetic study, and its properties in natural rubber/DCBR blend vulcanizates” *Polym. Adv. Technol.* **29**, 649–657 (2018).
43. N. Chalermwat, R. Rattanaprapanporn, B. Chalermssinsuwan, **S. Poompradub** “Natural Calcium-Based Residues for Carbon Dioxide Capture in a Bubbling Fluidized-Bed Reactor” *Chem. Eng. Technol.* **41(3)**, 428-435 (2018).

## 7. บทความ

ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ. “Reclaimed Rubber”. วารสารส่งเสริมเทคโนโลยี ปีที่ 35, ฉบับที่ 197 (ก.พ. – มี.ค. พ.ศ. 2551): 65 – 71.

## 8. หนังสือ

S. Poompradub, Soft bio-composites from natural rubber (NR) and marine products, in S. Kohjiya and Y. Ikeda, Eds. Chemistry, Manufacture and Applications of Natural Rubber, Woodhead Publishing, London, 2014.

## 9. สิทธิบัตร

1. Y. Ikeda, S. Poompradub, PCT/Japanese Patent 2006/306124 (2006).
2. ราตรี ผูกชอบ **ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ** ศุภศร วณิชเวชารุ่งเรือง “สูตรและกรรมวิธีการสังเคราะห์อนุภาคไมโครกักเก็บสารให้กลิ่นและการนำอนุภาคที่สังเคราะห์ได้ไปใช้ทำผลิตภัณฑ์จากยางพารา” เลขที่คำขอ 1303000846 ยื่นเมื่อวันที่ 31 กรกฎาคม 2556 เจ้าของคำขอ: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์ และจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
3. **ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ** สุภค มหาพรหมณ์ “วิธีการผลิตฟิล์มพอลิโอเลฟินส์ผสมน้ำยางธรรมชาติ” จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เลขที่คำขอ 1201005678 วันที่ยื่นคำขอ 26 ตุลาคม 2555
4. **ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ** ฐาปนี วิธินันทิกิตต์ “กระบวนการเตรียมยางบิวทาไดอินดัดแปรด้วยไดคลอโรคาร์บอน” จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เลขที่คำขอ 1501005694 วันที่ยื่นคำขอ 21 กันยายน 2558
5. **ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ** พัชรา อินทะแสง “กระบวนการผลิตยางธรรมชาติความหนืดที่โดยวิธีกำจัดหมู่คาร์บอนิล” เจ้าของคำขอ: สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย เลขที่คำขอ 1601004080 วันที่ยื่นคำขอ 29 เมษายน 2559

## 10. อนุสิทธิบัตร

1. **ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ** พนวิชญ คลังสุวรรณ “องค์ประกอบของยางธรรมชาติหรือยางสังเคราะห์ที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันโดยเปอร์ออกไซด์ที่มีกระดองปลาหมึกเป็นสารเสริมแรง” จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุสิทธิบัตรเลขที่ 5894 (7 มกราคม 2554)
2. **ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ** พัชณิตา ธรรมรงค์กิจ พิพัฒน์ ไทยเจริญ “วิธีการผลิตยางรีไซเคิลโดยกระบวนการเชิงกลร่วมเคมี” จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุสิทธิบัตรเลขที่ 5895 (7 มกราคม 2554)
3. **ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ** พนวิชญ คลังสุวรรณ “องค์ประกอบของยางธรรมชาติหรือยางสังเคราะห์ที่ผ่านกระบวนการวัลคาไนเซชันโดยซัลเฟอร์ที่มีกระดองปลาหมึกเป็นสารเสริมแรง” จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุสิทธิบัตรเลขที่ 8112 (25 มิถุนายน 2556)
4. **ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ** ณัชพล สวัสดิวิฑฒิพงศ์ ทศพร ชุมเงิน กฤตยา พันพลู เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ “วัสดุดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากน้ำยางธรรมชาติ” จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เลขที่คำขอ 1703002204 วันที่ยื่นคำขอ 8 พฤศจิกายน 2560

5. **ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ** ญัฐนัย วณิชวรสกุล วรุฒ ชิเมอเนซ ณิชพล สวัสดิ์วุฒิมิพงศ์ ทศพร ชุมเงิน กฤตยา พันพลุ เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ “วัสดุดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากยางธรรมชาติวัลคาไนเซชันในระบบเพอร์ออกไซด์” จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เลขที่คำขอ 1703002206 วันที่ยื่นคำขอ 8 พฤศจิกายน 2560
6. **ศิริลักษณ์ พุ่มประดับ** ญัฐนัย วณิชวรสกุล วรุฒ ชิเมอเนซ ณิชพล สวัสดิ์วุฒิมิพงศ์ ทศพร ชุมเงิน กฤตยา พันพลุ เบญจพล เฉลิมสินสุวรรณ “วัสดุดูดซับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากยางธรรมชาติวัลคาไนเซชันในระบบกำมะถัน” จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เลขที่คำขอ 1703002207 วันที่ยื่นคำขอ 8 พฤศจิกายน 2560

## 11. รางวัล

1. The Hitachi Trophy 2008 รางวัลชนะเลิศลำดับที่ 3 สาขาวิทยาศาสตร์ประยุกต์และเทคโนโลยี ในการประกวดโครงการวิจัย Senior Project เรื่อง “Silver nanoparticle based natural rubber film” จาก Chulalongkorn University and Hitachi Asia (Thailand) Co., Ltd.
2. The Science Forum 2008 รางวัลรองชนะเลิศ การแข่งขันเสนอผลงาน แบบบรรยาย เรื่อง “Improvement of the degradation resistance and mechanical properties of rubber by using modified  $\text{CaCO}_3$ ” จากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
3. The Science Forum 2009 (Best Presentation Award) รางวัลรองชนะเลิศ อันดับที่ 2 แบบบรรยาย เรื่อง “Mechano-chemical recycling process of vulcanized natural rubber” จาก จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
4. The Hitachi Trophy 2010 รางวัลชนะเลิศลำดับที่ 1 สาขาวิทยาศาสตร์ประยุกต์และเทคโนโลยี ในการประกวดโครงการวิจัย Senior Project เรื่อง “Improvement of heat combustion of ethanol by carbon additives” จาก Chulalongkorn University and Hitachi Asia (Thailand) Co., Ltd.
5. The Science Forum 2011 (Best Presentation Award) รางวัลรองชนะเลิศแบบโปสเตอร์ เรื่อง “Natural rubber latex/low density polyethylene blend for production of shrinkable film” จาก Chulalongkorn University
6. ประกาศนียบัตรชื่นชมผลงาน ประเภทผลงานวิจัยและวิชาการ ผลงานด้านวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม (พลังงานทดแทน) เรื่อง “โครงการการปรับปรุงค่าความร้อนการเผาไหม้ของเอทานอลให้เหมาะสมต่อการนำไปใช้กับเครื่องยนต์ในอนาคต” จากสภาวิศวกร วันที่ 3 มิถุนายน พ.ศ. 2554
7. The Hitachi Trophy 2012 รางวัลชนะเลิศลำดับที่ 1 สาขาวิทยาศาสตร์ประยุกต์และเทคโนโลยี ในการประกวดโครงการวิจัย Senior Project เรื่อง “ผลของภาวะเอสเทอร์ฟิเคชันเพื่อสังเคราะห์โมโนกลีเซอไรต์ในเครื่องปฏิกรณ์ไมโคร” จาก Chulalongkorn University and Hitachi Asia (Thailand) Co., Ltd.

8. The Science Forum 2013 รางวัลรองชนะเลิศแบบโปสเตอร์ การประกวดโครงการวิทยาศาสตร์ สาขาวิทยาศาสตร์ประยุกต์และเทคโนโลยี เรื่อง “Bio-based polyester from azeleic acid and glycerol” จาก Chulalongkorn University
9. การยกย่องเชิดชูเกียรติเป็นนักวิจัยดาวรุ่ง Rising star ของสมาคมโพลิเมอร์แห่งประเทศไทย ในการประชุมวิชาการโพลิเมอร์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 4 (The 4<sup>th</sup> Polymer Conference of Thailand: PCT-4) ในวันที่ 20-21 มีนาคม 2557 ณ โรงแรมปทุมวัน ปริ๊นเซส กรุงเทพฯ
10. รางวัลจุลมงกุฏ: ยกย่องเชิดชูเกียรตินักวิจัยรุ่นกลางดีเด่น กองทุนเพื่อการวิจัย คณะวิทยาศาสตร์ ประจำปี 2557 (สาขาเทคโนโลยี) วันที่ 24 มีนาคม พ.ศ. 2558
11. รางวัลนักวิจัยรุ่นกลางดีเด่น ประจำปี 2558 คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย วันที่ 6 มกราคม 2558
12. ทุนวิจัย ลอริอัล ประเทศไทย “เพื่อสตรีในงานวิทยาศาสตร์” ประจำปี 2558 โดยการสนับสนุนของ สำนักเลขาธิการแห่งชาติ ว่าด้วยการศึกษา วิทยาศาสตร์ และวัฒนธรรมแห่งสหประชาชาติ (ยูเนสโก)
13. รางวัลจุลมงกุฏ: รางวัลยกย่องเชิดชูเกียรติทุนวิจัย ลอริอัล ประเทศไทย “เพื่อสตรีในงานวิทยาศาสตร์” ประจำปี 2558 คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย วันที่ 22 มีนาคม พ.ศ. 2559

## นักวิจัย

### 1. ข้อมูลส่วนตัว

ชื่อ-นามสกุล (ไทย) นลพรรณ ดิศพัฒน์

(อังกฤษ) Nonpan Dispat

สังกัด ภาควิชาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถนนพญาไท เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ  
10330

โทรศัพท์ 083-846-6767

E-mail: fring\_non@hotmail.com

### 2. ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2558 ปริญญาตรี เคมีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พ.ศ. 2558-2562 นิสิตปริญญาโท เคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พ.ศ. 2562 ปริญญาโท สาขาเคมีเทคนิค จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ที่ปรึกษาโครงการ

ศาสตราจารย์กิตติคุณ ดร. สูดา เกียรติกำจรวงศ์

Prof. Emeritus Dr. Suda Kiatkamjornwong

List of publications *exhibited only ISI publication*

### Articles in peered review technical journals (ISI journals)

1. Kiatkamjornwong, S., Tommamichele, F. 1978. Transquide-Testelement und Europaskala, der Druckfarben: - Eine Untersuchung der Actinetaet. Fachhafte Bulletin Technique, 4, 187 –196.
2. Kiatkamjornwong, S., Chvajarenpun, J., Nakason, C. 1993. Modification on Liquid Retention Property of Cassava Starch by Radiation Grafting with Acrylonitrile. I. Effect of  $\gamma$ -Irradiation on Grafting Parameters. Radiation Physics and Chemistry, 42(1–3), 47–52.
3. Kiatkamjornwong, S., Noppakundilokrat, S., Yoshinobu, B., Nishide, K. 1996. Toner Charge Measurement and Evaluation with Newly Developed Non-Chromium Containing Charge Control Agent. ASEAN Journal of Science and Technology, 13(2), 19 – 36.
4. Kiatkamjornwong, S., Harnwanichsak, S., Visitsakvasin, S., Wattanawong, R. 1996. Deinking of UV-ink Printed-Paper, Journal of Oil Color and Chemist Association, Surface Coating International Part A 79(7), 320-326.
5. Kiatkamjornwong, S., Meechai, N. 1997. Enhancement of the Grafting Performance and of the Water Absorbing of Cassava Starch Graft Copolymer by Gamma Radiation. Radiation Physics and Chemistry, 49(6), 689 – 696.
6. Kiatkamjornwong, S., Suwanmala, P. 1997. Effect of Total Dose on Water Absorption of Partially Hydrolyzed Polyacrylamide-co-Poly(Vinyl Pyrrolidone) Superabsorbent by Gamma Irradiation. Radiation Physics and Chemistry, 50, 617 – 624.
7. Kiatkamjornwong, S., Noppakundilokrat, S., Ando, S., Hoshino, Y. 1997. Toner Adhesion Force Estimation by Electric Field Activated Toner Jumping. Journal of Imaging Technology, 41(1), 54 – 58.
8. Kiatkamjornwong, S., Suwanmala, P. 1998. Partially Hydrolyzed Polyacrylamide-co-Poly(1-Vinyl-2-Pyrrolidone) Synthesized by Gamma Irradiation. Journal of Applied Polymer Science, 68, 191 – 203.



9. Kiatkamjornwong, S., Suwanmala, P. 1998. Effect of Dose Rate on Water Absorption of Partially Hydrolyzed Polyacrylamide-co-Poly(Vinyl Pyrrolidone) Superabsorbent by Gamma Irradiation. *Radiation Physics and Chemistry*, 52, 217 – 221.
10. Kiatkamjornwong, S., Vithayapiset, S., Sonsuk, M., Prasassarakich, P., Pin-Chawee Vejjanukroh. 1999. Degradation of Cassava Starch-g-Polystyrene Filled Polystyrene Sheets. *Polymer Degradation and Stability*, 66, 323 – 335.
11. Poomtien, C., Kiatkamjornwong, S., Hoshino, Y. 1999. Effect of CCA and Charging Behavior on Print Quality. *Particulate Science and Technology*, 16(4), 295 – 310.
12. Netpradit, S., Kiatkamjornwong, S., Ando, Y., Ikeda, T. 1999. Effect of Developer Properties on Print Quality. *Particulate Science and Technology*, 16(4), 311 –327.
13. Kiatkamjornwong, S., Siwarungson, N., Nganbunsri, A. 1999. In Situ Immobilization of Alkaline Protease during Inverse Suspension Polymerization of Polyacrylamide and Poly(Acrylamide-co-Methacrylic Acid) Hydrogel Beads. *Journal of Applied Polymer Science*, 73(11), 2273 – 2291.
14. Kiatkamjornwong, S., Trisaranapong, S., Prasassarakich, P. 1999. Styrene-Divinylbenzene Copolymers: Influence of the Diluents on Absorption and Desorption Properties. *Journal of Porous Materials*, 6(3), 205 – 215.
15. Saelow, W., Kiatkamjornwong, S., Hoshino, Y., Watanabe, T. 1999. Dependence of Toner Charging Characteristics on Mixing Force. *Journal of Imaging Society of Japan*, 38(4), 310 – 313.
16. Kiatkamjornwong, S., Phunchareon, P. 1999. Influences of Reaction Parameters on Water Absorption of Neutralized Poly(Acrylic Acid-co-Acrylamide) Synthesized by Inverse Suspension Polymerization. *Journal of Polymer Applied Science*, 72(10), 1349-1366.
17. Kiatkamjornwong, S., Apiwattanon, S., Rikukawa, M., Ogata, N. 1999. Superfine Particles of Poly(Styrene-co-Methyl Methacrylate) by Dispersion Copolymerization. *Journal of Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 153, 229 – 240.
18. Kiatkamjornwong, S., Thinakorn, S., Tasakorn, P. 2000. Foaming Conditions of High-Density Polyethylene/Natural Rubber Blends. *Plastics and Rubber Composites* 29(4), 177 – 186
19. Kiatkamjornwong, S., Nuisin, R., Ma, G-H., Omi, S. 2000. Synthesis of Styrenic Toner Particles by SPG Emulsification Technique. *Chinese Journal of Polymer Science*, 18(4), 309 –322.

20. Kiatkamjornwong, S., Kongsupapsiri, C. 2000. Control of Monodisperse Particle Size of Styrenic-Acrylate Copolymers in Dispersion Copolymerization. *Polymer International*, 49(1), 1395-1408.
21. Nuisin, R., Ma, G-H. Omi, S., Kiatkamjornwong, S. 2000. Dependence of Morphological Changes of Polymer Particles on Hydrophobic/Hydrophilic Additives. *Journal of Applied Polymer Science*, 77(5), 1013 –1028.
22. Tawonsri, S., Omi, S., Kiatkamjornwong, S. 2000. Morphological Changes of Crosslinked (Meth) Acrylate Polymers and Evaluation as Organic Solvent Absorption and Desorption. *Journal of Polymer Science: Part A: Polymer Chemistry*, 38(22), 4038-4056.
23. Kiatkamjornwong, S., Chomsaksakul, W., Sonsuk, M. 2000. Radiation modification of water absorption of cassava starch by acrylic acid/acrylamide: *Radiation Physics and Chemistry* 59 (2000) pp. 413-427
24. Kiatkamjornwong, S., Thakeow, P. Sonsuk, M. 2001. Chemical Modification of Cassava Starch for Degradable Polystyrene Sheets, *Polymer Degradation and Stability*, 73, 363-375.
25. Nakason, C., Kaesman, A., Homsin, S., Kiatkamjornwong, S. 2001. Rheological and Curing Properties of Reactive Blending Products of Maleated Natural Rubber and Cassava Starch. *Journal of Applied Polymer Science*, 81(11), 2803-2813.
26. Kiatkamjornwong, S., Surunchanajirasakul, P. Tasakorn, P. 2001, Natural Rubber Cassava Starch Foam by Compression Moulding. *Plastics and Rubber Composites*, 30 (7), 318-327.
27. Kiatkamjornwong, S., Chientachakul, P., Prasassarakich, P., Darmronglerd, S. 2001. Kinetics Studies on Styrene-Divinylbenzene Copolymerization, *Journal of Applied Polymer Science*, 82(6), 1521-1540.
28. Thiraphattaraphun, L., Kiatkamjornwong, S., Prasassarakich, P. and Darmronglerd, S., 2001. Natural Rubber-g-Methyl Methacrylate/Poly(Methyl Methacrylate) Blends, *Journal of Applied Polymer Science*, 81(2), 428-439.
29. Kangwansupamongkon, W., Darmronglerd, S., Kiatkamjornwong, S. 2001. Effect of the Third Acrylated Vinyl Comonomer on Absorption and Desorption Properties of Styrene-Divinylbenzene-Alkyl Acrylate Terpolymer, *Journal of Applied Polymer Science*, 79(3), 504-516.

30. Nakason, C., Kaesaman, Wongkul, T., Kiatkamjornwong, S. 2001. Rheological and Curing Properties of Reactive Blending Products of Epoxidised Natural Rubber and Cassava Starch. *Plastics and Rubber Composites*, 30(4), 154-161
31. Kiatkamjornwong, S., Saelow, W., Takahashi, T., Ando, Y., and Hoshino, Y. 2001. Parameters Influencing Toner Charging Characteristics in Electrophotographic Printing, *Particulate Science and Technology*, 19(1), 67-83.
32. Nakason, C., Kaesman, A., Samoh, Z., Homsin, S., Kiatkamjornwong, S. 2002. Rheological Properties of Maleated Natural Rubber and Natural Rubber Blends, *Polymer Testing*, 21(4), 449–455
33. Kangwansupamongkol, W., Darmronglerd, S., Kiatkamjornwong, S., 2002. Effect of Diluent and Crosslinking Agent on Bead Properties of Styrene-Divinylbenzene Copolymers, *Journal of Applied Polymer Science*, 85, 654–669.
34. Sangsirimongkolying, S., Kiatkamjornwong, S., Darmronglerd, S., Ma, G-H, Omi. 2002. Multi-layered Polymer Particles: I Synthesis of Hydrophilic PDMAEMA Core Particles, *Journal of Applied Polymer Science*, 86, 1057–1070.
35. Kiatkamjornwong, S., Tessree, S., 2002. Synthesis and Characterization of Poly[(methyl methacrylate)-*co*-(methacrylic acid)] for a UV-Sensitive Aqueous Base Developable Lithographic Plate, *Journal of Applied Polymer Science*, 86, 1829–1837.
36. Kiatkamjornwong, S., Akkarakittimongkol, Omi, S. 2002. Syntheses of Acrylate Core/Shell Imbibitor Beads by Seeded Suspension Copolymerization and One-Stage Copolymerization for Solvent Absorption-Desorption. *Journal of Applied Polymer Science*, 85, 670–682.
37. Kiatkamjornwong, S., Mongkolsawat, K. Sonsuk, M. 2002. Synthesis and Property Characterization of Cassava Starch-*g*-Poly[acrylamide-*co*-(maleic acid)] via gamma-irradiation, *Polymer* 43 (14), 3915–3924.
38. Kiatkamjornwong, S., Komatatitaya, J, Shirota, K., Noguchi, H. 2002, Effect of Pigment/Resin Inks on Inkjet Printing for Fabrics, *The Journal of Imaging Science and Technology of Japan*, 41(4), 414–419.
39. Tongboon, S., Prasassarakich, P., Kiatkamjornwong, S., Oonchitichai, V. 2002. Particleboard from Para-Rubber Wood Flour with Polyurethane Binder, *Wood and Fiber Science Journal*, 34(3), 391–397.

40. Nuisin, R., Omi. S., Kiatkamjornwong, S., 2003. Synthesis and Property Behavior of DOP Plasticized Styrene-Acrylate Particles by SPG Emulsification and Subsequent Suspension Copolymerization. *Journal of Applied Polymer Science*, 90, 3037–3050.
41. Kiatkamjornwong, S., Rattanakasamsuk, K., Noguchi, H. 2003. Evaluation of Some Strategies to Control Fading of Printing of Print from Dye-based Ink jet, *Journal of Imaging Science and Technology*, 47(2), 149–154.
42. Nakason, S., Kaesaman, A., Rungvichaiwat, A., Eardrod, K., Kiatkamjornwong, S. 2003. Rheological and Curing Behavior of Reactive Blending II. Natural Rubber-g-Poly(Methyl Methacrylate)/Cassava Starch Blends. *Journal of Applied Polymer Science*, 89, 1453–1463.
43. Kiatkamjornwong, S., Pomsanam, P. K. 2003. Synthesis and Characterization of Styrenic-Based Polymerized Toner and Its Composite form Electrophotographic Printing, *Journal of Applied Polymer Science*, 89, 238–248.
44. Lewis, C., Bunyung, S., Kiatkamjornwong, S., 2003. Rheological Property and Compatibility of NR/EPDM and NR/Brominated EPDM Blends. *Journal of Applied Polymer Science*, 89, 837–847.
45. Lewis, C., Buanpa, R., Kiatkamjornwong, S. 2003. Effects of Rubber Ratio, Carbon Black and Accelerator Level on NR/BIIR Blend Properties, *Journal of Applied Polymer Science*, 90, 3059–3068.
46. Sapchookul, L., Shiota, K., Noguchi, H. Kiatkamjornwong, S., 2003. Preparation of pigmented Inkjet Inks and their Characterisation regarding print quality of pretreated cotton fabric. *Surface Coatings International Part A.86( A10)*, 403–410
47. Nuisin, R., Omi. S., Kiatkamjornwong, S., 2003. Synthesis and Property Behavior of DOP Plasticized Styrene-Acrylate Particles by SPG Emulsification and Subsequent Suspension Copolymerization. *Journal of Applied Polymer Science*, 90, 3037–3050.
48. Nakason, S., Kaesman, A., Rungvichaiwat, A., Eardrod, K., Kiatkamjornwong, S. 2003. Rheological and Curing Behavior of Reactive Blending II. Natural Rubber-g-Poly(Methyl Methacrylate)/Cassava Starch Blends, *Journal of Applied Polymer Science*, 89, 1453–1463.
49. Suriyachai, P., Kiatkamjornwong, S., Prasassarakich, P. 2004. Rubber-g-Glycidyl Methacrylate/Styrene as a Compatibilizer in Natural Rubber/PMMA Blends, *Rubber Chemistry and Technology*, 77(5), 914–930.

50. Kiatkamjornwong, S., Pairpisit, K., 2004, Natural Rubber/Ethylene Propylene Diene Blends for High Insulation Iron Crossarms, *Journal of Applied Polymer Science*, 92, 3401–3416.
51. Chirawithayaboon, A., Kiatkamjornwong, S., 2004. Compatibility of High-Impact Polystyrene/High-Density Polyethylene Blends by Styrene/Ethylene-Butylene/Styrene Block Copolymer, *Journal of Applied polymer Science*. 91, 742–755.
52. Nakason, C., Kaesaman, A., Sainamsai, W., Kiatkamjornwong, S., 2004. Rheological Behavior of Reactive Blending of Epoxidized Natural Rubber with Cassava Starch and Epoxidized Natural Rubber with Rubber and Cassava Starch, *Journal of Applied Polymer Science*, 91, 1753–1762.
53. Kiatkamjornwong, S., Wongwatthanasatien, R. 2004, Superabsorbent Polymer of Poly[acrylamide-co-(acrylic acid)] by Foamed Polymerization. I. Synthesis and Water Swelling Properties, *Macromolecular Symposia*, 207, 229–240.
54. Kiatkamjornwong, S., Yusabai, W. 2004, Effect of Epoxy Resin-Silane on Physical Properties of Coated Films on Steel Surfaces, *Surface Coating International, Coatings Transaction Part B*, 87, B3, 149–157.
55. Kangwansupamonkon, W., Fellows, C.F., Lamb, D J., Gilbert, R. G., Kiatkamjornwong, S. 2004. Kinetics of Surface Grafting on Polyisoprene Latexes by Reaction Calorimetry, *Polymer*, 47(17), 5775–5784
56. Kiatkamjornwong, S., Sripho, W., Hoshino, Y. 2005. Conductive Toner Cloud Confinement Using the Cone Shape of a Dented Electrode, *Particulate Science and Technology*, 23(2), 129–144.
57. Kiatkamjornwong, S., Putthimai, P., Noguchi, H. 2005. Comparison of Textile Print Quality between Inkjet and Screen Printings, *Surface Coating International, Coatings Transaction, Part B*, 88(B1), 25–34.
58. Kangwansupamonlon, W., Gilbert, R.G., Kiatkamjornwong, S. 2005. Modification of Natural Rubber by Grafting with Hydrophilic Vinyl Monomers, *Macromolecular Chemistry and Physics*, 206(24), 2450–2460.
59. Nuisin, R., Omi, S., Kiatkamjornwong, S. 2006. Effect of Acrylate Monomers and Polystyrene Molecules on Phase Behavior of DOP Plasticized Styrene-Acrylate Polymer Particles by SPG Technique, *Journal of Applied Polymer Science*, 99(3), 1195–1206.

60. Kochthongrasamee, T., Prasassarakich, P., Kiatkamjornwong, S. 2006. The Effect of Redox Initiator on Graft Copolymerization on Methyl Methacrylate on Natural Rubber, *Journal of Applied Polymer Science*, 101, 2587–2601.
61. Chansorn, C., Hoshino, Y., Kiatkamjornwong, S., 2006. Toner Cloud Generation and Its Supply over the Width of a Printing Area, *Particulate Science and Technology*, 24(2), 137–151.
62. Jiraprasertkul, W., Nuisin, R., Jinsart, W., Kiatkamjornwong, S. 2006, Synthesis and Characterization of Cassava Starch Graft Poly(acrylic acid) and Poly[(Acrylic Acid)-co-Acrylamide] and Polymer Flocculants for Wastewater Treatment, *Journal of Applied Polymer Science*, 102( 3), 2915 – 2928.
63. Nakason, C., Nuansomsri, K., Kaesaman, A., Kiatkamjornwong, S. 2006. Dynamic Vulcanization of High-Density Polyethylene/Natural Rubber Blends: Effect of Compatibilization, Blend Ratio and Curing System, *Polymer Testing*, 25, 782–796.
64. Lanthong P., Nuisin, R, Kiatkamjornwong, S. 2006. Graft Copolymerization, Characterization and Degradation of Cassava Starch-g-Acrylamide/Itaconic Acid Superabsorbents, *Carbohydrate Polymers*, 66, 229–245.
65. Janasak, A., Koopipat, C., Noguchi, H., Kiatkamjornwong, S. 2007. MTF Measurement for Inkjet Printing on Silk Fabrics, *Journal of Imaging Science and Technology*, 51(2), 127–140.
66. Noppakundilograt, S., Phattanarudee, S., Kumekawa, R., Ogura, M., Hoshino, Y., Kiatkamjornwong, S. 2007. Imaging Parameters Influencing the Rewritable Process of Titanium Dioxide by Electrophoresis, *Journal of Imaging Science and Technology*, 51(2), 190–196.
67. Aungsuprvate, O., Kangwansupamonkon, W., Kiatkamjornwong, S. 2007. Synthesis and Properties of High Oil Absorptive Methyl Methacrylate-Divinylbenzene Copolymer Beads, *Polymer Engineering and Science*, 47:447–459.
68. Hoshino, Y., and Kiatkamjornwong, S. 2007. Toner Jump Phenomena in Electric Field, *Particulate Science and Technology*, 25, 147–162.
69. Norakankorn, C., Pan, Q., Rempel, G.L., Kiatkamjornwong, S. 2007. Synthesis of Poly(methyl methacrylate) Nanoparticles Initiated by 2,2'-Azobisobutyronitrile via Differential Microemulsion Polymerization, *Macromolecular Rapid Communication*, 28, 1029–1033

70. Hoven, V.P., Tangpasuthadol, V., Angkitpaiboon, Y., Vallapa, N., Kiatkamjornwong, S. 2007. Surface-Charged Chitosan: Preparation and Protein Adsorption, *Carbohydrate Polymers*, 68, 44–53.
71. Channasanon, C., Graisuwan, W., Kiatkamjornwong, S., Hoven, V.P. 2007. Alternating Bioactivity of Multilayer Thin Films Assembled from Charged Derivatives of Chitosan, *Journal of Colloid and Interface Science*, 316, 331–343.
72. Hoven, V.P. Srinanthakul, M., Iwasaki, Y., Iwata, R., Kiatkamjornwong, S. 2007. Polymer Brushes in Nanopores Surrounded by Silicon-Supported Tris(trimethylsiloxy)silyl Monolayers, *Journal of Colloid and Interface Science*, 314, 446–459.
73. Yeamsawas, D., Kangwasupamonkon, Chailapakul, O., Kiatkamjornwong, S. 2007. Synthesis and Swelling Properties of Copolymeric Acrylamide-Crotonic Acid Superabsorbents, *Reactive & Functional Polymers*, 67, 865–882.
74. Kiatkamjornwong, S. 2007. Superabsorbent Polymers and Superabsorbent Polymer Composites, *ScienceAsia*, 33(1), 39–43.
75. Leelajariyakul, S., Noguchi, H., and Kiatkamjornwong, S. 2008. Surface-Modified and Micro-Encapsulated Pigmented Inks for Jet Printing on Textile Fabrics, *Progress in Organic Coatings*, 62 (2008) 145–161.
76. Nakason, C., Jamjinno S., Kaesaman, A., Kiatkamjornwong, S. 2008. Thermoplastic Elastomer Based on High-density Polyethylene/Natural Rubber Blends: Rheological, Thermal, and Morphological Properties, *Polymers for Advanced Technologies*, 19 (2008) 85–98.
77. Tangpasuthadol, V., Intasiri, A., Nuntivanich, D., N. Niyompanich, Kiatkamjornwong, S. 2008. Silica-Reinforced Natural Rubber Prepared from the Sol-Gel Process of Ethoxysilanes in Rubber Latex, *Journal of Applied Polymer Science*, 109, 4242–433.
78. Pichaiyut, S., Nakason, C., Kaesaman A., Kiatkamjornwong, S. 2008, Influences of blend compatibilizers on dynamic, mechanical, and morphological properties of dynamically cured maleated natural rubber and high-density polyethylene blends, *Polymer testing*, 27, 566–580.
79. Nakason, C., Jarnthong, M., Kaesaman, A., Kiatkamjornwong, S. 2008. Thermoplastic Elastomer Based on Epoxidized Natural Rubber and High-Density Polyethylene Blends: Effect of Blend Compatibilizers on Mechanical and Morphological Properties, *Journal of Applied Polymer Science*, 109, 2694–2702.

80. Siramanont, J., Tangpasuthadol, V., Intasiri, A., Na-Ranong, N. Kiatkamjornwong, S. 2009. Sol-gel Process of Alkyltriethoxysilane in Latex for Alkylated Silica Formation in Natural Rubber, *Polymer Engineering and Science*, 49(6): 1099-1106.
81. Nakason, C., Jarnthong, M., Kaesaman, A., Kiatkamjornwong, S. 2009, Influences of blend proportions and curing systems on dynamic, mechanical, and morphological properties of dynamically cured ENR/HDPE Blends, *Polymer Engineering and Science*, 49:281–292.
82. Phattanarudee<sup>1</sup>, S., Chakvattanatham, K., Kiatkamjornwong S. 2009. Pretreatment of Silk Fabric Surface with Amino Compound for Ink Jet Printing, *Progress in Organic Coatings*, 64(4), 405-418.
83. Satraphan, P., Intasiri, A., P. Tangpasuthadol, V., Kiatkamjornwong, S. 2009. Effects of methyl methacrylate grafting and in situ silica particle formation on the morphology and mechanical properties of natural rubber composite films. *Polymer for Advanced Technology*, 20: 473-486.
84. Noppakundilograt, S., Nanakorn, P., Sonjaipanich, K., Seetapan, N., Kiatkamjornwong. S. 2009. Synthesis and Characterization of Acrylamide-Based Aluminium Flocculants for Wastewater Treatment. *Journal of Applied Polymer Science*, 114, 2564–2575.
85. Norakankorn, C., Pan, Q., Rempel, G.L., Kiatkamjornwong, S. 2009. Synthesis of Poly(methyl methacrylate) Nanoparticles Initiated by Azobisisobutyronitrile using a Differential Microemulsion Polymerization Technique. *Journal of Applied Polymer Science*, 113: 375-382.
86. Norakankorn, C., Pan, Q., Rempel, G.L., Kiatkamjornwong, S. 2009. Synthesis of Core/shell Structure of Glycidyl-Functionalized Poly(methyl methacrylate) latex Nanoparticles via Differential Microemulsion Polymerization, *European Polymer Journal*. 45(11), 2977-2986.
87. Norakankorn, C., Pan, Q., Rempel, G.L. Kiatkamjornwong, S. 2010. Factorial Experimental Design on Synthesis of Functional Core/Shell Polymeric Nanoparticles via Differential Microemulsion Polymerization, *Journal of Applied Polymer Science*, 116(3), 1291-1298.
88. Nakason, C., Wohmang, T.; Kaesaman, A., Kiatkamjornwong, S. 2010. Preparation of Cassava Starch-Graft-Polyacrylamide Superabsorbents and Associated Composites by Reactive Blending, *Carbohydrate Polymers*, 81, 348–357.
89. Noppakundilograt, S., Nanakorn, P., Jinsart, W., Kiatkamjornwong, S. 2010. Synthesis of Acrylamide/acrylic acid-Based Aluminum Flocculant for Dye Reduction and Textile Wastewater Treatment, *Polymer Engineering and Science*, 50(8), 1535 - 1546.



90. Kangwansupamonkon, W., Jitbunpot, W., Kiatkamjornwong, S. 2010. Photocatalytic efficiency of TiO<sub>2</sub>/poly[acrylamide-co-(acrylic acid)] composite for textile dye degradation, *Polymer Degradation and Stability*, 95,1894-1902.
91. Noppakundilokrat, S., Buranagul, P. Graisuwan, W., Chawan Koopipat, C., Kiatkamjornwong, S. 2010. Modified Chitosan Pretreatment of Polyester Fabric for Printing by Ink Jet Ink, *Carbohydrate Polymers*, 82, 1124-1135.
92. Chakvattanatham, K., Phattanarudee, S., Kiatkamjornwong, S. 2010. Anionically surface-modified pigment/binder in jet inks for silk fabric printing. *Pigment & Resin Technology*, 39(6), 327-341.
93. Vallapa, N., Wiarachai, O., Thongchul, N., Pan, J., Tangpasuthadol, V., Kiatkamjornwong, S., Hoven, P. V. 2011. Enhancing antibacterial activity of chitosan surface by heterogeneous quaternization, *Carbohydrate Polymers*, 83,868-875.
94. Founfung, D., Seetapan, N., Phattanarudee, S., Kiatkamjornwong, S. 2011. Synthesis of acrylamide/itaconic acid superabsorbent polymers and superabsorbent polymer/mica nanocomposites. *Polymer for Advanced Technologies*, 22, 635-647.
95. Seetapan, N., Srisithipantakul, N., and Kiatkamjornwong, S. 2011. Synthesis of acrylamide-co-(itaconic acid) superabsorbent polymers and associated silica superabsorbent polymer composites, *Polymer Engineering and Science*, 51(4), 764-775.
96. Prachum, Y., Strauss, R.A. Kiatkamjornwong, S. 2011, The Physical and Mechanical Properties of Beta-nucleated Polypropylene/Montmorillonite Nanocomposites, *Journal of Applied Polymer Science*, 122(2), 1066-1076.
97. Limprayoon, N., Seetapan, N., Kiatkamjornwong, S. 2011. Acrylamide/2-acrylamido-2-methylpropane Sulfonic Acid and Associated Sodium Salt Superabsorbent Copolymers with Mica Nanocomposites as Fire Retardants, *Polymer Degradation and Stability*, 96(6),1054-1063.
98. Seetapan, N., Nattawut Limprayoon, N., Kiatkamjornwong, S. 2011. Effect of fire retardant on flammability of acrylamide and 2-acrylamido-2-methylpropane sodium sulfonate copolymer nanocomposites, *Polymer Degradation and Stability*, 96(10), 1927-1933.
99. Kangwansupamonkon, W., Suknithipol, M., Phattanarudee, S., Kiatkamjornwong, S. 2011, Inkjet printing: effects of binder particle size and chitosan pretreatment on the qualities of silk fabric, *Surface Coatings International, JOCCA Journal of Oil & Colour Chemist's Association*, 94(6), 216-225.

100. Seetapan, N., Wongsawaeng, J., Kiatkamjornwong, S., 2011, Gel strength and swelling of acrylamide-protic acid superabsorbent copolymers, *Polymer for Advanced Technologies*, 22 1685–1695.
101. Kiatkamjornwong, S., Hanseubsai, A. 2011. A Quest for Better Textile Printed Qualities: from Inkjet Ink Chemistry to Textile Surface Modification. *Journal of Printing Science*, 48(6), 375-382.
102. Chairrekij, S., Apirakchaiskul, A., Suvarnakich, K., Kiatkamjornwong, S. 2012. Kapok I: Properties investigation of kapok fiber as a potential pulp source for papermaking, *BioResources* 7(1), 475-488.
103. Stéphane Dubascoux; Chalao Thepchalem; Eric Dubreucq; Suwaluk Wisunthorn; Laurent Vaysse; Suda Kiatkamjornwong; Charoen Nakason; Frédéric Bonfils 2012 Comparative study of the mesostructure of natural and synthetic polyisoprene by size exclusion chromatography - multi-angle light scattering and asymmetrical flow field flow fractionation-multi-angle light scattering, *Journal of Chromatography A*, 1224, 27– 34.
104. Pransilp, P.; Kiatkamjornwong, S.; Bhanthumnavin, W.; Paosawatyanong, B. 2012. Plasma Nano-Modification of Poly(ethylene terephthalate) Fabric for Pigment Adhesion Enhancement, 12(1), 481-488.
105. Wiarachai, O., Thongchul, N., Kiatkamjornwong, S., Hoven, P.V. 2012. Surface-quaternized chitosan particles as an alternative and effective organic antibacterial filler, *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces* 92, 121– 129.
106. Akkahat, P., Mekboonsonglarp, W., Kiatkamjornwong, S. and Hoven V. P. 2012, Surface-Grafted Poly(acrylic acid) Brushes as a Precursor Layer for Biosensing Applications: Effect of Graft Density and Swellability on the Detection Efficiency, *Langmuir* 28(11), 5302-5311.
107. Akkahat, P., Kiatkamjornwong, S., Yusa, S., Hoven, P.V., and Iwasaki Y. (2012) Development of a Novel Anti-fouling Platform for Biosensing Probe Immobilization from Methacryloyloxyethyl Phosphorylcholine-containing Copolymer Brushes, *Langmuir* 28, 5872–5881.
108. Graisuwan, W., Wiarachai, O., Ananthanawat, C., Puthong, S., Soogarun, S., Kiatkamjornwong, S., Hoven. P. V. 2012., *Journal of Colloid and Interface Science* 376, 177–188.
109. Noppakundilokrat, S., Sonjaipanich, K., Thongchul, N., Kiatkamjornwong, S. 2013. Syntheses, Characterization and Antibacterial Activity of Chitosan Grafted Hydrogels and

- associated mica containing nanocomposite hydrogels, *Journal of Applied Polymer Science*, 127(6), 4927-4938, Doi:10.1002/app.37612.
110. Taenghom, T., Pan, Q., Rempel, G. L. and Kiatkamjornwong, S. 2013. Synthesis and characterization of nano-sized poly[(butyl acrylate)-co-(methyl methacrylate)-co-(methacrylic acid)] latex via differential microemulsion polymerization, *Colloid and Polymer Science*, 291(6), 1365-1374, DOI: 10.1007/s00396-012-2867-8.
  111. Nuisin, R., Krongsin, J., Noppakundilograt, S., Suda Kiatkamjornwong, S. 2013. Microencapsulation of menthol by crosslinked chitosan via porous glass membrane emulsification technique and their controlled release properties, *Journal of Microencapsulation*, 30(5), 498-509, doi: 10.3109/02652048.2012.758179
  112. Nakason, C., Nakaramontee, Y., Kaesaman, A., Kangwansukpamonkon, W., and Kiatkamjornwong, S. 2013 Synthesis and Characterization of Water Swellable Natural Rubber Vulcanizates, *European Polymer Journal*, 49(5), 1098-1110, , 2013. Modification of deproteinized natural rubber via grafting polymerization with maleic anhydride, *Eur Polym J* 2013; 49:4035–46.
  113. Kangwansupamonkon, W. Tiewtrakoonwat, W., Supaphol, P. Kiatkamjornwong, S. (2014). Surface Modification of Electrospun Chitosan Nanofibrous Mats for Antibacterial Activity, *J. Appl. Polym. Sci.*, 131, 40981.
  114. Wongthong, P., Nakason, C., Pan, Q., Rempel, G.L. Kiatkamjornwong, S. (2014). Styrene-assisted grafting of maleic anhydride onto deproteinized natural rubber, *European Polymer Journal*, 59, 144–155.
  115. Noppakundilograt, S., Pheatcharat, N., Kiatkamjorn, S., (2015). Multilayer-Coated NPK Compound Fertilizer Hydrogel with Controlled Nutrient Release and Water Absorbency, *Journal of Applied Polymer Science*, 132, 41249.
  116. Seetapan, N., Anasuan, N., & Kiatkamjornwong, S. (2015). Superabsorbent polymer nanocomposites with surfactant-or acid-modified Ca-montmorillonite: synthesis and water absorbency. *Journal of Polymer Research*, 22(3), 31.
  117. Graisuwan, W., Zhao, H., Kiatkamjornwong, S., Theato, P., & Hoven, V. P. (2015). Formation of thermo-sensitive and cross-linkable micelles by self-assembly of poly (pentafluorophenyl acrylate)-containing block copolymer. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 53(9), 1103-1113.

118. Thepchalerm, C., Vaysse, L., WINSUNTHORN, S., KIATKAMJORNWONG, S., Nakason, C., & Bonfils, F. (2015). The stability of luteins in *Hevea brasiliensis* latex influences the storage hardening of natural rubber. *Journal of Rubber Research*, 18(1), 17-26.
119. Wongthong, P., Nakason, C., Pan, Q., Rempel, G. L., & Kiatkamjornwong, S. (2015). Influences of the phenolic curative content and blend proportions on the properties of dynamically vulcanized natural rubber/acrylonitrile–butadiene–styrene blends. *Journal of Applied Polymer Science*, 132(36).
120. Noppakundilokrat, S., Piboon, P., Graisuwan, W., Nuisin, R., & Kiatkamjornwong, S. (2015). Encapsulated eucalyptus oil in ionically cross-linked alginate microcapsules and its controlled release. *Carbohydrate polymers*, 131, 23-33.
121. Meebungpraw, J., Wiarachai, O., Vilaivan, T., Kiatkamjornwong, S., & Hoven, V. P. (2015). Quaternized chitosan particles as ion exchange supports for label-free DNA detection using PNA probe and MALDI-TOF mass spectrometry. *Carbohydrate polymers*, 131, 80-89.
122. Pransilp, P., Pruettiphap, M., Bhanthumnavin, W., Paosawatyanong, B., & Kiatkamjornwong, S. (2016). Surface modification of cotton fabrics by gas plasmas for color strength and adhesion by inkjet ink printing. *Applied Surface Science*, 364, 208-220.
123. Noree, S., Tangpasuthadol, V., Kiatkamjornwong, S., & Hoven, V. P. (2017). Cascade post-polymerization modification of single pentafluorophenyl ester-bearing homopolymer as a facile route to redox-responsive nanogels. *Journal of colloid and interface science*, 501, 94-102.
124. Graisuwan, W., Puthong, S., Zhao, H., Kiatkamjornwong, S., Theato, P., & Hoven, V. P. (2017). Thermoresponsive and Active Functional Fiber Mats for Cultured Cell Recovery. *Biomacromolecules*, 18(11), 3714-3725.
125. Chanmungkalakul, S., Ervithayasuporn, V., Hanprasit, S., Masik, M., Prigyai, N., & Kiatkamjornwong, S. (2017). Silsesquioxane cages as fluoride sensors. *Chemical Communications*, 53(89), 12108-12111.
126. Pruettiphap, M., Rempel, G. L., Pan, Q., & Kiatkamjornwong, S. (2017). Morphology and drug release behavior of N-isopropylacrylamide/acrylic acid copolymer as stimuli-responsive nanogels. *Iranian Polymer Journal*, 26(12), 957-969.
127. Witinuntakit, T., Kiatkamjornwong, S., & Poompradub, S. (2018). Dichlorocarbene modified butadiene rubber (DCBR): Preparation, kinetic study, and its properties in natural rubber/DCBR blend vulcanizates. *Polymers for Advanced Technologies*, 29(1), 649-657.

128. Noppakundilokrat, S., Choopromkaw, Kiatkamjornwong, S. (2018). Hydrolyzed collagen-grafted-poly[(acrylic acid)-co-(methacrylic acid)] Hydrogel for drug delivery, *Journal of Applied Polymer Science*, 45654, 1-11.
129. Saini, N., Prigyai, N., Wannasiri, C., Ervithayasuporn, V., & Kiatkamjornwong, S. (2018). Green synthesis of fluorescent N, O-chelating hydrazone Schiff base for multi-analyte sensing in Cu<sup>2+</sup>, F<sup>-</sup> and CN<sup>-</sup> ions. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 358, 215-225.
130. Kangwansupaamonkon, W., Klaikaew, N., Kiatkamjornwong, S. 2018. Green synthesis of titanium dioxide/acrylamide-based hydrogel composite, self- degradation and environmental applications, *European Polymer Journal*, 107, 118-131.
131. Saengkaew, J., Le, D., Samart, C., Sawada, H., Nishida, M., Chanlek, N., Kongparakul, S. & Kiatkamjornwong, S. (2018). Superhydrophobic coating from fluoroalkylsilane modified natural rubber encapsulated SiO<sub>2</sub> composites for self-driven oil/water separation. *Applied Surface Science*, 462, 164-174.
132. Chanmungkalakul, S., Ervithayasuporn, V., Boonkitti, P., Phuekphong, A., Prigyai, N., Kladsomboon, S. & Kiatkamjornwong, S. (2018). Anion identification using silsesquioxane cages. *Chemical science*, 9(40), 7753-7765.
133. Ervithayasuporn, V., Chanmungkalakul, S., Churinthorn, N., Jaroentomeechai, T., Hanprasit, S., Sodkhomkhum, R., Kaewpijit, P. & Kiatkamjornwong, S. (2019). Modifying interlayer space of montmorillonite with octakis (3-(1-methylimidazolium) propyl) octasilsesquioxane chloride. *Applied Clay Science*, 171, 6-13.
134. Krainoi, A., Nakaramontri, Y., Wisunthorn, S., Pichaiyut, S., Nakason, C., Kummerlöwe, C., Vennemann, N. & Kiatkamjornwong, S. (2019). Influence of carbon nanotube and ionic liquid on properties of natural rubber nanocomposites. *Express Polymer Letters*, 13(4).
135. Charoen Nakason, Wasuthon Kitisavetjit; Yeampon Nakaramontri, Suwaluk Wisunthorn, Skulrat Pichaiyut, Suda Kiatkamjornwong, 2018, Influence of Carbon Nanotubes and Graphite Hybrid Filler on Properties of Natural Rubber Nanocomposites, *Composite A*, submitted.

## Patents

1. สุดา เกียรติกำจรวงศ์ สมศักดิ์ ดำรงค์เลิศ การผลิตพอลิเมอร์ดูดซึมน้ำจากแป้ง, เลขที่คำขอ 109159 วันที่ 2 มีนาคม 2549 อยู่ในขั้นตอนประกาศโฆษณา

2. Kiatkamjornwong, S., Lertjanyakul, P., Palakornkul, K., Damronglerd, S., Vasanapradit, T., Sribuathong, P. Preparation of Artificial Marble from Methyl Methacrylate and Unsaturated Polyester, December 21, 2007, Patent Application No. 0701006627.
3. สุดา เกียรติกำจรวงศ์, วลาสิณี จิตบรรพต, วียงค์ กังวานศุภมงคล, กนิษฐา บุญภาวานิชกุล คอมพอสิตพอลิเมอร์ดูดซึมน้ำมากที่สามารถแตกสลายตัวเองได้ โดยอาศัยการกระตุ้นด้วยรังสีอัลตราไวโอเล็ต เลขที่คำขอ 1001001273 วันที่ 26 กันยายน 2553 อยู่ในขั้นตอนประกาศโฆษณา
4. สุดา เกียรติกำจรวงศ์, ญัฐฉิ ลิ้มประยูร, นิสภา ศีตปิ่นย 2553 เจลอิมัลชันวัสดุเชิงประกอบพอลิเมอร์ดูดซึมน้ำมากและเจลอิมัลชันพอลิเมอร์ดูดซึมน้ำมากที่มีสมบัติหน่วงการติดไฟ เลขที่คำขอ 1101000208 วันที่ 15 กุมภาพันธ์ 2554 อยู่ในขั้นตอนประกาศโฆษณา
5. สุดา เกียรติกำจรวงศ์ สุภาภรณ์ นพคุณติลภรณ์ สวเนตร วงศ์แป้น ลิตสา วงศ์ศิริทรัพย์ สารปรับสภาพผิวผ้าจากไคโทซานในกรดมะนาวสำหรับการพิมพ์อิงค์เจ็ต เลขที่คำขอ1203000094 วันที่ยื่น 2 ก.พ. 2555 อยู่ในขั้นตอนประกาศโฆษณา
6. สุดา เกียรติกำจรวงศ์ สุภาภรณ์ นพคุณติลภรณ์ ญัฐธยาน์ เพชรรัตน์ ปุยละลายช้าและกรรมวิธีการผลิตปุยละลายช้าดังกล่าว เลขที่คำขอ 1201002793 วันที่ 12 มิถุนายน 2555 อยู่ในขั้นตอนประกาศโฆษณา
7. สุดา เกียรติกำจรวงศ์ วียงค์ กังวานศุภมงคล พิชญ์ ศุภผล กรรมวิธีการเตรียมนาโนไฟเบอร์ไคโทซานที่ดัดแปรพื้นผิวด้วยเกลือแอมโมเนียมที่มีสมบัติด้านฤทธิ์แบคทีเรีย เลขที่คำขอ1301001036 วันที่ 1 มีนาคม 2556 อยู่ในขั้นตอนประกาศโฆษณา
8. สุดา เกียรติกำจรวงศ์ วียงค์ กังวานศุภมงคล พิชญ์ ศุภผล กรรมวิธีการเตรียมนาโนไฟเบอร์ไคโทซานที่ดัดแปรพื้นผิวด้วยปฏิกิริยาอัลคิเลชันและเมทิลเลชันที่มีสมบัติด้านฤทธิ์แบคทีเรีย เลขที่คำขอ 1301001035 วันที่ 1 มีนาคม 2556 ผ่านการตอบข้อสงสัยของกรมฯ
9. สุดา เกียรติกำจรวงศ์ วียงค์ กังวานศุภมงคล นที คล้ายแก้ว 2556ไฮโดรเจลคอมพอสิตดูดซึมน้ำมากริเริ่มปฏิกิริยาด้วยโฟโตคะตะลิสต์ย่อยมกรรมวิธีในการเตรียมไฮโดรเจลคอมพอสิตดังกล่าว เลขที่คำขอ 1301007003 วันที่ 9 ธันวาคม 2556 ผ่านการตอบข้อสงสัยของกรมฯ
10. สุดา เกียรติกำจรวงศ์ วียงค์ กังวานศุภมงคล นที คล้ายแก้ว และ นางสาวกนิษฐา บุญภาวานิชกุล 2556 ตู้ปฏิบัติการฉายแสงสีขา (visible light) รังสีอัลตราไวโอเล็ตหรือแสงฟลูออเรสเซนต์สำหรับการเกิดปฏิกิริยาเคมี เลขที่คำขอ 1401000738 12 กุมภาพันธ์ 2557 อยู่ในขั้นตอนประกาศโฆษณา
11. สุดา เกียรติกำจรวงศ์ ภิญโญ วงษ์ทอง เจริญ นาคสรร Gary L. Rempel, Quimin Pan. 2556.การกราฟต์มาเลอิกแอนไฮโดรด์บนยางธรรมชาติโปรตีนต่ำด้วยเทคนิคฟิเพอเรนเชียลไมโครอิมัลชันพอลิเมอไรเซชันและกระบวนการผลิตยางธรรมชาติกราฟต์มาเลอิกแอนไฮโดรด์ เลขที่คำขอ1401001490 เมื่อ วันที่ 20 มีนาคม 2557

12. สุดา เกียรติกำจรวงศ์ สุภาภรณ์ นพคุณดิลกรัตน์ รุ่งกานต์ นุ้ยสินธุ์ และจารุวรรณ ครองศิลป์ 2557 ไมโครรอนแคปซูลเลขชี้ของเมนทอลและกรรมวิธีการผลิตไมโครแคปซูลดังกล่าว เลขที่คำขอ1401001492 วันที่ 20 มีนาคม 2557
13. สุดา เกียรติกำจรวงศ์ สุภาภรณ์ นพคุณดิลกรัตน์ กันต์กนิษฐ์ เกียรติกมลวงค์ ชลนรินทร์ เกาสมบัติ หมึกพิมพ์สกรีนฐานน้ำสำหรับพิมพ์บนพลาสติก สถาบันทรัพย์สินทางปัญญาแห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย 22 พฤศจิกายน 2559

### อนุสิทธิบัตร

1. สุดา เกียรติกำจรวงศ์, สุภาภรณ์ นพคุณดิลกรัตน์, เมธาวิ พุทธิภาพย์, ปริญาภรณ์ แสงสุข และจันทน์ เกียรติเจริญวิทย์ สารปรับสภาพผิวผ้าจากโคโทซานสำหรับการพิมพ์ระบบอิงก์เจ็ต อนุสิทธิบัตร เลขที่ 6633 วันที่ยื่นคำขอ 23 มกราคม 2551 หมดอายุอนุสิทธิบัตรแล้ว
2. สุดา เกียรติกำจรวงศ์, สุภาภรณ์ นพคุณดิลกรัตน์, เมธาวิ พุทธิภาพย์, ปริญาภรณ์ แสงสุข และจันทน์ เกียรติเจริญวิทย์ สารปรับสภาพผิวผ้าจากไกลซินสำหรับการพิมพ์ระบบอิงก์เจ็ต อนุสิทธิบัตร เลขที่ 6634 วันที่ยื่นคำขอ 23 มกราคม 2551 หมดอายุอนุสิทธิบัตรแล้ว
3. สุดา เกียรติกำจรวงศ์, สุภาภรณ์ นพคุณดิลกรัตน์, เมธาวิ พุทธิภาพย์, ปริญาภรณ์ แสงสุข และจันทน์ เกียรติเจริญวิทย์ สารปรับสภาพผิวผ้าจากโคโทซานและไกลซินสำหรับการพิมพ์ระบบอิงก์เจ็ต อนุสิทธิบัตรเลขที่ 6635 วันที่ยื่นคำขอ 23 มกราคม 2551 หมดอายุอนุสิทธิบัตรแล้ว
4. สุดา เกียรติกำจรวงศ์ สุภาภรณ์ นพคุณดิลกรัตน์ ปัญธิธร บูรณะกุล สารปรับสภาพผิวผ้าจากโคโทซานดัดแปรในกรดมะนาวสำหรับการพิมพ์ผ้าด้วยหมึกพิมพ์อิงก์เจ็ต คำขอเลขที่ 1203000095 วันที่ยื่น 2 ก.พ. 2555 เลขที่อนุสิทธิบัตร 9105 ตั้งแต่วันที่ 4 กันยายน 2557 ถึงวันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2561
5. สุดา เกียรติกำจรวงศ์, สุภาภรณ์ นพคุณดิลกรัตน์ และณัฐธยาน์ ปุยละลายซ่าเคลือบพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ เลขที่คำขอ 1203000563 วันที่ 12 มิถุนายน 2555 เลขที่อนุสิทธิบัตร 9166 ตั้งแต่วันที่ 29 กันยายน 2557 ถึงวันที่ 11 มิถุนายน 2561
6. สุดา เกียรติกำจรวงศ์ สารปรับสภาพผิวผ้าจากโคโทซานในกรดมะนาวสำหรับการพิมพ์อิงก์เจ็ต เลขที่คำขอ 1203000094 วันขอรับอนุสิทธิบัตร 2 กุมภาพันธ์ 2555 เลขที่อนุสิทธิบัตร 9552 ตั้งแต่วันที่ 18 กุมภาพันธ์ 2558 ถึงวันที่ 1 กุมภาพันธ์ 2561