



## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

### โครงการ

ไฮโดรเจลคอมโพสิตของอัลจินตและผงถ่านกัมมันต์สำหรับประยุกต์ใช้เป็นวัสดุกำจัด  
แอมโมเนียในการขนส่งปลาสวยงาม

Composite hydrogel of alginate and activated carbon for ammonia  
removal in ornamental fish transportation

หัวหน้าโครงการวิจัย

อ.ดร. ปิยะพร ณ หนองคาย

ผู้ร่วมวิจัย

ผศ.ดร. จริยาวดี สุริยพันธุ์

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้  
จากเงินอุดหนุนจากรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)  
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561 มหาวิทยาลัยบูรพา

รหัสโครงการ 2561A10802074

สัญญาเลขที่ 135/2561

## รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

### โครงการ

ไฮโดรเจลคอมโพสิตของอัลจิเนตและผงถ่านกัมมันต์สำหรับประยุกต์ใช้เป็นวัสดุกำจัด  
แอมโมเนียในการขนส่งปลาสวยงาม

Composite hydrogel of alginate and activated carbon for ammonia  
removal in ornamental fish transportation

อ.ดร. ปิยะพร ณ หนองคาย

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

ผศ.ดร. จริยวดี สุริยพันธุ์

ภาควิชาวาริชศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

มกราคม 2561

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561 มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ เลขที่สัญญา 135/2561

## บทคัดย่อ (Abstract)

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการเตรียมและการดูดซับแอมโมเนียของเม็ดคอมโพสิตที่เตรียมได้จากอัลจิเนตและถ่านกัมมันต์ เพื่อประยุกต์ใช้เป็นวัสดุดูดซับในการกำจัดแอมโมเนียในน้ำ โดยเตรียมได้จากการหยดสารละลายผสมของโซเดียมอัลจิเนต โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ( $\text{NaHCO}_3$ ) ทำหน้าที่เป็นสารสร้างรูพรุน F108 ทำหน้าที่เป็นสารลดแรงตึงผิว และผงถ่านกัมมันต์ ลงในสารละลายผสมระหว่างแคลเซียมคลอไรด์ ( $\text{CaCl}_2$ ) และกรดอะซิติก จะทำให้ได้เม็ดคอมโพสิตที่มีลักษณะเป็นทรงกลม วิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิค ATR-FTIR วิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาด้วยเทคนิค SEM ทดสอบความสามารถในการบวมในน้ำ และศึกษาการดูดซับแอมโมเนีย โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับแอมโมเนีย ได้แก่ ความเข้มข้นของโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ความเข้มข้นของแคลเซียมคลอไรด์ ความเข้มข้นของ F108 และความเข้มข้นของผงถ่านกัมมันต์ พบว่าเม็ดคอมโพสิตชนิด ALGAC5% มีค่าประสิทธิภาพในการดูดซับแอมโมเนียสูงสุดเท่ากับ 6.88 มิลลิกรัม/กรัม เมื่อใช้สารละลายแอมโมเนียเข้มข้น 100 mg-N/L ที่พีเอชของสารละลายเท่ากับ 6 เวลาที่ใช้ในการดูดซับ 6 ชั่วโมง และจากการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับพบว่ามีความสอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์

This research aims to study on preparation and ammonia adsorption of alginate and activated carbon composite beads for ammonia removal application. The spherical composite beads were formed by dropping mixed solution of sodium alginate, porogen ( $\text{NaHCO}_3$ ), surfactant (F108) and activated carbon powder into the mixed solution of  $\text{CaCl}_2$  and  $\text{CH}_3\text{COOH}$ . The chemical structure was characterized by ATR-FTIR. The morphology was characterized by SEM. The swellability and adsorption efficiency were also determined. The effects of  $\text{NaHCO}_3$ ,  $\text{CaCl}_2$ , F108 and activated carbon on ammonia adsorption were demonstrated in terms of adsorption capacity (mg/g) and %removal efficiency. The ALGAC5% beads showed the maximum adsorption capacity of 6.88 (mg/g) at 100 mg-N/L of ammonia concentration, pH 6 and 6 h of incubation time. The adsorption isotherm of these composite beads was fitted with Langmuir model.

# สารบัญ

	หน้า
<b>1. บทนำ</b>	<b>1</b>
1.1	ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา
1.2	วัตถุประสงค์ของการวิจัย
1.3	ขอบเขตของการวิจัย
1.4	วิธีดำเนินการวิจัยโดยสรุปทฤษฎี และแนวทางการคิดที่นำมาใช้ในการวิจัย
1.5	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ
<b>2. วิธีดำเนินการวิจัย</b>	<b>8</b>
2.1	สารเคมี
2.2	วิธีการทดลอง
2.2.1	การเตรียมเม็ดคอมโพสิตไฮโดรเจลของอัลจินตและผงถ่านกัมมันต์
2.2.2	การศึกษาสัดส่วนการบวมตัวของเม็ดคอมโพสิตไฮโดรเจล
2.2.3	การศึกษาการดูดซับสารละลายแอมโมเนียของเม็ดคอมโพสิตไฮโดรเจล
2.2.4	การศึกษาพฤติกรรมการดูดซับแอมโมเนียของเม็ดคอมโพสิตไฮโดรเจล
<b>3. ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง</b>	<b>14</b>
3.1	การเตรียมเม็ดคอมโพสิตไฮโดรเจลของอัลจินตและผงถ่านกัมมันต์
3.2	ศึกษาการดูดซับสารละลายแอมโมเนียของเม็ดคอมโพสิตไฮโดรเจล
3.3	ศึกษาพฤติกรรมการดูดซับแอมโมเนียของเม็ดคอมโพสิตไฮโดรเจล
<b>4. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ</b>	<b>44</b>
4.1	สรุปผลการทดลอง
4.2	ข้อเสนอแนะ
<b>ผลผลิต</b>	<b>45</b>
<b>บรรณานุกรม</b>	<b>46</b>
<b>ประวัตินักวิจัย</b>	<b>48</b>

## สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
1.1	การเปลี่ยนแปลงของสายโซ่พอลิเมอร์เมื่อเกิดการพองตัวโดยการแพร่ผ่านของโมเลกุลน้ำเข้าไปภายในโครงสร้างของไฮโดรเจล	3
1.2	โครงสร้างของอัลจินต (a) คือ 1,4- $\beta$ -D-manuronic acid (M) และ 1,4- $\alpha$ -L-guluronic acid (G) (b) คือ homopolymeric regions ของ G และ M และ (c) คือ MG-blocks	4
1.3	กลไกการเกิดเจลของ calcium alginate (Egg-box model)	4
1.4	การเตรียม Fish Gelatin/Imogolite Nanofiber Composite Hydrogel	5
1.5	การเตรียม Graphene oxide-based composite hydrogels	6
1.6	Silver-based composite hydrogels สำหรับการกำจัดสีย้อม	6
1.7	ภาพถ่าย SEM และแบบจำลองโครงสร้างภายในของถ่านกัมมันต์	7
3.1	เม็ดคอมโพสิตไฮโดรเจล ALG-AC50% ก) ลักษณะเม็ดก่อนอบ (wet) ข) ลักษณะเม็ดแห้งหลังอบ (dry) และ ค) ลักษณะเม็ดหลังการบวมตัว (swollen)	14
3.2	ภาพถ่าย SEM ของเม็ดคอมโพสิตไฮโดรเจล ALG-AC50% ก) ภาพถ่าย Top-view และ ข) ภาพถ่าย cross-section	15
3.3	ATR-FTIR สเปกตรัมของ NaALG , CaALG bead และ ALG-AC50%	16
3.4	ลักษณะของเม็ด ALG-AC ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต	17
3.5	อัตราการบวมตัวของเม็ด ALGAC ที่เตรียมโดยใช้สารสร้างรูพรุนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ	17
3.6	ภาพถ่าย SEM ก) เม็ด ALGAC-P0.25% ข) ภาพถ่าย cross-section เม็ด ALGAC-P0.25% ค) เม็ด ALGAC-P0.5% ง) ภาพถ่าย cross-section เม็ด ALGAC-P0.5% จ) เม็ด ALGAC-P1% และ ฉ) ภาพถ่าย cross-section เม็ด ALGAC-P1%	18
3.7	ภาพถ่าย SEM บริเวณพื้นผิวหน้า ก) กำลังขยาย 5000 เท่า ของเม็ด ALGAC-P0.25% ข) กำลังขยาย 20000 เท่า ของเม็ด ALGAC-P0.25% ค) กำลังขยาย 5000 เท่า ของเม็ด ALGAC-P0.5% ง) กำลังขยาย 20000 เท่า ของเม็ด ALGAC-P0.5% จ) กำลังขยาย 5000 เท่า ของเม็ด ALGAC-P1% และ ฉ) กำลังขยาย 20000 เท่า ของเม็ด ALGAC-P1%	19
3.8	ลักษณะก่อนอบ (wet) หลังอบ (dry) และหลังการบวมตัว (swollen) ของเม็ด ALGAC-P0.25% ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของ $\text{CaCl}_2$	20
3.9	อัตราการบวมตัวของเม็ด ALGAC-P0.25% ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของ $\text{CaCl}_2$	21
3.10	ภาพถ่าย SEM ก) เม็ด ALGAC ที่ใช้ $\text{CaCl}_2$ เข้มข้น 0.025 M ข) ภาพถ่าย cross-section เม็ด ALGAC ที่ใช้ $\text{CaCl}_2$ เข้มข้น 0.025 M ค) เม็ด ALGAC ที่ใช้ $\text{CaCl}_2$ เข้มข้น 0.1 M และ ง) ภาพถ่าย cross-section เม็ด ALGAC ที่ใช้ $\text{CaCl}_2$ เข้มข้น 0.1 M	22

## สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
3.11	ภาพถ่าย SEM บริเวณพื้นผิวหน้า ก) กำลังขยาย 5000 เท่า ของเม็ด ALGAC ที่ใช้ $\text{CaCl}_2$ เข้มข้น 0.025 M และ ข) กำลังขยาย 20000 เท่า ของเม็ด ALGAC ที่ใช้ $\text{CaCl}_2$ เข้มข้น 0.025 M	22
3.12	ภาพถ่าย SEM บริเวณพื้นผิวหน้า ก) กำลังขยาย 5000 เท่า ของเม็ด ALGAC ที่ใช้ $\text{CaCl}_2$ เข้มข้น 0.1 M และ ข) กำลังขยาย 20000 เท่า ของเม็ด ALGAC ที่ใช้ $\text{CaCl}_2$ เข้มข้น 0.1 M	23
3.13	ลักษณะก่อนอบ (wet) หลังอบ (dry) และหลังการบวมตัว (swollen) ของเม็ด ALGAC ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของ F108	24
3.14	อัตราการบวมตัวของเม็ด ALG-AC ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของ F108	25
3.15	ภาพถ่าย SEM ก) เม็ด ALGAC-S0.125% ข) ภาพถ่าย cross-section เม็ด ALGAC-S0.125% ค) เม็ด ALGAC-S0.25% และ ง) ภาพถ่าย cross-section เม็ด ALGAC-S0.25%	26
3.16	ภาพถ่าย SEM ก) เม็ด ALGAC-S0.5% ข) ภาพถ่าย cross-section เม็ด ALGAC-S0.5% ค) เม็ด ALGAC-S1% และ ง) ภาพถ่าย cross-section เม็ด ALGAC-S1%	27
3.17	ภาพถ่าย SEM บริเวณพื้นผิวหน้า ก) กำลังขยาย 5000 เท่า ของเม็ด ALGAC-S0.125% และ ข) กำลังขยาย 20000 เท่า ของเม็ด ALGAC-S0.125%	27
3.18	ภาพถ่าย SEM บริเวณพื้นผิวหน้า ก) กำลังขยาย 5000 เท่า ของเม็ด ALGAC-S0.25% ข) กำลังขยาย 20000 เท่า ของเม็ด ALGAC-S0.25% ค) กำลังขยาย 5000 เท่า ของเม็ด ALGAC-S0.5% ง) กำลังขยาย 20000 เท่า ของเม็ด ALGAC-S0.5% จ) กำลังขยาย 5000 เท่า ของเม็ด ALGAC-S1% และ ฉ) กำลังขยาย 20000 เท่า ของเม็ด ALGAC-S1%	28
3.19	ลักษณะก่อนอบ (wet) หลังอบ (dry) และหลังการบวมตัว (swollen) ของเม็ด ALGAC ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของผงถ่านกัมมันต์	29
3.20	อัตราการบวมตัวของเม็ด ALGAC ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของผงถ่านกัมมันต์	30
3.21	ภาพถ่าย SEM ก) เม็ด ALGAC0% ข) ภาพถ่าย cross-section เม็ด ALGAC0% ค) เม็ด ALGAC5% และ ง) ภาพถ่าย cross-section เม็ด ALGAC5%	31
3.22	ภาพถ่าย SEM ก) เม็ด ALGAC25% ข) ภาพถ่าย cross-section เม็ด ALGAC25% ค) เม็ด ALGAC50% และ ง) ภาพถ่าย cross-section เม็ด ALGAC50%	31

## สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
3.23	ภาพถ่าย SEM บริเวณพื้นผิวหน้า ก) กำลังขยาย 5000 เท่า ของเม็ด ALGAC0% ข) กำลังขยาย 20000 เท่า ของเม็ด ALGAC0% ค) กำลังขยาย 5000 เท่า ของเม็ด ALGAC5% และ ง) กำลังขยาย 20000 เท่า ของเม็ด ALGAC5%	32
3.24	ภาพถ่าย SEM บริเวณพื้นผิวหน้า ก) กำลังขยาย 5000 เท่า ของเม็ด ALGAC25% ข) กำลังขยาย 20000 เท่า ของเม็ด ALGAC25% ค) กำลังขยาย 5000 เท่า ของเม็ด ALGAC50% และ ง) กำลังขยาย 20000 เท่า ของเม็ด ALGAC50%	33
3.25	ปริมาณการดูดซับแอมโมเนีย (q) ของเม็ดคอมโพสิตที่เตรียมได้จากการใช้สารสร้างรูปพรุนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (ความเข้มข้นสารละลายแอมโมเนีย 5 (mg-N/L) เวลาในการดูดซับ 6 ชั่วโมง	34
3.26	ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนีย (% ammonia removal) ของเม็ดคอมโพสิตที่เตรียมได้จากการใช้สารสร้างรูปพรุนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (ความเข้มข้นสารละลายแอมโมเนีย 5 (mg-N/L) เวลาในการดูดซับ 6 ชั่วโมง)	34
3.27	ปริมาณการดูดซับแอมโมเนีย (q) ของเม็ดคอมโพสิตที่เตรียมได้จากการใช้สารเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (ความเข้มข้นสารละลายแอมโมเนีย 5 (mg-N/L) เวลาในการดูดซับ 6 ชั่วโมง)	35
3.28	ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนีย (% ammonia removal) ของเม็ดคอมโพสิตที่เตรียมได้จากการใช้สารเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (ความเข้มข้นสารละลายแอมโมเนีย 5 (mg-N/L) เวลาในการดูดซับ 6 ชั่วโมง)	35
3.29	ปริมาณการดูดซับแอมโมเนีย (q) ของเม็ดคอมโพสิตที่เตรียมได้จากการใช้สารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (ความเข้มข้นสารละลายแอมโมเนีย 5 (mg-N/L) เวลาในการดูดซับ 6 ชั่วโมง)	36
3.30	ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนีย (% ammonia removal) ของเม็ดคอมโพสิตที่เตรียมได้จากการใช้สารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (ความเข้มข้นสารละลายแอมโมเนีย 5 (mg-N/L) เวลาในการดูดซับ 6 ชั่วโมง)	36
3.31	ปริมาณการดูดซับแอมโมเนีย (q) ของผงถ่านกัมมันต์ของเม็ดคอมโพสิตที่เตรียมได้จากการใช้สารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (ความเข้มข้นสารละลายแอมโมเนีย 5 (mg-N/L) เวลาในการดูดซับ 6 ชั่วโมง)	37
3.32	ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนีย (% ammonia removal) ของเม็ดคอมโพสิตที่เตรียมได้จากการใช้สารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (ความเข้มข้นสารละลายแอมโมเนีย 5 (mg-N/L) เวลาในการดูดซับ 6 ชั่วโมง)	38
3.33	ปริมาณการดูดซับแอมโมเนีย (q) ของเม็ด ALGAC5% ที่ความเข้มข้นสารละลายแอมโมเนีย 5 (mg-N/L)	38



## สารบัญภาพ

รูปที่		หน้า
3.34	ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนีย (% ammonia removal) ของเม็ด ALGAC5% ที่ความเข้มข้นสารละลายแอมโมเนีย 5 (mg-N/L)	39
3.35	ปริมาณการดูดซับแอมโมเนีย (q) ของเม็ด ALGAC5% ที่ความเข้มข้นสารละลายแอมโมเนีย 5 (mg-N/L) ที่ pH ต่าง ๆ	40
3.36	ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนีย (% ammonia removal) ของเม็ด ALGAC5% ที่ความเข้มข้นสารละลายแอมโมเนีย 5 (mg-N/L) ที่ pH ต่าง ๆ	40
3.37	ปริมาณการดูดซับแอมโมเนีย (q) ของเม็ด ALGAC5% ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียต่าง ๆ ที่เวลาในการดูดซับ 6 ชั่วโมง	41
3.38	ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนีย (% ammonia removal) ของเม็ด ALGAC5% ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียต่าง ๆ ที่เหลือหลังการดูดซับ ( $C_e$ ) เวลาในการดูดซับ 6 ชั่วโมง	41
3.39	Langmuir Isotherm ในการดูดซับสารละลายแอมโมเนียของเม็ด ALGAC5%	42
3.40	Freundlich Isotherm ในการดูดซับสารละลายแอมโมเนียของเม็ด ALGAC5%	43

# 1. บทนำ (Introduction)

## 1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัจจุบันอุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงปลาสวยงามของประเทศไทยมีการขยายตัวอย่างรวดเร็ว และต่อเนื่อง กระบวนการขนส่งปลานับเป็นขั้นตอนหนึ่งที่มีความสำคัญเนื่องจากเกี่ยวข้องทั้งในเรื่องต้นทุนในการขนส่งและการรักษาคุณภาพของปลาในระหว่างการขนส่งจากผู้ผลิตไปถึงมือลูกค้าปลายทางทั้งในประเทศและต่างประเทศระบบการขนส่งปลาที่มีหลายรูปแบบหนึ่งในนั้นคือการขนส่งแบบบรรจุถุงซึ่งเป็นที่นิยมเนื่องจากเป็นวิธีการที่ง่ายและมีราคาถูกแต่ปัญหาส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นในการขนส่งคืออัตราการตายหรือการป่วยของปลาซึ่งมีสาเหตุหลักมาจากการเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำและสิ่งแวดล้อมในระหว่างการขนส่ง การเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำส่วนใหญ่เกิดจากการสะสมของเสียที่เกิดจากการขับถ่ายของปลาซึ่งจะมีปริมาณมากขึ้นเมื่อปลาอยู่ในสภาวะเครียดและในระบบการขนส่งด้วยภาชนะปิดปริมาณแอมโมเนียที่เพิ่มสูงขึ้นนี้ส่งผลกระทบต่อปลา ดังนั้นในการขนส่งปลาจึงนิยมเติมสารเคมีลงในน้ำเพื่อลดอัตราการขับถ่าย หรือลดความเครียด เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตามการใช้สารเคมีจะต้องมีการใช้อย่างระมัดระวังและมีกฎหมายควบคุมเพื่อป้องกันอันตรายที่อาจจะเกิดขึ้น

แอมโมเนียทั้งหมดที่อยู่ในน้ำจะอยู่ทั้งในรูปแอมโมเนียไม่แตกตัวหรือแอมโมเนียอิสระ (unionized ammonia หรือ free ammonia,  $\text{NH}_3$ ) ซึ่งมีความเป็นพิษต่อปลา และอยู่ในรูปแอมโมเนียมไอออน (ionized ammonium หรือ ammonium ion,  $\text{NH}_4^+$ ) ซึ่งไม่เป็นพิษต่อปลา โดยขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรด-เบสและอุณหภูมิของน้ำ ด้วยเหตุนี้ทำให้มีการศึกษาเกี่ยวกับการควบคุมคุณภาพน้ำในระหว่างการขนส่งปลาเพื่อเป็นการเพิ่มอัตราการรอดและการรักษาคุณภาพของปลาด้วยวิธีการต่างๆ เช่น การใช้สารละลายบัฟเฟอร์ (buffer) เพื่อควบคุมพีเอชของน้ำแต่วิธีการนี้ยังไม่มีการใช้กันแพร่หลายหรือการใช้วัสดุดูดซับ (adsorbent) ในการกำจัดแอมโมเนียที่เกิดขึ้นในน้ำ เช่น ซีโอไลต์ (zeolite) และถ่านกัมมันต์ (activated carbon) โดยอาศัยหลักการดูดซับ (adsorption) แต่ถึงแม้จะมีการนำวัสดุดูดซับชนิดต่างๆ มาใช้ในการกำจัดแอมโมเนียอย่างแพร่หลายแต่พบว่ายังมีประสิทธิภาพในการกำจัดที่ต่ำและจำเป็นต้องมีการใช้ร่วมกับวิธีการอื่นๆ เช่น การเติมสารเคมีเพื่อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมคุณภาพน้ำซึ่งสารเคมีบางชนิดมีราคาแพงจึงเป็นการเพิ่มต้นทุนในการขนส่งและรวมถึงอาจเป็นอันตรายต่อปลา ดังนั้นการเลือกวัสดุดูดซับที่จะนำมาใช้ต้องคำนึงถึงความปลอดภัยต่อปลา นอกจากนี้ผลกระทบทางอ้อมที่เกิดขึ้นจากอุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงปลาหรือสัตว์น้ำคือ น้ำทิ้ง ซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็นสารอินทรีย์จำพวกไนโตรเจนในปริมาณสูง เมื่อมีการทิ้งลงสู่แหล่งน้ำโดยตรงปราศจากระบบการจัดการน้ำเสียจะก่อให้เกิดปัญหาด้านคุณภาพของแหล่งน้ำ แนวทางหนึ่งที่ได้รับค่านิยมในการบำบัดน้ำเสียคือ การใช้กระบวนการดูดซับ (adsorption process) ซึ่งเกี่ยวข้องกับการดูดซับของสารเจือปนที่ละลายอยู่ในน้ำบนพื้นผิวของวัสดุดูดซับมีข้อดีคือ ไม่ทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจากไม่ได้เป็นการเติมสารเคมีต่างๆ ลงในน้ำ นอกจากนี้ยังสามารถแยกวัสดุดูดซับออกจากน้ำและนำกลับมาใช้ใหม่ได้ซึ่งเป็นการช่วยลดต้นทุนในการบำบัดน้ำเสีย วัสดุดูดซับจากธรรมชาติชนิดหนึ่งที่ได้รับค่านิยมในการนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสีย คือ ถ่านกัมมันต์เนื่องจากสามารถดูดซับกลิ่นและสารอินทรีย์ต่างๆ ได้ดี เช่น แอมโมเนีย และคลอรีน จึงถูกนำมาใช้เป็นวัสดุกรองในระบบกรองน้ำสำหรับอุปโภคและบริโภค รวมถึงระบบกรองน้ำสำหรับตู้ปลา

แต่จากงานที่วิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่จะเน้นศึกษาการนำผงถ่านกัมมันต์มาใช้ในการดูดซับแก๊สแอมโมเนียมีงานวิจัยเพียงส่วนน้อยที่ศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับแอมโมเนียในน้ำด้วยผงถ่านกัมมันต์ อีกทั้งยังเป็นการนำมาใช้โดยตรงทั้งในรูปของถ่านกัมมันต์แบบผง แบบเกร็ด หรืออัดแท่งซึ่งยากต่อการแยกออกจากสารละลายจึงไม่เหมาะสมในการนำมาใช้เป็นวัสดุดูดซับแอมโมเนียในการขนส่งปลาแบบบรรจุถุง ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาและพัฒนาการเตรียมวัสดุดูดซับแอมโมเนียจากพอลิเมอร์ธรรมชาติร่วมกับการใช้ผงถ่านกัมมันต์เพื่อประยุกต์ใช้ในการขนส่งปลาสวยงาม พอลิเมอร์ที่สนใจทำการศึกษาคือ อัลจินต (alginate) เป็นพอลิเมอร์จากธรรมชาติสกัดได้จากสาหร่ายทะเลสีน้ำตาล สามารถเตรียมเป็นเม็ดไฮโดรเจลได้ง่ายโดยอาศัยการเกิดพันธะไอออนิกระหว่างหมู่คาร์บอกซิเลตที่อยู่ในโครงสร้างของอัลจินตและไอออนของแคลเซียม ( $Ca^{2+}$ ) สามารถรับประทานได้ไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต (biocompatible) และสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ (biodegradable) จึงนิยมนำอัลจินตไฮโดรเจลไปประยุกต์ใช้งานหลายๆ ด้าน เช่น ใช้เป็นวัสดุทางการแพทย์ ใช้เป็นวัสดุนำส่งยา และใช้เป็นวัสดุดูดซับโลหะหนัก เป็นต้น ด้วยเหตุนี้จึงเห็นว่ามีควมน่าสนใจที่จะนำมาใช้เตรียมเป็นวัสดุดูดซับแอมโมเนีย โดยมุ่งเน้นศึกษาวิธีการเตรียมเม็ดไฮโดรเจลคอมโพสิตระหว่างอัลจินตและผงถ่านกัมมันต์ และการนำมาประยุกต์ใช้ในการขนส่งปลาสวยงาม ซึ่งคาดว่าจากคุณสมบัติที่ดีของอัลจินตไฮโดรเจลที่สามารถบวมตัวได้ดีในน้ำส่งผลต่อการแพร่ของสารเข้าไปภายในไฮโดรเจลแล้วเกิดการดูดซับและการมีหมู่คาร์บอกซิเลตที่มีขั้วช่วยเพิ่มแรงยึดเหนี่ยว (interaction) ในการดูดซับแอมโมเนียซึ่งเป็นสารที่มีขั้วรวมถึงสมบัติการเป็นตัวดูดซับสารอินทรีย์ของผงถ่านกัมมันต์จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียในน้ำให้กับวัสดุคอมโพสิตสามารถนำมาพัฒนาต่อยอดเป็นนวัตกรรมเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงปลาสวยงามของประเทศไทยได้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาวิธีการเตรียมและประสิทธิภาพในการดูดซับแอมโมเนียของไฮโดรเจลคอมโพสิตระหว่างอัลจินตและผงถ่านกัมมันต์

## 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

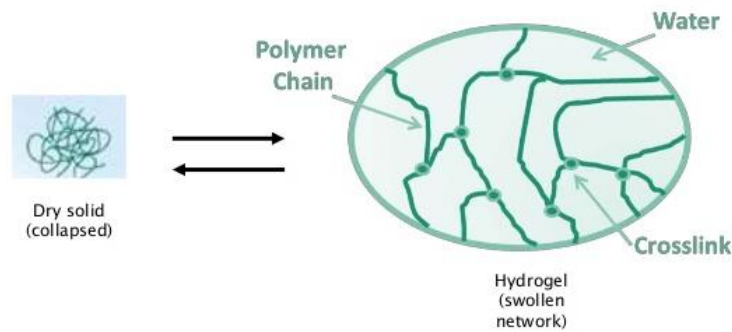
- 1.3.1 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมไฮโดรเจลคอมโพสิตระหว่างอัลจินตและผงถ่านกัมมันต์
- 1.3.2 ศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับแอมโมเนียของไฮโดรเจลคอมโพสิต
- 1.3.3 ศึกษาไอโซเทอร์มในการดูดซับแอมโมเนียของไฮโดรเจลคอมโพสิต

## 1.4 วิธีดำเนินการวิจัยโดยสรุปทฤษฎี และแนวทางการคิดที่นำมาใช้ในการวิจัย

หลักการพื้นฐานของการดูดซับ คือ การเคลื่อนย้ายมวลสาร (mass transfer) ของตัวถูกดูดซับ (adsorbate) มาสะสม (accumulation) ที่บริเวณพื้นผิวหรือระหว่างผิวหน้าของตัวดูดซับ (adsorbent) โดยอาศัยแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับด้วยแรงทางกายภาพหรือทางเคมี ความสามารถในการ

ดูดซับจะขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างพื้นที่ผิวและรูพรุนของตัวดูดซับความสามารถในการละลายของตัวถูกดูดซับและความชอบของตัวถูกดูดซับที่มีต่อตัวดูดซับ (specific affinity) ในปัจจุบันได้มีการนำวัสดุพอลิเมอร์ไฮโดรเจลมาใช้เป็นตัวดูดซับในการกำจัดและบำบัดมลพิษในน้ำ [1-5] เนื่องจากคุณสมบัติของพอลิเมอร์ไฮโดรเจลที่สามารถบวมตัวหรือดูดซับน้ำไว้ภายในโครงร่างตาข่ายสามมิติ (crosslinked network structure) พร้อมกับสามารถบวมตัวหรือขยายตัวออกได้และสามารถหดตัวกลับได้เมื่อมีการสูญเสียโมเลกุลของน้ำออกไปโดยไม่เกิดการละลายในน้ำแสดงดังรูปที่ 3 จึงทำให้โมเลกุลของตัวถูกดูดซับสามารถแพร่ผ่านเข้าไปภายในและเกิดการดูดซับภายในไฮโดรเจล นอกจากนี้พอลิเมอร์ยังมีหมู่ฟังก์ชันที่จะช่วยเพิ่มแรงในการดูดซับทางเคมี

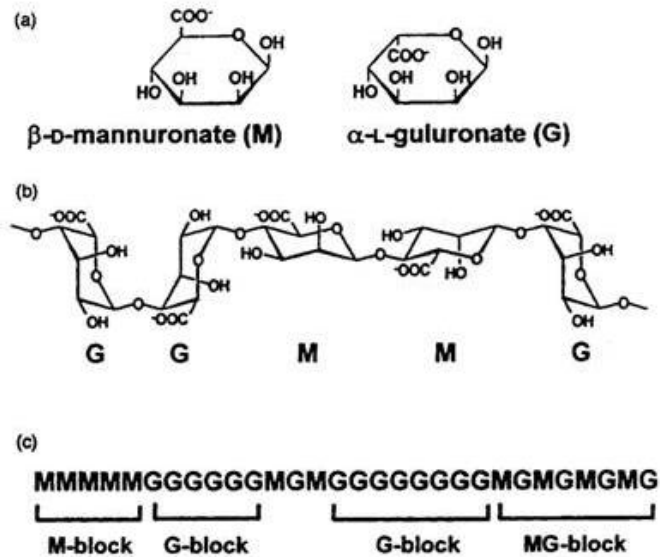
ไฮโดรเจลเกิดจากพอลิเมอร์ชนิดชอบน้ำ หรือไฮโดรฟิลิกพอลิเมอร์เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล (crosslink) ด้วยพันธะโคเวเลนต์พันธะไอออนิกพันธะไฮโดรเจน หรืออันตรกิริยาระหว่างหมู่ต่างๆ ในสายโซ่เกิดเป็นลักษณะคล้ายโครงร่างตาข่ายสามมิติจึงทำให้ไม่เกิดการละลายน้ำแต่จะสามารถดูดซับน้ำไว้ได้ ความสามารถในการบวมตัวของไฮโดรเจลจะขึ้นอยู่กับความชอบน้ำ (hydrophilicity) ของพอลิเมอร์, ปริมาณและความหนาแน่นของการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล



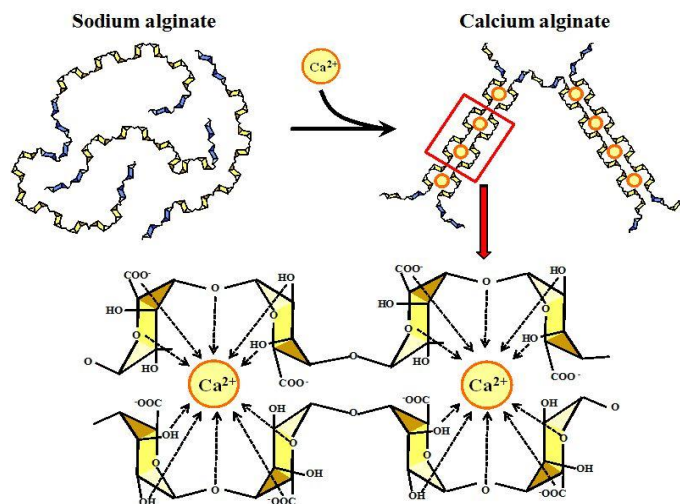
**รูปที่ 1.1** การเปลี่ยนแปลงของสายโซ่พอลิเมอร์เมื่อเกิดการพองตัวโดยการแพร่ผ่านของโมเลกุลน้ำเข้าไปภายในโครงสร้างของไฮโดรเจล

ในปัจจุบันไฮโดรเจลจากพอลิเมอร์ชีวภาพ (biopolymer) เริ่มได้รับความสนใจนำมาใช้ในงานหลายๆ ด้าน เช่น ทางการแพทย์ เกษษกรรม และอุตสาหกรรมอาหาร [6-9] รวมถึงการนำมาใช้เป็นวัสดุในการดูดซับสารพิษที่ปนเปื้อนอยู่ในสิ่งแวดล้อม [2-5] อัลจินेट (alginate) เป็นพอลิเมอร์จากธรรมชาติที่สกัดได้จากสาหร่ายทะเลสีน้ำตาล อัลจินेटจัดเป็นโคพอลิเมอร์สายตรง (unbranched binary copolymer) ของ 1,4-  $\beta$ -D-manuronic acid (M) และ 1,4- $\alpha$ -L-guluronic acid (G) ในโมเลกุลประกอบด้วยทั้งส่วนของโฮโมพอลิเมอร์ของ G และ M ที่เรียกว่า G- และ M-blocks และส่วนของโคพอลิเมอร์ของ MG-blocks แสดงดังรูปที่ 2 จากโครงสร้างที่เหมาะสมและการมีหมู่  $\text{COO}^-$  ของอัลจินेटทำให้สามารถเกิดเป็นเจล (irreversible gel) ได้ง่ายเมื่อทำปฏิกิริยากับโลหะประจุบวก (polyvalent metal cationic) เช่น  $\text{Ca}^{2+}$  ซึ่งจะทำให้สายโซ่ของอัลจินेटในส่วนของ G-blocks เกิดการเชื่อมโยงระหว่าง

โมเลกุลด้วยพันธะไอออนิก (ionic bond) มีลักษณะคล้ายกล่องไข่ (egg-box model) โดยมี  $\text{Ca}^{2+}$  อยู่ตรงกลางระหว่างสายโพลิเมอร์ แสดงดังรูปที่ 3 ซึ่งความสามารถในการเกิดเป็นไฮโดรเจลจะขึ้นอยู่กับปริมาณของ G-blocks ในสายโซ่โพลิเมอร์และปริมาณ  $\text{Ca}^{2+}$  ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการเตรียมอัลจินตไฮโดรเจลจึงสามารถเตรียมได้ง่ายและไม่จำเป็นต้องใช้สารเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลที่เป็นสารเคมีอันตรายหรือมีการใช้ปฏิกิริยาเคมีที่ยุ่งยากซับซ้อนเหมือนกับการเตรียมไฮโดรเจลจากโพลิเมอร์ชีวภาพชนิดอื่นๆ เช่น ไคโตซาน[8-9, 14-15]หรือเจลาติน [13]

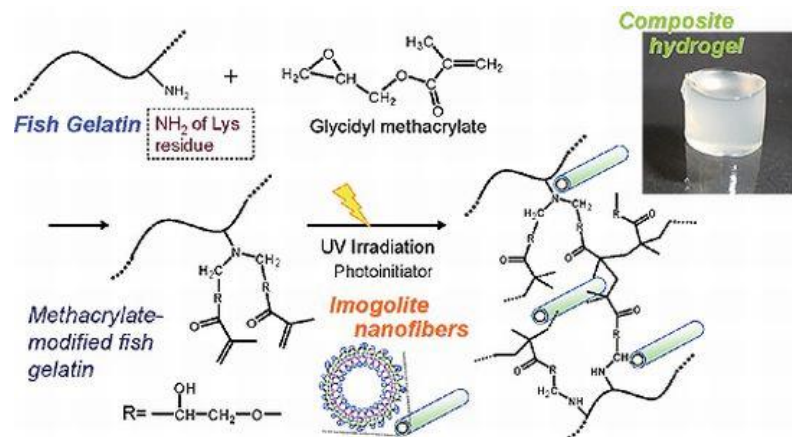


รูปที่ 1.2 โครงสร้างของอัลจินต (a) คือ 1,4-  $\beta$ -D-manuronic acid (M) และ 1,4- $\alpha$ -L-guluronic acid (G) (b) คือ homopolymeric regions ของ G และ M และ (c) คือ MG-blocks [10]



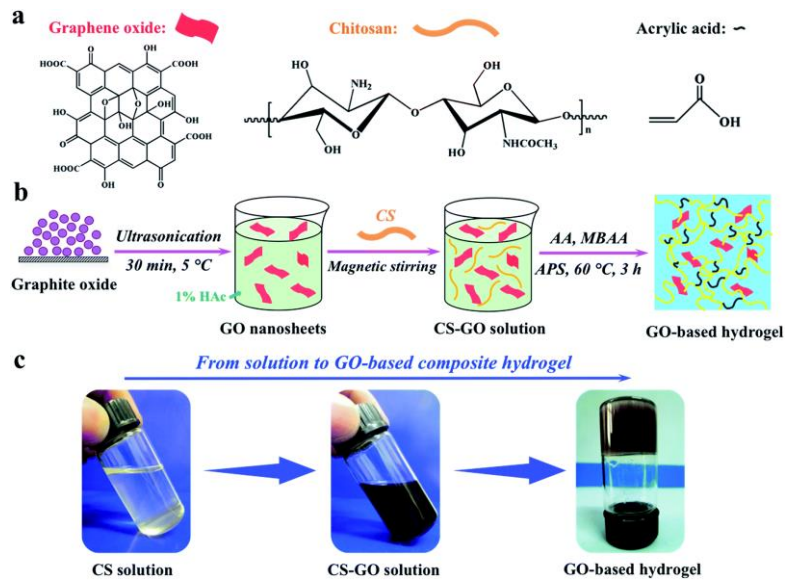
รูปที่ 1.3 กลไกการเกิดเจลของ calcium alginate (Egg-box model) [11]

การนำวัสดุไฮโดรเจลมาใช้งานยังมีข้อจำกัดเนื่องจากการมีสมบัติเชิงกล (mechanical properties) ที่ต่ำ ดังนั้นจึงได้มีงานวิจัยที่พัฒนาสมบัติด้านเชิงกลของไฮโดรเจลโดยการเติมสารเสริมแรง (reinforcing agent) เข้าไปในไฮโดรเจลหรือที่เรียกว่า composite hydrogel สารเสริมแรงที่นิยมใช้ส่วนใหญ่เป็นสารในกลุ่มเส้นใย (fiber) และอนุภาค (particles) เช่น การเติมเส้นใยคอลลาเจน (collagen fibril) ลงในอัลจิเนตไฮโดรเจล[12] การเติมเส้นใยระดับนาโนของ imogolite ลงในเจลาตินไฮโดรเจล[13]

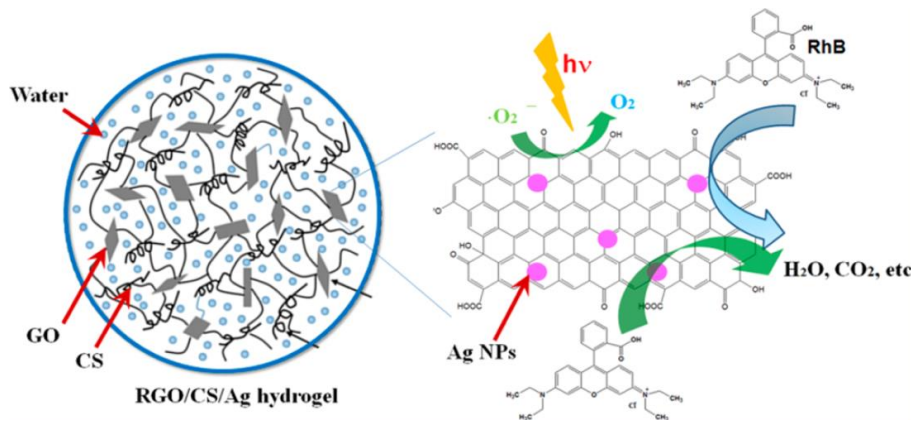


รูปที่ 1.4 การเตรียม Fish Gelatin/Imogolite Nanofiber Composite Hydrogel [13]

ข้อดีของการเตรียมเป็น composite hydrogel คือ นอกจากจะช่วยทำให้ไฮโดรเจลมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นแล้ว หากสารเสริมแรงมีคุณสมบัติอื่นๆ ร่วมด้วย ก็จะเป็นการช่วยเพิ่มสมบัติที่ดีด้านอื่นๆ ให้ไฮโดรเจลด้วยเช่นกัน เช่น การเติม graphene oxide ลงในไฮโดรเจลทำให้มีสมบัติด้านการนำไฟฟ้าเพิ่มขึ้น [14] หรือการเติมอนุภาคนาโนซิลเวอร์ในไฮโดรเจลทำให้มีสมบัติด้านการต้านทานเชื้อแบคทีเรีย หรือเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาใช้ในการบำบัดน้ำเสียได้ [15-16] เป็นต้น ดังนั้นสมบัติของไฮโดรเจลนอกจากจะขึ้นกับชนิดของพอลิเมอร์แล้วยังขึ้นอยู่กับสารเติมแต่งหรือสารเสริมแรงที่เติมเข้าไปด้วย



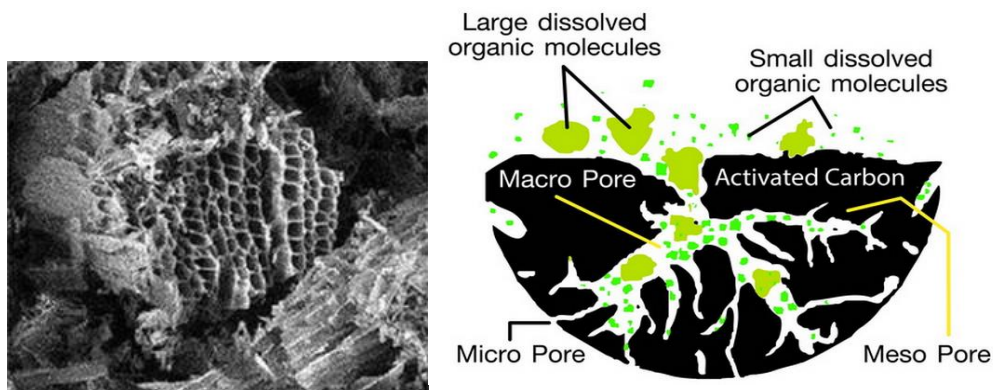
รูปที่ 1.5 การเตรียม Graphene oxide-based composite hydrogels [14]



รูปที่ 1.6 Silver-based composite hydrogels สำหรับการกำจัดสีย้อม [16]

ถ่านกัมมันต์ คือวัสดุอินทรีย์ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบได้จากการนำวัตถุดิบธรรมชาติที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบเช่น ไม้ไผ่ และกะลามะพร้าว เป็นต้น มาผ่านกระบวนการคาร์บอนไนซ์ (carbonization) และกระบวนการกระตุ้น (activation) ด้วยสารเคมีหรือวิธีทางกายภาพทำให้โครงสร้างทางกายภาพของถ่านเกิดเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากส่งผลทำให้มีพื้นที่ผิวภายในสูงประมาณ 600-1,000  $\text{m}^2/\text{g}$  ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบและกระบวนการผลิต จากคุณสมบัตินี้ทำให้ถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพในการดูดซับสารอินทรีย์ที่ดี จากคุณสมบัติที่เหมาะสมและมีราคาไม่แพงทำให้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับที่นิยมใช้กันมาก ถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับสารอินทรีย์ได้ทั้งในรูปของแก๊สและสารละลาย โดยเกิดการดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption) ด้วยแรง van der Waals force (รูปที่ 4) ซึ่งเกิดจากการแพร่ของตัวถูกดูดซับเข้าไปในรูพรุนภายในถ่านกัมมันต์ (intraparticle diffusion) โดยการแพร่นี้จะขึ้นอยู่กับขนาดของโครงสร้างของรูพรุนการแพร่อาจอยู่ในลักษณะของการแพร่ในรูพรุน (pore diffusion)

หรือการแพร่บนพื้นผิว (surface diffusion) จากนั้นก็จะเข้าสู่สถานะของการดูดซับตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์



รูปที่ 1.7 ภาพถ่าย SEM และแบบจำลองโครงสร้างภายในของถ่านกัมมันต์

จากงานที่วิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่จะเน้นศึกษาการนำผงถ่านกัมมันต์มาใช้ในการดูดซับแก๊สแอมโมเนีย มีงานวิจัยเพียงส่วนน้อยที่ทำการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับแอมโมเนียในน้ำด้วยผงถ่านกัมมันต์ [17-19] และจะเป็นการนำถ่านกัมมันต์มาใช้โดยตรงในรูปแบบผงถ่านซึ่งกระจายตัวอยู่ในน้ำยากต่อการแยกออกจากสารละลายจึงไม่เหมาะสมในการนำมาใช้เป็นวัสดุดูดซับแอมโมเนียในการขนส่งปลาแบบบรรจุถุง อีกทั้งยังไม่มีกรรมวิธีเตรียมเป็นวัสดุคอมโพสิตร่วมกับพอลิเมอร์ด้วยเหตุนี้คณะผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษาและพัฒนาวัสดุดูดซับชนิดใหม่ให้มีความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้ในระบบการขนส่งปลา โดยเลือกใช้อัลจิเนตซึ่งเป็นพอลิเมอร์จากธรรมชาติร่วมกับถ่านกัมมันต์ซึ่งก็เป็นวัสดุดูดซับจากธรรมชาติมาเตรียมให้อยู่ในรูปของเม็ดไฮโดรเจลคอมโพสิต ซึ่งแนวทางที่เลือกใช้นี้สามารถเตรียมได้ง่ายไม่ซับซ้อนอีกทั้งยังไม่มีการใช้สารเคมีที่เป็นอันตราย ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงคาดว่าน่าจะสามารถนำมาพัฒนาต่อยอดเป็นวัสดุดูดซับที่มีประสิทธิภาพ ปลอดภัย และราคาถูก

## 1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1.5.1 ได้องค์ความรู้ใหม่ที่สามารถเผยแพร่ความรู้จากงานวิจัยสู่วงวิชาการได้ ผ่านการตีพิมพ์ในวารสารระดับนานาชาติที่มี impact factor และนำเสนอผลงานวิจัยในงานประชุมระดับชาติ
- 1.5.2 ได้ไฮโดรเจลคอมโพสิตที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับแอมโมเนียที่
- 1.5.3 สามารถนำความรู้จากการวิจัยไปพัฒนาและต่อยอดเป็นวัสดุดูดซับในการกำจัดแอมโมเนียในระบบการขนส่งปลาสวยงามและระบบบำบัดน้ำเสีย



## 2. วิธีดำเนินการวิจัย (Material & Method)

### 2.1 สารเคมี

- 1) โซเดียมอัลจิเนต (alginic acid sodium salt, from brown algae) บริษัท Sigma Aldrich
- 2) โซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต (sodium hydrogen carbonate,  $\text{NaHCO}_3$  MW. 84.01) เกรดวิเคราะห์ AR ของบริษัท Asia Pacific Specialty Chemicals Limited
- 3) แคลเซียมคลอไรด์ (calcium chloride,  $\text{CaCl}_2$  MW. 110.99) เกรดวิเคราะห์ AR บริษัท Ajax Finechem
- 4) กรดอะซิติก (acetic acid glacial,  $\text{CH}_3\text{COOH}$  MW. 60.05) เกรด AR บริษัท Quality Reagent Chemical Product
- 5) Poly(ethylene glycol)-block-poly(propylene glycol)-block-poly(ethylene glycol) F108 (PEG-PPG-PEG MW. 14,600) บริษัท Sigma Aldrich
- 6) ผงถ่านกัมมันต์ (activated charcoal, MW. 12.01) อนุภาคขนาด 100 mesh (149 microns) พื้นที่ผิว 600 ตารางเมตร/กรัม ปริมาณรูพรุน 0.95 มิลลิลิตร/กรัม บริษัท Sigma Aldrich
- 7) แอมโมเนียมคลอไรด์ (ammonium chloride,  $\text{NH}_4\text{Cl}$  MW. 53.49) เกรด AR บริษัท EMSURE
- 8) ฟีนอล (phenol,  $\text{C}_6\text{H}_6\text{O}$  MW. 297.95) เกรด AR บริษัท Panreac Quimica
- 9) เอทานอล (ethanol,  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$  MW. 46.07) เกรด AR บริษัท Quality Reagent Chemical Product
- 10) โซเดียมไนโตรพรัสไซด์ไดไฮเดรต (sodiumnitroprusside dihydrate,  $\text{Na}_2\text{Fe}(\text{CN})_5\text{NO}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  MW. 297.95) บริษัท Sigma Aldrich
- 11) ไตรโซเดียมซิเตรทไดไฮเดรต (tri-sodium citrate dihydrate,  $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7\cdot 2\text{H}_2\text{O}$  MW. 294.10) เกรด AR บริษัท EMSURE
- 12) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide,  $\text{NaOH}$  MW. 40.00) เกรด AR บริษัท Quality Reagent Chemical Product
- 13) น้ำยาฟอกผ้าขาว ยี่ห้อไฮเตอร์ บริษัท คาโอ

### 2.2 วิธีการทดลอง

#### 2.2.1 การเตรียมเม็ดคอมโพสิตไฮโดรเจลของอัลจิเนตและผงถ่านกัมมันต์

##### 2.2.1.1. ศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นของสารสร้างรูพรุน

เตรียมสารละลายผสมของอัลจิเนต ถ่านกัมมันต์ สารลดแรงตึงผิว (F108) และสารสร้างรูพรุน ( $\text{NaHCO}_3$ ) ตามตารางที่ 2.1 คนสารละลายให้เข้ากันและให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $60^\circ\text{C}$  จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้

เย็นที่อุณหภูมิห้อง บรรจุสารละลายที่เตรียมได้ลงในกระบอกฉีดยา แล้วค่อยๆ หยดสารละลายในกระบอกฉีดยาให้เป็นหยดลงในสารละลายผสมของ  $\text{CaCl}_2$  (0.1 M) และกรดแอสซิติค (5% v/v) ปริมาตร 200 มิลลิลิตร แช่เม็ดคอมโพสิตไฮโดรเจลไว้ในสารละลายผสมดังกล่าวเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่น โดยทำการเปลี่ยนน้ำล้างทุก ๆ 5 นาที เป็นเวลา 20 นาที และอบให้แห้งที่อุณหภูมิ  $55^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

**ตารางที่ 2.1** ปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมเม็ดคอมโพสิตไฮโดรเจลเพื่อศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นของ  $\text{NaHCO}_3$

ตัวอย่าง	อัลจินต (กรัม)	ถ่านกัมมันต์ (กรัม)	F108 (กรัม)	$\text{NaHCO}_3$ (กรัม)	น้ำกลั่น (mL)
ALG-AC-P0.25%	0.7500	0.1875	0.1250	0.1250	50
ALG-AC-P0.5%	0.7500	0.1875	0.1250	0.2500	50
ALG-AC-P1.0%	0.7500	0.1875	0.1250	0.5000	50

### 2.2.1.2. ศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นของสารเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล

เตรียมสารละลายผสมของอัลจินต ถ่านกัมมันต์ สารลดแรงตึงผิว (F108) และสารสร้างรูพรุน ( $\text{NaHCO}_3$ ) ตามตารางที่ 2.2 คนสารละลายให้เข้ากันและให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $60^\circ\text{C}$  จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง บรรจุสารละลายที่เตรียมได้ลงในกระบอกฉีดยา แล้วค่อยๆ หยดสารละลายในกระบอกฉีดยาให้เป็นหยดลงในสารละลายผสมของ  $\text{CaCl}_2$  และกรดแอสซิติค (5% v/v) ปริมาตร 200 มิลลิลิตร โดยทำการศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นของสารละลาย  $\text{CaCl}_2$  ที่ความเข้มข้น 0.025, 0.05, 0.075 และ 0.1 M ตามลำดับ แช่เม็ดคอมโพสิต ไฮโดรเจลไว้ในสารละลายผสมดังกล่าวเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่น โดยทำการเปลี่ยนน้ำล้างทุก ๆ 5 นาที เป็นเวลา 20 นาที และอบให้แห้งที่อุณหภูมิ  $55^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

**ตารางที่ 2.2** ปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมเม็ดคอมโพสิตไฮโดรเจลเพื่อศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นของ  $\text{CaCl}_2$

ตัวอย่าง	อัลจินต (กรัม)	ถ่านกัมมันต์ (กรัม)	F108 (กรัม)	$\text{NaHCO}_3$ (กรัม)	น้ำกลั่น (mL)
ALGAC-P0.25%	0.7500	0.1875	0.1250	0.1250	50

### 2.2.1.3. ศึกษาความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว

เตรียมสารละลายผสมของอัลจินเต ถ่านกัมมันต์ สารลดแรงตึงผิว (F108) และสารสร้างรูพรุน ( $\text{NaHCO}_3$ ) ตามตารางที่ 2.3 คนสารละลายให้เข้ากันและให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $60^\circ\text{C}$  จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง บรรจุสารละลายที่เตรียมได้ลงในกระบอกฉีดยา แล้วค่อย ๆ หยดสารละลายในกระบอกฉีดยาให้เป็นหยดลงในสารละลายผสมของ  $\text{CaCl}_2$  (0.025 M) และกรดแอสซิติค (5% v/v) ปริมาตร 200 มิลลิลิตร แซ่เม็ดคอมโพสิตไฮโดรเจลไว้ในสารละลายผสมดังกล่าวเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่น โดยทำการเปลี่ยนน้ำล้างทุก ๆ 5 นาที เป็นเวลา 20 นาที และอบให้แห้งที่อุณหภูมิ  $55^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

ตารางที่ 2.3 ปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมเม็ดคอมโพสิตไฮโดรเจลเพื่อศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นของ F108

ตัวอย่าง	อัลจินเต (กรัม)	ถ่านกัมมันต์ (กรัม)	F108 (กรัม)	$\text{NaHCO}_3$ (กรัม)	น้ำกลั่น (mL)
ALGAC-S0.125%	0.7500	0.1875	0.0625	0.1250	50
ALGAC-S0.25%	0.7500	0.1875	0.1250	0.1250	50
ALGAC-S0.5%	0.7500	0.1875	0.2500	0.1250	50
ALGAC-S1%	0.7500	0.1875	0.5000	0.1250	50

### 2.2.1.4. ศึกษาอิทธิพลปริมาณของผงถ่านกัมมันต์

เตรียมสารละลายผสมของอัลจินเต ถ่านกัมมันต์ สารลดแรงตึงผิว (F108) และสารสร้างรูพรุน ( $\text{NaHCO}_3$ ) ตามตารางที่ 2.4 คนสารละลายให้เข้ากันและให้ความร้อนที่อุณหภูมิ  $60^\circ\text{C}$  จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง บรรจุสารละลายที่เตรียมได้ลงในกระบอกฉีดยา แล้วค่อย ๆ หยดสารละลายในกระบอกฉีดยาให้เป็นหยดลงในสารละลายผสมของ  $\text{CaCl}_2$  (0.025 M) และกรดแอสซิติค (5% v/v) ปริมาตร 200 มิลลิลิตร แซ่เม็ดคอมโพสิตไฮโดรเจลไว้ในสารละลายผสมดังกล่าวเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่น โดยทำการเปลี่ยนน้ำล้างทุก ๆ 5 นาที เป็นเวลา 20 นาที และอบให้แห้งที่อุณหภูมิ  $55^\circ\text{C}$  เป็นเวลา 12 ชั่วโมง

ตารางที่ 2.4 ปริมาณสารเคมีที่ใช้ในการเตรียมเม็ดคอมโพสิตไฮโดรเจลเพื่อศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นของ ถ่าน กัมมันต์

ตัวอย่าง	อัลจินต (กรัม)	ถ่านกัมมันต์ (กรัม)	F108 (กรัม)	NaHCO <sub>3</sub> (กรัม)	น้ำกลั่น (mL)
ALGAC0%	0.7500	0	0.5000	0.1250	50
ALGAC5%	0.7500	0.0375	0.5000	0.1250	50
ALGAC25%	0.7500	0.1875	0.5000	0.1250	50
ALGAC50%	0.7500	0.3750	0.5000	0.1250	50

### 2.2.2 การศึกษาสัดส่วนการบวมตัวของเม็ดคอมโพสิตไฮโดรเจล

ชั่งน้ำหนักเม็ดแห้งของตัวอย่างประมาณ 0.05 กรัม บันทึกน้ำหนักเป็นน้ำหนักแห้ง ( $W_d$ ) นำไปแช่ในน้ำกลั่น (pH = 7) ปริมาตร 15 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบตามเวลาที่กำหนด นำมาชั่งน้ำหนัก โดยชั่งน้ำส่วนเกินที่ผิวออกด้วยกระดาษทิชชูบันทึกเป็นน้ำหนักหลังการบวมตัว ( $W_t$ ) และคำนวณสัดส่วนการบวมตัวจากสมการที่ (1)

$$\text{Swelling ratio} = \frac{W_t - W_d}{W_d} \quad (1)$$

เมื่อ  $W_d$  คือ น้ำหนักเม็ดอัลจินตไฮโดรเจลแห้ง (กรัม)

$W_t$  คือ น้ำหนักเม็ดอัลจินตไฮโดรเจลหลังบวมตัว (กรัม)

### 2.2.3 การศึกษาการดูดซับสารละลายแอมโมเนียของเม็ดคอมโพสิตไฮโดรเจล

นำเม็ดแห้งของคอมโพสิตไฮโดรเจลมาประมาณ 0.2 กรัม แช่ลงในสารละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 5 mg-N/L ปริมาตร 25 มิลลิลิตร เขย่าสารละลายด้วยเครื่องเขย่าสารเป็นเวลา 6 ชั่วโมง เมื่อครบตามเวลาที่กำหนดแยกเม็ดคอมโพสิตไฮโดรเจลออกจากสารละลายและนำสารละลายมาเจือจาง 7 เท่าเพื่อให้ความเข้มข้นของสารละลายอยู่ในช่วงกราฟมาตรฐาน แล้วจึงนำไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณแอมโมเนียรวม (Total ammonia, TAN) ที่เหลืออยู่ภายหลังการดูดซับตามวิธี Phenol-hypochlorite method (Strickland, J. D., & Parsons, T. R., 1972) โดยอาศัยการทำปฏิกิริยาระหว่างแอมโมเนียในสารละลายกับไฮโปคลอไรท์ และฟีนอล โดยมีไนโตรปรัสไซด์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเกิดเป็นสาร Indophenol ที่มีสีน้ำเงิน จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิคยูวี-วิสิเบิลสเปกโทรสโกปี (UV-Vis) ซึ่งความเข้มของสีน้ำเงินที่เกิดขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณแอมโมเนียที่มีในน้ำ ซึ่งค่าแอมโมเนียรวมที่วิเคราะห์ได้จะประกอบด้วยแอมโมเนียทั้งในรูปที่  $\text{NH}_4^+$  และ  $\text{NH}_3$

คำนวณปริมาณการดูดซับแอมโมเนีย ( $q$ ) และประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนีย (% ammonia removal) ดังสมการที่ (2) และ (3) ตามลำดับ

$$q = \frac{(c_o - c_e) \times V}{m} \quad (2)$$

$$\% \text{ ammonia removal} = \frac{(c_o - c_e) \times 100}{c_o} \quad (3)$$

- เมื่อ  $q$  คือ ปริมาณการดูดซับแอมโมเนีย ( $\mu\text{g/g}$ )  
 $C_o$  คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายแอมโมเนีย ( $\text{mg-N/L}$ )  
 $C_e$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนียที่เหลือหลังการดูดซับ ( $\text{mg-N/L}$ )  
 $V$  คือ ปริมาตรของสารละลายแอมโมเนีย (L)  
 $m$  คือ น้ำหนักของเม็ดอัลจิเนต (g)

ทำการศึกษาอิทธิพลต่าง ๆ ที่มีผลต่อความสามารถในการดูดซับแอมโมเนีย เช่น ความเข้มข้นของสารสร้างรูพรุน ความเข้มข้นของสารเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล ( $\text{CaCl}_2$ ) ความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว (F108) ความเข้มข้นของผงถ่านกัมมันต์ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ พีเอชของสารละลายและความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนีย

#### 2.2.4 การศึกษาพฤติกรรมดูดซับแอมโมเนียของเม็ดคอมโพสิตไฮโดรเจล

ศึกษาไอโซเทอมของการดูดซับโดยใช้แบบจำลองไอโซเทอมของแลงเมียร์ (Langmuir model) และฟรุนดลิช (Freundlich model) ดังสมการที่ 3 และ 4 ตามลำดับ

สมการแลงเมียร์ (Langmuir Isotherm)

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{K_{ads} q_{max} C_e} + \frac{1}{q_{max}} \quad (4)$$

- เมื่อ  $q$  คือ ปริมาณการดูดซับแอมโมเนีย (มิลลิกรัม/กรัม)  
 $C_e$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนียที่เหลือหลังการดูดซับ (มิลลิกรัม/ลิตร)  
 $q_{max}$  คือ ปริมาณการดูดซับแอมโมเนียสูงสุด (มิลลิกรัม/กรัม)  
 $K_{ads}$  คือ ค่าคงที่ในการกระจายตัวในการดูดซับ (Adsorption Distribution Constant)

จากสมการที่ (3) เมื่อพลอตกราฟระหว่างค่า  $1/q$  และ  $1/C_e$  จะได้กราฟเส้นตรง ค่า  $q_{max}$  และ  $K_{ads}$  สามารถคำนวณได้จากค่าความชันของกราฟ (slope) และจุดตัดแกน y (intercept) ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $1/K_{ads} q_{max}$  และ  $1/q_{max}$  ตามลำดับ

สมการฟรุนดริช (Freundlich Isotherm)

$$\ln q = \ln K_f + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (5)$$

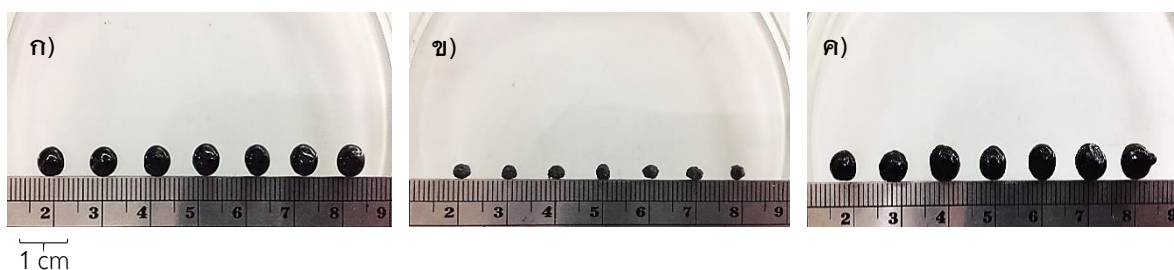
เมื่อ  $K_f$  คือ ค่าคงที่ที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับ (Sorption Capacity)  
 $1/n$  คือ ค่าคงที่ที่แสดงถึงพลังงานที่เกิดจากปฏิกิริยา (Adsorption Intensity)  
 $C_e$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนียที่เหลือหลังการดูดซับ (มิลลิกรัม/ลิตร)  
 $q$  คือ ปริมาณการดูดซับแอมโมเนีย (มิลลิกรัม/กรัม)

จากสมการที่ (4) เมื่อพลอตกราฟระหว่างค่า  $\ln q$  กับ  $\ln C_e$  จะได้กราฟเส้นตรงโดยค่าความชันของกราฟ (Slope) และจุดตัดแกน  $y$  (Intercept) มีค่าเท่ากับ  $1/n$  และ  $\ln K_f$  ตามลำดับ

### 3. ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

#### 3.1 การเตรียมเม็ดคอมโพสิตไฮโดรเจลของอัลจินตและผงถ่านกัมมันต์

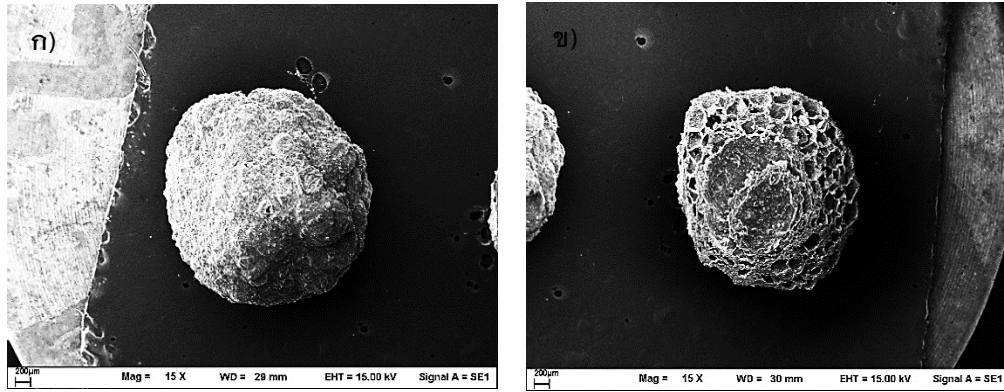
เม็ดคอมโพสิตไฮโดรเจลของอัลจินตและผงถ่านกัมมันต์ (alginate and activated carbon hydrogel composite beads, ALG-AC) เตรียมได้โดยการผสมผงถ่านกัมมันต์ลงในสารละลายอัลจินต จากนั้นนำมาขึ้นรูปให้เป็นเม็ดทรงกลมโดยการหยดสารละลายผสมลงในสารละลาย  $\text{CaCl}_2$  เพื่อให้เกิดการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลของสายโซ่โพลีเมอร์อัลจินตด้วย  $\text{Ca}^{2+}$  ทำให้ได้เม็ดคอมโพสิตไฮโดรเจล ALG-AC ที่มีลักษณะเป็นเม็ดทรงกลม สีดำ มีขนาดประมาณ  $5.64 \pm 0.35$  มิลลิเมตร เมื่อนำไปทำให้แห้งจะได้เม็ดคอมโพสิต ALG-AC ที่มีขนาดประมาณ  $2.86 \pm 0.48$  มิลลิเมตร และเมื่อนำเม็ดคอมโพสิต ALG-AC ที่เตรียมได้มาแช่ในน้ำอีกครั้งจะเกิดการบวมตัวและมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น สามารถคงรูปร่างเดิมไว้ได้ และไม่ละลายน้ำ (ดังแสดงในรูปที่ 3.1) แสดงให้เห็นถึงคุณสมบัติของการเป็นไฮโดรเจลที่ไม่ละลายน้ำแต่จะสามารถดูดซับน้ำและกักเก็บน้ำไว้ในโครงสร้างได้



รูปที่ 3.1 เม็ดคอมโพสิตไฮโดรเจล ALG-AC50% ก) ลักษณะเม็ดก่อนอบ (wet) ข) ลักษณะเม็ดแห้งหลังอบ (dry) และ ค) ลักษณะเม็ดหลังการบวมตัว (swollen)

ผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของเม็ดคอมโพสิต ALG-AC50% ดังแสดงในรูปที่ 3.2 พบว่าเม็ดคอมโพสิตมีลักษณะเป็นทรงกลม มีพื้นผิวภายนอกขรุขระ และเมื่อวิเคราะห์ลักษณะภายในด้วยภาพตัดขวาง (cross-section) แสดงให้เห็นลักษณะรูพรุนภายในเม็ดคอมโพสิต โดยมีลักษณะเป็นรูพรุนที่เชื่อมต่อกัน (interconnected pore) เกิดจากโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต ( $\text{NaHCO}_3$ ) ที่ถูกใช้เป็นสารสร้างรูพรุนในการเตรียมเม็ดคอมโพสิต ALG-AC เมื่อทำปฏิกิริยากับกรดแอสติกแล้วจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์  $\text{CO}_2$  แสดงดังสมการที่ 6 ซึ่งก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นจะช่วยให้เกิดรูพรุนขึ้นภายในเม็ดคอมโพสิต

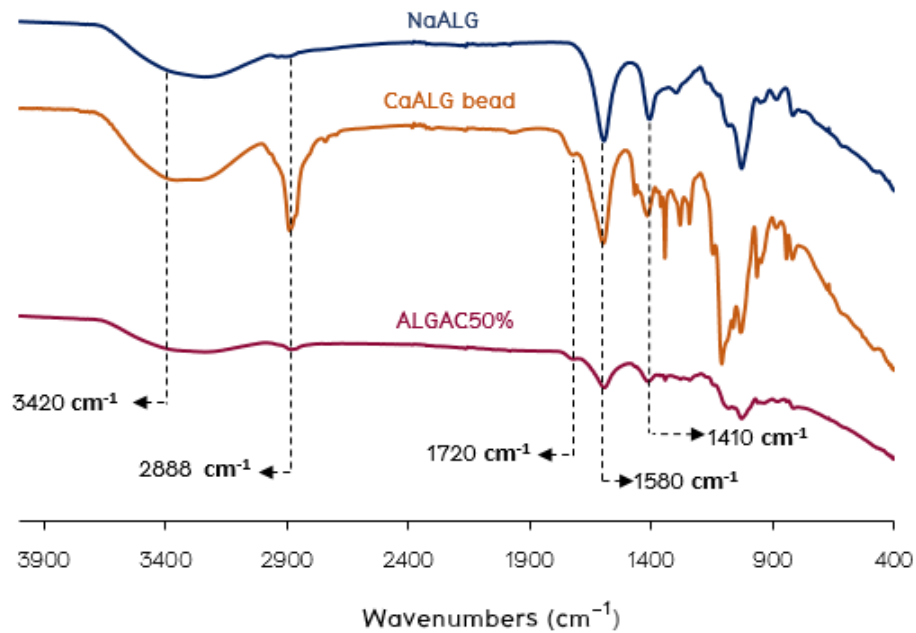




รูปที่ 3.2 ภาพถ่าย SEM ของเม็ดคอมโพสิตไฮโดรเจล ALG-AC50% ก) ภาพถ่าย Top-view และ ข) ภาพถ่าย cross-section

ทำการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของเม็ดคอมโพสิต ALG-AC50% ที่เตรียมได้เปรียบเทียบกับผงโซเดียมอัลจิเนต (sodium alginate, NaALG) และเม็ดอัลจิเนต (calcium alginate bead, CaALG bead) ด้วยเทคนิค ATR-FTIR แสดงผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 3.3 พบว่าในกรณีของ NaALG พบสัญญาณที่แสดงถึงพันธะ O-H (stretching) ที่เลขคลื่นประมาณ  $3000-3600\text{ cm}^{-1}$  และพบสัญญาณของ C-H (stretching) ที่เลขคลื่นประมาณ  $2800-2900\text{ cm}^{-1}$  แสดงถึงการมี  $-\text{CH}_2-$  ในโครงสร้างของสายโซ่พอลิเมอร์ของอัลจิเนต นอกจากนี้ยังพบสัญญาณที่สำคัญที่ตำแหน่ง  $1410$  และ  $1580\text{ cm}^{-1}$  แสดงถึง symmetric และ asymmetric (stretching) ของหมู่  $\text{COO}^-$  ของโซเดียมอัลจิเนต เมื่อนำโซเดียมอัลจิเนตมาทำการเตรียมเป็นเม็ดอัลจิเนตไฮโดรเจลโดยการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลด้วย  $\text{Ca}^{2+}$  จะปรากฏพีคที่คล้ายคลึงกับในกรณีของ NaALG แต่จะมีสัญญาณที่เพิ่มขึ้นใหม่ที่ตำแหน่ง  $1720\text{ cm}^{-1}$  ที่แสดงถึงการมีหมู่ฟังก์ชัน  $\text{COOH}$  ซึ่งคาดว่าน่าจะเกิดจากการที่หมู่  $\text{COO}^-$  ของโซเดียมอัลจิเนตเกิดการรับ  $\text{H}^+$  จากกรด  $\text{CH}_3\text{COOH}$  ที่ใช้ในกระบวนการเตรียมเม็ดไฮโดรเจล และในกรณีของเม็ดคอมโพสิต ALGAC50% ก็จะมีปรากฏพีคที่คล้ายคลึงกับในกรณีของเม็ดอัลจิเนตไฮโดรเจล





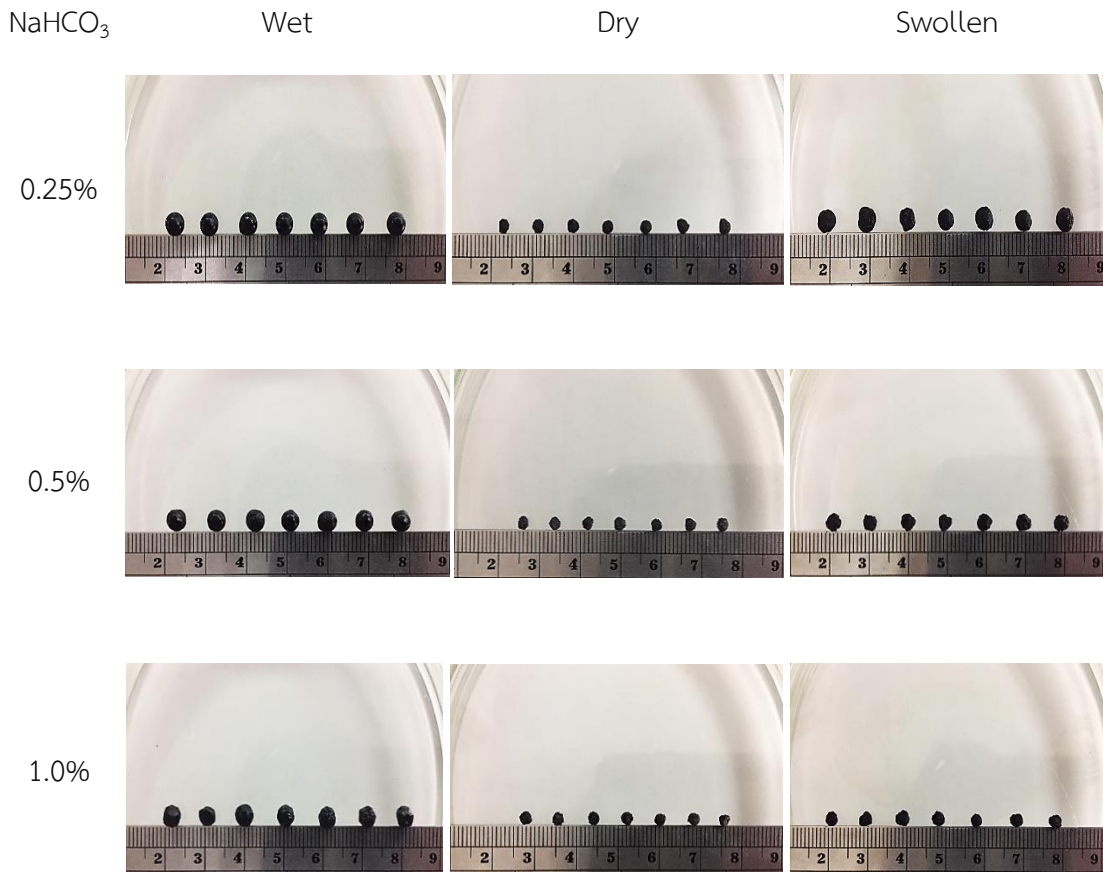
รูปที่ 3.3 ATR-FTIR สเปกตรัมของ NaALG , CaALG bead และ ALG-AC50%

จากการศึกษาอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการเตรียมเม็ดคอมโพสิต ALG-AC แสดงผลดังต่อไปนี้

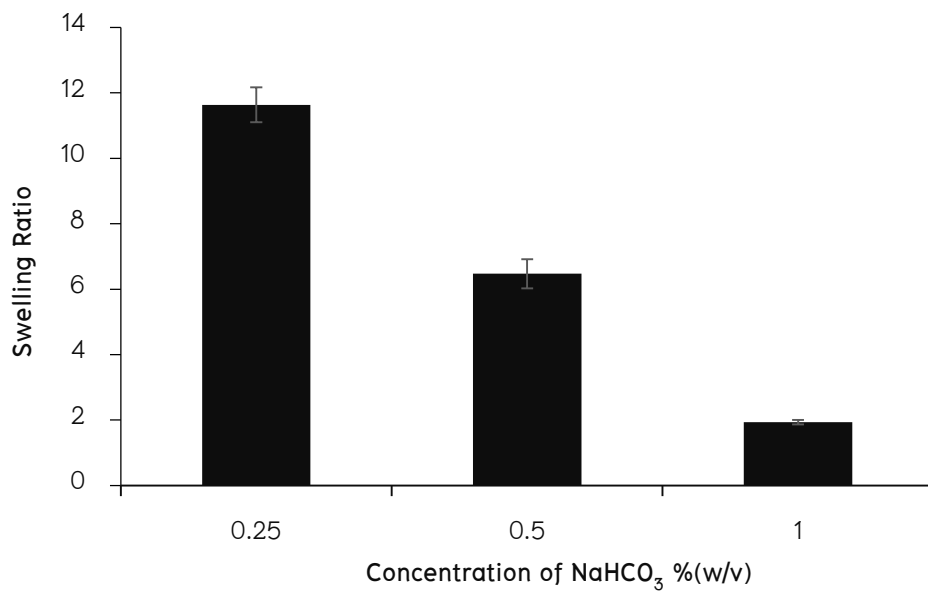
### 3.1.1 อิทธิพลความเข้มข้นของสารสร้างรูพรุน

จากการศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นของสารสร้างรูพรุน ( $\text{NaHCO}_3$ ) ที่มีผลต่อการเตรียมเม็ดคอมโพสิต ALG-AC พบว่า ความเข้มข้นของ  $\text{NaHCO}_3$  ในช่วง 0.25 - 1% w/v ไม่ส่งผลต่อขนาดของเม็ดคอมโพสิตที่เตรียมได้ดังแสดงในรูปที่ 3.4 แต่เมื่อนำมาศึกษาความสามารถในการบวมตัวในน้ำ พบว่า ค่าสัดส่วนการบวมตัว (swelling ratio) มีค่าลดลงตามความเข้มข้นของ  $\text{NaHCO}_3$  ที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.5

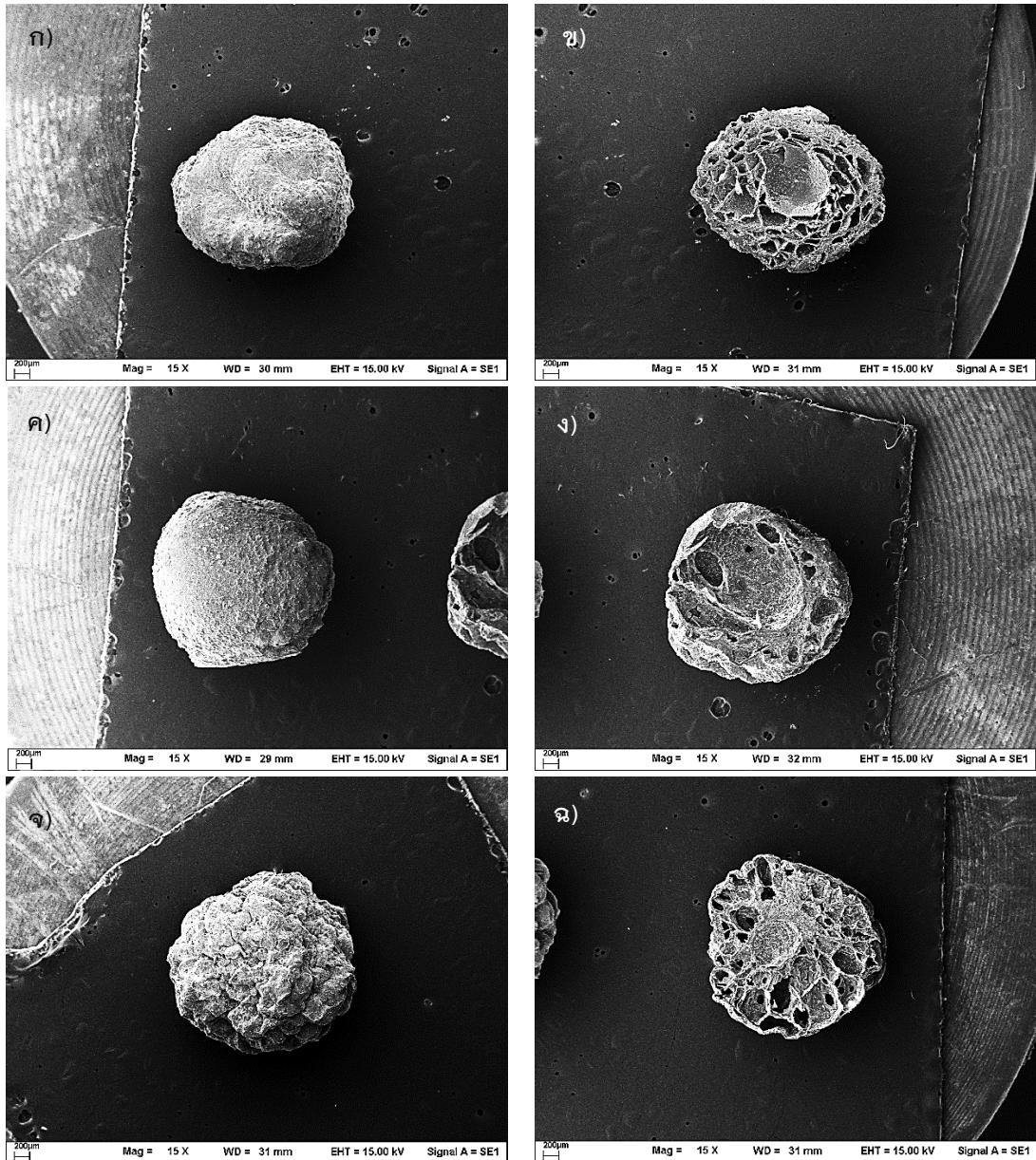
จากการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาทั้งบริเวณพื้นผิวหน้าภายนอกและลักษณะภายในของเม็ดคอมโพสิต ALG-AC ด้วยเทคนิค SEM แสดงผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 3.6 พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ  $\text{NaHCO}_3$  เม็ดคอมโพสิต ALG-AC จะมีลักษณะภายในที่ขรุขระเพิ่มขึ้น และขนาดของรูพรุนภายในเม็ดจะมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น เมื่อพิจารณาพื้นผิวภายนอกที่กำลังขยาย 5000 และ 20000 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 3.7 พบว่าบริเวณพื้นผิวหน้าภายนอกของเม็ดคอมโพสิต ALG-AC จะมีลักษณะเป็นรูเปิดหรือเกิดเป็นรอยแยกขนาดเล็กโดยขนาดของรูจะมีขนาดที่ใหญ่เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ  $\text{NaHCO}_3$  แต่จะมีปริมาณของรูที่ลดลง จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของ  $\text{NaHCO}_3$  ส่งผลต่อทั้งขนาดและปริมาณของรูพรุนภายในและรูเปิดบริเวณพื้นผิวหน้าภายนอก โดยเม็ดคอมโพสิต ALG-AC-P0.25% มีรูพรุนทั้งภายในและภายนอกขนาดเล็กเป็นจำนวนมากจึงคาดว่าน่าจะเป็นปัจจัยหนึ่งส่งผลทำให้เม็ดคอมโพสิต ALG-AC-P0.25% มีความสามารถในการบวมตัวสูงที่สุด ดังนั้นจึงเลือก ALG-AC-P0.25% ไปใช้ในการศึกษาอิทธิพลต่างๆ ต่อไป



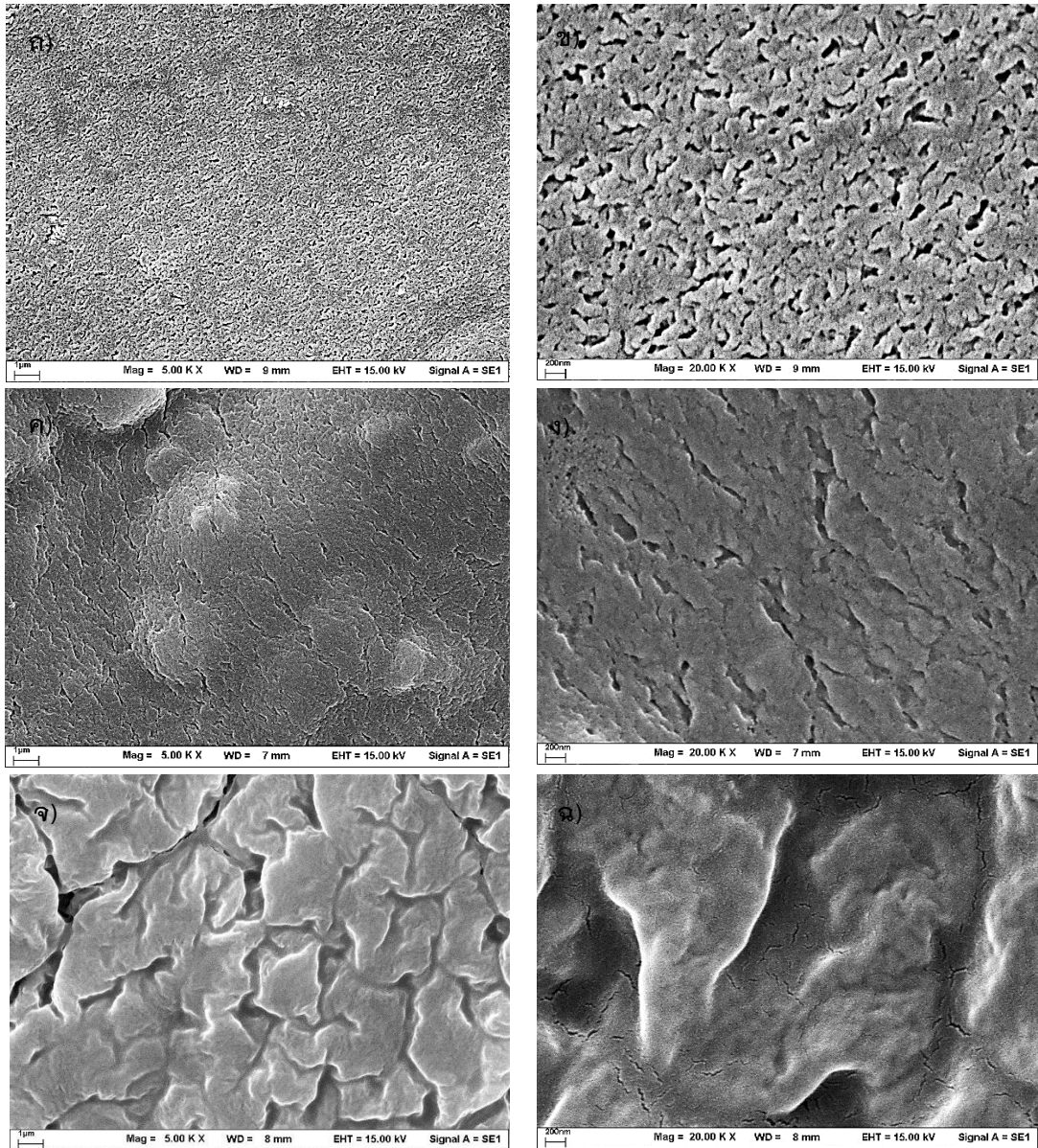
รูปที่ 3.4 ลักษณะของเม็ด ALG-AC ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของโซเดียมไฮโดรเจนคาร์บอเนต



รูปที่ 3.5 อัตราการบวมตัวของเม็ด ALGAC ที่เตรียมโดยใช้สารสร้างรูพรุนที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ



รูปที่ 3.6 ภาพถ่าย SEM ก) เม็ด ALGAC-P0.25% ข) ภาพถ่าย cross-section เม็ด ALGAC-P0.25% ค) เม็ด ALGAC-P0.5% ง) ภาพถ่าย cross-section เม็ด ALGAC-P0.5% ฉ) เม็ด ALGAC-P1% และ ฉ) ภาพถ่าย cross-section เม็ด ALGAC-P1%

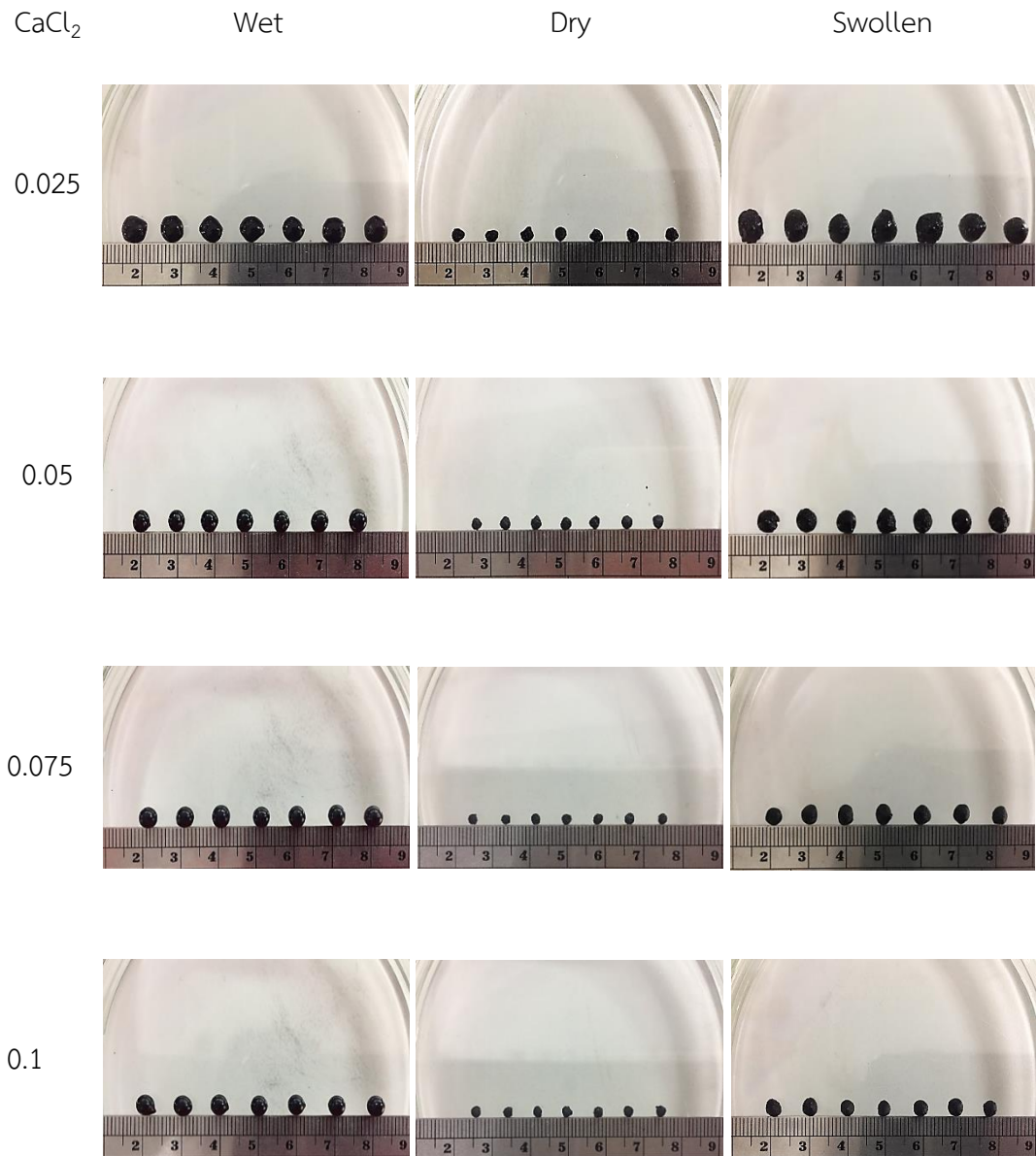


รูปที่ 3.7 ภาพถ่าย SEM บริเวณพื้นผิวหน้า ก) กำลังขยาย 5000 เท่า ของเม็ด ALGAC-P0.25% ข) กำลังขยาย 20000 เท่า ของเม็ด ALGAC-P0.25% ค) กำลังขยาย 5000 เท่า ของเม็ด ALGAC-P0.5% ง) กำลังขยาย 20000 เท่า ของเม็ด ALGAC-P0.5% จ) กำลังขยาย 5000 เท่า ของเม็ด ALGAC-P1% และ ฉ) กำลังขยาย 20000 เท่า ของเม็ด ALGAC-P1%

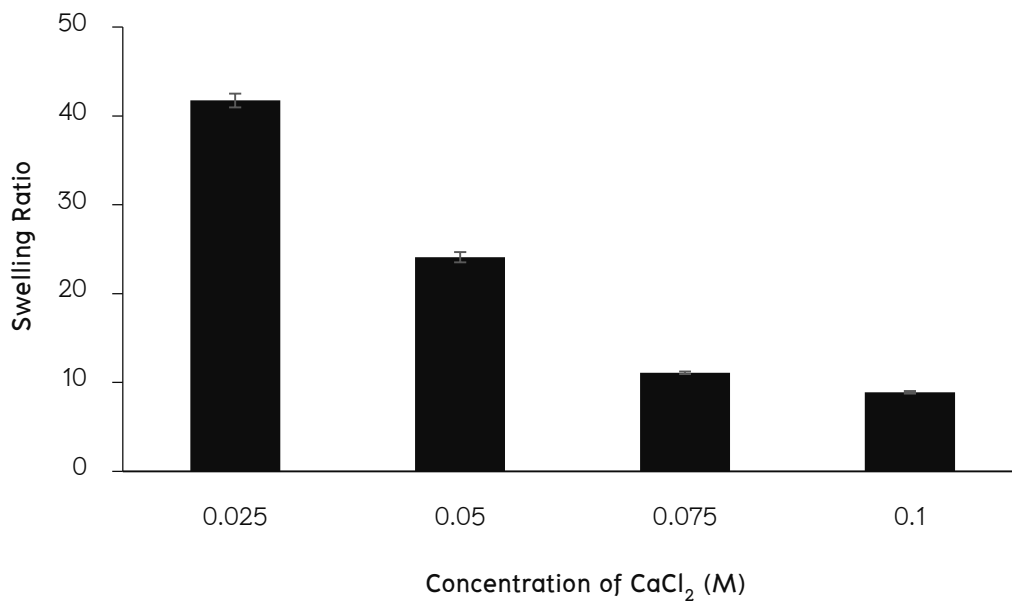
### 3.1.2. ศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นของสารเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล

แคลเซียมคลอไรด์ ( $\text{CaCl}_2$ ) ถูกใช้เป็นสารเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลในการเตรียมเม็ดคอมโพสิต ALG-AC โดยความเข้มข้นของ  $\text{CaCl}_2$  ส่งผลโดยตรงต่อความหนาแน่นในการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล (crosslink density) ซึ่งส่งผลต่อความเสถียร ความคงรูป และความสามารถในการบวมตัวของเม็ดคอมโพสิต ดังนั้นในการทดลองนี้จึงศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นของ  $\text{CaCl}_2$  ที่มีผลต่อการเตรียมเม็ดคอมโพสิต ALG-

AC พบว่า ความเข้มข้นของ  $\text{CaCl}_2$  ส่งผลต่อขนาดของเม็ดคอมโพลีเมอร์ที่เตรียมได้โดยจะมีขนาดเล็กลงเมื่อความเข้มข้นของ  $\text{CaCl}_2$  เพิ่มขึ้น แสดงลักษณะของเม็ดคอมโพลีเมอร์ที่เตรียมได้ดังรูปที่ 3.8 และเมื่อนำมาศึกษาความสามารถในการบวมตัวในน้ำ พบว่าค่าสัดส่วนการบวมตัว (swelling ratio) มีค่าลดลงตามความเข้มข้นของ  $\text{CaCl}_2$  ที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากปริมาณการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลที่เพิ่มขึ้น

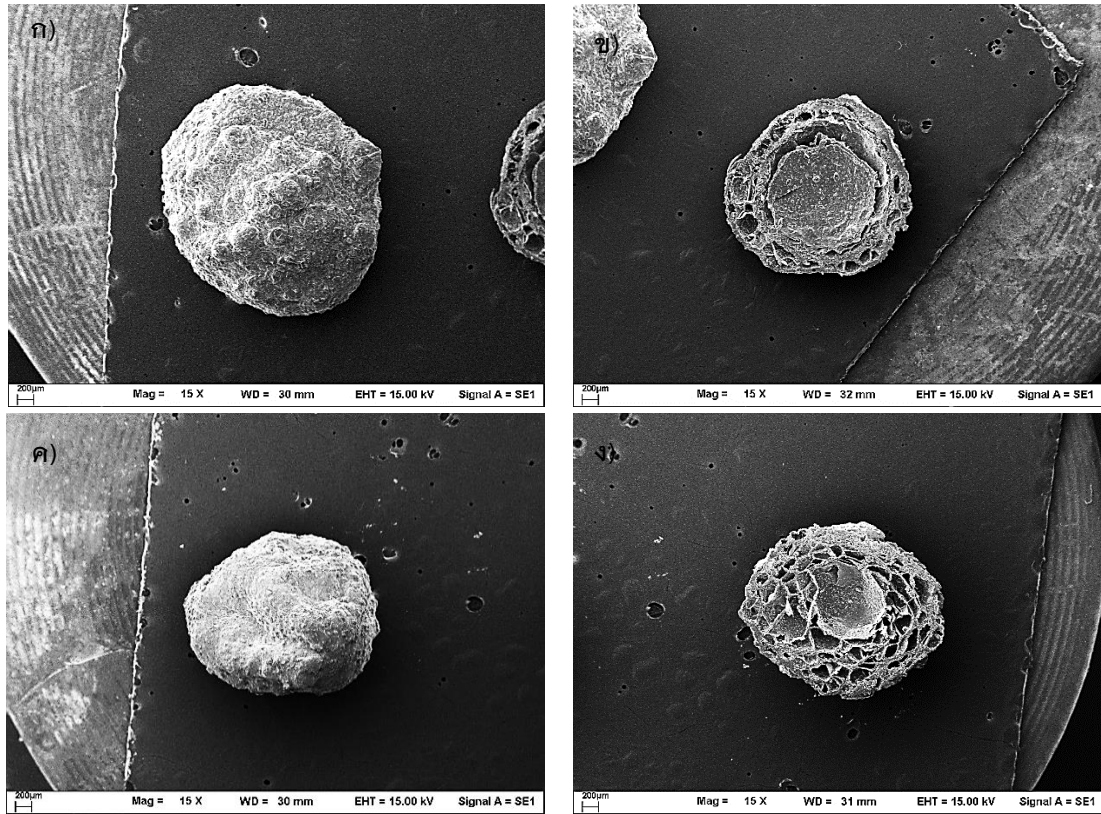


รูปที่ 3.8 ลักษณะก่อนอบ (wet) หลังอบ (dry) และหลังการบวมตัว (swollen) ของเม็ด ALGAC-P0.25% ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของ  $\text{CaCl}_2$

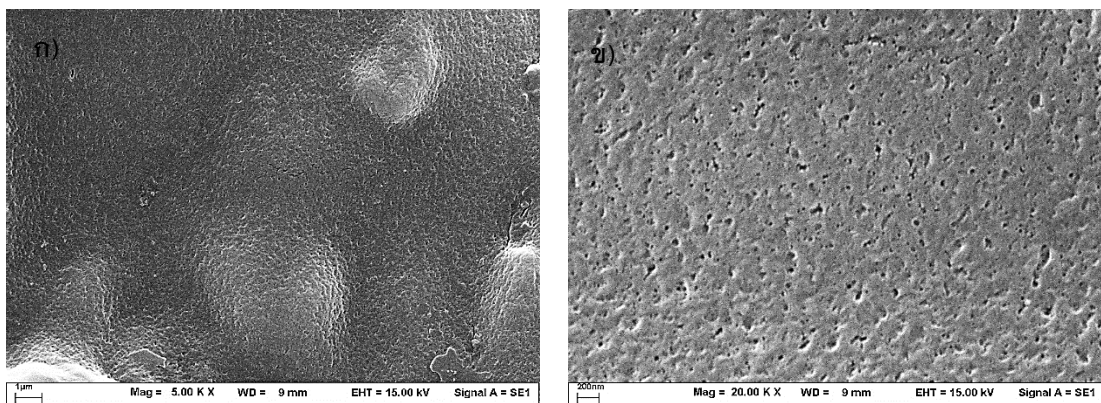


รูปที่ 3.9 อัตราการบวมตัวของเม็ด ALGAC-P0.25% ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของ CaCl<sub>2</sub>

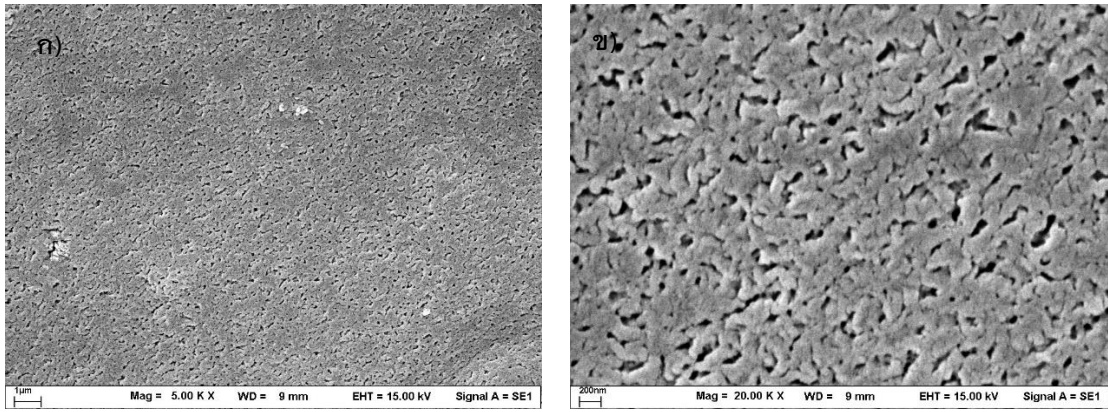
จากการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาทั้งบริเวณพื้นผิวหน้าภายนอกและลักษณะภายในของเม็ดคอมโพสิต ALG-AC ด้วยเทคนิค SEM แสดงผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 3.10 พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ CaCl<sub>2</sub> เม็ดคอมโพสิตจะมีลักษณะภายในที่ขรุขระน้อยลง แต่ขนาดของรูพรุนภายในเม็ดจะมีขนาดใหญ่ขึ้น เมื่อพิจารณาจากภาพถ่ายพื้นผิวภายนอกที่กำลังขยาย 5000 และ 20000 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 3.11 และ 3.12 พบว่า บริเวณพื้นผิวหน้าภายนอกของเม็ดคอมโพสิตจะมีลักษณะเป็นรูเปิดหรือเกิดเป็นรอยแยกขนาดเล็กโดยขนาดของรูจะมีขนาดที่ใหญ่เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ CaCl<sub>2</sub> แต่ปริมาณของรูลดลง จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของ CaCl<sub>2</sub> ส่งผลต่อทั้งขนาดและปริมาณของรูพรุนภายในและรูเปิดบริเวณพื้นผิวหน้าภายนอก โดยเม็ดคอมโพสิตที่ความเข้มข้น CaCl<sub>2</sub> 0.025 M จะมีรูพรุนทั้งภายในและภายนอกขนาดเล็กเป็นจำนวนมากจึงคาดว่าน่าจะเป็นปัจจัยหนึ่งส่งผลทำให้เม็ดคอมโพสิตที่ใช้ความเข้มข้นของ CaCl<sub>2</sub> 0.025 M มีความสามารถในการบวมตัวสูงที่สุด ดังนั้นจึงเลือกใช้ความเข้มข้นของ CaCl<sub>2</sub> ที่ 0.025 M ในการศึกษาอิทธิพลต่างๆ ต่อไป



รูปที่ 3.10 ภาพถ่าย SEM ก) เม็ด ALGAC ที่ใช้  $\text{CaCl}_2$  เข้มข้น 0.025 M ข) ภาพถ่าย cross-section เม็ด ALGAC ที่ใช้  $\text{CaCl}_2$  เข้มข้น 0.025 M ค) เม็ด ALGAC ที่ใช้  $\text{CaCl}_2$  เข้มข้น 0.1 M และ ง) ภาพถ่าย cross-section เม็ด ALGAC ที่ใช้  $\text{CaCl}_2$  เข้มข้น 0.1 M



รูปที่ 3.11 ภาพถ่าย SEM บริเวณพื้นผิวหน้า ก) กำลังขยาย 5000 เท่า ของเม็ด ALGAC ที่ใช้  $\text{CaCl}_2$  เข้มข้น 0.025 M และ ข) กำลังขยาย 20000 เท่า ของเม็ด ALGAC ที่ใช้  $\text{CaCl}_2$  เข้มข้น 0.025 M

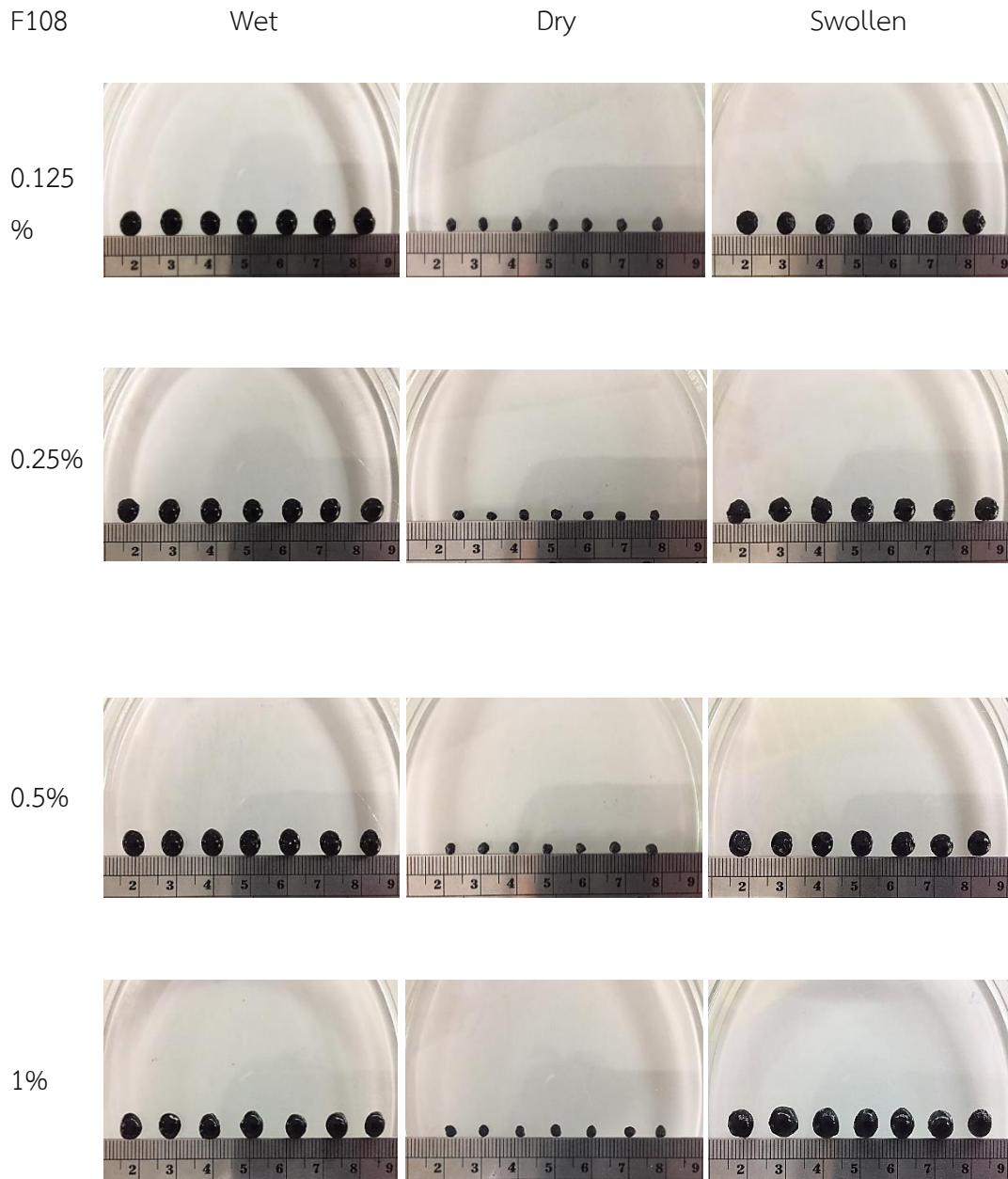


รูปที่ 3.12 ภาพถ่าย SEM บริเวณพื้นผิวหน้า ก) กำลังขยาย 5000 เท่า ของเมมเบรน ALGAC ที่ใช้  $\text{CaCl}_2$  เข้มข้น 0.1 M และ ข) กำลังขยาย 20000 เท่า ของเมมเบรน ALGAC ที่ใช้  $\text{CaCl}_2$  เข้มข้น 0.1 M

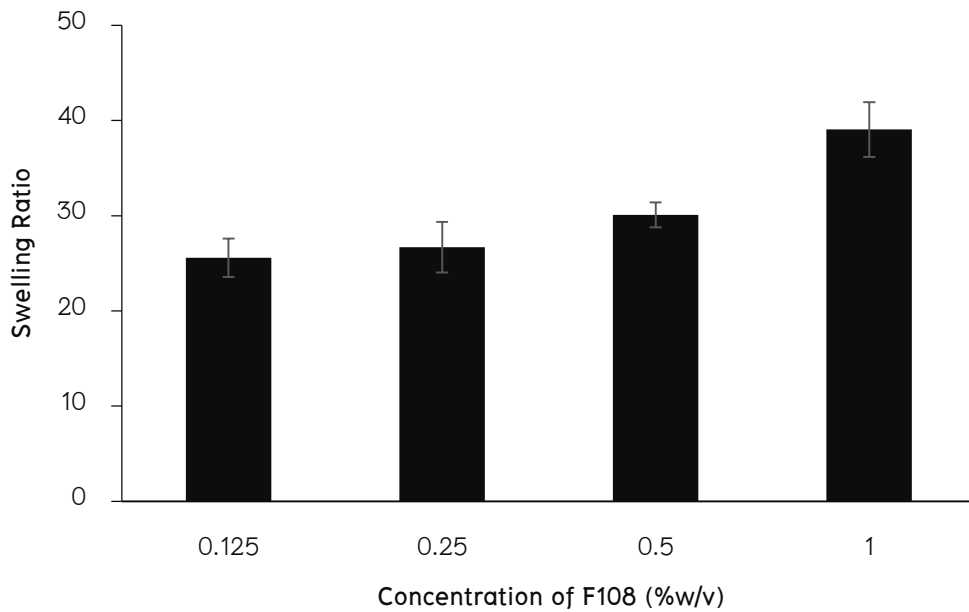
### 3.1.3) อิทธิพลความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว

Poly(ethylene glycol)-block-poly(propylene glycol)-block-poly(ethylene glycol) หรือ F108 เป็นสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ในการเตรียมเมมเบรนคอมโพสิต ALG-AC ช่วยเพิ่มความเสถียรให้ฟองก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ทำให้ฟองก๊าซคงสภาพอยู่ในเมมเบรนคอมโพสิตได้นานมากขึ้น ส่งผลต่อปริมาณรูพรุน ทำการศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นของ F108 ที่มีผลต่อการเตรียมเมมเบรนคอมโพสิต ALG-AC พบว่าความเข้มข้นของ F108 ในช่วง 0.125 - 1% w/v ไม่ส่งผลต่อขนาดของเมมเบรนคอมโพสิตที่เตรียมได้โดยมีขนาดอยู่ในช่วง  $4.96 \pm 0.11$  มิลลิเมตร แสดงลักษณะของเมมเบรนคอมโพสิตที่เตรียมได้ดังรูปที่ 3.13 และเมื่อนำมาศึกษาความสามารถในการบวมตัวในน้ำ พบว่าค่าสัดส่วนการบวมตัว (swelling ratio) มีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ F108 ที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.14



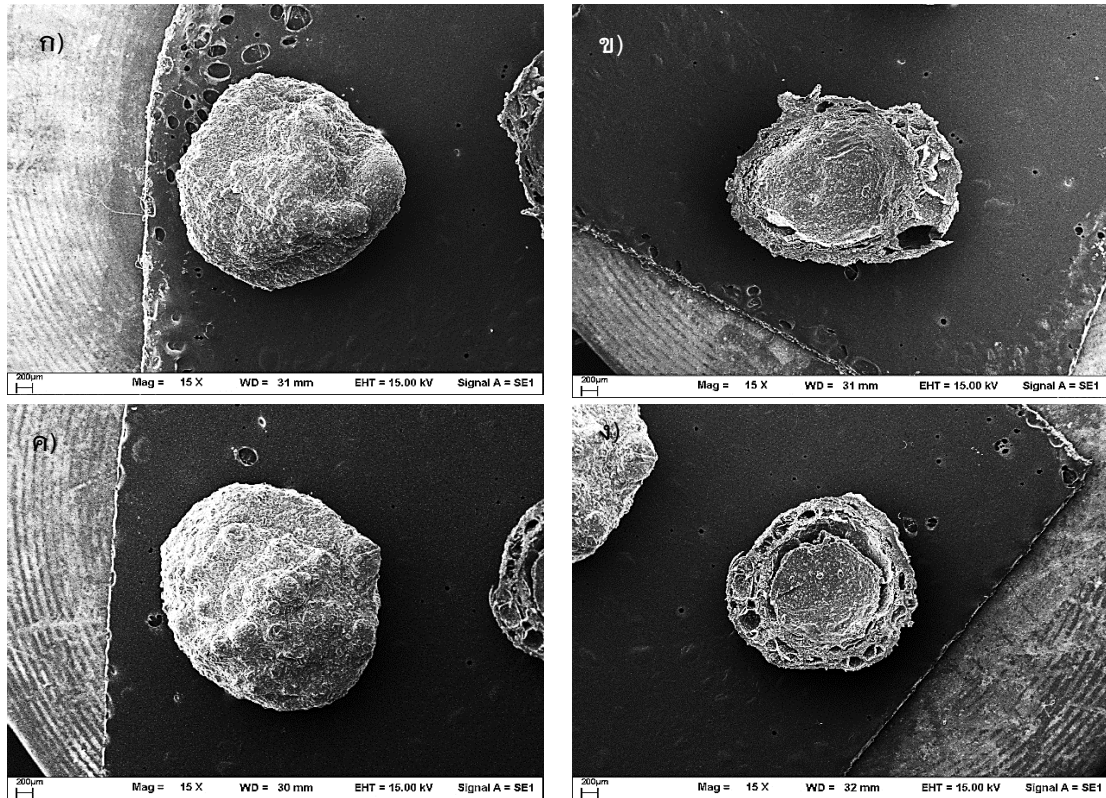


รูปที่ 3.13 ลักษณะก่อนอบ (wet) หลังอบ (dry) และหลังการบวมตัว (swollen) ของเม็ด ALGAC ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของ F108

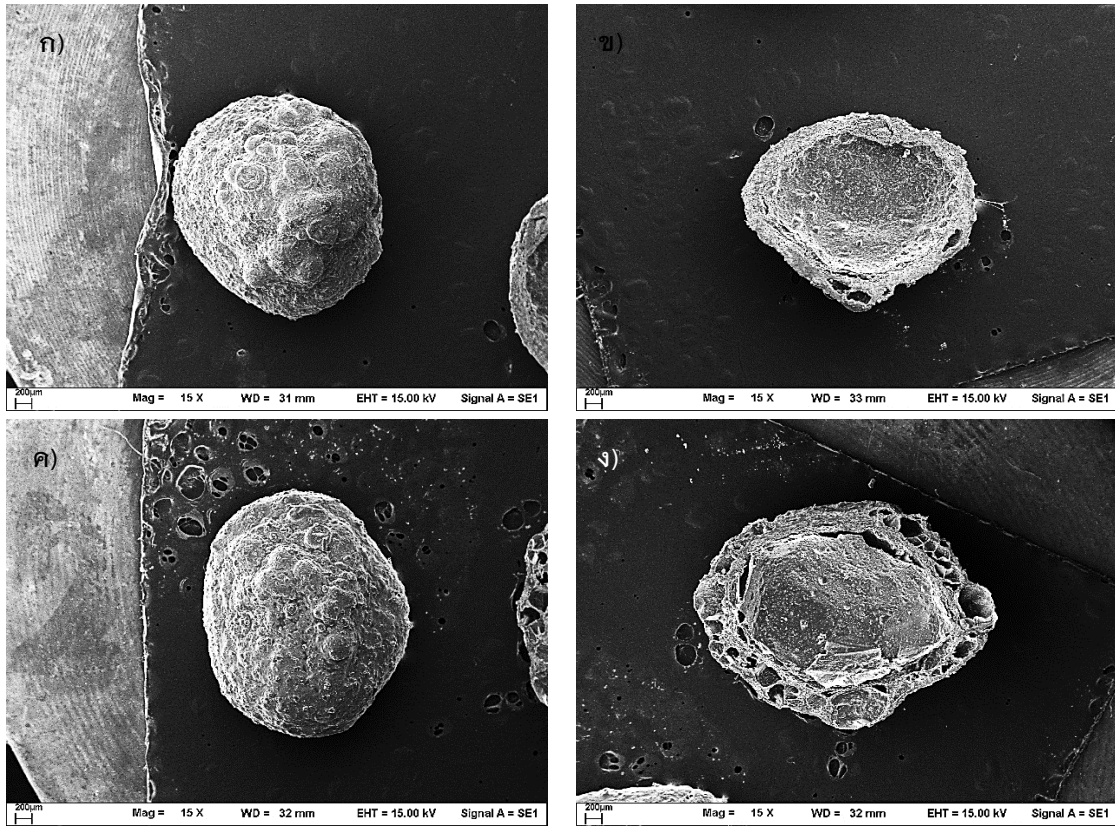


รูปที่ 3.14 อัตราการบวมตัวของเม็ด ALG-AC ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของ F108

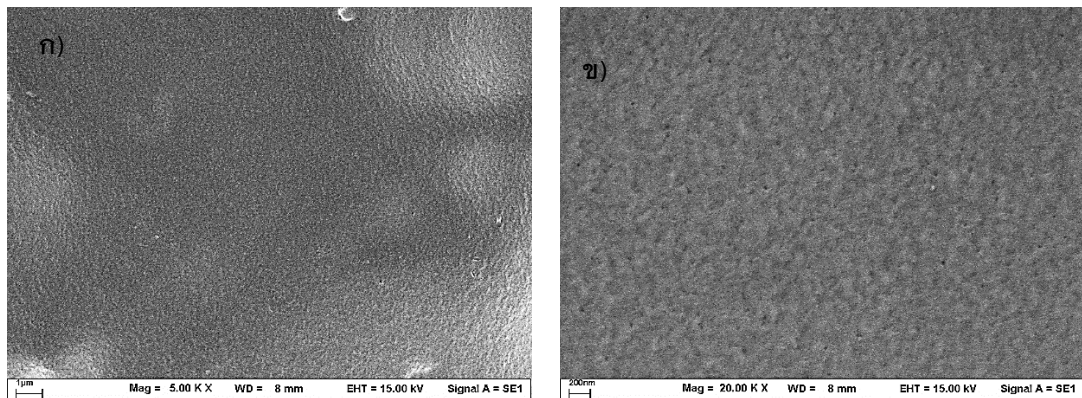
จากการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาทั้งบริเวณพื้นผิวหน้าภายนอกและลักษณะภายในของเม็ดคอมโพสิต ALGAC ด้วยเทคนิค SEM แสดงผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 3.15 พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของ F108 เม็ดคอมโพสิต ALGAC จะมีลักษณะภายในที่ขรุขระเพิ่มขึ้น และขนาดของรูพรุนภายในเม็ดจะมีขนาดที่ใหญ่ขึ้น เมื่อพิจารณาพื้นผิวภายนอกที่กำลังขยาย 5000 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 3.16 และ 3.17 พบว่า บริเวณพื้นผิวหน้าภายนอกของเม็ดคอมโพสิต ALGAC จะมีลักษณะเป็นรูเปิดหรือเกิดเป็นรอยแยกขนาดเล็กแต่จะเห็นได้ว่าเม็ดคอมโพสิตที่ใช้ F108 1% (ALGAC-S1%) จะมีลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระและมีปริมาณของรูพรุนหรือรอยแยกมากกว่าเม็ดคอมโพสิตชนิดอื่น ซึ่งคาดว่าน่าจะเป็นปัจจัยหนึ่งส่งผลทำให้มีความสามารถในการบวมตัวที่สูงสุด ดังนั้นจึงเลือกใช้ความเข้มข้นของ F108 ที่ 1%w/v ในการศึกษาอิทธิพลต่างๆ ต่อไป



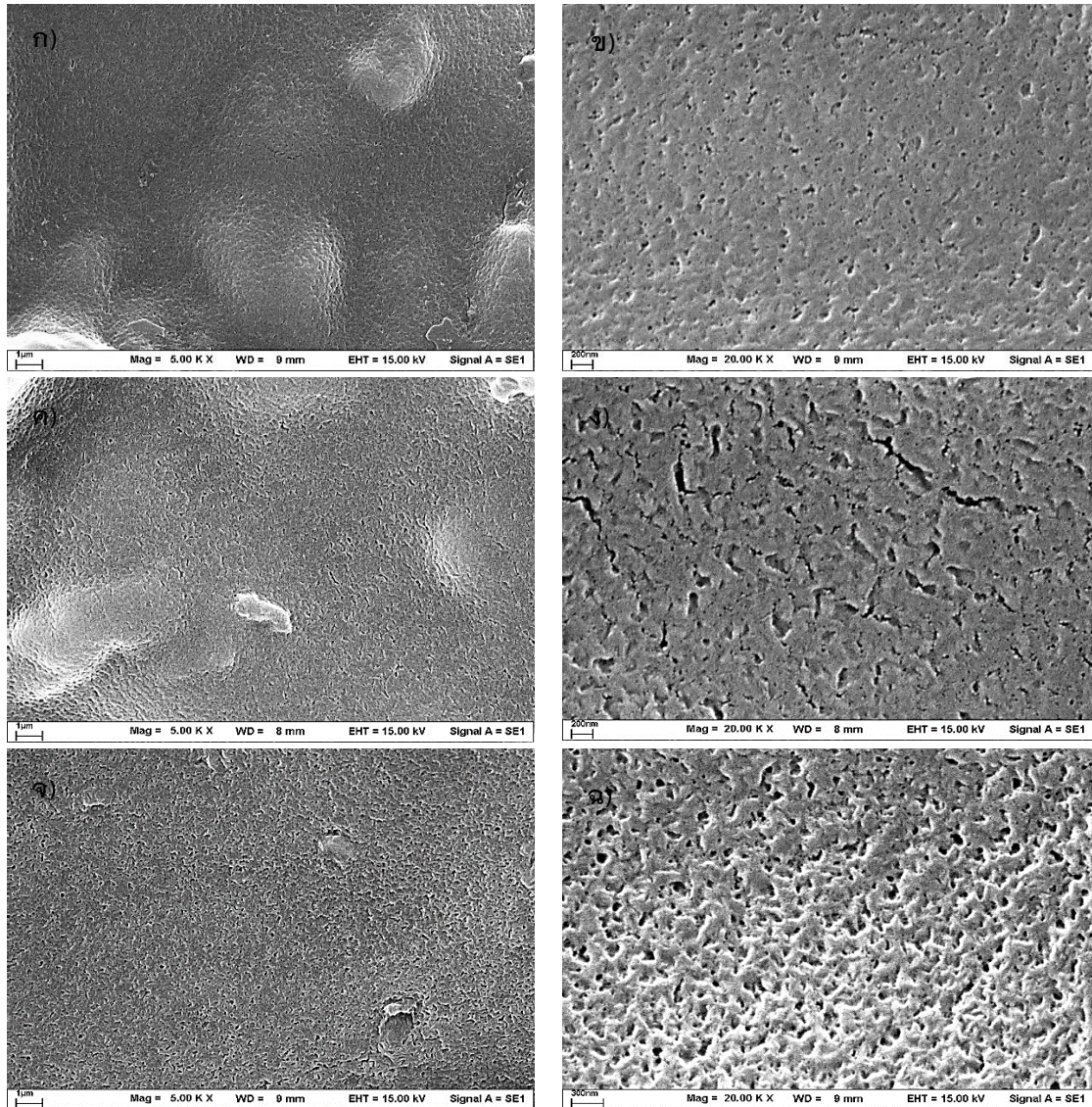
รูปที่ 3.15 ภาพถ่าย SEM ก) เม็ด ALGAC-S0.125% ข) ภาพถ่าย cross-section เม็ด ALGAC-S0.125% ค) เม็ดALGAC-S0.25% และ ง) ภาพถ่าย cross-section เม็ด ALGAC-S0.25%



รูปที่ 3.16 ภาพถ่าย SEM ก) เม็ด ALGAC-S0.5% ข) ภาพถ่าย cross-section เม็ด ALGAC-S0.5% ค) เม็ด ALGAC-S1% และ ง) ภาพถ่าย cross-section เม็ด ALGAC-S1%



รูปที่ 3.17 ภาพถ่าย SEM บริเวณพื้นผิวหน้า ก) กำลังขยาย 5000 เท่า ของเม็ด ALGAC-S0.125% และ ข) กำลังขยาย 20000 เท่า ของเม็ด ALGAC-S0.125%

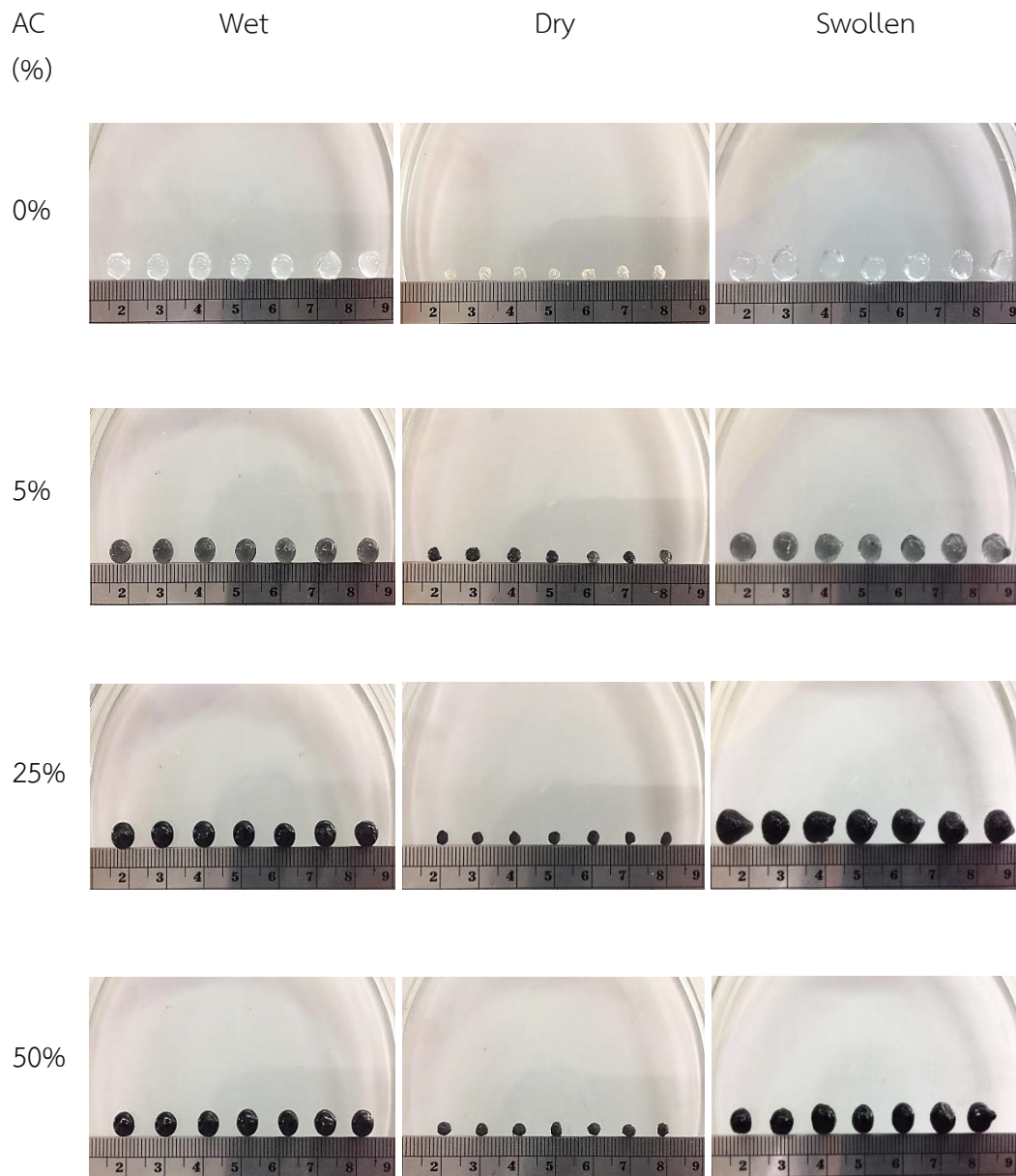


รูปที่ 3.18 ภาพถ่าย SEM บริเวณพื้นผิวหน้า ก) กำลังขยาย 5000 เท่า ของเม็ด ALGAC-S0.25% ข) กำลังขยาย 20000 เท่า ของเม็ด ALGAC-S0.25% ค) กำลังขยาย 5000 เท่า ของเม็ด ALGAC-S0.5% ง) กำลังขยาย 20000 เท่า ของเม็ด ALGAC-S0.5% จ) กำลังขยาย 5000 เท่า ของเม็ด ALGAC-S1% และ ฉ) กำลังขยาย 20000 เท่า ของเม็ด ALGAC-S1%

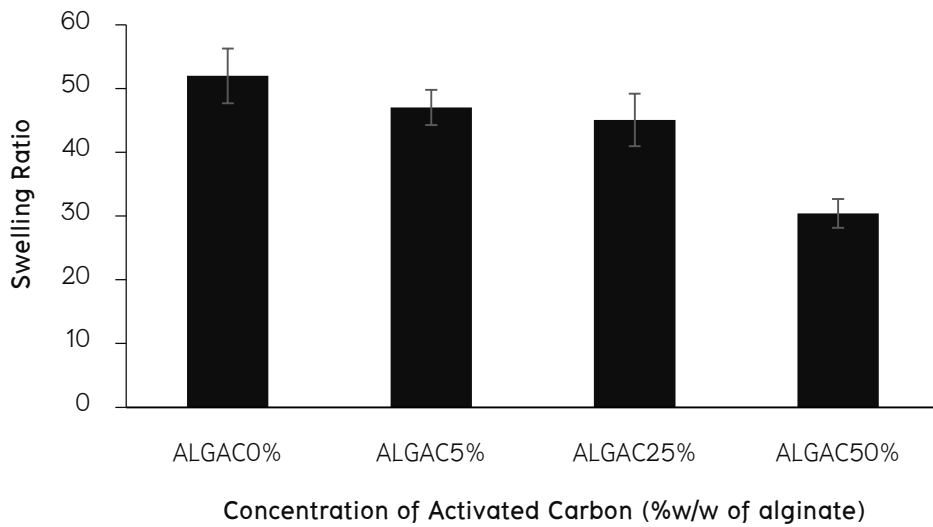
### 3.1.4) อิทธิพลปริมาณของผงถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ถูกใช้เป็นส่วนเสริมแรงในการเตรียมเม็ดคอมโพสิตเนื่องจากช่วยทำให้เม็ดคอมโพสิตมีความแข็งแรงมากขึ้น และจากคุณสมบัติในการเป็นวัสดุดูดซับช่วยทำให้เม็ดคอมโพสิตมีประสิทธิภาพในการเป็นตัวดูดซับได้เพิ่มขึ้น ทำการศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นของผงถ่านกัมมันต์ พบว่า ความเข้มข้นของผงถ่านกัมมันต์ในช่วง 0 – 50% ต่อน้ำหนักของอัลจิเนต (w/w of alginate) ไม่ส่งผลต่อขนาดของเม็ดคอมโพสิตที่เตรียมได้โดยมีขนาดอยู่ในช่วง  $5.2 \pm 0.17$  มิลลิเมตร แสดงลักษณะของเม็ดคอมโพสิตที่เตรียมได้ดังรูปที่ 3.19 แต่เมื่อนำมาศึกษาความสามารถในการบวมตัวในน้ำ พบว่า ค่าสัดส่วนการบวมตัว

(swelling ratio) มีค่าลดลงตามความเข้มข้นของผงถ่านกัมมันต์ที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 3.20 ถึงแม้ว่าเม็ด ALG-AC0% มีค่าการบวมตัวสูงที่สุดแต่มีความแข็งแรงต่ำที่สุดเมื่อทำการบีบด้วยแรงจะแตกเป็นชิ้นเล็กๆ

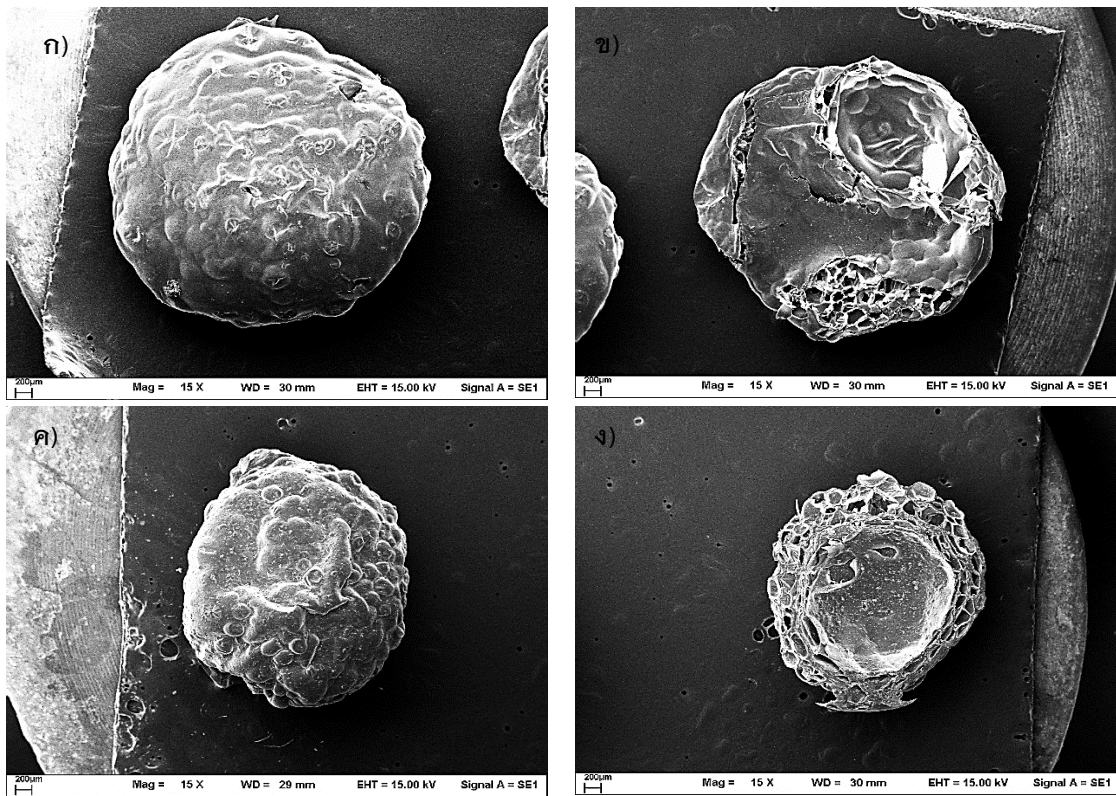


รูปที่ 3.19 ลักษณะก่อนอบ (wet) หลังอบ (dry) และหลังการบวมตัว (swollen) ของเม็ด ALGAC ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของผงถ่านกัมมันต์

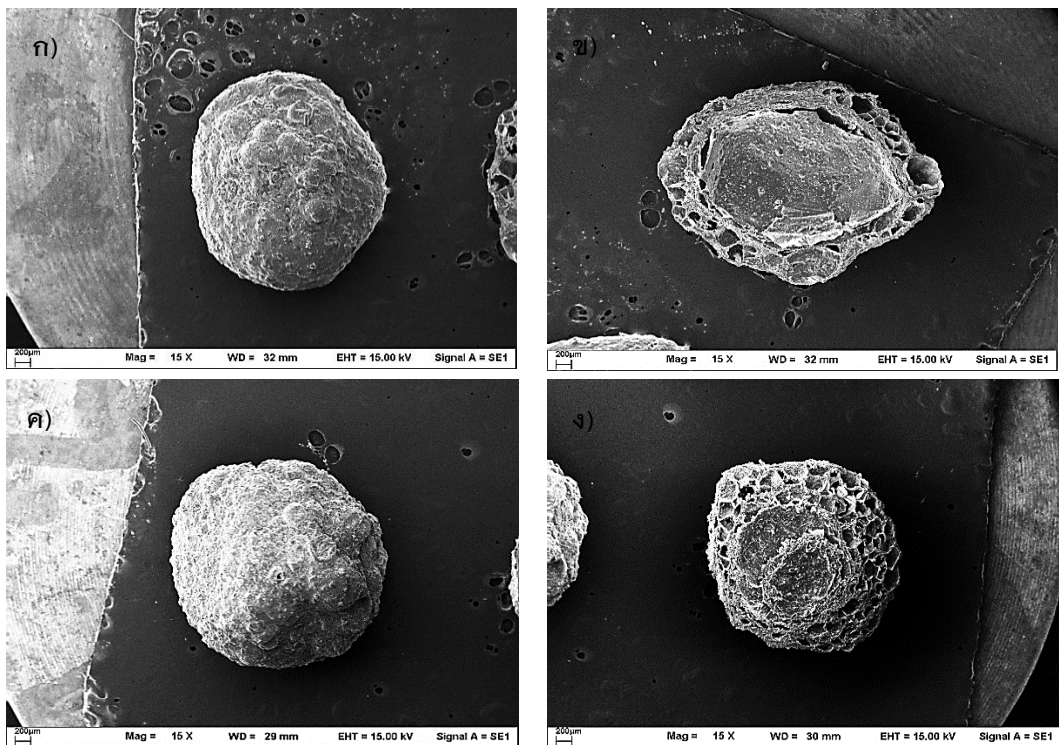


รูปที่ 3.20 อัตราการบวมตัวของเม็ด ALGAC ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ของผงถ่านกัมมันต์

จากการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาทั้งบริเวณพื้นผิวหน้าภายนอกและลักษณะภายในของเม็ดคอมโพสิต ALGAC ด้วยเทคนิค SEM แสดงผลการวิเคราะห์ดังรูปที่ 3.21 และ 3.22 พบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของผงถ่านกัมมันต์เม็ดคอมโพสิต ALGAC มีลักษณะภายในที่ขรุขระเพิ่มขึ้น แต่ขนาดของรูพรุนภายในเม็ดจะมีขนาดที่ไม่แตกต่างกันมากนัก เมื่อพิจารณาพื้นผิวภายนอกที่กำลังขยาย 5000 และ 20000 เท่า ดังแสดงในรูปที่ 3.23 และ 3.24 พบว่า บริเวณพื้นผิวหน้าภายนอกของเม็ดคอมโพสิต มีลักษณะเป็นรูเปิดหรือเกิดเป็นรอยแยกขนาดเล็กโดยขนาดของรูจะมีขนาดที่ใหญ่เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของถ่านกัมมันต์ แต่มีปริมาณของรูที่ลดลง ดังนั้นจึงส่งผลทำให้เม็ดคอมโพสิตที่มีปริมาณของถ่านกัมมันต์มากมีค่าการบวมตัวที่ต่ำกว่าเม็ดคอมโพสิตที่มีปริมาณของถ่านกัมมันต์ต่ำ

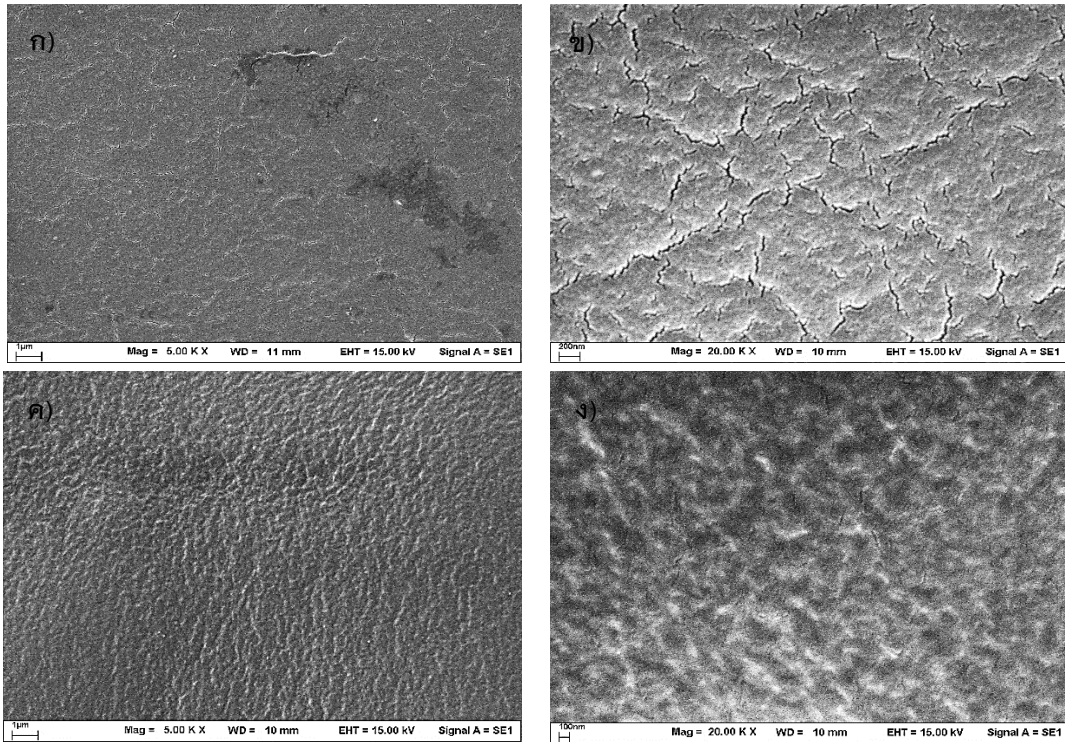


รูปที่ 3.21 ภาพถ่าย SEM ก) เม็ด ALGAC0% ข) ภาพถ่าย cross-section เม็ด ALGAC0% ค) เม็ด ALGAC5% และ ง) ภาพถ่าย cross-section เม็ด ALGAC5%

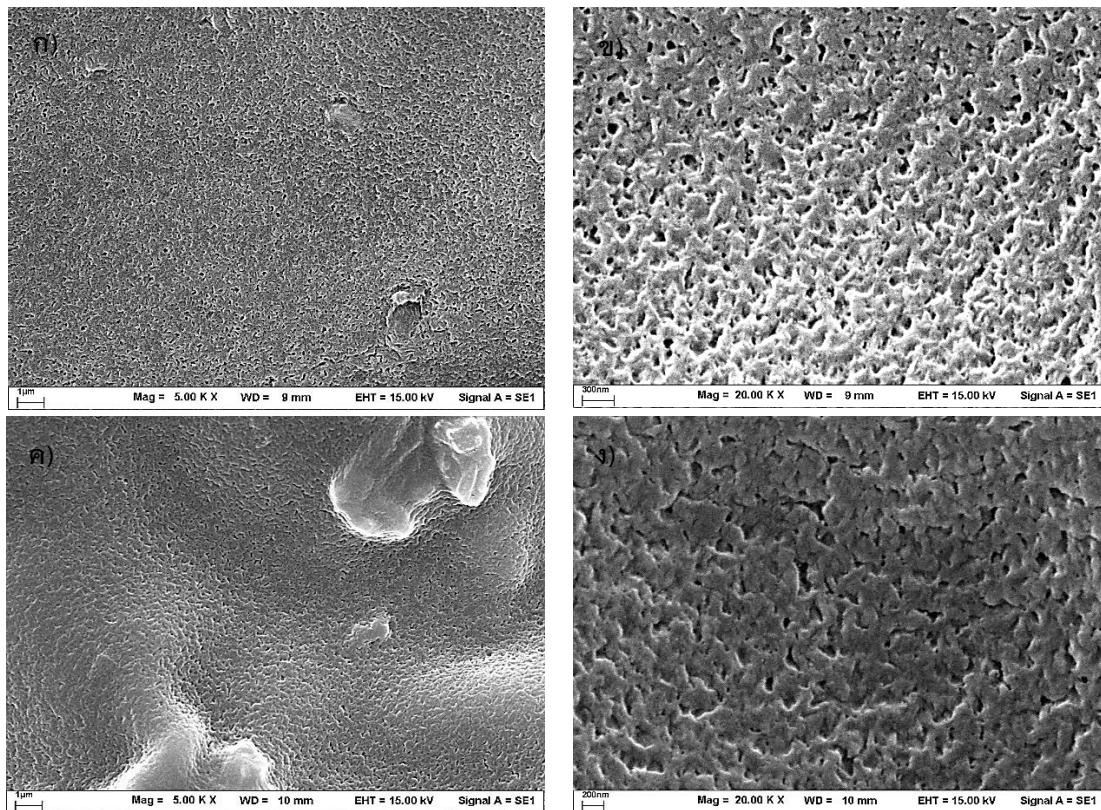


รูปที่ 3.22 ภาพถ่าย SEM ก) เม็ด ALGAC25% ข) ภาพถ่าย cross-section เม็ด ALGAC25% ค) เม็ด ALGAC50% และ ง) ภาพถ่าย cross-section เม็ด ALGAC50%





รูปที่ 3.23 ภาพถ่าย SEM บริเวณพื้นผิวหน้า ก) กำลังขยาย 5000 เท่า ของเมมเบรน ALGAC0% ข) กำลังขยาย 20000 เท่า ของเมมเบรน ALGAC0% ค) กำลังขยาย 5000 เท่า ของเมมเบรน ALGAC5% และ ง) กำลังขยาย 20000 เท่า ของเมมเบรน ALGAC5%

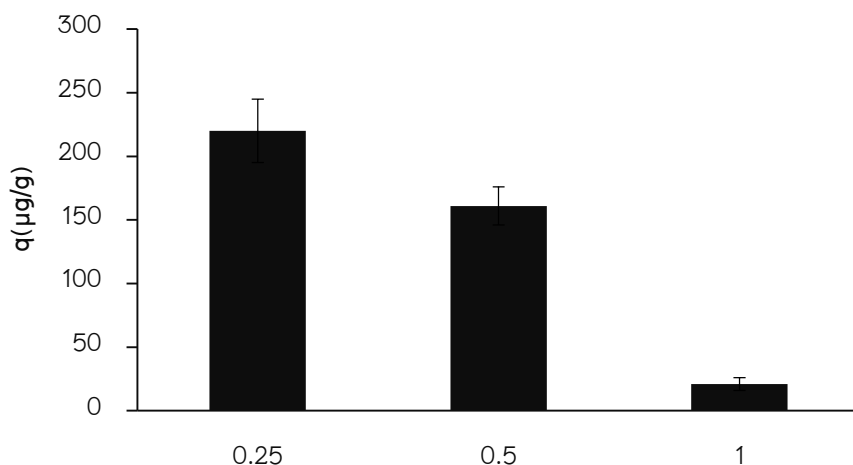


รูปที่ 3.24 ภาพถ่าย SEM บริเวณพื้นผิวหน้า ก) กำลังขยาย 5000 เท่า ของเมมเบรน ALGAC25% ข) กำลังขยาย 20000 เท่า ของเมมเบรน ALGAC25% ค) กำลังขยาย 5000 เท่า ของเมมเบรน ALGAC50% และ ง) กำลังขยาย 20000 เท่า ของเมมเบรน ALGAC50%

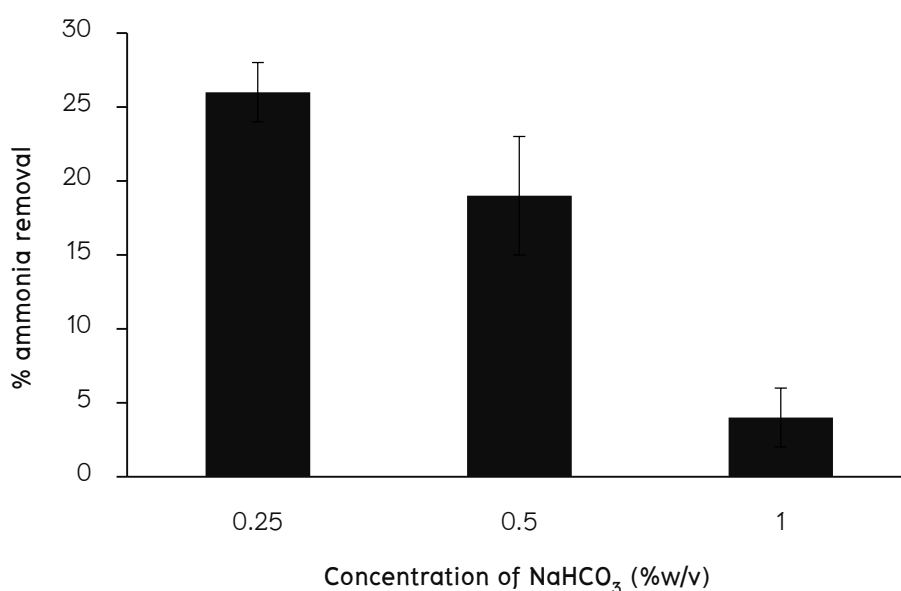
### 3.2 ศึกษาการดูดซับสารละลายแอมโมเนียของเมมเบรนคอมโพสิตไฮโดรเจล

#### 3.2.1) อิทธิพลความเข้มข้นของสารสร้างรูพรุน

ศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นของสารสร้างรูพรุนที่มีผลต่อปริมาณการดูดซับแอมโมเนีย (q) และประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนีย (% ammonia removal) ดังแสดงในรูปที่ 3.25 และ 3.26 ตามลำดับ พบว่า ปริมาณการดูดซับแอมโมเนีย และประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียมีแนวโน้มลดลงตามความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นซึ่งคาดว่าน่าจะเป็นผลเนื่องมาจากความสามารถในการบวมตัวของเมมเบรนคอมโพสิตไฮโดรเจลที่ลดลงตามความเข้มข้นของสารสร้างรูพรุนที่เพิ่มขึ้น จึงส่งผลทำให้โอกาสที่แอมโมเนียแพร่ผ่านเข้าไปภายในเมมเบรนคอมโพสิตไฮโดรเจลแล้วเกิดการดูดซับลดลง



รูปที่ 3.25 ปริมาณการดูดซับแอมโมเนีย (q) ของเม็ดคอมโพสิตที่เตรียมได้จากการใช้สารสร้างรูพรุนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (ความเข้มข้นสารละลายแอมโมเนีย 5 (mg-N/L) เวลาในการดูดซับ 6 ชั่วโมง)

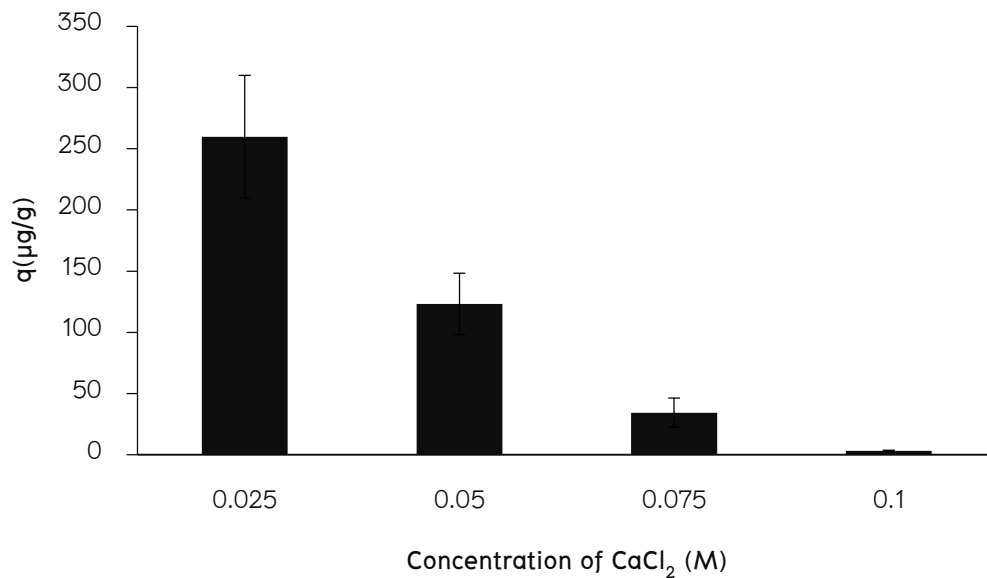


รูปที่ 3.26 ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนีย (% ammonia removal) ของเม็ดคอมโพสิตที่เตรียมได้จากการใช้สารสร้างรูพรุนที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (ความเข้มข้นสารละลายแอมโมเนีย 5 (mg-N/L) เวลาในการดูดซับ 6 ชั่วโมง)

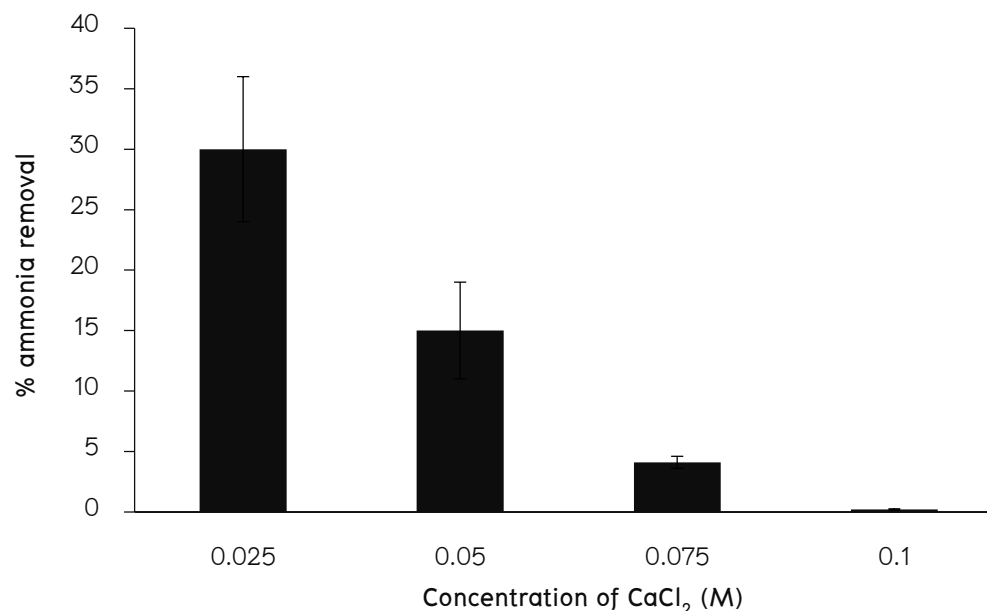
### 3.2.2) อิทธิพลความเข้มข้นของสารเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล

ศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นของสารเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลที่มีต่อปริมาณการดูดซับแอมโมเนีย (q) และประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนีย (% ammonia removal) ดังแสดงในรูปที่ 3.27 และ 3.28 พบว่า ปริมาณการดูดซับแอมโมเนีย และประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียมีแนวโน้มลดลงตามความเข้มข้นของสารเชื่อมโยงที่เพิ่มขึ้นซึ่งคาดว่าน่าจะเป็นผลเนื่องมาจากความสามารถในการบวมตัวของเม็ด

คอมโพสิตไฮโดรเจลที่ลดลงตามความเข้มข้นของสารเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลที่เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังคาดว่าน่าจะเกิดเนื่องจากการลดลงของหมู่  $\text{COO}^-$  ในโครงสร้างของอัลจินตภายหลังการเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุล จึงส่งผลทำให้แรงยึดเหนี่ยวกับแอมโมเนียลดลงไปด้วย จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า ความเข้มข้นของสารเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลนอกจากจะส่งผลต่อความสามารถในการบวมตัวของเม็ดคอมโพสิตไฮโดรเจลแล้วยังส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับแอมโมเนียด้วย



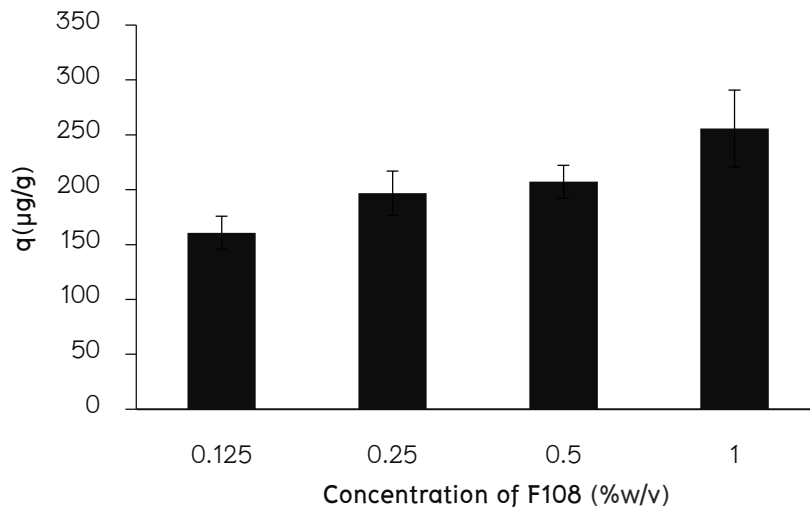
รูปที่ 3.27 ปริมาณการดูดซับแอมโมเนีย (q) ของเม็ดคอมโพสิตที่เตรียมได้จากการใช้สารเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (ความเข้มข้นสารละลายแอมโมเนีย 5 (mg-N/L) เวลาในการดูดซับ 6 ชั่วโมง)



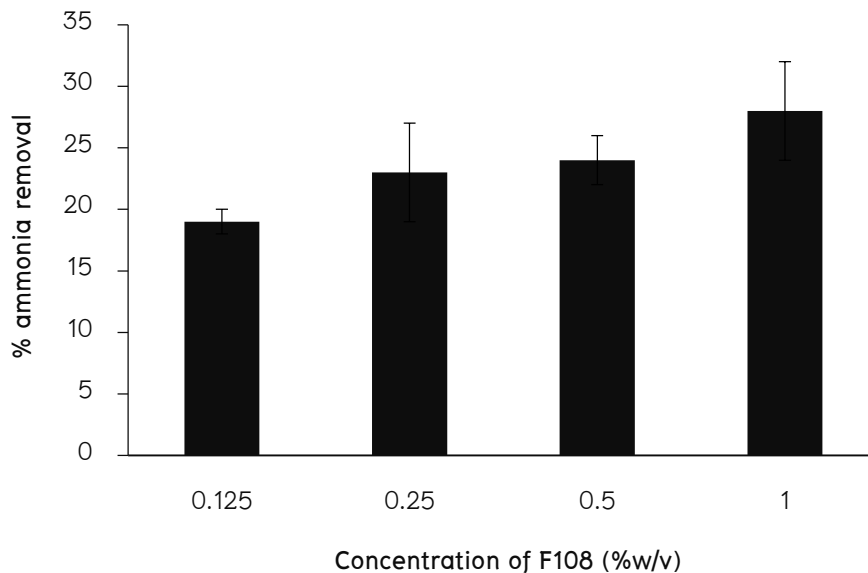
รูปที่ 3.28 ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนีย (% ammonia removal) ของเม็ดคอมโพสิตที่เตรียมได้จากการใช้สารเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (ความเข้มข้นสารละลายแอมโมเนีย 5 (mg-N/L) เวลาในการดูดซับ 6 ชั่วโมง)

### 3.2.3) อิทธิพลความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว

ศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิวที่มีผลปริมาณการดูดซับแอมโมเนีย ( $q$ ) และประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนีย (% ammonia removal) ดังแสดงในรูปที่ 3.29 และ 3.30 พบว่าปริมาณการดูดซับแอมโมเนีย และประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของ F108 ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับความสามารถในการบวมตัวของเม็ดคอมโพสิตไฮโดรเจลที่เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารลดแรงตึงผิว



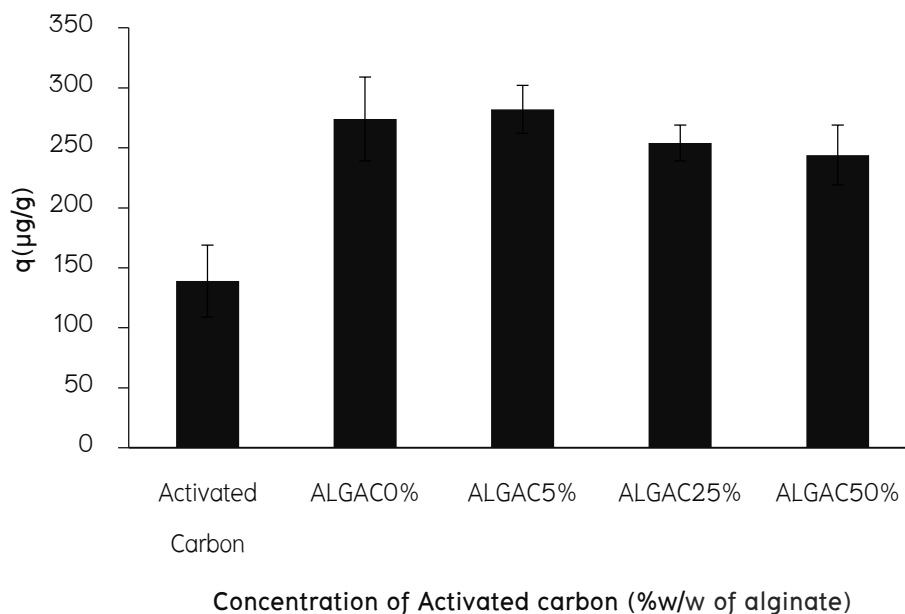
รูปที่ 3.29 ปริมาณการดูดซับแอมโมเนีย ( $q$ ) ของเม็ดคอมโพสิตที่เตรียมได้จากการใช้สารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (ความเข้มข้นสารละลายแอมโมเนีย 5 (mg-N/L) เวลาในการดูดซับ 6 ชั่วโมง)



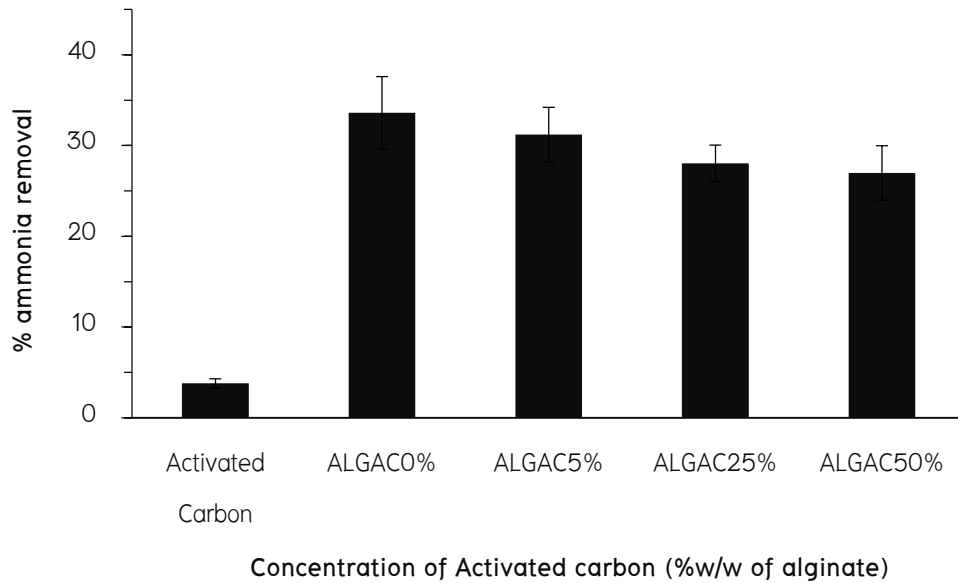
รูปที่ 3.30 ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนีย (% ammonia removal) ของเม็ดคอมโพสิตที่เตรียมได้จากการใช้สารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (ความเข้มข้นสารละลายแอมโมเนีย 5 (mg-N/L) เวลาในการดูดซับ 6 ชั่วโมง)

### 3.2.4) อิทธิพลความเข้มข้นของผงถ่านกัมมันต์

ศึกษาอิทธิพลของปริมาณผงถ่านกัมมันต์ที่มีต่อปริมาณการดูดซับแอมโมเนีย ( $q$ ) และประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนีย (% ammonia removal) ดังแสดงในรูปที่ 3.31 และ 3.32 พบว่าเม็ดอัลจิเนตไฮโดรเจลที่ไม่ได้เติมผงถ่านกัมมันต์มีปริมาณการดูดซับแอมโมเนียและประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียที่สูงกว่าผงถ่านกัมมันต์ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการดูดซับแอมโมเนียโดยอาศัยแรงทางเคมีระหว่างโมเลกุลของแอมโมเนีย และหมู่  $\text{COO}^-$  ที่มีในโครงสร้างของอัลจิเนตมีประสิทธิภาพมากกว่าการดูดซับทางกายภาพที่เกิดขึ้นภายในรูพรุนของผงถ่านกัมมันต์ แต่เมื่อนำมาเตรียมเป็นเม็ดคอมโพสิตไฮโดรเจลระหว่างอัลจิเนตและผงถ่านกัมมันต์กลับพบว่า ปริมาณการดูดซับแอมโมเนียและประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียไม่ได้มีค่าเพิ่มขึ้น โดยมีค่าใกล้เคียงกับเม็ดอัลจิเนตที่ไม่ได้เติมผงถ่านกัมมันต์ และนอกจากนี้ยังพบว่าทั้งปริมาณการดูดซับแอมโมเนียและประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียมีแนวโน้มลดลงตามปริมาณผงถ่านกัมมันต์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งคาดว่าน่าจะเป็นผลเนื่องมาจากความสามารถในการบวมตัวของเม็ดคอมโพสิตที่ลดลงนั่นเอง ดังนั้นจากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพในการดูดซับแอมโมเนียจะขึ้นอยู่กับหมู่  $\text{COO}^-$  ที่มีในโครงสร้างของอัลจิเนต และขึ้นอยู่กับความสามารถในการบวมตัวของวัสดุดูดซับ แต่อย่างไรก็ตามแม้ว่าเม็ดคอมโพสิตจะมีประสิทธิภาพในการดูดซับที่ไม่แตกต่างจากเม็ดอัลจิเนตไฮโดรเจล แต่ข้อดีของการเตรียมเป็นเม็ดคอมโพสิตคือ จะมีความแข็งแรงและทนทานต่อการใช้งานที่มากกว่า



รูปที่ 3.31 ปริมาณการดูดซับแอมโมเนีย ( $q$ ) ของผงถ่านกัมมันต์ของเม็ดคอมโพสิตที่เตรียมได้จากการใช้สารลดแรงตึงผิวที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ (ความเข้มข้นสารละลายแอมโมเนีย 5 (mg-N/L) เวลาในการดูดซับ 6 ชั่วโมง)

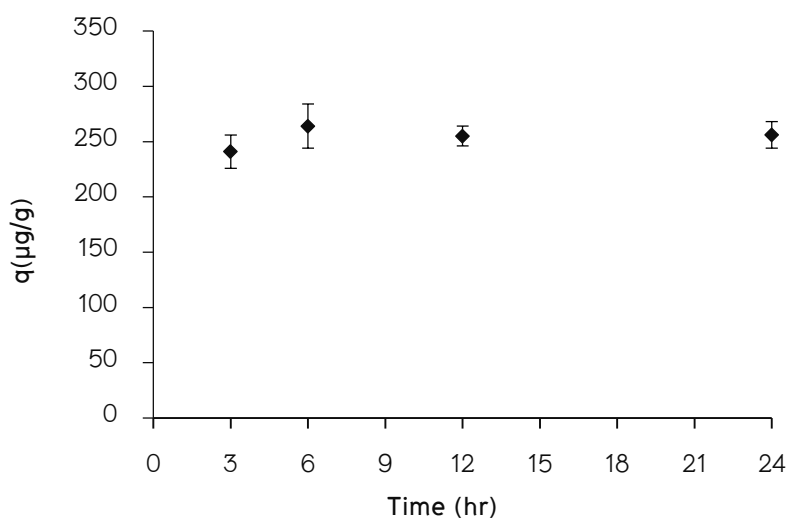


รูปที่ 3.32 ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนีย (% ammonia removal) ของเม็ดคอมโพสิตที่เตรียมได้จากการใช้สารลดแรงตึงผิวที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (ความเข้มข้นสารละลายแอมโมเนีย 5 (mg-N/L) เวลาในการดูดซับ 6 ชั่วโมง)

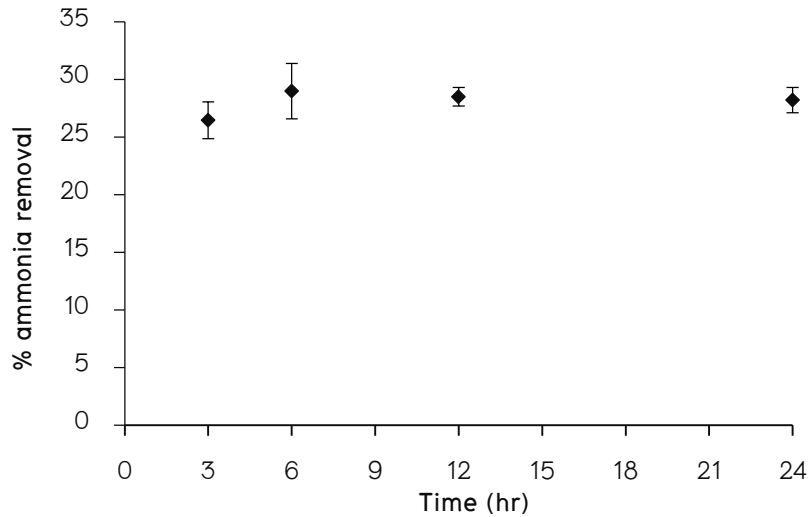
### 3.3 ศึกษาพฤติกรรมการดูดซับแอมโมเนียของเม็ดคอมโพสิตไฮโดรเจล

#### 3.3.1) อิทธิพลของเวลาในการดูดซับ

ศึกษาอิทธิพลของเวลาในการดูดซับที่เวลา 3, 6, 12 และ 24 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 3.33 และ 3.34 พบว่า ปริมาณการดูดซับแอมโมเนียมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลาตั้งแต่ 0 ถึง 6 ชั่วโมง และเริ่มมีค่าคงที่ตั้งแต่เวลา 6 ชั่วโมงเป็นต้นไป โดยมีค่าการดูดซับสูงสุด เท่ากับ  $264 \pm 20$  ไมโครกรัม/กรัม



รูปที่ 3.33 ปริมาณการดูดซับแอมโมเนีย (q) ของเม็ด ALGAC5% ที่ความเข้มข้นสารละลายแอมโมเนีย 5 (mg-N/L)

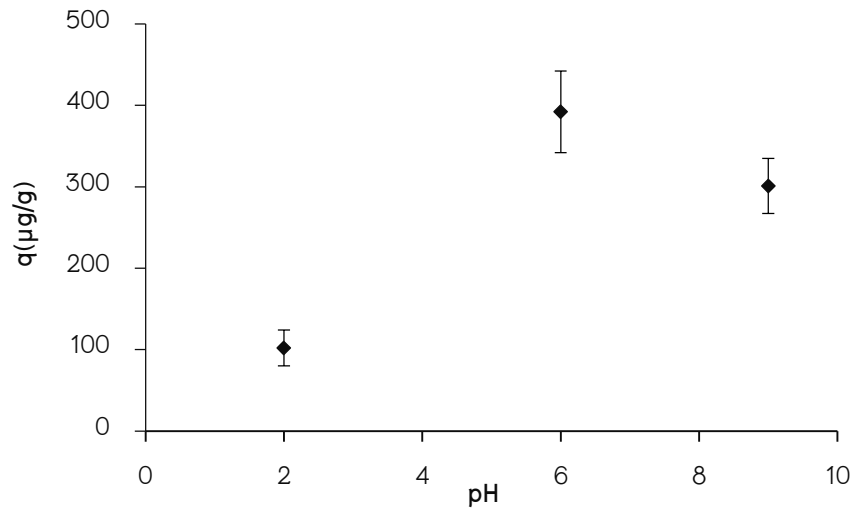


รูปที่ 3.34 ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนีย (% ammonia removal) ของเมมเบรน ALGAC5% ที่ความเข้มข้นสารละลายแอมโมเนีย 5 (mg-N/L)

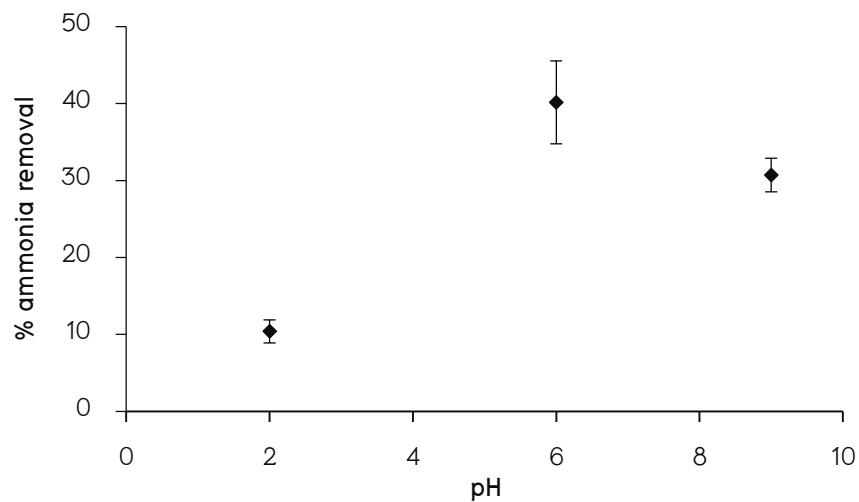
### 3.3.2) อิทธิพลของพีเอช

ศึกษาอิทธิพลของพีเอชสารละลายที่พีเอช 2, 6, และ 9 ดังแสดงในรูปที่ 3.35 และ 3.36 พบว่า ปริมาณการดูดซับแอมโมเนียมีค่าการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 392 ไมโครกรัม/กรัม ที่พีเอชเท่ากับ 6 ซึ่งคาดว่า เป็นผลเนื่องมาจากที่พีเอช 6 แอมโมเนียในสารละลายส่วนใหญ่จะอยู่ในรูป  $\text{NH}_4^+$  ในขณะที่หมู่  $\text{COOH}$  ในสายโซ่พอลิเมอร์ของอัลจินเตตจะแตกตัวอยู่ในรูป  $\text{COO}^-$  (Harris, D. C., 2007) ดังนั้นจึงทำให้เกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างประจุบวกและประจุลบระหว่าง  $\text{NH}_4^+$  ในสารละลายกับ  $\text{COO}^-$  ในวัสดุดูดซับส่งผลทำให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับที่ดี แต่เมื่อพีเอชของสารละลายเพิ่มขึ้นจะทำให้แอมโมเนียส่วนใหญ่อยู่ในรูป  $\text{NH}_3$  จึงทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างหมู่  $\text{COO}^-$  และ  $\text{NH}_3$  ลดลง ส่วนในกรณีของพีเอช 2 ถึงแม้ว่าแอมโมเนียส่วนใหญ่จะอยู่ในรูป  $\text{NH}_4^+$  แต่ในสายโซ่พอลิเมอร์ของอัลจินเตตหมู่  $\text{COO}^-$  จะรับ  $\text{H}^+$  แล้วอยู่ในรูป  $\text{COOH}$  ดังนั้นจึงทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างหมู่  $\text{COOH}$  และ  $\text{NH}_4^+$  เกิดขึ้นได้น้อยลงส่งผลให้เกิดการดูดซับที่น้อยในสภาวะกรด





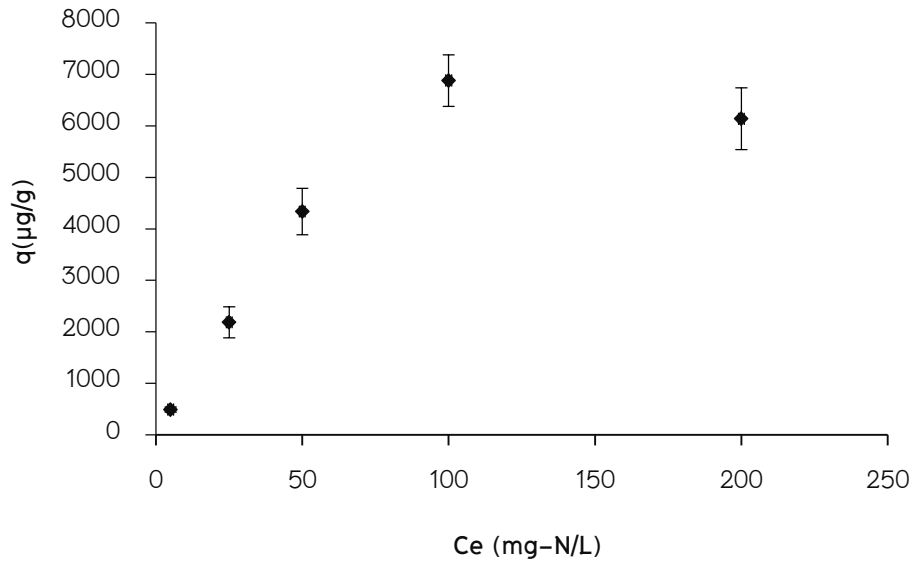
รูปที่ 3.35 ปริมาณการดูดซับแอมโมเนีย (q) ของเม็ด ALGAC5% ที่ความเข้มข้นสารละลายแอมโมเนีย 5 (mg-N/L) ที่ pH ต่าง ๆ



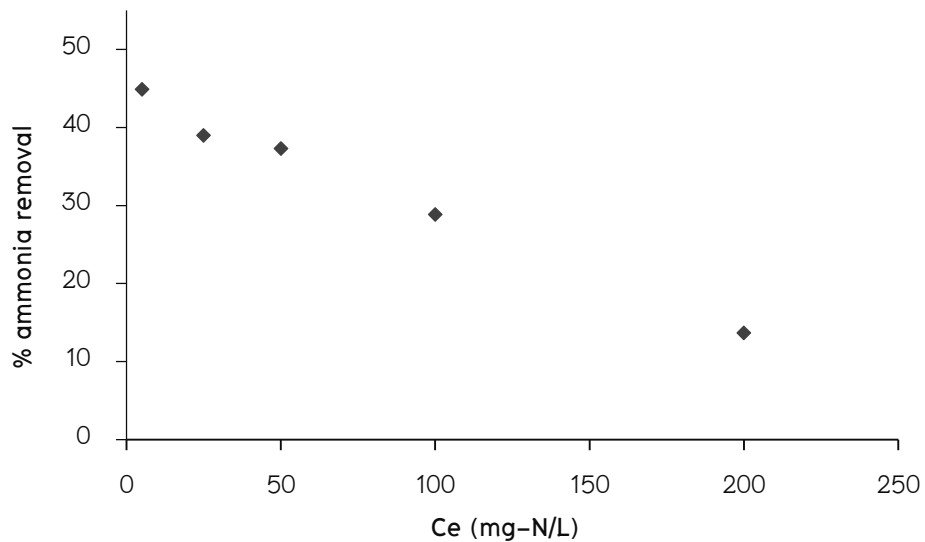
รูปที่ 3.36 ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนีย (% ammonia removal) ของเม็ด ALGAC5% ที่ความเข้มข้นสารละลายแอมโมเนีย 5 (mg-N/L) ที่ pH ต่าง ๆ

### 3.3.3) อิทธิพลความเข้มข้นสารละลายแอมโมเนีย

ศึกษาอิทธิพลความเข้มข้นของสารละลายแอมโมเนีย ดังแสดงในรูปที่ 3.37 พบว่าปริมาณการดูดซับแอมโมเนียมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นและเริ่มคงที่ที่ความเข้มข้น 100 mg-N/L โดยมีค่าการดูดซับสูงสุด ( $q_{max}$ ) เท่ากับ 6882 ไมโครกรัม/กรัม แต่ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียจะมีค่าลดลงตามความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้น (รูปที่ 3.38)



รูปที่ 3.37 ปริมาณการดูดซับแอมโมเนีย (q) ของเม็ด ALGAC5% ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียต่าง ๆ ที่ เวลาในการดูดซับ 6 ชั่วโมง



รูปที่ 3.38 ประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนีย (% ammonia removal) ของเม็ด ALGAC5% ที่ความเข้มข้นแอมโมเนียต่าง ๆ ที่เหลือหลังการดูดซับ ( $C_e$ ) เวลาในการดูดซับ 6 ชั่วโมง

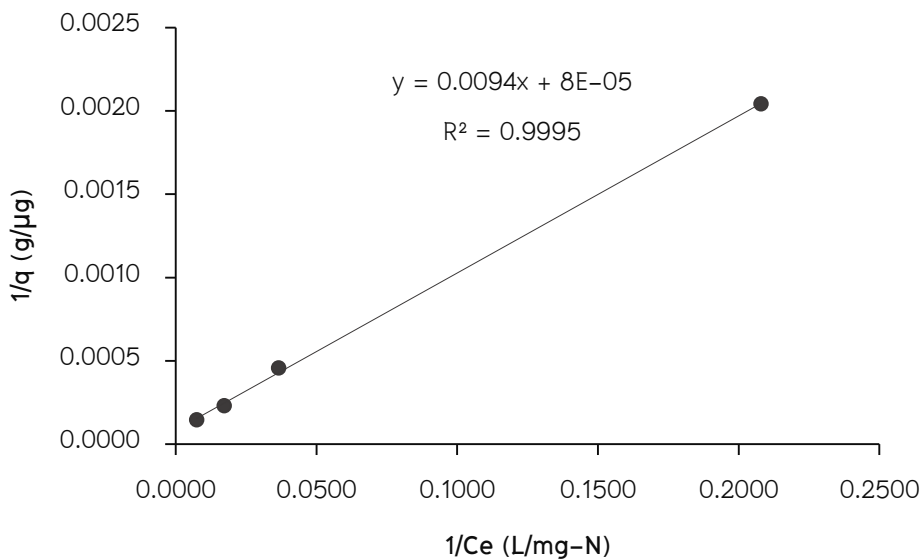
### 3.3.4) ไอโซเทอร์มของการดูดซับ

ศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับโดยใช้แบบจำลองไอโซเทอร์มของแลงเมียร์ (Langmuir model) และ ฟรุนดลิช (Freundlich model) ดังสมการ 6 และ 7 ตามลำดับ

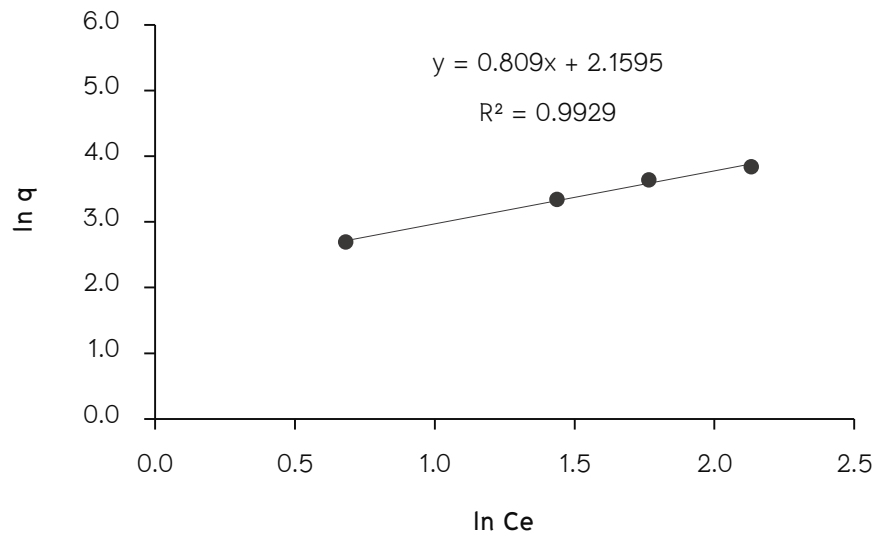
$$\frac{1}{q} = \frac{1}{K_{ads}q_{max}C_e} + \frac{1}{q_{max}} \quad (6)$$

$$\ln q = \ln K_f + \frac{1}{n} \ln C_e \quad (7)$$

จากสมการที่ (6) เมื่อพลอตกราฟระหว่างค่า  $\frac{1}{q}$  และ  $\frac{1}{C_e}$  จะได้กราฟเส้นตรงแสดงดังรูปที่ 3.39 และจากสมการที่ (7) เมื่อพลอตกราฟระหว่างค่า  $\ln q$  กับ  $\ln C_e$  จะได้กราฟเส้นตรงแสดงดังรูปที่ 3.40 พบว่าเม็ดคอมโพสิตไฮโดรเจลมีพฤติกรรมในการดูดซับแอมโมเนียที่สอดคล้องกับไอโซเทอร์ม ของ Langmuir มากกว่า Freundlich พิจารณาได้จากค่า  $R^2$  ที่เข้าใกล้หนึ่งมากกว่า แสดงให้เห็นว่าการดูดซับแอมโมเนียของวัสดุดูดซับชนิดนี้เป็นการดูดซับด้วยแรงทางเคมี และเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว สารที่ถูกดูดซับจะถูกยึดไว้ที่ตำแหน่งใดตำแหน่งหนึ่งบนพื้นผิวของวัสดุดูดซับเท่านั้น และแต่ละตำแหน่งจะสามารถจับสารที่ถูกดูดซับได้เพียงตัวเดียวเท่านั้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ว่าแอมโมเนียมไอออนจะถูกดูดซับด้วยแรงทางเคมีที่เกิดขึ้นเนื่องจากแรงดึงดูดระหว่างประจุบวกของ  $\text{NH}_4^+$  กับประจุลบของ  $\text{COO}^-$



รูปที่ 3.39 Langmuir Isotherm ในการดูดซับสารละลายแอมโมเนียของเม็ด ALGAC5%



รูปที่ 3.40 Freundlich Isotherm ในการดูดซับสารละลายแอมโมเนียของเม็ด ALGAC5%

## 4. สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

### 4.1 สรุปผลการทดลอง

เม็ดคอมโพสิตไฮโดรเจลของอัลจินตและถ่านกัมมันต์สามารถเตรียมได้โดยวิธีการที่สะดวก และง่ายโดยการใช้เทคนิคการหยดสารละลายผสมของอัลจินตและถ่านกัมมันต์ลงในสารละลายของ  $\text{CaCl}_2$  ซึ่งทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมโยงระหว่างโมเลกุลทำให้ได้เม็ดไฮโดรเจลที่คงรูปและมีลักษณะทรงกลม นอกจากนี้ยังสามารถเพิ่มความพรุนให้กับเม็ดคอมโพสิตไฮโดรเจลได้โดยการใช้  $\text{NaHCO}_3$  เป็นสารสร้างรูพรุน จากการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่ส่งผลการเตรียมเม็ดคอมโพสิตไฮโดรเจลและประสิทธิภาพในการดูดซับแอมโมเนีย พบว่าเม็ดคอมโพสิตไฮโดรเจลที่เตรียมได้จากการใช้  $\text{NaHCO}_3$  0.25% (w/v), F108 1% (w/v), ผงถ่านกัมมันต์ 5% (w/w) และ  $\text{CaCl}_2$  0.025 M มีประสิทธิภาพในการดูดซับสารละลายแอมโมเนียดีที่สุด และมีประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้ผงถ่านกัมมันต์เพียงอย่างเดียว และเมื่อทำการศึกษาพฤติกรรมในการดูดซับของเม็ดคอมโพสิตไฮโดรเจลดังกล่าว พบว่ามีค่าการดูดซับสูงสุด ( $q_{\text{max}}$ ) เท่ากับ 6882 ไมโครกรัม/กรัม ที่เวลา 6 ชั่วโมง พีเอช 6 และความเข้มข้นของแอมโมเนีย 100 mg-N/L โดยมีพฤติกรรมในการดูดซับสอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir

### 4.2 ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าการดูดซับสารละลายแอมโมเนียของเม็ดคอมโพสิตไฮโดรเจลเกิดจากแรงกระทำทางเคมีระหว่างประจุลบของหมู่คาร์บอกซิเลตที่อยู่ในโครงสร้างของอัลจินตและประจุบวกของแอมโมเนียมไอออน ดังนั้นหากต้องการเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับควรทำการปรับปรุงโดยการเพิ่มหมู่ฟังก์ชันให้กับผงถ่านกัมมันต์เพื่อเพิ่มปริมาณของหมู่ฟังก์ชันที่ใช้ในการเกิดแรงยึดเหนี่ยวกับ  $\text{NH}_4^+$  เช่น การดัดแปรให้มีหมู่คาร์บอกซิลิก เป็นต้น

## ผลผลิต (Output)

1. บุชราพรรณ บุญอุดม, สุพรรณิการ์ บุญจำเนียร และ ปิยะพร ณ หนองคาย. คอมโพสิตไฮโดรเจลที่มีรูพรุนของอัลจิเนตและอนุภาคนาโนแม่เหล็กสำหรับกำจัดแอมโมเนียในน้ำเสีย. “*Manuscript*”
2. Sutida Sriwichean, Jariyavadee Suriyaphan, Piyaporn Na-Nongkhai. Composite hydrogel of alginate and activated carbon for ammonia removal in ornamental fish transportation. “*Manuscript*”

- [1] Anderson, M. A., & Rubin, A. J. (1981). Adsorption of inorganics at solid-liquid interfaces. Ann Arbor Science.
- [2] Benhouria, A., Islam, M. A., Zaghouane-Boudiaf, H., Boutahala, M., & Hameed, B. H. (2015). Calcium alginate–bentonite–activated carbon composite beads as highly effective adsorbent for methylene blue. *Chemical engineering journal*, 270, 621-630.
- [3] Boopathy, R., Karthikeyan, S., Mandal, A. B., & Sekaran, G. (2013). Adsorption of ammonium ion by coconut shell-activated carbon from aqueous solution: kinetic, isotherm, and thermodynamic studies. *Environmental Science and Pollution Research*, 20, 533-542.
- [4] Chen, S., Zhang, J., Zhang, C., Yue, Q., Li, Y., & Li, C. (2010). Equilibrium and kinetic studies of methyl orange and methyl violet adsorption on activated carbon derived from *Phragmites australis*. *Desalination*, 252, 149-156.
- [5] Eiselt, P., Yeh, J., Latvala, R. K., Shea, L. D., & Mooney, D. J. (2000). Porous carriers for biomedical applications based on alginate hydrogels. *Biomaterials*, 21, 1921-1927.
- [6] Gaouar Yadi, M., Benguella, B., Gaouar-Benyelles, N., & Tizaoui, K. (2016). Adsorption of ammonia from wastewater using low-cost bentonite/chitosan beads. *Desalination and Water Treatment*, 57, 21444-21454.
- [7] Gay, S. W., & Knowlton, K. F. (2005). Ammonia emissions and animal agriculture.
- [8] Harris, D. C. (2007). *Quantitative chemical analysis* (Vol. 61). New York: WH Freeman.
- [9] Kim, T. Y., Jin, H. J., Park, S. S., Kim, S. J., & Cho, S. Y. (2008). Adsorption equilibrium of copper ion and phenol by powdered activated carbon, alginate bead and alginate-activated carbon bead. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 14, 714-719.
- [10] Kühbeck, D., Mayr, J., Häring, M., Hofmann, M., Quignard, F., & Díaz, D. D. (2015). Evaluation of the nitroaldol reaction in the presence of metal ion-crosslinked alginates. *New Journal of Chemistry*, 39, 2306-2315.

- [11] Ni ă, I., Iorgulescu, M., Spiroiu, M.F., Ghiurea, M., Petcu, C., & Cinteza, O. (2007), The adsorption of heavy metal ions on porous calcium alginate microparticles. *Chimie, Anul XVI (serie nouă)*, 16(1).
- [12] Ottenbrite, R. M., Huang, S. J., & Park, K. (1996), Hydrogels and biodegradable polymers for bioapplications. *American Chemical Society*, 627, 1-9.
- [13] Phillips, G. O., & Williams P. A. (2000), *Handbook of hydrocolloids*. Woodhead public-shing in food science, technology and nutrition, 810.
- [14] Serrano-Aroca, Á., Ruiz-Pividal, J. F., & Llorens-Gómez, M. (2017). Enhancement of water diffusion and compression performance of crosslinked alginate films with a minuscule amount of graphene oxide. *Scientific reports*, 7, 11684.
- [15] Strickland, J. D., & Parsons, T. R. (1972). *A practical handbook of seawater analysis*. Research Board of Canada, 167, 99-102.
- [16] Tien, C. (1994), *Adsorption Calculations and Modeling*, Butterworth-Heinemann, Boston, 29-40.
- [17] Zhuang, Y., Yu, F., Chen, H., Zheng, J., Ma, J. and Chen, J. (2016). Alginate/graphene double-network nanocomposite hydrogel beads with low-swelling, enhanced mechanical properties, and enhanced adsorption capacity. *Journal of Materials Chemistry A*, 4, 10885-10892.
- [18] กนกพร ลีวัฒนา. (2560). การเตรียมและการศึกษาการดูดซับแอมโมเนียของเม็ดคอมโพสิตไฮโดรเจลระหว่างอัลจินตและผงถ่านกัมมันต์. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรบัณฑิตมหาวิทยาลัยบูรพา.
- [19] สุขาดา ยางเอน. (2546). การกำจัดแอมโมเนียในน้ำเสียจากตู้เลี้ยงปลาโดยการกรองด้วยหินภูเขาไฟ. วิทยานิพนธ์ ปริญญาโทมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.