



# รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

## โครงการ

การใช้ประโยชน์จากสารเคมีในเปลือกหอยนางรม  
เพื่อการกำจัดโลหะหนักและฟอสเฟตในน้ำเสีย

โดย รศ.ดร.ดวงกมล ณ ระนอง และคณะ

เดือนปีที่เสร็จโครงการ มีนาคม 2554

# รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

## โครงการ

การใช้ประโยชน์จากสารเคมีในเปลือกหอยนางรม  
เพื่อการกำจัดโลหะหนักและฟอสเฟตในน้ำเสีย

### คณะผู้วิจัย

- รศ.ดร.ดวงกมล ณ ระนอง
- ดร.วลัยรัตน์ จันทอัมพร

### สังกัด

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### ชุดโครงการ

อาหารปลอดภัยและการพัฒนาอาชีพทางเลือกและการจัดการทรัพยากรชายฝั่ง จ.สุราษฎร์ธานี  
สนับสนุนโดยสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

(ความเห็นในรายงานผลการวิจัยเป็นของผู้วิจัย สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัยไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป)

# สารบัญ

## หน้าที่

สารบัญรูป	ii
สารบัญตาราง	v
บทสรุปผู้บริหาร	1
บทคัดย่อ	3
Abstract	3
เนื้อหาบทวิจัย	4
1. ความสำคัญ / ความเป็นมา	4
2. วัตถุประสงค์ของโครงการ	4
3. วิธีวิจัย	5
3.1 การเตรียมวัสดุทดสอบ	5
3.2 การสร้างเครื่องกรองน้ำขนาดเล็กสำหรับกำจัดโลหะหนักเพื่อใช้ในครัวเรือน	7
3.3 การสร้างเครื่องบำบัดน้ำเสียสำหรับกำจัดฟอสเฟต	9
4. ผลการทดลอง วิเคราะห์ และวิจารณ์	15
4.1 การเตรียมวัสดุทดสอบ	15
4.2 การสร้างเครื่องกรองน้ำขนาดเล็กสำหรับกำจัดโลหะหนักเพื่อใช้ในครัวเรือน	18
4.2.1 การทดลองแบบกะ	18
4.2.2 การทดลองแบบต่อเนื่อง	32
4.2.3 การทดลองโดยใช้เครื่องกรองน้ำต้นแบบ	35
4.3 การสร้างเครื่องบำบัดน้ำเสียสำหรับกำจัดฟอสเฟต	37
4.3.1 การทดลองแบบกะ	37
4.3.2 การทดลองแบบต่อเนื่อง	51
4.3.3 เครื่องบำบัดน้ำเสียครัวเรือนต้นแบบ	53
5. สรุปและข้อเสนอแนะ	55
6. เอกสารอ้างอิง	56
ภาคผนวก	57
ก. บทความสำหรับการเผยแพร่	58
ข. กิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการนำผลจากโครงการไปใช้ประโยชน์	70
ค. ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผน กิจกรรมที่ดำเนินการมา และผลที่ได้รับ	71

## สารบัญรูป

หน้าที่

รูปที่ 3.1-1	เครื่องมือเตรียมสารดูดซับจากเปลือกหอยนางรม (ระดับห้องปฏิบัติการ)	5
รูปที่ 3.1-2	เตาเผาสำหรับเตรียมสารดูดซับสำหรับการใช้งานจริงในระดับชุมชน	7
รูปที่ 3.2-1	แผนภาพลำดับการบรรจุสารในคอลัมน์ดูดซับที่ใช้ในการทดลองแบบต่อเนื่อง	8
รูปที่ 3.3-1	ชุดทดสอบการดูดซับฟอสเฟตสำหรับการทดลองแบบกะ	10
รูปที่ 3.3-2	ชุดทดสอบการดูดซับฟอสเฟตแบบต่อเนื่อง	11
รูปที่ 3.3-3	แผนภาพของเครื่องบำบัดน้ำเสียครัวเรือนต้นแบบ	12
รูปที่ 3.3-4	ถังตกไข่	12
รูปที่ 3.3-5	ชุดกรองอย่างง่าย	13
รูปที่ 3.3-6	ท่อบรรจุวัสดุดูดซับ (ความจุวัสดุดูดซับ 150 กรัม)	13
รูปที่ 3.3-7	ชุดบำบัดน้ำเสียจากครัวเรือน	14
รูปที่ 4.1-1	สเปกตรัม XRD ของ (a) เปลือกหอยนางรมบด (b) เปลือกหอยนางรมที่ผ่านการให้ความร้อนที่ 700°C ในอากาศ	16
รูปที่ 4.1-2	ภาพถ่าย SEM ของเปลือกหอยนางรมที่ผ่านการให้ความร้อนที่ 700°C นาน 6 ชั่วโมง ในบรรยากาศของ (a, b) อากาศ และ (c, d) ไนโตรเจน	17
รูปที่ 4.2-1	ไอโซเทอร์มการดูดซับของตะกั่ว (อุณหภูมิ 25°C)	19
รูปที่ 4.2-2	ความสัมพันธ์เชิงเส้นของการดูดซับตะกั่วตามรูปแบบแลงเมียร์ (อุณหภูมิ 25°C)	19
รูปที่ 4.2-3	ความสัมพันธ์เชิงเส้นของการดูดซับตะกั่วตามรูปแบบฟรอนดลิช (อุณหภูมิ 25°C)	20
รูปที่ 4.2-4	ไอโซเทอร์มการดูดซับของตะกั่วของสารดูดซับชนิดต่างๆ ซึ่งคำนวณจากแบบจำลองแลงเมียร์โดยใช้ค่า K และ ค่า $q_0$ จากตารางที่ 4.2-1	21
รูปที่ 4.2-5	ไอโซเทอร์มการดูดซับของแคดเมียม (อุณหภูมิ 25°C)	22
รูปที่ 4.2-6	ความสัมพันธ์เชิงเส้นของการดูดซับแคดเมียมตามรูปแบบแลงเมียร์ (อุณหภูมิ 25°C)	22
รูปที่ 4.2-7	ความสัมพันธ์เชิงเส้นของการดูดซับแคดเมียมตามรูปแบบฟรอนดลิช (อุณหภูมิ 25°C)	23
รูปที่ 4.2-8	ไอโซเทอร์มการดูดซับของสังกะสี (อุณหภูมิ 25°C)	24
รูปที่ 4.2-9	ความสัมพันธ์เชิงเส้นของการดูดซับสังกะสีตามรูปแบบแลงเมียร์ (อุณหภูมิ 25°C)	24
รูปที่ 4.2-10	ไอโซเทอร์มการดูดซับของสังกะสีของสารดูดซับชนิดต่างๆ ซึ่งคำนวณจากแบบจำลองฟรอนดลิช โดยใช้ค่า $K_f$ และ ค่า n จากตารางที่ 4.2-3	25
รูปที่ 4.2-11	ไอโซเทอร์มการดูดซับของเหล็ก (อุณหภูมิ 25°C)	26
รูปที่ 4.2-12	ความสัมพันธ์เชิงเส้นของการดูดซับเหล็กตามรูปแบบแลงเมียร์ (อุณหภูมิ 25°C)	27
รูปที่ 4.2-13	ความสัมพันธ์เชิงเส้นของการดูดซับเหล็กตามรูปแบบฟรอนดลิช (อุณหภูมิ 25°C)	27
รูปที่ 4.2-14	ไอโซเทอร์มการดูดซับของเหล็กของสารดูดซับชนิดต่างๆ ซึ่งคำนวณจากแบบจำลองฟรอนดลิช โดยใช้ค่า $K_f$ และ ค่า n จากตารางที่ 4.2-4	28
รูปที่ 4.2-15	ไอโซเทอร์มการดูดซับของโครเมียม (อุณหภูมิ 25°C)	29
รูปที่ 4.2-16	ความสัมพันธ์เชิงเส้นของการดูดซับโครเมียมตามรูปแบบฟรอนดลิช (อุณหภูมิ 25°C)	29

## สารบัญรูป (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 4.2-17 ไอโซเทอร์มการดูดซับของโครเมียมของสารดูดซับชนิดต่างๆ ซึ่งคำนวณจากแบบจำลองฟรันทลิช โดยใช้ค่า $K_f$ และ ค่า $n$ จากตารางที่ 4.2-5	30
รูปที่ 4.2-18 กราฟเบรคทรูจของการดูดซับไอออนของตะกั่ว (อุณหภูมิ 25°C)	32
รูปที่ 4.2-19 กราฟเบรคทรูจของการดูดซับไอออนของแคดเมียม (อุณหภูมิ 25°C)	32
รูปที่ 4.2-20 กราฟเบรคทรูจของการดูดซับไอออนของสังกะสี (อุณหภูมิ 25°C)	33
รูปที่ 4.2-21 กราฟเบรคทรูจของการดูดซับไอออนของเหล็ก (อุณหภูมิ 25°C)	33
รูปที่ 4.2-22 กราฟการดูดซับไอออนของโครเมียมในการทดลองแบบต่อเนื่อง (อุณหภูมิ 25°C)	34
รูปที่ 4.2-23 กราฟเบรคทรูจของการดูดซับไอออนแคดเมียมเมื่อใช้เครื่องกรองน้ำต้นแบบ	36
รูปที่ 4.2-24 กราฟเบรคทรูจของการดูดซับไอออนสังกะสีเมื่อใช้เครื่องกรองน้ำต้นแบบ	36
รูปที่ 4.3-1 การดูดซับฟอสเฟตจากน้ำเสียสมมติด้วยตัวดูดซับ (OS-treated, $N_2/700^\circ C$ ) ที่ 25°C ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ	38
รูปที่ 4.3-2 การดูดซับฟอสเฟตจากน้ำเสียสมมติความเข้มข้นเริ่มต้น 50 ppm ที่ 25°C ด้วยตัวดูดซับ OS-treated, $N_2/700^\circ C$ และ OS-treated, $98.5N_2-1.5H_2O/700^\circ C$	38
รูปที่ 4.3-3 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟอสเฟตที่ 25°C เมื่อใช้เปลือกหอยนางรมบดเป็นสารดูดซับ (OS)	39
รูปที่ 4.3-4 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟอสเฟตที่ 25°C เมื่อใช้เปลือกหอยนางรมที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยอากาศที่ (a) 700°C (OS-treated, air/700°C) และ (b) 800°C (OS-treated, air/800°C) เป็นสารดูดซับ	40
รูปที่ 4.3-5 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟอสเฟตที่ 25°C เมื่อใช้เปลือกหอยนางรมที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วย $N_2$ ที่ (a) 600°C (OS-treated, $N_2/600^\circ C$ ), (b) 700°C (OS-treated, $N_2/700^\circ C$ ) และ (c) 800°C (OS-treated, $N_2/800^\circ C$ ) เป็นสารดูดซับ	41
รูปที่ 4.3-6 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟอสเฟตที่ 25°C เมื่อใช้เปลือกหอยนางรมที่ปรับปรุงสมบัติด้วย $N_2$ ผสมไอน้ำในอัตราส่วน 1:1 ที่ 700°C (OS-treated, $N_2-H_2O/700^\circ C$ )	42
รูปที่ 4.3-7 ข้อมูลการดูดซับของสารดูดซับ OS-treated, $N_2/500^\circ C$ ในรูปความสัมพันธ์เชิงเส้นสำหรับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ (a) Freundlich และ (b) Langmuir	43
รูปที่ 4.3-8 ข้อมูลการดูดซับของสารดูดซับ OS-treated, air/700°C ในรูปความสัมพันธ์เชิงเส้นสำหรับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ (a) Freundlich และ (b) Langmuir	44
รูปที่ 4.3-9 ข้อมูลการดูดซับของสารดูดซับ OS-treated, air/800°C ในรูปความสัมพันธ์เชิงเส้นสำหรับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ (a) Freundlich และ (b) Langmuir	45
รูปที่ 4.3-10 ข้อมูลการดูดซับของสารดูดซับ OS-treated, $N_2/600^\circ C$ ในรูปความสัมพันธ์เชิงเส้นสำหรับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ (a) Freundlich และ (b) Langmuir	46
รูปที่ 4.3-11 ข้อมูลการดูดซับของสารดูดซับ OS-treated, $N_2/700^\circ C$ ในรูปความสัมพันธ์เชิงเส้นสำหรับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ (a) Freundlich และ (b) Langmuir	47

รูปที่ 4.3-12	ข้อมูลการดูดซับของสารดูดซับ OS-treated, $N_2/800^\circ C$ ในรูปความสัมพันธ์เชิงเส้นสำหรับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ (a) Freundlich และ (b) Langmuir	48
รูปที่ 4.3-13	ข้อมูลการดูดซับของสารดูดซับ OS-treated, $50N_2-50H_2O/700^\circ C$ ในรูปความสัมพันธ์เชิงเส้นสำหรับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ (a) Freundlich และ (b) Langmuir	49
รูปที่ 4.3-14	เปรียบเทียบสมการไอโซเทอร์มการดูดซับ (ตารางที่ 4.3-1) กับผลการทดลองที่ $25^\circ C$ ของสารดูดซับชนิดต่างๆ	50
รูปที่ 4.3-15	อัตราส่วนความเข้มข้นฟอสเฟตที่เหลือในน้ำเสียสมมติต่อความเข้มข้นฟอสเฟตเริ่มต้นที่แตกต่างกัน	52
รูปที่ 4.3-16	อิทธิพลของขนาดอนุภาควัสดุดูดซับที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสมมติ	52
รูปที่ 4.3-17	การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความเข้มข้นฟอสเฟตที่เหลือต่อความเข้มข้นฟอสเฟตเริ่มต้น $[C/C_0]$ เมื่อใช้ตัวอย่างเป็นน้ำเสียจากครัวเรือน	53

## สารบัญตาราง

		หน้าที่
ตารางที่ 3.1	สภาวะที่ใช้ในการทดลองแบบกะสำหรับ Pb, Cd, Zn, Fe และ Cr เครื่องแก๊สโครมาโตกราฟ GC-FID	8
ตารางที่ 4.1-1	องค์ประกอบของสารดูดซับซึ่งวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF เครื่องวิเคราะห์แก๊สโครมาโตกราฟ GC-FID	15
ตารางที่ 4.1-2	พื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุดูดซับที่ได้เมื่อให้ความร้อนเป็ลือกหอยนางรมที่ 700°C ภายใต้บรรยากาศของแก๊สพาสชนิดต่างๆ	16
ตารางที่ 4.2-1	การดูดซับตะกั่วด้วยสารดูดซับชนิดต่างๆ	20
ตารางที่ 4.2-2	การดูดซับแคดเมียมด้วยสารดูดซับชนิดต่างๆ	23
ตารางที่ 4.2-3	การดูดซับสังกะสีด้วยสารดูดซับชนิดต่างๆ	25
ตารางที่ 4.2-4	การดูดซับเหล็กด้วยสารดูดซับชนิดต่างๆ	28
ตารางที่ 4.2-5	การดูดซับโครเมียมด้วยสารดูดซับชนิดต่างๆ	30
ตารางที่ 4.2-6	รูปแบบไอโซเทอร์มที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับโลหะหนักชนิดต่างๆ ด้วยกระบวนการแบบกะ (อุณหภูมิ 25 °C)	31
ตารางที่ 4.2-7	ประสิทธิภาพของการดูดซับแบบกะโดยเฉลี่ยของโลหะแต่ละชนิด	31
ตารางที่ 4.2-8	เวลาสูงสุดที่สารดูดซับบำบัดน้ำได้ตามมาตรฐานน้ำบริโภคที่กฎหมายกำหนด และความสามารถในการดูดซับโลหะหนักแต่ละชนิด	35
ตารางที่ 4.3-1	ไอโซเทอร์มการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสมมติสำหรับสารดูดซับแต่ละชนิด	50
ตารางที่ 4.3-2	ปริมาณการดูดซับฟอสเฟตต่อมัตถ์ของสารดูดซับชนิดต่างๆ	51
ตารางที่ 4.3-3	ราคาเครื่องบำบัดน้ำเสียครัวเรือน (ต้นแบบขนาด 50 ลิตร)	54

## กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) ฝ่ายเกษตรที่สนับสนุนเงินทุนวิจัย

คณะผู้วิจัย



## บทสรุปผู้บริหาร

จังหวัดสุราษฎร์ธานีมีการเพาะเลี้ยงหอยนางรมกันอย่างแพร่หลายทำให้มีเปลือกหอยนางรมเหลือทิ้งปริมาณมาก เพื่อให้การพัฒนาอาชีพและวิถีความเป็นอยู่ในชุมชนมีความยั่งยืน จึงควรต้องมีแนวทางที่เหมาะสมในการจัดการเปลือกหอยนางรมเหลือทิ้ง โดยที่ผ่านมามีการนำเปลือกหอยนางรมไปผสมในอาหารสัตว์หรือปุ๋ย แต่การใช้ประโยชน์ดังกล่าวไม่อาจรองรับปริมาณเปลือกหอยนางรมที่เพิ่มมากขึ้นทุกปี รวมถึงยังเป็นการใช้ประโยชน์ที่ไม่คุ้มค่า ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาวิจัยเพื่อเพิ่มแนวทางการใช้ประโยชน์จากเปลือกหอยนางรมเหลือทิ้ง โดยนำไปใช้ส่งเสริมความเป็นอยู่และอาชีพเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่งของผู้คนในชุมชนให้ดีขึ้น จากรายงานการตรวจสอบคุณภาพน้ำของหน่วยศึกษาและเฝ้าระวังมลพิษทางน้ำ (Water Patrol) กรีนพีซ เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ พบว่าแหล่งน้ำธรรมชาติในจังหวัดสุราษฎร์ธานีและจังหวัดใกล้เคียงมีการปนเปื้อนโลหะหนักจำพวกตะกั่ว โครเมียม และแคดเมียม ในระดับที่รุนแรงมากจนไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้บริโภค และเมื่อน้ำเหล่านี้ไหลลงทะเลจะทำให้เกิดการสะสมของโลหะหนักในสัตว์ทะเลจนไม่สามารถนำมาบริโภคได้ ประกอบกับปัจจุบันเริ่มมีผลการศึกษาที่แสดงแนวโน้มการสะสมของแคดเมียมในระดับที่สูงขึ้นในหอยนางรมที่เพาะเลี้ยงในจังหวัดสุราษฎร์ธานีด้วย หากปล่อยทิ้งไว้จะทำให้คุณภาพของหอยนางรมไม่เป็นที่ยอมรับ และไม่ปลอดภัยต่อการบริโภค ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่ออุตสาหกรรมอาหาร การเพาะเลี้ยง และรายได้ของชุมชน นอกจากนี้การเติบโตของชุมชนตามชายฝั่งทะเลและแหล่งน้ำ ทำให้ปริมาณน้ำทิ้งทั้งจากครัวเรือน การเพาะปลูก และอุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมีปริมาณเพิ่มขึ้น ซึ่งหากทิ้งไว้จนเกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชันจะส่งผลเสียต่อการเพาะเลี้ยงหอยนางรม และแหล่งทรัพยากรในท้องทะเลถูกทำลายในวงกว้าง เป็นการสูญเสียที่ไม่อาจประเมินค่าได้ จึงต้องมีการป้องกันเพื่อไม่ให้เกิดปัญหาดังกล่าวขึ้น

งานวิจัยนี้มีเป้าหมายในการหาแนวทางในการนำเปลือกหอยนางรมเหลือทิ้งไปใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำที่มีโลหะหนักหรือฟอสเฟตปนเปื้อน โดยกำหนดวิธีและสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมสารดูดซับจากเปลือกหอยนางรมที่ใช้ดูดซับไอออนโลหะหนัก 5 ชนิด (ตะกั่ว แคดเมียม สังกะสี เหล็กและโครเมียม) และฟอสเฟต นำข้อมูลที่ได้ไปใช้ออกแบบเครื่องกรองน้ำ และเครื่องบำบัดน้ำเสียต้นแบบสำหรับใช้งานในชุมชน

จากผลการศึกษาเพื่อหาแนวทางในการนำเปลือกหอยนางรมเหลือทิ้งมาผลิตเป็นสารดูดซับสำหรับใช้กำจัดไอออนโลหะหนักและฟอสเฟตในน้ำเสีย สำหรับการกำจัดไอออนโลหะหนักเมื่อนำสารดูดซับที่ได้จากการเผาเปลือกหอยนางรมภายใต้สภาวะที่มีอากาศไหลผ่านที่อุณหภูมิ  $700^{\circ}\text{C}$  มาทำการทดลองแบบกะ พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก ได้แก่ เหล็ก สังกะสี แคดเมียม ตะกั่ว และโครเมียม คิดเป็นร้อยละ 92.19, 91.82, 90.62, 72.06 และ 24.30 ตามลำดับ เมื่อนำสารดูดซับที่ผลิตได้จากเปลือกหอยนางรมไปทดสอบด้วยเครื่องดูดซับแบบต่อเนื่อง พบว่าสามารถกำจัดเหล็กและแคดเมียมออกจากน้ำเสียที่มีองค์ประกอบชนิดเดียวได้เท่ากับ 3.6 และ 2.9 มิลลิกรัมโลหะหนัก/กรัมสารดูดซับ ตามลำดับ เมื่อทดลองใช้เครื่องกรองน้ำต้นแบบ (ดูดซับแบบต่อเนื่อง) บำบัดน้ำเสียสมมติที่มีโลหะหนักทั้ง 5 ชนิดผสมกัน พบว่าสามารถใช้งานได้ดีเฉพาะกรณีไม่มีเหล็กอยู่ด้วย โดยสามารถกำจัดแคดเมียมและสังกะสีได้ เท่ากับ 33 และ 38 มิลลิกรัมโลหะหนัก/กรัมสารดูดซับ ตามลำดับ สำหรับการกำจัดฟอสเฟต พบว่าสารดูดซับที่สังเคราะห์โดยใช้แก๊สต่างชนิดกันมีลักษณะไอโซเทอร์มการดูดซับต่างกัน และสารดูดซับที่เตรียมจากการเผาเปลือกหอยนางรมภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ  $700^{\circ}\text{C}$  เหมาะสมที่จะใช้บำบัดน้ำเสียจากครัวเรือนที่มีระดับความเข้มข้นของฟอสเฟตไม่เกิน 50 ppm และมีความจุอิ่มตัวเท่ากับ 583.5 mg-P/g ซึ่งสารดูดซับปริมาณ 15 กรัม สามารถบำบัดตัวอย่างน้ำเสียจากครัวเรือนด้วยอัตราการไหล 1 ลิตรต่อชั่วโมง ให้มีระดับความเข้มข้นของฟอสเฟตต่ำกว่าเกณฑ์ที่กฎหมายกำหนดได้นาน 10 ชั่วโมง โดยมีต้นทุนของเครื่องต้นแบบสำหรับบำบัดน้ำเสียชุมชนขนาด 50 ลิตร ในราคาประมาณ 1,700 บาท

อย่างไรก็ตามสารดูดซับที่ได้จากเปลือกหอยนางรมในงานวิจัยนี้มีข้อเสีย คือ มีอนุภาคขนาดเล็ก  
ขึ้นรูปยาก และชะละลายออกมาปนเปื้อนในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วย จึงต้องหาวิธีขึ้นรูปที่เหมาะสมและพัฒนา  
เทคนิคในการดำเนินงานเพื่อให้สามารถนำไปใช้ในเครื่องกรองน้ำและเครื่องบำบัดน้ำเสียขนาดใหญ่ที่ใช้งานได้จริง  
อย่างมีประสิทธิภาพ

## บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเพื่อหาแนวทางในการนำเปลือกหอยนางรมเหลือทิ้งมาผลิตเป็นสารดูดซับสำหรับใช้กำจัดไอออนโลหะหนักและฟอสเฟตในน้ำเสีย สำหรับการกำจัดไอออนโลหะหนักเมื่อนำสารดูดซับที่ได้จากการเผาเปลือกหอยนางรมภายใต้สภาวะที่มีอากาศไหลผ่านที่อุณหภูมิ 700°C มาทำการทดลองแบบกะพบว่าสามารถกำจัดโลหะหนักได้ทุกชนิดโดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดเหล็ก สังกะสี แคดเมียม ตะกั่ว และโครเมียม เท่ากับ 92.19%, 91.82%, 90.62%, 72.06% และ 24.30% ตามลำดับ เมื่อนำไปทดสอบด้วยเครื่องดูดซับแบบต่อเนื่องพบว่าสามารถกำจัดเหล็กและแคดเมียมออกจากน้ำเสียที่มีองค์ประกอบชนิดเดียวได้ 3.6 และ 2.9 mg/g ตามลำดับ เมื่อนำไปทดสอบกับน้ำเสียที่มีโลหะทั้ง 5 ชนิด พบว่าสามารถใช้งานได้ดีเฉพาะกรณีไม่มีเหล็กอยู่ด้วยโดยสามารถกำจัดแคดเมียมและสังกะสีได้ 33 และ 38 mg/g ตามลำดับ สำหรับการกำจัดฟอสเฟตพบว่าสารดูดซับที่สังเคราะห์โดยใช้แก๊สต่างชนิดกันมีลักษณะไอโซเทอร์มการดูดซับต่างกัน และสารดูดซับที่เตรียมโดยใช้อากาศที่ 700°C เหมาะสมที่จะใช้บำบัดน้ำเสียครัวเรือนที่มีฟอสเฟตเข้มข้นในช่วงไม่เกิน 50 ppm ที่สุด โดยมีความจุอิ่มตัวเท่ากับ 583.5 mg-P/g โดยตัวดูดซับ 15 กรัม สามารถบำบัดน้ำเสียครัวเรือนตัวอย่างด้วยอัตรา 1 ลิตรต่อชั่วโมงให้ความเข้มข้นฟอสเฟตต่ำกว่าเกณฑ์ที่กฎหมายกำหนดได้นาน 10 ชั่วโมง

## ABSTRACT

The preparation of adsorbent from oyster shell waste used in water treatment for removing heavy metal ions and phosphate has been investigated in this study. The adsorbent used in the heavy metal removal was prepared by heating the oyster shell under air atmosphere at 700°C. It showed removal efficiency of 92.19%, 91.82%, 90.62%, 72.06% and 24.30% in the removing ion of Fe, Zn, Cd, Pb and Cr, respectively, when the adsorption was tested in a small batch equipment. When the adsorption was tested using a continuous mode equipment, the adsorbent had efficiency of 3.6 and 2.9 mg/g for removal of Fe and Cd, respectively. From the test using the water containing all of the 5 metal ions, the adsorbent successfully used for water treatment only when no existing of iron. It could adsorb 33 and 38 mg/g of Cd and Zn, respectively. The study on the phosphate removal revealed that the adsorbents prepared under different conditions had different phosphate adsorption isotherms. Among all the prepared adsorbents, the one prepared using air at 700°C was the most effective adsorbent for phosphate removal from household waste water with phosphate concentration of  $\leq 50$  ppm. It had saturated adsorption capacity of 583.5 mg-P/g. The adsorbent (15 g) was able to treat the household waste water under the level stricted by law with the treatment rate of 1 dm<sup>3</sup>/h for 10 h.

# เนื้อหางานวิจัย

## 1. ความสำคัญ / ความเป็นมา

จังหวัดสุราษฎร์ธานีมีเนื้อที่เพาะเลี้ยงหอยนางรมบริเวณกว้างและมีเปลือกหอยนางรมเหลือทิ้งปริมาณมาก เพื่อให้การพัฒนาอาชีพและวิถีความเป็นอยู่ของผู้คนในชุมชนมีความยั่งยืนจำเป็นต้องมีการจัดการเปลือกหอยนางรมเหลือทิ้งให้เหมาะสม ที่ผ่านมามีเปลือกหอยนางรมถูกนำไปผสมอาหารสัตว์หรือใช้เป็นปุ๋ยเพราะมีธาตุแคลเซียมสูงแต่การใช้ประโยชน์ลักษณะนี้ไม่อาจรองรับเปลือกหอยนางรมเหลือทิ้งปริมาณมากที่เพิ่มขึ้นต่อเนื่องทุกปี คณะผู้วิจัยจึงต้องการเพิ่มแนวทางการใช้ประโยชน์เปลือกหอยนางรมเหลือทิ้งที่ให้ผลตอบแทนคุ้มค่าและช่วยส่งเสริมความเป็นอยู่ของผู้คนในชุมชนให้ดีขึ้น

หน่วยศึกษาและเฝ้าระวังมลพิษทางน้ำ (Water Patrol) กรีนพีซ เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ได้รายงานผลการตรวจสอบคุณภาพน้ำตามแหล่งน้ำต่างๆ ไว้ว่า แหล่งน้ำธรรมชาติในจังหวัดสุราษฎร์ธานีและจังหวัดใกล้เคียงมีการปนเปื้อนโลหะหนักจำพวกตะกั่ว โครเมียม และแคดเมียม ในระดับที่รุนแรงมากจนไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้บริโภค ประชากรที่อาศัยในพื้นที่ซึ่งบริโภคน้ำบาดาลหรือน้ำประปาที่ผลิตจากแหล่งน้ำดิบบริเวณนั้นอาจได้รับโลหะหนักและสะสมในร่างกายจนเกิดโรคต่างๆ ตามมา นอกจากนี้เมื่อน้ำเหล่านี้ไหลลงสู่ทะเลก็จะเกิดการสะสมของโลหะหนักในสัตว์ทะเลทำให้ไม่สามารถนำมาบริโภคได้ ปัจจุบันเริ่มมีผลการศึกษาที่แสดงแนวโน้มการสะสมแคดเมียมในระดับที่สูงขึ้นในหอยนางรมที่เพาะเลี้ยงในจังหวัดสุราษฎร์ธานีด้วย หากปล่อยทิ้งไว้จะทำให้คุณภาพของหอยนางรมไม่เป็นที่ยอมรับในตลาดต่างประเทศที่มีมาตรการควบคุมการปนเปื้อนที่เข้มงวด ส่งผลกระทบต่ออุตสาหกรรมอาหาร การเพาะเลี้ยง และรายได้ของคนในชุมชน นอกจากนี้จังหวัดสุราษฎร์ธานีและจังหวัดใกล้เคียงมีแหล่งท่องเที่ยวทางทะเลที่สวยงามควรค่าแก่การอนุรักษ์ไว้ให้เป็นแหล่งที่มาของรายได้ของชุมชน แต่เนื่องจากการเติบโตของชุมชนตามชายฝั่งทะเลและแหล่งน้ำทำให้ปริมาณการปล่อยน้ำทิ้งทั้งจากครัวเรือน การเพาะปลูกและอุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำเพิ่มขึ้น เมื่อมองในระยะยาวจะเกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชันที่ส่งผลเสียต่อการเพาะเลี้ยงหอยนางรมและทำให้แหล่งทรัพยากรในท้องทะเลถูกทำลายในวงกว้างซึ่งเป็นการสูญเสียที่ไม่อาจประเมินค่าได้ จึงต้องมีการป้องกันที่ดีไม่ให้เกิดปัญหาดังกล่าวขึ้น

งานวิจัยนี้มีเป้าหมายหลัก คือ นำเปลือกหอยนางรมเหลือทิ้งไปใช้ประโยชน์ในการบำบัดน้ำที่มีโลหะหนักหรือฟอสเฟตปนเปื้อน โดยหาวิธีและสภาวะที่เหมาะสมในการสังเคราะห์สารดูดซับจากเปลือกหอยนางรมที่ใช้ดูดซับไอออนโลหะหนัก 5 ชนิด (ตะกั่ว, แคดเมียม, สังกะสี, เหล็ก และโครเมียม) และฟอสเฟต นำข้อมูลที่ได้ไปใช้ออกแบบเครื่องกรองน้ำ และเครื่องบำบัดน้ำเสียต้นแบบสำหรับใช้งานในชุมชน ผลลัพธ์ที่ได้ทำให้เปลือกหอยนางรมเหลือทิ้งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลายขึ้นและช่วยส่งเสริมความเป็นอยู่ของผู้คนในชุมชนให้ดีขึ้น

## 2. วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. กำหนดวิธีการและสภาวะที่เหมาะสมและง่ายต่อการผลิตสารดูดซับจากเปลือกหอยนางรม
2. ทดสอบประสิทธิภาพในการลดปริมาณไอออนโลหะหนัก (ตะกั่ว, แคดเมียม, สังกะสี, เหล็ก และโครเมียม) และฟอสเฟตในน้ำเสียจากสารดูดซับที่ได้
3. สร้างเครื่องกรองน้ำขนาดเล็กราคาถูกเพื่อใช้ในการบริโภคในครัวเรือน
4. สร้างเครื่องต้นแบบที่ทำงานง่ายสำหรับบำบัดน้ำเสียในชุมชนที่ทำอุตสาหกรรมเพาะเลี้ยงหอยนางรม

### 3. วิธีวิจัย

งานวิจัยนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วน คือ (1) การเตรียมวัสดุดูดซับ, (2) การสร้างเครื่องกรองน้ำขนาดเล็กสำหรับกำจัดโลหะหนักเพื่อใช้ในครัวเรือน และ (3) การสร้างเครื่องบำบัดน้ำเสียสำหรับกำจัดฟอสเฟต ดังอธิบายรายละเอียดในหัวข้อ 3.1, 3.2 และ 3.3 ตามลำดับ

#### 3.1 การเตรียมวัสดุดูดซับ

##### 3.1.1 อุปกรณ์และสารเคมีที่ใช้

3.1.1.1 เครื่องมือที่ใช้เตรียมสารดูดซับระดับห้องปฏิบัติการ (รูปที่ 3.1-1)

3.1.1.2 เครื่องบดแบบใบมีดตัด

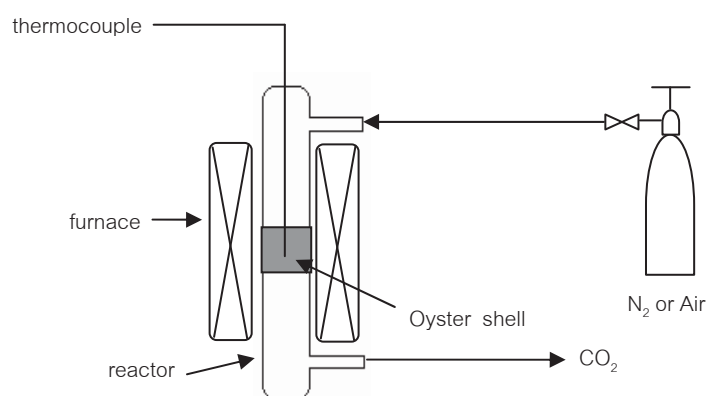
3.1.1.3 ตะแกรงคัดขนาด 150 และ 200 ไมโครเมตร

3.1.1.4 เปลือกหอยนางรมบด

3.1.1.5 แก๊สไนโตรเจน (99.99%)

3.1.1.6 อากาศ (air zero)

3.1.1.7 น้ำกลั่น



รูปที่ 3.1-1 เครื่องมือเตรียมสารดูดซับจากเปลือกหอยนางรม (ระดับห้องปฏิบัติการ)

### 3.1.2 วิธีเตรียมสารดูดซับ

#### 3.1.2.1 การทดลองระดับห้องปฏิบัติการ

การเตรียมสารดูดซับเพื่อใช้ในการทดลองระดับห้องปฏิบัติการทำโดยนำเปลือกหอยนางรมไปล้างด้วยน้ำสะอาด นำไปตากแห้ง บดละเอียด และนำมาร่อนคัดขนาดด้วยตะแกรง จากนั้นนำไปบรรจุลงในหลอดแก้วควอทซ์และให้ความร้อนภายใต้บรรยากาศของแก๊สเฉื่อย ( $N_2$ , air หรือ  $N_2$  ผสม  $H_2O$  ในสัดส่วน 50:50 และ 98.5:1.5) ที่อุณหภูมิ 500, 600, 700 หรือ  $800^\circ C$  นาน 6 ชั่วโมง ด้วยเครื่องมือในรูปที่ 3.1-1 เก็บแก๊สที่ปากทางออกมาวัดองค์ประกอบด้วยเครื่องวิเคราะห์แก๊สโครมาโตกราฟทุก 30 นาที เมื่อไม่พบคาร์บอนไดออกไซด์แล้วจึงลดอุณหภูมิลงมาที่อุณหภูมิห้อง เก็บสารดูดซับที่ได้ใน desiccators

OS หมายถึงเปลือกหอยนางรมที่ผ่านการให้ความร้อนที่  $500^\circ C$  โดยองค์ประกอบไม่เปลี่ยนแปลง สำหรับเปลือกหอยนางรมที่ผ่านการให้ความร้อนแล้วองค์ประกอบเปลี่ยนแปลงจะตั้งชื่อเป็น “OS-treated ชนิดแก๊ส/อุณหภูมิ” ได้แก่ OS-treated  $N_2/600^\circ C$ , OS-treated  $N_2/700^\circ C$ , OS-treated  $N_2/800^\circ C$ , OS-treated air/ $700^\circ C$ , OS-treated 50 $N_2$ -50 $H_2O/700^\circ C$  และ OS-treated 98.5 $N_2$ -1.5 $H_2O/700^\circ C$

สารดูดซับที่ได้จะถูกนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบและโครงสร้างด้วยเทคนิค XRF, XRD, BET และ SEM

#### 3.1.2.2 การใช้งานระดับชุมชน

การเตรียมสารดูดซับเพื่อการใช้งานจริงระดับชุมชนต้องเตรียมครั้งละปริมาณมากด้วยเครื่องมือที่ไม่นับซับซ้อน ทำงานง่าย และราคาถูก งานวิจัยนี้จึงดัดแปลงเตาเผาแก๊ส (รูปที่ 3.1-2) ซึ่งประกอบจากถังน้ำมัน 200 ลิตรและท่อเหล็ก ทำขึ้นได้ง่าย มีราคาถูก และยังสามารถใช้วัสดุชีวมวลหรือแก๊สชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนได้

การเตรียมสารดูดซับเริ่มจากนำเปลือกหอยนางรมไปล้างด้วยน้ำสะอาด ตากแห้ง (แต่ไม่จำเป็นต้องบดละเอียด) และนำไปวางบนตะแกรง ปิดฝาท่อด้านข้างของเตาเผา เปิดฝาด้านบนและด้านล่าง จากนั้นจุดไฟให้ความร้อน ตรวจสอบคาร์บอนไดออกไซด์ในแก๊สที่ออกจากเตาด้วยสารละลายน้ำปูนใส เมื่อไม่พบว่าน้ำปูนใสขุ่นจึงหยุดเผาเชื้อเพลิง รอจนอุณหภูมิลดลงมาที่อุณหภูมิห้อง



รูปที่ 3.1-2 เตาเผาสำหรับเตรียมสารดูดซับสำหรับการใช้งานจริงในระดับชุมชน

### 3.2 การสร้างเครื่องกรองน้ำขนาดเล็กสำหรับกำจัดโลหะหนักเพื่อใช้ในครัวเรือน

#### 3.2.1 สารเคมีที่ใช้

3.2.1.1  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$  analytical grade

3.2.1.2  $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  analytical grade

3.2.1.3  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  analytical grade

3.2.1.4  $\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  analytical grade

3.2.1.5  $\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  analytical grade

3.2.1.6 น้ำกลั่น

3.2.1.7 วัสดุดูดซับ OS-treated, air/700°C

#### 3.2.2 วิธีทดลอง

##### 3.2.2.1 การทดลองแบบกะ

เตรียมสารละลายโลหะหนักที่ความเข้มข้นต่างๆ ใส่ในขวดรูปชมพู่ จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่อุณหภูมิ 25 °C เป็นเวลา 1 วัน รอจนเข้าสู่สมดุลการดูดซับ จึงเก็บสารตัวอย่าง 5 มิลลิลิตร ใส่ในขวดเก็บสารตัวอย่างที่มีสารละลายกรดไนตริกเข้มข้น 2 มิลลิลิตร (เพื่อรักษาสภาพของตัวอย่าง และป้องกันการไม่ให้ออกไซด์ของโลหะหนักตกตะกอนที่ผนังภาชนะ) นำสารตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนัก โดยใช้เครื่อง AAS ตารางที่ 3.1 แสดงข้อมูลเกี่ยวกับสภาวะที่ใช้ในการทดลองสำหรับโลหะหนักแต่ละชนิด

ตารางที่ 3.1 สภาวะที่ใช้ในการทดลองแบบกะสำหรับ Pb, Cd, Zn, Fe และ Cr

โลหะหนัก	ความเข้มข้นเริ่มต้น (ppm)	ปริมาตร (ml)	ปริมาณตัวดูดซับ (g)
Pb	5, 10, 15, 20	1000	0.1
Cd	5, 10, 15, 20, 25, 30, 35	200	0.02
Zn	2.5, 5, 7.5, 10, 15, 20, 25, 30	200	0.02
Fe	3, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35	200	0.02
Cr	25, 50, 100, 200, 250, 350	100	0.01

### 3.2.2.2 การทดลองแบบต่อเนื่อง

ชุดทดลองที่ใช้ทำจากคอลัมน์พลาสติก (เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3 cm สูง 0.7 cm) ภายในบรรจุสำลี ตัวดูดซับ (0.1 g) และเม็ดแก้วเป็นลำดับชั้น ดังแสดงในรูปที่ 3.1 การทดลองทำโดยป้อนน้ำเสียสังเคราะห์ ที่มีโลหะหนักเข้มข้น 6 ppm เข้าสู่คอลัมน์จากด้านล่างด้วยอัตราการไหล (6 ml/min) ปลปล่อยให้ไหลขึ้นอย่างต่อเนื่อง (Up flow-fed) โดยใช้ Diaphragm Pump จากนั้นเก็บสารละลายตัวอย่างที่ไหลออกจากคอลัมน์ (5 ml) ใส่ในขวดที่มีกรดไนตริกเข้มข้น 2 ml เพื่อรักษาสภาพตัวอย่างและป้องกันไม่ให้ไอออนของโลหะหนักติดที่ผนังภาชนะ นำสารละลายตัวอย่างไปวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่อง AAS ทั้งนี้หากสารละลายตัวอย่างมีความเข้มข้นเกินช่วงที่เครื่อง AAS สามารถตรวจวัดได้ จะต้องเติมน้ำกลั่นเพื่อเจือจางสารละลายตัวอย่างก่อนใส่ในขวดที่มีกรดไนตริกเข้มข้น 2 ml การเก็บสารละลายตัวอย่างจะทำทุก 3 นาที ในช่วง 30 นาทีแรก จากนั้นจะเก็บทุก 5 นาที อีก 30 นาที, ทุก 10 นาที อีก 2 ชั่วโมง และทุก 20 นาที อีก 1 ชั่วโมง





รูปที่ 3.2-1 แผนภาพลำดับการบรรจุสารในคอลัมน์ดูดซับที่ใช้ในการทดลองแบบต่อเนื่อง

3.2.2.3 การทดลองโดยใช้เครื่องกรองน้ำต้นแบบ

เครื่องกรองน้ำต้นแบบที่ใช้เป็นคอลัมน์พลาสติก (เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 cm สูง 30 cm) ภายในบรรจุตัวดูดซับ 10 g น้ำเสียสมมติที่ใช้เป็นสารละลายผสมของโลหะหนักทุกชนิดที่ศึกษาในงานวิจัยนี้ (ตะกั่ว แคดเมียม เหล็ก สังกะสี และโครเมียม) โดยกำหนดความเข้มข้นของโลหะหนักแต่ละชนิดในน้ำเสียสมมติมีค่าเท่ากับ 10 ppm

การทดลองทำโดยป้อนน้ำเสียสมมติด้วย Diaphragm Pump กำหนดอัตราการไหลเป็น 1 l/h และเก็บสารละลายตัวอย่างที่ปากทางออกไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่อง AAS เช่นเดียวกับการทดลองในหัวข้อ 3.2.2.2

### 3.3 การสร้างเครื่องบำบัดน้ำเสียสำหรับกำจัดฟอสเฟต

#### 3.3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้

- 3.3.1.1 บีกเกอร์ขนาด 250 ml
- 3.3.1.2 เครื่องกวนแบบแม่เหล็ก (magnetic stirrer)
- 3.3.1.3 ชุดตรวจวัดอุณหภูมิ
- 3.3.1.4 Spectrophotometer ซึ่งมีอินฟราเรดทิวบ์สำหรับใช้กับความยาวคลื่น 880 nm
- 3.3.1.5 เครื่องแก้วที่ล้างด้วยน้ำกลั่นจนสะอาด
- 3.3.1.6 Anhydrous  $\text{KH}_2\text{PO}_4$
- 3.3.1.7 น้ำกลั่น
- 3.3.1.8 กรดซัลฟูริกเข้มข้น 5 N
- 3.3.1.9 แอนติโมนีลโพตัสเซียมตาร์เตรต ( $\text{K}(\text{SbO})\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ )
- 3.3.1.10 แอมโมเนียมโมลิบเดต ( $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ )
- 3.3.1.11 กรดแอสคอร์บิก
- 3.3.1.12 สารดูดซับ OS, OS-treated  $\text{N}_2/600^\circ\text{C}$ , OS-treated  $\text{N}_2/700^\circ\text{C}$ , OS-treated  $\text{N}_2/800^\circ\text{C}$ , OS-treated air/ $700^\circ\text{C}$ , OS-treated  $50\text{N}_2\text{-}50\text{H}_2\text{O}/700^\circ\text{C}$  และ OS-treated  $98.5\text{N}_2\text{-}1.5\text{H}_2\text{O}/700^\circ\text{C}$

#### 3.3.2 การวัดปริมาณฟอสเฟตด้วยวิธีแอสคอร์บิก

##### การเตรียมสารเคมี

1. เตรียมกรดซัลฟูริก 5 N โดยเติมกรดซัลฟูริกเข้มข้นปริมาตร 70 ml ลงในน้ำกลั่น แล้วเติมน้ำกลั่นจนมีปริมาตรรวมเท่ากับ 500 ml
2. เตรียมสารละลายแอนติโมนีลโพตัสเซียมตาร์เตรต โดยชั่ง  $\text{K}(\text{SbO})\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$  หนัก 0.2743 g ละลายลงในน้ำกลั่นแล้วเจือจางจนมีปริมาตรเท่ากับ 100 ml ในขวดวัดปริมาตร เก็บในขวดแก้ว
3. เตรียมสารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต โดยชั่ง  $(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  หนัก 4 g ละลายลงในน้ำกลั่นแล้วเจือจางจนมีปริมาตรเท่ากับ 100 ml เก็บในขวดพลาสติกที่อุณหภูมิ  $4^\circ\text{C}$
4. เตรียมกรดแอสคอร์บิก 0.1 M โดยชั่งกรดแอสคอร์บิกหนัก 1.76 g ละลายในน้ำกลั่นแล้วเจือจางจนมีปริมาตรเท่ากับ 100 ml เก็บไว้ที่อุณหภูมิ  $4^\circ\text{C}$  (ระยะเวลาการเก็บรักษาไม่เกิน 1 สัปดาห์)

5. เตรียมน้ำยารวม โดยผสมน้ำยาเคมีข้างต้นในสัดส่วนสำหรับ 20 ml ดังนี้

กรดซัลฟูริก 5 N	10 ml
สารละลายแอนติโมนิโพลีดีสซียูมตาร์เตรต	1 ml
สารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดต	3 ml
สารละลายกรดแอสคอร์บิก	6 ml

การผสมเริ่มจากนำสารละลายแต่ละชนิดมาตั้งทิ้งไว้จนมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง จากนั้นจึงนำสารละลายแต่ละชนิดมาผสมกัน (โดยเติมเรียงลำดับและต้องผสมให้เข้ากันทุกครั้งเมื่อเติมส่วนผสมแต่ละชนิด) ถ้ามีความขุ่นเกิดขึ้นในน้ำยารวมหลังจากเติมสารละลายแอนติโมนิโพลีดีสซียูมตาร์เตรต หรือสารละลายแอมโมเนียมโมลิบเดตให้เขย่าน้ำยาเคมีรวมนี้อย่างน้อย 2 – 3 นาที จนกระทั่งความขุ่นหายไป แล้วจึงจะเติมน้ำยาตัวอื่นต่อไป (น้ำยารวมนี้ต้องใช้ภายใน 4 ชั่วโมง)

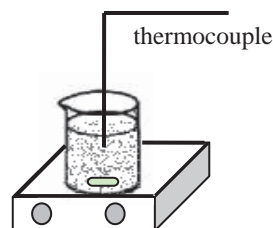
#### วิธีวิเคราะห์

1. เตรียมกราฟมาตรฐาน: เตรียมสารละลายมาตรฐานฟอสเฟตเข้มข้น 10, 25, 50, 75 และ 100 ppm จำนวน 5 ml ในขวดรูปกรวยขนาด 100 ml แล้วเติมน้ำยารวมลงไป 0.8 ml จากนั้นเขย่าให้เข้ากัน และตั้งทิ้งไว้อย่างน้อย 10 นาที แต่ไม่เกิน 30 นาที นำสารที่ได้ไปวัด %T ที่ความยาวคลื่น 880 nm โดยใช้น้ำกลั่นเป็นแบลนด์ แล้วเขียนกราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของฟอสเฟต (ppm) กับค่า log (%T)
2. การวิเคราะห์ฟอสฟอรัสในสารละลายตัวอย่าง: ปิเปตสารละลายตัวอย่างมา 5 ml ใส่ลงในขวดรูปกรวย แล้วเติมน้ำยารวมลงไป 0.8 ml จากนั้นเขย่าให้เข้ากัน และตั้งทิ้งไว้อย่างน้อย 10 นาที แต่ไม่เกิน 30 นาที นำสารที่ได้ไปวัด %T ที่ความยาวคลื่น 880 nm โดยใช้น้ำกลั่นเป็นแบลนด์

### 3.3.3 วิธีทดลอง

#### 3.3.3.1 การทดลองแบบกะ มีขั้นตอนดังนี้

1. เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้นต่างๆ โดยใช้ Anhydrous  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  ผสมกับน้ำกลั่น
2. เตรียมอุปกรณ์ตามรูปที่ 3.3-1 โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ 200 ml
3. เติมน้ำยาดูดซับจำนวน 0.1 g ลงในน้ำเสียสังเคราะห์
4. เก็บตัวอย่างปริมาตร 5 ml เมื่อการดูดซับอยู่ที่ภาวะสมดุลแล้ว (6 ชั่วโมง)
5. วัดปริมาณฟอสเฟตในน้ำเสียสมมติด้วยวิธีแอสคอร์บิก



รูปที่ 3.3-1 ชุดทดสอบการดูดซับฟอสเฟตสำหรับการทดลองแบบกะ

#### 3.3.3.2 การทดลองแบบต่อเนื่อง

ในการทดลองแบบต่อเนื่องจะพิจารณาเฉพาะ OS-treated  $\text{N}_2/700^\circ\text{C}$  เท่านั้น เนื่องจาก OS-treated  $\text{N}_2/700^\circ\text{C}$  มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการดูดซับฟอสเฟตสูงสุด เครื่องดูดซับฟอสเฟต

แบบต่อเนื่องประกอบด้วย ปั๊มป้อนสารที่มีอัตราการไหล 0.1–1 l/h และท่อสำหรับบรรจุสารดูดซับ (เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5 cm ยาว 20 cm) ควบคุมอุณหภูมิโดยน้ำหล่อเย็นใน jacket ด้านนอก ติดตั้งดังแสดงในรูปที่ 3.3-2 โดยสารละลายจะถูกปั๊มเข้าทางด้านล่างของท่อและสารละลายที่ผ่านการกำจัดฟอสเฟตแล้วจะไหลออกทางด้านบนของท่อ การทดสอบทำโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของฟอสเฟตเท่ากับ 15, 20, 25 และ 100 ppm (ซึ่งเป็นค่าความเข้มข้นที่ครอบคลุมความเข้มข้นของฟอสเฟตในน้ำทิ้งชุมชนและในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม) และใช้วัสดุดูดซับ 0.3 g ทำการทดลองโดยป้อนน้ำเสียสังเคราะห์เข้าสู่ท่อที่บรรจุวัสดุดูดซับด้วยอัตราการไหล 0.3 l/h และเก็บตัวอย่างที่ทางออกทุกๆ 20 – 30 นาที เพื่อวัดปริมาณฟอสเฟตที่เหลืออยู่ด้วยวิธีแอสคอร์บิก



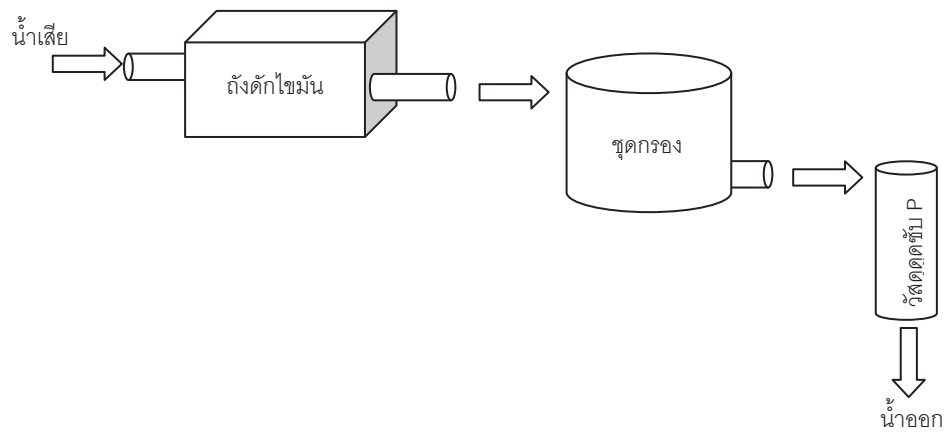
รูปที่ 3.3-2 ชุดทดสอบการดูดซับฟอสเฟตแบบต่อเนื่อง

### 3.3.3.3 การทดลองโดยใช้เครื่องบำบัดน้ำเสียครัวเรือนต้นแบบ

รูปที่ 3.3-3 แสดงแผนภาพของเครื่องบำบัดน้ำเสียครัวเรือนต้นแบบที่ใช้ ประกอบด้วยถังตกไขมัน (รูปที่ 3.3-4), ชุดกรองอย่างง่าย (รูปที่ 3.3-5) และท่อบรรจุสารดูดซับ OS-treated  $N_2/700^\circ C$  (รูปที่ 3.3-6) น้ำทิ้งจะถูกป้อนเข้าสู่ถังตกไขมันซึ่งทำหน้าที่ตกเศษอาหารและคราบไขมัน เมื่อไขมันถูกแยกออกจากน้ำทิ้งครัวเรือนแล้วจะไหลเข้าสู่ชุดกรองอย่างง่ายเพื่อกรองเศษวัสดุหรือเศษอาหารที่อาจตกค้างในน้ำ ลำดับชั้นของสารกรองในชุดกรองอย่างง่ายประกอบด้วยชั้นกรวดหยาบ, กรวดละเอียด, ทรายหยาบ, ทรายละเอียด, ถ่าน และสำลี น้ำเสียที่ออกจากชุดกรองอย่างง่ายจะไหลเข้าสู่ท่อบรรจุสารดูดซับในชั้นสุดท้าย โดยท่อบรรจุสารดูดซับเป็นท่อสองชั้น ท่อชั้นนอกทำด้วยพลาสติก ท่อชั้นในที่บรรจุสารดูดซับทำจากแผ่นตะแกรงขนาดรูเปิด 1 mm เพื่อให้น้ำเสียไหลผ่านเบดของสารดูดซับและไหลผ่านตะแกรงออกไปยังท่อชั้นนอกได้โดยมีความดันลดต่ำ

รูปที่ 3.3-7 แสดงเครื่องบำบัดน้ำเสียครัวเรือนต้นแบบที่สร้างขึ้น การทดลองทำโดยป้อนน้ำเสียชุมชนที่เกิดจากการซักล้างมีฟอสเฟต 12 ppm ด้วยอัตราการไหล 1 l/h เข้าสู่เครื่องบำบัดที่มีวัสดุดูดซับใน

ชั้นสุดท้ายหนัก 15 กรัม จากนั้นเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วไปวิเคราะห์หาปริมาณฟอสเฟตที่หลงเหลือที่เวลาต่างๆ



รูปที่ 3.3-3 แผนภาพของเครื่องบำบัดน้ำเสียครัวเรือนต้นแบบ



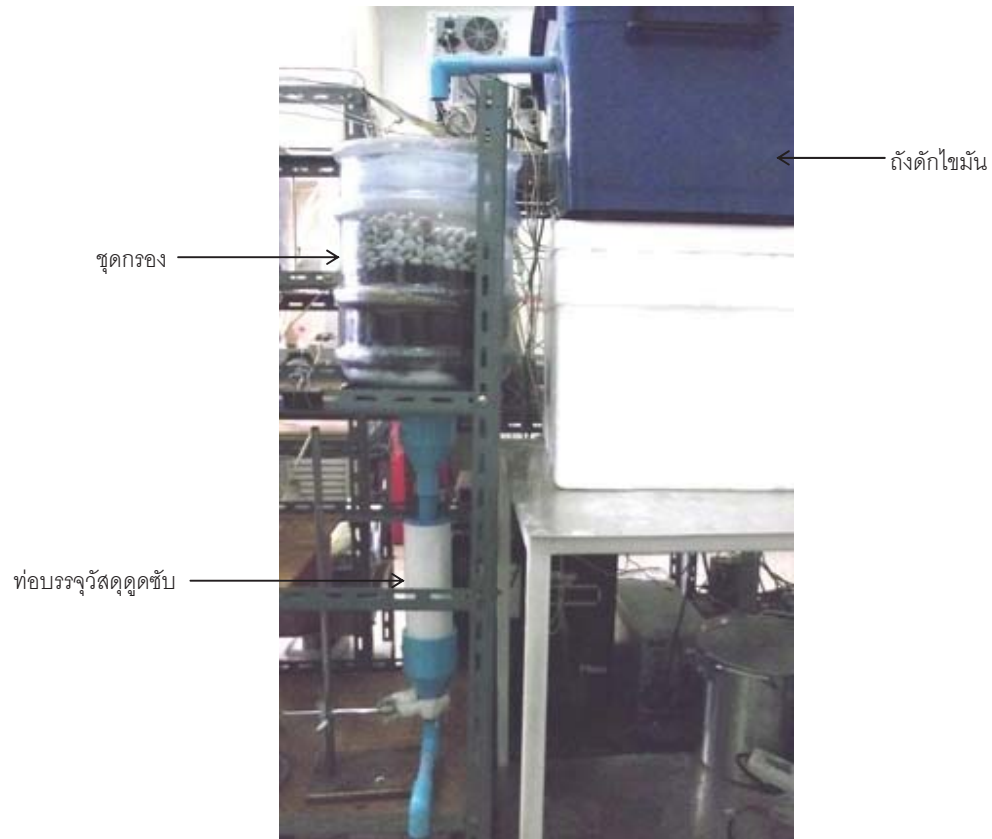
รูปที่ 3.3-4 ถังตกไขมัน



รูปที่ 3.3-5 ชุดกรองอย่างง่าย



รูปที่ 3.3-6 ท่อบรรจุวัสดุตุ้มน้ำหนัก (ความจุวัสดุตุ้มน้ำหนัก 150 กรัม)

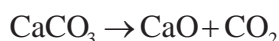


รูปที่ 3.3-7 ชุดบำบัดน้ำเสียจากครัวเรือน

#### 4. ผลการทดลอง วิเคราะห์ และวิจารณ์

##### 4.1 การเตรียมวัสดุดูดซับ

เมื่อนำเปลือกหอยนางรมบด (OS) ไปวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเทคนิค XRF พบว่ามีแคลเซียมคาร์บอเนต ( $\text{CaCO}_3$ ) เป็นองค์ประกอบหลัก (ร้อยละ 93.3 โดยน้ำหนัก) และมีสารประกอบออกไซด์ของโลหะอื่นๆ อีกเล็กน้อย ดังตารางที่ 4.1-1 เมื่อนำเปลือกหอยนางรมไปให้ความร้อนภายใต้บรรยากาศของแก๊สเฉื่อย (OS-treated) ที่อุณหภูมิ 600, 700 และ 800°C พบว่ามีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาจากเครื่องปฏิกรณ์ แต่เมื่อให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 500°C เป็นเวลานานมากกว่า 10 ชั่วโมง ไม่พบแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปากทางออกของเครื่องปฏิกรณ์เลย จึงสรุปได้ว่าการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่ำ ( $\leq 500^\circ\text{C}$ ) ไม่ทำให้องค์ประกอบของเปลือกหอยนางรมเปลี่ยนแปลง แต่การให้ความร้อนที่อุณหภูมิสูง ( $\geq 600^\circ\text{C}$ ) ทำให้องค์ประกอบของเปลือกหอยนางรมเปลี่ยนจาก  $\text{CaCO}_3$  เป็น  $\text{CaO}$  ตามปฏิกิริยา

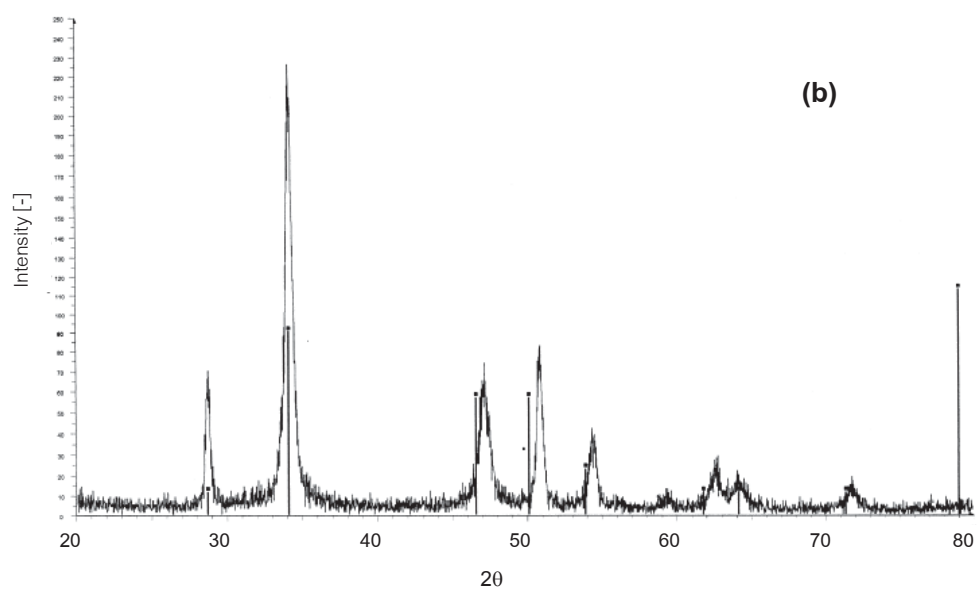
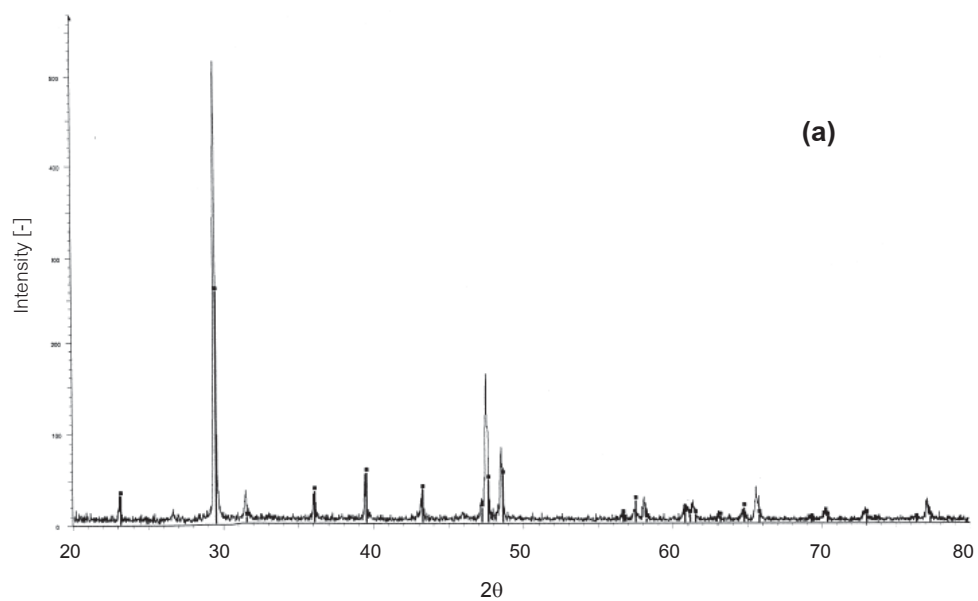


ผลการวิเคราะห์ในตารางที่ 4.1-1 (OS-treated, air/700°C และ OS-treated,  $\text{N}_2$ /700°C) แสดงว่าเปลือกหอยนางรมที่ผ่านการให้ความร้อนภายใต้บรรยากาศของแก๊สเฉื่อยที่อุณหภูมิ 700°C นาน 6 ชั่วโมง มี  $\text{CaO}$  เป็นองค์ประกอบหลัก และไม่มี  $\text{CaCO}_3$  หลงเหลืออยู่ การตรวจสอบโครงสร้างผลึกด้วยเทคนิค XRD (รูปที่ 4.1-1) แสดงว่าเปลือกหอยนางรมมีโครงสร้างผลึกเป็น  $\text{CaCO}_3$  เมื่อผ่านการให้ความร้อนภายใต้บรรยากาศของแก๊สเฉื่อยที่อุณหภูมิ 700°C แล้วโครงสร้างจะเปลี่ยนเป็น  $\text{CaO}$  ทั้งหมด การเตรียมวัสดุดูดซับจากหอยนางรมในงานวิจัยนี้โดยการให้ความร้อนภายใต้บรรยากาศของแก๊สเฉื่อยที่อุณหภูมิ  $\geq 600^\circ\text{C}$  จึงทำการวัดหาปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ปากทางออกของเครื่องปฏิกรณ์จนไม่มีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาแล้ว เพื่อให้แน่ใจว่าไม่มี  $\text{CaCO}_3$  เหลืออยู่ในวัสดุดูดซับ

ตารางที่ 4.1-2 แสดงผลการวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะของสารดูดซับเมื่อใช้เทคนิค BET เมื่อให้ความร้อนแก่เปลือกหอยนางรมที่อุณหภูมิเดียวกัน (700°C) ภายใต้บรรยากาศที่ไม่มีน้ำ การใช้อากาศจะเพิ่มพื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับได้มากกว่าการใช้ไนโตรเจน โดย OS-treated, air/700°C มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าพื้นที่ผิวจำเพาะของ OS-treated,  $\text{N}_2$ /700°C เกิน 2 เท่า และเมื่อผสมไอน้ำลงไปด้วยจะทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุดูดซับที่ได้มีค่ามากขึ้น โดย OS-treated, dried  $\text{N}_2$ /700°C มีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยที่สุด และ OS-treated, wet  $\text{N}_2$ /700°C มีพื้นที่ผิวจำเพาะมากที่สุด รูปที่ 4.1-2 แสดงลักษณะพื้นผิวทางกายภาพของอนุภาคเปลือกหอยนางรมที่ให้ความร้อนในบรรยากาศของอากาศและไนโตรเจน จะเห็นว่าชนิดของแก๊สที่ใช้มีผลทำให้ขนาดอนุภาคของสารดูดซับที่ได้แตกต่างกัน โดยเมื่อใช้อากาศอนุภาคจะยังคงมีขนาดใหญ่กว่าเมื่อใช้ไนโตรเจน จากผล BET และ SEM สรุปได้ว่าการใช้อากาศจะได้สารดูดซับที่มีความพรุนมากกว่าการใช้ไนโตรเจน โดยขนาดของรูพรุนภายในเฉลี่ยเมื่อใช้อากาศมีขนาดเล็กกว่าเมื่อใช้ไนโตรเจน ดังนั้นตัวดูดซับที่เตรียมโดยใช้อากาศจึงมีข้อจำกัดด้านการแพร่ภายในอนุภาคมากกว่าตัวดูดซับที่เตรียมโดยใช้ไนโตรเจน

ตารางที่ 4.1-1 องค์ประกอบของสารดูดซับซึ่งวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF

สารดูดซับ	ปริมาณของสารองค์ประกอบ (%wt)								
	$\text{CaCO}_3$	$\text{CaO}$	$\text{MgO}$	$\text{SiO}_2$	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	$\text{SrO}$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{CuO}$	Others
OS	93.300	-	1.270	1.910	0.622	0.307	0.839	0.487	1.752
OS-treated, air/700°C	-	97.000	0.917	0.588	0.252	0.244	0.235	0.232	0.532
OS-treated, $\text{N}_2$ /700°C	-	95.700	1.280	0.804	0.341	0.246	0.309	0.277	1.043

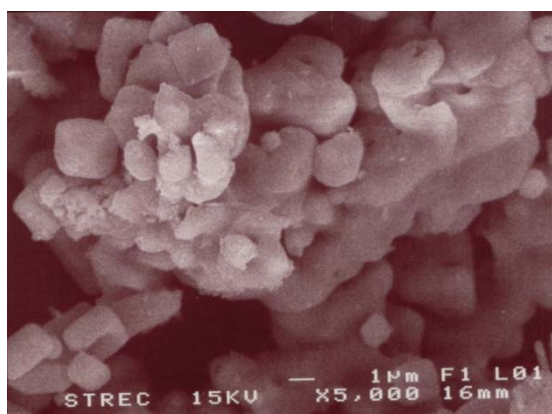


รูปที่ 4.1-1 สเปกตรัม XRD ของ (a) เปลือกหอยนางรมสด (b) เปลือกหอยนางรมที่ผ่านการให้ความร้อนที่ 700°C ในอากาศ

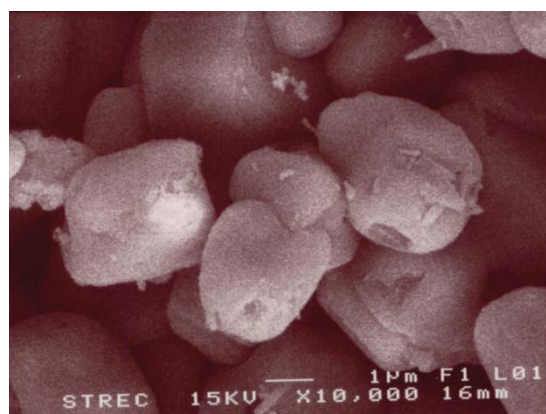


ตารางที่ 4.1-2 พื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุดูดซับที่ได้เมื่อให้ความร้อนเปลือกหอยนางรมที่ 700°C ภายใต้บรรยากาศของแก๊สพาชนิดต่างๆ

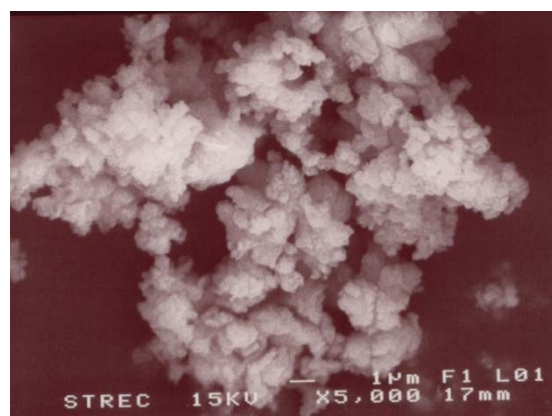
วิธีเตรียมวัสดุดูดซับจาก OS	Surface area (m <sup>2</sup> /g)
OS-treated, dried air/700°C	5.85
OS-treated, dried N <sub>2</sub> /700°C	2.39
OS-treated, wet N <sub>2</sub> /700°C	14.79



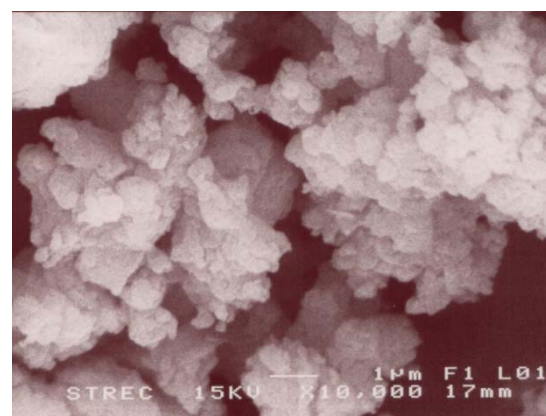
(a)



(b)



(c)



(d)

รูปที่ 4.1-2 ภาพถ่าย SEM ของเปลือกหอยนางรมที่ผ่านการให้ความร้อนที่ 700°C นาน 6 ชั่วโมง ในบรรยากาศของ (a, b) อากาศ และ (c, d) ไนโตรเจน

## 4.2 การสร้างเครื่องกรองน้ำขนาดเล็กสำหรับกำจัดโลหะหนักเพื่อใช้ในครัวเรือน

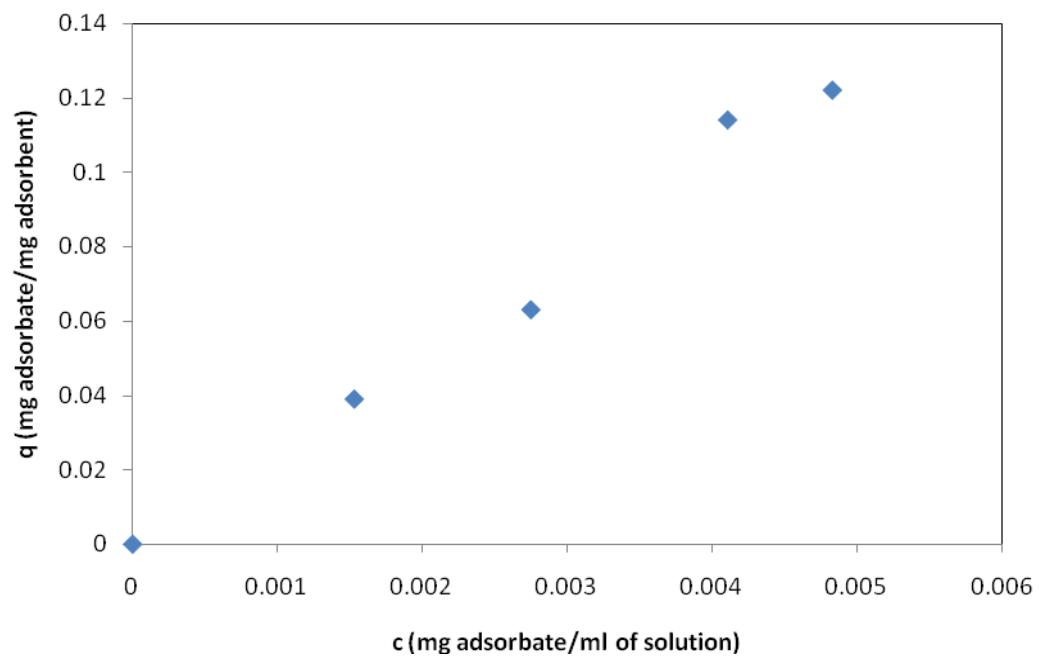
### 4.2.1 การทดลองแบบกะ

#### 4.2.1.1 การดูดซับไอออนตะกั่ว

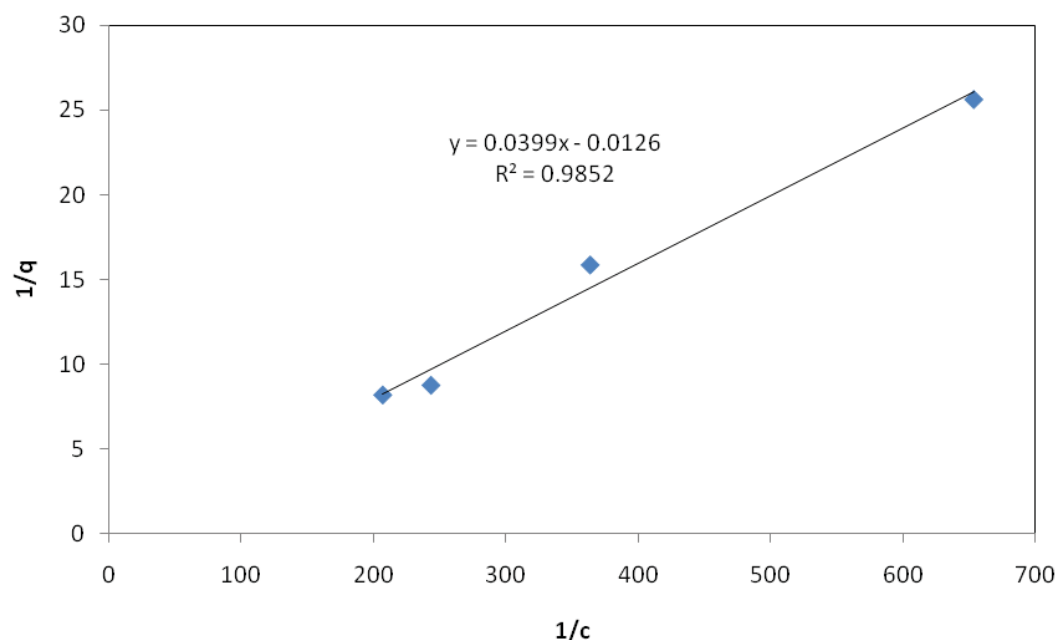
รูปที่ 4.2-1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายตะกั่วที่สมดุล (C) กับปริมาณของไอออนตะกั่วที่ถูกดูดซับ (q) เนื่องจากความสัมพันธ์ไอโซเทอร์มที่ได้ไม่ชัดเจนว่าเป็นการดูดซับแบบใด สามารถอธิบายได้ทั้งความสัมพันธ์แบบแลงเมียร์ (Langmuir) และแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich) จึงนำค่า q และค่า C ที่วัดได้ไปพลอตกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นตามรูปแบบของการดูดซับแลงเมียร์ (รูปที่ 4.2-2) และการดูดซับฟรอนด์ลิช (รูปที่ 4.2-3) จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดลองและค่าทางทฤษฎีพบว่าเมื่อพิจารณาว่าเป็นการดูดซับแบบแลงเมียร์จะได้ค่า  $R^2$  (coefficient of determination) เท่ากับ 0.9852 ในขณะที่เมื่อพิจารณาว่าเป็นการดูดซับแบบฟรอนด์ลิชจะได้ค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.9803

ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวจึงสรุปได้ว่าแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์และแบบจำลองการดูดซับแบบฟรอนด์ลิชสามารถใช้ทำนายการดูดซับของไอออนตะกั่วด้วยตัวดูดซับ (OS-treated, air/700°C) ได้ใกล้เคียงกัน แต่แบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์สามารถทำนายได้แม่นยำกว่าเล็กน้อย โดยมีพารามิเตอร์ K และ  $q_0$  เท่ากับ 934 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 23,474 มิลลิกรัมตะกั่วต่อกรัมตัวดูดซับ ตามลำดับ

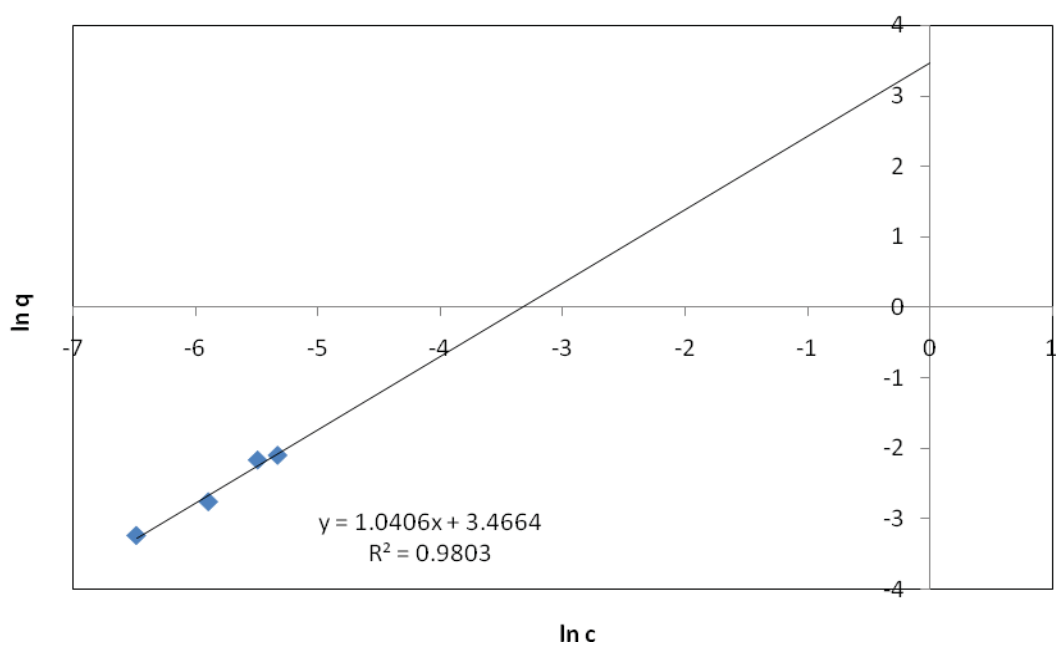
ตารางที่ 4.2-1 แสดงการดูดซับตะกั่วด้วยสารดูดซับที่สังเคราะห์ในงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับสารดูดซับชนิดต่างๆ ที่รายงานในงานวิจัยอื่น จะเห็นว่าพฤติกรรมของการดูดซับตะกั่วด้วยสารดูดซับชนิดต่างๆ สามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ โดยสารดูดซับ OS-treated, air/700°C ที่สังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรมในงานวิจัยนี้ความจุของตัวดูดซับ ( $q_0$ ) สูงที่สุด อย่างไรก็ตามเมื่อนำค่า K และค่า  $q_0$  จากตารางที่ 4.2-1 มาใช้คำนวณค่า q และที่ c ต่างๆ ด้วยแบบจำลองแลงเมียร์ (รูปที่ 4.2-4) ปรากฏว่า Dolomite ในงานวิจัยที่ [1] ดูดซับตะกั่วได้ดีกว่า OS-treated, air/700°C มากในช่วงความเข้มข้นที่ทำการทดสอบ ทั้งนี้เนื่องมาจากแม้ว่าค่า  $q_0$  ของ OS-treated, air/700°C จะสูงกว่าค่า  $q_0$  ของ Dolomite แต่ค่า K ของ OS-treated, air/700°C ก็สูงกว่าค่า K ของ Dolomite มากเช่นกัน



รูปที่ 4.2-1 ไอโซเทอร์มการดูดซับของตะกั่ว (อุณหภูมิ 25°C)



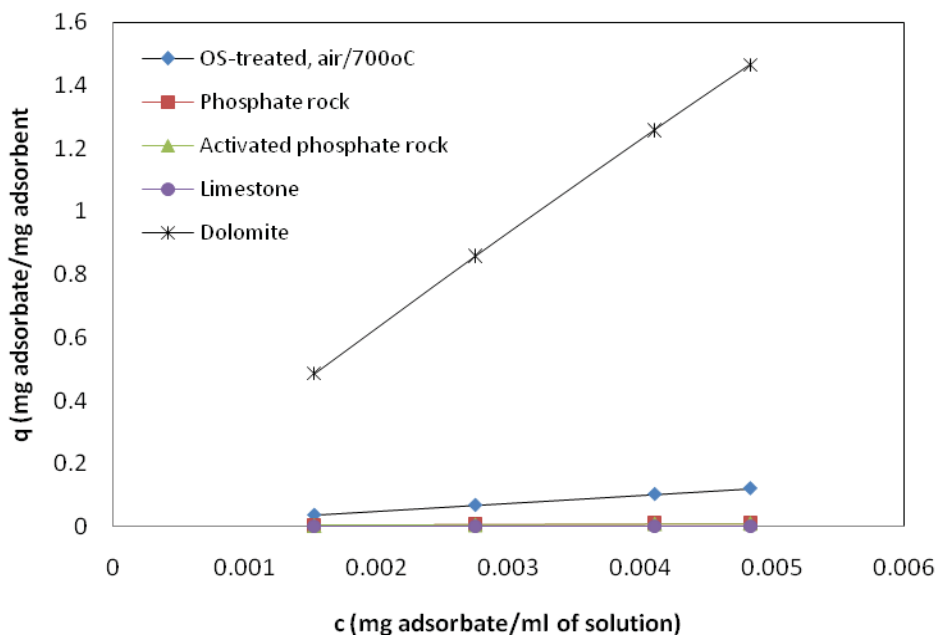
รูปที่ 4.2-2 ความสัมพันธ์เชิงเส้นของการดูดซับตะกั่วตามรูปแบบแลงเมียร์ (อุณหภูมิ 25°C)



รูปที่ 4.2-3 ความสัมพันธ์เชิงเส้นของการดูดซับตะกั่วตามรูปแบบฟรอนดลิช (อุณหภูมิ 25°C)

ตารางที่ 4.2-1 การดูดซับตะกั่วด้วยสารดูดซับชนิดต่างๆ

ชนิดสารดูดซับ	อ้างอิง	รูปแบบไอโซเทอรัม	$R^2$	$q_0$ (มก./ก.ตัวดูดซับ)	K (มก./ล.)	n	$K_f$ (มล./มก.) <sup>1/n</sup>
OS-treated, air/700°C	งานวิจัยนี้	แลงเมียร์	0.99	23,474	934	-	-
Dolomite	[1]	แลงเมียร์	0.97	21.76	0.067	-	-
Phosphate rock	[2]	แลงเมียร์	0.99	12.78	5.88	-	-
Activated phosphate rock	[2]	แลงเมียร์	0.99	15.47	5.26	-	-
		ฟรอนดลิช	0.99	-	-	2.63	2.66
Limestone	[3]	แลงเมียร์	0.96	0.017	0.5	-	-



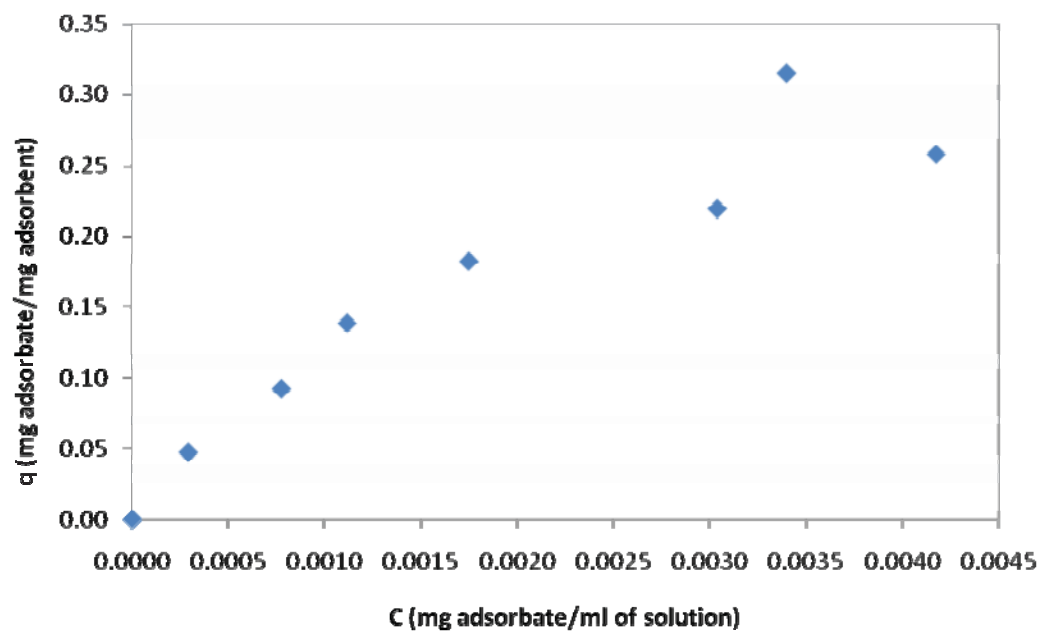
รูปที่ 4.2-4 ไอโซเทอร์มการดูดซับของตะกั่วของสารดูดซับชนิดต่างๆ ซึ่งคำนวณจากแบบจำลองแลงเมียร์โดยใช้ค่า K และ ค่า  $q_0$  จากตารางที่ 4.2-1 (Phosphate rock, Activated phosphate rock และ Limestone มีปริมาณการดูดซับใกล้เคียงกันจนแทบไม่เห็นความแตกต่าง)

#### 4.2.1.2 การดูดซับไอออนของแคลเซียม

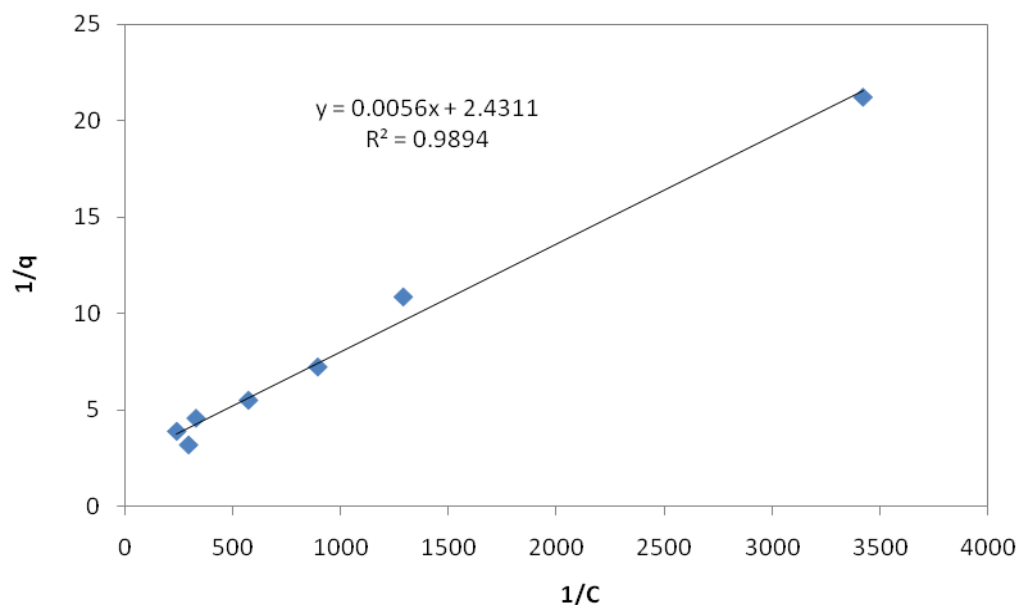
รูปที่ 4.2-5 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายแคลเซียมที่สมดุล (C) กับปริมาณของไอออนแคลเซียมที่ถูกดูดซับ (q) เนื่องจากความสัมพันธ์ไอโซเทอร์มที่ได้ไม่ชัดเจนว่าเป็นการดูดซับแบบใด สามารถอธิบายได้ทั้งความสัมพันธ์แบบแลงเมียร์ (Langmuir) และแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich) จึงนำค่า q และค่า C ที่ได้ไปพลอตกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นตามรูปแบบการดูดซับแบบแลงเมียร์ (รูปที่ 4.2-6) และการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช (รูปที่ 4.2-7) จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดลองและค่าทางทฤษฎีพบว่าเมื่อพิจารณาว่าเป็นการดูดซับแบบแลงเมียร์จะได้ค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.9894 ในขณะที่เมื่อพิจารณาว่าเป็นการดูดซับแบบฟรอนด์ลิชจะได้ค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.9637

ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวจึงสรุปได้ว่าแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์และแบบจำลองการดูดซับแบบฟรอนด์ลิชสามารถใช้ทำนายการดูดซับของไอออนแคลเซียมด้วยตัวดูดซับ (OS-treated, air/700°C) ได้ใกล้เคียงกัน แต่แบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์สามารถทำนายได้แม่นยำกว่าเล็กน้อย โดยมีพารามิเตอร์ K และ  $q_0$  เท่ากับ 2.3 มิลลิกรัมต่อลิตร และ 410 มิลลิกรัมแคลเซียมต่อกรัมตัวดูดซับ ตามลำดับ

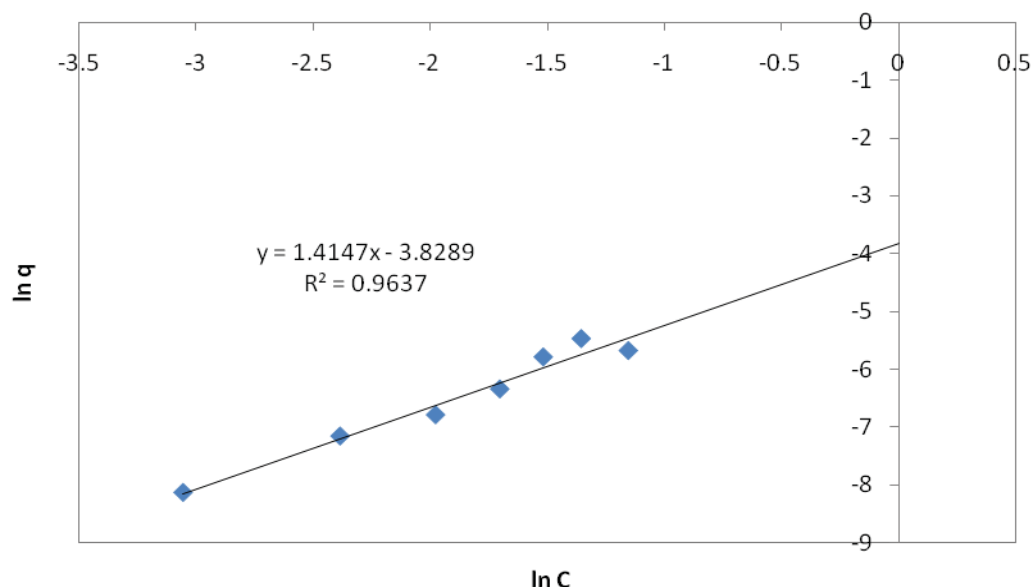
ตารางที่ 4.2-2 แสดงการดูดซับแคลเซียมด้วยสารดูดซับที่สังเคราะห์ในงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับสารดูดซับชนิดต่างๆ ที่รายงานในงานวิจัยอื่น จะเห็นว่าพฤติกรรมดูดซับแคลเซียมด้วยสารดูดซับทุกชนิดสามารถอธิบายได้ด้วยแบบจำลองไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ โดยสารดูดซับ OS-treated, air/700°C มีความสามารถในการดูดซับแคลเซียมดีที่สุด



รูปที่ 4.2-5 ไอโซเทอร์มการดูดซับของแคดเมียม (อุณหภูมิ 25°C)



รูปที่ 4.2-6 ความสัมพันธ์เชิงเส้นของการดูดซับแคดเมียมตามรูปแบบแลงเมียร์ (อุณหภูมิ 25°C)



รูปที่ 4.2-7 ความสัมพันธ์เชิงเส้นของการดูดซับแคดเมียมตามรูปแบบฟรอนดลิช (อุณหภูมิ 25°C)

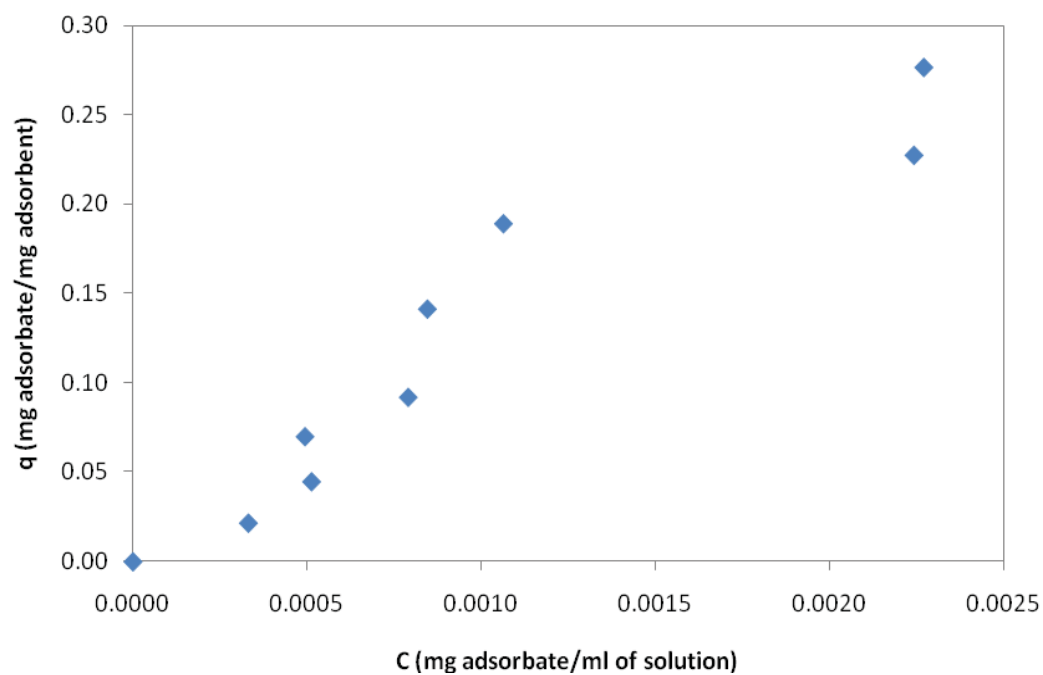
ตารางที่ 4.2-2 การดูดซับแคดเมียมด้วยสารดูดซับชนิดต่างๆ

ชนิดสารดูดซับ	อ้างอิง	รูปแบบ ไอโซเทอร์ม	$R^2$	$q_0$ (มก./ก.ตัวดูดซับ)	$K$ (มก./ล.)	$n$	$K_f$ (มล./มก.) <sup>1/n</sup>
OS-treated, air/700°C	งานวิจัยนี้	แลงเมียร์	0.99	410	2.3	-	-
Phosphate rock	[2]	แลงเมียร์	0.98	10.46	21.28	-	-
Activated phosphate rock	[2]	แลงเมียร์	0.98	13.56	25.00	-	-
Limestone	[3]	แลงเมียร์	0.97	0.018	0.41	-	-

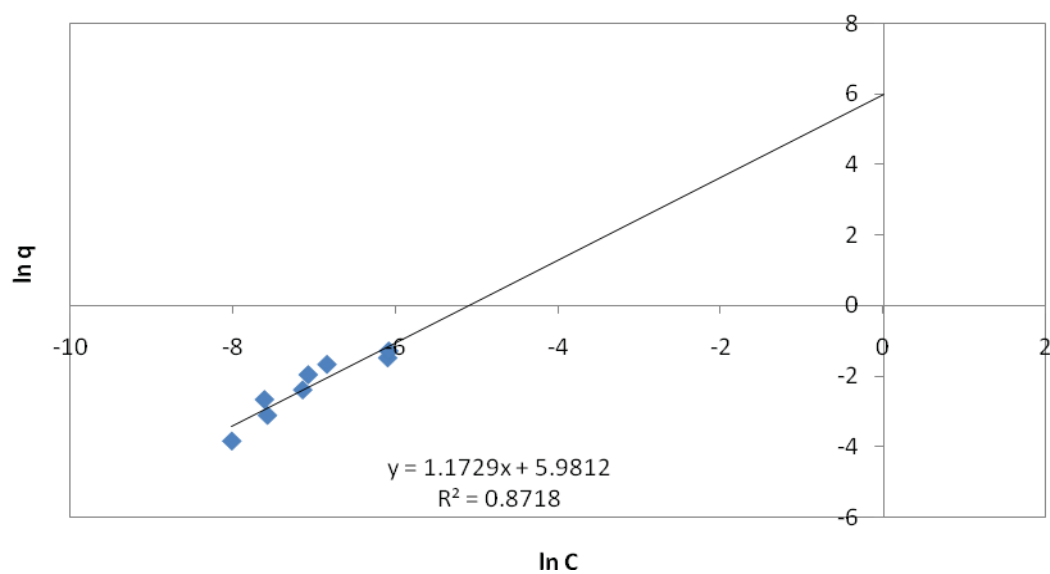
#### 4.2.1.3 การดูดซับไอออนของสังกะสี

รูปที่ 4.2-8 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายสังกะสีที่สมดุล ( $C$ ) กับปริมาณของไอออนสังกะสีที่ถูกดูดซับ ( $q$ ) จากรูปจะเห็นว่าความสัมพันธ์ไอโซเทอร์มมีแนวโน้มที่สอดคล้องกับไอโซเทอร์มแบบฟรอนดลิช และเมื่อนำค่า  $q$  และค่า  $C$  ที่วัดได้ไปพลอตกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นตามรูปแบบของการดูดซับฟรอนดลิชจะได้ดังรูปที่ 4.2-9 จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดลองและค่าทางทฤษฎีพบว่า มีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.8718 และพารามิเตอร์  $K_f$  และ  $n$  มีค่าเท่ากับ 395.84 (มิลลิลิตรต่อมิลลิกรัม)<sup>1/0.85</sup> และ 0.85 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2-3 แสดงการดูดซับสังกะสีด้วยสารดูดซับที่สังเคราะห์ในงานวิจัยนี้เปรียบเทียบกับสารดูดซับชนิดต่างๆ ที่รายงานในงานวิจัยอื่น เมื่อพิจารณาค่าของพารามิเตอร์  $K_f$  และ  $n$  ในแบบจำลองฟรอนดลิช ( $q = K_f C^{1/n}$ ) จะพบว่าสารดูดซับที่มีค่า  $K_f$  สูงและค่า  $n$  ต่ำจะความสามารถในการดูดซับสูง ดังนั้นจึงได้ทำการพลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า  $q$  และ ค่า  $c$  ซึ่งคำนวณจากแบบจำลองฟรอนดลิชโดยใช้ค่า  $K_f$  และค่า  $n$  จากตารางที่ 4.2-3 โดยกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 4.2-10 เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับสังกะสีของสารดูดซับที่สังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรมในงานวิจัยนี้กับสารดูดซับที่ใช้ในงานวิจัยของคณะอื่นจะเห็นชัดเจนว่าสารดูดซับ OS-treated, air/700°C ที่สังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรมในงานวิจัยนี้สามารถดูดซับสังกะสีได้ดีกว่าสารดูดซับชนิดอื่นๆ เป็นอย่างมาก ในช่วงความเข้มข้นที่ทำการศึกษา



รูปที่ 4.2-8 ไอโซเทอรั่มการดูดซับของสังกะสี (อุณหภูมิ 25°C)

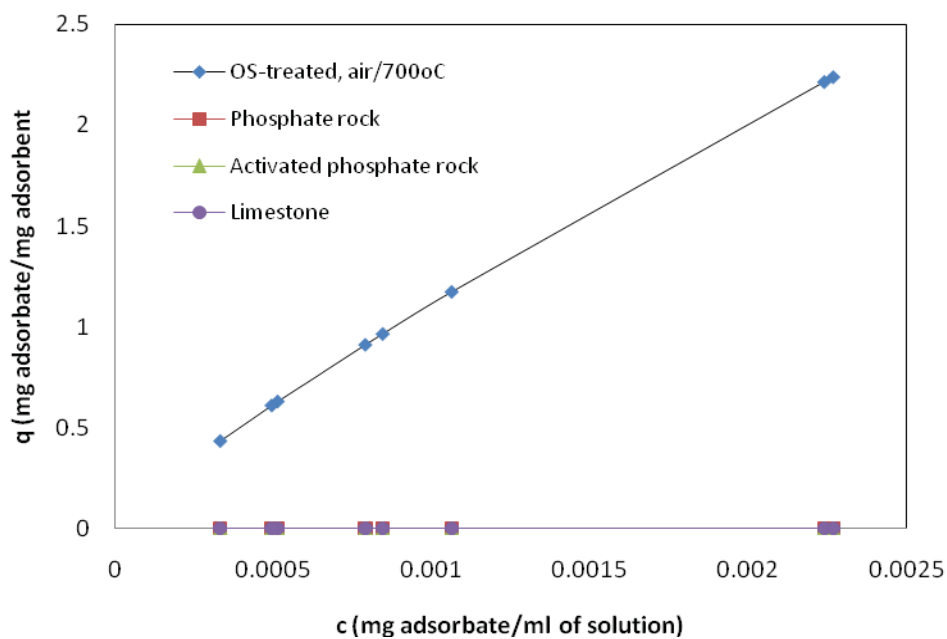


รูปที่ 4.2-9 ความสัมพันธ์เชิงเส้นของการดูดซับสังกะสีตามรูปแบบแลงเมียร์ (อุณหภูมิ 25°C)



ตารางที่ 4.2-3 การดูดซับสังกะสีด้วยสารดูดซับชนิดต่างๆ

ชนิดสารดูดซับ	อ้างอิง	รูปแบบไอโซเทอรัม	$R^2$	$q_0$ (มก./ก.ตัวดูดซับ)	K (มก./ล.)	n	$K_f$ (มล./มก.) <sup>1/n</sup>
OS-treated, air/700°C	งานวิจัยนี้	ฟรุนดลิช	0.87	-	-	0.85	395.84
Phosphate rock	[2]	แลงเมียร์	0.97	8.54	55.56	-	-
		ฟรุนดลิช	0.97	-	-	1.59	0.24
Activated phosphate rock	[2]	แลงเมียร์	0.97	13.56	25.00	-	-
		ฟรุนดลิช	0.97	-	-	1.54	0.31
Limestone	[3]	แลงเมียร์	0.98	0.012	1.7	-	-
		ฟรุนดลิช	0.97	-	-	0.79	0.013



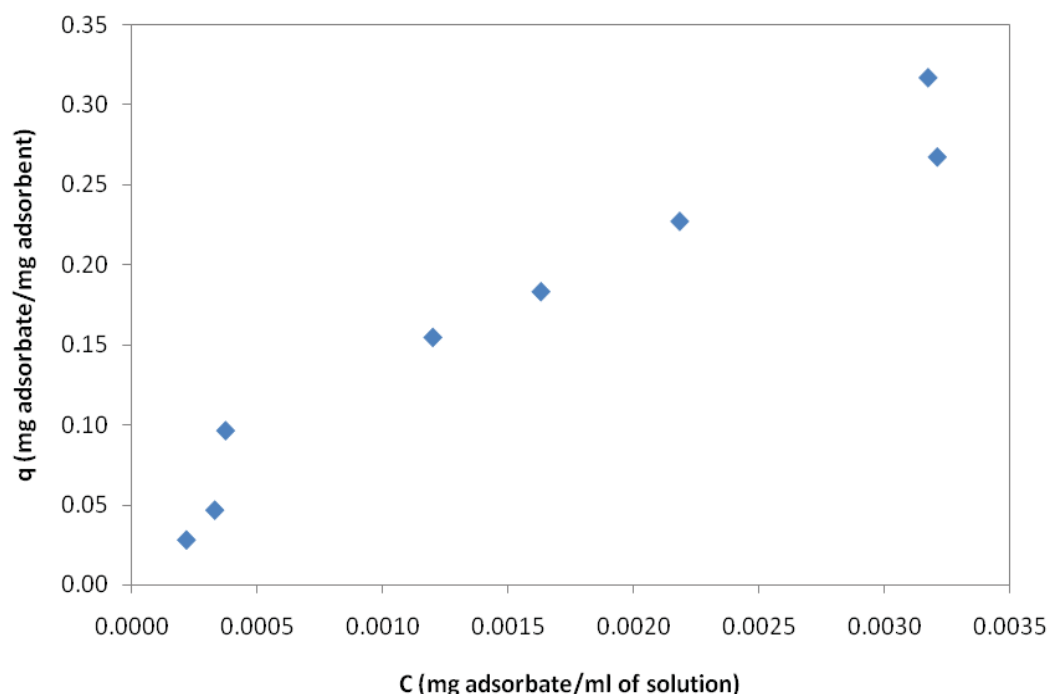
รูปที่ 4.2-10 ไอโซเทอรัมการดูดซับของสังกะสีของสารดูดซับชนิดต่างๆ ซึ่งคำนวณจากแบบจำลองฟรุนดลิช โดยใช้ค่า  $K_f$  และ ค่า n จากตารางที่ 4.2-3 (Phosphate rock, Activated phosphate rock และ Limestone มีปริมาณการดูดซับใกล้เคียงกันจนแทบไม่เห็นความแตกต่าง)

#### 4.2.1.4 การดูดซับไอออนของเหล็ก

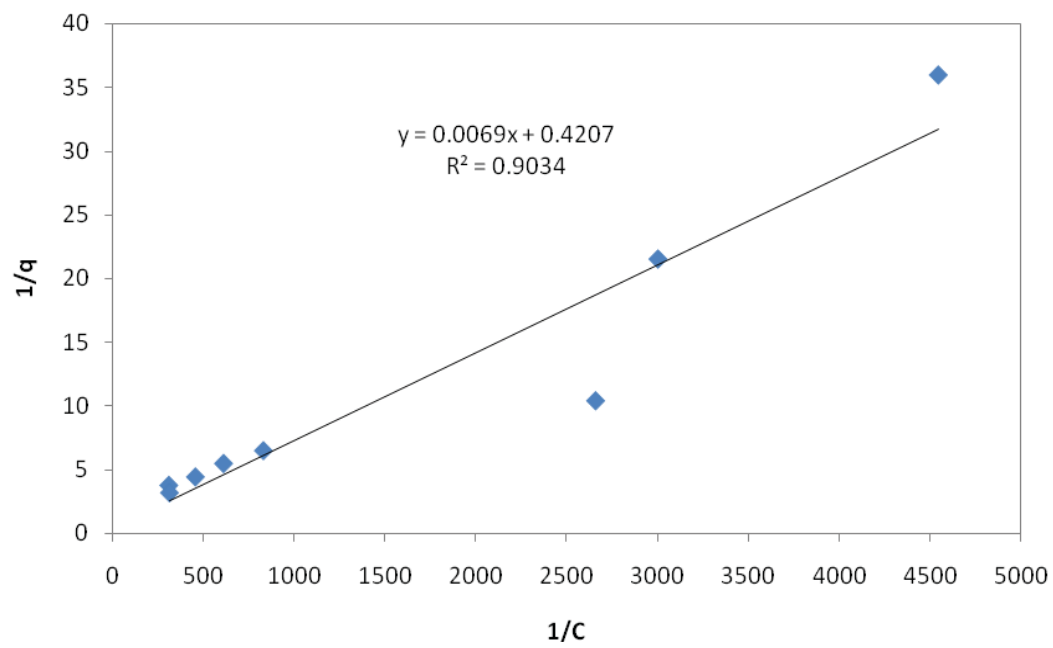
รูปที่ 4.2-11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายเหล็กที่สมดุล (C) กับปริมาณของไอออนเหล็กที่ถูกดูดซับ (q) เนื่องจากความสัมพันธ์ไอโซเทอร์มที่ได้ไม่ชัดเจนว่าเป็นการดูดซับแบบใด สามารถอธิบายได้ทั้งความสัมพันธ์แบบแลงเมียร์ (Langmuir) และแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich) จึงนำค่า q และ C ที่วัดได้ไปพลอตกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นตามรูปแบบของการดูดซับแลงเมียร์และการดูดซับฟรอนด์ลิช ดังแสดงในรูปที่ 4.2-12 และ 4.2-13 ตามลำดับ จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดลองและค่าทางทฤษฎีพบว่าเมื่อพิจารณาว่าเป็นการดูดซับแบบแลงเมียร์จะได้ค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.9034 ในขณะที่เมื่อพิจารณาว่าเป็นการดูดซับแบบฟรอนด์ลิชจะได้ค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.9243

ผลการวิเคราะห์ดังกล่าวสรุปได้ว่าแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์และแบบฟรอนด์ลิชสามารถใช้ทำนายการดูดซับของไอออนเหล็กด้วยตัวดูดซับ (OS-treated, air/700°C) ได้ใกล้เคียงกัน แต่แบบจำลองการดูดซับของฟรอนด์ลิชสามารถทำนายได้แม่นยำกว่า โดยมีพารามิเตอร์  $K_f$  และ n เท่ากับ 27.41 (มิลลิกรัมต่อมิลลิกรัม)<sup>1/1.28</sup> และ 1.28 ตามลำดับ

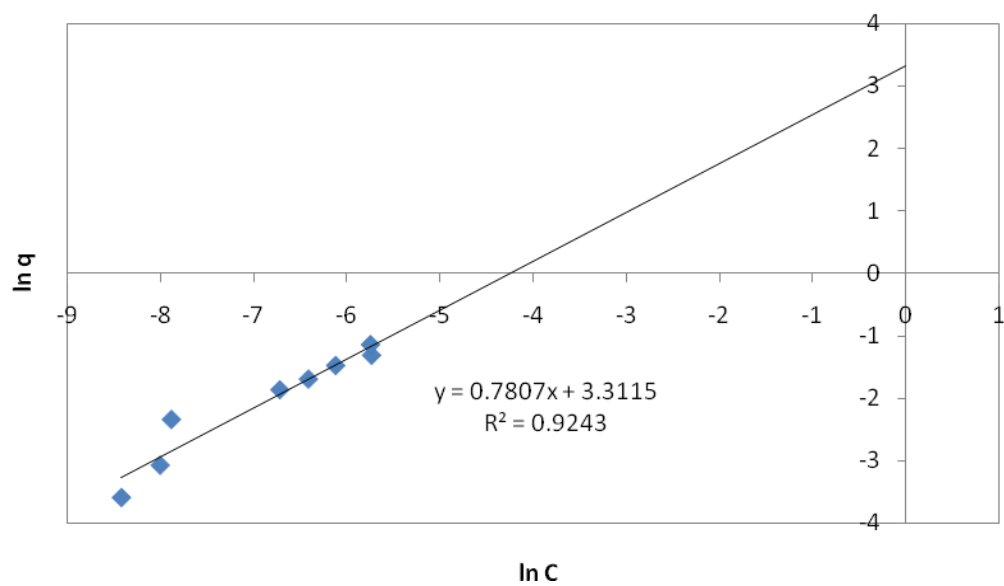
ตารางที่ 4.2-4 แสดงข้อมูลเปรียบเทียบการดูดซับเหล็กด้วย OS-treated, air/700°C ที่สังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรมในงานวิจัยนี้ กับ Activated carbon จากงานวิจัยของคณะอื่น [4] ซึ่งจากการเปรียบเทียบพบว่ายังไม่สามารถสรุปได้แน่ชัดว่าสารดูดซับชนิดใดสามารถดูดซับเหล็กได้ดีกว่ากัน เนื่องจากเมื่อพิจารณาจากค่า  $K_f$  นั้น พบว่า OS-treated, air/700°C น่าจะดูดซับเหล็กได้ดีกว่า Activated carbon แต่เมื่อพิจารณาจากค่า n แล้ว พบว่าผลที่ได้เป็นไปในทางกลับกัน จึงสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า q และ ค่า c ที่คำนวณโดยใช้แบบจำลองฟรอนด์ลิชที่มีค่า  $K_f$  และค่า n ดังแสดงในตารางที่ 4.2-4 ได้ กราฟความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 4.2-14 จะเห็นได้ชัดเจนว่าความสามารถในการดูดซับเหล็กของสารดูดซับ OS-treated, air/700°C ที่สังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรมในงานวิจัยนี้สูงกว่าความสามารถในการดูดซับเหล็กของ Activated carbon ที่ใช้ในงานวิจัยที่อ้างอิงเป็นอย่างมาก



รูปที่ 4.2-11 ไอโซเทอร์มการดูดซับของเหล็ก (อุณหภูมิ 25°C)



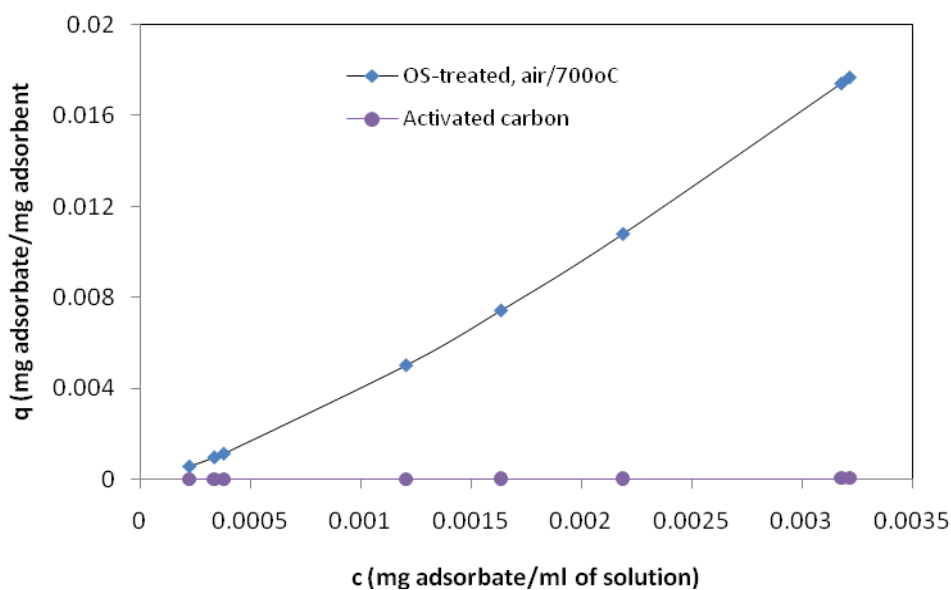
รูปที่ 4.2-12 ความสัมพันธ์เชิงเส้นของการดูดซับเหล็กตามรูปแบบแลงเมียร์ (อุณหภูมิ 25°C)



รูปที่ 4.2-13 ความสัมพันธ์เชิงเส้นของการดูดซับเหล็กตามรูปแบบฟรุนดลิช (อุณหภูมิ 25°C)

ตารางที่ 4.2-4 การดูดซับเหล็กด้วยสารดูดซับชนิดต่างๆ

ชนิดสารดูดซับ	อ้างอิง	รูปแบบไอโซเทอรัม	$R^2$	$q_0$ (มก./ก.ตัวดูดซับ)	K (มก./ล.)	n	$K_f$ (มล./มก.) <sup>1/n</sup>
OS-treated, air/700°C	งานวิจัยนี้	ฟรอนด์ลิช	0.92	-	-	1.28	27.41
Activated carbon	[4]	แลงเมียร์	0.98	81.89	$6.25 \times 10^4$	-	-
		ฟรอนด์ลิช	0.98	-	-	2.00	3.484



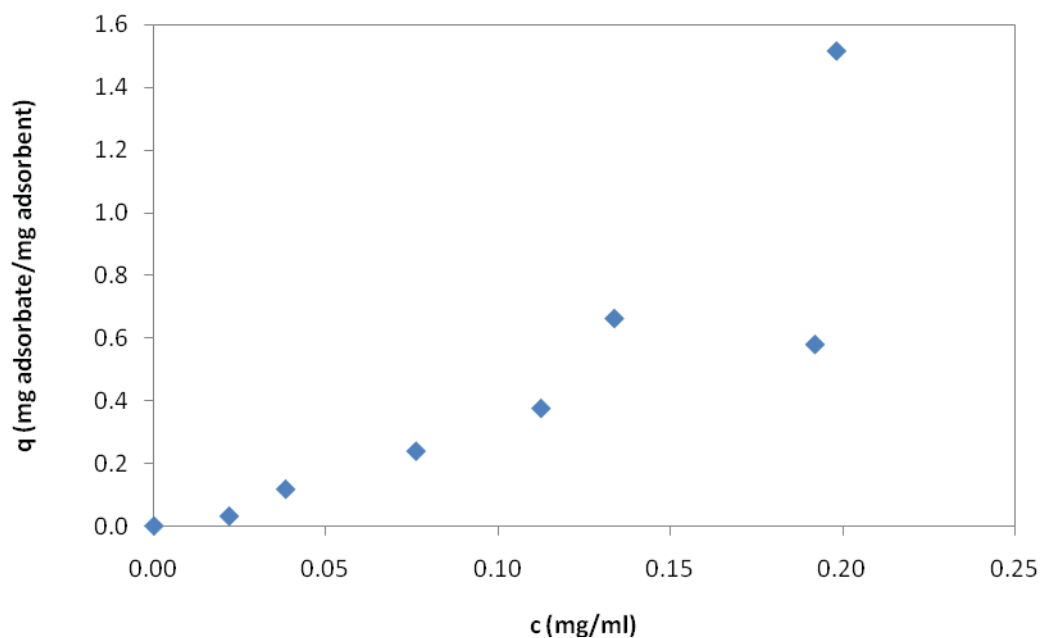
รูปที่ 4.2-14 ไอโซเทอรัมการดูดซับของเหล็กของสารดูดซับชนิดต่างๆ ซึ่งคำนวณจากแบบจำลองฟรอนด์ลิช โดยใช้ค่า  $K_f$  และค่า n จากตารางที่ 4.2-4

#### 4.2.1.5 การดูดซับไอออนของโครเมียม

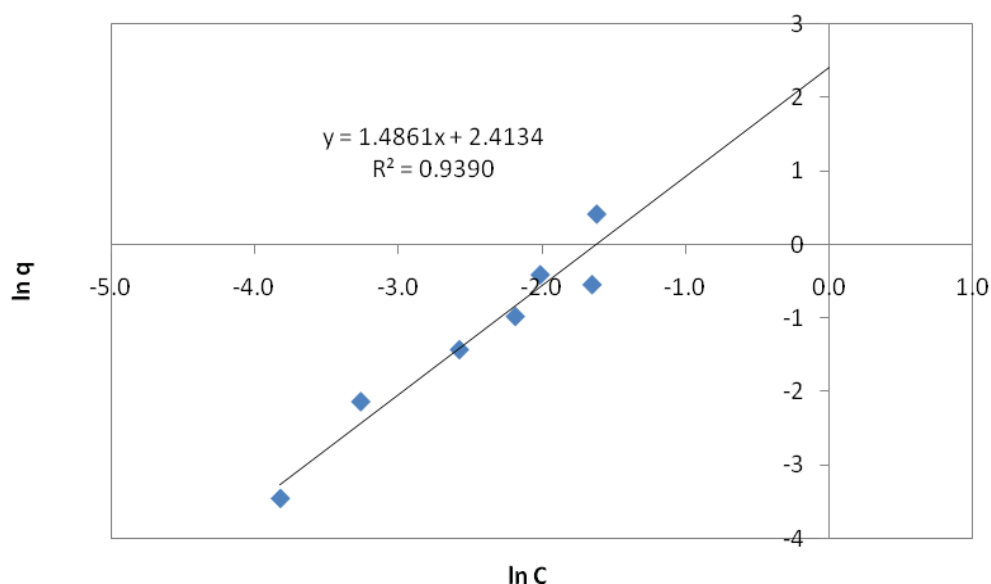
รูปที่ 4.2-15 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารละลายโครเมียมที่สมดุล (C) กับปริมาณของไอออนเหล็กที่ถูกดูดซับ (q) สามารถอธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์แบบฟรอนด์ลิช (Freundlich) เมื่อนำค่า q และ C ที่วัดได้ไปพลอตกราฟความสัมพันธ์เชิงเส้นตามรูปแบบของการดูดซับฟรอนด์ลิช (รูปที่ 4.2-16) มีค่าพารามิเตอร์  $K_f$  เท่ากับ 11.17 (มิลลิกรัมต่อมิลลิกรัม)<sup>1/0.67</sup> และมีค่า n เท่ากับ 0.67 เมื่อวิเคราะห์เปรียบเทียบผลการทดลองและค่าทางทฤษฎีพบว่าแบบจำลองที่ได้สามารถอธิบายพฤติกรรมของการดูดซับได้ดีพอควรโดยมีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.9243

ตารางที่ 4.2-5 แสดงข้อมูลเปรียบเทียบการดูดซับโครเมียมด้วย OS-treated, air/700°C ที่สังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรมในงานวิจัยนี้ กับ Limestone จากงานวิจัยของคณะอื่น [4] ซึ่งจากการเปรียบเทียบพบว่ายังไม่สามารถสรุปได้แน่ชัดว่าสารดูดซับชนิดใดสามารถดูดซับโครเมียมได้ดีกว่ากัน เนื่องจากเมื่อพิจารณาจากค่า  $K_f$  นั้น พบว่า OS-treated, air/700°C น่าจะดูดซับโครเมียมได้ดีกว่า Limestone แต่เมื่อพิจารณาจากค่า n แล้ว พบว่าผลที่ได้เป็นไปในทางกลับกัน ดังนั้นจึงได้ทำการพลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า q และ ค่า c ซึ่งคำนวณจากแบบจำลองฟรอนด์ลิชโดยใช้ค่า  $K_f$  และค่า n จากตารางที่

4.2-5 โดยกราฟความสัมพันธ์ดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 4.2-17 ซึ่งจากกราฟ เมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับโครเมียมของสารดูดซับที่สังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรมในงานวิจัยนี้กับสารดูดซับ Limestone ที่ใช้ในงานวิจัยของคณะอื่น สามารถกล่าวได้ว่าในช่วงความเข้มข้นที่ทำการศึกษา สารดูดซับ OS-treated, air/700°C ที่สังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรมจากงานวิจัยนี้สามารถดูดซับโครเมียมได้ดีกว่าสารดูดซับ Limestone ในงานวิจัยที่อ้างอิงเป็นอย่างมาก



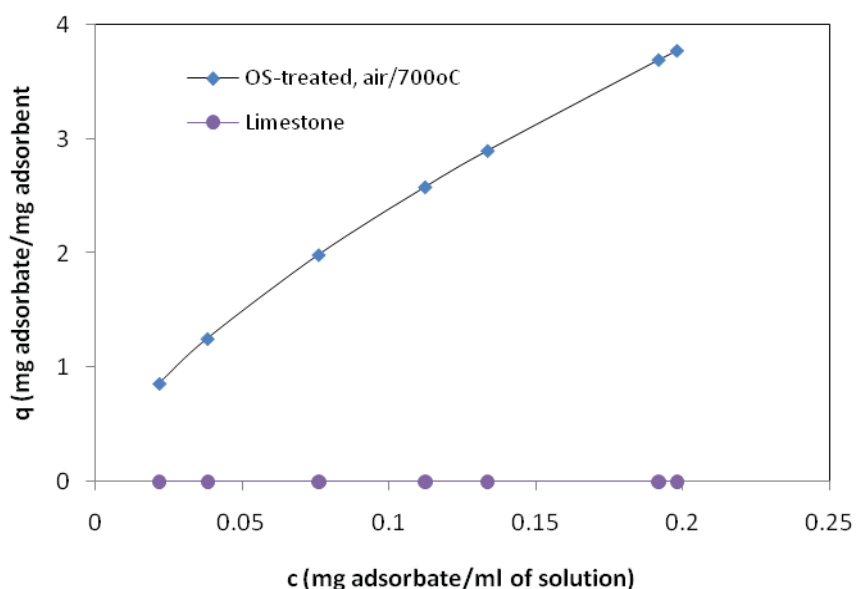
รูปที่ 4.2-15 ไอโซเทอรั่มการดูดซับของโครเมียม (อุณหภูมิ 25°C)



รูปที่ 4.2-16 ความสัมพันธ์เชิงเส้นของการดูดซับโครเมียมตามรูปแบบฟรอนดลิช (อุณหภูมิ 25°C)

ตารางที่ 4.2-5 การดูดซับโครเมียมด้วยสารดูดซับชนิดต่างๆ

ชนิดสารดูดซับ	อ้างอิง	รูปแบบไอโซเทอร์ม	$R^2$	$q_0$ (มก./ก.ตัวดูดซับ)	K (มก./ล.)	n	$K_f$ (มล./มก.) <sup>1/n</sup>
OS-treated, air/700°C	งานวิจัยนี้	ฟรอนดลิช	0.94	-	-	0.67	11.17
Limestone	[3]	แลงเมียร์	0.99	0.016	1.87	-	-
		ฟรอนดลิช	0.97	-	-	0.71	0.016



รูปที่ 4.2-17 ไอโซเทอร์มการดูดซับของโครเมียมของสารดูดซับชนิดต่างๆ ซึ่งคำนวณจากแบบจำลองฟรอนดลิช โดยใช้ค่า  $K_f$  และ ค่า  $n$  จากตารางที่ 4.2-5

#### 4.2.1.6 ไอโซเทอร์มการดูดซับของโลหะหนักชนิดต่างๆ

ตารางที่ 4.2-6 แสดงผลสรุปที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลการทดลองแบบกะที่อุณหภูมิ 25°C เพื่อกำหนดแบบจำลองไอโซเทอร์มสำหรับใช้อธิบายพฤติกรรมการดูดซับของไอออนโลหะหนักชนิดต่างๆ พร้อมค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง (การดูดซับแบบแลงเมียร์: ค่าคงที่สมดุล (K) และปริมาณการดูดซับอิ่มตัว ( $q_0$ ), การดูดซับแบบฟรอนดลิช: ค่าคงที่สมดุล ( $K_f$ ) และอันดับ (n)) และค่า  $R^2$  ซึ่งแสดงความน่าเชื่อถือของแบบจำลองที่นำเสนอ

สารดูดซับ (OS-treated, air/700°C) มีพฤติกรรมการดูดซับตะกั่วและแคดเมียมเป็นแบบแลงเมียร์โดยสามารถดูดซับตะกั่วได้ดีกว่าแคดเมียม และมีพฤติกรรมการดูดซับสังกะสี, เหล็ก และ โครเมียมเป็นแบบฟรอนดลิช โดยสามารถดูดซับสังกะสีได้ดีที่สุด รองลงมาคือ เหล็ก และ โครเมียม ตามลำดับ

ตารางที่ 4.2-6 รูปแบบไอโซเทอร์มที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับโลหะหนักชนิดต่างๆ ด้วยกระบวนการแบบกะ (อุณหภูมิ 25 °C)

โลหะหนัก	รูปแบบไอโซเทอร์ม	$q_0$ (มก./ก.ตัวดูดซับ)	n	$R^2$	K (มก./ล.)	$K_f$ (มล./มก.) <sup>1/n</sup>
ตะกั่ว	แลงเมียร์	23,474	-	0.9852	934	-
แคดเมียม	แลงเมียร์	410	-	0.9894	2.1	-
สังกะสี	ฟรุนดลิช	-	0.85	0.8718	-	395.84
เหล็ก	ฟรุนดลิช	-	1.28	0.9243	-	27.41
โครเมียม	ฟรุนดลิช	-	0.67	0.9390	-	11.17

#### 4.2.1.7 ประสิทธิภาพการดูดซับ

ตารางที่ 4.2-7 แสดงประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักชนิดต่างๆ ของสารดูดซับ OS-treated, air 700°C เมื่อทำการดูดซับแบบกะ โดยประสิทธิภาพการดูดซับแบบกะคำนวณตามสมการที่ (4.2-3)

$$\text{Efficiency} = \frac{C_i - C}{C_i} \times 100 \% \quad (4.2-3)$$

เมื่อ  $C_i$  คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนโลหะหนัก  
 $C$  คือ ความเข้มข้นของสารละลายที่สภาวะสมดุล

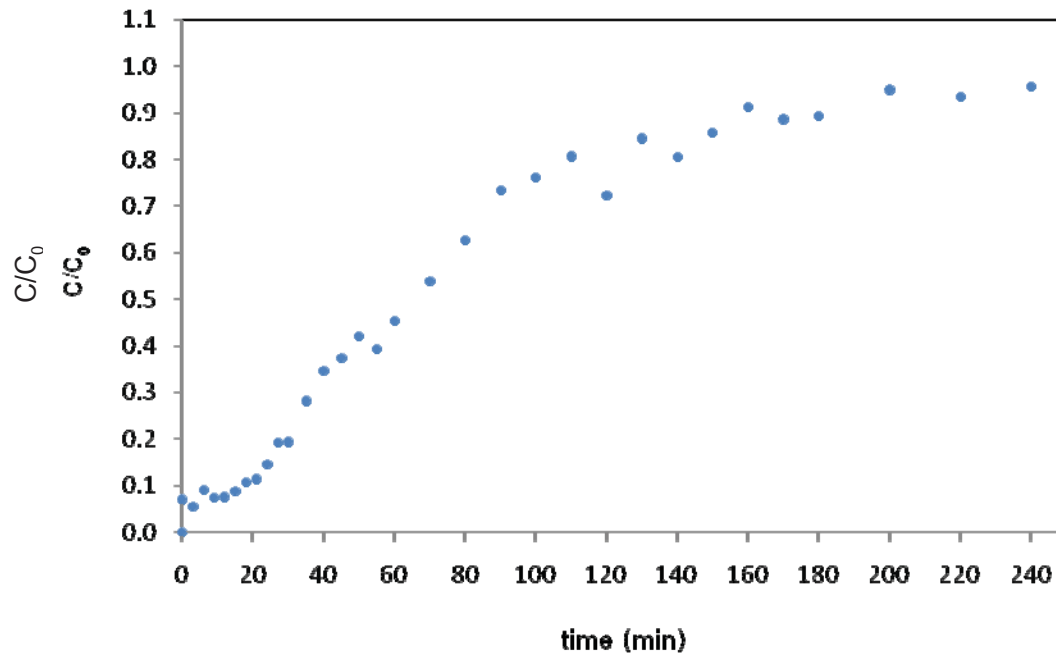
ตารางที่ 4.2-7 ประสิทธิภาพของการดูดซับแบบกะโดยเฉลี่ยของโลหะแต่ละชนิด

โลหะหนัก	ประสิทธิภาพการดูดซับแบบกะโดยเฉลี่ย (%)
ตะกั่ว	72.06
แคดเมียม	90.62
สังกะสี	91.82
เหล็ก	92.19
โครเมียม	24.30

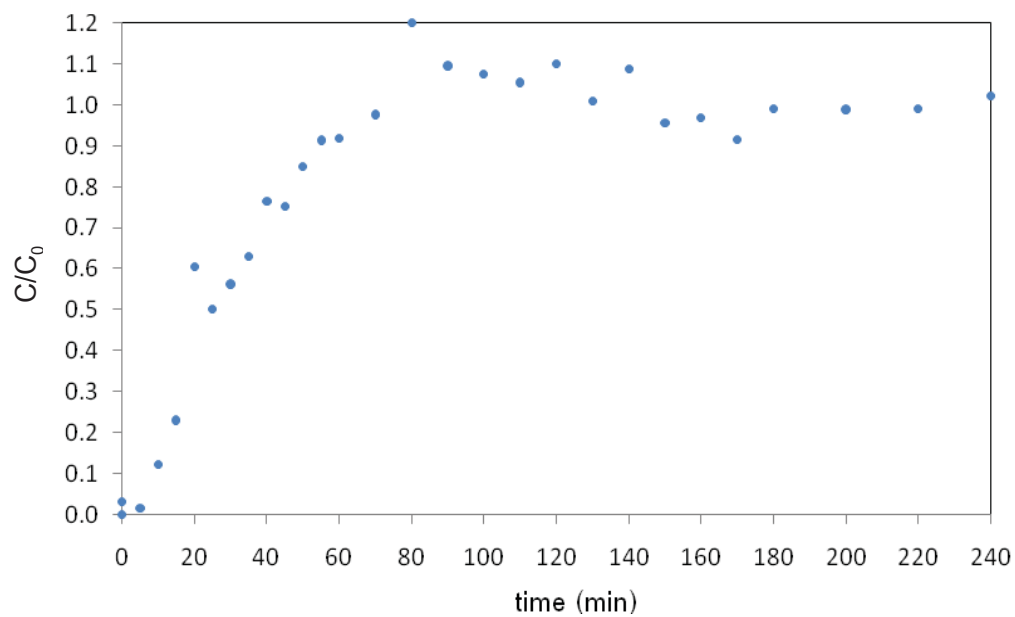
ข้อมูลในตารางที่ 4.2-7 แสดงให้เห็นว่าในการดูดซับแบบกะ OS-treated, air 700°C สามารถดูดซับเหล็ก สังกะสี และแคดเมียมได้ด้วยประสิทธิภาพที่ดีใกล้เคียงกันคือประมาณ 90% และสามารถดูดซับตะกั่วได้ในระดับรองลงมาคือ ที่ประสิทธิภาพการดูดซับประมาณ 72% และสามารถดูดซับโครเมียมได้ต่ำที่สุดคือ ที่ประสิทธิภาพการดูดซับเพียง 24%

#### 4.2.2 การทดลองแบบต่อเนื่อง

สำหรับการทดลองการดูดซับแบบต่อเนื่องจะวิเคราะห์หาความเร็วในการดูดซับดังนี้ คือ หาค่าความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีนที่ปากทางออกหลอดดูดซับที่เวลาต่างๆ (C) แล้วนำค่า C ที่ได้ไปเขียนกราฟเทียบกับเวลา (t) ได้กราฟเบรคทูร์ (breakthrough curve) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 4.2-18 ถึง 4.2-22

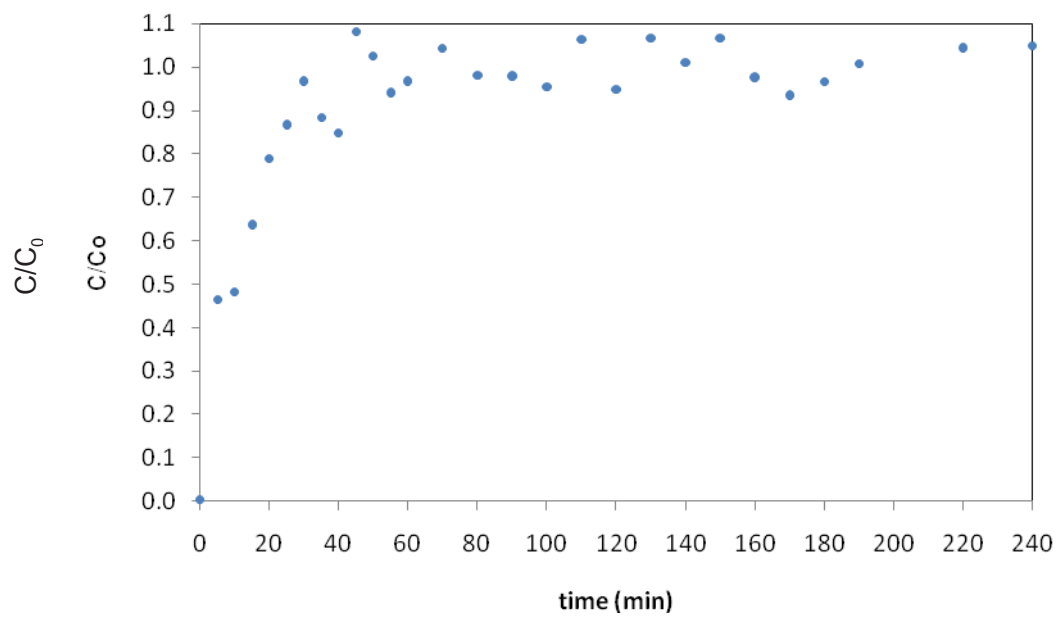


รูปที่ 4.2-18 กราฟเบรคทูร์ของการดูดซับไอโอดีนของตะกั่ว (อุณหภูมิ 25°C)

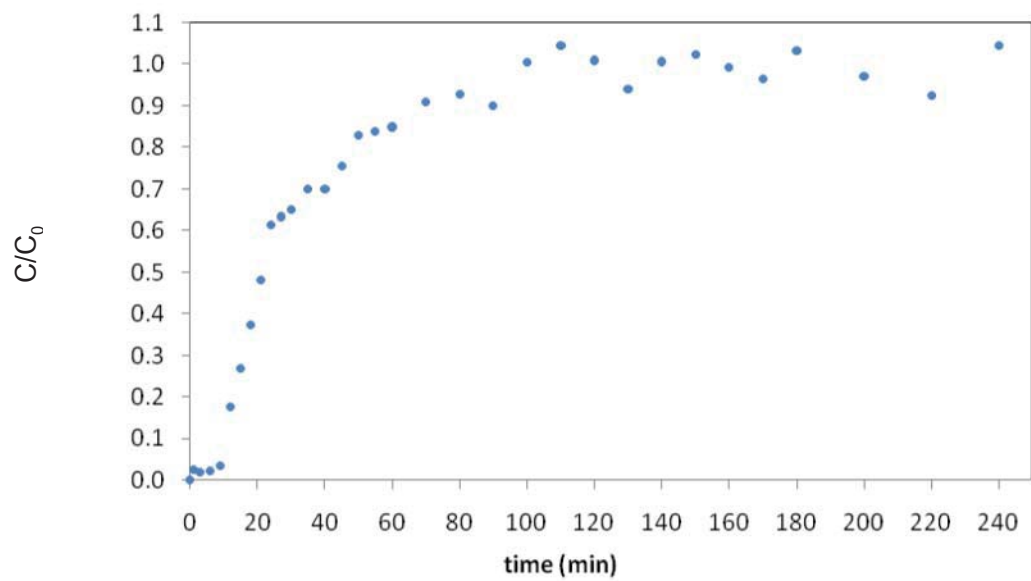


รูปที่ 4.2-19 กราฟเบรคทูร์ของการดูดซับไอโอดีนของแคดเมียม (อุณหภูมิ 25°C)

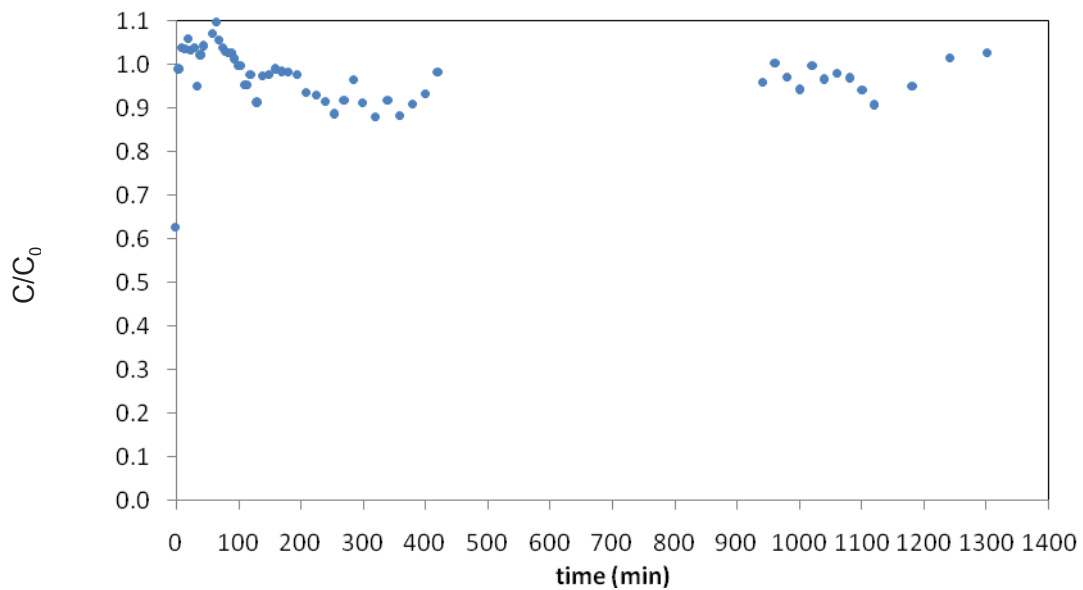




รูปที่ 4.2-20 กราฟเปอร์เซ็นต์ของการดูดซับไอออนของสังกะสี (อุณหภูมิ 25°C)



รูปที่ 4.2-21 กราฟเปอร์เซ็นต์ของการดูดซับไอออนของเหล็ก (อุณหภูมิ 25°C)



รูปที่ 4.2-22 กราฟการดูดซับไอออนของโครเมียมในการทดลองแบบต่อเนื่อง (อุณหภูมิ 25°C)

เราสามารถประเมินความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของสารดูดซับก่อนที่สารดูดซับจะเริ่มอิ่มตัวและไม่สามารถกำจัดโลหะหนักให้ได้ต่อไปจากกราฟเบรคทัวร์ของการดูดซับในรูปของปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของสารดูดซับ นับที่เวลานานที่สุดที่น้ำที่ปากทางออกของคอลัมน์ยังมีความเข้มข้นโลหะหนัก (C) ไม่เกินค่ามาตรฐานน้ำบริโภคตามที่กฎหมายกำหนด ตารางที่ 4.2-8 แสดงผลการประเมินที่ได้สำหรับโลหะหนักแต่ละชนิด โดย

$$C/C_0 = \frac{\text{ค่ามาตรฐานตามที่กฎหมายกำหนด}}{\text{ค่าความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียสมมติเริ่มต้น (6 มิลลิกรัมต่อลิตร)}} \quad (4.2-1)$$

และความสามารถในการดูดซับโลหะหนักคำนวณจากเวลาด้วยสมการที่ (4.2-2)

$$\text{ความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก} = C_0 \times \text{อัตราการป้อนสาร} \times \text{เวลา} \quad (4.2-2)$$

ตารางที่ 4.2-8 เวลาสูงสุดที่สารดูดซับบำบัดน้ำได้ตามมาตรฐานน้ำบริโภคที่กฎหมายกำหนดและความสามารถในการดูดซับโลหะหนักแต่ละชนิด

ชนิดโลหะหนัก	ค่ามาตรฐานตามกฎหมาย (มก./ลิตร)	C/C <sub>0</sub> (-)	เวลา (นาที)	ความสามารถในการดูดซับโลหะหนัก (มิลลิกรัมโลหะหนัก/กรัมตัวดูดซับ)
ตะกั่ว	< 0.05	0.008	*	-
แคดเมียม	< 0.01	0.002	5	2.9
สังกะสี	< 5	0.8	*	-
เหล็ก	< 0.5	0.08	10	3.6
โครเมียม	< 0.05	0.008	-	-

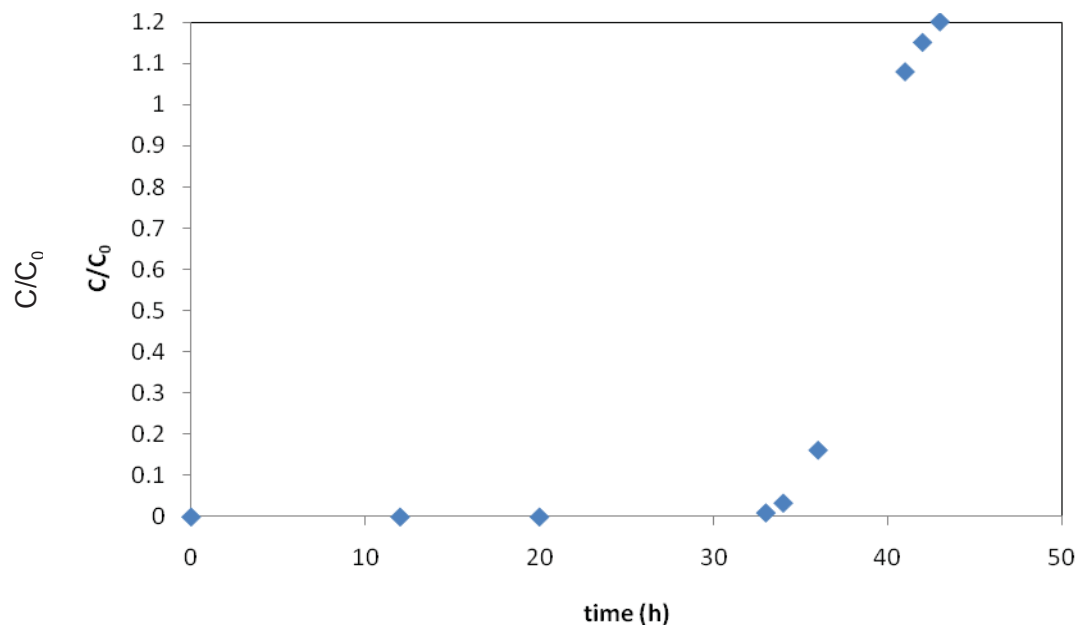
หมายเหตุ \* ไม่สามารถระบุเวลาได้แน่ชัดเนื่องจากสารดูดซับเริ่มอิ่มตัวในเวลารวดเร็วมาก

#### 4.2.3 การทดลองโดยใช้เครื่องกรองน้ำต้นแบบ

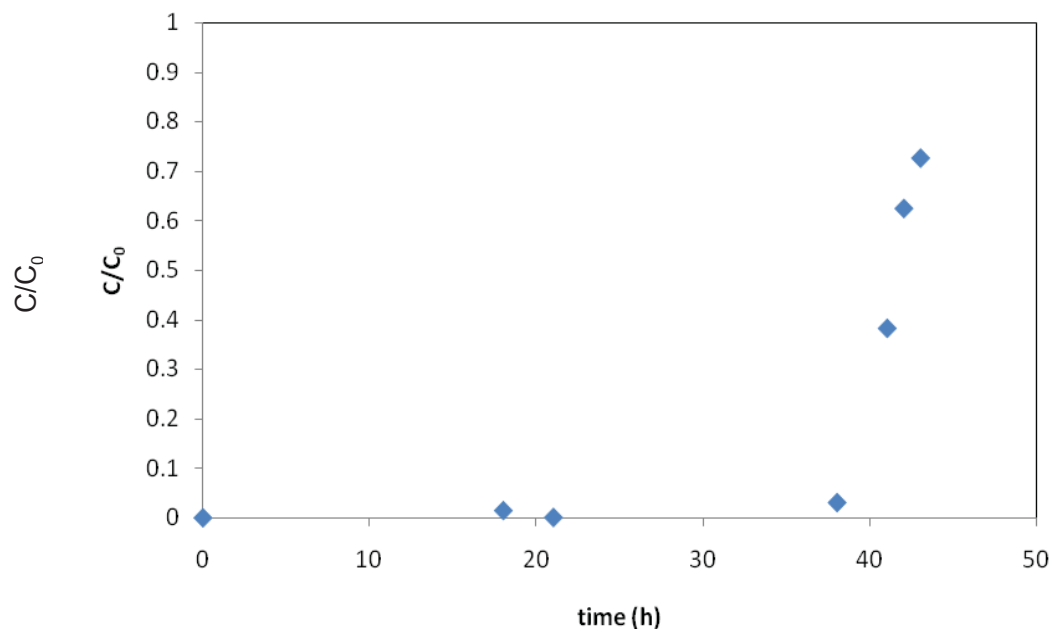
เครื่องกรองน้ำต้นแบบที่ใช้ออกแบบโดยขยายขนาดอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบการดูดซับโลหะหนักแบบต่อเนื่อง เป็นคอลัมน์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.4 เซนติเมตร บรรจุตัวดูดซับหนัก 10 กรัม น้ำเสียสมมติที่ใช้มีตะกั่ว, แคดเมียม, เหล็ก, สังกะสี และโครเมียมผสมรวมกัน โดยกำหนดให้ความเข้มข้นของโลหะหนักทุกชนิดมีค่าเท่ากันเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการป้อนน้ำเสียสมมติเท่ากับ 1 ลิตรต่อชั่วโมง

การดูดซับแคดเมียมและการดูดซับสังกะสีสามารถแสดงกราฟเบรคทูร์ที่ได้ดังรูปที่ 4.2-23 และ 4.2-24 สำหรับการดูดซับของตะกั่วและเหล็กไม่สามารถวัดปริมาณการดูดซับได้ทั้งนี้เนื่องมาจากการผสมสารละลายของโลหะหนักทั้ง 5 ชนิดเข้าด้วยกันทำให้เกิดการตกตะกอนของตะกั่วและเหล็ก สำหรับโครเมียมพบว่าเกิดการดูดซับขึ้นน้อยมากสอดคล้องกับการทดลองการดูดซับโลหะหนักแบบต่อเนื่องในหัวข้อที่ 4.2.2

เมื่อพิจารณากราฟเบรคทูร์ในการดูดซับแคดเมียมและสังกะสีในรูปที่ 4.2-23 และ 4.2-24 พบว่าสารดูดซับหนัก 10 กรัม สามารถใช้ดูดซับแคดเมียมและสังกะสีที่มีความเข้มข้นอย่างละ 10 มิลลิกรัมต่อลิตรได้นานประมาณ 33 และ 38 ชั่วโมงตามลำดับ ก่อนที่เบตจะเริ่มอิ่มตัว ซึ่งจากการคำนวณพบว่าสารดูดซับปริมาณ 10 กรัมสามารถดูดซับแคดเมียมได้ 330 มิลลิกรัมซึ่งเท่ากับประมาณ 2.9 มิลลิโมล และดูดซับสังกะสีได้ 380 มิลลิกรัมซึ่งเท่ากับประมาณ 5.8 มิลลิโมล ในเวลาเดียวกัน ดังนั้นโดยรวมแล้วอาจกล่าวได้ว่าสารดูดซับ 10 กรัมสามารถดูดซับโลหะหนักรวมได้ประมาณ 8.7 มิลลิโมลหรือคิดเป็น 0.87 มิลลิโมลต่อกรัมของสารดูดซับ



รูปที่ 4.2-23 กราฟเบรคทรูจของการดูดซับไอออนแคดเมียมเมื่อใช้เครื่องกรองน้ำต้นแบบ



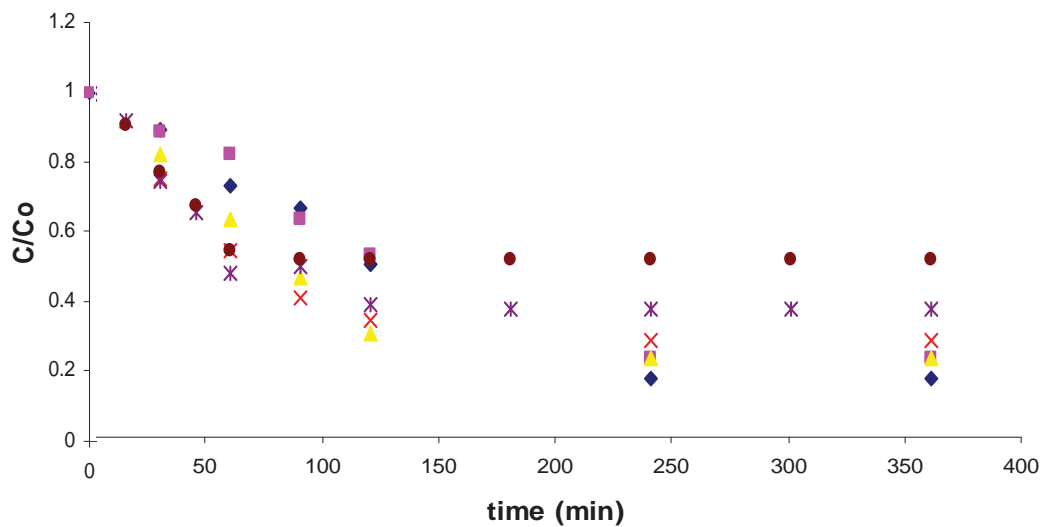
รูปที่ 4.2-24 กราฟเบรคทรูจของการดูดซับไอออนสังกะสีเมื่อใช้เครื่องกรองน้ำต้นแบบ

### 4.3 การสร้างเครื่องบำบัดน้ำเสียสำหรับกำจัดฟอสเฟต

#### 4.3.1 การทดลองแบบกะ

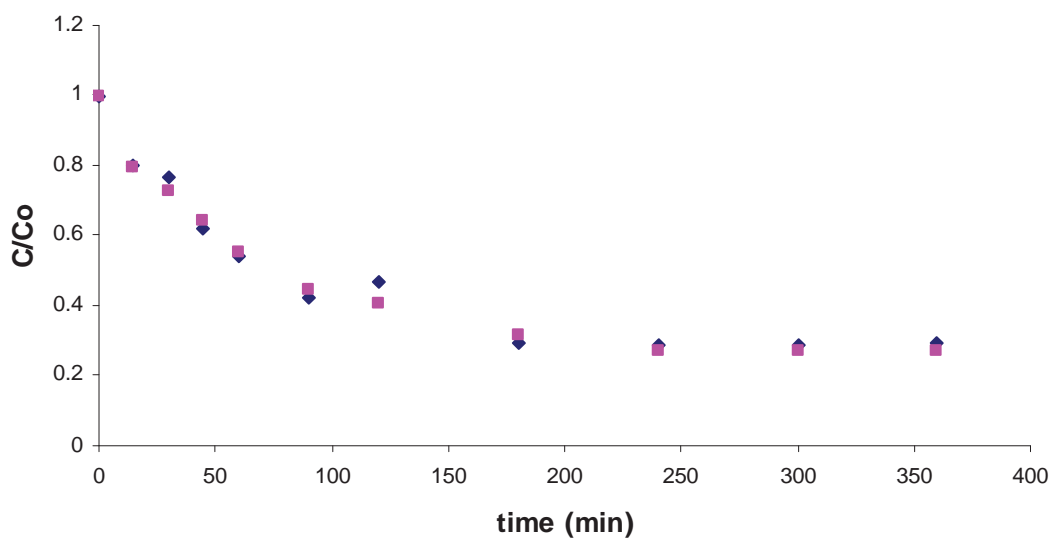
รูปที่ 4.3-1 แสดงการเปลี่ยนแปลงของอัตราส่วนความเข้มข้นฟอสเฟตที่เหลือในน้ำเสียสมมติต่อความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสเฟตในน้ำเสียสมมติ ( $\frac{C}{C_0}$ ) ที่เวลาต่างๆ เมื่อใช้เปลือกหอยนางรมที่ปรับปรุงสมบัติโดยการให้ความร้อนที่  $700^{\circ}\text{C}$  ภายใต้บรรยากาศของแก๊สไนโตรเจน (OS-treated,  $\text{N}_2/700^{\circ}\text{C}$ ) เป็นสารดูดซับ และความเข้มข้นของฟอสเฟตในน้ำเสียสมมติเท่ากับ 15, 20, 40, 50, 75 และ 100 ppm พบว่าเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสเฟตสูงทำให้การดูดซับเข้าสู่สมดุลเร็วกว่าความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสเฟตต่ำ และการดูดซับสำหรับทุกค่าความเข้มข้นเริ่มต้นเข้าสู่สมดุลก่อนเวลา 4 ชั่วโมง ดังนั้นในการทดลองภายใต้สภาวะอื่นๆ จึงถือว่าการดูดซับเข้าสู่สมดุลภายในเวลา 4 ชั่วโมง และเก็บตัวอย่างที่เวลา 6 ชั่วโมง เพื่อวิเคราะห์ปริมาณการดูดซับที่สภาวะสมดุล

รูปที่ 4.3-2 แสดงให้เห็นกว่าสารดูดซับ OS-treated,  $\text{N}_2/700^{\circ}\text{C}$  และสารดูดซับ OS-treated,  $98.5\text{N}_2-1.5\text{H}_2\text{O}/700^{\circ}\text{C}$  มีพฤติกรรมเหมือนกัน จึงสรุปได้ว่าการเติมน้ำปริมาณเพียงเล็กน้อยไม่มีอิทธิพลต่อสมบัติของสารดูดซับที่ได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการทดลองหาไอโซเทอร์มการดูดซับของสารดูดซับแต่ละชนิดยกเว้น OS-treated,  $98.5\text{N}_2-1.5\text{H}_2\text{O}/700^{\circ}\text{C}$



รูปที่ 4.3-1 การดูดซับฟอสเฟตจากน้ำเสียสมมติด้วยตัวดูดซับ (OS-treated,  $N_2/700^\circ C$ ) ที่  $25^\circ C$  ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ

◆ 15 ppm ■ 20 ppm ▲ 40 ppm × 50 ppm ✱ 75 ppm ● 100 ppm



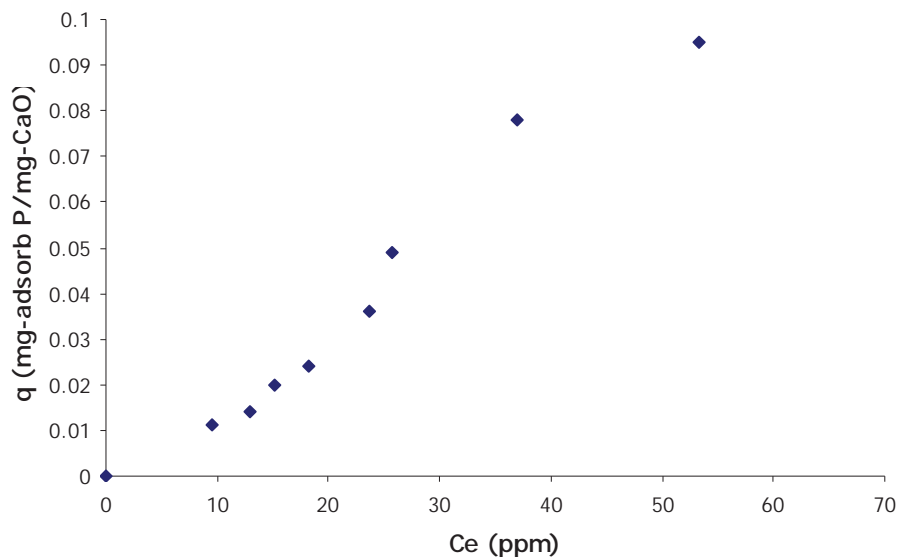
รูปที่ 4.3-2 การดูดซับฟอสเฟตจากน้ำเสียสมมติความเข้มข้นเริ่มต้น 50 ppm ที่  $25^\circ C$  ด้วยตัวดูดซับ

(◆) OS-treated,  $N_2/700^\circ C$  และ (■) OS-treated,  $98.5N_2-1.5H_2O/700^\circ C$

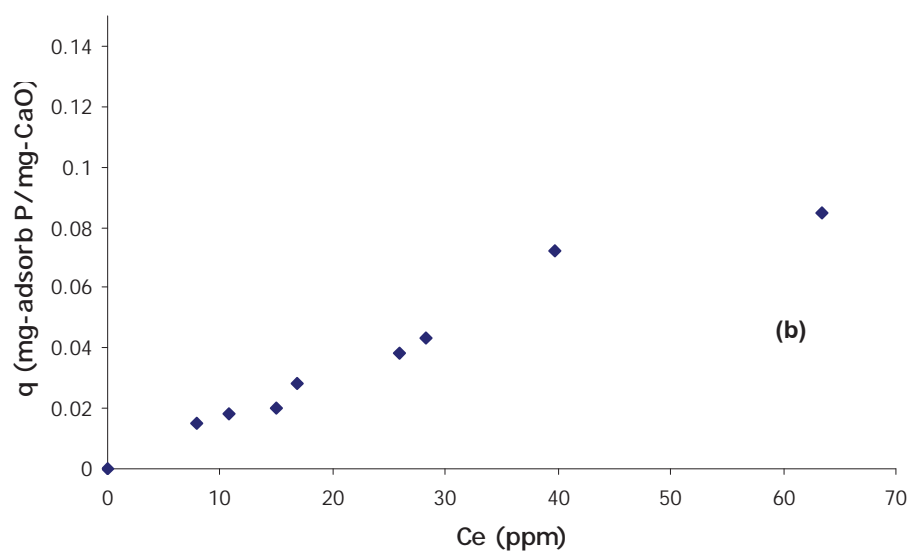
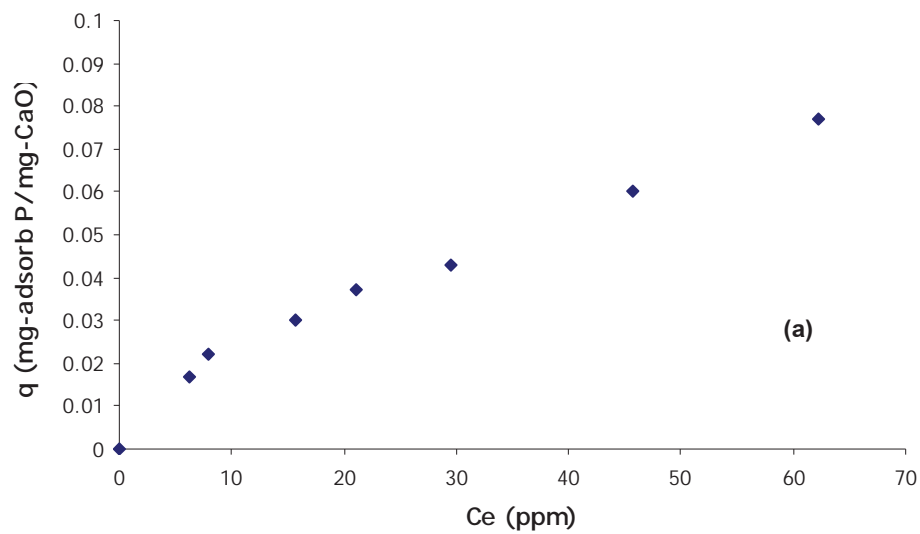
### ไอโซเทอร์มการดูดซับ

รูปที่ 4.3-3, 4.3-4, 4.3-5 และ 4.3-6 แสดงไอโซเทอร์มการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสมมติของสารดูดซับ OS, OS-treated air, OS-treated N<sub>2</sub> และ OS-treated, 98.5N<sub>2</sub>-1.5H<sub>2</sub>O ตามลำดับ เมื่อนำผลการทดลองที่ได้ไปเขียนกราฟความสัมพันธ์รูปแบบเชิงเส้นของสมการไอโซเทอร์มฟรุนดลิชและแลงเมียร์ได้ผลดังแสดงในรูปที่ 4.3-7 ถึง 4.3-13 และได้ค่าคงที่สำหรับไอโซเทอร์มการดูดซับของสารดูดซับแต่ละชนิดดังแสดงในตารางที่ 4.3-1 ซึ่งสรุปได้ว่าสารดูดซับ CaO ที่ได้จากเปลือกหอยนางรมมีพฤติกรรมการดูดซับแตกต่างกันขึ้นกับชนิดของแก๊สเฉื่อยที่ใช้ในการเปลี่ยนรูป CaCO<sub>3</sub> เป็น CaO

รูปที่ 4.3-14 แสดงการเปรียบเทียบไอโซเทอร์มการดูดซับของสารดูดซับแต่ละชนิดที่อุณหภูมิ 25°C จากรูปจะเห็นว่าสารดูดซับ OS-treated N<sub>2</sub>/700°C เป็นสารดูดซับฟอสเฟตที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ดังนั้นงานวิจัยในส่วนการออกแบบเครื่องทดสอบการดูดซับฟอสเฟตแบบป้อนสารต่อเนื่อง และเครื่องต้นแบบสำหรับบำบัดน้ำเสียชุมชนจึงเลือก OS-treated N<sub>2</sub>/700°C เป็นสารดูดซับ

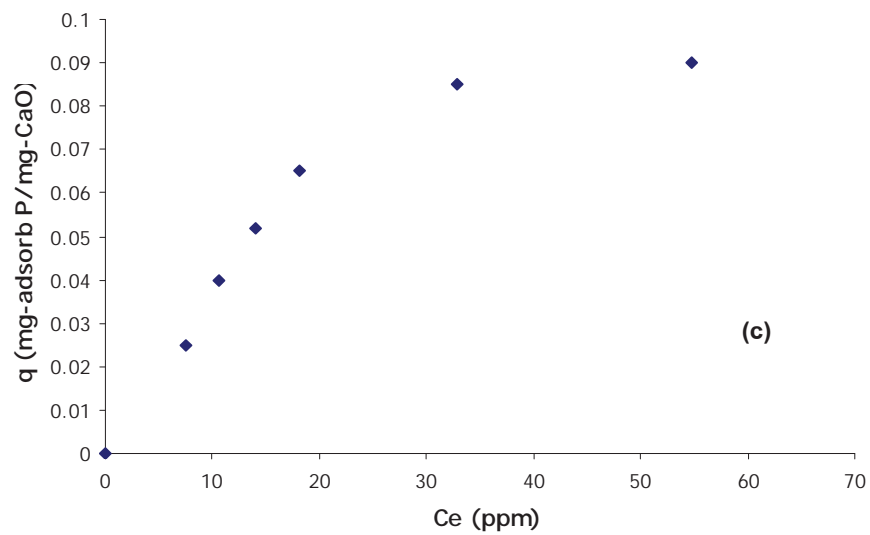
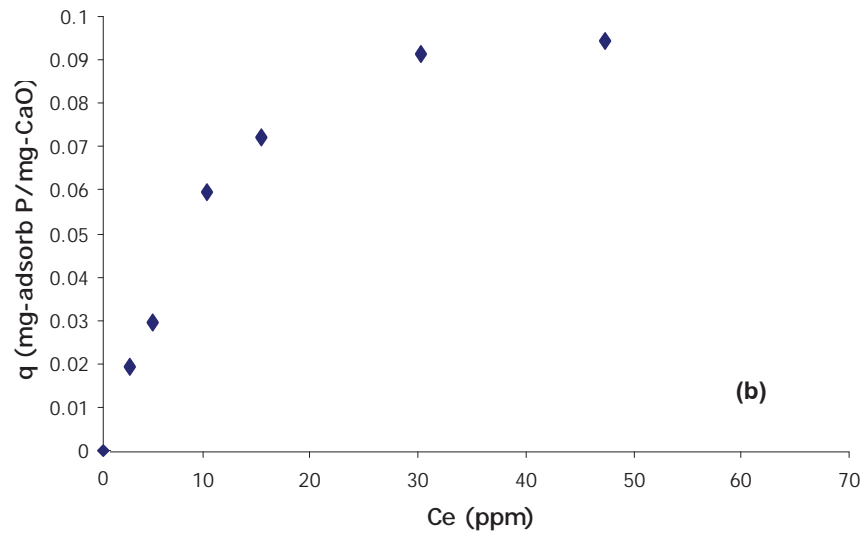
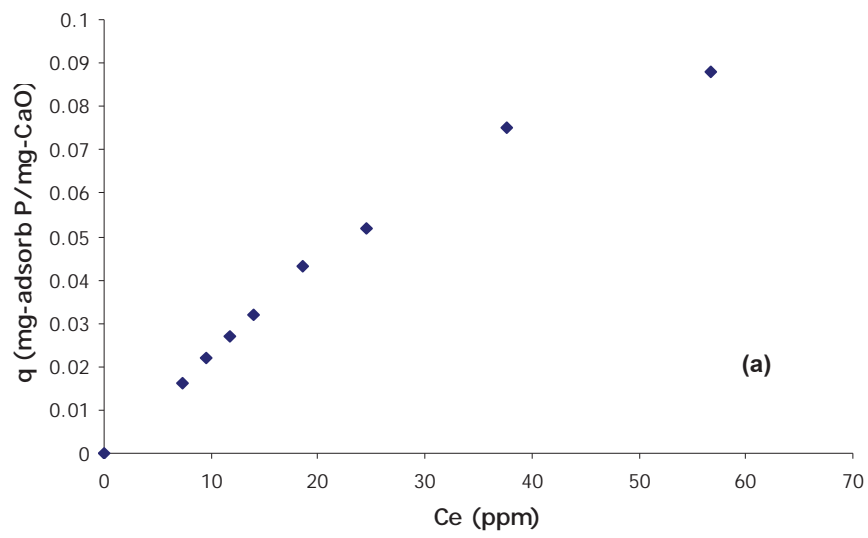


รูปที่ 4.3-3 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟอสเฟตที่ 25°C เมื่อใช้เปลือกหอยนางรมบดเป็นสารดูดซับ (OS)

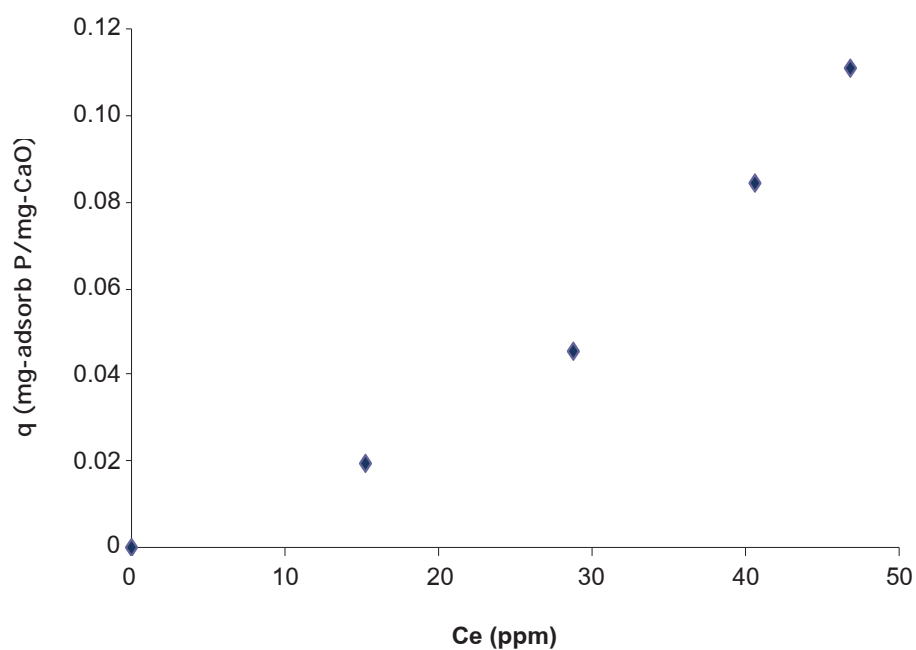


รูปที่ 4.3-4 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟอสเฟตที่ 25°C เมื่อใช้เปลือกหอยนางรมที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วยอากาศที่ (a) 700°C (OS-treated, air/700°C) และ (b) 800°C (OS-treated, air/800°C) เป็นสารดูดซับ

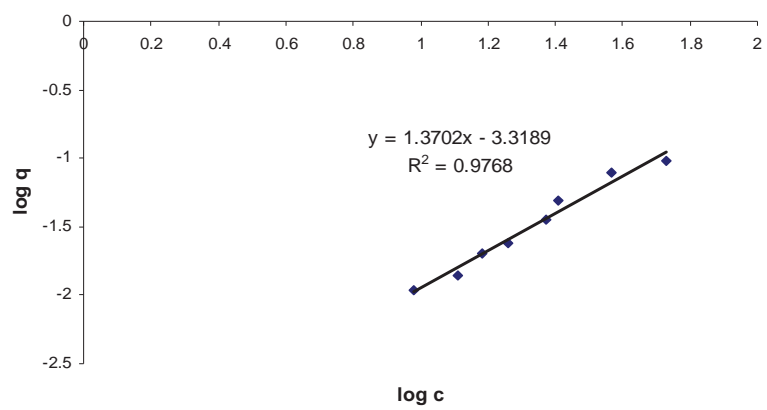




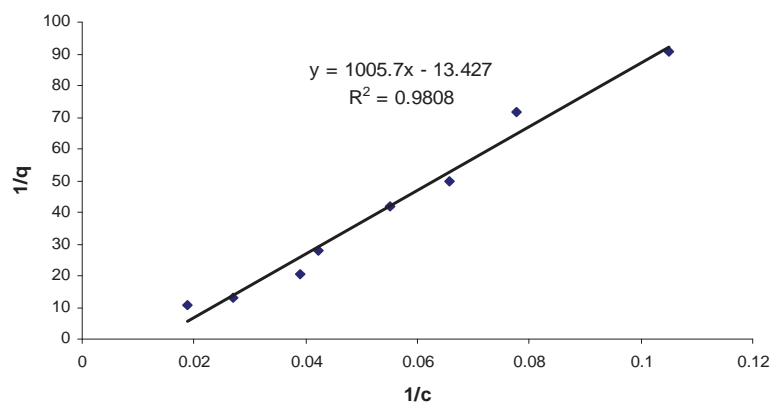
รูปที่ 4.3-5 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟอสเฟตที่ 25°C เมื่อใช้เปลือกหอยนางรมที่ผ่านการปรับปรุงสมบัติด้วย  $N_2$  ที่ (a) 600°C (OS-treated,  $N_2/600^\circ C$ ), (b) 700°C (OS-treated,  $N_2/700^\circ C$ ) และ (c) 800°C (OS-treated,  $N_2/800^\circ C$ ) เป็นสารดูดซับ



รูปที่ 4.3-6 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟอสเฟตที่ 25°C เมื่อใช้เปลือกหอยนางรมที่ปรับปรุงสมบัติด้วย  $N_2$  ผสมไอน้ำในอัตราส่วน 1:1 ที่ 700°C (OS-treated,  $N_2-H_2O/700^\circ C$ )

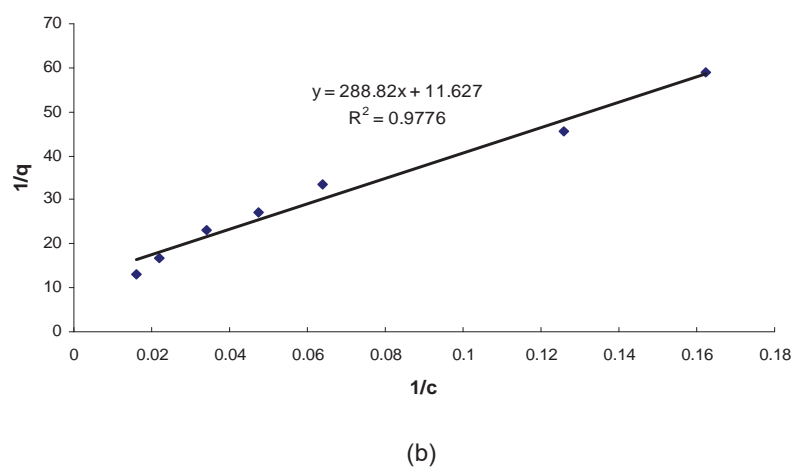
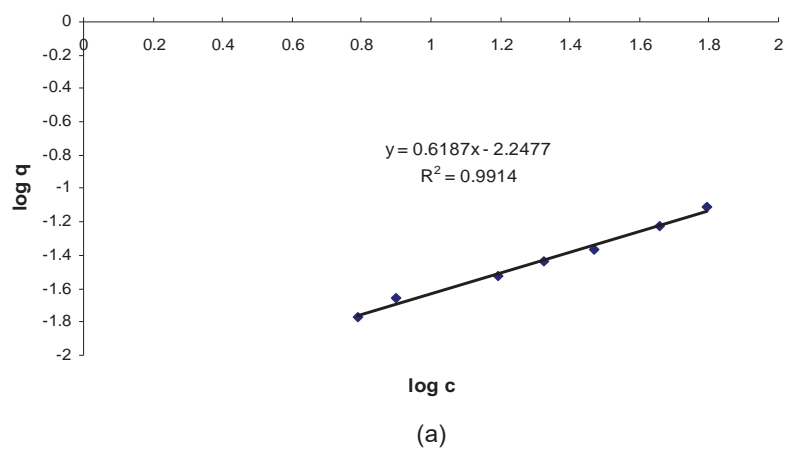


(a)

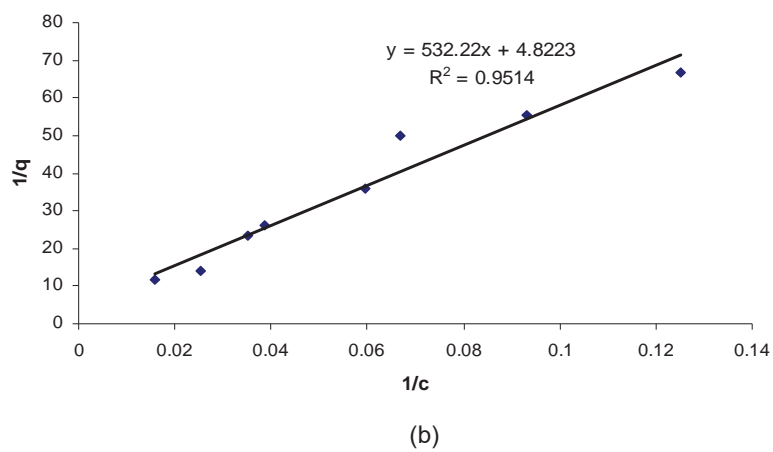
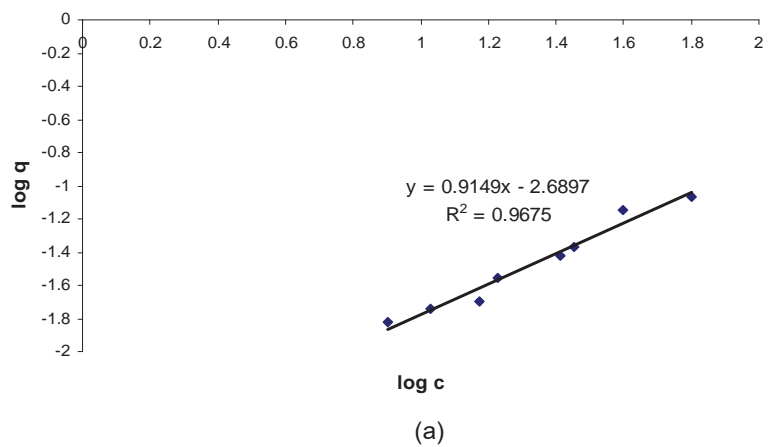


(b)

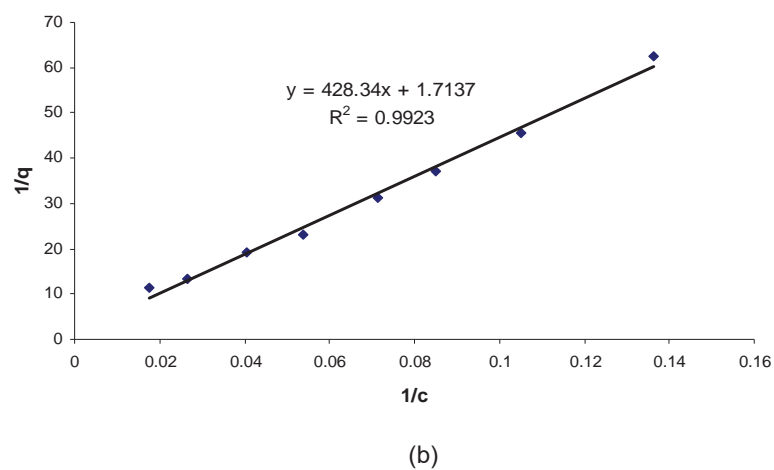
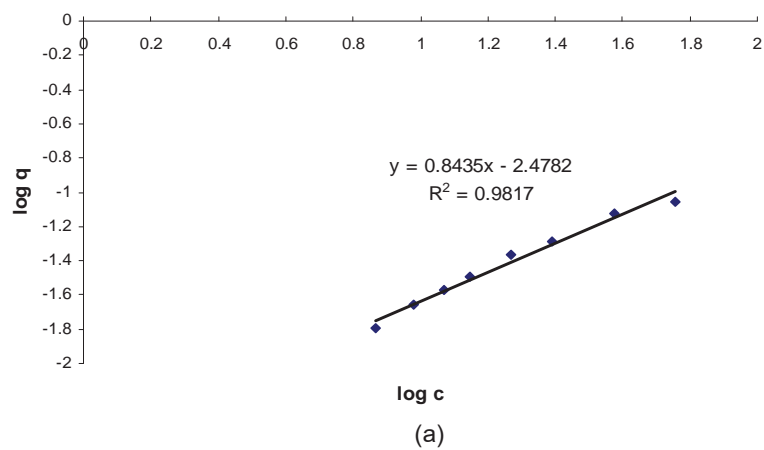
รูปที่ 4.3-7 ข้อมูลการดูดซับของสารดูดซับ OS-treated,  $N_2/500^\circ C$  ในรูปความสัมพันธ์เชิงเส้นสำหรับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ (a) Freundlich และ (b) Langmuir



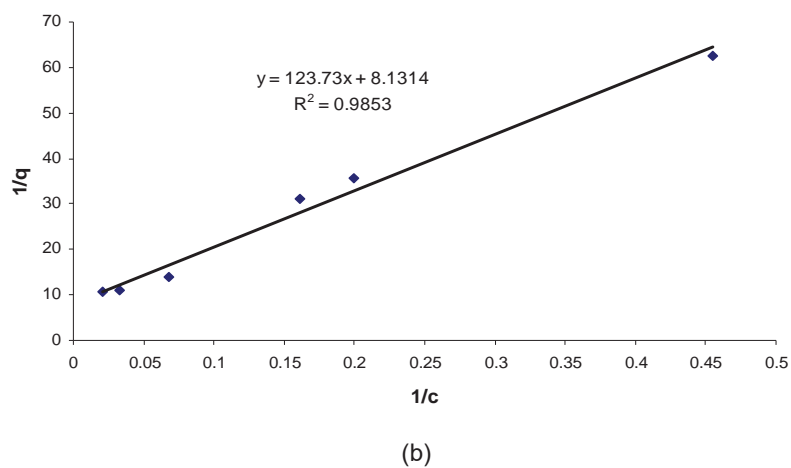
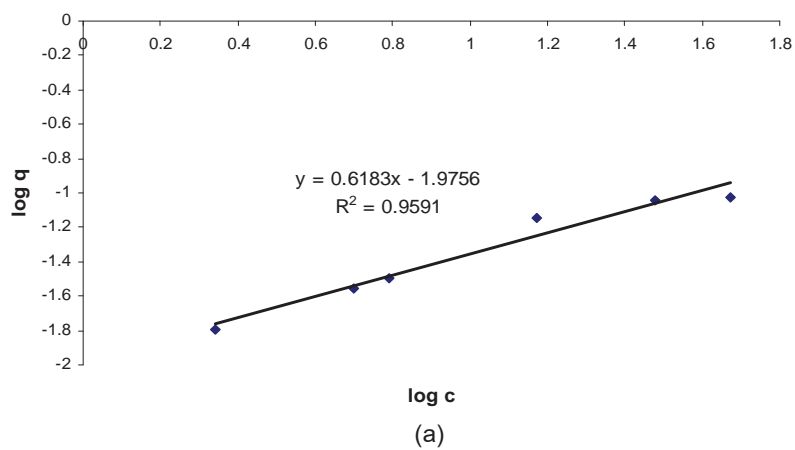
รูปที่ 4.3-8 ข้อมูลการดูดซับของสารดูดซับ OS-treated, air/700°C ในรูปความสัมพันธ์เชิงเส้นสำหรับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ (a) Freundlich และ (b) Langmuir



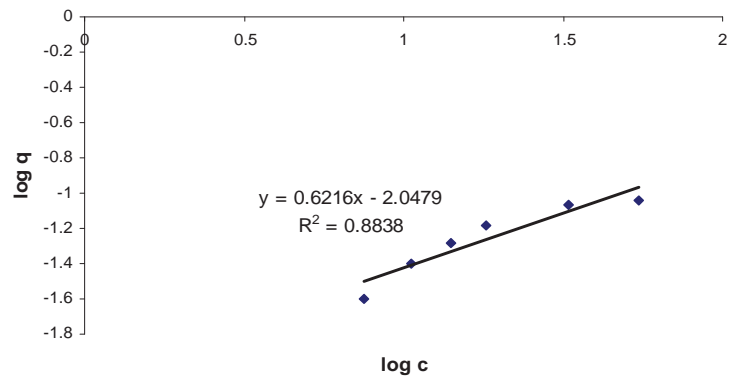
รูปที่ 4.3-9 ข้อมูลการดูดซับของสารดูดซับ OS-treated, air/800°C ในรูปความสัมพันธ์เชิงเส้นสำหรับไอโซเทอรั่มการดูดซับ  
แบบ (a) Freundlich และ (b) Langmuir



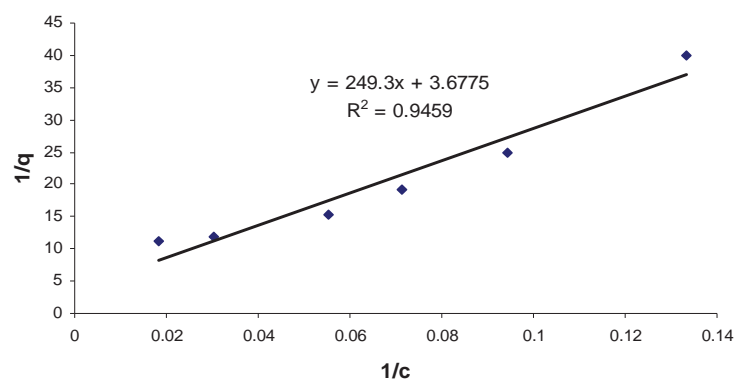
รูปที่ 4.3-10 ข้อมูลการดูดซับของสารดูดซับ OS-treated,  $N_2/600^\circ C$  ในรูปความสัมพันธ์เชิงเส้นสำหรับไอโซเทอรั่มการดูดซับ แบบ (a) Freundlich และ (b) Langmuir



รูปที่ 4.3-11 ข้อมูลการดูดซับของสารดูดซับ OS-treated,  $N_2/700^\circ C$  ในรูปความสัมพันธ์เชิงเส้นสำหรับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบ (a) Freundlich และ (b) Langmuir



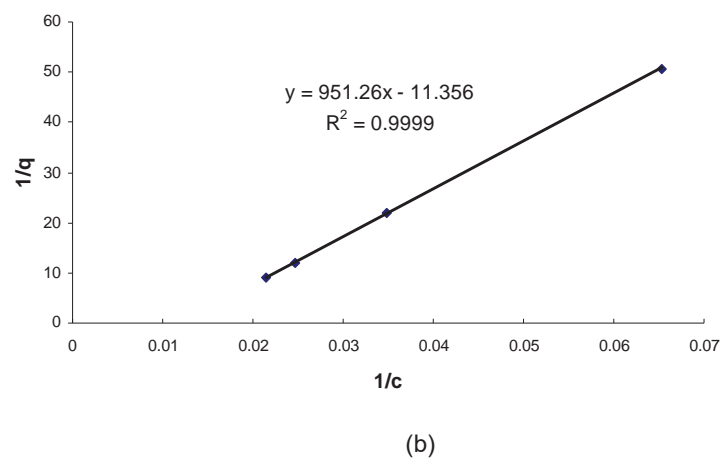
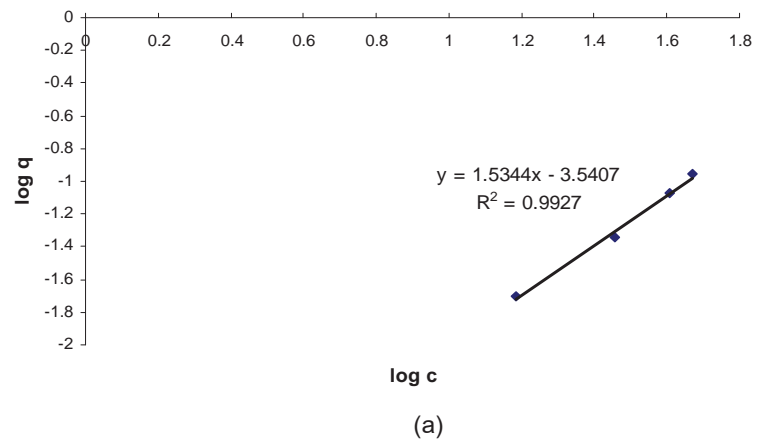
(a)



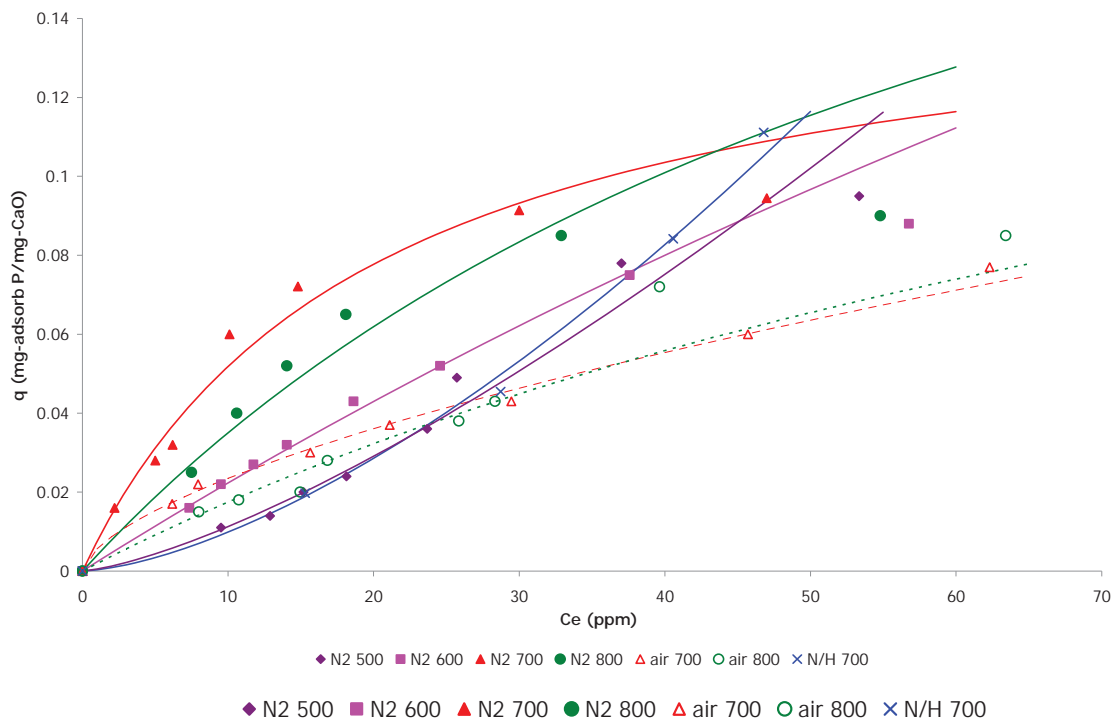
(b)

รูปที่ 4.3-12 ข้อมูลการดูดซับของสารดูดซับ OS-treated,  $N_2/800^\circ C$  ในรูปความสัมพันธ์เชิงเส้นสำหรับไอโซเทอรั่มการดูดซับแบบ (a) Freundlich และ (b) Langmuir





รูปที่ 4.3-13 ข้อมูลการดูดซับของสารดูดซับ OS-treated, 50N<sub>2</sub>-50H<sub>2</sub>O/700°C ในรูปความสัมพันธ์เชิงเส้นสำหรับไอโซเทอรั่มการดูดซับแบบ (a) Freundlich และ (b) Langmuir



รูปที่ 4.3-14 เปรียบเทียบสมการไอโซเทอร์มการดูดซับ (ตารางที่ 4.3-1) กับผลการทดลองที่ 25°C ของสารดูดซับชนิดต่างๆ

ตารางที่ 4.3-1 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสมมติสำหรับสารดูดซับแต่ละชนิด

วัสดุดูดซับ	Freundlich			Langmuir		
	$n$	$K_F$	$R^2$	$q_0$	$K_L$	$R^2$
OS	0.7298	$4.80 \times 10^{-4}$	0.9768	-	-	*
OS-treated-air-700	1.5625	$5.22 \times 10^{-3}$	0.9960	0.0883	26.952	0.9820
OS-treated-air-800	1.0930	$2.04 \times 10^{-3}$	0.9675	0.2074	110.366	0.9514
OS-treated-N <sub>2</sub> -600	1.1855	$3.33 \times 10^{-3}$	0.9817	0.5835	249.950	0.9923
OS-treated-N <sub>2</sub> -700	1.6173	$1.06 \times 10^{-2}$	0.9591	0.1230	15.216	0.9853
OS-treated-N <sub>2</sub> -800	1.6088	$8.96 \times 10^{-3}$	0.8838	0.2719	67.791	0.9459

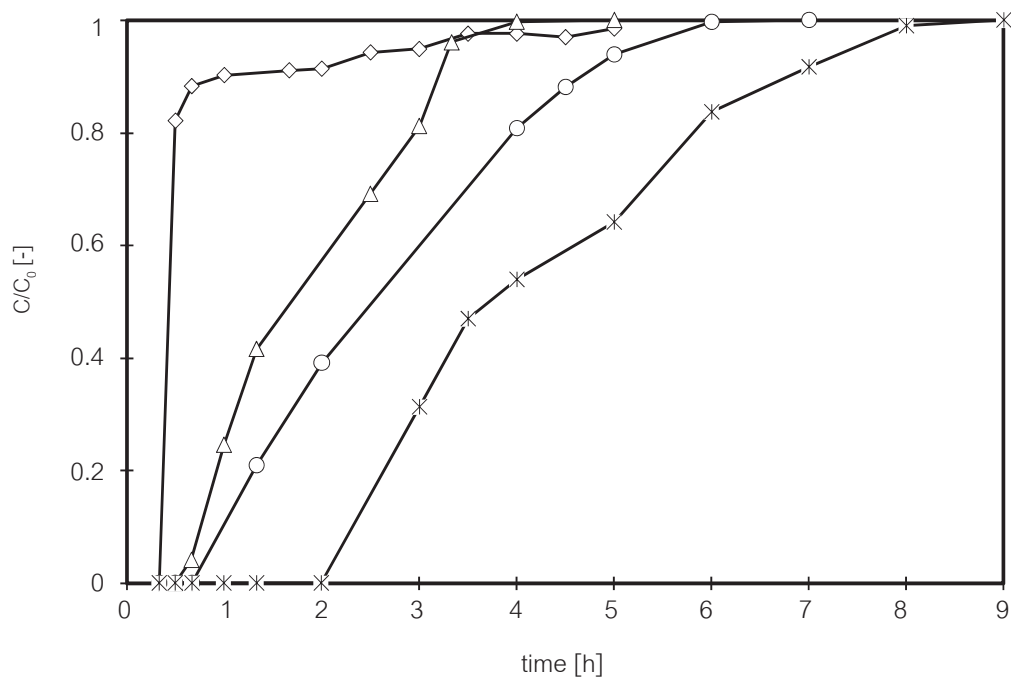
ตารางที่ 4.3-2 ปริมาณการดูดซับฟอสเฟตอิมมัตว์ของสารดูดซับชนิดต่างๆ

adsorbent	capacity (mg P/g)	ref.
fly ash	9.15	5
crab shell	108.9	6
red mud (acid-heat activated)	202.9	7
red mud (heat activated)	155.2	7
red mud	95.8	7
scallop shell	23	8
heat treated oyster shell	583.5	This work

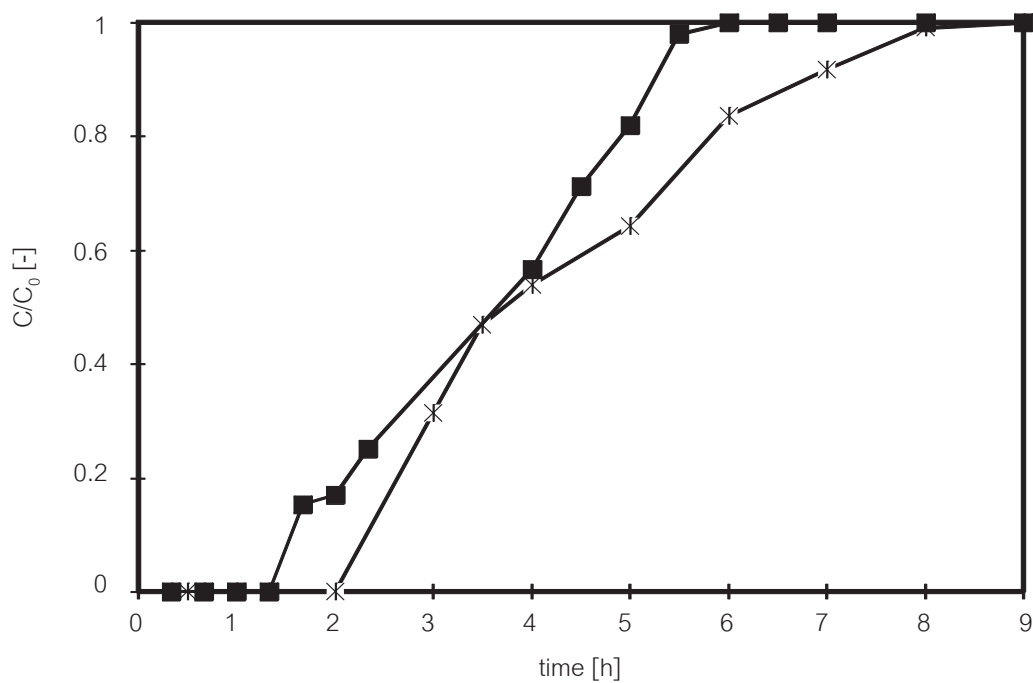
#### 4.3.2 การทดลองแบบต่อเนื่อง

รูปที่ 4.3-15 แสดงอัตราส่วนความเข้มข้นฟอสเฟตที่เหลือในน้ำเสียสมมติต่อความเข้มข้นฟอสเฟตเริ่มต้นในน้ำเสียสมมติ ( $C/C_0$ ) ที่เปลี่ยนแปลงเทียบกับเวลาบำบัดน้ำเสีย เมื่อป้อนน้ำเสียสมมติด้วยอัตราการไหล 0.3 ลิตรต่อชั่วโมง โดยกำหนดให้ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสเฟตในน้ำเสียสมมติมีค่า 15, 20, 25 และ 100 ppm พบว่าเมื่อฟอสเฟตมีความเข้มข้นสูง (100 ppm) สารดูดซับอิมมัตว์อย่างรวดเร็วภายในครึ่งชั่วโมง แต่เมื่อมีความเข้มข้นต่ำลงจะทำให้สามารถบำบัดน้ำเสียให้อยู่ภายใต้มาตรฐานที่กำหนด (2 ppm) ได้นานขึ้น โดยเมื่อน้ำเสียสมมติมีฟอสเฟตเข้มข้น 15 ppm ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่ใกล้เคียงกับค่าที่พบในน้ำทิ้งชุมชน สารดูดซับจำนวน 0.3 g สามารถใช้บำบัดน้ำเสียสมมติให้มีปริมาณฟอสเฟตต่ำกว่าค่าที่กำหนด ( $C/C_0 = 0.13$ ) ได้นาน 2 ชั่วโมง

รูปที่ 4.3-16 อิทธิพลของขนาดอนุภาคของสารดูดซับที่ใช้ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ เมื่ออัตราการป้อนน้ำเสียสมมติเท่ากับ 0.3 ลิตรต่อชั่วโมง และความเข้มข้นของฟอสเฟตในน้ำเสียสมมติมีค่า 15 ppm ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า วัสดุดูดซับที่มีอนุภาคขนาด 1 – 3 mm มีประสิทธิภาพในการดูดซับฟอสเฟตต่ำกว่าวัสดุดูดซับที่มีอนุภาคขนาดเล็กกว่า 1 mm เล็กน้อย โดยวัสดุดูดซับขนาด 1 – 3 mm สามารถใช้บำบัดน้ำเสียให้มีปริมาณฟอสเฟตต่ำกว่าค่าตามมาตรฐานนาน 1.5 ชั่วโมง เมื่อพิจารณาประกอบกับสภาพการใช้งานจริงซึ่งจะเกิดความดันตกคร่อมสูงเมื่อใช้อนุภาคขนาดเล็กในเครื่องบำบัดขนาดใหญ่และต้องเสียเวลาบดและคัดขนาดซ้ำเมื่อใช้สารดูดซับขนาดเล็ก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วัสดุดูดซับขนาด 1-3 mm ทำการศึกษาเพื่อขยายระบบดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียต่อไป



รูปที่ 4.3-15 อัตราส่วนความเข้มข้นฟอสเฟตที่เหลือในน้ำเสียสมมติต่อความเข้มข้นฟอสเฟตเริ่มต้น  
(ความเข้มข้นฟอสเฟตเริ่มต้น ; ◇ : 15 , △ : 20 , ○ : 25 , \* : 100 พีพีเอ็ม)

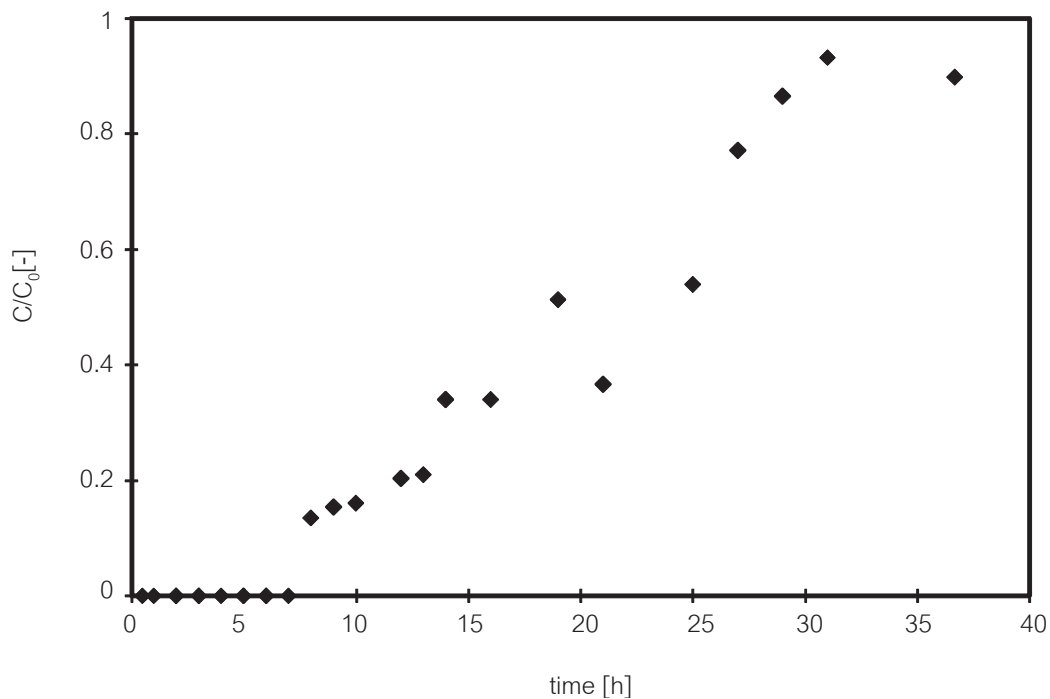


รูปที่ 4.3-16 อิทธิพลของขนาดอนุภาควัสดุดูดซับที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสมมติ  
(อนุภาคขนาด; \* : 1 มม., ■ : 1- 3 มม.)

#### 4.3.3 เครื่องบำบัดน้ำเสียครัวเรือนต้นแบบ

เมื่อติดตั้งเครื่องบำบัดน้ำเสียครัวเรือนต้นแบบตามรูปที่ 3.3-7 แล้วจึงทำการทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย โดยป้อนน้ำเสียครัวเรือนที่มีความเข้มข้นฟอสเฟตเท่ากับ 12 ppm เข้าสู่เครื่องบำบัดด้วยอัตราการไหลเท่ากับ 1 ลิตรต่อชั่วโมง บรรจุน้ำเสีย 15 กรัม พบว่าเครื่องบำบัดน้ำเสียที่ออกแบบสามารถบำบัดน้ำเสียให้มีปริมาณฟอสเฟตตามเกณฑ์มาตรฐาน น้ำทิ้งที่กฎหมายอนุญาตให้ปล่อยทิ้งสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้ 10 ชั่วโมง อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟตของเครื่องบำบัดน้ำเสียครัวเรือนต้นแบบยังต่ำกว่าประสิทธิภาพการดูดซับฟอสเฟตของชุดทดสอบแบบต่อเนื่องในระดับห้องปฏิบัติการ (หัวข้อ 4.3.2) ถึง 17 เท่า โดยการทดสอบการดูดซับด้วยระบบต่อเนื่องในระดับห้องปฏิบัติการสามารถดูดซับฟอสเฟตได้ 0.014 g<sub>P</sub>/(g<sub>CaO</sub>·h) แต่เครื่องต้นแบบดูดซับฟอสเฟตได้เพียง 0.0008 g<sub>P</sub>/(g<sub>CaO</sub>·h) ดังนั้นเมื่อต้องการขยายขนาดของเครื่องบำบัดน้ำเสียจึงไม่ควรขยายขนาดโดยใช้ท่อขนาดใหญ่ที่บรรจุน้ำเสียได้มากขึ้นเพียงท่อเดียว แต่ควรใช้ท่อขนาดเล็กบรรจุน้ำเสียปริมาณไม่มากหลายท่อต่อขนานกันจึงจะทำให้เครื่องดูดซับมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสูง

ตารางที่ 4.3-3 แสดงผลการประเมินราคาเครื่องบำบัดน้ำเสียครัวเรือนต้นแบบขนาด 50 ลิตร



รูปที่ 4.3-17 การเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความเข้มข้นฟอสเฟตที่เหลือต่อความเข้มข้นฟอสเฟตเริ่มต้น  $[C/C_0]$  เมื่อใช้ตัวอย่างเป็นน้ำเสียจากครัวเรือน

ตารางที่ 4.3-3 ราคาเครื่องบำบัดน้ำเสียครัวเรือน (ต้นแบบขนาด 50 ลิตร)

หน่วยปฏิบัติงาน	วัสดุ/อุปกรณ์	ราคา (บาท)
1. ถังดักไขมัน	1.1 ถังพลาสติกขนาด 45 ลิตร	200
	1.2 ท่อ PVC	200
	1.3 ตะแกรงแอสตันเลส	500
2. ชุดกรอง	2.1 กรวดหยาบ	45
	2.2 กรวดละเอียด	45
	2.3 ทรายหยาบ	20
	2.4 ทรายละเอียด	20
	2.5 ถ่าน	20
	2.6 สำลี	35
	2.7 ถังพลาสติกบรรจุสารกรอง	
3. ท่อบรรจุวัสดุดูดซับ	3.1 ท่อพลาสติก ( $\varnothing = 5$ cm)	200
	3.2 ตะแกรงลวดแอสตันเลส ( $\varnothing = 1$ mm)	100
	3.3 ท่อและข้อต่อ PVC	300
	รวม	1,685

## 5. สรุปและข้อเสนอแนะ

เปลือกหอยนางรมเหลือทิ้งสามารถใช้เป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์สารดูดซับที่มีองค์ประกอบเป็น  $\text{CaO}$  ได้ โดยวิธีการเตรียมที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อนและไม่ต้องใช้สารเคมีอันตราย สารดูดซับที่สังเคราะห์ได้มีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนัก (ตะกั่ว, แคดเมียม, สังกะสี, เหล็ก และโครเมียม) และฟอสเฟตในน้ำสูงกว่าสารดูดซับชนิดอื่น เช่น ถ้ำลอย เปลือกปู เปลือกหอย ที่เตรียมด้วยวิธีเดียวกัน และที่ผ่านการปรับปรุงประสิทธิภาพโดยการกระตุ้นด้วยสารเคมี (อ้างอิงจากข้อมูลงานวิจัยในฐานข้อมูล) อย่างไรก็ตามสารดูดซับที่สังเคราะห์ได้มีขนาดอนุภาคเล็กมาก อาจไม่เหมาะสมกับการใช้งานในลักษณะนำไปบรรจุในหอดูดซับขนาดใหญ่ จึงต้องพัฒนาเพิ่มเติม เช่น ทำการขึ้นรูปสารดูดซับให้กลายเป็นอนุภาคขนาดใหญ่ หรือปรับปรุงรูปแบบของเครื่องดูดซับให้เป็นลักษณะการใช้งานในถังกวน ซึ่งนอกจากจะสามารถใช้งานได้จริงในระดับครัวเรือนและชุมชนแล้ว ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการกักตักน้ำเสียที่เกิดจากอุตสาหกรรมได้อีกด้วย

## 6. เอกสารอ้างอิง

- [1] E. Pehlivan, A.M. Özkan, S. Dinc, S. Parlayici, "Adsorption of  $\text{Cu}^{2+}$  and  $\text{Pb}^{2+}$  ion on dolomite powder", Journal of Hazardous Materials, 167(2009)1044-1049.
- [2] Z. Elouear, J. Bouzid, N. Boujelben, M. Feki, F. Jamoussi, A. Montiel, "Heavy metal removal from aqueous solutions by activated phosphate rock", Journal of Hazardous Materials, 156(2008)412-420.
- [3] H.A. Aziz, M. N. Adlan, K.S. Ariffin, "Heavy metals (Cd, Pb, Zn, Ni, Cu, and Cr(III)) removal from water in Malaysia: Post treatment by high quality limestone", Bioresource Technology, 99(2008)1578-1583.
- [4] J.C. Moreno-Pirajan, V.S. Garcia-Cuello, L. Giraldo, "The removal and kinetic study of Mn, Fe, Ni, and Cu ions from wastewater onto activated carbon from coconut shells", Adsorption, 17(2011)505-514.
- [5] K. Xu, T. Deng, J. Liu, W. Peng, "Study on the phosphate removal from aqueous solution using modified fly ash" Fuel, 89 (2010) 3668-3674.
- [6] D. J. Jeon, S. H. Yeom, "Recycling wasted biomaterial, crab shells, as an adsorbent for the removal of high concentration of phosphate", Bioresource Technology, 100 (2009) 2646-2649.
- [7] C.-J. Liu, Y.-Z. Li, Z.-K. Zhao, Z.-Y. Chen, Z.-G. Zhang, Z.-P. Jia, "Adsorption removal of phosphate from aqueous solution by active red mud", Journal of Environmental Science, 19 (2007) 1166-1170.
- [8] S. H. Yeom, K.-Y. Jung "Recycling wasted scallop shell as an adsorbent for the removal of phosphate", Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 15 (2009) 40-44.



## ภาคผนวก

**ภาคผนวก ก. บทความสำหรับการเผยแพร่**

1. ต้นฉบับบทความวิจัยเรื่อง “การเตรียมวัสดุดูดซับจากเปลือกหอยนางรมเหลือทิ้งเพื่อใช้กำจัดฟอสเฟตในน้ำเสีย” ตีพิมพ์ในวารสารลาดกระบัง ปีที่ 28 ฉบับที่ 4 ธันวาคม 2554 หน้า 31-36
2. ต้นฉบับบทความวิจัยเรื่อง “Recycling oyster shell as adsorbent for phosphate removal” นำเสนอในงานประชุมวิชาการ TiChE International Conference 2011

# การเตรียมวัสดุดูดซับจากเปลือกหอยนางรมเหลือทิ้ง เพื่อใช้กำจัดฟอสเฟตในน้ำเสีย

## Preparation of Adsorbents From Oyster Shell Wastes For Phosphate Removal from Wastewater

รัตนากร ขวงสวัสดิ์<sup>1</sup>

<sup>1</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

เลขที่ 2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120

Email address: ratanaporn.y@rmutk.ac.th

วลัยรัตน์ จันทระอัมพร<sup>2</sup> และดวงกมล ณ ระนอง<sup>2</sup>

<sup>2</sup>สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กทม. 10520

Email address: kswalair@kmitl.ac.th, dnaranong@hotmail.com

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเปลือกหอยนางรมเหลือทิ้งมาสังเคราะห์เป็นวัสดุดูดซับเพื่อใช้กำจัดฟอสเฟตในน้ำเสีย ผลการทดลองแสดงว่าเมื่อเปลือกหอยนางรมถูกเผาภายใต้บรรยากาศของแก๊สเฉื่อยที่อุณหภูมิสูง ( $\geq 873$  K) แคลเซียมคาร์บอเนตในเปลือกหอยนางรมจะเปลี่ยนเป็นแคลเซียมออกไซด์ โดยชนิดของแก๊สและอุณหภูมิที่ใช้มีผลต่อลักษณะทางกายภาพและค่าความจุฟอสเฟตของวัสดุดูดซับที่ได้ ไอโซเทอร์มการดูดซับฟอสเฟตของวัสดุดูดซับแต่ละชนิดสอดคล้องกับแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์หรือฟรุนดลิช ทั้งนี้ค่าคงที่ในแบบจำลองขึ้นกับสภาวะที่ทำการสังเคราะห์ วัสดุดูดซับที่มีค่าความจุฟอสเฟตสูงสุดในงานวิจัยนี้ได้จากการเผาเปลือกหอยนางรมภายใต้บรรยากาศของไนโตรเจนที่ 873 K โดยมีค่าเท่ากับ 583.5 mg-P/g

### Abstract

In this study, an oyster shell waste was used as a raw material to synthesize an adsorbent for phosphate removal from wastewater. Experimental results showed that calcium carbonate was transformed into calcium oxide when the oyster shell was treated under inert atmosphere at high temperature ( $\geq 873$  K). Both the type of atmospheric gas and the treating temperature significantly affected the physical properties and the adsorption capacity toward phosphate of the obtained adsorbents. The adsorption isotherms of the obtained adsorbents were corresponded well with Langmuir or Freundlich models and the adsorption parameters in each isotherm depended on the synthesis condition. The adsorbent with the highest adsorption capacity toward phosphate was obtained when the oyster shell was treated under nitrogen atmosphere at the temperature of 873 K. Its adsorption capacity was 583.5 mg-P/g.

**Key words:** phosphate removal, wastewater, oyster shell, adsorption isotherm, calcium oxide

## 1. บทนำ

ปัจจุบันน้ำเสียที่ถูกปล่อยทิ้งจากแหล่งชุมชนมีปริมาณมากและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจากการเพิ่มจำนวนประชากรและการขยายตัวของชุมชน จากข้อมูลของกรมควบคุมมลพิษพบว่าในปีพ.ศ. 2552 มีปริมาณ 15,000 ล้านลิตรต่อวัน [1-2] และมีการประมาณว่าในปี พ.ศ. 2555 จะมีปริมาณถึง 24,306 ล้านลิตรต่อวัน [2] น้ำเสียชุมชนมีฟอสเฟตเข้มข้น 4 – 15 ppm [1] ถ้าถูกปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติโดยไม่ได้รับการบำบัดจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ Eutrophication [3] ซึ่งมีผลทำให้ออกซิเจนในน้ำลดลงอย่างมากและระบบนิเวศเสียสมดุลในที่สุด เพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าวจึงมีการออกกฎหมายควบคุมคุณภาพน้ำโดยกำหนดความเข้มข้นสูงสุดของฟอสเฟตที่อนุญาตให้ปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติได้ไว้ไม่เกิน 2 ppm [4]

การกำจัดฟอสเฟตในน้ำซึ่งสามารถทำได้หลายวิธีโดยการตกตะกอนด้วยสารเคมีเป็นวิธีที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำที่โรงงานอุตสาหกรรม และสารเคมีที่ใช้มีหลายชนิด เช่น สารส้ม (alum) [5],  $Al(OH)_3$  [5] และ ferric chloride [6] ซึ่งการตกตะกอนมีข้อเสีย คือ ต้องควบคุมค่าความเป็นกรด-เบส (pH) ให้เหมาะสม มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตค่อนข้างต่ำ และเกิดตะกอนที่จะต้องนำไปกำจัดต่อเป็นปริมาณมาก การกำจัดด้วยวิธีทางชีวภาพ [7] อาจทำภายใต้สภาวะ aerobic หรือ anaerobic แต่มีประสิทธิภาพในการกำจัดฟอสเฟตต่ำ มีความซับซ้อนในการปฏิบัติงาน และมีค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้นการตกตะกอนและการกำจัดด้วยวิธีทางชีวภาพจึงไม่เหมาะที่จะนำมาใช้กำจัดฟอสเฟตในน้ำเสียแต่ละครัวเรือน

เมื่อพิจารณาข้อจำกัดข้างต้นจะเห็นว่าการดูดซับเป็นวิธีที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้บำบัดน้ำเสียครัวเรือนเพราะเป็นวิธีที่ทำได้ง่าย สามารถติดตั้งเพื่อใช้งานตามครัวเรือนในแหล่งชุมชนทั่วไป ที่ผ่านมามีงานวิจัย [8-11] ที่นำวัสดุดูดซับชนิดต่างๆ (pumice, activated alumina, fly ash และ red mud) มาทดสอบการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียพบว่าสามารถทำให้น้ำที่ผ่านการบำบัดมีความเข้มข้นของฟอสเฟตต่ำกว่าเกณฑ์ที่กฎหมายกำหนดได้ แต่เมื่อพิจารณาความจุในการดูดซับฟอสเฟต (adsorption capacity toward

phosphate) ของวัสดุดูดซับเหล่านี้พบว่าโดยทั่วไปมีค่าต่ำและสามารถทำให้เพิ่มขึ้นได้โดยใช้ความร้อนหรือสารเคมีปรับปรุงโครงสร้างและคุณสมบัติของวัสดุดูดซับ

การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำตามชายฝั่งทะเลขยายตัวอย่างมากในภาคใต้และภาคตะวันออกของประเทศไทยทำให้มีอุตสาหกรรมการแปรรูปอาหารทะเลและชุมชนขยายเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว เปลือกหอยนางรมเหลือทิ้งจากการแปรรูปหอยนางรมสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้จำกัดทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมตามมา เนื่องจากเปลือกหอยต่างๆ รวมทั้งเปลือกหอยนางรมมีแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นองค์ประกอบหลักสามารถนำมาใช้กำจัดฟอสเฟตในน้ำได้ [12- 15] งานวิจัยนี้จึงมีจุดมุ่งหมายที่จะนำเปลือกหอยนางรมเหลือทิ้งมาพัฒนาเป็นวัสดุดูดซับที่มีความจุฟอสเฟตสูงเพื่อใช้บำบัดน้ำเสียครัวเรือนโดยนำมาปรับปรุงสมบัติโดยการให้ความร้อนที่อุณหภูมิต่างๆ ภายใต้บรรยากาศที่มีแก๊สเฉื่อยไหลผ่าน วัสดุดูดซับที่ได้จะถูกนำไปทดสอบการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสมมติด้วยชุดทดสอบแบบกะเพื่อหาไอโซเทอร์มการดูดซับที่ใช้ประเมินความสามารถในการดูดซับที่สมดุล

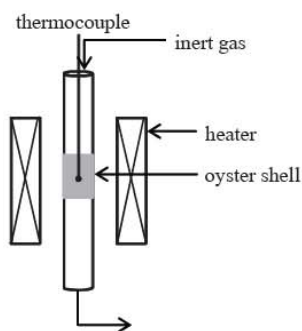
## 2. การทดลอง

### 2.1 การเตรียมวัสดุดูดซับ

งานวิจัยนี้ใช้เปลือกหอยนางรมที่มาจากจังหวัดสุราษฎร์ธานี เปลือกหอยนางรมจะถูกนำไปล้างด้วยน้ำสะอาด ตากแดด และอบแห้ง แล้วจึงนำมาบดด้วยเครื่องบดแบบใบมีดตัด และคัดขนาดให้อยู่ระหว่าง 1 – 3 mm

นำเปลือกหอยนางรมบด 2 กรัม บรรจุลงในท่อแก้วควอทซ์และติดตั้งอุปกรณ์ตามรูปที่ 2.1 จากนั้นป้อนอากาศ (หรือแก๊สไนโตรเจน) ผ่านเบดด้วยอัตราการไหล  $60 \text{ cm}^3/\text{min}$  พร้อมทั้งให้ความร้อน ร้อนอุณหภูมิคงที่ที่ 773, 873, 973 และ 1073 K เป็นเวลา 4 ชั่วโมง นำวัสดุดูดซับที่ได้เก็บไว้ใน dessicator วัสดุดูดซับที่ได้ถูกตั้งชื่อด้วยสัญลักษณ์ OS-treated-gas-T เช่น OS-treated-air-973 หมายถึงวัสดุดูดซับที่ได้จากการให้ความร้อนเปลือกหอยนางรมภายใต้บรรยากาศของอากาศที่ 973 K

โครงสร้างผลึก, ลักษณะพื้นผิว และพื้นที่ผิวจำเพาะของวัสดุดูดซับที่ได้จะถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD, SEM



รูปที่ 2.1 อุปกรณ์ที่ใช้สังเคราะห์วัสดุดูดซับ

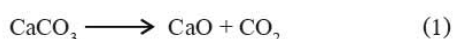
## 2.2 การดูดซับฟอสเฟตแบบกะ

เตรียมน้ำเสียสมมติที่มีฟอสเฟตเข้มข้น 5–100 ppm ปริมาตร 200 ml โดยผสม Anhydrous  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  (Ajax Finechem Pty Ltd.) ลงในน้ำกลั่น จากนั้นเติมวัสดุดูดซับหนัก 0.1 กรัม ลงไปในน้ำเสียสมมติแล้วปั่นกวนโดยใช้เครื่องกวนแบบแม่เหล็กด้วยความเร็วรอบประมาณ 200 rpm จากนั้นเก็บตัวอย่างทุก 20 นาที เพื่อนำมาวิเคราะห์ปริมาณฟอสเฟตที่เหลืออยู่ด้วยวิธีกรดแอสคอร์บิก [16]

## 3. ผลการทดลอง

### 3.1 สมบัติของวัสดุดูดซับ

เมื่อนำเปลือกหอยนางรมบด (OS) ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD จะได้สเปกตรัมดังรูปที่ 3.1 (ก) ซึ่งเป็นโครงสร้างของ  $\text{CaCO}_3$  และเมื่อนำเปลือกหอยนางรมบดหลังการให้ความร้อนภายใต้บรรยากาศของอากาศที่ 973 K (OS-treated-air-973 K) ไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRD จะได้สเปกตรัมดังรูปที่ 3.1 (ข) ซึ่งเป็นโครงสร้างของ CaO โดยไม่มีโครงสร้างของ  $\text{CaCO}_3$  เหลืออยู่แสดงว่าระหว่างการให้ความร้อนที่ 973 K  $\text{CaCO}_3$  ในเปลือกหอยนางรมเปลี่ยนเป็น CaO ตามสมการที่ (1) อย่างสมบูรณ์

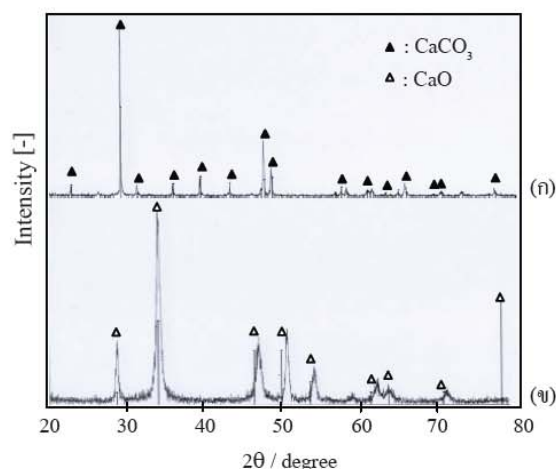


นอกจากนี้ยังพบว่า การให้ความร้อนที่ 873 และ 1073 K จะได้ผลเช่นเดียวกับกรณี 973 K แต่การให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 773 K แม้จะนานมากกว่า 10 ชั่วโมง ก็ยังไม่ทำให้

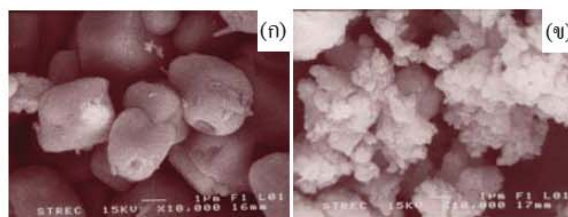
เกิดการเปลี่ยนแปลงตามสมการที่ (1) จึงสรุปว่าการให้ความร้อนที่อุณหภูมิอย่างน้อย 873 K สามารถเตรียมวัสดุดูดซับที่มีองค์ประกอบเป็น CaO จากเปลือกหอยนางรมได้ แต่การให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 773 K จะได้วัสดุดูดซับที่มีองค์ประกอบเป็น  $\text{CaCO}_3$  ในงานวิจัยนี้ไม่พบความแตกต่างขององค์ประกอบที่เกิดจากการเลือกใช้แก๊สต่างชนิดกัน

รูปที่ 3.2 (ก) และ (ข) แสดงภาพถ่าย SEM ของ CaO ที่สังเคราะห์ภายใต้บรรยากาศของอากาศและ ไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 973 K พบว่าเมื่อใช้แก๊สต่างชนิดกันจะทำให้ขนาดอนุภาคของวัสดุดูดซับที่ได้มีขนาดและลักษณะพื้นผิวของอนุภาคแตกต่างกัน โดย OS-treated-air-973 ( $\phi_{\text{avg}} = 2.8 \mu\text{m}$ ) มีขนาดอนุภาคใหญ่กว่า OS-treated- $\text{N}_2$ -973 ( $\phi_{\text{avg}} = 0.3 \mu\text{m}$ )

พื้นที่ผิวจำเพาะของ OS-treated-air-973 และ OS-treated- $\text{N}_2$ -973 ตามสมการ BET มีค่าเท่ากับ 5.85 และ 2.39  $\text{m}^2/\text{g}$  ตามลำดับ



รูปที่ 3.1 สเปกตรัม XRD ของ (ก) OS; (ข) OS-treated air-973



รูปที่ 3.2 ภาพถ่าย SEM ของ (ก) OS-treated-air-973; (ข) OS-treated- $\text{N}_2$ -973



### 3.2 การดูดซับฟอสเฟตแบบกะ

รูปที่ 3.3 แสดงการลดลงของความเข้มข้นฟอสเฟตในน้ำเสียสมมติ ( $C/C_0$ ) เทียบกับเวลา เมื่อทำการทดลองโดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสเฟต ( $C_0$ ) ในช่วง 15-100 ppm ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าค่า  $C_0$  ที่ใช้มีผลต่อเวลาที่ทำให้การดูดซับเข้าสู่สมดุลโดยเมื่อ  $C_0$  มีค่าสูงจะทำให้การดูดซับเข้าสู่สมดุลเร็ว ซึ่งทุกการทดลองแบบกะในงานวิจัยนี้พบว่า การดูดซับเข้าสู่สมดุลภายใน 4 ชั่วโมง

### 3.3 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟอสเฟต

รูปที่ 3.4 (ก), (ข) และ (ค) เป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟอสเฟตที่ถูกดูดซับที่สมดุล ( $q_e$ ) กับความเข้มข้นของสารละลายฟอสเฟตที่สมดุล ( $C_e$ ) ที่ 301 K เมื่อใช้ OS, OS-treated-air-T และ OS-treated-N<sub>2</sub>-T ตามลำดับ เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ในรูปที่ 3.4 (ก)-(ค) จะเห็นว่า การดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสมมติของวัสดุดูดซับแต่ละตัวมีพฤติกรรมคล้ายกับการดูดซับตามแบบจำลองของแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Model; สมการที่ 2) และ ฟรอนด์ลิช (Freundlich Adsorption Model; สมการที่ 3) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำผลการทดลองการดูดซับที่สมดุลที่อุณหภูมิคงที่ที่ได้มาวิเคราะห์เพื่อสร้างสมการอธิบายการดูดซับตามแบบจำลองทั้งสอง โดยแปลงสมการที่ (2) และ (3) เป็นสมการเชิงเส้น (linear equation) ดังสมการที่ (4) และ (5) ตามลำดับ

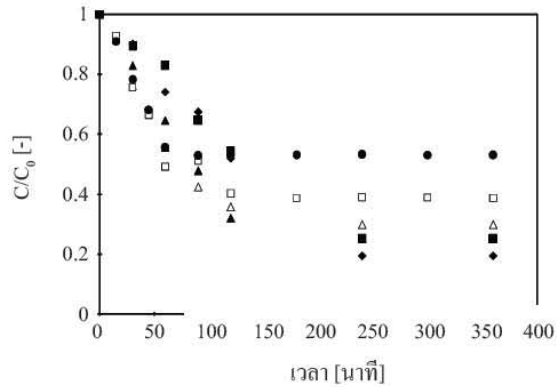
$$q_e = \frac{q_0 C_e}{K_L + C_e} \quad (2)$$

$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (3)$$

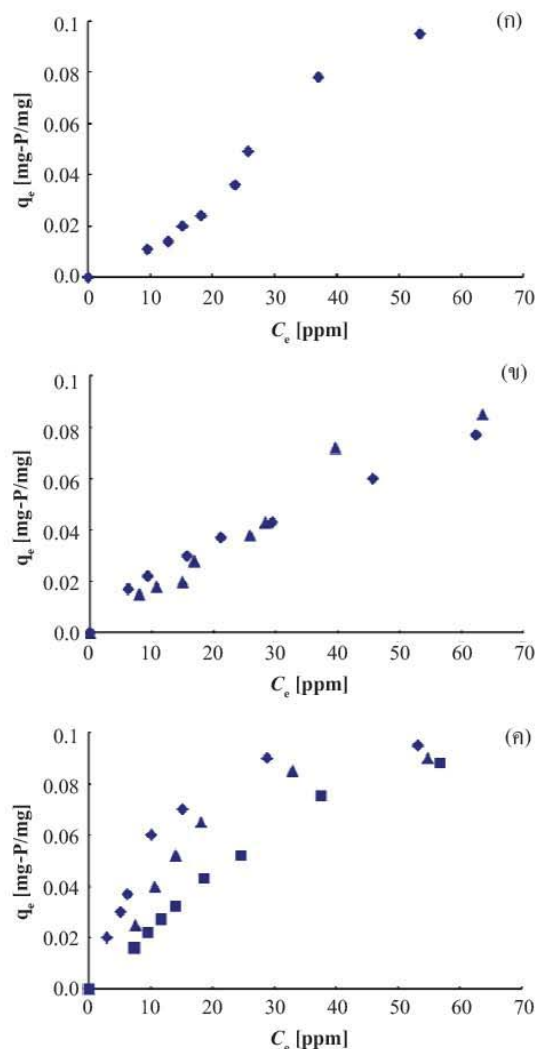
$$\frac{1}{q_e} = \frac{K_L}{q_0 C_e} + \frac{1}{q_0} \quad (4)$$

$$\log(q_e) = \log(K_F) + \frac{1}{n} \log(C_e) \quad (5)$$

รูปที่ 3.5 (ก) และ (ข) แสดงตัวอย่างกราฟเชิงเส้นที่ใช้ในการวิเคราะห์หาแบบจำลองที่เหมาะสมในการอธิบายพฤติกรรมดูดซับของ OS-treated-air-973



รูปที่ 3.3 การดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสมมติที่ 301 K ด้วยตัวดูดซับ OS-treated-N<sub>2</sub>-973 เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของฟอสเฟต ( $C_0$ ) เท่ากับ (◆) 15; (■) 20; (▲) 40; (△) 50; (□) 75; (●) 100 ppm

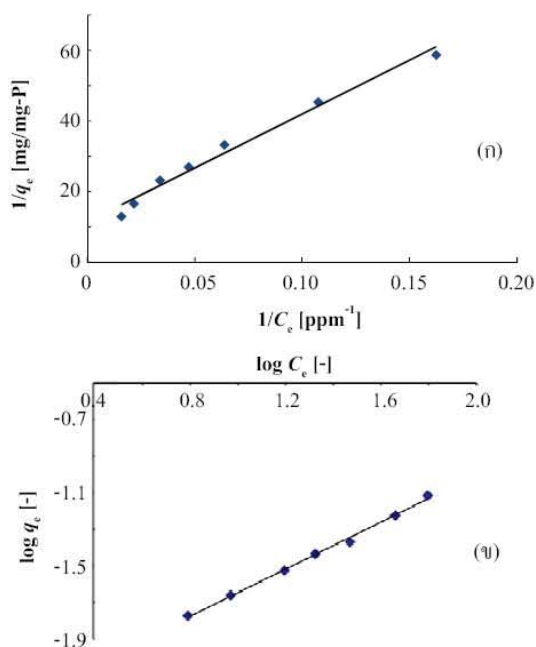


รูปที่ 3.4 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟอสเฟตที่ 301 K ของ (ก) OS; (ข) OS-treated-air-973, OS-treated-air-1073; (ค) OS-treated-N<sub>2</sub>-873, OS-treated-N<sub>2</sub>-973, OS-treated-N<sub>2</sub>-1073

ตารางที่ 3.1 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสมมติ ที่ 301 K ของวัสดุดูดซับที่เตรียมจากเปลือกหอยนางรม

วัสดุดูดซับ	Freundlich			Langmuir		
	$n$	$K_F$	$R^2$	$q_0$	$K_L$	$R^2$
OS	0.7298	$4.80 \times 10^{-4}$	0.9768	-	-	*
OS-treated-air-973	1.5625	$5.22 \times 10^{-3}$	0.9960	0.0883	26.952	0.9820
OS-treated-air-1073	1.0930	$2.04 \times 10^{-3}$	0.9675	0.2074	110.366	0.9514
OS-treated-N <sub>2</sub> -873	1.1855	$3.33 \times 10^{-3}$	0.9817	0.5835	249.950	0.9923
OS-treated-N <sub>2</sub> -973	1.6173	$1.06 \times 10^{-2}$	0.9591	0.1230	15.216	0.9853
OS-treated-N <sub>2</sub> -1073	1.6088	$8.96 \times 10^{-3}$	0.8838	0.2719	67.791	0.9459

หมายเหตุ: \* ค่า  $q_0$  และ  $K_L$  ที่คำนวณได้เป็นมีค่า ติดลบ แสดงว่าแบบจำลองแลงเมียร์ไม่เป็นจริงในกรณีนี้ จึงไม่จำเป็นต้องพลอตกราฟและคำนวณค่า  $R^2$

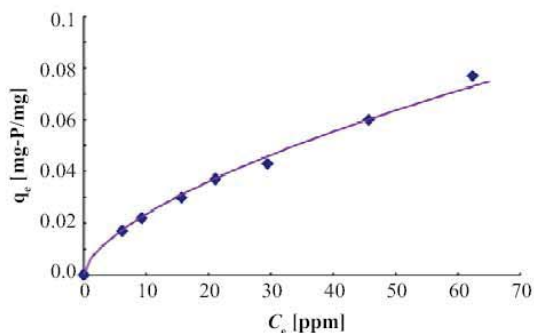


รูปที่ 3.5 ความสัมพันธ์เชิงเส้นของ  $q_e$  กับ  $C_e$  สำหรับแบบจำลองการดูดซับแบบ (ก) แลงเมียร์ และ (ข) ฟรุนด์ลิชเมื่อใช้ OS-treated-air-973

เส้นโค้งในรูปที่ 3.6 แสดงผลการคำนวณเมื่อใช้แบบจำลองและสัญลักษณ์แสดงผลการทดลองซึ่งจะเห็นว่าแบบจำลองสามารถอธิบายพฤติกรรมของการดูดซับของ OS-treated-air-973 ได้ดี โดยมีค่า  $R^2 = 0.9914$  ตารางที่ 3.1 แสดงผลการวิเคราะห์โดยสรุปสำหรับวัสดุดูดซับแต่ละตัวที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะเห็นว่าชนิดของแก๊สที่ใช้ในการเตรียมวัสดุดูดซับมีผลต่อพฤติกรรมการดูดซับของวัสดุดูดซับที่ได้ โดยเมื่อใช้อากาศวัสดุดูดซับจะมีพฤติกรรมการดูดซับ

ตารางที่ 3.2 ค่าความจุฟอสเฟตของวัสดุดูดซับชนิดต่างๆ เปรียบเทียบกับ OS-treated-N<sub>2</sub>-973

adsorbent	capacity (mg-P/g)	ref.
fly ash	9.15	[10]
red mud	95.8	[11]
red mud (acid-heat activated)	202.9	[11]
red mud (heat activated)	155.2	[11]
scallop shell	23.0	[12]
crab shell	108.9	[15]
OS-treated-N <sub>2</sub> -973	583.5	this work



รูปที่ 3.6 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟอสเฟตในน้ำเสียสมมติที่ 301 K ของ OS-treated-air-973; สัญลักษณ์แทนผลการทดลอง; เส้นโค้งแทนผลการคำนวณโดยใช้แบบจำลองฟรุนด์ลิชและค่าคงที่ในตารางที่ 3.1

เป็นแบบฟรุนด์ลิช และเมื่อใช้ในโครเจน วัสดุดูดซับจะมีพฤติกรรมการดูดซับเป็นแบบแลงเมียร์ วัสดุดูดซับที่มีความจุสูงสุดในช่วงความเข้มข้นที่พิจารณาในงานวิจัยนี้คือ OS-treated-N<sub>2</sub>-873 ตารางที่ 3.2 แสดงค่าความจุฟอสเฟตของ OS-treated-N<sub>2</sub>-873 เปรียบเทียบกับค่าความจุฟอสเฟตของวัสดุดูดซับที่ถูกพัฒนาขึ้นในงานวิจัยอื่น จะเห็นได้ว่าวัสดุดูดซับที่สังเคราะห์ได้ในงานวิจัยนี้มีค่าความจุในการดูดซับฟอสเฟตสูงที่สุด และสูงกว่า red mud ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยความร้อนและกรด HCl ของงานวิจัยที่ Lui และคณะ [11] ถึง 2.8 เท่า จึงยังกล่าวได้ว่าวัสดุดูดซับและวิธีการที่ใช้สังเคราะห์ในงานวิจัยนี้ได้ผลดีและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น เนื่องจากการกระตุ้นใช้ความร้อนอย่างเดียวโดยไม่ต้องใช้สารเคมี

#### 4. สรุป

เปลือกหอยนางรมเหลือทิ้งสามารถนำมาสังเคราะห์เป็นวัสดุดูดซับที่มีความจุในการดูดซับฟอสเฟตสูงได้โดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิไม่ต่ำกว่า 873 K ภายใต้สภาวะที่มีอากาศหรือไนโตรเจนไหลผ่าน วัสดุดูดซับที่ได้มี CaO เป็นองค์ประกอบหลัก และมีค่าความจุในการดูดซับฟอสเฟตสูงสุด (583.5 mg-P/g) เมื่อเตรียมโดยให้ความร้อนที่ 873 K ภายใต้บรรยากาศที่มีไนโตรเจนไหลผ่าน

#### 5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนจากสำนักงานส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัย (โครงการ RDG5220067)

#### 6. รายการสัญลักษณ์

$C$	ความเข้มข้นฟอสเฟตที่เวลาใดๆ [ppm]
$C_0$	ความเข้มข้นฟอสเฟตที่เวลาเริ่มต้น [ppm]
$C_e$	ความเข้มข้นฟอสเฟตที่สมดุล [ppm]
$K_L$	ค่าคงที่ในแบบจำลองแลงเมียร์ [-]
$K_F$	ค่าคงที่ในแบบจำลองฟรุนดลิช [-]
$n$	ค่าคงที่ในแบบจำลองฟรุนดลิช [-]
$q_0$	ค่าการดูดซับสูงสุดในแบบจำลองแลงเมียร์ [mg-P/g]
$q_e$	ปริมาณฟอสเฟตที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับที่สมดุล [mg-P/g]

#### 7. เอกสารอ้างอิง

- [1] [http://www.pcd.go.th/info\\_serv/water\\_wt.html#s1](http://www.pcd.go.th/info_serv/water_wt.html#s1)
- [2] [http://www.dmr.go.th/ewt\\_news.php?nid=15055](http://www.dmr.go.th/ewt_news.php?nid=15055)
- [3] <http://www.eoearth.org/article/Eutrophication>
- [4] ประกาศกระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม, ราชกิจจานุเบกษา, 2 มิถุนายน 2553
- [5] D. A. Georgantas and H. P. Grigoropoulou, "Orthophosphate and metaphosphate ion removal from aqueous solution using alum and aluminum hydroxide", J. Colloid Interf. Sci., 315 (2007) 70–79
- [6] A. H. Caravelli, E. M. Contreras and N. E. Zaritzky, "Phosphorous removal in batch systems using ferric chloride in the presence of activated sludges", J. Hazard. Mater., 177 (2010) 199–208
- [7] C. Sommariva, A. Converti and M. Del Borghi, "Increase in phosphate removal from wastewater by alternating aerobic and anaerobic conditions", Desalination, 108 (1996) 255–260
- [8] M. Özacar, "Adsorption of phosphate from aqueous solution onto alunite", Chemosphere, 51 (2003) 321–327
- [9] A. N. Onar, N. Balkaya and T. Akyüz, "Phosphate Removal by Adsorption" Environ. Technol., 17 (1996) 207–213
- [10] K. Xu, T. Deng, J. Liu and W. Peng, "Study on the phosphate removal from aqueous solution using modified fly ash", Fuel, 89 (2010) 3668 – 3674
- [11] C.J. Liu, Y.Z. Li, Z.K. Luan, Z.Y. Chen, Z.G. Zhang and Z.P. Jia, "Adsorption removal of phosphate from aqueous solution by active red mud", J. Environ. Sci. 19 (2007) 1166 – 1170
- [12] S. H. Yeom and K.-Y. Jung, "Recycling wasted scallop shell as an adsorbent for the removal of phosphate", J. Ind. Eng. Chem., 15 (2009) 40–44
- [13] C. W. Lee, H. B. Kwon, H. P. Jeon and B. Koopman, "A new recycling material for removing phosphorus from water", Journal of Cleaner Production, 17 (2009) 683–687
- [14] H.-B. Kwon, C.-W. Lee, B.-S. Jun, J.-D. Yun, S.-Y. Weon and B. Koopman, "Recycling waste oyster shells for eutrophication control", Resour. Conserv. Recy., 41 (2004) 75–82
- [15] J.J. Dong and H.Y. Sung, "Recycling wasted biomaterial, crab shells, as an adsorbent for the removal of high concentration of phosphate", Bioresource Technol. 100 (2009) 2646 - 2649
- [16] มั่นสิน ดัชนีกุลเวศม์, มั่นรักษ์ ดัชนีกุลเวศม์ "คู่มือวิเคราะห์คุณภาพน้ำ", พิมพ์ครั้งที่ 5, โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## Recycling oyster shell as adsorbent for phosphate removal

Ratanaporn Yuangsawad<sup>1\*</sup>, Duangkamol Na-Ranong<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Division of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep  
2 Nanglinchee Rd., Thungmahamek, Satom, Bangkok, 10120

<sup>2</sup>Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, King's Mongkut Institute of Technology Ladkrabang  
1 Chalongkrung Rd., Ladkrabang, Bangkok, 10520

\*e-mail: [ratanaporn.y@rmutk.ac.th](mailto:ratanaporn.y@rmutk.ac.th)

---

**Abstract** – The utilization of oyster shell wastes as the adsorbent for phosphate removal was studied. Oyster shell after thermal treatment has high CaO content which is active component for the phosphate adsorption from wastewater. The treating conditions influencing the adsorption capacity were investigated. The results indicated that the treating temperature and type of inert gas strongly effected on the phosphate removal capacity. The maximum adsorption capacity calculated from Langmuir isotherm was 583.5 mg-P/g when the oyster shell treated at 873 K in N<sub>2</sub> atmosphere was used as the adsorbent. The obtained adsorbent was successfully used for phosphate removal in the continuous system as well.

**Keywords:** *Oyster shell, phosphate removal, adsorption, CaO, wastewater*

---

### 1. INTRODUCTION

Recently, the amount of domestic wastewater has been discharged increasingly. In 2007, the wastewater was discharged to the surroundings about 15,000 million liters/day and it is likely to reach 20,000 million liters/day by 2017 [1]. The household wastewater contains 4 – 15 mg/l of phosphate and the discharge of high concentration of phosphate into the river, sea or other reservoirs cause the rapid growth of algae called the eutrophication phenomena [2]. Therefore, the maximum allowable of phosphate in the discharged wastewater was set as 2 mg/l.

The methods for removal of phosphate from the wastewater have been proposed by many researchers [2-5]. The chemical precipitation with alum, Al(OH)<sub>3</sub> and ferric oxide are widely used to remove phosphate at industrial level [3]. However, a toxic

chemical was also generated and difficult to handle these wastes. The phosphate removal by adsorption is an attractive

method due to the environmental friendly and simplicity operation [4-9]. The adsorption material such as dolomite, red mud, fly ash are considered as a low cost adsorbent and can be used to remove the phosphate economically but these materials have low capacity [4-6].

The oyster shell enriched with CaCO<sub>3</sub> seems to be the one of the suitable materials for phosphate removal because CaO which is an active component for phosphate adsorption could be produced from CaCO<sub>3</sub> [7]. Furthermore, a large amount of oyster shells discharging from the restaurant as waste cause the environmental problem as well. Therefore, the recycling of the abundant oyster shells into the useful materials can be the method to reduce the oyster shells wastes.

The objective of this research was to study the feasibility of the recycling oyster shell wastes as the absorbent for phosphate removal. The effect of the treatment condition on the phosphate removal was investigated. In the addition, the phosphate removal in the continuous system was also performed.

## 2. METHODOLOGY

### 2.1. Materials

Oyster shells (OS) were obtained from Surat Thani province. The dried shell was crushed into the size of 1-3 mm. The obtained powder was treated under the different atmospheric gas (dry  $N_2$ , wet  $N_2$ , dry air and wet air). The treating temperature was varied in the range of 773 – 1073 K. The treated oyster shell was denoted as OS-treated, gas-T hereafter.

### 2.2. Adsorption studies

The test of phosphate adsorption over the treated oyster shells was divided into 2 parts. The first part was the batch experiment and the second part was the continuous experiment. Standard phosphate solution was prepared from dissolving anhydrous  $KH_2PO_4$  (Ajax Finechem Pty Ltd.) in the distilled water to obtain the 15 – 100 mg/l of phosphate solution. For the batch experiment, 0.1 g of treated oyster shell was mixed with 200 ml of standard solution and magnetically stirred. The solution was collected every 20 min in order to measure the residue phosphate according to the ascorbic method [8] with UV-Vis spectrophotometer.

The second part was the continuous experiment, the 15 mg/l of phosphate solution was fed into the stainless tube which packed with the 0.3 g of adsorbent. The volumetric flow rate was  $300 \text{ cm}^3/\text{h}$ . The phosphate concentration at the outlet was measured by the same method employed in the case of batch experiment.

## 3. RESULTS AND DISCUSSIONS

### 3.1. Properties of oyster shell and treated oyster shell

Fig.1 shows the XRD patterns of the oyster shell (OS) and treated oyster shell under the temperature of 973 K in air atmosphere (OS-treated, air-973). The peaks corresponding to the  $CaCO_3$  was found in the XRD pattern of OS and the peak corresponding to the CaO appeared in the XRD pattern of OS-

treated, air-973. The results indicated that  $CaCO_3$  existed in the oyster shell transformed into the CaO after the thermal treating at a high enough temperature. These results corresponded to the XRF results as showed in Table 1. The oyster shell had 93% of  $CaCO_3$ . After treating at the temperature of 973 K, the oyster shell treated under air and  $N_2$  atmosphere contained 97 and 95.7% of CaO respectively. The previous studies reported that the efficiency of phosphate removal increased with the increasing of CaO content [7]. Therefore, the obtained adsorbent material in this study seems suitable for phosphate removal.

Fig.2 shows the SEM image of the OS-treated, air-973 and OS-treated,  $N_2$ -973. It was found that the surfaces of oyster shells treated under the air atmosphere were smooth and had the larger size particle than those of oyster shell treated under the  $N_2$  atmosphere.

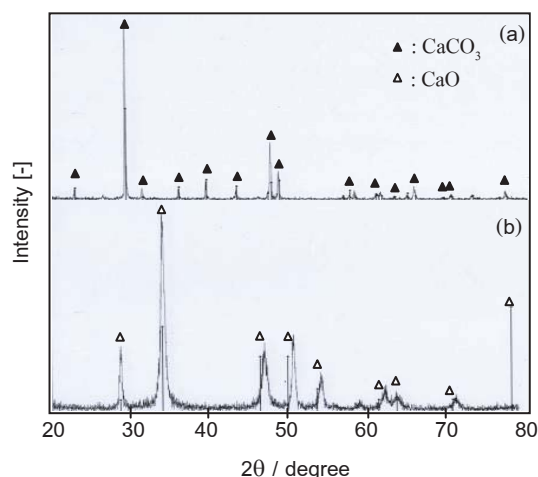
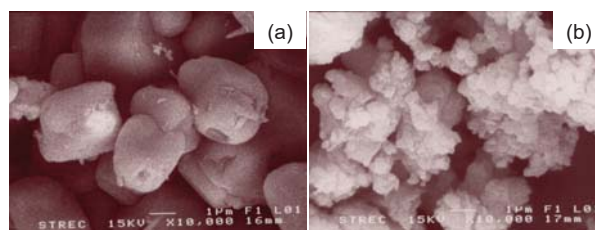


Fig. 1 XRD spectrum of (a) OS and (b) OS-treated, air-973

Table 1 The composition of OS and OS treated from XRF

Sample	$CaCO_3$ [%]	CaO [%]	Others [%]
OS	93.3	-	6.7
OS treated, air-973	-	97.0	3.0
OS treated, $N_2$ -973	-	95.7	4.3



$$q_e = K_F C_e^{1/n} \quad (3)$$

$$\log(q_e) = \log(K_F) + \frac{1}{n} \log(C_e) \quad (4)$$

Fig.2 Scanning electron microscopy (SEM) micrograph of  
(a) OS-treated, air-973; (b) OS-treated, N<sub>2</sub>-973

### 3.2. Phosphate removal

Fig.3 showed the effect of treating temperature on the percentage of phosphate removal. It could be seen that at a lower temperature of 873 K, the percentage of phosphate removal was approximately 50% and the adsorption capacity increased to 80% when the treating temperature was raised to 973 K. After reaching the maximum value, the percentage of phosphate removal dropped to 40% when the treating temperature increased to 1073 K. The results suggested that the treating temperature strongly affected on the removal capacity of the adsorbent.

In order to study the effect of water and type of inert gas on the phosphate removal, the oyster shell was treated under the difference of gas atmosphere (dried N<sub>2</sub>, dried air and wet N<sub>2</sub>). It was found that the adsorption capacity of OS-treated, air-973 was lower than those of OS-treated, N<sub>2</sub>-973 about 1.7 times as showed in Fig.4. In the addition, the difference of adsorption capacity was no observed when a small amount of water was added (Fig.4). It could be said that the addition of water showed negligible effect on the capacity of adsorbent in this study.

Fig.5 shows the adsorption of phosphate by OS-treated, N<sub>2</sub>-973 at various initial phosphate concentrations. It could be seen that phosphate quickly adsorbed over OS-treated, N<sub>2</sub>-973 in the first 120 min. After that the concentration of phosphate was almost constant and the adsorption reached equilibrium at 180 min for all initial phosphate concentrations. Therefore, the phosphate concentration at the time of 180 min was selected to investigate the adsorption isotherm.

In order to describe the adsorption behavior of OS treated, the Langmuir and Freundlich isotherm equation was employed as listed in eq.(1) –(4).

Langmuir equation;

$$q_e = \frac{q_0 C_e}{K_L + C_e} \quad (1)$$

$$\frac{1}{q_e} = \frac{K_L}{q_0 C_e} + \frac{1}{q_0} \quad (2)$$

Freundlich equation;

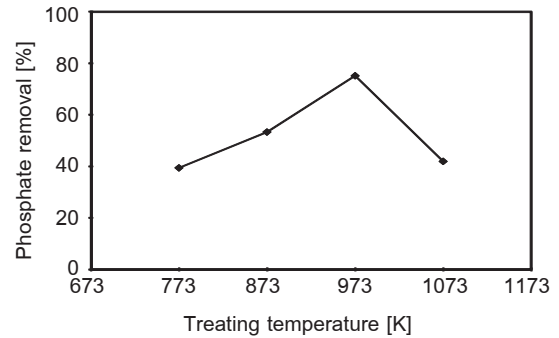


Fig.3 Effect of treating temperature on the phosphate removal ( $C_0 = 25$  mg/l, N<sub>2</sub> as inert gas)

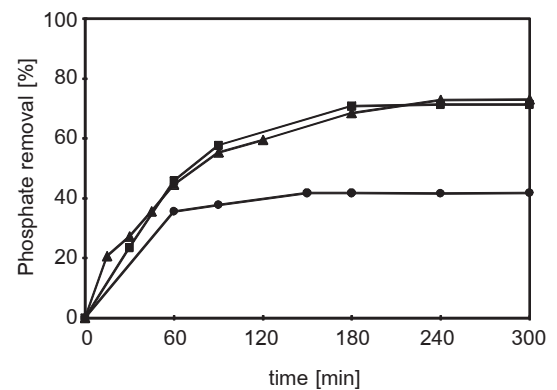


Fig.4 The percentage of phosphate removal at various atmospheric conditions ( $C_0 = 50$  mg/l);

■ ) OS-treated, N<sub>2</sub>-973, (●) OS-treated, air-973 and  
▲ ) OS-treated, 1.5% H<sub>2</sub>O + N<sub>2</sub>-973

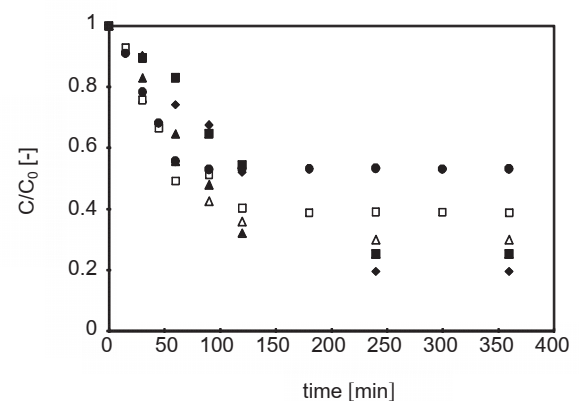


Fig.5 Phosphate removal with time at various initial phosphate concentrations (OS-treated, N<sub>2</sub>-973 as adsorbent)  
C<sub>0</sub> = (◆) 15; (■) 20; (▲) 40; (△) 50; (□) 75 and (●) 100 mg/l

The linear form of Langmuir and Freundlich isotherm equation (eq.2 and 4) were used to estimate the adsorption isotherm constants and the correlation coefficients ( $R^2$ ). Table 2 shows the adsorption isotherm equation and its constants with the highest value of  $R^2$  for each adsorbent. It should be noted that the oyster shell treated under air atmosphere fitted better with Freundlich equation. Contrary to the treating in air, the oyster shell treated under N<sub>2</sub> atmosphere was well fitted by Langmuir equation. These results indicated that the type of inert gas had strongly effect on the adsorption behavior of the adsorbent and the phosphate adsorbed over the oyster treated under N<sub>2</sub> atmosphere was the monolayer adsorption.

Furthermore, the adsorption constants listed in Table 2 also indicated the adsorption capacity of the adsorbent. The maximum adsorption capacity determined by Langmuir isotherm equation was 583.5 mg-P/g obtained from OS-treated, N<sub>2</sub>-873 which greater than the adsorption capacity of 108.9 and 23 mg-P/g obtained from the treated crab shell and scallop shell, respectively [9-10]. Fig.6 shows the adsorption isotherm of the OS-treated, N<sub>2</sub>-873, the symbol represented the data obtained from the experiment and the line represented the calculated data from Langmuir isotherm equation and its constants from Table 2. The result shows that the adsorption model showed a good correlation between the experimental and calculation results.

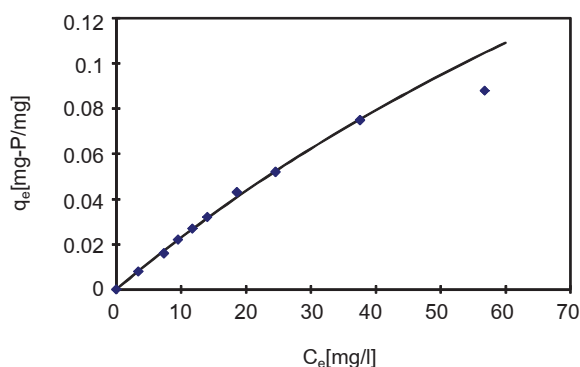


Fig.6 Langmuir isotherm of the phosphate adsorption on the OS-treated, N<sub>2</sub>-873

In order to study the possibility of the using of the treated oyster shell as the adsorbent for phosphate removal from household wastewater, the phosphate adsorption in the continuous system was carried out. Fig. 6 shows the adsorption of phosphate when the phosphate solution was continuously feed through the bed of OS-treated, N<sub>2</sub>-973. The result shows that the adsorbent could be used to maintain the phosphate concentration under the regulation limit (2 mg/l or C/C<sub>0</sub> = 0.13) for 2 hours when the initial concentration of phosphate solution was 15 mg/l.

Table 2 Adsorption isotherm equation and its constants of OS and OS treated

adsorbent	Isotherm equation	constants	$R^2$
OS	Freundlich	$n = 0.7298$ $K_f = 4.8 \times 10^{-4}$	-
OS-treated, air-973	Freundlich	$n = 1.5625$ $K_f = 5.22 \times 10^{-3}$	0.98
OS-treated, air-1073	Freundlich	$n = 1.0930$ $K_f = 2.04 \times 10^{-3}$	0.95
OS-treated, N <sub>2</sub> -873	Langmuir	$q_0 = 0.5835$ $K_L = 249.95$	0.99
OS-treated, N <sub>2</sub> -973	Langmuir	$q_0 = 0.1230$ $K_L = 15.216$	0.97
OS-treated, N <sub>2</sub> -1073	Langmuir	$q_0 = 0.2719$ $K_L = 67.7910$	0.94

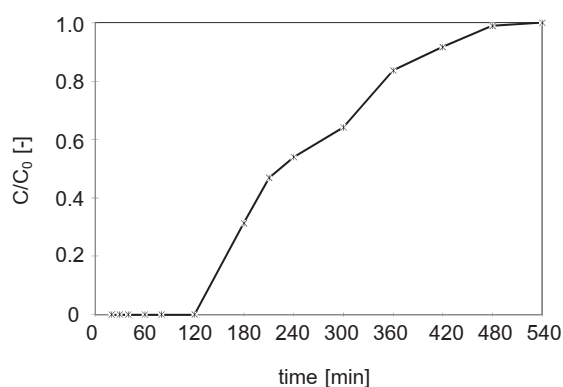


Fig. 7 Phosphate adsorption on the OS-treated, N<sub>2</sub>-973 in the continuous experiment (C<sub>0</sub> = 15 mg/l)

#### 4. CONCLUSION

The waste oyster shell could be used as the adsorbent for phosphate removal. The adsorption capacity of the adsorbent was strongly affected by the treating temperature and type of inert gas. The highest adsorption capacity of 583.5 mg-P/g was obtained when the oyster shell was treated at the temperature of 873 K under N<sub>2</sub> atmosphere. Furthermore, the obtained adsorbent was also successfully used for phosphate removal in the continuous system.

#### 5. ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by grant No. RDG5220067 from the Thailand Research Fund (TRF).

#### 6. NOMENCLATURE

C	concentration of phosphate (mg/l)
C <sub>0</sub>	initial concentration of phosphate (mg/l)
q <sub>e</sub>	amount of adsorbed phosphate per gram of adsorbent (mg-P/g)
C <sub>e</sub>	phosphate concentration in the solution at equilibrium (mg/l)
q <sub>0</sub> , K <sub>L</sub>	adsorption isotherm constant for the Langmuir equation
n, K <sub>F</sub>	adsorption isotherm constant for the Freundlich equation

#### REFERENCES

- [1] [http://www.pcd.go.th/info\\_serv/water\\_wt.html#s1](http://www.pcd.go.th/info_serv/water_wt.html#s1)
- [2] B. Grzmil, J. Wronkowski, Removal of phosphates and fluorides from industrial wastewater, *Desalination* 189(2006) 261-268 .
- [3] A. H. Caravelli, E. M. Contreras and N. E. Zaritzky, Phosphorous removal in batch systems using ferric chloride in the presence of activated sludges, *J. Hazard. Mater.*, 177 (2010) 199–208
- [4] C.J. Liu, Y.Z. Li, Z.K. Luan, Z.Y. Chen, Z.G. Zhang and Z.P. Jia, Adsorption removal of phosphate from aqueous solution by active red mud, *J. Environ. Sci.*, 19(2007), 1166-1170.
- [5] S. Karaca, A. Gürses, M. Ejder and M. Açıkyıldız, Adsorptive removal of phosphate from aqueous solutions using raw and calcinated dolomite, *J. Hazard. Mater.*, 128(2006), 273 – 279.
- [6] K. Xu, T. Deng, J. Liu and W. Peng, Study on the phosphate removal from aqueous solution using modified fly ash, *Fuel*, 89 (2010) 3668 – 3674.
- [7] A. N. Onar, N. Balkayaa and T. Akyüz, Phosphate removal by adsorption, *Environ. Technol*, 17 (1996) 207–213.
- [8] <http://www.umass.edu/tei/mwwp/acrobat/sm4500P-E>. PDF “Standard method for the examination of water and wastewater”.
- [9] D.J. Jeon, S.H. Yeom, Recycling wasted biomaterial, crab shells, as an adsorbent for the removal of high concentration of phosphate, *Bioresouce Technol.*, 100(2009), 2646-2649.
- [10] S.H. Yeom, K.Y. Jeong, Removal of phosphate using a packed-bed containing scallop shell, *J. Ind. Eng. Chem.*, 15(1), 40-44.

ภาคผนวก ข. กิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับการนำผลจากโครงการไปใช้ประโยชน์

แนะนำโครงการแก่ผู้นำชุมชนที่มีโครงการสร้างเครื่องบำบัดน้ำเสียครัวเรือนรับทราบ มีวีดิทัศน์ประกอบ (แผ่น CD)

ภาคผนวก ค. ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผน กิจกรรมที่ดำเนินการมา และผลที่ได้รับ

วัตถุประสงค์	กิจกรรมที่วางแผน	กิจกรรมที่ดำเนินการมา	ผลที่ได้รับ
1. กำหนดวิธีการและสภาวะที่เหมาะสมและง่ายต่อการผลิตสารดูดซับจากเปลือกหอยนางรม	1.1 ติดตั้งเครื่องมือที่ใช้ในการผลิตสารดูดซับ	1.1.1 ติดตั้งชุดสังเคราะห์สารดูดซับสำหรับใช้เตรียมในห้องปฏิบัติการ 1.1.2 ออกแบบ-สร้างเครื่องสังเคราะห์สารดูดซับขนาดใหญ่	1.1.1 ชุดสังเคราะห์สารดูดซับที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ 1.1.2 ชุดสังเคราะห์สารดูดซับที่ใช้ในงานภาคสนาม
	1.2 เตรียมสารดูดซับจากเปลือกหอยนางรม	1.2.1 เตรียมสารดูดซับด้วยวิธีทางความร้อนโดยเปลี่ยนอุณหภูมิและชนิดของแก๊สพา 1.2.2 วิเคราะห์โครงสร้าง, องค์ประกอบของสารดูดซับที่ได้ด้วย XRF, BET, XRD	1.2.1 สารดูดซับที่มีองค์ประกอบหลักเป็น CaO (97%) มีความพรุน, พื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่าเปลือกหอยนางรม
2. ทดสอบประสิทธิภาพในการลดไอออนโลหะหนักและฟอสเฟตในน้ำเสีย	2.1 ออกแบบและติดตั้งเครื่องมือแบบกะที่ใช้ทดสอบการดูดซับ	2.1.1 ออกแบบชุดทดสอบการดูดซับแบบกะให้สามารถควบคุมอุณหภูมิขณะทำการทดลองได้	2.1.1 ชุดทดสอบการดูดซับแบบกะขนาด 200 ml ควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ขณะทำการทดลองได้
	2.2 ทดสอบการดูดซับโดยใช้น้ำเสียสมมติด้วยระบบแบบกะ	2.2.1 ทดสอบการดูดซับของตะกั่ว, แคดเมียม, เหล็ก, สังกะสี และโครเมียม ที่ 25°C โดยเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ 2.2.2 ทดสอบการดูดซับของฟอสเฟต ที่ 25°C ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ ด้วยตัวดูดซับที่เตรียมภายใต้สภาวะต่างๆ	2.2.1 ไอโซเทอร์มการดูดซับของโลหะแต่ละชนิด 2.2.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟอสเฟตของสารดูดซับแต่ละตัว พบว่าสารดูดซับที่เตรียมโดยใช้อากาศที่ 700 C มีความเหมาะสมที่สุดในการบำบัดฟอสเฟตในน้ำเสียครัวเรือน
	2.3 ออกแบบและติดตั้งเครื่องมือแบบป้อนสารต่อเนื่อง	2.3.1 ออกแบบและติดตั้งเครื่องมือแบบป้อนสารต่อเนื่อง	2.3.1 ชุดทดสอบการดูดซับที่ทำงานโดยป้อนสารต่อเนื่องสามารถควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ได้
	2.4 ทดสอบการดูดซับโดยใช้น้ำเสียสมมติด้วยระบบแบบป้อนสารต่อเนื่อง	2.4.1 ทดสอบการดูดซับของตะกั่ว, แคดเมียม, เหล็ก, สังกะสี และโครเมียม ที่ 25°C ภายใต้สภาวะต่างๆ 2.4.2 ทดสอบการดูดซับของฟอสเฟต ที่ 25°C ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ ด้วยตัวดูดซับที่เตรียมภายใต้สภาวะต่างๆ	2.4.1 กราฟเบรคทูร์จของการดูดซับตะกั่ว, แคดเมียม, เหล็ก, สังกะสี สำหรับโครเมียมการดูดซับเกิดน้อยมากไม่สามารถวัดได้ 2.4.2 กราฟเบรคทูร์จของการดูดซับฟอสเฟต
	2.5 ทดสอบการดูดซับโดยใช้ตัวอย่างน้ำที่เก็บจากชุมชน	2.5.1 ทดสอบการดูดซับโลหะหนักและกำหนดสภาวะที่เหมาะสมเมื่อใช้ตัวอย่างน้ำในชุมชน 2.5.2 ทดสอบการดูดซับฟอสเฟตและกำหนดสภาวะที่เหมาะสมเมื่อใช้ตัวอย่างน้ำเสียครัวเรือน	2.5.1 ไม่สามารถหาตัวอย่างน้ำในชุมชนที่มีโลหะหนักได้ 2.5.2 สารดูดซับ 0.3 กรัม ใช้บำบัดน้ำที่มีฟอสเฟตเข้มข้น 15 ppm ให้มีความเข้มข้นต่ำกว่าที่กฎหมายกำหนดได้ 600 ml

ตารางเปรียบเทียบวัตถุประสงค์ กิจกรรมที่วางแผน กิจกรรมที่ดำเนินการมา และผลที่ได้รับ (ต่อ)

วัตถุประสงค์	กิจกรรมที่วางแผน	กิจกรรมที่ดำเนินการมา	ผลที่ได้รับ
3. สร้างเครื่องกรองน้ำเพื่อใช้ในครัวเรือน	3.1 ออกแบบ/ประเมินราคาโดยละเอียด/สร้างเครื่องกรองน้ำ	3.1.1 ออกแบบ ประกอบ และประเมินราคาเครื่องกรองน้ำ	3.1.1 เครื่องกรองน้ำขนาดเล็กราคาประมาณ 300 บาท
	3.2 ทดสอบประสิทธิภาพ	3.2.1 ทดสอบประสิทธิภาพโดยใช้น้ำเสียสมมติ	3.2.1 กราฟเปอร์เซ็นต์การดูดซับแคดเมียมและสังกะสี 3.2.2 น้ำเสียสมมติที่มีโลหะทั้ง 5 ชนิดเกิดการตกตะกอน 3.2.3 การดูดซับโครเมียมเกิดน้อยมาก
4. สร้างเครื่องต้นแบบสำหรับบำบัดน้ำเสียชุมชน	4.1 ออกแบบ/ประเมินราคาโดยละเอียด/สร้างเครื่องต้นแบบ	4.1.1 ออกแบบ ประกอบ และประเมินราคาเครื่องต้นแบบ	4.1.1 เครื่องต้นแบบขนาด 50 ลิตร ราคาประมาณ 1,700 บาท
	4.2 ทดสอบประสิทธิภาพ	4.2.1 ทดสอบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียที่มีฟอสเฟตเข้มข้น 12 ppm	4.2.1 เครื่องต้นแบบบำบัดน้ำเสียด้วยอัตราการไหล 1 ลิตรต่อชั่วโมงให้ผ่านเกณฑ์ที่กฎหมายกำหนดได้นาน 10 ชั่วโมง
5. ถ่ายทอดเทคโนโลยี	5.1 ติดต่อองค์กรบริหารงานส่วนท้องถิ่นเพื่อเผยแพร่ผลงาน	5.1.1 ติดต่อองค์กรท้องถิ่น	5.1.1 ผู้นำชุมชนแสดงความสนใจที่จะนำไปปรับใช้ในชุมชน