



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษากลไกการดูดซับสารหนูของสารดูดซับที่สังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรม  
The study of arsenic adsorption mechanism of the adsorbent synthesised from  
oyster shells

นางวลัยรัตน์ จันทระอัมพร

นางสาวพิชญ์นิภา ขวัญเฟือก

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้คณะ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



## รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์

การศึกษากลไกการดูดซับสารหนูของสารดูดซับที่สังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรม  
The study of arsenic adsorption mechanism of the adsorbent synthesised from  
oyster shells

นางวลัยรัตน์ จันทระอัมพร

นางสาวพิชญ์นิภา ขวัญเฟือก

ได้รับทุนสนับสนุนงานวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้คณะ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ชื่อโครงการ (ภาษาไทย) ..... การศึกษากลไกการดูดซับสารหนูของสารดูดซับที่สังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรม  
แหล่งเงิน งบประมาณเงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์

ประจำปีงบประมาณ 2558 ..... จำนวนเงินที่ได้รับการสนับสนุน 50,000 บาท

ระยะเวลาทำการวิจัย ..... 1 ปี ตั้งแต่ 1 ตุลาคม 2557 ถึง 30 กันยายน 2558

ชื่อ-สกุล หัวหน้าโครงการ และผู้ร่วมโครงการวิจัย พร้อมระบุ หน่วยงานต้นสังกัด

1. นางวลัยรัตน์ จันทอัมพร ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ (หัวหน้าโครงการ)
2. นางสาวพิชญ์นิภา ขวัญเฟือก ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ (นักศึกษาระดับปริญญาเอกผู้ร่วมโครงการ)

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ ศึกษากลไกการดูดซับสารหนูด้วยสารดูดซับที่สังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรม และผลของอัตราเร็วของการปั่นกววนที่มีต่อความสามารถในการดูดซับสารหนู จากการวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดพบว่า หลังจากดูดซับสารหนูแล้ว พบว่าพื้นผิวของสารดูดซับถูกปกคลุมด้วยสารคล้ายไบอูเลียสีขาว นอกจากนี้ จากผลการวิเคราะห์ด้วยเครื่องวิเคราะห์การเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ พบว่า หลังดูดซับสารหนู สารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรมบางส่วนจะเปลี่ยนจากสาร CaO เป็นสาร Ca-As-O

จากการศึกษาผลกระทบของอัตราการปั่นกววนที่มีผลต่อการดูดซับสารหนู ที่อัตราการปั่นกววน 250 -750 รอบต่อนาที พบว่า เมื่อเพิ่มอัตราการปั่นกววน ปริมาณการดูดซับสารหนูเพิ่มขึ้น ซึ่งน่าจะเกิดจากการที่อัตราการปั่นกววนเพิ่มมากขึ้นทำให้ชั้นฟิล์มที่เคลือบภายนอกสารดูดซับบางลง ส่งผลให้สารหนูสามารถแพร่ผ่านชั้นฟิล์มเข้าไปยังผิวของสารดูดซับได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับสมการของแบบจำลองการดูดซับ Pseudo-second order

คำสำคัญ : สารหนู การดูดซับ สารดูดซับ เปลือกหอยนางรม

**Research Title:** The study of arsenic adsorption mechanism of the adsorbent synthesised from oyster shells

**Researchers:** 1. Mrs. Walairat Chandra-ambhorn 2. Miss Pichnipa Khownpurk

**Faculty:** ..... Engineering ..... **Department:** ..... Chemical Engineering .....

## ABSTRACT

This research studies the mechanism of arsenic adsorption by the adsorbent synthesised from oyster shells and the effect of rotational speed on the arsenic adsorption ability. From SEM analysis, it was found that after arsenic adsorption the adsorbent surface was covered by white glass leaf - like substance. Moreover, it was found from X-ray diffraction analysis that, after arsenic adsorption, some of the adsorbent changed from CaO into Ca-As-O.

From the study of the effect of rotational speed on arsenic adsorption at the rotational speed range of 250 – 750 rpm, it was found that arsenic adsorption capacity increased with increasing the rotational speed. This should be because when the rotational speed was increased, the external film covering the adsorbent was thinner resulting in the increase in diffusion ability of arsenic through the film which fitted with the pseudo-second order adsorption model.

**Keywords :** Arsenic, Adsorption, Adsorbent, Oyster shell

## กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จากแหล่งทุนเงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2558 (เลขรหัสโครงการ 2558-01-01043)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัลย์รัตน์ จันทรัมย์พร



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	I
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	II
กิตติกรรมประกาศ.....	III
สารบัญ.....	IV
สารบัญตาราง.....	VI
สารบัญรูป.....	VII
<b>บทที่ 1 บทนำ</b> .....	<b>1</b>
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
<b>บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง</b> .....	<b>3</b>
2.1 กระบวนการการดูดซับ.....	3
2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ.....	3
2.3 การหาประสิทธิภาพของการดูดซับสารหนู.....	4
2.4 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสารหนู.....	5
2.5 กลไกการดูดซับสารหนูด้วยสารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรม.....	6
2.6 กระบวนการวิเคราะห์สารหนูด้วยกระบวนการไทเทรต.....	9
2.7 หลักการทดสอบ SEM.....	9
2.8 การวิเคราะห์ pH <sub>ZPC</sub> .....	10
2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	11
<b>บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย</b> .....	<b>22</b>
3.1 สารเคมี และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง.....	22
3.2 วิธีการทดลอง.....	22

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
<b>บทที่ 4 ผลการวิจัย</b>	25
4.1 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงสัณฐาน (Morphology) ของสารดูดซับ ที่สังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรม	25
4.2 การศึกษา $pH_{zpc}$ ของสารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรม	27
4.3 การศึกษาผลกระทบของอัตราการปั่นกวนที่มีต่อการดูดซับสารหนู	28
4.4 การศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงอัตราการปั่นกวนที่มีผลต่อการดูดซับสารหนู	33
4.5 การศึกษาผลกระทบของขนาดอนุภาคของสารดูดซับที่สังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรม	35
<b>บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ</b>	40
5.1 สรุปผลการวิจัย	40
5.2 ข้อเสนอแนะ	41
<b>บทที่ 6 สรุปผลผลิตงานวิจัย</b>	42
<b>เอกสารอ้างอิง</b>	50
<b>ภาคผนวก</b>	54
<b>ประวัตินักวิจัย</b>	56

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
4.1 ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณจาก Pseudo-first order rate equation และ Pseudo-second order rate equation ที่อัตราการปั่นกวน 250-850 rpm.....	30
4.2 ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณจากแบบจำลอง External mass transfer แบบจำลองของ Weber and Moris และแบบจำลองของ Urano and Tachikawa (U&T) ที่อัตราการปั่นกวน 250-850 rpm.....	32
4.3 ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณจาก Pseudo-first order rate equation และ Pseudo-second order rate equation ที่ขนาดอนุภาค 106-150 150-250 250-450 และ 450-600 ไมโครเมตร.....	37
4.4 ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณจากแบบจำลอง External mass transfer แบบจำลองของ Weber and Moris และแบบจำลองของ Urano and Tachikawa (U&T) ที่ขนาดอนุภาคของสารดูดซับต่างกัน.....	38

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
2.1 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเดลของการดูดซับด้วยสารที่มีรูพรุน.....	7
2.2 เปรียบเทียบสีของสาร โพลีเอทิลีนเพอร์เมอแกนต (ขวดซ้ายมือ) กับสารหนูเมื่อไทเทรตถึงจุดยุติ (ขวดขวามือ).....	9
2.3 ส่วนประกอบและการทำงานของเครื่อง SEM.....	10
2.4 แสดงภาพ SEM ของปูนขาวก่อนเผา (a) ปูนขาวหลังเผา (b) และ ปูนขาวหลังการดูดซับสารฟลูออไรด์ (c).....	14
2.5 แสดงภาพ SEM ของเปลือกหอยก่อนเผา (a) เปลือกหอยแครง (b) เปลือกหอยนางรม และเปลือกหลังเผาของ (c) เปลือกหอยแครง (d) เปลือกหอยนางรม.....	15
2.6 ภาพ SEM ของเปลือกหอยก่อนเผา (a) เปลือกหอยหลังเผาที่อุณหภูมิ 650 °C (b) เปลือกหอยหลังเผาที่อุณหภูมิ 750 °C (c) ลักษณะรูพรุนของเปลือกหอยหลังเผาที่อุณหภูมิ 900 °C (d) รูปผลึกหกเหลี่ยมของ $\text{Cd}(\text{OH})_2$ ที่เกิดจากการตกตะกอนบนเปลือกหอยหลังเผาที่อุณหภูมิ 750 °C (e) การฟอร์มตัวในรูปของ ผลึกที่มีลักษณะคล้ายเข็มหลังจากการดูดซับ Cd ในสารละลาย ของเปลือกหอยหลังเผาที่อุณหภูมิ 900 °C (f).....	17
4.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM ของเปลือกหอยนางรมก่อนเผาที่กำลังขยาย 30,000X.....	25
4.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM ของสารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรมที่กำลังขยาย 30,000X.....	25
4.3 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM ของสารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรม หลังจากดูดซับสารหนูที่กำลังขยาย 30,000X.....	26
4.4 ผลการทดลองหาค่า $\text{pH}_{\text{zpc}}$ ของสารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรม.....	27
4.5 กราฟความเข้มข้นของสารหนูในสารละลายที่ระยะเวลาต่างๆ.....	28
4.6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับสารหนูของสารสังเคราะห์จาก เปลือกหอยนางรม (q) กับเวลา.....	29
4.7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่อัตราการดูดซับ ( $k_a$ ) กับอัตราเร็วในการปั่นกว.....	31

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## สารบัญภาพ

รูปที่	หน้า
4.8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับสารหนูของสารสังเคราะห์ จากเปลือกหอยนางรม (q) กับเวลา <sup>0.5</sup> ที่อัตราการปั่นกวน 250-850 rpm.....	33
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารหนูที่เหลือยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์กับเวลา.....	34
4.10 กราฟความเข้มข้นของสารหนูในสารละลายที่ระยะเวลาต่างๆ.....	35
4.11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับสารหนูของสารสังเคราะห์ จากเปลือกหอยนางรม (q) กับเวลา.....	36
4.12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับสารหนูของสารสังเคราะห์ จากเปลือกหอยนางรม (q) กับเวลา <sup>0.5</sup> .....	39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 1

### บทนำ

#### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

สารหนูที่ปนเปื้อนในน้ำผิวดินจัดเป็นปัญหาในบริเวณพื้นที่ต่างๆทั่วโลก [1] กระบวนการกำจัดสารปนเปื้อนในน้ำมีหลายกระบวนการ ซึ่งกระบวนการดูดซับ เป็นกระบวนการหนึ่งที่ถูกนิยมนำมาบำบัดน้ำปนเปื้อน นอกจากนี้ยังพบว่าในแต่ละปีมีการผลิต และบริโภคหอยนางรมเป็นจำนวนมากจึงทำให้เปลือกหอยนางรมที่เหลือจากการบริโภคเป็นจำนวนมาก [2, 3] ดังนั้นจึงทำให้เปลือกหอยนางรมดังกล่าวเป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมอีกปัญหาหนึ่ง ซึ่งจาก 2 สาเหตุที่กล่าวมา ในงานวิจัยนี้จึงได้ทำการนำเปลือกหอยนางรมมาทำการสังเคราะห์เป็นสารดูดซับสารหนูในน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า สารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรมมีส่วนประกอบของ แคลเซียมออกไซด์ ร้อยละ 97 ซึ่งสารดังกล่าวมีประสิทธิภาพในการดูดซับสารหนูในน้ำเสียสังเคราะห์ จากการวิเคราะห์สารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรมด้วย BET พบว่า สารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรม มีพื้นที่ผิวเฉพาะ  $15.797 \text{ m}^2/\text{g}$  ซึ่งจากการเปรียบเทียบพื้นที่ผิวกับเปลือกหอยนางรม พบว่า สารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรมมีพื้นที่และขนาดรูพรุนสูงกว่าเปลือกหอยนางรม แสดงว่า การเผาเปลือกหอยนางรม ในอากาศที่อุณหภูมิ  $700 \text{ }^\circ\text{C}$  เป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมง จะเป็นการปรับโครงสร้างของเปลือกหอยนางรมทำให้มีพื้นที่และขนาดรูพรุนเพิ่มมากขึ้น จากการศึกษาผลกระทบบของค่า pH และค่าความเข้มข้นของสารหนูต่อการดูดซับสารหนู พบว่า ที่ความเข้มข้น  $100 \text{ ppm}$  ที่ค่า pH 11 มีประสิทธิภาพในการดูดซับสารหนูมากที่สุด และเมื่อความเข้มข้นของสารหนูเพิ่มขึ้น ปริมาณสารหนูที่ถูกดูดซับด้วยสารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรม มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้จากการศึกษาผลกระทบบของอัตราการปั่นกววนที่มีผลต่อการดูดซับสารหนู ที่อัตราการปั่นกววน  $250 - 750 \text{ rpm}$  พบว่า เมื่ออัตราการปั่นกววนเพิ่มมากขึ้น แนวโน้มปริมาณการดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้น น่าจะมาจากการที่อัตราการปั่นกววนเพิ่มมากขึ้น ทำให้ชั้นฟิล์มที่ล้อมรอบอนุภาคของสารหนูบางลง จึงทำให้ปริมาณสารหนูในสารละลายสามารถแพร่ผ่านชั้นฟิล์มเข้าไปยังผิวของสารดูดซับได้เร็วขึ้น จากการศึกษาทางจลนพลศาสตร์ พบว่า ผลการทดลองการดูดซับสารหนูด้วยสารดูดซับที่สังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรม ทั้ง 3 ปัจจัย สอดคล้องกับแบบจำลอง Pseudo-second order มากกว่าแบบจำลอง Pseudo-first order การศึกษาชนิดของไอโซเทอมการดูดซับสารหนูด้วยสารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรม พบว่า ค่าไอโซเทอมสอดคล้องกับสมการการดูดซับแบบแลงเมียร์ มากกว่าสมการ การดูดซับแบบฟรุนดลิช แสดงว่า การดูดซับสารหนูด้วยสารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรมน่าจะเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว ที่บริเวณผิวด้านนอกของสารดูดซับ ซึ่งจากผลการทดสอบ X-ray diffraction (XRD) เพื่อศึกษากลไกการดูดซับสารหนู พบว่า สารแคลเซียมคาร์บอเนตซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของเปลือกหอยนางรม จะเปลี่ยนเป็นสารแคลเซียมออกไซด์ในสารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรม จากนั้นเมื่อเปลือกหอยนางรมอยู่ในน้ำ สารดังกล่าวจะเปลี่ยนเป็นสารแคลเซียมไฮดรอกไซด์ และสุดท้ายเมื่อนำสารสังเคราะห์จากเปลือก หอยนางรมไปเป็นสารดูดซับสารหนู พบว่า สารหนูจะถูกดูดซับในรูป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของสารแคลเซียมอาร์เซไนต์ (Ca-As-O) ซึ่งเป็นการดูดซับทางเคมี โดยผลดังกล่าวสอดคล้องกับไอโซเทอมแบบ แลงเมียร์ แสดงว่า กระบวนการดูดซับสารหนูด้วยสารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรมเป็นกระบวนการดูดซับทางเคมีซึ่งจะทำการดูดซับหนูได้เพียงชั้นเดียวบนผิวของสารดูดซับ

งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษากลไกการดูดซับสารหนูและขั้นตอนควบคุมอัตราดูดซับสารหนูในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยสารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรมในขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม และขั้นตอนการแพร่ภายในรูพรุน นอกจากนี้จะทำการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ภายในรูพรุน โดยทำการทดลองการดูดซับแบบกะ ศึกษาผลกระทบของอัตราการปั่นกวนที่มีผลต่อการดูดซับสารหนู ศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงอัตราการปั่นกวนที่มีผลต่อการดูดซับสารหนู และทำการศึกษาผลกระทบของขนาดอนุภาคของสารดูดซับที่มีผลต่อการดูดซับสารหนู

## 1.2 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

เพื่อศึกษากลไกการดูดซับสารหนูแบบกะด้วยสารดูดซับที่สังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรม และศึกษาผลกระทบของอัตราการปั่นกวนที่มีต่อกลไกการดูดซับสารหนู

## 1.3 ขอบเขตของงานวิจัย

- 1.3.1 การศึกษากลไกการดูดซับสารหนูในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยสารดูดซับที่สังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรม
- 1.3.2 การศึกษาผลกระทบของอัตราการปั่นกวนที่มีผลต่อการดูดซับสารหนู
- 1.3.3 การศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงอัตราการปั่นกวนที่มีผลต่อการดูดซับสารหนู

## บทที่ 2

### ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 กระบวนการดูดซับ [4-9]

กระบวนการดูดซับ เป็นวิธีการหนึ่งที่น่าสนใจในการบำบัดน้ำเสีย โดยอาศัยความสามารถของสารใน การดึงโมเลกุลของสารปนเปื้อน หรือสารคอลลอยด์ที่อยู่ในของเหลวหรือแก๊ส ให้มาเกาะจับบนพื้นผิวของสารดูดซับ เรียกว่าปรากฏการณ์ที่สารปนเปื้อนเคลื่อนย้ายจากของเหลวหรือแก๊สมายังผิวของของแข็งว่า กระบวนการดูดซับ (Adsorption) เรียกตัวที่เป็นของแข็งหรือตัวที่ดูดซับว่า สารดูดซับ (Adsorbent) และเรียกตัวสาร โมเลกุลที่มาเกาะติดที่ผิวสารดูดซับว่า สารถูกดูดซับ (Adsorbate) โดยกระบวนการดูดซับสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemical adsorption)

1. กระบวนการดูดซับทางกายภาพ คือ การที่โมเลกุลของสารถูกดูดซับยึดติดกับผิวสารดูดซับด้วยแรง แวนเดอร์วาลส์ที่อ่อน (Weak van der waal's force) โดยเกิดจากความแตกต่างของพลังงานหรือแรงดึงดูดทาง ไฟฟ้า (Electric attractive force) อย่างอ่อนๆ นอกจากนี้ยังพบว่า การดูดซับชนิดนี้ โมเลกุลของสารถูกดูดซับที่ เกาะอยู่บนผิวสารดูดซับในลักษณะที่ซ้อนทับกันหลายชั้น เรียกว่า Multilayer โดยจำนวนชั้นของโมเลกุลมักเป็น สัดส่วนกับความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย

2. กระบวนการดูดซับทางเคมี ในกระบวนการนี้ โมเลกุลของสารดูดซับจะยึดติดกับผิวของสารดูดซับ ด้วยพันธะเคมีที่แข็งแรง ซึ่งมีความแข็งแรงมากกว่าแรงแวนเดอร์วาลส์ ในกระบวนการนี้ โมเลกุลของสารดูดซับ ที่เกาะอยู่บนผิวสารดูดซับจะอยู่ในลักษณะเกาะกันเพียงชั้นเดียว (Monolayer) [10]

#### 2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ [6, 8, 11]

##### 1. ค่า pH

ค่า pH ของสารละลายเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อกระบวนการดูดซับ เนื่องจากค่า pH มีอิทธิพลต่อ การแตกตัวของสารถูกดูดซับให้อยู่ในรูปของไอออนที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังมีผลต่อประจุบนผิวของสารดูดซับ [12] กล่าวคือในกระบวนการดูดซับ สารดูดซับแต่ละชนิดมีความสามารถในการดูดซับ ไอออนแต่ละชนิดของ สารถูกดูดซับแตกต่างกัน จึงทำให้ค่า pH มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ นอกจากนี้ค่า pH ของสารละลายยังมีผลต่อลักษณะของผิวของสารดูดซับ ที่ค่า pH ที่ทำให้ผิวของสารดูดซับมีลักษณะเป็นกลางหรือ มีประจุเป็นศูนย์ เรียกว่า Zero point of charge ( $pH_{ZPC}$ ) โดยที่ถ้าค่า pH ของสารละลายมีค่ามากกว่าค่าดังกล่าว บริเวณผิวของสาร ดูดซับจะมีลักษณะเป็นประจุลบ (Negative or anion charge) และทำการ ดูดซับสารที่มีลักษณะเป็นประจุบวกได้ ดี ในทางตรงข้าม ถ้าค่า pH มีค่าน้อยกว่าค่าดังกล่าว บริเวณผิวของสารดูดซับจะมีลักษณะเป็นประจุบวก (Positive charge) และสามารถทำการดูดซับสารที่มีลักษณะเป็นประจุลบได้ดี [13-15]

##### 2. พื้นที่ผิวของสารดูดซับ (Surface area)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

พื้นที่ผิวมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ (Adsorption capacity) เมื่อพื้นที่ผิวของสารดูดซับมีปริมาณเพิ่มมากขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นแต่ก็พบว่า มีบางกรณีพื้นที่ผิว ดูดซับมีปริมาณมาก แต่ความสามารถในการดูดซับมีค่าน้อย เนื่องจากมีปัจจัยอื่นเข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น ลักษณะรูพรุนของสารดูดซับที่มีขนาดเล็กกว่าสารถูกดูดซับ หรืออาจเกิดจากการที่สารดูดซับมีพื้นที่ดูดซับมากแต่ หมู่ฟังก์ชัน (Active site) สำหรับดูดซับน้อยมาก ทำให้ไม่สามารถดูดซับสารชนิดนั้นได้

### 3. เวลาในการสัมผัส (Contact time)

ระยะเวลาในการสัมผัส เป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ โดยระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสมจะทำให้การดูดซับมีประสิทธิภาพดีที่สุด ทั้งนี้ระยะเวลาดังกล่าวขึ้นอยู่กับชนิดของสารดูดซับ และสารถูกดูดซับด้วย

### 4. อัตราเร็วในการปั่นกวน (Mixing speed)

อัตราเร็วในการปั่นกวนมีผลต่ออัตราเร็วของการดูดซับ เนื่องจากอัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับ การขนส่งมวลสารภายในระบบ ประกอบไปด้วย 2 ขั้นตอน คือ การแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม (Film diffusion) และการแพร่เข้าสู่รูพรุน (Pore diffusion) หากระบบมีอัตราเร็วในการปั่นกวนต่ำ ฟิล์มน้ำที่ล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนา มาก เป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของ โมเลกุลของสารถูกดูดซับเข้าไปยังผิวของสารดูดซับ ทำให้การขนส่งของมวลสารเกิดขึ้นช้า จึงทำให้การแพร่ผ่านชั้นฟิล์มเป็นตัวกำหนดอัตราการดูดซับ แต่หากในระบบมีอัตราเร็วในการปั่นกวนสูง จะทำให้ชั้นฟิล์มที่อยู่รอบสารดูดซับบางลง จึงทำให้โมเลกุลของสารถูกดูดซับสามารถผ่านเข้าไปยังผิวสารดูดซับได้เร็ว ดังนั้น ขั้นตอนการแพร่เข้าสู่รูพรุนจะเป็นตัวกำหนดอัตราการดูดซับ

### 5. อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิมีผลต่ออัตราการดูดซับ และขีดความสามารถในการดูดซับ กล่าวคืออุณหภูมิจะแปรผันตรงกับอัตราเร็วในการดูดซับ แต่จะแปรผกผันกับขีดความสามารถในการดูดซับสารของสารดูดซับ ดังนั้น เมื่ออุณหภูมิเพิ่มมากขึ้น อัตราเร็วในการดูดซับจะเพิ่มขึ้น แต่ขีดความสามารถในการดูดซับจะลดลง เนื่องจากปฏิกิริยาการดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน (Exothermic reaction)

## 2.3 การหาประสิทธิภาพของการดูดซับสารหนู

การหาประสิทธิภาพการดูดซับสารหนู และปริมาณสารหนูที่ถูกดูดซับ ( $q_t$ ) ด้วยสารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรมสามารถหาได้ ดังสมการที่ (2-1) และ (2-2) ตามลำดับ

$$\% \text{ eff} = \frac{C_0 - C_e}{C_0} \times 100 \quad (2-1)$$

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t)V}{W} \quad (2-2)$$

เมื่อ % eff คือ ประสิทธิภาพการดูดซับสารหนูด้วยสารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรม

$C_0$  คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารหนู (mg/L)

$C_t$  คือ ความเข้มข้นของสารหนูที่เวลาใดๆ (mg/L)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- $C_e$  คือ ความเข้มข้นของสารหนูที่สภาวะสมดุล (mg/L)  
 $q_t$  คือ ปริมาณสารหนูที่ถูกดูดซับที่เวลาใดๆ (mg/g)  
 $V$  คือ ปริมาตรของสารหนูในน้ำเสียดังเคราะห์ (cm<sup>3</sup>)  
 $W$  คือ น้ำหนักของสารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรม (g)

## 2.4 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสารหนู

การศึกษาอัตราเร็วของการดูดซับสารหนูด้วยสารดูดซับที่สังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรมในงานวิจัยนี้ ใช้แบบจำลอง Pseudo-first order และแบบจำลอง Pseudo-second order พิจารณาข้อมูลผลการทดลองเพื่อหาค่าคงที่อัตราการดูดซับ

### 2.4.1 Pseudo-first order rate equation [16-19]

ในปี ค.ศ. 1898 Lagergren ได้ทำการเสนอ Pseudo-first order rate equation เพื่อใช้ในการอธิบายอัตราการดูดซับของกระบวนการดูดซับระหว่างของแข็งและของเหลว (Liquid-solid phase adsorption) แสดงได้ดังสมการ

$$\frac{dq_t}{dt} = k_a (q_e - q_t) \quad (2-3)$$

โดยที่  $q_t$  คือ ปริมาณสารหนูที่ถูกดูดซับที่เวลาใดๆ (mg/g)

$q_e$  คือ ปริมาณสารหนูที่ถูกดูดซับที่สภาวะสมดุล (mg/g)

$k_a$  คือ ค่าคงที่อัตราการดูดซับลำดับที่หนึ่ง (ต่อนาที)

$t$  คือ เวลา (นาที)

อินทิเกรตสมการ ที่สภาวะ  $q_t = 0$  และ  $t = 0$  ถึง  $q_t = q_t$   $t = t$  และจัดรูปเป็นสมการเส้นตรงดังสมการ

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_a t \quad (2-4)$$

เมื่อนำผลการทดลองมาเขียนกราฟระหว่าง  $\ln(q_e - q_t)$  กับ  $t$  ได้กราฟเส้นตรง ค่าความชันของกราฟเส้นตรง คือ ค่าคงที่อัตราการดูดซับลำดับที่หนึ่ง ( $k_a$ )

### 2.4.2 Pseudo-second order rate equation [16, 19-22]

แบบจำลอง Pseudo-second order rate equation นำเสนอสมการ โดย Ho [20, 22] เพื่อใช้อธิบายอัตราการดูดซับของกระบวนการดูดซับของเหลว โดยรูปแบบสมการ Pseudo-second order แสดงได้ดังนี้

$$\frac{dq_t}{dt} = k_a (q_e - q_t)^2 \quad (2-6)$$

สามารถเขียนใหม่ได้ดังสมการ

$$\frac{dq_t}{(q_e - q_t)^2} = k_a dt \quad (2-7)$$

อินทิเกรตสมการ ที่สภาวะ  $q_t = 0$  และ  $t = 0$  ถึง  $q_t = q_t$   $t = t$  จะได้ว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$\frac{1}{(q_e - q_t)} = \frac{1}{q_e} + k_a t \quad (2-8)$$

จัดให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรง

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_a q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (2-9)$$

โดย  $q_t$  คือ ปริมาณสารหนุที่ถูกดูดซับที่เวลาใดๆ (mg/g)

$q_e$  คือ ปริมาณสารหนุที่ถูกดูดซับที่สภาวะสมดุล (mg/g)

$k_a$  คือ ค่าคงที่อัตราการดูดซับลำดับที่สอง (กรัมต่อมิลลิกรัม-นาที)

$t$  คือ เวลา (นาที)

เมื่อนำผลการทดลองมาเขียนกราฟระหว่าง  $t/q_t$  กับ  $t$  ได้กราฟเส้นตรง มีค่าความชันเป็น  $1/q_e$  และจุดตัดแกนตั้งของกราฟสามารถนำมาหาค่าคงที่อัตราการดูดซับลำดับที่สอง ( $k_a$ )

แบบจำลองทั้ง 2 แบบ ใช้ในการหาอัตราการดูดซับ ซึ่งความถูกต้องของผลการทดลองสามารถตรวจสอบได้จากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ( $R^2$ ) หากสมการแบบจำลองชนิดใด มีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่า แสดงว่าข้อมูลของผลการทดลองมีความสอดคล้องกับสมการแบบจำลองนั้นมาก ดังนั้น อัตราการดูดซับของกระบวนการดูดซับจะเป็นไปตามรูปแบบจำลองชนิดนั้นมากกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าแบบจำลองทั้ง 2 แบบ ตั้งอยู่บนสมมติฐานว่ากระบวนการดูดซับและการคายซับเป็นปฏิกิริยาเคมีเทียม (Pseudo-chemical reaction) และอัตราการดูดซับขึ้นอยู่กับตำแหน่งในการดูดซับของสารดูดซับที่ยังไม่เกิดการดูดซับ [7]

## 2.5 กลไกการดูดซับสารหนุด้วยสารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรม [16, 19, 23-26]

อัตราการดูดซับเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อกระบวนการดูดซับ โดยอัตราการดูดซับที่รวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วขึ้น ซึ่งอัตราการดูดซับจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีความต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุล โดยที่ขั้นตอนที่ดำเนินไปช้าที่สุด จะเป็นขั้นตอนจำกัดอัตราการดูดซับ ขั้นตอนในกระบวนการดูดซับของสารละลายมี 3 ขั้นตอน คือ

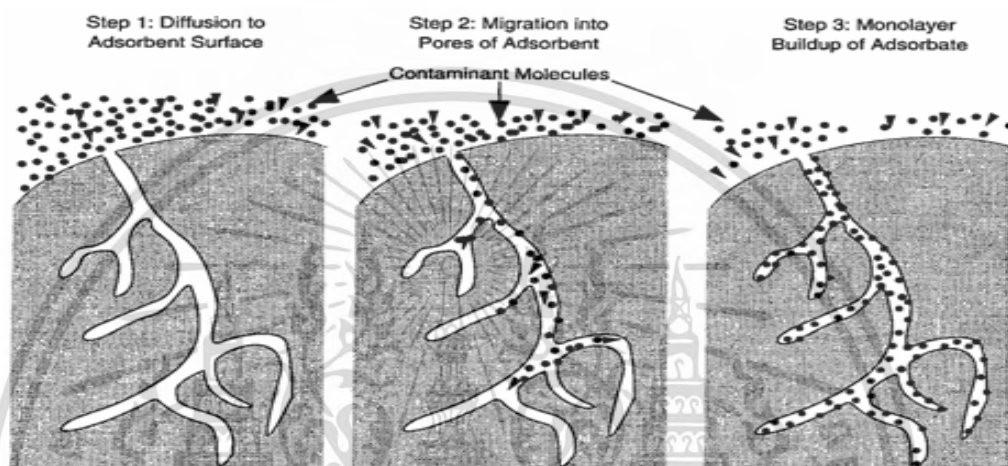
1. การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film transport or Film diffusion) เป็นขั้นตอนการขนส่งไอออนของสารหนุจากสารละลาย (Bulk solution) ผ่านชั้นฟิล์มของเหลว (Liquid film) ที่ล้อมรอบบริเวณผิวด้านนอกของสารดูดซับ
2. การขนส่งภายในอนุภาค หรือการแพร่ภายในรูพรุน (Intraparticle transport or Intra-particle diffusion) เป็นกระบวนการแพร่ไอออนของสารหนุผ่านเข้าสู่รูพรุนของสารดูดซับ
3. กระบวนการดูดซับภายในรูพรุน (Sorptions) เป็นกระบวนการที่สารหนุจะถูกดูดซับบริเวณภายในพื้นผิวของสารดูดซับ (Interior surface pore) และเกิดการดูดซับภายในรูพรุนของสารดูดซับ (Capillary area) ซึ่งเป็นการเกิดปฏิกิริยาเคมี (Chemical reaction)

จากทั้ง 3 ขั้นตอน ดังรูปที่ 2-1 ขั้นตอนที่เกิดขึ้นช้าที่สุด จะเป็นขั้นตอนที่ควบคุมอัตราการดูดซับ ซึ่งในขั้นตอนของกระบวนการดูดซับภายในรูพรุน พบว่า เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่สุด [19] ดังนั้นในกระบวนการดูดซับ ขั้นตอนที่ควบคุมอัตราการดูดซับ มีความเป็นไปได้ 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการขนส่งผ่านชั้น

เอกสาร เป็นเอกสารที่ส่งวันเวลาให้กับเครื่อง ในเพื่อการศึกษาเห็น เมื่ออยู่ดู เติเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการศึกษา

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ฟิล์ม และการขนส่งภายในอนุภาค [23] โดยในงานวิจัยนี้ได้ใช้แบบจำลองของ External mass transfer diffusion แบบจำลองของ Weber and Morris และแบบจำลองของ Urano and Tachikawa (U&T) ในการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อทำการศึกษากลไกการดูดซับ นอกจากนี้ยังพบว่า ขั้นตอนการขนส่งผ่านชั้นฟิล์มจะเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับในกรณีที่ระบบของการดูดซับมีการปั่นป่วนน้อย (Poor mixing) และ ความเข้มข้นของสารหนูต่ำ (Low concentration) ในทางตรงกันข้าม ถ้าระบบมีความปั่นป่วนมาก และ ความเข้มข้นของสารหนูสูง ขั้นตอนของการขนส่งภายในอนุภาคจะเป็นขั้นตอนของการควบคุมอัตราการดูดซับ แสดงว่า อัตราการปั่นกว่วนน่าจะมีผลต่อขั้นตอนการควบคุมอัตราการดูดซับ



รูปที่ 2-1 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของการดูดซับด้วยสารที่มีรูพรุน [24]

### 2.5.1 External mass transfer diffusion model (or boundary model) [27-30]

การแพร่ผ่านชั้นฟิล์มจะเป็นขั้นตอนควบคุมอัตราการดูดซับในช่วงระยะเวลาสั้นๆ ในช่วงแรกของการดูดซับ โดยงานวิจัยนี้ได้ใช้แบบจำลอง External mass transfer diffusion model (or boundary model) ในการศึกษาขั้นตอนการแพร่ของสารหนูจากสารละลายผ่านชั้นฟิล์มของสารดูดซับที่สังเคราะห์จากเปลือกหอยนารม ซึ่งโมเดลนี้ได้มีการตั้งสมมติฐานดังนี้

1. ความเข้มข้นในสารละลายมีลักษณะเหมือนกันหมด (Bulk concentration is uniform or well mixing)
2. กำหนดให้ขั้นตอนการแพร่ภายในรูพรุนมีค่าน้อยมากในช่วงแรกของการดูดซับ เนื่องจากในช่วงแรกของการดูดซับความเข้มข้นของสาร As(III) ที่บริเวณผิวของสารดูดซับมีปริมาณน้อยมาก จึงทำให้เกิดการแพร่ภายในรูพรุนได้รวดเร็ว ดังนั้นขั้นตอนการแพร่ภายในรูพรุนจึงไม่ใช่ขั้นตอนควบคุมอัตราการดูดซับ (For initial period of adsorption, intraparticle diffusion is negligible owing to negligible As(III) concentration on adsorbent surface.)
3. ที่เวลาเริ่มต้น ( $t=0$ ) กำหนดให้ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับที่บริเวณผิวของสารดูดซับมีค่าน้อยมาก (The surface concentration of As(III) ,  $C_s$  is negligible at  $t=0$ )

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากสมมติฐานข้างบนสามารถเขียนสมการแสดงอัตราการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้นของสารหนูต่อเวลา ได้ดังสมการ

$$\frac{dC}{dt} = -k_f S(C - C_s) \quad (2-10)$$

โดย  $C$  คือ ความเข้มข้นของสารหนู (mg/L)

$C_s$  คือ ความเข้มข้นของสารหนูที่พื้นผิวของสารดูดซับ (mg/L)

$S$  คือ พื้นผิวของสารดูดซับ (Specific surface area for mass transfer)

$k_f$  คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม (Liquid–solid mass transfer coefficient)

จากสมการที่ (11) กำหนดให้  $C=C_0$  เมื่อ  $t=0$  ดังนั้นจะเขียนได้ว่า

$$\left[ \frac{d(C/C_0)}{dt} \right]_{t \rightarrow 0} = -k_f S \quad (2-11)$$

นอกจากนี้ ในงานวิจัยนี้ได้สมมติว่าอนุภาคของสารดูดซับมีลักษณะเป็นทรงกลมดังนั้นค่าพื้นผิวของสารดูดซับ ( $S$ ) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$S = \frac{6m}{d_p \rho_{app}} \quad (2-12)$$

โดย  $m$  คือ น้ำหนักของสารดูดซับ (g)

$d_p$  คือ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอนุภาคสารดูดซับ (cm)

$\rho_{app}$  คือ ค่าความหนาแน่นจำเพาะ

## 2.5.2 Intraparticle mass transfer diffusion model

### 2.5.2.1 แบบจำลอง Weber and Morris [31] [26]

แบบจำลอง Weber and Morris นำเสนอโดย Weber and Morris ในปี 1963 โดยสมการแบบจำลอง Weber and Morris มีรูปแบบดังนี้

$$q_t = k_i t^{1/2} \quad (2-13)$$

โดย  $k_i$  คือ ค่าคงที่อัตราการแพร่ภายในรูพรุน (rate constant for intra-particle diffusion,  $\text{mg/g-t}^{0.5}$ ) ซึ่งค่า  $k_i$  สามารถหาได้จากความชันของเส้นกราฟระหว่าง  $q_t$  และ  $t^{1/2}$

### 2.5.2.2 แบบจำลอง Urano and Tachikawa (U&T)

แบบจำลอง Urano and Tachikawa นำเสนอโดย Urano และ Tachikawa โดยมีสมมติฐานว่าอัตราการดูดซับไม่ขึ้นกับอัตราการปั่นกววน (The sorption rate is considered independent of the stirring speed) และขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มมีผลต่ออัตราการดูดซับน้อยมาก (External mass transfer is negligible relative to the low overall rate) ซึ่งรูปแบบสมการของแบบจำลองนี้แสดงได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

$$f\left(\frac{q}{q_m}\right) = -\left[\log\left(1 - \left(\frac{q}{q_m}\right)^2\right)\right] = \frac{4\pi^2 Dt}{2.303d_p^2} \quad (2-14)$$

โดย  $D$  คือ ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ภายในอนุภาคของสารดูดซับ (Intraparticle diffusion coefficient in solid,  $\text{cm}^2/\text{min}$ )

## 2.6 กระบวนการวิเคราะห์สารหนูด้วยกระบวนการไทเทรต [32]

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการวิเคราะห์สารหนูด้วยกระบวนการไทเทรตกับสารละลายโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Potassium permanganate,  $\text{KMnO}_4$ ) ซึ่งมีสีม่วงเข้ม จนสารตัวอย่างเปลี่ยนจากใสไม่มีสีเป็นสีชมพูเข้มดังรูป 2-2 ซึ่งสามารถคำนวณหาปริมาณสารหนูในน้ำตัวอย่างได้ดังสมการที่ (2-15)



รูปที่ 2-2 เปรียบเทียบสีของสาร โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (ขวดซ้ายมือ) กับสารหนูเมื่อไทเทรตถึงจุดยุติ (ขวดขวามือ)

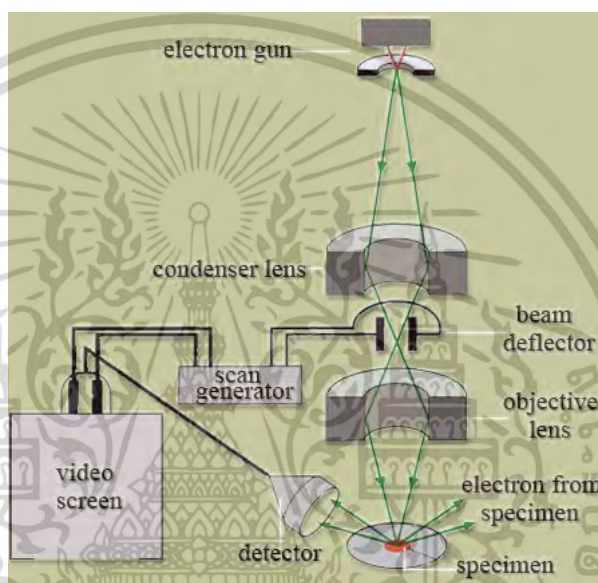
## 2.7 หลักการทดสอบ SEM

Scanning Electron Microscope (SEM) เป็นกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนที่มีกำลังขยายสูงสุดประมาณ 10 นาโนเมตร โดยภาพที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเครื่อง SEM จะเป็นภาพที่ได้จากการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของตัวอย่างที่ทำการทดสอบ ซึ่งภาพที่ได้เป็นภาพลักษณะของ 3 มิติ สามารถใช้ในการศึกษาลักษณะและรายละเอียดของลักษณะพื้นผิวของตัวอย่าง เช่น ลักษณะพื้นผิวด้านนอกของเนื้อเยื่อและเซลล์ หรือหน้าตัดของโลหะและวัสดุ เป็นต้น

องค์ประกอบของเครื่อง SEM สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2-3 โดยมีหลักการทำงานเริ่มจากแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอน (Electron gun) จะทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

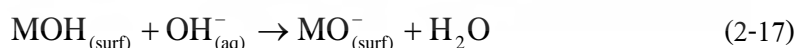
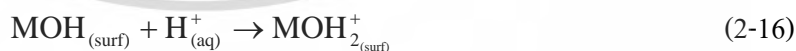
แหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser lens) เพื่อให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน โดยในส่วนนี้สามารถปรับให้ขนาดของลำอิเล็กตรอนให้มีขนาดใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ ซึ่งหากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะต้องทำการปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) ลงไปบนผิวของตัวอย่าง หลังจากลำอิเล็กตรอนถูกกราดลงบนตัวอย่าง จะทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ขึ้น โดยสัญญาณจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึกด้วยเครื่องรองรับสัญญาณ (Detector) จากนั้นจะทำการแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์และถูกนำไปสร้างเป็นภาพบนจอโทรทัศน์ซึ่งสามารถทำการบันทึกภาพจากหน้าจอโทรทัศน์



รูปที่ 2-3 ส่วนประกอบและการทำงานของเครื่อง SEM

## 2.8 การวิเคราะห์ $\text{pH}_{\text{zpc}}$

ประจุบนผิวของสารประเภทออกไซด์ และไฮดรอกไซด์เป็นประจุที่เกิดขึ้นชั่วคราว โดยประจุดังกล่าวเกิดจากการที่ผิวของสารดังกล่าวเกิดการให้โปรตอน (Protonation) และรับโปรตอน (Deprotonation) [33-35] ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวจะเกี่ยวข้องกับน้ำเท่านั้น โดยสามารถเขียนได้ดังสมการ



เมื่อ MOH คือ พื้นผิวของสารออกไซด์หรือไฮดรอกไซด์ และ M คือ โลหะ

ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้วิธี Potentiometric mass titration ในการวิเคราะห์  $\text{pH}_{\text{zpc}}$  โดยใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ เข้มข้น 0.01 โมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปรับค่า pH ของสารละลายให้มีค่าระหว่าง pH 2-13 ด้วยกรดไฮโดรคลอริก และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ใส่สารตั้งเคราะห์จากเปลือกหอยนางรม 0.2 กรัม ลงในสารละลายแต่ละขวด แล้วกวนด้วยเครื่องกวนสารละลาย ที่อัตราเร็วในการปั่นกวน 250 rpm เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง กรองแยกสารคูดัษออกจากสารละลายด้วยกระดาษกรอง แล้วทำการวัดค่า pH ของ

เอกลสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์ไว้เพื่อใช้ในการเรียนการสอน โดยอยู่ภายใต้เงื่อนไขการใช้งานที่ไม่ว่ากรรมใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารละลายโดย  $pH_{zpc}$  คือ จุดที่ค่า  $pH_{เริ่มต้น} - pH_{สุดท้าย}$  มีค่าเท่ากับศูนย์ [36-38] ซึ่งที่ค่า  $pH$  ของสารละลายมีค่าเท่ากับ  $pH_{zpc}$  พื้นผิวของสารดูดซับจะมีการรับและการจ่ายโปรตอนในปริมาณที่เท่ากันจึงทำให้ลักษณะพื้นที่ผิวของสารดูดซับมีประจุโดยรวมเท่ากับศูนย์ แต่ถ้าหากค่า  $pH$  ของสารละลายมีค่ามากกว่าค่าดังกล่าว บริเวณผิวของสารดูดซับจะมีการจ่ายโปรตอนมากกว่าการรับ โปรตอน ดังนั้นประจุโดยรวมของพื้นผิวของสารดูดซับจึงมีลักษณะโดยรวมเป็นประจุลบ และทำการดูดซับสารที่มีลักษณะเป็นประจุบวกได้ดี ในทางตรงข้าม ถ้าค่า  $pH$  มีค่าน้อยกว่าค่าดังกล่าว บริเวณผิวของสารดูดซับจะทำการจะมีการรับโปรตอนมากกว่าการจ่ายโปรตอน จึงทำให้บริเวณผิวของสารดูดซับมีลักษณะประจุโดยรวมเป็นประจุบวก และสามารถทำการดูดซับสารที่มีลักษณะเป็นประจุลบได้ดี [13-15]

## 2.9 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

**Hassan และคณะ** [37] ได้ทำการศึกษาการดูดซับสารหนูด้วยวัสดุดูดซับ 3 ชนิด ได้แก่ สารดูดซับ potassium hydroxide activated carbon based apricot stone (C) ซึ่งเตรียมจาก เมล็ดแอปพริคอตที่ผ่านการเผาด้วยแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิ  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$  เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นทำการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ในอัตราส่วนโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ต่อถ่านจากเมล็ดแอปพริคอตเท่ากับ 3 ต่อ 1 สารดูดซับ calcium alginate beads (G) เตรียมจากการนำโซเดียมแอลจีเนต (Sodium Alginate) มาทำปฏิกิริยากับแคลเซียมคลอไรด์ และ สารดูดซับ calciumalginate/activated carbon composite beads (GC) ซึ่งเป็นการนำสารดูดซับ 2 ชนิดในข้างต้นมาทำการผสมด้วยวิธี Ionic gelation โดยการทดสอบหาคุณสมบัติ  $pH_{zpc}$  ของสารตัวอย่างทั้ง 3 ชนิดนี้ ในงานวิจัยนี้ได้เริ่มจากการนำสารละลายโซเดียมคลอไรด์ เข้มข้น 0.01 โมลาร์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่ในขวดลูกผสมพู่ จากนั้นปรับค่า  $pH$  ของสารละลายให้มีค่าระหว่าง  $pH$  2-12 ด้วยกรดไฮโดรคลอริก หรือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ แล้วใส่สารตัวอย่าง 0.2 กรัมลงในสารละลายแต่ละขวด ทำการปิดฝา และกวนทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง ทำการวัดค่า  $pH$  หลังจากกวนแล้ว ซึ่งค่า  $pH_{zpc}$  คือค่าที่  $pH_{สุดท้าย} - pH_{เริ่มต้น}$  มีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งจากการทดลองพบว่าค่า  $pH_{zpc}$  ของสารดูดซับ potassium hydroxide activated carbon based apricot stone สารดูดซับ calcium alginate beads และสารดูดซับ calciumalginate/activated carbon composite beads มีค่าเท่ากับ 7.9 6.2 และ 7.3 ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าค่า  $pH_{zpc}$  คือค่า  $pH$  ที่ประจุโดยรวมบนพื้นผิว (Net surface charge) ที่ได้จากจากการดูดซับของ  $H^+$  และ  $OH^-$  มีค่าเท่ากับศูนย์ นอกจากนี้ ในการศึกษาผลกระทบของค่า  $pH$  ต่อประสิทธิภาพการดูดซับ พบว่า ค่า  $pH$  ที่มีเปอร์เซ็นต์การกำจัดสาร As(V) ของสารดูดซับ potassium hydroxide activated carbon based apricot stone สูงสุดที่ค่า  $pH$  มากกว่า 8.5 ในส่วนสารดูดซับ calcium alginate beads และสารดูดซับ calciumalginate/activated carbon composite beads พบที่ค่า  $pH$  ประมาณ 7 ซึ่งจากผลการทดลองในงานวิจัยนี้ พบว่า ที่ค่า  $pH$  เป็นกรดจะมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดสาร As(V) น้อย ( $pH$  น้อยกว่า  $pH_{zpc}$ ) เป็นผลมาจากที่ค่า  $pH$  ดังกล่าวมีปริมาณ  $H^+$  จำนวนมากบนผิวของสารดูดซับทำให้เกิดการแข่งขันในการดูดซับกับสาร As(V) บนผิวดูดซับ (Active site) และน่าจะเกิดแรงผลักระหว่าง  $H^+$  บนผิวของสารดูดซับกับ As(V) เมื่อค่า  $pH$  เพิ่มมากขึ้น ประจุโดยรวม บนสารดูดซับมีค่าลดลง ( $pH$  มากกว่า  $pH_{zpc}$ ) จึงทำให้แรงผลักระหว่างประจุบวกด้วยกันลดลง จึง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำให้สามารถทำการดูดซับ As(V) ได้ในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น แต่เมื่อค่า pH มากกว่า 9.5 พบว่า มีปริมาณการดูดซับลดลง เป็นผลเนื่องมาจากแรงผลักระหว่างประจุบนผิวของสารดูดซับกับประจุของสาร  $\text{H}_2\text{AsO}_4^{-1}$  และ  $\text{HAsO}_4^{2-}$  ที่ค่า pH ดังกล่าว

**Foo และ Hameed** [36] ได้ทำการศึกษาสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากเปลือกทุเรียนที่ถูกกระตุ้นด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ด้วยคลื่นไมโครเวฟ (DSAC) ในการทดสอบการดูดซับสีย้อม Methylene blue (MB) โดยในการศึกษา  $\text{pH}_{\text{zpc}}$  ในงานวิจัยนี้ได้ทำการปรับค่า pH ของสารละลายโซเดียมคลอไรด์ เข้มข้น 0.01 โมลาร์ ปริมาตร 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร ให้มีค่าระหว่าง pH 2-12 จากนั้นใส่สาร DSAC 0.15 กรัม ลงในสารละลายกวนทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นทำการวัดค่า pH โดยที่ค่า  $\text{pH}_{\text{zpc}}$  คือ ค่าที่  $\text{pH}_{\text{สุดท้าย}} - \text{pH}_{\text{เริ่มต้น}}$  มีค่าเท่ากับศูนย์ ซึ่งจากการทดลอง พบว่า สาร DSAC มีค่า  $\text{pH}_{\text{zpc}}$  เท่ากับ 6.20 ซึ่งในการทดลองพบว่าค่า pH มีผลต่อปริมาณการดูดซับ สารถูกดูดซับ โดยการปรับประจุบนผิวของสารดูดซับ และการแตกตัวของไอออน (Ionization/dissociation) ของสารถูกดูดซับ [39] ซึ่งจากการทดลองการนำ สาร DSAC ไปทำการดูดซับสีย้อม Methylene blue พบว่า ปริมาณการดูดซับสีย้อม Methylene blue มีปริมาณเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญที่ pH 6-8 แต่ที่ค่า pH เป็นกรดมาก ปริมาณการดูดซับสีย้อม Methylene blue จะลดลงเนื่องจากการให้โปรตอนของสีย้อม Methylene blue และในสารละลายมีโปรตอนเป็นจำนวนมาก จึงเกิดการแย่งกันในการดูดซับบนผิวของสารดูดซับ แต่ที่ค่า pH ช่วงเบส จะพบว่าประจุบนผิวของสารดูดซับมีปริมาณเพิ่มขึ้นจึงสามารถทำการดูดซับสีย้อม Methylene blue ในรูปประจุบวกได้ดี ซึ่งจากการทดลองดังกล่าวสามารถอธิบายได้ด้วยสมบัติของ  $\text{pH}_{\text{zpc}}$  ซึ่งที่ค่า pH ดังกล่าวทำให้ผิวของสารดูดซับมีประจุรวมเท่ากับศูนย์ เมื่อค่า pH ของสารละลาย น้อยกว่า  $\text{pH}_{\text{zpc}}$  สารดูดซับจะมีลักษณะเป็นประจุบวก แต่เมื่อค่า pH ของสารละลายมากกว่า  $\text{pH}_{\text{zpc}}$  สารดูดซับจะมีลักษณะเป็นประจุลบ

**Park และคณะ** [40] ได้ทำการศึกษาการกำจัดโลหะหนักด้วยเปลือกไข่ที่ใช้แล้วโดยการนำเปลือกไข่มาเผาที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง ทำการวิเคราะห์สารประกอบเปลือกไข่ด้วยวิธี XRF พบว่า มีองค์ประกอบหลักเป็น  $\text{CaCO}_3$  แต่หลังจากทำการเผาที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง พบว่า องค์ประกอบหลักของเปลือกไข่ คือ CaO ซึ่งองค์ประกอบของเปลือกไข่ทั้งก่อนและหลังเผามีองค์ประกอบเหมือนกับเปลือกหอยนางรม และสารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรมในงานวิจัยที่กำลังศึกษา นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษารูปแบบโครงสร้างผลึกของเปลือกไข่ก่อน และหลังเผา ด้วยวิธีวิเคราะห์ XRD โดยทำการตรวจวัดด้วยรังสี  $\text{CuK}\alpha$  ที่อัตราเร็วในการสแกน (8.0  $\theta/\text{min}$ ) โดยทำการสแกนในช่วง 10-90  $\theta$  โดยเปลือกไข่ก่อนเผาพบพีคหลักที่ 2  $\theta$  เท่ากับ 29.5 และพีคอื่นๆที่ 2  $\theta$  เท่ากับ 23.2 31.5 36.1 39.5 43.3 47.3 47.6 48.7 56.7 57.6 60.8 61.1 64.8 และ 65.8 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับไฟล์ JCPDS พบว่าตรงกับพีคของ  $\text{CaCO}_3$  ส่วนเปลือกไข่หลังเผาพบพีคหลักที่ 2  $\theta$  เท่ากับ 37.4 และพีคอื่นๆที่ 2  $\theta$  เท่ากับ 32.3 53.9 64.2 67.5 และ 79.7 ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับไฟล์ JCPDS พบว่าตรงกับพีคของ CaO ซึ่งจากการทดสอบดังกล่าวพบว่าสาร  $\text{CaCO}_3$  จะเปลี่ยนรูปไปเป็น CaO เมื่อได้รับความร้อน โดยสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาติให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านอื่นๆ  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

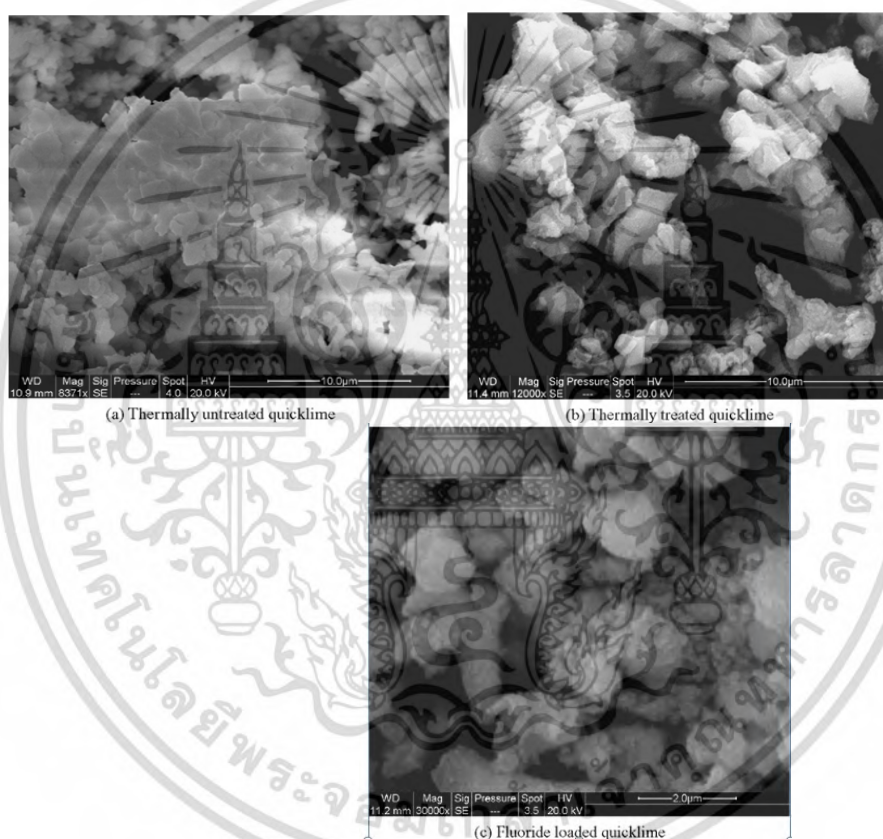
นอกจากนี้เมื่อนำเปลือกไข่ก่อนเผาและหลังเผามาทำการวิเคราะห์ด้วยวิธี SEM พบว่าเปลือกหอยก่อนเผามีลักษณะโครงสร้างผลึกไม่เป็นระเบียบ (Irregular crystal structure) แต่เมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิ 800 °C เป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมงพบว่าโครงสร้างของเปลือกไข่เปลี่ยนไปและมีโครงสร้างเป็นรูพรุนเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก ซึ่งเป็นผลมาจากการปล่อย CO<sub>2</sub> ในกระบวนการเผา ดังสมการด้านบน

**Islam และ Patel [41]** ได้ทำการศึกษากำจัดสารฟลูออไรด์ในน้ำด้วยปูนขาว (Quick lime) โดยปูนขาวที่ใช้นำมาจากเหมืองโคโลไมต์จากนั้นทำการกระตุ้นปูนขาวโดยการเผาที่อุณหภูมิ 450 °C เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง ซึ่งจากผลการทดลอง พบว่า ปูนขาวที่ผ่านการเผาจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารฟลูออไรด์ ได้มากกว่าปูนขาวที่ไม่ได้ผ่านการเผาถึง 2 เท่า ซึ่งจากการวิเคราะห์ BET พบว่า ปูนขาวมีพื้นที่ผิวเท่ากับ 4.19 m<sup>2</sup>/g ในขณะที่ปูนขาวที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 450 °C มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 11.75 m<sup>2</sup>/g แสดงว่าการเผापูนขาวที่อุณหภูมิ 450 °C จะทำให้ปูนขาวมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น นอกจากนี้จากการวิเคราะห์ด้วย SEM พบว่าลักษณะผิวของปูนขาวมีลักษณะเปลี่ยนไปเมื่อผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 450 °C ดังรูป 2-4 (a) และรูป 2-4 (b) และเมื่อปูนขาวทำการดูดซับสารฟลูออไรด์จะพบลักษณะเป็นก้อนกลมของสารฟลูออไรด์เกาะบนผิวของปูนขาว ดังรูป 2-4 (c) ซึ่งจากผลดังกล่าว แสดงว่า การเผापูนขาวที่อุณหภูมิ 450 °C จะทำให้พื้นที่ผิวและ โครงสร้างของปูนขาวเกิดการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากการสูญเสียน้ำที่อยู่ภายในอนุภาค ซึ่งจากผลดังกล่าวจึงทำให้ปูนขาวที่ผ่านการเผาจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารฟลูออไรด์ได้มากกว่าปูนขาวที่ไม่ได้ผ่านการเผา ซึ่งจากงานวิจัยนี้ได้ทำการสันนิษฐานว่า การที่พื้นที่ผิวและ โครงสร้างของปูนขาวเกิดการเปลี่ยนแปลงหลังจากเผานั้นจะเป็นผลเนื่องจากการสูญเสียน้ำที่อยู่ภายในอนุภาค ซึ่งในที่นี้ โครงสร้างของน้ำอาจอยู่ในรูปของน้ำที่อยู่ในผลึก และ/หรือ hydration ions ของออกไซด์ และไฮดรอกไซด์ โดยจากการตรวจสอบเปอร์เซ็นต์ แคลเซียมในสารตัวอย่างพบ 66.61 เปอร์เซ็นต์ แต่หลังจากการเผาแล้วพบ เปอร์เซ็นต์ของสาร ไม่ระเหย (Non-volatile matter) เพิ่มขึ้น เป็น 96.2 เปอร์เซ็นต์ และมีน้ำเป็นองค์ประกอบเพียง 3.8 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น นอกจากนี้ในระหว่างการทดลอง พบว่า ค่า pH ของสารละลายหลังจากเติมปูนขาวลงไปมักจะมีค่า pH มากกว่า 12 เสมอ ในส่วนของการศึกษากลไกการดูดซับสารฟลูออไรด์ด้วยปูนขาวได้ทำการศึกษาลักษณะการดูดซับจากแบบจำลองไอโซเทอม Dubinin-Radushkevich (DR) พบว่า ค่า Mean free energy (E) ของการดูดซับอยู่ในช่วง 8-16 kJ/mol<sup>-1</sup> ซึ่งแสดงว่าการดูดซับเป็นกระบวนการดูดซับทางเคมี ซึ่งในงานวิจัยนี้น่าจะเป็นกระบวนการและเปลี่ยน ไอออน (Exchange of ions) โดยเมื่อปูนขาวถูกเติมเข้าไปในน้ำ สาร CaO จะเปลี่ยนเป็น Ca(OH)<sub>2</sub> ซึ่งบางส่วนของสาร Ca(OH)<sub>2</sub> จะเกิดการละลายกับน้ำ และบางส่วนยังคงอยู่ในรูปของของแข็ง ซึ่งในส่วนของสาร Ca(OH)<sub>2</sub> ที่เกิดการละลายกับน้ำจะเกิดการทำปฏิกิริยากับสารฟลูออไรด์ แล้วเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของ CaF<sub>2</sub> ซึ่งเป็นสารที่ไม่ละลายน้ำ จากนั้นจะเกิดการตกตะกอนของสารดังกล่าว ซึ่งสาร Ca(OH)<sub>2</sub> ส่วนใหญ่จะไม่เกิดการละลายน้ำ ดังนั้นจึงเกิดการดูดซับสารฟลูออไรด์ โดยจะเกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่บริเวณผิวของสารดูดซับ (Surface chemical reaction) โดยการแทนที่กลุ่ม OH<sup>-</sup> ในสาร Ca(OH)<sub>2</sub> ด้วยสารฟลูออไรด์ (F<sup>-</sup>) แล้วเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของ CaF<sub>2</sub> ซึ่งสามารถเขียนปฏิกิริยาได้ดังนี้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

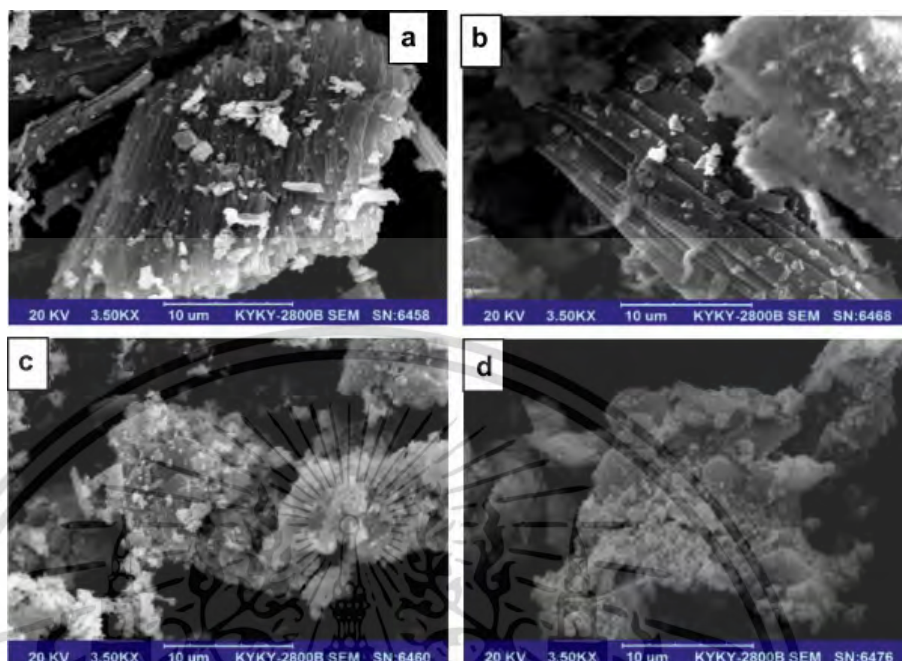
จากปฏิกิริยาดังกล่าวได้ทำการยืนยันผลโดยทำการตรวจวิเคราะห์ด้วย XRD และ SEM ซึ่งจากผลการวิเคราะห์ของ XRD พบว่า ปูนขาวที่ทำการเผาแล้ว ก่อนที่จะทำการดูดซับมีฟิสิกของสาร  $\text{CaO}$  และมีฟิสิกของสาร  $\text{Ca(OH)}_2$  แต่มีค่า Intensity ของฟิสิกต่ำ แต่เมื่อทำการวิเคราะห์อีกครั้งหลังจากการดูดซับพบฟิสิกของสาร  $\text{CaF}_2$  และ  $\text{Ca(OH)}_2$  แสดงว่า น่าจะเกิดการดูดซับดังที่อธิบายในข้างต้น นอกจากนี้จากการวิเคราะห์ปูนขาวก่อนทำการเผา พบฟิสิกของสาร  $\text{CaO}$  และสาร  $\text{Ca(OH)}_2$  แสดงว่า หากทำการเก็บปูนขาวไว้เป็นระยะเวลาสั้น สาร  $\text{CaO}$  สามารถเปลี่ยนเป็นสาร  $\text{Ca(OH)}_2$  ได้ นอกจากนี้ในส่วนของการศึกษาผลกระทบของสารไอออนอื่นในน้ำที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาโดยใช้ไอออนของ ซัลเฟต ฟอสเฟต และไนเตรต มาทำการศึกษา ซึ่งจากการศึกษาพบว่า ไอออนเหล่านี้มีผลทำให้การดูดซับสารฟลูออไรด์ลดลงโดยเรียงตามลำดับของไอออนที่มีผลต่อการดูดซับสารฟลูออไรด์จากมากไปหาน้อยได้ดังนี้ ฟอสเฟต ซัลเฟต และไนเตรต



รูปที่ 2-4 แสดงภาพ SEM ของปูนขาวก่อนเผา (a) ปูนขาวหลังเผา (b) และ ปูนขาวหลังการดูดซับสารฟลูออไรด์ (c) [41]

Xing และคณะ [42] ได้ทำการศึกษาการเปรียบเทียบคุณสมบัติของเปลือกหอยนางรม และเปลือกหอยแครงทั้งก่อนเผา และหลังเผาในการใช้เป็นสารดูดซับ ซึ่งในส่วนของการศึกษาสัณฐาน (Morphology) ของสารทั้ง 4 ตัวด้วยเทคนิค SEM พบว่า โครงสร้างของเปลือกของนางรม และเปลือกหอยแครงก่อนเผามีลักษณะคล้ายกัน กล่าวคือมีลักษณะเป็นเนื้อค่อนข้างหยาบ ถึงหยาบมาก พื้นผิวไม่สม่ำเสมอมีลักษณะเป็นชั้นๆ ขนานกัน (Schistous) แต่เมื่อทำการเผาที่อุณหภูมิ  $1050\text{ }^{\circ}\text{C}$  พบว่า ลักษณะ พื้นผิวไม่สม่ำเสมอมีลักษณะเป็นชั้นๆ ขนานกัน จะหายไป ดังรูปที่ 2-5 ซึ่งจากผลของการวิเคราะห์ XRD พบว่าเมื่อทำการเผาแล้ว สาร  $\text{CaCO}_3$  ในเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นอญูยาดเินหาไปไซประโยชน์ดานการคาไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เปลือกหอยนางรมจะเปลี่ยนเป็นสาร CaO ดังนั้นการหลุดออกของแก๊ส CO<sub>2</sub> น่าจะเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้โครงสร้างของเปลือกหอยทั้ง 2 ชนิดเกิดการเปลี่ยนแปลง



รูปที่ 2-5 แสดงภาพ SEM ของเปลือกหอยก่อนเผา (a) เปลือกหอยแครง (b) เปลือกหอยนางรม และเปลือกหลังเผาของ (c) เปลือกหอยแครง (d) เปลือกหอยนางรม [42]

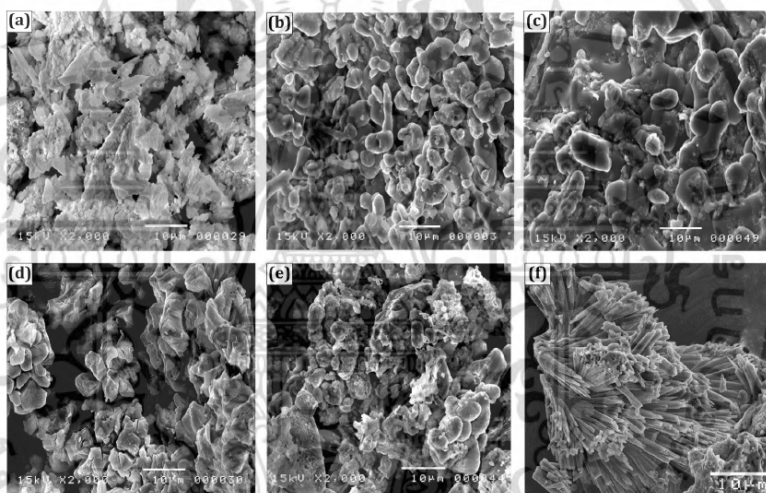
Alidoust และคณะ [2] ได้ทำการศึกษากลไกการดูดซับแคดเมียม (Cd) ในสารละลายด้วยเปลือกหอยนางรมเผา โดยจากการศึกษาคุณสมบัติของเปลือกหอยนางรมเผา ในส่วนขององค์ประกอบทางเคมี ค่า pH และสภาพการนำไฟฟ้า (Electrical conductivity) ของเปลือกหอยนางรมก่อนและหลังเผา พบว่า เมื่อเปลือกหอยนางรมผ่านการเผาที่อุณหภูมิสูงกว่า 652 °C การละลายของสารไอออนบวกในเปลือกหอยนางรมเผา (Cation) มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ซึ่งองค์ประกอบของเปลือกหอยนางรมส่วนใหญ่เป็นแคลเซียมซึ่งสามารถละลายน้ำได้ ทำให้เปลือกหอยนางรมหลังเผามีลักษณะเป็นเบส จึงทำให้ค่า pH ของเปลือกหอยนางรมเพิ่มขึ้นจาก pH 9 เป็น pH 12.7 เมื่อเปลือกหอยนางรมผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 750 800 และ 900 °C นอกจากนี้ จากการวิเคราะห์ด้วย BET พบว่า หลังจากเผาเปลือกหอยนางรมแล้วพื้นที่ผิวของเปลือกหอยนางรมจะเพิ่มขึ้นจาก 1.8 เป็น 64.6 m<sup>2</sup>/g ซึ่งอาจเกิดจากการที่ขนาดอนุภาคของเปลือกหอยนางรมที่ผ่านการเผาแล้วมีขนาดเล็กลง หรือเกิดจากการที่เปลือกหอยนางรมมีรูพรุนเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเผาที่อุณหภูมิสูง ซึ่งจากการตรวจสอบการกระจายของขนาดอนุภาค (Particle sized distribution) แล้วพบว่า ขนาดอนุภาคของเปลือกหอยนางรมก่อนเผาและหลังเผามีค่าแตกต่างกันเล็กน้อย จึงสามารถสรุปได้ว่า การเผาทำให้เปลือกหอยนางรมมีลักษณะเป็นรูพรุนเพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลให้พื้นที่ผิวของเปลือกหอยนางรมที่เพิ่มขึ้นหลังจากเผา จากการศึกษาปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับ พบว่า จากการทดสอบการดูดซับสาร Cd ด้วยเปลือกหอยนางรมก่อนเผา และเปลือกหอยนางรมที่ทำการเผาที่อุณหภูมิต่างๆ สามารถแบ่งตามค่าปริมาณการดูดซับที่มากที่สุด (Maximum adsorption) ออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ได้แก่ กลุ่มแรกคือ กลุ่มเปลือกหอยนางรมก่อนเผา และเปลือกหอยนางรมที่ทำการเผาที่อุณหภูมิ 450 °C และ 650 °C ซึ่งมีค่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณการดูดซับ อยู่ในช่วง 25.5-32.36 mg/g และกลุ่มที่ 2 คือ เปลือกหอยนางรมที่ทำการเผาที่อุณหภูมิ 750 °C 850 °C และ 950°C ซึ่งมีค่าปริมาณการดูดซับเท่ากับ 344.83 833.33 และ 1666.67 mg/g ตามลำดับ ซึ่งจากการศึกษาในกระบวนการเผา พบว่า ที่อุณหภูมิ 650 °C สาร  $\text{CaCO}_3$  ในเปลือกหอยนางรม เริ่มเปลี่ยนเป็นสาร  $\text{CaO}$  แต่มีปริมาณการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก แต่เมื่ออุณหภูมิในการเผาเพิ่มขึ้นสาร  $\text{CaCO}_3$  ในเปลือกหอยนางรมจะเปลี่ยนเป็นสาร  $\text{CaO}$  ในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น และสาร  $\text{CaCO}_3$  จะเปลี่ยนเป็นสาร  $\text{CaO}$  เกือบทั้งหมดที่อุณหภูมิ 900°C ซึ่งการดูดซับสาร Cd อาจสามารถทำการอธิบายได้ด้วย 5 สถานการณ์ ดังนี้ 1. เกิดจากการที่พื้นที่ของการดูดซับเพิ่มขึ้นในระหว่างกระบวนการเผา 2. เกิดจากการแลกเปลี่ยนไอออนของ  $\text{Ca}^{2+}$  หรือ  $\text{K}^+$  3. การตกตะกอนที่บริเวณผิวของสารดูดซับ 4. การตกตะกอนในสารละลาย (Bulk precipitation) ที่ค่า pH มากกว่า 9 และ 5. การรวมตัวกันของสาร Cd ใน ettringite crystal ( $\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$ ) ซึ่งในอันดับแรกจากการศึกษาพื้นที่ผิวของการเผาเปลือกหอยนางรม พบว่า พื้นที่ผิวของเปลือกหอยนางรมมีค่า เพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดที่อุณหภูมิ 750 °C ทำให้มีพื้นที่สำหรับการดูดซับสาร Cd เพิ่มขึ้น ซึ่งจากการศึกษาพบว่า ขนาดอนุภาคของสารดูดซับมีค่าสวนทางกับค่าของพื้นที่ผิวเฉพาะของสารดูดซับ (Specific surface area) นอกจากนี้ยังพบว่า การเผาที่อุณหภูมิ สูงกว่า 750 °C ไม่ได้ทำให้ขนาดอนุภาคของสารดูดซับเล็กลง แต่ในทางกลับกันกลับพบว่า อนุภาคสารดูดซับที่มีขนาดเล็กกว่า 250  $\mu\text{m}$  มีปริมาณลดลง ซึ่งน่าจะเกิดจากการหลอมรวมกันของโครงสร้างผลึก (Sintering process produce crystal aggregates) ทำให้สารดูดซับมีขนาดใหญ่ขึ้นในช่วงอนุภาค 250 -100  $\mu\text{m}$  จากเหตุผลนี้เป็นการยืนยันว่าการเพิ่มขึ้นของพื้นที่ผิวเฉพาะของสารดูดซับเกิดจากการที่สารดูดซับมีรูพรุนเพิ่มมากขึ้นจากการหลอมรวมกันของโครงสร้างผลึกของอนุภาคของสารดูดซับ นอกจากนี้จากการศึกษาค่า pH ของเปลือกหอยนางรมก่อนเผา และที่เผาที่อุณหภูมิต่างกัน พบว่า มีค่าอยู่ในช่วง pH 9-12.7 ซึ่งน่าจะเกิดจากการแตกตัวของสาร  $\text{CaCO}_3$  และ/หรือ  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ทำให้บริเวณผิวของสารดูดซับมีประจุเป็นลบ และสามารถทำการดูดซับสาร  $\text{Cd}^{2+}$  ได้ โดยเปลือกหอยนางรมที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 750 °C 850 °C และ 950°C พบว่า มีสาร  $\text{CaO}$  ปริมาณสูงมาก เมื่อสัมผัสน้ำจะเปลี่ยนเป็น  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  โดยสามารถทำการแตกตัวเป็น  $\text{Ca}^{2+}$  และ  $2\text{OH}^-$  ดังสมการ (2-21) จากปริมาณการแตกตัวเป็นจำนวนมากของสาร  $\text{OH}^-$  ซึ่งเป็นเบสแก่ทำให้กลุ่มเปลือกหอยที่ทำการเผาที่อุณหภูมิ 750-950 °C มีค่า pH ที่สูงมาก (pH เท่ากับ 10-12) สำหรับเปลือกหอยนางรมก่อนเผา สาร  $\text{CaCO}_3$  จะทำการแตกตัวในรูปของ  $\text{OH}^-$  ในปริมาณน้อย ดังสมการ (2-22) ทำให้ค่า pH ในสารละลายมีค่าน้อยกว่าค่า pH ของสารดูดซับในกลุ่มที่ผ่านกระบวนการเผาที่อุณหภูมิสูง จากเหตุผลดังกล่าวจึงเป็นไปได้ว่าจะเกิดการตกตะกอนในสารละลายของสารดูดซับในกลุ่มที่ผ่านกระบวนการเผาที่อุณหภูมิสูงมากกว่าสารดูดซับในกลุ่มที่ไม่ได้ผ่านการเผาหรือผ่านกระบวนการเผาที่อุณหภูมิไม่เกิน 650 °C นอกจากนี้ยังพบว่า สารดูดซับในกลุ่มผ่านกระบวนการเผาที่อุณหภูมิสูงจึงสามารถทำการดูดซับสาร  $\text{Cd}^{2+}$  ได้ดีกว่าสารดูดซับในกลุ่มแรก นอกจากเหตุผลที่กล่าวมาแล้ว ยังพบว่า ตัวสาร  $\text{Cd}^{2+}$  ยังสามารถเกิดการแลกเปลี่ยนไอออนกับสาร  $\text{Ca}^{2+}$  หรือ  $\text{K}^+$  จากนั้นจะเกิดการตกตะกอนทั้งบนผิวของสารดูดซับ และในสารละลาย โดยสาร  $\text{Cd}^{2+}$  จะสามารถทำการเข้าแทนที่สาร  $\text{Ca}^{2+}$  ในสาร  $\text{CaCO}_3$  และ  $\text{CaO}$  ได้ โดยทำการแทนที่อยู่ในรูปของ  $\text{CdCO}_3$  (Otavite) และ  $\text{Cd}(\text{OH})_2$  เนื่องจากรัศมีไอออนของสารทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน (รัศมีไอออนของสาร  $\text{Cd}^{2+}$  และ  $\text{Ca}^{2+}$  มีค่าเท่ากับ 0.95 และ 1.00 Å ตามลำดับ) โดยจากการศึกษา พบว่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากค่าการละลายของ CaO สูงกว่า CaCO<sub>3</sub> จึงทำให้สาร Cd<sup>2+</sup> ทำการแทนที่ Ca<sup>2+</sup> ในสาร CaO ง่ายกว่าการแทนที่ Ca<sup>2+</sup> ในสาร CaCO<sub>3</sub> จึงทำปฏิกิริยาไฮดรอกซิเดชันที่อุณหภูมิสูงมีประสิทธิภาพในการกำจัดสาร Cd<sup>2+</sup> มากกว่าปฏิกิริยาไฮดรอกซิเดชันที่ไม่ได้เผา และทำการเผาที่อุณหภูมิไม่เกิน 650 °C จากการศึกษาในส่วนของ SEM และ XRD พบว่า สารดูดซับจะทำการดูดซับสาร Cd<sup>2+</sup> ในรูปของสาร Cd(OH)<sub>2</sub> ที่เกิดจากการแตกตัวของสาร Ca(OH)<sub>2</sub> จากสาร CaO เป็นส่วนใหญ่ และมีบางส่วนที่เกิดการฟอร์มตัวในรูปของ otavite และ ettringite ที่มีลักษณะคล้ายเข็ม (Needle-like ettringite) ดังรูป 2-6 ซึ่งเป็นการยืนยันผลการทดลองดังที่กล่าวไว้ในข้างต้น



รูปที่ 2-6 ภาพ SEM ของเปลือกหอยก่อนเผา (a) เปลือกหอยหลังเผาที่อุณหภูมิ 650 °C (b) เปลือกหอยหลังเผาที่อุณหภูมิ 750 °C (c) ลักษณะรูพรุนของเปลือกหอยหลังเผาที่อุณหภูมิ 900 °C (d) รูปผลึกหกเหลี่ยมของ Cd(OH)<sub>2</sub> ที่เกิดจากการตกตะกอนบนเปลือกหอยหลังเผาที่อุณหภูมิ 750 °C (e) การฟอร์มตัวในรูปของ ผลึกที่มีลักษณะคล้ายเข็มหลังจากการดูดซับ Cd ในสารละลายของเปลือกหอยหลังเผาที่อุณหภูมิ 900 °C (f) [2]

Maiti และคณะ [43] ได้ทำการศึกษาการดูดซับสารอาร์เซไนต์ด้วยสาร Natural laterite เป็นสาร ดูดซับ โดยจากงานวิจัยในการศึกษาผลกระทบของอัตราเร็วในการปั่นกววน พบว่า เมื่อทำการเพิ่มอัตราการปั่นกววนเพิ่มขึ้น เปรอร์เซ็นในการกำจัดสารอาร์เซไนต์ในสารละลายเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจาก อัตราการปั่นกววนที่เพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้การแพร่ผ่านชั้นฟิล์มของสารจากสารละลาย (Bulk) ไปยังสารดูดซับ (Adsorbent) เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากชั้นฟิล์มที่ล้อมรอบสารดูดซับบางลง แต่เมื่ออัตราการปั่นกววนมากกว่า 2400 rpm พบว่า เพิ่มขึ้น เปรอร์เซ็นในการกำจัดสารอาร์เซไนต์ในสารละลายมีค่าเปลี่ยนแปลงน้อยมาก เนื่องจากชั้นฟิล์มที่ล้อมรอบสารดูดซับมีผลต่อการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มของสารจากสารละลายไปยังสารดูดซับน้อยมาก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

**Ho และคณะ [44]** ได้ทำการศึกษากลไกการดูดซับของสารดูดซับชีวภาพ (Biosorbent) โดยในงานวิจัยพบว่ากระบวนการดูดซับสามารถแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน คือ

1. การแพร่ในสารละลาย
2. การแพร่ผ่านชั้นฟิล์มที่ล้อมรอบสารดูดซับ
3. การแพร่ภายในรูพรุนของสารดูดซับ
4. การดูดซับและการคายซับที่บริเวณรูพรุนและพื้นผิวภายนอก

โดยจากการศึกษาพบว่าทั้ง 4 ขั้นตอน อาจมีขั้นตอนใดขั้นตอนหนึ่ง หรืออาจมีมากกว่าหนึ่งขั้นตอนเป็นขั้นตอนควบคุมอัตราการดูดซับ นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราการปั่นกวาส่งผลต่อขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มที่ล้อมรอบสารดูดซับ โดยอัตราการปั่นกวาที่เพิ่มมากขึ้น จะทำให้ชั้นฟิล์มที่ล้อมรอบสารดูดซับบางลง ทำให้สารถูกดูดซับสามารถแพร่จากสารละลายผ่านชั้นฟิล์มไปยังสารดูดซับได้เร็วขึ้น ซึ่งเมื่อเพิ่มอัตราการปั่นกวาที่มากพอ จะทำให้ผลกระทบของการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มมีผลต่ออัตราการดูดซับน้อยมาก จึงทำให้ขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มไม่ได้เป็นขั้นตอนควบคุมอัตราการดูดซับ แต่อาจเป็นขั้นตอนการแพร่ภายในรูพรุน หรือการดูดซับและการคายซับที่บริเวณรูพรุนและพื้นผิวภายนอก ที่เป็นขั้นตอนควบคุมอัตราการดูดซับ

**Sag และ Aktay [29]** ได้ทำการศึกษากลไกการดูดซับโครเมียม ไอออนบนโคลดิน โดยทำการศึกษาผลกระทบของค่า pH ขนาดอนุภาคของสารดูดซับ ความเข้มข้นเริ่มต้นของโครเมียม ปริมาณสารดูดซับ และ อัตราเร็วในการปั่นกวา ที่มีผลต่อการดูดซับ โดยในส่วนของการศึกษาขั้นตอนควบคุมอัตราการดูดซับ (Rate limiting step) ได้ใช้แบบจำลอง External mass transfer diffusion model และ แบบจำลอง Urano and Tachikawa (U&T) ในการพิจารณาข้อมูลจากการทดลองซึ่งจากการศึกษาพบว่าค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $1.16 \times 10^{-3} \text{ cm s}^{-1}$  แสดงว่าการดูดซับโครเมียมส่วนมากเกิดขึ้นที่บริเวณผิวของสารดูดซับ แต่อย่างไรก็ตามจากการทดลองพบว่าอัตราเร็วในการปั่นกวามีผลกระทบต่ออัตราการดูดซับโดยรวมน้อยมาก จากผลดังกล่าวแสดงว่าการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มไม่ใช่ปัจจัยหลักในขั้นตอนควบคุมอัตราการดูดซับ ซึ่งจากการคำนวณผลของสัมประสิทธิ์การแพร่ภายในรูพรุนพบว่าค่าเฉลี่ยเท่ากับ  $2.78 \times 10^3 \text{ mmol g}^{-1} \text{ s}^{0.5}$  จากผลดังกล่าวแสดงถึงการแพร่ของสารจากผิวของสารดูดซับเข้าไปในรูพรุนมีปริมาณน้อยมาก

**Benissa [45]** ได้ทำการศึกษาการดูดซับแคดเมียมโดยใช้เปลือกแอลมอนต์ โดยทำการศึกษาเพื่อหาขั้นตอนควบคุมอัตราการดูดซับในกลไกการดูดซับทั้งหมดที่เกิดขึ้น โดยทำการศึกษาในปัจจัยผลกระทบของค่า ความเข้มข้นเริ่มต้นของแคดเมียม ขนาดอนุภาคสารดูดซับ อัตราเร็วในการปั่นกวา อุณหภูมิ ปริมาณสารดูดซับ และค่า pH เริ่มต้นของสารละลาย และทำการพิจารณาหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านชั้นฟิล์มจากแบบจำลอง External mass transfer diffusion model ซึ่งมีการสันนิษฐานให้ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับมีค่าน้อยมากจนตัดทิ้งได้เป็นเวลาเข้าใกล้ศูนย์ ดังนั้น ผลของขั้นตอนการแพร่ภายในรูพรุนที่ช่วงเวลาดังกล่าวจึงมีค่าน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับค่าการแพร่ผ่านของชั้นฟิล์ม ซึ่งในการทดลองจะใช้การพิจารณาข้อมูลการดูดซับในช่วงระยะแรก เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของอัตราการดูดซับ (Initial rate of adsorption) ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม (External mass transfer coefficient) สามารถทำการคำนวณจากค่าความชันของกราฟในช่วงแรก (Initial slope) ที่ทำการพลอตระหว่าง  $C/C_0$  กับ  $t$  นอกจากนี้ในส่วนของการแพร่ภายในรูพรุนในงานวิจัยนี้ได้ใช้แบบจำลองของ Weber and Morris ซึ่งทำการพิจารณาโดยการนำข้อมูลการทดลองมาทำการเขียนเส้นกราฟระหว่าง  $q_t$  และ  $t^{1/2}$  ซึ่งหากขั้นตอนการแพร่ภายในรูพรุนเป็นขั้นควบคุมอัตราการดูดซับ เส้นกราฟที่ได้จะมีลักษณะเป็นเส้นตรง โดยค่าคงที่ที่พิจารณาได้จากความชันของกราฟดังกล่าวคือ ค่าคงที่อัตราเร็วในการแพร่ภายในรูพรุน นอกจากนี้จากตัวทฤษฎียังสามารถพิจารณาอีกสำหรับกรณีทีกราฟสามารถแบ่งออกเป็น 4 ช่วง ซึ่งแสดงถึงช่วงการแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม การแพร่ภายในรูพรุน ขนาด macro meso และ micro pore ตามลำดับ ซึ่งจากการศึกษาในส่วนการทดลองของผลกระทบของความเข้มข้นเริ่มต้นของแอดเมียม พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านชั้นฟิล์มมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารดูดซับเพิ่มมากขึ้น แสดงว่า เมื่อความเข้มข้นของสารดูดซับเพิ่มมากขึ้น จะทำให้การแพร่ผ่านชั้นฟิล์มจะเร็วขึ้นจึงทำให้ผลของการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มมีผลต่อขั้นควบคุมอัตราการดูดซับลดลงดังนั้นขั้นควบคุมอัตราการดูดซับจึงน่าจะเป็นขั้นตอนอื่น แสดงว่าการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มจะเป็นขั้นควบคุมอัตราการดูดซับในกรณีที่สารดูดซับมีความเจือจางมาก ในส่วนของการศึกษาอัตราการปั่นกวต้อการดูดซับ พบว่า ขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มจะเป็นขั้นควบคุมอัตราการดูดซับในกรณีที่ระบบมี อัตราเร็วในการปั่นกวต้อ ความเข้มข้นของสารดูดซับในสารละลายมีความเข้มข้นน้อย ขนาดอนุภาคของสารดูดซับมีขนาดเล็ก และมีแรงดึงดูดระหว่างสารดูดซับกับสารดูดซับสูง ในส่วนของขนาดอนุภาคสารดูดซับ พบว่า ขนาดอนุภาคของสารดูดซับมีขนาดเล็กจะส่งผลให้การแพร่ผ่านของชั้นฟิล์มและการแพร่ภายในอนุภาคเกิดได้เร็วขึ้นเนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จะมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อขนาดอนุภาค เล็กลง และเมื่อขนาดอนุภาคเล็กลงจะทำให้ระยะเวลาในการแพร่ของสารภายในอนุภาคลดลงเพราะระยะทางในการแพร่ภายในอนุภาคลดลงจึงทำให้อัตราเร็วในการแพร่ภายในอนุภาคเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่า ขนาดอนุภาคสารดูดซับเล็กจะทำให้ระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุลเกิดเร็วขึ้น ในส่วนผลกระทบของอุณหภูมิพบว่า หากการแพร่ภายในอนุภาคของสารดูดซับเป็นขั้นควบคุมอัตราการดูดซับ การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ภายในอนุภาคของสารดูดซับ (Diffusivity) มีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งโดยรวมแล้วจากผลการทดลองทั้งหมด พบว่า กระบวนการดูดซับมีความซับซ้อน โดยประกอบด้วยการแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม และการแพร่ภายในรูพรุน ซึ่งจากการพิจารณากลไกการดูดซับ พบว่า ขั้นตอนการแพร่ภายในรูพรุนเป็นขั้นควบคุมอัตราการดูดซับร่วมกับขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม ซึ่งเป็นขั้นควบคุมอัตราการดูดซับในช่วงแรกของกระบวนการดูดซับ

**Choy และคณะ [28]** ได้ทำการศึกษาการดูดซับ ไอออนของ Cu Cd และ Zn ด้วย bone char โดยในการศึกษาการดูดซับได้ใช้แบบจำลอง External mass transfer diffusion model มาทำการพิจารณาข้อมูลการทดลอง พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านชั้นฟิล์มจะมีค่าลดลงเมื่อขนาดอนุภาคของสารดูดซับมีขนาดใหญ่ขึ้น โดยให้เหตุผลว่าน่าจะเกิดจากการที่อัตราเร็วในการปั่นกวต้อที่เท่ากัน อนุภาคสารที่มีขนาดเล็กจะสามารถเคลื่อนที่ได้เร็วกว่าอนุภาคสารที่มีขนาดใหญ่ จึงทำให้มีโอกาสมากกว่าที่จะเกิดการเฉือน (Shear) ที่บริเวณผิวของสารดูดซับ จึงทำให้ชั้นฟิล์มที่ล้อมรอบอนุภาคดังกล่าวบางลง และทำให้เกิดการแพร่ของสารจากสารละลายไปยังเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์อื่นใด

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ผิวของสารดูดซับได้เร็วขึ้น ดังนั้นค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านชั้นฟิล์มจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดอนุภาคสารดูดซับ เล็กลงแต่ในทางกลับกัน เมื่ออนุภาคสารมีขนาดเล็กลงระยะทางในการแพร่ภายในอนุภาคก็มีระยะทางสั้นลง จึงทำให้ขั้นตอนการแพร่ภายในรูพรุนหรือการแพร่ภายในอนุภาคมีผลต่ออัตราการดูดซับลดลง จึงทำให้การแพร่ผ่านชั้นฟิล์มมีผลต่ออัตราเร็วในการดูดซับเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงมีโอกาสสูงที่ขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มจะเป็นขั้นตอนควบคุมอัตราการดูดซับ

**Yang และ Al-Duri [46]** ได้ทำการศึกษาการดูดซับสาร Reactive dye ด้วย Activated carbon โดยในส่วนของผลการทดลองของการหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านชั้นฟิล์มมีความสัมพันธ์กับความหนาของชั้นฟิล์ม และสถานะของระบบ เช่น อัตราส่วนของสารละลายต่อ ปริมาณสารดูดซับ นอกจากนี้ในส่วนของผลกระทบของขนาดอนุภาคที่มีผลต่ออัตราการแพร่ภายในอนุภาคของสารดูดซับ พบว่า อัตราการดูดซับมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อขนาดอนุภาคของสารดูดซับลดลง น่าจะเป็นผลเนื่องมาจากการที่อนุภาคของสารดูดซับมีขนาดเล็กลง ทำให้พื้นที่ผิวภายนอกของอนุภาคสารดูดซับเพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้เกิดการดูดซับได้เร็วขึ้น นอกจากนี้การที่อนุภาคของสารดูดซับลดลงจะทำให้อัตราเร็วในการแพร่ภายในรูพรุนเกิดได้เร็วขึ้น แต่ขนาดอนุภาคที่เล็กลงจะไม่เปลี่ยนโครงสร้างภายใน (Internal structure) ของสารดูดซับและปริมาณสารที่ถูกดูดซับทั้งหมด

**Sami และ Mohamed [30]** ได้ทำการศึกษาสาร Congo red ด้วย Natural clay โดยทำการศึกษาผลกระทบของอัตราการปั่นกววน ความเข้มข้นเริ่มต้นของสาร Congo red ปริมาณของ clay และขนาดของ clay ที่มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม โดยใช้แบบจำลอง External mass transfer diffusion model มาพิจารณาข้อมูลการทดลองซึ่งจากผลการทดลองในส่วนของอัตราเร็วในการปั่นกววน พบว่า เมื่ออัตราเร็วในการปั่นกววนเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ชั้นฟิล์มที่ล้อมรอบสารดูดซับมีลักษณะบางลง นอกจากนี้ในส่วนของการศึกษาผลกระทบของขนาดอนุภาคของสารดูดซับ พบว่า อัตราการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อขนาดอนุภาคของสารดูดซับเล็กลง เนื่องจากที่ปริมาณของสารดูดซับเท่ากัน ขนาดอนุภาคของสารดูดซับที่มีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวภายนอกของสารดูดซับมากกว่าอนุภาคของสารดูดซับที่มีขนาดใหญ่ ดังนั้นเมื่ออนุภาคมีขนาดเล็กลง พื้นที่ผิวภายนอกเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการแพร่ของสารถูกดูดซับจากสารละลายแพร่เข้าสู่ผิวของสารดูดซับได้เร็วขึ้น

**Ofomaja [31]** ได้ทำการศึกษาการดูดซับ lead (II) ด้วย Mansonia wood sawdust โดยในส่วนของ การศึกษากระบวนการแพร่ภายในอนุภาค (Intraparticle diffusion process) ของการดูดซับดังกล่าวได้ใช้แบบจำลองของ Weber and Morris ในการพิจารณาข้อมูลผลการทดลองโดยพบว่า หากขั้นตอนการแพร่ภายในรูพรุนเป็นขั้นตอนควบคุมอัตราการดูดซับ กราฟที่ได้จากการวาดความสัมพันธ์ระหว่าง  $q_t$  และ  $t^{1/2}$  จะมีลักษณะเป็นเส้นตรง และตัดแกน y ที่จุด 0,0 ในทางกลับกัน หากทำการวาดกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง  $q_t$  และ  $t^{1/2}$  แล้วได้เส้นกราฟที่มีความชันหลายค่า (Multi-linearity) แสดงว่าขั้นตอนการแพร่ภายในรูพรุนไม่ได้มีผลต่อขั้นตอนควบคุมอัตราการดูดซับเพียงอย่างเดียว แต่หากมีขั้นตอนอื่นร่วมด้วย โดยในช่วงแรกของกราฟที่มีลักษณะความชันมากแสดงถึงการแพร่ของสารถูกดูดซับจากสารละลายแพร่ผ่านชั้นฟิล์มเข้ามายังบริเวณผิวของสารดูดซับเป็นขั้นตอนเอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ควบคุมอัตราการดูดซับ ในขั้นตอนต่อมาจะแสดงถึงขั้นตอนในการแพร่ภายในรูพรุนเป็นขั้นควบคุมอัตราการดูดซับ และขั้นสุดท้ายจะแสดงถึงขั้นตอนการดูดซับที่เข้าสู่สภาวะสมดุล ซึ่งจากผลดังกล่าวแสดงว่าขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มและขั้นตอนการแพร่ภายในรูพรุนเป็นขั้นควบคุมอัตราการดูดซับ และพบว่า จุดตัดบนแกน  $y$  มีค่าแปรผันตรงกับค่าความหนาของชั้นฟิล์มที่ล้อมรอบอนุภาคของสารดูดซับ นอกจากนี้จากการทดลองยังพบว่า เมื่อค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารถูกดูดซับในสารละลายเพิ่มมากขึ้น ค่าคงที่อัตราการแพร่ภายในอนุภาคของสารดูดซับ (Intraparticle diffusion rate constant,  $k$ ) มีค่าเพิ่มขึ้น น่าจะเป็นผลเนื่องมาจากการที่ค่าความเข้มข้นเริ่มต้นของสารถูกดูดซับในสารละลายเพิ่มมากขึ้นจะทำให้ความแตกต่างของความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในสารละลาย และความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในอนุภาคของสารดูดซับหรือภายในรูพรุนมีค่าแตกต่างกันมาก จึงทำให้มีแรงผลักดันสูง (High concentration gradient) จึงทำให้สารถูกดูดซับเกิดการแพร่จากสารละลายไปยังสารดูดซับและการดูดซับได้อย่างรวดเร็ว (Faster diffusion and quicker adsorption)



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 สารเคมี และอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

##### 3.1.1 สารเคมี

1. เปลือกหอยนางรม
2. สารอาร์เซนิกไตรออกไซด์ (Arsenic trioxide,  $As_2O_3$ ) เกรดวิเคราะห์ (Ajax Finechem pty Ltd.)
3. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) เกรดวิเคราะห์ (Ajax Finechem pty Ltd.)
4. กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid, HCl) เกรดวิเคราะห์ของบริษัท QReC
5. โพแทสเซียมไอโอไดด์ (Potassium iodide, KI)
6. โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต (Potassium permanganate,  $KMnO_4$ )

##### 3.1.2 อุปกรณ์

1. เตาเผา (Furnace) ยี่ห้อ Barnstead Thermolyne รุ่น 1400 Furnace
2. เครื่องกวนสารละลาย (Magnetic Stirrer) ยี่ห้อ IKA รุ่น C-MAG HS 7
3. แท่งแม่เหล็ก (Magnetic)
4. เครื่องชั่งแบบดิจิทัล ยี่ห้อ METTLER TOLEDO รุ่น DRAGON 204
5. ขวดวัดปริมาตร (Volumetric flask) ขนาด 200 250 และ 1,000 มิลลิลิตร
6. บีกเกอร์ (Beaker) ขนาด 500 และ 1,000 มิลลิลิตร
7. ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) ขนาด 100 150 250 และ 1,000 มิลลิลิตร
8. ปิเปต (Volumetric pipette หรือ Transfer pipette) ขนาด 25 มิลลิลิตร
9. กระดาษกรอง (Filter paper) ยี่ห้อ Whatman ขนาด No.1 เส้นผ่านศูนย์กลาง 110 มิลลิเมตร
10. แท่งแก้ว (Stirring rod)
11. กรวยกรองแก้ว (Glass funnel)
12. เครื่องมือวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) ยี่ห้อ Hanna instrument รุ่น HI 98107
13. เครื่องตรวจวัดรังสี UV- Visible

#### 3.2 วิธีการทดลอง

##### 3.2.1 การเตรียมตัวดูดซับ

การเตรียมสารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรมเป็นตัวดูดซับทำได้โดยนำเปลือกหอยนางรมไปล้างให้สะอาดแล้วตากแดดจนแห้ง บด และคัดขนาด จากนั้นนำเปลือกหอยนางรมไปเผาที่อุณหภูมิ 700 °C ในอากาศ เป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง (Morphology) ของสารดูดซับ

ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารดูดซับในงานวิจัยนี้ได้ใช้การวิเคราะห์ SEM โดยตัวอย่างที่นำมาทดสอบได้แก่ เปลือกหอยนางรมบดขนาด 150-250 ไมโครเมตร สารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรม และสารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรมหลังจากดูดซับสารหนู

### 3.2.3 การศึกษา $pH_{zpc}$ ของสารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรม

ในการศึกษา  $pH_{zpc}$  ของสารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรมในงานวิจัยนี้ได้ใช้สารละลายโซเดียมคลอไรด์ เข้มข้น 0.01 โมลาร์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปรับค่า pH ของสารละลายให้มีค่าระหว่าง pH 2-13 ด้วยกรดไฮโดรคลอริก และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ จากนั้นใส่สารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรม 0.2 กรัมลงในสารละลายแต่ละขวด จากนั้นกวนด้วยเครื่องกวนสารละลาย ที่อัตราเร็วในการปั่นกวน 250 rpm เป็นระยะเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นกรองแยกสารดูดซับออกจากสารละลาย แล้วทำการวัดค่า pH ของสารละลาย

### 3.2.4 การเตรียมน้ำปนเปื้อนสังเคราะห์

น้ำปนเปื้อนสังเคราะห์ที่มีสารหนูความเข้มข้น 1,000 ppm เตรียมโดยชั่งสารอาร์ซีนิกไตรออกไซด์ 1.320 กรัม เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 50 กรัมต่อลิตร ปริมาตร 20 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำกลั่นประมาณ 500 มิลลิลิตร กวนสารละลายเป็นเวลา 2 ชั่วโมงจนสารละลายใส จากนั้นเติมน้ำกลั่นจนสารละลายมีปริมาตรรวม 1,000 มิลลิลิตร

### 3.2.5 การศึกษาผลกระทบของอัตราการปั่นกวนที่มีต่อการดูดซับสารหนู

เจือจางน้ำปนเปื้อนสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 1,000 ppm ด้วยน้ำกลั่น จนมีความเข้มข้น 100 ppm จากนั้นปรับค่า pH ของสารละลายให้เป็น 11 ด้วยกรดไฮโดรคลอริก และโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ใส่ตัวดูดซับ 0.3 กรัม ลงในสารละลายแต่ละขวด จากนั้นกวนด้วยเครื่องกวนสารละลาย ที่อัตราเร็วในการปั่นกวน 250-850 rpm และเก็บตัวอย่างประมาณ 15 มิลลิลิตร ที่เวลาต่างๆ จากนั้นกรองแยกตัวดูดซับออกจากสารตัวอย่างด้วยกระดาษกรอง นำตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณสารหนูด้วยวิธีการไทเทรต

### 3.2.6 การศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงอัตราการปั่นกวนที่มีต่อการดูดซับสารหนูในระบบปิด

เจือจางน้ำปนเปื้อนสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 100 ppm ด้วยน้ำกลั่น ปรับค่า pH ของสารละลายที่ pH 11 โดยบรรจุสารละลายลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 1,000 มิลลิลิตร จากนั้นใส่ตัวดูดซับ 0.3 กรัม ลงในสารละลาย กวนด้วยเครื่องกวนสารละลาย เก็บสารตัวอย่างที่เวลาต่างๆ เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นเปลี่ยนอัตราการปั่นกวนและเก็บสารตัวอย่างตามระยะเวลาที่กำหนด ปริมาตร 15 มิลลิลิตร จากนั้นกรองแยกตัวดูดซับออกจากสารตัวอย่างด้วยกระดาษกรอง นำตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณสารหนูด้วยวิธีการไทเทรต

### 3.2.7 การศึกษาผลกระทบของขนาดอนุภาคของสารดูดซับที่มีผลต่อการดูดซับสารหนู

เจือจางน้ำปนเปื้อนสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้น 1,000 ppm ด้วยน้ำกลั่น จนมีความเข้มข้น 100 ppm จากนั้นปรับค่า pH ของสารละลายให้เป็น 11 ด้วยกรดไฮโดรคลอริก และโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มีความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ใส่ตัวดูดซับขนาด 106-150 150-250 250-450 และ 450-600 ไมโครเมตร ปริมาตร 0.3 กรัม ลงใน

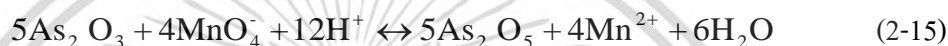
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น ไม่อนุญาตให้เผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาต

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สารละลายแต่ละขวด จากนั้นกวนด้วยเครื่องกวนสารละลาย ที่อัตราเร็วในการปั่นกวน 750 rpm และเก็บตัวอย่างปริมาณ 15 มิลลิลิตร ที่เวลาต่างๆ จากนั้นกรองแยกตัวดูดซับออกจากสารตัวอย่างด้วยกระดาษกรอง นำตัวอย่างที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณสารหนูด้วยวิธีการไทเทรต

### 3.2.8 การวิเคราะห์หาปริมาณสารหนูในน้ำตัวอย่าง

สำหรับงานวิจัยนี้ได้ใช้การไทเทรตปฏิกิริยารีดอกซ์ โดยใช้โพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนต ซึ่งมีลักษณะเป็น อินดิเคเตอร์ในตัวเอง ในการวิเคราะห์หาปริมาณสารหนู ซึ่งมีวิธีวิเคราะห์โดยนำสารตัวอย่างใส่ลงในขวดรูปชมพู่ เติมกรดไฮโดรคลอริกต่อน้ำในสัดส่วน 1:1 ปริมาณ 0.5 มิลลิลิตร จากนั้นหยดสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์เข้มข้น 0.001 โมลาร์ 2-3 หยดแล้วนำไปไทเทรตกับโพแทสเซียมเปอร์แมงกาเนตที่มีความเข้มข้น 50 ppm จนสารตัวอย่างเกิดสีชมพู คือ จุดยุติ (End Point) ปริมาณสารหนูสามารถคำนวณได้จากสมการ



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

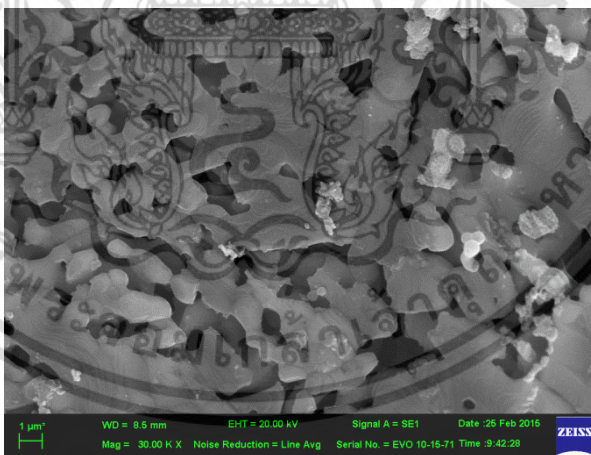
### ผลการทดลองและการวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 4.1 การศึกษาการเปลี่ยนแปลงสัณฐาน (Morphology) ของสารดูดซับที่สังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรม

ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงสัณฐานของสารดูดซับที่สังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรมในงานวิจัยนี้ได้ใช้เทคนิค SEM ในการวิเคราะห์สารตัวอย่างสามชนิด ได้แก่ เปลือกหอยนางรมก่อนเผา ขนาด 250-150 ไมโครเมตร สารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรม และสารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรมหลังจากทำการดูดซับสารหนูแล้ว ได้ผลการวิเคราะห์ดังรูป

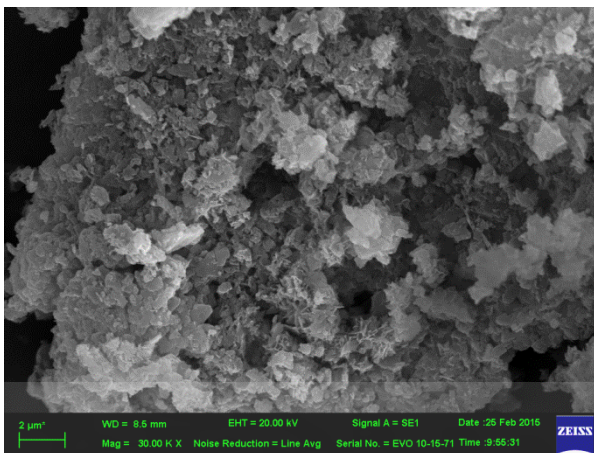


รูปที่ 4-1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM ของเปลือกหอยนางรมก่อนเผาที่กำลังขยาย 30,000X



รูปที่ 4-2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM ของสารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรมที่กำลังขยาย 30,000X

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

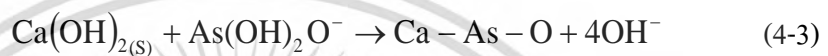
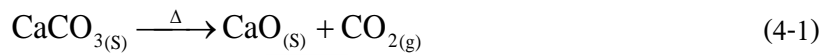


รูปที่ 4-3 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM ของสารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรมหลังดูดซับสารหนูที่ กำลังขยาย 30,000X

ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM ของ เปลือกหอยนางรมก่อนเผา และสารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรม แสดงได้ดังรูปที่ 4-1 และ 4-2 ตามลำดับ ซึ่งจากรูปจะพบว่า เมื่อทำการเผาเปลือกหอยนางรมที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมง โครงสร้างของเปลือกหอยนางรมจะเปลี่ยนจากลักษณะที่ไม่มีรูพรุนกลายเป็นโครงสร้างที่มีรูพรุนเป็นจำนวนมาก โดยผลการทดสอบที่ได้สอดคล้องกับผลการทดสอบ BET โดยพบว่า เปลือกหอยนางรมก่อนเผามีพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) 2.05 m<sup>2</sup>/g ในขณะที่สารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรมมีพื้นที่ผิวจำเพาะเพิ่มขึ้นเป็น 15.80 m<sup>2</sup>/g จากผลการทดสอบ XRD พบว่า องค์ประกอบหลักของเปลือกหอยนางรมและสารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรม คือ CaCO<sub>3</sub> และ CaO ตามลำดับ จากผลการทดสอบของ XRD BET และ SEM จึงสันนิษฐานได้ว่า รูพรุนที่เกิดขึ้นในโครงสร้างของสารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรม น่าจะเกิดจากการระเหยของแก๊ส CO<sub>2</sub> ในโมเลกุลของสาร CaCO<sub>3</sub> ของเปลือกหอยนางรม ระหว่างการเผาเปลือกหอยนางรมที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมง ทำให้สาร CaCO<sub>3</sub> ในเปลือกหอยนางรมเปลี่ยนเป็นสาร CaO ในสารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรม ดังปฏิกิริยาที่ (4-1) และอาจเกิดการหลอมรวมกันของอนุภาค (Grain) ของสารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรม ซึ่งการที่โครงสร้างของสารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรมมีลักษณะเป็นรูพรุนเพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก ทำให้สารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรมมีพื้นที่ผิวจำเพาะมากกว่าเปลือกหอยนางรมก่อนเผา นอกจากนี้จากการทดสอบ SEM ของสารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรมทำการดูดซับสารหนูแล้ว พบว่า ลักษณะความเป็นรูพรุนของสารดูดซับจะหายไปแต่จะมีลักษณะคล้ายผลึกสีขาวเกาะบนโครงสร้างของสารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรม และสารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรมมีขนาดเล็กลง ดังรูปที่ 4-3 จากผลการทดสอบ XRD พบว่า สารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรมหลังดูดซับสารหนูจะเปลี่ยนจากสาร CaO เป็นสาร Ca-As-O จากผลการวิเคราะห์สรุปผลได้ว่า การดูดซับสารหนูด้วยสารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรมเป็นกระบวนการ ดูดซับทางเคมี โดยเมื่อสาร CaO สัมผัสกับน้ำจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของ Ca(OH)<sub>2</sub> ดังปฏิกิริยาที่ (4-2) โดยสารดังกล่าวสามารถละลายน้ำได้บางส่วน จึงอาจเป็นสาเหตุให้สารดูดซับมีขนาดเล็กลง โดยละลายอยู่ในรูปของ Ca<sup>2+</sup> และ OH<sup>-</sup> จากนั้นตัวสาร Ca<sup>2+</sup> จะทำการจับกับสาร As(III) แล้วตกตะกอนในรูปของ Ca-As-O

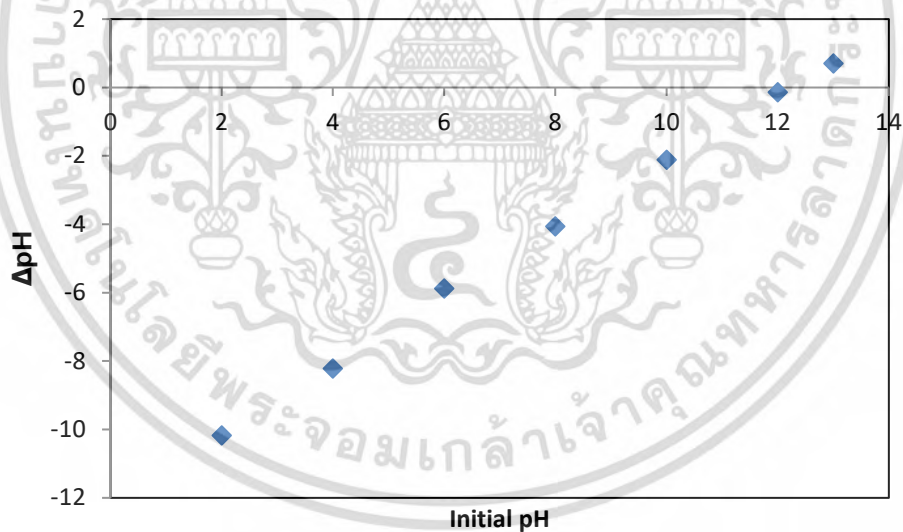
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซึ่งเป็นสารที่ไม่ละลายน้ำ [47] แต่สาร  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ส่วนใหญ่จะไม่ละลายน้ำ ดังนั้นจึงน่าจะเกิดปฏิกิริยาแลกเปลี่ยนไอออนที่บริเวณผิวของสารดูดซับโดยการแทนที่หมู่  $(\text{OH})_2$  แล้วเกิดการฟอร์มตัวอยู่ในรูปของ  $\text{Ca-As-O}$  ดังปฏิกิริยาที่ (4-3) ซึ่งจากผลการทดลองหลังการดูดซับได้ทำการตรวจวัดค่า pH ของสารละลาย พบว่า ค่า pH ของสารละลายมีค่าเพิ่มขึ้นจาก pH เริ่มต้นเท่ากับ 11 เป็น pH ประมาณ 12.3 ซึ่งจากผลของการทดสอบ มีค่าใกล้เคียงกับค่า pH ที่คำนวณได้จากปฏิกิริยาที่ (4-3)



#### 4.2 การศึกษา $\text{pH}_{\text{zpc}}$ ของสารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรม

การวิเคราะห์  $\text{pH}_{\text{zpc}}$  ของสารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรมในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธี Potentiometric mass titration ซึ่งค่า  $\text{pH}_{\text{zpc}}$  คือจุดที่ค่า  $\text{pH}_{\text{เริ่มต้น}} - \text{pH}_{\text{สุดท้าย}}$  มีค่าเท่ากับศูนย์ [36-38] จากผลการทดลองสามารถแสดงได้ดังรูป



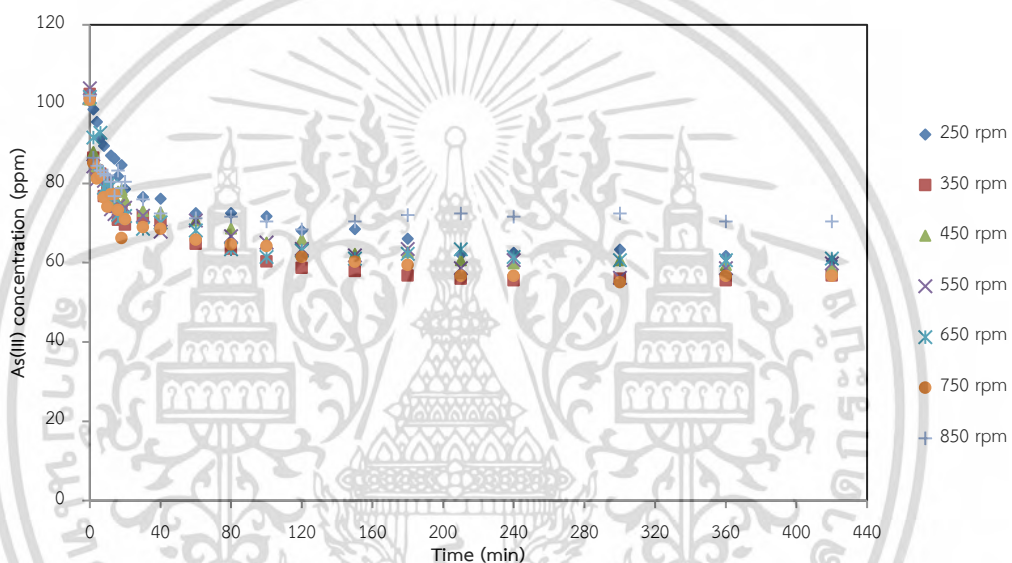
#### รูปที่ 4-4 ผลการทดลองหาค่า $\text{pH}_{\text{zpc}}$ ของสารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรม

จากรูปที่ 4-4 แสดงค่า  $\Delta\text{pH}$  ที่ค่า pH เริ่มต้น 2-13 ซึ่งพบว่า ค่า  $\Delta\text{pH}$  มีค่าเท่ากับศูนย์ที่ค่า pH เริ่มต้นประมาณ 12.1 โดยค่า  $\text{pH}_{\text{zpc}}$  ที่วิเคราะห์ได้ในงานวิจัยนี้เป็นค่า  $\text{pH}_{\text{zpc}}$  ของสารสังเคราะห์เปลือก หอยนางรมเมื่ออยู่ในน้ำ โดยจากผลการทดสอบ XRD พบว่าเมื่อสารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรมอยู่ในน้ำสาร  $\text{CaO}$  ในสารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรมจะเปลี่ยนเป็นสาร  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับเอกสารอ้างอิงลำดับที่ [23] ในงานวิจัยของ Atesok et al. work [35] ซึ่งในงานดังกล่าวได้มีการรายงาน  $\text{pH}_{\text{zpc}}$  ของสาร  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  ว่ามีค่ามากกว่า pH 12 จากผลการทดลอง แสดงว่า ประจุบนผิวของสารดูดซับมีลักษณะเป็นกลาง เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์เพื่อการศึกษาค้นคว้าเท่านั้น เมื่อผู้ใช้เห็นเว็บไซต์นี้จะเห็นการแจ้งเตือนว่ากรุณาอย่าคัดลอกข้อมูลนี้ไปเผยแพร่ในที่สาธารณะโดยไม่ได้รับอนุญาต และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หรือ มีประจุรวมบนผิวของสารดูดซับเป็นศูนย์ เนื่องจากพื้นผิวของสารดูดซับมีการรับและจ่าย  $H^+$  ในปริมาณที่เท่ากัน เมื่อค่า pH ของสารละลายมีค่าเท่ากับ 12.1 ถ้าค่า pH ของสารละลายมีค่ามากกว่าค่าดังกล่าว บริเวณผิวของสารดูดซับจะมีลักษณะโดยรวมเป็นประจุลบ และทำการ ดูดซับสารที่มีลักษณะเป็นประจุบวกได้ดี ในทางตรงข้าม ถ้าค่า pH มีค่าน้อยกว่าค่าดังกล่าว บริเวณผิวของสารดูดซับจะมีลักษณะประจุโดยรวมเป็นประจุบวก และสามารถทำการดูดซับสารที่มีลักษณะเป็นประจุลบได้ดี [13-15]

#### 4.3 การศึกษาผลกระทบของอัตราการปั่นกวนที่มีต่อการดูดซับสารหนู

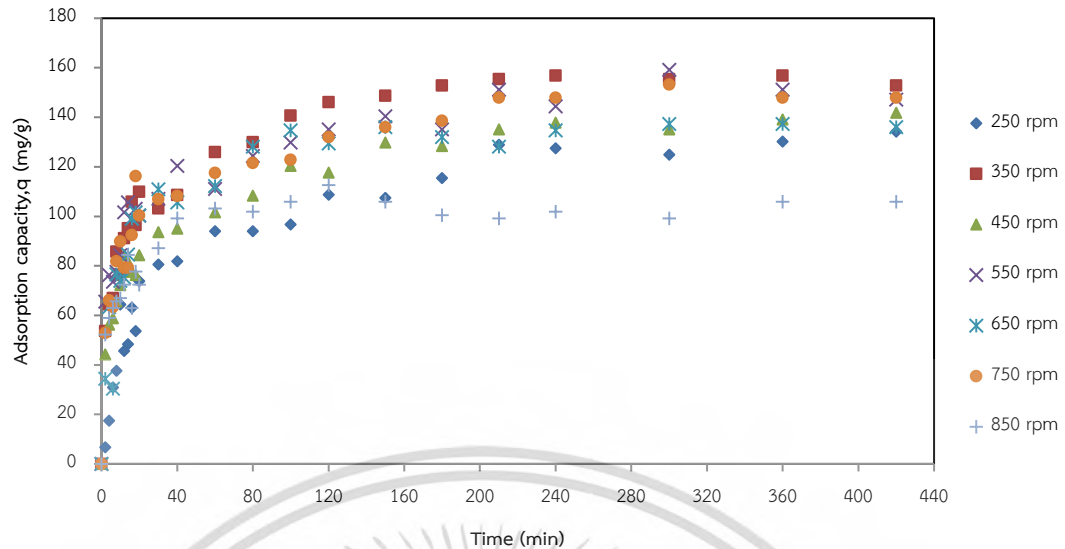
การศึกษาค้นคว้าผลกระทบของอัตราการปั่นกวนที่มีผลต่อการดูดซับสารหนูทำการทดลองที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ppm pH 11 อัตราการปั่นกวนเท่ากับ 250-850 rpm ได้ผลการทดลองดังรูป



รูปที่ 4-5 กราฟความเข้มข้นของสารหนูในสารละลายที่ระยะเวลาต่างๆ

จากผลการทดลองในรูปที่ 4-5 พบว่า เมื่อเติมสารดูดซับที่สังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรมลงในน้ำเสียสังเคราะห์ ในช่วงแรกความเข้มข้นของสารหนูจะลดลงอย่างรวดเร็ว กราฟมีความชันมาก และจากนั้นอัตราการลดลงของความเข้มข้นของสารหนูจะค่อยๆลดลง จนกระบวนการดูดซับเข้าสู่ภาวะสมดุล ซึ่งเป็นช่วงที่ความเข้มข้นของสารหนูในน้ำเสียสังเคราะห์คงที่

เมื่อทำการเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับสารหนูของสารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรม ( $q$ ) กับ เวลา ได้ผลดังรูปที่ 4-6



รูปที่ 4-6 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับสารหนูของสารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรม ( $q$ ) กับเวลา

เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับสารหนูของสารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรม ( $q$ ) ดังรูปที่ 4-6 พบว่า ในช่วงแรกของกระบวนการดูดซับจะมีปริมาณการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จากนั้นอัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณการดูดซับสารหนูจะค่อยๆ ลดลง และมีปริมาณคงที่เมื่อเข้าสู่สมดุลในที่สุด เนื่องจากในช่วงแรกพื้นที่บริเวณผิวดูดซับที่มีหมู่ฟังก์ชัน (Active site) ที่ยังว่างอยู่ในปริมาณมาก และความเข้มข้นของสารหนูที่บริเวณพื้นผิวของสารดูดซับและสารหนูในสารละลายมีความเข้มข้นต่างกันมากจึงทำให้มีแรงผลักดัน (Driving force) สูง จึงทำให้เกิดการแพร่ของสารหนูจากบริเวณสารละลายไปยังบริเวณพื้นผิวของสารดูดซับได้อย่างรวดเร็ว ทำให้ปริมาณการดูดซับสารหนูในช่วงแรกเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว จากนั้นเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น พบว่า อัตราเร็วในการเพิ่มขึ้นของปริมาณการดูดซับจะค่อยๆ ลดลง เป็นผลมาจากพื้นที่ว่างของบริเวณผิวของสารดูดซับมีปริมาณลดลง และความแตกต่างของปริมาณสารหนูที่บริเวณผิวของสารดูดซับกับความเข้มข้นของสารหนูในน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าลดลง ทำให้สารหนูในน้ำเสียสังเคราะห์แพร่ผ่านไปยังพื้นผิวของสารดูดซับได้ลดลง และเมื่อระบบเข้าสู่สมดุลความเข้มข้นของสารหนูในน้ำเสียจะคงที่

นอกจากนี้ ที่อัตราการปั่นกวน 250 -750 rpm พบว่า เมื่ออัตราการปั่นกวนเพิ่มมากขึ้น แนวโน้มปริมาณการดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้น น่าจะมาจากการที่อัตราการปั่นกวนเพิ่มมากขึ้นทำให้ชั้นฟิล์มที่ล้อมรอบอนุภาคของสารดูดซับบางลง จึงทำให้ปริมาณสารหนูในสารละลายสามารถแพร่ผ่านชั้นฟิล์มเข้าไปยังผิวของสารดูดซับได้มากขึ้น แต่ที่อัตราการปั่นกวน 850 rpm พบว่า อัตราการปั่นกวนที่เพิ่มขึ้น แต่แนวโน้มปริมาณการดูดซับมีค่าลดลง อาจจะเป็นผลมาจากการระเหยของสารละลายบางส่วนในระหว่างการเก็บตัวอย่าง โดยอัตราการปั่นกวนที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการระเหยของสารตัวอย่างได้เร็วขึ้น ดังนั้นจึงทำให้ความเข้มข้นของสารหนูในสารละลายเพิ่มมากขึ้น หรืออาจเกิดจากการคายซับ ซึ่งในส่วนนี้จะทำการยืนยันผลการทดลองในหัวข้อของผลกระทบการเปลี่ยนแปลงอัตราการปั่นกวนต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

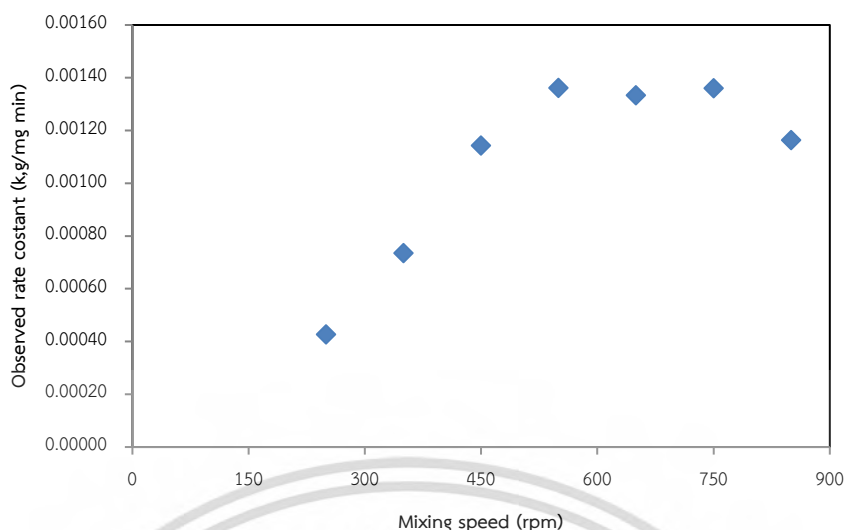
#### 4.3.1 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสารหนู

การศึกษาอัตราการดูดซับสารหนูด้วยสารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรมในงานวิจัยนี้ได้ใช้แบบจำลอง Pseudo-first order rate equation และ Pseudo-second order rate equation ในการวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลอง ซึ่งจากการฟิตข้อมูลการทดลองกับแบบจำลองทั้ง 2 แบบจำลอง สามารถคำนวณค่าคงที่อัตราการดูดซับ ( $k_a$ ) ค่า  $q_e$  ได้ดังตารางที่ 4-1

ตารางที่ 4-1 ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณจาก Pseudo-first order rate equation และ Pseudo-second order rate equation ที่อัตราการปั่นกวน 250-850 rpm

mixing speed (rpm)	$q_e$ from experiment	Pseudo-first order			Pseudo-second order		
		$k_a$	$q_e$	$R^2$	$k_a$	$q_e$	$R^2$
250	129.20	0.009	95.49	0.88	0.00043	125.00	0.98
350	128.86	0.019	90.56	0.92	0.00073	125.00	0.99
450	135.29	0.014	78.41	0.88	0.00114	125.00	0.99
550	145.47	0.016	70.39	0.75	0.00136	142.86	0.99
650	133.36	0.029	81.04	0.71	0.00133	125.00	0.94
750	145.62	0.015	75.64	0.71	0.00136	142.86	0.99
850	102.61	0.063	69.90	0.83	0.00116	125.00	0.99

จากตารางที่ 4-1 พบว่า ค่า  $R^2$  ที่คำนวณได้จากแบบจำลอง Pseudo-first order มีค่าอยู่ในช่วง 0.71-0.92 ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบกับค่า  $R^2$  ที่คำนวณได้จากแบบจำลอง Pseudo-second order ที่มีค่า  $R^2$  มากกว่า 0.94 จะพบว่ามีค่า  $R^2$  ที่คำนวณได้จากแบบจำลอง Pseudo-first order มีค่าน้อยกว่าค่า  $R^2$  ที่คำนวณได้จากแบบจำลอง Pseudo-second order นอกจากนี้จากการเปรียบเทียบค่า  $q_e$  ที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลองทั้ง 2 แบบจำลอง และค่า  $q_e$  ที่ได้จากการทดลอง พบว่า ค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลอง Pseudo-second order มีค่าสอดคล้องกับค่า  $q_e$  ที่ได้จากการทดลองมากกว่าแบบจำลอง Pseudo-first order ดังนั้นข้อมูลผลการทดลองจึงสอดคล้องกับแบบจำลอง Pseudo-second order มากกว่าแบบจำลอง Pseudo-first order นอกจากนี้ยังพบว่า เมื่ออัตราเร็วในการปั่นกวนเพิ่มขึ้น ค่าคงที่อัตราการดูดซับมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงอัตราการปั่นกวน 250-550 rpm ซึ่งเมื่อทำการนำค่าคงที่อัตราการดูดซับมาวาดกราฟกับค่าอัตราเร็วในการปั่นกวนจะได้ผลดังรูปที่ 4-7



รูปที่ 4-7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าคงที่อัตราการดูดซับ ( $k_o$ ) กับอัตราเร็วในการปั่นกววน

จากรูปพบว่าค่าคงที่อัตราการดูดซับในช่วงแรกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการปั่นกววนเพิ่มมากขึ้น (250-550 rpm) และเมื่ออัตราการปั่นกววนเกิน 550 rpm พบว่า ค่าคงที่อัตราการดูดซับมีแนวโน้มคงที่ จากผลการทดลองดังกล่าวพบว่า ในช่วงแรกที่ค่าอัตราการดูดซับเพิ่มมากขึ้นน่าจะเป็นผลมาจากการที่อัตราการปั่นกววนเพิ่มขึ้นทำให้ชั้นฟิล์มที่อยู่รอบสารดูดซับบางลง จึงทำให้สารหนูสามารถแพร่เข้าสู่สารดูดซับได้เร็วขึ้น แต่เมื่ออัตราเร็วในการปั่นกววนเกิน 550 rpm พบว่า ค่าคงที่อัตราการดูดซับมีแนวโน้มคงที่ น่าจะเป็นผลมาจากการที่ชั้นฟิล์มที่อยู่รอบสารดูดซับบางมากจนทำให้อัตราการแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม ไม่มีผลต่ออัตราการดูดซับ ซึ่งอัตราการดูดซับน่าจะถูกควบคุมด้วยขั้นตอนอื่น โดยจากงานวิจัยในระดับปริญญาโทพบว่า กระบวนการดูดซับประกอบด้วย 3 ขั้นตอน โดยในขั้นตอนแรกอัตราการแพร่ของสารหนูน่าจะถูกควบคุมด้วยขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม ขั้นตอนที่ 2 อัตราการแพร่ของสารหนูน่าจะถูกควบคุมด้วยขั้นตอนของการแพร่ผ่านภายในรูพรุน และขั้นที่ 3 น่าจะเป็นช่วงที่การแพร่เริ่มเข้าสู่สถานะสมดุล ดังนั้นจากผลการทดลองในช่วงที่อัตราการปั่นกววนเกิน 550 rpm การดูดซับน่าจะถูกรับควบคุมด้วยขั้นตอนของการแพร่ผ่านภายในรูพรุน

#### 4.3.2 การศึกษากลไกการดูดซับสารหนูด้วยสารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรม

การศึกษากลไกการดูดซับสารหนูด้วยสารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรมในงานวิจัยนี้ได้ใช้แบบจำลอง 3 แบบจำลองได้แก่ แบบจำลอง External mass transfer แบบจำลองของ Weber and Moris และแบบจำลองของ Urano and Tachikawa (U&T) ในการวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลอง ซึ่งค่าพารามิเตอร์ที่หาได้จากแบบจำลองทั้ง 3 แบบจำลองแสดงได้ดังตาราง

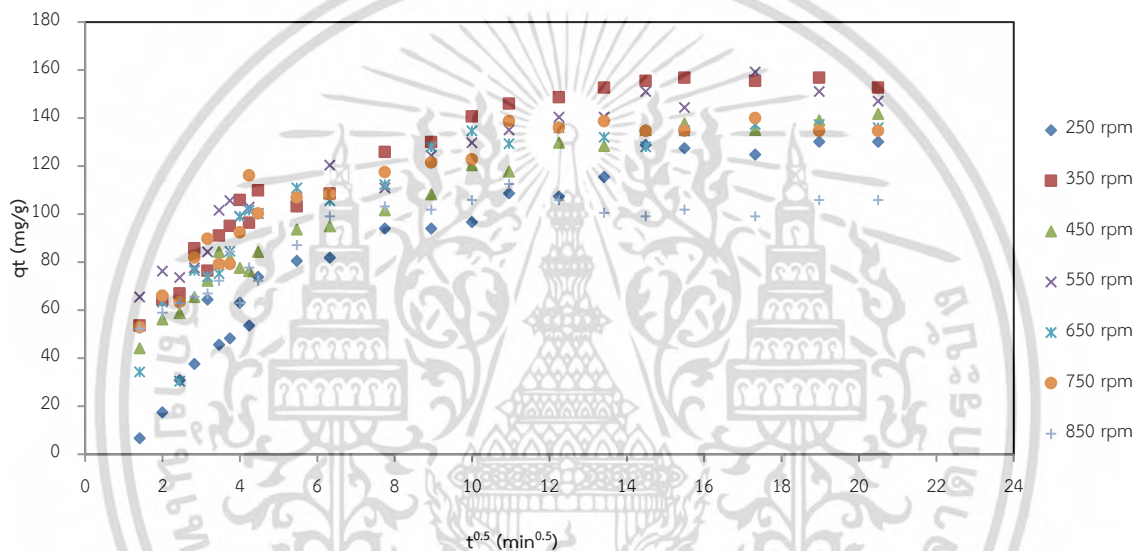
ตารางที่ 4-2 ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณจากแบบจำลอง External mass transfer แบบจำลองของ Weber and Moris และแบบจำลองของ Urano and Tachikawa (U&T) ที่อัตราการปั่นกวน 250-850 rpm

Agitation speed (rpm)	External mass transfer model		Intraparticle diffusion		
			Weber and Moris model		Urano and Tachikawa (U&T) model
	External mass transfer coefficient ( $k_p$ ) (cm/min)	film thickness (cm)	$k_{i1}$ (mg/g-min <sup>-0.5</sup> )	$k_{i2}$ (mg/g-min <sup>-0.5</sup> )	Intraparticle diffusion ( $D, \text{cm}^2/\text{min}$ )
250	$3.06 \times 10^{-5}$	0.327	18.59	4.48	$6.99 \times 10^{-8}$
350	$4.29 \times 10^{-5}$	0.233	17.15	6.60	$1.63 \times 10^{-7}$
450	$4.90 \times 10^{-5}$	0.204	17.77	5.91	$1.17 \times 10^{-7}$
550	$5.20 \times 10^{-5}$	0.192	14.14	4.56	$1.17 \times 10^{-7}$
650	$5.82 \times 10^{-5}$	0.172	20.19	6.71	$2.10 \times 10^{-7}$
750	$5.20 \times 10^{-5}$	0.192	20.31	5.45	$1.40 \times 10^{-7}$
850	$3.67 \times 10^{-5}$	0.272	11.64	6.01	$5.36 \times 10^{-7}$

ตารางที่ 4-2 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณข้อมูลผลการทดลองจากแบบจำลอง External mass transfer ที่อัตราการปั่นกวน 250-850 rpm ซึ่งจากตาราง พบว่า เมื่ออัตราการปั่นกวนของสารละลายเพิ่มมากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม ( $k_p$ ) มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น ในช่วงอัตราการปั่นกวนมีค่าระหว่าง 250 ถึง 650 rpm และจากการคำนวณค่าความหนาของชั้นฟิล์มจากแบบจำลองดังกล่าว พบว่ามีแนวโน้มสอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม จากผลการทดลองดังกล่าว แสดงว่า ที่อัตราการ ปั่นกวน 250-650 rpm ขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มเป็นขั้นตอนควบคุมอัตราการดูดซับหรือเมื่อเปรียบเทียบกับขั้นตอนอื่นแล้วขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มเป็นขั้นตอนที่ส่งผลกระทบต่ออัตราการดูดซับมากกว่าขั้นตอนอื่น แต่เมื่ออัตราการปั่นกวนเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ชั้นฟิล์มมีลักษณะบางลง จึงทำให้เกิดการแพร่ผ่านของสารหนูจากสารละลายไปยังผิวของสารดูดซับที่สังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรมได้เร็วขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านชั้นฟิล์มที่เพิ่มขึ้น แต่ที่อัตราการปั่นกวน 750-850 rpm พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม มีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้ น่าจะเป็นผลจากการที่ชั้นฟิล์มที่ล้อมรอบสารดูดซับมีลักษณะบางลงมากจนทำให้ขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มไม่ได้เป็นขั้นตอนควบคุมอัตราการดูดซับแต่เป็นขั้นตอนอื่นที่ควบคุมอัตราการดูดซับ หรือขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มอาจส่งผลกระทบต่ออัตราการดูดซับน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับขั้นตอนอื่น อาทิเช่น ขั้นตอนการแพร่ภายในรูพรุน และ/หรือขั้นตอนการดูดซับ ซึ่งจากผลการนำข้อมูลไปวิเคราะห์กับแบบจำลองของ Weber and Moris พบว่า กราฟที่วาดระหว่างปริมาณสารหนูที่ถูกดูดซับ ( $q$ ) กับเวลา<sup>0.5</sup> มีลักษณะความสัมพันธ์เป็นแบบ multi-linear curves ดังรูปที่ 4-8 ซึ่งจากรูปแบบดังกล่าว อธิบายกลไกการดูดซับได้ 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้น

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

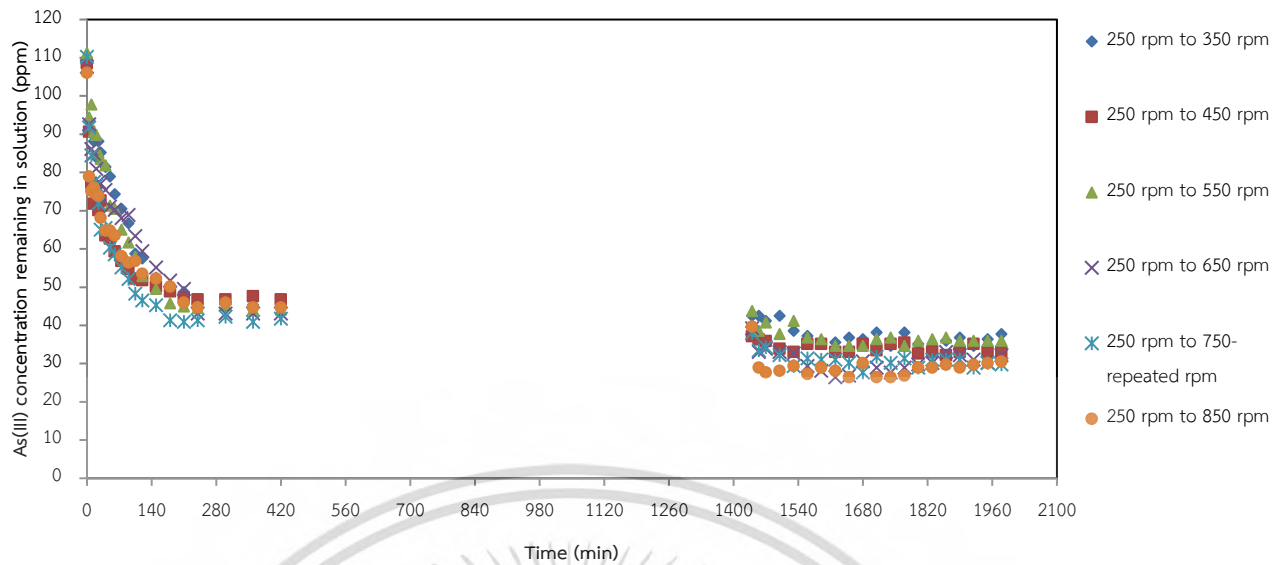
ฟิล์มจะเป็นชั้นควบคุมอัตราการดูดซับในช่วงระยะเวลาเริ่มแรกของกระบวนการดูดซับ และต่อมาชั้นตอนควบคุมอัตราการดูดซับจะถูกควบคุมโดยชั้นตอนการแพร่ภายใน รูพรุน และสุดท้ายจะเป็นช่วงที่กระบวนการดูดซับเข้าสู่ภาวะสมดุล ซึ่งจากแบบจำลองดังกล่าวสามารถคำนวณค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับ ( $k_{11}$  และ  $k_{22}$ ) ได้ดังตารางที่ 4-2 นอกจากนี้จากแบบจำลองของ Urano and Tachikawa สามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ภายในอนุภาค (Intraparticle diffusion, D) ได้ดังตารางที่ 4-2 ซึ่งจากตารางดังกล่าว พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ภายในอนุภาค มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจาก  $6.99 \times 10^{-8}$  เป็น  $5.36 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{min}$  เมื่ออัตราการปั่นกววนเพิ่มจาก 250 rpm เป็น 850 rpm ซึ่งจากผลดังกล่าว แสดงว่า อิทธิพลของชั้นตอนการแพร่ภายในรูพรุนมีผลต่อชั้นควบคุมอัตราการดูดซับเพิ่มมากขึ้นเมื่ออัตราการปั่นกววนเพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่ากระบวนการดูดซับสารหนูด้วยสารสังเคราะห์จากเปลือก หอยนางรมนั้นถูกควบคุมโดยชั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม และการแพร่ภายในรูพรุน



รูปที่ 4-8 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับสารหนูของสารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรม (q) กับเวลา<sup>0.5</sup> ที่อัตราการปั่นกววน 250-850 rpm

#### 4.4 การศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงอัตราการปั่นกววนที่มีผลต่อการดูดซับสารหนู

การศึกษาผลกระทบของการเปลี่ยนแปลงอัตราการปั่นกววนที่มีผลต่อการดูดซับสารหนูได้ทำการทดลองที่ความเข้มข้นของสารหนู 100 ppm pH 11 อัตราการปั่นกววนเริ่มต้นเท่ากับ 250 rpm เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทำการเปลี่ยนอัตราการปั่นกววนเป็น 350-850 rpm นำข้อมูลผลการทดลองมาทำการเขียนความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารหนูที่เหลืออยู่ในน้ำเสียดังเคราะห์กับเวลา แสดงผลได้ดังรูปที่ 4-9

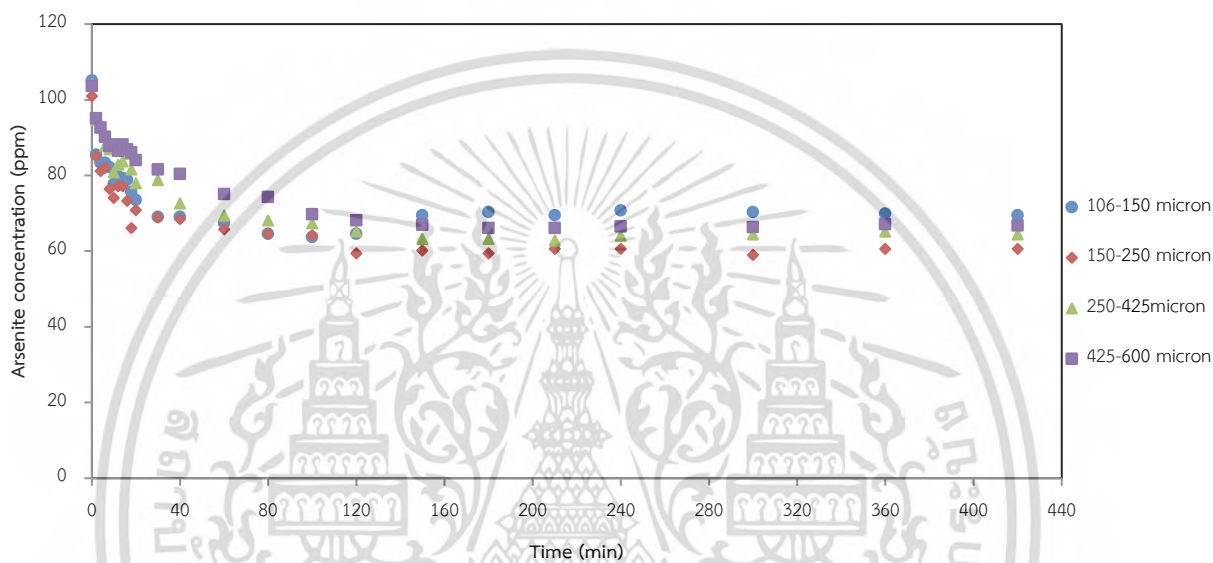


รูปที่ 4-9 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของสารหนูที่เหลืออยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์กับเวลา

ผลการทดลองแสดงผลได้ดังรูปที่ 4-9 จากรูปดังกล่าว พบว่า ที่อัตราการปั่นกววน 250 rpm ในช่วงแรก ความเข้มข้นของสารหนูในน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าลดลงอย่างรวดเร็ว เนื่องจากในช่วงแรกของการดูดซับ สารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรมยังมีพื้นที่ว่างในการดูดซับสารหนูว่างอยู่เป็นจำนวนมาก และความเข้มข้นของสารหนูที่บริเวณสารละลายกับสารดูดซับมีความแตกต่างกันมากจึงทำให้มีแรงผลักดัน (Driving force) สารหนูจากสารละลายแพร่ผ่านชั้นฟิล์มเข้าไปยังผิวของสารดูดซับมาก จึงทำให้เกิดการดูดซับอย่างรวดเร็ว และส่งผลให้ความเข้มข้นของสารหนูในสารละลายลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงแรก จากนั้นเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น อัตราการลดลงของสารหนูในน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าลดลง เนื่องจากการลดลงของพื้นที่ว่างในการดูดซับสารหนูและแรงผลักดันสารหนูจากสารละลายแพร่ผ่านชั้นฟิล์มเข้าไปยังผิวของสารดูดซับเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้น จนถึงเวลาประมาณ 150 นาที อัตราการลดลงของสารหนูในน้ำเสียสังเคราะห์มีแนวโน้มลดลง และเข้าสู่สภาวะสมดุลจนถึงเวลา 1440 นาที จากนั้นเมื่อทำการเปลี่ยนอัตราเร็วในการปั่นกววนเป็น 350 450 550 650 750 และ 850 rpm พบว่า ความเข้มข้นของสารหนูในน้ำเสียสังเคราะห์มีปริมาณแนวโน้มลดลงในช่วงแรก และมีแนวโน้มคงที่เมื่อระยะเวลาผ่านไปประมาณ 1680 นาที ซึ่งในช่วงแรกที่เปลี่ยนอัตราเร็วในการปั่นกววนปริมาณสารหนูในน้ำเสียสังเคราะห์มีปริมาณลดลง น่าจะเป็นผลเนื่องมาจากอัตราการปั่นกววนที่เพิ่มมากขึ้นจะทำให้ชั้นฟิล์มที่ล้อมรอบสารดูดซับบางลงจึงทำให้เกิดการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มได้เพิ่มมากขึ้น จึงทำให้สามารถทำการดูดซับสารหนูได้เพิ่มขึ้น ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับผลที่ได้กล่าวในก่อนหน้า (หัวข้อ 4.3) คือ อัตราการปั่นกววนเพิ่มขึ้น ทำให้ชั้นฟิล์มที่ล้อมรอบสารดูดซับบางลงจึงทำให้เกิดการแพร่ของสารหนูจากสารละลายไปยังผิวของสารดูดซับได้เร็วขึ้น นอกจากนี้ในการศึกษาผลการทดลองนี้ไม่พบการ คายซับปรากฏขึ้นอย่างชัดเจน แสดงว่าการดูดซับสารหนูในช่วงที่อัตราเร็ว 850 rpm ที่กล่าวในหัวข้อ 4.3 ซึ่งพบว่า ปริมาณการดูดซับสารหนูลดลง น่าจะเป็นผลจากการระเหยของสารละลายในช่วงระยะเวลาการเก็บตัวอย่าง

### 4.5 การศึกษาผลกระทบของขนาดอนุภาคของสารดูดซับที่สังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรม

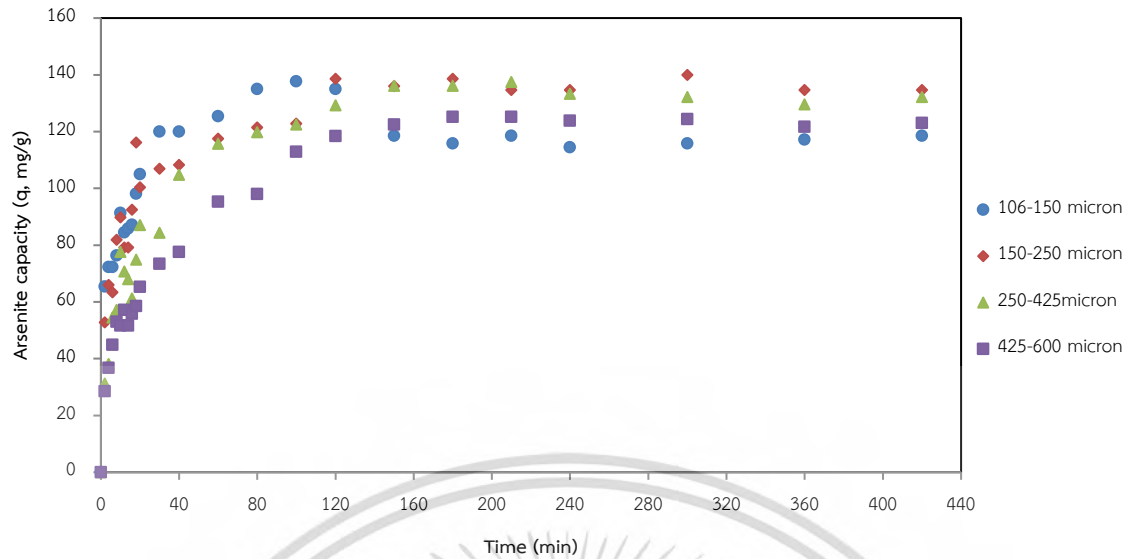
การศึกษาผลกระทบของขนาดอนุภาคของสารดูดซับที่สังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรมในงานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองโดยใช้สารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรมที่มีขนาดอนุภาคต่างกัน 4 ขนาด ได้แก่ 106-150 150-250 250-450 และ 450-600 ไมโครเมตร ปริมาณ 0.3 กรัม ทำการทดลองการดูดซับสารหนูที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 ppm ปริมาณ 1,000 มิลลิลิตร pH 11 ที่อัตราเร็วในการปั่นกวน 750 rpm เก็บตัวอย่างที่ระยะเวลาที่เหมาะสม แล้วนำตัวอย่างไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณสารหนูที่เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยวิธีการไทเทรต ซึ่งผลการทดลองสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4-10



รูปที่ 4-10 กราฟความเข้มข้นของสารหนูในสารละลายที่ระยะเวลาต่างๆ

จากผลการทดลองในรูปที่ 4-10 พบว่า เมื่อเติมสารดูดซับที่สังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรมลงในน้ำเสียสังเคราะห์ ในช่วงระยะเวลาประมาณ 30 นาทีแรกความเข้มข้นของสารหนูจะลดลงอย่างรวดเร็วจากนั้นอัตราการลดลงของความเข้มข้นของสารหนูจะค่อยๆลดลง และกระบวนการดูดซับเริ่มเข้าสู่สภาวะสมดุลที่ระยะเวลาประมาณ 120-180 นาทีเป็นต้นไป ซึ่งเป็นช่วงที่ความเข้มข้นของสารหนูในน้ำเสียสังเคราะห์คงที่

จากผลการทดลองในรูปที่ 4-10 เมื่อนำข้อมูลมาทำการเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับสารหนูของสารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรม (q) กับ เวลา ได้ผลดังรูปที่ 4-11



รูปที่ 4-11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับสารหนูของสารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรม ( $q$ ) กับเวลา

รูปที่ 4-11 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับสารหนูของสารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรม ( $q$ ) กับเวลา จากรูปดังกล่าว พบว่า ปริมาณการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลาประมาณ 30 นาที แรกของกระบวนการดูดซับ น่าจะเป็นผลเนื่องจากในช่วงแรกของระยะเวลาการดูดซับ มีพื้นที่บริเวณผิวดูดซับที่มีหมู่ฟังก์ชัน ที่ยังว่างอยู่ในปริมาณมาก และความเข้มข้นของสารหนูที่บริเวณพื้นผิวของสารดูดซับและสารหนูในสารละลายมีความเข้มข้นต่างกันมากจึงทำให้มีแรงผลักดันสูง จึงทำให้เกิดการแพร่ของสารหนูจากบริเวณสารละลายไปยังบริเวณพื้นผิวของสารดูดซับได้อย่างรวดเร็ว จึงทำให้ปริมาณการดูดซับสารหนูในช่วงแรกเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว จากนั้น เมื่อระยะเวลาเพิ่มมากขึ้นจะพบว่า อัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณการดูดซับสารหนูจะค่อยๆ ลดลง เป็นผลจากการลดลงของปริมาณพื้นที่ว่างของบริเวณผิวของสารดูดซับ และความแตกต่างของปริมาณสารหนูที่บริเวณผิวของสารดูดซับกับความเข้มข้นของสารหนูในน้ำเสียสังเคราะห์มีค่าลดลง จึงทำให้ปริมาณสารหนูในน้ำเสียสังเคราะห์แพร่ผ่านไปยังพื้นผิวของสารดูดซับได้ลดลงและเมื่อระบบเข้าสู่สมดุลจะพบว่าปริมาณการดูดซับสารหนูในน้ำเสียจะมีค่าคงที่ นอกจากนี้ยังพบว่าขนาดอนุภาคที่มีขนาดเล็กมีแนวโน้มเข้าสู่สภาวะสมดุลได้รวดเร็วกว่าอนุภาคของสารดูดซับขนาดใหญ่ ทั้งนี้ น่าจะเป็นผลเนื่องมาจากอนุภาคที่มีขนาดเล็ก ชั้นฟิล์มจะมีขนาดเล็กกว่าอนุภาคของสารดูดซับที่มีขนาดเล็กกว่า นอกจากนี้ ขนาดอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ ระยะทางการแพร่จากผิวของสารดูดซับเข้าไปภายในอนุภาคของสารดูดซับมีระยะทางมากกว่าอนุภาคของสารดูดซับขนาดเล็ก [2, 28, 30, 46]

#### 4.5.1 การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสารหนู

การศึกษาอัตราการดูดซับสารหนูด้วยสารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรมในงานวิจัยนี้ได้ใช้แบบจำลอง Pseudo-first order rate equation และ Pseudo-second order rate equation ในการวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลอง สามารถคำนวณค่าคงที่อัตราการดูดซับ ( $k_a$ ) ค่า  $q_e$  ได้ดังตาราง 4-3

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่ออนุญาตเห็นไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4-3 ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณจาก Pseudo-first order rate equation และ Pseudo-second order rate equation ที่ขนาดอนุภาค 106-150 150-250 250-450 และ 450-600 ไมโครเมตร

Particle size (micrometer)	$q_e$ from experiment	Pseudo-first order			Pseudo-second order		
		$k_a$	$q_e$	$R^2$	$k_a$	$q_e$	$R^2$
106-150	117.03	0.079	76.94	0.88	0.001167	142.86	0.99
150-250	136.50	0.019	67.02	0.74	0.001361	142.86	0.99
250-425	133.85	0.024	86.02	0.96	0.000613	142.86	0.98
425-600	123.89	0.024	104.17	0.96	0.000408	142.86	0.98

จากตารางที่ 4-3 พบว่า ค่า  $R^2$  ที่คำนวณได้จากแบบจำลอง Pseudo-first order มีค่าอยู่ในช่วง 0.71-0.92 ซึ่งเมื่อทำการเปรียบเทียบกับค่า  $R^2$  ที่คำนวณได้จากแบบจำลอง Pseudo-second order ที่มีค่า  $R^2$  มากกว่า 0.94 ซึ่งจากข้อมูลจะพบว่ามีค่า  $R^2$  ที่คำนวณได้จากแบบจำลอง Pseudo-first order มีค่าน้อยกว่าค่า  $R^2$  ที่คำนวณได้จากแบบจำลอง Pseudo-second order นอกจากนี้จากการเปรียบเทียบค่า  $q_e$  ที่ได้จากการคำนวณจากแบบจำลองทั้ง 2 แบบจำลอง และค่า  $q_e$  ที่ได้จากการทดลอง พบว่า ค่าที่คำนวณได้จากแบบจำลอง Pseudo-second order มีค่าสอดคล้องกับค่า  $q_e$  ที่ได้จากการทดลองมากกว่าแบบจำลอง Pseudo-first order ดังนั้นข้อมูลผลการทดลองจึงสอดคล้องกับแบบจำลอง Pseudo-second order มากกว่าแบบจำลอง Pseudo-first order นอกจากนี้ยังพบว่า ขนาดอนุภาคของสารดูดซับมีขนาดเล็กถึงค่าคงที่อัตราการดูดซับที่คำนวณได้จากแบบจำลอง Pseudo-second order กลับมีค่าเพิ่มมากขึ้น น่าจะเป็นผลเนื่องมาจากที่อัตราเร็วในการปั่นกววนเดียวกัน อนุภาคของสารดูดซับมีขนาดเล็กถึงค่าคงที่อัตราการดูดซับที่คำนวณได้จากแบบจำลอง Pseudo-second order จะได้รับแรงเหวี่ยงทำให้เคลื่อนที่ตามอัตราเร็วได้ไวกว่าอนุภาคสารดูดซับที่มีขนาดใหญ่ ทำให้เกิดแรงเฉือนที่บริเวณชั้นฟิล์มของอนุภาคสารดูดซับขนาดเล็กได้มากกว่าอนุภาคสารดูดซับขนาดใหญ่ จึงทำให้ชั้นฟิล์มของอนุภาคสารดูดซับขนาดเล็กมีลักษณะบางกว่าชั้นฟิล์มของอนุภาคสารดูดซับที่มีขนาดใหญ่ [28] จึงส่งผลให้สารหนูทำการแพร่จากชั้นฟิล์มไปยังผิวของสารดูดซับได้เร็วขึ้น นอกจากนี้ที่น้ำหนักของสารดูดซับที่เท่ากัน อนุภาคสารดูดซับที่มีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวในการถ่ายเทมวลมากกว่าอนุภาคสารดูดซับที่มีขนาดใหญ่ [30, 46] แต่จากผลการทดลอง พบว่า ค่าคงที่อัตราการดูดซับของอนุภาคสารดูดซับขนาด 106-150 ไมโครเมตรและ 150-250 ไมโครเมตร มีค่าต่างกันน้อยมาก ดังนั้นเพื่อสะดวกในการแยกสารดูดซับออกจากน้ำเสียสังเคราะห์จึงควรใช้อนุภาคสารดูดซับขนาด 150-250 ไมโครเมตร

#### 4.5.2 การศึกษากลไกการดูดซับสารหนูด้วยสารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรม

การศึกษากลไกการดูดซับสารหนูด้วยสารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรมในงานวิจัยนี้ได้ใช้แบบจำลอง External mass transfer แบบจำลองของ Weber and Moris และแบบจำลองของ Urano and Tachikawa (U&T) ในการวิเคราะห์ข้อมูลผลการทดลอง โดยสามารถหาค่าพารามิเตอร์ได้ดังตารางที่ 4-4

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

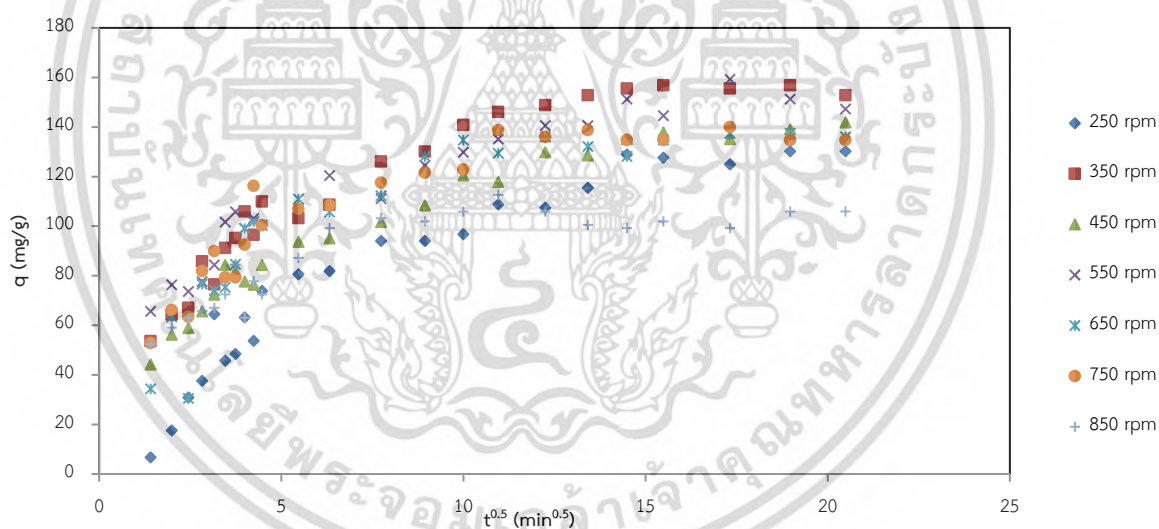
ตารางที่ 4-4 ค่าพารามิเตอร์ที่คำนวณจากแบบจำลอง External mass transfer แบบจำลองของ Weber and Moris และแบบจำลองของ Urano and Tachikawa (U&T) ที่ขนาดอนุภาคของสารดูดซับต่างกัน

Particle size (micrometer)	External mass transfer model		Intraparticle diffusion		
			Weber and Moris model		Urano and Tachikawa (U&T) model
	External mass transfer coefficient ( $k_p$ )	film thickness (cm)	$k_{i1}$ (mg/g- min <sup>-0.5</sup> )	$k_{i2}$ (mg/g- min <sup>-0.5</sup> )	Intraparticle diffusion (D, cm <sup>2</sup> /min)
106-150	$1.57 \times 10^{-05}$	0.638	12.95	3.77	$2.48 \times 10^{-07}$
150-250	$5.2 \times 10^{-05}$	0.192	15.97	5.67	$1.4 \times 10^{-07}$
250-425	$4.65 \times 10^{-05}$	0.215	13.64	4.04	$5.31 \times 10^{-07}$
425-600	$3.14 \times 10^{-05}$	0.319	9.09	4.18	$1.38 \times 10^{-06}$

เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลในช่วงแรกของการดูดซับด้วยแบบจำลอง External mass transfer จะได้ผลดังตารางที่ 4-4 ซึ่งจากตารางดังกล่าว พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม (External mass transfer coefficient,  $k_p$ ) มีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นเมื่อขนาดอนุภาคของสารดูดซับมีขนาดเล็กลง ซึ่งน่าจะเป็นผลมาจากการที่ชั้นฟิล์มที่ล้อมรอบสารดูดซับมีลักษณะที่บางลง โดยจากการคำนวณความหนาของชั้นฟิล์มที่ล้อมรอบอนุภาคของสารดูดซับ พบว่า สอดคล้องกับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม จึงกล่าวได้ว่า เมื่ออนุภาคสารดูดซับมีขนาดเล็กลงจะทำให้ชั้นฟิล์มที่ล้อมรอบสารดูดซับมีลักษณะบางลง จึงทำให้สารหนูเกิดการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มได้เร็วขึ้น แต่ที่อนุภาคขนาด 106-150 ไมโครเมตร พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านชั้นฟิล์มมีค่าลดลง น่าจะเป็นผลเนื่องมาจากที่ขนาดอนุภาค ดังกล่าว เกิดการคายซับอย่างรวดเร็วและทั้งนี้อาจเนื่องมาจากขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มน่าจะไม่ใช่ขั้นตอนควบคุมอัตราการดูดซับ แต่น่าจะเป็นขั้นตอนอื่น หรือขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มส่งผลต่ออัตราการดูดซับน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับขั้นตอนอื่น จึงทำให้ผลที่ได้ไม่สอดคล้องกับแนวโน้มของผลการทดลองอื่น นอกจากนี้ยังพบว่า ขนาดอนุภาคของสารดูดซับที่มีขนาดเล็กลงจะใช้ระยะเวลาเข้าสู่สมดุลเร็วกว่าอนุภาคของสารดูดซับที่มีขนาดใหญ่ ทั้งนี้ น่าจะเป็นผลเนื่องมาจากอนุภาคของสารดูดซับที่มีขนาดเล็กจะได้รับแรงเหวี่ยงทำให้เคลื่อนที่ตามอัตราเร็วได้ไวกว่าอนุภาคสารดูดซับที่มีขนาดใหญ่ ณ อัตราการปั่นกววนเดียวกัน จึงทำให้เกิดแรงเฉือนที่บริเวณชั้นฟิล์มของอนุภาคสารดูดซับขนาดเล็กได้มากกว่าอนุภาคสารดูดซับขนาดใหญ่ [28] ดังนั้น ชั้นฟิล์มของอนุภาคสารดูดซับขนาดเล็กมีลักษณะบางกว่าชั้นฟิล์มของอนุภาคสารดูดซับที่มีขนาดใหญ่ และ ที่น้ำหนักของสารดูดซับเท่ากัน อนุภาคสารดูดซับที่มีขนาดเล็กจะมีพื้นที่ผิวสำหรับการถ่ายโอนมวลมากกว่าสารที่มีอนุภาคขนาดใหญ่ จากเหตุผลดังกล่าวจึงทำให้สารหนูแพร่จากชั้นฟิล์มไปยังผิวของสารดูดซับได้เร็วขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ทำการคำนวณดังที่กล่าวในข้างต้น นอกจากนี้ระยะทางการแพร่ภายในอนุภาคของสารดูดซับที่มีขนาดเล็กจะมีระยะทางในการแพร่น้อยกว่าอนุภาคสารดูดซับที่มีขนาดใหญ่จึงส่งผลให้

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อนุภาคของสารดูดซับที่มีขนาดเล็กทำการแพร่ได้เร็วกว่าอนุภาคสารดูดซับที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับงานของ Benissa และ Sabatini ที่พบว่า เมื่อขั้นตอนการแพร่ภายในรูพรุนเป็นขั้นควบคุมอัตราการดูดซับระยะเวลาในการเข้าสู่สมดุลของอนุภาคสารดูดซับที่มีขนาดเล็กจะใช้ระยะเวลาน้อยกว่าอนุภาคของสารดูดซับขนาดใหญ่ [45, 48] ซึ่งจากการศึกษากลไกการดูดซับด้วยแบบจำลองของ Weber and Moris ได้ผลการทดลองดังรูปที่ 4-12 ซึ่งพบว่า กราฟที่ได้จากการพล็อตความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณสารหนูที่ถูกดูดซับ ( $q$ ) กับเวลา<sup>0.5</sup> มีลักษณะความสัมพันธ์เป็นแบบ multi-linear curves รูปแบบดังกล่าว อธิบายกลไกการดูดซับได้ว่า ในช่วงระยะเริ่มแรกของกระบวนการดูดซับ ขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มจะเป็นขั้นควบคุมอัตราการดูดซับ และต่อมาขั้นตอนการแพร่ภายในรูพรุนจะเป็นขั้นควบคุมอัตราการดูดซับ และสุดท้ายจะเป็นช่วงที่กระบวนการดูดซับเข้าสู่ภาวะสมดุล ซึ่งจากรูปสามารถหาค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับของแบบจำลอง Weber and Moris ( $k_{11}$  และ  $k_{12}$ ) และสามารถคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ภายในอนุภาค (Intraparticle diffusion,  $D$ ) จากแบบจำลองของ Urano and Tachikawa ได้ดังตารางที่ 4-4 จากตารางดังกล่าว พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ภายในอนุภาคมีค่าอยู่ในช่วง  $1.38 \times 10^{-6}$  ถึง  $5.31 \times 10^{-7}$   $\text{cm}^2/\text{min}$  ดังนั้นจากผลการทดลองนี้จึงกล่าวได้ว่ากระบวนการดูดซับสารหนูด้วยสารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรมนั้นถูกควบคุมโดยขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม และการแพร่ภายในรูพรุน



รูปที่ 4-12 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับสารหนูของสารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรม ( $q$ ) กับเวลา<sup>0.5</sup>

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการศึกษากลไกการดูดซับสารหนูและขั้นตอนควบคุมอัตราดูดซับสารหนูในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยสารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรมในขั้นตอนการแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม และขั้นตอนการแพร่ภายในรูพรุน นอกจากนี้จะทำการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม และค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ภายในรูพรุน โดยทำการทดลองการดูดซับแบบกะ ซึ่งจากผลการทดลองสามารถสรุปได้ ดังนี้

1. จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงสัณฐานของสารดูดซับที่สังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรมด้วยเทคนิค SEM พบว่า เมื่อทำการเผาเปลือกหอยนางรมที่อุณหภูมิ 700 °C เป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมง โครงสร้างของเปลือกหอยนางรมจะเปลี่ยนจากลักษณะที่ไม่มีรูพรุนกลายเป็นโครงสร้างที่มีรูพรุนเป็นจำนวนมาก ซึ่งน่าจะเกิดจากการระเหยของแก๊ส CO<sub>2</sub> ในโมเลกุลของสาร CaCO<sub>3</sub> ของเปลือกหอยนางรมแล้วเปลี่ยนเป็นสาร CaO ในสารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรม เมื่อสารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรมทำการดูดซับสารหนูแล้ว พบว่าลักษณะความเป็นรูพรุนของสารดูดซับจะหายไป แต่จะมีลักษณะคล้ายผลิตภัณฑ์ขาวเกาะบนผิวของสารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรม นอกจากนี้ยังพบว่า สารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรมมีขนาดเล็กกล ซึ่งจากผลการทดสอบ XRD พบว่า สารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรมหลังดูดซับสารหนูจะเปลี่ยนจากสาร CaO เป็นสาร Ca-As-O

2. การวิเคราะห์ pH<sub>zpc</sub> ของสารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรมด้วยวิธี Potentiometric mass titration พบว่า ค่า pH<sub>zpc</sub> ของสารสังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรมซึ่งเมื่ออยู่ในน้ำจะอยู่ในรูปของ Ca(OH)<sub>2</sub> มีค่าเท่ากับ 12.1

3. จากการศึกษาผลกระทบของอัตราการปั่นกวนที่มีผลต่อการดูดซับสารหนู ที่อัตราการปั่นกวน 250 - 750 rpm พบว่า เมื่ออัตราการปั่นกวนเพิ่มมากขึ้น แนวโน้มปริมาณการดูดซับมีค่าเพิ่มขึ้น น่าจะมาจากการที่อัตราการปั่นกวนเพิ่มมากขึ้นทำให้ชั้นฟิล์มที่ปกคลุมสารดูดซับบางลง จึงทำให้ปริมาณสารหนูในสารละลายสามารถแพร่ผ่านชั้นฟิล์มเข้าไปยังผิวของสารดูดซับได้มากขึ้น แต่ที่อัตราการปั่นกวน 850 rpm พบว่า อัตราการปั่นกวนที่เพิ่มขึ้น แต่แนวโน้มปริมาณการดูดซับมีค่าลดลง

4. จากการศึกษาผลกระทบของอัตราการปั่นกวนที่มีผลต่อการดูดซับสารหนู พบว่า ข้อมูลผลการทดลองสอดคล้องกับสมการของแบบจำลอง Pseudo-second order มากกว่า สมการของแบบจำลอง Pseudo-first order นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าคงที่อัตราการดูดซับในช่วงอัตราการปั่นกวน 250-550 rpm มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่ออัตราการปั่นกวนเพิ่มมากขึ้น แต่เมื่ออัตราการปั่นกวนเกิน 550 rpm พบว่าค่าคงที่อัตราการดูดซับมีแนวโน้มคงที่ จากผลการทดลองดังกล่าว พบว่า ในช่วงแรกที่ค่าอัตราการดูดซับเพิ่มมากขึ้นน่าจะเป็นผลมาจากการที่อัตราการปั่นกวนเพิ่มขึ้นทำให้ชั้นฟิล์มที่อยู่รอบสารดูดซับบางลง จึงทำให้สารหนูสามารถแพร่เข้าสู่สารดูดซับได้เร็วขึ้น แต่

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เมื่ออัตราเร็วในการปั่นกววนเกิน 550 rpm พบว่าค่าคงที่อัตราการดูดซับมีแนวโน้มคงที่ น่าจะเป็นผลมาจากการที่ชั้นฟิล์มที่อยู่รอบสารดูดซับบางมากจึงทำให้อัตราการแพร่ผ่านชั้นฟิล์ม ไม่มีผลต่ออัตราการดูดซับ หรือมีผลต่ออัตราการดูดซับน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับขั้นตอนอื่น จึงเป็นเหตุให้อัตราการดูดซับน่าจะถูกควบคุมด้วยขั้นตอนอื่น

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

ควรทำการศึกษาไอออนชนิดอื่นๆที่มีในน้ำว่ามีผลกระทบต่อ การดูดซับสารหนู



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 6

### สรุปผลผลิตงานวิจัย

Key Engineering Materials  
ISSN: 1662-9795, Vol. 728, pp 327-334  
doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.728.327  
© 2017 Trans Tech Publications, Switzerland

Submitted: 2016-03-17  
Revised: 2016-06-09  
Accepted: 2016-09-03  
Online: 2017-01-25

#### Arsenic Adsorption Using the Adsorbent Synthesised from Oyster Shell

Pichnipa Khownpurk<sup>1, a</sup>, Wichitra Wongpromrat<sup>1, b</sup>,  
Walairat Chandra-Ambhom<sup>1, c\*</sup>

Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering,  
King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang  
1 Soi Chalalongkrung 1, Ladkrabang, Bangkok 10520, Thailand

<sup>a</sup>pichnipa.k@gmail.com, <sup>b</sup>w.wichitra@gmail.com, <sup>c</sup>walairat.ch@kmitl.ac.th\*

**Keywords:** Adsorption, Arsenite, Oyster shell, Adsorption kinetics

**Abstract.** Ground oyster shells were calcined and used as an adsorbent to remove As (III) from contaminated water. Adsorption experiment was performed by batch tests. The effect of pH on the adsorption performance was investigated. The result showed that at the initial concentration of 100 mg/L, over the pH range of 5-11, the highest efficiency was obtained at pH 11. The experimental data better correlated with pseudo-second order model. The maximum adsorption capacity ( $q_m$ ) of approximately 195.5 mg/g was obtained at pH 11.

#### Introduction

Arsenic contamination in water is an environmental problem that harms human health. Arsenic pollution has been reported in many countries such as Argentina, Chile, Bangladesh, India, China, Vietnam and Thailand [1-8]. In Thailand, it has been reported that there were many areas in 25 provinces affected by arsenic contamination in groundwater particularly in Amphur Ronpiboon, Nakorn Si Thammarat [9].

The toxicity of arsenic has been reported in terms of skin, liver, bladder and kidney cancers, nerve tissue injuries [10-12] and Blackfoot disease [13]. Depending on the prevalent redox conditions, arsenic may exist in water both in -3 and +5 oxidation states. The toxicity of arsenite (As (III)) is more than that of arsenate (As (V)) [14].

Several methods such as oxidation or/and reduction, precipitation, solid/liquid separation, reverse osmosis, biological removal process and adsorption [12] have been developed to remove arsenic from contaminated water. Among these techniques, the adsorption is an effective technique for removing contaminant from contaminated water due to the simplicity of the process. Furthermore, the adsorbent can be synthesised from inexpensive raw materials. There were many types of materials applied as the adsorbent such as char-carbon [15], copper (II) (oxide nanoparticles [16], amorphous iron hydroxide [17], activated carbon [15], goethite [17, 18], etc.

The expansion of shore ostreaculture in the eastern and southern of Thailand caused a lot of waste oyster shells. It was also reported in 2005 that the total productivity of pacific cupped oysters was about 4.5 million tons around the world and only the shells weighed approximately 4 million tons [19]. The main chemical composition of oyster shells is calcium carbonate [20] which can be used to synthesise the adsorbent for heavy metals adsorption [19, 21].

The purpose of this research is to study the feasibility to use the adsorbent synthesised from oyster shells to remove As (III) contaminated water. The effects of pH on the adsorption performance was investigated and the adsorption kinetics were studied.

#### Materials and Methods

##### Preparation of Adsorbent

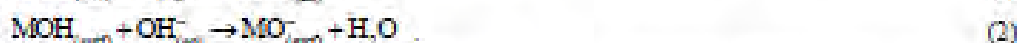
To prepare the adsorbent, oyster shells were firstly washed with water and dried in air. Then, the oyster shells were ground and sieved to obtain particles sized between 150-250  $\mu\text{m}$ . After that, it was calcined at 700  $^{\circ}\text{C}$  in air for 8 hours and characterised by SEM (EVO<sup>®</sup> HD, Carl Zeiss), XRD (XRD-6100, Shimadzu), XRF (PW2400, Philips) and BET (BELSORP MAX) techniques.

All rights reserved. No part of contents of this paper may be reproduced or transmitted in any form or by any means without the written permission of Trans Tech Publications, www.ttp.net. (IP: 172.250.44.16-19) | 12/15/00 32:14

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์โดยกองส่งเสริมเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นำออกจำหน่ายไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### Zero Point of Charge Analysis

Surface charges of oxide and hydroxide are the result of surface ionisation either protonation or deprotonation of amphoteric surface sites [22, 23]. The surface reactions can be written as follows:



where MOH and M stand for amphoteric surface sites and a metal, respectively. In this research, the zero point of charge ( $\text{pH}_{\text{zpc}}$ ) was determined by the potentiometric mass titration method. It was conducted by adjusting pH of 100 ml of 0.01 M NaCl solutions with 0.01 M of NaOH and/or HCl to the values between 2-13. The  $\text{pH}_{\text{zpc}}$  was determined by adding 0.2 g of the adsorbent synthesised from oyster shells into the NaCl solutions with different pH. After stirring these solutions for 48 h, the final pHs were measured. The  $\text{pH}_{\text{zpc}}$  is the point where  $\text{pH}_{\text{initial}} - \text{pH}_{\text{final}} = 0$  [24-26].

### Adsorption Experiment

The adsorption experiments were performed by batch tests. Firstly,  $\text{As}_2\text{O}_3$  was dissolved in 20 ml of 50 mg/L of NaOH and diluted with distilled water in order to obtain 1,000 mg/L of As (III) solution. After that, this As (III) solution was further diluted into As (III) solutions with the concentration of 100 mg/L. The initial pH of the solutions was adjusted to be 5-11 by using 0.1 M of HCl and/or NaOH solutions. Then, 0.3 g of the adsorbent was added into 1,000 ml of As (III) solution and stirred at the agitation speed of 250 rpm. Samples were taken at appropriate time intervals and As (III) concentration of the samples was determined by the titration with  $\text{KMnO}_4$ . The adsorption capacity,  $q_t$  (mg/g) was calculated by the following equation:

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t)V}{W} \quad (3)$$

where  $C_0$  and  $C_t$  are liquid phase concentrations of As (III) at initially and equilibrium (mg/L), respectively.  $V$  is the volume of solution (L) and  $W$  is mass of adsorbent used (g).

### Kinetics Study

In this work, pseudo-first order and pseudo-second order models were applied to describe the As (III) adsorption on the adsorbent synthesised from oyster shells.

Pseudo-first order model was presented by Lagergren in 1898 [27-30]. The linear form of pseudo-first order rate model is given by the following equation:

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_{\text{ad}} t \quad (4)$$

where  $q_t$  is the amount of As (III) adsorbed at time  $t$  (mg/g) and  $k_{\text{ad}}$  is the adsorption rate constant (L/min). The values of  $q_e$  and  $k_{\text{ad}}$  can be calculated from the slope and intercept of the linear plot between  $\ln(q_e - q_t)$  and  $t$ .

Pseudo-second order model was presented by Ho [31, 32]. The linear form of this model can be expressed as the following equation.

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_{\text{ad}} q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (5)$$

The straight line plots of  $t/q_t$  against  $t$  has been tested to obtain the values of  $q_e$  and  $k_{\text{ad}}$ . These parameters can be calculated from the slope and intercept of the plot, respectively.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## Results and Discussion

### Adsorbent Characterisation

The prepared adsorbent was characterised by XRF and BET techniques. The results indicated that the synthesised adsorbent consisted mainly of 97% of CaO with the specific surface area of  $15.8 \text{ m}^2/\text{g}$ , specific volume of  $3.63 \text{ cm}^3(\text{STP})/\text{g}$ , total pore volume of  $0.018 \text{ cm}^3/\text{g}$  and mean pore diameter of  $4.67 \text{ nm}$ . The XRD results in Figure 1 also show that the ground oyster shell had a crystal structure of  $\text{CaCO}_3$ , while the calcined ground oyster shell consisted of a crystalline CaO.

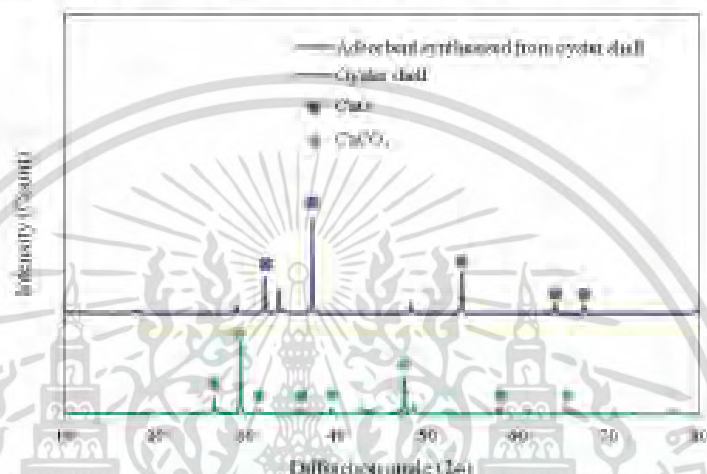


Fig. 1 XRD patterns of oyster shell and adsorbent synthesised from oyster shells.

### Adsorbent Morphology

The morphologies of ground oyster shell, ground oyster shell after calcinations at  $700^\circ\text{C}$  for 8 hours and calcined ground oyster shell after used to adsorb As (III) in the synthetic contaminated water are shown in Fig. 2.



Fig. 2 SEM images of (a) ground oyster shell, (b) calcined ground oyster shell and (c) calcined ground oyster shell after As (III) adsorption experiment.

It can be seen that when the ground oyster shell was calcined, it became porous as the  $\text{CO}_2$  was released from the structure. After the As (III) adsorption test, the surface of the adsorbent was covered by As (III).

### Zero Point of Charge

The adsorbent synthesised from oyster shells mainly composed of CaO. When CaO contacted with water, it changed into  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Therefore, the measured  $\text{pH}_{\text{zpc}}$  was the  $\text{pH}_{\text{zpc}}$  of the adsorbent in contact with water which should be in the form of  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . In this work, the  $\text{pH}_{\text{zpc}}$  of the adsorbent in contacting with water ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) determined by the potentiometric mass titration

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

method was approximately 12.1. This value is in good agreement with Ref. [23] of Atesok et al work [33] which reported the  $pH_{zpc}$  of  $Ca(OH)_2$  at above 12. This means that if pH of the solution is lower than  $pH_{zpc}$  (12.1), the net surface charge of the adsorbent will be positive charge and therefore can better attract anions (negative charge). On the other hand, if pH of the solution is higher than  $pH_{zpc}$  (12.1), net surface charge of the adsorbent will be negative charge. The negatively charged surface can better attract cations (positive charge).

#### Effect of pH on As (III) Adsorption Performance

Figure 3 shows the change of As (III) adsorption capacity of adsorbent synthesised from oyster shells ( $q_t$ ) as a function of time.

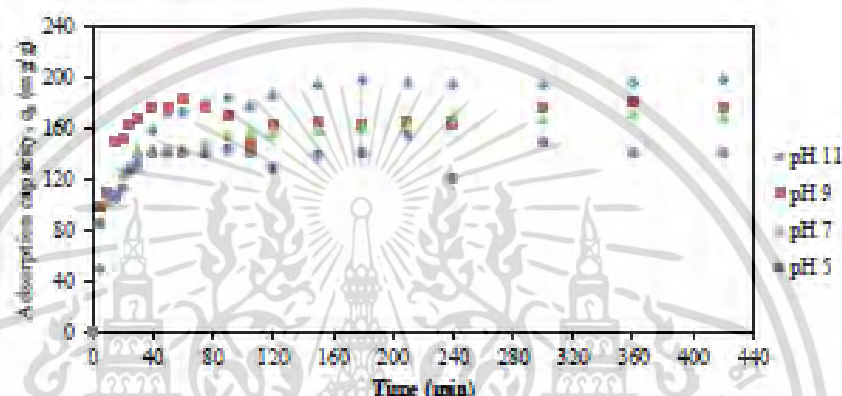


Fig. 3 Adsorption capacity of As (III) on the adsorbent synthesised from oyster shells ( $q_t$ ) with time at pH 5-11 for As (III) initial concentration of 100 mg/L.

It can be seen that there is a rapid increase in adsorption capacity within the first 30 min. The rapid increase in adsorption capacity was because it still had a lot of active sites on the adsorbent available for As (III) ions. In addition, the concentration of As (III) ions on the outer surface of the adsorbent was much lower than that in the solution then, the driving force was still high. After 30 min, the adsorption capacity slowly increased with time because of the decrease in available active sites and therefore, decreasing the driving force of As (III) diffusion. The adsorption process reached equilibrium in approximately 300 min. Over the pH range of 7 – 11, the removal efficiency of As (III) was more than 50%. The maximum efficiency of As (III) removal was observed at pH 11 with 57.85% efficiency. The removal efficiency at pH 7 and pH 9 were about equal and at pH 5 was the lowest. The speciation of As (III) ions in aqueous medium are governed by pH solutions and the dissociated constant of arsenic acid ( $H_3AsO_4^0$  or  $As(OH)_3$ ) [8, 10, 26] as shown in the Reactions (6) - (8).



However, at equilibrium,  $pK_a$  is equal to pH. Reactions (6) - (8) indicate that the dominant species of As (III) ions at the initial pH range of 0-9.2 is the neutral form,  $H_3AsO_4^0$ . The one negative charge species,  $H_2AsO_4^-$ , plays a significant role only at pH 9.2-12.1. When the initial pH is higher than 12.1, the dominant species of As (III) ions are two and three negative charge species ( $HAsO_4^{2-}$  and  $AsO_4^{3-}$ ), respectively [8, 10, 26, 34]. As mentioned before, pH of solution affected the temporary surface charge of the adsorbent. The  $pH_{zpc}$  of the adsorbent synthesised from oyster shells was approximately 12.1. In this work, the initial pH of solutions (pH 5-11) was lower than the  $pH_{zpc}$ . Thus, net surface charge of the adsorbent was positive charge and it could better attract

anions (negative charge). For this reason, the highest efficiency of As (III) removal was obtained at pH 11 because the adsorbent performed positive surface which could better attract with negative charge of the adsorbate ( $H_2AsO_4^-$ ) appearing over the pH range of 9.3-12.1. Furthermore, when CaO contacts with water, it changes into  $Ca(OH)_2$  which is an alkaline substance that can dissociate into  $Ca^{2+}$  and  $OH^-$  while HCl used to adjust pH of the solution in this work can dissociate into  $H^+$  and  $Cl^-$ . For acidic pH, the solution contained excess  $H^+$ . Therefore,  $OH^-$  from the dissociation of  $Ca(OH)_2$  reacted with  $H^+$  in the solution to form water while  $Ca^{2+}$  reacted with  $Cl^-$  to form  $CaCl_2$ . The loss of  $Ca(OH)_2$  at the acidic initial pH 5 caused the efficiency of As (III) removal to be the lowest.

#### Kinetics Study

Pseudo-first order and pseudo-second order models were applied to analyse adsorption data. The accuracy of these models were based on the values of the correlation coefficient ( $R^2$ ) and agreement between  $q_{e,exp}$  values obtained from the experiment and  $q_{e,cal}$  values calculated from the pseudo-first order and pseudo-second order models. The results are shown in Table 1.

Table 1 Kinetics parameters of As (III) adsorption at different pH.

pH	$q_{e,exp}$ (mg/g)	Pseudo-first order model			Pseudo-second order model		
		$q_{e,cal}$ (mg/g)	$k_{a,1}$ (L/min)	$R^2$	$q_{e,cal}$ (mg/g)	$k_{a,2}$ (g/mg·min)	$R^2$
5	140.0	100.3	0.079	0.91	133.3	0.0038	0.98
7	169.5	64.0	0.013	0.85	166.7	0.0010	1.00
9	170.6	181.9	0.135	0.96	178.6	0.0013	0.97
11	195.5	120.9	0.023	0.89	200.0	0.0005	0.99

As seen in Table 1, the comparison between  $q_{e,exp}$  and  $q_{e,cal}$  shows that the  $q_{e,exp}$  values are closer to the  $q_{e,cal}$  values of pseudo-second order model than the  $q_{e,cal}$  values of pseudo-first order model. Furthermore, the  $R^2$  values of pseudo-second order are higher than the  $R^2$  values of pseudo-first order. This means that pseudo-second order model better described the As (III) adsorption behaviour of the adsorbent. As (III) adsorption on the adsorbent synthesised from oyster shells might involve chemical adsorption and the rate of As (III) adsorption on the adsorbent synthesised from oyster shells was proportional to the square of the number of available active sites [32, 35]. For the pseudo-second order model, the observed adsorption rate constants were varied between 0.0005-0.0038 g/mg·min and maximum adsorption capacity of 195.5 mg/g was obtained at pH 11.

#### Adsorption Capacities of Different Adsorbents

Table 2 shows the adsorption capacity of the adsorbent synthesised from oyster shells in comparison with those of other adsorbents reported in literature. As seen in the table, the surface area and adsorption capacity of the adsorbent synthesised from oyster shells are 15.8 m<sup>2</sup>/g and 195.5 mg/g, respectively.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Table 2 Comparison of As (III) adsorption potential of adsorbent synthesised from oyster shells with other adsorbents.

Adsorbent	As (III) initial concentration (mg/L)	Surface area (m <sup>2</sup> /g)	Adsorption capacity (mg/g)	Reference
Adsorbent synthesised from oyster shells	100	15.8	195.5	-
Coconut husk carbon	50-600	206.0	146.3	[35]
Char carbon	193-992	36.5	89.0	[15]
Activated carbon	193-992	43.4	29.0	[15]
Oxisol	10-1000	35.7	2.6	[18]
Gibbsite	10-1000	13.5	3.3	[18]
Goethite	10-1000	12.7	7.5	[18]
FePO <sub>4</sub> (Amorphous)	0.5-100	21.0	53.6	[36]
FePO <sub>4</sub> (Crystalline)	0.5-100	16.0	35.9	[36]

The comparison between the surface area of the adsorbent synthesised from oyster shells and surface area of other adsorbents shows that the surface area of the adsorbent synthesised from oyster shells is comparable with the surface areas of gibbsite, goethite and FePO<sub>4</sub> (crystalline) while FePO<sub>4</sub> (amorphous), oxisol, char carbon, activated carbon, and coconut husk carbon provided larger surface area. However, among these materials, the adsorbent synthesised from oyster shells in this work provided the highest adsorption capacity. Therefore, the adsorbent synthesised from oyster shells is a promising adsorbent used to remove As (III) as it provides very high adsorption capacity even at neutral pH with very low cost of raw material.

### Conclusions

The adsorbent synthesised from oyster shells is an effective material for removing As (III) from contaminated water. The experimental results showed that p*H*<sub>max</sub> of the adsorbent contacting with water was approximately 12.1. At 100 mg/L initial concentration, the highest efficiency of 57.85% was obtained at pH 11. For the kinetics study, the experiment data correlated with pseudo-second order model. The maximum adsorption capacity of about 195.5 mg/g was obtained at pH 11.

### Acknowledgement

The authors would like to acknowledge Faculty of Engineering and KMITL the financial support.

### References

- [1] H.B. Nicolli, J.M. Suriano, P. Gomez, Groundwater contamination with arsenic and other trace elements in an area of the pampa, province of Cordoba, Argentina, *Environ Geol Water S.* 14 (1989) 3-16.
- [2] P.L. Smedley, D.G. Kinniburgh, Chapter 1. Source and behaviour of arsenic in natural waters, in: *United Nations Synthesis Report on Arsenic in Drinking Water*, World Health Organization, 2001, pp. 1-60.
- [3] R.K. Dhar, B.K. Biswas, G. Samanta, B.K. Mandal, D. Chakraborti, S. Roy, A. Jafar, A. Islam, G. Ara, S. Kabir, A.W. Khan, S.A. Ahmed, S.A. Hadi, Groundwater arsenic calamity in Bangladesh, *Curr Sci.* 73 (1997) 48-59.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [4] B.K. Mandal, T.R. Chowdhury, G. Samanta, G.K. Basu, P.P. Chowdhury, C.R. Chanda, Arsenic in groundwater in seven districts of West Bengal, India—the biggest arsenic calamity in the world, *Curr Sci.* 70 (1996) 976-986.
- [5] J. Yunlong, Progress on arsenic in China, in: M. Kabuto (Ed.), Proceedings of the First International workshop on arsenic pollution of Drinking Water in South Asia and China, national Institute of Environmental Studies, R-166-201, Tokyo, Japan, 2001, pp. 35-39.
- [6] M. Berg, H.C. Tran, T.C. Nguyen, H.V. Pham, R. Schertenleib, W. Giger, Arsenic contamination of groundwater and drinking water in Vietnam: a human health threat, *Environ Sci Technol.* 35 (2001) 2621-2622.
- [7] M. Williams, F. Fordyce, A. Pajjaprapapon, P. Charoenchaisri, Arsenic contamination in surface drainage and groundwater in part of the southeast Asian tin belt, Nakhon Si Thammarat Province, southern Thailand, *Environ. Geol. Water Sci.* 27 (1995) 16-33.
- [8] V.K. Sharma, M. Sohn, Aquatic arsenic: Toxicity, speciation, transformations, and remediation, *Environ. Int.* 35 (2009) 743-759.
- [9] J. Wongsanoon, J. Laowlam, L. Wongsanoon, Y. Sounboon, Risk factors related to the consumption of arsenic from contaminated soil without the intent of the people in Dan Chang District Suphanburi Province, *BU Academic Review*, 10(2)(2011)81-95.
- [10] D. Mohan, C.U. Pittman Jr, Arsenic removal from water/wastewater using adsorbents: A critical review, *J. Hazard. Mater.* 142 (2007) 1-53.
- [11] G.N. Mazumder, Chronic arsenic toxicity: clinical features, epidemiology, and treatment: experience in West Bengal, *J. Environ. Sci. Health, Part A—Toxic/Haz. Sub. Environ. Eng.* 38 (2003) 141-163.
- [12] T.S.Y. Choong, T.G. Chuah, Y. Robiah, F.L. Gregory Koay, I. Azni, Arsenic toxicity, health hazards and removal techniques from water: an overview, *Desalination*, 217 (2007) 139-166.
- [13] C.J. Chen, M.M. Wu, S.S. Lee, J.D. Wang, S.H. Chang, H.Y. Wu, Atherogenicity and carcinogenicity of high-arsenic artesian well water, *Arteriosclerosis*, 8 (1988) 452-460.
- [14] A. Maiti, S. DasGupta, J.K. Basu, S. De, Adsorption of arsenite using natural laterite as adsorbent, *Sep. Purif. Technol.* 55 (2007) 350-359.
- [15] I. Pattanayak, K. Mondal, S. Mathew, S.B. Lalvani, A parametric evaluation of the removal of As(V) and As(III) by carbon-based adsorbents, *Carbon*, 38 (2000) 589-596.
- [16] A. Goswami, P.K. Raul, M.K. Purkait, Arsenic adsorption using copper (II) oxide nanoparticles, *Chem. Eng. Res. Des.* 90 (2012) 1387-1396.
- [17] V. Lenoble, O. Bouras, V. Deluchat, B. Serpaud, J.-C. Bollinger, Arsenic Adsorption onto Pillared Clays and Iron Oxides, *J. Colloid Interface Sci.* 255 (2002) 52-58.
- [18] A.C.Q. Ladeira, V.n S.T. Ciminelli, Adsorption and desorption of arsenic on an oxisol and its constituents, *Water Res.* 38 (2004) 2087-2094.
- [19] D. Alidoust, M. Kawahigashi, S. Yoshizawa, H. Sumida, M. Watanabe, Mechanism of cadmium biosorption from aqueous solutions using calcined oyster shells, *J. Environ. Manage.* 150 (2015) 103-110.
- [20] G.L. Yoon, B.T. Kim, B.O. Kim, S.H. Han, Chemical-mechanical characteristics of crushed oyster-shell, *Waste Manage.* 23 (2003) 825-834.
- [21] H.C. Tsai, S.L. Lo, J. Kuo, Using pretreated waste oyster and clam shells and microwave hydrothermal treatment to recover boron from concentrated wastewater, *Bioresour. Technol.* 102 (2011) 7802-7806.
- [22] T. Preocanin, N. Kallay, Application of  $\gg$ Mass Titration  $\ll$  to Determination of Surface Charge of Metal Oxides, *CROATICA CHEMICA ACTA*, 71 (1998) 1117-1125.
- [23] A.M. Cardenas-Pena, J.G. Ibanez, R. Vasquez-Medrano, Determination of the Point of Zero Charge for Electrocoagulation Principles from an Iron Anode, *Int. J. Electrochem. Sci.* 7 (2012) 6142-6153.
- [24] K.Y. Foo, B.H. Hameed, Textural porosity, surface chemistry and adsorptive properties of durian shell derived activated carbon prepared by microwave assisted NaOH activation, *Chem. Eng. J.* 187 (2012) 53-62.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [25] A.F. Hassan, A.M. Abdel-Mohsen, H. Elhadidy, Adsorption of arsenic by activated carbon, calcium alginate and their composite beads, *Int. J. Biol. Macromol.* 68 (2014) 125-130.
- [26] K.C.M. Kwok, L.F. Koong, G. Chen, G. McKay, Mechanism of arsenic removal using chitosan and nanochitosan, *J. Colloid Interface Sci.* 416 (2014) 1-10.
- [27] H. QUI, L. LV, B.c. PAN, Q.j. ZHANG, W.m. ZHANG, Q.x. ZHANG, Critical review in adsorption kinetic models, *J. Zhejiang Univ.-SCI A.* 10 (2009) 716-724.
- [28] Y.S. Ho, G. McKay, The sorption of lead(II) ions on peat, *Water Res.* 33 (1999) 578-584.
- [29] S. Lagergren, About the theory of so-called adsorption of soluble substances, *Kungliga Svenska Vetenskapsakademiens Handlingar.* 24 (1898) 1-39.
- [30] M.A. Malana, R.B. Qureshi, M.N. Ashiq, Adsorption studies of arsenic on nano aluminium doped manganese copper ferrite polymer (MA, VA, AA) composite: Kinetics and mechanism, *Chem. Eng. J.* 172 (2011) 721-727.
- [31] Y.S. Ho, Review of second-order model for adsorption system, *J. Hazard. Mater.* 136 (2006) 681-689.
- [32] Y.S. Ho, G. McKay, Pseudo-second order model for sorption processes, *Process Biochem.* 34 (1999) 451-465.
- [33] G. Atesok, P. Somasundaran, L.J. Morgan, Adsorption properties of  $Ca^{2+}$  on Na-kaolinite and its effect on flocculation using polyacrylamides, *Colloids and Surfaces.* 32 (1988) 127-138.
- [34] Y. Salameh, A.B. Albadarin, S. Allen, G. Walker, M.N.M. Ahmad, Arsenic(III,V) adsorption onto charred dolomite: Charring optimization and batch studies, *Chem. Eng. J.* 259 (2015) 663-671.
- [35] G.N. Manju, C. Raji, T.S. Anirudhan, Evaluation of coconut husk carbon for the removal of arsenic from water, *Water Res.* 32 (1998) 3062-3070.
- [36] V. Lenoble, C. Laclautre, V. Deluchat, B. Serpaud, J.C. Bollinger, Arsenic removal by adsorption on iron(III) phosphate, *J. Hazard. Mater.* 123 (2005) 262-268.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## เอกสารอ้างอิง

- [1] V.K. Sharma, M. Sohn, Aquatic arsenic: Toxicity, speciation, transformations, and remediation, *Environment International* 35 (2009) 743-759.
- [2] D. Alidoust, M. Kawahigashi, S. Yoshizawa, H. Sumida, M. Watanabe, Mechanism of cadmium biosorption from aqueous solutions using calcined oyster shells, *Journal of Environmental Management* 150 (2015) 103-110.
- [3] T.-C. Hsu, Experimental assessment of adsorption of  $\text{Cu}^{2+}$  and  $\text{Ni}^{2+}$  from aqueous solution by oyster shell powder, *Journal of Hazardous Materials* 171 (2009) 995-1000.
- [4] เจนวิทย์ วงษ์सानุน จตุรงค์ เหลาแหลม ลำไย วงษ์सानุน และเยาวเรศ ส่วนบุญ, ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับความเสี่ยงที่จะได้รับสารหนูจากการบริโภคดินที่ปนเปื้อนโดยไม่ได้ตั้งใจของประชาชนในพื้นที่อำเภอด่านช้าง จังหวัดสุพรรณบุรี, 2554.
- [5] ชัชชนันท์ สุชากุลวิรัฐ, ชุตติศรีณ์ วัฒนาศรีสกุล, และนภดาว สบายใจ, การศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับโลหะแคดเมียมในน้ำเสียโดยใช้ตัวดูดซับที่สังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2554, pp. 56.
- [6] นนทชัย เพิ่มพวงสาเจริญ, ปวีณา พลนวน, และ วิทวัส คุณานิช, การศึกษาการดูดซับโลหะหนักโดยใช้ตัวดูดซับที่สังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2553.
- [7] วีรนุช หลาง, ชมวรรณ เดชมา, วันวิสาข์ บูรณบริรักษ์, ศาโรจน์ ศิริคันสนียกุล, แบบจำลองทางจลนพลศาสตร์ของการดูดซับและการคายสารอนินทรีย์ในดินด้วยเส้นใยไรโซวิทที่เจริญและถูกตรึงในเม็ดไคโตซาน, *Environment and Natural Resource Journal* 7 (2009) 82-97.
- [8] SuZuki.M., *Adsorption Engineering*, Elsevier.Inc, Tokyo, 1990.
- [9] นางสาวเกวลี ชันธุ์ชัยภูมิ, นางสาวจุฑารัตน์ ขนไทย, น. เลิศคุณาสรรค์, การศึกษาเปรียบเทียบการดูดซับโครเมียม (III) โดยใช้ไคโตซาน และไคโตซานที่ปรับปรุงโครงสร้างด้วยกลูตาอัลดีไฮด์, คณะวิทยาศาสตร์ สาขาวิชาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2551, pp. 62.
- [10] G.W. CASTELLAN, *PHYSICAL CHEMISTRY*, ADDISON-WESLEY PUBLISHING COMPANY, INC 1964.
- [11] ชุตติมา สันท์ภักดี, พ. พัดภู, การดูดซับทองแดงและแคดเมียมในน้ำชะละลายจากกากตะกอนโดยใช้ไคโตซาน, คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาเคมี, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพมหานคร, 2544.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [12] C. Escudero, N. Fiol, I. Villaescusa, J.-C. Bollinger, Arsenic removal by a waste metal (hydr)oxide entrapped into calcium alginate beads, *Journal of Hazardous Materials* 164 (2009) 533-541.
- [13] G. Atesok, P. Somasundaran, L.J. Morgan, Adsorption properties of  $\text{Ca}^{2+}$  on Na-kaolinite and its effect on flocculation using polyacrylamides, *Colloids and Surfaces* 32 (1988) 127-138.
- [14] J. Lü, H. Liu, R. Liu, X. Zhao, L. Sun, J. Qu, Adsorptive removal of phosphate by a nanostructured Fe-Al-Mn trimetal oxide adsorbent, *Powder Technology* 233 (2013) 146-154.
- [15] D.A. Sverjensky, Zero-point-of-charge prediction from crystal chemistry and solvation theory, *Geochimica et Cosmochimica Acta* 58 (1994) 3123-3129.
- [16] H. QUI, L. LV, B.-c. PAN, Q.-j. ZHANG, W.-m. ZHANG, Q.-x. ZHANG, Critical review in adsorption kinetic models, *Journal of Zhejiang University SCIENCE A* 10 (2009) 716-724.
- [17] Y.S. Ho, G. McKay, The sorption of lead(II) ions on peat, *Water Research* 33 (1999) 578-584.
- [18] Lagergren S, About the theory of so-called adsorption of soluble substances, *Hanlingar* 1891.
- [19] M.A. Malana, R.B. Qureshi, M.N. Ashiq, Adsorption studies of arsenic on nano aluminium doped manganese copper ferrite polymer (MA, VA, AA) composite: Kinetics and mechanism, *Chemical Engineering Journal* 172 (2011) 721-727.
- [20] Y.S.Ho, Review of second-order model for adsorption system, *J.Hazard.Mater.* 136 (2006) 681-689.
- [21] Ö. Neşe, K. T. Ennil, A kinetic study of nitrite adsorption onto sepiolite and powdered activated carbon, *Desalination* 223 (2008) 174-179.
- [22] Y.S.Ho, G.MCKAY, Pseudo-second order model for sorption processes, *Process Biochemistry* 34 (1999) 451-465.
- [23] B.F. Urbano, B.L. Rivas, F. Martinez, S.D. Alexandratos, Equilibrium and kinetic study of arsenic sorption by water-insoluble nanocomposite resin of poly[N-(4-vinylbenzyl)-N-methyl-D-glucamine]-montmorillonite, *Chemical Engineering Journal* 193-194 21-30.
- [24] กัญทิลา ขำวิจิตราภรณ์, มธุรส ไกรเลิศศิลป์, การกำจัดโลหะหนักแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ถ่านกระดุกหมูที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2552.
- [25] G.F. Malash, M.I. El-Khaiary, Piecewise linear regression: A statistical method for the analysis of experimental adsorption data by the intraparticle-diffusion models, *Chemical Engineering Journal* 163 256-263.
- [26] F.-C. Wu, R.-L. Tseng, R.-S. Juang, Initial behavior of intraparticle diffusion model used in the description of adsorption kinetics, *Chemical Engineering Journal* 153 (2009) 1-8.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- [27] V. Ponnusami, K.S. Rajan, S.N. Srivastava, Application of film-pore diffusion model for methylene blue adsorption onto plant leaf powders, *Chemical Engineering Journal* 163 (2010) 236-242.
- [28] K.K.H. Choy, D.C.K. Ko, C.W. Cheung, J.F. Porter, G. McKay, Film and intraparticle mass transfer during the adsorption of metal ions onto bone char, *Journal of Colloid and Interface Science* 271 (2004) 284-295.
- [29] Y. Sag, Y. Aktay, Mass Transfer and equilibrium studies for the sorption of chromium ions onto chitin, *Process Biochemistry* 36 (2000) 157-173.
- [30] G. Sami and, B. Mohamed, Sorption Kinetics for Dye Removal From Aqueous Solution Using Natural Clay, *Journal of Environment and Earth Science* 2 (2012) 30-39.
- [31] A.E. Ofomaja, Intraparticle diffusion process for lead(II) biosorption onto mansonia wood sawdust, *Bioresource Technology* 101 5868-5876.
- [32] G.-L. Yoon, B.-T. Kim, B.-O. Kim, S.-H. Han, Chemical-mechanical characteristics of crushed oyster-shell, *Waste Management* 23 (2003) 825-834.
- [33] T. Preocanin, N. Kallay, Application of Mass Titration to Determination of Surface Charge of Metal Oxides, *CROATICA CHEMICA ACTA* 71 (1998) 1117-1125.
- [34] A.M. Cardenas-Pena, J.G. Ibanez, R. Vasquez-Medrano, Determination of the Point of Zero Charge for Electrocoagulation Precipitates from an Iron Anode, *International Journal of ELECTROCHEMICAL SCIENCE* 7 (2012) 6142-6153.
- [35] T. Preocanin, N. Kallay, Point of Zero Charge and Surface Charge Density of  $\text{TiO}_2$  in Aqueous Electrolyte Solution as Obtained by Potentiometric Mass Titration, *CROATICA CHEMICA ACTA* 79 (2006) 95-106.
- [36] K.Y. Foo, B.H. Hameed, Textural porosity, surface chemistry and adsorptive properties of durian shell derived activated carbon prepared by microwave assisted NaOH activation, *Chemical Engineering Journal* 187 (2012) 53-62.
- [37] A.F. Hassan, A.M. Abdel-Mohsen, H. Elhadidy, Adsorption of arsenic by activated carbon, calcium alginate and their composite beads, *International Journal of Biological Macromolecules* 68 (2014) 125-130.
- [38] K.C.M. Kwok, L.F. Koong, G. Chen, G. McKay, Mechanism of arsenic removal using chitosan and nanochitosan, *Journal of Colloid and Interface Science* 416 (2014) 1-10.
- [39] K.Y. Foo, B.H. Hameed, Microwave-assisted preparation and adsorption performance of activated carbon from biodiesel industry solid residue: Influence of operational parameters, *Bioresource Technology* 103 398-404.
- [40] H.J. Park, S.W. Jeong, J.K. Yang, B.G. Kim, S.M. Lee, Removal of heavy metals using waste eggshell, *Journal of Environmental Sciences* 19 (2007) 1436-1441.

- [41] M. Islam, R.K. Patel, Evaluation of removal efficiency of fluoride from aqueous solution using quick lime, *Journal of Hazardous Materials* 143 (2007) 303-310.
- [42] R. Xing, Y. Qin, X. Guan, S. Liu, H. Yu, P. Li, Comparison of antifungal activities of scallop shell, oyster shell and their pyrolyzed products, *Egyptian Journal of Aquatic Research* 39 (2013) 83-90.
- [43] A. Maiti, S. DasGupta, J.K. Basu, S. De, Adsorption of arsenite using natural laterite as adsorbent, *Separation and Purification Technology* 55 (2007) 350-359.
- [44] Y.S. Ho, J.C.Y. Ng, G. McKay, KINETICS OF POLLUTANT SORPTION BY BIOSORBENTS: REVIEW, SEPARATION AND PURIFICATION METHODS 29 (2000) 189-232.
- [45] H. Benissa, RATE DETERMINING STEPS STUDY IN CADMIUM SORPTION FROM AQUEOUS SOLUTIONS BY ALMOND PEEL, Eleventh International Water Technology Conference (IWTC11) Sharm El-Sheikh, Egypt, 2007, pp. 197-208.
- [46] X.-Y. Yang, B. Al-Duri, Application of branched pore diffusion model in the adsorption of reactive dyes on activated carbon, *Chemical Engineering Journal* 83 (2001) 15-23.
- [47] CALCIUM ARSENITE, New Jersey Department of Health and Senior Services HAZARDOUS SUBSTANCE FACT SHEET New Jersey Department of Health and Senior Services, New Jersey, 2002.
- [48] D.A. Sabatini, Sorption and Intraparticle Diffusion of Fluorescent Dye with Consolidated Aquifer Media, *GROUND WATER* 38 (2000) 651-656.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## รายงานการเงิน

หมวดค่าใช้จ่าย	งบประมาณรวม ทั้งโครงการ	ค่าใช้จ่าย (บาท)	คงเหลือ (หรือเกิน)
งบบุคลากร : ค่าจ้างชั่วคราว	-		
งบดำเนินงาน			
ค่าตอบแทน	-	-	-
ค่าใช้สอย	17,000	17,000	-
ค่าวัสดุ	33,000	33,000	-
ค่าสาธารณูปโภค	-	-	-
งบลงทุน: ค่าครุภัณฑ์			
<b>รวม</b>	<b>300,000</b>	<b>300,000</b>	<b>0</b>

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ข้อมูลประวัติคณะผู้วิจัย

### 1. นางวัลย์รัตน์ จันทระอัมพร

ตำแหน่งปัจจุบัน: ผู้ช่วยศาสตราจารย์

หน่วยงานและสถานที่อยู่ที่ติดต่อได้สะดวก :

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

โทรศัพท์ 081 6589499 โทรสาร 02 329 8360 – 3 ต่อ 4 E-mail: walairat.ch@kmitl.ac.th

### ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
วศ.บ.	วิศวกรรมเคมี	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์	2541
วศ.ม.	วิศวกรรมปิโตรเคมี	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	2545
Ph.D.	วิศวกรรมเคมี	The University of Manchester, UK	2550

สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ : สาขาวิศวกรรมศาสตร์และอุตสาหกรรมวิจัย

### ทุนการศึกษาและทุนวิจัยที่เคยได้รับ

ปี พ.ศ.	ทุนการศึกษาและทุนวิจัย	สถาบันที่ให้
2559		สจล.
2556-2558	Cotutelle of doctoral thesis between University of Grenoble (France) and KMITL 2013-2015. ชื่อโครงการวิจัย: High temperature oxidation and volatilisation of chromium from AISI 441 ferritic steel in humidified atmosphere and its protection	สจล.- รัฐบาลฝรั่งเศส
2558	ทุนสนับสนุนโครงการวิจัยโดยใช้เงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ ปีงบประมาณ 2558 ชื่อโครงการวิจัย: การศึกษากลไกการดูดซับสารหนูของสารดูดซับที่สังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรม	สจล.
2557	ทุนสนับสนุนโครงการวิจัยโดยใช้เงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ ปีงบประมาณ 2557 ชื่อโครงการวิจัย: การกำจัดสารหนูปนเปื้อนในน้ำด้วยสารดูดซับที่สังเคราะห์จากเปลือกหอยนางรม	สจล.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2557	ทุนสนับสนุนโครงการวิจัยโดยใช้เงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ ปีงบประมาณ 2557 ชื่อโครงการวิจัย: การกำจัดสารหนูปนเปื้อนในน้ำด้วยสารดูดซับที่สังเคราะห์ จากเปลือกหอยนางรม	สจล.
2556	ทุนสนับสนุนโครงการวิจัยโดยใช้เงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ ปีงบประมาณ 2556 ชื่อโครงการวิจัย: การเคลือบผิวแผ่นกั้นเซลล์ที่ทำจากวัสดุประเภทโลหะที่ใช้ ในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งเพื่อลดการระเหยของสเกลโครเมียม	สจล.
2555	ทุนสนับสนุนโครงการวิจัยโดยใช้เงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ ปีงบประมาณ 2555 ชื่อโครงการวิจัย: การลดการระเหยของโครเมียมบนพื้นผิวของเหล็กกล้าไร้ สนิมที่ใช้เป็นวัสดุทำแผ่นกั้นเซลล์ในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็งด้วยวิธี เคลือบผิว	สจล.
2554-2555	Franco-Thai Cooperation Program in Higher Education and Research Year 2011-2012. ชื่อโครงการวิจัย: Durability of Stainless Steel Bipolar Plates in Solid Oxide Electrolysis Cells for Hydrogen Production	รัฐบาลฝรั่งเศส
2554	ทุนสนับสนุนโครงการวิจัยโดยใช้เงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ ปีงบประมาณ 2554 ชื่อโครงการวิจัย: การศึกษาการเกิดการระเหยของโครเมียมจากพื้นผิวของอัล ลอยที่มีโลหะโครเมียมเป็นส่วนประกอบซึ่งใช้เป็นวัสดุทำแผ่นกั้นเซลล์ใน เซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิดออกไซด์แข็ง	สจล.
2552	ทุนสนับสนุนโครงการวิจัยโดยใช้เงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ ปีงบประมาณ 2552 ชื่อโครงการวิจัย: การผลิตไฮโดรเจนจากปฏิกิริยาดีไฮโดรจิเนชันของเมทิลไซ โคลเฮกเซน	สจล.
2546	ทุนรัฐบาล ก.พ.	รัฐบาลไทย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์

### ผลงานวิจัย/งานสร้างสรรค์ที่ตีพิมพ์เผยแพร่

1. V. Parry, W. Wongpromrat, L. Latu-Romain, C. Pascal, W. Chandra-ambhorn, S. Chandra-ambhorn, Y. Wouters, A. Galerie, “Morpho-Chemical Investigations and Thermodynamic Study of Nb-Rich Passive Nodules Grown on AISI 441 Oxidized in Wet Atmosphere”, Corrosion Science, 141(2018)255-263.
2. P. Khownpurk, W. Chandra-ambhorn, “Preparation and Characterization of Oyster Shell Powder-Treated Rich Husk Ash Adsorbent Pellet for As(III) Removal”, MATEC Web of Conferences 192(2018)01003.
3. P. Khownpurk, W. Wongpromrat, W. Chandra-ambhorn, “Arsenic Adsorption Using the Adsorbent Synthesised from Oyster Shell”, Key Engineering Materials, 728(2017)327-334.
4. W. Wongpromrat, V. Parry, W. Chandra-ambhorn, S. Chandra-ambhorn, A. Galerie, Y. Wouters, “Advanced Microstructural Investigations of AISI 441 Early Stage Oxidation in Wet Atmosphere”, Key Engineering Materials, 720(2017)3-8.
5. W. Wongpromrat, G. Berthomé, V. Parry, S. Chandra-ambhorn, W. Chandra-ambhorn, C. Pascal, A. Galerie, Y. Wouters, “Reduction of Chromium Volatilisation from Stainless Steel Interconnector of Solid Oxide Electrochemical Devices by Controlled Preoxidation”, Corrosion Science, 106(2016)172-178.
6. W. Wongpromrat, V. Parry, F. Charlot, A. Crisci, L. Latu-Romain, W. Chandra-ambhorn, S. Chandra-ambhorn, A. Galerie, Y. Wouters, “Possible Connection between Nodule Development and Presence of Niobium and/or Titanium during Short Time Thermal Oxidation”, Materials at High Temperatures, 32(2015)22-27.
7. W. Wongpromrat, H. Thaikhan, W. Chandra-ambhorn, S. Chandra-ambhorn, “Chromium Vaporisation from AISI 441 Stainless Steel Oxidised in Humidified Oxygen”, Oxidation of Metals, 79(2013)529-540.
8. M.R. Ardigo, V. Parry, I. Popa, S. Chevalier, W. Chandra-ambhorn, P. Phakpeetinan, Y. Wouters, “Optimisation of Metallic Interconnects for Hydrogen Production by High Temperature Water Vapour Electrolysis”, Defect and Diffusion Forum, 323-325(2012)239-244.

### การเสนอผลงานวิชาการ

1. P. Khownpurk, W. Chandra-ambhorn, “Preparation and Characterization of Oyster Shell Powder-Treated Rice Husk Ash Adsorbent Pellet for As(III) Removal” The 4<sup>th</sup> International Conference on Engineering, Applied Sciences and Technology (ICEAST), 4-7 July 2018.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2. P. Khownpurk, W. Chandra-ambhorn, “Arsenite Adsorption on the Adsorbent Synthesized from Oyster Shells”, The 4th TIChE International Conference, 18-19 December 2014.
3. W. Chandra-ambhorn, N. Yaowaman, P. Srijuntanakul, D. Na-Ranong, “Hydrogen Generation via Dehydrogenation of Methylcyclohexane Using Ni/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> as a Catalyst”, The 17th Regional Symposium on Chemical Engineering (RSCE 2010), 22-23 November 2010.
4. วิจิตร วงศ์พร้อมรัตน์, สมฤกษ์ จันทอัมพร, วลัยรัตน์ จันทอัมพร, “การระเหยของโครเมียมจากเหล็กกล้าไร้สนิมซึ่งใช้เป็นแผ่นกั้นเซลล์ในเซลล์เชื้อเพลิงชนิดออกไซด์แข็ง”, การประชุมโลหวิทยาแห่งชาติ ครั้งที่ 5, 19-20 มกราคม 2555.

## 2. นางสาวพิชญ์นิภา ขวัญเฟือก

ตำแหน่งปัจจุบัน: นักศึกษาปริญญาเอก

หน่วยงานและสถานที่อยู่ที่ติดต่อได้สะดวก:

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### ประวัติการศึกษา

ชื่อย่อปริญญา	สาขา	สถาบันที่จบ	ปีที่จบ
วท.บ.	เทคโนโลยีปิโตรเคมี หลักสูตรนานาชาติ	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	2553
วศ.ม.	วิศวกรรมเคมี	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง	2556

สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ: การดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้