



การประยุกต์ใช้และปรับปรุงแร่ดินเหนียวเบนโทไนท์ลพบุรีสำหรับการกำจัดไนเตรด  
ในน้ำบาดาลในพื้นที่เกษตรกรรม

Application and improvement of Lopburi bentonite clay for nitrate removal  
in groundwater of agricultural area

อาจารย์สุชาติ สวัสดิ์

งานวิจัยนี้ได้รับทุนจากสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

ปี 2562

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี ที่สนับสนุนและ  
ให้ทุนวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน พ.ศ. 2562

ขอขอบคุณสาขาวิชาเคมี (ค.บ.) มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรีที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้  
เครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิจัย

สุชาดา สวัสดิ์  
ผู้วิจัย

มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

## บทคัดย่อภาษาไทย

ในการศึกษาได้ทำการทดลองการดูดซับไนเตรตด้วยเบนโทไนต์ลพบุรี โดยทำการทดลองในระบบกะ ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ ความเป็นกรด-ด่าง เวลาที่สัมผัส ความเข้มข้นสารละลาย และ อุณหภูมิ และใช้ไอโซเทอร์มแลงเมียร์และฟรอนตลิชอธิบายข้อมูลการทดลองผลการทดลองพบว่า สมดุลการดูดซับเกิดขึ้นที่เวลา 60 นาที และสามารถอธิบายการดูดซับด้วยไอโซเทอร์มแลงเมียร์ โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 52.91 มิลลิกรัมต่อกรัม และจลนพลศาสตร์การดูดซับ สอดคล้องกับสมการอันดับสอง จากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าเบนโทไนต์ลพบุรีเป็นตัวดูดซับที่มี ประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรตในสารละลายได้ดี

คำสำคัญ: การดูดซับ, ไนเตรต, เบนโทไนต์

มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

## Abstract

In this study, application and improvement of Lopburi bentonite clay for nitrate removal in groundwater of agricultural area was carried out in batch process. The effect of adsorption such as pH, contact time, initial concentration, and temperature were investigated. The experimental data were analysed by Langmuir and Freundlich isotherms. Experiment results showed that the nitrate uptake occurred at equilibrium time of 60 min. The adsorption data was fitted well with Langmuir isotherm. The maximum adsorption capacity of Langmuir isotherm was 52.91 mg/g. The kinetics for the adsorption corresponded to the pseudo-second order model. The results showed that the bentonite clay Lopburi was effective adsorbent for removing of nitrate in aqueous solution.

Key words : adsorption, nitrate, bentonite clay

มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

## สารบัญ

	หน้า
กิตติกรรมประกาศ	ก.
บทคัดย่อภาษาไทย	ข.
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ค.
สารบัญ	ง.
สารบัญตาราง	ช.
สารบัญรูป	ซ.
บทที่ 1	1
1.1 ความสำคัญและที่มา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 กรอบแนวคิดของโครงการวิจัย	3
1.5 นิยามศัพท์	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	4
2.1 วัสดุที่ใช้ดูดซับ	4
2.2 แร่ดินเหนียวเบนโทไนต์	4
2.3 สารประกอบไนโตรเจน	6
2.4 หลักการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนไอออนในการกำจัดไนเตรต	7
2.5 การดูดซับ	9
2.6 จลนพลศาสตร์การดูดซับ	13
2.7 การกำจัดไนเตรตด้วยวัสดุดูดซับชนิดต่าง ๆ	14
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย	16
3.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานไนเตรต	
3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	16
3.2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง	16
3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	16
3.2.3 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง	17
3.3 วิธีดำเนินการวิจัย	17
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผลการทดลอง	20
4.1 การเตรียมตัวดูดซับ	20
4.2 การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวดูดซับ	21

4.3 ผลของค่าความเป็นกรด-ด่างในการดูดซับ	23
4.4 ผลของเวลาที่เข้าสู่สมดุล	23
4.5 ผลของความเข้มข้นสารละลาย	24
4.6 ผลของอุณหภูมิ	25
4.7 ไอโซเทอร์มการดูดซับ	25
4.8 จลนพลศาสตร์การดูดซับ	27
4.9 กลไกการดูดซับในเตตระด้วยเบนโทไนด์ที่ปรับสภาพ	28
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	30
เอกสารอ้างอิง	31
ภาคผนวก	33
ภาคผนวก ก.	34

มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ความแตกต่างของการดูดซับแบบกายภาพและแบบเคมี	9
2.2 ปัจจัยการแยกที่มีผลต่อรูปร่างของไอโซเทอร์มแลงเมียร์	13
4.1 องค์ประกอบทางเคมีก่อนและหลังการดูดซับของเบนโทไนด์	22
4.2 พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของเบนโทไนด์	23
4.3 ผลการคำนวณจากไอโซเทอร์มการดูดซับตามสมการแลงเมียร์และฟรุนดลิช	25
4.4 พารามิเตอร์ของไอโซเทอร์มการดูดซับไนเตรตด้วยเบนโทไนด์ที่ปรับสภาพ	27
4.5 จลนพลศาสตร์การดูดซับไนเตรตด้วยเบนโทไนด์ที่ปรับสภาพ	28
ก.1 ผลของค่าความเป็นกรด-ด่างในการดูดซับไนเตรตด้วยเบนโทไนด์ปรับสภาพ	34
ก.2 ผลของเวลาในการดูดซับไนเตรตด้วยเบนโทไนด์ปรับสภาพ	34
ก.3 ผลของความเข้มข้นสารละลายในการดูดซับไนเตรตด้วยเบนโทไนด์ปรับสภาพ	35
ก.4 ผลของอุณหภูมิในการดูดซับไนเตรตด้วยเบนโทไนด์ปรับสภาพ	35

มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์

## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างเบนโทไนท์	5
2.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับพื้นฐาน 5 ชนิด	11
4.1 เบนโทไนท์ที่ปรับสภาพ	20
4.2 หมู่ฟังก์ชันของเบนโทไนท์ก่อนและหลังดูดซับ	21
4.3 ลักษณะสัณฐานวิทยาด้วย SEM	22
4.4 ผลของค่าความเป็นกรด-ด่าง	23
4.5 ผลของเวลาที่เข้าสู่สมดุล	24
4.6 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย	24
4.7 ผลของอุณหภูมิ	25

มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี



## บทที่ 1 บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มา

จังหวัดลพบุรี เป็นอีกพื้นที่หนึ่งที่ประสบปัญหาการขาดแคลนน้ำช่วงฤดูร้อนทุกๆ ปี ซึ่งรัฐบาลได้มีการณรงค์ให้มีการใช้น้ำบาดาล โดยน้ำบาดาลนอกจากจะเป็นแหล่งน้ำที่ใช้ในการอุปโภคบริโภคที่สำคัญแล้ว ยังเป็นแหล่งน้ำสำรองที่ใช้ในการเกษตรกรรมและอุตสาหกรรม จังหวัดลพบุรีมีจำนวนบ่อบาดาลเพื่อการเกษตรจำนวน 3,799 บ่อ บ่อน้ำบาดาลเพื่อการอุปโภค-บริโภค จำนวน 6,878 บ่อ (บทบาทน้ำบาดาลในภาคเกษตรกรรมในพื้นที่ด้านเหนือของที่ราบภาคกลางตอนล่าง, 2553) หน่วยปฏิบัติการวิจัยระบบการจัดการแหล่งน้ำจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ได้ทำการวิเคราะห์คุณภาพน้ำบาดาลในช่วงหน้าแล้งและหน้าฝน พบว่าในจังหวัดลพบุรีคุณภาพน้ำบาดาลโดยรวมสามารถใช้เพื่อการอุปโภคและบริโภคได้แต่ต้องทำการปรับปรุงคุณภาพน้ำก่อนนำไปใช้ และเนื่องจากจังหวัดลพบุรีประชากรส่วนใหญ่ประกอบอาชีพเกษตรกรรม ในการทำการเกษตรเพื่อให้ได้ผลผลิตที่ดีและมากขึ้น ทำให้เกษตรกรมีการใช้ปุ๋ยเคมีเพื่อให้ได้ผลผลิตส่งออกได้ตามกำหนด ทำให้มีการใช้ปุ๋ยเคมีเกินความต้องการของพืช และเมื่อมีการสะสมและใช้เป็นเวลานานทำให้มีสารตกค้างไหลซึมปนเปื้อนอยู่ในแหล่งน้ำบาดาล ดังเช่น ในตำบลนิคมสร้างตนเอง อำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี ซึ่งผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ปริมาณไนเตรตในน้ำบาดาลบริเวณที่มีการทำเกษตรกรรมเพาะปลูกอ้อยและข้าวโพด พบว่ามีปริมาณสูงประมาณ 80 มิลลิกรัมต่อกรัม (เกินค่ามาตรฐาน) ไนเตรตเป็นมลภาวะที่มีอยู่ทั่วไปในน้ำบาดาล (groundwater) เนื่องจากการใช้ปุ๋ยเคมีมากเกินไป และไนเตรตเป็นสารปนเปื้อนที่เป็นอันตรายถ้าไม่มีการบำบัดอย่างถูกต้องจะเป็นอันตรายต่อการอุปโภคและบริโภคของประชาชน ดังนั้นน้ำบาดาลจึงเป็นแหล่งสำคัญในการใช้สำหรับการอุปโภคและบริโภคของประชาชน (Della Rocca et al., 2007; Wang et al., 2009 ; Hekmatzadeh et al., 2012) และที่สำคัญถ้ามีการปนเปื้อนไนเตรตในน้ำดื่ม ไนเตรตจะถูกรีดิวซ์กลายเป็นไนไตรต์ในระบบการย่อยแล้วดูดซึมเข้ากระแสเลือดและเมื่อไปรวมตัวฮีโมโกลบินทำให้เลือดไม่สามารถนำพาออกซิเจนได้ ทำให้เกิดโรคที่เรียกว่า blue baby syndrome ในทารก ยิ่งไปกว่านั้นการเกิดเป็นสารไนเตรตในกระเพาะอาหารจะนำไปสู่การเป็นมะเร็ง (Winneberger, 1982; Samatya, 2006)

ไนเตรต เป็นสารที่มีความเสถียรสูง และเมื่อเป็นไอออนในสารละลายก็ยากที่จะกำจัดออกด้วยวิธีดั้งเดิม (Hendricks, 2006) การกำจัดไนเตรตมีหลายวิธี เช่น รีเวอร์สออสโมซิส ไดอะไลซิสด้วยไฟฟ้า การแลกเปลี่ยนไอออนการดูดซับ ปฏิกริยารีดักชันด้วยเหล็กที่มีประจุเป็นศูนย์และปฏิกริยารีดักชันด้วยตัวเร่ง เป็นต้น การแลกเปลี่ยนไอออนเป็นวิธีที่ดีในการกำจัดไนเตรต เนื่องจากเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ การออกแบบไม่ยุ่งยากและมีราคาถูก (Hekmatzadeh et al., 2012) ซึ่งงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการใช้เรซินมาใช้ในกระบวนการแลกเปลี่ยนไอออน แต่เรซินมีข้อจำกัดทั้งเรื่องของราคาและถ่าน้ำตัวอย่างที่มีซัลเฟตมากจะทำให้ความสามารถในการกำจัดสารของเรซินลดลง ดังนั้นเพื่อเป็นการพัฒนาและศึกษาประสิทธิภาพของตัวดูดซับให้ดีขึ้นจึงมีการนำวัสดุจากธรรมชาติมาใช้ทดแทน จังหวัดลพบุรีเป็นจังหวัดที่อุดมสมบูรณ์ไปด้วยแร่ธรรมชาติอย่างมากมาย เช่น เพอร์ไลต์ เคโอลิน เฟลสปาร์ มอนต์มอริลโลไนต์และรวมทั้งมีแร่ดินเหนียวเบนโทไนท์ (bentonite clay) ซึ่ง

เป็นแร่ดินเหนียวชนิดนี้มีลักษณะเป็นแร่ดินในกลุ่มสมεκไทต์ (smectite) และมอนต์มอริลโลไนท์ (montmorillonite) เป็นองค์ประกอบหลักจากโครงสร้างของแร่ดินที่เป็นประจุลบทำให้สามารถแลกเปลี่ยนไอออนได้

จากเหตุผลข้างต้นงานวิจัยนี้เล็งเห็นถึงความสำคัญของการใช้ทรัพยากรในท้องถิ่นให้เกิดประโยชน์อย่างสูงสุดและเพื่อสุขภาวะที่ดีของชุมชน จึงสนใจที่จะศึกษาการกำจัดไนเตรตในน้ำบาดาลด้วยแร่ดินเหนียวเบนโทไนท์ เนื่องจากเป็นตัวดูดซับที่หาง่าย ราคาถูก อีกทั้งเป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มและใช้ประโยชน์จากวัสดุธรรมชาติที่มีในท้องถิ่นให้เกิดประโยชน์อย่างสูงสุด และทำการออกแบบสร้างถังกรองสำหรับระบบปฏิบัติการจริงในการกำจัดไนเตรตในน้ำบาดาลให้แก่ชุมชน รวมทั้งต้องการถ่ายทอดวิธีการดังกล่าวสู่ชุมชนเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในการไนเตรตในน้ำบาดาล เพื่อใช้สำหรับการอุปโภคและบริโภค เพื่อสร้างสมดุลของความหลากหลายทางชีวภาพและป้องกันไม่ให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพของประชาชนซึ่งเป็นการส่งเสริมการอนุรักษ์ทรัพยากรธรรมชาติสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน

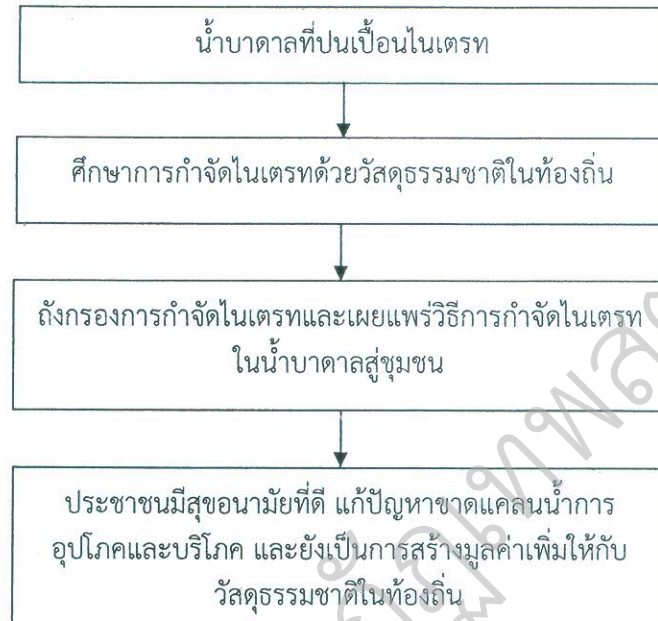
### 1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาประสิทธิภาพและปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับไนเตรตได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง เวลาที่สัมผัส ความเข้มข้นสารละลาย และอุณหภูมิ
2. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับกำจัดไนเตรตด้วยแร่ดินเหนียวเบนโทไนต์ลพบุรี

### 1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ตัวดูดซับที่ใช้ได้แก่ เบนโทไนท์ที่ปรับสภาพด้วยกรด เป็นเบนโทไนท์ที่ได้จากตำบลมหาโพธิ์ อำเภอสระโบสถ์ จังหวัดลพบุรี
2. น้ำตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำสังเคราะห์และน้ำปนเปื้อนไนเตรตจากชุมชนในตำบลนิคมสร้างตนเอง อำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี
3. ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดไนเตรตในน้ำบาดาล โดยศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัด ได้แก่ ความเป็นกรด-ด่าง (2-12) เวลาที่สัมผัส (1-120 นาที) ความเข้มข้นสารละลาย (25-300 มิลลิกรัมต่อลิตร) และอุณหภูมิ (20-40 องศาเซลเซียส) และใช้สมการทางคณิตศาสตร์ได้แก่ ไอโซเทอร์ม จลนพลศาสตร์และอุณหพลศาสตร์การกำจัดไนเตรตเพื่อหาประสิทธิภาพและออกแบบถังบำบัด
4. ศึกษาองค์ประกอบทางกายภาพและเคมีของเบนโทไนท์ที่ปรับสภาพ ได้แก่
  - 4.1 วิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน ด้วยวิธีบีอีที (BET method)
  - 4.2 วิเคราะห์ลักษณะทางสัณฐานวิทยาและเทคนิคการวัดการกระจายพลังงานด้วย Scanning Electron Microscope equipped (SEM)
  - 4.3 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วย Fourier transform infrared spectroscopy (FT-IR)
  - 4.4 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย X-ray fluorescence spectroscopy (XRF)

#### 1.4 กรอบแนวคิดของโครงการวิจัย



#### 1.5 นิยามศัพท์

การดูดซับ คือ การถ่ายโอนองค์ประกอบจากของเหลว (liquid phase) ไปอยู่บนผิวของของแข็ง (solid phase) โมเลกุลที่จับอยู่กับผิวของแข็งเรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ขณะที่ของแข็งที่จับตัวถูกดูดซับ เรียกว่า ตัวดูดซับ (adsorbent)

ไอโซเทอร์ม คือ ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับ ( $q_e$ ) ต่อ 1 หน่วยมวลของตัวดูดซับกับความเข้มข้นสมดุล ( $C_e$ ) และที่อุณหภูมิคงที่

จลนพลศาสตร์การดูดซับ คือ การศึกษากลไกการดูดซับจากการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารตั้งต้นต่อหนึ่งหน่วยเวลาหรือเรียกว่า อัตราเร็วของการดูดซับ (rate of reaction) ณ เวลาต่าง ๆ ก่อนการดูดซับเข้าสู่สภาวะสมดุล

## บทที่ 2 เอกสารที่เกี่ยวข้อง

### 2.1 วัสดุที่ใช้ดูดซับ

สารที่มีความสามารถในการดูดซับมีหลายชนิด อาจแบ่งได้เป็น 5 ประเภท (นิพนธ์ และคณิตา, 2550) ได้แก่

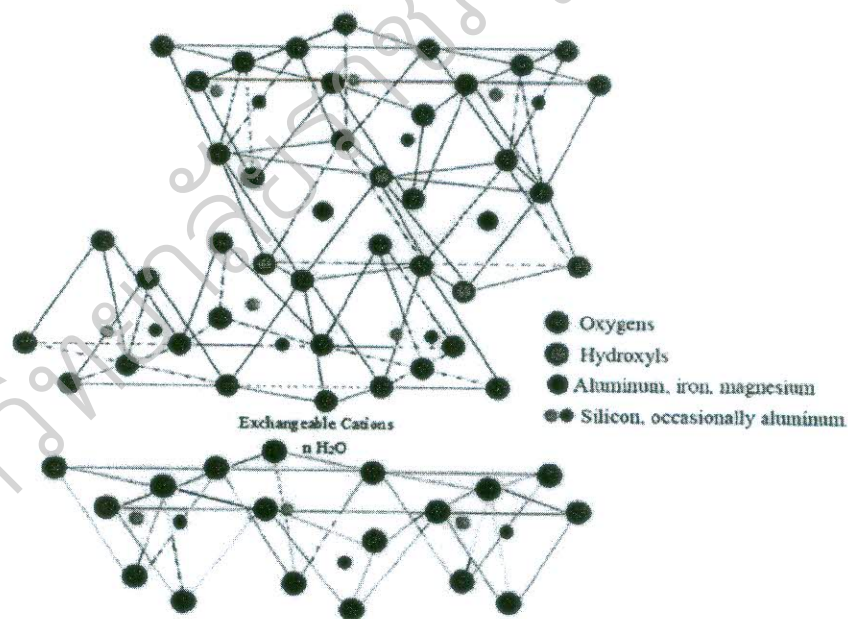
1. สารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่าง ๆ แมกนีเซียมออกไซด์ และซิลิกาแกมมันต์ สีนแร่ จำพวกอะลูมิเนียมซิลิเกต วัสดุดูดซับสารอนินทรีย์จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 50 – 200 ตารางเมตรต่อกรัม และดูดซับโมเลกุลสารเพียงไม่กี่ชนิด
2. ถ่านกัมมันต์ มีพื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 500–1,400 ตารางเมตรต่อกรัม เป็นวัสดุดูดซับที่มีประสิทธิภาพและมีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวาง
3. สารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารแลกเปลี่ยนไอออน (เรซิน, resin) ชนิดพิเศษ ที่สังเคราะห์ขึ้นเพื่อกำจัดสารอนินทรีย์ต่างๆ พื้นที่ผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม
4. วัสดุชีวภาพ (biomaterials) ส่วนใหญ่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น ชี้อ้อย ใคโตซาน กากกาแฟ ชานอ้อย กากถั่วเหลือง ถั่วแกลบดำ เปลือกไม้ ฟางข้าว เป็นต้น
5. วัสดุดูดซับชีวภาพ (biosorbent) ได้แก่ เซลล์จุลินทรีย์ เช่น ยีสต์ หรือราสายพันธุ์ต่างๆ แบคทีเรีย และสาหร่าย

### 2.2 แร่ดินเหนียวเบนโทไนต์

เบนโทไนต์เป็นแร่ดิน (Clay Mineral) ที่มีคุณสมบัติการพองตัวสูง ถูกตั้งชื่อจากสถานที่ที่มีการขุดขึ้นมาใช้ในเชิงพาณิชย์เป็นครั้งแรก คือที่ ฟอร์ตเบนทอน มลรัฐไวโอมิ่ง สหรัฐอเมริกา (Fort Benton, Wyoming USA) ในทางธรณีวิทยา แร่เบนโทไนต์ อยู่ในตระกูลของแร่ดิน มีสัดส่วนจำนวนธาตุองค์ประกอบที่แตกต่างกันไปตามแหล่งที่พบ ซึ่งทำให้เกิดลักษณะทางกายภาพและทางเคมีที่ไม่ซ้ำกัน ส่วนใหญ่กำเนิดมาจากภูเขาไฟ ในยุคทางธรณีวิทยายุคที่สาม (ยุคที่ไดโนเสาร์สูญพันธุ์แล้ว คือ ยุคครีตาเซียส (146 ล้านปี ถึง 63 ล้านปีก่อน) หรืออาจจะเป็นตั้งแต่ยุคที่ไดโนเสาร์ยังมีชีวิตอยู่ คือ ยุคจูราสสิก (190 ล้านปี ถึง 146 ล้านปีก่อน) แร่ดินที่ใช้ประโยชน์ทางการค้าได้ส่วนใหญ่จะเกิดจากปฏิกิริยาการสังเคราะห์ระหว่างน้ำกับ หินหรือซีเมนต์ของภูเขาไฟที่สามารถรวมตัวได้ในน้ำ ซึ่งพบในทุกทวีป ยกเว้นทวีปแอนตาร์กติกาในทางทรัพยากรธรณี แร่เบนโทไนต์ ประกอบด้วย แร่มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite: ซิลิเกตที่มีลักษณะอ่อน และคล้ายดิน) เป็นหลัก ปะปนอยู่ร่วมกับแร่ธาตุต่างๆ เช่น เฟลด์สปาร์ (Feldspar), แคลไซต์ (Calcite), ซิลิกา (Silica), ยิปซัม (Gypsum), ฯลฯ แร่มอนต์มอริลโลไนต์ (Montmorillonite) อยู่ในกลุ่มดินสเมคโตต์ (Smectite) ซึ่งรวมถึงแร่ที่มีคุณสมบัติการทำงานคล้ายคลึงกันเช่น ไบเดลไลต์ (Beidellite), ซาโปไนต์ (Saponite), เฮคโตไรต์ (Hectorite) ลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของ แร่มอนต์มอริลโลไนต์ คือมีลักษณะเป็นแผ่นหรือเกล็ดขนาดเล็กๆ ซ้อนกัน 3 ชั้น มีแผ่นกลางเป็นแผ่นของกลุ่มโมเลกุล อลูมิเนียมไฮดรอกซิลโมเลกุลแปดระนาบ (Octahedral Aluminum Hydroxyl) อยู่ตรงกลางระหว่าง แผ่นของกลุ่มโมเลกุลซิลิคอน

ออกไซด์ โมเลกุลสี่เหลี่ยมพีรามิด (Siliconoxygen Tetrahedral) โดยที่อะตอมของอลูมิเนียม บางส่วน จะถูกแทนที่ด้วยอะตอมของแมกนีเซียม หรืออะตอมของธาตุเหล็ก ซึ่งจะช่วยสร้างประจุลบ บนระนาบด้านฐานของโมเลกุลซิลิกา และจะมีการสร้างสมดุลโดยการแลกเปลี่ยนประจุบวกกับแผ่นที่อยู่ติดกัน ในแร่มอนต์มอริลโลไนท์ตามธรรมชาติ, ประจุบวกเหล่านี้มักจะเป็นแคลเซียม, โซเดียม หรือ แมกนีเซียม ขึ้นอยู่กับสภาพดินฟ้าอากาศและสภาวะแวดล้อมในช่วงเวลาที่ก่อตัว และลักษณะการก่อตัวขึ้นของแร่ในทางเคมี, แร่มอนต์มอริลโลไนท์ สามารถเขียนเป็นสูตรโมเลกุล ได้ดังนี้:  $M + [Al_{2y} (MgFe)_y] Si_4O_{10}(OH)_2 \cdot nH_2O$  โดยที่ + M หมายถึงประจุบวกที่มาทำการแลกเปลี่ยนประจุกัน อาจเป็นได้ทั้ง แคลเซียม หรือ โซเดียม โครงสร้างทางกายภาพของแร่มอนต์มอริลโลไนท์ Montmorillonite คือ กลุ่มของเกล็ดหรือผลึก ที่มีระนาบฐานที่กว้าง แตกต่างกันในวงความยาวที่ 0.2-2.0 ไมครอน (10<sup>-6</sup> เมตร) และความหนาที่ 6-10 ไมครอน ซึ่งในความเป็นจริง ลักษณะและการก่อตัวของผลึก สามารถแตกต่างกันไปได้ ตามการกำเนิด และลักษณะเฉพาะที่ของแหล่งแร่

ลักษณะและคุณสมบัติของเบนโทไนท์ มีความซับซ้อนและยังค่อนข้างมีความเฉพาะตัวแตกต่างกันไปตามแหล่งแร่ คุณสมบัติทาง “เคมี-กายวิภาค” คือการมีขนาดของอนุภาคละเอียดมาก และการมีประจุบวก ที่ทำการแลกเปลี่ยนประจุได้ดี ทำให้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ดีในเรื่องการดูดซึมและการเคลื่อนตัว นอกจากนี้ คุณสมบัติเหล่านี้ยังก่อให้เกิด การนำไปใช้งานแบบใหม่ๆ ได้อย่างมากมาย หลังจากการถลุงและแปรรูป



รูปที่ 2.1 โครงสร้างเบนโทไนท์  
ที่มา (SIPAG BISLTA SPA , 2560)

### 2.3 สารประกอบไนโตรเจน

สารประกอบไนโตรเจนที่เกี่ยวข้องกับงานด้านคุณภาพน้ำ มีหลายรูปแบบ อาทิเช่น สารอินทรีย์ สารอนินทรีย์รูปที่ละลาย รูปเป็นหยดของเหลว หรือรูปที่เป็นของแข็ง ไนโตรเจนจัดเป็นปัจจัยที่สำคัญในวงจรชีวิตของสิ่งมีชีวิต เนื่องจากเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของอินทรีย์สารที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิต เช่น เป็นส่วนประกอบของโปรตีนและไขมันบางชนิด ไนโตรเจนรูปแบบต่างๆเกิดขึ้นมาจากจุลินทรีย์ ทั้งจำพวกที่อาศัยได้ในสภาวะที่มีออกซิเจน และไม่มีออกซิเจน

สารประกอบไนโตรเจนมีมากมายหลายรูปในวาเลนซีที่แตกต่างกันถึง 7 ค่า คือ  $\text{NH}_3(-3)$ ,  $\text{N}_2(0)$ ,  $\text{N}_2\text{O}(+1)$ ,  $\text{NO}(+2)$ ,  $\text{N}_2\text{O}_3(+3)$ ,  $\text{NO}_2(+4)$ , และ  $\text{N}_2\text{O}_5(+5)$  สารประกอบไนโตรเจนที่เกี่ยวข้องในน้ำอุปโภคบริโภคและน้ำเสีย สารประกอบไนโตรเจนอาจแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ

(1) สารประกอบอนินทรีย์ไนโตรเจน เช่น  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  สารประกอบจำพวกนี้อาจอยู่ในรูป ปุ๋ย หรือเกลือในปัสสาวะ

(2) สารประกอบอินทรีย์ไนโตรเจน เช่น โปรตีน กรดอะมิโน กรดนิวคลีอิก สารพวกนี้เป็นส่วนประกอบของร่างกายพืชและสัตว์ในอุจจาระ และในปุ๋ยคอก เป็นต้น สาเหตุที่สารเหล่านี้เข้ามามีบทบาทในน้ำเพราะไนโตรเจนสามารถเปลี่ยนรูปจากสารอินทรีย์ไปเป็นสารอนินทรีย์โดยกระบวนการที่เรียกว่า Mineralization ซึ่งจุลินทรีย์เป็นตัวสำคัญในการทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง นอกจากนี้สารอนินทรีย์ในรูปต่างๆก็อาจเปลี่ยนรูปไปมาได้โดยจุลินทรีย์เช่นกัน กระบวนการในการเกิดมีชื่อเรียกต่าง ๆ กัน เช่น Ammonification, Nitrification และ Denitrification

สารประกอบไนโตรเจนในรูปต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานด้านคุณภาพน้ำ แบ่งได้ 2 ประเภท ดังนี้

1) อินทรีย์ไนโตรเจน (Organic nitrogen) หมายความถึงไนโตรเจนในรูปของโปรตีนและเปปไทด์ (Proteins and Peptides) กรดนิวคลีอิกและยูเรีย (Nucleic acid and Urea) และสารอินทรีย์อื่นๆ ที่สังเคราะห์ขึ้นความเข้มข้นของอินทรีย์ไนโตรเจนแปรผัน 100 ไมโครกรัมต่อลิตรในน้ำจนถึงมากกว่า 20 มิลลิกรัมต่อลิตรในน้ำเสีย

2) แอมโมเนีย (Ammonia) หมายถึง แก๊สไนโตรเจนที่อยู่ในรูป Ionized form ( $\text{NH}_4^+$ ) หรือในรูป un-ionized form ( $\text{NH}_3$ ) ซึ่งสมดุลกันเรียกว่า แอมโมเนีย-ไนโตรเจน ตามธรรมชาติจะพบแอมโมเนียในน้ำผิวดิน น้ำใต้ดินและน้ำโสโครก แอมโมเนียจำนวนมากเกิดจากขบวนการดีแอมโมเนีย ออกจากสารประกอบที่มีอินทรีย์สารไนโตรเจน (Deamination) และเกิดจากการแยกสลายยูเรียด้วยน้ำ (Hydrolysis) นอกจากนี้ยังเกิดตามธรรมชาติโดยการ reduction ไนเตรทภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจน (Anaerobic) (ศรีสมร สิทธิกาญจนกุล, 2550 หน้า 79)

#### ผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งแวดล้อม

ไนโตรเจน เป็นกลุ่มสารอาหารอินทรีย์ และการเปลี่ยนรูปของไนโตรเจนในสิ่งแวดล้อมตามวัฏจักรไนโตรเจนมีความสำคัญ ต่อสิ่งแวดล้อมเพราะหากมีสารประกอบไนโตรเจนที่มากเกินไปที่ผิวดินของพื้นที่การเกษตรการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งอาศัย ในเมืองน้ำโสโครกและน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอาจทำให้เกิดเป็นแหล่งมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมได้ ปริมาณไนเตรทในแหล่งน้ำเกิดจากการเน่าเปื่อยของซากพืชซากสัตว์อุจจาระ น้ำเน่า ปุ๋ย และน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและ

สารเคมีจากเกษตรกรรม เมื่อแบคทีเรียย่อยสลายอินทรีย์ไนโตรเจน จากน้ำเสีย อุจจาระ และสารประกอบโปรตีนเปลี่ยนไปเป็นแอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) จากนั้น เป็นไนไตรท์ ( $\text{NO}_2^-$ ) และสุดท้ายไปเป็นไนเตรท ( $\text{NO}_3^-$ ) ซึ่งสามารถละลายได้ดีในน้ำ จึงไหลซึมผ่านการกรองของชั้นดินลงสู่ใต้ดิน และสู่แหล่งน้ำบาดาล แต่บางส่วนพืชใช้เป็นอาหาร เนื่องจากไนเตรทเป็นสารอาหารของพืชผักและจำเป็นต่อสิ่งมีชีวิต ดังนั้น การเน่าเปื่อยของสารอินทรีย์และปุ๋ย เป็นสาเหตุหลักของการปนเปื้อนไนเตรทในแหล่งน้ำ ซึ่งอาจเพิ่มความเข้มข้นของไนเตรทในน้ำผิวดินและน้ำใต้ดินมากขึ้นจนถึงปริมาณที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตได้

การมีปริมาณไนเตรทในน้ำบริโภคสูงเป็นสาเหตุให้เด็กทารกป่วยเกี่ยวกับเมธิโมโกลบินในเลือดได้คือทำให้ทารกมีอาการตัวเขียว เนื่องจากไนเตรทไปทำให้ฮีโมโกลบินเป็น เมธิโมโกลบิน ซึ่งทำให้เม็ดเลือดแดงไม่สามารถนำออกซิเจนไปเลี้ยงส่วนต่าง ๆ ของร่างกายได้ (เทพวิฑูรย์ ทองศรี, 2555).

มาตรฐานคุณภาพน้ำของประเทศไทยกำหนดให้น้ำบริโภค มีปริมาณไนเตรท ( $\text{NO}_3^-$ ) ไม่เกิน 45 มิลลิกรัม/ลิตร น้ำดื่ม ในภาชนะบรรจุที่ปิดสนิท มีไนเตรท ในรูปของ ไนเตรท ไนโตรเจน ( $\text{NO}_3^- - \text{N}$ ) ไม่เกิน 4.0 มิลลิกรัม/ลิตร และน้ำบาดาลที่ใช้บริโภคมีไนเตรทไม่เกิน 45 มิลลิกรัม/ลิตร.

#### 2.4 หลักการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนไอออนในการกำจัดไนเตรต

Pornpimol (1995) อ้างถึงใน จีระศักดิ์ อาจณรงค์ฤทธิ (2547). กล่าวถึงการกำจัดไนเตรท โดยการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินจะเป็นไปตามกฎของสมดุลมวล และถูกควบคุมโดยสมดุลเคมีระหว่างแอนไอออนบนเรซินและแอนไอออนในน้ำนั้นที่เข้ามาสัมผัสกับเรซิน ซึ่งเป็นไปตามปฏิกิริยาเคมี ดังนี้



เมื่อ R = เรซิน, X = ตัวแลกเปลี่ยนไอออน (โดยทั่วไปใช้  $\text{Cl}^-$ ):

→ ลูกศรชี้ไปข้างหน้า คือ ปฏิกิริยาระหว่างการบำบัดของน้ำผ่านเรซิน

→ ลูกศรชี้กลับ คือ ปฏิกิริยาระหว่างการคืนสภาพของเรซิน

ที่สมดุลของการแลกเปลี่ยนไอออนที่มีประจุเดียว ( $\text{NO}_3^-$ ) และไอออนที่มี 2 ประจุ ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) แสดงดังปฏิกิริยาเคมีที่ (1) และ (2) ตามลำดับ การแลกเปลี่ยนไอออนลักษณะนี้จะปรากฏข้อที่น้ำสังเกตอยู่ 3 ประการด้วยกัน คือ

1. ระหว่าง  $\text{SO}_4^{2-}$  กับ  $\text{NO}_3^-$  ไอออนบนเรซินจะเลือกจับกับ  $\text{SO}_4^{2-}$  เนื่องจากอำนาจในการเลือกประจุของเรซินที่ใช้ในการกำจัดไนเตรท เป็นดังนี้



เรซินที่จับกับไนเตรตชนิดแมคโครพอร์ส เบสแก่ โครงสร้างเชื่อมโยงแบบแน่น (Macroporous, Strong base / Tight Cross Linking Structure) เมื่อเรซินได้ถูกฟื้นคืนอำนาจความสามารถในการจับไนเตรตของเรซินจะไม่เพิ่มขึ้น แต่จะลดลงจากความจุเดิมที่เรซินมีอยู่

2. ลำดับในการแทนที่สมดุลของปฏิกิริยาในการฟื้นคืนอำนาจของเรซิน ความเข้มข้นของไอออน  $X^-$  (ปรกติใช้คลอไรด์) จะค่อย ๆ เพิ่มขึ้นระหว่างการฟื้นคืนอำนาจ ตั้งแต่เรซินจับกับ  $\text{Cl}^-$  น้อย ๆ จนมากกว่าไนเตรตและซัลเฟต

$$V_1 = k_1 [RX] \cdot [\text{NO}_3^-] = \text{kinetic reaction} \quad (1) \text{ ทิศทางไปข้างหน้า}$$

$$V_2 = k_2 [R\text{NO}_3^-] \cdot [X^-] = \text{kinetic reaction} \quad (2) \text{ ทิศทางย้อนกลับ}$$

ที่สมดุล K เป็นค่าคงที่สมดุลของปฏิกิริยา (1)

$$K = \frac{k_1}{k_2} = \frac{[X^-] \cdot [R\text{NO}_3^-]}{[RX] \cdot [\text{NO}_3^-]} \quad (3)$$

เมื่อ  $[X^-]$  เพิ่มขึ้น,  $[R\text{NO}_3^-]$  ลดลง จะทำให้  $[RX]$  และ  $[\text{NO}_3^-]$  เพิ่มขึ้น ถ้าระบบสมดุลไปทางซ้ายจะพบวาระหว่าง  $V_1$  และ  $V_2$  สมดุลจะมีแนวโน้มไปข้างหน้า ในการใช้งานจริงของเรซิน สารรีเจนเนอแรนท์ที่ใช้ปล่อยให้ไหลผ่านชั้นของเรซิน สมดุลนี้จะถูกแทนที่ด้วยปฏิกิริยา(2)

3. ไอออน  $\text{SO}_4^{2-}$  จะแทนที่เป็น 2 เท่า ของไอออน  $X^-$  ซึ่งมากกว่า  $\text{NO}_3^-$  น้ำที่ผ่านการบำบัดจาก resin จะถูกปรุงแต่งด้วยไอออน  $X^-$  (โดยทั่วไป คือ คลอไรด์) สำหรับประเทศไทยมาตรฐานน้ำดื่มอนามัยให้มีความเข้มข้นของคลอไรด์ได้ถึง 250 มก./ลิตร ในกรณีของการกำจัดไนเตรตตามทฤษฎีของการแลกเปลี่ยนไอออนจะเป็นการถ่ายโอนระหว่างไอออนของ  $\text{Cl}^-$  ที่อยู่บนเรซินกับไอออนของ  $\text{NO}_3^-$  ในน้ำนั้น



## 2.5 การดูดซับ

การดูดซับเป็นการแยกสารองค์ประกอบที่ต้องการออกจากสารละลายของเหลวหรือก๊าซ โดยให้สารละลายหรือก๊าซผสมสัมผัสกับตัวดูดซับ องค์ประกอบแต่ละชนิดในสารละลายมีความสามารถในการกระจายบนผิวและเกิดแรงดึงดูดกับตัวดูดซับได้ต่างกัน

ในปฏิกิริยาของการดูดซับที่เกิดขึ้นนี้ วัสดุถูกดูดซับจะถูกดูดซับกับผิวของวัสดุดูดซับด้วยกลไกการดูดซับ ซึ่งมี 2 แบบ คือ

### 1. การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption)

เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นจากแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของวัสดุถูกดูดซับกับสารองค์ประกอบที่ถูกดูดซับ ซึ่งแรงนี้มีค่ามากกว่าแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลขององค์ประกอบในสารละลาย ถ้าวัสดุดูดซับมีความพรุนสูง ของเหลวหรือก๊าซที่ควบแน่นนั้นจะสามารถซึมผ่านเข้าสู่ช่องว่างภายในของวัสดุดูดซับได้ ถึงแม้ว่าความดันของระบบจะต่ำกว่าความดันไอของสารองค์ประกอบนั้นก็ตามปรากฏการณ์นี้เกิดขึ้นได้ที่อุณหภูมิปกติและคายความร้อนออกมาเล็กน้อย แต่มากกว่าความร้อนของการควบแน่น เมื่อลดความดันของระบบหรือเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้ความสามารถในการดูดซับลดลง เนื่องจากวัสดุถูกดูดซับเคลื่อนที่ออกจากวัสดุดูดซับ ปรากฏการณ์ช่วงนี้เรียกว่า การคาย (Desorption) ซึ่งเป็นวิธีการนำวัสดุดูดซับกลับมาใช้ใหม่ สมมติฐานของการดูดซับทางกายภาพ มีดังนี้

1. การดูดซับเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ
2. การดูดซับเกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์
3. พลังงานในการดูดซับต่ำ ( $\Delta H < 20 \text{ kJ mol}^{-1}$ )
4. การดูดซับเป็นแบบหลายชั้น (Multilayer)
5. พลังงานกระตุ้นต่ำ
6. การดูดซับเป็นแบบผันกลับได้ (Reversible Adsorption)

### 2. การดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption)

เป็นการดูดซับที่เกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิสูง ซึ่งจะแตกต่างกับการดูดซับทางกายภาพ โดยจะเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างวัสดุดูดซับกับองค์ประกอบที่ต้องการถูกดูดซับ เกิดเป็นสารประกอบของวัสดุถูกดูดซับที่ผิวของตัวดูดซับ ทำให้ปริมาณของวัสดุถูกดูดซับลดลง และให้ความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาเคมีออกมาสูงมาก สำหรับวิธีนี้ปริมาณของวัสดุถูกดูดซับต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักของวัสดุดูดซับค่อนข้างน้อย เนื่องจากการดูดซับเกิดจากปฏิกิริยาเคมีที่พื้นผิวของวัสดุดูดซับเพียงบางส่วนเท่านั้น แต่การดูดซับทางกายภาพเกิดได้ทั่วถึงบนพื้นผิวทั้งหมด การดูดซับทางเคมี จะไม่เกิดการคายเพราะองค์ประกอบที่ถูกดูดซับมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีและปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นแบบผันกลับไม่ได้ ปรากฏการณ์นี้จะขึ้นอยู่กับองค์ประกอบที่ถูกดูดซับและสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสม เช่น องค์ประกอบบางชนิดไม่เกิดการดูดซับทางเคมีที่อุณหภูมิปกติ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิจะสามารถเกิดการดูดซับทางเคมีได้ สมมติฐานของการดูดซับทางเคมี มีดังนี้

1. การดูดซับเกิดขึ้นได้ดีที่อุณหภูมิสูง
2. การดูดซับเกิดจากพันธะทางเคมีระหว่างตัวถูกดูดซับกับผิวหน้าตัวดูดซับ
3. พลังงานในการดูดซับสูง ( $50 \text{ kJ mol}^{-1} < \Delta H < 800 \text{ kJ mol}^{-1}$ )
4. การดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว (Monolayer)
5. พลังงานกระตุ้นสูง
6. การดูดซับเป็นแบบผันกลับไม่ได้ (Irreversible Adsorption)

ตารางที่ 2.1 ความแตกต่างของการดูดซับแบบกายภาพและแบบเคมี

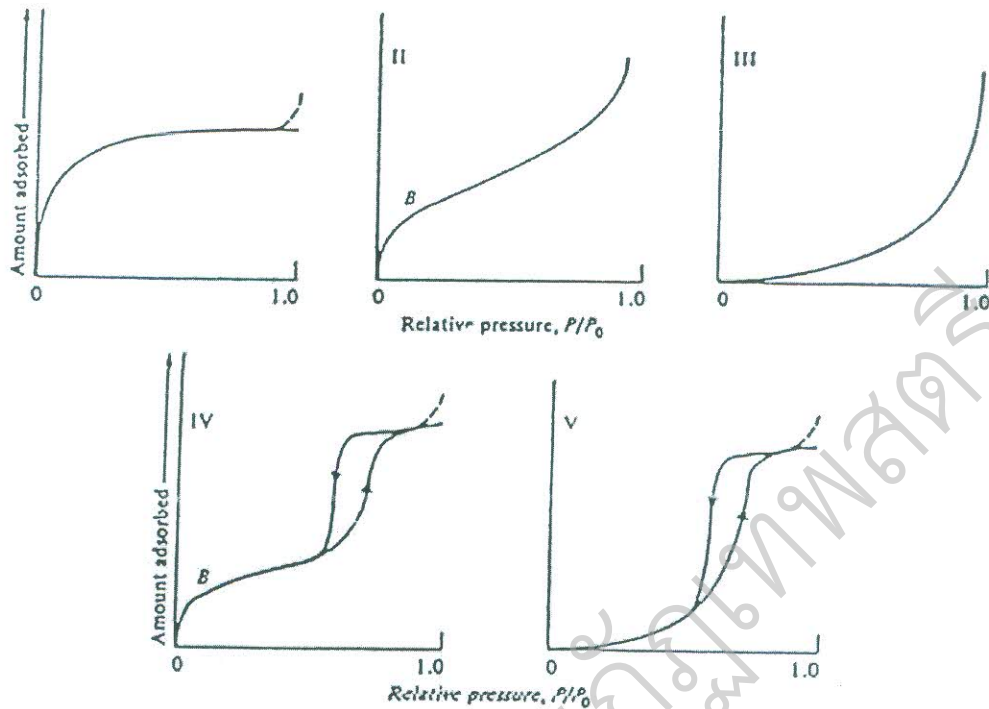
การดูดซับแบบกายภาพ	การดูดซับแบบเคมี
1. ความร้อนของการดูดซับต่ำ คายพลังงาน 100 แคลอรีต่อโมล	1. ความร้อนของการดูดซับสูง คายพลังงาน 10,000 แคลอรีต่อโมล
2. ไม่มีควมจำเพาะ	2. มีความจำเพาะสูง
3. การดูดซับแบบชั้นเดียวหรือหลายชั้น	3. การดูดซับแบบชั้นเดียว
4. การดูดซับแบบไม่รวมตัว	4. การดูดซับแบบรวมตัว
5. เกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ	5. เกิดขึ้นที่อุณหภูมิกว้าง
6. เกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ไม่เกิดการกระตุ้นและ ผันกลับได้	6. เกิดการกระตุ้น เกิดขึ้นอย่างช้า ๆ และ ไม่สามารถผันกลับได้
7. ไม่มีการถ่ายเทอิเล็กตรอน	7. มีการถ่ายเทอิเล็กตรอน

ที่มา (Ruthven, 1984, p. 427)

### 3. การดูดซับทางไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Adsorption)

การดูดซับทางไฟฟ้าเคมีหรือการแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange) เป็นการดูดซับที่เกิดจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้า (Electrostatic Force) ระหว่างประจุบนโมเลกุลตัวถูกดูดซับกับประจุบนผิวหน้าของตัวดูดซับ การดูดซับทางไฟฟ้าเคมีมีความแข็งแรงมากกว่าการดูดซับทางกายภาพแต่อ่อนกว่าการดูดซับทางเคมี

กระบวนการดูดซับจะเกิดขึ้นเรื่อยๆ โดยที่สารที่ถูกดูดซับจะถูกดูดซับและคายการดูดซับ (desorption) ไปพร้อมๆกัน จนกว่าอัตราการดูดซับและการคายการดูดซับจะเท่ากัน ซึ่งจะทำให้เกิดสภาวะสมดุล เรียกว่า สมดุลของการดูดซับ (Adsorption equilibrium) ส่วนไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherm) เป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของตัวดูดซับ กับความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่เหลืออยู่ ที่สมดุลการดูดซับ ณ อุณหภูมิหนึ่งๆ เมื่อนำเอาความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับที่เหลืออยู่ที่สมดุลการดูดซับไปพล็อตกราฟกับปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับ จะได้เส้นโค้งแนวโน้มที่เกิดขึ้นจากการลากผ่านจุดที่ได้จากการทดลองทั้งหมด เรียกว่า ไอโซเทอมของการดูดซับ รูปแบบของไอโซเทอมของการดูดซับมีหลายสมการด้วยกัน ซึ่งแล้วแต่ว่าจะนำเอาสมการแบบใดมาอธิบายเกี่ยวกับสมดุลของการดูดซับ รูปแบบพื้นฐานของไอโซเทอมการดูดซับมี 5 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ไอโซเทอร์มการดูดซับพื้นฐาน 5 ชนิด  
ที่มา (Jankowska et al, 1991)

1. ไอโซเทอมชนิดที่ 1 บางครั้งอาจเรียกว่าไอโซเทอมที่มีรูปแบบแบบแลงเมียร์ หรือแบบแอล (Langmuir or L-Shaped) เป็นการดูดซับของของแข็งที่มีลักษณะรูพรุนขนาดเล็กและการดูดซับส่วนใหญ่จะเป็นการดูดซับในรูพรุนขนาดเล็ก พื้นที่ผิวภายนอก (External Surface Area) จะต่ำที่ความดันย่อยต่ำก็สามารถดูดซับได้มาก ตัวอย่างการดูดซับของไอโซเทอมแบบที่ 1 คือ การดูดซับของไนโตรเจนบนถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดเล็กที่อุณหภูมิ 77 เคลวิน การดูดซับของแอมโมเนียบนผิวถ่านกัมมันต์ที่อุณหภูมิ 273 เคลวิน และการดูดซับบนซีโอไลต์

2. ไอโซเทอมชนิดที่ 2 บางครั้งอาจเรียกว่าไอโซเทอมที่มีรูปแบบแบบซิกมอยด์ หรือแบบเอส (Sigmoid or S - Shaped) เป็นรูปแบบไอโซเทอมการดูดซับของวัสดุดูดซับที่ไม่มีรูพรุนหรือวัสดุดูดซับที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ ซึ่งอาจเกิดการดูดซับได้หลายชั้น (Multilayer) จากไอโซเทอมตรงบริเวณจุดเปลี่ยนโค้ง หรือจุด B (Break Through) จะแสดงถึงการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) นั้นเสร็จสมบูรณ์ จากนั้นที่ความดันสูงขึ้นจะเกิดการดูดซับที่ต่อเนื่องจากชั้นแรกต่อไป และจะเกิดการดูดซับเสร็จสมบูรณ์ที่ความดันย่อยสูงๆ

3. ไอโซเทอมชนิดที่ 3 เป็นรูปแบบของการดูดซับที่มีแรงดึงดูดที่อ่อนระหว่างวัสดุดูดซับและวัสดุถูกดูดซับ แต่แรงดึงดูดระหว่างวัสดุถูกดูดซับด้วยกันมีค่อนข้างมาก จากกรณีนี้จะทำให้เกิดการรวมตัวกันของวัสดุถูกดูดซับก่อนที่การดูดซับชั้นแรกจะเสร็จสมบูรณ์ ตัวอย่างการดูดซับของไอโซเทอมแบบที่ 3 คือ การดูดซับของไอน้ำบนผิวถ่านหินที่ไม่มีรูพรุน

4. ไอโซเทอมชนิดที่ 4 จะพบในวัสดุดูดซับที่มีขนาดรูพรุนประมาณ 15–1000 อังสตรอม ความชันของกราฟเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อความดันเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าตัวถูกดูดซับเริ่มเข้าเติมในรูพรุนอีกครั้ง และการเปลี่ยนระดับของกราฟเมื่อความดันเพิ่มขึ้นอีกเป็นผลมาจากการควบแน่นภายในรูพรุนของของแข็ง (Capillary Condensation in Pores) โดยลักษณะของกราฟในช่วงแรกจะเหมือนกับชนิดที่ 2 ซึ่งจุดเปลี่ยนโค้ง จะแสดงถึงการดูดซับชั้นแรกอย่างสมบูรณ์ ตัวอย่างเช่นการดูดซับเบนซีน (Benzene) บนเจลของไอออนออกไซด์ (Iron (III) Oxide Gel) ที่อุณหภูมิ 320 เคลวิน

5. ไอโซเทอมชนิดที่ 5 จะพบในการดูดซับระหว่างโมเลกุลของก๊าซกับผิวของของแข็ง มีลักษณะคล้ายชนิดที่ 3 แต่ชนิดที่ 5 จะสามารถเกิดการควบแน่นของก๊าซภายในรูพรุนได้ วัสดุดูดซับมีขนาดรูพรุนในช่วงเดียวกับไอโซเทอมชนิด 4 ตัวอย่างเช่น การดูดซับไอน้ำบนถ่านหินที่อุณหภูมิ 373 เคลวิน สำหรับไอโซเทอมชนิดที่ 3 และชนิดที่ 5 นี้จะคำนวณหาพื้นที่ผิวได้ยากเนื่องจากชั้นการดูดซับชั้นที่ 2 จะถูกสร้างขึ้นก่อนที่ชั้นแรกจะเสร็จสมบูรณ์

สมการไอโซเทอมการดูดซับที่นิยมนำมาใช้ในการอธิบายการดูดซับ คือ สมการไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir's adsorption isotherm) และสมการไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดลิช (Freundlich's adsorption isotherm)

ไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ มีสมมติฐานของสมการว่าทุกๆ ตำแหน่งดูดซับ (Adsorption site) มีลักษณะเหมือนกัน (Homogenous) และการดูดซับจะเกิดขึ้นบนพื้นผิวที่มีพื้นที่ในการดูดซับที่แน่นอนและพื้นที่นั้นๆสามารถดูดซับโมเลกุลได้เพียงชั้นเดียว (Monolayer) สมการเส้นตรงไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ ดังสมการ 1

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

โดยที่  $C_e$  = ความเข้มข้นของสีย้อมที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)  $q_e$  = ปริมาณการดูดซับของตัวดูดซับที่สมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)  $q_m$  = ปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับต่อปริมาณตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม) และ  $K_L$  = ค่าคงที่ของสมการแลงเมียร์

ผลของรูปร่างไอโซเทอรัมสามารถทำนายรูปร่างการดูดซับว่าสอดคล้องหรือไม่สอดคล้องกับการดูดซับทั้งในระบบเบดนิ่ง (fixed bed) และระบบเขย่าได้จากลักษณะไอโซเทอรัมของแลงเมียร์ โดยสามารถอธิบายในเทอมปัจจัยการแยก (separation factor) หรือค่าพารามิเตอร์ที่สภาวะสมดุล (equilibrium parameter):  $R_L$  ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (Won et al, 2006)

$$R_L = \frac{1}{(1 + K_L C_0)} \quad \dots\dots\dots(2)$$

โดยที่  $C_0$  = ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)  $K_L$  = ค่าคงที่ของไอโซเทอร์มแลงเมียร์ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

ตารางที่ 2.2 ปัจจัยการแยกที่มีผลต่อรูปร่างของไอโซเทอร์มแลงเมียร์

$R_L$	รูปร่างของไอโซเทอร์ม
$R_L > 1$	unfavorable
$R_L = 1$	linear
$0 < R_L < 1$	favorable
$R_L = 0$	irreversible

ไอโซเทอร์มแบบพรุนตลิก มีสมมติฐานของสมการว่าทุกๆ ตำแหน่งดูดซับ (Adsorption site) มีลักษณะไม่เหมือนกัน (Heterogenous) และการดูดซับจะเกิดขึ้นสามารถดูดซับโมเลกุลได้หลายชั้น (Multilayer) สมการเส้นตรงของไอโซเทอร์มแบบพรุนตลิก ดังสมการ 3

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad \dots\dots\dots(3)$$

โดยที่  $q_e$  = ปริมาณของสีย้อมถูกดูดซับต่อปริมาณของตัวดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)  $C_e$  = ความเข้มข้นของสีย้อมที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)  $K_F$  = ค่าคงที่ของพรุนตลิก (ลิตรต่อมิลลิกรัม) และ  $1/n$  = ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ

## 2.6 จลนพลศาสตร์การดูดซับ

จลนพลศาสตร์การดูดซับด้วยสมการ Pseudo-First Order Equation ดังสมการ 4

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1 t}{2.303} \quad \dots\dots\dots(4)$$

โดยที่  $q_e$  = ความสามารถในการดูดซับที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)  $q_t$  = ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)  $k_1$  = ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง (ต่อนาที) และ  $t$  = เวลาที่ใช้ในการดูดซับ (นาที)

สมการ Pseudo-Second Order Equation ดังสมการ 5

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad \dots\dots\dots(5)$$

การแพร่ภายในอนุภาค (Intraparticle Diffusion) ใช้ศึกษากลไกการดูดซับ มีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 6

$$q_t = k_{id} t^{1/2} \quad \dots\dots\dots(6)$$

เมื่อ  $q_t$  = ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม) และ  $k_{id}$  = ค่าคงที่อัตราเร็วของการแพร่เข้าไปอนุภาค(มิลลิกรัมต่อกรัมต่อนาที<sup>1/2</sup>)

## 2.7 การกำจัดไนเตรตด้วยวัสดุดูดซับชนิดต่าง ๆ

Pornpimol (1995) ศึกษาการกำจัดไนเตรตจากน้ำใต้ดิน โดยขบวนการแลกเปลี่ยนไอออนและขบวนการดีไนตริฟิเคชัน พบว่าสามารถกำจัดไนเตรตจากน้ำใต้ดินสังเคราะห์ที่ความเข้มข้น 150 mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N/l ให้มีค่าต่ำกว่า 10 mg NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N/l ได้ เมื่อทำงานที่ภาระบรรทุกของไนเตรต ไนโตรเจนที่ 525-1250 g.N (m<sup>3</sup> .h) ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของเรซินชนิดแอนไอออนที่อยู่ 0.7 – 0.8 eq/l ของเรซิน ที่ระดับการฟื้นคืนอำนาจของ 80 g Cl<sup>-</sup> /l ของเรซิน หรือ 30 g NaCl/l ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไนเตรต-ไนโตรเจน พบว่าอยู่ในช่วง 0.15-0.35 eq/l ของเรซิน และความเข้มข้นของซัลเฟตในน้ำมีผลต่อความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของไนเตรต-ไนโตรเจนของแอนไอออนเรซินชนิดนี้ เมื่อในน้ำมีซัลเฟตอยู่ 180 mg SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> /l ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของไนเตรต - ไนโตรเจน มีค่า 0.15 eq/l ของเรซิน และเมื่อในน้ำมีซัลเฟตอยู่ 40 mg SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> /l พบว่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของไนเตรต-ไนโตรเจน อยู่ที่ 0.35 eq/l ของเรซิน

Cengeloglu et al (2006). ศึกษาการกำจัดไนเตรตด้วยดินแดง (red mud) และดินแดงที่ปรับสภาพ ปัจจัยที่ศึกษาได้แก่ พีเอช ปริมาณตัวดูดซับและเวลาที่สัมผัส ผลการทดลองพบว่าดินแดงที่ปรับสภาพมีความสามารถในการดูดซับมากกว่าดินแดงที่ไม่ปรับสภาพที่พีเอชน้อยกว่า 7 ในการดูดซับใช้สมการแลงเมียร์และฟรุนดลิชทำนายผลการทดลอง พบว่าสมการแลงเมียร์อธิบายผลการทดลองได้ดี โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 1.859 และ 5.858 มิลลิกรัมต่อกรัมของดินแดงที่ปรับสภาพและดินแดงที่ไม่ปรับสภาพ ตามลำดับ และสมการดูดซับที่เวลา 60 นาที กลไกการดูดซับไนเตรตสามารถพิจารณาได้จากโครงสร้างของดินแดงและอันตรกิริยาระหว่างพื้นผิวออกไซด์ของโลหะและไอออนไนเตรต

Hekmatzadeh et al (2012). ทำการศึกษาการกำจัดไนเตรทจากสารละลายในน้ำโดยใช้เรซินเป็นสารแลกเปลี่ยนไอออนทำการทดลองแบบแบทช์และแบบคอลัมน์ การทดลองการกำจัดไนเตรทในน้ำบาดาลและน้ำสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ และไอออนเช่น ซัลเฟต ใช้สมการของ Langmuir isotherm เพื่ออธิบายผลการทดลอง ส่วนการทดลองในระบบคอลัมน์พบว่ากราฟเบรคทูลสามารถอธิบายผลการทดลองได้ดี และการทดลองในระบบคอลัมน์สอดคล้องกับผลการทดลองในระบบแบทช์

Nur et al (2015) ศึกษาการกำจัดไนเตรทโดยใช้เรซิน (Purolite A520E) เป็นตัวแลกเปลี่ยนไอออนในระบบแบทช์และคอลัมน์ จลนพลศาสตร์การดูดซับอธิบายได้ด้วย pseudo-first-order, pseudo-second-order และแบบจำลองการแพร่กระจายของผิวที่เป็นเนื้อเดียวกัน ค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดของสมการแลงเมียร์เท่ากับ 32.2 mg N/g. สำหรับปริมาณเรซิน 1.5 และ 3.0 กรัม/ลิตร ที่ความเข้มข้นของไนเตรท 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนการทดลองในระบบคอลัมน์พบว่าสมการแบบโทมัส อธิบายผลการทดลองได้ดีที่อัตราการไหล 2.5 และ 5.0 m/h ณ ความสูงของชั้นดูดซับ 12 เซนติเมตร โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 12.0–13.5 and 8.2–9.7 mg N/g ตามลำดับ

Hooshmanda et al (2016) ศึกษาการกำจัดไนเตรทด้วยถ่านชีวภาพจากขานอ้อยที่ปรับสภาพผิวด้วย 40% trimethylamine ทำการศึกษาพื้นผิว หมู่ฟังก์ชัน องค์ประกอบธาตุ ค่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนบวก-ลบและพื้นที่ผิว ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับได้แก่ พีเอช ปริมาณตัวดูดซับ เวลาที่สัมผัส ความเข้มข้นเริ่มต้น แอนไอออนและอุณหภูมิ ผลการทดลองใช้จลนพลศาสตร์การดูดซับ (pseudo-first-order, pseudo-second-order, intraparticle diffusion และ Avrami models) และไอโซเทอร์มการดูดซับต่างๆ อธิบายผลการทดลอง (Langmuir, Freundlich, Sips และ Dubinin-Raduskovich models) สภาวะที่กำจัดไนเตรทสูงสุดที่ pH = 4.64 เวลาสัมผัส 60 นาที และปริมาณตัวดูดซับ 2 กรัมต่อลิตร ผลการทดลองสอดคล้องกับจลนพลศาสตร์การดูดซับแบบปฏิกิริยาอันดับสองและสมการแลงเมียร์ โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุดของสมการแลงเมียร์เท่ากับ 28.21 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วนอุณหพลศาสตร์การดูดซับพบว่าการดูดซับเป็นแบบดูดความร้อนและสามารถเกิดขึ้นได้เอง

### บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย

#### 3.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานไนเตรต

เตรียมสารละลาย stock ของสารละลายโซเดียมไนเตรตความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร

#### 3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

##### 3.2.1 เครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

1. ตู้อบความร้อน (hot air oven) บริษัท Memmert GmbH
2. โถดูดความชื้น (dessicator)
3. เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง (analytical balance) บริษัท Mettler-Toledo
4. เครื่องเขย่าควบคุมอุณหภูมิ (shaker bath) บริษัท Forma Scientific
5. เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง (pH meter)
6. เครื่องกวนสาร (stirrer vertical)
7. เครื่องคนอัตโนมัติ (magnetic stirrer)
8. เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (UV-Vis spectrophotometer)
9. เครื่องวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน (Fourier Transform Infrared

Spectrophotometer) รุ่น model two บริษัท Perkin Elmer

##### 3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. ชุดกรองสุญญากาศ (vacuum)
2. บีกเกอร์ (beaker)
3. ขวดปรับปริมาตร (volumetric flask)
4. ขวดรูปชมพู่ (erlenmeyer flask)
5. แท่งแก้ว (stirrer)
6. แท่งกวน (magnetic stirrer)
7. กรวยกรอง (funnel)
8. ขวดน้ำกลั่น (washing bottle)
9. ปิเปต (pipet)
10. หลอดหยด (dropper)
11. ช้อนตักสาร (spatular)
12. กระจกนาฬิกา (watch glass)
13. กระดาษกรองเบอร์ 42 (filter paper whatman No.42)



### 3.2.3 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

1. กรดไฮโดรคลอริก (HCl) ชนิด AR grade จากบริษัท Merck ประเทศเยอรมัน
2. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ชนิด AR grade จากบริษัท APS Ajax Finechem ประเทศออสเตรเลีย
3. โซเดียมไนเตรท (Sodium nitrate :  $\text{NaNO}_3$ ) A.R. Grade. Ajax Finechem Pty Ltd.
4. สารละลายบรูซัน-กรดซัลฟานิลิก

### 3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย

#### 1. ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

น้ำตัวอย่าง น้ำตัวอย่างที่ใช้ในการวิจัยมี 2 ชนิดได้แก่

1. น้ำบาดาลสังเคราะห์ เป็นน้ำบาดาลที่จำลองให้มีความเข้มข้นที่ใกล้เคียงสภาวะจริง
2. น้ำบาดาลที่ปนเปื้อนไนเตรท เป็นน้ำบาดาลที่ปนเปื้อนไนเตรทจากพื้นที่เกษตรกรรมเพาะปลูกอ้อยชุมชนในตำบลนิคมสร้างตนเอง อำเภอเมือง จังหวัดลพบุรี

#### ตัวดูดซับ

ตัวดูดซับที่ใช้ ได้แก่ เบนโทไนท์ ซึ่งเป็นหินเพอร์โลต์ (สีขาว) จาก ตำบลมหาโพธิ์ อำเภอสระโบสถ์ จังหวัดลพบุรี

#### วิธีการเตรียมตัวดูดซับ

1. นำเบนโทไนท์ แช่ด้วย 0.1 M HCl อัตราส่วน 1: 10 เขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 6 ชั่วโมง
2. นำมาคัดขนาดอนุภาคให้ได้ 50–100 เมช มาล้างด้วยน้ำกลั่น และนำไปอบที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เก็บในโถดูดความชื้น

#### 2. ศึกษาประสิทธิภาพและปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับไนเตรทของเบนโทไนท์

ทำการศึกษาการกำจัดไนเตรทในน้ำบาดาลที่เตรียมขึ้นเอง โดยเตรียมให้มีความเข้มข้นใกล้เคียงกับสภาวะจริง และศึกษาประสิทธิภาพและปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ขั้นตอนการทดลองดังนี้

## 2.1 ค่าความเป็นกรด-ต่างของสารละลาย

1. ชั่งเบนโทไนท์ ปริมาณที่เหมาะสม ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. ปิเปิดน้ำบาดาลที่เตรียมขึ้นเองที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร และปรับค่าความเป็นกรด-ต่างให้ได้ 2-12 ค่า
3. นำไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เก็บตัวอย่างที่เวลาต่าง ๆ (300 นาที) จนถึงเวลาสมมูล ที่อุณหภูมิ 30°C
4. นำสารละลายที่ได้ไปกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 และวัดปริมาณไนเตรทที่เหลือด้วยเครื่อง UV-Vis spectroscopy ที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร ทำการทดลองซ้ำ 3 ซ้ำ

## 2.2 ศึกษาเวลาที่เข้าสู่สมดุล

1. ชั่งเบนโทไนท์ ปริมาณที่เหมาะสม ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. ปิเปิดน้ำบาดาลที่เตรียมขึ้นเองที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร และปรับค่าความเป็นกรด-ต่างให้เท่ากับข้อ 2.1
3. นำไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เก็บตัวอย่างที่เวลาต่าง ๆ (1-240 นาที) จนถึงเวลาสมมูล ที่อุณหภูมิ 30°C
4. นำสารละลายที่ได้ไปกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 และวัดปริมาณไนเตรทที่เหลือด้วยเครื่อง UV-Vis spectroscopy ที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร ทำการทดลองซ้ำ 3 ซ้ำ

## 2.3 ศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลาย

1. ชั่งเบนโทไนท์ปริมาณที่เหมาะสม ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. ปิเปิดน้ำบาดาลที่เตรียมขึ้นเองที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร และปรับค่าความเป็นกรด-ต่างให้เท่ากับข้อ 2.1
3. นำไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที ตามเวลาที่ได้จากข้อ 2.2 ที่อุณหภูมิ 30°C
4. นำสารละลายที่ได้ไปกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 และวัดปริมาณไนเตรทที่เหลือด้วยเครื่อง UV-Vis spectroscopy ที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร ทำการทดลองซ้ำ 3 ซ้ำ

## 2.4 ศึกษาผลของอุณหภูมิ

1. ชั่งเบนโทไนท์ปริมาณที่เหมาะสม ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2. ปิเปิดน้ำบาดาลที่เตรียมขึ้นเองที่ความเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร และปรับค่าความเป็นกรด-ด่างให้เท่ากับข้อ 2.1
3. นำไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที ตามเวลาที่ได้จากข้อ 2.2 ที่อุณหภูมิ 20-40°C
4. นำสารละลายที่ได้ไปกรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 42 และวัดปริมาณไนเตรทที่เหลือด้วยเครื่อง UV-Vis spectroscopy ที่ความยาวคลื่น 410 นาโนเมตร ทำการทดลองซ้ำ 3 ซ้ำ

จากผลการทดลองที่ได้นำมาคำนวณหาร้อยละการดูดซับ ดังสมการ 1

$$\% \text{ ดูดซับ} = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} \times 100 \quad \dots\dots\dots(1)$$

และคำนวณความสามารถในการดูดซับ (adsorption capacity) ดังสมการ 2

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

โดยที่  $q$  = ความสามารถในการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)  $C_0$  = ความเข้มข้นเริ่มต้นของ (มิลลิกรัมต่อลิตร)  $C_t$  = ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ที่เวลาหนึ่ง ๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร)  $V$  = ปริมาตรสารละลายที่ใช้ (มิลลิลิตร) และ  $W$  = ปริมาณตัวดูดซับ (กรัม)

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและอภิปรายผลการทดลอง

ในการทดลองนี้ แบ่งการทดลองดังบทที่ 3 ที่มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

ตอนที่ 1 การเตรียมตัวดูดซับ

ตอนที่ 2 วิเคราะห์คุณสมบัติของตัวดูดซับ ด้วยเครื่อง FTIR SEM XRF และ BET

ตอนที่ 3 ประสิทธิภาพการดูดซับ โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่

1. เวลาที่เข้าสู่สมดุล
2. ปริมาณของตัวดูดซับ
3. อุณหภูมิ

ตอนที่ 4 จากผลการทดลองใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์แบบไอโซเทอร์มการดูดซับ

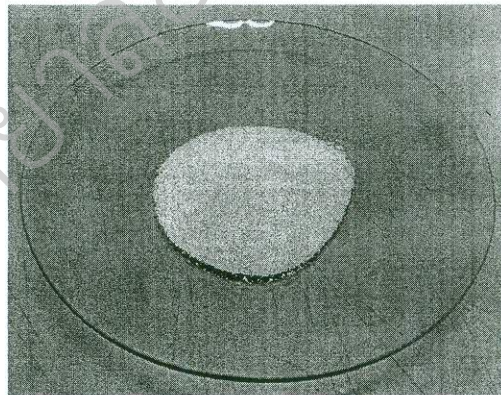
ตอนที่ 5 จลนพลศาสตร์การดูดซับอธิบายผลการทดลอง

ตอนที่ 6 อุณหพลศาสตร์การดูดซับ

โดยผลการทดลองมีผลการทดลองดังต่อไปนี้

#### 4.1 การเตรียมตัวดูดซับ

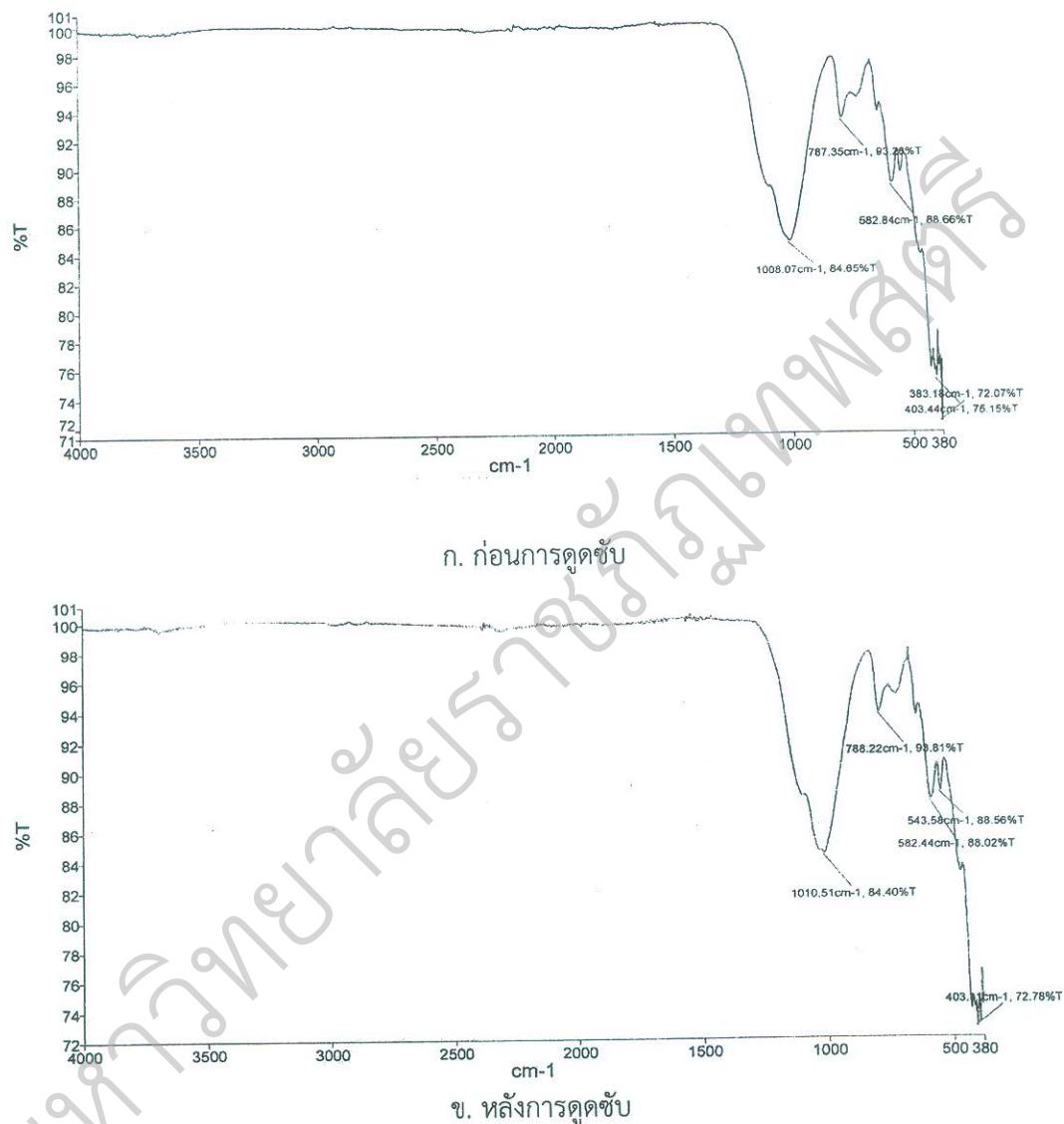
นำเบนโทไนท์ไปแช่กรดด้วยความเข้มข้น 0.1 โมลลาร์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง แล้วล้างด้วยน้ำกลั่น จนกระทั่ง pH เป็นกลาง และคัดขนาดอนุภาค 50-100 เมช จะได้ตัวดูดซับ ดังรูปที่ 4.1



รูปที่ 4.1 เบนโทไนท์ที่ปรับสภาพ

#### 4.2 การวิเคราะห์คุณลักษณะของตัวดูดซับ

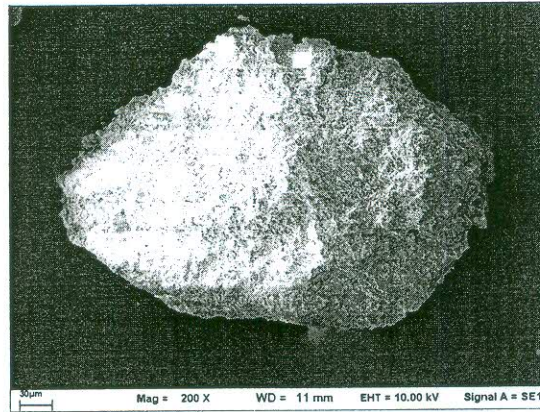
ทำการศึกษาคุณลักษณะของตัวดูดซับ ได้แก่ FTIR SEM XRF และ BET โดยรูปที่ 4.2 ก. และ ข. วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันบนโหนดก่อนและหลังการดูดซับ



รูปที่ 4.2 หมู่ฟังก์ชันของเบนโทไนด์ก่อนและหลังดูดซับ

รูปที่ 4.2 ก. และ ข. หมู่ฟังก์ชันเบนโทไนด์ก่อนและหลังการดูดซับช่วงเลขคลื่น 450–4000  $\text{cm}^{-1}$  จากรูป 4.2 ก. หมู่ฟังก์ชันเบนโทไนด์ก่อนดูดซับ พบฟังก์ชันช่วง 1008.07 (หมู่ไฮดรอกซิล) 787.35 และ 582.84  $\text{cm}^{-1}$  หลังการดูดซับ รูป 4.2 ข. พบฟังก์ชันเลขคลื่น 1010.51 788.22 และ 582.44  $\text{cm}^{-1}$

วิเคราะห์คุณลักษณะตัวดูดซับด้วย SEM พบว่าพื้นผิวของเบนโทไนด์ที่ปรับสภาพ มีลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็ก ๆ จำนวนมาก ดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ลักษณะสัณฐานวิทยาด้วย SEM

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย XRF ก่อนและหลังดูดซับไนเตรต พบว่าร้อยละของซิลิกา ก่อนและหลังการดูดซับเกิดการเปลี่ยนแปลงซึ่งมีค่าลดลงดังตารางที่ 4.1 บ่งบอกว่าซิลิกาส่งผลต่อการกำจัดไนเตรต

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีก่อนและหลังการดูดซับของเบนโทไนด์

ก่อนดูดซับ		หลังดูดซับ	
elements	unit (%)	elements	unit (%)
Si	68.588	Si	66.275
K	26.821	K	28.994
Fe	2.569	Fe	2.644
Rh	0.926	Rh	0.934
Ti	0.677	Ti	0.758
Zr	0.156	Zr	0.156
Rb	0.117	Rb	0.114
Ni	0.046	Ni	0.040
Cu	0.041	Cu	0.037
Y	0.027	Y	0.026
Nb	0.018	Nb	0.018
As	0.007	As	-

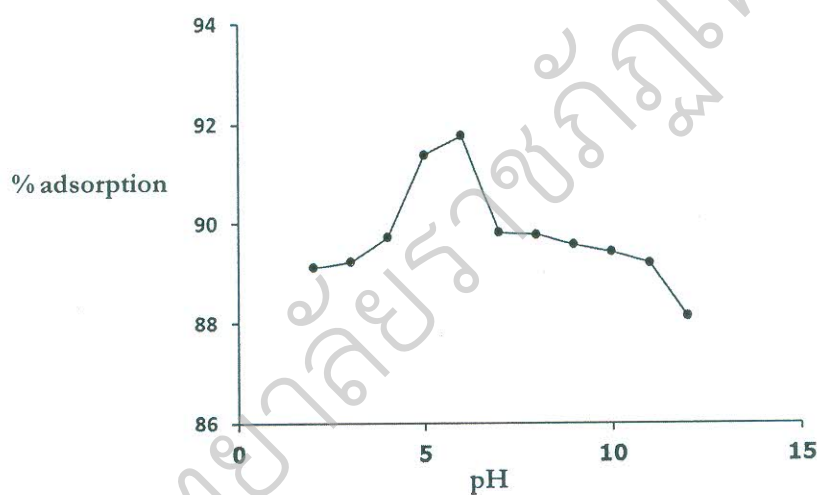
วิเคราะห์พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของตัวดูดซับด้วยแก๊สไนโตรเจนที่ 196°C ดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนของเบนโทไนต์

BET surface area (m <sup>2</sup> /g)	pore volume (cc/g)	average pore radius (angstrom)
12.01	0.0319	53.10

#### 4.3 ผลของค่าความเป็นกรด-ด่างในการดูดซับ

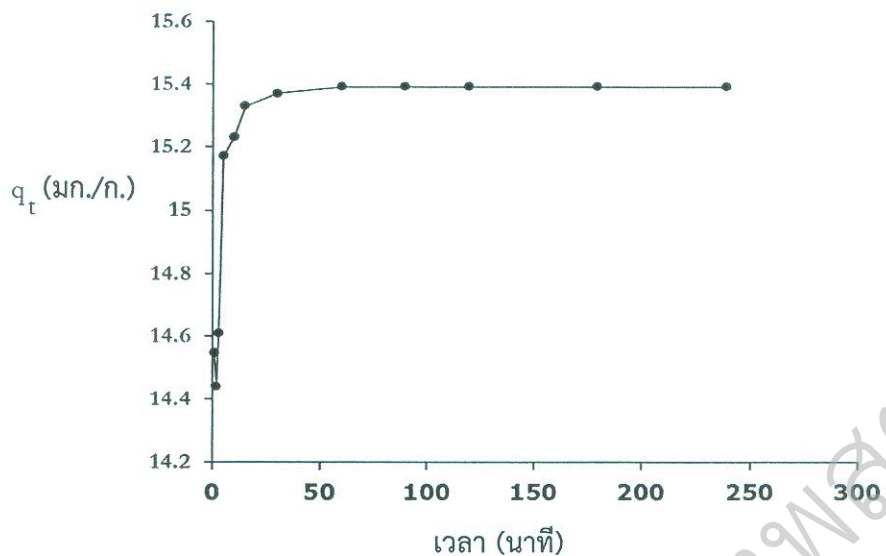
ศึกษาการดูดซับสารละลายไนเตรทที่เข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อกรัม ปริมาณเบนโทไนต์ 0.3 กรัม ที่ค่าความเป็นกรด-ด่างต่างในช่วง 2-12 ตามลำดับ เขย่าเป็นเวลา 4 ชั่วโมง ผลการทดลองดังรูปที่ 4.4 ผลการทดลองพบว่าที่ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 6 มีร้อยละการดูดซับมากที่สุด



รูปที่ 4.4 ผลของค่าความเป็นกรด-ด่าง

#### 4.4 ผลของเวลาที่เข้าสู่สมดุล

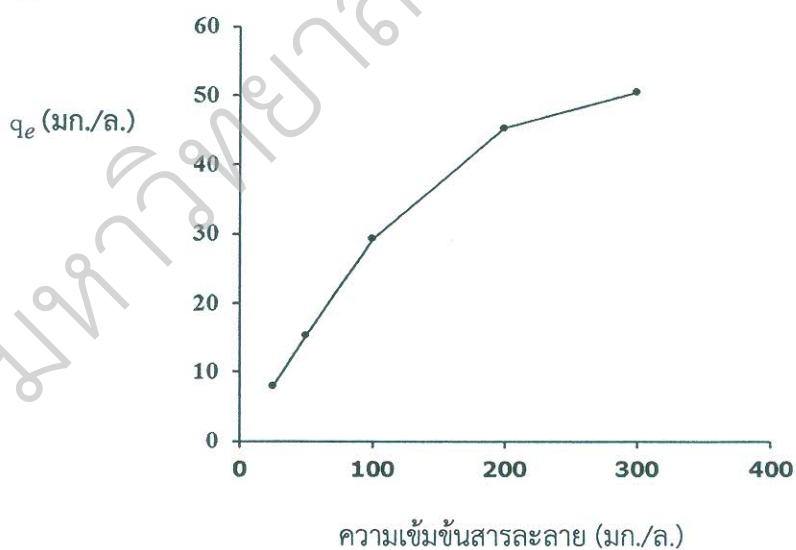
ทำการดูดซับเป็นเวลา 1-240 นาที ปริมาณเบนโทไนต์ 0.3 กรัม ความเข้มข้นสารละลาย 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.5 ผลการทดลองพบว่าการดูดซับเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วที่เวลา 1 นาที มีค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 14.55 มิลลิกรัมต่อกรัม และการดูดซับดำเนินไปเรื่อย ๆ จนเข้าสู่สมดุลที่เวลา 60 นาที และมีค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 15.39 มิลลิกรัมต่อกรัม



รูปที่ 4.5 ผลของเวลาที่เข้าสู่สมดุล

#### 4.5 ผลของความเข้มข้นสารละลาย

ทำการดูดซับที่เวลา 60 นาที ปริมาณเบนโทไนท์ 0.3 กรัม ความเข้มข้นสารละลาย 50-มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.6 ผลการทดลองพบว่าเมื่อสารละลายมีความเข้มข้นมากขึ้นทำให้ค่าความสามารถในการดูดซับมากขึ้น โดยมีค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 7.99-50.39 มิลลิกรัมต่อกรัมที่ความเข้มข้น 25-300 มิลลิกรัมต่อลิตร

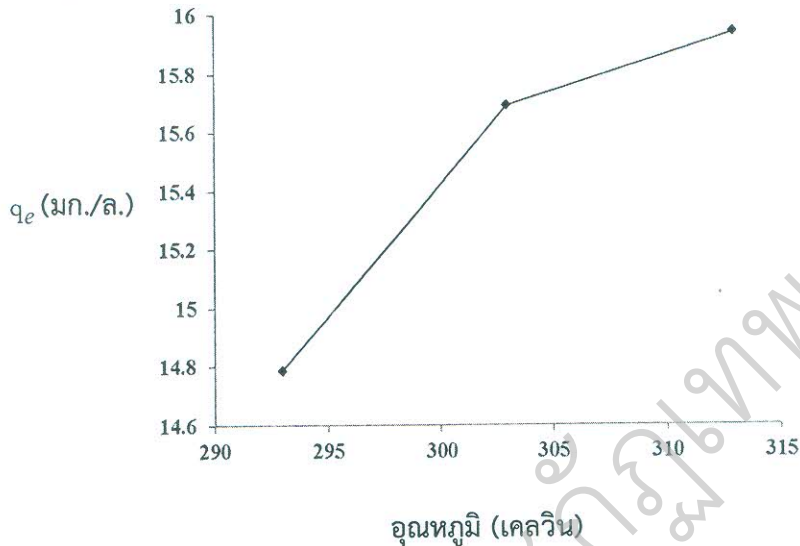


รูปที่ 4.6 ผลของความเข้มข้นของสารละลาย



#### 4.6 ผลของอุณหภูมิ

ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิในการดูดซับ ที่เวลาเข้าสู่สมดุล 60 นาที ปริมาณเบนโทไนท์ 0.3 กรัม ความเข้มข้นสารละลาย 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 6 ที่อุณหภูมิ 20-40 องศาเซลเซียส ดังรูปที่ 4.7 ผลการทดลองพบว่ามีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิมากขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 14.78-15.94 มิลลิกรัมต่อกรัม



รูปที่ 4.7 ผลของอุณหภูมิ

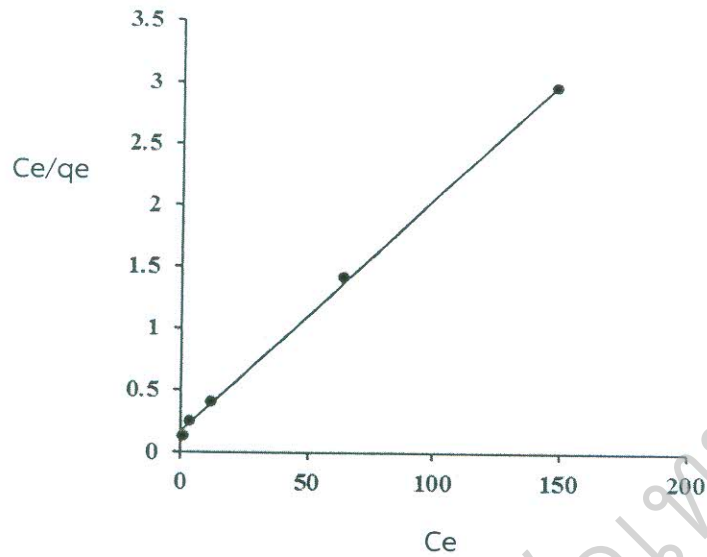
#### 4.7 ไอโซเทอร์มการดูดซับ

กระบวนการดูดซับสามารถใช้สมการไอโซเทอร์มช่วยในการทำนายและออกแบบการทดลอง การทดลองการดูดซับในเตรตด้วยเบนโทไนท์ที่ปรับสภาพผิวใช้แบบจำลองแลงเมียร์และฟรุนดลิช ทำการทดลองที่ความเข้มข้นสารละลาย 25, 50, 100, 200 และ 300 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 6 ปริมาณตัวดูดซับ 0.3 กรัม เวลาในการสัมผัส 60 นาที อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ผลการทดลองและค่าความสัมพันธ์ตามสมการไอโซเทอร์มจะเป็นดังตารางที่ 4.3

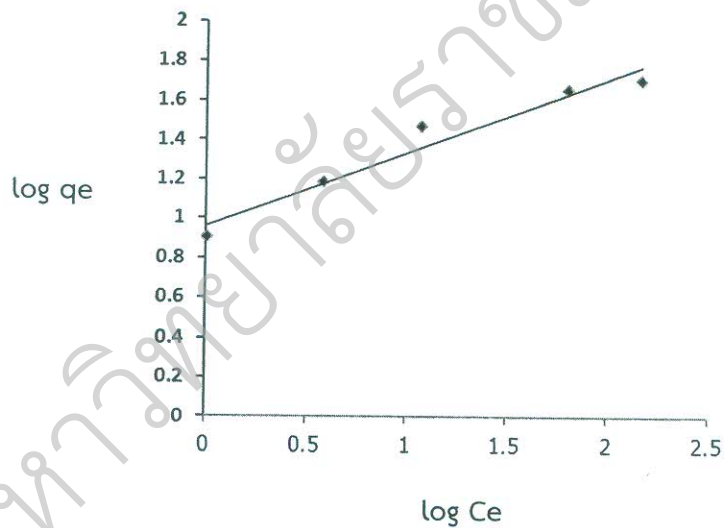
ตารางที่ 4.3 ผลการคำนวณจากไอโซเทอร์มการดูดซับตามสมการแลงเมียร์และฟรุนดลิช

Co (mg/l)	Ce (mg/l)	qe (mg/g)	Ce/qe	log Ce	log qe
25	1.028	7.991	0.129	0.012	0.903
50	3.833	15.389	0.249	0.584	1.187
100	11.8704	29.377	0.404	1.074	1.468
200	64.278	45.241	1.421	1.808	1.656
300	148.815	50.395	2.953	2.173	1.702

จากข้อมูลในตารางที่ 4.3 เมื่อนำมาเขียนกราฟแบบสมการเส้นตรง (linear equation) จะได้กราฟเส้นตรงของไอโซเทอร์มแลงเมียร์กับฟรอนตลิช ดังรูปที่ 4.8 และ 4.9



รูปที่ 4.8 ไอโซเทอร์มการดูดซับแลงเมียร์



รูปที่ 4.9 ไอโซเทอร์มการดูดซับฟรอนตลิช

จากการวิเคราะห์ผลโดยใช้สมการเส้นตรงไอโซเทอร์มแลงเมียร์และฟรอนตลิชในการทำนายผลการทดลองการดูดซับไนเตรตด้วยเบนโทไนต์ที่ปรับสภาพ จะได้พารามิเตอร์ต่างๆ ดังตารางที่ 4.4

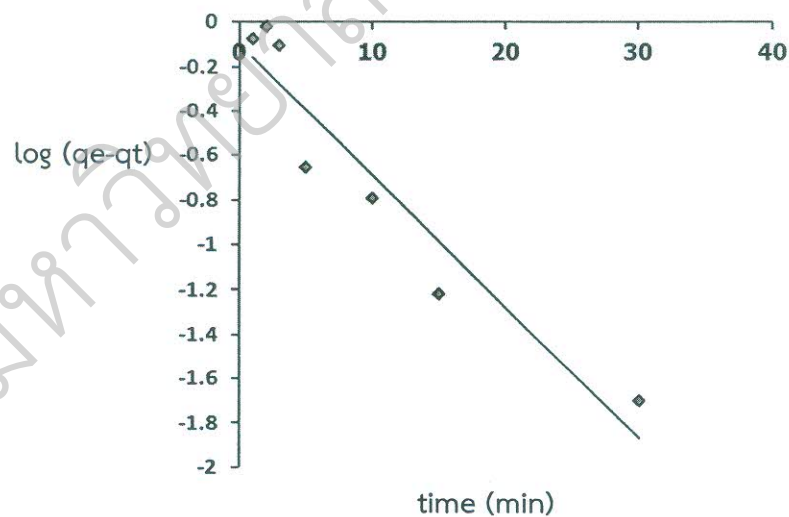
ตารางที่ 4.4 พารามิเตอร์ของไอโซเทอร์มการดูดซับไนเตรตด้วยเบนโทไนต์ที่ปรับสภาพ

ไอโซเทอร์มแลงเมียร์				ไอโซเทอร์มฟรุนดลิช		
$q_{\max}$ (mg/g)	$K_L$ (L/mg)	$R_L$	$R^2$	1/n	$K_F$ (mg/g)	$R^2$
52.91	0.11	0.258-0.148	0.999	0.37	9.14	0.954

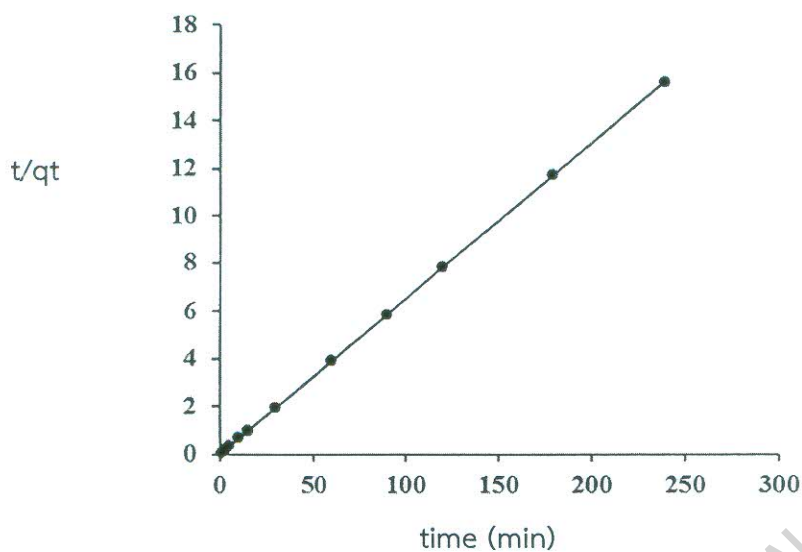
ผลการทดลองการดูดซับที่สมดุลของการกำจัดไนเตรตด้วยเบนโทไนต์ที่ปรับสภาพ ที่ความเข้มข้น 25-300 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อนำผลการทดลองมาวิเคราะห์โดยใช้สมการไอโซเทอร์ม พบว่าสมการแลงเมียร์มีค่า correlation coefficient ( $R^2$ ) เท่ากับ 0.999 ซึ่งมากกว่าของสมการฟรุนดลิช ( $R^2 = 0.954$ ) บ่งบอกว่าการดูดซับของไนเตรตด้วยเบนโทไนต์ที่ปรับสภาพ ที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) และมีค่าความสามารถในการดูดซับสูงสุด (maximum adsorption capacity:  $q_{\max}$ ) จากสมการแลงเมียร์เท่ากับ 52.91 มิลลิกรัมต่อกรัม

#### 4.8 จลนพลศาสตร์การดูดซับ

ศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับโดยใช้สมการ Pseudo first order และ Pseudo second order ในการทำนายผลการทดลอง โดยทำการศึกษาที่ความเข้มข้นของสารละลาย 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณตัวดูดซับ 0.3 กรัม เวลาที่เข้าสู่สมดุล 60 นาที อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ทำการทดลองที่เวลาต่าง ๆ 1-240 นาที ผลการทดลองเมื่อนำไปเขียนกราฟตามสมการ pseudo-first order และ pseudo-second order ดังรูปที่ 4.10 และ 4.11 และนำผลที่ได้จากสมการทั้งสองไปหาพารามิเตอร์จลนพลศาสตร์การดูดซับจะเป็นดังตารางที่ 4.5



รูปที่ 4.10 จลนพลศาสตร์การดูดซับแบบ Pseudo first order



รูปที่ 4.11 จลนพลศาสตร์การดูดซับแบบ Pseudo second order

การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับไนเตรตด้วยเบนโทไนด์ที่ปรับสภาพ ที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เวลา 1-240 นาที จะได้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 จลนพลศาสตร์การดูดซับไนเตรตด้วยเบนโทไนด์ที่ปรับสภาพ

จลนพลศาสตร์การดูดซับ	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/L)
	200
$q_e$ (exp) (mg/g)	15.39
Pseudo-first order	
$q_e$ (cal) (mg/g)	1.25
$k_1$ ( $\text{min}^{-1}$ )	0.13
$R^2$	0.90
Pseudo-second order	
$q_e$ (cal) (mg/g)	15.40
$k_2$ ( $\text{g} \cdot \text{mg}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ )	0.78
$R^2$	1.000

ผลการทดลองเมื่อพิจารณาจากค่า correlation coefficient ( $R^2$ ) ของจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับหนึ่งและอันดับสอง พบว่ากราฟสมการเส้นตรงจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองมี

ความเป็นเส้นตรงมากกว่าทำให้มีค่า  $R^2$  และมีค่าความสามารถในการดูดซับจากการคำนวณเท่ากับ 15.39 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่ใกล้เคียงกับค่าความสามารถในการดูดซับจากทดลอง 15.40 มิลลิกรัมต่อกรัม มากกว่าอธิบายได้ว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นการดูดซับแบบเคมี (chemical adsorption) ซึ่งการดูดซับทางเคมีจะเกี่ยวข้องกับการนำอิเล็กตรอนมาใช้ร่วมกัน หรือเกิดการเปลี่ยนของอิเล็กตรอนระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ

มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

## บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย

ในการศึกษาการกำจัดไนเตรตด้วยเบนโทไนด์ลพบุรีที่ปรับสภาพ สรุปผลการทดลองได้ดังนี้

### 1. วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันหินพัมมิชเซียสเฟอร์ไรต์

จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยวิธี FTIR พบว่าหมู่ฟังก์ชันของเบนโทไนด์ที่ปรับสภาพ พบว่ามีหมู่ซิลอกเซน (Si-O-Si) ที่สามารถแลกเปลี่ยนประจุกับสารละลายได้

2. การดูดซับไนเตรตด้วยเบนโทไนด์ลพบุรีที่ปรับสภาพ พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 6 มีประสิทธิภาพในการดูดซับดีที่สุด เวลาที่เข้าสู่สมดุลเหมาะสมอยู่ที่เวลา 60 นาที

3. การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับไนเตรตด้วยเบนโทไนด์ลพบุรีที่ปรับสภาพ พบว่าการดูดซับสารละลาย สามารถอธิบายผลการทดลองได้ด้วยไอโซเทอร์มแลงเมียร์ บ่งบอกว่าเป็นการดูดซับทางแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption) และจากค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากสมการแลงเมียร์ คือ ปัจจัยการแยกพบว่ามีค่าปัจจัยการแยกน้อยกว่า 1 ซึ่งบ่งบอกว่าเป็นการดูดซับที่ดี

4. การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับไนเตรตด้วยเบนโทไนด์ลพบุรีที่ปรับสภาพ อธิบายได้ด้วยจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองบ่งบอกว่าเป็นการดูดซับทางเคมี (chemisorption)

5. จากข้อมูลการทดลองสรุปได้ว่าเบนโทไนด์ที่ปรับสภาพมีประสิทธิภาพในการกำจัดไนเตรตได้ดี

## เอกสารอ้างอิง

- Cengeloglu, Y., Tor, A., Ersoz, M., Arslan, G., (2006). Removal of nitrate from aqueous solution by using red mud. *Separation and Purification Technology*. 51: 374-378.
- Della Rocca, C., Belgiorno, V., Meriç, S. (2007). Overview of in-situ applicable nitrate removal Processes. *Desalination*. 204 : 46-62.
- Dogan, M., Abak , H., Alkan, M. (2008). Biosorption of Methylene Blue from Aqueous Solutions by Hazelnut Shells: Equilibrium, Parameters and Isotherms. *Water, Air, and Soil Pollution journal*. 192 : 141-153.
- Faust, S.D. and Aly, O.M. (1987). *Adsorption Process Water Treatment*. Butterworths, Boston.
- Hafshejani, L.D., Hooshmanda, A., Naseri, A.A., Mohammadi, A.S., Abbasi, F., Bhatnagar, A. (2006). Removal of nitrate from aqueous solution by modified sugarcane bagasse biochar. *Ecological Engineering*. 95 : 101-111.
- Hekmatzadeh, AA., Karimi-Jashani, A., Talebbeydokhti, N. and Kløve, B. (2012). Modeling of nitrate removal for ion exchange resin in batch and fixed Bed experiments. *Desalination*. 284 : 22-31.
- Hendricks, D. (2006). *Water Treatment Unit Processes*. Taylor and Francis Group, Boca Raton. Nur, T., Shim, W. G.
- Loganathan, P., Vigneswaran, S, Kandasamy. J. (2015). Nitrate removal using PuroLite A520E ion exchange resin: batch and fixed-bed column adsorption modeling. *International Journal of Environmental Science and Technology*. 12:1311-1320.
- Pornpimol Varathorn. (1995). Nitrate Removal from Ground water by The Combined Process of Ion Exchange and Biological Denitrification. Doctoral dissertation, Asian Institute of Technology.
- Samatya, S., Kabay, N., Yuksel, U., Arda, M., Yuksel, M. (2006). Removal of nitrate from Aqueous solution by nitrate selective ion exchange resins. *Reactive & Functional. Polymers Journal*. 66 : 1206-1214.
- Wang, Q., Feng, C., Zhao, Y., Hao, C. (2009). Denitrification of nitrate contaminated groundwater with a fiber-based biofilm reactor. *Bioresource Technology*. 100: 2223-2227.
- Winneberger, J.H. (1982). *Nitrogen*. Public Health, and the Environment, Ann Arbor Science Publishers Inc., Ann Arbor, Michigan.

จිරศักดิ์ อัจฉรวงศ์ฤทธิ. (2547). การกำจัดไนเตรทจากน้ำทิ้งที่บำบัดแล้วโดยวิธีการแลกเปลี่ยนไอออน. วิศวกรรมมหาบัณฑิต วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์  
ดินเบนโทไนท์. (2559). การใช้ประโยชน์แร่ดินเบนโทไนท์ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ.  
<http://www.siliconclay.com/siliconclay.html>.

บทบาทน้ำบาดาลในภาคเกษตรกรรมในพื้นที่ด้านเหนือของที่ราบภาคกลางตอนล่าง. (2553).  
หน่วยปฏิบัติการวิจัยระบบการจัดการแหล่งน้ำจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

นิรมล วรสิษฐ์.(2547).การใช้เบนทอไนต์ฟอกสีคล้ำในน้ำมันปาล์มที่ใช้ทอดแล้วหลายครั้ง  
วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต เคมีอินทรีย์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ยุวรัตน์ เงินเย็น (มปป.) การตรวจสอบสมบัติการดูดซับสีย้อมผ้าไหมที่ปนเปื้อนในน้ำของแร่ดิน  
เบนโทไนต์.รายงานการวิจัยโครงการพัฒนานักวิจัยใหม่ มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

ศรีสมร สิทธิกาญจนกุล. (2550). สารประกอบไนโตรเจน. คู่มือการปฏิบัติงาน การวิเคราะห์คุณภาพ  
น้ำ (Nitrogen Compounds) กลุ่มงานเคมี ส่วนวิจัยและพัฒนาด้านวิทยาศาสตร์ สำนักวิจัย  
และพัฒนา. กรมชลประทาน.

เทพวิฑูรย์ ทองศรี.(2555).ผลกระทบของไนโตรเจนต่อสิ่งแวดล้อม.วารสารกรมวิทยาศาสตร์บริการ  
ปีที่ 60 ฉบับที่ 190.



ภาคผนวก

มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

## ภาคผนวก ก

## การดูดซับไนเตรตด้วยเบนโทไนด์ปรับสภาพ

ตารางที่ ก.1 ผลของค่าความเป็นกรด-ด่างในการดูดซับไนเตรตด้วยเบนโทไนด์ปรับสภาพ

ค่าความเป็นกรด-ด่าง	ร้อยละการดูดซับ
2	89.11
3	89.23
4	89.72
5	91.39
6	91.77
7	89.81
8	89.77
9	89.57
10	89.42
11	89.2
12	88.12

ตารางที่ ก.2 ผลของเวลาในการดูดซับไนเตรตด้วยเบนโทไนด์ปรับสภาพ

เวลา (นาที)	ความสามารถในการดูดซับ (มก./ก.)
1	14.55
2	14.44
3	14.61
5	15.17
10	15.23
15	15.33
30	15.37
60	15.39
90	15.39
120	15.39
180	15.39
240	15.39

ตารางที่ ก.3 ผลของความเข้มข้นสารละลายในการดูดซับไนเตรตด้วยเบนโทไนด์ปรับสภาพ

ความเข้มข้นสารละลาย (มก./ล.)	ความสามารถในการดูดซับ (มก./ก.)
25	7.99
50	15.38
100	29.37
200	45.24
300	50.39

ตารางที่ ก.4 ผลของอุณหภูมิในการดูดซับไนเตรตด้วยเบนโทไนด์ปรับสภาพ

อุณหภูมิ (เคลวิน)	ความสามารถในการดูดซับ (มก./ก.)
293	2.36
303	4.81
313	6.09