



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วจากสารละลาย

โดยใช้อิฐมวลเบาเป็นตัวดูดซับ

Adsorption Efficiency of Lead(II) Ion from Aqueous Solution

by using an Aerated Concrete as Adsorbent

วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากงบประมาณรายได้คณะ

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2558

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

2558

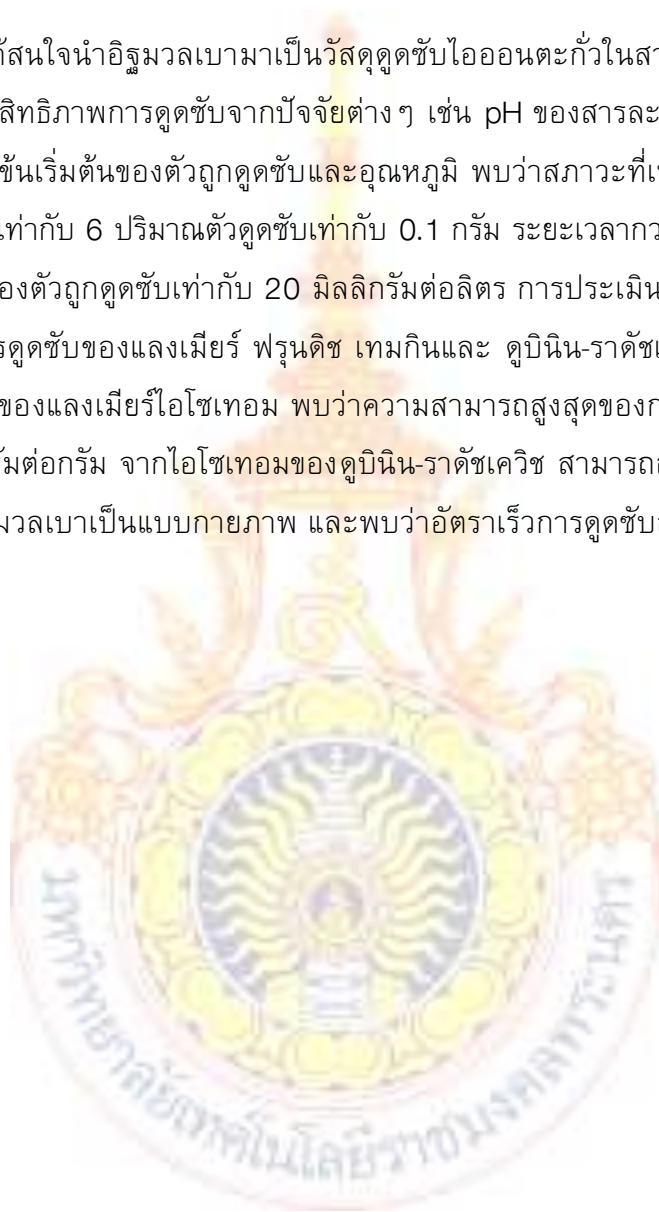
ชื่อเรื่อง : ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วจากสารละลายโดยใช้อิฐมวลเบาเป็นตัวดูดซับ

ผู้วิจัย : วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ

พ.ศ. : 2558

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้สนใจนำอิฐมวลเบามาเป็นวัสดุดูดซับไอออนตะกั่วในสารละลายโดยวิธีแบบพาส์ โดยทำการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับจากปัจจัยต่างๆ เช่น pH ของสารละลาย ปริมาณตัวดูดซับ ระยะเวลา ความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับและอุณหภูมิ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับไอออนตะกั่วคือ pH เท่ากับ 6 ปริมาณตัวดูดซับเท่ากับ 0.1 กรัม ระยะเวลาจนเท่ากับ 60 นาทีและความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับเท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร การประเมินรูปแบบการดูดซับโดยอาศัยแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์ ฟรุนดลิช เทมกินและ ดูปินิน-ราดซ์เควิช พบว่าการดูดซับสอดคล้องกับสมการของแลงเมียร์ไอโซเทอม พบว่าความสามารถสูงสุดของการดูดซับแบบชั้นเดียวเท่ากับ 3.99 มิลลิกรัมต่อกรัม จากไอโซเทอมของดูปินิน-ราดซ์เควิช สามารถอธิบายได้ว่าการดูดซับไอออนตะกั่วด้วยอิฐมวลเบาเป็นแบบกายภาพ และพบว่าอัตราเร็วการดูดซับสอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับสองเทียม



Title : Adsorption efficiency of lead(II) ion from aqueous solution by using an aerated concrete as adsorbent

Researcher : Woravith Chansuvarn, Ph.D.

Year : 2014

ABSTRACT

In this study, autoclaved aerated concrete (ACC), were investigated as low-cost and simple adsorbents for removal of Pb(II) from aqueous solution. The adsorption of Pb(II) was carried out by batch experiments as a function of solution pH, adsorbent dosage, contact time, initial Pb(II) concentration and temperature. The experimental data were analyzed by the Langmuir, Freundlich, Temkin and D-R isotherm models. The Langmuir isotherm model is more suitable. The monolayer adsorption capacity of ACC was found to be 3.99 mg g^{-1} . The adsorption of Pb(II) onto ACC was physical in nature. The kinetic studies of Pb(II) demonstrated that the adsorption of Pb(II) onto ACC adsorbents followed a pseudo second-order model with a good correlation.

Keywords: Firebrick, Lead, Autoclaved aerated concrete, Adsorption isotherm, Kinetics,



สารบัญ

	หน้า
บคคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บคคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญรูป	ฉ
สารบัญตาราง	ช
บทที่ 1 บทนำ	
ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
ทฤษฎีการดูดซับ	3
การดูดซับทางกายภาพ	3
การดูดซับทางเคมี	4
สมดุลการดูดซับ	5
ไอโซเทอมของการดูดซับ	8
ทฤษฎีการดูดซับของ BET	10
จลนพลศาสตร์การดูดซับ	11
โลหะตะกั่ว	13
อิฐมวลเบา	14
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	16
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	
เครื่องมือ	17
สารเคมี	17
วิธีการทดลอง	17
บทที่ 4 ผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง	
เอกลักษณ์ทางกายภาพของอิฐมวลเบา	21
ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับโลหะตะกั่ว	22
ไอโซเทอมการดูดซับ	25

ผลการศึกษาจนผลศาสตร์	31
บทที่ 5 อภิปรายผลการวิจัย	33
เอกสารอ้างอิง	34
ภาคผนวก	36



กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัย จากงบประมาณรายได้ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ประจำปี พ.ศ. 2558

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่อนุเคราะห์เครื่องมือวิเคราะห์และอุปกรณ์ต่าง ๆ จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ อิ่มยิ้ม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อนุเคราะห์เครื่องมือวิเคราะห์และคำแนะนำ จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ผู้วิจัยขอขอบคุณเพื่อน พี่ และน้องทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ ตลอดจนช่วยแก้ไขปัญหากจนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ดร.วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ



สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1 ประเภทไอโซเทอมการดูดซับพื้นฐาน 5 ชนิด	6
รูปที่ 2.2 ประเภทไอโซเทอมของการดูดซับของ IUPAC (IUPAC, 1985)	6
รูปที่ 3.1 อิฐมวลเบา	18
รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR	21
รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM	22
รูปที่ 4.3 ผลของ pH ของสารละลายต่อการดูดซับโลหะตะกั่ว (สภาวะการทดลองดังนี้ 20 mg/L Pb, ปริมาณตัวดูดซับ 0.1 g, ระยะเวลาการดูดซับ 30 นาที, อุณหภูมิ 25°C และปริมาตรของสารละลาย 10 mL)	23
รูปที่ 4.4 ผลของปริมาณตัวดูดซับต่อการดูดซับโลหะตะกั่ว (สภาวะการทดลองดังนี้ 20 mg/L Pb, pH 6, ระยะเวลาการดูดซับ 30 นาที, อุณหภูมิ 25°C และปริมาตรของสารละลาย 10 mL)	23
รูปที่ 4.5 ผลของเวลาต่อการดูดซับโลหะตะกั่ว (สภาวะการทดลองดังนี้ 20 mg/L Pb, pH 6, ปริมาณตัวดูดซับ 0.1 g, อุณหภูมิ 25°C และปริมาตรของสารละลาย 10 mL)	24
รูปที่ 4.6 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนตะกั่วต่อการดูดซับ (สภาวะการทดลองดังนี้ เวลา 60 นาที, pH 6, ปริมาณตัวดูดซับ 0.1 g, อุณหภูมิ 25°C และปริมาตรของสารละลาย 10 mL)	25
รูปที่ 4.7 กราฟไอโซเทอมของแลงเมียร์	26
รูปที่ 4.8 กราฟไอโซเทอมของ Freundlich	27
รูปที่ 4.9 กราฟไอโซเทอมของ Temkin	28
รูปที่ 4.10 กราฟไอโซเทอมของ Dubinin-Radushkevich	29
รูปที่ 4.11 กราฟจลพลศาสตร์การดูดซับไอออนตะกั่วด้วยอิฐมวลเบา (ก) pseudo-first-order, (ข) pseudo-second-order และ (ค) intra-particle diffusion	31

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สมบัติของการดูดซับทางเคมีและทางกายภาพ	4
ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบธาตุในอิฐมวลเบาด้วยเทคนิค XRF	21
ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET	22
ตารางที่ 4.3 ไอโซเทอมการดูดซับของ Langmuir, Freundlich, Temkin และ Dubinin-Radushkevich สำหรับการดูดซับไอออนตะกั่วด้วยอิฐมวลเบา	30
ตารางที่ 4.4 จนพลศาสตร์การดูดซับไอออนตะกั่วด้วยอิฐมวลเบา	32



บทที่ 1

บทนำ

ความสำคัญและที่มาของปัญหา

การปนเปื้อนโลหะหนักในน้ำไม่ว่าจะเป็นแหล่งน้ำผิวดิน น้ำบาดาลหรือน้ำทิ้งอุตสาหกรรม เป็นปัญหาที่สำคัญต่อสิ่งแวดล้อม สิ่งมีชีวิตและมนุษย์ เนื่องจากโลหะหนักย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติได้ช้าและน้อยมาก ดังนั้นเมื่อมีการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมจะทำให้เกิดการสะสม เมื่อระยะเวลาผ่านไปปริมาณโลหะหนักที่สะสมอาจเพิ่มมากขึ้นและมีความเป็นพิษมากขึ้นด้วย ตะกั่ว (Pb) เป็นโลหะหนักชนิดหนึ่งที่มีอันตรายสูง การแพร่กระจายอาจเกิดจากหลายแหล่ง เช่นน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการใช้ตะกั่วในกระบวนการผลิต อุตสาหกรรมสี แบตเตอรี่ ขยะอิเล็กทรอนิกส์ และอื่นๆ การปนเปื้อนสารตะกั่วในแหล่งน้ำเป็นอันตรายอย่างยิ่ง เนื่องจากจะเกิดการแพร่กระจายได้ง่าย การสะสมของตะกั่วในแหล่งน้ำยังส่งผลกระทบต่อห่วงโซ่อาหาร สัตว์น้ำ พืชน้ำ และจะส่งผลกระทบต่อมนุษย์ ความเป็นพิษของสารตะกั่วเป็นอันตรายที่ร้ายแรง เมื่อเข้าไปสะสมในร่างกายของมนุษย์ปริมาณมากอาจทำให้ร่างกายทำงานผิดปกติมีผลถึงขั้นพิการและเสียชีวิตได้ ปัญหาการปนเปื้อนของสารตะกั่วในลำห้วยคลิตี้ อำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี เป็นตัวอย่างกรณีศึกษาที่สำคัญ สาเหตุปัญหาเกิดจากการรั่วไหลของหางแร่จากบ่อกักเก็บตะกอนกากแร่ของโรงแต่งแร่คลิตี้ของบริษัทเอกชน ได้ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชนในหมู่บ้านคลิตี้ล่างจำนวนมาก จากผลรายงานพบว่าระดับตะกั่วที่ปนเปื้อนในดิน พืช ผัก มีระดับตะกั่วสูงเกินค่ามาตรฐาน และยังส่งผลกระทบต่อเด็กที่เกิดขึ้นพบว่ามียุติกาจำนวนมากพบพัฒนาการผิดปกติ สาเหตุหนึ่งที่สำคัญมาจากการใช้น้ำอุปโภคบริโภคของประชาชน เนื่องจากความเป็นพิษสูงของโลหะตะกั่วองค์การอนามัยโลก (WHO) ได้กำหนดปริมาณมากที่สุดที่มีได้ (maximum permissible limit) ในน้ำดื่มต้องไม่เกิน 3 – 10 ไมโครกรัมต่อลิตร (Shahid et al. 2012) สำหรับประเทศไทยได้กำหนดปริมาณตะกั่วในมาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรมไว้ไม่เกิน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตร

วิธีการกำจัดโลหะตะกั่วในน้ำเสียหรือน้ำทิ้งอุตสาหกรรมมีอยู่ด้วยกันหลายวิธี เช่น การแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchange) การกรองแบบอัลตราฟิลเตรชัน (ultrafiltration) กระบวนการแยกด้วยไฟฟ้าผ่านเยื่อกรอง (electrodialysis) กระบวนการออสโมซิสผันกลับ (reverse osmosis) กระบวนการตกตะกอนและตกตะกอนด้วยเคมี (precipitation and coagulation) และกระบวนการดูดซับ (adsorption) (Fu and Wang, 2010) ซึ่งแต่ละวิธีมีข้อดีข้อเสียแตกต่างกันไป แต่วิธีการดูดซับเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวาง เนื่องจากการลงทุนไม่สูง แต่มีข้อจำกัดหลายประการเช่นกัน ดังนั้นการพัฒนาตัวดูดซับชนิดใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูงและต้นทุนต่ำ วิธีการดูดซับเป็น

ปรากฏการณ์เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวของแข็งโดยเป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายระหว่างพื้นที่ผิวของของแข็ง การดูดซับจะเกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสารหรือว่าความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นที่ผิวกับพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่าง 2 สภาวะใดๆ อนุภาคสารที่ถูกดูดซับเรียกว่า สารถูกซับ (adsorbate) ส่วนสารที่ทำหน้าที่เป็นสารดูดซับเรียกว่า ตัวดูดซับ (adsorbent) ตัวดูดซับที่นิยมนำมาใช้ในการบำบัดโลหะตะกั่วในน้ำเสียมีอยู่หลายประเภท แม้ว่าถ่านกัมมันต์จะเป็นที่นิยมในการใช้เป็นตัวดูดซับ แต่เนื่องจากมีราคาสูงและมีการสูญเสียเกิดขึ้นระหว่างการกลับคืนสภาพ (regeneration) ได้มีการพัฒนาถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรหรือกากวัสดุอุตสาหกรรม (Giraldo-Gutiérrez and Moreno-Piraján, 2008; Mouni et al., 2011; Lo et al., 2012; Cechinel et al., 2014; Owamah, 2014, Jiang et al., 2009; Das et al., 2013) การนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรหรือของเสียทางอุตสาหกรรมได้นำมาเป็นสารดูดซับหรือปรับปรุงพื้นผิวเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ เช่น ดินเหนียวหรือดิน (Jiang et al., 2009; Das et al., 2013) ไม้ไผ่ (Lo et al., 2012) กากชา (Amarasinghe and Williams, 2007) เปลือกข้าว (Wang, 2008; Naiya et al., 2009) เปลือกผลไม้ (Zein et al., 2010; Chong et al., 2013)

ในงานวิจัยนี้ได้สนใจนำอิฐมวลเบา (aerated concrete) มาเป็นวัสดุดูดซับไอออนตะกั่วในสารละลายโดยวิธีแบทช์ (batch) โดยทำการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับจากปัจจัยต่างๆ เช่น pH ปริมาณตัวดูดซับ (adsorption dose) เวลา (equilibrium time) และอุณหภูมิ (temperature) การศึกษาอันดับจลนพลศาสตร์การดูดซับ (adsorptive kinetics) และศึกษาแบบจำลองการดูดซับ (adsorption isotherm)

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วโดยใช้อิฐมวลเบาเป็นตัวดูดซับ
- 2) เพื่อศึกษากลไกการดูดซับไอออนตะกั่วโดยใช้อิฐมวลเบา

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) ประสิทธิภาพการดูดซับของอิฐมวลเบาสำหรับการกำจัดไอออนตะกั่วในสารละลาย
- 2) กลไกการดูดซับไอออนตะกั่วโดยใช้อิฐมวลเบา

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีการดูดซับ

การดูดซับ (adsorption) หมายถึง การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารที่พื้นผิวของสารดูดซับ (adsorbate) ที่สัมผัสโดยตรงกับสารดูดซับ (adsorbent) โดยสารที่มีพลังงานอิสระที่ผิว (surface free energy) ต่ำจะถูกดูดซับได้ แต่สารที่มีพลังงานอิสระที่ผิวสูงจะไม่ถูกดูดซับ กระบวนการดูดซับเกิดขึ้นเมื่อมีการสัมผัสกันโดยตรงระหว่างสารดูดซับกับสารดูดซับ ปริมาณการดูดซับขึ้นกับหลายปัจจัย เช่น ธรรมชาติของสารดูดซับกับสารดูดซับ พื้นที่ผิวของตัวดูดซับ พลังงานกระตุ้นของตัวดูดซับ และสภาวะการดูดซับ อาทิ อุณหภูมิ ความเข้มข้น ความดัน และพลังงานศักย์ของอันตรกิริยาระหว่างสารที่ถูกดูดซับ (อาจเป็นของแข็งของเหลวหรือแก๊ส) กับสารดูดซับ (ซึ่งอาจเป็นของเหลวหรือของแข็ง) ดังนั้นเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความดันหรือความเข้มข้น และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะทำให้ปริมาณการดูดซับเปลี่ยนแปลง

การดูดซับเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณผิวสัมผัส (interface) โดยที่มีภูมิภาคหนึ่งเป็นของแข็งเสมอ และเป็นภูมิภาคคายความร้อน โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเกาะอยู่บนผิวหน้าของของแข็งของสารดูดซับ ดังนั้นการดูดซับด้วยของแข็งจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวสัมผัสของของสารดูดซับ การดูดซับจะเกิดขึ้นเนื่องจากแรงดึงดูดที่พื้นผิวของของแข็งซึ่งเป็นสารดูดซับมีค่ามากกว่าค่าพลังงานจลน์ของโมเลกุลของของเหลวนั้น การดูดซับบนผิวของแข็ง แบ่งออกได้ตามแรงที่ดูดซับระหว่างพื้นผิวโมเลกุลเป็น 2 ชนิด คือ การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี

การดูดซับทางกายภาพ

การดูดซับทางกายภาพ (physical adsorption หรือ physisorption) อาศัยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าอย่างอ่อนๆ เรียกว่าแรงแวนเดอร์วาลส์ (van der Waals) หรือพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bond) แรงดึงดูดระหว่างสารที่อยู่ในของเหลวกับสารดูดซับมีมากกว่าแรงดึงดูดระหว่างสารในของเหลวกับของเหลว ทำให้สารที่อยู่ในของเหลวเข้าติดอยู่ที่สารดูดซับแทน การดูดซับทางกายภาพไม่มีแรงกระตุ้น (activation energy) มาเกี่ยวข้อง ความร้อนของการดูดซับมีค่าน้อยการกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับได้ง่ายและการดูดซับเกิดขึ้นกันได้หลายชั้น (multilayer) โดยแต่ละชั้นจะซ้อนทับกันอยู่เหนือชั้นที่เกิดขึ้นก่อน โดยจำนวนชั้นจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของสารและเกิดขึ้นได้ไม่ดีที่อุณหภูมิต่ำ

การดูดซับทางเคมี

การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption หรือ chemisorption) เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีจากตัวถูกดูดซับเดิม คือ มีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมและกลุ่มอะตอมเดิม แล้วมีการจัดเรียงอะตอมขึ้นใหม่โดยมีพันธะเคมีที่แข็งแรงแรงที่ใช้ดูดซับเป็นพันธะโคเวเลนต์ มักเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตของสารที่ถูกดูดซับ มีพลังงานกระตุ้น (activation energy) เข้ามาเกี่ยวข้อง ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงการกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับได้ยากและการดูดซับเป็นแบบขั้นเดียว

ตารางที่ 2.1 สมบัติของการดูดซับทางเคมีและทางกายภาพ

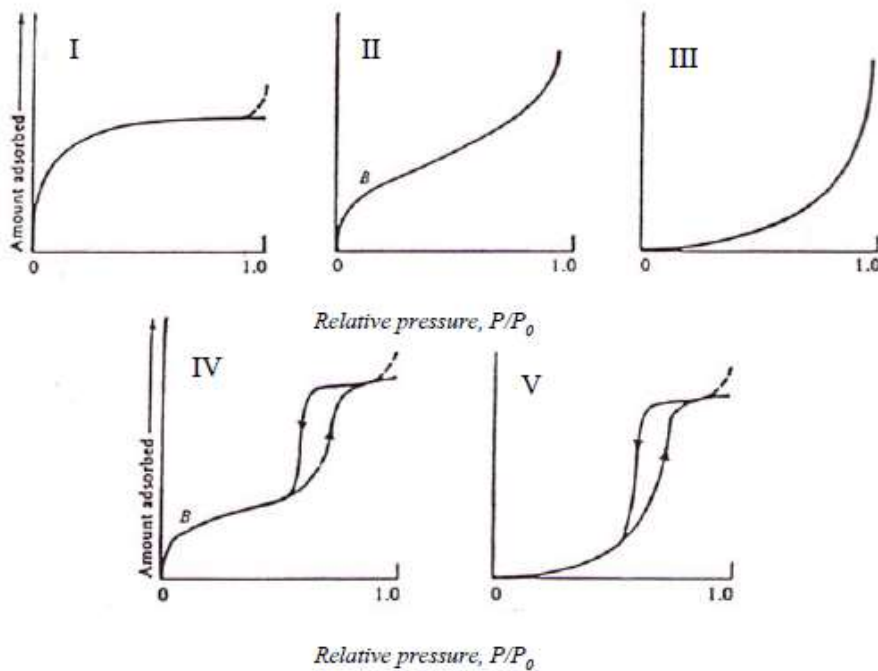
การดูดซับทางเคมี	การดูดซับทางกายภาพ
ค่าความร้อนของการดูดซับ 50-400 kJ/mol	ค่าความร้อนของการดูดซับประมาณ 20 kJ/mol หรือน้อยกว่า
เกิดได้ที่อุณหภูมิสูง	เกิดได้ที่อุณหภูมิต่ำ
ไม่เกิดการผันกลับ	เกิดการผันกลับได้เป็นส่วนใหญ่
เกิดการดูดซับเพียงชั้นเดียว	เกิดการดูดซับหลายชั้น
มีพลังงานก่อกัมมันต์เกี่ยวข้อง	ไม่มีพลังงานก่อกัมมันต์เกี่ยวข้องในกระบวนการ
แรงดึงดูดของสารดูดซับกับสารที่ถูกดูดซับเป็นแรงดึงดูดที่แข็งแรง (เกิดพันธะเคมี)	แรงดึงดูดของสารดูดซับกับสารที่ถูกดูดซับเป็นแรงดึงดูดอย่างอ่อน ๆ (แรงแวนเดอร์วาลส์)

นอกจากการแบ่งประเภทการดูดซับเป็นการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมีแล้ว ยังอาจแบ่งประเภทการดูดซับตามกลไกเพิ่มเติมได้อีก คือ การดูดซับแบบแลกเปลี่ยนประจุ (exchange adsorption) เป็นการดูดซับที่อาศัยการดูดติดด้วยแรงไฟฟ้าสถิตบริเวณผิว เมื่อตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมีประจุและเกิดแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับเป็นไอออนที่มีประจุกับตัวดูดซับที่มีประจุตรงกันข้าม และการดูดซับแบบเฉพาะเจาะจง (specific adsorption) เกิดขึ้นเนื่องจากแรงยึดเหนี่ยวของโมเลกุลตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับที่มีหมู่ฟังก์ชันอยู่บนผิว แต่ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของตัวดูดซับ พฤติกรรมการดูดซับนี้จะมีค่าพลังงานในการยึดเหนี่ยวอยู่ระหว่างพลังงานของการดูดซับทางกายภาพและเคมี

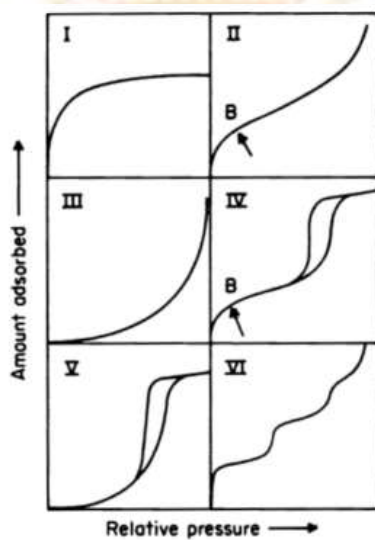
สมดุลการดูดซับ

สมดุลของการดูดซับจะอาศัยความสัมพันธ์ที่สภาวะสมดุลของสมดุลของมวลสาร ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในวัฏภาคของเหลวกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับบนวัฏภาคของแข็ง กระบวนการดูดซับจะเกิดขึ้นต่อไปเรื่อยๆ โดยสารที่ถูกดูดซับและมีการคายการดูดซับ (desorption) ไปพร้อมกัน ซึ่งสมดุลจะเกิดขึ้นเมื่ออัตราการดูดซับและการคายการดูดซับเท่ากัน การวัดปริมาณสารที่ถูกดูดซับที่อุณหภูมิคงที่หนึ่งๆ โดยการแสดงด้วยรูปภาพ เรียกว่า ไอโซเทอมการดูดซับ (adsorption isotherm) ซึ่งเป็นตัวแทนในการอธิบายการกระจายตัวของตัวถูกดูดซับระหว่างวัฏภาคของเหลวและของแข็ง โดยอัตราการกระจายตัวนี้สามารถวัดได้ที่จุดสมดุลและจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับหรือคุณสมบัติของตัวถูกดูดซับ เมื่อเกิดการดูดซับขึ้น โมเลกุลของตัวที่ถูกดูดซับจะเข้าครอบครองทุกตำแหน่งที่สามารถจะเกิดการดูดซับจนเต็มทุกตำแหน่ง และจะทำให้แรงดึงดูดของผิวตัวดูดซับอ่อนลงเนื่องจากตำแหน่งพื้นผิวมีน้อยลง แต่อาจยังคงสามารถดูดซับโมเลกุลตัวถูกดูดซับได้โดยทำให้เกิดเป็นการดูดซับชั้นที่สองหรือชั้นที่สามเกิดขึ้น ซึ่งอาจเกิดการดูดซับชั้นที่สองก่อนที่ชั้นแรกจะเต็มทุกตำแหน่งและในบางตำแหน่งอาจจะดูดซับต่อหลายชั้นซ้อนสูงขึ้น รูปร่างของไอโซเทอมการดูดซับจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการดูดซับและปริมาณของสารถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับ

ไอโซเทอมการดูดซับมีหลายแบบแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับชนิดของสารดูดซับ ชนิดสารที่ถูกดูดซับ และอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลกับพื้นผิวของสารดูดซับ ในปี ค.ศ.1940 ได้มีการจำแนกไอโซเทอมการดูดซับของสมดุลวัฏภาคแก๊สกับของแข็งขึ้นโดย Brunauer, Deming, Deming และ Teller เรียกว่า BDDT ได้แบ่งลักษณะไอโซเทอมการดูดซับออกเป็น 5 แบบ ดังรูปที่ 2.1 (Wang et al., 2012) ซึ่งการแบ่งประเภทไอโซเทอมการดูดซับของ BDDT ได้เป็นหลักในการแบ่งประเภทไอโซเทอมการดูดซับของ IUPAC และปัจจุบันได้มีการเสนอประเภทไอโซเทอมการดูดซับเพิ่มอีก 1 ประเภท ซึ่งทำให้ไอโซเทอมการดูดซับของ IUPAC สมบูรณ์ เป็น 6 ประเภท ดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.1 ประเภทไอโซเทอมการดูดซับพื้นฐาน 5 ชนิด (Wang et al., 2012)



รูปที่ 2.2 ประเภทไอโซเทอมของการดูดซับของ IUPAC (IUPAC, 1985)

ไอโซเทอมของการดูดซับทางกายภาพแต่ละประเภทอธิบายได้ดังนี้

- แบบ I เป็นไอโซเทอมของการดูดซับลักษณะเฉพาะของสารดูดซับที่มีขนาดเล็กกว่า 2 nm (microporous adsorbent) การดูดซับส่วนใหญ่จะเป็นการดูดซับในรูพรุนขนาดเล็ก ลักษณะไอโซเทอมจะเป็นโค้งเข้า (concave) หาแกน P/P_0 สารดูดซับมีขนาดใหญ่กว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่มาก สารดูดซับมีพื้นที่ผิวภายนอกน้อย ดังนั้นการดูดซับจะถูกจำกัดเนื่องจากไม่สามารถเข้าไปยังรู

พอร์ขนาดเล็กลงได้ การบรรจุโมเลกุลลงในรูขนาดเล็กลงของสารดูดซับนี้ได้อย่างสมบูรณ์ และมีการอึดตัวที่แน่นอนโดยเกิดการเรียงเป็นชั้นเดียว ไอโซเทอมแบบนี้บางครั้งเรียกว่า Langmuir หรือ L-shape isotherm

- แบบ II เป็นรูปแบบปกติของไอโซเทอมที่เกิดในสารดูดซับที่ไม่มีรูพอร์ (nonporous) หรือตัวดูดซับที่มีรูพอร์ขนาดใหญ่ (microporous) โดยในแบบนี้จะเกิดการดูดซับที่ต่อเนื่องจากการเรียงตัวโมเลกุลเพียงชั้นเดียว (monolayer) อย่างสมบูรณ์ก่อนจึงเกิดเป็นหลายชั้น (multilayer) ในต่อมา จากไอโซเทอมตรงบริเวณจุดเปลี่ยนโค้งหรือจุด B (break through) จะแสดงถึงการดูดซับแบบชั้นเดียวนั้นเสร็จสมบูรณ์ จากนั้นที่ความดันสูงขึ้นจะเกิดการดูดซับที่ต่อเนื่องจากชั้นแรกต่อไป และจะเกิดการดูดซับเสร็จสมบูรณ์ที่ความดันย่อยสูง ๆ ไอโซเทอมแบบนี้บางครั้งเรียกว่า Sigmoid หรือ S-shape isotherm)
- แบบ III เป็นรูปแบบของการดูดซับที่มีแรงดึงดูดที่อ่อนระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ แต่แรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับด้วยกันมีค่อนข้างมาก จากกรณีนี้จะทำให้เกิดการรวมตัวกันของตัวถูกดูดซับก่อนที่การดูดซับชั้นแรกจะเสร็จสมบูรณ์ ในแบบที่ III จะมีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวสารดูดซับมากกว่าแบบ II ซึ่งเส้นกราฟจะโค้งออก (convex) จากแกน P/P_0 จำนวนสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างไม่จำกัด ซึ่งเป็นแบบพิเศษ
- แบบ IV เป็นไอโซเทอมของการดูดซับที่มีรูพอร์ที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลที่ถูกดูดซับมาก จึงเกิดการเรียงตัวของโมเลกุลที่ผิวของสารดูดซับเป็นสองชั้น (bilayer) ความชันของกราฟเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อความดันเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าตัวถูกดูดซับเริ่มเข้าเติมใน รูพอร์อีกครั้ง และการเปลี่ยนระดับของกราฟเมื่อความดันเพิ่มขึ้นอีกเป็นผลมาจากการควบแน่น ภายในรูพอร์ของของแข็ง (Capillary Condensation in Pores) โดยลักษณะของกราฟในช่วงแรกจะเหมือนกับชนิดที่ 2 ซึ่งจุดเปลี่ยนโค้ง จะแสดงถึงการดูดซับชั้นแรกอย่างสมบูรณ์
- แบบ V เป็นไอโซเทอมรูปแบบพิเศษ มีความคล้ายกับแบบ III เกิดขึ้นเมื่อแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับมีค่าน้อย ซึ่งจะพบในสารดูดซับที่มีขนาดรูพอร์ในช่วงเดียวกับไอโซเทอมแบบ IV สำหรับไอโซเทอมแบบ III และแบบ V นี้จะคำนวณหาพื้นที่ผิวได้ยากเนื่องจากชั้นการดูดซับชั้นที่ 2 จะถูกสร้างขึ้นก่อนที่ชั้นแรกจะเสร็จสมบูรณ์
- แบบ VI เป็นการดูดซับแบบ multilayer เป็นชั้น ๆ ขึ้นบนผิวของ nonporous โดยความสูงของแต่ละชั้นจะเป็นความสามารถของ monolayer ในชั้นนั้น ๆ

ไอโซเทอมของการดูดซับ

ไอโซเทอมของการดูดซับ (adsorption isotherm) อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สมดุลกับจำนวนของตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ที่มีการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ สำหรับการดูดซับตัวถูกละลายบนผิวแข็งจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายที่ภาวะสมดุลที่อุณหภูมิใด ๆ

1) ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)

ในปี ค.ศ. 1916 แลงเมียร์ (Irving Langmuir) ได้เสนอไอโซเทอมแบบง่ายที่สุดโดยมีสมมติฐานคือ

- 1) ใช้สำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption)
 - 2) โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนที่แน่นอนและมีตำแหน่งของการดูดซับที่แน่นอน
 - 3) ในแต่ละโมเลกุลของสารดูดซับจะดูดซับโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น ในแต่ละตำแหน่งค่าความร้อนของการดูดซับเท่ากันและคงที่ ไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่อยู่ตำแหน่งใกล้เคียงกัน พลังงานของการดูดซับจะเหมือนกันทุก ๆ พื้นที่ของตัวดูดซับ
 - 4) โมเลกุลที่จะถูกดูดซับไม่สามารถที่จะขยายขามผิวหรือเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลข้างเคียงได้
- สมการแลงเมียร์เป็นสมการง่าย ๆ แบบจำลองเป็นพื้นฐานทางฟิสิกส์และสามารถนำมาใช้งานได้ในช่วงที่กว้าง ในขณะที่สมการของแลงเมียร์มีข้อจำกัดของการใช้งาน ได้แก่ พลังงานของการดูดซับเป็นอิสระจากระดับการควบคุม แรงที่ใช้ในการดึงดูดเป็นแรงอ่อน ๆ ที่สามารถผันกลับได้และจะใช้ได้
- ในกรณีที่ผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นแบบชั้นเดียวเท่านั้น สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์เขียนได้ดังนี้

$$q_e = \frac{q_m b C_e}{1 + b C_e} \quad \dots\dots(2.1)$$

เมื่อ q_e คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับ (mg) ต่อปริมาณของตัวดูดซับ (g) ที่ภาวะสมดุล หรือเรียกว่า หรือค่าการดูดซับที่สมดุล

q_m คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับมากที่สุด (mg/g) ที่ถูกดูดซับเพื่อสร้างแผ่นชั้นเดียว (monolayer)

b คือ ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ หรือค่าคงที่ของแลงเมียร์ (L/mg)

C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (mg/L)

สมการ 2.2 จัดรูปให้เป็นสมการเส้นตรง คือ

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{b q_m} + \frac{C_e}{q_m} \quad \dots\dots(2.2)$$

จากสมการไอโซเทอมของแลงเมียร์ (สมการ 2.3) เมื่อเขียนกราฟระหว่าง C_e/q_e กับ C_e ค่า q_m และ b หาได้จากความชัน (slope) และจุดตัดแกน (intercept) สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์ ยังอาจแสดงได้ด้วยปัจจัยของการแยกหรือค่าตัวแปรที่สภาวะสมดุล (separation factor or equilibrium parameter, R_L) ดังสมการ

$$R_L = \frac{1}{1 + bC_0} \quad \dots\dots(2.3)$$

เมื่อ C_0 คือความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับ (mg/L) โดยค่า R_L จะเป็นตัวบอกรูปร่างของไอโซเทอมว่าสอดคล้องกับการดูดซับหรือไม่ ถ้า $R_L > 1$ การดูดซับไม่ดี (unfavorable), $R_L = 1$ การดูดซับเป็นเส้นตรง (linear), $0 < R_L < 1$ การดูดซับดี (favorable) และ $R_L = 0$ การดูดซับเกิดผันกลับได้ (irreversible)

2) ไอโซเทอมแบบ Freundlich (Freundlich isotherm)

สมการของ Freundlich มีสมมติฐานของการดูดซับที่ว่าพื้นผิวของตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด (พื้นผิวของตัวดูดซับมีลักษณะขรุขระ) พื้นผิวและพลังงานมีการกระจายตัวเป็นแบบเลขชี้กำลัง ใช้ทั้งกับการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพ ไอโซเทอมแบบ Freundlich เป็นไอโซเทอมที่พัฒนาจากไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ที่เกิดบนผิวหน้าไม่เป็นเนื้อเดียว (heterogeneous) โดยที่การดูดซับบนพื้นผิวของตัวถูกดูดซับจะเป็นแบบหลายชั้น (multilayer)

$$q_e = K_F C_e^{\frac{1}{n}} \quad \dots\dots(2.4)$$

$$\log q_e = \frac{1}{n} \log C_e + \log K_F \quad \dots\dots(2.5)$$

เมื่อ C_e คือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่สมดุล (mg/L)

q_e คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับ (mg) ต่อปริมาณของตัวดูดซับ (g) ที่ภาวะสมดุล

K_F คือค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น (mg/g)

n คือค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดซับ ซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารละลาย

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $1/n$ และมีจุดตัดแกนเท่ากับ $\log K_F$ จากสมการการดูดซับแบบ Freundlich ความสามารถในการดูดซับพิจารณาจากความชันของกราฟระหว่าง $\log C_e$ กับ $\log q_e$ โดยถ้าเส้นกราฟที่ได้มีค่าความชันมาก หรือค่า n น้อยแสดงว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่ความเข้มข้นสูงๆ แต่เกิดขึ้นได้น้อยที่ความเข้มข้นต่ำ ค่า $1/n$ อธิบายถึงไอโซเทอมของการดูดซับ ถ้าเท่ากับ 1 ไอโซเทอมของการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง แต่ค่า

มากกว่า 1 อธิบายถึงบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากที่จะใช้ในการดูดซับ และถ้าน้อยกว่า 1 อธิบายถึงปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับมีปริมาณจำกัดที่จะใช้ในการดูดซับ

ทฤษฎีการดูดซับของ BET

ในปี ค.ศ.1938 Brunauer, Emmett และ Teller ได้ทำการปรับปรุงสมการของ Langmuir เพื่อให้อธิบายการดูดซับแบบหลายชั้น เรียกว่า สมการของ BET สมมติฐานเบื้องต้นของสมการนี้คือ โมเลกุลที่ถูกดูดซับในชั้นแรกจะเป็นพื้นผิวในการเกาะของสารที่ถูกดูดซับในชั้นที่สองและชั้นต่อ ๆ ไป ดังนั้นโมเลกุลในชั้นที่สองจะเกาะอยู่บนสารที่ถูกดูดซับไม่ใช่พื้นผิวของการดูดซับ จึงเหมือนอยู่ในภาวะอิมตัวของของเหลว แตกต่างจากในชั้นแรกที่โมเลกุลสัมผัสกับพื้นผิวของสารดูดซับโดยตรง

$$\frac{1}{W\left(\frac{P_0}{P}\right)^{-1}} = \frac{1}{W_m C} + \frac{C-1\left(\frac{P_0}{P}\right)}{W_m C} \quad \dots(2.6)$$

เมื่อ P คือความดันของการดูดซับ

P_0 คือความดันอิ่มตัว

W คือน้ำหนักของสารที่ถูกดูดซับ

W_m คือน้ำหนักของสารที่ปกคลุมเต็มชั้นหนึ่ง

C คือค่าคงที่

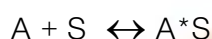
ในปัจจุบันการใช้สมการการดูดซับของ BET เพื่อหาขนาดพื้นที่ของตัวดูดซับได้รับการยอมรับทั่วไป ซึ่งพื้นที่ผิวสามารถหาได้จากการหาปริมาณแก๊สดังกล่าวมาเปลี่ยนจำนวนโมเลกุลของแก๊สที่ปกคลุมพื้นผิวเต็มหนึ่งชั้น คูณด้วยพื้นที่สำหรับการปกคลุมด้วยแก๊สหนึ่งโมเลกุล จากนั้นนำพื้นที่ทั้งหมดไปหารด้วยน้ำหนักของตัวดูดซับที่นำมาทดสอบจะได้พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับนั้น สมการ BET นี้ใช้ได้ดีในช่วงความดันสัมพัทธ์ไม่เกิน 0.2 การหาพื้นที่ผิว (surface area) โดยวิธี BET เป็นการวัดพื้นที่ผิวโดยการคำนวณการดูดซับของแก๊ส คือการสร้างไอโซเทอมของการดูดซับ สภาวะที่เกิดการดูดซับทางกายภาพ โดยใช้การดูดซับแก๊สไนโตรเจนที่อุณหภูมิต่ำ เส้นไอโซเทอมของการดูดซับจะเป็นเส้นตรงความชันและจุดตัดบนแกนจะให้ปริมาณของแก๊สซึ่งใช้เพื่อจัดโมโนเลเยอร์ เมื่อรู้พื้นที่ของแต่ละโมเลกุลสามารถคำนวณพื้นที่ของการดูดซับได้

จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับที่นิยมกันอย่างแพร่หลายคือ สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง (pseudo-first order) และอันดับสอง (pseudo-second order) ซึ่งเป็นสมการจลนพลศาสตร์ที่ใช้อธิบายการดูดซับที่ผิวของสารดูดซับ นอกจากนี้ยังพบขั้นตอนการแพร่ภายในรูพรุนของสารดูดซับมีส่วนสำคัญในขั้นตอนการดูดซับ ดังนั้นสมการการแพร่ภายในรูพรุน (intraparticle diffusion) จึงเป็นอีกสมการจลนพลศาสตร์ที่นำมาใช้อธิบายจลนพลศาสตร์การดูดซับด้วย

1) สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง

จากสมมุติฐานการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับเป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้า (electrostatic interaction) ระหว่างผิวตัวดูดซับกับโมเลกุลตัวถูกดูดซับและการดูดซับเป็นการดูดซับทางเคมี สามารถคำนวณหาอัตราเร็วในการดูดซับได้โดยใช้สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับของ Lagergren จากปฏิกิริยาการดูดซับ



โดยที่ A คือ ตัวถูกดูดซับ (adsorbate) และ S คือตัวดูดซับ (adsorbent) และ A·S คือสารประกอบที่เกิดจากการดูดซับ (adsorbed compound) สามารถเขียนสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง ได้ดังนี้

$$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \quad \dots(2.7)$$

โดยที่ k คือ ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง (นาที่⁻¹)

q_t คือ ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ เวลาใดๆ (mg/g)

q_e คือค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ สมดุล (mg/g)

เมื่ออินทิเกรตสมการ (2.7) โดยมีขอบเขตตั้งแต่ $t=0$ จนถึง $t=t$ และตั้งแต่ $q_t=0$ จนถึง $q_t=q_t$ จะได้สมการคือ

$$\log \frac{q_e}{q_e - q_t} = \frac{k_1}{2.303} t \quad \dots(2.8)$$

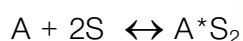
จัดสมการให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้น จะได้

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \frac{k_1}{2.303} t \quad \dots(2.9)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log(q_e - q_t)$ กับ t จะได้ความชันเท่ากับ $-k_1/2.303$ และได้จุดตัดแกน y เท่ากับ $\log q_e$

2) สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง

สมการจลนพลศาสตร์สำหรับอธิบายการดูดซับบนผิวตัวดูดซับที่นิยมอีกสมการหนึ่งคือสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง บนสมมติฐานการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนผิวตัวดูดซับเป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าและเป็นการดูดซับทางเคมีที่มีผลมาจากตำแหน่งการเกิดปฏิกิริยา (active site) จากปฏิกิริยาการดูดซับ



สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสองสามารถเขียนอัตราเร็วการดูดซับได้ดังนี้

$$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \quad \text{.....(2.10)}$$

โดยที่ k คือ ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง (นาที่⁻¹)

เมื่ออินทิเกรตสมการ (2.10) โดยมีขอบเขตตั้งแต่ $t=0$ จนถึง $t=t$ และตั้งแต่ $q_t=0$ จนถึง $q_t=t$ จะได้สมการคือ

$$\frac{1}{q_e - q_t} = \frac{1}{q_e} - k_2 t \quad \text{.....(2.11)}$$

จัดสมการให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้น จะได้

$$\frac{1}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad \text{.....(2.12)}$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $1/q_t$ กับ t จะได้ความชันเท่ากับ $1/q_e$ และได้จุดตัดแกน y เท่ากับ $1/k_2 q_e^2$

3) การแพร่ภายในรูพรุน (intraparticle diffusion)

จลนพลศาสตร์การดูดซับนอกจากจะสอดคล้องกับสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับที่ผิวตัวดูดซับแล้ว จลนพลศาสตร์การดูดซับอาจจะสอดคล้องกับการแพร่ภายในรูพรุนด้วย ดังนั้นสมการการแพร่ภายในรูพรุนจึงเป็นอีกสมการหนึ่งที่ถูกใช้ในการทำนายจลนพลศาสตร์การดูดซับ สมการการแพร่ภายในรูพรุนของ Weber และ Morris สามารถเขียนอยู่ในรูปสมการเชิงเส้นได้ดังนี้

$$q_t = k_1 t^{0.5} + C \quad \text{.....(2.13)}$$

โดยที่ k คือ ค่าคงที่อัตราเร็วในการดูดซับของการแพร่ภายในรูพรุน (mg/g min) เมื่อเขียนระหว่าง q_t กับ $t^{0.5}$ จะได้ความชันของกราฟเท่ากับ k_p และจุดตัดแกน y เท่ากับ C ซึ่งค่า C จะบอกถึงผลกระทบที่เกิดจากความหนาของชั้นฟิล์ม ยิ่งค่า C มากผลกระทบที่เกิดจากความหนาของชั้นฟิล์มยิ่งมาก

โลหะตะกั่ว

โลหะหนัก (heavy metal) หมายถึงโลหะที่มีความหนาแน่นเกินกว่า 5 g/cm^3 โลหะตะกั่ว (lead) สัญลักษณ์ธาตุคือ Pb เป็นธาตุที่มีอยู่ในธรรมชาติที่จัดอยู่ในหมู่ที่ IV ของตารางธาตุ มีเลขอะตอม 82 เลขมวล 207.19 จุดหลอมเหลว (melting point) $3,640^\circ\text{C}$ จุดเดือด (boiling point) $1,749^\circ\text{C}$ ตะกั่วมีสมบัติทางกายภาพและเคมีคล้ายดีบุก นำมาทำให้บริสุทธิ์ได้ง่าย ทนต่อการผุกร่อนได้ดี ละลายน้ำได้น้อย ในธรรมชาติตะกั่วมีกำเนิดจากหินอัคนีและหินแปรมีประมาณ 10–20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม พบในรูปของสารประกอบตะกั่วซัลไฟด์ ตะกั่วซัลเฟต ตัวอย่างแร่ที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ แร่ galena หรือ galena ซึ่งเป็นซัลไฟด์ของตะกั่ว แร่ cerussite (PbCO_3), anglesite (PbSO_4), pyromorphit ($\text{PbCl}_2 \cdot 3\text{Pb}_3(\text{PO}_4)_2$), minium (Pb_3O_4), wulfenite (PbMnO_4), crocite (PbCrO_4), ZnS และ pyrite

ตะกั่วเป็นโลหะหนักที่มีลักษณะอ่อนทำให้หลอมเหลวได้ง่ายและสามารถพิมพ์แบบออกมาเป็นรูปร่างต่าง ๆ ได้ดี จึงนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย มีการนำตะกั่วมาใช้ตั้งแต่สมัยโบราณ ในปัจจุบันก็ยังมีการใช้ตะกั่วในงานต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย ภาวะตะกั่วเป็นพิษเป็นโรคที่พบได้บ่อยในประเทศไทย อาการของตะกั่วเป็นพิษเป็นอาการที่เกิดขึ้นกับอวัยวะหลายระบบและคล้ายกับอาการของโรคอื่น ๆ

ตะกั่วเป็นสารที่พบปนเปื้อนทั่วไป ในสมัยอดีตเด็กเป็นโรคพิษตะกั่วจากการรับประทานสีทาบ้าน หรือใช้มือจับของที่ติดสีดังกล่าว ในปัจจุบันสีทาด้วยตะกั่วมีน้อยลง แหล่งที่สำคัญที่ทำให้เกิดพิษสำหรับผู้ใหญ่คือจากอุตสาหกรรมได้แก่ โรงงานทำแบตเตอรี่และโรงงานอื่น ๆ ที่มีการใช้ตะกั่วอย่างกว้างขวาง เช่น อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ สำหรับประชาชนโดยทั่วไปอาจได้รับตะกั่วจากอากาศ ซึ่งมักมีตะกั่วปนเปื้อนจากการใช้เตตระเอทิลเลด (tetraethyl lead) ในน้ำมันรถยนต์ นอกจากนี้ยังมีแหล่งอื่นๆ อีกจำนวนมากที่อาจจะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดภาวะตะกั่วเป็นพิษได้แก่ หัวกระสุนตะกั่วที่ตกค้างในร่างกาย การทำงานในสนามยิงปืน ยาสูบไซร่ หมึก แป้งทาตัวเด็ก (จ๋วยจุ๋ง) ภาชนะเซรามิกส์ ที่มีตะกั่ว ท่อประปาที่ทำด้วยตะกั่ว ผลิตภัณฑ์จากแบตเตอรี่และอาหารที่มีตะกั่วปนเปื้อน เหล้าไวน์ เครื่องยนต์ที่ใช้ตะกั่วเป็นส่วนประกอบ การเจียรไนพลอยที่ใช้จานตะกั่ว ตะกั่วที่ใช้เป็นตัวพิมพ์หนังสือ ตะกั่วถ่วงน้ำหนักม่าน สีที่ทาของใช้ของเด็ก เป็นต้น

ตะกั่วเป็นธาตุที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมทั่ว ๆ ไป ปกติผู้ใหญ่จะรับประทานอาหารโดยมีตะกั่วปนเปื้อนอยู่ด้วยประมาณวันละ 150 ไมโครกรัม อาหารเด็กอาจมีตะกั่วปนประมาณวันละ 100 ไมโครกรัมและรับตะกั่วในน้ำดื่มประมาณ 100 ไมโครกรัมต่อวัน นอกจากนี้คนเรายังรับตะกั่วทางการหายใจ โดยทั่วไปอากาศอาจจะมีปริมาณตะกั่ว 1-2 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ประมาณกันว่าถ้าปริมาณตะกั่วในอากาศ 1 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตรจะทำให้ตะกั่วในเลือดสูงขึ้น 1 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์ลิตร โดยสรุปคนหนึ่งอาจรับตะกั่วเข้าไปในร่างกายวันละ 0.1-2 มิลลิกรัม ในจำนวนนี้ประมาณ ร้อยละ 75 เข้าทางทางเดินอาหารและร้อยละ 25 เข้าทางการหายใจ การดูดซึมตะกั่วไปทางเดินอาหาร ผู้ใหญ่จะดูดซึมเข้าไปในร่างกายประมาณร้อยละ 10 ส่วนเด็กจะดูดซึมมากกว่าถึงร้อยละ 40 ดังนั้นเด็กที่รับประทานสารที่ปนเปื้อนตะกั่วทางปากอาจจะมีอาการเป็นพิษมากกว่า ส่วนตะกั่วที่เข้าไปในทางเดินหายใจ ถ้าขนาดของผงฝุ่นที่มีตะกั่วยิ่งเล็กลงการดูดซึมก็ยิ่งมาก ผงฝุ่นตะกั่วที่เล็กกว่า 0.5 ไมโครเมตร ร่างกายสามารถดูดซึมได้ถึงร้อยละ 90 การกระจายของตะกั่วในร่างกายเนื่องจากปกติตะกั่วที่เข้าสู่ร่างกายจะถูกกำจัดออกไปช้า ๆ ผลทำให้ตะกั่วมีการสะสมขึ้น ในคนทั่วไปตะกั่วอาจจะสะสมในร่างกายประมาณ 200 มิลลิกรัม ส่วนในคนงานที่ทำงานเกี่ยวกับสารตะกั่วอาจจะสะสมถึง 500 มิลลิกรัม

อิฐมวลเบา

คอนกรีตมวลเบาหรืออิฐมวลเบาเป็นวัสดุก่อสร้างที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากมีคุณสมบัติที่โดดเด่นและยังเป็นทางเลือกใหม่สำหรับผู้ที่ต้องการลดต้นทุนในการผลิตอีกด้วย เนื่องจากอิฐมวลเบา มีคุณสมบัติพิเศษที่แตกต่างจากอิฐชนิดอื่น ๆ อิฐมวลเบา มีการใช้มานานในต่างประเทศ แต่ยังเป็นวัสดุก่อสร้างแบบใหม่ในประเทศไทย อิฐมวลเบาได้รับการพัฒนาจากอิฐแดงหรืออิฐมอญ ซึ่งอิฐมอญ (brick) เป็นวัสดุที่นำมาใช้ด้านงานก่อสร้างเป็นเวลาช้านานมาแล้ว เป็นวัสดุก่อสร้างที่ผลิตจากทรายและดินเหนียว หรือทรายและหิน แฉ่งคุณสมบัติทางฟิสิกส์ขึ้นอยู่กับสัดส่วนและชนิดของวัสดุต่าง ๆ ที่ใช้ วิธีใช้และการผลิต เวลาและอุณหภูมิในการเผา เมื่ออุณหภูมิในการเผาเพิ่มขึ้น อิฐจะมีสีคล้ำ ความพรุนจะลดลงและความแข็งแรงของอิฐจะเพิ่มขึ้น

อิฐมวลเบาเป็นวัสดุที่ผลิตมาจากปูนซีเมนต์ ทราย ปูนขาว ยิปซัม น้ำ และผงอลูมิเนียม ในส่วนผสมจะมีฟองอากาศอยู่ปริมาณมาก ประมาณ 75% จึงทำให้อิฐเบา (ลอยน้ำได้) ฟองอากาศจะเป็นลักษณะ closed cell ไม่ดูดซึมน้ำ (ดูดซึมน้ำน้อยกว่าอิฐมอญ 4 เท่า) ความเบาของอิฐก็จะทำให้โครงสร้างประหยัด เป็นฉนวนความร้อน ค่าการต้านทานความร้อนของอิฐมวลเบา จะดีกว่าคอนกรีตบล็อกถึง 4 เท่า และดีกว่าอิฐมอญ 6-8 เท่า ที่สำคัญไม่สะสมความร้อน ไม่ติดไฟ ทนไฟ ประมาณ 1,100 องศาเซลเซียส ได้นานถึง 4 ชม. กันเสียงได้ดีมาก เมื่อมีการฉาบจะมีการแตกร้าวน้อยกว่าการ

ก่ออิฐฉาบปูนทั่วไป เนื่องจากตัวบล็อกกับปูนฉาบนั้นมีส่วนผสมที่ใกล้เคียงและในการก่อผนังก็จะรับน้ำหนักได้ ประมาณ 80 กก./ตร.ม.

ข้อมูลจากกรมส่งเสริมอุตสาหกรรมพบว่าลักษณะของอิฐมวลเบาที่มีทั้งชนิดเสริมเหล็ก คือพวกแผ่นผนัง/พื้น/หลังคา และแบบไม่เสริมเหล็กคือบล็อกสำหรับก่อผนัง เลื่อยตัดได้เหมือนไม้ ทนแรงกด 30-80 กก. ซึ่งมีขนาดตามมาตรฐาน มีความหนา 7.5 ซม., 10 ซม., 12.5 ซม., 15 ซม., 20 ซม. ความกว้าง 20 ซม. และความยาว 60 ซม. สำหรับชั้นคุณภาพ 2 ชนิด 0.5 มีความหนาแน่นแห้ง ไม่เกิน 500 กก./ลบ.ม. และค่ารับกำลังแรงอัด ไม่น้อยกว่า 30 กก./ตร.ซม. ตามมาตรฐาน มอก. 1505-2541 สำหรับชั้นคุณภาพ 4 ชนิด 0.7 มีความหนาแน่นแห้ง ไม่เกิน 700 กก./ลบ.ม.และค่ารับแรงอัด ไม่น้อยกว่า 50 กก./ตร.ซม. ตามมาตรฐาน มอก.1505-25

คุณสมบัติของอิฐมวลเบา

อิฐมวลเบาที่ใช้ระบบการผลิตแบบ AAC (autoclaved aerated concrete) เป็นระบบการผลิตโดยใช้การอบไอน้ำภายใต้แรงดัน เป็นเทคโนโลยีการผลิตคอนกรีตมวลเบาที่เน้นคุณสมบัติพิเศษคือมีน้ำหนักเบา ขนาดก้อนได้มาตรฐานเท่ากันทุกก้อน ทนไฟ ป้องกันความร้อน ป้องกันเสียง ตัดแต่งเข้ารูปง่ายใช้งานได้เกือบ 100% ที่สำคัญคือรวดเร็ว สะอาด ลดระยะเวลาในการก่อสร้างและประหยัดค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง ส่วนประกอบของคอนกรีตมวลเบาชนิดที่ใช้ระบบการผลิตแบบ AAC นี้ประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ ปูนขาว แก้วกลบหรือทราย โดยส่วนมากใช้วัสดุที่มีปริมาณซิลิกาเป็นองค์ประกอบสูงและผงอะลูมิเนียมจะทำหน้าที่เป็นสารก่อให้เกิดการขยายตัว อัตราการใช้ประมาณ 5-8% โดยปริมาตร

ส่วนประกอบของอิฐมวลเบา

การผลิตอิฐมวลเบาที่มีวัตถุดิบในการผลิตคือ ทรายละเอียด (สัดส่วน 50%) ยิปซั่ม (สัดส่วน 9%) ปูนขาว (สัดส่วน 9%) ปูนซีเมนต์ (สัดส่วน 30%) ผงอะลูมิเนียม (สัดส่วน 2%) โดยนำส่วนผสมมาทำให้แข็งด้วยการอบไอน้ำภายใต้ความดัน และ อุณหภูมิประมาณ 180 องศาเซลเซียส มีฟองอากาศมากประมาณ 75% ทำให้เบา (ลอยน้ำได้) ฟองอากาศเป็น closed cell ไม่ดูดซึมน้ำ (ดูดซึมน้ำน้อยกว่าอิฐมอญ 4 เท่า) ความเบาจะทำให้ประหยัดโครงสร้างและสารเคมีที่กระจายอย่างสม่ำเสมอในเนื้อวัสดุ ผ่านการอบไอน้ำ ภายใต้อุณหภูมิและความดันที่เหมาะสม

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Sari et al. (2007) ได้ใช้ดินเหนียวจากเมือง Celtek ประเทศตุรกี ซึ่งเป็นดินที่ใช้ทำอิฐก่อสร้าง ดินเหนียว Celtek เป็นตัวดูดซับไอออนตะกั่วและโครเมียมโดยวิธีแบบทซ์ ปัจจัยที่เหมาะสมในการดูดซับ คือปริมาณตัวดูดซับ 0.1 กรัม ที่ pH 6 ระยะเวลาในการกวนที่ 30 นาที พบว่าพฤติกรรมการดูดซับสอดคล้องกับไอโซเทอมของ Langmuir ดีกว่าไอโซเทอมของ Freundlich พบว่าการดูดซับแบบชั้นเดียวสูงสุด (maximum monolayer adsorption capacity, q_m) สำหรับดูดซับตะกั่วเท่ากับ 18.08 mg/g สอดคล้องกับรายงานของ Ozdes et al. (2011) ใช้ดินเหนียวแร่อิลไลต์ (illite clay) ประเทศตุรกีสำหรับดูดซับไอออนตะกั่วและโครเมียม พบว่าการดูดซับแบบชั้นเดียวสูงสุดสำหรับดูดซับตะกั่วเท่ากับ 53.76 mg/g ในสภาวะปริมาณดิน 1.0 g/L pH เท่ากับ 4 และระยะเวลาการกวน 240 นาที

ดินเหนียวแร่ kaolinite ได้นำมาใช้กำจัดไอออนตะกั่วโดยวิธีการดูดซับ Gupta et al. (2005) พบว่าการดูดซับแบบชั้นเดียวสูงสุดสำหรับดูดซับตะกั่วเท่ากับ 11.52 mg/g Jiang et al. (2009) เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วระหว่างดินเหนียวแร่ kaolinite ธรรมชาติกับดินเหนียวแร่ kaolinite ที่ผ่านการดัดแปลงพื้นผิว พบว่าดินเหนียวแร่ kaolinite ที่ผ่านการดัดแปลงพื้นผิวมีประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนตะกั่วดีกว่าประมาณ 4.5 เท่า พบว่าการดูดซับแบบชั้นเดียวสูงสุดสำหรับดูดซับตะกั่วเท่ากับ 4.73 mg/g และ 32.2 mg/g สำหรับดินเหนียวแร่ kaolinite ธรรมชาติ และดินเหนียวแร่ kaolinite ที่ผ่านการดัดแปลงพื้นผิว ตามลำดับ สอดคล้องกับรายงานของ Jiang et al. (2010) ที่ทดสอบดินเหนียวแร่ kaolinite ธรรมชาติ ประเทศจีน ดูดซับไอออนตะกั่ว แคดเมียม นิกเกิลและทองแดง พบว่าการดูดซับแบบชั้นเดียวสูงสุดสำหรับดูดซับตะกั่วเท่ากับ 2.35 mg/g

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

3.1 เครื่องมือ (apparatus)

- 1) อะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (AAS), ICE3000 series, Thermo Scientific, USA
- 2) เตาอบไฟฟ้า, Binder FD115, Germany
- 3) เครื่องชั่งละเอียด, AND HM-200, Japan
- 4) Magnetic stirrer,
- 5) pH meter,
- 6) Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), Nicolet 6700, Thermo Scientific, USA
- 7) X-ray fluorescence (XRF)
- 8) Scanning electron microscope (SEM), JEOL, USA
- 9) Centrifuge,
- 10) BET (BELSORP-mini, BEL, Japan)

3.2 สารเคมี (reagents)

สารเคมีที่ใช้ในการทดลองเป็นเกรดวิเคราะห์ (reagent grade)

- 1) Lead(II) nitrate ($\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$)
- 2) Nitric acid (70% HNO_3), BDH, England
- 3) Sulfuric acid (99% H_2SO_4), BDH, England
- 4) Sodium hydroxide (NaOH)

3.3 วิธีการทดลอง (methodology)

3.3.1 การเตรียมอิฐมวลเบา

อิฐมวลเบาซื้อจากร้านวัสดุก่อสร้าง ทบให้เป็นก้อนเล็กๆ ล้างด้วยน้ำเพื่อล้างสิ่งสกปรก อบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วบดให้ละเอียด คัดเลือกขนาดโดยใช้ตะแกรงร่อนขนาดรู 500 ไมโครเมตร แล้วเก็บในเดซิเคเตอร์ (รูปที่ 3.1)



รูปที่ 3.1 อิฐมวลเบา

3.3.2 การทดสอบเอกลักษณ์

อิฐมวลเบาได้ทำการทดสอบเอกลักษณ์โดยการศึกษาหมู่ฟังก์ชันโดยวิธี FTIR และการหาพื้นที่ผิวและรูพรุนโดยวิธี BET และตรวจเอกลักษณ์พื้นผิวด้วยเทคนิค SEM และหาค่าประกอบธาตุด้วยเทคนิค XRF

3.3.3 การหาประจุที่ผิวเป็นศูนย์ (point of zero charge, pzc)

นำอิฐมวลเบาปริมาณ 0.1 กรัม ใส่ในหลอดเซนต์ปีแยร์ PETE ขนาด 50 mL ปรับ pH ให้อยู่ในช่วง 3.0 ถึง pH 12.0 ด้วยสารละลายกรดไนตริกและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ นำไปกวนที่ความเร็วคงที่ 700 รอบต่อนาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นวัดค่า pH ของสารละลาย เขียนกราฟระหว่างค่า pH เริ่มต้น (initial pH) และสุดท้าย (final pH) ประจุที่ผิวเป็นศูนย์ของตัวดูดซับหาได้จากวิธีการแบบดริฟท์เทส (drift test)

3.3.4 การศึกษาการดูดซับโลหะตะกั่ว

ซึ่งอิฐมวลเบาใส่ในหลอดเซนต์ปีแยร์ PETE ขนาด 50 mL เติมสารละลายโลหะตะกั่วเข้มข้น 20 mg/L ปริมาตร 10 mL กวนโดยใช้เครื่องกวนสารละลายที่ความเร็วรอบคงที่ 700 รอบต่อนาที เป็นเวลา 60 นาที จากนั้นแยกสารละลายโดยการหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 5000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที แล้วกรองผ่านกระดาษกรอง สารละลายที่ได้นำไปวัดปริมาณโลหะตะกั่วที่เหลือด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

ประสิทธิภาพของการดูดซับโลหะหนักของอิฐมวลเบาโดยการเปรียบเทียบปริมาณโลหะ ตะกั่ว ก่อนและหลังการดูดซับด้วยอิฐมวลเบา ประสิทธิภาพของการดูดซับโลหะตะกั่วคำนวณจากสมการ

$$AC = \frac{(C_0 - C_e)}{mass} \times V \quad (1)$$

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

- เมื่อ AC คือ ปริมาณของโลหะหนักที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับ (adsorption capacity)
 RE คือ ประสิทธิภาพการกำจัด (removal efficiency)
 C_0 คือ ความเข้มข้นโลหะหนัก (mg/L) เริ่มต้น
 C_e คือ ความเข้มข้นโลหะหนัก (mg/L) ที่สมดุล
 V คือ ปริมาตรของสารละลาย (L)
 mass คือ น้ำหนักของตัวดูดซับ (g)

3.3.5 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับโลหะตะกั่วด้วยอิฐมวลเบา

1) ปัจจัย pH

- อิฐมวลเบา 0.10 กรัม ใส่ในหลอด PETE ขนาด 50 mL เต็มสารละลายมาตรฐานโลหะตะกั่วเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 มิลลิลิตรที่ปรับ pH 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 ด้วย dil.HNO₃ และ dil.NaOH

- กวนโดยใช้เครื่องกวนแม่เหล็กด้วยอัตราเร็วคงที่เป็นเวลา 60 นาที
- กรองสารละลายแล้วนำสารละลายไปวัดปริมาณโลหะตะกั่วด้วยเครื่อง AAS

2) ระยะเวลาการกวน (equilibrium time)

- อิฐมวลเบา 0.10 กรัม ใส่ในหลอด PETE ขนาด 50 mL เต็มสารละลายมาตรฐานโลหะตะกั่วเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 มิลลิลิตร

- กวนโดยใช้เครื่องกวนแม่เหล็กด้วยอัตราเร็วคงที่เป็นเวลา 5, 10, 15, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210 และ 240 นาที
- กรองสารละลายแล้วนำสารละลายไปวัดปริมาณโลหะตะกั่วด้วยเครื่อง AAS

3) ปริมาณของตัวดูดซับ (adsorbent dosage)

- อิฐมวลเบา น้ำหนักที่แตกต่างกันคือ 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 กรัม ใส่ในหลอด PETE ขนาด 50 mL เต็มสารละลายมาตรฐานโลหะตะกั่วเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 มิลลิลิตร

- กวนโดยใช้เครื่องกวนแม่เหล็กด้วยอัตราเร็วคงที่เป็นเวลา 60 นาที
- กรองสารละลายแล้วนำสารละลายไปวัดปริมาณโลหะตะกั่วด้วยเครื่อง AAS

4) ผลความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนตะกั่ว

- อิฐมวลเบา 0.10 กรัม ใส่ในหลอด PETE ขนาด 50 mL เติมน้ำละลายมาตรฐานโลหะตะกั่วเข้มข้นตั้งแต่ 20-200 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 มิลลิลิตร
- กวนโดยใช้เครื่องกวนแม่เหล็กด้วยอัตราเร็วคงที่เป็นเวลา 60 นาที
- กรองสารละลายแล้วนำสารละลายไปวัดปริมาณโลหะตะกั่วด้วยเครื่อง AAS

5) การศึกษาอุณหภูมิ

- อิฐมวลเบา 0.10 กรัม ใส่ในหลอด PETE ขนาด 50 mL เติมน้ำละลายมาตรฐานโลหะตะกั่วเข้มข้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 มิลลิลิตร
- กวนโดยใช้เครื่องกวนแม่เหล็กด้วยอัตราเร็วคงที่เป็นเวลา 60 นาที ที่อุณหภูมิ 25, 40 และ 60°C
- กรองสารละลายแล้วนำสารละลายไปวัดปริมาณโลหะตะกั่วด้วยเครื่อง AAS



บทที่ 4

ผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง

4.1 เอกลักษณะทางกายภาพของอิฐมวลเบา

4.1.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF

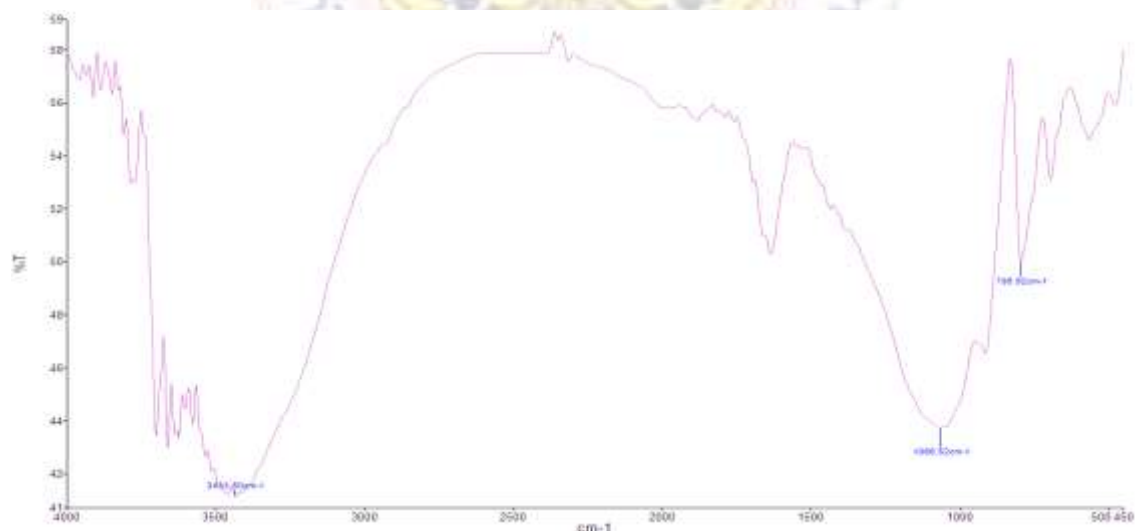
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุในอิฐมวลเบาด้วยเทคนิค X-ray fluorescence แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุในอิฐมวลเบาด้วยเทคนิค XRF

ธาตุองค์ประกอบ	%
Si	54.58%
Ca	38.08%
K	1.64% %
Mn	0.03%
S	2.98%
Fe	2.0%
Al	2.0%

4.1.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR

ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR ดังรูปที่ 4.1 พบว่าสัญญาณที่บริเวณ 3433 cm^{-1} มีลักษณะแถบกว้าง (broad band) เนื่องจากหมู่ไฮดรอกซี (OH) ของหมู่ซิลินอล (Si-OH)



รูปที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FTIR

4.1.3 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET

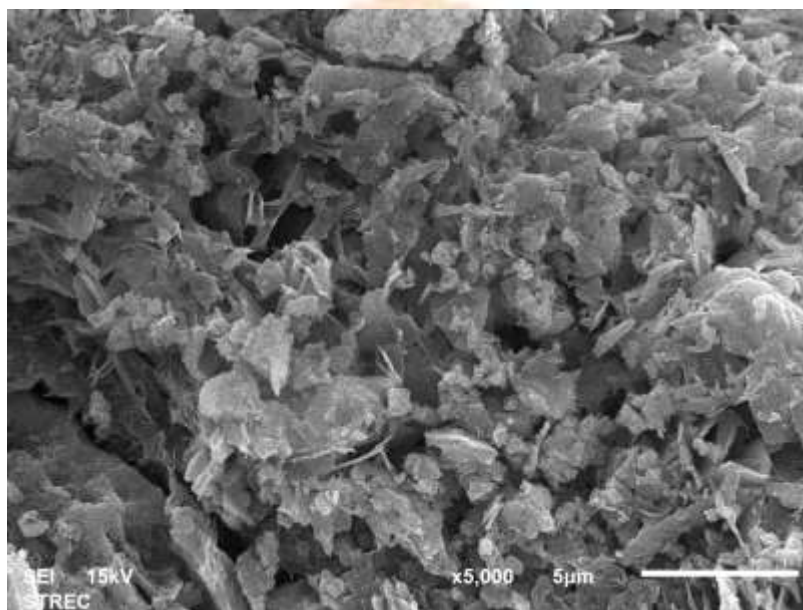
การวิเคราะห์พื้นที่ผิว (surface area) ปริมาตรรูพรุน (pore volume) และขนาดรูพรุนเฉลี่ย (average pore size) ด้วยเทคนิค BET ของอิฐมวลเบา แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค BET

พื้นที่ผิว (surface area)	14.17 m ² /g
ปริมาตรรูพรุน (pore volume)	0.016 cm ³ /g
ขนาดรูพรุนเฉลี่ย (average pore size)	4.55 nm

4.1.4 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM

การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของอิฐมวลเบาด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) แสดงดังรูปที่ 4.2



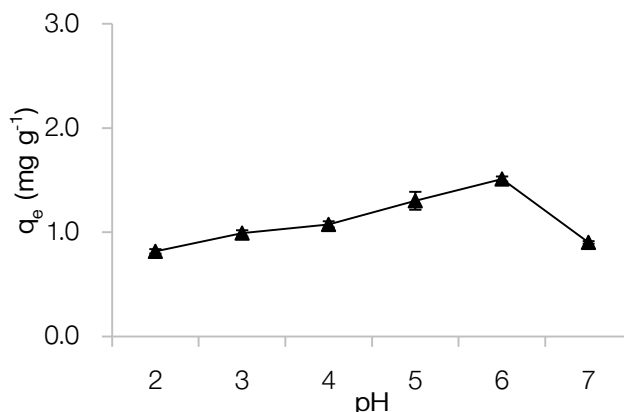
รูปที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM

4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับโลหะตะกั่ว

1) ผลของ pH ของสารละลาย

การศึกษาอิทธิพลของ pH ต่อการดูดซับโลหะตะกั่วโดยใช้อิฐมวลเบาในช่วง pH 2-7 พบว่า ความจุการดูดซับ (adsorption capacity) เพิ่มขึ้นสูงสุดที่ pH เท่ากับ 6 โดยมีประสิทธิภาพการกำจัด (removal efficiency) ประมาณร้อยละ 85 ดังแสดงในรูปที่ 4.3 ผลการทดลองสอดคล้องกับรายงานวิจัยที่ระบุว่าความจุการดูดซับของตัวดูดซับจะต่ำในสภาวะที่สารละลายเป็นกรดเนื่องจากบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับจะถูก protonate ส่งผลให้เกิดการแข่งขันระหว่างโปรตอนและไอออนโลหะ

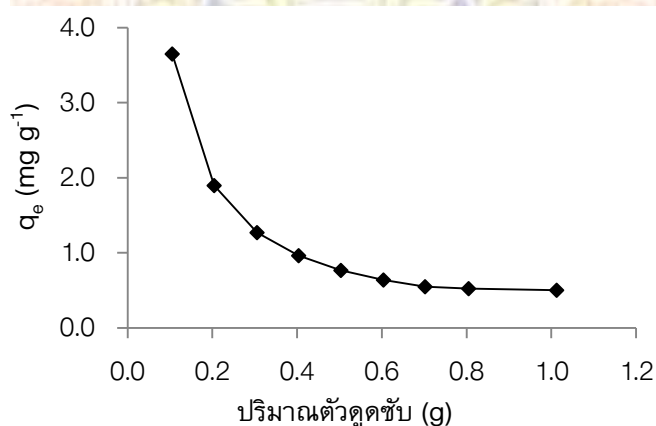
ในขณะที่ pH มากกว่า 6 ความจุการดูดซับของตัวดูดซับจะลดลงเนื่องจากตะกั่วอยู่ในรูป $Pb(OH)_2$ ซึ่งมีค่าการละลายต่ำจึงเกิดเป็นตะกอน



รูปที่ 4.3 ผลของ pH ของสารละลายต่อการดูดซับโลหะตะกั่ว (สภาวะการทดลองดังนี้ 20 mg/L Pb, ปริมาณตัวดูดซับ 0.1 g, ระยะเวลาทวน 30 นาที, อุณหภูมิ 25°C และปริมาตรของสารละลาย 10 mL)

2. ผลของปริมาณตัวดูดซับ

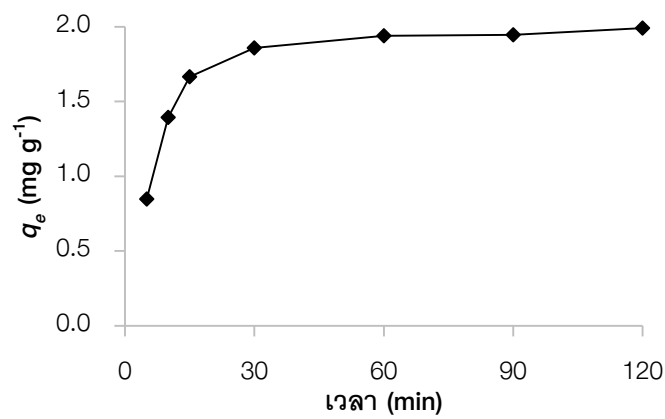
การศึกษาอิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับต่อประสิทธิภาพการดูดซับโลหะตะกั่ว แสดงในรูปที่ 4.4 พบว่าความจุการดูดซับลดลงจาก 3.65 mg/g (ประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 98.6) ถึง 0.50 mg/g (ประสิทธิภาพการกำจัดร้อยละ 99.5) เมื่อปริมาณอิฐมวลเบาเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 0.1-1.0 g ผลการศึกษาสรุปได้ว่าปริมาณตัวดูดซับเพิ่มขึ้น พื้นที่ผิวบริเวณดูดซับเพิ่มขึ้นด้วย ในการทดลองนี้เลือกปริมาณอิฐมวลเบาเท่ากับ 0.1 g ในการทดลองต่อไป



รูปที่ 4.4 ผลของปริมาณตัวดูดซับต่อการดูดซับโลหะตะกั่ว (สภาวะการทดลองดังนี้ 20 mg/L Pb, pH 6, ระยะเวลาทวน 30 นาที, อุณหภูมิ 25°C และปริมาตรของสารละลาย 10 mL)

3. ผลของเวลา

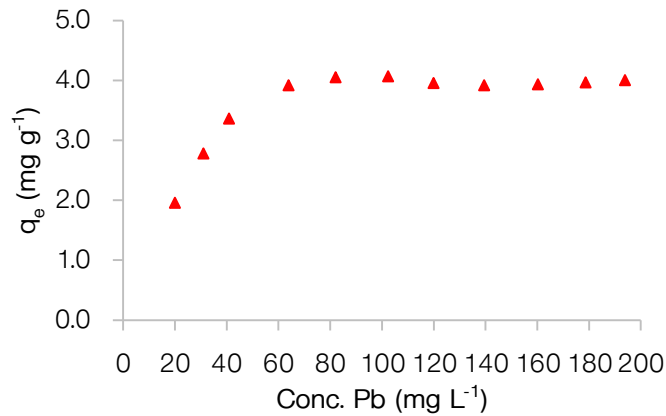
การศึกษาปัจจัยระยะเวลาในการกวนสารละลายโดยใช้อิฐมวลเบา 0.1 กรัม ในสารละลาย ปริมาตร 10 mL ของ 20 mg/L Pb อัตราในการกวนคงที่ ณ อุณหภูมิห้อง โดยระยะเวลาที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับคือ 5 ถึง 120 นาที ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะตะกั่วแสดงในรูปที่ 4.5 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดโลหะตะกั่วเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 30 นาทีแรก และมีประสิทธิภาพการกำจัดสูงถึงร้อยละ 93.6 การดูดซับไอออนตะกั่วได้อย่างรวดเร็วในช่วงแรก เนื่องจากพื้นที่ผิวของตัวดูดซับยังมีปริมาณมาก และเมื่อปริมาณพื้นที่การดูดซับอิ่มตัว ความจุการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าและคงที่ ดังนั้นในการทดลองใช้เวลาในการกวนที่ 30 นาที



รูปที่ 4.5 ผลของเวลาต่อการดูดซับโลหะตะกั่ว (สภาวะการทดลองดังนี้ 20 mg/L Pb, pH 6, ปริมาณตัวดูดซับ 0.1 g, อุณหภูมิ 25°C และปริมาตรของสารละลาย 10 mL)

4. ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนตะกั่ว

การศึกษาปัจจัยความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนตะกั่วโดยความเข้มข้นของตะกั่วตั้งแต่ 20-200 mg/L สภาวะการทดลองอื่นคงที่คือปริมาณอิฐมวลเบา 0.1 กรัม อัตราในการกวนคงที่ ณ อุณหภูมิห้อง ระยะเวลา 60 นาที พบว่าความจุการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของตะกั่วเพิ่มขึ้น และจะคงที่ที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 80 mg/L ดังแสดงในรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนตะกั่วต่อการดูดซับ (สภาวะการทดลองดังนี้ เวลา 60 นาที, pH 6, ปริมาณตัวดูดซับ 0.1 g, อุณหภูมิ 25°C และปริมาตรของสารละลาย 10 mL)

4.3 ไอโซเทอมการดูดซับ

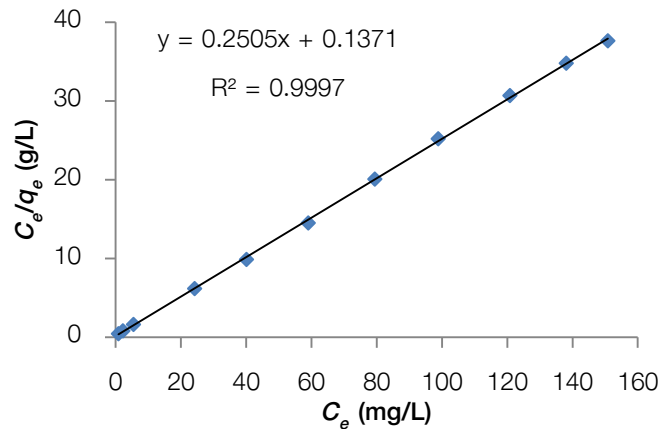
ไอโซเทอมของการดูดซับ อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สมดุล กับจำนวนของตัวถูกดูดซับที่มีการดูดซับ ที่อุณหภูมิคงที่ ไอโซเทอมของการดูดซับเป็นสมการที่มีประโยชน์สำหรับวิเคราะห์การดูดซับ

ไอโซเทอมของแลงเมียร์

สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir) มีสมมติฐานที่ว่าโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะเกิดการดูดซับบนผิวในตำแหน่งที่แน่นอนของตัวดูดซับ แต่ละโมเลกุลของตัวดูดซับเกิดการดูดซับบนผิวแบบชั้นเดียวแต่ละพื้นผิวของตัวดูดซับมีลักษณะแบบเดียวกัน สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์เขียนได้ดังสมการ

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{bq_m} + \frac{C_e}{q_m} \quad \dots(4.1)$$

จากสมการไอโซเทอมของแลงเมียร์ เมื่อเขียนกราฟระหว่าง C_e/q_e กับ C_e ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ค่า q_m และ b หาได้จากความชัน (slope) และจุดตัดแกน (intercept) ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า q_m เท่ากับ 3.99 mg/g และ b เท่ากับ 1.83 L/g โดยมีความเป็นเส้นตรง R_2 เท่ากับ 0.9997



รูปที่ 4.7 กราฟไอโซเทอมของแลงเมียร์

สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์ ยังอาจแสดงได้ด้วยปัจจัยของการแยกหรือค่าตัวแปรที่สภาวะสมดุล (equilibrium parameter, R_L) ดังสมการ

$$R_L = \frac{1}{1 + bC_0} \quad \dots(4.2)$$

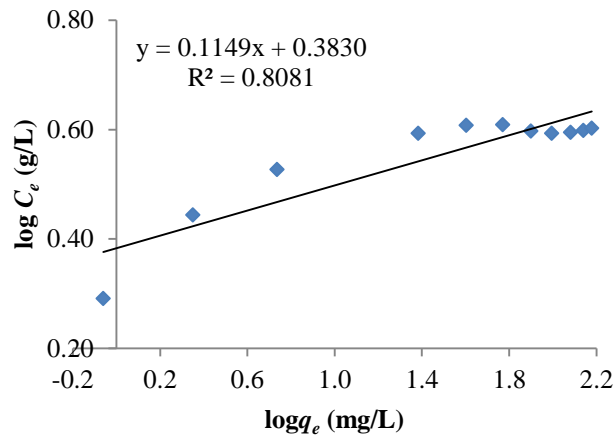
เมื่อ C_0 คือความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับ (mg/L) จากผลการทดลองพบว่าค่า R_L อยู่ในช่วง 0.003-0.027 เมื่อความเข้มข้นของตะกั่วระหว่าง 20–200 mg/L รูปร่างของไอโซเทอมสอดคล้องกับการดูดซับ เนื่องจาก $0 < R_L < 1$ คือการดูดซับดี

ไอโซเทอมของ Freundlich

สมการของ Freundlich มีสมมติฐานของการดูดซับที่ว่าพื้นผิวของตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด โดยที่การดูดซับบนพื้นผิวของตัวถูกดูดซับจะเป็นแบบหลายชั้น (multilayer) สมการที่ได้จากการสังเกตและทดลองการดูดซับโดยอาศัยสมมติฐานของทฤษฎีนี้ เป็นแนวความคิดของแบบจำลองแบบหลายชั้น

$$\log q_e = \log K_f + \left(\frac{1}{n}\right) \log C_e \quad \dots(4.3)$$

เมื่อ K_f คือค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น (mg/g) และ n คือค่าคงที่แสดงการขึ้นตรงกับความเข้มข้นของสารละลาย เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$ ดังแสดงในรูปที่ 4.8 จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $1/n$ และมีจุดตัดแกนเท่ากับ $\log K_f$ จากผลพบว่าค่า K_f เท่ากับ 2.42 ดังแสดงในตารางที่ 4.3



รูปที่ 4.8 กราฟไอโซเทอมของ Freundlich

ค่า $1/n$ อธิบายถึงไอโซเทอมของการดูดซับ จากรูปที่ 4.8 พบว่า $1/n$ น้อยกว่า 1 แสดงว่า ปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับมีปริมาณจำกัดที่จะใช้ในการดูดซับ

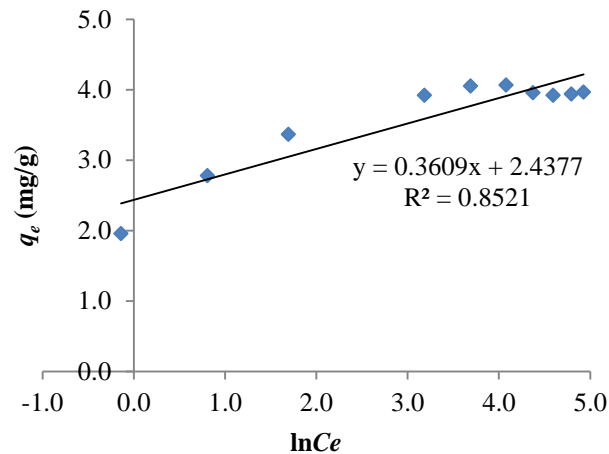
ไอโซเทอมของ Temkin

ไอโซเทอมการดูดซับของ Temkin จะแตกต่างจากของ Langmuir และ Freundlich ซึ่งไอโซเทอมการดูดซับของ Temkin สามารถนำไปใช้ได้กับการดูดซับทางเคมี เนื่องจากในสมการจะพิจารณาถึงพลังงานกระตุ้นของตัวดูดซับ ไอโซเทอมนี้อาศัยสมมติฐานว่าพลังงานการดูดซับจะลดลงเป็นเส้นตรงเมื่อปริมาณผิวหน้าของตัวดูดซับถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับ (adsorbent-adsorbate interactions) สมการของ Temkin เขียนได้เป็น

$$q_e = B \ln A + B \ln C_e \quad \dots(4.4)$$

$$B = \frac{RT}{b} \quad \dots(4.5)$$

เมื่อ B คือค่าคงที่ Temkin ซึ่งสัมพันธ์กับความร้อนของการดูดซับ (J/mol), A คือ ค่าคงที่ สมดุลของการยึดเกาะ (L/g) ซึ่งสอดคล้องกับพลังงานยึดเกาะสูงสุด (maximum binding energy), R คือ ค่าคงที่ของแก๊ส ($8.314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$) และ T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ (K) จากสมการ (4.4) เมื่อเขียนกราฟระหว่าง q_e กับ $\ln C_e$ ค่าคงที่ A และ B หาได้จากจุดตัดแกนและความชันของเส้นกราฟตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4.9



รูปที่ 4.9 กราฟไอโซเทอมของ Temkin

ไอโซเทอมของ Dubinin-Radushkevich (D-R isotherm)

Dubinin-Radushkevich ได้เสนอไอโซเทอมการดูดซับเพื่อประเมินกลไกการดูดซับของตัวดูดซับเป็นการดูดซับทางเคมีหรือทางกายภาพ สมการของไอโซเทอมของ Dubinin-Radushkevich เขียนได้เป็น

$$\ln q_e = \ln q_m - \beta \varepsilon^2 \quad \text{.....(4.6)}$$

$$\varepsilon = RT \ln \left(1 + \frac{1}{C_e} \right) \quad \text{.....(4.7)}$$

เมื่อ q_e คือปริมาณการดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ (mg/g)

q_m คือความจุการดูดซับทางทฤษฎี (mol/g)

β คือค่าคงที่การดูดซับของ Dubinin-Radushkevich (mol^2/J^2) ซึ่งสัมพันธ์กับพลังอิสระการดูดซับเฉลี่ยต่อสารที่ถูกดูดซับ 1 โมล

ε คือ Polanyi potential (KJ/mol)

C_e คือความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในสารละลาย ณ ภาวะสมดุล (mol/L)

R คือค่าคงที่ของแก๊ส (8.314 J/mol K)

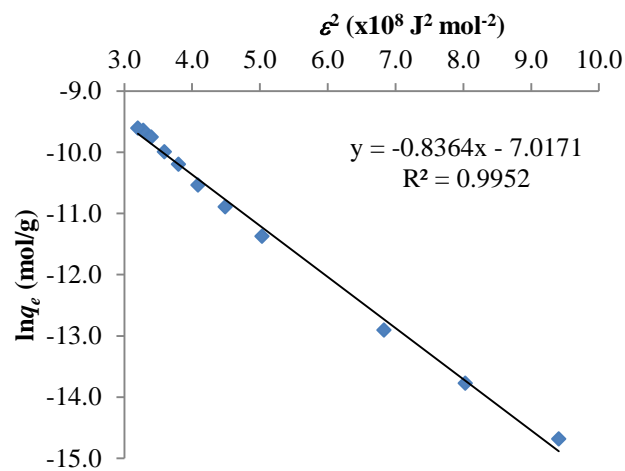
T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

จากสมการ (4.6) เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\ln q_e$ กับ ε^2 สามารถหาค่า q_m และ β ได้จากจุดตัดแกนและความชัน ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าค่า q_m เท่ากับ 185.5 mg/g และค่า β เท่ากับ $0.836 \text{ mol}^2/\text{J}^2$ ค่า β จากสมการ Dubinin-Radushkevich เกี่ยวข้องกับพลังงานดูดซับอิสระ (E)

ของการดูดซับต่อโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับ เมื่อเกิดการเคลื่อนที่จากสารละลายสู่พื้นผิวของตัวดูดซับ ซึ่งพลังงานดูดซับอิสระ หาได้จากสมการ

$$E = \frac{1}{\sqrt{2\beta}} \quad \dots(4.8)$$

จากผลการทดลองพบว่าพลังงานดูดซับอิสระเท่ากับ 0.77 kJ/mol จากสมมติฐานเกี่ยวกับค่าพลังงานดูดซับอิสระ ถ้าน้อยกว่า 8 kJ/mol กลไกการดูดซับจะเป็นแบบกายภาพ แต่ถ้าอยู่ในช่วง 8 ถึง 16 กลไกการดูดซับจะเป็นแบบเคมี ดังนั้นในการทดลองนี้ การดูดซับไอออนโลหะตะกั่วด้วยอิฐมวลเบามีกลไกการดูดซับแบบกายภาพ



รูปที่ 4.10 กราฟไอโซเทอมของ Dubinin-Radushkevich



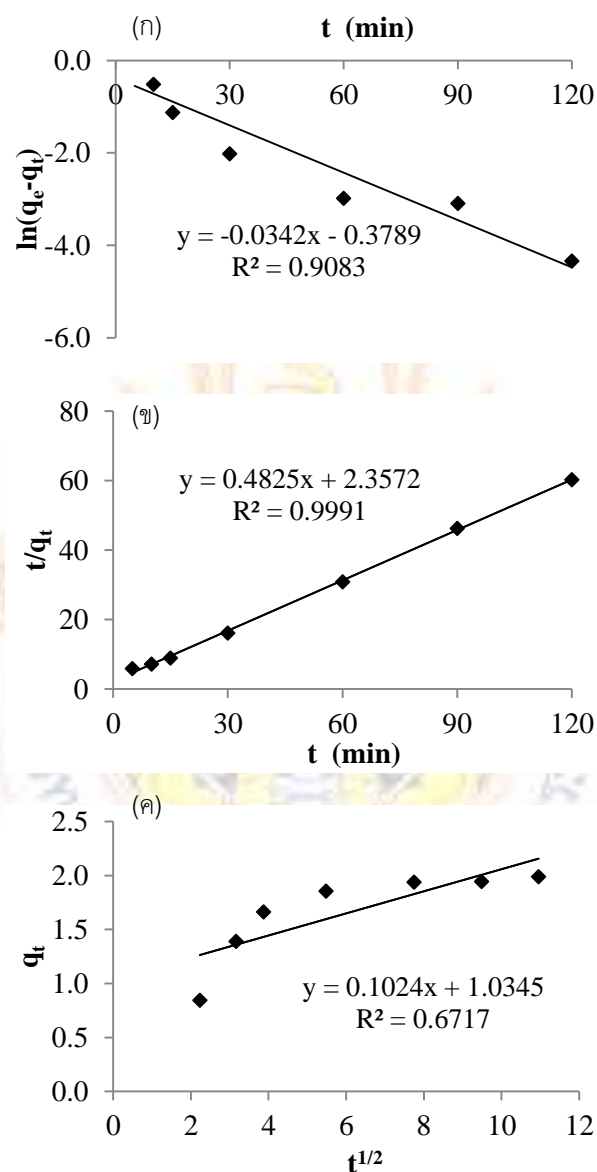
ตารางที่ 4.3 ไอโซเทอมการดูดซับของ Langmuir, Freundlich, Temkin และ D-R สำหรับการดูดซับ ไอออนตะกั่วด้วยอิฐมวลเบา

ไอโซเทอม	
Langmuir	
$q_{m(cal)}$ (mg g ⁻¹)	3.99
$q_{m(exp)}$ (mg g ⁻¹)	4.07
b (L g ⁻¹)	1.83
R_L	0.003-0.027
R^2	0.9997
Freundlich	
K_f (mg g ⁻¹)	2.42
n	8.70
R^2	0.8081
Temkin	
A (L g ⁻¹)	857.9
B	0.3609
b (J mol ⁻¹)	6.716
R^2	0.8521
Dubinin-Radushkevich	
q_m (mg g ⁻¹)	185.56
β (mol ² kJ ²)	0.836
E (kJ mol ⁻¹)	0.77
R^2	0.9952

4.4 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์

เพื่อทราบถึงกลไกการดูดซับซึ่งเป็นการถ่ายโอนมวลสารระหว่างสารถูกดูดซับและวัสดุดูดซับแบบจำลองที่นิยมใช้ในการอธิบายกลไกดูดซับที่เกิดขึ้นมี 2 แบบ คือ pseudo-first order และ pseudo-second order โดยแบบจำลองทั้ง 2 แบบตั้งบนสมมติฐานว่ากระบวนการดูดซับและการคายเป็นปฏิกิริยาเคมีเทียม (pseudo chemical reaction) และอัตราการดูดซับขึ้นกับตำแหน่งในการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุดูดซับที่ยังไม่ถูกครอบครอง

เมื่อนำผลการทดลองปัจจัยความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนตะกั่วที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยสมการการดูดซับตามแบบจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียมและอันดับสองเทียม พบว่าผลการทดลองสอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับสองเทียม ดังแสดงรูปที่ 4.11



รูปที่ 4.11 กราฟจลนพลศาสตร์การดูดซับไอออนตะกั่วด้วยอิฐมวลเบา (ก) pseudo-first-order, (ข) pseudo-second-order และ (ค) intra-particle diffusion

ตารางที่ 4.4 จนพลศาสตร์การดูดซับไอออนตะกั่วด้วยอิฐมวลเบา

<i>pseudo-first-order</i>	
$q_{e(cal)}, (mg\ g^{-1})$	1.23
$q_{e(exp)}, (mg\ g^{-1})$	1.99
$k_1, (min^{-1})$	0.0589
R^2	0.8577
<i>pseudo-second-order</i>	
$q_{e(cal)}, (mg\ g^{-1})$	2.07
$q_{e(exp)}, (mg\ g^{-1})$	1.99
$k_2, (g\ mg^{-1}\ min^{-1})$	0.0989
R^2	0.9991
<i>intra-particle diffusion</i>	
$k_i, (mg\ g^{-1}\ min^{-1/2})$	0.1024
$C, (mg\ g^{-1})$	1.0347
R^2	0.6713



บทที่ 5

อภิปรายผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้นำอิฐมวลเบามาเป็นวัสดุดูดซับไอออนตะกั่วในสารละลายโดยวิธีแบทช์ โดยทำการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับจากปัจจัยต่างๆ เช่น pH ของสารละลาย, ปริมาณตัวดูดซับ, ระยะเวลา, ความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับ และอุณหภูมิ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับไอออนตะกั่วคือ pH เท่ากับ 6 ปริมาณตัวดูดซับเท่ากับ 0.1 กรัม ระยะเวลาจนเท่ากับ 60 นาทีและความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับเท่ากับ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

การประเมินรูปแบบการดูดซับโดยอาศัยแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir), ฟรุนดลิช (Freundlich), เทมกิน (Temkin) และ ดูบินิน-ราดัสเควิช (Dubinin-Radushkevich) พบว่าการดูดซับสอดคล้องกับสมการของแลงเมียร์ไอโซเทอม พบว่าความสามารถสูงสุดของการดูดซับแบบชั้นเดียวเท่ากับ 3.99 มิลลิกรัมต่อกรัม จากไอโซเทอมของดูบินิน-ราดัสเควิช สามารถอธิบายได้ว่าการดูดซับไอออนตะกั่วด้วยอิฐมวลเบาเป็นแบบกายภาพ

จากการศึกษาจลนศาสตร์เคมีของการดูดซับพบว่าการดูดซับไอออนตะกั่วด้วยอิฐมวลเบาสอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (pseudo second order)

ข้อเสนอแนะ

จากผลการทดลองโดยใช้อิฐมวลเบาเป็นตัวดูดซับไอออนตะกั่ว พบว่าความสามารถสูงสุดของการดูดซับแบบชั้นเดียวเท่ากับ 3.99 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับตัวดูดซับชนิดอื่นๆ ดังนั้นควรปรับปรุงพื้นผิวตัวดูดซับให้มีลักษณะพิเศษ ซึ่งจะสามารถในการดูดซับได้มากขึ้น

เอกสารอ้างอิง

- Amarasinghe B.M.W.P.K., Williams R.A., 2007. Tea waste as a low cost adsorbent for the removal of Cu and Pb from wastewater. *Chem. Eng. J.* 132, 299-309.
- Cechinel M.A.P., Ulson de Souza S.M.A.G., Ulson de Souza A.A., 2014. Study of lead(II) adsorption onto activated carbon originating from cow bone. *J. Clean. Prod.* 65, 342-349.
- Chong H.L.H., Chia P.S., Ahmad M.N., 2013. The adsorption of heavy metal by Bornean oil palm shell and its potential application as constructed wetland media. *Bioresour. Technol.* 130, 181-186.
- Das B., Mondal N.K., Bhaumik R., Roy P., 2013. Insight into adsorption equilibrium, kinetics and thermodynamics of lead onto alluvial soil. *Int. J. Environ. Sci. Technol.* 11, 1-14.
- Fu F., Wang Q., 2011. Removal of heavy metal ions from wastewaters: A review. *J. Environ. Manage.* 92, 407-418.
- Giraldo-Gutiérrez L., Moreno-Piraján J.C., 2008. Pb(II) and Cr(VI) adsorption from aqueous solution on activated carbons obtained from sugar cane husk and sawdust. *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 81, 278-284.
- Jiang M.Q., Wang Q.P., Jin X.Y., Chen Z.L., 2009. Removal of Pb(II) from aqueous solution using modified and unmodified kaolinite clay. *J. Hazard. Mater.* 170, 332-339.
- Lo S.F., Wang S.Y., Tsai M.J., Lin L.D., 2012. Adsorption capacity and removal efficiency of heavy metal ions by Moso and Ma bamboo activated carbons. *Chem. Eng. Res. Des.* 90, 1397-1406.
- Mouni L., Merabet D., Bouzaza A., Belkhiri L., 2011. Adsorption of Pb(II) from aqueous solutions using activated carbon developed from Apricot stone. *Desalination* 276, 148-153.
- Naiya T.K., Bhattacharya A.K., Mandal S., Das S.K., 2009. The sorption of lead(II) ions on rice husk ash. *J. Hazard. Mater.* 163, 1254-1264.
- Owamah H.I., 2014. Biosorptive removal of Pb(II) and Cu(II) from wastewater using activated carbon from cassava peels. *J. Mater. Cycles Waste Manage.* 16, 347-358.
- Shahid M., Pinelli E., Dumat C., 2012. Review of Pb availability and toxicity to plants in relation with metal speciation; role of synthetic and natural organic ligands. *J. Hazard. Mater.* 219-220, 1-12.
- Sarı A., Tuzen M., Soylak M., 2007. Adsorption of Pb(II) and Cr(III) from aqueous solution on Celtek clay. *J. Hazard. Mater.* 144, 41-46.

- Wang L.H., Lin C.I. (2008) Adsorption of lead(II) ion from aqueous solution using rice hull ash. *Indus. Eng. Chem. Res.* 47, 4891-4897.
- Zein R., Suhaili R., Earnestly F., Indrawati, M.E., 2010. Removal of Pb(II), Cd(II) and Co(II) from aqueous solution using *Garcinia mangostana* L. fruit shell. *J. Hazard. Mater.* 181, 52-56.



ภาคผนวก

มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
1. ค่าความเป็นกรดและด่าง (pH value)	5.5-9.0	pH meter
2. ค่าที่ติเอส (TDS หรือ total dissolved solids)	<ul style="list-style-type: none"> ● ไม่เกิน 3,000 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 5,000 มก./ล. ● น้ำทิ้งที่จะระบายลงแหล่งน้ำกร่อยที่มีค่าความเค็ม (Salinity) เกิน 2,000 มก./ล. หรือลงสู่ทะเล ค่าที่ติเอสในน้ำทิ้งจะมีค่ามากกว่าค่าที่ติเอสที่มีอยู่ในแหล่งน้ำกร่อยหรือน้ำทะเลได้ไม่เกิน 5,000 มก./ล. 	ระเหยแห้งที่อุณหภูมิ 103 - 105°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
3. สารแขวนลอย (suspended solids)	ไม่เกิน 50 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม หรือประเภทของระบบบำบัดน้ำเสียตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 150 มก./ล.	กรองผ่านกระดาษกรองใยแก้ว (glass fiber filter disc)
4. อุณหภูมิ (temperature)	ไม่เกิน 40°C	เครื่องวัดอุณหภูมิ วัดขณะทำการเก็บตัวอย่างน้ำ
5. สีหรือกลิ่น	ไม่เป็นที่พึงรังเกียจ	ไม่ได้กำหนด
6. ซัลไฟด์ (sulfide as H ₂ S)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	titration
7. ไซยาไนด์ (cyanide as HCN)	ไม่เกิน 0.2 มก./ล.	กลั่นและตามด้วยวิธี pyridine barbituric acid
8. น้ำมันและไขมัน (fat, oil and grease)	ไม่เกิน 5.0 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือ ประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 15 มก./ล.	สกัดด้วยตัวทำละลาย แล้วแยกหาน้ำหนักของน้ำมันและไขมัน
9. ฟอर्मัลดีไฮด์ (formaldehyde)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	spectrophotometry

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
10. สารประกอบฟีนอล (phenols)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	กลั่นและตามด้วยวิธี 4-aminoantipyrine
11. คลอรีนอิสระ (free chlorine)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	iodometric method
12. สารที่ใช้ป้องกันหรือกำจัดศัตรูพืชหรือสัตว์ (pesticide)	ต้องตรวจไม่พบตามวิธีตรวจสอบที่กำหนด	gas-chromatography
13. ค่าบีโอดี (5 วัน ที่อุณหภูมิ 20°C) (biochemical oxygen demand : BOD)	ไม่เกิน 20 มก./ล. หรือแตกต่างแล้วแต่ละประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 60 มก./ล.	azide modification ที่อุณหภูมิ 20°C เป็นเวลา 5 วัน
14. ค่าที่เคเอ็น (TKN หรือ total kjeldahl nitrogen)	ไม่เกิน 100 มก./ล. หรืออาจแตกต่างแล้วแต่ละประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 200 มก./ล.	Kjeldahl
15. ค่าซีโอดี (chemical oxygen demand : COD)	ไม่เกิน 120 มก./ล. หรืออาจแตกต่างแล้วแต่ละประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 400 มก./ล.	potassium dichromate digestion
16. โลหะหนัก (heavy metal)		
16.1 สังกะสี (Zn)	ไม่เกิน 5.0 มก./ล.	atomic absorption spectrophotometry ชนิด direct aspiration
16.2 โครเมียมชนิดเฮกซะวาเลนต์ (hexavalent chromium)	ไม่เกิน 0.25 มก./ล.	หรือวิธี plasma emission spectroscopy ชนิด
16.3 โครเมียมชนิดไตรวาเลนต์ (trivalent chromium)	ไม่เกิน 0.75 มก./ล.	inductively coupled plasma : ICP
16.4 ทองแดง (Cu)	ไม่เกิน 2.0 มก./ล.	
16.5 แคดเมียม (Cd)	ไม่เกิน 0.03 มก./ล.	
16.6 แบเรียม (Ba)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	
16.7 ตะกั่ว (Pb)	ไม่เกิน 0.2 มก./ล.	
16.8 นิกเกิล (Ni)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	
16.9 แมงกานีส (Mn)	ไม่เกิน 5.0 มก./ล.	
16.10 เซเลเนียม (Se)	ไม่เกิน 0.02 มก./ล.	

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
16.11 อาร์เซนิก (As)	ไม่เกิน 0.25 มก./ล.	- atomic absorption spectrophotometry ชนิด hydride generation หรือวิธี plasma emission spectroscopy ชนิด inductively coupled plasma : ICP
16.12 ปรอท (Hg)	ไม่เกิน 0.005 มก./ล.	- atomic absorption cold vapour technique

แหล่งที่มา : ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ.2539) เรื่อง “กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม” ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 99 ตอนที่ 113 ตอนที่ 13ง ลงวันที่ 13 กุมภาพันธ์ 2539

