



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การกำจัดโลหะหนักจากสารละลายโดยตัวดูดซับจากวัสดุชีวภาพ

Bioadsorbents for the removal of heavy metals from an aqueous solution

วรวิทย์ จันท์สุวรรณ
สิริรัตน์ พานิช

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากงบประมาณรายได้คณะ
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2563

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
2563

ชื่อเรื่อง : การกำจัดโลหะหนักจากสารละลายโดยตัวดูดซับจากวัสดุชีวภาพ

ผู้วิจัย : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรวิทย์ จันท์สุวรรณ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สิริรัตน์ พานิช

พ.ศ. : 2563

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้นำบัวที่ไม่ได้ตัดแปรพื้นผิวเป็นตัวดูดซับไอออนตะกั่วในสารละลายโดยวิธีแบบชั่ง พบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับคือสภาวะ pH เท่ากับ 6 ความเข้มข้นของตัวดูดซับเท่ากับ 5 g/L ระยะเวลาสัมผัส 15 นาที และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไอออนตะกั่วอยู่ในช่วง 50-500 mg/L การประเมินรูปแบบการดูดซับโดยอาศัยแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir), ฟรุนดิช (Freundlich) และดูบินิน-ราดัสเควิช (Dubinin-Radushkevich) พบว่าการดูดซับสอดคล้องกับสมการของแลงเมียร์ไอโซเทอม พบว่าความสามารถสูงสุดของการดูดซับแบบชั้นเดียวเท่ากับ 13.33 มิลลิกรัมต่อกรัม จากการศึกษาจลนศาสตร์เคมีของการดูดซับพบว่าการดูดซับไอออนตะกั่วด้วยตัวดูดซับสอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (pseudo second order)

คำสำคัญ: การดูดซับ, ตะกั่ว, บัว

Title : Bioadsorbents for the removal of heavy metals from an aqueous solution

Researchers : Asst.Prof. Woravith Chansuvarn, Ph.D.

Asst.Prof. Sirirat Panich, Ph.D.

Year : 2020

ABSTRACT

The objective of this work was to study the adsorption efficiency of the lotus powder for removal of Pb(II) ion. The adsorption of Pb(II) from aqueous solution onto lotus powder was evaluated based on batch experiment. The adsorption efficiency of lotus powder onto Pb(II) was investigated as a function of the initial pH of 6, equilibrium time of 15 min, adsorbent concentration of 5 g/L and initial concentration of Pb(II) solution in the range of 50-500 mg/L. The adsorption isotherms of Langmuir and Freundlich were used to describe the equilibrium isotherm. It is observed that the data from lotus powder adsorbents fitted well to the Langmuir isotherm. The maximum monolayer adsorption capacities of lotus powder were estimated as 13.33 mg/g. The kinetic studies of Pb(II) demonstrated that the adsorption of Pb(II) onto powder lotus adsorbent followed a pseudo second-order model with a good correlation.

Keywords: Adsorption, lead, lotus powder

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญภาพ	ฉ
สารบัญตาราง	ซ
 บทที่ 1 บทนำ	
ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
 บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
ทฤษฎีการดูดซับ	3
การดูดซับทางกายภาพ	3
การดูดซับทางเคมี	4
สมดุลการดูดซับ	4
ไอโซเทอมของการดูดซับ	7
ทฤษฎีการดูดซับของ BET	8
จลนพลศาสตร์การดูดซับ	9
โลหะตะกั่ว	11
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	12
 บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	
เครื่องมือ	15
สารเคมี	15
วิธีการทดลอง	15
 บทที่ 4 ผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง	
เอกลักษณ์ทางกายภาพทางกายภาพตัวดูดซับ	19
ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับไอออนตะกั่ว	20
ไอโซเทอมการดูดซับ	22
ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์	25

บทที่ 5 อภิปรายผลการวิจัย	28
เอกสารอ้างอิง	29
ภาคผนวก	31
ประวัติผู้วิจัย	34

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัย จากงบประมาณรายได้ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ประจำปี พ.ศ. 2563

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่อนุเคราะห์เครื่องมือวิเคราะห์และอุปกรณ์ต่างๆ จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

คณะผู้วิจัย

สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 2.1	5
ภาพที่ 2.2	6
ภาพที่ 3.1	16
ภาพที่ 3.2	16
ภาพที่ 4.1	19
ภาพที่ 4.2	20
ภาพที่ 4.3	21
ภาพที่ 4.4	21
ภาพที่ 4.5	22
ภาพที่ 4.6	23
ภาพที่ 4.7	24
ภาพที่ 4.8	27

ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF
 ผลการวิเคราะห์ร้อยละองค์ประกอบของธาตุ
 ผลของ pH ของสารละลายต่อประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่ว
 ผลของปริมาณตัวดูดซับต่อประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่ว
 ผลของเวลาต่อประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่ว
 กราฟไอโซเทอมของแลงเมียร์
 กราฟไอโซเทอมของ Freundlich
 กราฟจลนพลศาสตร์การดูดซับไอออนตะกั่ว (ก) pseudo-first-order, (ข) pseudo-second-order และ (ค) intra-particle diffusion

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สมบัติของการดูดซับทางเคมีและทางกายภาพ	4
ตารางที่ 4.1 ไอโซเทอมการดูดซับของ Langmuir และ Freundlich	24
ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดไอออนตะกั่ว	25
ตารางที่ 4.3 ปัจจัยของจลนพลศาสตร์การดูดซับไอออนตะกั่ว	26

บทที่ 1

บทนำ

ความสำคัญและที่มาของปัญหา

ปัญหาการปนเปื้อนโลหะหนักในแหล่งน้ำธรรมชาติ เช่น น้ำผิวดิน น้ำบาดาล น้ำทิ้งอุตสาหกรรม หรือการเกษตร ส่งผลกระทบโดยตรงต่อสิ่งมีชีวิตทั้งสัตว์น้ำและมนุษย์ ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาเป็นลูกโซ่ในสิ่งแวดล้อมที่เป็นห่วงโซ่อาหาร เนื่องจากโลหะหนักย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติได้ช้าและน้อยมาก ดังนั้นเมื่อมีการปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมจะทำให้เกิดการสะสม เมื่อระยะเวลาผ่านไปปริมาณโลหะหนักที่สะสมอาจเพิ่มมากขึ้นและมีความเป็นพิษมากขึ้นด้วย โลหะหนัก เช่น ตะกั่ว (Pb) และ แคดเมียม (Cd) เป็นโลหะหนักชนิดหนึ่งที่มีอันตรายสูง การแพร่กระจายอาจเกิดจากหลายแหล่ง เช่น น้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีการใช้ตะกั่วในกระบวนการผลิต อุตสาหกรรมสี แบตเตอรี่ ขยะอิเล็กทรอนิกส์ และอื่นๆ การปนเปื้อนสารตะกั่วในแหล่งน้ำเป็นอันตรายอย่างยิ่ง เนื่องจากจะเกิดการแพร่กระจายได้ง่าย การสะสมของตะกั่วในแหล่งน้ำยังส่งผลกระทบโดยตรงต่อห่วงโซ่อาหาร สัตว์น้ำ พืชน้ำ และจะส่งผลกระทบต่อมนุษย์ ความเป็นพิษของสารตะกั่วเป็นอันตรายที่ร้ายแรง เมื่อเข้าไปสะสมในร่างกายของมนุษย์ปริมาณมากอาจทำให้ร่างกายทำงานผิดปกติมีผลถึงขั้นพิการและเสียชีวิตได้ วิธีการกำจัดโลหะหนักมีด้วยกันหลายวิธี เช่น กระบวนการแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchange) กระบวนการกรองแบบอุลตราฟิลเตรชัน (ultrafiltration) กระบวนการแยกด้วยไฟฟ้าผ่านเยื่อกรอง (electrodialysis) กระบวนการออสโมซิสผันกลับ (reverse osmosis) กระบวนการตกตะกอนและตกตะกอนด้วยเคมี (precipitation and coagulation) และกระบวนการดูดซับ (adsorption) เป็นต้น ซึ่งกระบวนการต่างๆ เหล่านี้มีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันออกไป แม้ว่าวิธีเหล่านี้จะสามารถกำจัดโลหะหนักได้ดีแต่ส่วนมากมักใช้ค่าใช้จ่ายสูง ใช้ระยะเวลานาน มีขั้นตอนการแยกหลายขั้นตอน เป็นต้น

วิธีการดูดซับเป็นปรากฏการณ์เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวของแข็งโดยเป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายระหว่างพื้นที่ผิวของของแข็ง การดูดซับจะเกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสารหรือว่าความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นที่ผิวกับพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่าง 2 สภาวะใดๆ อนุภาคสารที่ถูกดูดซับเรียกว่าสารถูกดูดซับ (adsorbate) ส่วนสารที่ทำหน้าที่เป็นสารดูดซับเรียกว่าตัวดูดซับ (adsorbent) ตัวดูดซับที่นิยมนำมาใช้ในการบำบัดน้ำเสียคือ ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) ถ่านกัมมันต์เตรียมได้โดยทำการคาร์บอนไนซ์ (carbonization) ที่อุณหภูมิสูงแล้วกระตุ้นด้วยสารเคมีที่อุณหภูมิสูง สารเคมีที่ใช้กระตุ้นเช่น ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) หรือกรดเกลือ (HCl) การเตรียมถ่านกัมมันต์โดยใช้วัสดุเหลือใช้จากวัสดุทางธรรมชาติเป็นอีกทางเลือกหนึ่งเพราะนอกจากจะมีประสิทธิภาพแล้วยังเป็นการลดต้นทุนในกระบวนการกำจัดโลหะหนักได้อีกด้วย เนื่องจากวัสดุเหลือใช้ทางธรรมชาติมีอยู่มากและหาได้ง่าย มีงานวิจัยจำนวนมากได้รายงานการกำจัดไอออนโลหะหนัก โดยการใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากวัสดุต่างๆ เช่น ถ่านกัมมันต์มูลโค กะลามะพร้าว ฟางข้าว ไคโตซาน เปลือกหอย ทลายปาล์ม เปลือกกล้วย กากชา เป็นต้น (Amarasinghe 2007, Amuda et al. 2007, Issabayeva et al. 2010, Chen et al. 2006) ผงถ่านไม้ไผ่ (Kanann and Veemraj, 2009, ลักขณา, 2559 อีรดิติล, 2560) นอกจากตัวดูดซับที่เป็นถ่านกัมมันต์แล้วตัวดูดซับ

ประเภทผงไผ่ (clay) ทราย (sand) หรือดินเผา (fire brick) ได้นำใช้เป็นตัวดูดซับโลหะหนักโดยการดัดแปรพื้นผิวโดยวิธีการต่างๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่ว การดัดแปรพื้นผิวตัวดูดซับด้วยการเคลือบ MnO_2 ได้รับความนิยมมากวิธีหนึ่งเช่น MnO_2 coated-diatomite (Al-Degs et al. 2000), MnO_2 coated-sand (Tutunju et al. 2000, Han et al. 2006), MnO_2 coated-zeolite (Zou et al. 2006) และ MnO_2 coated-bentonite (Eren et al. 2009)

ในงานวิจัยนี้ได้สนใจนำวัสดุชีวภาพที่ไม่ได้ประโยชน์ เช่น บัว มาทำการศึกษาการดูดซับไอออนตะกั่ว โดยปัจจัยที่ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับไอออนโลหะหนักคือ ปัจจัย pH, ปัจจัยปริมาณตัวดูดซับ (adsorbent dosage), ปัจจัยเวลา (time), ปัจจัยความเข้มข้นเริ่มต้น (initial concentration)

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักด้วยตัวดูดซับชีวภาพและวัสดุชีวภาพทางการเกษตร

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เพื่อทราบประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วของตัวดูดซับชีวภาพที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปรพื้นผิว และเข้าใจรูปแบบพฤติกรรมดูดซับของตัวดูดซับ

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีการดูดซับ

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

การดูดซับเกิดขึ้นเฉพาะบริเวณผิวสัมผัส (interface) โดยที่มีวัฏภาคหนึ่งเป็นของแข็งเสมอ และเป็นวัฏภาคคายความร้อน โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเกาะอยู่บนผิวหน้าของของแข็งของสารดูดซับ ดังนั้นการดูดซับด้วยของแข็งจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวสัมผัสของของสารดูดซับ การดูดซับจะเกิดขึ้นเนื่องจากแรงดึงดูดที่พื้นผิวของของแข็งซึ่งเป็นสารดูดซับมีค่ามากกว่าค่าพลังงานจลน์ของโมเลกุลของของเหลวนั้น การดูดซับบนผิวของแข็ง แบ่งออกได้ตามแรงที่ดูดซับระหว่างพื้นผิวโมเลกุลเป็น 2 ชนิดคือ การดูดซับทางกายภาพ และการดูดซับทางเคมี

2.1.1 การดูดซับทางกายภาพ

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

2.1.2 การดูดซับทางเคมี

การดูดซับทางเคมี (chemical adsorption หรือ chemisorption) เกิดขึ้นเมื่อตัวถูกดูดซับทำปฏิกิริยาเคมีกัน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีจากตัวถูกดูดซับเดิม คือ มีการทำลายแรงยึดเหนี่ยวระหว่างอะตอมและกลุ่มอะตอมเดิม แล้วมีการจัดเรียงอะตอมขึ้นใหม่โดยมีพันธะเคมีที่แข็งแรง แรงที่ใช้ดูดซับเป็นพันธะโคเวเลนต์มักเกิดขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงกว่าอุณหภูมิวิกฤตของสารที่ถูกดูดซับ มีพลังงาน

กระตุ้น (activation energy) เข้ามาเกี่ยวข้อง ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูงการกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับได้ยากและการดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว

ตารางที่ 2.1 สมบัติของการดูดซับทางเคมีและทางกายภาพ

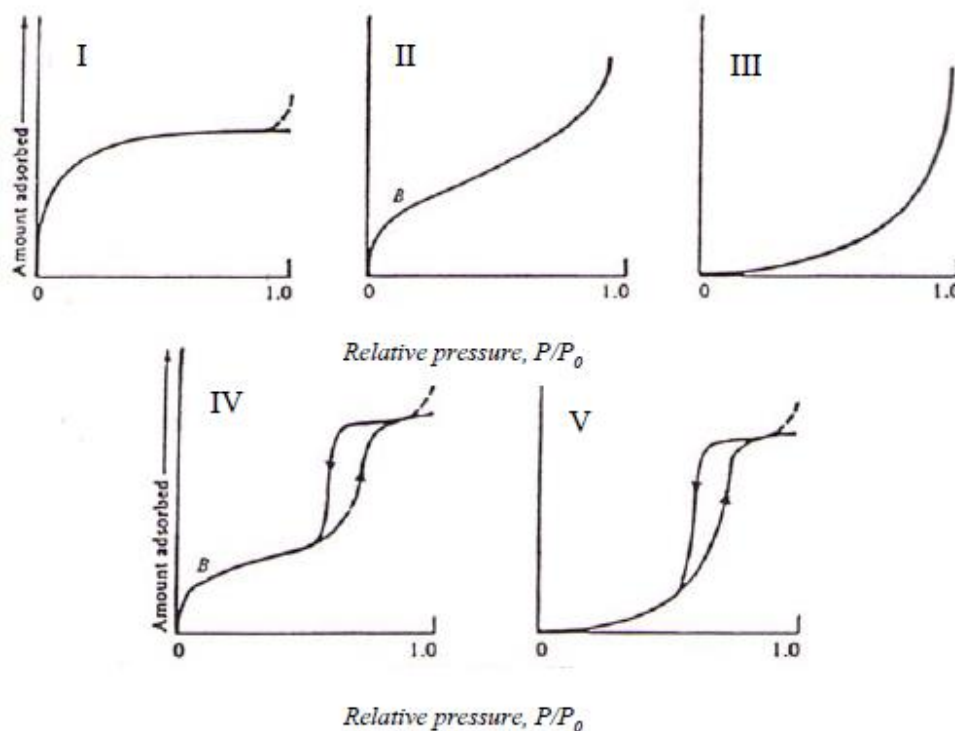
การดูดซับทางเคมี	การดูดซับทางกายภาพ
ค่าความร้อนของการดูดซับ 50-400 kJ/mol	ค่าความร้อนของการดูดซับประมาณ 20 kJ/mol หรือน้อยกว่า
เกิดได้ที่อุณหภูมิสูง	เกิดได้ที่อุณหภูมิต่ำ
ไม่เกิดการผันกลับ	เกิดการผันกลับได้เป็นส่วนใหญ่
เกิดการดูดซับเพียงชั้นเดียว	เกิดการดูดซับหลายชั้น
มีพลังงานก่อกัมมันต์เกี่ยวข้อง	ไม่มีพลังงานก่อกัมมันต์เกี่ยวข้องในกระบวนการ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

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

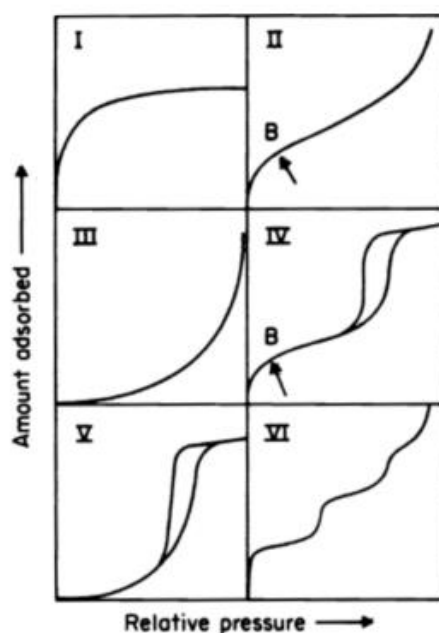
2.2 สมดุลการดูดซับ

สมดุลของการดูดซับจะอาศัยความสัมพันธ์ที่สถานะสมดุลของสมดุลของมวลสาร ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในวัฏภาคของเหลวกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับบนวัฏภาคของแข็ง กระบวนการดูดซับจะเกิดขึ้นต่อไปเรื่อยๆ โดยสารที่ถูกดูดซับและมีการคายการดูดซับ (desorption) ไปพร้อมกัน ซึ่งสมดุลจะเกิดขึ้นเมื่ออัตราการดูดซับและการคายการดูดซับเท่ากัน การวัดปริมาณสารที่ถูกดูดซับที่อุณหภูมิคงที่หนึ่งๆ โดยการแสดงด้วยกราฟ เรียกว่า ไอโซเทอมการดูดซับ (adsorption isotherm) ซึ่งเป็นตัวแทนในการอธิบายการกระจายตัวของตัวถูกดูดซับระหว่างวัฏภาคของเหลวและของแข็ง โดยอัตราการกระจายตัวนี้สามารถวัดได้ที่จุดสมดุลและจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับหรือคุณสมบัติของตัวถูกดูดซับ เมื่อเกิดการดูดซับขึ้น โมเลกุลของตัวที่ถูกดูดซับจะเข้าครอบครองทุกตำแหน่งที่สามารถจะเกิดการดูดซับจนเต็มทุกตำแหน่ง และจะทำให้แรงดึงดูดของผิวตัวดูดซับอ่อนลงเนื่องจากตำแหน่งพื้นผิวมีน้อยลง แต่อาจยังคงสามารถดูดซับโมเลกุลตัวถูกดูดซับได้โดยทำให้เกิดเป็นการดูดซับชั้นที่สองหรือชั้นที่สามเกิดขึ้น ซึ่งอาจเกิดการดูดซับชั้นที่สองก่อนที่ชั้นแรกจะเต็มทุกตำแหน่ง และในบางตำแหน่งอาจจะดูดซับต่อหลายชั้นซ้อนสูงขึ้น รูปร่างของไอโซเทอมการดูดซับจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการดูดซับและปริมาณของสารที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับ

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



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



ภาพที่ 2.2 ประเภทไอโซเทอมของการดูดซับของ IUPAC (IUPAC, 1985)

ไอโซเทอมของการดูดซับทางกายภาพแต่ละประเภทอธิบายได้ดังนี้

- แบบ I เป็นไอโซเทอมของการดูดซับลักษณะเฉพาะของสารดูดซับที่มีขนาดเล็กกว่า 2 nm (microporous adsorbent) การดูดซับส่วนใหญ่จะเป็นการดูดซับในรูพรุนขนาดเล็ก ลักษณะไอโซเทอมจะเป็นโค้งเข้า (concave) หาแกน P/P_0 สารดูดซับมีขนาดใหญ่กว่าขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่มาก สารดูดซับมีพื้นที่ผิวภายนอกน้อย ดังนั้นการดูดซับจะถูกจำกัดเนื่องจากไม่สามารถเข้าไปยังรูพรุนขนาดเล็กได้ การบรรจุโมเลกุลลงในรูขนาดเล็กของสารดูดซับนี้อย่างสมบูรณ์ และมีการอึดตัวที่แน่นอนโดยเกิดการเรียงเป็นชั้นเดียว ไอโซเทอมแบบนี้บางครั้งเรียกว่า Langmuir หรือ L-shape isotherm
- แบบ II เป็นรูปแบบปกติของไอโซเทอมที่เกิดในสารดูดซับที่ไม่มีรูพรุน (nonporous) หรือตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ (microporous) โดยในแบบนี้จะเกิดการดูดซับที่ต่อเนื่องจากการเรียงตัวโมเลกุลเพียงชั้นเดียว (monolayer) อย่างสมบูรณ์ก่อนจึงเกิดเป็นหลายชั้น (multilayer) ในต่อมา จากไอโซเทอมตรงบริเวณจุดเปลี่ยนโค้ง หรือจุด B (break through) จะแสดงถึงการดูดซับแบบชั้นเดียวนั้นเสร็จสมบูรณ์ จากนั้นที่ความดันสูงขึ้นจะเกิดการดูดซับที่ต่อเนื่องจากชั้นแรกต่อไป และจะเกิดการดูดซับเสร็จสมบูรณ์ที่ความดันย่อยสูงๆ 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 เป็นไอโซเทอมของการดูดซับที่มีรูพรุนที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลที่ถูกดูดซับมาก จึงเกิดการเรียงตัวของโมเลกุลที่ผิวของสารดูดซับเป็นสองชั้น (bilayer) ความชันของกราฟเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อความดันเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าตัวถูกดูดซับเริ่มเข้าเติมใน รูพรุนอีกครั้ง และการเปลี่ยนระดับของกราฟเมื่อความดันเพิ่มขึ้นอีกเป็นผลมาจากการควบแน่น ภายในรูพรุนของของแข็ง (Capillary Condensation in Pores) โดยลักษณะของกราฟในช่วงแรกจะเหมือนกับชนิดที่ 2 ซึ่งจุดเปลี่ยนโค้ง จะแสดงถึงการดูดซับชั้นแรกอย่างสมบูรณ์
- แบบ V เป็นไอโซเทอมรูปแบบพิเศษ มีความคล้ายกับแบบ III เกิดขึ้นเมื่อแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวของสารดูดซับมีค่าน้อย ซึ่งจะพบในสารดูดซับที่มีขนาดรูพรุนในช่วงเดียวกับไอโซเทอมแบบ IV สำหรับไอโซเทอมแบบ III และแบบ V นี้จะคำนวณหาพื้นที่ผิวได้ยากเนื่องจากชั้นการดูดซับชั้นที่ 2 จะถูกสร้างขึ้นก่อนที่ชั้นแรกจะเสร็จสมบูรณ์
- แบบ VI เป็นการดูดซับแบบ multilayer เป็นชั้นๆ ขึ้นบนผิวของ nonporous โดยความสูงของแต่ละชั้นจะเป็นความสามารถของ monolayer ในชั้นนั้นๆ

2.3 ไอโซเทอมของการดูดซับ

ไอโซเทอมของการดูดซับ (adsorption isotherm) อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สมดุลกับจำนวนของตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ที่มีการดูดซับที่อุณหภูมิคงที่ สำหรับการดูดซับตัวถูกละลายบนผิวแข็งจะเป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับกับความเข้มข้นของสารละลายที่ภาวะสมดุลที่อุณหภูมิใดๆ

2.3.1 ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)

ในปี ค.ศ.1916 แลงเมียร์ (Irving Langmuir) ได้เสนอไอโซเทอมแบบง่ายที่สุด โดยมีสมมติฐานคือ

- 1) ใช้สำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption)
- 2) โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนแน่นอนและมีตำแหน่งของการดูดซับที่แน่นอน
- 3) ในแต่ละโมเลกุลของสารดูดซับจะดูดซับโมเลกุลของสารถูกดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น ในแต่ละตำแหน่งค่าความร้อนของการดูดซับเท่ากันและคงที่ ไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่อยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน พลังงานของการดูดซับจะเหมือนกันทุกๆ พื้นที่ของตัวดูดซับ
- 4) โมเลกุลที่จะถูกดูดซับไม่สามารถที่จะย้ายข้ามผิว หรือเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลข้างเคียงได้

สมการแลงเมียร์เป็นสมการง่ายๆ แบบจำลองเป็นพื้นฐานทางฟิสิกส์และสามารถนำมาใช้งานได้ในช่วงที่กว้าง ในขณะที่สมการของแลงเมียร์มีข้อจำกัดของการใช้งาน ได้แก่ พลังงานของการดูดซับเป็นอิสระจากระดับการควบคุม แรงที่ใช้ในการดึงดูดเป็นแรงอ่อนๆ ที่สามารถผันกลับได้และจะใช้ได้ในกรณีที่ผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นแบบชั้นเดียวเท่านั้น สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์เขียนได้ดังนี้

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

เมื่อ q_e คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับ (mg) ต่อปริมาณของตัวดูดซับ(g) ที่ภาวะสมดุล หรือเรียกว่าหรือค่าการดูดซับที่สมดุล

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

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

จากสมการไอโซเทอมของแลงเมียร์ (สมการ 2.3) เมื่อเขียนกราฟระหว่าง C_e/q_e กับ C_e ค่า q_m และ b หาได้จากความชัน (slope) และจุดตัดแกน (intercept) สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์ ยังอาจ

แสดงได้ด้วยปัจจัยของการแยกหรือค่าตัวแปรที่สภาวะสมดุล (separation factor or equilibrium parameter, R_L) ดังสมการ

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

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

2.3.2 ไอโซเทอมแบบ Freundlich (Freundlich isotherm)

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

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

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

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 แต่ค่ามากกว่า 1 อธิบายถึงบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับมีปริมาณมากที่จะใช้ในการดูดซับ และถ้าน้อยกว่า 1 อธิบายถึงปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับมีปริมาณจำกัดที่จะใช้ในการดูดซับ

2.4 ทฤษฎีการดูดซับของ BET

ในปี ค.ศ. 1938 Brunauer, Emmett และ Teller ได้ทำการปรับปรุงสมการของ Langmuir เพื่อให้อธิบายการดูดซับแบบหลายชั้น เรียกว่า สมการของ BET สมมติฐานเบื้องต้นของสมการนี้คือ โมเลกุลที่ถูกดูดซับในชั้นแรกจะเป็นพื้นผิวในการเกาะของสารที่ถูกดูดซับในชั้นที่สองและชั้นต่อไป ดังนั้น โมเลกุลในชั้นที่สองจะเกาะอยู่บนสารที่ถูกดูดซับไม่ใช่พื้นผิวของการดูดซับ จึงเหมือนอยู่ในภาวะอ้อมตัวของเหลว แตกต่างจากในชั้นแรกที่มีโมเลกุลสัมผัสกับพื้นผิวของสารดูดซับโดยตรง

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

เมื่อ P คือความดันของการดูดซับ
 P_0 คือความดันอิ่มตัว
 W คือน้ำหนักของสารที่ถูกดูดซับ
 W_m คือน้ำหนักของสารที่ปกคลุมเต็มชั้นหนึ่ง
 C คือค่าคงที่

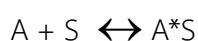
ในปัจจุบันการใช้สมการการดูดซับของ BET เพื่อหาขนาดพื้นที่ของตัวดูดซับได้รับการยอมรับทั่วไป ซึ่งพื้นที่ผิวสามารถหาได้จากการหาปริมาณแก๊สดังกล่าวมาเปลี่ยนจำนวนโมเลกุลของแก๊สที่ปกคลุมพื้นผิวเต็มหนึ่งชั้น คูณด้วยพื้นที่สำหรับการปกคลุมด้วยแก๊สหนึ่งโมเลกุล จากนั้นนำพื้นที่ทั้งหมดไปหารด้วยน้ำหนักของตัวดูดซับที่นำมาทดสอบจะได้พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับนั้น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

2.5 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

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

2.5.1 สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง

จากสมมุติฐานการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับเป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้า (electrostatic interaction) ระหว่างผิวตัวดูดซับกับโมเลกุลตัวถูกดูดซับและการดูดซับเป็นการดูดซับทางเคมี สามารถคำนวณหาอัตราเร็วในการดูดซับได้โดยใช้สมการจลนพลศาสตร์การดูดซับของ Lagergren จากปฏิกิริยาการดูดซับ



โดยที่ A คือ ตัวถูกดูดซับ (adsorbate) และ S คือตัวดูดซับ (adsorbent) และ A^*S คือ สารประกอบที่เกิดจากการดูดซับ (adsorbed compound) สามารถเขียนสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง ได้ดังนี้

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

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 $q_t=t$ จะได้สมการคือ

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

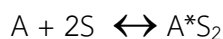
จัดสมการให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้น จะได้

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

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

2.5.2 สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง

สมการจลนพลศาสตร์สำหรับอธิบายการดูดซับบนผิวตัวดูดซับที่นิยมอีกสมการหนึ่งคือ สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง 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 $1/k_2 q_e^2$

2.5.3 การแพร่ภายในรูพรุน (intraparticle diffusion)

จลนพลศาสตร์การดูดซับนอกจากจะสอดคล้องกับสมการจลนพลศาสตร์การดูดซับที่ผิวตัวดูดซับแล้ว จลนพลศาสตร์การดูดซับอาจจะสอดคล้องกับการแพร่ภายในรูพรุนด้วย ดังนั้นสมการการแพร่ภายในรูพรุนจึงเป็นอีกสมการหนึ่งที่ใช้ในการทำนายจลนพลศาสตร์การดูดซับ สมการการแพร่ภายในรูพรุนของ Weber และ Morris สามารถเขียนอยู่ในรูปสมการเชิงเส้นได้ดังนี้

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

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

2.6 โลหะหนัก

โลหะหนัก (heavy metal) หมายถึงโลหะที่มีความหนาแน่นเกินกว่า 5 g/m³ โลหะตะกั่ว (lead) สัญลักษณ์ธาตุคือ Pb เป็นธาตุที่มีอยู่ในธรรมชาติที่จัดอยู่ในหมู่ที่ IV ของตารางธาตุ มีเลขอะตอม 82 เลขมวล 207.19 จุดหลอมเหลว (melting point) 3,640°C จุดเดือด (boiling point) 1,749°C ตะกั่วมีสมบัติทางกายภาพและเคมีคล้ายดีบุก นำมาทำให้บริสุทธิ์ได้ง่าย ทนต่อการผุกร่อนได้ดี ละลายน้ำได้น้อย ในธรรมชาติตะกั่วมีกำเนิดจากหินอัคนีและหินแปรมีประมาณ 10–20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม พบในรูปของสารประกอบตะกั่วซัลไฟด์ ตะกั่วซัลเฟต ตัวอย่างแร่ที่มีตะกั่วเป็นองค์ประกอบ ได้แก่ แร่จีไรต์ (galenite) ซึ่งเป็นซัลไฟด์ของตะกั่ว แร่ซีรซีไซด์ (cerussite, PbCO₃) แร่แองกลีไซด์ (anglesite, PbSO₄) แร่ไพโรโมไฟต์ (pyromophite, PbCl₂·3Pb₃(PO₄)₂) เป็นต้น

ตะกั่วเป็นโลหะหนักที่มีลักษณะอ่อนทำให้หลอมเหลวได้ง่ายและสามารถพิมพ์แบบออกมาเป็นรูปร่างต่างๆ ได้ดี จึงนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลาย มีการนำตะกั่วมาใช้ตั้งแต่สมัยโบราณ ในปัจจุบันก็ยังมีการใช้ตะกั่วในงานต่างๆ อย่างแพร่หลาย ภาวะตะกั่วเป็นพิษเป็นโรคที่พบได้บ่อยในประเทศไทย อาการของตะกั่วเป็นพิษเป็นอาการที่เกิดขึ้นกับอวัยวะหลายระบบและคล้ายกับอาการของโรคอื่นๆ

ตะกั่วเป็นสารที่พบปนเปื้อนทั่วไป ในสมัยอดีตเด็กเป็นโรคพิษตะกั่วจากการรับประทานสีทาบ้านหรือใช้มือจับของที่ติดสีดังกล่าว ในปัจจุบันสีทาด้วยตะกั่วมีน้อยลง แหล่งที่สำคัญที่ทำให้เกิดพิษสำหรับผู้ใหญ่คือจากอุตสาหกรรมได้แก่ โรงงานทำแบตเตอรี่และโรงงานอื่นๆ ที่มีการใช้ตะกั่วอย่างกว้างขวาง เช่น อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ สำหรับประชาชนโดยทั่วไปอาจได้รับตะกั่วจากอากาศ ซึ่งมักมีตะกั่วปนเปื้อนจากการใช้เตตระเอทิลเลด (tetraethyl lead) ในน้ำมันรถยนต์ นอกจากนี้ยังมีแหล่งอื่นๆ อีกจำนวนมากที่อาจจะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดภาวะตะกั่วเป็นพิษ ได้แก่ หัวกระสุนตะกั่วที่ตกค้างในร่างกาย การทำงานในสนามยิงปืน ยาสูบนิโคติน รมิก แป้งทาลูกเต้า (จู้ฮั้ง) ภาชนะเซรามิกส์ ที่มีตะกั่ว ท่อประปาที่ทำด้วยตะกั่ว ผลิตภัณฑ์จากแบตเตอรี่และอาหารที่มีตะกั่วปนเปื้อน เหล้าไวน์ เครื่องยนต์ที่ใช้ตะกั่วเป็นส่วนประกอบ การเจียรไนพลอยที่ใช้จานตะกั่ว ตะกั่วที่ใช้เป็นตัวพิมพ์หนังสือ ตะกั่วถ่วงน้ำหนักฆาน สีที่ทาของใช้ของเด็ก เป็นต้น

ตะกั่วเป็นธาตุที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมต่างๆ ไป ปกติผู้ใหญ่จะรับประทานอาหารโดยมีตะกั่วปนเปื้อนอยู่ด้วยประมาณวันละ 150 ไมโครกรัม อาหารเด็กอาจมีตะกั่วปนประมาณวันละ 100 ไมโครกรัม และรับตะกั่วในน้ำดื่มประมาณ 100 ไมโครกรัมต่อวัน นอกจากนี้คนเรายังรับตะกั่วทางการหายใจ

โดยทั่วไปอากาศอาจจะมีปริมาณตะกั่ว 1-2 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ประมาณกันว่าถ้าปริมาณตะกั่วในอากาศ 1 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตรจะทำให้ตะกั่วในเลือดสูงขึ้น 1 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์ลิตร โดยสรุป คนหนึ่งอาจรับตะกั่วเข้าไปในร่างกายวันละ 0.1-2 มิลลิกรัม ในจำนวนนี้ประมาณ ร้อยละ 75 เข้าทางทางเดินอาหารและร้อยละ 25 เข้าทางการหายใจ การดูดซึมตะกั่วไปทางเดินอาหาร ผู้ใหญ่จะดูดซึมเข้าไปในร่างกายประมาณร้อยละ 10 ส่วนเด็กจะดูดซึมมากกว่าถึงร้อยละ 40 ดังนั้นเด็กที่รับประทานสารที่ปนเปื้อนตะกั่วทางปากอาจจะมีอาการเป็นพิษมากกว่า ส่วนตะกั่วที่เข้าไปในทางเดินหายใจ ถ้าขนาดของผงฝุ่นที่มีตะกั่วยิ่งเล็การดูดซึมก็ยิ่งมาก ผงฝุ่นตะกั่วที่เล็กกว่า 0.5 ไมโครเมตร ร่างกายสามารถดูดซึมได้ถึงร้อยละ 90 การกระจายของตะกั่วในร่างกาย เนื่องจากปกติตะกั่วที่เข้าสู่ร่างกายจะถูกกำจัดออกไปช้าๆ ผลทำให้ตะกั่วมีการสะสมขึ้น ในคนทั่วไปตะกั่วอาจจะสะสมในร่างกายประมาณ 200 มิลลิกรัม ส่วนในคนงานที่ทำงานเกี่ยวกับสารตะกั่วอาจจะสะสมถึง 500 มิลลิกรัม

เมื่อสารตะกั่วเข้าสู่ร่างกายจะกระจายไปยังเนื้อเยื่อของอวัยวะส่วนต่างๆ (ค่าครึ่งชีวิต 40 วัน) เช่น สมอง หัวใจ ปอด ตับ ม้าม ไชกระดูก เส้นผม เป็นต้น หลังจากนั้นจะสะสมที่กระดูกและฟันเกือบทั้งหมด (ค่าครึ่งชีวิต 10-20 ปี) มีเพียงเล็กน้อยที่อยู่ในกระแสเลือด โดยเฉพาะเม็ดเลือดแดง (ค่าครึ่งชีวิต 30-40 วัน) แล้วจะขับออกทางไตและทางอุจจาระ เหงื่อ หากขับออกได้ช้าจะมีการสะสมและเกิดพิษ โดยเฉพาะเมื่อร่างกายมีภาวะขาดสมดุลกรด-ด่าง สารตะกั่วที่สะสมอยู่ในกระดูกจะเข้าสู่หลอดเลือดและกระจายไปตามเนื้อเยื่ออ่อนทำให้เกิดอาการพิษมากขึ้น สารตะกั่วจะขัดขวางการสร้างฮีโมโกลบินในเม็ดเลือดแดง ขัดขวางเอนไซม์ที่เกี่ยวกับการสร้างฮีโมโกลบิน โดยขัดขวางการจับตัวระหว่างเหล็ก (Fe) กับโปรโตพอร์ไฟริน (Protoporphyrin) ทำให้ระดับของฮีโมโกลบินและฮีโมกลิตลดลง ส่งผลกระทบต่อการสร้างเม็ดเลือด และ protoporphyrin จะจับกับสังกะสี (Zn) เป็น Zinc protoporphyrin (ZPP) นอกจากนี้พิษจากสารตะกั่วยังมีผลลดการส่งผ่านกระแสไฟฟ้าให้หัวใจ ทำให้หัวใจเต้นผิดจังหวะและการไหลเวียนเลือดผิดปกติ ไตทำงานผิดปกติเกี่ยวกับการขับกรดยูริก สารตะกั่วสามารถผ่านไปยังสมองทาง Blood brain barrier ทำให้เกิดอาการทางระบบประสาทได้ และยังมีผลต่ออวัยวะสืบพันธุ์และโครโมโซม

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เพ็ชรพร เขาวกิจเจริญ (2537) ได้ใช้ผักตบชวาและชานอ้อยเป็นสารแลกเปลี่ยนไอออน สำหรับกำจัด ทองแดง นิกเกิลและสังกะสี พบว่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวาที่ไม่ปรับสภาพมีค่าสูงที่สุดอยู่ในช่วง 0.686-0.809 mEq/g ส่วนผักตบชวาที่ปรับสภาพแบบคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเอทิลและโครอสต์ลิ่งค์แซนเทตมีค่าอยู่ในช่วง 0.330-0.496 mEq/g 0.233-0.503 mEq/g และ 0.279-0.595 mEq/g ตามลำดับ สำหรับชานอ้อยที่ไม่ได้ปรับสภาพความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน มีค่าอยู่ในช่วง 0.065-0.086 mEq/g และชานอ้อยที่ปรับสภาพแบบคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส มีค่าอยู่ในช่วง 0.052-0.069 mEq/g ผลจากการวิจัยพบว่าการปรับสภาพโดยวิธีทางเคมีทั้ง 3 วิธี ทำให้ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวาและชานอ้อยลดลง สำหรับอิทธิพลของความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสีย พบว่าความสามารถในแลกเปลี่ยนไอออนเพิ่มขึ้น เมื่อน้ำเสียมีความเข้มข้นของโลหะหนักน้อยลง สำหรับการรีเจนเนอเรชันใช้สารรีเจนเนอเรนต์แต่ละชนิด เข้มข้น 0.5 นอร์มอล ประมาณ 2-3 ปริมาตรเรซิน

นิริรัชต์ สงวนเดือน. 2545. ได้ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักนิกเกิล ทองแดง และสังกะสีโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากซังข้าวโพด เปลือกถั่วเหลือง และก้านดอกทานตะวันชนิดไม่ปรับสภาพ ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก ปรับสภาพด้วยฟอร์มาลดีไฮด์ 5% และปรับสภาพด้วยฟอร์มาล

ดีไฮด์ 37% ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่า เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากเปลือกถั่วเหลืองมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักมากที่สุด รองลงมาคือก้านดอกทานตะวัน และซิงข้าวโพด ตามลำดับ ผลของการปรับสภาพทางเคมีไม่ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักเพิ่มมากขึ้น เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำการศึกษามีประสิทธิภาพกำจัดทองแดงได้มากกว่า สังกะสี และนิกเกิล ตามลำดับ เรซินแลกเปลี่ยนไอออนมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักดีที่สุด ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักในน้ำเสีย 5 มก./ล. โดยเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักจะลดลง กลไกหลักในการกำจัดโลหะหนัก คือ การแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างเรซินแลกเปลี่ยนไอออนกับไอออนของโลหะหนักในน้ำเสีย และอาจเกิดการดูดติดผิวประกอบด้วย โดยกลไกการดูดติดผิวเป็นไปตามสมการของแลงมัวร์ เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากเปลือกถั่วเหลือง และก้านดอกทานตะวัน ชนิดไม่ปรับสภาพ มีแนวโน้มสามารถนำมาใช้ทดแทนเรซินสังเคราะห์ได้ โดยมีความสามารถทั้งหมดในการแลกเปลี่ยนไอออนเท่ากับ 5.4 และ 4.5 meq./g. ตามลำดับ

ชัชฎาพร องอาจ. 2545. เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักนิกเกิล ทองแดง และสังกะสี โดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรได้แก่ ต้นมันสำปะหลังใบสับปะรด และกาบมะพร้าว ชนิดไม่ปรับสภาพ ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก 1 นอร์มัลปรับสภาพด้วยฟอร์มาลดีไฮด์ 5% และปรับสภาพด้วยฟอร์มาลดีไฮด์ 37% โดยทำการทดลองแบบที่ละเท่าการวิจัยพบว่าเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากกาบมะพร้าวชนิดไม่ได้ปรับสภาพจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักได้สูงกว่าชนิดที่ปรับสภาพด้วย ฟอร์มาลดีไฮด์ 5% ชนิดที่ปรับสภาพด้วยฟอร์มาลดีไฮด์ 37% และชนิดที่ปรับสภาพด้วย 1 นอร์มัล กรดไฮโดรคลอริก ตามลำดับ เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากกาบมะพร้าวมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะทองแดง นิกเกิลและสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์สูงกว่าเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากต้นมันสำปะหลังและใบสับปะรด โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะทองแดง นิกเกิล และสังกะสีเฉลี่ยเท่ากับ 67.72%, 22.55% และ 44.78% ตามลำดับ เรซินแลกเปลี่ยนไอออนมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักดีที่สุด ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักในน้ำเสีย 5 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยพบว่าเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะจะลดลง นอกจากนี้ผลการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งมีความเข้มข้นของทองแดง นิกเกิล และสังกะสีเริ่มต้นเท่ากับ 3.930, 4.034 และ 0.567 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ พบว่ากาบมะพร้าวชนิดไม่ได้ปรับสภาพสามารถกำจัดโลหะหนักดังกล่าวได้เฉลี่ย 85.80, 65.13 และ 90.43 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

พรรณีพา พวันนา และคณะ (2560) ทำการสังเคราะห์เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดไอออนบวกจากผักตบชวาโดยปฏิกิริยาเอสเทอร์รีฟิเคชันระหว่างเซลลูโลสในผักตบชวากับกรดซิตริก เพื่อใช้เป็นสารแลกเปลี่ยนไอออนในสารละลายน้ำ พบว่า ค่าความจุเฉลี่ยสูงสุดของเรซิน เท่ากับ 5.1044, 4.7377, 4.6285 และ 4.4229 มิลลิสมมูลต่อกรัมเรซิน ค่าความจุไอออนของเรซินไม่ได้เพิ่มขึ้นตามการเกิดปฏิกิริยาที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการเกิดการเชื่อมขวางขึ้นในโครงสร้างของเรซิน การศึกษาความสามารถในการดูดซับไอออนทองแดงในสารละลายน้ำ (พีเอช 5, 24 ชั่วโมง) พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับอยู่ในช่วงร้อยละ 55 ถึง 82 โดยเรซินที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 240 นาที และอุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 180 นาที

Sari et al. (2007) ได้ใช้ผงเถ้าจากเมือง Celtek ประเทศตุรกี ซึ่งเป็นดินที่ใช้ทำอิฐก่อสร้าง ผงเถ้า Celtek เป็นตัวดูดซับไอออนตะกั่วและโครเมียมโดยวิธีแบทช์ ปัจจัยที่เหมาะสมในการดูดซับ คือ ปริมาณตัวดูดซับ 0.1 กรัม ที่ pH 6 ระยะเวลาในการกวนที่ 30 นาที พบว่าพฤติกรรมการดูดซับสอดคล้องกับไอโซ

เทอมของ Langmuir ดีกว่าไอโซเทอมของ Freundlich พบว่าการดูดซับแบบชั้นเดียวสูงสุด (maximum monolayer adsorption capacity, q_m) สำหรับดูดซับตะกั่วเท่ากับ 18.08 mg/g สอดคล้องกับรายงานของ Ozdes et al. (2011) ใช้ผงไพล์ไรต์ (illite clay) ประเทศตุรกีสำหรับดูดซับไอออนตะกั่วและโครเมียม พบว่าการดูดซับแบบชั้นเดียวสูงสุดสำหรับดูดซับตะกั่วเท่ากับ 53.76 mg/g ในสภาวะปริมาณดิน 1.0 g/L pH เท่ากับ 4 และระยะเวลาการกวน 240 นาที

ลักขณา โชติธรรม และคณะ (2559) ได้เตรียมและศึกษาลักษณะจำเพาะของถ่านกัมมันต์จากไผ่ตง ลี้มแล้ง เพื่อนำไปใช้ในการกำจัดสารละลายตะกั่ว โดยศึกษาผลของตัวกระตุ้น ได้แก่ กรดฟอสฟอริกและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ วิธีการให้ความร้อนด้วยเทคนิครีฟลักซ์และเครื่องไมโครเวฟ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่ว และปริมาณถ่านกัมมันต์ที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับสารละลายตะกั่ว จากผลการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์ไผ่ตง ลี้มแล้งคือ ให้ความร้อนด้วยเครื่องไมโครเวฟเป็นเวลา 10 นาที โดยได้ค่าไอโอดีนัมเบอร์สูงสุดเท่ากับ 1265 มิลลิกรัมต่อกรัม จากการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วในน้ำสังเคราะห์ พบว่าเมื่อใช้ปริมาณถ่านกัมมันต์ 0.25 กรัม ในสารละลายตะกั่วเข้มข้น 10 ppm ระยะเวลาสัมผัส 8 นาที ได้ร้อยละการดูดซับสูงสุด

ผงไผ่แร่ kaolinite ได้นำมาใช้กำจัดไอออนตะกั่วโดยวิธีการดูดซับ Gupta et al. (2005) พบว่าการดูดซับแบบชั้นเดียวสูงสุดสำหรับดูดซับตะกั่วเท่ากับ 11.52 mg/g Jiang et al. (2009) เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วระหว่างผงไผ่แร่ kaolinite ธรรมชาติกับผงไผ่แร่ kaolinite ที่ผ่านการดัดแปรพื้นผิว พบว่าผงไผ่แร่ kaolinite ที่ผ่านการดัดแปรพื้นผิวมีประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนตะกั่ว ดีกว่าประมาณ 4.5 เท่า พบว่าการดูดซับแบบชั้นเดียวสูงสุดสำหรับดูดซับตะกั่วเท่ากับ 4.73 mg/g และ 32.2 mg/g สำหรับผงไผ่แร่ kaolinite ธรรมชาติและผงไผ่แร่ kaolinite ที่ผ่านการดัดแปรพื้นผิว ตามลำดับ สอดคล้องกับรายงานของ Jiang et al. (2010) ที่ทดสอบผงไผ่แร่ kaolinite ธรรมชาติ ประเทศจีน ดูดซับไอออนตะกั่ว แคดเมียม นิกเกิลและทองแดง พบว่าการดูดซับแบบชั้นเดียวสูงสุดสำหรับดูดซับตะกั่วเท่ากับ 2.35 mg/g

Al-Degs et al. (2000) ทำการดัดแปรพื้นผิว diatomite ด้วย MnO_2 โดยการแช่ในสารละลาย MnO_2 (0.38g/ 1 g diatomite) พบว่าพื้นที่ผิวมากกว่า diatomite ประมาณ 2.4 เท่า การดูดซับไอออนตะกั่วสูงสุดเท่ากับ 99 mg/g ที่ pH 4 ซึ่งการดูดซับไอออนตะกั่วของ MnO_2 -diatomite ดีกว่า diatomite ประมาณ 4 เท่า Han et al. (2006) ทำการดัดแปรพื้นผิวทรายด้วย MnO_2 โดยการตกตะกอนคอลลอยด์ของแมงกานีสออกไซด์บนพื้นผิวของทราย Eren et al. (2009) รายงานการดัดแปรพื้นผิว bentonite ด้วย MnO_2 (MnO_2 -bentonite) จากผลการทดสอบการดูดซับไอออนตะกั่วพบว่า สามารถดูดซับไอออนตะกั่วได้ดีกว่า bentonite ประมาณ 3 เท่า

บทที่ 3

การดำเนินงานวิจัย

3.1 เครื่องมือ (apparatus)

- 1) อะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ (AAS), iCE3000 series, Thermo Scientific, England
- 2) เตาอบไฟฟ้า, Binder FD115, Germany
- 3) เครื่องชั่งละเอียด, AND HM-200, Japan
- 4) Magnetic stirrer, CAT M6, SCHOTT, Germany
- 5) pH meter, Lab860, SCHOTT, Germany
- 6) X-ray fluorescence (XRF), Horiba Japan
- 7) Centrifuge, PLC-012E Universal centrifuge, USA
- 8) Microwave digestion, Toplex, China

3.2 สารเคมี (reagents)

สารเคมีที่ใช้ในการทดลองเป็นเกรดวิเคราะห์ (reagent grade)

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

3.3 วิธีการทดลอง (methodology)

3.3.1 การเตรียมตัวดูดซับ

- 1) การเตรียมตัวดูดซับ

วิธีการเตรียมตัวดูดซับ โดยการนำบัวสด ตากแดดจนแห้ง (ดังภาพที่ 3.1) อบที่อุณหภูมิ 80-90 องศาเซลเซียสจนแห้ง บดละเอียด และร่อนผ่านตะแกรงร่อนขนาด 500 ไมครอน แล้วเก็บในโถสุญญากาศ (ดังภาพที่ 3.2)



(ก)



(ข)

ภาพที่ 3.1 ฝักบัว (ก) สด และ (ข) แห้ง



ภาพที่ 3.2 ตัวดูดซับบัวบดละเอียด

3.3.2 การศึกษาการดูดซับโลหะตะกั่ว

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

ประสิทธิภาพของการดูดซับไอออนตะกั่วของตัวดูดซับ โดยการเปรียบเทียบปริมาณไอออนตะกั่ว ก่อนและหลังการดูดซับ ประสิทธิภาพของการดูดซับไอออนตะกั่วคำนวณจากสมการ

$$AC = \frac{(C_0 - C_e)}{mass} \times V \quad \dots\dots(3.1)$$

$$\%RE = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0} \times 100 \quad \dots\dots(3.2)$$

เมื่อ AC คือ ปริมาณของโลหะหนักที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับ (adsorption capacity)

RE คือ ประสิทธิภาพการกำจัด (removal efficiency)

C_0 คือ ความเข้มข้นไอออนตะกั่ว (mg/L) เริ่มต้น

C_e คือ ความเข้มข้นไอออนตะกั่ว (mg/L) ที่สมดุล

V คือ ปริมาตรของสารละลาย (L)

mass คือ น้ำหนักของตัวดูดซับ (g)

3.3.3 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับไอออนตะกั่ว

1) ปัจจัย pH

- ตัวดูดซับ 0.10 กรัม ใส่ในหลอด PETE ขนาด 50 mL เติมสารละลายมาตรฐานไอออนตะกั่วเข้มข้น 100 mg/L ปริมาตร 10 mL ที่ปรับค่า pH เป็น 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 ด้วย dil.HNO₃ และ dil.NaOH

- กวนโดยใช้เครื่องกวนแม่เหล็กด้วยอัตราเร็วคงที่เป็นเวลา 60 นาที

- กรองสารละลายแล้วนำสารละลายไปวัดปริมาณไอออนตะกั่วด้วยเครื่อง AAS

2) ระยะเวลาสัมผัส (equilibrium time)

- ตัวดูดซับ 0.10 กรัม ใส่ในหลอด PETE ขนาด 50 mL เติมสารละลายมาตรฐานไอออนตะกั่วเข้มข้น 100 mg/L ปริมาตร 10 mL ที่ pH ของสารละลายเท่ากับ 6

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

- กรองสารละลายแล้วนำสารละลายไปวัดปริมาณไอออนตะกั่วด้วยเครื่อง AAS

3) ปริมาณของตัวดูดซับ (adsorbent dosage)

- ตัวดูดซับน้ำหนักที่แตกต่างกันคือ 0.1, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 และ 1.0 กรัม ใส่ในหลอด PETE ขนาด 50 mL เติมสารละลายมาตรฐานไอออนตะกั่วเข้มข้น 100 mg/L ปริมาตร 10 mL ที่ pH ของสารละลายเท่ากับ 6

- กวนโดยใช้เครื่องกวนแม่เหล็กด้วยอัตราเร็วคงที่เป็นเวลา 60 นาที
- กรองสารละลายแล้วนำสารละลายไปวัดปริมาณไอออนตะกั่วด้วยเครื่อง AAS

4) ผลความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนตะกั่ว

- ตัวดูดซับ 0.10 กรัม ใส่ในหลอด PETE ขนาด 50 mL เติมสารละลายมาตรฐานไอออนตะกั่วเข้มข้นตั้งแต่ 20-200 mg/L ปริมาตร 10 mL ที่ pH ของสารละลายเท่ากับ 6

- กวนโดยใช้เครื่องกวนแม่เหล็กด้วยอัตราเร็วคงที่เป็นเวลา 60 นาที
- กรองสารละลายแล้วนำสารละลายไปวัดปริมาณไอออนตะกั่วด้วยเครื่อง AAS

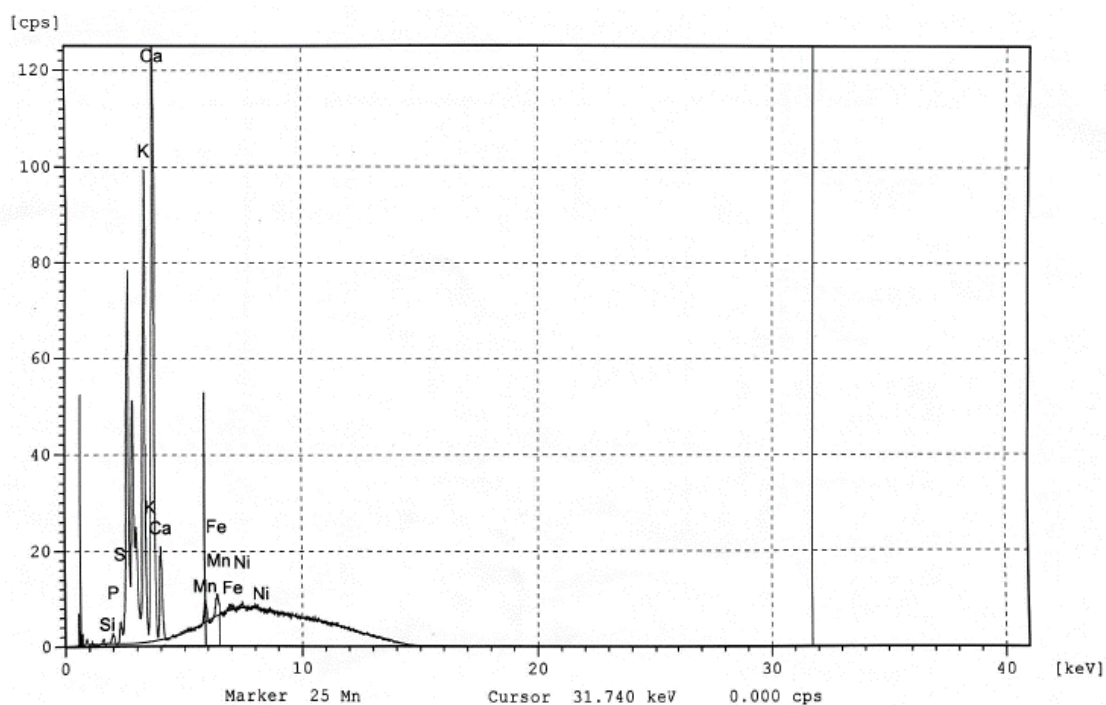
บทที่ 4

ผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง

4.1 เอกลักษณ์ทางกายภาพของตัวดูดซับ

4.1.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF

การวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุด้วยเทคนิค XRF แสดงดังภาพที่ 4.1 โดยพบว่าองค์ประกอบหลักของตัวดูดซับบั่วเป็นธาตุแคลเซียม และโพแทสเซียม มากกว่าร้อยละ 77 ดังแสดงในภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค XRF

Collimator	: 3 mm	Live time	: 100 s
X-ray tube vol.	: 15 kV	Current	: 200 μ A
Path	: Air	Processing Time	: P3
X-ray Filter	: Cl	Material	: -

[Concentration]					
No. Target	Results	Unit	3sigma	Intensity[cps/mA]	method
- Pb	5233.2565	ppm	7297.1163	12.70	FP
- Cd	3843.2527	ppm	2870.8616	21.81	FP
- Cr	0.0000	ppm	0.0000	0.00	FP
- Hg	1611.7780	ppm	4579.7019	6.73	FP
- Br	1290.0833	ppm	3059.3172	6.71	FP
- Cl	149880.8045	ppm	2290.7440	4470.75	FP

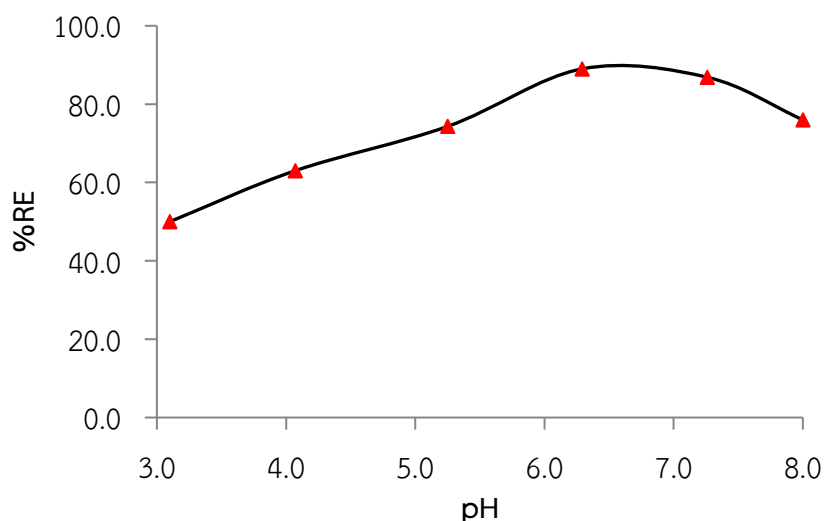
[Other elements:FPM]					
Quant. Corr.	: Standard-less				
Resid Comp. automatic setup	OFF				
Elem.	Line	Mass[%]	3sigma[%]	Intensity[cps/mA]	
14 Si Silicon	K	0.29	0.33	4.10	
15 P Phosphorus	K	1.29	0.18	57.16	
16 S Sulfur	K	2.18	0.10	266.63	
19 K Potassium	K	25.87	0.23	5933.26	
20 Ca Calcium	K	52.10	0.32	8424.66	
25 Mn Manganese	K	1.01	0.06	309.17	
26 Fe Iron	K	0.93	0.06	312.23	
28 Ni Nickel	K	0.14	0.05	54.70	

ภาพที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ร้อยละประกอบของธาตุ

4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับไอออนตะกั่ว

1) ผลของ pH ของสารละลาย (pH of solution)

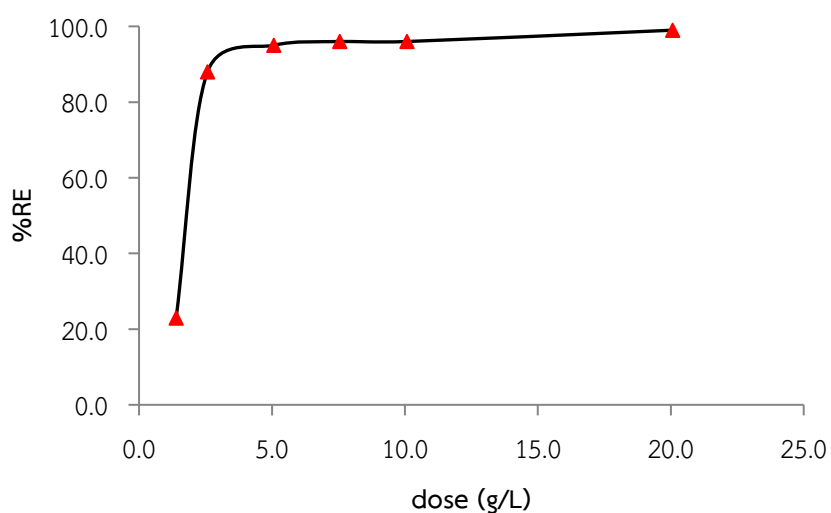
การศึกษาอิทธิพลของ pH ต่อการดูดซับไอออนตะกั่วในช่วง pH 2-7 พบว่าความจุการดูดซับ (adsorption capacity) ของตัวดูดซับ เพิ่มขึ้นสูงสุดที่ pH เท่ากับ 6 โดยมีประสิทธิภาพการกำจัด (removal efficiency) ประมาณร้อยละ 85 ดังแสดงในภาพที่ 4.3 ผลการทดลองสอดคล้องกับรายงานวิจัยที่ระบุว่าความจุการดูดซับของตัวดูดซับจะต่ำในสภาวะที่สารละลายเป็นกรดเนื่องจากบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับจะถูก protonate ส่งผลให้เกิดการแข่งขันระหว่างโปรตอนและไอออนโลหะ ในขณะที่ pH มากกว่า 6 ความจุการดูดซับของตัวดูดซับจะลดลงเนื่องจากตะกั่วอยู่ในรูป $Pb(OH)_2$ ซึ่งมีค่าการละลายต่ำจึงเกิดเป็นตะกอน



ภาพที่ 4.3 ผลของ pH ของสารละลายต่อประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่ว

2. ผลของปริมาณตัวดูดซับ (adsorbent concentration)

การศึกษาอิทธิพลของปริมาณตัวดูดซับต่อประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วแสดงในภาพที่ 4.4 ปริมาณตัวดูดซับที่ทำการศึกษาในช่วง 1-100 g/L (0.01-1.0 g) พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 43.3-95.5 เมื่อความเข้มข้นของตัวดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 1-60 g/L ในการทดลองนี้ความเข้มข้นของตัวดูดซับที่เหมาะสมเท่ากับ 5 g/L

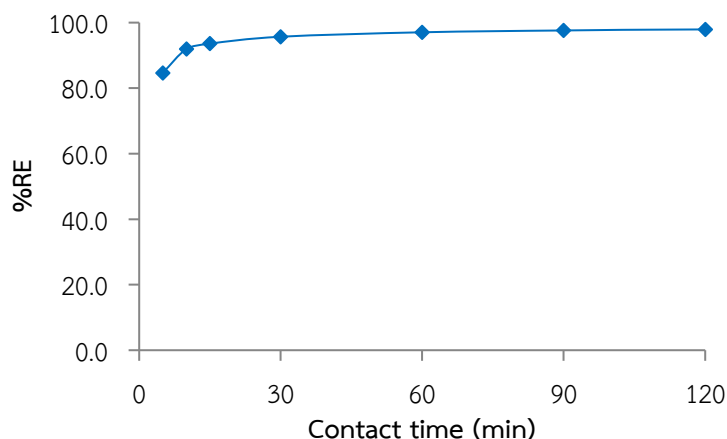


ภาพที่ 4.4 ผลของปริมาณตัวดูดซับต่อประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่ว

3. ผลของระยะเวลาสัมผัส (contact time)

การศึกษาปัจจัยระยะเวลาในการกวนสารละลายโดยใช้สภาวะดังนี้ ค่า pH ของสารละลายเท่ากับ 6 ปริมาณของตัวดูดซับ 0.05 g/L (5 g/10 mL ของ 50 mg/LPb) โดยอัตราเร็วในการ

กวนคงที่ ณ อุณหภูมิห้อง โดยระยะเวลาที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับตั้งแต่ 5-120 นาที ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วแสดงในภาพที่ 4.5 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดไอออนตะกั่วเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 15 นาทีแรก และเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ในช่วง 5 นาทีแรกประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วมากกว่าร้อยละ 84 และเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อเวลาตั้งแต่ 60 นาทีเป็นต้นไป ดังนั้นในการทดลองนี้เลือกใช้เวลาสัมผัสเป็น 15 นาที



ภาพที่ 4.5 ผลของเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่ว

4.3 ไอโซเทอมการดูดซับ

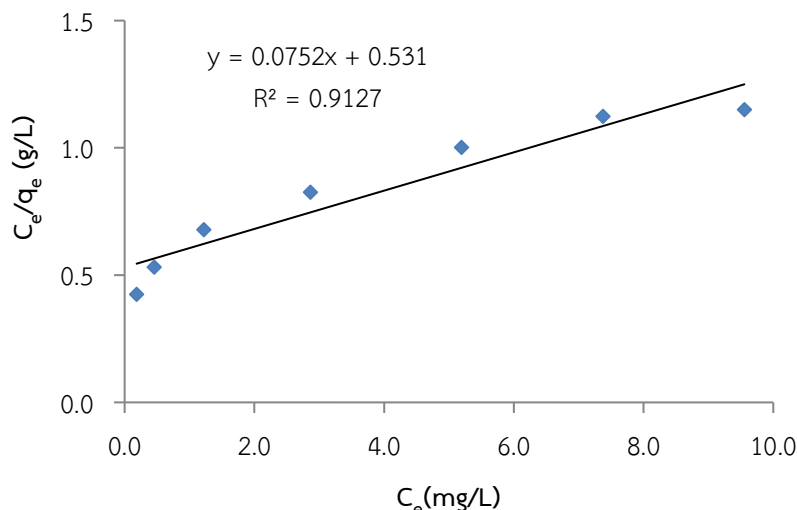
ไอโซเทอมของการดูดซับ อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สมดุล กับจำนวนของตัวถูกดูดซับที่มีการดูดซับ ที่อุณหภูมิคงที่ ไอโซเทอมของการดูดซับเป็นสมการที่มีประโยชน์สำหรับวิเคราะห์การดูดซับ

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 ดังแสดงในภาพที่ 4.6 ค่า q_m และ b หาได้จากความชัน (slope) และจุดตัดแกน (intercept) ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า q_m เท่ากับ 13.33 mg/g และ b เท่ากับ 0.141 L/g โดยมีความเป็นเส้นตรง R^2 เท่ากับ 0.9127



ภาพที่ 4.6 กราฟไอโซเทอมของแลงเมียร์

สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์ ยังอาจแสดงได้ด้วยปัจจัยของการแยกหรือค่าตัวแปรที่สภาวะสมดุล (equilibrium parameter, R_L) ดังสมการ

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

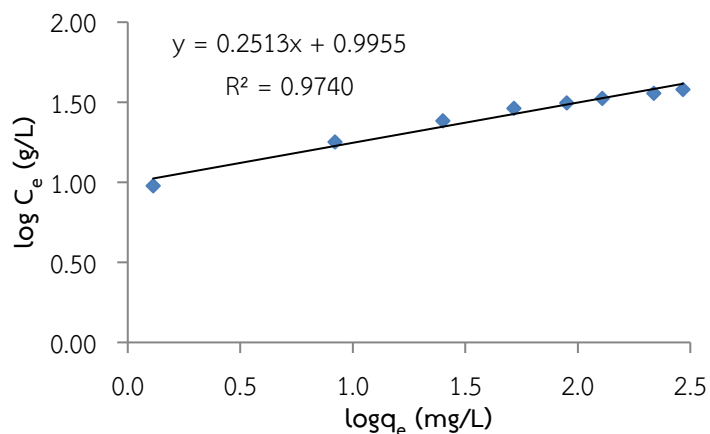
เมื่อ C_0 คือความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกละลาย (mg/L) จากผลการทดลองพบว่าค่า R_L อยู่ในช่วง 0.028-0.220 เมื่อความเข้มข้นของตะกั่วระหว่าง 50-500 mg/L รูปร่างของไอโซเทอมสอดคล้องกับการดูดซับ เนื่องจาก $0 < R_L < 1$ คือการดูดซับดี

ไอโซเทอมของ Freundlich

สมการของ Freundlich มีสมมติฐานของการดูดซับที่ว่าพื้นผิวของตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ตลอด โดยที่การดูดซับบนพื้นผิวของตัวถูกละลายจะเป็นแบบหลายชั้น (multilayer) สมการที่ได้จากการสังเกตและทดลองการดูดซับโดยอาศัยสมมติฐานของทฤษฎีนี้ เป็นแนวความคิดของแบบจำลองแบบหลายชั้น

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

เมื่อ K_f คือค่าคงที่แสดงความสามารถในการดูดซับแบบหลายชั้น (mg/g) และ n คือค่าคงที่แสดงการขึ้นตรงกับความเข้มข้นของสารละลาย เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$ ดังแสดงในภาพที่ 4.7 จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $1/n$ และมีจุดตัดแกนเท่ากับ $\log K_f$ จากผลพบว่าค่า K_f เท่ากับ 9.897



ภาพที่ 4.7 กราฟไอโซเทอมของ Freundlich

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

ตารางที่ 4.1 ไอโซเทอมการดูดซับของ Langmuir และ Freundlich

ไอโซเทอม	MnO-BB
Langmuir	
$q_{m(cal)}$ (mg/g)	13.33
$q_{m(exp)}$ (mg/g)	13.21
b (L/g)	0.141
R_L	0.028-0.220
R^2	0.9127
Freundlich	
K_f (mg/g)	9.897
n	3.98
R^2	0.9740

ตารางที่ 4.2 เป็นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วด้วยตัวดูดซับที่มีลักษณะใกล้เคียงกับงานวิจัยนี้

ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่ว

ตัวดูดซับ	สภาวะการทดลอง				q_m (mg/g)	b (L/mg)	R^2	Ref.
	dosage (g/mL)	pH	time (min)	T (K)				
Kaolin clay	0.5/20	6.4	60	303	4.73	0.03	0.997	(Jiang et al., 2009)
Modified kaolin clay	0.5/20	6.4	60	303	32.2	0.0504	0.998	(Jiang et al., 2009)
Turkish illitic clay	1/1000	4	240	298	53.76	0.069	0.9990	(Ozdes et al., 2011)
Kaolinite	2.0/1000	5.7	180	303	11.52	0.0207	0.99	(Gupta and Bhattacharya, 2005)
Montmorillonite	2.0/1000	5.7	180	303	31.05	0.0310	0.99	(Gupta and Bhattacharya, 2005)
Celtek clay	0.1/60	6	30	293	18.08	0.381	0.9910	(Sari et al., 2007)
Kaolinite clay	0.5/20	7	60	303	2.35	0.374	0.8980	(Jiang et al., 2010)
MnO ₂ -sand	0.4/20	4	180	295	1.60		1.0	(Han et al., 2006a)
MnO ₂ -sand	0.4/20	4	180	303	1.77		1.0	(Han et al., 2006a)
MnO ₂ -sand	0.4/20	4	180	318	1.91		0.999	(Han et al., 2006a)
Bentonite	0.05/20	6	180	303	16.70	1.30	0.997	(Eren et al., 2009)
MnO ₂ -bentonite (in 0.1 M KNO ₃)	0.05/20	6	180	303	58.88	0.59	0.999	(Eren et al., 2009)
MnO-BB	0.05/10	6	30	298	41.06	0.0721	0.997	งานวิจัยนี้

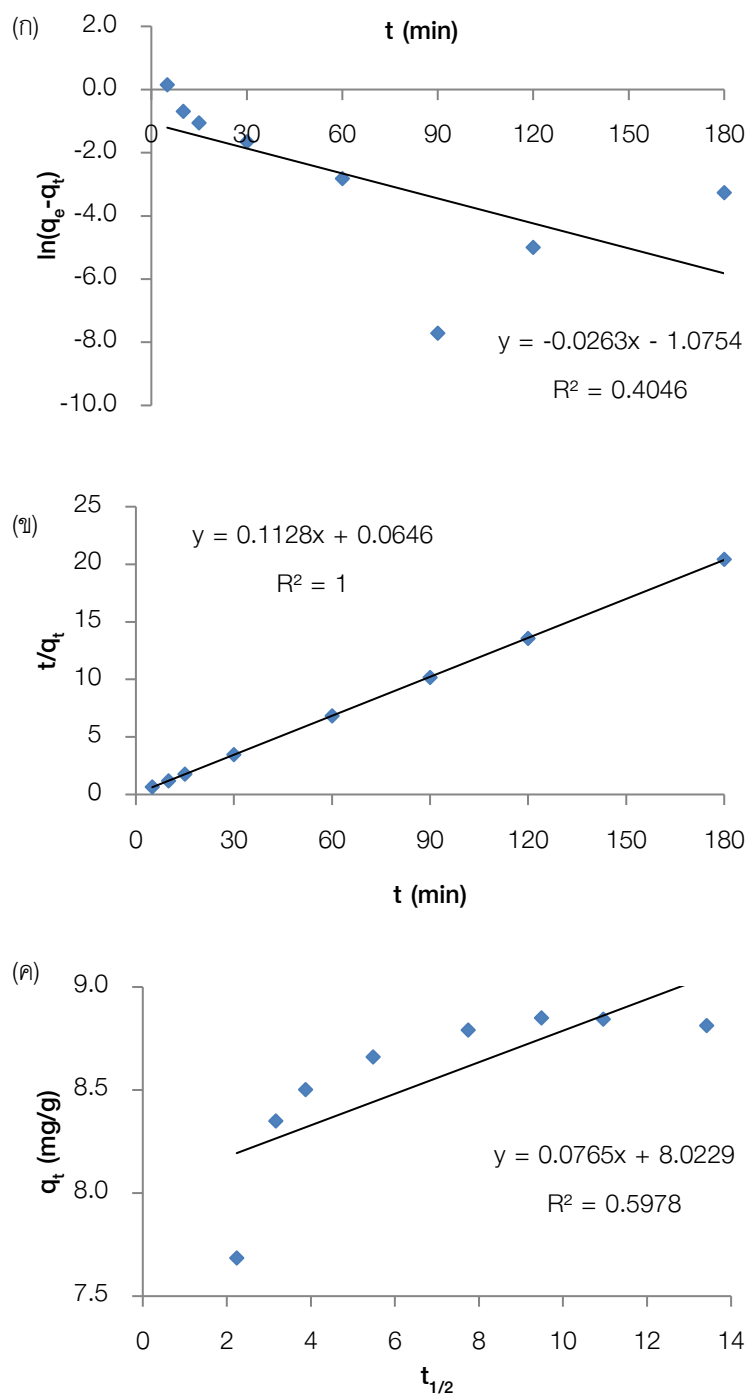
4.4 ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์

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

เมื่อนำผลการทดลองปัจจัยความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนตะกั่วที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยสมการการดูดซับตามแบบจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียมและอันดับสองเทียม พบว่าผลการทดลองสอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับสองเทียม ดังตารางที่ 4.3 และรูปกราฟของจลนพลศาสตร์แสดงในภาพที่ 4.8

ตารางที่ 4.3 ปัจจัยของจลนพลศาสตร์การดูดซับไอออนตะกั่ว

Kinetic models	Parameters	MnO-BB
Pseudo-first-order	$q_{e(cal)} (mg\ g^{-1})$	0.3412
	$q_{e(exp)} (mg\ g^{-1})$	8.851
	$k_1 (min^{-1})$	0.0263
	R^2	0.4046
Pseudo-second-order	$q_{e(cal)} (mg\ g^{-1})$	8.865
	$q_{e(exp)} (mg\ g^{-1})$	8.851
	$k_2 (g\ mg^{-1}\ min^{-1})$	0.197
	R^2	1.0
Intra-particle diffusion	$k_i (mg\ g^{-1}\ min^{-1})$	0.0765
	$C (mg\ g^{-1})$	8.023
	R^2	0.5978



ภาพที่ 4.8 กราฟจลนพลศาสตร์การดูดซับไออนตะกั่ว (ก) pseudo-first-order, (ข) pseudo-second-order และ (ค) intra-particle diffusion

บทที่ 5

อภิปรายผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้ศึกษาประสิทธิภาพของบัวที่เป็นวัสดุชีวภาพที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปรพื้นผิวมาเป็นตัวดูดซับไอออนตะกั่วในสารละลายโดยวิธีแบทช์ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับดังนี้

- 1) สภาวะ pH ที่เหมาะสมเท่ากับ 6
- 2) ความเข้มข้นของตัวดูดซับ เท่ากับ 5 g/L
- 3) ระยะเวลาสัมผัส 15 นาที
- 4) ช่วงความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไอออนตะกั่วคือ 50-500 mg/L

การประเมินภาพแบบการดูดซับโดยอาศัยแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir), และ ฟรุนดิช (Freundlich) พบว่าการดูดซับสอดคล้องกับสมการของแลงเมียร์ไอโซเทอม พบว่าความสามารถสูงสุดของการดูดซับแบบชั้นเดียวเท่ากับ 13.33 มิลลิกรัมต่อกรัม จากการศึกษาจลนศาสตร์เคมีของการดูดซับพบว่าการดูดซับไอออนตะกั่วสอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (pseudo second order) โดยกลไกการดูดซับน่าจะเกิดจากกลไกทางเคมีที่มีการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่าง H^+ และพันธะ MnO กับไอออนตะกั่วในสารละลาย

เอกสารอ้างอิง

- เกศสุชา พูลคำ. 2537. การกำจัดโลหะหนักโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากขานอ้อยและผักตบชวา. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ซัชฎาพร งามอาจ. 2545. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากต้นมันสำปะหลัง ใบสับประรด และกาบมะพร้าว. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นิริรัชต์ สงวนเดือน. 2545. การกำจัดโลหะหนักโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากขี้ข้าวโพด เปลือกถั่วเหลืองและก้านดอกทานตะวัน. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธีรดิษฐ์โพธิ์ตันติมงคล. 2560. ถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรโดยการกระตุ้นทางเคมี เพื่อการประยุกต์ใช้กำจัดสารมลพิษในน้ำ. วารสารหน่วยวิจัยวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อมเพื่อการเรียนรู้. ฉบับที่ 1. หน้า 196-214.
- เพ็ชรพร เชาวกิจเจริญ. 2537. การกำจัดโลหะหนักโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร : รายงานผลงานวิจัย. กรุงเทพมหานคร : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พรรณีพา พวันนา, วชิรี บางแบ่ง และพิพัฒน์ เหลมเฉียบ. 2560. การสังเคราะห์เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดไอออนบวกจากผักตบชวาที่ปรับสภาพด้วยกรดซิตริก, วารสารวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์, ฉบับที่ 10, หน้า 17-30.
- วรวิทย์ จันทรสุวรรณ. 2563. เคมีวิเคราะห์ : หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงปริมาณ. สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ลักขณา โชติธรรม, พนิดา สุมานะตระกูล และพนิดา กังชุ่น. 2559. การเตรียม ลักษณะจำเพาะและการประยุกต์ใช้ดูดซับตะกั่วของถ่านกัมมันต์ไฟต่งลิ้มแล้ง. วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ. ฉบับที่ 2. หน้า 43.51.
- Al-Degs, Y.S., Tutunju, M.F. and Shawabkeh, R.A., The feasibility of using diatomite and Mn-diatomite for remediation of Pb^{2+} , Cu^{2+} , and Cd^{2+} from water, Separ. Sci. Technol., 35(2000) 2299-2310.
- Amarasinghe, B. and Williams R., Tea waste as a low-cost adsorbent for the removal of Cu and Pb from wastewater, Chem. Eng. J., 132(2007) 299-309
- Amuda, O., Bello, I. and Giwa, A., Removal of heavy metal from industrial wastewater using modified activated coconut shell carbon, Biochem. Eng. J., 36(2007) 174-181.
- Chen, Z., Han, R., Jinghua, Z, Shi, J. and Zou, W., Kinetic study of adsorption of Cu(II) and Pb(II) from aqueous solutions using manganese oxide coated zeolite in batch mode, Colloids Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects Pyrolysis. 279(2006) 238-246.
- Eren, E., Afsin, B. and Onal, Y., Removal of lead ions by acid activated and manganese oxide-coated bentonite, J. Hazard. Mater., 161(2009) 677-685.
- Gupta, S.S. and Bhattacharyya, K.G., Interaction of metal ions with clays: I. A case study with Pb(II), Appl. Clay Sci., 30(2005) 199-208.

- Han, R., Zou, W., Zhang, Z., Shi, J. and Yang, J., Removal of copper(II) and lead(II) from aqueous solution by manganese oxide coated sand: I. Characterization and kinetic study, *J. Hazard. Mater.*, 137(2006) 384-395.
- Kanann, N., and Veemraj T., Removal of lead(II) ions by adsorption onto bamboo dust and commercial activated carbons -A comparative study, *E-Journal of Chemistry*, 6(2009), 247-256.
- Issabayeva, G., Kheireddine, M. and Sulaiman N.M., Study on palm shell activated carbon adsorption capacity to remove copper ions from aqueous solutions, *Desalination*, 262(2010) 94-98.
- Jiang M.Q., Wang Q.P., Jin X.Y. and Chen Z.L., Removal of Pb(II) from aqueous solution using modified and unmodified kaolinite clay. *J. Hazard. Mater.* 170(2009)332-339.
- Jiang, M.Q., Jin, X.Y., Lu, X.Q. and Chen, Z.L., Adsorption of Pb(II), Cd(II), Ni(II) and Cu(II) onto natural kaolinite clay, *Desalination*, 252(2010) 33-39.
- Ozdes, D., Duran, C. and Senturk, H.B., Adsorptive removal of Cd(II) and Pb(II) ions from aqueous solutions by using Turkish illitic clay, *J. Environ. Manage.*, 92(2011) 3082-3090.
- Sarı A., Tuzen M. and Soylak M., Adsorption of Pb(II) and Cr(III) from aqueous solution on Celtek clay. *J. Hazard. Mater.* 144(2007)41-46.
- Zou, W., Han, R., Chen, Z., Jinghua, Z. and Shi, J., Kinetic study of adsorption of Cu(II) and Pb(II) from aqueous solutions using manganese oxide coated zeolite in batch mode, *Colloids Surfaces A: Physicochem. Eng. Aspects*, 279(2006) 238-246.

ภาคผนวก
มาตรฐานน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
1. ค่าความเป็นกรดและด่าง (pH value)	5.5-9.0	pH meter
2. ค่าทีดีเอส (TDS หรือ total dissolved solids)	● ไม่เกิน 3,000 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้งหรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 5,000 มก./ล. ● น้ำทิ้งที่จะระบายลงแหล่งน้ำกร่อยที่มีค่าความเค็ม (Salinity) เกิน 2,000 มก./ล. หรือลงสู่ทะเล ค่าทีดีเอสในน้ำทิ้งจะมีค่ามากกว่าค่าทีดีเอสที่มีอยู่ในแหล่งน้ำกร่อยหรือน้ำทะเลได้ไม่เกิน 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, grease)	ไม่เกิน 5.0 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือ ประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 15 มก./ล.	สกัดด้วยตัวทำละลาย แล้วแยกหาน้ำหนักของน้ำมันและไขมัน
9. ฟอर्मัลดีไฮด์ (formaldehyde)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	spectrophotometry
10. สารประกอบฟีนอล (phenols)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	กลั่นและตามด้วยวิธี 4-aminoantipyrine
11. คลอรีนอิสระ (free chlorine)	ไม่เกิน 1.0 มก./ล.	iodometric method

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
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. ค่าทีเคเอ็น (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		atomic absorption spectrophotometry ชนิด direct aspiration หรือวิธี plasma emission spectroscopy ชนิด inductively coupled plasma : ICP
16.1 สังกะสี (Zn)	ไม่เกิน 5.0 มก./ล.	
16.2 โครเมียมชนิดเฮกซะวาเลนต์ (hexavalent chromium)	ไม่เกิน 0.25 มก./ล.	
16.3 โครเมียมชนิดไตรวาเลนต์ (trivalent chromium)	ไม่เกิน 0.75 มก./ล.	
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

ดัชนีคุณภาพน้ำ	ค่ามาตรฐาน	วิธีวิเคราะห์
16.11 อาร์เซนิก (As)	ไม่เกิน 0.25 มก./ล.	- atomic absorption spectrophotometry ชนิด hydride generation หรือ วิธี plasma emission spectroscopy ชนิด inductively coupled plasma : ICP
16.12ปรอท (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

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ – นามสกุล (ภาษาไทย) ดร.วรวิทย์ จันท์สุวรรณ
(ภาษาอังกฤษ) Dr.Woravith Chansuvarn

ตำแหน่งปัจจุบัน

ตำแหน่งทางวิชาการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์

หน่วยงาน

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
เลขที่ 1381 ถนนประชากรราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800
โทร 0-2836-3000 มือถือ 08-4667-3969
E-mail : woravith.c@rmutp.ac.th

ประวัติการศึกษา

ระดับปริญญา	คุณวุฒิ/สาขาวิชา	สถาบันอุดมศึกษา	ปีที่สำเร็จ
ปริญญาเอก	วทด.เคมี (เคมีวิเคราะห์)	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย	2555
ปริญญาโท	วทม.เคมี (เคมีวิเคราะห์)	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่	2546
ปริญญาตรี	วทบ.เคมี	สถาบันราชภัฏกาญจนบุรี	2543

สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ (แตกต่างจากวุฒิการศึกษา) ระบุสาขาวิชาการ

- เคมีสิ่งแวดล้อม
- เคมีอาหาร
- วัสดุนาโน/Composited nanoparticle
- Biosorption

ผลงานตีพิมพ์ระดับนานาชาติ

1. Chansuvarn W., and Imyim A. Visual and colorimetric detection of Hg(II) ion using gold nanoparticles stabilized with dithia-diaza ligand, Microchim. Acta 176(2012) 56-67.
2. Chansuvarn W., Panich S., and Imyim A. Simple spectrophotometric method for determination of melamine in liquid milks based on green Mannich reaction, Spectrochimica Acta Part A: molecular and biomolecular spectroscopy 113(2013) 154-158.
3. Chansuvarn W., Tuntulani T., and Imyim A. Colorimetric detection of mercury(II) based on gold nanoparticles, fluorescent gold nanoclusters and other gold- based nanomaterials. Trends in Analytical Chemistry 65(2015) 83-96.

ผลงานตีพิมพ์ระดับชาติ

1. วรวิทย์ จันท์สุวรรณ. 2557. การออกแบบเซนเซอร์ทางเคมีสำหรับตรวจวัดไอออนปรอทด้วยตาเปล่า, วารสารวิทยาศาสตร์ มข. ฉบับที่ 42 ฉบับที่ 4 เลขหน้า 748-760.

ผลงานตีพิมพ์ระดับนานาชาติ

1. Chansuvarn W., & Imyim A. (2012). Visual and colorimetric detection of Hg(II) ion using gold nanoparticles stabilized with dithia-diaza ligand, *Microchim. Acta*, 176(-), 56-67.
2. Chansuvarn W., Panich S., & Imyim A. (2013). Simple spectrophotometric method for determination of melamine in liquid milks based on green Mannich reaction, *Spectrochimica Acta Part A: molecular and biomolecular spectroscopy*, 113(-), 154-158.
3. Chansuvarn W., Tuntulani T., & Imyim A. (2015), Colorimetric detection of mercury(II) based on gold nanoparticles, fluorescent gold nanoclusters and other gold-based nanomaterials. *Trends in Analytical Chemistry*, 65(-), 83-96.
4. Chansuvarn W., & Jainae K. (2015). Adsorption of Pb(II) from aqueous solution onto manganese oxide-modified laterite soil. *Proceedings 2015 International Conference on Science and Technology*, 198-205.
5. Chansuvarn W., & Imyim A. (2017). Novel visual detection of mercury (II) ion based on *in-situ* deposited gold nanoparticles. *Appl. Mechanics Mater.*, 866, 398-401.
6. Chansuvarn W., Pandee Y., Saechim A., & Habunmee K. (2018). Adsorption of cadmium(II) ion from aqueous solution onto a raw material of bamboo powder and its surface modification. *Appl. Mechanics Mater.*, 879, 131-136.
7. Chansuvarn W. (2018). Removal of phosphate from wastewater using carbonized filter cake. *Appl. Mechanics Mater.* 879,125-130.
8. Chansuvarn, W. (2019). Determination of total arsenic using microwave digestion technique-graphite furnace atomic absorption spectrophotometry, *Appl. Mechanics Mater.* 891,154-160.
9. Chansuvarn, W., & Jainee, K. (2018). Determination of Contaminated Heavy Metals in Lacquer Thinner. *Appl. Mechanics Mater.* 879,144-148.
10. Chansuvarn, W., & Chansuvarn, S. (2018). Distribution of Residue Carbofuran and Glyphosate in Soil and Rice Grain. *Appl. Mechanics Mater.* 879,118-124.
11. Chansuvarn, W. (2020). Determination of Residual Heavy Metals in an Incinerator Bottom Ash from Municipal Solid Waste Power Plant. *Appl. Mechanics Mater.*, 901, 65-71.

ผู้ร่วมวิจัย

ชื่อ (ภาษาไทย) นางสาวสิริรัตน์ นามสกุล พานิช

ชื่อ (ภาษาอังกฤษ) Miss Sirirat Panich

ตำแหน่งปัจจุบัน อาจารย์

หน่วยงานและสถานที่อยู่ที่ติดต่อได้สะดวก

กลุ่มวิชาเคมี สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล

พระนคร กระทรวงศึกษาธิการ 1381 ถ.พิบูลสงคราม แขวงบางซื่อ เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

E-mail: sirirat.pan@rmutp.ac.th

ประวัติการศึกษา

ปี พ.ศ.	วุฒิการศึกษา	สถานศึกษา	จังหวัด
2560	Ph.D (Chemistry)	Imperial College London	UK
2551	วทม.เคมี (เคมีวิเคราะห์และเคมีอินทรีย์ประยุกต์)	มหาวิทยาลัยมหิดล	กรุงเทพมหานคร
2547	วทบ.เคมี	ม.บูรพา	ชลบุรี
	ประกาศนียบัตร (ทางการสอน)	ม.บูรพา	ชลบุรี
	มัธยมศึกษาตอนปลาย (โครงการสควค.)	รร.พิบูลวิทยาลัย	ลพบุรี

สาขาวิชาการที่มีความชำนาญพิเศษ

การเขียนใช้โปรแกรมพิเศษทางเคมี เช่น ChemDraw

การใช้เทคโนโลยีทางการศึกษา

งานวิจัยทางเคมีในระดับนาโน และสารต้านอนุมูลอิสระ

Whispering gallery mode

งานวิจัยที่ทำเสร็จแล้ว

Sirirat Panich, Maliwan Amatatongchai, Nuanlaor Ratanawimanwong, Tanorm Lomas, Thitima Maturos, Adisorn Tuantranont and Duangjai Nacapricha. “A new approach for assessing total antioxidant capacity of fruit juices by lab-on-a-chip” (accepted for proceeding of the 10th National Graduate Research Conference at Sukhothai Thammathirat University, Nonthaburi, Thailand).

Woravith Chansuvarn, Sirirat Panich, Apichat Imyim. “Simple spectrophotometric method for determination of melamine in liquid milks based on green Mannich reaction”. Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc., 2013, 9(113), pp 154-158.

Sirirat Panich, Kerry A. Wilson, Philippa Nuttall, Christopher K. Wood, Tim Albrecht, and Joshua B. Edel. Label-Free Pb(II) Whispering Gallery Mode Sensing Using Self-Assembled Glutathione-Modified Gold Nanoparticles on an Optical Microcavity. Anal. Chem., 2014, 86 (13), pp 6299–6306.

Sirirat Panich, Mazen Haj Sleiman, Isobel Steer, Sylvain Ladame and Joshua B. Edel. "Real-Time Monitoring of Ligand Binding to G-Quadruplex and Duplex DNA by Whispering Gallery Mode Sensing. *ACS Sens.*, 2016, 1 (9), pp 1097–1102.

Sirirat Panich. All-in-One Flow Injection Spectrophotometric System for Field Testing. *Applied Mechanics and Materials.*, 2018, (879), pp 206-211

Sirirat Panich. A novel assay for evaluation of the total antioxidant capacity using a nontoxic probe. *TJPS* 2018, 42 (1) pp 21-26