



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การดูดซับโลหะหนักโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากผงไผ่และ
การดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์

Heavy metal adsorption by ion exchange resin made
from bamboo powder and surface modification with
manganese oxide

วรัญญู จันทร์สุวรรณ
ธัญญา อำนวยวิฒนะกุล

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากงบประมาณรายได้คณะ
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2561
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
2561

ชื่อเรื่อง : การดูดซับโลหะหนักโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากผงไผ่และการดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์

ผู้วิจัย : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธัญญา อำนวยวัฒนะกุล

พ.ศ. : 2561

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ได้นำผงไผ่มาทำการดัดแปรพื้นผิวทางเคมีด้วยแมงกานีสออกไซด์ โดยแมงกานีสออกไซด์ขนาดระดับไมโครเมตรเคลือบบนผิวของอนุภาคผงไผ่ทำให้เกิดรูพรุนมากขึ้น เมื่อนำผงไผ่ดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์มาเป็นตัวดูดซับไอออนตะกั่วในสารละลายโดยวิธีแบทช์ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับคือสภาวะ pH เท่ากับ 6 ความเข้มข้นของผงไผ่ดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์เท่ากับ 5 g/L ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที และความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไอออนตะกั่วอยู่ในช่วง 50-500 mg/L การประเมินรูปแบบการดูดซับโดยอาศัยแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir), ฟรุนดิช (Freundlich) และดูบินิน-ราดชเควิช (Dubinin-Radushkevich) พบว่าการดูดซับสอดคล้องกับสมการของแลงเมียร์ไอโซเทอม พบว่าความสามารถสูงสุดของการดูดซับแบบชั้นเดียวเท่ากับ 41.06 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผงไผ่ที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปรพื้นผิวพบว่าผงไผ่ดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์มีความจุการดูดซับไอออนตะกั่วมากกว่าถึงประมาณ 40 เท่า จากไอโซเทอมของดูบินิน-ราดชเควิช สามารถอธิบายได้ว่าการดูดซับไอออนตะกั่วด้วยผงไผ่ดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์เป็นแบบเคมี จากการศึกษาจลนศาสตร์เคมีของการดูดซับพบว่าการดูดซับไอออนตะกั่วด้วยผงไผ่ดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์สอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (pseudo second order) โดยกลไกการดูดซับน่าจะเกิดจากกลไกทางเคมีที่มีการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่าง H^+ และพันธะ MnO กับไอออนตะกั่วในสารละลาย

คำสำคัญ: การดูดซับ, ตะกั่ว, ผงไผ่

Title : Heavy metal adsorption by ion exchange resin made from bamboo powder and surface modification with manganese oxide

Researchers : Asst.Prof.Dr.Woravith Chansuvarn
Asst.Prof. Tanutta Amnuaywatanakul

Year : 2018

ABSTRACT

The objective of this work was to study the adsorption efficiency of bamboo and its surface modified with manganese oxide for removal of Pb(II) ion. The adsorption of Pb(II) from aqueous solution onto bamboo (BB) and manganese oxide- modified bamboo powder (MnO-BB) was evaluated based on batch experiment. The adsorption efficiency of MnO-BB onto Pb(II) was investigated as a function of the initial pH of 6, equilibrium time of 30 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, Freundlich and Dubinin-Radushkevich were used to describe the equilibrium isotherm. It is observed that the data from MnO-BB adsorbents fitted well to the Langmuir isotherm. The maximum monolayer adsorption capacities of MnO- NC were estimated as 38.76 mg/g. By comparing with BB, the amount of Pb(II) adsorbed onto MnO- BB was more than BB by about 40 times under the optimized adsorption condition. According to Dubinin-Radushkevich isotherm, the adsorptive mechanism of Pb(II) onto MnO-BB was chemisorption. The kinetic studies of Pb(II) demonstrated that the adsorption of Pb(II) onto MnO-BB adsorbent followed a pseudo second-order model with a good correlation. The adsorption mechanism was processed via chemical ion exchange between H^+ and bonded MnO groups and Pb(II) ions in solution.

Keywords: Adsorption, lead, bamboo powder

กิตติกรรมประกาศ

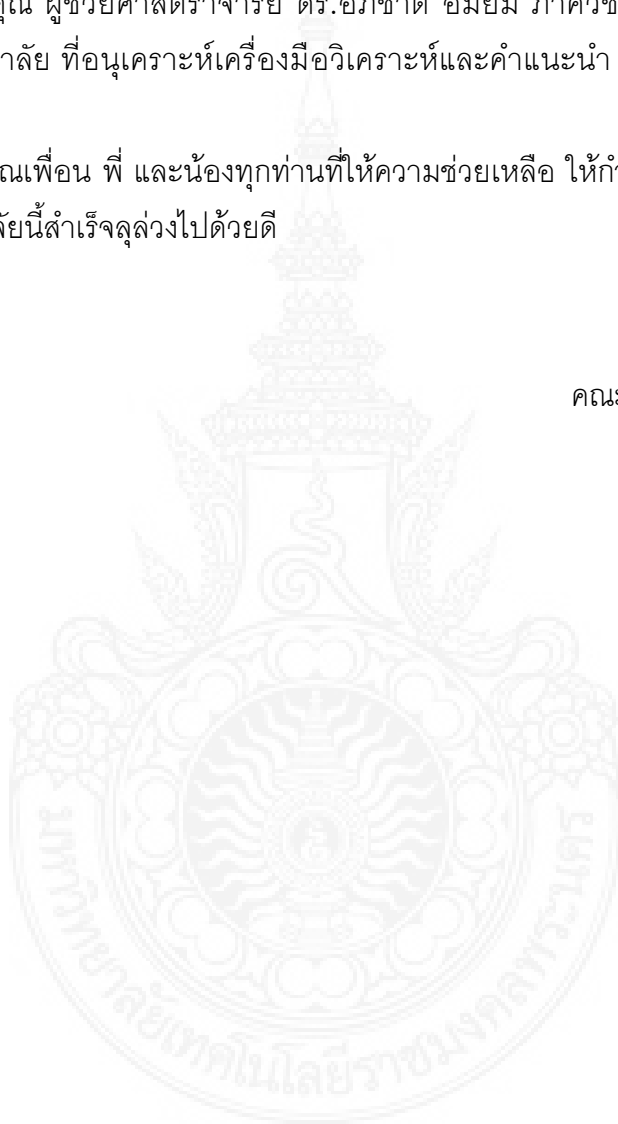
ผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัย จากงบประมาณรายได้ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ประจำปี พ.ศ. 2561

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่อนุเคราะห์เครื่องมือวิเคราะห์และอุปกรณ์ต่าง ๆ จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ผู้วิจัยขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ อิ่มยิ้ม ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่อนุเคราะห์เครื่องมือวิเคราะห์และคำแนะนำ จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ผู้วิจัยขอขอบคุณเพื่อน พี่ และน้องทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือ ให้กำลังใจ ตลอดจนช่วยแก้ไข ปัญหาจนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

คณะผู้วิจัย



สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ (ภาษาไทย)	ก
บทคัดย่อ (ภาษาอังกฤษ)	ข
กิตติกรรมประกาศ	จ
สารบัญภาพ	ฉ
สารบัญตาราง	ช
บทที่ 1 บทนำ	
ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
ทฤษฎีการดูดซับ	3
การดูดซับทางกายภาพ	3
การดูดซับทางเคมี	4
สมดุลการดูดซับ	4
ไอโซเทอมของการดูดซับ	7
ทฤษฎีการดูดซับของ BET	9
จลนพลศาสตร์การดูดซับ	10
โลหะตะกั่ว	12
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	14
บทที่ 3 การดำเนินงานวิจัย	
เครื่องมือ	17
สารเคมี	17
วิธีการทดลอง	18
บทที่ 4 ผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง	
เอกลักษณ์ทางกายภาพทางกายภาพตัวดูดซับ	21

ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับไอออนตะกั่ว	23
ไอโซเทอมการดูดซับ	25
ผลการศึกษาจลนพลศาสตร์	29
บทที่ 5 อภิปรายผลการวิจัย	32
เอกสารอ้างอิง	33
ภาคผนวก	38
ประวัติผู้วิจัย	41



สารบัญภาพ

	หน้า	
ภาพที่ 2.1	ประเภทไอโซเทอมการดูดซับพื้นฐาน 5 ชนิด	5
ภาพที่ 2.2	ประเภทไอโซเทอมของการดูดซับของ IUPAC	6
ภาพที่ 4.1	ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM	21
ภาพที่ 4.2	ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM (ก) ผงไฟต์ดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์ และ (ข) ผงไฟต์ที่เตรียมเป็นเรซินแลกเปลี่ยนไอออน	22
ภาพที่ 4.3	ผลของ pH ของสารละลายต่อประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่ว	23
ภาพที่ 4.4	ผลของปริมาณตัวดูดซับต่อประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่ว	24
ภาพที่ 4.5	ผลของเวลาต่อประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่ว	24
ภาพที่ 4.6	กราฟไอโซเทอมของแลงเมียร์	25
ภาพที่ 4.7	กราฟไอโซเทอมของ Freundlich	26
ภาพที่ 4.8	กราฟไอโซเทอมของ Dubinin-Radushkevich	28
ภาพที่ 4.9	กราฟจลนพลศาสตร์การดูดซับไอออนตะกั่ว (ก) pseudo-first-order, (ข) pseudo-second-order และ (ค) intra-particle diffusion	31



สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สมบัติของการดูดซับทางเคมีและทางกายภาพ	5
ตารางที่ 4.1 ไอโซเทอมการดูดซับของ Langmuir, Freundlich, และ Dubinin-Radushkevich	28
ตารางที่ 4.2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดไอออนตะกั่ว	29
ตารางที่ 4.3 ปัจจัยของจลนพลศาสตร์การดูดซับไอออนตะกั่ว	30



บทที่ 1

บทนำ

ความสำคัญและที่มาของปัญหา

การปนเปื้อนโลหะหนักในน้ำไม่ว่าจะเป็นแหล่งน้ำผิวดิน น้ำบาดาล น้ำทิ้งอุตสาหกรรมหรือ การเกษตรนับได้ว่าเป็นปัญหาที่สำคัญอย่างหนึ่งต่อสิ่งแวดล้อมที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตและมนุษย์ เนื่องจากโลหะหนักย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติได้ช้าและน้อยมาก ดังนั้นเมื่อมีการปนเปื้อนใน สิ่งแวดล้อมจะทำให้เกิดการสะสม เมื่อระยะเวลาผ่านไปปริมาณโลหะหนักที่สะสมอาจเพิ่มมากขึ้น และมีความเป็นพิษมากขึ้นด้วย โลหะหนักเช่นตะกั่ว (Pb) และแคดเมียม (Cd) เป็นโลหะหนักชนิด หนึ่งที่มีอันตรายสูง การแพร่กระจายอาจเกิดจากหลายแหล่ง เช่นน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มี การใช้ตะกั่วในกระบวนการผลิต อุตสาหกรรมสี แบตเตอรี่ ขยะอิเล็กทรอนิกส์ และอื่น ๆ การ ปนเปื้อนสารตะกั่วในแหล่งน้ำเป็นอันตรายอย่างยิ่ง เนื่องจากจะเกิดการแพร่กระจายได้ง่าย การ สะสมของตะกั่วในแหล่งน้ำยังส่งผลกระทบต่อห่วงโซ่อาหาร สัตว์น้ำ พืชน้ำ และจะส่งผล กระทบต่อมนุษย์ ความเป็นพิษของสารตะกั่วเป็นอันตรายที่ร้ายแรง เมื่อเข้าไปสะสมในร่างกายของ มนุษย์ปริมาณมากอาจทำให้ร่างกายทำงานผิดปกติมีผลถึงขั้นพิการและเสียชีวิตได้ วิธีการกำจัด โลหะหนักมีด้วยกันหลายวิธี เช่นกระบวนการแลกเปลี่ยนประจุ (ion exchange) กระบวนการกรอง แบบอุลตราฟิลเตรชัน (ultrafiltration) กระบวนการแยกด้วยไฟฟ้าผ่านเยื่อกรอง (electrodialysis) กระบวนการออสโมซิสผันกลับ (reverse osmosis) กระบวนการตกตะกอนและตกตะกอนด้วยเคมี (precipitation and coagulation) และกระบวนการดูดซับ (adsorption) เป็นต้น ซึ่งกระบวนการต่าง ๆ เหล่านี้มีข้อดีข้อเสียที่แตกต่างกันออกไป แม้ว่าวิธีเหล่านี้จะสามารถกำจัดโลหะหนักได้ดีแต่ส่วนมาก มักใช้ค่าใช้จ่ายสูง ใช้ระยะเวลานาน มีขั้นตอนการแยกหลายขั้นตอน เป็นต้น

วิธีการดูดซับเป็นปรากฏการณ์เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวของแข็งโดยเป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลง ความเข้มข้นของสารละลายระหว่างพื้นที่ผิวของของแข็ง การดูดซับจะเกี่ยวข้องกับการสะสมตัว ของสารหรือว่าความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นที่ผิวกับพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่าง 2 สภาวะใด ๆ อนุภาคสารที่ถูกดูดซับเรียกว่าสารถูกดูดซับ (adsorbate) ส่วนสารที่ทำหน้าที่เป็นสารดูดซับเรียกว่าตัว ดูดซับ (adsorbent) ตัวดูดซับที่นิยมนำมาใช้กับการบำบัดน้ำเสียคือ ถ่านกัมมันต์ (activated carbon) ถ่านกัมมันต์เตรียมได้โดยทำการคาร์บอนไนซ์ (carbonization) ที่อุณหภูมิสูงแล้วกระตุ้นด้วยสารเคมีที่ อุณหภูมิสูง สารเคมีที่ใช้กระตุ้นเช่นซิงค์คลอไรด์ (ZnCl₂) หรือกรดเกลือ (HCl) การเตรียมถ่านกัมมันต์ โดยใช้วัสดุเหลือใช้จากวัสดุทางธรรมชาติเป็นอีกทางเลือกหนึ่งเพราะนอกจากจะมีประสิทธิภาพแล้ว

ยังเป็นการลดต้นทุนในกระบวนการกำจัดโลหะหนักได้อีกด้วย เนื่องจากวัสดุเหลือใช้ทางธรรมชาติมีอยู่มากและหาได้ง่าย มีงานวิจัยจำนวนมากได้รายงานการกำจัดไอออนโลหะหนัก โดยการใส่ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากวัสดุต่าง ๆ เช่น ถ่านกัมมันต์มูลโคะละมาปะพร้าว 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, ลักษณะ, 2559 ธีรดิตถ์, 2560) นอกจากตัวดูดซับที่เป็นถ่านกัมมันต์แล้วตัวดูดซับประเภทผงไฟ (clay) ททราย (sand) หรือดินเผา (fire brick) ได้นำมาใช้เป็นตัวดูดซับโลหะหนักโดยการดัดแปรพื้นผิวโดยวิธีการต่าง ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่ว การดัดแปรพื้นผิวดูดซับด้วยการเคลือบ 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)

ในงานวิจัยนี้ได้สนใจนำผงไฟมาดัดแปรพื้นผิว 2 วิธีคือเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากผงไฟ และผงไฟเคลือบด้วยแมงกานีสออกไซด์สำหรับเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับไอออนโลหะหนักบางชนิดจากสารละลาย โดยปัจจัยที่ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับไอออนโลหะหนักคือ ปัจจัย pH, ปัจจัยปริมาณตัวดูดซับ (adsorbent dosage), ปัจจัยเวลา (time), ปัจจัยความเข้มข้นเริ่มต้น (initial concentration) และเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักระหว่างผงไฟที่ไม่ได้ผ่านการดัดแปรพื้นผิวและผงไฟที่ผ่านการดัดแปรพื้นผิว

วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโลหะตะกั่วด้วยผงไฟที่ดัดแปรพื้นผิวโดย MnO

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- 1) เพื่อทราบประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วของตัวดูดซับที่ผ่านการดัดแปรพื้นผิวและเข้าใจรูปแบบพฤติกรรมกรรมการดูดซับของตัวดูดซับ

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) อาศัยแรงดึงดูดทางไฟฟ้าอย่างอ่อน ๆ 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 มีพลังงานกระตุ้น (activation energy) เข้ามาเกี่ยวข้อง ความร้อนของการดูดซับมีค่าสูง การกำจัดตัวถูกดูดซับออกจากผิวตัวดูดซับได้ยากและการดูดซับเป็นแบบขั้นเดียว

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)

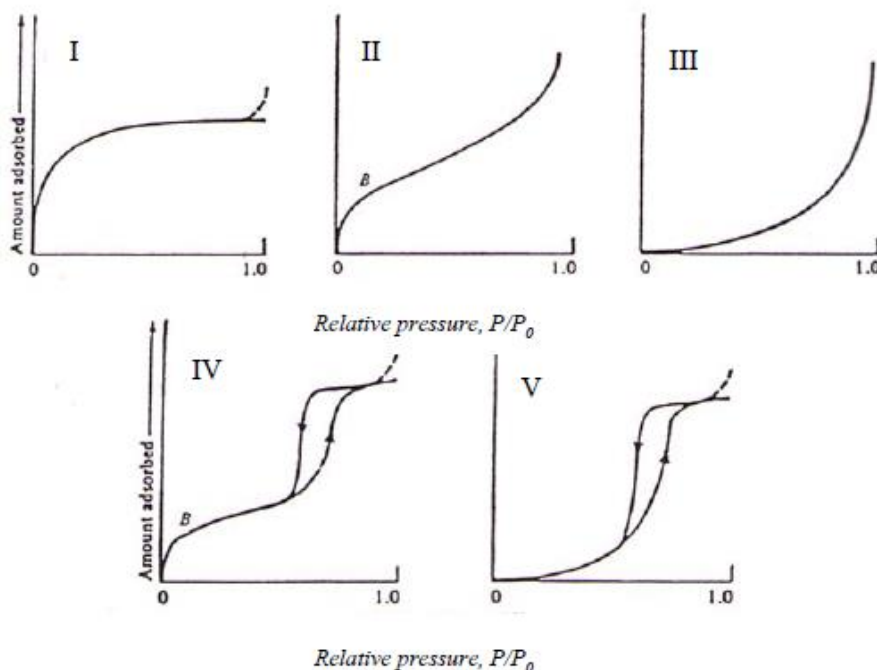
นอกจากการแบ่งประเภทการดูดซับเป็นการดูดซับทางกายภาพและการดูดซับทางเคมีแล้วยังอาจแบ่งประเภทการดูดซับตามกลไกเพิ่มเติมได้อีก คือ การดูดซับแบบแลกเปลี่ยนประจุ (exchange adsorption) เป็นการดูดซับที่อาศัยการดูดติดด้วยแรงไฟฟ้าสถิตบริเวณผิว เมื่อตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับมีประจุและเกิดแรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับเป็นไอออนที่มีประจุกับตัวดูดซับที่มีประจุตรงกันข้าม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

2.2 สมดุลการดูดซับ

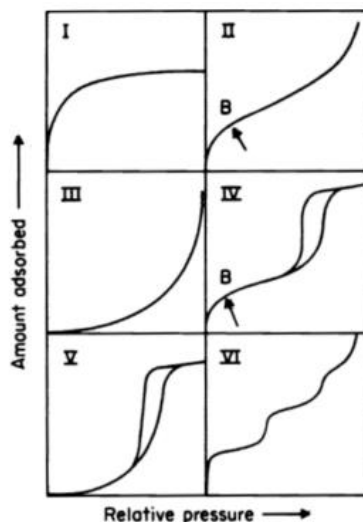
สมดุลของการดูดซับจะอาศัยความสัมพันธ์ที่สภาวะสมดุลของสมดุลของมวลสาร ซึ่งเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับในวัฏภาคของเหลวกับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับบนวัฏภาคของแข็ง กระบวนการดูดซับจะเกิดขึ้นต่อไปเรื่อยๆ โดยสารที่ถูกดูดซับและมีการคาย

การดูดซับ (desorption) ไปพร้อมกัน ซึ่งสมดุลจะเกิดขึ้นเมื่ออัตราการดูดซับและการคายการดูดซับเท่ากัน การวัดปริมาณสารที่ถูกดูดซับที่อุณหภูมิคงที่หนึ่ง ๆ โดยการแสดงด้วยกราฟ 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 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 และมีการอิมมัตวที่แน่นอนโดยเกิดการเรียงเป็นชั้นเดียว ไอโซเทอมแบบนี้บางครั้งเรียกว่า Langmuir หรือ L-shape isotherm
- แบบ II เป็นรูปแบบปกติของไอโซเทอมที่เกิดในสารดูดซับที่ไม่มีรูพรุน (nonporous) หรือตัวดูดซับที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ (microporous) โดยในแบบนี้จะเกิดการดูดซับที่ต่อเนื่องจากการเรียงตัวโมเลกุลเพียงชั้นเดียว (monolayer) อย่างสมบูรณ์ก่อนจึงเกิดเป็นหลายชั้น (multilayer) ในต่อมา จากไอโซเทอมตรงบริเวณจุดเปลี่ยนโค้งหรือจุด B (break through) จะแสดงถึงการดูดซับแบบชั้นเดียวนั้นเสร็จสมบูรณ์ จากนั้นที่ความดันสูงขึ้นจะเกิดการดูดซับที่ต่อเนื่องจากชั้นแรกต่อไป และจะเกิดการดูดซับเสร็จสมบูรณ์ที่ความดันย่อยสูงๆ ไอโซเทอมแบบนี้บางครั้งเรียกว่า Sigmoid หรือ S-shape isotherm)
- แบบ III เป็นรูปแบบของการดูดซับที่มีแรงดึงดูดที่อ่อนระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ แต่แรงดึงดูดระหว่างตัวถูกดูดซับด้วยกันมีค่อนข้างมาก จากกรณีนี้จะทำให้เกิดการรวมตัวกันของตัวถูกดูดซับก่อนที่การดูดซับชั้นแรกจะเสร็จสมบูรณ์ ในแบบที่ III จะมีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่ถูกดูดซับกับผิวสารดูดซับมากกว่าแบบ II ซึ่ง

เส้นกราฟจะโค้งออก (convex) จากแกน P/P_0 จำนวนสารที่ถูกดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างไม่จำกัด ซึ่งเป็นแบบพิเศษ

- แบบ IV เป็นไอโซเทอมของการดูดซับที่มีรูพรุนที่มีขนาดใหญ่กว่าขนาดของเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุลที่ถูกดูดซับมาก จึงเกิดการเรียงตัวของโมเลกุลที่ผิวของสารดูดซับเป็นสองชั้น (bilayer) ความชันของกราฟเพิ่มขึ้นอีกครั้งเมื่อความดันเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าตัวถูกดูดซับเริ่มเข้าเต็มใน 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 เป็นชั้น ๆ ขึ้นบนผิวของ nonporous โดยความสูงของแต่ละชั้นจะเป็นความสามารถของ monolayer ในชั้นนั้น ๆ

2.3 ไอโซเทอมของการดูดซับ

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

2.3.1 ไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ (Langmuir isotherm)

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

- 1) ใช้สำหรับการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer adsorption)
- 2) โมเลกุลที่ถูกดูดซับมีจำนวนแน่นอนและมีตำแหน่งของการดูดซับที่แน่นอน
- 3) ในแต่ละโมเลกุลของสารดูดซับจะดูดซับโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับได้เพียงหนึ่งโมเลกุลเท่านั้น ในแต่ละตำแหน่งค่าความร้อนของการดูดซับเท่ากันและคงที่ ไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลที่อยู่ใกล้กัน พลังงานของการดูดซับจะเหมือนกันทุก ๆ พื้นที่ของตัวดูดซับ
- 4) โมเลกุลที่จะถูกดูดซับไม่สามารถที่จะย้ายข้ามผิว หรือเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลข้างเคียงได้

สมการแลงเมียร์เป็นสมการง่าย ๆ แบบจำลองเป็นพื้นฐานทางฟิสิกส์และสามารถนำมาใช้งานได้ในช่วงที่กว้าง ในขณะที่สมการของแลงเมียร์มีข้อจำกัดของการใช้งาน ได้แก่ พลังงานของการดูดซับเป็นอิสระจากระดับการควบคุม แรงที่ใช้ในการดึงดูดเป็นแรงอ่อน ๆ ที่สามารถผันกลับได้และจะใช้ได้ในกรณีที่ผิวของตัวดูดซับเกิดขึ้นแบบชั้นเดียวเท่านั้น 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 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

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

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

$$R_L = \frac{1}{1 + b C_0} \quad \dots\dots(2.3)$$

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)

2.3.2 ไอโซเทอมแบบ Freundlich (Freundlich isotherm)

สมการของ Freundlich มีสมมติฐานของการดูดซับที่ว่าพื้นผิวของตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด (พื้นผิวของตัวดูดซับมีลักษณะขรุขระ) พื้นผิวและพลังงานมีการกระจายตัวเป็นแบบเลขชี้กำลัง ใช้ทั้งกับการดูดซับทางเคมีและการดูดซับทางกายภาพ ไอโซเทอมแบบ Freundlich

เป็นไอโซเทอมที่พัฒนาจากไอโซเทอมแบบแลงค์เมียร์ที่เกิดบนผิวหน้าไม่เป็นเนื้อเดียว (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 น้อยแสดงว่าการดูดซับจะเกิดขึ้นได้ดีที่ความเข้มข้นสูง ๆ 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 โมเลกุลที่ถูกดูดซับในชั้นแรกจะเป็นพื้นผิวในการเกาะของสารที่ถูกดูดซับในชั้นที่สองและชั้นต่อ ๆ ไป ดังนั้นโมเลกุลในชั้นที่สองจะเกาะอยู่บนสารที่ถูกดูดซับไม่ใช่พื้นผิวของการดูดซับ จึงเหมือนอยู่ในภาวะอิมิตวของของเหลว แตกต่างจากในชั้นแรกที่มีโมเลกุลสัมผัสกับพื้นผิวของสารดูดซับโดยตรง

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

เมื่อ P คือความดันของการดูดซับ

P_0 คือความดันอิมิตว

W คือน้ำหนักของสารที่ถูกดูดซับ

W_m คือน้ำหนักของสารที่ปกคลุมเต็มชั้นหนึ่ง

C คือค่าคงที่

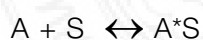
ในปัจจุบันการใช้สมการการดูดซับของ BET เพื่อหาขนาดพื้นที่ของตัวดูดซับได้รับการยอมรับทั่วไป ซึ่งพื้นที่ผิวสามารถหาได้จากการหาปริมาณแก๊สดังกล่าวมาเปลี่ยนจำนวนโมเลกุลของแก๊สที่ปกคลุมพื้นผิวเต็มหนึ่งชั้น คูณด้วยพื้นที่สำหรับการปกคลุมด้วยแก๊สหนึ่งโมเลกุล จากนั้นนำพื้นที่ทั้งหมดไปหารด้วยน้ำหนักของตัวดูดซับที่นำมาทดสอบจะได้พื้นที่ผิวจำเพาะของตัวดูดซับนั้น 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

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

โดยที่ k คือ ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับหนึ่ง (นาที่⁻¹)

q_t คือ ค่าการดูดซับของตัวดูดซับ ณ เวลาใด ๆ (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

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

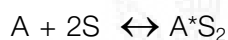
จัดสมการให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้น จะได้

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

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

2.5.2 สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง

สมการจลนพลศาสตร์สำหรับอธิบายการดูดซับบนผิวตัวดูดซับที่นิยมอีกสมการหนึ่งคือสมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง บนสมมติฐานการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนผิวตัวดูดซับเป็นผลมาจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าและเป็นการดูดซับทางเคมีที่มีผลมาจากตำแหน่งการเกิดปฏิกิริยา (active site) จากปฏิกิริยาการดูดซับ



สมการอัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสองสามารถเขียนอัตราเร็วการดูดซับได้ดังนี้

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

โดยที่ k คือ ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาเทียมอันดับสอง (นาที⁻¹)

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

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

จัดสมการให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้น จะได้

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

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 ดังนั้นสมการการแพร่ภายในรูพรุนจึงเป็นอีกสมการหนึ่งที่ถูกใช้ในการทำนายจลนพลศาสตร์การดูดซับ สมการการแพร่ภายในรูพรุนของ Weber และ Morris สามารถเขียนอยู่ในรูปสมการเชิงเส้นได้ดังนี้

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

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

2.6 โลหะหนัก

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 galenite หรือ galena ซึ่งเป็นซัลไฟด์ของตะกั่ว แร่ cerussite (PbCO_3), anglesite (PbSO_4), pyromophit ($\text{PbCl}_2 \cdot 3\text{Pb}_3(\text{PO}_4)_2$), 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 ในปัจจุบันสีทำด้วยตะกั่วน้อยลง แหล่งที่สำคัญที่ทำให้เกิดพิษสำหรับผู้ใหญ่คือจากอุตสาหกรรมได้แก่ โรงงานทำแบตเตอรี่และโรงงานอื่น ๆ ที่มีการใช้ตะกั่วอย่างกว้างขวาง เช่น อุตสาหกรรมอิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์ สำหรับประชาชนโดยทั่วไปอาจได้รับตะกั่วจากอากาศ ซึ่งมักมีตะกั่วปนเปื้อนจากการใช้เตตระเอทิลเลด (tetraethyl lead) ในน้ำมัน

รถยนต์ นอกจากนี้ยังมีแหล่งอื่น ๆ อีกจำนวนมากที่อาจจะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดภาวะตะกั่วเป็นพิษ ได้แก่ หัวกระสุนตะกั่วที่ตกค้างในร่างกาย การทำงานในสนามยิงปืน ยาสมุนไพรมหิก แป้งทาตัวเด็ก (จุ๋ยซู่) ภาชนะเซรามิกส์ ที่มีตะกั่ว ท่อประปาที่ทำด้วยตะกั่ว ผลิตภัณฑ์จากแบตเตอรี่และอาหารที่มีตะกั่วปนเปื้อน เหล้าไวน์ เครื่องยนต์ที่ใช้ตะกั่วเป็นส่วนประกอบ การเจียรในพลอยที่ใช้จานตะกั่ว ตะกั่วที่ใช้เป็นตัวพิมพ์หนังสือ ตะกั่วถ่วงน้ำหนักมาบน 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 ถ้าขนาดของผงฝุ่นที่มีตะกั่วยิ่งเล็กลงการดูดซึมนั้นก็ยิ่งมาก ผงฝุ่นตะกั่วที่เล็กกว่า 0.5 ไมโครเมตร ร่างกายสามารถดูดซึมได้ถึงร้อยละ 90 การกระจายของตะกั่วในร่างกาย เนื่องจากปกติตะกั่วที่เข้าสู่ร่างกายจะถูกกำจัดออกไปช้า ๆ ผลทำให้ตะกั่วมีการสะสมขึ้นในคนทั่วไปตะกั่วอาจจะสะสมในร่างกายประมาณ 200 มิลลิกรัม ส่วนในคนงานที่ทำงานเกี่ยวกับสารตะกั่วอาจจะสะสมถึง 500 มิลลิกรัม

เมื่อสารตะกั่วเข้าสู่ร่างกายจะกระจายไปยังเนื้อเยื่อของอวัยวะส่วนต่าง ๆ (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) ทำให้ระดับของฮีโมโกลบินและฮีโมกลินส่งผลกระทบต่อการสร้างเม็ดเลือด และ protoporphyrin จะจับกับสังกะสี (Zn) เป็น Zinc protoporphyrin (ZPP) นอกจากนี้พิษจากสารตะกั่วยังมีผลลดการส่งผ่านกระแสไฟฟ้าให้หัวใจ ทำให้หัวใจเต้นผิดจังหวะและการไหลเวียนเลือดผิดปกติ ไตทำงานผิดปกติเกี่ยวกับการขับกรดยูริก สารตะกั่วสามารถผ่านไปยังสมองทาง Blood brain barrier ทำให้เกิดอาการทางระบบประสาทได้ และยังมีผลต่ออวัยวะสืบพันธุ์และโครโมโซม

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เพชรพร เชาวกิจเจริญ (2537) ได้ใช้ผักตบชวาและขานอ้อยเป็นสารแลกเปลี่ยนไอออนสำหรับกำจัด ทองแดง นิกเกิลและสังกะสี พบว่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวาที่ไม่ปรับสภาพมีค่าสูงที่สุดอยู่ในช่วง 0.686-0.809 มิลลิอิกควาเลนท์/กรัม ส่วนผักตบชวาที่ปรับสภาพแบบคาร์บอกซีเมททีลซัลโฟเอทิลและครอสส์ลิงค์แซนเทตมีค่าอยู่ในช่วง 0.330-0.496 มิลลิอิกควาเลนท์ 0.233-0.503 มิลลิอิกควาเลนท์/กรัม และ 0.279-0.595 มิลลิอิกควาเลนท์/กรัม ตามลำดับ สำหรับขานอ้อยที่ไม่ได้ปรับสภาพความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออน มีค่าอยู่ในช่วง 0.065-0.086 มิลลิอิกควาเลนท์/กรัม และขานอ้อยที่ปรับสภาพแบบคาร์บอกซีเมททีล มีค่าอยู่ในช่วง 0.052-0.069 มิลลิอิกควาเลนท์/กรัม ผลจากการวิจัยพบว่าการปรับสภาพโดยวิธีทางเคมีทั้ง 3 วิธี ทำให้ประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนไอออนของผักตบชวาและขานอ้อยลดลง สำหรับอิทธิพลของความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสีย พบว่าความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนเพิ่มขึ้น เมื่อน้ำเสียมีความเข้มข้นของโลหะหนักน้อยลง สำหรับการรีเจนเนอเรชันใช้สารรีเจนเนอเรนต์แต่ละชนิด เพิ่มขึ้น 0.5 นอร์มอล ประมาณ 2-3 ปริมาตรเรซิน

นิริรัชต์ สงวนเดือน. 2545. ได้ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักนิกเกิล ทองแดง และสังกะสีโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากขังข้าวโพด เปลือกถั่วเหลือง และก้านดอกทานตะวันชนิดไม่ปรับสภาพ ปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก ปรับสภาพด้วยฟอร์มาลดีไฮด์ 5% และปรับสภาพด้วยฟอร์มาลดีไฮด์ 37% ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่าเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากเปลือกถั่วเหลืองมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักมากที่สุด รองลงมาคือก้านดอกทานตะวัน และขังข้าวโพด ตามลำดับ ผลของการปรับสภาพทางเคมีไม่ทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักเพิ่มมากขึ้น เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำการศึกษาสามารถกำจัดทองแดงได้มากกว่า สังกะสี และนิกเกิล ตามลำดับ เรซินแลกเปลี่ยนไอออนมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักดีที่สุด ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักในน้ำเสีย 5 มก./ล. โดยเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักจะลดลง กลไกหลักในการกำจัดโลหะหนัก คือการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่างเรซินแลกเปลี่ยนไอออนกับไอออนของโลหะหนักในน้ำเสีย 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% โดยทำการทดลองแบบที่

ละเทการวิจัยพบว่าเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากกากมะพร้าวชนิดไม่ได้ปรับสภาพจะมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักได้สูงกว่าชนิดที่ปรับสภาพด้วย ฟอรั่มลดีไฮด์ 5% ชนิดที่ปรับสภาพด้วยฟอรั่มลดีไฮด์ 37% และชนิดที่ปรับสภาพด้วย 1 นอร์มัล กรดไฮโดรคลอริก ตามลำดับ เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากกากมะพร้าวมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะทองแดง นิกเกิล และสังกะสีจากน้ำเสียสังเคราะห์สูงกว่าเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากต้นมันสำปะหลังและใบสับปะรด โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะทองแดง นิกเกิลและสังกะสีเฉลี่ยเท่ากับ 67.72%, 22.55% และ 44.78% ตามลำดับ เรซินแลกเปลี่ยนไอออนมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักที่ดีที่สุด ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักในน้ำเสีย 5 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยพบว่าเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นเพิ่มขึ้นประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะจะลดลง นอกจากนี้ผลการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งมีความเข้มข้นของทองแดง นิกเกิล และสังกะสีเริ่มต้นเท่ากับ 3.930, 4.034 และ 0.567 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ พบว่ากากมะพร้าวชนิดไม่ได้ปรับสภาพสามารถกำจัดโลหะหนักดังกล่าวได้เฉลี่ย 85.80, 65.13 และ 90.43 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

พรรนิพา พวันนา และคณะ (2560) ทำการสังเคราะห์เรซินแลกเปลี่ยนไอออนชนิดไอออนบวกจากผักตบชวาโดยปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างเซลลูโลสในผักตบชวากับกรดซัลฟิวริก เพื่อใช้เป็นสารแลกเปลี่ยนไอออนในสารละลายน้ำ พบว่า ค่าความจุเฉลี่ยสูงสุดของเรซิน เท่ากับ 5.1044, 4.7377, 4.6285 และ 4.4229 มิลลิสมมูลย์ต่อกรัมเรซิน 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) ได้ใช้ผงไฟจากเมือง Celtek ประเทศตุรกี ซึ่งเป็นดินที่ใช้ทำอิฐก่อสร้าง ผงไฟ Celtek เป็นตัวดูดซับไอออนตะกั่วและโครเมียมโดยวิธีแบทช์ ปัจจัยที่เหมาะสมในการดูดซับ คือ ปริมาณตัวดูดซับ 0.1 กรัม ที่ pH 6 ระยะเวลาในการกวนที่ 30 นาที พบว่าพฤติกรรมดูดซับสอดคล้องกับไอโซเทอมของ Langmuir ดีกว่าไอโซเทอมของ Freundlich พบว่าการดูดซับแบบชั้นเดียวสูงสุด (maximum monolayer adsorption capacity, q_m) สำหรับดูดซับตะกั่วเท่ากับ 18.08 mg/g สอดคล้องกับรายงานของ Ozdes et al. (2011) ใช้ผงไฟแร่อิลไลท์ (illite clay) ประเทศตุรกี สำหรับดูดซับไอออนตะกั่วและโครเมียม พบว่าการดูดซับแบบชั้นเดียวสูงสุดสำหรับดูดซับตะกั่วเท่ากับ 53.76 mg/g ในสภาวะปริมาณดิน 1.0 g/L pH เท่ากับ 4 และระยะเวลาการกวน 240 นาที

ลักขณา โชติธรรม และคณะ (2559) ได้เตรียมและศึกษาลักษณะจำเพาะของถ่านกัมมันต์จากไฟตงลิ้มแล้ง เพื่อนำไปใช้ในการกำจัดสารละลายตะกั่ว โดยศึกษาผลของตัวกระตุ้น ได้แก่ กรดฟอสฟอริกและโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ วิธีการให้ความร้อนด้วยเทคนิครีฟลักซ์และเครื่องไมโครเวฟ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายตะกั่ว และปริมาณถ่านกัมมันต์ที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

สารละลายตะกั่ว จากผลการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์ไฟตง สีมแดง คือ ให้ความร้อนด้วยเครื่องไมโครเวฟเป็นเวลา 10 นาที โดยได้ค่าไอโอดีนนัมเบอร์สูงสุดเท่ากับ 1265 มิลลิกรัมต่อกรัม จากการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วในน้ำสังเคราะห์ พบว่าเมื่อใช้ ปริมาณถ่านกัมมันต์ 0.25 กรัม ในสารละลาย ตะกั่วเข้มข้น 10 ppm ระยะเวลาสัมผัส 8 นาที ได้ ร้อยละการดูดซับสูงสุด

ผงไฟแร่ kaolinite ได้นำมาใช้กำจัดไอออนตะกั่วโดยวิธีการดูดซับ Gupta et al. (2005) พบว่า การดูดซับแบบชั้นเดียวสูงสุดสำหรับดูดซับตะกั่วเท่ากับ 11.52 mg/g Jiang et al. (2009) เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วระหว่างผงไฟแร่ kaolinite ธรรมชาติกับผงไฟแร่ kaolinite ที่ผ่านการดัดแปรพื้นผิว พบว่าผงไฟแร่ kaolinite ที่ผ่านการดัดแปรพื้นผิวมีประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนตะกั่วดีกว่าประมาณ 4.5 เท่า พบว่าการดูดซับแบบชั้นเดียวสูงสุดสำหรับดูดซับ ตะกั่วเท่ากับ 4.73 mg/g และ 32.2 mg/g สำหรับผงไฟแร่ kaolinite ธรรมชาติและผงไฟแร่ kaolinite ที่ผ่านการดัดแปรพื้นผิว ตามลำดับ สอดคล้องกับรายงานของ Jiang et al. (2010) ที่ทดสอบผงไฟแร่ kaolinite ธรรมชาติ ประเทศจีน ดูดซับไอออนตะกั่ว แคดเมียม นิกเกิลและทองแดง พบว่าการดูดซับ แบบชั้นเดียวสูงสุดสำหรับดูดซับตะกั่วเท่ากับ 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 การดูดซับ ไอออนตะกั่วสูงสุดเท่ากับ 99 mg/g ที่ pH 4 ซึ่งการดูดซับไอออนตะกั่วของ MnO_2 -diatomite ดีกว่า diatomite ประมาณ 4 เท่า Han et al. (2006) ทำการดัดแปรพื้นผิวทรายด้วย MnO_2 โดยการ ตกตะกอนคอลลอยด์ของแมงกานีสออกไซด์บนพื้นผิวของทราย Eren et al. (2009) รายงานการดัดแปรพื้นผิว bentonite ด้วย MnO_2 (MnO_2 -bentonite) จากผลการทดสอบการดูดซับไอออนตะกั่ว พบว่า 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) Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR), Nicolet 6700, Thermo Scientific, USA
- 7) X-ray fluorescence (XRF), Horiba Japan
- 8) Scanning electron microscope (SEM), JEOL, USA
- 9) Centrifuge, PLC-012E Universal centrifuge, USA
- 10) BET (BELSORP-mini, BEL, Japan)

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) Manganese chloride (MnCl_2), QRec, New Zealand
- 6) Hydrochloric acid (HCl)
- 7) Acetic acid (CH_3COOH)
- 8) Sodium acetate (CH_3COONa)
- 9) Citric acid
- 10) ผงไผ่ (Bamboo powder)

3.3 วิธีการทดลอง (methodology)

3.3.1 การเตรียมตัวดูดซับโดยการดัดแปรพื้นผิวทางเคมี

1) การเตรียมเรซินแลกเปลี่ยนไอออนจากผงไผ่

วิธีการเตรียมการเตรียมเรซินแลกเปลี่ยนไอออนจากผงไผ่ดัดแปลงจากการเตรียมจากผักตบชวา (พวรรณิพา, 2560) โดยนำผงไผ่ที่ผ่านการคัดขนาดน้อยกว่า 500 ไมครอน แช่ในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร ในอัตราส่วนผงไผ่ 100 กรัม ต่อสารละลาย 2 ลิตร ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นทำการกรองสารละลายทิ้ง แล้วล้างผงไผ่ด้วยน้ำกลั่นหลายๆ ครั้งจนโซเดียมไฮดรอกไซด์ถูกล้างออกไปจนหมด (ทดสอบโดยการวัดพีเอชของน้ำล้าง) นำมาอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เก็บในเดซิเคเตอร์ก่อนนำไปเตรียมเรซินแลกเปลี่ยนประจุด้วยกรดซิตริก

การสังเคราะห์เรซินจากปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชัน การเกิดปฏิกิริยาเอสเทอร์ริฟิเคชันระหว่างหมู่ไฮดรอกซี (-OH) ของเซลลูโลสและกรดซิตริกแบ่งออกเป็น 2 ช่วงอุณหภูมิที่ต่อเนื่องกัน คือ เริ่มต้นปฏิกิริยาที่อุณหภูมิ 60°C หลังจากนั้นจึงเพิ่มอุณหภูมิ เป็น 110 ถึง 140°C โดยช่วงผงไผ่ 1.5 กรัม ในบีกเกอร์ขนาด 100 mL เติมสารละลายกรดซิตริก ความเข้มข้น 0.6 mol/L ปริมาตร 15 mL คนให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 30 นาที แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิของตู้อบเป็น 140°C เวลา 3 ชั่วโมง หลังจากนั้นรอให้อุณหภูมิลดลงแล้วเติมน้ำกลั่นปริมาตร 20 mL นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า นาน 2 ชั่วโมง เพื่อล้างกรดซิตริกที่เหลือจากปฏิกิริยา แยกน้ำล้างเก็บไว้ แล้วล้างเรซินที่ได้ด้วยน้ำกลั่นหลายๆ ครั้ง จนน้ำล้างเป็นกลาง (ทดสอบด้วยกระดาษลิตมัส) นำน้ำล้างเรซินไปรวมกันแล้วหาค่า %reaction efficiency นำเรซินที่ผ่านการล้างอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปวิเคราะห์ค่าความจุแลกเปลี่ยนไอออน

2) การดัดแปรพื้นผิวผงไผ่ด้วยแมงกานีสออกไซด์

วิธีการดัดแปรพื้นผิวผงไผ่ด้วยแมงกานีสออกไซด์ดัดแปลงจากจากรายงานวิจัยของ Sari and Tuzen (2013) โดยนำผงไผ่ 15 กรัมผสมกับ 100 mL ของ 6 mol/L NaOH แล้วกระตุ้นโดยให้ความร้อนที่ 90°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นรินสารทั้งหมดที่ผ่านการกระตุ้นลงในสารละลาย MnCl₂ ปริมาตร 100 mL (ปรับค่า pH เป็น 2 ด้วย HCl) แล้วตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 10 ชั่วโมง จากนั้นทำการกรองจะได้ตะกอน Mn(OH)₂ บนผิวของอนุภาคผงไผ่ แล้วนำตะกอนผสมกับ 100 mL ของ 6 mol/L NaOH แล้วตั้งทิ้งให้สัมผัสกับอากาศมากที่สุดเป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วทำการกรองและล้างตะกอนหลายๆ รอบ จนกระทั่งน้ำล้างตะกอนเป็นกลาง แล้วจึงอบตะกอนที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เก็บในเดซิเคเตอร์ก่อนนำไปใช้เป็นตัวดูดซับ

3.3.2 การศึกษาการดูดซับโลหะตะกั่ว

ซึ่งตัวดูดซับใส่ในหลอดเซนติพิวล์ PETE ขนาด 50 mL เต็มสารละลายโลหะตะกั่วเข้มข้น 20 mg/L ปริมาตร 10 mL กวนโดยใช้เครื่องกวนสารละลายที่ความเร็วรอบคงที่ 700 รอบต่อนาที เป็นเวลา 60 นาที จากนั้นแยกสารละลายโดยการหมุนเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 5000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที แล้วกรองผ่านกระดาษกรอง สารละลายที่ได้นำไปวัดปริมาณไอออนตะกั่วที่เหลือด้วยเครื่องอะตอมมิกแอบซอร์บชันสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

ประสิทธิภาพของการดูดซับไอออนตะกั่วของตัวดูดซับ โดยการเปรียบเทียบปริมาณไอออนตะกั่วก่อนและหลังการดูดซับ 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 เต็มสารละลายมาตรฐานไอออนตะกั่วเข้มข้น 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) ระยะเวลาสัมพัทธ์ (equilibrium time)

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

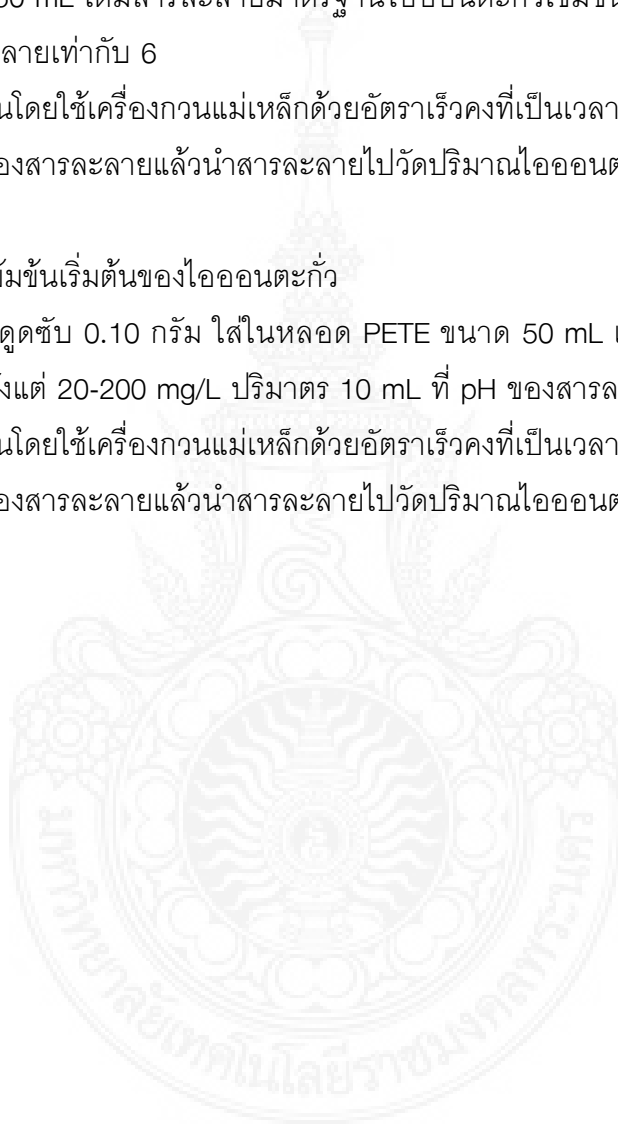
- กวนโดยใช้เครื่องกวนแม่เหล็กด้วยอัตราเร็วคงที่เป็นเวลา 5, 10, 15, 30, 60, 90, 120, 150, 180, 210 และ 240 นาที
- กรองสารละลายแล้วนำสารละลายไปวัดปริมาณไอออนตะกั่วด้วยเครื่อง AAS

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



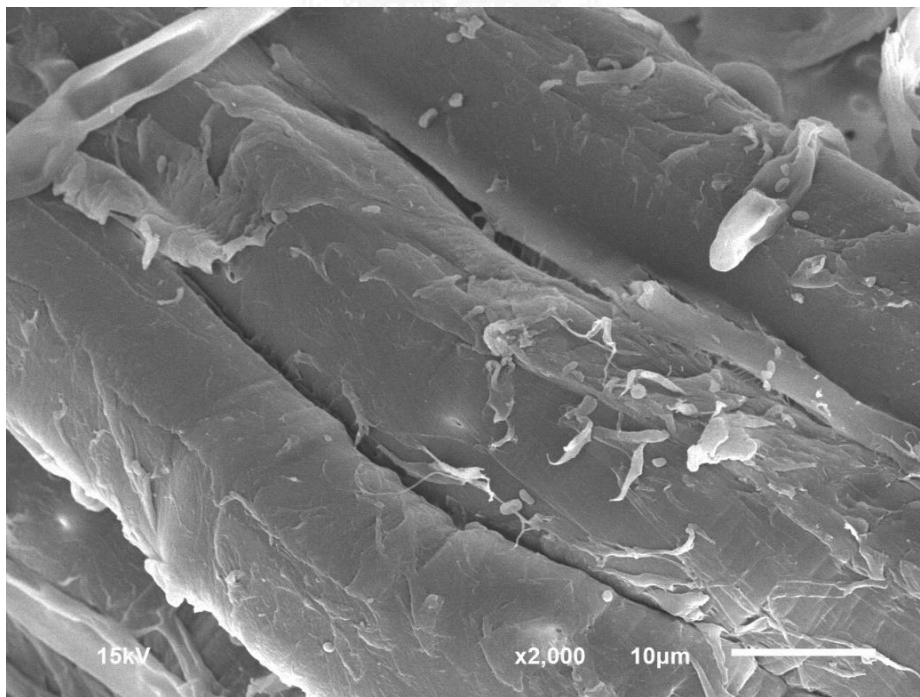
บทที่ 4

ผลการทดลองและสรุปผลการทดลอง

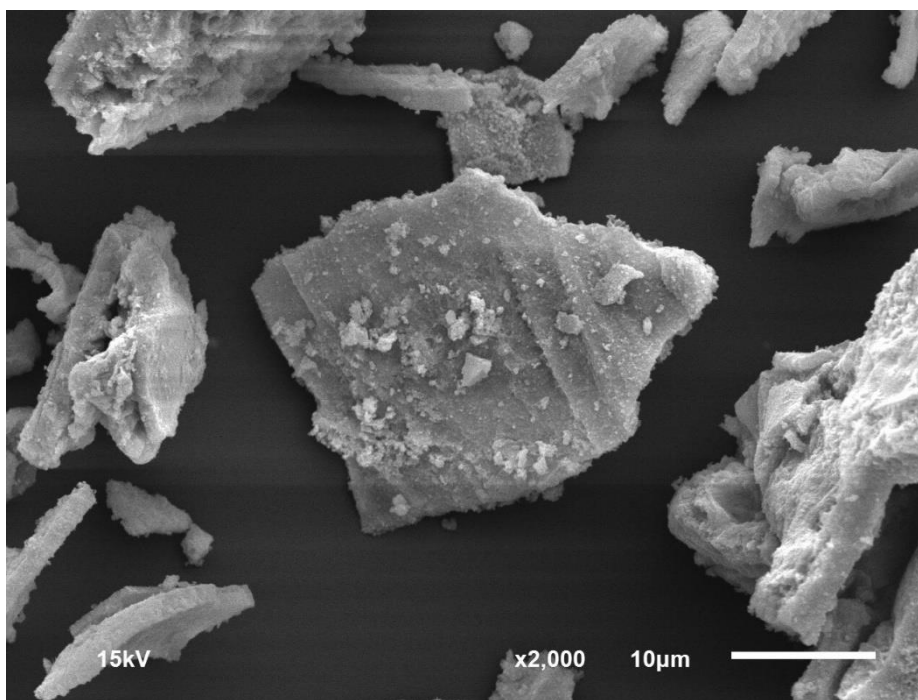
4.1 เอกลักษณะทางกายภาพของตัวดูดซับ

4.1.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM

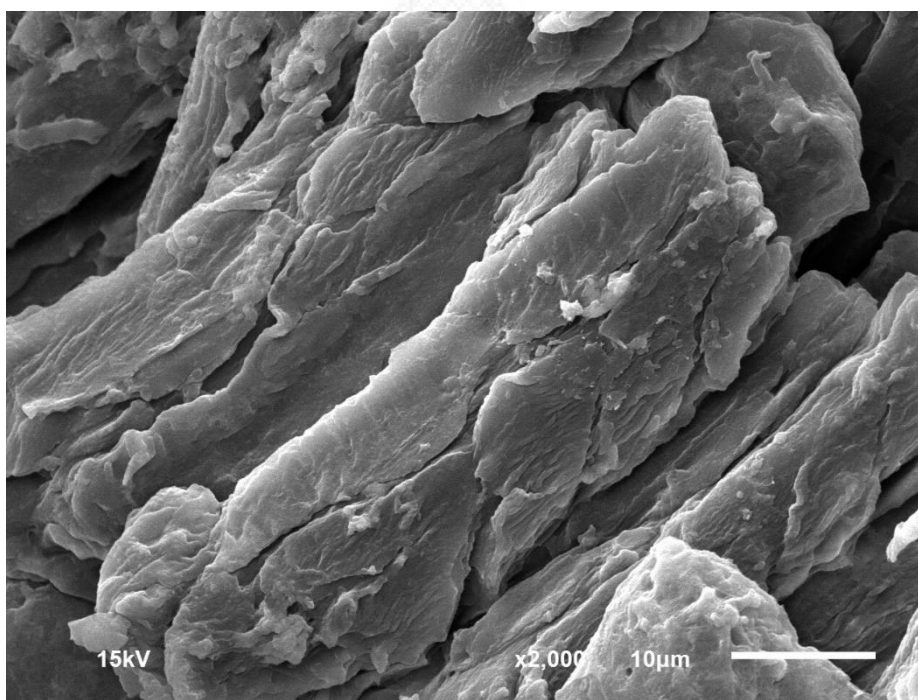
การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของผงไผ่ที่ไม่ผ่านการตัดแปรพื้นผิวและผงไผ่ตัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์ และเรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่เตรียมจากผงไผ่ ด้วยเทคนิคจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (scanning electron microscope, SEM) แสดงดังภาพที่ 4.1 พื้นผิวของผงไผ่ที่ไม่ผ่านการตัดแปรพื้นผิวมีลักษณะพื้นผิวค่อนข้างเรียบ เมื่อเทียบกับผงไผ่ตัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์ มีจะถูกปกคลุมด้วยแมงกานีสออกไซด์ขนาดไมโครเมตรจำนวนมากซึ่งเป็นผลมาจากการตัดแปรพื้นผิว ดังภาพที่ 4.2(ก)



ภาพที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM ผงไผ่



(ก)



(ข)

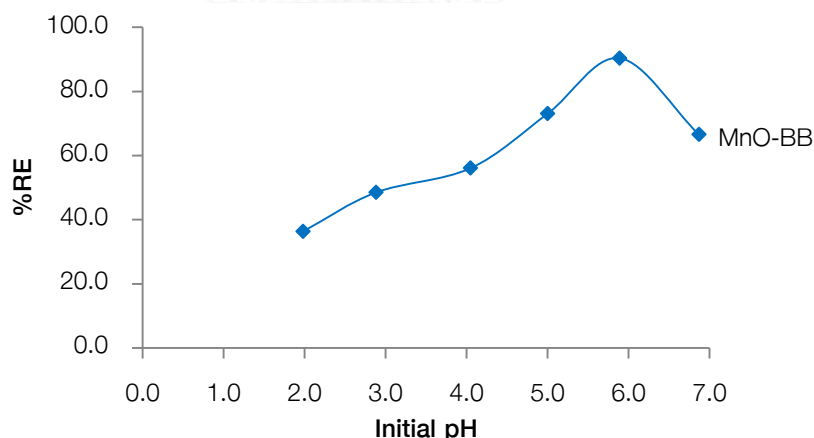
ภาพที่ 4.2 ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค SEM (ก) ผงไม้ที่ตัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์ และ (ข) ผงไม้ที่เตรียมเป็นเรซินแลกเปลี่ยนไอออน

4.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับไอออนตะกั่ว

ในการทดลองศึกษาผลการดูดซับไอออนตะกั่วในสารละลาย ทำการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างผงที่ไม่ผ่านการดัดแปรพื้นผิว (BB) และผงที่ดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์ (MnO-BB) เท่านั้น ส่วนเรซินที่เตรียมจากผงที่ไม่ได้ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสม

1) ผลของ pH ของสารละลาย (pH of solution)

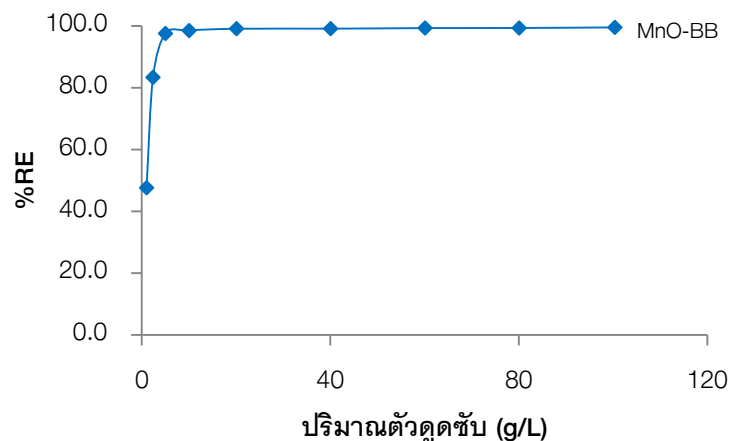
การศึกษากิจการของ pH ต่อการดูดซับไอออนตะกั่วในช่วง pH 2-7 พบว่าความจุการดูดซับ (adsorption capacity) ของผงที่ดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์ (MnO-BB) เพิ่มขึ้นสูงสุดที่ pH เท่ากับ 6 โดยมีประสิทธิภาพการกำจัด (removal efficiency) ประมาณร้อยละ 88 ดังแสดงในภาพที่ 4.3 ผลการทดลองสอดคล้องกับรายงานวิจัยที่ระบุว่าความจุการดูดซับของตัวดูดซับจะต่ำในสภาวะที่สารละลายเป็นกรดเนื่องจากบริเวณพื้นผิวของตัวดูดซับจะถูก protonate ส่งผลให้เกิดการแข่งขันระหว่างโปรตอนและไอออนโลหะ ในขณะที่ pH มากกว่า 6 ความจุการดูดซับของตัวดูดซับจะลดลงเนื่องจากตะกั่วอยู่ในรูป $Pb(OH)_2$ ซึ่งมีค่าการละลายต่ำจึงเกิดเป็นตะกอน



ภาพที่ 4.3 ผลของ pH ของสารละลายต่อประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่ว

2. ผลของปริมาณตัวดูดซับ (adsorbent concentration)

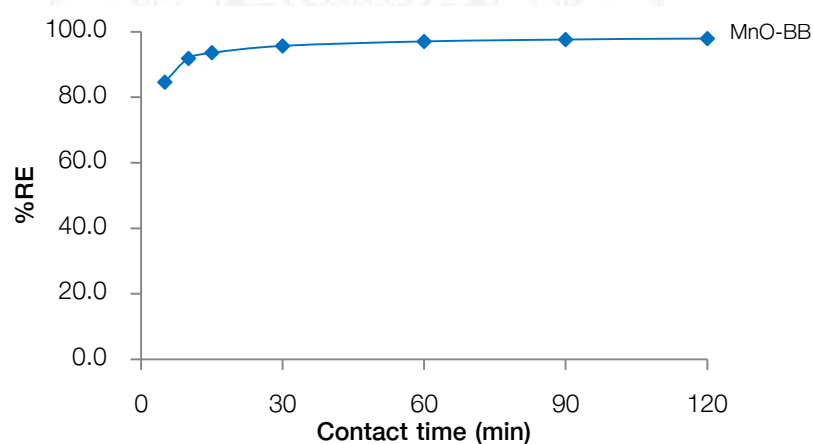
การศึกษากิจการของปริมาณตัวดูดซับต่อประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วแสดงในภาพที่ 4.4 ปริมาณตัวดูดซับที่ทำการศึกษาในช่วง 1-100 g/L (0.01-1.0 g) พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดเพิ่มขึ้นร้อยละ 44.7-99.2 เมื่อความเข้มข้นของผงที่ดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์เพิ่มขึ้นจาก 1-60 g/L ในการทดลองนี้ความเข้มข้นของตัวดูดซับที่เหมาะสมเท่ากับ 5 g/L



ภาพที่ 4.4 ผลของปริมาณตัวดูดซับต่อประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่ว

3. ผลของระยะเวลาสัมผัส (contact time)

การศึกษาปัจจัยระยะเวลาในการกวนสารละลายโดยใช้สภาวะดังนี้ ค่า pH ของสารละลายเท่ากับ 6 ปริมาณของตัวดูดซับผงไผ่ดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์ 0.05 g/L (5 g/10 mL ของ 50 mg/LPb) โดยอัตราเร็วในการกวนคงที่ ณ อุณหภูมิห้อง โดยระยะเวลาที่ใช้ในการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับตั้งแต่ 5-120 นาที ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วแสดงในภาพที่ 4.5 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดไอออนตะกั่วของผงไผ่ดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 30 นาทีแรก และเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ในช่วง 5 นาทีแรกประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วมากกว่าร้อยละ 84 และเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อเวลาตั้งแต่ 60 นาทีเป็นต้นไป ดังนั้นในการทดลองนี้เลือกใช้เวลาดำเนินการเป็น 30 นาที



ภาพที่ 4.5 ผลของเวลาสัมผัสต่อประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่ว

4.3 ไอโซเทอมการดูดซับ

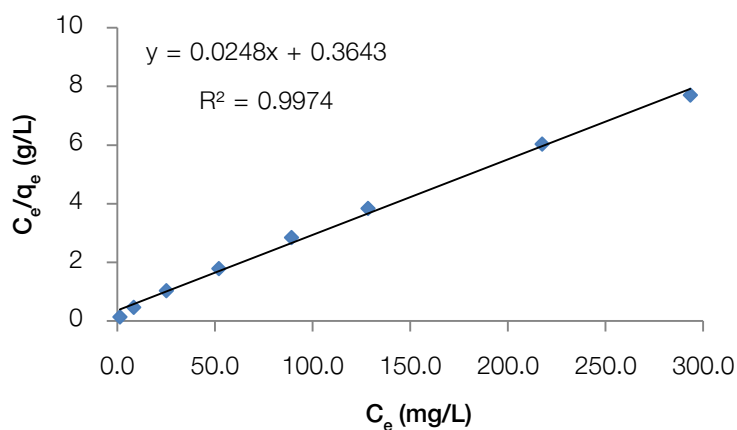
ไอโซเทอมของการดูดซับ อธิบายความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่สมดุล กับจำนวนของตัวถูกดูดซับที่มีการดูดซับ ที่อุณหภูมิคงที่ ไอโซเทอมของการดูดซับเป็นสมการที่มีประโยชน์สำหรับวิเคราะห์การดูดซับ

ไอโซเทอมของแลงเมียร์

สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir) มีสมมติฐานที่ว่าโมเลกุลของตัวถูกดูดซับจะเกิดการดูดซับบนผิวในตำแหน่งที่แน่นอนของตัวดูดซับ แต่ละโมเลกุลของตัวดูดซับเกิดการดูดซับบนผิวแบบชั้นเดียวแต่ละพื้นผิวของตัวดูดซับมีลักษณะแบบเดียวกัน สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์เขียนได้ดังสมการ

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

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 41.06 mg/g และ b เท่ากับ 0.0725 L/g โดยมีความเป็นเส้นตรง R^2 เท่ากับ 0.9974



ภาพที่ 4.6 กราฟไอโซเทอมของแลงเมียร์

สมการการดูดซับแบบแลงเมียร์ ยังอาจแสดงได้ด้วยปัจจัยของการแยกหรือค่าตัวแปรที่สภาวะสมดุล (equilibrium parameter, R_L) ดังสมการ

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

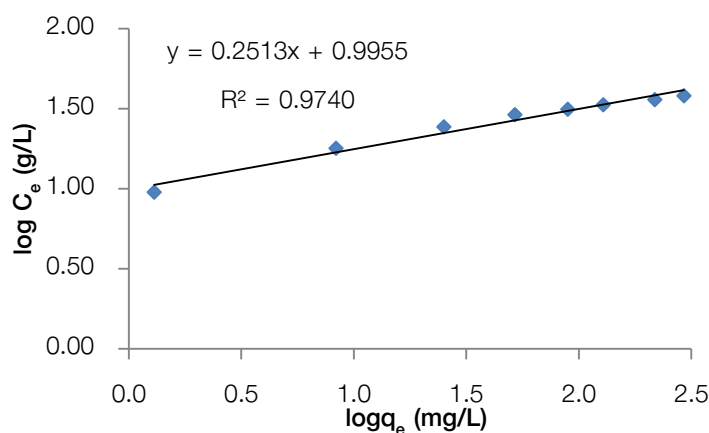
เมื่อ C_0 คือความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวถูกดูดซับ (mg/L) จากผลการทดลองพบว่าค่า R_L อยู่ในช่วง 0.028-0.220 เมื่อความเข้มข้นของตะกั่วระหว่าง 50-500 mg/L รูปร่างของไอโซเทอมสอดคล้องกับการดูดซับ เนื่องจาก $0 < R_L < 1$ คือการดูดซับดี

ไอโซเทอมของ Freundlich

สมการของ Freundlich มีสมมติฐานของการดูดซับที่ว่าพื้นผิวของตัวดูดซับไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด โดยที่การดูดซับบนพื้นผิวของตัวถูกดูดซับจะเป็นแบบหลายชั้น (multilayer) สมการที่ได้จากการสังเกตและทดลองการดูดซับโดยอาศัยสมมติฐานของทฤษฎีนี้ เป็นแนวความคิดของแบบจำลองแบบหลายชั้น

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

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 แสดงว่าปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับมีปริมาณจำกัดที่จะใช้ในการดูดซับ

ไอโซเทอมของ Dubinin-Radushkevich (D-R isotherm)

Dubinin-Radushkevich ได้เสนอไอโซเทอมการดูดซับเพื่อประเมินกลไกการดูดซับของตัวดูดซับเป็นการดูดซับทางเคมีหรือทางกายภาพ สมการของไอโซเทอมของ Dubinin-Radushkevich เขียนได้เป็น

$$\ln q_e = \ln q_m - \beta \varepsilon^2 \quad \dots\dots(4.4)$$

$$\varepsilon = RT \ln \left(1 + \frac{1}{C_e} \right) \quad \dots\dots(4.5)$$

เมื่อ q_e คือปริมาณการดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ (mg/g)

q_m คือความจุการดูดซับทางทฤษฎี (mol/g)

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

ε คือ Polanyi potential (KJ/mol)

C_e คือความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดซับในสารละลาย ณ ภาวะสมดุล (mol/L)

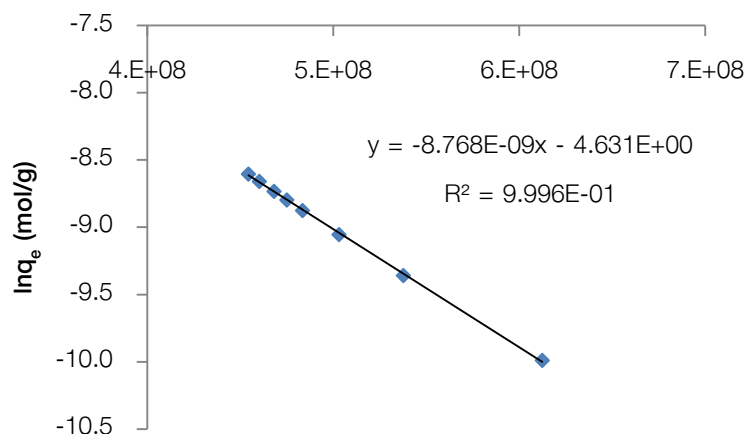
R คือค่าคงที่ของแก๊ส (8.314 J/mol K)

T คืออุณหภูมิสัมบูรณ์ (K)

จากสมการ (4.4) เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\ln q_e$ กับ ε^2 สามารถหาค่า q_m และ β ได้จากจุดตัดแกนและความชัน ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าค่า q_m เท่ากับ 71.1 mg/g และค่า β เท่ากับ $2.11 \times 10^{-9} \text{ mol}^2/\text{J}^2$ โดยค่า β จากสมการ Dubinin-Radushkevich เกี่ยวข้องกับพลังงานดูดซับอิสระ (E) ของการดูดซับต่อโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับ เมื่อเกิดการเคลื่อนที่จากสารละลายสู่พื้นผิวของตัวดูดซับ ซึ่งพลังงานดูดซับอิสระ หาได้จากสมการ

$$E = \frac{1}{\sqrt{2\beta}} \quad \dots\dots(4.6)$$

จากผลการทดลองพบว่าพลังงานดูดซับอิสระด้วยผงไผ่ดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์ เท่ากับ 12.15 kJ/mol จากสมมติฐานเกี่ยวกับค่าพลังงานดูดซับอิสระ ถ้าน้อยกว่า 8 kJ/mol กลไกการดูดซับจะเป็นแบบกายภาพ แต่ถ้าอยู่ในช่วง 8 ถึง 16 กลไกการดูดซับจะเป็นแบบเคมี ดังนั้นในการทดลองนี้ การดูดซับไอออนตะกั่วด้วยผงไผ่ที่ไม่ผ่านการดัดแปรพื้นผิวมีกลไกการดูดซับแบบกายภาพ ส่วนเหนียวดัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์มีรูปแบบการดูดซับเป็นแบบเคมี (chemisorption)



ภาพที่ 4.8 กราฟไอโซเทอมของ Dubinin-Radushkevich

ตารางที่ 4.1 ไอโซเทอมการดูดซับของ Langmuir, Freundlich และ Dubinin-Radushkevich

ไอโซเทอม	MnO-BB
Langmuir	
$q_{m(cal)}$ (mg/g)	41.06
$q_{m(exp)}$ (mg/g)	40.03
b (L/g)	0.0725
R_L	0.028-0.220
R^2	0.9974
Freundlich	
K_f (mg/g)	9.897
n	3.98
R^2	0.9740
Dubinin-Radushkevich	
q_m (mg/g)	71.1
β (mol ² /kJ ²)	2.11×10^{-9}
E (kJ/mol)	12.15
R^2	0.9960

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	(San 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

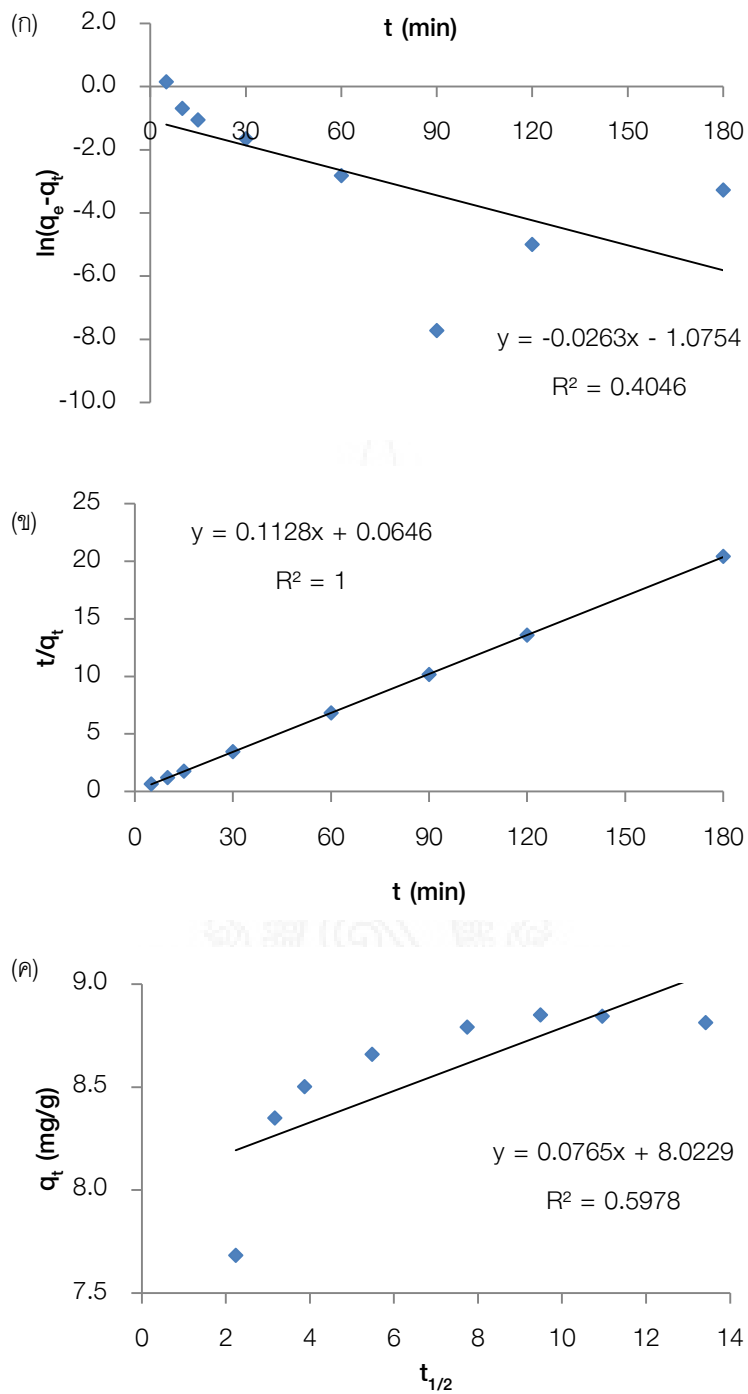
เพื่อทราบถึงกลไกการดูดซับซึ่งเป็นการถ่ายโอนมวลสารระหว่างสารถูกดูดซับและวัสดุดูดซับแบบจำลองที่นิยมใช้ในการอธิบายกลไกดูดซับที่เกิดขึ้นมี 2 แบบ คือ pseudo-first order และ pseudo-second order โดยแบบจำลองทั้ง 2 แบบตั้งบนสมมติฐานว่ากระบวนการดูดซับและการ

คายเป็นปฏิกิริยาเคมีเทียม (pseudo chemical reaction) และอัตราการดูดซับขึ้นกับตำแหน่งในการเกิดปฏิกิริยาของวัสดุดูดซับที่ยังไม่ถูกครอบครอง

เมื่อนำผลการทดลองปัจจัยความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนตะกั่วที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยสมการการดูดซับตามแบบจลนพลศาสตร์อันดับหนึ่งเทียมและอันดับสองเทียม พบว่าผลการทดลองสอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับสองเทียม ดังตารางที่ 4.3 และรูปภาพของจลนพลศาสตร์แสดงในภาพที่ 4.10

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

บทที่ 5

อภิปรายผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ได้นำผงเฝื่อนมาทำการตัดแปรพื้นผิวทางเคมีด้วยแมงกานีสออกไซด์ โดยแมงกานีสออกไซด์ขนาดระดับไมโครเมตรเคลือบบนผิวของอนุภาคผงเฝื่อนทำให้เกิดรูพรุนมากขึ้น เมื่อนำผงเฝื่อนตัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์มาเป็นตัวดูดซับไอออนตะกั่วในสารละลายโดยวิธีแบทช์ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับดังนี้

- 1) สภาวะ pH ที่เหมาะสมเท่ากับ 6
- 2) ความเข้มข้นของผงเฝื่อนตัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์ เท่ากับ 5 g/L
- 3) ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที
- 4) ช่วงความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายไอออนตะกั่วคือ 50-500 mg/L

การประเมินภาพแบบการดูดซับโดยอาศัยแบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir), ฟรอนดิช (Freundlich) และ ดุบินิน-ราดซุคเควิช (Dubinin-Radushkevich) พบว่าการดูดซับสอดคล้องกับสมการของแลงเมียร์ไอโซเทอม พบว่าความสามารถสูงสุดของการดูดซับแบบชั้นเดียวเท่ากับ 41.06 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับผงเฝื่อนที่ไม่ได้ผ่านการตัดแปรพื้นผิวพบว่าผงเฝื่อนตัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์มีความจุการดูดซับไอออนตะกั่วมากกว่าถึงประมาณ 38 เท่า จากไอโซเทอมของดุบินิน-ราดซุคเควิช สามารถอธิบายได้ว่าการดูดซับไอออนตะกั่วด้วยผงเฝื่อนตัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์เป็นแบบเคมี ในขณะที่ผงเฝื่อนที่ไม่ได้ผ่านการตัดแปรพื้นผิวเป็นการดูดซับทางกายภาพ จากการศึกษาจลนศาสตร์เคมีของการดูดซับพบว่าการดูดซับไอออนตะกั่วด้วยที่ผงเฝื่อนที่ไม่ได้ผ่านการตัดแปรพื้นผิวและผงเฝื่อนตัดแปรพื้นผิวด้วยแมงกานีสออกไซด์สอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (pseudo second order) โดยกลไกการดูดซับน่าจะเกิดจากกลไกทางเคมีที่มีการแลกเปลี่ยนไอออนระหว่าง H^+ และพันธะ MnO กับไอออนตะกั่วในสารละลาย

เอกสารอ้างอิง

- เกศสุชา พูลคำ. 2537. การกำจัดโลหะหนักโดยการไ้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากชานอ้อยและ
ผักตบชวา. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ชัชฎาพร องอาจ. 2545. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยน
ไอออนที่เตรียมจากต้นมันสำปะหลัง ใบสับปะรด และกากมะพร้าว. วิทยานิพนธ์
มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- นิธิรัชต์ สงวนเดือน. 2545. การกำจัดโลหะหนักโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากขังข้าวโพด
เปลือกถั่วเหลืองและก้านดอกทานตะวัน. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรม
สิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ธีรดิถีโพธิ์ตันติมงคล. 2560. ถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรโดยการกระตุ้นทางเคมี
เพื่อการประยุกต์ใช้กำจัดสารมลพิษในน้ำ. วารสารหน่วยวิจัยวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและ
สิ่งแวดล้อมเพื่อการเรียนรู้. ฉบับที่ 1. หน้า 196-214.
- เพชรพร เขาวงกัจเจริญ. 2537. การกำจัดโลหะหนักโดยใช้เรซินแลกเปลี่ยนไอออนที่ทำจากวัสดุเหลือ
ทิ้งทางการเกษตร : รายงานผลงานวิจัย. กรุงเทพมหานคร : จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- พรณิพา พวันนา, วัชรวิ บางแบ่ง และพิพัฒน์ แหลมเฉียบ. 2560. การสังเคราะห์เรซินแลกเปลี่ยน
ไอออนชนิดไอออนบวกจากผักตบชวาที่ปรับสภาพด้วยกรดซิตริก, วารสารวิชาการวิทยาศาสตร์
และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์, ฉบับที่ 10, หน้า 17-30.
- ลักขณา โชติธรรม, พนิดา สุมานะตระกูล และพนิดา กังซุ่น. 2559. การเตรียม ลักษณะจำเพาะและ
การประยุกต์ใช้ดูดซับตะกั่วของถ่านกัมมันต์ไม่ดัดแปลง. 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.I., 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.
- Sari 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)	<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 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 and grease)	ไม่เกิน 5.0 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือ ประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควรแต่ไม่เกิน 15 มก./ล.	สกัดด้วยตัวทำละลาย แล้วแยกหาน้ำหนักของน้ำมันและไขมัน
9. ฟอรัมาลดีไฮด์ (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. หรือแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง 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. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 200 มก./ล.	Kjeldahl
15. ค่าซีโอดี (chemical oxygen demand : COD)	ไม่เกิน 120 มก./ล. หรืออาจแตกต่างกันแล้วแต่ประเภทของแหล่งรองรับน้ำทิ้ง หรือประเภทของโรงงานอุตสาหกรรม ตามที่คณะกรรมการควบคุมมลพิษเห็นสมควร แต่ไม่เกิน 400 มก./ล.	potassium dichromate digestion
16. โลหะหนัก		
16.1 สังกะสี (Zn)	ไม่เกิน 5.0 มก./ล.	atomic absorption spectrophotometry
16.2 โครเมียมชนิดเฮกซะวาเลนต์ (hexavalent chromium)	ไม่เกิน 0.25 มก./ล.	ชนิด direct aspiration หรือวิธี plasma emission spectroscopy
16.3 โครเมียมชนิดไตรวาเลนต์ (trivalent chromium)	ไม่เกิน 0.75 มก./ล.	ชนิด 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 : ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ.2539) เรื่อง “กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภทอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม” ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 99 ตอนที่ 113 ตอนที่ 13 ง ลงวันที่ 13 กุมภาพันธ์ 2539

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ - นามสกุล (ภาษาไทย) ดร.วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ
(ภาษาอังกฤษ) Dr.Woravith Chansuvarn

ตำแหน่งปัจจุบัน

ตำแหน่งทางวิชาการ ผู้ช่วยศาสตราจารย์

หน่วยงาน

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

เลขที่ 1381 ถนนประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800

โทร 0-2836-3000 มือถือ 08-4667-3969

E-mail : woravith.c@rmutp.ac.th

ประวัติการศึกษา

ระดับ ปริญญา	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 จันทร์สุวรรณ. 2557. การออกแบบเซนเซอร์ทางเคมีสำหรับตรวจวัดไอออนปรอทด้วยตาเปล่า, วารสารวิทยาศาสตร์ มข. ฉบับที่ 42 ฉบับที่ 4 เลขหน้า 748-760.

การประชุมวิชาการระดับนานาชาติ

1. Woravith Chansuvarn and Pratuangtip Rojanavipat, Value addition of waste building material for removal of lead(II) ion from aqueous solution. The 5th RMUTP international conference on science, technology and innovation for sustainable development: the road towards a green future. Bangkok. Thailand. 17-18 July 2014. (Poster presentation).

2. Woravith Chansuvarn. Adsorption of Pb(II) from aqueous solution using an autoclaved aerated concrete. 5th RMUTIC: Technology and innovation towards ASEAN. PhraNakhon Si Ayutthaya. Thailand, 23-25 July 2014. (Poster presentation).

3. Woravith Chansuvarn. Kunawoot Jainae and Supattra Chansuvarn. Quality of groundwater for producing village tap water in Samchuk district, Suphanburi province. The 6th RMUTIC: Green Innovation for a Better Life. Nakhon Ratchasima. Thailand. 1-3 September 2015. (Poster presentation).