

การดูดซับไอออนตะกั่วและนิกเกิลจากสารละลายโดยใช้ไม้มะละกอบเป็นตัวดูดซับทางชีวภาพ

สารนิพนธ์

ของ

ไพรัตน์ ฮงทอง

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี

พฤษภาคม 2552

การดูดซับไอออนตะกั่วและนิกเกิลจากสารละลายโดยใช้ไม้มะละกอสเป็นตัวดูดซับทางชีวภาพ

สารนิพนธ์

ของ

ไพรัตน์ ฮงทอง

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาเคมี

พฤษภาคม 2552

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

การดูดซับไอออนตะกั่วและนิกเกิลจากสารละลายโดยใช้ไม้มะละกอกเป็นตัวดูดซับทางชีวภาพ

บทคัดย่อ

ของ

ไพรัตน์ ฮงทอง

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี

พฤษภาคม 2552

ไพรัตน์ ฮงทอง(2552). การดูดซับไอออนตะกั่วและนิกเกิลจากสารละลายโดยใช้ไม้มะละกอเป็นตัวดูดซับทางชีวภาพ. สารนิพนธ์ กศ.ม.(เคมี). กรุงเทพฯ: บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ. อาจารย์ที่ปรึกษาสารนิพนธ์: รองศาสตราจารย์สมพล มงคลพิทักษ์สุข, อาจารย์ ดร.ปิยะดา จิตรตั้งประเสริฐ.

การวิจัยครั้งนี้ศึกษาการกำจัดไอออนโลหะหนักโดยใช้ไม้มะละกอเป็นวัสดุดูดซับชีวภาพชนิดใหม่กับสารละลายไอออนตะกั่วและนิกเกิลที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตรผสมไม้มะละกอ 10 กรัม ที่ pH 2-7 เป็นเวลา $3\frac{1}{2}$ ชั่วโมง พบว่า ที่ pH 5.5 และ pH 2 ไม้มะละกอมีความสามารถดูดซับไอออนตะกั่วและนิกเกิลได้เท่ากับ 8.94 มิลลิกรัมต่อลิตร (89.40%) และ 8.73 มิลลิกรัมต่อลิตร (62.80%) ตามลำดับ การดูดซับไอออนโลหะหนักเป็นไปตามแบบจำลอง Langmuir Adsorption Isotherm โดยมีค่าปริมาณไอออนตะกั่วและนิกเกิลที่ถูกดูดซับได้สูงสุด เท่ากับ 7.02 และ 4.76 มิลลิกรัมต่อกรัมของไม้มะละกอ ตามลำดับ และค่าคงที่ของการดูดซับของไอออนโลหะหนักทั้งสองเท่ากัน 0.07 ลิตรต่อมิลลิกรัมโลหะหนัก ซึ่งไอออนตะกั่วและนิกเกิลเข้าสู่สมดุลที่เวลาในการดูดซับเท่ากันที่ 2 ชั่วโมง และการศึกษากลไกการเกิดปฏิกิริยาการดูดซับไอออนโลหะหนักเป็นปฏิกิริยาอันดับสองเทียม โดยมีค่าปริมาณไอออนตะกั่วและนิกเกิลที่ถูกดูดซับ เท่ากับ 12.39 มิลลิกรัมต่อกรัมของไม้มะละกอ ($R^2 = 0.99$) และ 10.83 มิลลิกรัมต่อกรัมของไม้มะละกอ($R^2 = 0.95$)

THE ADSORPTION OF LEAD(II) AND NICKEL(II) FROM AQUEOUS SOLUTION BY
USING PAPAYA WOOD AS THE BIOSORBENT

AN ABSTRACT
BY
PAIRAT HONGTHONG

Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the
Master of Education Degree in Science Education
at Srinakharinwirot University
May 2009

Pairat Hongthong(2009). *The adsorption of lead (II) and nickel (II) from aqueous solution by using papaya wood as the biosorbent*. Master Thesis, M.Ed. (Chemistry).

Bangkok: Graduate School, Srinakharinwirot University. Advisor committee:

Assoc. Prof. Sompol Mongkolpitaksuk, Dr. Piyada Jittangprasert.

The aim of this research was to study the adsorption of heavy metals by using papaya wood as biosorbent. Ten mg/l of lead (II) and nickel (II) ions were mixed with 10 gm of papaya wood at room temperature, pH 2-7, for $3\frac{1}{2}$ hours. The maximum adsorption was 8.94 mg/g (89.40%) at pH 5.5 and 8.73 mg/g (87.30%) at pH 2 for lead (II) and nickel (II) ions, respectively. The adsorption of heavy metals followed Langmuir Adsorption Isotherm with the maximum adsorption of lead (II) and nickel (II) ions at 7.02 and 4.76 mg/g of papaya wood, respectively. The constant adsorption of lead (II) and nickel (II) ions was the same value at 0.07 liter/mg. The adsorption equilibrium was 2 hours for both lead (II) and nickel (II) ions. The biosorbent kinetics was found to be pseudo-second-order reaction with the adsorption of lead (II) ion at 12.39 mg/g of papaya wood ($R^2 = 0.99$) while the adsorption of nickel (II) ion was 10.83 mg/g of papaya wood ($R^2 = 0.95$).

การดูดซับไอออนตะกั่วและนิกเกิลจากสารละลายโดยใช้ไม้มะละกอบนตัวดูดซับทางชีวภาพ

สารนิพนธ์

ของ

ไพรัตน์ ฮงทอง

เสนอต่อบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

ตามหลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี

พฤษภาคม 2552

อาจารย์ที่ปรึกษาสารนิพนธ์ ประธานคณะกรรมการบริหารหลักสูตร และคณะกรรมการสอบ
ได้พิจารณาสารนิพนธ์เรื่อง การดูดซับไอออนตะกั่วและนิกเกิลจากสารละลายโดยใช้ไม้มะละกอเป็นตัว
ดูดซับทางชีวภาพ ของไพรัตน์ ฮงทอง ฉบับนี้แล้ว เห็นสมควรรับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตาม
หลักสูตรปริญญาการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒได้

อาจารย์ที่ปรึกษาสารนิพนธ์

.....
(รองศาสตราจารย์สมพล มงคลพิทักษ์สุข)

ประธานคณะกรรมการบริหารหลักสูตร

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธารรัตน์ ศุภศิริ)

คณะกรรมการสอบ

..... ประธาน
(รองศาสตราจารย์สมพล มงคลพิทักษ์สุข)

..... กรรมการสอบสารนิพนธ์
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธารรัตน์ ศุภศิริ)

..... กรรมการสอบสารนิพนธ์
(อาจารย์ ดร.ปิยะดา จิตรตั้งประเสริฐ)

..... กรรมการสอบสารนิพนธ์
(อาจารย์ศศิวิมล วุฒิกนกกาญจน์)

อนุมัติให้รับสารนิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาการศึกษา
มหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. วิเชียร มากตุ่น)

วันที่ เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2552

ประกาศคุณูปการ

สารนิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี เพราะผู้วิจัยได้รับความกรุณาอย่างยิ่งจาก รองศาสตราจารย์สมพล มงคลพิทักษ์สุข ประธานกรรมการที่ปรึกษาสารนิพนธ์ และขอกราบ ขอบพระคุณอาจารย์ ดร.ปิยะดา จิตรตั้งประเสริฐ กรรมการที่ปรึกษาร่วมสารนิพนธ์ ท่านได้เสียสละ เวลาอันมีค่าเพื่อให้คำปรึกษาแนะนำในการดำเนินการวิจัยทุกขั้นตอน ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ อย่างดียิ่ง อีกทั้งทำให้ผู้วิจัยได้รับประสบการณ์ในการทำงานวิจัย ได้รู้และเห็นคุณค่าของงานวิจัย และพร้อมทั้งเป็นแบบอย่างของอาจารย์ที่ทุ่มเทให้กับศิษย์ในงานด้านการวิจัยและพัฒนาอย่างไม่เหน็ด เหนื่อย ผู้วิจัยรู้สึกซาบซึ้ง และขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้

ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.ธาวรัตน์ ศุภศิริ ที่ได้กรุณาเป็นกรรมการสอบ สารนิพนธ์นี้

ขอกราบขอบพระคุณอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิประสาทวิชาความรู้แก่ผู้วิจัยในการศึกษา ตามหลักสูตรการศึกษามหาบัณฑิต สาขาวิชาเคมี ซึ่งทำให้ผู้วิจัยได้รับความรู้อย่างเต็มเปี่ยมสามารถ นำความรู้ไปใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด

ขอขอบคุณอาจารย์ศศิวิมล วุฒิกนกกาญจน์ ที่ได้ให้คำแนะนำการใช้เครื่องมือในการวิจัย ตลอดจนได้กรุณาเป็นกรรมการสอบสารนิพนธ์นี้

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่ได้ให้ ความอนุเคราะห์ในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์

ขอขอบคุณผู้อำนวยการเฟื่องฟ้า ประดิษฐ์พจน์ โรงเรียนสตรีวิทยา รองผู้อำนวยการโรงเรียน ทุกกลุ่มบริหารงาน กลุ่มสาระการเรียนรู้วิทยาศาสตร์และคณะครูโรงเรียนสตรีวิทยา ที่สนับสนุนโอกาส ให้ผู้วิจัยได้พัฒนาชีวิตให้เจริญก้าวหน้า ทั้งคอยสนับสนุน ให้คำแนะนำ ช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจ เสมอมา

คุณค่าและประโยชน์ของสารนิพนธ์ฉบับนี้ขอมอบเป็นเครื่องบูชาพระคุณต่อครอบครัว “สงทอง” ที่มอบความรัก คอยเอาใจใส่ และสนับสนุนในทุก ๆ ด้าน ทำให้ผู้วิจัยประสบความสำเร็จใน ครั้งนี้และคุณค่าทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากสารนิพนธ์เล่มนี้ ผู้วิจัยน้อมรำลึกและบูชาพระคุณแก่บุพการีของ ผู้วิจัย และบูรพาจารย์ทุกท่านที่อยู่เบื้องหลังในการวางรากฐานการศึกษาให้กับผู้วิจัย ตั้งแต่อดีตจนถึง ปัจจุบัน

ไพรัตน์ สงทอง

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ภูมิหลัง.....	1
ความมุ่งหมายของการวิจัย.....	3
ความสำคัญของงานวิจัย.....	3
ขอบเขตของงานวิจัย.....	3
นิยามศัพท์เฉพาะ.....	4
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	5
ข้อมูลทั่วไปของมะละกอ.....	5
คุณสมบัติและความสำคัญของโลหะหนัก.....	8
กระบวนการดูดซับ.....	12
จลนพลศาสตร์ของการดูดซับโลหะหนักระหว่างของเหลว – ของแข็ง.....	25
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	27
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	32
การดำเนินการวิจัยและการเก็บรวบรวมข้อมูล.....	32
การเตรียมตัวอย่าง.....	32
วิธีการทดลอง.....	33
การจัดกระทำและการวิเคราะห์ข้อมูล.....	35
4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	37
ผลของ pH ที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะ.....	37
ผลของปริมาณไม้มะละกอที่มีต่อการดูดซับโลหะหนัก.....	39
ระยะเวลาสัมผัสที่มีต่อการดูดซับโลหะหนัก.....	41
ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของไม้มะละกอในการดูดซับโลหะหนัก.....	43
จลนพลศาสตร์ของการดูดซับโลหะหนักของไม้มะละกอ.....	48

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
5 สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ.....	53
บรรณานุกรม.....	60
ประวัติย่อผู้วิจัย.....	66

บัญชีตาราง

ตาราง	หน้า
1 ปริมาณสารอาหารต่อมะละกอสุก 100 กรัม.....	6
2 ลักษณะการดูดซับทางเคมีและทางกายภาพของตัวดูดซับ	14
3 ความสามารถในการดูดซับไอออนตะกั่วและนิกเกิลของไม้มะละกอ ที่ pH ต่างๆ.....	32
4 ปริมาณไม้มะละกอที่ใช้ในการดูดซับไอออนตะกั่ว (Pb^{2+}) และนิกเกิล (Ni^{2+}).....	39
5 ระยะเวลาที่เหมาะสมกับการดูดซับไอออนตะกั่ว (Pb^{2+}) และนิกเกิล (Ni^{2+}).....	41
6 ผลการดูดซับไอออนตะกั่ว (Pb^{2+}) และนิกเกิล (Ni^{2+}) ของไม้มะละกอ ที่ระดับ ความเข้มข้นของสารละลาย 1-500 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	43
7 การเปรียบเทียบไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ และฟรุนดลิช ของการดูดซับ ไอออนตะกั่ว (Pb^{2+}) และนิกเกิล (Ni^{2+}).....	47
8 ผลการดูดซับไอออนตะกั่ว (Pb^{2+}) และนิกเกิล (Ni^{2+}) ของไม้มะละกอ ที่เวลาต่าง ๆ...	48
9 ค่าคงที่ได้จากการคำนวณของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมและอันดับสองเทียม ของการดูดซับไอออนตะกั่ว (Pb^{2+}) และนิกเกิล (Ni^{2+}).....	52
10 การเปรียบเทียบการดูดซับไอออนของโลหะหนักโดยใช้ไม้มะละกอเป็นตัวดูดซับ ทางชีวภาพกับรูปแบบกลไกการดูดซับของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมและปฏิกิริยา อันดับสองเทียม.....	58

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ	หน้า
1 ผลมะละกอ.....	5
2 ไม้มะละกอที่เตรียมสำหรับการดูดซับ.....	6
3 โครงสร้างโมเลกุลของลิกนิน.....	7
4 ลักษณะการยืดเหนียวด้วยแรงทางกายภาพ.....	15
5 ตัวถูกดูดซับในสารละลาย.....	16
6 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบพื้นฐาน.....	18
7 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเส้นตรง.....	19
8 ไอโซเทอร์มของตัวดูดซับแบบเชิงเส้นตรงของฟรอนด์ลิซ.....	20
9 ไอโซเทอร์มของการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นฟรอนด์ลิซ.....	21
10 กลไกการดูดซับของตัวดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว เมื่อตัวดูดซับถูกดูดซับไว้แล้วจะไม่มีสารคายออกจากพื้นผิวตัวดูดซับ.....	21
11 ปริมาณตัวดูดซับที่ถูกดูดซับที่เวลาต่าง ๆ จนถึงจุดอิ่มตัว.....	22
12 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของแลงเมียร์.....	22
13 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์.....	23
14 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของ BET.....	24
15 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของ BET.....	25
16 ผลของ pH ที่เหมาะสมในการดูดซับของไอออนตะกั่ว (Pb^{2+}) และนิกเกิล (Ni^{2+}).....	38
17 เปอร์เซ็นต์การดูดซับไอออนตะกั่ว (Pb^{2+}) และนิกเกิล (Ni^{2+}) ของไม้มะละกอ.....	40
18 ผลของระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับของไอออนตะกั่ว (Pb^{2+}) และนิกเกิล (Ni^{2+}).....	42
19 ผลการดูดซับไอออนตะกั่ว (Pb^{2+}) และนิกเกิล (Ni^{2+}) ของไม้มะละกอ ที่ระดับความเข้มข้นของสารละลาย 1-500 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	44
20 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของฟรอนด์ลิซ สำหรับการดูดซับไอออนตะกั่ว (Pb^{2+}) และนิกเกิล (Ni^{2+})	45
21 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์ สำหรับการดูดซับไอออนตะกั่ว (Pb^{2+}) และนิกเกิล (Ni^{2+}).....	46

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

ภาพประกอบ	หน้า
22 ผลการดูดซับไอออนตะกั่ว (Pb^{2+}) และนิกเกิล (Ni^{2+}) ของไม้มะละกอ ที่เวลาต่าง ๆ	49
23 ปฏิกริยาอันดับหนึ่งเทียมของการดูดซับไอออนตะกั่ว (Pb^{2+}) และนิกเกิล (Ni^{2+}).....	50
24 ปฏิกริยาอันดับสองเทียมของการดูดซับไอออนตะกั่ว (Pb^{2+}) และนิกเกิล (Ni^{2+}).....	51

บทที่ 1

บทนำ

ภูมิหลัง

ในปัจจุบันของเสียที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ นับวันจะก่อให้เกิดปัญหามลพิษมากขึ้น ชุมชนที่มีความเจริญและมีความหนาแน่นของประชากรมากเท่าใดก็จะยิ่งก่อให้เกิดปัญหามลพิษมากขึ้น ปัจจุบันประเทศไทยได้มีการขยายตัวทางด้านอุตสาหกรรมขึ้นอย่างรวดเร็ว ทำให้มีการนำทรัพยากรต่างๆมาใช้จำนวนมาก และก่อให้เกิดปัญหามลภาวะ โดยเฉพาะอย่างยิ่งมลภาวะทางน้ำ นับวันปัญหาน้ำเน่าเสียจะทวีความรุนแรงมากขึ้น เห็นได้จากปัญหาน้ำเสียในแม่น้ำปาดตานีและในคลองอู่ตะเภา หรือแหล่งน้ำที่ใกล้เคียงกับโรงงานอุตสาหกรรม ทำให้ส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตทั้งมนุษย์และสัตว์น้ำ ปริมาณน้ำเสียที่พบนั้นโลหะหนักจัดเป็นปัญหาสำคัญที่ก่อให้เกิดอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม ตัวอย่างของโลหะหนักที่เจือปนอยู่ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมได้แก่ ตะกั่ว นิกเกิล ทองแดง สังกะสี แคดเมียมปรอท เป็นต้น (ดาริกา เจริญฤทธิ์ และ อรพินท์ โชคไพศาล. 2549:1)

น้ำเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับการดำเนินชีวิตของมนุษย์ มนุษย์ได้นำน้ำในการทำกิจกรรมต่างๆ น้ำเสียที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์เป็นสาเหตุทำให้เกิดมลภาวะทางน้ำ ตัวอย่างเช่น น้ำเสียจากบ้านเรือน ชุมชน โดยน้ำเสียจะระบายเข้าสู่ระบบบำบัด หลังบำบัดแล้วจะถูกระบายลงสู่แหล่งน้ำตามธรรมชาติ ความก้าวหน้าทางด้านอุตสาหกรรมและเทคโนโลยีที่กำลังดำเนินไปอย่างไม่หยุดยั้งได้ก่อให้เกิดมลพิษมากมาย โดยเฉพาะโลหะหนักนับวันยิ่งจะมีอัตราการถ่ายเทเข้าสู่สิ่งแวดล้อมมากขึ้น โลหะหนักเหล่านี้เป็นส่วนประกอบของผลิตภัณฑ์อำนวยความสะดวกแก่มนุษย์ เช่น ตะกั่ว แคดเมียม โครเมียม ปรอท นิกเกิล โคบอลต์ สังกะสี ทองแดง เหล็ก และแมงกานีส สารเคมีที่ใช้อยู่ในชีวิตประจำวันซึ่งอยู่ในรูปแบบต่าง ๆ โลหะเหล่านี้บางชนิดร่างกายไม่ต้องการในขณะที่บางชนิดจำเป็นต่อร่างกาย เช่น สังกะสี (Zn) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในกระบวนการเมแทบอลิซึมของร่างกาย บางชนิดเป็นส่วนประกอบของเอนไซม์หลายชนิด และบางชนิดทำหน้าที่สังเคราะห์กรดต่างๆ มากกว่า 80 ชนิดในร่างกาย จึงนับว่าเป็นประโยชน์ต่อร่างกายอย่างมาก แต่ถ้าหากร่างกายได้รับโลหะหนักเหล่านี้ในปริมาณมากเกินไปจะทำให้เกิดความเป็นพิษขึ้นได้

ปัญหามลพิษทางน้ำที่มีผลกระทบต่อมนุษย์มากที่สุดคือ ปัญหาการปนเปื้อนของโลหะหนักในแหล่งน้ำ เนื่องจากโลหะหนักในแหล่งน้ำไม่สูญสลายไปในธรรมชาติ เพียงแต่เปลี่ยนไปอยู่ในรูปที่ไม่มีพิษชั่วคราว เช่น การตกตะกอน ซึ่งขึ้นกับสภาพปัจจัยทางชีวภาพและทางเคมีของแหล่งน้ำ โดยโลหะหนักบางส่วนจะถูกดูดซับโดยดินตะกอน และสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กในแหล่งน้ำ เช่น แพลงก์ตอนพืช สัตว์น้ำ พืชพรรณใต้น้ำต่าง ๆ เมื่อแหล่งน้ำมีสภาพเป็นกรด โลหะหนักที่ตกตะกอนและสะสมอยู่ในรูป

เป็นพิษได้ ส่วนของโลหะหนักที่ถูกดูดซับอยู่ในดินตะกอน และสะสมอยู่ในแพลงก์ตอนพืชจะถูกถ่ายทอดเข้าสู่ห่วงโซ่อาหารโดยสัตว์ที่กินตะกอน ซากเน่าเปื่อย หรือสัตว์ที่กินแพลงก์ตอนพืชเป็นอาหาร และถ่ายทอดเข้าสู่ห่วงโซ่อาหารจนถึงผู้บริโภคขั้นสุดท้ายคือ หอย หรือปลา เมื่อมนุษย์บริโภคสัตว์น้ำเหล่านี้โลหะหนักก็จะถูกถ่ายทอดเข้าสู่ร่างกาย และสะสมเพิ่มปริมาณมากขึ้นจนทำให้เป็นอันตรายได้ (สุนิรัตน์ เรื่องสมบูรณ์. 2547: 43)

การปนเปื้อนของสารมลพิษอาจเกิดขึ้นในบริเวณที่เป็นแหล่งกำเนิดของสารพิษ เช่น น้ำบริเวณที่มีการปล่อยน้ำที่ใช้แล้วจากอุตสาหกรรม น้ำเสียจากที่อยู่อาศัย หรือการปนเปื้อนอาจเกิดในลักษณะที่ห่างไกลจากแหล่งกำเนิด เช่น การใช้สารเคมีกำจัดศัตรูพืช ในนา ไร่ สวน แล้วฝนได้ชะล้างสารเหล่านี้เข้าสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ เช่น แม่น้ำ ลำคลอง ของเสียจากอุตสาหกรรมนับว่าเป็นแหล่งสำคัญ สารเคมีที่พบได้แก่ สารเคมีอินทรีย์ สารเคมีอนินทรีย์ โลหะหนัก เช่น โครเมียม โปรท เป็นต้น (คุณหญิงมจรสุรจิรวัดณ์ ; และจุฑามาส สัตยวิวัฒน์. 2549: 309) อุตสาหกรรมที่เพิ่มขึ้นในช่วงทศวรรษนี้ ทำให้เกิดการปล่อยน้ำเสียที่เป็นมลพิษต่อสิ่งมีชีวิต โดยโลหะหนักซึ่งมีพิษมากจำเป็นต้องถูกกลั่นกรองให้ลดพิษลง (Volesky B.; 2001: 433) การดูดซับโลหะหนักนี้ทำได้โดยใช้สาหร่ายขนาดเล็ก สาหร่ายทะเล แบคทีเรีย รา ปากผลผลิตทางการเกษตร แต่การใช้ส่วนที่เหลือใช้จากเนื้อไม้ที่ปลูกยังได้รับความสนใจน้อยอยู่ เช่น เปลือกสน ขี้เลื่อย เยื่อปาล์ม (Saeed A.; et al. 2005: 25) การค้นหาเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักแนวโน้มได้มุ่งไปที่เทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพและราคาถูก การดูดซับทางชีวภาพน่าจะเป็นคำตอบสำหรับเทคโนโลยีแนวโน้มดังกล่าว ข้อได้เปรียบของวิธีการดูดซับทางชีวภาพคือ มีประสิทธิภาพดีในการดูดซับโลหะหนักที่ความเข้มข้นต่ำได้ดี มีราคาถูก มีความสามารถในการเลือกจับโลหะหนักในสารละลายที่มีความเข้มข้นสูงของไอออนอื่น ๆ (Esposito.; et al. 2001: 129)

ในการดูดซับโลหะหนักออกจากน้ำเสียมีหลายวิธีทั้งวิธีทางกายภาพ เคมี และชีวภาพ ซึ่งวิธีทางชีวภาพคือวิธีที่ใช้สิ่งมีชีวิตชนิดต่าง ๆ เช่น แบคทีเรีย โปรโตซัว แพลงก์ตอนพืช สาหร่าย รา ฯลฯ ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับความสนใจในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นวิธีที่ประหยัด ปลอดภัย ไม่มีสารเคมีตกค้างในการบำบัด และนอกจากนี้ยังมีการนำเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเช่น ไม้มะละกอ ซึ่งมีโครงสร้างแบบรูพรุน น่าจะมีความสามารถในการดูดซับได้ ดังนั้นจึงมีการใช้เนื้อเยื่อไม้มะละกอซึ่งเหลือใช้จากการปลูกและไม่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจมาบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนัก เพื่อจะได้เป็นแนวทางในการตัดสินใจเกี่ยวกับการนำน้ำที่บำบัดแล้วไปใช้ประโยชน์ต่อไป

ความมุ่งหมายของการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ตั้งความมุ่งหมายไว้ดังนี้

1. เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของไม้มะละกอ
2. เพื่อศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับโลหะหนักของไม้มะละกอ
3. เพื่อศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับโลหะหนักของไม้มะละกอ

ความสำคัญของการวิจัย

ผลการศึกษาครั้งนี้เป็นข้อมูลในการศึกษาความสามารถของไม้มะละกอในการดูดซับโลหะหนัก นำความรู้เกี่ยวกับการดูดซับตะกั่วและนิกเกิลจากสารละลายโดยใช้ไม้มะละกอเป็นตัวดูดซับทางชีวภาพเพื่อลดความเป็นพิษของโลหะหนักในน้ำเสียหรือแหล่งน้ำธรรมชาติ ทำให้สภาพแวดล้อมมีคุณภาพที่ดีขึ้น ตลอดจนเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้ในการกำจัดโลหะหนักชนิดอื่น ๆ

ขอบเขตของการวิจัย

ทำการศึกษา ความสามารถในการดูดซับ ไอโซเทอร์มและจลนพลศาสตร์ของการดูดซับโลหะหนักของไม้มะละกอกับสารละลายตะกั่ว และสารละลายนิกเกิลในช่วงเวลาที่สัมผัสต่าง ๆ และผลของ pH ต่อการดูดซับ ความสัมพันธ์ระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับ และทำการตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลายโลหะที่เหลือหลังการดูดซับ โดยใช้เทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรสโคปี

ตัวแปรที่ศึกษา

1. ตัวแปรอิสระ ได้แก่ ไม้มะละกอพันธุ์แขกนวล
2. ตัวแปรตาม ได้แก่ การดูดซับโลหะหนัก
 - 2.1 ไอออนตะกั่ว (Pb^{2+})
 - 2.2 ไอออนนิกเกิล (Ni^{2+})

นิยามศัพท์เฉพาะ

1. ไม้มะละกอ หมายถึง ไม้มะละกอส่วนที่เป็นวาสคิวลาร์ แคมเบียม (Vascular cambium) ที่ผ่านกระบวนการเตรียมให้เป็นเส้นใยแข็งมีลักษณะตาข่ายมีรูพรุนขนาดเล็กใช้เป็นตัวดูดซับ
2. สารละลายโลหะหนัก หมายถึง สารละลายโลหะหนักที่มีเวเลนซ์ตามทีระบุ โดยสารละลายตะกั่ว (Pb^{2+}) และสารละลายนิกเกิล (Ni^{2+}) ที่เตรียมในน้ำบริสุทธิ์ปราศจากไอออนอื่น ใช้เป็นสารละลายในการทดสอบความสามารถในการดูดซับซึ่งสัมผัสกับไม้มะละกอ

3. การดูดซับ (Adsorption) หมายถึงกระบวนการที่เกิดขึ้นระหว่างเฟส 2 เฟส โดยเกิดที่พื้นที่ผิวสัมผัส (Interface) ซึ่งเป็นพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างของเหลวกับก๊าซ หรือของแข็งกับก๊าซ หรือของแข็งกับของเหลว หรือของเหลวกับของเหลว สารที่พื้นผิวเกิดการดูดซับขึ้น เรียกว่า ตัวดูดซับ (Adsorbent) ส่วนสารที่ถูกดูดซับ เรียกว่า ตัวถูกดูดซับ (Adsorbate) อันตรกิริยาที่เกิดขึ้นในการดูดซับ อาจเป็นแรงที่ไม่เจาะจง เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ หรือแรงที่มีลักษณะเจาะจง ซึ่งเป็นแรงที่อยู่ในรูปของพันธะเคมี

4. ไอโซเทอร์มของการดูดซับ (Adsorption isotherm) หมายถึง สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวต่อปริมาณของตัวดูดซับ (q) กับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย (C) ที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิคงที่

บทที่ 2

เอกสารที่เกี่ยวข้อง

ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและได้นำเสนอตามหัวข้อต่อไปนี้

1. ข้อมูลทั่วไปของมะละกอ
2. คุณสมบัติและความสำคัญของโลหะหนัก ได้แก่
 - 2.1 ตะกั่ว
 - 2.2 นิกเกิล
3. กระบวนการดูดซับ
4. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง
 - 4.1 งานวิจัยภายในประเทศ
 - 4.2 งานวิจัยต่างประเทศ

1. ข้อมูลทั่วไปของมะละกอ

มะละกอจัดอยู่ในอาณาจักรพืช Plantae ส่วน Magnoliophyta ชั้น Magnoliopsida ตระกูล Brassicales วงศ์ Caricaceae สกุล Carica สปีชีส์ C. papaya ชื่อทวินาม Carica papaya L. ลักษณะทั่วไป มะละกอเป็นไม้ล้มลุก สูงประมาณ 5-10 เมตร มีถิ่นกำเนิดในอเมริกากลาง ส่วนใบมีลักษณะเป็นใบเดี่ยว 5-9 แฉก เกาะกลุ่มอยู่ด้านบนสุดของลำต้น ภายในก้านใบและใบมียางเหนียวสีขาว มะละกอบางต้นอาจมีดอกเพียงเพศเดียว แต่บางต้นอาจมีดอกทั้งสองเพศ ผลเป็นรูปรี อาจหนักได้ถึง 9 กิโลกรัม ดังภาพประกอบ 1 ผลดิบมีสีเขียว และมีน้ำยางสีขาวสะสมอยู่ที่เปลือก ส่วนผลสุก เนื้อในจะมีสีเหลืองถึงส้ม มีเมล็ดสีดำเล็กๆ อยู่ภายใน นิยมนำมารับประทานสดหรือนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อื่น ๆ เนื้อมะละกามีสารอาหารที่มีประโยชน์มากมาย ดังตาราง 1



ภาพประกอบ 1 ผลมะละกอ

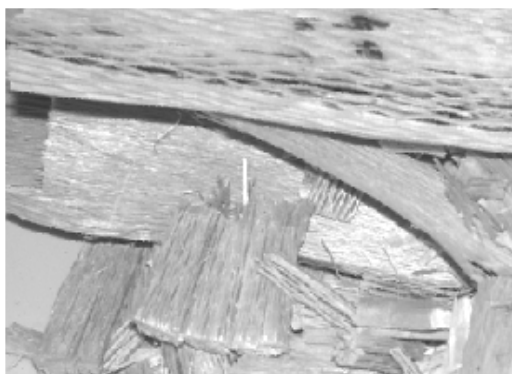
ตาราง 1 ปริมาณสารอาหารต่อมะละกอสุก 100 กรัม

สารอาหาร	ปริมาณสารอาหารต่อมะละกอสุก 100 กรัม
โปรตีน	0.5 กรัม
ไขมัน	0.1 กรัม
แคลเซียม	24 มิลลิกรัม
ฟอสฟอรัส	22 มิลลิกรัม
เหล็ก	0.6 มิลลิกรัม
โซเดียม	0.04 มิลลิกรัม
ไทอะมีน	4 มิลลิกรัม
ไรโบฟลาวิน	0.04 มิลลิกรัม
ไนอะซิน	0.4 มิลลิกรัม
กรดแอสคอร์บิก (วิตามินซี)	70 มิลลิกรัม

ข้อมูลจาก <http://herbal-medicine.philsite.net/papaya.htm>

มะละกอไม้ไผ่พืชที่มีถิ่นกำเนิดในประเทศไทย มีการนำเข้ามาปลูกในประเทศไทยหลายร้อยปีมาแล้ว สำหรับพันธุ์มะละกอที่ปลูกในเมืองไทย ได้แก่ พันธุ์แขกดำ พันธุ์โกโก พันธุ์แขกนวล พันธุ์สายน้ำผึ้ง และพันธุ์ปากช่อง (บุษกร ศรีประเสริฐ. 2536: 5-8)

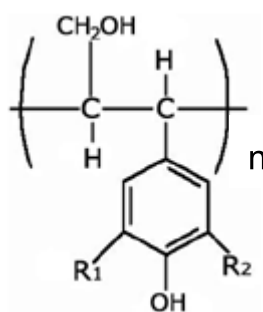
องค์ประกอบหลักทางเคมีของไม้มะละกอประกอบด้วย โปรตีน 4.41% เนือดิบเส้นใย 32.70% และเถ้าถ่านของแร่ธาตุ 6.25% ในส่วนเนือดิบเส้นใยมีลิกนิน 37.33% และเซลลูโลส 34.10% ซึ่งส่วนมากเป็นเฮมิเซลลูโลสและพอลิแซคคาไรด์ ดังภาพประกอบ 2 (Saeed A.; et al. 2005: 25)



ภาพประกอบ 2 ไม้มะละกอที่เตรียมสำหรับการดูดซับ

ลิกนิน (Lignin) เป็นสารประกอบพอลิเมอร์ไม่มีรูปผลึกจะเกาะกันอยู่ในชั้นระหว่างเส้นใย (Middle lamella) ซึ่งทำหน้าที่ยึดเกาะเส้นใยเข้าด้วยกัน และบางส่วนผสมอยู่ในเส้นใย โครงสร้างพื้นฐานของลิกนิน คือ ฟีนิลโพรเพน (Phenylpropane) หรือสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีคาร์บอนประมาณร้อยละ 65-67 ดังภาพประกอบ 3 ลิกนินเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของพืช ปริมาณลิกนินในไม้เนื้อแข็งมีประมาณร้อยละ 17-25 ในไม้เนื้ออ่อนมีสัดส่วนประมาณร้อยละ 24-32 ซึ่งอยู่ในเส้นใยเปลือกลำต้น (Bast fibres) เช่น ป่านลินิน ป่านมนิลา และปอ มีอยู่เล็กน้อย ลิกนินและอนุพันธ์ของลิกนินสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างกว้างขวาง ดังนี้

1. ใช้เป็นสารยึดติด (Adhesives) เช่นสารก้นซึม (Size) สารเชื่อมติด (Binders) และสารเคลือบ (Coatings) ในอุตสาหกรรม
2. ใช้ในด้านเคมีภัณฑ์เกษตร (Agricultural chemicals) ได้แก่ เคมีภัณฑ์ปรับปรุงดิน เคมีภัณฑ์ควบคุมฝูงชน ปุ๋ย ยาฆ่าแมลง ยากำจัดวัชพืช ใช้ในการหมัก และเป็นสารเติมแต่งในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ เป็นต้น
3. ใช้ทำเคมีภัณฑ์สำหรับผลิตน้ำให้บริสุทธิ์ และเคมีภัณฑ์ที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสีย ได้แก่ สารพวกเรซินแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange resins)
4. ใช้ผสมในซีเมนต์ เพื่อเพิ่มสมบัติ เช่น ช่วยให้การแข็งตัวของซีเมนต์ดีขึ้น เพิ่มความแข็งแรงคงทน
5. ใช้ในอุตสาหกรรมยางเป็นสารเติมแต่ง สารเร่งปฏิกิริยา สารช่วยให้มีการยืด (Elastomer) และสารช่วยให้ความเป็นพลาสติกดีขึ้น
6. ใช้เป็นสารช่วยกระจาย (Dispersing agent) ที่ใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมหลายอย่าง เช่น การกำจัดหมึกในอุตสาหกรรมกระดาษ การชุบเคลือบ และการฟอกย้อมในอุตสาหกรรมสิ่งทอ เป็นต้น (กิติ เชี่ยวชาญวิทย์. 2551: ออนไลน์)



ภาพประกอบ 3 โครงสร้างโมเลกุลของลิกนิน

ข้อมูลจาก <http://bugs.bio.usyd.edu.au/Mycology/images/Topics/Feeding/ligninStructure.gif>

2. สมบัติและความสำคัญของโลหะหนัก

ความเป็นพิษของสารมลพิษบางชนิดที่มีการพบการปนเปื้อนในน้ำและดิน ได้แก่ โลหะ (Metals) โลหะได้รับความสนใจเนื่องจากมีโลหะหนักบางชนิดที่ถูกสงสัยว่าเป็นสารก่อมะเร็ง โลหะหนักบางชนิดจะเคลื่อนที่ไปได้ง่ายในดิน และโลหะหนักบางชนิดจะเข้าไปสู่ห่วงโซ่อาหารได้ ตัวอย่างโลหะต่าง ๆ ได้แก่ ตะกั่ว นิกเกิล ปรอท แคดเมียม และสารหนู เป็นต้น

2.1 ตะกั่ว (Lead; Pb)

ตะกั่วเป็นโลหะหนักที่พบบนผิวโลก โดยทั่วไปมีประมาณเฉลี่ย 10-15 มิลลิกรัมต่อลิตร ในปัจจุบันตะกั่วเป็นโลหะที่กำลังได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง เพราะมนุษย์นำมาใช้ผลิตวัสดุอุปกรณ์ต่าง ๆ เพื่อใช้งานกันอย่างมากมายในปัจจุบัน เช่น แบตเตอรี่ ทั้งนี้เป็นผลมาจากความก้าวหน้าอย่างรวดเร็วทางเทคโนโลยีมีการ ทำให้อุตสาหกรรมหลายประเภทที่ต้องใช้ตะกั่วเป็นวัตถุดิบเป็นจำนวนมาก อุตสาหกรรมเหล่านี้ได้ปลดปล่อยตะกั่วในรูปของสารมลภาวะออกสู่สิ่งแวดล้อมตามธรรมชาติอย่างรุนแรง ส่งผลกระทบกระเทือนต่อคุณภาพของสภาวะแวดล้อมในธรรมชาติ ตะกั่วที่พบในธรรมชาติจะเจือปนอยู่ทั่วไปทั้งในดิน หิน น้ำ อากาศ และพืช ในระดับความเข้มข้นต่ำ กล่าวคือในดินและหินมีปริมาณเฉลี่ยอยู่ในช่วง 5-25 มิลลิกรัมต่อลิตร ในน้ำมีปริมาณ 1-60 ไมโครกรัมต่อลิตร ในอากาศมีปริมาณ 0.0001-0.001 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร และในพืชมีปริมาณ 0.1-2.5 มิลลิกรัมต่อลิตร ของน้ำหนักแห้ง การเจือปนของตะกั่วเข้าสู่สภาวะแวดล้อมจากแหล่งต่าง ๆ ตามธรรมชาติมีความสำคัญทางด้านมลภาวะเป็นพิษน้อยมาก เมื่อเปรียบเทียบกับ การปนเปื้อนจากแหล่งที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ในปัจจุบัน

ในสภาวะปกติตะกั่วสามารถเข้าสู่ร่างกายได้ 3 ทางคือ

1. ระบบทางเดินหายใจ เนื่องจากสารตะกั่วในอากาศส่วนใหญ่มาจากไอเสียรถยนต์ และจากโรงงานอุตสาหกรรมแบตเตอรี่ ดังนั้นอากาศในเมืองที่มีการจราจรคับคั่งหรือมีอุตสาหกรรมมากจึงมีตะกั่วมากด้วย โดยตะกั่วที่เข้าสู่ร่างกายทางการหายใจประมาณร้อยละ 40 จะถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกาย

2. ทางผิวหนัง ตะกั่วที่เข้าทางผิวหนังจะมีเฉพาะสารประกอบอินทรีย์ของสารตะกั่วบางชนิดเท่านั้น เช่น เตตระเอทิลเลด (Tetraethyl lead) ซึ่งมักจะพบในคนงานที่ทำหน้าที่ในการผสมสารประกอบชนิดนี้กับน้ำมันเชื้อเพลิง ถ้าผิวหนังส่วนที่เป็นแผลหรือมีรอยถลอก สัมผัสกับสารตะกั่วที่มีปริมาณมาก ๆ และต่อเนื่องเป็นเวลานาน ๆ สารตะกั่วบางส่วนจะซึมเข้าสู่ร่างกายทางผิวหนังส่วนนั้นได้

3. ระบบทางเดินอาหาร ตะกั่วอาจเข้าสู่ร่างกายมนุษย์ได้โดยปนเปื้อนมากับน้ำ อาหาร อาจมีสารตะกั่วปะปนมาด้วย โดยที่การปะปนนี้เกิดได้หลายกรณี ทั้งได้รับโดยตรง หรือ จากกรรมวิธีในการผลิต โดยทั่วไปอาหารที่คนบริโภคแต่ละวันประมาณ 55-85 % จะมีการปนเปื้อนของตะกั่วโดยการ

ดูดซึมผ่านระบบทางเดินอาหาร เมื่อตะกั่วอยู่ในรูปเกลือที่ละลายน้ำได้ การดูดซึมส่วนใหญ่เกิดขึ้นบริเวณลำไส้เล็กและลำไส้ใหญ่ ตะกั่วในอาหารจะถูกดูดซึมเข้าไปเพียงร้อยละ 5 ส่วนที่เหลือจะถูกขับออกมาทางอุจจาระและปัสสาวะ อย่างไรก็ตามปริมาณตะกั่วที่ได้รับต่อวันนั้นเกิดจากการดูดซึมโดยทางเดินอาหารมากกว่าการดูดซึมโดยทางเดินหายใจ (สมคิด ปราบภัย. 2542: 52)

ตะกั่ว เป็นโลหะที่มีความเป็นพิษต่อระบบต่าง ๆ ของร่างกายเช่น ระบบเลือดจะมีความอ่อนไหวต่อพิษของตะกั่วทำให้เกิดเลือดจางได้ นอกจากนี้ตะกัวยังเป็นสารที่มีความเป็นพิษต่อระบบประสาทเด็กจะเป็นกลุ่มที่จะได้รับอันตรายจากตะกั่วมากกว่ากลุ่มอื่น ๆ ในต่างประเทศทารกและเด็กจะได้รับตะกั่วจากนิสัยของเด็กที่ชอบจับของแปลก ๆ ใส่ปากเคี้ยว เช่น ดินหรือสะเก็ดสีที่หลุดร่อนตามอาคารที่พักอาศัย สำหรับการปนเปื้อนของตะกั่วในประเทศไทยที่รู้จักกันดี คือ การปนเปื้อนของตะกั่วที่ห้วยคลิตี้ จังหวัดกาญจนบุรี

ตะกั่วที่ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมมาจากการทำเหมือง การหลอมตะกั่วและการใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ หากอยู่ในบริเวณโรงงานหรือสถานประกอบการที่มีการใช้ตะกั่ว และในบริเวณที่มีการจราจรคับคั่ง และยังใช้น้ำมันที่มีสารตะกั่ว มีการใช้ตะกั่วเติมในน้ำมันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้น้ำมัน นอกจากนี้ยังใช้ในอุตสาหกรรมสี แบตเตอรี่ ภาชนะใส่อาหาร เซรามิคชนิดเคลือบสี ดังนั้นการได้รับตะกั่วเข้าสู่ร่างกายจึงได้จากการหายใจและการรับประทาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งทารก เด็ก และหญิงมีครรภ์จะไวต่อสารนี้มาก (เนาวรัตน์ เจริญคำ. 2538:102)

การปนเปื้อนของตะกั่วบริเวณห้วยคลิตี้ อำเภอทองผาภูมิ จังหวัดกาญจนบุรี เริ่มตั้งแต่ พ.ศ. 2536-2541 ชาวบ้านได้รับความเดือดร้อน โดยมีสาเหตุการปนเปื้อนของตะกั่วจากโรงแต่งแร่ของ บริษัท ตะกั่วคอนเซนเตรทส์ (ประเทศไทย) จำกัด ซึ่งตั้งอยู่ริมห้วยคลิตี้ จากการตรวจสอบของกรมควบคุมมลพิษพบว่า บริเวณก่อนผ่านโรงงานแต่งแร่คลิตี้ ค่าตะกั่วที่ตรวจวัดได้มีค่าต่ำกว่ามาตรฐานแหล่งน้ำผิวดินซึ่งกำหนดไว้ไม่เกิน 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร (สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อม. 2534) แต่เมื่อน้ำไหลผ่านโรงแต่งแร่พบว่า ปริมาณของตะกั่วสูงกว่าค่ามาตรฐาน และจากการตรวจสอบปริมาณของตะกั่วในปลาที่อาศัยในแหล่งน้ำที่ชาวบ้านจับปลามาประกอบอาหารโดยกรมอนามัยเมื่อปี พ.ศ. 2542 พบว่าส่วนใหญ่มีตะกั่วปนเปื้อนเกินเกณฑ์มาตรฐาน (ไม่เกิน 1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม) โดยพบว่า มีค่าระหว่าง 1.215- 1.275 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม

การปนเปื้อนของตะกั่วในน้ำเกินมาตรฐานจำเป็นต้องมีการประกาศเตือนให้ชาวบ้านหลีกเลี่ยงการใช้น้ำดื่มจากแหล่งปนเปื้อนดังกล่าว และควรมีการตรวจวัดระดับตะกั่วโดยเฉพาะเด็กเล็กหากเกินกำหนดจำเป็นต้องทำการรักษาโดยเร่งด่วน เพื่อหลีกเลี่ยงอันตรายที่เกิดจากพิษตะกั่ว โดยเฉพาะต่อระบบประสาท

2.1.1 ความเป็นพิษ

ตะกั่วอินทรีย์จะถูกดูดซึมจากระบบทางเดินอาหารและระบบหายใจ การดูดซึมจากระบบทางเดินอาหารในเด็กจะดีกว่าผู้ใหญ่ และสามารถผ่าน Blood – brain barrier เข้าสมองได้ ตะกั่วกระจายตัวอยู่ในกระแสเลือด ตับ และไต การได้รับตะกั่วอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานานตะกั่วส่วนใหญ่จะถูกสะสมที่เนื้อเยื่อกระดูก

อวัยวะเป้าหมายที่ตะกั่วทำให้เกิดพิษ คือระบบเลือดและระบบประสาท

1) ระบบเลือด

ฮีโมโกลบิน (hemoglobin) เป็นโปรตีนในเม็ดเลือดแดง ซึ่งมีหน้าที่ขนส่งออกซิเจนโดยมี heme เป็นองค์ประกอบที่สำคัญ การสังเคราะห์จะต้องอาศัยเอนไซม์หลายชนิด และตะกั่วจะยับยั้งการทำงานของเอนไซม์บางชนิด เอนไซม์ที่มีความไวต่อตะกั่ว คือ อะมิโนลิวินิก แอซิด ดีไฮเดรเทส (Aminolevulinic acid dehydratase; ALAD) และ ฮีม ซินเทเทส (Heme synthetase) เป็นผลให้การสร้างฮีม (Heme) ผิดปกติทำให้เกิดเลือดจางชนิดไฮโปโครเมติก (Hypochromatic) และไมโครไซติก (Microcytic)

โดยทั่วไปอาการแสดงออกของภาวะเลือดจาง จะไม่พบจนกว่าผู้ป่วยจะได้รับตะกั่วในปริมาณพอสมควร (ปริมาณตะกั่วในเลือดประมาณ 50 ไมโครลิตรต่อเดซิลิตร) แต่การยับยั้งเอนไซม์ ALAD จะพบได้เมื่อมีตะกั่วในเลือดประมาณ 10 ไมโครกรัมต่อเดซิลิตร เพียงเล็กน้อยขัดขวางการทำงานของ ALAD จัดเป็นดัชนีชีวภาพของการได้รับตะกั่วไม่ใช่ดัชนีชีวภาพของความเป็นพิษจากตะกั่ว

2) ระบบประสาท

ระบบประสาทเป็นอวัยวะเป้าหมายอย่างหนึ่งของตะกั่ว โดยเฉพาะความเป็นพิษของตะกั่วต่อเด็กอ่อน เนื่องจากระบบประสาทยังคงกำลังอยู่ในช่วงที่มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง แม้ว่าเด็กอ่อนจะได้รับตะกั่วในขนาดต่ำ ๆ ก็แสดงอาการผิดปกติได้ เช่น ไฮเปอร์แอคติวิตี (Hyperactivity) สมาธิสั้น สติปัญญาต่ำ และการมองเห็นผิดปกติ ในปริมาณสูงตะกั่วจะทำให้เกิดโรคของสมอง (Encephalopathy) ได้ทั้งในเด็กและผู้ใหญ่ ตะกั่วจะทำความเสียหายให้หลอดเลือดขนาดเล็กและหลอดเลือดฝอย ส่งผลให้เกิดการบวมของสมอง และทำให้เซลล์ประสาทเสื่อมสภาพ การแสดงออกทางคลินิกที่พบ ได้แก่ เคนเซ (Ataxia) หมดสติ โคม่า และอาการชัก (Convulsions) ซึ่งอาจพบเมื่อตะกั่วในเลือดอยู่ประมาณ 70 ไมโครกรัมต่อเดซิลิตร ในขนาด 40-50 ไมโครกรัมต่อเดซิลิตร เด็กอาจจะมีอาการ hyperactivity สมาธิสั้น และระดับสติปัญญาต่ำเล็กน้อย การเกิดโรคของระบบประสาทส่วนปลาย (Peripheral neuropathy) จะทำให้มีอาการข้อมือตก (wrist-drop) และข้อเท้าตก (Foot-drop) ซึ่งแสดงว่ามีความเสียหายที่ระบบประสาทส่วนที่เรียกว่า motor nerves ตะกั่วจะทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของ Schwann cells ตามด้วย demyelination และ axonal degeneration

นอกจากอวัยวะเป้าหมายดังกล่าวแล้ว การได้รับตะกั่วเป็นระยะเวลานาน อาจจะมีผลต่อการทำงานของไต ตำแหน่งที่เกิดความเสียหาย คือ บริเวณท่อไตส่วนต้น ความเป็นพิษต่อไตระยะแรกของตะกั่วจะพบว่า จะมีเอนไซม์ในไลโซโซมชื่อเอ็น-อะเซทิล-เบต้า-ดี-กลูโคซามินิเดส (N-acetyl- β -D-glucosaminidase) ถูกขับออกมาทางปัสสาวะ (คุณหญิงมธุรส รุจิวิวัฒน์ ; และจุฑามาศ สัตยวิวัฒน์. 2549: 269,308-310)

2.2 นิกเกิล (Nickel; Ni)

นิกเกิลเป็นโลหะที่มีสีขาวด้านคล้ายเงิน มีจุดหลอมเหลวที่ 1452 °C มีความแข็งประมาณ 80-120 Brinell นิกเกิลใช้กันแพร่หลายมากในอุตสาหกรรมชุบโลหะด้วยไฟฟ้า เพราะนิกเกิลมีความทนทานต่อการสึกกร่อนได้ดี ดังนั้นการชุบนิกเกิลบนโลหะอื่นเพื่อรักษาเนื้อโลหะเดิมไม่ให้เกิดสนิมง่าย และยังช่วยทำให้โลหะที่ชุบสวยงามอีกด้วย นิกเกิลใช้ชุบรองพื้นบนชิ้นงานก่อนชุบโลหะโครเมียม และรองพื้นก่อนชุบทองหรือเงิน

สารประกอบนิกเกิลที่ใช้ในการชุบโลหะด้วยไฟฟ้า คือนิกเกิลซัลเฟต ($\text{NiSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) นิกเกิลคลอไรด์ ($\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) และกรดบอริก (H_3BO_3) เป็นตัวควบคุม pH (อนันต์ ทองมอย.ไม่ปรากฏปีที่พิมพ์: 52)

นิกเกิลในรูปของฝุ่นละอองและสารประกอบนิกเกิลคาร์บอนิล [$\text{Ni}(\text{CO})_4$] ก่อให้เกิดมะเร็งได้ (ทบวงมหาวิทยาลัย, เคมีเล่ม2. 2528: 413)

ผลกระทบต่อสุขภาพ

นิกเกิลเป็นสารประกอบที่ปะปนอยู่กับสิ่งแวดล้อม มนุษย์ใช้สารนี้ในหลายเป้าหมายที่แตกต่างกัน ใช้เป็นส่วนประกอบของเหล็กกล้าและผลิตภัณฑ์โลหะอื่นเช่น พบในอุตสาหกรรมการทำเครื่องประดับ อุตสาหกรรมอาหารพบเพียงเล็กน้อย ในช็อกโกแลตและไขมันพบในปริมาณมาก การเพิ่มขึ้นของนิกเกิลในการบริโภคผักซึ่งมาจากปัญหามลพิษทางดิน ฝุ่นควันทำให้มีการเพิ่มนิกเกิลมากขึ้น ดังนั้นจึงมีผลต่อปอด และนิกเกิลยังพบในสารชักฝอกด้วย

การได้รับนิกเกิลผ่านทางอากาศ น้ำดื่ม อาหารหรือฝุ่นควัน ไม่ว่าจะได้รับการสัมผัสดินหรือน้ำเป็นผลให้แสดงอาการที่เกิดจากนิกเกิลแม้ในปริมาณเล็กน้อย แต่เมื่อได้รับในปริมาณที่เพิ่มขึ้นสามารถทำให้เกิดอันตรายต่อมนุษย์ได้ ตามลำดับ เช่น

1. การได้รับในปริมาณที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดโรคมะเร็งปอด มะเร็งจมูก มะเร็งหลอดอาหารและมะเร็งทรวงอก
2. ผลกระทบต่อระบบทางเดินหายใจและภาวะการเจ็บป่วย

3. ปอดถูกทำลาย
4. ระบบหัวใจล้มเหลว
5. เป็นหมัน
6. เป็นโรคหอบหืดและหลอดลมอักเสบเรื้อรัง
7. เกิดอาการแพ้สารจากผลิตภัณฑ์เครื่องประดับ เช่น คัน ผื่นแดง
8. ระบบไหลเวียนของเลือดในหัวใจผิดปกติ

ผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม

นิกเกิลถูกปล่อยสู่อากาศโดยโรงงานและเตาเผาขยะจะทำให้ตกลงสู่พื้นดินหรือตกลงหลังจากทำปฏิกิริยากับหยดน้ำฝน ปกติมีการได้รับนิกเกิลในระยะยาวซึ่งถูกย้ายจากดิน นิกเกิลสามารถทำให้เกิดปัญหาในส่วนผิวหนังของน้ำเสียที่ไหล มีการดูดซับของหินตะกอนหรืออนุภาคของดินและผลมาจากการเคลื่อนที่ไม่ได้ อย่างไรก็ตามในดินที่เป็นกรดนิกเกิลมาจากการเคลื่อนที่และการชะล้างดินด้วยน้ำ

มีข้อมูลไม่เพียงพอสำหรับนิกเกิลต่อร่างกายของมนุษย์ ความเข้มข้นของนิกเกิลที่เพิ่มขึ้นในดินสามารถทำให้เกิดความเสียหายต่อพืชและที่ผิวหนังทำให้อัตราการเจริญเติบโตของสาหร่ายน้อยลง อวัยวะเล็ก ๆ สามารถรับรู้จากการเติบโตที่ลดลงเนื่องจากการแสดงออกของนิกเกิล แต่สิ่งเหล่านั้นมีการพัฒนาการต้านทานหลังจากได้รับนิกเกิลตามปกติ

สำหรับสัตว์ นิกเกิลมีความจำเป็นที่สุดในอาหารซึ่งมีจำนวนน้อย แต่นิกเกิลไม่เพียงเป็นธาตุที่จำเป็น ยังสามารถทำให้เกิดอันตรายได้เมื่อมีมากเกินไป ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดมะเร็งหลายชนิดในปริมาณที่ร่างกายสัตว์ได้รับแตกต่างกันส่วนใหญ่อาศัยอยู่ใกล้โรงงานน้ำตาล

นิกเกิลไม่เพียงแต่ทำให้เกิดการสะสมในพืชหรือสัตว์ ขณะที่ผลของนิกเกิลจะไม่ทำให้ขยายให้ใหญ่ขึ้นในห่วงโซ่อาหาร(สมบัติทางเคมีของนิกเกิล-ผลกระทบต่อสุขภาพ-สิ่งแวดล้อมของนิกเกิล. 2551: ออนไลน์)

3. กระบวนการดูดซับ (Adsorption Process)

การดูดซับเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญของกระบวนการทางกายภาพ ชีวภาพ และเคมี การดูดซับได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในการบำบัดน้ำเสีย การดูดซับเป็นความสามารถของสารในการดึงโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในแก๊สหรือของเหลวให้มาเกาะจับและติดบนผิว เป็นปรากฏการณ์เคลื่อนย้ายจากของเหลวหรือแก๊สมายังผิวของของแข็งที่เป็นส่วนสำคัญของกระบวนการนี้ โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่าตัวถูกดูดซับ ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของตัวถูกดูดซับ เรียกว่า ตัวดูดซับ คุณสมบัติที่สำคัญที่สุดของตัวดูดซับคือ ความพรุน เพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัส

ภายใน นอกจากนี้สมบัติอื่น ๆ ของตัวดูดซับ เช่นโครงสร้างการจัดเรียงตัว ขนาด และความสม่ำเสมอ ล้วนมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ การเลือกตัวดูดซับที่เหมาะสม ทำให้สามารถแยกโมเลกุลที่ต้องการออกมา โดยให้ตัวถูกดูดซับบนตัวดูดซับนั้นถูกดูดซับจนอิ่มตัวแล้ว จากนั้นนำมาไล่โมเลกุลที่ถูกดูดซับไว้ออกโดยการเปลี่ยนสภาพสมดุล เช่น การเปลี่ยนอุณหภูมิ หรือเปลี่ยนความดัน ทำให้ตัวดูดซับกลับสู่สภาพเดิม และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก

การดูดซับมีบทบาทที่สำคัญต่อการเคลื่อนย้าย และการเปลี่ยนรูปของสารเคมีในสิ่งแวดล้อม โดยที่โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะถูกกำจัดความอิสระในการเคลื่อนย้าย (จะตกตะกอนไปพร้อมกับตัวดูดซับ) เทียบกับโมเลกุลอิสระส่วนไม่ถูกดูดซับ และโมเลกุลที่ไม่ถูกดูดซับจะเกิดกระบวนการเปลี่ยนรูปของสารเคมี การย่อยสลายด้วยแสง หรือการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์ สามารถเกิดขึ้นได้ง่ายกว่าโมเลกุลชนิดเดียวกัน แต่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับ

3.1 กลไกการดูดซับ

กลไกการดูดซับแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การแพร่ภายนอก (External diffusion) การแพร่ภายนอกเป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับ ซึ่งพื้นที่ผิวของตัวดูดซับมีของเหลวห่อหุ้มโดยโมเลกุลแทรกผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวน้ำของตัวดูดซับ

ขั้นตอนที่ 2 การแพร่ภายใน (Internal diffusion) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกดูดซับแพร่กระจายเข้าสู่บริเวณพื้นที่ผิวภายในโพรงตัวดูดซับ เพื่อให้เกิดการดูดซับ

ขั้นตอนที่ 3 ปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface reaction) เป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับติดที่ผิวของตัวดูดซับซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ ดังนั้นควรคำนึงถึงการต้านทานปฏิกิริยาพื้นผิวด้วย (นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์; และคณิตา ตั้งคณานุรักษ์. 2550: 141-142)

ปฏิกิริยาบนพื้นผิว (Reaction on surface)

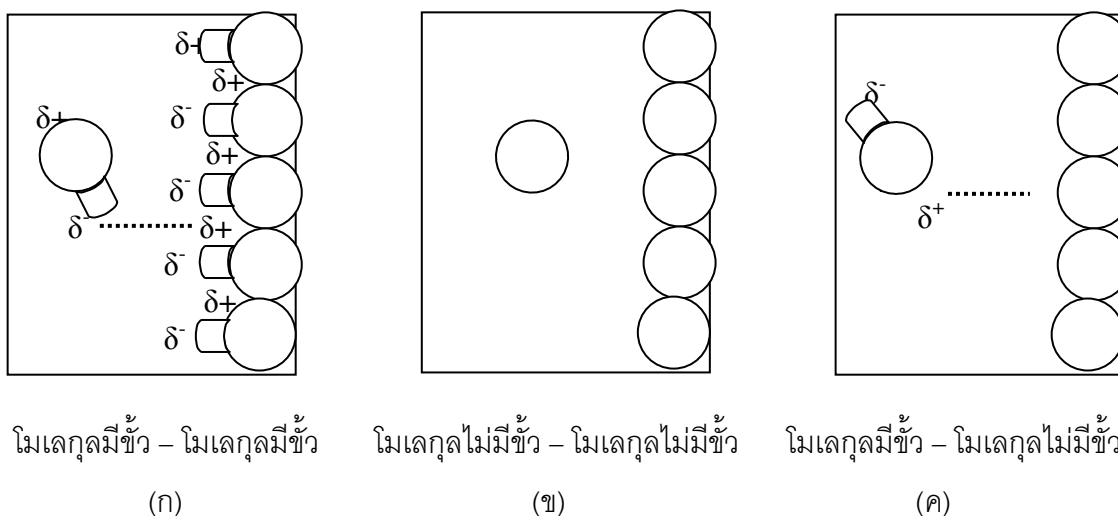
โดยทั่วไปปฏิกิริยาเนื้อผสมเกิดกระบวนการดูดซับของตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวดูดซับ การดูดซับเกิดจากแรงดึงดูดระหว่างพื้นผิวดูดซับกับตัวถูกดูดซับ แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ การดูดซับทางเคมีมีบทบาทสำคัญในการเร่งปฏิกิริยาเนื้อผสม และขณะที่การดูดซับทางกายภาพมีบทบาทที่สำคัญยิ่งในการย่อย การป้องกันการเกิดสนิม การวิเคราะห์ทางโครมาโทกราฟี ลักษณะการดูดซับทางเคมีและทางกายภาพแตกต่างกัน ดังตาราง 2

ตาราง 2 ลักษณะการดูดซับทางเคมีและทางกายภาพของตัวดูดซับ

ลักษณะ	การดูดซับทางเคมี	การดูดซับทางกายภาพ
แรงยึดเหนี่ยว	แข็งแรง เช่น พันธะโคเวเลนต์	อ่อน เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์
อุณหภูมิที่เกิดปฏิกิริยา	ที่อุณหภูมิสูงสุด	ที่อุณหภูมิต่ำ
ความร้อนของการดูดซับ	100-400 kJ/mol	ประมาณ 20 kJ/mol
ความจำเพาะ	มีความจำเพาะสูง ขึ้นกับธรรมชาติของตัวดูดซับ และตัวถูกดูดซับ	ไม่จำเพาะ ไม่ขึ้นกับธรรมชาติของตัวดูดซับ และตัวถูกดูดซับ
การย้อนกลับ	ไม่ย้อนกลับ	ย้อนกลับ
โครงสร้างของการดูดซับ	ชั้นเดียว	หลายชั้น
ผลของอุณหภูมิ	ตอนแรกการดูดซับเพิ่ม ต่อมาลดลงเมื่ออุณหภูมิ เพิ่มขึ้น	การดูดซับลดลง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น

ที่มา: สมพล มงคลพิทักษ์สุข. 2549: 165

การดูดซับทางกายภาพ (Physical adsorption หรือ Van der Waals adsorption) เป็นแรงยึดเกาะหรือยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดซับกับโมเลกุลที่พื้นผิวหน้าของตัวดูดซับจัดเป็นแรงดึงดูดค่อนข้างอ่อน เช่น แรงแวนเดอร์วาลส์ แรงไดโพล-ไดโพล และไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีทั้งของตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับโดยที่โมเลกุลของตัวถูกดูดซับเกาะอยู่บนผิวดูดซับในลักษณะที่ซ้อนกันเป็นหลายชั้น (multilayer) และจำนวนชั้นของโมเลกุลตัวถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้น การจัดเรียงตัวของโมเลกุล การกระจายตัว และการเหนี่ยวนำ จัดเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับทางกายภาพ การดูดซับทางกายภาพโดยทั่วไป จะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิต่ำ ทำให้พลังงานของระบบลดลงเป็นการทำให้ระบบมีความเสถียรมากขึ้น ดังภาพประกอบ 4



ภาพประกอบ 4 ลักษณะการยึดเหนี่ยวด้วยแรงทางกายภาพ

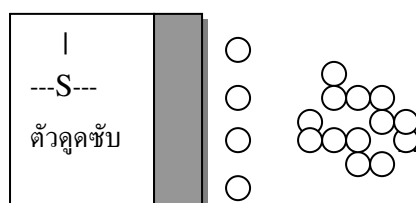
3.2 ตัวดูดซับ

สารที่มีความสามารถในการดูดซับมีหลายชนิด อาจแบ่งได้เป็น 5 ประเภท

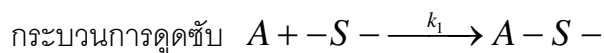
- 1) สารอนินทรีย์ เช่น ดินเหนียวชนิดต่างๆ แมกนีเซียมออกไซด์ ซิลิกาแกมมันต์ อะลูมิเนียมแกมมันต์ ถ่านกระดูก สินแร่จำพวกอะลูมิเนียมโนซิลิเกต เช่น kaonlinite เป็นต้น ตัวดูดซับสารอนินทรีย์จะมีพื้นผิวจำเพาะประมาณ 50-200 ตารางเมตรต่อกรัม และดูดซับโมเลกุลสารเพียงไม่กี่ชนิด ทำให้การใช้ประโยชน์จากราดูดซับสารอนินทรีย์มีขีดจำกัด
- 2) ถ่านแกมมันต์ มีพื้นผิวจำเพาะประมาณ 500-1400 ตารางเมตรต่อกรัม เป็นการดูดซับที่มีประสิทธิภาพ และมีการนำไปใช้งานอย่างกว้างขวางในด้านต่างๆ เช่น ฟอกสี ใช้ในการกำจัดกลิ่นและรสในการกำจัดตะกอนในโรงงานเบียร์ เป็นต้น
- 3) สารอินทรีย์สังเคราะห์ ได้แก่ สารแลกเปลี่ยนไอออน (เรซิน, resin) ชนิดพิเศษที่สังเคราะห์ขึ้นกำจัดสารอินทรีย์ต่างๆ สารเรซินเหล่านี้มีพื้นผิวจำเพาะประมาณ 300-500 ตารางเมตรต่อกรัม
- 4) วัสดุชีวภาพ (biomaterials) ส่วนใหญ่เป็นวัสดุเหลือใช้ทางด้านการเกษตร เช่น ขี้เลื่อย ไคโตซาน(chitosan) กากกาแฟ กากชา กากถั่วเหลือง ฟางข้าว เปลือกไม้ ถั่วแกลบดำ เป็นต้น
- 5) สารดูดซับชีวภาพ(biosorbent) ได้แก่ เซลล์จุลินทรีย์ เช่น เซลล์ของแบคทีเรีย ยีสต์ หรือรา พันธุ์ต่าง ๆ หรือสาหร่าย

3.3 สมดุลการดูดซับ (adsorption equilibrium)

เมื่อเติมตัวดูดซับปริมาณหนึ่งลงไปในสารละลายที่มีโมเลกุลตัวถูกละลายเข้มข้นในช่วงเริ่มต้น โมเลกุลตัวถูกละลายบางส่วนไปเกาะติดพื้นผิวตัวดูดซับ เมื่อระยะเวลาผ่านไปจะมีจำนวนโมเลกุลตัวถูกละลายไปเกาะติดกับพื้นผิวตัวดูดซับเพิ่มมากขึ้น ในขณะเดียวกันโมเลกุลตัวถูกละลายบางส่วนที่เกาะติดกับพื้นผิวจะคายออกมา อัตราการคายจะเกิดน้อยกว่าอัตราการดูดซับ เมื่อปล่อยให้กระบวนการดูดซับดำเนินไปจนกระทั่งอัตราการดูดซับเท่ากับอัตราการคาย ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุล สภาวะสมดุลการดูดซับ จำนวนโมเลกุลตัวถูกละลายและจำนวนโมเลกุลตัวถูกละลายที่คายออกมามีปริมาณคงที่ ดังภาพประกอบ 5



ภาพประกอบ 5 ตัวถูกละลายในสารละลาย



เมื่อ A แทน โมเลกุลของตัวถูกดูดซับ มีความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น C_0

-S- แทน โมเลกุลของตัวดูดซับ

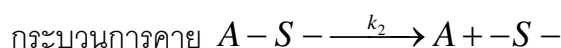
q แทน สัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับต่อจำนวนนักตัวดูดซับ

1-q แทน สัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

r_1 แทน อัตราการดูดซับ จะแปรตามความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลือยู่ในสารละลาย C และสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ไม่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ

k_1 แทน ค่าคงที่อัตราการดูดซับ

$$r_1 = k_1[C](1-q) \quad (2.1)$$



เมื่อ r_2 แทน อัตราการคาย ซึ่งจะแปรตามสัดส่วนโมเลกุลตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับต่อจำนวนนักตัวดูดซับเท่านั้น

k_2 แทน ค่าคงที่อัตราการคาย

$$r_2 = k_2(q) \quad (2.2)$$

ณ สภาวะสมดุล

$$r_1 = r_2$$

$$k_1[C](1-q) = k_2(q)$$

$$\frac{q}{(1-q)} = \frac{k_1}{k_2}[C] = KC$$

$$q = \frac{K[C]}{1+K[C]} \quad (2.3)$$

เมื่อ K แทน ค่าคงที่สมดุลการดูดซับมีหน่วยเป็นส่วนกลับของความเข้มข้น

สำหรับ $A + -S- \longrightarrow A - S -$

ณ สภาวะสมดุล $K = \frac{q}{C}$ (2.4)

เมื่อ q แทน ปริมาณตัวถูกดูดซับที่ถูกดูดซับบนพื้นผิวต่อมวลตัวดูดซับหรืออาจเรียกว่า ความจุของการดูดซับ (adsorption capacity)

W แทน มวลของตัวดูดซับที่ใช้

V แทน ปริมาตรของสารละลายที่มีตัวดูดซับละลายอยู่

C แทน ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย

ณ สภาวะสมดุลของการดูดซับ จะได้ว่า

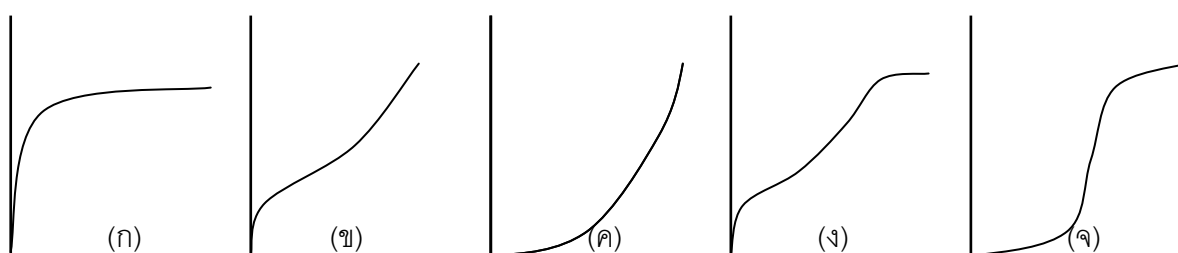
ปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวของตัวดูดซับ = ปริมาณตัวดูดซับที่หลุดออกมาจากตัวดูดซับ

$$qW = V(C_0 - C) \quad (2.5)$$

3.4 ไอโซเทอรั่มของการดูดซับ (Adsorption isotherm)

ไอโซเทอรั่มของการดูดซับ เป็นสมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณตัวถูกดูดซับบนพื้นผิวต่อปริมาณของตัวดูดซับ (q) กับความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลาย (C) ที่สภาวะสมดุล ณ อุณหภูมิคงที่

ถ้าเขียนกราฟระหว่างค่า q ในแกนตั้ง และค่า C ในแกนนอน จะให้รูปแบบพื้นฐานของไอโซเทอรั่มของการดูดซับ 5 แบบ ดังภาพประกอบ 6



ภาพประกอบ 6 ไอโซเทอรั่มการดูดซับแบบพื้นฐาน

ที่มา : นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์; และคณิตา ตั้งคณานุรักษ์.2550:149

จากภาพประกอบ 6 (ก) จัดเป็นไอโซเทอรั่มของการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นแบบชั้นเดียว ส่วน (ข) ถึง (จ) เป็นไอโซเทอรั่มของการดูดซับเป็นหลายชั้น

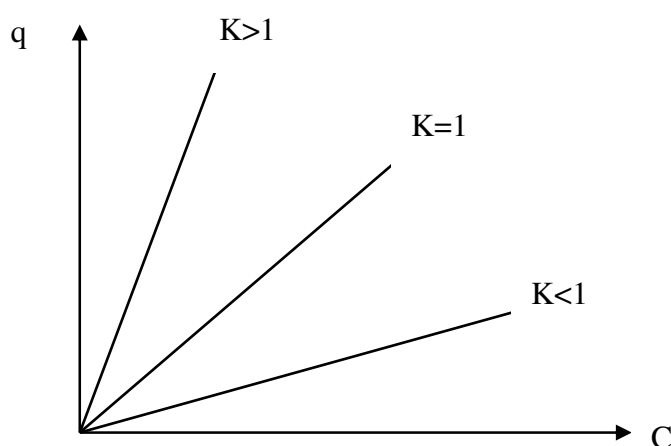
สมการไอโซเทอรั่มของการดูดซับจะอาศัยแบบจำลองการดูดซับทางคณิตศาสตร์ ในที่นี้จะกล่าวถึง 4 สมการที่นิยมใช้กัน ดังนี้

1) **สมการการดูดซับแบบเส้นตรง (linear equation)** จัดเป็นสมการเชิงเส้นระหว่างค่า q และ C

$$\text{ตามสมการที่ 2.4} \quad K = \frac{q}{C}$$

$$\text{จะได้} \quad q = KC$$

จะเห็นว่าปริมาณตัวดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับต่อปริมาณของตัวถูกดูดซับ จะแปรตามความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลืออยู่ในสารละลายในสภาวะสมดุล โดยกำหนดว่าพื้นผิวของตัวดูดซับมีบริเวณให้ตัวถูกดูดซับแบบไม่จำกัดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับเป็นแบบแรงแวนเดอร์วาลส์ ใช้ได้ดีกับสารละลายที่มีความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับต่ำ



ภาพประกอบ 7 ไอโซเทอรั่มการดูดซับแบบเส้นตรง

$K > 1$ แสดงว่าปริมาณตัวถูกดูดซับ ถูกดูดซับไว้ได้มากบนพื้นผิวตัวดูดซับ

$K < 1$ แสดงว่าปริมาณตัวถูกดูดซับ ถูกดูดซับไว้ได้น้อยบนพื้นผิวตัวดูดซับ

$K = 1$ แสดงว่าการดูดซับอยู่ในสภาวะสมดุล

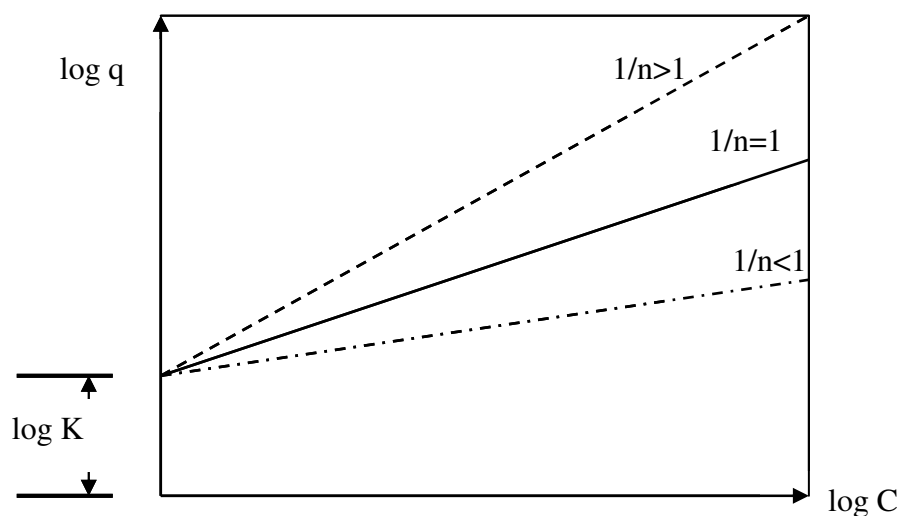
2) สมการการดูดซับของฟรอนด์ลิช (Freundlich adsorption isotherm) นักเคมีฟิสิกส์ชาวเยอรมัน Herbert Max Freundlich (1880-7-1941) ใช้อธิบายไอโซเทอร์มของตัวดูดซับภายใต้สมมติฐานที่ว่าพื้นผิวของตัวดูดซับเป็นแบบวิวิธพันธ์ (Heterogenous adsorption surface) มีรูปแบบของสมการเป็นดังนี้

$$q = KC^n \quad (2.6)$$

สมการที่ (2.6) ไม่ให้ความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง เมื่อ n แทน ค่าคงที่ของฟรอนด์ลิช (Freundlich constant) ของแต่ละระบบที่กำลังศึกษาหรือทดลองและ n ใช้อธิบายลักษณะเส้นกราฟไอโซเทอร์มของตัวดูดซับ โดยทั่ว ๆ ไป n จะมีค่ามากกว่าหนึ่ง เมื่อจัดรูปสมการที่ (2.6) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรงโดยใส่ลอการิทึมทั้งสองข้างของสมการ ดังภาพประกอบ 8

$$\log q = \log K + \frac{1}{n} \log C \quad (2.7)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log q$ กับ $\log C$ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีค่าความชันเท่ากับ $\frac{1}{n}$ และมีจุดตัดแกนเท่ากับ $\log K$



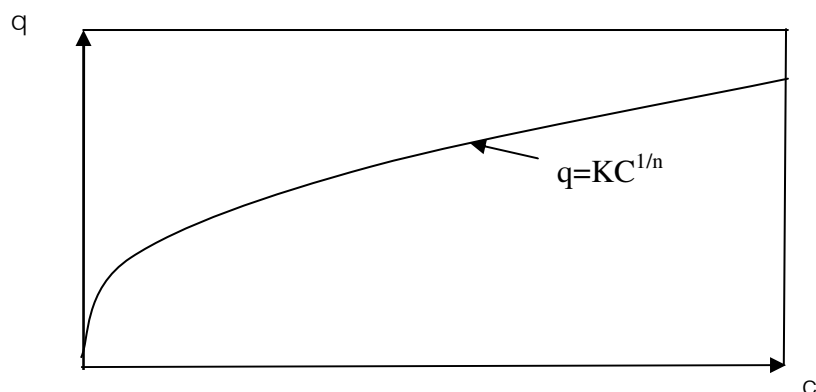
ภาพประกอบ 8 ไอโซเทอร์มของตัวดูดซับแบบเชิงเส้นตรงของฟรอนด์ลิช

ถ้า $\frac{1}{n} = 1$ ไอโซเทอร์มของการดูดซับเป็นแบบเส้นตรง

ถ้า $\frac{1}{n} < 1$ บอกลักษณะความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับจะต่ำในทุกค่าของความเข้มข้น C หรือกล่าวว่ามีปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับในปริมาณจำกัดในการดูดซับ

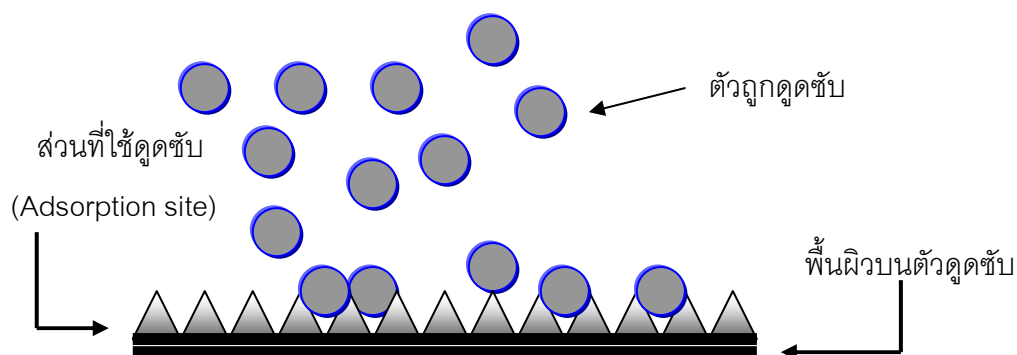
ถ้า $\frac{1}{n} > 1$ บอกลักษณะความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับจะดูดซับได้มาก หรือกล่าวว่ามีบริเวณพื้นที่ผิวบนตัวดูดซับมีปริมาณมากในการดูดซับ

เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า q และ c ตามสมการที่ (2.6) จะได้ไอโซเทอर्मการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นพหุนคติข ดังภาพประกอบ 9 ที่ไม่สามารถบอกถึงปริมาณของตัวถูกดูดซับได้มากที่สุด (Adsorption maxima) เนื่องจากตัวดูดซับสามารถเกิดการดูดซับซ้อนทับกันได้



ภาพประกอบ 9 ไอโซเทอर्मของการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นพหุนคติข

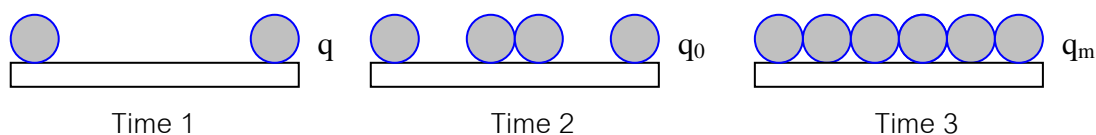
3) สมการการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm) พัฒนาขึ้นโดยนักเคมีชาวสหรัฐอเมริกา Irving Langmuir ในปี ค.ศ. 1916 ได้รับรางวัลโนเบลสาขาเคมีในปี ค.ศ. 1932



ภาพประกอบ 10 กลไกการดูดซับของตัวดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบชั้นเดียว เมื่อตัวดูดซับถูกดูดซับไว้แล้วจะ ไม่มีการคายออกจากพื้นผิวตัวดูดซับ

โดยมีข้อกำหนดว่า พื้นผิวบนตัวดูดซับเป็นแบบเดียวกันหมด (Monogeneous adsorption surface) มีกลไกของการดูดซับเหมือนกัน การดูดซับของตัวดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว ตัวถูกดูดซับจะจัดเรียงตัวเพียงชั้นเดียวบนพื้นผิวตัวดูดซับ โดยที่โมเลกุลตัวถูกดูดซับไม่เกิดการซ้อนทับกัน พื้นผิวตัวดูดซับมีจำนวนจำกัด และเมื่อตัวถูกดูดซับไว้บนพื้นผิวแล้วจะไม่มีการเคลื่อนที่หรือเคลื่อนย้ายหรือเปลี่ยนตำแหน่งกันกับตัวดูดซับ พื้นผิวตัวดูดซับจะถูกปกคลุมด้วยตัวถูกดูดซับมากขึ้น เมื่อความ

เข้มข้นของสารละลายเพิ่มขึ้น จนถึงจุดอิ่มตัวที่มีปริมาณตัวถูกละลายอยู่บนพื้นผิวของตัวดูดซับสูงสุด โดยตัวถูกละลายจะปกคลุมจนเต็มพื้นที่ผิวของตัวดูดซับเพียงชั้นเดียว (ถูกดูดซับได้มากที่สุด q_m) ดังภาพประกอบ 11



ภาพประกอบ 11 ปริมาณตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับที่เวลาต่าง ๆ จนถึงจุดอิ่มตัว

ถ้า q เป็นปริมาณตัวถูกละลายที่เวลา time 1

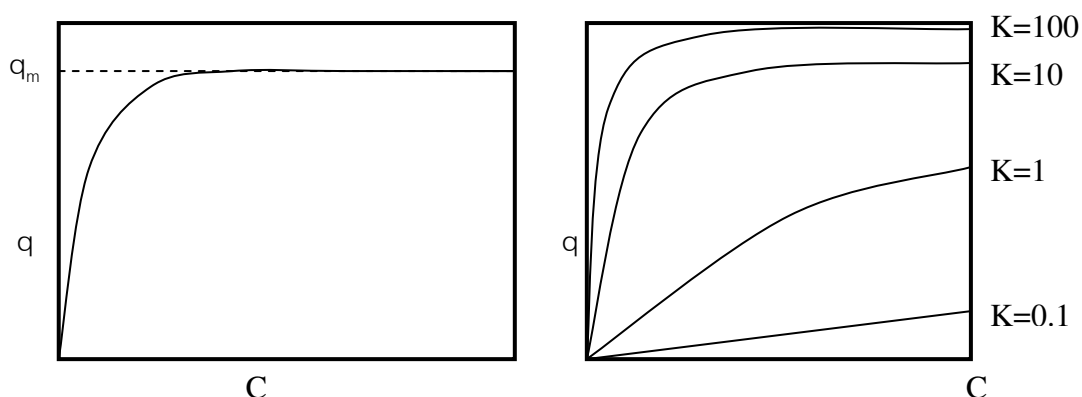
q_0 เป็นปริมาณตัวถูกละลายที่เวลา time 2

q_m เป็นปริมาณตัวถูกละลายสูงสุดที่เวลา time 3

จากความรู้เรื่องสมดุลการดูดซับ และจากสมการที่ (2.1) ถือว่าการดูดซับได้มากที่สุดเท่ากับ 1 รูปแบบของสมการแลงเมียร์จะใช้สมการที่ (2.1) เพียงแต่ต้องคูณปริมาณตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับได้มากที่สุดต่อปริมาณตัวถูกละลายแทนด้วย q_m ดังนั้น สมการที่ (2.3) จึงมีรูปแบบดังนี้

$$q = \frac{q_m K C}{1 + K C} \quad (2.8)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า q และ C จากสมการที่ (2.8) จะได้กราฟดังภาพประกอบ 12

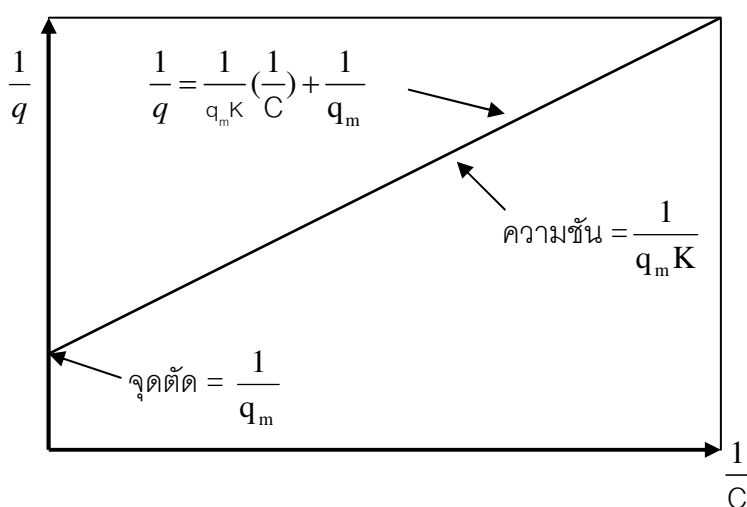


ภาพประกอบ 12 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของแลงเมียร์

เมื่อกราฟจัดรูปสมการที่ (2.8) ให้อยู่ในรูปสมการเส้นตรง จะได้

$$\frac{1}{q} = \frac{1}{q_m K} \left(\frac{1}{C} \right) + \frac{1}{q_m} \quad (2.9)$$

เขียนกราฟระหว่าง $\frac{1}{q}$ และ $\frac{1}{C}$ จะได้กราฟเส้นตรงมีค่าความชันเท่ากับ $\frac{1}{q_m K}$ และจุดตัดบนแกนตั้งเท่ากับ $\frac{1}{q_m}$ ดังภาพประกอบ 13



ภาพประกอบ 13 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์

4) สมการการดูดซับของเบท (Bruner-Emmet-Teller หรือ BET Adsorption isotherm)

ถูกพัฒนาขึ้นจากนักวิทยาศาสตร์ชาวอเมริกา 3 ท่านในปี ค.ศ.1938 Stephen Brunauer, Paul Emmett และ Edward Teller โดยมีสมมติฐานดังนี้คือ

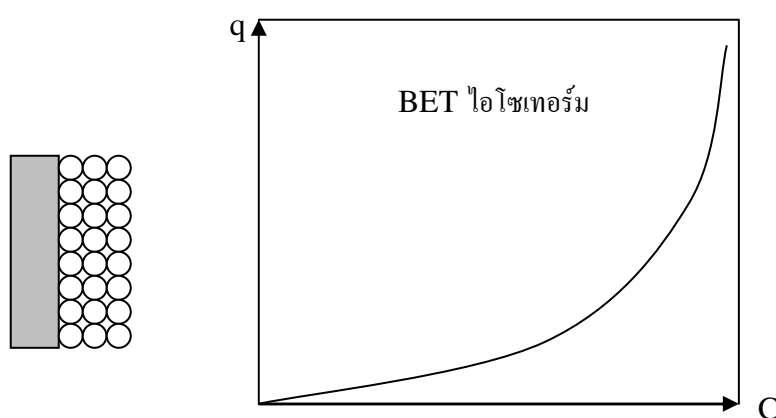
- 1) การดูดซับบนพื้นผิวตัวดูดซับแบบหลายชั้น (Multi-layer adsorption)
- 2) โมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่เกิดการเคลื่อนที่ออกจากพื้นที่ผิวของตัวดูดซับ
- 3) ทุกโมเลกุลในชั้นมีพลังงานของการดูดซับเท่ากัน
- 4) แต่ละชั้นของการดูดซับไม่ต้องการการดูดซับที่สมบูรณ์ก่อนเกิดการดูดซับในชั้นต่อไป

สมการการดูดซับแบบเบทถูกพัฒนามาจากสมการการดูดซับของแลงเมียร์ มีรูปแบบสมการ

2.10

$$q = \frac{q_m K C}{(C_0 - C) \left[1 + (K - 1) \frac{C}{C_0} \right]} \quad (2.10)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง q และ c จะให้ไอโซเทอรั่มของการดูดซับแบบไม่เชิงเส้น ดังภาพประกอบ 14

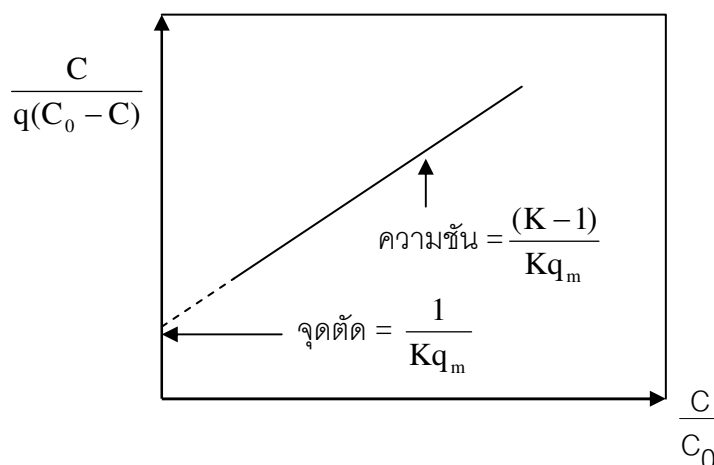


ภาพประกอบ 14 ไอโซเทอรั่มการดูดซับแบบไม่เชิงเส้นของ BET

เมื่อจัดรูปสมการที่ (2.10) ใหม่จะได้สมการเส้นตรง ดังสมการ 2.11

$$\frac{C}{q(C_0 - C)} = \frac{1}{q_m K} + \frac{(K - 1)}{q_m K} \left(\frac{C}{C_0} \right) \quad (2.11)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่างค่า $\frac{C}{q(C_0 - C)}$ กับค่า $\frac{C}{C_0}$ จะได้กราฟเส้นตรง มีค่าความชันเท่ากับ $\frac{(K-1)}{Kq_m}$ และจุดตัดบนแกนตั้งเท่ากับ $\frac{1}{Kq_m}$



ภาพประกอบ 15 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของ BET

ที่มา: นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์; และคณิตา ตั้งคณานุรักษ์. 2550: 149-154.

3.5 จลนพลศาสตร์ของการดูดซับโลหะระหว่างของเหลว – ของแข็ง

กลไกการดูดซับไอออนโลหะหนักระหว่างของเหลวและของแข็งมีความสำคัญอย่างยิ่งที่สามารถทำนายอัตราการเกิดปฏิกิริยาซึ่งเกิดจากการปนเปื้อนของโลหะหนักที่ถูกกำจัดออกจากสารละลายในอันดับของการดูดซับที่บำบัดด้วยพืช อันดับการเกิดปฏิกิริยาดังกล่าวเกิดกลไกการดูดซับที่แตกต่างระหว่างความเข้มข้นเริ่มต้นและอุณหภูมิ ลักษณะค่าคงที่ของอัตราการดูดซับซึ่งตรวจสอบโดยใช้สมการปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมของลาเกอร์ซึ่งเป็นพื้นฐานบนความจุจำเพาะของของแข็งและสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียมซึ่งเป็นพื้นฐานการดูดซับของแข็ง (Bulut Y.; et al. 2007: 301)

$$\log(q_e - q_t) = \log q_e - \left(\frac{K_1}{2.303} \right) t \quad (2.12)$$

เมื่อ q_e แทน สมดุลมวลของโลหะที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

q_t แทน มวลของโลหะที่ถูกดูดซับที่เวลา t (มิลลิกรัมต่อกรัม)

K_1 แทน ค่าคงที่สมดุลอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (1/นาที)

t แทน เวลา (นาที)

การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ในการดูดซับของไอออนโลหะหนัก ประยุกต์ใช้กับรูปแบบการดูดซับเป็นแบบปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมและปฏิกิริยาอันดับสองเทียม สำหรับสมการอัตราปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมของลาเกอเกร็นเป็นหนึ่งในสมการที่ถูกนำมาใช้กันอย่างกว้างขวางสำหรับการดูดซับของตัวละลายจากสารละลายของเหลว ดังสมการ

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - K_1 t \quad (2.13)$$

ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมเมื่อพิจารณาอัตราของขนาดของการดูดซับกับจำนวนที่ไม่มีการดูดซับ เส้นตรงที่เขียนกราฟระหว่างค่าของ $\log(q_e - q_t)$ กับ t ในการประยุกต์ใช้กับรูปแบบกลไกปฏิกิริยาอันดับหนึ่งในปฏิกิริยาอันดับหนึ่งแท้ ค่า $\log q_e$ เท่ากับจุดตัดของค่าที่เขียนระหว่าง $\log(q_e - q_t)$ กับ t ในกรณีสมการพื้นฐานของสมดุลการดูดซับปฏิกิริยาอันดับสองเทียมแสดงในรูปสมการ

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{K_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (2.14)$$

เมื่อ K_2 แทน ค่าคงที่สมดุลอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับสอง (กรัมต่อมิลลิกรัมต่อนาที) กราฟที่เขียนระหว่างค่าของ $\frac{t}{q_t}$ กับ t จะได้เส้นตรง แสดงความสัมพันธ์สำหรับการประยุกต์ใช้กลไกปฏิกิริยาอันดับสอง การศึกษาสมการปฏิกิริยาอันดับสองเทียมจากการทดลองเปรียบเทียบกับค่าความจุจำเพาะของการดูดซับและค่าที่ได้จากการคำนวณตามทฤษฎีเส้นตรงที่ได้จากการเขียนกราฟระหว่างค่า $\frac{t}{q_t}$ กับ t สำหรับสมการปฏิกิริยาอันดับสองจะได้เส้นตรงทุกกรณี (Jianlong W.; et al. 2001: 273)

การดูดซับแบบเจเนอรัลไลซ์แลงเมียร์เป็นการดูดซับชนิดพื้นฐานและถ้ามีการดูดซับแบบอุณหภูมิกึ่งที่ของแลงเมียร์ให้เป็นแบบทั่วไป ซึ่งเรียกว่า การดูดซับแบบอุณหภูมิกึ่งที่ชนิดเจเนอรัลไลซ์แลงเมียร์ (generalized Langmuir) สามารถเขียนได้ดังนี้

$$\theta_t = \left(\frac{(K[A])^n}{1 + (K[A])^n} \right)^{\frac{m}{n}} \quad (2.15)$$

เมื่อ θ_t แทน สัดส่วนการดูดซับทั้งหมด

K แทน ค่าคงที่การดูดซับ

$[A]$ แทน ความเข้มข้นของสารละลาย

ส่วน n และ m เป็นค่าคงที่ที่ได้จากการทดลอง ซึ่งมีค่าระหว่าง $0 < n, m \leq 1$ กรณีที่ค่าคงที่ $n = m = 1$ ทำให้การดูดซับแบบอณูโมเลกุลที่ชนิดเจเนอรัลไลซ์แลงเมียร์ลดรูปเป็นการดูดซับแบบอณูโมเลกุลที่แบบแลงเมียร์ซึ่งเป็นสมการคล้ายกับการดูดซับแบบอณูโมเลกุลที่ของแก๊สบนของแข็ง ดังสมการ 2.16

$$\theta_t = \frac{K[A]}{1+K[A]} \quad (2.16)$$

หรือในสมการ (2.3) จะได้ $q = \frac{K[C]}{1+K[C]}$ แต่ถ้าค่า $n = m$ มีค่าเท่ากันจะลดรูปเป็นการดูดซับแบบแลงเมียร์-ฟรุนดลิช (Langmuir-Freundlich) ดังนี้ (วิทยา เรื่องพรพิสุทธิ์. 2547)

$$\theta_t = \frac{(K[A])^n}{1+(K[A])^n} \quad (2.17)$$

4. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

4.1 งานวิจัยภายในประเทศ

ฉวีพันธ์ ทรวงเกียรติกุล. (2539) ทำการศึกษาการกำจัดตะกั่วและนิกเกิลจากน้ำเสียโดยใช้ซีลีเยอ พบว่าซีลีเยอพื้นฟูสภาพแล้วสามารถดูดซับตะกั่วและนิกเกิลจากน้ำเสียได้ โดยประสิทธิภาพการกำจัดขึ้นอยู่กับความเข้มข้นและชนิดของน้ำเสีย กล่าวคือความเข้มข้นของตะกั่วและนิกเกิลเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพจะลดลง น้ำเสียสังเคราะห์มีความเข้มข้นของตะกั่วประมาณ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร และนิกเกิล 2 มิลลิกรัมต่อลิตร ซีลีเยอพื้นฟูสภาพมีประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดตะกั่วและนิกเกิลได้ร้อยละ 99.91 และ 72.59 ตามลำดับ ส่วนน้ำเสียโรงงานประกอบรถยนต์ ซีลีเยอพื้นฟูสภาพมีประสิทธิภาพสูงสุดในการกำจัดตะกั่วและนิกเกิลได้ร้อยละ 72.21 และ 54.08 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วและนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์สูงกว่าในน้ำเสียจากโรงงานประกอบรถยนต์ นอกจากนั้นซีลีเยอพื้นฟูสภาพที่ผ่านการทำพื้นฟูสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก 0.5 นอร์มอล ปริมาตร 500 ลูกบาศก์เซนติเมตร ด้วยอัตราการไหล 15 มิลลิกรัมต่อนาที สามารถดูดซับตะกั่วและนิกเกิลจากน้ำเสียโรงงานประกอบรถยนต์ได้สูงสุดร้อยละ 70.16 และ 53.83 ตามลำดับ

สุนิรัตน์ เรืองสมบุญ. (2547: 42) ทำการศึกษาการดูดซับตะกั่วและแคดเมียมจากน้ำเสียโดยใช้ *Scenedesmus dimorphus* เป็นตัวดูดซับ พบว่าระดับพีเอชที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับของสารละลายตะกั่วและแคดเมียมเท่ากับ 3.5 และ 5.5 ตามลำดับ และการศึกษาจำนวนเซลล์ของ *S. dimorphus* ที่มีผลต่อการดูดซับโลหะซึ่งใช้จำนวนเซลล์ 6 ระดับ โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับจากการพิจารณาปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักแห้งของแพลงก์ตอน พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักนั้นเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวนเซลล์ของ *S. dimorphus* ลดลงระยะเวลาที่

เหมาะสม ต่อการดูดซับตะกั่วและแคดเมียมคือ 10 และ 5 นาที ตามลำดับ และในการใช้สมการของ Langmuir adsorption isotherm แสดงความสามารถสูงสุดของ *S. dimorphus* ในการดูดซับตะกั่วและแคดเมียม พบว่ามีค่า q_{max} เท่ากับ 123.46 mgPb/g และ 217.39 mgCd/g ตามลำดับ

จันฐมณีนันท์ แย้มเกตุ และคนอื่นๆ. (2547: 1) ทำการกำจัดไฮออนนิกเกิลและแคดเมียมด้วย ถ้ำเกลบและแบคทีเรียบาซิลลัส ซับทิลิส (*Bacillus subtilis*) พบว่าในการกำจัดไฮออนโลหะหนักโดยใช้วัสดุดูดซับกับสารละลายไฮออนนิกเกิลและแคดเมียมที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH 5, pH 6 และ pH 7 เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ซึ่งเป็นการศึกษาการดูดซับโลหะด้วยถ้ำเกลบ พบว่าที่ pH 7 ประสิทธิภาพการดูดซับไฮออนนิกเกิลและแคดเมียมดีที่สุด ถ้ำเกลบสามารถดูดซับไฮออนนิกเกิลและแคดเมียมได้เท่ากับ 30.957% และ 52.847% ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่า การดูดซับไฮออนโลหะหนักเป็นไปตามแบบจำลอง Langmuir adsorption isotherm โดยมีค่าปริมาณไฮออนนิกเกิลและแคดเมียมที่ถูกดูดซับได้สูงสุด เท่ากับ 4.032 และ 14.663 มิลลิกรัมต่อกรัมถ้ำเกลบ ตามลำดับ และค่าคงที่ของการดูดซับเท่ากับ 0.394 และ 0.048 ลิตรต่อมิลลิกรัมของโลหะหนัก ตามลำดับโดยไฮออนนิกเกิลและแคดเมียมเข้าสู่สมดุลที่เวลาในการดูดซับ 2 ชั่วโมง และ 4 ชั่วโมง ตามลำดับ การศึกษาการดูดซับไฮออนโลหะหนักด้วยแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* เป็นเวลา 12 ชั่วโมง หลังจากการดูดซับโลหะหนักด้วยถ้ำเกลบ พบว่าแบคทีเรียจะเพิ่มความสามารถในการดูดซับไฮออนนิกเกิลและแคดเมียมได้เท่ากับ 39.383% และ 67.986% ตามลำดับ

ดลเดช ตั้งตระการพงษ์ และภาณุมาศ พรหมเทศ. (2548: 2) ทำการศึกษาการดูดซับแคดเมียมและนิกเกิลออกจากสารละลายด้วยเปลือกแพชชั่นฟรุต พบว่าเวลาสมดุลการดูดซับเท่ากับ 60 นาที การอธิบายกลไกการดูดซับโลหะหนักด้วยสมการแลงเมียร์ให้ความสัมพันธ์ที่ดีกว่าสมการฟรุนดลิช โดยเปลือกแพชชั่นฟรุตสามารถดูดซับนิกเกิลได้สูงกว่าแคดเมียม ความสามารถในการดูดซับสูงสุดตามสมการแลงเมียร์เท่ากับ 16.50 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกรัม และ 29.33 มิลลิกรัมนิกเกิลต่อกรัม โดยสารละลายกรดไนตริกความเข้มข้น 0.1 โมลต่อลิตร สามารถสกัดแคดเมียมและนิกเกิลออกจากเปลือกแพชชั่นฟรุตได้ดีที่สุดมากกว่าร้อยละ 93.68 ส่วนประสิทธิภาพการนำกลับมาใช้ใหม่ 4 รอบ พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมลดลงเฉลี่ยร้อยละ 23.36 และนิกเกิลลดลงเฉลี่ยร้อยละ 41.21 ของการดูดซับรอบที่ 1 ตามลำดับ

วรารณณ์ พินโย และคนอื่นๆ. (2548: 18) ทำการศึกษาความสามารถและจลนศาสตร์ในการกำจัดนิกเกิล ตะกั่ว และแคดเมียมไฮออนของซีโอไลต์ชนิดโซเดียมเอ็กซ์ และโซดาไลต์ที่สังเคราะห์จากถ้ำลอย พบว่าที่ความเข้มข้นของไฮออนในช่วง 10-100 ส่วนในล้านส่วนของสารละลายที่สภาวะความเป็นกรดต่างคงที่เท่ากับ 7 ปริมาณไฮออนที่เกิดการแลกเปลี่ยนถูกติดตามด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ของการดูดกลืนของอะตอม ผลปรากฏซีโอไลต์ชนิดโซเดียมเอ็กซ์เกิดการเปลี่ยนได้ดีที่สุดสำหรับ

ไอออนทั้งสามชนิด นอกจากนี้ยังทำการศึกษาพฤติกรรมการแลกเปลี่ยนไอออนทั้งสามชนิดในซีโอไลต์แบบจำลองทางจุลศาสตร์ของแลงเมียร์ และ คูบินิน-คากาเนอร์ราตซ์เควิช โดยแบบจำลองที่อธิบายพฤติกรรมเปลี่ยนแปลงไอออนทั้งสามชนิดในซีโอไลต์ได้ดีที่สุดคือ แบบจำลองของแลงเมียร์

4.2 งานวิจัยต่างประเทศ

ลิ และคนอื่นๆ (Li; et al. 2002: 263-269) ได้ทำการทดลองดูดซับตะกั่วโดยใช้ถ่านกัมมันต์ CTN (Carbon nanotubes) ที่ความเข้มข้นของตะกั่ว 10 มิลลิกรัมต่อลิตร pH 3 5 และ 7 พบว่าความสามารถในการดูดซับตะกั่วเพิ่มสูงขึ้นเมื่อค่า pH สูงขึ้น เนื่องจากที่ pH สูงจะเกิดการตกตะกอนของโลหะหนักพร้อมกับการดูดซับ

ซาอิด และคนอื่นๆ (Saeed A.; et al. 2005: 25-31) ศึกษาเกี่ยวกับการกำจัดและการนำกลับมาใช้ใหม่ของโลหะหนักจากสารละลายโดยใช้ไม้มะละกอบเป็นตัวดูดซับชีวภาพ พบว่าจากการใช้ไม้มะละกอในการดูดซับโลหะหนัก ทองแดง แคดเมียม และสังกะสี ถูกกำจัดไป 97.8% 94.9% และ 66.8% ตามลำดับ การดูดซับเกิดขึ้นดีที่สุดที่ pH 5 และเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราส่วนของสารละลายโลหะหนักต่อปริมาณมวลชีวภาพลดลง ในทางกลับกันการดูดซับลดลงเมื่ออัตราส่วนเพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของไอออนโลหะมีความเกี่ยวข้องกับการเพิ่มขึ้นการดูดซับเชิงชีวภาพที่ความเข้มข้นต่ำ ๆ ณ ภาวะสมดุล การดูดซับของไม้มะละกอต่โลหะที่ถูกดูดซับ เรียงลำดับจากมากไปน้อย คือ ทองแดง แคดเมียม และสังกะสี ตามลำดับ ซึ่งยังคงผลเหมือนเดิมเมื่อทำการทดลองซ้ำโดยแปรปัจจัยต่าง ๆ ให้มีความหลากหลายออกไป การดูดซับมีความสอดคล้องกับไอโซเทอรั่มการดูดซับแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิช ส่วนการศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับทางชีวภาพจะเห็นได้ว่าเป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับสองและระหว่างการศึกษาเกิดปฏิกิริยาดูดซับ-ปลดปล่อยเป็นจำนวน 5 รอบ ไม่พบความสูญเสียในประสิทธิภาพการดูดซับ

ซูซูกิ และคนอื่นๆ (Suzuki Y.; et al. 2005: 1803-1808) ศึกษาการกำจัดโลหะหนักออกจากสารละลายโดยใช้สาหร่าย *Ulva* ที่ตายแล้วเป็นตัวดูดซับ พบว่าความจุจำเพาะของการดูดซับแคดเมียมเพิ่มขึ้นในสภาวะที่เป็นเบสของสารละลายและไอโซเทอรั่มของการดูดซับแบบแลงเมียร์ของแคดเมียม นิกเกิล และทองแดง พบว่ามีค่าความจุจำเพาะของการดูดซับเท่ากับ 60 – 90 mg/g และสัมพรรคภาพของการดูดซับมีค่าเท่ากับ 0.03 - 0.04 L/mg ที่ pH 7.8

สเวโควา และคนอื่นๆ (Svecova L.; et al. 2006: 142-153) ศึกษาสารที่เป็นของเสียจากอุตสาหกรรมเกี่ยวกับการหมัก 2 ชนิด อันได้แก่ *Penicillium oxalicum* และ *Tolypocladium* sp. ถูกนำมาทดสอบโดยวิธีที่ต่างกันในฐานะของ สารดูดซับ แคดเมียม ตะกั่ว และปรอท การศึกษาในช่วงแรกนั้นเน้นที่การประเมินถึงผลกระทบของค่า pH ที่มีต่อโลหะดังกล่าว จากนั้นจึงศึกษาต่อถึงการ

กำหนดคุณสมบัติในการดูดซึมที่เท่ากัน โดยความสามารถในการดูดซึมของโลหะเป้าหมายนั้นสามารถถูกจัดลำดับสำหรับ *Penicillium oxalicum* ได้ดังนี้ $\text{ปรอท} >> \text{ตะกั่ว} > \text{แคดเมียม}$ และสำหรับ *Tolypocladium* sp. มีดังนี้ $\text{ปรอท} >> \text{แคดเมียม} > \text{ตะกั่ว}$ โดย *Penicillium oxalicum* นั้นแสดงถึงความสามารถในการดูดซึมที่สูงกว่า *Tolypocladium* sp. (ยึดความสามารถในการดูดซึมตามหน่วย Molar) โดยความสามารถในการดูดซึมสูงสุดสูง 270 mg.Hg.g^{-1} (pH เริ่มต้นคือ 5 และ ณ จุดสมดุลประมาณ 6.2) สามารถเกิดขึ้นได้กับ *Penicillium* สมการของอุณหภูมิที่เท่ากันของแลงเมียร์นั้นสามารถสอดคล้องกับข้อมูลทางการทดลองได้ดีกว่า สมการของฟรุนดลิชอย่างมีนัยสำคัญ

อัลลา และคนอื่นๆ (Alaa H.; et al. 2006: 692-700) ศึกษาเกี่ยวกับการดูดซับ ตะกั่ว แคดเมียม ทองแดง และนิกเกิล โดยใช้ชีวมวลไร้อากาศมีลักษณะเม็ดเล็ก ๆ พบว่าการประยุกต์ใช้แบคทีเรียที่มีลักษณะเล็กและมีโครงสร้างรูพรุน และมีความสามารถในการคงรูปดียิ่งหลังจากบำบัดด้วยชีวมวลกับไอออนของแคลเซียมมีการแลกเปลี่ยนความจุไอออนบวกของชีวมวลประมาณ 111 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัมของน้ำหนักแห้งชีวมวลซึ่งใกล้เคียงกับความจุของการจับโลหะหนักของเรซิน งานวิจัยนี้ทำการศึกษาสมดุลการดูดซับแบบ BET การทดลองให้เห็นว่าการจับกับชีวมวลมีค่าเพิ่มสูงขึ้นและส่วนที่ไม่ใช้ชีวมวลบำบัดกับแคลเซียมการจับของโลหะมีค่าเพิ่มสูงขึ้น ค่า pH ของสารละลายเริ่มต้นมีผลต่อการดูดซับโลหะซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง pH 4.0-5.5 ที่ pH ต่ำการจับโลหะจะลดลงและสมดุลของการดูดซับจะเพิ่มหลังจาก 30 นาที พบว่ามีค่าสูงสุดของ Pb^{2+} , Cd^{2+} , Cu^{2+} และ Ni^{2+} ไอออนเป็น 255, 60, 55 และ 26 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ความเข้มข้นของไอออนโลหะสามารถจับพอเหมาะในรูปแบบของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์

ชวน และคนอื่นๆ (Xuan Z.; et al. 2006: 160-164) ทำการศึกษาสมดุล จลนพลศาสตร์ และไอโซเทอร์มของการดูดซับชีวภาพของตะกั่วไอออนในการดัดแปลงเปลือกส้ม (pretreated chemically) พบว่าตะกั่วมีความจุจำเพาะเพิ่มขึ้นที่เวลาหนึ่งสูงสุดเป็น 1.22 mol.kg^{-1} ค่าสมดุลจะย้อนกลับที่เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง การดูดซับขึ้นอยู่ค่า pH และมีการกำจัดตะกั่วได้สูงสุดที่ pH ช่วง 4.5-6.0 การทดลองสอดคล้องรูปแบบการดูดซับของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ ค่าสูงสุดของอัตราส่วนระหว่างของแข็งต่อของเหลวเป็น 3.0 g/l

เชน และคนอื่นๆ (Chen Z.; et al. 2007: 1-7) ศึกษาการดูดซับนิกเกิลและทองแดง ด้วยสาหร่าย *Undaria pinnatifida* ในการประยุกต์ใช้กับรูปแบบไอโซเทอร์มและจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ พบว่าสาหร่ายดังกล่าวสามารถดูดซับนิกเกิลและทองแดงเพิ่มขึ้นที่ pH 4.7 และ 4.0 ตามลำดับที่ภาวะสมดุล เวลา 100 นาที และการดูดซับเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (pseudo-first-order) และปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (pseudo-second-order) ตามรูปแบบของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิช

ไอซิค (İşik M.. 2008: 97-104) ศึกษาการดูดซับนิกเกิลออกจากสารละลายโดยใช้ชิ้นส่วนผสมที่มีชีวิตและไม่มีชีวิตของยูเรียโอไลติก (ureolytic) พบว่าการกำจัดนิกเกิลออกจากสารละลายโดยใช้ส่วนที่มีชีวิตและไม่มีชีวิตเป็น 16 และ 13% ที่สมดุล ณ เวลา 110 และ 60 นาที ตามลำดับ ตามรูปแบบของแลงเมียร์และฟรุนดลิชและจลนพลศาสตร์ของการดูดซับเป็นปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม และเป็นปฏิกิริยาอันดับสองเทียม ส่วนผสมทั้งสองสามารถนำมากำจัดนิกเกิลจากน้ำเสียได้

ป๊อปปูรี และคนอื่น ๆ (Popuri S.R.;et al. 2009: 194-199) ศึกษาการดูดซับไอออนทองแดงและนิกเกิลจากน้ำโดยใช้ไคโตซานเคลือบฟิวซี พบว่าไคโตซานที่เคลือบด้วยฟิวซีมีค่าจำเพาะของการดูดซับสูงสุดของไอออนทองแดงและนิกเกิลเป็น 87.9 mg/g และ 120.5 mg/g ตามลำดับ การดูดซับสอดคล้องกับรูปแบบไอโซเทอรัมแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิช และกลไกการดูดซับเป็นปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

1. สารเคมี วัสดุดิบ เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้

1.1 สารเคมี และวัสดุดิบ

- 1) สารละลายมาตรฐานตะกั่ว 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร, MERCK
- 2) สารละลายมาตรฐานนิกเกิล 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร, MERCK
- 3) สารละลายฟอสเฟตบัพเฟอร์
- 4) น้ำกลั่นบริสุทธิ์ ปราศจากไอออนตะกั่วและนิกเกิล
- 5) ไม้มะละกอพันธุ์แขกนวล

1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้

- 1) เครื่องอะตอมมิคแอบซอร์บชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Atomic Absorption Spectrophotometer) Analytik jena AG รุ่น novAA 300
- 2) เครื่องวัดพีเอชของสาร (pH meter)
- 3) เครื่องชั่งไฟฟ้าอย่างละเอียด 4 ตำแหน่ง รุ่น 205 A Superbalance series
- 4) เครื่องเขย่าสารในแนวนวงกลมกำหนดรอบได้
- 5) ขวดเก็บตัวอย่างชนิดพอลิโพรพิลีนมีฝาปิดแบบเกลียวขนาด 15 มิลลิลิตร

2. การเตรียมตัวอย่าง

2.1 ไม้มะละกอ

- 1) เตรียมไม้มะละกอที่ใช้สำหรับการดูดซับ
 1. นำต้นมะละกอที่โตเต็มที่ตัดเป็นท่อนให้ได้ขนาด 30 เซนติเมตร แช่น้ำไว้ 3 วัน ให้ส่วนประกอบอื่นหลุดลอก และเปื่อยยุ่ยจนเหลือส่วนที่เป็นเนื้อไม้แข็ง
 2. นำไม้มะละกอที่ได้จากข้อ 1 มาตัดเป็นชิ้นเล็ก ๆ ให้มีขนาด 2 x 2 เซนติเมตร ต้มในน้ำเดือด 30 นาที แล้วล้างด้วยน้ำประปา ทิ้งไว้ในน้ำกลั่น 2-3 ชั่วโมง เปลี่ยนน้ำ 3-4 ครั้ง
 3. นำไม้มะละกอที่ได้จากข้อ 2 มาอบที่อุณหภูมิ 70 ($\pm$ 2) องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

4. ใช้ไม้มะละกอในการดูดซับโลหะหนัก ตัดให้มีขนาดกว้างประมาณ 0.05 - 2 มิลลิเมตร ยาว 2.5 มิลลิเมตร โดยตะแกรงทัดขนาด 2.5 มิลลิเมตรสำหรับแยกขนาดใช้ในการทดลองต่อไป

3. วิธีการทดลอง

ตอนที่ 1 การตรวจสอบตะกั่ว

เตรียมสารละลายมาตรฐานตะกั่วจากสารละลายมาตรฐานตะกั่ว 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้มีความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานตะกั่วเป็น 10.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้มีความเป็นกรด-เบส ด้วยสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ตามต้องการ และนำไปใช้ในการทดลองขั้นต่อไป

1. ศึกษาพีเอช (pH) ที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนัก

ใส่ไม้มะละกอ 10 กรัมต่อลิตร ในสารละลายตะกั่วเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH 2, 3, 4, 5, และ 5.5 เขย่าด้วยความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 60 นาที กรองและเก็บสารละลาย วัดปริมาณสารละลายตะกั่วที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer

2. ศึกษาปริมาณไม้มะละกอที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนัก

ใส่ไม้มะละกอ ปริมาณ 5.0, 10.0, 15.0, 20.0, 50.0, 100.0, 150.0 และ 200.0 กรัมต่อลิตร ในสารละลายตะกั่วเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH ที่เหมาะสมจากข้อ 1 เขย่าด้วยความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 60 นาที กรองและเก็บสารละลาย วัดปริมาณสารละลายตะกั่วที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer

3. ศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนัก

ใส่ไม้มะละกอในปริมาณที่เหมาะสมจากข้อ 2 ในสารละลายตะกั่วเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH ที่เหมาะสมจากข้อ 1 เขย่าด้วยความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1, 5, 10, 15, 30, 45, 60, 90, 120, 160, 180 และ 210 นาที กรองและเก็บสารละลาย วัดปริมาณสารละลายตะกั่วที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer

4. ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของไม้มะละกอในการดูดซับโลหะหนัก

ใส่ไม้มะละกอปริมาณ 5.0 กรัมต่อลิตร ในสารละลายตะกั่วที่ความเข้มข้น 1, 5, 10, 20, 50, 80, 160, 300, 400, และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH ที่เหมาะสมจากข้อ 1 เขย่าจนถึงระยะเวลาที่เหมาะสม (Equilibrium time) กรองและเก็บสารละลาย วัดปริมาณสารละลายตะกั่วที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer

5. ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับโลหะหนักของไม้มะละกอ

ใส่ไม้มะละกอปริมาณ 5.0 กรัมต่อลิตร ในสารละลายตะกั่วเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH ที่เหมาะสมจากข้อ 1 เขย่าจนถึงระยะเวลาที่เหมาะสมจากข้อ 4 กรองและเก็บสารละลาย วัดปริมาณสารละลายตะกั่วที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer

ในทุกชุดการทดลองขั้นที่ 1-4 ทำการทดลอง 3 ซ้ำ หาค่าเฉลี่ย และมีชุดควบคุมกับสารละลายที่เตรียมก่อนให้สัมผัสกับไม้มะละกอ

ตอนที่ 2 การตรวจสอบนิกเกิล

เตรียมสารละลายมาตรฐานนิกเกิลจากสารละลายมาตรฐานนิกเกิล 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้มีความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานนิกเกิลเป็น 10.0 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้มีความเป็นกรด-เบส ด้วยสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ตามต้องการ และนำไปใช้ในการทดลองขั้นต่อไป

1. ศึกษาพีเอช (pH) ที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนัก

ใส่ไม้มะละกอ 10 กรัมต่อลิตร ในสารละลายนิกเกิลเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH 2, 3, 4, 5, 6 และ 7 เขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 60 นาที กรองและเก็บสารละลาย วัดปริมาณสารละลายนิกเกิลที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer

2. ศึกษาปริมาณไม้มะละกอที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนัก

ใส่ไม้มะละกอ ปริมาณ 5.0, 10.0, 15.0, 20.0, 50.0, 100.0, 150.0 และ 200.0 กรัมต่อลิตร ในสารละลายนิกเกิลเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH ที่เหมาะสมจากข้อ 1 เขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 60 นาที กรองและเก็บสารละลาย วัดปริมาณสารละลายนิกเกิลที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer

3. ศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนัก

ใส่ไม้มะละกอในปริมาณที่เหมาะสมจากข้อ 2 ในสารละลายนิกเกิลเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH ที่เหมาะสมจากข้อ 1 เขย่าที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1, 5, 10, 15, 30, 45, 60, 90, 120, 160, 180 และ 210 นาที กรองและเก็บสารละลาย วัดปริมาณสารละลายนิกเกิลที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer

4. ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของไม้มะละกอในการดูดซับโลหะหนัก

ใส่ไม้มะละกอปริมาณ 5.0 กรัมต่อลิตร ในสารละลายนิกเกิลที่มีความเข้มข้น 1, 5, 10, 20, 50, 80, 160, 300, 400, และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH ที่เหมาะสมจากข้อ 1 เขย่าจนถึงระยะเวลาที่เหมาะสมกรองและเก็บสารละลายวัดปริมาณสารละลายนิกเกิลที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer

5. ศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับโลหะหนักของไม้มะละกอ

ใส่ไม้มะละกอปริมาณ 5.0 กรัมต่อลิตร ในสารละลายนิกเกิลเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH ที่เหมาะสมจากข้อ 1 เขย่าจนถึงระยะเวลาที่เหมาะสมจากข้อ 4 กรองและเก็บสารละลาย วัดปริมาณสารละลายตะกั่วที่เหลือในสารละลายด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer

ในทุกชุดการทดลองขั้นที่ 1-4 ทำการทดลอง 3 ซ้ำ หาค่าเฉลี่ย และมีชุดควบคุมกับสารละลายที่เตรียมก่อนให้สัมผัสกับไม้มะละกอ

4. การจัดกระทำและการวิเคราะห์ข้อมูล

1. วิธีการวิเคราะห์

1. การสร้างกราฟมาตรฐาน (calibration curve)

1.1 เตรียมสารละลายมาตรฐานตะกั่วจากสารละลายมาตรฐานตะกั่ว 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้มีความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานตะกั่วเป็น 0.5, 1.0, 5.0 และ 10.0 มิลลิกรัมต่อลิตร วัดปริมาณสารละลายด้วยเครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer

1.2 เตรียมสารละลายมาตรฐานนิกเกิลจากสารละลายมาตรฐานนิกเกิล 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้มีความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐานนิกเกิลเป็น 0.5, 1.0, 5.0 และ 10.0 มิลลิกรัมต่อลิตร วัดปริมาณสารละลายด้วยเครื่อง Atomic Absorption spectrophotometer

1.3 ใช้น้ำกลั่นเป็นสารละลายเบลงค์ (Blank solution) ทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายมาตรฐานของสารละลายในแต่ละข้อ โดยใช้เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometer

2. วิเคราะห์ปริมาณไอออนตะกั่ว และนิกเกิล โดยใช้เทคนิคอะตอมมิกแอบซอร์พชันสเปกโตรโฟโตเมตรี

2.1 การวิเคราะห์ตะกั่ว มีสภาวะการวิเคราะห์ คือ ใช้ความยาวคลื่น 283.3 นาโนเมตร ความกว้างช่องสลิตที่โมโนโครมาเตอร์ 1.2 นาโนเมตร กระแสไฟฟ้า 3.0 มิลลิแอมป์ ชนิดของเปลวไฟแบบ C_2H_2/Air อัตราการไหลของเชื้อเพลิง 65 ลิตรต่อชั่วโมง

2.2 การวิเคราะห์นิกเกิล มีสภาวะการวิเคราะห์ คือ ใช้ความยาวคลื่น 232 นาโนเมตร ความกว้างช่องสลิตที่โมโนโครมาเตอร์ 0.2 นาโนเมตร กระแสไฟฟ้า 5.0 มิลลิแอมป์ ชนิดของเปลวไฟแบบ C_2H_2/Air อัตราการไหลของเชื้อเพลิง 55 ลิตรต่อชั่วโมง

3. นำค่าที่ได้จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน

4. การวิเคราะห์ผลการทดลอง

4.1 วิเคราะห์ผลของ pH ที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนัก

4.2 วิเคราะห์ผลของปริมาณไม้มะละกอที่มีต่อการดูดซับโลหะหนัก

4.3 วิเคราะห์ผลของระยะเวลาสัมผัสที่มีต่อการดูดซับโลหะหนัก

4.4 วิเคราะห์ประสิทธิภาพการดูดซับของไม้มะละกอในการดูดซับโลหะหนักโดยใช้ไอโซเทอร์มของการดูดซับโลหะหนักของไม้มะละกอโดยไอโซเทอร์มของแลงเมียร์และฟรุนดลิช

4.5 วิเคราะห์ผลจลนพลศาสตร์ของการดูดซับโลหะหนักของไม้มะละกอ

บทที่ 4

ผลการวิเคราะห์ข้อมูล

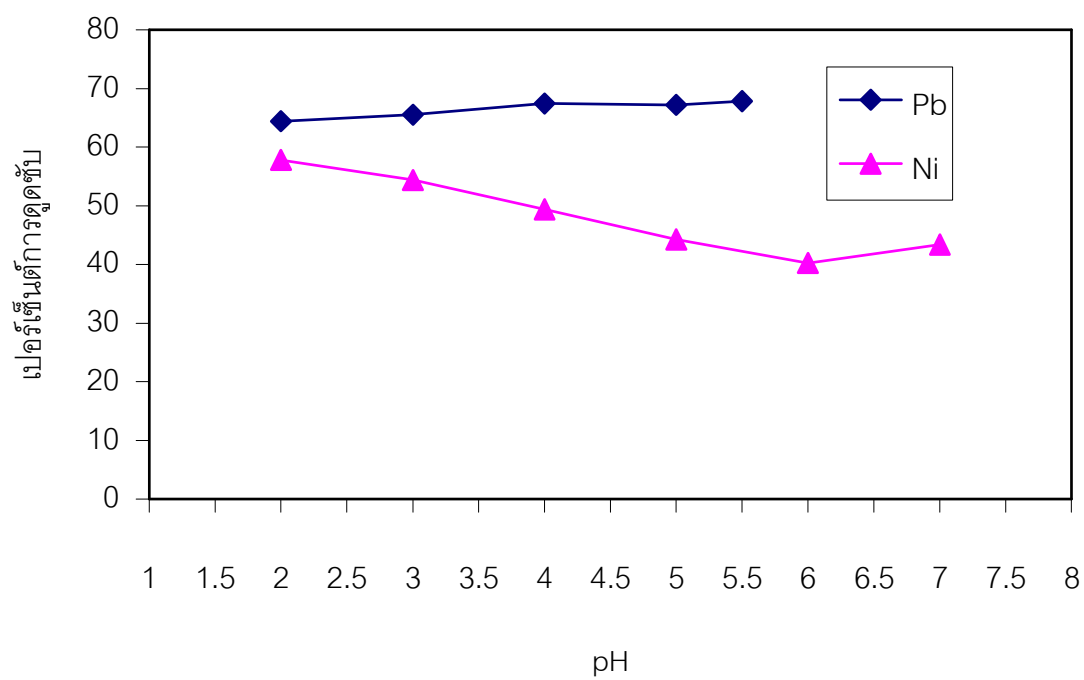
การศึกษาค้นคว้าการดูดซับไอออนตะกั่วและไอออนนิกเกิลจากสารละลายโดยใช้ไม้มะละกอเป็นตัวดูดซับทางชีวภาพ งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของ pH ปริมาณของไม้มะละกอ ช่วงเวลาการสัมผัสต่อการดูดซับโลหะหนัก ไอโซเทอร์มและจลนพลศาสตร์ของการดูดซับโลหะหนักของไม้มะละกอกับสารละลายตะกั่วและสารละลายนิกเกิลในช่วงเวลาที่สัมผัสต่าง ๆ ผลการวิเคราะห์ข้อมูลนำเสนอตามลำดับดังนี้

1. ผลของ pH ที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนัก

จากการทดลองการดูดซับไอออนตะกั่วและนิกเกิลของไม้มะละกอในสภาวะสารละลายที่ pH 2-7 พบว่า ความสามารถในการดูดซับไอออนตะกั่วและนิกเกิลของไม้มะละกอเพิ่มขึ้นเมื่อ pH สูงขึ้น ที่ pH 5.5 มีการดูดซับมากที่สุด 6.78 มิลลิกรัมต่อลิตร (67.80%) และการดูดซับไอออนนิกเกิลของไม้มะละกอมีความสามารถในการดูดซับลดลงเมื่อ pH สูงขึ้น ที่ pH 2 มีการดูดซับมากที่สุด 6.28 มิลลิกรัมต่อลิตร (62.80%) ตามลำดับ ดังนั้นผลของ pH มีผลต่อการดูดซับโลหะหนักของไม้มะละกอที่อุณหภูมิคงที่ ดังปรากฏในตาราง 3 และภาพประกอบ 16

ตาราง 3 ความสามารถในการดูดซับไอออนตะกั่วและนิกเกิลของไม้มะละกอ ที่ pH ต่างๆ

pH	ปริมาณที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	
	ตะกั่ว	นิกเกิล
2	6.44±0.09 (64.40%)	6.28±0.11 (62.80%)
3	6.55±0.08 (65.50%)	5.91±0.12 (59.10%)
4	6.74±0.06 (67.40%)	5.37±0.17 (53.70%)
5	6.72±0.06 (67.20%)	4.80±0.20 (48.00%)
5.5	6.78±0.09 (67.80%)	ไม่ได้ศึกษา
6	ไม่ได้ศึกษา	4.37±0.12 (43.70%)
7	ไม่ได้ศึกษา	4.71±0.20 (47.10%)



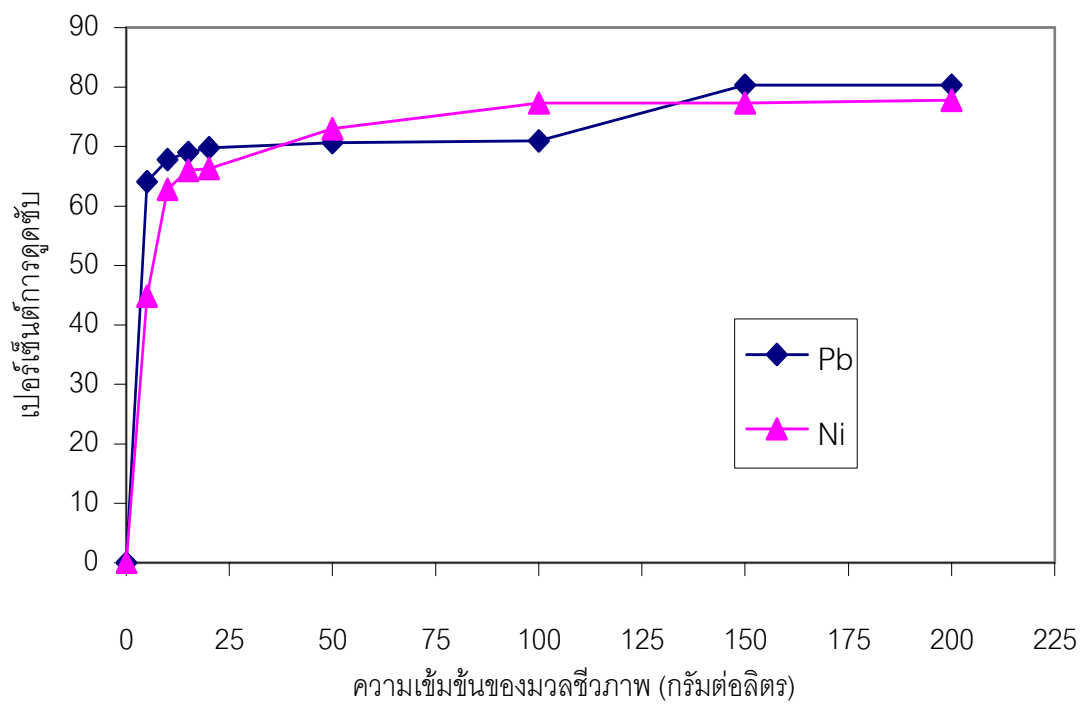
ภาพประกอบ 16 ผลของ pH ที่เหมาะสมในการดูดซับของไอออนตะกั่ว (Pb^{2+}) และนิกเกิล (Ni^{2+})

2. ผลของปริมาณไม้มะละกอที่มีต่อการดูดซับโลหะหนัก

จากการทดลองปริมาณไม้มะละกอที่ใช้ในการดูดซับโลหะหนัก พบว่า ปริมาณไม้มะละกอตั้งแต่ 150 กรัมต่อลิตร มีการดูดซับไอออนตะกั่วสูงสุด 8.03 มิลลิกรัมต่อลิตร (80.30%) และปริมาณไม้มะละกอตั้งแต่ 100 กรัมต่อลิตร มีการดูดซับไอออนนิกเกิลสูงสุด 7.73 มิลลิกรัมต่อลิตร (77.30%) ดังปรากฏในตาราง 4 และภาพประกอบ 17

ตาราง 4 ปริมาณไม้มะละกอที่ใช้ในการดูดซับไอออนตะกั่ว (Pb^{2+}) และนิกเกิล (Ni^{2+})

ปริมาณไม้มะละกอ (กรัมต่อลิตร)	ปริมาณที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	
	ตะกั่ว	นิกเกิล
5	6.41±0.05 (64.10%)	4.48±0.09 (44.80%)
10	6.78±0.09 (67.80%)	6.28±0.12 (62.80%)
15	6.90±0.09 (69.00%)	6.60±0.12 (66.00%)
20	6.98±0.03 (69.80%)	6.63±0.07 (66.30%)
50	7.06±0.03 (70.60%)	7.30±0.12 (73.00%)
100	7.09±0.05 (70.90%)	7.73±0.05 (77.30%)
150	8.03±0.01 (80.30%)	7.73±0.12 (77.30%)
200	8.03±0.02 (80.30%)	7.75±0.02 (77.50%)



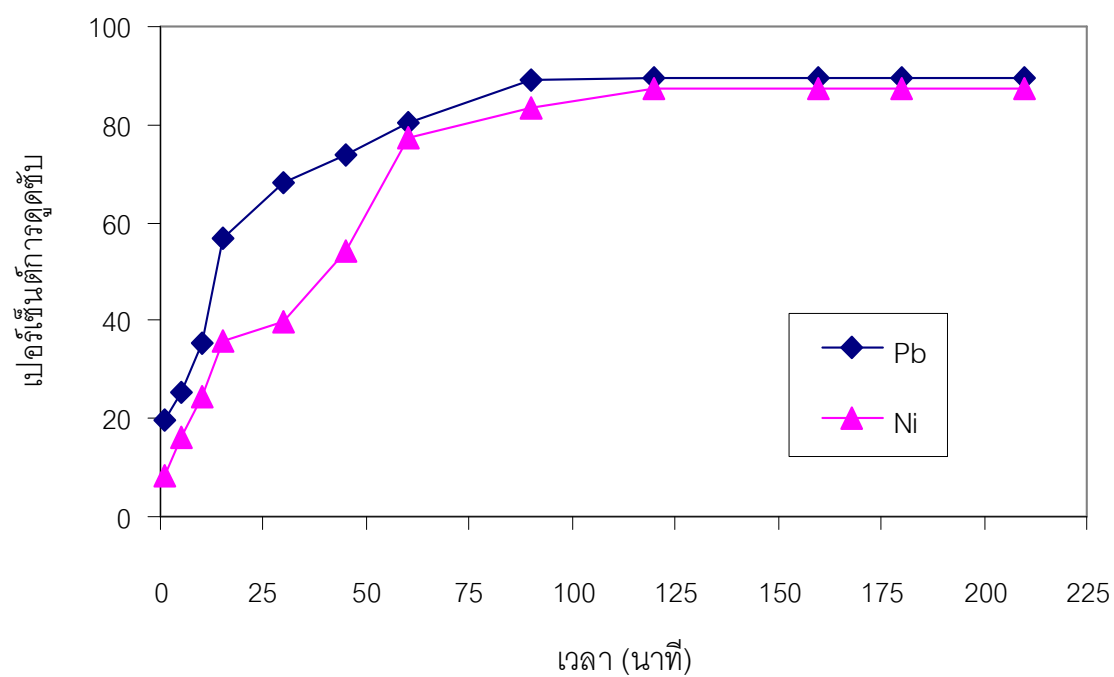
ภาพประกอบ 17 เปอร์เซ็นต์การดูดซับไอออนตะกั่ว (Pb^{2+}) และนิกเกิล (Ni^{2+}) ของไม้มะละกอ

3. ระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนัก

การทดลองระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนตะกั่วและนิกเกิล พบว่า ระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนักของไม้มะละกอ คือที่เวลา 120 นาที มีการดูดซับไอออนตะกั่วสูงสุด 8.94 มิลลิกรัมต่อลิตร (89.40%) และที่เวลา 120 นาที มีการดูดซับไอออนนิกเกิลสูงสุด 8.73 มิลลิกรัมต่อลิตร (87.30%) ดังปรากฏในตาราง 5 และภาพประกอบ 18

ตาราง 5 ระยะเวลาที่เหมาะสมกับการดูดซับไอออนตะกั่ว (Pb^{2+}) และนิกเกิล (Ni^{2+})

เวลา (นาที)	ปริมาณที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	
	ตะกั่ว	นิกเกิล
1	1.98±0.06 (19.80%)	0.81±0.08 (8.10%)
5	2.53±0.10 (25.30%)	1.63±0.05 (16.30%)
10	3.55±0.08 (35.50%)	2.43±0.02 (24.30%)
15	5.67±0.01 (56.70%)	3.56±0.05 (35.60%)
30	6.80±0.07 (68.00%)	3.99±0.04 (39.90%)
45	7.37±0.04 (73.70%)	5.43±0.07 (54.30%)
60	8.03±0.02 (80.30%)	7.73±0.03 (77.30%)
90	8.92±0.01 (89.20%)	8.35±0.04 (83.50%)
120	8.94±0.04 (89.40%)	8.73±0.04 (87.30%)
160	8.94±0.02 (89.40%)	8.73±0.05 (87.30%)
180	8.94±0.01 (89.40%)	8.73±0.04 (87.30%)
210	8.94±0.07 (89.40%)	8.73±0.06 (87.30%)



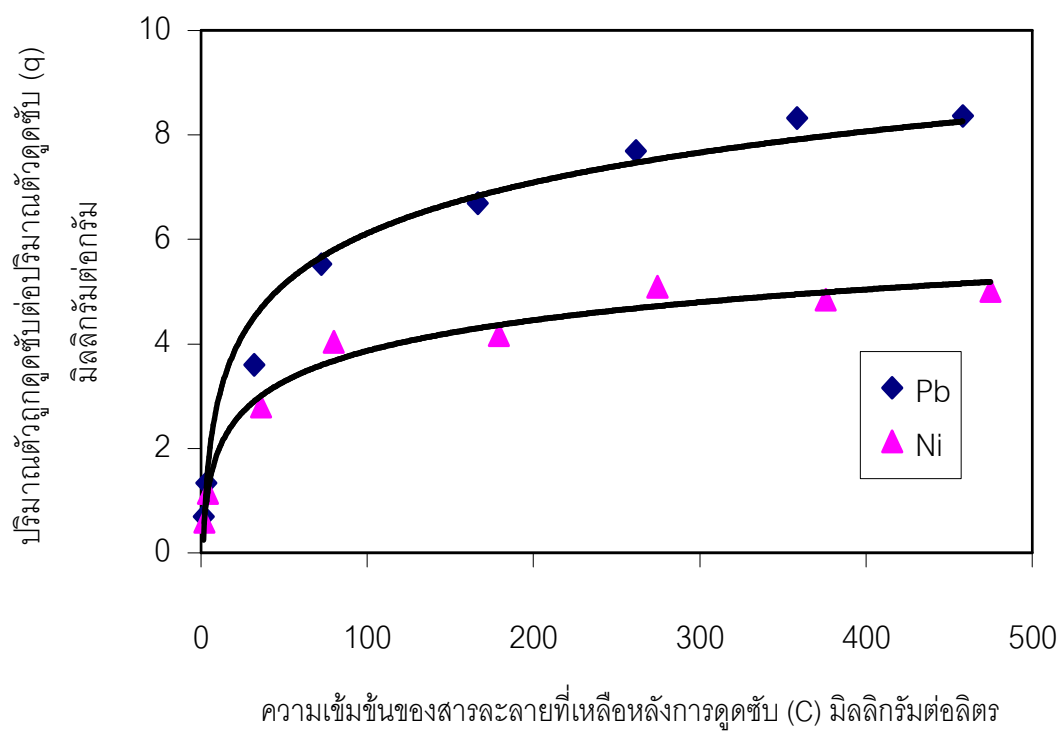
ภาพประกอบ 18 ผลของระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับของไอออนตะกั่ว (Pb^{2+}) และนิกเกิล (Ni^{2+})

4. ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของไม้มะละกอในการดูดซับโลหะหนัก

จากการทดลองการดูดซับของไอออนตะกั่ว (Pb^{2+}) ที่ pH 5.5 และนิกเกิล (Ni^{2+}) ที่ pH 2 ที่ความเข้มข้น 1-500 มิลลิกรัมต่อลิตร อุณหภูมิคงที่ และระยะเวลาที่เหมาะสม 120 นาทีของตะกั่ว และนิกเกิล เพื่อหาประสิทธิภาพการดูดซับของไม้มะละกอ พบว่า การดูดซับไอออนตะกั่วและนิกเกิล สูงสุด q_m เมื่อปริมาณไม้มะละกอกิ่งที่เป็น 8.32 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 5.09 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ดังปรากฏในตาราง 6 และภาพประกอบ 19

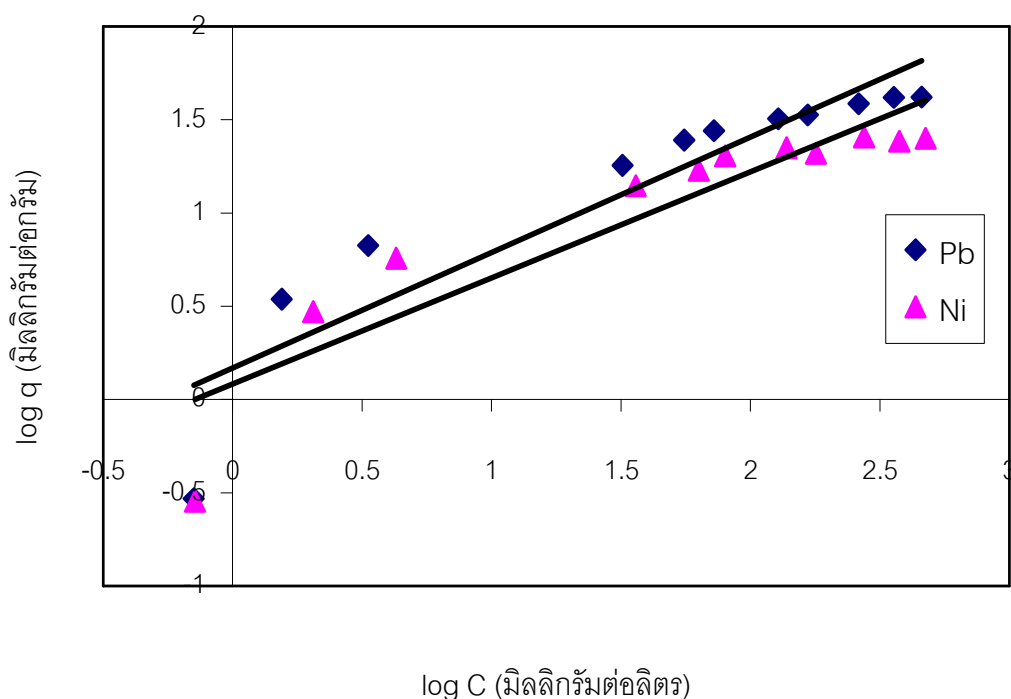
ตาราง 6 ผลการดูดซับไอออนตะกั่ว (Pb^{2+}) และนิกเกิล (Ni^{2+}) ของไม้มะละกอ ที่ระดับความเข้มข้นของ สารละลาย 1-500 มิลลิกรัมต่อลิตร

ความเข้มข้น ของสารละลาย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นของสารละลายที่เหลือ หลังการดูดซับ (มิลลิกรัมต่อลิตร)		ปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับต่อ ปริมาณไม้มะละกอ (มิลลิกรัมต่อกรัม)	
	ตะกั่ว	นิกเกิล	ตะกั่ว	นิกเกิล
1	0.71	0.72	0.06±0.04	0.06±0.08
5	3.91	4.33	0.69±0.05	0.59±0.25
10	5.67	7.52	1.34±0.08	1.14±0.02
20	9.26	15.17	3.60±0.10	2.79±0.04
50	28.35	36.01	4.92±0.07	3.38±0.10
80	49.79	63.05	5.53±0.04	4.04±0.04
160	118.53	138.42	6.39±0.06	4.46±0.09
300	256.42	274.29	6.69±0.06	4.16±0.12
400	354.85	375.77	7.69±0.02	5.09±0.44
500	453.86	474.85	8.32±0.02	4.85±0.31



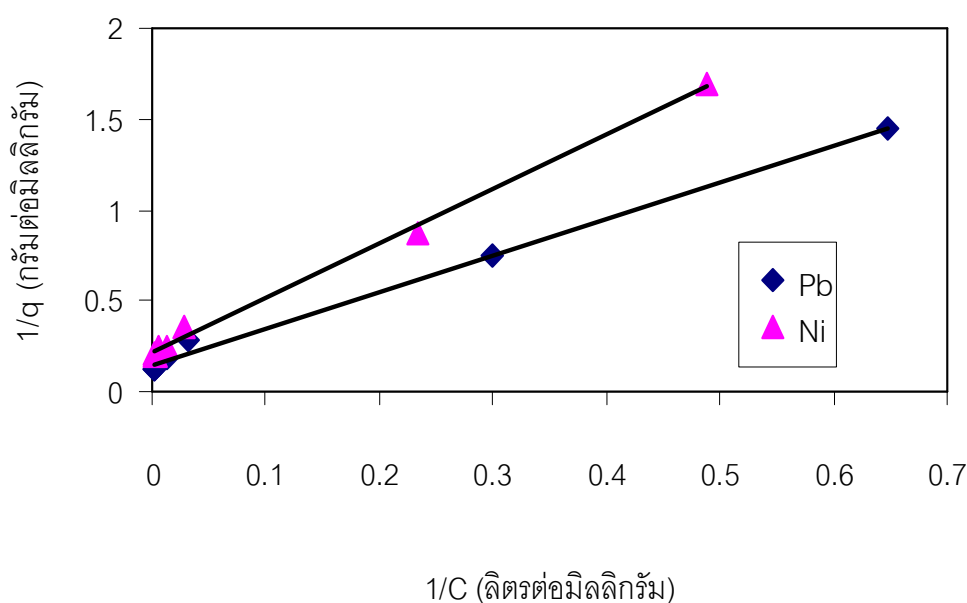
ภาพประกอบ 19 ผลการดูดซับไอออนตะกั่ว (Pb^{2+}) และนิกเกิล (Ni^{2+}) ของไม้มะละกอ ที่ระดับความเข้มข้นของสารละลาย 1-500 มิลลิกรัมต่อลิตร

ถ้าพิจารณาไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรอนด์ลิซจากสมการ (2.7) เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log q$ กับ $\log C$ จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $\frac{1}{n}$ และมีจุดตัดเท่ากับ $\log K$ พบว่า ผลการดูดซับไอออนตะกั่วเป็นไปตามสมการ $y = 0.62x + 0.17$ ค่า $R^2 = 0.85$ มีค่าความสามารถในการดูดซับไอออนตะกั่ว ($\frac{1}{n}$) = 0.62 ค่าความจุจำเพาะของการดูดซับ (K) = 1.48 และการดูดซับไอออนนิกเกิลเป็นไปตามสมการ $y = 0.57x + 0.08$ ค่า $R^2 = 0.84$ มีค่าความสามารถในการดูดซับไอออนนิกเกิล ($\frac{1}{n}$) = 0.57 ค่าความจุจำเพาะของการดูดซับ (K) = 1.21 ตามลำดับ ดังภาพประกอบ 20



ภาพประกอบ 20 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของฟรอนด์ลิซ สำหรับการดูดซับไอออนตะกั่ว (Pb^{2+}) และนิกเกิล (Ni^{2+})

สำหรับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์ การดูดซับไอออนตะกั่ว (Pb^{2+}) และ นิกเกิล (Ni^{2+}) พิจารณาสมการ (2.9) เขียนกราฟระหว่าง $\frac{1}{q}$ และ $\frac{1}{C}$ จะได้กราฟเส้นตรงมีความชัน เท่ากับ $\frac{1}{q_m K}$ และจุดตัดเท่ากับ $\frac{1}{q_m}$ พบว่า การดูดซับไอออนตะกั่วเป็นไปตามสมการ $y = 2.02x + 0.14$ ค่า $R^2 = 0.99$ และการดูดซับสูงสุดที่ไม่จะละกอดูดซับได้ 7.02 มิลลิกรัมต่อกรัม มีค่าคงที่การดูดซับ (K) เท่ากับ 0.07 ลิตรต่อมิลลิกรัม ส่วนสมการการดูดซับไอออนนิกเกิลเป็นไปตาม สมการ $y = 3.00x + 0.21$ ค่า $R^2 = 0.99$ และการดูดซับสูงสุดที่ไม่จะละกอดูดซับได้ 4.76 มิลลิกรัมต่อ กรัม มีค่าคงที่การดูดซับ (K) เท่ากับ 0.07 ลิตรต่อมิลลิกรัม ตามลำดับ ดังภาพประกอบ 21



ภาพประกอบ 21 ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบเชิงเส้นของแลงเมียร์ สำหรับการดูดซับไอออนตะกั่ว (Pb^{2+}) และนิกเกิล (Ni^{2+})

พารามิเตอร์ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์และฟรุนดลิช สรุปดังปรากฏในตาราง 7

ตาราง 7 การเปรียบเทียบไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ และฟรุนดลิช ของการดูดซับไอออนตะกั่ว (Pb^{2+}) และนิกเกิล (Ni^{2+})

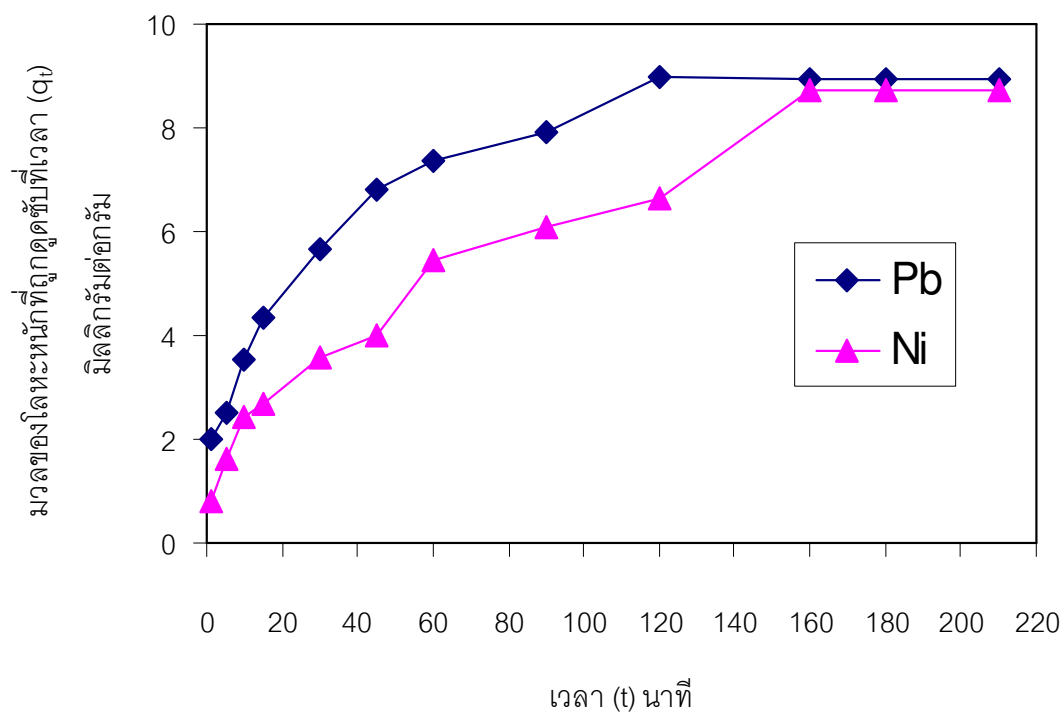
ไอออนโลหะหนัก	pH	q_m จากการทดลอง (มิลลิกรัมต่อกกรัม)	แลงเมียร์			ฟรุนดลิช		
			q_m	K	R^2	K	$\frac{1}{n}$	R^2
Pb	5.5	8.32	7.02	0.07	0.99	1.48	0.62	0.85
Ni	2	5.09	4.76	0.07	0.99	1.21	0.57	0.84

5. จลนพลศาสตร์ของการดูดซับโลหะหนักของไม้มะละกอ

จากการทดลองการดูดซับของไอออนตะกั่ว (Pb^{2+}) ที่ pH 5.5 และนิกเกิล (Ni^{2+}) ที่ pH 2 ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร สัมผัสไม้มะละกอ 5 กรัมต่อลิตร ที่เวลา 1-210 นาที เพื่อวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ของการดูดซับโลหะหนัก พบว่า การดูดซับไอออนโลหะหนักของไม้มะละกอในช่วงเวลา 1-210 นาที มวลของไอออนตะกั่วและนิกเกิลที่ถูกดูดซับต่อมวลไม้มะละกอที่ภาวะสมดุลมีค่า 8.94 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 8.73 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ดังปรากฏในตาราง 8 และภาพประกอบ 22

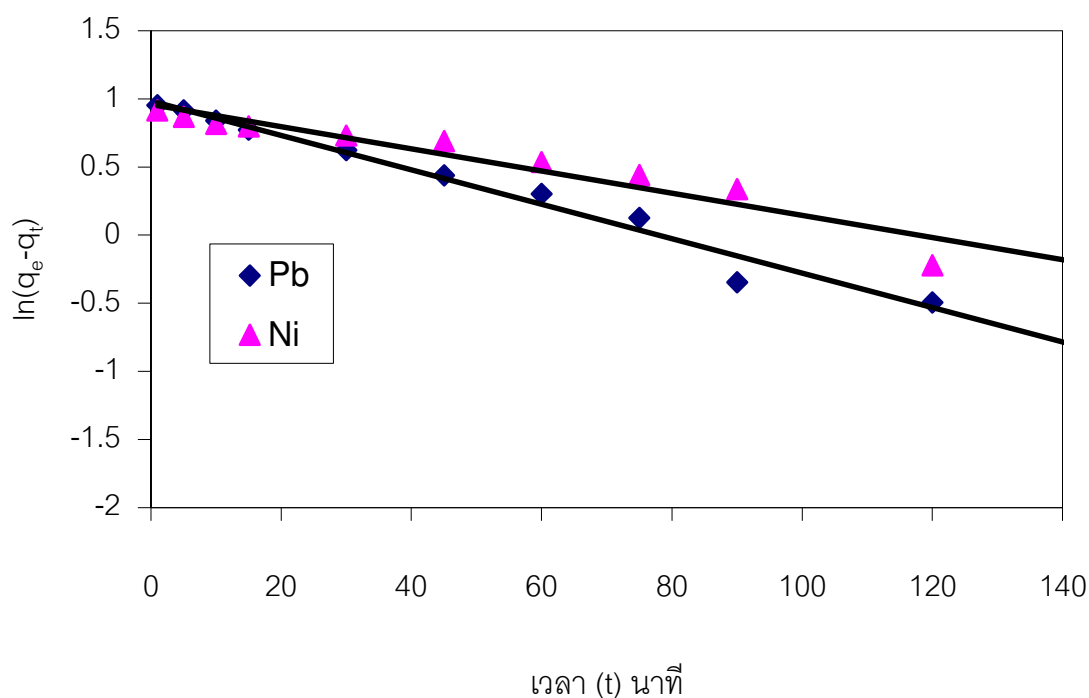
ตาราง 8 ผลการดูดซับไอออนตะกั่ว (Pb^{2+}) และนิกเกิล (Ni^{2+}) ของไม้มะละกอ ที่เวลาต่าง ๆ

เวลา (นาที)	มวลของโลหะที่ถูกดูดซับที่เวลา t (q_t) (มิลลิกรัมต่อกรัม)		สมดุลมวลของโลหะที่ถูกดูดซับ (q_e) (มิลลิกรัมต่อกรัม)	
	ตะกั่ว	นิกเกิล	ตะกั่ว	นิกเกิล
1	1.98±0.06	0.81±0.08	8.94	8.73
5	2.53±0.10	1.63±0.05	8.94	8.73
10	3.55±0.08	2.43±0.02	8.94	8.73
15	4.32±0.01	2.68±0.05	8.94	8.73
30	5.67±0.07	3.56±0.04	8.94	8.73
45	6.80±0.04	3.99±0.07	8.94	8.73
60	7.37±0.02	5.43±0.03	8.94	8.73
90	7.90±0.01	6.07±0.04	8.94	8.73
120	8.97±0.04	6.63±0.05	8.94	8.73
160	8.91±0.02	8.73±0.04	8.94	8.73
180	8.94±0.02	8.73±0.04	8.94	8.73
210	8.94±0.01	8.73±0.06	8.94	8.73



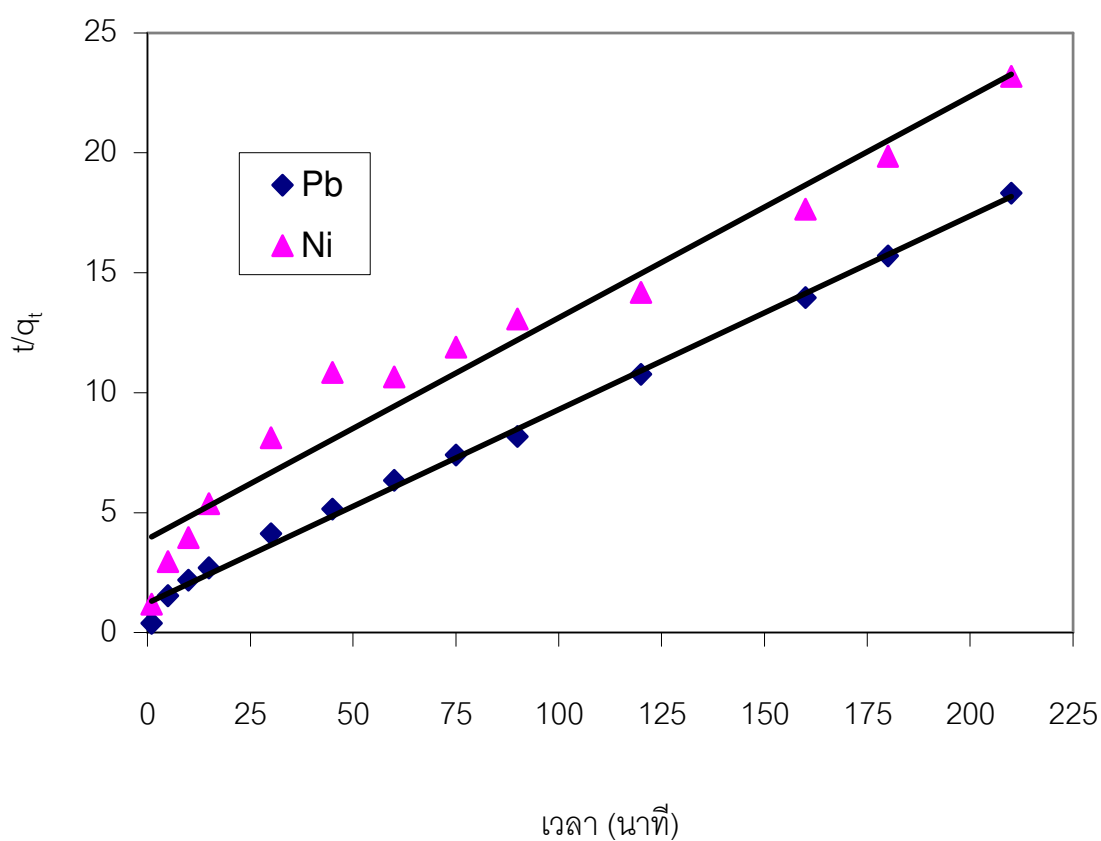
ภาพประกอบ 22 ผลการดูดซับไอออนตะกั่ว (Pb^{2+}) และนิเกิล (Ni^{2+}) ของไม้มะละกอ ที่เวลาต่าง ๆ

พิจารณาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับสำหรับปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมจากสมการ (2.13) เขียนกราฟระหว่างค่าของ $\ln(q_e - q_t)$ กับเวลา t จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชัน $-K_1$ และจุดตัด $\ln q_e$ พบว่า กลไกการเกิดปฏิกิริยาของการดูดซับไอออนโลหะหนักมีรูปแบบปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมของการดูดซับไอออนตะกั่วของไม้มะละกอก็มีความสัมพันธ์กับสมการ $y = -0.01x + 0.98$ มีค่า $R^2 = 0.98$, $K=0.01$ ต่อหน้าที่ $q_e=2.66$ มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนรูปแบบการดูดซับไอออนนิกเกิลของไม้มะละกอก็มีความสัมพันธ์กับสมการ $y = -0.01x + 0.96$ มีค่า $R^2 = 0.92$, $K=0.01$ ต่อหน้าที่ $q_e=2.61$ มิลลิกรัมต่อกรัม ดังภาพประกอบ 23



ภาพประกอบ 23 ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมของการดูดซับไอออนตะกั่ว (Pb^{2+}) และนิกเกิล (Ni^{2+})

สำหรับปฏิกิริยอันดับสองเทียมจากสมการ (2.14) เขียนกราฟระหว่าง $\frac{t}{q_t}$ กับเวลา t จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชัน $\frac{1}{q_e}$ จุดตัดแกน $\frac{1}{K_2 q_e^2}$ พบว่า การดูดซับไอออนตะกั่วเป็นไปตามสมการ $y = 0.08x + 1.23$ มีค่า $R^2 = 0.99$, $q_e = 12.39$ มิลลิกรัมต่อกรัม $K_2 = 5.28$ กรัมต่อมิลลิกรัมต่อนาที่ และปฏิกิริยอันดับสองเทียมของการดูดซับไอออนนิกเกิลเป็นไปตามสมการ $y = 0.09x + 3.89$ มีค่า $R^2 = 0.95$, $q_e = 10.83$ มิลลิกรัมต่อกรัม $K_2 = 2.19$ กรัมต่อมิลลิกรัมต่อนาที่ ดังภาพประกอบ 24



ภาพประกอบ 24 ปฏิกิริยอันดับสองเทียมของการดูดซับไอออนตะกั่ว (Pb^{2+}) และนิกเกิล (Ni^{2+})

ค่าคงที่สำหรับปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมและอันดับสองเทียมของการดูดซับไอออนตะกั่วและไอออนนิกเกิลของไม้มะละกอ สรุปดังปรากฏในตาราง 9

ตาราง 9 ค่าคงที่ได้จากการคำนวณของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมและอันดับสองเทียมของการดูดซับไอออนตะกั่ว (Pb^{2+}) และนิกเกิล (Ni^{2+})

ไอออนโลหะหนัก	ค่า q_e จากการทดลอง (มิลลิกรัมต่อกรัม)	ค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม			ค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับสองเทียม		
		q_e	K_1	R^2	q_e	$K_2(\times 10^{-3})$	R^2
Pb	8.94	2.66	0.01	0.98	12.39	5.28	0.99
Ni	8.73	2.61	0.01	0.92	10.83	2.19	0.95

บทที่ 5

สรุปผล อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

การวิจัยครั้งนี้มีจุดมุ่งหมายสำคัญเพื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับโลหะหนักของไม้มะละกอ ไอโซเทอร์ม และจลนพลศาสตร์ของการดูดซับโลหะหนักของไม้มะละกอ งานวิจัยนี้ได้ออกแบบการทดลองในตรวสอบการดูดซับไอออนตะกั่วและนิกเกิลจากสารละลายที่มีความเข้มข้น 10.00 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับให้มีความเป็นกรด-เบส ด้วยสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ในช่วง pH 2-7 นำไปสัมผัสกับไม้มะละกอที่มีน้ำหนักและเวลาคงที่ เพื่อศึกษาผลของ pH ของสารละลายโลหะหนักที่เหมาะสมในการดูดซับ ปริมาณของไม้มะละกอและเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับที่ pH คงที่ ขั้นสุดท้าย หาค่าประสิทธิภาพการดูดซับของไม้มะละกอในการดูดซับโลหะหนักโดยใช้ไม้มะละกอที่มีน้ำหนักและ pH คงที่ สัมผัสกับสารละลายที่เวลาต่างๆ ตั้งแต่ 1 – 210 นาที โดยใช้สมการการดูดซับของแลงเมียร์ และฟรุนดลิช และศึกษาจลนพลศาสตร์ของการดูดซับโลหะหนักของไม้มะละกอ จากนั้นวิเคราะห์ผลของ pH ต่อการดูดซับ ความสัมพันธ์ระหว่างตัวถูกดูดซับกับตัวดูดซับ ความสามารถในการดูดซับ ไอโซเทอร์มและจลนพลศาสตร์ของการดูดซับโลหะหนักของไม้มะละกอในช่วงเวลาที่สัมผัสต่าง ๆ

สรุปผลการวิจัย

ความสามารถในการดูดซับไอออนตะกั่วของไม้มะละกอ พบว่า ความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อ pH สูงขึ้นที่ pH 5.5 มีการดูดซับสูงสุดคิดเป็น 67.80% ส่วนการดูดซับไอออนนิกเกิลของไม้มะละกอมีความสามารถในการดูดซับลดลงเมื่อ pH สูงขึ้น ที่ pH 2 มีการดูดซับสูงสุดคิดเป็น 62.80% ดังนั้น pH มีผลต่อการดูดซับไอออนโลหะหนักของไม้มะละกอที่อุณหภูมิคงที่ ผลของปริมาณไม้มะละกอที่มีต่อการดูดซับไอออนโลหะหนัก พบว่าเมื่อปริมาณของโลหะหนักในสารละลายคงที่ที่ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ไม้มะละกอปริมาณ 150 กรัมต่อลิตร สามารถดูดซับไอออนตะกั่วได้สูงสุด 8.03 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่ไม้มะละกอปริมาณ 100 กรัมต่อลิตร สามารถดูดซับไอออนนิกเกิลได้สูงสุด 7.73 มิลลิกรัมต่อลิตร และระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนตะกั่วและนิกเกิลของไม้มะละกอเท่ากันคือ 120 นาที ตามลำดับ

ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนโลหะหนักของไม้มะละกอ พบว่า การดูดซับไอออนตะกั่วและนิกเกิลโดยไม้มะละกอเป็นการดูดซับแบบ monolayer คือไอออนโลหะหนักถูกดูดซับไว้เพียงชั้นเดียวบนผิวของไม้มะละกอ การดูดซับไอออนตะกั่วและนิกเกิลสูงสุด 8.32 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 5.09 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ไอโซเทอร์มการดูดซับสอดคล้องกับสมการแลงเมียร์

จลนพลศาสตร์ของการดูดซับไอออนโลหะหนักของไม้มะละกอ พบว่า การดูดซับไอออนตะกั่ว และนิกเกิลต่อมวลตัวดูดซับที่ภาวะสมดุลมีค่า 8.94 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 8.73 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ และจลนพลศาสตร์ของการดูดซับเป็นปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

อภิปรายผล

จากผลการทดลองสามารถอภิปรายผลในประเด็นสำคัญได้ดังนี้

การดูดซับไอออนตะกั่วของไม้มะละกอมีความสามารถในการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อ pH สูงขึ้น ที่ pH 5.5 มีการดูดซับมากที่สุด 67.80% และการดูดซับไอออนนิกเกิลของไม้มะละกอมีความสามารถในการดูดซับลดลงเมื่อ pH สูงขึ้น ที่ pH 2 มีการดูดซับมากที่สุด 62.80% ที่ pH ต่ำหรือสูงกว่านี้คือ pH 5.5 สำหรับไอออนตะกั่ว และ pH 2 สำหรับไอออนนิกเกิล จะมีค่าการดูดซับลดลง เนื่องจาก pH มีผลต่อการละลายของโลหะหนัก โดยโลหะตะกั่วสามารถแตกตัวอยู่ในรูป Pb^{2+} ได้ดีที่ pH ต่ำกว่า 5.5 ส่วนนิกเกิลแตกตัวอยู่ในรูป Ni^{2+} ได้ดีที่ pH ต่ำกว่า 11 ที่ระดับสูงกว่านี้ไอออนตะกั่วและนิกเกิลจะเริ่มตกตะกอน ซึ่งไม้มะละกอไม่สามารถดูดซับได้ (Abollino O.; et al. 2000: 223-237) ที่ pH ยิ่งต่ำโลหะหนักจะแตกตัวเป็นไอออนได้ดี ขณะเดียวกันในสารละลายจะมีไฮโดรเจนไอออน (H^+) มากด้วยเช่นกัน แต่ H^+ ถูกดูดซับได้ดีกว่าทำให้ปริมาณไอออนของตะกั่ว (Pb^{2+}) และนิกเกิล (Ni^{2+}) ถูกดูดซับได้น้อยลง (Tobin J.M.; et al. 1984: 821)

จากการศึกษาครั้งนี้ pH ของสารละลายตะกั่วที่เหมาะสมต่อการดูดซับของไม้มะละกอ มีค่าอยู่ในช่วงเดียวกันกับการดูดซับด้วยเปลือกส้มดัดแปลง pH ที่เหมาะสมคือ 4.5-6.0 (Chen Z.; et al. 2006: 160) และถ่านกัมมันต์ pH เหมาะสม 3 5 และ 7 ตามลำดับ (Li; et al. 2002: 263-269) สำหรับ pH ของสารละลายนิกเกิลที่เหมาะสมต่อการดูดซับโดยใช้ไม้มะละกอ มีค่าต่ำกว่าเก้าแถบ (ฉัฐมณฑน์ เข้มเกตุ และคนอื่นๆ. 2549: 1) สำหรับ *Ulva* ที่ตายแล้ว (Suzuki Y.; et al. 2005: 1803) และสำหรับ *Undaria pinnatifida* (Chen Z.; et al. 2007: 1) เป็นตัวดูดซับ ซึ่งมีค่า pH ที่เหมาะสม คือ 7 7.8 และ 4.7 ตามลำดับ แสดงว่า pH ของสารละลายโลหะหนักที่เหมาะสมต่อการดูดซับของตัวดูดซับนั้น นอกจากขึ้นกับการแตกตัวของโลหะหนักเป็นไอออน ยังขึ้นกับลักษณะของตัวดูดซับด้วย

ผลของปริมาณไม้มะละกอต่อการดูดซับไอออนโลหะหนัก พบว่าเมื่อปริมาณไม้มะละกอสูงขึ้น การดูดซับไอออนตะกั่วและนิกเกิลสูงขึ้นจนกระทั่งเข้าสู่ภาวะสมดุล ในช่วงความเข้มข้นของไม้มะละกอต่ำการดูดซับไอออนทั้งสองจะเกิดขึ้นได้เร็ว และการดูดซับไอออนตะกั่วดีกว่าไอออนนิกเกิล ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อปริมาณไม้มะละกอมากขึ้นพื้นผิวของการดูดซับของไม้มะละกอเพิ่มขึ้นทำให้การดูดซับไอออนโลหะหนักได้ดี (Goyal N.; et al. 2003: 311) การทดลองนี้ให้ผลสอดคล้องกับการทดลองโดยใช้เซลล์สาหร่าย *S. dimorphus* ดูดซับตะกั่วและแคดเมียม (สุนิรัตน์ เรืองสมบูรณ์ . 2547:42-47) และ

สอดคล้องกับการดูดซับไอออนโลหะหนักทองแดง แคดเมียม และสังกะสี จากสารละลายโดยใช้ไม้มะละกอบเป็นตัวดูดซับชีวภาพ (Saeed A.; et al. 2005: 25-31)

ผลของระยะเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนตะกั่วและนิกเกิลพบว่า เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 60 นาทีแรก เนื่องจากพื้นที่ผิวของไม้มะละกอร่าง หลังจากนั้นปริมาณไอออนโลหะหนักที่ถูกดูดซับจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย และการดูดซับไอออนตะกั่วและนิกเกิลถึงจุดสมดุลที่เวลา 120 นาที (ภาพประกอบ 18) การทดลองนี้ยังแสดงให้เห็นว่าไม้มะละกามีประสิทธิภาพการดูดซับไอออนตะกั่วดีกว่าไอออนนิกเกิล ความแตกต่างของประสิทธิภาพนี้เกิดขึ้นจากความแตกต่างของขนาดของไอออนของโลหะทั้งสอง ธรรมชาติ การกระจายของไม้มะละกอ และอันตรกิริยาระหว่างไอออนโลหะหนักกับไม้มะละกอ ในการดูดซับไอออนโลหะหนักจะแบ่งได้เป็น 2 ช่วง คือ ช่วงที่ 1 จะเกิดขึ้นเร็ว และช่วงที่ 2 เกิดขึ้นอย่างช้า ๆ ซึ่งในช่วงแรกมีตั้งแต่หลายนาฬิกาไปจนถึง 1-2 ชั่วโมง ขณะที่ช่วงที่ 2 อาจกินเวลาตั้งแต่หลายชั่วโมงถึงเป็นวัน ช่วงแรกที่เกิดขึ้นเร็วอธิบายได้จากการมีอยู่มากของบริเวณสัมผัสที่ยังไม่จับกับไอออนโลหะหนัก ต่อมาเมื่อบริเวณที่เกิดปฏิกิริยาเริ่มลดลงทำให้ความว่องไวของปฏิกิริยาน้อยลงไปด้วย นอกจากนี้ไอออนโลหะหนักที่ถูกดูดซับได้เร็วเป็นเพราะโครงสร้างที่พรุนของไม้มะละกอและมีพื้นที่ผิวมากสำหรับเกิดปฏิกิริยา แต่ก็มีข้อจำกัดในการแพร่ที่อาจจะเกิดขึ้นได้

ระยะเวลาที่ไม้มะละกอใช้ในการดูดซับตะกั่วจนถึงจุดสมดุลนั้นมากกว่าการกำจัดและนำกลับมาใช้ใหม่ของโลหะหนักจากสารละลายโดยใช้ไม้มะละกอบเป็นตัวดูดซับชีวภาพ คือทองแดง แคดเมียมและสังกะสีที่จุดสมดุลที่เวลา 60 นาที (Saeed A.; et al. 2005: 25-31) ส่วนอัตราการดูดซับแคดเมียมจากสารละลายโดยการใส่เกลบบำบัด พบว่าการดูดซับจนถึงจุดสมดุลที่เวลา 10 ชั่วโมงสำหรับเกลบบดบ สำหรับเกลบที่ผ่านกระบวนการด้วยอีพิกลอโรไฮดริน โซเดียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมไบคาร์บอเนต มีการดูดซับจนถึงสมดุลที่เวลา 2, 4 และ 1 ชั่วโมงตามลำดับ (Kumar U.; Bandyopadhyay M.. 2006: 104-109) การดูดซับทองแดง ตะกั่ว และแคดเมียมด้วยสาหร่ายทะเล *Ecklonia maxima* พบว่าจุดสมดุลที่เวลา 60 นาที (Feng D.; Aldrich C.. 2004: 1-10) การดูดซับนิกเกิลที่วางไว้อิสระและถูกทำให้เคลื่อนที่ไม่ได้จากเซลล์สาหร่ายมีสมดุลการดูดซับที่เวลา 120 นาที (Abu Al-Rub; et al. 2004: 1767-1773) การนำเชื้อราบรจุในโครงสร้างตาข่ายของไม้มะละกอซึ่งใช้ในการดูดซับไอออนสังกะสี พบว่าอัตราการดูดซับเกิดขึ้นเร็วในช่วงเริ่มต้น 30 นาทีแรกของการดูดซับและถึงจุดสมดุลที่เวลา 60 นาที (Iqbal M. And Saeed A.. 2006: 996-1001) การดูดซับปรอทบนไม้มะละกอ :การทดลองและรูปแบบการดูดซับแบบ BET พบว่า การดูดซับปรอทมีจุดสมดุลที่เวลา 120 นาที (Basha S.; et al. 2009: 226-234) การดูดซับไอออนของแคดเมียม ทองแดง นิกเกิล และสังกะสีจากสารละลายโดยใช้สาหร่ายสีน้ำตาล พบว่า การดูดซับมีจุดสมดุลที่เวลาประมาณ 120 นาที (Liu; et al. 2009: 931-938)

การดูดซับไอออนตะกั่วและนิกเกิลโดยไม้มะละกอสามารถอธิบายด้วยไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์ และฟรุนดลิช ข้อมูลจากการทดลองสอดคล้องกับไอโซเทอร์มโดและพิจารณาจาก 2 พารามิเตอร์ที่คำนวณได้จากวิธีถดถอยเชิงเส้น และสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (regression coefficient : R^2) (กัลยา วาณิชยปัญญา. 2542) ความสามารถในการดูดซับโลหะหนักสูงสุด q_m จากการคำนวณด้วยสมการแลงเมียร์ พบว่า ไม้มะละกอสามารถดูดซับไอออนตะกั่วได้ดีกว่าไอออนนิกเกิล และค่า q_m สอดคล้องกับผลการทดลอง ค่า R^2 ใกล้เคียง 1 ดังปรากฏในตาราง 7 เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการดูดซับของไม้มะละกอในการดูดซับไอออนโลหะหนักโดยใช้ไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟรุนดลิช พบว่าค่า $\frac{1}{n}$ ของไอออนตะกั่ว และนิกเกิลมีค่าน้อยกว่า 1 อธิบายได้ว่าไม้มะละกอสามารถดูดซับไอออนตะกั่วและนิกเกิลต่ำในทุกค่าของความเข้มข้น C หรือมีปริมาณพื้นผิวบนตัวดูดซับในปริมาณจำกัดในการดูดซับ ค่า K ซึ่งแสดงความจุจำเพาะของการดูดซับของไอออนตะกั่วสูงกว่าไอออนนิกเกิล ปรากฏในตาราง 7 แสดงว่าไม้มะละกอมีความสามารถดูดซับไอออนตะกั่วได้มากกว่านิกเกิลซึ่งสอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับแบบแลงเมียร์

ผลการทดลองใช้ไม้มะละกอในการดูดซับไอออนตะกั่วสูงสุดต่ำกว่าการใช้เซลล์สาหร่าย *S. dimorphus* ซึ่งดูดซับตะกั่วได้ 123.46 มิลลิกรัมต่อกรัม (สุนิรัตน์ เนื่องสมบูรณ์. 2547:42-47) ผลการดูดซับยังต่ำกว่าการใช้ถ่านกัมมันต์จากสาหร่ายซึ่งดูดซับตะกั่วได้ 149 มิลลิกรัมต่อกรัม (Park H.G.; et al. 2007: 1371-1377) และต่ำกว่าการใช้สาหร่ายขนาดเล็ก *Chlamydomonas reinhardtii* ซึ่งดูดซับตะกั่วได้สูงสุด 285.7 มิลลิกรัมต่อกรัม (Bayramoglu G.; et al. 2006: 35-43) และต่ำกว่าการใช้ *Shaeorotilus natans* มีค่าการดูดซับสูงสุด 134.55 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่ pH 5 (Pagnanelli F.; et al. 2003: 627-633) ส่วนการดูดซับไอออนนิกเกิลสูงสุดสามารถดูดซับได้สูงกว่าการใช้ถ่านแกลบและแบคทีเรีย *Bacillus subtilis* ซึ่งดูดซับได้สูงสุด 4.032 มิลลิกรัมต่อกรัม (จิ๋วสมณชนัน แยมเกตุ และคนอื่นๆ. 2547: 1) และการดูดซับสูงกว่าการใช้เปลือกแพลงก์ตอนพืชดูดซับไอออนนิกเกิลจากสารละลาย 0.036 มิลลิกรัมต่อกรัม (ดลเดช ตั้งตระการพงษ์ และภาณุมาศ พรหมเทศ. 2548: 2)

นอกจากนี้มีรายงานการศึกษาการดูดซับโลหะหนักโดยการใช้ซีโอไลต์กำจัดแคดเมียม ตะกั่วปรอท และสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่าการดูดซับไอออนแคดเมียม และตะกั่ว เป็นแบบฟรุนดลิช เมื่อพิจารณาค่า n ที่มีค่าต่ำกว่า 1 ส่วนปรอทและสังกะสีพบว่าการดูดซับแบบแลงเมียร์ เมื่อพิจารณาค่า n ที่มีค่าสูงกว่า 1 ตามลำดับ (วัฒนชัย อยู่ในวงศ์. 2546) การดูดซับทางชีวภาพของไอออนปรอท แคดเมียม และตะกั่วจากสารละลายโดยใช้สาหร่ายขนาดเล็ก *Chlamydomonas reinhardtii* ที่ถูกทำให้อยู่ในเม็ดสาหร่ายเคลือบที่ไม่ได้ พบว่า มีการดูดซับแบบแลงเมียร์ของโลหะหนักทุกชนิด (Bayramoglu G.; et al. 2006: 35-43) การกำจัดตะกั่วในน้ำเสียโดยสาหร่ายอบแห้ง *Sagassum polycystum* และ *Hydrilla verticillata* (L.f.) Royle พบว่าสาหร่าย *Sagassum polycystum* อบแห้ง

สามารถดูดซับตะกั่วได้สูงสุด 169.49 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่ pH 5 ส่วนสาหร่าย *Hydrilla verticillata* (L.f.) Royle อบแห้งสามารถดูดซับตะกั่วได้สูงสุด 100.00 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่ pH 5 และสองแบบนี้มีการดูดซับแบบแลงเมียร์ (มารุต ไหลสกุล. 2546) และการดูดซับปรอทบนไม้มะละกอ: การทดลองและรูปแบบการดูดซับแบบ BET พบว่า การดูดซับปรอทมีค่าสูงสุด 155.6 มิลลิกรัมต่อกรัม บนผิวสัมผัสชั้นเดียวตามสมการแลงเมียร์เช่นกัน (Basha S.; et al. 2009: 226-234)

จลนพลศาสตร์ของการดูดซับไอออนโลหะหนักของไม้มะละกอ พบว่า อัตราเร็วของการดูดซับไอออนตะกั่วสูงกว่าไอออนนิกเกิลและการดูดซับเข้าสู่ภาวะสมดุลที่เวลา 120 นาที สำหรับไอออนตะกั่วและเวลา 160 นาที สำหรับไอออนนิกเกิล (ภาพประกอบ 22) อัตราการดูดซับก่อนเข้าสู่ภาวะสมดุลมี 2 ขั้นตอน สำหรับไอออนตะกั่วขั้นตอนแรกเกิดขึ้นเร็วภายในระยะเวลา 90 นาที หลังจากนั้นเกิดขึ้นช้าจนถึง 120 นาที ส่วนไอออนนิกเกิลขั้นตอนแรกเกิดขึ้นเร็วภายในระยะเวลา 60 นาที หลังจากนั้นเกิดขึ้นช้าจนถึง 160 นาที แสดงว่าขั้นตอนที่ 2 เป็นขั้นตอนกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับของไอออนโลหะหนักทั้งสอง การดูดซับไอออนโลหะหนักทั้งสองด้วยไม้มะละกอจัดเป็นปฏิกิริยาอันดับสองเทียมซึ่งพิจารณาได้จากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) สูงใกล้เคียง 1 และค่าการดูดซับโลหะหนักต่อน้ำหนักไม้มะละกอที่ภาวะสมดุลสอดคล้องกับผลการทดลอง ดังปรากฏในตาราง 9

การทดลองนี้สอดคล้องกับรายงานการวิจัยเรื่องการศึกษาสมดุลและเทอร์โมไดนามิกของการดูดซับตะกั่วด้วยจุลินทรีย์ *Candida albicans* พบว่า มีกลไกในการดูดซับตะกั่วเป็นปฏิกิริยาอันดับสองเทียม มีค่า $R^2 = 0.99$ ($q_e = 48.78$ mg/g) (Baysal Z.; et al. 2008: 6) การดูดซับนิกเกิลและทองแดงที่ถูกบำบัดด้วยสาหร่าย *Undaria pinnatifida* : การประยุกต์ใช้ในรูปแบบไอโซเทอร์มและจลนพลศาสตร์ พบว่ามีกลไกการดูดซับนิกเกิลเป็นปฏิกิริยาอันดับสองเทียม มีค่า $R^2 = 0.99$ ($q_e = 25.04$ mg/g) (Chen Z.; et al. 2007: 1) การดูดซับไอออนตะกั่วโดย *Sargassum* sp. พบว่ามีกลไกการดูดซับเป็นปฏิกิริยาอันดับสองเทียม มีค่า $R^2 = 0.99$ ($q_e = 25.24$ mg/g) (Martin B.L.; et al. 2006: 310) การกำจัดของโลหะหนักจากสารละลายโดยใช้ไม้มะละกอเป็นตัวดูดซับทางชีวภาพและนำกลับมาใช้ใหม่ของไม้มะละกอ พบว่ากลไกการดูดซับโลหะหนักของทองแดง แคดเมียม และสังกะสี เป็นแบบปฏิกิริยาอันดับสอง มีค่า $R^2 = 0.99$ ($q_e = 1.994, 1.916, 1.948$ mg/g) ตามลำดับ (Saeed A.; et al. 2005: 25-31) ส่วนการดูดซับทางชีวภาพของไอออนปรอท แคดเมียม และตะกั่วจากสารละลายโดยใช้สาหร่ายขนาดเล็ก *Chlamydomonas reinhardtii* ที่ถูกทำให้อยู่ในเมล็ดสาหร่ายเคลือบที่ไม่ได้ พบว่า กลไกการดูดซับไอออนโลหะหนักจากสารละลายมีรูปแบบการดูดซับเป็นปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (Bayramoglu G.; et al. 2006: 42) และการดูดซับปรอทบนไม้มะละกอ :การทดลองและรูปแบบการดูดซับแบบ BET พบว่ากลไกการดูดซับปรอทมีรูปแบบการดูดซับเป็นปฏิกิริยาอันดับสองเทียม $R^2=0.99$, ($q_e=38.91$ mg/g) (Basha S.; et al. 2009: 226-234)

การดูดซับไอออนตะกั่วและนิกเกิลจากสารละลายโดยใช้ไม้มะละกอบเป็นตัวดูดซับทางชีวภาพ เมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดซับไอออนของโลหะหนักชนิดอื่น ๆ โดยใช้ไม้มะละกอบ สามารถสรุป ดังปรากฏในตาราง 10

ตาราง 10 การเปรียบเทียบการดูดซับไอออนของโลหะหนักโดยใช้ไม้มะละกอบเป็นตัวดูดซับทางชีวภาพ กับรูปแบบกลไกการดูดซับของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียมและปฏิกิริยาอันดับสองเทียม

ไอออน โลหะหนัก	ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม			q_e จากการทดลอง (มิลลิกรัมต่อกรัม)	ปฏิกิริยาอันดับสองเทียม			อ้างอิง
	q_e	K_1	R^2		q_e	K_2	R^2	
ตะกั่ว	2.66	0.01	0.98	8.94	12.39	5.28	0.99	ผู้วิจัย
นิกเกิล	2.61	0.01	0.92	8.73	10.83	2.19	0.95	ผู้วิจัย
ทองแดง	1.72	-0.07	0.88	1.94	1.99	3.80	0.99	Saeed A.;
แคดเมียม	1.31	-0.04	0.92	1.92	1.92	2.10	0.99	et al
สังกะสี	0.91	-0.03	0.94	1.34	1.95	2.90	0.99	“
ปรอท	37.83	-0.01	0.90	38.10	38.91	3.72	0.99	Basha S.

ข้อเสนอแนะในการวิจัย

ผลการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ มีข้อเสนอแนะดังนี้

1. ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยมาใช้

1.1 นำผลการศึกษาไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดโลหะหนักในแหล่งน้ำหรือในน้ำเสีย จากแหล่งต่าง ๆ เนื่องจากมีประสิทธิภาพสูงในการดูดซับ หาง่าย ไม่มีราคา

2. ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป

2.1 ควรทำการทดลองการดูดซับของไม้มะละกอกับไอออนชนิดอื่นนอกเหนือจากตะกั่ว นิกเกิล ทองแดง แคดเมียม สังกะสีและปรอท

2.2 ควรทำการทดลองการดูดซับตัวดูดซับทางชีวภาพชนิดอื่นกับไอออนของตะกั่วและ นิกเกิล เช่น ผลผลิตจากการเกษตรชนิดต่างๆ ถ่านกัมมันต์ ขี้เลื่อย กากกาแฟ กากชา กากถั่วเหลือง ฟางข้าว เปลือกไม้ แก้วกลบดำ เป็นต้น

2.3 ควรทำการศึกษาความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์ที่มีประจุบวกในน้ำทิ้ง

2.4 เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับควรเปลี่ยนแปลงสภาพ เช่น การกระตุ้นด้วยกรดหรือเบสของไม้มะละกอให้มีการดูดซับมากขึ้น

2.5 ควรทำการศึกษาการดูดซับโลหะหนักผสมหลายชนิด

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- กรมวิชาการเกษตร. (2536). คำแนะนำที่ 83 เรื่อง การปลูกมะละกอ. กรุงเทพฯ: กองส่งเสริมพืชสวน.
- กัลยา วาณิชบัญชา. (2542). การวิเคราะห์ข้อมูลด้วย SPSS for Windows. พิมพ์ครั้งที่ 3 .
กรุงเทพฯ : โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ฉวีพันธ์ ทรวงเกียรติกุล. (2539). การกำจัดตะกั่วและนิกเกิลจากน้ำเสียโดยใช้ชีล้อย.
- ฉัฐมณีนธ์ แยมเกตุ; ปวีณรัตน์ ชาญวิมลวัฒน์; วิชพร สุขสมพงษ์; และวัชร เวียงแก้ว. (2547).
การกำจัดไฮดรอนิกเกิลและแคดเมียมด้วยถ้ำแคลบ และแบคทีเรีย *Bacillus subtilis*.
กรุงเทพฯ: ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ.
ดลเดช ตั้งตระการพงษ์; และภาณุมาศ พรหมเทศ. (2548). การศึกษาการดูดซับแคดเมียมและนิกเกิล
ออกจากสารละลายด้วยเปลือกแพชชันฟรุต. พิษณุโลก: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย
นเรศวร.
- ดาริกา เจริญฤทธิ์ และ อรพินท์ โชคไพศาล. (2549). การดูดซับของตะกั่วบนถ่านกัมมันต์จากไม้
ยางพารา. สงขลา: ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ทพวงมหาวิทยาลัย. (2528). เคมี เล่ม 2. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ : อักษรเจริญทัศน์
ธิตี เขียวชาญวิทย์. (2551). ลิกนิน. กรุงเทพฯ: สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่ง
ประเทศไทย.
- นิพนธ์ ตั้งคณานุรักษ์; และคณิดา ตั้งคณานุรักษ์. (2550). หลักการการตรวจวิเคราะห์คุณภาพน้ำ
ทางเคมี. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
- เนาวรัตน์ เจริญคำ. (2538, มิถุนายน-กรกฎาคม). การวิเคราะห์คุณภาพน้ำและน้ำเสีย. ส่งเสริม
เทคโนโลยี; 22(121): 99-107
- มธุรส รุจิวัฒน์, คุณหญิง; และจุฑามาส สัตยวิวัฒน์. (2549). พิษวิทยาสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพฯ:
ทรินิตี้พับลิชชิ่ง
- มารุต ไหลสกุล. (2546). การกำจัดตะกั่วในน้ำเสียโดยสาหร่ายอบแห้ง *Sagassum polycystum*
และ *Hydrilla vertillata* (L.f.) Royle. ขอนแก่น: สาขาวิชาอนามัยสิ่งแวดล้อม คณะสาธารณสุข
ศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
- แมน อมรสิทธิ์; และอมร เพชรสม. (2535). หลักการและเทคนิคการวิเคราะห์เชิงเครื่องมือ.
กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- วรรณาก จงเลนจันยา. (2550). การดูดซับทางชีวภาพของตะกั่วและทองแดงจากสารละลาย.
กรุงเทพฯ: ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

- วรารณณ์ พินโย; คริสตอป สนเทก; และอพิณภัส รุจิวัตรรา. (2548). *การศึกษาความสามารถและ
จลนศาสตร์ในการกำจัดนิกเกิล ตะกั่ว และแคดเมียมไฮดรอกไซด์ของซีโอไลต์ชนิดโซเดียมเอ็กซ์
และโซดาไลต์ที่สังเคราะห์จากเถ้าลอย*. เชียงใหม่: ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- วิทยา เรืองพรวิสุทธิ. (2547). *ปฏิกิริยาเร่งเคมีเกี่ยวกับผิวและปิโตรเคมี*. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริม
เทคโนโลยี(ไทย-ญี่ปุ่น)
- วัฒน์ชัย อยู่โนวงศ์. (2546). *การใช้ซีโอไลต์กำจัดแคดเมียม ตะกั่ว ปรอท และสังกะสีในน้ำเสีย
สังเคราะห์*. ขอนแก่น: ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
- สมคิด ปราบภัย. (2542). *อะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโตรสโคปีและการใช้งานเครื่องอะตอมมิก
แอบซอร์ปโตรโฟโตมิเตอร์ รุ่น 300 ของบริษัท Perkin-Elmer*. ขอนแก่น: คณะวิทยาศาสตร์
ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- _____. *การวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วและแคดเมียมในผักต่างๆโดยเครื่องอะตอมมิก
แอบซอร์ปชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์*. ขอนแก่น: คณะวิทยาศาสตร์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์
สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยขอนแก่น
- สมพล มงคลพิทักษ์สุข. (2549). *จลนพลศาสตร์เคมี*. (เอกสารประกอบการสอน). กรุงเทพฯ: ภาควิชา
เคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
- สุนิรัตน์ เรืองสมบูรณ์. (2547). *การดูดซับตะกั่วและแคดเมียมจากน้ำเสียโดยใช้ Scenedesmus
dimorphus เป็นตัวดูดซับ*. กรุงเทพฯ: ภาควิชาวิทยาศาสตร์การประมง คณะเทคโนโลยี
การเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
- สำนักงานคณะกรรมการสิ่งแวดล้อม. (2534). *มาตรฐานคุณภาพน้ำประปาประเทศไทย*. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์
ศาสนา
- อนันต์ ทองมอญ. (ม.ป.ป.). *ชุบโลหะด้วยไฟฟ้า*. กรุงเทพฯ: กองบริการอุตสาหกรรม
- Abollino O., Aceto M., Sarzanini C. and Mentasti E. (2001). The Retention of Metal species by
Different solid sorbents Mechanisms for Heavy Metal Speciation by Sequential
Three Column Uptake. *Analy Chem. Acta*. 411. 223-237
- Abu Al-Rub F.A., El-Naas M.H., Benyahia F., Ashour, I., (2004). Biosorption of nickel on
blank alginate beads, free and immobilized algal cells. *Process Biochem*. 39. 1767-
1773

- Ahmad A.L., Sumathi S., Hameed B.H.. (2005). Residual oil and suspended solid removal using natural adsorbents chitosan, bentonite and activated carbon: A comparative study. *Chemical Engineering journal*. 108. 179-185
- Alaa H. Hawari, Catherine N. Mulligan. (2006). Biosorption of lead(II), cadmium(II), Copper(II) and nickel(II) by anaerobic granular biomass. *Bioresource Technology*. 97. 692-700
- American Public Health Association. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater
- AOAC, (1984). Official Methods of analysis, *Association of official analytical Chemists*, Washington, DC. USA.
- Basha S., Murthy Z.V.P., Jha B.. (2009). Sorption of Hg(II) onto *Carica papaya*: Experimental studies and design of batch sorber. *Chemical Engineering Journal*. 147. 226-234
- Bayramoglu G., Tuzum I., Celik G., Yilmaz M., Yakup Arica M.. (2006). Biosorption of mercury(II), cadmium(II) and lead (II) ions from aqueous system by microalgae *Chlamydomonas reinhardtii* immobilized in alginate beads. *Int.J. Miner.Process*. 81. 35-43
- Baysal Z., Çınar E., Bulut Y., H. Alkan, Dogru M.. (2008). Equilibrium and thermodynamic studies on biosorption of Pb(II) onto *candida albicans* biomass. *Journal of Hazardous Materials*. 6-11
- Bulut Y., Gözübenli N., Aydın H.. (2007). Equilibrium and adsorption of kinetics studies for adsorption of direct blue 71 from aqueous solution by wheat shells. *J. Hazard. Mater*. 144. 300-306
- Chen Z., Ma W., and Han M., (2007). Biosorption of nickel and copper onto treated alga (*Undaria pinnatifida*): Application of isotherm and kinetic models. *Journal of Hazardous Materials*. 1-7
- Esposito A., Pagnanelli F., Lodi A., Solisio C. and Vegliò F., (2001). Biosorption of heavy metals by *Sphaerotilus natans* : an equilibrium study at different pH and biomass concentrations, *Hydrometallurgy*. 60. 129-141

- Feng D., Aldrich C., (2004). Adsorption of heavy metals by biomaterials derived from the marine alga *Ecklonia maxima*. *Hydrometallurgy*. 73. 1-10
- Goyal N., Jain S.C., Banerjee U.C.. (2003). *Adv. Environ. Res.* 7. 311
- Ho Y.S., Chiang C.C., (2001). Adsorption. 7. 139
- Iqbal M., and Saeed A.. (2006). Entrapment of fungal hyphae in structural fibrous network of papaya wood to produce a unique biosorbent for the removal of heavy metals. *Enzyme and Microbial Technology*. 39. 996-1001
- Işık M.. (2008). Biosorption of Ni(II) from aqueous solutions by living and non-living ureolytic mixed culture. *Colloids and surfaces B: Biointerfaces*. 62. 97-104.
- Jianlong W., Xinmin Z., Decai D.J.. (2001). Bioadsorption of lead(II) from aqueous by fungal biomass of *Aspergillus niger*. *Biotechnol.* 87. 273
- Kumar U., Bandyopadhyay M.. (2006). Sorption of cadmium from aqueous solution using pretreated rice husk. *Bioresource Technology*. 97. 104-109
- Li, Y.H., Wang, S., Wei, J., Zhang, X., Xu, C., Luan, Z., Wu, D. and Wei, B. (2002). Lead Adsorption On Carbon Nanotubes. *Chemical Physics Letters*. 357 . 263-269
- Liu Y., Cao Q., Luo F., Chen J.. (2009). Biosorption of Cd^{2+} , Cu^{2+} , Ni^{2+} and Zn^{2+} ions from aqueous solutions by pretreated biomass of brown algae. 163. 931-938
- Maron, S.H. and Protton, C.F. (1961). Principles of Physical chemistry. 3rd ed. Macmillan, Co. New York.
- Martins B.L., Cruz C.V.C., Aderval S.L., Henriques C.A., (2006). Sorption and desorption of Pb^{2+} ions by dead *Sargassum sp.* Biomass. *Biochem. Eng. J.* 27. 310-314
- Pagnanelli F., Esposito A., Toro L., Veglio F.. (2003). Metal speciation and pH effect on Pb, Cu, Zn and Cd Biosorption onto *Sphaerotilus natans*: Langmuir-type empirical model. 37. 627-633
- Park H.G., Kim T. W., Chae M. Y., Yoo I.. (2007). Activated carbon-containing alginate adsorbent for the simultaneous removal of heavy metals and toxic organics. 42. 1371-1377
- Popuri S.R., Vijaya Y., Bodda V.M., Abburi K.. (2009). Adsorptive removal of copper and nickel ions from water using chitosan coated PVC beads. *Bioresource Technology*. 100. 194-199.

- Saeed A., Akhter M. W., Iqbal M.. (2005). Removal and recovery of heavy metals from aqueous solution using papaya wood as a new biosorbent. *Separation and Purification Technology*. 45. 25-31
- Schiewer S., Volesky B., (2000). Environmental Microbe-Metal Interactions, ASM Press, Washington, DC. Chapter 14
- Suzuki Y., Kametani T., and maruyama T., (2005). Removal of heavy metals from aqueous solution by nonliving *Ulva* as biosorbent. *Water Research*. 39. 1803 - 1808
- Svecova L., Spanelova M., Kubal M., and Guibal E.. (2006). Cadmium, lead and mercury biosorption on waste fungal biomass issued from fermentation industry. I. Equilibrium studies. *Separation and Purification Technology*. 52. 142-153
- Tobin J.M., Cooper D.G., Neufeld R.J.. (1984). Apply Environment Microbiology. 47. 821
- Volesky B., Holan Z.R., (1995). Biosorption of heavy metals. *Biotechnol. Prog.*. 11.235-250
- Wang S., Zhu Z.H., Coomes A., Haghseresht F., Lu G.Q.. (2005). The physical and surface chemical characteristics of activated carbons and the adsorption of methylene blue from wastewater. *Journal of Colloid and Interface Science*. 284. 440-446
- Xiangliang P., Jianlong W., Daoyong Z.. (2005). Biosorption of Pb(II) by *pleurotus ostreatus* immobilized in calcium alginate gel. *Process Biochem*. 40. 2799-2803
- Xuan Z., Tang Y., Li X., Lui Y., and Luo F.. (2006). Study on the equilibrium kinetics and isotherm of biosorption of lead ions onto pretreated chemically modified orange peel. *Biochemical Engineering Journal*. 31.160-164

ประวัติย่อผู้ทำสารนิพนธ์

ประวัติย่อผู้ทำสารนิพนธ์

ชื่อ - ชื่อสกุล	นายไพรัตน์ ฮงทอง
วันเดือนปีเกิด	14 มกราคม 2519
สถานที่เกิด	ต.ละทาย อ.กันทรารมย์ จ.ศรีสะเกษ
สถานที่อยู่ปัจจุบัน	83 ศุภสินอพาร์ทเมนต์ แขวงคลองตันใต้ เขตคลองสาน กรุงเทพมหานคร 10600
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	ครู อันดับ คศ.1
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	โรงเรียนสตรีวิทยา เขตพระนคร กรุงเทพมหานคร สำนักงานเขตพื้นที่การศึกษากทม กรุงเทพมหานคร เขต 1
ประวัติการศึกษา	
พ.ศ. 2538	ชั้นมัธยมศึกษาปีที่ 6 จากโรงเรียนกันทรารมย์ จังหวัดศรีสะเกษ
พ.ศ. 2542	ครุศาสตรบัณฑิต (ค.บ.) สาขาเคมี จากมหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา
พ.ศ. 2552	การศึกษามหาบัณฑิต (กศ.ม.) สาขาเคมี จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ