

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย เรื่อง

การใช้ตะกอนจุลินทรีย์เป็นวัสดุดูดซับไอออนโลหะหนักในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย

Using Microbial Sludge as Heavy Metal Ions Adsorbent in Wastewater Treatment

Process

โดย

นายชยาภาส ทับทอง

หัวหน้าโครงการ

เมษายน ๒๕๕๑

สัญญาเลขที่ 080/2550

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

โครงการวิจัย เรื่อง “การใช้ตะกอนจุลินทรีย์เป็นวัสดุดูดซับไอออนโลหะหนักใน
กระบวนการบำบัดน้ำเสีย”

Using Microbial Sludge as Heavy Metal Ions Adsorbent in Wastewater Treatment
Process

คณะผู้วิจัย

สังกัด

1. นายชยาภาส ทับทอง

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประจำปี 2550

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถในการกำจัดไอออนโลหะหนักของตะกอนจุลินทรีย์ที่ไม่มีชีวิต โดยการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น และปริมาณการใช้ตะกอนจุลินทรีย์ ตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้เป็นวัสดุดูดซับในการทดลองนี้มี 3 ชนิด โดย 2 ชนิดแรกคือ AS-P และ MUR-P ได้จากระบบบำบัดน้ำเสีย Activated Sludge และ Upflow Anaerobic Sludge Blanket ของอุตสาหกรรมน้ำอัดลม ส่วนชนิดที่ 3 คือ CASS-N ได้จากระบบบำบัดน้ำเสีย Cyclic Activated Sludge System ของโรงควบคุมคุณภาพน้ำ กรุงเทพมหานคร ตะกอนจุลินทรีย์ที่ได้จะนำมาล้างด้วยน้ำกลั่น อบแห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 105°C บดและแยกขนาดให้ได้อนุภาคที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 106-150 ไมโครเมตร จากผลการทดลองพบว่าการดูดซับจะเข้าสู่สมดุลที่เวลา 15 นาที โดยมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนตะกั่วสูงถึง 93-99 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น 60 มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนี้ยังใช้สมการไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm) และไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรอนด์ลิช (Freundlich adsorption isotherm) มาใช้ทำนายผลการทดลอง พบว่าสมการไอโซเทอร์มการดูดซับทั้ง 2 สมการ สามารถใช้ทำนายผลการทดลองได้ดี ค่า K_f ที่สูง แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการดูดซับไอออนตะกั่วของตะกอนจุลินทรีย์ทั้ง 3 ชนิด สูง ส่วนปริมาณไอออนโลหะหนักตะกั่ว แคดเมียม และสังกะสี ที่ถูกดูดซับสูงสุด (q_m) ของตะกอนจุลินทรีย์ ที่ได้จากสมการไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ มีค่าเป็น 247-253, 213-238 และ 184-214 มิลลิกรัมโลหะต่อกรัมวัสดุดูดซับตามลำดับ

คำสำคัญ : การกำจัด, การดูดซับ, ตะกั่ว, แคดเมียม, สังกะสี, ตะกอนจุลินทรีย์

ABSTRACT

The objective of this work was to study the heavy metal ions adsorption ability of nonviable microbial sludge by varying initial concentration of solution and adsorbent dose. Three kinds of microbial sludge was used as adsorbent for this experiment. The first two kinds of microbial sludge, AS-P and MUR-P, were obtained from Activated Sludge and Upflow Anaerobic Sludge Blanket process of soft drinks industry and the last kind, CASS-N, from Cyclic Activated Sludge System of water quality control plant in Bangkok province. The microbial sludge was washed with distilled water, dried in the oven at 105°C, crushed and sieved for particle size diameter between 106-150 μm . The experimental result demonstrated that adsorption reached equilibrium in 15 min. The lead removal was 94-99% at initial concentration 60 mg L^{-1} . Moreover, Langmuir and Freundlich adsorption isotherm were used to fit the experimental data. The result showed that the both of adsorption isotherm fitted the experimental data very well. The high K_f value showed that the lead ions adsorption capacity of three kinds of microbial sludge was high. The maximum lead adsorption capacity (q_m) of nonviable microbial sludge from Langmuir adsorption isotherm were 247-253, 213-238 and 184-214 (mg-metal/g-adsorbent), respectively.

Keyword : Removal, Adsorption, Lead, Cadmium, Zinc, Microbial Sludge

ประกาศคุณูปการ

โครงการวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณแผ่นดินมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประจำปี 2550 และผู้วิจัยขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ที่อนุเคราะห์เครื่องมือและสถานที่ในการทำวิจัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ง
ประกาศศุณูปการ	จ
สารบัญ	ฉ
บัญชีตาราง	ช
บัญชีภาพประกอบ	ฉ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	1
1.3 ขอบเขตของการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	2
1.5 ระยะเวลาที่ทำการวิจัย และสถานที่ทำการวิจัย	2
1.6 แผนการดำเนินงานตลอดโครงการ	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 การดูดซับไอออนโลหะหนักโดยจุลินทรีย์ที่ไม่มีชีวิต	4
2.2 กลไกการดูดซับไอออนโลหะหนักโดยกากตะกอนจุลินทรีย์ที่ไม่มีชีวิต	5
2.3 ไอโซเทอร์มการดูดซับ	7
บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย	
3.1 สารเคมี	8
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์วิเคราะห์	8
3.3 วิธีดำเนินการวิจัย	
1. การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์	8
2. การเตรียมวัสดุดูดซับจากตะกอนจุลินทรีย์	9
3. การศึกษาผลของระยะเวลาในการดูดซับ	9
4. การศึกษาผลของปริมาณการใช้ตะกอนจุลินทรีย์	9
5. การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น	10
6. การศึกษา Adsorption Isotherm	11

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิจัย	
4.1 ลักษณะสมบัติของตะกอนจุลินทรีย์	13
4.2 การศึกษาการดูดซับไอออนโลหะตะกั่ว	15
4.2.1 ผลของระยะเวลาในการดูดซับ	15
4.2.2 ผลของปริมาณการใช้ตะกอนจุลินทรีย์	16
4.2.3 ผลของความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น	16
4.2.4 การศึกษาการดูดซับ	18
4.3 การศึกษาการดูดซับไอออนโลหะแคดเมียม	15
4.3.1 ผลของระยะเวลาในการดูดซับ	21
4.3.2 ผลของปริมาณการใช้ตะกอนจุลินทรีย์	21
4.3.3 ผลของความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น	22
4.3.4 การศึกษาการดูดซับ	23
4.4 การศึกษาการดูดซับไอออนโลหะสังกะสี	26
4.4.1 ผลของระยะเวลาในการดูดซับ	26
4.4.2 ผลของปริมาณการใช้ตะกอนจุลินทรีย์	26
4.4.3 ผลของความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น	27
4.4.4 การศึกษาการดูดซับ	28
บทที่ 5 สรุปผลวิจัย	
5.1 สรุปผลวิจัย	31
เอกสารอ้างอิง	32
ประวัติย่อผู้วิจัย	34

บัญชีตาราง

	หน้า
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
ตารางที่ 1 ปริมาณการดูดซับไอออนโลหะหนักโดยจุลินทรีย์ที่ไม่มีชีวิต	5
บทที่ 4 ผลการวิจัย	
ตารางที่ 1 ลักษณะสมบัติของตะกอนจุลินทรีย์	13
ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์และค่า R^2 ของสมการ Langmuir และ Freundlich adsorption isotherm ของการดูดซับไอออนตะกั่ว	19
ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์และค่า R^2 ของสมการ Langmuir และ Freundlich adsorption isotherm ของการดูดซับไอออนแคดเมียม	25
ตารางที่ 4 ค่าพารามิเตอร์และค่า R^2 ของสมการ Langmuir และ Freundlich adsorption isotherm ของการดูดซับไอออนสังกะสี	29

บัญชีภาพประกอบ

	หน้า
บทที่ 4 ผลการวิจัย	
รูปที่ 1 แสดงเปอร์เซ็นต์การยอมให้แสงผ่าน (%T) กับความยาวคลื่น (cm^{-1}) ของ AS-P	14
รูปที่ 2 แสดงเปอร์เซ็นต์การยอมให้แสงผ่าน (%T) กับความยาวคลื่น (cm^{-1}) ของ CASS-N	14
รูปที่ 3 แสดงเปอร์เซ็นต์การยอมให้แสงผ่าน (%T) กับความยาวคลื่น (cm^{-1}) ของ MUR-P	15
รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนตะกั่วของ AS-P กับระยะเวลาในการดูดซับ	15
รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนตะกั่วกับปริมาณการใช้ตะกอนจุลินทรีย์	16
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนตะกั่วของตะกอนจุลินทรีย์กับความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น ที่ปริมาณการใช้ตะกอนจุลินทรีย์ 0.5 g L^{-1}	17
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับไอออนตะกั่วของตะกอนจุลินทรีย์กับความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นที่ปริมาณการใช้ตะกอนจุลินทรีย์ 0.5 g L^{-1}	17
รูปที่ 8 Langmuir adsorption isotherm ของการดูดซับไอออน โลหะตะกั่ว โดย AS-P (รูป a), MUR-P (รูป b) และ CASS-N (รูป c)	18
รูปที่ 9 Freundlich adsorption isotherm ของการดูดซับไอออนตะกั่ว โดย AS-P (รูป a), MUR-P (รูป b) และ CASS-N (รูป c)	19
รูปที่ 10 ค่าปริมาณไอออนตะกั่วที่ถูกดูดซับสูงสุด (q_m) ของวัสดุดูดซับชนิดต่างๆ	20
รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนแคดเมียมของ AS-P กับระยะเวลาในการดูดซับ	21
รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนแคดเมียม กับปริมาณการใช้ตะกอนจุลินทรีย์ ที่ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น 20 mg L^{-1}	22
รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนแคดเมียมของตะกอนจุลินทรีย์กับความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นที่ปริมาณการใช้ตะกอนจุลินทรีย์ 0.5 g L^{-1}	23
รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับไอออนแคดเมียมของตะกอนจุลินทรีย์กับความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นที่ปริมาณการใช้ตะกอนจุลินทรีย์ 0.5 g L^{-1}	23
รูปที่ 15 Langmuir adsorption isotherm ของการดูดซับไอออน โลหะแคดเมียม โดย AS-P (รูป a), MUR-P (รูป b) และ CASS-N (รูป c)	24

บัญชีภาพประกอบ (ต่อ)

	หน้า
รูปที่ 16 Freundlich adsorption isotherm ของการดูดซับไอออนโลหะแคดเมียม โดย AS-P (รูป a), MUR-P (รูป b) และ CASS-N (รูป c)	24
รูปที่ 17 ค่าปริมาณไอออนแคดเมียมที่ถูกดูดซับสูงสุด (q_m) ของวัสดุดูดซับชนิดต่างๆ	25
รูปที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนสังกะสีของ AS-P กับระยะเวลาในการดูดซับ	26
รูปที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนสังกะสีกับปริมาณการใช้ตะกอนจุลินทรีย์	27
รูปที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนสังกะสีของตะกอนจุลินทรีย์ กับความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นที่ปริมาณการใช้ตะกอนจุลินทรีย์ 0.5 g L^{-1}	27
รูปที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับไอออนสังกะสีของตะกอนจุลินทรีย์ กับความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น ที่ปริมาณการใช้ตะกอนจุลินทรีย์ 0.5 g L^{-1}	28
รูปที่ 22 Langmuir adsorption isotherm ของการดูดซับไอออนโลหะสังกะสี โดย AS-P (รูป a), MUR-P (รูป b) และ CASS-N (รูป c)	28
รูปที่ 23 Freundlich adsorption isotherm ของการดูดซับไอออนโลหะสังกะสี โดย AS-P (รูป a), MUR-P (รูป b) และ CASS-N (รูป c)	29
รูปที่ 24 ค่าปริมาณไอออนสังกะสีที่ถูกดูดซับสูงสุด (q_m) ของวัสดุดูดซับชนิดต่างๆ	29

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของปัญหา

น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมโดยเฉพาะอุตสาหกรรมสี ฟอกย้อม และชุบโลหะ มักมีโลหะหนักปนเปื้อนเกินเกณฑ์มาตรฐานกำหนดของกรมโรงงานอุตสาหกรรม น้ำเสียที่มีไอออนโลหะหนักปนเปื้อนมักพบจากโรงงานอุตสาหกรรมบางประเภท เช่น โรงงานชุบโลหะ โรงงานฟอกย้อม โรงงานผลิตแผ่นสังกะสี เป็นต้น โดยโลหะหนักที่ปนเปื้อน เช่น ตะกั่ว แคดเมียม สังกะสี ปรอท เป็นต้น มีความเป็นพิษสูง ไม่สามารถย่อยสลายตามธรรมชาติ เมื่อสะสมในเซลล์สิ่งมีชีวิตจะทำให้เกิดโรคร้ายแรง [1] กระบวนการบำบัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียด้วยวิธีทางเคมี-กายภาพ เช่น การตกตะกอนด้วยสารเคมี การแลกเปลี่ยนไอออน การกรองผ่านเยื่อกรอง กระบวนการรีเวอร์สออสโมซิส เป็นต้น ปัจจุบันวิธีการกำจัดไอออนโลหะหนักจากน้ำเสียนิยมใช้วิธีการตกตะกอนเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งมีค่าใช้จ่ายสูงอีกทั้งน้ำเสียที่ผ่านการตกตะกอนมักมีความเป็นด่างสูง และมีสารเคมีที่ใช้ในการตกตะกอนปนออกมา จึงต้องทำการบำบัดอีกครั้งหนึ่งก่อนปล่อยสู่แหล่งน้ำ ซึ่งทำให้เสียค่าใช้จ่ายถึงสองขั้นตอน ยังประสบกับปัญหาในเรื่องวิธีการบำบัดที่ยู่งยากหรือมีค่าใช้จ่ายสูง เมื่อความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียดำกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร [2] การกำจัดไอออนโลหะหนักด้วยการดูดซับเป็นวิธีหนึ่งที่เหมาะสมกับกรณีที่น้ำเสียมีความเข้มข้นของโลหะหนักต่ำ งานวิจัยที่ผ่านมาของนักวิจัยหลายท่าน แสดงให้เห็นว่าจุลินทรีย์ทั้งที่มีชีวิตและไม่มีชีวิต สามารถดูดซับไอออนโลหะหนักออกจากน้ำเสียได้ โดยสะสมไว้ที่บริเวณผิว และ/หรือภายในของเซลล์ [3-4]

การวิจัยนี้ได้นำกากตะกอนจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม น้ำอัดลม และโรงปรับปรุงคุณภาพน้ำ มาใช้ในการดูดซับโลหะหนักออกจากน้ำเสีย ซึ่งสามารถลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดโลหะหนัก เนื่องจากหาได้ง่าย เป็นของเหลือทิ้ง มีราคาถูก และเป็นข้อมูลพื้นฐานในการนำไปประยุกต์ใช้ในงานบำบัดน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรม

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. เพื่อศึกษาการใช้ประโยชน์ตะกอนจุลินทรีย์ที่ไม่มีชีวิตจากระบบบำบัดน้ำเสียเป็นวัสดุดูดซับ

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1. ตะกอนจูลินทรีย์ 3 ชนิด ที่ไม่มีชีวิต จากสำนักงานระบายน้ำกรุงเทพฯ และ โรงงานผลิตน้ำอัดลม
2. ศึกษาการกำจัดไอออนโลหะหนัก 3 ชนิด ได้แก่ Pb^{2+} , Cd^{2+} และ Zn^{2+}
3. ความเข้มข้นของสารละลาย 20, 40, 60, 80 และ 100 mg/L ที่ pH 6
4. ศึกษาปริมาณการใช้ตะกอนจูลินทรีย์
5. ศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ (Adsorption Isotherm)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. เป็นแนวทางในการพัฒนาและนำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้ประโยชน์ในการแก้ปัญหาการบำบัดน้ำเสีย อุตสาหกรรมที่มีโลหะหนักปนเปื้อน

1.5 ระยะเวลาและสถานที่ทำงานวิจัย

ระยะเวลา 1 ปี

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

63 หมู่ 7 ถ.รังสิต-นครนายก ต.องครักษ์ อ.องครักษ์ จ.นครนายก

1.6 แผนการดำเนินงานตลอดโครงการ (Research Plan)

รวมระยะเวลาในการทำงาน 1 ปี

ลำดับ ที่	กิจกรรม	เดือน					
		1-2	3-4	5-6	7-8	9-10	11-12
1	ค้นคว้าและสำรวจเอกสาร จัดซื้อสารเคมีและเครื่องแก้ว						
2	ศึกษาการดูดซับไอออนโลหะ Pb^{2+}						
3	ศึกษาการดูดซับไอออนโลหะ Cd^{2+}						
4	ศึกษาการดูดซับไอออนโลหะ Zn^{2+}						
5	ศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ						
6	วิเคราะห์ผลการวิจัย						
7	เขียนรายงานฉบับสมบูรณ์						

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการกำจัดไอออนโลหะหนักออกจากน้ำเสียด้วยวิธีการต่างๆ ได้ดำเนินการอย่างต่อเนื่องในช่วงหลายปีที่ผ่านมา แต่งานวิจัยที่น่าสนใจและมีความเหมาะสมกับความเข้มข้นของโลหะหนักในน้ำเสียดำกว่า 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ในประเทศไทย คือ การกำจัดโลหะหนักโดยการใช้วัสดุธรรมชาติเป็นตัวดูดซับ เช่น แกลบ เปลือกถั่ว ชังข้าวโพด ชานอ้อย กากตะกอนจุลินทรีย์ กากกาแฟ จี้เถ้าจากเปลือกและทะลายปาล์ม เป็นต้น ซึ่งวัสดุธรรมชาติเหล่านี้มีศักยภาพเพียงพอในการพัฒนาเป็นวัสดุดูดซับโลหะหนักออกจากรน้ำเสียอุตสาหกรรมในอนาคต

การกำจัดไอออนโลหะหนักจากรน้ำเสียเป็นวิธีการที่สนใจของนักวิจัยหลายๆ ท่านในช่วงหลายปีที่ผ่านมาจนถึงปัจจุบัน ยังสามารถพัฒนาได้อีกมาก และงานวิจัยหลายเรื่องก็ได้พัฒนาไปถึงระดับการค้าและอุตสาหกรรม สามารถสรุปแนวความคิดและแนวทางในการดำเนินงานของนักวิจัยที่ทำงานวิจัยด้านนี้ได้ดังนี้

1. นักวิจัยพยายามนำวัสดุธรรมชาติหลายๆ ชนิดมาทดสอบความสามารถในการดูดซับไอออนโลหะหนักเพื่อประเมินศักยภาพในการนำไปใช้หรือพัฒนาเป็นวัสดุดูดซับไอออนโลหะหนัก [Kuh และ Kim (2000), Low และคณะ (2000), Cimino และคณะ (2000), Chu และ Hashim (2002), Juang และ Shao (2002), Reddad และคณะ (2002), ชีรวิทย์ และ วิโรจน์ (2540)]
2. ปรับปรุงวัสดุธรรมชาติเหล่านั้นให้มีความสามารถและประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนโลหะหนักสูงขึ้น [Kuh และ Kim (2000), Cimino และคณะ (2000)]
3. พยายามอธิบายกลไกและปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นของกระบวนการดูดซับ [Kuh และ Kim (2000), Low และคณะ (2000), Cimino และคณะ (2000), Chu และ Hashim (2002), Juang และ Shao (2002), Reddad และคณะ (2002), วิโรจน์และ ชีรวิทย์ (2540)]
4. เปรียบเทียบการกำจัดไอออนโลหะหนักโดยใช้วัสดุธรรมชาติเป็นวัสดุดูดซับกับวิธีการกำจัดไอออนโลหะหนักอื่นๆ เช่น การตกตะกอน การแลกเปลี่ยนไอออน เป็นต้น [Bailey และคณะ (1999), Volesky, B. และ Holan, Z.R. (1995)]
5. วัสดุธรรมชาติที่มีศักยภาพเพียงพอก็จะพัฒนาในระดับเชิงการค้า เช่น MRA, AlgaSORP และ Bip-Fix [Smith และคณะ (1994)]

2.1 การดูดซับไอออนโลหะหนักโดยจุลินทรีย์ที่ไม่มีชีวิต

Camille Dumat และคณะ ได้ศึกษาถึงการดูดซับ Cesium โดยดินสังเคราะห์ เพื่อหาปริมาณการดูดซับของ polymer, โปรตีน และ polysaccharide โดยการใช้แร่ในดินเพื่อลดการดูดซับ Cesium ซึ่งในการวิจัยจะทำการทดลองในสภาวะต่างๆกัน เช่นความเข้มข้น, pH และปริมาณประจุ โดย polymer ส่วนใหญ่จะทำให้การดูดซับใน Cesium ลดลง ซึ่งการจะทำให้เกิดปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นทำได้โดยการเพิ่มการดูดซับของ polymer บนผิวหน้าของดินแต่ให้มีการเปลี่ยนค่าตัวแปรในการทดลองที่เงื่อนไขในสภาวะต่างๆ ซึ่งจากการวิจัยนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในหลายๆด้าน เช่น การป้องกันการพังทลายของหน้าดิน, ปรับปรุงคุณสมบัติผิวหน้าของดินและยังสามารถนำมาลดไอออนโลหะตัวอื่นที่อยู่ในแร่ธาตุดินอีกด้วย

Fourest และ Roex ได้ศึกษาจุลินทรีย์เหลือทิ้ง *Rhizopus arrhizus* ที่ไม่มีชีวิตจากโรงงานอุตสาหกรรม มาใช้เป็นวัสดุดูดซับไอออนโลหะหนักเกิด สังกะสี แคลเซียม และตะกั่ว ที่ pH เป็นกลาง ตะกั่วดูดซับได้ดีที่ pH 5.0 และการดูดซับจะน้อยลงเมื่อ pH ผลการทดลองสามารถวิเคราะห์โดยแบบจำลองของ Langmuir โดยค่าปริมาณการดูดซับไอออนหนักเกิด สังกะสี แคลเซียม และตะกั่ว สูงสุดเท่ากับ 18.7, 13.5, 26.8 และ 55.6 มิลลิกรัมต่อกรัมตามลำดับ

Sampedro และคณะ ได้ศึกษา pH ที่เหมาะสมต่อการดูดซับไอออนโลหะหนัก โครเมียม ตะกั่ว สังกะสี ทองแดง ของเชื้อ *Cyanobacterium Phormidium Laminosum* ที่ไม่มีชีวิต พบว่าการดูดซับไอออนโลหะหนักต่างเกิดขึ้นได้ดีที่ pH ประมาณ 6-7 และผลการดูดซับไอออนโลหะสอดคล้องกับโมเดลของ Langmuir isotherm

ธีรวิทย์ ทับทอง ทำการศึกษาการดูดซับไอออนโลหะหนักโดยวัสดุชีวมวลที่เหลือทิ้งได้แก่ ยีสต์, *A.niger* และกากตะกอนเร่ง และศึกษาความสามารถในการดูดซับไอออนของโลหะหนัก พบว่าจะถึงสมดุลภายใน 30 วินาที และกากตะกอนเร่งจะสามารถดูดซับไอออนโลหะแคลเซียม ทองแดง นิกเกิล ตะกั่ว และสังกะสีได้ดีที่สุด จากนั้นนำกากตะกอนเร่งไปตรึงเป็นเม็ด 2 ขนาด คือ 3.34-4.00 และ 1.18-2.00 มิลลิเมตร ก่อนการดูดซับ พบว่ากรณีขนาด 3.35-4.00 การดูดซับจะลดลงกว่า 56 % ส่วนขนาด 1.18-2.00 จะดูดซับตะกั่วได้ดีที่ 17.90, 16.72 และ 23.47 และนำไปชะด้วย 0.1 M HCL พบว่าจะชะโลหะหนักออกได้ประมาณ 90 % แต่ความสามารถในการดูดซับจะลดลงกว่าจะลดลงกว่า 49 % หลังจากนำมาใช้เป็นครั้งที่ 3

Sag และ Kusal ศึกษาถึงผลพารามิเตอร์ต่างๆที่มีผลต่อการดูดซับโครเมียมและแคลเซียม โดยใช้ *Zoogloea ramigera* ที่ตายแล้ว พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการดูดซับโครเมียมและแคลเซียมมีค่าเท่ากับ 25 °C pH มีค่าเท่ากับ 2 และ 6 ตามลำดับ ส่วนความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะโครเมียมเท่ากับ 75 มิลลิกรัมต่อลิตร และแคลเซียมเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งจะทำให้อัตราในการดูดซับสูงสุด

ตารางที่ 1 ปริมาณการดูดซับไอออนโลหะหนักโดยจุลินทรีย์ที่ไม่มีชีวิต

Metal	Microorganism	Microorganism Class	Metal Uptake (mg/g)	Reference
Cd	Ascopphyium nodosum	Brown marine alga	215	Holan et al., 1993
	Sargassum natans	Brown marine alga	135	Holan et al., 1993
	Fungal biomass	Biosorption	135	Brierley et al., 1986
	Bacillus subtilis	Biosorption	101	Brierley et al., 1986
	Fucus vesiculosus	Brown marine alga	73	Holan et al., 1993
	Candida tropicalis	Yeast	60	Mattuschka et al., 1993
	Rhizopus nigricans	Fungus	19	Holan & Volesky, 1995
	Penicillium spinnulosum	Fungus	0.4	Townsley et al, 1986
Pb	Bacillus subtilis	Biosorption	601	Beveridge et al., 1986
	Fungal biomass	Biosorption	373	Beveridge et al., 1986
	Absidia orchidis	Fungus	351	Holan & Volesky, 1994
	Fucus vesiculosus	Brown marine alga	220 - 370	Holan & Volesky, 1994
	Ascophyllum nidusun	Brown marine alga	270 - 360	Holan & Volesky, 1994
	Bacillus subtilis	Biosorption	189	Holan & Volesky, 1994
	Zn	Bacillus subtilis	Biosorption	137
Fungal biomass		Biosorption	98	Beveridge et al., 1986
Candida tropicalis		Yeast	30	Mattuschka et al., 1993
Penicillium chrysogenum		Fungus	6.5	Niu et al., 1993
Bacillus		Bacterium	3.4	Cotoras et al., 1993

จากงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่าจุลินทรีย์ที่ไม่มีชีวิตส่วนใหญ่มีความสามารถในการดูดซับไอออนโลหะหนักสูงกว่าจุลินทรีย์ที่มีชีวิต ซึ่งงานวิจัยในช่วงหลังจะเน้นการศึกษาในด้านการนำวัสดุชีวมวลที่เหลือทิ้งจากโรงงานมาใช้เป็นวัสดุดูดซับโลหะหนัก เนื่องจากมีปริมาณมาก และราคาถูก ส่วนผลการดูดซับไอออนโดยจุลินทรีย์ที่ไม่มีชีวิตในระบบแบบกะ จะใช้แบบจำลอง Langmuir ในการทำนาย

2.2 กลไกการดูดซับไอออนโลหะหนักโดยกากตะกอนจุลินทรีย์ที่ไม่มีชีวิต

แบคทีเรียที่ไม่มีชีวิตสามารถดูดซับโลหะหนักได้ด้วยหมู่เคมีต่างๆ ที่บริเวณผนังเซลล์ จากงานวิจัยของ Beveridge พบว่าผนังเซลล์ของแบคทีเรียแกรมบวก เช่น *Bacillus subtilis* การใช้ตะกอนจุลินทรีย์เป็นวัสดุดูดซับไอออนโลหะหนักในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย

ประกอบด้วยกลุ่มสายใยเปปทิโดไกลแคน (Peptidoglycan) ซึ่งเชื่อมกันด้วยพันธะโควาเลนต์ ในช่องว่างของกลุ่มเปปทิโดไกลแคนจะมีกรดไทคูอิก (Teichoic) และกรดไทคูโรนิก (Teichuronic) ซึ่งหมู่ฟอสโฟไดเอสเทอร์ (Phosphodiester) ของกรดไทคูอิก และหมู่คาร์บอกซิลของไทคูโรนิก เป็นส่วนที่สามารถจับโลหะหนักได้ ส่วนผนังเซลล์แบคทีเรียแกรมลบประกอบด้วยกลุ่มเปปไทโดไกลแคนบางๆ ซึ่งมีไลพอพอลิแซคคาไรด์ (Lipopolysaccharide) เป็นเยื่ออยู่ด้านนอกอีกที หมู่ฟอสฟอริล (Phosphoryl) ของสายใยพอลิแซคคาไรด์สามารถจับโลหะได้ แต่สำหรับ E.coli แล้วโลหะจับกับหมู่คาร์บอกซิเลต (Carboxylate Group) ของเปปไทโดไกลแคน ได้ดีกว่าเนื้อเยื่อชั้นนอก และหมู่คาร์บอกซิลิกบนสายใยเปปไทโดไกลแคนของ E.coli ได้ดี

สาหร่ายทะเลหลายชนิดโดยเฉพาะสาหร่ายสีน้ำตาลมีความสามารถในการดูดซับโลหะหนักได้สูง กระบวนการดูดซับไอออนโลหะหนักของสาหร่ายที่ไม่มีชีวิตเกิดจากการแลกเปลี่ยนไอออนในส่วนของหมู่คาร์บอกซิลของกรดพวกยูโรนิก (Uronic) เช่น กาแลคทูโรนิก (Galacturonic), กลูคูโรนิก (Glucuronic), แมนนูโรนิก (Mannuronic) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักของโครงสร้างของสาหร่าย นอกจากนี้หมู่ซัลเฟตเอสเทอร์ (Sulfate Esters) ในเซลล์ลาร์พอลิแซคคาไรด์ (Cellular Polysaccharides) ก็สามารถจับกับโลหะได้อีกด้วย จากงานวิจัยของ Nishida และคณะที่ทำการศึกษาดูดซับของสาหร่ายสายพันธุ์ fucoidan ในดิวิชัน Phaeopyhta พบว่ามีหมู่ $O-SO_3^-$ ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ C_2 หรือ/และ C_3 ในหน่วย α -1,4-linked L-Fucopyranosyl นอกจากนี้ยังพบหมู่ซัลเฟตเอสเทอร์ในอีก 21 สายพันธุ์ ได้แก่ *Fucus vesiculosus*, *Sargassum thurnbergii* และ *Padina arborescens* เช่นเดียวกับ Stevenson ที่ทำการศึกษาสาหร่ายในดิวิชัน rhodophyta พบว่ามีหมู่ซัลเฟตเอสเทอร์ที่คาร์บอนตำแหน่ง C_2 หรือ C_3 หรือ C_6 ของหน่วย 1,3 และ 1,4-D,Llinked Galactosyl (หรือที่ C_2 และ C_6 ในพวกที่เป็น λ -Carrageensn) ส่วนงานวิจัยของ Chapman พบว่าหมู่ซัลเฟตเอสเทอร์ที่คาร์บอนตำแหน่ง C_2 และ C_6 ของ β -1,3-Galactan ในสาหร่ายสายพันธุ์ Chlorophyta สามารถจับไอออนโลหะหนักได้

ยีสต์และราที่ไม่มีชีวิตสามารถดูดซับโลหะหนักได้เช่นเดียวกับแบคทีเรียและสาหร่าย จากการศึกษาของ Brandy และคณะที่ทดสอบการดูดซับโลหะโดยกลูแคน แมนแนนและไคติน ที่ได้จากการสกัดจากผนังเซลล์ยีสต์ พบว่ากลูแคนสามารถดูดซับโลหะแคดเมียม ทองแดง และโคบอลต์ได้ในปริมาณ 0.35 ไมโครโมลต่อมิลลิกรัม แมนแนนดูดซับทองแดงได้ 1.1 ไมโครโมลต่อมิลลิกรัม ดูดซับโคบอลต์ และแคดเมียมได้ 0.4 ไมโครโมลต่อมิลลิกรัม ส่วนไคตินดูดซับทองแดง โคบอลต์ และแคดเมียมได้ 0.6, 0.4 และ 0.5 ไมโครโมลต่อมิลลิกรัม ตามลำดับ ซึ่ง Rapport และ Muter เสริมว่าการที่ผิวของ *Caccharomyces cerevisiae* สามารถจับไอออนประจุบวกได้ดีนั้นเกิดจากการจับตัวของโปรตีนกับแมนแนน นอกจากนี้ยังพบอีกว่าโปรตีนที่ยีสต์ผลิตขึ้นมา เช่น Cysteine, Glutamyl Peptide สามารถจับกับแคดเมียมได้ดีอีกด้วย

2.3 ไอโซเทอร์มการดูดซับ

2.3.1 Langmuir adsorption isotherm

สมการ ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์แสดงในสมการที่ 1

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

จัดในรูปสมการเส้นตรง

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{K_L q_m} + \frac{1}{q_m} C_e \quad (2)$$

โดย C_e = ค่าความเข้มข้นของสารละลายที่สมดุล (mg L^{-1})

q_e = ปริมาณไอออนโลหะหนักที่ถูกดูดซับต่อปริมาณวัสดุดูดซับที่สภาวะสมดุล (mg g^{-1})

q_m = ปริมาณไอออนตะกั่วที่ถูกดูดซับสูงสุดต่อปริมาณวัสดุดูดซับ (mg g^{-1})

K_L = ค่าคงที่ (L mg^{-1})

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง C_e/q_e กับ C_e จะสามารถคำนวณค่า q_m และ K_L จากความชันเท่ากับ $1/q_m$ และจุดตัดเท่ากับ $1/K_L q_m$ ตามลำดับ

2.3.2 Freundlich adsorption isotherm

สมการ ไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรอนด์ลิชแสดงในสมการที่ 5

$$q_e = K_F C_e^{(1/n)} \quad (5)$$

จัดในรูปสมการเส้นตรง

$$\log q_e = \log K_F + \left(\frac{1}{n}\right) \log C_e \quad (6)$$

โดย K_F = ค่าคงที่ ($\text{mg g}^{-1} (\text{L mg}^{-1})^{1/n}$)

n = ค่าคงที่

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$ จะสามารถคำนวณค่า n และ K_F จากความชันเท่ากับ $1/n$ และจุดตัดเท่ากับ $\log K_F$ ตามลำดับ

บทที่ 3

การดำเนินการวิจัย

3.1 สารเคมี

1. แคดเมียมไนเตรท [$\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$] AR Grade
2. ซิงค์ไนเตรท [$\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$] AR Grade
3. เลดไนเตรท [$\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$] AR Grade
4. Cadmium standard Solution
5. Zinc Standard Solution
6. Lead Standard Solution
7. Sodium Hydroxide
8. Hydrochloric Acid

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์วิเคราะห์

1. เครื่อง Atomic Absorption Spectrophotometers (AAS) ยี่ห้อ GBC รุ่น 908 AA
2. เครื่องชั่งน้ำหนักละเอียด (ทศนิยม 4 ตำแหน่ง)
3. เตาอบ ยี่ห้อ Memmert รุ่น D-91126
4. pH Meter ยี่ห้อ Hach รุ่น EC220
5. เครื่องเขย่า ยี่ห้อ Gallenkamp รุ่น Orbital Shaker
6. กระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1

3.3 วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์

น้ำเสียสังเคราะห์ไอออนโลหะหนักแต่ละชนิดที่มีความเข้มข้น 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตรเตรียมโดยละลาย $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ หรือ $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ หรือ $\text{Zn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ในน้ำกลั่น และเติมกรด HNO_3 เข้มข้น ปริมาตร 5 มิลลิลิตรต่อปริมาตรของสารละลายที่เตรียม 1 ลิตร สารละลายดังกล่าวจะ

เก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4°C เพื่อใช้เป็นสารละลายตั้งต้นสำหรับเจือจางเป็นน้ำเสียที่ความเข้มข้นต่างๆ ตามที่ต้องการ

2. การเตรียมวัสดุคูดซับจากตะกอนจุลินทรีย์

ตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองนี้มี 3 ชนิด โดย 2 ชนิดแรก คือ AS-P และ MUR-P ได้จากระบบบำบัดน้ำเสีย Activated Sludge และ Upflow Anaerobic Sludge Blanket ของอุตสาหกรรมน้ำอัดลม ส่วนชนิดที่ 3 คือ CASS-N ได้จากระบบบำบัดน้ำเสีย Cyclic Activated Sludge System ของโรงควบคุมคุณภาพน้ำ กรุงเทพมหานคร ตะกอนจุลินทรีย์จะถูกศึกษาลักษณะสมบัติเบื้องต้น ได้แก่ ค่า pH ปริมาณความชื้น ของแข็งระเหยในตะกอนแห้ง และปริมาณโลหะในตะกอนจุลินทรีย์เริ่มต้น

การเตรียมวัสดุคูดซับทำโดยล้างด้วยน้ำกลั่น 3 ครั้ง นำไปตากแดดให้แห้ง อบในตู้อบที่ 105°C บดและแยกขนาดด้วยตะแกรงร่อน ให้ได้อนุภาคที่มีขนาด 106-150 ไมโครเมตร จากนั้นจึงเก็บไว้ในที่แห้งเพื่อใช้เป็นวัสดุคูดซับในการทดลองขั้นต่อไป

3. การศึกษาผลของระยะเวลาในการคูดซับ

ตะกอนจุลินทรีย์ปริมาณ 0.05 กรัม ขนาดอนุภาค 106-150 ไมโครเมตร ที่ได้จากการเตรียมจะถูกนำไปใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ที่บรรจุสารละลายไอออนตะกั่ว ความเข้มข้น 60 มิลลิกรัมต่อลิตร pH 6 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร นำขวดรูปชมพู่ไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ทำการเก็บตัวอย่างสารละลายปริมาตร 1 มิลลิลิตร ที่เวลา 0, 2, 5, 10, 15, 30 และ 60 นาที ตามลำดับ นำไปกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 ทันที จากนั้นจึงเติมกรด HNO₃ เข้มข้น ปริมาตร 0.05 มิลลิลิตร สารละลายส่วนใสที่ได้จะนำไปวิเคราะห์หาปริมาณไอออนตะกั่ว ด้วยเครื่อง Flame Atomic Absorption Spectrophotometer ตามวิธีมาตรฐานของ Standard Methods : 3111B [5]

ผลการทดลองที่ได้จะถูกนำไปวิเคราะห์หาระยะ เวลาที่เข้าสู่สมดุลของการคูดซับ

4. การศึกษาผลของปริมาณการใช้ตะกอนจุลินทรีย์

ตะกอนจุลินทรีย์ปริมาณ 0.05, 0.1, 0.2, 0.5 และ 1 กรัม จะนำไปใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร แต่ละใบที่บรรจุสารละลายไอออนตะกั่ว ความเข้มข้น 60 มิลลิกรัมต่อลิตร pH 6 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร นำขวดรูปชมพู่ไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ทำการเก็บตัวอย่างสารละลายที่เวลาเริ่มต้นและเวลาสมดุลของการคูดซับ (15 นาที) ปริมาตร 1 มิลลิลิตร นำไปใช้ตะกอนจุลินทรีย์เป็นวัสดุคูดซับ ไอออนโลหะหนักในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย

ชยาภาส หับทอง

กรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 ทันที จากนั้นจึงเติมกรด HNO_3 เข้มข้น ปริมาตร 0.05 มิลลิลิตร สารละลายส่วนใสที่ได้ จะนำไปวิเคราะห์หาปริมาณไอออนตะกั่ว ตามวิธีมาตรฐานของ Standard Methods : 3111B [5]

เปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนตะกั่ว (%Removal) ของตะกอนจุลินทรีย์ สามารถหาได้จากสมการที่ 1

$$\% \text{Removal} = \frac{C_i - C_e}{C_i} \times 100 \quad (1)$$

โดย C_i = ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น (mg L^{-1})

C_e = ความเข้มข้นของสารละลายที่สมดุล (mg L^{-1})

5. การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น

ตะกอนจุลินทรีย์ปริมาณ 0.05 กรัม จะนำไปใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร แต่ละใบ ที่บรรจุสารละลายไอออนตะกั่วที่ความเข้มข้น 60, 80, 100, 120 และ 140 มิลลิกรัมต่อลิตร pH 6 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร นำขวดรูปชมพู่ไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ทำการเก็บตัวอย่างสารละลายปริมาตร 1 มิลลิลิตร ที่เวลาเริ่มต้นและเวลาสมดุลของการดูดซับ (15 นาที) นำไปกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 ทันที จากนั้นจึงเติมกรด HNO_3 เข้มข้น ปริมาตร 0.05 มิลลิลิตร สารละลายส่วนใสที่ได้ จะนำไปวิเคราะห์หาปริมาณไอออนตะกั่ว ตามวิธีมาตรฐานของ Standard Methods : 3111B [5]

เปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนตะกั่ว (%Removal) และ ปริมาณไอออนตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อปริมาณวัสดุดูดซับ (Adsorption capacity, q_e) หาจากสมการที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

$$q_e = \frac{(C_i - C_e)v}{w} \quad (2)$$

โดย q_e = ปริมาณไอออนตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อปริมาณ

วัสดุดูดซับที่สภาวะสมดุล (mg g^{-1})

C_i = ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น (mg L^{-1})

C_e = ความเข้มข้นของสารละลายที่สมดุล (mg L^{-1})

v = ปริมาตรของสารละลาย (L)

w = ปริมาณวัสดุดูดซับ (g)

6. การศึกษา Adsorption isotherm

ข้อมูลที่ได้จากการทดลองในตอนต้นที่ 5 จะถูกนำไปวิเคราะห์ ด้วยสมการไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ และฟรอนด์ลิช เพื่อเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับไอออนตะกั่วของตะกอนจุลินทรีย์ทั้ง 3 ชนิด ส่วนการพิจารณาว่าสมการใดสามารถทำนายผลการทดลองได้ดีกว่ากันนั้น จะพิจารณาจากค่า R^2

6.1 Langmuir adsorption isotherm [6]

สมการไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์แสดงในสมการที่ 3

$$q_e = \frac{K_L q_m C_e}{1 + K_L C_e} \quad (3)$$

จัดในรูปสมการเส้นตรง

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{K_L q_m} + \frac{1}{q_m} C_e \quad (4)$$

โดย C_e = ค่าความเข้มข้นของสารละลายที่สมดุล

(mg L^{-1})

q_e = ปริมาณไอออนตะกั่วที่ถูกดูดซับต่อปริมาณ
วัสดุดูดซับที่สภาวะสมดุล (mg g^{-1})

q_m = ปริมาณไอออนตะกั่วที่ถูกดูดซับสูงสุดต่อ
ปริมาณวัสดุดูดซับ (mg g^{-1})

K_L = ค่าคงที่ (L mg^{-1})

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง C_e/q_e กับ C_e จะสามารถคำนวณค่า q_m และ K_L จากความชันเท่ากับ $1/q_m$ และจุดตัดเท่ากับ $1/K_L q_m$ ตามลำดับ

6.2 Freundlich adsorption isotherm [7]

สมการไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรอนด์ลิชแสดงในสมการที่ 5

$$q_e = K_F C_e^{(1/n)} \quad (5)$$

จัดในรูปสมการเส้นตรง

$$\log q_e = \log K_F + \left(\frac{1}{n}\right) \log C_e \quad (6)$$

โดย K_F = ค่าคงที่ ($\text{mg g}^{-1}(\text{L mg}^{-1})^{1/n}$)

n = ค่าคงที่

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log q_c$ กับ $\log C_c$ จะสามารถคำนวณค่า n และ K_f จากความชันเท่ากับ $1/n$ และจุดตัดเท่ากับ $\log K_f$ ตามลำดับ

บทที่ 4

ผลการวิจัย

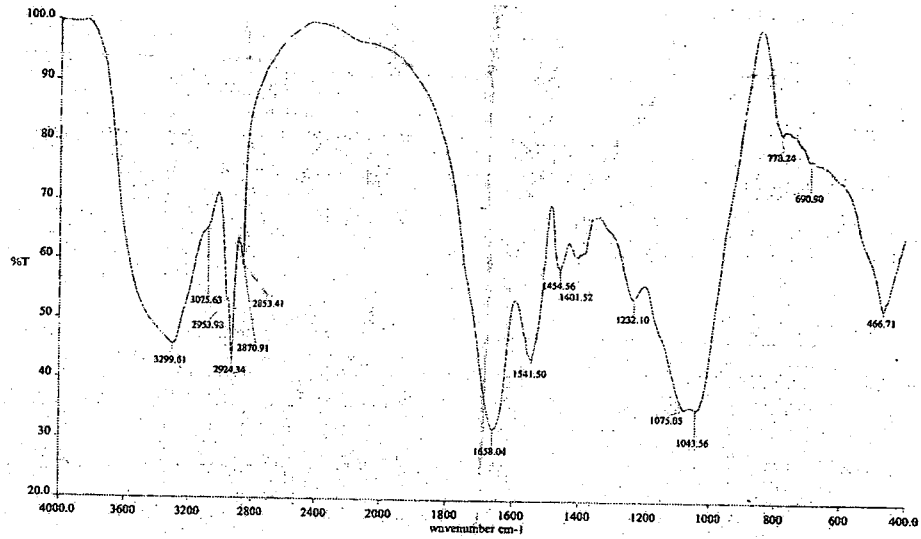
4.1 ลักษณะสมบัติของตะกอนจุลินทรีย์

ตะกอนจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียก่อนเตรียมเป็นวัสดุดูดซับ ถูกศึกษาลักษณะสมบัติเบื้องต้น ได้แก่ ค่า pH ปริมาณความชื้น ปริมาณของแข็งระเหยในตะกอนแห้ง และปริมาณโลหะในตะกอนจุลินทรีย์เริ่มต้น แสดงในตารางที่ 1

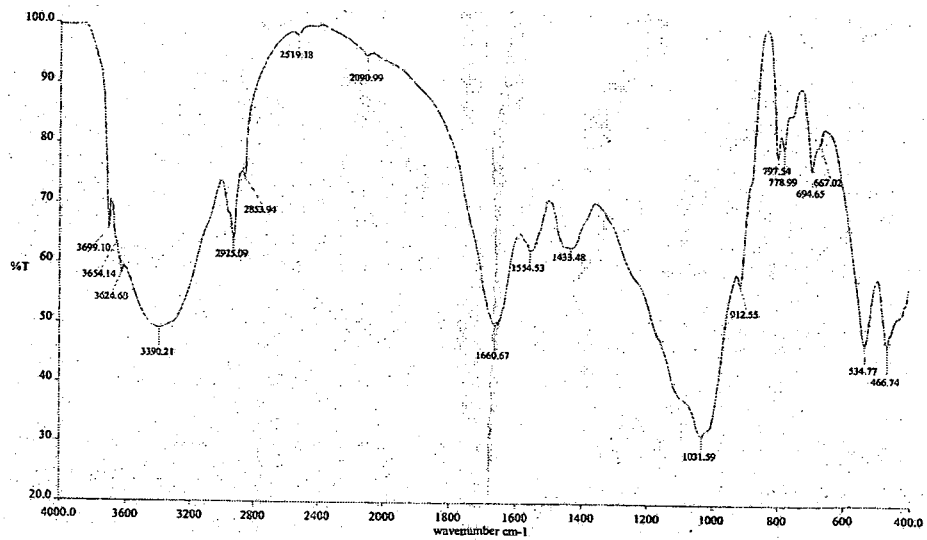
ตารางที่ 1 ลักษณะสมบัติของตะกอนจุลินทรีย์

ชนิดตะกอน	pH	ความชื้น (%)	ของแข็งระเหย (%)	ปริมาณตะกั่วเริ่มต้น (mg/g)	ปริมาณแคดเมียมเริ่มต้น (mg/g)	ปริมาณสังกะสีเริ่มต้น (mg/g)
AS-P	7.30	80.35	73.67	0	0	0
MUR-P	6.49	86.44	65.70	0	0	0
CASS-N	7.13	78.48	71.53	0	0	0

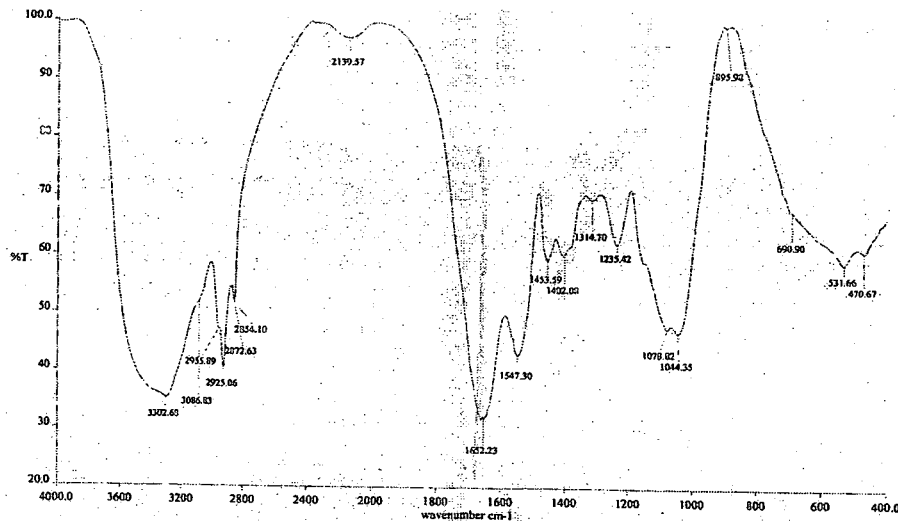
นอกจากนี้ยังได้วิเคราะห์ หมู่ฟังก์ชันของตะกอนจุลินทรีย์ด้วยเครื่อง FTIR กราฟที่ได้แสดงในรูปที่ 1-3 พบว่า ประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันของกรดคาร์บอกซิลิก เอไมด์ เอมีน ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่มีผลต่อการดูดซับไอออนโลหะหนัก



รูปที่ 1 แสดงเปอร์เซ็นต์การยอมให้แสงผ่าน (%T) กับความยาวคลื่น (cm⁻¹) ของ AS-P



รูปที่ 2 แสดงเปอร์เซ็นต์การยอมให้แสงผ่าน (%T) กับความยาวคลื่น (cm⁻¹) ของ CASS-N

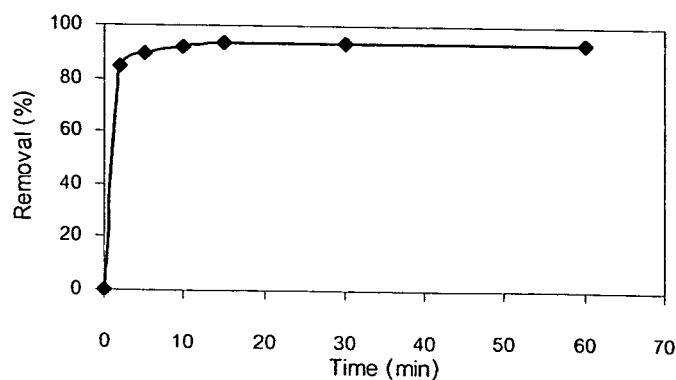


รูปที่ 3 แสดงเปอร์เซ็นต์การยอมให้แสงผ่าน (%T) กับความยาวคลื่น (cm^{-1}) ของ MUR-P

4.2 การศึกษาการดูดซับไอออนโลหะตะกั่ว

4.2.1 ผลของระยะเวลาในการดูดซับ

จากการศึกษาผลของระยะเวลาในการดูดซับไอออนตะกั่วของตะกอนจุลินทรีย์ ที่ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น 60 มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อหาเวลาที่เข้าสู่สมดุลของการดูดซับ พบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง เปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนตะกั่วของตะกอนจุลินทรีย์ทั้ง 3 ชนิด กับระยะเวลาในการดูดซับ มีแนวโน้มในทำนองเดียวกัน คือ การดูดซับไอออนตะกั่วจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 5 นาทีแรก แล้วจึงเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ในช่วงเวลาถัดมา จนกระทั่งเข้าสู่สมดุลที่เวลา 15 นาที โดยเปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนตะกั่วของตะกอนจุลินทรีย์ AS-P มีค่าประมาณ 94 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 4

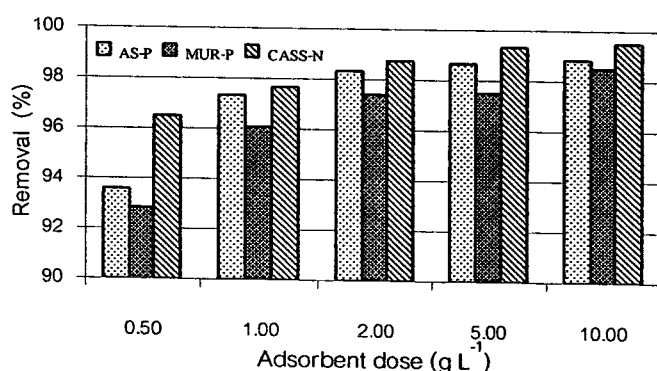


รูปที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนตะกั่วของ AS-P กับระยะเวลาในการดูดซับ

4.2.2 ผลของปริมาณการใช้ตะกอนจุลินทรีย์

จากการศึกษาผลของปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการดูดซับไอออนตะกั่วออกจากสารละลาย ความเข้มข้นเริ่มต้น 60 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนตะกั่วของตะกอน จุลินทรีย์ทั้ง 3 ชนิด กับปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ มีแนวโน้มในทำนองเดียวกัน คือ เปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนตะกั่วของตะกอนจุลินทรีย์เพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้เพิ่มขึ้น โดยเปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนตะกั่วเพิ่มขึ้นจาก 93-96 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้ปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 99 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้ปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 5 การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเป็นเพราะปริมาณไอออนตะกั่วในสารละลายเริ่มต้นยังคงเท่าเดิม แต่ปริมาณพื้นที่ของการดูดซับเพิ่มขึ้นจากการใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่เพิ่มขึ้น จึงทำให้ไอออนตะกั่วที่อยู่ในสารละลายถูกดูดซับเพิ่มขึ้น [8]

นอกจากนี้ ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าปริมาณการใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่เหมาะสมอยู่ที่ 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากการเพิ่มปริมาณการใช้ตะกอนจุลินทรีย์มากกว่านั้นนั้น มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนตะกั่วไม่มาก

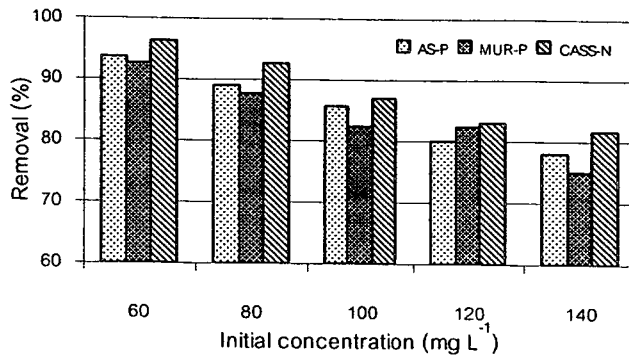


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนตะกั่วกับปริมาณการใช้ตะกอนจุลินทรีย์

4.2.3 ผลของความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น

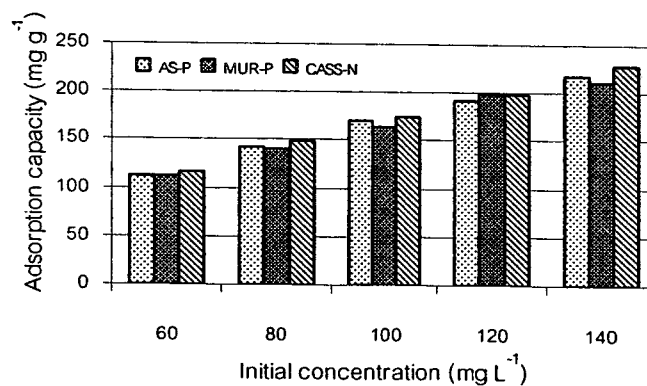
จากการศึกษาผลของความเข้มข้นไอออนตะกั่วในสารละลายเริ่มต้น พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนตะกั่วของตะกอนจุลินทรีย์ทั้ง 3 ชนิด กับความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น มีแนวโน้มในทำนองเดียวกัน คือ เปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนตะกั่วของตะกอนจุลินทรีย์จะลดลง เมื่อปริมาณไอออนตะกั่วในสารละลายเริ่มต้นเพิ่มขึ้น โดยลดลงจาก 93-96 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 60 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นประมาณ 75-82 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 140 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 6 การลดลงของเปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนตะกั่ว เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นนั้น

เนื่องจากสารละลายมีไอออนตะกั่วเพิ่มขึ้น ขณะที่ปริมาณพื้นผิวของการดูดซับยังคงเท่าเดิม จึงทำให้มีปริมาณไอออนตะกั่วที่ไม่ถูกดูดซับเพิ่มมากขึ้น [9]



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนตะกั่วของตะกอนจุลินทรีย์ กับความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น ที่ปริมาณการใช้ตะกอนจุลินทรีย์ 0.5 g L⁻¹

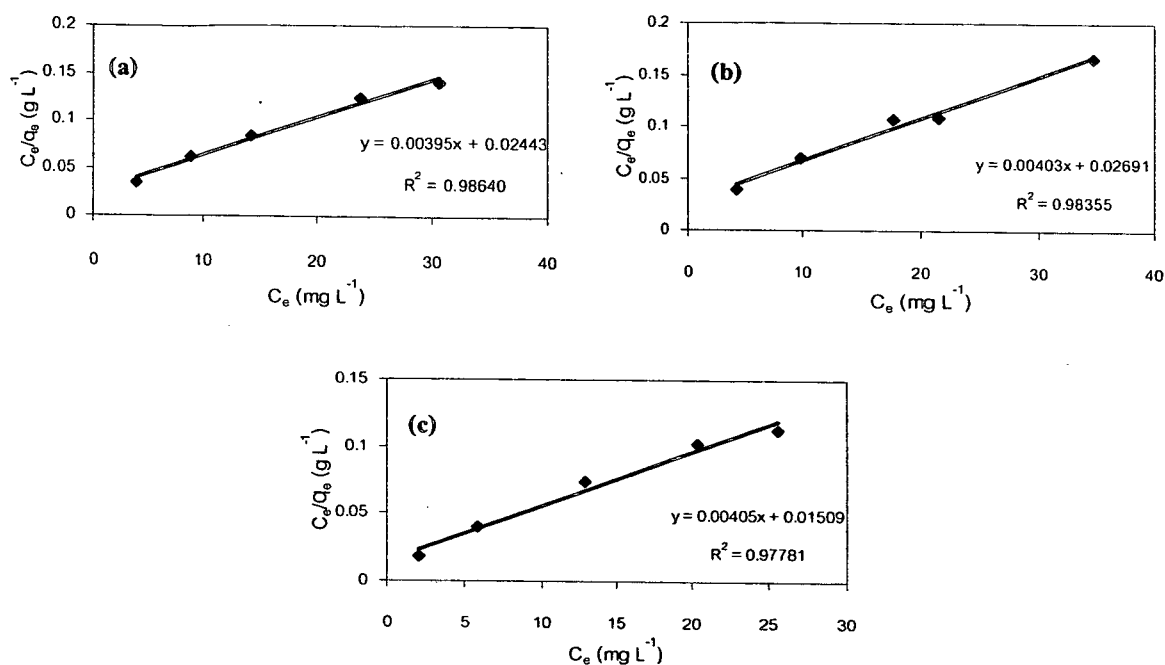
ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับไอออนตะกั่วของตะกอนจุลินทรีย์ทั้ง 3 ชนิด กับความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น พบว่ามีแนวโน้มในทำนองเดียวกัน คือ ปริมาณการดูดซับไอออนตะกั่วของตะกอนจุลินทรีย์ทั้ง 3 ชนิด เพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นเพิ่มขึ้น โดยเพิ่มขึ้นจาก 112-115 มิลลิกรัมตะกั่วต่อกรัมวัสดุดูดซับ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 60 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 210-229 มิลลิกรัมตะกั่วต่อกรัมวัสดุดูดซับ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 140 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 7



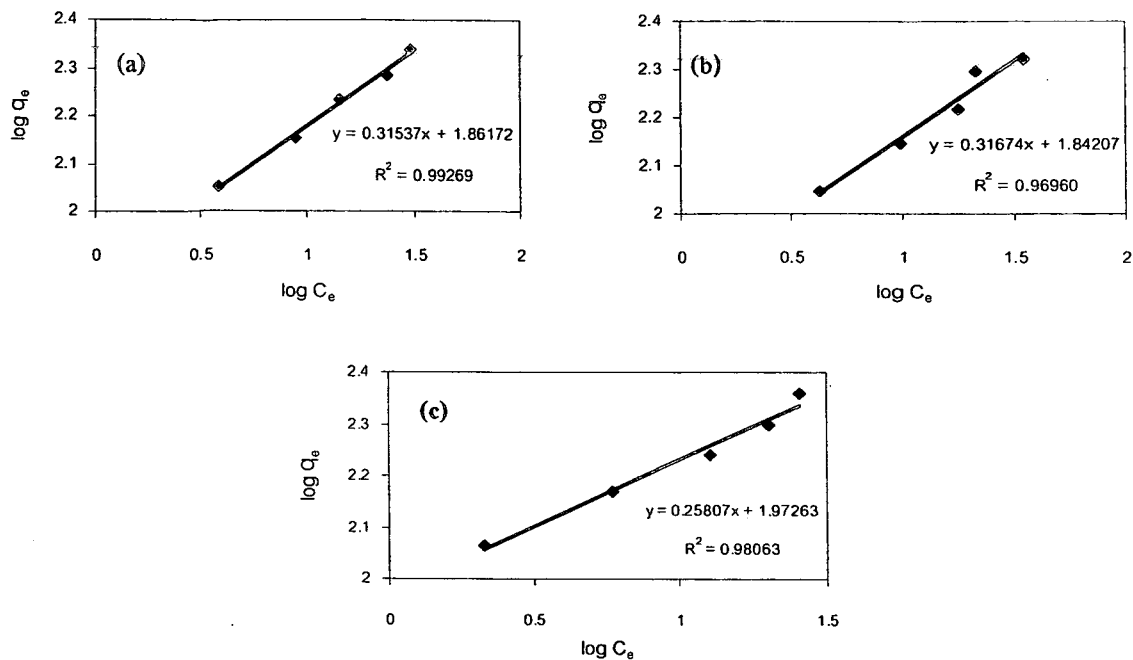
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับไอออนตะกั่วของตะกอนจุลินทรีย์กับความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นที่ปริมาณการใช้ตะกอนจุลินทรีย์ 0.5 g L⁻¹

4.2.4 การศึกษา Adsorption isotherm

Langmuir และ Freundlich adsorption isotherm ของการดูดซับไอออนโลหะตะกั่วโดยตะกอนจุลินทรีย์ทั้ง 3 ชนิด แสดงในรูปที่ 8 และ รูปที่ 9 ตามลำดับ ส่วนค่าพารามิเตอร์ต่างๆ และค่า R^2 จากสมการ adsorption isotherm จะแสดงในตารางที่ 2



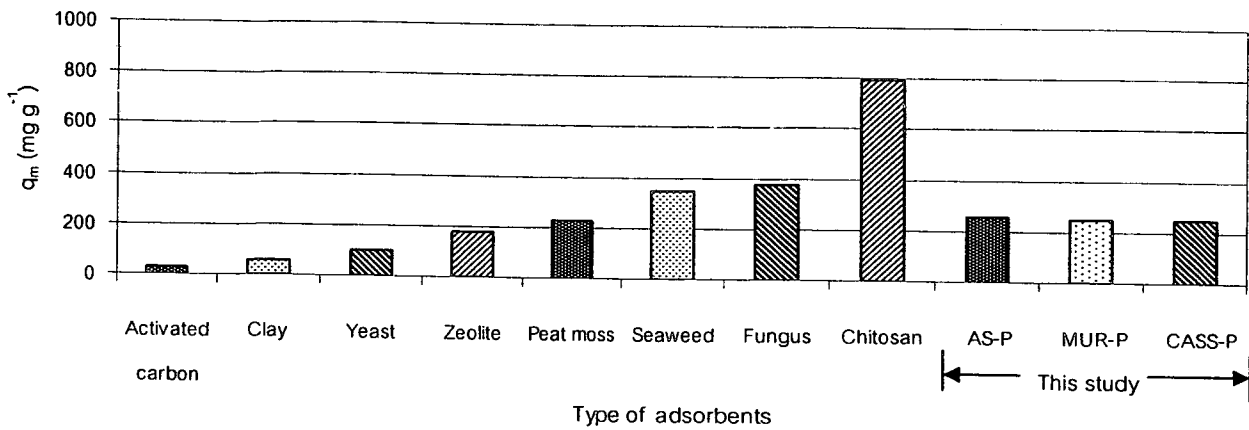
รูปที่ 8 Langmuir adsorption isotherm ของการดูดซับไอออนโลหะตะกั่วโดย AS-P (รูป a), MUR-P (รูป b) และ CASS-N (รูป c)



รูปที่ 9 Freundlich adsorption isotherm ของการดูดซับไอออนตะกั่วโดย AS-P (รูป a), MUR-P (รูป b) และ CASS-N (รูป c)

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์และค่า R^2 ของสมการ Langmuir และ Freundlich adsorption isotherm

ชนิดของ ตะกอนจุลินทรีย์	Langmuir Adsorption Isotherm			Freundlich Adsorption Isotherm		
	q_m (mg g^{-1})	K_L (L g^{-1})	R^2	K_F	$1/n$	R^2
AS-P	253.16	0.1617	0.9864	72.73	0.32	0.9927
MUR-P	248.13	0.1497	0.9836	69.51	0.32	0.9696
CASS-N	246.91	0.2684	0.9778	93.89	0.26	0.9806



รูปที่ 10 ค่าปริมาณไอออนตะกั่วที่ถูกดูดซับสูงสุด (q_m) ของวัสดุดูดซับชนิดต่างๆ

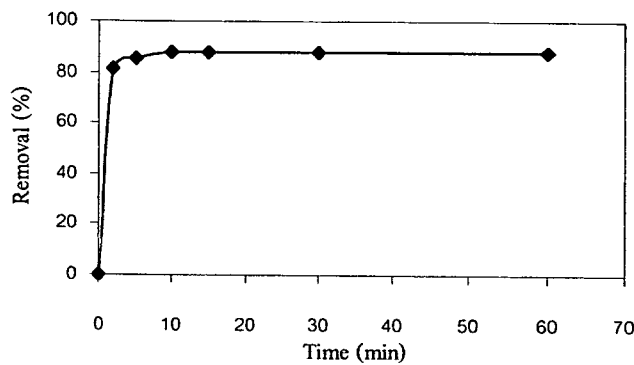
จากผลการทดลอง พบว่าสมการไอโซเทอร์มการดูดซับทั้ง 2 สมการ สามารถใช้ทำนายผลการทดลองได้ดี เมื่อพิจารณาจากค่า R^2 ที่มีค่ามากกว่า 0.96 ค่าความชัน $1/n$ ที่มาก แสดงถึงความสามารถในการดูดซับที่ดีเมื่อความเข้มข้นสูง ส่วน ค่า K_F ที่มาก แสดงถึงความสามารถในการดูดซับที่สูง เมื่อนำ ค่า K_F ของ AS-P, MUR-P และ CASS-N มีค่าเป็น 72.73, 69.51 และ 93.89 ตามลำดับ มาเปรียบเทียบกับ ค่า K_F ของวัสดุดูดซับชนิดอื่น เช่น ถ่านกัมมันต์ทางการค้า Filtrasorb 300 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 6.29 [10] พบว่าค่า K_F ของตะกอนจุลินทรีย์มีค่าสูงกว่าถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 ถึง 11-15 เท่า ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการดูดซับไอออนตะกั่วของตะกอนจุลินทรีย์ทั้ง 3 ชนิด ที่สูงกว่าถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 มาก ส่วนค่าความชัน $1/n$ ของตะกอนจุลินทรีย์ทั้ง 3 ชนิด มีค่าสูงกว่าถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 เล็กน้อย

ค่า K_L นอกจากจะแสดงถึงค่าคงที่ของอัตราการดูดซับต่อค่าคงที่ของอัตราการคายแล้ว ยังสามารถบอกถึงลักษณะของพลังงานที่เกิดจากการดูดซับ ถ้าการดูดซับเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ซึ่งโดยปกติก็มักเป็นเช่นนั้น ค่า K_L จะมีค่าลดลง เมื่อให้อุณหภูมิของระบบเพิ่มขึ้น [11] ส่วนปริมาณไอออนโลหะหนักตะกั่วที่ถูกดูดซับสูงสุด (q_m) ของ AS-P, MUR-P และ CASS-N ที่ได้จากสมการไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ มีค่าเป็น 253, 248 และ 247 มิลลิกรัมโลหะต่อกรัมวัสดุดูดซับ ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าในระดับปานกลาง เมื่อเทียบกับวัสดุดูดซับชนิดอื่นที่ใช้ในงานวิจัยที่ผ่านมา [8, 12-14] ดังแสดงในรูปที่ 10 จากรูปดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าไคโตซาน (Chitosan) มีค่า q_m สูงสุด เมื่อเทียบกับวัสดุดูดซับชนิดอื่น โดยมีค่าเท่ากับ 796 มิลลิกรัมต่อกรัม แต่เนื่องจากไคโตซานมีราคาแพงกว่าตะกอนจุลินทรีย์ ซึ่งเป็นของเหลือทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียมาก จึงเป็นข้อจำกัดสำคัญในการนำไคโตซานมาใช้เป็นวัสดุดูดซับไอออนโลหะหนัก

4.3 การศึกษาการดูดซับไอออนโลหะแคะเดเมียม

4.3.1 การศึกษาผลของระยะเวลาในการดูดซับ

จากการศึกษาผลของระยะเวลาในการดูดซับเพื่อหาเวลาที่เข้าสู่สมดุลของการดูดซับ พบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง เปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนแคะเดเมียมของตะกอน จุลินทรีย์ทั้ง 3 ชนิด กับระยะเวลาในการดูดซับ มีแนวโน้มในทำนองเดียวกัน การดูดซับไอออนแคะเดเมียมจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 5 นาทีแรก จากนั้นจึงเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ในช่วงเวลาถัดมา จนกระทั่งเข้าสู่สมดุลที่เวลา 15 นาที โดยเปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนแคะเดเมียมของตะกอนจุลินทรีย์มีค่าประมาณ 88 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 11

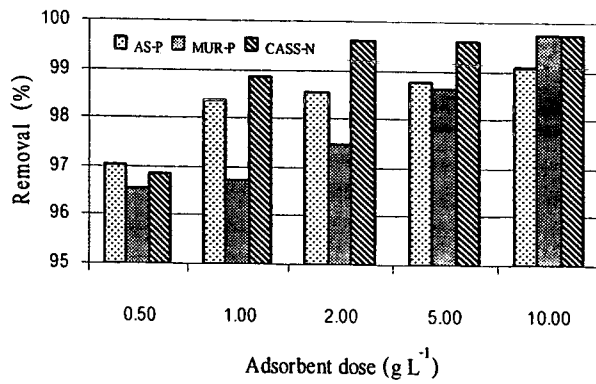


รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนแคะเดเมียมของ AS-P กับระยะเวลาในการดูดซับ

4.3.2 การศึกษาผลของปริมาณการใช้ตะกอนจุลินทรีย์

จากการศึกษาผลของปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการดูดซับไอออนแคะเดเมียม พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนแคะเดเมียมของตะกอนจุลินทรีย์ทั้ง 3 ชนิด กับปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ มีแนวโน้มในทำนองเดียวกัน เปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนแคะเดเมียมของตะกอนจุลินทรีย์เพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้เพิ่มขึ้น โดยเปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนแคะเดเมียมเพิ่มขึ้นจาก 96 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้ปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 99 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้ปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 12 การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเป็นเพราะปริมาณไอออนแคะเดเมียมในสารละลายเริ่มต้นยังคงเท่าเดิม แต่ปริมาณพื้นที่ของการดูดซับเพิ่มขึ้นจากการใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่เพิ่มขึ้น จึงทำให้ไอออนแคะเดเมียมที่เหลืออยู่ในสารละลายถูกดูดซับเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ ผลการทดลองยังแสดงให้เห็นว่าปริมาณการใช้ตะกอนจุลินทรีย์เหมาะสมอยู่ที่ 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากการเพิ่มปริมาณการใช้ตะกอนจุลินทรีย์มากกว่านี้ มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนแคะเดเมียมไม่มาก ดังนั้นการทดลองในตอนต่อไปจะใช้ปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร

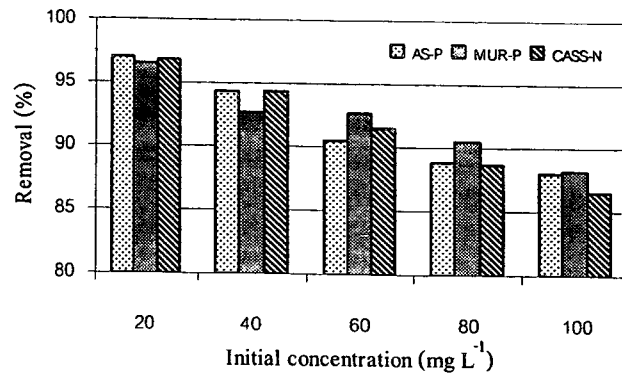


รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนแคดเมียม กับปริมาณการใช้ตะกอนจุลินทรีย์ ที่ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น 20 mg L⁻¹

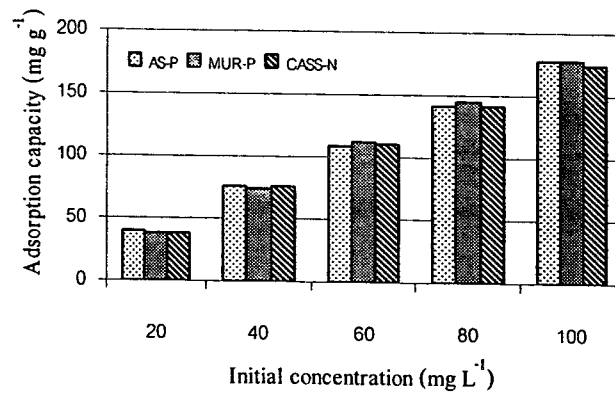
4.3.3 การศึกษาผลของความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น

จากการศึกษาผลของความเข้มข้นไอออนแคดเมียมในสารละลายเริ่มต้น พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนแคดเมียมของตะกอนจุลินทรีย์ทั้ง 3 ชนิด กับความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น มีแนวโน้มในทำนองเดียวกัน เปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนแคดเมียมของตะกอนจุลินทรีย์จะลดลงเมื่อปริมาณ ไอออนแคดเมียมในสารละลายเริ่มต้นเพิ่มขึ้น โดยลดลงจาก 96 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นประมาณ 87 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 13 การลดลงของเปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนแคดเมียม เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นนั้น เนื่องจากสารละลายมีไอออนแคดเมียมเพิ่มขึ้น ขณะที่ปริมาณพื้นผิวของการดูดซับยังคงเท่าเดิม จึงทำให้มีปริมาณไอออนที่ไม่ถูกดูดซับเพิ่มมากขึ้น

ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับไอออนแคดเมียมของตะกอนจุลินทรีย์ทั้ง 3 ชนิด กับความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น พบว่ามีแนวโน้มในทำนองเดียวกัน ปริมาณการดูดซับไอออนแคดเมียมของตะกอนจุลินทรีย์ทั้ง 3 ชนิด จะเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของไอออนแคดเมียมในสารละลายเริ่มต้นเพิ่มขึ้น โดยเพิ่มขึ้นจาก 38 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกรัมวัสดุดูดซับ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 177 มิลลิกรัมแคดเมียมต่อกรัมวัสดุดูดซับ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 14



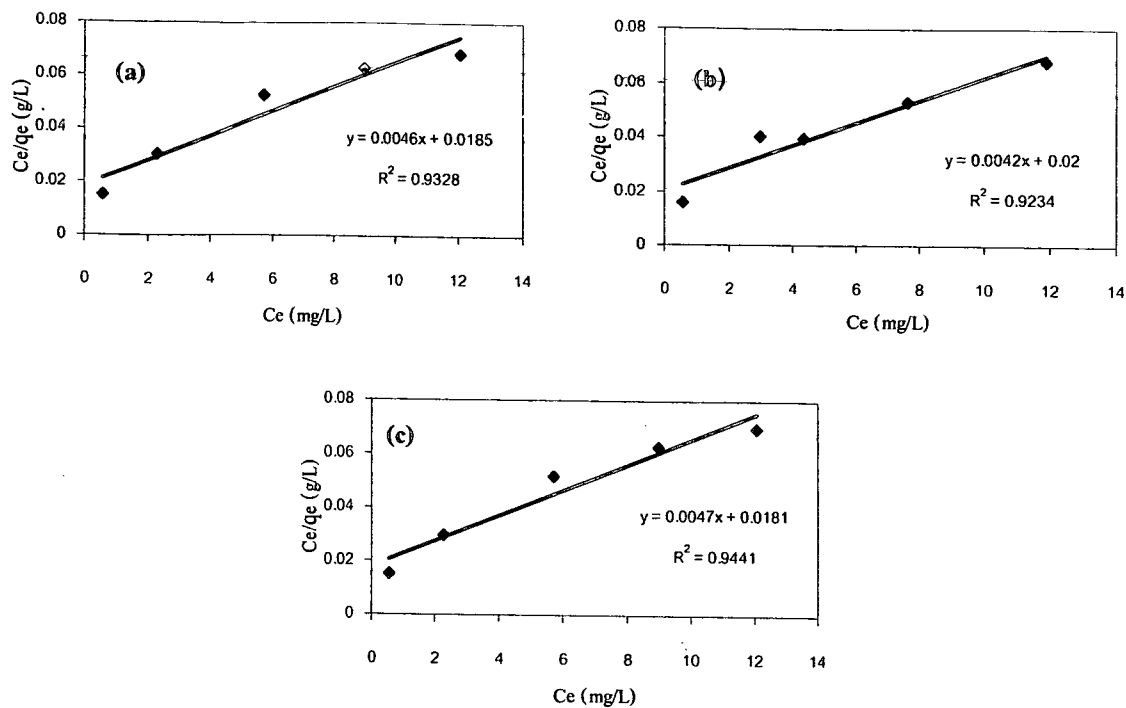
รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนแควดเมียมของตะกอนจุลินทรีย์ กับความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น ที่ปริมาณการใช้ตะกอนจุลินทรีย์ 0.5 g L⁻¹



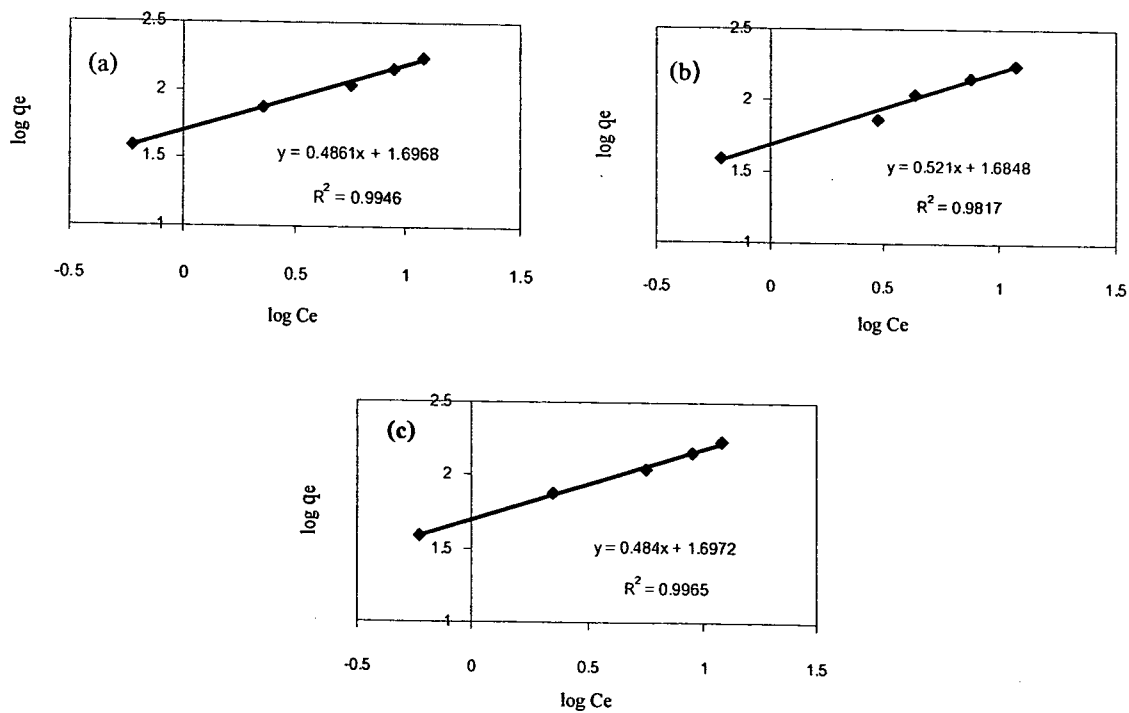
รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับไอออนแควดเมียมของตะกอนจุลินทรีย์ กับความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น ที่ปริมาณการใช้ตะกอนจุลินทรีย์ 0.5 g L⁻¹

4.3.4 การศึกษา Adsorption isotherm

รูปที่ 15 แสดง Langmuir adsorption isotherm ของการดูดซับไอออนโลหะแควดเมียมโดยตะกอนจุลินทรีย์ทั้ง 3 ชนิด ส่วนรูปที่ 16 แสดง Freundlich adsorption isotherm ของการดูดซับไอออนโลหะแควดเมียมโดยตะกอนจุลินทรีย์ทั้ง 3 ชนิด ค่าพารามิเตอร์และค่า R² ของสมการ Langmuir และ Freundlich adsorption isotherm ดังแสดงในตารางที่ 3



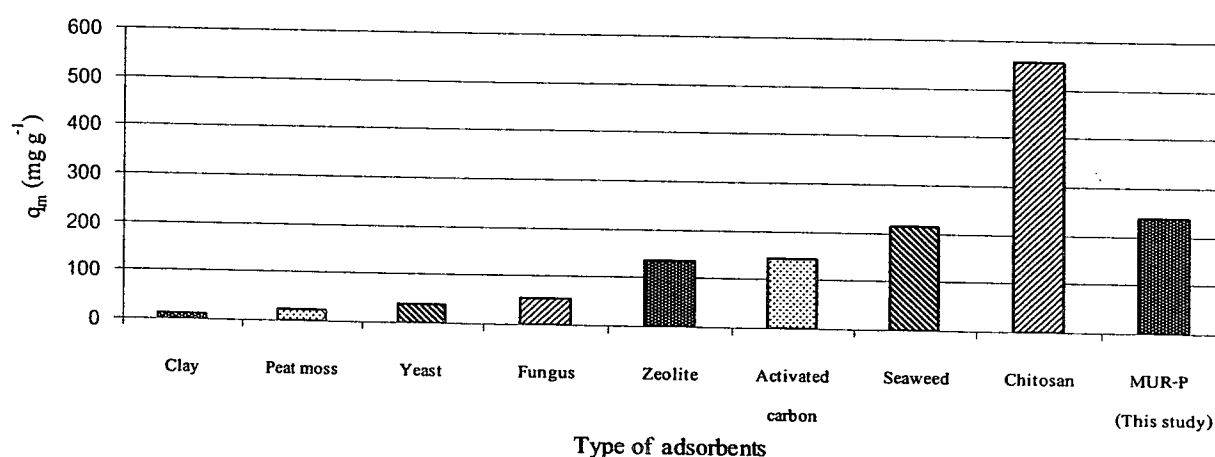
รูปที่ 15 Langmuir adsorption isotherm ของการดูดซับไอออนโลหะแคดเมียมโดย AS-P (รูป a), MUR-P (รูป b) และ CASS-N (รูป c)



รูปที่ 16 Freundlich adsorption isotherm ของการดูดซับไอออนโลหะแคดเมียมโดย AS-P (รูป a), MUR-P (รูป b) และ CASS-N (รูป c)

ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์และค่า R^2 ของสมการ Langmuir และ Freundlich Adsorption Isotherm

ชนิดของ ตะกอนจุลินทรีย์	Langmuir Adsorption Isotherm			Freundlich Adsorption Isotherm		
	q_m (mg g^{-1})	K_L (L g^{-1})	R^2	K_F	n	R^2
AS-P	217.39	0.248	0.9328	49.75	2.07	0.9946
MUR-P	238.09	0.210	0.9234	48.39	1.92	0.9817
CASS-N	212.76	0.257	0.9441	49.79	2.07	0.9965



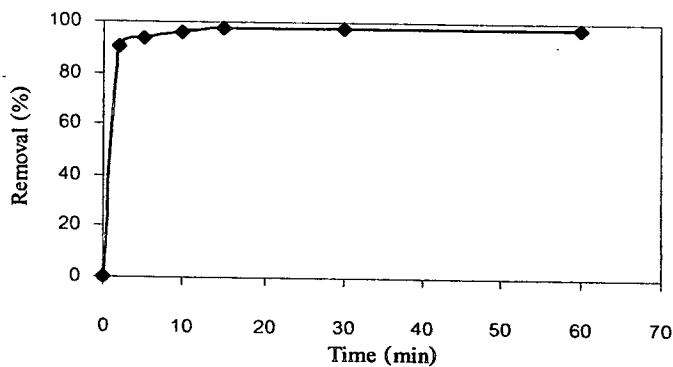
รูปที่ 17 ค่าปริมาณไอออนแอมโมเนียมที่ถูกดูดซับสูงสุด (q_m) ของวัสดุดูดซับชนิดต่างๆ

จากผลการทดลอง พบว่าไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรอนด์ลิซและแลงเมียร์ สามารถทำนายผลการทดลองได้ดี เนื่องจากมีค่า R^2 ใกล้เคียง 1 ค่า K_F จาก ไอโซเทอร์มการดูดซับของฟรอนด์ลิซ ของตะกอนจุลินทรีย์ทั้ง 3 ชนิด มีค่าสูง ซึ่งอยู่ระหว่าง 48-50 ค่าดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงความสามารถในการดูดซับที่ดี ส่วนค่าปริมาณไอออนแอมโมเนียมที่ถูกดูดซับสูงสุด (q_m) ที่ได้จาก ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ ของตะกอนจุลินทรีย์ทั้ง 3 ชนิด ได้แก่ AS-P, MUR-P และ CASS-N มีค่าเท่ากับ 217, 238 และ 213 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งเป็นระดับที่สูงเมื่อเทียบกับวัสดุดูดซับชนิดอื่นที่ใช้ในงานวิจัยที่ผ่านมา [8, 12-14] ยกเว้นไคโตซาน (Chitosan) ที่มีค่าปริมาณไอออนแอมโมเนียมที่ถูกดูดซับสูงสุด (q_m) ที่ 558 มิลลิกรัมต่อกรัม (รูปที่ 17) แต่เนื่องจากราคาของไคโตซานแพงกว่าตะกอนจุลินทรีย์ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียมาก จึงเป็นข้อจำกัดที่สำคัญในการนำไคโตซานมาใช้เป็นวัสดุดูดซับไอออนโลหะหนักออกจากรน้ำเสีย

4.4 การศึกษาการดูดซับไอออนโลหะสังกะสี

4.4.1 ผลของระยะเวลาในการดูดซับ

จากการศึกษาผลของระยะเวลาในการดูดซับ ไอออนตะกั่วของตะกอนจุลินทรีย์ ที่ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อหาเวลาที่เข้าสู่สมดุลของการดูดซับ พบว่าความสัมพันธ์ระหว่าง เปอร์เซ็นต์การกำจัด ไอออนสังกะสีของตะกอนจุลินทรีย์ทั้ง 3 ชนิด กับระยะเวลาในการดูดซับ มีแนวโน้มในทำนองเดียวกัน คือ การดูดซับไอออนสังกะสีจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 5 นาทีแรก แล้วจึงเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ ในช่วงเวลาถัดมา จนกระทั่งเข้าสู่สมดุลที่เวลา 15 นาที โดยเปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนสังกะสี ของตะกอนจุลินทรีย์ AS-P มีค่าประมาณ 97 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในรูปที่ 18

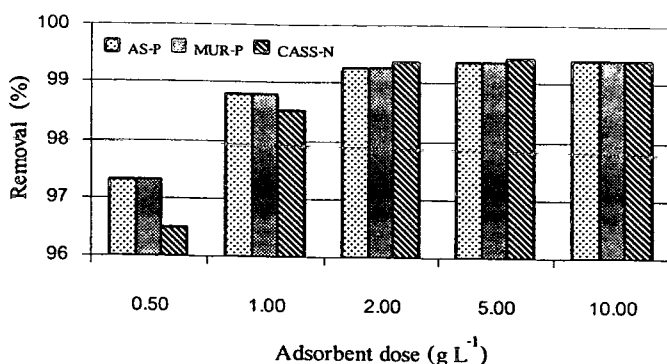


รูปที่ 18 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนสังกะสีของ AS-P กับระยะเวลาในการดูดซับ

4.4.2 ผลของปริมาณการใช้ตะกอนจุลินทรีย์

จากการศึกษาผลของปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ในการดูดซับ ไอออนสังกะสีออกจากสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัด ไอออนสังกะสีของตะกอนจุลินทรีย์ทั้ง 3 ชนิด กับปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้ มีแนวโน้มในทางเดียวกัน คือ เปอร์เซ็นต์การกำจัด ไอออนสังกะสีของตะกอนจุลินทรีย์เพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ที่ใช้เพิ่มขึ้น โดยเปอร์เซ็นต์การกำจัด ไอออนสังกะสีเพิ่มขึ้นจาก 97 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้ปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 99 เปอร์เซ็นต์ เมื่อใช้ปริมาณตะกอนจุลินทรีย์ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 19 การเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเป็นเพราะปริมาณ ไอออนสังกะสีในสารละลายเริ่มต้นยังคงเท่าเดิม แต่ปริมาณพื้นที่ของการดูดซับเพิ่มขึ้น จากการใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่เพิ่มขึ้น จึงทำให้ไอออนสังกะสีที่อยู่ในสารละลายถูกดูดซับเพิ่มขึ้น

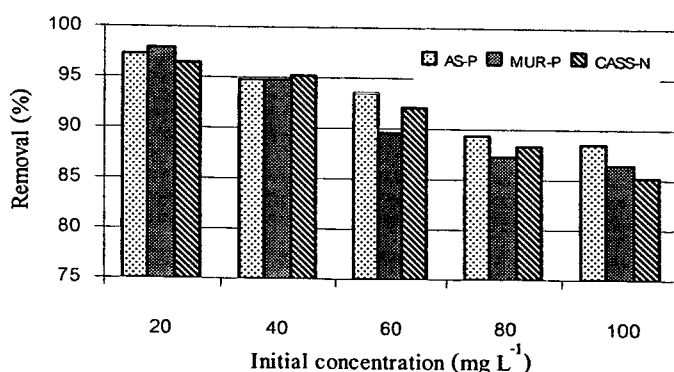
นอกจากนี้ ผลการทดลองยังแสดงในเห็นว่าการใช้ตะกอนจุลินทรีย์ที่เหมาะสมอยู่ที่ 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากการเพิ่มปริมาณการใช้ตะกอนจุลินทรีย์มากกว่านี้ มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของเปอร์เซ็นต์การกำจัด ไอออนสังกะสีไม่มาก ดังนั้นจึงใช้ตะกอนจุลินทรีย์ปริมาณ 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ในการทดลองต่อไป



รูปที่ 19 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนสังกะสีกับปริมาณการใช้ตะกอนจุลินทรีย์

4.4.3 ผลของความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น

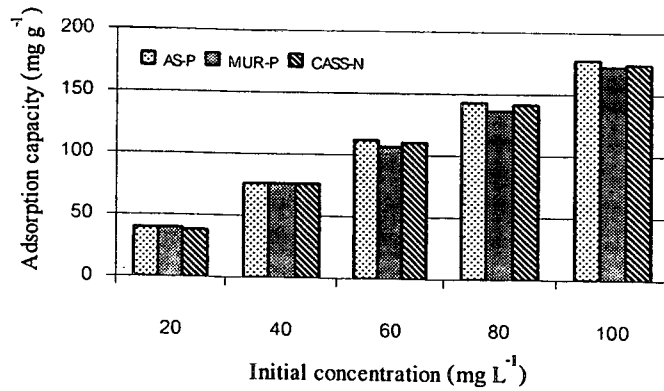
จากการศึกษาผลของความเข้มข้นสารละลายเริ่มต้น ที่ปริมาณการใช้ตะกอนจุลินทรีย์ 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนสังกะสีของตะกอนจุลินทรีย์ทั้ง 3 ชนิด กับความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น มีแนวโน้มในทางเดียวกัน คือ เปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนสังกะสีของตะกอนจุลินทรีย์จะลดลง เมื่อปริมาณไอออนสังกะสีในสารละลายเริ่มต้นเพิ่มขึ้น โดยลดลงจาก 97-98 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นประมาณ 85-88 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 20 การลดลงของเปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนสังกะสี เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นนั้น เนื่องจากสารละลายมีไอออนสังกะสีเพิ่มขึ้น ขณะที่ปริมาณพื้นผิวของการดูดซับยังคงเท่าเดิม จึงทำให้มีปริมาณไอออนสังกะสีที่ไม่ถูกดูดซับเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 20 ความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนสังกะสีของตะกอนจุลินทรีย์ กับความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น ที่ปริมาณการใช้ตะกอนจุลินทรีย์ 0.5 g L⁻¹

ส่วนความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับไอออนสังกะสีของตะกอนจุลินทรีย์ทั้ง 3 ชนิด กับความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น พบว่ามีแนวโน้มในทำนองเดียวกัน คือ ปริมาณการดูดซับไอออนสังกะสีของตะกอนจุลินทรีย์ทั้ง 3 ชนิด เพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้นเพิ่มขึ้น โดยเพิ่มขึ้นจาก 39 มิลลิกรัมสังกะสีต่อกรัมการใช้ตะกอนจุลินทรีย์เป็นวัสดุดูดซับไอออนโลหะหนักในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย

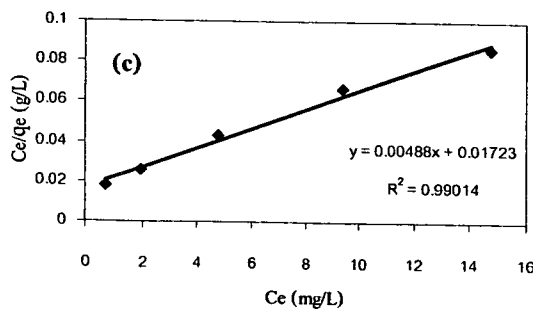
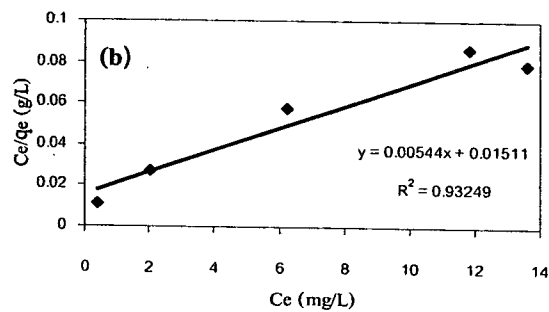
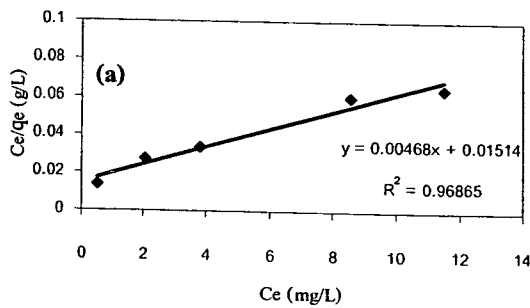
วัสดุดูดซับ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 174-177 มิลลิกรัมสังกะสีต่อกรัมวัสดุดูดซับ ที่ความเข้มข้นเริ่มต้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังแสดงในรูปที่ 21



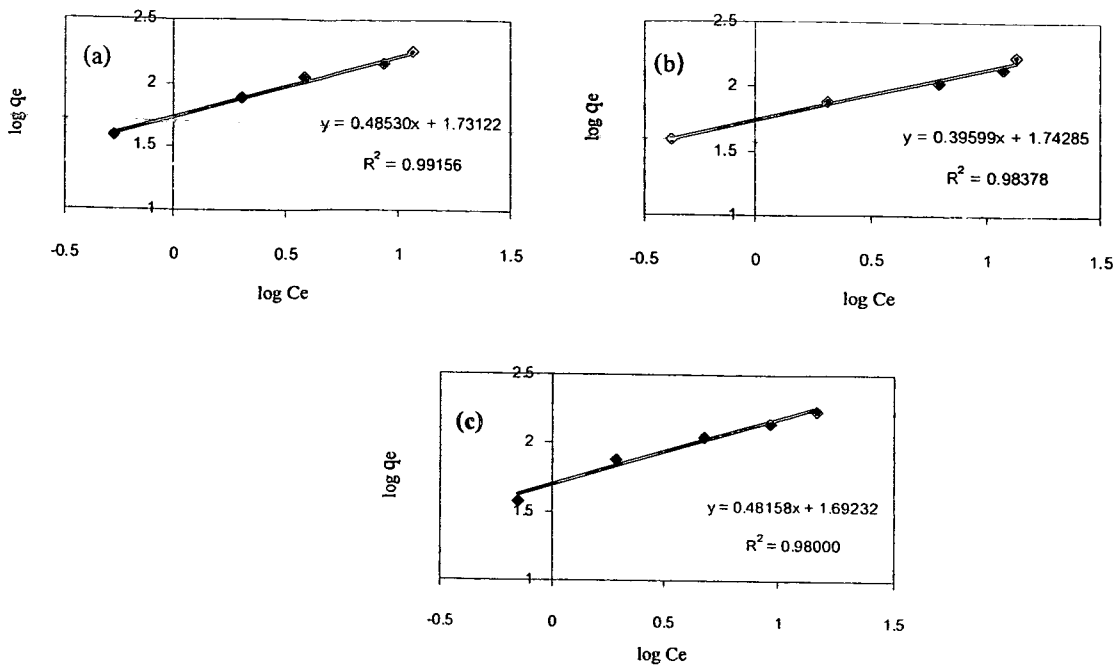
รูปที่ 21 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับไอออนสังกะสีของตะกอนจุลินทรีย์ กับความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น ที่ปริมาณการใช้ตะกอนจุลินทรีย์ 0.5 g L⁻¹

4.4.4 การศึกษา Adsorption isotherm

รูปที่ 22 แสดง Langmuir adsorption isotherm ของการดูดซับไอออนโลหะสังกะสีโดย AS-P, MUR-P และ CASS-N ตามลำดับ รูปที่ 23 แสดง Freundlich adsorption isotherm ของการดูดซับไอออนโลหะสังกะสีโดย AS-P, MUR-P และ CASS-N ตามลำดับ ส่วนค่าพารามิเตอร์และค่า R² ของสมการ Langmuir และ Freundlich adsorption isotherm จะแสดงในตารางที่ 4



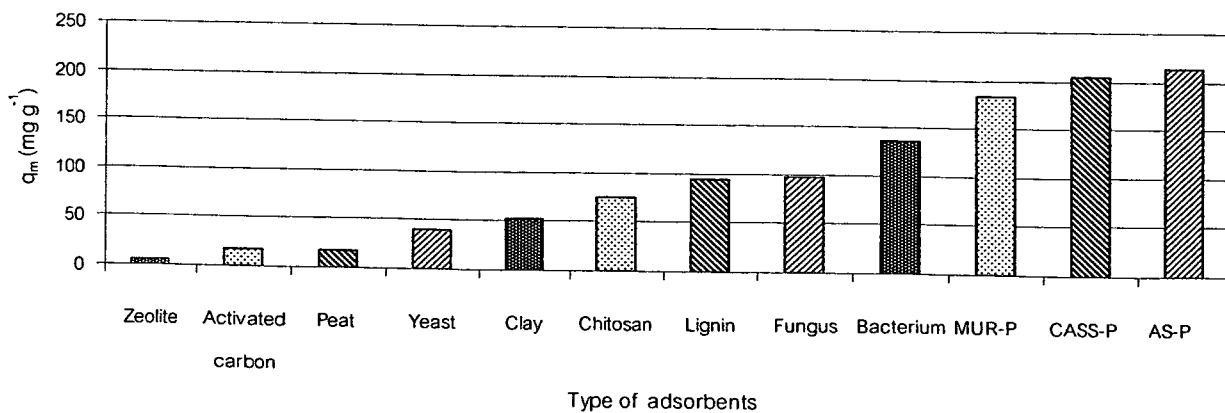
รูปที่ 22 Langmuir adsorption isotherm ของการดูดซับไอออนโลหะสังกะสีโดย AS-P (รูป a), MUR-P (รูป b) และ CASS-N (รูป c)



รูปที่ 23 Freundlich adsorption isotherm ของการดูดซับไอออนโลหะสังกะสีโดย AS-P (รูป a), MUR-P (รูป b) และ CASS-N (รูป c)

ตารางที่ 4 ค่าพารามิเตอร์และค่า R² ของสมการ Langmuir และ Freundlich adsorption isotherm

ชนิดของตะกอนจุลินทรีย์	Langmuir Adsorption Isotherm			Freundlich Adsorption Isotherm		
	q_m (mg g ⁻¹)	K_L (L g ⁻¹)	R^2	K_F	n	R^2
AS-P	213.67	0.3091	0.9686	53.85	2.060	0.9916
MUR-P	183.82	0.3600	0.9325	55.32	2.525	0.9838
CASS-N	204.92	0.2832	0.9901	49.24	2.076	0.9800



รูปที่ 24 ค่าปริมาณไอออนสังกะสีที่ถูกดูดซับสูงสุด (q_m) ของวัสดุดูดซับชนิดต่างๆ

จากผลการทดลอง พบว่าสมการไอโซเทอร์มการดูดซับทั้ง 2 สมการ สามารถใช้ทำนายผลการทดลองได้ดี ค่า K_f ที่สูง แสดงถึงความสามารถในการดูดซับไอออนสังกะสีของตะกอนจุลินทรีย์ทั้ง 3 ชนิด ที่สูง ส่วนปริมาณไอออนโลหะหนักสังกะสีที่ถูกดูดซับสูงสุด (q_m) ของ AS-P, MUR-P และ CASS-N ที่ได้จากสมการไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ มีค่าเป็น 214, 184 และ 205 มิลลิกรัมโลหะต่อกรัมวัสดุดูดซับ ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าวัสดุดูดซับชนิดอื่นที่ใช้ในงานวิจัยที่ผ่านมา ดังแสดงในรูปที่ 24

สรุปผลการวิจัย

สรุปผลการวิจัย

ตะกอนจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพของอุตสาหกรรมน้ำอัดลม และ โรงควบคุมคุณภาพน้ำ กรุงเทพมหานคร มีศักยภาพในการนำไปใช้เป็นวัสดุดูดซับไอออนโลหะหนัก เนื่องจาก

- 1) มีราคาถูก
- 2) สามารถดูดซับไอออนตะกั่วได้อย่างรวดเร็ว โดยเข้าสู่สมดุลภายในเวลา 15 นาที
- 3) มีความสามารถในการกำจัดไอออนตะกั่วสูง โดยมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนตะกั่วประมาณ 93-99 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น 60 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าปริมาณไอออนตะกั่วที่ถูกดูดซับสูงสุด (q_m) ระหว่าง 247-253 มิลลิกรัมต่อกรัม
- 4) มีความสามารถในการกำจัดไอออนแคดเมียมสูง โดยมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนแคดเมียมประมาณ 96-99 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าปริมาณไอออนแคดเมียมที่ถูกดูดซับสูงสุด (q_m) ระหว่าง 213-238 มิลลิกรัมต่อกรัม
- 5) มีความสามารถในการกำจัดไอออนสังกะสีสูง โดยมีเปอร์เซ็นต์การกำจัดไอออนสังกะสีประมาณ 97-99 เปอร์เซ็นต์ ที่ความเข้มข้นของสารละลายเริ่มต้น 20 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีปริมาณไอออนสังกะสีที่ถูกดูดซับสูงสุด (q_m) ระหว่าง 184-214 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งมีค่าสูงกว่าวัสดุดูดซับชนิดอื่นที่ใช้ในงานวิจัยที่ผ่านมา

เอกสารอ้างอิง

- [1] Wang, Y., Lin, S. and Juang, R. 2003. Removal of Heavy Metal Ions from Aqueous Solutions Using Various Low-cost Adsorbents. *Journal of Hazardous Materials*. B102 : 291-302.
- [2] Gulnaz, O., Saygideger, S. and Kusvuran, E. 2005. Study of Cu(II) Biosorption by Dried Activated Sludge: Effect of Physico-chemical Environment and Kinetic Study. *Journal of Hazardous Materials*. B120 : 193-200.
- [3] Gadd, G.M. 1990. Fungi and Yeasts for Metal Accumulation. In: Ehlich, H.L. and Brierley, C.L. (ed.), *Microbial Mineral Recovery*, McGraw-Hill, New York. : 249-276.
- [4] Gadd, G.M. 1988. Accumulation of Metals by Microorganism and Algae. In: Rehm, H.R. (ed.), *Biotechnology Vol. 6*, Springer-Verlag, Hamburg. : 401-433.
- [5] Clesceri, L. S., Greenberg, A. E. and Eaton. A. D. 2000. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th ed., American Public Health Association, Washington, DC.
- [6] Langmuir, I. 1918. The Adsorption of Gases on Plane Surfaces of Glass, Mica and Platinum. *Journal of the American Chemical Society*. 40 : 1361-1403.
- [7] Weber, W. J., Jr., 1972. *Physicochemical Processes for Water Quality Control*, Wiley, New York.
- [8] Sekar, M., Sakthi, V. and Rengaraj, S. 2004. Kinetic and Equilibrium Adsorption Study of Lead(II) onto Activated Carbon Prepared from Coconut Shell. *Journal of Colloid and Interface Science*. 279 : 307-313.
- [9] Kuh, S. E. and Kim, D. S. 2000. Removal Characteristics of Cadmium Ions by Waste Egg Shell. *Environmental Technology*. 21 : 883-890.
- [10] ชเรศ ศรีสถิตย์, ปณิตดา คำรัตน์ และวรรณนา วงษ์สุด. 2546. ประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากจี้แป้งของโรงงานน้ำยางข้นในการกำจัดตะกั่ว และปรอทในน้ำเสียสังเคราะห์. *วารสารวิจัยสภาวะแวดล้อม*. 25(2) : 1-13.

- [11] Mouflih, M., Aklil, A. and Sebti, S. 2005. Removal of lead from aqueous solutions by activated phosphate. *Journal of Hazardous Materials*. B119 : 183-188.
- [12] Volesky, B. and Holan, Z.R. 1995. Biosorption of Heavy Metals. *Biotechnology Progress*. 11(2) : 235-250.
- [13] Bailey, S. E., Olin, T. J., Bricka, R. M. and Adrian, D. D. 1999. A Review of Potentially Low-cost Adsorbents for Heavy Metals. *Water Research*. 33(11) : 2469-2479.
- [14] Babel, S. and Kurniawan, T. A. 2003. Low-cost Adsorbents for Heavy Metals Uptake from Contaminated Water : a review. *Journal of Hazardous Materials*. B97 : 219-243.

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-นามสกุล

ชื่อ (ภาษาไทย) นายชยาภาส ทับทอง
ชื่อ (ภาษาอังกฤษ) Mr.CHAYAPHAS THABTHONG
วัน เดือน ปีเกิด 5 ธันวาคม 2513

ที่อยู่ติดต่อได้

นายชยาภาส ทับทอง
63 หมู่ 7 ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ถนน รังสิต-นครนายก ตำบล องค์กรักษ์ อำเภอ องค์กรักษ์ จังหวัด นครนายก 26120
โทรศัพท์ 0-2664-1000 ต่อ 2069, 2076
โทรสาร 0-3732-2608 e-mail address : thabthong_c@yahoo.com

ประวัติการศึกษา

ปริญญาโท วศ.ม.(วิศวกรรมเคมี) ปี พ.ศ.2542 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ปริญญาตรี วท.บ.(เทคโนโลยีชีวภาพ) ปี พ.ศ. 2537 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประวัติการทำงาน

พ.ศ. 2542-ปัจจุบัน อาจารย์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
พ.ศ. 2542 อาจารย์พิเศษ มหาวิทยาลัยเจ้าพระยา
พ.ศ. 2537 ผู้ควบคุมระบบน้ำ และไอน้ำ บ.ไฮคิวผลิตภัณฑ์อาหาร จำกัด

งานวิจัย

	ตำแหน่ง	ชื่อโครงการวิจัย	แหล่งทุน	ปีงบประมาณ
1	หัวหน้าโครงการ	กระดาษจากต้นทานตะวัน	เครือข่ายการวิจัยภาคกลางตอนบน ปีงบประมาณ 2548	เม.ย. 2548 – มี.ค. 2549
2	หัวหน้าโครงการ	การกำจัดไอออนโลหะหนักจากน้ำเสียด้วยเปลือกหอย	งบประมาณแผ่นดิน ปีงบประมาณ 2548	ต.ค. 2547 - ก.ย. 2548
3	ผู้ร่วมวิจัย	การพัฒนาปุ๋ยหมักชีวภาพด้วยสมุนไพร	เครือข่ายการวิจัยภาคกลางตอนบน ปีงบประมาณ 2547	มิ.ย. 2547 – มี.ค. 2548

งานบริการวิชาการ

	ตำแหน่ง- หน้าที่	หลักสูตร	หน่วยงาน	ปี พ.ศ.
1	ผู้ช่วย ผู้เชี่ยวชาญ	การอนุรักษ์พลังงานแบบมีส่วนร่วม	กรมอนุรักษ์พลังงานแห่ง ประเทศไทย	ตุลาคม 2548 – กันยายน 2549
2	วิทยากร ฝึกอบรม	หลักสูตรผู้รับผิดชอบด้าน พลังงาน	กรมพัฒนาพลังงาน ทดแทนและอนุรักษ์ พลังงาน	เมษายน 2546 – เมษายน 2548

ผลงานวิจัยและวิชาการ

1. บทความวิจัย

1.1 วารสารวิจัยระดับประเทศ

	คณะผู้วิจัย	เรื่อง	วารสาร	ปี พ.ศ.
1	ชยาภาส ทับทอง	การกำจัดไอออนตะกั่วจากน้ำ เสียด้วยตะกอนจุลินทรีย์	วารสารวิจัยสภาวะแวดล้อม ปีที่ 28 เล่มที่ 1	2549
2	ชยาภาส ทับทอง	การกำจัดไอออนแคดเมียมจาก น้ำเสียด้วยตะกอนจุลินทรีย์	วารสารวิศวกรรม สิ่งแวดล้อม ปีที่ 20 ฉบับที่ 1	2549

1.2 การประชุมวิชาการระดับประเทศ

	คณะผู้วิจัย	เรื่อง	การประชุมวิชาการ	ปี พ.ศ.
1	ชยาภาส ทับทอง	การกำจัดไอออนสังกะสี ด้วยตะกอนจุลินทรีย์	การประชุมวิชาการวิศวกรรม เคมีและเคมีประยุกต์แห่ง ประเทศไทย ครั้งที่ 15	2548
2	ชยาภาส ทับทอง, รมณีย์ หวังศิธรรม, ชมพูนุช ชุ่มเกษร, บุรินทร์ หทัยเกียรติกุล และณรงค์วิทย์ นันทวนิช	กระดาษจากต้นกล้วย	การประชุมวิชาการวิศวกรรม เคมีและเคมีประยุกต์แห่ง ประเทศไทย ครั้งที่ 14	2547

3	ธีรวิทย์ ทับทอง, มีชัย มีดา และวิโรจน์ บุญ อำนวยวิทยา	การตรึงกากตะกอนเร่ง ด้วยพอลิเมอร์เพื่อดูดซับ โลหะหนักในน้ำเสีย	การประชุมวิชาการวิศวกรรม เคมีและเคมีประยุกต์แห่ง ประเทศไทย ครั้งที่ 8	2541
4	วิโรจน์ บุญอำนวย วิทยา และธีรวิทย์ ทับทอง	การดูดซับโลหะหนักโดย กากวัสดุชีวมวลเหลือทิ้ง	การประชุมวิชาการวิศวกรรม เคมีและเคมีประยุกต์แห่ง ประเทศไทย ครั้งที่ 7	2540
5	สุนีย์ นิธิสินประเสริฐ, ธีรวิทย์ ทับทอง, สุรัชย์ แซ่เล่า, วิชัย ตุรงค์พันธ์ และ อำนาจ เจริรัตน์	การคัดเลือกสารพันธุ์ แบคทีเรียแลคติกเพื่อใช้ ในการปรับปรุงการทำ Silage	การประชุมเทคโนโลยีชีวภาพ กับความหลากหลายทาง ชีวภาพ	2537

2. บทความวิชาการ

	ผู้เขียน	เรื่อง	การประชุมวิชาการ	ปี พ.ศ.
1	ชยาภาส ทับทอง	โปรไบโอติกในโยเกิร์ต	หนังสือ 12 ปี คณะ วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ	2547