

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

การดูฉบับตะกั่วและโครเมียมโดยใช้ถ่านกัมมันต์และซีเฝ้าลอย



โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต

ภาควิชาเคมี สาขาเคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม

คณะวิทยาศาสตร์

วพ.

๒๕๔๓

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขที่ 2543

ปีการศึกษา 2543

เลขทะเบียน 40052

b.....

วัน, เดือน, ปี 24 ก.ค. 2544

เอกสารนี้เป็นเอกสารสงวนลิขสิทธิ์สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้ทำซ้ำโดยไม่ได้รับอนุญาต  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

Adsorption of Lead (II) and Chromium (VI) on Activated Carbon and Fly Ash



A Special Project submitted in partial Fulfillment of the  
Requirement for The Degree of Bachelor of Science

Department of Chemistry

Faculty of Science King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang

2000

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ  
นักศึกษา

การดูซัปดาห์ตะกั่วและโครเมียมโดยใช้ถ่านกัมมันต์และซีเถ้าลอย  
นาย ภาสกร สว่างวุฒิธรรม  
นาย ศุภโชค ชายแสน  
นาย สมชาย กองทรัพย์เจริญ

ภาควิชา

เคมี

สาขาวิชา

เคมีทรัพยากรสิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ อำนาจ เพิ่มทรัพย์สกุล

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบังอนุมัติให้  
โครงการพิเศษนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต



(ผศ.ดร. สมศักดิ์ วรมงคลชัย)

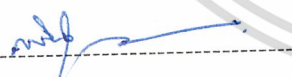
หัวหน้าภาควิชาเคมี

คณะกรรมการตรวจสอบโครงการพิเศษ



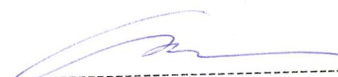
(อาจารย์ พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย)

ประธานกรรมการ



(อาจารย์ กุลนัฐคนธ์ สุวรรณรัตน์)

กรรมการ



(อาจารย์ อำนาจ เพิ่มทรัพย์สกุล)

กรรมการ

ลิขสิทธิ์ของภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์  
สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

หัวข้อโครงการพิเศษ การดูดซับตะกั่วและโครเมียมโดยใช้ถ่านกัมมันต์และขี้เถ้าลอย

นักศึกษา นาย ภาสกร สว่างวุฒิชัยธรรม  
นาย ศุภโชค ชายแสน  
นาย สมชาย กองทรัพย์เจริญ

อาจารย์ที่ปรึกษา อ.อำนาจ เพิ่มทรัพย์สกุล

กรรมการ อ.พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย  
อ.กลั่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์  
บทคัดย่อ

โครงการพิเศษนี้เป็นการศึกษาถึงการดูดซับตะกั่วและโครเมียมโดยใช้ตัวดูดซับคือ ถ่านกัมมันต์และขี้เถ้าลอยในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยทำการศึกษาถึงผลของ พีเอช ความเข้มข้นเริ่มต้น อุณหภูมิและไอโซเทอมของการดูดซับ พีเอช ที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับตะกั่วและโครเมียมด้วยถ่านกัมมันต์คือ พีเอช 3 สำหรับขี้เถ้าลอย พีเอช ที่เหมาะสมสำหรับการดูดซับตะกั่วและโครเมียมคือ พีเอช 4 และ พีเอช 5 ตามลำดับ ส่วนอุณหภูมิที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนักทั้ง 2 ประเภทด้วยตัวดูดซับทั้ง 2 ชนิดคืออุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โดยสภาวะที่เหมาะสมจะถูกนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียจริงโดยพบว่าถ่านกัมมันต์สามารถกำจัดโครเมียมได้ 98.41 เปอร์เซ็นต์ และกำจัดตะกั่วได้ 83.93 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ขี้เถ้าลอยสามารถกำจัดโครเมียมได้ 1.51 เปอร์เซ็นต์ และกำจัดตะกั่วได้ 25.93 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นถ่านกัมมันต์จึงเป็นตัวดูดซับที่เหมาะสมกว่าขี้เถ้าลอยในการกำจัดโลหะหนัก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

<b>Project Title</b>	Adsorption of Lead(II) and Chromium(VI) on Activated Carbon and Fly Ash	
<b>Author</b>	Mr. Passakorn	Swangvudthitham
	Mr. Suppachock	Chaisaen
	Mr. Somchai	Kongsubjaroen
<b>Advisor</b>	Mr. Amnat	Permsubscul
<b>Major Program</b>	Environment Resource Chemistry	
<b>Academic year</b>	2000	

### Abstract

This special project studied the removal of Lead(II) and Chromium (VI) by adsorption on activated carbon and fly ash from synthetic wastewater and industrial wastewater. In this research the effect of pH, initial concentration, temperature and adsorption isotherm were investigated . The suitable pH for adsorption of lead(II) and chromium(VI) onto activated carbon was 3 and for fly ash the suitable pH for lead(II) and chromium(VI) adsorption was 4 and 5, respectively. The optimum temperature for all adsorption was 30 °C. The %removal of lead(II) and chromium(VI) by activated carbon was 83.93% and 98.41% ,respectively, and 1.5% of lead (II) and 25.93 % of chromium(VI) has been removed by fly ash. There for activated carbon has better adsorption efficiency than fly ash.

## กิตติกรรมประกาศ

โครงการพิเศษนี้สามารถสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีในครั้งนี้ สืบเนื่องมาจากความร่วมมือ และความกรุณาของทุกๆท่าน ทั้งอาจารย์ที่ปรึกษา อาจารย์ อำนวย เพิ่มทรัพย์สกุล ที่กรุณาติดตาม ตรวจสอบ ดูแลเอาใจใส่อย่างใกล้ชิดและให้คำปรึกษา ดิชมจนผลงานสำเร็จลงได้ในที่สุด อีกทั้งท่าน อาจารย์กรรมการ อาจารย์ พิสมัย ชัยรัตน์อุทัย และอาจารย์ กลิ่นสุคนธ์ สุวรรณรัตน์ ที่ได้ให้คำแนะนำในทุกๆเรื่องรวมถึงท่านอาจารย์ภาควิชาเคมีทุกๆท่าน อีกทั้งเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการและเจ้าหน้าที่ธุรการภาควิชาเคมีทุกๆท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือในทุกๆด้านอย่างเต็มที่

อีกทั้งบริษัท เอนโคไทย จำกัด และบริษัทสยาม ยี เอส แบดเตอร์รี่ ที่อนุเคราะห์ในการเก็บน้ำ ตัวอย่าง และการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ที่ได้กรุณาเอื้อเฟื้อขี้อ่ายสำหรับ โครงการพิเศษ นี้

ทั้งคุณพ่อคุณแม่ ญาติ พี่น้อง และเพื่อนๆทั้งในภาควิชาเคมีและที่ต่างๆ รวมถึงรุ่นพี่ รุ่นน้อง ภาควิชาเคมีทุกคนที่ได้ให้กำลังใจกับพวกเรา ให้พวกเราเมีกำลังใจในการต่อสู้ ฝ่าฟันอุปสรรคนานับ ประการจนโครงการพิเศษนี้สำเร็จลงได้ในที่สุด

ทางผู้จัดทำสำนึกในพระคุณของทุกๆท่านและถือโอกาสนี้กราบขอบพระคุณทุกๆท่านที่ให้ความกรุณาให้กำลังใจ ให้คำปรึกษา และอดทนกับโครงการพิเศษมาโดยตลอด มา ณ โอกาสนี้ด้วย

ขอกราบขอบพระคุณ

ภาสกร สว่างวุฒิธรรม

ศุภโชค ชายแสน

สมชาย กองทรัพย์เจริญ

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	ข
กิตติกรรมประกาศ	ค
สารบัญตาราง	ณ
สารบัญรูป	ช
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการพิเศษ	1
1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการพิเศษ	2
1.3 ขอบเขตของโครงการพิเศษ	2
1.4 ขั้นตอนการวิจัยและการดำเนินโครงการพิเศษ	2
1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	3
บทที่ 2 ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง	
2.1 ถ่านกัมมันต์	4
2.2 ขี้เถ้าลอย	8
2.3 โลหะหนัก	9
2.4 วิธีการกำจัดโลหะในน้ำเสีย	12
2.5 การดูดซับ	13
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	23
บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย	
3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง	25
3.2 ขั้นตอนการทำการวิจัย	26
3.3 วิธีการทดลอง	27
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์	
4.1 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของตัวดูดซับ	33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.2 การดูดซับ โครเมียมและตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์	
4.2.1 การดูดซับ โครเมียมและตะกั่วด้วยถ่านกัมมันต์	35
4.2.2 การดูดซับ โครเมียมและตะกั่วด้วยขี้เถ้าลอย	52
4.3 การกำจัดปริมาณ โลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม	67
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลการวิจัย	70
5.2 ข้อเสนอแนะ	71
บรรณานุกรม	72
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก การวิเคราะห์ปริมาณโครเมียมโดยวิธีการเทียบสี	74
ภาคผนวก ข การวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วโดยวิธีโคโรโซน	75



## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 ผลของ pH ที่มีผลต่อการดูดซับโลหะหนัก	30
3.2 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะที่มีผลต่อการดูดซับ	30
3.3 ผลของอุณหภูมิของการดูดซับที่มีผลต่อการดูดซับโลหะหนัก	31
4.1 องค์ประกอบทางเคมีของถ่านกัมมันต์	33
4.2 องค์ประกอบทางเคมีของซีเถ้าลอย	34
4.3 ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ของโครเมียมและเปอร์เซ็นต์การกำจัดเทียบกับเวลาที่ pH ต่างๆ โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์	36
4.4 ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ของตะกั่วและเปอร์เซ็นต์การกำจัดเทียบกับเวลาที่ pH ต่างๆ โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์	37
4.5 ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ของโครเมียมและเปอร์เซ็นต์การกำจัดเทียบกับเวลาที่อุณหภูมิต่างๆ โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์	42
4.6 ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ของตะกั่วและเปอร์เซ็นต์การกำจัดเทียบกับเวลาที่อุณหภูมิต่างๆ โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์	43
4.7 ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ของโครเมียมและปริมาณการดูดซับต่อน้ำหนักถ่านกัมมันต์ที่ความเข้มข้นต่างๆ	45
4.8 ตัวแปรต่างๆ สำหรับการหาไอโซเทอมที่สอดคล้องกับการดูดซับสารละลายโครเมียมด้วยถ่านกัมมันต์	46
4.9 ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ของตะกั่วและปริมาณการดูดซับต่อน้ำหนักถ่านกัมมันต์ที่ความเข้มข้นต่างๆ	48
4.10 ตัวแปรต่างๆ สำหรับการหาไอโซเทอมที่สอดคล้องกับการดูดซับสารละลายตะกั่วด้วยถ่านกัมมันต์	49
4.11 ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ของโครเมียมและเปอร์เซ็นต์การกำจัดเทียบกับเวลาที่ pH ต่างๆ โดยการดูดซับด้วยซีเถ้าลอย	53
4.12 ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ของตะกั่วและเปอร์เซ็นต์การกำจัดเทียบกับเวลาที่ pH ต่างๆ โดยการดูดซับด้วยซีเถ้าลอย	54
4.13 ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ของโครเมียมและเปอร์เซ็นต์การกำจัดเทียบกับเวลาที่อุณหภูมิต่างๆ โดยการดูดซับด้วยซีเถ้าลอย	57

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.14 ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ของตะกั่วและเปอร์เซ็นต์การกำจัดเทียบกับ เวลาที่อุณหภูมิต่างๆ โดยการดูดซับด้วยซีเฝ้าลอย	58
4.15 ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ของโครเมียมและปริมาณการดูดซับ ต่อน้ำหนักซีเฝ้าลอยที่ความเข้มข้นต่างๆ	60
4.16 ตัวแปรต่างๆสำหรับการหาไอโซเทอมที่สอดคล้องกับการดูดซับ สารละลายโครเมียมด้วยซีเฝ้าลอย	61
4.17 ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ของตะกั่วและปริมาณการดูดซับ ต่อน้ำหนักซีเฝ้าลอยที่ความเข้มข้นต่างๆ	63
4.18 ตัวแปรต่างๆสำหรับการหาไอโซเทอมที่สอดคล้องกับการดูดซับ สารละลายตะกั่วด้วยซีเฝ้าลอย	64
4.19 ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ ปริมาณการดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับ และเปอร์เซ็นต์การกำจัดของโครเมียมและตะกั่ว	67



## สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 carbon-oxygen complex บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์	4
2.2 แผนภาพแสดงกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์	6
2.3 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์	16
2.4 ไอโซเทอมการดูดซับแบบพื้นฐาน	17
2.5 กราฟแสดงค่าคงที่ในสมการไอโซเทอมแบบต่างๆ	21
4.1 ลักษณะของถ่านกัมมันต์	33
4.2 ลักษณะของซี้เถ้าลอย	34
4.3 ผลของ pH ที่มีต่อ%การกำจัดโครเมียม โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์	36
4.4 ผลของ pH ที่มีต่อ%การกำจัดตะกั่ว โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์	37
4.5 แผนภาพการกระจายสปีชีส์ของโครเมียมที่ pH ต่างๆ	39
4.6 แผนภาพการกระจายสปีชีส์ของตะกั่วที่ pH ต่างๆ	40
4.7 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ%การกำจัดโครเมียม โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์	43
4.8 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ%การกำจัดตะกั่ว โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์	44
4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับต่อน้ำหนักถ่านกัมมันต์กับเวลาที่ความเข้มข้นสารละลายโครเมียมต่างๆกัน	46
4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $C_e/q_e$ กับ $C_e$ เพื่อคำนวณหาค่าคงที่ของ langmiur isotherm สำหรับการดูดซับโครเมียมด้วยถ่านกัมมันต์	47
4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$ เพื่อคำนวณหาค่าคงที่ของ freundlich isotherm สำหรับการดูดซับโครเมียมด้วยถ่านกัมมันต์	47
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับต่อน้ำหนักถ่านกัมมันต์กับเวลาที่ความเข้มข้นสารละลายตะกั่วต่างๆกัน	49
4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $C_e/q_e$ กับ $C_e$ เพื่อคำนวณหาค่าคงที่ของ langmiur isotherm สำหรับการดูดซับตะกั่วด้วยถ่านกัมมันต์	50
4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$ เพื่อคำนวณหาค่าคงที่ของ freundlich isotherm สำหรับการดูดซับตะกั่วด้วยถ่านกัมมันต์	50
4.15 ผลของ pH ที่มีต่อ%การกำจัดโครเมียม โดยการดูดซับด้วยซี้เถ้าลอย	53
4.16 ผลของ pH ที่มีต่อ%การกำจัดตะกั่ว โดยการดูดซับด้วยซี้เถ้าลอย	54

4.17 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ%การกำจัดโครเมียม โดยการดูดซับด้วยซีเถ้าลอย	58
4.18 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ%การกำจัดตะกั่ว โดยการดูดซับด้วยซีเถ้าลอย	59
4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับต่อน้ำหนักซีเถ้าลอยกับเวลาที่ความเข้มข้นสารละลายโครเมียมต่างๆกัน	61
4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $C_e/q_e$ กับ $C_e$ เพื่อคำนวณหาค่าคงที่ของ langmiur isotherm สำหรับการดูดซับโครเมียมด้วยซีเถ้าลอย	62
4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$ เพื่อคำนวณหาค่าคงที่ของ freundich isotherm สำหรับการดูดซับโครเมียมด้วยซีเถ้าลอย	62
4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับต่อน้ำหนักซีเถ้าลอยกับเวลาที่ความเข้มข้นสารละลายตะกั่วต่างๆกัน	64
4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $C_e/q_e$ กับ $C_e$ เพื่อคำนวณหาค่าคงที่ของ langmiur isotherm สำหรับการดูดซับตะกั่วด้วยซีเถ้าลอย	65
4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $\log q_e$ กับ $\log C_e$ เพื่อคำนวณหาค่าคงที่ของ freundich isotherm สำหรับการดูดซับตะกั่วด้วยซีเถ้าลอย	65
4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง%การกำจัดโครเมียมกับเวลา โดยถ่านกัมมันต์กับซีเถ้าลอย	68
4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง%การกำจัดตะกั่วกับเวลา โดยถ่านกัมมันต์กับซีเถ้าลอย	69

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการพิเศษ

เนื่องจากปัจจุบันวิทยาศาสตร์ได้มีการเจริญและพัฒนาไปอย่างมากทำให้มีผู้ที่สนใจเกิดขึ้นมากมาย ดังนั้นเมื่อมีการพัฒนาและการดำเนินการต่างๆเกิดขึ้นก็จะมีของเสียเกิดขึ้นตามมา โลหะหนักก็เป็นปัญหาอย่างหนึ่งที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในปัจจุบันอย่างมาก ตัวอย่างเช่น ปรอท ตะกั่ว แคดเมียมและโครเมียม ซึ่งโลหะหนักเหล่านี้ได้มาจากโรงงานอุตสาหกรรมฟอกย้อมโรงงานชุบโลหะ หรือโรงงานผลิตแบตเตอรี่เป็นต้น ซึ่งโลหะหนักเหล่านี้เป็นของเสียที่เป็นอันตรายอย่างมากต่อมนุษย์ สิ่งมีชีวิต และระบบนิเวศ เมื่อสิ่งมีชีวิตได้รับสารเคมีเหล่านี้เข้าไปอาจก่อให้เกิดโรคต่างๆมากมาย เช่น โรคมะเร็งจากตะกั่วและโรคมะเร็งจากโครเมียมเป็นต้น ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องทำการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมเหล่านี้ ซึ่งวิธีการกำจัดนั้นมีหลายวิธี ได้แก่ การตกตะกอนทางเคมี ขบวนการแลกเปลี่ยนไอออน หรือการใช้กระบวนการกรองผ่านเมมเบรนซึ่งวิธีการเหล่านี้ล้วนแล้วแต่เป็นวิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียได้ดีทั้งสิ้น แต่เนื่องจากเป็นวิธีที่สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการลงทุนและจำเป็นที่จะต้องมีการนำเทคโนโลยี รวมทั้งต้องมีการจัดการอย่างมีประสิทธิภาพ

ดังนั้นหากสามารถนำของเสียที่เกิดขึ้นมาใช้ให้เป็นประโยชน์ ก็นับได้ว่าเป็นการช่วยจัดการกับของเสียเหล่านั้นอีกทางหนึ่ง ดังนั้นการวิจัยครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาถึงความเป็นไปได้ที่จะทำการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยกระบวนการดูดซับโดยใช้ตัวดูดซับที่มีคุณสมบัติการดูดซับที่ดีและราคาถูกนั่นคือ ถ่านกัมมันต์และซีเ็ดลอส ซึ่งถ่านกัมมันต์สามารถผลิตจากวัตถุดิบที่เป็นอินทรีย์วัตถุซึ่งมีคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็น ถ่านหิน ไม้ กะลามะพร้าว ชานอ้อย และเมล็ดผลไม้ เป็นต้น ซึ่งวัตถุดิบเหล่านี้หาได้ง่ายและราคาถูก ส่วนซีเ็ดลอสเป็นผลพลอยได้จากการเผาถ่านหินลิกไนต์เพื่อการผลิตกระแสไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย โดยประเมินคร่าวๆว่ามีมากกว่า 2 ล้านตันต่อปีมาใช้ในการกำจัดโลหะหนัก 2 ชนิดคือ ตะกั่วและโครเมียม โดยจะเน้นการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการบำบัดเพื่อให้มีปริมาณของโลหะหนักที่จะถ่ายเทสู่แหล่งน้ำสาธารณะมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานน้ำทิ้ง โดยทำการหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการบำบัดโลหะหนักเหล่านี้ และหากประสิทธิภาพในการบำบัดมีค่าสูงพอที่จะนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียจริง ก็จะเป็นวิธีการกำจัดโลหะหนักที่มีประสิทธิภาพ และเป็นการนำเอาสารดูดซับที่มีราคาถูกมาใช้ให้เกิดประโยชน์อีกทางหนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการพิเศษ

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการลดปริมาณโลหะหนัก 2 ชนิดคือ ตะกั่วและโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริง โดยใช้ถ่านกัมมันต์และซีเถ้าลอยเป็นสารดูดซับ
2. เพื่อศึกษาผลของ pH ความเข้มข้นของโลหะหนักเริ่มต้น อุณหภูมิที่เหมาะสมในการดูดซับ และไอโซเทอมของการดูดซับโลหะหนักด้วยตัวดูดซับทั้งสองชนิด

## 1.3 ขอบเขตของโครงการพิเศษ

1. ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับตะกั่วและโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ถ่านกัมมันต์และซีเถ้าลอย ปัจจัยที่ทำการศึกษาได้แก่
  - pH ของน้ำเสียสังเคราะห์โดยเปลี่ยนแปลงค่า pH ของตะกั่วเป็น 1 , 2 , 3 , 4 และ 5 และเปลี่ยนค่า pH สำหรับโครเมียมเป็น 3 , 5 , 7 , 9 และ 11
  - อุณหภูมิของการดูดซับ โดยเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเป็น 20 , 30 และ 40 ° C สำหรับทั้งตะกั่วและโครเมียม
  - ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนัก สำหรับตะกั่วและโครเมียมโดยใช้ตัวดูดซับเป็นถ่านกัมมันต์เปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเป็น 25 , 40 , 60 และ 75 mg/l สำหรับตัวดูดซับซีเถ้าลอยเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นเริ่มต้นเป็น 15 , 25 และ 40 mg/l สำหรับการหาไอโซเทอมการดูดซับที่เหมาะสม
2. ทำการดูดซับตะกั่วและโครเมียมในน้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรม ด้วยถ่านกัมมันต์และซีเถ้าลอย โดยใช้ pH และอุณหภูมิที่เหมาะสมที่ได้จากการศึกษาในน้ำเสียสังเคราะห์

## 1.4 ขั้นตอนการวิจัยและการดำเนินงานโครงการพิเศษ

1. สืบค้นข้อมูลที่เกี่ยวข้อง
2. ออกแบบการทดลอง จัดหาอุปกรณ์และสารเคมี
3. ดำเนินการทดลองโดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ตอน

ตอนที่ 1 ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับตะกั่วและโครเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ตัวดูดซับเป็นถ่านกัมมันต์ และซีเถ้าลอย

ตอนที่ 2 ศึกษาการดูดซับตะกั่วและโครเมียมจากน้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมจากตอนที่ 1

4: สรุปผลและรายงานผล

การดำเนินงาน	ระยะเวลาการดำเนินงาน									
	มี.ย.43	ก.ค.43	ส.ค.43	ก.ย.43	ต.ค.43	พ.ย.43	ธ.ค.43	ม.ค.44	ก.พ.44	
1. สืบค้นข้อมูล	←→									
2. ออกแบบการทดลองจัด อุปกรณ์และสารเคมี		←→								
3. ดำเนินการทดลอง										
ตอนที่ 1			←→							
ตอนที่ 2							←→			
4. สรุปผลและรายงานผล										←→

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- ทราบถึงประสิทธิภาพในการดูดซับของตัวดูดซับระหว่างถ่านกัมมันต์ และซีดีถั่วลันเตา เพื่อเป็นแนวทางในการนำตัวดูดซับที่เหมาะสมไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนัก
- ทราบถึงสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับตะกั่ว และโครเมียม และสามารถนำสภาวะที่เหมาะสมนี้ไปประยุกต์กับการใช้กับการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมได้
- เป็นแนวทางหนึ่งที่จะช่วยให้มีการนำซีดีถั่วลันเตาซึ่งเป็นกากของเสียจากการผลิตกระแสไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าพลังงานความร้อนในประเทศไทยให้สามารถนำกลับมาใช้ได้อีก

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

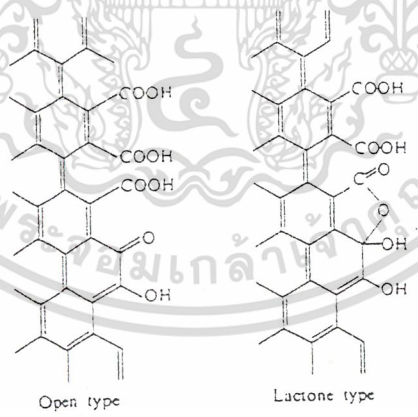
## บทที่ 2

### ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 ถ่านกัมมันต์ [1]

ถ่านกัมมันต์เป็นคาร์บอนอสัณฐานชนิดหนึ่ง แต่ถูกทำขึ้นมาเป็นพิเศษโดยการกระตุ้นซึ่งจะทำให้พื้นผิวภายในเพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากโครงสร้างที่เป็นรูพรุนจำนวนมาก ที่ผิวหน้าของถ่านกัมมันต์มีขั้ว (polar) เล็กน้อยเนื่องจากมี carbon-oxygen complexes เกิดขึ้นอันเนื่องมาจากวัตถุดิบที่ใช้ผลิตหรือเกิดจากการออกซิเดชันของอากาศในระหว่างขั้นตอนการกระตุ้น ดังนั้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์จึงมีความชอบน้ำ (hydrophilicity) และมีความเป็นกรด (acidity) carbon-oxygen complexes บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ จะประกอบไปด้วยหมู่ฟังก์ชันต่างๆ ดังนี้

- คือ
1. หมู่คาร์บอกซิลิกที่แรง (strong carboxylic groups)
  2. หมู่คาร์บอกซิลิกที่อ่อน (weak carboxylic groups) ซึ่งจะอยู่ในรูปของหมู่แล็ก โตอน (lactone) รวมกับหมู่คาร์บอนิล (carbonyl)
  3. หมู่ฟีนอลิก (phenolic groups)
  4. หมู่คาร์บอนิล (carbonyl groups)



รูปที่ 2.1 carbon-oxygen complex บนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ [1]

โดยทั่วไปแล้ว ถ่านกัมมันต์จะมีความเป็นผลึก มีการเปลี่ยนแปลงและรูปร่างตามอุณหภูมิที่เผา รูปร่างอะตอมคาร์บอนจะเปลี่ยนตามส่วนประกอบและโครงสร้างของวัตถุดิบ โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์จะมีผลอย่างมากต่ออัตราส่วนของพื้นผิวต่อขนาด โดยรูพรุนขนาดใหญ่จะไม่มีผลต่อพื้นที่ผิวสัมผัสของถ่านกัมมันต์มากนัก ดังนั้นในการกระตุ้นคาร์บอนจึงเป็นการทำให้เกิดรูพรุนขนาดเล็ก เพื่อให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้นสำหรับการดูดซับ (500-2500 ตารางเมตรต่อกรัม)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนลิขสิทธิ์และสงวนสิทธิ์ในวงจำกัดไว้เพื่อประโยชน์ใช้สอยในโครงการวิจัย การนำเอกสารนี้ไปเผยแพร่โดยไม่ได้รับอนุญาตเป็นการฝ่าฝืนกฎหมายและต้องรับผิดชอบต่อผู้เสียหาย  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ถ่านกัมมันต์ โดยทั่วไปจะมีอยู่ 2 แบบ คือ

1. ชนิดผง (powder) คือ มีขนาดเล็กกว่า U.S. sieve เบอร์ 50 (297 ไมครอน) จะใช้ในการดูดซับสารละลาย เช่นสี สารอินทรีย์ และการบำบัดน้ำเสีย โดยทั่วไปจะผลิตโดยกระตุ้นเศษไม้ ถ่าน ชี้เลื่อย แล้วนำไปบดให้มีขนาดเล็กลง
2. ชนิดเม็ด (granular) คือ มีขนาดใหญ่กว่า U.S. sieve เบอร์ 50 (297 ไมครอน) จะใช้ในการดูดซับก๊าซหรือไอระเหย ดูดซับสีและกลิ่นในน้ำดื่ม และการบำบัดน้ำเสีย

อัตราการดูดซับจะขึ้นอยู่กับขนาดอนุภาคของคาร์บอน แต่ความสามารถในการดูดซับจะขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวสัมผัส ขนาดของถ่านกัมมันต์ที่ใช้จะต้องมีขนาดใกล้เคียงกัน และไม่เล็กจนเกินไป เพื่อที่จะป้องกันการเกิดความดันตกภายในเบตมากเกินไป และการหลุดลอยของถ่านกัมมันต์ไปตามกระแสก๊าซ

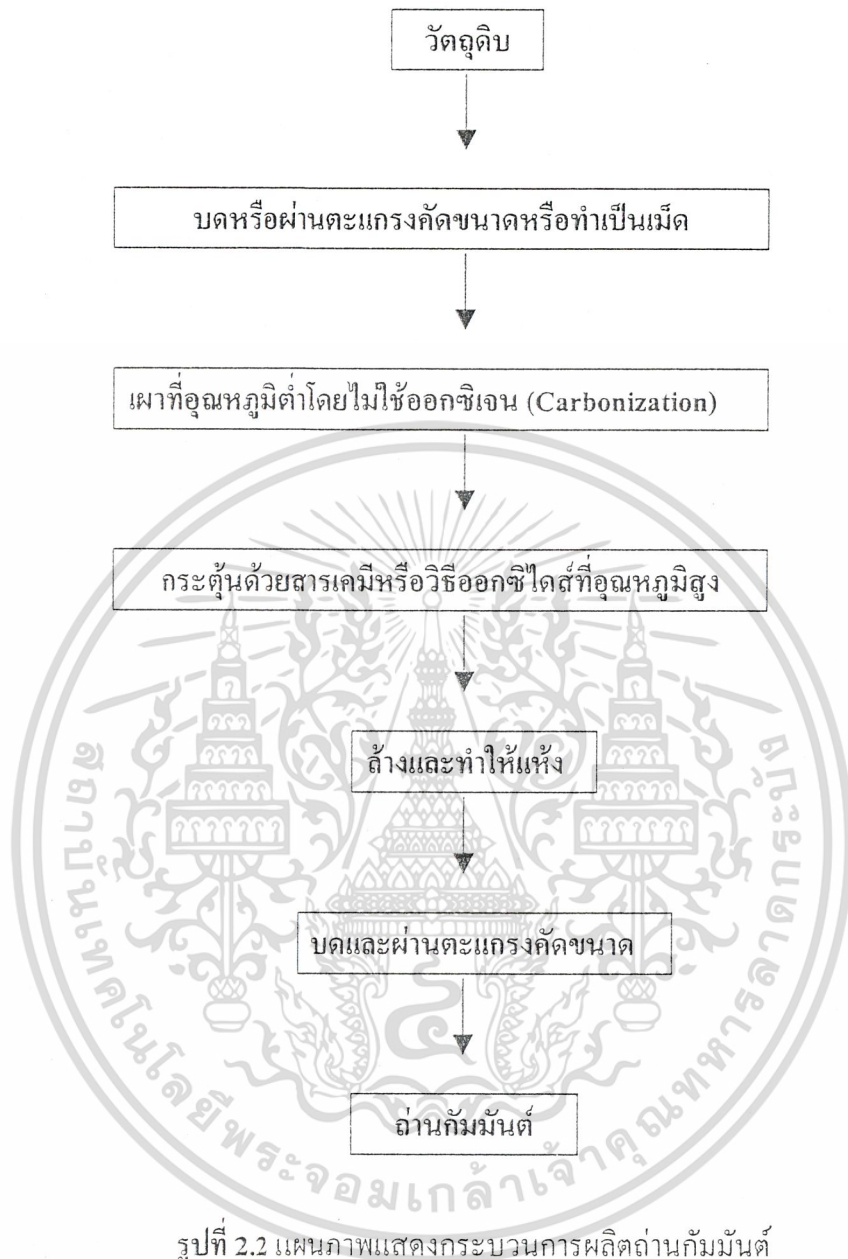
### 2.1.1 การผลิตถ่านกัมมันต์

การผลิตถ่านกัมมันต์สามารถเริ่มจากวัตถุดิบโดยตรง หรือเริ่มจากวัตถุดิบที่เป็นถ่านแล้วก็ได้ วัตถุดิบที่ใช้ผลิตมักพิจารณาจากอินทรีย์วัตถุเป็นส่วนใหญ่ เช่น ชานอ้อย กระจุก กะลามะพร้าว เมล็ดกาแฟ ถ่านน้ำตาล แกลบ และไม้

อินทรีย์วัตถุที่ใช้เป็นวัตถุดิบสามารถแบ่งเป็นชนิดต่างๆ ได้ดังนี้

- ก. พวกเซลล์ลูโลสที่มาจากพืช เช่น แกลบ กะลามะพร้าว ชี้เลื่อย ชานอ้อย ชังข้าวโพด
- ข. พวกถ่านหิน เช่น ลิกไนต์ พีท บิทูมินัส
- ค. วัตถุดิบที่มาจากสัตว์ เช่น กระจุก

ในปัจจุบันวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์มีมากมายหลายวิธี ขึ้นอยู่กับว่าวัตถุดิบที่ใช้เป็นอะไร และต้องการถ่านกัมมันต์ที่มีคุณสมบัติอย่างไร กรรมวิธีโดยทั่วไปประกอบด้วย การเตรียมวัตถุดิบ หมายถึง การอบแห้ง การบด การทำให้เป็นเม็ด การเผาที่อุณหภูมิต่ำ จากนั้นนำไปกระตุ้นด้วยสารเคมีหรือสารออกซิไดส์ต่างๆ กระบวนการผลิตแสดงดังรูปที่ 2.2



การกระตุ้น (activation) เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวโดยทำให้สารมีรูพรุนมากขึ้นและเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับสารของถ่านกัมมันต์ กระบวนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์จะมีขั้นตอนดังนี้

1. ดีไฮเดรชัน (dehydration) การกำจัดน้ำโดยทำให้ร้อนถึงประมาณ 170 องศาเซลเซียส
2. คาร์บอนไนเซชัน (carbonization) การเปลี่ยนองค์ประกอบอินทรีย์ให้เป็นคาร์บอนและกำจัดส่วนที่ไม่ใช่คาร์บอนออกไป ใช้อุณหภูมิสูงกว่า 170 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. การกระตุ้นคาร์บอน (activated carbon) เป็นการทำให้รูพรุนเพิ่มขึ้น โดยการใช้สารกระตุ้นประเภทต่างๆเป็นสารกระตุ้น (activating agent) ผ่านเข้าไปยังคาร์บอนเพื่อเผา by product ที่ขวางอยู่ในรูพรุนและทำให้รูพรุนขยายเพิ่มขึ้น

### 2.1.2 ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์

ได้มีการแบ่งการใช้ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์ ออกเป็น 2 ประเภทคือ

1. ประเภทใช้กับของเหลว (liquid phase carbon) อุตสาหกรรมที่นำถ่านกัมมันต์ไปใช้ในสารละลายหรือในของเหลว ได้แก่

- อุตสาหกรรมน้ำตาล จะใช้ถ่านกัมมันต์เพื่อฟอกสีและทำให้น้ำตาลดิบบริสุทธิ์ขึ้น
- อุตสาหกรรมน้ำมันและไขมันสำหรับบริโภค ใช้ในการฟอกสีและการแยกเอาสบู่และเปอร์ออกไซด์ออกจากน้ำมันและไขมันด้วย
- อุตสาหกรรมอาหาร ใช้ถ่านกัมมันต์เพื่อดูดกลิ่นสีของผลิตภัณฑ์อาหารเช่น น้ำตาลเหลว น้ำเชื่อม น้ำมันพืช น้ำมันสัตว์ น้ำส้มสายชู น้ำซอสปรุงรส
- อุตสาหกรรมเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ เช่น ไวน์ วิสกี้ มักจะใช้ถ่านกัมมันต์เพื่อดูดกลิ่นที่ไม่ต้องการ
- อุตสาหกรรมเคมีและยา มีการนำถ่านกัมมันต์ไปช่วยในการผลิตยาปฏิชีวนะ วิตามินและฮอร์โมนบางชนิด
- อุตสาหกรรมทำน้ำให้บริสุทธิ์ โดยใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดกลิ่นและฟอกสีในกระบวนการทำน้ำให้บริสุทธิ์จากน้ำที่มีมลพิษมาก

2. ประเภทที่ใช้ในการดูดก๊าซและไอ (gas phase carbon) ใช้ในอุตสาหกรรมต่อไปนี้

- อุตสาหกรรมทำหน้ากากป้องกันก๊าซพิษ ทั้งที่ใช้ในการทหารและที่ใช้กันทั่วไป ทั้งนี้เพราะถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับก๊าซพิษและไอระเหยของสารอินทรีย์ได้
- การนำไอระเหยของตัวทำละลายที่ใช้แล้วกลับมาใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่ ถ่านกัมมันต์จะดูดซับไอระเหยเหล่านั้นที่อุณหภูมิห้อง ความดันบรรยากาศและจะคายออกที่ความดันไอระเหยต่ำๆ
- อุตสาหกรรมปรับอากาศและแยกก๊าซ จะใช้ถ่านกัมมันต์ดูดสารปนเปื้อนออกจากอากาศหรือก๊าซที่ต้องการ
- อุตสาหกรรมนุหรีใช้ถ่านกัมมันต์ทำกั้นกรองของนุหรี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.2 ขี้เถ้าลอย [2]

ขี้เถ้าลอยเป็นของเสียที่ได้จากการเผาไหม้ของถ่านหิน ซึ่งในโครงการพิเศษนี้เป็นขี้เถ้าลอยจากการเผาไหม้ถ่านหินที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ซึ่งถ้าจะแบ่งโครงสร้างโมเลกุลของถ่านหินตามสมบัติเคมี สามารถแบ่งได้เป็นโครงสร้างอินทรีย์ และส่วนที่เป็นสารประกอบแร่ธาตุ โดยโครงสร้างอินทรีย์ของถ่านหินประกอบด้วยคาร์บอนประมาณ 70-79 ส่วน ไฮโดรเจน 3-5 ส่วน ออกซิเจน 1-2 ส่วน กำมะถันและไนโตรเจน 1-2 ส่วน และสำหรับส่วนประกอบที่เป็นแร่ธาตุ จะมีซิลิกาเป็นองค์ประกอบหลัก นอกจากนั้นยังมีอลูมิเนียม เหล็ก แคลเซียม แมกนีเซียม คีเตเนียม โซเดียม และโพแทสเซียม

ถ่านหินลิกไนต์เมื่อถูกบดละเอียดและส่งเข้าไปในเตาเผาไหม้ที่มีอากาศเพียงพอ จะเกิดการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ ความร้อนในเตาเผาจะช่วยให้ปฏิกิริยาทางเคมีเปลี่ยนแปลงสภาพของแร่ธาตุในรูปออกไซด์ของโลหะหลายชนิดที่ซับซ้อน เถ้าลิกไนต์ที่เหลืออยู่ประกอบด้วย

1. เถ้าหนัก (bottom ash หรือ wet ash) เป็นเถ้าที่ได้จากการปะทะกันของอนุภาคเถ้าในบริเวณที่เกิดการสันดาป อุณหภูมิบริเวณนี้สูงพอที่จะหลอมเถ้าที่เป็นเม็ดหรือก้อนตกลงสู่ก้นเตา และหลอมติดกันเป็นก้อนขนาดใหญ่ เรียกว่า slag เมื่อน้ำหนักรวมกันมากขึ้นจนเกาะติดผนังไม่ไหวก็จะหล่นลงสู่ก้นเตา

2. เถ้าลอย (fly ash หรือ pulverized fuel ash หรือ dry ash) เป็นเถ้าที่มีขนาดเล็กและเบาสามารถแยกออกได้โดยใช้เครื่องดักฝุ่น

### 2.2.1 สมบัติทางกายภาพของขี้เถ้าลอย

ขี้เถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าที่ได้จากการเผาไหม้ๆ จะมีสีเทาอมแดง เมื่อปล่อยให้เย็นลงจะมีสีเทาเข้มขึ้น มีลักษณะละเอียด จากการวิเคราะห์พบว่ารูปร่างของขี้เถ้าลอยมีลักษณะค่อนข้างกลม และมีขนาดตั้งแต่ 0.03-0.42 มิลลิเมตร ความถ่วงจำเพาะอยู่ระหว่าง 2.23-2.48

### 2.2.2 สมบัติทางเคมีของขี้เถ้าลอย

ในการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของขี้เถ้าลอยนั้นเป็นการยากมากที่จะแบ่งธาตุแต่ละชนิดให้ออกมาเป็นปริมาณหรือธาตุเดี่ยวๆ โดยอาศัยวิธีทางกายภาพ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องหาธาตุโดยอาศัยวิธีทางเคมีในรูปร้อยละของออกไซด์ โดยจากงานวิจัยของ วราภรณ์ คุณวานากิจ [3] ได้วิเคราะห์ขี้เถ้าลอยลิกไนต์จากเหมืองแม่เมาะ พบว่าขี้เถ้าลอยประกอบด้วยแคลเซียมออกไซด์ ( $\text{CaO}$ ) ที่มีปริมาณร้อยละ 10-17 โดยน้ำหนักปริมาณอลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) และเหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ปริมาณร้อยละ 5-20 โดยน้ำหนัก ซัลเฟอร์ออกไซด์มีปริมาณร้อยละ 8-10 โดยน้ำหนัก นอกจากนั้น ประกอบด้วย  $MgO$   $K_2O$   $Na_2O$  และ  $TiO_2$  ในปริมาณเล็กน้อย

### 2.2.3 ประโยชน์ของซีเมนต์ลอย

- เป็นส่วนผสมในคอนกรีต (concrete additive)
- เป็นวัสดุน้ำหนักเบา (light weight aggregate)
- นำมาเป็นส่วนผสมเพื่อทำพื้นทางหรือรองพื้นทาง
- ใช้ในอุตสาหกรรมผลิตซีเมนต์
- นำมาเป็นตัวเติม (filler) ในการทำคอนกรีตผสมยางมะตอย
- นำมาทำบล็อกคอนกรีต

### 2.3 โลหะหนัก [2]

โลหะหนัก หมายถึง โลหะที่มีความหนาแน่นมากกว่า 5 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร เช่น ตะกั่ว แคดเมียม ปรอท นิเกิล โครเมียม เป็นต้น โดยทั่วไปโลหะหนักมีสถานะเป็นของแข็ง ยกเว้นปรอทที่มีสถานะเป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ ซึ่งโลหะหนักส่วนใหญ่มีสมบัติทางกายภาพคล้ายคลึงกัน ได้แก่ การนำไฟฟ้าและความร้อนได้ดี มีความมันวาว และสามารถนำมาตีเป็นแผ่นบางๆ ได้ ส่วนสมบัติทางเคมีที่สำคัญคือ สามารถที่จะรวมตัวกับสารอื่น เป็นสารประกอบเชิงซ้อนได้หลายรูปแบบที่เสถียรกว่าโลหะอิสระ

โลหะหนักสามารถจัดแบ่งโดยอาศัยแนวโน้มความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อมได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่มีแนวโน้มความเป็นพิษต่อสภาวะแวดล้อมสูงมาก ได้แก่ As, Au, Cd, Cu, Cr, Hg, Pb, Sb, Te และ Zn และกลุ่มที่มีแนวโน้มความเป็นพิษต่อสภาวะแวดล้อมสูงรองลงมา ได้แก่ Ba, Bi, Fe, Mo, Ti, และ U

ความเป็นพิษของโลหะหนักกลุ่มเหล่านี้ เป็นผลมาจากการที่มนุษย์ได้รับสารเหล่านี้ในปริมาณที่ต่างกัน แล้วก่อให้เกิดอันตรายต่อร่างกายนั่นเอง แหล่งที่มาสำคัญของโลหะหนักเหล่านี้ ก็คือ กระบวนการการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งสามารถปนเปื้อนมากับน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม จากนั้นจึงเกิดการปนเปื้อนเข้าสู่สิ่งแวดล้อมในดิน น้ำ อากาศและผลิตผลจากการเกษตร และเข้าสู่ร่างกายมนุษย์และมีผลต่อเมตาโบลิซึมของเซลล์สิ่งมีชีวิต

### 2.3.1 ตะกั่ว [4]

ปัจจุบันมีการนำตะกั่วมาใช้ผลิตวัสดุอุปกรณ์เพื่อใช้งานกันอย่างมากมาย ซึ่งทำให้มีอุตสาหกรรมประเภทที่ต้องใช้ตะกั่วเป็นวัตถุดิบมีจำนวนมาก เช่น อุตสาหกรรมแบตเตอรี่ เป็นอุตสาหกรรมที่ใช้ตะกั่วมากที่สุด รองลงมา คือ อุตสาหกรรมปิโตรเลียมที่ใช้ตะกั่วเป็นสารเติมแต่งในการผลิตแก๊สโซลีน นอกจากนี้ยังมีการใช้ตะกั่วในอุตสาหกรรมชุบเคลือบโลหะด้วยไฟฟ้า อุตสาหกรรมการผลิตหลอดภาพโทรทัศน์สี และอุตสาหกรรมการผลิตรังควัดถู เป็นต้น

#### ความเป็นพิษของตะกั่ว

ตะกั่วที่เจือปนอยู่ในอากาศอาจแพร่กระจายสู่สิ่งมีชีวิตได้ 2 ทาง ทางตรงโดยการสูดหายใจหรือกินอาหารที่มีตะกั่วเจือปนเข้าไป ส่วนทางอ้อมนั้นตะกั่วจะเข้ารกบวณหรือทำอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต โดยผ่านห่วงโซ่อาหาร ตะกั่วเมื่อเข้าสู่ร่างกายจะถูกขับออกมาได้ช้ามาก ส่วนใหญ่จะถูกจับยึดอยู่กับเม็ดเลือดแดงหมุนเวียนไปตามกระแสเลือด กระจายไปทั่วร่างกายสู่เนื้อเยื่อส่วนต่างๆ โดยจะสะสมอยู่ในไตในความเข้มข้นที่สูงที่สุด รองลงมาคือตับ หลังจากนั้นชั่วระยะเวลาหนึ่งก็จะแพร่กระจายอีกครั้งหนึ่ง โดยไปยึดเกาะอยู่ในกระดูกส่วนใหญ่ ส่วนที่เหลือจะกระจายไปอยู่ในฟันและผม ตะกั่วเมื่อถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายจะมีผลรกบวณและเป็นอันตรายต่อระบบภายในร่างกายสิ่งมีชีวิตหลายระบบคือ

1. ระบบการสร้างเม็ดเลือด พิษตะกั่วทำให้เกิดโรคโลหิตจางโดยมีผลไปขัดขวางการทำงานของเอนไซม์ที่สังเคราะห์ฮีโม (heme) ทำให้ระดับฮีโมโกลบินลดลง

2. ระบบประสาทตะกั่วมีพิษทำลายระบบประสาท ทำให้เกิดอาการเฉื่อยชา เมื่อยล้าง่าย เป็นอัมพาต ซ้อมือข้อเท้าตลก วิงเวียนศีรษะ กล้ามเนื้อทำงานไม่สัมพันธ์กัน ปวดหัวนอนไม่หลับ หงุดหงิด มึนงง และอาการชัก

3. ไต ตะกั่วจะทำความเสียหายแก่ท่อไต ทำให้มีการขับกรดอะมิโน น้ำตาลและฟอสเฟตออกมากับปัสสาวะมากผิดปกติ ทั้งนี้เนื่องจากตะกั่วรวมตัวกับโปรตีนของเซลล์ภายในไตทำให้หลอดไตทำงานผิดปกติ

นอกจากนี้ตะกั่วยังมีผลต่อการทำงานของตับ หัวใจ และเส้นเลือด และยังเป็นสารก่อมะเร็งอีกด้วย

### 2.3.2 โครเมียม [5]

โครเมียม (Cr) เป็นธาตุที่มีเลขอะตอมเท่ากับ 24 เกิดตามธรรมชาติในรูปของโครไมต์หรือสินแร่ Chrome iron ( $\text{FeOCr}_2\text{O}_3$ ) ที่มีอยู่ประมาณ 0.037 % ของเปลือกโลก ทว่าทั้งโลกจะมีความเข้มข้นของโครเมียมในดินในช่วงตั้งแต่ปริมาณน้อยมาก ๆ จนถึง 2.4 % ขณะที่ความเข้มข้นในบรรยากาศจะมีอยู่ในช่วง 0.001-0.007 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร เลขออกซิเดชันของโครเมียมมีตั้งแต่ -2 ถึง +6 ในอุตสาหกรรมหลายประเภทได้มีการนำโครเมียมมาใช้อย่างกว้างขวาง เช่น ในอุตสาหกรรมผลิตเหล็ก รางควัตถุ สีทา สีย้อม สารยัดอายุไม้ สารป้องกันการกัดกร่อนของโลหะ การชุบโครเมียมและการพอกหนัง เป็นต้น

#### ความเป็นพิษของโครเมียม

โครเมียมเมื่อถูกซึมเข้าสู่ร่างกายจะเกิดอาการเป็นพิษดังนี้

1. แผลจากโครเมียมจากการสะสมของฝุ่นละอองของโครเมียม ซึ่งโดยมากจะเริ่มเป็นรอยดลอกที่ผิวหนังและจะพบมากที่สุดที่ โคนเล็บมือตามข้อที่นิ้วมือหรือหลังเท้า มีลักษณะเป็นแผลวงกลมขอบค่อนข้างเรียบ บวมเล็กน้อย ปกติมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 1 เซนติเมตรหรือเล็กกว่าซึ่งจะมองดูคล้ายถูกเจาะด้วยตะปู ถึงแม้ว่าแผลนี้จะไม่เจ็บปวดแต่จะคันมากเวลากลางคืน ต่อไปอาจเกิดการติดเชื้อขึ้นและอาจทำให้ลุกลามไปถึงข้อต่อใกล้เคียง ซึ่งอาจทำให้ต้องตัดนิ้วทิ้ง ฝุ่นของเกลือโครเมียมหรือควันของกรดโครมิกอาจตกลงบนหลังตาหรือที่ปลายจมูกซึ่งอาจทำให้เกิดแผลขึ้นได้ใกล้เคียงกัน
2. ผิวหนังอักเสบ บริเวณที่อาจเกิดการอักเสบ ได้แก่ มือ แขน ขา ใบหน้า และหน้าอก อาจเกิดเมื่อสัมผัสโครเมียมมาแล้ว 6 เดือน ในรายที่รุนแรงใบหน้าจะมีสีแดงเข้มและบวม ส่วนที่อักเสบจะคันมากและอาจเจ็บแสบด้วย
3. ผื่นงันในโพรงจมูกอาจถูกเจาะทะลุ คนที่ทำงานเกี่ยวข้องกับโครเมียมจะได้รับควันกรดโครมิกหรือฝุ่นละอองของโครเมียมเป็นประจำจะทำให้ผื่นงันในจมูกถูกทำลายจนเป็นรูทะลุ ซึ่งการทะลุนี้จะไม่รู้สึกเจ็บปวดแต่อย่างใด จะรู้ตัวก็ต่อเมื่อมีเสียงอู้อี้หรือดังจุมกบี้แบนลง
4. มะเร็งปอดอาจเกิดกับผู้ที่สูดเอาโครเมียมเข้าสู่ร่างกายอยู่เป็นประจำและเป็นเวลานาน ซึ่งจะเป็นอันตรายอย่างมาก

## 2.4 วิธีการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย [2]

กระบวนการบำบัดโลหะหนักในน้ำเสีย มีหลายวิธี การพิจารณาจะเลือกใช้วิธีใดขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในแง่ต่างๆ ได้แก่ คุณสมบัติน้ำเสียก่อนบำบัด คุณภาพน้ำที่ต้องการหลังจากการบำบัด ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งสามารถสรุปวิธีการบำบัดได้ดังนี้

### 1. การตกตะกอนทางเคมี (chemical precipitation )

เป็นวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบันกระบวนการนี้จะทำหน้าที่เปลี่ยนสภาพของต่างๆ ที่ละลายอยู่ในรูปสารละลายให้เป็นสารที่อยู่ในรูปไม่ละลาย โดยวิธีการเติมสารเคมีผสมกับน้ำเสียให้ทั่วถึง ซึ่งการตกตะกอนด้วยสารเคมีมีหลายวิธีด้วยกัน แต่ที่นิยมใช้ในการตกตะกอนโลหะหนักมี อยู่ 2 วิธีด้วยกัน คือ การตกตะกอนไฮดรอกไซด์ และการตกตะกอนซัลไฟด์

### 2. การแลกเปลี่ยนไอออน ( ion exchange )

กระบวนการนี้อาศัยหลักการที่ไอออนแต่ละชนิดจะมีความชอบหรือถูกดูดซับโดยเรซินไม่เท่ากัน ในการแยกโลหะหนักออกจากสารละลาย โดยสารที่ใช้แลกเปลี่ยนไอออนซึ่งมาจากทั้งธรรมชาติ และสังเคราะห์ขึ้น จะมีหมู่ฟังก์ชันของไอออนติดอยู่ และถูกทำให้สมดุลด้วยไอออนที่มีประจุตรงข้ามซึ่งอยู่ในสารละลาย เหมาะสำหรับการกำจัดโลหะที่มีปริมาณน้อยและประสิทธิภาพสูง

### 3. การออสโมซิสย้อนกลับ ( reverse osmosis )

เป็นการแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสีย โดยใช้หลักการความแตกต่างของแรงดันระหว่างแผ่นเมมเบรนซึ่งจะให้เฉพาะตัวทำละลายผ่าน เพื่อแยกสารที่ต้องการออกและทำให้เข้มข้นขึ้น จะต้องใช้ความดันสูงโดยอาจสูงกว่า 100 บรรยากาศ

### 4. การระเหย ( evaporation )

เป็นวิธีการง่ายๆ ทำโดย ระเหยน้ำออกทำให้มีความเข้มข้นสูงขึ้น มีทั้งการระเหยที่ความดันบรรยากาศ และการระเหยภายใต้สุญญากาศ ได้ผลดีกับน้ำเสียที่มีปริมาณโลหะหนักสูงๆเท่านั้น เป็นวิธีการที่ต้องใช้ต้นทุนในการดำเนินการสูง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 5. อิเล็กโทรไลซิส (electrodialysis)

วิธีการนี้จะเป็นการแยกไอออนออกจากสารละลายด้วยกระแสไฟฟ้าตรง ร่วมกับการใช้เมมเบรนที่เลือกเฉพาะสำหรับไอออนแต่ละชนิด (ion selective membrane) กลไกของวิธีนี้เป็น การแลกเปลี่ยนไอออนร่วมกับการสกัดด้วยตัวทำละลายและน้ำเสียจะต้องผ่านการกรองก่อนเพื่อป้องกันการอุดตันของแผ่นเมมเบรน ความบริสุทธิ์ของไอออนขึ้นอยู่กับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ไหลผ่านเมมเบรน วิธีนี้มีต้นทุนค่าก่อสร้างและการดำเนินงานสูง แต่มีข้อดีคือสามารถกำหนดชนิดของไอออนที่ต้องการได้

## 6. การสกัดกลับคืนด้วยไฟฟ้า (electrolytic recovery)

วิธีการนี้จะเป็นการกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า ซึ่งจะลดปริมาณไอออนของโลหะที่อยู่ในสารละลายให้อยู่ในรูปของธาตุที่ขั้วแคโทด และเกิดแก๊สออกซิเจนที่ขั้วแอโนดตลอดเวลา วิธีนี้เหมาะสำหรับสารละลายที่มีความเข้มข้นโลหะสูง แต่ไม่นิยมเนื่องจากสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าสูงมาก

## 7. การดูดซับ (adsorption)

วิธีการนี้เป็นกระบวนการในการกำจัดสารที่มีขนาดเล็กจนถึงระดับโมเลกุล โดยสารที่ใช้ในการดูดซับมักจะเป็นถ่านกัมมันต์ (activated carbon) ที่ใช้กันมี 2 ลักษณะ คือ แบบคาร์บอนเป็นเม็ด (granular carbon) มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 0.1 มิลลิเมตร และแบบคาร์บอนเป็นผง (powder carbon) มีเส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 200 ไมครอน ถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่สังเคราะห์ขึ้นเป็นพิเศษเพื่อให้มีพื้นที่ผิวมากที่สุด ซึ่งทำได้โดยการทำให้มีรูพรุนหรือโพรงภายในเนื้อคาร์บอนมากเท่าที่จะทำได้ รูพรุนหรือโพรงมีขนาดตั้งแต่  $20 \text{ \AA}$  ถึง  $20000 \text{ \AA}$  กระบวนการนี้สามารถนำมาใช้กำจัดโลหะหนักได้ จนเหลือถึงระดับที่ยอมให้มีได้

## 2.5 การดูดซับ [6]

### 2.5.1 หลักการ

การดูดซับเป็นปรากฏการณ์ที่สำคัญของกระบวนการทางกายภาพ ชีวภาพและเคมี การดูดซับได้ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลาย ในการบำบัดน้ำเสีย การดูดซับเป็นความสามารถของสารในการดึง โมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่อยู่ในของเหลวหรือแก๊สให้มาเกาะจับและติดบนผิวของมัน ซึ่งปรากฏการณ์เคลื่อนย้ายสารจากของเหลวหรือแก๊สมายังผิวของของแข็งเป็นส่วนที่สำคัญของกระบวนการ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

การนี้ โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่เคลื่อนย้ายมาเรียกว่าตัวถูกดูดซับ (adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีผิวเป็นที่เกาะจับของตัวถูกดูดซับ เรียกว่า ตัวดูดซับ (adsorbent)

การดูดซับจะมีความสามารถในการกำจัดสิ่งที่เป็นอันตรายในน้ำเสียทั้งที่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ โดยอาศัยกลไกทางกายภาพเคมี สารที่สามารถใช้กระบวนการดูดซับในการกำจัดได้มีหลายชนิด เช่น สี กลิ่น บีโอดี ซีโอดี ยาฆ่าแมลง เป็นต้น การดูดซับเป็นกระบวนการที่ง่ายต่อการควบคุม มีประสิทธิภาพที่ดีและระบบมีความทนทานต่อสารพิษ ซึ่งมีผลกระทบอย่างมากต่อระบบชีวภาพ นอกจากนี้ยังมีข้อดีเมื่อเปรียบเทียบกับระบบชีวภาพ คือต้องการพื้นที่น้อยและไม่มีกลิ่นที่นำรังเกียจ

การดูดซับที่สำคัญมี 2 แบบ คือ การดูดซับทางกายภาพ(physical adsorption) และการดูดซับทางเคมี (chemical adsorption) การดูดซับทั้ง 2 แบบนี้เกิดขึ้นเมื่อ โมเลกุลในวัฏภาคก๊าซหรือของเหลวเข้าไปใกล้และยึดติดกับผิวของของแข็ง ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดึงดูดที่ผิวของของแข็งซึ่งเป็นตัวดูดซับซึ่งสามารถเอาชนะพลังงานจลน์ของ โมเลกุลของสารที่อยู่ในของเหลวหรือก๊าซได้

การดูดซับทางกายภาพเกิดจากความแตกต่างของพลังงานหรือแรงดึงดูดทางไฟฟ้า (electric attractive force) อย่างอ่อนๆ ซึ่งเรียกว่า แรงวานเดอร์วาลส์ (van der waals force) โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะถูกยึดติดแบบกายภาพกับ โมเลกุลของสารดูดซับ การดูดซับนี้เป็นแบบหลายชั้น (multilayers) ซึ่งแต่ละชั้นของโมเลกุลจะติดอยู่บนชั้นโมเลกุลก่อนหน้า โดยจำนวนของชั้นเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลาย ซึ่งจำนวนชั้นของโมเลกุลจะมากขึ้นตามความเข้มข้นที่สูงขึ้นของตัวถูกละลายในสารละลาย การดูดซับแบบกายภาพทั่วไปจะเกิดที่อุณหภูมิจะเกิดที่อุณหภูมิต่ำซึ่งการดูดซับมีพลังงานต่ำ การย้อนกลับของกระบวนการดูดซับทางกายภาพขึ้นอยู่กับความแข็งแรงของแรงดูดซับระหว่างสารดูดซับและสารถูกดูดซับ แต่ถ้าแรงมีค่าน้อยการหลุดออกของสารถูกดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้

การดูดซับทางเคมีเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาระหว่างสารถูกดูดซับและสารดูดซับ เกิดเป็นสารประกอบทางเคมี ซึ่งแตกต่างจากการดูดซับทางกายภาพ กระบวนการนี้จะมีความหนาของโมเลกุลเพียงชั้นเดียว (monolayer) และไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาผันกลับเองได้ (irreversible) ส่วนการดูดซับทางกายภาพสามารถที่จะผันกลับได้ (reversible) เนื่องจากมีการจับตัวทางเคมีสร้างสารประกอบใหม่ที่ผิวของสารดูดซับ การดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูง เนื่องจากปฏิกิริยาทางเคมีจะกระทำอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิสูงมากกว่า อุณหภูมิต่ำ

ความแข็งแรงของแรงดึงดูดสามารถวัดได้จากผลต่างของความร้อนที่เกิดขึ้นจากการดูดซับ โดยการดูดซับทางกายภาพจะให้พลังงานต่ำโดยทั่วไปประมาณ 2-10 กิโลแคลอรีต่อโมล ส่วนการ

ดูดซับทางเคมีจะให้พลังงานสูงโดยจะให้พลังงานประมาณ 15-50 กิโลแคลอรีต่อโมล เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนุญตให้ไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า

ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 2.5.2 ความแตกต่างของการดูดซับทางกายภาพกับการดูดซับทางเคมี คือ

1. การดูดซับทางกายภาพไม่เกี่ยวข้องกับการแลกเปลี่ยนหรือใช้อิเลคตรอนร่วมกัน
2. การดูดซับทางกายภาพจะไม่จำกัดเกี่ยวกับบริเวณที่เกิดปฏิกิริยา โมเลกุลที่ถูกดูดซับสามารถเข้าไปเกาะยังพื้นผิวส่วนใดก็ได้ แต่การดูดซับทางเคมีจะเลือกเฉพาะบริเวณที่สามารถเกิดพันธะเคมีได้เท่านั้น
3. ค่าความร้อนของการดูดซับทางกายภาพจะมีค่าต่ำ มีค่าเท่ากับความร้อนของการกลาย เป็นของเหลว เมื่อเปรียบเทียบกับ การดูดซับทางเคมี ซึ่งจะมีค่าเปลี่ยนแปลงตามปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้น แต่ค่าความร้อนของการดูดซับก็ไม่ใช่ค่าที่สำคัญในการพิจารณา
4. การดูดซับทางกายภาพจะเกี่ยวข้องกับการเกิดของชั้นหลายโมเลกุล (multimolecular layers) ส่วนการดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นสมบูรณ์เมื่อมีการเกิดชั้นที่ 1 แล้วซึ่งบางครั้ง การดูดซับทางกายภาพจะเกิดขึ้นที่พื้นผิวชั้นบนของการดูดซับทางเคมีก็ได้
5. การดูดซับทางกายภาพจะเกิดขึ้นอย่างทันที (เป็นการแพร่เข้าไปในรูพรุนของสารดูดซับ ซึ่งต้องใช้เวลามากพอสมควร) ส่วนการดูดซับทางเคมีจะเกิดขึ้นอย่างทันทีเช่นกันแต่ต้องอาศัยพลังงานกระตุ้น (activation energy) ค่อนข้าง

## 2.5.3 กลไกการดูดซับและอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (Rate of Molecule Transfer)

### 2.5.3.1 กลไกการดูดซับ แบ่งเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้

1. การแพร่ภายนอก (External Diffusion) เป็นกลไกที่โมเลกุลของตัวถูกละลายเข้าถึงสารดูดซับ ซึ่งพื้นผิวของสารดูดซับมีของเหลวห่อหุ้ม โดยโมเลกุลแทรกตัวผ่านชั้นของของเหลวเข้าถึงผิวหน้าสารดูดซับ
2. การแพร่ภายใน (Internal Diffusion) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกละลายแทรกตัวเข้าถึงช่องว่างของสารดูดซับ เพื่อให้เกิดการดูดซับ
3. ปฏิกิริยาพื้นผิว (Surface Reaction) เป็นกลไกซึ่งโมเลกุลของตัวถูกละลายดูดที่ผิวของสารดูดซับ ซึ่งเป็นกระบวนการที่รวดเร็วมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการแพร่ ดังนั้นความต้านทานจากกระบวนการนี้จึงละเลยได้

### 2.5.3.2 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (Rate of Molecule Transfer)

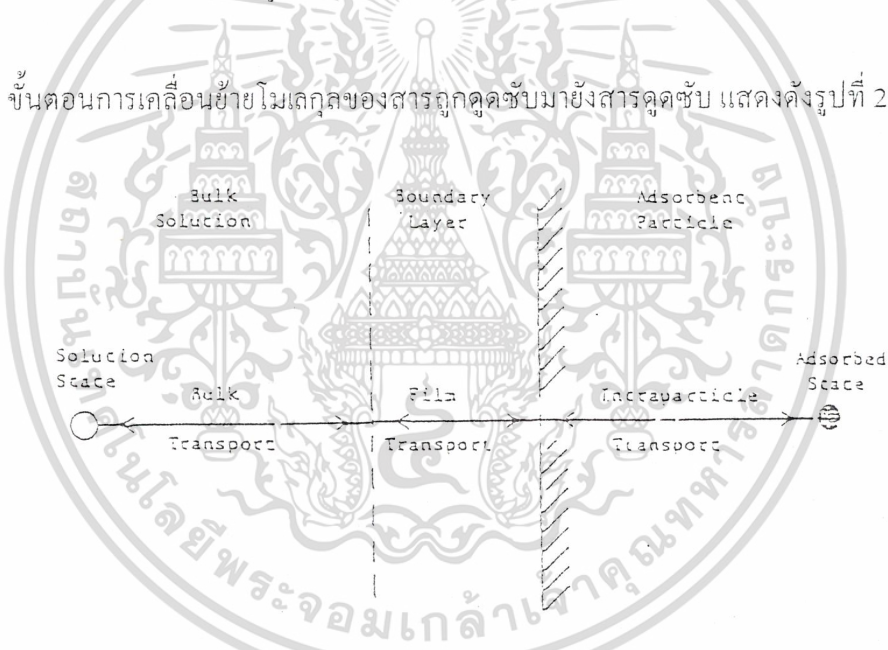
อัตราการดูดซับมีความสำคัญอย่างมาก อัตราการดูดซับที่รวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วขึ้น อัตราการดูดซับจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีความต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ย้ายโมเลกุล ซึ่งขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับ ขั้นตอนในการดูดซับของสารละลายมี 3 ขั้นตอนคือ

1. การขนส่งทั้งก้อน (bulk transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกละลายจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆที่ห่อหุ้มด้วยสารดูดซับ
2. การขนส่งชั้นฟิล์ม (film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆแทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการแพร่ผ่านฟิล์ม (Film Diffusion) จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับขั้นตอนหนึ่ง
3. การขนส่งภายในอนุภาค (Intraparticle Transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดซับ (Pore Diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายใน ขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับเช่นเดียวกัน

ขั้นตอนการเคลื่อนย้าย โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับมายังสารดูดซับ แสดงดังรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 ขั้นตอนการเคลื่อนย้าย โมเลกุลของการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ [6]

ภายใต้สภาวะการทำงานหนึ่งๆ การขนส่งผ่านชั้นฟิล์มจัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับ แต่ถ้าหากว่าภายในระบบมีสภาพความปั่นป่วนเพียงพอ ขั้นตอนการขนส่งภายในอนุภาคจะเป็นขั้นตอนที่ควบคุมอัตราการดูดซับ

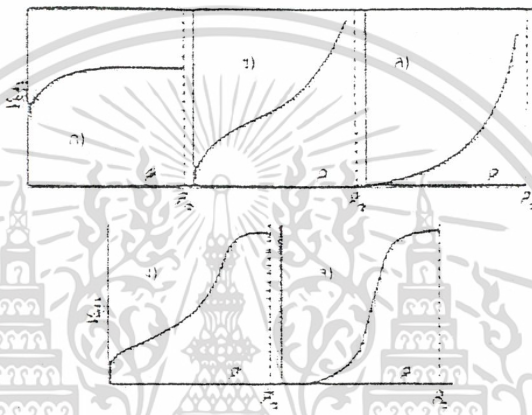
#### 2.5.4 การดูดซับที่สภาวะสมดุล (Adsorption Equilibrium)

สามารถอธิบายปรากฏการณ์กระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นว่า ณ จุดสมดุลของการดูดซับ

สมรรถนะของตัวดูดซับ (adsorption capacity) สามารถเขียนอยู่ในรูปความสัมพันธ์กับความเข้มข้นของสารเป็นเอกสารที่สวางนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ของตัวถูกดูดซับในน้ำที่อุณหภูมิคงที่ โดยเรียกความสัมพันธ์นี้ว่า ไอโซเทอมการดูดซับ (adsorption isotherm)

ไอโซเทอมการดูดซับจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับการดูดซับ และปริมาณของสารถูกดูดซับบนพื้นผิวของสารดูดซับ รูปแบบพื้นฐานของไอโซเทอมการดูดซับมี 5 แบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งจากไอโซเทอมรูปที่ 2.4 ก เป็นระบบที่การดูดซับเกิดขึ้นเพียงชั้นเดียว ส่วนในรูปที่ 2.4 ข ถึง 2.4 จ เป็นการดูดซับของโมเลกุลหลายชั้น



รูปที่ 2.4 ไอโซเทอมการดูดซับแบบพื้นฐาน [6]

หลายทฤษฎีที่ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อแสดงไอโซเทอมการดูดซับ ในปัจจุบันยังไม่มีทฤษฎีไหนที่จะอธิบายสมการและกลไกการดูดซับ ได้อย่างถูกต้อง ในที่นี้จะนำเสนอสมการทั่วไปสำหรับไอโซเทอมการดูดซับ ดังนี้

2.5.4.1 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir Adsorption Isotherm)

มีสมมติฐานพื้นฐานที่เรียกว่า Ideal Localized Monolayer Model ดังนี้

1. เกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) เท่านั้น
2. โมเลกุลที่ถูกดูดซับ ไม่สามารถเคลื่อนที่อย่างอิสระบนพื้นผิวของตัวดูดซับได้
3. เอนทาลปีของการดูดซับมีค่าเดียวกันสำหรับทุกๆ โมเลกุล
4. พลังงานการดูดซับแต่ละบริเวณมีค่าเท่ากัน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ แสดงดังสมการที่ 2.1

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

- เมื่อ  $q_e$  = ปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัม)
- $Q$  = ปริมาณของตัวถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของตัวดูดซับ เมื่อเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียวอย่างสมบูรณ์ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
- $C_e$  = ความเข้มข้นของตัวดูดซับในสารละลายที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)
- $b$  = ค่าคงที่ของพลังงานในการดูดซับ

จากสมการที่ 2.1 สามารถจัดให้อยู่ในรูปสมการเชิงเส้นได้ดังนี้

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{bQ} + \frac{C_e}{Q} \quad (2.2)$$

หรือ

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{Q} + \frac{1}{bQ} \quad (2.3)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $1/q_e$  กับ  $1/C_e$  ดังแสดงในรูปที่ 2.5 (ก) และเราสามารถหาค่าคงที่  $b$  และ  $Q$  ได้จากความชันและจุดตัดของกราฟ

#### 2.5.4.2 ไอโซเทอมการดูดซับแบบ บีอีที (Brunauer-Emmett-Teller, BET, Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอมแบบ บีอีทีพัฒนามาจากไอโซเทอมแบบแลงเมียร์ อธิบายการดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer) โดยมีสมมติฐานดังนี้

1. โมเลกุลที่ถูกดูดซับไม่เกิดการเคลื่อนที่ออกจากพื้นผิวของตัวดูดซับ
2. เอนทัลปีของการดูดซับมีค่าคงที่สำหรับทุกโมเลกุล
3. ทุกโมเลกุลในชั้นมีพลังงานของการดูดซับเท่ากัน
4. ชั้นการดูดซับไม่ต้องการการดูดซับที่สมบูรณ์ก่อนเกิดการดูดซับชั้นต่อไป

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สมการ ไอโซเทอมการดูดซับแบบ บิอิตี แสดงในสมการที่ 2.4

$$q_e = \frac{QBC_s}{(C_s - C_e)[1 + (B-1)(C_e/C_s)]} \quad (2.4)$$

เมื่อ  $q_e$  = ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$Q$  = ปริมาณของตัวถูกละลายต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดซับที่ใช้ในการสร้างแผ่นชั้นเดียว (มิลลิกรัมต่อกรัม)

$C_s$  = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$C_e$  = ความสามารถในการละลายของตัวถูกละลายในน้ำที่อุณหภูมิหนึ่งๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$B$  = ค่าคงที่ของพลังงานของการดูดซับ

สมการที่ 2.4 สามารถจัดเรียงเป็นแบบเชิงเส้น ได้ดังนี้

$$\frac{C_s}{q_e (C_s - C_e)} = \frac{1}{QB} + \frac{(B-1)(C_e)}{(QB)(C_s)} \quad (2.5)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง  $C_e/(C_s - C_e) q_e$  กับ  $C_e/C_s$  จะได้เส้นตรงที่มีความชัน  $(B-1)/(QB)$  และมีจุดตัดแกนเท่ากับ  $1/QB$  กราฟสมการการดูดซับแบบบิอิตีแสดงในรูปที่ 2.5 ข

### 2.5.4.3 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich Isotherm)

ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนด์ลิชใช้กันอย่างแพร่หลาย ในการอธิบายการดูดซับในระบบของของเหลว

สมการการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช แสดงในสมการที่ 2.6

$$\frac{x}{m} = KC_e^{1/n} \quad (2.6)$$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

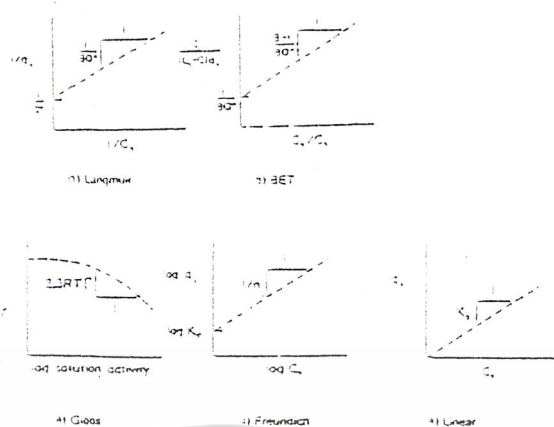
เมื่อ	$x$	=	ปริมาณของตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัม)
	$m$	=	น้ำหนักของสารดูดซับ (กรัม)
	$C_s$	=	ความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)
	$K, 1/n$	=	ค่าคงที่ของระบบ

สามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการเส้นตรงได้ดังนี้

$$\frac{\log(x)}{(m)} = \frac{\log K + \frac{1}{n} \log C_s}{n} \quad (2.7)$$

พลอตกราฟระหว่าง  $\log(x/m)$  กับ  $\log C_s$  จะได้เส้นตรงซึ่งมีความชันเท่ากับ  $1/n$  และมีจุดตัดแกนเท่ากับ  $\log K$  ดังแสดงในรูปที่ 2.5 ง ค่า  $1/n$  ที่ได้จากการดูดซับของสารประกอบอินทรีย์ด้วยถ่านกัมมันต์จะมีค่าน้อยกว่า 1 สำหรับค่า  $1/n$  ที่เกือบจะเท่ากับ 1 แสดงถึงความจุของการดูดซับที่ดี

สมการ Freundlich มีประโยชน์มากที่สุดสำหรับการละลายที่เจือจาง ปกติจะใช้กับการดูดซับสิ่งเจือปนในสารละลายบนถ่านกัมมันต์



รูปที่ 2.5 กราฟแสดงการหาค่าคงที่ในสมการไอโซเทอมแบบต่างๆ [6]

2.5.5 ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับ

2.5.5.1 ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดซับ (Size and Surface Area)

ความสามารถในการดูดซับ มีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ และ อัตราการดูดซับเป็นสัดส่วนผกผันกับขนาดของตัวดูดซับ และพื้นที่ผิวของสารดูดซับมีความสัมพันธ์โดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ (adsorption capacity) อัตราการดูดซับเป็นอัตราส่วนผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดซับ เมื่อสารดูดซับนั้นไม่มีรูพรุน สำหรับสารดูดซับที่มีรูพรุนอัตราการเคลื่อนเข้าสู่ผิวภายในรูพรุนถูกควบคุมโดยความต้านทานภายนอกที่เรียกว่า การขนผ่านส่งชั้นฟิล์ม (Film Transport) ดังนั้นอัตราการดูดซับจะเป็นอัตราส่วนกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดซับ ในทางกลับกันถ้าการเคลื่อนที่ภายในอนุภาคเป็นตัวควบคุมการดูดซับ การดูดซับจะเป็นอัตราส่วนผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวดูดซับ

2.5.5.2 ลักษณะของสารดูดซับ (Nature of Absorbent)

สิ่งสำคัญในการดูดซับตัวถูกละลายอย่างหนึ่งคือ ความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลาย การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายมีค่าลดลง เนื่องจากในการดูดซับ ตัวถูกละลายจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลาย นอกจากนี้ขนาดของโมเลกุลของตัวถูกละลายยังมีผลต่ออัตราการดูดซับอีกด้วย เนื่องจากอัตราการเคลื่อนที่ภายในโพรง เป็นอัตราที่ควบคุมกลไกการดูดซับ ขนาดของโมเลกุลตัวถูกละลายจะแปรผกผันกับอัตราการดูดซับ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 2.5.5.3 ความปั่นป่วน (Mixing Speed)

อัตราเร็วในการดูดซับขึ้นอยู่กับกระบวนการขนส่งโมเลกุลของระบบ ซึ่งจัดว่าเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราเร็วของการดูดซับ ขั้นตอนนี้ประกอบด้วย การแพร่ผ่านฟิล์ม (film diffusion) และการแพร่เข้าสู่โพรง (pore diffusion) ซึ่งขึ้นกับความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบสารดูดซับจะมีความหนามาก และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดซับ ทำให้การแพร่ผ่านฟิล์ม เป็นตัวกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ ในทางตรงกันข้ามถ้าน้ำมีความปั่นป่วนสูง ทำให้ความหนาของชั้นฟิล์มลดลงทำให้โมเลกุลเคลื่อนที่เข้าหาตัวดูดซับได้เร็วดังนั้นการแพร่เข้าสู่โพรงจะเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ

### 2.5.5.4 เวลาสัมผัส (Contact Time)

เวลาสัมผัสเป็นตัวแปรที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดซับ ในการบำบัดน้ำเสีย ระยะเวลาสัมผัสที่ใช้จะต้องเหมาะสมที่จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดดีที่สุดในที่นี้ก็จะขึ้นกับชนิดของตัวดูดซับและสารที่ถูกดูดซับ ซึ่งระยะเวลาที่เหมาะสมต้องทำการศึกษาในระดับปฏิบัติการก่อนนำไปใช้งานจริง

### 2.5.5.5 ค่าพีเอช (pH)

ค่าพีเอชของสารละลายเป็นปัจจัยสำคัญของการดูดซับ เนื่องจากไฮโดรเจนไอออนและไฮดรอกซิลไอออนสามารถดูดติดผิวได้อย่างแข็งแรง ค่าพีเอชมีอิทธิพลต่อการแตกตัวของไอออนและการละลายของสารต่างๆ ดังนั้นจึงมีผลกระทบต่อ การดูดซับ

## 2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

### 1. Yadava และคณะ (1987) [7]

ศึกษาการใช้ซีซีแอลลอยถ่านหินลิกไนต์ในการกำจัดแคดเมียม โดยในการทดลองได้ใช้ซีซีแอลลอยปริมาณ 1 กรัมต่อสารละลายแคดเมียมสังเคราะห์ 50 มิลลิลิตร และหาปริมาณแคดเมียมที่เหลือโดยใช้วิธีโคโธไซน ผลการศึกษาพบว่าการดูดซับจะเกิดได้ดีเมื่อ pH เท่ากับ 8.5 เวลาที่เข้าสู่สมดุลประมาณ 2 ชั่วโมงที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เมื่อความเข้มข้นของแคดเมียมเริ่มต้นลดลงมาก 0.15 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 0.10 มิลลิกรัมต่อลิตร ทำให้ประสิทธิภาพของการกำจัดเพิ่มขึ้นจาก 84 เป็น 89.82 เปอร์เซ็นต์

### 2. Yadava และคณะ (1991) [8]

ศึกษาการดูดซับตะกั่วจากน้ำเสียโดยใช้ตัวดูดซับเป็น China Clay และ Wallastonite พบว่าปริมาณตะกั่วที่ถูกดูดซับจะขึ้นกับอุณหภูมิของสารละลายที่มีตัวดูดซับและอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการดูดซับคืออุณหภูมิต่ำ เวลาที่การดูดซับเข้าสู่สมดุลสำหรับ China Clay เท่ากับ 90 นาที และสำหรับ Wallastonite เท่ากับ 120 นาที ข้อมูลการทดลองที่อุณหภูมิต่างๆ จะถูกศึกษาไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์พบว่าความร้อนของการดูดซับสำหรับการดูดซับตะกั่วบน China Clay และ Wallastonite เท่ากับ  $-77.95 \text{ kJ.mol}^{-1}$  และ  $-16.40 \text{ kJ.mol}^{-1}$  ตามลำดับชี้ให้เห็นว่ากระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการคายความร้อนในทั้ง 2 ระบบที่ทำการศึกษา

### 3. Diamadopoulos และคณะ (1993) [9]

ศึกษาวิจัยเรื่องการนำซีซีแอลมาใช้ในการกำจัดอาร์เซนิกจากน้ำ โดยในการทดลองนี้จะใช้ซีซีแอลลอย 1 กรัม เพื่อกำจัดอาร์เซนิกที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทำการทดลองที่ค่า pH เท่ากับ 4, 7 และ 10 ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นที่เหลือของอาร์เซนิกในน้ำจะขึ้นอยู่กับเวลา กล่าวคือ ที่ 20 ชั่วโมงแรกของการทดลองจะเกิดการดูดซับอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นก็จะเกิดการดูดซับอย่างช้าๆ และที่ pH เท่ากับ 4 ประสิทธิภาพเท่ากับ 3 และ 4 เท่าเมื่อเทียบกับที่ค่า pH เท่ากับ 10 และ 7 ตามลำดับ

### 4. Leyva-Ramos และคณะ (1995) [10]

ศึกษาการดูดซับโครเมียม(III) บนถ่านกัมมันต์ โดยทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับคือ pH และอุณหภูมิ ผลของ pH ที่มีต่อการดูดซับจะทำการศึกษาที่ pH 2, 4, 5 และ 6 จากการศึกษาพบว่าเมื่อค่า pH ต่ำกว่า 2 โครเมียม(III) จะไม่ถูกดูดซับ และที่ค่า pH มากกว่า 6.4 โครเมียม(III) จะแยกสารนี้เป็นเอกสารที่ส่งวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่นิยมนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตกตะกอนเป็นโครเมียมไฮดรอกไซด์ ดังนั้น การดูดซับสูงสุดจะเกิดที่ pH 5 ประสิทธิภาพการดูดซับจะเพิ่มขึ้น 20 % เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 25 เป็น 40 องศาเซลเซียส จากการวิจัยสามารถสรุปได้ว่าโครเมียม(III) สามารถถูกดูดซับบนถ่านกัมมันต์ได้ และการดูดซับขึ้นกับ pH เป็นอย่างมาก



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 3

### การดำเนินการวิจัย

#### 3.1 สารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

##### 3.1.1 สารเคมี

1. ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (Granular activated carbon) เกรดวิเคราะห์บริษัท Merck
2. ขี้เถ้าลอย (fly ash) จากการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย
3. โซเดียมไดโครเมต (Sodium dichromate,  $\text{Na}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ) เกรดวิเคราะห์จากบริษัท Carlo Erba
4. ตะกั่วไนเตรด (Lead nitrate,  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$ ) เกรดวิเคราะห์จากบริษัท Merck
5. 1,5-ไดฟีนิลคาร์บาไซด์ (1,5-diphenyl carbazide) เกรดวิเคราะห์จากบริษัท Merck
6. อะซิโตน (Acetone,  $\text{CH}_3\text{COCH}_3$ ) เกรดวิเคราะห์จากบริษัท J.T. Baker
7. ไดธิโซน (Dithizone) เกรดวิเคราะห์จากบริษัท Merck
8. แอมโมเนียมซิเตรตไดเบสิก (Ammonium citrate dibasic,  $(\text{NH}_4)_2\text{HC}_6\text{H}_5\text{O}_7$ ) เกรดวิเคราะห์จากบริษัท Carlo Erba
9. โซเดียมซัลไฟต์ (Sodium sulfite,  $\text{Na}_2\text{SO}_3$ ) เกรดวิเคราะห์จากบริษัท Carlo Erba
10. ไฮดรอกซิลามีนไฮโดรคลอไรด์ (Hydroxylamine hydrochloride,  $\text{NH}_2\text{OH}\cdot\text{HCl}$ ) เกรดวิเคราะห์จากบริษัท Carlo Erba
11. โพแทสเซียมไซยาไนด์ (Potassium cyanide, KCN) เกรดวิเคราะห์จากบริษัท Carlo Erba
12. คลอโรฟอร์ม (Chloroform,  $\text{CHCl}_3$ ) เกรดวิเคราะห์จากบริษัท Merck
13. กรดซัลฟูริก (Sulfuric acid,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) เกรดวิเคราะห์จากบริษัท BDH
14. กรดไนตริก (Nitric acid,  $\text{HNO}_3$ ) เกรดวิเคราะห์จากบริษัท J.T. Baker
15. แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Ammonium hydroxide,  $\text{NH}_4\text{OH}$ ) เกรดวิเคราะห์จากบริษัท J.T. Baker

##### 3.1.2 อุปกรณ์

1. เครื่อง UV/VIS Spectrophotometer ชี่ห้อ SHIMAZU รุ่น 760
2. เครื่องเขย่า (Shaking Machine) Heto รุ่น Hetofrig CB60 VS

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

3. Microwave Digester Unit Milestone รุ่น MLS-1200  
พร้อม Rotor ชนิดMDR-1000/6/100/110(PN 34134)
4. เครื่องชั่งแบบดิจิทัล ซีรีส์ SWISS QUALITY รุ่น PRESICA760
5. ขวดวัดปริมาตรขนาด 50, 100 และ 500 มิลลิลิตร
6. บีกเกอร์ขนาด 100, 250 และ 500 มิลลิลิตร
7. ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 และ 500 มิลลิลิตร
8. กระจกบดวงขนาด 10, 50 และ 50 มิลลิลิตร
9. ปิเปตขนาด 10, 25 และ 50 มิลลิลิตร
10. ไมโครปิเปต
11. กรวยแยกขนาด 250 และ 500 มิลลิลิตร
12. ชุดกรองแบบลดความดัน

### 3.2 ขั้นตอนการทำวิจัย

#### 3.2.1 การดูดซับโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริง

1. สังเคราะห์น้ำเสียจากโซเดียมไดโครเมต
2. นำน้ำเสียจากข้อที่ 1 มาทำการศึกษาผลของ pH ที่มีผลต่อการดูดซับและทำการหา pH ที่เหมาะสมโดยเปลี่ยนแปลง pH เป็น 3, 5, 7, 9 และ 11 โดยใช้ตัวดูดซับคือ ถ่านกัมมันต์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร
3. ทำการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักที่มีต่อการดูดซับโดยใช้ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนัก 25, 40, 60 และ 75 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ pH ที่เหมาะสมในข้อ 2 และปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร
4. ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการดูดซับและหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการดูดซับโลหะหนักโดยเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเป็น 20, 30 และ 40 องศาเซลเซียส โดยใช้ pH ที่เหมาะสมในข้อ 2 ความเข้มข้นเริ่มต้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณตัวดูดซับร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร
5. นำน้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรมชุบโครเมียมมาทำการดูดซับด้วยสภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองข้างต้น
6. ทำการทดลองตั้งแต่เริ่มต้นใหม่แต่เปลี่ยนตัวดูดซับจากถ่านกัมมันต์เป็นซีโอไลต์
7. ศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับและค่าคงที่ของไอโซเทอร์ม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

### 3.2.2 การดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริง

1. สังเคราะห์น้ำเสียจาก ตะกั่วในเตรต
2. ทำการทดลองเหมือนตอนที่ 3.2.1 แต่เปลี่ยน pH จาก 3, 5, 7, 9 และ 11 เป็น 1, 2, 3, 4 และ 5 และเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นจาก 25, 40, 60 และ 75 เป็น 15, 25 และ 40 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้ตัวดูดซับเป็นถ่านกัมมันต์และซีโอไลต์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร
3. นำน้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรมแบตเตอรี่มาทำการดูดซับ โดยตัวดูดซับทั้ง 2 ชนิด โดยสภาวะการดูดซับที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์

### 3.3 วิธีการทดลอง

#### 3.3.1 การศึกษาผลของตัวแปรสภาวะและการหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับโครเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์

##### 3.3.1.1 ศึกษาผลของ pH ที่มีต่อการดูดซับโครเมียม

1. เตรียมสารละลายโครเมียมเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 250 มิลลิลิตร จากสารละลายสต็อกโครเมียมเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร
2. นำสารละลายที่เตรียมได้จากข้อที่ 1 เทใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร จากนั้นปรับ pH ของสารละลายให้เป็น 3, 5, 7, 9 และ 11
3. นำสารละลายที่ได้จากข้อ 2 ไปตั้งในเครื่องเขย่าและควบคุมอุณหภูมิที่ 30 องศาเซลเซียส เติมถ่านกัมมันต์โดยใช้ร้อยละ 1 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรจากนั้นทำการจับเวลาเพื่อสุ่มตัวอย่างมาวิเคราะห์โดยทำตั้งแต่นาทีที่ 0, 5, 10, 15, 20, 30, 60, 90, 120, 180 และ 240
4. สุ่มตัวอย่างตามเวลาดังข้อ 3 โดยสุ่มตัวอย่างมา 1 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 100 มิลลิลิตร
5. สารละลายที่ปรับปริมาตรไปทำการหาปริมาณโครเมียมที่เหลือโดยใช้วิธีการตาม Standard Method for Water and Wastewater [11] ซึ่งแสดงไว้ในภาคผนวก ก.

##### 3.3.1.2 ศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของโครเมียมที่มีต่อการดูดซับโครเมียม

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการทดลองเช่นเดียวกับ 3.3.1.1 โดยใช้สภาวะ pH ที่เหมาะสมจาก 3.3.1.1 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของโครเมียมจาก 40 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 25 ,60 และ 75 มิลลิกรัมต่อลิตร

### 3.3.1.3 ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการดูดซับโครเมียม

ทำการทดลองเช่นเดียวกับ 3.3.1.1 โดยใช้สภาวะ pH ที่เหมาะสมจาก 3.3.1.1 ความเข้มข้นเริ่มต้นของโครเมียม 40 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่เปลี่ยนอุณหภูมิ จาก 30 องศาเซลเซียส เป็น 20 และ 40 องศาเซลเซียส

### 3.3.1.4 ศึกษาชนิดของตัวดูดซับที่มีผลต่อการดูดซับโครเมียม

ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ 3.3.1.1 ถึง 3.3.1.3 โดยเปลี่ยนตัวดูดซับจากถ่านกัมมันต์เป็นซีเถ้าลอย

## 3.3.2 การศึกษาผลของตัวแปรสภาวะและการหาสภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์

### 3.3.2.1 ศึกษาผลของ pH ที่มีต่อการดูดซับตะกั่ว

เตรียมสารละลายตะกั่วเข้มข้น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 250 มิลลิลิตร จากสารละลายสต็อกตะกั่วเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นทำการทดลองเช่นเดียวกับ 3.3.1.1 โดยปรับ pH ของสารละลายให้เท่ากับ 1, 2, 3, 4 และ 5 ตามลำดับ การวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วใช้วิธีไดโครโซนตาม Standard Method for Water and Wastewater [11] ดังแสดงไว้ในภาคผนวก ข.

### 3.3.2.2 ศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วที่มีต่อการดูดซับตะกั่ว

ทำการทดลองเช่นเดียวกับ 3.3.2.1 โดยใช้สภาวะ pH ที่เหมาะสมจาก 3.3.2.1 โดยเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วจาก 40 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 15 และ 25 มิลลิกรัมต่อลิตร

### 3.3.2.3 ศึกษาผลของอุณหภูมิที่มีต่อการดูดซับตะกั่ว

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ทำการทดลองเช่นเดียวกับ 3.3.2.1 โดยใช้สภาวะ pH ที่เหมาะสมจาก 3.3.2.1 ความเข้มข้นเริ่มต้นของตะกั่วเป็น 40 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่เปลี่ยนอุณหภูมิ จาก 30 องศาเซลเซียส เป็น 20 และ 40 องศาเซลเซียส

#### 3.3.2.4 ศึกษาชนิดของตัวดูดซับที่มีผลต่อการดูดซับตะกั่ว

ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ 3.3.2.1 ถึง 3.3.2.3 โดยเปลี่ยนตัวดูดซับจากถ่านกัมมันต์เป็นซีเถ้าลอย

#### 3.3.2.5 ศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับและค่าคงที่ของไอโซเทอร์ม

จากการทดลองที่ 3.3.1 และ 3.3.2 สามารถสรุปสภาวะที่ต่อการศึกษาได้ดังตารางที่ 3.1 ถึง 3.3



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1 ศึกษาผลของ pH ที่มีผลต่อการดูดซับโลหะหนัก

ชนิดตัวดูดซับ	ชนิดโลหะหนัก	ความเข้มข้นเริ่มต้น	ปริมาณของตัวดูดซับ	pH
ถ่านกัมมันต์	โครเมียม	40 มิลลิกรัม/ลิตร	1%w/v	3
				5
	ตะกั่ว			7
				9
				11
ซีลื้อลอย	โครเมียม	40 มิลลิกรัม/ลิตร	1%w/v	1
				2
	ตะกั่ว			3
				4
				5

ตารางที่ 3.2 ผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะหนักที่มีผลต่อการดูดซับ

ชนิดตัวดูดซับ	ชนิดโลหะหนัก	ปริมาณของตัวดูดซับ	pH	ความเข้มข้นเริ่มต้น
ถ่านกัมมันต์	โครเมียม	1%w/v	ที่เหมาะสมจากการทดลองในตารางที่ 3.1	25
ซีลื้อลอย				40
				75
ถ่านกัมมันต์	ตะกั่ว	1%w/v	ที่เหมาะสมจากการทดลองในตารางที่ 3.1	15
ซีลื้อลอย				25
				40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.3 ผลของอุณหภูมิของการดูดซับที่มีผลต่อการดูดซับ โลหะหนัก

ชนิดตัวดูดซับ	ชนิดโลหะหนัก	pH	ปริมาณของตัวดูดซับ	ความเข้มข้นเริ่มต้น	อุณหภูมิ (°C)
ถ่านกัมมันต์	โครเมียม	ที่เหมาะสมจาก	1%w/v	ที่เหมาะสมจาก	20
	ตะกั่ว	การทดลองในตารางที่ 3.1			30
					40
ซีเถ้าลอย	โครเมียม	ที่เหมาะสมจาก	1%w/v	ที่เหมาะสมจาก	20
	ตะกั่ว	การทดลองในตารางที่ 3.1			30
					40

### 3.3.3 การศึกษาการดูดซับโครเมียมและตะกั่วจากน้ำเสียจริงโดยใช้สภาวะที่เหมาะสมจาก 3.3.1 และ 3.3.2 ตามลำดับ

การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรม 2 แห่งคือ จากโรงงานชุบโลหะและโรงงานผลิตแบตเตอรี่ ซึ่งน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะจะมีโครเมียมในปริมาณสูงด้วย ส่วนน้ำเสียจากโรงงานผลิตแบตเตอรี่จะมีตะกั่วในปริมาณสูงด้วยเช่นกัน โดยน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมจะนำมาทำการวิเคราะห์หาปริมาณโลหะหนักเริ่มต้นและหลังจากการดูดซับด้วยตัวดูดซับ โดยมีขั้นตอนดังนี้

#### 3.3.3.1 น้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ

1. นำน้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรมมาย่อยด้วยกรด จากนั้นวิเคราะห์ความเข้มข้นเริ่มต้นของโครเมียมด้วยเครื่อง อะตอมมิกแอ็บซอร์บชัน สเปกโตรโฟโตมิเตอร์
2. นำน้ำเสียที่ได้จากข้อ 1 มาใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตรจำนวน 250 มิลลิลิตร ปรับ pH ของน้ำเสียให้เป็น pH ที่เหมาะสมตามการทดลองจากน้ำเสียสังเคราะห์
3. นำน้ำเสียจากข้อ 2 มาเติมตัวดูดซับลงไป ปริมาณร้อยละ 1 น้ำหนักต่อ

ปริมาตร

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4. นำไปตั้งในเครื่องเขย่า ความคุมอุณหภูมิที่เหมาะสม ทำการจับเวลาเพื่อสุ่มตัวอย่างมาวิเคราะห์ในเวลาที่ 0, 30,60,90,120, 240 และ1440
5. สุ่มตัวอย่างตามข้อ 4 โดยสุ่มมาครั้งละ 1 มิลลิลิตร ใส่ในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น
6. นำสารละลายที่ปรับปริมาตรแล้วไปทำการวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียมที่เหลือด้วยเครื่อง อะตอมมิกแอบซอร์บชัน สเปกโตรโฟโตมิเตอร์

### 3.3.3.2 นำเสียจากโรงงานผลิตแบตเตอรี่

นำน้ำเสียจากโรงงานผลิตแบตเตอรี่มาทำการทดลองเหมือนกับข้อ 3.3.3.1 แต่ใช้สถานะที่เหมาะสมจาก 3.3.2



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์

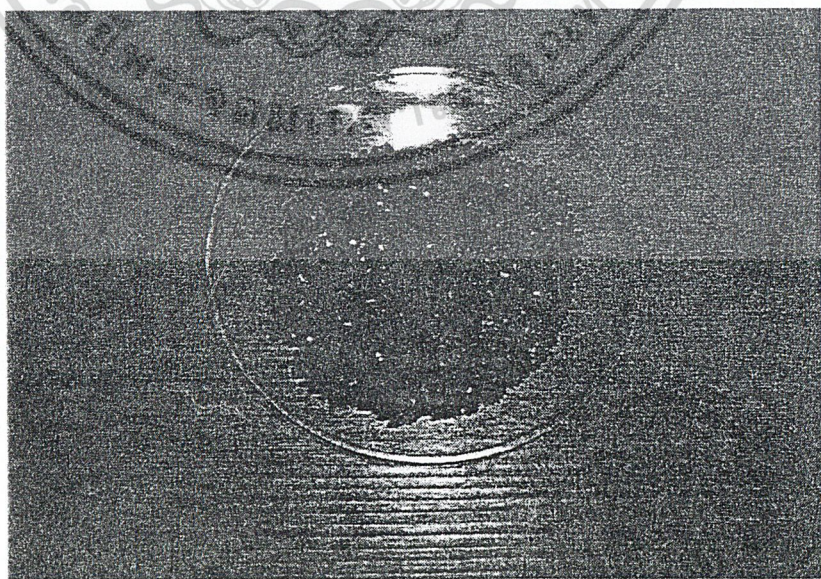
#### 4.1 ลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของตัวดูดซับ

##### 4.1.1 ถ่านกัมมันต์ (activated carbon)

ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ มีลักษณะเป็นของแข็งสีดำ มีพื้นที่ผิวจำเพาะเฉลี่ย ซึ่งวิเคราะห์โดยวิธี BET เท่ากับ 667.36 ตารางเมตรต่อกรัม ขนาดอนุภาค 2.5 มิลลิเมตร องค์ประกอบทางเคมีของถ่านกัมมันต์จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ ดิฟแฟรคชัน (X-ray Diffraction) แสดงดังตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 แสดงลักษณะของถ่านกัมมันต์

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบทางเคมีของถ่านกัมมันต์

องค์ประกอบทางเคมี	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
เปอร์เซ็นต์โดยประมาณ	12.0	14.6	40.3	11.18	11.4



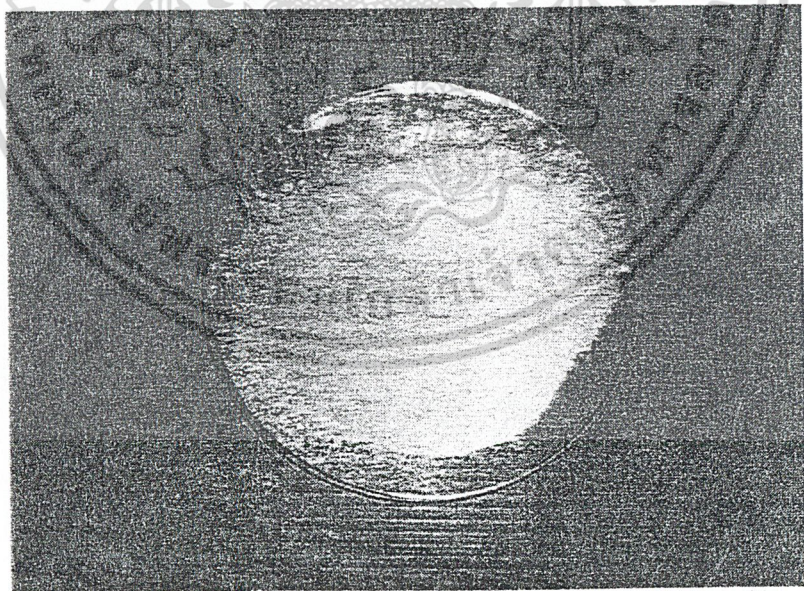
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้รูปที่ 4.1 ลักษณะของถ่านกัมมันต์ให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

4.1.2 ขี้เถ้าลอย (Fly ash)

ขี้เถ้าลอยที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้จากการเผาไหม้ถ่านหินลิกไนต์ ของการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย มีลักษณะเป็นของแข็งสีเทา มีความเบาและเกิดการฟุ้งได้ง่ายเนื่องจากขนาดอนุภาคที่เล็ก มีพื้นที่ผิวจำเพาะเฉลี่ยซึ่งวิเคราะห์โดยวิธี BET เท่ากับ 6.38 ตารางเมตรต่อกรัม องค์ประกอบทางเคมีของขี้เถ้าลอยจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคเอ็กซ์เรย์ ดีฟแฟรคชัน แสดงดังตารางที่ 4.2 ลักษณะของขี้เถ้าลอยแสดงดังรูปที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของขี้เถ้าลอยโดยแสดงในรูปของออกไซด์ของโลหะ

องค์ประกอบทางเคมี	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	MgO	Na <sub>2</sub> O
เปอร์เซ็นต์โดยประมาณ	43.8	23.1	13.1	9.73	2.87	2.64	2.17	1.29



รูปที่ 4.2 ลักษณะของขี้เถ้าลอย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## 4.2 การดูดซับโครเมียมและตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์

กำหนดให้

$C_f$  = ความเข้มข้นของโลหะที่เหลืออยู่ (mg/l)

$q_f$  = ปริมาณโลหะหนักที่ถูกดูดซับบนตัวดูดซับต่อหนึ่งหน่วยน้ำหนักตัวดูดซับ (mg/g)

$$\% \text{การกำจัด} = \left[ \frac{C_f \text{ ที่เวลาเริ่มต้น} - C_f \text{ ที่เวลาสุดท้าย}}{C_f \text{ ที่เวลาเริ่มต้น}} \right] \times 100$$

### 4.2.1 การดูดซับโครเมียมและตะกั่วด้วยถ่านกัมมันต์

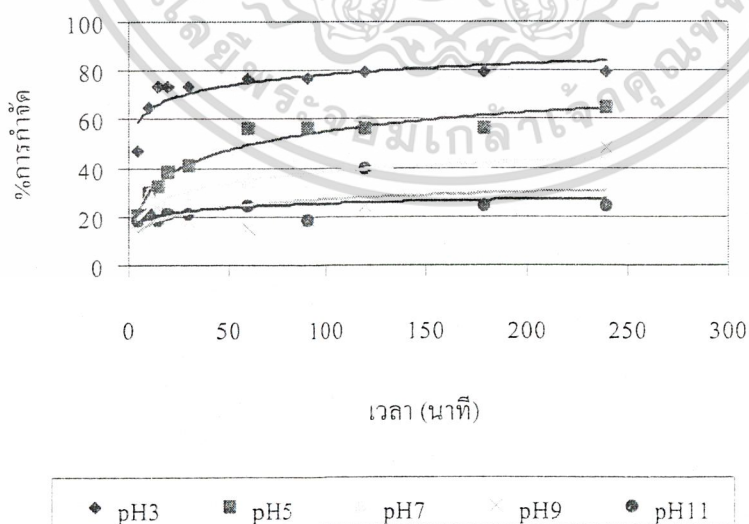
จากการทดลองการดูดซับโครเมียมและตะกั่วด้วยถ่านกัมมันต์ มีหลายปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ซึ่งเราได้ทำการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับคือ ค่า pH อุณหภูมิ และความเข้มข้นเริ่มต้น

#### 4.2.1.1 ผลของ pH

ค่า pH เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่เราใช้ในการทดลอง ซึ่งในการทดลองได้ใช้ค่า pH ต่างๆกันคือ 3, 5, 7, 9 และ 11 สำหรับสารละลายโครเมียมและ 1, 2, 3, 4 และ 5 สำหรับสารละลายตะกั่ว ความเข้มข้นที่เหลืออยู่และเปอร์เซ็นต์การกำจัดที่ pH ต่างๆ สำหรับโครเมียมและตะกั่วแสดงดังตารางที่ 4.3 และ 4.4 ผลของ pH ที่มีต่อเปอร์เซ็นต์การกำจัดโครเมียมและตะกั่วแสดงดังรูปที่ 4.3 และ 4.4

ตารางที่ 4.3 ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ของ โครเมียมและเปอร์เซนต์การกำจัดเทียบกับเวลาที่ pH ต่างๆ โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

เวลา (นาที)	pH 3		pH 5		pH 7		pH 9		pH 11	
	$C_f$ (mg/l)	%การ กำจัด	$C_f$ (mg/l)	%การ กำจัด	$C_f$ (mg/l)	%การ กำจัด	$C_f$ (mg/l)	%การ กำจัด	$C_f$ (mg/l)	%การ กำจัด
0	45.68	0	45.68	0	45.68	0	44.33	0	44.33	0
5	24.11	47.22	36.24	20.67	37.59	17.71	36.24	18.25	36.24	18.25
10	16.03	64.91	32.20	29.51	32.20	29.51	34.90	21.27	34.90	21.27
15	11.98	73.77	30.85	32.46	34.90	23.60	36.24	18.25	36.24	18.25
20	11.98	73.77	28.16	38.35	33.55	26.55	34.90	21.27	34.90	21.27
30	11.98	73.77	26.81	41.31	32.20	29.51	36.24	18.25	34.90	21.27
60	10.63	76.73	20.07	56.06	29.51	35.40	37.59	15.20	33.55	24.32
90	10.63	76.73	20.07	56.06	29.51	35.40	36.34	18.25	36.24	18.25
120	9.28	79.68	20.07	56.06	28.16	38.35	33.55	24.32	26.81	39.52
180	9.28	79.68	20.07	56.06	26.81	41.31	32.20	27.36	33.55	24.32
240	9.28	79.68	16.03	64.91	24.11	47.22	22.77	48.64	33.55	24.32

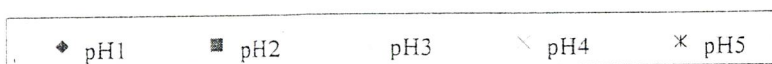
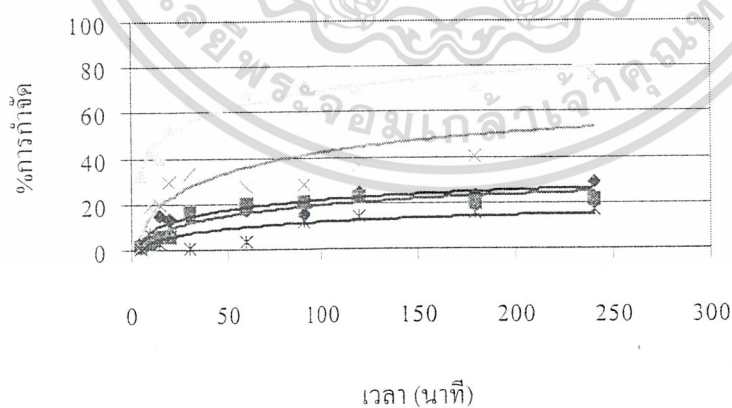


รูปที่ 4.3 ผลของ pH ที่มีต่อ%การกำจัด โครเมียม โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.4 ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ของตะกั่วและเปอร์เซ็นต์การกำจัดเทียบกับเวลาที่ pH ต่างๆ โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

เวลา (นาที)	pH 1		pH 2		pH 3		pH 4		pH 5	
	$C_t$ (mg/l)	% การ กำจัด	$C_t$ (mg/l)	% การ กำจัด	$C_t$ (mg/l)	% การ กำจัด	$C_t$ (mg/l)	% การ กำจัด	$C_t$ (mg/l)	% การ กำจัด
0	40.0	0	40.0	0	40.0	0	40.0	0	40.0	0
5	38.54	3.65	39.52	1.20	26.88	32.8	39.38	1.55	39.78	0.55
10	38.17	4.58	38.89	2.78	22.83	42.93	32.44	18.90	37.11	7.23
15	34.00	15.00	37.86	5.35	23.77	40.58	31.94	20.15	38.95	2.73
20	34.62	13.45	37.65	5.88	18.78	53.05	28.09	29.78	36.08	9.80
30	34.31	14.23	33.38	16.55	14.42	63.95	26.53	33.68	39.78	0.55
60	33.19	17.03	32.16	19.60	12.86	67.85	28.81	27.98	38.54	3.75
90	33.74	15.65	31.78	20.55	10.99	72.53	28.71	28.23	35.24	11.90
120	29.96	25.10	30.82	22.95	11.62	70.95	25.29	36.78	34.31	14.23
180	30.61	23.48	31.94	20.15	11.31	71.73	23.95	40.13	33.72	15.70
240	28.25	29.38	31.49	21.28	9.44	76.40	9.30	76.75	33.19	17.23



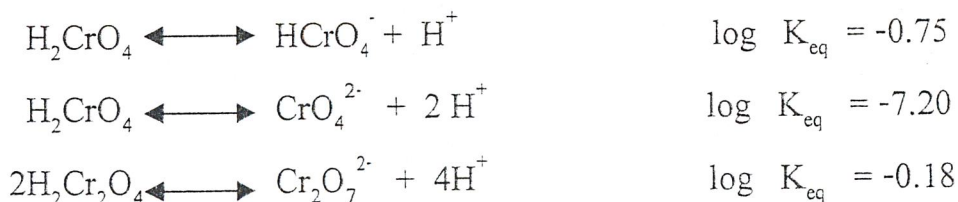
รูปที่ 4.4 ผลของ pH ที่มีต่อ%การกำจัดตะกั่ว โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

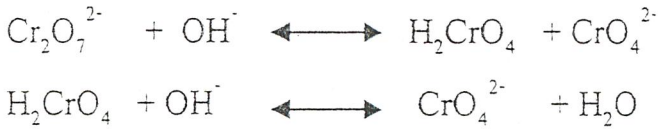
จากรูปที่ 4.3 จะเห็นได้ว่าถ่านกัมมันต์จะดูดซับโครเมียมได้มากที่สุดที่ pH 3 โดยการกำจัดสูงสุดเป็น 79.68 % ส่วนตะกั่วจะถูกดูดซับได้มากที่สุดที่ pH 3 เช่นกันการกำจัดสูงสุดเท่ากับ 76.40 % ดังรูปที่ 4.4 โดย % การกำจัดจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงเวลา 30 นาทีแรกหลังจากนั้น % การกำจัดจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆจนคงที่ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า pH มีผลอย่างมากต่อการดูดซับรวมทั้งลักษณะของตัวดูดซับด้วย โดยถ่านกัมมันต์มีโครงสร้างคล้ายผลึกกราฟไฟต์ โดยอะตอมคาร์บอนจะวางตัวเป็นชั้นๆ แรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นคือแรงแรงแคอวาล์ว ซึ่งเป็นแรงที่ไม่แข็งแรงมากนัก แต่ละชั้นประกอบด้วยกลุ่มอะตอมคาร์บอนที่มีโครงสร้างคล้ายรูปหกเหลี่ยม อะตอมคาร์บอนแต่ละตัวจะใช้ซิigmaอิลิแคตรอนสร้างพันธะเดี่ยว 3 อะตอม อิลิแคตรอนที่เหลืออีกหนึ่งตัวคือ piอิลิแคตรอน ที่ใช้ในการสร้างพันธะคู่ (double bond) แต่โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์จะมีอิลิแคตรอนไม่ครบคู่ อะตอมคาร์บอนบางตัวจึงต้องรับอิลิแคตรอนดังกล่าวไว้ทำให้มีความหนาแน่นประจุสูง อะตอมดังกล่าวไว้ทำให้ความหนาแน่นประจุสูง อะตอมดังกล่าวจะปล่อยให้อิลิแคตรอนเคลื่อนที่ไปยังอะตอมข้างเคียงหรือเกิดเรโซแนนซ์ (resonance) เพื่อลดความหนาแน่นของประจุเพื่อทำให้โครงสร้างเสถียรยิ่งขึ้น[12]

การดูดซับบนถ่านกัมมันต์นั้นจะเกิดที่บริเวณผิวภายในรูพรุนที่มีหมู่ฟังก์ชันที่เกิดจากการกระตุ้น โดยหมู่ฟังก์ชันหลักๆบนถ่านกัมมันต์ได้แก่ หมู่ carboxyl หมู่ phenolic หมู่ carbonyl และอื่นๆ โดยหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้จะมีความแรงต่างกัน และหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้สามารถแสดงพฤติกรรมได้ทั้งเป็นกรดและเบสบนผิวถ่านกัมมันต์ (amphotheric) ขึ้นอยู่กับว่าอยู่ในสภาวะความเป็นกรดเบสของสารละลายอย่างไร[13]

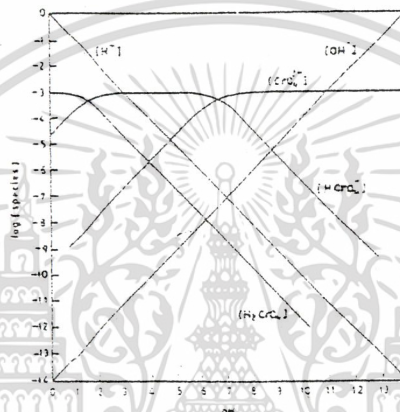
โลหะหนักที่นำมาทำการดูดซับในโรงงานพิเศษนี้คือโครเมียมและตะกั่ว จะต้องตรวจสอบว่าความสามารถในการเกิดไฮโดรไลซิส (hydrolysis) เป็นอย่างไร ซึ่งโครเมียมนั้นเมื่อเกิดไฮโดรไลซิส จะเกิดสปีชีส์ (species) แตกต่างกันตามสภาวะของ pH โดยสมมูลของการไฮโดรไลซิสเป็นดังนี้[14]



หรือในกรณีไฮโดรไลซิสในสภาวะต่าง สมดุลที่เกิดขึ้นคือ

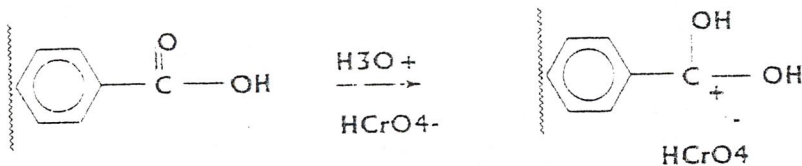


การไฮโดรไลซิสของโครเมียมที่ pH ต่างๆสามารถแสดงในแผนภาพการกระจายสปีชีส์ของโครเมียม ดังแสดงในรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 แผนภาพการกระจายสปีชีส์ของ โครเมียมที่ pH ต่างๆ[15]

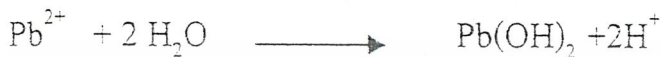
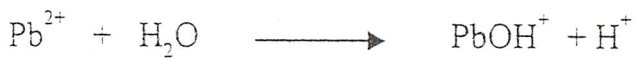
จากรูปที่ 4.5 เห็นว่า สปีชีส์ ของโครเมียมมีหลายชนิดขึ้นกับ pH โดยช่วง pH ต่ำๆ (pH2-5)  $\text{HCrO}_4^-$  จะเป็นสปีชีส์ที่เด่นและมีปริมาณมากในช่วงนี้และหลังจากนั้นจะลดลง เมื่อ pH สูงขึ้น  $\text{CrO}_4^{2-}$  จะเป็นสปีชีส์ที่เด่น จากการทดลอง การดูดซับที่คิดที่สุดจะเกิดขึ้นที่ pH 3 ส่วน pH 5, 7 และ 9 นั้นเปอร์เซ็นต์การดูดซับจะลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการดูดซับในช่วง pH 3 นั้นเป็นผลมาจาก  $\text{HCrO}_4^-$  โดยในช่วง pH ต่ำๆซึ่งจะมีความเป็นกรดสูง หมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรดอ่อนก็จะแสดงสมบัติความเป็นเบส ตัวอย่างเช่น หมู่คาร์บอกซิลิก จะถูกโปรโตเนต (protonate) ด้วยโปรตอนกลายเป็นประจุบวกที่คาร์บอนของหมู่คาร์บอนิล[16] ดังสมการ



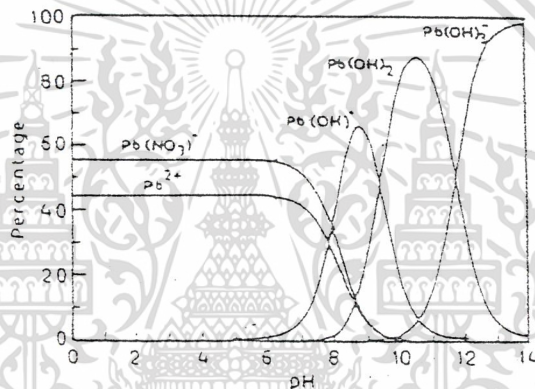
บริเวณ carbocation จะเป็นบริเวณที่เกิดการดูดซับกับ  $\text{HCrO}_4^-$  ซึ่งเป็นการดูดซับทางเคมี ส่วนที่ pH สูงขึ้นนั้นจะมีการรบกวนของ  $\text{OH}^-$  ทำให้การดูดซับเกิดได้ไม่ดี

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

สำหรับการดูดซับตะกั่วด้วยถ่านกัมมันต์นั้นจะเกิดการดูดซับบริเวณพื้นผิวภายในรูพรุน จากทฤษฎีการดูดซับตะกั่วที่ตะกั่วจะตกตะกอนกลายเป็นตะกั่วไฮดรอกไซด์ที่ pH ประมาณ 4 เป็นต้นไปดังสมการนี้ [14]



และสามารถแสดงแผนภาพการกระจายของสปีชีส์ของตะกั่วกับ pH ดังรูปที่ 4.6



รูปที่ 4.6 แผนภาพการกระจายของสปีชีส์ของตะกั่วที่ pH ต่างๆ [17]

จากรูปที่ 4.6 จะเห็นว่าการดูดซับตะกั่วที่ pH ต่ำๆ นั้น Pb<sup>2+</sup> จะเป็นสปีชีส์ที่เด่นและมีปริมาณมาก จากการทดลองพบว่าในช่วง pH 1-2 การดูดซับจะเกิดขึ้นได้น้อย อาจเป็นเพราะหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวบางส่วนถูกโปรโตเนต แต่เมื่อ pH มากกว่า 2 การดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วดังจะเห็นได้จาก % การกำจัดซึ่งเพิ่มจาก 21.28 % ไปเป็น 76.40 % ที่ pH 3 ซึ่งผลการทดลองสอดคล้องกับการวิจัยของ T.C. Tan และ W.K. Teo [18] ซึ่งผลการวิจัยพบว่า ที่ pH ต่ำจะดูดซับได้น้อยมากในช่วง pH 1-2 แล้วจะเริ่มมีการดูดซับที่ดีขึ้นและเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง pH 2.5-4.5 หลังจากนั้นจะเริ่มคงที่ที่ pH 4.5 เป็นต้นไปซึ่งช่วง pH ที่เหมาะสมกับการดูดซับที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองคือ pH 3 ซึ่งสอดคล้องกับทางทฤษฎี

การดูดซับระหว่างตะกั่วกับถ่านกัมมันต์เป็นการดูดซับทางเคมีเช่นเดียวกับการดูดซับ โครเมียมแต่กลไกนั้นต่างกัน โดยการไฮโดรไลซิสของหมู่ฟังก์ชันที่เป็นกรดบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ จะเป็นปัจจัยสำคัญที่จะทำให้เกิดการดูดซับกับไอออนของตะกั่ว ดังปฏิกิริยาที่แสดงในสมการ [16]



จากสมการ  $\text{H}^+$  จะถูก deprotonated ในสภาวะกรดทำให้  $\text{H}^+$  หลุดออกมาหลังจากนั้น  $\text{Pb}^{2+}$  จะเข้าไปดึงดูดประจุกับประจุลบของออกซิเจน สำหรับที่ pH 4 และ 5 นั้นตะกั่วจะเริ่มตกตะกอนเป็นตะกั่วไฮดรอกไซด์ทำให้ผลที่ได้ไม่ได้มาจากการดูดซับทั้งหมด



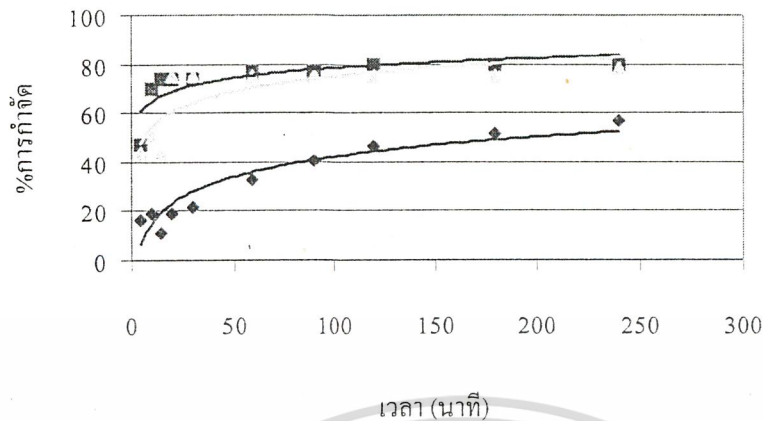
#### 4.2.1.2 ผลของอุณหภูมิ

อุณหภูมิก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่เราใช้ในการทดลอง ซึ่งในการทดลองได้ใช้อุณหภูมิต่างๆกันคือ 20, 30 และ 40 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นที่เหลืออยู่และเปอร์เซ็นต์การกำจัดที่อุณหภูมิต่างๆ สำหรับโครเมียมและตะกั่วแสดงดังตารางที่ 4.5 และ 4.6 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การกำจัดโครเมียมและตะกั่วแสดงดังรูปที่ 4.7 และ 4.8

ตารางที่ 4.5 ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ของโครเมียมและเปอร์เซ็นต์การกำจัดเทียบกับเวลาที่อุณหภูมิต่างๆ โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

เวลา (นาที)	20°C		30°C		40°C	
	C <sub>f</sub> (mg/l)	%การ กำจัด	C <sub>f</sub> (mg/l)	%การ กำจัด	C <sub>f</sub> (mg/l)	%การ กำจัด
0	56.46	0	41.64	0	42.98	0
5	55.12	16.25	29.51	47.22	41.64	43.9
10	51.07	18.97	22.77	69.91	42.98	50.16
15	53.77	10.84	22.77	73.77	42.98	43.9
20	51.07	18.97	21.42	73.77	42.98	75.27
30	52.42	21.68	28.16	73.77	41.64	75.27
60	47.03	32.52	22.77	76.73	41.64	75.27
90	45.68	40.65	21.42	76.73	42.98	75.27
120	44.33	46.08	20.07	79.68	40.29	75.27
180	41.64	51.51	16.03	79.68	40.29	75.27
240	40.29	56.92	13.33	79.68	38.94	78.41

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



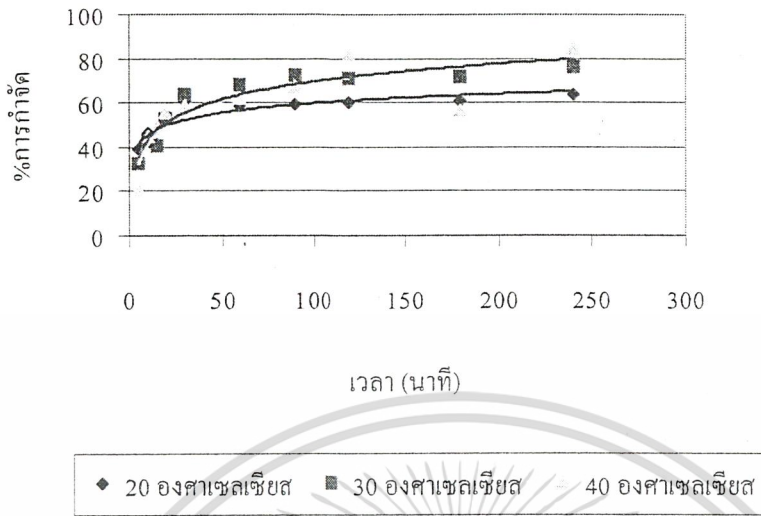
◆ 20 องศาเซลเซียส    ■ 30 องศาเซลเซียส    □ 40 องศาเซลเซียส

รูปที่ 4.7 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ%การกำจัดโครเมียมโดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

ตารางที่ 4.6 ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ของตะกั่วและเปอร์เซ็นต์การกำจัดเทียบกับเวลาที่อุณหภูมิต่างๆ โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

เวลา (นาที)	20 °C		30 °C		40 °C	
	$C_t$ (mg/l)	% การ กำจัด	$C_t$ (mg/l)	% การ กำจัด	$C_t$ (mg/l)	% การ กำจัด
0	40	0	40.0	0	40	0
5	24.36	39.1	26.88	32.8	31.51	21.23
10	21.56	46.1	22.83	42.93	21.98	45.05
15	23.42	41.45	23.77	40.58	20.40	49.00
20	19.07	52.33	18.78	53.05	17.76	55.60
30	15.65	60.88	14.42	63.95	16.51	58.73
60	16.64	58.40	12.86	67.85	15.02	62.45
90	16.11	59.73	10.99	72.53	13.00	67.50
120	16.05	59.88	11.62	70.95	7.37	81.58
180	15.55	61.13	11.31	71.73	17.43	56.43
240	14.59	63.53	9.44	76.40	6.22	84.45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.8 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ%การกำจัดตะกั่ว โดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์

ผลของอุณหภูมิที่มีต่อการดูดซับจากการทดลองพบว่าเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นการดูดซับจะเกิดได้ดีขึ้นซึ่งสามารถอธิบายได้ผ่านกลไกการดูดซับทั้ง 3 แบบคือการแพร่ภายนอก การแพร่ภายใน และปฏิกิริยาพื้นผิวคือ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นจะเพิ่มพลังงานจลน์ของไอออนโลหะหนัก เมื่อไอออนมีพลังงานจลน์สูงขึ้นทำให้การเคลื่อนที่เข้าแพร่เข้าสู่พื้นผิวของตัวดูดซับเร็วขึ้นดังนั้นการดูดซับจะเกิดได้ดีขึ้นเมื่ออุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น

#### 4.2.1.3 ผลของความเข้มข้น

ความเข้มข้นก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์เช่นกัน ซึ่งในการทดลองได้ใช้ความเข้มข้นต่างๆกันคือ 25, 40, 60 และ 75 mg/l สำหรับโครเมียม และ 15, 25 และ 40 mg/l สำหรับตะกั่ว ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ของโครเมียมและตะกั่ว และปริมาณการดูดซับต่อน้ำหนักถ่านกัมมันต์แสดงดังตารางที่ 4.7 และ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับต่อน้ำหนักถ่านกัมมันต์กับเวลา ที่ความเข้มข้นของสารละลายโครเมียมและตะกั่วต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.9 และ 4.12

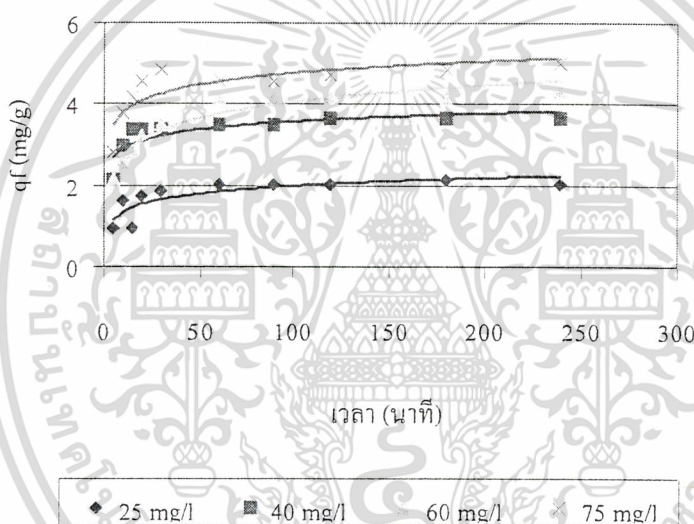
ตารางที่ 4.7 ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ของ โครเมียมและปริมาณการดูดซับต่อน้ำหนักถ่านกัมมันต์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ

เวลา (นาที)	25 mg/l		40 mg/l		60 mg/l		75 mg/l	
	$C_r$ (mg/l)	$q_r$ (mg/g)	$C_r$ (mg/l)	$q_r$ (mg/g)	$C_r$ (mg/l)	$q_r$ (mg/g)	$C_r$ (mg/l)	$Q_r$ (mg/g)
0	24.11	0	45.68	0	61.85	0	69.94	0
5	14.68	0.943	24.11	2.157	40.29	2.156	41.64	2.830
10	10.63	1.617	16.03	2.965	36.24	2.561	32.20	3.774
15	14.68	0.943	11.98	3.370	33.55	2.830	28.16	4.178
20	6.99	1.752	11.98	3.370	29.51	3.234	24.11	4.583
30	5.24	1.887	11.98	3.370	26.81	3.504	21.42	4.852
60	3.90	2.021	10.63	3.505	20.07	4.178	24.11	4.583
90	3.90	2.021	10.63	3.505	20.07	4.178	24.11	4.583
120	3.90	2.021	9.28	3.640	20.07	4.178	22.77	4.717
180	2.55	2.156	9.28	3.640	20.07	4.178	21.42	4.852
240	3.90	2.021	9.28	3.640	18.72	4.313	20.07	4.987

%การกำจัดที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ ที่เวลา 240 นาที เป็นดังนี้

25 mg/l	%การกำจัด = 83.82
40 mg/l	%การกำจัด = 79.68
60 mg/l	%การกำจัด = 69.73
75 mg/l	%การกำจัด = 71.30

จากข้อมูลในตาราง 4.7 จะนำมาหาไอโซเทอมที่สอดคล้องกับการดูดซับโครเมียมด้วยถ่านกัมมันต์ว่าเป็นแบบ langmuir หรือ freundlich โดยแสดงดังรูปที่ 4.10 รูปที่ 4.11 และตารางที่ 4.8

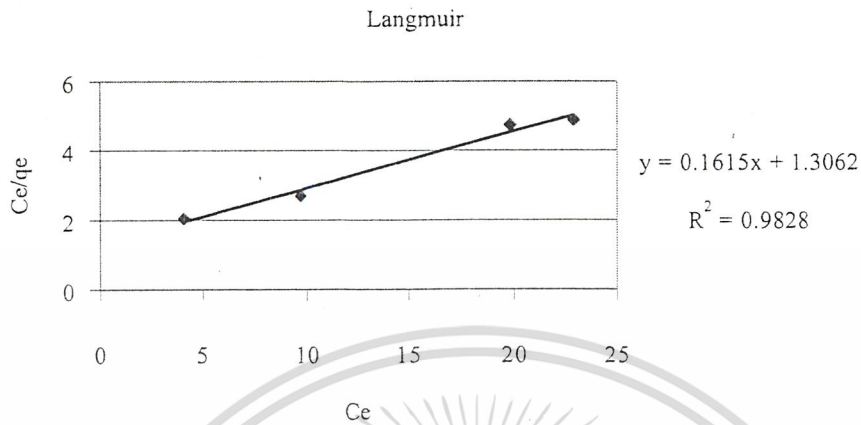


รูปที่ 4.9 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับต่อน้ำหนักถ่านกัมมันต์กับเวลาที่ความเข้มข้นสารละลายโครเมียมต่างๆกัน

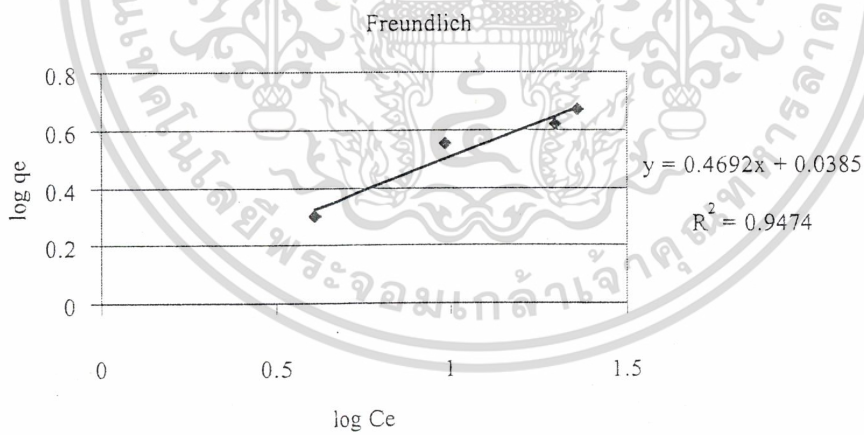
ตารางที่ 4.8 ตัวแปรต่างๆ สำหรับการหาไอโซเทอมที่สอดคล้องกับการดูดซับสารละลายโครเมียมด้วยถ่านกัมมันต์

ความเข้มข้น (mg/l)	$q_e$ (mg/g)	$C_e$ (mg/l)	$\log q_e$	$\log C_e$	$C_e/q_e$
25	2.0	4.11	0.301	0.614	2.06
40	3.6	9.68	0.556	0.986	2.69
60	4.2	19.85	0.623	1.298	4.73
75	4.7	22.94	0.672	1.361	4.88

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น เมื่อนำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.10 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_e/q_e$  กับ  $C_e$  เพื่อคำนวณหาค่าคงที่ของ langmuir isotherm สำหรับการดูดซับโครเมียมด้วยถ่านกัมมันต์



รูปที่ 4.11 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log q_e$  กับ  $\log C_e$  เพื่อคำนวณหาค่าคงที่ของ freundlich isotherm สำหรับการดูดซับโครเมียมด้วยถ่านกัมมันต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.9 ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ของตะกั่วและปริมาณการดูดซับต่อน้ำหนักถ่านกัมมันต์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ

เวลา (นาที)	15 mg/l		25 mg/l		40 mg/l	
	$C_f$ (mg/l)	$Q_f$ (mg/g)	$C_f$ (mg/l)	$q_f$ (mg/g)	$C_f$ (mg/l)	$q_f$ (mg/g)
0	15	0	25	0	40	0
5	7.57	0.25	12.24	1.65	26.88	1.28
10	6.32	0.4	12.86	1.9	22.83	1.72
15	6.94	0.21	15.04	1.93	23.77	2.014
20	5.07	0.37	12.24	1.99	18.78	2.18
30	4.45	0.31	10.06	1.90	14.42	2.84
60	2.58	0.59	8.50	1.93	12.86	3.18
90	1.02	0.93	8.81	2.09	10.99	3.77
120	1.65	1.024	6.32	2.18	11.62	3.55
180	1.02	0.868	5.39	2.06	11.31	3.65
240	0.4	1.117	3.83	2.39	9.94	3.80

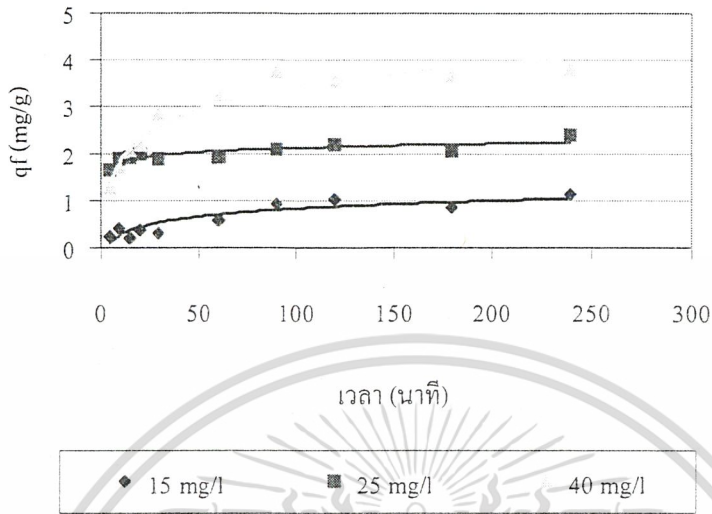
%การกำจัดที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ ที่เวลา 240 นาที เป็นดังนี้

15 mg/l            %การกำจัด = 97.33

25 mg/l            %การกำจัด = 84.68

40 mg/l            %การกำจัด = 75.15

จากข้อมูลในตาราง 4.9 จะนำมาหาไอโซเทอมที่สอดคล้องกับการดูดซับตะกั่วด้วยถ่านกัมมันต์ว่าเป็นแบบ langmuir หรือ freundlich โดยแสดงดังรูปที่ 4.13 รูปที่ 4.14 และตารางที่ 4.10

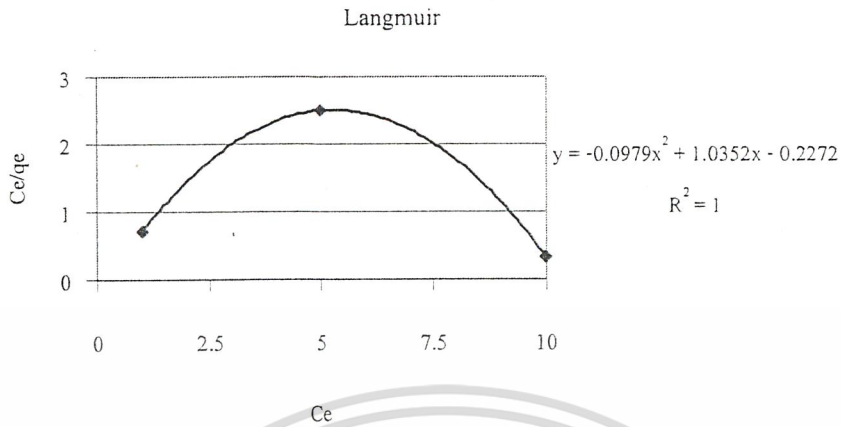


รูปที่ 4.12 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับต่อน้ำหนักถ่านกัมมันต์กับเวลาที่ความเข้มข้นสารละลายตะกั่วต่างๆกัน

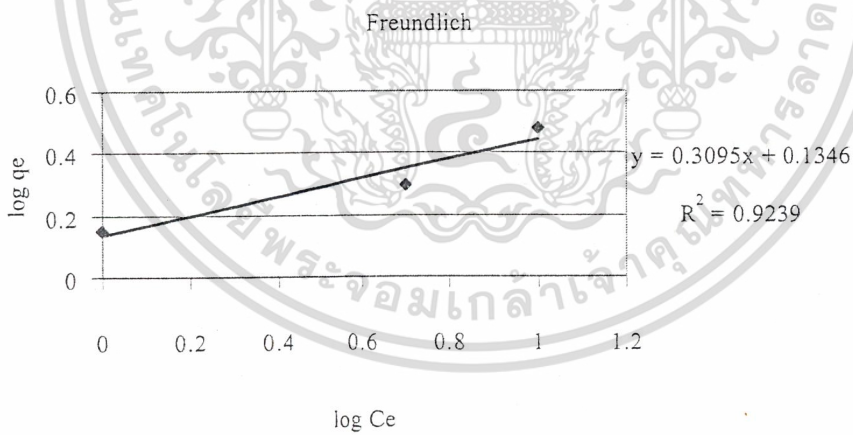
ตารางที่ 4.10 ตัวแปรต่างๆ สำหรับการหาไอโซเทอมที่สอดคล้องกับการดูดซับสารละลายตะกั่วด้วยถ่านกัมมันต์

ความเข้มข้น (mg/l)	$q_e$ (mg/g)	$C_e$ (mg/l)	$\log q_e$	$\log C_e$ (mg/l)	$C_e/q_e$ (mg/l)
15	1.4	1	0.15	0	0.71
25	2.0	5	0.3	0.7	2.5
40	3.0	10	0.48	1	0.33

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.13 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_e/q_e$  กับ  $C_e$  เพื่อคำนวณหาค่าคงที่ของ langmuir isotherm สำหรับการดูดซับตะกั่วด้วยถ่านกัมมันต์



รูปที่ 4.14 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log q_e$  กับ  $\log C_e$  เพื่อคำนวณหาค่าคงที่ของ freundlich isotherm สำหรับการดูดซับตะกั่วด้วยถ่านกัมมันต์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

อย่างที่ทราบกันว่า ความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นหมายถึงปริมาณไอออนของโลหะหนักนั้นๆเพิ่มขึ้นในปริมาตรสารละลายที่เท่ากัน ในการทดลองได้แปรเปลี่ยนความเข้มข้นเริ่มต้น และพบว่า เมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น เปอร์เซ็นต์การกำจัดจะลดลง ดังแสดงในตารางที่ 4.7 และ 4.9 ซึ่งสามารถอธิบายตามหลักความจริงได้ว่าเมื่อปริมาณไอออนที่จะต้องถูกดูดซับมีมากขึ้น ในขณะที่เดียวกันความสามารถในการดูดซับของตัวดูดซับมีเท่าเดิมทำให้สามารถดูดซับไอออนของโลหะหนักได้เท่าเดิม เมื่อการดูดซับถึงจุดสมดุลแล้ว ปริมาณไอออนที่เหลืออยู่ก็ยังมีปริมาณมากอยู่ เมื่อเปรียบเทียบเป็นเปอร์เซ็นต์การกำจัดโดยเทียบความเข้มข้นที่เวลาสุดท้ายกับความเข้มข้นที่เวลาเริ่มต้นแล้ว เปอร์เซ็นต์การกำจัดของการดูดซับที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นต่ำจะสูงกว่าเปอร์เซ็นต์การกำจัดของการดูดซับที่มีความเข้มข้นเริ่มต้นสูง

จากรูปที่ 4.10 และ 4.11 ไอโซเทอมการดูดซับของโครเมียมด้วยถ่านกัมมันต์จะสอดคล้องกับไอโซเทอมแบบ langmuir มากกว่า freundlich เนื่องจากมีค่า  $R^2$  มากกว่า โดยมีค่า  $Q = 6.192$  mg/g และ  $b = 0.1236$  l/mg

จากรูปที่ 4.13 และ 4.14 ไอโซเทอมการดูดซับของตะกั่วด้วยถ่านกัมมันต์จะสอดคล้องกับไอโซเทอมแบบ freundlich โดยมีค่า  $K = 1.379$  mg/g และ  $1/n = 0.3095$

#### 4.2.2 การดูดซับโครเมียมและตะกั่วด้วยซีเถ้าลอย

การทดลองการดูดซับ โครเมียมและตะกั่วด้วยซีเถ้าลอยนั้นมีหลายปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ซึ่งเราได้ทำการศึกษปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับเหมือนกันกับถ่านกัมมันต์คือ ค่า pH, อุณหภูมิ และความเข้มข้นเริ่มต้น

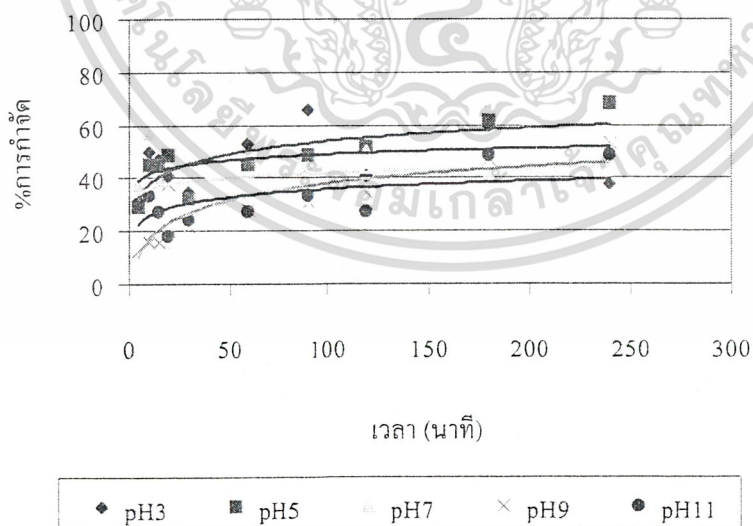
##### 4.2.2.1 ผลของ pH

ค่า pH เป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการดูดซับของซีเถ้าลอยที่เราใช้ในการทดลอง ซึ่งในการทดลองได้ใช้ค่า pH ต่างๆกันคือ 3, 5, 7, 9 และ 11 สำหรับสารละลายโครเมียมและ 1, 2, 3, 4 และ 5 สำหรับสารละลายตะกั่ว ความเข้มข้นที่เหลืออยู่และเปอร์เซ็นต์การกำจัดที่ pH ต่างๆ สำหรับโครเมียมและตะกั่วแสดงดังตารางที่ 4.11 และ 4.12 ผลของ pH ที่มีต่อเปอร์เซ็นต์การกำจัดโครเมียมและตะกั่วแสดงดังรูปที่ 4.15 และ 4.16



ตารางที่ 4.11 ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ของโครเมียมและเปอร์เซนต์การกำจัดเทียบกับเวลาที่ pH ต่างๆ โดยการดูดซับด้วยซีเมนต์ลอย

เวลา (นาที)	pH 3		pH 5		pH 7		pH 9		pH 11	
	C <sub>r</sub> (mg/l)	%การ กำจัด	C <sub>r</sub> (mg/l)	%การ กำจัด	C <sub>r</sub> (mg/l)	%การ กำจัด	C <sub>r</sub> (mg/l)	%การ กำจัด	C <sub>r</sub> (mg/l)	%การ กำจัด
0	42.98	0	41.64	0	42.98	0	42.98	0	44.33	0
5	29.51	31.34	29.51	29.13	26.81	37.62	37.59	12.54	30.85	30.41
10	21.42	50.16	22.77	45.32	18.72	56.44	36.24	15.68	29.51	33.44
15	22.77	47.02	22.77	45.32	25.46	40.76	36.24	15.68	32.20	27.36
20	25.46	40.76	21.42	48.56	36.24	15.68	26.81	37.62	36.24	18.25
30	28.16	34.48	28.16	32.37	32.20	25.08	33.55	21.94	33.55	24.32
60	20.07	53.30	22.77	45.32	29.51	31.34	30.85	28.22	32.20	27.36
90	14.68	65.84	21.42	48.56	24.11	43.90	29.51	31.34	29.51	33.44
120	25.46	40.76	20.07	51.80	21.42	50.16	28.16	34.48	32.20	27.36
180	17.37	59.59	16.03	61.50	25.46	40.76	22.77	47.02	22.77	48.64
240	26.81	37.62	13.33	67.99	20.07	53.30	20.07	53.30	22.77	48.64

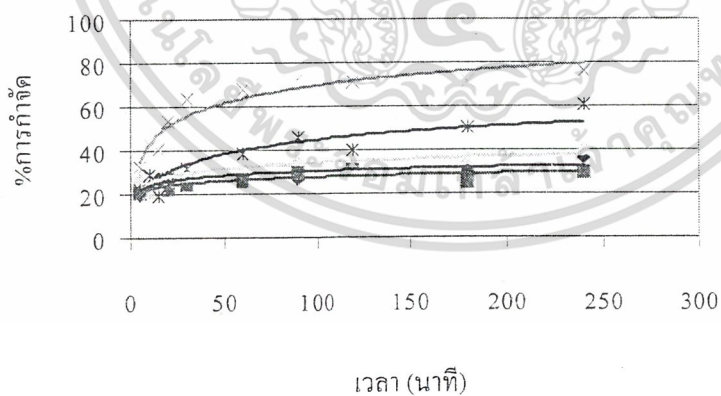


รูปที่ 4.15 ผลของ pH ที่มีต่อ%การกำจัดโครเมียม โดยการดูดซับด้วยซีเมนต์ลอย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.12 ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ของตะกั่วและเปอร์เซ็นต์การกำจัดเทียบกับเวลาที่ pH ต่างๆ โดยการดูดซับด้วยซีเถ้าลอย

เวลา (นาทึ)	pH 1		pH 2		pH 3		pH 4		pH 5	
	$C_r$ (mg/l)	%การ กำจัด	$C_r$ (mg/l)	%การ กำจัด	$C_r$ (mg/l)	%การ กำจัด	$C_r$ (mg/l)	%การ กำจัด	$C_r$ (mg/l)	%การ กำจัด
0	40.0	0	40.0	0	40.0	0	40.0	0	40.0	0
5	31.51	21.23	31.78	20.55	28.62	28.45	26.88	32.80	31.05	22.37
10	30.39	24.03	31.46	21.35	31.49	21.28	22.83	42.93	28.43	28.93
15	29.17	27.08	29.86	25.35	30.39	24.03	23.77	40.58	32.38	19.05
20	28.62	28.45	31.05	22.38	29.39	26.53	18.78	53.05	28.90	27.75
30	29.65	25.88	30.24	24.40	28.43	28.93	14.42	63.95	27.37	31.58
60	28.99	27.53	29.54	26.15	26.88	32.80	12.86	67.85	24.67	38.33
90	29.39	26.53	28.16	29.60	25.35	36.63	10.99	72.53	21.67	45.83
120	27.22	31.95	27.65	30.88	27.37	31.57	11.62	70.95	23.96	40.10
180	27.79	30.53	29.96	25.10	25.63	35.93	11.31	71.73	19.81	50.48
240	25.60	36.00	28.00	30.00	23.61	40.98	9.44	76.40	15.77	60.58



รูปที่ 4.16 ผลของ pH ที่มีต่อ%การกำจัดตะกั่ว โดยการดูดซับด้วยซีเถ้าลอย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ซีเถ้าลอยมาจากกระบวนการเผาไหม้ของถ่านหินโดยธาตุอนินทรีย์ที่ไม่ถูกเผาไหม้จะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปออกไซด์โดยมีองค์ประกอบที่สำคัญคือ ซิลิกอนและอลูมิเนียม ซึ่งซีเถ้าลอยที่นำมาจากเหมืองแม่เมาะเพื่อนำมาใช้ในการศึกษานี้มีซิลิกอนออกไซด์ ( $\text{SiO}_2$ ) เป็นส่วนประกอบอยู่มากที่สุดคือ 43.88 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก รองลงมาคืออลูมิเนียมออกไซด์ ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 10-17 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่วนเหล็กออกไซด์ ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) มีปริมาณ 9.73 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แคลเซียมออกไซด์มีปริมาณ 13.1 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นอกจากนี้ประกอบไปด้วย แมกนีเซียมออกไซด์ โซเดียมออกไซด์และโพแทสเซียมออกไซด์อยู่ปริมาณเล็กน้อย ดังนั้นที่พื้นที่ผิวของซีเถ้าลอยจะประกอบด้วยออกไซด์ของธาตุเหล่านี้

การดูดซับโดยซีเถ้าลอยนั้นเป็นการดูดซับทางเคมีเช่นเดียวกับการดูดซับโดยถ่านกัมมันต์ ซึ่งจากการทดลองค่า pH ที่เหมาะสมคือ pH 5 สามารถเขียนปฏิกิริยาได้ดังนี้ [19]



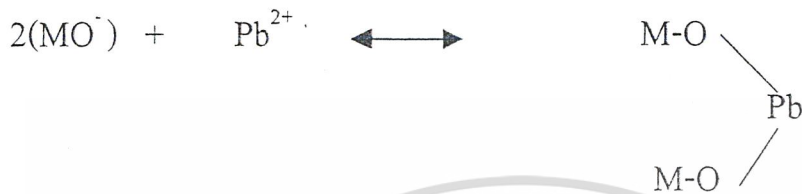
จากสมการอธิบายได้ว่าในสารละลายกรดไฮโดรเจนไอออน ( $\text{H}^+$ ) จะวิ่งไปเกาะที่ผิวของสารออกไซด์ทำให้พื้นผิวของออกไซด์เป็นประจุบวก ( $\text{MOH}_2^+$ ) ซึ่งสามารถดูดซับ  $\text{HCrO}_4^-$  ได้โดย pH 5 มีความเป็นกรดไม่มากนัก ส่วนที่ pH ต่ำกว่าสามารถดูดซับได้น้อยกว่าเนื่องจากทำให้ประจุบวกที่พื้นผิวลดน้อยลง  $\text{CaO}$  ภายในซีเถ้าลอยซึ่งสามารถละลายน้ำได้และจะให้ไฮดรอกซิลไอออนออกมารอบๆตัวของซีเถ้าลอยทำให้ pH รอบๆพื้นผิวซีเถ้าลอยสูงขึ้นแม้จะไม่มากนักแต่ก็มีผลทำให้  $\text{H}^+$  เข้าจับกับ  $\text{OH}^-$  ของ  $\text{CaO}$  ทำให้  $\text{HCrO}_4^-$  ถูกดูดซับบนประจุบวกของผิวออกไซด์ได้น้อยลง

ที่ pH 5 นั้นปริมาณ  $\text{H}^+$  ในสารละลายนั้นมีความพอดีจึงมีการดูดซับดีที่สุด และที่ pH 7, 9 และ 11 นั้นการดูดซับเกิดได้ไม่ดีเท่าที่ควรเนื่องจากประจุบนผิวของออกไซด์จะเป็นประจุลบ ( $\text{MO}^-$ ) ซึ่งจะผลัดกับ  $\text{HCrO}_4^-$

ส่วนการดูดซับตะกั่วโดยใช้ซีเถ้าลอยนั้นจะได้การดูดซับในลักษณะเดียวกันคือ เป็นการดูดซับทางเคมี และเกิดการดูดซับที่บริเวณพื้นที่ผิวของซีเถ้าลอยกับตะกั่ว จากรูปที่ 4.6 แสดงให้เห็นว่าค่า pH = 6 นั้นปริมาณตะกั่วไอออนอิสระปริมาณจะลดลงโดยเปลี่ยนรูปเป็น  $\text{PbOH}^+$  ขึ้นแทนและเมื่อค่า pH มากกว่า 8.5  $\text{PbOH}^+$  จะลดลงและเกิดตะกอน  $\text{Pb}(\text{OH})_2$  เพิ่มขึ้นเรื่อยๆซึ่งก็เป็นเหตุผลหนึ่งในการทดลองว่าทำไมจึงเลือกศึกษาที่ pH 1-5 เนื่องมาจากเป็นสภาวะที่มีการตกตะกอนน้อยมากจนอาจจะไม่มีเลย จากการทดลองการดูดซับตะกั่วโดยซีเถ้าลอยนั้นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดคือที่ pH 4 ซึ่งการดูดซับเกิดขึ้นเนื่องมาจากปฏิกิริยาระหว่างตะกั่วกับอะลูมิเนียมออกไซด์  $\text{Al}_2\text{O}_3$  และซิลิ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

คอนออกไซด์  $\text{SiO}_2$  ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักที่มีอยู่ในซีเมนต์และคาร์ซีเมนต์ของตะกั่วบนพื้นผิวของ ซีเมนต์เป็นดั่งสมการดังต่อไปนี้[13]



ที่สภาวะ pH 4 นั้นเกิดการดูดซับได้ดีที่สุดเนื่องจากเป็นภาวะที่เป็นกรดน้อย มีความเป็นด่างมากกว่าที่ pH 1, 2 และ 3 ส่วนที่ pH 5 นั้นตะกั่วจะเริ่มตกตะกอนเป็น  $\text{PbOH}^+$  ได้บางส่วนแต่ตะกอนเหล่านี้ยังมีปริมาณไม่มากพอและมีขนาดเล็กมากดังนั้นจึงทำให้ pH 4 เป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อการดูดซับมากที่สุด



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

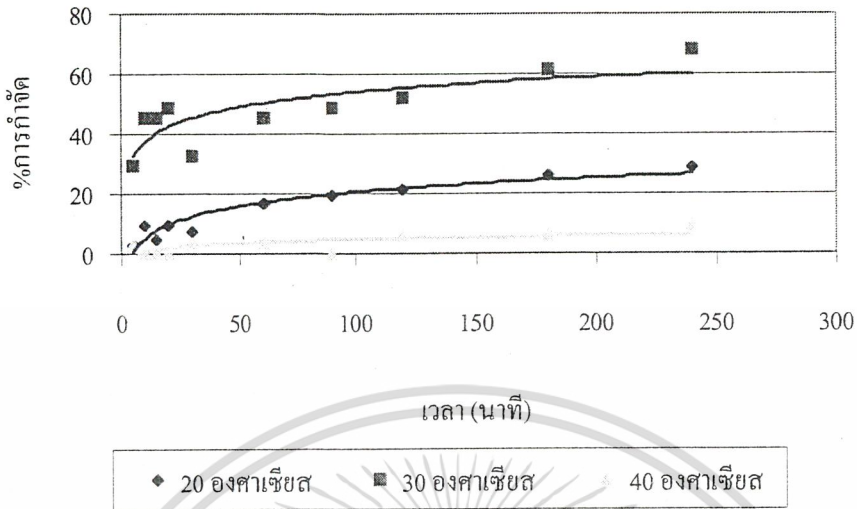
#### 4.2.2.2 ผลของอุณหภูมิ

อุณหภูมิก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการดูดซับของซีเฝ้าลอยที่เราใช้ในการทดลอง ซึ่งในการทดลองได้ใช้อุณหภูมิต่างๆกันคือ 20, 30 และ 40 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นที่เหลืออยู่และเปอร์เซ็นต์การกำจัดที่อุณหภูมิต่างๆ สำหรับโครเมียมและตะกั่วแสดงดังตารางที่ 4.13 และ 4.14 ผลของอุณหภูมิที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การกำจัด โครเมียมและตะกั่วแสดงดังรูปที่ 4.17 และ 4.18

ตารางที่ 4.13 ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ของโครเมียมและเปอร์เซ็นต์การกำจัดเทียบกับเวลาที่อุณหภูมิต่างๆ โดยการดูดซับด้วยซีเฝ้าลอย

เวลา (นาที)	20°C		30°C		40°C	
	C <sub>f</sub> (mg/l)	%การ กำจัด	C <sub>f</sub> (mg/l)	%การ กำจัด	C <sub>f</sub> (mg/l)	%การ กำจัด
0	56.46	0	41.64	0	42.98	0
5	55.12	2.37	29.51	29.13	41.64	3.12
10	51.07	9.55	22.77	45.32	42.98	0
15	53.77	4.76	22.77	45.32	42.98	0
20	51.07	9.55	21.42	48.56	42.98	0
30	52.42	7.16	28.16	32.37	41.64	3.12
60	47.03	16.70	22.77	45.32	41.64	3.12
90	45.68	19.09	21.42	48.56	42.98	0
120	44.33	21.48	20.07	51.80	40.29	6.26
180	41.64	26.25	16.03	61.50	40.29	6.26
240	40.29	28.64	13.33	67.99	38.94	9.40

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

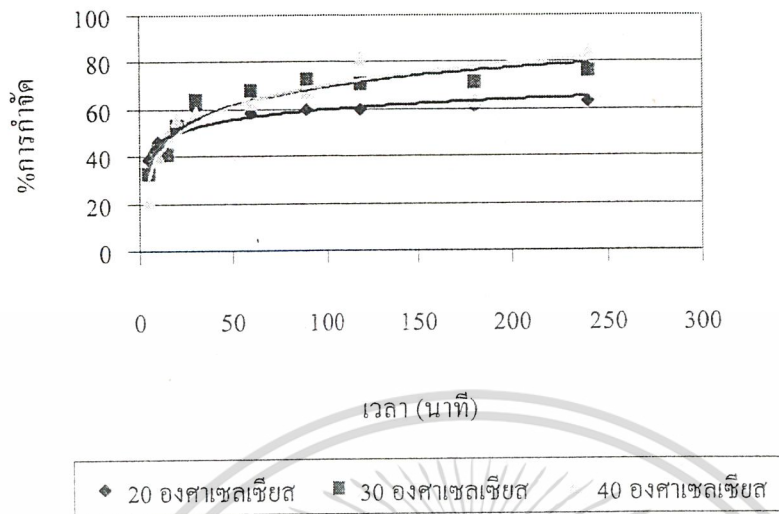


รูปที่ 4.17 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ%การกำจัดโครเมียม โดยการดูดซับด้วยซีเลอไลต์

ตารางที่ 4.14 ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ของตะกั่วและเปอร์เซ็นต์การกำจัดเทียบกับเวลาที่อุณหภูมิต่างๆ โดยการดูดซับด้วยซีเลอไลต์

เวลา (นาที)	20 °C		30 °C		40 °C	
	C <sub>r</sub> (mg/l)	% การกำจัด	C <sub>r</sub> (mg/l)	% การกำจัด	C <sub>r</sub> (mg/l)	% การกำจัด
0	40	0	40	0	40	0
5	24.36	39.10	26.88	32.80	31.51	21.22
10	21.56	46.10	22.83	42.93	23.98	40.05
15	23.42	41.45	23.77	40.58	20.41	48.98
20	19.07	52.33	18.78	53.05	17.76	55.60
30	15.65	60.88	14.42	63.95	16.51	58.73
60	16.64	58.40	12.86	67.85	15.02	62.45
90	16.11	59.73	10.99	72.53	13.00	67.50
120	16.05	59.88	11.62	70.95	7.37	81.58
180	15.55	61.12	11.31	71.73	14.74	63.15
240	14.59	63.53	9.44	76.40	6.22	84.45

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.18 ผลของอุณหภูมิที่มีต่อ%การกำจัดจีไธลอส โดยการดัดด้วยจีไธลอส

ผลของอุณหภูมิในการดัดซึบโครเมียมและตะกั่วด้วยจีไธลอสมีแนวโน้มเช่นเดียวกับการดัดซึบ โดยถ่านกัมมันต์คือ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพในการดัดซึบก็จะดีขึ้น

#### 4.2.2.3 ผลของความเข้มข้น

ความเข้มข้นก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการดูดซับของซีเถ้าลอยเช่นกัน ซึ่งในการทดลองได้ใช้ความเข้มข้นต่างๆกันคือ 25, 40, 60 และ 75 mg/l สำหรับโครเมียม และ 15, 25 และ 40 mg/l สำหรับตะกั่ว ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ของโครเมียมและตะกั่ว และปริมาณการดูดซับต่อน้ำหนักซีเถ้าลอยแสดงดังตารางที่ 4.15 และ 4.17 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับต่อน้ำหนักซีเถ้าลอยกับเวลา ที่ความเข้มข้นของสารละลายโครเมียมและตะกั่วต่างๆ แสดงดังรูปที่ 4.19 และ 4.22

ตาราง 4.15 ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ของ โครเมียมและปริมาณการดูดซับต่อน้ำหนักซีเถ้าลอยที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ

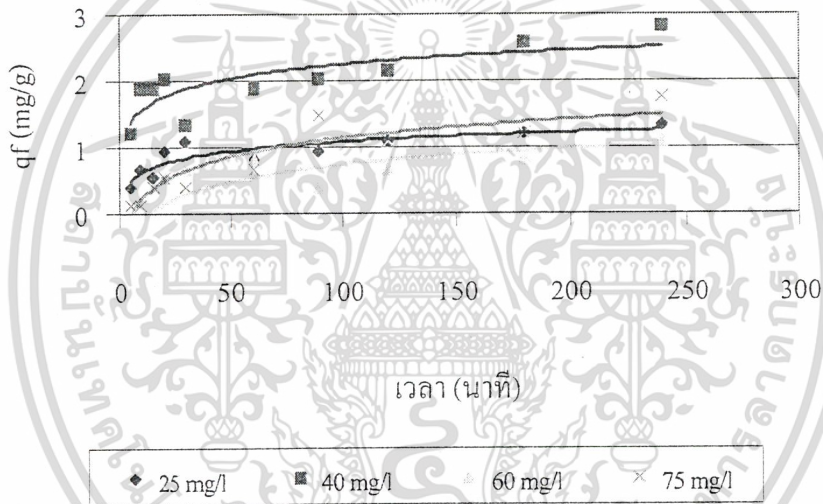
เวลา (นาที)	25 mg/l		40 mg/l		60 mg/l		75 mg/l	
	$C_r$ (mg/l)	$q_r$ (mg/g)	$C_r$ (mg/l)	$q_r$ (mg/g)	$C_r$ (mg/l)	$q_r$ (mg/g)	$C_r$ (mg/l)	$q_r$ (mg/g)
0	28.16	0	41.64	0	64.55	0	82.07	0
5	24.11	0.405	29.51	1.213	71.29	-0.674	80.73	0.134
10	21.42	0.674	22.77	1.887	65.90	-0.135	80.73	0.134
15	22.77	0.539	22.77	1.887	65.90	-0.135	78.03	0.404
20	18.72	0.944	21.42	2.022	59.16	0.539	76.68	0.539
30	17.37	1.079	28.16	1.348	57.81	0.674	78.03	0.404
60	20.07	0.809	22.77	1.887	56.46	0.809	75.33	0.674
90	18.72	0.944	21.42	2.022	60.51	0.404	67.25	1.482
120	17.37	1.079	20.07	2.157	57.81	0.674	71.29	1.078
180	16.03	1.213	16.03	2.561	56.46	0.809	69.94	1.213
240	14.64	1.347	13.33	2.831	53.77	1.078	64.55	1.752

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

%การกำจัดที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆที่เวลา 240 นาที เป็นดังนี้

25 mg/l	%การกำจัด = 48.01
40 mg/l	%การกำจัด = 67.99
60 mg/l	%การกำจัด = 16.70
75 mg/l	%การกำจัด = 21.35

จากข้อมูลในตาราง 4.15 จะนำมาหาไอโซเทอมที่สอดคล้องกับการดูดซับ โครเมียมด้วยวิธีแก้ลอยว่าเป็นแบบ langmuir หรือ freundlich โดยแสดงดังรูปที่ 4.20 รูปที่ 4.21 และ ตารางที่ 4.16

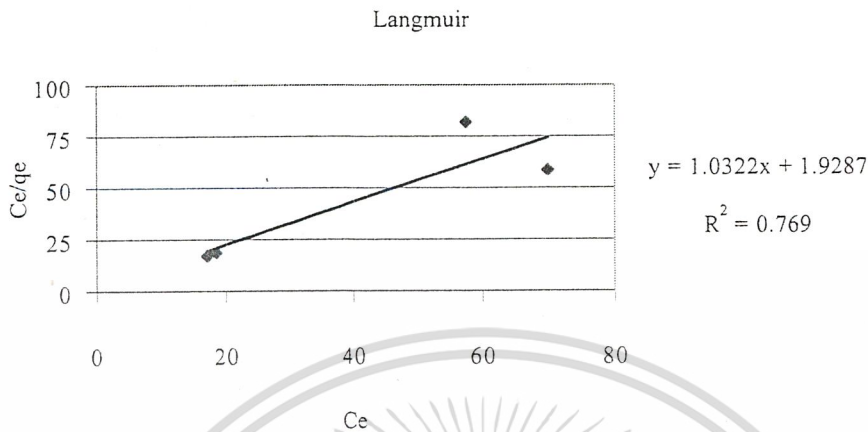


รูปที่ 4.19 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับต่อน้ำหนักซีเมนต์ล่อยกับเวลาที่ความเข้มข้นสารละลายโครเมียมต่างๆกัน

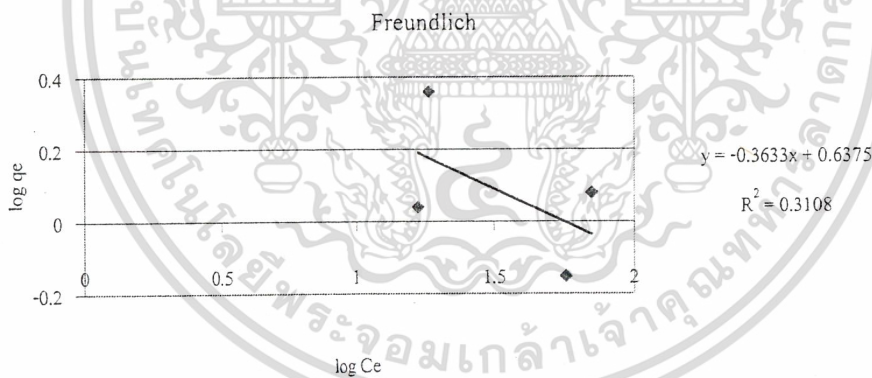
ตารางที่ 4.16 ตัวแปรต่างๆ สำหรับการหาไอโซเทอมที่สอดคล้องกับการดูดซับสารละลายโครเมียมด้วยวิธีแก้ลอย

ความเข้มข้น (mg/l)	$q_e$ (mg/g)	$C_e$ (mg/l)	$\log q_e$	$\log C_e$	$C_e/q_e$
25	2.3	18.64	0.36	1.27	18.64
40	1.1	17.16	0.04	1.23	17.16
60	0.7	57.55	-0.15	1.76	82.21
75	1.2	70.07	0.08	1.85	58.39

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.20 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_e/q_e$  กับ  $C_e$  เพื่อคำนวณหาค่าคงที่ของ langmuir isotherm สำหรับการดูดซับโครเมียมด้วยซีเถ้าลอย



รูปที่ 4.21 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $\log q_e$  กับ  $\log C_e$  เพื่อคำนวณหาค่าคงที่ของ freundlich isotherm สำหรับการดูดซับโครเมียมด้วยซีเถ้าลอย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 4.17 ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ของตะกั่วและปริมาณการดูดซับต่อน้ำหนักซีเมนต์ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆ

เวลา (นาทีก)	15 mg/l		25 mg/l		40 mg/l	
	$C_f$ (mg/l)	$q_f$ (mg/g)	$C_f$ (mg/l)	$q_f$ (mg/g)	$C_f$ (mg/l)	$q_f$ (mg/g)
0	15	0	25	0	40	0
5	7.57	0.25	12.24	1.65	26.88	1.28
10	6.32	0.4	12.86	1.9	22.83	1.72
15	6.94	0.21	15.04	1.93	23.77	2.014
20	5.07	0.37	12.24	1.99	18.78	2.18
30	4.45	0.31	10.06	1.90	14.42	2.84
60	2.58	0.59	8.50	1.93	12.86	3.18
90	1.02	0.93	8.81	2.09	10.99	3.77
120	1.65	1.024	6.32	2.18	11.62	3.55
180	1.02	0.868	5.39	2.06	11.31	3.65
240	0.4	1.117	3.83	2.39	9.94	3.80

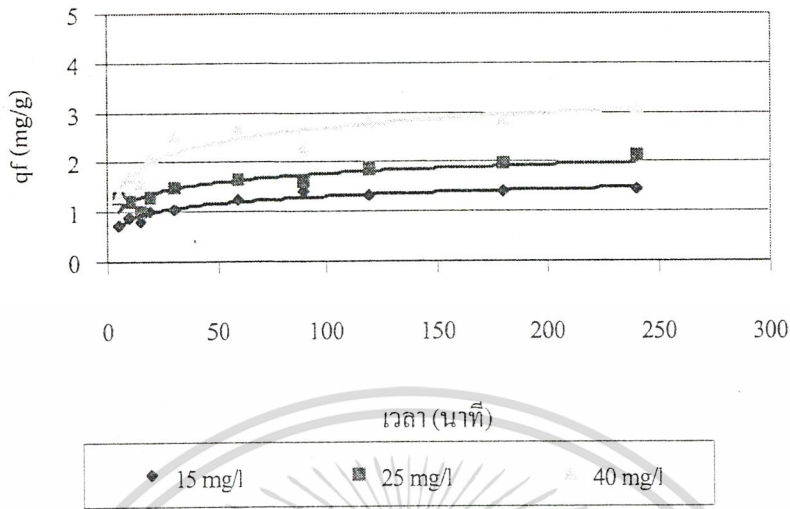
%การกำจัดที่ความเข้มข้นเริ่มต้นต่างๆที่เวลา 240 นาที เป็นดังนี้

15 mg/l            %การกำจัด = 97.33

25 mg/l            %การกำจัด = 84.68

40 mg/l            %การกำจัด = 75.15

จากข้อมูลในตาราง 4.17 จะนำมาหาไอโซเทอมที่สอดคล้องกับการดูดซับตะกั่วด้วยซีเมนต์ว่าเป็นแบบ langmuir หรือ freundlich โดยแสดงดังรูปที่ 4.23 รูปที่ 4.24 และ ตารางที่ 4.18

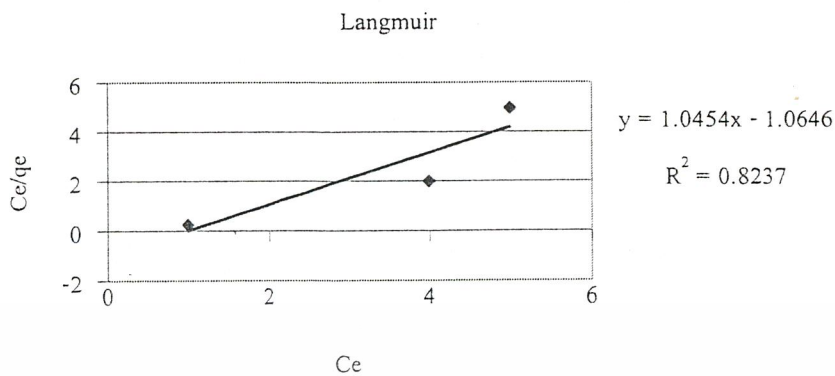


รูปที่ 4.22 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดซับต่อน้ำหนักซีเมนต์กับความเข้มข้นสารละลายตะกั่วต่างๆกัน

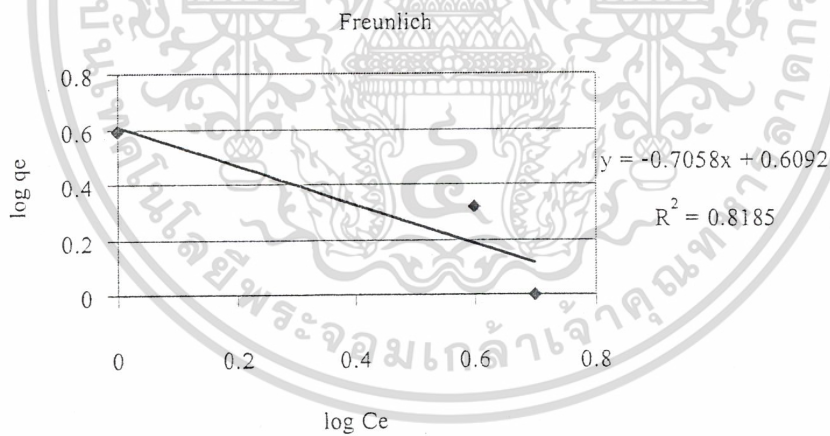
ตาราง 4.18 ค่าแปรต่างๆ สำหรับการหาไอโซเทอมที่สอดคล้องกับการดูดซับสารละลายตะกั่วด้วยซีเมนต์

ความเข้มข้น (mg/l)	$q_c$ (mg/g)	$C_c$ (mg/l)	$\log q_c$	$\log C_c$	$C_c/q_c$
15	1.0	5	0	0.7	5
25	2.1	4	0.32	0.6	2
40	3.9	1	0.59	0	0.26

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.23 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_e/q_e$  กับ  $C_e$  เพื่อคำนวณหาค่าคงที่ของ langmuir isotherm สำหรับการดูดซับตะกั่วด้วยซีเถ้าลอย



รูปที่ 4.24 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง  $C_e/q_e$  กับ  $C_e$  เพื่อคำนวณหาค่าคงที่ของ freundlich isotherm สำหรับการดูดซับตะกั่วด้วยซีเถ้าลอย

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

จากตารางที่ 4.15 และ 4.17 ผลของความเข้มข้นในการดูดซับโดยซีเถ้าลอยนั้นไม่แตกต่างกับการดูดซับโดยถ่านกัมมันต์ ความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นหมายถึงปริมาณไอออนของโลหะหนักนั้นๆ เพิ่มขึ้นในปริมาตรสารละลายเท่ากัน ในการทดลองได้แปรผันความเข้มข้นต่างๆ และพบว่า เมื่อความเข้มข้นสูงขึ้น เปอร์เซนต์การกำจัดจะลดลง ซึ่งสามารถอธิบายได้ทำนองเดียวกับการดูดซับโดยถ่านกัมมันต์

จากรูปที่ 4.20 และ 4.21 ไอโซเทอมการดูดซับโครเมียมด้วยซีเถ้าลอยจะสอดคล้องกับไอโซเทอมแบบ langmuir โดยมีค่า  $Q = 0.969 \text{ mg/g}$  และ  $b = 0.5351 \text{ l/mg}$

จากรูปที่ 4.23 และ 4.24 ไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วด้วยซีเถ้าลอย จะสอดคล้องกับไอโซเทอมแบบ langmuir โดยมีค่า  $Q = 0.957 \text{ mg/g}$  และ  $b = -0.982 \text{ l/mg}$



### 4.3 การกำจัดปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

จากการทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์

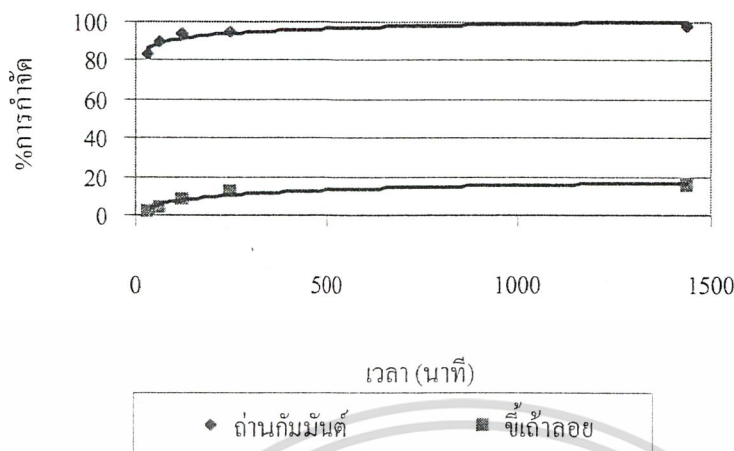
- โครเมียม pH ที่เหมาะสมคือ 3 และ 5 โดยใช้ตัวดูดซับเป็นถ่านกัมมันต์และซีเถ้าลอยตามลำดับ อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการดูดซับคือ 30 องศาเซลเซียสทั้ง 2 สภาวะ
- ตะกั่ว pH ที่เหมาะสมคือ 3 และ 4 โดยใช้ตัวดูดซับเช่นเดียวกับโครเมียม อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการดูดซับ คือ 30 องศาเซลเซียสเช่นเดียวกัน

ดังนั้นจึงนำสภาวะที่เหมาะสมจากการทดลองในน้ำเสียสังเคราะห์นั้นมาทำการทดลองกับน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งน้ำเสียในกรณีของโลหะโครเมียมที่ได้จะได้จากกระบวนการอุตสาหกรรมชุบโลหะในบ่อพักที่ 1 ซึ่งไม่มีการเจือปนน้ำทิ้งจากการอุปโภคบริโภค และน้ำเสียในกรณีของตะกั่วที่ได้จะได้จากกระบวนการอุตสาหกรรมทำแบตเตอรี่รถยนต์ในบ่อพักที่ 2 ที่มีการเจือจางน้ำโดยน้ำที่ใช้ล้างปริมาณโลหะหนักในสายการผลิต โดยนำน้ำเสียดังกล่าวมาทำการทดลองตามที่ได้กล่าวมาแล้ว ซึ่งผลที่ได้คือ

ตารางที่ 4.19 ความเข้มข้นที่เหลืออยู่ ปริมาณการดูดซับต่อน้ำหนักตัวดูดซับ และเปอร์เซ็นต์การกำจัด ของโครเมียมและตะกั่ว

เวลา (นาที)	โครเมียม						ตะกั่ว					
	ถ่านกัมมันต์			ซีเถ้าลอย			ถ่านกัมมันต์			ซีเถ้าลอย		
	$C_f$ (mg/l)	$q_f$ (mg/g)	%การ กำจัด	$C_f$ (mg/l)	$q_f$ (mg/g)	%การ กำจัด	$C_f$ (mg/l)	$q_f$ (mg/g)	%การ กำจัด	$C_f$ (mg/l)	$q_f$ (mg/g)	%การ กำจัด
0	120	0	0	105.0	0	0	28	0	0	27	0	0
30	20.09	9.99	83.26	102.3	0.27	2.57	-	-	-	26	0.1	3.70
60	12.28	10.77	89.77	101.2	0.38	3.62	25.5	0.25	8.93	24.5	0.25	9.26
120	7.43	11.26	93.81	96.3	0.87	8.29	19	0.9	32.14	24	0.3	11.11
240	5.64	11.44	95.3	92.3	1.27	12.09	18	0.8	35.71	23	0.4	14.81
1440	1.90	11.81	98.41	89.9	1.51	15.86	4.5	2.35	83.93	20	0.7	25.93

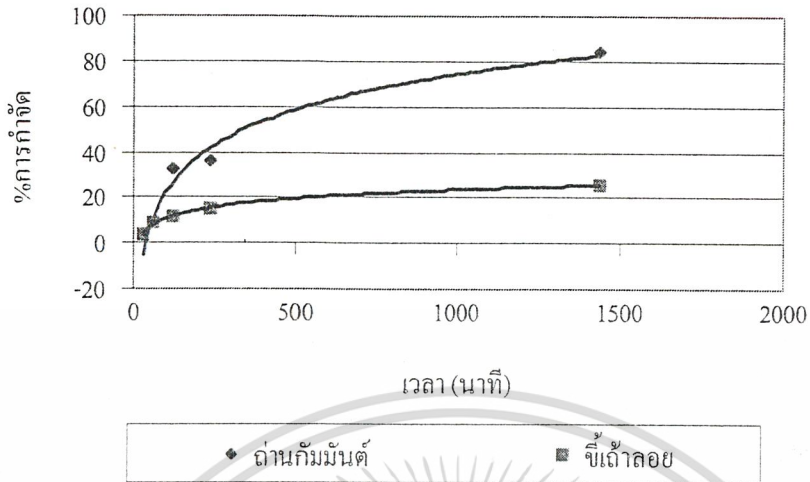
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 4.25 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %การกำจัดโครเมียมกับเวลาโดยถ่านกัมมันต์กับขี้เถ้าลอย

จากรูปจะเห็นได้ว่า%การกำจัดโครเมียมโดยใช้ถ่านกัมมันต์นั้นมีค่าสูงถึง 98.41% ส่วนขี้เถ้าลอยนั้นสามารถกำจัดได้เพียง 1.51 % แสดงว่าการกำจัดโครเมียมโดยถ่านกัมมันต์นั้นสามารถกำจัดได้ดีกว่าขี้เถ้าลอย ดังนั้นจึงควรที่จะใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับเนื่องจากให้เปอร์เซ็นต์การกำจัดได้สูงกว่าขี้เถ้าลอย

เหตุที่ถ่านกัมมันต์สามารถกำจัดได้ดีกว่านั้นเนื่องมาจากมีพื้นที่ผิวในการดูดซับมากกว่าและสามารถดูดซับปริมาณโลหะหนักในกรณีที่มีความเข้มข้นสูงๆได้ ซึ่งขี้เถ้าลอยมีพื้นที่ผิวน้อยกว่าและไม่สามารถดูดซับปริมาณโลหะหนักในกรณีที่มีความเข้มข้นสูงๆได้ แต่ถ้าขี้เถ้าลอยมาทำการเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับ เช่น การแลกเปลี่ยนประจุ เป็นต้น ก็จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดได้



รูปที่ 4.26 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง %การกำจัดตะกั่วกับเวลาโดยใช้น้ำมันกับน้ำ

จากรูปจะเห็นได้ว่า %การกำจัดโครเมียมตะกั่วโดยใช้น้ำมันนั้นมีค่าสูงถึง 83.93% ส่วนน้ำนั้นสามารถกำจัดได้เพียง 25.93% แสดงว่าการกำจัดโดยใช้น้ำมันนั้นสามารถกำจัดได้ดีกว่าน้ำ ดังนั้นจึงควรที่จะใช้น้ำมันในการดูดซับเนื่องจากให้เปอร์เซ็นต์การกำจัดได้สูงกว่าน้ำ เช่นเดียวกับโครเมียม

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

โครงการพิเศษนี้ เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการลดปริมาณ โลหะหนักของตัวดูดซับ 2 ชนิดคือ ถ่านกัมมันต์และซีเถ้าลอย โดยใช้โลหะหนัก 2 ชนิดคือ ตะกั่วและโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรมชุบ โลหะและโรงงานแบตเตอรี่ และศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับและสภาวะที่เหมาะสม โดยการเปลี่ยนแปลง พีเอช อุณหภูมิ และความเข้มข้นเริ่มต้นของ โลหะหนัก และหาไอโซเทอมการดูดซับและค่าคงที่ของไอโซเทอม สามารถสรุปได้ดังนี้

1. พีเอช ที่เหมาะสมต่อการดูดซับตะกั่วและ โครเมียมด้วยซีเถ้าลอยคือ พีเอช 3 ส่วน พีเอช ที่เหมาะสมต่อการดูดซับตะกั่วและ โครเมียมด้วยถ่านกัมมันต์คือ พีเอช 5 และ พีเอช 4 ตามลำดับ อุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 30 องศาเซลเซียส ในทุกๆการทดลอง
2. เปอร์เซนต์การกำจัดโลหะหนักจะเพิ่มขึ้นกับอุณหภูมิ และเปอร์เซนต์การกำจัดโลหะหนักจะลดลงเมื่อความเข้มข้นของโลหะหนักเพิ่มขึ้น
3. ถ่านกัมมันต์สามารถกำจัด โครเมียมในน้ำเสียจริงได้ 98.41% กำจัดตะกั่วได้ 83.93% ส่วนซีเถ้าลอยสามารถกำจัดโครเมียม ได้ 1.51% และกำจัดตะกั่วตะกั่ว 25.93% ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ดีกว่าซีเถ้าลอยมากอาจเป็นเพราะว่ามีพื้นที่ผิวมากกว่าถึงประมาณ 100 เท่า และมีหมู่ฟังก์ชันที่พื้นที่ผิวเหมาะแก่การดูดซับ โลหะหนัก
4. ไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วและโครเมียมโดยใช้ถ่านกัมมันต์และซีเถ้าลอยเป็นดังต่อไปนี้
  - 4.1 ไอโซเทอมของการดูดซับโครเมียมด้วยถ่านกัมมันต์สอดคล้องกับ Langmuir Isotherm โดยมีค่า  $Q = 6.192 \text{ mg/g}$  และ  $b = 0.1236 \text{ L/mg}$
  - 4.2 ไอโซเทอมของการดูดซับตะกั่วด้วยถ่านกัมมันต์สอดคล้องกับ Freundlich Isotherm โดยมีค่า  $K = 1.379 \text{ mg/g}$  และ  $1/n = 0.3095$

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 4.3 ไอโซเทอมของการดูดซับโครเมียมด้วยซีเถ้าลอยสอดคล้องกับ Langmuir Isotherm โดยมีค่า  $Q = 0.969 \text{ mg/g}$  และ  $b = 0.5351 \text{ L/mg}$
- 4.4 ไอโซเทอมของการดูดซับตะกั่วด้วยซีเถ้าลอยสอดคล้องกับ Langmuir Isotherm โดยมีค่า  $Q = 0.957 \text{ mg/g}$  และ  $b = -0.982 \text{ L/mg}$
5. การดูดซับโครเมียมและตะกั่วด้วยซีเถ้าลอยและถ่านกัมมันต์เป็นการดูดซับทางเคมี เนื่องจากไอโซเทอมการดูดซับส่วนมากเป็นแบบ Langmuir Isotherm

## 5.2 ข้อเสนอแนะ

1. กระบวนการกำจัดโลหะโดยการดูดซับด้วยตัวดูดซับนั้นไม่เหมาะกับการบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูงมากๆ ดังจะเห็นได้จากเปอร์เซ็นต์การกำจัดที่ต่ำ ดังนั้นในการนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมจริงควรจะใช้ควบคู่กับกระบวนการอื่นๆ เช่น การตกตะกอนให้มีความเข้มข้นน้อยลงก่อนแล้วจึงนำมาทำการดูดซับจึงจะได้คุณภาพน้ำทิ้งที่ดีขึ้น
2. เนื่องจากซีเถ้าเป็นตัวดูดซับที่มีพื้นที่ผิวในการดูดซับน้อย ทำให้ร้อยละการกำจัดที่ได้มีค่าต่ำดังนั้นจึงควรที่จะมีการเพิ่มพื้นที่ผิวให้แก่ซีเถ้าลอย โดยทำการแลกเปลี่ยนประจุกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนที่จะทำการดูดซับเพื่อการดูดซับเกิดได้ดีขึ้น
3. ซีเถ้าลอยที่ผ่านการดูดซับแล้วสามารถนำมาทำประโยชน์ให้อีกคือ นำมาทำเป็นสารเสริมแรง ซีเมนต์ เป็นต้น
4. วัสดุธรรมชาติหลายชนิดสามารถนำมาทำการดูดซับได้เช่นเดียวกับถ่านกัมมันต์และซีเถ้าลอย เช่น กะลามะพร้าว ชานอ้อย ชานปาล์ม โดยนำมาทำการเพิ่มพื้นที่ผิวโดยการเผาที่อุณหภูมิสูงและการกระตุ้นด้วยสารเคมีหรือแก๊สเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับ

## บรรณานุกรม

1. Slejkoi, F.L. 1985. **Adsorption Technology**. New York : Marcel Dekker, Inc.
2. ชุติมา เสพย์ธรรม 2543. “การกำจัดโลหะหนักในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมด้วยถ้ำลอยที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ” วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
3. วราภรณ์ คุณวานากิจ 2537. “คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของถ้ำลอยลิกไนต์แม่เมาะ” วารสาร กฟผ. 3(1) : 55 - 59.
4. พิมพ์ เรียนวัฒนา และชัยวัฒน์ เจนวานิชย์ 2539. **เคมีสถานะแวดล้อม**. พิมพ์ครั้งที่ 2 กรุงเทพฯ : สำนักพิมพ์โอเคียนสโตร์.
5. รินดา คันธาร และอำภา เรืองปรีดามย์ 2541. “การใช้โคโคแซนดรีงรูปสาหร่ายสีเขียว *Chlorella Vulgaris* TISTR 8261 เพื่อดูดซับโครเมียม(VI)” โครงการพิเศษวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง.
6. Suzuki, M. 1990. **Adsorption Engineering**. Tokyo : Elsevier, Inc.
7. Yadava, K.P., Tyagi, B.S., Panday, K.K., and Singh, V.N. 1987. “Fly Ash for the Treatment of Cd (II) Rich Effluents” **Environ. Tech. Letters**. 8 : 225 - 234.
8. Yadava, K.P., Tyagi, B.S., and Singh, V.N. 1991. “Effect of Temperature on the Removal of Lead (II) by Adsorption on China Clay and Woolastonite” **J. Chem. Tech. Biotechnol.** 51 : 47 - 60.
9. Diamadopoulos, E., Loannidis, S., and Sakellaropoulos, G.P. 1993. “As (V) removal from Aqueous Solution by Fly Ash” **Wat. Res.** 12 : 1773 - 1777.
10. Leyva-Ramos, R., Fuentes-Rubio, L., Guerrero-Coronada, R., and Mendoza-Barron, J. 1995. “Adsorption of Trivalent Chromium from Aqueous Solution onto Activated Carbon” **J. Chem. Tech. Biotechnol.** 51 : 47 - 60.
11. APHA, AWWA and WPCF, 1995 **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 19<sup>th</sup> ed.
12. Noll, K.E., Gounaris, V. and Hua, W.S. 1992. **Adsorption Technology for Air and Water Pollution Control**. New York. : Lewis Publishers.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 13 . Corapcioglu ,M.O. and Huang, C.P. 1987. "The Adsorption of Heavy Metals onto Hydrous Activated Carbon" **Wat. Res.** 21:1031-1044
- 14 . Faust, S.D. and Aly, O.M.1983. **Chemistry of Water treatment.** New York : Butterworths.
- 15 . Singh, V.K. and Tiwari, P.N. 1996. "Removal And Recovery of Chromium(VI) from Industrial Waste Water" **J.Chem.Tech. Biotechnol.** 69 : 376-382
- 16 . Paszum, D. and Szychaj, T. 1997. "Chemical Recycling of Poly(ethylene terephthalate)" **Ind. Eng. Chem . Res.** 36 : 4347-4352.
- 17 . จันทนา สงวนรุ่งเรือง . 2538 " การกำจัดโลหะหนักในน้ำโดยใช้ซีเมนต์ลอย" วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ ภาควิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ , จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย .
- 18 .Tan, T.C. and Teo, W.K. 1987 " Combined Effect of Carbon Dosage and Initial Adsorbate Concentration on the Adsorption Isoterm of Heavy Metal on Activated Carbon" **Wat. Res.** 21: 1183-1188.
- 19 . Singh, B.K. and Rawat, N.S. 1994 " Comparative Sorption Equilibrium Studies of Toxic Phenols on Fly ash and Impregnated Fly ash " **J.Chemtech. Biotechnol.** 61: 307-317.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า  
ไม่ว่ากรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

## ภาคผนวก ก.

### การวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียมโดยวิธีการเทียบสี[11]

#### ก.1 การเตรียมสารเคมี

1. สารละลายโครเมียมเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น จะได้สารละลายละลาย โซเดียมไดโครเมต 143.27 มิลลิกรัม ในน้ำกลั่น ปรับปริมาตรเป็น 500 มิลลิลิตร จะได้สารละลายโครเมียมเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นสารละลายสต็อกโครเมียมเข้มข้นจากนั้นปีเปิดสารละลายโครเมียมเข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อลิตรมา 5 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรเป็น 100 โครเมียมเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

2. สารละลายไดฟีนิลคาร์บาไซด์

ละลาย 1,5-ไดฟีนิลคาร์บาไซด์ 250 มิลลิกรัมในอะซิโตน 50 มิลลิลิตร เก็บในขวดสีชา ควรทิ้งเมื่อสารละลายเปลี่ยนสี

#### ก.2 การเตรียมกราฟมาตรฐานของสารละลายโครเมียม

1. เตรียมสารละลายมาตรฐาน โครเมียมให้มีความเข้มข้น 10, 20, 30, 40, 50, 60 และ 80 ไมโครกรัมต่อลิตร โดยปีเปิดสารละลายมาตรฐาน โครเมียมเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตรมา 2, 4, 6, 8, 10, 12 และ 16 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 100 มิลลิลิตร

2. เทสารละลายมาตรฐานโครเมียมแต่ละความเข้มข้นในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตร และทำการปรับ pH ของสารละลายด้วยกรดซัลฟูริกเข้มข้น 2 นอร์มัล ให้มี pH  $1.0 \pm 0.3$  โดยอาศัยเครื่องวัด pH

3. เติมสารละลายไดฟีนิลคาร์บาไซด์ 2 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ 5-10 นาที เพื่อให้ปฏิกิริยาสร้างสีเกิดโดยสมบูรณ์ จากนั้นนำไปวัด %T ที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร โดยใช้น้ำกลั่นเป็น แบลงค์

4. พล็อตกราฟระหว่างความเข้มข้นของโครเมียมเป็นไมโครกรัม และ %T โดยใช้กราฟ

Semi log

## ภาคผนวก ข.

### การวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วโดยวิธีไอโซโทป[11]

#### ข.1 การเตรียมสารเคมี

##### 1. สารละลายตะกั่วพร้อมใช้

ละลายตะกั่วไนเตรต 0.1622 กรัมในน้ำประมาณ 200 มิลลิลิตร เติมกรดไนตริกเข้มข้น 10 มิลลิลิตร แล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นเป็น 1000 มิลลิลิตร ได้สารละลายสต็อกตะกั่วจากนั้นปิเปตสารละลายสต็อกตะกั่วมา 2 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร จะได้สารละลายตะกั่วพร้อมใช้

##### 2. สารละลายกรดไนตริก (1+4)

เจือจางกรดไนตริกเข้มข้น 200 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่นให้เป็น 1 ลิตร

##### 3. สารละลายแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (1+99)

เจือจางแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 10 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่นให้เป็น 1 ลิตร

##### 4. สารละลายกรดไฮโดรคลอริก (1+1)

เจือจางกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 50 มิลลิลิตรให้เป็น 100 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่น

##### 5. สารละลายซีเตรตไซยาไนด์รีดิวซ์

ละลาย แอมโมเนียมซีเตรตไดเบซีล 100 กรัม โซเดียมซัลไฟด์ 5 กรัม ไฮดรอกซีลามีนไฮโดรคลอไรด์ 2.5 กรัม และโปแตสเซียมไซยาไนด์ 10 กรัม ในน้ำกลั่นเจือจางให้เป็น 250 มิลลิลิตร จากนั้นเติมแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 500 มิลลิลิตร แล้วเขย่าให้เข้ากัน

##### 6. การเตรียมสารละลายไอโซโทปเข้มข้น

ละลายไอโซโทปเข้มข้น 100 มิลลิกรัมด้วยคลอโรฟอร์ม 50 มิลลิลิตร

เทสารละลายลงในกรวยแยกขนาด 500 มิลลิลิตร ล้างบีกเกอร์ด้วยคลอโรฟอร์มครั้งละ 5 มิลลิลิตร จนไม่มีไอโซโทปติดอยู่

เติมแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (1+99) 100 มิลลิลิตร เขย่าอย่างแรงประมาณ 1 นาที ตั้งทิ้งไว้ให้แยกชั้น

ถ่ายชั้นคลอโรฟอร์มใส่กรวยแยกขนาด 250 มิลลิลิตร จะเหลือชั้นน้ำสีส้ม ในกรวยแยก 1 แล้วสกัดซ้ำชั้นคลอโรฟอร์มในกรวยแยก 2 ซ้ำด้วยแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (1+99) 100 มิลลิลิตร เขย่าตั้งทิ้งไว้ให้แยกชั้น

ถ่ายชั้นคลอโรฟอร์มใส่กรวยแยกขนาด 250 มิลลิลิตรอีกใบ ถ่ายชั้นน้ำสีส้มในกรวยแยก 2 ลงในกรวยแยก 1 สกัดชั้นคลอโรฟอร์มในกรวยแยก 3 อีกครั้ง ทิ้งชั้นคลอโรฟอร์มไป นำชั้นน้ำรวมกันในกรวยแยก 1

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เติมกรดไฮโดรคลอริก (1+1) 2 มิลลิลิตร แล้วเขย่าให้เข้ากัน เติมอีกจนกว่าจะตกตะกอนหมด คือสารละลายไม่เป็นสีส้มอีกต่อไป (ได้น้ำใสมีตะกอนโคโรโซนสีเขียวตกอยู่)

สกัดตะกอนโคโรโซนด้วยคลอโรฟอร์มครั้งละ 25 มิลลิลิตร จนตะกอนละลายหมด แต่ครั้งทิ้งให้แยกชั้นแล้วถ่ายชั้นคลอโรฟอร์มโคโรโซนลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 1000 มิลลิลิตร ทุกครั้ง ทำจนกระทั่งตะกอนละลายหมด จากนั้นปรับปริมาตรให้เป็น 1000 มิลลิลิตร

#### 7. สารละลายโคโรโซนพร้อมใช้

เจือจางสารละลายโคโรโซนเข้มข้น 100 มิลลิลิตร ให้มีปริมาตร 250 มิลลิลิตร

#### 8. สารละลายโคโรโซนพิเศษ

ละลายโคโรโซน 250 มิลลิกรัม ในคลอโรฟอร์ม 250 มิลลิลิตร

### ข.2 การเตรียมกราฟมาตรฐานของสารละลายตะกั่ว

1. เตรียมสารละลายมาตรฐานตะกั่วให้มีความเข้มข้น 2, 4, 6, 8, 10 และ 12 ไมโครกรัมต่อลิตร โดยปีเปตสารละลายมาตรฐานตะกั่วพร้อมใช้มา 1, 2, 3, 4, 5 และ 6 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 100 มิลลิลิตร

2. เทสารละลายมาตรฐานตะกั่วแต่ละความเข้มข้นในกรวยแยกขนาด 250 มิลลิลิตร เติมกรดไนตริกเข้มข้น (ประมาณ 1 มิลลิลิตร) ให้ได้ pH ประมาณ 2 แล้วจึงเติมกรดไนตริก (1+4) อีก 20 มิลลิลิตร เติมสารละลายซิงค์ไซยาไนด์รีดิวซ์ซึ่ง 50 มิลลิลิตร เขย่าแล้วเติมสารละลายโคโรโซนพร้อมใช้ 10 มิลลิลิตร เขย่าประมาณ 30 วินาที ตั้งทิ้งไว้ให้แยกชั้น ชั้นคลอโรฟอร์มจะอยู่ด้านล่าง ส่วนน้ำจะอยู่ด้านบน

3. ใส่อำลิบบางๆที่ปลายกรวยแยก โขชั้นคลอโรฟอร์มผ่านสำลิตั้ง 1-2 มิลลิลิตร แรกไป เก็บชั้นคลอโรฟอร์มในหลอดทดลองที่แห้ง สะอาด และทิ้งชั้นน้ำไป นำคลอโรฟอร์มที่ได้ไปวัด %T ที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร ใช้น้ำกลั่นเป็นแบลนด์ 100 มิลลิลิตร พล็อตกราฟระหว่างความเข้มข้นตะกั่วเป็นไมโครกรัมกับ %T โดยใช้กราฟ Semi log