

สำนักหอสมุดกลาง พระจอมเกล้าลาดกระบัง

รายงานโครงการวิจัยโดยใช้เงินรายได้คณะวิศวกรรมศาสตร์ ประจำปี 2550

ชื่อโครงการวิจัย การทำสารคูลซ์บจากกระดูกหมูเหลือทิ้ง

ผู้รับผิดชอบโครงการวิจัย อาจารย์รพีรฤติ เบญจางคประเสริฐ

ผู้ร่วมโครงการวิจัย

นางสาวจิตรลดา เลิศกิตติกุล

นางสาวฤชดา รัชมีโชค



RCH

TD

758.5

.H43

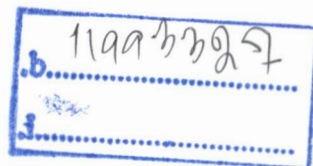
5556n

เลขหมู่.....

84501

เลขทะเบียน.....

วัน,เดือน,ปี. **13 ต.ค. 2551**



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทคัดย่อ

ในการศึกษาการทำสารดูดซับจากกระดูกหมูเหลือทิ้งนี้ เตรียมถ่านกระดูกหมูโดยเผาได้สารระเหยในบรรยากาศ แล้วกระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์ที่มีความเข้มข้น 50 % โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส ใช้สารละลายซิงค์คลอไรด์ต่อกระดูกบดในอัตราส่วน 1:1 1.5:1 และ 2:1 เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกระดูกสำหรับศึกษาผลของพีเอช ปริมาณถ่านกระดูก และประสิทธิภาพในการดูดซับตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยการทดลองแบบแบตช์ต่อไป จากลักษณะพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรจำเพาะ และขนาดของโพรงถ่านกระดูกที่ถุกกระตุ้น ซึ่งวิเคราะห์ด้วย BET Surface Area Analyzer พบว่าถ่านกระดูกซึ่งถุกกระตุ้นด้วยอัตราส่วน 1:1 มีค่าพื้นที่ผิวและปริมาตรจำเพาะของโพรงมากที่สุด และมีประสิทธิภาพการดูดซับตะกั่วสูงที่สุด จึงใช้อัตราส่วนนี้ในการศึกษาถึงผลของพีเอชของน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีต่อการดูดซับ โดยใช้ถ่านกระดูกดูดซับตะกั่วในน้ำเสียซึ่งมีการเขย่าด้วยความเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 13 ชั่วโมง พบว่าการกำจัดตะกั่วมากที่สุดเมื่อน้ำเสียสังเคราะห์มีพีเอช 6 และในการใช้ถ่านกระดูกปริมาณ 0.7 กรัมต่อลิตรของน้ำเสียจะมีการดูดซับตะกั่วได้ถึงร้อยละ 87 จากศึกษาโดยใช้สมการไอโซเทอมในการทำนายประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่ว พบว่าค่า R^2 ของไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช และแบบแลงมัวร์มีค่า 0.9655 และ 0.9202 ตามลำดับ เนื่องจากไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชมีค่า R^2 มากกว่า ไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชจึงมีความเหมาะสมที่จะใช้ในการทำนายกลไกการกำจัดตะกั่วมากกว่าไอโซเทอมแบบแลงมัวร์

ABSTRACT

The study of the adsorption of lead from synthetic wastewater by zinc chloride activated bone char. The pig bone was prepared by volatilization of volatile matters in open flame. Then, bone char was activated by 50 % weight zinc chloride solution by ratio of this solution to bone char 1:1, 1.5:1 and 2:1. The activation was done at 400 degree celcius in the furnace. The specific surface area, specific volume, and pore size of bone char were analyzed by BET method. The results showed that the 1:1 ratio gave the highest specific surface area and maximum adsorption efficiency. This ratio was selected for preparing the bone char for the further experiment. From the batch adsorption test, the effect of p^H was studied. The adsorption of lead by bone char were done at various p^H with shaking at 150 rpm for 13 hours. The maximum of lead removal efficiency was achieved at pH 6. When the amount of bone char was varied, the adsorption of lead by 0.7 of bone char /l of synthetic water at p^H 6 gave the adsorption efficiency 87%. After fitting the data with two isotherm equations, it was found that R^2 of Freundlich and Langmuir isotherms were 0.9655 and 0.9202, respectively. Because the R^2 value of the Freundlich isotherm larger than that of Langmuir isotherm, it can be concluded that the Freundlich isotherm was better to predict the adsorption mechanism of this system than the Langmuir isotherm.

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ก
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ข
สารบัญตาราง.....	ค
สารบัญรูป.....	ง
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
บทที่ 2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ตะกั่ว.....	3
2.1.1 อันตรายของสารตะกั่วต่อมนุษย์.....	3
2.2 การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย.....	4
2.2.1 การตกตะกอนผลึกทางเคมี (Chemical Precipitation).....	4
2.2.2 การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์.....	4
2.2.3 การตกผลึกของซัลไฟด์.....	5
2.2.4 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange).....	6
2.2.5 รีเวอร์ส ออสโมซิส (Reverse Osmosis).....	6
2.2.6 ออกซิเดชันและรีดักชัน (Oxidation and Reduction).....	7
2.2.7 การสกัดกลับคืนด้วยไฟฟ้า (Electrolytic Recovery).....	7
2.2.8 การระเหย(Evaporation).....	7
2.2.9 อิเล็กโทรไดอะไลซิส (Electrodialysis).....	7
2.2.10 การดูดซับ (Adsorption).....	8
2.3 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์.....	8
2.3.1 การคาร์บอนไนซ์ (Carbonization).....	8
2.3.2 กระบวนการกระตุ้นถ่านชาร์.....	8
2.4 กลไกการดูดซับ (Adsorption Mechanism).....	10
2.5 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (Rate of molecular transfer).....	10
2.6 สมดุลของการดูดซับ (Adsorption Equilibrium).....	11
2.6.1 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich Adsorption Isotherm).....	12
2.6.2 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ (Langmuir Adsorption Isotherm).....	12

2.6.3 ไอโซเทอมการดูดซับแบบบีอีที (BET Adsorption Isotherm)	13
2.7 ถ่านกระดูก (Bone charcoal).....	13
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	15
2.8.1 งานวิจัยต่างประเทศ.....	15
2.8.2 งานวิจัยในประเทศ	15
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัยและผลการวิจัย.....	17
3.1 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	17
3.2 ขอบเขตของการวิจัย.....	17
3.3 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์โลหะหนักตะกั่ว.....	18
3.4 การไทเทรต	18
3.4.1 ประเภทของการไทเทรตโดยอาศัยการเกิดสารเชิงซ้อน.....	19
3.5 อินดิเคเตอร์ที่ใช้ในการ ไทเทรตด้วยอีดีทีเอ	20
3.6 การเตรียมสารละลายสำหรับการ ไทเทรต	21
3.6.1 สารละลายอีดีทีเอเข้มข้น 0.1M.....	21
3.6.2 สารละลายอีดีทีเอเข้มข้น 0.01M.....	21
3.6.3 สารละลายมาตรฐานแคลเซียมคาร์บอเนต.....	21
3.6.4 การวิเคราะห์หาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายอีดีทีเอ.....	22
3.6.5 สารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 10.....	22
3.6.6 สารละลายอินดิเคเตอร์เอริโอโครมเบลคที.....	22
3.7 การวิเคราะห์หาปริมาณของตะกั่ว	22
3.8 เครื่องมือ อุปกรณ์ และวัสดุ	23
3.9 แผนการทดลอง.....	27
3.10 การดำเนินการทดลอง	28
3.10.1 การศึกษาอัตราส่วนของถ่านกระดูกต่อสารละลายซิงค์คลอไรด์ในสภาวะที่ กำหนด.....	28
3.10.2 การศึกษาหาพีเอชที่เหมาะสมโดยทำการทดลองแบบแบตช์.....	28
3.10.3 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับตะกั่ว โดยทำการทดลองแบบ แบตช์.....	31

สารบัญ(ต่อ)

	หน้า
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง.....	33
4.1 การศึกษาสภาวะในการเตรียมถ่านกระดูกที่กระตุ้นด้วยสารละลายซิงก์คลอไรด์	33
4.2 การศึกษาพีเอชที่เหมาะสมโดยทำการทดลองแบบแบตช์	34
4.3 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับตะกั่ว โดยทำการทดลองแบบแบตช์.....	35
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	38
5.1 สรุป.....	38
5.1.1 ผลการศึกษาสภาวะในการเตรียมถ่านกระดูกด้วยซิงก์คลอไรด์	38
5.1.2 ผลการศึกษาพีเอชที่เหมาะสมโดยทำการทดลองแบบแบตช์.....	38
5.1.3 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับตะกั่ว โดยทำการทดลองแบบแบตช์	38
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	39
บรรณานุกรม.....	40
ภาคผนวก.....	41
ภาคผนวก ก ผลการศึกษาพีเอชที่เหมาะสมโดยการทดลองแบบแบตช์.....	42
ภาคผนวก ข ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับในการกำจัดตะกั่ว โดยทำการทดลองแบบแบตช์.....	43

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของถ่านกระดูกเกรดการค้าชื่อ Brimax 216.....	14
3.1 สมบัติของอินดิเคเตอร์.....	20
4.1 ผลการวิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (BET) ปริมาตรจำเพาะของโพรง และขนาดของโพรง ที่สภาวะการเตรียมสัดส่วนของซิงก์คลอไรด์ต่อกระดูกบดที่ต่างกัน.....	34
ก-1 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วของถ่านกระดูกที่เตรียมจากซิงก์คลอไรด์ต่อกระดูกบดในอัตราส่วน 1:1 ปริมาณถ่าน 0.5 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง พีเอช 6 และความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	42
ข-1 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วของถ่านกระดูกที่เตรียมจากซิงก์คลอไรด์ต่อกระดูกบดในอัตราส่วน 1:1 ปริมาณถ่าน 0.3 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง พีเอช 6 และความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	43
ข-2 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วของถ่านกระดูกที่เตรียมจากซิงก์คลอไรด์ต่อกระดูกบดในอัตราส่วน 1:1 ปริมาณถ่าน 0.4 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง พีเอช 6 และความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	44
ข-3 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วของถ่านกระดูกที่เตรียมจากซิงก์คลอไรด์ต่อกระดูกบดในอัตราส่วน 1:1 ปริมาณถ่าน 0.5 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง พีเอช 6 และความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	45
ข-4 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วของถ่านกระดูกที่เตรียมจากซิงก์คลอไรด์ต่อกระดูกบดในอัตราส่วน 1:1 ปริมาณถ่าน 0.6 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง พีเอช 6 และความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	46
ข-5 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วของถ่านกระดูกที่เตรียมจากซิงก์คลอไรด์ต่อกระดูกบดในอัตราส่วน 1:1 ปริมาณถ่าน 0.7 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง พีเอช 6 และความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	47
ข-6 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วของถ่านกระดูกที่เตรียมจากซิงก์คลอไรด์ต่อกระดูกบดในอัตราส่วน 1:1 ปริมาณต่างๆ พีเอช 6 และความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร.....	48

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 การตกตะกอนผลึกโลหะหนักชนิดต่างๆในรูปไฮดรอกไซด์.....	5
2.2 การตกตะกอนผลึกของโลหะหนักชนิดต่างๆในรูปของซัลไฟด์.....	6
2.3 Molecular Transfer	11
3.1 โครงสร้างของเอทีลิน ไดเอมีนเทระอะซิติกแอซิด	18
3.2 เคอร์ฟของการไทเทรต	19
3.3 เผาอุณหภูมิสูง.....	24
3.4 เตาอบวัสดุ.....	24
3.5 ชุดเครื่องกรองสูญญากาศ	25
3.6 เครื่องเขย่า	25
3.7 BET Surface area analyzer	26
3.8 ตะแกรงร่อนคัดขนาด	26
3.9 เครื่องมือบดวัสดุ.....	27
3.10 โกร่งบดยา.....	27
3.11 การศึกษาอัตราส่วนของถ่านกระดูกต่อซิงก์กลอไรด์ในสภาวะที่กำหนด.....	29
3.12 การหาเวลาที่เหมาะสมสำหรับศึกษาพีเอช โดยทำการทดลองแบบแบดซ์	30
3.13 การหาพีเอชที่เหมาะสม โดยทำการทดลองแบบแบดซ์.....	31
3.14 การหาไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วโดยทำการทดลองแบบแบดซ์.....	32
4.1 ความเข้มข้นของตะกั่วที่เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 6 ปริมาณถ่านกระดูก 0.5 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง.....	34
4.2 ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อ ลิตร พีเอช 6 ปริมาณถ่านกระดูก 0.5 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง.....	35
4.3 ความเข้มข้นตะกั่วที่เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์จากการกำจัดด้วยถ่านกระดูกปริมาณต่างๆ.....	36
4.4 ร้อยละการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ถ่านกระดูกปริมาณต่างๆ.....	36
4.5 ไอโซเทอมการดูดซับแบบพุนดลิกซ์ของถ่านกระดูกที่เตรียมจากซิงก์กลอไรด์ต่อกระดูกบด ในอัตราส่วน 1:1 ปริมาณ 0.3 0.4 0.5 0.6 และ 0.7 กรัมต่อลิตรน้ำเสียสังเคราะห์ พีเอช 6 และความเข้มข้นเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส.....	37

4.6 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ของถ่านกระดูกที่เตรียมจากซิงก์คลอไรด์ต่อกระดูกบด ในอัตราส่วน 1:1 ปริมาณ 0.3 0.4 0.5 0.6 และ 0.7 กรัมต่อลิตรน้ำเสียสังเคราะห์ พีเอช 6 และความเข้มข้น เริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส37



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

ปัญหาด้านน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมในประเทศไทย เป็นปัญหาที่นับวันจะทวีความรุนแรงขึ้น เนื่องจากประเทศไทย มีการประกอบอาชีพที่เกี่ยวข้องกับเกษตรกรรมอยู่เป็นส่วนใหญ่ จึงมีการนำน้ำจากแหล่งธรรมชาติมาใช้ในการเพาะปลูก การประมง และการปศุสัตว์ นอกจากนี้ประชากรในเขตภูมิภาคยังใช้ในการบริโภค หากโรงงานอุตสาหกรรมปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติโดยไม่มีการบำบัดจะส่งผลกระทบต่อประชากรจำนวนมากโดยปกติน้ำเสียมักจะมีสารประกอบอินทรีย์ปนเปื้อนอยู่ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นเกลือของโลหะหนัก เช่น พวกเกลือของปรอท ตะกั่ว โครเมียม และสังกะสี เป็นต้น เกลือของโลหะหนักส่วนใหญ่สามารถละลายน้ำได้ ดังนั้นเมื่อถูกปล่อยสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ สัตว์น้ำที่อาศัยในแหล่งน้ำนั้นจะสะสมของเสียในเนื้อตัว และถ่ายทอดสู่มนุษย์ได้ หากได้รับการสะสมในระดับที่เกินมาตรฐาน อาจก่อให้เกิดโรคอันตรายต่อทั้งมนุษย์และสิ่งมีชีวิตในน้ำได้

โรงงานอุตสาหกรรมที่มีโลหะหนักปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสีย ได้แก่ โรงงานเคลือบชุบโลหะ โรงงานสแตนเลส โรงงานฟอกย้อม โรงงานปุ๋ยเคมี และเหมืองแร่ เป็นต้น การบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักเจือปนอยู่เป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง เพื่อควบคุมมิให้ปริมาณมากเกินมาตรฐานที่กำหนดไว้ หากละเลยอาจมีอันตรายถึงชีวิต เช่น สารประกอบโครเมียมที่ละลายอยู่ในน้ำจะมีความเป็นพิษสูงมาก เมื่อเข้าสู่ร่างกายในปริมาณหนึ่ง อาจก่อให้เกิดอาการท้องร่วง อาเจียน และอาจทำให้เสียชีวิตได้ ถ้ามีปริมาณสูง นอกจากนี้ยังสามารถสะสมแล้วก่อให้เกิดโรคมะเร็งได้

ปัจจุบันมีการนำถ่านกัมมันต์มาใช้เพื่อดูดซับสารประกอบอินทรีย์จากน้ำเสีย ซึ่งการนำถ่านกัมมันต์มาใช้ในการดูดซับสารอินทรีย์นั้นมีการศึกษามาเป็นเวลานานแล้ว แต่การนำถ่านกัมมันต์มาใช้ในการดูดซับโลหะหนักเพิ่งมีการศึกษาอย่างจริงจังเมื่อ ประมาณ 5-6 ปีที่ผ่านมา เนื่องจากถ่านกัมมันต์เป็นวัสดุที่มีราคาสูง แต่มีความสามารถในการดูดซับสูงมาก แม้ยังมีข้อจำกัดเกี่ยวกับการดูดซับที่ไม่ครอบคลุมกับสารละลายโลหะหนักทุกชนิด และต้องอยู่ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมจึงจะมีประสิทธิภาพการดูดซับที่ดี สภาวะเหล่านั้น ได้แก่ ความเป็นกรด-ด่าง อุณหภูมิ ความเข้มข้น และขนาดของถ่านกัมมันต์ เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีการศึกษาวิธีการนำถ่านกัมมันต์ที่ดูดซับโลหะหนักแล้วกลับมาใช้ใหม่เป็นการใช้ประโยชน์จากธรรมชาติอย่างคุ้มค่า และนำโลหะที่มีค่าทางเศรษฐกิจกลับมาหมุนเวียนใช้ได้ [1]

ถ่านกัมมันต์ เป็นถ่านที่สังเคราะห์ขึ้นด้วยกระบวนการพิเศษ เพื่อให้เกิดมีรูพรุนมากมาย ซึ่งทำให้มีพื้นที่ผิวสูง โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์จะมีพื้นที่ผิวประมาณ 600-1,500 ตารางเมตรต่อกรัม รูพรุนหรือโพรง (micropores) ของถ่านกัมมันต์นี้มีขนาดอยู่ระหว่าง 20-20,000 อังสตรอม วัสดุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์นั้นมีหลายชนิดทั้งจากพืชและจากสัตว์ ได้แก่ ไม้ กะลามะพร้าว ถ่านหิน ถ่านโค้ก กระจุก ขี้เลื่อย กากเมล็ดกาแฟ เปลือกของผลไม้บางชนิด เช่น ลูกวอลนัท เป็นต้น



บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ตะกั่ว

ตะกั่ว เป็นโลหะอ่อน สีเทาเงินหรือแกมน้ำเงิน มีจุดหลอมเหลว 327 องศาเซลเซียส สำหรับตะกั่วที่ใช้ในการเชื่อมบัดกรีซึ่งมีการผสมกับดีบุก จะทำให้จุดหลอมเหลวลดลงเหลือ 200 องศาเซลเซียส

ตะกั่วที่ใช้ในวงการอุตสาหกรรมแบ่งออกเป็นสองชนิด คือ ตะกั่วอนินทรีย์ (inorganic lead) เช่น lead oxide (Pb_3O_4) ซึ่งใช้มากในโรงงานแบตเตอรี่ โรงงานทำสีและ lead chromate ($PbCrO_4$) ซึ่งใช้ทำสีทาบ้าน เป็นต้น ส่วนตะกั่วอินทรีย์ (organic lead) ได้แก่ tetramethyl lead และ tetraethyl lead ซึ่งใช้เป็นสารที่ทำให้เครื่องยนต์เดินเรียบ (antiknock compounds)

สำหรับบุคคลทั่วไป ตะกั่วเข้าสู่ร่างกายได้ 3 ทาง คือ ทางการรับประทานอาหารและน้ำดื่มที่ปนเปื้อนตะกั่ว ทางการหายใจซึ่งส่วนใหญ่มาจากไอเสียรถยนต์ และทางการดูดซึมทางผิวหนัง ส่วนมากเกิดกับบุคคลที่มีอาชีพเกี่ยวข้องกับตะกั่วเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งตะกั่วอินทรีย์จะถูกดูดซึมเข้าผิวหนังได้ดี [2]

2.1.1 อันตรายของสารตะกั่วต่อมนุษย์ [3] [4]

พิษเรื้อรังที่เกิดจากสารตะกั่วเมื่อร่างกายได้รับสารตะกั่วทีละน้อย ตะกั่วจะเข้าสู่ของเหลวในร่างกายและสะสมอยู่จนถึงระดับหนึ่งจึงแสดงอาการออกมา ตะกั่วสามารถเข้าสู่ร่างกายได้และถูกดูดซึมเข้าสู่ระบบไหลเวียนโลหิตแล้วจึงไปจับกับเม็ดเลือดแดงแทนที่เหล็ก(Fe^{2+})ซึ่งเป็นโลหะที่จำเป็นในการสร้างเม็ดเลือดแดงทำให้เกิดโรคโลหิตจาง (Anaemia) และมีผลให้ปริมาณเหล็กในน้ำเหลืองเพิ่มขึ้นผิดปกติ

ตะกั่วบางส่วนจะไปสะสมในกระดูก โดยตะกั่ว(Pb^{2+})ซึ่งเป็นโลหะที่จำเป็นในการสร้างกระดูกและฟัน ทำให้มีอาการปวดตามข้อ กระดูกผุและหักง่าย ถ้าไปสะสมที่รากฟันจะทำให้เหงือกเป็นสีม่วงหรือสีดำ บางครั้งเรียกว่าเส้นตะกั่ว (Lead line) จะทำให้ฟันหลุดง่าย มีผู้วิจัยพบว่าตะกั่วสามารถเกาะกระดูกในร่างกายได้นานถึง 32 ปี และยังสามารถได้ในไขมัน ระบบประสาท สมอง ระบบน้ำเหลือง ตับ และไต

อาการพิษเรื้อรังที่พบบ่อย คือ อาการของระบบย่อยอาหารผิดปกติจะเกิดการปวดท้อง น้ำหนักลด เมื่ออาหาร คลื่นไส้ อาเจียน ท้องผูก อาการพิษทางประสาทและสมอง ทำให้ทรงตัวไม่อยู่ เกิดอาการประสาทหลอน ซึมไม่รู้สึกตัว ชัก มือและเท้าตก เป็นอัมพาต และอาจตายได้

มาตรฐานของสารตะกั่วในสิ่งแวดล้อมที่องค์การอนามัยโลก (WHO) และสำนักงานกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติกำหนดไว้ คือ ตะกั่วในอากาศไม่เกิน 10 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ในช่วงปี พ.ศ. 2531 ถึง 2532 มีรายงานการวัดสารตะกั่วในอากาศในกรุงเทพมหานครและริมทางด่วน

พบว่าบริเวณที่มีการจราจรคับคั่งจะพบสารตะกั่วมากที่สุดคือบริเวณถนนวงเวียนใหญ่ แขวงราช
 ประตูนํ้ามีค่าเฉลี่ยสูงสุด อยู่ในระดับ 5 ถึง 7 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ส่วนริมทางด่วนมี
 ค่าเฉลี่ยสูงสุดที่ ด้านเก็บเงินดินแดง 3 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งต่ำกว่าค่ามาตรฐานคุณภาพ
 อากาศที่กำหนดไว้ (น้อยกว่า 10 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) และค่ามาตรฐานในสถานที่
 ประกอบการในปี 1989 ที่ให้มีได้ไม่เกิน 50 มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เมตร

ตะกั่วในน้ำ กำหนดไว้ไม่เกิน 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่ง WHO ให้มีได้ไม่เกิน 10 มิลลิกรัมต่อ
 ลิตร แต่จากการวัดน้ำประปามีน้อยกว่า 20 มิลลิกรัมต่อลิตร

ตะกั่วในอาหาร กำหนดไว้ให้น้อยกว่า 300 มิลลิกรัมต่อวัน และจากการวัดน้อยกว่า 20
 มิลลิกรัมต่อวัน

2.2 การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย

กระบวนการที่ใช้ในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียมักมีหลายวิธี การพิจารณาจะเลือกใช้วิธีใด
 นั้นขึ้นอยู่กับความเหมาะสมในหลายด้าน ได้แก่

- คุณสมบัติของน้ำเสียก่อนบำบัด
- คุณภาพของน้ำที่ต้องการ
- พื้นที่ที่ต้องใช้สำหรับบำบัดน้ำเสีย
- ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย
- ความเป็นไปได้ในการบำบัดนำของเสียกลับมาใช้ใหม่

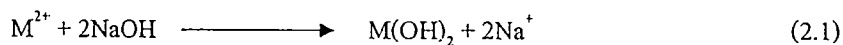
วิธีการกำจัดโลหะหนักสรุปได้ ดังนี้

2.2.1 การตกตะกอนผลึกทางเคมี (Chemical Precipitation)

วิธีนี้เป็นที่นิยมใช้กันมานาน โดยการเติมสารเคมีลงไปในน้ำเพื่อทำปฏิกิริยากับโลหะหนัก
 ที่ละลายอยู่ เกิดตะกอนแยกออกได้ ซึ่งการตกตะกอนผลึกด้วยสารเคมีมีหลายวิธี แต่ที่นิยมใช้คือ
 การตกผลึกไฮดรอกไซด์ และการตกตะกอนผลึกซัลไฟด์ ซึ่งการตกตะกอนผลึกของโลหะชนิด
 ต่างๆในรูปของไฮดรอกไซด์ และซัลไฟด์ แสดงดังรูปที่ 2.1 และรูปที่ 2.2

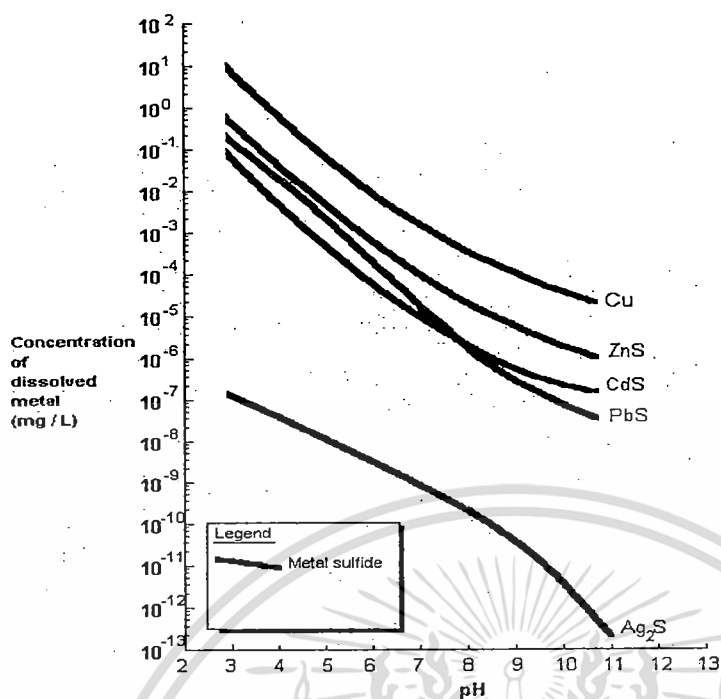
2.2.2 การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์

การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์จัดเป็นการตกตะกอนแบบดั้งเดิมทำได้โดยการเติมแคล-
 เซียมไฮดรอกไซด์หรือปูนขาวลงในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยาดังสมการ



โดย M^{2+} คือโลหะของอออน

การตกผลึกไฮดรอกไซด์สามารถใช้น้ำเสียหลายประเภทด้วยกัน แต่มีข้อจำกัดคือ
 โลหะไฮดรอกไซด์จะไม่สามารถตกตะกอนที่พีเอชหนึ่ง แต่จะตกตะกอนในช่วงที่พีเอชกว้าง



รูปที่ 2.2 การตกตะกอนผลึกของโลหะชนิดต่างๆ ในรูปของซัลไฟด์ [5]

2.2.4 การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange)

การแลกเปลี่ยนไอออนสามารถแยกโลหะหนักออกจากสารละลายได้ โดยอาศัยหลักการที่ไอออนแต่ละชนิดมีความชอบหรือคู่กับเรซินไม่เท่ากัน เรซินที่ใช้แลกเปลี่ยนไอออนมีทั้งชนิดที่ได้จากธรรมชาติและชนิดที่สังเคราะห์ขึ้น เรซินนี้จะมีหมู่ฟังก์ชันของไอออนติดอยู่และจะถูกทำให้สมดุลด้วยไอออนที่มีประจุตรงข้าม ซึ่งไอออนที่เป็นประจุตรงข้ามนี้เป็นไอออนที่เกิดจากการแลกเปลี่ยนกับ ไอออนที่มีอยู่ในสารละลาย

วิธีนี้เหมาะสำหรับการกำจัดโลหะหนักที่มีปริมาณน้อยและให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสูง นิยมใช้กับระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้า แต่วิธีนี้มีข้อจำกัดคือ หากมีสารปนเปื้อนชนิดอื่นอยู่ต้องกำจัดออกไปเสียก่อนที่จะเข้าถังเรซินเพื่อทำให้การบำบัดมีประสิทธิภาพสูงที่สุด จึงมีค่าใช้จ่ายและการลงทุนสูง

2.2.5 รีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis)

วิธีการนี้เป็นการแยกโลหะออกจากน้ำเสียโดยหลักการความแตกต่างของแรงดันระหว่างเมมเบรนที่ทำด้วยเซลลูโลสอะซีเตตและโพลีเอไมด์ ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นเยื่อเลือกผ่าน (Semi-permeable Membrane) ซึ่งจะให้เฉพาะตัวทำละลายผ่านเพื่อแยกสารที่ต้องการออกและมีความเข้มข้นมากขึ้นวิธีนี้ต้องใช้แรงดันสูงและอาจสูงกว่า 100 ความดันบรรยากาศดังนั้นแผ่นเมมเบรนจึงต้องทนความดันสูงและต้องมีการบำบัดขั้นต้นด้วยวิธีการปรับพีเอช มีการแยกสารออกซิไดซ์ที่แรง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ออก และกรองสารแขวนลอยก่อนเพื่อป้องกันการอุดตันของแผ่นเมมเบรน วิธีนี้เหมาะสำหรับกำจัด โลหะหนักจากอุตสาหกรรม การชุบโลหะด้วยกระแสไฟฟ้า และน้ำเสียจากการล้างภาพของฟิล์ม ถ่ายรูป

2.2.6 ออกซิเดชันและรีดักชัน (Oxidation and Reduction)

วิธีการนี้เป็นวิธีทางเคมีที่นิยมใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะซึ่งมีสารประกอบ โลหะต่างๆเจือปนอยู่ ในการกำจัดต้องเติมสารเคมีลงไปเพื่อทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือ รีดักชันกับสารประกอบที่ต้องกำจัด ทำให้สารประกอบนั้นเปลี่ยนรูปไปเป็นสารประกอบอื่นที่ไม่ เป็นพิษหรือตกตะกอนได้ สารเคมีที่ใช้เป็นตัวออกซิไดซ์ได้แก่ อากาศ ออกซิเจน โอโซน คลอรีน ไฮโปคลอไรต์ เปอร์แมงกานेट โครเมต และไนเตรต ส่วนสารเคมีที่ทำให้เกิดปฏิกิริยารีดักชัน ได้แก่ เหล็ก(II)ซัลเฟต โซเดียมเมตาไบซัลเฟต ซัลเฟอร์ไดออกไซด์ สำหรับตัวอย่างการบำบัดน้ำ ที่ด้วยวิธีการออกซิเดชัน ได้แก่ การกำจัดไซยาไนด์ในน้ำทิ้งของโรงงานชุบโลหะโดยใช้คลอรีน หรือไฮโปคลอไรต์ ส่วนตัวอย่างการบำบัดน้ำทิ้งด้วยวิธีรีดักชันได้แก่ การบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงาน ชุบโลหะที่มีสารประกอบโครเมตหรือกรดโครมิกเจือปนอยู่โดยใช้เหล็ก(II)ซัลเฟต โดยต้องทำ ปฏิกิริยาที่พีเอชต่ำกว่า 3 หลังจากนั้นเติมปูนขาว(Lime)ลงไปเพื่อตกตะกอนอีกชั้นหนึ่ง ซึ่งเห็นได้ ว่าการบำบัดด้วยวิธีนี้ค่าพีเอชมีความสำคัญมาก และต้องปรับค่าพีเอชให้เหมาะสมจึงจะเกิดปฏิกิริยา ได้อย่างสมบูรณ์

2.2.7 การสกัดกลับคืนด้วยไฟฟ้า (Electrolytic Recovery)

วิธีการนี้เป็นกระบวนการทางเคมีไฟฟ้าซึ่งจะลดปริมาณไอออนของ โลหะที่อยู่ในสารละลาย ให้อยู่ในรูปของธาตุที่ขั้วแคโทด(ขั้วบวก) และเกิดออกซิเจนที่ขั้วแอโนด(ขั้วลบ)ตลอดเวลา วิธีนี้ เหมาะสำหรับสารละลายโลหะที่มีความเข้มข้นสูง แต่มักไม่นิยมวิธีการนี้เพราะสิ้นเปลืองพลังงาน ไฟฟ้าสูง

2.2.8 การระเหย(Evaporation)

เป็นการระเหยเอาน้ำออก ซึ่งเป็นวิธีการง่ายๆที่ทำให้สารละลายมีความเข้มข้นสูงขึ้น การ ระเหยมีทั้งที่เป็นการระเหยที่ความดันบรรยากาศ และภายใต้สภาวะสุญญากาศ วิธีการบำบัดแบบนี้ ใช้ได้ผลดีกับน้ำเสียที่มีปริมาณโลหะสูง แต่มีข้อเสียคือใช้ต้นทุนในการดำเนินงานสูงเพื่อให้ กระบวนการมีประสิทธิภาพสูง

2.2.9 อิเล็กโทรไดอะไลซิส (Electrodialysis)

วิธีการนี้เป็นการแยกไอออนแต่ละชนิดออกจากสารละลายโดยการใช้ไฟฟ้ากระแสตรง ร่วมกับการใช้เมมเบรนสำหรับไอออน (Ion selective Membrane) กลไกของกระบวนการนี้เป็นการ แลกเปลี่ยนไอออนร่วมกับการสกัดตัวทำละลาย ซึ่งน้ำเสียจะต้องผ่านการกรองก่อนเพื่อป้องกันการ อุดตันของแผ่นเมมเบรน ความบริสุทธิ์ของไอออนขึ้นอยู่กับค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าที่ไหลผ่านเมม

เบรณ วิธีนี้มีข้อเสียคือค่าต้นทุนการก่อสร้างและดำเนินการสูง แต่มีข้อดีคือสามารถกำหนดชนิดของอโอนที่ต้องการได้

2.2.10 การดูดติดผิว (Adsorption)

การดูดติดผิวเป็นกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการสะสมความเข้มข้นของอนุภาคที่ผิวหน้าหรือระหว่างผิวของสารสองสถานะเช่น ของแข็งกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว เป็นต้น โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ที่ถูกดูดเรียกว่า สารถูกดูดซับ (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสำหรับดูดซับเรียกว่าสารดูดซับ (Adsorbent)

ถ่านกัมมันต์เป็นสารดูดซับที่สำคัญชนิดหนึ่ง ทำจากวัตถุดิบได้หลายชนิด มีชนิดต่างๆ ทำได้โดยการผ่านกระบวนการที่ทำให้เกิดรูพรุนจำนวนมากที่พื้นผิว สำหรับคุณภาพของถ่านจะแตกต่างกันไปตามชนิดของวัสดุ

2.3 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์

กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์มีหลายวิธี ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบและสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ต้องการ ซึ่งการผลิตประกอบไปด้วยสองขั้นตอนดังนี้

2.3.1 การคาร์บอนไนซ์ (Carbonization)

การคาร์บอนไนซ์ เป็นกระบวนการไพโรไลซิสรูปแบบหนึ่ง ซึ่งจะเป็นการเผากระดูกในที่อับอากาศในช่วงอุณหภูมิ 200 ถึง 500 องศาเซลเซียส มีจุดมุ่งหมายคือเพิ่มประสิทธิภาพของคาร์บอนให้สูงขึ้น โดยให้ความร้อนแก่วัสดุจนกระทั่งสารที่สามารถระเหยได้สลายตัวไป การคาร์บอนไนซ์เป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ เพราะเป็นขั้นตอนที่จะเริ่มต้นการเกิดโครงสร้างที่เป็นรูพรุน โดยความร้อนทำให้เกิดการแตกตัวทางเคมีของสารบางชนิดออกมาในรูปของก๊าซ เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน และไฮโดรเจน ส่วนคาร์บอนอิสระที่มีอยู่จะรวมตัวกันอยู่ในรูปของถ่านชาร์ (Char)

2.3.2 กระบวนการกระตุ้นถ่านชาร์

1) วิธีกระตุ้นทางเคมี (Chemical Activation)

เป็นวิธีที่สารกระตุ้นทำปฏิกิริยาเคมีกับผิวคาร์บอน โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสารที่นิยมใช้ได้แก่ ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) แคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$) และกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) ข้อดีของการกระตุ้นด้วยวิธีนี้คือใช้อุณหภูมิไม่สูงมาก (400 ถึง 600 องศาเซลเซียส) แต่มีข้อเสียคือมีสารเคมีตกค้างในถ่านกัมมันต์ทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการล้างสารเคมีออก อีกทั้งอุปกรณ์ที่ใช้ต้องเป็นอุปกรณ์พิเศษชนิดทนการกัดกร่อน ตัวกระตุ้นดังกล่าวมักเป็นเกลืออนินทรีย์ จำพวกเกลือของโลหะคลอไรด์ เช่น แคลเซียมคลอไรด์ แมกนีเซียมคลอไรด์ ซึ่งละลายน้ำได้ นอกจากนี้ยังนิยม

ใช้ซิงก์คลอไรด์ โดยหลักการแล้วสามารถใช้เกลืออนินทรีย์ทุกชนิดที่ทนต่อการเผาไหม้ แต่ซิงก์คลอไรด์มีคุณสมบัติดีกว่า คือ

- ซิงก์คลอไรด์มีจุดเดือดสูงถึง 756 องศาเซลเซียส จึงมีความทนทานต่อการสลายตัวที่อุณหภูมิสูง
- ซิงก์คลอไรด์สามารถกระจายอยู่ทั่วไปได้มากกว่าและค่อนข้างสม่ำเสมอกว่าเกลืออื่นๆ หลังจากสกัดซิงก์คลอไรด์ออกจากหลังการกระตุ้นจะเกิดรูพรุนจำนวนมากและสม่ำเสมอ ทำให้คุณสมบัติการกำจัดสารถูกดูดซับดีขึ้น

2) วิธีกระตุ้นทางฟิสิกส์ (Physical Activation)

เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์ โดยให้ผิวของคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางฟิสิกส์ เช่น การจัดเรียงตัวใหม่ ซึ่งจะทำให้ถ่านมีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น ก๊าซที่นิยมใช้ในการออกซิไดซ์ ได้แก่ ไอน้ำ อิมตัวยังขวด คาร์บอนไดออกไซด์และออกซิเจน โดยใช้ร่วมกับความร้อน ปฏิบัติการกระตุ้นอาจเกิดจากความร้อนเพียงอย่างเดียวแต่ต้องใช้อุณหภูมิสูงมากถึง 1,200 องศาเซลเซียส แต่ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จะมีคุณภาพต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตโดยการกระตุ้นด้วยก๊าซออกซิไดซ์ ปัจจัยที่มีผลต่อการกระตุ้นด้วยก๊าซออกซิไดซ์ คือ

- สมบัติทางเคมีและความเข้มข้นของก๊าซออกซิไดซ์ที่ใช้
- อุณหภูมิขณะเกิดปฏิกิริยา
- ระยะเวลาของปฏิกิริยา
- ชนิดและปริมาณวัสดุคิบที่ใช้

อุณหภูมิที่ใช้ไม่สามารถกำหนดได้อย่างแน่นอน แต่มักไม่เกิน 1,000 องศาเซลเซียส เพราะถ้าใช้อุณหภูมิสูงกว่า 1,000 องศาเซลเซียส จะทำให้ความสามารถของถ่านในการดูดซับลดน้อยลง ส่วนมากใช้อุณหภูมิตั้งแต่ 800 ถึง 900 องศาเซลเซียส

ในการกระตุ้นคาร์บอนจะทำปฏิกิริยากับสารออกซิไดซ์กลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แพร่ออกจากผิวคาร์บอน เกิดก๊าซซิฟิเคชันบางส่วนของเม็ดถ่านเป็นรูพรุนในโครงสร้าง ถ่านจากการคาร์บอนไนซ์จะประกอบด้วยรูพรุนเล็ก ๆ จำนวนมาก ซึ่งเกิดจากช่องว่างระหว่างผลึกในการจัดเรียงตัวของอะตอมคาร์บอน รูพรุนนี้จะถูกอุดตันด้วยทาร์ที่เกิดจากการสลายตัวด้วยความร้อน และถูกขัดขวางด้วยอะมอฟสคาร์บอน ดังนั้นการกระตุ้นจึงเป็นการเปิดรูพรุนที่ถูกปิดและสร้างรูพรุนขึ้นมาใหม่ด้วย

2.4 กลไกการดูดซับ (Adsorption Mechanism)

กระบวนการดูดซับสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ การดูดซับทางกายภาพ (Physical Adsorption) และการดูดซับทางเคมี (Chemical Adsorption) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับธรรมชาติของแรงที่เข้ามาเกี่ยวข้อง ซึ่งการดูดซับทั้งสองแบบนี้เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลในชั้นของเหลวเข้าใกล้และยึดติดกับผิวของของแข็ง จนแรงนี้สามารถเอาชนะพลังงานจลน์ของโมเลกุลของสารที่อยู่ในของเหลวได้

การดูดซับทางกายภาพเป็นผลมาจากแรงแวนเดอร์วาลส์ (Vander waals force) ซึ่งเกิดจากการรวมกันของแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic force) โมเลกุลของสารดูดซับจะดูดซับกันทางกายภาพกับโมเลกุลของสารดูดซับ การดูดซับแบบนี้เป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (Multilayer) กล่าวคือ แต่ละชั้นของโมเลกุลสารดูดซับจะติดอยู่กับชั้นโมเลกุลก่อนหน้านั้น โดยจำนวนชั้นของโมเลกุลจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารดูดซับเพิ่มขึ้น [6]

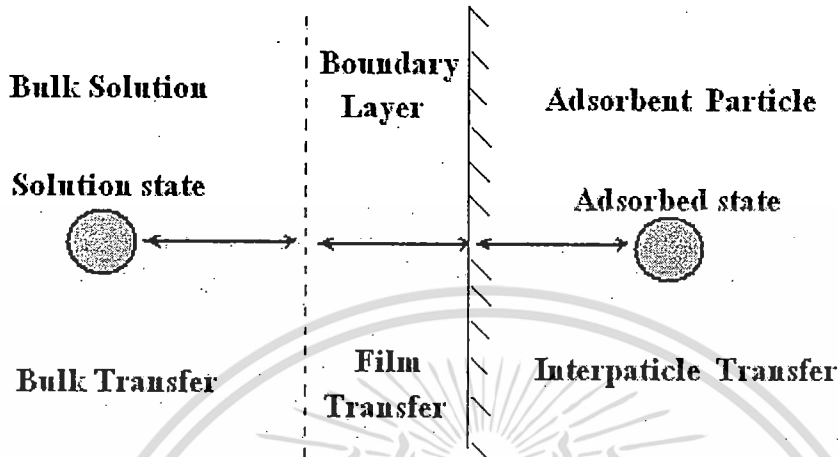
การดูดซับทางเคมี (Chemisorption) เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างสารดูดซับ และสารดูดซับ เกิดเป็นสารประกอบทางเคมีขึ้น การดูดซับทางเคมีแตกต่างกับทางกายภาพ เนื่องจากเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว (Monolayer) และไม่สามารถผันกลับได้ (Irreversible) ดังนั้นโมเลกุลที่ถูกดูดซับจะติดอยู่ที่ใดที่หนึ่งเฉพาะที่

2.5 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (Rate of molecular transfer)

อัตราการดูดซับที่รวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วขึ้น อัตราการดูดซับจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีความต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุล ซึ่งขั้นตอนที่ช้าที่สุดจะเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับ ขั้นตอนในการดูดซับของสารละลายโดยสารดูดซับที่มีรูพรุนมี 3 ขั้นตอน ดังรูปที่ 2.3 คือ

1. การขนส่งทั้งก้อน (Bulk transfer) เป็นขั้นตอนที่เกิดเร็วที่สุดโดยการแพร่ของโมเลกุลจากสารละลายไปยังพื้นผิวภายนอกของชั้นของเหลวบาง ๆ ที่ห่อหุ้มสารดูดซับ
2. การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film transfer) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบาง ๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดซับ เป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการแพร่ผ่านฟิล์ม (Film diffusion)
3. การขนส่งภายในอนุภาค (Interparticle transfer) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดซับ (Pore diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายใน

ภายใต้สภาวะที่มีความปั่นป่วนน้อย การขนส่งชั้นฟิล์มจัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับ แต่หากว่า ภายในระบบมีความปั่นป่วนเพียงพอ ขั้นตอนการแพร่สู่รูพรุน (Pore diffusion) จะเป็นขั้นตอนที่ควบคุมอัตราการดูดซับ



รูปที่ 2.3 Molecular Transfer [7]

2.6 สมดุลของการดูดซับ (Adsorption Equilibrium)

การดูดซับสารละลายเกี่ยวข้องกับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่อยู่บนผิวหน้าของสารดูดซับ เมื่อกระบวนการดูดซับเกิดขึ้น ตัวถูกละลายที่ถูกดูดซับมีแนวโน้มที่จะหลุดออกมาสู่สารละลายอีกครั้งหนึ่ง ตัวถูกละลายจะถูกดูดซับและหลุดออกมาในจำนวนที่เท่ากันที่เวลาสมดุล ซึ่งเป็นสภาวะที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารถูกดูดซับหรือตัวถูกละลายในสารละลายอีกต่อไป

ไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption isotherm) เป็นผลที่ได้มาจากความสัมพันธ์ของปริมาณสารถูกดูดซับกับเวลาที่อุณหภูมิคงที่ สมการที่ใช้สำหรับอธิบายข้อมูลไอโซเทอมโดยฟรุนดลิช (Freundlich) โดยแลงมัวร์ (Langmuir) และโดยBrunauer Emmet และ Teller ซึ่งได้ข้อมูลจากการทดลอง สมการไอโซเทอมของฟรุนดลิชใช้อธิบายสมบัติการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในงานบำบัดน้ำมากที่สุด ไอโซเทอมแบบต่างๆมีรายละเอียดดังนี้

2.6.1 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich Adsorption Isotherm)

ฟรอนด์ลิชไอโซเทอมมีรูปแบบสมการดังนี้ [8]

$$\frac{x}{m} = K_f \cdot C_e^{\frac{1}{n}} \quad (2.3)$$

เมื่อ $\frac{x}{m}$ คือ ปริมาณทั้งหมดโดยน้ำหนักของสารถูกดูดซับที่ดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของถ่านกัมมันต์

C_e คือ ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในสารละลายที่จุดสมดุลภายหลังการดูดซับ

K_f, n คือ ค่าคงที่เอมไพริคัล หรือค่าคงที่จากการทดลอง

ค่าคงที่ในฟรอนด์ลิชไอโซเทอมสามารถหาได้โดยการกำหนดจุดบนกราฟระหว่างค่า $\log\left(\frac{x}{m}\right)$ กับค่า $\log C_e$ ที่ $C_e = 1$ จะได้ค่า K_f และค่า $\frac{1}{n}$ เท่ากับค่าความชันของเส้นกราฟ สามารถเขียนสมการใหม่ที่ใช้หาค่าคงที่จากการทดลองได้ดังนี้

$$\log\left(\frac{x}{m}\right) = \log K_f + \left(\frac{1}{n}\right) \log C_e \quad (2.4)$$

2.6.2 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ (Langmuir Adsorption Isotherm)

แลงมัวร์ไอโซเทอมมีรูปแบบสมการดังนี้ [8]

$$\frac{x}{m} = \frac{abC_e}{1 + bC_e} \quad (2.5)$$

เมื่อ $\frac{x}{m}$ คือ ปริมาณทั้งหมดโดยน้ำหนักของสารถูกดูดซับที่ดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของถ่านกัมมันต์

a, b คือ ค่าคงที่เอมไพริคัล

C_e คือ ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในสารละลายที่จุดสมดุลภายหลังการดูดซับ

ค่าคงที่ในแลงมัวร์ไอโซเทอม สามารถหาได้โดยการกำหนดจุดบนกราฟระหว่าง $\frac{C_e}{(x/m)}$

กับค่า C_e หาค่า a ได้จากค่าความชันของเส้นกราฟซึ่งมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{a}$ และหาค่า b ได้จากค่าของ

จุดตัดแกน Y ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{ab}$ สามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{C_e}{(x/m)} = \frac{1}{ab} + \frac{1}{a} \cdot C_e \quad (2.6)$$

2.6.3 ไอโซเทอมการดูดซับแบบบีอีที (BET Adsorption Isotherm)

บีอีทีไอโซเทอม จะมีรูปแบบสมการดังนี้

$$\frac{x}{m} = \frac{ACX_m}{(C_s - C) \left(1 + (A-1) \frac{C}{C_s} \right)} \quad (2.7)$$

เมื่อ $\frac{x}{m}$ คือ ปริมาณทั้งหมดโดยน้ำหนักของสารถูกดูดซับที่ถูกลดต่อหน่วยน้ำหนักของถ่านกัมมันต์

X_m คือ ปริมาณของสารถูกดูดซับทั้งหมดที่ถูกดูดซับในแบบผกผันเดียวโดยสมบูรณ์

C_s คือ ความเข้มข้นอิ่มตัวของสารถูกดูดซับในสารละลาย

C คือ ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในสารละลายที่จุดสมดุล

A คือ ค่าคงที่ที่ใช้อธิบายพลังงานของการเกิดรวมกันระหว่างสารถูกดูดซับกับพื้นที่ผิวของสารดูดซับ

ค่าคงที่ในบีอีทีไอโซเทอมสามารถหาได้โดยการกำหนดจุดบนกราฟระหว่างค่า

$\frac{C}{(C_s - C)(x/m)}$ กับค่า $\frac{C}{C_s}$ หากค่า A ได้จากค่าความชันของเส้นกราฟซึ่งมีค่าเท่ากับ $\frac{(A-1)}{A(X_m)}$ และหาค่าที่จุดตัดแกน Y ซึ่งมีค่าเท่ากับ $\frac{1}{A(X_m)}$ และสามารถเขียนสมการใหม่ได้ดังนี้

$$\frac{C}{(C_s - C) \frac{x}{m}} = \frac{1}{A(X_m)} + \frac{(A-1)}{A(X_m)} \cdot \frac{C}{C_s} \quad (2.8)$$

2.7 ถ่านกระดูก (Bone charcoal)

ถ่านกระดูกเป็นผลิตภัณฑ์ที่ทำมาจากกระดูกสัตว์ เช่น กระดูกโค กระบือ หมู ปลา เป็นต้น เนื่องจากเป็นวัสดุเหลือใช้ ซึ่งในอดีตเมื่อปี ค.ศ.1811 นักเภสัชศาสตร์ชาวฝรั่งเศสได้นำมาใช้เป็นสารฟอกสีน้ำตาล ต่อมาในศตวรรษที่ 19 จึงนิยมใช้กันมากขึ้นอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมน้ำตาลจนกระทั่งปัจจุบันนี้ โดยถ่านกระดูกนี้จัดเป็นสารประเภทอนินทรีย์ ประกอบด้วยองค์ประกอบหลักที่สำคัญ 2 ส่วน คือ คาร์บอน และไฮดรอกซีอะพาไทต์ (Hydroxyapatite) โดยคาร์บอนจะเป็นส่วนที่มีกลไกการกำจัดแบบดูดซับ ในขณะที่ไฮดรอกซีอะพาไทต์ซึ่งเป็น

สารประกอบแคลเซียมฟอสเฟตรูปแบบหนึ่งมีสูตรเคมี $\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_5(\text{OH})_2$ เป็นส่วนประกอบหลักที่เป็นสารอนินทรีย์ในกระดูกนั่นเอง โดยจะเป็นตัวกำจัดการประเภทโมเลกุลประจุบวกประเภทไอออนอนินทรีย์ (inorganic ion) ได้หลายชนิด ด้วยแรงทางประจุบวกซึ่งมีความแข็งแรงมากกว่าแรงยึดเหนี่ยวบนผิวคาร์บอน [9] ดังนั้นจึงมีความแตกต่างกับถ่านกัมมันต์ที่ทำจากพืชซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือคาร์บอนเท่านั้น คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของถ่านกระดูกเกรดการค้าชื่อ Brimax 216 แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติทางเคมีและทางกายภาพของถ่านกระดูกเกรดการค้าชื่อ Brimax 216 [10]

Chemical composites		Physical properties	
Items	Limits	Items	Limits
Calcium carbonate	7-9 wt.%	Bulk density(dry)	640 kg m ⁻³
Calcium sulfate	0.1-0.2 wt.%	Carbon surface area	50 m ² g ⁻¹
Carbon content	9-11 wt.%	Total surface area	100 m ² g ⁻¹
CaHAP	70-76 wt.%	Pore volume	0.225 cm ³ g ⁻¹
Iron-as Fe2O3	< 0.3 wt.%	Moisture	5 wt.%

จากการมีองค์ประกอบหลักทั้ง 2 ส่วน จึงทำให้ถ่านกระดูกสามารถดูดซับ ได้ทั้งแอนไอออนและแคตไอออนในสารละลาย นอกจากนี้เมื่อทำการดูดซับด้วยถ่านกระดูกแล้วตัวที่ถูกดูดซับจะถูกยึดติดทางเคมีภายใน โครงร่างผลึกแคลเซียมไฮดรอกซีอะพาไทต์ ซึ่งเรียกปรากฏการณ์นี้ว่าเคมีซอร์บชัน(Chemisorption) และไม่พบคุณสมบัตินี้ในสารที่มีองค์ประกอบคาร์บอนทั่วไป ดังนั้นจึงเป็นปัจจัยที่ทำให้ถ่านกระดูกมีความสามารถในการดูดซับ โลหะหนักได้หลายชนิดและยังสามารถใช้ในการดูดซับสี กลิ่น รส ตะกั่ว โลหะหนักชนิดอื่น และสารอินทรีย์ในน้ำได้อีกด้วย ปัจจุบันมีการนำถ่านกระดูกมาใช้งานดังต่อไปนี้ คือ

1. ใช้เป็นสารดูดติดผิวในอุตสาหกรรมอาหาร โดยเฉพาะอย่างยิ่งอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาล นำถ่านกระดูกมาใช้ในการฟอกสีของน้ำตาล
2. ใช้ในการกรองน้ำเพื่อลดปริมาณของโลหะหนัก และแอนไอออนจำพวกคลอไรด์ โบรไมด์ และฟลูออไรด์ รวมทั้งยาฆ่าแมลง
3. ใช้เป็นสารดูดติดผิวสำหรับการกรองน้ำที่ใช้หมุนเวียนในสระว่ายน้ำ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.8.1 งานวิจัยต่างประเทศ

Ayll'on และคณะ [11] ศึกษาการไพโรไลซิสอินทรีย์สารที่เป็นเนื้อสัตว์และกระดูกสัตว์ป่นในเครื่องปฏิกรณ์แบบเบดนิ่ง(Fixed bed reactor) เพื่อวิเคราะห์การกระจายตัวของอุณหภูมิและอัตราการให้ความร้อนกับผลิตภัณฑ์ และศึกษาองค์ประกอบและลักษณะของถ่านที่ได้ โดยแบ่งการทดลองเป็น 2 กระบวนการ ซึ่งให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 300 และ 900 องศาเซลเซียส และมีอัตราการให้ความร้อน 2 ถึง 14 องศาเซลเซียสต่ออนาที พบว่า อุณหภูมิการให้ความร้อนแก่เบดมีผลต่อองค์ประกอบและลักษณะของรูพรุนมากกว่าอัตราการให้ความร้อน และจากการวิเคราะห์การกระจายตัวของผลิตภัณฑ์พบว่าองค์ประกอบหลักของเบดคือ Char และ Tar ที่อุณหภูมิและอัตราการให้ความร้อนต่างๆ ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่จะเกิดการสลายตัวก่อนถึงช่วง 500 องศาเซลเซียส และหากเกิน 750 องศาเซลเซียส จะไม่มีการสลายตัวอีก Char ที่ได้จะมีพื้นที่ผิวจำเพาะน้อยกว่า 45 ตารางเมตรต่อกรัม

Choy และคณะ [12] ศึกษาอัตราการดูดซับไอออนของโลหะแคดเมียม ทองแดงและสังกะสีด้วยถ่านกระดูก โดยเปรียบเทียบระหว่างน้ำหนักของถ่านกระดูกที่ใช้กับความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายที่มีไอออนของโลหะผสมอยู่ ซึ่งความสามารถในการดูดซับโลหะทั้ง 3 ชนิดนี้ด้วยถ่านกระดูก คือ 0.477 0.709 และ 0.505 มิลลิโมลต่อกรัม สำหรับโลหะแคดเมียม ทองแดงและสังกะสีตามลำดับ ซึ่งดีกว่าการใช้สารดูดซับชนิดอื่นๆ จากการทดลองของ Crank พบว่ากราฟแสดงความเข้มข้นลดลงเมื่อเทียบกับเวลา โดยใช้สมการการแพร่ผ่านพื้นผิวของ Crank จากการทดลองดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่าแบบจำลองการแพร่ของ Crank นั้นดีกว่าแบบเดิมที่ใช้การแพร่ผ่านรูพรุน และสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่านพื้นผิวแปรผันตามความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนโลหะ โดยความสามารถในการแพร่ผ่านพื้นผิวสำหรับโลหะแคดเมียม ทองแดง และสังกะสีอยู่ในช่วง 3.00×10^{-9} ถึง 8.80×10^{-9} ตารางเซนติเมตรต่อวินาที 2.11×10^{-9} ถึง 5.4×10^{-9} ตารางเซนติเมตรต่อวินาที และ 3.10×10^{-9} ถึง 8.49×10^{-9} ตารางเซนติเมตรต่อวินาที และค่าความเข้มข้นของสารละลายที่มีไอออนของโลหะผสมอยู่คือ 2.10 ถึง 5.40 มิลลิโมลต่อลูกบาศก์เดซิเมตร

2.8.2 งานวิจัยในประเทศ

จักรพงษ์ แสนชัย [13] ศึกษาประสิทธิภาพของถ่านกระดูกกระตุ้นโดยซิงก์คลอไรด์เพื่อการกำจัดโลหะหนัก 2 ชนิดจากน้ำเสียสังเคราะห์ ได้แก่ ตะกั่ว และแคดเมียม โดยศึกษาลักษณะพื้นผิวและ โครงสร้างของถ่านกระดูก ซึ่งถูกกระตุ้นโดยซิงก์คลอไรด์ต่อกระดูกบดในอัตราส่วน 1:1 1.5:1 และ 2:1 เพื่อหาอัตราส่วนที่ดีที่สุด แล้วใช้อัตราส่วนนี้ในการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักแบบเบดซ์ต่อไป จากผลการวิเคราะห์พบว่าถ่านกระดูกซึ่งถูกกระตุ้นด้วยอัตราส่วน 1:1

ให้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรจำเพาะของโพรง และปริมาณผลิตภัณฑ์มากที่สุด สำหรับ แคลเมียมพบว่าภายหลังการดูดซับไม่มีการเปลี่ยนแปลงของชนิดผลึก จากผลการศึกษารูปได้ว่า กลไกการดูดซับตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ใช้กลไกการละลายและกลไกการตกตะกอน และการดูดซับแคลเมียมใช้กลไกการดูดติดผิว จากการศึกษาแบบแบตช์พบว่าถ่านกระดูกสามารถกำจัดตะกั่ว ได้ดีกว่าแคลเมียมมาก สำหรับการทดสอบกับน้ำเสียสังเคราะห์หัตถ์ตะกั่ว 50 มิลลิกรัมต่อลิตร และน้ำเสียสังเคราะห์แคลเมียม 10 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าพีเอชที่เหมาะสมคือ 4 และ 7 ตามลำดับ ซึ่งจากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า ถ่านกระดูกมีความสามารถในการกำจัดตะกั่วโดยกลไกการละลาย และกลไกการตกตะกอนมากที่สุด 1,002 มิลลิกรัมตะกั่ว/กรัมถ่านกระดูก หรือร้อยละ 68.38 และความสามารถในการกำจัดแคลเมียมโดยกลไกการดูดติดผิวของถ่านกระดูกมากที่สุด 22.06 มิลลิกรัมแคลเมียม/กรัมถ่านกระดูกหรือร้อยละ 24.70



บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัยและผลการวิจัย

3.1 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

2. ศึกษาขั้นตอนการเตรียมถ่านกัมมันต์ให้มีคุณภาพพร้อมทั้งการประยุกต์การใช้งานของถ่านกัมมันต์ในอุตสาหกรรม
3. ศึกษาลักษณะทางกายภาพ และโครงสร้างของถ่านกระดูกที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์
4. ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักตะกั่ว ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ถ่านกระดูกที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์
5. ศึกษาผลของพีเอชในน้ำเสียที่มีต่อประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักโดยใช้ถ่านกระดูกที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้งานจริง
6. เพื่อนำเอาวัตถุดิบที่เหลือใช้มาใช้เกิดประโยชน์สูงสุด

3.2 ขอบเขตการวิจัย

1. เตรียมถ่านกระดูกเพื่อใช้เป็นสารในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย โดยใช้สารละลายซิงค์คลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก โดยมีอัตราส่วนของซิงค์คลอไรด์ต่อกระดูกบดเป็น 1:1 1.5:1 2:1 ตามลำดับ ซึ่งถ่านกระดูกที่ใช้ในการทดลองจะผ่านการบดและร่อนให้ผ่านตะแกรงเบอร์ 325
2. ศึกษาแนวโน้มของพื้นที่ผิวจำเพาะ BET ของถ่านกระดูก ภายหลังจากเตรียมด้วยสารละลายที่เหมาะสมในอัตราส่วนต่างๆ
3. ศึกษาการกำจัดโลหะหนักตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยการทดลองแบบแบตช์
4. ปรับเปลี่ยนพีเอชน้ำเสียเพื่อศึกษาผลที่มีต่อประสิทธิภาพและความสามารถในการจัดโลหะหนักโดยการทดลองแบบแบตช์ น้ำเสียตะกั่วที่มีพีเอชตั้งแต่ 3 ถึง 7
5. ศึกษา Adsorption Isotherm ของการกำจัดตะกั่ว โดยการทดลองแบบแบตช์
6. วิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ใช้วิธีไทเทรต

3.3 การเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์โลหะหนักตะกั่ว

ชั่งตะกั่วไนเตรต ($Pb(NO_3)_2$) 50 มิลลิกรัม ละลายด้วยน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร จะได้สารละลายตะกั่วเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร

3.4 การไทเทรต [14]

การหาปริมาณตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์นั้นจะใช้วิธีไทเทรตกับสารละลายอิตีทีเอ วิธีนี้เรียกว่าการไทเทรตโดยอาศัยการทำให้เกิดสารเชิงซ้อน (Complexometric titration) สารเชิงซ้อนเกิดจาก อีออนของโลหะทำปฏิกิริยากับสารที่มีคู่อิเล็กตรอนโดดเดี่ยวซึ่งเรียกว่าลิแกนด์ ในโมเลกุลของสารเชิงซ้อนเหล่านี้จะมีอะตอมของไนโตรเจน ออกซิเจน และกำมะถัน เช่น แอมโมเนีย (NH_3) ที่เกิดเป็นพันธะกับอีออนของโลหะ จำนวนลิแกนด์ที่ล้อมรอบอีออนเรียกว่าเลขโคออดิเนชัน (Coordination number) ในการไทเทรตโดยอาศัยการทำให้เกิดสารเชิงซ้อนจะไม่ใช้แอมโมเนีย เนื่องจากเห็นจุดยุติได้ยาก เพราะเกิดสารเชิงซ้อนได้หลายชั้น แต่ละชั้นมีค่าคงที่ในการเกิดเป็นสารเชิงซ้อนน้อยและไม่ต่างกันมากนัก การใช้สารที่มีหมู่อิเล็กตรอนหลายหมู่ภายในโมเลกุลในการไทเทรตจะได้สารเชิงซ้อนที่ดีกว่า เช่น กรดอะมิโนคาร์บอกซิลิกที่มีหมู่ไนโตรเจนและคาร์บอกซิลิกเป็นลิแกนด์ เรียกสารนี้ว่า มัลติเดนเตตลิแกนด์ (Multidentate ligand) ได้แก่ ไบเดนเตตลิแกนด์ (Bidentate ligand) เช่น เอทิลีนไดเอมีน ($H_2NCH_2CH_2NH_2$) สามารถเกิดเป็นสารเชิงซ้อนกับ Cu^{2+} ได้ $Cu(H_2NCH_2CH_2NH_2)_2^{2+}$

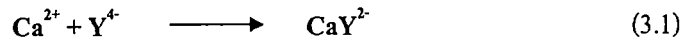
สารอินทรีย์ที่มีหมู่ให้อิเล็กตรอนหลายๆหมู่ภายในโมเลกุลเรียกสารนี้ว่าคีเลติงเอเจนต์ (Chelating agent) ซึ่งทำหน้าที่เป็นลิแกนด์ เมื่อทำปฏิกิริยากับอีออนของโลหะแล้วได้คีเลต (Chelate) ที่มีลักษณะเป็นก้ามปูล้อมรอบอีออน คีเลตที่นิยมใช้ได้แก่ เอทิลีนไดเอมีนเทระอะซิดิกแอซิด (Ethylenediaminetetraacetic acid, EDTA) ซึ่งมีโครงสร้างดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 โครงสร้างของเอทิลีนไดเอมีนเทระอะซิดิกแอซิด

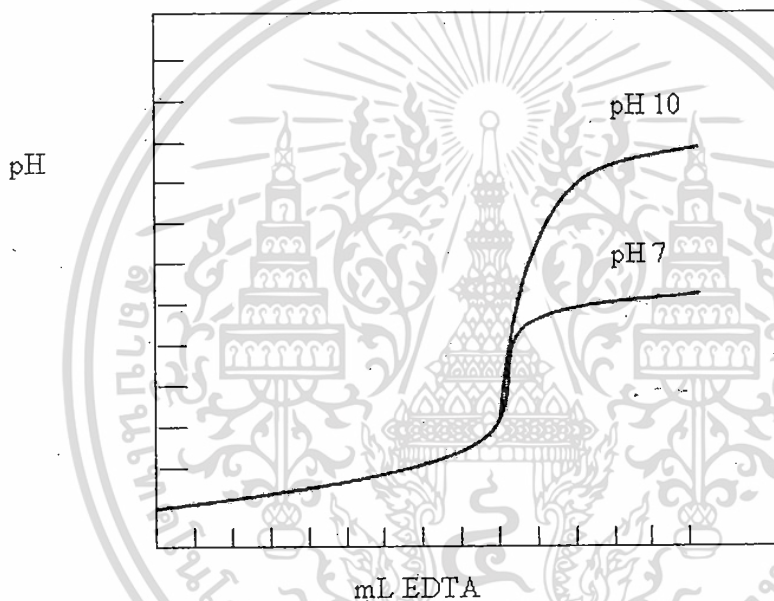
เขียนย่อเป็น H_4Y โดยไนโตรเจนสองหมู่และคาร์บอกซิลสี่หมู่สามารถเกิดเป็นสารเชิงซ้อนกับอีออนได้ ถ้า Ca^{2+} เกิดสารเชิงซ้อนกับ H_4Y โดยอัตราส่วนของอีออนต่ออิตีทีเอเป็น 1:1 ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเขียนได้ดังนี้

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



เมื่อ K_f คือ ค่าคงที่สมดุลของการเกิดสารเชิงซ้อน

การแตกตัวของ H_4Y ขึ้นอยู่กับพีเอชของสารละลาย ซึ่งมีผลต่อความเสถียรของสารเชิงซ้อนระหว่าง H_4Y กับไอออนแต่ละชนิด บางชนิดมีความเสถียรในสารละลายที่เป็นกรด บางชนิดมีความเสถียรในสารละลายที่เป็นเบส เช่น สารเชิงซ้อนของ Ca^{2+} มีความเสถียรมากที่พีเอช 10 เมื่อไทเทรต Ca^{2+} ด้วยสารละลายอีดีทีเอ จะเห็นช่วงการเปลี่ยนแปลงช่วงจุดยุติที่กว้าง แต่ถ้าวไทเทรตที่พีเอช 7 ช่วงการเปลี่ยนแปลงที่จุดยุติจะแคบลงจะเห็นจุดยุติไม่ชัดเจน ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.2 เคอร์ฟของการไทเทรต ที่พีเอช 7 และที่พีเอช 10

3.4.1 ประเภทของการไทเทรตโดยอาศัยการเกิดสารเชิงซ้อน

1) การไทเทรตโดยตรง (Direct titration)

ไอออนของโลหะจะถูกไทเทรตด้วยสารละลายอีดีทีเอ โดยจะต้องปรับค่าพีเอชของสารละลายไอออนของโลหะเพื่อให้ได้สารเชิงซ้อนที่เสถียรที่สุด

2) การไทเทรตแบบย้อนกลับ (Back titration)

วิธีนี้ใช้สำหรับการไทเทรตไอออนที่มีสมบัติไม่เหมาะกับการไทเทรตโดยตรงเนื่องจาก

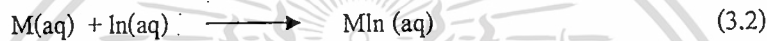
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- อีออนของโลหะเกิดเป็นสารเชิงซ้อนที่เฉื่อย
- ไม่มีอินดิเคเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการไทเทรตอีออนของโลหะ

การไทเทรตแบบย้อนกลับทำได้โดยการเติมสารละลายอีดีทีเอปริมาณมากเกินไปที่ทราบความเข้มข้น และปริมาตรที่แน่นอนลงในสารละลายอีออนของโลหะ แล้วควบคุมพีเอชให้เหมาะสมด้วยการเติมบัฟเฟอร์ลงไป อีดีทีเอจะเกิดปฏิกิริยากับอีออนของโลหะ และอีดีทีเอที่เหลือจากปฏิกิริยา หาได้ด้วยการไทเทรตกับสารละลายมาตรฐานของอีออนของโลหะอื่น ซึ่งต้องเป็นอีออนที่ไม่สามารถแทนที่อีออนในสารเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นครั้งแรกได้

3.5 อินดิเคเตอร์ที่ใช้ในการไทเทรตด้วยอีดีทีเอ [14]

โดยทั่วไปอินดิเคเตอร์ที่ใช้ในการบอกจุดยุติของการไทเทรตด้วยอีดีทีเอ เป็นสารอินทรีย์ที่มีสี ซึ่งสามารถเกิดเป็นสารเชิงซ้อนที่มีสีกับอีออนของโลหะได้ดังปฏิกิริยา



อินดิเคเตอร์ที่ใช้ในการไทเทรตแสดงดังในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 สมบัติของอินดิเคเตอร์ [14]

อินดิเคเตอร์	สีอินดิเคเตอร์	สีของสารเชิงซ้อนของโลหะ
มูเรกไซด์ (Murexide) < พีเอช 9 (H_4In^-) พีเอช 9-11 (H_3In^{2-}) >พีเอช 11 (H_2In^{3-})	แดง-ม่วง ม่วง น้ำเงิน	- สีม (Cu^{2+}) - เหลือง (Ni^{2+} และ Co^{2+}) - แดง (Ca^{2+})
โซโลโครมแบลค(Solochromeblack) หรือ เอริโอโครมแบลค ที (Eriochrome black T) < พีเอช 5 (H_2In^-) พีเอช 7-11 (HIn^{2-}) >พีเอช 11.5 (In^{3-})	แดง น้ำเงิน ส้ม	ช่วง พีเอช 7-11 สีเปลี่ยนจาก น้ำเงิน-แดง(Mg, Mn, Zn, Cd, Hg, Pb, Cu, Al, Fe, Ti, Co, Ni และ Pt)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ 3.1(ต่อ) สมบัติของอินดิเคเตอร์ [14]

อินดิเคเตอร์	สีอินดิเคเตอร์	สีของสารเชิงซ้อนของโลหะ
แคลมาไกท์(Calmagite) < พีเอช 5 (H_2In) พีเอช 7-9 (HIn^{2-}) >พีเอช 11.4 (In^{3-})	แดง น้ำเงิน แดง-ส้ม	การเปลี่ยนสีของโลหะบางชนิดจะเหมือนกับโซโลโครมแบบลค แต่จะให้สีที่ชัดเจนกว่า
ไพโรแคทคอลลิวโอเลต (Pyrocatechol violet) < พีเอช 9 (H_4In) พีเอช 2-6 (H_3In) พีเอช 7 (H_2In^{2-}) >พีเอช 10 (In^{4-})	แดง เหลือง ม่วง น้ำเงิน	ช่วง พีเอช 2-6สีเปลี่ยนจากเหลือง-น้ำเงิน (Bi และTh) ช่วง พีเอช 7 สีเปลี่ยนจากม่วง-น้ำเงิน ($Cu^{2+}, Zn^{2+}, Cd^{2+}, Ni^{2+}$ และ Co^{2+})

3.6 การเตรียมสารละลายสำหรับการไทเทรต

3.6.1 สารละลายอิดีทีเอเข้มข้น 0.1M

ละลาย $Na_2H_2Y \cdot 2H_2O$ จำนวน 37.2 กรัม ด้วยน้ำกลั่น 1 ลิตร ในบีกเกอร์ขนาด 1 ลิตร เก็บสารละลายในขวดสีชาที่มีฝาปิดมิดชิดเพื่อป้องกันแสงสว่าง

3.6.2 สารละลาย อิดีทีเอ เข้มข้น 0.01 M

เตรียมสารละลายอิดีทีเอเข้มข้น 0.1 M มาจำนวน 25 ลูกบาศก์เซนติเมตร ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 500 ลูกบาศก์เซนติเมตร เติมแมกนีเซียมซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) (หรือแมกนีเซียมคลอไรด์) 0.03 กรัม คนให้ของแข็งละลายจนหมด แล้วเติมน้ำกลั่นลงไปจนสารละลายมีปริมาตร 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร คนสารละลายให้เข้ากัน แล้วหาความเข้มข้นที่แน่นอนของอิดีทีเอ

3.6.3 สารละลายมาตรฐานแคลเซียมคาร์บอเนต เข้มข้น 0.01 M

- 1) อบแคลเซียมคาร์บอเนตจำนวน 2 กรัม ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียสนาน 2 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในเคซิเคเตอร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้าไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- 2) ชั่งแคลเซียมคาร์บอเนตให้ได้น้ำหนักที่แน่นอนและใกล้เคียง 0.1 กรัม โดยวิธีการตักออกใส่บีกเกอร์ขนาด 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร ถ่ายใส่ขวดวัดปริมาตรขนาด 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยใช้กรวยกรอง
- 3) ล้างแคลเซียมคาร์บอเนตในขวดวัดปริมาตรด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 0.5 M เล็กน้อย เขย่าให้ของแข็งละลายจนหมด ปรับปริมาตรให้ถึงขีดบอกริมาตรด้วยกรดไฮโดรคลอริกเขย่าให้สารละลายเข้ากัน
- 4) กำหนดหาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายแคลเซียมคาร์บอเนต

3.6.4 การวิเคราะห์หาความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายอีดีทีเอ

- 1) ปิเปตสารละลายมาตรฐานแคลเซียมคาร์บอเนต จำนวน 25 ลูกบาศก์เซนติเมตร ใส่ในขวดรูปกรวยขนาด 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร
- 2) เติมสารละลายบัฟเฟอร์ ฟือซ 10 ลงไป 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร โดยใช้กระบอกตวง และหยดสารละลายอินดิเคเตอร์เอริโอโครมแบลคทีลงไป 2 ถึง 3 หยด เขย่าสารละลายให้เข้ากัน
- 3) ไทเทรตด้วยสารละลายอีดีทีเอเข้มข้น 0.01 M จนสารละลายเปลี่ยนจากสีองุ่นแดง(wine red) เป็นสีน้ำเงิน(blue)
- 5) ทำการทดลองซ้ำ 1 ครั้ง กำหนดหาความเข้มข้นเฉลี่ยที่ถูกต้องของสารละลายอีดีทีเอ

3.6.5 สารละลายบัฟเฟอร์ฟือซ 10

ละลายแอมโมเนียมคลอไรด์ 6.8 กรัม ในสารละลายแอมโมเนีย จำนวน 57 ลูกบาศก์เซนติเมตร ในบีกเกอร์ขนาด 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วเจือจางด้วยน้ำกลั่นจนมีปริมาตรเป็น 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร

3.6.6 สารละลายอินดิเคเตอร์เอริโอโครมแบลคที

ละลายเอริโอโครมแบลคทีเกรดวิเคราะห์ 0.15 กรัม ในไทรเอทานอลามีน 15 ลูกบาศก์เซนติเมตร เติมเอทานอล 15 ลูกบาศก์เซนติเมตร เก็บสารละลายในขวดสีชาที่มีฝาปิดมิดชิด

3.7 การวิเคราะห์หาปริมาณของตะกั่ว

1. นำน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร จำนวน 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร ใส่ลงในขวดลูกผสมพู่ขนาด 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร
2. เติมถ่านกระดูกที่ต้องการลงในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมไว้
3. ใช้จุกยางปิดขวดให้แน่นก่อนนำไปเขย่า
4. นำขวดสารตัวอย่างที่ได้ไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าด้วยความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที

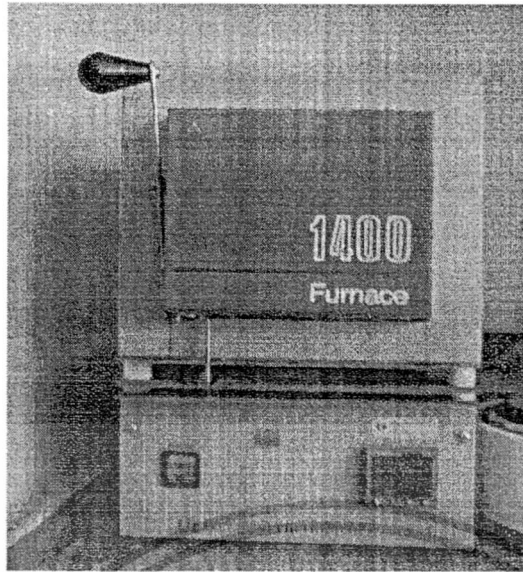
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

5. บีเปิดสารตัวอย่างมา 10 ลูกบาศก์เซนติเมตรที่เวลาต่างๆ เพื่อไทเทรตหาปริมาณตะกั่ว
6. บีเปิดสารละลายบัฟเฟอร์พีเอช 10 จำนวน 5 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วในการไทเทรตหยดสารละลายอินดิเคเตอร์เอริโอโครมเบลคที่ 2 ถึง 3 หยด ลงในสารตัวอย่างเขย่าสารละลายให้เข้ากัน
7. ไทเทรตสารละลายที่ได้กับสารละลายมาตรฐานอีดีทีเอเข้มข้น 0.01 M ที่ทราบความเข้มข้นที่แน่นอนเพื่อหาจุดยุติ
8. ทำการทดลองซ้ำ แล้วหาค่าเฉลี่ย

3.8 เครื่องมือ อุปกรณ์ และวัสดุ

1. เครื่องเขย่า
2. เครื่องมืออบวัสดุ
3. โกร่งบดยา
4. เครื่องชั่งน้ำหนักไฟฟ้าแบบละเอียด
5. BET Surface area analyzer
6. ตะแกรงร่อนคัดขนาดเมช 20 40 60 100 140 200 และ 325 (U.S. ASTM)
7. ชุดเครื่องกรองสุญญากาศ
8. เตาเผาอุณหภูมิสูง
9. เตาอบวัสดุ
10. โถดูดความชื้น
11. กระจกยลิตมีส
12. กระจกกรอง
13. กระจกหมูนึ่ง

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

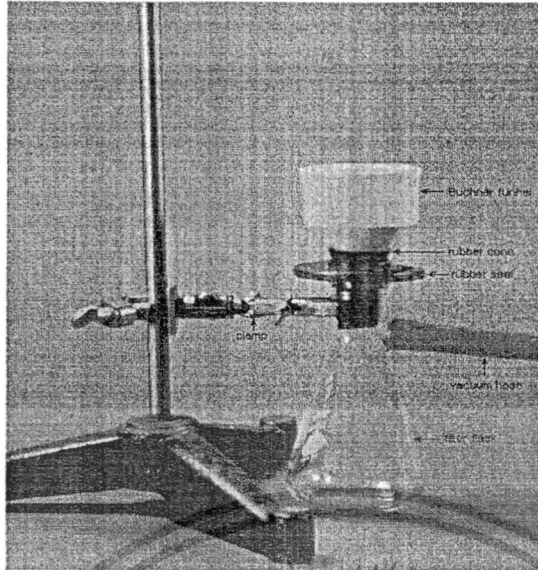


รูปที่ 3.3 เตาเผาอุณหภูมิสูง

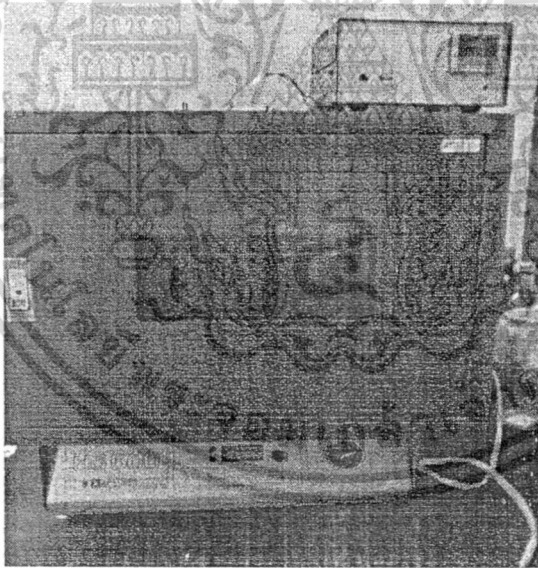


รูปที่ 3.4 เตาอบวัสดุ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

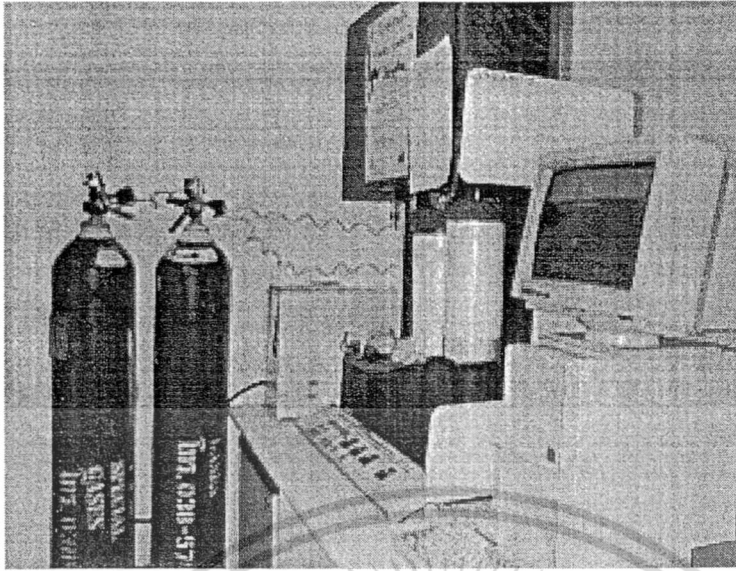


รูปที่ 3.5 ชุดเครื่องกรองสุญญากาศ



รูปที่ 3.6 เครื่องเขย่า

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

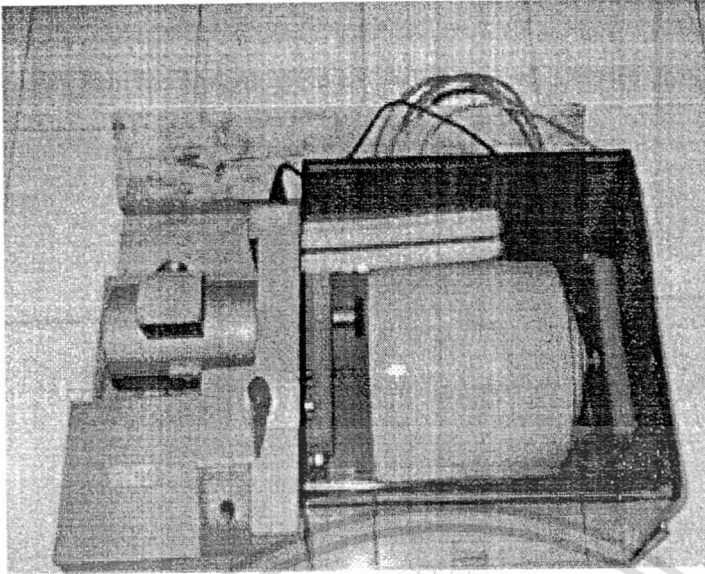


รูปที่ 3.7 BET Surface area analyzer



รูปที่ 3.8 ตะแกรงร่อนคัดขนาด

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.9 เครื่องมือบดวัสดุ



รูปที่ 3.10 โกร่งบดยา

3.9 แผนการทดลอง

การศึกษาถึงประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ถ่านกระดูกซึ่ง
กระตุ้นด้วยสารละลายซิงก์คลอไรด์นี้แบ่งการทดลองออกเป็น 3 หัวข้อ คือ

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- การทดลองที่ 1 การศึกษาอัตราส่วนของถ่านกระดูกต่อซิงค์กลอไรด์ในสภาวะที่กำหนด
- การทดลองที่ 2 การศึกษาพีเอชที่เหมาะสม โดยทำการทดลองแบบแบดซ์
- การทดลองที่ 3 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับในการกำจัดโลหะหนักโดยทำการทดลองแบบแบดซ์

3.10 การดำเนินการทดลอง

3.10.1 การศึกษาอัตราส่วนของถ่านกระดูกต่อซิงค์กลอไรด์ในสภาวะที่กำหนด

มีขั้นตอนและวิธีทำ สรุปได้ดังรูปที่ 3.11 และมีรายละเอียดดังนี้

- 1) นำวัสดุดิบ (กระดูกหนึ่ง) ไปเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อให้สารที่ระเหยได้และเพื่อให้ทำการบดได้ง่ายขึ้น
- 2) บดและคัดให้มีขนาดระหว่างเมช 60-100
- 3) แช่กระดูกบดในสารกระตุ้นที่เป็นสารละลายซิงค์กลอไรด์เข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก โดยมีอัตราส่วนของสารละลายต่อกระดูกบดเป็น 1:1 1.5:1 และ 2:1 ตามลำดับ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง
- 4) นำไปอบไล่ไอน้ำที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส จนแห้ง
- 5) เผาในเตาเผาอับอากาศที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทั้งให้เย็นในเตา
- 6) นำออกมาล้างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งน้ำที่ล้างได้เป็นกลาง โดยการทดสอบด้วยกระดาษลิตมัส
- 7) อบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส จนแห้งแล้วเก็บถ่านกระดูกไว้ในโถดูดความชื้น
- 8) บดให้มีขนาดเล็กกว่า 45 ไมโครเมตร หรือเมช 325
- 9) วิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ BET ปริมาตรจำเพาะของโพรง และขนาดของโพรง
- 10) เลือกสภาวะที่ดีที่สุดจากพื้นที่ผิวจำเพาะ BET และปริมาตรจำเพาะของโพรง
- 11) เลือกสภาวะที่เหมาะสมจากการเปรียบเทียบ

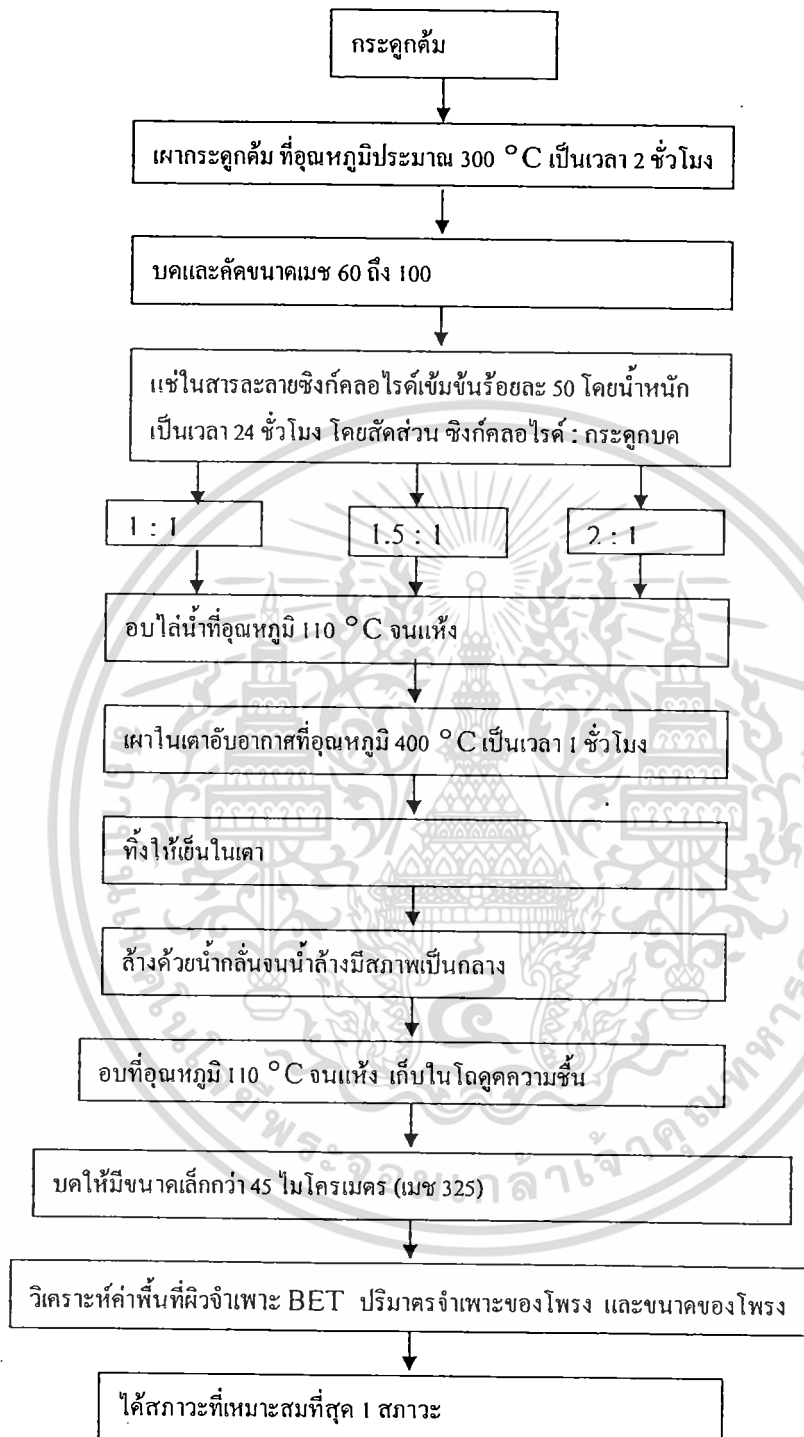
3.10.2 การศึกษาพีเอชที่เหมาะสม โดยทำการทดลองแบบแบดซ์

- 1) การหาเวลาที่เหมาะสมสำหรับศึกษาพีเอชที่เหมาะสมของสารละลายตะกั่ว โดยทำการทดลองแบบแบดซ์ โดยมีขั้นตอนและวิธีทำ สรุปได้ดังรูปที่ 3.12 และมีรายละเอียดวิธีทำดังนี้

ชั่งถ่านกระดูกที่เตรียมได้ปริมาณ 0.5 กรัมต่อลิตรน้ำเสียสังเคราะห์ ใส่ในน้ำเสียสังเคราะห์ ตะกั่วความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่พีเอช 5 ปริมาตร 250 มิลลิลิตร ในขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 มิลลิลิตร นำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าด้วยความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที จากนั้นเก็บตัวอย่างที่เวลา

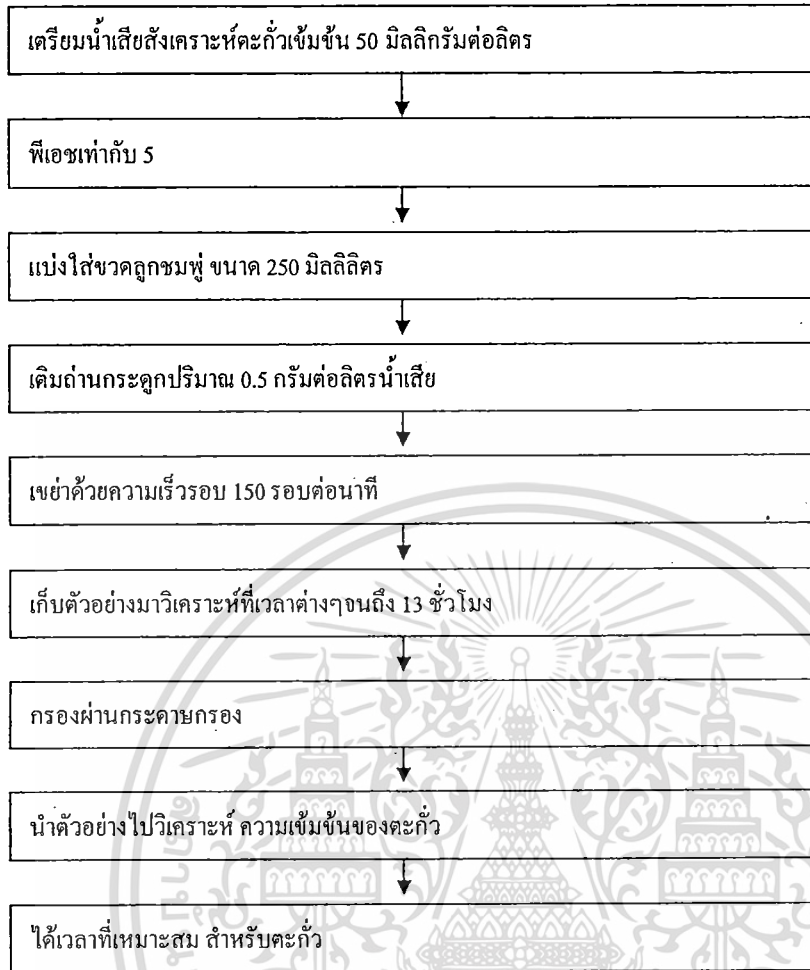
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ต่างๆจนถึง 13 ชั่วโมง แล้วนำน้ำตัวอย่างไปกรองผ่านกระดาษกรอง และนำน้ำจากการกรองที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วด้วยวิธีการไทเทรต



รูปที่ 3.11 การศึกษาอัตราส่วนของถ่านกระดุกต่อซิงค์คลอไรด์ในสภาวะที่กำหนด

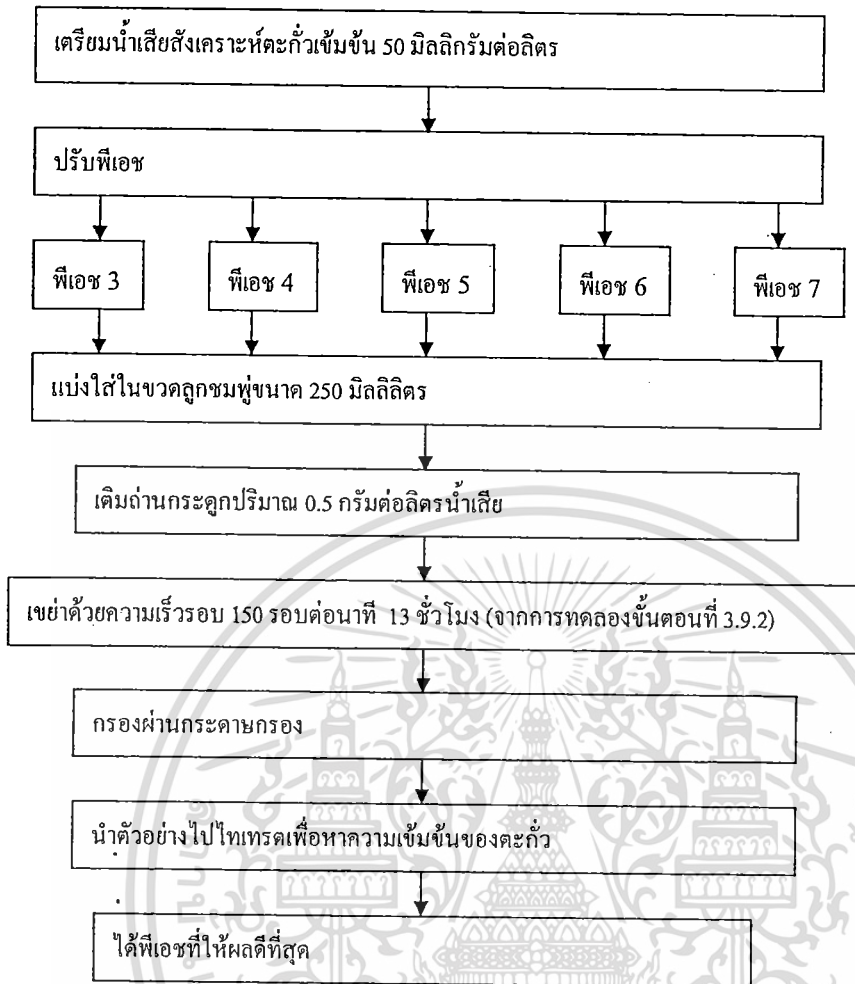
เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.12 การหาเวลาที่เหมาะสมสำหรับศึกษาพีเอช โดยทำการทดลองแบบแบดซ์

2) การหาพีเอชที่เหมาะสมสำหรับสารละลายตะกั่ว โดยทำการทดลองแบบแบดซ์ มีขั้นตอนและวิธีทำสรุปได้ดังรูปที่ 3.13 และมีรายละเอียดวิธีทำดังนี้

ซึ่งถ่านกระดูกที่สภาวะการเตรียมที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง ขั้นตอนที่ 3.10.1 เติมน้ำเสี้ยงเคราะห์ตะกั่วที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขวดรูปชมพู่เขย่าสารขนาด 250 มิลลิตร ปรับพีเอชให้เป็น 3 4 5 6 และ 7 แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าด้วยความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที ตามเวลาที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองขั้นที่ 3.10.2 ข้อ 1 จากนั้นนำไปกรองด้วยกระดาษกรอง แล้วนำน้ำจากการกรองที่ได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วด้วยวิธีการไทเทรต



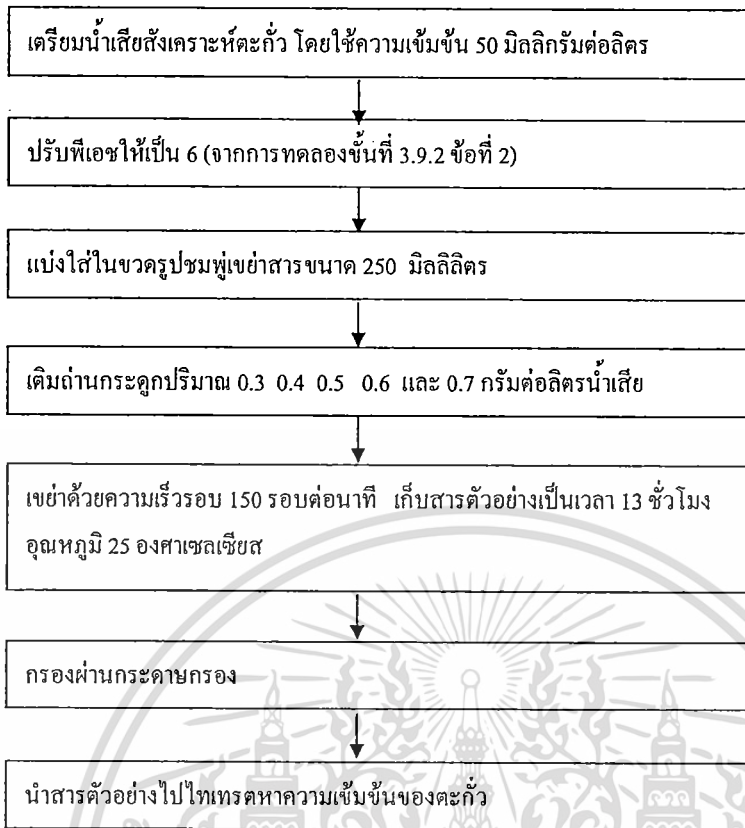
รูปที่ 3.13 การหาพีเอชที่เหมาะสมโดยการทดลองแบบเบตซ์

3.10.3 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วโดยทำการทดลองแบบเบตซ์

มีขั้นตอนและวิธี สรุปได้ดังรูปที่ 3.14 และมีรายละเอียดวิธีทำดังนี้

ซึ่งถ่านกระดูกที่สภาวะการเตรียมที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองขั้นที่ 3.10.1 ปริมาณ 0.3 0.4 0.5 0.6 และ 0.7 กรัมต่อลิตรน้ำเสียสังเคราะห์ เติมน้ำเสียสังเคราะห์ค่าเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชให้เป็น 6 ซึ่งให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุดที่ได้จากการทดลองขั้นที่ 3.10.2 ข้อ 2 จากนั้นนำไปเขย่าด้วยความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที โดยควบคุมอุณหภูมิเท่ากับ 25 องศาเซลเซียสตลอดการทดลอง เก็บตัวอย่างเป็นเวลา 13 ชั่วโมง เมื่อครบตามเวลานำไปกรองด้วยกระดาษกรอง แล้วนำน้ำที่ได้จากการกรองไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วด้วยวิธีไทเทรต

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้



รูปที่ 3.14 การหาไอโซเทอมการดูดซับตะกั่ว โดยทำการทดลองแบบเบตซ์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

4.1 การศึกษาสภาวะในการเตรียมถ่านกระดูกที่กระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์

โครงการนี้ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้กระดูกหมูเป็นวัตถุดิบ นำไปเผาเป็นเวลา 2 ชั่วโมง จนกระทั่งสารจำพวก volatile matter ระเหยออกไป สังเกตได้ว่าเมื่อเผาไปได้ระยะหนึ่งจะไม่มีควันออกมาจากกระดูก และยังสามารถบดได้ง่ายขึ้น บดและคัดขนาดให้มีขนาดระหว่างเมช 60 ถึง 100 แล้วใช้ในสารละลายซิงค์คลอไรด์ เข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก โดยมีสัดส่วนซิงค์คลอไรด์ต่อกระดูกบดเป็น 1:1 1.5:1 และ 2:1 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง อบไล่ไอน้ำที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส จนแห้ง ใช้เวลาประมาณ 48 ชั่วโมง จากนั้นนำกระดูกแต่ละสภาวะใส่ครุชีเบิล แล้วนำไปเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในเตา นำมาล้างด้วยน้ำกลั่นจนน้ำที่ล้างได้มีพีเอชเป็นกลางทดสอบด้วยกระดาษลิตมัส จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส ประมาณ 48 ชั่วโมงเพื่อให้ถ่านแห้ง บดให้มีขนาดเล็กกว่า 45 ไมโครเมตร หรือเมช 325 เพื่อนำไปใช้ในการทดลองต่อไป

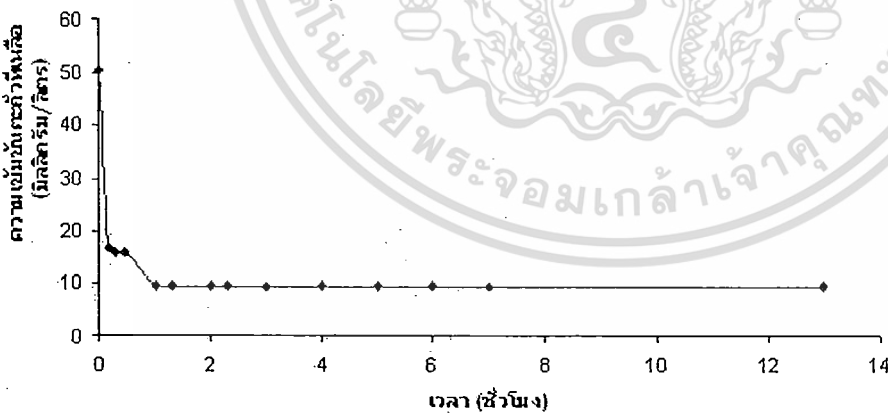
เมื่อนำถ่านทั้ง 3 สภาวะข้างต้นไปวิเคราะห์โดย BET Surface Area Analyzer ผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 4.1 พบว่ากระดูกที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์นั้น ซิงค์คลอไรด์สามารถทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรโพรงเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มสัดส่วนซิงค์คลอไรด์ต่อกระดูกบดมากขึ้นจะทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะและปริมาตรโพรงลดลง การลดลงของทั้งสองค่านี้มีความสำคัญต่อกลไกการกำจัดมาก ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าซิงค์คลอไรด์เป็นเกลือที่มีจุดเดือดสูงถึง 756 องศาเซลเซียส จึงมีความคงทนต่อการสลายตัวสูง เมื่อซิงค์คลอไรด์หลอมเหลวที่หลอมเหลวที่อุณหภูมิ 275 องศาเซลเซียส ซิงค์คลอไรด์จะแทรกไปตามรูพรุนหรือช่องว่างที่เกิดขึ้น ดังนั้นเมื่อปริมาณซิงค์คลอไรด์มากเกินไปอาจทำให้สิ่งเจือปนในกระดูกไม่สามารถที่จะหลุดไปได้อย่างสะดวก แต่ทำให้เกิดการติดค้างอยู่ในรูพรุนได้มากขึ้น จะเห็นว่าสัดส่วนซิงค์คลอไรด์ต่อกระดูกบด 1:1 ให้ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะและค่าปริมาตรจำเพาะของโพรงมากที่สุด สัดส่วนขนาดโพรงถึงแม้จะมีแนวโน้มลดลงเช่นกันแต่ก็ยังมีความใหญ่เมื่อเทียบกับขนาดของไอออนของโลหะหนัก

ตารางที่ 4.1 ผลการวิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (BET) ปริมาตรจำเพาะของโพรง และขนาดโพรง ที่สภาวะการเตรียมสัปดาห์ของซิงค์คลอไรด์ต่อกระดูกบดที่ต่างกัน

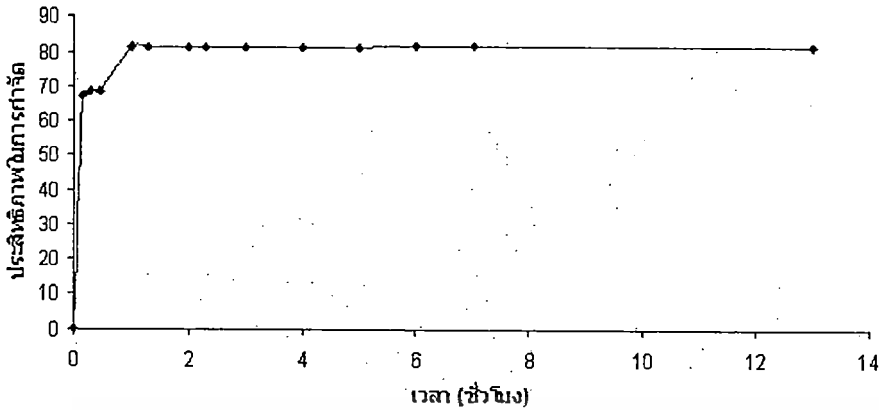
ตัวอย่าง	ซิงค์คลอไรด์:กระดูกบด	พื้นที่ผิวจำเพาะ (BET) (m ² /g)	ปริมาตรจำเพาะของโพรง (cm ³ /g)	ขนาดของโพรง(A°)
1	1 : 1	57.49	0.03995	29.44
2	1.5 : 1	49.67	0.03409	29.07
3	2 : 1	43.60	0.03478	26.21

4.2 การศึกษาฟิโชนที่เหมาะสมโดยการทดลองแบบแบตช์

เมื่อใช้ถ่านกระดูกจากสภาวะที่เลือกคือสัปดาห์ซิงค์คลอไรด์ต่อกระดูกบดเป็น 1:1 ปริมาณ 0.5 กรัมต่อลิตรน้ำเสียสังเคราะห์ ใส่ลงในน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณฟิโชน 6 แล้วเขย่าด้วยเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที หลังจากนั้นเก็บตัวอย่างที่เวลาต่างๆจนครบ 13 ชั่วโมง แล้วนำน้ำตัวอย่างที่ได้ไปกรองผ่านกระดาษกรอง และนำไปวิเคราะห์ปริมาณตะกั่วด้วยวิธีไทเทรต จากผลการทดลองพบว่าถ่านกระดูกมีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วได้สูงมากโดยพบว่าความเข้มข้นตะกั่วลดลงจาก 50.25 มิลลิกรัมต่อลิตร เหลือเพียง 15.87 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นร้อยละในการกำจัดสูงถึง 68.42 ภายในเวลาเพียง 45 นาทีแรก และกำจัดได้ร้อยละ 81.64 ภายในเวลา 13 ชั่วโมง ดังแสดงในรูปที่ 4.1 และรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.1 ความเข้มข้นของตะกั่วที่เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้น 50.25 มิลลิกรัมต่อลิตร ฟิโชน 6 ปริมาณถ่านกระดูก 0.5 กรัมต่อลิตรน้ำเสียสังเคราะห์

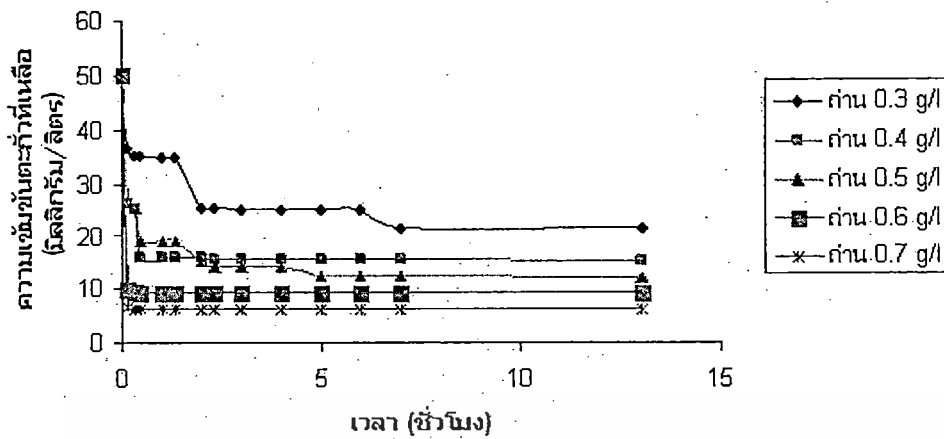


รูปที่ 4.2 ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้น 50.25 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอช 6 ปริมาณถ่านกระดูก 0.5 กรัมต่อลิตรน้ำเสียสังเคราะห์

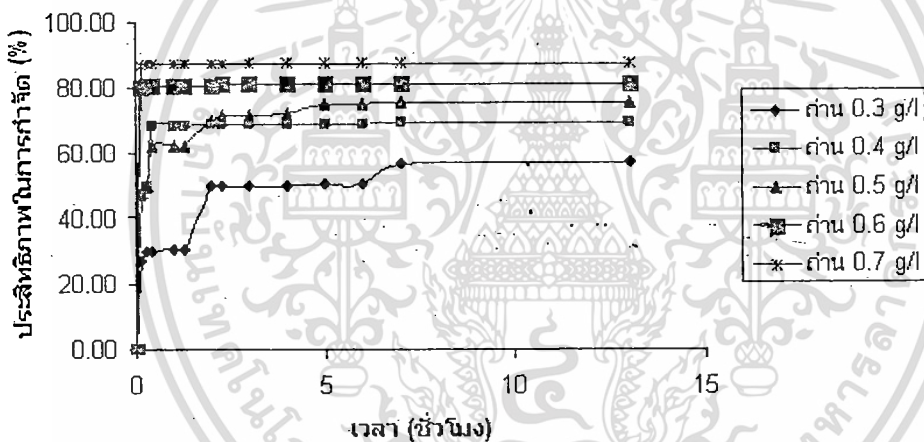
4.3 การหาไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วโดยทำการทดลองแบบแบดซ์

เมื่อใช้ถ่านกระดูกจากสภาวะการเตรียมที่เลือกคือ สัดส่วนซึ่งกักลอไรต์ต่อกระดูกบดเป็น 1:1 ปริมาณ 0.3 0.4 0.5 0.6 และ 0.7 กรัมต่อน้ำเสียสังเคราะห์ เดิมน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่มีพีเอช 6 ซึ่งให้ประสิทธิภาพการกำจัดสูงสุด จากนั้นนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าด้วยความเร็ว 150 รอบต่อนาทีจนถึง 13 ชั่วโมง เมื่อครบตามเวลานำไปกรองด้วยกระดาษกรอง แล้วจึงนำไปวิเคราะห์หาปริมาณตะกั่วด้วยวิธีการไทเทรต ซึ่งข้อมูลความเข้มข้นที่เหลือ ณ เวลาต่างๆของแต่ละปริมาณถ่าน แสดงดังภาคผนวก ข ตารางที่ ข-1 ถึง ข-5 และผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.3

ผลการทดลองพบว่าถ่านปริมาณ 0.7 กรัมต่อลิตรน้ำเสียสังเคราะห์ เข้าสู่สมดุลเร็วที่สุดคือใช้เวลา 45 นาที และสำหรับถ่านปริมาณ 0.6 0.5 0.4 และ 0.3 กรัมต่อลิตรน้ำเสียสังเคราะห์ ระบบสามารถเข้าสู่สมดุลได้ภายใน 1 3 3 และ 13 ชั่วโมงตามลำดับ โดยพบว่าร้อยละการกำจัดจะเพิ่มขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้น และค่าร้อยละในการกำจัดตะกั่วทั้งหมดที่สมดุลเมื่อใช้ถ่านปริมาณ 0.3 0.4 0.5 0.6 และ 0.7 กรัมต่อลิตรน้ำเสียสังเคราะห์ มีค่าเท่ากับ 56.93 69.48 75.62 81.54 และ 87.73 ตามลำดับ จากรูปที่ 4.4 จะเห็นว่าเมื่อปริมาณถ่านกระดูกต่อลิตรน้ำเสียสังเคราะห์มากขึ้น จะส่งผลให้ระบบเข้าสู่สมดุลเร็วขึ้น ร้อยละการกำจัดเพิ่มขึ้นเนื่องจากตัวดูดซับมีปริมาณมากขึ้น ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าระยะเวลาเข้าสู่สมดุลจะเร็วมากขึ้นและร้อยละการกำจัดจะเพิ่มมากขึ้น เมื่อปริมาณถ่านที่ใช้เพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4.3 ความเข้มข้นตะกั่วที่เหลือในน้ำเสียสังเคราะห์จากการกำจัดด้วยถ่านกระดูกปริมาณต่างๆ

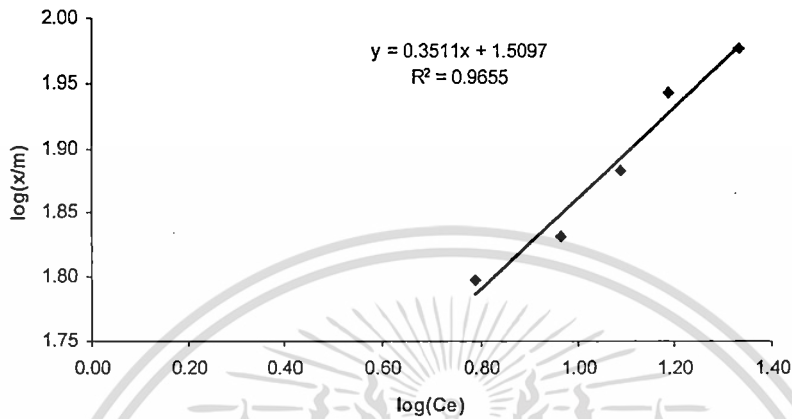


รูปที่ 4.4 ร้อยละการกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ถ่านกระดูกปริมาณต่างๆ

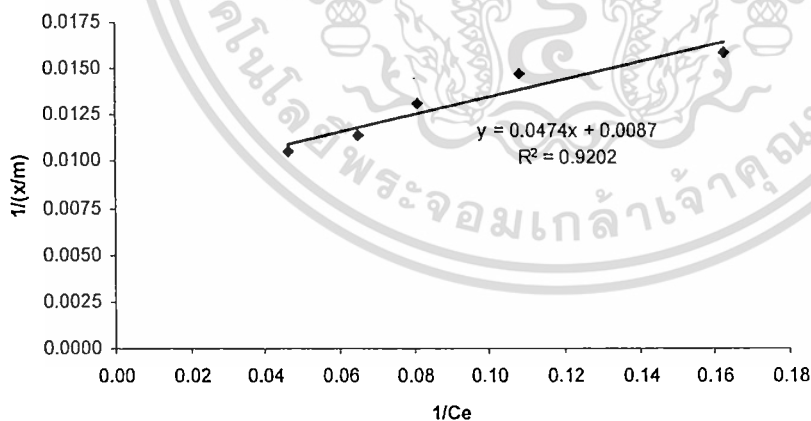
เมื่อพิจารณาผลการทดลองโดยอธิบายด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ไอโซเทอม 2 แบบคือ ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชและแบบแลงมีวัวร์ ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4.5 และ 4.6 ของไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชและแบบแลงมีวัวร์มีค่าเท่ากับ 0.9655 และ 0.9202 ตามลำดับ โดยสมการไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชคือ $\log(x/m) = 0.3511 \log C_e + 1.5097$ และสมการไอโซเทอมแบบแลงมีวัวร์คือ $1/(x/m) = 0.0474(1/C_e) + 0.0082$ จากผลการวิเคราะห์สมการไอโซเทอมพบว่า สมการแบบฟรุนดลิชมีความเหมาะสมที่จะนำมาทำนายกลไกการกำจัดตะกั่วมากกว่าสมการแบบแลงมีวัวร์

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

เนื่องจากมีค่า R^2 มากกว่า ซึ่งแสดงว่าข้อมูลการทดลองสอดคล้องกับสมการของฟรุนดลิชได้ดีกว่าสมการของแลงมัวร์



รูปที่ 4.5 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชของถ่านกระดูกที่เตรียมจากซิงก์คลอไรด์ต่อกระดูกบด ในอัตราส่วน 1:1 ปริมาณ 0.3 0.4 0.5 0.6 และ 0.7 กรัมต่อลิตรน้ำเสียสังเคราะห์พีเอช 6 และความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส



รูปที่ 4.6 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ของถ่านกระดูกที่เตรียมจากซิงก์คลอไรด์ต่อกระดูกบด ในอัตราส่วน 1:1 ปริมาณ 0.3 0.4 0.5 0.6 และ 0.7 กรัมต่อลิตรน้ำเสียสังเคราะห์พีเอช 6 และความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุป

จากการศึกษาความสามารถในการกำจัดโลหะหนักตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยการทดลองแบบแบตช์ โดยใช้ถ่านกระดูกที่กระตุ้นด้วยซิงค์กลอไรด์ ที่อัตราส่วนซิงค์กลอไรด์ต่อถ่านกระดูกที่ต่างกัน และทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพของกระดูกหลังจากที่กระตุ้นแล้ว ได้ผลสรุปจากการทดลองดังนี้

5.1.1 ผลการศึกษาสถานะในการเตรียมถ่านกระดูกด้วยซิงค์กลอไรด์

เมื่อนำกระดูกที่ผ่านการเผาและการคัดขนาดจนได้ขนาดที่ต้องการแล้ว มากระตุ้นด้วยซิงค์กลอไรด์ต่อกระดูกบด ในสัดส่วน 1:1 1.5:1 และ 2:1 ที่อุณหภูมิการเผา 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงพบว่าซิงค์กลอไรด์สามารถทำให้พื้นที่ผิวปริมาตรโพรงเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มสัดส่วนของซิงค์กลอไรด์ต่อกระดูกมากขึ้นจะทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรจำเพาะของโพรงมีแนวโน้มที่จะลดลงตามสัดส่วนของซิงค์ที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงเลือกสัดส่วนที่ศึกษาแล้วได้สภาพผลที่ดีที่สุดคือ 1:1 เป็นตัวแทนในการทดสอบการกำจัดตะกั่วต่อไป

5.1.2 ผลการศึกษาหาพีเอชที่เหมาะสมโดยทำการทดลองแบบแบตช์

สำหรับน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่วที่ทดสอบที่ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร ถ่านกระดูก 0.5 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง ที่พีเอชเท่ากับ 3 4 5 6 และ 7 แล้วนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่าด้วยความเร็วรอบ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 13 ชั่วโมง พบว่าที่พีเอช 6 ได้ค่าการกำจัดสารตะกั่วมากที่สุด โดยได้ถึงร้อยละ 81.64 ดังนั้นจึงเลือกพีเอช 6 ไปใช้ในการทดสอบเพื่อหาไอโซเทอมต่อไป

5.1.3 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วโดยทำการทดลองแบบแบตช์

จากการศึกษาโดยใช้สมการไอโซเทอมที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ในการทำนายประสิทธิภาพการกำจัดสำหรับน้ำเสียสังเคราะห์ตะกั่ว พบว่าค่า R^2 ของไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช และแบบแลงมัวร์ มีค่าเท่ากับ 0.9655 และ 0.9202 ตามลำดับ ดังนั้นสมการแบบฟรุนดลิชจึงมีความเหมาะสมที่จะมาเป็นตัวแทนในการทำนายกลไกการกำจัดตะกั่วมากกว่าสมการแบบแลงมัวร์ เนื่องจากมีค่า R^2 มากกว่า ซึ่งแสดงว่าข้อมูลการทดลองสอดคล้องกับสมการของฟรุนดลิชได้ดีกว่าสมการของแบบแลงมัวร์

5.2 ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักชนิดอื่น เช่น แคดเมียม ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ถ่านกระตุ้นที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลายซิงก์คลอไรด์
2. ศึกษาวิธีการนำซิงก์คลอไรด์กลับมาใช้ใหม่ และนำถ่านที่ใช้แล้วกลับมาใช้ใหม่
3. ควรระวังเรื่องซิงก์คลอไรด์ดูดความชื้นจากบรรยากาศ
4. ศึกษาถึงสถานะและประสิทธิภาพของการดูดซับโลหะหนักในน้ำเสียจริง



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บรรณานุกรม

- [1] Supapom Chuaprasert. "Production of Activated Carbon from Biological Wastes for Removing and Recycling Chromium (Cr^{6+}) from Industrial Waste Water." [Online]. Available : <http://www.kmutt.ac.th/rippc/produce2.htm>
- [2] สุตศน์ ยกसान. "มนุษย์กับการบริโภคตะกั่ว." [Online]. Available: <http://www.school.net.th/library/snet6/envi3/tatua/tatuan.htm>
- [3] ปิยะรัตน์ โตสุโขวงศ์ "Lead Poisoning." [Online]. Available : http://cai.md.chula.ac.th/lesson/lesson4613/lesson/page_f.html
- [4] "โรคพิษตะกั่ว" [Online]. Available : <http://envocc.dpc7.net/job/lead.doc>
- [5] "Hydroxide Precipitation" [Online]. Available : <http://www.hoffland.net/src/tks/3.xml>
- [6] C. J. Geankoplis, Transport Processes and Separation Process Principles 4th ed., Prentice Hall PTR, 2003.
- [7] W. W. Eckenfelder Jr., Industrial Water Pollution Control 2nd ed., McGraw-Hill , 1989.
- [8] G. Tchobanoglous and F.L. Burton, Wastewater Engineering Treatment, Disposal and Reuse 3rd ed., McGraw-Hill, 1991.
- [9] Ebonex Coporation. "Bone Char"[Online]. Available: <http://www.ebonox.com/bapp.htm#water>.
- [10] D.C.K. Ko, C.W. Cheung, K.K.H. Choy, and others, Sorption equilibria of metal ions on bone char. Journal of Chemosphere, vol. 54, pp. 273-281, 2004.
- [11] M. Ayll'on, M. Aznar, J.L. Sanchez, and others, Influence of temperature and heating rate on the fixed bed pyrolysis of meat and bone meal, Chemical Engineering Journal, vol.121, no.2-3, pp.85-96, 2006.
- [12] K.H.C. Keith, G. McKay, Sorption of cadmium, copper, and zinc ions onto bone char using Crank diffusion model, Journal of Chemosphere, vol. 60, no.8, pp.1141-1150, 2005.
- [13] จักรพงษ์ แสนชัย. การกำจัดตะกั่วและแคดเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ถ่านกระดูกกระตุ้นโดยซิงค์คลอไรด์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
- [14] สุวรรณ ไชยสิทธิ์. ปฏิบัติการเคมีวิเคราะห์, ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, 2547.



เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ก

ผลการศึกษาพีเอชที่เหมาะสมโดยการทดลองแบบแบบตซ์

ตารางที่ ก-1 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วของถ่านกระดูกที่เตรียมจากซิงก์คลอไรด์ต่อกระดูกบดในอัตราส่วน 1:1 ปริมาณถ่าน 0.5 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง พีเอช 6 และความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น 50.25 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาเก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง : นาที)	ความเข้มข้นน้ำเสียเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นน้ำเสียสุดท้าย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละการกำจัด (เปอร์เซ็นต์)
0:15	50.25	16.56	67.04
0:30	50.25	15.90	68.36
0:45	50.25	15.87	68.42
1:00	50.25	9.50	81.09
1:30	50.25	9.48	81.13
2:00	50.25	9.46	81.17
2:30	50.25	9.44	81.21
3:00	50.25	9.41	81.27
4:00	50.25	9.38	81.32
5:00	50.25	9.35	81.39
6:00	50.25	9.32	81.46
7:00	50.25	9.27	81.54
13:00	50.25	9.23	81.64

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ภาคผนวก ข

ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับในการกำจัดตะกั่ว โดยทำการทดลองแบบแบตช์

ตารางที่ ข-1 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วของถ่านกระดูกที่เตรียมจากซิงค์คลอไรด์ต่อกระดูกบด
ในอัตราส่วน 1:1 ปริมาณถ่าน 0.3 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง พีเอช 6 และความเข้มข้น
ตะกั่วเริ่มต้น 49.98 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาเก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง : นาที)	ความเข้มข้นน้ำเสียเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นน้ำเสียสุดท้าย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละการกำจัด (เปอร์เซ็นต์)	x/m
0:15	49.98	36.43	27.11	45.17
0:30	49.98	34.98	30.02	50.00
0:45	49.98	34.92	30.14	50.20
1:00	49.98	34.85	30.27	50.43
1:30	49.98	34.78	30.42	50.67
2:00	49.98	25.24	49.51	82.47
2:30	49.98	25.17	49.64	82.70
3:00	49.98	25.10	49.78	82.93
4:00	49.98	25.02	49.93	83.20
5:00	49.98	24.94	50.10	83.47
6:00	49.98	24.84	50.30	83.80
7:00	49.98	21.64	56.70	94.47
13:00	49.98	21.53	56.93	94.83

x/m = ความสามารถในการกำจัดโลหะหนักของถ่านกระดูก (มิลลิกรัมตะกั่วต่อกรัมถ่านกระดูก)

ตารางที่ ข-2 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วของถ่านกระดุกที่เตรียมจากซิงก์คลอไรด์ต่อกระดุกบด
ในอัตราส่วน 1:1 ปริมาณถ่าน 0.4 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง พีเอช 6 และความเข้มข้น
ตะกั่วเริ่มต้น 50.45 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาเก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง : นาที)	ความเข้มข้นน้ำเสียเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นน้ำเสียสุดท้าย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละการกำจัด (เปอร์เซ็นต์)	x/m
0:15	50.45	26.50	47.47	59.88
0:30	50.45	25.44	49.57	62.53
0:45	50.45	15.87	68.54	86.45
1:00	50.45	15.86	68.56	86.48
1:30	50.45	15.83	68.63	86.55
2:00	50.45	15.79	68.70	86.65
2:30	50.45	15.75	68.78	86.75
3:00	50.45	15.71	68.87	86.85
4:00	50.45	15.66	68.96	86.98
5:00	50.45	15.60	69.07	87.13
6:00	50.45	15.54	69.19	87.28
7:00	50.45	15.47	69.33	87.45
13:00	50.45	15.40	69.48	87.63

x/m = ความสามารถในการกำจัดโลหะหนักของถ่านกระดุก (มิลลิกรัมตะกั่วต่อกรัมถ่านกระดุก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-3 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วของถ่านกระดุกที่เตรียมจากซิงก์คลอไรด์ต่อกระดุกบด
ในอัตราส่วน 1:1 ปริมาณถ่าน 0.5 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง พีเอช 6 และความเข้มข้น
ตะกั่วเริ่มต้น 50.45 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาเก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง : นาที)	ความเข้มข้นน้ำเสียเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นน้ำเสียสุดท้าย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละการกำจัด (เปอร์เซ็นต์)	x/m
0:15	50.45	26.50	47.47	47.90
0:30	50.45	25.44	49.58	50.02
0:45	50.45	19.04	62.25	62.82
1:00	50.45	19.01	62.32	62.88
1:30	50.45	18.97	62.40	62.96
2:00	50.45	15.14	69.99	70.62
2:30	50.45	14.16	71.93	72.58
3:00	50.45	14.12	72.01	72.66
4:00	50.45	14.08	72.10	72.74
5:00	50.45	12.47	75.28	75.96
6:00	50.45	12.42	75.38	76.06
7:00	50.45	12.37	75.49	76.16
13:00	50.45	12.30	75.62	76.30

x/m = ความสามารถในการกำจัดโลหะหนักของถ่านกระดุก (มิลลิกรัมตะกั่วต่อกรัมถ่านกระดุก)

ตารางที่ ข-4 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วของถ่านกระดูกที่เตรียมจากซิงก์คลอไรด์ต่อกระดูก ใน อัตราส่วน 1:1 ปริมาณถ่าน 0.6 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง พีเอช 6 และความเข้มข้นตะกั่ว เริ่มต้น 49.97 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาที่บตัวอย่าง (ชั่วโมง : นาที)	ความเข้มข้นน้ำเสียเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นน้ำเสียสุดท้าย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละการกำจัด (เปอร์เซ็นต์)	x/m
0:15	49.97	9.94	80.11	66.72
0:30	49.97	9.54	80.91	67.38
0:45	49.97	9.52	80.94	67.42
1:00	49.97	9.50	80.98	67.45
1:30	49.97	9.48	81.02	67.48
2:00	49.97	9.46	81.06	67.52
2:30	49.97	9.44	81.11	67.55
3:00	49.97	9.41	81.16	67.60
4:00	49.97	9.38	81.22	67.65
5:00	49.97	9.35	81.29	67.70
6:00	49.97	9.32	81.36	67.75
7:00	49.97	9.27	81.44	67.83
13:00	49.97	9.23	81.54	67.90

x/m = ความสามารถในการกำจัดโลหะหนักของถ่านกระดูก (มิลลิกรัมตะกั่วต่อกรัมถ่านกระดูก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-5 ประสิทธิภาพการกำจัดตะกั่วของถ่านกระดูกที่เตรียมจากซิงค์กลอไรด์ต่อกระดูก ในอัตราส่วน 1:1 ปริมาณถ่าน 0.7 กรัมต่อลิตรน้ำตัวอย่าง พีเอช 6 และความเข้มข้นตะกั่วเริ่มต้น 50.13 มิลลิกรัมต่อลิตร

เวลาเก็บตัวอย่าง (ชั่วโมง : นาที)	ความเข้มข้นน้ำเสียเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ความเข้มข้นน้ำเสียสุดท้าย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ร้อยละการกำจัด (เปอร์เซ็นต์)	x/m
0:15	50.13	6.62	86.79	62.16
0:30	50.13	6.36	87.31	62.53
0:45	50.13	6.35	87.34	62.54
1:00	50.13	6.34	87.36	62.56
1:30	50.13	6.32	87.39	62.59
2:00	50.13	6.31	87.42	62.60
2:30	50.13	6.29	87.45	62.63
3:00	50.13	6.28	87.48	62.64
4:00	50.13	6.26	87.52	62.67
5:00	50.13	6.23	87.56	62.71
6:00	50.13	6.21	87.61	62.74
7:00	50.13	6.18	87.67	62.79
13:00	50.13	6.15	87.73	62.83

x/m = ความสามารถในการกำจัดโลหะหนักของถ่านกระดูก (มิลลิกรัมตะกั่วต่อกรัมถ่านกระดูก)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

ตารางที่ ข-6 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับตะกั่วของถ่านกระดุกที่เตรียมจากซิงก์คลอไรด์ต่อ
กระดุกบด ในอัตราส่วน 1:1 ปริมาณต่างๆ พีเอช 6

C_0	x	m	x/m	1/(x/m)	C_e	1/ C_e	Log(x/m)	Log(C_e)
49.98	28.45	0.3	94.83	0.0105	21.53	0.05	1.98	1.33
50.45	35.05	0.4	87.63	0.0114	15.40	0.06	1.94	1.19
50.45	38.15	0.5	76.30	0.0131	12.30	0.08	1.88	1.09
49.97	40.74	0.6	67.90	0.0147	9.23	0.11	1.83	0.97
50.13	43.98	0.7	62.83	0.0159	6.15	0.16	1.80	0.79

C_0 ความเข้มข้นของตะกั่วเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_e ความเข้มข้นของตะกั่วที่สภาวะสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

x ความเข้มข้นของตะกั่วที่ถูกกำจัด (มิลลิกรัมต่อลิตร)

m ปริมาณถ่านกระดุก (กรัมต่อลิตรน้ำเสียสังเคราะห์)

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า
ไม่ว่ากรณีใดๆทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ดัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้