

การจัดไอออนทองแดงออกจากร่างกายโดยการดูดซับบนถ่านกัมมันต์



นางสาว กรรณิการ์ รักกิจ

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาเคมีเทคนิค ภาควิชาเคมีเทคนิค


คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974-17-6771-4

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

REMOVAL OF COPPER IONS FROM WASTEWATER BY ADSORPTION ON ACTIVATED CARBON



Miss Kannika Rukkid

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science in Chemical Technology

Department of Chemical Technology

Faculty of Science

Chulalongkorn University

Academic Year 2004

ISBN 974-17-6771-4

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การจัดโลหะหนักออกจากร่างกายโดยการดูดซับบนถ่านกัมมันต์
โดย	นางสาว กรรณิการ์ รักกิจ
สาขาวิชา	เคมีเทคนิค
อาจารย์ที่ปรึกษา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สงบทิพย์ พงศ์สถาปดี
อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม	รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้หัวข้อวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิทยาศาสตร์
(ศาสตราจารย์ ดร.เปี่ยมศักดิ์ เมณะเสวต)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ งามประเสริฐสิทธิ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สงบทิพย์ พงศ์สถาปดี)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์)

..... กรรมการ
(ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ)

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา เทพไพฑูริย์)

กรรมจักร์ รักรกิจ : การขจัดไอออนทองแดงออกจากรน้ำเสียโดยการดูดซับบนถ่านกัมมันต์.
(REMOVAL OF COPPER IONS FROM WASTEWATER BY ADSORPTION ON
ACTIVATED CARBON)

อ. ที่ปรึกษา: ผศ.ดร.สงบทิพย์ พงศ์สถาปติ, อ.ที่ปรึกษาร่วม: รองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิต
สานต์ จำนวนหน้า 91 หน้า. ISBN 974-17-6771-4.

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการขจัดไอออนทองแดงออกจากรน้ำเสียสังเคราะห์
และน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยใช้ถ่านกัมมันต์เกรดการค้า 4 ชนิด คือ ถ่านกัมมันต์ A B C และ D
ซึ่งถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิดผลิตจากกะลามะพร้าว การทดลองแบ่งออกเป็น 4 ส่วนคือ การศึกษาความ
สามารถในการดูดซับไอออนทองแดงบนถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด โดยมีตัวแปรที่ศึกษาคือ ค่าความเป็นกรด
เบส เวลาสัมผัสและไอโซเทอมการดูดซับ ทดสอบประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนทองแดงบนถ่านกัม
มันต์โดยใช้การทดลองแบบต่อเนื่อง และศึกษาการฟื้นฟูคุณภาพถ่านกัมมันต์ที่หมดประสิทธิภาพการใช้
งาน

ในขั้นตอนการศึกษาความสามารถในการดูดซับไอออนทองแดงบนถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิดพบว่า
ค่าความเป็นกรดเบสที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนทองแดงสำหรับ ถ่านกัมมันต์ A คือ ค่าความเป็นกรด
เบสเท่ากับ 4 และสำหรับถ่านกัมมันต์ B C และ D มีค่าความเป็นกรดเบสที่เหมาะสม เท่ากับ 5 ถ่านกัมมันต์
ที่มีความสามารถในการดูดซับไอออนทองแดงสูงที่สุด คือ ถ่านกัมมันต์ A รองลงมาเป็นถ่านกัมมันต์ B C
และ D ตามลำดับ

การทดลองแบบต่อเนื่องได้เลือกใช้ถ่านกัมมันต์ A บรรจุลงในถังดูดซับเพื่อทดสอบประสิทธิภาพ
การดูดซับไอออนทองแดงพบว่า ถังดูดซับแบบแบ่งส่วนมีระยะเวลาการใช้งานนานกว่า และสามารถกำจัด
ไอออนทองแดงได้ดีกว่าถังดูดซับแบบคอลัมน์ และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างน้ำเสียสังเคราะห์กับน้ำเสียจาก
โรงงานอุตสาหกรรมพบว่า ถ่านกัมมันต์ A สามารถดูดซับไอออนทองแดงที่อยู่ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม
ได้มากกว่าไอออนทองแดงที่อยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์

ถ่านกัมมันต์ A ที่ใช้ในการดูดซับไอออนทองแดงออกจากรน้ำเสียสังเคราะห์สามารถนำมาฟื้นฟูคุณภาพ
แล้วกลับมาใช้ใหม่ได้ 2 ครั้ง หลังจากนั้นก็จะหมดประสิทธิภาพในการดูดซับอย่างถาวร

ขั้นตอนการแยกไอออนทองแดงออกจากสารละลายกรดไนตริกที่ได้จากการฟื้นฟูคุณภาพถ่านกัม
มันต์พบว่าสามารถแยกไอออนทองแดงได้มากกว่า 90%

ภาควิชา.....เคมีเทคนิค.....

สาขาวิชา.....เคมีเทคนิค.....

ปีการศึกษา.....2547.....

ลายมือชื่อนิสิต.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม.....

4572207023 : MAJOR CHEMICAL TECHNOLOGY

KEY WORD: ACTIVATED CARBON / ADSORPTION / COPPER / REGENERATION

KANNIKA RUKKID: REMOVAL OF COPPER IONS FROM WASTEWATER BY ADSORPTION ON ACTIVATED CARBON: THESIS ADVISOR : ASST. PROF. SANGOBTIP PONGSTABODEE, Ph.D., THESIS COADVISOR : ASSOC. PROF. THARAPONG VITITSAN, Ph.D., 91 pp. ISBN 974-17-6119-8.

The purpose of this research was to study the adsorption of copper ion from synthesis and industrial wastewater using 4 types of commercial coconut shell activated carbon, namely AC A, AC B, AC C and AC D. The first one involved an effect of each factor on copper adsorption in batch mode. These factors were pH, contacted time and activated carbon dosage for adsorption isotherm. The second one dealt with a performance of activated carbon in packed bed continuous mode. The third one considered regeneration of exhausted activated carbon to find out a life time of that activated carbon.

Adsorption of copper depended on contacted time and pH of the metal solution. Maximum removal of copper by adsorption on AC A was at pH 4 while the maximum copper ion adsorption on AC B, AC C and AC D was at pH 5. From Freundlich adsorption isotherm, it was found that AC A was more effective than AC B, AC C and AC D.

In continuous mode, AC A was packing in wither horizontal or vertical packed-bed column. The result showed that horizontal packed-bed column gave more effective than vertical column. An amount of copper ion in industrial wastewater was more adsorbed on AC A than that in synthesis wastewater.

In regeneration section, exhausted AC A could adsorb copper ion for 2 life-cycles after being regenerated by nitric solution. More than 90%, copper ion in eluted solution was recovered by electrochemical technique.

Department.....Chemical Technology.....	Student's signature.....
Field of study....Chemical Technology...	Advisor's signature.....
Academic year...2004.....	Co-advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สงบทิพย์ พงศ์สถาปดี อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และรองศาสตราจารย์ ดร.ธราพงษ์ วิทิตสานต์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางการทำงานวิจัย ตลอดจนให้ความเห็นในการปรับปรุงงานวิจัยให้สำเร็จโดยสมบูรณ์

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ งามประเสริฐสุทธิ ประชานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ศาสตราจารย์ ดร.ภัทรพรรณ ประศาสน์สารกิจ และรองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา เทพไพฑูรย์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้ความเห็น และคำแนะนำในการจัดทำวิทยานิพนธ์

ขอกราบขอบพระคุณ คุณจิระประภา เนียมปาน ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่เอื้อเฟื้อเครื่องอะตอมมิคแอบซอบชันสเปคโตรมิเตอร์ สำหรับวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก

ขอกราบขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ภาควิชาเคมีเทคนิคทุกท่าน และเพื่อนนิสิตที่ช่วยเหลือให้คำแนะนำ ตั้งแต่เริ่มดำเนินการวิจัยจนเสร็จสิ้น

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ที่ให้คำสอน อบรมเลี้ยงดู ให้การสนับสนุน และเป็นกำลังใจให้เสมอมา

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	จ
กิตติกรรมประกาศ	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง	ฅ
สารบัญภาพ	ฉ
บทที่	
1 บทนำ	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตและวิธีดำเนินการวิจัย.....	3
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
2 ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 น้ำเสีย.....	4
2.2 ถ่านกัมมันต์.....	6
2.3 การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์.....	15
2.4 ไอโซเทอมการดูดซับ.....	21
2.5 การดูดซับแบบต่อเนื่อง.....	23
2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	25
3 วิธีดำเนินการวิจัย	28
3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย.....	28
3.2 ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการทดลอง.....	30
3.3 วิธีดำเนินงานวิจัย.....	31

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
4 ผลการทดลองและอภิปรายผล.....	40
4.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์.....	40
4.2 ผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับแบบของถ่านกัมมันต์.....	42
4.3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับโดยใช้ถังดูดซับแบบแห้ง.....	49
4.4 ผลการศึกษาการฟื้นฟูคุณภาพถ่านกัมมันต์ที่หมดประสิทธิภาพการใช้งาน.....	56
4.5 ผลการศึกษาการแยกไอออนทองแดงจากสารละลายโดยใช้เทคนิคไฟฟ้าเคมี.....	62
4.6 สรุปผลที่ได้จากการศึกษา.....	63
5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ	65
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	65
5.2 ข้อเสนอแนะ	66
รายการอ้างอิง	67
ภาคผนวก	70
ภาคผนวก ก	71
ภาคผนวก ข	76
ภาคผนวก ค	80
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์	91

สารบัญญัตราง

ตารางที่		หน้า
4.1	ลักษณะทางกายภาพของถ่านกัมมันต์เกรดการค้าทั้ง 4 ชนิด.....	40
4.2	แสดงสมการเส้นตรงของไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช และแลงเมียร์.....	48
4.3	ค่าคงที่ของถ่านกัมมันต์แต่ละชนิด จากสมการของฟรุนดลิช.....	48
4.4	เขตการถ่ายโอนมวล ของถังดูดซับทรงสี่เหลี่ยมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม.....	55
4.5	เขตการถ่ายโอนมวล ของถังดูดซับทรงกระบอกในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม.....	56
4.6	เขตการถ่ายโอนมวล ของการดูดซับไอออนทองแดงออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ทั้ง 3 ครั้ง.....	62
ก.1	น้ำหนักประมาณของตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์ค่าไอโอดีน.....	74
ข.1	แสดงผลการคำนวณไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชของถ่านกัมมันต์ A.....	76
ข.2	แสดงผลการคำนวณไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชของถ่านกัมมันต์ B.....	76
ข.3	แสดงผลการคำนวณไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชของถ่านกัมมันต์ C.....	77
ข.4	แสดงผลการคำนวณไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชของถ่านกัมมันต์ D.....	77
ข.5	แสดงค่าคงที่จากกราฟไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช.....	77
ข.6	แสดงผลการคำนวณไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ของถ่านกัมมันต์ A.....	78
ข.7	แสดงผลการคำนวณไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ของถ่านกัมมันต์ B.....	78
ข.8	แสดงผลการคำนวณไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ของถ่านกัมมันต์ C.....	78
ข.9	แสดงผลการคำนวณไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ของถ่านกัมมันต์ D.....	79
ค.1	ผลการศึกษาความสามารถในการละลายของไอออนทองแดงที่ค่าความเป็นกรดเบส 3-7.....	80
ค.2	ผลการศึกษาค่ากรด-เบสที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนทองแดง.....	80
ค.3	ผลการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิดที่เวลาสัมผัสต่างๆ	81
ค.4	ผลการศึกษาการดูดซับไอออนทองแดงของถ่านกัมมันต์ A ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ถังดูดซับทรงสี่เหลี่ยม.....	82-83
ค.5	ผลการศึกษาการดูดซับไอออนทองแดงของถ่านกัมมันต์ A ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ถังดูดซับทรงกระบอก.....	84
ค.6	ผลการศึกษาการดูดซับไอออนทองแดงของถ่านกัมมันต์ A ในน้ำเสียจริงจากโรงงานอุตสาหกรรมโดยใช้ถังดูดซับทรงสี่เหลี่ยม.....	85-86

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
ค.7	ผลการศึกษาคู่ชัดไอออนทองแดงของถ่านกัมมันต์ A ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมโดยใช้ถ่านดูดซับทรงกระบอก.....	87
ค.8	ผลการศึกษาคู่ฟลูออรีนฟลูออรีนถ่านกัมมันต์ครั้งที่ 1.....	88
ค.9	ผลการศึกษาคู่ฟลูออรีนฟลูออรีนถ่านกัมมันต์ครั้งที่ 2.....	89
ค.10	ผลการศึกษาคู่แยกไอออนทองแดงจากสารละลายโดยใช้เทคนิคไฟฟ้าเคมี.....	90



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญญภาพ

รูปที่		หน้า
2.1	กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์.....	9
2.2	ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์.....	16
2.3	การดูดซับสิ่งสกปรกบนถ่านกัมมันต์	17
2.4	การดูดซับของโมเลกุลแบบหลายชั้นบนผิวของแข็ง.....	18
2.5	ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมีวัวร์.....	22
2.6	ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช.....	23
2.7	เขตการถ่ายเทมวลของอัตราการไหลที่แตกต่างกัน.....	24
2.8	แสดงเส้นโค้งเบรคทรูจ์ในถังดูดซับแบบคอลัมน์.....	25
3.1	ถังดูดซับอะคลีริกใสทรงสี่เหลี่ยม.....	29
3.2	ถังดูดซับแก้วใสทรงกระบอก.....	29
3.3	ชุดอุปกรณ์การดูดซับแบบต่อเนื่องโดยใช้ถังดูดซับทรงสี่เหลี่ยม.....	30
3.4	ชุดอุปกรณ์การดูดซับแบบต่อเนื่องโดยใช้ถังดูดซับทรงกระบอก.....	30
3.5	ขั้นตอนการศึกษาอิทธิพลของความเป็นกรดเบสที่มีต่อการดูดซับ.....	32
3.6	ขั้นตอนการศึกษาอิทธิพลของเวลาสัมผัสที่มีต่อการดูดซับ.....	33
3.7	ขั้นตอนการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของถ่านกัมมันต์.....	34
3.8	ขั้นตอนการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับของถ่านกัมมันต์โดยใช้การทดลองแบบต่อเนื่อง.....	36
3.9	ขั้นตอนการศึกษาการฟื้นฟูคุณภาพถ่านกัมมันต์ที่หมดประสิทธิภาพการใช้งานแล้ว.....	37
3.10	แสดงชุดอุปกรณ์ไฟฟ้าเคมีขณะทำการแยกไอออนทองแดงออกจากสารละลายที่ได้จากการฟื้นฟูคุณภาพถ่านกัมมันต์.....	38
3.11	ขั้นตอนการศึกษาการแยกไอออนทองแดงจากสารละลายที่ได้จากการฟื้นฟูคุณภาพถ่านกัมมันต์โดยใช้เทคนิคไฟฟ้าเคมี.....	39
4.1	พื้นผิวและรูพรุนของ (ก) ถ่านกัมมันต์ A, (ข) ถ่านกัมมันต์ B, (ค) ถ่านกัมมันต์ C และ (ง) ถ่านกัมมันต์ D เมื่อใช้กำลังขยาย 250 เท่า.....	41
4.2	ความเข้มข้นของทองแดงไอออนในน้ำเสียสังเคราะห์หลังจากปรับค่าความเป็นกรดเบสต่างๆ.....	42
4.3	ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มข้นไอออนทองแดงที่เหลือ (C) ต่อความเข้มข้นไอออนทองแดงเริ่มต้น (Co) กับค่าความเป็นกรดเบสของสารละลายไอออนทองแดง หลังผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด เป็นเวลา 4 ชั่วโมง.....	43

สารบัญญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.4	อัตราส่วนความเข้มข้นไอออนทองแดงที่เหลือ (C) ต่อความเข้มข้นไอออนทองแดงเริ่มต้น (Co) หลังผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิดที่เวลาสัมผัสต่างๆ
45	
4.5	อัตราส่วนความเข้มข้นไอออนทองแดงที่เหลือ (C) ต่อความเข้มข้นไอออนทองแดงเริ่มต้น (Co) หลังผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิดที่ปริมาณต่างๆกัน.....
46	
4.6	ไอโซเทอมการดูดซับ (ก) แบบฟรุนดลิช สำหรับถ่านกัมมันต์ A (ข) แบบแลงเมียร์ สำหรับถ่านกัมมันต์ A (ค) แบบฟรุนดลิช สำหรับถ่านกัมมันต์ B (ง) แบบแลงเมียร์ สำหรับถ่านกัมมันต์ B (จ) แบบฟรุนดลิช สำหรับถ่านกัมมันต์ C (ฉ) แบบแลงเมียร์ สำหรับถ่านกัมมันต์ C (ช) แบบฟรุนดลิช สำหรับถ่านกัมมันต์ D (ซ) แบบแลงเมียร์ สำหรับถ่านกัมมันต์ D.....
46-47	
4.7	อัตราส่วนความเข้มข้นไอออนทองแดงที่เหลือ (C) ต่อความเข้มข้นไอออนทองแดงเริ่มต้น (Co) หลังผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ A ที่เวลาต่างๆ ของถังดูดซับทรงสี่เหลี่ยม (ก) ส่วนที่ 1 (ข) ส่วนที่ 2 (ค) ส่วนที่ 3 (ง) ส่วนที่ 4 (จ) ส่วนที่ 5.....
50	
4.8	อัตราส่วนความเข้มข้นไอออนทองแดงที่เหลือ (C) ต่อความเข้มข้นไอออนทองแดงเริ่มต้น (Co) หลังผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ A ที่เวลาต่างๆ ของถังดูดซับทรงกระบอก.....
51	
4.9	อัตราส่วนความเข้มข้นไอออนทองแดงที่เหลือ (C) ต่อความเข้มข้นไอออนทองแดงเริ่มต้น (Co) หลังผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ A ที่เวลาต่างๆ ของถังดูดซับทรงสี่เหลี่ยม (ก) ส่วนที่ 1 (ข) ส่วนที่ 2 (ค) ส่วนที่ 3 (ง) ส่วนที่ 4 (จ) ส่วนที่ 5.....
52-53	
4.10	อัตราส่วนความเข้มข้นไอออนทองแดงที่เหลือ (C) ต่อความเข้มข้นไอออนทองแดงเริ่มต้น (Co) หลังผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ A ที่เวลาต่างๆของถังดูดซับทรงกระบอก.....
53	
4.11	อัตราส่วนความเข้มข้นไอออนทองแดงที่เหลือ (C) ต่อความเข้มข้นไอออนทองแดงเริ่มต้น (Co) หลังผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ A ที่เวลาต่างๆในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม.....
54	
4.12	อัตราส่วนความเข้มข้นไอออนทองแดงที่เหลือ (C) ต่อความเข้มข้นไอออนทองแดงเริ่มต้น (Co) หลังผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ A ที่เวลาต่างๆในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม.....
55	

สารบัญภาพ (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.13 อัตราส่วนความเข้มข้น ไอออนทองแดงที่เหลือ (C) ต่อความเข้มข้น ไอออนทองแดงเริ่มต้น (Co) หลังผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ A ที่เวลาต่างๆ สำหรับการดูดซับครั้งที่ 1 (ก) ส่วนที่ 1 (ข) ส่วนที่ 2 (ค) ส่วนที่ 3 (ง) ส่วนที่ 4 (จ) ส่วนที่ 5.....	57
4.14 อัตราส่วนความเข้มข้น ไอออนทองแดงที่เหลือ (C) ต่อความเข้มข้น ไอออนทองแดงเริ่มต้น (Co) หลังผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ A ที่เวลาต่างๆ สำหรับการดูดซับครั้งที่ 2 (ก) ส่วนที่ 1 (ข) ส่วนที่ 2 (ค) ส่วนที่ 3 (ง) ส่วนที่ 4 (จ) ส่วนที่ 5.....	58-59
4.15 อัตราส่วนความเข้มข้น ไอออนทองแดงที่เหลือ (C) ต่อความเข้มข้น ไอออนทองแดงเริ่มต้น (Co) หลังผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ A ที่เวลาต่างๆ สำหรับการดูดซับครั้งที่ 3 (ก) ส่วนที่ 1 (ข) ส่วนที่ 2 (ค) ส่วนที่ 3 (ง) ส่วนที่ 4 (จ) ส่วนที่ 5.....	59-60
4.16 อัตราส่วนความเข้มข้น ไอออนทองแดงที่เหลือ (C) ต่อความเข้มข้น ไอออนทองแดงเริ่มต้น (Co) หลังผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ A ที่เวลาต่างๆ สำหรับการดูดซับทั้ง 3 ครั้ง.....	61
4.17 อัตราส่วนความเข้มข้น ไอออนทองแดงที่เหลือในสารละลายต่อความเข้มข้นเริ่มต้น หลังจากผ่านการแยกไอออนทองแดงด้วยใช้เทคนิคไฟฟ้าเคมี.....	63
4.18 แผนผังผลการทำงานแบบครบวงจร.....	63

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

น้ำเป็นปัจจัยอย่างหนึ่งที่มีความสำคัญ ต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์ และสิ่งมีชีวิตทุกชนิด นอกจากนี้ยังเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่มีความสำคัญต่อการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศ ทั้งในด้านการเกษตร การประมง ตลอดจนการพัฒนาอุตสาหกรรม ดังนั้นปัญหามลพิษทางน้ำจึงเป็นปัญหาที่ได้รับความสนใจ เนื่องจากเป็นปัญหาที่ส่งผลกระทบต่อประชาชนเป็นวงกว้าง และมีแนวโน้มของความรุนแรงมากยิ่งขึ้น การปนเปื้อนของแหล่งน้ำมีต้นกำเนิดที่สำคัญคือ การปล่อยน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งโรงงานอุตสาหกรรมหลายประเภทมีการใช้โลหะหนักเป็นส่วนผสมในการผลิตจึงทำให้น้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมที่ใช้โลหะหนักเป็นวัตถุเคมีโลหะหนักปนเปื้อนอยู่อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ โลหะหนักที่มักปนเปื้อน เช่น ตะกั่ว โครเมียม โปรท ทองแดง สังกะสี และแคดเมียม เป็นต้น โลหะหนักเหล่านี้มีความเป็นพิษสูง สามารถคงอยู่ในสภาพแวดล้อมได้นาน สะสมในสิ่งมีชีวิตได้ และก่อให้เกิดโรคต่างๆ เช่น โรคมินามาตะ เกิดจากโปรท โรคอิไต-อิไต เกิดจากแคดเมียม เป็นต้น การปนเปื้อนโลหะหนักเหล่านี้มีแหล่งกำเนิดที่สำคัญ เช่น โรงงานชุบโลหะ การทำเหมือง โรงงานหลอมโลหะ และโรงงานแบตเตอรี่ เป็นต้น (Kadirvelu, Thamaraiselvi and Namasivayam, 2001)

ในการบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักเจือปน มีวิธีการกำจัดหลายวิธี อาทิเช่น

1) การทำให้ตกตะกอน (Precipitation)

วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมานานโดยการเติมสารเคมีลงไปให้น้ำทิ้ง เพื่อไปทำปฏิกิริยากับโลหะหนักที่มีอยู่ เกิดตะกอนที่สามารถแยกออกจากน้ำได้ โดยทั่วไปแล้วนิยมตกตะกอนโลหะหนักเป็นตะกอนไฮดรอกไซด์ โดยการเติมแคลเซียมไฮดรอกไซด์ หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ สารเคมีอื่นที่นิยมใช้กันมากคือ โซเดียมคาร์บอเนต โลหะหนักแต่ละชนิดสามารถตกตะกอนได้ที่ค่าความเป็นกรดเบสต่างกัน การตกตะกอนไฮดรอกไซด์จึงต้องเลือกปรับค่าความเป็นกรดเบสให้เหมาะสมกับโลหะหนักแต่ละชนิด

2) ออกซิเดชัน-รีดักชัน (Oxidation-Reduction)

นิยมใช้มากในโรงงานชุบโลหะ ซึ่งมีสารประกอบโลหะหนักต่างๆเจือปนอยู่ ในการกำจัดต้องเติมสารเคมีลงไป เพื่อทำปฏิกิริยาออกซิเดชันหรือรีดักชันกับโลหะหนักที่ต้องการ

กำจัด ทำให้โลหะหนักเปลี่ยนรูปไปเป็นสารประกอบอื่นที่ไม่มีพิษหรือตกตะกอนได้ สารเคมีที่เป็นตัวทำให้เกิดปฏิกิริยา เช่น ออกซิเจน โอโซน คลอรีน เป็นต้น

3) การระเหย (Evaporation)

เป็นวิธีง่าย ๆ ที่ใช้กันมากวิธีหนึ่ง โดยการขจัดน้ำออกจากน้ำเสีย แต่จะใช้ได้ผลดีในกรณีที่มีปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียมาก วิธีนี้มีข้อเสียเกี่ยวกับราคาที่ต้องลงทุน

4) การสกัดด้วยตัวทำละลาย (Solvent Extraction)

เป็นวิธีการแยกโลหะหนักออกจากสารละลาย โดยการเติมตัวทำละลายซึ่งสามารถละลายโลหะหนักนั้นได้ดีกว่า วิธีนี้มีข้อเสียคือ ค่าใช้จ่ายของตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัดค่อนข้างสูง

5) การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion Exchange)

เป็นเทคนิคที่อาศัยเรซินเป็นตัวแยกโลหะหนักออกจากสารละลาย โดยการแลกเปลี่ยนไอออนในสารละลายกับไอออนบนผิวเรซิน เรซินที่ใช้เป็นแคตไอออนเรซิน เป็นพวกกรดอินทรีย์ที่ไม่ละลาย ซึ่งอาจเป็นพวกซัลโฟนิก หรือคาร์บอกซิลิกแอซิด เนื่องจากการกำจัดต้องใช้เรซินที่มีความจำเพาะเจาะจงจึงไม่ค่อยนิยมใช้กัน วิธีการนี้เหมาะสำหรับการกำจัดโลหะหนักที่มีปริมาณน้อยและให้ประสิทธิภาพสูง นิยมใช้กับระบบกำจัดน้ำเสียจากโรงงานชุบไฟฟ้า เนื่องจากมีข้อเสียคือ ถ้ามีสารปนเปื้อนชนิดอื่นอยู่ต้องกำจัดออกก่อนที่จะผ่านเรซิน

6) อิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis)

วิธีนี้จะแยกโลหะหนักโดยจะให้ผ่านเยื่อเลือกผ่าน (Permeable membrane) โดยใช้กระแสไฟฟ้า วิธีนี้มีข้อเสียคือ ราคาแพงจึงไม่ค่อยนิยมใช้กัน

ดังนั้นการใช้ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) เป็นทางเลือกหนึ่งที่จะใช้ในการบำบัด หรือกำจัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียโดยใช้หลักการดูดซับ เนื่องจากใช้เทคโนโลยีที่ไม่ยุ่งยากซับซ้อน มีต้นทุนต่ำ และสามารถนำถ่านกัมมันต์ไปผ่านกระบวนการเพื่อนำกลับมาใช้ได้

ในงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับของถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายทั่วไปตามท้องตลาดในการดูดซับไอออนทองแดง และศึกษาการฟื้นฟูคุณภาพถ่านกัมมันต์ที่หมดสภาพการใช้งานแล้วเพื่อให้สามารถนำกลับมาใช้ได้

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดไอออนทองแดงด้วยวิธีการดูดซับบนถ่านกัมมันต์ออกจากน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

1.2.2 ศึกษาการกำจัดไอออนทองแดงด้วยการดูดซับบนถ่านกัมมันต์ในถังดูดซับแบบแบ่งส่วนและในแบบคอลัมน์

1.2.3 ศึกษาการฟื้นฟูคุณภาพถ่านกัมมันต์ที่หมดสภาพการใช้งานแล้ว

1.3 ขอบเขตและวิธีดำเนินการวิจัย

1.3.1 ศึกษาลักษณะทางกายภาพที่สำคัญของถ่านกัมมันต์ที่มีขายตามท้องตลาด 4 ชนิด

1.3.2 ศึกษาปัจจัยต่างๆที่มีผลต่อการดูดซับไอออนทองแดงบนถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด ได้แก่ อิทธิพลของค่าความเป็นกรดเบส อิทธิพลของเวลาสัมผัส และการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับไอออนทองแดงบนถ่านกัมมันต์โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์

1.3.3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของถ่านกัมมันต์ทั้งหมด

1.3.4 ศึกษาประสิทธิภาพการขจัดไอออนทองแดงด้วยการดูดซับบนถ่านกัมมันต์แบบต่อเนื่อง โดยใช้น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

1.3.5 ศึกษาการฟื้นฟูคุณภาพถ่านกัมมันต์ที่หมดสภาพแล้ว

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้ภาวะที่เหมาะสมในการขจัดไอออนทองแดงออกจากน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมโดยวิธีที่ไม่ยุ่งยาก และลงทุนต่ำ

1.4.2 ได้แนวทางในการนำถ่านกัมมันต์ที่หมดสภาพแล้วกลับมาใช้ใหม่

บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 น้ำเสีย

น้ำเสีย หมายถึง น้ำที่ถูกใช้โดยกิจกรรมต่างๆของมนุษย์ ที่เกิดในกิจกรรมประจำวัน เช่น การอาบน้ำ การใช้ห้องน้ำ การประกอบอาหาร น้ำเสียจะเกิดขึ้นตามปริมาณการใช้น้ำประปาเป็นสำคัญ ซึ่งในการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียมักจะพิจารณาอัตราการใช้น้ำเฉลี่ยของกิจกรรมที่เกิดขึ้น เช่น การใช้น้ำของบ้านเรือน สถานประกอบการโดยเทียบกับหน่วยการใช้น้ำ เป็นต้น สำหรับโรงงานอุตสาหกรรมจะมีการใช้น้ำที่แตกต่างกันสำหรับประเภท หรือชนิดของโรงงาน บางโรงงานอาจต้องการใช้น้ำเพียงเพื่ออุปโภค บริโภคของคนงานและเจ้าหน้าที่ของโรงงานเท่านั้น แต่บางโรงงานอาจต้องการน้ำในการผลิตสินค้า โดยสามารถแบ่งประเภทของการใช้น้ำในกระบวนการต่างๆของโรงงานอุตสาหกรรมดังนี้ (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2539)

- 1) ใช้น้ำเป็นตัวประกอบของผลิตภัณฑ์
- 2) ใช้น้ำเป็นตัวทำความสะอาดล้างวัตถุดิบ
- 3) ใช้น้ำเป็นตัวทำละลายวัตถุดิบที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม
- 4) ใช้น้ำเพื่อกิจกรรมทั่วไปในโรงงานอุตสาหกรรม

2.1.1 ประเภทของน้ำเสีย

น้ำเสียแบ่งเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ตามแหล่งกำเนิด คือน้ำเสียชุมชน และน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม การประกอบกิจกรรมประกอบอาชีพ เป็นต้น

น้ำเสียชุมชนหมายถึง น้ำเสียที่เกิดจากกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ เช่น กิจกรรมประจำวัน น้ำเสียจะเกิดขึ้นตามปริมาณการใช้น้ำประปาเป็นสำคัญ สิ่งสกปรกในน้ำทิ้งประเภทนี้ส่วนมากเป็นสารอินทรีย์ เช่น เศษอาหาร สบู่ ผงซักฟอก สิ่งขับถ่ายในร่างกายมนุษย์ เป็นต้น

น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม คือน้ำเสียที่เกิดจากกิจกรรมต่างๆ ของโรงงานอุตสาหกรรม เช่น น้ำทิ้งจากกระบวนการผลิต น้ำทิ้งที่เกิดจากกระบวนการหล่อเย็น น้ำทิ้งจากกระบวนการชะล้าง ได้แก่ น้ำทิ้งที่เกิดจากการล้างวัตถุดิบต่างๆ น้ำล้างเครื่องจักร น้ำล้างทำความสะอาดพื้นโรงงาน และน้ำทิ้งจากกิจกรรมอื่นๆ สิ่งสกปรกในน้ำทิ้งประเภทนี้มีทั้งสารอินทรีย์ และสารอนินทรีย์ ลักษณะน้ำเสียจาก โรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ จะมีความแตกต่างกันมาก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่ใช้ และปัจจัยอื่นๆ อีกมากมาย

2.1.2 กระบวนการบำบัดน้ำเสีย

กระบวนการบำบัดน้ำเสียขึ้นอยู่กับสิ่งเจือปนในน้ำเสีย มีอยู่ด้วยกันหลายกระบวนการ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 กระบวนการใหญ่ๆ ดังต่อไปนี้ (เกรียงศักดิ์ อุคมสิน โรจน์, 2542)

1) กระบวนการทางกายภาพ (Physical unit processes) คือวิธีการบำบัดน้ำเสียที่อาศัยแรงต่างๆ เพื่อนำไปใช้ในการแยกของแข็งที่ไม่ละลายน้ำออกจากน้ำเสีย โดยมากจะเป็นขั้นตอนแรกของระบบบำบัดน้ำเสีย ได้แก่ การคัดด้วยตะแกรง (Screening) การตัดย่อย (Comminuting), การกวาด (Skimming) การกวน (Mixing) การทำให้ลอย (Flotation) การตกตะกอน (Sedimentation) การแยกตัวด้วยแรงเหวี่ยง (Centrifugation) การกรอง (Filtration) และ การกำจัดตะกอนหนัก (Grit removal) เป็นต้น

2) กระบวนการทางเคมี (Chemical unit processes) คือวิธีการบำบัดน้ำเสียที่อาศัยสารเคมีผสมกับน้ำเสียเพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเคมี เพื่อแยกเอาสารปนเปื้อนต่างๆ ออกจากน้ำเสีย ได้แก่ การตกตะกอนผลึก (Precipitation), การทำให้เป็นกลางหรือการสะเทิน (Neutralization) และการฆ่าเชื้อโรค (Disinfection) เป็นต้น

3) กระบวนการทางชีวภาพ (Biological unit processes) คือวิธีการบำบัดน้ำเสียที่อาศัยจุลินทรีย์ย่อยสลายสารปนเปื้อน ได้แก่ Activated sludge Trickling filter Aerated lagoon Anaerobic filter Anaerobic pond และ Stabilization pond เป็นต้น

4) กระบวนการทางกายภาพ-เคมี (Physicochemical unit processes) คือวิธีการบำบัดน้ำเสียที่อาศัยทั้งทางกายภาพและเคมีมารวมกัน จะใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำเสีย ได้แก่ การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion exchange) การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Carbon adsorption) ออสโมซิสผันกลับ (Reverse osmosis) และการแยกด้วยไฟฟ้าและเยื่อกรอง (Electro dialysis)

การบำบัดน้ำเสียที่มีโลหะหนักในโรงงานอุตสาหกรรม นิยมใช้วิธีการตกตะกอนโลหะหนักในรูปไฮดรอกไซด์ โลหะซัลไฟด์ และโลหะคาร์บอเนต หรือการตกตะกอนร่วมนอกจากนี้ยังมีวิธีอื่นๆอีก ได้แก่ การแลกเปลี่ยนประจุ การดูดซับ และการแยกด้วยไฟฟ้าและเยื่อกรอง (Eckenfelder, 2000) แต่วิธีตกตะกอนด้วยสารเคมีนั้นในบางครั้งยังไม่สามารถลดปริมาณโลหะหนักในน้ำเสียให้ต่ำจนถึงค่ามาตรฐานที่ต้องการได้ การกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสีย การดูดซับโดยถ่านกัมมันต์จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่นิยมใช้เนื่องจากมีราคาถูก และสามารถกำจัดโลหะหนักได้ถึงแม้จะมีปริมาณโลหะหนักเพียงน้อยนิดในน้ำเสียได้ (Petermele et al. 1999)

2.1.3 ขั้นตอนการบำบัดน้ำเสีย

ขั้นตอนการบำบัดน้ำเสีย สามารถแบ่งออกเป็นขั้นตอนใหญ่ๆ ได้ดังนี้ (เกรียงศักดิ์ อุคมสินโรจน์, 2542)

1) ระบบบำบัดก่อนขั้นต้น (Preliminary treatment) เป็นระบบที่อยู่ในขั้นตอนแรกของระบบบำบัดน้ำเสีย ได้แก่ การดักด้วยตะแกรง การกำจัดตะกอนหนัก การทำให้ลอย และการบดตัด เป็นต้น

2) ระบบบำบัดขั้นต้น (Primary treatment) เป็นระบบที่อยู่ต่อจากระบบบำบัดก่อนขั้นต้น ระบบบำบัดขั้นต้นเป็นระบบที่อยู่ในขั้นที่ต้องการแยกสารแขวนลอยออกจากน้ำเสีย และกำจัดสารอินทรีย์บางส่วนออกจากน้ำเสีย ได้แก่ การตกตะกอน เป็นต้น

3) ระบบบำบัดขั้นที่สอง (Secondary treatment) จะต่อจากระบบบำบัดขั้นต้น เป็นระบบที่กำจัดสารอินทรีย์และตะกอนแขวนลอยออกจากน้ำเสีย โดยมากจะเป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่ใช้กระบวนการทางชีวภาพ สำหรับฆ่าเชื้อโรคในน้ำทิ้ง เช่น การเติมคลอรีน

4) ระบบบำบัดขั้นที่สาม (Tertiary treatment) อยู่ต่อเนื่องจากระบบบำบัดขั้นที่สอง ระบบนี้มักมีหน้าที่แยกและกำจัดสารตะกอนแขวนลอยที่เหลือจากระบบบำบัดขั้นที่สอง การกำจัดสารไนโตรเจน และฟอสฟอรัสออกจากน้ำเสีย และการกำจัดสารปนเปื้อนอื่นๆ ที่หลงเหลือจากระบบบำบัดขั้นที่สอง ซึ่งขั้นนี้ขึ้นอยู่กับความต้องการที่จะบำบัดน้ำเสียให้ได้คุณภาพของน้ำทิ้งดีขนาดไหน โดยทั่วไประบบบำบัดขั้นที่สามมักจะใช้กับการบำบัดน้ำเสียเพื่อให้ได้น้ำทิ้งที่ต้องการนำกลับมาใช้ได้อีก

2.2 ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)

2.2.1 ความหมายของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ หมายถึง ผลิตภัณฑ์ถ่านที่อยู่ในรูปคาร์บอนอสัณฐาน (amorphous carbon) คือมีรูปร่างไม่แน่นอน สัมผัสจะหยาบจากการนำวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักมาผ่านกระบวนการเผาในที่อับอากาศ และผ่านกระบวนการกระตุ้น ซึ่งจะทำให้พื้นผิวภายใน (internal surface area) เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากสารเคมี หรือการกระตุ้นทางกายภาพจะทำให้เกิดช่องว่างระหว่างผลึก (elementary crystallites) เพิ่มมากขึ้น โดยถ่านกัมมันต์จะต้องมีพื้นที่ผิวอย่างน้อยที่สุด 5 ตารางเมตรต่อกรัม แต่โดยทั่วไปโครงสร้างที่เป็นรูพรุนของถ่านกัมมันต์จะมีพื้นที่ผิวสูงอยู่ระหว่าง 500-2,000 ตารางเมตรต่อกรัม โครงสร้างเป็นรูพรุน หรือโพรงมีขนาดตั้งแต่ 20-20,000 อังสตรอม และมีสมบัติดูดซับสารต่างๆ ได้ดี

2.2.2 วัสดุที่ใช้ทำถ่านกัมมันต์

วัสดุที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์ จะถูกพิจารณาจากอินทรีย์วัตถุเป็นหลัก (องค์ประกอบของคาร์บอน และไฮโดรเจน) อินทรีย์วัตถุที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์สามารถแบ่งออกเป็น 3 ชนิดใหญ่ๆ ได้ดังนี้ (เกศรา นุตาลัย และคณะ, 2531)

1) พวกเซลลูโลสที่มาจากพืช เช่น แกลบ กะลามะพร้าว จี้เลื่อย ชานอ้อย ชังข้าวโพด เมล็ดในของผลไม้ เปลือกหุ้มเมล็ดผลไม้บางชนิด เป็นต้น

2) พวกถ่านหิน เช่น ลิกไนต์ ถ่านพีท บิทูมินัส

3) วัสดุที่ได้มาจากสัตว์ เช่น กระดุก

ถ่านที่ได้จากอินทรีย์วัตถุ (Artificial char) แบ่งออกตามอินทรีย์วัตถุที่นำมาใช้ได้ 2 ประเภทคือ

1) ถ่านแข็ง (Hard artificial char) เช่น ถ่านที่ได้จากเมล็ดผลไม้แข็ง (fruit pit char) ถ่านไม้เผาที่ความดันสูง

2) ถ่านอ่อน (Soft artificial char) เช่น ถ่านไม้ ถ่านชานอ้อย ถ่านแกลบ ถ่านหินน้ำมัน (oil shale char) ถ่านกากน้ำตาล

โดยทฤษฎีแล้วอินทรีย์วัตถุทุกชนิดสามารถนำมาทำถ่านกัมมันต์ได้ แต่สมบัติของถ่านและความสามารถในการดูดซับของถ่านที่ได้จะแตกต่างกันไป นอกจากนี้อุณหภูมิ และเวลาในการคาร์บอนในเซชัน (Carbonization) รวมถึงวิธีการที่ใช้ในการกระตุ้น (Activation) มีอิทธิพลอย่างมากต่อสมบัติของถ่านกัมมันต์

2.2.3 ชนิดของถ่านกัมมันต์

ชนิดของถ่านกัมมันต์ซึ่งแบ่งตามเกณฑ์ต่างๆ คือ (เกศรา นุตาลัย, 2531)

1) แบ่งตามชนิดของตัวกระตุ้น

ก. เคมี (chemical activated carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการใช้สารเคมีทำปฏิกิริยาเคมีกับผิวคาร์บอน มักเป็นพวกที่มีรูพรุนขนาดใหญ่

ข. กายภาพ (physical activated carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการกระตุ้นโดยใช้ก๊าซออกซิไดซ์ มักเป็นพวกที่มีรูพรุนขนาดเล็ก

2) แบ่งตามขนาดของรูพรุนบนผิวคาร์บอน

ก. ขนาดเล็ก (micropores) คือ ถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนไม่เกิน 15 นาโนเมตร มักใช้ในการดูดซับก๊าซ หรือไอระเหย

ข. ขนาดกลาง (mesopores) คือ ถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนประมาณ 15-100 นาโนเมตร มักใช้ในปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (catalytic reaction)

ค. ขนาดใหญ่ (macropores) คือ ถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนใหญ่กว่า 100 นาโนเมตร มักใช้ในการฟอกสี และการผลิตยา

3) แบ่งตามความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์ที่ได้

ก. ถ่านกัมมันต์ที่มีความหนาแน่นต่ำ มักใช้ในสภาวะที่มีสารละลาย เช่นการฟอกสีน้ำตาลดิบ หรือการให้น้ำบริสุทธิ์ เป็นต้น

ข. ถ่านกัมมันต์ที่มีความหนาแน่นสูง ประเภทนี้มักใช้ดูดซับก๊าซพิษ หรือไอระเหย

4) แบ่งตามชนิดของสารที่ถูกดูดซับ

ก. ก๊าซ (Gas adsorbent) คือ ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดซับก๊าซพิษ และไอสารอินทรีย์ มักใช้ถ่านจากการคาร์บอนไนซ์ และมีความแข็ง (Hard artificial char)

ข. สี (Color adsorbent) คือ ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการฟอกสี มักใช้ถ่านจากการคาร์บอนไนซ์ และไม่แข็ง (Soft artificial char)

ค. โลหะ (Metal adsorbent) คือ ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดซับโลหะต่างๆ เช่นดูดซับทอง เงิน ออกจากแร่ที่ขุดได้

5) แบ่งตามรูปร่างลักษณะ

ก. ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (Powder activated carbon) ทำได้โดยการเอาถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มาบด รูปร่างจะแตกต่างออกไปตามวิธีการบด ซึ่งจะมีผลทำให้คุณสมบัติการดูดซับแตกต่างกันออกไป ถ่านกัมมันต์ชนิดผงนี้นิยมใช้สำหรับการดูดสี โดยทั่วไปมีขนาด 5-100 ไมโครเมตร

ข. ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (Granular activated carbon) ทำจากวัตถุดิบที่เป็นเม็ดหรือแบบผงทำให้เป็นเม็ดโดยการเติมตัวประสาน (Binding agent) ตัวอย่างเช่น ทาร์ (tar) แล้วนำมาอัดเป็นเม็ด วัตถุดิบที่นิยมนำมาทำถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด ได้แก่ วัตถุดิบที่ค่อนข้าง และมีความหนาแน่นสูง เช่น กะลามะพร้าว ถ่านหิน ถ่านกัมมันต์ชนิดนี้มักใช้ในการดูดกลิ่นก๊าซพิษ และไอของสารละลายอินทรีย์

2.2.4 การผลิตถ่านกัมมันต์ (Processing of activated carbon)

ในปัจจุบันกรรมวิธีผลิตถ่านกัมมันต์มีมากมายหลายวิธี ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบ ลักษณะและคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ต้องการ แต่โดยทั่วไปกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ๆ 3 ขั้นตอน ดังนี้ คือ ขั้นตอนเตรียมวัตถุดิบ การเผาให้เป็นถ่าน หรือ คาร์บอนไนเซชัน (Carbonization) และการกระตุ้น หรือแอคติเวชัน (Activation) ดังแสดงรูปที่ 2.1



รูปที่ 2.1 กระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์

2.2.4.1 การเตรียมวัตถุดิบ

ถ่านกัมมันต์สามารถผลิตจากวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ ซึ่งการผลิตถ่านกัมมันต์สามารถเริ่มจากวัตถุดิบโดยตรง หรือเริ่มจากวัตถุดิบที่เป็นถ่านแล้วก็ได้ขึ้นอยู่กับการผลิต แต่โดยทั่วไปมักนำวัตถุดิบมาบด และคัดขนาดก่อนที่จะนำไปคาร์บอนไนซ์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการคาร์บอนไนซ์ หลังจากนั้นทำการอบ หรือตากวัตถุดิบให้แห้ง (Dehydration) แต่บางครั้งวัตถุดิบอาจมีความแข็ง และเหนียว ทำให้การบดวัตถุดิบโดยตรงทำได้ยาก ก็อาจนำวัตถุดิบนั้นไปคาร์บอนไนซ์ก่อน แล้วจึงนำมาบดคัดขนาดก็ได้

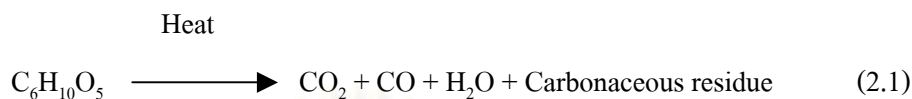
สำหรับวัตถุดิบที่มีลักษณะเป็นผง อาจนำมาทำให้เป็นเม็ดโดยใช้ตัวประสานเช่น แป้ง น้ำมันเตา หรือทาร์ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้มาจากกระบวนการคาร์บอนไนซ์เซชันแล้วนำไปอัดเป็นเม็ดก่อนที่คาร์บอนไนซ์เป็นขั้นตอนต่อไป

2.2.4.2 การคาร์บอนไนซ์เซชัน (Carbonization)

ขั้นตอนนี้เป็นการนำวัตถุดิบมาเผาในสภาวะที่มีออกซิเจนอยู่น้อยที่อุณหภูมิ 200-500 องศาเซลเซียส หรือการเผาแบบไพโรไลซิส (Pyrolysis) ซึ่งจะทำให้สารที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน และซัลเฟอร์ ถูกปล่อยออกมาในรูปก๊าซ ส่วนคาร์บอนที่มีอยู่ในรูปของเซลล์ูโลส เฮมิเซลล์ูโลส และลิกนิน จะรวมตัวกันเป็นผลึก (Microcrystalline) ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ในรูปของ

ถ่าน ขนาดของผลึกจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการเผา ระยะเวลาในการเผา องค์ประกอบ และโครงสร้างของวัตถุดิบ

เมื่อมีการเผาวัตถุดิบให้เป็นถ่าน องค์ประกอบที่เป็นคาร์บอนที่มีอยู่ก็จะสลายไป ซึ่งการสลายที่เกิดขึ้นคือ วัตถุดิบที่มีโครงสร้างหลักเป็นเซลลูโลส ($C_6H_{10}O_5$) เมื่อถ่านถูกเผาในกระบวนการไพโรไลซิส จะเกิดปฏิกิริยาดังสมการที่ 2.1



คาร์บอนในซีเซชันเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์เพราะเป็นขั้นตอนเริ่มต้นของโครงสร้างที่เป็นรูพรุน คาร์บอนอิสระที่มีอยู่จะรวมตัวกันอยู่ในรูปของถ่านชาร์ ถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์ ควรมีลักษณะดังนี้

- 1) มีสีดำตลอด (uniformly black)
- 2) เมื่อหักดูส่วนที่หักจะมีผิวเป็นมันเงา (shiny surface)
- 3) ปลายที่หักจะแหลมคม (sharp)
- 4) ปราศจากผงฝุ่น และเถ้า

ถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์นี้มีความสามารถในการดูดซับต่ำมากเพราะว่าการทำให้เกิดถ่านชาร์จะใช้อุณหภูมิประมาณ 400-600 องศาเซลเซียส ซึ่งยังคงมีน้ำมันทาร์ตกค้างอยู่ภายในช่องว่าง (pore) หรือเกาะอยู่ตามผิว จึงจำเป็นต้องนำถ่านนี้ไปผ่านกระบวนการกระตุ้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับ

2.2.4.3 การกระตุ้น (Activation)

การกระตุ้น คือ การทำให้คาร์บอน หรือถ่านมีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น ทั้งนี้เนื่องมาจากการเพิ่มพื้นที่ผิว และการทำให้ผิวมีความว่องไวมากขึ้น

วัตถุประสงค์ของการกระตุ้นถ่านคาร์บอนเพื่อ

- 1) เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวที่ว่องไว (active surface area) โดยเกิดปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้โมเลกุลบางกลุ่มหลุดออกไป และเกิดส่วนที่มีความสามารถในการดูดซับขึ้นมาแทน
- 2) เป็นการเพิ่มความว่องไวในการดูดซับให้พื้นที่ผิวที่มีอยู่แล้ว ซึ่งหมายถึง ทำให้อะตอมของคาร์บอนมีพลังงานศักย์สูงขึ้น โดยจัดเปลี่ยนโครงสร้างใหม่ ให้มีความว่องไวในการดูดซับสูงขึ้น
- 3) เป็นการกำจัดอินทรีย์วัตถุ หรืออนินทรีย์วัตถุต่างๆ ซึ่งเป็นสารปนเปื้อนออกจากบริเวณที่ทำหน้าที่ดูดซับ (active centers)

การกระตุ้นด้านกัมมันต์แบ่งตามกลไกที่เกิดขึ้นได้ 2 ประเภท คือ วิธีกระตุ้นทางกายภาพ และการกระตุ้นทางเคมี

1) วิธีกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation)

เป็นการกระตุ้นด้านกัมมันต์โดยที่ผิวคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น การจัดเรียงตัวใหม่ ซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการดูดซับของถ่านให้สูงขึ้น เนื่องจากรูพรุนจะกว้างมากขึ้น และมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น ตัวที่นิยมใช้เป็นตัวกระตุ้นคือ ตัวออกซิไดซ์ต่างๆ เช่น ไออน้ำอิมตัวยิ่งยวด ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ก๊าซออกซิเจน (O₂) เป็นต้น ร่วมกับการใช้ความร้อนปฏิกิริยาการกระตุ้นอาจเกิดจากความร้อนเพียงอย่างเดียว แต่ต้องใช้อุณหภูมิสูงมากถึง 1,200 องศาเซลเซียส พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยความร้อนเพียงอย่างเดียวจะมีคุณภาพต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้นด้วยก๊าซออกซิไดซ์

ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ คือ (Hassler, 1974)

- ก. ชนิดและปริมาณขององค์ประกอบที่มีอยู่ในวัตถุดิบ
- ข. สมบัติทางเคมีและอัตราส่วนของก๊าซที่ใช้
- ค. อุณหภูมิขณะเกิดปฏิกิริยา
- ง. ระยะเวลาของการเกิดปฏิกิริยา

ข้อดีของการกระตุ้นแบบนี้ คือ ไม่มีสารเคมีตกค้าง หลังจากกระตุ้นจนได้ถ่านกัมมันต์แล้วสามารถนำไปใช้งานได้ทันที เพราะไม่มีปัญหาในการล้างสารเคมีที่เหลือตกค้าง ส่วนข้อเสียคือ ต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่าแบบกระตุ้นด้วยสารเคมี (700-1,200 องศาเซลเซียส) จึงเป็นการสิ้นเปลืองพลังงาน

2) วิธีกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation)

เป็นการกระตุ้นด้านกัมมันต์โดยการเติมสารเคมีที่เป็นสารกระตุ้น (Activation agent) เข้าไปผสมคลุกเคล้าเข้ากับถ่านที่ต้องการถูกกระตุ้น และทำปฏิกิริยาเคมีกับผิวคาร์บอนบนถ่านนั้นๆ โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้น นิยมใช้สารประกอบของโปแตสเซียม หรือโซเดียม เช่น โปแตสเซียมคาร์บอเนต โปแตสเซียมซัลไฟด์ และการกระตุ้นโดยใช้สารดูดน้ำ (Dehydrating agent) เช่น สารในกลุ่มเกลือของโลหะคลอไรด์ เช่น แคลเซียมคลอไรด์ ซิงค์คลอไรด์ กรดฟอสฟอริก กรดซัลฟูริก เป็นต้น

เมื่อนำเอาวัตถุดิบที่ต้องการทำเป็นถ่านกัมมันต์ มาผสมสารประกอบที่มีไอออนของโปแตสเซียม หรือไอออนของโซเดียม ไอออนเหล่านี้จะแทรกเข้าไปอยู่ระหว่างชั้นของผลึกแกรไฟต์ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงกว่า 700 องศาเซลเซียส โมเลกุลของน้ำ ก๊าซออกซิเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะหลุดออก ทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ตามต้องการ

ข้อดีของการกระตุ้นทางเคมีคือใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นไม่สูงมาก (400-600 องศาเซลเซียส) สารเคมีแทรกซึมได้ทั่วถึง ได้รู้พรุนของถ่านกัมมันต์ที่ค่อนข้างใหญ่ แต่มีข้อเสียคือ มีสารเคมีตกค้างในถ่านกัมมันต์ทำให้ต้องเสียเวลา และค่าใช้จ่ายในการล้างสารเคมีดังกล่าวออก รวมทั้งเครื่องมือที่ใช้ก็ต้องเป็นชนิดพิเศษที่สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ เพราะสารเคมีเหล่านี้เป็นสารกัดกร่อน แต่สำหรับเกลือแกง เป็นสารที่มีสมบัติดูน้ำได้มีราคาถูก หาซื้อได้ตามท้องตลาด และไม่ก่อให้เกิดสารพิษหลังผ่านการกระตุ้น (ดำรง ชุมมงคล และอภิสิทธิ์ เจริญกุล, 2533)

ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากวิธีการกระตุ้นทางเคมี คือ

ก. ชนิดของวัตถุดิบ ถ่านกัมมันต์ที่ได้จะมีคุณภาพแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับโครงสร้างของวัตถุดิบ

ข. ชนิดและปริมาณของสารกระตุ้น อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการกระตุ้น

2.2.5 โครงสร้างและคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์

2.2.5.1 ลักษณะและโครงสร้างของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์นั้นมีโครงสร้างเช่นเดียวกับแกรไฟต์ แต่มีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบน้อยกว่า ผลึกแกรไฟต์ประกอบไปด้วยชั้นคาร์บอนอะตอมในรูปเบนซีนริง (Benzene ring) หรือกลุ่มของอะตอมคาร์บอนที่มีโครงสร้างคล้ายรูปหกเหลี่ยม นั่นคือแต่ละอะตอมจะเกิดพันธะเดียวกับอีก 3 อะตอมในแผ่นราบ (Plane) ในลักษณะสมมาตรกัน อิเล็กตรอนที่ใช้ในการเกิดพันธะนี้เป็นซิกมาอิเล็กตรอน ความยาวระหว่างอะตอมภายในชั้นประมาณ 1.442 อังสตรอม อิเล็กตรอนที่เหลืออีกหนึ่งเป็น ไพอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปทั่วโครงสร้างเกิดเป็นเรโซแนนซ์ (Resonance) แรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นเป็นแรงแวนเดอร์วาล (Van der Waals) แต่ละแผ่นราบห่างกัน 3.354 อังสตรอม ดิสเพลสเมนต์ (Displacement) ในทิศทางขนานกับแผ่น (Layer) จะเกิดง่ายเพราะแรงยึดเหนี่ยวแวนเดอร์วาลอ่อน ดังนั้นจะเกิดข้อบกพร่อง (Defect) ในโครงสร้าง ณ จุดนี้ได้ง่าย

เมื่อศึกษาด้วยวิธีเอ็กซ์เรย์ดิฟแฟกชันพบว่า ถ่านกัมมันต์ประกอบด้วยโครงสร้างที่เป็นผลึกเล็กๆ ที่ไม่สมบูรณ์เกิดการเบี่ยงเบนในแนวฉากและซ้อนเหลื่อมกันในแนวระนาบ เรียกว่า “เทอร์โบสแตติกเจอร์ (turbostatic structure)” การจัดเรียงตัวของผลึกเล็กๆ จะมีทิศทางไม่แน่นอน ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการคาร์บอนไนซ์ ผลึกเล็กๆนี้มักมีความสูง 9-12 อังสตรอม กว้าง (เส้นผ่านศูนย์กลางหน้าตัด) ประมาณ 20-30 อังสตรอม ประกอบด้วย 3 แผ่นระนาบของชั้นแกรไฟต์และมีเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 9 เท่า ของความกว้างของอะตอมคาร์บอนรูป 6 เหลี่ยม

โครงสร้างของถ่านกัมมันต์จะขึ้นอยู่กับภาวะในการผลิต ได้แก่ อุณหภูมิและเวลา ในการให้ความร้อน ได้มีการพยายามแบ่งประเภทของถ่านกัมมันต์ตามโครงสร้างของผลึก ตัวอย่าง เช่น แบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ โครงสร้างที่เป็นแกรไฟต์ง่ายที่อุณหภูมิและโครงสร้างที่มีลักษณะแกรไฟต์เพียงเล็กน้อย (ที่สภาวะเดียวกัน)

2.2.5.2 โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์

ในการกระตุ้นจะทำให้ถ่านที่ได้จากการคาร์บอนไนซ์มีความพรุนมากขึ้น เนื่องจากการสูญเสียสารประกอบคาร์บอนระหว่างฟลิกคาร์บอน รูพรุนทำให้เกิดพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับ การกระตุ้นที่เหมาะสมคือการทำให้มีรูพรุนไม่ใช่ขนาดของรูใหญ่

เมื่อพิจารณาลักษณะผิวของถ่านกัมมันต์ จะพบว่ามีลักษณะเป็นรูพรุนจำนวนมาก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน รูพรุนเหล่านี้จะลึกเข้าไปในเนื้อของถ่านกัมมันต์อย่างไม่เป็นระเบียบและความลึกไม่สม่ำเสมอ ลักษณะของรูปร่างของรูนั้นไม่สามารถบอกได้แน่นอน บางรูมีลักษณะเปิดข้างปิดข้างหนึ่ง บางครั้งเป็นรูปตัววี Dubinin (1996) ได้ทำการทดลองเตรียมถ่านกัมมันต์จากพีทและซีลือด้วยซิงค์คลอไรด์ พบว่า ลักษณะของรูที่เกิดขึ้นเป็นรูคอแคบคล้ายคอขวด หรือที่เรียกว่า “อิงค์บอทเทิล (ink-bottle)” ในขณะที่กระตุ้นซีลือด้วยไอน้ำแล้วได้ลักษณะรูที่เกิดขึ้นอยู่ที่วิธีการเตรียมและวัตถุดิบที่ใช้

Dubinin (1996) ได้จำแนกชนิดของรูพรุนตามขนาดรัศมีของรูพรุนออกเป็น

1) แมคโครพอร์ (Macro pores) รัศมีของรูพรุนมากกว่าหรือเท่ากับ 1,000-2,000 อังสตรอม ปริมาตรอยู่ระหว่าง 0.2-0.8 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิวไม่เกิน 0.5 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งน้อยมากเมื่อเทียบกับรูพรุนประเภทอื่น ดังนั้นแมคโครพอร์จึงไม่ค่อยมีความสำคัญในการดูดซับเป็นเพียงทางส่งผ่านอนุภาคเข้าไปในรูพรุนที่เล็กกว่า

2) มีโซพอร์ (Meso pores) หรือทรานซิชันนัลพอร์ (Transitional pores) ขนาดรัศมีอยู่ระหว่าง 15-1,000 อังสตรอม ปริมาตรอยู่ระหว่าง 0.1-0.5 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิว 20-100 ตารางเมตรต่อกรัม ตัวอย่างสารดูดซับที่มีขนาดของรูเป็นมีโซพอร์ ได้แก่ ซิลิกาเจล (Silica gels) อะลูมินาเจล (Alumina gels) อะมิโนซิลิเกตคะตะลิสต์ (Amino silicate catalyst)

3) ไมโครพอร์ (Micro pores) ขนาดรัศมีน้อยกว่า 15-16 อังสตรอม ปริมาตรอยู่ระหว่าง 0.2-0.6 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิวจำเพาะมากมายหลายร้อยตารางเมตรต่อกรัม บางครั้งถึง 1,500 ตารางเมตรต่อกรัม ไมโครพอร์มีความสำคัญที่สุดในการดูดซับ เนื่องจากพื้นที่การดูดซับและพลังงานดูดซับ (Adsorption energy) มากที่สุด ทำให้การดูดซับเพิ่มมากขึ้นที่ความดันต่ำๆ รูพรุนขนาดเล็กมีความสัมพันธ์กับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะซึ่งเชื่อว่าปริมาณของรูพรุนแต่ละขนาดหรือที่เรียกกันว่า “การกระจายขนาดรูพรุน (Pore size distribution)” จะขึ้นกับชนิดของวัตถุดิบที่ใช้และวิธีการกระตุ้น ตัวอย่างของตัวดูดซับที่มีขนาดรูพรุนเป็นไมโครพอร์ คือ ซีโอไลต์ (Zeolite)

โครงสร้างของถ่านกัมมันต์ส่วนมากประกอบด้วยรูพรุนกระจายโครงสร้าง ที่มีทั้งแมคโครพอร์ มีโซพอร์และไมโครพอร์ เรียกว่า “โครงสร้างผสม (Mixed structure type)” โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์เกรดการค้าจะมีรูพรุนขนาดกลางประมาณ 200-300 ตารางเมตรต่อกรัม สำหรับรูพรุนขนาดเล็กซึ่งมีผลต่อความจุในการดูดซับ มีประมาณร้อยละ 90-95 ของพื้นที่ผิวทั้ง

หมด นอกจากนี้ยังพบว่าความจุในการดูดซับยังขึ้นกับลักษณะและธรรมชาติของผิวด้วย กล่าวคือ ถ้าบริเวณผิวของถ่านเป็นเพียงระนาบพื้นฐาน (Basal planes) ซึ่งไม่มีหมู่ฟังก์ชันอื่น ๆ การดูดซับจะเกิดจากแรงแวนเดอร์วาลส์ หรืออาจเกิดจากไฟอิลิเล็กตรอน แรงยึดเหนี่ยวทั้งสองเป็นแรงที่ค่อนข้างอ่อน แม้ว่าจะดูดซับได้แต่มีโอกาสที่จะหลุดออกได้ง่าย แต่ถ้าเป็นผิวบริเวณที่มีหมู่ฟังก์ชันนัล การดูดซับจะเกิดจากแรงที่แข็งแรง โอกาสที่โมเลกุลของสารถูกดูดซับจะหลุดออกจึงมีน้อยกว่า หมู่ฟังก์ชันนัลบริเวณผิวถ่านกัมมันต์มี 2 ชนิด คือพวกออกไซด์ของกรด ซึ่งพบมากในถ่านกัมมันต์ที่ผลิตที่อุณหภูมิต่ำกว่า 400-500 องศาเซลเซียส และพวกออกไซด์ของด่าง ซึ่งพบมากในถ่านกัมมันต์ที่ผลิตที่อุณหภูมิประมาณ 800-1,000 องศาเซลเซียส

2.2.5.3 โครงสร้างทางเคมีของพื้นผิวถ่านกัมมันต์

พื้นผิวของถ่านกัมมันต์จะมีอะตอมที่สามารถเกิดพันธะเคมีกับอะตอมอื่น ๆ ได้ เช่น อะตอมของออกซิเจน และไฮโดรเจน ในกระบวนการกระตุ้นถ่านกัมมันต์ จะทำให้ธาตุเหล่านี้เปลี่ยนแปลงไปซึ่งเป็นผลจากกระบวนการผลิต ทั้งในขั้นตอนการคาร์โบไนเซชัน และการเกิดพันธะเคมีบนผิวถ่านกัมมันต์ในขั้นตอนการกระตุ้น การที่มีอะตอมของออกซิเจนและไฮโดรเจนนี้ส่งผลอย่างมากต่อคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ เนื่องจากอะตอมเหล่านี้เมื่อเกิดการรวมตัวกับอะตอมของคาร์บอนโดยเกิดพันธะเคมี จะเกิดเป็นกลุ่มฟังก์ชันนัล (Functional groups) บนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ กลุ่มฟังก์ชันนัลที่พบบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ที่พบได้บ่อย ๆ ได้แก่ Carbonyl groups, Phenolic hydroxyl groups, Quinone type carbonyl groups, Normal lactone groups, Fluorescein type lactone groups, Carboxylic acid anhydride groups และ Cyclic peroxide groups นอกจากนี้ในขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์ยังเกิดเถ้า (Ash) ซึ่งเถ้าและองค์ประกอบทางเคมีของเถ้า ยังมีหลากหลายอีกด้วย

2.2.6 ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์

ในอุตสาหกรรมมีการใช้ถ่านกัมมันต์อย่างแพร่หลาย หน้าที่ของถ่านกัมมันต์จะแตกต่างกันไป ตัวอย่างเช่น

- 1) ประเภทที่ใช้กับการดูดซับก๊าซ หรือไอ
 - ก. ใช้ในอุตสาหกรรมทำหน้าที่ปกป้องกันก๊าซพิษ ทั้งนี้เพราะถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับก๊าซพิษ และไอของสารอินทรีย์ได้
 - ข. ใช้แยกก๊าซโซลีนออกจากก๊าซธรรมชาติ
 - ค. ใช้แยกไอระเหยของตัวทำละลายที่ใช้แล้วเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ โดยถ่านกัมมันต์จะดูดซับไอระเหยเหล่านั้นที่อุณหภูมิห้อง และคายออกที่ความดันไอล่าง
 - ง. กำจัดสิ่งเจือปนออกจากก๊าซ เช่น ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ฮีเลียม อะเซทีลีน แอมโมเนีย คาร์บอนไดออกไซด์ สารประกอบออร์แกนิกซัลเฟอร์ เป็นต้น

จ. กำจัดกลิ่นออกจากอากาศ ในเครื่องปรับอากาศทำให้กลิ่นเหม็นน้อยลง
 ฉ. ใช้ดูดซับกัมมันตภาพรังสีออกมาจากปฏิกิริยานิวเคลียร์สำหรับหน่วยปฏิบัติการ
 ให้การสลายตัวเกิดขึ้นสมบูรณ์ขณะที่ยังถูกจับไว้ในเบดของถ่านกัมมันต์

2) ประเภทที่ใช้กับของเหลว

ก. ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำตาล อุตสาหกรรมผลิตอาหาร เครื่องดื่มแอลกอฮอล์
 ข. ใช้ในทางการแพทย์ อุตสาหกรรมเคมีและยา
 ค. ใช้ทำน้ำดื่มให้บริสุทธิ์ เป็นการกำจัดรส สี และกลิ่น นอกจากนี้ยังใช้ในการ
 บำบัดน้ำเสีย

ง. ใช้แยกโลหะจากสารละลายที่ต้องการ เช่น การแยกทองหลังการสกัดจากแร่
 ด้วยวิธีไซยาไนด์ เป็นต้น

จ. ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาหรือเป็นตัวพาสารเร่งปฏิกิริยา (Catalyst carrier) เช่นตัว
 พาสารเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชัน (Hydrogenation) เป็นต้น

2.3 การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Carbon adsorption)

2.3.1 การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Carbon adsorption)

การใช้ถ่านเป็นตัวดูดซับเป็นกระบวนการกำจัดน้ำเสียด้วยวิธีทางกายภาพ-เคมี การดูด
 ซับเกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสาร หรือความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นผิวกระบวนการนี้
 สามารถเกิดขึ้นที่ผิวหน้าของ 2 สถานะใดๆ เช่น ของเหลวกับของเหลว ก๊าซกับของเหลว ก๊าซกับ
 ของแข็ง หรือของเหลวกับของแข็ง โดยโมเลกุลหรือคอลลอยด์ของสารที่ถูกดูดซับ เรียกว่า สารถูก
 ดูดซับ (Adsorbate) ส่วนของแข็งที่มีพื้นผิวเป็นที่เกาะจับของสารถูกดูดซับเรียกว่า สารดูดซับ
 (Adsorbent)

การดูดซับบนถ่านกัมมันต์ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในการบำบัดทั้งน้ำดี และน้ำ
 เสีย เพื่อใช้ในการกำจัดสิ่งสกปรกที่ละลายน้ำบางชนิด ทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ออกจากน้ำ
 เสีย เช่น บีโอดี ซีโอดี สี กลิ่น รส โลหะหนัก และยาฆ่าแมลง เป็นต้น เนื่องจากการดูดซับเป็น
 กระบวนการที่ง่ายต่อการควบคุม มีประสิทธิภาพสูง และระบบมีความทนทานต่อสารพิษซึ่งเป็นข้อ
 จำกัดของระบบชีวภาพ นอกจากนี้ยังไม่มีการเปลี่ยนแปลงค่ากรด-เบส อุณหภูมิ
 หรือปริมาณสารอินทรีย์ (Organic load) ในระบบ ใช้เงินลงทุนต่ำ และระบบมีความยืดหยุ่นสูง
 สามารถเพิ่มหรือลดขนาดของระบบได้ง่าย

2.3.2 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (Rate of molecule transfer)

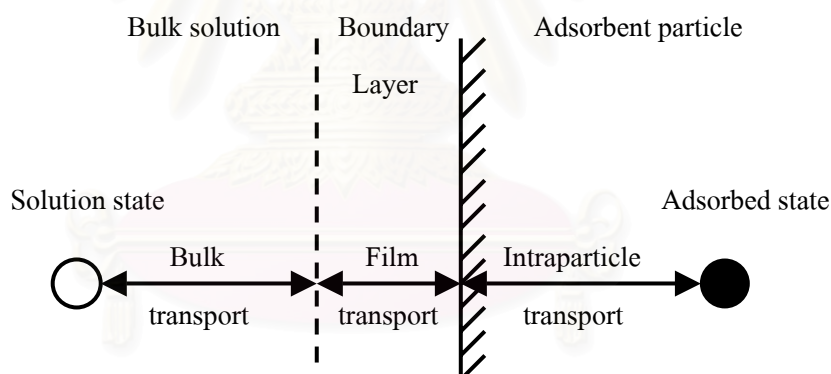
อัตราการดูดซับมีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากอัตราการดูดซับที่รวดเร็วจึงทำให้ระบบเข้าสู่ภาวะสมดุลได้เร็วขึ้น อัตราการดูดซับจะถูกควบคุมโดยขั้นตอนที่มีความต้านทานมากที่สุดในการเคลื่อนย้ายโมเลกุล ขั้นตอนในการดูดซับของสารละลายโดยสารดูดซับที่มีรูพรุน มี 3 ขั้นตอนคือ

1) การขนส่งทั้งก้อน (Bulk transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของสารที่ละลายในของเหลวจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ ที่ห่อหุ้มสารดูดซับ

2) การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่สารดูดซับ การขนส่งในขั้นตอนนี้เป็นกระบวนการที่เกิดการแพร่ผ่านฟิล์มของเหลว (Film diffusion) จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับขั้นตอนนี้

3) การขนส่งภายในอนุภาค (Intraparticle transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลสารที่ละลายในของเหลวเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของตัวดูดซับ (Pore diffusion) และทำให้เกิดการดูดซับขึ้นภายใน ขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับเช่นเดียวกัน

ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารถูกดูดซับมายังสารดูดซับ แสดงดังรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Eckenfelder, 1981)

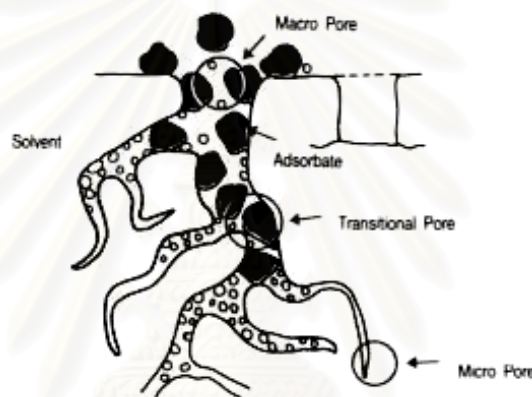
ภายใต้ภาวะการทำงานหนึ่งๆ การขนส่งชั้นผิวหน้าของสารดูดซับจัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดซับ แต่หากว่าภายในระบบมีสภาพความปั่นป่วนเพียงพอ ขั้นตอนการขนส่งภายในอนุภาคจะเป็นขั้นตอนที่ควบคุมอัตราการดูดซับ

2.3.3 กลไกการดูดซับ

การดูดซับสิ่งสกปรกที่ละลายอยู่ในน้ำด้วยถ่านกัมมันต์ ในระยะแรกโมเลกุลของสิ่งสกปรกจะเคลื่อนที่ไปเกาะอยู่รอบนอกของเม็ดถ่าน ในระยะที่สองโมเลกุลของสิ่งสกปรกจะฝัง

กระจาย (Diffusion) เข้าไปในรูพรุนของเม็ดถ่าน ดังรูปที่ 2.3 ดังนั้นอัตราการดูดซับนี้จึงถูกควบคุมด้วยอัตราการฟุ้งกระจายเข้าไปในตามรูพรุนของเม็ดถ่าน อัตราการดูดซับนี้จึงแปรผกผันกับกำลังสองของเส้นผ่านศูนย์กลางของโมเลกุล และจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสิ่งสกปรกในน้ำเสีย และจะลดลงตามการเพิ่มของน้ำหนักโมเลกุล นอกจากนี้ยังแปรผกผันตามกำลังสองของเวลาสัมผัสระหว่างโมเลกุลของสิ่งสกปรกกับถ่าน และจะเพิ่มขึ้นถ้าค่าความเป็นกรดเบสของน้ำเสียลดลง (เสริมพล รัตสุข และไชยยุทธ กลิ่นสุคนธ์, 2525)

ความสามารถในการดูดซับของถ่านจะขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของถ่าน และชนิดของสารที่ดูดซับ ดังนั้นการใช้ถ่านดูดซับจึงจำเป็นต้องศึกษาทดลองเพื่อหาถ่านที่เหมาะสมที่สุดสำหรับแต่ละการใช้งาน



รูปที่ 2.3 การดูดซับสิ่งสกปรกบนถ่านกัมมันต์ (Cheremisinoff and Morresi, 1978)

การดูดซับที่เกิดขึ้นในระบบบำบัดน้ำเสียอาจมีด้วยกัน 3 ลักษณะ คือ

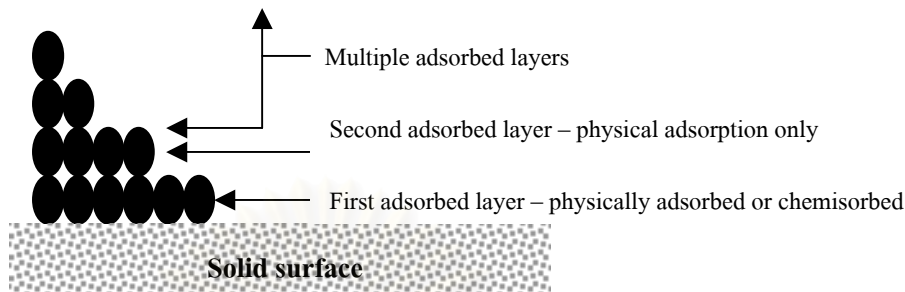
1) แบบแลกเปลี่ยนประจุ (Exchange adsorption) การดูดซับแบบนี้อาศัยการดูดซับด้วยแรงดึงดูดระหว่างไอออน (Ionic forces) หรือแรงไฟฟ้าสถิต (Electrostatic forces) บริเวณผิวหน้าของสารดูดซับ (Myers, 1999)

2) แบบเคมี (Chemical adsorption หรือ Chemisorbed) การดูดซับแบบนี้อาศัยการเกิดปฏิกิริยาเคมีต่อกัน ทำให้โมเลกุลของสารเคมีที่ถูกดูดซับไม่เกิดการเคลื่อนที่บริเวณผิว

3) แบบกายภาพ (Physical adsorption) การดูดซับแบบนี้อาศัยการเกิดการดูดซับด้วยแรงประเภท Van der Waals ซึ่งไม่ยึดติดแน่นเหมือนสองแบบแรก และเป็นกระบวนการที่ผันกลับได้ มักจะเหมาะสมกับสภาวะอุณหภูมิต่ำๆ

ในกระบวนการดูดซับ โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเข้ามาอยู่ในชั้นแรกจะสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับผิวของสารดูดซับได้จึงเกิดการดูดซับทั้งแบบกายภาพและเคมี ส่วนการดูดซับของโมเลกุลชั้นต่อไปจะเกิดการดูดซับแบบกายภาพเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.4 ซึ่งรูปแบบจำนวนชั้น

ของโมเลกุลที่ถูกดูดซับแบบกายภาพ จะมีความสำคัญต่อการเลือกใช้สมการทางคณิตศาสตร์ในการประเมินความสามารถในการดูดซับ หรือการคำนวณไอโซเทอมการดูดซับ



รูปที่ 2.4 การดูดซับของ โมเลกุลแบบหลายชั้นบนผิวของแข็ง (Myers, 1999)

2.3.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ

ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับของถ่านกัมมันต์ได้แก่

1) สมบัติทางกายภาพและเคมีของถ่านกัมมันต์ เช่น (Schuliger, 1987)

ก. ขนาดของถ่านกัมมันต์ ถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดเล็กจะมีอัตราดูดซับเร็วกว่า ดังนั้นถ่านกัมมันต์ชนิดผงจึงมีอัตราเร็วในการดูดซับสูงกว่าถ่านกัมมันต์แบบเม็ด

ข. พื้นที่ผิวมีความสำคัญโดยตรงกับความสามารถในการดูดซับ นั่นคือถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวมากย่อมดูดโมเลกุลของสารไว้ได้มากกว่าถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวน้อย

ค. ปริมาณของถ่านกัมมันต์ ถ้าใช้ถ่านกัมมันต์จำนวนมากขึ้นประสิทธิภาพในการบำบัดก็จะมากขึ้นด้วย แต่การนำถ่านมาใช้จำเป็นต้องเลือกปริมาณที่เหมาะสม จึงควรมีการทำไอโซเทอมการดูดซับเพื่อประเมินปริมาณถ่านที่จะนำมาใช้งาน

ง. นอกจากนี้ขนาดของรูพรุน และส่วนประกอบทางเคมีก็เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับเช่นกัน

2) สมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวดูดซับ เช่น

ก. ความสามารถในการละลาย สารที่มีความสามารถในการละลายสูงจะสามารถดูดซับได้น้อย

ข. ขนาดของโมเลกุล การดูดซับจะเกิดได้ดีที่สุดเมื่อขนาดของโมเลกุลสารถูกดูดซับมีขนาดเล็กกว่าขนาดของรูพรุนเล็กน้อย และโมเลกุลมีโครงสร้างเป็นกิ่ง (branched chain) จะถูกดูดซับได้ดีกว่าโมเลกุลที่เป็นโซ่ตรง

ค. นอกจากนี้ยังมีสมบัติอื่นๆ เช่น ประจุไฟฟ้าของโมเลกุล และส่วนประกอบทางเคมี เป็นต้น

3) ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในสารละลาย

ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในสารละลาย จะมีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับของสารถูกดูดซับ โดยการดูดซับในสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารถูกดูดซับต่ำ จะมีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงกว่าสารละลายที่มีความเข้มข้นของสารถูกดูดซับสูง

4) สมบัติของสารละลาย เช่น

ก. ค่าความเป็นกรดเบส (pH) เนื่องจากความสามารถในการดูดซับขึ้นกับสภาพความเป็นขั้วของพื้นผิวคาร์บอน

ข. อุณหภูมิ การเพิ่มอุณหภูมิจะทำให้การแพร่ผ่านของสารที่ถูกดูดซับลงไปยังรูพรุนของถ่านได้เร็วขึ้น แต่จะส่งผลให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับกับพื้นที่ผิวของถ่านลดลง

5) ระยะเวลาในการสัมผัสระหว่างถ่านกัมมันต์และสารถูกดูดซับในระบบ

ระยะเวลาในการสัมผัสระหว่างถ่านกัมมันต์และสารถูกดูดซับ เมื่อน้ำเสียสัมผัสกับถ่านเป็นเวลานาน โอกาสที่จะเกิดการดูดซับก็จะเพิ่มสูงขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับเพิ่มขึ้น

2.3.5 สมบัติต่างๆของถ่านกัมมันต์

ในการนำถ่านกัมมันต์ไปใช้ในการบำบัดน้ำเสีย จำเป็นที่จะต้องมีการเลือกถ่านที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งานแต่ละประเภท โดยพิจารณาจากลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่าน ลักษณะคุณสมบัติของน้ำเสียหรือน้ำทิ้ง ตลอดจนความสะดวกในการควบคุมระบบบำบัด เป็นต้น

ลักษณะสมบัติของถ่านที่เป็นตัวกำหนดการใช้งาน ได้แก่ (Cheremisinoff and Ellerbusch, 1978)

1) พื้นที่ผิว (Surface area) โดยทั่วไปถ่านที่มีพื้นที่ผิวมากจะมีความสามารถในการดูดซับมาก

2) ความหนาแน่นปรากฏ (Apparent density) ใช้ในการประเมินความสามารถในการฟื้นฟูสภาพของถ่าน (Carbon regeneration)

3) ความหนาแน่นก้อน (Bulk density) ใช้ในการประเมินปริมาณของถ่านในแต่ละการใช้งาน

4) ขนาดใช้งาน (Effective size), เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (Mean particle diameter) และสัมประสิทธิ์ของความเสมอกัน (Uniformity coefficient) ใช้ในการประเมินภาวะทางชลศาสตร์ (Hydraulic conditions) ของถังดูดซับ (Adsorption column)

5) ปริมาตรรูพรุน (Pore volume) เป็นตัวกำหนดการดูดซับ โมเลกุลของน้ำเสีย

- 6) การวิเคราะห์ขนาดโดยใช้ตะแกรงร่อน (Sieve analysis) เป็นตัวตรวจสอบ Plant-Handling Effect ของถ่านกัมมันต์
- 7) แอบริชัน นัมเบอร์ (Abrasion number) ใช้ในการประเมินความคงทนต่อการขัดสี
- 8) ปริมาณร้อยละของเถ้า (% Ash) แสดงถึงกากของถ่าน
- 9) ความชื้น (Moisture) แสดงปริมาณน้ำในถ่านจากการผลิต
- 10) ไอโอดีนนัมเบอร์ (Iodine number) เป็นตัวกำหนดความสามารถของถ่านในการดูดซับสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ
- 11) โมลาสนัมเบอร์ (Molasses number) เป็นตัวกำหนดความสามารถของถ่านในการดูดซับสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง
- 12) ขนาดของรูพรุน (Pore size) เป็นตัวกำหนดความสามารถในการดูดซับโมเลกุลจำเพาะบางชนิด

2.3.6 การฟื้นฟูคุณภาพของถ่านกัมมันต์ (Carbon regeneration)

เมื่อถ่านถูกใช้งานไปเป็นเวลานานๆ รูพรุนของเม็ดถ่านจะถูกอุดตันด้วยโมเลกุลของสิ่งสกปรกทำให้ถ่านหมดประสิทธิภาพในการดูดซับ ดังนั้นเพื่อลดค่าใช้จ่ายในการกำจัดจะต้องนำถ่านที่หมดประสิทธิภาพ (Exhausted carbon) มาฟื้นฟูเพื่อสามารถนำกลับมาใช้งานอีก การฟื้นฟูประสิทธิภาพถ่านกัมมันต์โดยการนำไปกำจัดโมเลกุลของสิ่งสกปรกที่อุดตันอยู่ในรูพรุนของถ่าน อาจทำได้หลายวิธี ได้แก่ (Lyman, 1987)

1) การใช้ความร้อน (Thermal reactivation)

วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมาก ถ่านกัมมันต์ที่หมดประสิทธิภาพแล้วจะรวมกับน้ำมีลักษณะขุ่น (Slurry) นำเข้ามาในระบบฟื้นฟูคุณภาพ หลังจากนั้นทำการแยกน้ำ (Dewater) ออกจากถ่านกัมมันต์ แล้วส่งเข้าเตาเผาที่เรียกว่า multiple hearth furnace หรือ rotary kiln ทำการเผาที่อุณหภูมิ 870-980 องศาเซลเซียส ระหว่างนี้ถ่านจะถูกทำให้แห้ง และการเผาใหม่จะทำให้โมเลกุลของสิ่งสกปรกที่เป็นสารอินทรีย์บนผิวหน้า และในรูพรุนของเม็ดถ่านระเหยเป็นไอและถูกเผาทำลายตัวไป ในขั้นตอนการเผาจะต้องควบคุมปริมาณออกซิเจนเพื่อให้ความร้อนทำลายโมเลกุลของสิ่งสกปรกที่ติดผิวถ่าน แต่ไม่ทำลายเนื้อถ่าน (Cheremisinooff and Morresi, 1978) หลังจากนั้นถ่านที่ร้อนจัดจะถูกทำให้เย็นโดยจุ่มลงในน้ำ (Quenching) แล้วนำไปล้างแยกเศษผงถ่านออกแล้วจึงนำไปเก็บไว้หรือนำกลับไปใช้งาน

2) การใช้ด่าง (Alkaline regeneration) วิธีนี้นิยมใช้กับสารถูกดูดซับ หรือภาวะที่ใช้ในการดูดซับเป็นกรด

3) การใช้กรด (Acid regeneration) วิธีนี้นิยมใช้กับสารถูกดูดซับ หรือภาวะที่ใช้ในการดูดซับเป็นด่าง

- 4) การใช้ตัวทำละลาย (Solvent regeneration) วิธีนี้นิยมใช้กับสารดูดซับที่เป็นสารอินทรีย์
- 5) การใช้ไอน้ำ (Steam regeneration) วิธีนี้นิยมใช้กับสารดูดซับที่เป็นไอได้ง่าย
- 6) การฟื้นฟูคุณภาพโดยวิธีทางชีวเคมี (Biological regeneration) วิธีนี้นิยมใช้กับสารดูดซับที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ เช่นสารอินทรีย์

2.4 ไอโซเทอมการดูดซับ (Adsorption isotherm)

ไอโซเทอมการดูดซับ เป็นการแสดงปริมาณของสารดูดซับที่ถูกดูดซับต่อหน่วยของสารดูดซับ ซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นที่จุดสมดุลในสารละลายที่อุณหภูมิคงที่ ไอโซเทอมการดูดซับมีหลายแบบ ดังนี้

2.4.1 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ (Langmuir adsorption isotherm)

สมมติฐานพื้นฐานของแบบจำลอง ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ คือ

- 1) โมเลกุลถูกดูดซับอยู่บริเวณที่แน่นอนบนพื้นผิวของสารดูดซับ
- 2) มีโมเลกุลเดียวในบริเวณที่ถูกดูดซับ
- 3) พื้นที่ของบริเวณดูดซับมีจำนวนแน่นอน ซึ่งกำหนดโดยลักษณะของพื้นผิว
- 4) พลังงานของการดูดซับมีค่าเท่ากันทุกบริเวณ

การดูดซับจากสารละลายโดยสารดูดซับ แสดงได้ดังสมการ

$$X = \frac{X_m b C_e}{1 + b C_e} \quad (2.2)$$

โดย X = ปริมาณสารดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของคาร์บอน (มิลลิกรัม/กรัม)

X_m = ปริมาณสารดูดซับมากที่สุดที่ถูกดูดซับเพื่อสร้างแผ่นชั้นเดียว (มิลลิกรัม/กรัม)

C_e = ความเข้มข้นของสารดูดซับในสารละลายที่จุดสมดุล (มิลลิกรัม/ลิตร)

b = ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ (ลิตร/มิลลิกรัม)

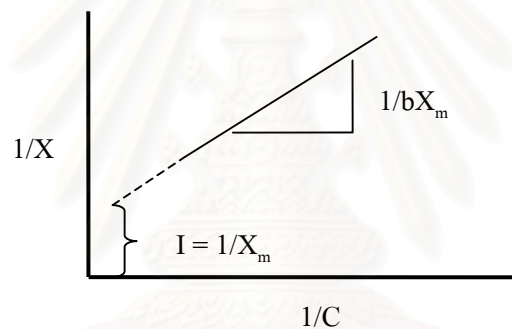
เมื่อ X เข้าสู่ X_m และ C_e เข้าสู่ infinity จะเขียนสมการได้เป็น

$$\frac{C_e}{X} = \frac{1}{bX_m} + \frac{C_e}{X_m} \quad (2.3)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง C_e/X กับ C_e ซึ่งเป็นเส้นตรง จะมีความชัน $1/X_m$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $1/bX_m$ และเมื่อหารด้วย C_e จะได้สมการเส้นตรง คือ

$$\frac{1}{X} = \frac{1}{X_m} + \frac{1}{C_e} \left(\frac{1}{bX_m} \right) \quad (2.4)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $1/X$ กับ $1/C_e$ ซึ่งเป็นเส้นตรง จะมีความชัน $1/bX_m$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $1/X_m$ จากสมการ 2.3 และ 2.4 แสดงได้ดังรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.5 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมีวัวร์ (Cheremisinoff and Morresi, 1978)

2.4.2 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช (Freundlich adsorption isotherm)

สมการการดูดซับแบบฟรุนดลิชใช้กันแพร่หลายที่สุดในการอธิบายการดูดซับในระบบของเหลว ซึ่งมีสมการดังนี้คือ

$$\frac{X}{m} = KCe^{1/n} \quad (2.5)$$

โดย X/m = ปริมาณสารถูกดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของคาร์บอน (มิลลิกรัม/กรัม)

C_e = ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในสารละลายที่จุดสมดุล (มิลลิกรัม/ลิตร)

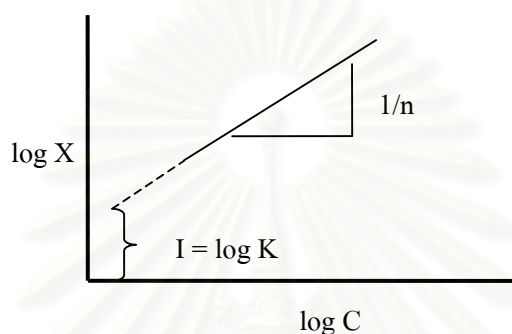
K = ค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับของคาร์บอน (มิลลิกรัม/กรัม)

$1/n$ = ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดซับ (ลิตร/กรัม)

จากสมการที่ 2.5 สามารถเขียนในรูป logarithmic ได้ดังนี้ คือ

$$\log\left(\frac{X}{m}\right) = (\log K) + \left(\frac{1}{n}\right)(\log Ce) \quad (2.6)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log(X/m)$ กับ $\log C_e$ จะเป็นเส้นตรงที่มีความชัน $1/n$ และ $\log K$ จุดตัดแกน y ของ $\log(X/m)$ ที่ $\log C_e = 0$ ($C_e = 1$) จากสมการที่ 2.5 และ 2.6 แสดงได้ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนคลิช (Cheremisinoff and Morresi, 1978)

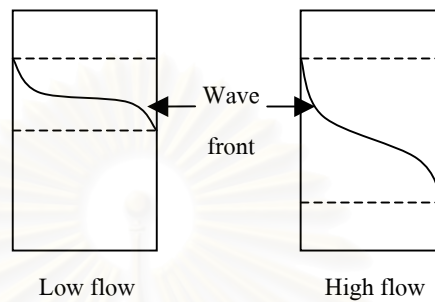
2.5 การดูดซับแบบต่อเนื่อง (The adsorption column)

ในการดูดซับโดยใช้คอลัมน์ ถ่านกัมมันต์จะถูกบรรจุไว้ในปริมาณที่คงที่ โดยมีการป้อนของเหลวซึ่งมีสารถูกดูดซับไหลผ่านชั้นของถ่านกัมมันต์ โดยเป็นการป้อนอย่างต่อเนื่อง Weber (1972) กล่าวว่า การดูดซับแบบต่อเนื่องมีข้อดีเหนือกว่าการดูดซับแบบแบตช์ (Batch) คืออัตราการดูดซับจะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในสารละลาย ซึ่งความเข้มข้นของสารถูกดูดซับจะสัมผัสชั้นถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์อย่างต่อเนื่อง

2.5.1 เขตการถ่ายโอนมวล (MTZ, Mass Transfer Zone)

เมื่อน้ำที่มีสารปนเปื้อนไหลผ่านชั้นของสารดูดซับ เขตการถ่ายโอนมวลก็เกิดขึ้นจากการดูดซับอย่างต่อเนื่องของสารถูกดูดซับในชั้นถ่านกัมมันต์ สารถูกดูดซับจะถูกดูดซับอย่างรวดเร็วในชั้นบนของถ่านกัมมันต์ จนกระทั่งปริมาณการดูดซับเข้าสู่สมดุล ที่จุดนี้สารถูกดูดซับที่ชั้นบนจะหมดสภาพการใช้งาน การดูดซับก็เกิดขึ้นต่อไปในชั้นถ่านกัมมันต์ที่อยู่ต่ำลงมา ในเขตที่สารปนเปื้อนเปลี่ยนแปลงจากของเหลวมาอยู่ในภาวะที่ถูกดูดซับนี้เรียกว่า เขตการถ่ายโอนมวล (Mass Transfer Zone) ซึ่งความลึกของขอบเขตการถ่ายโอนมวลจะขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ คือ ชนิดของสารถูกดูดซับ ลักษณะของสารดูดซับ และปัจจัยทางพลศาสตร์ Bernardin (1976) กล่าวว่า เมื่อ

สารละลายเคลื่อนที่ผ่านชั้นถ่านกัมมันต์ด้วยอัตราการไหลที่เร็ว จะทำให้เขตการถ่ายโอนมวลกว้าง เป็นผลให้เกิดการหลุดรอดของสารปนเปื้อนในน้ำออกขึ้นอย่างรวดเร็ว ในทางตรงข้ามหากสารละลายเคลื่อนที่ผ่านชั้นของถ่านกัมมันต์อย่างช้าๆ จะทำให้เกิดการสะสมตัวของสารปนเปื้อนที่ละ น้อย จนกระทั่งเกิดการหลุดรอดของสารนั้นในน้ำออก ในกรณีนี้ถ่านกัมมันต์จะถูกใช้ประโยชน์ อย่างเต็มที่



รูปที่ 2.7 เขตการถ่ายเทมวลของอัตราการไหลที่แตกต่างกัน (Bernardin, 1976)

เขตการถ่ายโอนมวลแสดงดังสมการ

$$L_m = L \left(1 - \frac{t_b}{t_e}\right) \quad (2.7)$$

โดย t_b = เบรคทรูจ์พอยท์ คือ เวลาที่ความเข้มข้นขาออกต่อความเข้มข้นขาเข้ามีค่าเท่ากับ 10% (ชั่วโมง)

t_e = จุดเสื่อมสภาพของถ่านกัมมันต์ คือ เวลาที่ความเข้มข้นขาออกต่อความเข้มข้นขาเข้ามีค่าเท่ากับ 90% (ชั่วโมง)

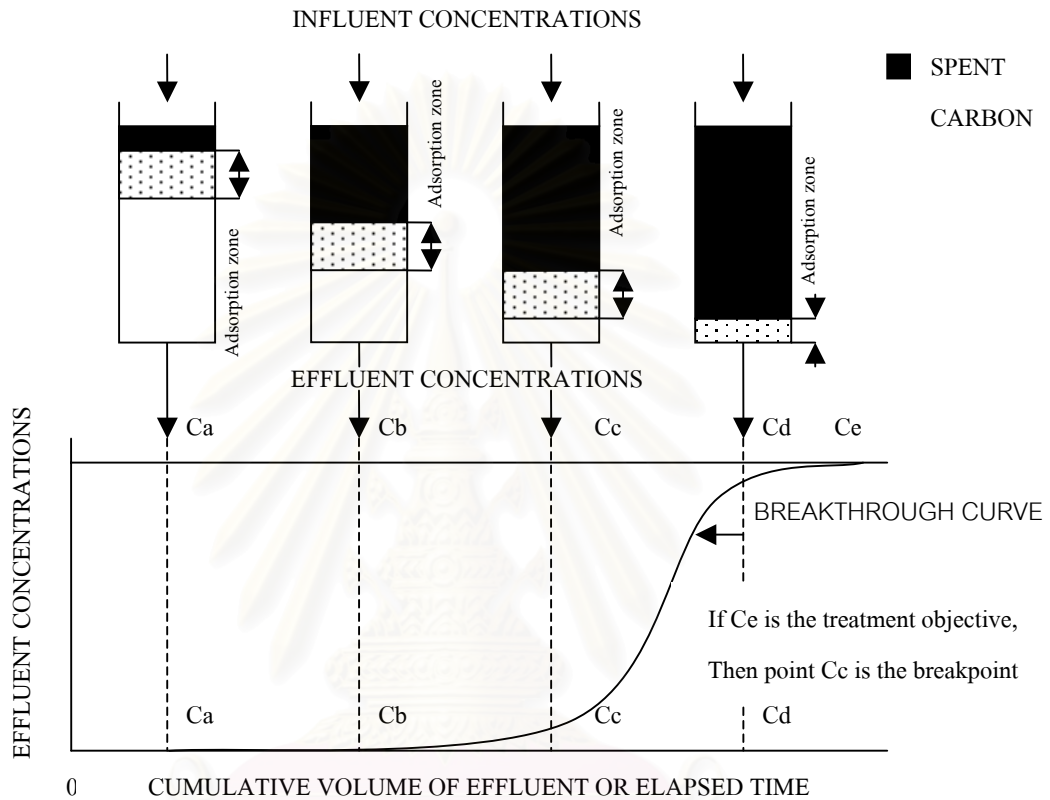
L = ความสูงของเบด (เซนติเมตร)

L_m = ความสูงของเขตการถ่ายโอนมวล (เซนติเมตร)

2.5.2 ลักษณะเบรคทรูจ์ (Breakthrough Characteristics)

ลักษณะเบรคทรูจ์เป็นความสัมพันธ์แบบต่อเนื่อง ระหว่างความเข้มข้นของสารในน้ำออกกับปริมาณน้ำที่บำบัดได้หรือเวลา ดังรูปที่ 2.8 แสดงรูปทั่วไปของเส้นโค้งเบรคทรูจ์ และแสดงความสัมพันธ์ของเส้นโค้งเบรคทรูจ์กับปริมาณของชั้นถ่านที่หมดสภาพ ชั้นของถ่านที่ยังไวงานอยู่ (Active Zone) และชั้นของถ่านที่ปราศจากสารถูกดูดซับ

จากรูปที่จุดเริ่มต้น น้ำที่ผ่านออกจากถังดูดซับแบบแท่งจะมีปริมาณสารถูกดูดซับต่ำ สารถูกดูดซับส่วนใหญ่จะถูกดูดซับโดยถ่านกัมมันต์ในชั้นต้นๆ เมื่อของเหลวไหลผ่านเป็นจำนวนมากขึ้น ความสามารถในการดูดซับจะลดลงทำให้ปริมาณของสารถูกดูดซับในน้ำออกเพิ่มมากขึ้นทีละน้อย จนกระทั่งชั้นของถ่านกัมมันต์ใกล้หมดสภาพปริมาณของตัวถูกละลายในน้ำออกจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนมีค่าเท่ากับปริมาณของสารถูกดูดซับในน้ำขาเข้า



รูปที่ 2.8 แสดงเส้นโค้งเบรคทรูจ์ในถังดูดซับแบบคอลัมน์ (Clark and Lykins, 1989)

2.6 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ชนิตา เสมรรัตน์ (2543) ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีของน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมสิ่งทอ ด้วยกระบวนการดูดซับ โดยสารดูดซับที่ใช้คือ ถ่านกัมมันต์ ถ่านกะลา และถ่านชานอ้อย โดยการกระตุ้นด้วยโซเดียมคลอไรด์ ผลการทดลองพบว่าถ่านกะลาไม่มีสมบัติที่เหมาะสมในการนำไปใช้งาน โดยพิจารณาจากผลการทดสอบไอโซเทอมของฟรุนดลิช ส่วนถ่านกัมมันต์ และถ่านชานอ้อยมีความเป็นไปได้ที่จะนำไปใช้งาน

ประกฤษ เติศจรัสอร่ามดี (2539) ศึกษาประสิทธิภาพการขจัดไอออนตะกั่วและไอออนปรอทในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยการใช้ซีลีเนียม ฟางข้าว และขุยมะพร้าว ผลการศึกษาพบว่า ขุยมะพร้าวที่ความเข้มข้นของ ไอออนตะกั่วและไอออนปรอท 50 ส่วนในล้านส่วน ปริมาณ 0.20 กรัม ความสามารถในการขจัดไอออนตะกั่ว และไอออนปรอทในน้ำเสียสังเคราะห์ สามารถที่จะขจัดได้ 80% และ 78% ตามลำดับ และเมื่อเปรียบเทียบการใช้ซีลีเนียมและฟางข้าว พบว่าขุยมะพร้าวมีความสามารถในการขจัดไอออนโลหะหนักได้ดีกว่าซีลีเนียมและฟางข้าว สำหรับน้ำเสียจากโรงงานแบตเตอรี่ที่มีความเข้มข้นของตะกั่ว 0.3-0.7 ส่วนในล้านส่วน พบว่า ซีลีเนียม ฟางข้าว และขุยมะพร้าวสามารถขจัดไอออนตะกั่วได้เกือบ 100%

ลลิตา นิตศนจารุกุล (2544) ศึกษาการดูดซับไอออนตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร คือเปลือกทุเรียน และเปลือกเม็ดมะม่วงหิมพานต์ พบว่า การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อค่าความเป็นกรดเบสของน้ำเสียเพิ่มขึ้น ตั้งแต่ 2-9 และที่ความเป็นกรดเบสของน้ำเสียตั้งแต่ 4 ขึ้นไป พบว่าถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ชนิดมีประสิทธิภาพในการขจัดไอออนตะกั่วสูงกว่า 90% ทั้งนี้เนื่องจากเกิดการดูดซับบนถ่านกัมมันต์ร่วมกับการตกตะกอนของ ไอออนตะกั่ว ผลของเวลาสัมผัสพบว่า สมดุลของการดูดซับสำหรับถ่านทั้ง 2 ชนิดคือ 10 นาที

อริชัย นพแก้ว (2539) ศึกษาการใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับโลหะหนักจากน้ำชะมูลฝอยที่ผ่านบ่อเก็บกัก พบว่า ภาวะที่เหมาะสมในการขจัดไอออนโครเมียมและไอออนปรอท คือ ความเป็นกรดเบสเท่ากับ 4 เวลาสัมผัส 15 นาที สำหรับน้ำเสียสังเคราะห์ และสำหรับน้ำชะมูลฝอย คือ ความเป็นกรดเบสเดิมของน้ำชะมูลฝอยซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 7-8 เวลาสัมผัส 15 นาที ซึ่งจากการทดลองพบว่า ถ่านกัมมันต์นอกจากจะขจัดไอออนโลหะหนักแล้วยังขจัดซีโอไซด์และสีจากน้ำชะมูลฝอยอีกด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าการขจัดไอออนโลหะหนักในน้ำชะมูลฝอยมีประสิทธิภาพดีกว่าการใช้น้ำเสียสังเคราะห์ เมื่อปริมาตรน้ำผ่านการบำบัดเท่ากัน โดยมีประสิทธิภาพรวมประมาณ 90% และ 70% สำหรับการขจัดไอออนโลหะหนักจากน้ำชะมูลฝอยและน้ำเสียสังเคราะห์ตามลำดับ

Reed และคณะ (1996) ได้ทำการศึกษาการขจัดไอออนตะกั่วออกจากน้ำเสียทั้งแบบเบตซ์ และแบบคอลัมน์ โดยการศึกษาอิทธิพลของความเป็นกรดเบส เวลาสัมผัส และอัตราการไหลของน้ำเสียในคอลัมน์ถ่านกัมมันต์แบบเม็ด ผลการทดลองพบว่า ความเป็นกรดเบสของคอลัมน์มีความสำคัญต่อการกำจัดไอออนตะกั่ว โดยการกำจัดไอออนตะกั่วจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเป็นกรดเบสเพิ่มขึ้น และเมื่อทำการป้อนน้ำเสียที่มีความเข้มข้นไอออนตะกั่ว 10 มิลลิกรัมต่อลิตรผ่านคอลัมน์จนถึงจุดเสื่อมสภาพของถ่านกัมมันต์ พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ได้มีค่าคงที่การดูดซับ (x/m) เท่ากับ 8 มิลลิกรัมต่อ

กรัม และการฟื้นฟูสภาพถ่านโดยใช้กรดและด่างพบว่า มีประสิทธิภาพในการทำให้ไอออนตะกั่ว หลุดออกจากพื้นผิว และละลายกลับเข้าสู่สารละลาย

Bin Yu และคณะ (2000) ได้ทำการศึกษาการดูดซับไอออนทองแดงจากน้ำเสียโดยใช้ซีลีเยอ พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับขึ้นอยู่กับ ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย ปริมาณของซีลีเยอที่ใช้ เวลาที่ใช้ในการดูดซับ และค่าความเป็นกรดเบสของสารละลายโลหะ ค่าความเป็นกรดเบสที่เหมาะสมในการใช้ซีลีเยอดูดซับไอออนทองแดงเท่ากับ 7 และสามารถดูดซับไอออนทองแดงได้ 1.79 มิลลิกรัมต่อกรัม

Chen และ Wang (2000) ได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด Filtrasorb 200 โดยทำการทดลองแบบต่อเนื่อง เมื่อทำการป้อนน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีโลหะหนัก 3 ชนิดคือ ไอออนทองแดง ไอออนสังกะสี และไอออนตะกั่ว ผ่านถังดูดซับแบบแท่งพบว่าความเป็นกรดเบสเป็นปัจจัยที่สำคัญที่สุด ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการขจัดไอออนโลหะหนักออกจากน้ำเสีย จากการทดลองพบว่าค่าเบรคทรูจ์ของถ่านกัมมันต์ในถังดูดซับแบบแท่งจะเพิ่มขึ้น เมื่อค่าความเป็นกรดเบสของน้ำเสียเริ่มต้นที่เข้าสู่ระบบมีค่าสูงขึ้น และประสิทธิภาพในการขจัดไอออนโลหะ 3 ชนิดแตกต่างกัน โดยประสิทธิภาพการขจัดเรียงจากมากไปน้อย คือไอออนทองแดง ไอออนตะกั่ว และไอออนสังกะสี ตามลำดับ เมื่อมีการปรับสภาพของถ่านกัมมันต์โดยใช้กรดไนตริก และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อนผ่านน้ำผ่านสู่ชั้นถ่าน จะทำให้ประสิทธิภาพในการบำบัดเพิ่มขึ้น

Kadirvelu และคณะ (2001) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับไอออนโลหะหนักจากน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรม ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกาบมะพร้าว โดยใช้วิธีการกระตุ้นทางเคมี พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับจะเพิ่มขึ้นจากความเป็นกรดเบสเท่ากับ 2 ถึง 6 และจะคงที่จนถึงความเป็นกรดเบสเท่ากับ 10 และจากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพของการดูดซับ ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของไอออนโลหะ และสามารถขจัดได้สูงสุดดังนี้คือ ขจัด Cu(II) ไอออน ได้ 73% ขจัด Hg(II) ไอออน Pb(II) ไอออน และ Cd(II) ไอออน ได้ 100% และ ขจัด Ni(II) ไอออน ได้ 92% สำหรับความเป็นกรดเบสที่เหมาะสมในการขจัดไอออนโลหะหนัก Cu(II) Pb(II) Ni(II) Hg(II) และ Cd(II) เท่ากับ 5.0 4.0 3.5 3.5 และ 4.0 ตามลำดับ

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

3.1.1 อุปกรณ์สำหรับใช้ทดลองในห้องปฏิบัติการ

- 1) เครื่องชั่งแบบละเอียด 4 ตำแหน่ง : รุ่น 1702 บริษัท Scientific Promotion Co. LTD
- 2) เครื่องเขย่า (Shaker)
- 3) เครื่องวัดความเป็นกรดเบส : รุ่น 420A บริษัท ORION
- 4) กระดาษกรอง Whatman No. 1
- 5) เครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC power supply) : รุ่น EE-1243-3
- 6) ขั้วอิเล็กโทรด
แอโนด – ทำจากไทเทเนียมเคลือบรูทีเนียมออกไซด์
แคโทด – ทำจากเหล็กกล้าไร้สนิม (stainless steel) พื้นที่ผิว 32 ตารางเซนติเมตร
- 7) เครื่องกวน (Magnetic stirrer) : รุ่น SLR บริษัท Scientific Promotion Co. LTD
- 8) แท่งกวนแม่เหล็ก (Magnetic bar)
- 9) สายไฟ

3.1.2 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

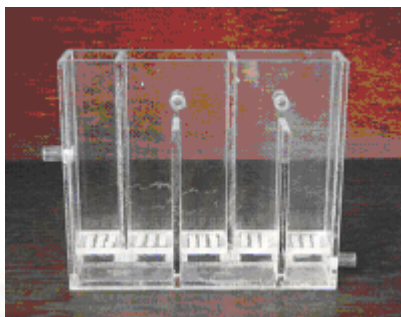
- 1) สารละลายมาตรฐานไอออนทองแดง ความเข้มข้น 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร : บริษัท Fisher Chemicals
- 2) กรดไนตริก (HNO_3) : บริษัท Fisher Chemicals
- 3) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) : บริษัท J.T BAKER

3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณทองแดง

เครื่องอะตอมมิกแอบซอร์ปชันสเปกโตรมิเตอร์ : Perkin Elmer Instruments, Analyst 300 Atomic Adsorption Spectrometer. USA. ความยาวคลื่นที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณไอออนทองแดงคือ 324 นาโนเมตร

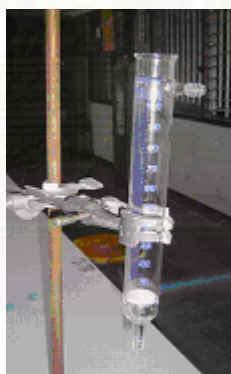
3.1.4 อุปกรณ์สำหรับการทดลองแบบต่อเนื่อง (Column test)

1) คอลัมน์อะคลีริกใสแบบแบ่งส่วน ขนาดกว้าง 2 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร ภายในแบ่งเป็น 5 ช่อง ขนาดกว้าง 2 เซนติเมตร ยาว 2 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.1



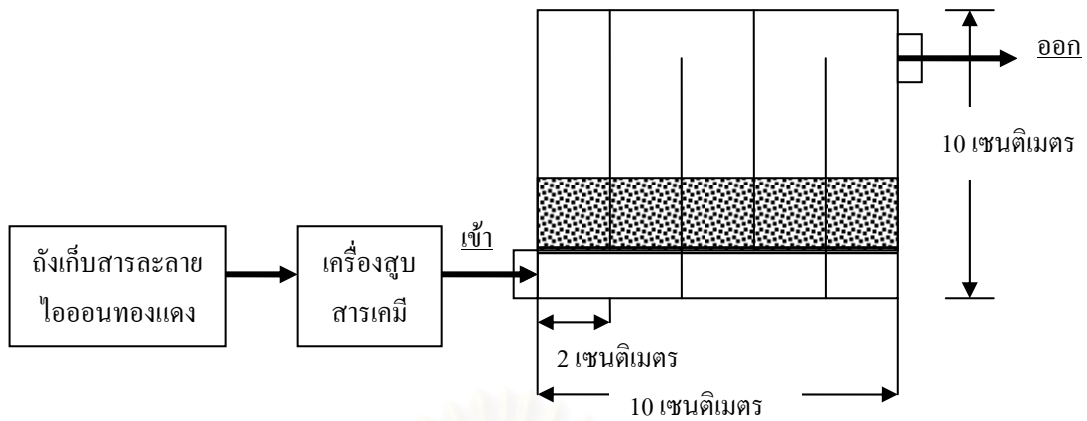
รูปที่ 3.1 ถังดูดซับอะคลีริกใสทรงสี่เหลี่ยม

2) คอลัมน์แก้วใสทรงกระบอก เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.2

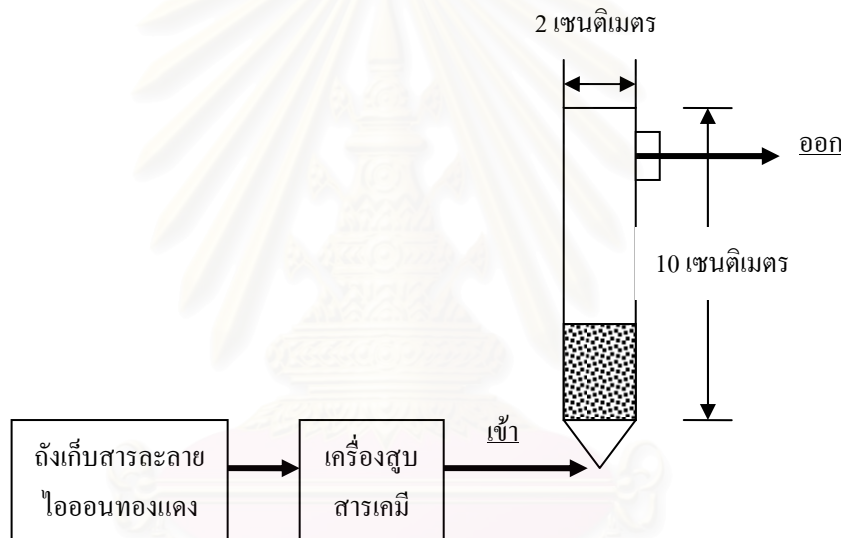


รูปที่ 3.2 คอลัมน์แก้วใสทรงกระบอก

- 3) สายยางพลาสติก
- 4) เครื่องสูบลำเคมี (Peristaltic Pump)
- 5) ถังน้ำพลาสติก



รูปที่ 3.3 ชุดอุปกรณ์การดูดซับแบบต่อเนื่องโดยใช้ถังดูดซับทรงสี่เหลี่ยม



รูปที่ 3.4 ชุดอุปกรณ์การดูดซับแบบต่อเนื่องโดยใช้ถังดูดซับทรงกระบอก

3.2 ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการทดลอง

ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการทดลองมีทั้งหมด 4 ชนิดคือ ถ่านกัมมันต์ A B C และ D โดยถ่านกัมมันต์ A เป็นถ่านกะลาจากบริษัท Carbokarn ถ่านกัมมันต์ B เป็นถ่านกะลาจากบริษัท C-gigantic ถ่านกัมมันต์ C เป็นถ่านกะลาที่ผ่านการกระตุ้นด้วยไอน้ำเป็นเวลา 60 นาที และถ่านกัมมันต์ D เป็นถ่านกะลาที่ผ่านการกระตุ้นด้วยไอน้ำเป็นเวลา 30 นาที ถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิดเป็นแบบเม็ดฉะนั้นก่อนจะทำการทดลองจะต้องร่อนคัดขนาด โดยร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 8 และค้างอยู่บนตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 16 ซึ่งจะได้ขนาดของถ่านกัมมันต์อยู่ระหว่าง 1.18-2.36 มม.แล้วจึงล้างด้วยน้ำกลั่นเพื่อกำจัดเศษ

ผงและสิ่งปนเปื้อนต่างๆออกจากถ่านกัมมันต์ จากนั้นนำไปอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 150 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วจึงทิ้งให้เย็นในโถป้องกันความชื้น (Desicator)

3.3 วิธีดำเนินงานวิจัย

3.3.1 การศึกษาความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์

ศึกษาความสามารถในการดูดซับไอออนทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ของถ่านกัมมันต์เกรดการค้า 4 ชนิด โดยใช้การทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch test) และศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับ ดังนี้ อิทธิพลของความเป็นกรดเบส อิทธิพลของเวลาสัมผัส และไอโซเทอมการดูดซับ

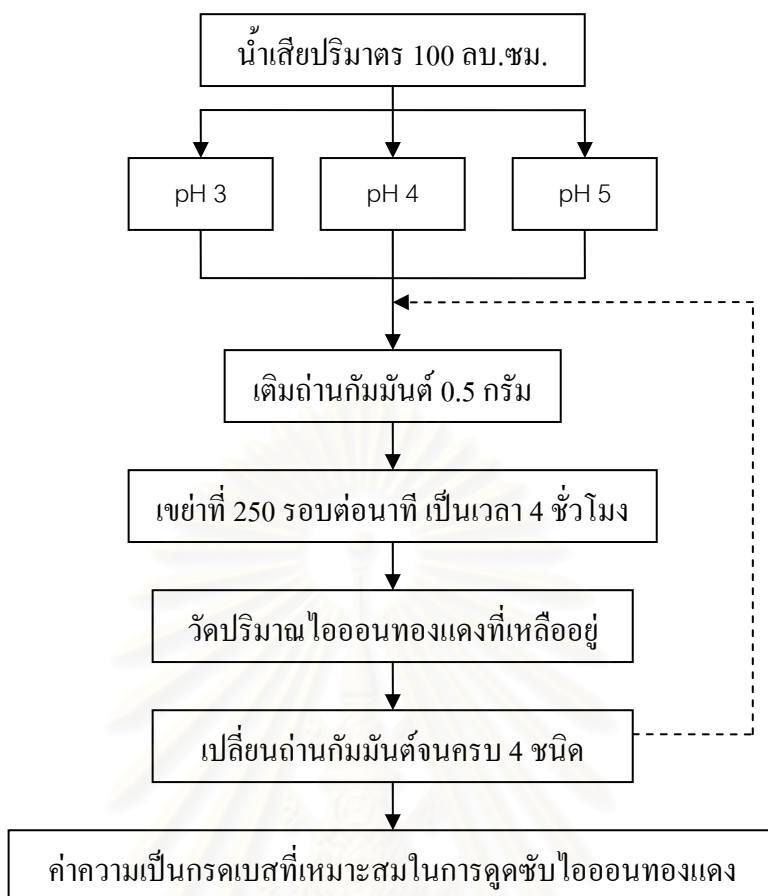
3.3.1.1 อิทธิพลของความเป็นกรดเบสที่มีต่อการดูดซับ

1) นำน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีระดับความเข้มข้นไอออนทองแดง 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 ลบ.ซม. ที่ปรับค่าความเป็นกรดเบสให้เท่ากับ 3 4 และ 5 ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ลบ.ซม. เติมถ่านกัมมันต์ปริมาณ 0.5 กรัม ลงในขวดแต่ละใบ นำขวดไปเขย่าบนเครื่องเขย่าเป็นเวลา 4 ชั่วโมง

2) แยกถ่านกัมมันต์ออกด้วยกระดาษกรอง แล้วนำน้ำเสียไปวัดปริมาณไอออนทองแดงที่เหลืออยู่

3) ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนแรก โดยเปลี่ยนถ่านกัมมันต์จนครบทั้ง 4 ชนิด แล้วเปรียบเทียบเลือกค่าความเป็นกรดเบสที่ดีที่สุด ขั้นตอนการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.5

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการศึกษาอิทธิพลของความเป็นกรดเบสที่มีต่อการดูดซับ

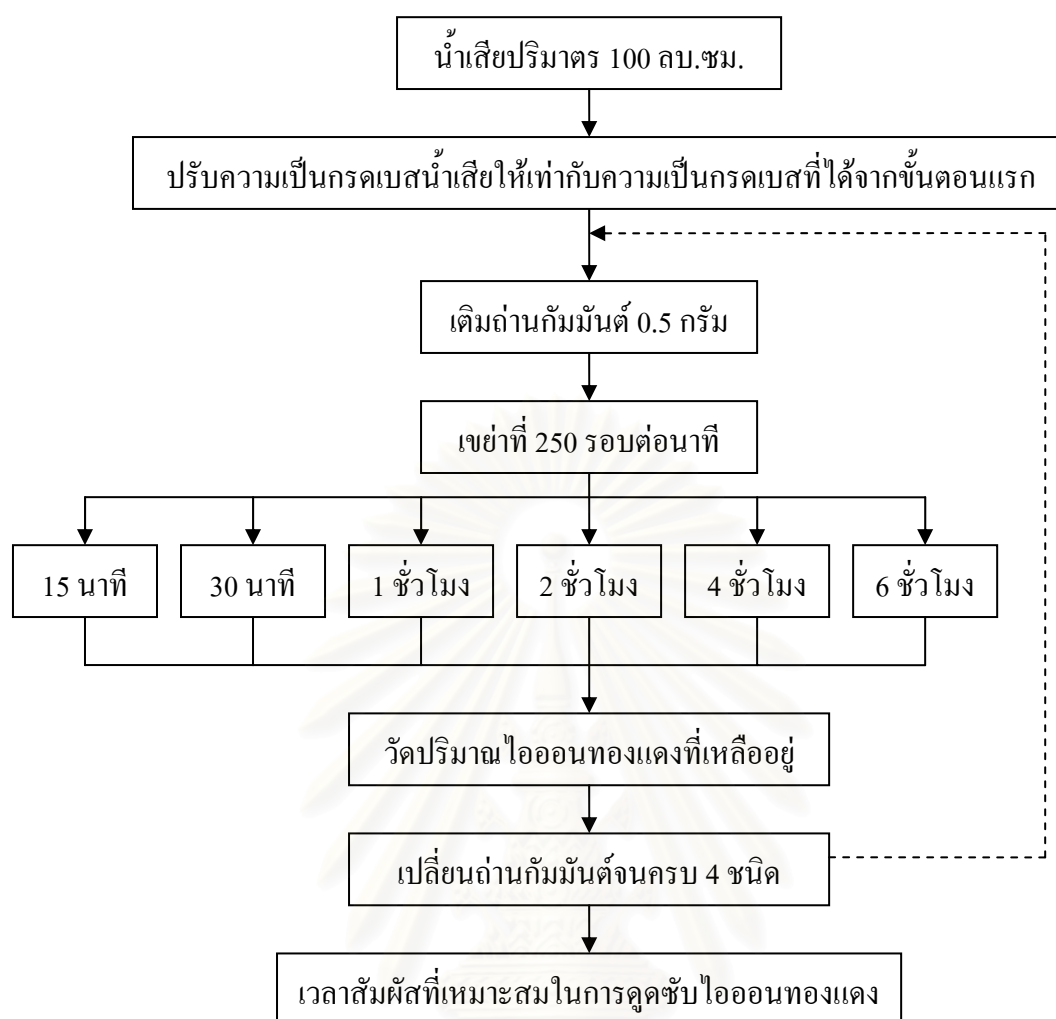
3.3.1.2 อิทธิพลของเวลาสัมผัสที่มีต่อการดูดซับ

1) นำน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีระดับความเข้มข้นไอออนทองแดง 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับค่าความเป็นกรดเบสให้เท่ากับค่าความเป็นกรดเบสที่ได้จากขั้นตอนแรก ปริมาตร 100 ลบ.ซม. ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ลบ.ซม. เติมถ่านกัมมันต์ปริมาณ 0.5 กรัม ลงในขวดจำนวน 18 ใบ

2) นำขวดไปเขย่าบนเครื่องเขย่าเป็นเวลา 15 นาที 30 นาที 1 ชั่วโมง 2 ชั่วโมง 4 ชั่วโมง และ 6 ชั่วโมง และเก็บตัวอย่างตามเวลาที่กำหนดจำนวน 5 มิลลิลิตร

3) แยกถ่านกัมมันต์ออกด้วยกระดาษกรอง แล้วนำน้ำเสียไปวัดปริมาณไอออนทองแดงที่เหลืออยู่

4) ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนแรก โดยเปลี่ยนถ่านจนครบทั้ง 4 ชนิด แล้ว ขั้นตอนการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.6



รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการศึกษาอิทธิพลของเวลาสัมผัสที่มีต่อการดูดซับ

3.3.1.3 การศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของถ่านกัมมันต์

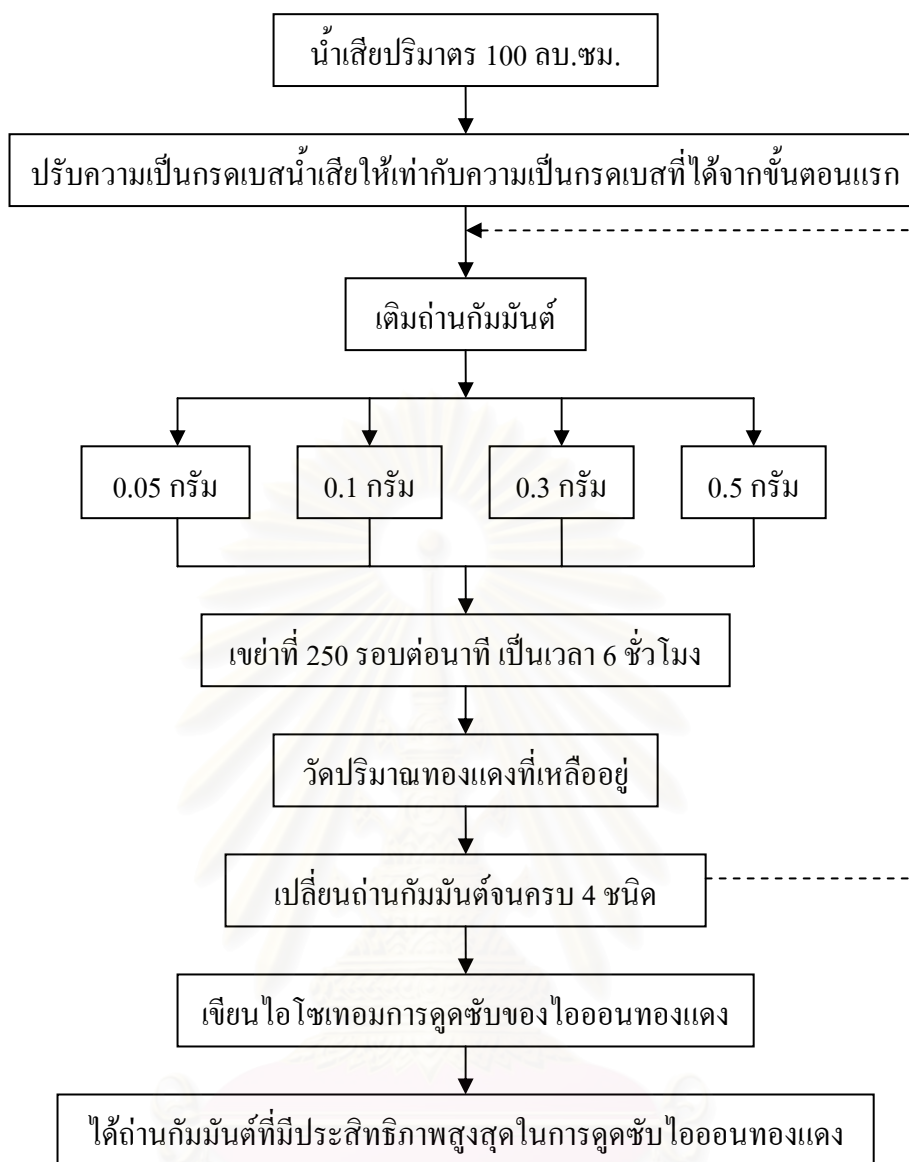
1) นำน้ำเสียสังเคราะห์ที่ระดับความเข้มข้นไอออนทองแดง 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับความเป็นกรดเบสให้เท่ากับความเป็นกรดเบสที่ได้จากขั้นตอนแรก ปริมาตร 100 ลบ.ซม. ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ลบ.ซม.

2) เติมถ่านกัมมันต์ปริมาณ 0.05 0.1 และ 0.3 กรัม ลงในขวดแต่ละใบตามลำดับเขย่าเป็นเวลา 6 ชั่วโมง

3) แยกถ่านกัมมันต์ออก แล้วนำน้ำเสียไปวัดปริมาณไอออนทองแดงที่เหลืออยู่

4) นำค่าที่ได้ไปเขียนไอโซเทอมการดูดซับ

5) ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนแรก โดยเปลี่ยนถ่านจนครบทั้ง 4 ชนิด แล้ว ขั้นตอนการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.7



รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของถ่านกัมมันต์

3.3.2 ทดสอบประสิทธิภาพในการดูดซับของถ่านกัมมันต์โดยใช้การทดลองแบบต่อเนื่อง

(Column test)

ทดสอบประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนทองแดงของถ่านกัมมันต์ โดยการทดลองแบบต่อเนื่อง (Column test) โดยนำถ่านกัมมันต์ที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับสูงสุดจากผลการทดสอบไอโซเทอมการดูดซับมาบรรจุในถังดูดซับแบบแท่ง

ใช้ถังดูดซับ 2 แบบคือ ถังดูดซับทรงสี่เหลี่ยมทำจากอะคริลิกขนาดกว้าง 2 ซม. ยาว 10 ซม. สูง 10 ซม. ซึ่งภายในแบ่งออกเป็น 5 ช่องขนาดกว้าง 2 ซม. ยาว 2 ซม. และถังดูดซับทรงกระบอกทำจากแก้วขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 ซม. สูง 10 ซม.

3.3.2.1 น้ำเสียสังเคราะห์

1) บรรจุถ่านกัมมันต์ปริมาณ 10 กรัมลงในถังดูดซับ ถ่านกัมมันต์ที่ใช้เลือกจากผลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ

2) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีระดับความเข้มข้นไอออนทองแดง 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรดเบสของน้ำเสียที่ใช้ได้จากการทดลองแบบแบตช์ ป้อนน้ำเสียอย่างต่อเนื่องด้วยอัตราเร็ว 0.6 ลิตรต่อชั่วโมง

3) เก็บตัวอย่างน้ำเสียทุกๆ 1 ชั่วโมงโดยกรองผ่านกระดาษกรอง และวิเคราะห์ปริมาณไอออนทองแดงที่เหลืออยู่แล้วนำไปสร้างเส้นโค้งเบรคทูล์ของถ่านกัมมันต์

4) ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนแรก โดยเปลี่ยนถังดูดซับจนครบทั้งสองแบบ

3.3.2.2 น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

น้ำเสียจริงที่ใช้ในการทดลองได้จากโรงงานบางกอกอินดัสเทรียลลามิเนท (BIL) ซึ่งเป็นน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นต้นมาแล้ว ซึ่งจะเหลือความเข้มข้นของไอออนทองแดงประมาณ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และมีค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 2.81

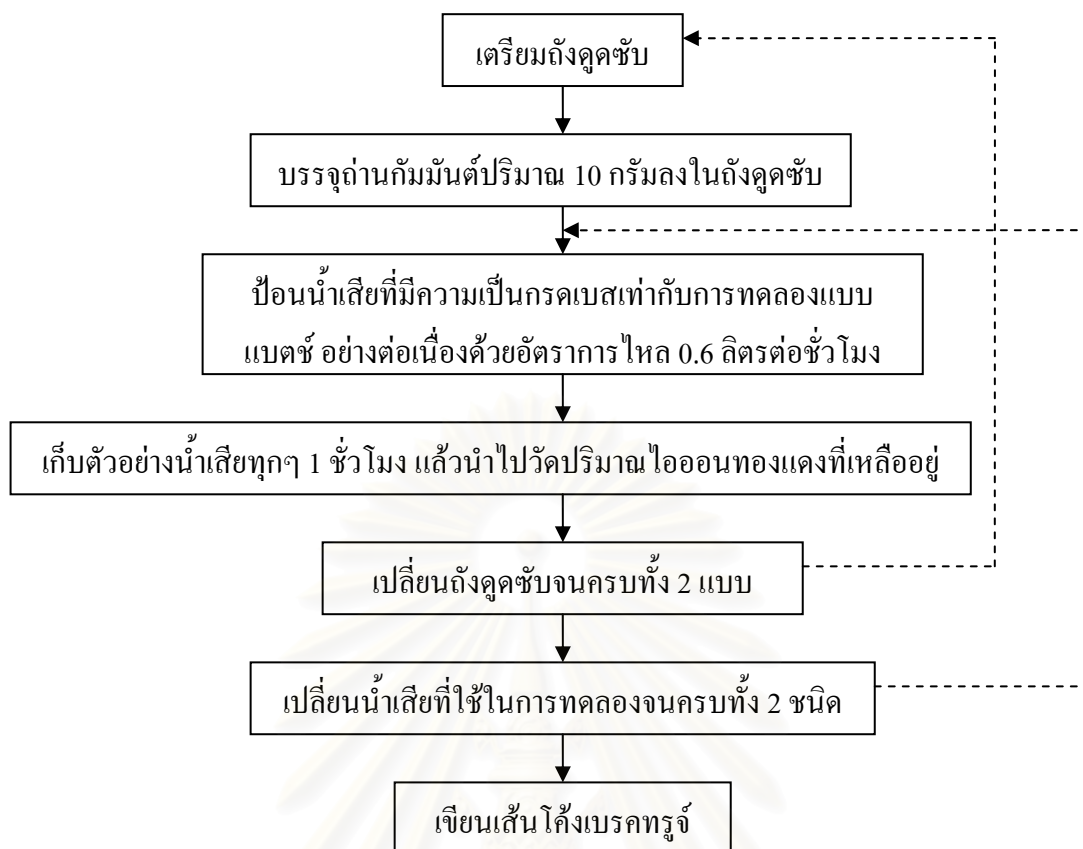
1) บรรจุถ่านกัมมันต์ปริมาณ 10 กรัมลงในถังดูดซับ ถ่านกัมมันต์ที่ใช้เลือกจากผลการทดสอบไอโซเทอร์มการดูดซับ

2) ป้อนน้ำเสียอย่างต่อเนื่องด้วยอัตราเร็ว 0.6 ลิตรต่อชั่วโมง ปรับค่าความเป็นกรดเบสของน้ำเสียที่ได้จากการทดลองแบบแบตช์

3) เก็บตัวอย่างน้ำเสียทุกๆ 1 ชั่วโมงโดยกรองผ่านกระดาษกรอง และวิเคราะห์ปริมาณไอออนทองแดงที่เหลืออยู่แล้วนำไปสร้างเส้นโค้งเบรคทูล์ของถ่านกัมมันต์

4) ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนแรก โดยเปลี่ยนถังดูดซับจนครบทั้งสองแบบ ขั้นตอนการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.8

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

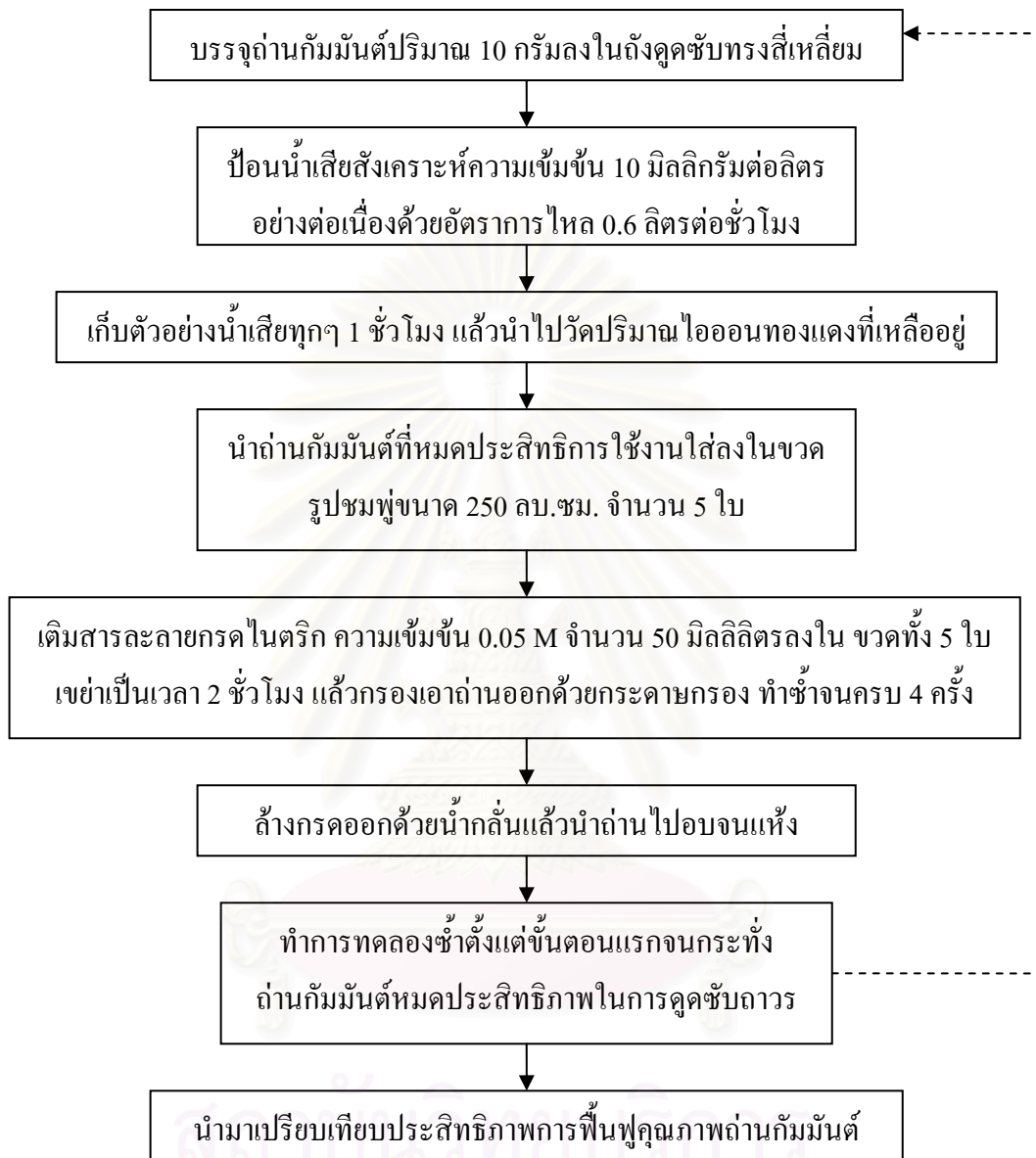


รูปที่ 3.8 ขั้นตอนการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับของถ่านกัมมันต์โดยใช้การทดลองแบบต่อเนื่อง

3.3.3 ศึกษาการฟื้นฟูคุณภาพถ่านกัมมันต์ที่หมดประสิทธิภาพการใช้งาน

- 1) บรรจุถ่านกัมมันต์ปริมาณ 10 กรัมลงในถึงคูดซับทรงสี่เหลี่ยม ถ่านกัมมันต์ที่ใช้เลือกจากผลการทดสอบไอโซเทอมการดูดซับ
- 2) เตรียมน้ำเสียตั้งคราะห์ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นกรดเบสของน้ำเสียที่ใช้ได้จากการทดลองแบบแบคซ์ ป้อนน้ำเสียอย่างต่อเนื่องด้วยอัตราเร็ว 0.6 ลิตรต่อชั่วโมง
- 3) เก็บตัวอย่างน้ำเสียทุกๆ 1 ชั่วโมง โดยกรองผ่านกระดาษกรอง และวิเคราะห์ปริมาณไอออนทองแดงที่เหลืออยู่ เก็บตัวอย่างจนกระทั่งถ่านหมดประสิทธิภาพในการดูดซับ
- 4) นำถ่านกัมมันต์ที่หมดประสิทธิภาพการใช้งานในแต่ละช่องของถึงคูดซับใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 ลบ.ซม. จำนวน 5 ใบ
- 5) เติมสารละลายกรดไนตริก ความเข้มข้น 0.05 M จำนวน 50 มิลลิลิตรลงใน ขวดทั้ง 5 ใบ เขย่าเป็นเวลา 2 ชั่วโมง
- 6) กรองเอาถ่านออกด้วยกระดาษกรอง ทำซ้ำจนครบ 4 ครั้ง
- 7) ล้างกรดออกด้วยน้ำกลั่น แล้วนำถ่านกัมมันต์ไปอบจนแห้ง

8) ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนแรกจนกระทั่งถ่านกัมมันต์หมดประสิทธิภาพในการดูดซับถาวร ขั้นตอนการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.9



รูปที่ 3.9 ขั้นตอนการศึกษาการฟื้นฟูคุณภาพถ่านกัมมันต์ที่หมดประสิทธิภาพการใช้งานแล้ว

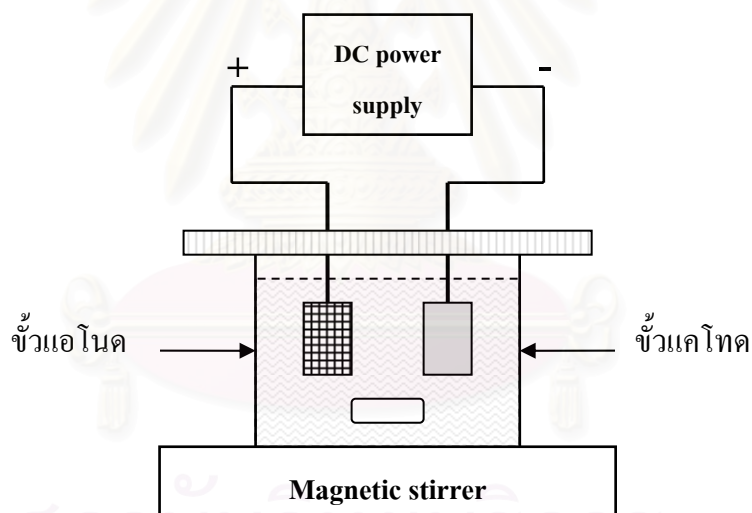
3.3.4 ศึกษาการแยกไอออนทองแดงจากสารละลายที่ได้จากการฟื้นฟูคุณภาพถ่านกัมมันต์โดยใช้เทคนิคไฟฟ้าเคมี

1) นำสารละลายไอออนทองแดงทั้งหมดที่ได้จากการล้างถ่านกัมมันต์ด้วยกรดไนตริก ความเข้มข้น 0.05 M ในขั้นตอนฟื้นฟูคุณภาพถ่านกัมมันต์ เทใส่ในบีกเกอร์ขนาด 2000 มิลลิลิตร แล้วใส่แท่งแม่เหล็กตั้งบนเครื่องกวน

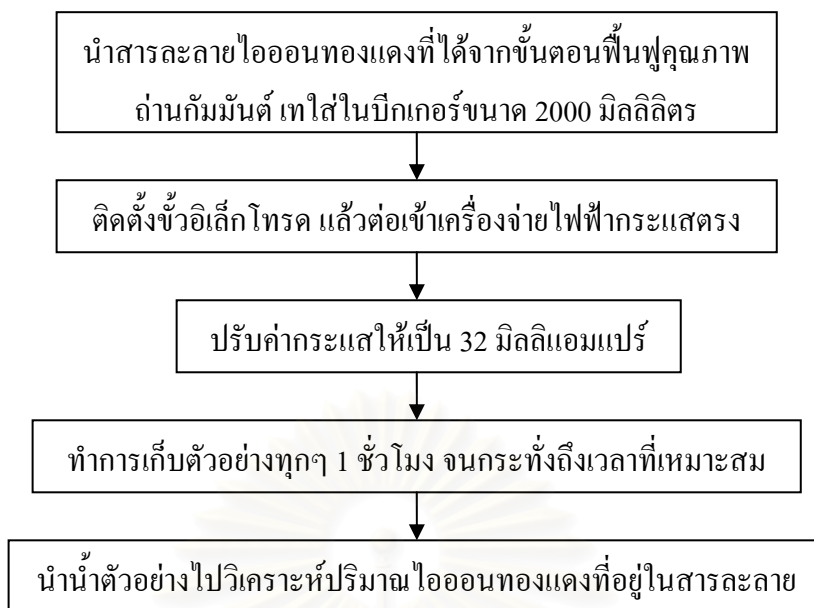
2) ติดตั้งขั้วอิเล็กโทรดกับแท่งวางให้เรียบร้อย โดยระดับของขั้วอิเล็กโทรดจะต้องอยู่ในระดับเดียวกัน

3) ต่อขั้วอิเล็กโทรดเข้าเครื่องจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง (DC power supply) เปิดเครื่อง ปรับให้เป็นกระแสควบคุม (Current control) ใส่ขั้วทั้งสองลงในสารละลายดังรูปที่ 3.10 ปรับค่ากระแสให้เป็น 32 มิลลิแอมแปร์

4) ทำการเก็บตัวอย่างทุกๆ 10 นาที จนครบ 100 นาที แล้วนำตัวอย่างไปวิเคราะห์ปริมาณไอออนทองแดงที่อยู่ในสารละลาย ขั้นตอนการทดลองดังแสดงในรูปที่ 3.11



รูปที่ 3.10 แสดงชุดอุปกรณ์ไฟฟ้าเคมีขณะทำการแยกไอออนทองแดงออกจากสารละลายที่ได้จากการฟื้นฟูคุณภาพถ่านกัมมันต์



รูปที่ 3.11 ขั้นตอนการศึกษาการแยกไอออนทองแดงจากสารละลายที่ได้จากการฟื้นฟูคุณภาพถ่านกัมมันต์โดยใช้เทคนิคไฟฟ้าเคมี

บทที่ 4

ผลการทดลอง และอภิปรายผล

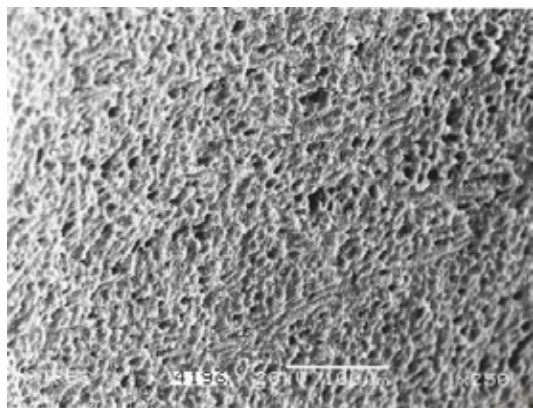
งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการขจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียโดยการดูดซับบนถ่านกัมมันต์ ซึ่งโลหะหนักที่ใช้ในการศึกษาคือ ไอออนทองแดง การศึกษาแบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ การศึกษาสมบัติของถ่านกัมมันต์เกรดการค้าทั้ง 4 ชนิด การศึกษาความสามารถในการดูดซับแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch test) ของถ่านกัมมันต์ การศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับของถ่านกัมมันต์โดยใช้การทดลองแบบต่อเนื่อง (Column test) และศึกษาการฟื้นฟูคุณภาพถ่านกัมมันต์ที่หมดประสิทธิภาพการใช้งาน

4.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติของถ่านกัมมันต์

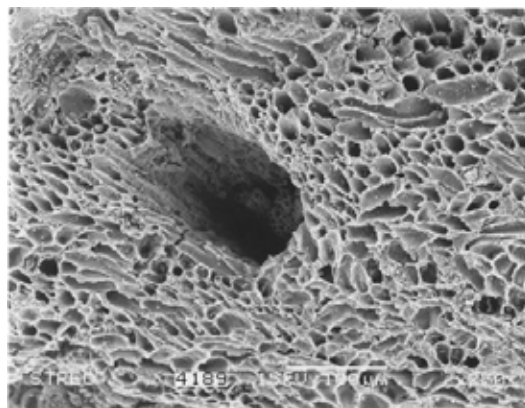
นำถ่านกัมมันต์เกรดการค้าทั้ง 4 ชนิดมาศึกษาลักษณะทางกายภาพ อันได้แก่ พื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน ปริมาณร้อยละของเถ้า (%Ash) โดยใช้เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิว (BET) ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ ผลการศึกษาที่ได้แสดงดังตารางที่ 4.1 และทำการศึกษาลักษณะพื้นผิว และรูพรุนของถ่านกัมมันต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM) แสดงดังรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของถ่านกัมมันต์เกรดการค้าทั้ง 4 ชนิด

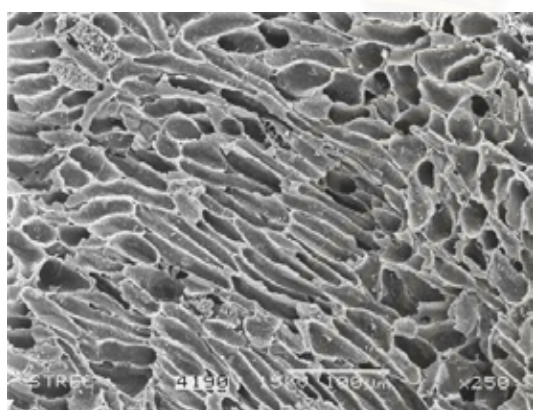
สมบัติของถ่านกัมมันต์	ถ่านกัมมันต์ A	ถ่านกัมมันต์ B	ถ่านกัมมันต์ C	ถ่านกัมมันต์ D
วัตถุดิบ	กะลามะพร้าว	กะลามะพร้าว	กะลามะพร้าว	กะลามะพร้าว
พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางเมตร/กรัม)	950.02	805.06	388.12	420.17
ปริมาตรรูพรุน (ลูกบาศก์เซนติเมตร/กรัม)	0.5097	0.4517	0.2189	0.2295
ไอโอดีนนัมเบอร์ (มิลลิกรัมของไอโอดีนต่อกรัมของถ่านกัมมันต์)	1074	861	410	484
ปริมาณร้อยละของเถ้า (% Ash)	1.32	1.69	1.37	1.63



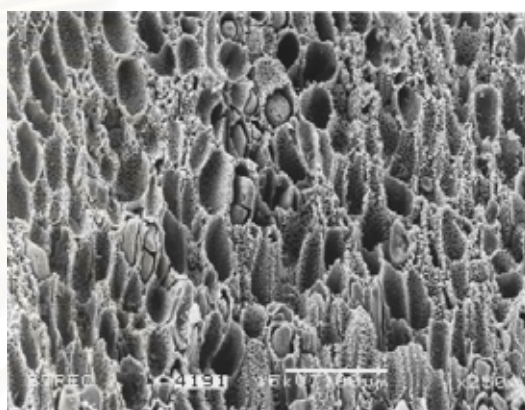
(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.1 พื้นผิวและรูพรุนของ (ก) ถ่านกัมมันต์ A, (ข) ถ่านกัมมันต์ B, (ค) ถ่านกัมมันต์ C และ (ง) ถ่านกัมมันต์ D เมื่อใช้กำลังขยาย 250 เท่า

จากการศึกษาภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของถ่านกัมมันต์เกรดการค้าทั้ง 4 ชนิด โดยใช้กำลังขยาย 250 เท่า รูปที่ 4.1(ก) พื้นผิวของถ่านกัมมันต์ A มีรูพรุนขนาดเล็กกระจายอยู่อย่างสม่ำเสมอ พื้นผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ A ที่วิเคราะห์โดยใช้เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิว (BET) มีค่ามากที่สุดคือ 950.02 ตารางเมตรต่อกรัม ส่วนในรูปที่ 4.1(ข) พื้นผิวของถ่านกัมมันต์ B มีรูพรุนขนาดเล็ก และขนาดกลางกระจายอยู่ทั่วไป ซึ่งพื้นที่ผิวจำเพาะที่วิเคราะห์ได้คือ 805.06 ตารางเมตรต่อกรัม ส่วนในรูปที่ 4.1(ค) พื้นผิวของถ่านกัมมันต์ C มีรูพรุนขนาดกลางกระจายอยู่ทั่วไป ซึ่งพื้นที่ผิวจำเพาะที่วิเคราะห์ได้ คือ 388.12 ตารางเมตรต่อกรัม และในรูปที่ 4.1(ง) พื้นผิวถ่านกัมมันต์ D มีรูพรุนขนาดกลาง และขนาดใหญ่กระจายอยู่ทั่วไป ซึ่งพื้นที่ผิวจำเพาะที่วิเคราะห์ได้คือ 420.17 ตารางเมตรต่อกรัม และจะสังเกตว่าภายในรูพรุนของถ่านกัมมันต์ D นั้น บางที่เป็นรูตันซึ่งทำให้พื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ลดลง

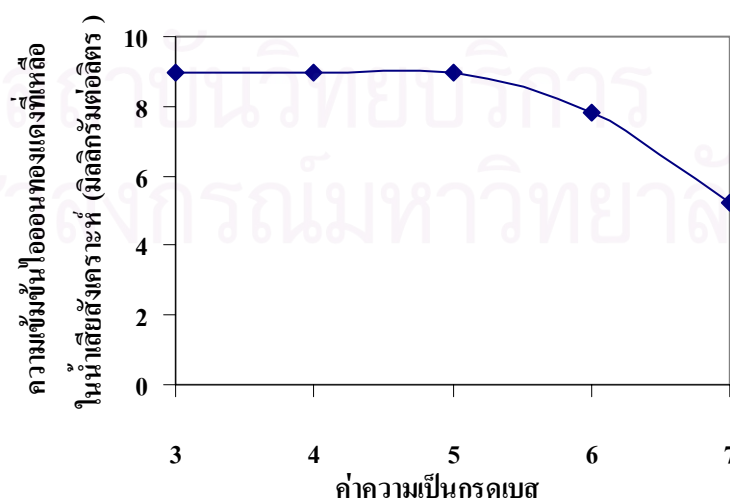
จากผลการศึกษาปริมาณรุกรุนและค่าไอโอดีนนมเบอร์มีลำดับแนวโน้มนสอดคล้องเช่นเดียวกับผลของพื้นที่ผิวจำเพาะของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด ถ่านกัมมันต์ที่มีค่าไอโอดีนนมเบอร์มีสูง แสดงว่ามีรุกรุนขนาดเล็กจำนวนมากจึงเป็นเหตุให้ถ่านกัมมันต์นั้นมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูง ขณะที่ถ่านกัมมันต์ที่มีค่าไอโอดีนนมเบอร์มีต่ำ แสดงว่ามีรุกรุนขนาดใหญ่จำนวนมากจึงเป็นเหตุให้ถ่านกัมมันต์นั้นมีพื้นที่ผิวจำเพาะต่ำ เมื่อใช้ถ่านกัมมันต์ที่ทำจากกะลาปาล์มและกะลามะพร้าว ก็ให้ผลลักษณะสอดคล้องแบบนี้เช่นกัน (สุจินีย์ คู่ยเสงี่ยม, 2544)

4.2 ผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับแบบไม่ต่อเนื่องของถ่านกัมมันต์

ในขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาความสามารถในการดูดซับไอออนทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิดและศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับโดยทำการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch test)

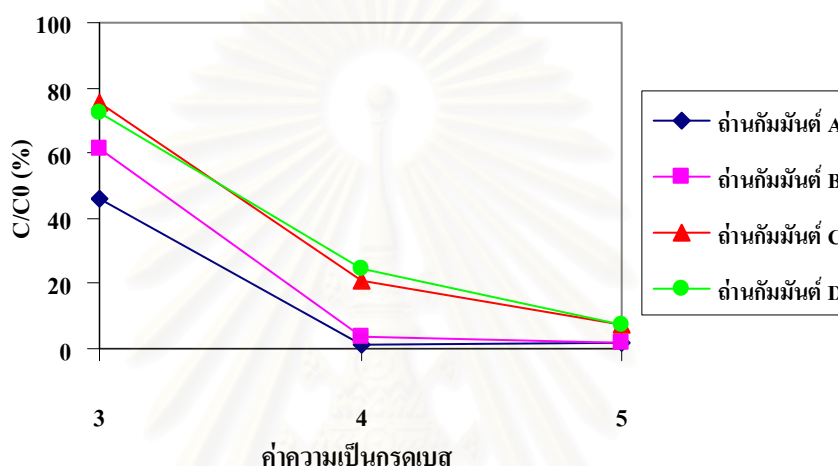
4.2.1 อิทธิพลของความเป็นกรดเบสที่มีต่อการดูดซับ

จากการทดลองศึกษาอิทธิพลของความเป็นกรดเบสที่มีต่อการดูดซับ โดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ที่มีระดับความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนทองแดง 8.986 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าความเป็นกรดเบสมีค่าเท่ากับ 3 ถึง 7 ซึ่งปรับค่าความเป็นกรดเบสด้วยสารละลายกรดไนตริกและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากการทดลองพบว่า ไอออนทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์จะเริ่มตกตะกอนเมื่อค่าความเป็นกรดเบสมีค่าตั้งแต่ 6 ขึ้นไปและจะมีผลทำให้ความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์เปลี่ยนแปลงไป ดังแสดงในรูปที่ 4.2



รูปที่ 4.2 ความเข้มข้นของไอออนทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์หลังจากปรับค่าความเป็นกรดเบสต่างๆ

จากการทดลองจะเห็นว่าที่ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 6 ไอออนทองแดงจะเริ่มตกตะกอนเล็กน้อย และจะตกตะกอนเพิ่มขึ้นเรื่อยๆเมื่อค่าความเป็นกรดเบสสูงขึ้น ดังนั้นในการทดลองศึกษาอิทธิพลของค่าความเป็นกรดเบสที่มีต่อการดูดซับ จะใช้ค่าความเป็นกรดเบสของน้ำเสียสังเคราะห์ในช่วง 3-5 โดยมีความเข้มข้นของไอออนทองแดง 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และปริมาณถ่านกัมมันต์แต่ละชนิด 0.5 กรัม แล้วนำไปเขย่าที่ความเร็ว 250 รอบต่อนาที เป็นเวลา 4 ชั่วโมง แล้วแยกถ่านกัมมันต์ออกด้วยกระดาษกรอง แล้วนำไปวัดปริมาณไอออนทองแดงที่เหลืออยู่ เพื่อหาค่าความเป็นกรดเบสของน้ำเสียที่เหมาะสมที่จะทำการศึกษาการดูดซับ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.3



รูปที่ 4.3 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มข้นไอออนทองแดงที่เหลือ (C) ต่อความเข้มข้นไอออนทองแดงเริ่มต้น (C_0) กับค่าความเป็นกรดเบสของสารละลายไอออนทองแดง หลังผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด เป็นเวลา 4 ชั่วโมง

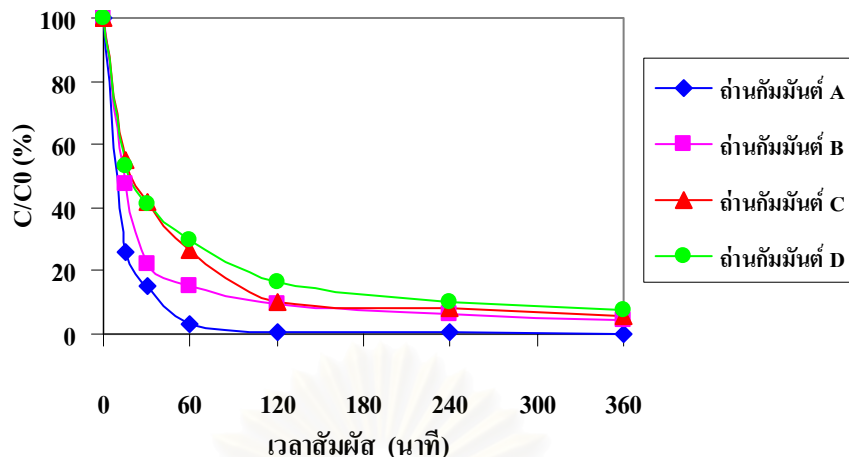
จากรูปที่ 4.3 พบว่าเมื่อค่าความเป็นกรดเบสของน้ำเสียสังเคราะห์เพิ่มขึ้นความเข้มข้นไอออนทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ลดลง แสดงว่าเมื่อค่าความเป็นกรดเบสเพิ่มขึ้นถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับไอออนทองแดงได้มากขึ้น สำหรับถ่านกัมมันต์ A พบว่าความเข้มข้นไอออนทองแดงที่เหลือในน้ำเสียจะลดลงอย่างมากเมื่อค่าความเป็นกรดเบสเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์เพิ่มขึ้นจากค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 3 เป็น 4 โดยที่ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 3 ความเข้มข้นไอออนทองแดงที่เหลืออยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์หลังผ่านการดูดซับต่อความเข้มข้นเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 45.97% ส่วนที่ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 4 ความเข้มข้นไอออนทองแดงที่เหลืออยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์ต่อความเข้มข้นเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 0.92% และที่ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 5 ความเข้มข้นไอออนทองแดงที่เหลืออยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์ต่อความเข้มข้นเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 0.91% ซึ่งใกล้เคียงกับที่ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 4 สำหรับถ่านกัมมันต์ B พบว่าความเข้มข้นไอออนทองแดงที่เหลือในน้ำเสียจะลดลงอย่างมากเมื่อค่าความเป็นกรดเบสเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์เพิ่มขึ้นจาก 3 เป็น 5 โดยที่ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 3 และ 4 ความ

เข้มข้นไอออนทองแดงที่เหลืออยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์หลังผ่านการดูดซับต่อความเข้มข้นเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 61.40% และ 3.982% ตามลำดับและที่ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 5 ความเข้มข้นไอออนทองแดงที่เหลืออยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์ต่อความเข้มข้นเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 1.98% และสำหรับถ่านกัมมันต์ C และ D ก็มีแนวโน้มเช่นเดียวกับถ่านกัมมันต์ B คือ ความเข้มข้นไอออนทองแดงที่เหลือในน้ำเสียจะลดลงอย่างมากเมื่อค่าความเป็นกรดเบสเริ่มต้นของน้ำเสียสังเคราะห์เพิ่มขึ้นจาก 3 เป็น 5 โดยที่ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 3 และ 4 ความเข้มข้นไอออนทองแดงที่เหลืออยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์หลังผ่านการดูดซับต่อความเข้มข้นเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 75.61% และ 20.63% สำหรับถ่านกัมมันต์ C และ 75.57% และ 24.51% สำหรับถ่านกัมมันต์ D ส่วนที่ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 5 ความเข้มข้นไอออนทองแดงที่เหลืออยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์ต่อความเข้มข้นเริ่มต้นสำหรับถ่านกัมมันต์ C และ D มีค่าเท่ากับ 7.22% และ 7.59% ตามลำดับ

ดังนั้นค่าความเป็นกรดเบสของน้ำเสียที่เหมาะสม ที่จะทำการศึกษาการดูดซับไอออนทองแดงสำหรับถ่านกัมมันต์ A คือค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 4 สำหรับถ่านกัมมันต์ B C และ D คือค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 5 เนื่องจากเป็นค่าความเป็นกรดเบสที่ถ่านสามารถดูดซับไอออนทองแดงได้ดีที่สุด ลักษณะผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองของ Yu และคณะ (2000) ได้ทำการศึกษาการดูดซับไอออนทองแดงโดยใช้ซีลีออย พบว่าค่าความเป็นกรดเบสที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนทองแดงโดยใช้ซีลีออยมีค่าเท่ากับ 7 และผลการทดลองของ Teker และคณะ (1998) ศึกษาการดูดซับไอออนทองแดงโดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากฟางข้าวที่ผ่านกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พบว่า ค่าความเป็นกรดเบสที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนทองแดงคือ 5.30 ฉะนั้นจึงกล่าวได้ว่าค่าความเป็นกรดเบสที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนทองแดงจากน้ำเสียสังเคราะห์ขึ้นอยู่กับถ่านกัมมันต์ที่ใช้ เนื่องจากถ่านกัมมันต์แต่ละชนิดผลิตจากวัตถุดิบที่ต่างกัน หรือการนำมาผ่านกระบวนการกระตุ้นที่ภาวะต่างกัน จึงได้ถ่านกัมมันต์ที่มีสมบัติแตกต่างกันเช่น หมูฟิงก์ชันบนผิวของถ่านกัมมันต์ทำให้ค่าความเป็นกรดเบสที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนทองแดงของถ่านกัมมันต์แต่ละชนิดแตกต่างกัน

4.2.2 อิทธิพลของเวลาสัมผัสที่มีต่อการดูดซับ

จากการศึกษาอิทธิพลของเวลาสัมผัสที่มีต่อการดูดซับไอออนทองแดง โดยนำน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีระดับความเข้มข้นไอออนทองแดง 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 ลบ.ซม. ปรับค่าความเป็นกรดเบสให้เท่ากับค่าความเป็นกรดเบสที่เหมาะสมสำหรับถ่านกัมมันต์แต่ละชนิด เติมถ่านกัมมันต์ 0.5 กรัม นำขวดไปเขย่าบนเครื่องเขย่า เป็นเวลา 15, 30, 60, 120, 240 และ 360 นาที แยกถ่านกัมมันต์ออกแล้วนำน้ำเสียไปวัดปริมาณไอออนทองแดงที่เหลืออยู่ ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.4



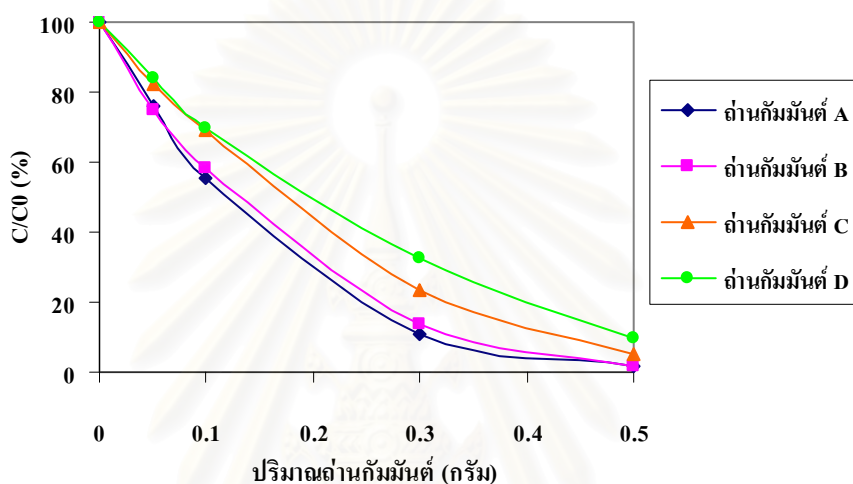
รูปที่ 4.4 อัตราส่วนความเข้มข้นไอออนทองแดงที่เหลือ (C) ต่อความเข้มข้นไอออนทองแดงเริ่มต้น (C_0) หลังผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิดที่เวลาสัมผัสดต่างๆ

จากผลการทดลองในรูปที่ 4.4 เมื่อพิจารณาที่ถ่านกัมมันต์ A พบว่าการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเวลาผ่านไป 60 นาทีและเริ่มเข้าสู่จุดสมดุลเมื่อเวลาผ่านไป 120 นาทีและสำหรับถ่านกัมมันต์ B C และ D พบว่าการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเวลาผ่านไป 120 นาทีและเริ่มเข้าสู่จุดสมดุลเมื่อเวลาผ่านไป 240 นาที ดังนั้นเวลาสัมผัสดที่เหมาะสมของการกำจัดไอออนทองแดงออกจากน้ำเสีย สำหรับถ่านกัมมันต์ A และ B มีค่าประมาณ 2 ชั่วโมง และสำหรับถ่านกัมมันต์ C และ D มีค่าประมาณ 4 ชั่วโมง ดังนั้นเวลาสัมผัสด 6 ชั่วโมงที่ใช้ในการทดลองก็เพียงพอ สำหรับการเข้าสู่จุดสมดุลของการดูดซับไอออนทองแดงของถ่านกัมมันต์ ทั้ง 4 ชนิด

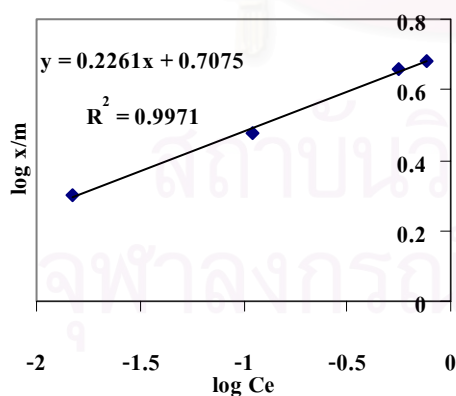
จากรูปเมื่อพิจารณาที่เวลาสัมผัสดเดียวกัน พบว่าถ่านกัมมันต์ A สามารถดูดซับไอออนทองแดงได้มากกว่าถ่านกัมมันต์ B C และ D เช่น ที่ 60 นาทีแรก สำหรับถ่านกัมมันต์ A ความเข้มข้นไอออนทองแดงที่เหลืออยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์หลังผ่านการดูดซับต่อความเข้มข้นเริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 3.41% สำหรับถ่านกัมมันต์ B C และ D มีค่าเท่ากับ 15.14% 26.53% 29.44% ตามลำดับ ฉะนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าเวลาที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนทองแดงจากน้ำเสียขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวจำเพาะและค่าไอโอดีนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์นั้นๆคือ ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะและค่าไอโอดีนัมเบอร์สูงจะสามารถดูดซับไอออนทองแดงได้มาก ขณะที่ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะและค่าไอโอดีนัมเบอร์ต่ำจะสามารถดูดซับไอออนทองแดงได้น้อย ลักษณะผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองของ Jin-Wha Kima และคณะ (2001) ศึกษาการดูดซับไอออนทองแดงโดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากเปลือกถั่วลิสงซึ่งมีค่าไอโอดีนัมเบอร์เท่ากับ 1100 มิลลิกรัมต่อกรัม พบว่าการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเวลาผ่านไป 30 นาทีและการดูดซับเข้าสู่จุดสมดุลเมื่อเวลาผ่านไป 60 นาที

4.2.3 ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับของถ่านกัมมันต์

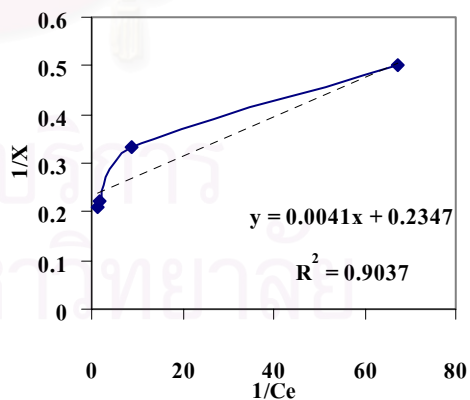
จากการศึกษาอิทธิพลของปริมาณถ่านกัมมันต์ที่มีต่อการดูดซับไอออนทองแดง โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 ลบ.ซม. ปรับค่าความเป็นกรดเบสให้เท่ากับค่าความเป็นกรดเบสที่เหมาะสมสำหรับถ่านแต่ละชนิด เดิมถ่านกัมมันต์ปริมาณ 0.05, 0.1, 0.3 และ 0.5 กรัม นำขวดไปเขย่าเป็นเวลา 6 ชั่วโมง แยกถ่านกัมมันต์ออก นำน้ำเสียไปวัดปริมาณไอออนทองแดงที่เหลืออยู่ และสามารถนำข้อมูลไปเขียนเส้นไอโซเทอมการดูดซับได้ดัง รูปที่ 4.5 และ 4.6



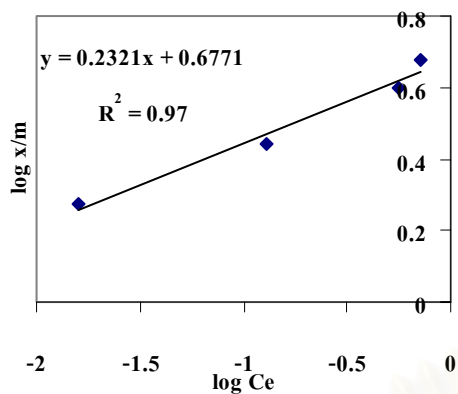
รูปที่ 4.5 อัตราส่วนความเข้มข้นไอออนทองแดงที่เหลือ (C) ต่อความเข้มข้นไอออนทองแดงเริ่มต้น (C₀) หลังผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิดที่ปริมาณต่าง ๆ กัน



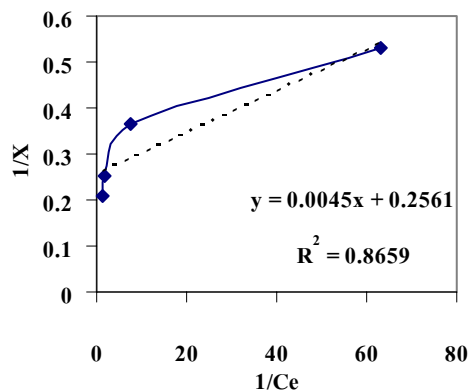
(ก)



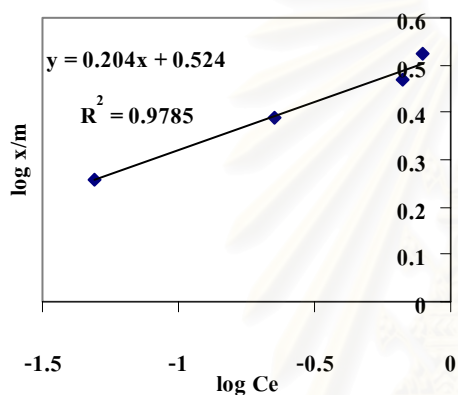
(ข)



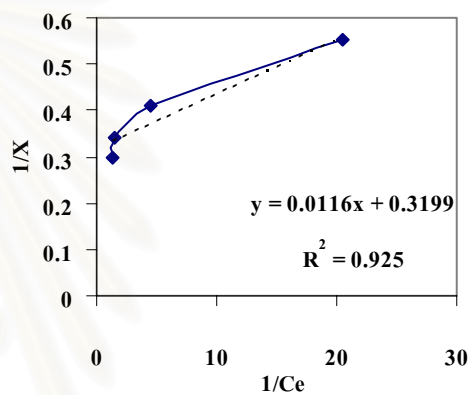
(ก)



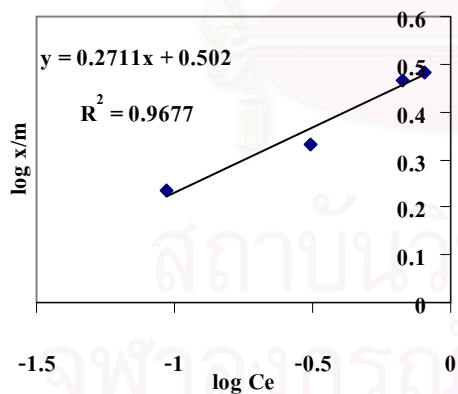
(ง)



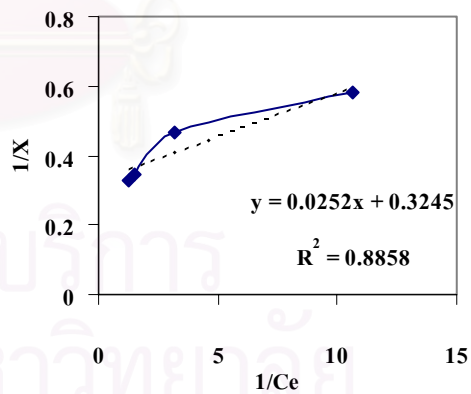
(ค)



(จ)



(ข)



(ฉ)

รูปที่ 4.6 ไอโซเทอมการดูดซับ (ก) แบบฟรุนดลิช สำหรับถ่านกัมมันต์ A (ข) แบบแลงเมียร์ สำหรับถ่านกัมมันต์ A (ค) แบบฟรุนดลิช สำหรับถ่านกัมมันต์ B (ง) แบบแลงเมียร์ สำหรับถ่านกัมมันต์ B (จ) แบบฟรุนดลิช สำหรับถ่านกัมมันต์ C (ฉ) แบบแลงเมียร์ สำหรับถ่านกัมมันต์ C (ช) แบบฟรุนดลิช สำหรับถ่านกัมมันต์ D (ซ) แบบแลงเมียร์ สำหรับถ่านกัมมันต์ D

ตารางที่ 4.2 แสดงสมการเส้นตรงของไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช และแลงเมียร์

ถ่านกัมมันต์	ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช		ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์	
	$\log\left(\frac{X}{m}\right) = \left(\frac{1}{n}\right)(\log Ce) + (\log K)$	R	$\frac{1}{X} = \frac{1}{Ce}\left(\frac{1}{bXm}\right) + \left(\frac{1}{Xm}\right)$	R
A	$y = 0.226x + 0.7075$	0.9985	$y = 0.0041x + 0.2347$	0.9506
B	$y = 0.232x + 0.6771$	0.9849	$y = 0.0045x + 0.2561$	0.9305
C	$y = 0.204x + 0.5240$	0.9892	$y = 0.0116x + 0.3199$	0.9617
D	$y = 0.271x + 0.5020$	0.9837	$y = 0.0252x + 0.3245$	0.9411

จากตารางที่ 4.2 แสดงค่า Correlation coefficient (R) ของไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชสำหรับถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด เมื่อเปรียบเทียบกับค่า Correlation coefficient ของไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์พบว่าค่า Correlation coefficient ของไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชมีค่าเข้าใกล้ 1 มากกว่า แสดงว่าการดูดซับของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิดที่นำมาเขียนเป็นไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชมีความเหมาะสมมากกว่าไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ จึงสามารถสรุปได้ว่าถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิดเกิดการดูดซับแบบกายภาพ (Physical adsorption) คือการดูดซับเกิดขึ้นโดยอาศัยแรงแวน เดอ วาลส์ (Van der Waals) สามารถเกิดขึ้นได้หลายชั้น ลักษณะผลที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองของ S. Cay (2003) ถึงแม้จะใช้ตัวดูดซับต่างกันก็ตาม

เมื่อพิจารณาค่าคงที่ (K และ $1/n$) ที่ปรากฏในสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช ดังแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่าลำดับค่า K เรียงจากมากไปน้อยตามชนิดถ่านกัมมันต์ ดังนี้ถ่านกัมมันต์ A ให้ค่าคงที่ K สูงกว่า ถ่านกัมมันต์ B C และ D ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 ค่าคงที่ของถ่านกัมมันต์แต่ละชนิด จากสมการของฟรุนดลิช

ถ่านกัมมันต์	K (มิลลิกรัมต่อกรัม)	$1/n$ (ลิตรต่อกรัม)
A	5.099	0.226
B	4.754	0.232
C	3.342	0.204
D	3.177	0.271

ซึ่งค่า K แสดงความสามารถในการดูดซับไอออนทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์ ถ้าถ่านกัมมันต์ใดมีค่า K สูงแสดงว่าถ่านกัมมันต์นั้นสามารถดูดซับไอออนทองแดงได้ดีกว่าถ่านกัมมันต์ที่มีค่า K ต่ำ ซึ่งผลนี้ก็สอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้จากขั้นตอน 4.2.1 และ 4.2.2 นอกจากนี้ยังพบว่าถ่านกัมมันต์ D มีค่า $1/n$ สูงที่สุด แสดงว่าค่าความเข้มข้นมีบทบาทต่อความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ D นั่นคือ ถ่านที่ถูกลดซับมีความเข้มข้นสูงถ่านกัมมันต์ D มีแนวโน้มในการดูดซับได้ดี

จากการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการทดลองที่ได้จากขั้นตอน 4.2.1 และ 4.2.2 นั่นคือ ถ่านกัมมันต์ A เป็นถ่านที่มีค่าไอ โอซินนัมเบอร์และพื้นที่ผิวสูงสุด จึงสามารถดูดซับไอออนทองแดงได้สูงกว่า และตามด้วยถ่านกัมมันต์ B, C และ D ตามลำดับ ดังนั้นจึงเลือกถ่านกัมมันต์ A เพื่อนำไปใช้ในการทดลองแบบต่อเนื่องต่อไป

4.3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนทองแดงโดยใช้ถังดูดซับแบบแท่ง

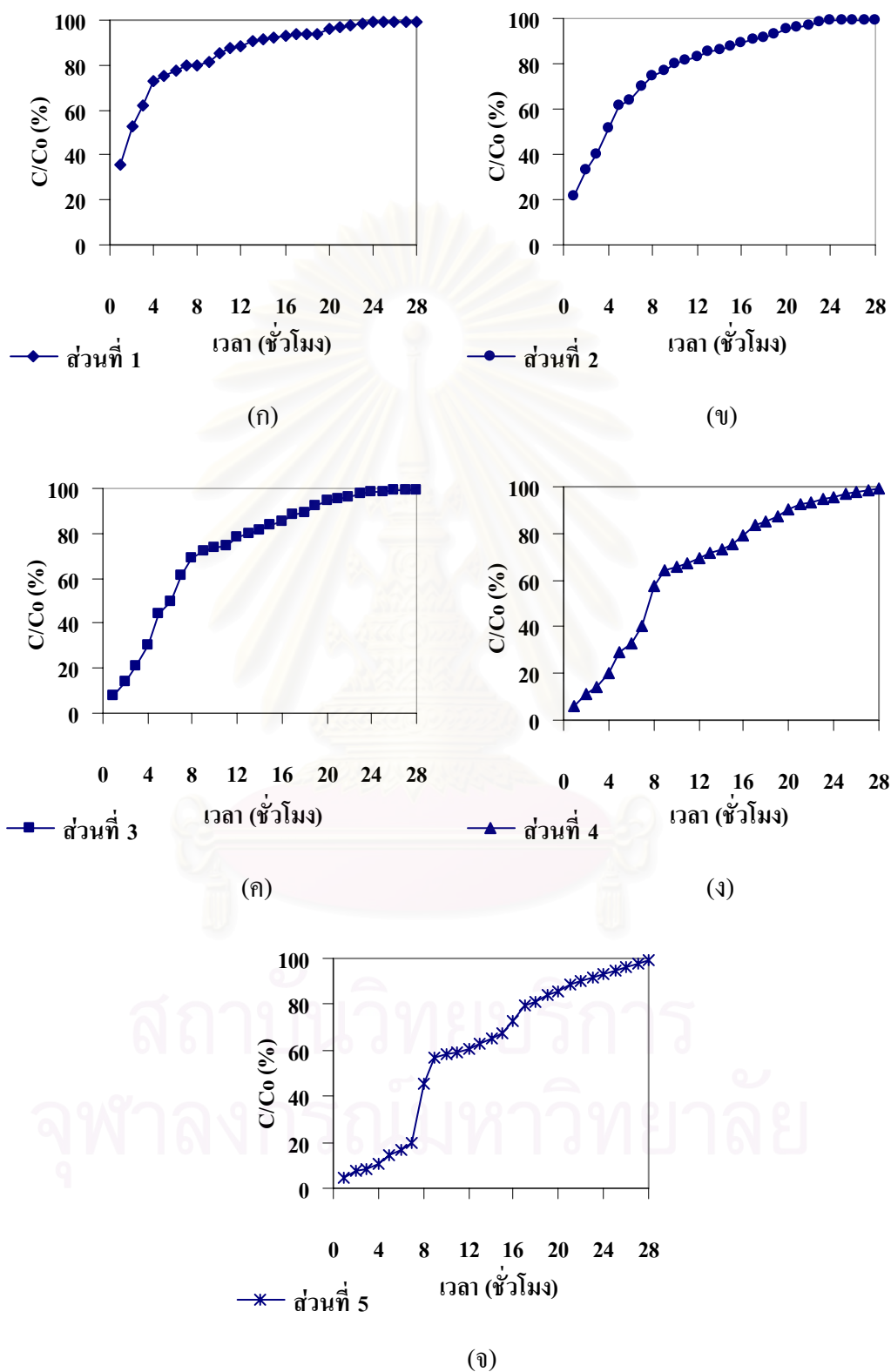
การทดลองนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพ หรือความสามารถในการทำงานของถ่านกัมมันต์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับไอออนทองแดง ซึ่งถ่านกัมมันต์ที่เลือกคือ ถ่านกัมมันต์ A โดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยใช้ถังดูดซับ 2 แบบคือ ถังดูดซับทรงสี่เหลี่ยม (Packed-bed column) ขนาดกว้าง 2 ซม. ยาว 10 ซม. สูง 10 ซม. ซึ่งภายในแบ่งออกเป็น 5 ช่อง ขนาดกว้าง 2 ซม. ยาว 2 ซม. และถังดูดซับทรงกระบอก (Column) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 ซม. สูง 10 ซม.

จุดเบรคพอยท์ (Breakpoint) พิจารณาที่จุดความเข้มข้นขาออกต่อความเข้มข้นขาเข้า (C/C_0) เท่ากับ 10% และจุดที่ถ่านเสื่อมสภาพ (Exhausted point) พิจารณาที่จุดความเข้มข้นขาออกต่อความเข้มข้นขาเข้า (C/C_0) เท่ากับ 90%

4.3.1 ผลการศึกษาการดูดซับในถังดูดซับแบบแท่งโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์

ในการทดลองใช้ถ่านกัมมันต์ A ปริมาณ 10 กรัม บรรจุในถังดูดซับทั้ง 2 แบบ โดยเมื่อบรรจุลงในถังดูดซับทรงกระบอก ความสูงเบดเท่ากับ 2.5 เซนติเมตรและเมื่อบรรจุลงในถังดูดซับทรงสี่เหลี่ยม ความสูงเบดเท่ากับ 1 เซนติเมตร ป้อนน้ำเสียที่มีความเข้มข้นไอออนทองแดง 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้มีการไหลอย่างต่อเนื่องด้วยอัตราเร็ว 0.6 ลิตรต่อชั่วโมง เก็บตัวอย่างน้ำที่ผ่านการบำบัดทุกๆ 1 ชั่วโมง นำไปวัดปริมาณทองแดง หลังจากนั้นนำค่าที่ได้ไปสร้างเส้นโค้งเบรคพอยท์

4.3.1.1 ถังดูดซับทรงสี่เหลี่ยม (Packed-bed column)

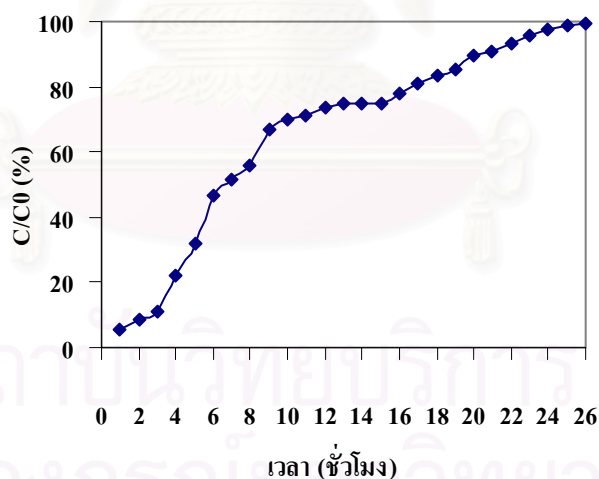


รูปที่ 4.7 อัตราส่วนความเข้มข้นไอออนทองแดงที่เหลือ (C) ต่อความเข้มข้นไอออนทองแดงเริ่มต้น (Co) หลังผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ A ที่เวลาต่างๆ ของถังดูดซับทรงสี่เหลี่ยม (ก) ส่วนที่ 1 (ข) ส่วนที่ 2 (ค) ส่วนที่ 3 (ง) ส่วนที่ 4 (จ) ส่วนที่ 5

จากรูปที่ 4.7 เมื่อพิจารณาที่ส่วนต่างๆของถังดูดซับทรงสี่เหลี่ยมพบว่า จุดที่ถ่านเสื่อมสภาพในส่วนที่ 1 ถึง 5 คือเมื่อเวลาดูดซับผ่านไป 13 17 19 20 และ 22 ชั่วโมงตามลำดับ แสดงว่าความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ส่วนที่ 1 ถึง 5 เริ่มหมดที่เวลาผ่านไป 13 17 19 20 และ 22 ชั่วโมงตามลำดับ

จากผลการทดลองสามารถบอกได้ว่า ถ่านกัมมันต์ในส่วใดของถังดูดซับถึงจุดเสื่อมสภาพแล้วและสามารถนำเอาถ่านกัมมันต์ที่บรรจุอยู่ในส่วนนั้นออกมาฟื้นฟูคุณภาพ ซึ่งแต่ละส่วนของถังดูดซับจะมีระยะเวลาการใช้งานต่างกันโดยถ่านกัมมันต์ในส่วนที่ 1 จะถึงจุดเสื่อมสภาพก่อน เนื่องจากถ่านกัมมันต์ในส่วนนี้สัมผัสกับไอออนทองแดงที่มีความเข้มข้นมากก่อนส่วนอื่นๆ หลังจากนั้นส่วนที่ 2 3 4 และ 5 ก็จะถึงจุดเสื่อมสภาพตามลำดับ ซึ่งในการทดลองนี้ส่วนที่ 1 2 3 4 และ 5 ของถังดูดซับเมื่อเวลาดูดซับผ่านไป 13 17 19 20 และ 22 ชั่วโมงตามลำดับ ควรนำเอาถ่านกัมมันต์ที่บรรจุอยู่ออกมาฟื้นฟูคุณภาพ เนื่องจากถ่านกัมมันต์เหล่านั้นถึงจุดเสื่อมสภาพแล้ว

4.3.1.2 ถังดูดซับแบบทรงกระบอก (Column)



รูปที่ 4.8 อัตราส่วนความเข้มข้นไอออนทองแดงที่เหลือ (C) ต่อความเข้มข้นไอออนทองแดงเริ่มต้น (Co) หลังผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ A ที่เวลาต่างๆ ของถังดูดซับทรงกระบอก

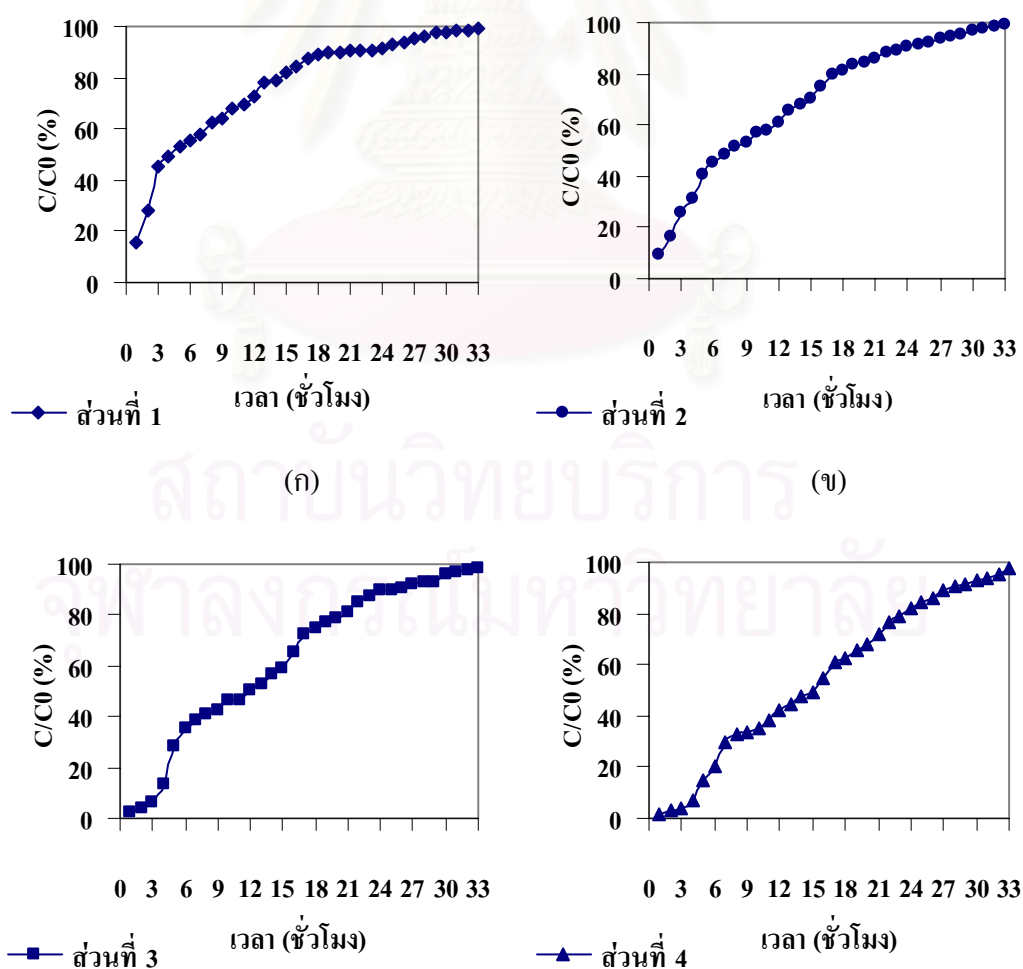
จากรูปที่ 4.8 แสดงอัตราส่วนความเข้มข้นไอออนทองแดงที่เหลืออยู่หลังผ่านการดูดซับต่อความเข้มข้นเริ่มต้น ของถังดูดซับทรงกระบอก พบว่าจุดที่ถ่านเสื่อมสภาพคือเมื่อเวลาดูดซับผ่านไป

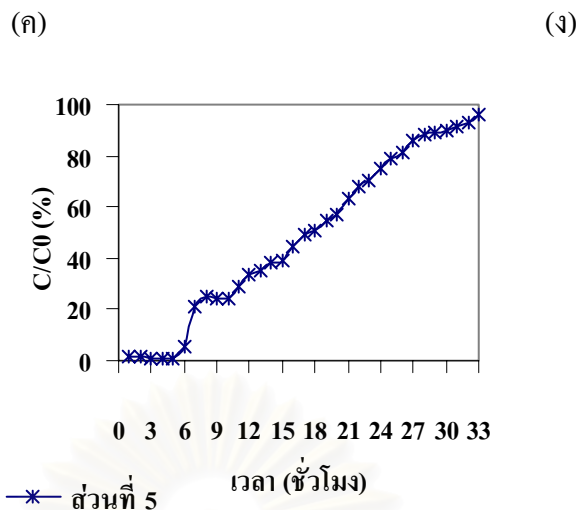
ไป 20 ชั่วโมง แสดงว่าชั่วโมงที่ 20 ของการดูดซับนี้ถ่านกัมมันต์ที่บรรจุอยู่ในถังดูดซับเริ่มหมดความสามารถในการดูดซับแล้ว

4.3.2 ผลการศึกษาการดูดซับในถังดูดซับแบบแท่งโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

น้ำเสียจากโรงงานบางกอกอินคัสเทรียลลามิเนท (BIL) ที่ใช้นั้นประกอบด้วยทองแดงไอออนในรูปของ $\text{Cu}(\text{SO}_4)$ เกือบ 100% ในการทดลองใช้ถ่านกัมมันต์ A ปริมาณ 10 กรัม บรรจุในถังดูดซับทั้ง 2 แบบโดยเมื่อบรรจุลงในถังดูดซับทรงกระบอก ความสูงเบดเท่ากับ 2.5 เซนติเมตรและเมื่อบรรจุลงในถังดูดซับทรงสี่เหลี่ยม ความสูงเบดเท่ากับ 1 เซนติเมตร ป้อนน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งมีความเข้มข้นของไอออนทองแดงประมาณ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ให้มีการไหลอย่างต่อเนื่องด้วยอัตราเร็ว 0.6 ลิตรต่อชั่วโมง เก็บตัวอย่างน้ำที่ผ่านการบำบัดทุกๆ 1 ชั่วโมง นำไปวัดปริมาณไอออนทองแดงหลังจากนั้นนำค่าที่ได้ไปสร้างเส้นโค้งเบรคทรูจ์

4.3.2.1 ถังดูดซับทรงสี่เหลี่ยม (Packed-bed column)



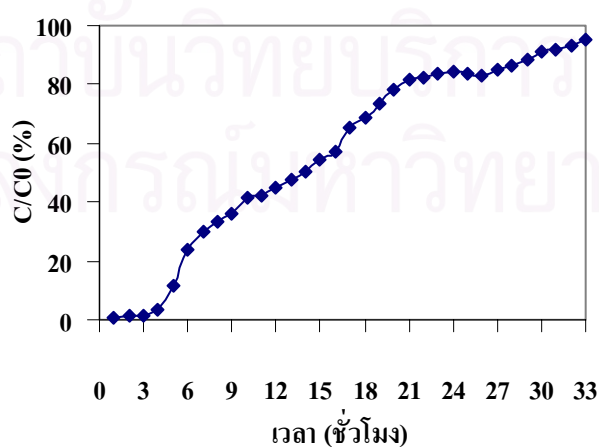


(จ)

รูปที่ 4.9 อัตราส่วนความเข้มข้นไอออนทองแดงที่เหลือ (C) ต่อความเข้มข้นไอออนทองแดงเริ่มต้น (C_0) หลังผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ A ที่เวลาต่างๆ ของถังดูดซับทรงสี่เหลี่ยม (ก) ส่วนที่ 1 (ข) ส่วนที่ 2 (ค) ส่วนที่ 3 (ง) ส่วนที่ 4 (จ) ส่วนที่ 5

จากรูปที่ 4.9 พบว่าผลการทดลองที่ได้มีแนวโน้มเดียวกันกับการทดลองดูดซับไอออนทองแดงในน้ำเสียสังเคราะห์คือ เมื่อทำการดูดซับไปจนถึงเวลาหนึ่งถ่านกัมมันต์ในส่วนที่ 1 ของถังดูดซับจะเริ่มถึงจุดที่ถ่านเสื่อมสภาพก่อน หลังจากนั้นส่วนที่ 2 3 4 และ 5 ก็จะถึงจุดเสื่อมสภาพตามลำดับ ซึ่งในการทดลองดูดซับไอออนทองแดงออกจากน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมนี้ส่วนที่ 1 2 3 4 และ 5 ของถังดูดซับเมื่อเวลาดูดซับผ่านไป 21 24 26 28 และ 30 ชั่วโมงตามลำดับ ควรนำเอาถ่านกัมมันต์ที่บรรจุอยู่ออกมาฟื้นฟูคุณภาพ เนื่องจากถ่านกัมมันต์เหล่านั้นถึงจุดเสื่อมสภาพแล้ว

4.3.2.2 ถังดูดซับทรงกระบอก (Column)



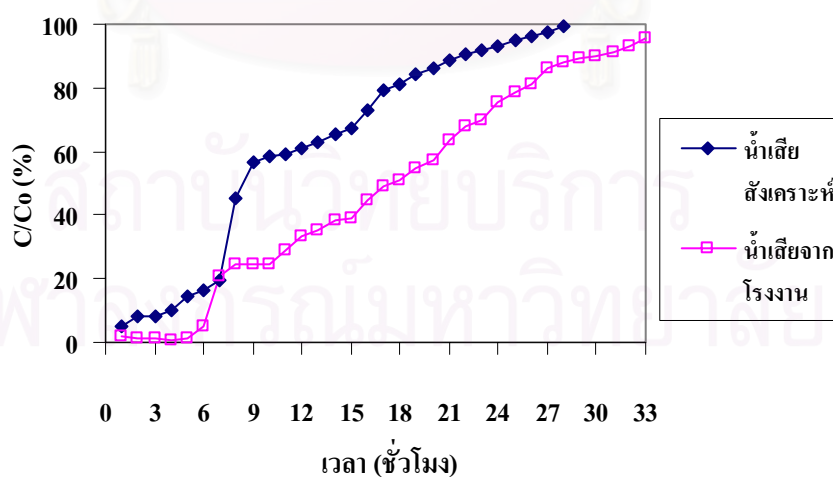
รูปที่ 4.10 อัตราส่วนความเข้มข้นไอออนทองแดงที่เหลือ (C) ต่อความเข้มข้นไอออนทองแดงเริ่มต้น (Co) หลังผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ A ที่เวลาต่างๆของถังดูดซับทรงกระบอก

จากรูปที่ 4.10 แสดงอัตราส่วนความเข้มข้นไอออนทองแดงที่เหลืออยู่หลังผ่านการดูดซับต่อความเข้มข้นเริ่มต้น ของถังดูดซับทรงกระบอก พบว่าจุดที่ถ่านเสื่อมสภาพคือเมื่อเวลาดูดซับผ่านไป 25 ชั่วโมง แสดงว่าชั่วโมงที่ 25 ของการดูดซับนี้ควรนำเอาถ่านกัมมันต์ที่บรรจุอยู่ออกมาฟื้นฟูคุณภาพ เนื่องจากถ่านกัมมันต์ที่บรรจุอยู่ในถังดูดซับเริ่มหมดความสามารถในการดูดซับแล้ว

จากการทดลองการดูดซับไอออนทองแดงออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ และน้ำเสียจากโรงงาน เมื่อพิจารณาถึงการใช้งานของถังดูดซับทั้งสองแบบที่ปริมาณถ่านกัมมันต์ที่ใช้บรรจุเท่ากันพบว่า ถังดูดซับทรงสี่เหลี่ยมมีความสะดวกในการใช้งานมากกว่าถังดูดซับทรงกระบอกเนื่องจากถังดูดซับทรงสี่เหลี่ยมออกแบบให้บรรจุถ่านกัมมันต์เป็นส่วนๆ ซึ่งแต่ละส่วนมีการไหลอย่างต่อเนื่องโดยไม่ต้องใช้เครื่องสูบลมหรือน้ำเสียระหว่างช่องที่บรรจุถ่านกัมมันต์ ทำให้พื้นที่ติดตั้งถังดูดซับทรงสี่เหลี่ยมมีขนาดเล็กและสะดวกในการใช้งาน แต่ในทางกลับกันถังดูดซับทรงกระบอกนั้นเมื่อต้องการนำมาต่อกันหลายๆอัน ระหว่างถังดูดซับจะต้องติดตั้งเครื่องสูบลมหรือน้ำเสียให้มีการไหลอย่างต่อเนื่อง จึงทำให้ระบบมีขนาดใหญ่ เปลืองพื้นที่และเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมในการติดตั้งเครื่องสูบลมมากกว่าการดูดซับที่ใช้ถังดูดซับทรงสี่เหลี่ยม

4.3.3 เปรียบเทียบการดูดซับในถังดูดซับแบบแท่งโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

4.3.3.1 ถังดูดซับทรงสี่เหลี่ยม



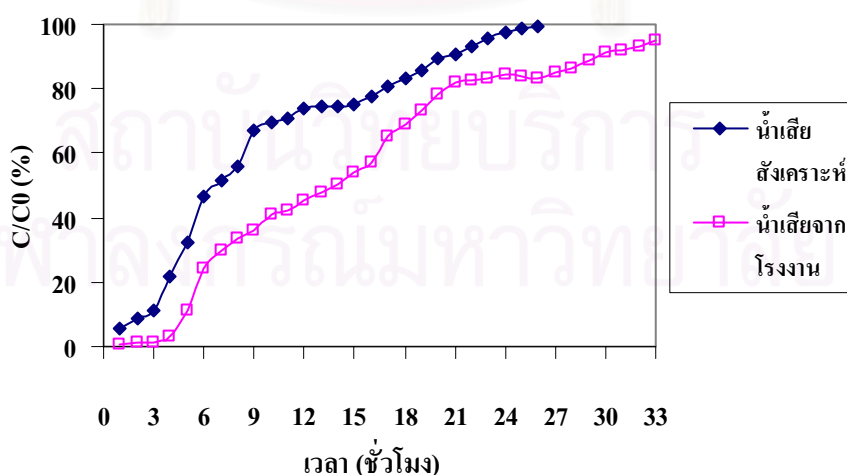
รูปที่ 4.11 อัตราส่วนความเข้มข้นไอออนทองแดงที่เหลือ (C) ต่อความเข้มข้นไอออนทองแดงเริ่มต้น (Co) หลังผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ A ที่เวลาต่างๆในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

ตารางที่ 4.4 เขตการถ่ายโอนมวล ของถังดูดซับทรงสี่เหลี่ยมในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

น้ำเสีย	เขตการถ่ายโอนมวล (เซนติเมตร)
สังเคราะห์	0.82
โรงงานอุตสาหกรรม	0.77

จากตารางที่ 4.4 การดูดซับไอออนทองแดงออกจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ถังดูดซับทรงสี่เหลี่ยมมีจุดเบรกพอยท์เท่ากับ 4 ชั่วโมง มีจุดที่ผ่านเสื่อมสภาพเท่ากับ 22 ชั่วโมงและสำหรับการดูดซับไอออนทองแดงออกจากน้ำเสียจากโรงงานมีจุดเบรกพอยท์เท่ากับ 7 ชั่วโมง มีจุดที่ผ่านเสื่อมสภาพเท่ากับ 30 ชั่วโมงพบว่า ความสามารถการดูดซับของถังดูดซับทรงสี่เหลี่ยมในการดูดซับไอออนทองแดงออกจากน้ำเสียจากโรงงานมีความสามารถดีกว่าการดูดซับไอออนทองแดงออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ เนื่องจากเขตการถ่ายโอนมวลมีค่าน้อยกว่า คือพื้นที่ที่เกิดการดูดซับไอออนทองแดงตั้งแต่เริ่มจนถึงจุดที่ไอออนทองแดงหลุดลอกออกจากถังดูดซับมีค่าน้อยกว่า ลักษณะผลที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองของ Jia Guo (2002) ศึกษาการดูดซับซัลเฟอร์ไดออกไซด์โดยใช้ถ่านกัมมันต์เปลือกปาล์มและถ่านกัมมันต์เกรดการค้าของบริษัท Filtracarb โดยพบว่าเมื่อค่าเขตการถ่ายโอนมวลเพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับลดลง

4.3.3.2 ถังดูดซับทรงกระบอก



รูปที่ 4.12 อัตราส่วนความเข้มข้นไอออนทองแดงที่เหลือ (C) ต่อความเข้มข้นไอออนทองแดงเริ่มต้น (Co) หลังผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ A ที่เวลาต่างๆในน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

ตารางที่ 4.5 เขตการถ่ายโอนมวล ของถ่านกัมมันต์ทรงกระบอกในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์และน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

น้ำเสีย	เขตการถ่ายโอนมวล (เซนติเมตร)
สังเคราะห์	2.14
โรงงานอุตสาหกรรม	2.00

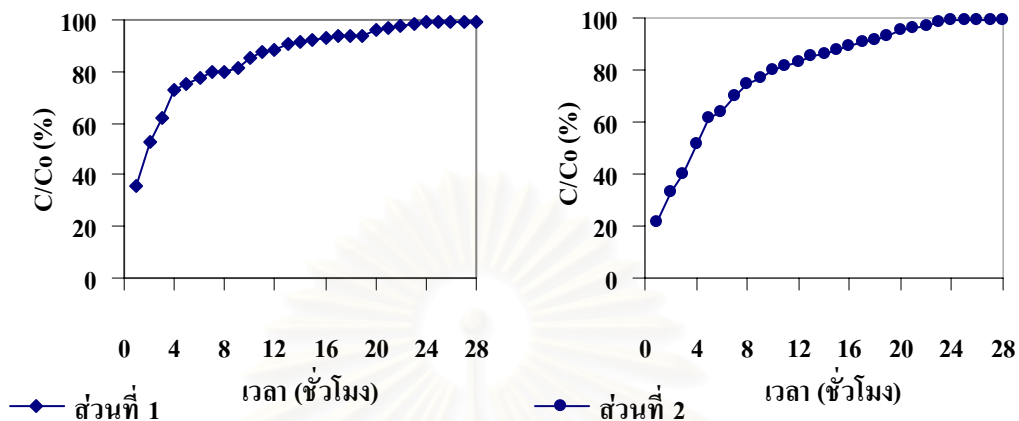
จากตารางที่ 4.5 การดูดซับไอออนทองแดงออกจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ถ่านกัมมันต์ทรงกระบอกมีจุดเบรคพอยท์เท่ากับ 3 ชั่วโมง มีจุดที่ถ่านเสื่อมสภาพเท่ากับ 20 ชั่วโมงและสำหรับการดูดซับไอออนทองแดงออกจากน้ำเสียจากโรงงานมีจุดเบรคพอยท์เท่ากับ 5 ชั่วโมง มีจุดที่ถ่านเสื่อมสภาพเท่ากับ 25 ชั่วโมงพบว่า ผลที่ได้จากการคำนวณมีลักษณะเช่นเดียวกับการดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์ทรงสี่เหลี่ยมคือ ความสามารถในการดูดซับไอออนทองแดงออกจากน้ำเสียจากโรงงานมีความสามารถดีกว่าการดูดซับไอออนทองแดงออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ เนื่องจากเขตการถ่ายโอนมวลมีค่าน้อยกว่า

เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 4.13 และ 4.14 พบว่า ถ่านกัมมันต์ A มีระยะเวลาการใช้งานและสามารถดูดซับไอออนทองแดงออกจากน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมได้มากกว่าการดูดซับไอออนทองแดงออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ ทั้งในการใช้ถ่านกัมมันต์ทรงสี่เหลี่ยมและถ่านกัมมันต์ทรงกระบอก ผลการทดลองเป็นดังนี้อาจเป็นเพราะถ่านกัมมันต์ A สามารถดูดซับทองแดงที่อยู่ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมได้ดีกว่าไอออนทองแดงที่อยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์ เนื่องจากไอออนทองแดงที่อยู่ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอยู่ในรูป $\text{Cu}(\text{SO}_4)$ แต่ไอออนทองแดงที่อยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์อยู่ในรูป $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการดูดซับไอออนทองแดงในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมดีกว่าในน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับเขตการถ่ายโอนมวล

4.4 ผลการศึกษาการฟื้นฟูคุณภาพถ่านกัมมันต์ที่หมดประสิทธิภาพการใช้งาน

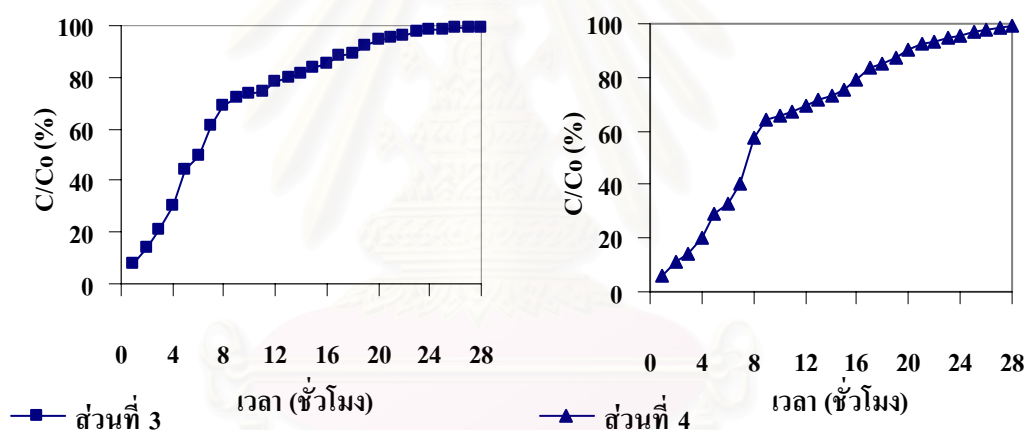
การทดลองนี้ศึกษาการฟื้นฟูคุณภาพถ่านกัมมันต์ที่หมดประสิทธิภาพการใช้งาน เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ เป็นการศึกษาเพื่อหาแนวทางในการใช้ถ่านกัมมันต์ที่มีอยู่ให้เกิดประโยชน์สูงสุดและลดค่าใช้จ่ายในการสั่งซื้อถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการศึกษา คือถ่านกัมมันต์ A ถึงจุดซบที่ใช้คือถึงจุดซบทรงสี่เหลี่ยมสารละลายที่ใช้ในการฟื้นฟูคุณภาพถ่านกัมมันต์ คือสารละลายกรดไนตริก (HNO_3) ความเข้มข้น 0.05 M ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.13 ถึงรูปที่ 4.16



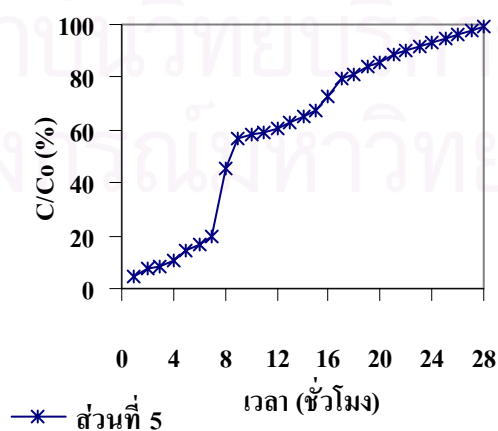
(ก)

(ข)



(ค)

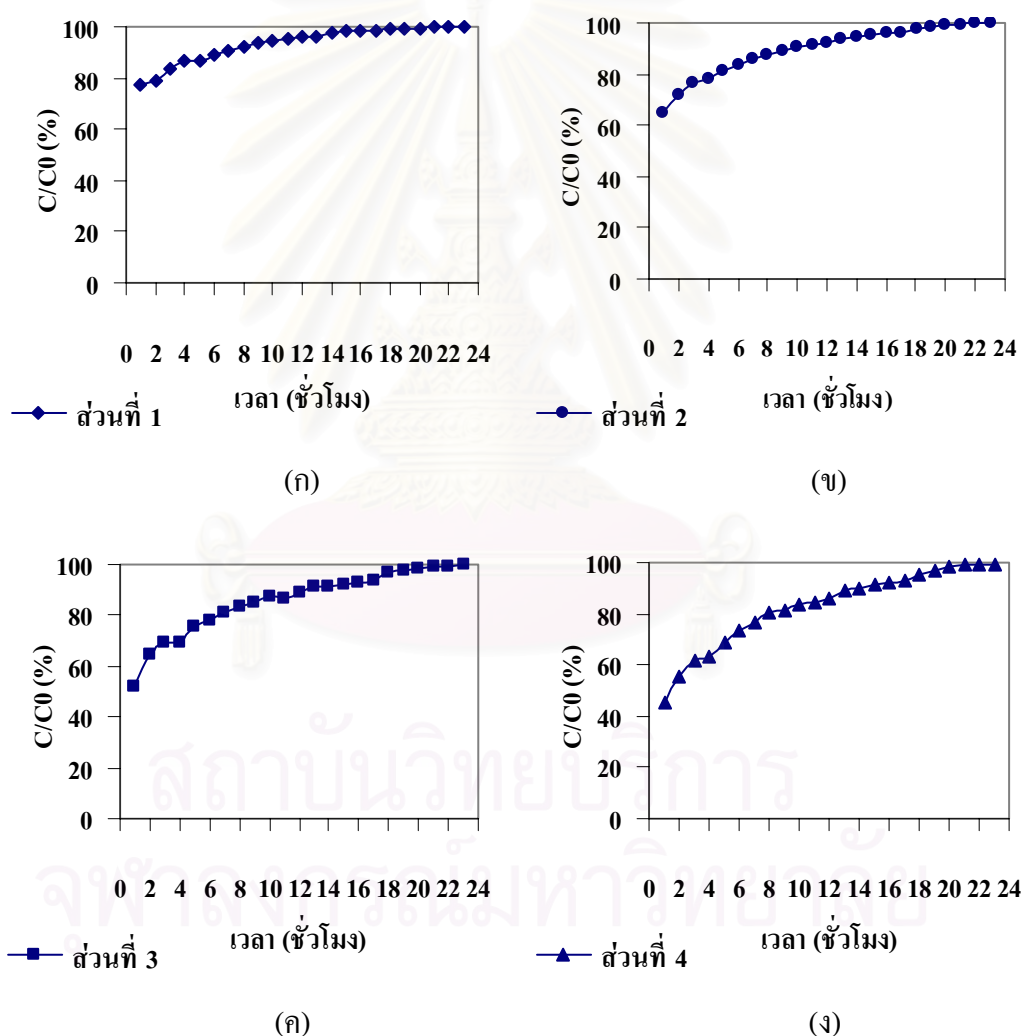
(ง)

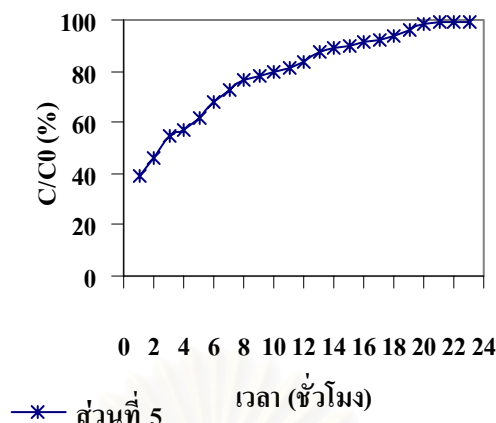


(จ)

รูปที่ 4.13 อัตราส่วนความเข้มข้นไอออนทองแดงที่เหลือ (C) ต่อความเข้มข้นไอออนทองแดงเริ่มต้น (C_0) หลังผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ A ที่เวลาต่างๆ สำหรับการดูดซับครั้งที่ 1 (ก) ส่วนที่ 1 (ข) ส่วนที่ 2 (ค) ส่วนที่ 3 (ง) ส่วนที่ 4 (จ) ส่วนที่ 5

จากรูปที่ 4.13 ถ่านกัมมันต์ในส่วนที่ 1 จะถึงจุดเสื่อสภาพก่อน เนื่องจากถ่านกัมมันต์ในส่วนนี้ สัมผัสกับไอออนทองแดงที่มีความเข้มข้นมากก่อนส่วนอื่นๆ หลังจากนั้นส่วนที่ 2 3 4 และ 5 ก็จะถึงจุดเสื่อสภาพตามลำดับ ซึ่งในการทดลองนี้จุดเสื่อสภาพของถ่านกัมมันต์ในส่วนที่ 1 2 3 4 และ 5 ของ ถังดูดซับคือ 13 17 19 20 และ 22 ชั่วโมงตามลำดับ

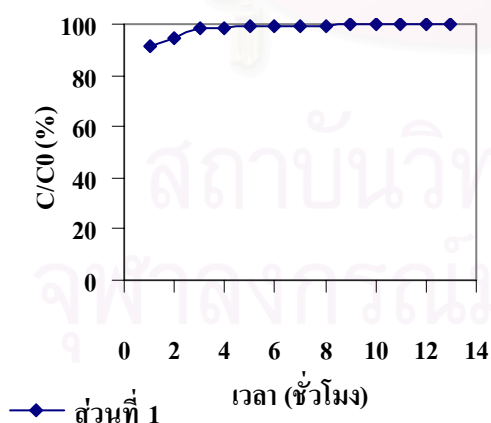




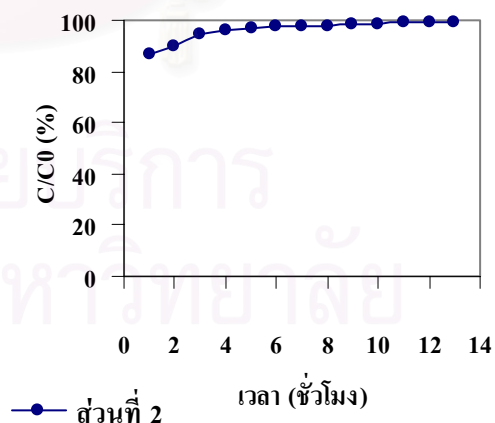
(จ)

รูปที่ 4.14 อัตราส่วนความเข้มข้นไอออนทองแดงที่เหลือ (C) ต่อความเข้มข้นไอออนทองแดงเริ่มต้น (C_0) หลังผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ A ที่เวลาต่างๆ สำหรับการดูดซับครั้งที่ 2 (ก) ส่วนที่ 1 (ข) ส่วนที่ 2 (ค) ส่วนที่ 3 (ง) ส่วนที่ 4 (จ) ส่วนที่ 5

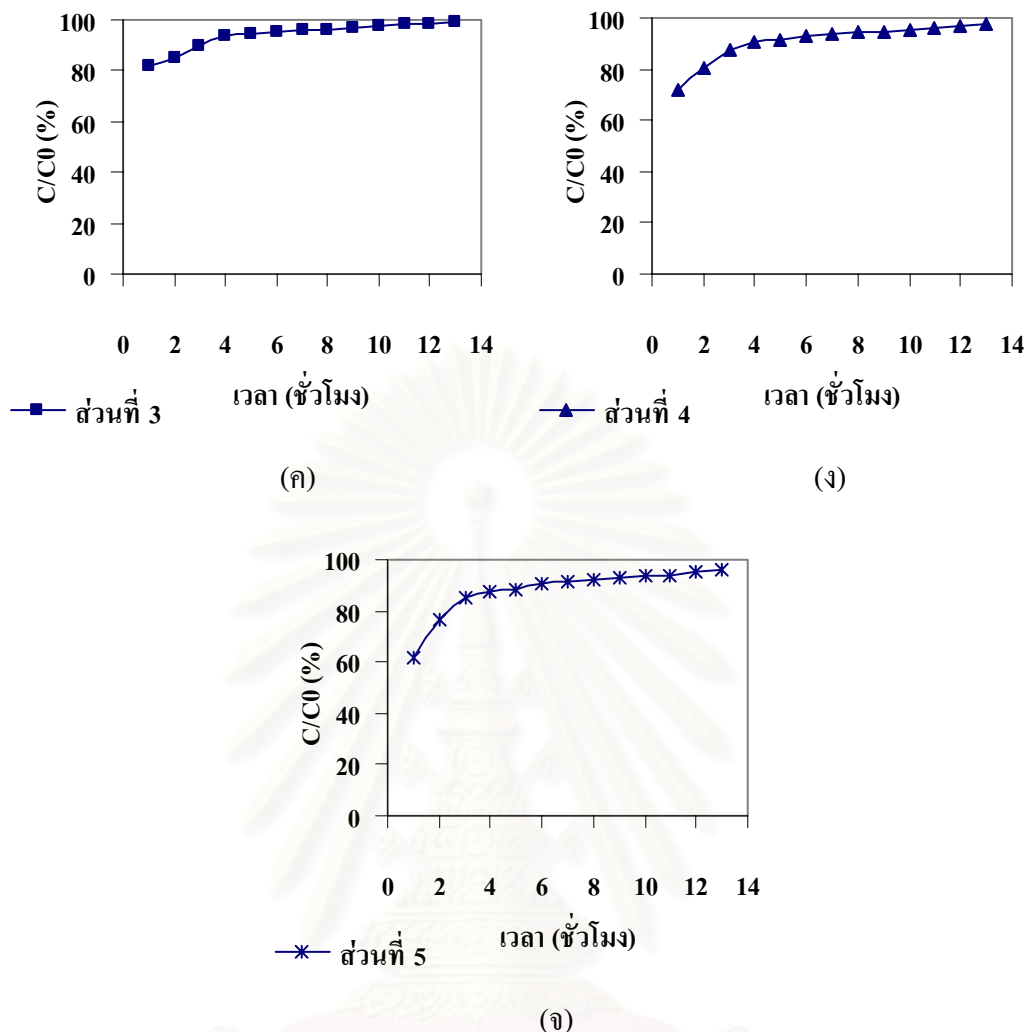
จากรูปที่ 4.14 พบว่าถ่านกัมมันต์เมื่อนำไปผ่านกระบวนการฟื้นฟูคุณภาพ ความสามารถในการดูดซับไอออนทองแดงลดลงอย่างมาก จากผลการทดลองถ่านกัมมันต์ในส่วนที่ 1 จะถึงจุดเสื่อมสภาพก่อน เนื่องจากถ่านกัมมันต์ในส่วนนี้สัมผัสกับไอออนทองแดงที่มีความเข้มข้นมากก่อนส่วนอื่นๆ หลังจากนั้นส่วนที่ 2 3 4 และ 5 ก็จะถึงจุดเสื่อมสภาพตามลำดับ ซึ่งในการทดลองนี้จุดเสื่อมสภาพของถ่านกัมมันต์ในส่วนที่ 1 2 3 4 และ 5 ของถึงดูดซับคือ 7 10 13 14 และ 15 ชั่วโมงตามลำดับ



(ก)

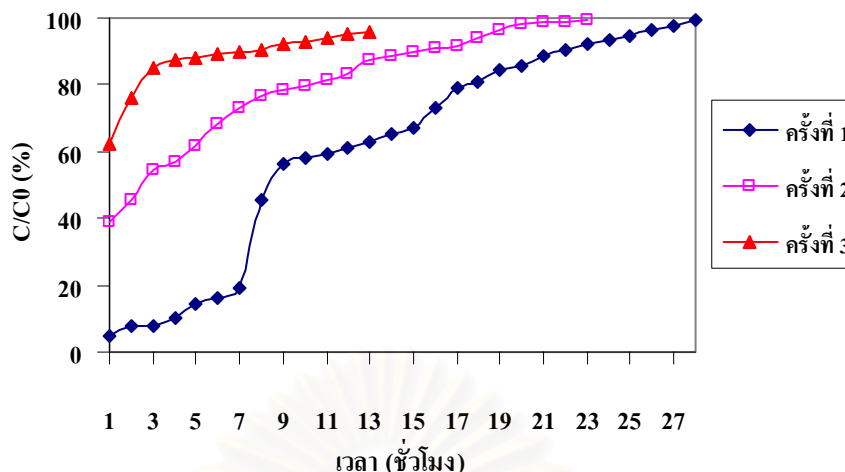


(ข)



รูปที่ 4.15 อัตราส่วนความเข้มข้นไอออนทองแดงที่เหลือ (C) ต่อความเข้มข้นไอออนทองแดงเริ่มต้น (C_0) หลังผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ A ที่เวลาต่างๆ สำหรับการดูดซับครั้งที่ 3 (ก) ส่วนที่ 1 (ข) ส่วนที่ 2 (ค) ส่วนที่ 3 (ง) ส่วนที่ 4 (จ) ส่วนที่ 5

จากรูปที่ 4.15 พบว่าถ่านกัมมันต์เมื่อนำไปผ่านกระบวนการฟื้นฟูคุณภาพถึง 2 ครั้ง ทำให้ความสามารถในการดูดซับไอออนทองแดงลดลงจากถ่านกัมมันต์ที่ยังไม่ผ่านการฟื้นฟูคุณภาพอย่างมาก จากผลการทดลองถ่านกัมมันต์ในส่วนที่ 1 จะถึงจุดเสถียรภาพก่อน เนื่องจากถ่านกัมมันต์ในส่วนนี้สัมผัสกับไอออนทองแดงที่มีความเข้มข้นมากกว่าส่วนอื่นๆ หลังจากนั้นส่วนที่ 2 3 4 และ 5 ก็จะถึงจุดเสถียรภาพตามลำดับ ซึ่งในการทดลองนี้ถ่านกัมมันต์ในส่วนที่ 1 เมื่อเริ่มทำการดูดซับไอออนทองแดง 1 ชั่วโมงแรก ค่าความเข้มข้นไอออนทองแดงที่เหลืออยู่ในน้ำเสียต่อความเข้มข้นเริ่มต้นมีค่าเกินกว่าจุดที่ถ่านเสถียรภาพที่ได้ตั้งไว้คือ 90% ดังนั้นในส่วนที่ 1 มีจุดเสถียรภาพคือ 1 ชั่วโมงแรก ในส่วนที่ 2 3 4 และ 5 ของถึงดูดซับ จุดที่ถ่านเสถียรภาพคือ 2 3 4 และ 6 ชั่วโมงตามลำดับ



รูปที่ 4.16 อัตราส่วนความเข้มข้นไอออนทองแดงที่เหลือ (C) ต่อความเข้มข้นไอออนทองแดงเริ่มต้น (C₀) หลังผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ A ที่เวลาต่างๆ สำหรับการดูดซับทั้ง 3 ครั้ง

จากรูปที่ 4.16 จุดเบรคพอยท์ สำหรับการดูดซับครั้งที่ 1 มีค่าเท่ากับ 4 ชั่วโมง สำหรับการดูดซับครั้งที่ 2 และครั้งที่ 3 นั้นค่าความเข้มข้นไอออนทองแดงที่เหลืออยู่ในน้ำเสียดกับความเข้มข้นเริ่มต้นที่ชั่วโมงที่ 1 มีค่ามากกว่า 10% ซึ่งเกินกว่าจุดเบรคพอยท์ที่กำหนดไว้ และจุดที่ถ่านเสื่อมสภาพ สำหรับการดูดซับครั้งที่ 1 มีค่าเท่ากับ 22 ชั่วโมง สำหรับการดูดซับครั้งที่ 2 มีค่าเท่ากับ 15 ชั่วโมงและสำหรับการดูดซับครั้งที่ 3 มีค่าเท่ากับ 6 ชั่วโมง

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการฟื้นฟูคุณภาพครั้งที่ 1 และครั้งที่ 2 มีความสามารถในการดูดซับและระยะเวลาการใช้งานลดลงจากถ่านกัมมันต์ที่เริ่มใช้ครั้งแรก ทั้งนี้เนื่องจากว่าถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการใช้งานจนถึงจุดเสื่อมสภาพแล้ว จะมีอนุภาคของทองแดงไปอุดตันตามรูพรุนของถ่านกัมมันต์ แล้วเมื่อนำไปผ่านกระบวนการฟื้นฟูคุณภาพอนุภาคทองแดงบางส่วนจะหลุดออกมาจากรูพรุนแล้วไปละลายอยู่ในสารละลายกรดที่ใช้ในการฟื้นฟูคุณภาพ แต่อนุภาคทองแดงบางส่วนจะยังคงเกาะติดอยู่ในรูพรุนเนื่องจากการดูดซับไอออนทองแดงโดยใช้ถ่านกัมมันต์ A เป็นการดูดซับทางกายภาพซึ่งเกิดการดูดซับหลายชั้นทำให้อนุภาคไอออนทองแดงที่ถูกดูดซับในชั้นแรกไม่สามารถสัมผัสกับสารละลายกรดได้อย่างทั่วถึงและรูพรุนของถ่านกัมมันต์มีลักษณะเป็นโพรง แล้วแตกกิ่งก้านสาขาเป็นโพรงเล็กๆเข้าไปภายในเนื้อถ่านกัมมันต์ ดังนั้นสารละลายกรดที่ใช้ชะล้างไอออนทองแดงจึงไม่สามารถสัมผัสกับอนุภาคไอออนทองแดงได้อย่างทั่วถึง (อิริชัย นพแก้ว, 2539) เมื่อนำถ่านกัมมันต์นั้นไปใช้ดูดซับอีกครั้ง ความสามารถในการดูดซับจึงลดลง แล้วยิ่งเมื่อนำถ่านกัมมันต์มาใช้และผ่านการฟื้นฟูคุณภาพหลายๆครั้ง ความสามารถในการดูดซับจึงหมดไปอย่างถาวร

ตารางที่ 4.6 เขตการถ่ายโอนมวล ของการดูดซับไอออนทองแดงออกจากร้าน้ำเสียสังเคราะห์ทั้ง 3 ครั้ง

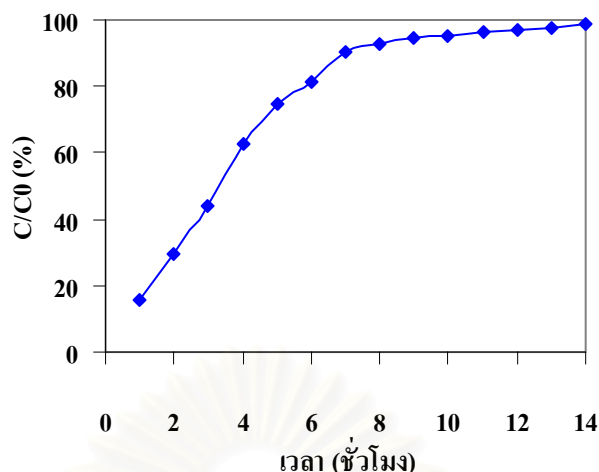
ครั้งที่ดูดซับ	เขตการถ่ายโอนมวล (เซนติเมตร)
1	0.82
2	-
3	-

จากตารางที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าถ่านกัมมันต์ที่นำมาผ่านกระบวนการฟื้นฟูคุณภาพเมื่อนำไปดูดซับไอออนทองแดงอีกครั้งจะทำให้ เขตการถ่ายโอนมวลมีค่ามากขึ้น แสดงว่าความสามารถในการดูดซับไอออนทองแดงด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการฟื้นฟูคุณภาพมีค่าลดลง จนไม่สามารถดูดซับไอออนทองแดงได้อีก ลักษณะผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองของ K. Vijayaraghavan และคณะ (2004) ศึกษาฟื้นฟูคุณภาพสาหร่ายทะเลสีน้ำตาลหลังจากดูดซับไอออนทองแดงโดยใช้กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ พบว่า การดูดซับครั้งที่ 1 มีเขตการถ่ายโอนมวลเท่ากับ 15 เซนติเมตรและการดูดซับครั้งสุดท้าย ครั้งที่ 7 มีเขตการถ่ายโอนมวลเท่ากับ 18.6 เซนติเมตร ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าถ่านกัมมันต์ A สามารถนำมาใช้ดูดซับไอออนทองแดงได้ทั้งหมด 3 ครั้ง คือผ่านการฟื้นฟูคุณภาพ 2 ครั้ง แล้วก็จะหมดความสามารถในการดูดซับอย่างถาวร

4.5 ผลการศึกษาการแยกไอออนทองแดงจากสารละลายโดยใช้เทคนิคไฟฟ้าเคมี

การทดลองนี้ศึกษาการแยกไอออนทองแดงจากสารละลายกรดไตริกที่ได้จากขั้นตอนการฟื้นฟูคุณภาพถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ครั้งโดยใช้เทคนิคไฟฟ้าเคมี ซึ่งความเข้มข้นเริ่มต้นของไอออนทองแดงในสารละลายกรดไนตริก มีค่าเท่ากับ 24.63 มิลลิกรัมต่อลิตร การทดลองแสดงดังรูปที่ 4.17

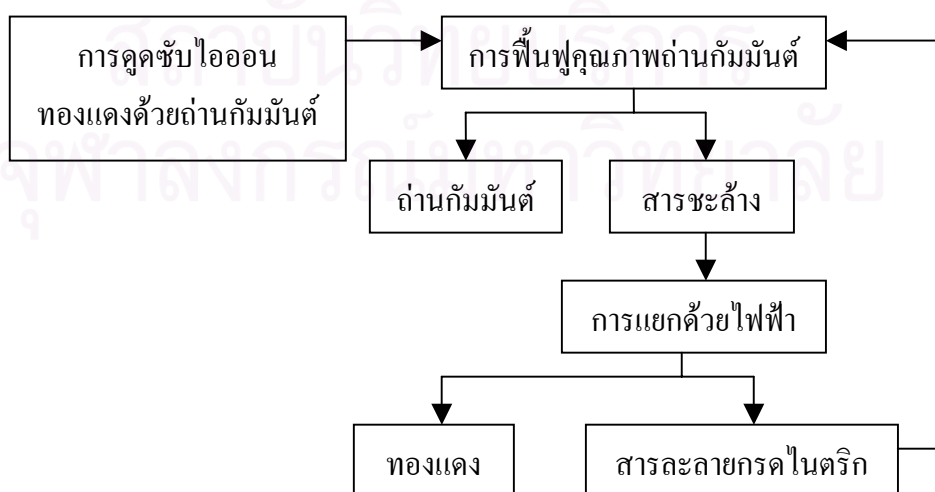
สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.17 อัตราส่วนความเข้มข้นไอออนทองแดงที่เหลือในสารละลายต่อความเข้มข้นเริ่มต้น หลังจากผ่านการแยกไอออนทองแดงด้วยใช้เทคนิคไฟฟ้าเคมี

จากรูปที่ 4.17 ความหนาแน่นกระแสที่ใช้ในการทดลองคือ 10 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ขั้วแคโทดที่ใช้คือ เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) ขั้วแอโนดที่ใช้คือ โทเทเนียมเคลือบรูทีเนียมออกไซด์ พบว่าสามารถแยกไอออนทองแดงออกจากสารละลายได้ดี เมื่อใช้เวลาในการแยกประมาณ 14 ชั่วโมง ซึ่งสามารถแยกทองแดงได้เกือบ 100% ลักษณะผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองของ หทัยทัต (2544) ศึกษาการนำไอออนทองแดงกลับคืนจากตะกอนโดยวิธีไฟฟ้าเคมีโดยขั้วแคโทดที่ใช้คือ เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) ขั้วแอโนดที่ใช้คือ โทเทเนียมเคลือบรูทีเนียมออกไซด์ พบว่า ที่ความหนาแน่นกระแสไฟฟ้าประมาณ 10 แอมแปร์ต่อตารางเมตร สามารถกำจัดทองแดงได้มากกว่า 90 %

4.6 สรุปผลที่ได้จากการศึกษา



รูปที่ 4.18 แผนผังผลการทำงานแบบครบวงจร

งานวิจัยนี้เป็นการทำงานแบบครบวงจรคือ

- 1) นำถ่านกัมมันต์มาดูดซับไอออนทองแดงออกจากน้ำเสียโดยใช้ถังดูดซับแบบแท่ง
- 2) นำถ่านกัมมันต์ที่หมดประสิทธิภาพมาผ่านการฟื้นฟูคุณภาพโดยใช้กรดไนตริก
- 3) นำถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการฟื้นฟูคุณภาพแล้วกลับมาใช้ใหม่
- 4) นำสารละลายกรดไนตริกจากขั้นตอนการฟื้นฟูคุณภาพมาทำการแยกไอออนทองแดงออก

จากสารละลายกรด เพื่อให้ได้ทองแดงบริสุทธิ์ และกรดไนตริก หลังจากนั้นสามารถนำกรดไนตริกกลับไปใช้งานได้

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการดูดซับไอออนทองแดงโดยใช้ถังดูดซับทรงสี่เหลี่ยม ซึ่งเป็นถังดูดซับทรงสี่เหลี่ยมที่ภายในแบ่งออกเป็นช่อง 5 ช่องเพื่อให้ น้ำเสียที่ต้องการบำบัดมีการไหลอย่างต่อเนื่องโดยใช้ระบบน้ำล้น จากการศึกษาพบว่าข้อดีของถังดูดซับแบบนี้คือ แต่ละส่วนมีการไหลอย่างต่อเนื่องโดยไม่ต้องใช้เครื่องสูบลมหรือน้ำเสียระหว่างช่องที่บรรจุถ่านกัมมันต์ ทำให้พื้นที่ติดตั้งถังดูดซับทรงสี่เหลี่ยมมีขนาดเล็กและสะดวกในการใช้งาน แต่ในทางกลับกันถังดูดซับทรงกระบอกนั้นเมื่อต้องการนำมาต่อกันหลายๆอัน ระหว่างถังดูดซับจะต้องติดตั้งเครื่องสูบลมเพื่อสูบน้ำเสียให้มีการไหลอย่างต่อเนื่อง จึงทำให้ระบบมีขนาดใหญ่ เปลืองพื้นที่และเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมในการติดตั้งเครื่องสูบลมมากกว่าการดูดซับที่ใช้ถังดูดซับทรงสี่เหลี่ยม

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 การศึกษาความสามารถในการดูดซับ

1) อิทธิพลของค่าความเป็นกรดเบสที่มีการดูดซับ ไอออนทองแดง

ค่าความเป็นกรดเบสที่เหมาะสมในการดูดซับ ไอออนทองแดงสำหรับ ถ่านกัมมันต์ A คือ ค่าความเป็นกรดเบสเท่ากับ 4 และสำหรับถ่านกัมมันต์ B C และ D มีค่าความเป็นกรดเบสที่เหมาะสม เท่ากับ 5

2) อิทธิพลของเวลาสัมผัสที่มีต่อการดูดซับ

เวลาการดูดซับ ไอออนทองแดงจนถึงจุดสมดุล สำหรับถ่านกัมมันต์ A มีค่าประมาณ 2 ชั่วโมง และสำหรับถ่านกัมมันต์ B C และ D มีค่าประมาณ 4 ชั่วโมง

3) ไอโซเทอมการดูดซับของถ่านกัมมันต์

ไอโซเทอมที่เหมาะสมกับการดูดซับ ไอออนทองแดงของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด คือ ไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดลิช และพบว่าถ่านกัมมันต์ที่สามารถดูดซับ ไอออนทองแดงสูงที่สุด คือ ถ่านกัมมันต์ A รองลงมาเป็นถ่านกัมมันต์ B C และ D ตามลำดับ โดยมีค่า K ของการดูดซับทองแดงเท่ากับ 5.099 4.754 3.342 และ 3.177 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ

5.1.2 การศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับโดยใช้ถังดูดซับแบบแท่ง

1) ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการดูดซับ ไอออนทองแดงโดยใช้ถังดูดซับทรงสี่เหลี่ยม ซึ่งเป็นถังดูดซับทรงสี่เหลี่ยมที่ภายในแบ่งออกเป็นช่อง 5 ช่องเพื่อให้ น้ำเสียที่ต้องการบำบัด มีการไหลอย่างต่อเนื่องโดยใช้ระบบน้ำเดิน จากการศึกษาพบว่าข้อดีของถังดูดซับแบบนี้คือ แต่ละส่วนมีการไหลอย่างต่อเนื่องโดยไม่ต้องใช้เครื่องสูบลมหรือน้ำเสียระหว่างช่องที่บรรจุถ่านกัมมันต์ ทำให้พื้นที่ติดตั้งถังดูดซับทรงสี่เหลี่ยมมีขนาดเล็กและสะดวกในการใช้งาน แต่ในทางกลับกันถังดูดซับทรงกระบอกนั้นเมื่อต้องการนำมาต่อกันหลายๆอัน ระหว่างถังดูดซับจะต้องติดตั้งเครื่องสูบลมหรือน้ำเสียให้มีการไหลอย่างต่อเนื่อง จึงทำให้ระบบมีขนาดใหญ่ เปลืองพื้นที่ และเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มเติมในการติดตั้งเครื่องสูบลมมากกว่าการดูดซับที่ใช้ถังดูดซับทรงสี่เหลี่ยม

2) ถ่านกัมมันต์ A มีระยะเวลาการใช้งานและสามารถดูดซับไอออนทองแดงออกจากน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมได้มากกว่าการดูดซับไอออนทองแดงออกจากน้ำเสียสังเคราะห์ ทั้งในการใช้ถ่านกัมมันต์แบบแบ่งส่วนและถ่านกัมมันต์แบบคอลัมน์ ผลการทดลองเป็นดังนี้อาจเป็นเพราะถ่านกัมมันต์ A สามารถดูดซับไอออนทองแดงที่อยู่ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมได้ดีกว่า ไอออนทองแดงที่อยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์ เนื่องจากไอออนทองแดงที่อยู่ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมอยู่ในรูป $\text{Cu}(\text{SO}_4)$ แต่ไอออนทองแดงที่อยู่ในน้ำเสียสังเคราะห์อยู่ในรูป $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ จึงส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับไอออนทองแดงในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมดีกว่าในน้ำเสียสังเคราะห์

5.1.3 การศึกษาการฟื้นฟูคุณภาพถ่านกัมมันต์ที่หมดประสิทธิภาพการใช้งาน

ถ่านกัมมันต์ A สามารถนำมาใช้ดูดซับไอออนทองแดงได้ทั้งหมด 3 ครั้ง ทั้งนี้เนื่องจากว่า ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการใช้งานจนถึงจุดเสื่อมสภาพแล้ว จะมีอนุภาคของไอออนทองแดงไปอุดตันตามรูพรุนของถ่านกัมมันต์ แล้วเมื่อนำไปผ่านกระบวนการฟื้นฟูคุณภาพอนุภาคไอออนทองแดงบางส่วนจะหลุดออกมาจากรูพรุนแล้วไปละลายอยู่ในสารละลายกรดที่ใช้ในการฟื้นฟูคุณภาพ แต่อนุภาคไอออนทองแดงบางส่วนจะยังคงเกาะติดอยู่ในรูพรุน เมื่อนำถ่านกัมมันต์นั้นไปใช้ดูดซับอีกครั้ง ความสามารถในการดูดซับจึงลดลง แล้วยิ่งเมื่อนำถ่านกัมมันต์มาใช้และผ่านการฟื้นฟูคุณภาพหลายๆครั้ง ความสามารถในการดูดซับจึงหมดไปอย่างถาวร

5.1.4 การศึกษาการแยกโลหะจากสารละลายโดยใช้เทคนิคไฟฟ้าเคมี

การแยกไอออนทองแดงออกจากสารละลายกรดไนตริกโดยใช้เทคนิคไฟฟ้าเคมี ซึ่งความหนาแน่นกระแสที่ใช้คือ 10 แอมแปร์ต่อตารางเมตร ขั้วแคโทดที่ใช้คือ เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless steel) ขั้วแอโนดที่ใช้คือ ไทเทเนียมเคลือบรูทีเนียมออกไซด์ พบว่าสามารถแยกไอออนทองแดงออกจากสารละลายกรดที่ได้จากการฟื้นฟูคุณภาพถ่านกัมมันต์ได้ดี เมื่อใช้เวลาในการแยกประมาณ 14 ชั่วโมง ซึ่งสามารถแยกไอออนทองแดงได้เกือบ 100%

5.2 ข้อเสนอแนะ

- 1) ควรมีการทดลองนำโลหะชนิดอื่นมาศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์แบบแบ่งส่วน
- 2) ควรมีการประยุกต์ถ่านกัมมันต์แบบแบ่งส่วนให้สามารถนำมาใช้งานได้จริงในโรงงานอุตสาหกรรม

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- เกศรา นุตาลัย และคณะ. 2531. รายงานวิจัยการผลิตถ่านกัมมันต์จากดินพรุในห้องปฏิบัติการ. รายงานฉบับที่ 1 โครงการวิจัยที่ ภ30-14 โครงการวิจัยและพัฒนาดินพรุเพื่อประโยชน์ทางอุตสาหกรรม, กรุงเทพมหานคร: สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย.
- เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2542. การบำบัดน้ำเสีย. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: สยามสเตชันเนอรีซ์พพลาย.
- ชนิตา เสมรัตน์. 2543. ประสิทธิภาพในการกำจัดสีของน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสิ่งทอด้วยกระบวนการดูดติดผิวโดยใช้ถ่านที่ผลิตจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- คำรง ขุมมงคล และอภิสิทธิ์ เจริญกุล. 2533. การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ NaCl เป็นตัวกระตุ้น. วิศวกรรมสาร. 43(6): 96-99.
- ประกฤต เลิศจรสวรรค์. 2539. การกำจัดตะกั่วและปรอทในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยการใช้ขี้เถ้าเฝ้างั่วและขุยมะพร้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ลลิตา นิพัทธจารุกุล. 2544. การกำจัดตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการดูดติดผิวโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- สุเจนี๋ ค่อยเส็งยม. 2544. การกำจัดตะกั่วและปรอทจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มและกะลามะพร้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- เสริมพล รัตสุข และไชยยุทธ กลิ่นสุคนธ์. 2525. การกำจัดน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและแหล่งชุมชน. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย.
- หทัยทัต ชื้อสุวรรณ. 2544. การนำกลับโลหะหนักกลับคืนจากตะกอนโดยวิธีไฟฟ้าเคมี. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาเคมีเทคนิค บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อริชัย นพแก้ว. 2539. การใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดซับโลหะหนักจากน้ำมูลฝอยที่ผ่านบ่อเก็บกัก. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ภาษาอังกฤษ

- Bernadin, F.E. 1976. Selecting and Specifying Activated-Carbon-Adsorption Systems. Chemical Engineering. 83: 77-82.
- Bin Yu a, Y. Zhang, Alka Shukla, Shyam S. Shukla and Kenneth L. Dorris. 2000. The removal of heavy metal from aqueous solutions by sawdust adsorption — removal of copper. Journal of Hazardous Materials. B80 (2000): 33–42.
- Chen, J. P. and Wang, X. 2000. Removing copper, zinc and lead ion by granular activated carbon in pretreated fixed-bed columns. Separation and Purification Technology 19: 157-167.
- Cheremisinoff, P.N. and Morresi, A.C. 1987. Carbon adsorption applications. In P.N. Cheremisinoff and F. Ellerbusch (eds.), Carbon adsorption handbook. Michigan: Ann Arbor Science.
- Clark, R.M., and Lykins, B.W., Jr. 1989. Granular Activated Carbon Design Operation and cost. Michigan: Lewis.
- Eckenfelder, W. W., 2000. Industrial water pollution control. 3rd ed. Singapore: McGraw-Hill book.
- Hassler, J. W. 1974. Purification with activated carbon. 3rd ed. New York: Chemical Publishing.
- Jia Guo, Aik Chong Lua. 2002. Adsorption of sulphur dioxide onto activated carbon prepared from oil-palm shells with and without pre-impregnation. Separation and Purification Technology.30 (2003) 265- 273.
- Jin-Wha Kim, Myoung-Hoi Sohn, Dong-Su Kim, Seung-Man Sohn and Young-Shik Kwon. 2001. Production of granular activated carbon from waste walnut shell and its adsorption characteristics for Cu²⁺ ion. Journal of Hazardous Materials. B85 (2001): 301–315.
- K. Vijayaraghavan, J. Jegan, K. Palanivelu, M. Velan, 2004. Batch and column removal of copper from aqueous solution using a brown marine alga *Turbinaria ornata*. Chemical Engineering Journal. 106 (2005) 177–184.
- Kadirvelu, K., Thamaraiselvi, K. and Namasivayam C. 2001. Removal of heavy metals from industrial wastewater by adsorption onto activated carbon prepared from an agricultural solid waste. Bioresource Technology. 76 (1): 63-65.
- Lyman, W. J. 1978. Applicability of carbon adsorption to the treatment of hazardous industrial wastes. In P.N. Cheremisinoff and F. Ellerbusch (eds.), Carbon adsorption handbook. Michigan: Ann Arbor Science.

- Murat Teker, 1998. Adsorption of Copper and Cadmium Ions by Activated Carbon From Rice Hulls. Turk J Chem. 23 (1999), 185-191.
- Myer, D. 1999. Surface, interface and colloids: principle and applications. 2nd ed. New York: John Wiley & Sons.
- Petermele, W. S., Winkler - Hechenleitner A. A. and Pineda, E. A. G. 1999. Adsorption of Cd (II) and Pb (II) onto functionalized formic lignin from sugar cane bagasse. Bioresource Technology. 68 (1): 95-100.
- Reed, B. E., Jamil, M. and Thomas, B. 1996. Effect of pH, empty bed contact time and hydraulic loading rate on lead removal by granular activated carbon columns. Water Environment Research. 68(5): 877-882.
- S. Cay. 2003. Single and binary component adsorption of copper (II) and cadmium (II) from aqueous solutions using tea-industry waste. Separation and Purification Technology.
- Schuliger, W. G. 1987. Purification of industrial liquids with granular activated carbon: Techniques for obtaining and interpreting data and selecting the type of commercial system. In P.N. Cheremisinoff and F. Ellerbusch (eds.), Carbon adsorption handbook. Michigan: Ann Arbor Science.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

วิธีการหาค่าไอโอดีนนัมเบอร์

วิธีการหาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ (Standard test method for determination of iodine number of activated carbon, ASTM D4607-94)

1. เครื่องมือ

- 1) เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง
- 2) เตาอบอุณหภูมิ 110-150 องศาเซลเซียส
- 3) ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) ขนาด 250 มิลลิลิตร
- 4) กระดาษกรองเบอร์ 42 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร
- 5) เครื่องแก้ว : บิวเรตต์, ปิเปต, กรวยกรอง, ปิกเกอร์, ขวดปรับปริมาตรขนาด 1 ลิตร
- 6) โถดูดความชื้น (Desiccator)

2. สารเคมีและวิธีเตรียม

- 1) สารละลายกรดไฮโดรคลอริก ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก
ผสมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นจำนวน 70 มิลลิลิตร ลงในน้ำกลั่น 550 มิลลิลิตร
- 2) สารละลายมาตรฐานโปแตสเซียมไอโอเดต 0.1 นอร์มัล (Normal, N)
ชั่งโปแตสเซียมไอโอเดต (Primary standard grade potassium iodate, KIO_3) ที่ผ่านกา
รอบที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็นในดูดความชื้น จำนวน
 3.5667 ± 0.1 มิลลิกรัม ละลายในน้ำกลั่นปริมาณ 100 มิลลิลิตร ถ่ายสารละลายลงในขวดปรับปริมาตร
(Volumetric flask) ขนาด 1 ลิตร ทำให้เจือจางด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1 ลิตร
- 3) สารละลายมาตรฐานโซเดียมไธโอซัลเฟต 0.1 ± 0.001 นอร์มัล
สารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต (Sodium thiosulfate, $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$) 24.820 กรัม ใน
น้ำกลั่นที่ผ่านการต้มให้เดือด 75 ± 25 มิลลิลิตร เติมโซเดียมคาร์บอเนต 0.1 ± 0.01 กรัม ถ่ายสารละลายลง
ในขวดปรับปริมาตรขนาด 1 ลิตร ทำให้เจือจางด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1 ลิตร เก็บสารละลายในขวด
สีชา ทิ้งไว้อย่างน้อย 4 วัน ก่อนทำการตรวจสอบความเข้มข้น
- 4) สารละลายมาตรฐานไอโอดีน 0.1 ± 0.001 นอร์มัล
ชั่งไอโอดีน 12.7 กรัมและโปแตสเซียมไอโอไดน์ (KI) 19.1 กรัม ผสมให้เข้ากันเติมน้ำ
กลั่น 2-5 มิลลิลิตร คนให้ของแข็งละลาย ค่อยๆเติมน้ำทีละน้อย (ครั้งละประมาณ 5 มิลลิลิตร) จนกระทั่ง

ได้สารละลายประมาณ 40 มิลลิลิตร ทิ้งสารละลายไว้อย่างน้อย 4 ชั่วโมง คนเป็นระยะ เพื่อให้แน่ใจว่าของแข็งละลายหมด ถ่ายสารละลายลงในขวดปรับปริมาตร 1 ลิตร เก็บสารละลายไว้ในขวดสีชา ตรวจสอบความเข้มข้นกับสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต 0.1 N

5) สารละลายแป้ง

ละลายแป้ง (Soluble starch) 1.0 ± 0.5 กรัม ในน้ำเย็น 5-10 มิลลิลิตร คนสารละลายพร้อมกับเติมน้ำกลั่นเพิ่มอีก 25 ± 5 มิลลิลิตร เทสารละลายลงในน้ำเดือด 1 ลิตร แล้วต้มต่อให้เดือดอีก 4-5 นาที

3. การตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลาย

1) การตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต

ใช้ปิเปตดูดสารละลายโปแตสเซียมไอโอเดต (KIO_3) 25 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่เติมโปแตสเซียมไอโอไดน์ (KI) 2.0 ± 0.01 กรัม เขย่าจนสารละลาย ปิเปตกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 5 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ แล้วไตเตรดทันทีด้วยสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต 0.1 N เมื่อสีของสารละลายไอโอดีนจางลงจนกระทั่งเป็นสีเหลืองอ่อน (ใกล้ถึงจุด end point) หยคน้ำแป้ง 2-3 หยด สารละลายจะเป็นสีน้ำเงิน ไตเตรดต่อจนสารละลายไม่มีสี บันทึกปริมาตรของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ใช้ ทำการไตเตรดซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้ง คำนวณหาความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต โดยใช้สูตร

$$N_1 = (P.R)/S$$

เมื่อ	N_1	= ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต, นอร์มัล
	P	= ปริมาตรสารละลายโปแตสเซียมไอโอเดต, มิลลิลิตร
	R	= ความเข้มข้นสารละลายโปแตสเซียมไอโอเดต, นอร์มัล
	S	= ปริมาตรสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ใช้, มิลลิลิตร

2) การตรวจสอบหาความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน

ใช้ปิเปตดูดสารละลายไอโอดีน 25 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ แล้วไตเตรดทันทีด้วยสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต 0.1 N เมื่อสีของสารไอโอดีนจางลงจนกระทั่งเป็นสีเหลืองอ่อน (ใกล้ถึงจุด end point) หยคน้ำแป้ง 2-3 หยด สารละลายจะเป็นสีน้ำเงิน ไตเตรดต่อจนสารละลายไม่มีสี บันทึกปริมาตรของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ใช้ ทำการไตเตรดซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้ง คำนวณหาความเข้มข้นสารละลายไอโอดีนโดยใช้สูตร

$$N_2 = (S \cdot N_1) / L$$

เมื่อ	N_2	= ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน, นอร์มัล
	S	= ปริมาตรสารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟตที่ใช้, มิลลิลิตร
	N_1	= ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟต, นอร์มัล
	L	= ปริมาตรสารละลายไอโอดีน, มิลลิลิตร

4. วิธีการวิเคราะห์

1) บดถ่านกัมมันต์ที่จะทำการวิเคราะห์ให้ละเอียด จนถ่านสามารถร่อนผ่านตะแกรงคัดขนาดเบอร์ 100 เมช ได้ 95% และสามารถร่อนผ่านตะแกรงคัดขนาดเบอร์ 325 เมช ได้ 60%

2) นำถ่านที่บดแล้ว มาอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 145-155 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็นใน โถดูดความชื้น (ตามวิธีของ Standard test methods for moisture in activated carbon, ASTM D2867)

3) ประมาณค่า iodine number ของถ่านตัวอย่าง เพื่อนำไปคำนวณหา carbon dosage หรือค่าน้ำหนักของถ่านที่จะใช้ในการทดลอง 3 ค่าน้ำหนัก โดยใช้สูตรในข้อ 5.2 (หรือตามค่าประมาณน้ำหนักตัวอย่างในตารางที่ ก.1) ชั่งถ่านที่อบแห้งแล้วตามน้ำหนักที่คำนวณได้ในขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 มิลลิลิตร

4) ปิเปต 5% สารละลายกรดไฮโดรคลอริก จำนวน 10 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่แต่ละใบ ปิดจุกเขย่าเบาๆ เพื่อให้ตัวอย่างเปียกทั่ว เปิดฝา แล้วนำไปตั้งบน hot plate ในตู้ดูดควัน ให้ความร้อนของเหลวในภาชนะเดือด ทิ้งให้เดือดต่อประมาณ 30 ± 2 วินาที เพื่อไล่ซัลเฟอร์ในตัวอย่าง หลังจากนั้นนำตัวอย่างออก แล้วทิ้งให้เย็นจนถึงอุณหภูมิ

5) ปิเปตสารละลายไอโอดีน 0.1 N จำนวน 100 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ปิดจุกขวดทันที แล้วเขย่าอย่างแรงเป็นเวลา 30 ± 1 วินาทีเปิดจุกแล้วกรองสารละลายผ่านกระดาษกรองพับจีบหมายเลข 42

6) ปิเปตสารละลายที่กรองได้ 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ไตเตรตสารละลายด้วยสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮโอซัลเฟต 0.1 N จนกระทั่งสารละลายเป็นสีเหลืองอ่อน เติมสารละลายน้ำแป้งลงไป 2 มิลลิลิตรแล้วไตเตรตต่อ จนกระทั่งสารละลายในขวดรูปชมพู่ไม่มีสี บันทึกปริมาตรสารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟตที่ใช้

5. การคำนวณ

- 1) การคำนวณหาค่า Iodine number ใช้สูตร

$$X/M = (A - (DF) (B) (S))/M$$

โดยที่	X/M	= ปริมาณไอโอดีนที่ถูกดูดซับต่อน้ำหนักของถ่านกัมมันต์, มิลลิกรัมต่อกรัม
	A	= (N ₂) (12693), N ₂ = ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน, นอร์มัล
	B	= (N ₁) (12693), N ₁ = ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไซโอซัลเฟต, นอร์มัล
	DF	= dilution factor = (100+10)/50 = 2.2
	S	= ปริมาตรสารละลายโซเดียมไซโอซัลเฟตที่ใช้, มิลลิลิตร
	M	= น้ำหนักตัวอย่าง, กรัม

- 2) การคำนวณหา carbon dosages ใช้สูตร

$$M = (A - (DF) (C) (126.93) (50))/E$$

โดยที่	M	= น้ำหนักตัวอย่าง, กรัม
	A	= (N ₂) (12693), N ₂ = ความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน, นอร์มัล
	DF	= dilution factor = (100+10)/50 = 2.2
	C	= residue iodine
	E	= ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ โดยประมาณ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.1 น้ำหนักประมาณของตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์ค่าไอโอดีน

M				M			
E	C=0.01	C=0.02	C=0.03	E	C=0.01	C=0.02	C=0.03
300	3.766	3.300	2.835	1550	0.792	0.639	0.549
350	3.228	2.829	2.430	1600	0.706	0.616	0.531
400	2.824	2.475	2.126	1650	0.684	0.600	0.515
450	2.510	2.200	1.890	1700	0.664	0.582	0.500
500	2.259	1.980	1.701	1750	0.645	0.566	0.486
550	2.054	1.800	1.546	1800	0.628	0.550	0.472
600	1.883	1.650	1.417	1850	0.610	0.535	0.460
650	1.738	1.523	1.308	1900	0.594	0.521	0.447
700	1.614	1.414	1.215	1950	0.579	0.508	0.436
750	1.506	1.320	1.134	2000	0.565	0.495	0.425
800	1.412	1.237	1.063	2050	0.551	0.483	0.415
850	1.329	1.164	1.000	2100	0.538	0.471	0.405
900	1.255	1.100	0.945	2150	0.525	0.460	0.396
950	1.189	1.042	0.895	2200	0.513	0.450	0.388
1000	1.130	0.990	0.850	2250	0.502	0.440	0.378
1050	1.076	0.943	0.810	2300	0.491	0.430	0.370
1100	1.027	0.900	0.773	2350	0.481	0.421	0.362
1150	0.982	0.861	0.739	2400	0.471	0.412	0.354
1200	0.941	0.825	0.709	2450	0.461	0.404	0.347
1250	0.904	0.792	0.680	2500	0.452	0.396	0.340
1300	0.869	0.761	0.654	2550	0.443	0.388	0.333
1350	0.837	0.733	0.630	2600	0.434	0.381	0.327
1400	0.807	0.707	0.607	2650	0.426	0.374	0.321
1450	0.799	0.683	0.586	2700	0.418	0.367	0.315
1500	0.753	0.666	0.567	2750	0.411	0.360	0.309

ภาคผนวก ข

การคำนวณค่าคงที่ในไอโซเทอมดูดซับ

1. ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนด์ลิช (Freundlich adsorption isotherm)

ตารางที่ ข.1 แสดงผลการคำนวณ ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนด์ลิชของถ่านกัมมันต์ A

น้ำหนักถ่าน (M, กรัม)	ค่าความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	C	X	X/M	log (X/M)	log (C)
0.05	7.73	0.773	0.24	4.82	0.68	-0.11
0.10	5.60	0.560	0.45	4.55	0.66	-0.25
0.30	1.11	0.111	0.90	3.00	0.48	-0.95
0.50	0.15	0.015	0.99	1.99	0.30	-1.83

ตารางที่ ข.2 แสดงผลการคำนวณ ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรอนด์ลิชของถ่านกัมมันต์ B

น้ำหนักถ่าน (M, กรัม)	ค่าความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	C	X	X/M	log (X/M)	log (C)
0.05	7.18	0.718	0.24	4.78	0.68	-0.14
0.10	5.59	0.559	0.39	3.97	0.60	-0.25
0.30	1.31	0.131	0.83	2.75	0.44	-0.88
0.50	0.16	0.016	0.94	1.88	0.27	-1.80

ตารางที่ ข.3 แสดงผลการคำนวณ ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชของถ่านกัมมันต์ C

น้ำหนักถ่าน (M, กรัม)	ค่าความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	C	X	X/M	log (X/M)	log (C)
0.05	7.90	0.790	0.17	3.34	0.52	-0.10
0.10	6.63	0.663	0.29	2.93	0.47	-0.17
0.30	2.24	0.224	0.73	2.44	0.39	-0.64
0.50	0.49	0.049	0.91	1.81	0.26	-1.31

ตารางที่ ข.4 แสดงผลการคำนวณ ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชของถ่านกัมมันต์ D

น้ำหนักถ่าน (M, กรัม)	ค่าความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	C	X	X/M	log (X/M)	log (C)
0.05	8.04	0.804	0.15	3.04	0.48	-0.09
0.10	6.65	0.665	0.29	2.92	0.46	-0.17
0.30	3.11	0.311	0.65	2.15	0.33	-0.50
0.50	0.94	0.094	0.86	1.72	0.24	-1.02

ตารางที่ ข.5 แสดงค่าคงที่จากกราฟไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช

ชนิดถ่าน	สมการไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช	r^2	1/n	n	log K	K
A	$y = 0.226x + 0.7075$	$r^2 = 0.997$	0.226	4.423	0.708	5.099
B	$y = 0.232x + 0.6771$	$r^2 = 0.970$	0.232	4.308	0.677	4.754
C	$y = 0.204x + 0.5240$	$r^2 = 0.979$	0.204	4.902	0.524	3.342
D	$y = 0.271x + 0.5020$	$r^2 = 0.968$	0.271	3.689	0.502	3.177

2. ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ (Langmuir adsorption isotherm)

ตารางที่ ข.6 แสดงผลการคำนวณ ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ของถ่านกัมมันต์ A

น้ำหนักถ่าน (M, กรัม)	ค่าความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	C	X	1/X	1/C
0.05	7.73	0.773	4.82	0.21	1.29
0.10	5.60	0.560	4.55	0.22	1.79
0.30	1.11	0.111	3.00	0.33	8.97
0.50	0.15	0.015	1.99	0.50	67.11

ตารางที่ ข.7 แสดงผลการคำนวณ ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ของถ่านกัมมันต์ B

น้ำหนักถ่าน (M, กรัม)	ค่าความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	C	X	1/X	1/C
0.05	7.18	0.718	4.78	0.21	1.39
0.10	5.59	0.559	3.97	0.25	1.79
0.30	1.31	0.131	2.75	0.36	7.66
0.50	0.16	0.016	1.88	0.53	63.29

ตารางที่ ข.8 แสดงผลการคำนวณ ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ของถ่านกัมมันต์ C

น้ำหนักถ่าน (M, กรัม)	ค่าความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	C	X	1/X	1/C
0.05	7.90	0.790	3.34	0.30	1.26
0.10	6.63	0.663	2.93	0.34	1.50
0.30	2.24	0.224	2.44	0.41	4.46
0.50	0.49	0.049	1.81	0.55	20.53

ตารางที่ ข.9 แสดงผลการคำนวณ ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงเมียร์ของถ่านกัมมันต์ D

น้ำหนักถ่าน (M, กรัม)	ค่าความเข้มข้น (มิลลิกรัมต่อลิตร)	C	X	1/X	1/C
0.05	8.04	0.804	3.04	0.33	1.24
0.10	6.65	0.665	2.92	0.34	1.50
0.30	3.11	0.311	2.15	0.46	3.21
0.50	0.94	0.094	1.72	0.58	10.62



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค

ข้อมูลการทดลอง

ตารางที่ ค.1 ผลการศึกษาความสามารถในการละลายของไอออนทองแดงที่ค่าความเป็นกรดเบส 3-7

ค่าความเป็นกรดเบส	ความเข้มข้นทองแดงไอออน (มิลลิกรัมต่อลิตร)
3	8.986
4	8.986
5	8.986
6	7.832
7	5.225

ตารางที่ ค.2 ผลการศึกษาค่าความเป็นกรดเบสที่เหมาะสมในการดูดซับไอออนทองแดง

ถ่านกัมมันต์	C/Co (%)		
	3	4	5
A	45.968	0.921	0.911
B	61.404	3.982	1.975
C	75.163	20.631	7.221
D	75.565	24.508	7.594

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับไอออนทองแดงของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิดที่เวลาสัมผัสต่างๆ

เวลา (นาที)	C/Co (%)			
	ถ่านกัมมันต์ A	ถ่านกัมมันต์ B	ถ่านกัมมันต์ C	ถ่านกัมมันต์ D
0	100.00	100.00	100.00	100.00
15	26.07	47.31	55.01	53.26
30	15.26	22.36	41.92	41.22
60	3.41	15.14	26.53	29.44
120	0.47	9.23	10.43	16.24
240	0.45	6.12	8.10	9.92
360	0.21	4.73	6.00	7.36

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.4 ผลการศึกษาการดูดซับไอออนทองแดงของถ่านกัมมันต์ A ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ถังดูดซับทรงสี่เหลี่ยม

เวลา (ชั่วโมง)	C/Co				
	ช่องที่ 1	ช่องที่ 2	ช่องที่ 3	ช่องที่ 4	ช่องที่ 5
1	35.778	21.602	7.425	6.168	4.910
2	52.345	33.323	14.301	11.103	7.904
3	62.365	39.780	20.689	14.356	8.024
4	72.555	51.213	29.870	20.055	10.240
5	74.970	61.727	44.481	29.456	14.431
6	77.814	63.748	49.681	33.034	16.387
7	79.701	70.349	60.998	40.195	19.391
8	79.890	74.451	69.012	57.295	45.579
9	83.600	77.000	70.900	60.000	51.400
10	85.549	79.651	73.752	66.023	58.293
11	87.754	81.267	74.780	66.911	59.042
12	88.600	83.400	78.200	69.559	60.918
13	90.319	85.050	79.780	71.537	63.064
14	91.417	86.387	81.357	73.273	65.190
15	94.400	88.800	83.782	75.494	67.206
16	93.030	89.294	85.559	79.329	73.100
17	93.443	90.858	88.273	83.752	79.232
18	93.713	91.532	89.351	85.160	80.968
19	93.962	92.974	91.986	87.325	84.261
20	96.337	95.344	94.351	90.130	85.908
21	97.156	96.257	95.359	92.784	86.400
22	97.974	97.171	96.367	93.343	90.319
23	98.792	98.084	97.375	94.701	92.026
24	99.611	98.997	98.383	95.808	93.234
25	99.401	99.092	98.782	96.778	94.774
26	99.251	99.092	98.932	97.582	96.231

ตารางที่ ค.4 (ต่อ) ผลการศึกษาการดูดซับไอออนทองแดงของถ่านกัมมันต์ A ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ถังดูดซับทรงสี่เหลี่ยม

เวลา (ชั่วโมง)	C/Co				
	ช่องที่ 1	ช่องที่ 2	ช่องที่ 3	ช่องที่ 4	ช่องที่ 5
27	99.321	99.286	99.251	98.470	97.688
28	99.391	99.356	99.321	99.233	99.145



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.5 ผลการศึกษาการดูดซับไอออนทองแดงของถ่านกัมมันต์ A ในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ถังดูดซับทรงกระบอก

เวลา (ชั่วโมง)	C/Co
1	5.38
2	8.78
3	11.04
4	22.04
5	32.09
6	46.77
7	51.67
8	55.78
9	67.18
10	69.73
11	71.01
12	73.80
13	74.71
14	74.81
15	75.05
16	77.93
17	80.85
18	83.41
19	85.47
20	90.42
21	91.78
22	93.28
23	95.79
24	97.30
25	98.71
26	99.23

ตารางที่ ค.6 ผลการศึกษาการดูดซับไอออนทองแดงของถ่านกัมมันต์ A ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมโดยใช้ถังดูดซับทรงสี่เหลี่ยม

เวลา (ชั่วโมง)	C/Co				
	ช่องที่ 1	ช่องที่ 2	ช่องที่ 3	ช่องที่ 4	ช่องที่ 5
1	15.945	9.134	2.323	1.952	1.582
2	28.186	16.183	4.181	2.806	1.431
3	45.097	25.669	6.240	3.641	1.042
4	49.500	31.266	13.032	6.981	0.929
5	52.881	40.441	28.000	14.546	1.092
6	55.638	45.634	35.631	20.446	5.261
7	57.790	48.293	38.795	29.847	20.900
8	62.718	51.732	40.747	32.688	24.630
9	64.384	53.505	42.627	33.563	24.500
10	67.690	56.937	46.184	35.342	24.500
11	69.670	58.186	46.702	37.901	29.100
12	72.348	61.212	50.076	41.838	33.600
13	77.799	65.373	52.948	44.239	35.530
14	79.127	67.817	56.507	47.353	38.200
15	82.180	70.635	59.090	49.135	39.180
16	84.266	74.861	65.457	55.039	44.620
17	87.138	79.731	72.323	60.757	49.190
18	88.733	81.608	74.484	62.707	50.930
19	89.723	83.362	77.001	65.810	54.620
20	89.871	84.179	78.487	67.918	57.350
21	90.695	85.866	81.037	72.124	63.210
22	90.807	87.990	85.173	76.575	67.977
23	90.929	89.155	87.381	78.693	70.005
24	91.736	90.596	89.457	82.336	75.216
25	92.927	91.413	89.899	84.313	78.728
26	93.748	92.247	90.745	85.933	81.121

ตารางที่ ค.6 (ต่อ) ผลการศึกษาการดูดซับไอออนทองแดงของถ่านกัมมันต์ A ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมโดยใช้ถัสดูดซับทรงสี่เหลี่ยม

เวลา (ชั่วโมง)	C/Co				
	ช่องที่ 1	ช่องที่ 2	ช่องที่ 3	ช่องที่ 4	ช่องที่ 5
27	95.127	93.451	91.776	89.025	86.273
28	96.283	94.565	92.847	90.422	87.997
29	97.744	95.400	93.056	91.150	89.245
30	97.858	96.789	95.721	92.951	90.181
31	98.163	97.413	96.663	94.038	91.413
32	98.631	98.207	97.783	95.438	93.093
33	98.913	98.857	98.801	97.289	95.776

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก.7 ผลการศึกษาการดูดซับไอออนทองแดงของถ่านกัมมันต์ A ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมโดยใช้ถังดูดซับทรงกระบอก

เวลา (ชั่วโมง)	C/Co	เวลา (ชั่วโมง)	C/Co
1	0.870	18	68.810
2	1.067	19	73.430
3	1.444	20	78.450
4	3.101	21	81.779
5	11.274	22	82.610
6	24.093	23	83.521
7	29.700	24	84.520
8	33.300	25	83.629
9	36.282	26	83.270
10	41.200	27	85.300
11	42.200	28	86.527
12	45.100	29	88.721
13	47.627	30	91.048
14	50.554	31	91.997
15	54.186	32	93.171
16	56.911	33	94.960
17	65.382		

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.8 ผลการศึกษาการฟื้นฟูคุณภาพน้ำกัมมันต์ครั้งที่ 1

เวลา (ชั่วโมง)	C/Co				
	ช่องที่ 1	ช่องที่ 2	ช่องที่ 3	ช่องที่ 4	ช่องที่ 5
1	77.201	64.763	52.326	45.528	38.731
2	78.655	71.656	64.657	55.184	45.711
3	83.500	76.413	69.325	62.006	54.687
4	86.405	77.822	69.240	63.143	57.046
5	86.900	81.100	75.300	68.406	61.511
6	89.100	83.611	78.122	73.228	68.333
7	90.518	85.685	80.851	76.870	72.890
8	92.280	87.866	83.452	80.176	76.900
9	93.884	89.330	84.776	81.480	78.183
10	94.385	90.948	87.511	83.567	79.622
11	95.338	91.142	86.946	84.174	81.402
12	95.859	92.311	88.763	86.147	83.530
13	96.481	93.846	91.211	89.344	87.477
14	97.834	94.483	91.133	89.930	88.728
15	98.156	95.245	92.335	91.032	89.730
16	98.499	95.801	93.103	92.154	91.205
17	98.658	96.149	93.641	92.750	91.859
18	99.098	97.860	96.621	95.338	94.055
19	99.312	98.353	97.393	96.804	96.214
20	99.599	99.198	98.797	98.466	98.135
21	99.769	99.591	99.413	99.130	98.847
22	99.930	99.734	99.539	99.298	99.058
23	99.950	99.845	99.739	99.549	99.358

ตารางที่ ค.9 ผลการศึกษาการฟื้นฟูคุณภาพถ่านกัมมันต์ครั้งที่ 2

เวลา (ชั่วโมง)	C/Co				
	ช่องที่ 1	ช่องที่ 2	ช่องที่ 3	ช่องที่ 4	ช่องที่ 5
1	91.131	86.354	81.576	71.790	62.004
2	94.185	89.669	85.153	80.670	76.186
3	98.347	94.190	90.032	87.487	84.943
4	98.236	95.994	93.751	90.662	87.573
5	99.133	96.886	94.638	91.322	88.006
6	99.284	97.349	95.414	92.844	90.274
7	99.204	97.561	95.919	93.505	91.091
8	99.446	97.773	96.100	94.260	92.421
9	99.919	98.428	96.936	94.850	92.764
10	99.960	98.750	97.541	95.621	93.701
11	99.980	99.015	98.049	95.983	93.918
12	99.990	99.305	98.619	96.791	94.962
13	99.970	99.580	99.190	97.598	96.006

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.10 ผลการศึกษาการแยกไอออนทองแดงจากสารละลายโดยใช้เทคนิคไฟฟ้าเคมี

เวลา (ชั่วโมง)	C/Co (%)
1	84.265
2	70.239
3	55.843
4	37.598
5	25.315
6	18.899
7	9.900
8	7.192
9	5.677
10	5.092
11	3.379
12	3.236
13	2.148
14	1.332

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวกรรณิการ์ รักกิจ เกิดเมื่อวันที่ 11 พฤษภาคม พ.ศ. 2524 ที่จังหวัด กรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ในปีการศึกษา 2544 และเข้าศึกษาต่อหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค ที่จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2545



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย