

การใช้ถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส (*Eucalyptus camaldulensis* Dehnh.) และไม้กระถินเทพา (*Acacia mangium* Willd.) เพื่อการกำจัดโครเมียม และนิเกิล จากน้ำเสียสังเคราะห์



นายวัชชัย สิงห์ศิริ

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)

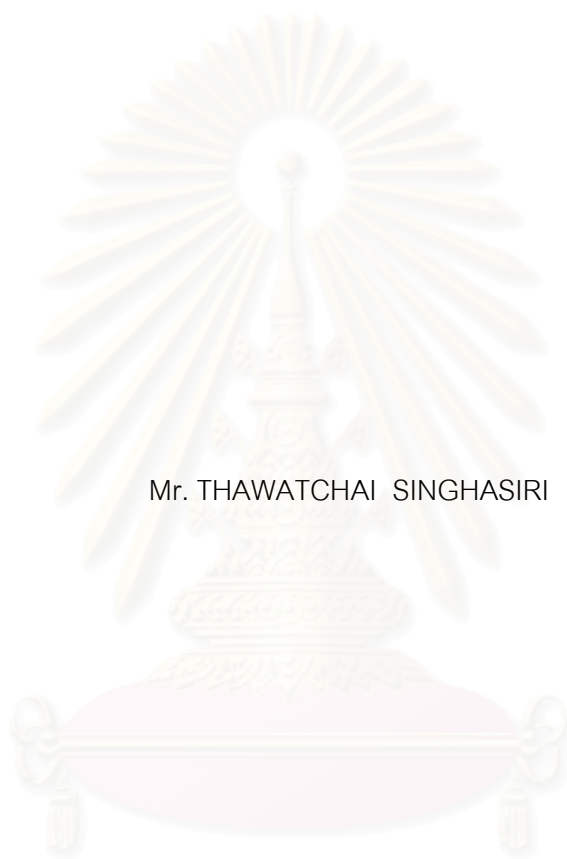
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2548

ISBN 974-17-3967-2

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

USING ACTIVATED CARBON FROM EUCALYPTUS (*Eucalyptus camaldulensis* Dehnh.)
AND ACACIA (*Acacia mangium* Willd.) FOR CROMIUM AND NICKEL
REMOVAL FROM SYNTHETIC WASTEWATER



Mr. THAWATCHAI SINGHASIRI

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Environmental Science
(Inter-department) Graduate School

Chulalongkorn University

Academic Year 2005

ISBN 9740-17-3967-2

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การใช้ถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส (*Eucalyptus camaldulensis* Dehnh.) และไม้กระถินเทพา (*Acacia mangium* Willd.) เพื่อการกำจัด ไครเมียม และนิเกิล จากน้ำเสียสังเคราะห์

โดย

นายธวัชชัย สิงหศิริ

สาขาวิชา

วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม

อาจารย์ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร.ธเรศ ศรีสถิตย์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

.....*ดร.ธเรศ ศรีสถิตย์*..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ม.ร.ว. กัลยา ดิงศภักดิ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....*ดร.ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์*..... ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์)

.....*ดร.ธเรศ ศรีสถิตย์*..... อาจารย์ที่ปรึกษา
(รองศาสตราจารย์ ดร. ธเรศ ศรีสถิตย์)

.....*ดร.สมใจ เห่งปรีชา*..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมใจ เห่งปรีชา)

.....*ดร.ศิริมา ปัญญาเมธีกุล*..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริมา ปัญญาเมธีกุล)

ธวัชชัย สิงหศิริ : การใช้ถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส (*Eucalyptus camaldulensis* Dehnh.) และไม้กระถินเทพา (*Acacia mangium* Willd.) เพื่อการกำจัดโครเมียม และนิกเกิล จากน้ำเสียสังเคราะห์ (USING ACTIVATED CARBON FROM EUCALYPTUS (*Eucalyptus camaldulensis* Dehnh.) AND ACACIA (*Acacia mangium* Willd.) FOR CROMIUM AND NICKEL REMOVAL FROM SYNTHETIC WASTEWATER) อ. ที่ปรึกษา : รศ.ดร.ธเรศ ศรีสถิตย์ ; 142 หน้า. ISBN 974-17-3967-2

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถในการกำจัดโครเมียมและนิกเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส และไม้กระถินเทพา ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมีโดยใช้โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ผลการทดลองในขั้นตอนการเตรียมถ่านพบว่า ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากไม้ยูคาลิปตัสและไม้กระถินเทพา โดยทำการเผาคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที ผลผลิตมีค่าสูงที่สุดถึงร้อยละ 59.01 และร้อยละ 60.91 ตามลำดับ แซ่สารกระตุ้นเกลือแกงตามอัตราส่วนโดยน้ำหนักของวัตถุดิบต่อสารกระตุ้นเกลือแกงที่อัตราส่วน 1:2 และเผากระตุ้นอีกครั้งที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ได้ผลิตถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสและไม้กระถินเทพามีค่าไอโอดีนัมเบอร์สูงสุดเท่ากับ 612 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 701 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากไม้ยูคาลิปตัส และไม้กระถินเทพา มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 368.68 ตารางเมตรต่อกรัม และ 408.64 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรโพรงเท่ากับ 0.27 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม 0.34 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ขนาดโพรงเฉลี่ยเท่ากับ 13.55 อังสตรอม และ 18.04 อังสตรอม ตามลำดับ การทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบ ฟลุนดลิส ที่ pH 9 พบว่า ถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส ไม้กระถินเทพา และ Calgon Filtrasorb 300 มีค่า K ของการดูดติดผิวโครเมียม ซึ่งมีค่า 1.36, 12.57 และ 24.64 มิลลิกรัมต่อกรัม และการดูดติดผิวนิกเกิล ซึ่งมีค่า 38.24, 50.31 และ 217.99 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ การทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับโดยใช้ถังดูดซับแบบแท่ง (adsorption column) เลือกใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากไม้กระถินเทพา บรรจุในคอลัมน์ที่ระดับความสูงของคอลัมน์ 30, 60, 90 และ 120 เซนติเมตร โดย สามารถกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ คิดเป็น 82.34, 52.94, 43.14 และ 41.18 BV ที่ความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ และสามารถกำจัดนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ คิดเป็น 129.41, 70.59, 50.98 และ 50.00 BV ที่ความเข้มข้นนิกเกิลเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และได้นำ ถ่านกัมมันต์จากไม้กระถินเทพาไปผ่านการฟื้นฟูสภาพ (Regeneration) โดยการผ่านของสารละลายกรดไฮดรอกลอริก (HCl) ความเข้มข้น 5 % พบว่ามีค่าไอโอดีนัมเบอร์ เท่ากับ 388 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 421 มิลลิกรัมต่อกรัม ของ ถ่านกัมมันต์ที่มีการดูดติดผิวโครเมียมและนิกเกิล ตามลำดับ

สาขาวิชา.....วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา).....ลายมือชื่อนิสิต.....

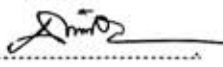

ปีการศึกษา.....2548.....ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

##4689084120 :MAJOR INTER-DEPARTMENT OF ENVIRONMENTAL SCIENCE

KEYWORD : ACTIVATED CARBON / ADSORPTION / CHROMIUM / NICKEL

THAWATCHAI SINGHASIRI : USING ACTIVATED CARBON FROM EUCALYPTUS (*Eucalyptus camaldulensis Dehnh.*) AND ACACIA (*Acacia mangium Willd.*) FOR CROMIUM AND NICKEL REMOVAL FROM SYNTHETIC WASTEWATER. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. THARES SRISATIT, Ph.D. 142 pp. ISBN 974-17-3967-2

The objective of this research is to study the adsorption of chromium and nickel from synthetic wastewater by activated carbon from Eucalyptus (*Eucalyptus camaldulensis Dehnh.*) and Acacia (*Acacia mangium Willd.*). The chemical activated process was sodium chloride. In the activated carbon preparation process, the results showed that the temperature suitable for carbonization of the raw material was 300 degree Celsiuses at 120 minutes, which gave the highest yield percent at 59.01 % and 60.91 % for both charcoal materials respectively. The appropriate ratio by weight of charcoal material to sodium chloride was 1:2 for both activated carbon at temperature 800 degree Celsiuses for 1 hour, which gave the highest iodine number at 612 and 701 milligrams per gram respectively. The activated carbon from eucalyptus and acacia had surface area 368.68 and 408.64 meters square, pore volume 0.27 and 0.34 centimeters cubic, average pore size 13.55 and 18.04 Å⁰ respectively. Freundlich adsorption isotherm, it was found that K value of activated carbon from eucalyptus acacia and Calgon Filtrasorb 300, at pH 9 can adsorbed chromium 1.36, 12.57 and 24.64 milligram per gram and nickel for 38.24, 50.31 and 217.99 milligram per gram respectively. In adsorption column test, activated carbon from acacia was used for packing in the column. The result showed that activated carbon can treated chromium from synthetic wastewater for 82.34, 52.94, 43.14 and 41.18 BV with 10 milligrams per liter of chromium influent concentration respectively and at depth of adsorbent 30, 60, 90 and 120 centimeters of column test, activated carbon from acacia can treated nickel from synthetic wastewater for 129.41, 70.59, 50.98 and 50.00 BV with 10 milligrams per liter of nickel influent concentration respectively. For activated carbon regeneration studies, by using 5% by weight of hydrochloric acid as a regenerant it found that the iodine number of activated carbon value was 388 and 421 milligram per gram on chromium and nickel adsorption respectively.

Field of study.....Environmental Science (Inter-Department)..... Student's signature.....
Academic year.....2005..... Advisor's signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ช่วยเหลืออย่างดียิ่งจากบุคคลหลาย ๆ ฝ่าย จึงขอแสดงความขอบคุณทุกๆ ท่านไว้ ณ ที่นี้

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ธเรศ ศรีสถิตย์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ที่ให้ทั้งความรู้ ความช่วยเหลือ คำแนะนำ ชี้แนะ ส่งเสริม ตลอดจนความช่วยเหลือต่างๆ อันเป็นประโยชน์อย่างยิ่งต่อศิษย์ ทำให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์ ผู้อำนวยการหลักสูตร สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม รองศาสตราจารย์ ดร.สมใจ เพ็งปรีชา และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศิริมา ปัญญาเมธีกุล ที่ได้สละเวลาอันมีค่ายิ่ง เพื่อเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้

ขอขอบคุณ โรงงานชุบโลหะแห่งหนึ่ง จังหวัดอุดรธานี ที่ให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสีย เพื่อใช้ในการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ ผู้อำนวยการศูนย์วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเพื่อการวิจัยและพัฒนาท้องถิ่น ประชานหลักสูตรสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่และเครื่องมือของห้องปฏิบัติการในการทำวิจัย ตลอดจนการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยสำหรับงานวิจัยในครั้งนี้

นอกจากนี้ขอขอบคุณเพื่อนๆ อาจารย์ ในหลักสูตรสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี ที่ให้ความช่วยเหลือ ตลอดจนนักศึกษาที่ช่วยทำงานวิจัยในครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ญาติพี่น้อง ครูอาจารย์ทุกท่าน ที่ได้ให้การสนับสนุน และให้กำลังใจตลอดมาในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สุเมธ ธรรมสาร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ฏ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	3
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
2.1 เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสีย.....	4
2.2 ทฤษฎีการตกตะกอนทางเคมี.....	5
2.2.1 การกำจัดโลหะด้วยการตกตะกอนไฮดรอกไซด์.....	6
2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการตกตะกอนทางเคมี.....	7
2.3 การกรอง (Filtration).....	9
2.3.1 ลักษณะการกรอง.....	9
2.3.2 กลไกการกรองน้ำ.....	10
2.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการกรองน้ำ.....	12
2.3.4 ประสิทธิภาพการกรอง.....	12
2.4 การดูดติดผิว (Adsorption).....	13
2.4.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิว.....	15
2.4.2 สมดุลและไอโซเทอมของการดูดติดผิว.....	16
2.5 ถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ (The adsorption column).....	21

	หน้า
2.6 ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon).....	24
2.6.1 ความหมายของถ่านกัมมันต์.....	24
2.6.2 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์.....	25
2.6.2.1 โครงสร้างรูพรุน (pores).....	25
2.6.2.2 โครงสร้างทางเคมี.....	26
2.6.3 ชนิดของถ่านกัมมันต์.....	28
2.6.3.1 แบ่งตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (2532).....	28
2.6.3.2 แบ่งตามชนิดของตัวกระตุ้น.....	28
2.6.3.3 แบ่งตามชนิดของสารที่ถูกดูดติดผิว.....	28
2.6.3.4 แบ่งตามความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์ที่ได้.....	28
2.6.4 การผลิตถ่านกัมมันต์.....	29
2.6.4.1 การเตรียมวัตถุดิบ.....	30
2.6.4.2 การเผาวัตถุดิบให้เป็นถ่านคาร์บอน.....	30
2.6.4.3 การกระตุ้น หรือการแอคติเวชัน (Activation).....	31
2.6.5 การประเมินและการเลือกใช้ถ่าน.....	34
2.6.6 การปรับคืนสภาพของถ่านกัมมันต์ (Carbon regenerate).....	35
2.7 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับโลหะหนัก.....	36
2.7.1 โครเมียม (Chromium ; Cr)	36
2.7.2 นิกเกิล (Nickel ; Ni)	37
2.8 การกำจัดน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะ.....	38
2.9 คุณสมบัติของน้ำเสียโรงงานชุบโครเมียมแห่งหนึ่งในพื้นที่จังหวัดอุดรธานี.....	39
2.10 เกลือ.....	39
2.11 ไม้ยูคาลิปตัส.....	41
2.12 ไม้กระถินเทพา.....	42
2.13 เอกสารที่เกี่ยวข้อง.....	44
บทที่ 3 แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย.....	47
3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	47

3.1.1	อุปกรณ์สำหรับเตรียมถ่านกัมมันต์.....	47
3.1.2	อุปกรณ์สำหรับใช้ทดลองในห้องปฏิบัติการ.....	47
3.1.3	อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณโครเมียมและนิเกิล.....	47
3.1.4	อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์... 48	
3.1.5	อุปกรณ์สำหรับใช้ในการทดลองแบบต่อเนื่อง (Column test).....	48
3.2	วิธีการดำเนินการวิจัย.....	48
3.2.1	การเตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสและไม้กระถินเทพา.....	49
	โดยการกระตุ้นด้วยโซเดียมคลอไรด์ (NaCl)	
3.2.2	ศึกษาคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้.....	51
3.2.3	การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิวโครเมียม และนิเกิล.....	52
3.2.4	การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียม.....	54
	และนิเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้การทดลอง	
	แบบต่อเนื่อง (Column test)	
บทที่ 4	ผลการทดลองและวิจารณ์ผล.....	57
4.1	การเตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสและไม้กระถินเทพา	
4.1.1	ผลของอุณหภูมิและเวลาในการเผาต่อร้อยละผลผลิตของ.....	57
	ถ่านไม้ยูคาลิปตัสและไม้กระถินเทพา	
4.1.2	ผลของอุณหภูมิและเวลาในการเผาต่อประสิทธิภาพของ.....	59
	ถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสและไม้กระถินเทพา	
4.1.3	ผลของอัตราส่วนของวัตถุดิบต่อสารกระตุ้นต่อประสิทธิภาพของ.....	61
	ถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสและไม้กระถินเทพา	
4.2	คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์.....	70
4.3	ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากไม้ยูคาลิปตัส	
	และไม้กระถินเทพา	
4.3.1	การทดลองหาค่า pH ที่เหมาะสม.....	74
4.3.2	การหาความเข้มข้นที่เหมาะสม.....	80

	หน้า
4.3.3 การทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟลูนดลิซของ.....	83
ถ่านไม้ยูคาลิปตัส ไม้กระถินเทพา และ	
ถ่าน Calgon Filtrasorb 300	
4.4 การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมและนิกเกิลของ.....	91
ถ่านกัมมันต์โดยใช้การทดลองแบบต่อเนื่อง (Column test)	
บทที่ 5 สรุปและข้อเสนอแนะ.....	106
5.1 สรุปผลการทดลอง.....	106
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	108
รายการอ้างอิง.....	109
ภาคผนวก	
ภาคผนวก ก.....	114
ภาคผนวก ข.....	120
ภาคผนวก ค.....	122
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	142

สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 2.1 สารเคมีที่ใช้เป็นสารกระตุ้นในการกระตุ้นด้วยวิธีทางเคมี.....	32
ตารางที่ 4.1 ค่าร้อยละผลผลิตของถ่านไม้ยูคาลิปตัสที่เผาที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ.....	57
ตารางที่ 4.2 ค่าร้อยละผลผลิตของถ่านไม้กระถินเทพาที่เผาที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ.....	58
ตารางที่ 4.3 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาต่อประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์.....	59
ตารางที่ 4.4 ร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์ที่ได้เทียบกับถ่านไม้วัตถุดิบ และค่าไอโอดีนนมเบอร์ของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส ไม้กระถินเทพา และถ่านกัมมันต์ที่ขายตามทั่วไป	62
ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส..... ไม้กระถินเทพา และถ่านกัมมันต์ที่มีขายตามท้องตลาดทั่วไป	71
ตารางที่ 4.6 ขนาดประสิทธิผลและสัมประสิทธิ์ความคงตัวของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส	72
ตารางที่ 4.7 ขนาดประสิทธิผลและสัมประสิทธิ์ความคงตัวของถ่านกัมมันต์จากกระถินเทพา..	73
ตารางที่ 4.8 การตกตะกอนของโครเมียมที่ pH ต่างๆ.....	75
ตารางที่ 4.9 ประสิทธิภาพการดูดติดผิวและการกำจัดโครเมียม..... ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ pH ต่างๆ ของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส ไม้กระถินเทพา และถ่านกัมมันต์ Calgon Filtrasorb 300	75
ตารางที่ 4.10 การตกตะกอนของนิเกิลที่ pH ต่างๆ	77
ตารางที่ 4.11 ประสิทธิภาพการดูดติดผิวและการกำจัดนิเกิล..... ในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ pH ต่างๆ ของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส ไม้กระถินเทพา และถ่านกัมมันต์ Calgon Filtrasorb 300	77
ตารางที่ 4.12 การหาความเข้มข้นที่เหมาะสมในการดูดติดผิวโครเมียมของ..... ถ่านไม้ยูคาลิปตัส ไม้กระถินเทพา และ Calgon Filtrasorb 300	81
ตารางที่ 4.13 การหาความเข้มข้นที่เหมาะสมในการดูดติดผิวนิเกิลของ..... ถ่านไม้ยูคาลิปตัส ไม้กระถินเทพา และ Calgon Filtrasorb 300	81
ตารางที่ 4.14 การทดสอบการดูดติดผิวโครเมียมของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส.....	84

ตารางที่ 4.15 การทดสอบการดูดติดผิวที่เกิดของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส.....	85
ตารางที่ 4.16 การทดสอบการดูดติดผิวโครเมียมของถ่านกัมมันต์จากไม้กระถินเทพา.....	86
ตารางที่ 4.17 การทดสอบการดูดติดผิวที่เกิดของถ่านกัมมันต์จากไม้กระถินเทพา.....	87
ตารางที่ 4.18 การทดสอบการดูดติดผิวโครเมียมของถ่านกัมมันต์ Calgon Filtrasorb 300.....	88
ตารางที่ 4.19 การทดสอบการดูดติดผิวที่เกิดของถ่านกัมมันต์ Calgon Filtrasorb 300.....	89
ตารางที่ 4.20 ค่าคงที่ของถ่านกัมมันต์ไม้ยูคาลิปตัส ไม้กระถินเทพา และถ่าน Calgon Filtrasorb 300 จากสมการการดูดติดผิวแบบฟลูนดลิตซ์	90
ตารางที่ 4.21 ปริมาตรของชั้นถ่านกัมมันต์ที่ความสูงต่างๆ.....	93
ตารางที่ 4.22 ปริมาณโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์หลัง..... ผ่านคอลัมน์ชั้นถ่านสูง 30 เซนติเมตร	93
ตารางที่ 4.23 ปริมาณโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์หลัง..... ผ่านคอลัมน์ชั้นถ่านสูง 60 เซนติเมตร	94
ตารางที่ 4.24 ปริมาณโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์หลัง..... ผ่านคอลัมน์ชั้นถ่านสูง 90 เซนติเมตร	95
ตารางที่ 4.25 ปริมาณโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์หลัง..... ผ่านคอลัมน์ชั้นถ่านสูง 120 เซนติเมตร	96
ตารางที่ 4.26 ปริมาณนิเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์หลัง..... ผ่านคอลัมน์ชั้นถ่านสูง 30 เซนติเมตร	97
ตารางที่ 4.27 ปริมาณนิเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์หลัง..... ผ่านคอลัมน์ชั้นถ่านสูง 60 เซนติเมตร	98
ตารางที่ 4.28 ปริมาณนิเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์หลัง..... ผ่านคอลัมน์ชั้นถ่านสูง 90 เซนติเมตร	99
ตารางที่ 4.29 ปริมาณนิเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์หลัง..... ผ่านคอลัมน์ชั้นถ่านสูง 120 เซนติเมตร	101
ตารางที่ 4.30 ผลการทดลองการกำจัดโครเมียมในถังดูดติดผิวแบบแท่ง.....	103
ตารางที่ 4.31 ผลการทดลองการกำจัดนิเกิลในถังดูดติดผิวแบบแท่ง	103
ตารางที่ ก. 1 น้ำหนักประมาณของตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์ค่าไอโอดีน.....	119
ตารางที่ ค.1 การวิเคราะห์ค่าไอโอดีนนมเบอร์ของถ่านไม้ยูคาลิปตัส.....	124

หน้า

ตารางที่ ค.2 การวิเคราะห์ค่าไอโอดีนนมเบอร์ของถ่านไม้กระถินเทพา..... 133

ตารางที่ ค.3 การวิเคราะห์ค่าไอโอดีนนมเบอร์ของถ่านCalgon Filtrasorb 300..... 140



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการตกตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์ และซัลไฟด์ที่พีเอชต่างๆ....8	
รูปที่ 2.2 ประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยขึ้นกับขนาด	10
รูปที่ 2.3 กลไกในการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยเข้าหาสารกรอง.....	11
รูปที่ 2.4 กลไกการกรองน้ำในเครื่องกรองทรายแบบกรองเร็ว.....	12
รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายอนุภาคของสารถูกดูดติดผิวมายังสารดูดติดผิว.....	14
รูปที่ 2.6 การดูดติดผิวของโมเลกุลแบบหลายชั้นบนผิวของแข็ง.....	14
รูปที่ 2.7 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบพื้นฐาน.....	17
รูปที่ 2.8 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์.....	19
รูปที่ 2.9 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบเบท.....	20
รูปที่ 2.10 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช.....	21
รูปที่ 2.11 เขตการถ่ายเทมวล (Mass transfer zon) ในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์.....	22
รูปที่ 2.12 ลักษณะโดยทั่วไปในการทำงานของถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์.....	23
รูปที่ 2.13 กลุ่มฟังก์ชันบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์.....	28
รูปที่ 2.14 ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์.....	30
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการเตรียมถ่านและการคัดเลือกถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสม.....	50
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการศึกษาคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์.....	52
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิวโครเมียม (ทั้งหมด) และนิเกิล.....	54
รูปที่ 3.4 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียม (ทั้งหมด) และนิเกิล.....	55
ในน้ำเสียอุตสาหกรรมชุบโลหะโดยใช้การทดลองแบบต่อเนื่อง (Column test)	
รูปที่ 3.5 ระบบถังดูดติดผิวแบบแท่งที่ใช้ในการทดลอง.....	56
รูปที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาต่อประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์...60	
รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์ที่อัตราส่วนวัตต์ตีสารกระตุ้นเกลือแกง..63	
รูปที่ 4.3 อัตราส่วนสารกระตุ้นเกลือแกงต่อประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์.....63	
จากไม้ยูคาลิปตัสและไม้กระถินเทพา	
รูปที่ 4.4 ลักษณะโครงสร้าง และพื้นผิวของไม้ยูคาลิปตัสก่อนทำการเผา.....	67
และกระตุ้นให้เป็นถ่านกัมมันต์	

รูปที่ 4.5 ลักษณะโครงสร้าง และพื้นผิวของไม้กระถินเทพาก่อนทำการเผา.....	69
และกระตุ้นให้เป็นถ่านกัมมันต์	
รูปที่ 4.6 ขนาดประสิทธิผลและสัมประสิทธิ์ความคงตัวของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส.....	72
รูปที่ 4.7 ขนาดประสิทธิผลและสัมประสิทธิ์ความคงตัวของถ่านกัมมันต์จากไม้กระถินเทพา.....	73
รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์.....	76
ของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส ไม้กระถินเทพา	
และถ่าน Calgon Filtrasorb 300	
รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดนิเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ของ.....	78
ถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส ไม้กระถินเทพา และถ่าน Calgon Filtrasorb 300	
รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมและนิเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์.....	79
ของถ่านไม้ยูคาลิปตัส ไม้กระถินเทพา	
และถ่าน Calgon Filtrasorb 300 ที่ pH ต่างๆ	
รูปที่ 4.11 ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ของถ่านไม้ยูคาลิปตัส	82
ไม้กระถินเทพา และ ถ่าน Calgon Filtrasorb 300 ที่ความเข้มข้นต่างๆ	
รูปที่ 4.12 ประสิทธิภาพการกำจัดนิเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ของถ่านไม้ยูคาลิปตัส	82
ไม้กระถินเทพา และถ่าน Calgon Filtrasorb 300 ที่ความเข้มข้นต่างๆ	
รูปที่ 4.13 ไอโซเทอมการดูดติดผิวโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ หลังการดูดติดผิว.....	84
ด้วยถ่านจากไม้ยูคาลิปตัส	
รูปที่ 4.14 ไอโซเทอมการดูดติดผิวนิเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ หลังการดูดติดผิว.....	85
ด้วยถ่านจากไม้ยูคาลิปตัส	
รูปที่ 4.15 ไอโซเทอมการดูดติดผิวโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ หลังการดูดติดผิว.....	86
ด้วยถ่านจากไม้กระถินเทพา	
รูปที่ 4.16 ไอโซเทอมการดูดติดผิวนิเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ หลังการดูดติดผิว.....	87
ด้วยถ่านจากไม้กระถินเทพา	
รูปที่ 4.17 ไอโซเทอมการดูดติดผิวโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ หลังการดูดติดผิว.....	88
ด้วยถ่าน Calgon Filtrasorb 300	
รูปที่ 4.18 ไอโซเทอมการดูดติดผิวนิเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ หลังการดูดติดผิว.....	89
ด้วยถ่าน Calgon Filtrasorb 300	

รูปที่ 4.19 แสดงเส้นโค้งเบรคทรุจ์ ระหว่างความเข้มข้นของโครเมียม.....	94
กับปริมาณน้ำเสียที่ความสูงชั้นถ่านกัมมันต์ที่ 30 เซนติเมตร	
รูปที่ 4.20 แสดงเส้นโค้งเบรคทรุจ์ ระหว่างความเข้มข้นของโครเมียม	95
กับปริมาณน้ำเสียที่ความสูงชั้นถ่านกัมมันต์ที่ 60 เซนติเมตร	
รูปที่ 4.21 แสดงเส้นโค้งเบรคทรุจ์ ระหว่างความเข้มข้นของโครเมียม	96
กับปริมาณน้ำเสียที่ความสูงชั้นถ่านกัมมันต์ที่ 90 เซนติเมตร	
รูปที่ 4.22 แสดงเส้นโค้งเบรคทรุจ์ ระหว่างความเข้มข้นของโครเมียม	97
กับปริมาณน้ำเสียที่ความสูงชั้นถ่านกัมมันต์ที่ 120 เซนติเมตร	
รูปที่ 4.23 แสดงเส้นโค้งเบรคทรุจ์ ระหว่างความเข้มข้นของนิเกิล	98
กับปริมาณน้ำเสียที่ความสูงชั้นถ่านกัมมันต์ที่ 30 เซนติเมตร	
รูปที่ 4.24 แสดงเส้นโค้งเบรคทรุจ์ ระหว่างความเข้มข้นของนิเกิล	99
กับปริมาณน้ำเสียที่ความสูงชั้นถ่านกัมมันต์ที่ 60 เซนติเมตร	
รูปที่ 4.25 แสดงเส้นโค้งเบรคทรุจ์ ระหว่างความเข้มข้นของนิเกิล.....	100
กับปริมาณน้ำเสียที่ความสูงชั้นถ่านกัมมันต์ที่ 90 เซนติเมตร	
รูปที่ 4.26 แสดงเส้นโค้งเบรคทรุจ์ ระหว่างความเข้มข้นของนิเกิล	102
กับปริมาณน้ำเสียที่ความสูงชั้นถ่านกัมมันต์ที่ 120 เซนติเมตร	
รูปที่ 4.27 ลักษณะโครงสร้าง และพื้นผิวของถ่านไม้กระถินเทพาที่ผ่านการ.....	104
ดูดติดผิวโครเมียม เมื่อใช้กำลังขยาย 1000 เท่า	
รูปที่ 4.28 ลักษณะโครงสร้าง และพื้นผิวของถ่านไม้กระถินเทพาที่ผ่านการ.....	104
ดูดติดผิวนิเกิล เมื่อใช้กำลังขยาย 1000 เท่า	

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันประเทศไทยกำลังมีการขยายตัวของโรงงานอุตสาหกรรมเพิ่มมากขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุหนึ่งของปัญหามลพิษทางน้ำ และนับวันจะทวีความรุนแรงมากยิ่งขึ้น โลหะหนักที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่สำคัญหลายประเภท ได้แก่ โรงงานสแตนเลส โรงงานแบตเตอรี่ โรงงานเคลือบชุบโลหะ โรงงานฟอกย้อม โรงงานผลิตปุ๋ยเคมี เป็นต้น (Kadirvelu , Thamaraiselvi และ Namasivayam , 2001) โดยน้ำเสียมักจะมีสารประกอบอนินทรีย์ปนเปื้อนอยู่ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นเกลือของโลหะ สามารถละลายน้ำได้ เนื่องจากสารโลหะหนักเหล่านี้มีความเป็นพิษสูง สามารถคงอยู่ในสภาพแวดล้อมได้นานและสะสมในสิ่งมีชีวิตได้ (Fergusson , 1990) ดังนั้นเมื่อถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ สัตว์น้ำที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำจะสะสมโลหะหนักและถ่ายทอดสู่มนุษย์ เมื่อเข้าสู่ร่างกายในระดับที่สูงและเกินเกณฑ์มาตรฐานอาจก่อให้เกิดอันตรายทั้งมนุษย์และสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำได้ เช่น เมื่อร่างกายได้รับโครเมียม (VI) ทางผิวหนังจะก่อให้เกิดอาการคัน ไอของกรดโครมิกจะเป็นอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจ ต่อเนื้อเยื่อ ไต และชักนำให้เกิดโรคมะเร็งได้ ส่วนเมื่อร่างกายได้รับนิกเกิล จะก่อให้เกิดโรคมะเร็งในระบบทางเดินอาหาร และยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ แต่อุตสาหกรรมหลายประเภทจำเป็นต้องใช้วัตถุดิบที่มีโลหะหนักเป็นส่วนผสมอยู่ สุดท้ายโลหะหนักจะปนออกมากับของเสียจากอุตสาหกรรมเหล่านี้อย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ หากไม่มีการกำจัดที่ดีพอโลหะหนักเหล่านี้จะถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ วิธีการที่ใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนโลหะหนักมีอยู่หลายวิธี ได้แก่ การกรองผ่านเยื่อกรองแบบผันกลับ การแลกเปลี่ยนประจุ การตกตะกอน และการดูดซับ (Chen และ Wang , 2000) ซึ่งแต่ละวิธีมีประสิทธิภาพและข้อจำกัดแตกต่างกัน ทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจใช้กันอย่างแพร่หลาย คือ การดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่ไม่ยุ่งยาก ซับซ้อน มีต้นทุนต่ำ และสามารถนำถ่านกัมมันต์ไปผ่านกระบวนการเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก ในกระบวนการกำจัดโลหะหนักออกจากน้ำเสียโดยการดูดซับของถ่านกัมมันต์ ซึ่งเป็นถ่านที่ถูกสังเคราะห์ขึ้นเป็นพิเศษให้มีพื้นที่ผิว มีรูพรุนหรือโพรงภายในเนื้อคาร์บอนมากที่สุดเพื่อให้สามารถดูดโมเลกุลของสารโลหะหนักจำนวนมากๆ มาเกาะที่ผิวได้ ในปัจจุบันถ่านกัมมันต์ที่ใช้ต้องสั่งซื้อจากต่างประเทศ จากข้อมูลของกรมศุลกากรในปี พ.ศ. 2546 ประเทศไทยนำเข้าถ่านกัมมันต์คิดเป็นมูลค่า 145,810,837 บาท และเพิ่มขึ้นเป็น 155,816,098 บาทในปี พ.ศ. 2547 ทำให้ต้นทุน

ของการบำบัดน้ำเสียสูงขึ้น จึงมีความพยายามที่จะศึกษาวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์จากวัสดุดิบและสารเคมีที่หาได้ง่าย ราคาถูกและมีความเป็นพิษต่ำ ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากไม้ยูคาลิปตัสและไม้กระถินเทพาจึงเป็นทางเลือกในการกำจัดโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำเสีย เนื่องจากเป็นวัสดุที่มีอยู่ในท้องถิ่นหาได้ง่าย ราคาถูก ไม่เป็นอันตรายและมีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย สามารถพัฒนาไปใช้ได้ทั้งในระดับครอบครัวและระดับอุตสาหกรรม เป็นการเพิ่มมูลค่าของวัสดุ และลดปริมาณการนำเข้าถ่านกัมมันต์จากต่างประเทศ

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 ศึกษาความสามารถในการกำจัดโครเมียม และนิเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส และไม้กระถินเทพา

1.2.2 ศึกษาลักษณะทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากไม้ยูคาลิปตัส และไม้กระถินเทพา

1.2.3 ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดซับโครเมียม และนิเกิลจากถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากไม้ยูคาลิปตัส และไม้กระถินเทพา และถ่านกัมมันต์ที่จำหน่ายในตลาด

1.3 ขอบเขตการวิจัย

1.3.1 จัดเตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส และไม้กระถินเทพา โดยการกระตุ้นด้วยโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ตัวแปรที่ทำการศึกษาคือ อุณหภูมิที่ใช้ในการเผากระตุ้น และอัตราส่วนโดยน้ำหนักของไม้ยูคาลิปตัสและไม้กระถินเทพา ต่อสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้น

1.3.2 ศึกษาลักษณะทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ ได้แก่ ค่าไอโอดีนนมเบอร์ , พื้นที่ผิว , ปริมาตรโพรง , ขนาดโพรงเฉลี่ย , ขนาดประสิทธิผล และสัมประสิทธิ์ความคงตัว

1.3.3 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิวโครเมียมและนิเกิล จากน้ำเสียสังเคราะห์ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ ได้แก่ pH, ความเข้มข้นที่เหมาะสม, และทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช (Freundlich isotherm) โดยทำการทดลองแบบแบทช์ (batch process)

1.3.4 ทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมและนิเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ โดยทำการทดลองแบบต่อเนื่องในถังดูดซับแบบแท่ง (adsorption column) ด้วยอัตราไหลของน้ำเสีย 3 ลิตรต่อชั่วโมง

1.3.5 ในการวิจัยครั้งนี้ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ที่ทราบค่าความเข้มข้นแน่นอน

1.3.6 ถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายตามท้องตลาดทั่วไป ใช้ถ่าน Calgon Filtration 300

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถทราบข้อมูลพื้นฐานและประสิทธิภาพของตัวดูดซับในการกำจัดโครเมียมและนิเกิลซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการนำไปใช้ในระดับอุตสาหกรรมในการเลือกวัสดุรวมทั้งวิธีการเตรียมถ่านกัมมันต์ที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย

1.4.2 เป็นแนวทางในการพัฒนาระบบกำจัดโลหะหนักของโรงงานอุตสาหกรรม

1.4.3 สามารถลดค่าใช้จ่ายในการสั่งซื้อถ่านกัมมันต์จากต่างประเทศและเป็นการเพิ่มมูลค่าวัสดุในท้องถิ่น



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสีย

การบำบัดน้ำเสียจากโรงงานที่มีโลหะหนักปะปนอยู่ในน้ำเสีย สามารถทำได้โดยอาศัยกระบวนการอย่างใดอย่างหนึ่งหรือหลายอย่างรวมกัน ดังต่อไปนี้ (Patterson, 1985)

1) การตกผลึก (Precipitation) เป็นการเปลี่ยนรูปโลหะที่ละลายอยู่ในน้ำให้อยู่ในรูปของแข็ง (solids) ซึ่งสามารถทำได้โดยการทำอย่างหนึ่งอย่างใด เช่น

- การเติมสารเคมีเพื่อทำปฏิกิริยากับโลหะโดยตรงเกิดเป็นสารประกอบที่มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำ เช่น การเติมซัลไฟด์ เป็นต้น
- การเปลี่ยนสมดุลของปฏิกิริยาเคมี โดยการเติมสารที่ทำให้ความเข้มข้นของโลหะมีค่าลดลง ได้แก่ การปรับค่าความเป็นกรดต่าง

2) การรวมตะกอน (Flocculation) เป็นกระบวนการรวมรวมตะกอนที่มีอยู่ในน้ำเสียให้มีความใหญ่ขึ้น สามารถตกตะกอนได้เร็ว

3) การตกตะกอน (Sedimentation) เป็นกระบวนการที่ใช้ในการแยกของแข็งออกจากน้ำ โดยสารประกอบของโลหะที่มีความหนาแน่นกว่า จะตกตะกอนได้เร็ว กระบวนการนี้มักเป็นกระบวนการต่อจากกระบวนการตกผลึกและการรวมตะกอน

4) การกรอง (Filtration) เป็นกระบวนการแยกของแข็งออกจากน้ำ โดยทั่วไปกระบวนการกรองมักจะใช้กับตะกอนขนาดเล็กและแขวนลอย ที่ไม่สามารถแยกได้โดยการตกตะกอนเพียงอย่างเดียว

5) ออกซิเดชันและรีดักชัน (Oxidation - Reduction) เป็นกระบวนการทางเคมีที่มีการเปลี่ยนค่าเลขประจุเพื่อให้เกิดความเป็นพิษน้อยลง อยู่ในรูปที่สามารถกำจัดได้ง่ายขึ้น เช่น การกำจัดไซยาไนด์ ไครเมียมมวหก

6) กระบวนการแลกเปลี่ยนประจุ (Ion Exchange) เป็นกระบวนการทางเคมี น้ำเสียที่มีโลหะที่มีประจุบวก หรือสารประกอบที่มีประจุลบ เมื่อผ่านชั้นของสารแลกเปลี่ยนก็จะถูกจับไว้ในชั้นนั้นๆ ทำให้น้ำมีคุณภาพดีขึ้น

7) รีเวอร์สออสโมซิส (Reverse Osmosis) เป็นกระบวนการแยกน้ำออกจากน้ำเสีย โดยอาศัยการสร้างแรงดันอัดน้ำเสียให้ผ่านเยื่อ (Semi - permeable Membrane) เยื่อนี้จะยอมให้น้ำและสารบางชนิดผ่านได้ ดังนั้นจะได้น้ำที่สะอาดและน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสูงขึ้น กระบวนการนี้ต้องใช้พลังงานมากและต้องมีการควบคุมคุณภาพน้ำเสียที่เข้าด้วย

8) การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) เนื่องจากถ่านกัมมันต์เป็นสารที่พื้นผิวและความพรุนสูงมาก มีพื้นที่ผิวต่อน้ำหนักสูง เมื่อสัมผัสกับน้ำเสียจะทำให้มลสารต่างๆ รวมทั้งโลหะที่อยู่ในน้ำเสียถูกจับไว้ในรูพรุนและพื้นผิวของถ่านกัมมันต์

2.2 ทฤษฎีการตกตะกอนทางเคมี

การตกตะกอนทางเคมีเป็นกระบวนการที่เปลี่ยนสารที่อยู่ในรูปสารละลายให้อยู่ในรูปของแข็ง ซึ่งขึ้นกับสภาวะสมดุลทางเคมีที่มีผลต่อการละลายน้ำของสารนั้น ซึ่งมีหลายวิธีโดยอาจเป็นกระบวนการใดกระบวนการหนึ่งหรือหลายกระบวนการรวมกัน เช่น

1) การตกผลึกเนื่องจากการเติมสารเคมีเพื่อทำปฏิกิริยาโดยตรงกับสารที่ละลายอยู่ในน้ำ เกิดเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้น้อยลง ซึ่งในการกำจัดโลหะก็อาจใช้หลักการนี้ได้ เช่น ในการกำจัดสังกะสีที่ละลายในน้ำ (Zn^{2+}) จะเติม โซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) ซึ่งละลายน้ำได้ดี จะเกิดปฏิกิริยาได้ซิงค์ซัลไฟด์ (ZnS) ซึ่งละลายน้ำได้น้อยมาก ดังสมการ



2) การตกผลึกเนื่องจากการเปลี่ยนสมดุลการละลาย (Solubility equilibrium) ในการกำจัดโลหะที่ละลายอยู่ในน้ำด้วยวิธีนี้ ทำโดยการเติมสารเคมีเพื่อปรับพีเอชของน้ำเสียให้สูงขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออนในน้ำ ความเข้มข้นของไอออนของโลหะในสารละลายจะต่ำลง เนื่องจากการเลื่อนสมดุลเคมี โลหะส่วนเกินจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปตะกอน ดังสมการ



3) การเปลี่ยนอุณหภูมิของสารละลายอิ่มตัว หรือเกือบอิ่มตัวไปในทางที่ทำให้ค่าความสามารถในการละลายน้ำลดลง จนเปลี่ยนไปอยู่ในสถานะเป็นของแข็ง

อย่างไรก็ตามการตกตะกอนทางเคมีเพื่อกำจัดโลหะออกจากน้ำเสีย นิยมใช้สารประกอบหลายชนิด ได้แก่ ไฮดรอกไซด์ คาร์บอเนต และซัลไฟด์ ซึ่งแต่ละชนิดจะตกตะกอนโลหะในรูปที่แตกต่างกัน การใช้สารเคมีเหล่านี้สามารถใช้แยกกันหรือร่วมกันในปริมาณที่เพียงพอที่ทำให้

เกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างโลหะที่ละลายในน้ำเสียกับสารเคมีที่ทำให้เกิดเป็นตะกอน ซึ่งสามารถแยกออกจากน้ำเสียด้วยกระบวนการอื่นๆ ต่อไป

2.2.1 การกำจัดโลหะด้วยการตกตะกอนไฮดรอกไซด์

โลหะในระบบบำบัดน้ำเสีย จะอยู่ในรูปทั้งที่เป็นของแข็งและสารละลาย หลักการในการบำบัดโลหะหนักด้วยการตกตะกอนไฮดรอกไซด์ คือ การปรับพีเอชของสารละลาย (ความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออน) ด้วยการเติมสารเคมีที่มีไฮดรอกไซด์หรือทำให้เกิดไฮดรอกไซด์ไอออน เช่น ปูนขาว โซดาไฟ ในสภาวะอิ่มตัวของโลหะไฮดรอกไซด์ ผลจากความเข้มข้นไอออนระหว่างโลหะและไฮดรอกไซด์จะเท่ากับค่าคงที่ผลคูณการละลาย ซึ่งสามารถแสดงได้ดังสมการ

$$[M^{+n}][OH^-]^n = K_{sp} \quad \dots\dots\dots (2.3)$$

เมื่อ $[M^{+n}]$ = แทนความเข้มข้นไอออนของโลหะในน้ำที่ประจุบวก n

$[OH^-]$ = แทนความเข้มข้นไอออนของไฮดรอกไซด์ในน้ำ

K_{sp} = แทนค่าคงที่ผลคูณการละลายซึ่งมีค่าคงที่ที่อุณหภูมิหนึ่ง

เมื่อเติมปูนขาวหรือโซดาไฟลงไปในน้ำเสียที่มีโลหะละลายอยู่ ทำให้พีเอชของน้ำเสียสูงขึ้นและเพิ่มความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออน เมื่อความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออนมีค่ามากจนทำให้ผลคูณความเข้มข้นของไอออนระหว่างโลหะและไฮดรอกไซด์มีค่ามากกว่าค่าคงที่ผลคูณการละลาย ซึ่งโดยหลักการของ เลอ ชาเตอลิเยร์แล้ว เมื่อระบบที่อยู่ในสภาวะที่สมดุลถูกระบบกวน ระบบจะปรับตัวไปในทิศทางที่จะทำให้ปัจจัยระบบนั้นลดลงเหลือน้อยที่สุด แล้วระบบจะปรับตัวเข้าสู่สภาวะสมดุลอีกครั้งหนึ่ง จากหลักการดังกล่าว ไอออนของโลหะที่อยู่ในน้ำเสียจะรวมตัวกับไฮดรอกไซด์ไอออน เกิดเป็นตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์และตกตะกอนออกจากสารละลาย จนกระทั่งผลคูณความเข้มข้นของไอออนทั้งสองในน้ำเสียเท่ากับค่าคงที่ผลคูณการละลาย โลหะส่วนที่เหลือก็ยังคงละลายอยู่ในน้ำต่อไป อย่างไรก็ตามหากพีเอชของน้ำเสียลดลง โลหะไฮดรอกไซด์จะสามารถละลายกลับลงมาอยู่ในน้ำได้อีก จึงต้องมีแยกโลหะไฮดรอกไซด์ที่เป็นของแข็งออกจากน้ำเสียก่อนด้วยกระบวนการอื่นๆ อีก

2.2.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการตกตะกอนทางเคมี (Eckenfelder, 2000)

1) ความสามารถในการละลายน้ำของโลหะไฮดรอกไซด์ โลหะไฮดรอกไซด์แต่ละชนิดมีความสามารถในการละลายน้ำที่พีเอชต่างๆ ไม่เท่ากัน โลหะบางชนิดที่มีคุณสมบัติ แอมโฟเทอริก (Amphoteric) เช่น สังกะสี ทองแดง โครเมียม ตะกั่ว นิเกิลจะละลายน้ำได้น้อยลงเรื่อยๆ เมื่อค่าความเป็นกรดต่างเพิ่มขึ้น จนถึงจุดหนึ่งที่ทำให้ความสามารถในการละลายต่ำที่สุด เมื่อพีเอชของน้ำเพิ่มขึ้นต่อไปโลหะไฮดรอกไซด์เหล่านี้จะกลับละลายได้มากขึ้นอีกแสดงในรูปที่ 2.1 ดังนั้นการกำจัดโลหะออกจากน้ำโดยการตกตะกอนทางเคมีให้มีปริมาณโลหะละลายเหลือต่ำกว่าค่าความสามารถในการละลายในน้ำต่ำที่สุดจึงเป็นไปได้ยาก นอกจากนี้จะมีกลไกอื่นร่วมอยู่ด้วย เช่น มีการดูดติดผิวไอออนของโลหะบนตะกอนเคมี เป็นต้น

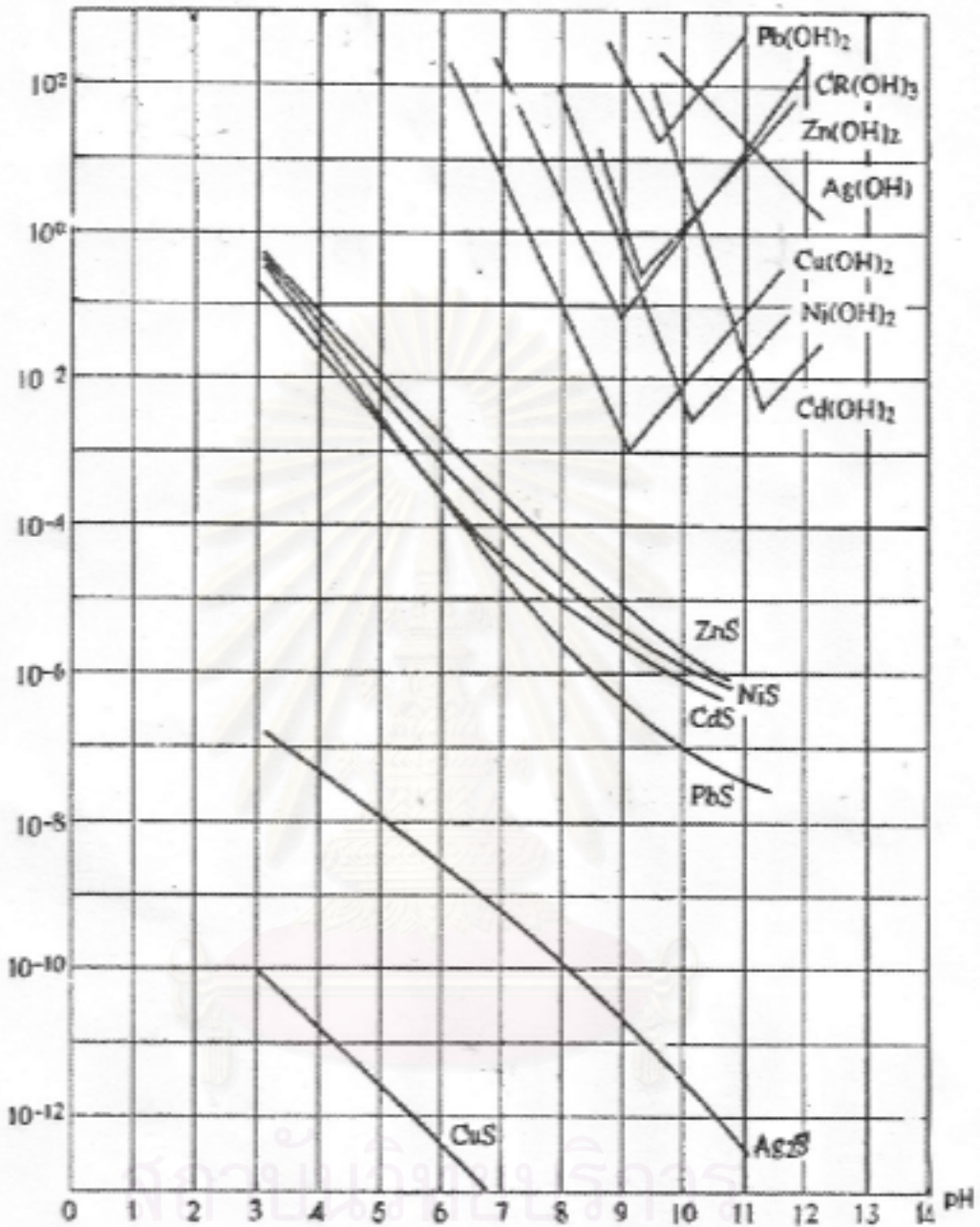
2) พีเอชและปริมาณสารเคมี เนื่องจากสารเคมีที่ใช้เติมให้เพื่อให้เกิดตะกอนไฮดรอกไซด์ จะทำหน้าที่ปรับพีเอชของน้ำเสียด้วย ดังนั้นการควบคุมพีเอชและปริมาณของสารเคมีที่เติมที่ใช้ต้องคำนึงถึงพีเอชที่ทำให้ค่าความสามารถในการละลายน้ำของโลหะไฮดรอกไซด์ต่ำที่สุดในกรณีที่ต้องการกำจัดโลหะหลายชนิดพร้อมกันจำเป็นต้องทดลองหาค่าพีเอชที่เหมาะสม ในกรณีของโลหะแอมโฟเทอริก การควบคุมพีเอชของน้ำเสียต้องทำอย่างระมัดระวัง มิฉะนั้นจะไม่สามารถกำจัดโลหะออกจากน้ำเสีย

3) อุณหภูมิ ผลของอุณหภูมิจะมีผลต่อการตกตะกอนทางเคมีของโลหะ ในกรณีที่การเกิดปฏิกิริยาทางเคมีที่เป็นปฏิกิริยาคายความร้อนจะตกตะกอนทางเคมีได้ดีที่อุณหภูมิสูงขึ้น แต่ถ้าปฏิกิริยาที่เกิดเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน จะตกตะกอนทางเคมีได้ดีที่อุณหภูมิต่ำ สังเกตได้จากค่าคงที่ผลคูณการละลายเปลี่ยนแปลงเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป

4) เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยา การตกตะกอนทางเคมีต้องอาศัยเวลาในการกวนผสมสารเคมีที่เติมให้กระจายอย่างทั่วถึงและมีโอกาสสัมผัสระหว่างไอออนต่างๆ ในน้ำกับสารเคมีที่ใช้ สารเคมีบางชนิด เช่น ปูนขาว ละลายได้น้อยต้องใช้เวลาในการกวนผสมนานกว่าโซดาไฟซึ่งละลายน้ำได้ดี นอกจากนี้การกวนช้าๆ เพื่อให้ตะกอนที่เกิดมีโอกาสสัมผัสกันเกิดเป็นตะกอนขนาดใหญ่ที่มีความเสถียรสูงและแยกออกโดยการตกตะกอนได้ง่าย

5) ไอออนเชิงซ้อน ไอออนหลายชนิด เช่น ไซยาไนด์ (CN) แอมโมเนีย และสารจำพวกคีแลนท์ เช่น EDTA สามารถเกิดไอออนเชิงซ้อนที่เสถียรกับโลหะหลายชนิดในน้ำเสีย ไอออนเชิงซ้อนที่เกิดขึ้นจะขัดขวางการตกตะกอนทางเคมี

Concentration of dissolved metal



รูปที่ 2.1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างการตกตะกอนโลหะไฮดรอกไซด์ และซัลไฟด์ที่พีเอชต่างๆ
ที่มา : Eckenfelder, 2000

2.3 การกรอง (Filtration)

การกรองเป็นกระบวนการหนึ่งที่ใช้อย่างแพร่หลายในการกำจัดของแข็งที่แขวนลอยอยู่ในน้ำ ซึ่งจะใช้กระบวนการนี้กับน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดขั้นทุติยภูมิ (Secondary treatment) มาก่อนที่จะปล่อยออกสู่แหล่งน้ำภายนอก นอกจากนี้การกรองยังใช้ในการกำจัดของแข็งที่เกิดขึ้นหลังจากการตกตะกอนด้วยปูนขาว และยังใช้เป็นการบำบัดก่อนหน้า (Pretreatment) ก่อนที่จะเข้าสู่ถังถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) เป็นต้น (Metcalf และ Eddy, 1991)

2.3.1 ลักษณะการกรอง

การกรองเกิดขึ้นได้ 2 ลักษณะ คือ การกรองแบบติดชั้นผิวกรอง (Surface filtration) และการกรองแบบติดในชั้นกรอง (In-Depth filtration) (มันลิน, 2539)

1) การกรองแบบติดชั้นผิวกรอง (Surface filtration) เป็นการกรองตะกอนที่แขวนลอยหรือความขุ่น จะถูกดักจับและติดค้างอยู่บนผิวของสารกรอง สารกรองอาจเป็นผ้า แผ่นใยสังเคราะห์หรือแท่งกรองก็ได้ การกรองแบบติดชั้นผิวกรองแบ่งได้เป็น 3 แบบ คือ

(1) แบบใช้แผ่นกรอง ซึ่งอาจทำด้วยผ้า แผ่นโลหะ หรือแผ่นใยสังเคราะห์

(2) แบบใช้แท่งกรอง (Porous media) ซึ่งมีลักษณะเป็นแท่งวัสดุที่มีความพรุนขนาดเล็ก ซึ่งจะยอมให้น้ำผ่านเท่านั้น ส่วนตะกอนและความขุ่นที่อยู่ในน้ำจะติดอยู่บนแท่งของชั้นกรอง

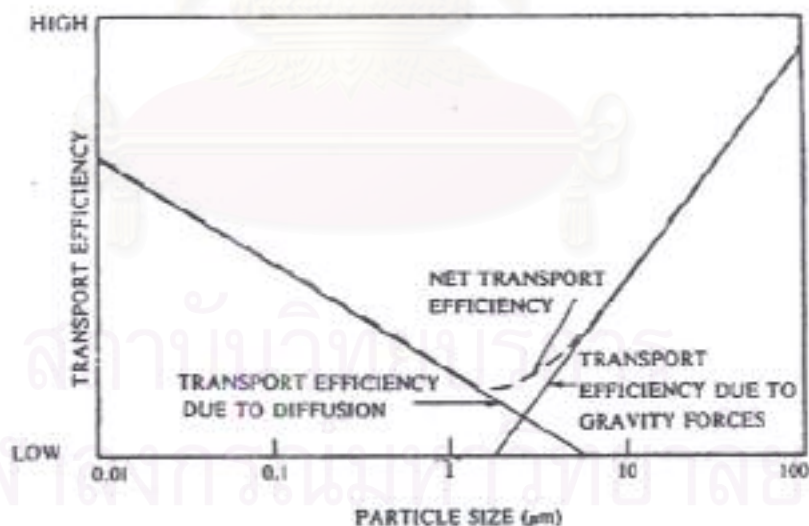
(3) แบบที่ใช้สารกรองที่เตรียมขึ้นจากสารบางอย่าง เช่น Diatomaceous earth นำมาเคลือบผิวให้มีรูขนาดเล็ก เมื่อกรองน้ำก็จะเกิดกระบวนการกรองเช่นเดียวกับแผ่นกรอง

2) การกรองแบบติดค้างในชั้นกรอง (In-Depth filtration) เป็นการกรองน้ำแบบธรรมชาติที่ใช้กันในโรงงานผลิตน้ำประปา สารกรองที่นิยมใช้กันคือ ททราย แต่เนื่องด้วยขนาดของสารกรองจะมีขนาดใหญ่กว่าการกรองแบบติดผิว ตะกอนความขุ่นจึงมีโอกาสเข้าไปในชั้นของสารกรองได้ ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็นหลายชนิดตามลักษณะการกรอง เช่น แบ่งตามอัตรากรอง แบ่งตามชนิดสารกรอง แบ่งตามทิศทางการไหลของน้ำที่ผ่านสาร แบ่งตามลักษณะการเรียงตัวของสารกรอง หรือว่า แบ่งตามสภาพการไหลของน้ำที่ไหลผ่านกรอง

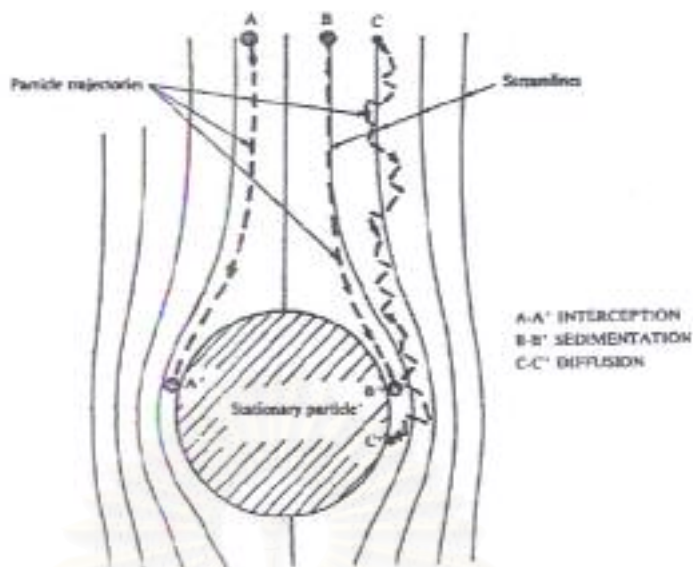
2.3.2 กลไกการกรองน้ำ

กลไกการกรองน้ำประกอบด้วย 2 กลไก ดังนี้ (มันลิน, 2539)

1) กลไกเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยเข้าหาสารกรอง (Transport mechanism) สารแขวนลอยสามารถเคลื่อนเข้าหาสารกรองได้สองลักษณะ ลักษณะแรกเป็นสารที่มีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน เป็นการเคลื่อนที่ในระดับโมเลกุลที่เกิดจากการแพร่กระจายแบบบราวเนียน (Brownian diffusion) ซึ่งอาศัยแรงจากการแพร่ (Diffusion force) ลักษณะที่สองเป็นของสารที่มีขนาดใหญ่กว่า 1 ไมครอน จะเคลื่อนที่ตามเส้นทางการไหลของน้ำ แล้ววิ่งเบียดเข้าหาสารกรอง (Interception) ในขณะที่ผ่านช่องว่างขนาดเล็ก นอกจากนี้สำหรับสารกรองที่มีขนาดใหญ่ยังอาจตะกอนในทิศทางที่เคลื่อนที่เข้าหาสารกรองได้ กล่าวโดยสรุป คือ ขนาดและการกระจายขนาด (Size distribution) มีความสำคัญต่อกลไกการเคลื่อนย้ายของสารแขวนลอยเข้าหาสารกรองอย่างมาก เมื่อขนาดของสารแขวนลอยมีขนาดเล็กกว่า 1 ไมครอน การแพร่กระจายจะเป็นตัวทำให้สารแขวนลอยมีโอกาสเข้าหาสารกรองได้มากกว่า แต่เมื่อขนาดของสารแขวนลอยมีขนาดใหญ่กว่า 1 ไมครอน ขนาดและน้ำหนักของสารแขวนลอยจะมีบทบาทสำคัญในการสร้างกลไกการตกตะกอนและติดค้าง (Intercept) (รูปที่ 2.2 และ 2.3)

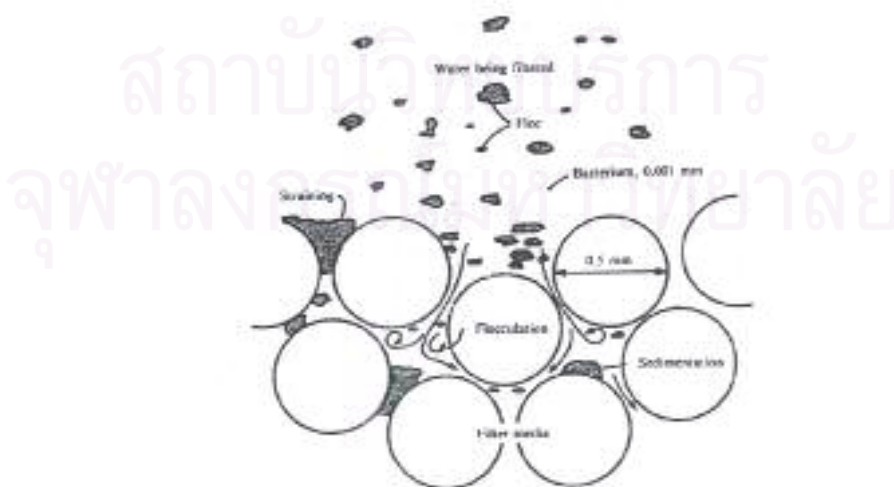


รูปที่ 2.2 ประสิทธิภาพในการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยขึ้นกับขนาด (Yao, 1971)



รูปที่ 2.3 กลไกในการเคลื่อนย้ายสารแขวนลอยเข้าหาสารกรอง (Yao, 1971)

2) กลไกการจับสารแขวนลอย (Attachment mechanism) สารแขวนลอยขนาดใหญ่อาจตกตะกอนและเกาะติดอยู่บนสารกรอง หรือตกค้างในช่องว่างระหว่างสารกรอง ทำให้สามารถกรองออกจากรน้ำได้ นอกจากนี้ยังปรากฏว่าสามารถกำจัดคอลลอยด์ขนาดเล็กออกจากรน้ำได้ด้วย ซึ่งพบว่าอาศัยกลไกแบบที่ใช้ในขบวนการโคแอกกูแลนต์ด้วย นั่นคือ การดูดติดผิว (Adsorption) และการทำลายประจุไฟฟ้าของคอลลอยด์ให้เป็นกลาง (Charge neutralization) การดูดติดผิวเป็นกลไกสำคัญที่ทำให้คอลลอยด์สามารถเกาะจับบนสารกรอง หรือสิ่งอื่นที่จับบนสารกรองอยู่ก่อน (แสดงดังรูปที่ 2.4)



รูปที่ 2.4 กลไกการกรองน้ำในเครื่องกรองทรายแบบกรองเร็ว (Yao, 1971)

การกรองน้ำโดยอาศัยกลไกทั้งสองแบบมีผลต่อการกรองน้ำต่างกัน การตกตะกอนและการติดค้าง ซึ่งเป็นกลไกทางกายภาพจะเกิดที่ผิวหน้าของชั้นกรองหรือว่าที่ความลึกไม่เกิน 2 – 3 นิ้วจากผิวหน้า ทำให้เกิดการสูญเสียเสด เครื่องกรองน้ำที่ทำงานได้ดีจะมีกลไกการกรองทั้งสองแบบเพื่อให้เกิดการกรองอย่างทั่วถึงชั้นกรอง และเกิดการกรองอย่างสม่ำเสมอ

2.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการกรองน้ำ

1) การเตรียมน้ำก่อนกรอง (Pretreatment) การกรองน้ำดิบที่มีความขุ่นโดยตรง มักจะไม่ได้น้ำใสเท่าที่ควรทั้งที่ใช้อัตราการกรองที่ต่ำมาก เนื่องจากเวลาที่คอลลอยด์และสารแขวนลอยในน้ำมักมีประจุลบเหมือนสารกรองดังนั้น โอกาสในการสัมผัสและเกาะติดกันจึงมีไม่มาก การเตรียมน้ำก่อนการกรอง จึงมีความสำคัญต่อการกรองน้ำเป็นอย่างยิ่ง

2) ขนาดของสารกรอง ขนาดของสารกรองเป็นพารามิเตอร์ที่สามารถใช้กำหนดสมรรถนะของเครื่องกรอง หากใช้สารกรองขนาดเล็ก เช่น ททราย จะผลิตน้ำคุณภาพสูง แต่ อายุการกรองสั้น ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีการใช้สารต่างๆ (Filter aid) เช่น สารส้ม หรือโพลีเมอร์ ซึ่งช่วยให้การใช้สารกรองขนาดใหญ่ได้ และสูญเสียเสดต่ำ

3) คุณภาพน้ำดิบ น้ำดิบที่เข้าเครื่องกรองเป็นปัจจัยชี้ว่าจะต้องเตรียมน้ำดิบก่อนการกรองหรือไม่ โดยปกติ น้ำดิบที่มีความขุ่นไม่เกิน 20 – 25 หน่วยความขุ่น สามารถกรองได้โดยตรง แต่หากความขุ่นมากกว่าจะต้องมีการปรับปรุงคุณภาพน้ำก่อน

4) ความหนาของชั้นกรอง ความหนาของชั้นกรองเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่กำหนดโอกาสการสัมผัสระหว่างสารแขวนลอยและสารกรองซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพการกรอง ดังนั้น การเตรียมน้ำดิบสำหรับกรองก็จะเป็นการใช้ประโยชน์ชั้นกรองได้ตลอดทั้งความลึก

2.3.4 ประสิทธิภาพการกรอง

เครื่องกรองนั้น มีประสิทธิภาพสูงมากในการกำจัดของแข็งและสารแขวนลอยที่อยู่ในน้ำ สารสกปรกหลายๆ ประเภท เช่น ความขุ่น แบคทีเรีย สาหร่าย ไวรัส เหล็กและสังกะสีที่ถูกออกซิไดซ์แล้ว หรือว่าสารเคมีที่เติมก่อนหน้าการกรอง การที่การกรองน้ำเป็นกรรมวิธีในการบำบัดประเภทกายภาพและทางเคมี เป็นผลให้อยู่ภายใต้อิทธิพลของตัวแปรหลายตัว ตัวแปรเหล่านี้ส่วนหนึ่งเป็นของน้ำที่เข้าเครื่องกรอง อีกส่วนหนึ่งของตัวเครื่องกรองเอง

ความสามารถในการกรอง (Filtrability) ถือเป็นปัจจัยที่สำคัญมากกว่าปัจจัยอื่นๆ และเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติต่างๆ ของสารแขวนลอยและคอลลอยด์ที่อยู่ในน้ำ ความสามารถในการกรองอาจปรับปรุงโดยการเติมสารเคมีต่างๆ ลงไป เช่น โคแอกกูแลนต์ หรือ โพลีอิเล็กโตรไลต์ ซึ่งจะช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของน้ำก่อนที่จะนำไปกรอง

คุณสมบัติของสารกรองในเครื่องกรองน้ำที่มีอิทธิพลต่อการทำงานของเครื่องกรอง ได้แก่ ขนาดและรูปร่างของสารกรอง ความพรุนของชั้นกรอง การเรียงตัวของสารกรอง ความลึกและการสูญเสียความดันในชั้นกรอง โดยทั่วไปประสิทธิภาพของถังกรองจะเพิ่มขึ้นตามขนาดของสารกรองที่เล็กลง ความพรุนที่ลดลงหรือความลึกที่เพิ่มขึ้น

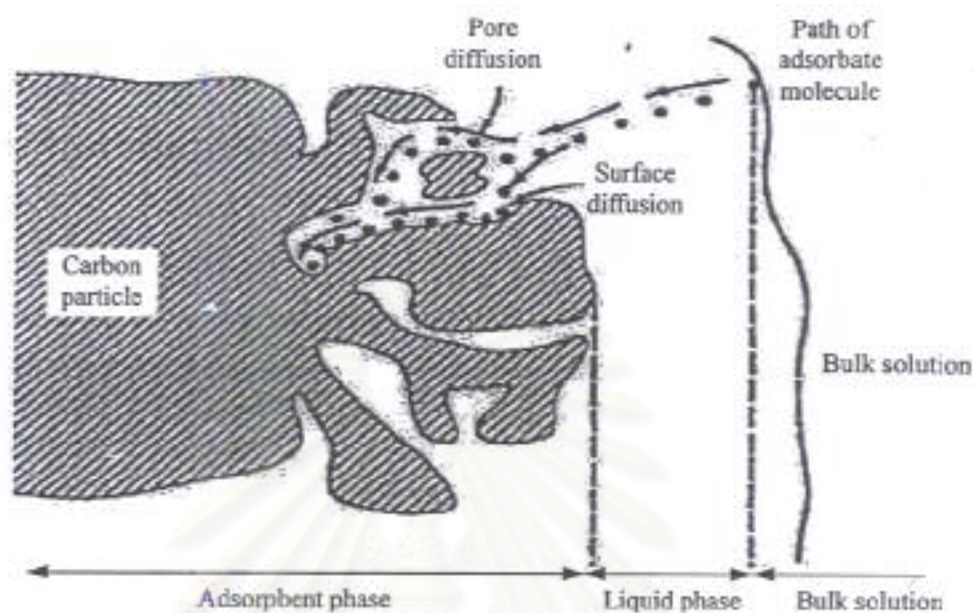
2.4 การดูดติดผิว (Adsorption)

การดูดติดผิวหรือการดูดซับ (Adsorption) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวของของแข็ง โดยเป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของของไหล (ก๊าซ ของเหลว) ระหว่างพื้นผิวของของแข็งและตัวของไหลเอง มีการนำไปประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ มากมาย ทั้งทางด้านอุตสาหกรรมและทางด้านสิ่งแวดล้อม การดูดติดผิวจะเกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสารหรือว่าความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นที่ผิวกับพื้นที่ผิวสัมผัส กระบวนการนี้สามารถเกิดขึ้นกับบริเวณผิวสัมผัสระหว่าง 2 สภาวะใดๆ เช่น ของแข็งกับของเหลว ของแข็งกับก๊าซ อนุภาคของสารที่ถูกดูดติดผิวเรียกว่า สารถูกดูดติดผิว (Adsorbate) ส่วนสารที่ทำหน้าที่เป็นสารดูดติดผิว เรียกว่า สารดูดติดผิว (Adsorbent) (รูปที่ 2.5) ทฤษฎีการดูดติดผิวสามารถแบ่งได้เป็นสองแบบ คือ การดูดติดผิวแบบทางกายภาพ (Physical adsorption) ซึ่งเป็นกระบวนการที่อาศัยแรงระหว่างโมเลกุลที่อ่อน และ การดูดติดผิวแบบทางเคมี (Chemical adsorption) ซึ่งเป็นกระบวนการที่เกิดการสร้างพันธะทางเคมีระหว่างโมเลกุลของตัวถูกดูดและพื้นที่ผิวของของแข็งที่เป็นวัสดุดูดติดผิว ซึ่งความแตกต่างระหว่าง การดูดติดผิวแบบทางกายภาพและแบบทางเคมี สรุปได้ดังนี้ (Faus และ Aly, 1987)

1) การดูดติดผิวทางกายภาพ เป็นกระบวนการที่ไม่เกิดการใช้หรือว่าถ่ายอิเล็กตรอนระหว่างตัวดูดและตัวถูกดูด กระบวนการนี้ เป็นกระบวนการที่สามารถผันกลับได้ง่าย และเกิดขึ้นช้าเนื่องจากอาศัยการแพร่ของตัวถูกดูดไปบนพื้นผิวของตัวดูด แต่ การดูดติดผิวแบบทางเคมี จะเกิดการสร้างพันธะทางเคมี เกิดขึ้นระหว่างตัวดูดและตัวถูกดูด โดยกระบวนการนี้เกิดขึ้นแล้วจะผันกลับได้ยากกว่า

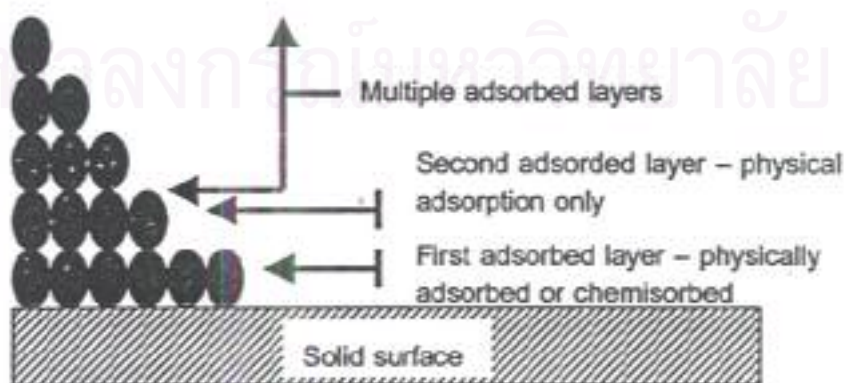
2) การดูดติดผิวทางกายภาพ เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นแบบไม่จำเพาะเจาะจงเฉพาะบริเวณใดบริเวณหนึ่งบนพื้นผิวของตัวดูดติดผิว แต่เกิดไปทั่วทั้งพื้นผิวของตัวดูดติดผิว โดยที่

โมเลกุลของตัวดูดซับสามารถเคลื่อนที่ไปได้ทั่วถึงทั้งพื้นที่ผิวของตัวดูดซับได้ ในขณะที่ การดูดซับแบบทางเคมี เป็นกระบวนการที่เกิดเฉพาะเจาะจงกับพื้นที่หรือบริเวณเฉพาะบริเวณใด บริเวณหนึ่ง



รูปที่ 2.5 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายอนุภาคของสารที่ถูกดูดซับมายังสารดูดซับ (Montgomery, 1985)

กระบวนการดูดซับ โมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับเข้ามาในชั้นแรกจะสามารถเข้าไปทำปฏิกิริยากับผิวของตัวดูดซับได้ จึงเกิดการดูดซับทั้งแบบกายภาพและเคมี ส่วนการดูดซับของโมเลกุลในชั้นต่อไป จะเกิดการดูดซับแบบกายภาพเท่านั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.6 ซึ่งรูปแบบของจำนวนชั้นของโมเลกุลที่ดูดซับแบบกายภาพจะมีความสำคัญต่อการเลือกใช้สมการทางคณิตศาสตร์ในการประเมินความสามารถในการดูดซับ หรือการคำนวณไอโซเทอมการดูดซับ



รูปที่ 2.6 การดูดซับของโมเลกุลแบบหลายชั้นบนผิวของแข็ง (Myer, 1999)

2.4.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิว

1) ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดติดผิว

ความสามารถในการดูดติดผิวมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะและอัตราการดูดติดผิวที่ผิวเป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดสารดูดติดผิว โดยกลไกการดูดติดผิวที่ผิวภายนอกของสารที่ไม่มีโพรงจะมีอัตราการดูดติดผิวที่เป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดของสารดูดติดผิว สำหรับสารดูดติดผิวที่มีโพรง อัตราการเคลื่อนที่เข้าสู่พื้นที่ผิวภายในโพรงถูกควบคุมโดยความต้านทานภายนอกที่เรียกว่า Film diffusion ดังนั้นอัตราการดูดติดผิวจะมีความสัมพันธ์เป็นสัดส่วนกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดติดผิว ในทางตรงข้ามถ้าการเคลื่อนที่ภายในเป็นอัตราการดูดติดผิว การดูดติดผิวจะเป็นอัตราส่วนผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดติดผิว

2) ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในตัวถูกละลาย

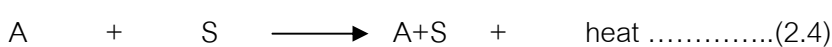
ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในตัวถูกละลาย จะมีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดติดผิวของตัวถูกละลาย โดยการดูดติดผิวในสารละลายที่มีความเข้มข้นของตัวถูกละลายต่ำจะมีประสิทธิภาพในการดูดติดผิวสูงกว่าสารละลายที่มีความเข้มข้นของตัวถูกละลายสูง

3) ลักษณะของสารดูดติดผิว

ความสามารถในการละลายน้ำของสารละลายและของตัวถูกละลายเป็นปัจจัยสำคัญในการดูดติดผิว การดูดติดผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายน้ำของตัวถูกละลายลดลง เนื่องจาก ในการดูดติดผิว ตัวถูกละลายจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลาย ซึ่งในที่นี้คือน้ำ ดังนั้น เมื่อตัวถูกละลายมีคุณสมบัติในการละลายน้ำได้ดีหรือแตกตัวเป็นไอออนได้ดีและมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำสูง ก็ยากที่จะดูดติดผิวได้ดี ดังนั้นสารที่ละลายน้ำได้น้อยหรือไม่ละลายจะสามารถดูดติดผิวได้ดี นอกจากนี้ขนาดของโมเลกุลของตัวถูกละลายยังมีความสัมพันธ์กับการดูดติดผิว หากอัตราการเคลื่อนที่ภายในโพรงเป็นกลไกการควบคุมการดูดติดผิว ความสามารถในการดูดติดผิวจะแปรผกผันกับขนาดของโมเลกุลตัวถูกละลาย

4) อุณหภูมิ

การดูดติดผิวโดยทั่วไปเป็นกระบวนการคายความร้อน (Exothermic reaction) ดังนั้นความสามารถในการดูดติดผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่ออุณหภูมิลดลง แต่อัตราเร็วในการดูดติดผิวจะสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นดังสมการ



เมื่อ A = สารถูกละลาย

S = พื้นที่ผิว

5) ความปั่นป่วน

อัตราเร็วในการดูดติดผิวขึ้นกับการแพร่ภายนอกและการแพร่ภายใน ถ้าระบบมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มน้ำซึ่งรอบตัวดูดติดผิวจะมีความหนาแน่นและเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาผิวของสารดูดติดผิว ดังนั้นการแพร่ภายนอกก็จะเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วการดูดติดผิว ในทางตรงกันข้ามถ้าความปั่นป่วนสูงจะเกิดฟิล์มบางๆ ทำให้การแพร่ภายในเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วการดูดติดผิว ในกรณีของถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ ความปั่นป่วนในถังก็คือความเร็วของสารละลายที่ไหลผ่านพื้นที่หน้าตัดของถัง ซึ่งจะทำให้อัตราในการดูดติดผิวสูงขึ้น เนื่องจากความปั่นป่วนสูงขึ้น

6) พีเอช

พีเอชมีอิทธิพลต่อการดูดติดผิว เนื่องจากไฮโดรเจนไอออน และไฮดรอกไซด์ไอออนสามารถถูกดูดติดผิวได้ค่อนข้างแข็งแรง การดูดติดผิวไอออนอื่นๆ จึงมีผลกระทบเนื่องจากพีเอชของสารละลาย นอกจากนี้พีเอชยังมีผลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและการละลายน้ำของสารต่างๆ ด้วย

7) เวลาสัมผัส

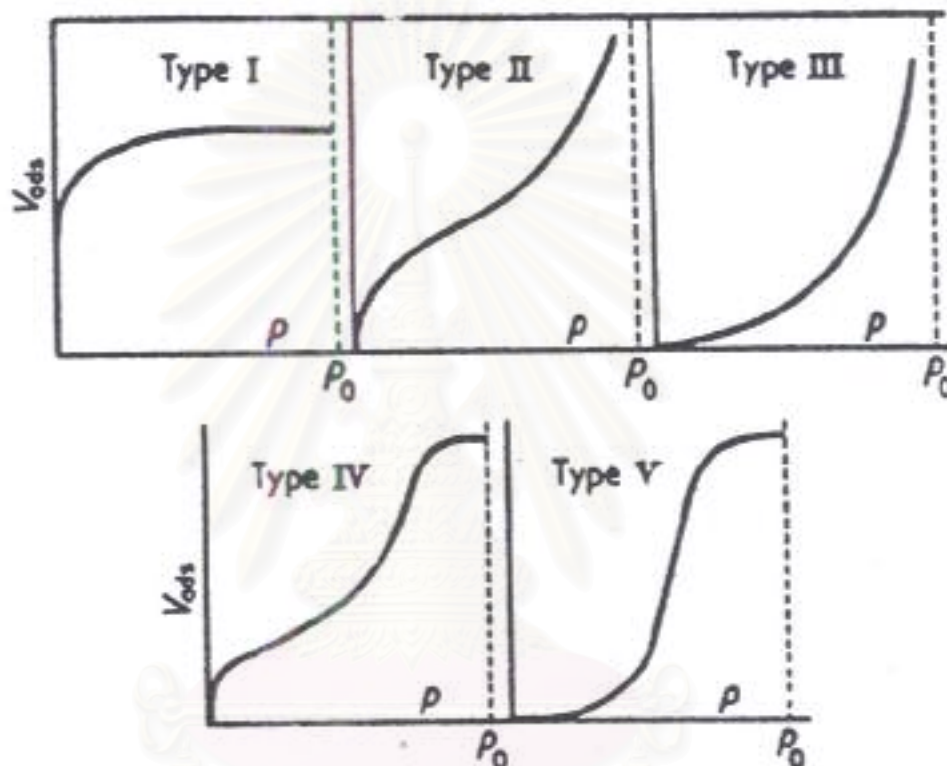
ในกรณีของถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ เวลาสัมผัสจะเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดติดผิวและอายุการใช้งานของถัง โดยถ้าเวลาในการสัมผัสเพิ่มขึ้นและความเข้มข้นของตัวถูกดูดลดลงแล้วอายุการใช้งานของถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์จะนานขึ้น แต่อย่างไรก็ดี เวลาสัมผัสมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการดูดติดผิวเพียงช่วงหนึ่งเท่านั้น ถ้าหากช่วงเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้นจนเลยช่วงเวลาสัมผัสที่เหมาะสมแล้ว แทบจะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดติดผิวเลย

2.4.2 สมดุลและไอโซเทอมของการดูดติดผิว

สมดุลการดูดติดผิว (Adsorption equilibrium) จะเกิดขึ้นในกระบวนการดูดติดผิวเมื่อสารที่ถูกดูดติดผิวมีแนวโน้มที่จะคายตัวออกไปสู่สารละลาย จนกระทั่งอัตราการดูดติดผิวของสารที่ถูกดูดติดผิวมีค่าเท่ากับอัตราการคายสารที่ถูกดูดติดผิวออกสู่สารละลาย จนกระทั่งเข้าสู่สภาวะคงที่ จะเรียกจุดนี้ว่า สมดุลของการดูดติดผิว ที่จุดสมดุลนี้จะเป็นสมดุลของระบบทั้งหมด จะไม่สามารถสังเกตเห็นการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารถูกดูดติดผิวบนพื้นผิวของสารดูดติดผิวหรือในของเหลวได้ ไม่ว่าจะเป็สารถูกดูดติดผิว สารดูดติดผิว ตัวทำละลาย อุณหภูมิ ค่าพีเอช และอื่นๆ ปริมาณการดูดติดผิวที่จุดสมดุลจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารถูกดูดติดผิวเพิ่มขึ้น

การแสดงให้เห็นปริมาณของสารที่ถูกดูดซับต่อปริมาณของสารดูดซับในสารละลายที่อุณหภูมิคงที่ที่จุดสมดุลเรียกว่า ไอโซเทอมของการดูดซับ (Adsorption isotherm)

ไอโซเทอมการดูดซับมีหลายรูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 2.7 รูปร่างของไอโซเทอมการดูดซับจะให้ข้อมูลเกี่ยวกับกระบวนการดูดซับ ลักษณะการดูดซับของพื้นที่ตัวดูดซับในขณะที่เกิดกระบวนการดูดซับ



รูปที่ 2.7 ไอโซเทอมการดูดซับแบบพื้นฐาน (Faust และ Aly, 1987)

ไอโซเทอมการดูดซับมีหลายรูปแบบ เป็นผลมาจากการพัฒนาความรู้และความสังเกต แต่โดยทั่วไปที่นิยมใช้กันมากในการอธิบายทางทฤษฎีของการดูดซับ มักจะกล่าวอ้างถึงไอโซเทอม 3 แบบ ดังต่อไปนี้

1) ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ (Langmuir adsorption isotherm)

สมมติฐานพื้นฐานของแบบจำลองไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์

คือ

(1) โมเลกุลถูกดูดซับอยู่บริเวณที่แน่นอนบนพื้นผิวของสารดูดซับ

ของพื้นที่ผิว

- (2) มีโมเลกุลเดียวในบริเวณถูกดูดติด
- (3) พื้นที่ของบริเวณดูดติดผิวมีจำนวนที่แน่นอน ซึ่งกำหนดโดยลักษณะ
- (4) พลังงานการดูดติดผิวมีค่าเท่ากันทุกบริเวณ
- การดูดติดผิวจากสารละลายโดยสารดูดติดผิว แสดงดังสมการ

$$X = (X_m bC)/(1 + bC) \quad \dots\dots\dots(2.5)$$

โดย X = ปริมาณสารถูกดูดติดผิวต่อปริมาณสารดูดติดผิว
มีหน่วยเป็น (มิลลิกรัม/กรัม หรือ โมล/กรัม)

X_m = ปริมาณสารถูกดูดติดผิวต่อปริมาณสารดูดติดผิว
ที่สภาวะสมดุล
มีหน่วยเป็น (มิลลิกรัม/กรัม หรือ โมล/กรัม)

C = ความเข้มข้นของสารถูกดูดติดผิวในสารละลาย
มีหน่วยเป็น (มิลลิกรัม/ลิตร หรือ โมล/ลิตร)

b = ค่าคงที่ของการดูดติดผิว

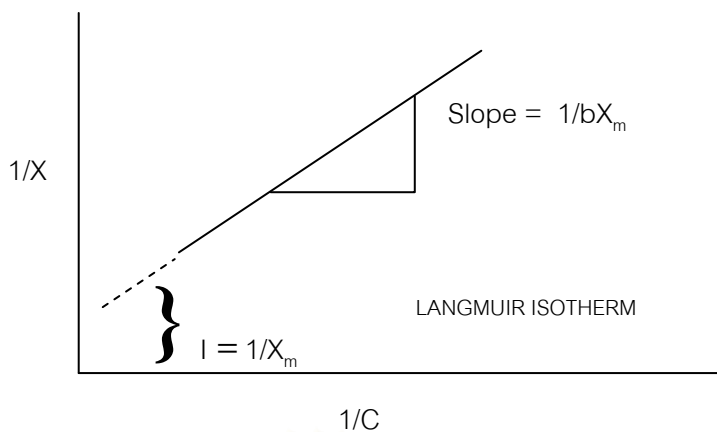
เมื่อ X เข้าสู่อันันต์ X_m และ C เข้าใกล้ค่าอนันต์ (Infinity, ∞) จะเขียนสมการได้เป็น

$$C/X = (1/bX_m) + (C/X_m) \quad \dots\dots\dots(2.6)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง C/X กับ C ซึ่งเป็นเส้นตรง จะมีความชัน $1/X_m$ และจุดตัด
แกน y เท่ากับ $1/bX_m$ และเมื่อหารด้วย C จะได้สมการเส้นตรง คือ

$$1/X = (1/X_m) + (1/C)(1/bX_m) \quad \dots\dots\dots(2.7)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $1/X$ กับ $1/C$ จะได้กราฟซึ่งเป็นเส้นตรง มีค่าความชัน
(Slope) เท่ากับ $1/bX_m$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $1/X_m$ จากสมการ 2.7 แสดงได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์

2) ไอโซเทอมการดูดซับแบบเบท (BET : Brunauer-Emmett-Teller adsorption isotherm)

ไอโซเทอมการดูดซับแบบเบท พัฒนามาจากสมการไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ ที่คิดจากการดูดซับแบบชั้นเดียว (monolayer) เป็นการดูดซับแบบหลายชั้น (multilayer) ซึ่งแต่ละโมเลกุลในชั้นดูดซับผิวชั้นแรก จะเป็นบริเวณที่ซึ่งมีโมเลกุลชั้นที่ 2 ดูดซับเช่นเดียวกับชั้นอื่นๆ ต่อไป โดยแสดงเป็นสมการได้ดังนี้

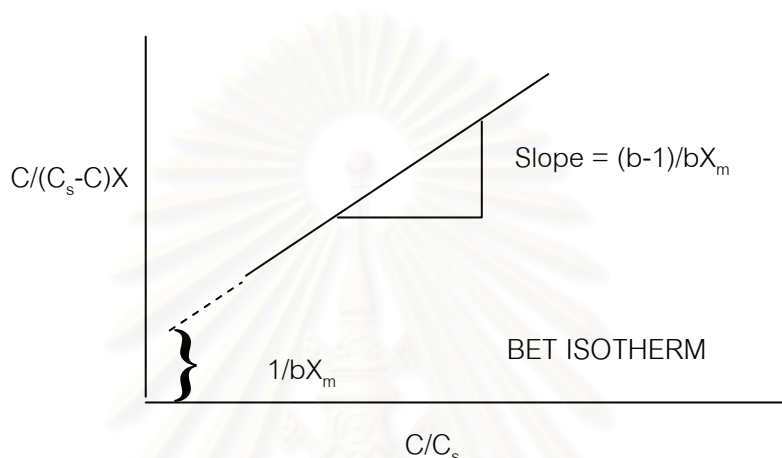
$$X = (X_m bC)/(C_s - C)(1 + (b - 1)C/C_s) \dots\dots\dots (2.8)$$

- โดย
- X = ปริมาณสารถูกดูดซับต่อปริมาณสารดูดซับ มีหน่วยเป็น (มิลลิกรัม/กรัม หรือ โมล/กรัม)
 - X_m = ปริมาณสารถูกดูดซับต่อปริมาณสารดูดซับ ที่สภาวะสมดุล มีหน่วยเป็น (มิลลิกรัม/กรัม หรือ โมล/กรัม)
 - C = ความเข้มข้นของสารถูกดูดซับในสารละลาย มีหน่วยเป็น (มิลลิกรัม/ลิตร หรือ โมล/ลิตร)
 - C_s = ความเข้มข้นอิ่มตัวของสารถูกดูดซับ ณ ทุกๆชั้น มีหน่วยเป็น (มิลลิกรัม/ลิตร หรือ โมล/ลิตร)
 - b = ค่าคงที่ของการดูดซับ

จากสมการ 2.8 สามารถเขียนได้เป็น

$$C/X(C_s - C) = (1/X_m b) + ((b-1)/X_m b)(C/C_s) \dots\dots\dots(2.9)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $C/X(C_s - C)$ กับ C/C_s จะได้กราฟซึ่งเป็นเส้นตรงที่มีความชัน เท่ากับ $(b-1)/bX_m$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $1/bX_m$ แสดงได้ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบเบท

3) ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช (Freundlich adsorption isotherm)

สมการการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิชใช้กันอย่างแพร่หลายที่สุดในการอธิบายการดูดติดผิวในระบบของเหลว ซึ่งมีสมการดังนี้ คือ

$$X/m = KC^{1/n} \dots\dots\dots (2.10)$$

โดย X = ปริมาณสารถูกดูดติดผิวต่อปริมาณสารดูดติดผิว
มีหน่วยเป็น (มิลลิกรัม/กรัม หรือ โมล/กรัม)

m = น้ำหนักของสารดูดติดผิว มีหน่วยเป็น กรัม

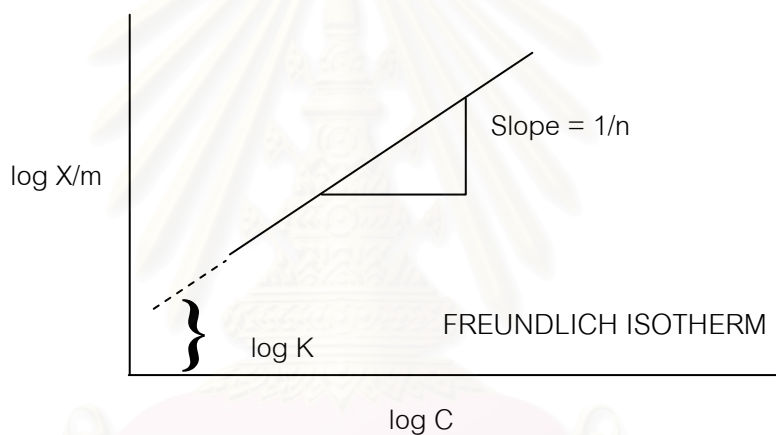
C = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลาย ที่สภาวะสมดุลย์
มิลลิกรัม/ลิตร หรือ โมล/ลิตร

K, 1/n = ค่าคงที่ของการดูดติดผิว

จากสมการที่ 2.10 สามารถเขียนสมการในรูป Logarithmic ได้ดังนี้ คือ

$$\log(X / m) = \log K + 1/n \log C \dots\dots\dots (2.11)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $\log (X/m)$ กับ $\log C$ จะได้กราฟที่เป็นเส้นตรง มีค่าความชันเท่ากับ $1/n$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $\log K$ ของ $\log (X/m)$ ที่ $\log C = 0$ ($C = 1$) จากสมการที่ 2.11 แสดงได้ดังรูปที่ 2.10 จากสมการการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช แสดงถึงความสามารถในการดูดติดผิว โดยถ้าค่า $1/n < 1$ แสดงถึงการดูดติดผิวที่ไม่ดี แต่ถ้าค่า $1/n > 1$ แสดงถึงการดูดติดผิวที่ดี และถ่านที่มีเส้นไอโซเทอมมีความชันมากแสดงว่าการดูดติดผิวเกิดขึ้นได้ดีที่ความเข้มข้นสูงๆ และเกิดขึ้นได้น้อยที่ความเข้มข้นต่ำ



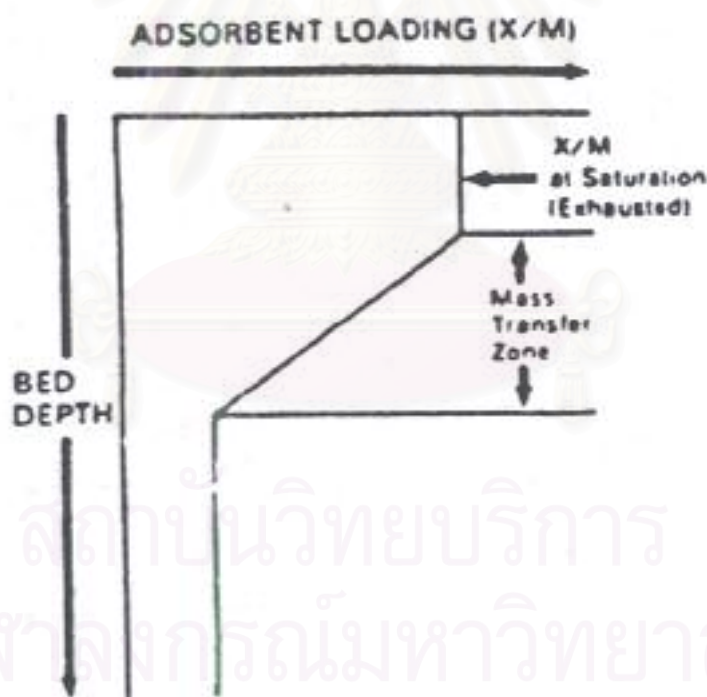
รูปที่ 2.10 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช

2.5 ถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ (The adsorption column)

ในกระบวนการทดลองแบบ Batch ปริมาณของตัวดูดติดผิวที่รู้แน่นอนและเพียงพอจะถูกผสมลงในสารละลายที่มีตัวถูกดูดติดผิว เมื่อให้เวลาการสัมผัสที่เหมาะสมจนกระบวนการดูดติดผิวเกิดขึ้นสมบูรณ์ ตัวดูดติดผิวและตัวถูกดูดติดผิวก็จะแยกจากสารละลายก็เป็นอันเสร็จสิ้นกระบวนการกำจัดสารที่ไม่ต้องการในสารละลาย ในการประยุกต์ใช้งานกระบวนการดูดติดผิว ซึ่งเป็นกระบวนการที่มีของเหลวหรือของไหลไหลอย่างต่อเนื่อง มักจะใช้กระบวนการดูดติดผิวในถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ ซึ่งจะมีตัวดูดติดผิวบรรจุอยู่ภายในถังและให้ของเหลวหรือของไหลผ่านและเกิดกระบวนการดูดติดผิวเอาสารที่ไม่ต้องการออกจากของไหล กระบวนการดูดติดผิวโดยอาศัยถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์นี้จะมีประสิทธิภาพดีกว่ากระบวนการแบบ Batch (Faust และ Aly, 1987)

จุดเริ่มต้นกระบวนการดูดซับในถังดูดซับแบบคอลัมน์ สารดูดซับจะสัมผัสกับสารละลายที่มีตัวถูกละลายอย่างต่อเนื่อง ซึ่งตัวถูกละลายจะทำตัวเหมือนเป็นชุดของชั้นดูดซับ ซึ่งแต่ละชั้นจะสัมผัสกับสารละลายใหม่ที่ไหลผ่านอยู่ตลอดเวลา ซึ่งเป็นการใช้ตัวกลางให้สามารถดูดซับได้เต็มความสามารถของตัวกลางโดยพิจารณาที่ความเข้มข้นของสารละลายที่คงที่ (ตัวกลางสัมผัสกับสารละลายที่มีความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ตลอดเวลา) ซึ่งตรงข้ามกับกระบวนการแบบ Batch ที่มีความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายจะลดลงเรื่อยๆ (เนื่องจากถูกละลายออกจากสารละลายอยู่เรื่อยๆ)

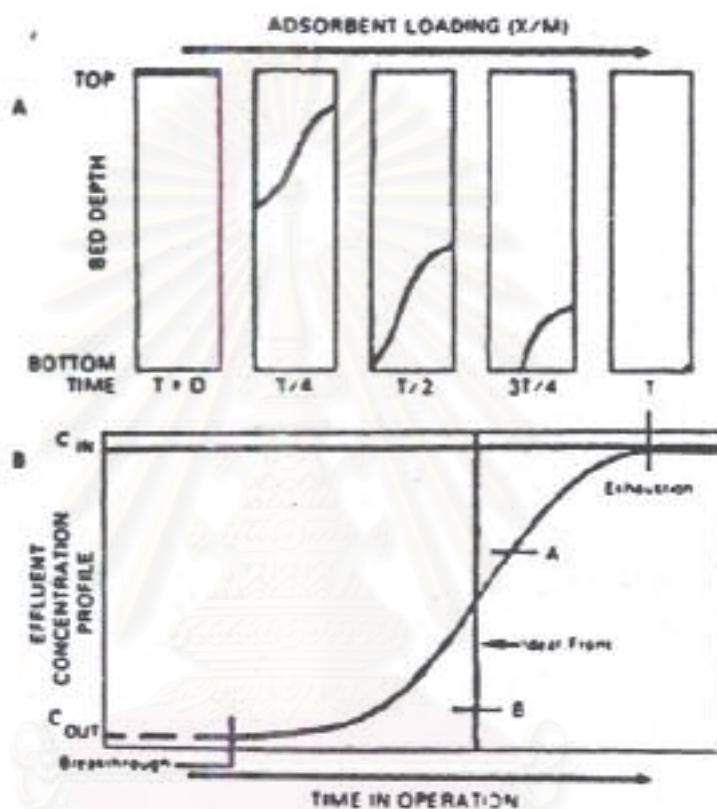
เมื่อสารละลายไหลผ่านชั้นของตัวกลางที่อยู่ในถังดูดซับแบบคอลัมน์ หน้าคลื่น (Wave front) หรือเขตถ่ายเทมวลสาร (Mass transfer zone) จะเกิดขึ้นเนื่องจากกระบวนการดูดซับสารละลายในชั้น ดังแสดงในรูปที่ 2.11 แสดงการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ผิวของตัวดูดซับตามความลึกของชั้นตัวดูดซับ



รูปที่ 2.11 เขตการถ่ายเทมวล (Mass transfer zone) ในถังดูดซับแบบคอลัมน์

เมื่อสารละลายไหลผ่านเข้าไปในชั้นตัวดูดซับ ตัวถูกละลายจะถูกดูดซับที่ชั้นบนของชั้นกลางจนกระทั่งถึงจุดสมดุลของตัวถูกละลาย ณ ขณะนี้ตัวดูดซับได้ดูดซับไว้จนเต็มความสามารถในการดูดซับแล้ว ที่ชั้นถัดลงไปเป็นชั้นที่กระบวนการดูดซับเกิดขึ้นและตัวถูกละลาย

ดูดติดผิวกำลังถูกดูดด้วยตัวดูดติดผิว บริเวณที่เกิดการดูดติดผิวอยู่นี้เรียกว่า เขตการถ่ายเทมวล ความหนาของเขตถ่ายเทมวลนี้ขึ้นกับปัจจัยหลายอย่าง เช่น ตัวถูกดูดติดผิวที่อยู่ในสารละลาย ลักษณะของตัวดูดติดผิว และ hydraulic factor ของถังดูดติดผิวเอง และเมื่อเขตถ่ายเทมวล เคลื่อนที่ลงไปจนกระทั่งจุดล่างสุดของถังดูดติดผิว ที่จุดนี้เรียกว่า จุด Breakthrough ซึ่งหมายถึง จุดที่ตัวถูกดูดติดผิวในสารละลายหลุดออกจากถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ ดังแสดงในรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 ลักษณะโดยทั่วไปในการทำงานของถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์

(Faust และ Aly, 1987)

เวลาหรือปริมาตรของน้ำที่ผ่านถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์จนกระทั่งถึงจุด Breakthrough ซึ่งเป็นจุดที่บอกว่าถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์หมดความสามารถในการบำบัดจะมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับ

- 1) ขนาดของตัวกลางที่อยู่ในถังดูดติดผิว เมื่อขนาดของตัวกลางเพิ่มขึ้น เวลาหรือปริมาตรน้ำที่ผ่านถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์จนกระทั่งถึงจุด Breakthrough จะลดลง
- 2) ความเข้มข้นของตัวถูกดูดติดผิวที่ไหลผ่านถังดูดติดผิว เมื่อเพิ่มความเข้มข้นเวลาหรือปริมาตรน้ำที่ผ่านถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์จนกระทั่งถึงจุด Breakthrough จะลดลง

3) พีเอชของสารละลายที่ไหลผ่าน เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น เวลาหรือปริมาตรน้ำที่ผ่านถึงจุดติดผิวแบบคอลัมน์จนกระทั่งถึงจุด Breakthrough จะลดลง เมื่อตัวถูกติดผิวเป็นสารที่มีการแตกตัวในน้ำได้น้อย

4) อัตราการไหลของสารในถึงจุดติดผิว (Hydraulic load, volumn/area/time) เมื่ออัตราการไหลมากขึ้นเวลาหรือปริมาตรน้ำที่ผ่านถึงจุดติดผิวแบบคอลัมน์จนกระทั่งถึงจุด Breakthrough จะลดลง

ปัจจัยดังกล่าวเป็นเงื่อนไขในกรณีนี้ Breakthrough เป็นรูปตัว S แต่ในสารละลายที่มีไอออน หรือตัวถูกติดผิวมากกว่าหนึ่งตัว หรือกรณีของการประยุกต์ใช้กับน้ำเสียจริง จะมีปัจจัยอื่นเป็นตัวร่วมกำหนดลักษณะของ Breakthrough curve เช่น การแข่งขันการถูกติดผิว การแทนที่ตัวถูกติดผิวได้ไม่ดีด้วยตัวถูกติดผิวได้ดี ซึ่งทำให้ breakthrough curve ไม่เป็นรูปตัว S

2.6 ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon)

2.6.1 ความหมายของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) เป็นถ่านที่อยู่ในรูปของคาร์บอนอสัณฐาน (Amorphous carbon) ชนิดหนึ่งแต่ถูกผลิตขึ้นมาโดยการกระตุ้น (Activated) ซึ่งจะทำให้พื้นผิวภายใน (Internal surface area) เพิ่มขึ้นอันเนื่องจากโครงสร้างที่เป็นรูพรุนจำนวนมาก สำหรับดูดซับจำนวนมาก ซึ่งจะเกี่ยวพันโดยตรงกับขนาดและปริมาตรของรูพรุนที่มีอยู่

ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) หมายถึง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการนำวัตถุดิบธรรมชาติที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักมาผ่านกรรมวิธีก่อกัมมันต์ จนได้ผลิตภัณฑ์สีดำ มีโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นรูพรุน มีพื้นที่ผิวสูง มีสมบัติในการดูดซับสารต่างๆ ได้เป็นอย่างดี (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2532)

ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) หมายถึง ถ่านที่มีลักษณะรูปร่างอสัณฐานที่มีความเหนือชั้นกว่าถ่านทั่วไป ด้วยมีพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนภายในมากมายเป็นพิเศษ และมีคุณสมบัติในการดูดติดผิว ซึ่งนำไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ต่างๆ ได้หลากหลายทั้งในการใช้กับของเหลวและก๊าซ ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดติดผิวที่ใช้งานได้กว้างขวางเป็นพิเศษเพราะมีขนาดและการกระจายตัวของรูพรุนในขนาดต่างๆ ที่สามารถทำการควบคุมตามความต้องการของตลาดได้

ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) หมายถึง ถ่านคาร์บอนที่มีลักษณะรูปร่าง อสังฐาน ซึ่งมีความสามารถในการดูดติดผิวสูง (High adsorptivity) สามารถดูดติดผิวก๊าซหลายชนิด, กอลลิน และอนุภาคแขวนลอยต่างๆ (Colloidal solids) ถ่านกัมมันต์ผลิตได้จากไม้ เปลือกถั่ว กระจูด สัตว์ หรือวัสดุอื่นๆ ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ โดยการเปลี่ยนโครงสร้างด้วยการให้ความร้อน หรือการกระตุ้นที่ 800 – 900 °C ด้วยไอน้ำหรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งจะได้โครงสร้างที่มีรูพรุนภายในมากมาย (Honeycomb-like) พื้นที่ผิวภายในของถ่านกัมมันต์โดยเฉลี่ยประมาณ 10,000 ตารางฟุตต่อกรัม มีความหนาแน่น 0.08 – 0.5 (Lewis R.J., 1997)

2.6.2 โครงสร้างของถ่านกัมมันต์

2.6.2.1 โครงสร้างรูพรุน (pores)

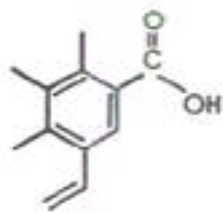
ผิวของถ่านกัมมันต์ มีลักษณะรูพรุนจำนวนมาก มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน รูพรุนเหล่านี้จะลึกเข้าไปในเนื้อของถ่านกัมมันต์อย่างไม่เป็นระเบียบและความลึกไม่สม่ำเสมอ ลักษณะของรูพรุนเหล่านี้เปรียบได้กับหลอดแก้วขนาดเล็ก (Capillary tube) ที่เสียบเข้าไปในเนื้อถ่านกัมมันต์ โดยทั่วไปจะเรียกรูพรุนเหล่านี้ตามขนาด คือ ขนาดเล็ก (micropore) มีเส้นผ่านศูนย์กลางของรูพรุนเล็กกว่า 2 นาโนเมตร รูพรุนขนาดกลาง (mesopore) มีเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2 ถึง 50 นาโนเมตร และรูพรุนขนาดใหญ่ (macropore) มีเส้นผ่านศูนย์กลางมากกว่า 50 นาโนเมตร รูพรุนขนาดเล็กมีความสัมพันธ์กับค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ และการกระจายขนาดรูพรุน (pore size ditribution) จะขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบที่ใช้และวิธีการกระตุ้น รูพรุนที่มีขนาดใหญ่ จะทำหน้าที่เป็นเพียงทางผ่านของสารถูกดูดติดผิวเข้าไปยังรูพรุนขนาดเล็ก จึงไม่มีผลต่อความจุในการดูดติดผิว แต่จะมีผลต่ออัตราเร็วในการดูดติดผิว สำหรับรูพรุนขนาดกลางนั้น สามารถดูดติดผิวโมเลกุลของเหลวได้บ้าง และมีความสำคัญมากขึ้นเมื่อดูดติดผิวที่ความดันสัมพัทธ์สูงๆ โดยทั่วไป ถ่านกัมมันต์เกรดการค้า จะมีรูพรุนขนาดกลางประมาณ 200 – 300 ตารางเมตรต่อกรัม สำหรับรูพรุนขนาดเล็กมีหน้าที่ในการดูดซับ จึงมีผลต่อความจุในการดูดติดผิว โดยเฉพาะการดูดติดผิวที่มีความดันสัมพัทธ์ต่ำ ถ่านกัมมันต์จะมีรูพรุนขนาดเล็กประมาณร้อยละ 90 – 95 ของพื้นที่ทั้งหมด นอกจากนี้ ถ้าผิวของถ่านบริเวณนั้นเป็นเพียงระนาบพื้นฐาน (Basal planes) ซึ่งไม่มีหมู่ฟังก์ชันอื่น ๆ การดูดติดผิวจะเกิดจากแรงแวนเดอร์วาล หรืออาจเกิดจากไฟอิเล็คตรอน แรงยึดเหนี่ยวทั้งสองเป็นแรงที่ค่อนข้างอ่อน แม้ว่าจะดูดติดผิวได้ แต่มีโอกาสที่จะหลุดออกได้ง่าย แต่ถ้าเป็นผิวบริเวณที่มีหมู่ฟังก์ชันอื่น การดูดติดผิวจะเกิดจากแรงที่แข็งแรงโอกาสที่

โมเลกุลของสารที่ถูกตัดติดผิวจะหลุดออกจึงมีน้อยกว่า หมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์มี 2 ชนิด คือ พวกออกไซด์ของกรด และพวกออกไซด์ของด่าง

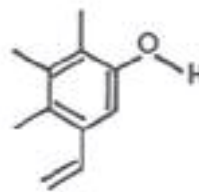
2.6.2.2 โครงสร้างทางเคมี

ถ่านกัมมันต์ส่วนใหญ่ มักเตรียมจากถ่านที่ได้จากการเผาผลาญสารอินทรีย์ด้วยความร้อน (Pyrolysis) ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1000 องศาเซลเซียส ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่า การคาร์บอนไนเซชัน ในระหว่างการเผาผลาญอะตอมต่างๆ ที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน และไฮโดรเจน จะถูกกำจัดออกไปในรูปของก๊าซ อะตอมของคาร์บอนที่เหลือจะจัดเรียงเป็นชั้นๆ แต่ละชั้นประกอบด้วยวงแหวนเฮลิยม (Aromatic ring) เชื่อมโยงกันอย่างไม่เป็นระเบียบ และเกิดช่องว่างหรือโพรง ซึ่งจะเป็นที่อยู่ของทาร์ และสารอื่นที่ได้จากการเผาผลาญ ช่องว่างเหล่านี้จะกลายเป็นรูพรุนที่มีความสามารถในการดูดซับ ด้วยกระบวนการที่เรียกว่า การกระตุ้น โดยการล้างทาร์และสารต่างๆ ที่ได้จากการเผาผลาญออกจากช่องว่าง หรือโพรง และสร้างหมู่ฟังก์ชันนำขึ้นมาแทน ความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ จึงเป็นผลสืบเนื่องมาจากโครงสร้างทางเคมีด้วย ถ่านกัมมันต์มีโครงสร้างคล้ายผลึกแกรไฟท์ กล่าวคือ อะตอมของคาร์บอนจะวางตัวเป็นชั้นๆ แต่ละชั้นจะห่างกันประมาณ 0.335 นาโนเมตร แรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นคือ แรงแวลเดอวาล ซึ่งเป็นแรงที่ไม่แข็งแรงนัก แต่ละชั้นจะประกอบไปด้วยกลุ่มอะตอมคาร์บอนที่มีโครงสร้างคล้ายรูปหกเหลี่ยม อะตอมแต่ละตัวจะใช้ซิกมาอิลเล็กตรอนสร้างพันธะเดี่ยวกับอะตอมข้างเคียง 3 อะตอม ความยาวระหว่างอะตอมภายในชั้นประมาณ 0.144 นาโนเมตร อิลเล็กตรอนที่เหลืออีกหนึ่งตัวเป็นไพอิลเล็กตรอน ที่ใช้ในการสร้างพันธะที่ไม่อิ่มตัว คือ พันธะคู่ (double bond) ดังรูปที่ 2.14 แต่โดยทั่วไป ถ่านหรือถ่านกัมมันต์ จะมีอิลเล็กตรอนไม่ครบคู่อะตอมคาร์บอนบางตัวจึงต้องรับอิลเล็กตรอนดังกล่าวไว้ ทำให้มีความหนาแน่นประจุสูง อะตอมดังกล่าวจะปล่อยให้อิลเล็กตรอนเคลื่อนที่ไปยังอะตอมข้างเคียง (resonance) เพื่อลดความหนาแน่นของประจุเพื่อให้โครงสร้างเสถียรยิ่งขึ้น

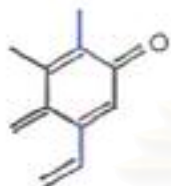
กลุ่มฟังก์ชันที่พบบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ที่พบบ่อยๆ ได้แก่ Carbonyl groups, Phenolic hydroxyl groups, Quinone type carbonyl groups, Normal lactones groups, Fluorescein type groups, Carboxylic acid anhydrides groups และ Cyclic peroxide groups ดังแสดงในรูปที่ 2.13



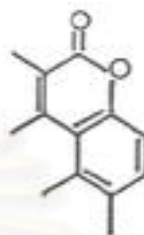
(a) Carboxylic Group



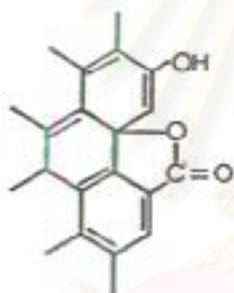
(b) Phenolic Hydroxyl Group



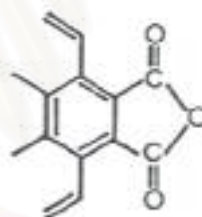
(c) Quinone Type Carbonyl Group



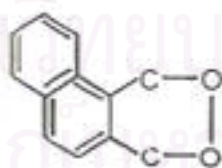
(d) Normal Lactone Group



(e) Fluorescein Type Lactone Group



(f) Carboxyl Acid Anhydride Group



(g) Cyclic Peroxide Group

รูปที่ 2.13 กลุ่มฟังก์ชันลดบนพื้นผิวถ่านกัมมันต์ (Cookson, 1978)

2.6.3 ชนิดของถ่านกัมมันต์

2.6.3.1 แบ่งตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (2532)

ได้กำหนดชนิดของถ่านกัมมันต์ไว้ 2 ชนิดคือ

- 1) ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (Powder Activated Carbon : PAC) เป็นถ่านที่มีขนาดปริมาณที่ร่อนผ่านตะแกรงขนาด 150 ไมโครเมตร ต้องไม่น้อยกว่าร้อยละ 99 โดยน้ำหนัก
- 2) ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (Granular Activated Carbon : GAC) เป็นถ่านที่มีขนาดปริมาณที่ผ่านตะแกรงขนาด 150 ไมโครเมตร ต้องไม่เกินร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

2.6.3.2 แบ่งตามชนิดของตัวกระตุ้น

- 1) การกระตุ้นทางเคมี (Chemical activated carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการใช้สารเคมีทำปฏิกิริยาเคมีกับผิวคาร์บอน มักเป็นพวกที่มีรูพรุนขนาดใหญ่
- 2) การกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activated carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการใช้ก๊าซออกซิไดซ์ มักเป็นพวกที่มีรูพรุนขนาดเล็ก

2.6.3.3 แบ่งตามชนิดของสารที่ถูกดูดติดผิว

- 1) สารสำหรับดูดซับก๊าซ (Gas adsorbent) คือ ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดติดผิวก๊าซพิษและไอสารอินทรีย์ มักใช้ถ่านจากการคาร์บอนไนซ์และความแข็ง (Hard artificial char) เป็นวัตถุดิบในการผลิต
- 2) สารสำหรับดูดซับสี (Color adsorbent) คือ ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการฟอกสี มักใช้ถ่านจากการคาร์บอนไนซ์และไม่แข็ง (Soft artificial char)

2.6.3.4 แบ่งตามความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์ที่ได้

- 1) ถ่านกัมมันต์ความหนาแน่นต่ำ ถ่านกัมมันต์ประเภทนี้มักใช้ในสถานะที่เป็นสารละลาย เช่น การฟอกสีน้ำตาลดิบ หรือการทำให้น้ำบริสุทธิ์ ฯลฯ
- 2) ถ่านกัมมันต์ความหนาแน่นสูง ถ่านกัมมันต์ประเภทนี้มักใช้ดูดก๊าซพิษหรือไอระเหย

2.6.4 การผลิตถ่านกัมมันต์

วัตถุดิบที่นำมาผลิตถ่านกัมมันต์ จะได้จากวัตถุดิบที่มีธาตุคาร์บอน (C) เป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ถ่านหิน, ไม้, เปลือกไม้, แกลบ, กะลามะพร้าว, ชังข้าวโพด, กากกาแฟ, ของเสียจากโรงงานเยื่อกระดาษ, ขี้เลื่อย (Hassler, 1967) ปัจจุบันกรรมวิธีผลิตถ่านกัมมันต์มีมากมายหลายวิธี ขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ที่ต้องการนำไปใช้งาน แหล่งวัตถุดิบ ชนิดของวัตถุดิบ ลักษณะและคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ต้องการ โดยทั่วไปกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ๆ 3 ขั้นตอน ดังนี้ คือ ขั้นตอนเตรียมวัตถุดิบ การเผาให้เป็นถ่าน หรือ คาร์บอนไนเซชัน (carbonization) และการกระตุ้น หรือ แอคติเวชัน (Activation) แสดงในรูปที่ 2.14



รูปที่ 2.14 ขั้นตอนการผลิตถ่านกัมมันต์

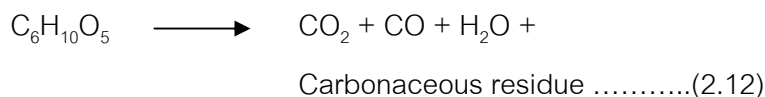
2.6.4.1 การเตรียมวัตถุดิบ

การผลิตถ่านกัมมันต์สามารถผลิตจากวัตถุดิบที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลัก หรือเริ่มจากวัตถุดิบที่เป็นถ่านแล้วก็ได้ โดยทั่วไปมักนำวัตถุดิบมาบดและคัดขนาดก่อนที่จะนำไปคาร์บอนไนซ์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการคาร์บอนไนซ์ หลังจากนั้นทำการอบหรือตากวัตถุดิบให้แห้ง หากวัตถุดิบที่มีความแข็งและเหนียวทำให้การบดวัตถุดิบโดยตรงทำได้ยาก ก็อาจนำวัตถุดิบนั้นไปคาร์บอนไนซ์ก่อน แล้วจึงนำมาบดคัดขนาด และหากวัตถุดิบที่มีลักษณะเป็นผง อาจนำมาทำให้เป็นเม็ดโดยใช้ตัวประสาน เช่น แป้ง น้ำมันเตา หรือทาร์ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการคาร์บอนไนเซชันแล้วนำไปอัดเป็นเม็ดก่อนที่คาร์บอนไนซ์เป็นขั้นตอนต่อไป ในการผลิตเพื่อการค้า สมบัติบางประการของวัตถุดิบที่สำคัญในการผลิตถ่านกัมมันต์ ดังนี้

- 1) มีค่าคาร์บอนคงตัว (fixed carbon) สูง
- 2) มีปริมาณความชื้น (moisture) ต่ำ
- 3) มีสารที่ระเหยได้ (volatile matter) ต่ำ
- 4) มีปริมาณขี้เถ้า (ash) ต่ำ
- 5) ไม่สลายตัวเมื่อเก็บ
- 6) สามารถใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพสูงได้

2.6.4.2 การเผาวัตถุดิบให้เป็นถ่านคาร์บอน หรือ การคาร์บอนไนเซชัน (Carbonization)

คาร์บอนไนเซชันเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ เพราะเป็นขั้นตอนเริ่มต้นของโครงสร้างที่เป็นรูพรุน เป็นขั้นตอนการเผาวัตถุดิบแบบไพโรไลซิส (pyrolysis) ซึ่งเป็นการเผาวัตถุดิบในระบบสภาวะอับอากาศหรือไร้ก๊าซออกซิเจน (O_2) โดยทั่วไปอุณหภูมิที่ใช้เผาในขั้นตอนนี้จะเผาที่ $200 - 500\text{ }^{\circ}\text{C}$ ซึ่งจะทำให้สารที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน และซัลเฟอร์ถูกไล่ออกมาในรูปก๊าซ ส่วนคาร์บอนที่มีอยู่ในรูปของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน จะรวมตัวกันเป็นผลึก (Microcrystalline) ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ในรูปของถ่านขนาดของผลึกจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการเผา ระยะเวลาในการเผาองค์ประกอบและโครงสร้างของวัตถุดิบ วัตถุดิบที่มีเซลลูโลส (Cellulose) เป็นองค์ประกอบ เช่น ไม้ ซังข้าวโพด ชานอ้อย แกลบ กะลามะพร้าว เป็นต้น เมื่อถูกเผาแบบไพโรไลซิส จะเกิดปฏิกิริยา ดังนี้



ถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอนไนเซชัน ควรจะมีลักษณะที่เป็นของแข็งสีดำตลอด (uniformly black) เมื่อหักดูส่วนที่หักจะมีผิวที่เป็นมันเงา (shiny surface) ปลายที่หักจะแหลมคม (sharp) และปราศจากผงฝุ่นและขี้เถ้า (no ash) อย่างไรก็ตาม ถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอนไนเซชันนี้ ยังมีความสามารถในการดูดซับต่ำ เพราะการเผาที่ใช้อุณหภูมิประมาณ 200 – 500 °C นั้น ยังคงมีน้ำมันดิน (tar) ตกค้างอยู่ในช่องว่าง (pore) หรือเกาะอยู่ตามผิวของถ่าน จึงจำเป็นต้องนำถ่านนี้ไปผ่านกระบวนการกระตุ้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดซับ

2.6.4.3 การกระตุ้น หรือการแอคทีเวชัน (Activation)

การกระตุ้น คือ การทำให้คาร์บอนหรือถ่านมีความสามารถในการดูดติดผิวสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องจากการเพิ่มพื้นที่ผิวและการทำให้ผิวมีความว่องไวมากขึ้น โดยการกำจัดน้ำมันดินให้หลุดออกมา จึงทำให้ผิวที่ได้มีอะตอมคาร์บอนอิสระอยู่ด้วย ทำให้ถ่านกัมมันต์ที่ได้มีความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น ซึ่งวัตถุประสงค์ของการกระตุ้นถ่านคาร์บอน เพื่อ

- เป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวที่ว่องไว (Active surface area) โดยเกิดปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้โมเลกุลบางกลุ่มหลุดออกไป และเกิดส่วนที่มีอำนาจดูดติดผิวขึ้นมาแทน

- เป็นการเพิ่มความว่องไวในการดูดติดผิวให้พื้นผิวที่มีอยู่แล้ว ซึ่งหมายถึง ทำให้อะตอมของคาร์บอนมีพลังงานศักย์สูงขึ้นโดยจัดเปลี่ยนโครงสร้างใหม่ให้มีความว่องไวในการดูดติดผิวสูงขึ้น

- เป็นการกำจัดอินทรีย์วัตถุหรืออนินทรีย์วัตถุต่างๆ ซึ่งเป็นสารปนเปื้อนออกจากบริเวณที่ทำหน้าที่ดูดติดผิว (Active centers)

การกระตุ้นถ่านกัมมันต์แบ่งตามกลไกวิธีการกระตุ้นที่ใช้ สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 วิธี ใหญ่ๆ คือ

1) วิธีการกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation)

วิธีการนี้เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยที่ผิวคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ มักใช้ไอน้ำ และก๊าซที่เป็นตัวออกซิไดซ์ (Oxidizing gas) เช่น ก๊าซ

คาร์บอนไดออกไซด์ หรือ อากาศ ไปทำการออกซิไดซ์น้ำมันดินและอะตอมของคาร์บอนบางตัวในโครงสร้างผลึกในสภาวะที่ควบคุม ทำให้เกิดการเรียงตัวใหม่ ซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการดูดติดผิวของถ่านให้สูงขึ้น เนื่องจากรูพรุนจะกว้างมากขึ้น ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ คือ ชนิดและปริมาณขององค์ประกอบที่มีอยู่ในวัตถุดิบ, คุณสมบัติทางเคมีและอัตราส่วนของก๊าซที่ใช้, อุณหภูมิขณะเกิดปฏิกิริยา และระยะเวลาของการเกิดปฏิกิริยา (Hassler, 1967) การกระตุ้นทางกายภาพมีทั้งข้อดีและข้อเสีย คือ

ข้อดี เมื่อกระตุ้นเสร็จแล้วสามารถนำไปใช้งานได้เลย
ไม่มีปัญหาในเรื่องการล้างสารตกค้างที่อาจเป็นอันตราย

ข้อเสีย ต้องใช้อุณหภูมิในการเผาสูง และรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ได้จะเล็กกว่าชนิดที่กระตุ้นด้วยวิธีทางเคมี รูพรุนมีขนาดประมาณ micropore ซึ่งเหมาะสำหรับดูดกลิ่น, ไอ หรือก๊าซพิษ

2) วิธีกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation)

เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยการเติมสารเคมีให้เป็นสารกระตุ้น (Activation agent) ผสมและคลุกเคล้าเข้ากับวัตถุดิบ และทำปฏิกิริยาเคมีกับผิวคาร์บอนของวัตถุดิบ สารเคมีที่นิยมนำมาใช้เป็นสารกระตุ้นแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 สารเคมีที่ใช้เป็นสารกระตุ้นในการกระตุ้นด้วยวิธีทางเคมี

กรดบอริก (H_3BO_3)	โพแตสเซียมไธโอไซยาเนต ($K_2S_2O_3$)
แคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$)	แมงกานีสคลอไรด์ ($MnCl_2$)
แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($Ca(OH)_2$)	แมงกานีสซัลเฟต ($MnSO_4$)
ไซยาไนด์ (CN)	กรดไนตริก (HNO_3)
ปูนโดโลไมต์ ($CaMg(CO_3)_2$)	โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
เฟอร์ริคคลอไรด์ ($FeCl_3$)	โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4)
กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4)	กรดซัลฟูริก (H_2SO_4)
โพแทสเซียมซัลไฟด์ (K_2S)	ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$)

ที่มา : Yehaskel (1978)

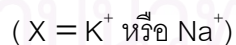
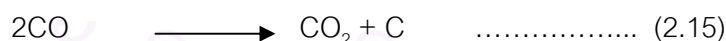
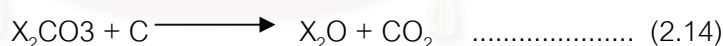
วิธีการกระตุ้นด้วยเคมีอาจทำได้ 2 แบบ คือ

แบบที่ 1 นำวัตถุดิบมาทำการเผาในที่อับอากาศให้เป็นถ่านก่อน แล้วจึงนำไปแช่หรือผสมกับสารเคมีที่ใช้กระตุ้น จากนั้นจึงทำการเผากระตุ้นแบบไพโรไลซิสอีกครั้ง

แบบที่ 2 นำวัตถุดิบแช่หรือผสมกับสารเคมีที่ใช้กระตุ้น แล้วจึงทำการเผากระตุ้นแบบไพโรไลซิส ควบคู่ไปกับการทำให้วัตถุดิบเป็นถ่านในขั้นตอนเดียว

สารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้น นิยมใช้สารประกอบของโพแทสเซียมและโซเดียม เช่น โพแทสเซียมคาร์บอเนต โพแทสเซียมซัลไฟด์ และ การกระตุ้นโดยใช้สารดูดน้ำ (Dehydrating agent) เช่น สารในกลุ่มเกลือโลหะคลอไรด์ เช่น แคลเซียมคลอไรด์ ซิงค์คลอไรด์ กรดฟอสฟอริก กรดซัลฟิวริก เป็นต้น

สารละลายที่มีโพแทสเซียมไอออน (K^+) หรือโซเดียมไอออน (Na^+) ซึ่งไอออนเหล่านี้จะแทรกเข้าไปอยู่ระหว่างชั้นของผลึกแกรไฟต์ เมื่ออุณหภูมิสูงกว่า $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ โมเลกุลของ H_2O และ CO_2 จะหลุดออกมา ทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ตามต้องการ จากการศึกษาพบว่า การใช้สารกระตุ้นที่เป็นสารประกอบโพแทสเซียมจะให้ถ่านกัมมันต์ที่มีคุณภาพดีกว่าการใช้สารประกอบโซเดียม ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์เป็นดังสมการ



ซิงค์คลอไรด์ก็เป็นสารเคมีที่นิยมใช้เป็นตัวกระตุ้นชนิดหนึ่ง อัตราส่วนที่ใช้คือ สารละลายซิงค์คลอไรด์เข้มข้นประมาณ 0.5 ถึง 4 ส่วน ต่อน้ำหนักของวัตถุดิบแห้ง 1 ส่วน บางครั้งอาจมีการเติมกรดเกลือ (HCl) หรือกรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) ลงไปเล็กน้อย จากนั้นนำไปเผาในที่อับอากาศในช่วงอุณหภูมิ $400 - 900\text{ }^{\circ}\text{C}$ นำถ่านกัมมันต์ที่ได้ไปล้างน้ำและกรดเกลือเจือจาง เพื่อเอาซิงค์คลอไรด์ที่เหลือออก (พงศศักดิ์ โอซารส, 2539) แล้วล้างด้วยสารละลายเบสเจือจางเพื่อปรับค่าพีเอชให้เหมาะสม จากนั้นล้างตามด้วยน้ำที่สะอาดจนค่าพีเอชคงที่

การกระตุ้นทางเคมีนี้มีทั้งข้อดีและข้อเสีย ดังนี้คือ

ข้อดี ใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าและผลผลิตที่ได้มากกว่าทางกายภาพ

ข้อเสีย ต้องล้างสารเคมีออกจากถ่านกัมมันต์ก่อนใช้งาน และอาจมีสารเคมีตกค้างได้ รวมทั้งเครื่องมือใช้ก็ต้องเป็นชนิดพิเศษที่สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ เพราะสารเคมีเหล่านี้เป็นสารกัดกร่อน แต่สำหรับเกลือแกง เป็นสารที่มีคุณสมบัติดูน้ำได้ดี มีราคาถูก หาซื้อได้ตามท้องตลาด และไม่ก่อให้เกิดมลพิษตกค้างหลังผ่านการกระตุ้น (ดำรง ชุมมงคล และอภิสิทธิ์ เจริญกุล, 2533)

2.6.5 การประเมินและการเลือกใช้ถ่าน

ในการนำถ่านกัมมันต์ไปใช้ในการบำบัดน้ำเสีย จำเป็นที่จะต้องมีการเลือกถ่านที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งานแต่ละประเภท โดยพิจารณาจากลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของถ่าน ลักษณะคุณสมบัติของน้ำเสียหรือน้ำทิ้ง ตลอดจนความสะดวกในการควบคุมระบบ

ลักษณะสมบัติของถ่านที่เป็นตัวกำหนดการใช้งาน ได้แก่

- 1) พื้นที่ผิว (Surface Area) เป็นตัวกำหนดความสามารถในการดูดติดผิว โดยถ่านที่มีพื้นที่ผิวมากจะมีความสามารถในการดูดติดผิวมาก
- 2) ความหนาแน่นปรากฏ (Apparent Density) เป็นตัวกำหนดความสามารถในการปรับคืนสภาพของถ่าน
- 3) ความหนาแน่นก้อน (Bulk Density) เป็นตัวกำหนดปริมาณของถ่านในแต่ละการใช้งาน
- 4) ขนาดใช้งาน (Effective Size), เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย (Mean Particle diameter) และสัมประสิทธิ์ของความเสมอกัน (Uniformity Coefficient) เป็นตัวกำหนดภาวะทางชลศาสตร์ (Hydraulic Conditions) ของถังดูดติดผิว (Adsorption Column)
- 5) ปริมาตรรูพรุน (Pore Volume) เป็นตัวกำหนดการดูดติดผิวโมเลกุลของน้ำเสีย
- 6) การวิเคราะห์ขนาดโดยใช้ตะแกรงร่อน (Sieve Analysis) เป็นตัวตรวจสอบ Plant – Handling Effect ของถ่าน
- 7) แอบริชัน นัมเบอร์ (Abrasion Number) ใช้ในการประเมินความคงทนต่อการขัดสี
- 8) ปริมาณร้อยละของเถ้า (% Ash) แสดงถึงกากของถ่าน

- 9) ความชื้น (Moisture) แสดงปริมาณน้ำในถ่านจากการผลิต
- 10) ไอโอดีนัมเบอร์ (Iodine Number) เป็นตัวกำหนดความสามารถของถ่านในการดูดติดสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ
- 11) โมลาสซัมเบอร์ (Molass Number) เป็นตัวกำหนดความสามารถของถ่านในการดูดติดสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง
- 12) ขนาดของรูพรุน (Pore Size) เป็นตัวกำหนดความสามารถในการดูดติดผิวโมเลกุลจำเพาะบางชนิด

2.6.6 การปรับคืนสภาพของถ่านกัมมันต์ (Carbon regenerate)

เมื่อถ่านกัมมันต์ผ่านการใช้งานเป็นเวลานานๆ บริเวณพื้นผิวและรูพรุนของเม็ดถ่านจะดูดซับสารและสิ่งสกปรกต่างๆ จนกระทั่งถ่านกัมมันต์หมดประสิทธิภาพ แต่เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีราคาค่อนข้างสูง ดังนั้นเพื่อจะลดภาระค่าใช้จ่ายจึงนำถ่านกัมมันต์ที่หมดประสิทธิภาพ มาฟื้นฟูคุณภาพเพื่อนำกลับไปใช้งานอีก การฟื้นฟูคุณภาพทำได้โดยการนำถ่านไปกำจัดโมเลกุลของสิ่งสกปรกที่อุดอยู่ในรูของถ่านกัมมันต์อาจทำได้หลายวิธี ทั้งวิธีทางกายภาพและวิธีทางเคมี คือ

- 1) การใช้ความร้อนในการฟื้นฟูสภาพ (Thermal regeneration) วิธีนี้เป็นที่นิยมใช้กันมาก ทำได้โดยนำถ่านกัมมันต์ที่หมดสภาพและแยกน้ำออกแล้วส่งเข้าเตาเผาแบบ Multiple heat หรือ Rotary kiln ทำการเผาที่อุณหภูมิ 870 – 980 °C ในช่วงการเผาใหม่นี้โมเลกุลของสิ่งสกปรกที่เป็นสารอินทรีย์ในรูพรุนและพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ จะระเหยเป็นไอและถูกเผาไหม้สลายตัวไป ในขั้นตอนนี้จะต้องควบคุมปริมาณออกซิเจนให้พอเหมาะที่จะทำลายโมเลกุลของสารอินทรีย์ แต่ไม่ทำลายเนื้อถ่านกัมมันต์ หลังจากนั้นนำถ่านที่กำลังร้อนอยู่นั้นไปทำให้เย็นอย่างรวดเร็วโดยการจุ่มลงในน้ำ (Quenching) นำไปล้างแยกเศษผงถ่านกัมมันต์ออกแล้วจึงนำไปใช้งาน

- 2) การใช้ไอน้ำในการฟื้นฟูสภาพ (Steam regeneration) วิธีนี้มักนิยมใช้กับตัวดูดติดผิวที่ระเหยเป็นไอได้ง่าย

- 3) การใช้สารเคมีในการฟื้นฟูสภาพ (Chemical regeneration) วิธีนี้นิยมใช้กับตัวดูดติดผิวที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้

- ใช้สารละลายกรดในการฟื้นฟู (Acid regeneration) วิธีนี้นิยมใช้กับตัวดูดติดผิวหรือสภาวะที่ใช้ในการดูดติดผิวเป็นต่าง

- ใช้สารละลายต่างในการฟื้นฟู (Alkaline regeneration) วิธีนี้ นิยมใช้กับตัวถูกดูดติดผิวหรือสภาวะที่ใช้ในการดูดติดผิวที่เป็นกรด
- ใช้ตัวทำละลายอินทรีย์ในการฟื้นฟู (Organic solvent regeneration) วิธีนี้มักนิยมใช้กับตัวถูกดูดติดผิวที่เป็นสารอินทรีย์

2.7 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับโลหะหนัก

สารโลหะหนักเป็นสารพิษที่เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิต อาจเกิดจากธรรมชาติหรือจากโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งมนุษย์ก็ยังใช้ประโยชน์จากสารพิษกลุ่มนี้อยู่หลายอย่างทั้งในอุตสาหกรรม และในชีวิตประจำวัน อาจแบ่งสารโลหะที่เป็นพิษเป็น 3 กลุ่มใหญ่ตามความเป็นพิษของมันต่อร่างกาย (ไมตรี สุทธิจิตต์, 2534)

- 1) สารโลหะที่ทำให้เกิดโรคเกี่ยวข้องกับระบบการหายใจส่วนใหญ่เป็นอนุภาคที่แขวนลอยในอากาศ ได้แก่ เหล็ก ทังสแตน ไนโอเบียม
- 2) สารโลหะที่ทำให้เกิดโรคเกี่ยวกับอวัยวะภายใน ตับ ไต และหัวใจ ธาตุโลหะที่เป็นพิษ ได้แก่ โครเมียม, แมงกานีส, โมลิบดีนัม, วาเนเดียม, นิกเกิล, โคบอลต์, ทองแดง, เงิน และแคดเมียม
- 3) สารโลหะที่เป็นพิษร้ายแรงจนเกินความสามารถที่จะรักษาให้หายได้ยาก ได้แก่ ปรอท, ตะกั่ว, แมงกานีส, สารหนู และพลวง สารพิษในกลุ่มนี้อาจเป็นพิษต่อระบบประสาท และระบบสมองส่วนกลาง

2.7.1 โครเมียม (Chromium ; Cr)

โครเมียม เป็นโลหะหนักซึ่งมีน้ำหนักอะตอมเท่ากับ 52.01 เป็นสมาชิกของหมู่ธาตุ VI B หรือ กลุ่ม Transitional elements มีวาเลนซ์เท่ากับ 3 และ 6

2.7.1.1 แหล่งเกิดในสิ่งแวดล้อม

โลหะโครเมียมถูกใช้งานมาในการชุบเคลือบโลหะเพื่อกันสนิม และให้เป็นเงางาม ใช้ใส่ในโลหะผสมทั้งหลาย โดยเฉพาะในเหล็กกล้า สารประกอบโครเมต (chromate) ถูกใช้ในอุตสาหกรรมฟอกหนัง สารจำพวกไดโครเมต (dichromate) เป็นส่วนประกอบของสีย้อมวัสดุต่างๆ และผสมในน้ำกรดแบตเตอรี่ สังกะสีโครเมตใช้เป็นสีรองพื้นก่อนเคลือบด้วยสีอย่างอื่น Cr_2O_3 และกรดโครมิกมีฤทธิ์กัดเนื้อเยื่อ จึงใช้เป็นยากัดหูดและยาทาภายนอกในร่างกาย

ในการชุบโลหะด้วยโครเมียม จะชุบโลหะที่ต้องการชุบลงในสารละลายของกรดโครมิก แล้วผ่านกระแสไฟตรงลงไปบนอิเล็กโทรด ขบวนการชุบโครเมียมนี้จะมีความร้อน ทำให้เกิดละอองเล็กๆ ของกรดโครมิกเดือดกระจายขึ้นมาในอากาศเหนือถังชุบนั้นเสมอ จึงทำให้บุคคลผู้มีอาชีพเกี่ยวกับอุตสาหกรรมชุบโครเมียมได้รับสารโครเมียมสะสมทางปอดเป็นประจำ และเกิดล้มป่วยในเวลาต่อมา

2.7.1.2 ความเป็นพิษของโครเมียม

กรดโครมิก หรือสารโครเมต ทำลายเนื้อเยื่อเฉพาะแห่ง โดยการทำลายสภาพธรรมชาติของโปรตีน ทำให้กลายเป็นแผลพุพองตามผิวหนัง ซึ่งเรียกว่า “chromic holes” ทำให้โพรงจมูก (nasal septum) บวม ทำให้มีการระคายเคืองของตาและทางเดินลมหายใจ ถ้าได้รับสารประกอบโครเมตเข้าไปตลอดเวลาทางปาก จะทำให้ปวดท้อง ภาวะลำไส้เป็นแผลอักเสบ มีอาการอ่อนเพลียและปวดตามข้อ มีตับอักเสบซึ่งอาจร่วมกับดีซ่านได้ สารโครเมตเป็นทั้งสารก่อการกลายพันธุ์และสารก่อมะเร็ง เนื่องจากโครเมตรบกวนการสังเคราะห์ DNA ในเซลล์โครเมียม (VI) เป็นอันตรายต่อเนื้อเยื่อและไต การสูดดมไอกรดโครมิกจะเป็นอันตรายต่อระบบทางเดินหายใจ

2.7.2 นิกเกิล (Nickel ; Ni)

นิกเกิลเป็นโลหะที่มีน้ำหนักอะตอมเท่ากับ 58.71 อยู่ในกลุ่มธาตุ VIII B ในตารางธาตุ มีวาเลนซ์เท่ากับ 2 ธาตุนิกเกิลไม่มีอยู่อย่างอิสระในสิ่งแวดล้อมทั่วไป แต่อาจพบในโรงงานถลุงแร่ นิกเกิล โลหะนิกเกิลใช้ทำเป็นโลหะผสม ผงโลหะนิกเกิลใช้เป็นตัวคะตะลิสต์ในการเติมไฮโดรเจน (hydrogenation) ของน้ำมันพืช เพื่อทำเนยเทียม สารนิกเกิลคาร์บอนิล ($\text{Ni}(\text{CO})_4$) เป็นของเหลวที่ไม่มีสี เกิดขึ้นในขบวนการทำโลหะนิกเกิลให้บริสุทธิ์ สารนี้จะเหยไได้ง่าย เป็นพิษมาเท่ากับพิษของไซยาไนด์ มีพิษร้ายแรงกว่า CO 5 – 10 เท่า พบนิกเกิลคาร์บอนิลในควันบุหรี่ เมื่อหายใจเข้าไปในปอดจะแตกตัวให้ก๊าซ CO และโลหะนิกเกิลซึ่งอาจทำให้เกิดมะเร็งของทางเดินหายใจทั้งในคนและสัตว์ เนื่องจากนิกเกิลคาร์บอนิลจะไปทำลายการสังเคราะห์ DNA ทำให้เซลล์ตายและมีแผลอักเสบ อาการเริ่มแรกที่เกิดจากพิษนิกเกิล คือ การปวดศีรษะส่วนหน้า ง่วงนอน บางทีมีอาการคลื่นไส้และอาเจียน มีอาการปวดหลัง ตัวเขียว ปวดร้าวที่หน้าอก ไอ หายใจไม่สะดวกอ่อนเพลีย ปวดท้องและท้องร่วง เป็นต้น

2.8 การกำจัดน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโลหะ

การตกตะกอนเป็นวิธีที่ใช้ขจัดโลหะออกจากน้ำทิ้ง โดยการเติมปูนขาวหรือต่างถึงระดับ pH ที่ไปตกตะกอนเป็นไฮดรอกไซด์ของโลหะ แต่อย่างไรก็ตาม ไฮดรอกไซด์ของโลหะหลายตัวมีความเป็นแอมโฟเทอริก และแสดงการละลายต่ำสุด โลหะโครเมียมมีการละลายต่ำสุดที่ pH 7.5 และการละลายเพิ่มขึ้นอย่างมากที่ pH สูงกว่านี้ การตกตะกอนสามารถลดปริมาณโลหะลงได้ถึงระดับ 1 – 2 มิลลิกรัมต่อลิตร การกรองจะช่วยลดความเข้มข้นลงได้อีกถึงระดับ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร หรือต่ำกว่านี้ สำหรับน้ำทิ้งของโครเมียม (+6) จะต้องรีดิวซ์เป็นโครเมียม (+3) ก่อนในสารละลายที่เป็นกรดและจึงตกตะกอนด้วยปูนขาว

ปัจจุบันมีการกำจัดน้ำทิ้งจากโรงงานชุบโครเมียมที่ใช้กันมีหลายวิธี เช่น วิธีการกำจัดน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม และวิธีการกำจัดน้ำทิ้งของสถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมเครื่องจักรกลและโลหะการ

วิธีการกำจัดน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม เป็นวิธีที่เรียกว่า Batch Process คือ การขจัดเป็นครั้งๆ ไม่ต่อเนื่อง เหมาะสำหรับโรงงานชุบโลหะขนาดเล็ก และขนาดกลาง ซึ่งมีการเติมสารเคมี และปรับ pH หลายขั้นตอน ดังนี้

- 1) ปรับค่า pH = 2.5 ด้วยกรดกำมะถัน
- 2) เติมเฟอร์รัสซัลเฟต และกวน 30 นาที
- 3) ปรับค่า pH = 8.5 ด้วยปูนขาว
- 4) กวน 30 นาที ในระหว่างนี้ถ้ามีนิเกิล ทองแดง หรือสังกะสี ละลายอยู่ก็จะถูกทำ

ปฏิกิริยาให้สามารถตกตะกอนได้

- 5) ปล่อยให้ตกตะกอน 4 ชั่วโมง
- 6) ปล่อยน้ำใส (Effluent) ข้างบนทิ้ง
- 7) ปล่อยให้ตะกอนเหลว ลงสู่ถังกรองตะกอน (Sand Drying Bed) ส่วนที่เป็นตะกอนจะถูกกรองติดอยู่บนทราย และจะแห้งไปในที่สุด และส่วนที่เป็นน้ำจะไหลผ่านชั้นทราย หิน-อิฐ และไหลไปสู่ถังเก็บน้ำเสีย

วิธีการกำจัดน้ำทิ้งของสถาบันพัฒนาอุตสาหกรรมเครื่องจักรกลและโลหะการ (MIDI) สถาบันได้ออกแบบกระบวนการกำจัดน้ำทิ้งตามความเหมาะสมของสถาบัน เนื่องจากโรงงานชุบโลหะด้วยไฟฟ้าของสถาบันเป็นแบบผสมผสาน มีการชุบหลายชนิด เช่น การชุบทองแดง – นิเกิล –

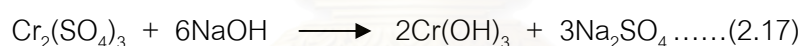
โครเมียม การชุบสังกะสี การชุบฮาร์ดโครม การอะโนไดซ์ และการกัดล้างโลหะ เป็นต้น น้ำเสียที่มาจากระบบบำบัดน้ำเสียจึงมีหลายประเภทด้วยกัน แยกได้ดังนี้

- 1) น้ำเสียที่มีไซยาไนด์
- 2) น้ำเสียที่มีกรดโครมิก
- 3) น้ำเสียที่มีกรดและต่างชนิดต่างๆ

ระบบกำจัดน้ำเสียของสถาบันจึงมีขนาดใหญ่ เป็นแบบผสมที่ใช้สารเคมีเป็นตัวทำปฏิกิริยา มีประสิทธิภาพของการทำงานโดยกำจัดน้ำเสียที่มีไซยาไนด์ และกรดโครมิกได้ในอัตราส่วน 1.0 ลูกบาศก์เมตรต่อชั่วโมง กำจัดน้ำเสียที่มีกรดและต่างชนิดต่างๆ ได้ในอัตราส่วน 2.0 ลูกบาศก์ต่อชั่วโมง โครเมียมในน้ำเสียจากโรงงานชุบโลหะ เป็นกรดโครมิก จากน้ำยาชุบโครเมียมหรือเป็นโซเดียมไดโครเมต ในการชุบสังกะสี ทำการเปลี่ยนโครเมียม (+6) ให้เป็นโครเมียม (+3) ที่ตกตะกอนได้ โดยปรับ pH เป็น 2 และเติมโซเดียมไบซัลไฟท์ (NaHSO₃)



เติมโซเดียมไฮดรอกไซด์เพื่อปรับ pH ให้อยู่ในช่วง 8 – 9 และตกตะกอนเป็นไฮดรอกไซด์



ซึ่งทั้งสองวิธี มีหลักการกำจัดโครเมียมคล้ายกัน

2.9 คุณสมบัติของน้ำเสียโรงงานชุบโครเมียมแห่งหนึ่งในพื้นที่จังหวัดอุดรธานี

เป็นโรงงานชุบโครเมียม ที่มีการชุบนิเกิลก่อนเป็นการรองพื้น แล้วค่อยชุบโครเมียมอีกที ซึ่งได้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งมาวิเคราะห์ในเบื้องต้นพบว่ามีความเข้มข้นของโครเมียม เท่ากับ 3.754 มิลลิกรัมต่อลิตร และนิเกิลเท่ากับ 0.978 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอช เท่ากับ 9.14

2.10 เกลือ

เกลือ (salt) มีคุณสมบัติเด่นคือมีรสเค็ม มีชื่อทางแร่วิทยาว่า "เฮไลต์" และมีองค์ประกอบทางเคมีคือ โซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ประกอบด้วย คลอรีน (Chlorine) ร้อยละ 60.7 และ โซเดียม (Sodium) ร้อยละ 39.3 เกลือมีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 58.4 มีรูปผลึกแบบสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ใสไม่

มีสีเมื่อบริสุทธิ์ แต่เมื่อมีการปนเปื้อนจะมีสีขาว สีเทา สีน้ำตาล และสีส้ม มีความถ่วงจำเพาะ 2.165 ค่าดัชนีหักเหแสง 1.5442 ความแข็งตาม Moh's Scale 2.5 มีจุดหลอมตัวที่ 800.8 องศาเซลเซียส และน้ำเกลือจะเปลี่ยนเป็นน้ำแข็งที่อุณหภูมิ 21.12 องศาเซลเซียส เกลือเป็นสารอาหาร ตัวปรุงรส สารถนอมอาหารป้องกันน้ำแข็งจับถนน และเป็นสารตั้งต้นของอุตสาหกรรมเคมีการผลิตเกลือของโลกในแต่ละปีสูงถึงประมาณ 200 ล้านตัน โดยมีสหรัฐอเมริกาผลิตมากที่สุด รองมาคือ จีน เยอรมันนี และแคนาดา ซึ่งแต่ละประเทศผลิตมากกว่า 10 ล้านตัน ประมาณ 1 ใน 4 ของเกลือที่ผลิตได้มาจากน้ำทะเล ส่วนที่เหลือผลิตจากชั้นแร่เกลือหินโดยตรง หรือทำเหมืองละลาย โดยนำเกลือไปใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้แก่

- 1) อุตสาหกรรมอาหาร ทั้งในรูปแบบของการปรุงรส ถนอมอาหารและเพิ่มธาตุอาหาร
- 2) ผลิตภัณฑ์อื่น ที่ใช้ในการทำสารโพลีเมอร์สำหรับการทำพลาสติกใยสังเคราะห์ และใยสังเคราะห์
- 3) โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Caustic Soda) ใช้ในอุตสาหกรรมแก้ว เส้นใยไนลอน ใยสังเคราะห์ พลาสติก ทำสบู่ ผงซักฟอก
- 4) ใช้ในการกลั่นน้ำมัน ทำยาฆ่าแมลง ผงซักฟอก น้ำยาล้างห้องน้ำน้ำฆ่าเชื้อโรค ผลิตน้ำประปา ปรับสภาพน้ำ และน้ำเสีย
- 5) ผลิตภัณฑ์เกลือ เพื่อใช้ในการทำยางสังเคราะห์ ทำความสะอาดแก้ว และบ่อน้ำมัน
- 6) ใช้เกลือละลายน้ำแข็งบนถนน ในประเทศที่มีหิมะตกใช้เกลือเป็นจำนวนมากสำหรับละลายน้ำแข็งบนผิวทางหลวงกันถนนลื่น โดยเฉพาะอย่างยิ่งแคนาดา ซึ่งใช้เกลือถึงปีละประมาณ 10 ล้านตัน สำหรับกิจกรรมนี้
- 7) โซเดียมคลอไรด์ เพื่อใช้ในการหล่อเย็น ส่งถ่ายความร้อนโดยเฉพาะในเตาปฏิกรณ์
- 8) โซเดียมคลอไรด์ ใช้ทำโลหะทองเหลือง โลหะผสม ผสมสีย้อมผ้า และโซเดียมไฮดรอกไซด์
- 9) โซเดียมซัลเฟต เพื่อให้ทำกระดาษ เยื่อไม้ สีย้อมผ้า เคลือบเซรามิกซ์
- 10) โซเดียมคาร์บอเนต ใช้ในอุตสาหกรรมแก้ว กระดาษเยื่อไม้ ใยสังเคราะห์
- 11) โซเดียมโบรไมด์ ใช้ในอุตสาหกรรมทอผ้า เครื่องหนังทำแก้ว และปุ๋ย
- 12) โซเดียมไนเตรต ทำปุ๋ยและวัตถุระเบิด
- 13) โซเดียมผลิตพลังงานโดยตรง เนื่องจากในชั้นเกลือหินบริเวณที่มีโดมเกลือจะมีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณอื่น สามารถพัฒนานำเอาความร้อนนี้มาใช้เป็นแหล่งพลังงานโดยตรงหรือผลิตกระแสไฟฟ้าได้
- 14) โซเดียมผลิตพลังงาน โดยกระบวนการ Molten Salt Solar Energy Production ที่ปัจจุบันมีการดำเนินการอยู่ในรัฐแคลิฟอร์เนียตอนใต้ นอกจากนี้ยังใช้ลานตากเกลือเป็นแหล่งสะสมความร้อนจากแสงอาทิตย์ เพื่อนำมาใช้เป็นพลังงาน

2.11 ไม้ยูคาลิปตัส

ชื่อวิทยาศาสตร์ *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh.

ชื่อวงศ์ Myrtaceae

ชื่อสามัญ ยูคาลิปตัส

ชื่อทางการค้า Red gum

2.11.1 ลักษณะทั่วไป

เป็นไม้ยืนต้นขนาดกลาง-ใหญ่ สูง 24-30 ม. และอาจสูงได้ถึง 50 ม. ไม้ผลัดใบ เป็นพันธุ์ไม้โตเร็ว ถ้าปลูกในประเทศไทยจะมีรูปทรงสูงเพรียว ลำต้นเปล่าตรงมีกิ่งก้านน้อย

- รูปทรง (เรือนยอด) เป็นรูปทรงกรวยสูง (ปลูกในประเทศไทย)
- ใบ เดี่ยว เรียงเวียนสลับ ใบรูปหอกหรือรูปขอบขนานแกมหอก
- ดอก มีขนาดเล็ก ออกตามง่ามใบใกล้ปลายกิ่ง เป็นช่อขนาดเล็กสีขาว ออก

ดอก เกือบตลอดปี

- ผล เป็นแบบแห้งแข็งแล้วแตกอ้า มีขนาดเล็ก ภายในมีเมล็ดขนาดเล็กมาก (น้อยกว่า 1 มม.)

2.11.2 การกระจายพันธุ์ตามธรรมชาติ

ยูคาลิปตัสเป็นพันธุ์ไม้ต่างประเทศ มีถิ่นกำเนิดอยู่ในทวีปออสเตรเลียเป็นส่วน ใหญ่ สามารถเจริญเติบโตได้ในทุกสภาพดิน ตั้งแต่ดินทราย ดินเค็ม ดินเปรี้ยว แต่ไม่ทนดินที่มี หินปูนสูง ทนต่อความแห้งแล้งได้ดี

2.11.3 การขยายพันธุ์และการเพาะปลูก

การขยายพันธุ์และการผลิตกล้า การเพาะเมล็ดโดยทั่วไปเมล็ดยูคาลิปตัส 1 กก. มีเมล็ดประมาณ 100,00-200,000 เมล็ด ปัจจัยสิ่งแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการปลูก

- ดิน ทุกชนิดที่มีการระบายน้ำดี ยกเว้นดินที่มีหินปูนหรือเป็นต่งสูง
- ความชื้น ต้องการมาก-น้อย

2.11.4 ประโยชน์

1) การใช้ประโยชน์ทางด้านเนื้อไม้ เนื้อไม้มีแก่นสีน้ำตาลแดงจนถึงน้ำตาลแดง กระพี้สีน้ำตาลอ่อน เนื้อไม้แข็งแต่จะแตกง่ายหลังจากตัดฟันแต่ถ้าทำถูกวิธีก็สามารถนำมาใช้ก่อสร้างทำเครื่องเรือนได้ นำมาเผาถ่านซึ่งให้ความร้อนใกล้เคียงกับไม้โกงกาง ผลิตเยื่อกระดาษ (ไม้อายุ 3-6 ปี) หรือนำไปทำไม้อัด (ไม้อายุ 6-10 ปี)

2) การใช้ประโยชน์ทางด้านนิเวศน์ ในปัจจุบันยูคาลิปตัสนิยมนำมาปลูกเป็นป่าอนุรักษ์เนื่องจากปลูกง่ายโตเร็วและทนต่อสภาพแวดล้อมได้หลากหลาย ช่วยทำให้พื้นที่แห้งแล้งมีความชุ่มชื้นขึ้น

3) การใช้ประโยชน์ทางด้านโภชนาการ พื้นที่สวนป่ายูคาลิปตัสมักจะมีเห็ดยูคาลิปตัส เวลาหลังฝนตกซึ่งสามารถนำมารับประทานได้

2.12 ไม้กระถินเทพา

ชื่อวิทยาศาสตร์ *Acacia mangium Willd.*

ชื่อวงศ์ Leguminosae - Mimosoideae

ชื่อสามัญ Kra thin te pha (ไทย), Sabah salwood, Tongke hutan หรือ mangge hutan (อินโดนีเซีย)

ชื่อทางการค้า Brown salwood (ชื่อทางการค้าของออสเตรเลีย)

2.12.1 การกระจายพันธุ์ตามธรรมชาติ

กระถินเทพาเป็นพันธุ์ไม้ต่างประเทศ มีถิ่นกำเนิดในรัฐควีนส์แลนด์ ประเทศออสเตรเลีย หมู่เกาะโมล็ดคาส ประเทศอินโดนีเซีย และแถบตะวันตกเฉียงใต้ของประเทศปาปัวนิวกินี โดยพบขึ้นอยู่ทั่วไปในเขตติดต่อระหว่างป่าชายเลนและแนวป่าไม้พุ่มเตี้ย ตลอดจนป่าตามริมฝั่งแม่น้ำและทุ่งหญ้าต่าง ๆ ไม่พบขึ้นในป่าดิบชื้นที่มีไม้ใหญ่ขึ้นหนาแน่น แต่มีขึ้นบ้างตามแนวชายป่าที่มีแสงแดดส่องถึง กระถินเทพาจัดเป็นไม้บุกเบิกชนิดหนึ่ง ที่สามารถปรับตัวเจริญเติบโตได้ดีในพื้นที่ซึ่งสภาพแวดล้อมถูกทำลาย ดังนั้นจึงมีการนำไปปลูกเป็นสวนป่าในหลายประเทศ เช่น

มาเลเซีย ปาปัวนิวกินี เนปาล ฟิลิปปินส์ บังคลาเทศ เป็นต้น สำหรับประเทศไทยเริ่มมีการนำเข้ามาปลูกในปี พ.ศ. 2523 เนื่องจากกระถินเทพามีคุณสมบัติที่เหมาะสมดังนี้ คือ

- 1) เป็นไม้โตเร็ว มีอัตราการเจริญเติบโตดีกว่าไม้ซ้อและยูคาลิปตัส ซึ่งไม้ทั้งสองชนิดนี้จัดเป็นไม้โตเร็วมากที่สุดจำพวกหนึ่งที่เขตร้อนชื้น
- 2) สามารถเจริญเติบโตได้ดีกว่าไม้อื่น ๆ ในสภาพดินไม่ค่อยอุดมสมบูรณ์ เช่น ดินลูกรัง ดินซึ่งผ่านการทำไร่เลื่อนลอย และดินตามบริเวณพื้นที่ลาดชัน เป็นต้น
- 3) ขึ้นได้ในสภาพดินที่มีความเป็นกรดสูง (pH 4.2) ซึ่งนับว่าเป็นคุณสมบัติที่ดีมากประการหนึ่ง ทั้งนี้เนื่องจากสภาพดินส่วนใหญ่ในภูมิภาคเขตร้อนซึ่งรวมทั้งประเทศไทยด้วย มักจะมีสภาพความเป็นกรดอยู่โดยทั่วไป
- 4) ลำตัวตรง ปราศจากกิ่งก้าน
- 5) เป็นพืชบำรุงดิน เนื่องจากมีเชื้อแบคทีเรียสกุลไรโซเบียมอาศัยอยู่ที่ปมราก ช่วยตรึงธาตุไนโตรเจนจากอากาศในดินมาใช้ให้เกิดประโยชน์ เช่นเดียวกับพืชตระกูลถั่วอื่น ๆ หลายชนิด

2.12.2 ลักษณะทั่วไป

1) ลำต้น กระถินเทพาเป็นไม้ที่มีลักษณะลำต้นตรงและไม่ค่อยแตกกิ่งแขนง กล่าวคือ มีช่วงของลำต้นที่ปราศจากกิ่งก้านเกือบครึ่งหนึ่งของความสูงทั้งหมด ทั้งนี้เนื่องจากกระถินเทพามีลักษณะพิเศษ คือ รีดกิ่งได้เองตามธรรมชาติ โดยกิ่งส่วนล่างจะทยอยแห้งตายไปตั้งแต่อายุน้อย ทรวงพุ่มของต้นกระถินเทพาจะเปลี่ยนแปลงไปตามสภาพแวดล้อมโดยจะมีพุ่มกว้าง ถ้าปลูกห่างหรือขึ้นอยู่ในบริเวณที่โล่ง และจะสูงโปร่งถ้าปลูกชิดกันในสภาพของสวนป่า ลำต้นเมื่ออายุมากจะมีเปลือกแข็งหนา ขรุขระและแตกเป็นร่องตามยาว

2) ใบ ในระยะที่เป็นต้นอ่อน กระถินเทพาจะมีใบจริงประเภทใบรวม ซึ่งประกอบด้วยใบย่อยหลาย ๆ ใบคล้ายกับใบของกระถิน แต่เมื่อมีอายุได้ 2-3 สัปดาห์ ต้นกระถินเทพาจะสร้างใบเทียมที่มีลักษณะเป็นใบเดี่ยวมีเส้นใบแบบขนานขึ้นมาแทนใบจริง โดยใบเทียมดังกล่าวนี้เป็นส่วนของก้านใบและแกนกลางของใบรวมที่ขยายตัวแผ่กว้างออกไป จนมีลักษณะคล้ายแผ่นใบของพืชทั่วไป

3) ดอก มีลักษณะเป็นช่อคล้ายหางกระรอก ซึ่งประกอบด้วยดอกย่อยขนาดเล็กสีขาวหรือสีครีม โดยทั่วไปกระถินเทพาจะมีการผสมข้าม แต่ในบางครั้งก็สามารถผสมตนเองได้เช่นเดียวกัน

2.13 เอกสารที่เกี่ยวข้อง

วิจิตร จินดาพันธ์ไพโรจน์ (2543) ได้ศึกษาการผลิตถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. ด้วยวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ โดยนำส่วนที่เป็นเศษเหลือทิ้งมาใช้ การศึกษาในงานวิจัยนี้ ทำการเปรียบเทียบคุณภาพของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส อายุ 4 ปี และอายุ 5 ปี ซึ่งในขั้นตอนแรก เป็นขั้นตอนการคาร์บอนไนซ์ ศึกษาถึงผลของอุณหภูมิและเวลา พบว่า ภาวะที่เหมาะสมในการคาร์บอนไนซ์ของไม้ทั้งสองชนิด อยู่ที่ภาวะเดียวกัน คือ ที่อุณหภูมิ 450 องศาเซลเซียส เวลา 45 นาที ขั้นตอนที่สองเป็นการกระตุ้นถ่านชาร์ โดยศึกษาถึงผลของอุณหภูมิ เวลา ขนาดอนุภาค และชนิดของแก๊สในการกระตุ้น ภาวะที่เหมาะสมในการกระตุ้นของถ่านชาร์จากไม้ยูคาลิปตัส อายุ 4 ปีและอายุ 5 ปี อยู่ที่สภาวะเดียวกัน คือ ที่อุณหภูมิ 900 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 150 นาที ขนาดอนุภาค 0.3 – 0.6 มิลลิเมตร และใช้ไอน้ำเป็นสารกระตุ้นสมบัติของถ่านที่ได้คือ ค่าความหนาแน่นเชิงปริมาตร 0.1809 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ร้อยละปริมาณเถ้า 6.37 ร้อยละผลิตภัณฑ์ 33.14 ค่าการดูดซับไอโอดีน 1233 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการดูดซับเมทิลีนบลู 242 มิลลิกรัมต่อกรัม พื้นที่ผิวแบบแลงมัวร์ (S Langmuir) 1497.32 ตารางเมตรต่อกรัม พื้นที่ผิวแบบบีอีที (S BET) 1076.15 ตารางเมตรต่อกรัม

สุজনีย์ คู่ยเสงี่ยม (2544) ได้ทำการศึกษาการกำจัดตะกั่วและปรอทจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มและกะลามะพร้าว ซึ่งการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วและปรอทจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลาปาล์มและกะลามะพร้าวโดยใช้โซเดียมคลอไรด์เป็นตัวกระตุ้นกับถ่านกัมมันต์ที่จำหน่ายตามท้องตลาดทั่วไป ผลการทดลองพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าว มีค่าไอโอดีน 532.29 มิลลิกรัมต่อกรัม พื้นที่ผิว 492.4200 ตารางเมตรต่อกรัม การทดสอบไอโซเทอมของการดูดติดผิวแบบพุนดลิชโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ พบว่าสามารถดูดซับตะกั่วและปรอทได้ 8.37 และ 5.52 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วนการทดสอบการดูดซับโดยใช้ถังดูดซับแบบแท่งดูดซับน้ำทิ้งจากโรงงานสิ่งทอ สามารถดูดซับตะกั่วได้ 2.45, 2.57, 2.69 และ 2.81 มิลลิกรัม/กรัม และดูดซับปรอทได้ 2.21, 2.45, 2.45 และ 2.70 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่ระดับความสูง 30, 60, 90 และ 120 เซนติเมตร ที่ความเข้มข้นของตะกั่วและปรอทเริ่มต้น 9.824 และ 9.830 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ส่วนถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลาปาล์ม มีค่าไอโอดีน เท่ากับ 486.45

มิลลิลิตรต่อกรัม มีพื้นที่ผิว 385.9073 ตารางเมตรต่อกรัม การทดสอบไอโซเทอมของการดูดติดผิวแบบพรุนดิลิชโดยใช้ น้ำเสียสังเคราะห์ พบว่า สามารถดูดซับตะกั่วและปรอทได้ 2.53 และ 1.63 มิลลิลิตรต่อกรัม ซึ่งแสดงว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าวมีคุณสมบัติดีกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่จำหน่ายตามท้องตลาดทั่วไป ผลการทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบพรุนดิลิชพบว่า สามารถดูดซับตะกั่วและปรอทได้ 50.18 และ 19.95 มิลลิลิตรต่อกรัม การทดสอบการดูดซับโดยใช้ถังดูดซับแบบแท่งดูดซับน้ำทิ้งจากโรงงานสิ่งทอ สามารถดูดซับตะกั่วได้ 3.83, 3.83, 3.75 และ 3.88 มิลลิลิตรต่อกรัม และดูดซับปรอทได้ 3.61, 3.83, 3.61 และ 3.72 มิลลิลิตรต่อกรัม ที่ระดับความสูง 30, 60, 90 และ 120 เซนติเมตร ที่ความเข้มข้นของตะกั่วและปรอทเริ่มต้น 9.853 และ 9.865 มิลลิลิตรต่อลิตร ตามลำดับ

ลลิตา นิตศนาจารุกุล (2544) ได้ทำการศึกษาการกำจัดน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการดูดติดผิว โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร คือเปลือกทุเรียนและเปลือกเม็ดมะม่วงหิมพานต์ ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมีโดยใช้เกลือแกง (NaCl) การทดลองแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ขั้นแรกเป็นการเตรียมถ่านกัมมันต์ ขั้นตอนที่สองคือการทดสอบแบบไม่ต่อเนื่องหรือแบบแบตช์และขั้นตอนสุดท้ายคือการทดลองแบบต่อเนื่องโดยใช้ถังดูดติดผิวแบบแท่ง ในขั้นตอนแรกพบว่า อุณหภูมิที่เหมาะสมที่ใช้ในการเผาวัตถุดิบให้เป็นถ่านพร้อมกับการกระตุ้นคือ 800 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยน้ำหนักของวัตถุดิบต่อเกลือแกงที่เหมาะสม ที่ทำให้ได้ค่าไอโอดีนนัมเบอร์สูงสุดคือ 1:0 โดยถ่านเปลือกทุเรียน และถ่านเปลือกเม็ดมะม่วงหิมพานต์ จะมีค่าไอโอดีนนัมเบอร์สูงสุดเท่ากับ 567 และ 532 มิลลิลิตรของไอโอดีนนัมเบอร์ต่อกรัมของถ่านกัมมันต์ตามลำดับ การดูดติดผิวตะกั่วจะเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชของน้ำเสียเพิ่มขึ้น ตั้งแต่พีเอช 2 ถึงพีเอช 9 และที่พีเอชของน้ำเสียเริ่มต้นตั้งแต่ 4 ขึ้นไป พบว่าถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ชนิดมีประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วจากน้ำเสียสูงกว่า 90% และการทดลองแบบต่อเนื่องได้เลือกใช้ถ่านเปลือกทุเรียนบรรจุในชุดถังดูดติดผิวแบบแท่ง เมื่อทำการป้อนน้ำเสียแบบไหลลงอย่างต่อเนื่อง และทำการเก็บน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดทางปลายท่อ จนกระทั่งถ่านหมดประสิทธิภาพในการดูดติดผิว พบว่า ถ่านเปลือกทุเรียนที่ขึ้นความสูง 30, 60, 90 และ 120 เซนติเมตร สามารถบำบัดน้ำเสียได้ 94.01 , 58.85 , 50.98 และ 47.06 BV ตามลำดับ จากการศึกษาเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรพบว่า ถ่านเปลือกทุเรียนมีศักยภาพที่จะพัฒนาไปใช้งานได้ทั้งในระดับครัวเรือนและระดับอุตสาหกรรม

พงษ์ศักดิ์ โอซารส (2539) ศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตถ่านกัมมันต์จากขังข้าวโพดโดยใช้เกลือแกงเป็นตัวกระตุ้น ทำการทดลองโดยการเผาขังข้าวโพดและทำการกระตุ้นด้วยเกลือ

แกงให้เป็นถ่านกัมมันต์ไปพร้อมๆ กัน กำหนดตัวแปรในการทดลอง 3 ตัวแปร คือ อัตราส่วนของ
 โดยน้ำหนักของซังข้าวโพดต่อเกลือแกง อุณหภูมิ และระยะเวลาในการเผาโดยใช้ค่าไอโอดีนนม
 เบอร์เป็นตัวชี้วัดคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ จากการทดลองพบว่าสภาวะที่ใช้ในการผลิตถ่านกัม
 มนต์จากซังข้าวโพดโดยใช้เกลือแกงเป็นตัวกระตุ้นที่เหมาะสมที่สุดคือ ใช้อัตราส่วนซังข้าวโพดต่อ
 เกลือแกงเท่ากับ 1:2 อุณหภูมิในการเผา 800 องศาเซลเซียส เวลาเผานาน 60 นาที ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่
 ได้จากการเผาในสภาวะนี้มีลักษณะทางกายภาพใกล้เคียงกับข้อกำหนดของมาตรฐาน
 ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม (มอก.900-2532) คือ มีค่าไอโอดีนนมเบอร์ 621.37 มิลลิกรัมต่อกรัม
 ความชื้นร้อยละ 3.38 และความแข็งร้อยละ 68

พงศธร ไคว์ชชาภรณ์ (2538) ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากซังข้าวโพดรวมทั้งศึกษา
 คุณสมบัติและการใช้งานของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้โดยใช้วิธีกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ พบว่าซัง
 ข้าวโพดสามารถที่จะเปลี่ยนเป็นถ่านกัมมันต์ได้ คุณสมบัติของถ่านที่ทำการสังเคราะห์ คือ ค่า
 ไอโอดีน ค่าการฟอกสีเมธิลีนบลู ความชื้น ปริมาณร้อยละของผลผลิต พื้นที่ผิว จากการทดลอง
 พบว่า ซังข้าวโพดสามารถที่จะเปลี่ยนเป็นถ่านกัมมันต์ได้เมื่อถูกกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ที่อัตราส่วน
 1:2 อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เวลาการเผา 3 ชั่วโมง มีปริมาณร้อยละของผลผลิตคือ 62.82 ค่า
 ไอโอดีน 800-900 มิลลิกรัมต่อกรัม ค่าการฟอกสีเมธิลีนบลู 120-180 มิลลิกรัมต่อกรัม พื้นที่ผิว
 1,000 ตารางเมตรต่อกรัม ประสิทธิภาพการฟอกสีปานกลาง

Kadirvelu , Thamaraiselvi and Namasivayam (2001) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพ
 การดูดติดผิวโลหะหนักจากน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรม ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากมะพร้าว
 โดยใช้วิธีการกระตุ้นทางเคมี พบว่าประสิทธิภาพการดูดติดผิวจะเพิ่มขึ้นจากพีเอช 2 ถึง 6 และจะ
 คงที่จนถึงพีเอช 10 และจากการทดลองพบว่า ประสิทธิภาพของการดูดติดผิว ขึ้นอยู่กับ
 องค์ประกอบของโลหะหนัก และค่าพีเอชโดยสามารถกำจัดได้สูงสุดดังนี้ Cu(II) ได้ 73 % , Hg(II),
 Pb(II), และ Cd(II) ได้ 100 % และ Ni(II) ได้ 92 % สำหรับค่าพีเอชที่เหมาะสมในการกำจัดโลหะ
 หนัก Cu(II), Pb(II), Ni(II), Hg(II) และ Cd(II) เท่ากับ 5.0 , 4.0 , 3.5 และ 4.0 ตามลำดับ

บทที่ 3

แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย

การทดลองวิจัยครั้งนี้ ดำเนินการที่ห้องปฏิบัติการวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม อาคารศูนย์วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเพื่อการวิจัยและพัฒนาท้องถิ่น มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี โดยมีแผนการดำเนินงานดังต่อไปนี้

3.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.1.1 อุปกรณ์สำหรับเตรียมถ่านกัมมันต์

- เต้าเผา : CARBOLITE CWF 1200
- ตู้อบความร้อน : MEMMERT 600
- เครื่องบดละเอียด : JANKE & KUNKEL ; IKA – Labortech nik
- ชุดกรองสูญญากาศ
- ภาชนะดินเผา พร้อมฝาปิด
- ตะแกรงคัดขนาดเบอร์ 8, 30, และ 325 เมช

3.1.2 อุปกรณ์สำหรับใช้ทดลองในห้องปฏิบัติการ

- เครื่องเขย่า (shaker)
- เครื่องวัดความเป็นกรด – ด่าง : CONSORT C833
- เครื่องชั่งแบบละเอียด 4 ตำแหน่ง : METTLER TOLEDO DRAGON 204
- กระดาษกรอง Whatman No. 42
- โถดูดความชื้น
- เครื่องแก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการอื่นๆ

3.1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณโครเมียมและนิกเกิล

- เครื่องอะตอมมิคแอบซอร์ปชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ชนิดฟิล์ม : PERKIN ELMER ; Atomic Absorption Spectrophotometer 3110
- เครื่องอะตอมมิคแอบซอร์ปชันสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ชนิดกราฟไฟท์ : Varian SpectrAA – 640z

3.1.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์

- Scanning Electron Microscope (SEM) : JEOL ; JSM-6400 SCANNING MICROSCOPE
- เครื่องวัดพื้นที่ผิว : Surface Area Analyzer ; Thermofinnigan Sorptomatic 1990

3.1.5 อุปกรณ์สำหรับใช้ในการทดลองแบบต่อเนื่อง (Column test)

- ถังดูดซับแบบแท่ง (adsorption column) : ใช้ท่ออะคริลิค (Acrylic) ไส่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.9 เซนติเมตร ความสูง 150 เซนติเมตร จำนวน 2 อัน
- ถังพลาสติกเก็บน้ำเสีย
- ป้อนน้ำและสายยาง

3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

การศึกษาแบ่งเป็น 4 ขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกเป็นการเตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสและไม้กระถินเทพา โดยเผาให้เป็นถ่านไม้และกระตุ้นด้วยโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ตัวแปรที่ทำการศึกษา คือ อุณหภูมิที่ใช้ในการเผากระตุ้น และอัตราส่วนโดยน้ำหนักของไม้ยูคาลิปตัสและไม้กระถินเทพา ต่อโซเดียมคลอไรด์ที่ใช้ในการกระตุ้น และเลือกค่าไอโอดีนนัมเบอร์สูงสุดไปใช้ในการทดลองขั้นต่อไป ขั้นตอนที่ 2 เป็นการศึกษาลักษณะทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ ได้แก่ ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ พื้นที่ผิว ปริมาตรโพรง ขนาดโพรงเฉลี่ย ขนาดประสิทธิผล และสัมประสิทธิ์ความคงตัว ขั้นตอนที่ 3 เป็นการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิวโครเมียม และนิเกิล จากน้ำเสียสังเคราะห์ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ ได้แก่ pH ความเข้มข้นที่เหมาะสม และทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช (Freundlich isotherm) โดยทำการทดลองแบบแบทช์ (batch process) และขั้นตอนที่ 4 เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียม และนิเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ โดยทำการทดลองแบบต่อเนื่องในถังดูดซับแบบแท่ง (adsorption column) ด้วยอัตราไหลของน้ำเสีย 3 ลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

3.2.1 การเตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสและไม้กระถินเทพาโดยการกระตุ้นด้วยโซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

1) นำวัตถุดิบ คือ ไม้ยูคาลิปตัส และไม้กระถินเทพา มาตัดให้เป็นชิ้นเล็กๆ ขนาดประมาณ 0.5 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วล้างด้วยน้ำสะอาดหลายๆ ครั้ง เพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่ติดอยู่ที่ผิวของวัตถุดิบ หลังจากนั้นให้นำไปตากแดดให้แห้ง และเผาให้เป็นถ่านไม้ เเผาที่อุณหภูมิ 300 – 500 องศาเซลเซียส และเวลา 20, 30, 60, 90, 120 และ 180 นาที แล้วเลือกถ่านไม้ที่มีผลผลิตมากที่สุดเป็นตัวทดสอบต่อไป

2) นำถ่านไม้ยูคาลิปตัส และถ่านไม้กระถินเทพา มาแช่ในสารละลายอิ่มตัวของเกลือแกง (NaCl) 24 ชั่วโมง

3) กรองไม้ยูคาลิปตัส และไม้กระถินเทพา จากข้อ 2) โดยใช้ตะแกรงกรอง แล้วนำไปผึ่งลมให้แห้ง

4) ทำการเผาในหม้อดินที่มีฝาปิด เพื่อเลือกอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาที่เหมาะสม โดยเผาที่อุณหภูมิ 400, 500, 600, 700 และ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ได้อุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผากระตุ้น

5) นำวัตถุดิบที่ได้จากข้อ 1.4 เข้าสู่กระบวนการคาร์บอนไนเซชัน และการกระตุ้น โดยการเผาที่อุณหภูมิ ที่ได้จากข้อ 5) เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทั้งไม้ยูคาลิปตัส และไม้กระถินเทพา ทำการเผาที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของวัตถุดิบต่อเกลือแกงเท่ากับ 1:0, 1:1, 1:2, 1:3 และ 1:4 การเผา จะทำการเผาในหม้อดินเผาที่ปิดฝา

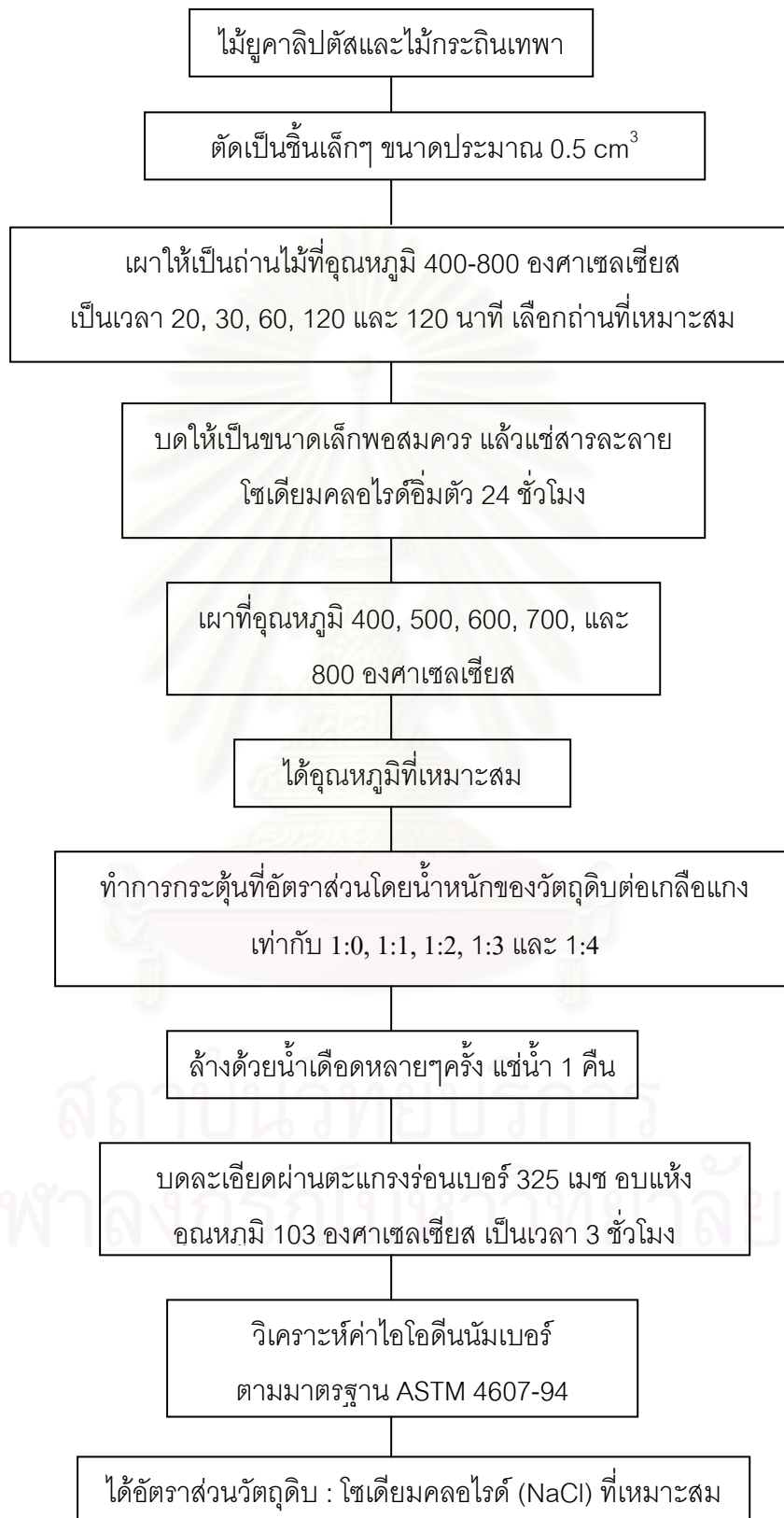
6) หลังจากการเผา นำถ่านกัมมันต์ที่ได้มาล้างด้วยน้ำเดือดหลายๆ ครั้ง และแช่น้ำค้างคืนไว้ 1 คืน เพื่อล้างเกลือแกงที่เหลือจากการเผาและติดค้างอยู่บนวัตถุดิบจนหมด โดยสามารถดูได้จากการวัด pH ของน้ำล้างถ่าน ซึ่งมีค่าคงที่จากการวัดในน้ำล้างหลายๆ ครั้ง แล้วผึ่งลมให้แห้ง

7) นำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มาบดให้ละเอียดผ่านตะแกรงเบอร์ 325 เมช

8) นำถ่านกัมมันต์ที่บดละเอียดไปอบที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วนำกลับไปไว้ในโถดูดความชื้น (desiccator)

9) นำถ่านที่อบแห้งแล้วไปวิเคราะห์หาค่าไอโอดีน ตามวิธีการของ American Society for Testing and Material (Standard Test Method for Determination of Iodine Number of Activated carbon, ASTM D 4607 - 94) เพื่อหาอัตราส่วนของวัตถุดิบต่อเกลือแกงที่เหมาะสมต่อไป นอกจากนี้จะทำการหาค่าไอโอดีนของไม้ยูคาลิปตัส และไม้กระถินเทพา ที่ยังไม่ได้ทำการกระตุ้น เพื่อเปรียบเทียบ

ขั้นตอนการเตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสและไม้กระถินเทพาโดยการ
กระตุ้นด้วยโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) แสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการเตรียมถ่านและการคัดเลือกถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสม

3.2.2 ศึกษาคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้

1) การทดสอบหาค่าพื้นที่ผิว, ปริมาตรโพรง และขนาดโพรงเฉลี่ย โดยนำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้และคัดเลือกที่เหมาะสมที่สุดแล้วจากข้อ 3.2.1 ไปทดสอบหาค่าพื้นที่ผิว, ปริมาตรโพรง และขนาดโพรงเฉลี่ย โดยใช้เครื่อง Specific Surface Area Analyzer ด้วยวิธี BET (Brunauer – Emmett – Teller) โดยการวัดปริมาณก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดเก็บไว้โดยถ่านกัมมันต์

2) การทดสอบหาค่าขนาดประสิทธิผล และสัมประสิทธิ์ความคงตัว โดยนำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ร่อนผ่านชุดตะแกรงมาตรฐานเบอร์ต่างๆ (sieve analysis) วัดน้ำหนักถ่านที่ค้างอยู่ตะแกรงแต่ละเบอร์ แล้วนำค่าที่ได้มาพล็อตกราฟ Log – probability เพื่อหาค่าขนาดประสิทธิผลและสัมประสิทธิ์ความคงตัว

ขั้นตอนการศึกษาคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ แสดงในรูปที่ 3.2



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการศึกษาคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์

3.2.3 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิวโครเมียมและนิกเกิล

การทดสอบไอโซเทอมการดูดติดแบบฟรอนดลิช ตามมาตรฐาน ASTM D 3860 – 89a จะทำการทดลองแบบแบทช์ โดยน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งมีความเข้มข้นของโครเมียม และนิกเกิล ต่างๆ กัน โดยนำน้ำเสียสังเคราะห์ปริมาณ 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดแล้วจึงนำถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิด ที่ปริมาณต่างๆ กัน ใส่ลงไปจากนั้นนำไปใส่เครื่องเขย่า (Shaker) ทำการเขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 120 นาที ทิ้งให้ถ่านจมตัว จากนั้นนำไปกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 5 เพื่อแยกถ่านออกและนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียม และนิกเกิล โดยการทดลองที่พีเอช 2 – 9 และทำการทดลองที่อุณหภูมิห้องโดยมีขั้นตอน ดังต่อไปนี้

1) นำถ่านกัมมันต์ 3 ชนิด คือ ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากไม้ยูคาลิปตัส ไม้กระถิน เทพา และถ่านกัมมันต์ Calgon filtrasorb 300 นำมาบดให้ละเอียดและร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 เมช และอบแห้งที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วนำไปเก็บไว้ใน ถังดูดความชื้น (desiccator)

2) นำน้ำเสียสังเคราะห์ที่เตรียมจาก $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3$ และ $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$ ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ที่ปรับค่าพีเอชให้เท่ากับ 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 และ 9 จากนั้นนำไปใส่เครื่องเขย่า (Shaker) ทำการเขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 120 นาที ทิ้งให้ถ่านจมตัว จากนั้นนำไปกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 5 เพื่อแยกถ่านออกและนำไป วิเคราะห์หาปริมาณโครเมียม และนิกเกิล ได้ร้อยละของการตกตะกอน

3) นำน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ของโครเมียมและนิกเกิล ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ที่ปรับค่าพีเอชให้เท่ากับ 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 และ 9 เติมผงถ่านกัมมันต์ 0.2 กรัม จากนั้นนำไปใส่เครื่องเขย่า (Shaker) ทำการเขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็น เวลา 120 นาที ทิ้งให้ถ่านจมตัว จากนั้นนำไปกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 5 เพื่อแยกถ่านออก และนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียม และนิกเกิล ได้พีเอชที่เหมาะสม

4) ความเข้มข้นของโครเมียม และนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ จะทำการทดลองที่ ความเข้มข้นต่างๆ กัน 3 ค่า คือ

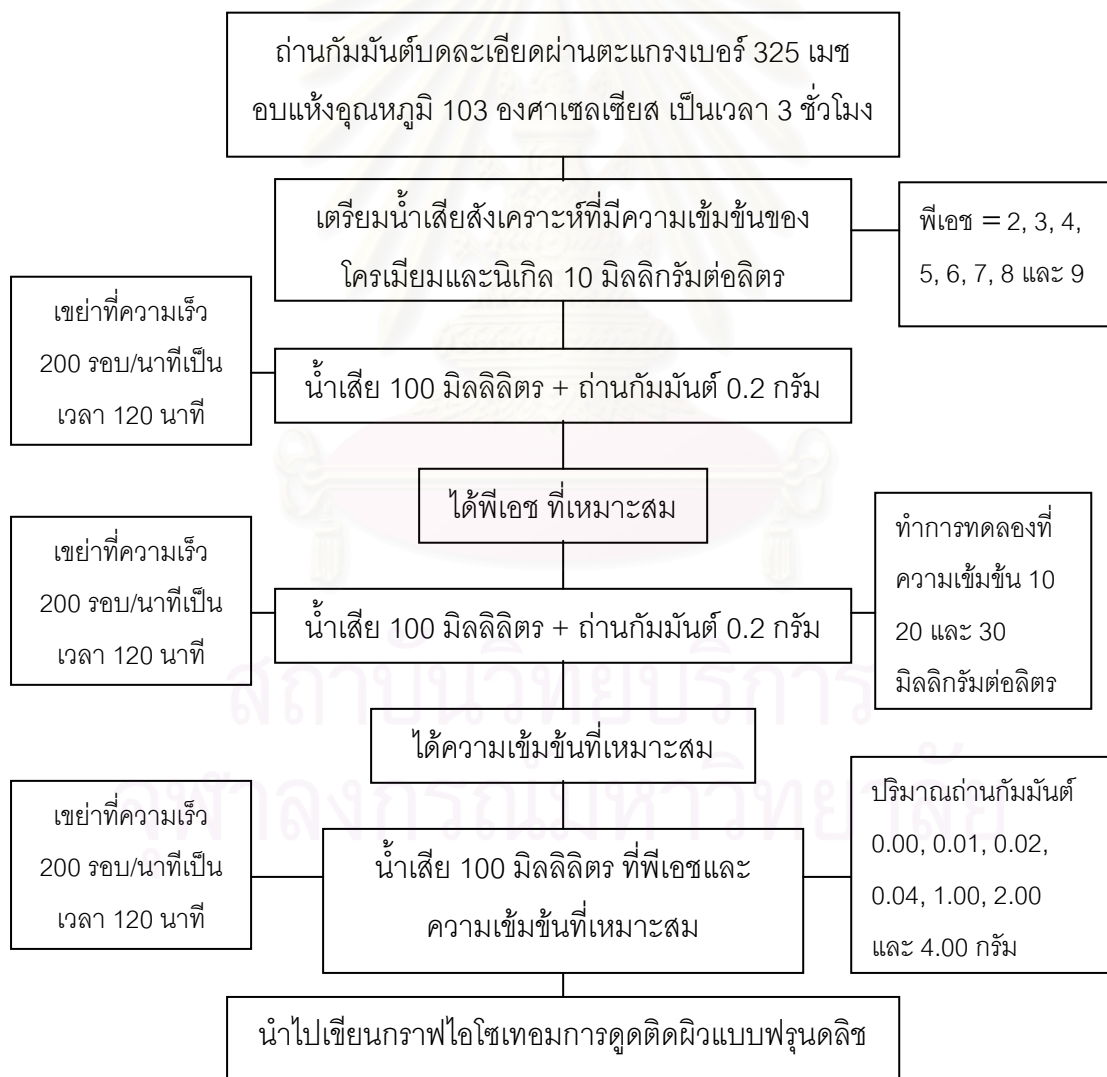
- ความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ เท่ากับ 10 20 30 mg/L
- ความเข้มข้นของนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ เท่ากับ 10 20 30 mg/L

นำน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้นต่างๆ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ที่ได้ค่าพีเอชที่ เหมาะสม เติมผงถ่านกัมมันต์ 0.2 กรัม จากนั้นนำไปใส่เครื่องเขย่า (Shaker) ทำการเขย่าด้วย ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 120 นาที ทิ้งให้ถ่านจมตัว จากนั้นนำไปกรองผ่านกระดาษ

กรองเบอร์ 5 เพื่อแยกถ่านออกและนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียมและนิเกิล ได้ความเข้มข้นที่เหมาะสม

5) อิทธิพลของปริมาณถ่านกัมมันต์ นำน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้นและพีเอชที่เหมาะสม ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมผงถ่านกัมมันต์ 10 ค่า คือ 0, 0.01, 0.02, 0.04, 0.10, 0.20, 0.40, 1.00, 2.00 และ 4.00 กรัม ลงในขวดแต่ละใบ ตามลำดับ นำขวดไปเขย่าบนเครื่องเขย่า เป็นเวลา 120 นาที ทิ้งให้ถ่านจมตัว จากนั้นนำไปกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 5 เพื่อแยกถ่านออกและนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียมและนิเกิล แล้วนำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช

ขั้นตอนการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิวโครเมียมและนิเกิล แสดงในรูปที่ 3.3

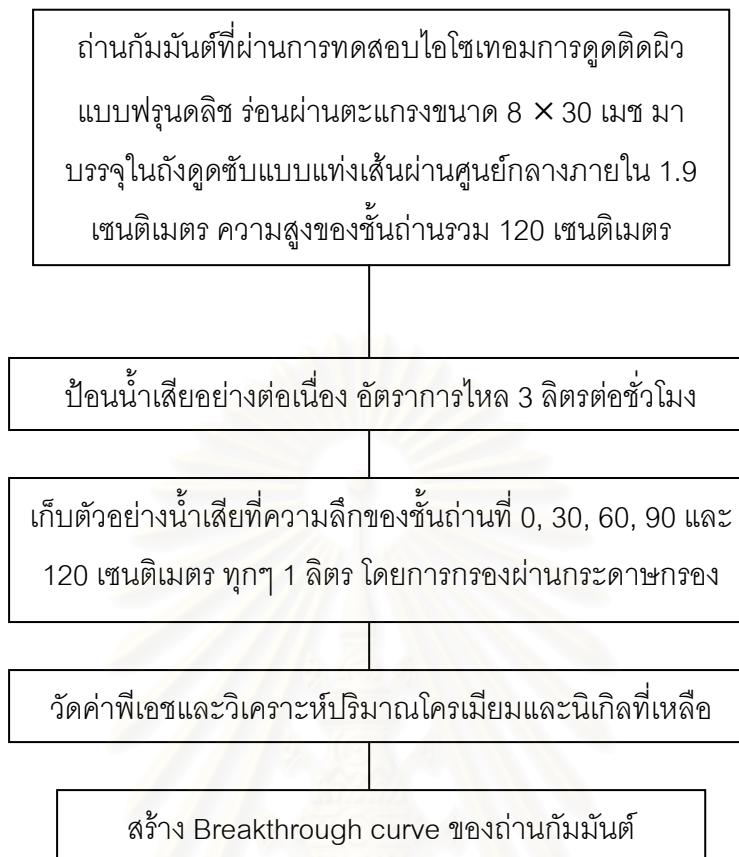


รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิวโครเมียม และนิเกิล

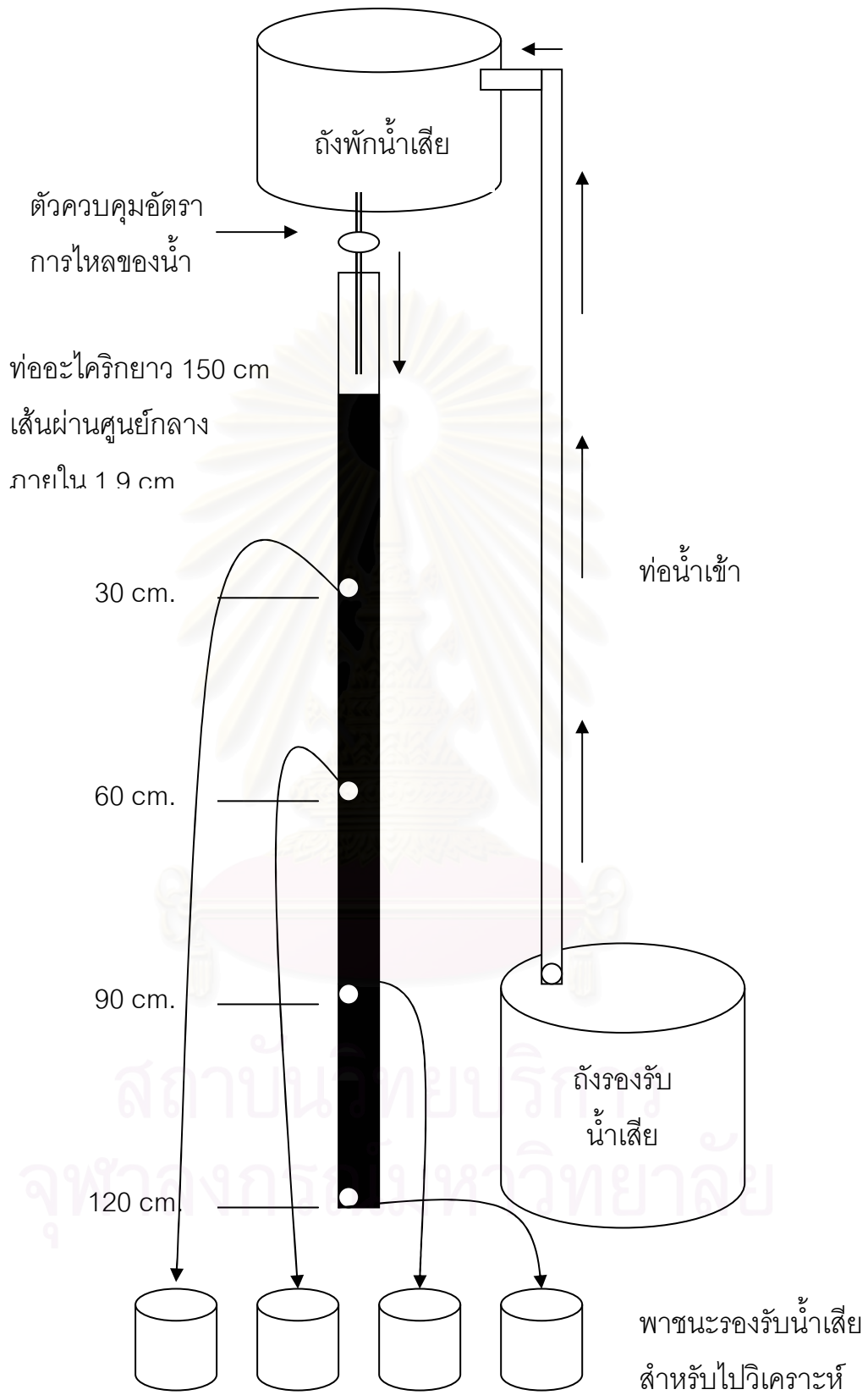
3.2.4 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมและนิเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้การทดลองแบบต่อเนื่อง (Column test)

การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมและนิเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้การทดลองแบบต่อเนื่อง (column test) โดยนำถ่านกัมมันต์ที่มีประสิทธิภาพการดูดติดผิวสูงสุดจากผลการทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบพุนดลิตมาบรรจุในถังดูดติดผิวแบบแบ่งดังต่อไปนี้

- 1) นำถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมสำหรับการดูดติดผิวโครเมียมและนิเกิลมาทำการคัดขนาดในช่วง 8×30 เมช ซึ่งจะมีขนาดระหว่าง 0.59 – 2.38 มิลลิเมตร บรรจุในถังดูดซับแบบแบ่งที่เป็นท่ออะคริลิกแบบใส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.9 เซนติเมตร และมีการเจาะรูเพื่อเก็บตัวอย่างน้ำเสียระดับความลึกของชั้นถ่านกัมมันต์ที่ 0, 30, 60, 90 และ 120 เซนติเมตร ดังรูปที่ 3.5 บันทึกน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ที่ใช้บรรจุในคอลัมน์สูง 120 เซนติเมตร
- 2) ป้อนน้ำสะอาดผ่านคอลัมน์เพื่อไล่ฟองอากาศในถังดูดซับและทิ้งไว้เป็นเวลา 1 วัน
- 3) เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีโครเมียมและนิเกิล ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และปรับพีเอชที่เหมาะสมจากข้อ 3.2.3
- 4) ป้อนน้ำเสียโครเมียมและนิเกิลที่เตรียมได้จากข้อ 3) เข้าสู่คอลัมน์ โดยการปล่อยให้ไหลจากด้านบนลงด้านล่าง โดยมีตัวควบคุมอัตราการไหลของน้ำให้คงที่ 3 ลิตรต่อชั่วโมงหรือตามความเหมาะสมที่ทำให้น้ำเสียไหลอย่างต่อเนื่องโดยไม่ล้นถังดูดซับ
- 5) เก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ความลึกของชั้นถ่านที่ 0, 30, 60, 90 และ 120 เซนติเมตร ทุกๆ 1 ลิตร โดยการกรองผ่านกระดาษกรอง
- 6) นำน้ำเสียที่ได้มาวัดค่าพีเอชและวิเคราะห์ปริมาณโครเมียมและนิเกิลที่เหลือ
- 7) คำนวณชั้นความลึกของถ่านที่เหมาะสม แล้วสร้าง Breakthrough curve ของถ่านกัมมันต์ ตามขั้นตอนการทดลอง แสดงในรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียม และนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้การทดลองแบบต่อเนื่อง (Column test)



รูปที่ 3.5 ระบบถังดูดติดผิวแบบแท่งที่ใช้ในการทดลอง

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

4.1 การเตรียมถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสและไม้กระถินเทพา

4.1.1 ผลของอุณหภูมิและเวลาในการเผาต่อร้อยละผลผลิตของถ่านไม้ยูคาลิปตัสและไม้กระถินเทพา

ผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 4.1 ถึง 4.2

ตารางที่ 4.1 ค่าร้อยละผลผลิตของถ่านไม้ยูคาลิปตัสที่เผาที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

อุณหภูมิที่ใช้ในการเผา (องศาเซลเซียส)	เวลาที่ใช้ในการเผา (นาที)	นน.ก่อนเผา (กรัม)	นน.หลังเผา (กรัม)	ผลผลิต (%)	เฉลี่ย (%)	หมายเหตุ
300	120	26.85	15.98	59.52	59.01	
	120	26.85	15.71	58.51		
	180	26.85	11.82	44.02	44.28	
	180	26.85	11.96	44.54		
400	30	26.85	11.75	43.76	44.36	
	30	26.85	12.07	44.95		
	60	26.85	9.15	34.08	33.78	
	60	26.85	8.99	33.48		
	90	26.85	8.71	32.44	31.45	
	90	26.85	8.18	30.47		
500	20	26.85	9.63	35.87	34.47	* ถ่านยัง ไหม้ไม่หมด
	20	26.85	8.88	33.07		
	30	26.85	8.68	32.33	31.79	
	30	26.85	8.39	31.25		

จากตารางที่ 4.1 คุณหมุมิและเวลาที่ใช้ในการทดลองเผาไม้ยูคาลิปตัสนั้นจะอยู่ในช่วง คุณหมุมิ 300 – 500 องศาเซลเซียส และช่วงเวลา 20 – 180 นาที ผลผลิตมีค่าสูงสุดถึงร้อยละ 59.01 ในการเผาที่คุณหมุมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที และผลผลิตที่มีค่าต่ำสุดเพียง ร้อยละ 31.45 ในการเผาที่คุณหมุมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที

ตารางที่ 4.2 ค่าร้อยละผลผลิตของถ่านไม้กระถินเทพาที่เผาที่คุณหมุมิและเวลาต่างๆ

คุณหมุมิที่ใช้ในการเผา (องศาเซลเซียส)	เวลาที่ใช้ในการ เผา (นาที)	นน.ก่อนเผา (กรัม)	นน.หลังเผา (กรัม)	ผลผลิต (%)	เฉลี่ย (%)	หมายเหตุ
300	120	26.85	16.25	60.52	60.91	
	120	26.85	16.46	61.30		
	180	26.85	12.02	44.77	44.69	
	180	26.85	11.98	44.62		
400	30	26.85	11.49	42.79	42.46	
	30	26.85	11.31	42.12		
	60	26.85	9.45	35.20	35.40	
	60	26.85	9.56	35.61		
	90	26.85	9.71	36.16	35.42	
	90	26.85	9.31	34.67		
500	20	26.85	11.46	42.68	43.22	* ถ่านยังไหม้ไม่หมด
	20	26.85	11.75	43.76		
	30	26.85	8.68	32.33	31.79	
	30	26.85	8.39	31.25		

จากตารางที่ 4.2 คุณหมุมิและเวลาที่ใช้ในการทดลองเผาไม้กระถินเทพานั้นจะ อยู่ในช่วงคุณหมุมิ 300 – 500 องศาเซลเซียส และช่วงเวลา 20 – 180 นาที ผลผลิตมีค่าสูงสุดถึง ร้อยละ 60.91 ในการเผาที่คุณหมุมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที และผลผลิตที่มีค่า ต่ำสุดเพียงร้อยละ 31.79 ในการเผาที่คุณหมุมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

จากผลของอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเผา ร้อยละผลผลิตทั้งของถ่านไม้ยูคาลิปตัสและ กระถินเทพาที่ได้ พบว่า ผลผลิตของถ่านที่ได้เมื่อเทียบกับวัตถุดิบจะลดลง เมื่ออุณหภูมิและเวลาที่ใช้ ในการเผาสูงขึ้น เนื่องจากในวัตถุดิบนอกจากจะมีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักแล้ว ยังมี สารประกอบอื่นๆ อีกมากมาย เช่น เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน สารที่สามารถสกัดได้ (Extractives) เช่น เทอร์พีน (terpenes), แทนนิน (tannins), กรดไขมัน (fatty acid), และเรซิน (resins) เป็นต้น ซึ่ง สารเหล่านี้จะมีอุณหภูมิในการสลายตัวแตกต่างกัน (Orfao, Antunes and Figueiredo, 1999)

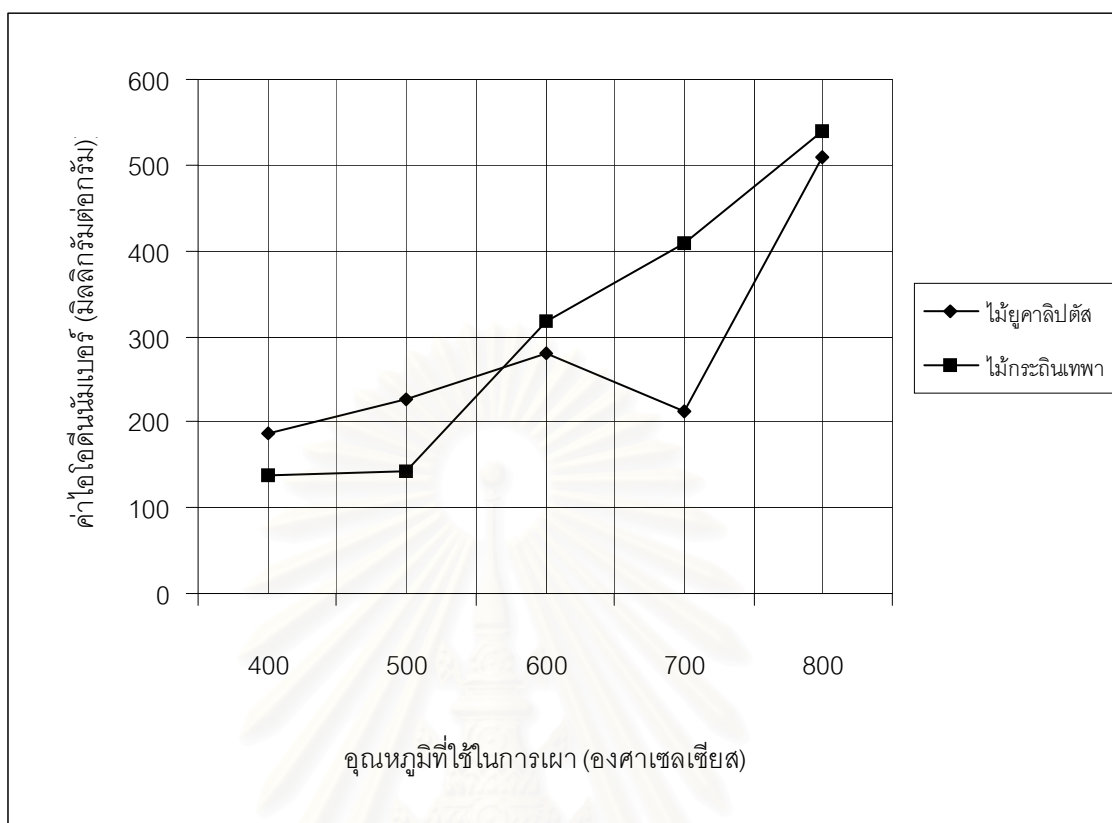
เมื่อเผาวัตถุดิบ สารประกอบต่างๆ เหล่านี้ก็จะเริ่มสลายตัว เมื่อใช้อุณหภูมิและเวลาในการเผาเพิ่มขึ้น สารที่สลายตัวก็มีจำนวนมากขึ้น จึงทำให้ถ่านที่เผาที่อุณหภูมิสูง มีร้อยละผลผลิตของถ่านทั้งสองชนิดลดลง ดังนั้นจึงเลือกการเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที ซึ่งให้ร้อยละผลผลิตสูงสุด ไปใช้ในการศึกษาขั้นต่อไป

4.1.2 ผลของอุณหภูมิในการเผาต่อประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสและไม้กระถินเทพา

นำถ่านจากไม้ยูคาลิปตัสและไม้กระถินเทพาที่ได้จากการศึกษาเบื้องต้น มาทดลองผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาต่อประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ โดยนำถ่านที่ผ่านการแช่สารละลายเกลือแกงอิ่มตัวเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และอบแห้งแล้ว ทำการเผาถ่านพร้อมกับการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 400, 500, 600, 700 และ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปวิเคราะห์หาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ (ASTM D 4607 – 94 ซึ่งแสดงในภาคผนวก ก) โดยวัดความเข้มข้นที่เหลือจากการดูดติดผิวโดยถ่านกัมมันต์ จะแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการดูดติดผิวดังนั้นประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์พิจารณาจากค่าไอโอดีนนัมเบอร์ เมื่อพิจารณาจากค่าไอโอดีนนัมเบอร์ที่วัดได้ ถ่านกัมมันต์ที่มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์สูง ถ่านกัมมันต์นั้นจะมีความสามารถในการดูดติดผิวสูง ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์ที่วิเคราะห์ได้แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.1

ตารางที่ 4.3 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาต่อประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์

วัตถุดิบ	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
ไม้ยูคาลิปตัส	400	186
	500	226
	600	281
	700	212
	800	510
ไม้กระถินเทพา	400	138
	500	142
	600	318
	700	408
	800	539



รูปที่ 4.1 แสดงการเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาต่อประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์

ประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากไม้ยูคาลิปตัสและไม้กระถินเทพา ที่เผาที่อุณหภูมิต่างๆ กัน คือ 400, 500, 600, 700 และ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยพิจารณาจากค่าไอโอดีนัมเบอร์ พบว่า ค่าไอโอดีนัมเบอร์จะเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการเผาสูงขึ้น เนื่องจากการที่ใช้อุณหภูมิในการเผาสูงขึ้น เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และสารประกอบอื่นๆ ในถ่านไม้ยูคาลิปตัสและถ่านไม้กระถินเทพาที่สลายยังไม่หมดจากการเผาก็จะสลายเมื่อมากขึ้น ส่วนที่เหลืออยู่ก็จะเป็นถ่านคาร์บอนคงตัว หรือ โครงสร้างหลักของถ่านกัมมันต์ เมื่อสารประกอบที่ระเหยได้สลายไป พื้นที่ว่างในโครงสร้างถ่านก็จะเพิ่มมากขึ้น ทำให้มีพื้นที่ผิวมากขึ้นด้วย ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นจากการศึกษานี้พบว่า อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส จะได้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากไม้ยูคาลิปตัสและไม้กระถินเทพามีค่าไอโอดีนัมเบอร์สูงสุดคือ 510 และ 539 มิลลิกรัมไอโอดีนต่อกรัมของถ่านกัมมันต์ ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่าเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุด จึงเลือกอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส มาเป็นอุณหภูมิที่ใช้ในการศึกษาในขั้นต่อไป

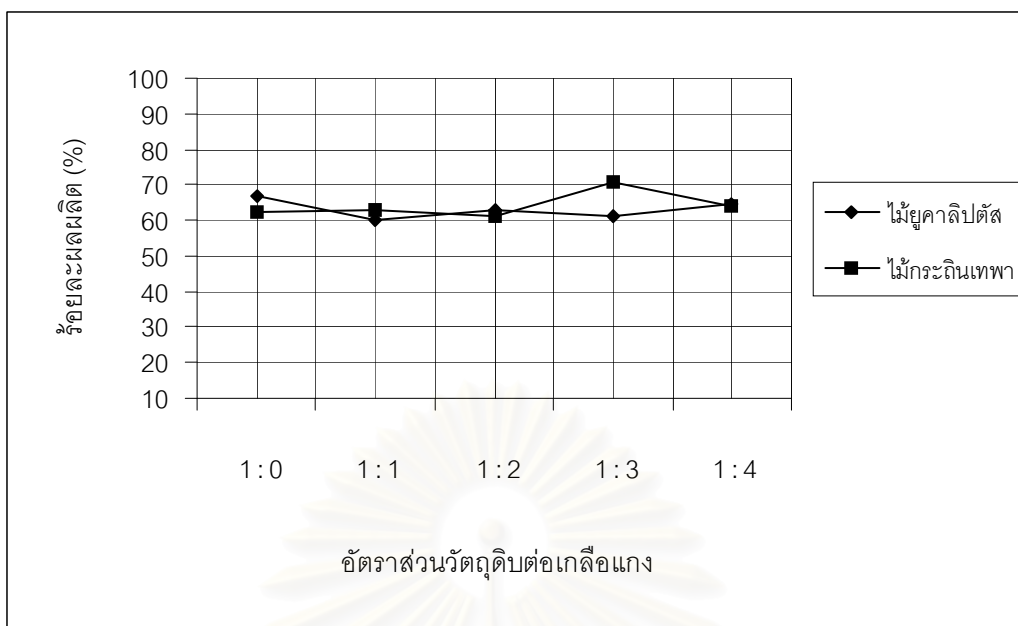
4.1.3 ผลของอัตราส่วนของวัตถุดิบต่อสารกระตุ้นต่อประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสและไม้กระถินเทพา

การศึกษาประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากถ่านไม้ยูคาลิปตัสและถ่านไม้กระถินเทพา โดยใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของถ่านไม้ยูคาลิปตัสและถ่านไม้กระถินเทพาต่อสารกระตุ้นเกลือแกง ที่อัตราส่วนต่างๆ กัน คือ 1:0, 1:1, 1:2, 1:3 และ 1:4 ทำการเผากระตุ้นที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ที่ได้จะพิจารณาจากค่าไอโอดีนนัมเบอร์ เช่นเดียวกับการทดลองในเบื้องต้น จากการวิเคราะห์หรือผลผลิตของถ่านกัมมันต์ที่ได้เทียบกับถ่านไม้วัตถุดิบ และค่าไอโอดีนนัมเบอร์ แสดงรายละเอียด ดังตารางที่ 4.4 และจากข้อมูลที่ได้นำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ของอัตราส่วนสารกระตุ้นเกลือแกงต่อประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ที่ได้ ดังรูปที่ 4.2 และรูปที่ 4.3

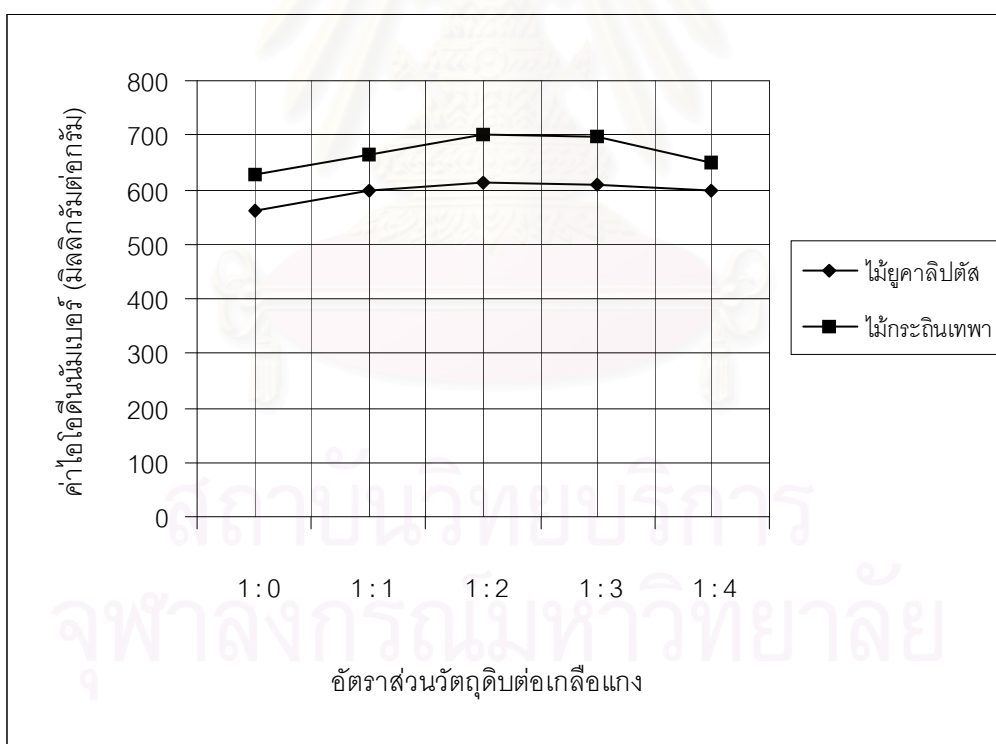
ตารางที่ 4.4 ร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์ที่ได้เทียบกับถ่านไม้วัตถุดิบ และค่าไอโอดีนนมเบอร์ของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส ไม้กระถินเทพา และถ่านกัมมันต์ที่ขายตามทั่วไป

วัตถุดิบ	อัตราส่วนวัตถุดิบ ต่อเกลือแกง	ผลผลิต (%)	เฉลี่ย (%)	ค่าไอโอดีนนมเบอร์ (มิลลิกรัมต่อกรัม)	ค่าเฉลี่ยไอโอดีนนมเบอร์ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
ไม้ยูคาลิปตัส	1 : 0	67.20	66.84	569	561
	1 : 0	66.47		552	
	1 : 1	58.27	60.07	598	600
	1 : 1	61.87		602	
	1 : 2	63.63	62.60	575	612
	1 : 2	61.57		649	
	1 : 3	64.53	60.97	582	611
	1 : 3	57.40		639	
	1 : 4	62.67	64.62	643	597
	1 : 4	66.57		550	
ไม้กระถินเทพา	1 : 0	63.83	62.27	606	628
	1 : 0	60.70		649	
	1 : 1	66.53	62.97	649	665
	1 : 1	59.40		681	
	1 : 2	63.90	61.09	701	701
	1 : 2	58.27		701	
	1 : 3	80.20	70.84	691	696
	1 : 3	61.47		701	
	1 : 4	59.17	64.00	691	651
	1 : 4	68.83		610	
ถ่านกัมมันต์ F300*					891

หมายเหตุ * ถ่าน F300 คือ ถ่าน Filtrasorb 300 ที่มีขายในท้องตลาดทั่วไปที่นำมาเปรียบเทียบ



รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์ที่อัตราส่วนวัตถุดิบต่อสารกระตุ้นเกลือแกง



รูปที่ 4.3 อัตราส่วนสารกระตุ้นเกลือแกงต่อประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์จากไม่ยูคาลิปตัสและไม่กระถินเทพา

จากการศึกษาผลของอัตราส่วนของวัตถุดิบต่อเกลือแกงของถ่านไม้ยูคาลิปตัส และไม้กระถินเทพาที่มีต่อร้อยละผลผลิต พบว่า ร้อยละผลผลิตของน้ำหนักถ่านที่ได้เทียบกับ วัตถุดิบถ่านของถ่านไม้ยูคาลิปตัสจะให้ผลใกล้เคียงกัน คือ อยู่ช่วงร้อยละ 60 – 69 เช่นเดียวกับ ถ่านไม้กระถินเทพา ซึ่งค่าที่ได้อยู่ในช่วงร้อยละ 61 – 71 แสดงว่า อัตราส่วนของวัตถุดิบต่อสาร กระตุ้นเกลือแกงไม่มีผลต่อร้อยละผลผลิตของน้ำหนักถ่านที่ได้ และจากการทดลองพบว่าร้อยละ ผลผลิตของน้ำหนักถ่านทั้งไม้ยูคาลิปตัสและไม้กระถินเทพามีค่าไม่แตกต่างกันมากนักซึ่งถ่านไม้ กระถินเทพาจะมีค่าสูงกว่าเพียงเล็กน้อย

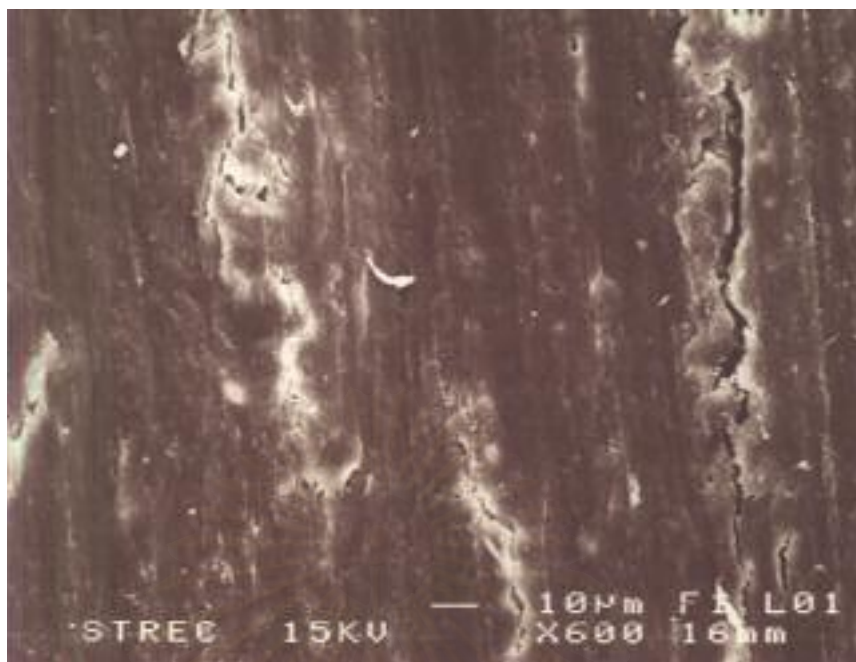
เมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าไอโอดีนนมเบอร์ของถ่านไม้ยูคาลิปตัสที่อัตราส่วน วัตถุดิบถ่านไม้ยูคาลิปตัสต่อสารกระตุ้นเกลือแกง เท่ากับ 1:0 1:1 และ 1:2 จะเห็นว่าค่าไอโอดีน นมเบอร์เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน คือ จาก 561 มิลลิกรัมต่อกรัม เป็น 600 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 612 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ แสดงว่า สารกระตุ้นเกลือแกงทำให้ประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์เพิ่ม สูงขึ้น แต่เมื่อมีการเติมสารกระตุ้นเกลือแกงเพิ่มลงไป 3 และ 4 เท่าของน้ำหนักวัตถุดิบ พบว่าค่า ไอโอดีนนมเบอร์มีค่าลดลงจาก 611 มิลลิกรัมต่อกรัม เป็น 597 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ของ ถ่านไม้ยูคาลิปตัสที่เตรียมในอัตราส่วน 1:2 ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก

สำหรับถ่านไม้กระถินเทพา ก็ให้ผลการศึกษาเช่นเดียวกัน เมื่อเปรียบเทียบค่า ไอโอดีนนมเบอร์ของถ่านไม้กระถินเทพาที่อัตราส่วนวัตถุดิบถ่านไม้กระถินเทพาต่อสารกระตุ้น เกลือแกง เท่ากับ 1:0 1:1 และ 1:2 จะเห็นได้ว่าค่าไอโอดีนนมเบอร์เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน คือ จาก 628 มิลลิกรัมต่อกรัม เป็น 665 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 701 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ แสดงว่า สารกระตุ้นเกลือแกงทำให้ประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์เพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อมีการเติมสารกระตุ้น เกลือแกงเพิ่มลงไปเป็น 3 และ 4 เท่าของน้ำหนักวัตถุดิบ พบว่าค่าไอโอดีนนมเบอร์มีค่าลดลงจาก 696 มิลลิกรัมต่อกรัม เป็น 651 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับของถ่านไม้กระถินเทพาที่เตรียมใน อัตราส่วน 1:2 ซึ่งมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก เช่นเดียวกันกับไม้ยูคาลิปตัส

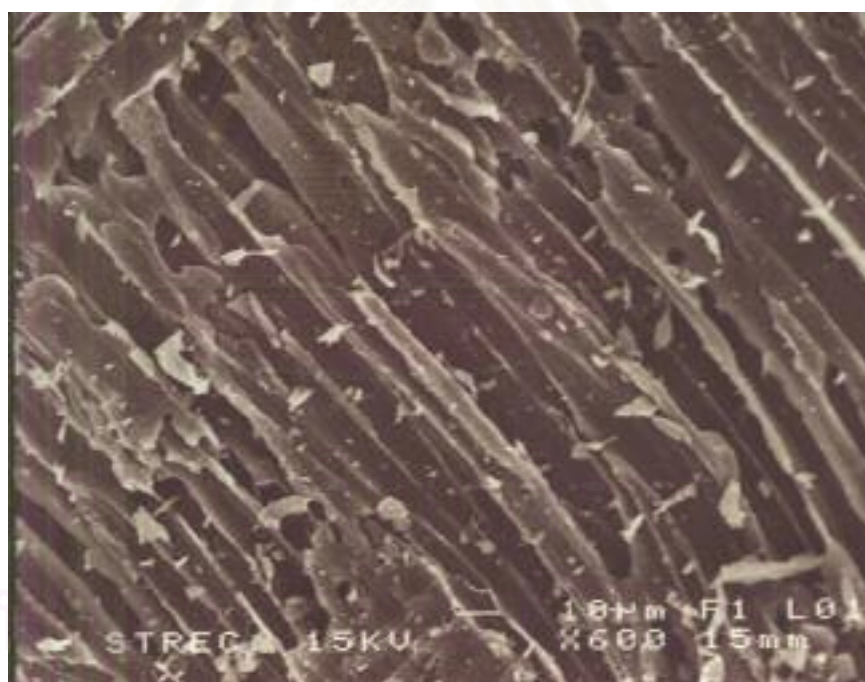
ค่าไอโอดีนนมเบอร์ของถ่านที่เตรียมขึ้นทั้งจากถ่านไม้ยูคาลิปตัสและถ่านไม้ กระถินเทพา โดยมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของวัตถุดิบต่อสารกระตุ้นเกลือแกงเท่ากับ 1:2 มีค่า มากกว่าค่าไอโอดีนนมเบอร์ของอัตราส่วน 1:0 และ 1:1 นั้น อาจเกิดจากการที่มีผลึกเกลือแกงที่มี ปริมาณมากเพียงพอแทรกอยู่ในเนื้อของวัตถุดิบ เมื่อทำการเผาและกระตุ้นวัตถุดิบให้เป็นถ่านกัม มันต์ ผลึกเกลือจะเข้าไปอยู่ในเนื้อโครงสร้างของถ่าน และทำหน้าที่คล้ายเป็นเสาค้ำยัน เมื่อล้างสาร กระตุ้นเกลือแกงออกด้วยน้ำร้อน ผลึกเกลือแกงที่อยู่ในโครงสร้างของถ่านก็จะหลุดออก ทำให้เกิดรู พรุนและพื้นที่ผิวภายในเพิ่มขึ้นเหมาะสำหรับการดูดติดผิวได้ แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยน้ำหนัก ของวัตถุดิบต่อสารกระตุ้นเกลือแกง เป็น 1:3 และ 1:4 พบว่า ค่าไอโอดีนนมเบอร์ของถ่านกัมมันต์ ที่เตรียมได้มีค่าลดลง แสดงว่า การเพิ่มสารกระตุ้นเกลือแกงไม่สามารถทำให้ถ่านกัมมันต์มี ประสิทธิภาพสูงขึ้น แต่จะทำให้ขนาดของรูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งส่งผลให้พื้นที่ผิวของถ่านกัม

มันต์ลดลงตามไปด้วย ทำให้ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ลดต่ำลง เช่นเดียวกับการศึกษาของ ลลิตา นิทัศน์จากรุกุล (2544) ก็พบว่า ค่าไอโอดีนนัมเบอร์จะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมสารกระตุ้นจนถึงอัตราส่วนหนึ่งและจะลดลงเมื่ออัตราส่วนเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณของสารกระตุ้นที่มากเกินไป จึงทำให้รูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้น และมีพื้นที่ผิวสำหรับการดูดติดผิวลดลง

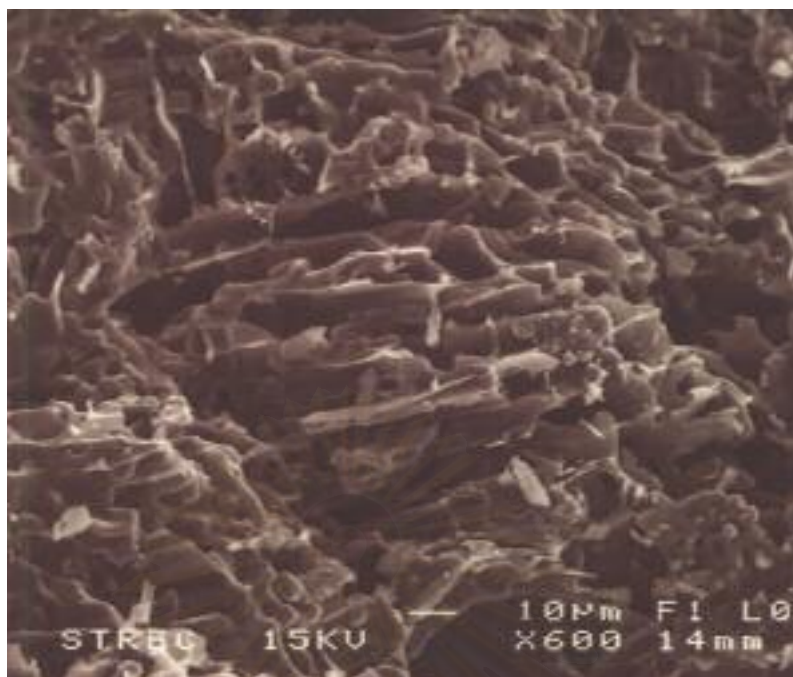
จากการเปรียบเทียบระหว่างค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์จากถ่านไม้ยูคาลิปตัสและถ่านไม้กระถินเทพาที่อัตราส่วนต่างๆ พบว่า ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านไม้ยูคาลิปตัสมีค่าน้อยกว่าถ่านไม้กระถินเทพาเพียงเล็กน้อย เนื่องจากถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านไม้กระถินเทพามีความพรุนหรือมีพื้นที่ผิวมากกว่าถ่านกัมมันต์จากถ่านไม้ยูคาลิปตัส ซึ่งจะต้องนำไปทดสอบลักษณะทางกายภาพโดยใช้เครื่อง Specific Surface Area Analyzer ด้วยวิธี BET (Brunaur-Emmett-Teller) เพื่อยืนยันต่อไป และนอกจากนี้ยังได้นำไม้ยูคาลิปตัสและไม้กระถินเทพาซึ่งเป็นวัตถุดิบเริ่มต้น ถ่านไม้ที่ผ่านการเผา ณ อุณหภูมิและเวลาเหมาะสม ถ่านไม้ที่ผ่านการแช่สารละลายเกลือแกงอิ่มตัว และถ่านกัมมันต์หลังการกระตุ้นที่อัตราส่วน 1:2 ไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) เมื่อพิจารณาโครงสร้างพื้นผิวและความพรุน พบว่า ไม้ยูคาลิปตัสก่อนเผามีรูพรุนน้อยมาก แต่เมื่อเผาแล้วจะเกิดรูพรุนทั่วถ่านกัมมันต์ (รูปที่ 4.4) ส่วนไม้กระถินเทพาวัตถุดิบก่อนเผามีรูพรุนเกิดตามธรรมชาติบ้างพอสมควรซึ่งมากกว่าไม้ยูคาลิปตัส และหลังจากผ่านการกระตุ้นด้วยสารกระตุ้นเกลือแกงแล้ว พบว่า มีความพรุนมากขึ้น ขนาดรูพรุนจะกระจายอย่างสม่ำเสมอ (รูปที่ 4.5)



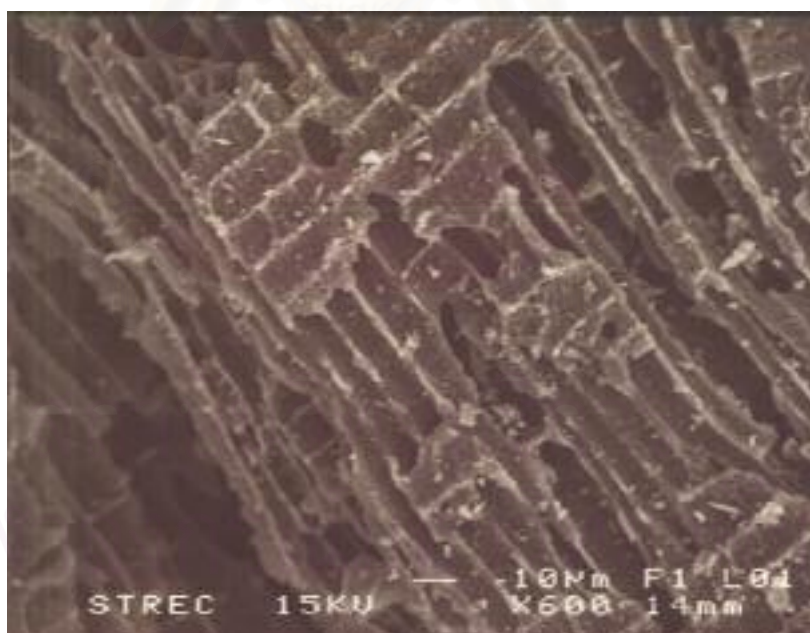
ก. โครงสร้าง และพื้นที่ผิว ของไม้ยูคาลิปตัสก่อนเผา เมื่อใช้กำลังขยาย 600 เท่า



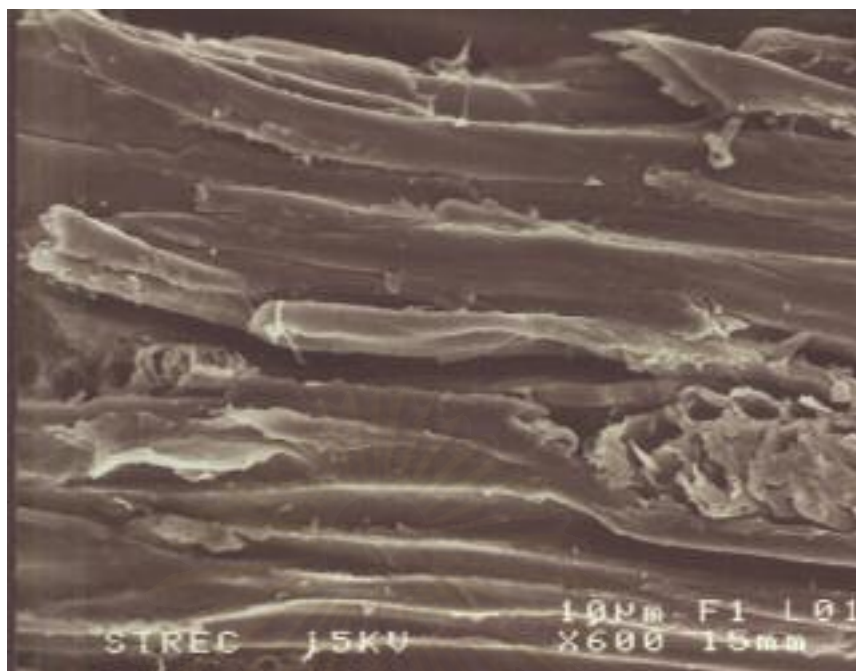
ข. โครงสร้าง และพื้นที่ผิว ของถ่านไม้ยูคาลิปตัสที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที เมื่อใช้กำลังการขยาย 600 เท่า



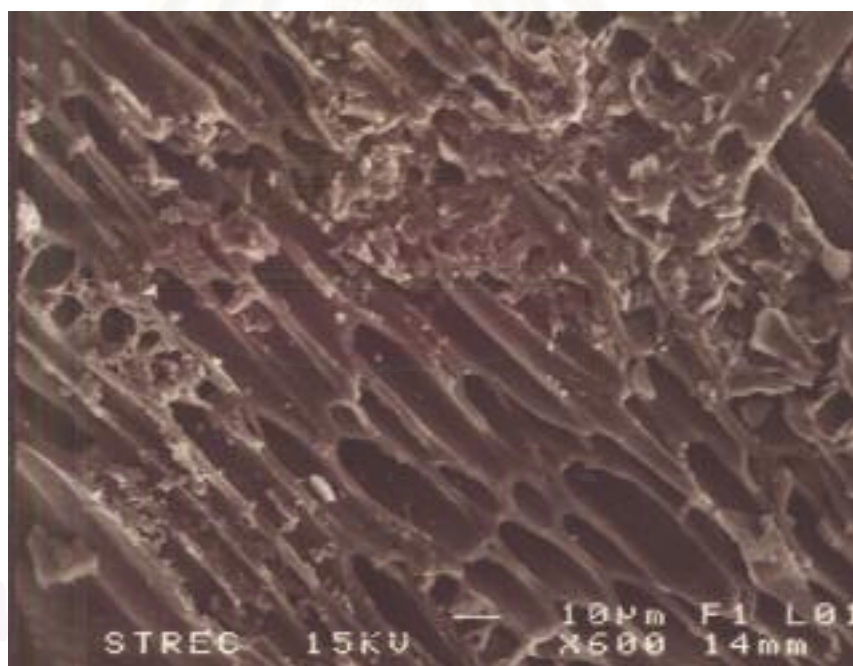
ค. โครงสร้าง และพื้นที่ผิว ของถ่านไม้ยูคาลิปตัสที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายเกลือแกงอิ่มตัว เมื่อใช้กำลังการขยาย 600 เท่า



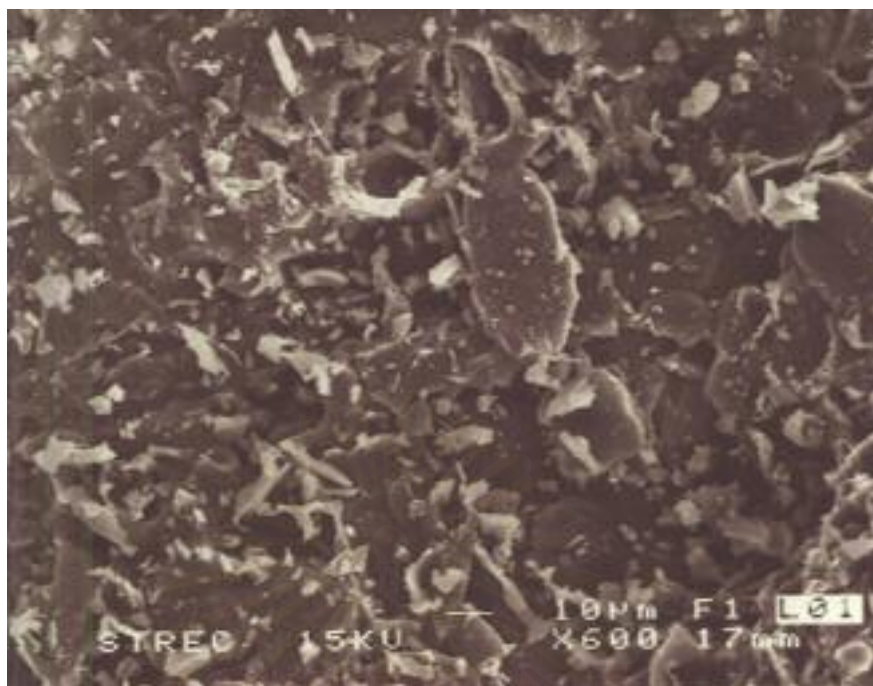
ง. โครงสร้าง และพื้นที่ผิว ของถ่านไม้ยูคาลิปตัสหลังการกระตุ้นด้วยสารกระตุ้นเกลือแกง ด้วยอัตราส่วนของวัตถุดิบต่อสารกระตุ้นเกลือแกง เท่ากับ 1:2 เมื่อใช้กำลังการขยาย 600 เท่า รูปที่ 4.4 ลักษณะโครงสร้าง และพื้นที่ผิวของไม้ยูคาลิปตัสก่อนทำการเผาและกระตุ้นให้เป็น ถ่านกัมมันต์



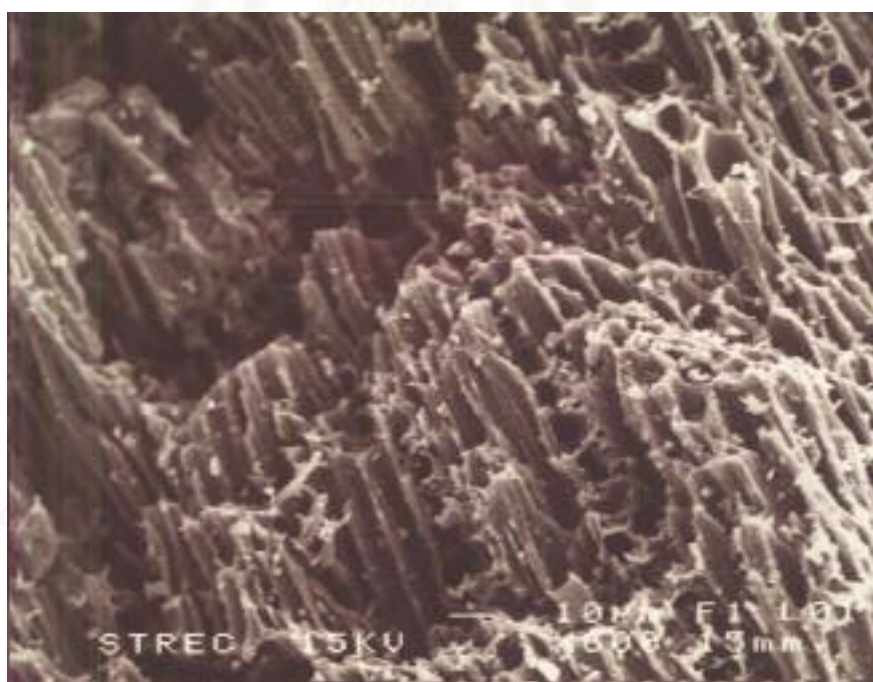
ก. โครงสร้าง และพื้นที่ผิว ของไม้กระถินเทพาก่อนเผา เมื่อใช้กำลังขยาย 600 เท่า



ข. โครงสร้าง และพื้นที่ผิว ของถ่านไม้กระถินเทพาที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที เมื่อใช้กำลังการขยาย 600 เท่า



ค. โครงสร้าง และพื้นที่ผิว ของถ่านไม้กระถินเทพาที่ผ่านการแช่ด้วยสารละลายเกล็ดแกมมัตัว เมื่อใช้กำลังการขยาย 600 เท่า



ง. โครงสร้าง และพื้นที่ผิว ของถ่านไม้กระถินเทพาหลังการกระตุ้นด้วยสารกระตุ้นเกล็ดแกมมัตัวด้วยอัตราส่วนของวัตถุดิบต่อสารกระตุ้นเกล็ดแกมมัตัวเท่ากับ 1:2 เมื่อใช้กำลังการขยาย 600 เท่า รูปที่ 4.5 ลักษณะโครงสร้าง และพื้นที่ผิวของไม้กระถินเทพาก่อนทำการเผาและกระตุ้นให้เป็น ถ่านกัมมันต์

จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากถ่านไม้ยูคาลิปตัส โดยมีเกลือแกงเป็นสารกระตุ้นที่อัตราส่วน 1:2 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด โดยมีค่าไอโอดีนนัมเบอร์สูงสุดเท่ากับ 612 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วนถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากถ่านไม้กระถินเทพา โดยมีเกลือแกงเป็นสารกระตุ้นที่อัตราส่วน 1:2 เช่นกัน เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุด โดยมีค่าไอโอดีนนัมเบอร์สูงสุดเท่ากับ 701 มิลลิกรัมต่อกรัม ดังนั้น อัตราส่วนของวัตถุดิบต่อสารกระตุ้นเกลือแกง ทั้งถ่านไม้ยูคาลิปตัสและถ่านไม้กระถินเทพาที่เหมาะสมนำไปทดสอบต่อไป ได้เท่ากับ 1:2 นอกจากนี้เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์ Calgon Filtrasorb 300 ซึ่งเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายตามท้องตลาดทั่วไป มีค่า 891 มิลลิกรัมต่อกรัม พบว่า ทั้งถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากถ่านไม้ยูคาลิปตัสและถ่านไม้กระถินเทพา มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์ต่ำกว่า อย่างไรก็ตาม ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากถ่านไม้ยูคาลิปตัสและถ่านไม้กระถินเทพา ที่อัตราส่วนของวัตถุดิบต่อสารกระตุ้นเกลือแกง 1:2 มีค่าใกล้เคียงกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม ซึ่งกำหนดมาตรฐานไว้ที่ 600 มิลลิกรัมต่อกรัม จึงมีความเป็นไปได้ในการผลิตเป็นอุตสาหกรรม

4.2 คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์

นอกจากการศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์ และศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์แล้ว ยังได้ทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพที่สำคัญของถ่านกัมมันต์ ได้แก่ พื้นที่ผิว (surface area), ปริมาตรรูพรุน (pore volume) และ ขนาดโพรงเฉลี่ย (average pore size) ซึ่งทำการวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง Specific Surface Area Analyzer ด้วยวิธี BET (Brunauer-Emmett-Teller) สำหรับขนาดประสิทธิผล (effective size) แสดงดังตารางที่ 4.5 และสัมประสิทธิ์ความคงตัว (uniformity coefficient) วิเคราะห์ด้วยวิธี Sieve Analysis คือ การร่อนผ่านชุดตะแกรงมาตรฐาน แสดงดังตารางที่ 4.6 ถึง 4.7 และรูปที่ 4.6 ถึง 4.7

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส ไม้กระถิน เทพา และถ่านกัมมันต์ที่มีขายตามท้องตลาดทั่วไป

ลักษณะทางกายภาพ	ถ่านกัมมันต์จาก ไม้ยูคาลิปตัส		ถ่านกัมมันต์จาก ไม้กระถินเทพา		ถ่านกัมมันต์ Calgon Filtrasorb 300
	ก่อนการ กระตุ้น	หลังการ กระตุ้น	ก่อนการ กระตุ้น	หลังการ กระตุ้น	
พื้นที่ผิว (ตร.ม./กรัม)	14.02	368.68	129.30	408.64	900-1000*
ปริมาตรโพรง (ลบ.ซม./กรัม)	0.02	0.27	0.13	0.34	0.75-0.85*
ขนาดโพรงเฉลี่ย (อังสตรอม)	6.14	13.55	6.13	18.04	16.51**

หมายเหตุ * ค่าที่ทางบริษัทผู้ผลิตแจ้งมาในคู่มือของผลิตภัณฑ์

** ลลิตา นิต์ศนจากรุกุล, 2544

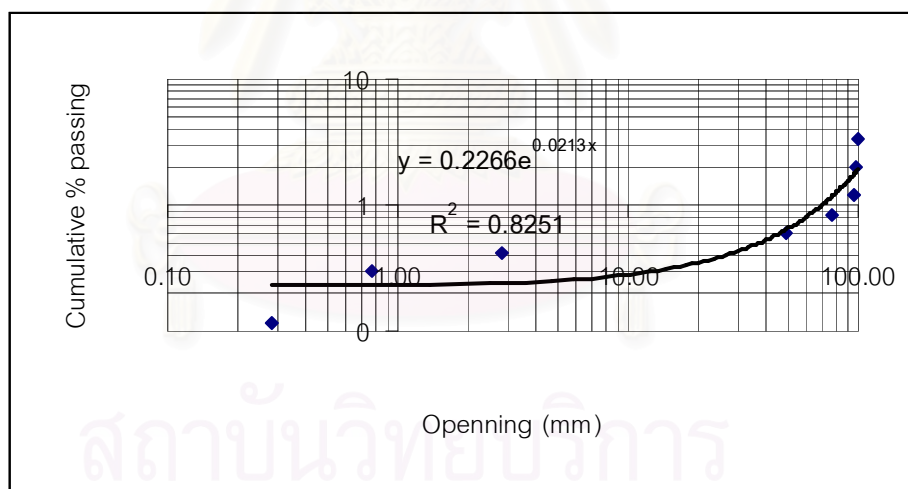
จากตารางที่ 4.5 ลักษณะทางกายภาพที่สำคัญ ซึ่งจะมีคุณสมบัติแสดงถึงความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ได้ผลการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้คือ ถ่านไม้ยูคาลิปตัส ก่อนการกระตุ้นด้วยสารกระตุ้นเกลือแกง มีค่าพื้นที่ผิว (ตร.ม./กรัม) ปริมาตรโพรง (ลบ.ซม./กรัม) และขนาดโพรงเฉลี่ย (อังสตรอม) เท่ากับ 14.02 ตร.ม./กรัม 0.02 ลบ.ซม./กรัม และ 6.14 อังสตรอม ตามลำดับ และหลังการกระตุ้นด้วยสารกระตุ้นเกลือแกง เท่ากับ 368.68 ตร.ม./กรัม 0.27 ตร.ม./กรัม และ 13.55 อังสตรอม ตามลำดับ

สำหรับถ่านไม้กระถินเทพาก่อนการกระตุ้นด้วยสารกระตุ้นเกลือแกง มีค่าพื้นที่ผิว (ตร.ม./กรัม) ปริมาตรโพรง (ลบ.ซม./กรัม) และขนาดโพรงเฉลี่ย (อังสตรอม) เท่ากับ 129.30 ตร.ม./กรัม, 0.13 ลบ.ซม./กรัม และ 6.13 อังสตรอม ตามลำดับ และหลังการกระตุ้นด้วยสารกระตุ้นเกลือแกง เท่ากับ 408.64 ตร.ม./กรัม 0.34 ลบ.ซม./กรัม และ 18.04 อังสตรอม ตามลำดับ

จากผลการวิเคราะห์ พื้นที่ผิว ปริมาตรโพรงและขนาดโพรงเฉลี่ย ทั้งถ่านไม้ยูคาลิปตัสและถ่านไม้กระถินเทพา ก่อนและหลังการกระตุ้นด้วยสารกระตุ้นเกลือแกง มีค่าเพิ่มขึ้น และถ่านไม้กระถินเทพามีค่าสูงกว่าถ่านไม้ยูคาลิปตัสเพียงเล็กน้อย ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับการหาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ และจากการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ ที่ผ่านมา แสดงว่า ถ่านไม้กระถินเทพาย่อมมีความสามารถในการดูดซับได้ดีกว่าถ่านไม้ยูคาลิปตัส และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ Calgon Filtrasorb 300 ซึ่งเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายตามท้องตลาดทั่วไป ถ่าน Calgon Filtrasorb 300 จะมีค่าสูงกว่า ดังนั้นถ่านกัมมันต์ Calgon Filtrasorb 300 ย่อมมีความสามารถในการดูดซับได้ดีกว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านไม้ยูคาลิปตัสและถ่านไม้กระถินเทพา

ตารางที่ 4.6 ขนาดประสิทธิผลและสัมประสิทธิ์ความคงตัวของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส

Sieve No.	Opening (mm)	Wt.Sieve (g)	Wt.Sieve + Sample (g)	Wt.Sieve Retained (g)	% Retained on sieve	Cumulative % Passing through sieve
6	3.360	504.27	504.64	0.35	0.17	99.83
10	2.000	481.35	484.02	2.67	1.32	98.51
16	1.190	459.41	464.09	4.68	2.31	96.21
20	0.840	426.53	465.68	39.15	19.28	76.92
30	0.590	426.75	483.34	57.59	28.37	48.56
40	0.420	399.96	492.78	92.82	45.72	2.84
50	0.279	379.53	383.74	4.21	2.07	0.76
80	0.117	356.79	357.77	0.98	0.48	0.28
pan	0.000	326.42	326.99	0.57	0.28	0.00
Total				203.02	100.00	



รูปที่ 4.6 ขนาดประสิทธิผลและสัมประสิทธิ์ความคงตัวของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส

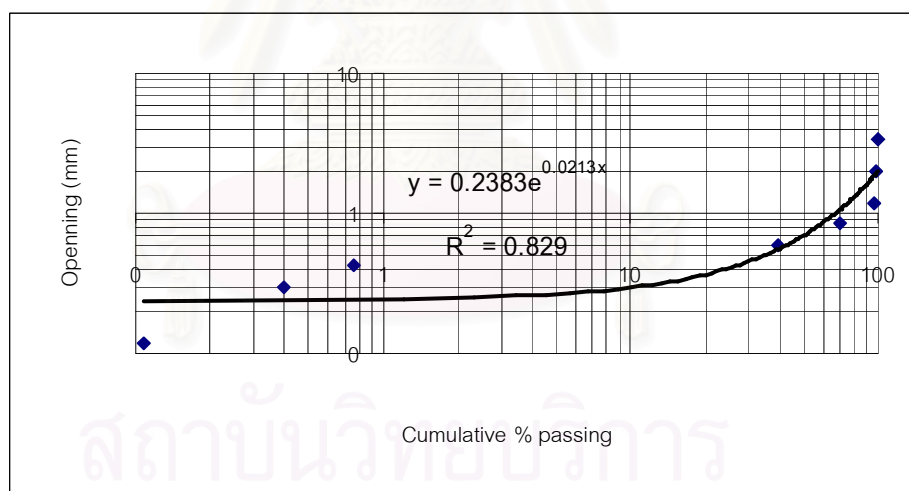
จากรูปที่ 4.6

ค่าขนาดประสิทธิผล = (intersects 10 % passing value) = 0.28 mm

ค่าสัมประสิทธิ์ความคงตัว = (intersects 60 % passing value) = 2.9
(intersects 10 % passing value)

ตารางที่ 4.7 ขนาดประสิทธิผลและสัมประสิทธิ์ความคงตัวของถ่านกัมมันต์จากกระถินเทพา

Sieve No.	Opening (mm)	Wt.Sieve (g)	Wt.Sieve + Sample (g)	Wt.Sieve Retained (g)	% Retained on sieve	Cumulative % Passing through sieve
6	3.360	504.27	504.84	0.57	0.28	99.72
10	2.000	481.35	484.10	2.75	1.35	98.37
16	1.190	459.41	463.92	4.51	2.22	96.15
20	0.840	426.53	479.10	52.57	25.83	70.32
30	0.590	426.75	488.66	62.91	30.91	39.41
40	0.420	399.96	478.60	78.64	38.64	0.77
50	0.279	379.53	380.29	0.76	0.37	0.39
80	0.117	356.79	357.37	0.58	0.28	0.11
pan	0.000	326.42	326.64	0.22	0.11	0.00
Total				203.51	100.00	



รูปที่ 4.7 ขนาดประสิทธิผลและสัมประสิทธิ์ความคงตัวของถ่านกัมมันต์จากไม้กระถินเทพา

จากรูปที่ 4.7

ค่าขนาดประสิทธิผล = (intersects 10 % passing value) = 0.29 mm

ค่าสัมประสิทธิ์ความคงตัว = $\frac{\text{(intersects 60 \% passing value)}}{\text{(intersects 10 \% passing value)}}$ = 2.9

จากตารางที่ 4.6 ถึง 4.7 และรูปที่ 4.6 ถึง 4.7 พบว่า ถ่านกัมมันต์จากถ่านไม้ยูคา ลิปต์สและถ่านไม้กระถินเทพา มีลักษณะการกระจายตัวของขนาดถ่านกัมมันต์เมื่อนำมาพล็อต กราฟ จะได้กราฟที่มีลักษณะความสัมพันธ์เป็นเส้นโค้งแบบ exponential จากกราฟสามารถ คำนวณหาค่าขนาดประสิทธิผล ของถ่านกัมมันต์ไม้ยูคาลิปต์สและไม้กระถินเทพา ซึ่งมีค่า ใกล้เคียงกัน เท่ากับ 0.28 และ 0.29 มิลลิเมตร ตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์ความคงตัว มีค่าเท่ากับ เท่ากับ 2.9

จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า จากการเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพและ ค่าไอโอดีนนมเบอร์ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านไม้ยูคาลิปต์ส ถ่านไม้กระถินเทพา และ ถ่านกัมมันต์ Calgon Filtrasorb 300 ซึ่งเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายตามท้องตลาดทั่วไป พบว่า ถ่าน Calgon Filtrasorb 300 มีคุณภาพดีกว่า เนื่องจาก วัตถุประสงค์ และวิธีการกระตุ้นที่ต่างกัน เช่น การใช้ไอน้ำหรือก๊าซไนโตรเจนเป็นตัวกระตุ้น รวมทั้งการใช้กรดล้างตัวกระตุ้นแทนน้ำในวิธีการ กระตุ้นทางเคมี ซึ่งทำให้ปริมาณเถ้าลดลง ซึ่งส่งผลให้มีพื้นที่ผิวและค่าไอโอดีนนมเบอร์เพิ่มสูงขึ้น ทำให้มีความสามารถในการดูดติดผิวดีขึ้นด้วย

4.3 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากไม้ยูคาลิปต์สและไม้ กระถินเทพา

ขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิวโครเมียมและนิเกิล จากน้ำเสีย สังกะสีของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากไม้ยูคาลิปต์สและไม้กระถินเทพาที่กระตุ้นด้วยสาร กระตุ้นเกลือแกง ได้แก่ pH ความเข้มข้นที่เหมาะสม และทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบ ฟรอนด์ลิช (Freundlich isotherm) โดยทำการทดลองแบบแบทช์ (batch process)

4.3.1 การทดลองหาค่า pH ที่เหมาะสม

นำน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ของโครเมียมและนิเกิล ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ที่ปรับค่าพีเอชให้เท่ากับ 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 และ 9 เติมผงถ่านกัมมันต์ 0.2 กรัม จากนั้นนำไปใส่เครื่องเขย่า (Shaker) ทำการเขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็น เวลา 120 นาที ทิ้งให้ถ่านจมตัว จากนั้นนำไปกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 5 เพื่อแยกถ่านออก และนำน้ำไปวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียม (ทั้งหมด)และนิเกิล ได้พีเอชที่เหมาะสม จากผลการ ทดลอง สามารถแสดงผลการทดลองได้ดังตารางที่ 4.8 ถึง 4.11 และรูปที่ 4.8 ถึง 4.9

ตารางที่ 4.8 การตกตะกอนของโครเมียมที่ pH ต่างๆ

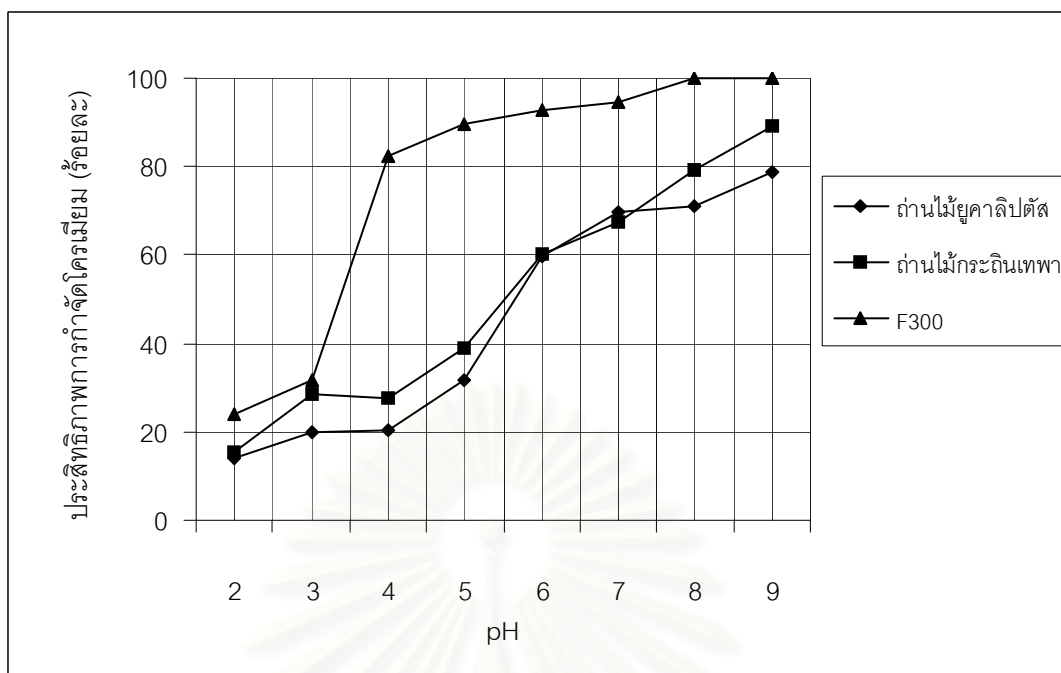
(ความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้น เท่ากับ 10 mg/L)

pH	ปริมาณโครเมียมที่เหลือ (mg/l)				การตกตะกอน (%)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
2	9.458	9.871	9.657	9.662	3.38
3	9.137	9.513	9.134	9.261	7.39
4	8.745	8.461	8.651	8.619	13.81
5	8.836	8.347	8.731	8.638	13.62
6	7.398	7.854	7.637	7.629	23.71
7	7.246	6.467	6.964	6.892	31.08
8	3.759	3.214	3.469	3.480	65.20
9	2.789	2.735	2.978	2.834	71.66

ตารางที่ 4.9 ประสิทธิภาพการดูดซับและการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ pH ต่างๆ

ของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส ไม้กระถินเทพา และถ่านกัมมันต์ Calgon Filtrasorb 300

pH	ถ่านกัมมันต์								
	ถ่านไม้ยูคาลิปตัส			ถ่านไม้กระถินเทพา			ถ่าน Filtrasorb 300		
	pH หลัง เขย่า	โครเมียม ที่เหลือ (mg/l)	%removal	pH หลัง เขย่า	โครเมียม ที่เหลือ (mg/l)	%removal	pH หลัง เขย่า	โครเมียม ที่เหลือ (mg/l)	%removal
2	2.00	8.591	14.09	2.08	8.443	15.57	2.12	7.591	24.09
3	3.37	8.012	19.88	3.87	7.127	28.73	6.44	6.842	31.58
4	4.43	7.967	20.33	6.18	7.223	27.77	7.85	1.779	82.21
5	5.00	6.845	31.55	6.73	6.117	38.83	7.62	1.025	89.75
6	6.76	4.024	59.76	7.27	3.994	60.06	8.35	0.704	92.96
7	7.89	3.045	69.55	7.81	3.237	67.63	8.82	0.543	94.57
8	8.07	2.879	71.21	8.02	2.078	79.22	9.27	0.012	99.88
9	9.09	2.118	78.82	9.17	1.103	88.97	9.22	0.00	100



รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ของถ่านกัมมันต์จาก ไม้ยูคาลิปตัส ไม้กระถินเทพา และถ่าน Calgon Filtrasorb 300

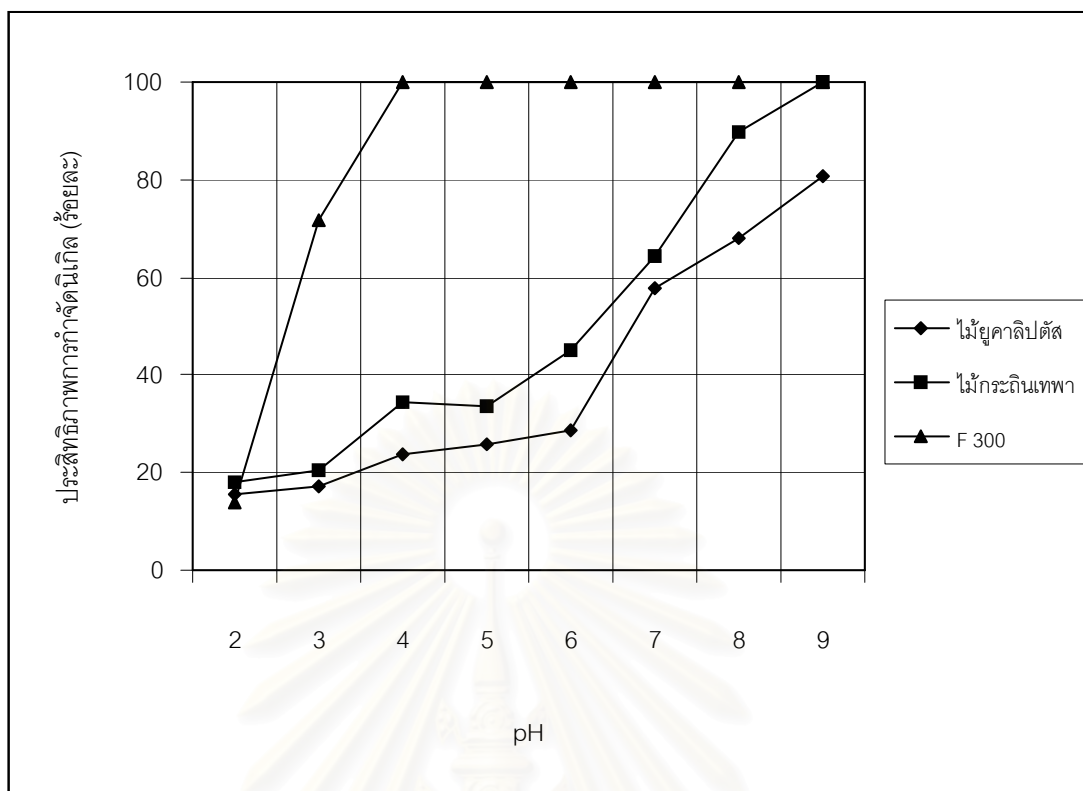
จากตารางที่ 4.8 ถึง 4.9 และรูปที่ 4.8 การทดลองหา pH ที่เหมาะสม พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ของถ่านแต่ละชนิดที่ pH ต่างๆ กัน โดย สำหรับถ่านไม้ยูคาลิปตัส มีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมเพิ่มขึ้น เมื่อ pH เพิ่มขึ้น ที่ pH 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 และ 9 มีค่าร้อยละ 14.09, 19.88, 20.33, 31.53, 59.75, 69.55, 71.21 และ 78.82 ตามลำดับ ส่วนถ่านไม้กระถินเทพามีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมมีค่าร้อยละ 15.57, 28.73, 27.77, 38.83, 60.06, 67.63, 79.22 และ 88.97 ตามลำดับ และสำหรับถ่าน Calgon Filtrasorb 300 มีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมมีค่าร้อยละ 24.09, 31.58, 82.21, 89.75, 92.96, 94.57, 99.88 และ 100 ตามลำดับ ซึ่งจะพบว่าถ่าน Calgon Filtrasorb 300 มีความสามารถในการกำจัดโครเมียมได้ดีกว่า ถ่านจากไม้ยูคาลิปตัสและไม้กระถินเทพา

ตารางที่ 4.10 การตกตะกอนของนิเกิลที่ pH ต่างๆ (ความเข้มข้นนิเกิลเริ่มต้น เท่ากับ 10 mg/L)

pH	ปริมาณนิเกิลที่เหลือ (mg/l)				การตกตะกอน (%)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
2	8.646	8.739	8.567	8.650	13.50
3	8.534	8.431	8.251	8.405	15.95
4	7.697	8.347	7.949	7.997	20.03
5	7.492	7.847	7.737	7.692	23.08
6	7.397	7.394	7.247	7.346	26.54
7	4.241	4.543	4.724	4.502	54.98
8	3.235	3.478	3.986	3.566	64.34
9	2.734	2.927	2.891	2.850	71.50

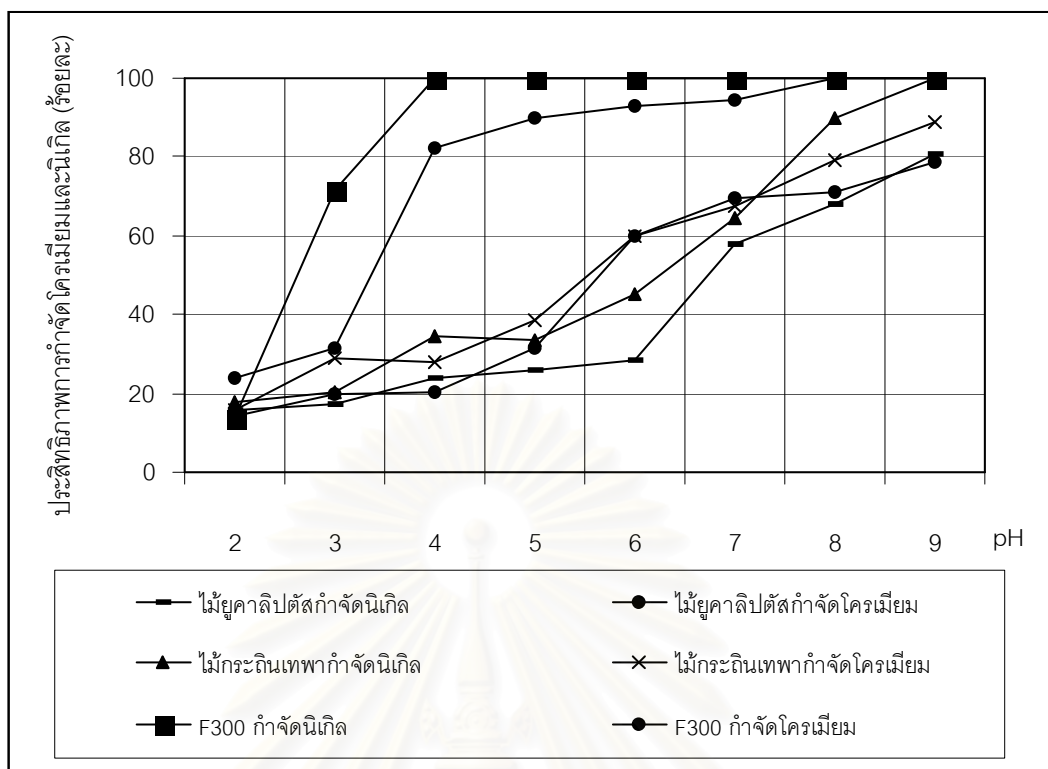
ตารางที่ 4.11 ประสิทธิภาพการดูดซับและการกำจัดนิเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ pH ต่างๆ ของ ถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส ไม้กระถินเทพา และถ่านกัมมันต์ Calgon Filtrasorb 300

pH	ถ่านกัมมันต์								
	ถ่านไม้ยูคาลิปตัส			ถ่านไม้กระถินเทพา			ถ่าน Filtrasorb 300		
	pH หลัง เขย่า	นิเกิลที่เหลือ (mg/l)	%removal	pH หลัง เขย่า	นิเกิลที่เหลือ (mg/l)	%removal	pH หลัง เขย่า	นิเกิลที่เหลือ (mg/l)	%removal
2	2.17	1.562	15.62	2.21	1.787	17.87	2.10	8.616	13.84
3	3.43	1.733	17.33	4.35	2.049	20.49	6.61	2.837	71.63
4	5.34	2.376	23.76	6.35	3.453	34.53	7.70	0.000	100
5	6.31	2.565	25.65	7.68	3.358	33.58	8.30	0.000	100
6	7.12	2.859	28.59	7.83	4.511	45.11	8.32	0.000	100
7	7.81	5.782	57.82	8.12	6.443	64.43	8.40	0.000	100
8	7.79	6.785	67.85	8.34	8.977	89.77	8.75	0.000	100
9	8.35	8.068	80.68	8.73	0.000	100	9.05	0.000	100



รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดนิเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ของถ่านกัมมันต์จาก ไม้ยูคาลิปตัส ไม้กระถินเทพา และถ่าน Calgon Filtrasorb 300

จากตารางที่ 4.10 ถึง 4.11 และรูปที่ 4.9 การทดลองหา pH ที่เหมาะสม พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดนิเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ของถ่านแต่ละชนิดที่ pH ต่างๆ กัน โดยสำหรับ ถ่านไม้ยูคาลิปตัส มีประสิทธิภาพในการกำจัดนิเกิลเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับประสิทธิภาพการกำจัด โครเมียม ที่ pH 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 และ 9 มีค่าร้อยละ 15.62, 17.33, 23.76, 25.65, 28.59, 57.82, 67.85 และ 80.68 ตามลำดับ ส่วนถ่านไม้กระถินเทพามีประสิทธิภาพในการกำจัดนิเกิล มี ค่าร้อยละ 17.87, 20.49, 34.53, 33.58, 45.11, 64.43, 89.77 และ 100 ตามลำดับ สำหรับถ่าน Calgon Filtrasorb 300 มีประสิทธิภาพในการกำจัดนิเกิล ที่ pH 2 และ 3 มีค่าร้อยละ 13.84 และ 71.63 ตามลำดับ และตั้งแต่ pH 4 ถึง 9 มีค่าร้อยละ 100 ซึ่งพบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัด นิเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ดีกว่าถ่านไม้ยูคาลิปตัสและไม้กระถินเทพา เช่นเดียวกับประสิทธิภาพ ในการกำจัดโครเมียม



รูปที่ 4.10 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมและนิกเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์ของถ่านไม้ยูคาลิปตัส ไม้กระถินเทพา และถ่าน Calgon Filtrasorb 300 ที่ pH ต่างๆ

จากรูปที่ 4.10 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียม และนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ ของถ่านไม้ยูคาลิปตัส ไม้กระถินเทพา และถ่าน Calgon Filtrasorb 300 ที่ pH ต่างๆ พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมและนิกเกิลของถ่านกัมมันต์ทั้งสามประเภทจะเพิ่มขึ้น เมื่อปรับ pH ให้สูงขึ้น โดยถ่านไม้ยูคาลิปตัสมีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมสูงสุด เท่ากับ ร้อยละ 78.82 ที่ pH 9 และมีประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลสูงสุด เท่ากับ ร้อยละ 80.68 ที่ pH 9 ส่วนถ่านไม้กระถินเทพามีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมสูงสุด เท่ากับ ร้อยละ 88.97 ที่ pH 9 และมีประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลสูงสุด เท่ากับ ร้อยละ 100 ที่ pH 9 และถ่าน Calgon Filtrasorb 300 มีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมสูงสุดที่ pH เท่ากับ 9 และมีประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลสูงสุดที่ pH 4 นอกจากนี้ ทั้งถ่านไม้ยูคาลิปตัส ไม้กระถินเทพา และถ่าน Calgon Filtrasorb 300 มีประสิทธิภาพในการกำจัดนิกเกิลได้ดีกว่าโครเมียม ณ pH เดียวกัน จากการทดลองพบว่า ถ่านกัมมันต์ประเภทที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดทั้งโครเมียมและนิกเกิลสูงสุด คือ Calgon Filtrasorb 300 ไม้กระถินเทพา และไม้ยูคาลิปตัส ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากคุณสมบัติของพื้นที่ผิว รูพรุน และค่าไอไอตึนัมเบอร์ของถ่านที่ได้ทดลองในเบื้องต้น

เมื่อพิจารณาจากการตกตะกอนของโครเมียมและนิกเกิล พบว่า โครเมียมจะเริ่มตกตะกอนที่ pH ประมาณ 7 ถึง 8 และจะตกตะกอนมากที่สุดที่ pH ประมาณ 9 หลังจากนั้นถ้า pH สูงขึ้นก็จะตกตะกอนน้อยลงอีกครั้ง ส่วนนิกเกิลจะเริ่มตกตะกอนที่ pH ประมาณ 6 ถึง 7 และ

จะตกตะกอนมากที่สุดประมาณ 10 ซึ่งเป็นสภาวะที่ใช้ในการทดลอง ดังนั้นประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมและนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์จึงไม่ใช่การดูดติดผิวเพียงอย่างเดียว แต่ส่วนหนึ่งเป็นเพราะการตกตะกอนด้วย อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาร้อยละการตกตะกอนของโครเมียมและนิกเกิลที่ pH ต่างๆ ซึ่งการตกตะกอนโครเมียมสูงสุด เท่ากับ ร้อยละ 71.66 ที่ pH 9 และการตกตะกอนนิกเกิลสูงสุด เท่ากับ ร้อยละ 71.50 ที่ pH 9 ซึ่งใกล้เคียงกับช่วงของ pH ที่มีการตกตะกอนมากที่สุดของโครเมียมและนิกเกิล แต่ก็ยังเหลือปริมาณโครเมียมและนิกเกิลอยู่ แสดงว่าประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมและนิกเกิลที่ได้ส่วนใหญ่ยังคงเป็นการดูดติดผิวของถ่านอยู่

จากผลการทดลอง สรุปได้ว่าที่ pH 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 และ 9 ประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมและนิกเกิลของถ่านไม้ยูคาลิปตัสและกระถินเทพา สามารถดูดติดผิวได้สูงสุด ดังนั้นจึงเลือก pH เท่ากับ 9 เพื่อใช้ในการทดลองขั้นต่อไป ส่วนถ่าน Calgon Filtrasorb 300 เลือก pH เท่ากับ 4 เป็นสภาวะในการทดลองขั้นต่อไป

4.3.2 การหาความเข้มข้นที่เหมาะสม

ความเข้มข้นของโครเมียม และนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ จะทำการทดลองที่ความเข้มข้นต่างๆ กัน 3 ค่า คือ ความเข้มข้นของโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ เท่ากับ 10 20 30 mg/L และความเข้มข้นของนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ เท่ากับ 10 20 30 mg/L

นำน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้นต่างๆ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ที่ได้ค่าพีเอชที่เหมาะสม เติมผงถ่านกัมมันต์ 0.2 กรัม จากนั้นนำไปใส่เครื่องเขย่า (Shaker) ทำการเขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 120 นาที ทิ้งให้ถ่านจมตัว จากนั้นนำไปกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 5 เพื่อแยกถ่านออกและนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียมและนิกเกิล

การทดลองหาค่าความเข้มข้นที่เหมาะสมในการดูดซับโครเมียมและนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ ของถ่านไม้ยูคาลิปตัส ไม้กระถินเทพา และถ่าน Calgon Filtrasorb 300 สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังตารางที่ 4.12 ถึง 4.13 และรูปที่ 4.11 ถึง 4.12

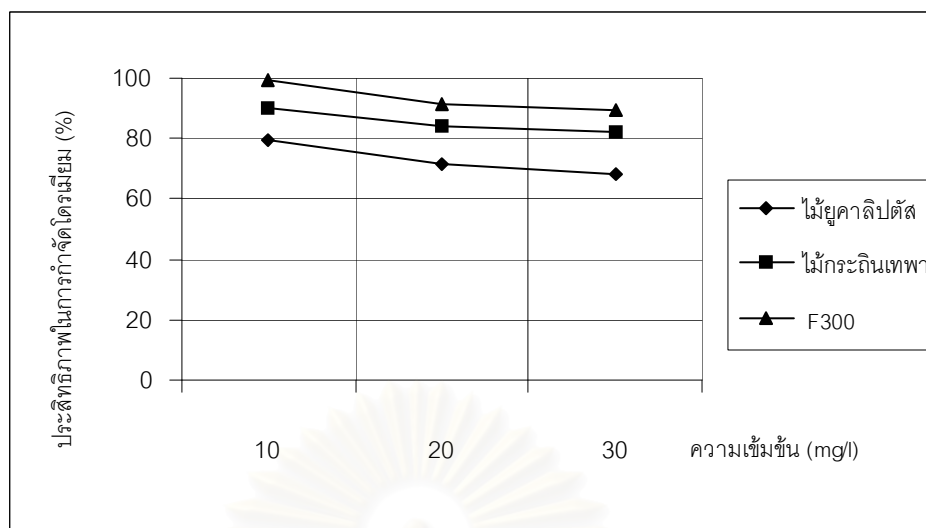
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.12 การหาความเข้มข้นที่เหมาะสมในการดูดติดผิวโครเมียมของถ่านไม้ยูคาลิปตัส ไม้
กระถินเทพา และ Calgon Filtrasorb 300

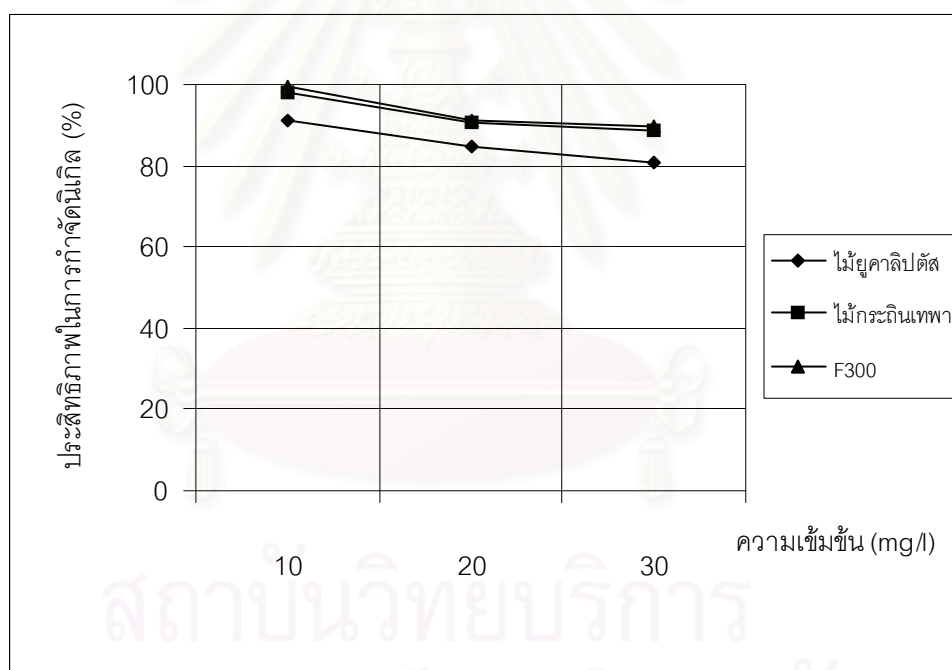
ถ่านกัมมันต์	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/l)	ปริมาณโครเมียมที่เหลือ (mg/l)				ประสิทธิภาพใน การดูดติดผิว (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
ไม้ยูคาลิปตัส	10	2.018	1.946	2.105	2.023	79.77
	20	5.257	5.942	5.843	5.680	71.60
	30	9.571	9.824	9.238	9.544	68.19
ไม้กระถิน เทพา	10	0.948	1.013	0.985	0.982	90.18
	20	3.035	3.137	3.325	3.166	84.17
	30	5.457	5.328	5.432	5.406	81.98
Calgon Filtrasorb 300	10	0.031	0.093	0.065	0.063	99.37
	20	1.735	1.711	1.694	1.713	91.43
	30	3.025	3.123	3.356	3.168	89.44

ตารางที่ 4.13 การหาความเข้มข้นที่เหมาะสมในการดูดติดผิวนิกเกิลของถ่านไม้ยูคาลิปตัส ไม้
กระถินเทพา และ Calgon Filtrasorb 300

ถ่านกัมมันต์	ความเข้มข้นเริ่มต้น (mg/l)	ปริมาณนิกเกิลที่เหลือ (mg/l)				ประสิทธิภาพใน การดูดติดผิว (%)
		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย	
ไม้ยูคาลิปตัส	10	0.876	0.913	0.835	0.875	91.25
	20	3.027	2.978	3.016	3.007	84.97
	30	5.819	5.912	5.598	5.776	80.75
ไม้กระถิน เทพา	10	0.191	0.173	0.183	0.182	98.18
	20	1.987	1.832	1.768	1.862	90.69
	30	3.343	3.258	3.434	3.345	88.85
Calgon Filtrasorb 300	10	0.042	0.039	0.031	0.037	99.63
	20	1.679	1.958	1.733	1.790	91.05
	30	3.018	3.124	3.066	3.069	89.77



รูปที่ 4.11 ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ของถ่านไม้ยูคาลิปตัส ไม้กระถินเทพา และ ถ่าน Calgon Filtrasorb 300 ที่ความเข้มข้นต่างๆ



รูปที่ 4.12 ประสิทธิภาพการกำจัดนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ของถ่านไม้ยูคาลิปตัส ไม้กระถินเทพา และถ่าน Calgon Filtrasorb 300 ที่ความเข้มข้นต่างๆ

จากตารางที่ 4.12 ถึง 4.13 และรูปที่ 4.11 ถึง 4.12 พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโครเมียมและนิกเกิล จาก 10, 20 และ 30 mg/l ตามลำดับ ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมและนิกเกิลของถ่านไม้ยูคาลิปตัส ไม้กระถินเทพา และถ่าน Calgon Filtrasorb 300 มีค่าลดลง โดยถ่านไม้ยูคาลิปตัส พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมจะลดลงจากร้อยละ 79.77, 71.61 และ 68.19 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโครเมียม เป็น 10, 20 และ 30 mg/l ตามลำดับ สำหรับถ่าน

ไม้กระถินเทพา พบว่า มีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมจะลดลงจากร้อยละ 90.17, 84.17 และ 81.98 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโครเมียม เป็น 10, 20 และ 30 mg/l ตามลำดับ และถ่าน Calgon Filtrasorb 300 พบว่า มีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมจะลดลงจากร้อยละ 99.37, 91.43 และ 89.44 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโครเมียม เป็น 10, 20 และ 30 mg/l ตามลำดับ

สำหรับประสิทธิภาพในการกำจัดนิเกิลของถ่านไม้ยูคาลิปตัสจะลดลงจากร้อยละ 91.25, 84.97 และ 80.75 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของนิเกิล เป็น 10, 20 และ 30 mg/l ตามลำดับ ส่วนถ่านไม้กระถินเทพา ประสิทธิภาพการกำจัดนิเกิลจะลดลงจากร้อยละ 98.18, 90.69 และ 88.85 mg/l เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของนิเกิล เป็น 10, 20 และ 30 mg/l ตามลำดับ และถ่าน Calgon Filtrasorb 300 มีประสิทธิภาพการกำจัดนิเกิลจะลดลงจากร้อยละ 99.63, 91.05 และ 89.77 mg/l ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโครเมียมและนิเกิล ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมและนิเกิลทั้งของถ่านไม้ยูคาลิปตัส ไม้กระถินเทพา และ Calgon Filtrasorb 300 จะมีค่าลดลง ทั้งนี้เป็นเพราะ การดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ในระยะแรกของโครเมียมและนิเกิลจะเข้าไปแทรกอยู่บริเวณรูพรุนและพื้นที่ผิวซึ่งมีอยู่มากพอบริเวณผิวถ่านกัมมันต์ แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นขึ้นเรื่อยๆ โครเมียมและนิเกิล ซึ่งมีลักษณะของการจับตัวเป็นชั้นๆ ลักษณะเป็นแผ่นฟิล์ม ซึ่งจับตัวกันไม่แข็งแรงมากนัก ดังนั้นจึงมีโอกาสที่จะหลุดออกจากผิวของถ่านกัมมันต์ได้ง่าย ดังนั้นที่ความเข้มข้นต่างๆ ถ่านไม้ยูคาลิปตัส ไม้กระถินเทพา และ Calgon Filtrasorb 300 จึงมีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมและนิเกิลได้ดีกว่าที่ความเข้มข้นสูงๆ

4.3.3 การทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟลุนดิลิชของถ่านไม้ยูคาลิปตัส ไม้กระถินเทพา และ ถ่าน Calgon Filtrasorb 300

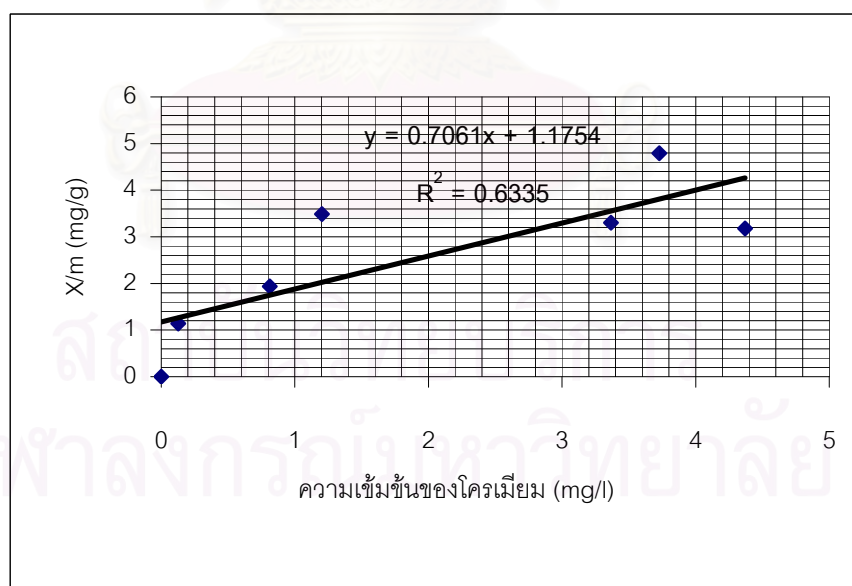
ในการทดลองนี้ เป็นการศึกษาอิทธิพลของปริมาณถ่านกัมมันต์ โดยนำน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของโครเมียมและนิเกิล 10 mg/l และพีเอชเท่ากับ 9 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมผงถ่านกัมมันต์ 10 ค่า คือ 0, 0.01, 0.02, 0.04, 0.10, 0.20, 0.40, 1.00, 2.00 และ 4.00 กรัม ลงในขวดแต่ละใบ ตามลำดับ นำขวดไปเขย่าบนเครื่องเขย่า เป็นเวลา 120 นาที ทิ้งให้ถ่านจมตัว จากนั้นนำไปกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 5 เพื่อแยกถ่านออก และนำไปวิเคราะห์หาปริมาณโครเมียมและนิเกิล แล้วนำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟลุนดิลิช ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.14 ถึง 4.19 และรูปที่ 4.13 ถึง 4.18

1) ไอโซเทอมการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส

จากการศึกษาอิทธิพลของปริมาณถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสต่อการดูดติดผิวของโครเมียมและนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ ได้ผลดังตารางที่ 4.14 ถึง 4.15 และรูปที่ 4.13 ถึง 4.14

ตารางที่ 4.14 การทดสอบการดูดติดผิวโครเมียมของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส

น้ำหนักถ่าน (g)	ความเข้มข้นของโครเมียมที่เหลือ (mg/l)			C (mg)	X (mg)	X/m (mg/g)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย			
0.00	4.803	4.571	4.687	0.4687	-	-
0.01	4.726	4.012	4.369	0.4369	0.0318	3.180
0.02	3.544	3.912	3.728	0.3728	0.0959	4.795
0.04	3.487	3.247	3.367	0.3367	0.132	3.300
0.10	1.082	1.324	1.203	0.1203	0.3484	3.484
0.20	0.789	0.837	0.813	0.0813	0.3874	1.937
0.40	0.109	0.145	0.127	0.0127	0.456	1.140

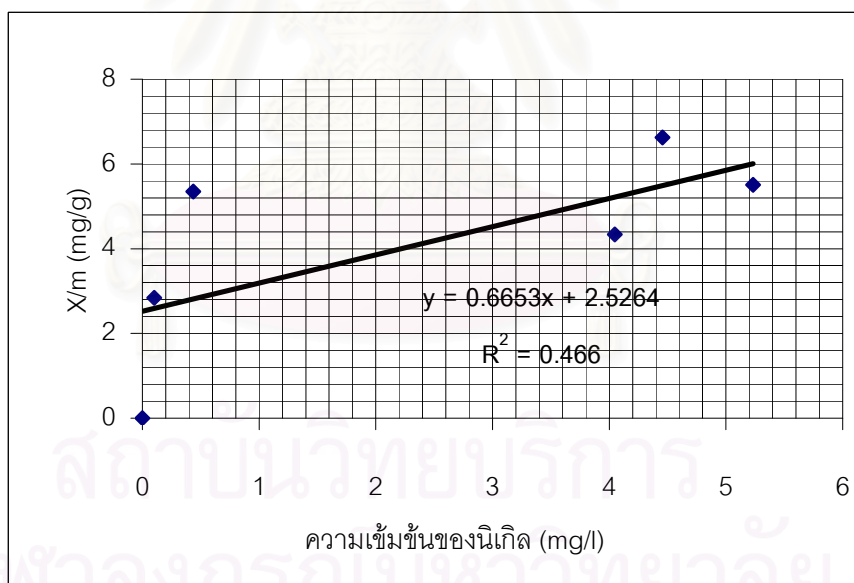


รูปที่ 4.13 ไอโซเทอมการดูดติดผิวโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ หลังการดูดติดผิวด้วยถ่านจากไม้ยูคาลิปตัส

จากรูปที่ 4.13 กราฟไอโซเทอมการดูดติดผิวโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์แบบฟลูนดลิตซ์ของถ่านไม้ยูคาลิปตัส สามารถคำนวณหาสมการเส้นตรงได้เท่ากับ $y = 0.7061x + 1.1754$ และค่า $R^2 = 0.6335$

ตารางที่ 4.15 การทดสอบการดูดติดผิวที่เกิดขึ้นของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส

น้ำหนักถ่าน (g)	ความเข้มข้นของนิเกิลที่เหลือ (mg/l)			C (mg)	X (mg)	X/m (mg/g)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย			
0.00	5.947	5.617	5.782	0.5782	-	-
0.01	5.450	5.012	5.231	0.5231	0.0551	5.510
0.02	4.283	4.631	4.457	0.4457	0.1325	6.625
0.04	4.149	3.947	4.048	0.4048	0.1734	4.335
0.10	0.162	0.712	0.437	0.0437	0.5345	5.345
0.20	0.089	0.214	0.101	0.0101	0.5681	2.841



รูปที่ 4.14 ไอโซเทอมการดูดติดผิวนิเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ หลังการดูดติดผิวด้วยถ่านจากไม้ยูคาลิปตัส

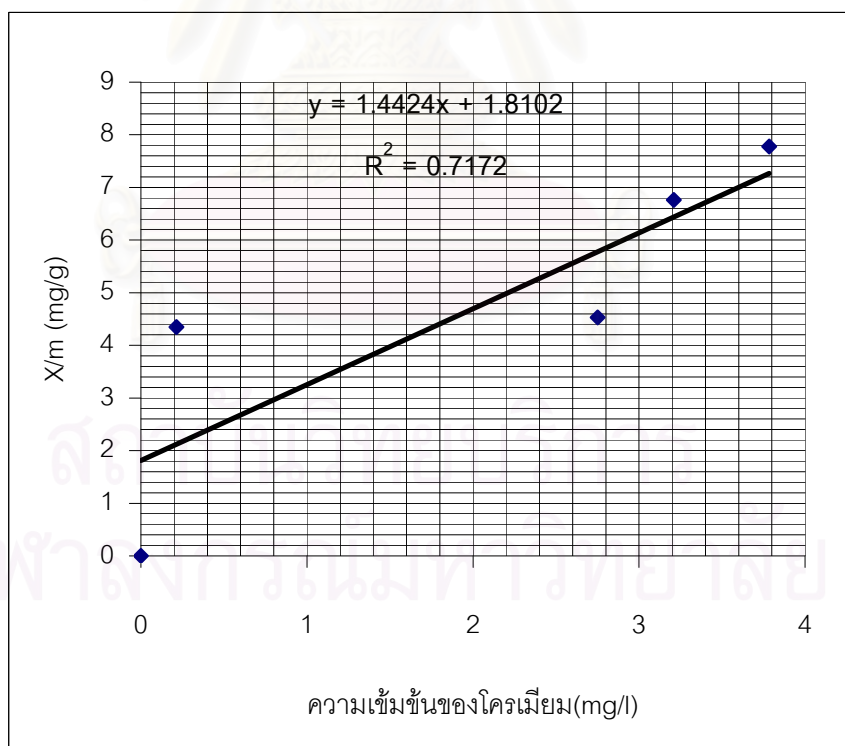
จากรูปที่ 4.14 กราฟไอโซเทอมการดูดติดผิวโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์แบบฟลูนดลิตซ์ของถ่านไม้ยูคาลิปตัส สามารถคำนวณหาสมการเส้นตรงได้เท่ากับ $y = 0.6653x + 2.5264$ และค่า $R^2 = 0.466$

2) ไอโซเทอมการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์จากไม้กระถินเทพา

จากการศึกษาอิทธิพลของปริมาณถ่านกัมมันต์จากไม้กระถินเทพาต่อการดูดติดผิวของโครเมียมและนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ ได้ผลดังตารางที่ 4.16 ถึง 4.17 และรูปที่ 4.15 ถึง 4.16

ตารางที่ 4.16 การทดสอบการดูดติดผิวโครเมียมของถ่านกัมมันต์จากไม้กระถินเทพา

น้ำหนักถ่าน (g)	ความเข้มข้นของโครเมียมที่เหลือ (mg/l)			C (mg)	X (mg)	X/m (mg/g)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย			
0.00	4.890	4.234	4.562	0.4562	-	-
0.01	4.051	3.517	3.784	0.3784	0.0778	7.780
0.02	3.007	3.413	3.210	0.3210	0.1352	6.760
0.04	2.989	2.513	2.751	0.2751	0.1811	4.528
0.10	0.167	0.261	0.214	0.0214	0.4348	4.348

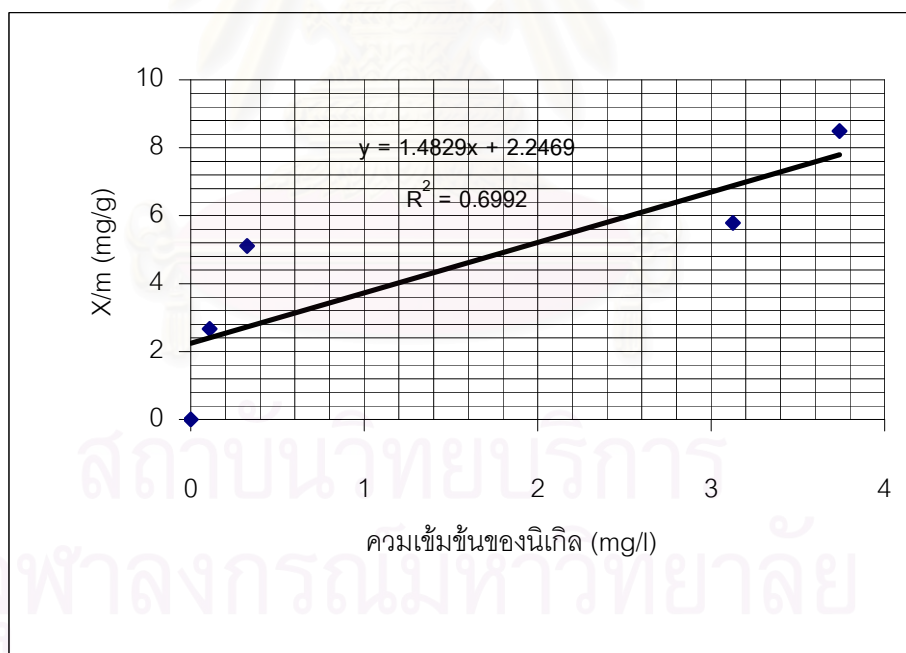


รูปที่ 4.15 ไอโซเทอมการดูดติดผิวโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ หลังการดูดติดผิวด้วยถ่านจากไม้กระถินเทพา

จากรูปที่ 4.15 กราฟไอโซเทอมการดูดติดผิวโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ แบบ ฟลูนดลิชของถ่านไม้กระถินเทพา สามารถคำนวณหาสมการเส้นตรงได้ เท่ากับ
 $y = 1.4424x + 1.8102$ และค่า $R^2 = 0.7172$

ตารางที่ 4.17 การทดสอบการดูดติดผิวที่เกิดขึ้นของถ่านกัมมันต์จากไม้กระถินเทพา

น้ำหนัก ถ่าน (g)	ความเข้มข้นของนิเกิลที่เหลือ (mg/l)			C (mg)	X (mg)	X/m (mg/g)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย			
0.00	5.662	5.214	5.438	0.5438	-	-
0.01	5.405	5.137	5.271	0.5271	0.0167	1.670
0.02	3.646	3.832	3.739	0.3739	0.1699	8.495
0.04	2.929	3.321	3.125	0.3125	0.2313	5.783
0.10	0.294	0.356	0.325	0.0325	0.5113	5.113
0.20	0.019	0.197	0.108	0.0108	0.533	2.665



รูปที่ 4.16 ไอโซเทอมการดูดติดผิวนิเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ หลังการดูดติดผิวด้วยถ่านจาก ไม้กระถินเทพา

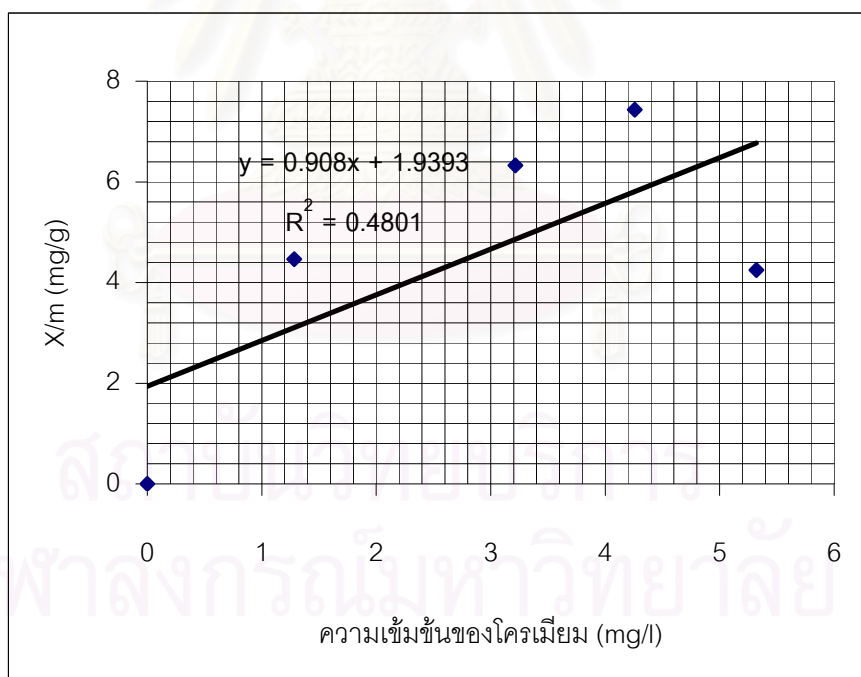
จากรูปที่ 4.16 กราฟไอโซเทอมการดูดติดผิวนิเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ แบบฟลูนด ลิชของถ่านไม้กระถินเทพา สามารถคำนวณหาสมการเส้นตรงได้ เท่ากับ
 $y = 1.4829x + 2.2469$ และค่า $R^2 = 0.6992$

3) ไอโซเทอมการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ Calgon Filtrasorb 300

จากการศึกษาอิทธิพลของปริมาณถ่านกัมมันต์ Calgon Filtrasorb 300 ต่อการดูดติดผิวของโครเมียมและนิกเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ ได้ผลดังตารางที่ 4.18 ถึง 4.19 และรูปที่ 4.17 ถึง 4.18

ตารางที่ 4.18 การทดสอบการดูดติดผิวโครเมียมของถ่านกัมมันต์ Calgon Filtrasorb 300

น้ำหนักถ่าน (g)	ความเข้มข้นของโครเมียมที่เหลือ (mg/l)			C (mg)	X (mg)	X/m (mg/g)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย			
0.00	5.850	5.642	5.746	0.5746	-	-
0.01	5.428	5.214	5.321	0.5321	0.0425	4.250
0.02	4.307	4.211	4.259	0.4259	0.1487	7.435
0.04	3.114	3.314	3.214	0.3214	0.2532	6.330
0.10	1.261	1.305	1.283	0.1283	0.4463	4.463

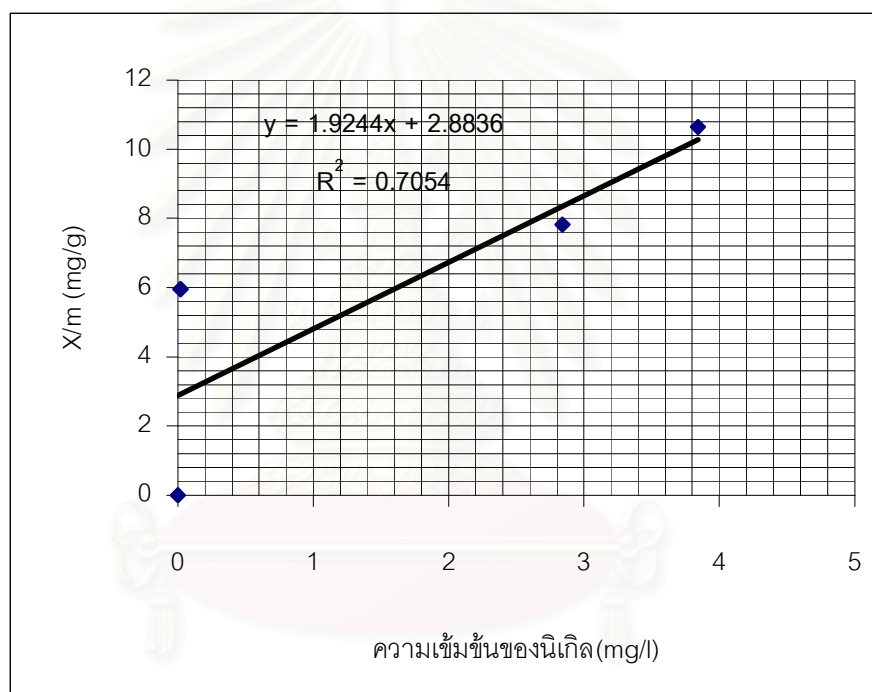


รูปที่ 4.17 ไอโซเทอมการดูดติดผิวโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ หลังการดูดติดผิวด้วยถ่าน Calgon Filtrasorb 300

จากรูปที่ 4.17 กราฟไอโซเทอมการดูดติดผิวโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์แบบฟลูนดิลิชของถ่าน Calgon Filtrasorb 300 สามารถคำนวณหาสมการเส้นตรงได้ เท่ากับ $y = 0.908x + 1.9393$ และค่า $R^2 = 0.4801$

ตารางที่ 4.19 การทดสอบการดูดติดผิวที่เกิดของถ่านกัมมันต์ Calgon Filtrasorb 300

น้ำหนัก ถ่าน (g)	ความเข้มข้นของนิเกิลที่เหลือ (mg/l)			C (mg)	X (mg)	X/m (mg/g)
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	เฉลี่ย			
0.00	6.200	5.742	5.971	0.5971	-	-
0.01	5.148	5.314	5.231	0.5231	0.074	7.400
0.02	3.966	3.716	3.841	0.3841	0.213	10.650
0.04	2.969	2.713	2.841	0.2841	0.313	7.825
0.10	0.015	0.021	0.018	0.0018	0.5953	5.953



รูปที่ 4.18 ไอโซเทอมการดูดติดผิวของนิเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ หลังการดูดติดผิวด้วยถ่าน Calgon Filtrasorb 300

จากรูปที่ 4.18 กราฟไอโซเทอมการดูดติดผิวของนิเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ แบบฟลูนดิลิชของถ่าน Calgon Filtrasorb 300 สามารถคำนวณหาสมการเส้นตรงได้ เท่ากับ $y = 1.9244x + 2.8836$ และค่า $R^2 = 0.7054$

ในการทดลองหาไอโซเทอมการดูดติดผิว ตามมาตรฐาน ASTM D3860 – 89a (Standard practice for determination of adsorptive capacity of activated carbon by

aqueous phase isotherm technique) ได้กำหนดน้ำหนักของถ่านในการทดลองเป็น 10 ค่า แต่เมื่อทำการทดลองพบว่า จะใช้น้ำหนักในการทดลองได้ตั้งแต่ 0.00 ถึง 0.20 กรัม เท่านั้น เนื่องจากน้ำหนักมากกว่านี้จะไม่สามารถตรวจวัดโครเมียมและนิเกิลที่เหลือในน้ำเสียได้ ทั้งนี้เกิดจากการดูดติดผิวร่วมกับการตกตะกอน ดังนั้นจึงทำการลดปริมาณถ่านที่ใช้ในการทดลองเหลือเพียง 6 ค่า คือ 0.00, 0.01, 0.02, 0.04, 0.10 และ 0.20 กรัม

เส้นไอโซเทอมการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส ไม้กระถินเทพา และ Calgon Filtrasorb 300 จากรูปที่ 4.13 ถึง 4.18 สามารถอธิบายได้จากสมการฟรุนดลิช คือ $X/M = KC^{1/n}$ หรือ $\log X/M = \log K + (1/n) \log C$ เมื่อนำค่า X/M และค่า C ไปวาดลงบนกราฟ \log เส้นกราฟที่ได้จะเป็นเส้นตรง ความสามารถในการดูดติดผิวโครเมียมและนิเกิลของถ่านกัมมันต์แต่ละชนิดจะพิจารณาได้จากค่า X/M ซึ่งเป็นปริมาณของสารโครเมียมและนิเกิลที่ถูกดูดติดผิวต่อน้ำหนักถ่านที่ใช้ โดยทั่วไปถ่านกัมมันต์ที่มีเส้นไอโซเทอมการดูดติดผิวที่อยู่เหนือเส้นอื่นๆ จะมีประสิทธิภาพในการดูดติดผิวได้ดีกว่า ดังนั้นประสิทธิภาพในการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์แต่ละชนิด สามารถใช้ค่าคงที่ K และ $1/n$ ที่ได้จากสมการฟรุนดลิช โดยที่ $\log K$ เป็นจุดตัดแกน y และ $1/n$ เป็นความชันของสมการเส้นตรง โดยมีวิธีการคำนวณจากสมการเส้นตรง คือ $y = a + bx$ และจากสมการฟรุนดลิช คือ $\log X/M = \log K + (1/n) \log C$ เมื่อ $\log C$ เท่ากับ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร จะได้ $a = \log K$ เมื่อนำค่า a และ b มาแทนในสมการจะได้ $K = 10^a$ และ $b = 1/n$ พบว่า ค่าที่คำนวณได้จากกราฟ เป็นค่าที่คลาดเคลื่อนไปจากค่าที่ควรจะเป็นอย่างมาก เนื่องจากไม่ใช่ค่าที่มาจากกรากำจัดโครเมียมและนิเกิลด้วยการดูดติดผิวเพียงอย่างเดียว แต่มีการตกตะกอนร่วมด้วย การที่มีการตกตะกอนของโครเมียมและนิเกิลร่วมกับการดูดติดผิวเมื่อใช้ปริมาณถ่านกัมมันต์มากขึ้นเรื่อยๆ ส่งผลให้ค่าที่พลอตลงในกราฟ \log ในตำแหน่งที่ใกล้กับแกนตั้งหรือแกน y อยู่ในตำแหน่งที่สูงกว่าค่าที่เป็นจริง ทั้งนี้เป็นเพราะ ในการทดลองนั้นได้ใช้ pH 9 ดังนั้นจึงได้คำนวณเพื่อให้ได้ค่าคงที่ของการดูดติดผิวของฟรุนดลิช โดยพิจารณาจาก ร้อยละการตกตะกอน และร้อยละการกำจัดของโครเมียมและนิเกิล (ตารางที่ 4.8 ถึง 4.11) จะได้ค่าคงที่ของการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช ที่ pH 9 ซึ่งค่าดังกล่าวแสดงดังตารางที่ 4.20

ตารางที่ 4.20 ค่าคงที่ของถ่านกัมมันต์ไม้ยูคาลิปตัส ไม้กระถินเทพา และถ่าน Calgon Filtrasorb 300 จากสมการการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช

ถ่านกัมมันต์	โครเมียม		นิเกิล	
	K (mg/g)	1/n	K (mg/g)	1/n
ถ่านไม้ยูคาลิปตัส	1.36	0.71	38.24	0.67
ถ่านไม้กระถินเทพา	12.57	1.44	50.31	1.48
ถ่าน Calgon Filtrasorb 300	24.64	0.91	217.99	1.92

ถ่านกัมมันต์ที่มีค่า K สูงสุด คือ ถ่าน Calgon Filtrasorb 300 ซึ่งจะสูงกว่าถ่านไม้ กระถินเทพา และถ่านไม้ยูคาลิปตัส ทั้งในการดูดติดผิวโครเมียมและนิเกิล แสดงว่า ถ่านกัมมันต์ที่สามารถดูดติดผิวโครเมียมและนิเกิลได้ดี คือ ถ่าน Calgon Filtrasorb 300 ถ่านไม้กระถินเทพา และถ่านไม้ยูคาลิปตัส โดยมีค่า K ของการดูดติดผิวโครเมียม ที่ pH 9 เท่ากับ 24.64, 12.57 และ 1.36 mg/g และการดูดติดผิวนิเกิล เท่ากับ 217.99, 50.31 และ 38.24 mg/g ตามลำดับ

นอกจากนี้พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากไม้กระถินเทพาจะมีค่า $1/n$ สูงในการดูดติดผิวโครเมียม และถ่าน Calgon Filtrasorb 300 มีค่า $1/n$ สูงในการดูดติดผิวนิเกิล แสดงว่า ค่าความเข้มข้น มีบทบาทต่อความสามารถในการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากไม้กระถินเทพา และ ถ่าน Calgon Filtrasorb 300 นั่นคือ ถ้าสารดูดติดผิวมีความเข้มข้นสูงจะมีแนวโน้มในการดูดติดผิวได้ดี

และจากการทดลองนี้ สอดคล้องกับผลการหาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ และการหาพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านมา นั่นคือ ถ่าน Calgon Filtrasorb 300 เป็นถ่านที่มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์ และพื้นที่ผิวสูงสุด รองลงมาคือถ่านจากไม้กระถินเทพา และถ่านไม้ยูคาลิปตัส ตามลำดับ

จากการเปรียบเทียบค่าไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟลูนดลิกซ์ในการดูดติดผิวโครเมียมและนิเกิลของถ่านจากไม้ยูคาลิปตัสและไม้กระถินเทพา พบว่า ถ่านไม้กระถินเทพามีประสิทธิภาพในการกำจัดทั้งโครเมียมและนิเกิลสูงกว่าไม้ยูคาลิปตัส โดยพิจารณาจากค่าคงที่ที่คำนวณได้ และแนวโน้มของกราฟไอโซเทอมการดูดติด ซึ่งพบว่าเส้นกราฟของถ่านไม้กระถินเทพาจะสูงกว่า ดังนั้นจึงเลือกถ่านไม้กระถินเทพาเพื่อนำไปใช้ในการทดลองแบบต่อเนื่องต่อไป

4.4 การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมและนิเกิลของถ่านกัมมันต์โดยใช้การทดลองแบบต่อเนื่อง (Column test)

การทดลองในขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาความสามารถในการใช้งานของถ่านกัมมันต์ โดยเลือกถ่านไม้กระถินเทพามาใช้เป็นตัวดูดติดผิว เนื่องจาก พบว่า มีคุณสมบัติในการดูดติดผิวโครเมียมและนิเกิลได้ดีกว่าถ่านไม้ยูคาลิปตัส ที่มีขนาดระหว่าง 0.25 – 2.36 มิลลิเมตร บรรจุลงในถังดูดติดผิวแบบแท่ง (column test) ที่เป็นท่ออะครีลิกแบบใส ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.9 เซนติเมตร และสูง 150 เซนติเมตร จำนวน 1 แท่ง และมีการเจาะรูเพื่อเก็บตัวอย่างน้ำเสียระดับความลึกของชั้นถ่านกัมมันต์ที่ 30, 60, 90 และ 120 เซนติเมตร น้ำหนักของถ่านกัมมันต์ในแต่ละชั้นถ่านหนักประมาณ 25.49 กรัม

ทำการป้อนน้ำเสียจากสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของโครเมียมและนิเกิล เท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับพีเอชของน้ำเสียเท่ากับ 9 โดยมีทิศทางการไหลของน้ำจากด้านบนลงล่าง

(down flow) อัตราการไหลของน้ำประมาณ 3 ลิตรต่อชั่วโมง ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทุกๆ 1 ลิตร ที่ความลึกของชั้นถ่านกัมมันต์ที่ 30, 60, 90 และ 120 เซนติเมตร เพื่อทำการวิเคราะห์ค่าพีเอช และปริมาณโครเมียมและนิกเกิลที่เหลือนอยู่ หลังจากนั้นนำค่าที่ได้ไปสร้างเส้นโค้งเบรคทราจ (Breakthrough curve) ระหว่างปริมาณโครเมียมและนิกเกิลที่เหลือนอยู่ในน้ำเสีย กับค่า Bed Volume (BV) โดยการคำนวณ Bed volume ของถ่านกัมมันต์จะใช้สูตร

$$\text{Bed Volume} = \frac{\text{ปริมาตรของน้ำที่ผ่านการบำบัด (ลิตร)}}{\text{ปริมาตรของชั้นถ่านกัมมันต์ (ลิตร)}}$$

และปริมาตรของชั้นถ่านกัมมันต์สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$\text{ปริมาตรของชั้นถ่านกัมมันต์ (ลิตร)} = \frac{\pi D^2 x h}{1000}$$

เมื่อ D = รัศมีภายในของคอลัมน์ (เซนติเมตร)

h = ความสูงของชั้นถ่านในคอลัมน์ (เซนติเมตร)

ซึ่งค่าปริมาตรของชั้นถ่านที่ความสูงต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.21

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

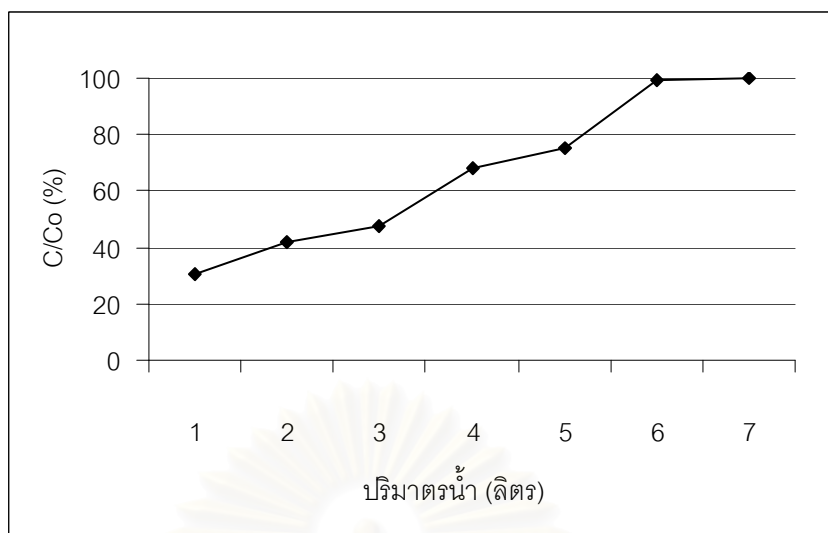
ตารางที่ 4.21 ปริมาตรของชั้นถ่านกัมมันต์ที่ความสูงต่างๆ

ชั้นความสูงของถ่านกัมมันต์ (เซนติเมตร)	ปริมาตรของชั้นถ่านกัมมันต์ (ลิตร)	น้ำหนักของถ่านกัมมันต์ (กรัม)
30	0.085	25.49
60	0.170	50.98
90	0.255	76.47
120	0.340	101.96

ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.22 ถึง 4.29 และนำค่าที่ได้จากตารางไปเขียนเส้นโค้ง
เบรคทลูจีได้ดังรูปที่ 4.19 ถึง 4.26

ตารางที่ 4.22 ปริมาณโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์หลังผ่านคอลัมน์ชั้นถ่านสูง 30 เซนติเมตร
ความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้น เท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตรของชั้นถ่านกัมมันต์ เท่ากับ
0.085 ลิตร

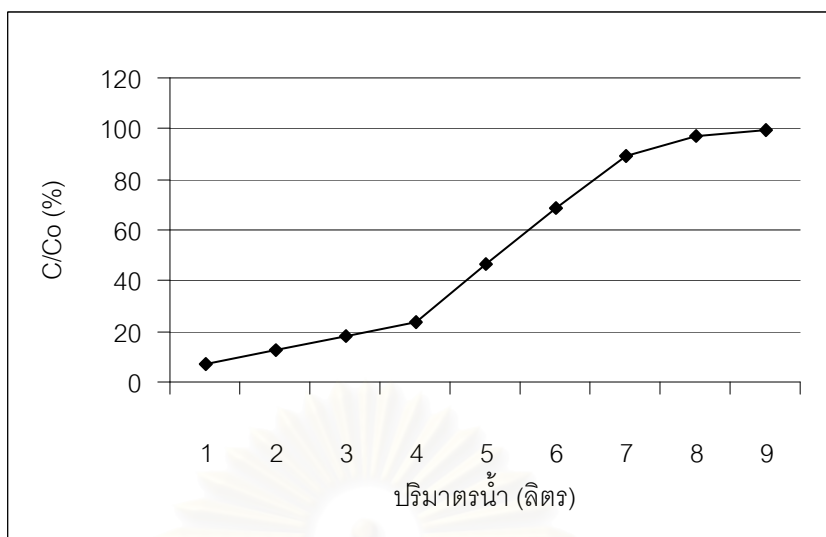
ปริมาตรน้ำ (ลิตร)	ปริมาตรน้ำ (BV)	pH	ความเข้มข้นโครเมียมที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	C/Co (%)
1	11.76	7.37	3.021	30.21
2	23.53	7.48	4.210	42.10
3	35.29	7.65	4.768	47.68
4	47.05	7.48	6.781	67.81
5	58.81	7.23	7.483	74.83
6	70.58	6.97	9.941	99.41
7	82.34	7.04	9.980	99.80



รูปที่ 4.19 เส้นโค้งเบรคทอร์จ ระหว่างความเข้มข้นของโครเมียม กับปริมาณน้ำเสียที่ความสูงชั้น ถ่านกัมมันต์ที่ 30 เซนติเมตร

ตารางที่ 4.23 ปริมาณโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์หลังผ่านคอลัมน์ชั้นถ่านสูง 60 เซนติเมตร ความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้น เท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตรของชั้นถ่านกัมมันต์ เท่ากับ 0.170 ลิตร

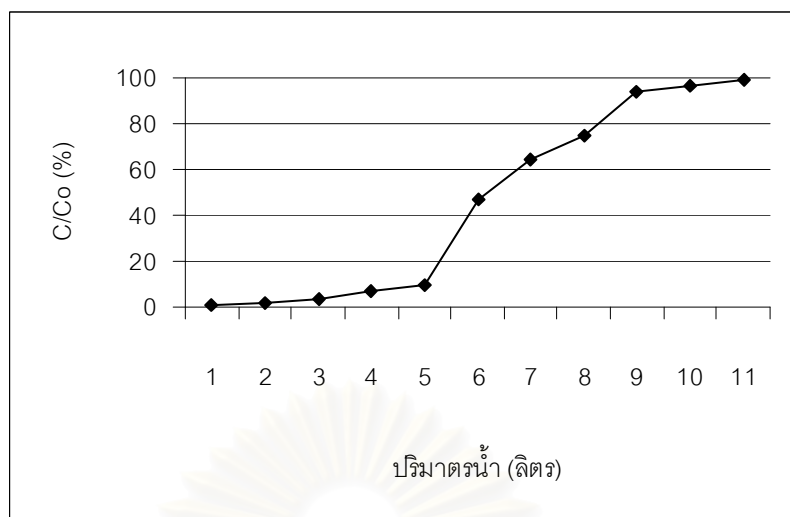
ปริมาณน้ำ (ลิตร)	ปริมาตรน้ำ (BV)	pH	ความเข้มข้นโครเมียมที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	C/Co (%)
1	5.88	7.24	0.734	7.34
2	11.76	7.09	1.243	12.43
3	17.65	6.83	1.789	17.89
4	23.53	6.73	2.343	23.43
5	29.41	7.12	4.677	46.77
6	35.29	7.13	6.893	68.93
7	41.18	6.98	8.934	89.34
8	47.06	6.74	9.673	96.73
9	52.94	7.22	9.911	99.11



รูปที่ 4.20 เส้นโค้งเบรคทวูร์ ระหว่างความเข้มข้นของโครเมียม กับปริมาณน้ำเสียที่ความสูงชั้น ถ่านกัมมันต์ที่ 60 เซนติเมตร

ตารางที่ 4.24 ปริมาณโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์หลังผ่านคอลัมน์ชั้นถ่านสูง 90 เซนติเมตร ความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้น เท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตรของชั้นถ่านกัมมันต์ เท่ากับ 0.255 ลิตร

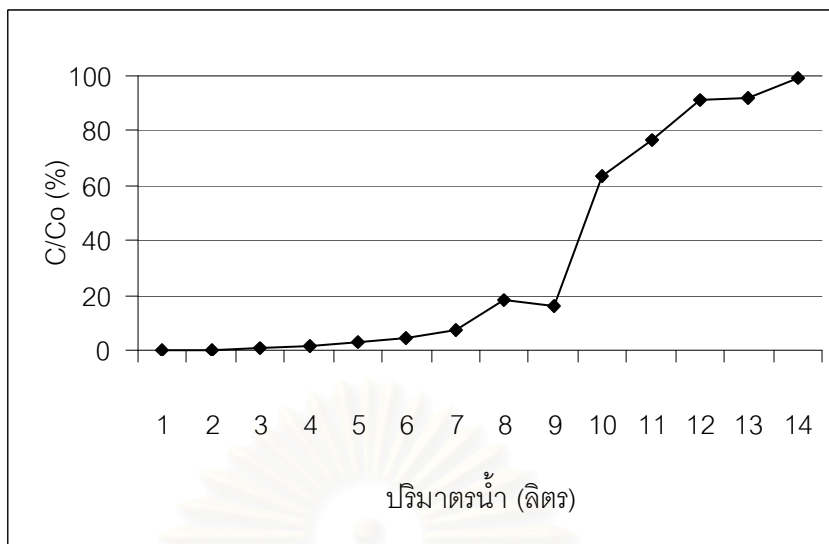
ปริมาณน้ำ (ลิตร)	ปริมาณน้ำ (BV)	pH	ความเข้มข้นโครเมียมที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	C/Co (%)
1	3.92	7.06	0.076	0.76
2	7.84	7.12	0.214	2.14
3	11.76	7.43	0.347	3.47
4	15.69	7.21	0.678	6.78
5	19.61	7.07	0.918	9.18
6	23.53	6.93	4.736	47.36
7	27.45	7.11	6.431	64.31
8	31.37	6.94	7.513	75.13
9	35.29	6.76	9.433	94.33
10	39.22	7.01	9.634	96.34
11	43.14	6.76	9.951	99.51



รูปที่ 4.21 เส้นโค้งเบรคทวูจ์ ระหว่างความเข้มข้นของโครเมียม กับปริมาณน้ำเสียที่ความสูงชั้น ถ่านกัมมันต์ที่ 90 เซนติเมตร

ตารางที่ 4.25 ปริมาณโครเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์หลังผ่านคอลัมน์ชั้นถ่านสูง 120 เซนติเมตร ความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้น เท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตรของชั้นถ่านกัมมันต์ เท่ากับ 0.340 ลิตร

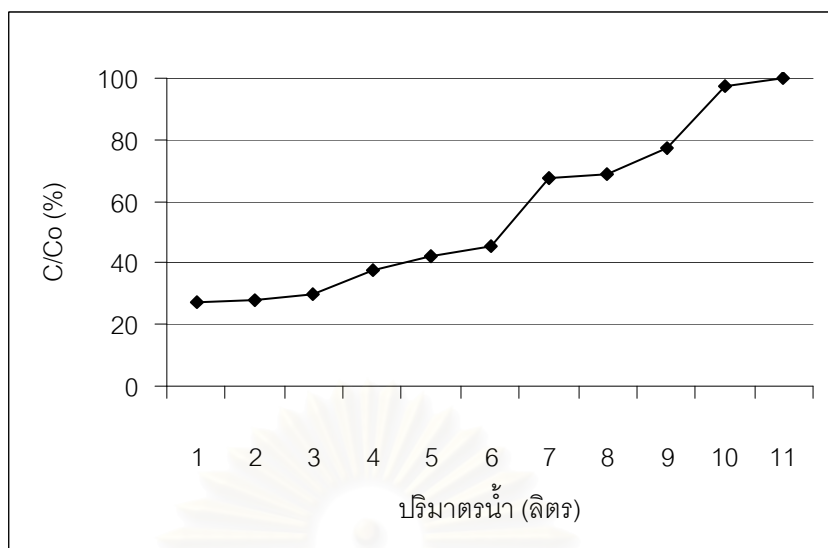
ปริมาณน้ำ (ลิตร)	ปริมาณน้ำ (BV)	pH	ความเข้มข้นโครเมียมที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	C/Co (%)
1	2.94	7.22	0.000	0.00
2	5.88	7.76	0.015	0.15
3	8.82	7.09	0.079	0.79
4	11.76	7.43	0.134	1.34
5	14.71	7.34	0.261	2.61
6	17.65	7.19	0.432	4.32
7	20.59	6.98	0.731	7.31
8	23.53	6.78	1.797	17.97
9	26.47	6.71	1.600	16.00
10	29.41	6.63	6.343	63.43
11	32.35	6.51	7.634	76.34
12	35.29	6.68	9.121	91.21
13	38.24	7.03	9.218	92.18
14	41.18	7.67	9.954	99.54



รูปที่ 4.22 เส้นโค้งเบรคทอร์จ ระหว่างความเข้มข้นของโครเมียม กับปริมาตรน้ำเสียที่ความสูงชั้น ถ่านกัมมันต์ที่ 120 เซนติเมตร

ตารางที่ 4.26 ปริมาณนิเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์ผ่านคอลัมน์ชั้นถ่านสูง 30 เซนติเมตร ความเข้มข้นนิเกิลเริ่มต้น เท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตรของชั้นถ่านกัมมันต์ เท่ากับ 0.085 ลิตร

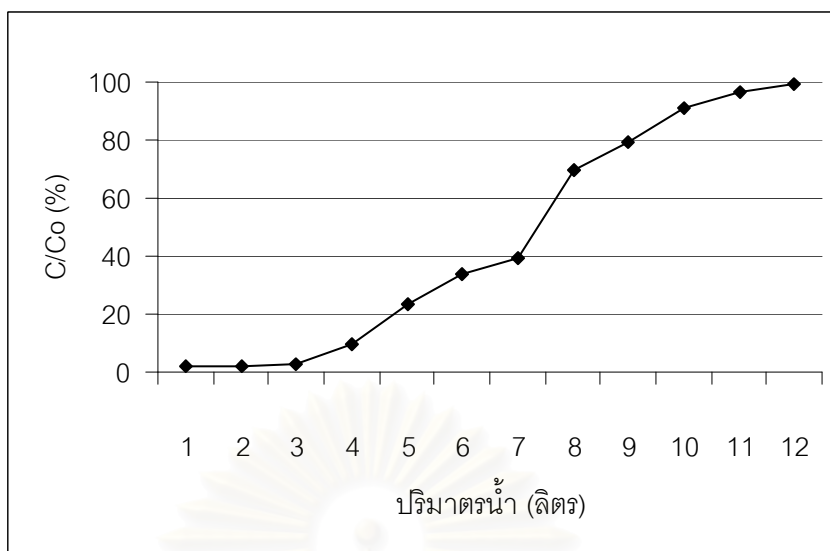
ปริมาตรน้ำ (ลิตร)	ปริมาตรน้ำ (BV)	pH	ความเข้มข้นนิเกิลที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	C/Co (%)
1	11.76	7.79	2.713	27.13
2	23.53	7.69	2.783	27.83
3	35.29	7.43	2.997	29.97
4	47.05	7.53	3.761	37.61
5	58.81	7.21	4.213	42.13
6	70.58	7.37	4.567	45.67
7	82.34	7.41	6.741	67.41
8	94.10	7.56	6.901	69.01
9	105.88	7.13	7.731	77.31
10	117.65	7.12	9.713	97.13
11	129.41	7.35	9.998	99.98



รูปที่ 4.23 เส้นโค้งเบรคทอร์จ ระหว่างความเข้มข้นของนิเกิล กับปริมาณน้ำเสียที่ความสูงชั้น ถ่านกัมมันต์ที่ 30 เซนติเมตร

ตารางที่ 4.27 ปริมาณนิเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์หลังผ่านคอลัมน์ชั้นถ่านสูง 60 เซนติเมตร ความเข้มข้นนิเกิลเริ่มต้น เท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตรของชั้นถ่านกัมมันต์ เท่ากับ 0.170 ลิตร

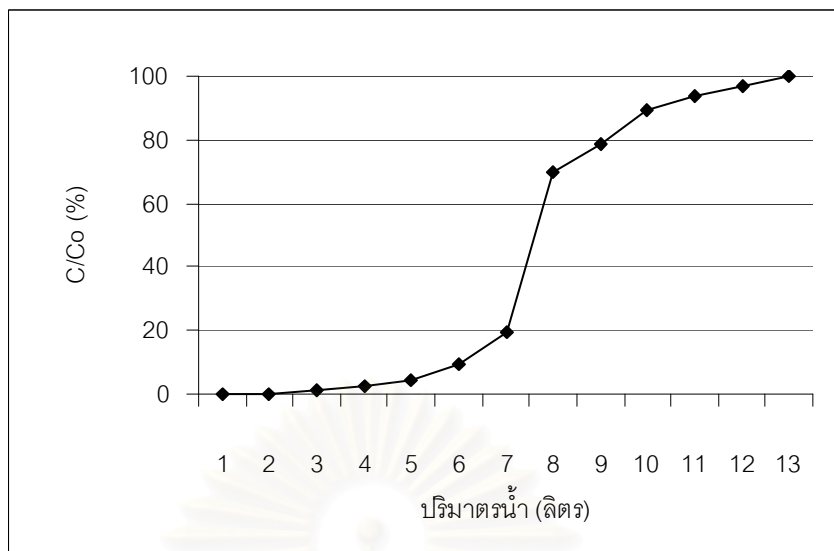
ปริมาณน้ำ (ลิตร)	ปริมาณน้ำ (BV)	pH	ความเข้มข้นนิเกิลที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	C/Co (%)
1	5.88	7.21	0.214	2.14
2	11.76	7.59	0.235	2.35
3	17.65	7.47	0.305	3.05
4	23.53	7.71	0.978	9.78
5	29.41	7.29	2.341	23.41
6	35.29	7.81	3.413	34.13
7	41.18	7.30	3.915	39.15
8	47.06	7.41	6.988	69.88
9	52.94	7.53	7.931	79.31
10	58.82	7.32	9.113	91.13
11	64.71	7.85	9.678	96.78
12	70.59	7.11	9.913	99.13



รูปที่ 4.24 เส้นโค้งเบรคทอร์จ ระหว่างความเข้มข้นของนิเกิล กับปริมาตรน้ำเสียที่ความสูงชั้น ถ่านกัมมันต์ที่ 60 เซนติเมตร

ตารางที่ 4.28 ปริมาณนิเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์หลังผ่านคอลัมน์ชั้นถ่านสูง 90 เซนติเมตร ความเข้มข้นนิเกิลเริ่มต้น เท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตรของชั้นถ่านกัมมันต์ เท่ากับ 0.255 ลิตร

ปริมาตรน้ำ (ลิตร)	ปริมาตรน้ำ (BV)	pH	ความเข้มข้นนิเกิลที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	C/Co (%)
1	3.92	7.11	0.018	0.18
2	7.84	7.03	0.029	0.29
3	11.76	6.98	0.121	1.21
4	15.69	6.76	0.234	2.34
5	19.61	6.73	0.415	4.15
6	23.53	6.71	0.914	9.14
7	27.45	7.31	1.954	19.54
8	31.37	7.21	6.974	69.74
9	35.29	7.01	7.841	78.41
10	39.22	7.13	8.935	89.35
11	43.14	7.24	9.344	93.44
12	47.06	7.23	9.667	96.67
13	50.98	7.19	9.995	99.95

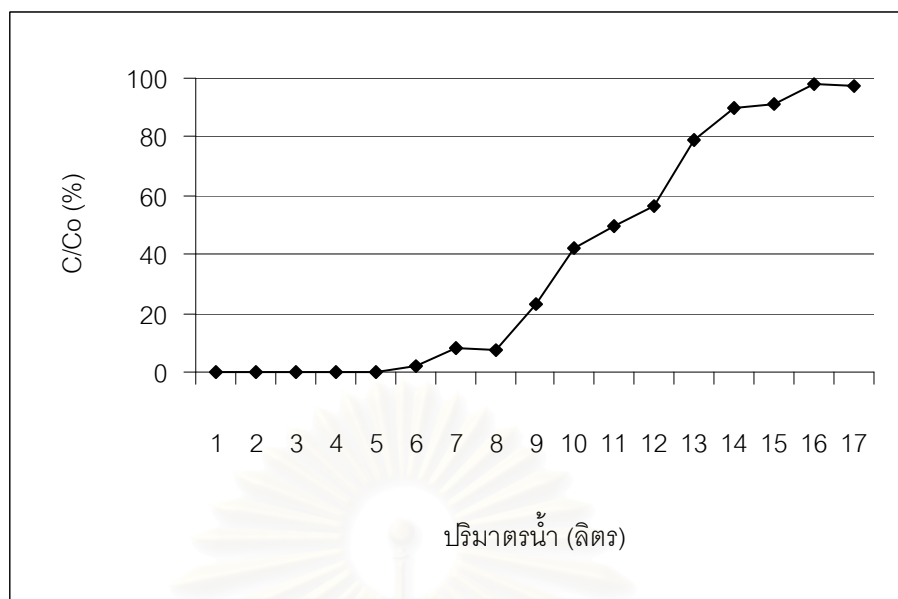


รูปที่ 4.25 เส้นโค้งเปอร์เซ็นต์ ระหว่างความเข้มข้นของนิเกิล กับปริมาณน้ำเสียที่ความสูงชั้น ถ่านกัมมันต์ที่ 90 เซนติเมตร

ตารางที่ 4.29 ปริมาณนิเกิลในน้ำเสียสังเคราะห์หลังผ่านคอลัมน์ชั้นถ่านสูง 120 เซนติเมตร ความเข้มข้นนิเกิลเริ่มต้น เท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตรของชั้นถ่านกัมมันต์ เท่ากับ 0.340 ลิตร

ปริมาตรน้ำ (ลิตร)	ปริมาตรน้ำ (BV)	pH	ความเข้มข้นนิเกิลที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	C/Co (%)
1	2.94	7.34	0.000	0.00
2	5.88	7.28	0.000	0.00
3	8.82	7.15	0.000	0.00
4	11.76	7.31	0.012	0.12
5	14.71	7.20	0.017	0.17
6	17.65	7.11	0.213	2.13
7	20.59	7.13	0.817	8.17
8	23.53	7.29	0.731	7.31
9	26.47	7.01	2.341	23.41
10	29.41	7.38	4.241	42.41
11	32.35	7.43	4.973	49.73
12	35.29	7.02	5.663	56.63
13	38.24	6.98	7.891	78.91
14	41.18	6.83	8.991	89.91
15	44.12	7.08	9.121	91.21
16	47.05	7.11	9.787	97.87
17	50.00	7.35	9.743	97.43

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.26 เส้นโค้งเบรคทราจ์ ระหว่างความเข้มข้นของนิเกิล กับปริมาณน้ำเสียที่ความสูงชั้นถ่านกัมมันต์ที่ 120 เซนติเมตร

จากการทดลองในตารางที่ 4.22 ถึง 4.29 พบว่า ทั้งความเข้มข้นของโครเมียมและนิเกิลที่ผ่านออกจากคอลัมน์ในระยะแรกมีปริมาณน้อย แต่เมื่อปริมาณน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์มากขึ้นเรื่อยๆ ความเข้มข้นของโครเมียมและนิเกิลในน้ำเสียจะค่อยๆ สูงขึ้น และประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมและนิเกิลในระดับชั้นความสูงแต่ละชั้นมีแนวโน้มที่ลดลง แสดงว่า ถ่านกัมมันต์จากไม้กระถินเทพาที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์เริ่มหมดประสิทธิภาพของการดูดติดผิว ถึงปริมาณหนึ่งที่ความเข้มข้นของโครเมียมและนิเกิลในน้ำเสียเท่ากับความเข้มข้นโครเมียมและนิเกิลเริ่มต้น ณ จุดนี้เรียกว่า จุดหมดสภาพ ซึ่งเป็นจุดที่ถ่านไม้กระถินเทพาหมดประสิทธิภาพในการดูดติดผิว นั่นเอง และการที่ในระยะแรกปริมาณโครเมียมและนิเกิลลดลงนั้น เนื่องจาก ถ่านไม้กระถินเทพายังมีพื้นที่ผิวอยู่มาก ดังนั้นจึงสามารถดูดติดผิวโครเมียมและนิเกิลที่ผ่านคอลัมน์ได้สูง แต่เมื่อมีปริมาณน้ำเสียไหลผ่านคอลัมน์มากยิ่งขึ้นทำให้มีพื้นที่ผิวสำหรับการดูดติดผิวลดน้อยลง และไม่สามารถดูดติดผิวโครเมียมและนิเกิลที่ผ่านเข้ามาใหม่ได้ จึงทำให้น้ำเสียที่ออกจากคอลัมน์ในระยะหลังมีปริมาณโครเมียมและนิเกิลสูงขึ้น

จากรูปที่ 4.19 ถึงรูปที่ 4.22 แสดง Breakthrough Curve ของการดูดติดผิวโครเมียมที่ระดับความสูงของคอลัมน์ 30, 60, 90 และ 120 เซนติเมตร โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากไม้กระถินเทพา ดังนั้นที่ระดับความสูง 30, 60, 90 และ 120 เซนติเมตร ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากไม้กระถินเทพา 1 กรัม สามารถดูดติดผิวโครเมียมได้เท่ากับ 2.75, 1.77, 1.44 และ 1.37 มิลลิกรัม

ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และคิดเป็น 82.34, 52.94, 43.14 และ 41.18 BV ตามลำดับ

และจากรูปที่ 4.23 ถึงรูปที่ 4.26 แสดง Breakthrough Curve ของการดูดติดผิวที่เกิดขึ้นที่ระดับความสูงของคอลัมน์ 30, 60, 90 และ 120 เซนติเมตร โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากไม้กระถินเทพา ดังนั้นที่ระดับความสูง 30, 60, 90 และ 120 เซนติเมตร ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากไม้กระถินเทพา 1 กรัม สามารถดูดติดผิวที่เกิดขึ้นได้เท่ากับ 4.32, 2.35, 1.70 และ 1.67 มิลลิกรัมตามลำดับ ที่ความเข้มข้นที่เกิดขึ้นเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และคิดเป็น 129.41, 70.59, 50.98 และ 50.00 BV ตามลำดับ

จากการทดสอบประสิทธิภาพของการดูดติดผิวโครเมียมและนิกเกิลของถ่านไม้กระถินเทพา ในถังดูดติดผิวแบบแท่ง สามารถสรุปปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัดได้ดังตารางที่ 4.30 ถึง 4.31

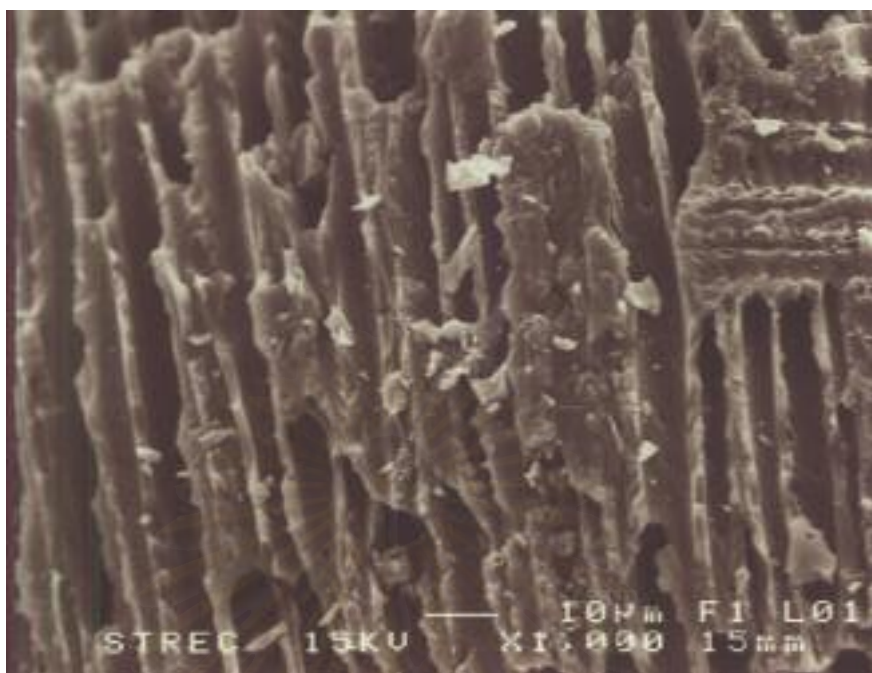
ตารางที่ 4.30 ผลการทดลองการกำจัดโครเมียมในถังดูดติดผิวแบบแท่ง

ชั้นความสูงของถ่านกัมมันต์ (เซนติเมตร)	ปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัด (ลิตร)	คิดเป็นปริมาณ Bed Volume	น้ำหนักโครเมียมที่ถูกกำจัดต่อกรัมของถ่านกัมมันต์ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
30	7	82.34	2.75
60	9	52.94	1.77
90	11	43.14	1.44
120	14	41.18	1.37

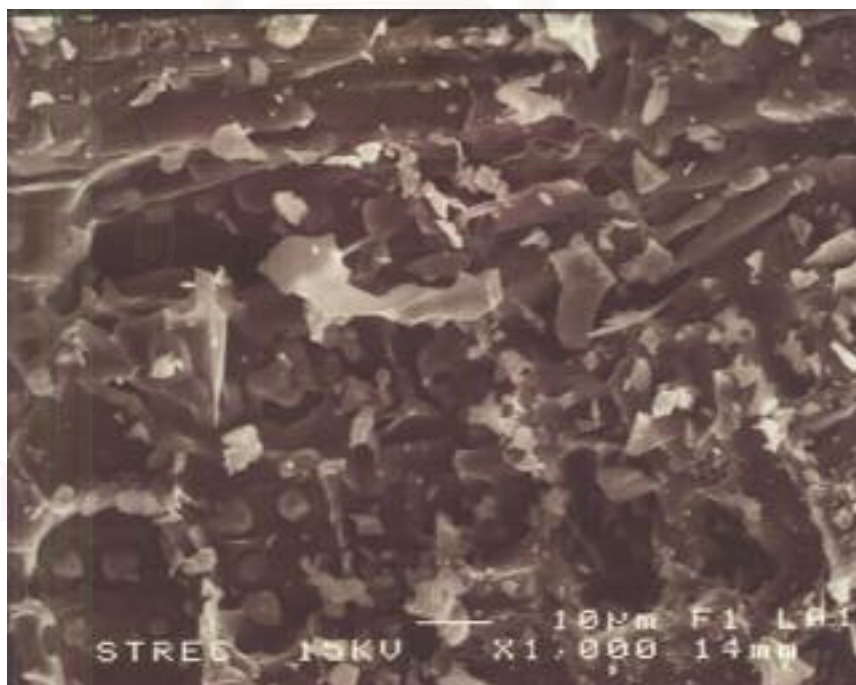
ตารางที่ 4.31 ผลการทดลองการกำจัดนิกเกิลในถังดูดติดผิวแบบแท่ง

ชั้นความสูงของถ่านกัมมันต์ (เซนติเมตร)	ปริมาณน้ำที่ผ่านการบำบัด (ลิตร)	คิดเป็นปริมาณ Bed Volume	น้ำหนักนิกเกิลที่ถูกกำจัดต่อกรัมของถ่านกัมมันต์ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
30	11	129.41	4.32
60	12	70.59	2.35
90	13	50.98	1.70
120	17	50.00	1.67

และเมื่อนำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากไม้กระถินเทพาที่ผ่านการดูดติดผิวจากคอลัมน์ไปทำการตรวจดูพื้นที่ผิวด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบลักษณะพื้นผิวและรูพรุนของถ่านกัมมันต์ก่อนและหลังการดูดติดผิวโครเมียมและนิกเกิล ได้แสดงดังรูปที่ 4.27 ถึง 4.28



รูปที่ 4.27 ลักษณะโครงสร้าง และพื้นผิวของถ่านไม้กระถินเทพาที่ผ่านการดูดติดผิวโครเมียม เมื่อใช้กำลังขยาย 1000 เท่า



รูปที่ 4.28 ลักษณะโครงสร้าง และพื้นผิวของถ่านไม้กระถินเทพาที่ผ่านการดูดติดผิวคาร์บอน เมื่อใช้กำลังขยาย 1000 เท่า

จากรูปที่ 4.27 และ 4.28 พื้นผิวของถ่านหลังจากการดูดติดผิวโครเมียมและนิเกิลจะเปลี่ยนแปลงไป โดยพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ส่วนใหญ่จะถูกปิด จากภาพ คาดว่าจะเป็นตะกอนของโครเมียมและนิเกิล ซึ่งตกอยู่บนพื้นผิวของถ่าน เนื่องจากพื้นผิวที่มีคุณสมบัติเป็นต่างของถ่านกัมมันต์

นอกจากนี้ยังได้นำถ่านกัมมันต์จากไม้กระถินเทพาไปทำการฟื้นฟูสภาพ (Regeneration) โดยการผ่านของสารละลายกรดไฮดรอกลอริก (HCl) ความเข้มข้น 5 %HCl โดยน้ำหนัก แล้วนำไปวิเคราะห์หาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ ซึ่งมีค่าไอโอดีนนัมเบอร์ เท่ากับ 388 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 421 มิลลิกรัมต่อกรัม ของถ่านกัมมันต์ที่มีการดูดติดผิวโครเมียมและนิเกิล ตามลำดับ ซึ่งพบว่า มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์ลดลงจากเกือบร้อยละ 50 ทั้งนี้เนื่องจาก ตะกอนของโครเมียมและนิเกิลซึ่งถูกดูดติดผิวเข้าไปภายในรูพรุนของถ่านกัมมันต์ ทำให้พื้นที่ผิวลดลง ซึ่งส่งผลให้ถ่านมีความสามารถดูดติดผิวลดลง



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาหาประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียม และนิเกิลจากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส และไม้กระถินเทพา โดยเปรียบเทียบกับถ่าน Calgon Filtrasorb 300 ซึ่งเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีขายตามท้องตลาดทั่วไป สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 การเตรียมถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากไม้ยูคาลิปตัสโดยทำการเผาคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที ผลผลิตมีค่าสูงสุดถึงร้อยละ 59.01 แซ่สารกระตุ้นเกลือแกงตามอัตราส่วนโดยน้ำหนักของวัตถุดิบต่อสารกระตุ้นเกลือแกงที่อัตราส่วน 1:2 และเผากระตุ้นอีกครั้งที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ได้ผลิตภัณฑ์ถ่านไม้ยูคาลิปตัสมีค่าไอโอดีนนัมเบอร์สูงสุดเท่ากับ 612 มิลลิกรัมต่อกรัม

ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากไม้กระถินเทพาโดยทำการเผาคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที ผลผลิตมีค่าสูงสุดถึงร้อยละ 60.91 แซ่สารกระตุ้นเกลือแกงตามอัตราส่วนโดยน้ำหนักของวัตถุดิบต่อสารกระตุ้นเกลือแกงที่อัตราส่วน 1:2 และเผากระตุ้นอีกครั้งที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ได้ผลิตภัณฑ์ถ่านไม้กระถินเทพามีค่าไอโอดีนนัมเบอร์สูงสุดเท่ากับ 701 มิลลิกรัมต่อกรัม

พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากไม้ยูคาลิปตัส และไม้กระถินเทพา เท่ากับ 368.68 และ 408.64 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรโพรงเท่ากับ 0.27 และ 0.34 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และมีขนาดโพรงเฉลี่ยเท่ากับ 13.55 และ 18.04 อังสตรอม ตามลำดับ

Calgon Filtrasorb 300 มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์ เท่ากับ 900 มิลลิกรัมต่อกรัม พื้นที่ผิว เท่ากับ 900 – 1000 ตารางเมตรต่อกรัม และปริมาตรโพรง เท่ากับ 0.75 – 0.85 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม

5.1.2 การทดสอบประสิทธิภาพของถ่านไม้ยูคาลิปตัสและไม้กระถินเทพา เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ Calgon Filtrasorb 300 ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด

การหาพีเอชที่เหมาะสม

จากผลการทดลอง สรุปได้ว่าที่ pH 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 และ 9 ประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมและนิเกิลของถ่านไม้ยูคาลิปตัสและกระถินเทพา สามารถดูดติดผิวได้สูงสุด คือ pH เท่ากับ 9 ดังนั้นจึงเลือก pH เท่ากับ 9 เพื่อใช้ในการทดลองขั้นต่อไป ส่วนถ่าน Calgon Filtrasorb 300 เลือก pH เท่ากับ 4

การหาความเข้มข้นที่เหมาะสม

เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโครเมียมและนิเกิล จาก 10, 20 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ประสิทธิภาพการกำจัดโครเมียมและนิเกิลของถ่านไม้ยูคาลิปตัส ไม้กระถินเทพา และถ่าน Calgon Filtrasorb 300 มีค่าลดลง โดยถ่านไม้ยูคาลิปตัส พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมจะลดลงจากร้อยละ 79.77, 71.61 และ 68.19 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโครเมียม เป็น 10, 20 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ สำหรับถ่านไม้กระถินเทพา พบว่า มีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมจะลดลงจากร้อยละ 90.17, 84.17 และ 81.98 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโครเมียม เป็น 10, 20 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และถ่าน Calgon Filtrasorb 300 พบว่า มีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมจะลดลงจากร้อยละ 99.37, 91.43 และ 89.44 เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโครเมียม เป็น 10, 20 และ 30 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

การทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรอนดลิชของถ่านไม้ยูคาลิปตัส ไม้กระถินเทพา และถ่าน Calgon Filtrasorb 300

จากการทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรอนดลิช พบว่า ถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัส ไม้กระถินเทพา และ Calgon Filtrasorb 300 มีค่า K ของการดูดติดผิวโครเมียม ที่ pH 9 เท่ากับ 1.36, 12.57 และ 24.64 mg/g และการดูดติดผิวนิเกิล เท่ากับ 38.24, 50.31 และ 217.99 mg/g ตามลำดับ นอกจากนี้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากไม้กระถินเทพาจะมีค่า $1/n$ สูงสุดในการดูดติดผิวโครเมียม และ ถ่าน Calgon Filtrasorb 300 มีค่า $1/n$ สูงสุดในการดูดติดผิวนิเกิล แสดงว่า ค่าความเข้มข้น มีบทบาทต่อความสามารถในการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจาก

ไม้กระถินเทพาและ ถ่าน Calgon Filtrasorb 300 นั่นคือ ถ้ำสารที่ถูกดูดติดผิวมีความเข้มข้นสูง ถ่านกัมมันต์จากไม้กระถินเทพา และถ่าน Calgon Filtrasorb 300 มีแนวโน้มในการดูดติดผิวได้

5.1.3 การศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากไม้กระถินเทพาโดยการทดลองแบบต่อเนื่องในคอลัมน์ (Column Test)

การใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากไม้กระถินเทพา ในการดูดติดผิวโครเมียมที่ระดับความสูงของคอลัมน์ 30, 60, 90 และ 120 เซนติเมตร โดย ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากไม้กระถินเทพา 1 กรัม สามารถดูดติดผิวโครเมียมได้เท่ากับ 2.75, 1.77, 1.44 และ 1.37 มิลลิกรัม ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นโครเมียมเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และคิดเป็น 82.34, 52.94, 43.14 และ 41.18 BV ตามลำดับ

และการดูดติดผิวนิกเกิลที่ระดับความสูงของคอลัมน์ 30, 60, 90 และ 120 เซนติเมตร โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากไม้กระถินเทพา ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากไม้กระถินเทพา 1 กรัม สามารถดูดติดผิวนิกเกิลได้เท่ากับ 4.32, 2.35, 1.70 และ 1.67 มิลลิกรัม ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นนิกเกิลเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และคิดเป็น 129.41, 70.59, 50.98 และ 50.00 BV ตามลำดับ

ถ่านกัมมันต์จากไม้กระถินเทพาที่ผ่านการฟื้นฟูสภาพ (Regeneration) โดยการผ่านของสารละลายกรดไฮดรอกลอริก (HCl) ความเข้มข้น 5 %HCl โดยน้ำหนัก แล้วนำไปวิเคราะห์หาค่าไอโอดีนัมเบอร์ ซึ่งมีค่าไอโอดีนัมเบอร์ เท่ากับ 388 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 421 มิลลิกรัมต่อกรัม ของถ่านกัมมันต์ที่มีการดูดติดผิวโครเมียมและนิกเกิล ตามลำดับ ซึ่งพบว่า มีค่าไอโอดีนัมเบอร์ ลดลงจากเดิมเกือบร้อยละ 50

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 ควรมีการศึกษาวิธีการล้างถ่านหลังจากผ่านการกระตุ้นด้วย NaCl ให้ประหยัดน้ำกลับ เนื่องจากสิ้นเปลืองน้ำกลับและเสียเวลาในการล้างเกลือออกค่อนข้างมาก

5.2.2 ควรมีการศึกษาทดลองนำถ่านกัมมันต์จากไม้ยูคาลิปตัสและไม้กระถินเทพาไปใช้ประโยชน์ในการดูดติดผิวสารอื่นๆ เช่น ตะกั่ว แคดเมียม สี เป็นต้น

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

กรมศุลกากร. สถิติการนำเข้าคาร์บอนกัมมันต์ [Online].

<http://www.customs.go.th/Statistic/StatisticIndex.jsp> .(วันที่ 3 กันยายน 2548)

กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย, กรมควบคุมมลพิษ.2541. แคดเมียม(Cadmium). พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร.

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2539. การบำบัดน้ำเสีย (Wastewater Treatment). พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร : มิตรนราการพิมพ์.

ดำรง ชุมมมงคล และ อภิสสิทธิ์ เจริญกุล. 2533. การผลิตถ่านกัมมันต์ โดยใช้ NaCl เป็นตัวกระตุ้น. วิศวกรรมสาร 43 (6): 96-99.

ชัยวัฒน์ เจนวานิชย์. 2525. สารานุกรมธาตุ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพ : สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์.

พงศธร ใคว์ชชาภรณ์ .2538. ถ่านกัมมันต์จากขังข้าวโพด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต ภาควิชา วิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

พงศ์ศักดิ์ ไชยารส. 2539. การศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตถ่านกัมมันต์จากขังข้าวโพดโดยใช้เกลือ แก่งเป็นตัวกระตุ้น. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีที่เหมาะสมเพื่อการพัฒนาทรัพยากร บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล.

มันสิน ต้นทุลเวศม์.2539. วิศวกรรมการประปา เล่ม 2. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มานพ ตีระรัตนสมโภช .2545.การกำจัดตะกั่วในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกัมมันต์จากขี้เลื่อย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ไมตรี สุทธิจิตต์. 2534. สารพิษรอบตัวเรา. พิมพ์ครั้งที่ 2. เชียงใหม่ : ดาวคอมพิวกราฟิค.

รัชนก แซ่เจิน. 2541. การลดปริมาณสารหนูในน้ำ ด้วยกระบวนการดูดซับ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

ภาษาไทย (ต่อ)

ลลิตา นิต์ศนจารกุล. 2544. การกำจัดตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการดูดติดผิวโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

วิจิตร จินดาพันธ์ไพโรจน์. 2543. การเตรียมถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากไม้ยูคาลิปตัส Eucalyptus camaldulensis Dehnh. กระตุ้นด้วยคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำร้อนยวดยิ่ง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาเคมีเทคนิค คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สุจันย์ คู่ยเสียม. 2544. การกำจัดตะกั่วและปรอทจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มและกะลามะพร้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อุตสาหกรรม , กระทรวง. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม , สำนักงาน. 2532. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์ : Standard for activated carbon. กรุงเทพมหานคร : สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาษาอังกฤษ

- American Society for Testing and Materials. 1996. Standard practice for : Determination of adsorptive capacity of activated carbon by aqueous phase isotherm technique, D 3860 – 89a. Annual book of ASTM standards Vol. 15.01. Philadelphia:ASTM.
- American Society for Testing and Materials. 1996. Standard test method for: Determination of iodine number of activated carbon, D 4607 - 94. Annual book of ASTM standards Vol. 15.01. Philadelphia:ASTM.
- American Society for Testing and Materials. 1977. Standard test method for: Specific surface area of carbon or graphite, C 819 - 77. Annual book of ASTM standards. Philadelphia:ASTM.
- Calgon Carbon Coperation. 1996. Filtrisorb 300 and 400 Granular Activated Carbon For Wastewater. (n.p.).
- Chen , J.P. and Wang. 2000. Removing copper zinc and lead ion by granular activated carbon in pretreated fixed-bed columns. Separation and Purification Technology 19 : 157-167.
- Cookson, J.T.Jr. 1978. Adsorption machanisms : the chemistry of organic adsorption on activated carbon. In P.N. Cheremisinoff, and F. Ellerbusch (eds.). Carbon adsorption handbook. Michigan: Ann Arbor Science.
- Eckenfelder, W.W. 2000. Industrial water pollution control. 2nd New York: McGraw-Hill .
- Faust, S. D., and Aly, O.M. 1987. Adsorption Process for Water Treatment. MA.: Butterworth Publisher.
- Fergusson , J.E. 1990. The heavy elements : Chemistry , environment impact and health effect. Great Britain : BPCC Wheatons.
- Hassler, J.W. 1967. Activated carbon. London : Leonard Hill.

ภาษาอังกฤษ (ต่อ)

- Kadirvelu, K., Thamaraiselvi, K. and Namasivayam C. 2001. Removal of heavy metals from industrial wastewater by adsorption onto activated carbon prepared from an agricultural soil waste. Bioresource Technology 76 (1) : 63-65.
- Lewis, R.J. Carbon, activated. 1997. Hawley's Condensed Chemical Dictionary. 13th ed. New York: John Wiley & Sons.
- Metcalf and Eddy, Inc. 1991. Wastewater engineering : treatment disposal reuse. 3rd ed. New York : McGraw-Hill.
- Montgomery, J.M. 1985. Water treatment principles and design. New York: John Wiley and Sons.
- Myer, D. 1999. Surface, interface and colloids: principal and applications. 2nd ed. New York : John Wiley & Sons.
- Orfao, J. J. M., Antunes, F. J. A. and Figueiredo, J. L. 1999. Pyrolysis kinetics of lignocellulosic materials – three independent reactions model. Fuel 78: 349-358
- Patterson, J.W. 1985. Industrial waste water treatment technology. 2^{ed}. Boston : Butterworth
- Rouquerol, F., Rouquerol, J. and Sing, K. 1999. Adsorption by powders and porous solids
Adsorption by powders & porous solids : principles, methodology and applications. San Diego, California.: Academic Press.
- Yehaskel, A. 1978. Activated Carbon: Manufacture and Regeneration, Park Ridge, New Jersey : Noyes Data Corporation.
- Yao, K.M., Habbian, M.T. and O' Melia, C.R. 1971. Water and wastewater Filtration. Environmental Science and Technology 5 : 1105 – 1112.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

วิธีการหาค่าไอโอดีนัมเบอร์ (Standard test method for determination of iodine number of activated carbon , ASTM D 4607)

1. เครื่องมือ

- เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง
- เตาอบอุณหภูมิ 110 – 150 องศาเซลเซียส
- ขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer Flask) ขนาด 250 มิลลิลิตร
- กระดาษกรองเบอร์ 42 ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร
- เครื่องแก้ว : บิวเรตต์ , ปิเปต , กรวยกรอง , บีกเกอร์ , ขวดปรับปริมาตรขนาด 1 ลิตร
- โถดูดความชื้น (Desiccator)

2. สารเคมี และวิธีเตรียม

2.1 สารละลายกรดไฮโดรคลอริก ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

- ผสมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นจำนวน 70 มิลลิลิตร ลงในน้ำกลั่น 550 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน

2.2 สารละลายมาตรฐานโปแตสเซียมไอโอเดต 0.1000 นอร์มัล (normal, N)

- ชั่งโปแตสเซียมไอโอเดต (primary standard grade potassium iodate, KIO_3) ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 110 ± 5 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น จำนวน 3.5667 ± 0.1 มิลลิกรัม ละลายในน้ำกลั่นปริมาณ 100 มิลลิลิตร ถ่ายสารละลายลงในขวดปรับปริมาตร (volumetric flask) ขนาด 1 ลิตร ทำให้เจือจางด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร

2.3 สารละลายมาตรฐานโซเดียมไธโอซัลเฟต 0.1 ± 0.001 นอร์มัล (normal, N)

- ละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต (sodium thiosulfate, $Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$) 24.820 กรัม ในน้ำกลั่นที่ผ่านการต้มให้เดือด 75 ± 25 มิลลิลิตร เติมโซเดียมคาร์บอเนต 0.10 ± 0.01 กรัม ถ่ายสารละลายลงในขวดปรับปริมาตร (volumetric flask) ขนาด 1 ลิตร ทำให้เจือจางด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร เก็บสารละลายนี้ไว้ในขวดสีชา ทิ้งไว้อย่างน้อย 4 วัน ก่อนทำการตรวจสอบความเข้มข้น

2.4 สารละลายมาตรฐานไอโอดีน 0.1 ± 0.001 นอร์มัล (normal, N)

- ชั่งไอโอดีน 12.7 กรัม และโปแตสเซียมไอโอไดน์ (KI) 19.1 กรัม ผสมให้เข้ากัน เติมน้ำกลั่น 2 – 5 มิลลิลิตร คนให้ของแข็งละลาย ค่อยๆ เติมน้ำทีละน้อย (ครั้งละ ประมาณ 5 มิลลิลิตร) จนกระทั่งได้สารละลายปริมาณ 40 มิลลิลิตร ที่ซึ่ง สารละลายไว้อย่างน้อย 4 ชั่วโมง คนเป็นระยะ เพื่อให้แน่ใจว่าของแข็งละลายหมด ถ่ายสารละลายลงในขวดปริมาตร (volumetric flask) ขนาด 1 ลิตรทำให้เจือจางด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร เก็บสารละลายนี้ไว้ในขวดสีชา ตรวจสอบความเข้มข้นกับสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต 0.1 N

2.5 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

3.1 การตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต

ใช้ปิเปตดูดสารละลายโปแตสเซียมไอโอเดต (KIO_3) 25 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ เติมโปแตสเซียมไอโอไดน์ (KI) 2.0 ± 0.01 กรัม เขย่าจนละลาย ปิดตกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 5 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ แล้วไตเตรดทันทีด้วยสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต 0.1 N เมื่อสีของสารละลายไอโอดีนจางลงจนกระทั่งเป็นสีเหลืองอ่อน (ใกล้ถึงจุด end point) หยดน้ำแป้ง 2 – 3 หยด สารละลายจะเป็นสีน้ำเงิน ไตเตรดต่อจนสารละลายไม่มีสี บันทึกปริมาตรของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ใช้ ทำการไตเตรดซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้ง คำนวณหาความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตโดยใช้สูตร

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

เมื่อ	N1	= ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต, นอร์มัล
	P	= ปริมาตรสารละลายโปแตสเซียมไอโอเดต, มิลลิลิตร
	R	= ความเข้มข้นสารละลายโปแตสเซียมไอโอเดต, นอร์มัล และ
	S	= ปริมาตรสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ใช้, มิลลิลิตร

3.2 การตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน

ใช้ปิเปตดูดสารละลายไอโอดีน 25 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ แล้วไตเตรดทันทีด้วยสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต 0.1 N เมื่อสีของสารละลายไอโอดีนจางลง จนกระทั่งเป็นสีเหลืองอ่อน (ใกล้ถึงจุด end point) หยดน้ำแบ่ง 2 – 3 หยด สารละลายจะเป็นสีน้ำเงิน ไตเตรดต่อจนสารละลายไม่มีสี บันทึกปริมาตรของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ใช้ ทำการไตเตรดซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้ง คำนวณหาความเข้มข้นสารละลายไอโอดีนโดยใช้สูตร

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

เมื่อ	N_2	= ความเข้มข้นสารละลายไอโอดีน, นอร์มัล
	S	= ปริมาตรสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ใช้, มิลลิลิตร
	N_1	= ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต, นอร์มัล
	I	= ปริมาตรสารละลายไอโอดีน, มิลลิลิตร

4. วิธีการวิเคราะห์

4.1 บดถ่านกัมมันต์ที่จะทำการวิเคราะห์ให้ละเอียด จนถ่านสามารถร่อนผ่านตะแกรงคัดขนาดเบอร์ 100 เมช ได้ 95 % และสามารถร่อนผ่านตะแกรงคัดขนาดเบอร์ 325 เมช ได้ 60 %

4.2 นำถ่านกัมมันต์ที่บดแล้ว มาอบไล่ความชื้น ที่อุณหภูมิ 145 ถึง 155 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น (ตามวิธีของ Standard test methods for moisture in activated carbon, ASTM D 2867)

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

4.4 ปิเปต 5% สารละลายกรดไฮโดรคลอริก จำนวน 10 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่แต่ละใบ ปิดจุก เขย่าเบาๆ เพื่อให้ตัวอย่างเปียกทั่ว เปิดฝา แล้วนำไปตั้งบน hot plate ในตู้ดูดควัน ให้ความร้อนของเหลวในภาชนะเดือด ทิ้งให้เดือดต่อประมาณ 30 ± 2 วินาที เพื่อไล่ซัลเฟตในตัวอย่าง หลังจากนั้นนำตัวอย่างออก แล้วทิ้งให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง

4.5 ปิเปตสารละลายไอโอดีน 0.1 N จำนวน 100 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ ปิดจุกขวดทันที แล้วเขย่าอย่างแรงเป็นเวลา 30 ± 1 วินาที ปิดจุก แล้วกรองสารละลายผ่านกระดาษกรองพับจีบ หมายเลข 42

4.6 บีเปตสารละลายที่กรองได้ 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ ไตเตรตสารละลายด้วย สารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟต 0.1 N จนกระทั่งสารละลายเป็นสีเหลืองอ่อน เติมสารละลายน้ำแป้งลงไป 2 มิลลิลิตรแล้วไตเตรดต่อ จนกระทั่งสารละลายในขวดรูปชมพู่ไม่มีสี บันทึกปริมาตรสารละลายโซเดียมไฮโอซัลเฟตที่ใช้

5. การคำนวณ

5.1 การคำนวณหาค่า Iodine number ใช้สูตร

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

โดยที่

$$X/M = \text{Iodine adsorption per gram of carbon (mg/g)}$$

$$A = (N_2) (12693.0) \text{ ---- } N_2 = \text{ความเข้มข้นไอโอดีน (N)}$$

$$B = (N_1) (126.93) \text{ ----- } N_1 = \text{ความเข้มข้น } Na_2S_2O_3 \text{ (N)}$$

$$DF = \text{dilution factor} = (100 + 10) / 50 = 2.2$$

$$S = \text{ปริมาตรของ } Na_2S_2O_3 \text{ ที่ใช้ (มิลลิลิตร)}$$

$$M = \text{น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)}$$

5.2 การคำนวณหา carbon dosages ใช้สูตร

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

โดยที่

$$M = \text{น้ำหนักของถ่าน (กรัม)}$$

$$A = (N_2) (12693.0)$$

$$DF = \text{dilution factor}$$

$$C = \text{residue iodine}$$

$$E = \text{ค่า iodine number โดยประมาณ}$$

ค่า carbon dosages 3 ค่า จะคำนวณโดยใช้ค่า C ซึ่งโดยทั่วไปจะใช้ 0.01, 0.02 และ 0.03

ตัวอย่างการคำนวณ ของตัวอย่างที่ 1 จากตารางภาคผนวก ค.1

การคำนวณค่าการดูดซับจำเพาะ (X/M) และความเข้มข้นที่สมดุลของสารละลายไอโอดีน(C) ได้จาก

$$X/M \text{ (มิลลิกรัม/กรัม)} = (1269.30/M) - (2.2) (12.693) (S/M)$$

$$C = (0.1/50)S$$

$$\text{เมื่อ } M = \text{น้ำหนักของถ่าน (กรัม)}$$

$$S = \text{ปริมาตรของ } Na_2S_2O_3 \text{ ที่ใช้ (มิลลิลิตร)}$$

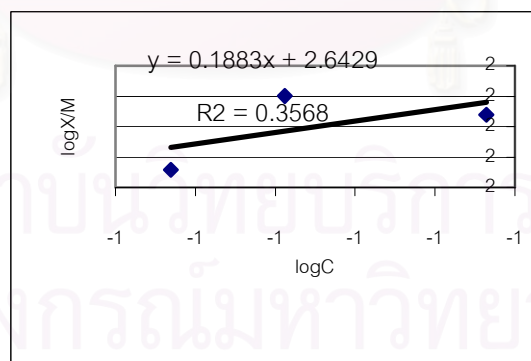
นำค่า X/M ที่ได้ทั้ง 3 ค่ามาสร้าง Iodine Adsorption Isotherm ซึ่งเป็นกราฟระหว่างแกนราบ คือ logC แกนตั้งฉาก คือ log[(X/M)] ซึ่งจะได้เส้นความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง ตำแหน่งที่ C = 0.02 หรือ logC = -1.699 จะทราบค่าบนแกนตั้งฉาก สมมติเท่ากับ Y นำค่าที่ได้มาคำนวณหาค่า IA ดังนี้

$$IA \text{ (มิลลิกรัม/กรัม)} = 10^Y$$

จากมาตรฐาน ASTM ค่า X/M ที่ค่า C เท่ากับ 0.02 นอร์มัล เรียกว่า ค่า ไอโอดีนนัมเบอร์

จากตารางภาคผนวก ค.

เบออร์	น้ำหนักถ่าน ที่ใช้ในการทดลอง (g)	ปริมาตร $Na_2S_2O_3$ (ml)	X/M (mg/g)	log (X/M)	C (mg)	logC
1	2.510	23.60	243.13922	2.3858550	0.04720	-1.3260580
	2.200	25.20	257.09095	2.4100868	0.05040	-1.2975695
	1.890	28.30	253.45705	2.4039044	0.05660	-1.2471836



จากสมการเส้นตรง Y เท่ากับ 2.323 แทนค่า 10^Y จะได้ $10^{2.323}$ เท่ากับ 210

เพราะฉะนั้น ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ เท่ากับ 210 มิลลิกรัม/กรัม

ตารางที่ ก. 1 นำหนักประมาณของตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์ค่าไอโอดีน

FIND M FOR CALCULATE IODINE NUMBER BY USING ASTM D4607

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	0.729	0.639	0.549
350	3.228	2.829	2.430	1600	0.706	0.619	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	0.3091

ภาคผนวก ข

วิธีวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะทั้งหมดของถ่านกัมมันต์ (Standard test method for specific surface area of carbon or graphite, ASTM C 819 - 77)

วิธีวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะทั้งหมดของถ่านกัมมันต์นี้ เป็นวิธีของ Brunauer, Emmett and Teller method หรือ BET method ซึ่งวิธีนี้อาศัยหลักการของการดูดติดผิวแบบชั้นเดียว (monolayer) ที่อุณหภูมิจุดเดือดปกติ (-195.8 องศาเซลเซียส) บนผิวหน้าของถ่านกัมมันต์ วิธีวิเคราะห์มีดังนี้

1. เครื่องมือ

- เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวรุ่น ASAP 2000 ของบริษัท Micromeritics
- เครื่องคอมพิวเตอร์ พร้อมโปรแกรมคำนวณ
- หลอดใส่ตัวอย่าง

2. การเตรียมตัวอย่าง

- ใช้ตัวอย่างถ่านกัมมันต์ขนาด 8 × 30 เมช
- อบตัวอย่างให้แห้งที่ 150 องศาเซลเซียส
- ชั่งและบันทึกน้ำหนักของหลอดใส่ตัวอย่าง ให้ละเอียดถึงทศนิยมตำแหน่งที่ 4
- ใส่ตัวอย่างลงในหลอด ให้มีน้ำหนักประมาณ 0.3 – 0.5 กรัม
- นำไปล้างโมเลกุลปนเปื้อนที่อยู่บนผิวถ่านกัมมันต์ (Outgas) ที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดันสุญญากาศ
- ชั่งน้ำหนักของตัวอย่างและหลอดใส่ตัวอย่าง เพื่อให้ทราบน้ำหนักของตัวอย่างหลัง outgas เพื่อให้ทราบน้ำหนักของตัวอย่าง (W)

3. การวิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิว

- กำหนดความดันสัมพัทธ์ที่สมดุล (P/Po) ทั้งหมด 10 จุด
- ผ่านไนโตรเจนที่ปราศจากออกซิเจน ซึ่งมีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5 จนกระทั่งความดันสัมพัทธ์ที่ภาวะสมดุลที่เท่ากับที่กำหนด บันทึกปริมาตรของก๊าซไนโตรเจนที่ใช้

4. การคำนวณ

การหาพื้นที่ผิวจำเพาะทั้งหมด

- นำค่าที่ได้จากการวิเคราะห์มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแกนราบ คือ ความดันสัมพัทธ์ (P/Po) แกนตั้งฉาก คือ ปริมาณของก๊าซไนโตรเจนที่ถูกดูดซับที่ความดันสัมพัทธ์ในเทอมของ $[W (P/Po) - 1] - 1$ จะได้เส้นความสัมพันธ์เป็นเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ S จุดตัดบนแกนตั้งฉาก คือ I สามารถคำนวณพื้นที่ผิว (S_{BET}) ได้ดังนี้

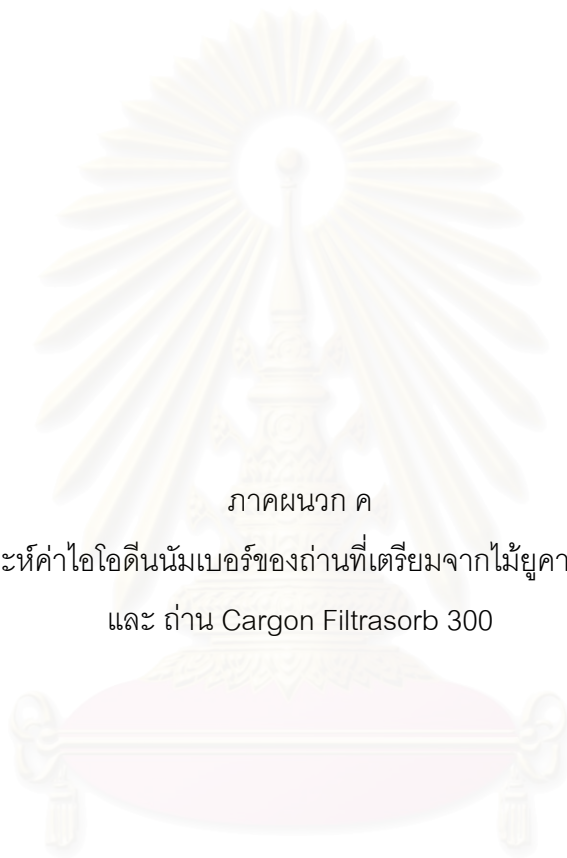
$$S_{BET} \text{ (ตารางเมตรต่อกรัม)} = N A_{cs} / [(S+I) * (MW)]$$

โดย $N =$ เลขอาโวกาโดร (6.02×10^{23} โมเลกุลต่อโมล)

$A_{cs} =$ พื้นที่หน้าตัดของโมเลกุลไนโตรเจน
(16.2 ตารางอังสตรอม)

$MW =$ น้ำหนักโมเลกุลของไนโตรเจน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ค

ตารางผลการวิเคราะห์ค่าไอโอดีนนมเบอร์ของถ่านที่เตรียมจากไม้ยูคาลิปตัส ไม้กระถินเทพา
และ ถ่าน Cargon Filtrasorb 300

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.1 การวิเคราะห์ค่าไอโอดีนนมเบอร์ของถ่านไม้ยูคาลิปตัส

เบอร์	น้ำหนัก ก่อนแช่ (g)	น้ำหนัก หลังแช่ (g)	อุณหภูมิที่ ใช้ในการ เผา (°C)	อัตราส วน วัตถุติด :NaCl	น้ำหนัก หลังเผา (g)	ร้อยละ ผลผลิต	น้ำหนักถ่าน ที่ใช้ในการ ทดลอง(g)	ปริมาตร Na ₂ S ₂ O ₃ (ml)	X/M (mg/g)	log (X/M)	C (mg)	logC	Iodine number (mg/g)	Iodine number (mg/g) เฉลี่ย
1	30.00	36.64	400	1 : 0	26.97	89.90	2.510	23.60	243.13922	2.3858550	0.04720	-1.3260580	210	203
							2.200	25.20	257.09095	2.4100868	0.05040	-1.2975695		
							1.890	28.30	253.45705	2.4039044	0.05660	-1.2471836		
2	30.00	37.28	400	1 : 0	26.61	88.70	2.510	27.25	202.53173	2.3064931	0.05450	-1.2636035	196	203
							2.200	30.10	194.89525	2.2898012	0.06020	-1.2204035		
							1.890	31.55	205.43856	2.3126820	0.06310	-1.1999706		
3	30.00	36.46	400	1 : 1	24.67	82.23	2.510	24.40	234.23895	2.3696591	0.04880	-1.3115802	221	231
							2.200	25.10	258.36025	2.4122257	0.05020	-1.2992963		
							1.890	28.75	246.80833	2.3923598	0.05750	-1.2403322		
4	30.00	36.14	400	1 : 1	24.82	82.73	2.510	23.00	249.81442	2.3976175	0.04600	-1.3372422	240	231
							2.200	25.20	257.09095	2.4100868	0.05040	-1.2975695		
							1.890	28.30	253.45705	2.4039044	0.05660	-1.2471836		
5	30.00	35.96	400	1 : 2	26.36	87.87	2.510	23.30	246.47682	2.3917761	0.04660	-1.3316141	209	201
							2.200	25.10	258.36025	2.4122257	0.05020	-1.2992963		
							1.890	28.05	257.15078	2.4101878	0.05610	-1.2510371		
6	30.00	37.63	400	1 : 2	24.75	82.50	2.510	22.95	250.37069	2.3985835	0.04590	-1.3381873	193	201
							2.200	24.20	269.78395	2.4310161	0.04840	-1.3151546		
							1.890	27.25	268.97071	2.4297050	0.05450	-1.2636035		

ตารางที่ ค.1 การวิเคราะห์ค่าไอโอดีนนมเบอร์ของถ่านไม้ยูคาลิปตัส (ต่อ)

เบอร์	น้ำหนัก ก่อนแช่ (g)	น้ำหนัก หลังแช่ (g)	อุณหภูมิที่ ใช้ในการ เผา (C)	อัตราส่วน น้ำหนัก วัตถุติด :NaCl	น้ำหนัก หลังเผา (g)	ร้อยละ ผลผลิต	น้ำหนักถ่าน ที่ใช้ในการ ทดลอง(g)	ปริมาตร Na ₂ S ₂ O ₃ (ml)	X/M (mg/g)	log (X/M)	C (mg)	logC	Iodine number (mg/g)	Iodine number (mg/g) เฉลี่ย
7	30.00	36.01	400	1 : 3	25.06	83.53	2.510	23.10	248.70189	2.3956791	0.04620	-1.335358	216	174
							2.200	25.10	258.36025	2.4122257	0.05020	-1.2992963		
							1.890	28.00	257.88952	2.4114337	0.05600	-1.251812		
8	30.00	36.32	400	1 : 3	26.91	89.70	2.510	24.05	238.13282	2.3768192	0.04810	-1.3178549	131	174
							2.200	26.05	246.30190	2.3914678	0.05210	-1.2831623		
							1.890	27.05	271.9257	2.4344503	0.05410	-1.2668027		
9	30.00	36.87	400	1 : 4	27.54	91.80	2.510	23.00	249.81442	2.3976175	0.04600	-1.3372422	221	223
							2.200	25.10	258.36025	2.4122257	0.05020	-1.2992963		
							1.890	28.00	257.88952	2.4114337	0.05600	-1.251812		
10	30.00	36.52	400	1 : 4	27.04	90.13	2.510	25.55	221.44481	2.3452655	0.05110	-1.2915791	224	223
							2.200	26.55	239.95540	2.3801305	0.05310	-1.2749055		
							1.890	30.05	227.60094	2.3571740	0.06010	-1.2211255		
11	30.00	37.03	500	1 : 0	22.26	74.20	2.510	23.05	249.25816	2.3966494	0.04610	-1.3362991	239	236
							2.200	25.25	256.4563	2.4090134	0.05050	-1.2967086		
							1.890	28.35	252.7183	2.4026367	0.05670	-1.2464169		
12	30.00	37.04	500	1 : 0	22.08	73.60	2.510	23.10	248.70189	2.3956791	0.04620	-1.335358	233	236
							2.200	25.30	255.82165	2.4079373	0.05060	-1.2958495		
							1.890	28.30	253.45705	2.4039044	0.05660	-1.2471836		

ตารางที่ ค.1 การวิเคราะห์ค่าไอโอดีนนมเบอร์ของถ่านไม้ยูคาลิปตัส (ต่อ)

เบอร์	น้ำหนัก ก่อนแช่ (g)	น้ำหนัก หลังแช่ (g)	อุณหภูมิที่ ใช้ในการ เผา (C)	อัตราส่วน น้ำหนัก วัตถุติด :NaCl	น้ำหนัก หลังเผา (g)	ร้อยละ ผลผลิต	น้ำหนักถ่าน ที่ใช้ในการ ทดลอง(g)	ปริมาตร Na ₂ S ₂ O ₃ (ml)	X/M (mg/g)	log (X/M)	C (mg)	logC	Iodine number (mg/g)	Iodine number (mg/g) เฉลี่ย
13	30.00	36.45	500	1 : 1	24.22	80.73	2.510	22.95	250.37069	2.3985835	0.04590	-1.3381873	244	239
							2.200	24.20	269.78395	2.4310161	0.04840	-1.3151546		
							1.890	27.95	258.62827	2.4126760	0.05590	-1.2525882		
14	30.00	36.39	500	1 : 1	23.74	79.13	2.510	22.80	252.03949	2.4014686	0.04560	-1.3410352	233	239
							2.200	24.35	267.88000	2.4279403	0.04870	-1.312471		
							1.890	27.80	260.84451	2.4163817	0.05560	-1.2549252		
15	30.00	37.18	500	1 : 2	23.60	78.67	3.228	21.89	203.85084	2.3093125	0.04378	-1.3587242	203	226
							2.829	23.90	212.76142	2.3278929	0.04780	-1.3205721		
							2.430	27.50	206.32654	2.3145551	0.05500	-1.2596373		
16	30.00	35.92	500	1 : 2	22.00	73.33	3.228	16.30	252.20849	2.4017597	0.03260	-1.4867824	248	226
							2.829	18.30	268.03811	2.4281966	0.03660	-1.4365189		
							2.430	22.75	260.91167	2.4164935	0.04550	-1.3419886		
17	30.00	36.85	500	1 : 3	22.53	75.10	3.228	18.60	232.31178	2.3660712	0.03720	-1.4294571	233	229
							2.829	20.35	247.8029	2.3941064	0.04070	-1.3904056		
							2.430	24.75	237.92846	2.3764464	0.04950	-1.3053948		
18	30.00	37.18	500	1 : 3	25.97	86.57	3.228	17.35	243.12521	2.3858300	0.03470	-1.4596705	224	229
							2.829	18.90	262.11561	2.4184929	0.03780	-1.4225082		
							2.430	22.85	259.76251	2.4145765	0.04570	-1.3400838		

ตารางที่ ค.1 การวิเคราะห์ค่าไอโอดีนนมเบอร์ของถ่านไม้ยูคาลิปตัส (ต่อ)

เบอร์	น้ำหนัก ก่อนแช่ (g)	น้ำหนัก หลังแช่ (g)	อุณหภูมิที่ ใช้ในการ เผา (C)	อัตราส่วน น้ำหนัก วัตถุติด :NaCl	น้ำหนัก หลังเผา (g)	ร้อยละ ผลผลิต	น้ำหนักถ่าน ที่ใช้ในการ ทดลอง(g)	ปริมาตร Na ₂ S ₂ O ₃ (ml)	X/M (mg/g)	log (X/M)	C (mg)	logC	Iodine number (mg/g)	Iodine number (mg/g) เฉลี่ย
19	30.00	39.05	500	1 : 4	26.69	88.97	3.228	18.15	236.20462	2.3732884	0.03630	-1.4400934	229	236
							2.829	20.15	249.77706	2.3975526	0.04030	-1.394695		
							2.430	24.25	243.67426	2.3868097	0.04850	-1.3142583		
20	30.00	36.71	500	1 : 4	25.45	84.83	3.228	16.70	248.7482	2.3957599	0.03340	-1.4762535	242	
							2.829	19.70	254.21894	2.4052079	0.03940	-1.4045038		
							2.430	23.35	254.0167	2.4048623	0.04670	-1.3306831		
21	30.00	37.93	600	1 : 0	22.42	74.73	3.228	3.85	359.91025	2.5561942	0.00770	-2.1135093	431	411
							2.829	6.70	382.53983	2.5826767	0.01340	-1.8728952		
							2.430	8.30	426.96536	2.6303926	0.01660	-1.7798919		
22	30.00	37.76	600	1 : 0	21.51	71.70	3.228	6.65	335.68817	2.5259360	0.01330	-1.8761484	391	
							2.829	7.55	374.14962	2.5730453	0.01510	-1.8210231		
							2.430	10.90	397.08719	2.5988859	0.02180	-1.6615435		
23	30.00	36.23	600	1 : 1	22.51	75.03	3.228	5.90	342.17623	2.5342498	0.01180	-1.9281180	380	340
							2.829	8.90	360.82399	2.5572954	0.01780	-1.7495800		
							2.430	11.05	395.36344	2.5969965	0.02210	-1.6556077		
24	30.00	36.87	600	1 : 1	22.14	73.80	3.228	10.45	302.81534	2.4811779	0.02090	-1.6798537	300	
							2.829	12.2	328.25022	2.5162050	0.02440	-1.6126102		
							2.430	15.00	349.9716	2.5440328	0.03000	-1.5228787		

ตารางที่ ค.1 การวิเคราะห์ค่าไอโอดีนนมเบอร์ของถ่านไม้ยูคาลิปตัส (ต่อ)

เบอร์	น้ำหนัก ก่อนแช่ (g)	น้ำหนัก หลังแช่ (g)	อุณหภูมิที่ ใช้ในการ เผา (C)	อัตราส่วน น้ำหนัก วัตถุติด :NaCl	น้ำหนัก หลังเผา (g)	ร้อยละ ผลผลิต	น้ำหนักถ่าน ที่ใช้ในการ ทดลอง(g)	ปริมาตร Na ₂ S ₂ O ₃ (ml)	X/M (mg/g)	log (X/M)	C (mg)	logC	Iodine number (mg/g)	Iodine number (mg/g) เฉลี่ย
25	30.00	37.35	600	1 : 2	22.22	74.07	3.228	6.60	336.12071	2.5264953	0.01320	-1.8794261	377	417
							2.829	8.65	363.2917	2.5602555	0.01730	-1.7619539		
							2.430	11.45	390.7668	2.5919177	0.02290	-1.6401645		
26	30.00	38.58	600	1 : 2	21.91	73.03	3.228	4.75	352.12458	2.5466963	0.00950	-2.0222764	457	417
							2.829	5.05	398.82671	2.6007842	0.01010	-1.9956786		
							2.430	8.15	428.6891	2.6321424	0.01630	-1.7878124		
27	30.00	37.27	600	1 : 3	22.08	73.60	3.228	5.85	342.60876	2.5347985	0.01170	-1.9318141	383	407
							2.829	7.85	371.18837	2.5695944	0.01570	-1.8041003		
							2.430	11.45	390.7668	2.5919177	0.02290	-1.6401645		
28	30.00	37.15	600	1 : 3	20.24	67.47	3.228	3.95	359.04518	2.5551491	0.00790	-2.1023729	431	407
							2.829	5.50	394.38484	2.5959202	0.01100	-1.9586073		
							2.430	9.00	418.92123	2.6221324	0.01800	-1.7447275		
29	30.00	37.63	600	1 : 4	20.77	69.23	3.228	4.55	353.85473	2.5488250	0.00910	-2.0409586	416	349
							2.829	6.75	382.04629	2.5821160	0.01350	-1.8696662		
							2.430	9.55	412.60085	2.6155301	0.01910	-1.7189666		
30	30.00	36.88	600	1 : 4	21.87	72.90	3.228	11.30	295.46221	2.4705019	0.02260	-1.6458916	281	349
							2.829	14.10	309.49563	2.4906545	0.02820	-1.5497509		
							2.430	16.20	336.18168	2.5265740	0.03240	-1.4894550		

ตารางที่ ค.1 การวิเคราะห์ค่าไอโอดีนนมเบอร์ของถ่านไม้ยูคาลิปตัส (ต่อ)

เบอร์	น้ำหนัก ก่อนแช่ (g)	น้ำหนัก หลังแช่ (g)	อุณหภูมิที่ ใช้ในการ เผา (C)	อัตราส่วน น้ำหนัก วัตถุติด :NaCl	น้ำหนัก หลังเผา (g)	ร้อยละ ผลผลิต	น้ำหนักถ่าน ที่ใช้ในการ ทดลอง(g)	ปริมาตร Na ₂ S ₂ O ₃ (ml)	X/M (mg/g)	log (X/M)	C (mg)	logC	Iodine number (mg/g)	Iodine number (mg/g) เฉลี่ย
31	30.00	42.41	700	1 : 0	23.57	78.57	3.228	4.35	355.58488	2.5509433	0.00870	-2.0604807	426	480
							2.829	6.75	382.04629	2.5821160	0.01350	-1.8696662		
							2.430	8.90	420.0704	2.6233221	0.01780	-1.7495800		
32	30.00	41.36	700	1 : 0	21.50	71.67	3.228	1.55	379.80696	2.5795629	0.00310	-2.5086383	534	480
							2.829	2.50	423.99735	2.6273631	0.00500	-2.3010300		
							2.430	4.85	466.6114	2.6689553	0.00970	-2.0132283		
33	30.00	41.98	700	1 : 1	23.29	77.63	3.228	4.60	353.42219	2.5482938	0.00920	-2.0362122	421	437
							2.829	7.10	378.5915	2.5781709	0.01420	-1.8477117		
							2.430	9.10	417.77207	2.6209394	0.01820	-1.7399286		
34	30.00	41.98	700	1 : 1	21.20	70.67	3.228	2.10	375.04905	2.5740881	0.00420	-2.3767507	453	437
							2.829	4.25	406.72338	2.6092991	0.00850	-2.0705811		
							2.430	7.40	437.3078	2.6407872	0.01480	-1.8297383		
35	30.00	39.28	700	1 : 2	21.80	72.67	3.228	2.30	373.3189	2.5720800	0.00460	-2.3372422	494	486
							2.829	3.85	410.67172	2.6134948	0.00770	-2.1135093		
							2.430	6.20	451.09773	2.6542706	0.01240	-1.9065783		
36	30.00	39.96	700	1 : 2	21.78	72.60	3.228	2.45	372.02129	2.5705678	0.00490	-2.3098039	477	486
							2.829	4.10	408.20401	2.6108773	0.00820	-2.0861861		
							2.430	6.75	444.77735	2.6481427	0.01350	-1.8696662		

ตารางที่ ค.1 การวิเคราะห์ค่าไอโอดีนนมเบอร์ของถ่านไม้ยูคาลิปตัส (ต่อ)

เบอร์	น้ำหนัก ก่อนแช่ (g)	น้ำหนัก หลังแช่ (g)	อุณหภูมิที่ ใช้ในการ เผา (C)	อัตราส่วน น้ำหนัก วัตถุติด :NaCl	น้ำหนัก หลังเผา (g)	ร้อยละ ผลผลิต	น้ำหนักถ่าน ที่ใช้ในการ ทดลอง(g)	ปริมาตร Na ₂ S ₂ O ₃ (ml)	X/M (mg/g)	log (X/M)	C (mg)	logC	Iodine number (mg/g)	Iodine number (mg/g) เฉลี่ย
37	30.00	43.29	700	1 : 3	21.35	71.17	3.228	1.65	378.94189	2.5785726	0.00330	-2.4814861	502	506
							2.829	3.15	417.5813	2.6207410	0.00630	-2.2006595		
							2.430	5.55	458.56727	2.6614031	0.01110	-1.9546770		
38	30.00	38.35	700	1 : 3	21.28	70.93	3.228	1.45	380.67204	2.5805510	0.00290	-2.5376020	509	506
							2.829	2.70	422.02318	2.6253363	0.00540	-2.2676062		
							2.430	5.30	461.44017	2.6641154	0.01060	-1.9746941		
39	30.00	40.6	700	1 : 4	21.30	71.00	3.228	1.80	377.64428	2.5770829	0.00360	-2.4436975	495	503
							2.829	3.75	411.6588	2.6145374	0.00750	-2.1249387		
							2.430	5.60	457.99269	2.6608585	0.01120	-1.9507820		
40	30.00	40.84	700	1 : 4	20.74	69.13	3.228	1.95	376.34666	2.5755881	0.00390	-2.4089354	511	503
							2.829	3.30	416.10068	2.6191984	0.00660	-2.1804561		
							2.430	5.60	457.99269	2.6608585	0.01120	-1.9507820		
41	30.00	42.77	800	1 : 0	20.16	67.20	2.259	4.80	502.55065	2.7011798	0.00960	-2.0177288	569	561
							1.980	7.05	541.63211	2.7337044	0.01410	-1.8507809		
							1.701	10.60	572.19238	2.7575421	0.02120	-1.6736641		
42	30.00	38.79	800	1 : 0	19.94	66.47	2.259	5.15	498.22413	2.6974248	0.01030	-1.9871628	552	561
							1.980	7.10	540.92694	2.7331386	0.01420	-1.8477117		
							1.701	11.50	557.41746	2.7461806	0.02300	-1.6382722		

ตารางที่ ค.1 การวิเคราะห์ค่าไอโอดีนนมเบอร์ของถ่านไม้ยูคาลิปตัส (ต่อ)

เบอร์	น้ำหนัก ก่อนแช่ (g)	น้ำหนัก หลังแช่ (g)	อุณหภูมิที่ ใช้ในการ เผา (C)	อัตราส วน วัตถุติบ :NaCl	น้ำหนัก หลังเผา (g)	ร้อยละ ผลผลิต	น้ำหนักถ่าน ที่ใช้ในการ ทดลอง(g)	ปริมาตร Na ₂ S ₂ O ₃ (ml)	X/M (mg/g)	log (X/M)	C (mg)	logC	Iodine number (mg/g)	Iodine number (mg/g) เฉลี่ย
43	30.00	38.01	800	1 : 1	17.48	58.27	2.259	4.00	512.43984	2.7096429	0.00800	-2.0969100	598	600
							1.980	6.80	545.15794	2.7365223	0.01360	-1.8664611		
							1.701	9.10	596.81725	2.7758414	0.01820	-1.7399286		
44	30.00	35.44	800	1 : 1	18.56	61.87	2.259	3.20	522.32903	2.7179442	0.00640	-2.1938200	602	600
							1.980	6.10	555.03027	2.7443167	0.01220	-1.9136402		
							1.701	8.95	599.27974	2.7776296	0.01790	-1.7471470		
45	30.00	36.98	800	1 : 2	19.09	63.63	2.259	3.85	514.29406	2.7112115	0.00770	-2.1135093	575	612
							1.980	6.05	555.73544	2.7448681	0.01210	-1.9172146		
							1.701	10.55	573.01321	2.7581646	0.02110	-1.6757175		
46	30.00	35.37	800	1 : 2	18.47	61.57	2.259	2.35	532.83629	2.7265938	0.00470	-2.3279021	649	612
							1.980	4.85	572.65944	2.7578964	0.00970	-2.0132283		
							1.701	7.20	628.00875	2.7979657	0.01440	-1.8416375		
47	30.00	35.27	800	1 : 3	19.36	64.53	2.259	3.75	515.53021	2.7122541	0.00750	-2.1249387	582	611
							1.980	6.80	545.15794	2.7365223	0.01360	-1.8664611		
							1.701	9.75	586.14647	2.7680062	0.01950	-1.7099654		
48	30.00	34.6	800	1 : 3	17.22	57.40	2.259	2.05	536.54474	2.7296059	0.00410	-2.3872161	639	611
							1.980	4.30	580.41627	2.7637396	0.00860	-2.0655015		
							1.701	7.65	620.62129	2.7928267	0.01530	-1.8153086		

ตารางที่ ค.1 การวิเคราะห์ค่าไอโอดีนนมเบอร์ของถ่านไม้ยูคาลิปตัส (ต่อ)

เบอร์	น้ำหนัก ก่อนแช่ (g)	น้ำหนัก หลังแช่ (g)	อุณหภูมิที่ ใช้ในการ เผา (C)	อัตราส่วน น้ำหนัก วัตถุติด :NaCl	น้ำหนัก หลังเผา (g)	ร้อยละ ผลผลิต	น้ำหนักถ่าน ที่ใช้ในการ ทดลอง(g)	ปริมาตร Na ₂ S ₂ O ₃ (ml)	X/M (mg/g)	log (X/M)	C (mg)	logC	Iodine number (mg/g)	Iodine number (mg/g) เฉลี่ย
49	30.00	35.05	800	1 : 4	18.80	62.67	2.259	3.55	518.00251	2.7143319	0.00710	-2.1487417	643	597
							1.980	5.90	557.85094	2.7465182	0.01180	-1.9281180		
							1.701	7.75	618.97963	2.7916764	0.01550	-1.8096683		
50	30.00	35.1	800	1 : 4	19.97	66.57	2.259	5.45	494.51568	2.6941801	0.01090	-1.9625735	550	
							1.980	9.20	511.30994	2.7086842	0.01840	-1.7351822		
							1.701	10.20	578.75901	2.7624978	0.02040	-1.6903698		

ตารางที่ ค.2 การวิเคราะห์ค่าไอโอดีนนมเบอร์ของถ่านไม้กระถินเทพา

เบอร์	น้ำหนัก ก่อนแช่ (g)	น้ำหนัก หลังแช่ (g)	อุณหภูมิ ที่ใช้ใน การเผา (C)	อัตราส วน วัตถุติบ :NaCl	น้ำหนัก หลังเผา (g)	ร้อยละ ผลผลิต	น้ำหนักถ่าน ที่ใช้ในการ ทดลอง(g)	ปริมาตร Na ₂ S ₂ O ₃ (ml)	X/M (mg/g)	log (X/M)	C (mg)	logC	Iodine number (mg/g)	Iodine number (mg/g) เฉลี่ย
51	30.00	37.49	400	1 : 0	23.83	79.43	3.766	15.90	219.14468	2.3407309	0.03180	-1.497573	172	165
							3.300	18.55	227.66626	2.3572987	0.03710	-1.430626		
							2.835	20.20	248.75594	2.3957735	0.04040	-1.393619		
52	30.00	38.71	400	1 : 0	26.97	89.90	3.766	15.05	225.44736	2.3530452	0.03010	-1.521434	158	165
							3.300	16.50	245.01336	2.3891898	0.03300	-1.481486		
							2.835	18.30	267.47084	2.4272764	0.03660	-1.436519		
53	30.00	37.15	400	1 : 1	25.72	85.73	3.766	16.20	216.9202	2.3363000	0.03240	-1.489455	129	164
							3.300	18.05	231.89726	2.3652956	0.03610	-1.442493		
							2.835	19.05	260.08338	2.4151126	0.03810	-1.419075		
54	30.00	36.27	400	1 : 1	23.33	77.77	3.766	13.80	234.71602	2.3705427	0.02760	-1.559091	198	164
							3.300	15.95	249.66746	2.3973619	0.03190	-1.496209		
							2.835	18.05	269.93332	2.4312565	0.03610	-1.442493		
55	30.00	38.09	400	1 : 2	25.86	86.20	3.766	17.20	209.50528	2.3211950	0.03440	-1.463442	168	168
							3.300	20.70	209.47296	2.3211280	0.04140	-1.383000		
							2.835	21.00	240.87598	2.3817935	0.04200	-1.376751		
56	30.00	38.62	400	1 : 2	24.72	82.40	3.766	16.25	216.54946	2.3355571	0.03250	-1.488117	167	168
							3.300	17.65	235.28206	2.3715888	0.03530	-1.452225		
							2.835	20.35	247.27844	2.3931863	0.04070	-1.390406		

ตารางที่ ค.2 การวิเคราะห์ค่าไอโอดีนนมเบอร์ของถ่านไม้กระถินเทพา (ต่อ)

เบอร์	น้ำหนัก ก่อนแช่ (g)	น้ำหนัก หลังแช่ (g)	อุณหภูมิ ที่ใช้ใน การเผา (C)	อัตราส วน วัตถุค :NaCl	น้ำหนัก หลังเผา (g)	ร้อยละ ผลผลิต	น้ำหนักถ่าน ที่ใช้ในการ ทดลอง(g)	ปริมาตร Na ₂ S ₂ O ₃ (ml)	X/M (mg/g)	log (X/M)	C (mg)	logC	Iodine number (mg/g)	Iodine number (mg/g) เฉลี่ย
57	30.00	34.79	400	1 : 3	24.60	82.00	3.766	15.20	224.33512	2.3508973	0.03040	-1.517126	191	183
							3.300	17.20	239.08996	2.3785613	0.03440	-1.463442		
							2.835	20.00	250.72593	2.3991992	0.04000	-1.397940		
58	30.00	37.95	400	1 : 3	26.22	87.40	3.766	15.50	222.11065	2.3465694	0.03100	-1.508638	175	170
							3.300	17.70	234.85896	2.3708071	0.03540	-1.450997		
							2.835	19.75	253.18841	2.4034438	0.03950	-1.403403		
59	30.00	39.91	400	1 : 4	24.55	81.83	3.766	14.75	227.67184	2.3573093	0.02950	-1.530178	184	170
							3.300	16.50	245.01336	2.3891898	0.03300	-1.481486		
							2.835	18.90	261.56087	2.4175728	0.03780	-1.422508		
60	30.00	36.27	400	1 : 4	24.83	82.77	3.766	15.35	223.22289	2.3487387	0.03070	-1.512862	155	170
							3.300	17.70	234.85896	2.3708071	0.03540	-1.450997		
							2.835	18.35	266.97834	2.4264760	0.03670	-1.435334		
61	30.00	39.11	500	1 : 0	23.64	78.80	3.766	14.20	231.75005	2.3650198	0.02840	-1.546682	198	236
							3.300	17.50	236.55136	2.3739255	0.03500	-1.455932		
							2.835	18.35	266.97834	2.4264760	0.03670	-1.435334		
62	30.00	36.52	500	1 : 0	20.32	67.73	3.766	9.35	267.71242	2.4276685	0.01870	-1.728158	274	236
							3.300	11.60	286.47716	2.4570900	0.02320	-1.634512		
							2.835	13.60	313.76559	2.4966053	0.02720	-1.565431		

ตารางที่ ก.2 การวิเคราะห์ค่าไอโอดีนนมเบอร์ของถ่านไม้กระถินเทพา (ต่อ)

เบอร์	น้ำหนัก ก่อนแช่ (g)	น้ำหนัก หลังแช่ (g)	อุณหภูมิ ที่ใช้ใน การเผา (C)	อัตราส่วน น้ำหนัก วัตถุติด :NaCl	น้ำหนัก หลังเผา (g)	ร้อยละ ผลผลิต	น้ำหนักถ่าน ที่ใช้ในการ ทดลอง(g)	ปริมาตร Na ₂ S ₂ O ₃ (ml)	X/M (mg/g)	log (X/M)	C (mg)	logC	Iodine number (mg/g)	Iodine number (mg/g) เฉลี่ย
63	30.00	37.42	500	1 : 1	21.53	71.77	3.766	10.20	261.40974	2.4173218	0.02040	-1.690370	260	244
							3.300	12.40	279.70756	2.4467042	0.02480	-1.605548		
							2.835	15.10	298.99067	2.4756576	0.03020	-1.519993		
64	30.00	38.46	500	1 : 1	22.02	73.40	3.766	11.80	249.54586	2.3971504	0.02360	-1.627088	228	244
							3.300	14.40	262.78356	2.4195982	0.02880	-1.540608		
							2.835	15.85	291.60321	2.4647923	0.03170	-1.498941		
65	30.00	37.00	500	1 : 2	21.49	71.63	3.766	10.20	261.40974	2.4173218	0.02040	-1.690370	262	229
							3.300	11.75	285.20786	2.4551615	0.02350	-1.628932		
							2.835	14.65	303.42314	2.4820487	0.02930	-1.533132		
66	30.00	40.09	500	1 : 2	23.17	77.23	3.766	13.20	239.16497	2.3786976	0.02640	-1.578396	196	229
							3.300	14.95	258.12946	2.4118376	0.02990	-1.524329		
							2.835	16.75	282.73825	2.4513846	0.03350	-1.474955		
67	30.00	38.26	500	1 : 3	21.22	70.73	3.766	9.55	266.22944	2.4252561	0.01910	-1.718967	271	245
							3.300	11.55	286.90026	2.4577309	0.02310	-1.636388		
							2.835	13.65	313.27309	2.4959231	0.02730	-1.563837		
68	30.00	36.93	500	1 : 3	23.38	77.93	3.766	12.80	242.13094	2.3840503	0.02560	-1.591760	219	245
							3.300	15.15	256.43706	2.4089808	0.03030	-1.518557		
							2.835	17.56	274.7598	2.4389532	0.03512	-1.454445		

ตารางที่ ก.2 การวิเคราะห์ค่าไอโอดีนนมเบอร์ของถ่านไม้กระถินเทพา (ต่อ)

เบอร์	น้ำหนัก ก่อนแช่ (g)	น้ำหนัก หลังแช่ (g)	อุณหภูมิ ที่ใช้ใน การเผา (C)	อัตรา ส่วน วัตถุ :NaCl	น้ำหนัก หลังเผา (g)	ร้อยละ ผลผลิต	น้ำหนักถ่าน ที่ใช้ในการ ทดลอง(g)	ปริมาตร Na ₂ S ₂ O ₃ (ml)	X/M (mg/g)	log (X/M)	C (mg)	logC	Iodine number (mg/g)	Iodine number (mg/g) เฉลี่ย
69	30.00	44.86	500	1 : 4	24.82	82.73	3.766	8.45	274.38586	2.4383617	0.01690	-1.772113	317	295
							3.300	9.15	307.20906	2.4874340	0.01830	-1.737549		
							2.835	11.10	338.39046	2.5294181	0.02220	-1.653647		
70	30.00	43.85	500	1 : 4	20.25	67.50	3.766	9.35	267.71242	2.4276685	0.01870	-1.728158	273	
							3.300	11.70	285.63096	2.4558053	0.02340	-1.630784		
							2.835	13.75	312.2881	2.4945554	0.02750	-1.560667		
71	30.00	36.61	600	1 : 0	21.19	70.63	3.766	1.90	322.9536	2.5091401	0.00380	-2.420216	446	390
							3.300	3.75	352.90386	2.5476564	0.00750	-2.124939		
							2.835	5.00	398.47513	2.6004012	0.01000	-2.000000		
72	30.00	36.23	600	1 : 0	22.84	76.13	3.766	6.05	292.18167	2.4656530	0.01210	-1.917215	333	
							3.300	8.55	312.28626	2.4945529	0.01710	-1.767004		
							2.835	10.60	343.31543	2.5356933	0.02120	-1.673664		
73	30.00	36.31	600	1 : 1	20.28	67.60	3.766	1.55	325.54882	2.5126161	0.00310	-2.508638	461	417
							3.300	2.65	362.21206	2.5589629	0.00530	-2.275724		
							2.835	4.75	400.93762	2.6030768	0.00950	-2.022276		
74	30.00	34.63	600	1 : 1	20.10	67.00	3.766	5.35	297.37212	2.4733002	0.01070	-1.970616	372	
							3.300	6.90	326.24856	2.5135486	0.01380	-1.860121		
							2.835	9.05	358.58285	2.5545895	0.01810	-1.742321		

ตารางที่ ก.2 การวิเคราะห์ค่าไอโอดีนนมเบอร์ของถ่านไม้กระถินเทพา (ต่อ)

เบอร์	น้ำหนัก ก่อนแช่ (g)	น้ำหนัก หลังแช่ (g)	อุณหภูมิ ที่ใช้ใน การเผา (C)	อัตรา ส่วน วัตถุ :NaCl	น้ำหนัก หลังเผา (g)	ร้อยละ ผลผลิต	น้ำหนักถ่าน ที่ใช้ในการ ทดลอง(g)	ปริมาตร Na ₂ S ₂ O ₃ (ml)	X/M (mg/g)	log (X/M)	C (mg)	logC	Iodine number (mg/g)	Iodine number (mg/g) เฉลี่ย
75	30.00	34.26	600	1 : 2	20.84	69.47	3.766	3.35	312.20196	2.4944356	0.00670	-2.173925	368	397
							3.300	5.40	338.94156	2.5301248	0.01080	-1.966576		
							2.835	8.90	360.06034	2.5563753	0.01780	-1.749580		
76	30.00	34.58	600	1 : 2	19.69	65.63	3.766	1.60	325.17808	2.5121213	0.00320	-2.494850	425	397
							3.300	2.95	359.67346	2.5559084	0.00590	-2.229148		
							2.835	5.75	391.08767	2.5922741	0.01150	-1.939302		
77	30.00	33.87	600	1 : 3	19.75	65.83	3.766	1.95	322.58285	2.5086413	0.00390	-2.408935	446	413
							3.300	3.35	356.28866	2.5518020	0.00670	-2.173925		
							2.835	5.35	395.02765	2.5966275	0.01070	-1.970616		
78	30.00	32.71	600	1 : 3	20.96	69.87	3.766	4.15	306.27002	2.4861045	0.00830	-2.080922	380	413
							3.300	5.75	335.97986	2.5263132	0.01150	-1.939302		
							2.835	8.50	364.00032	2.5611018	0.01700	-1.769551		
79	30.00	32.93	600	1 : 4	20.32	67.73	3.766	3.45	311.46047	2.4934029	0.00690	-2.161151	400	394
							3.300	5.10	341.48016	2.5333655	0.01020	-1.991400		
							2.835	7.50	373.85026	2.5726977	0.01500	-1.823909		
80	30.00	33.5	600	1 : 4	20.37	67.90	3.766	3.30	312.57271	2.4949511	0.00660	-2.180456	388	394
							3.300	5.30	339.78776	2.5312077	0.01060	-1.974694		
							2.835	7.80	370.89528	2.5692513	0.01560	-1.806875		

ตารางที่ ก.2 การวิเคราะห์ค่าไอโอดีนนมเบอร์ของถ่านไม้กระถินเทพา (ต่อ)

เบอร์	น้ำหนัก ก่อนแช่ (g)	น้ำหนัก หลังแช่ (g)	อุณหภูมิ ที่ใช้ใน การเผา (C)	อัตรา ส่วน วัตถุ :NaCl	น้ำหนัก หลังเผา (g)	ร้อยละ ผลผลิต	น้ำหนักถ่าน ที่ใช้ในการ ทดลอง(g)	ปริมาตร Na ₂ S ₂ O ₃ (ml)	X/M (mg/g)	log (X/M)	C (mg)	logC	Iodine number (mg/g)	Iodine number (mg/g) เฉลี่ย
81	30.00	33.54	700	1 : 0	19.01	63.37	3.766	1.40	326.66106	2.5140974	0.00280	-2.552842	490	485
							3.300	2.50	363.48136	2.5604821	0.00500	-2.301030		
							2.835	4.05	407.83258	2.6104819	0.00810	-2.091515		
82	30.00	33.72	700	1 : 0	17.09	56.97	3.766	1.00	329.62703	2.5180228	0.00200	-2.698970	480	485
							3.300	2.00	367.71236	2.5655082	0.00400	-2.397940		
							2.835	3.80	410.29507	2.6130963	0.00760	-2.119186		
83	30.00	33.26	700	1 : 1	18.47	61.57	3.766	0.45	333.70524	2.5233630	0.00090	-3.045757	575	527
							3.300	0.80	377.86676	2.5773387	0.00160	-2.795880		
							2.835	1.90	429.00997	2.6324674	0.00380	-2.420216		
84	30.00	32.77	700	1 : 1	19.22	64.07	3.766	0.95	329.99778	2.5185110	0.00190	-2.721246	479	527
							3.300	1.50	371.94336	2.5704768	0.00300	-2.522879		
							2.835	3.80	410.29507	2.6130963	0.00760	-2.119186		
85	30.00	32.66	700	1 : 2	18.99	63.30	3.766	0.85	330.73927	2.5194858	0.00170	-2.769551	525	583
							3.300	1.45	372.36646	2.5709706	0.00290	-2.537602		
							2.835	3.00	418.17503	2.6213581	0.00600	-2.221849		
86	30.00	40.29	700	1 : 2	17.47	58.23	3.766	0.40	334.07599	2.5238453	0.00080	-3.096910	640	583
							3.300	0.75	378.28986	2.5778247	0.00150	-2.823909		
							2.835	1.45	433.44244	2.6369314	0.00290	-2.537602		

ตารางที่ ก.2 การวิเคราะห์ค่าไอโอดีนนมเบอร์ของถ่านไม้กระถินเทพา (ต่อ)

เบอร์	น้ำหนัก ก่อนแช่ (g)	น้ำหนัก หลังแช่ (g)	อุณหภูมิ ที่ใช้ใน การเผา (C)	อัตรา ส่วน วัตถุ :NaCl	น้ำหนัก หลังเผา (g)	ร้อยละ ผลผลิต	น้ำหนักถ่าน ที่ใช้ในการ ทดลอง(g)	ปริมาตร Na ₂ S ₂ O ₃ (ml)	X/M (mg/g)	log (X/M)	C (mg)	logC	Iodine number (mg/g)	Iodine number (mg/g) เฉลี่ย
87	30.00	39.36	700	1 : 3	23.44	78.13	3.766	0.50	333.33449	2.5228803	0.00100	-3.000000	524	553
							3.300	1.10	375.32816	2.5744112	0.00220	-2.657577		
							2.835	2.45	423.5925	2.6269483	0.00490	-2.309804		
88	30.00	39.45	700	1 : 3	25.08	83.60	3.766	0.45	333.70524	2.5233630	0.00090	-3.045757	581	553
							3.300	0.75	378.28986	2.5778247	0.00150	-2.823909		
							2.835	1.85	429.50247	2.6329657	0.00370	-2.431798		
89	30.00	39.28	700	1 : 4	19.36	64.53	3.766	0.50	333.33449	2.5228803	0.00100	-3.000000	537	545
							3.300	1.05	375.75126	2.5749004	0.00210	-2.677781		
							2.835	2.30	425.06999	2.6284604	0.00460	-2.337242		
90	30.00	38.81	700	1 : 4	19.57	65.23	3.766	0.25	335.18822	2.5252888	0.00050	-3.301030	552	545
							3.300	0.80	377.86676	2.5773387	0.00160	-2.795880		
							2.835	1.50	432.94995	2.6364377	0.00300	-2.522879		
91	30.00	38.57	800	1 : 0	19.15	63.83	3.766	0.35	334.44673	2.5243270	0.00070	-3.154902	606	628
							3.300	0.60	379.55916	2.5792795	0.00120	-2.920819		
							2.835	1.50	432.94995	2.6364377	0.00300	-2.522879		
92	30.00	38.99	800	1 : 0	18.21	60.70	3.766	0.25	335.18822	2.5252888	0.00050	-3.301030	649	628
							3.300	0.50	380.40536	2.5802466	0.00100	-3.000000		
							2.835	1.10	436.88993	2.6403720	0.00220	-2.657577		

ตารางที่ ก.2 การวิเคราะห์ค่าไอโอดีนนมเบอร์ของถ่านไม้กระถินเทพา (ต่อ)

เบอร์	น้ำหนัก ก่อนแช่ (g)	น้ำหนัก หลังแช่ (g)	อุณหภูมิ ที่ใช้ใน การเผา (C)	อัตราส่วน วัตถุติด :NaCl	น้ำหนัก หลังเผา (g)	ร้อยละ ผลผลิต	น้ำหนักถ่าน ที่ใช้ในการ ทดลอง(g)	ปริมาตร Na ₂ S ₂ O ₃ (ml)	X/M (mg/g)	log (X/M)	C (mg)	logC	Iodine number (mg/g)	Iodine number (mg/g) เฉลี่ย
93	30.00	38.42	800	1 : 1	19.96	66.53	3.766	0.25	335.18822	2.5252888	0.00050	-3.301030	649	665
							3.300	0.50	380.40536	2.5802466	0.00100	-3.000000		
							2.835	1.10	436.88993	2.6403720	0.00220	-2.657577		
94	30.00	38.7	800	1 : 1	17.82	59.40	3.766	0.25	335.18822	2.5252888	0.00050	-3.301030	681	
							3.300	0.50	380.40536	2.5802466	0.00100	-3.000000		
							2.835	1.00	437.87492	2.6413501	0.00200	-2.698970		
95	30.00	39.56	800	1 : 2	19.17	63.90	3.766	0.15	335.92972	2.5262484	0.00030	-3.522879	701	701
							3.300	0.40	381.25156	2.5812116	0.00080	-3.096910		
							2.835	0.65	441.3224	2.6447560	0.00130	-2.886057		
96	30.00	38.86	800	1 : 2	17.48	58.27	3.766	0.15	335.92972	2.5262484	0.00030	-3.522879	701	
							3.300	0.40	381.25156	2.5812116	0.00080	-3.096910		
							2.835	0.65	441.3224	2.6447560	0.00130	-2.886057		
97	30.00	36.79	800	1 : 3	24.06	80.20	3.766	0.15	335.92972	2.5262484	0.00030	-3.522879	691	696
							3.300	0.45	380.82846	2.5807294	0.00090	-3.045757		
							2.835	0.6	441.8149	2.6452404	0.00120	-2.920819		
98	30.00	38.47	800	1 : 3	18.44	61.47	3.766	0.15	335.92972	2.5262484	0.00030	-3.522879	701	
							3.300	0.40	381.25156	2.5812116	0.00080	-3.096910		
							2.835	0.65	441.3224	2.6447560	0.00130	-2.886057		

ตารางที่ ก.2 การวิเคราะห์ค่าไอโอดีนนมเบอร์ของถ่านไม้กระถินเทพา (ต่อ)

เบอร์	น้ำหนัก ก่อนแช่ (g)	น้ำหนัก หลังแช่ (g)	อุณหภูมิ ที่ใช้ใน การเผา (C)	อัตรา ส่วน วัตถุติด :NaCl	น้ำหนัก หลังเผา (g)	ร้อยละ ผลผลิต	น้ำหนักถ่าน ที่ใช้ในการ ทดลอง(g)	ปริมาตร Na ₂ S ₂ O ₃ (ml)	X/M (mg/g)	log (X/M)	C (mg)	logC	Iodine number (mg/g)	Iodine number (mg/g) เฉลี่ย
99	30.00	36.92	800	1 : 4	17.75	59.17	3.766	0.15	335.92972	2.5262484	0.00030	-3.522879	691	651
							3.300	0.45	380.82846	2.5807294	0.00090	-3.045757		
							2.835	0.6	441.8149	2.6452404	0.00120	-2.920819		
100	30.00	35.5	800	1 : 4	20.65	68.83	3.766	0.25	335.18822	2.5252888	0.00050	-3.301030	610	
							3.300	0.55	379.98226	2.5797633	0.00110	-2.958607		
							2.835	1.25	435.41243	2.6389008	0.00250	-2.602060		

ตารางที่ ก.3 การวิเคราะห์ค่าไอโอดีนนมเบอร์ของถ่านCalgon Filtrasorb 300

น้ำหนักถ่าน ที่ใช้ในการทดลอง(g)	ปริมาตร Na ₂ S ₂ O ₃ (ml)	X/M (mg/g)	log (X/M)	C (mg)	logC	Iodine number (mg/g)
1.614	0.05	785.56615	2.8951828	0.0001	-4.000000	891
1.414	2.00	858.16888	2.9335728	0.004	-2.397940	
1.215	7.05	882.65973	2.9457933	0.0141	-1.850781	

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายรัชชัย สิงหศิริ เกิดเมื่อวันที่ 25 พฤษภาคม 2519 ที่อำเภอพนมพิสัย จังหวัดหนองคาย จบการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม จากหลักสูตรสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี เมื่อปี พ.ศ.2543 เข้าทำงานในตำแหน่ง พนักงานอาจารย์ หลักสูตรสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี เข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโท หลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ.2546 ปัจจุบันเป็นพนักงานอาจารย์ หลักสูตรสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี



สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย