การกำจัดแคดเมียมและสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าว และเมล็ดมะขาม

นางสาวพรรษกร ใจประดับเพชร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา)
บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2549
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

CADMIUM AND ZINC REMOVAL IN SYNTHETIC WASTEWATER BY ACTIVATED CARBON PREPARED FROM COCONUT SHELL AND TAMARIND SEED

Miss Pasakorn Jaipradubpetch

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Program in Environmental Science
(Interdisciplinary Program)
Graduate School
Chulalongkorn University
Academic Year 2006

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การกำจัดแคดเมียมและสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าว และเมล็ดมะขาม
โดย	นางสาวพรรษกร ใจประดับเพชร
สาขาวิชา	วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.ธเรศ ศรีสถิตย์

บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ม.ร.ว.กัลยา ติงศภัทิย์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

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

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

..... กรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.สมใจ เพ็งปรีชา)

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

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พรรษกร ใจประดับเพชร : การกำจัดแคดเมียมและสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าว และเมล็ดมะขาม. (CADMIUM AND ZINC REMOVAL IN SYNTHETIC WASTEWATER BY ACTIVATED CARBON PREPARED FROM COCONUT SHELL AND TAMARIND SEED) อ. ที่ปรึกษา : รศ.ดร.ธเรศ ศรีสถิตย์, 115 หน้า.

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดติดผิวแคดเมียม และสังกะสี โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าว และเมล็ดมะขามที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมี โดยใช้โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)

ในขั้นตอนการเตรียมถ่าน พบว่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผาคาร์บอไนซ์คือที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ให้มีร้อยละผลผลิตสูงสุดของถ่านกะลามะพร้าว และถ่านเมล็ดมะขามเท่ากับร้อยละ 49.48 ± 5.88 และร้อยละ 50.57 ± 3.15 ตามลำดับ แช่สารกระตุ้นเกลือแกงตามอัตราส่วนโดยน้ำหนักของวัตถุดิบต่อการกระตุ้นเกลือแกงที่อัตราส่วน 1:2 และเผากระตุ้นอีกครั้งที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 60 นาที โดยถ่านกัมมันต์ทั้งสองชนิดคือ ถ่านกะลามะพร้าว และถ่านเมล็ดมะขามจะมีค่าไอโอดีนนัมเบอร์สูงสุดเท่ากับ 651 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 609 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าว และเมล็ดมะขาม มีพื้นที่ผิวเท่ากับ 366.68 ตารางเมตรต่อกรัม และ 137.05 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรโพรงเท่ากับ 0.17 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และ 0.27 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ขนาดโพรงเฉลี่ยเท่ากับ 14.42 อังสตรอม และ 19.50 อังสตรอม ตามลำดับ การทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช พบว่าค่าคงที่ความสัมพันธ์กับความสามารถในการดูดติดผิวแคดเมียม (K) ของถ่านกะลามะพร้าว และถ่านเมล็ดมะขามเท่ากับ 6.4912 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 4.2854 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ค่า 1/n เท่ากับ 0.723 และ 0.4508 ตามลำดับ และค่า K ของการดูดติดผิวสังกะสีของถ่านกะลามะพร้าว และถ่านเมล็ดมะขามเท่ากับ 7.6839 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 5.3654 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ค่า 1/n เท่ากับ 0.5451 และ 0.4045 ตามลำดับ

การทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับโดยใช้ถังดูดติดผิวแบบแท่ง เลือกใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าว บรรจุลงในคอลัมน์สูง 90 เซนติเมตร แล้วบรรจุทรายลงในคอลัมน์ 30 เซนติเมตร ที่ระดับความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ 30, 60 และ 90 เซนติเมตร ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าว 1 กรัม สามารถกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมได้เท่ากับ 1.784, 1.388 และ 1.058 มิลลิกรัม ตามลำดับ คิดเป็น 72.23, 56.18 และ 42.79 BV ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นแคดเมียมเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และที่ระดับความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ 30, 60 และ 90 เซนติเมตร โดยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าว 1 กรัม สามารถกำจัดสังกะสีในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมได้เท่ากับ 1.785, 1.586 และ 1.256 มิลลิกรัม ตามลำดับ คิดเป็น 72.23, 64.21 และ 50.82 BV ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นสังกะสีเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และได้นำถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวไปผ่านการฟื้นฟูสภาพ (Regeneration) โดยการใช้สารละลายกรดไฮดรอคลอริก (HCl) ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก แล้วนำไปวิเคราะห์หาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ ซึ่งมีค่าไอโอดีนนัมเบอร์เท่ากับ 288 มิลลิกรัมต่อกรัม

สาขาวิชา วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม ลายมือชื่อนิสิต พรรษกร ใจประดับเพชร

ปีการศึกษา 2549 ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา

##4789116720 : MAJOR INTER - DEPARTMANT OF ENVIRONMENTAL SCIENCE
KEYWORD : ACTIVATED CARBON / CADMIUM / ZINC / COCONUT SHELL / TAMARIND SEED

PASAKORN JAIPRADUBPETCH: CADMIUM AND ZINC REMOVAL IN SYNTHETIC WASTEWATER BY ACTIVATED CARBON PREPARED FROM COCONUT SHELL AND TAMARIND SEED. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. THARES SRISATIT, Ph.D., 115 pp.

The purpose of this research is to study the adsorption of cadmium and zinc using activated carbon from coconut shell and tamarind seed. They were prepared by chemical activated processes using sodium chloride (NaCl).

In the activated carbon preparation process, the results showed that the suitable temperature for carbonization of the raw material was 400 degree Celsius at 30 minutes, which gave the highest yield at 49.48 ± 5.88% and 50.57 ± 3.15% for coconut shell and tamarind seed respectively and suitable temperature for carbonization and activated of the charcoal material was 800 degree Celsius at 60 minutes. The appropriate ratio by weight of charcoal material with sodium chloride was 1:2 for both activated carbons, which gave the highest iodine number at 651 and 609 milligrams of iodine per gram of activated carbon respectively. The activated carbon from coconut shell and tamarind seed had surface area of 366.68 and 137.05 square meters, pore volume of 0.17 and 0.27 cubic centimeters, average pore size at 14.42 and 19.50 A° respectively. From adsorptive isotherm test, the results can be explained by Freundlich isotherm, with adsorptive capacity constant (K) of cadmium was 6.4912 and 4.2854 milligrams per gram and the value of 1/n was 0.723 and 0.4508 of both activated carbons respectively. And the adsorptive capacity constants (K) of zinc were 7.6839 and 5.3654 milligrams per gram and the values of 1/n were 0.5451 and 0.4045 of both activated carbons respectively.

In adsorption column test, activated carbon from coconut shell was used in the column at the height of 90 centimeters and column test was packed sand at the height of 30 centimeters. The results of provided activated carbon from coconut shell when packed at the height level at 30, 60 and 90 centimeters of column test show that activated carbon from coconut shell 1 gram can remove cadmium from industrial wastewater for 1.784, 1.388 and 1.058 milligrams with 72.23, 56.18 and 42.79 BV and can treat zinc from the industrial wastewater for 1.785, 1.586 and 1.256 milligrams, with 72.23, 64.21 and 50.82 BV at 10 milligrams per liter of cadmium and zinc influent concentration, respectively. Activated carbon regeneration studies were by using hydrochloric acid (5% by weight). It can be obtained from the iodine number at 288 milligrams of iodine per gram of activated carbon at the first time only.

Field of study Environmental Science Student's signature Pasakorn J.

Academic year 2006 Advisor's signature T. Srisatit

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ช่วยเหลืออย่างดีจากบุคคลหลายๆ ฝ่าย จึงขอแสดงความขอบคุณทุกท่าน ดังมีรายนามดังต่อไปนี้

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

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชาญวิทย์ โฆษิตานนท์ ผู้อำนวยการหลักสูตรสหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม รองศาสตราจารย์ ดร.สมใจ เพ็งปรีชา และ ผู้ช่วยศาตราจารย์ ดร.ศิริมา ปัญญาเมธีกุล ที่ได้สละเวลาอันมีค่ายิ่ง เพื่อเป็นคณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ในครั้งนี้ ทั้งยังให้ข้อคิด ข้อเสนอแนะ รวมทั้งหลักการต่างๆ อันเป็นประโยชน์ต่องานวิจัย

ขอขอบคุณ ห้องปฏิบัติการมูลฝอย หน่วยวิจัยการจัดการกากอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่ วัสดุอุปกรณ์ และสารเคมี ในการวิจัย

ขอขอบคุณ คุณจิระประภา เนียมปาน เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการเครื่อง AAS ภาควิชาธรณีวิทยา คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้คำแนะนำในการใช้เครื่อง AAS

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือวิเคราะห์พื้นที่ผิว

ขอขอบคุณ คุณสังวาลย์ เริงโพธิ์ ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ตัวอย่างกะลามะพร้าวมาใช้ในการศึกษา

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยสำหรับงานวิจัยในครั้งนี้

นอกจากนี้ขอขอบคุณพี่ๆ เพื่อนๆ และทุกคน ที่คอยช่วยเหลือในการทำการทดลอง และให้กำลังใจตลอดการทำงานวิจัยครั้งนี้

สุดท้ายนี้ขอกราบขอบพระคุณ คุณพ่อ คุณแม่ ญาติพี่น้อง ที่ได้ให้การสนับสนุน และให้กำลังใจตลอดมาในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... **ง**

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... **จ**

กิตติกรรมประกาศ ..... **ฉ**

สารบัญ ..... **ช**

สารบัญตาราง ..... **ฏ**

สารบัญรูป ..... **ฑ**

บทที่ 1 บทนำ **1**

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์ 3

1.3 สมมติฐาน 3

1.4 ขอบเขตการศึกษา 3

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 4

บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง **5**

2.1 โลหะหนัก 5

2.1.1 แคดเมียม (Cadmium, Cd) 6

2.1.1.1 คุณสมบัติของแคดเมียม 6

2.1.1.2 การปนเปื้อนของแคดเมียมในสิ่งแวดล้อม 6

2.1.1.3 ความเป็นพิษของแคดเมียม 8

2.1.2 สังกะสี (Zinc, Zn) 8

2.1.2.1 คุณสมบัติของสังกะสี 8

2.1.2.2 การปนเปื้อนและผลต่อสิ่งแวดล้อม 9

2.1.2.3 ความเป็นพิษของสังกะสี 9

2.2 การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย 10

2.2.1 การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยวิธีทางเคมี 10

2.2.1.1 การปรับสภาพกรด - ด่าง (pH Adjustment) 10

2.2.1.2 การตกตะกอนทางเคมี (Chemincal Precipitation) 10

2.2.1.3 การทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่น (Chemical Oxidation) 11

หน้า

2.2.1.4 การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion Exchange) 11
2.2.1.5 การใช้ไฟฟ้า (Electrodialysis) 11
2.2.2 การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยวิธีทางฟิสิกส์ 11
2.2.2.1 การกรอง (Filtration) 11
2.2.2.2 การทำให้แห้ง (Drying) 11
2.2.2.3 การดูดซับหรือการดูดติด (Adsorption) 12
2.2.2.4 การหมุนเหวี่ยง (Centrifuge) 12
2.2.2.5 การแยกตัวทำละลาย (Solvent Extraction) 12
2.3 การดูดติดผิว 12
2.3.1 กลไกการดูดติดผิว (Adsorption Mechanism) 13
2.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการดูดติดผิว 15
2.3.2.1 ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดติดผิว 15
2.3.2.2 ลักษณะของสารถูกดูดติดผิว 15
2.3.2.3 อุณหภูมิ 15
2.3.2.4 พีเอช 16
2.3.2.5 ความปั่นป่วน 16
2.3.2.6 เวลาสัมผัส 16
2.3.3 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (Rate of Molecular Transfer) 17
2.4 ถ่านกัมมันต์ 18
2.4.1 คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ 19
2.4.1.1 ลักษณะและโครงสร้างของถ่านกัมมันต์ 19
2.4.1.2 โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์ 19
2.4.1.3 โครงสร้างทางเคมีของผิวถ่านกัมมันต์ 20
2.4.2 การผลิตถ่านกัมมันต์ (Processing of activated carbon) 22
2.4.2.1 การเตรียมวัตถุดิบ 23
2.4.2.2 การทำให้เป็นถ่านคาร์บอน หรือคาร์บอไนเซชั่น (Carbonization) 23
2.4.2.3 การกระตุ้น หรือแอคติเวชั่น (Activation) 24
2.4.3 ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์ 26

หน้า

2.5 ไอโซเทอมการดูดติดผิว (Adsorption Isotherm) 27
2.5.1 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ (Langmuir adsorption isotherm) 27
2.5.2 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบเบท (Brunauer- Emmett-Teller Adsorption Isotherm) 29
2.5.3 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช (Freundlich Adsorption - Isotherm) 30
2.6 ถังดูดติดผิวแบบท่อ (Adsorption column test) 31
2.7 การฟื้นฟูสภาพของถ่านดูดติดผิว (Carbon regeneration) 33
2.8 เกลือ 34
2.9 มะพร้าว 36
2.9.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ 36
2.9.2 กะลามะพร้าว 37
2.10 มะขาม 37
2.10.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ 38
2.10.2 เมล็ดมะขาม 38
2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 39
บทที่ 3 แผนการทดลองและการดำเนินงานวิจัย 43
3.1 รูปแบบการดำเนินการศึกษา 43
3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย 43
3.2.1 อุปกรณ์สำหรับเตรียมถ่านกัมมันต์ 43
3.2.2 อุปกรณ์สำหรับใช้ทดลองในห้องปฏิบัติการ 43
3.2.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียม และสังกะสี 44
3.2.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ 44
3.2.5 อุปกรณ์สำหรับใช้ในการทดลองแบบต่อเนื่อง (Column test) 44
3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย 44
3.3.1 การเตรียมถ่านกัมมันต์ การคัดเลือกถ่านกัมมันต์ในสภาวะของอุณหภูมิ อัตราส่วนการกระตุ้นที่เหมาะสม และการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ 45

หน้า

3.3.1.1 ผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ 45
3.3.1.2 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักของวัตถุดิบต่อโซเดียมคลอไรด์ต่อประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ 45
3.3.2 การศึกษาความสามารถในการดูดติดผิว 48
3.3.2.1 ผลของพีเอชต่อการดูดติดผิว 48
3.3.2.2 ผลของเวลาสัมผัสต่อการดูดติดผิว 50
3.3.2.3 ผลของปริมาณถ่านกัมมันต์ 52
3.3.3 การทดสอบประสิทธิภาพในการดูดติดผิวของโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยทำการทดลองแบบต่อเนื่องในคอลัมน์ที่บรรจุชั้นทราย และชั้นถ่านกัมมันต์ 54
บทที่ 4 ผลการทดลองและการอภิปรายผล 56
4.1 การเตรียมถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว และเมล็ดมะขาม 56
4.1.1 ผลของอุณหภูมิในการเผาต่อร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว และเมล็ดมะขาม 56
4.1.2 ผลของอุณหภูมิในการเผาต่อร้อยละผลผลิต และประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว และเมล็ดมะขาม 58
4.1.3 ผลของอัตราส่วนต่อสารกระตุ้นในการเผาต่อร้อยละผลผลิต และประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว และเมล็ดมะขาม 60
4.1.4 ลักษณะทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ 63
4.2 การศึกษาความสามารถในการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าว และเมล็ดมะขาม 66
4.2.1 ผลของพีเอชต่อการดูดติดผิว 66
4.2.2 ผลของเวลาสัมผัสต่อการดูดติดผิว 71
4.2.3 ผลของปริมาณถ่านกัมมันต์ 74
4.2.3.1 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิชของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว 75
4.2.3.2 ไอโซเทอมการดูดติดผิวของแบบฟรุนดลิชถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม 78
4.2.3.3 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิชของถ่านกัมมันต์จาก Filtrasorb 300 80

หน้า

4.3 การทดสอบประสิทธิภาพในการดูดติดผิวของโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยทำการทดลองแบบต่อเนื่องในคอลัมน์ที่บรรจุชั้นทราย และชั้นถ่านกัมมันต์ 85

บทที่ 5 สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ 94

5.1 สรุปผลการทดลอง 94

5.2 ข้อเสนอแนะ 97

รายการอ้างอิง 98

ภาคผนวก 102

ภาคผนวก ก วิธีการหาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ 103

ภาคผนวก ข วิธีวิเคราะห์พื้นที่ผิวจำเพาะทั้งหมดของถ่านกัมมันต์ 108

ภาคผนวก ค วิธีการหาไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช 110

ภาคผนวก ง รูปการทดลองในห้อง ปฏิบัติการ 112

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 115

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

			หน้า
ตารางที่	1.1	ปริมาณการนำเข้า และมูลค่าการนำเข้าถ่านกัมมันต์ในประเทศไทย	2
ตารางที่	3.1	อัตราส่วนของกะลามะพร้าว และเมล็ดมะขามต่อโซเดียมคลอไรด์ที่ใช้ในการทดลอง	46
ตารางที่	4.1	ค่าร้อยละผลผลิตถ่านกะลามะพร้าวเมื่อเผาที่อุณหภูมิต่างๆเป็นเวลา 30 นาที	56
ตารางที่	4.2	ค่าร้อยละผลผลิตถ่านเมล็ดมะขาม เมื่อเผาที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 30 นาที	57
ตารางที่	4.3	ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาต่อร้อยละของผลผลิต และประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์	58
ตารางที่	4.4	ผลของอัตราส่วนวัตถุดิบต่อเกลือแกงต่อประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์	61
ตารางที่	4.5	ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม ถ่านเมล็ดมะขามที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ และถ่านกัมมันต์ที่มีขายตามท้องตลาดทั่วไป	63
ตารางที่	4.6	การละลาย และการตกตะกอนของแคดเมียมที่พีเอชต่างๆ (ความเข้มข้นแคดเมียมเริ่มต้น เท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร)	66
ตารางที่	4.7	ประสิทธิภาพการดูดติดผิวและการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่พีเอช ต่างๆ ของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว เมล็ดมะขาม และถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300	67
ตารางที่	4.8	การละลาย และการตกตะกอนของสังกะสีที่พีเอชต่างๆ (ความเข้มข้นสังกะสีเริ่มต้น เท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร)	68
ตารางที่	4.9	ประสิทธิภาพการดูดติดผิวและการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่พีเอช ต่างๆ ของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว เมล็ดมะขาม และถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300	69
ตารางที่	4.10	ปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ หลังผ่านการดูดติดผิวด้วยถ่านกัมมันต์ที่เวลาสัมผัสต่างๆ	72
ตารางที่	4.11	ปริมาณสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ หลังผ่านการดูดติดผิวด้วยถ่านกัมมันต์ที่เวลาสัมผัสต่างๆ	73
ตารางที่	4.12	การทดสอบการดูดติดผิวแคดมียมของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว	75
ตารางที่	4.13	การทดสอบการดูดติดผิวสังกะสีของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว	77
ตารางที่	4.14	การทดสอบการดูดติดผิวแคดเมียมของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม	78
ตารางที่	4.15	การทดสอบการดูดติดผิวสังกะสีของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม	79

หน้า

ตารางที่ 4.16 การทดสอบการดูดติดผิวแคดเมียมของถ่านกัมมันต์จาก Filtrasorb 300 81
ตารางที่ 4.17 การทดสอบการดูดติดผิวสังกะสีของถ่านกัมมันต์จาก Filtrasorb 300 82
ตารางที่ 4.18 ค่าคงที่ของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว เมล็ดมะขาม และถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 จากสมการการดูดติดผิวแบบฟลุนดลิช 84
ตารางที่ 4.19 ปริมาตรของชั้นถ่านกัมมันต์ที่ความสูง30, 60 และ 90 เซนติเมตร 86
ตารางที่ 4.20 ปริมาณแคดเมียม และสังกะสีในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมหลังผ่านคอลัมน์ชั้นทรายสูง 30 เซนติเมตร ความเข้มข้นแคดเมียม และสังกะสีเริ่มต้นเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร 87
ตารางที่ 4.21 ปริมาณแคดเมียม และสังกะสีในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมหลังผ่านคอลัมน์ชั้นถ่านกัมมันต์สูง 30 เซนติเมตร ความเข้มข้นแคดเมียม และสังกะสีเริ่มต้น เท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตรของชั้นถ่านกัมมันต์เท่ากับ 0.125 ลิตร 88
ตารางที่ 4.22 ปริมาณแคดเมียม และสังกะสีในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมหลังผ่านคอลัมน์ชั้นถ่านกัมมันต์สูง 60 เซนติเมตร ความเข้มข้นแคดเมียม และสังกะสีเริ่มต้น เท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตรของชั้นถ่านกัมมันต์ เท่ากับ 0.249 ลิตร 89
ตารางที่ 4.23 ปริมาณแคดเมียม และสังกะสีในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมหลังผ่านคอลัมน์ชั้นถ่านกัมมันต์สูง 90 เซนติเมตร ความเข้มข้นแคดเมียม และสังกะสีเริ่มต้น เท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตรของชั้นถ่านกัมมันต์ เท่ากับ 0.374 ลิตร 90
ตารางที่ ก.1 น้ำหนักประมาณของตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์ค่าไอโอดีน 107
ตารางที่ ค.1 การทดสอบการดูดติดผิวแคดมียมของถ่านกัมมันต์ 110
ตารางที่ ค.2 การคำนวณการดูดติดผิวแคดมียมของถ่านกัมมันต์ 111

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

			หน้า
รูปที่	2.1	ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายอนุภาคของสารถูกดูดติดผิวมายังสารดูดติดผิว	14
รูปที่	2.2	ความสัมพันธ์ของเวลาสัมผัส กับประสิทธิภาพการดูดติดผิว	16
รูปที่	2.3	กระบวนการเคลื่อนที่ของน้ำเสียผ่านถ่านกัมมันต์	18
รูปที่	2.4	กลุ่มฟังก์ชันนอลบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์	21
รูปที่	2.5	ขั้นตอนผลิตถ่านกัมมันต์	22
รูปที่	2.6	การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในการเผา	23
รูปที่	2.7	ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์	29
รูปที่	2.8	ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบเบท	30
รูปที่	2.9	ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช	31
รูปที่	2.10	ลักษณะการหมดสภาพของถังดูดซับ	33
รูปที่	2.11	มะพร้าว	36
รูปที่	2.12	มะขาม	37
รูปที่	3.1	ขั้นตอนการเตรียมถ่าน และการคัดเลือกถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสม	47
รูปที่	3.2	ขั้นตอนการศึกษาอิทธิพลของพีเอชต่อการดูดติดผิว	49
รูปที่	3.3	ขั้นตอนการศึกษาอิทธิพลของเวลาสัมผัสต่อการดูดติดผิว	51
รูปที่	3.4	ขั้นตอนการศึกษาอิทธิพลของน้ำหนักถ่านต่อการดูดติดผิว	53
รูปที่	3.5	แผนภาพการทดสอบประสิทธิภาพในการดูดติดผิวของแคดเมียม และสังกะสีโดยทำการทดลองแบบต่อเนื่องในคอลัมน์	55
รูปที่	4.1	ร้อยละผลผลิตเฉลี่ยของถ่านกะลามะพร้าว และเมล็ดมะขามที่เผากระตุ้นที่อุณหภูมิ 500, 600, 700 และ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง	59
รูปที่	4.2	เปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาต่อประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว และเมล็ดมะขาม	59
รูปที่	4.3	เปรียบเทียบอัตราส่วนสารกระตุ้นเกลือแกงต่อประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว และเมล็ดมะขาม	61
รูปที่	4.4	ลักษณะโครงสร้างพื้นที่ผิว และรูพรุน โดยเปรียบเทียบก่อน และหลังกระตุ้น ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน กำลังขยาย 600 เท่า	64

หน้า

รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ พีเอช ต่างๆ ของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว เมล็ดมะขาม และถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 67
รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ พีเอช ต่างๆ ของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว เมล็ดมะขาม และถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 69
รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ พีเอช ต่างๆ ของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว เมล็ดมะขาม และถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 70
รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เวลาสัมผัสต่างๆ ของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว เมล็ดมะขาม และถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 72
รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เวลาสัมผัสต่างๆ ของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว เมล็ดมะขาม และถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 74
รูปที่ 4.10 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแคดเมียมแบบฟรุนดลิชในน้ำเสียสังเคราะห์ หลังการดูดติดผิวด้วยถ่านจากกะลามะพร้าว 76
รูปที่ 4.11 ไอโซเทอมการดูดติดผิวสังกะสีแบบฟรุนดลิชในน้ำเสียสังเคราะห์ หลังการดูดติดผิวด้วยถ่านจากกะลามะพร้าว 77
รูปที่ 4.12 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแคดเมียมแบบฟรุนดลิชในน้ำเสียสังเคราะห์ หลังการดูดติดผิวด้วยถ่านจากเมล็ดมะขาม 79
รูปที่ 4.13 ไอโซเทอมการดูดติดผิวสังกะสีแบบฟรุนดลิชในน้ำเสียสังเคราะห์ หลังการดูดติดผิวด้วยถ่านจากเมล็ดมะขาม 80
รูปที่ 4.14 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแคดเมียมแบบฟรุนดลิชในน้ำเสียสังเคราะห์ หลังการดูดติดผิวด้วยถ่านจาก Filtrasorb 300 81
รูปที่ 4.15 ไอโซเทอมการดูดติดผิวสังกะสีแบบฟรุนดลิชในน้ำเสียสังเคราะห์ หลังการดูดติดผิวด้วยถ่านจาก Filtrasorb 300 83
รูปที่ 4.16 เส้นโค้งเบรคทรูจ์ ระหว่างความเข้มข้นของแคดเมียม และสังกะสี กับปริมาตรน้ำเสียที่ความสูงชั้นทรายที่ 30 เซนติเมตร 87

หน้า

รูปที่ 4.17 เส้นโค้งเบรคทรูจ์ ระหว่างความเข้มข้นของแคดเมียม และสังกะสี กับ ปริมาตรน้ำเสียที่ความสูงชั้นถ่านกัมมันต์ที่ 30 เซนติเมตร 88
รูปที่ 4.18 เส้นโค้งเบรคทรูจ์ ระหว่างความเข้มข้นของแคดเมียม และสังกะสี กับ ปริมาตรน้ำเสียที่ความสูงชั้นถ่านกัมมันต์ที่ 60 เซนติเมตร 90
รูปที่ 4.19 เส้นโค้งเบรคทรูจ์ ระหว่างความเข้มข้นของแคดเมียม และสังกะสี กับ ปริมาตรน้ำเสียที่ความสูงชั้นถ่านกัมมันต์ที่ 90 เซนติเมตร 92
รูปที่ ง.1 กะลามะพร้าวก่อนเผา 112
รูปที่ ง.2 กะลามะพร้าวหลังเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที 112
รูปที่ ง.3 เมล็ดมะขามก่อนเผา 113
รูปที่ ง.4 เมล็ดมะขามหลังเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที 113
รูปที่ ง.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพในการดูดติดผิวของแคดเมียม และสังกะสี โดยทำการทดลองแบบต่อเนื่องในคอลัมน์ 114

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันปัญหาผลกระทบจากการปนเปื้อนของโลหะหนักได้ทวีความรุนแรงยิ่งขึ้น อันเนื่องมาจากการส่งเสริมการพัฒนาทางด้านเศรษฐกิจ เช่นการพัฒนาอุตสาหกรรม และการทำเหมืองแร่ เป็นต้น โดยเฉพาะจากการปนเปื้อนแคดเมียมทั้งในดิน น้ำ และพืช ที่บ้านพะเด๊ะ ต.พระธาตุผาแดง อ.แม่สอด จ.ตาก ซึ่งแคดเมียมที่พบปนอยู่กับโลหะชนิดอื่น ได้แก่ สังกะสี โดยจะพบปนอยู่มากในโลหะสังกะสีร้อยละ 0.1 – 5 จนก่อให้เกิดผลกระทบต่อประชาชนที่อยู่ในบริเวณนั้น

โดยทั่วไปการกำจัดโลหะหนักในน้ำสามารถทำได้หลายวิธี ได้แก่ การตกตะกอน (Precipitation) การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion exchange) การกรองผ่านเยื่อเมมเบรน (Membrane filtration) และการดูดติดผิว (Adsorption) (Chen และ Wang, 2000) เป็นต้น

การกำจัดโลหะหนักโดยวิธีการดูดติดผิวด้วยถ่านกัมมันต์เป็นการดูดซับด้วยวิธีทางกายภาพ – เคมี ถ่านกัมมันต์ได้ถูกนำไปใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมหลายแห่ง เนื่องจากมีคุณสมบัติเป็นสารดูดซับที่ดีเพราะมีความเป็นรูพรุน และมีพื้นที่ผิวภายในสูง จึงได้มีการนำถ่านกัมมันต์ไปใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ เช่น ใช้ในการบำบัดสี กลิ่น และสารอินทรีย์ที่ปนเปื้อนในน้ำ ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในประเทศส่วนใหญ่นั้นจะนำเข้ามาจากต่างประเทศ และมีราคาแพง ซึ่งจากสถิติการนำเข้าถ่านกัมมันต์จากต่างประเทศของกรมศุลกากร (ตารางที่ 1.1) ตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบันพบว่ามีแนวโน้มสูงขึ้น และเนื่องจากบริษัทผลิตถ่านกัมมันต์ในประเทศมีเพียงไม่กี่ราย ขาดการยอมรับด้านคุณภาพ ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาวิจัยเพื่อตอบสนองความต้องการใช้ถ่านกัมมันต์ และยังเป็นการพัฒนาวัตถุดิบที่มีอยู่ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น รวมทั้งสามารถพัฒนาถ่านกัมมันต์ด้วยวิธีการที่ไม่ซับซ้อน เพื่อใช้ประโยชน์ในชนบท สามารถกรองโลหะหนักออกจากน้ำมาใช้ในการอุปโภค และบริโภค

ตารางที่ 1.1 ปริมาณการนำเข้า และมูลค่าการนำเข้าถ่านกัมมันต์ในประเทศไทย

ปี	ปริมาณการนำเข้า (ตัน)	มูลค่าการนำเข้า (บาท)
2545	3,278,957	145,201,933
2546	3,493,984	145,810,837
2547	4,162,058	155,816,098
2548	4,802,834	204,881,304
2549	5,658,602	263,223,505

ที่มา: http://www.customs.go.th/

การศึกษาครั้งนี้เป็นการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว และเมล็ดมะขาม โดยมะพร้าวนั้นจากสำนักงานสถิติแห่งชาติได้เคยสำรวจพบว่า ประชากรไทย 1 คน จะบริโภคเนื้อมะพร้าวประมาณปีละ 8,273.2 กรัม หรือประมาณ 18 ผล/คน/ปี ซึ่งปัจจุบันประเทศไทยมีประชากรประมาณ 63 ล้านคน จะใช้ผลมะพร้าวประมาณ 1000 ล้านผล หรือประมาณร้อยละ 65 ของผลผลิตทั้งหมด ส่วนที่เหลือประมาณร้อยละ 35 ของผลผลิตทั้งหมด ใช้ในรูปของอุตสาหกรรม หรือส่งออก ส่วนมะขามนั้นได้มีการนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์หลายชนิด ได้แก่ มะขามแก้ว ลูกอมมะขาม ไวน์มะขาม น้ำมะขามเข้มข้น เป็นต้น ซึ่งผลิตผลที่เกิดจากการแปรรูปมะขามที่ได้มากที่สุดคือ เมล็ดมะขาม เนื่องจากฝักมะขามมีเมล็ดมะขามเป็นส่วนประกอบประมาณร้อยละ 34 ของทั้งหมด จากข้อมูลข้างต้นจึงได้นำกะลามะพร้าว และเมล็ดมะขามมาใช้เพื่อเพิ่มมูลค่าของวัตถุดิบและเป็นแนวทางในการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่นๆ โดยในการศึกษาครั้งนี้จะทำการศึกษาการกำจัดแคดเมียมและสังกะสีโดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการกำจัดแคดเมียมและสังกะสีของถ่านกัมมันต์ซึ่งเตรียมจากกะลามะพร้าว และเมล็ดมะขาม โดยใช้โซเดียมคลอไรด์เป็นตัวกระตุ้นและหาปัจจัยที่เหมาะสมในการกำจัดแคดเมียม และสังกะสีพร้อมทั้งเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมและสังกะสีโดยการทดลองแบบต่อเนื่อง ทั้งยังทำการกรองโดยใช้ทรายเป็นตัวกรองเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการกรองอีกด้วย

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ซึ่งเตรียมจากกะลามะพร้าว และเมล็ดมะขาม โดยใช้โซเดียมคลอไรด์เป็นตัวกระตุ้น

1.2.2 ศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดติดผิวของแคดเมียม และสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าว เมล็ดมะขาม และถ่านกัมมันต์ที่มีขายตามท้องตลาดทั่วไป

1.2.3 ศึกษาความสามารถของการดูดติดผิวของแคดเมียม และสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าว เปรียบเทียบกับเมล็ดมะขาม และถ่านกัมมันต์ที่มีขายตามท้องตลาดทั่วไป

1.2.4 ศึกษาประสิทธิภาพของการกำจัดโลหะหนักจากน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมของตัวกรองถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้

1.3 สมมติฐาน

จากคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ในการดูดซับโลหะหนักได้ ดังนั้นถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าว และเมล็ดมะขามสามารถนำมาดูดซับแคดเมียมและสังกะสีในน้ำได้

1.4 ขอบเขตการศึกษา

1.4.1 เตรียมถ่านกัมมันต์จาก กะลามะพร้าว และเมล็ดมะขาม โดยการกระตุ้นด้วยโซเดียมคลอไรด์

1.4.2 ศึกษาลักษณะของถ่าน และถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ ได้แก่ ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ ค่าพื้นที่ผิว ค่าปริมาตรโพรง และขนาดโพรงเฉลี่ย

1.4.3 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิวแคดเมียม และสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ของถ่านกัมมันต์ ได้แก่พีเอช เวลาสัมผัส และปริมาณถ่านกัมมันต์

1.4.4 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดติดผิวแคดเมียม และสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ในคอลัมน์ดูดติดผิวแบบแท่งโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

1.4.5 การฟื้นสภาพของถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้วด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้นร้อยละ 5

1.5 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.5.1 เป็นการพัฒนาวิธีการในการเตรียมถ่านกัมมันต์ให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยใช้วัสดุเหลือทิ้งให้เป็นประโยชน์ และมีคุณค่ามากขึ้น

1.5.2 ทราบประสิทธิภาพของการดูดติดผิวของการกำจัดแคดเมียมและสังกะสีจากถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าว และเมล็ดมะขามในการบำบัดน้ำเสีย

1.5.3 เป็นแนวทางในการใช้ในการกำจัดแคดเมียมและสังกะสีเพื่อการบำบัดน้ำเสียในพื้นที่จริง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 โลหะหนัก

โลหะหนัก หมายถึง โลหะที่มีความถ่วงจำเพาะตั้งแต่ 5 ขึ้นไป มีเลขอะตอมอยู่ ระหว่าง 23 – 92 ภายในคาบที่ 4 - 7 ของตารางธาตุ มีจำนวนทั้งสิ้น 68 ธาตุ มีสถานะ เป็นของแข็ง (ยกเว้น ปรอทเป็นของเหลวที่อุณหภูมิปกติ) มีลักษณะเป็นมันวาวสะท้อนแสง เหนียว และนำมาตีเป็นแผ่นบางๆ ได้ มีค่าออกซิเดชันได้หลายค่า โลหะหนักสามารถรวมตัวกับสารอื่นๆ เป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่เสถียรกว่าโลหะอิสระได้หลายรูป โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์เป็นสารประกอบโลหะอินทรีย์ (Organometallic Compound) ซึ่งเป็นพิษ หากปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมจะสามารถถ่ายทอดเข้าสู่สิ่งมีชีวิตได้ โดยผ่านไปตามห่วงโซ่อาหาร ประกอบกับความเป็นพิษของโลหะหนักหลายชนิดเป็นอันตรายร้ายแรง เมื่อมีการสะสมในร่างกายของมนุษย์ อาจมีผลทำให้พิการ หรือเสียชีวิตได้ U.S. EPA จึงได้กำหนด โลหะที่มีพิษที่ต้องกำจัดออกจากน้ำเสียก่อนปล่อยทิ้ง 13 ชนิด ได้แก่ แบริลเลียม แคดเมียม โครเมียม นิกเกิล ตะกั่ว สังกะสี เงิน อาร์เซนิค แอนติโมนี เซเลเนียม แทลเลียม และปรอท ในจำนวนนี้ ปรอท แคดเมียม อาร์เซนิค และตะกั่ว จัดเป็นโลหะหนักที่มีพิษถาวรไม่สามารถเปลี่ยนรูปตามกาลเวลาและยังสามารถสะสมอยู่ในร่างกายของสิ่งมีชีวิต อีกทั้งปัจจุบันโลหะหนักทั้ง 4 ชนิด ถูกนำมาใช้ในกระบวนการอุตสาหกรรมอย่างกว้างขวาง ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการกำจัดออกจากน้ำเสีย ของเสีย รวมถึงกากตะกอนก่อนทิ้ง เพื่อป้องกันการแพร่กระจายของโลหะหนักสู่สิ่งแวดล้อม

แคดเมียมเป็นโลหะที่พบปนอยู่กับโลหะชนิดอื่น ได้แก่ สังกะสี ตะกั่ว และทองแดง อัตราส่วนที่แตกต่างกันออกไป โดยพบปนอยู่กับโลหะสังกะสีร้อยละ 0.1 – 5 สำหรับประเทศไทย แหล่งแร่สังกะสีอยู่ที่จังหวัดตาก ซึ่งมีแคดเมียมประกอบอยู่ร้อยละ 0.23 – 0.38 และจากการสำรวจขององค์การนานาชาติอีมี (IWMI; International Water Management Institute) ที่ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับทรัพยากรน้ำ และดินในประเทศกำลังพัฒนา ร่วมกับกรมวิชาการเกษตร ในพื้นที่ลำน้ำแม่ตาว ตำบลพระธาตุผาแดง และตำบลแม่ตาวใหม่ อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก พบว่าจากการสุ่มดินในนา พบว่ามีแคดเมียมอยู่ในช่วง 3.4 – 284 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ซึ่งสูงกว่ามาตรฐานของสหภาพยุโรปที่กำหนดไว้ 3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ถึง 1.13 – 94 เท่า นอกจากนี้ยังพบแคดเมียมในผลิตผลทางการเกษตร ได้แก่ ข้าว กระเทียม และถั่วเหลือง ในการวิเคราะห์หาแคดเมียมในน้ำใต้ดิน น้ำผิวดิน พบปริมาณแคดเมียมในระดับที่น้อยกว่า 0.01 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่กำหนด

ไว้ 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่พบแคดเมียมในตะกอนดินที่พัดพามากับกระแสน้ำในปริมาณสูง ซึ่งในระยะยาวยังไม่มีการยืนยันว่าหากได้รับแคดเมียมเป็นเวลานานจะเกิดการสะสมหรือไม่ ดังเช่นในกรณีของประเทศญี่ปุ่นที่ชาวบ้านป่วยเป็นโรคอิไต - อิไต (Itai - Itai) จากการทำเหมือง และถลุงโลหะ ซึ่งผลิตโลหะทองแดง ตะกั่ว และสังกะสี โดยทิ้งกากโลหะจากโรงงานลงแม่น้ำ จนชาวบ้านที่อาศัยอยู่บริเวณนั้นมีอาการผิดปกติ คือมีอาการปวดกระดูกตามน่อง ซี่โครง และหลัง ซึ่งมาทราบภายหลังว่าเกิดมาจากกินข้าวที่ปนเปื้อนแคดเมียมเป็นเวลานาน

2.1.1 แคดเมียม (Cadmium, Cd)

2.1.1.1 คุณสมบัติของแคดเมียม

แคดเมียมเป็นโลหะอ่อนสีเงิน อยู่ในหมู่ 2B ของตารางธาตุ มีเลขอะตอม 48 น้ำหนักอะตอม 112.4 จุดหลอมเหลว 320.9 องศาเซลเซียส จุดเดือด 769 องศาเซลเซียส ค่าความถ่วงจำเพาะ 8.65 แคดเมียมมีเลขออกซิเดชันเพียงค่าเดียวคือ +2 ละลายได้ในกรดไนตริกและสารละลายแอมโมเนียมไนเตรท (Hawley, 1977) โลหะชนิดนี้ไม่จำเป็นและไม่เป็นประโยชน์ต่อร่างกาย ยิ่งกว่านี้ยังเป็นพิษต่อร่างกายอีกด้วย แคดเมียมเป็นธาตุที่เกิดขึ้นในธรรมชาติ มักจะพบอยู่ร่วมกับสังกะสีและตะกั่วแต่มีสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์คล้ายกับสังกะสี คือ ทนทานต่อการผุกร่อน และเนื่องจากแคดเมียมมีโครงสร้างของอะตอมคล้ายกับสังกะสีจึงสามารถเข้าแทนที่สังกะสีในระบบเอนไซม์ ตัวอย่างเช่น แคดเมียมสามารถเข้าแทนที่สังกะสีในระบบเอนไซม์ carboxypeptidase

2.1.1.2 การปนเปื้อนของแคดเมียมในสิ่งแวดล้อม

แหล่งที่แพร่กระจายแคดเมียมสู่สิ่งแวดล้อมที่สำคัญ คือ

1) อุตสาหกรรมตะกั่วและสังกะสี (ได้แก่ การทำเหมือง การหลอม และถลุง) อุตสาหกรรมแคดเมียม ซึ่งอุตสาหกรรมเหล่านี้จะปล่อยฝุ่น ไอ (Fume) น้ำเสีย กากตะกอน (Sludge) ที่มีแคดเมียมปนอยู่ออกมา
2) โรงงานชุบโลหะแคดเมียม ซึ่งของเสียจากโรงงานประเภทนี้จะมีแคดเมียมประมาณ 100 - 500 ppm และมีโลหะหนักอื่นๆ รวมทั้งไซยาไนด์และสารเคมีอื่นๆ ผสมอยู่ด้วย
3) Primary Iron and Steel Industry และ Secondary Non - Ferous MetalIndustry อุตสาหกรรมประเภทนี้จะปล่อยฝุ่น ไอ น้ำเสีย กากตะกอน ที่มีแคดเมียมปนอยู่ออกมา

4) การเผาของเสีย (Incineration) การเผาของเสียที่มีแคดเมียมประกอบอยู่ เช่นพลาสติก เม็ดสี โลหะเคลือบ เศษเหล็ก เป็นต้น จะปล่อยแคดเมียมออกมาในรูป Cadmium Aerosols เช่น แคดเมียมออกไซด์
5) ยางรถยนต์ที่สึกหรอ ยางรถยนต์ จะมีแคดเมียมประกอบอยู่ประมาณ 20 – 29 ppm โดยเป็นสิ่งเจือปน (Impurity) ใน Zinc Oxide ซึ่งเป็นสารรักษาความเร่ง
6) ปุ๋ยฟอสเฟต มีแคดเมียมปนอยู่ เนื่องจากหินฟอสเฟตที่เป็นวัตถุดิบแคดเมียมประมาณ 2 - 170 ppm มีรายงานการศึกษาพบว่าการใช้ปุ๋ยฟอสเฟตจะไปเพิ่มปริมาณแคดเมียมในดินเพราะแคดเมียมฟอสเฟตละลายน้ำได้น้อย และส่วนที่ไม่ละลายพืชไม่สามารถดูดซึมได้ ดังนั้นแคดเมียมส่วนนี้จึงสะสมอยู่ในดิน แต่ถ้ามีการใช้ปุ๋ยแอมโมเนียร่วมด้วยแคดเมียมจะละลายได้มากขึ้น เนื่องจากแคดเมียมจะไปรวมตัวกับแอมโมเนียเป็นอิออนที่ละลายน้ำได้ (กรมควบคุมมลพิษ, กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย, 2545)
7) การใช้ถ่านหิน และ Heating Oil แคดเมียมเป็นธาตุปริมาณน้อยใน Fossil Fuels ดังนั้นเมื่อมีการใช้เชื่อเพลิงเหล่านี้ แคดเมียมจะถูกปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมในรูปของไอและเถ้าปริมาณแคดเมียมในถ่านหินอยู่ในช่วง 0.25 - 5 ppm ถึงแม้จะไม่ทราบเปอร์เซ็นต์ที่แน่นอนของแคดเมียมที่ถูกปล่อยออกจากปล่อง หรือส่วนที่ถูกขจัดโดย Scrubber หรือส่วนที่ถูกทำให้ตกตะกอน (Precipitated) ก็ตาม แต่พบว่าในเถ้าจากถ่านหิน(Coal Ash) มีปริมาณแคดเมียมสูงถึง 150 ppm ส่วนความเข้มข้นของแคดเมียมโดยเฉลี่ยใน heating oil ประมาณ 0.3 ppm
8) การตะกอนของน้ำทิ้ง (Sewage Sludge) กากตะกอนจากโรงงานกำจัดน้ำเสียมีปริมาณแคดเมียมค่อนข้างสูง ปริมาณแคดเมียมในกากตะกอนจากโรงงานกำจัดน้ำเสียจำนวน 56 แห่งในประเทศสวีเดน มีค่าเฉลี่ย 15.6 ppm และการใช้กากตะกอนเหล่านี้เพื่อเป็นปุ๋ย ได้มีการคำนวณว่าจากการใช้Sewage Sludge (ที่มี Cd ~ 20 ppm หรือมากกว่า) จำนวน 2 - 3 ตัน/ปี ใส่ลงในพื้นที่เพาะปลูกที่ยังไม่มีปัญหามลพิษ (Unpolluted Agriculture Soils ซึ่งมี Cd < 0.1 - 0.5 ppm) จะไปเพิ่มปริมาณแคดเมียมในดินเพาะปลูกนี้เป็น 1.2 - 6 ppm และพบว่าพืชบางชนิด เช่น ข้าว ข้าวสาลี สามารถดูดซึมแคดเมียมจากดินได้ดี
9) การสึกกร่อนของสังกะสี (Corrosion of Zinc) แคดเมียมเป็นสิ่งเจือปนในสังกะสี เมื่อโลหะหรือภาชนะที่ชุบสังกะสีเกิดการสึกกร่อนแคดเมียมก็จะแพร่กระจายออกสู่สิ่งแวดล้อมได้

2.1.1.3 ความเป็นพิษของแคดเมียม

ความเป็นพิษของแคดเมียมโดยเฉพาะอย่างยิ่งต่อมนุษย์นั้นจะมีทั้งผลเฉียบพลันและแบบเรื้อรัง แคดเมียมสามารถเข้าไปสะสมในร่างกาย ทั้งระบบทางเดินหายใจ ผิวหนังและระบบทางเดินอาหาร ซึ่งส่วนใหญ่มีสาเหตุมาจากการกินอาหารหรือเครื่องดื่มที่มีแคดเมียมปนเปื้อน เนื่องจากอาหารหรือเครื่องดื่มดังกล่าวบรรจุภาชนะที่เคลือบด้วยแคดเมียม โดยปริมาณที่มีผลอาจทำให้ถึงตายได้อยู่ที่ 350 – 3,500 มิลลิกรัม และปริมาณที่มีผลทำให้ตายได้อยู่ที่ 1,530 – 8,900 มิลลิกรัม (กรมควบคุมมลพิษ, กองจัดการสารอันตราย และกากของเสีย, 2545) ในการรับประทานอาหารของคนไทยได้รับปริมาณแคดเมียมจากพืช 28.82 ไมโครกรัมต่อวัน โดยแคดเมียมในอาหารจะถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายโดยผ่านทางลำไส้ ระบบทางเดินหายใจ ไต ตับ และที่ตับอ่อน ในช่วงระยะเวลา 1 วัน แคดเมียมสามารถสะสมไว้ในร่างกาย 2 ไมโครกรัม บางครั้งอาจสูงถึง 3 – 4 ไมโครกรัมในผู้ที่สูบบุหรี่จัด (สุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2545) และจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามอายุ เนื่องจากค่าครึ่งชีวิต (biological half life) ของแคดเมียมยาว จึงทำให้การสลายตัวของแคดเมียมใช้เวลานาน ร่างกายมนุษย์หรือสัตว์จะขับถ่ายแคดเมียมปนมากับปัสสาวะมากกว่าอุจจาระ นอกจากนี้แคดเมียมปริมาณน้อยๆ จะถูกขับปนออกมากับเหงื่อ

ความเป็นพิษเฉียบพลันของแคดเมียมถ้าได้รับสูงถึง 326 มิลลิกรัมจากอาหาร จะมีอาการปวดหัวอย่างรุนแรง เสมหะมาก อาเจียน ท้องเดิน ถ้าได้รับ 350 มิลลิกรัมถึง 1 กรัม อาจจะให้เกิดอาการช็อคและล้มลงทันทีจนอาจถึงตายได้อย่างน้อยภายในเวลา 24 ชั่วโมงหรือภายใน 1 - 2 สัปดาห์ และในระหว่างนี้ตับและไตอาจถูกทำลาย ส่วนผลระยะยาวเมื่อได้รับแคดเมียม 30 - 40 มิลลิกรัมต่อวันเป็นเวลานานจะมีผลเสียโดยตรงกับการสร้างกระดูก โดยแคดเมียมจะไปลดการสะสมของธาตุแคลเซียม ขณะที่มีการสร้างและซ่อมแซมกระดูก และจะไม่มีการสะสมของคอลลาเจน (collagen) ในกระดูก โดยที่แคดเมียมเป็นตัวการที่ทำให้เอนไซม์ไลซีออกซิเดส (lysyloxidase) หมดประสิทธิภาพ จึงทำให้กระดูกผุกร่อนเสียรูปและทำให้เจ็บปวดมาก เรียกโรคนี้ว่า โรคอิไต - อิไต นอกจากนี้แคดเมียมมีผลเสียต่อการทำงานของร่างกายทุกระบบ เช่น ทำลายระบบทางเดินอาหาร ระบบประสาทส่วนกลาง และเส้นประสาทถูกทำลาย ระบบการเมตาโบลิซึมของธาตุเหล็ก สังกะสี และทองแดง ทำงานผิดปรกติ

2.1.2 สังกะสี (Zinc, Zn)

2.1.2.1 คุณสมบัติของสังกะสี

สังกะสีเป็นโลหะที่อยู่ในหมู่ 2B ในตารางธาตุ มีน้ำหนักอะตอม 65.37 เลขอะตอม 30 ความถ่วงจำเพาะ 7.14 จุดหลอมเหลว 419.5 องศาเซลเซียส จุดเดือด 906 องศาเซลเซียส สังกะสีมีคุณสมบัติทนต่อการผุกร่อนได้ดี ดังนั้นจึงมีการนำเอาสังกะสีมาฉาบผิวเหล็กเพื่อช่วยให้เหล็กคงทน

ต่อการทำปฏิกิริยากับความชื้นในอากาศ สังกะสีมีเลขออกซิเดชันเพียงค่าเดียวคือ +2 (Hawley,1977) สังกะสีละลายได้ดีในกรดแก่ และด่างแก่ เป็นโลหะที่มีคุณสมบัติแอมโฟเทอริค คือ ไฮดรอกไซด์ของโลหะประเภทนี้ หากละลายในกรดจะทำให้เกิดแคทอิออน Zn^{2+} หากละลายในเบสจะทำให้เกิด $Zn(OH)_2$ จะละลายน้ำได้น้อยลงเรื่อยๆ

2.1.2.2 การปนเปื้อนและผลต่อสิ่งแวดล้อม

สังกะสีเป็นธาตุที่ละลายได้ดีในสภาพเป็นกรด สังกะสีสามารถแพร่กระจายออกสู่สิ่งแวดล้อมทางน้ำได้มาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากทางน้ำทิ้งจากโรงงานถลุงแร่สังกะสีและจากการใช้ยาปราบศัตรูพืช เป็นต้น (พรรณราย สิทธิวงษ์, 2543) พบว่า การชะล้างของน้ำฝนจากบ้านที่มุงหลังคาโลหะสังกะสีเคลือบ มีโอกาสปนเปื้อนลงในแหล่งน้ำได้ และจะมีผลกระทบต่อระบบนิเวศแหล่งน้ำซึ่งความเป็นพิษของสังกะสีนั้นจะไปทำลายเซลล์บริเวณเหงือกของปลา และมีผลต่อการวางไข่และตัวอ่อนของปลา นอกจากนี้ยังมีผลต่อการเจริญเติบโตของปลา ทำให้การเจริญเติบโตของปลาช้าลงในบริเวณปากแม่น้ำบางแห่ง พบว่าสามารถฆ่าตัวอ่อนของหอยได้ที่ความเข้มข้น 0.4 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ละระดับความเป็นพิษที่สามารถฆ่าหอยที่เป็นตัวแก่และปลาได้ อาจมีค่าสูงถึง 10 มิลลิกรัมต่อลิตร (Portmann, 1972) สังกะสีในรูปของสารประกอบเป็นพิษมากกว่าในรูปของธาตุหรือไอออนอิสระ (Hegstrom และ Stephen, 1989) ความเป็นพิษของสังกะสีไม่สามารถลดลงได้ด้วยหมู่ SH - (Sulhydrin) เหมือนโลหะชนิดอื่น (Catherine และ Dheiann, 1989)

ของเสียจากโรงงานที่มีสังกะสีในปริมาณสูง เช่นเถ้าฟุ้งกระจายหรือเถ้าลอย (fly ash) อาจนำไปใช้เป็นปุ๋ยสังกะสีได้ในดินที่เป็นกรด (ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา, 2545) อย่างไรก็ตามถ้าวัสดุเหลือใช้มีสังกะสีอยู่มากและแคดเมียมอยู่สูง เช่น กากตะกอนหลายชนิด การลดปริมาณสังกะสีในดินให้น้อยลงอาจทำได้โดยยกระดับพีเอชให้เลย 6.5 ซึ่งเป็นคำแนะนำในการใช้กากตะกอนโดยทั่วไป

2.1.2.3 ความเป็นพิษของสังกะสี

สังกะสีเป็นกลุ่มโลหะหนักที่มีแนวโน้มจะเป็นพิษ ปกติสังกะสีจะมีประโยชน์ต่อสุขภาพของมนุษย์ และสิ่งมีชีวิต แต่ถ้าได้รับมากเกินไปจะทำให้เกิดอันตราย สามารถที่จะรวมตัวกับสารอื่นๆ เป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Complex - Compound) เมื่อรวมตัวกับสารประกอบอินทรีย์ (Organometallic Compound) เข้าสู่สิ่งมีชีวิตโดยผ่านห่วงโซ่อาหาร (Food Chain) โดยกระบวนการทวีความเข้มข้นในสิ่งมีชีวิต (Bio Accumulation) (Corn, 1993) รวมทั้งการสัมผัสกับโลหะโดยตรงจากการประกอบกิจกรรมในการดำรงชีวิตประจำวัน จึงปรากฏความเป็นพิษของโลหะหนักในสิ่งมีชีวิตทั้งพืช สัตว์และมนุษย์อยู่เสมอ ความเป็นพิษต่อพืชของสังกะสีขึ้นอยู่กับชนิดของพืชซึ่งจะทนทานต่อปริมาณสังกะสีได้แตกต่างกัน พืชที่ทนทานต่อสังกะสีได้มาก เนื่องจากพืชสามารถนำ

สังกะสีไปรวมอยู่ในผนังเซลล์ เมื่อพืชที่ได้รับพิษจากสังกะสีจะสูญเสียคลอโรฟิลถึง 50 เปอร์เซ็นต์ โดยไม่ปรากฏอาการแต่จะลดการดูดดึงของฟอสฟอรัส

2.2 การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย

ปัจจุบันปัญหาการปนเปื้อนของโลหะหนักในสิ่งแวดล้อมทวีความรุนแรงขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากมีปริมาณการใช้ และการผลิตมากขึ้น จากอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น เหมืองแร่ ชุบโลหะ ปิโตรเลียม สี ตลอดจนแบตเตอรี่ ซึ่งล้วนเป็นอุตสาหกรรมที่ใช้โลหะหนักในกระบวนการผลิต และก่อให้เกิดของเสียที่ถูกปนเปื้อนด้วยโลหะหนักดังกล่าวทั้งสิ้น โดยของเสียที่เกิดขึ้นนี้มีทั้งเป็นฝุ่นละออง ไอ ตลอดจนน้ำเสีย ส่วนกระบวนการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียนั้นมีหลายวิธี การพิจารณาว่าจะเลือกใช้วิธีการใดนั้น ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมหลายๆ ด้าน ดังนี้ คือ คุณสมบัติของน้ำเสียก่อนบำบัด คุณภาพของน้ำที่ต้องการ พื้นที่ที่ต้องการใช้ในการบำบัด ค่าใช้จ่ายในการบำบัดน้ำเสีย และความเป็นไปได้ในการนำของเสียกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งสามารถสรุปวิธีการกำจัดโลหะหนักได้ 2 วิธีใหญ่ๆ คือ วิธีทางเคมี และวิธีทางฟิสิกส์

2.2.1 การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยวิธีทางเคมี

เป็นวิธีการทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีในน้ำเสียโดยเติมสารเคมีลงไป มักใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่ไม่สามารถบำบัดโดยวิธีการอื่นได้ วิธีการบำบัดทางนี้ เช่น

2.2.1.1 การปรับสภาพกรด - ด่าง (pH Adjustment)

เป็นการปรับสภาพกรด - ด่างของน้ำเสียให้ได้ค่ามาตรฐานน้ำเสีย (ค่ามาตรฐานน้ำทิ้งของพีเอชไม่น้อยกว่า 5.5 และไม่มากกว่า 9.0) หรือค่าที่เหมาะสมสำหรับขั้นตอนการบำบัดต่อไป หลักการทั่วไปถ้าน้ำเสียมีฤทธิ์เป็นกรดก็จะปรับสารเคมีประเภทด่าง เช่น โซดาไฟ (NaOH) ปูนขาว (Lime, $CaOH_2$) เป็นต้น

2.2.1.2 การตกตะกอนทางเคมี (Chemical Precipitation)

เป็นการเติมสารเคมีลงในน้ำเพื่อทำให้อิออนของโลหะหนักที่ละลายอยู่ในน้ำเปลี่ยนสถานะมาอยู่ในรูปของแข็งที่ไม่ละลายน้ำเกิดเป็นตะกอนและน้ำหนักมากขึ้นจมตัวลงตกตะกอนแยกออกจากน้ำเสียได้รวดเร็วขึ้น สารเคมีที่ใช้เติมมีหลายชนิด เช่น ปูนขาว โซดาไฟ โซเดียมคาร์บอเนต ($NaCO_3$) โซเดียมซัลไฟด์ สารส้ม เฟอริคคลอไรด์ เฟอริคซัลเฟต เป็นต้น

2.2.1.3 การทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่น (Chemical Oxidation)

เป็นกระบวนการเกิดปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้องกับการสูญเสียอิเล็กตรอนของอะตอม (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2539) โดยการใช้สารออกซิแดนท์ (Oxidant) ทำปฏิกิริยากับสารต่างๆ ในน้ำเสีย สารออกซิแดนท์มีหลายชนิด เช่น โอโซน ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ด่างทับทิม และคลอรีน เป็นต้น

2.2.1.4 การแลกเปลี่ยนประจุ (Ion Exchange)

หลักการคือ อิออนในน้ำเสียจะมาเกาะแลกเปลี่ยนกับอิออนเรซิน (Resin) ซึ่งมีทั้งชนิดอิออนลบ และอิออนบวกโดยไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงด้านโครงสร้างของตัวกลาง เช่น การใช้เรซินที่มีอิออนลบกับน้ำเสียจากการชุบโลหะที่โลหะหนักประเภทประจุบวก เป็นต้น เรซินเมื่อใช้แล้วสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้โดยการล้างด้วยกรด

2.2.1.5 การใช้ไฟฟ้า (Electrodialysis)

อุปกรณ์ที่ใช้จะเป็นเซลล์ไฟฟ้า ภายในมีแผ่นเยื่อกรอง (Membrane) 2 ชนิด ทั้งที่เป็นเยื่อประจุลบและประจุบวก แต่โมเลกุลของน้ำจะไหลผ่านได้ยาก ทำให้แยกโลหะหนักออกได้ ซึ่งยอมให้ประจุที่เหมือนกันไหลผ่าน แต่โมเลกุลของน้ำจะไหลผ่านได้ยาก ทำให้แยกโลหะหนักออกได้ เช่น จากการแยกโลหะหนักออกจากน้ำเสียจากการชุบโลหะ การแยกเงินจากน้ำยาล้างฟิล์ม เป็นต้น (บุญจง ขาวสิทธิวงษ์, 2539)

2.2.2 การกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียโดยวิธีทางฟิสิกส์

เป็นการนำหลักการทางฟิสิกส์มาประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียซึ่งมีด้วยกันหลายวิธี

2.2.2.1 การกรอง (Filtration)

การกรองน้ำอาศัยหลักการอัดน้ำเสียที่มีความดันสูงผ่านวัสดุกรอง ของแข็งที่ไม่สามารถเล็ดลอดช่องกรองได้จะถูกดักไว้การกรองมีหลายแบบ เช่น การกรองที่มีช่องกรองละเอียด (Microfilration) การกรองที่มีช่องกรองละเอียดมาก (Ultrafiltration) และการกรองโดยวิธีออสโมซิสกลับ ระบบกรองน้ำมักใช้ ในการแยกสารแขวนลอยที่มีคุณค่าทางเศรษฐกิจ

2.2.2.2 การทำให้แห้ง (Drying)

การทำให้น้ำเสียแห้งนี้อาจใช้แสงแดด หรือให้ความร้อนโดยตรง เพื่อระเหยน้ำออกไปจะได้ของแข็งเหลืออยู่ เช่น การตากตะกอนให้แห้ง โดยใช้แสงแดด เป็นต้น

2.2.2.3 การดูดซับหรือการดูดติด (Adsorption)

เป็นปรากฏการณ์โมเลกุลของของไหลหรือคอลลอยด์ (Adsorbate) เคลื่อนที่ไปสัมผัสและเกาะติดแน่นอยู่บนผิวของของแข็งโดยแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลที่ต่างชนิดกันของสารที่เป็นของแข็ง และของไหลนั้น โดยสารดูดซับ (Adsorbent) เช่น ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) และยังมีสารดูดซับหลายชนิด เช่น ซิลิก้าเจล (Silica Gel) เบนโธไนต์ (Benthonite) และดินเหนียวกัมมันต์ (Activated Clay) แต่มักนิยมใช้ถ่านกัมมันต์มากกว่าสารดูดซับอื่นๆ เพราะกำจัดกลิ่น สี และโลหะหนักในน้ำได้ดี (บุญจง ขาวสิทธิวงษ์, 2539)

2.2.2.4 การหมุนเหวี่ยง (Centrifuge)

โดยอาศัยหลักการแรงหนีศูนย์กลาง ซึ่งน้ำเสียจะถูกเหวี่ยงโดยหมุนด้วยความเร็วสูง ของแข็งที่มีความถ่วงจำเพาะสูงจะถูกเหวี่ยงออกไปรอบนอกวิธีนี้เหมาะกับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของสารแขวนลอยสูง

2.2.2.5 การแยกตัวทำละลาย (Solvent Extraction)

หลักการโดยใช้สารสกัด (Extractant) ซึ่งไม่ละลายน้ำแต่สามารถละลายสารที่อยู่ในน้ำเสียได้ จากนั้นจึงแยกสารสกัดที่มีสารถูกสกัดละลายอยู่ออกไป เช่น โดยวิธีกลั่น เป็นต้น วิธีนี้อาจได้สารละลายอยู่ในน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่

2.3 การดูดติดผิว

การดูดติดผิวหรือการดูดซับ (Adsorption) เป็นปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้นบริเวณพื้นผิวของแข็ง โดยเป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของของไหล (ก๊าซ ของเหลว) ระหว่างพื้นที่ผิวของของแข็งและตัวของไหลเอง มีการนำไปประยุกต์ใช้งานด้านต่างๆ มากมาย ทั้งทางด้านอุตสาหกรรมและทางด้านสิ่งแวดล้อม การดูดติดผิวจะเกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของสารหรือว่าความเข้มข้นของสารที่บริเวณพื้นที่ผิวกับพื้นที่ผิวสัมผัส กระบวนการนี้สามารถเกิดขึ้นกับบริเวณผิวสัมผัสระหว่าง 2 สภาวะใดๆ เช่น ของแข็งกับของเหลว ของแข็งกับก๊าซ อนุภาคของสารที่ถูกดูดติดผิวเรียกว่า สารถูกดูดติดผิว (Adsorbate) ส่วนสารที่ทำหน้าที่เป็นสารดูดติดผิว เรียกว่า สารดูดติดผิว (Adsorbent) ซึ่งสารดูดติดผิวในการบำบัดน้ำเสีย ได้แก่ Activated Carbon, Adsorbent Resins, Ion Exchange Resins, Metal Oxides, Hydroxides and Carbonates, Clays, Activated Alumina และของแข็งอื่นๆ ที่แขวนลอยอยู่หรือสัมผัสกับน้ำ (อธิชัย นพแก้ว, 2539)

การดูดติดผิวมีบทบาทสำคัญในการปรับปรุงคุณภาพน้ำ เนื่องจากสามารถใช้ดูดติดผิวโมเลกุลของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ซึ่งเป็นสาเหตุของกลิ่น สี เชื้อโรค และสารพิษต่างๆ การ

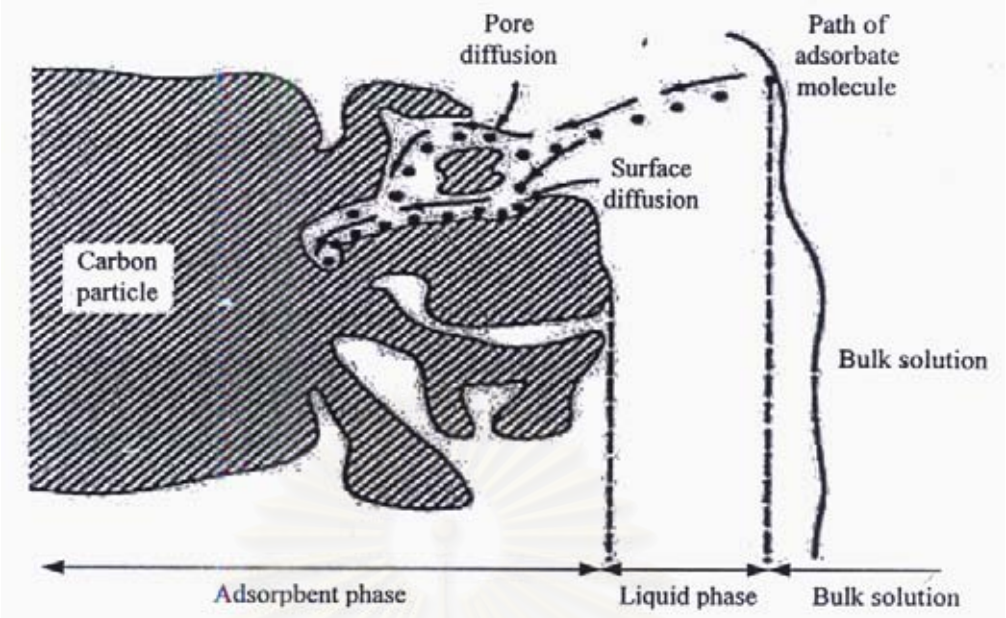
เกาะติดผิวของโมเลกุลสารอินทรีย์ตามธรรมชาติบน Ion Exchange Resins และ Adsorbent resins เป็นสิ่งที่ใช้เพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสารประกอบอินทรีย์ และมีบทบาทมากในการผลิตน้ำประปา เนื่องจากสามารถกำจัดมลสารที่เล็กมากๆ ซึ่งไม่สามารถกำจัดได้โดยวิธีการตกตะกอนหรือการกรองธรรมดา ถ่านกัมมันต์สามารถใช้ดูดติดผิวโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่เป็นสาเหตุของกลิ่น สี และสารอันตรายต่างๆ เช่น กรณีของอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์และเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ที่เป็นของแข็งอันเกิดจากการรวมตัวระหว่างการทำโคแอ็กกูเลชั่น จะดูดติดผิวสีซึ่งเกิดจากโมเลกุลและสารประกอบจากปฏิกิริยาของคลอรีนกับไตรฮาโลมีเทน หรือยาฆ่าแมลงที่ถูกดูดติดผิวในเม็ดดินเหนียว เป็นต้น (Frederick, 1990)

2.3.1 กลไกการดูดติดผิว (Adsorption Mechanism)

การดูดติดผิวของสารประกอบอินทรีย์เกิดจากแรงรวมตัว (Binding force) หลายชนิดระหว่างโมเลกุลของสารอินทรีย์และพื้นที่ผิวของคาร์บอน ซึ่งแรงทั้งหมดมีแหล่งที่มาจากอันตรกิริยาแม่เหล็กไฟฟ้า (Electromagnetic interaction) การดูดติดผิวที่สำคัญแบ่งเป็น 2 แบบ คือ การดูดติดผิวทางกายภาพ (Physisorption) และการดูดติดผิวทางเคมี (Chemisorption) การดูดติดผิวทั้ง 2 แบบนี้เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลในชั้นของเหลวเข้าใกล้และยึดติดกับผิวของของแข็ง ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดึงดูดที่ผิวของของแข็ง สามารถเอาชนะพลังงานจลน์ของโมเลกุลของสารที่อยู่ในของเหลว ซึ่งความแตกต่างของการดูดติดผิวทางกายภาพและทางเคมี มีดังนี้

1) การดูดติดผิวทางกายภาพ เป็นกระบวนการที่ไม่เกิดการใช้หรือว่าถ่ายอิเล็กตรอนระหว่างตัวดูดและตัวถูกดูด กระบวนการนี้ เป็นกระบวนการที่สามารถผันกลับได้ง่าย และเกิดขึ้นช้าเนื่องจากอาศัยการแพร่ของตัวถูกดูดไปบนพื้นผิวของตัวดูด การดูดติดผิวทางกายภาพ เป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นแบบไม่จำเพาะเจาะจงเฉพาะบริเวณใดบริเวณหนึ่งบนพื้นผิวของตัวดูดติดผิว แต่เกิดไปทั่วทั้งพื้นผิวของตัวดูดติดผิว โดยที่โมเลกุลของตัวถูกดูดสามารถเคลื่อนที่ไปได้ทั่วถึงทั้งพื้นที่ผิวของตัวดูดติดผิวได้
2) การดูดติดผิวแบบทางเคมี จะเกิดการสร้างพันธะทางเคมี เกิดขึ้นระหว่างตัวดูดและตัวถูกดูด โดยกระบวนการนี้เกิดขึ้นแล้วจะผันกลับได้ยากกว่า การดูดติดผิวแบบทางเคมี เป็นกระบวนการที่เกิดเฉพาะเจาะจงกับพื้นที่หรือบริเวณเฉพาะบริเวณใดบริเวณหนึ่ง

การดูดติดผิวทางเคมี มีลักษณะสำคัญที่เกิดปฏิกิริยาอันนำมาซึ่งความร้อนที่สูงจากพันธะทางเคมีที่เกิดขึ้น อาทิ การหมุนตัวของอิเล็กตรอน การเกิดสนามแม่เหล็ก ซึ่งมาจากการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอน และพันธะเคมีจากการรวมตัวของสารดูดติดผิวกับสารที่ถูกดูดติดผิว และเนื่องจากพันธะทางเคมีนี้ส่งผลให้เกิดอุณหภูมิที่สูงขึ้นด้วย (Faust และ Aly, 1987)



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายอนุภาคของสารถูกดูดติดผิวมายังสารดูดติดผิว
ที่มา: Montgomery, 1985

การดูดติดผิวทางกายภาพเป็นผลมาจากแรงแวนเดอร์วาล (Van der waals force) ซึ่งเกิดจากการรวมกันของแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (Iondon dispersion force) และแรงไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic force) โมเลกุลของสารถูกดูดติดผิวจะยึดติดกันทางกายภาพกับโมเลกุลของสารดูดติดผิว การดูดติดผิวแบบนี้เป็นการดูดติดผิวจะยึดติดกันทางกายภาพกับโมเลกุลของสารดูดติดผิว การดูดติดผิวแบบนี้เป็นการดูดติดผิวแบบหลายชั้น (Multilayered) กล่าวคือ แต่ละชั้นของโมเลกุลจะเกิดอยู่บนชั้นโมเลกุลที่ถูกดูดติดก่อนหน้านี้ โดยจำนวนชั้นเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของโมเลกุลของสารถูกดูดติดผิว หรือจำนวนชั้นของโมเลกุลจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารถูกดูดติดผิวเพิ่มขึ้น ดังนั้นการดูดติดผิวทางกายภาพจะขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญได้แก่ การจัดเรียงตัวของโมเลกุล (Orientation) การกระจายตัว (Dispersion) และการเหนี่ยวนำ (Induction) สำหรับโมเลกุลที่มีขั้วนั้นแรงดึงดูดจะเกิดจากการจัดเรียงตัวของโมเลกุลซึ่งเป็นแรงดึงดูดที่เกิดจากโมเลกุลที่มีขั้วสองโมเลกุล คือ ขั้วลบของโมเลกุลหนึ่งดึงดูดกับขั้วบวกของอีกโมเลกุลหนึ่ง สำหรับโมเลกุลที่ไม่มีขั้นนั้นการดูดติดผิวจะเกิดแบบการกระจายตัวหรือเกิดการสั่นของอิเล็กตรอนรองๆ นิวเคลียสของอะตอม ทำให้พลังงานของระบบลดลง ระบบจึงมีความเสถียรขึ้นทำให้โมเลกุลสามารถเข้ามาเกาะติดกันได้ (อธิชัย นพแก้ว, 2539)

2.3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการดูดติดผิว

2.3.2.1 ขนาดและพื้นที่ผิวของสารดูดติดผิว

ความสามารถดูดติดผิวมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ และอัตราการดูดติดผิวเป็นอัตราส่วนผกผันกับขนาดสารดูดติดผิว โดยกลไกของการดูดติดผิวภายนอกของสารดูดติดผิวที่ไม่มีโพรงนั้น อัตราการดูดติดผิวจะเป็นอัตราส่วนผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดติดผิว สำหรับสารดูดติดผิวที่มีโพรง อัตราของการเคลื่อนที่เข้าสู่พื้นผิวภายในโพรงถูกควบคุมโดยความต้านทานภายนอกที่เรียกว่า Film Transport ดังนั้น อัตราการดูดติดผิวจะมีความสัมพันธ์เป็นสัดส่วนกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดติดผิว ในทางตรงกันข้าม ถ้าการเคลื่อนที่ภายในเป็นตัวควบคุมอัตราการดูดติดผิว อัตราการดูดติดผิวจะเป็นสัดส่วนผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางของสารดูดติดผิว

2.3.2.2 ลักษณะของสารถูกดูดติดผิว

ความสามารถในการละลายน้ำ ของตัวถูกละลายเป็นปัจจัยสำคัญในการดูดติดผิว การดูดติดผิวจะเพิ่มขึ้น เมื่อความสามารถในการละลายน้ำของสารถูกดูดติดผิวในตัวทำละลายลดลง เนื่องจากในการดูดติดผิวสารถูกดูดติดผิวจะต้องถูกแยกออกจากตัวทำละลาย ซึ่งในที่นี้คือน้ำ โดยสารถูกดูดติดผิวที่ละลายน้ำได้ดีหรือแตกตัวเป็นไอออนได้ดีจะมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำสูงจึงเป็นการยากในการดูดติดผิว ดังนั้น สารที่ไม่ละลายน้ำ หรือละลายได้น้อยจะสามารถถูกดูดติดผิวได้ดี นอกจากความสามารถในการละลายแล้ว ขนาดโมเลกุลของสารถูกดูดติดผิวยังมีความสัมพันธ์กับการดูดติดผิว ซึ่งถ้าอัตราการเคลื่อนที่ภายในโพรงเป็นอัตราที่ควบคุมกลไกแล้ว ความสามารถในการดูดติดผิวจะแปรผกผันกับขนาดโมเลกุลของตัวละลาย

2.3.2.3 อุณหภูมิ

Weber (1972) กล่าวว่าการดูดติดผิวโดยทั่วไปเป็นกระบวนการคายความร้อน (Exothermic) ดังนั้น ความสามารถในการดูดติดผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อลดอุณหภูมิ แต่อัตราเร็วในการดูดติดผิวจะลดลง ในทางตรงข้ามเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความสามารถในการดูดติดผิวจะลดลง แต่อัตราเร็วในการดูดติดผิวจะสูงขึ้น นอกจากนี้อุณหภูมิจะมีผลต่อความสามารถในการดูดติดผิว โดยเปลี่ยนความสามารถในการละลาย เช่น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิซึ่งโดยปกติจะทำให้ความสามารถในการละลายสูงขึ้น มีผลทำให้ความสามารถในการดูดติดผิวลดลง

2.3.2.4 พีเอช

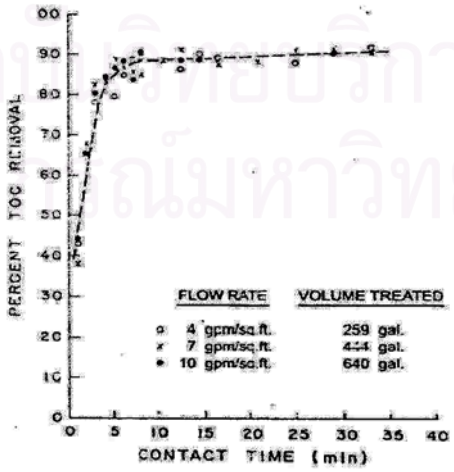
พีเอชมีอิทธิพลต่อการดูดติดผิวเนื่องจากไฮโดรเจนอิออน และไฮดรอกซิลอิออน สามารถถูกดูดติดอย่างค่อนข้างแข็งแรง การดูดติดอิออนอื่นๆ จึงมีผลกระทบมาจากพีเอชของสารละลาย นอกจากนี้พีเอชยังมีอิทธิพลต่อการแตกตัวของอิออน และการละลายน้ำของสารต่างๆ

2.3.2.5 ความปั่นป่วน

อัตราเร็วในการดูดติดผิวขึ้นอยู่กับการแพร่ภายนอก และการแพร่ภายใน ซึ่งขึ้นกับความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำฟิล์มน้ำซึ่งล้อมรอบสารดูดติดผิวจะมีความหนามาก และเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาสารดูดติดผิว ดังนั้นการแพร่ภายนอกเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดติดผิว ในทางตรงข้ามถ้าความปั่นป่วนสูงจะเกิดฟิล์มบางๆ ทำให้การแพร่ภายในเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดติดผิว ความปั่นป่วนในถังดูดติดผิวคือความเร็วของน้ำที่ผ่านถังต่อหน่วยพื้นที่หน้าตัด ซึ่งตามทฤษฎีถ้าเพิ่มความเร็วจะทำให้อัตราเร็วในการดูดติดผิวสูงขึ้น เนื่องจากความปั่นป่วนสูงขึ้น

2.3.2.6 เวลาสัมผัส

ในกรณีของถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์ เวลาสัมผัสจะเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดติดผิวและอายุการใช้งานของถัง โดยถ้าเวลาในการสัมผัสเพิ่มขึ้นและความเข้มข้นของตัวถูกดูดลดลงแล้วอายุการใช้งานของถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์จะนานขึ้น แต่อย่างไรก็ดีเวลาสัมผัสมีความสัมพันธ์กับประสิทธิภาพการดูดติดผิวเพียงช่วงหนึ่งเท่านั้น ถ้าหากช่วงเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้นจนเลยช่วงเวลาสัมผัสที่เหมาะสมแล้ว แทบจะไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการดูดติดผิวเลย



รูปที่ 2.2 ความสัมพันธ์ของเวลาสัมผัส กับประสิทธิภาพการดูดติดผิว

ที่มา: Valencia และ Gioyna, 1972

2.3.3 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล (Rate of Molecular Transfer)

การดูดติดผิวของสารประกอบที่เป็นของเหลวเข้าไปยังถ่านกัมมันต์ มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องรู้ถึงอัตราการดูดติดผิว เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบระบบทั้งแบบแบท (Batch reactor) หรือแบบคอลัมน์ รวมไปถึงการทำโมเดลด้วย อัตราการดูดติดผิวที่รวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วขึ้น ขั้นตอนในการดูดติดผิวของสารจากสารละลายโดยสารดูดติดผิวที่มีรูพรุน 4 ขั้นตอนที่เกิดอย่างต่อเนื่องกัน ดังนี้

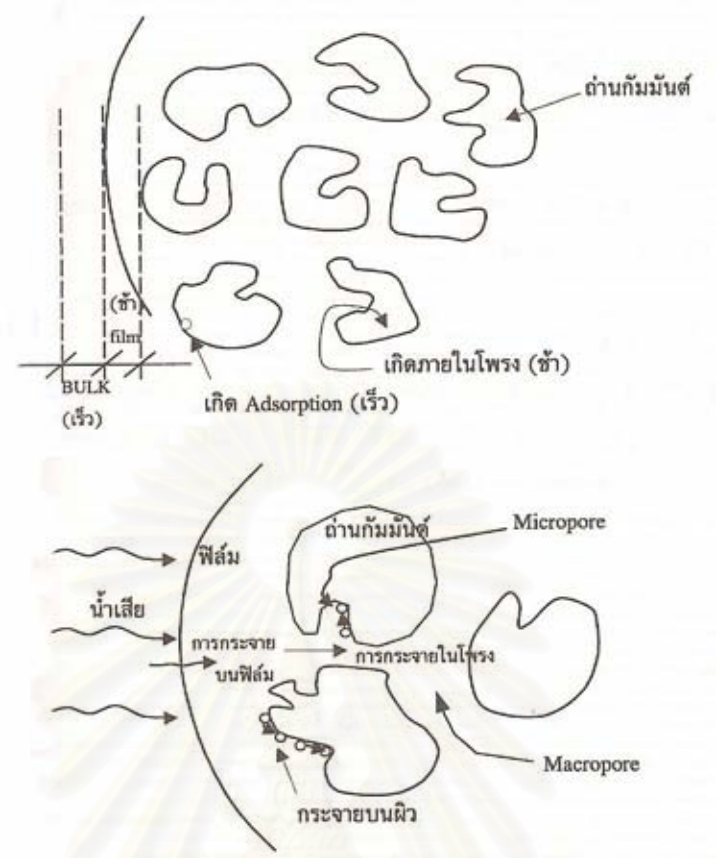
1) การขนส่งทั้งก้อน (Bulk Fluid transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของตัวถูกละลายในของเหลวจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ ที่ห่อหุ้มสารดูดติดผิว ในทางปฏิบัติจะไม่สามารถเห็นถึงชั้นฟิล์มที่อยู่รอบๆ เม็ดคาร์บอน

2) การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของสารดูดติดผิว การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นโดยการแพร่ผ่านฟิล์ม (Film diffusion) ซึ่งการเคลื่อนที่แบบนี้จะเคลื่อนที่ได้ช้ากว่าการเคลื่อนที่ทั้งก้อน

3) การขนส่งภายในอนุภาค (Inrapraticle หรือ Pore Diffusion) เป็นการแพร่ของโมเลกุลตัวถูกละลายเข้าสู่โพรงหรือรูพรุนของสารดูดติดผิว และทำให้เกิดการดูดติดผิวขึ้นภายใน ซึ่งการเคลื่อนที่แบบนี้จะเคลื่อนที่ได้ช้า

4) การเกาะติดทางกายภาพ (Actual Physical Attachment) เป็นการเคลื่อนที่ของของของเหลวเข้าสู่สารดูดติดผิว จนกระทั่งเกิดแรงทางกายภาพ ซึ่งเป็นการเคลื่อนที่ได้ค่อนข้างเร็ว กลไกที่เกิดขึ้นมีดังนี้ พันธะไฮโดรเจน (H bonding) แรงแวนเดอร์วาล (Van der Waals) แรงไฟฟ้าสถิต

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.3 กระบวนการเคลื่อนที่ของน้ำเสียผ่านถ่านกัมมันต์
ที่มา: เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2546

2.4 ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) เป็นถ่านที่ได้รับการเพิ่มคุณภาพหรือประสิทธิภาพการดูดติดผิวให้มากขึ้น โดยการใช้เทคโนโลยีทางวิทยาศาสตร์ โครงสร้างที่มีลักษณะพรุน มีพื้นที่ผิวสูง และมีอิเล็กตรอนอิสระอยู่บนผิวและรูพรุนเหล่านั้น ทำให้มีประสิทธิภาพในการดูดติดผิวสูง สามารถดูดติดสารที่อยู่ในสภาพของก๊าซและของเหลวได้จึงมีประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น ผลิตภัณฑ์อาหาร ได้แก่ กระบวนการทำให้น้ำบริสุทธิ์เคมีและยา น้ำดื่ม โดยใช้ถ่านกัมมันต์ดูดกลิ่นและฟอกสี นอกจากนี้ ถ่านกัมมันต์ยังใช้ในการกำจัดน้ำเสียและมลภาวะต่างๆ

ถ่านกัมมันต์ผลิตขึ้นจากการเผา (Carbonization) จากวัตถุดิบที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ ในการผลิตอาจเริ่มจากวัตถุดิบโดยตรง หรือจากวัตถุดิบที่เป็นถ่านแล้วก็ได้ ซึ่งวัตถุดิบที่ใช้ผลิตมี อยู่หลายชนิด แต่มักจะพิจารณาจากอินทรียวัตถุ ซึ่งเป็นสารที่มีคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่จะเป็นพวกเซลลูโลส จากพืชหรือต้นไม้โดยตรง เช่น ไม้ชนิดต่างๆ หรือในรูปของเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร หรืออุตสาหกรรม เช่น ชานอ้อย แกลบ กะลามะพร้าว ขี้เลื่อย ซังข้าวโพด เปลือกถั่วลิสง ฯลฯ

โดยทั่วไปแล้วผิวหน้าของถ่านกัมมันต์นั้นไม่มีขั้ว แต่เนื่องจากมีสารประกอบออกไซด์เกิดขึ้นเสมอที่ผิวหน้า และการจัดเรียงของอะตอมอยู่ในลักษณะเฮกซะโกนัล (Hexagonal) ทำให้ผิวหน้าของถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวสูงกว่าสารดูดติดผิวอื่นๆเช่น ซิลิกาเจล (Silica Gel) จึงทำให้ดูดติดผิวสารได้มากกว่า (เพียรพรรค ทัศคร, 2535)

ถ่านกัมมันต์เป็นถ่านที่เตรียมขึ้นเพื่อให้มีพื้นที่ผิวมากที่สุด ซึ่งทำได้โดยการทำให้มีรูพรุนหรือโพรงภายในเนื้อคาร์บอนมากเท่าที่จะมากได้ การที่คาร์บอนต้องมีพื้นที่ผิวสูงก็เพื่อให้สามารถดูดโมเลกุลจำนวนมากๆ มาเกาะติดที่ผิวได้ ดังนั้นพื้นที่ผิวสูงจึงมีความสามารถในการดูดติดผิว (Adsorptive Capacity) สูงตามไปด้วยการวัดพื้นที่ผิวของคาร์บอนกระทำได้โดยการหาปริมาณไนโตรเจนที่ถูกคาร์บอนดูดเก็บไว้ วิธีวัดสมรรถนะของคาร์บอนอาจกระทำได้โดยการวัดไอโอดีนนัมเบอร์ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับพื้นที่ผิวของคาร์บอน

2.4.1 คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์

2.4.1.1 ลักษณะและโครงสร้างของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์นั้นมีโครงสร้างเช่นเดียวกันกับแกรไฟต์ แต่มีการจัดเรียงตัวเป็นระเบียบน้อยกว่าผลึกแกรไฟต์ ประกอบไปด้วยชั้นคาร์บอนอะตอมในรูปของเบนซินริง (Benzene Ring) หรือกลุ่มของอะตอมคาร์บอนที่มีโครงสร้างคล้ายรูปหกเหลี่ยม นั่นคือแต่ละอะตอมจะเกิดพันธะเดี่ยวกับอีก 3 อะตอม ในแผ่นราบ (Plane) ในลักษณะสมมาตรกัน อิเล็กตรอนที่ใช้ในการเกิดพันธะนี้เป็นซิกมาอิเล็กตรอน ความยาวระหว่างอะตอมภายในชั้นประมาณ 1.442 อังสตรอม อิเล็กตรอนที่เหลืออีกหนึ่งเป็นไพอิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ไปทั่วโครงสร้างเกิดเป็นเรโซแนนซ์ (Resonance) เพื่อทำให้โครงสร้างเสถียรยิ่งขึ้น แรงยึดเหนี่ยวระหว่างชั้นเป็นแรงแวนเดอร์วาล (Van der Waals) แต่ละแผ่นราบห่างกัน 3.354 อังสตรอม ดิสเพลสเมนต์ (Displacement) ในทิศทางขนานกับแผ่น (Layer) จะเกิดง่ายเพราะแรงยึดเหนี่ยวแวนเดอร์วาลอ่อน ดังนั้นจะเกิดข้อบกพร่อง (Defect) ในโครงสร้างที่จุดนี้ได้ง่าย

2.4.1.2 โครงสร้างรูพรุนของถ่านกัมมันต์

ในการกระตุ้นจะทำให้ถ่านที่ได้จากการคาร์บอไนซ์มีความพรุนมากขึ้น เนื่องจากมีการสูญเสียสารประกอบคาร์บอนระหว่างช่องระหว่างผลึกของคาร์บอน รูพรุนทำให้เกิดพื้นที่ผิวสัมผัสมากขึ้น ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดติดผิว การกระตุ้นที่เหมาะสมคือการทำให้มีความพรุนไม่ใช่ขนาดของรูใหญ่

เมื่อพิจารณาลักษณะผิวของถ่านกัมมันต์ จะพบว่ามีลักษณะเป็นรูพรุนจำนวนมากมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางแตกต่างกัน รูพรุนเหล่านี้จะลึกเข้าไปในเนื้อของถ่านกัมมันต์อย่างไม่เป็นระเบียบ

และความลึกไม่สม่ำเสมอ ลักษณะของรูปร่างของรูนั้นไม่สามารถบอกได้แน่นอน บางรูมีลักษณะเปิดข้างหนึ่งปิดข้างหนึ่ง บางครั้งเป็นรูปตัววี (Dubinin, 1966) ความพรุนสามารถแบ่งได้ 3 แบบ คือ

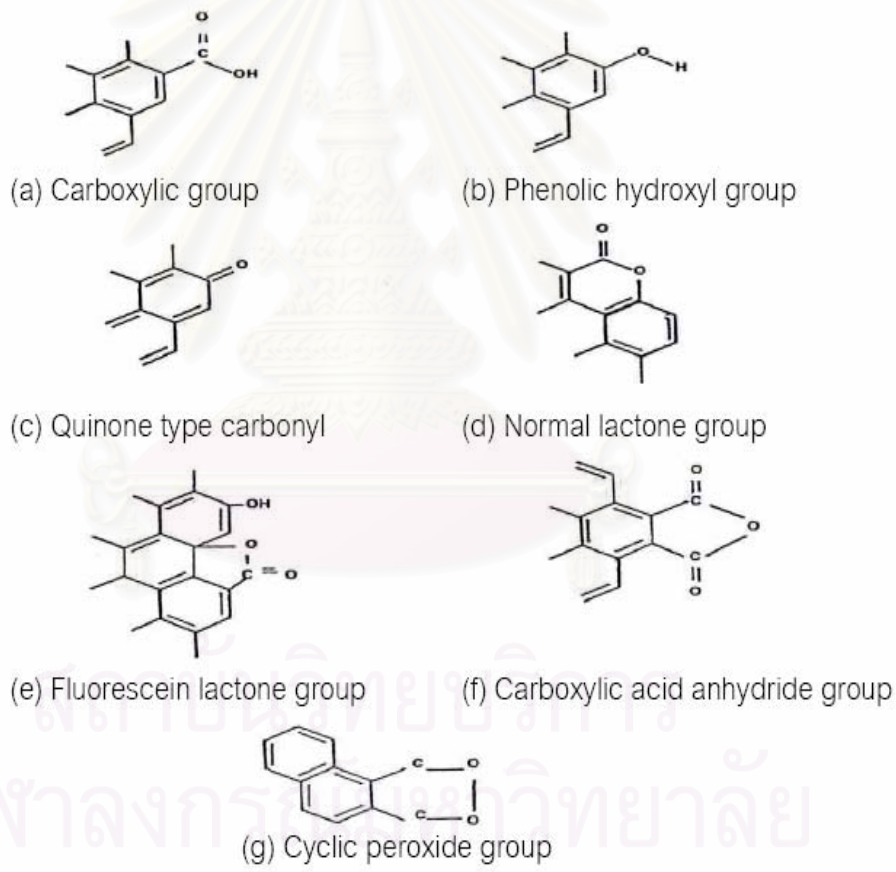
1) มาโครพอร์ (Macropores) ทั่วไปมาโครพอร์ในถ่านกัมมันต์ที่พบมีรัศมีอยู่ในช่วง 5,000 - 20,000 อังสตรอม ปริมาตรความพรุนมีค่าระหว่าง 0.2 - 0.8 มิลลิลิตรต่อกรัม และพื้นที่ผิวมีค่า 0.5 - 2 ตารางเมตรต่อกรัม
2) ทรานซิทชันนอลพอร์ (Transitional pores) รัศมีของทรานซิทชันนอลพอร์มีค่าอยู่ในช่วง 40 - 200 อังสตรอม โมเลกุลเดี่ยว และโพลีโมเลกุล (Polymolecule) สามารถถูกดูดติดได้ที่พื้นผิวบริเวณนี้ ปริมาตรความพรุนมีค่าอยู่ระหว่าง 0.02 - 0.1 มิลลิลิตรต่อกรัม พื้นที่ผิวบริเวณนี้มีค่าอยู่ในช่วง 20 - 70 ตารางเมตรต่อกรัม
3) ไมโครพอร์ (Micropores) รัศมีของไมโครพอร์มีค่าน้อยกว่า 20 อังสตรอม ปริมาตรความพรุนมีค่าระหว่าง 0.15 - 0.5 มิลลิลิตรต่อกรัม และพื้นที่ผิวมีค่าอย่างน้อยที่สุดร้อยละ 95 ของพื้นที่ผิวทั้งหมด มาโครพอร์เปิดโดยตรงสู่ผิวภายนอกของอนุภาคถ่านกัมมันต์ โดยที่ทรานซิทชันนอลพอร์จะแตกสาขาออกมาจากมาโครพอร์ และในรูปแบบเดียวกันไมโครพอร์แตกสาขาออกจากทรานซิทชันนอลพอร์ ไมโครพอร์มีความสำคัญที่สุดในการดูดติดผิวอันเนื่องมาจากมีพื้นที่ผิวจำเพาะ และปริมาตรความพรุนสูงที่สุด

2.4.1.3 โครงสร้างทางเคมีของผิวถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์มักเตรียมจากถ่านที่ได้จากการเผาสลายสารอินทรีย์ด้วยความร้อน (Pyrolysis) ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 1,000 องศาเซลเซียส ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่า การคาร์บอไนซ์เซชั่น ในระหว่างการเผาสลายอะตอมต่างๆ ที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ออกซิเจน ไนโตรเจน และไฮโดรเจน จะถูกกำจัดออกไปในรูปก๊าซ อะตอมคาร์บอนที่เหลือจะจัดเรียงเป็นชั้นๆ แต่ละชั้นประกอบด้วยวงหกเหลี่ยม (Aromatic Ring) เชื่อมโยงกันอย่างไม่เป็นระเบียบและเกิดช่องว่างหรือโพรง ซึ่งจะเป็นที่อยู่ของพวกทาร์และสารอื่นที่ได้จากการเผาสลาย ช่องว่างเหล่านี้จะกลายเป็นรูพรุนที่มีความสามารถในการดูดติดผิวด้วยกระบวนการที่เรียกว่า การกระตุ้น โดยการล้างพวกทาร์และสารต่างๆ ที่ได้จากการเผาสลายออกจากช่องว่างหรือโพรงและสร้างหมู่ฟังก์ชันนัลขึ้นมาแทน ความสามารถในการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์จึงเป็นผลสืบเนื่องจากโครงสร้างทางเคมีด้วย

ความสามารถในการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์เกิดจาก อิเล็กตรอนอิสระซึ่งอยู่ในสภาพที่ไม่เสถียร คือ วาเลนซี่ไม่อิ่มตัว (Unsaturated Valencies) จึงพยายามที่จะเกาะกับอะตอมหรือโมเลกุลอื่นๆ เช่น ออกซิเจนในอากาศหรืออะตอมต่างๆ ที่อยู่ในสารตั้งต้น กระบวนการกระตุ้นจะช่วยในการเกาะของอะตอมคาร์บอนกับอะตอมอื่นกลายเป็นพันธะทางเคมีที่แข็งแรง มักจะเกิดกับอะตอมคาร์บอนที่อยู่ที่ขอบของวงหกเหลี่ยม ถ่านกัมมันต์สามารถดูดติดผิวแบบเคมี

(Chemisorption) กับออกซิเจนที่อุณหภูมิ 400 – 500 องศาเซลเซียส และกลายสภาพเป็นออกไซด์เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น นอกจากนี้พบว่ายังสามารถสร้างพันธะที่แข็งแรงกับอะตอมไฮโดรเจน ซึ่งจะไม่หลุดออกมาแม้จะใช้อุณหภูมิสูงถึง 1,000 องศาเซลเซียส และสามารถดึงอะตอมไนโตรเจนออกจากโมเลกุลแอมโมเนียและซัลเฟอร์ออกจากโมเลกุลไฮโดรเจนซัลไฟด์ และดึงอะตอมกลุ่มฮาโลเจน (Halogen) ออกจากโมเลกุลฮาโลเจน ทั้งที่อยู่ในสภาพก๊าซหรือของเหลวก็ได้ จึงเกิดเป็นหมู่ฟังก์ชันนัลต่างๆ บนผิวของถ่านกัมมันต์ แต่ที่สำคัญคือผิวที่เกิดจากอะตอมของคาร์บอนและออกซิเจนหรือที่เรียกว่า ผิวออกไซด์ กลุ่มของฟังก์ชันนอลที่พบบนพื้นผิวของคาร์บอนประกอบด้วยกลุ่ม Carboxyl, Phenolic Hydroxyl, Quinone Type Carbonyl, Normal Lactone, Fluroscein Type Lactone, Carboxylic Acid Anhydride และ Cyclic Peroxide ดังแสดงในรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 กลุ่มฟังก์ชันนอลบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์
ที่มา: Cookson, 1978

จากคุณสมบัติเหล่านี้จึงถูกนำมาใช้ในการเลือกชนิดของถ่านกัมมันต์ให้เหมาะสมกับการใช้งาน ถ่านกัมมันต์ที่มีโครงสร้างพื้นผิวของออกซิเจนที่มีขั้ว (Polar) เหมาะสำหรับการดูดติดผิวสารอินทรีย์ที่มีขั้ว (Polar Organic) ส่วนถ่านกัมมันต์ที่ไม่มีออกซิเจนพื้นผิวสามารถใช้ในการกำจัดโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว (Non-Polar) ซึ่งหมู่ฟังก์ชันนอลบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์มีผลกระทบอย่างมากต่อความจุของการดูดติดผิว เช่น หมู่ฟังก์ชันนอลคาร์บ๊อกซิล (Carboxylic group) ความจุการดูดติดผิวฟีนอลลดลง เป็นต้น (อธิชัย นพแก้ว, 2539)

2.4.2 การผลิตถ่านกัมมันต์ (Processing of activated carbon)

ในปัจจุบันกรรมวิธีผลิตถ่านกัมมันต์มีมากหมายหลายวิธี ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบ ลักษณะและคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ต้องการ โดยวัตถุดิบที่นำมาผลิตถ่านกัมมันต์ จะได้จากวัตถุที่มีธาตุคาร์บอน (C) เป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ถ่านหิน ไม้ เปลือกไม้ แกลบ กะลามะพร้าว ซังข้าวโพด กากกาแฟ ของเสียจากโรงงานเยื่อกระดาษ ขี้เลื่อย (Hassler, 1967) แต่โดยทั่วไปกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ๆ 3 ขั้นตอน ดังนี้ คือ เตรียมวัตถุดิบ การเผาให้เป็นถ่าน หรือคาร์บอไนเซชั่น (Carbonization) และการกระตุ้น หรือแอคติเวชั่น (Activation) ดังแสดงในรูปที่ 2.5

รูปที่ 2.5 ขั้นตอนผลิตถ่านกัมมันต์

2.4.2.1 การเตรียมวัตถุดิบ

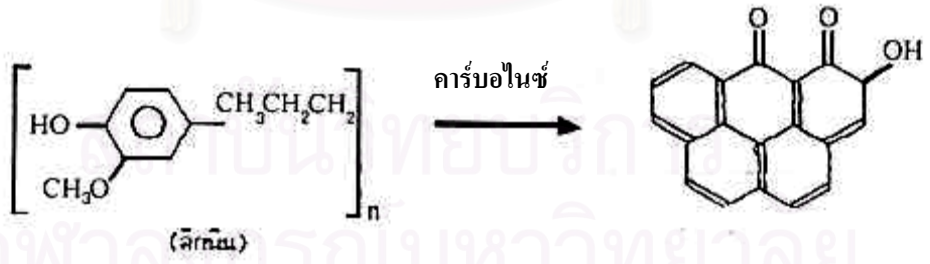
ถ่านกัมมันต์สามารถผลิตจากวัตถุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ ซึ่งการผลิตถ่านกัมมันต์สามารถเริ่มจากวัตถุดิบโดยตรงหรือเริ่มจากวัตถุดิบที่เป็นถ่านแล้วก็ได้ขึ้นอยู่กับการผลิต แต่โดยทั่วไปมักนำวัตถุดิบมาบดและคัดขนาดก่อนที่จะนำไปคาร์บอไนซ์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการคาร์บอไนซ์ หลังจากนั้นทำการอบหรือตากวัตถุดิบให้แห้ง (Dehydration) แต่บางครั้งวัตถุดิบอาจมีความแข็งและเหนียว ทำให้การบดวัตถุดิบโดยตรงทำได้ยาก ก็อาจนำวัตถุดิบนั้นไปคาร์บอไนซ์ก่อน แล้วจึงนำมาบดคัดขนาดก็ได้

สำหรับวัตถุดิบที่มีลักษณะเป็นผง อาจนำมาทำให้เป็นเม็ดโดยใช้ตัวประสาน เช่น แป้ง น้ำมันเตา หรือทาร์ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้มาจากกระบวนการคาร์บอไนซ์เซชั่นแล้วนำไปอัดเป็นเม็ดก่อนที่คาร์บอไนซ์เป็นขั้นตอนต่อไป

2.4.2.2 การทำให้เป็นถ่านคาร์บอน หรือคาร์บอไนเซชั่น (Carbonization)

ขั้นตอนนี้เป็นการนำวัตถุดิบมาเผาในสภาวะที่มีออกซิเจนอยู่น้อย หรือการเผาแบบไพโรไลซิส (Pyrolysis) ซึ่งจะทำให้สารที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน และซัลเฟอร์ถูกไล่ออกมาในรูปก๊าซ ส่วนคาร์บอนที่มีอยู่ในรูปของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน จะรวมตัวกันเป็นผลึก (Microcrystalline) ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ในรูปของถ่าน ขนาดของผลึกจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการเผา ระยะเวลาในการเผาองค์ประกอบและโครงสร้างของวัตถุดิบ

เมื่อมีการเผาวัตถุดิบให้เป็นถ่าน องค์ประกอบที่เป็นคาร์บอนที่มีอยู่ก็จะสลายไป ซึ่งการสลายจะเกิดขึ้นคือ วัตถุดิบที่มีโครงสร้างหลักเป็นเซลลูโลส ($C_6H_{10}O_5$) เมื่อถูกเผาในกระบวนการไพโรไลซิส ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในการเผา
ที่มา: ปิยะพร บารมี, 2542

คาร์บอไนเซชั่นเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ เพราะเป็นขั้นตอนเริ่มต้นของโครงสร้างที่เป็นรูพรุน โดยทำให้เกิดการแตกตัวทางเคมีของสารที่ไม่ใช่

คาร์บอน (เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน) ออกมาในรูปของก๊าซ คาร์บอนอิสระที่มีอยู่จะรวมตัวกันอยู่ในรูปของถ่านชาร์ ถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอไนเซชั่น ควรจะมีลักษณะดังต่อไปนี้

- มีสีดำตลอด (uniformly black)
- เมื่อหักดูส่วนที่หักจะมีผิวที่เป็นมันเงา (shiny surface)
- ปลายที่หักจะแหลมคม (sharp)
- ปราศจากผงฝุ่นและขี้เถ้า

ถ่านชาร์ที่ได้จากขั้นตอนการคาร์บอไนเซชั่นนี้มีความสามารถในการดูดติดผิวต่ำมาก เพราะว่าการทำให้เกิดถ่านชาร์จะใช้อุณหภูมิประมาณ 400 - 600 องศาเซลเซียส ซึ่งยังคงมีน้ำมันทาร์ตกค้างอยู่ภายในช่องว่าง (Pore) หรือเกาะอยู่ตามผิว จึงจำเป็นต้องนำถ่านนี้ไปผ่านกระบวนการกระตุ้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดติดผิว

2.4.2.3 การกระตุ้น หรือแอคติเวชั่น (Activation)

การกระตุ้น คือ การทำให้คาร์บอนหรือถ่านมีความสามารถในการดูดติดผิวสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเพิ่มพื้นที่ผิวและการทำให้ผิวมีความว่องไวมากขึ้น

วัตถุประสงค์ของการกระตุ้นถ่านคาร์บอนเพื่อ

- เป็นการเพิ่มพื้นที่ว่องไว (Active surface area) โดยเกิดปฏิกิริยาทางเคมี ทำให้โมเลกุลบางกลุ่มหลุดออกไป และเกิดส่วนที่มีอำนาจดูดติดผิวขึ้นมาแทน

- เป็นการเพิ่มความว่องไวในการดูดติดผิวให้พื้นผิวที่มีอยู่แล้ว ซึ่งหมายถึง ทำให้อะตอมของคาร์บอนมีพลังงานศักย์สูงขึ้นโดยจัดเปลี่ยนโครงสร้างใหม่ ให้มีความว่องไวในการดูดติดผิวสูงขึ้น

- เป็นการกำจัดอินทรีย์วัตถุหรืออนินทรีย์วัตถุต่างๆ ซึ่งเป็นสารปนเปื้อนออกจากบริเวณที่ทำหน้าที่ดูดติดผิว (Active centers)

การกระตุ้นถ่านกัมมันต์แบ่งตามกลไกที่เกิดได้ 2 ประเภท คือ วิธีกระตุ้นทางกายภาพและการกระตุ้นทางเคมี

1) วิธีกระตุ้นทางกายภาพ (Physical activation)

เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์ โดยที่ผิวคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น การจัดเรียงตัวใหม่ ซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการดูดติดผิวของถ่านให้สูงขึ้น เนื่องจากรูพรุนจะกว้างมากขึ้น และมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น นิยมใช้ก๊าซออกซิไดซ์ต่างๆ เช่น ไอน้ำอิ่มตัวยิ่งยวด ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซออกซิเจน เป็นต้น ร่วมกับการใช้ความร้อนปฏิกิริยาการกระตุ้นอาจเกิดจากความร้อนเพียงอย่างเดียว แต่ต้องใช้อุณหภูมิสูงมากถึง 1,200 องศาเซลเซียส แต่พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จะมีคุณภาพต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตโดยการกระตุ้นด้วยก๊าซออกซิไดซ์ ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากวิธีการกระตุ้นทางกายภาพ คือ ชนิดและปริมาณ

ขององค์ประกอบที่มีอยู่ในวัตถุดิบ, คุณสมบัติทางเคมีและอัตราส่วนของก๊าซที่ใช้, อุณหภูมิขณะเกิดปฏิกิริยา และระยะเวลาของการเกิดปฏิกิริยา (Hassler, 1967)

ข้อดีของการกระตุ้นแบบนี้คือ ไม่มีสารเคมีตกค้าง หลังจากกระตุ้นจนได้ถ่านกัมมันต์แล้วสามารถนำไปใช้งานได้ทันที เพราะไม่มีปัญหาในการล้างสารเคมีที่เหลือตกค้างส่วนข้อเสียคือต้องใช้อุณหภูมิสูงกว่าแบบกระตุ้นด้วยสารเคมี (700 - 1,200 องศาเซลเซียส) จึงเป็นการสิ้นเปลืองพลังงาน

2) วิธีกระตุ้นทางเคมี (Chemical activation)

เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยการเติมสารเคมีให้เป็นสารกระตุ้น (Activation agent) ผสมคลุกเคล้าเข้ากับวัตถุดิบ และทำปฏิกิริยาเคมีกับผิวคาร์บอน โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

วิธีการกระตุ้นทางเคมี แบ่งเป็น 2 แบบ คือ

แบบที่ 1 ผสมวัตถุดิบกับสารเคมีโดยตรงแล้วให้ความร้อนแบบไพโรไลซิส เพื่อทำให้เป็นผลึกถ่าน พร้อมๆ กับการกระตุ้น

แบบที่ 2 ทำให้วัตถุดิบเป็นถ่านก่อนเติมสารเคมี แล้วจึงให้ความร้อนเพื่อทำการกระตุ้นอีกครั้งหนึ่ง

การกระตุ้นเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิว โดยทำให้ถ่านมีรูพรุนมากขึ้น และเป็นการเพิ่มความสามารถในการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ ประสิทธิภาพของการกระตุ้นขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบ ชนิดของสารกระตุ้น รวมถึงวิธีการอื่นๆ ที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วย

สารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้น นิยมใช้สารประกอบของโปแตสเซียมหรือโซเดียม เช่น โปแตสเซียมคาร์บอเนต โพแทสเซียมซัลไฟต์ และการกระตุ้นโดยใช้สารดูดน้ำ (Dehydrating agent) เช่น สารในกลุ่มเกลือโลหะคลอไรด์ เช่น แคลเซียมคลอไรด์ ซิงค์คลอไรด์ กรดฟอสฟอริก กรดซัลฟูริก เป็นต้น

เมื่อนำเอาวัตถุดิบที่ต้องการทำเป็นถ่านกัมมันต์ มาผสมสารประกอบที่มีไอออนของโปแตสเซียมหรือไอออนของโซเดียม ไอออนเหล่านี้จะแทรกเข้าไปอยู่ระหว่างชั้นของผลึกแกรไฟต์ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงกว่า 700 องศาเซลเซียส โมเลกุลของน้ำ ก๊าซออกซิเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะหลุดออก ทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ตามต้องการ

ปฏิกิริยาที่เกิดในการกระตุ้นด้วยสารประกอบของโซเดียม มีดังนี้

$$2X + 3CO \longrightarrow X_2CO_3 + 2C \quad \text{..... (2.1)}$$

$$X_2CO_3 + C \longrightarrow X_2O + 2CO \quad \text{..... (2.2)}$$

$$2CO \longrightarrow CO_2 + C \quad \text{..... (2.3)}$$

โดยที่ X คือ ไอออนของโปแตสเซียม (K^+) หรือ ไอออนของโซเดียม (Na^+)

ข้อดีของการกระตุ้นทางเคมีคือใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นไม่สูงมาก (400 - 600 องศาเซลเซียส) สารเคมีแทรกซึมได้ทั่วถึง ได้รูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ค่อนข้างใหญ่ แต่มีข้อเสียคือมีสารเคมีตกค้างในถ่านกัมมันต์ทำให้ต้องเสียเวลา และค่าใช้จ่ายในการล้างสารเคมีดังกล่าวออกเพิ่มมากขึ้น รวมทั้งเครื่องมือที่ใช้ก็ต้องเป็นชนิดพิเศษที่สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ เพราะสารเคมีเหล่านี้เป็นสารกัดกร่อน แต่สำหรับเกลือแกง เป็นสารที่มีคุณสมบัติดูดน้ำได้ มีราคาถูก หาซื้อได้ตามท้องตลาด และไม่ก่อให้เกิดพิษตกค้างหลังผ่านการกระตุ้น (ดำรง ขุมมงคล และอภิสิทธิ์ เจริญกุล, 2533)

2.4.3 ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์

ในอุตสาหกรรมมีการใช้ถ่านกัมมันต์อย่างแพร่หลาย หน้าที่ของถ่านกัมมันต์ในแต่ละโรงงานจะแตกต่างกันไป ตัวอย่างเช่น

1) ถ่านกัมมันต์ประเภทที่ใช้กับการดูดติดผิวก๊าซหรือไอ
   - ใช้ในอุตสาหกรรมทำหน้ากากป้องกันก๊าซพิษ ทั้งนี้เพราะถ่านกัมมันต์สามารถดูดติดผิวก๊าซพิษและไอของสารอินทรีย์ได้ใช้แยกก๊าซโซลีนออกจากก๊าซธรรมชาติ
   - ใช้แยกไอระเหยของตัวทำละลายที่ใช้แล้วเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ โดยถ่านกัมมันต์จะดูดติดผิวไอระเหยเหล่านั้นที่อุณหภูมิห้องและคายออกที่ความดันของไอต่ำๆ
   - กำจัดสิ่งเจือปนออกจากก๊าซ เช่น ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ฮีเลียม อะเซทิลีน แอมโมเนีย คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ สารประกอบออร์แกนิกซัลเฟอร์ เป็นต้น
   - ใช้ดูดติดผิวกัมมันตภาพรังสีออกมาจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ สำหรับหน่วยปฏิกิริยาให้การสลายตัวเกิดขึ้นสมบูรณ์ขณะที่ยังถูกจับไว้ในเบดของถ่านกัมมันต์ (Activated carbon bed)

2) ประเภทที่ใช้กับของเหลว (ฟอกสีและทำให้ของเหลวบริสุทธิ์) ซึ่งใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น
   - ใช้ทำน้ำดื่มให้บริสุทธิ์ เป็นการกำจัดรส สี และกลิ่น นอกจากนี้ยังใช้ในการบำบัดน้ำเสีย
   - ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำตาล อุตสาหกรรมผลิตอาหาร เครื่องดื่ม แอลกอฮอล์

- ใช้ในทางการแพทย์ อุตสาหกรรมเคมีและยา เช่น ให้ยาถูกดูดติดผิวบนถ่านกัมมันต์ ยาจะค่อยๆ ออกฤทธิ์โดยมีความเข้มข้นสม่ำเสมอ ตัวอย่างคือ ไฮดรอกซีลอะมิโนฟีนิลาโซนิคแอซิด (Hydroxyl Aminophenylarsonic Acid) สำหรับรักษาโรคที่เกิดจากการติดเชื้ออะมีบา และพาราไซต์ และยังใช้ดูดสารพิษจากผู้ที่ได้รับยาเกินขนาด หรือกินยาพิษ
- ใช้แยกโลหะจากสารละลายที่ต้องการ เช่น การแยกทองหลังการสกัดจากแร่ด้วยวิธีไซยาไนด์ เป็นต้น
- ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาหรือเป็นตัวพาสารเร่งปฏิกิริยา (Catalyst – carrier) เช่น ตัวพาสารเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชั่น (Hydrogenation) เป็นต้น

2.5 ไอโซเทอมการดูดติดผิว (Adsorption Isotherm)

ในการออกแบบระบบดูดติดผิวด้วยถ่าน จำเป็นที่ต้องทำการศึกษาทดลองเพื่อให้ได้ถ่านที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด ในขั้นการทดลองในห้องปฏิบัติการ (Laboratory test) การทดลองเพื่อหาความสามารถในการดูดติดผิวของถ่านทำได้หลายวิธี วิธีที่นิยมมากที่สุดคือ การหาไอโซเทอมการดูดติดผิว (Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอมการดูดติดผิว คือ ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่ถูกดูดติดผิวกับความเข้มข้นของสารนั้นที่ยังเหลืออยู่ที่จุดสมดุลของการดูดติดผิว เมื่อนำมาวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ เพื่อให้ได้รูปสมการอย่างง่าย แล้วสามารถนำมาวาดกราฟเพื่อวิเคราะห์หาค่าคงที่ต่างๆ ได้ ซึ่งใช้เป็นแนวทางในการนำค่าคงที่นั้นมาออกแบบระบบดูดติดผิว ได้มีผู้วิเคราะห์ไอโซเทอมไว้ 3 กลุ่ม คือของ ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ (Langmuir adsorption isotherm) แบบเบท (Brunauer- Emmett-Teller Adsorption Isotherm) และแบบฟรุนดลิช (Freundlich Adsorption - Isotherm)ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

2.5.1 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ (Langmuir adsorption isotherm)

สมมติฐานพื้นฐานของแบบจำลองแลงมัวร์ที่เรียกว่า Ideal Localized Monolayer Model คือ

- โมเลกุลถูกดูดติดผิวอยู่บริเวณที่แน่นอนบนพื้นผิวของสารดูดติดผิว
- มีโมเลกุลเดียวในบริเวณถูกดูดติด

- พื้นที่ของบริเวณดูดติดผิวมีจำนวนที่แน่นอน ซึ่งกำหนดโดยลักษณะของพื้นที่ผิว
- พลังงานการดูดติดผิวมีค่าเท่ากันทุกบริเวณ

การดูดติดผิวจากสารละลายโดยสารดูดติดผิว แสดงดังสมการ

$$X = (X_m bC)/(1+bC) \qquad \text{..... (2.4)}$$

โดยที่ X = ปริมาณสารที่ถูกดูดติดผิวต่อน้ำหนักของสารดูดติดผิว (มิลลิกรัมต่อกรัม หรือ โมลต่อกรัม)

X_m = ขีดจำกัดของการดูดติดผิว (มิลลิกรัมต่อกรัม หรือ โมลต่อกรัม)

C = ความเข้มข้นสารถูกดูดติดผิวที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ โมลต่อลิตร)

b = ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดติดผิว

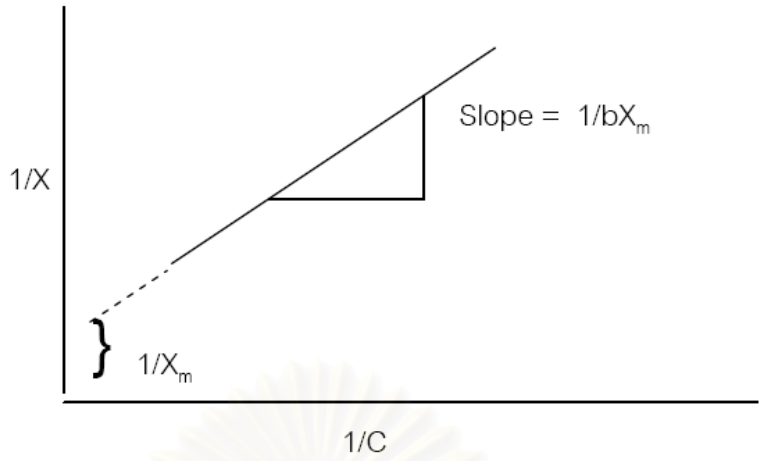
เมื่อ X เข้าสู่ X_m และ C เข้าใกล้ค่าอนันต์ (Infinity, ∞) จะเขียนสมการได้เป็น

$$C/X = (1/bX_m) + (C/X_m) \qquad \text{..... (2.5)}$$

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

$$1/X = (1/X_m) + (1/C)(1/bX_m) \qquad \text{..... (2.6)}$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง 1/X กับ 1/C จะได้กราฟซึ่งเป็นเส้นตรง มีค่าความชัน (Slope) เท่ากับ $1/bX_m$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $1/X_m$ จากสมการ 2.6 แสดงได้ดังรูปที่ 2.7



รูปที่ 2.7 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์

2.5.2 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบเบท (Brunauer- Emmett-Teller Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอมแบบเบทพัฒนามาจากไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ ที่คิดจากการดูดติดแบบชั้นเดียว เป็นการดูดติดแบบหลายชั้น (Multilayers) ซึ่งแบบจำลองของเบทมีพื้นฐานอยู่บนสมมติฐานที่ว่าแต่ละโมเลกุลในชั้นดูดติดผิวชั้นแรก เป็นบริเวณที่ซึ่งโมเลกุลชั้นที่สองและชั้นต่อๆ ไปดูดติดผิว

$$X = (X_m bC)/(C_s - C)(1 + (b-1)C/C_s) \quad \text{..... (2.7)}$$

โดยที่ X = ปริมาณสารที่ถูกดูดติดผิวต่อน้ำหนักของสารดูดติดผิว (มิลลิกรัมต่อกรัม หรือ โมลต่อกรัม)

X_m = ปริมาณสารถูกดูดติดผิวต่อปริมาณสารดูดติดผิว ที่สภาวะสมดุลย์ มีหน่วยเป็น (มิลลิกรัมต่อกรัม หรือ โมลต่อกรัม)

C = ความเข้มข้นของสารถูกดูดติดผิวในสารละลายมีหน่วยเป็น (มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ โมลต่อลิตร)

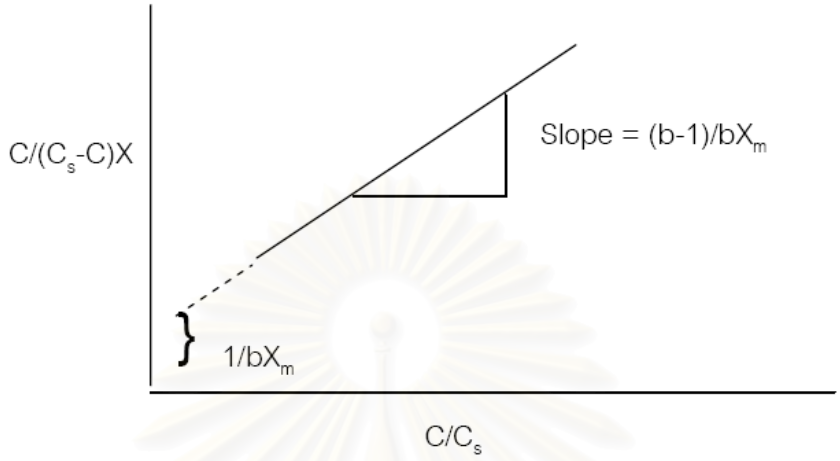
C_s = ความเข้มข้นอิ่มตัวของสารถูกดูดติดผิว ณ ทุกๆชั้นมีหน่วยเป็น (มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ โมลต่อลิตร)

b = ค่าคงที่ของการดูดติดผิว

จากสมการ 2.7 สามารถเขียนได้เป็น

$$C/X(C_s - C) = (1/X_m b) + ((b-1)/X_m b)(C/C_s) \quad \text{..... (2.8)}$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง C/X (C_s-C) กับ C/C_s จะได้กราฟซึ่งเป็นเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ (b-1)/bX_mและจุดตัดแกน y เท่ากับ 1/bX_m แสดงได้ดังรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบเบท (BET)

2.5.3 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช (Freundlich Adsorption - Isotherm)

สมการการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิชใช้อย่างแพร่หลาย ในการอธิบายการดูดติดผิวในระบบของเหลว โดยวิธีทางคณิตศาสตร์ ซึ่งมีสมการดังนี้

$$X / m = KC^{1/n} \qquad \text{..... (2.9)}$$

โดยที่ X = ปริมาณสารที่ถูกดูดติดผิวต่อน้ำหนักของสารดูดติดผิว (มิลลิกรัมต่อกรัม หรือ โมลต่อกรัม)

m = น้ำหนักของสารดูดติดผิว มีหน่วยเป็น กรัม

C = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลาย ที่สภาวะสมดุลย์ (มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ โมลต่อลิตร)

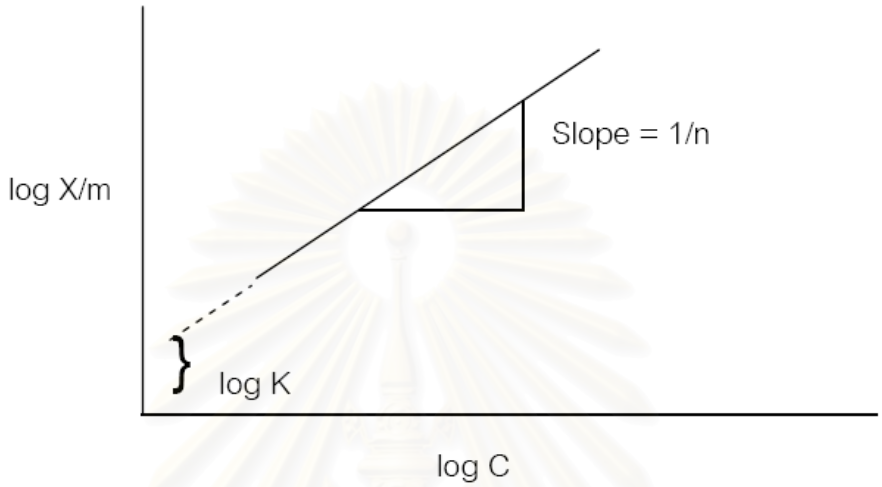
K, 1/n = ค่าคงที่ของการดูดติดผิว

จากสมการที่ 2.9 สามารถเขียนสมการในรูป Logarithmic ได้ดังนี้ คือ

$$\log(X / m) = \log K + 1/n \log C \qquad \text{..... (2.10)}$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง log (X/m) กับ logC จะได้กราฟที่เป็นเส้นตรง มีค่าความชัน เท่ากับ 1/n และจุดตัดแกน y เท่ากับ log K ของ log (X/m) ที่ log C = 0 (C = 1) จากสมการที่ 2.10 แสดงได้ดังรูปที่ 2.9 จากสมการการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช แสดงถึงความสามารถในการดูดติดผิว โดยถ้า

ค่า 1/n < 1แสดงถึงการดูดติดผิวที่ไม่ดี แต่ถ้าค่า 1/n > 1 แสดงถึงการดูดติดผิวที่ดี และถ่านที่มีเส้นไอโซเทอมมีความชันมากแสดงว่าการดูดติดผิวเกิดขึ้นได้ดีที่ความเข้มข้นสูงๆและเกิดขึ้นได้น้อยที่ความเข้มข้นต่ำ โดยทั่วไปถ่านที่มีเส้นไอโซเทอมชันมากจะมีประสิทธิภาพในการดูดติดผิวสูงเมื่อนำไปใช้ในระบบสัมผัส (เสริมพล รัตสุข และไชยยุทธ กลิ่นสุคนธ์, 2514)



รูปที่ 2.9 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช

2.6 ถังดูดติดผิวแบบท่อ (Adsorption column test)

การหาไอโซเทอมการดูดติดผิวนั้น เป็นการทดลองแบบชั่วคราว ซึ่งบอกให้ทราบได้ว่าการดูดติดผิวด้วยถ่านนั้นจะใช้ได้ผลดีหรือไม่ ซึ่งข้อมูลที่ได้นั้นยังไม่เพียงพอสำหรับการออกแบบระบบบำบัดโดยใช้การดูดติดผิวด้วยถ่าน ดังนั้นจึงจำเป็นที่ต้องทำการทดลองแบบต่อเนื่องโดยใช้ท่อขนาดเล็กแทนถังบรรจุถ่าน ระบบดูดติดผิวแบบนี้น้ำเสียไหลผ่านชั้นถ่านที่อยู่กับที่ ไม่มีการเคลื่อนที่ขึ้นลง ลักษณะการดูดติดผิวเริ่มเกิดขึ้นบริเวณส่วนบนๆ ของถังดูดติดผิวแบบแท่ง แล้วบริเวณการดูดติดผิวจะค่อยๆ เคลื่อนลง และจะเกิดการดูดติดผิวขึ้นที่ส่วนล่างของชั้นถ่านจนกระทั่งหมดสภาพการดูดติดผิวที่ส่วนก้นของชั้น ดังแสดงผลของการดูดติดผิวไว้ในรูปที่ 2.10 ดังนั้นความเข้มข้นของสิ่งสกปรกในน้ำเสียที่ผ่านการดูดติดผิวแล้วจะเพิ่มขึ้นตามเวลาหรือปริมาณน้ำเสีย จนในที่สุดความเข้มข้นของสิ่งสกปรกในน้ำเสียที่ผ่านถังดูดติดผิวแบบแท่งจะเท่ากับความเข้มข้นที่เข้าสู่ระบบ

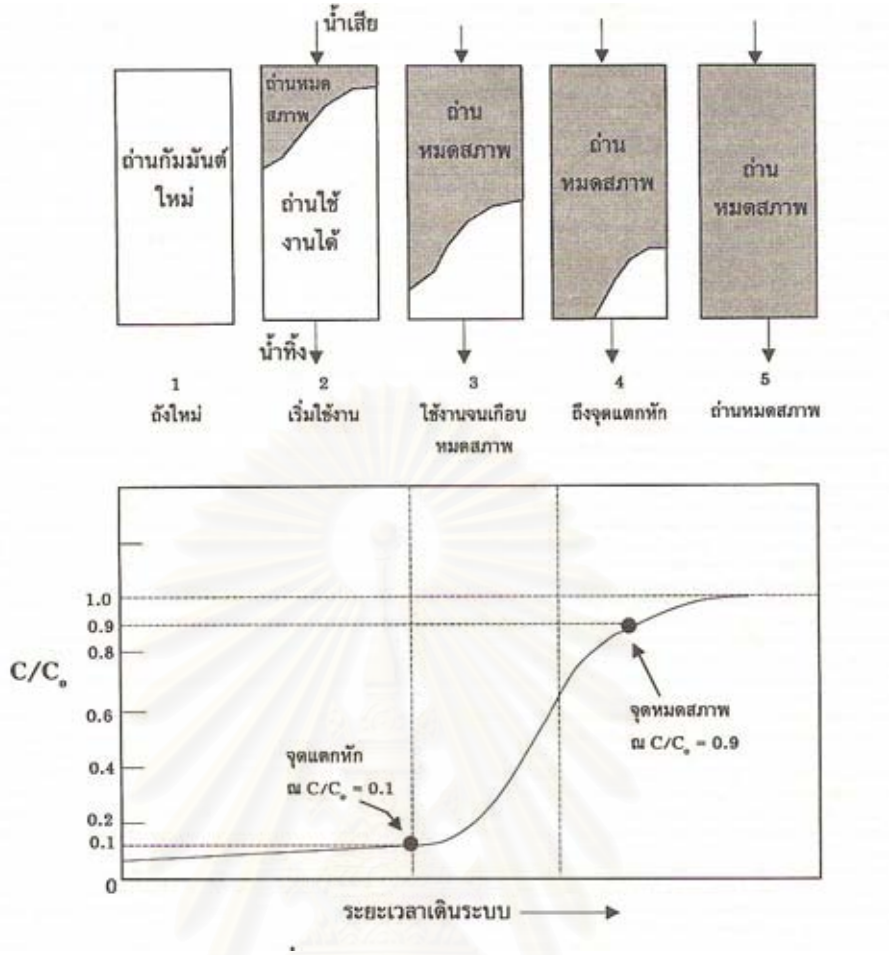
กราฟที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในน้ำทิ้งที่ผ่านชั้นถ่านแล้ว ต่อความเข้มข้นเริ่มต้น เทียบกับปริมาณน้ำที่ผ่านชั้นถ่านกัมมันต์ คือ เส้นโค้งที่เรียกว่าเส้นโค้งเบรคทรูจ์ (Breakthrough curve) ณ จุดที่การดูดติดผิวถ่านเริ่มทำงานไม่ได้ประสิทธิภาพ นิยมเรียกว่าจุดเริ่มหมดสภาพ และหลังจากจุดนี้ต่อไปเป็นเส้นตรงยกขึ้นสูง คือ

ประสิทธิภาพการดูดติดผิวค่อยๆ ลดลง จนถ่านหมดสภาพจนไม่สามารถบำบัดน้ำเสียได้อีก เส้นโค้งเบรคทรูจ์แสดงในรูปที่ 2.10 ที่จุด C_E ที่เรียกว่าจุดหมดสภาพ (Breakthrough point) ระยะเวลานับจากเริ่มต้นการดูดติดผิวจนถึงจุดที่เรียกว่า Breakpoint time ซึ่งเป็นจุดที่บอกว่าถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์หมดความสามารถในการบำบัด จะมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับ

1) ขนาดของตัวกลางที่อยู่ในถังดูดติดผิว เมื่อขนาดของตัวกลางเพิ่มขึ้น เวลาหรือปริมาตรน้ำที่ผ่านถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์จนกระทั่งถึงจุด Breakthrough จะลดลง
2) ความเข้มข้นของตัวถูกดูดติดผิวที่ไหลผ่านถังดูดติดผิว เมื่อเพิ่มความเข้มข้น เวลาหรือปริมาตรน้ำที่ผ่านถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์จนกระทั่งถึงจุด Breakthrough จะลดลง
3) พีเอชของสารละลายที่ไหลผ่าน เมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น เวลาหรือปริมาตรน้ำที่ผ่านถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์จนกระทั่งถึงจุด Breakthrough จะลดลง เมื่อตัวถูกดูดติดผิวเป็นสารที่มีการแตกตัวในน้ำได้น้อย
4) อัตราการไหลของสารในถังดูดติดผิว (Hydraolic load, volumn/area/time) เมื่ออัตราการไหลมากขึ้นเวลาหรือปริมาตรน้ำที่ผ่านถังดูดติดผิวแบบคอลัมน์จนกระทั่งถึงจุด Breakthrough จะลดลง

ปัจจัยดังกล่าวเป็นเงื่อนไขในกรณีที่ Breakthrough เป็นรูปตัว S แต่ในสารละลายที่มีไอออน หรือตัวถูกดูดติดผิวมากกว่าหนึ่งตัว หรือกรณีของการประยุกต์ใช้กับน้ำเสียจริง จะมีปัจจัยอื่นเป็นตัวร่วมกำหนดลักษณะของ Breakthrough curve เช่น การแข่งขันการถูกดูดติดผิว การแทนที่ตัวถูกดูดติดผิวได้ไม่ดีด้วยตัวถูกดูดติดผิวได้ดี ซึ่งทำให้ breakthrough curve ไม่เป็นรูปตัว S

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.10 ลักษณะการหมดสภาพของถังดูดซับ
ที่มา: เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2546

2.7 การฟื้นฟูสภาพของถ่านดูดติดผิว (Carbon regeneration)

เมื่อถ่านดูดติดผิวถูกใช้งานไปเป็นเวลานานๆ รูพรุนของเมล็ดถ่านจะถูกอุดตันด้วยโมเลกุลของสิ่งสกปรก ทำให้ถ่านหมดประสิทธิภาพในการดูดติดผิว เนื่องจากถ่านดูดติดผิวมีราคาค่อนข้างสูง ดังนั้นเพื่อที่จะลดราคาค่าใช้จ่ายในการกำจัดจะต้องนำถ่านดูดติดผิวที่หมดประสิทธิภาพ (Exhausted carbon) มาฟื้นฟูเพื่อสามารถนำกลับมาใช้งานอีก การฟื้นฟูถ่านดูดติดผิวโดยการนำถ่านไปกำจัดโมเลกุลของสิ่งสกปรกที่อุดอยู่ในรูของถ่านดูดติดผิวอาจทำได้หลายวิธี ได้แก่ (Lyman, 1987)

1) การใช้ความร้อนในการฟื้นฟูสภาพ (Thermal reactivation) วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมาก ถ่านดูดติดผิวที่หมดประสิทธิภาพแล้วจะรวมกับน้ำมีลักษณะข้น (slurry) นำเข้ามาในระบบฟื้นฟูคุณภาพ หลังจากนั้นทำการแยกน้ำ (dewater) ออกจากถ่านดูดติดผิว แล้วส่งเข้าเตาเผาที่เรียกว่า multiple heat furnace หรือ rotary kiln ทำการเผาที่อุณหภูมิ 870 - 980 องศาเซลเซียส ระหว่างนี้ถ่าน

จะถูกทำให้แห้ง และการเผาไหม้ให้จะทำให้โมเลกุลของสิ่งสกปรกที่เป็นสารอินทรีย์บนผิวหน้าและในรูพรุนของเม็ดถ่านระเหยเป็นไอและถูกเผาสลายตัวไป ในขั้นตอนการเผานี้จะต้องควบคุมปริมาณออกซิเจนเพื่อให้ความร้อนทำลายโมเลกุลของสิ่งสกปรกที่ติดผิวถ่าน แต่ไม่ทำลายเนื้อถ่าน (Cheremisinoff and Morresi, 1978) หลังจากนั้นถ่านดูดติดผิวที่ร้อนจัดจะถูกทำให้เย็นโดยจุ่มลงในน้ำ (Quenching) แล้วนำไปล้างแยกเศษผงถ่านออกแล้วจึงสูบไปเก็บไว้หรือนำกลับไปใช้งาน การฟื้นฟูคุณภาพของถ่านดูดติดจะใช้เวลาประมาณ 30 นาที และสิ้นเปลืองพลังงานประมาณ 4,000 - 5,000 บีทียูต่อถ่านหนึ่งปอนด์ ในแต่ละขั้นตอนถ่านจะสูญหายไปประมาณร้อยละ 4 - 9

2) การใช้ตัวทำละลายในการฟื้นฟูสภาพ (Solvent regeneration) วิธีนี้นิยมใช้กับตัวถูกดูดติดผิวกลุ่มสารอินทรีย์

3) การใช้ไอน้ำในการฟื้นฟูสภาพ (Steam regeneration) วิธีนี้นิยมใช้กับตัวถูกดูดติดผิวที่เป็นไอได้ง่าย

4) การฟื้นฟูสภาพโดยวิธีทางเคมี (Biological regeneration) วิธีนี้นิยมใช้กับตัวถูกดูดติดผิวที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ เช่น สารอินทรีย์

5) การใช้กรดในการฟื้นฟูสภาพ (Acid regeneration) วิธีนี้นิยมใช้กับตัวถูกดูดติดผิวหรือสภาวะที่ใช้ในการดูดติดผิวที่เป็นด่าง

6) การใช้ด่างในการฟื้นฟูสภาพ (Alkaline regeneration) วิธีนี้นิยมใช้กับตัวถูกดูดติดผิว หรือสภาวะที่ใช้ในการดูดติดผิวที่เป็นกรด

2.8 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 ใสไม่มีสี เมื่อบริสุทธิ์ แต่เมื่อมีการปนเปื้อนจะมีสีขาว สีเทา สีน้ำตาล และสีส้ม มีความถ่วงจำเพาะ 2.165 ค่าดัชนีหักเหแสง 1.5442 ความแข็งตาม Moh's Scale 2.5 มีจุดหลอมตัวที่ 800.8 องศาเซลเซียส และน้ำเกลือจะเปลี่ยนเป็นน้ำแข็งที่อุณหภูมิลบ 21.12 องศาเซลเซียส โดยทั่วไปถ้าแบ่งเกลือตามแหล่งที่มา จะแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

1) เกลือทะเล หรือเกลือสมุทร เป็นเกลือที่ผลิตจากน้ำทะเล โดยการทำนาเกลือ จะทำในพื้นที่บริเวณชายทะเล พื้นดินเป็นดินเหนียว สามารถเก็บกักน้ำได้ดี มีน้ำทะเลขึ้นลงในระดับที่เหมาะสม

2) เกลือสินเธาว์ เป็นเกลือที่ได้จากเกลือที่มีอยู่ในดิน ผลิตกันมากในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ มีลักษณะเป็นเม็ดเล็ก ผลิตได้จากการตากแดดน้ำเกลือจากบ่อน้ำเกลือผิวดิน หรือบ่อน้ำเกลือใต้ดิน และการต้มเกลือที่ค้างอยู่กับดินด้วยน้ำ

เกลือเป็นสารอาหาร ตัวปรุงรส สารถนอมอาหารป้องกันน้ำแข็งจับถนน และเป็นสารตั้งต้นของอุตสาหกรรมเคมีการผลิตเกลือของโลกในแต่ละปีสูงถึงประมาณ 200 ล้านตัน โดยมีสหรัฐอเมริกาผลิตมากที่สุด รองมาคือ จีน เยอรมัน และแคนาดา ซึ่งแต่ละประเทศผลิตมากกว่า 10 ล้านตัน ประมาณ 1 ใน 4 ของเกลือที่ผลิตได้มาจากน้ำทะเล ส่วนที่เหลือผลิตจากชั้นแร่เกลือหินโดยตรง หรือทำเหมืองละลาย โดยนำเกลือไปใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้แก่

- อุตสาหกรรมอาหาร ทั้งในรูปแบบของการปรุงรส ถนอมอาหารและเพิ่มธาตุอาหาร
- การผลิตโซดาไฟ(Caustic Soda) ใช้ในอุตสาหกรรมแก้ว เส้นใยไนล่อน ใยสังเคราะห์ พลาสติก ทำสบู่ ผงซักฟอก
- การผลิตคลอรีน ที่ใช้ในการทำสารโพลิเมอร์สำหรับการทำพลาสติกใยสังเคราะห์ และยางสังเคราะห์
- ใช้ในการกลั่นน้ำมัน ทำยาฆ่าแมลง ผงซักฟอก น้ำยาล้างห้องน้ำฆ่าเชื้อโรค ผลิตน้ำประปา ปรับสภาพน้ำ และน้ำเสีย
- การผลิตโซเดียมซัลเฟต เพื่อให้ทำกระดาษ เยื่อไม้ สีย้อมผ้า เคลือบเซรามิก
- การผลิตโซเดียมคาร์บอเนต ใช้ในอุตสาหกรรมแก้ว กระดาษเยื่อไม้ ใยสังเคราะห์
- การผลิตโซเดียมไบคาร์บอเนต ใช้ในอุตสาหกรรมทอผ้า เครื่องหนังทำแก้ว และปุ๋ย
- การผลิตโซเดียมไนเตรต ทำปุ๋ย และวัตถุระเบิด
- การผลิตกรดเกลือ เพื่อใช้ในการทำยางสังเคราะห์ ทำความสะอาดแก้ว และบ่อน้ำมัน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.9 มะพร้าว

ชื่อวิทยาศาสตร์ *Cocos nucifera* Linn.
ชื่อวงศ์ Palmae
ชื่อสามัญ Coconut

รูปที่ 2.11 มะพร้าว
ที่มา: http://www.plantapalm.com/

2.9.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

มะพร้าวเป็นไม้ยืนต้น สูงชะลูด 7 - 10 เมตร เปลือกลำต้นแข็ง มีระบบรากเป็นรากฝอยมีขนาดเท่าๆ กัน แผ่กระจายออกรอบต้น ลำต้นมีลำต้นเดียว ไม่แตกแขนง มีรอยแผลจากการหลุดร่วงของใบตลอดลำต้น สามารถคำนวณอายุของต้นมะพร้าวได้จากรอยแผลนี้ คือ ในปีหนึ่งมะพร้าวจะสร้างใบประมาณ 12- 14 ใบ ดังนั้นใน 1 ปี จะมีรอยแผลที่ลำต้น 12 – 14 รอยแผล

ใบ เป็นใบประกอบ ออกอยู่ตามส่วนของลำต้น ประกอบด้วยก้านทาง มีขนาดใหญ่และยาวและมีใบย่อยบนก้านทางประมาณ 200 – 250 ใบ

ดอก ออกเป็นช่อตามบริเวณกาบที่หุ้ม มีทั้งดอกตัวผู้และดอกตัวเมีย อยู่ในช่อเดียวกัน ดอกมีกลีบดอก 6 กลีบ สีครีมหรือสีเหลืองนวล ไม่มีก้านดอกย่อยดอกตัวเมียจะมีกลีบดอกหนาและแข็งกว่ากลีบดอกตัวผู้

ผล เป็นรูปกลมหรือรี เส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 8 - 9.5 นิ้ว เปลือกนอกเรียบเกลี้ยง ผลอ่อนมีสีเขียว เมื่อแก่มีสีน้ำตาล เปลือกชั้นกลางเป็นเส้นใยนุ่ม ชั้นในแข็งเป็นกะลา เนื้อผลมีสีขาวนุ่ม และมีน้ำใส รสจืดหรือหวาน มีเปลือก 3 ชั้นคือ

1) เปลือกชั้นนอก (exocarp) เป็นเส้นใยที่เหนียวและแข็ง เมื่อแก่อาจมีสีเขียว แดง เหลืองหรือน้ำตาล

2) เปลือกชั้นกลาง (mesocarp) มีลักษณะเป็นเส้นใย มีความหนาพอประมาณ
3) เปลือกชั้นใน (endocarp) มีลักษณะแข็งหรือที่เรียกกันว่า กะลา (shell) เมล็ด (seed of kernel) คือ เนื้อมะพร้าว ภายในเมล็ดเป็นช่อกลวงขณะผลอ่อนจะมีน้ำอยู่เต็ม ผลแก่น้ำมะพร้าวจะแห้งไปบางส่วนใบ ออกเป็นใบรวม มีใบย่อยเป็นแผ่นแคบยาว เรียงสลับกันเป็นรูปขนนกปลายใบแหลม

2.9.2 กะลามะพร้าว

ในประเทศที่ผลิตมะพร้าวไว้บริโภค และส่งออกเป็นสินค้าจะมีกะลามะพร้าวซึ่งเป็นผลพลอยได้ กะลามะพร้าวเหล่านี้มักถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงอบแห้งเนื้อมะพร้าว และเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนในบ้านเรือน แต่ไม่เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในหม้อกำเนิดไอน้ำ เนื่องจากจะทำให้เกิดการกัดกร่อนสูง องค์ประกอบของกะลามะพร้าวคล้ายกับไม้เนื้อแข็ง ต่างกันตรงที่กะลามะพร้าวมีเซลลูโลส (cellulose) ต่ำกว่าไม้เนื้อแข็ง แต่มีลิกนินสูงกว่าไม้เนื้อแข็ง

2.10 มะขาม

ชื่อวิทยาศาสตร์ *Tamarindus indica* Linn.
ชื่อวงศ์ Leguminosae
ชื่อสามัญ Tamarind, Indian Date

รูปที่ 2.12 มะขาม
ที่มา: http://www.botanical.com/

2.10.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

มะขามเป็นไม้ยืนต้นขนาดกลางจนถึงขนาดใหญ่ สูง 20 - 25 ม. แตกกิ่งก้านสาขามาก เปลือกต้นขรุขระและหนา สีน้ำตาลอ่อนหรือสีเทาดำ

ใบ ใบเรียงสลับ ใบประกอบแบบขนนกชั้นเดียวปลายคู่ มีใบย่อยขนาดเล็ก 20 - 40 คู่ ใบย่อยรูปขอบขนาน โคนใบไม่เท่ากัน ปลายใบมนหรือกว้าง ขอบใบเรียบ ผิวใบเรียบลื่น ใบมีสีเขียวด้านล่างเส้นใบเรียบ

ดอก ดอกเดี่ยวหรือดอกช่อ ออกตามซอกใบและปลายกิ่ง ดอกย่อยขนาดเล็ก ดอกสมบูรณ์เพศ กลีบดอกสีเหลือง และมีจุดประสีแดงอยู่กลางดอก กลีบเลี้ยง 5 กลีบ กลีบดอก 5 กลีบ ขนาดไม่เท่ากัน เมื่อบานเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.0 - 1.5 ซม. เกสรตัวผู้ 10 อัน ที่สมบูรณ์มี 3 อัน เกสรตัวเมีย 1 อัน

ผล ฝักยาวหรือโค้ง กว้าง 1.0 - 2.5 ซม. ยาว 5 - 15 ซม. เปลือกผลหนา แข็ง เปราะ สีน้ำตาลหรือสีน้ำตาลอมเทา ผลสดเมื่อแก่มีสีเขียวเข้ม เมื่อสุกมีสีน้ำตาลเนื้อฉ่ำน้ำ มีรสเปรี้ยว บางพันธุ์อาจหวาน หรือหวานอมเปรี้ยว เมล็ดกลมรีมีสีดำ มี 3 - 12 เมล็ด

2.10.2 เมล็ดมะขาม

เมล็ดมะขามเมื่อเปลือกอ่อนจะมีสีขาว และเมื่อแก่จะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเข้มเป็นมันเงา เนื้อในเมล็ดมีสีขาว ซึ่งประกอบด้วยเปลือกเมล็ด ร้อยละ 30.1 แป้ง ร้อยละ 51.47 ส่วนที่เหลือเป็นความชื้น แล้วยังพบว่าเมล็ดมะขามทั้งเมล็ด มีคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบหลักร้อยละ 50 - 57 ในเปลือกเมล็ดมะขามมีเส้นใยร้อยละ 21.6 และมีแทนนินร้อยละ 20.2 (Shankarachaya, 1998) แป้งในเมล็ดมะขามบางครั้งเรียกว่า TKP หรือ Tamarind Kernel Powder มีประโยชน์สามารถใช้บริโภคได้ เพราะมีคุณค่าทางอาหาร ใกล้เคียงกับแป้งข้าวเจ้าและข้าวสาลี นอกจากนั้นยังใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ เพราะแป้งเมล็ดมะขามประกอบด้วยสารโพลีแซคคาไรด์ ชื่อเจลโลส (Jellose) ประมาณ ร้อยละ 60 และเมื่อนำไปผสมกับสารละลายบอแร็กซ์แล้วจะได้กาวที่มีความเหนียวสูง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.11 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

มานัด แก้วถาวร (2537) ทำการศึกษาเกี่ยวกับกรรมวิธีการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวโดยใช้สารกระตุ้น 3 ชนิด คือ โซเดียมคลอไรด์ ซิงค์คลอไรด์ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าการกระตุ้นด้วยสารทั้งสามชนิดนั้นจะทำให้ถ่านมีคุณสมบัติในการดูดซับดีขึ้นกว่าการใช้ถ่านธรรมดา การเพิ่มเวลาที่ใช้ในการการกระตุ้นจาก 30 - 120 นาที จะทำให้ถ่านที่มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์เพิ่มขึ้น แต่ร้อยละของผลผลิตจะลดลงประมาณ 0.6 - 5.6 และเมื่อใช้อุณหภูมิเพิ่มขึ้นค่าค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน การศึกษาขนาดกะลาพบว่าขนาดกะลาที่เล็กลงจะทำให้ถ่านมีคุณสมบัติในการดูดซับดีขึ้น แต่ค่าร้อยละผลผลิตลดลง ซึ่งอัตราส่วนของสารกระตุ้น คือ ปริมาณกะลามะพร้าวต่อซิงค์คลอไรด์ และโซเดียมคลอไรด์ ที่เหมาะสม คือ 1:1 และ 1:2 ตามลำดับ ส่วนก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นสารกระตุ้นนั้นอุณหภูมิที่เหมาะสมคือ 800 - 900 องศาเซลเซียส สำหรับการศึกษาการใช้สารกระตุ้น พบว่าโซเดียมคลอไรด์เป็นสารกระตุ้นที่มีประสิทธิภาพต่ำกว่าซิงค์คลอไรด์ แต่ซิงค์คลอไรด์เป็นตัวกระตุ้นที่ดีแต่เป็นพิษต้องล้างออกก่อนนำไปใช้งาน เมื่อใช้แล้วจึงต้องพยายามนำกลับมาใช้ใหม่

Chang และ Ku (1994) ได้ศึกษาการดูดติดผิวแคดเมียมด้วยถ่านกัมมันต์โดยการทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างโลหะแคดเมียมกับสารคีเลต 3 ชนิด คือ EDTA, Citric acid และ Nitrilotriacetic acid (NTA) พบว่าค่าพีเอชของสารละลายเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงประจุที่ผิวหน้าของถ่านกัมมันต์ และการกระจายตัวของชนิดของสารประกอบเชิงซ้อนที่เกิดขึ้น ซึ่งจะส่งผลต่อการดูดติดผิวของสารประกอบเชิงซ้อน กับกลุ่มฟังก์ชันที่ผิวหน้าของถ่านกัมมันต์

อธิชัย นพแก้ว (2539) ศึกษาการใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดติดผิวโลหะหนักจากน้ำชะมูลฝอยที่ผ่านบ่อเก็บกักพบว่าที่สภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดโครเมียม และปรอท คือ พีเอชเท่ากับ 4 เวลาสัมผัส 15 นาที สำหรับน้ำเสียสังเคราะห์ และสำหรับน้ำชะมูลฝอย คือ พีเอชเดิมของน้ำชะมูลฝอยซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง 7 – 8 เวลาสัมผัส 15 นาที ซึ่งจากการทดลองพบว่าถ่านกัมมันต์นอกจากจะกำจัดโลหะหนักในน้ำชะมูลฝอยแล้วยังกำจัดซีโอดี และสีจากน้ำชะมูลฝอยอีกด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าการกำจัดโลหะหนักในน้ำชะมูลฝอยมีประสิทธิภาพดีกว่าในน้ำเสียสังเคราะห์เมื่อมีปริมาตรน้ำจากที่ผ่านการบำบัดเท่ากัน โดยมีประสิทธิภาพรวมประมาณร้อยละ 90 และร้อยละ 70 สำหรับการกำจัดโลหะหนักจากน้ำชะมูลฝอย และน้ำเสียสังเคราะห์ตามลำดับ

รัชนก แซ่เจน (2541) ได้ศึกษาการดูดซับสารหนูโดยถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากแกลบและถ่านกะลามะพร้าวโดยใช้โซเดียมคลอไรด์และเฟอริคคลอไรด์ เป็นตัว Activate ซึ่งจะทำการดูดซับสารหนู 2 ชนิดคือ Arsenic(III) และ Arsenic (V) จากนั้นจะทำการศึกษาผลของการดูดซับโดยแบ่งตามชนิดของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้โดยมีอัตราส่วนของวัตถุดิบต่อสารกระตุ้น ดังนี้คือ กะลามะพร้าว:NaCl เท่ากับ 1:3 กะลามะพร้าว:$FeCl_3$ เท่ากับ 1:3 แกลบ:NaCl เท่ากับ 1:1

แกลบ:$FeCl_3$ เท่ากับ 1:1 จะได้อัตราในการดูดซับดังนี้คือ เมื่อดูดซับกับ Arsenic (III) ได้ 0.01, 0.44, 0.03 และ 0.21 มิลลิกรัม/กรัม และเมื่อดูดซับกับ Arsenic (V) ได้ 0.01, 3.26, 0.01 และ 2.92 มิลลิกรัม/กรัม ตามลำดับ จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าถ่านกัมมันต์ที่ใช้ $FeCl_3$ เป็นตัว Activate จะดูดซับสารหนูได้ดีกว่าถ่านกัมมันต์ ที่ใช้ NaCl เป็นตัว Activate

ลลิดา นิทัศนจารุกุล (2544) ศึกษาความสามารถในการดูดติดผิวตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเปลือกทุเรียน และเปลือกเม็ดมะม่วงหิมพานต์ ที่ผ่านการกระตุ้นโดยใช้โซเดียมคลอไรด์ ที่อุณหภูมิที่เหมาะสม คือ 800 องศาเซลเซียส อัตราส่วนโดยน้ำหนักของวัตถุดิบต่อโซเดียมคลอไรด์ 1:0 ซึ่งให้ค่าไอโอดีนนัมเบอร์สูงสุด เท่ากับ 567 และ 532 มิลลิกรัมต่อกรัม ของถ่านกัมมันต์จากเปลือกทุเรียนและเปลือกเม็ดมะม่วงหิมพานต์ ตามลำดับ ซึ่งพบว่าการแช่วัตถุดิบด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์อิ่มตัวเป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำไปอบแห้ง แล้วทำการเผา และกระตุ้นเพียงพอที่จะทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีประสิทธิภาพสูง สำหรับการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิวตะกั่ว พบว่าที่พีเอชตั้งแต่ 4 ขึ้นไป ถ่านกัมมันต์ทั้ง 2 ชนิด จะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วสูงกว่าร้อยละ 90 ที่ผลของเวลาสัมผัส 10 นาที และการทดลองแบบต่อเนื่องได้เลือกใช้ถ่านเปลือกทุเรียน บรรจุในชุดถังดูดติดผิวแบบแท่ง โดยทำการป้อนน้ำเสียแบบไหลลงอย่างต่อเนื่อง และทำการเก็บน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดทางปลายท่อจนกระทั่งถ่านหมดประสิทธิภาพในการดูดติดผิว พบว่า ถ่านเปลือกทุเรียนที่ชั้นความสูง 30, 60, 90 และ 120 เซนติเมตร สามารถบำบัดน้ำเสียได้ 94.01 , 58.85 , 50.98 และ 47.06 BV ตามลำดับ จากการศึกษาเตรียมถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรพบว่า ถ่านเปลือกทุเรียนมีศักยภาพที่จะพัฒนาไปใช้งานได้ทั้งในระดับครัวเรือนและระดับอุตสาหกรรม

สุจนีย์ คุ่ยเสงี่ยม (2544) ได้ทำการศึกษาการกำจัดตะกั่วและปรอทจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มและกะลามะพร้าว ซึ่งการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดตะกั่วและปรอทจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสิ่งทอ โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลาปาล์มและกะลามะพร้าวโดยใช้โซเดียมคลอไรด์เป็นตัวกระตุ้นกับถ่านกัมมันต์ที่จำหน่ายตามท้องตลาดทั่วไป ผลการทดลองพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าว มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์ 532.29 มิลลิกรัมต่อกรัม พื้นที่ผิว 492.4200 ตารางเมตรต่อกรัม การทดสอบไอโซเทอมของการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิชโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ 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 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ ส่วนถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลาปาล์ม มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์ เท่ากับ 486.45 มิลลิกรัมต่อกรัม มีพื้นที่ผิว 385.9073 ตารางเมตรต่อกรัม

การทดสอบไอโซเทอมของการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิชโดยใช้น้ำเสียสังเคราะห์ พบว่าสามารถดูดซับตะกั่วและปรอทได้ 2.53 และ 1.63 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งแสดงว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าวมีคุณสมบัติดีกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่จำหน่ายตามท้องตลาดทั่วไป ผลการทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิชพบว่า สามารถดูดซับตะกั่วและปรอท ได้ 50.18 และ 19.95 มิลลิกรัมต่อกรัม การทดสอบการดูดซับโดยใช้ถังดูดซับแบบแท่งดูดซับน้ำทิ้งจากโรงงานสิ่งทอ สามารถดูดซับตะกั่วได้ 3.83, 3.83, 3.75 และ 3.88 มิลลิกรัมต่อกรัม และดูดซับปรอทได้ 3.61, 3.83, 3.61 และ 3.72 มิลลิกรัมต่อกรัม ที่ระดับความสูง 30, 60, 90 และ 120 เซนติเมตร ที่ความเข้มข้นของตะกั่วและปรอทเริ่มต้น 9.853 และ 9.865 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

สุมงคล กัลยาณี (2545) ทำการศึกษาการกำจัดเหล็กออกจากน้ำบาดาลโดยใช้ทรายไม่คัดขนาด และถ่านกรอง โดยใช้ท่ออะคริลิกใส เส้นผ่านศูนย์กลาง 7.4 เซนติเมตร สูง 2 เมตร ความเข้มข้นของเหล็ก 3, 7 และ 12 มิลลิกรัม พบว่าอัตราส่วนของทรายไม่คัดขนาดต่อถ่านกรองที่ 50:30 และ 40:40 เซนติเมตร มีประสิทธิภาพสูงกว่าอัตราส่วนของทรายไม่คัดขนาดต่อถ่านกรองที่ 30:50 เซนติเมตร

สุโรชินี สกุลดวงดี (2545) ได้ทำการศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์ และการทดสอบความชอบในการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มโดยใช้สารละลายซิงค์คลอไรด์ในการกระตุ้น พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์ม คือความเข้มข้นของวัตถุดิบต่อสารละลายซิงค์คลอไรด์ คือ 1:3 ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที โดยมีค่าร้อยละผลผลิตเท่ากับ 49.18 ค่าพื้นที่ผิว 2168 ตารางเมตรต่อกรัม ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ 1565 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีขนาดรูพรุน 2 – 10 นาโนเมตร แล้วเมื่อนำทดสอบการดูดซับกับตัวทำละลายอินทรีย์ พบว่า ถ่านกัมมันต์มีความสามารถดูดซับตัวทำละลายที่ไม่มีขั้วได้ดีกว่าตัวทำละลายมีขั้ว

หทัยกาญจน์ เบญจวิทยาธรรม (2547) ทำการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยถ่านไม้แดงและถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านไม้แดง โดยใช้เกลือแกงเป็นตัวกระตุ้น พบว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านไม้แดง และถ่านไม้แดงมีค่าไอโอดีนนัมเบอร์ 432.2 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 301.6 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ แต่ประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมของถ่านไม้คือร้อยละ 29.78 ซึ่งมีค่ามากกว่าถ่านกัมมันต์คือร้อยละ 20.17

จักริน นักไร่ (2549) ทำการศึกษาการกำจัดสีในน้ำชะมูลฝอย โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเมล็ดมะขาม ซึ่งกระตุ้นโดยใช้สารละลายซิงค์คลอไรด์ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม คือความเข้มข้นของวัตถุดิบต่อสารละลายซิงค์คลอไรด์ คือ 1:2 ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส แล้วล้างด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้นร้อยละ 5 ซึ่งได้ถ่านกัมมันต์มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์ เท่ากับ 724 มิลลิกรัมต่อกรัม มีค่าพื้นที่ผิว เท่ากับ 522 ตารางเมตรต่อกรัม โดยมีค่าคงที่สัมพันธ์กับการดูดติดผิว (K) เท่ากับ 1.65 แพลทตินัม – โคบอลต์

ต่อกรัมถ่าน และ 1/n มีค่าเท่ากับ 0.7876 และผลการฟื้นสภาพถ่านกัมมันต์ด้วยการล้างกรดอะซีติก (CH_3COOH) ความเข้มข้นร้อยละ 5 พบว่ามีประสิทธิภาพในการฟื้นสภาพครั้งแรกเท่ากับ ร้อยละ 90.67 ครั้งที่สองเท่ากับ ร้อยละ 82.02 และครั้งที่สามเท่ากับ ร้อยละ 74.69 ตามลำดับ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

แผนการทดลองและการดำเนินงานวิจัย

3.1 รูปแบบการดำเนินการศึกษา

การศึกษาครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงการทดลอง (Experimental research) ทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory scale) โดยทำการศึกษา ณ ห้องปฏิบัติการมูลฝอย (Solid waste laboratory) หน่วยวิจัยการจัดการกากอุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.1 อุปกรณ์สำหรับเตรียมถ่านกัมมันต์

- เตาเผา: Valcan box furnance, Model 3-1750. USA.
- ตู้อบความร้อน: WTB Binder. German
- เครื่องบดละเอียด
- ชุดกรองสุญญากาศ
- ภาชนะดินเผา พร้อมฝาปิด
- ตะแกรงคัดขนาด 8 เมช (2.38 มิลลิเมตร) 30 เมช (0.59 มิลลิเมตร) และ 325 เมช (45 ไมโครเมตร)

3.2.2 อุปกรณ์สำหรับใช้ทดลองในห้องปฏิบัติการ

- เครื่องเขย่า (shaker)
- เครื่องวัดความเป็นกรด – ด่าง: HANNA pH211
- เครื่องชั่งแบบละเอียด 4 ตำแหน่ง: METTLER TOLEDO AL 204
- กระดาษกรอง Whatman No. 42
- โถดูดความชื้น ขนาด 15 นิ้ว
- เครื่องแก้วที่ใช้ในห้องปฏิบัติการอื่นๆ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.2.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณแคดเมียม และสังกะสี

- เครื่องอะตอมมิคแอบซอร์บชั่นสเปคโตรโฟโตมิเตอร์: PERKIN ELMER AAnalyst 200

3.2.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์

- Scanning Electron Microscope (SEM): JEOL; JSM - 6400 SCANNING MICROSCOPE
- เครื่องวัดพื้นที่ผิว: Surface Area Analyzer; Micromeritics ASAP 2000

3.2.5 อุปกรณ์สำหรับใช้ในการทดลองแบบต่อเนื่อง (Column test)

- ถังดูดซับแบบแท่ง (adsorption column): ใช้ท่ออะครีลิค (Acrylic) ใส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.3 เซนติเมตร ความสูง 130 เซนติเมตร
- ถังพลาสติกเก็บน้ำเสีย
- ปั๊มน้ำและสายยาง

3.3 วิธีการดำเนินการวิจัย

การศึกษาแบ่งเป็น 3 ขั้นตอน โดยขั้นตอนแรกเป็นการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวและ เมล็ดมะขาม โดยเผาให้เป็นถ่านแล้วกระตุ้นด้วยโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) และทำการคัดเลือกอัตราส่วนโดยน้ำหนักของกะลามะพร้าวและ เมล็ดมะขามต่อโซเดียมคลอไรด์ ที่ทำให้ถ่านกัมมันต์มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์สูงสุด ไปใช้ในการทดลองขั้นตอนต่อไป ขั้นตอนที่ 2 เป็นการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิวแคดเมียม และสังกะสี ในน้ำเสียสังเคราะห์ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ โดยทำการทดลองแบบแบทช์ (Batch test) ขั้นตอนที่ 3 เป็นการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียม และสังกะสี ในน้ำเสียอุตสาหกรรมของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ โดยทำการทดลองแบบต่อเนื่องในถังดูดซับแบบแท่ง (adsorption column) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.3.1 การเตรียมถ่านกัมมันต์ การคัดเลือกถ่านกัมมันต์ในสภาวะของอุณหภูมิ อัตราส่วนการกระตุ้นที่เหมาะสม และการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์

3.3.1.1 ผลของอุณหภูมิต่อประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์

1) นำกะลามะพร้าว และเมล็ดมะขามมาอบแห้งในเตาอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส
2) นำกะลามะพร้าว และเมล็ดมะขามเผาให้ได้ถ่านที่อุณหภูมิ 350, 400, 450, 500 และ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที หาร้อยละของผลิตภัณฑ์ถ่าน เพื่อหาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการเผา และนำไปใช้ในขั้นตอนต่อไป
3) นำถ่านกะลามะพร้าว และถ่านเมล็ดมะขาม บดจนร่อนผ่านตะแกรงขนาด 8 เมช และค้างอยู่บนตะแกรงขนาด 30 เมช ซึ่งถ่านที่ได้จะมีขนาดระหว่าง 0.59 – 2.38 มิลลิเมตร แล้วแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์อิ่มตัวเป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วอบให้แห้ง
4) นำถ่านกะลามะพร้าว และถ่านเมล็ดมะขามที่ได้ใส่ภาชนะดินเผาที่ปิดฝา เพื่อให้อยู่ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน จากนั้นนำไปใส่ในเตาอบ ทำการกระตุ้นโดยแปรผันค่าอุณหภูมิที่อุณหภูมิ 500, 600, 700 และ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เพื่อเลือกอุณหภูมิในการกระตุ้นที่เหมาะสม และนำไปใช้ในขั้นตอนต่อไป

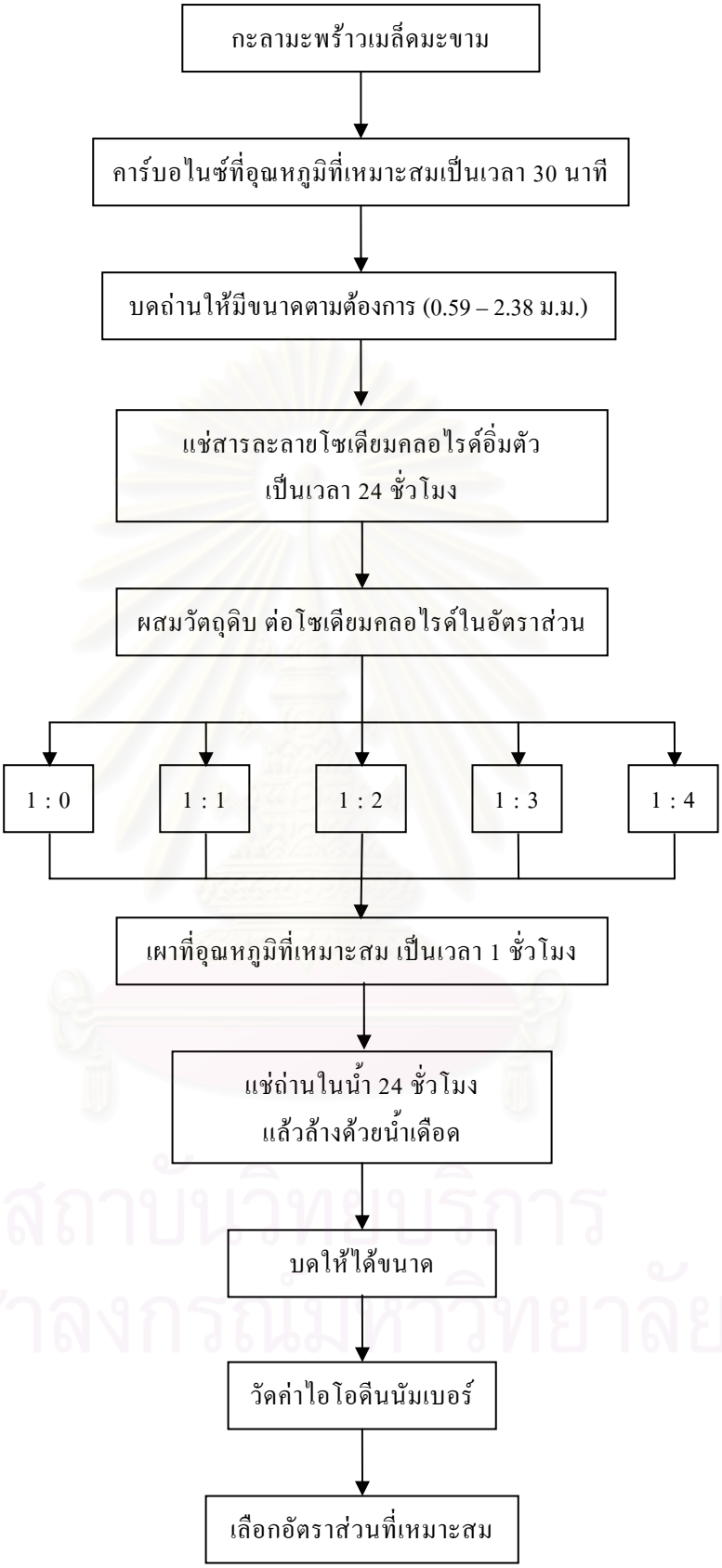
3.3.1.2 ผลของอัตราส่วนโดยน้ำหนักของวัตถุดิบต่อโซเดียมคลอไรด์ ต่อประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์

1) นำกะลามะพร้าวและเมล็ดมะขามเผาในอุณหภูมิที่เหมาะสม แล้วบดจนร่อนผ่านตะแกรงขนาด 8 เมชและค้างอยู่บนตะแกรงขนาด 30 เมช ซึ่งถ่านที่ได้จะมีขนาดระหว่าง 0.59 – 2.38 มิลลิเมตร จึงนำไปแช่ในสารละลายโซเดียมคลอไรด์อิ่มตัวเป็นเวลา 24 ชั่วโมง
2) นำถ่านกะลามะพร้าว และถ่านเมล็ดมะขามที่แช่สารละลายโซเดียมคลอไรด์แล้วอบให้แห้ง แล้วผสมกับโซเดียมคลอไรด์ตามอัตราส่วน 1:0, 1:1, 1:2, 1:3 และ 1:4 โดยน้ำหนักของถ่านต่อโซเดียมคลอไรด์ แล้วบรรจุถ่าน และโซเดียมคลอไรด์ในภาชนะดินเผา ปิดฝา แล้วนำเข้าสู่กระบวนการเผา และกระตุ้นในเตาเผาที่อุณหภูมิที่เหมาะสม เป็นเวลา 1 ชั่วโมง อัตราส่วนของกะลามะพร้าว และเมล็ดมะขามต่อโซเดียมคลอไรด์ ที่อัตราส่วนต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนของกะลามะพร้าว และเมล็ดมะขามต่อโซเดียมคลอไรด์ ที่ใช้ในการทดลอง

ชนิดของวัตถุดิบ	อัตราส่วนของวัตถุดิบต่อโซเดียมคลอไรด์	จำนวนวัตถุดิบที่ผ่านการแช่สารละลายโซเดียมคลอไรด์	จำนวนโซเดียมคลอไรด์ที่เติมลงในวัตถุดิบในขั้นตอนการเผาและการกระตุ้น (ส่วน)
กะลามะพร้าว และ เมล็ดมะขาม	1:0	1	-
	1:1	1	1
	1:2	1	2
	1:3	1	3
	1:4	1	4

3) หลังจากการเผา นำถ่านกัมมันต์มาล้างสารกระตุ้นออกโดยการแช่น้ำค้างคืนทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นล้างถ่านด้วยน้ำเดือดหลายๆ ครั้ง จนมีค่าพีเอชเป็นกลาง นำไปอบแห้ง
4) นำถ่านที่ผ่านการเผาที่อัตราส่วนต่างๆ หาค่าไอโอดีนนัมเบอร์สูงสุดเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดติดผิวของถ่านที่ทำการเผาที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของกะลามะพร้าว และเมล็ดมะขามต่อโซเดียมคลอไรด์ต่างๆ เพื่อหาอัตราส่วนของวัตถุดิบต่อโซเดียมคลอไรด์ที่เหมาะสม และเลือกอัตราส่วนที่ทำให้ถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพสูงสุดมาใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพการดูดติดผิวแคดเมียม และสังกะสี ขั้นตอนการทดลองแสดงดังรูปที่ 3.1
5) ศึกษาสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของถ่านกัมมันต์ที่ได้ ดังต่อไปนี้
   - ค่าการดูดติดผิวไอโอดีนตาม ASTM D 4607 – 94 (วิธีวิเคราะห์แสดงในภาคผนวก ก)
   - ค่าพีเอชตาม ASTM D 3838 – 80
   - ค่าพื้นที่ผิวตาม ASTM C 819 – 77 (วิธีวิเคราะห์แสดงในภาคผนวก ข)
6) ศึกษาลักษณะโครงสร้าง พื้นที่ผิว และความเป็นรูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope: SEM)



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการเตรียมถ่าน และการคัดเลือกถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

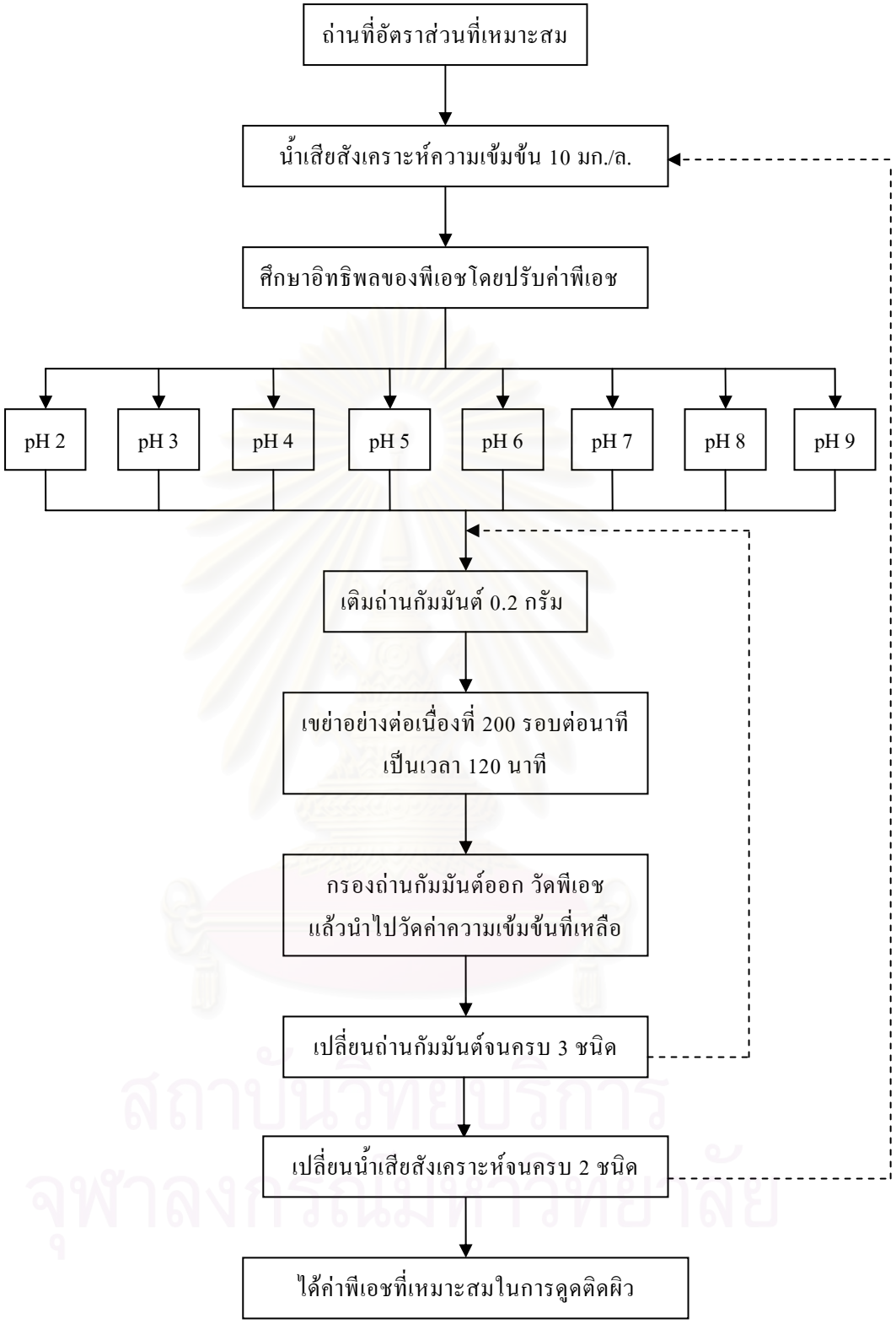
3.3.2 การศึกษาความสามารถในการดูดติดผิว

ศึกษาความสามารถในการดูดติดผิวของแคดเมียม และสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ของถ่านกะลามะพร้าว ถ่านเมล็ดมะขามและถ่านกัมมันต์ที่มีขายตามท้องตลาดทั่วไป โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิว ดังนี้ พีเอช ความเข้มข้นของโลหะหนัก และปริมาณถ่านกัมมันต์ แล้วนำผลที่ได้มาเขียนไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช (Freundlich Isotherm)

3.3.2.1 ผลของพีเอชต่อการดูดติดผิว

1) นำน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีแคดเมียมความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับค่าพีเอชให้ได้ 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 และ 9 ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เติมผงถ่านกะลามะพร้าว ปริมาณ 0.2 กรัม เขย่าที่ความเร็ว 200 รอบ/นาที เป็นเวลา 120 นาที
2) กรองแยกผงถ่านออก วัดพีเอชของน้ำเสียหลังเขย่า แล้วนำน้ำเสียไปวัดปริมาณแคดเมียมที่เหลืออยู่ ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง
3) เปลี่ยนชนิดของน้ำเสียสังเคราะห์เป็นสังกะสี ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร แล้วทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ต้น
4) เปลี่ยนชนิดถ่านเป็นถ่านเมล็ดมะขาม และถ่านกัมมันต์ที่มีขายตามท้องตลาดทั่วไปแล้วทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ต้น ดังแสดงในรูปที่ 3.2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



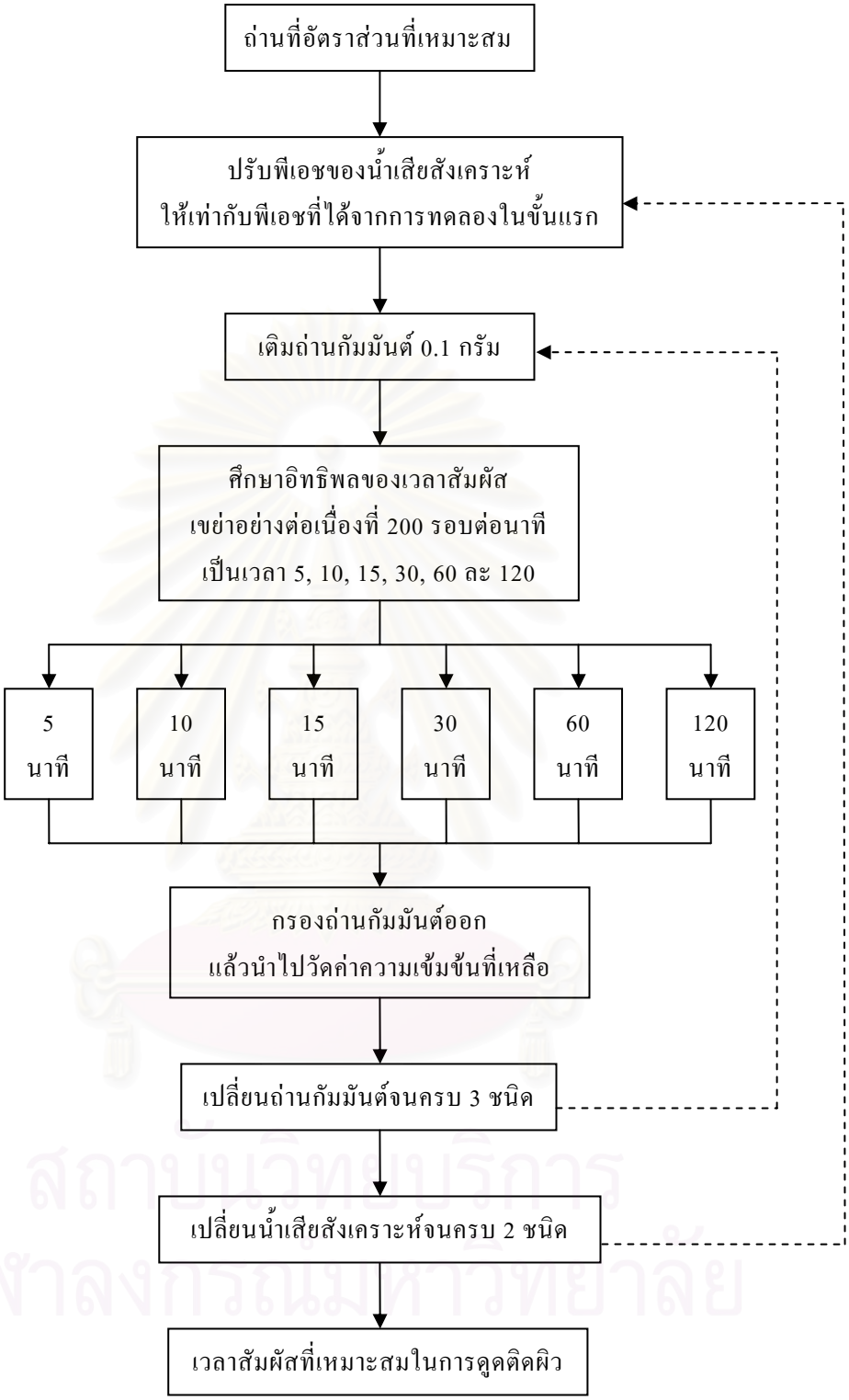
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการศึกษาอิทธิพลของพีเอชต่อการดูดติดผิว

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3.2.2 ผลของเวลาสัมผัสต่อการดูดติดผิว

1) นำน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีแคดเมียมความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับค่าพีเอช ให้เหมาะสมตามที่ได้จากขั้นตอนแรก ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เติมผงถ่านกะลามะพร้าวที่เตรียมได้ ปริมาณ 0.1 กรัม ลงในขวดแต่ละใบ
2) นำขวดไปเขย่า เป็นเวลา 5, 10, 15, 30, 60 และ 120 นาที
3) กรองแยกผงถ่านออก วัดพีเอชของน้ำเสียหลังเขย่า แล้วนำน้ำเสียไปวัดปริมาณแคดเมียมที่เหลืออยู่ ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง
4) เปลี่ยนชนิดของน้ำเสียสังเคราะห์เป็นสังกะสี ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร แล้วทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ต้น
5) เปลี่ยนชนิดถ่านเป็นถ่านเมล็ดมะขาม และถ่านกัมมันต์ที่มีขายตามท้องตลาดทั่วไปแล้วทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ต้น ดังแสดงในรูปที่ 3.3

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



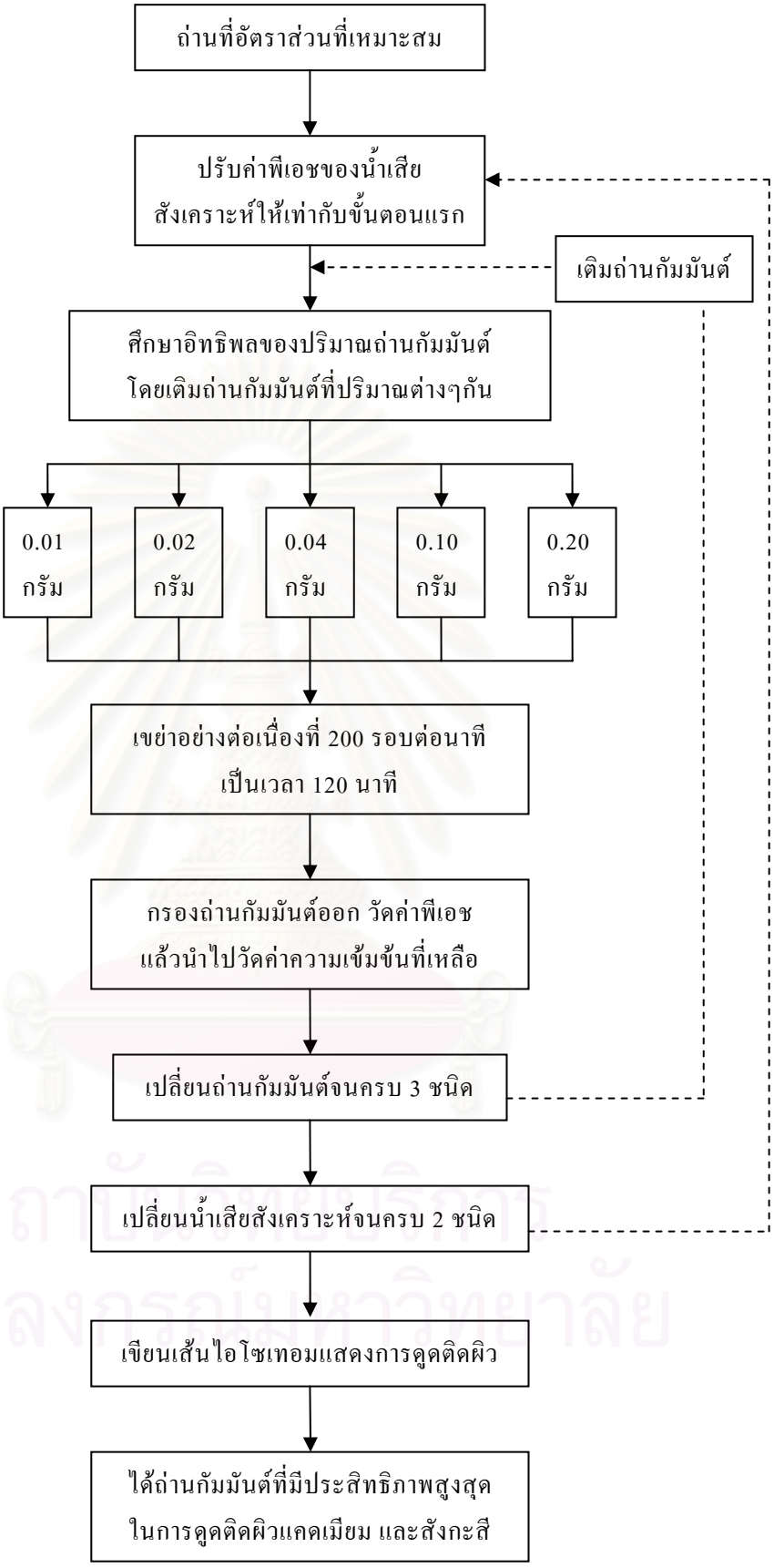
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการศึกษาอิทธิพลของเวลาสัมผัสต่อการดูดติดผิว

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3.2.3 ผลของปริมาณถ่านกัมมันต์

1) นำน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีแคดเมียมความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับค่าพีเอช ให้เหมาะสมตามที่ได้จากขั้นตอนแรก ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร
2) เติมผงถ่านกะลามะพร้าวปริมาณ 0.01, 0.02, 0.04, 0.1 และ 0.2 กรัม นำไปเขย่าบนเครื่องเขย่า เป็นเวลา 120 นาที
3) กรองแยกผงถ่านออก วัดพีเอชของน้ำเสียหลังเขย่า แล้วนำน้ำเสียไปวัดปริมาณแคดเมียมที่เหลืออยู่ ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง
4) เปลี่ยนชนิดของน้ำเสียสังเคราะห์เป็นสังกะสี แล้วทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ต้น
5) เปลี่ยนชนิดถ่านเป็นถ่านเมล็ดมะขาม และถ่านกัมมันต์ที่มีขายตามท้องตลาดทั่วไปแล้วทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ต้น
6) นำผลการวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนัก (แคดเมียม และสังกะสี) ที่เหลือของถ่านแต่ละชนิดมาเขียนกราฟสมการไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช ดังแสดงในรูปที่ 3.4

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



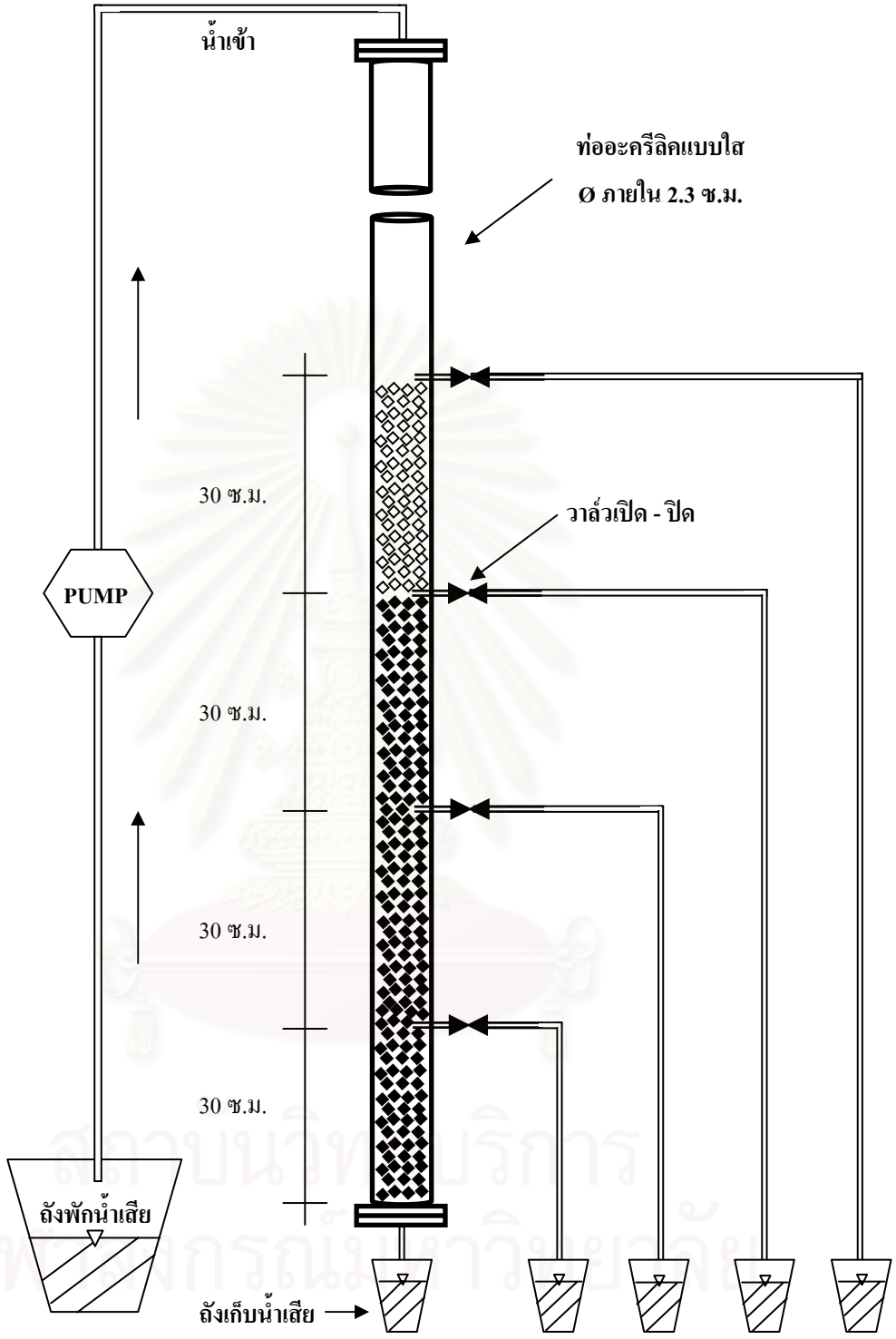
รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการศึกษาอิทธิพลของน้ำหนักถ่านต่อการดูดติดผิว

3.3.3 การทดสอบประสิทธิภาพในการดูดติดผิวของโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยทำการทดลองในถังดูดติดผิวแบบแท่งที่บรรจุชั้นทราย และชั้นถ่านกัมมันต์

ทดสอบประสิทธิภาพในการดูดติดผิวของแคดเมียม และสังกะสี โดยทำการทดลองแบบต่อเนื่องในคอลัมน์ ดังรูปที่ 3.5โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุดจากการทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช

1) นำถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมที่เตรียมได้ และทรายร่อนผ่านตะแกรงขนาด 8 เมช และค้างอยู่บนตะแกรงขนาด 30 เมช ซึ่งถ่าน และทรายที่ได้จะมีขนาดระหว่าง 0.59 – 2.38 มิลลิเมตร
2) บรรจุถ่านกัมมันต์ลงในคอลัมน์ โดยให้ชั้นถ่านกัมมันต์สูง 90 เซนติเมตร แล้วบรรจุทรายลงในคอลัมน์โดยให้ชั้นทรายสูง 30 เซนติเมตร
3) ทำการป้อนน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมแบบไหลลง เก็บน้ำเสียที่ระดับความสูงของชั้นทราย 30 เซนติเมตร และที่ระดับความสูงของชั้นถ่าน 30, 60 และ 90 เซนติเมตร โดยกรองผ่านกระดาษกรอง นำมาวัดค่าและหาปริมาณแคดเมียม และสังกะสีที่เหลืออยู่
4) นำค่าวิเคราะห์ความเข้มข้นที่เหลืออยู่มาสร้างเส้นโค้งเบรคทรูจ์ (Breakthrough Curve)
5) หลังจากนั้นนำถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการทดสอบประสิทธิภาพการดูดติดผิวแล้ว นำไปทำการคืนสภาพ โดยนำถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการทดสอบประสิทธิภาพการดูดติดผิวแล้วปริมาณ 2 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร โดยเติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้นร้อยละ 5 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร นำไปเขย่าบนเครื่องเขย่า เป็นเวลา 120 นาที
6) กรองแยกถ่านออก อบให้แห้ง หาค่าไอโอดีนนัมเบอร์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของถ่านที่ยังไม่ได้ใช้ และถ่านที่ใช้แล้วหลังจากการคืนสภาพ

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.5 แผนภาพการทดสอบประสิทธิภาพในการดูดติดผิวของแคดเมียม และสังกะสี โดยทำการทดลองแบบต่อเนื่องในคอลัมน์

บทที่ 4

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

จากการดำเนินการทดลองในห้องปฏิบัติการ ตามขั้นตอนที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ข้อมูลมีดังนี้

4.1 การเตรียมถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว และเมล็ดมะขาม

4.1.1 ผลของอุณหภูมิในการเผาต่อร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว และเมล็ดมะขาม

กะลามะพร้าว และเมล็ดมะขามจะถูกนำไปเผาให้เป็นถ่านด้วยกระบวนการคาร์บอไนซ์ที่อุณหภูมิ 400 - 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที และเนื่องจากที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาทีนั้น กะลามะพร้าว และเมล็ดมะขาม ยังไหม้เป็นถ่านไม่หมดจึงไม่ได้นำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้ หลังจากนั้นนำกะลามะพร้าว และเมล็ดมะขามที่ได้มาชั่งน้ำหนัก เพื่อคำนวณหาร้อยละผลผลิต และทำการคัดเลือกอุณหภูมิที่เหมาะสม ดังตารางที่ 4.1 และตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.1 ค่าร้อยละผลผลิตถ่านกะลามะพร้าว เมื่อเผาที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 30 นาที

อุณหภูมิที่ใช้เผา (°C)	น้ำหนักก่อนเผา (กรัม)	น้ำหนักหลังเผา (กรัม)	ร้อยละของผลผลิต	ร้อยละของผลผลิตเฉลี่ย
400	100.387	45.902	45.73	49.48 ± 5.88
	100.409	46.657	46.47	
	100.095	56.311	56.26	
450	100.251	42.586	42.48	44.10 ± 3.02
	100.371	42.386	42.23	
	100.287	47.719	47.58	
500	100.007	37.342	37.34	37.45 ± 0.68
	100.385	36.979	36.84	
	100.165	38.251	38.198	
550	100.254	35.438	35.35	36.07 ± 1.04
	100.186	35.663	35.60	
	100.222	37.339	37.26	

จากตารางที่ 4.1 อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองเผากะลามะพร้าวนั้นจะอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 400 - 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ร้อยละผลผลิตมีค่าสูงสุดถึงร้อยละ 49.48 ± 5.88 ในการเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที และร้อยละผลผลิตที่มีค่าต่ำสุดเพียงร้อยละ 36.07 ± 1.04 ในการเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

ตารางที่ 4.2 ค่าร้อยละผลผลิตถ่านเมล็ดมะขาม เมื่อเผาที่อุณหภูมิต่างๆ เป็นเวลา 30 นาที

อุณหภูมิที่ใช้เผา (°C)	น้ำหนักก่อนเผา (กรัม)	น้ำหนักหลังเผา (กรัม)	ร้อยละของผลผลิต	ร้อยละของผลผลิตเฉลี่ย
400	100.035	48.714	48.70	50.57 ± 3.15
	100.046	48.829	48.81	
	100.051	54.231	54.20	
450	100.034	43.201	43.19	44.13 ± 2.91
	100.015	41.809	41.80	
	100.022	47.402	47.39	
500	100.040	34.326	34.31	35.12 ± 1.08
	100.031	34.718	34.71	
	100.049	36.363	36.35	
550	100.012	31.572	31.57	32.02 ± 0.91
	100.043	31.448	31.43	
	100.032	33.078	33.07	

จากตารางที่ 4.2 อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองเผาเมล็ดมะขามนั้นจะอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 400 - 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ร้อยละผลผลิตมีค่าสูงสุดถึงร้อยละ 50.57 ± 3.15 ในการเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที และร้อยละผลผลิตที่มีค่าต่ำสุดเพียงร้อยละ 32.02 ± 0.91 ในการเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

จากผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา ร้อยละผลผลิตทั้งของถ่านกะลามะพร้าว และเมล็ดมะขามที่ได้ พบว่า ร้อยละผลผลิตของถ่านที่ได้เมื่อเทียบกับวัตถุดิบจะลดลง เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการเผาสูงขึ้น เนื่องจากในกะลามะพร้าวจะมีเซลลูโลส และในเมล็ดมะขามมีเจลโลส (Jellose) เป็นองค์ประกอบหลักแล้ว ยังมีสารประกอบอื่นๆ อีกมากมาย เช่น เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน สารที่สามารถสกัดได้ (Extractives) เช่น เทอร์พีน (terpenes), แทนนิน (tannins), กรดไขมัน (fatty acid) และเรซิน (resins) เป็นต้น ซึ่งสารเหล่านี้จะมีอุณหภูมิในการสลายตัวแตกต่างกัน (Orfao, Antunes and Figueiredo, 1999) เมื่อเผาวัตถุดิบ สารประกอบต่างๆ เหล่านี้ก็จะเริ่มสลายตัว เมื่อใช้อุณหภูมิและ

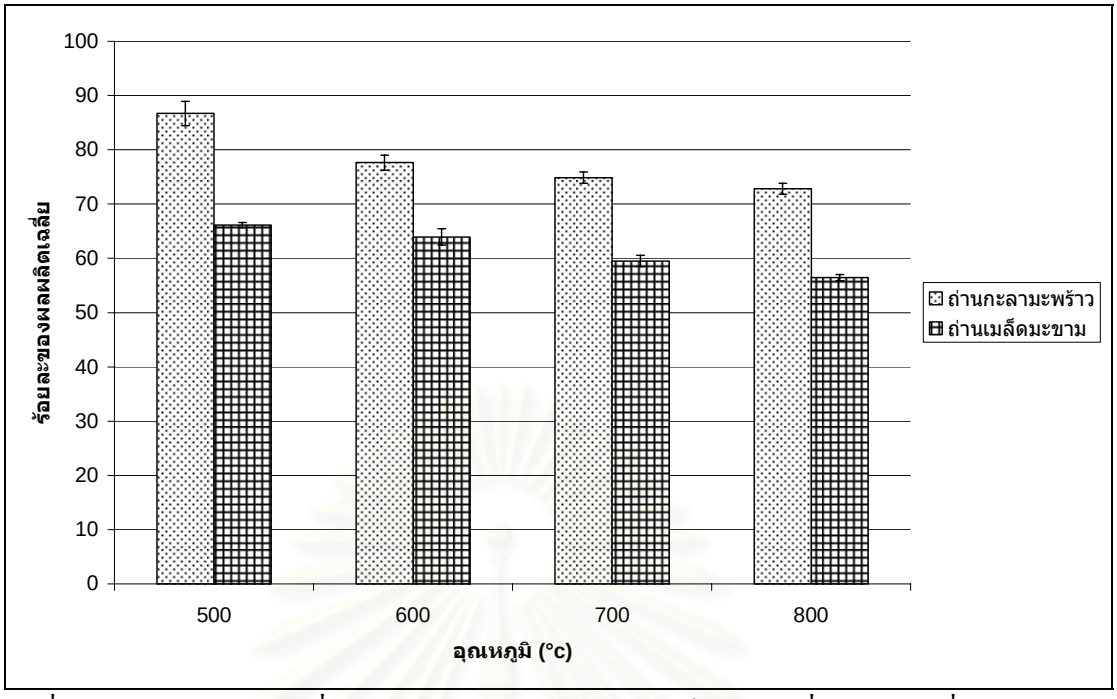
เวลาในการเผาเพิ่มขึ้น สารที่สลายตัวก็มีจำนวนมากขึ้น จึงทำให้ถ่านที่เผาที่อุณหภูมิสูง มีร้อยละผลผลิตของถ่านทั้งสองชนิดลดลง ดังนั้นจึงเลือกการเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ซึ่งให้ร้อยละผลผลิตสูงสุด ไปใช้ในการศึกษาขั้นต่อไป

4.1.2 ผลของอุณหภูมิในการเผาต่อร้อยละผลผลิต และประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว และเมล็ดมะขาม

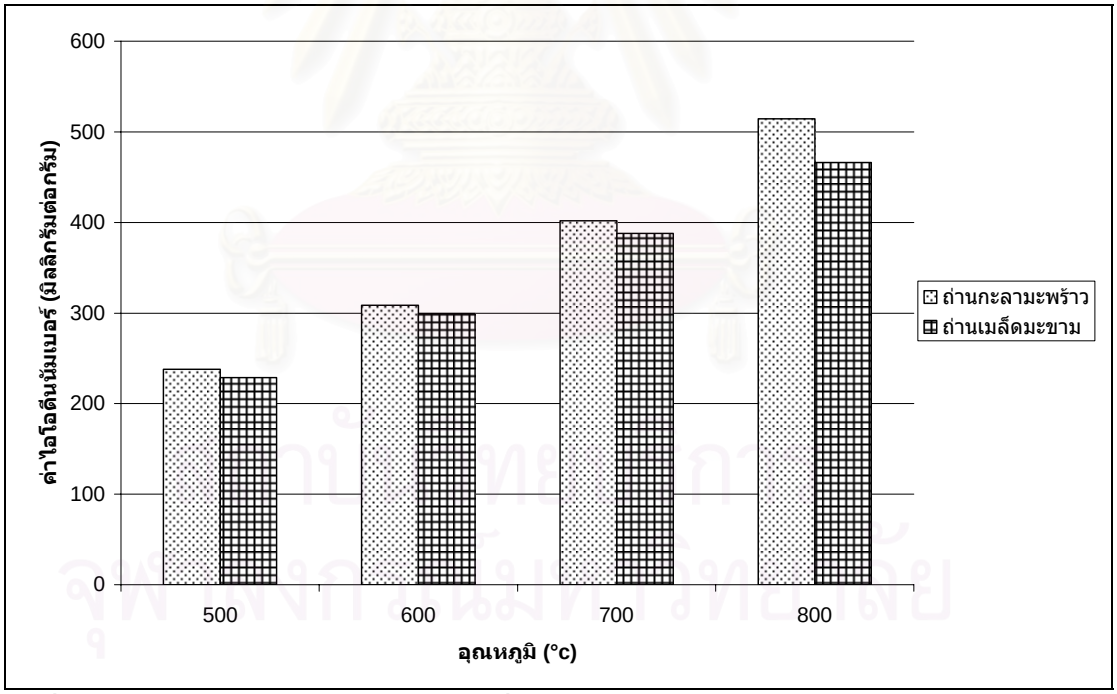
นำถ่านจากกะลามะพร้าว และเมล็ดมะขามที่ได้จากการศึกษาเบื้องต้น มาทดลองผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาต่อประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ โดยนำถ่านมาบดจนร่อนผ่านตะแกรงขนาด 8 เมช และค้างอยู่บนตะแกรงขนาด 30 เมช ซึ่งถ่านที่ได้จะมีขนาดระหว่าง 0.59 – 2.38 มิลลิเมตร แล้วแช่สารละลายเกลือแกงอิ่มตัวเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และอบแห้งแล้ว ทำการเผาถ่านพร้อมกับการกระตุ้นที่อุณหภูมิ 500, 600, 700 และ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำไปวิเคราะห์หาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ (ASTM D 4607 – 94 ซึ่งแสดงในภาคผนวก ก) โดยวัดความเข้มข้นที่เหลือจากการดูดติดผิวโดยถ่านกัมมันต์ จะแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการดูดติดผิว ดังนั้นประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์พิจารณาจากค่าไอโอดีนนัมเบอร์ เมื่อพิจารณาจากค่าไอโอดีนนัมเบอร์ที่วัดได้ ถ่านกัมมันต์ที่มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์สูง ถ่านกัมมันต์นั้นจะมีความสามารถในการดูดติดผิวสูง ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ และร้อยละของผลผลิตเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์ที่วิเคราะห์ได้แสดงรายละเอียดดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.1 และ 4.2

ตารางที่ 4.3 ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาต่อร้อยละของผลผลิต และประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์

วัตถุดิบ	อุณหภูมิ (°C)	ร้อยละของผลผลิตเฉลี่ย	ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ (มิลลิกรัมต่อกรัม)
ถ่านกะลามะพร้าว	500	86.70 ± 2.24	238
	600	77.64 ± 1.37	309
	700	74.86 ± 1.04	402
	800	72.83 ± 1.01	514
ถ่านเมล็ดมะขาม	500	66.11 ± 0.48	229
	600	63.93 ± 1.52	299
	700	59.51 ± 1.04	388
	800	56.44 ± 0.56	466



รูปที่ 4.1 ร้อยละผลผลิตเฉลี่ยของถ่านกะลามะพร้าว และเมล็ดมะขามที่เผากระตุ้นที่อุณหภูมิ 500, 600, 700 และ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง



รูปที่ 4.2 เปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาต่อประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว และเมล็ดมะขาม

จากการศึกษาผลของอุณหภูมิในการเผาถ่านกะลามะพร้าวและเมล็ดมะขามที่มีต่อร้อยละของผลผลิต พบว่า ร้อยละของผลผลิตของน้ำหนักถ่านที่ได้เทียบกับวัตถุดิบถ่านของถ่าน

กะลามะพร้าวอยู่ช่วงร้อยละ 71 - 81 ส่วนถ่านเมล็ดมะขาม ซึ่งค่าที่ได้อยู่ในช่วงร้อยละ 56 - 66 และจากการทดลองพบว่าร้อยละผลผลิตของน้ำหนักถ่านจากกะลามะพร้าว มีค่าสูงกว่าเมล็ดมะขาม เนื่องจากกะลามะพร้าวมีเนื้อแน่น และแข็งกว่าเมล็ดมะขาม และเมื่อพิจารณาจากการทดลองจะพบว่าเมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงขึ้นมากกว่า 800 องศาเซลเซียสนั้น ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ก็มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นด้วย แต่เมื่อพิจารณาค่าร้อยละผลผลิตจะพบว่ามีค่าลดลง ถึงแม้ว่าจะแตกต่างกันไม่มาก แต่ในแง่ของการผลิตแล้วนั้นจะมีผลสูง ดังนั้นจึงไม่เลือกอุณหภูมิที่สูงกว่านี้ในการทำการศึกษา

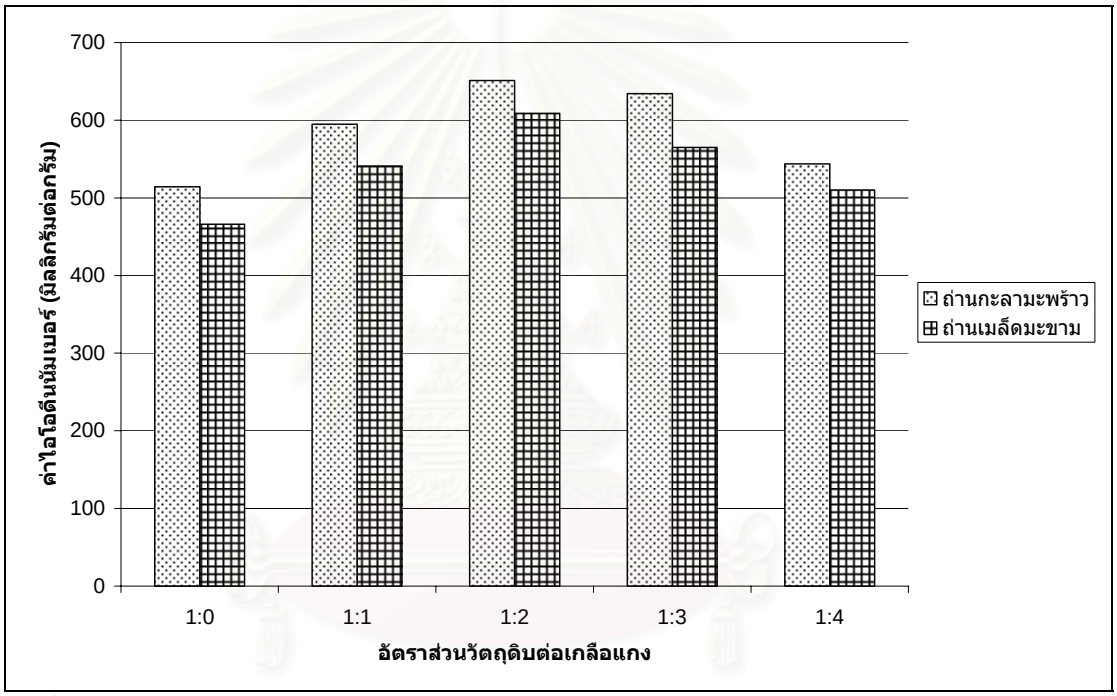
ประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าว และเมล็ดมะขาม ที่เผาที่อุณหภูมิต่างๆ กัน คือ 500, 600, 700 และ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยพิจารณาจากค่าไอโอดีนนัมเบอร์ พบว่าค่าไอโอดีนนัมเบอร์จะเพิ่มขึ้น เมื่ออุณหภูมิที่ใช้ในการเผาสูงขึ้น เนื่องจากการที่ใช้อุณหภูมิในการเผาสูงขึ้น สารประกอบต่างๆ ในถ่านกะลามะพร้าว และถ่านเมล็ดมะขามที่สลายยังไม่หมดจากการเผาก็จะสลายตัวมากขึ้น ส่วนที่เหลืออยู่ก็จะเป็นถ่านคาร์บอนคงตัว หรือโครงสร้างหลักของถ่านกัมมันต์ เมื่อสารประกอบที่ระเหยได้สลายไป พื้นที่ว่างในโครงสร้างถ่านก็จะเพิ่มมากขึ้น ทำให้มีพื้นที่ผิวมากขึ้นด้วย ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์เพิ่มมากขึ้น ดังนั้นจากการศึกษานี้ พบว่า อุณหภูมิที่ใช้ในการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส จะได้ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกะลามะพร้าว และเมล็ดมะขามมีค่าไอโอดีนนัมเบอร์สูงที่สุดคือ 514 และ 466 มิลลิกรัมไอโอดีนต่อกรัมของถ่านกัมมันต์ ตามลำดับ ซึ่งแสดงว่าเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุด จึงเลือกอุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส มาเป็นอุณหภูมิที่ใช้ในการศึกษาในขั้นต่อไป

4.1.3 ผลของอัตราส่วนต่อสารกระตุ้นในการเผาต่อร้อยละผลผลิต และประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว และเมล็ดมะขาม

การศึกษาประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากถ่านกะลามะพร้าวและถ่านเมล็ดมะขาม โดยบดจนร่อนผ่านตะแกรงขนาด 8 เมช และค้างอยู่บนตะแกรงขนาด 30 เมช ซึ่งถ่านที่ได้จะมีขนาดระหว่าง 0.59 – 2.38 มิลลิเมตร แล้วใช้อัตราส่วนโดยน้ำหนักของถ่านกะลามะพร้าวและถ่านเมล็ดมะขามต่อสารกระตุ้นเกลือแกง ที่อัตราส่วนต่างๆ กัน คือ 1:0, 1:1, 1:2, 1:3 และ1:4 ทำการเผากระตุ้นที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ที่ได้จะพิจารณาจากค่าไอโอดีนนัมเบอร์ จากการวิเคราะห์ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ แสดงรายละเอียด ดังตารางที่ 4.4 และจากข้อมูลที่ได้นำมาเขียนกราฟความสัมพันธ์ของอัตราส่วนสารกระตุ้นเกลือแกงต่อประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ที่ได้ ดังรูปที่ 4.3

ตารางที่ 4.4 ผลของอัตราส่วนวัตถุดิบต่อเกลือแกงต่อประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์

อัตราส่วนวัตถุดิบ	ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ (มิลลิกรัมต่อกรัม)	
ต่อเกลือแกง	ถ่านกะลามะพร้าว	ถ่านเมล็ดมะขาม
1:0	514	466
1:1	595	541
1:2	651	609
1:3	635	565
1:4	544	510



รูปที่ 4.3 เปรียบเทียบอัตราส่วนสารกระตุ้นเกลือแกงต่อประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว และเมล็ดมะขาม

จากผลการทดลองพบว่าค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกะลามะพร้าว และถ่านเมล็ดมะขามที่อัตราส่วนวัตถุดิบต่อสารกระตุ้นเกลือแกงเท่ากับ 1:2 มีค่ามากที่สุด คือ 651 มิลลิกรัมต่อกรัม และ 609 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ ซึ่งพบว่าค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านทั้งสองชนิด มีค่ามากกว่าค่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของประเทศไทย ตาม มอก.900 - 2532 (กระทรวงอุตสาหกรรม, 2532) ได้กำหนดไว้ว่า ถ่านกัมมันต์แบบผง และแบบเม็ดนั้น ต้องมีค่าไอโอดีนนัมเบอร์ ไม่น้อยกว่า 600 มิลลิกรัมต่อกรัม

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกะลามะพร้าว และถ่านเมล็ดมะขามที่อัตราส่วนวัตถุดิบต่อสารกระตุ้นเกลือแกงเท่ากับ 1:0 1:1 และ 1:2 จะเห็นว่าค่าไอโอดีนนัมเบอร์เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน โดยของถ่านกะลามะพร้าวเพิ่มจาก 514 มิลลิกรัมต่อกรัม เป็น 651 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วนของถ่านเมล็ดมะขามเพิ่มจาก 466 มิลลิกรัมต่อกรัม เป็น 609 มิลลิกรัมต่อกรัม แสดงว่าสารกระตุ้นเกลือแกงทำให้ประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์เพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อมีการเติมสารกระตุ้นเกลือแกงเพิ่มลงไป 3 และ 4 เท่าของน้ำหนักวัตถุดิบ พบว่าค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกะลามะพร้าวมีค่าลดลงจาก 635 มิลลิกรัมต่อกรัม เป็น 544 มิลลิกรัมต่อกรัม และค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านเมล็ดมะขามลดลงจาก 565 มิลลิกรัมต่อกรัม เป็น 510 มิลลิกรัมต่อกรัม

ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านที่เตรียมขึ้นทั้งจากถ่านกะลามะพร้าว และถ่านเมล็ดมะขาม โดยมีอัตราส่วนโดยน้ำหนักของวัตถุดิบต่อสารกระตุ้นเกลือแกงเท่ากับ 1:2 มีค่ามากกว่าค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของอัตราส่วน 1:0 และ 1:1 นั้น เกิดจากการที่มีผลึกเกลือแกงที่มีปริมาณมากเพียงพอแทรกอยู่ในเนื้อของวัตถุดิบ เมื่อทำการเผาและกระตุ้นวัตถุดิบให้เป็นถ่านกัมมันต์ ผลึกเกลือจะเข้าอยู่ในเนื้อโครงสร้างของถ่าน และทำหน้าที่คล้ายเป็นเสาค้ำยัน เมื่อล้างสารกระตุ้นเกลือแกงออกด้วยน้ำร้อน ผลึกเกลือแกงที่อยู่ในโครงสร้างของถ่านก็จะหลุดออก ทำให้เกิดรูพรุนและพื้นที่ผิวภายในเพิ่มขึ้นเหมาะสำหรับการดูดติดผิวได้ แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนโดยน้ำหนักของวัตถุดิบต่อสารกระตุ้นเกลือแกง เป็น 1:3 และ 1:4 พบว่า ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มีค่าลดลง แสดงว่า การเพิ่มสารกระตุ้นเกลือแกงไม่สามารถถ่านกัมมันต์มีประสิทธิภาพสูงขึ้น แต่จะทำให้ขนาดของรูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้น ซึ่งส่งผลให้พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ลดลงตามไปด้วย ทำให้ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ลดต่ำลง เช่นเดียวกับการศึกษาของ ลลิดา นิทัศนจารุกุล (2544) ก็พบว่า ค่าไอโอดีนนัมเบอร์จะเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเติมสารกระตุ้นจนถึงอัตราส่วนหนึ่งและจะลดลงเมื่ออัตราส่วนเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณของสารกระตุ้นที่มากเกินไป จึงทำให้รูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีพื้นที่ผิวสำหรับการดูดติดผิวลดลง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

4.1.4 ลักษณะทางกายภาพของถ่านกัมมันต์

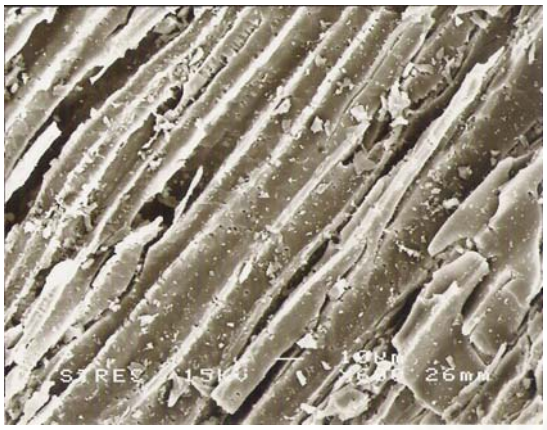
จากการศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์ และศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิต พบว่าถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวและเมล็ดมะขามที่ให้ค่าไอโอดีนนัมเบอร์สูงสุดคือที่อัตราส่วนวัตถุดิบต่อสารกระตุ้นเกลือแกงเท่ากับ 1:2 จึงได้นำมาศึกษาลักษณะทางกายภาพที่สำคัญของถ่านกัมมันต์ ได้แก่ พื้นที่ผิว (surface area), ปริมาตรรูพรุน (pore volume) และ ขนาดโพรงเฉลี่ย (average pore size) ซึ่งทำการวิเคราะห์โดยใช้เครื่อง Specific Surface Area Analyzer ด้วยวิธี BET (Brunauer – Emmett - Teller) แสดงดังตารางที่ 4.5 และทำการศึกษาลักษณะโครงสร้างพื้นที่ผิวและรูพรุน โดยเปรียบเทียบก่อน และหลังกระตุ้นที่อัตราส่วนวัตถุดิบต่อสารกระตุ้นเกลือแกงเท่ากับ 1:2 อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope: SEM) ดังแสดงในรูปที่ 4.4

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม ถ่านเมล็ดมะขามที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ และถ่านกัมมันต์ที่มีขายตามท้องตลาดทั่วไป

ลักษณะทางกายภาพ	ชนิดของถ่านกัมมันต์			
	ถ่านกะลามะพร้าว	ถ่านเมล็ดมะขาม	ถ่านเมล็ดมะขาม (กระตุ้นด้วย $ZnCl_2$)	Filtrasorb 300
พื้นที่ผิว(ตร.ม./กรัม)	366.68	137.05	522.81*	719.36*
ปริมาตรโพรง(ลบ.ซม./กรัม)	0.17	0.27	0.24*	0.33*
ขนาดโพรงเฉลี่ย (อังสตรอม)	14.42	19.50	14.65*	14.81*

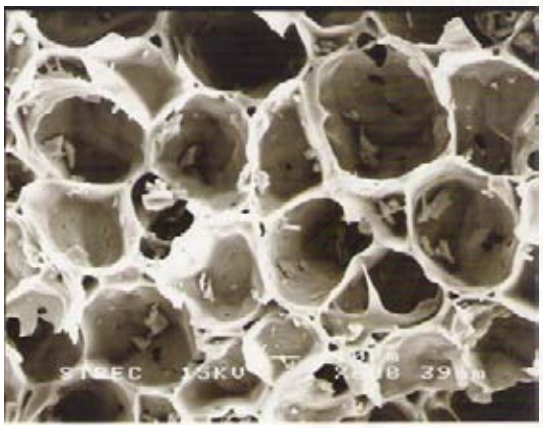
หมายเหตุ * จักริน นักไร่, 2549

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

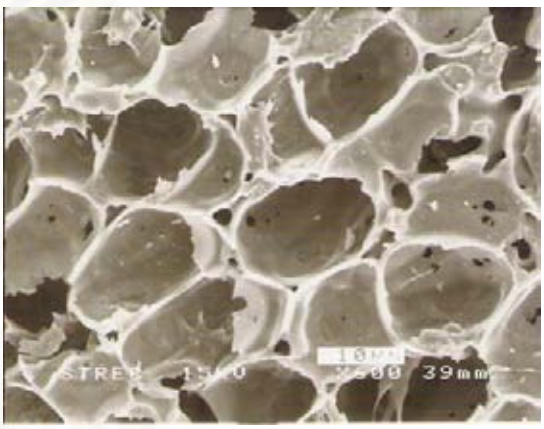


(ก)

(ข)



(ค)



(ง)

รูปที่ 4.4 ลักษณะโครงสร้างพื้นที่ผิว และรูพรุน โดยเปรียบเทียบก่อน และหลังกระตุ้น ส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน กำลังขยาย 600 เท่า

(ก) โครงสร้าง และพื้นที่ผิว ของถ่านกะลามะพร้าวที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

(ข) โครงสร้าง และพื้นที่ผิว ของถ่านกะลามะพร้าวหลังการกระตุ้นด้วยสารกระตุ้นเกลือแกงด้วยอัตราส่วนของวัตถุดิบต่อสารกระตุ้นเกลือแกง เท่ากับ 1:2 อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

(ค) โครงสร้าง และพื้นที่ผิว ของถ่านเมล็ดมะขามที่ผ่านการเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

(ง) โครงสร้าง และพื้นที่ผิว ของถ่านเมล็ดมะขามหลังการกระตุ้นด้วยสารกระตุ้นเกลือแกงด้วยอัตราส่วนของวัตถุดิบต่อสารกระตุ้นเกลือแกง เท่ากับ 1:2 อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

จากผลการวิเคราะห์ พื้นที่ผิว ปริมาตรโพรงและขนาดโพรงเฉลี่ย ของถ่านกะลามะพร้าว พบว่าพื้นที่ผิวมีค่า 366.68 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรโพรง 0.17 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ขนาดโพรงเฉลี่ย 14.42 อังสตรอม ส่วนของถ่านเมล็ดมะขามพื้นที่ผิวมีค่า 137.05 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรโพรง 0.27 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม ขนาดโพรงเฉลี่ย 19.50 อังสตรอม ทั้งนี้พบว่าพื้นที่ผิวของถ่านกะลามะพร้าวมีค่าสูงกว่าถ่านเมล็ดมะขาม ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับการหาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ซึ่งถ่านกะลามะพร้าวมีค่าสูงกว่าถ่านเมล็ดมะขามเช่นกัน แสดงว่าถ่านกะลามะพร้าวย่อมมีความสามารถในการดูดติดผิวได้ดีกว่าถ่านเมล็ดมะขาม และเมื่อนำไปเปรียบเทียบกับ ถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 ซึ่งเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายตามท้องตลาดทั่วไป ถ่าน Filtrasorb 300 จะมีค่าสูงกว่า ดังนั้นถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 ย่อมมีความสามารถในการดูดติดผิวได้ดีการถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านกะลามะพร้าว และถ่านเมล็ดมะขาม

ทั้งนี้ยังพบว่าถ่านเมล็ดมะขามที่ได้ทำการศึกษาคือผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลายเกลือแกง กับถ่านเมล็ดมะขามที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์ในการศึกษาของ จักรินนักไร่ (2549) เมื่อนำมาเปรียบเทียบ จะพบว่าถ่านเมล็ดมะขามที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์มีค่าพื้นที่ผิวมากกว่าถ่านเมล็ดมะขามที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลายเกลือแกง แต่มีค่าปริมาตรโพรง และขนาดโพรงเฉลี่ยน้อยกว่าถ่านเมล็ดมะขามที่ผ่านการกระตุ้นด้วยสารละลายเกลือแกง

นอกจากนี้เมื่อได้นำถ่านกะลามะพร้าว และถ่านเมล็ดมะขามที่ยังไม่ผ่านการกระตุ้น และถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการแช่เกลือแกงอิ่มตัว แล้วกระตุ้นที่อัตราส่วน 1:2 ที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) เมื่อพิจารณาโครงสร้างพื้นผิวและความพรุน พบว่า ถ่านกะลามะพร้าวเมื่อเผาแล้วมีเพียงรูพรุนขนาดใหญ่ แต่เมื่อเผากระตุ้นแล้วจะเกิดรูพรุนทั้งที่มีขนาดใหญ่ และขนาดเล็กทั่วถ่านกัมมันต์ (รูปที่ 4.4ก และ4.4ข) ส่วนของถ่านเมล็ดมะขามนั้น เมื่อเผาแล้วพบว่าลักษณะของรูพรุนยังไม่คงตัว แต่เมื่อผ่านการกระตุ้นแล้วลักษณะของรูพรุนมีความคงตัวมากยิ่งขึ้น (รูปที่ 4.4ค และ4.4ง)

จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่า จากการเปรียบเทียบลักษณะทางกายภาพและค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านกะลามะพร้าว ถ่านเมล็ดมะขาม และถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 ซึ่งเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายตามท้องตลาดทั่วไป พบว่า ถ่าน Filtrasorb 300 มีคุณภาพดีกว่า เนื่องจาก วัตถุดิบ และวิธีการกระตุ้นที่ต่างกัน เช่น การใช้ไอน้ำหรือก๊าซไนโตรเจนเป็นตัวกระตุ้น รวมทั้งการใช้กรดล้างตัวกระตุ้นแทนน้ำในวิธีการกระตุ้นทางเคมี ซึ่งทำให้ปริมาณเถ้าลดลง ซึ่งส่งผลให้มีพื้นที่ผิวและค่าไอโอดีนนัมเบอร์เพิ่มสูงขึ้น ทำให้มีความสามารถในการดูดติดผิวดีขึ้นด้วย

4.2 การศึกษาความสามารถในการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าว และเมล็ดมะขาม

ขั้นตอนนี้เป็นการศึกษาความสามารถในการดูดติดผิวแคดเมียม และสังกะสี จากน้ำเสียสังเคราะห์ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากกะลามะพร้าว และเมล็ดมะขามที่กระตุ้นด้วยสารกระตุ้นเกลือแกง โดยศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิวคือ พีเอช เวลาสัมผัส และทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช (Freundlich isotherm) โดยทำการทดลองแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch process)

4.2.1 ผลของพีเอชต่อการดูดติดผิว

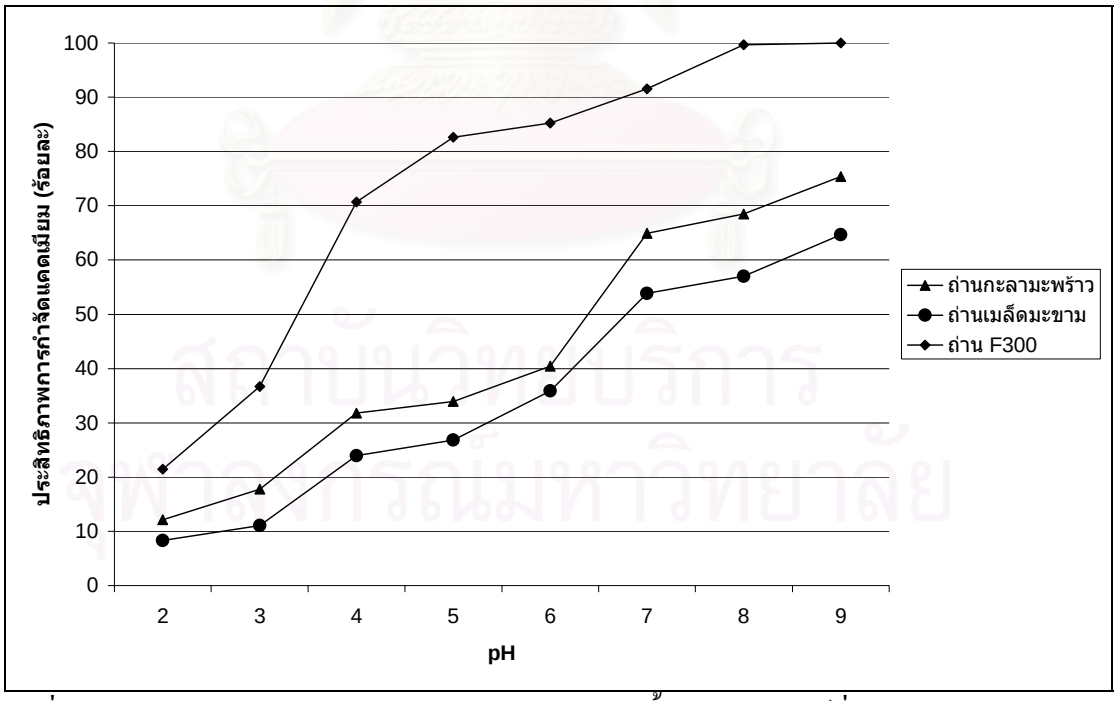
นำน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตรของแคดเมียม และสังกะสี ปรับค่าพีเอชให้ได้ 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 และ 9 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เติมผงถ่านกัมมันต์ปริมาณ 0.2 กรัม เขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 120 นาที ทิ้งให้ถ่านจมตัว จากนั้นนำไปกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 42 เพื่อแยกถ่านออกและนำน้ำไปวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียม และสังกะสี ได้พีเอชที่เหมาะสม จากผลการทดลอง สามารถแสดงผลการทดลองได้ดังตารางที่ 4.6 ถึง 4.9 และรูปที่ 4.5 ถึง 4.7

ตารางที่ 4.6 การละลาย และการตกตะกอนของแคดเมียมที่พีเอชต่างๆ (ความเข้มข้นแคดเมียมเริ่มต้น เท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร)

พีเอช	ปริมาณแคดเมียมที่เหลือ (มก./ล.)				การละลาย (%)	การตกตะกอน (%)
	1	2	3	เฉลี่ย		
2	8.783	8.936	8.842	8.85	88.54	11.46
3	8.848	8.625	8.739	8.74	87.37	12.63
4	7.483	7.796	7.822	7.70	77.00	23.00
5	7.622	7.458	7.524	7.53	75.35	24.65
6	6.873	6.985	6.819	6.89	68.92	31.08
7	6.791	6.743	6.947	6.83	68.27	31.73
8	4.658	4.892	4.536	4.70	46.95	53.05
9	3.643	3.457	3.239	3.45	34.46	65.54

ตารางที่ 4.7 ประสิทธิภาพการดูดติดผิวและการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ พีเอช ต่างๆ ของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว เมล็ดมะขาม และถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300

pH	ถ่านกะลามะพร้าว			ถ่านเมล็ดมะขาม			ถ่าน Filtrasorb 300		
	pH หลังเขย่า	แคดเมียมที่เหลือ (มก./ล.)	%removal	pH หลังเขย่า	แคดเมียมที่เหลือ (มก./ล.)	%removal	pH หลังเขย่า	แคดเมียมที่เหลือ (มก./ล.)	%removal
2	2.14	8.78	12.17	2.55	9.17	8.33	2.16	7.85	21.47
3	3.26	8.22	17.78	3.33	8.89	11.08	5.54	6.33	36.69
4	4.54	6.82	31.79	5.86	7.60	23.97	7.32	2.93	70.67
5	5.57	6.60	33.96	6.43	7.32	26.81	7.47	1.74	82.64
6	6.72	5.96	40.43	7.43	6.41	35.89	7.53	1.48	85.24
7	7.23	3.51	64.90	7.67	4.61	53.87	7.31	0.84	91.57
8	8.56	3.15	68.50	8.85	4.30	56.99	8.89	0.04	99.64
9	9.45	2.46	75.39	9.85	3.53	64.66	9.88	0.00	100



รูปที่ 4.5 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ พีเอช ต่างๆ ของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว เมล็ดมะขาม และถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300

จากตารางที่ 4.6 ถึง 4.7 และรูปที่ 4.5 การทดลองหาพีเอชที่เหมาะสม พบว่าประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ของถ่านแต่ละชนิดที่ พีเอช ต่างๆ กัน โดยสำหรับถ่านกะลามะพร้าว มีประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชเพิ่มขึ้น ที่พีเอช 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 และ 9 มีค่าร้อยละ 12.17, 17.78, 31.79, 33.96, 40.43, 64.90, 68.50, 75.39 และ 75.39 ตามลำดับ ส่วนถ่าน เมล็ดมะขามมีประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมมีค่าร้อยละ 8.33, 11.08, 23.97, 26.81, 35.89, 53.87, 56.99 และ 64.66 ตามลำดับ และสำหรับถ่าน Filtrasorb 300 มีประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมมีค่าร้อยละ 21.47, 36.69, 70.67, 82.64, 85.24, 91.57, 99.64 และ 100 ตามลำดับ ซึ่งจะพบว่าถ่าน Filtrasorb 300 มีความสามารถในการกำจัดแคดเมียมได้ดีกว่าถ่านจากกะลามะพร้าว และ เมล็ดมะขาม

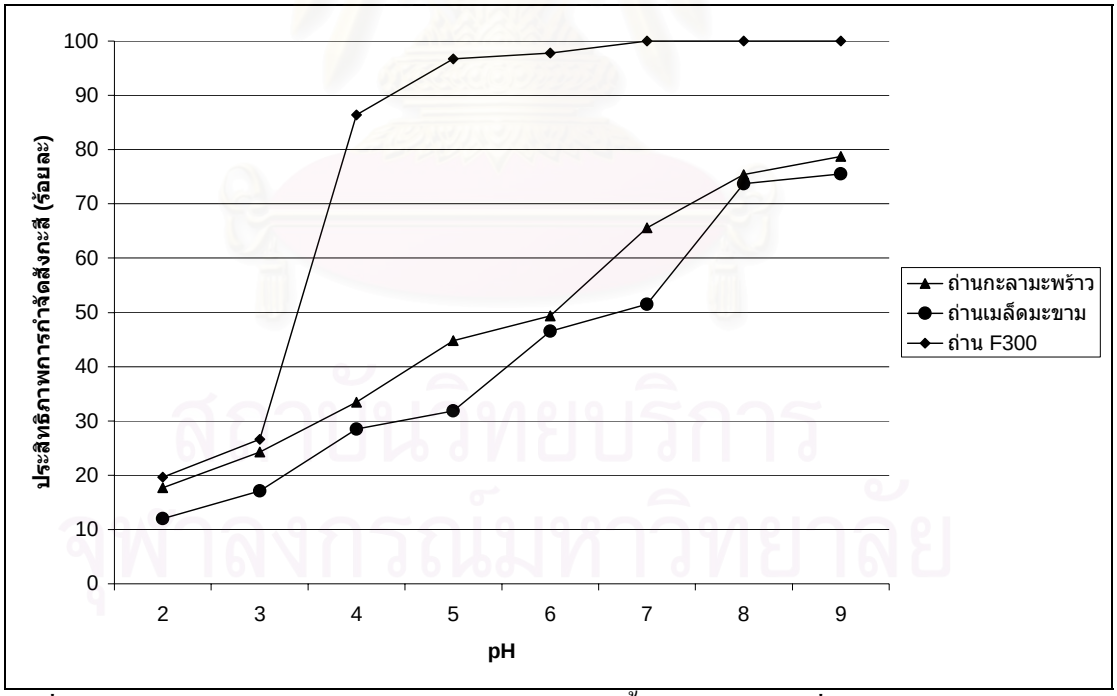
ตารางที่ 4.8 การละลาย และการตกตะกอนของสังกะสีที่พีเอชต่างๆ (ความเข้มข้นสังกะสีเริ่มต้นเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร)

พีเอช	**ปริมาณสังกะสีที่เหลือ (มก./ล.)**				**การละลาย**	**การตกตะกอน**
	1	**2**	**3**	**เฉลี่ย**	**(%)**	**(%)**
2	7.745	7.872	7.692	7.77	77.70	22.30
3	7.736	7.542	7.427	7.57	75.68	24.32
4	7.211	6.974	7.443	7.21	72.09	27.91
5	6.866	6.949	6.725	6.85	68.47	31.53
6	6.544	6.787	6.894	6.74	67.42	32.58
7	6.438	6.293	6.624	6.45	64.52	35.48
8	3.735	3.472	3.614	3.61	36.07	63.93
9	2.433	2.648	2.356	2.48	24.79	75.21

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

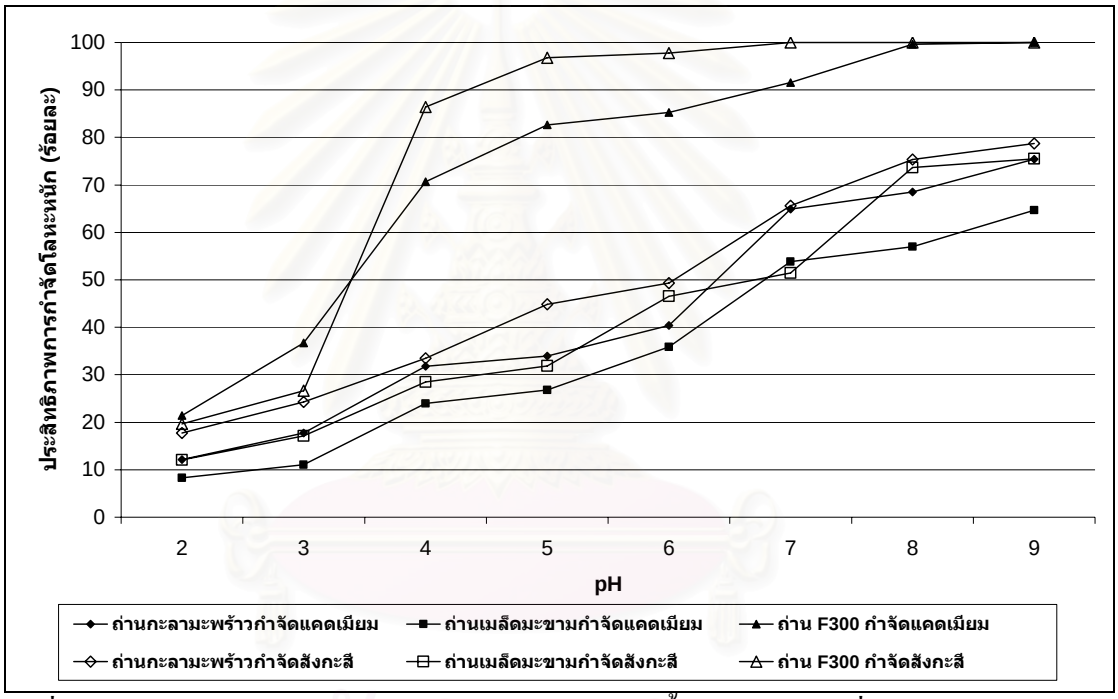
ตารางที่ 4.9 ประสิทธิภาพการดูดติดผิวและการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ พีเอช ต่างๆ ของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว เมล็ดมะขาม และถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300

pH	ถ่านกะลามะพร้าว			ถ่านเมล็ดมะขาม			ถ่าน Filtrasorb 300		
	pH หลังเขย่า	สังกะสีที่เหลือ (มก./ล.)	%removal	pH หลังเขย่า	สังกะสีที่เหลือ (มก./ล.)	%removal	pH หลังเขย่า	สังกะสีที่เหลือ (มก./ล.)	%removal
2	2.34	8.23	17.71	2.64	8.80	12.04	2.31	8.04	19.64
3	3.56	7.57	24.28	3.74	8.29	17.11	4.43	7.34	26.63
4	4.53	6.65	33.46	4.39	7.15	28.50	5.51	1.36	86.38
5	5.64	5.52	44.83	5.34	6.81	31.88	6.89	0.33	96.74
6	6.34	5.07	49.35	6.82	5.35	46.53	7.42	0.22	97.81
7	7.43	3.44	65.61	7.51	4.85	51.49	7.64	0.00	100
8	8.47	2.46	75.38	8.93	2.63	73.68	8.24	0.00	100
9	9.63	2.12	78.76	9.27	2.45	75.50	9.31	0.00	100



รูปที่ 4.6 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ พีเอช ต่างๆ ของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว เมล็ดมะขาม และถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300

จากตารางที่ 4.8 ถึง 4.9 และรูปที่ 4.6 การทดลองหา พีเอช ที่เหมาะสม พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ของถ่านแต่ละชนิดที่ พีเอช ต่างๆ กัน โดยสำหรับถ่านกะลามะพร้าว มีประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีเพิ่มขึ้น เมื่อ พีเอช เพิ่มขึ้น ที่ พีเอช 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 และ 9 มีค่าร้อยละ 17.71, 24.28, 33.46, 44.83, 49.35, 65.61, 75.38และ 78.76 ตามลำดับ ส่วนถ่าน เมล็ดมะขามมีประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีมีค่าร้อยละ 12.04, 17.11, 28.50, 31.88, 46.53, 51.49, 73.68, และ 75.50 ตามลำดับ และสำหรับถ่าน Filtrasorb 300 มีประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีมีค่าร้อยละ 19.64, 26.63, 86.38, 96.74, 97.81, 100, 100, และ 100 ตามลำดับ ซึ่งจะพบว่าถ่าน Filtrasorb 300 มีความสามารถในการกำจัดแคดเมียมได้ดีกว่า ถ่านจากกะลามะพร้าว และเมล็ดมะขาม เช่นเดียวกับประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียม



รูปที่ 4.7 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดโลหะหนักในน้ำเสียสังเคราะห์ที่ พีเอช ต่างๆ ของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว เมล็ดมะขาม และถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300

จากรูปที่ 4.7 แสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียม และสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ ของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว เมล็ดมะขาม และถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 ที่ พีเอช ต่างๆ พบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียม และสังกะสีของถ่านกัมมันต์ทั้งสามประเภทจะเพิ่มขึ้น เมื่อปรับ พีเอช ให้สูงขึ้น โดยถ่านกะลามะพร้าวมีประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมสูงสุดเท่ากับ ร้อยละ 75.39 ที่ พีเอช 9 และมีประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีสูงสุด เท่ากับ ร้อยละ 78.76 ที่ พีเอช 9 ส่วนถ่านเมล็ดมะขามมีประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมสูงสุด เท่ากับ ร้อยละ 64.66 ที่ พีเอช 9 และมีประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีสูงสุด เท่ากับ ร้อยละ 75.50 ที่ พีเอช 9 และถ่าน

Filtrasorb 300 มีประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมสูงสุด เท่ากับ 100 ที่พีเอช 9 และมีประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีสูงสุดเท่ากับ 100 ที่พีเอช 7 นอกจากนี้ ทั้งถ่านกะลามะพร้าว เมล็ดมะขาม และถ่าน Filtrasorb 300 มีประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีได้ดีกว่าแคดเมียม ที่ พีเอชค่าเดียวกัน จากการทดลองพบว่า ถ่านกัมมันต์ประเภทที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดทั้งแคดเมียมและสังกะสีสูงสุด คือ ถ่าน Filtrasorb 300 รองลงมาคือ กะลามะพร้าว และเมล็ดมะขาม ตามลำดับ ซึ่งเป็นผลมาจากคุณสมบัติของพื้นที่ผิว รูพรุน และค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านที่ได้ทดลองในเบื้องต้น

เมื่อพิจารณาจากการตกตะกอนของแคดเมียม และสังกะสี พบว่าแคดเมียม และสังกะสีจะเริ่มตกตะกอนที่ พีเอช ประมาณ 7 ถึง 8 และจะตกตะกอนมากที่สุดที่ พีเอช ประมาณ 9 จะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียม และสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์จึงไม่ใช่การดูดติดผิวเพียงอย่างเดียว แต่ส่วนหนึ่งเป็นเพราะการตกตะกอนด้วย อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาร้อยละการตกตะกอนของแคดเมียม และสังกะสีที่ พีเอช ต่างๆ ซึ่งการตกตะกอนแคดเมียมสูงสุด เท่ากับร้อยละ 65.54 ที่ พีเอช 9 และการตกตะกอนสังกะสีสูงสุด เท่ากับ ร้อยละ 75.21 ที่ พีเอช 9 ซึ่งใกล้เคียงกับช่วงของ พีเอช ที่มีการตกตะกอนมากที่สุด ของแคดเมียม และสังกะสี แต่ก็ยังเหลือปริมาณแคดเมียม และสังกะสี อยู่ แสดงว่าประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียม และสังกะสี ที่ได้ส่วนใหญ่ยังคงเป็นการดูดติดผิวของถ่านอยู่

การใช้ถ่านกัมมันต์ในการกำจัดแคดเมียม และสังกะสีนั้น เนื่องจากมีการตกตะกอนร่วมด้วยแล้ว เมื่อนำร้อยละการกำจัดทั้งหมด มาลบกับกับค่าร้อยละการกำจัดโลหะหนักที่ได้จากการปรับพีเอชนั้น พบว่าจากการคำนวณที่พีเอชเท่ากับ 7 จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมมากที่สุด โดยของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวคือ 33.17 ถ่านเมล็ดมะขาม เท่ากับ 22.14 และถ่าน Filtrasorb 300 เท่ากับ59.84 และประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีมากที่สุด โดยของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวคือ 30.13 ถ่านเมล็ดมะขาม เท่ากับ 16.01 และถ่าน Filtrasorb 300 เท่ากับ 64.52 ดังนั้นจึงเลือกพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 7 เพื่อนำไปใช้ในการทดลองขั้นต่อไป และได้ลดปริมาณถ่านลงเหลือ 0.1 กรัม เพื่อไม่ให้พีเอชของน้ำเสียหลังเขย่าลดลงจนถึงช่วงพีเอชของการตกตะกอน เนื่องจากถ่านมีความเป็นด่างสูง

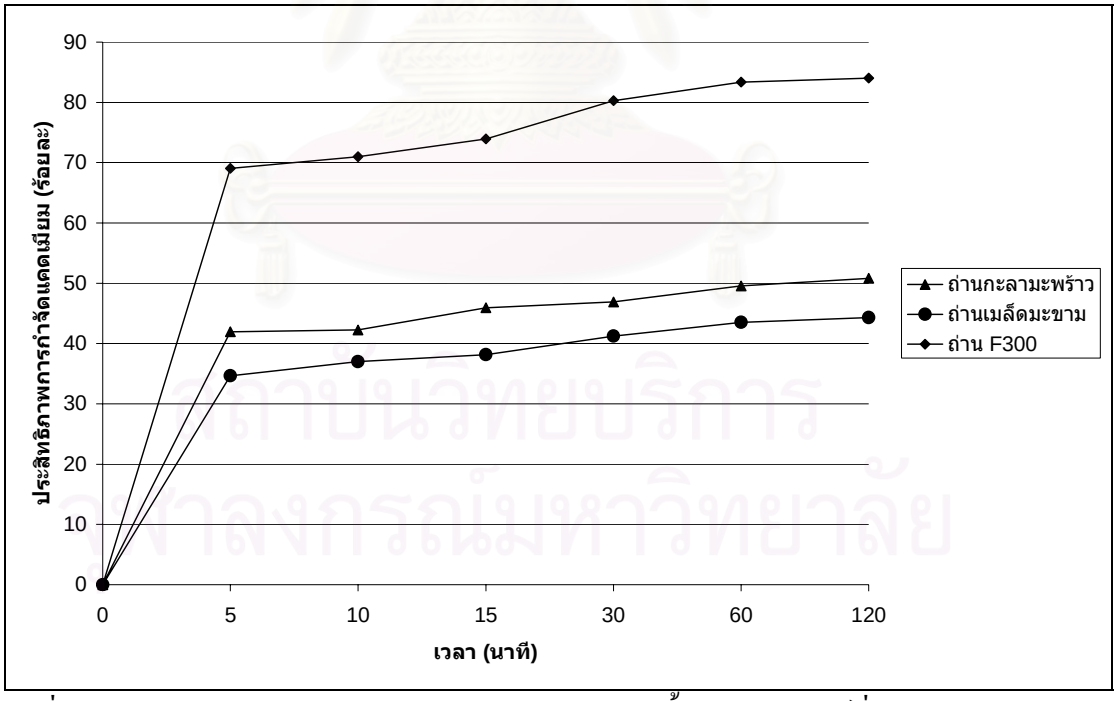
4.2.2 ผลของเวลาสัมผัสต่อการดูดติดผิว

นำน้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปรับค่าพีเอชให้ได้เท่ากับค่าที่ต้องการคือ พีเอช 7 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร เติมผงถ่านกัมมันต์ปริมาณ 0.1 กรัม เขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 10 15 30 60 และ120 นาที ทิ้งให้ถ่านจมตัว จากนั้นนำไปกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 42 เพื่อแยกถ่านออกและนำน้ำไปวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียม และสังกะสี ได้

พีเอชที่เหมาะสม จากผลการทดลอง สามารถแสดงผลการทดลองได้ดังตารางที่ 4.10 ถึง 4.11 และรูปที่ 4.8 ถึง 4.9

ตารางที่ 4.10 ปริมาณแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ หลังผ่านการดูดติดผิวด้วยถ่านกัมมันต์ที่เวลาสัมผัสต่างๆ

เวลาสัมผัส (นาที)	ถ่านกะลามะพร้าว			ถ่านเมล็ดมะขาม			ถ่าน Filtrasorb 300		
	pH หลังเขย่า	แคดเมียมที่เหลือ (มก./ล.)	%removal	pH หลังเขย่า	แคดเมียมที่เหลือ (มก./ล.)	%removal	pH หลังเขย่า	แคดเมียมที่เหลือ (มก./ล.)	%removal
5	7.05	5.81	41.93	7.15	6.53	34.66	7.03	3.10	69.04
10	7.18	5.77	42.25	7.29	6.30	37.02	7.12	2.90	70.99
15	7.24	5.41	45.94	7.32	6.19	38.13	7.17	2.61	73.95
30	7.32	5.31	46.89	7.51	5.88	41.20	7.24	1.97	80.31
60	7.46	5.04	49.58	7.65	5.65	43.51	7.31	1.66	83.36
120	7.48	4.92	50.82	7.72	5.57	44.33	7.63	1.60	84.05



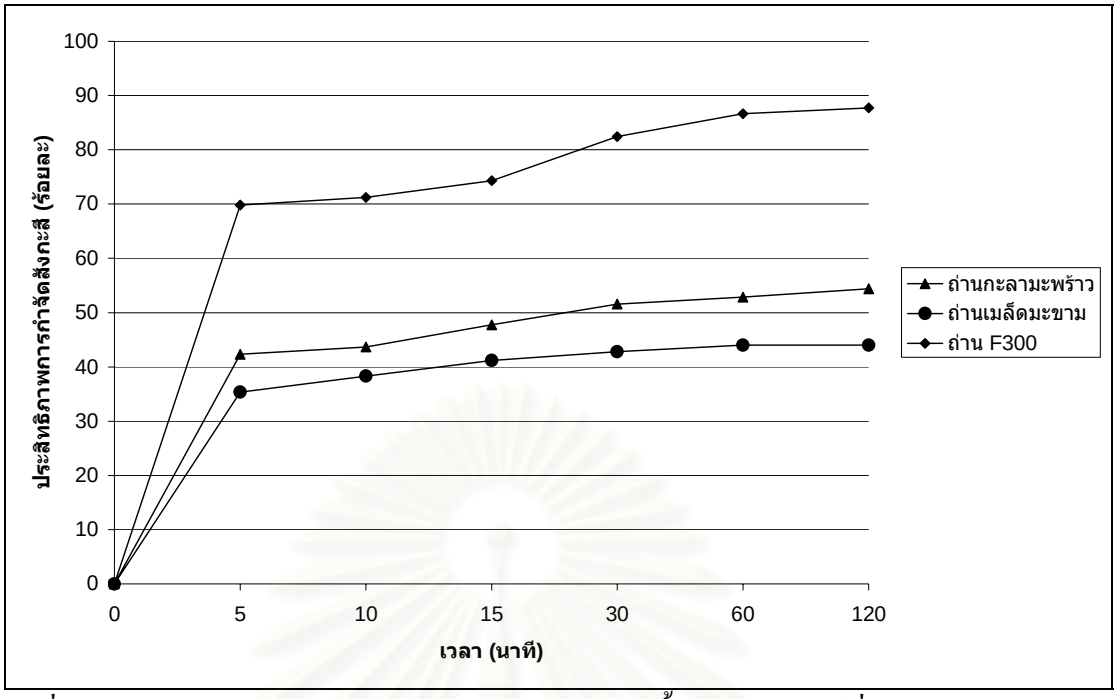
รูปที่ 4.8 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เวลาสัมผัสต่างๆ ของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว เมล็ดมะขาม และถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300

จากการศึกษาเวลาสัมผัสที่มีผลต่อการดูดติดผิวของแคดเมียมของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว เมล็ดมะขาม และถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 ในน้ำเสียสังเคราะห์ดังตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.8 พบว่าถ่านทั้ง 3 ชนิดมีอัตราการดูดติดผิวอย่างรวดเร็วเมื่อเวลาสัมผัส 5 นาที หลังจากนั้นอัตราการกำจัดแคดเมียมมีแนวโน้มที่จะเริ่มคงที่ขึ้นเรื่อยๆ โดยถ่านกัมมันต์กะลามะพร้าวมีการกำจัดแคดเมียมสูงสุด เท่ากับร้อยละ 50.82 ที่ระยะเวลาสัมผัส 120 นาที ส่วนของถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามมีการกำจัดแคดเมียมสูงสุด เท่ากับร้อยละ 44.33 ที่ระยะเวลาสัมผัส 120 นาที และถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 มีการกำจัดแคดเมียมสูงสุด เท่ากับร้อยละ 84.05 ซึ่งถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 มีประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียมสูงสุด รองลงมาคือถ่านกัมมันต์กะลามะพร้าว และถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม ตามลำดับ แล้วจะเห็นได้ว่าพีเอชจะสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาสัมผัสนานขึ้น

ตารางที่ 4.11 ปริมาณสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ หลังผ่านการดูดติดผิวด้วยถ่านกัมมันต์ที่เวลาสัมผัสต่างๆ

เวลาสัมผัส (นาที)	ถ่านกะลามะพร้าว			ถ่านเมล็ดมะขาม			ถ่าน Filtrasorb 300		
	pH หลังเขย่า	สังกะสีที่เหลือ (มก./ล.)	%removal	pH หลังเขย่า	สังกะสีที่เหลือ (มก./ล.)	%removal	pH หลังเขย่า	สังกะสีที่เหลือ (มก./ล.)	%removal
5	7.19	5.77	42.30	7.21	6.47	35.34	7.07	3.02	69.79
10	7.24	5.64	43.63	7.27	6.17	38.27	7.15	2.88	71.24
15	7.27	5.23	47.73	7.35	5.88	41.16	7.24	2.57	74.32
30	7.36	4.84	51.56	7.56	5.72	42.76	7.33	1.76	82.42
60	7.46	4.72	52.83	7.61	5.60	43.98	7.47	1.34	86.64
120	7.57	4.29	54.40	7.69	5.23	44.03	7.59	1.23	87.71

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.9 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ที่เวลาสัมผัสต่างๆ ของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว เมล็ดมะขาม และถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300

จากการศึกษาเวลาสัมผัสที่มีผลต่อการดูดติดผิวของสังกะสีของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว เมล็ดมะขาม และถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 ในน้ำเสียสังเคราะห์ดังตารางที่ 4.10 และรูปที่ 4.9 พบว่าถ่านทั้ง 3 ชนิดมีอัตราการดูดติดผิวอย่างรวดเร็วเมื่อเวลาสัมผัส 5 นาที หลังจากนั้นอัตราการกำจัดสังกะสี เพิ่มขึ้นเล็กน้อยแล้วมีแนวโน้มที่จะเริ่มคงที่ขึ้นเรื่อยๆ โดยถ่านกัมมันต์กะลามะพร้าวมีการกำจัดสังกะสีสูงสุด เท่ากับร้อยละ 54.40 ที่ระยะเวลาสัมผัส 120 นาที ส่วนของถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามมีการกำจัดสังกะสีสูงสุด เท่ากับร้อยละ 44.03 ที่ระยะเวลาสัมผัส 120 นาที และถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 มีการกำจัดสังกะสีสูงสุด เท่ากับร้อยละ 87.71 ซึ่งถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 มีประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีสูงสุด รองลงมาคือถ่านกัมมันต์กะลามะพร้าว และถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม ตามลำดับ แล้วจะเห็นได้ว่าพีเอชจะสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาสัมผัสนานขึ้นเช่นเดียวกับการกำจัดแคดเมียม ซึ่งจากการทดลอง พบว่าเวลา 120 นาทีเพียงพอสำหรับการเข้าสู่สภาวะสมดุลการดูดติดผิว ในการศึกษาการดูดติดผิวแคดเมียม และสังกะสีของถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิด

4.2.3 ผลของปริมาณถ่านกัมมันต์

ในการทดลองนี้ เป็นการศึกษาอิทธิพลของปริมาณถ่านกัมมันต์ โดยนำน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีความเข้มข้นของแคดเมียม และสังกะสี 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และพีเอชเท่ากับ 7 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 42 เพื่อแยกถ่านออกและนำน้ำไปวิเคราะห์หาปริมาณแคดเมียม และสังกะสี แล้วนำค่าที่ได้ไปเขียนกราฟไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช (ภาคผนวก ค) ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.12 ถึง 4.17 และรูปที่ 4.9 ถึง 4.14

ในการทดลองหาไอโซเทอมการดูดติดผิว ตามมาตรฐาน ASTM D3860 – 89a (Standard practice for determination of adsorptive capacity of activated carbon by aqueous phase isotherm techniqe) ได้กำหนดน้ำหนักของถ่านในการทดลองเป็น 10 ค่า น้ำหนัก คือ 0.00, 0.01, 0.02, 0.04, 0.10, 0.20, 0.40, 1.00, 2.00 และ 4.00 กรัม แต่เมื่อทำการทดลองพบว่า จะใช้น้ำหนักในการทดลองได้ตั้งแต่ 0.00 ถึง 0.20 กรัม เท่านั้น ถ้าหากน้ำหนักมากกว่านี้จะไม่สามารถตรวจวัดแคดเมียม และสังกะสีที่เหลือในน้ำเสียได้ ทั้งนี้เกิดจากการดูดติดผิวร่วมกับการตกตะกอน ดังนั้นจึงทำการลดปริมาณถ่านที่ใช้ในการทดลองเหลือเพียง 6 ค่า คือ 0.00, 0.01, 0.02, 0.04, 0.10 และ 0.20 กรัม

4.2.3.1 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิชของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว

จากการศึกษาอิทธิพลของปริมาณถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวต่อการดูดติดผิวของแคดเมียมและสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ ได้ผลดังตารางที่ 4.12 ถึง 4.13 และรูปที่ 4.10 ถึง 4.11

ตารางที่ 4.12 การทดสอบการดูดติดผิวแคดมียมของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว

น้ำหนักถ่าน (กรัม)	ความเข้มข้นของแคดเมียมที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)				C (mg)	X (mg)	X/m (mg/g)
	1	2	3	เฉลี่ย			
0	7.523	7.342	7.428	7.431	0.743	-	-
0.01	6.876	6.754	6.964	6.865	0.686	0.057	5.663
0.02	6.476	6.554	6.564	6.531	0.653	0.090	4.498
0.04	5.857	5.678	5.642	5.726	0.573	0.171	4.263
0.1	4.257	4.375	4.273	4.302	0.430	0.313	3.129
0.2	1.968	2.647	2.728	2.448	0.245	0.498	2.492

โดยที่ ค่า X = ปริมาณของสารปนเปื้อน (แคดเมียมหรือสังกะสี) ที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม) ซึ่งจะเท่ากับ $(C_i - C_f)V$

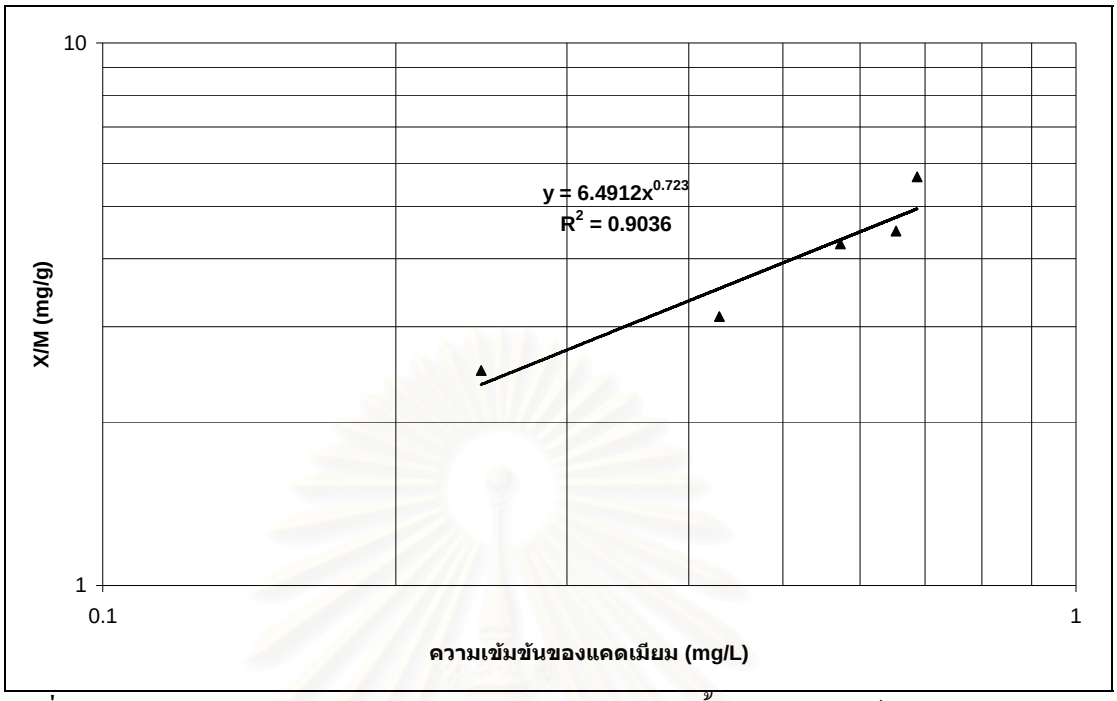
m = น้ำหนักของถ่านกัมมันต์ (กรัม)

C = ความเข้มข้นของสารปนเปื้อน (มิลลิกรัม)

C_i = ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในน้ำเข้า (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_f = ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในน้ำออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)

V = ปริมาตรของน้ำเสีย (ลิตร)



รูปที่ 4.10 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแคดเมียมแบบฟรุนดลิชในน้ำเสียสังเคราะห์ หลังการดูดติดผิวด้วยถ่านจากกะลามะพร้าว

จากรูปที่ 4.10 กราฟไอโซเทอมการดูดติดผิวแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์แบบฟรุนดลิชของถ่านกะลามะพร้าว สามารถคำนวณหาสมการได้เท่ากับ $y = 6.4912x^{0.723}$ และค่า $R^2 = 0.9036$

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.13 การทดสอบการดูดติดผิวสังกะสีของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว

น้ำหนักถ่าน (กรัม)	ความเข้มข้นของสังกะสีที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)				C (mg)	X (mg)	X/m (mg/g)
	1	2	3	เฉลี่ย			
0	7.345	7.543	7.651	7.513	0.751	-	-
0.01	6.643	6.752	6.843	6.746	0.675	0.077	7.670
0.02	6.321	6.128	6.491	6.313	0.631	0.120	5.998
0.04	5.324	5.432	5.726	5.494	0.549	0.202	5.048
0.1	3.364	3.526	4.625	3.838	0.384	0.367	3.675
0.2	1.428	1.356	1.727	1.504	0.150	0.601	3.005

โดยที่ ค่า X = ปริมาณของสารปนเปื้อน (แคดเมียมหรือสังกะสี) ที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม) ซึ่งจะเท่ากับ $(C_i - C_f)V$

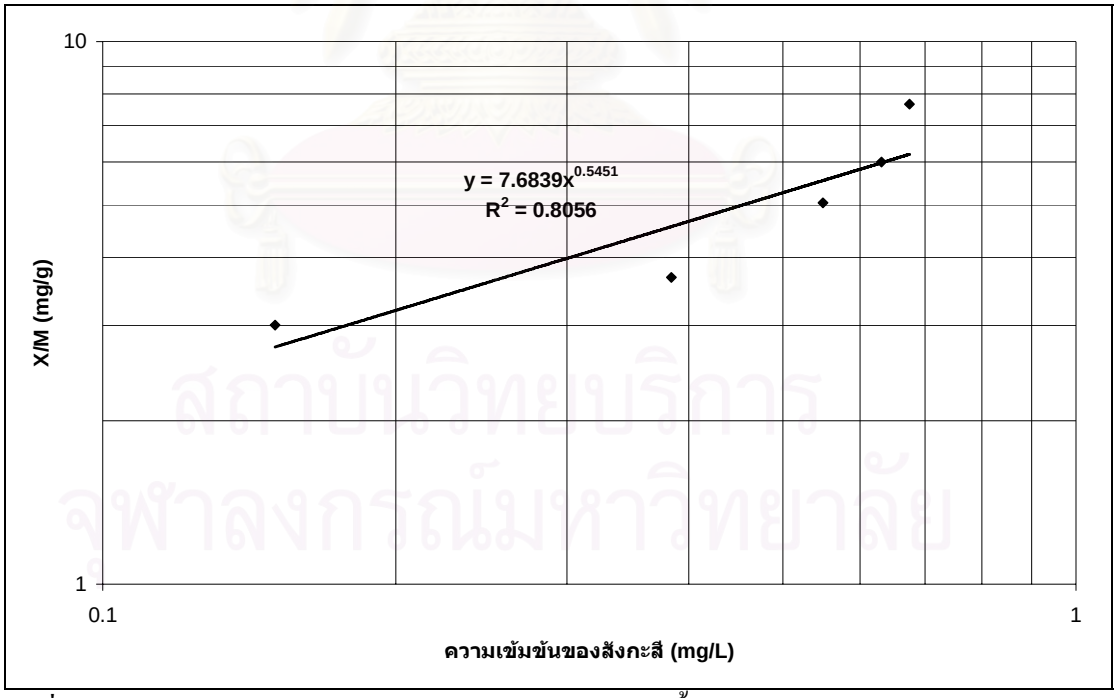
m = น้ำหนักของถ่านกัมมันต์ (กรัม)

C = ความเข้มข้นของสารปนเปื้อน (มิลลิกรัม)

C_i = ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในน้ำเข้า (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_f = ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในน้ำออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)

V = ปริมาตรของน้ำเสีย (ลิตร)



รูปที่ 4.11 ไอโซเทอมการดูดติดผิวสังกะสีแบบฟรุนดลิชในน้ำเสียสังเคราะห์ หลังการดูดติดผิวด้วยถ่านจากกะลามะพร้าว

จากรูปที่ 4.11 กราฟไอโซเทอมการดูดติดผิวสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์แบบฟรุนดลิชของถ่านกะลามะพร้าว สามารถคำนวณหาสมการได้เท่ากับ $y = 7.6839x^{0.5451}$ และค่า $R^2 = 0.8056$

4.2.3.2 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิชของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม

จากการศึกษาอิทธิพลของปริมาณถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามต่อการดูดติดผิวของแคดเมียมและสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ ได้ผลดังตารางที่ 4.14 ถึง 4.15 และรูปที่ 4.12 ถึง 4.13

ตารางที่ 4.14 การทดสอบการดูดติดผิวแคดเมียมของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม

น้ำหนักถ่าน (กรัม)	ความเข้มข้นของแคดเมียมที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)				C (mg)	X (mg)	X/m (mg/g)
	1	2	3	เฉลี่ย			
0	7.234	7.353	7.213	7.267	0.727	-	-
0.01	6.976	6.854	6.954	6.928	0.693	0.034	3.387
0.02	6.546	6.643	6.365	6.518	0.652	0.075	3.743
0.04	6.445	5.443	5.512	5.800	0.580	0.147	3.667
0.1	4.576	4.634	4.435	4.548	0.455	0.272	2.718
0.2	1.979	2.788	2.854	2.540	0.254	0.473	2.363

โดยที่ ค่า X = ปริมาณของสารปนเปื้อน (แคดเมียมหรือสังกะสี) ที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม) ซึ่งจะเท่ากับ $(C_i - C_f)V$

m = น้ำหนักของถ่านกัมมันต์ (กรัม)

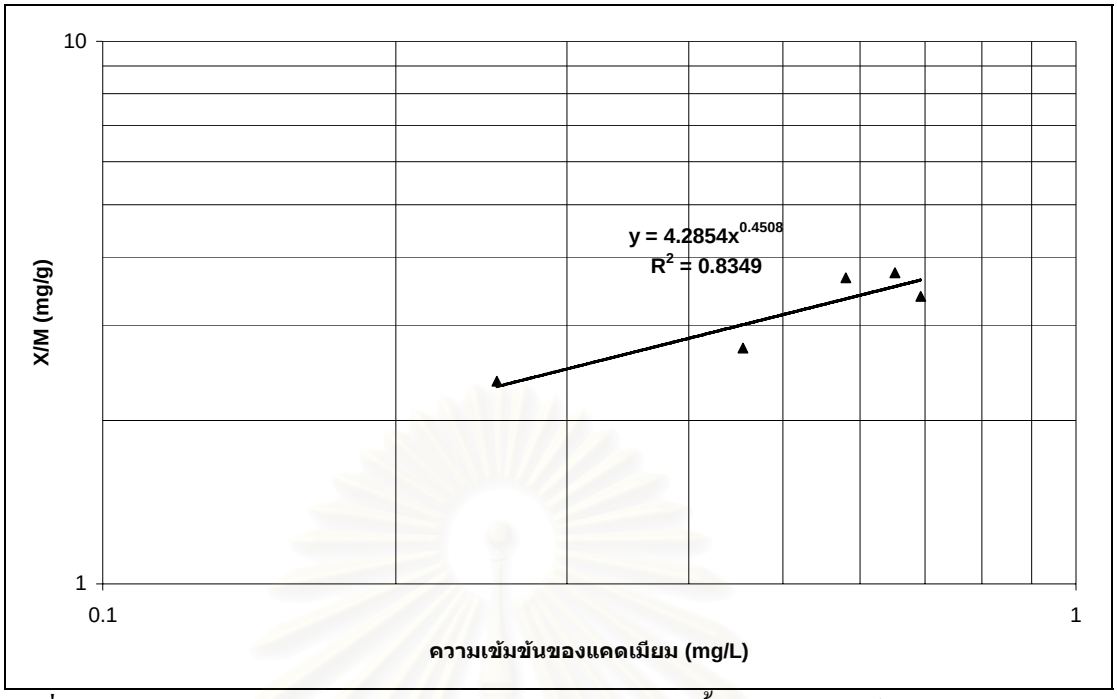
C = ความเข้มข้นของสารปนเปื้อน (มิลลิกรัม)

C_i = ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในน้ำเข้า (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_f = ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในน้ำออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)

V = ปริมาตรของน้ำเสีย (ลิตร)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.12 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแคดเมียมแบบฟรุนดลิชในน้ำเสียสังเคราะห์ หลังการดูดติดผิวด้วยถ่านจากเมล็ดมะขาม

จากรูปที่ 4.12 กราฟไอโซเทอมการดูดติดผิวแคดมียมในน้ำเสียสังเคราะห์แบบฟรุนดลิชของถ่านเมล็ดมะขาม สามารถคำนวณหาสมการได้เท่ากับ $y = 4.2854x^{0.4508}$ และค่า $R^2 = 0.8349$

ตารางที่ 4.15 การทดสอบการดูดติดผิวสังกะสีของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม

น้ำหนักถ่าน (กรัม)	ความเข้มข้นของสังกะสีที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)				C (mg)	X (mg)	X/m (mg/g)
	1	2	3	เฉลี่ย			
0	7.212	7.032	7.143	7.129	0.713	-	-
0.01	6.974	6.877	6.249	6.700	0.670	0.043	4.290
0.02	6.463	5.532	6.325	6.107	0.611	0.102	5.112
0.04	5.528	5.689	5.536	5.584	0.558	0.154	3.862
0.1	3.546	3.763	3.424	3.578	0.358	0.355	3.551
0.2	1.583	1.523	2.242	1.783	0.178	0.535	2.673

โดยที่ ค่า X = ปริมาณของสารปนเปื้อน (แคดเมียมหรือสังกะสี) ที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม) ซึ่งจะเท่ากับ $(C_i - C_f)V$

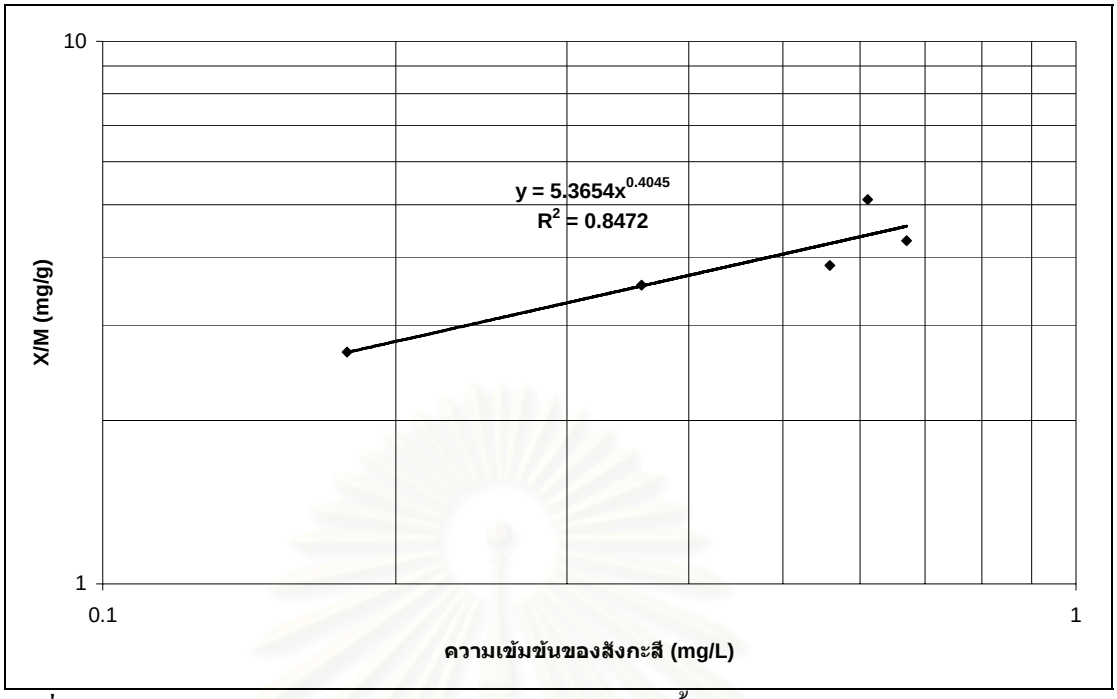
m = น้ำหนักของถ่านกัมมันต์ (กรัม)

C = ความเข้มข้นของสารปนเปื้อน (มิลลิกรัม)

C_i = ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในน้ำเข้า (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_f = ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในน้ำออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)

V = ปริมาตรของน้ำเสีย (ลิตร)



รูปที่ 4.13 ไอโซเทอมการดูดติดผิวสังกะสีแบบฟรุนดลิชในน้ำเสียสังเคราะห์ หลังการดูดติดผิวด้วยถ่านจากเมล็ดมะขาม

จากรูปที่ 4.13 กราฟไอโซเทอมการดูดติดผิวสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์แบบฟรุนดลิชของถ่านเมล็ดมะขาม สามารถคำนวณหาสมการได้เท่ากับ $y = 5.3654x^{0.4045}$ และค่า $R^2 = 0.8472$

4.2.3.3 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิชของถ่านกัมมันต์จาก Filtrasorb 300

จากการศึกษาอิทธิพลของปริมาณถ่านกัมมันต์จาก Filtrasorb 300 ต่อการดูดติดผิวของแคดเมียมและสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์ ได้ผลดังตารางที่ 4.16 ถึง 4.17 และรูปที่ 4.14 ถึง 4.15

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.16 การทดสอบการดูดติดผิวแคดเมียมของถ่านกัมมันต์จาก Filtrasorb 300

น้ำหนักถ่าน (กรัม)	ความเข้มข้นของแคดเมียมที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)				C (mg)	X (mg)	X/m (mg/g)
	1	2	3	เฉลี่ย			
0	7.543	7.324	7.312	7.393	0.739	-	-
0.01	6.732	6.543	6.453	6.576	0.658	0.082	8.170
0.02	5.875	5.758	5.974	5.869	0.587	0.152	7.620
0.04	4.560	4.428	4.632	4.540	0.454	0.285	7.133
0.1	3.452	3.211	3.498	3.387	0.339	0.401	4.006
0.2	1.762	1.527	1.672	1.654	0.165	0.574	2.870

โดยที่ ค่า X = ปริมาณของสารปนเปื้อน (แคดเมียมหรือสังกะสี) ที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม) ซึ่งจะเท่ากับ $(C_i - C_f)V$

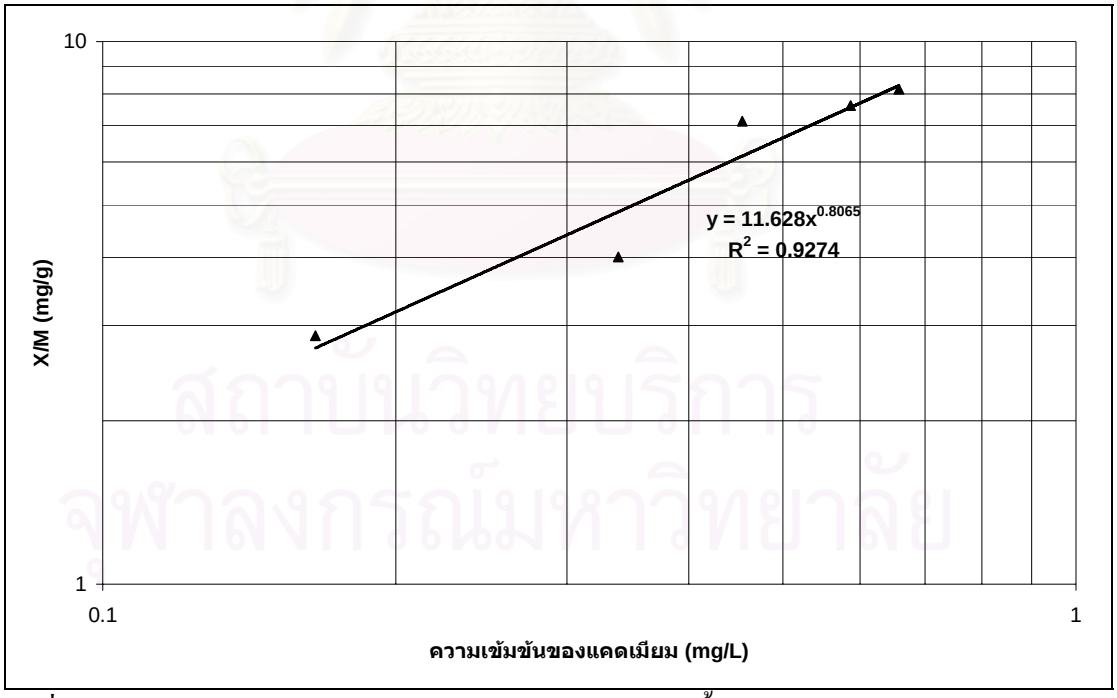
m = น้ำหนักของถ่านกัมมันต์ (กรัม)

C = ความเข้มข้นของสารปนเปื้อน (มิลลิกรัม)

C_i = ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในน้ำเข้า (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_f = ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในน้ำออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)

V = ปริมาตรของน้ำเสีย (ลิตร)



รูปที่ 4.14 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแคดเมียมแบบฟรุนดลิชในน้ำเสียสังเคราะห์ หลังการดูดติดผิวด้วยถ่านจาก Filtrasorb 300

จากรูปที่ 4.14 กราฟไอโซเทอมการดูดติดผิวแคดมียมในน้ำเสียสังเคราะห์แบบฟรุนดลิช ของถ่าน Filtrasorb 300 สามารถคำนวณหาสมการได้เท่ากับ $y = 11.628x^{0.8065}$ และค่า $R^2 = 0.9274$

ตารางที่ 4.17 การทดสอบการดูดติดผิวสังกะสีของถ่านกัมมันต์จาก Filtrasorb 300

น้ำหนักถ่าน (กรัม)	ความเข้มข้นของสังกะสีที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)				C (mg)	X (mg)	X/m (mg/g)
	1	2	3	เฉลี่ย			
0	7.465	7.536	7.531	7.511	0.751	-	-
0.01	6.243	6.353	6.432	6.343	0.634	0.117	11.680
0.02	5.456	5.564	5.647	5.556	0.556	0.196	9.775
0.04	4.532	4.234	4.526	4.431	0.443	0.308	7.700
0.1	2.438	2.313	2.436	2.396	0.240	0.512	5.115
0.2	1.734	1.647	1.836	1.739	0.174	0.577	2.886

โดยที่ ค่า X = ปริมาณของสารปนเปื้อน (แคดเมียมหรือสังกะสี) ที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม) ซึ่งจะเท่ากับ $(C_i - C_f)V$

m = น้ำหนักของถ่านกัมมันต์ (กรัม)

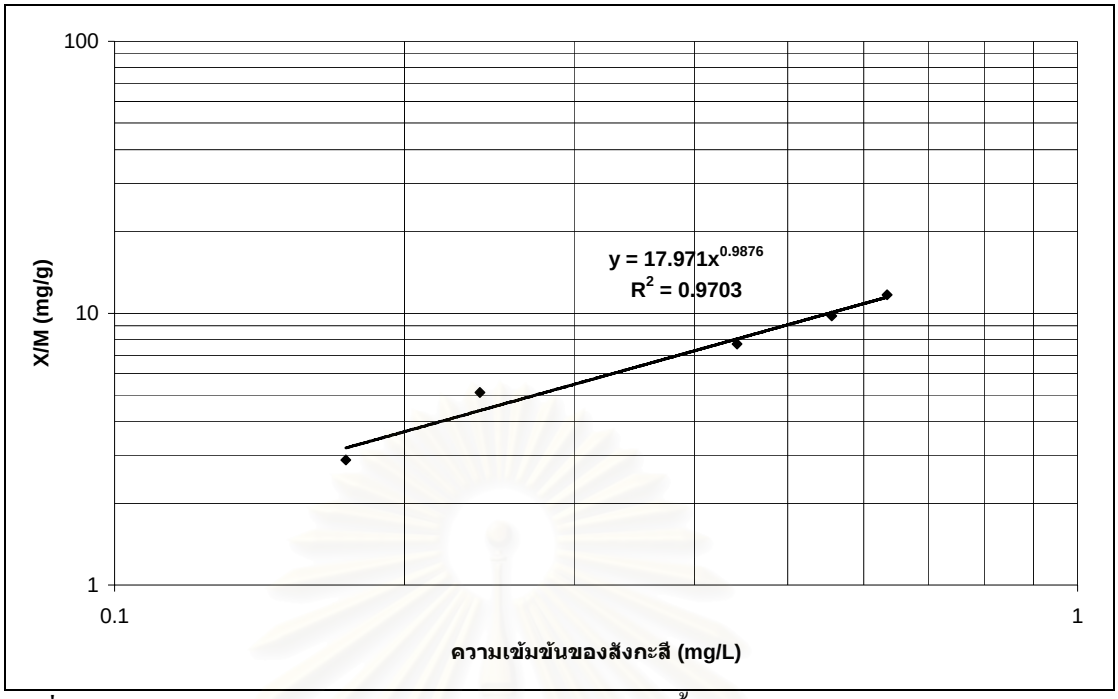
C = ความเข้มข้นของสารปนเปื้อน (มิลลิกรัม)

C_i = ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในน้ำเข้า (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_f = ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในน้ำออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)

V = ปริมาตรของน้ำเสีย (ลิตร)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.15 ไอโซเทอมการดูดติดผิวสังกะสีแบบฟรุนดลิชในน้ำเสียสังเคราะห์ หลังการดูดติดผิวด้วยถ่านจาก Filtrasorb 300

จากรูปที่ 4.15 กราฟไอโซเทอมการดูดติดผิวสังกะสีในน้ำเสียสังเคราะห์แบบฟรุนดลิชของถ่าน Filtrasorb 300 สามารถคำนวณหาสมการได้เท่ากับ $y = 17.971x^{0.9876}$ และค่า $R^2 = 0.9703$

เส้นไอโซเทอมการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว เมล็ดมะขาม และถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 จากรูปที่ 4.10 ถึง 4.15 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 ความสามารถในการดูดติดผิวแคดเมียม และสังกะสีของถ่านกัมมันต์แต่ละชนิดจะพิจารณาได้จากค่า X/M ซึ่งเป็นปริมาณของสารแคดเมียม และสังกะสีที่ถูกดูดติดผิวต่อน้ำหนักถ่านที่ใช้ 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 logC เท่ากับ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร จะได้ $a = \log K$ ดังนั้น $K = 10^a$ เมื่อนำค่า a และ b มาแทนในสมการจะได้ $K = 10^a$ และ $b = 1/n$ ซึ่งค่าดังกล่าวแสดงดังตารางที่ 4.18

ตารางที่ 4.18 ค่าคงที่ของถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว เมล็ดมะขาม และถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 จากสมการการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช

ถ่านกัมมันต์	แคดเมียม		สังกะสี	
	K (mg/g)	1/n	K (mg/g)	1/n
ถ่านกะลามะพร้าว	6.4912	0.723	7.6839	0.5451
ถ่านเมล็ดมะขาม	4.2854	0.4508	5.3654	0.4045
ถ่าน Filtrasorb 300	11.628	0.8065	17.971	0.9876

ถ่านกัมมันต์ที่มีค่า K สูงสุด คือ ถ่าน Filtrasorb 300 ซึ่งจะสูงกว่าถ่านกะลามะพร้าว และถ่านเมล็ดมะขาม ทั้งในการดูดติดผิวแคดเมียม และสังกะสี แสดงว่า ถ่านกัมมันต์ที่สามารถดูดติดผิวแคดเมียม และสังกะสีได้ดี คือ ถ่าน Filtrasorb 300 โดยมีค่า K ของการดูดติดผิวแคดเมียม เท่ากับ 11.628 มิลลิกรัมต่อกรัม และการดูดติดผิวสังกะสี เท่ากับ 17.971 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วนความสามารถดูดติดผิวแคดเมียม และสังกะสีที่รองลงมา คือ ถ่านกะลามะพร้าว โดยมีค่า K ของการดูดติดผิวแคดเมียม เท่ากับ 6.4912 มิลลิกรัมต่อกรัม และการดูดติดผิวสังกะสี เท่ากับ 7.6839 มิลลิกรัมต่อกรัม และถ่านที่มีความสามารถในการดูดติดผิวแคดเมียม และสังกะสีน้อยที่สุด คือ ถ่านเมล็ดมะขาม โดยมีค่า K ของการดูดติดผิวแคดเมียม เท่ากับ 4.2854 มิลลิกรัมต่อกรัม และการดูดติดผิวสังกะสี เท่ากับ 5.3654 มิลลิกรัมต่อกรัม

นอกจากนี้พบว่า ถ่าน Filtrasorb 300 จะมีค่า 1/n สูงในการดูดติดผิวแคดเมียม และสังกะสี แสดงว่า ค่าความเข้มข้นมีบทบาทต่อความสามารถในการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่าน Filtrasorb 300 นั่นคือ ถ้าสารที่ถูกดูดติดผิวมีความเข้มข้นสูง ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่าน Filtrasorb 300 มีแนวโน้มในการดูดติดผิวได้ดี

และจากการทดลองนี้ สอดคล้องกับผลการหาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ และการหาพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่ผ่านมา นั่นคือ ถ่าน Filtrasorb 300 เป็นถ่านที่มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์ และพื้นที่ผิวสูงสุด และตามด้วยถ่านจากกะลามะพร้าว และถ่านเมล็ดมะขามตามลำดับ ดังนั้นจึงมีความสามารถในการดูดติดแคดเมียม และสังกะสีได้ดีกว่า

จากการเปรียบเทียบค่าไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิชในการดูดติดผิวแคดเมียม และสังกะสีของถ่านจากกะลามะพร้าว และถ่านเมล็ดมะขาม พบว่าถ่านจากกะลามะพร้าวมีประสิทธิภาพสูงกว่าถ่านจากเมล็ดมะขามโดยพิจารณาจากค่าคงที่ที่คำนวณได้ และแนวโน้มของกราฟไอโซเทอมการดูดติด ซึ่งพบว่าเส้นกราฟของถ่านกะลามะพร้าวจะสูงกว่า ดังนั้นจึงเลือกถ่านกะลามะพร้าวเพื่อนำไปใช้ในการทดลองแบบต่อเนื่องต่อไป

4.3 การทดสอบประสิทธิภาพในการดูดติดผิวของโลหะหนักในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม โดยทำการทดลองแบบต่อเนื่องในคอลัมน์ที่บรรจุชั้นทราย และชั้นถ่านกัมมันต์

การทดลองในขั้นนี้เป็นการศึกษาความสามารถในการใช้งานของถ่านกัมมันต์ โดยเลือกถ่านกะลามะพร้าวมาใช้เป็นตัวดูดติดผิว โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่บดจนร่อนผ่านตะแกรงขนาด 8 เมช และค้างอยู่บนตะแกรงขนาด 30 เมช ซึ่งถ่านที่ได้จะมีขนาดระหว่าง 0.59 – 2.38 มิลลิเมตร บรรจุลงในถังดูดติดผิวแบบแท่ง (column test) ที่เป็นท่ออะครีลิคแบบใส ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.3 เซนติเมตร โดยให้ชั้นถ่านกัมมันต์สูง 90 เซนติเมตร แล้วบรรจุทราย (ขนาดระหว่าง 0.59 – 2.38 มิลลิเมตร) ลงในคอลัมน์โดยให้ชั้นทรายสูง 30 เซนติเมตร และมีการเจาะรูเพื่อเก็บตัวอย่างน้ำเสียระดับความลึกของชั้นทราย 30 เซนติเมตร และความลึกของชั้นถ่านกัมมันต์ที่ 30 (ความลึกของคอลัมน์ 60 เซนติเมตร), 60 (ความลึกของคอลัมน์ 90 เซนติเมตร) และ 90 (ความลึกของคอลัมน์ 120 เซนติเมตร) เซนติเมตร โดยน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ในแต่ละชั้นถ่านหนักประมาณ 90.51 กรัม

ทำการป้อนน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมแห่งหนึ่งที่มีความเข้มข้นของแคดเมียม และสังกะสี เท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยการปรับน้ำเสียจากซึ่งทำการเก็บมาวิเคราะห์ในเบื้องต้นมีความเข้มข้นของแคดเมียม เท่ากับ 0.014 มิลลิกรัมต่อกรัม และสังกะสี เท่ากับ 3.423 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ แล้วปรับให้เป็น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร พีเอชของน้ำเสียเท่ากับ 7 โดยมีทิศทางการไหลของน้ำจากด้านบนลงล่าง (down flow) อัตราการไหลของน้ำประมาณ 3 ลิตรต่อชั่วโมง ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทุกๆ 1 ลิตร ที่ความลึกของชั้นตัวกลางในการดูดติด (ทราย และถ่านกัมมันต์) ที่ 30, 60, 90 และ 120 เซนติเมตร เพื่อทำการวิเคราะห์ค่าพีเอช และปริมาณแคดเมียม และสังกะสีที่เหลืออยู่ หลังจากนั้นนำค่าที่ได้ไปสร้างเส้นโค้งเบรคทรูจ์ (Breakthrough curve) ระหว่างปริมาณแคดเมียม และสังกะสีที่เหลืออยู่ในน้ำเสีย กับค่า Bed Volume (BV) โดยการคำนวณ Bed volume ของถ่านกัมมันต์จะใช้สูตร

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

และปริมาตรของชั้นถ่านกัมมันต์สามารถคำนวณได้จากสูตร

$$\text{ปริมาตรของชั้นถ่านกัมมันต์ (ลิตร)} = \frac{\P r^2 xh}{1000}$$

เมื่อ r = รัศมีภายในของคอลัมน์ (เซนติเมตร)

h = ความสูงของชั้นถ่านในคอลัมน์ (เซนติเมตร)

ซึ่งค่าปริมาตรของชั้นถ่านที่ความสูงต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.19

ตารางที่ 4.19 ปริมาตรของชั้นถ่านกัมมันต์ที่ความสูง 30, 60 และ 90 เซนติเมตร

ชั้นความสูงของถ่านกัมมันต์ (เซนติเมตร)	**ปริมาตรของชั้นถ่านกัมมันต์ (ลิตร)**	**น้ำหนักของถ่านกัมมันต์ (กรัม)**
30	0.125	50.43
60	0.249	100.86
90	0.374	151.29

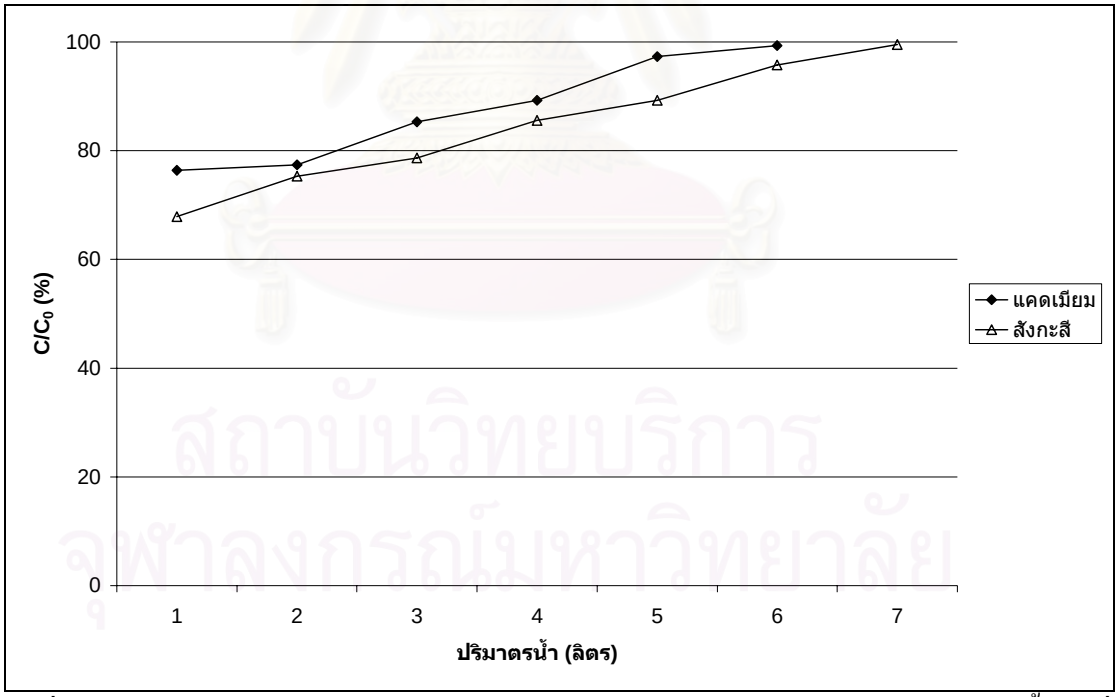
ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 4.20 ถึง 4.23 และนำค่าที่ได้จากตารางไปเขียนเส้นโค้งเบรคทรูจ์ได้ดังรูปที่ 4.16 ถึง 4.19

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.20 ปริมาณแคดเมียม และสังกะสีในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมหลังผ่านคอลัมน์ชั้นทรายสูง 30 เซนติเมตร ความเข้มข้นแคดเมียม และสังกะสีเริ่มต้น เท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร

ปริมาตรน้ำ (ลิตร)	ปริมาณโลหะหนักที่เหลือ (มก./ล.)			
	แคดเมียม	C/C_0 (%)	สังกะสี	C/C_0 (%)
1	7.64	76.4	6.79	67.9
2	7.74	77.4	7.53	75.3
3	8.53	85.3	7.87	78.7
4	8.93	89.3	8.56	85.6
5	9.73	97.3	8.93	89.3
6	9.93	99.3	9.58	95.8
7	-	-	9.95	99.5

โดยที่ C/C_0 = ความเข้มข้นของสารปนเปื้อน (แคดเมียมหรือสังกะสี) ในน้ำออก ต่อ ความเข้มข้นของสารปนเปื้อน (แคดเมียมหรือสังกะสี) ในน้ำเข้า

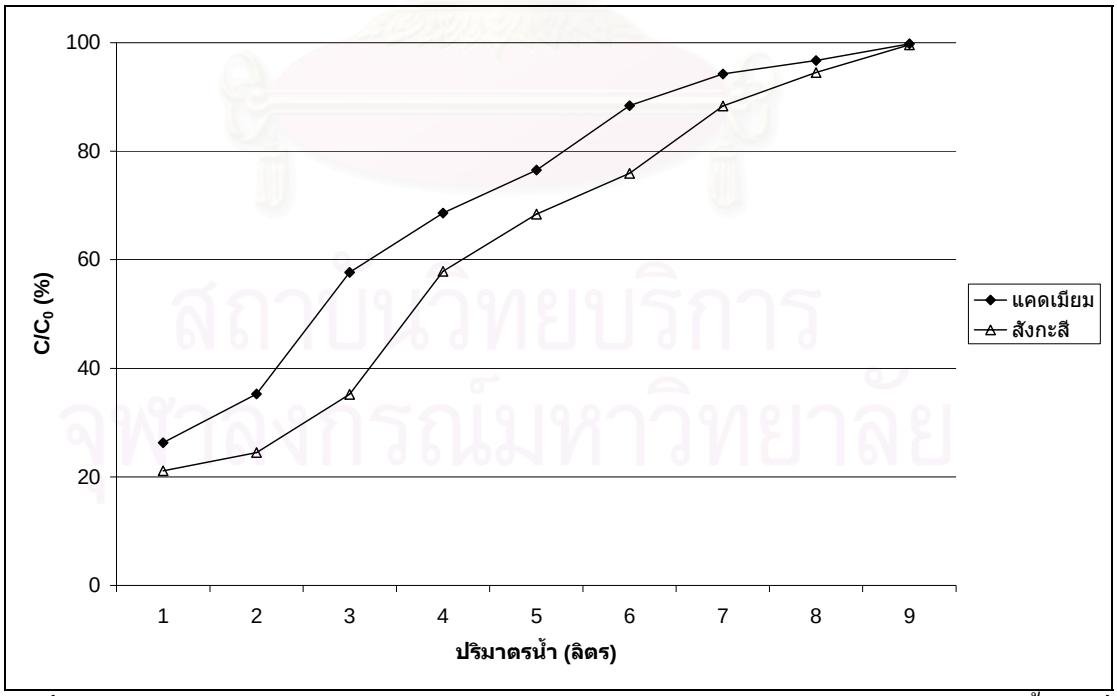


รูปที่ 4.16 เส้นโค้งเบรคทรูจ์ ระหว่างความเข้มข้นของแคดเมียม และสังกะสี กับปริมาตรน้ำเสียที่ความสูงชั้นทรายที่ 30 เซนติเมตร

ตารางที่ 4.21 ปริมาณแคดเมียม และสังกะสีในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมหลังผ่านคอลัมน์ชั้นถ่านกัมมันต์สูง 30 เซนติเมตร ความเข้มข้นแคดเมียม และสังกะสีเริ่มต้น เท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตรของชั้นถ่านกัมมันต์ เท่ากับ 0.125 ลิตร

ปริมาตรน้ำ (ลิตร)	Bed Volume (BV)	ปริมาณโลหะหนักที่เหลือ (มก./ล.)			
		แคดเมียม	C/C_0 (%)	สังกะสี	C/C_0 (%)
1	8.03	2.63	26.3	2.11	21.1
2	16.05	3.53	35.3	2.45	24.5
3	24.08	5.77	57.7	3.52	35.2
4	32.10	6.86	68.6	5.79	57.9
5	40.13	7.65	76.5	6.84	68.4
6	48.15	8.84	88.4	7.59	75.9
7	56.18	9.42	94.2	8.83	88.3
8	64.21	9.67	96.7	9.45	94.5
9	72.23	9.98	99.8	9.96	99.6

โดยที่ C/C_0 = ความเข้มข้นของสารปนเปื้อน (แคดเมียมหรือสังกะสี) ในน้ำออก ต่อ ความเข้มข้นของสารปนเปื้อน (แคดเมียมหรือสังกะสี) ในน้ำเข้า



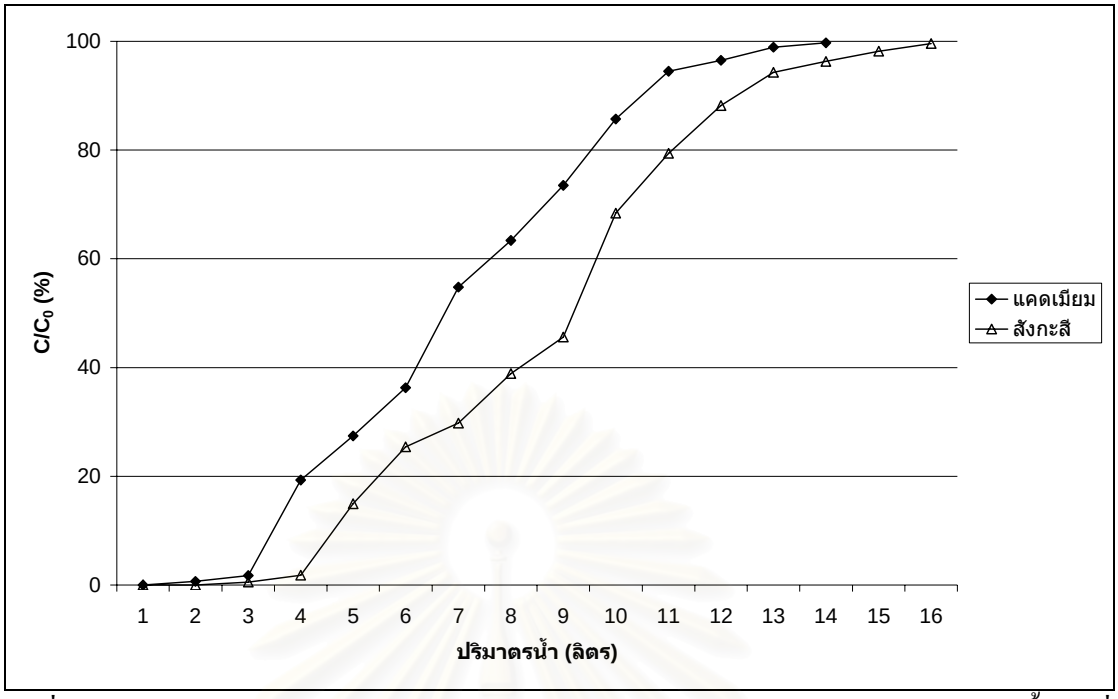
รูปที่ 4.17 เส้นโค้งเบรคทรูจ์ ระหว่างความเข้มข้นของแคดเมียม และสังกะสี กับปริมาตรน้ำเสียที่ความสูงชั้นถ่านกัมมันต์ที่ 30 เซนติเมตร

ตารางที่ 4.22 ปริมาณแคดเมียม และสังกะสีในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมหลังผ่านคอลัมน์ชั้นถ่านกัมมันต์สูง 60 เซนติเมตร ความเข้มข้นแคดเมียม และสังกะสีเริ่มต้น เท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตรของชั้นถ่านกัมมันต์ เท่ากับ 0.249 ลิตร

ปริมาตรน้ำ (ลิตร)	Bed Volume (BV)	ปริมาณโลหะหนักที่เหลือ (มก./ล.)			
		แคดเมียม	C/C_0 (%)	สังกะสี	C/C_0 (%)
1	4.01	0.00	0.0	0.00	0.0
2	8.03	0.06	0.6	0.00	0.0
3	12.04	0.17	1.7	0.06	0.6
4	16.05	1.93	19.3	0.18	1.8
5	20.06	2.74	27.4	1.50	15.0
6	24.08	3.63	36.3	2.54	25.4
7	28.09	5.48	54.8	2.98	29.8
8	32.10	6.34	63.4	3.89	38.9
9	36.12	7.35	73.5	4.56	45.6
10	40.13	8.57	85.7	6.84	68.4
11	44.14	9.45	94.5	7.94	79.4
12	48.15	9.65	96.5	8.82	88.2
13	52.17	9.89	98.9	9.43	94.3
14	56.18	9.97	99.7	9.63	96.3
15	60.19	-	-	9.82	98.2
16	64.21	-	-	9.96	99.6

โดยที่ C/C_0 = ความเข้มข้นของสารปนเปื้อน (แคดเมียมหรือสังกะสี) ในน้ำออก ต่อ ความเข้มข้นของสารปนเปื้อน (แคดเมียมหรือสังกะสี) ในน้ำเข้า

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.18 เส้นโค้งเบรคทรูจ์ ระหว่างความเข้มข้นของแคดเมียม และสังกะสี กับปริมาตรน้ำเสียที่ความสูงชั้นถ่านกัมมันต์ที่ 60 เซนติเมตร

ตารางที่ 4.23 ปริมาณแคดเมียม และสังกะสีในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมหลังผ่านคอลัมน์ชั้นถ่านกัมมันต์สูง 90 เซนติเมตร ความเข้มข้นแคดเมียม และสังกะสีเริ่มต้น เท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตรของชั้นถ่านกัมมันต์ เท่ากับ 0.374 ลิตร

ปริมาตรน้ำ (ลิตร)	Bed Volume (BV)	ปริมาณโลหะหนักที่เหลือ (มก./ล.)			
		แคดเมียม	C/C_0 (%)	สังกะสี	C/C_0 (%)
1	2.67	0.00	0.0	0.00	0.0
2	5.35	0.00	0.0	0.00	0.0
3	8.02	0.04	0.4	0.00	0.0
4	10.70	0.26	2.6	0.03	0.3
5	13.37	0.47	4.7	0.24	2.4
6	16.05	1.64	16.4	0.56	5.6
7	18.72	1.98	19.8	0.64	6.4
8	21.40	2.64	26.4	1.37	13.7
9	24.07	3.85	38.5	1.74	17.4

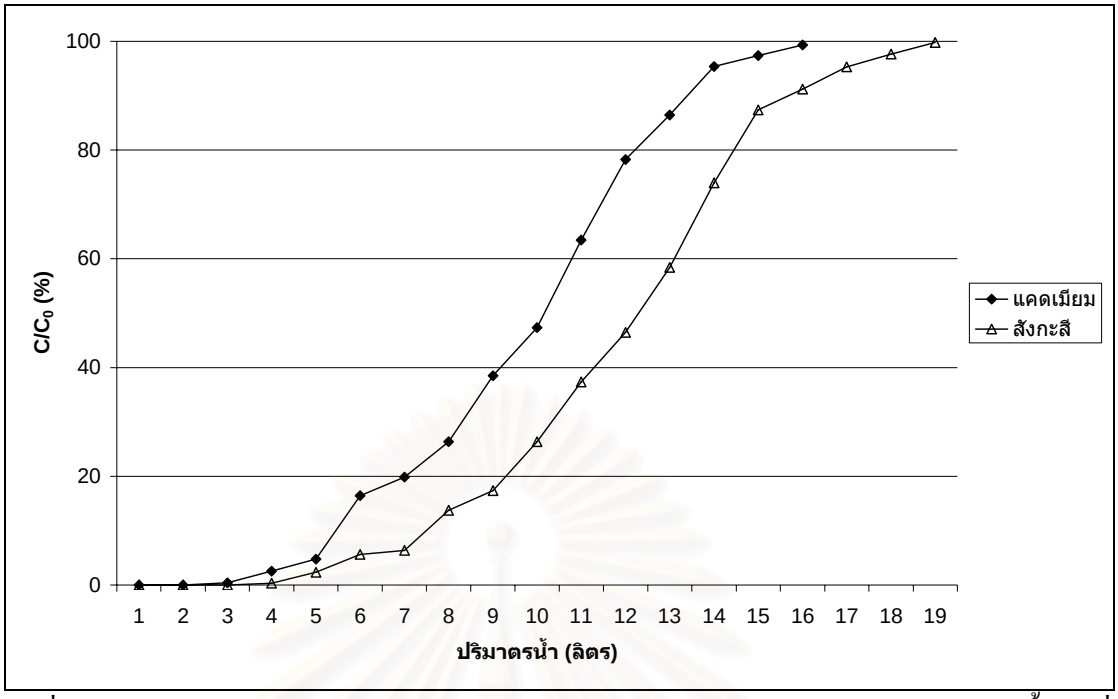
โดยที่ C/C_0 = ความเข้มข้นของสารปนเปื้อน (แคดเมียมหรือสังกะสี) ในน้ำออก ต่อ ความเข้มข้นของสารปนเปื้อน (แคดเมียมหรือสังกะสี) ในน้ำเข้า

ตารางที่ 4.23 (ต่อ)ปริมาณแคดเมียม และสังกะสีในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมหลังผ่านคอลัมน์ชั้นถ่านกัมมันต์สูง 90 เซนติเมตร ความเข้มข้นแคดเมียม และสังกะสีเริ่มต้นเท่ากับ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตรของชั้นถ่านกัมมันต์ เท่ากับ 0.374 ลิตร

ปริมาตรน้ำ (ลิตร)	Bed Volume (BV)	ปริมาณโลหะหนักที่เหลือ (มก./ล.)			
		แคดเมียม	C/C_0 (%)	สังกะสี	C/C_0 (%)
10	26.75	4.74	47.4	2.64	26.4
11	29.42	6.35	63.5	3.74	37.4
12	32.09	7.83	78.3	4.65	46.5
13	34.77	8.65	86.5	5.84	58.4
14	37.44	9.53	95.3	7.40	74.0
15	40.12	9.74	97.4	8.74	87.4
16	42.79	9.94	99.4	9.12	91.2
17	45.47	-	-	9.53	95.3
18	48.14	-	-	9.76	97.6
19	50.82	-	-	9.98	99.8

โดยที่ C/C_0 = ความเข้มข้นของสารปนเปื้อน (แคดเมียมหรือสังกะสี) ในน้ำออก ต่อ ความเข้มข้นของสารปนเปื้อน (แคดเมียมหรือสังกะสี) ในน้ำเข้า

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.19 เส้นโค้งเบรคทรูจ์ ระหว่างความเข้มข้นของแคดเมียม และสังกะสี กับปริมาตรน้ำเสียที่ความสูงชั้นถ่านกัมมันต์ที่ 90 เซนติเมตร

จากการทดลองในตารางที่ 4.20 และรูปที่ 4.16 พบว่าความเข้มข้นของแคดเมียม และสังกะสีที่ผ่านชั้นทรายนั้น จะเห็นว่าชั้นทรายมีความสามารถการดูดติดในระดับหนึ่งเท่านั้น เนื่องจากอนุภาคทรายไม่มีความสามารถในการดูดซับไอออนของโลหะหนัก (ประยุทธ สมบูรณ์, 2542) แต่เนื่องจากอนุภาคทรายที่ใช้นั้น ก่อนการนำมาทดลองนั้นได้ล้างอย่างสะอาดด้วยน้ำหลายครั้ง แต่อาจมีอนุภาคดินปนมา จึงทำให้เกิดการดูดติดผิวของโลหะหนักเกิดขึ้นได้

จากตารางที่ 4.21 ถึง 4.23 พบว่าความเข้มข้นของแคดเมียม และสังกะสีที่ผ่านออกจากคอลัมน์ในระยะแรกมีปริมาณน้อย แต่เมื่อปริมาณน้ำที่ไหลผ่านคอลัมน์มากขึ้นเรื่อยๆ ความเข้มข้นของแคดเมียม และสังกะสีในน้ำเสียจะค่อยๆ สูงขึ้น และประสิทธิภาพการกำจัดแคดเมียม และสังกะสีในระดับชั้นความสูงแต่ละชั้นมีแนวโน้มที่ลดลง แสดงว่าถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวที่บรรจุอยู่ในคอลัมน์เริ่มหมดประสิทธิภาพของการดูดติดผิว แล้วเมื่อถึงปริมาตรหนึ่งที่ความเข้มข้นของแคดเมียม และสังกะสีในน้ำเสียเท่ากับความเข้มข้นแคดเมียม และสังกะสีเริ่มต้น ณ จุดนี้เรียกว่าจุดหมดสภาพ ซึ่งเป็นจุดที่ถ่านกะลามะพร้าวหมดประสิทธิภาพในการดูดติดผิว นั่นเอง และการที่ในระยะแรกปริมาณแคดเมียม และสังกะสีลดลงนั้น เนื่องจากกะลามะพร้าวยังมีพื้นที่ผิวอยู่มาก ดังนั้นจึงสามารถดูดติดผิวแคดเมียม และสังกะสีที่ผ่านคอลัมน์ได้สูง แต่เมื่อมีปริมาณน้ำเสียไหลผ่านคอลัมน์มากยิ่งขึ้นทำให้มีพื้นที่ผิวสำหรับการดูดติดผิวลดน้อยลง และไม่สามารถดูดติดผิวแคดเมียม และสังกะสีที่ผ่านเข้ามาใหม่ได้ จึงทำให้น้ำเสียที่ออกจากคอลัมน์ในระยะหลังมีปริมาณแคดเมียม และสังกะสีสูงขึ้น

จากรูปที่ 4.17 ถึงรูปที่ 4.19 แสดง Breakthrough Curve ของการดูดติดผิวแคดเมียม ที่ระดับความสูงของคอลัมน์ 30, 60 และ 90 เซนติเมตร โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าว ดังนั้นที่ระดับความสูง 30, 60 และ 90 เซนติเมตร ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าว 1 กรัม สามารถดูดติดผิวแคดเมียมได้เท่ากับ 1.784, 1.388 และ 1.058 มิลลิกรัม ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นแคดเมียมเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และคิดเป็น 72.23, 56.18 และ 42.79 BV ตามลำดับ

ส่วนการดูดติดผิวสังกะสีที่ระดับความสูงของคอลัมน์ 30, 60 และ 90 เซนติเมตร โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าวดังนั้นที่ระดับความสูง 30, 60 และ 90 เซนติเมตร ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าว 1 กรัม สามารถดูดติดผิวสังกะสีได้เท่ากับ 1.785, 1.586 และ 1.256 มิลลิกรัม ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นสังกะสีเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และคิดเป็น 72.23, 64.21 และ 50.82 BV ตามลำดับ

นอกจากนี้ยังได้นำถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวที่ผ่านการทดสอบการดูดติดผิวไปทำการฟื้นฟูสภาพ (Regeneration) โดยใช้ถ่านปริมาณ 2 กรัม ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร โดยเติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้นร้อยละ 5 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร นำไปเขย่าบนเครื่องเขย่า เป็นเวลา 120 นาที แล้วนำไปวิเคราะห์หาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ ซึ่งมีค่าไอโอดีนนัมเบอร์เท่ากับ 288 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งพบว่า มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์ลดลงจากเดิมเท่ากับ 651 มิลลิกรัมต่อกรัมของกะลามะพร้าวที่เตรียมด้วยอัตราส่วนวัตถุดิบต่อน้ำหนักสารกระตุ้นเกลือแกง 1:2 เผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เนื่องจาก ตะกอนของแคดเมียม และสังกะสีซึ่งถูกดูดติดผิวเข้าไปภายในรูพรุนของถ่านกัมมันต์ ทำให้พื้นที่ผิวลดลง ซึ่งส่งผลให้ถ่านมีความสามารถดูดติดผิวลดน้อยลง ซึ่งประสิทธิภาพของการฟื้นฟูสภาพ คิดเป็นร้อยละ 44.24

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษาหาประสิทธิภาพในการกำจัดแคดเมียม และสังกะสี โดยใช้ถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว และเมล็ดมะขาม โดยเปรียบเทียบกับถ่าน Filtrasorb 300 ซึ่งเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีขายตามท้องตลาดทั่วไป สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 ผลการศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว และเมล็ดมะขาม

ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าวโดยทำการเผาคาร์บอไนซ์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ร้อยละผลผลิตเท่ากับ ร้อยละ 49.48 ± 5.88 แช่สารกระตุ้นเกลือแกงตามอัตราส่วนโดยน้ำหนักของวัตถุดิบต่อสารกระตุ้นเกลือแกงที่อัตราส่วน 1:2 และเผากระตุ้นอีกครั้งที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ได้ผลิตภัณฑ์ถ่านกะลามะพร้าวมีค่าไอโอดีนนัมเบอร์สูงสุดเท่ากับ 651 มิลลิกรัมต่อกรัม

ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเมล็ดมะขามโดยทำการเผาคาร์บอไนซ์ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ร้อยละผลผลิตมีค่าสูงสุดถึงร้อยละ 50.57 ± 3.15 แช่สารกระตุ้นเกลือแกงตามอัตราส่วนโดยน้ำหนักของวัตถุดิบต่อสารกระตุ้นเกลือแกงที่อัตราส่วน 1:2 และเผากระตุ้นอีกครั้งที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ได้ผลิตภัณฑ์ถ่านเมล็ดมะขามมีค่าไอโอดีนนัมเบอร์สูงสุดเท่ากับ 609 มิลลิกรัมต่อกรัม

พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าว เท่ากับ 366.68 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรโพรงเท่ากับ 0.17 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และมีขนาดโพรงเฉลี่ยเท่ากับ 14.42 อังสตรอม และพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเมล็ดมะขาม เท่ากับ 137.05 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาตรโพรงเท่ากับ 0.27 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อกรัม และมีขนาดโพรงเฉลี่ยเท่ากับ 19.50 อังสตรอม

5.1.2 ผลการศึกษาความสามารถในการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าว และเมล็ดมะขาม เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด

1) ค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการดูดติดผิว

ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าว ทำการทดลองที่พีเอช 2 ถึง 9 พบว่าพีเอชมีผลต่อประสิทธิการดูดติดผิวทั้งของแคดเมียม และสังกะสี โดยมีการดูดติดผิวของแคดเมียมสูงสูดที่พีเอชเท่ากับ 7 เท่ากับ ร้อยละ 64.90 และเกิดตะกอนจากการปรับพีเอช เท่ากับ ร้อยละ 31.73 และการดูดติดผิวของสังกะสีสูงสูดที่พีเอชเท่ากับ 7 เท่ากับ ร้อยละ 65.61 และเกิดตะกอนจากการปรับพีเอช เท่ากับ ร้อยละ 35.48

ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเมล็ดมะขาม ทำการทดลองที่พีเอช 2 ถึง 9 พบว่าพีเอชมีผลต่อประสิทธิการดูดติดผิวทั้งของแคดเมียม และสังกะสี โดยมีการดูดติดผิวของแคดเมียมสูงสูดที่พีเอชเท่ากับ 7 เท่ากับ ร้อยละ 53.87 และเกิดตะกอนจากการปรับพีเอช เท่ากับ ร้อยละ 31.73 และการดูดติดผิวของสังกะสีสูงสูดที่พีเอชเท่ากับ 7 เท่ากับ ร้อยละ 51.49 และเกิดตะกอนจากการปรับพีเอช เท่ากับ ร้อยละ 35.48

ถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 ทำการทดลองที่พีเอช 2 ถึง 9 พบว่าพีเอชมีผลต่อประสิทธิการดูดติดผิวทั้งของแคดเมียม และสังกะสี โดยมีการดูดติดผิวของแคดเมียมสูงสูดที่พีเอชเท่ากับ 7 เท่ากับ ร้อยละ 91.57 และเกิดตะกอนจากการปรับพีเอช เท่ากับ ร้อยละ 31.73 และการดูดติดผิวของสังกะสีสูงสูดที่พีเอชเท่ากับ 7 เท่ากับ ร้อยละ 100 และเกิดตะกอนจากการปรับพีเอช เท่ากับ ร้อยละ 35.48

2) เวลาสัมผัสที่เหมาะสมต่อการดูดติดผิว

ถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว โดยทำการทดลองที่ระยะเวลาสัมผัส 5 ถึง 120 นาที พบว่าถ่านกัมมันต์มีอัตราการดูดติดผิวอย่างรวดเร็วเมื่อเวลาสัมผัส 5 นาที หลังจากนั้นอัตราการกำจัดแคดเมียม และสังกะสีมีแนวโน้มที่จะเริ่มคงที่ขึ้น มีการกำจัดแคดเมียมสูงสุด เท่ากับร้อยละ 50.82 ที่ระยะเวลาสัมผัส 120 นาที และการกำจัดสังกะสีสูงสุด เท่ากับร้อยละ 54.40 ที่ระยะเวลาสัมผัส 120 นาที เช่นกัน

ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม โดยทำการทดลองที่ระยะเวลาสัมผัส 5 ถึง 120 นาที พบว่าถ่านกัมมันต์มีอัตราการดูดติดผิวอย่างรวดเร็วเมื่อเวลาสัมผัส 5 นาที หลังจากนั้นอัตราการกำจัดแคดเมียม และสังกะสีมีแนวโน้มที่จะเริ่มคงที่ขึ้น มีการกำจัดแคดเมียมสูงสุด เท่ากับร้อยละ 44.33 ที่ระยะเวลาสัมผัส 120 นาที และการกำจัดสังกะสีสูงสุด เท่ากับร้อยละ 44.03 ที่ระยะเวลาสัมผัส 120 นาที

ถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 โดยทำการทดลองที่ระยะเวลาสัมผัส 5 ถึง 120 นาที พบว่าถ่านกัมมันต์มีอัตราการดูดติดผิวอย่างรวดเร็วเมื่อเวลาสัมผัส 5 นาที หลังจากนั้นอัตราการกำจัดแคดเมียม และสังกะสีมีแนวโน้มที่จะเริ่มคงที่ขึ้น มีการกำจัดแคดเมียมสูงสุด เท่ากับร้อยละ 84.05 และการกำจัดสังกะสีสูงสุด เท่ากับร้อยละ 87.71 ที่ระยะเวลาสัมผัส 120 นาที

3) ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช

ถ่านกัมมันต์ที่มีค่า K สูงสุด คือ ถ่าน Filtrasorb 300 ซึ่งจะสูงกว่าถ่านกะลามะพร้าว และถ่านเมล็ดมะขาม ทั้งในการดูดติดผิวแคดเมียม และสังกะสี แสดงว่า ถ่านกัมมันต์ที่สามารถดูดติดผิวแคดเมียม และสังกะสีได้ดี คือ ถ่าน Filtrasorb 300 โดยมีค่า K ของการดูดติดผิวแคดเมียม เท่ากับ 11.628 มิลลิกรัมต่อกรัม และการดูดติดผิวสังกะสี เท่ากับ 17.971 มิลลิกรัมต่อกรัม ส่วนความสามารถดูดติดผิวแคดเมียม และสังกะสีที่รองลงมา คือ ถ่านกะลามะพร้าว โดยมีค่า K ของการดูดติดผิวแคดเมียม เท่ากับ 6.4912 มิลลิกรัมต่อกรัม และการดูดติดผิวสังกะสี เท่ากับ 7.6839 มิลลิกรัมต่อกรัม และถ่านที่มีความสามารถในการดูดติดผิวแคดเมียม และสังกะสีน้อยที่สุด คือ ถ่านเมล็ดมะขาม โดยมีค่า K ของการดูดติดผิวแคดเมียม เท่ากับ 4.2854 มิลลิกรัมต่อกรัม และการดูดติดผิวสังกะสี เท่ากับ 5.3654 มิลลิกรัมต่อกรัม

ทั้งนี้ยังพบว่า ถ่าน Filtrasorb 300 จะมีค่า 1/n สูงในการดูดติดผิวแคดเมียม และ สังกะสี แสดงว่า ค่าความเข้มข้นมีบทบาทต่อความสามารถในการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่าน Filtrasorb 300 นั่นคือ ถ้าสารที่ถูกดูดติดผิวมีความเข้มข้นสูง ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่าน Filtrasorb 300 มีแนวโน้มในการดูดติดผิวได้ดี

5.1.3 การศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าวโดยการทดลองในถังดูดติดผิวแบบแท่ง

การศึกษาการดูดติดผิวโดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าว ในการดูดติดผิวแคดเมียมที่ระดับความสูง 30, 60 และ 90 เซนติเมตร ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าว 1 กรัม สามารถดูดติดผิวแคดเมียมได้เท่ากับ 1.784, 1.388 และ 1.058 มิลลิกรัม ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นแคดเมียมเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และคิดเป็น 72.23, 56.18 และ 42.79 BV ตามลำดับ

ส่วนการดูดติดผิวสังกะสีที่ระดับความสูงของคอลัมน์ 30, 60 และ 90 เซนติเมตร โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าวดังนั้นที่ระดับความสูง 30, 60 และ 90 เซนติเมตร ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกะลามะพร้าว 1 กรัม สามารถดูดติดผิวสังกะสีได้เท่ากับ 1.785, 1.586 และ 1.256 มิลลิกรัม ตามลำดับ ที่ความเข้มข้นสังกะสีเริ่มต้น 10 มิลลิกรัมต่อลิตร และคิดเป็น 72.23, 64.21 และ 50.82 BV ตามลำดับ

และเมื่อนำถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวไปทำการฟื้นฟูสภาพ (Regeneration) โดยการใช้สารละลายกรดไฮดรอคลอริก (HCl) ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก แล้วนำไปวิเคราะห์หาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ ซึ่งมีค่าไอโอดีนนัมเบอร์ เท่ากับ 288 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งพบว่า มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์ลดลงจากเดิมเท่ากับ 651 มิลลิกรัมต่อกรัมของกะลามะพร้าวที่เตรียมด้วยอัตราส่วนวัตถุดิบต่อน้ำหนักสารกระตุ้นเกลือแกง 1:2 เผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ซึ่งประสิทธิภาพของการฟื้นฟูสภาพ คิดเป็นร้อยละ 44.24

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว และเมล็ดมะขามด้วยวิธีการกระตุ้นอื่น เช่น การกระตุ้นด้วยการใช้ไอน้ำ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เพื่อพัฒนาให้มีความสามารถในการดูดติดผิวได้ดียิ่งขึ้น
2) ทำการศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของถ่านกัมมันต์ต่อทรายในการดูดติดผิวเพื่อประสิทธิภาพในการดูดติดผิวที่ดียิ่งขึ้น
3) ศึกษาการฟื้นฟูสภาพของถ่านโดยหาสภาวะที่เหมาะสมในการฟื้นฟูสภาพ เช่น สารเคมีที่ใช้ ปริมาณถ่าน และเวลา เพื่อจะได้การฟื้นฟูสภาพที่เหมาะสมที่สุด

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

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

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. 2546. ของเสียอันตราย. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยรังสิต.

ควบคุมมลพิษ, กรม. กองจัดการสารอันตรายและกากของเสีย. 2545. แคดเมียม เอกสารเผยแพร่ทางวิชาการของสารเคมีเฉพาะเรื่อง. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: กองจัดจัดการสารอันตรายและกากของเสีย, กรมควบคุมมลพิษ.

จักริน นักไร่. 2549. การกำจัดสีจากน้ำชะมูลฝอยโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ดำรง ขุมมงคล และอภิสิทธิ์ เจริญกุล. 2533. การผลิตถ่านกัมมันต์โดยใช้ NaCl เป็นตัวกระตุ้น. วิศวกรรมสาร 43 (6): 96 – 99.

บุญจง ขาวสิทธิวงษ์. 2539. น้ำทิ้งอุตสาหกรรม. ความปลอดภัยและสิ่งแวดล้อม 6(3): 73 - 88.

ประยุทธ สมบูรณ์. 2542. การแพร่กระจายของแคดเมียม และสังกะสีในดินจากกิจกรรมเหมืองแร่สังกะสี: กรณีศึกษา เหมืองสังกะสี อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการวางแผนสิ่งแวดล้อมเพื่อพัฒนาชนบท บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยมหิดล.

ปิยะพร บารมี. 2542. การเตรียมถ่านกัมมันต์จากยางเหลือทิ้งโดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

พรรณราย สิทธิวงษ์. 2543. ปริมาณโลหะหนัก แคดเมียม ทองแดง ตะกั่ว และสังกะสี ในดินตะกอนชายฝั่งทะเลแหลมผักเบี้ยจังหวัดเพชรบุรี. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

เพียรพรรค ทัศคร. 2535. หน่วยปฏิบัติการทั่วไป. คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

มานัด แก้วถาวร. 2537. ผลของโซเดียมคลอไรด์ ซิงค์คลอไรด์ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ต่อการผลิตถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

รัชนก แซ่เจน. 2541. การลดปริมาณสารหนูในน้ำด้วยกระบวนการดูดซับ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

ลลิดา นิทัศนจารุกุล. 2544. การกำจัดตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการดูดติดผิวโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

ศุภมาศ พนิชศักดิ์พัฒนา. 2545. ภาวะมลพิษของดินจากการใช้สารเคมี. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ศุลกากร, กรม. 2549. สถิติการนำเข้าส่งออก[ออนไลน์]. กระทรวงพาณิชย์, กรมศุลกากร. แหล่งที่มา: http://www.customs.go.th/ [29 มกราคม 2550]

สุจนีย์ คุ่ยเสงี่ยม. 2544. การกำจัดตะกั่วและปรอทจากน้ำทิ้งอุตสาหกรรมสิ่งทอโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มและกะลามะพร้าว. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

สุมงคล กัลยาณี. 2545. การกำจัดเหล็กออกจากน้ำบาดาลโดยใช้ทรายไม่คัดขนาด และถ่านกรอง. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สาขาวิชาอนามัยสิ่งแดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

สุโรชินี สกุลดวงดี. 2545. การเตรียมถ่านกัมมันต์ และการทดสอบความชอบในการดูดซับของถ่านกัมมันต์จากกะลาปาล์มโดยใช้สารละลายซิงค์คลอไรด์ในการกระตุ้น. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

เสริมพล รัตสุข และไชยยุทธ กลิ่นสุคนธ์. 2514. การกำจัดน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและแหล่งชุมชน. พิมพ์ครั้งที่ 2. สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย.

หทัยกาญจน์ เบญจวิทยาธรรม. 2547. การกำจัดแคดเมียมจากน้ำเสียสังเคราะห์โดยถ่านไม้และถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากถ่านไม้. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อธิชัย นพแก้ว. 2539. การใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดติดผิวโลหะหนักจากน้ำชะขยะมูลฝอยที่ผ่านบ่อเก็บกัก. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

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

ภาษาอังกฤษ

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. Philadephia: ASTM.

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. Philadephia: 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. Philadephia: ASTM.

Catherine, A.M., and Dheiann, M. 1989. Renal glutation depletion and nephrotoxicity of cadmium metalotion in rats. Toxicol. and Appl. Pharm 98: 544 - 552.

Chang, C., and Ku, Y. 1994. Adsorption kinetics of cadmium chelates on activated carbon. Journal of Hazardous Materials 38: 439 – 451.

Chen , J.P., and Wang, X. 2000. Removing copper zinc and lead ion by granular activated carbon in pretreated fixed-bed columns. Separation and Purification Technology 19: 157 - 167.

Cheremisinoff, P.N., and Morresi, A.C. 1978. Carbon adsorption handbook. Michigan: Ann Arbor Science.

Cookson, J.T., Jr. 1978. Adsorption mechanisms: the chemistry of organic adsorption on activated carbon. In Chereminisinoff, P.N., and Ellerbusch, F. (eds.). Carbon adsorption handbook. Michigan: Ann Arbor Science.

Corn, M. 1993. Hazadous Materials. San Diego: Academic Press.

Dubinin, M.M. 1966. Chemistry and physics of Carbon. In Walker, P.L., Jr., and Dekker, M. (eds.). New York.

Faust, S. D., and Aly, O.M. 1987. Adsorption Process for Water Treatment. MA.: Butterworth Publisher.

Frederick, W.P. 1990. Water Quality and Tretment. 4th ed. New York: McGraw Hill.

Grieve, M. 1995. A modern herbal[online]. Available from: http://www.botanical.com/ [27 July 2005]

Hassler, J.W. 1967. Activated carbon. London: Leonard Hill.

Hawley, G.G. 1977. The Condensed Chemical Dictionary. 9th ed. London: Van Nostran Reinhold.

Hegstrom, J., and Stephen, D.S. 1989. Heavy metal accumulation in small mammals following sewage sludge application to forests. J. Environ. Qual 18: 345 – 349.

PASCOF (palm & cycad society of florida. 1998. Cocos nucifera[online]. Institute for systematic botany. Available from: http://www.plantapalm.com/ [5 August 2005]

Lyman, W.J. 1987. Applicability of carbon adsorption to the treatment of hazardous industrial wastes. In Chereminioff, P.N., and Ellerbusch, F. (eds), Carbon adsorption handbook. Michigan: Ann Arbor Science.

Montgomery, J.M. 1985. Water treatment principles and design. New York: John Wiley and 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.

Portmann, J.E. 1972. Marine Pollution in Japan. In M., Mario (ed.), Marine Pollution and Sea Life, pp. 25 - 31. London: Food and Agriculture Organization of the United Nations.

Shankarachaya, N.B. 1998. Tamarind – chemistry, technology and uses – a critical appraisal. J. Food. Sci. Tech 35: 193 – 208.

Valencia, G., and Gloyna, E.F. 1972. On the synthesis of activated column design data. In Ingkaphiak, S. (ed.), Performance of COD and Color Removal from Landfill.

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก

วิธีการหาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ (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, $Na_2S_2O_3.5H_2O$) 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 (ครั้งละประมาณ 5 มิลลิลิตร) จนกระทั่งได้สารละลายปริมาณ 40 มิลลิลิตร ทิ้งสารละลายไว้อย่างน้อย 4 ชั่วโมง คนเป็นระยะ เพื่อให้แน่ใจว่าของแข็งละลายหมด ถ่ายสารละลายลงในขวดปรับปริมาตร (volumetric flask) ขนาด 1 ลิตร ทำให้เจือจางด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 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 ปิเปตกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 5 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ แล้วไตเตรททันทีด้วยสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต 0.1 N เมื่อสีของสารละลายไอโอดีนจางลงจนกระทั่งเป็นสีเหลืองอ่อน (ใกล้ถึงจุด end point) หยดน้ำแป้ง 2 – 3 หยด สารละลายจะเป็นสีน้ำเงิน ไตเตรทต่อจนสารละลายไม่มีสี บันทึกปริมาตรของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ใช้ ทำการไตเตรทซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้ง คำนวณหาความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตโดยใช้สูตร

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

เมื่อ N_1 = ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต, นอร์มัล

P = ปริมาตรสารละลายโปแตสเซียมไอโอเดต, มิลลิลิตร

R = ความเข้มข้นสารละลายโปแตสเซียมไอโอเดต, นอร์มัล และ

S = ปริมาตรสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ใช้, มิลลิลิตร

3.2 การตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน

ใช้ปิเปตดูดสารละลายไอโอดีน 25 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ แล้วไตเตรททันทีด้วยสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต 0.1 N เมื่อสีของสารละลายไอโอดีนจางลง จนกระทั่งเป็นสีเหลืองอ่อน (ใกล้ถึงจุด end point) หยดน้ำแป้ง 2 – 3 หยด สารละลายจะเป็นสีน้ำเงิน ไตเตรทต่อจนสารละลายไม่มีสี บันทึกปริมาตรของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ใช้ ทำการไตเตรทซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้ง คำนวณหาความเข้มข้นสารละลายไอโอดีนโดยใช้สูตร

$$N_2 = (S.N_1) / I$$

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 เพื่อไล่ซัลเฟอร์ในตัวอย่าง หลังจากนั้นนำตัวอย่างออก แล้วทิ้งให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง

4.5 ปิเปตสารละลายไอโอดีน 0.1 N จำนวน 100 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ ปิดจุกขวดทันที แล้วเขย่าอย่างแรงเป็นเวลา 30 ± 1 วินาที เปิดจุก แล้วกรองสารละลายผ่านกระดาษกรองพับจีบหมายเลข 42

4.6 ปิเปตสารละลายที่กรองได้ 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ ไตเตรทสารละลายด้วยสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต 0.1 N จนกระทั่งสารละลายเป็นสีเหลืองอ่อน เติมสารละลายน้ำแป้งลงไป 2 มิลลิลิตรแล้วไตเตรทต่อ จนกระทั่งสารละลายในขวดรูปชมพู่ไม่มีสี บันทึกปริมาตรสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ใช้

5. การคำนวณ

5.1 การคำนวณหาค่า Iodine number ใช้สูตร

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

โดยที่

X/M = Iodine adsorption per gram of carbon (mg/g)

A = (N_2) (12693.0) - - - - N_2 = ความเข้มข้นไอโอดีน (N)

B = (N_1) (126.93) - - - - - N_1 = ความเข้มข้น $Na_2S_2O_3$ (N)

DF = dilution factor = (100 + 10) / 50 = 2.2

S = ปริมาตรของ $Na_2S_2O_3$ ที่ใช้ (มิลลิลิตร)

M = น้ำหนักตัวอย่าง (กรัม)

5.2 การคำนวณหา carbon dosages ใช้สูตร

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

โดยที่

M = น้ำหนักของถ่าน (กรัม)

A = (N_2) (12693.0)

DF = dilution factor

C = residue iodine

E = ค่า iodine number โดยประมาณ

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

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ก. 1 น้ำหนักประมาณของตัวอย่างที่ใช้วิเคราะห์ค่าไอโอดีน

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

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 (momolayer) ที่อุณหภูมิจุดเดือดปกติ (-195.8 องศาเซลเซียส) บนผิวหน้าของถ่านกัมมันต์ วิธีวิเคราะห์มีดังนี้

1. เครื่องมือ

- เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิวรุ่น ASAP 2000 ของบริษัท Micromeritics
- เครื่องคอมพิวเตอร์ พร้อมโปรแกรมคำนวณ
- หลอดใส่ตัวอย่าง

2. การเตรียมตัวอย่าง

- ใช้ตัวอย่างถ่านกัมมันต์ที่บดจนร่อนผ่านตะแกรงขนาด 8 เมช และค้างอยู่บนตะแกรงขนาด 30 เมช ซึ่งถ่านที่ได้จะมีขนาดระหว่าง 0.59 – 2.38 มิลลิเมตร
- 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

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

โดย N = เลขอาโวกาโดร (6.02 × 1023 โมเลกุลต่อโมล)

A_{cs} = พื้นที่หน้าตัดของโมเลกุลไนโตรเจน (16.2 ตารางอังสตรอม)

MW = น้ำหนักโมเลกุลของไนโตรเจน

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค วิธีการหาไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช

จากการทดลองจะใช้สมการการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช ในการอธิบายการดูดซับสารปนเปื้อนด้วยถ่านกัมมันต์ ซึ่งพบว่าสมการการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช เป็นสมการที่เหมาะสมกับการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ โดยได้แสดงสมการการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช ซึ่งมีดังนี้ (เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์, 2546)

$$X / m = KC^{1/n}$$

โดยที่ X = ปริมาณของสารปนเปื้อน (แคดเมียมหรือสังกะสี) ที่ถูกดูดซับ (มิลลิกรัมต่อกรัม) ซึ่งจะเท่ากับ $(C_i - C_f)V$

m = น้ำหนักของถ่านกัมมันต์ (กรัม)

C_i = ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในน้ำเข้า (มิลลิกรัมต่อลิตร)

C_f = ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในน้ำออก (มิลลิกรัมต่อลิตร)

V = ปริมาตรของน้ำเสีย (ลิตร)

C = ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลาย ที่สภาวะสมดุลย์ (มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ โมลต่อลิตร)

K, 1/n = ค่าคงที่ของการดูดติดผิว

ตัวอย่างวิธีการคำนวณ

จากตารางที่ 4.12 ในบทที่ 4 ในการศึกษาอิทธิพลของปริมาณถ่านกัมมันต์จากกะลามะพร้าวต่อการดูดติดผิวของแคดเมียมในน้ำเสียสังเคราะห์ได้ผลดังนี้

ตารางที่ ค.1 การทดสอบการดูดติดผิวแคดมียมของถ่านกัมมันต์

น้ำหนักถ่าน (กรัม)	ความเข้มข้นของแคดเมียมที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)			
	1	2	3	เฉลี่ย
0	7.523	7.342	7.428	7.431
0.01	6.876	6.754	6.964	6.865
0.02	6.476	6.554	6.564	6.531
0.04	5.857	5.678	5.642	5.726
0.1	4.257	4.375	4.273	4.302
0.2	1.968	2.647	2.728	2.448

ใช้สมการการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช จากสมการ

$$X / m = KC^{1/n}$$

จากตารางที่ ค.1 ปริมาณแคดเมียมที่เหลือ จะเท่ากับ

$$= 7.431 \frac{\text{mg}}{\text{L}} \times 100 \text{ mL} \times \frac{1 \text{ L}}{1000 \text{ mL}}$$

= 0.743 มิลลิกรัม

ดังนั้นเมื่อนำมาคำนวณสมการการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิชจะได้ ดังตารางที่ ค.2

ตารางที่ ค.2 การคำนวณการดูดติดผิวแคดมียมของถ่านกัมมันต์

น้ำหนักถ่าน, m (กรัม)	ความเข้มข้นของแคดเมียมที่เหลือ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณแคดเมียมที่เหลือ C_f (mg)	X (mg) $(C_i - C_f)$	X/m (mg/g)
0	7.431	0.743 (C_i)	-	-
0.01	6.865	0.686	0.057	5.663
0.02	6.531	0.653	0.090	4.498
0.04	5.726	0.573	0.171	4.263
0.1	4.302	0.430	0.313	3.129
0.2	2.448	0.245	0.498	2.492

แล้วนำข้อมูลจากตารางที่ได้มาวาดกราฟลงบนกราฟ log โดยให้แกน x เป็นค่าปริมาณแคดเมียมที่เหลือ (มิลลิกรัม) และแกน y เป็นค่า X/m (ปริมาณของ แคดเมียมที่ถูกดูดซับ, มิลลิกรัมต่อกรัม) ซึ่งจะได้เส้นกราฟที่เป็นเส้นตรง

โดยประสิทธิภาพในการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์แต่ละชนิด สามารถใช้ค่าคงที่ K และ 1/n ที่ได้จากสมการฟรุนดลิช โดยที่ log K เป็นจุดตัดแกน y และ 1/n เป็นความชันของสมการเส้นตรงโดยมีวิธีการคำนวณจากสมการเส้นตรง คือ $y = a + bx$ และจากสมการฟรุนดลิช คือ $\log X/M = \log K + (1/n)\log C$ เมื่อ logC เท่ากับ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร จะได้ $a = \log K$ ดังนั้น $K = 10^a$ เมื่อนำค่า a และ b มาแทนในสมการจะได้ $K = 10^a$ และ $b = 1/n$

ภาคผนวก ง รูปการทดลองในห้อง ปฏิบัติการ

รูปที่ ง.1 กะลามะพร้าวก่อนเผา

รูปที่ ง.2 กะลามะพร้าวหลังเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ง.3 เมล็ดมะขามก่อนเผา

รูปที่ ง.4 เมล็ดมะขามหลังเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ ง.5 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพในการดูดติดผิวของแคดเมียม และสังกะสี โดยทำการทดลองแบบต่อเนื่องในคอลัมน์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวพรรษกร ใจประดับเพชร เกิดเมื่อวันที่ 20 เมษายน พ.ศ.2524 ที่จังหวัดพระนครศรีอยุธยา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ เมื่อปี พ.ศ.2545 และเข้าศึกษาต่อระดับปริญญาโทในหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สหสาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปี พ.ศ.2547

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย