การกำจัดสีจากน้ำชะมูลฝอยโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม

นายจักริน นักไร่

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ปีการศึกษา 2549
ISBN 974-14-2055-2
ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

COLOR REMOVAL FROM LEACHATE
USING ACTIVATED CARBON FROM TAMARIND SEEDS

Mr. Jakkarin Nakrai

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering
Faculty of Engineering
Chulalongkorn University

Academic Year 2006
ISBN 974-14-2055-2

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การกำจัดสีจากน้ำชะมูลฝอยโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม
โดย	นายจักริน นักไร่
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร.ธเรศ ศรีสถิตย์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้นับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญามหาบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

(ศาสตราจารย์ ดร.ดิเรก ลาวัณย์ศิริ)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ

(รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิมปเสนีย์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษา

(รองศาสตราจารย์ ดร.ธเรศ ศรีสถิตย์)

..... กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิริมา ปัญญาเมธีกุล)

..... กรรมการ

(อาจารย์ ดร. วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

จักริน นักไร่ : การกำจัดสีจากน้ำชะมูลฝอยโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม (COLOR REMOVAL FROM LEACHATE USING ACTIVATED CARBON FROM TAMARIND SEEDS) อ. ที่ปรึกษา : รศ.ดร.ธเรศ ศรีสถิตย์ , 154 หน้า.ISBN 974-14-2055-2

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดติดผิวสีน้ำชะมูลฝอยโดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเมล็ดมะขาม ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมีโดยใช้สารซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) และทำการล้างสารกระตุ้นด้วยกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้นร้อยละ 5 เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่จำหน่ายตามท้องตลาดทั่วไป (Filtrasorb 300)

ในขั้นตอนการเตรียมถ่านกัมมันต์พบว่า อุณหภูมิในการเผากระตุ้นที่เหมาะสม คือ 700 องศาเซลเซียส ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของเมล็ดมะขามต่อซิงค์คลอไรด์ที่เหมาะสม เท่ากับ 1 : 2 และล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 5 ซึ่งจะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์เท่ากับ 724 มิลลิกรัมต่อกรัม มีค่าพื้นที่ผิวเท่ากับ 522.81 ตารางเมตรต่อกรัม ส่วนถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์เท่ากับ 982 มิลลิกรัมต่อกรัม มีค่าพื้นที่ผิวเท่ากับ 719.36 ตารางเมตรต่อกรัม จากนั้นได้ทำการทดลองแบบแบทช์ เพื่อศึกษาถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดติดผิวสีน้ำชะมูลฝอย โดยใช้ถ่านกัมมันต์ปริมาณ 0.5 กรัม สำหรับถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม พบว่าที่พีเอช 8 และเวลาสัมผัส 90 นาที มีประสิทธิภาพการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยดีที่สุด เท่ากับร้อยละ 58.69 และ 61.78 ตามลำดับ จากการทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิว สามารถอธิบายได้ด้วยไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช โดยมีค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดติดผิว (K) เท่ากับ 1.65 แพลทตินัม-โคบอลต์ต่อกรัมถ่าน และ 1/n มีค่าเท่ากับ 0.7876 ส่วนถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 พบว่าที่พีเอช 8 และเวลาสัมผัส120 นาที มีประสิทธิภาพการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยดีที่สุด เท่ากับร้อยละ 92.81 และ 92.08 ตามลำดับ จากการทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิว พบว่ามีค่า K เท่ากับ 2.05 แพลทตินัม-โคบอลต์ต่อกรัมถ่าน และ 1/n มีค่าเท่ากับ 0.9305 ผลของการฟื้นสภาพถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม โดยการล้างถ่านกัมมันต์ด้วยกรดอะซิติก (CH_3COOH) เข้มข้นร้อยละ 5 พบว่ามีประสิทธิภาพในการฟื้นสภาพครั้งแรก เท่ากับร้อยละ 90.67 และครั้งที่สอง เท่ากับร้อยละ 82.02 และครั้งที่สาม เท่ากับร้อยละ 74.69 ตามลำดับ ส่วนถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 มีประสิทธิภาพในการฟื้นสภาพครั้งแรก เท่ากับร้อยละ 95.47 และครั้งที่สอง เท่ากับร้อยละ 89.32 และครั้งที่สาม เท่ากับร้อยละ 82.78 ตามลำดับ

การทดลองแบบต่อเนื่องโดยใช้ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามบรรจุในถังดูดติดผิวแบบแท่ง ทำการป้อนน้ำชะมูลฝอยแบบไหลลงอย่างต่อเนื่อง ที่อัตราภาระบรรทุกทางชลศาสตร์ 0.6 ม.^{3}/ม.^{2}-ชม. และทำการเก็บตัวอย่างที่ชั้นความสูง 30, 60, 90 และ 120 เซนติเมตร สามารถบำบัดน้ำชะมูลฝอยได้ 4.85, 5.88, 6.63 และ 8.94 ลิตร ตามลำดับ ส่วนถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 สามารถบำบัดน้ำชะมูลฝอยได้ 6.82, 8.84, 11.93 และ 11.94 ลิตร ตามลำดับ

ภาควิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่อนิสิต.....

สาขาวิชา.....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม..... ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา.....

ปีการศึกษา.....2549.....

4770238321 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORD: ACTIVATED CARBON /LEACHATE / TAMARIND SEEDS/COLOR

JAKKARIN NAKRAI: COLOR REMOVAL FROM LEACHATE USING ACTIVATED CARBON FROM TAMARIND SEEDS. THISIS ADVISOR: ASSOC.PROF.THARES SRISATIT, Ph.D., 154 pp. ISBN 974-14-2055-2.

The purpose of this research is to study the color removal from landfill leachate using activated carbon from tamarind seeds. They were made by chemical activated process by using zinc chloride ($ZnCl_2$) and washed by 5% hydrochloric acid (HCl) then compare the efficiency with commercial activated carbon (Filtrasorb 300).

In the activated carbon preparation process, the results showed that the suitable temperature was 700 degree Celsius and the appropriate ratio by weight of raw tamarind seeds with zinc chloride was 1:2 and washed by 5% hydrochloric acid which gave the Iodine number at 724 mg/g. Surface area equaled to 522.81 m^2/g. The Filtrasorb 300 activated carbon gave the Iodine number at 982 mg/g. Surface area equaled to 719.36 m^2/g. In batch experiment, the factor effect of leachate color adsorption efficiency with weighty activated carbon 0.5 gram. The tamarind seeds activated carbon, the results shown that best adsorption efficiency of both types at pH 8 and contact time at 90 minutes for equilibrium was 58.69% and 61.78% respectively. From adsorptive isotherm test, the results can be explained by Freundlich isotherm, with adsorptive capacity constant (K) of 1.65 pt-co/g-carbon and the value of 1/n was 0.7876. The Filtrasorb 300 activated carbon, the results shown that best adsorption efficiency of both types was at pH 8 and contact time at 120 minutes for equilibrium was 92.81% and 92.08% respectively. From adsorptive isotherm test, the results can be explained by Freundlich isotherm with K of 2.05 pt-co/g-carbon and the value of 1/n was 0.9305. From efficiency in tamarind seeds activated carbon regeneration test, which washed by 5% acetic acid (CH_3COOH) had efficiency in regeneration in the first time was 90.67% and second time was 82.02% and the third time was 74.69% respectively. The Filtrasorb 300 activated carbon had efficiency in regeneration in the first time was 95.47% and second time was 89.32% and the third time was 82.78% respectively.

In continuous studies, activated carbon from tamarind seeds was used for packing in the column. Leachate was fed continuously down flow with 0.6 m^3/m^2-hr and collected at the height level of 30, 60, 90 and 120 centimeters can treat the color of leachate 4.85, 5.88, 6.63 and 8.94 liters respectively. The Filtrasorb 300 activated carbon can treat the color of leachate 6.82, 8.84, 11.93 and 11.94 liters respectively.

Department.....Environmental Engineering..... Student's Signature..... J. Nakrai

Field of study... Environmental Engineering..... Advisor's Signature..... T. Srisatit

Academic year.....2006.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความอนุเคราะห์ช่วยเหลือจากบุคคลหลายๆ ฝ่าย ดังนั้นจึงของแสดงความขอบคุณทุกท่าน ดังมีรายนามต่อไปนี้

กราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. ธเรศ ศรีสถิตย์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ผู้ที่ให้ความรู้ ความช่วยเหลือ ชี้แนะ และแก้ไขในสิ่งที่บกพร่องมาโดยตลอด อันเป็นประโยชน์ต่ออย่างยิ่งต่อศิษย์ นับตั้งแต่แนวคิดในการทำงานวิจัย ตลอดจนกระทั่งจบโครงการ ทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

กราบขอบพระคุณ รองศาสตร์จารย์ วงศ์พันธ์ ลิมปเสนีย์ ที่เป็นประธานกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ศิริมา ปัญญาเมธีกุล และ อาจารย์ ดร. วิบูลย์ ศรีเจริญชัยกุล ที่ให้คำชี้แนะ ปรึกษา และช่วยแก้ไข จนวิทยานิพนธ์สำเร็จไปด้วยดี

ขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และเจ้าหน้าที่ห้องธุรการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกให้เสมอมา

ขอขอบคุณ ห้องปฏิบัติการมูลฝอย ห้องปฏิบัติการของเสียอันตราย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ และห้องปฏิบัติการสถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ประจำห้องปฏิบัติการทุกท่าน ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือ

ขอขอบคุณ บัณฑิตวิทยาลัย ที่ให้ทุนอุดหนุนเพื่อใช้ในการวิจัยนี้

ขอขอบคุณ เจ้าหน้าที่ ประจำศูนย์ฝังกลบขยะมูลฝอย เทศบาลตำบลแสนสุข อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี ที่คอยอำนวยความสะดวกในการเก็บตัวอย่างน้ำเสีย

ขอบคุณ พี่อครินทร์ ที่พาไปเก็บน้ำเสียด้วยกันเสมอ และเพื่อนๆ ที่ให้กำลังใจ ในระหว่างการทำวิจัยมาโดยตลอด

สุดท้ายนี้ กราบขอบพระคุณ คุณพ่อ และครูบาอาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ และให้กำลังใจตลอดมาในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ที่สำคัญที่สุดคือคุณแม่ แม้ล่วงลับไปแล้วแต่ท่านคือผู้มีพระคุณสูงสุดที่ไม่เคยลืมเลย

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย ..... ง

บทคัดย่อภาษาอังกฤษ ..... จ

กิตติกรรมประกาศ ..... ฉ

สารบัญ ..... ช

สารบัญตาราง ..... ฎ

สารบัญรูป ..... ฐ

บทที่ 1 บทนำ 1

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา 1

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย 2

1.3 ขอบเขตการศึกษา 2

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3

บทที่ 2 ทบทวนเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 4

2.1 น้ำชะมูลฝอย 4

2.1.1 การเกิดน้ำชะมูลฝอย 4

2.1.2 องค์ประกอบของน้ำชะมูลฝอย 5

2.1.3 การบำบัดน้ำชะมูลฝอย 8

2.1.4 การบำบัดน้ำชะมูลฝอยโดยวิธีทางเคมีกายภาพ 9

2.2 สีของน้ำชะมูลฝอย 12

2.2.1 กระบวนการย่อยสลายในหลุมฝังกลบ 12

2.2.2 องค์ประกอบของสารประกอบฮิวมิค 13

2.2.3 การวัดสีน้ำชะมูลฝอย 16

2.3 ถ่านกัมมันต์ 17

2.3.1 คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ 19

2.3.2 ชนิดของถ่านกัมมันต์ 25

2.3.3 การผลิตถ่านกัมมันต์ 26

2.3.4 ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์ 30

2.4 การดูดติดผิว 31

หน้า

2.4.1 กลไกการดูดติดผิว 32
2.4.2 อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล 33
2.4.3 ไอโซเทอมการดูดติดผิว 36
2.4.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิว 39
2.5 ถังดูดติดผิวแบบแท่ง 41
2.6 การฟื้นสภาพถ่านกัมมันต์ 43
2.7 มะขาม 44
2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 45
บทที่ 3 แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย 52
3.1 แผนการทดลอง 52
3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย 54
3.2.1 การเตรียมถ่านกัมมันต์เพื่อคัดเลือกอัตราส่วนตัวกระตุ้น และอุณหภูมิในการกระตุ้นที่เหมาะสมและการทดสอบ คุณสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ 54
3.2.2 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิวของ ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม 57
3.2.3 การศึกษาประสิทธิภาพในการฟื้นสภาพถ่านกัมมันต์ที่ ผ่านการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอย 63
3.2.4 การศึกษาประสิทธิภาพในการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ โดยการทดลองแบบต่อเนื่องในถังดูดติดผิวแบบแท่ง 65
3.2.5 การคำนวณค่าใช้จ่ายในการผลิตถ่านกัมมันต์ จากเมล็ดมะขาม 68
3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย 68
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง 70
4.1 การเตรียมถ่านกัมมันต์และการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิต 70
4.1.1 ผลของอุณหภูมิและเวลาในการเผาต่อร้อยละผลผลิต ของถ่านกัมมันต์ 70
4.1.2 ผลของอัตราส่วนวัตถุดิบต่อสารกระตุ้นและอุณหภูมิ ในการเผาต่อร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม 72

หน้า

4.1.3 ผลของอัตราส่วนวัตถุดิบต่อสารกระตุ้นและอุณหภูมิในการเผาต่อค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม 74
4.1.4 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ 78
4.2 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม 79
4.2.1 ผลของค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการดูดติดผิวสีน้ำชะมูลฝอย 80
4.2.2 ผลของเวลาที่เหมาะสมต่อการดูดติดผิวสีน้ำชะมูลฝอย 83
4.2.3 ผลการทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ 85
4.3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการฟื้นสภาพถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอย 89
4.4 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยของถ่านกัมมันต์โดยการทดลองแบบต่อเนื่องในถังดูดติดผิวแบบแท่ง 94
4.5 ผลการคำนวณค่าใช้จ่ายในการผลิตถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม 100
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ 102
5.1 สรุปผลการวิจัย 102
5.1.1 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม 102
5.1.2 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิวสีน้ำชะมูลฝอยของถ่านกัมมันต์ 102
5.1.3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการฟื้นสภาพถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอย 103
5.1.4 ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยของถ่านกัมมันต์ในถังดูดติดผิวแบบแท่ง 104
5.1.5 ผลการคำนวณค่าใช้จ่ายในการผลิตถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม 104
5.2 ข้อเสนอแนะ 105
รายการอ้างอิง 106
ภาคผนวก 110
ภาคผนวก ก วิธีการวัดสีของน้ำในหน่วยแพลทตินัมโคบอลต์ 111
ภาคผนวก ข วิธีการหาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ 115

หน้า

ภาคผนวก ค ผลการเตรียมถ่านกัมมันต์และศึกษาสภาวะที่เหมาะสม
ในการผลิต 121
ภาคผนวก ง ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิวของ
ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม 132
ภาคผนวก จ ผลการฟื้นสภาพถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดูดติดผิว
สีน้ำชะมูลฝอย 139
ภาคผนวก ฉ การกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยของถ่านกัมมันต์โดยการทดลอง
แบบต่อเนื่อง ในถังดูดติดผิวแบบแท่ง 142
ภาคผนวก ช ผลการวิเคราะห์ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามด้วยเครื่องมือ
Thermal Gravimetric Analysis 147
ภาคผนวก ซ ผลการวิเคราะห์โครงสร้างพื้นที่ผิวและความพรุนของ
ถ่านกัมมันต์ด้วยวิธี BET 150
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์ 154

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ลักษณะน้ำชะมูลฝอยจากสถานีฝังกลบใหม่และเก่าในยุโรป และอเมริกา 6

ตารางที่ 2.2 สารประกอบอินทรีย์ในน้ำชะมูลฝอย 7

ตารางที่ 2.3 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำชะมูลฝอยด้วยวิธีทางกายภาพเคมี 9

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบทางเคมีและอัตราส่วนของสารประกอบฮิวมิค ในน้ำชะมูลฝอย 15

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติและส่วนประกอบทางเคมีของถ่านกัมมันต์โดยทั่วไป 19

ตารางที่ 2.6 พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ชนิดต่างๆ 20

ตารางที่ 2.7 แสดงความเป็นกรดของพื้นที่ผิวหมู่ฟังก์ชันนอลและพื้นที่ผิวของ ถ่านกัมมันต์บางชนิด 23

ตารางที่ 2.8 คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ในท้องตลาด 24

ตารางที่ 2.9 สารเคมีที่ใช้เป็นสารกระตุ้นในการกระตุ้นด้วยวิธีทางเคมี 29

ตารางที่ 2.10 เวลาที่ใช้ในการกำจัดสารบางชนิดโดยถ่านกัมมันต์ขนาดต่างๆ 35

ตารางที่ 2.11 ลักษณะโดยทั่วไปของแป้งในเมล็ดมะขาม 44

ตารางที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง COD/TOC, BOD/COD, COD และ อายุของหลุมฝังกลบต่อประสิทธิภาพในการลดสารอินทรีย์ ในน้ำชะมูลฝอยของกระบวนการต่างๆ 47

ตารางที่ 2.13 การฟื้นสภาพถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 400 ที่ผ่านการกำจัด กรดฮิวมิค 49

ตารางที่ 2.14 คุณสมบัติของน้ำเสียก่อนเข้าระบบและจุดแรกของน้ำเสีย ที่ออกจากระบบ 51

ตารางที่ 3.1 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของถ่านกัมมันต์ 55

ตารางที่ 4.1 ร้อยละผลผลิตถ่านเมล็ดมะขามหลังจากเผาที่อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ 70

ตารางที่ 4.2 ร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากเมล็ดมะขาม 73

ตารางที่ 4.3 ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จาก เมล็ดมะขาม 74

หน้า

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ด้วยเครื่อง TGA 76
ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิว ปริมาตรโพรงและขนาดโพรงเฉลี่ย
ของถ่านกัมมันต์ 78
ตารางที่ 4.6 ค่าพารามิเตอร์ของน้ำชะมูลฝอยที่ใช้ในการวิจัย 80
ตารางที่ 4.7 ประสิทธิภาพการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยที่พีเอชต่างๆ 81
ตารางที่ 4.8 ประสิทธิภาพการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยที่เวลาสัมผัสต่างๆ 84
ตารางที่ 4.9 การทดสอบไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชและแลงมัวร์ของ
ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม 86
ตารางที่ 4.10 การทดสอบไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชและแลงมัวร์ของ
ถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 86
ตารางที่ 4.11 ค่าคงที่ของไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชและแลงมัวร์ 88
ตารางที่ 4.12 ประสิทธิภาพการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยหลังฟื้นสภาพ
และประสิทธิภาพในการฟื้นสภาพถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม 90
ตารางที่ 4.13 ประสิทธิภาพการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยหลังฟื้นสภาพ
และประสิทธิภาพในการฟื้นสภาพถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 91
ตารางที่ 4.14 ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามที่บรรจุลงในถังดูดติดผิวแบบแท่ง 94
ตารางที่ 4.15 ถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 ที่บรรจุลงในถังดูดติดผิวแบบแท่ง 96
ตารางที่ 4.16 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้งานของถังดูดติดผิวแบบแท่ง
ที่บรรจุถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามและถ่านกัมมันต์
Filtrasorb 300 ที่จุดยุติ 98

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญรูป

หน้า

รูปที่ 2.1 ลักษณะการเกิดน้ำซะมูลฝอย 5
รูปที่ 2.2 คุณสมบัติทางเคมีของสารประกอบฮิวมิค 14
รูปที่ 2.3 ร้อยละการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของกรดฮิวมิค (a) กรดฟัลวิค (b) 15
รูปที่ 2.4 โครงสร้างของกราไฟท์ 17
รูปที่ 2.5 โครงสร้างของกราไฟท์ 18
รูปที่ 2.6 ลักษณะการแบ่งชั้นของโครงสร้างถ่านกัมมันต์ 18
รูปที่ 2.7 ลักษณะบริเวณของพื้นที่ผิวถ่านกัมมันต์ 21
รูปที่ 2.8 กลุ่มฟังก์ชันนอลบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ 22
รูปที่ 2.9 ขั้นตอนผลิตถ่านกัมมันต์ 26
รูปที่ 2.10 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารดูดติดผิวด้วยถ่านกัมมันต์ 34
รูปที่ 2.11 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ 37
รูปที่ 2.12 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบ BET 38
รูปที่ 2.13 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช 39
รูปที่ 2.14 ผลของน้ำหนักโมเลกุลในการดูดติดผิว 40
รูปที่ 2.15 ระบบดูดติดผิวแบบไหลต่อเนื่อง 42
รูปที่ 2.16 ประสิทธิภาพการฟื้นสภาพถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 400 ที่
ผ่านการกำจัดไนโตรเบนซิน ด้วยกรดฟอร์มิก 48
รูปที่ 2.17 ประสิทธิภาพการฟื้นสภาพถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 400 ที่
ผ่านการกำจัดไนโตรเบนซิน ด้วยกรดอะซิติก 48
รูปที่ 2.18 ประสิทธิภาพการฟื้นสภาพถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 400 ที่
ผ่านการกำจัด Rhodamine-B 49
รูปที่ 2.19 ไอโซเทอมการดูดติดผิวของกรดฟัลวิคที่มวลโมเลกุลต่างกัน 50
รูปที่ 2.20 ไอโซเทอมการดูดติดผิวของกรดฮิวมิคที่มวลโมเลกุลต่างกัน 50
รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย 53
รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการหาอัตราส่วนตัวกระตุ้นต่อปริมาณเมล็ดมะขาม
และอุณหภูมิในการกระตุ้นที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพถ่านกัมมันต์ 56
รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการศึกษาอิทธิพลของพีเอชต่อการดูดติดผิว 58
รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการศึกษาอิทธิพลของเวลาสัมผัสต่อการดูดติดผิว 60

หน้า

รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ 62
รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการศึกษาประสิทธิภาพในการฟื้นสภาพถ่านกัมมันต์ที่
ผ่านการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอย 64
รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการทดสอบประสิทธิภาพถ่านโดยใช้ถังดูดติดผิวแบบแท่ง 66
รูปที่ 3.8 ระบบถังดูดติดผิวแบบแท่งที่ใช้ในการทดลอง 67
รูปที่ 4.1 เมล็ดมะขามที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์ 70
รูปที่ 4.2 ร้อยละผลผลิตถ่านเมล็ดมะขามหลังจากเผาที่อุณหภูมิ
และเวลาต่างๆ 71
รูปที่ 4.3 ร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากเมล็ดมะขาม 73
รูปที่ 4.4 ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากเมล็ดมะขาม 75
รูปที่ 4.5 ร้อยละผลผลิตและค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์
ที่เตรียมได้ 76
รูปที่ 4.6 ถ่านเมล็ดมะขามก่อนกระตุ้นและหลังกระตุ้นเปรียบเทียบกับ
ถ่าน Filtrasorb 300 77
รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวถ่านกัมมันต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์
อิเล็กตรอน (SEM) ที่กำลังขยาย 500 เท่า 79
รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยที่พีเอชต่างๆโดยใช้
ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม 82
รูปที่ 4.9 ประสิทธิภาพการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยที่พีเอชต่างๆโดยใช้
ถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 82
รูปที่ 4.10 ประสิทธิภาพการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยที่เวลาสัมผัสต่างๆ 85
รูปที่ 4.11 การทดสอบไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชและแลงมัวร์ของ
ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม 87
รูปที่ 4.12 การทดสอบไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชและแลงมัวร์ของ
ถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 87
รูปที่ 4.13 ประสิทธิภาพการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยหลังการฟื้นสภาพ
ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม 90
รูปที่ 4.14 ประสิทธิภาพในการฟื้นสภาพถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม 91
รูปที่ 4.15 ประสิทธิภาพการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยหลังการฟื้นสภาพ
ถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 92

หน้า

รูปที่ 4.16 ประสิทธิภาพในการฟื้นสภาพถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 92
รูปที่ 4.17 แนวโน้มของประสิทธิภาพในการฟื้นสภาพถ่านกัมมันต์ 93
รูปที่ 4.18 ความเข้มสีน้ำชะมูลฝอยที่ผ่านถังดูดติดผิวแบบแท่งบรรจุ
ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามที่ระดับความลึก 30, 60, 90 และ
120 เซนติเมตร อัตราบรรทุกทางชลศาสตร์ 0.6 ม.^{3}/ม.^{2}-ชม. 95
รูปที่ 4.19 ประสิทธิภาพการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยที่ผ่านถังดูดติดผิว
แบบแท่งบรรจุถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามที่ระดับความลึก
30, 60, 90 และ120 เซนติเมตร อัตราบรรทุกทางชลศาสตร์
0.6 ม.^{3}/ม.^{2}-ชม. 95
รูปที่ 4.20 ความเข้มสีน้ำชะมูลฝอยที่ผ่านถังดูดติดผิวแบบแท่งบรรจุ
ถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 ที่ระดับความลึก 30, 60, 90 และ
120 เซนติเมตร อัตราบรรทุกทางชลศาสตร์ 0.6 ม.^{3}/ม.^{2}-ชม. 97
รูปที่ 4.21 ประสิทธิภาพการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยที่ผ่านถังดูดติดผิว
แบบแท่งบรรจุถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 ที่ระดับความลึก
30, 60, 90 และ120 เซนติเมตร อัตราบรรทุกทางชลศาสตร์
0.6 ม.^{3}/ม.^{2}-ชม. 97
รูปที่ 4.22 เปรียบเทียบเวลาการใช้งานของถังดูดติดผิวแบบแท่งที่บรรจุ
ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามและถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 98
รูปที่ 4.23 เปรียบเทียบปริมาตรน้ำชะมูลฝอยที่ผ่านการบำบัดด้วยถังดูดติดผิว
แบบแท่งที่บรรจุถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามและถ่านกัมมันต์
Filtrasorb 300 98
รูปที่ 4.24 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ของ
ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามที่ผ่านการดูดติดผิวสีน้ำชะมูลฝอยใน
ถังดูดติดผิวแบบแท่งที่กำลังขยาย 500 เท่า 99
รูปที่ 4.25 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ของ
ถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 ที่ผ่านการดูดติดผิวสีน้ำชะมูลฝอยใน
ถังดูดติดผิวแบบแท่งที่กำลังขยาย 500 เท่า 99

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

การกำจัดขยะมูลฝอยในประเทศไทยส่วนใหญ่นั้นจะถูกบำบัดโดยวิธีฝังกลบ (Sanitary Landfill) ซึ่งการฝังกลบทำให้เกิดน้ำจากมูลฝอย รวมทั้งน้ำฝนที่ตกลงมาสู่หลุมฝังกลบ โดยน้ำฝนจะพาสารละลายและสารแขวนลอยออกมา ทำให้เกิดเป็นน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนสูง เรียกว่า น้ำชะมูลฝอย (Leachate) ซึ่งจะปนเปื้อนแหล่งน้ำผิวดินบริเวณใกล้เคียง เพื่อไม่ให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจึงต้องมีการบำบัดก่อนปล่อยสู่แหล่งน้ำสาธารณะ

น้ำชะมูลฝอยเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาทางเคมีและชีวภาพในหลุมฝังกลบมูลฝอย น้ำชะมูลฝอยมักมีสีน้ำตาลดำที่เกิดจากสารประกอบฮิวมิค (Humic Substance) ซึ่งสีของน้ำชะมูลฝอยนี้นอกจากจะก่อให้เกิดความรู้สึกพึงรังเกียจต่อผู้ที่พบเห็นแล้ว หากน้ำชะมูลฝอยมีความเข้มสีสูงปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำจะขัดขวางการเดินทางของแสงแดดลงสู่แหล่งน้ำ เกิดผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ในน้ำ น้ำชะมูลฝอยที่เกิดขึ้นสามารถบำบัดโดยทางชีวภาพ (Biological) กายภาพ (Physical) เคมี (Chemical) หรือแบบผสมของวิธีดังกล่าว การเลือกใช้วิธีการบำบัดขึ้นอยู่กับลักษณะทางกายภาพและเคมีของน้ำชะมูลฝอย Qasim และ Walter (1994) กล่าวว่า ในสถานที่ฝังกลบที่มีอายุน้อย น้ำชะมูลฝอยส่วนใหญ่ประกอบด้วยสารประกอบอินทรีย์มวลโมเลกุลต่ำซึ่งเหมาะที่จะบำบัดได้ดีด้วยวิธีทางชีวภาพ แต่ในกรณีสถานที่ฝังกลบมีอายุมาก ลักษณะน้ำชะมูลฝอยประกอบด้วยสารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อนที่มีมวลโมเลกุลสูง มีการย่อยสลายโดยวิธีทางชีวภาพได้ยาก จึงเหมาะที่จะบำบัดโดยวิธีทางกายภาพเคมี

การดูดติดผิว (Adsorption) โดยใช้ถ่านกัมมันต์เป็นกระบวนการทางกายภาพเคมีวิธีหนึ่งในการบำบัดน้ำเสีย เป็นหนึ่งทางเลือกที่ได้รับความนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากใช้เทคโนโลยีไม่ซับซ้อน มีต้นทุนต่ำ และสามารถนำถ่านกัมมันต์ไปฟื้นสภาพเพื่อนำกลับมาใช้ได้อีก ซึ่งพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์เป็นปัจจัยสำคัญในการกำหนดความสามารถในการดูดติดผิว ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงจะมีอำนาจหรือขีดความสามารถในการดูดติดผิว (Adsorption Capacity) สูงตามไปด้วย (มั่นสิน, 2538) เนื่องจากในกระบวนการกำจัดสีออกจากน้ำชะมูลฝอยโดยการดูดติดผิวถ่านกัมมันต์นี้ โมเลกุลของสีจะเข้ามาติดอยู่ในรูพรุนบริเวณผิวของถ่านกัมมันต์ นอกจากนี้ถ่านกัมมันต์ยังสามารถใช้ในการกำจัดกลิ่น รส โลหะหนัก ยาฆ่าแมลง ผงซักฟอก ฟีนอล รวมถึงสารประกอบไฮโดรคาร์บอน และสารปนเปื้อนอื่นๆ ที่เป็นทั้งสารอินทรีย์และสารอินทรีย์ได้อีกด้วย

การผลิตถ่านกัมมันต์สามารถผลิตได้จากวัตถุดิบที่มีส่วนประกอบของคาร์บอน เช่น ถ่านแอนทราไซต์ บิทูมินัส ลิกไนต์ ถ่านพีท และวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร โดยนำมาเผาเป็นถ่าน จากนั้นจะนำมากระตุ้นโดยวิธีทางกายภาพหรือโดยวิธีทางเคมี เช่น การกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ เฟอริกคลอไรด์ โซเดียมคลอไรด์ เพื่อให้ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้มีประสิทธิภาพในการดูดติดผิวสูงขึ้น

การเตรียมถ่านกัมมันต์โดยใช้วัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรซึ่งสามารถหาได้ง่ายและมีราคาถูก ทำให้ต้นทุนในการบำบัดน้ำเสียต่ำลง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำเมล็ดมะขามที่สามารถหาได้ในท้องถิ่นมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์ อันจะเป็นการแปรรูปวัสดุที่มีราคาถูกให้เป็นวัสดุที่มีมูลค่าและคุณค่าสูงขึ้น

1.2 วัตถุประสงค์การวิจัย

1.2.1 เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามโดยการกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์

1.2.2 เพื่อศึกษาความสามารถในการกำจัดสีจากน้ำชะมูลฝอยของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเมล็ดมะขาม เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายในตลาด

1.2.3 เพื่อศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการกำจัดสีจากน้ำชะมูลฝอยของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเมล็ดมะขาม และหาประสิทธิภาพในการฟื้นสภาพถ่านกัมมันต์

1.2.4 เปรียบเทียบราคาในการผลิตถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามกับถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายในตลาด

1.3 ขอบเขตการศึกษา

1.3.1 เตรียมถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม โดยใช้ซิงค์คลอไรด์เป็นสารกระตุ้น

1.3.2 ศึกษาลักษณะทางกายภาพที่สำคัญและประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเมล็ดมะขาม เปรียบเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมถ่านกัมมันต์และถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300

1.3.3 เปรียบเทียบความสามารถในการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ โดยศึกษาค่าไอโอดีนนัมเบอร์และร้อยละผลผลิต เพื่อเลือกอัตราส่วนโดยน้ำหนักที่เหมาะสมระหว่างวัตถุดิบต่อสารกระตุ้นและอุณหภูมิที่เหมาะสม

1.3.4 นำน้ำชะมูลฝอยจากบ่อพักน้ำชะมูลฝอย สถานที่ฝังกลบมูลฝอยเทศบาลตำบลแสนสุข จ.ชลบุรี มากรองเอาตะกอนแขวนลอยออก แล้วนำมาวัดความเข้มสีในหน่วยแพลทตินัม-โคบอลต์ (Pt-Co) ก่อนนำไปใช้ในการทดลองขั้นต่อไป

1.3.5 ทำการศึกษาปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อการดูดติดผิวสีน้ำชะมูลฝอยของถ่านกัมมันต์ คือ อิทธิพลของพีเอช และอิทธิพลของเวลาสัมผัส

1.3.6 ทำการทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิว (Adsorption Isotherm) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดติดผิวสีน้ำชะมูลฝอยถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามกับถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300

1.3.7 ทำการฟื้นสภาพถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ เพื่อหาประสิทธิภาพในการฟื้นสภาพ โดยทำการทดลองแบบแบทช์ (Batch Test)

1.3.8 ศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานของถ่านโดยเก็บน้ำเสียที่ผ่านถังดูดติดผิวแบบแท่งที่ระยะความลึกต่างๆ และเขียนเส้นโค้งเบรคทรู (Breakthrough Curve) ของการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยโดยการทดลองแบบต่อเนื่อง (Column Test)

1.3.9 เปรียบเทียบราคาในการผลิตถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามกับถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายในตลาด

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 สามารถนำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ไปใช้ในการบำบัดสีน้ำชะมูลฝอย และสามารถพัฒนาไปใช้ในระดับครัวเรือนและระดับอุตสาหกรรมได้

1.4.2 สามารถนำวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรมาใช้ให้เกิดประโยชน์ได้

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

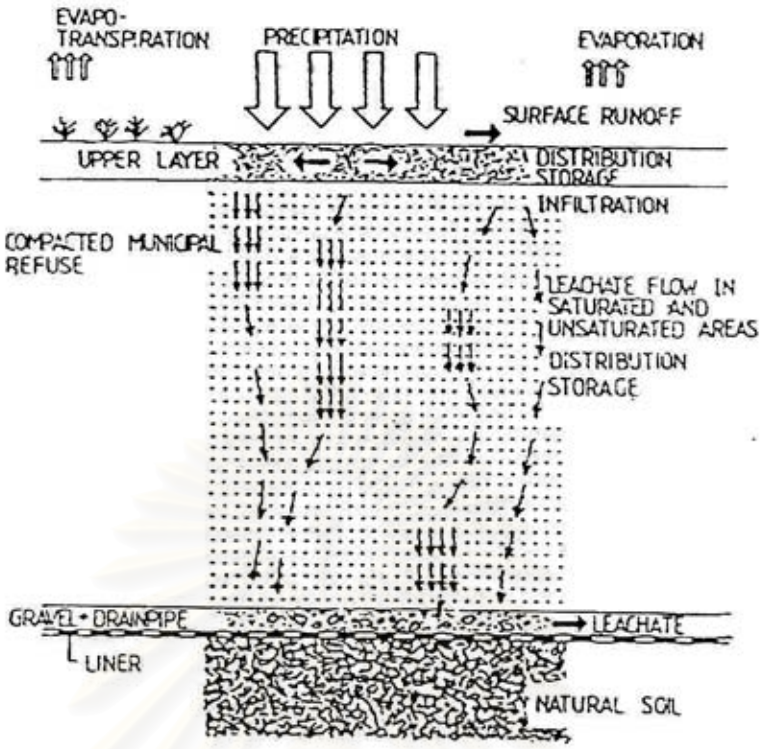
2.1 น้ำชะมูลฝอย (Leachate)

2.1.1 การเกิดน้ำชะมูลฝอย (Leachate Generation)

น้ำชะมูลฝอยเกิดจากของเหลวที่ซึมผ่านชั้นมูลฝอยในหลุมฝังกลบมูลฝอย แล้วชะละลายเอาสารละลายหรือสารแขวนลอยต่างๆ ออกมากับของเหลวนั้น ซึ่งของเหลวที่ซึมผ่านลงมานี้ส่วนใหญ่จะเป็นน้ำฝนที่ตกลงมาบริเวณหลุมฝังกลบ แสดงดังรูปที่ 2.1

น้ำฝนที่ตกลงมาบริเวณหลุมฝังกลบส่วนหนึ่งจะกลายเป็นน้ำบนผิวดิน (Surface Runoff) ภายหลังจากที่ผ่านการระเหย การคายน้ำของดินและพืช ส่วนที่เหลือจะถูกเก็บกักไว้ในชั้นดินจนกระทั่งความชื้นที่สะสมในชั้นดินเกินความจุภาคสนาม (Field Capacity) ของดิน น้ำจะซึมลงสู่ชั้นของขยะมูลฝอย ของเหลวที่ซึมลงมานี้จะสะสมอยู่ในชั้นของขยะมูลฝอย จนกระทั่งถึงค่าความจุภาคสนามของมูลฝอย น้ำเหล่านี้จะชะละลายสารต่างๆ ออกจากมูลฝอย และซึมลงไปสะสมตัวที่พื้นข้างใต้หลุมฝังกลบ เรียกว่า น้ำชะมูลฝอย (Leachate) นอกจากนี้แหล่งที่มาของของเหลวที่ทำให้เกิดน้ำชะมูลฝอยยังมาจากแหล่งอื่นๆ ได้อีก เช่น น้ำใต้ดิน น้ำพุใต้ดิน และของเหลวที่ถูกผลิตขึ้นจากการย่อยสลายของมูลฝอย (Tchobanoglous, Theisen และ Vigil, 1993)

ปัจจัยเบื้องต้นที่มีอิทธิพลต่อการเกิดน้ำชะมูลฝอย คือสภาพภูมิอากาศบริเวณที่ทำการฝังกลบ สภาพภูมิประเทศ ลักษณะดิน สภาพอุทกธรณีวิทยา ดินและวัสดุกลบทับชั้นสุดท้าย รวมทั้งลักษณะของมูลฝอยที่ฝังกลบ ปริมาณของน้ำชะมูลฝอยจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของน้ำที่ซึมเข้าสู่บริเวณฝังกลบ ซึ่งจะสัมพันธ์กับปริมาณฝนที่ตก การระเหยกลับ และการสูญเสียน้ำอื่นๆ โดยปริมาณของน้ำชะมูลฝอยจะเพิ่มขึ้น ถ้าอัตราการซึมได้ของน้ำผ่านดินรองก้นหลุมฝังกลบ (Underlying) และดินกลบทับ (Intermediate and Final Cover Soil) สูง



รูปที่ 2.1 ลักษณะการเกิดน้ำชะมูลฝอย

ที่มา : Stegmann, 1983

2.1.2 องค์ประกอบของน้ำชะมูลฝอย

ส่วนใหญ่จะพบว่าองค์ประกอบของน้ำชะมูลฝอย ขึ้นอยู่กับอายุของสถานที่ฝังกลบซึ่งแสดงถึงความคงตัวของน้ำชะมูลฝอย Chain และ Dewalle (1977) กล่าวว่า สารอินทรีย์ที่พบในน้ำชะมูลฝอยส่วนใหญ่จะประกอบด้วยกรดไขมันระเหยอิสระ (Free Volatile Fatty Acids) อันดับต่อมาเป็นสารที่มีลักษณะคล้ายฟัลวิคซึ่งประกอบด้วยกลุ่ม Carboxyl และ Aromatic Hydroxyl เป็นจำนวนมาก สารอินทรีย์ที่เหลือจำนวนเล็กน้อยประกอบด้วยสารเชิงซ้อนฮิวมิคที่มีลักษณะเหมือนคาร์โบไฮเดรตและมีมวลโมเลกุลสูง สำหรับปัจจัยอื่นที่กำหนดลักษณะของน้ำชะมูลฝอย ได้แก่ ลักษณะสมบัติของมูลฝอย วิธีกำจัดมูลฝอย ช่วงระยะเวลาในการย่อยสลาย (อายุของมูลฝอย) นอกจากนี้อาจแปรเปลี่ยนเนื่องจากสภาวะแวดล้อมขณะเก็บตัวอย่างน้ำ เช่น การเจือจางโดยน้ำฝน ปฏิกิริยาที่เกิดกับดิน รวมทั้งการย่อยสลายที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องภายหลังจากการเก็บตัวอย่างน้ำมาวิเคราะห์ โดยทั่วไปลักษณะของน้ำชะมูลฝอยมักมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำและไอออนของสารอินทรีย์ในปริมาณที่สูง นอกจากนี้จะพบโลหะหลายชนิด เช่น เหล็ก โซเดียม แคลเซียม โปแตสเซียม แมงกานีส และสังกะสี

Andreottola และ Cannas (1992) ได้ศึกษาคุณลักษณะน้ำชะมูลฝอยจากหลุมฝังกลบมูลฝอย 70 แห่งในยุโรป และสหรัฐอเมริกา เปรียบเทียบระหว่างหลุมฝังกลบใหม่ และหลุมฝังกลบเก่า รายละเอียดดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ลักษณะน้ำชะมูลฝอยจากหลุมฝังกลบใหม่และเก่าในยุโรปและอเมริกา

พารามิเตอร์	หลุมฝังกลบใหม่ (น้อยกว่า 2 ปี)		หลุมฝังกลบเก่า
	ช่วงที่พบ (มก./ล.)	ค่าเฉลี่ย (มก./ล.)	(มก./ล.)
BOD_5	2,000-30,000	10,000	100-200
TOC	1,500-20,000	6,000	80-160
COD	3,000-60,000	18,000	100-500
Total suspended solids	200-2,000	500	100-400
Organic nitrogen	10-800	200	80-120
Ammonia nitrogen	10-800	200	20-40
Nitrate	5-40	25	5-10
Total phosphorus	5-100	30	5-10
Ortho phosphorus	4-80	20	4-8
Alkalinity as $CaCO_3$	1,000-10,000	3,000	200-1,000
pH	4.5-7.5	6	6.6-7.5
Total hardness as $CaCO_3$	300-10,000	3,500	200-500
Calcium	200-3,000	1,000	100-400
Magnesium	50-1,500	250	50-200
Chloride	200-3,000	500	100-400
Sulfate	50-1,000	300	20-50
Total iron	50-1,200	60	20-200

ที่มา : Andreottola และ Cannas, 1992

จากข้อมูลที่แสดงองค์ประกอบลักษณะน้ำชะมูลฝอยในตารางที่ 2.1 พบว่ามีสารประกอบหลายชนิดเป็นองค์ประกอบอยู่ในน้ำชะมูลฝอย และตารางที่ 2.2 แสดงข้อมูลสารประกอบอินทรีย์ชนิดต่างๆ ในน้ำชะมูลฝอยซึ่งเป็นสารประกอบอันตราย

ตารางที่ 2.2 สารประกอบอินทรีย์ในน้ำชะมูลฝอย

พารามิเตอร์	หน่วย	ช่วง	ค่าเฉลี่ย
Acenaphthene	µg/l	13.9-21.3	17.60
Benzene	µg/l	1-1,630	11.10
Bis-2-ethythexyl phthalate	µg/l	91-7,900	1,050
Butyl benzyl phthalate	µg/l	10-64.1	37.05
Carbon tetrachloride	µg/l	3-995	28.00
Chlorobenzene	µg/l	3-188	25.20
Chloroethane	µg/l	2-730	17
Chloroform	µg/l	4.4-16	7.14
Di-N-butyl phthalene	µg/l	13-540	28.70
Di-N-octyl phthalene	µg/l	16.1-542	110
Dibromochloromethane	µg/l	22-160	91
Dichlorodifluoromethane	µg/l	100-242.1	171.05
Dichloromethane	µg/l	27.6-58,200	483
Diethyl phthalate	µg/l	12-230	44
Ethylbenzene	µg/l	1-1,680	43.50
Fluoranthene	µg/l	9.56-723	39.10
Fluorene	µg/l	21-32.6	26.80
Fluorotrichloromethane	µg/l	1-183	34
Formaldehyde	µg/l	1-1.4	1.20
Halogen, total organic	µg/l	0.0039-33,400	623.50
Isophorane	µg/l	3.18-520	76
Methyl ethyl Ketone	µg/l	2,100-37,000	19,550
Napthalene	µg/l	4.6-186	33.75
p-dichlorobenzene	µg/l	2-250	14
Phenanthrene	µg/l	8.1-1,220	50.70
Phenol	µg/l	1.1-2,170	174
Phenolics, total	µg/l	0.052-19,000	619
Tannin and lignin, combined	µg/l	0.12-264	1.94
Tetrachloroethylene	µg/l	1-232	16.30

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.2 สารประกอบอินทรีย์ในน้ำชะมูลฝอย (ต่อ)

พารามิเตอร์	หน่วย	ช่วง	ค่าเฉลี่ย
Tetrahydrofuran	μg/l	410-1,400	730
Toluene	μg/l	1-11,800	360
Trichloroethylene	μg/l	1-373.2	19
Vinyl chloride	μg/l	10-3,000	230
Xylene	μg/l	9.4-240	72.50

ที่มา : Christensen, Cossu และ Stegmann, 1992

2.1.3 การบำบัดน้ำชะมูลฝอย

เนื่องจากความเข้มข้นของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ในน้ำชะมูลฝอยมีค่าสูง จึงจำเป็น ต้องบำบัดก่อนปล่อยออกสู่ธรรมชาติ มลสารที่จะต้องบำบัดขึ้นอยู่กับข้อกำหนดของแต่ละประเทศ โดยทั่วไปมีแนวโน้มที่จะต้องบำบัดมลสารเหล่านี้ คือ สารอินทรีย์ สี แอมโมเนีย Halogenated Hydrocarbon โลหะหนัก และสารพิษ (Qasim และ Walter, 1994)

การบำบัดน้ำชะมูลฝอยมีหลายวิธี สรุปได้ดังนี้

1) การบำบัดทางชีววิทยาโดยใช้ออกซิเจน
2) การบำบัดทางชีววิทยาโดยไม่ใช้ออกซิเจน
3) การบำบัดทางกายภาพและเคมี
4) การหมุนเวียนคืนลงไปในหลุมฝังกลบ (Recycling Leachate Through Landfill)
5) การบำบัดโดยปล่อยบนพื้นดิน (Land Treatment)
6) การบำบัดร่วมกับน้ำเสียชุมชน

เนื่องจากลักษณะน้ำชะมูลฝอยเปลี่ยนแปลงตามอายุการฝังกลบ ระบบบำบัดน้ำชะมูลฝอยเพียงขั้นตอนเดียวอาจไม่ได้ผลดี จึงควรประกอบด้วยหลายขั้นตอนตามลักษณะน้ำชะมูลฝอยแต่ละระยะ โดยเริ่มจากการใช้การหมุนเวียนคืนลงไปในหลุมฝังกลบ เพื่อเร่งการสลายตัวทางชีวะของมูลฝอย เนื่องจากช่วงแรกของการฝังกลบจะมีความเข้มข้นของค่า BOD_5 ต่ำ ขั้นต่อไปจะเน้นการกำจัดสารอินทรีย์ และการเกิดไนตริฟิเคชั่นเพื่อบำบัดแอมโมเนียโดยใช้กระบวนการทางชีววิทยา และขั้นสุดท้ายจำเป็นต้องใช้วิธีการทางกายภาพเคมี (Christensen Cossu และ Stegmann, 1992)

2.1.4 การบำบัดน้ำชะมูลฝอยโดยวิธีทางกายภาพเคมี

ในอดีตการบำบัดน้ำชะมูลฝอยโดยวิธีทางกายภาพเคมี นิยมใช้สำหรับบำบัดน้ำชะมูลฝอยจากหลุมฝังกลบเก่า (Cossu, Serra และ Muntoni, 1992) ซึ่งมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ย่อยสลายง่ายต่ำ ($BOD_5/COD<0.2$) แต่ในปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้ร่วมกับวิธีทางชีวภาพเพื่อบำบัดน้ำชะมูลฝอยจากหลุมฝังกลบใหม่ ให้ได้คุณภาพน้ำทิ้งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานกำหนด ซึ่งในปัจจุบันมีความเข้มงวดมากขึ้น สำหรับระบบบำบัดน้ำชะมูลฝอยที่อาศัยวิธีทางกายภาพเคมี นิยมใช้บำบัดน้ำชะมูลฝอยจากหลุมฝังกลบเก่า และใช้เป็นระบบบำบัดขั้นต้น (Pretreatment) หรือขั้นสุดท้ายสำหรับหลุมฝังกลบใหม่

สำหรับการออกแบบระบบบำบัดน้ำชะมูลฝอย การเลือกใช้ระบบบำบัดประเภทใดขึ้นอยู่กับคุณลักษณะน้ำชะมูลฝอย คุณภาพน้ำทิ้งที่ต้องการ เทคโนโลยีที่มีอยู่ และความชำนาญของบุคลากรที่ต้องการ นอกจากนี้อายุของหลุมฝังกลบมูลฝอยก็อาจใช้คาดการณ์ลักษณะน้ำชะมูลฝอยและระบบที่ใช้บำบัดน้ำชะมูลฝอยได้ (ตารางที่ 2.3)

ตารางที่ 2.3 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำชะมูลฝอยด้วยวิธีทางกายภาพเคมี

Treatment process	Author	Initial COD	BOD/ COD	COD/ TOC	Treatment system	% COD removal	Dosage
Chemical Precipitation	Cook and Force	14,900	0.45	3.45	Lime	13	2,760 mg/l $Ca(OH)_{.H15}$
	Ho, et al.	9,100	0.75	-	Ferric chloride	16.3	1,000 mg/l
		9,100	0.75	-	Alum	5.3	1,000 mg/l
		10,800	0.74	-	Lime	3.5	1,840 mg/l
		538	0.27	-	Lime treatment of anaerobic digestor effluent	7.7	2,700 mg/l
		366	0.11	-	Lime treatment of anaerobic digestor effluent	29	1,400 mg/l
	Karr	4,800	0.66	2.73	Alum and lime	40	2,250 mg/l $AL_2(SO_4)_3$ and 800 mg/l Cao
					Ferrosultate	13	2,250 mg/l $AL_2(SO_4)_3$ and 1,000 mg/l Cao
	Roy Weston Inc.	139	0.04	2.1	Lime	0	1,000 mg/l
	Rogers	3,400	0.81	-	Lime	0	1,000 mg/l
	Simensen and Odegaard	1,240	0.66	2.78	Lime and Aeration	8	210 ml Saturated lime/l.leachate

ตารางที่ 2.3 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำชะมูลฝอยด้วยวิธีทางกายภาพเคมี (ต่อ)

Treatment process	Author	Initial COD	BOD/ COD	COD/ TOC	Treatment system	% COD removal	Dosage
		1,234	0.68	2.88	Iron and Aeration	0	200 mg/l. $FeCl_3$
		1,234	0.68	2.88	Alum and Aeration	11	180 mg/l $AL_2(SO_4)_3$
	Thornton and	5,033	0.60	-	Lime	24	1,350 mg/l
	Blanc	12,923	0.57	-	Lime	26	1,200 mg/l
	Van Fleet,et al.	2,000	0.36	-	Alum	31	2,700 mg/l
	Chain and de Walle	2,820	0.65	2.89	Lime	26	450 mg/l
Activated carbon and Ion exchange adsorption	Cook and Force	330	0.07	2.57	Activated carbon batch treatment of aerated lagoon effluent	70	-
		3,290	0.45	3.45	Activated carbon column treatment of lime pretreated	81	15 min after initial Volume turnovers
	Flo, et al.	4,920	0.75	-	Activated carbon batch	34	16,000 mg/l
		7,213	0.75	-	Activated carbon column	59	45 min after3 Volume turnovers
	Karr	5,500	0.66	3.73	Activated carbon batch	60	160,000 mg/l
	Roy Weston Inc.	1271	0.04	2.1	Activated carbon batch	85	10,000 mg/l
	Van Fleet, et al	2,000	0.36	-	Activated carbon column treatment of leachate	71	
					Activated carbon column treatment of alum pretreated	94	
	Chain and de Walle	632	0.65	2.89	Activated carbon column treatment of leachate	70-13	
		546	<0.1	2.55	Activated carbon column treatment of aerated lagoon effluent	70	
		527	<0.1	2.46	Ion exchange column treatment of aerated lagoon effluent	50	
		522	<0.1	2.7	Activated carbon column treatment of anaerobic filter effluent	70	

ตารางที่ 2.3 ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำชะมูลฝอยด้วยวิธีทางกายภาพเคมี (ต่อ)

Treatment process	Author	Initial COD	BOD/ COD	COD/ TOC	Treatment system	% COD removal	Dosage
Chemical oxidation	Cook and Force	330	0.07	2.57	Chlorination	33	65 ml. Bleach/l.
	Ho, et al.	1,500	0.75	-	Chlorination with $Ca(OCl)_2$	8	8,000 mg/l $Ca(ClO)_2$
		7,162	0.75	-	Ozonation	37	7,700 mg O_3/t-hr
	Karr	4,800	0.66	2.73	Chlorination	22	2,000 mg/l cl_2
	Roy Weston Inc.	139	0.04	2.1	Chlorination with $Ca(OCl)_2$	0	1,000 mg/l $Cl_2/(ClO_2)$
		139	0.04	2.1	Ozonation	22	4 hr 34 mg O_3/l-hr
	Chain and de Walle	1,250	-	2.9	Ozonation of anaerobic filter effluent	37	3 hr 600 mg O_3/l-hr
		627	-	2.5	Ozonation of aerated lagoon effluent	43	3 hr 400 mg.O_3/l-hr
Reverse Osmosis	Roy Weston ind.	265	-	2.1	Reverse osmosis	80	80% Permeate yield
	Chain and de Walle	53.330	0.65	2.89	Reverse osmosis of leachate at pH 5.5 cellulose acetate membrane	56	50% Permeate yield
		53.330	0.65	2.89	Reverse osmosis of leachate at pH 8.0 cellulose acetate membrane	89	50% Permeate yield
		900	-	2.9	Reverse osmosis of anaerobic filter effluent Dupont B-9	98	77% Permeate yield
		536	-	2.5	Reverse osmosis of aerated lagoon effluent cellulose acetate membrane		50% Permeate yield

ที่มา : Chain และ Dewalle, 1976

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2.2 สีของน้ำชะมูลฝอย

สีของน้ำในธรรมชาติส่วนใหญ่เกิดจากพืชหรือใบไม้ที่เน่าเปื่อยและมักจะมีสีชา หรืออาจจะเป็นสีที่เกิดจากน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมต่างๆ ซึ่งการที่น้ำมีสีผิดปกติ ทำให้เป็นที่น่ารังเกียจ สีของน้ำอาจแบ่งออกได้เป็นสองชนิด (มั่นสิน, 2538) คือ

1) สีแท้หรือสีจริง (True Color) หมายถึง สีที่ละลายจนกลายเป็นเนื้อเดียวกับน้ำ สีแท้เกิดจากสารอินทรีย์ซึ่งย่อยสลายยาก ประเภทกรดฮิวมิค และฟัลวิค (Humic and Fulvic Acid) ซึ่งเป็นผลมาจากการย่อยสลายพืชต่างๆ กรดอินทรีย์ดังกล่าวเป็นสารที่มีความคงตัวสูงมากจนไม่สลายตัวอีกต่อไปแล้ว ดังนั้น การกำจัดสีแท้ออกจากน้ำจึงไม่อาจกระทำได้โดยง่าย

2) สีปรากฏ (Appearance Color) หมายถึง สีของน้ำที่สามารถกำจัดออกได้โดยวิธีทางกายภาพ เช่น ตกตะกอน หรือ กรอง เมื่อกำจัดสีปรากฏออกไปแล้ว จะทำให้เห็นสีแท้จริงของน้ำ

Artiola และ Fuller (1982) พบว่าองค์ประกอบส่วนใหญ่มากกว่าร้อยละ 60 ของปริมาณสารประกอบคาร์บอนอินทรีย์ทั้งหมด (ทีโอซี) ในน้ำชะมูลฝอยจากหลุมฝังกลบเป็นสารประกอบฮิวมิค (Humic Substances) มีสีน้ำตาลเข้ม โดยที่ปริมาณของกรดฮิวมิคจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆตามอายุของน้ำชะมูลฝอย ซึ่งตรงกันข้ามกับกรดฟัลวิค (Fulvic Acid) ที่จะมีปริมาณลดลงเรื่อยๆ เมื่ออายุของน้ำชะมูลฝอยสูงขึ้น เนื่องจากกรดฟัลวิคจะเปลี่ยนสภาพไปเป็นกรดฮิวมิค

2.2.1 กระบวนการย่อยสลายของน้ำชะมูลฝอยในหลุมฝังกลบ

King และ Elassen (1993) กล่าวว่า การย่อยสลายของน้ำชะมูลฝอยในหลุมฝังกลบ ประกอบด้วย 5 ขั้นตอนดังนี้

1) Initial Adjustment Phase เป็นขั้นแรกของการย่อยสลาย ซึ่งในขั้นนี้จะเป็นการย่อยสลายแบบใช้อากาศ (Aerobic Condition) เนื่องจากยังมีออกซิเจนหลงเหลืออยู่ในหลุมฝังกลบ

2) Transition Phase เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเมื่อออกซิเจนเริ่มขาดแคลน กำลังจะเกิดสภาพไร้อากาศ (Anaerobic Condition) ในขั้นนี้จะใช้ไนเตรทและซัลเฟตในกระบวนการย่อยสลายเกิดผลิตภัณฑ์เป็นก๊าซไนโตรเจน (N_2) และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ในขั้นตอนนี้ ค่าพีเอชของน้ำชะมูลฝอยจะเริ่มลดต่ำลงเนื่องมาจากกรดอินทรีย์ (Organic Acid) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ขึ้นในกระบวนการย่อยสลาย

3) Acid Phase ในขั้นตอนนี้จะแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนย่อยๆ คือ การเปลี่ยนรูปของสารประกอบที่มีมวลโมเลกุลสูง (เช่นไขมัน และโปรตีน เป็นต้น) ไปเป็นสารประกอบที่เหมาะสมสำหรับจุลินทรีย์เพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานและเซลคาร์บอน ถัดไปเป็นขั้นตอนการเปลี่ยน

สารประกอบที่ได้จากขั้นตอนแรกไปเป็นสารประกอบที่มีมวลโมเลกุลต่ำประเภทกรดอะซิติก (Acetic Acid) และสารประกอบที่มีความเข้มข้นต่ำๆ ของกรดฟัลวิค (Fulvic Acid) และกรดอินทรีย์ประเภทอื่นๆซึ่งการย่อยสลายในขั้นตอนที่สามนี้ก๊าซที่เกิดส่วนใหญ่จะเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ส่วนก๊าซไฮโดรเจน (H_2) จะเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องในขั้นตอนนี้เรียกว่า Facultative Bacteria และ Obligate Anaerobic Bacteria

ในขั้นตอนนี้ค่าพีเอชจะลดต่ำลง เนื่องจากการเพิ่มมากขึ้นของกรดอินทรีย์ (Organic Acid) และปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ส่วนค่าความสกปรกในรูปของบีโอดี (BOD) ซีโอดี (COD) และค่าการนำไฟฟ้า (Conductivity) ของน้ำชะมูลฝอยจะเพิ่มขึ้น เนื่องจากค่าพีเอชที่ต่ำจะทำให้ความสามารถในการละลายของกรดอินทรีย์และธาตุอาหารในน้ำชะมูลฝอยดีขึ้น

4) Methane Fermentation Phase จุลินทรีย์ในขั้นตอนนี้จะเปลี่ยนกรดอะซิติกและก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ที่เกิดจากแบคทีเรียชนิดที่สร้างกรด (Acid Former) ในขั้นตอนที่ 3 ไปเป็นก๊าซมีเทน (CH_4) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการย่อยสลายนี้เป็นจุลินทรีย์ที่สร้างก๊าซมีเทน (Methane Former) ซึ่งอยู่ได้ในสภาพไร้อากาศเท่านั้น ในขั้นตอนนี้ Acid Former และ Methane Former จะทำงานควบคู่กัน โดยอัตราการสร้างกรดจะลดลงเรื่อยๆ ส่งผลให้ค่าพีเอชของน้ำชะมูลฝอยเพิ่มสูงขึ้น ทำให้โลหะหนักละลายน้ำได้น้อยลง ส่งผลให้ค่าโลหะหนักในน้ำชะมูลฝอยลดลงด้วย

5) Maturation Phase ขั้นตอนสุดท้ายจะเกิดขึ้นหลังจากสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ถูกเปลี่ยนไปเป็นก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แล้ว เมื่อความชื้นยังคงเหลืออยู่ในช่องว่างของมูลฝอย อินทรีย์สารที่ยังไม่ได้สัมผัสกับความชื้นจะถูกย่อยสลายและเปลี่ยนรูปต่อไป ในขั้นตอนนี้อัตราการเกิดก๊าซจะลดลงเรื่อยๆ เนื่องจากสารอินทรีย์ที่เหลืออยู่เป็นประเภทย่อยสลายยาก ก๊าซที่เกิดส่วนใหญ่ได้แก่ก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

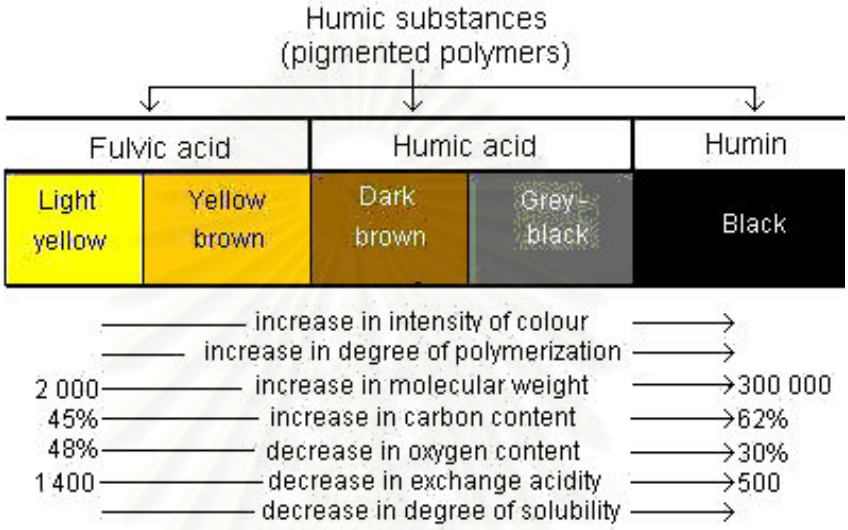
2.2.2 องค์ประกอบของสารประกอบฮิวมิค

สารประกอบฮิวมิค (Humic Substance) เป็นกลุ่มสารที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงเมื่อเทียบกับสารอื่น มีสีน้ำตาลจนถึงดำ โดยปฏิกิริยาการสังเคราะห์ขั้นที่สอง (Secondary Synthesis Reactions) ซึ่งมีสารที่ละลายอยู่เป็นส่วนประกอบ คือ กรดฮิวมิค (Humic Acid) กรดฟัลวิค (Fulvic Acid) และฮิวมิน (Humin)

1) กรดฮิวมิค เป็นส่วนหนึ่งของสารประกอบฮิวมิคที่ไม่ละลายน้ำในสภาวะเป็นกรด (พีเอช <2) แต่จะละลายได้ดีที่พีเอชสูงๆ พบเป็นส่วนใหญ่ในสารประกอบฮิวมิค มีสีน้ำตาลเข้มจนถึงเทาดำ

2) กรดฟัลวิค เป็นส่วนหนึ่งของสารประกอบฮิวมิคที่ละลายน้ำได้ในทุกสภาวะของพีเอช จะพบเมื่อแยกกรดฮิวมิคออกแล้วด้วยกระบวนการตกสะสมของกรด (Acidification) กรดฟัลวิคมีสีเหลืองอ่อนถึงเหลือง-น้ำตาล

3) ฮิวมิน เป็นส่วนหนึ่งของสารประกอบฮิวมิคที่ไม่ละลายน้ำในทุกสภาวะของพีเอช และฮิวมินจะมีสีดำ



รูปที่ 2.2 คุณสมบัติทางเคมีของสารประกอบฮิวมิค

ที่มา : Stevenson, 1982

Kang, Shin และ Park (2002) ได้ศึกษาถึงองค์ประกอบของสารประกอบฮิวมิคในน้ำชะมูลฝอยจากหลุมฝังกลบในประเทศเกาหลี ซึ่งพบว่ามีความแตกต่างกันโดยขึ้นอยู่กับอายุของหลุมฝังกลบ เมื่อหลุมฝังกลบ G มีอายุต่ำกว่า 5 ปี, หลุมฝังกลบ P มีอายุระหว่าง 5-10 ปี และหลุมฝังกลบ N มีอายุมากกว่า 10 ปี แสดงดังตารางที่ 2.4

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.4 องค์ประกอบทางเคมีและอัตราส่วนของสารประกอบฮิวมิคในน้ำชะมูลฝอย

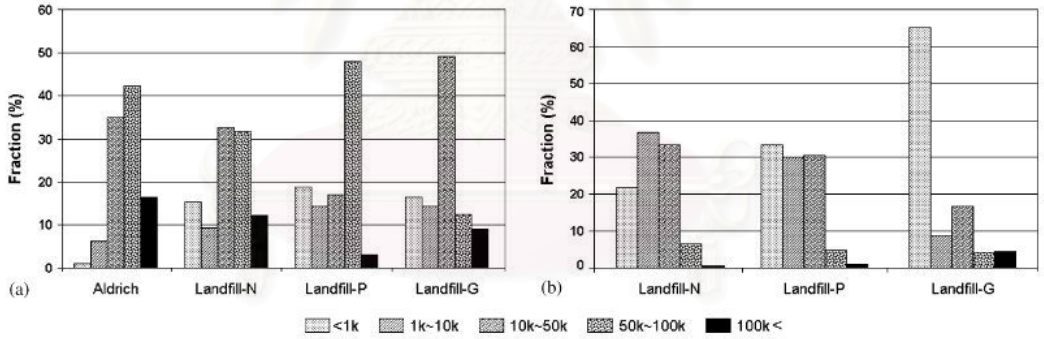
ธาตุ / อัตราส่วน	กรดฮิวมิค					กรดฟัลวิค				
	หลุมฝังกลบ			ค่าอ้างอิง		หลุมฝังกลบ			ค่าอ้างอิง	
	G	P	N	ในน้ำ	ในดิน	G	P	N	ในน้ำ	ในดิน
C	56.2	57.1	56.1	53-60	54-62	45.6	53.6	50.9	42-51	43-53
H	8.8	7	7.2	3.7-5.1	2.9-5.8	9.6	6.7	6.4	3.6-4.3	3.3-5.9
O	26.7	30.2	29.3	33.4-40.8	29.5-36.8	32.8	33.8	35.2	44.2-53.2	42.9-51.4
N	8.3	5.7	7.4	2.0-2.1	1.6-4.8	12	2.5	2.4	1.0-1.6	0.7-4.1
S	ND	ND	ND	-	-	ND	3.4	5.1	-	-
H/C	1.54	1.48	1.88	0.74-1.15	0.56-1.29	1.51	1.49	2.53	0.85-1.23	0.75-1.65
O/C	0.39	0.4	0.36	0.42-0.58	0.36-0.51	0.52	0.47	0.54	0.65-0.95	0.61-0.90
N/C	0.11	0.09	0.13	0.029-0.034	0.022-0.076	0.04	0.04	0.23	0.017-0.033	0.011-0.082

*ค่าอ้างอิง = งานวิจัยของ Visser SA.(1983) และ Steelink C.(1985)

*ND = Not detected

ที่มา : Kang, Shin และ Park, 2002

อัตราส่วน H/C ที่สูงแสดงให้เห็นว่าจะมีโครงสร้างทางเคมีของกลุ่มอะลิฟาติก (Aliphatic) ส่วนค่า O/C ที่ต่ำก็แสดงให้เห็นว่ามีออกซิเจนรวมตัวกับคาร์โบไฮเดรตได้น้อย ซึ่งได้วิเคราะห์หาร้อยละการกระจายของน้ำหนักโมเลกุลกรดฮิวมิคและกรดฟัลวิค ดังรูปที่ 2.3



*Aldrich = กรดฮิวมิคทางการค้า ของบริษัท Aldrich

รูปที่ 2.3 ร้อยละการกระจายน้ำหนักโมเลกุลของ (a) กรดฮิวมิค (b) กรดฟัลวิค

ที่มา : Kang, Shin และ Park, 2002

จากรูปที่ 2.3 พบว่าการกระจายตัวของน้ำหนักโมเลกุลของกรดฮิวมิคมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุของหลุมฝังกลบ และมีขนาดโมเลกุลกับกลุ่มอะโรมาติก (Aromatic) ที่เล็กกว่ากรดฮิวมิคทางการค้า ส่วนกรดฟัลวิคในหลุมฝังกลบจะมีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่ากรดฮิวมิค ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากรดฟัลวิค เป็นสารก่อมลพิษที่ไวต่อการเปลี่ยนแปลง จึงสามารถส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้มากกว่ากรดฮิวมิค

2.2.3 การวัดสีน้ำชะมูลฝอย

การวัดสีของน้ำต้องกระทำทันทีหลังจากเก็บตัวอย่างน้ำมาแล้วในขวดเก็บตัวอย่างน้ำที่สะอาด แต่ถ้าไม่สามารถกระทำได้ในทันที จะต้องเก็บตัวอย่างน้ำไว้ในที่ที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า 4 องศาเซลเซียส โดยทั่วไปการวัดความเข้มสีของตัวอย่างน้ำจะวัดความเข้มสีในรูปของสีจริงซึ่งเป็นความเข้มสีที่กำจัดเอาสารแขวนลอยออกแล้ว การกำจัดสารแขวนลอยที่ใช้กันมี 2 วิธี คือ

1) วิธีการกรอง (Filtration System) โดยการกรองผ่านกระดาษกรอง Glass Fiber Filter GF/C (ขนาดรูพรุน 1.2 ไมครอน)

2) วิธีการหมุนเหวี่ยง (Centrifuge System) โดยการหมุนเหวี่ยงที่ 1,000 รอบ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

เนื่องจากสีของน้ำจะขึ้นกับความเป็นกรด-ด่าง ของน้ำอย่างมาก โดยที่สีของน้ำจะเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชของน้ำเพิ่มขึ้น โดยทั่วไปเมื่อวัดสีของน้ำแล้วมักจะรายงานผลการตรวจวัดสีพร้อมกับรายงานพีเอชของน้ำนั้นไว้ด้วย อย่างไรก็ตามในทางปฏิบัติโดยทั่วไปมักจะตรวจวัดความเข้มสีของตัวอย่างน้ำโดยกำหนดหลักเกณฑ์การวัดสีไว้ดังนี้ คือ

1) วัดความเข้มสีอุณหภูมิห้อง

2) วัดความเข้มสีที่สภาพตัวอย่างน้ำที่เป็นอยู่ โดยแสดงพีเอชของตัวอย่างน้ำขณะตรวจวัดสีไว้ในรายงานผลความเข้มสี

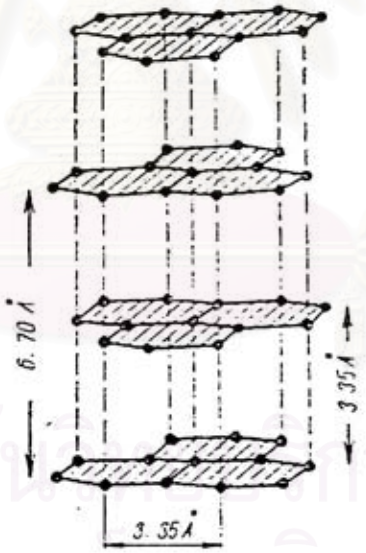
3) วัดความเข้มสีของตัวอย่างน้ำที่ปรับสภาพแล้วโดยการปรับพีเอชของตัวอย่างน้ำให้ได้เท่ากับค่ามาตรฐานที่กำหนดคือ 7.6 (APHA, 1998)

การวัดสีในปัจจุบันมีหลายวิธี เช่น วัดโดยหน่วยซิลิกา (Silica Scale Method) วัดโดยหน่วยแพลทตินัม-โคบอลต์ (Platinum-Cobalt Method), วัดโดยหน่วยโลวิบอนด์ (Lovibond Method) หรือวัดโดยหน่วยเอดีเอ็มไอ (ADMI Method; ADMI = American Dye Manufacturing Institute) เนื่องจากสีของน้ำชะมูลฝอยเกิดจากสารประกอบฮิวมิค เป็นสารอินทรีย์เชิงซ้อน มักจะมีสีเหลืองหรือสีน้ำตาล ซึ่งการวัดสีของน้ำที่เกิดจากสารอินทรีย์ตามธรรมชาตินั้น เหมาะที่จะใช้วิธีวัดสีในหน่วยแพลทตินัม-โคบอลต์ (ASTM, 2000) โดยสีมาตรฐานที่ใช้จะเตรียมมาจากสารละลายมาตรฐานแพลทตินัม-โคบอลต์ สีที่มีความเข้มข้น 1 หน่วยแพลทตินัม-โคบอลต์ จะเกิดจากสารละลายแพลทตินัมจำนวน 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปของคลอโรแพลทติเนท (Chloroplatinate Ion) ซึ่งสีมาตรฐานที่เตรียมได้จะมีสีเหลืองใกล้เคียงกับสีของน้ำชะมูลฝอย วิธีวัดสีในหน่วยแพลทตินัม-โคบอลต์แสดงในภาคผนวก ก.

2.3 ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon) เป็นถ่านซึ่งมีประสิทธิภาพในการดูดติดผิวสูง สามารถดูดติดสารที่อยู่ในสภาพของก๊าซและของเหลวได้จึงมีประโยชน์ต่ออุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น ผลิตภัณฑ์อาหาร ได้แก่ กระบวนการทำให้น้ำบริสุทธิ์เคมีและยา น้ำดื่ม โดยใช้ถ่านกัมมันต์ดูดกลิ่นและฟอกสี นอกจากนี้ ถ่านกัมมันต์ยังใช้ในการกำจัดน้ำเสียและมลพิษต่างๆ ซึ่งถ่านกัมมันต์สามารถผลิตขึ้นจากการเผา (Carbonization) วัตถุดิบที่มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ

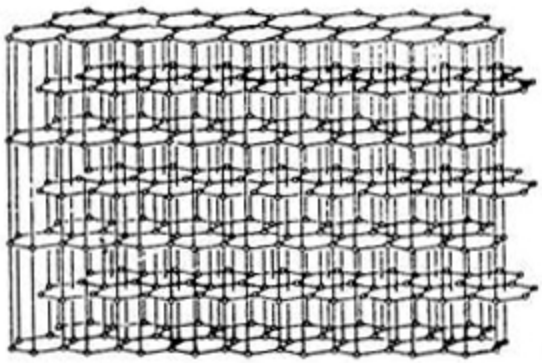
ถ่านกัมมันต์มีโครงสร้างเป็นกลุ่มของคาร์บอน ซึ่งมีลักษณะคล้ายกราไฟท์ (Graphite) แต่แตกต่างกันที่พื้นที่ผิวภายในที่มากมายของถ่านกัมมันต์ กราไฟท์ประกอบด้วยแผ่นชั้นที่เกิดจากอะตอมของคาร์บอนเรียงตัวแบบหกเหลี่ยมด้านเท่า (Regular Hexagons) ซึ่งเหมือนกับสารประกอบอินทรีย์อะโรเมติค ระยะห่างระหว่างอะตอมของคาร์บอนในแต่ละแผ่นชั้นมีขนาด 1.42 อังสตรอม โดยในแต่ละแผ่นชั้นมีลักษณะขนานกันระยะห่างระหว่างแผ่นชั้นมีขนาด 3.35 อังสตรอม อิเลคตรอน 3 ใน 4 ตัวของคาร์บอนสร้างพันธะโควาเลนท์ (Covalent Bond) กับอะตอมที่ติดกัน ขณะที่อิเลคตรอนตัวที่ 4 เคลื่อนที่ระหว่างโครงสร้างวาแลนซ์ ดังรูปที่ 2.4 และรูปที่ 2.5



รูปที่ 2.4 โครงสร้างของกราไฟท์

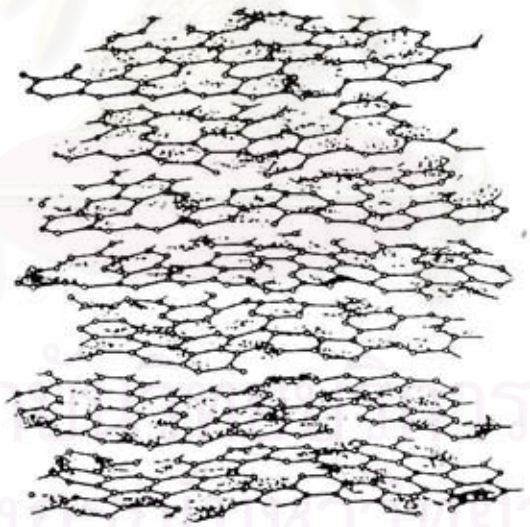
ที่มา : Smisek และ Cernyn, 1970

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.5 โครงสร้างของกราไฟท์
ที่มา : Faust และ Aly, 1987

โครงสร้างของถ่านกัมมันต์แตกต่างจากกราไฟท์เล็กน้อยในระหว่างกระบวนการคาร์บอนไน-เซชั่น ซึ่งโครงสร้างนี้เป็นไมโครคลิสตอลไลท์ (Microcrystallites) ประกอบด้วยวงหกเหลี่ยมด้านเท่าของอะตอมคาร์บอนผสมกัน เส้นผ่านศูนย์กลางของชั้นคาร์บอนที่สร้างไมโครคลิสตอลไลท์จะมีขนาดประมาณ 150 อังสตรอม และระยะห่างระหว่างไมโครคลิสตอลไลท์มีค่าอยู่ระหว่าง 20-50 อังสตรอม ดังรูปที่ 2.6



รูปที่ 2.6 ลักษณะการแบ่งชั้นของโครงสร้างถ่านกัมมันต์
ที่มา : Faust และ Aly, 1987

2.3.1 คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ที่ถูกใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสียโดยทั่วไป จะมีคุณสมบัติและส่วนประกอบทางเคมี ดังตารางที่ 2.5 ซึ่งในการคัดเลือกถ่านกัมมันต์ก่อนนำไปใช้ ควรพิจารณาถึงคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ โดยเฉพาะค่าพื้นที่ผิว ความพรุน และโครงสร้างทางเคมี โดยค่าพื้นที่ผิวนั้นมีความสัมพันธ์กับปริมาตรโพรง ส่วนขนาดของโพรงจะใหญ่หรือเล็กแตกต่างกันนั้น จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิและการออกซิไดซ์ในระหว่างการกระตุ้น

ตารางที่ 2.5 คุณสมบัติและส่วนประกอบทางเคมีของถ่านกัมมันต์โดยทั่วไป

คุณสมบัติ	ส่วนประกอบทางเคมี
ความหนาแน่น	Sulfur
การกระจายขนาดอนุภาค	Sulfides
ความพรุน	Sulfated
พื้นที่ผิว	Phosphate
อัตราการกรอง	Chlorides
ความเปียกน้ำ	Iron
ความเป็นผง	Copper
อุณหภูมิเกิดประกายไฟ	Zinc
การนำไฟฟ้า	Calcium
การกักเก็บน้ำมัน	Magnesium
ความชื้น	Silica
พีเอช	
เถ้า	
ความต้านทานการสึกกร่อน	
ความแข็ง	
กรดอนินทรีย์ละลายน้ำ	

ที่มา : Faust และ Aly, 1987

2.3.1.1 พื้นที่ผิว (Surface Area)

ถ่านกัมมันต์โดยทั่วไปมีค่าพื้นที่ผิวอยู่ระหว่าง 450-1,500 ตารางเมตรต่อกรัม โดยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากวัตถุดิบแต่ละชนิดก็จะมีค่าพื้นที่ผิวที่แตกต่างกัน ตัวอย่างดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.6 พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ชนิดต่างๆ

ถ่านกัมมันต์	วัตถุดิบ	ค่าพื้นที่ผิว (m^2/g)
PCC SGL	Bituminous coal	1,000-1,200
PCC BPL	Bituminous coal	1,000-1,200
PCC RB	Bituminous coal	1,200-1,400
PCC GW	Bituminous coal	800-1,000
Columbia CXA/SXA	Coconut shell	1,100-1,300
Columbia AC	Coconut shell	1,2001,400
Columbia G	Coconut shell	1,100-1,150
Darco S 51	Lignite	500-550
Darco G 60	Lignite	750-800
Darco KB	Wood	950-1,000
Hydro Darco	Lignite	500-600
Nuchar Aqua	Pulp mill residue	550-650
Nuchar C	Pulp mill residue	1,050-1,100
Nuchar (various)	Pulp mill residue	300-1,400
Norit (various)	Wood	700-1,400

ที่มา : Faust และ Aly, 1987

2.3.1.2 ความเป็นโพรง (Porosity)

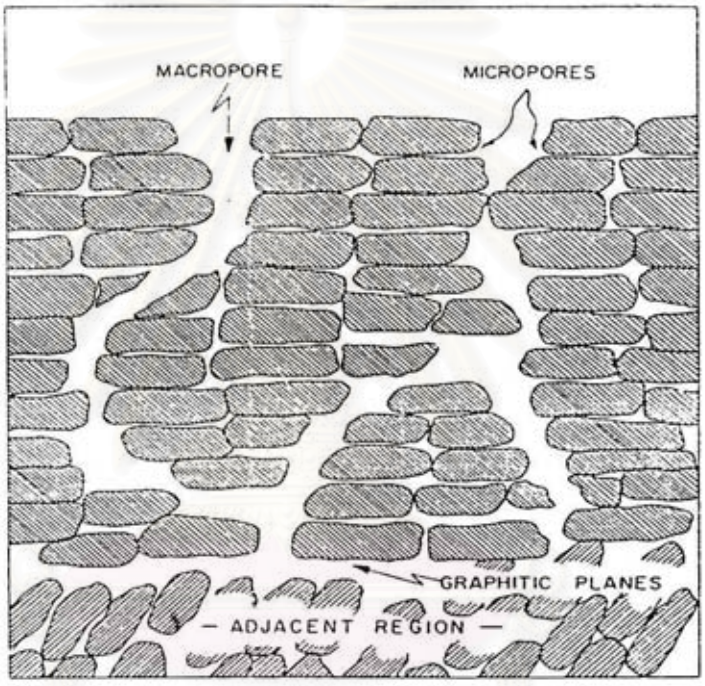
ปริมาตรโพรงของถ่านกัมมันต์ โดยทั่วไปมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 0.5-1.5 มิลลิลิตรต่อกรัม จากลักษณะโครงสร้างของความเป็นโพรง สามารถแบ่งได้ 3 แบบ คือ

1) มาโครพอร์ (Macropores) รัศมีของมาโครพอร์มีค่าอยู่ในช่วง 5,000 -20,000 อังสตรอม ปริมาตรโพรงมีค่าระหว่าง 0.2-0.8 มิลลิลิตรต่อกรัม และพื้นที่ผิวมีค่า 0.5-2 ตารางเมตรต่อกรัม

2) ทรานซิชันนอลพอร์ (Transitional Pores) รัศมีของทรานซิทชันนอล-พอร์ มีค่าอยู่ในช่วง 40-200 อังสตรอม โมเลกุลเดี่ยว และโพลีโมเลกุล (Polymolecule) สามารถถูกดูดติดได้ที่พื้นผิวบริเวณนี้ ปริมาตรโพรงมีค่าอยู่ระหว่าง 0.02-0.1 มิลลิลิตรต่อกรัม พื้นที่ผิวบริเวณนี้มีค่าอยู่ในช่วง 20-70 ตารางเมตรต่อกรัม

3) ไมโครพอร์ (Micropores) รัศมีของไมโครพอร์มีค่าน้อยกว่า 20 อังสตรอม ปริมาตรโพรงมีค่าระหว่าง 0.15-0.5 มิลลิลิตรต่อกรัม และมีค่าพื้นที่ผิวมากที่สุดประมาณ 95 เปอร์เซนต์ของพื้นที่ผิวทั้งหมด

ลักษณะของโพรงถ่านกัมมันต์แสดงดังรูปที่ 2.7 โดยมาโครพอร์จะเปิดโดยตรงสู่ผิวภายนอกของถ่านกัมมันต์ ส่วนทรานซิทชันนอลพอร์จะแตกสาขาออกมาจากมาโครพอร์และไมโครพอร์แตกสาขาออกจากทรานซิทชันนอลพอร์ ตามลำดับ ซึ่งทรานซิทชันนอลพอร์จะเป็นส่วนสำคัญต่อการดูดติดผิวมากที่สุด เนื่องจากโมเลกุลของสารถูกดูดติดผิวจะถูกดูดติดที่บริเวณนี้เป็นส่วนใหญ่และหลุดออกไปได้ยาก

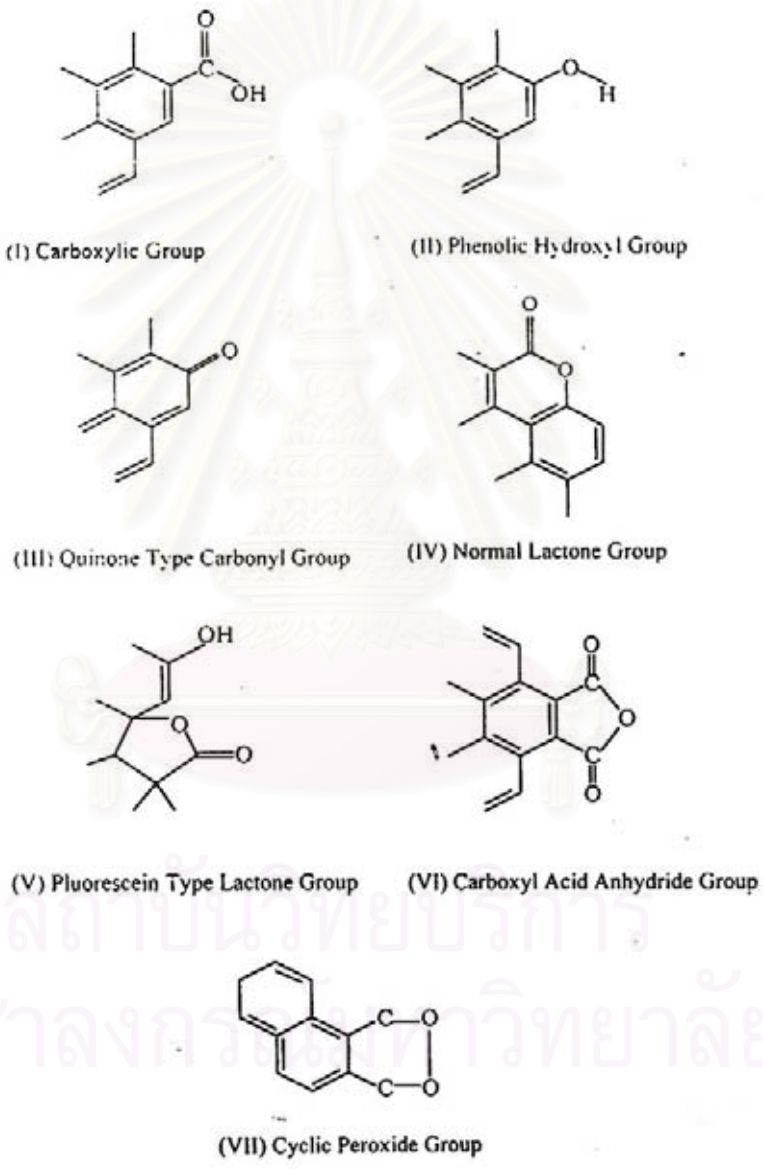


รูปที่ 2.7 ลักษณะบริเวณของพื้นที่ผิวถ่านกัมมันต์
ที่มา : Faust และ Aly, 1987

2.3.1.3 โครงสร้างทางเคมี

คุณสมบัติทางเคมีของถ่านกัมมันต์จะขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์และรูปแบบของการกระตุ้น พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ส่วนใหญ่เป็นระนาบ และไม่มีขั้ว (Non-polar) และมีลักษณะการเรียงตัวซ้อนกันเป็นชั้นๆ ซึ่งโครงสร้างของคาร์บอนที่อยู่ในแต่ละชั้นจะเปลี่ยนไปเมื่อทำการเผากระตุ้น กลุ่มของชั้นคาร์บอนที่เปลี่ยนไปนั้นมีผลกระทบต่อระยะทางของชั้นคาร์บอนที่อยู่ติดกัน ซึ่งจะทำให้โครงสร้างของไมโครคริสตอลไลท์ (Microcrystallites) เปลี่ยนแปลงไปด้วย อะตอมตัวริมสุดของไมโครคริสตอลไลท์จึงสามารถทำปฏิกิริยากับอะตอมของ

ธาตุอื่นๆ ได้ เช่น ออกซิเจนและไฮโดรเจน ด้วยเหตุนี้จึงทำให้เกิดกลุ่มฟังก์ชันนอลหลายชนิดที่แตกต่างกันบนพื้นผิวของคาร์บอน โดยโครงสร้างพื้นผิวของคาร์บอน-ออกซิเจน (Carbon-Oxygen Surface Structure) เป็นลักษณะของพื้นผิวที่สำคัญที่มีผลต่อคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ ซึ่งขึ้นกับสภาวะที่ใช้ในการกระตุ้น กลุ่มของฟังก์ชันนอลที่พบบนพื้นผิวของคาร์บอน ประกอบด้วยกลุ่ม Carboxylic, Phenolic Hydroxyl, Quinone Type Carbonyl, Normal Lactone, Pluorescein Type Lactone, Carboxyl Acid Anhydride และ Cyclic Peroxide ดังแสดงในรูปที่ 2.8



รูปที่ 2.8 กลุ่มฟังก์ชันนอลบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์
ที่มา : Eckenfelder, 1981

ในการกระตุ้นคาร์บอนที่อุณหภูมิ 1,000 องศาเซลเซียส ด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์บริสุทธิ์ ตามด้วยการอบด้วยออกซิเจนที่อุณหภูมิห้อง จะได้คาร์บอนที่มีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นและมีค่าพีเอชเพิ่มขึ้นด้วย แต่หากทำการกระตุ้นคาร์บอนด้วยออกซิเจนที่อุณหภูมิ 200 ถึง 400 องศาเซลเซียส ลักษณะพื้นที่ผิวจะมีคุณสมบัติตรงข้าม นั่นคือวิธีการกระตุ้นที่อุณหภูมิต่างกันจะทำให้ลักษณะกรด-เบสที่พื้นผิวต่างกัน โดยการออกซิไดซ์คาร์บอนที่อุณหภูมิต่ำนั้น คาร์บอนที่ได้จะสามารถดูดติดผิวไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) ได้ดีจะเรียกว่าคาร์บอนแบบแอล (L-type Carbon) แต่ถ้าทำการกระตุ้นที่อุณหภูมิสูงจะได้คาร์บอนแบบเอช (H-type Carbon) ซึ่งสามารถดูดติดผิวไฮโดรเจนไอออน (H^+) ได้ดี ซึ่งแบ่งช่วงอุณหภูมิการกระตุ้นที่ 500-600 องศาเซลเซียส คาร์บอนแบบแอลจะใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นตัวออกซิไดซ์ที่สำคัญ ส่วนคาร์บอนแบบเอชจะใช้ตัวออกซิไดซ์เป็นคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ในตารางที่ 2.7 แสดงปริมาณเบสที่ใช้ในการสะเทินพื้นผิวที่เป็นกรดของคาร์บอน หมู่ฟังก์ชันแนลและพื้นที่ผิวของคาร์บอน (Faust และ Aly, 1987)

ตารางที่ 2.7 ความเป็นกรดของพื้นที่ผิวหมู่ฟังก์ชันนอลและพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์บางชนิด

Sample	Base Consumption (Meq/100g)				Surface Groups* (Meq/100g)				BET (N_2)
	NaOEt	NaOH	Na_2CO_3	$NaHCO_3$	IV	III	II	I	(m^2/g)
LC325	59	48	28	30	11	20	-	30	1,076
LC325 O[a]	310	292	205	150	18	87	55	150	861
LC325 Or[b]	246	210	129	92	36	81	36	92	840
LC325 Od[c]	65	55	15	10	10	40	5	10	1,015
S51	108	71	48	40	37	23	8	40	586
S51 O	421	357	245	185	64	112	60	185	596
S51 OR	215	181	112	80	34	70	32	80	836
S51 OD	60	60	25	20	-	35	5	20	725
P607	265	203	132	109	62	71	23	109	646
P607 O	350	267	185	152	83	82	33	152	613
P607 OR	298	223	142	107	75	81	35	107	640

a = oxidized $(NH_4)_2S_2O_3$

b = oxidized followed by reduction with hydrogen at room temperation

c = oxidized followed by vacuum outgasing at 890°C

*surface groups : I = carboxylic group, II = phenolic hydroxyl group,

III = quinine type carbonyl group, IV = normol lactone group

ที่มา : Faust และ Aly, 1987

ตารางที่ 2.8 คุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ในท้องตลาด

Physical Properties and Specifications	Atlas Darco	Calgon Fil-trasorb 300	Calgon Fil-trasorb 400	Westvaco		Witco 517
				8×10	12×40	
Surface area, m^2/g(BET)	600-650	950-1,050	1,000-1,200	850	850	1,050
Apparent density, g/cc	0.38	0.48	0.44	-	-	0.48
Density, backwashed and drained, lb/ft^3	24	26	25	30	30	30
Real density, g/cc	-	3.1	3.1	-	-	-
Particle density, g/cc	0.67	1.3-1.4	1.3-1.4	1.4	1.4	0.92
Effective size	-	0.8-0.9	0.55-0.65	0.90	0.65	-
Uniformity coefficient	-	1.9 or less	1.9 or less	1.8	1.6	-
Pore volume, cc/g	0.98	0.85	0.94	-	-	0.60
Mean particle diameter, mm	1.05	1.5-1.7	0.9-1.1	-	-	-
Sieve size (U.S. Std. Series)						
Larger than no. 8-max. %	-	8	-	2	-	-
Larger than no. 12-max. %	5	-	5	-	2	a
Larger than no. 30-max. %	-	5	-	1	-	a
Larger than no. 40-max. %	5	-	5	-	1	-
Iodine number	650	900	1,000	850	850	-
Abrasion no., minimum	-	70	75	70	70	85
Ash, %	-	8	8.5	7	7	0.5
Moisture as packed, max. %	-	2	2	2	2	-

ที่มา : Faust และ Aly, 1987

จากตารางที่ 2.8 เป็นคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ถูกนำมาใช้ในการเลือกชนิดของถ่านกัมมันต์ให้เหมาะสมกับการใช้งาน ส่วนคุณสมบัติอื่นๆ เช่น ถ่านกัมมันต์ที่มีโครงสร้างพื้นผิวของออกซิเจนที่มีขั้ว (Polar) เหมาะสำหรับการดูดติดผิวสารอินทรีย์ที่มีขั้ว (Polar Organic) ส่วนถ่านกัมมันต์ที่ไม่มีโครงสร้างพื้นผิวของออกซิเจน เหมาะสำหรับดูดติดผิวโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว (Non-polar) ซึ่งหมู่ฟังก์ชันนอลบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์จะมีผลอย่างมากต่อความจุของการดูดติดผิว เช่น หมู่ฟังก์ชันนอลคาร์บ็อกซิล (Carboxylic Group) จะทำให้ความจุการดูดติดผิวฟีนอลลดลง เป็นต้น (อธิชัย, 2539)

2.3.2 ชนิดของถ่านกัมมันต์

ชนิดของถ่านกัมมันต์ซึ่งแบ่งตามเกณฑ์ต่างๆ คือ (เกศรา, 2531)

2.3.2.1 แบ่งตามชนิดของตัวกระตุ้น

- เคมี (Chemical Activated Carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการใช้สารเคมีทำปฏิกิริยาเคมีกับผิวคาร์บอน มักเป็นพวกที่มีรูพรุนขนาดใหญ่

- กายภาพ (Physical Activated Carbon) เป็นถ่านกัมมันต์ที่ได้จากการใช้ก๊าซออกซิไดซ์ มักเป็นพวกที่มีรูพรุนขนาดเล็ก

2.3.2.2 แบ่งตามขนาดรูพรุนบนผิวคาร์บอน

- ขนาดเล็ก (Micropores) คือ ถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนไม่เกิน 15 นาโนเมตร มักใช้ในการดูดติดผิวก๊าซหรือไอระเหย

- ขนาดกลาง (Transitional pores) คือ ถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนประมาณ 15-100 นาโนเมตร มักใช้ในปฏิกิริยาที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic Reaction)

- ขนาดใหญ่ (Macropores) คือ ถ่านกัมมันต์ที่มีรัศมีของรูพรุนใหญ่กว่า 100 นาโนเมตร มักใช้ในการฟอกสีและการผลิตยา

2.3.2.3 แบ่งตามความหนาแน่นของถ่านกัมมันต์ที่ได้

- ความหนาแน่นต่ำ ถ่านกัมมันต์ประเภทนี้มักใช้ในสภาวะที่เป็นสารละลาย เช่น การฟอกสีน้ำตาลดิบ หรือการทำให้น้ำบริสุทธิ์ ฯลฯ

- ความหนาแน่นสูง ถ่านกัมมันต์ประเภทนี้มักใช้ดูดก๊าซพิษหรือไอระเหย

2.3.2.4 แบ่งตามชนิดของสารที่ถูกดูดติดผิว

- ก๊าซ (Gas Adsorbent) คือ ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการดูดติดผิวก๊าซพิษและไอสารอินทรีย์ มักใช้ถ่านจากคาร์บอนไนซ์และมีความแข็ง (Hard Artificial Char) เป็นวัตถุดิบในการผลิต

- สี (Color Adsorbent) คือ ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการฟอกสี มักใช้ถ่านจากการคาร์บอไนซ์และไม่แข็ง (Soft Artificial Char)

- โลหะ (Metal Adsorbent) คือ ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการแยกโลหะต่างๆ เช่น แยก ทอง, เงิน ออกจากแร่ที่ขุดได้

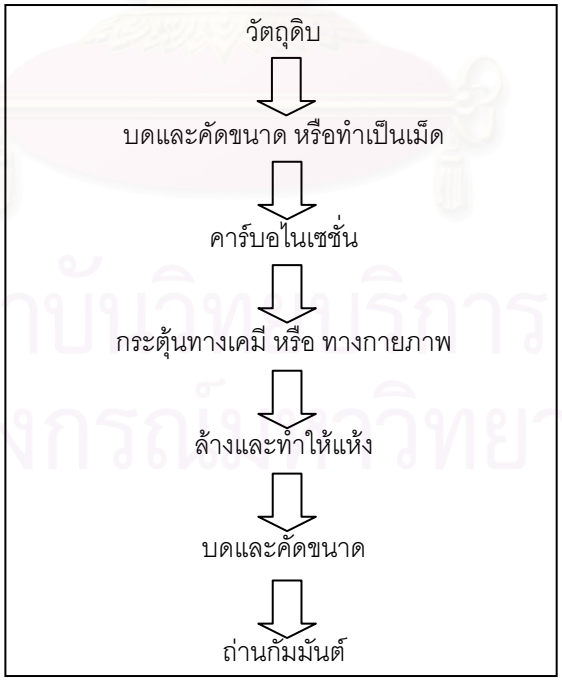
2.3.2.5 แบ่งตามรูปร่างลักษณะ

- ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (Powder Activated Carbon) ทำได้โดยการเอาถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้มาบด รูปร่างจะแตกต่างกันไปขึ้นกับวิธีการบด ซึ่งจะมีผลทำให้คุณสมบัติการดูดติดผิวแตกต่างกันไป ถ่านกัมมันต์ชนิดนี้นิยมใช้สำหรับการดูดสีในสภาวะที่เป็นของเหลวส่วนใหญ่ โดยทั่วไปมีขนาด 5-100 ไมโครเมตร

- ถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด (Granular Activated Carbon) ทำจากวัตถุดิบที่เป็นเม็ด หรือแบบผงทำให้เป็นเม็ดโดยการเติมตัวประสาน (Binding Agent) ตัวอย่างเช่น ทาร์ (Tar) แล้วนำมาอัดเป็นเม็ด วัตถุดิบที่นิยมทำถ่านกัมมันต์ชนิดเม็ด ได้แก่ วัตถุดิบที่ค่อนข้างแข็งและมีความหนาแน่นสูง เช่น กะลามะพร้าว ถ่านหิน ถ่านกัมมันต์ชนิดนี้มักใช้ในการดูดกลิ่นก๊าซพิษ และไอของสารละลายอินทรีย์

2.3.3 **การผลิตถ่านกัมมันต์** (Processing of Activated Carbon)

ในปัจจุบันกรรมวิธีผลิตถ่านกัมมันต์มีหลายวิธี ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบลักษณะและคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ต้องการ แต่โดยทั่วไปกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ประกอบด้วยขั้นตอนใหญ่ๆ 3 ขั้นตอน ดังนี้ คือ ขึ้นเตรียมวัตถุดิบ การเผาให้เป็นถ่าน หรือ คาร์บอไนเซชั่น (Carbonization) และการกระตุ้น หรือแอคติเวชั่น (Activation) ดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ขั้นตอนผลิตถ่านกัมมันต์

ที่มา : ลลิดา, 2544

2.3.3.1 การเตรียมวัตถุดิบ

ถ่านกัมมันต์สามารถผลิตจากวัตถุที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ ซึ่งการผลิตถ่านกัมมันต์สามารถเริ่มจากวัตถุดิบโดยตรงหรือเริ่มจากวัตถุดิบที่เป็นถ่านแล้วก็ได้ขึ้นอยู่กับการผลิต แต่โดยทั่วไปมักนำวัตถุดิบมาบดและคัดขนาดก่อนที่จะนำไปคาร์บอไนซ์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการคาร์บอไนซ์ หลังจากนั้นทำการอบหรือตากวัตถุดิบให้แห้ง (Dehydration) แต่บางครั้งวัตถุดิบอาจมีความแข็งและเหนียว ทำให้การบดวัตถุดิบโดยตรงทำได้ยาก ก็อาจนำวัตถุดิบนั้นไปคาร์บอไนซ์ก่อน แล้วจึงนำมาบดคัดขนาดก็ได้

สำหรับวัตถุดิบที่มีลักษณะเป็นผง อาจนำมาทำให้เป็นเม็ดโดยใช้ตัวประสาน เช่น แป้ง น้ำมันเตา หรือทาร์ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้มาจากกระบวนการคาร์บอไนซ์เซชั่น แล้วนำไปอัดเป็นเม็ดก่อนที่คาร์บอไนซ์เป็นขั้นตอนต่อไป

2.3.3.2 การทำให้เป็นถ่านคาร์บอน หรือคาร์บอไนเซชั่น (Carbonization)

ขั้นตอนนี้เป็นการนำวัตถุดิบมาเผาในสภาวะที่มีออกซิเจนอยู่น้อยที่อุณหภูมิ 200-500 องศาเซลเซียสหรือการเผาแบบไพโรไลซิส (Pyrolysis) ซึ่งจะทำให้สารที่ไม่ใช่คาร์บอน เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน และซัลเฟอร์ ถูกไล่ออกมาในรูปก๊าซ ส่วนคาร์บอนที่มีอยู่ในรูปของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน จะรวมตัวกันเป็นผลึก (Microcrystalline) ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ในรูปของถ่าน ขนาดของผลึกจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของการเผา ระยะเวลาในการเผา องค์ประกอบและโครงสร้างของวัตถุดิบ

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

$$C_6H_{10}O_5 \xrightarrow{\text{heat}} CO_2 + CO + H_2O + \text{Carbonaceous Residue} \qquad (2.1)$$

คาร์บอไนเซชั่นเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ เพราะเป็นขั้นตอนเริ่มต้นของโครงสร้างที่เป็นรูพรุน โดยทำให้เกิดการแตกตัวทางเคมีของสารที่ไม่ใช่คาร์บอน (เช่น ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน) ออกมาในรูปของก๊าซ คาร์บอนอิสระที่มีอยู่จะรวมตัวกันอยู่ในรูปของถ่านชาร์ ถ่านชาร์ที่ได้จากการคาร์บอไนเซชั่น ควรจะมีลักษณะดังต่อไปนี้

- มีสีดำตลอด (Uniformly Black)
- เมื่อหักดูส่วนที่หักจะมีผิวที่เป็นมันเงา (Shiny Surface)
- ปลายที่หักจะแหลมคม (Sharp)
- ปราศจากผงฝุ่นและขี้เถ้า

ถ่านชาร์ที่ได้จากขั้นตอนการคาร์บอไนเซชั่นนี้มีความสามารถในการดูดติดผิวต่ำมากเพราะว่าการทำให้เกิดถ่านชาร์จะใช้อุณหภูมิประมาณ 400-600 องศาเซลเซียส ซึ่งยังคงมีน้ำมันทาร์ตกค้างอยู่ภายในช่องว่าง (Pore) หรือเกาะอยู่ตามผิว จึงจำเป็นต้องนำถ่านนี้ไปผ่านกระบวนการกระตุ้นเพื่อเพิ่มความสามารถในการดูดติดผิว

2.3.3.3 การกระตุ้น (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 วิธีกระตุ้นทางกายภาพ และการกระตุ้นทางเคมี

1) วิธีกระตุ้นทางกายภาพ (Physical Activation)

เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์ โดยที่ผิวคาร์บอนเกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพ เช่น การจัดเรียงตัวใหม่ ซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการดูดติดผิวของถ่านให้สูงขึ้น เนื่องจากรูพรุนจะกว้างมากขึ้น และมีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น นิยมใช้ก๊าซออกซิไดซ์ต่างๆ เช่น ไอน้ำอิ่มตัวยิ่งยวด ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซออกซิเจน เป็นต้น ร่วมกับการใช้ความร้อนปฏิกิริยาการกระตุ้นอาจเกิดจากความร้อนเพียงอย่างเดียว แต่ต้องใช้อุณหภูมิสูงมากถึง 1,200 องศาเซลเซียส แต่พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จะมีคุณภาพต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตโดยการกระตุ้นด้วยก๊าซออกซิไดซ์

ปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากวิธีการกระตุ้นทางกายภาพคือ (Hassler, 1974)

- ชนิดและปริมาณขององค์ประกอบที่มีอยู่ในวัตถุดิบ
- คุณสมบัติทางเคมีและอัตราส่วนของก๊าซที่ใช้

- อุณหภูมิขณะเกิดปฏิกิริยา
- ระยะเวลาของการเกิดปฏิกิริยา

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

2) วิธีกระตุ้นทางเคมี (Chemical Activation)

เป็นการผลิตถ่านกัมมันต์โดยการเติมสารเคมีให้เป็นสารกระตุ้น (Activation Agent) ผสมคลุกเคล้าเข้ากับวัตถุดิบ และทำปฏิกิริยาเคมีกับผิวคาร์บอน โดยมีความร้อนเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สารที่นิยมใช้ดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 สารเคมีที่ใช้เป็นสารกระตุ้นในการกระตุ้นด้วยวิธีทางเคมี

กรดบิวริค (H_3BO_3)	แมงกานีสซัลเฟต ($MnSO_3$)
แคลเซียมคลอไรด์ ($CaCl_2$)	กรดฟอสฟอริค (H_3PO_4)
แคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CaOH)	กรดไนตริค (HNO_3)
แคลเซียมฟอสเฟต ($Ca(PO_3)_2$)	กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4)
ปูนโดโลไมต์ ($CaMg(CO_3)_2$)	โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
เฟอร์ริคคลอไรด์ ($FeCl_2$)	โซเดียมซัลเฟต ($NaSO_4$)
โพแทสเซียมซัลไฟด์ (K_2S)	โซเดียมคลอไรด์ (NaCl)
โพแทสเซียมไธโอไซยาเนต ($K_2S_2O_3$)	ซิงค์คลอไรด์($ZnCl_2$)
แมงกานีสคลอไรด์ ($MnCl_2$)	

ที่มา : Yehaskel, 1978

วิธีการกระตุ้นทางเคมี แบ่งเป็น 2 แบบ คือ

แบบที่ 1 ผสมวัตถุดิบกับสารเคมีโดยตรงแล้วให้ความร้อนแบบไพโรไลซิส เพื่อทำให้เป็นผลึกถ่าน พร้อมๆ กับการกระตุ้น

แบบที่ 2 ทำให้วัตถุดิบเป็นถ่านก่อนเติมสารเคมี แล้วจึงให้ความร้อนเพื่อทำการกระตุ้นอีกครั้งหนึ่ง

การกระตุ้นเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิว โดยทำให้ถ่านมีรูพรุนมากขึ้น และเป็นการเพิ่มความสามารถในการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ ประสิทธิภาพของการกระตุ้นขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบ ชนิดของสารกระตุ้น รวมถึงวิธีการอื่นๆ ที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์ด้วย

สารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้น นิยมใช้สารประกอบของโพแตสเซียมหรือโซเดียม เช่น โปแตสเซียมคาร์บอเนต โพแทสเซียมซัลไฟต์ และการกระตุ้นโดยใช้สารดูดน้ำ (Dehydrating Agent) เช่น สารในกลุ่มเกลือโลหะคลอไรด์ เช่น แคลเซียมคลอไรด์ ซิงค์คลอไรด์ กรดฟอสฟอริก กรดซัลฟิวริก เป็นต้น

เมื่อนำเอาวัตถุดิบที่ต้องการทำเป็นถ่านกัมมันต์ มาผสมสารประกอบที่มีไอออนของโปแตสเซียมหรือไอออนของโซเดียม ไอออนเหล่านี้จะแทรกเข้าไปอยู่ระหว่างชั้นของผลึกแกรไฟต์ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิสูงกว่า 700 องศาเซลเซียส โมเลกุลของน้ำ ก๊าซออกซิเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะหลุดออก ทำให้ได้ถ่านกัมมันต์ตามต้องการ

ปฏิกิริยาที่เกิดในการกระตุ้นด้วยสารประกอบของโซเดียม มีดังนี้

$$2X + 3CO \longrightarrow X_2CO_3 + 2C \qquad (2.2)$$

$$X_2CO_3 + C \longrightarrow X_2O + 2CO \qquad (2.3)$$

$$2CO \longrightarrow CO_2 + C \qquad (2.4)$$

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

ข้อดีของการกระตุ้นทางเคมีคือใช้อุณหภูมิในการกระตุ้นไม่สูงมาก (400-600 องศาเซลเซียส) สารเคมีแทรกซึมได้ทั่วถึง ได้รูพรุนของถ่านกัมมันต์ที่ค่อนข้างใหญ่ แต่มีข้อเสียคือ มีสารเคมีตกค้างในถ่านกัมมันต์ทำให้ต้องเสียเวลา และค่าใช้จ่ายในการล้างสารเคมีดังกล่าวออกเพิ่มมากขึ้น รวมทั้งเครื่องมือที่ใช้ก็ต้องเป็นชนิดพิเศษที่สามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ เพราะสารเคมีเหล่านี้เป็นสารกัดกร่อน

2.3.4 ประโยชน์ของถ่านกัมมันต์

ในอุตสาหกรรมมีการใช้ถ่านกัมมันต์อย่างแพร่หลาย หน้าที่ของถ่านกัมมันต์ในแต่ละโรงงานจะแตกต่างกันไป ตัวอย่างเช่น

2.3.4.1 ถ่านกัมมันต์ประเภทที่ใช้กับการดูดติดผิวก๊าซหรือไอ

- ใช้ในอุตสาหกรรมทำหน้ากากป้องกันก๊าซพิษ ทั้งนี้เพราะถ่านกัมมันต์สามารถดูดติดผิวก๊าซพิษและไอของสารอินทรีย์ได้
- ใช้แยกไอระเหยของตัวทำละลายที่ใช้แล้วเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ โดยถ่านกัมมันต์จะดูดติดผิวไอระเหยเหล่านั้นที่อุณหภูมิห้องและคายออกที่ความดันของไอต่ำๆ
- กำจัดสิ่งเจือปนออกจากก๊าซ เช่น ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ฮีเลียม อะเซทิลีน แอมโมเนีย คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์

สารประกอบออร์แกนิกซัลเฟอร์ เป็นต้น

- กำจัดกลิ่นจากอากาศ ในเครื่องปรับอากาศ ทำให้กลิ่นเหม็นลดลง
- ใช้ดูดติดผิวกัมมันตภาพรังสีออกมาจากปฏิกิริยานิวเคลียร์ สำหรับหน่วยปฏิกิริยาให้การสลายตัวเกิดขึ้นสมบูรณ์ขณะที่ยังถูกจับไว้ในเบดของถ่านกัมมันต์ (Activated Carbon Bed)

2.3.4.2 ประเภทที่ใช้กับของเหลว (ฟอกสีและทำให้ของเหลวบริสุทธิ์) ซึ่งใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น

- ใช้ในอุตสาหกรรมน้ำตาล อุตสาหกรรมผลิตอาหาร เครื่องดื่มแอลกอฮอล์
- ใช้ในทางการแพทย์ อุตสาหกรรมเคมีและยา
- ใช้ทำน้ำดื่มให้บริสุทธิ์ เป็นการกำจัดรส สี และกลิ่น นอกจากนี้ยังใช้ในการบำบัดน้ำเสีย
- ใช้แยกโลหะจากสารละลายที่ต้องการ เช่น การแยกทองหลังการสกัดจากแร่ด้วยวิธีไซยาไนด์ เป็นต้น
- ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาหรือเป็นตัวพาสารเร่งปฏิกิริยา (Catalyst – carrier) เช่น ตัวพาสารเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาไฮโดรเจเนชั่น (Hydrogenation) เป็นต้น

2.4 การดูดติดผิว

การดูดติดผิว (Adsorption) เป็นการสะสมของสารมากกว่าสองชนิดที่บริเวณผิว 2 สถานะ เช่น ของเหลวและของแข็ง หรือก๊าซและของแข็ง โมเลกุลที่สะสมหรือเกาะติดที่ผิวเรียกว่า สารถูกดูดติดผิว (Adsorbate) และของแข็งซึ่งมีการเกาะติดที่ผิวเกิดขึ้นเรียกว่า สารดูดติดผิว (Adsorbent) ซึ่งสารดูดติดผิวในการบำบัดน้ำเสียนอกจากถ่านกัมมันต์แล้ว ได้แก่ Adsorbent Resins, Ion Exchange Resins, Metal Oxides, Hydroxides and Carbonates, Clays, Activated Alumina และของแข็งอื่นๆ ที่แขวนลอยอยู่หรือสัมผัสกับน้ำ

การดูดติดผิวมีบทบาทสำคัญในการปรับปรุงคุณภาพน้ำ เนื่องจากสามารถใช้ดูดติดผิวโมเลกุลของสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ซึ่งเป็นสาเหตุของกลิ่น สี เชื้อโรค และสารพิษต่างๆ ซึ่งถ่านกัมมันต์สามารถใช้ดูดติดผิวโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่เป็นสาเหตุของกลิ่น สี และสารอันตรายต่างๆ เช่น กรณีของอลูมิเนียมไฮดรอกไซด์และเฟอร์ริกไฮดรอกไซด์ที่เป็นของแข็งอันเกิดจากการรวมตัวระหว่างการทำโคแอ็กกูเลชั่น จะดูดติดผิวสีซึ่งเกิดจากโมเลกุลและสารประกอบจาก

ปฏิกิริยาของคลอรีนกับไตรฮาโลมีเทน หรือยาฆ่าแมลงที่ถูกดูดติดผิวในเม็ดดินเหนียว เป็นต้น (Frederick, 1990)

2.4.1 **กลไกการดูดติดผิว** (Adsorption Mechanism)

การดูดติดผิวของสารประกอบอินทรีย์เกิดจากแรงรวมตัว (Binding Force) หลายชนิดระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดติดผิวและพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ โดยสามารถแบ่งการดูดติดผิวได้เป็น 2 แบบ คือ การดูดติดผิวทางกายภาพ (Physisorption) และการดูดติดผิวทางเคมี (Chemisorption) การดูดติดผิวทั้ง 2 แบบนี้ เกิดขึ้นเมื่อโมเลกุลสารถูกดูดติดผิวเข้าใกล้และยึดติดกับผิวของถ่านกัมมันต์ ซึ่งเป็นผลมาจากแรงดึงดูดที่ผิวของถ่านกัมมันต์ สามารถเอาชนะพลังงานจลน์ของโมเลกุลของสารถูกดูดติดผิว ซึ่งความแตกต่างของการดูดติดผิวทางกายภาพและทางเคมี มีดังนี้

1) การดูดติดผิวทางกายภาพ จะทำให้เกิดการคายตัว (Desorption) ของโมเลกุลสารถูกดูดติดผิวได้ ซึ่งจะเกิดได้ทั้งการดูดติดผิวและการคายตัวในเวลาเดียวกัน แต่การดูดติดผิวทางเคมีจะหมายถึงการใช้พันธะเคมีในการยึดเหนี่ยวระหว่างถ่านกัมมันต์และสารถูกดูดติดผิว โดยที่โมเลกุลของสารถูกดูดติดผิวจะไม่สามารถแยกตัวออกไปได้อีก

2) การดูดติดผิวทางกายภาพจะไม่มีพื้นที่เฉพาะ โมเลกุลสารถูกดูดติดผิวจะเป็นอิสระในการเข้าไปติดยังพื้นผิว พื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดติดผิวสามารถวัดได้จากถ่านกัมมันต์ ในทางตรงข้าม การดูดติดผิวทางเคมีจะมีพื้นที่เฉพาะโมเลกุลที่ถูกดูดติดผิวทางเคมีจะมีพื้นที่ตายตัว

3) ความร้อนที่เกิดจากการดูดติดผิวทางกายภาพมีค่าน้อย เมื่อเปรียบเทียบกับการดูดติดผิวทางเคมี การดูดติดผิวทางกายภาพจะมีความร้อนที่เกิดสูงสุดประมาณ 20 กิโลแคลอรีต่อโมล ในการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนเล็กๆ ส่วนความร้อนในการดูดติดผิวทางเคมีจะอยู่ในช่วง 20-100 กิโลแคลอรีต่อโมล ดังนั้นความร้อนที่เกิดขึ้นสามารถเป็นเกณฑ์ในการแยกประเภทของกระบวนการในการดูดติดผิวได้

การดูดติดผิวทางเคมี มีลักษณะสำคัญที่เกิดปฏิกิริยาอันนำมาซึ่งความร้อนที่สูงจากพันธะทางเคมีที่เกิดขึ้น อาทิ การหมุนตัวของอิเลคตรอน การเกิดสนามแม่เหล็ก ซึ่งมาจากการเคลื่อนที่ของอิเลคตรอน และพันธะเคมีจากการรวมตัวของสารดูดติดผิวกับสารที่ถูกดูดติดผิว และเนื่องจากพันธะทางเคมีนี้ส่งผลให้เกิดอุณหภูมิที่สูงขึ้นด้วย

การดูดติดผิวทางกายภาพเป็นผลมาจากแรงวานเดอวาล์ว (Van der Waals Force) ซึ่งเกิดจากการรวมกันของแรง 2 ชนิด คือ แรงกระจาย (London Dispersion Force) และแรงไฟฟ้าสถิตย์ (Electrostatic Force) โมเลกุลของสารถูกดูดติดผิวจะยึดติดกันทางกายภาพกับโมเลกุลของถ่านกัมมันต์ การดูดติดผิวแบบนี้เป็นการดูดติดผิวแบบหลายชั้น (Multilayers)

กล่าวคือ แต่ละชั้นของโมเลกุลจะเกิดอยู่บนชั้นโมเลกุลที่ถูกดูดติดก่อนหน้านี้ โดยจำนวนชั้นเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของโมเลกุลของสารถูกดูดติดผิว หรือจำนวนชั้นของโมเลกุลจะเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของสารถูกดูดติดผิวเพิ่มขึ้น ดังนั้นการดูดติดผิวทางกายภาพจะขึ้นอยู่กับปัจจัยที่สำคัญได้แก่ การจัดเรียงตัวของโมเลกุล (Orientation) การกระจายตัว (Dispersion) และการเหนี่ยวนำ (Induction) สำหรับโมเลกุลที่มีขั้วนั้น แรงดึงดูดจะเกิดจากการจัดเรียงตัวของโมเลกุลซึ่งเป็นแรงดึงดูดที่เกิดจากโมเลกุลที่มีขั้วสองโมเลกุลคือ ขั้วลบของโมเลกุลหนึ่งดึงดูดกับขั้วบวกของอีกโมเลกุลหนึ่ง สำหรับโมเลกุลที่ไม่มีขั้วนั้นการดูดติดผิวจะเกิดแบบการกระจายตัวหรือเกิดการสั่นของอิเล็กตรอนรอบๆ นิวเคลียสของอะตอม ทำให้พลังงานของระบบลดลง ระบบจึงมีความเสถียรขึ้นทำให้โมเลกุลสามารถเข้ามาเกาะติดกันได้ (Faust และ Aly, 1987)

2.4.2 **อัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล** (Rate of Molecular Transfer)

การดูดติดผิวของสารประกอบที่เป็นของเหลวเข้าไปยังถ่านกัมมันต์ มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องรู้ถึงอัตราการดูดติดผิว เพื่อนำไปใช้ในการออกแบบระบบทั้งแบบแบทช์ (Batch Test) หรือแบบคอลัมน์ รวมไปถึงการทำโมเดลด้วย อัตราการดูดติดผิวที่รวดเร็วจะทำให้ระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลได้เร็วขึ้น ขั้นตอนในการดูดติดผิวของสารจากสารละลายโดยถ่านกัมมันต์มี 3 ขั้นตอนที่เกิดอย่างต่อเนื่องกัน ดังนี้

1) การขนส่งทั้งก้อน (Bulk Transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด โมเลกุลของสารถูกดูดติดผิวในน้ำจะถูกส่งไปที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ ที่ห่อหุ้มถ่านกัมมันต์ ในทางปฏิบัติจะไม่สามารถเห็นถึงชั้นฟิล์มที่อยู่รอบๆ เม็ดคาร์บอน แต่สามารถอธิบายการต้านทานของมวลที่ถูกส่งไปยังพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ได้จากสมการ

$$K_f = D_e / \delta \qquad (2.5)$$

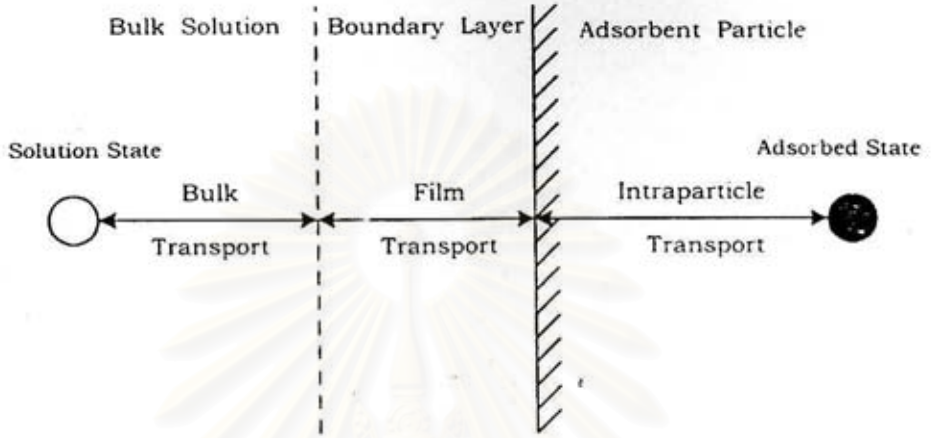
เมื่อ K_f คือ สัมประสิทธิ์การเคลื่อนที่ของมวล

D_e คือ พลังงานของสารถูกดูดติดผิวที่ใช้ในเคลื่อนที่เข้าสู่ผิวถ่าน

และ δ คือ ความหนาแน่นของชั้นของเหลว

2) การขนส่งชั้นฟิล์ม (Film Transport) เป็นขั้นตอนที่โมเลกุลของสารถูกดูดติดผิวที่ผิวหน้าของชั้นของเหลวบางๆ แทรกตัวเข้าสู่ผิวหน้าของถ่านกัมมันต์ การขนส่งชั้นฟิล์มเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นโดยการแพร่ผ่านฟิล์ม (Film Diffusion) จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดติดผิวขั้นตอนหนึ่ง

3) การขนส่งภายในอนุภาค (Intraparticle Transport) เป็นการแพร่ของโมเลกุลสารถูกดูดติดผิวเข้าสู่รูพรุนของถ่านกัมมันต์ (Pore Diffusion) และทำให้เกิดการดูดติดผิวขึ้นภายใน ขั้นตอนนี้จัดเป็นขั้นตอนที่จำกัดอัตราการดูดติดผิวเช่นเดียวกัน แสดงการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารถูกดูดติดผิวมายังถ่านกัมมันต์ได้ดังรูปที่ 2.10



รูปที่ 2.10 ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายโมเลกุลของสารดูดติดผิวด้วยถ่านกัมมันต์
ที่มา : Eckenfelder, 1981

ขนาดของโมเลกุลที่ถูกดูดติดผิวและขนาดของถ่านกัมมันต์ มีส่วนสำคัญต่ออัตราการดูดติดผิว สัมประสิทธิ์การเคลื่อนที่ของสารถูกดูดติดผิวจะลดลงเมื่อขนาดโมเลกุลใหญ่ขึ้น ดังนั้น ในการกำจัดโมเลกุลของสารฮิวมิค ซึ่งมีโมเลกุลใหญ่จะใช้เวลานานกว่าการกำจัดฟีนอลที่มีโมเลกุลเล็ก ในส่วนของถ่านกัมมันต์ ขนาดจะมีส่วนสำคัญเนื่องจากสามารถใช้หาเวลาในการเคลื่อนที่เข้าสู่รูพรุนที่เหมาะสม ที่สามารถเกิดการดูดติดผิวได้ Randtke และ Snoeyink (1993) ทำการทดลองโดยใช้ถ่านกัมมันต์ทำการดูดติดผิวไดเมทิลฟีนอล (Dimethylphenol) ซึ่งเป็นสารที่มีขนาดโมเลกุลเล็กจะใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุล 8 วันสำหรับถ่านกัมมันต์ที่มีเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.4 มิลลิเมตร แต่ใช้เวลาเพียง 15 นาที สำหรับถ่านกัมมันต์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 44 ไมโครเมตร ดังตารางที่ 2.10 สำหรับโมเลกุลของสารขนาดใหญ่ เช่น กรดฮิวมิค จะใช้เวลาในการเข้าสู่สมดุลมากกว่า 1 ปี ในการดูดติดผิวโดยถ่านกัมมันต์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3.4 มิลลิเมตร และใช้เวลาเพียง 2 วัน สำหรับถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 44 ไมโครเมตร

ตารางที่ 2.10 เวลาที่ใช้ในการกำจัดสารบางชนิดโดยถ่านกัมมันต์ขนาดต่างๆ

Adsorbate	GAC (Mesh size)	Particle dia. (mm)	C_o (mg/l)	Time (days)
Dimethylphenol	8	3.380	90.67	7.70
	30	0.595	90.67	0.54
	325	0.044	90.67	0.01
Rhodamine	8	3.380	85.10	590
	30	0.595	85.10	37
	325	0.044	85.10	0.2
Peat fulvic acid	8	3.380	0.73	1,840
	30	0.595	0.73	115
	325	0.044	0.73	0.7
Humic acid	8	3.380	37.93	5,300
	30	0.595	37.93	333
	325	0.044	37.93	2.0

ที่มา : Frederick, 1990

Frederick (1990) กล่าวถึงข้อสังเกตในการศึกษาอัตราการเคลื่อนย้ายโมเลกุล ดังนี้

1) ถ่านกัมมันต์แบบเม็ดสามารถถูกทำให้เป็นแบบผงได้ในการหาไอโซเทอม เนื่องจากการทำให้เป็นผงจะไม่มีผลต่อพื้นที่ผิวรวมในการดูดติดผิว

2) ขนาดของถ่านกัมมันต์ที่เล็กเกินไปจะทำให้เกิดการสูญเสียทางจลน์ และการสูญเสียระหว่างการฟื้นสภาพ ควรนำมาพิจารณาเพื่อให้ได้ค่าทางจลศาสตร์ที่ดีที่สุด

3) ความสามารถในการดูดติดผิวของอนุภาคถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์ จะไม่ถูกใช้ทั้งหมด ทั้งนี้เนื่องมาจากระยะเวลาในการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์มักจะไม่เพียงพอต่อการเข้าสู่สมดุล

2.4.3 **ไอโซเทอมการดูดติดผิว** (Adsorption Isotherm)

การออกแบบระบบดูดติดผิวด้วยถ่านกัมมันต์ มีความจำเป็นที่ต้องทำการทดลองเพื่อให้ได้ถ่านกัมมันต์ที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด ในขั้นการทดลองในห้องปฏิบัติการ (Laboratory Test) การทดลองเพื่อหาความสามารถในการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ทำได้หลายวิธี วิธีที่นิยมมากที่สุดคือ การหาไอโซเทอมการดูดติดผิว (Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอมการดูดติดผิว คือ ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่ถูกดูดติดผิวกับความเข้มข้นของสารนั้นที่ยังเหลืออยู่ที่จุดสมดุลของการดูดติดผิว เมื่อนำมาวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ เพื่อให้ได้รูปสมการอย่างง่าย แล้วสามารถนำมาวาดกราฟเพื่อวิเคราะห์หาค่าคงที่ต่างๆได้ ซึ่งใช้เป็นแนวทางในการนำค่าคงที่นั้นมาออกแบบระบบดูดติดผิว ได้มีผู้วิเคราะห์ไอโซเทอมไว้ 3 กลุ่ม คือของ Langmuir, B.E.T. และ Freundlich ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้

2.4.3.1 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์ (Langmuir Adsorption Isotherm)

สมมติฐานพื้นฐานของแบบจำลองแลงมัวร์ที่เรียกว่า Ideal Localized Monolayer Model คือ พลังงานในการดูดติดผิวมีค่าคงที่และไม่ขึ้นกับคุณสมบัติของพื้นที่ผิว การดูดติดผิว จะเกิดเฉพาะที่ โมเลกุลเดียวโดยไม่มีแรงกระทำระหว่างโมเลกุลของสารถูกดูดติดผิว ซึ่งมีสมการดังนี้

$$X = (X_m b C_e) / (1+bC_e) \qquad (2.6)$$

โดยที่ X = ปริมาณสารที่ถูกดูดติดผิวต่อน้ำหนักของสารดูดติดผิว (มก./ก. หรือ โมล/ก.)

X_m = ขีดจำกัดของการดูดติดผิว (มก./ก. หรือ โมล/ก.)

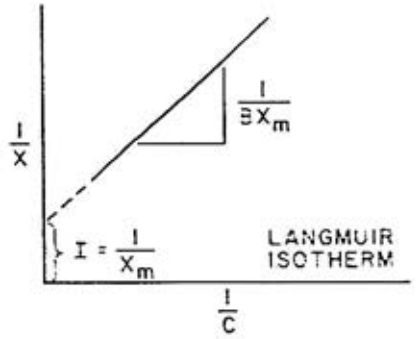
C_e = ความเข้มข้นสารถูกดูดติดผิวที่จุดสมดุล (มก./ล. หรือ โมล/ล.)

b = ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดติดผิว

เปลี่ยนเป็นรูปของสมการเส้นตรงได้ดังสมการที่ (2.7)

$$1/X = (1/X_m) + (1/C_e)(1/bX_m) \qquad (2.7)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $1/X$ กับ $1/C_e$ ซึ่งเป็นเส้นตรงจะมีความชัน $1/bX_m$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $1/X_m$ (รูปที่ 2.11)



รูปที่ 2.11 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบแลงมัวร์

ที่มา : Valencia และ Gloyna, 1972

2.4.3.2 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบ BET (Brunauer-Emmett-Teller Adsorption Isotherm)

ไอโซเทอมแบบ BET พัฒนามาจากไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ จากการดูดติดแบบชั้นเดียวเป็นการดูดติดแบบหลายชั้น (Multilayers) ซึ่งแบบจำลองของ BET มีพื้นฐานอยู่บนสมมติฐานที่ว่าแต่ละโมเลกุลในชั้นดูดติดผิวชั้นแรก เป็นบริเวณที่ซึ่งโมเลกุลชั้นที่สองและชั้นต่อๆ ไปดูดติดผิว

$$X = (X_m b C_e) / (C_s - C_e) [1+(b-1) C_e/C_s] \quad (2.8)$$

โดยที่ X = ปริมาณสารถูกดูดติดผิวต่อน้ำหนักสารดูดติดผิว (มก./ก. หรือ โมล/ก.)

X_m = ขีดจำกัดของการดูดติดผิวตัวกลางชั้นเดียว (มก./ก. หรือ โมล/ก.)

C_e = ความเข้มข้นสารถูกดูดติดผิวที่จุดสมดุล (มก./ล. หรือ โมล/ล.)

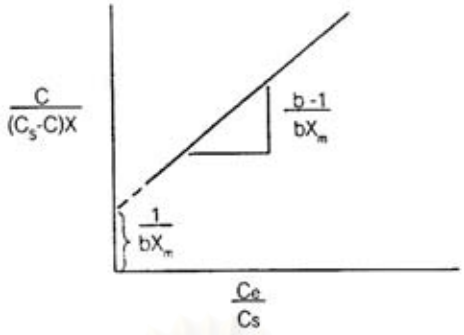
C_s = ความเข้มข้นสารถูกดูดติดผิวอิ่มตัว (มก./ล. หรือ โมล/ล.)

b = ค่าคงที่ทางพลังงานของการดูดติดผิว

สมการ (2.8) เปลี่ยนรูปเป็นสมการเส้นตรงดังสมการ (2.9)

$$C_e/X(C_s-C_e) = (1/X_m b) + [(b-1)/X_m b] (C_e/C_s) \quad (2.9)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง $C_e/X(C_s-C_e)$ กับ C_e/C_s ได้กราฟเส้นตรงมีความชัน $(b-1)/X_m b$ และจุดตัดแกน y เท่ากับ $1/X_m b$ (รูปที่ 2.12)



รูปที่ 2.12 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบ BET
ที่มา : Valencia และ Gloyna, 1972

2.4.3.3 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช (Freundlich Adsorption-Isotherm)

สมการการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิชใช้อย่างแพร่หลาย ในการอธิบายการดูดติดผิวในระบบของเหลว โดยวิธีทางคณิตศาสตร์ ซึ่งมีสมการดังนี้

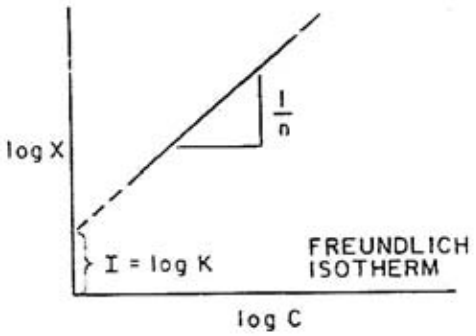
$$X/M = KC_e^{1/n} \quad (2.10)$$

โดยที่ X/M = ปริมาณสารถูกดูดติดผิวต่อน้ำหนักสารดูดติดผิว (มก./ก. หรือ โมล/ก.)
C_e = ความเข้มข้นสารถูกดูดติดผิวที่จุดสมดุล (มก./ล. หรือ โมล/ล.)
K = ค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดติดผิวของสารดูดติดผิว
I/n = ค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานของการดูดติดผิว

สมการ (2.10) สามารถเขียนในรูปแบบลอการิทมิค ได้เป็น

$$\log(X/M) = \log K + 1/n \log C_e \quad (2.11)$$

เมื่อเขียนกราฟระหว่าง log(X/M) กับ log C_e จะเป็นเส้นตรง ซึ่งมีความชัน 1/n และ log K เป็นจุดตัดแกน y ของ log(X/M) ที่ log C_e = 0 (C_e = 1) ดังรูปที่ 2.13 ซึ่งสมการของฟรุนดลิชบอกถึงความสามารถดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์โดย K แสดงถึงความจุดูดติดผิวและ 1/n แสดงถึงสภาวะการดูดติดผิวที่ความเข้มข้นนั้น ถ้า 1/n มีค่าน้อยกว่า 1 หมายถึงถ่านเกิดการดูดติดผิวสารปนเปื้อนได้ดี ถ้า 1/n มีค่ามากกว่า 1 หมายถึงถ่านเกิดการดูดติดผิวสารปนเปื้อนได้ไม่ดี (Mihelcic, 1999)



รูปที่ 2.13 ไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช
ที่มา : Valencia และ Gloyna, 1972

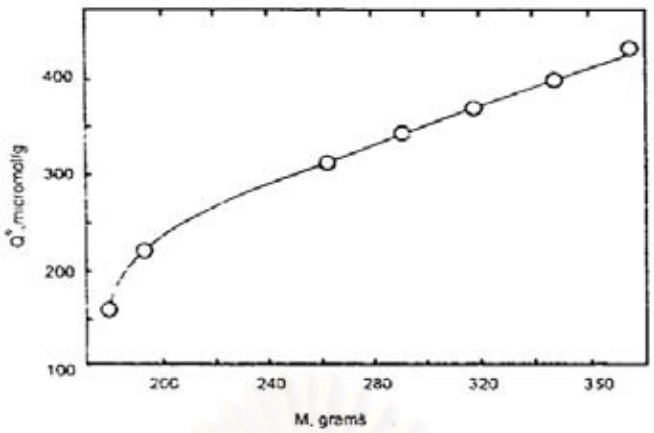
2.4.4 ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการดูดติดผิว

2.4.4.1 ขนาดและพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์

ความสามารถดูดติดผิวมีความสัมพันธ์โดยตรงกับพื้นที่ผิวจำเพาะ โดยอัตราการเคลื่อนที่ของสารถูกดูดติดผิวเข้าสู่รูพรุนของถ่านกัมมันต์ จะถูกควบคุมโดยชั้นของเหลวที่ห่อหุ้มโดยรอบถ่านกัมมันต์ ดังนั้นอัตราการดูดติดผิวจะมีความสัมพันธ์เป็นสัดส่วนกับเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์ ในทางตรงกันข้าม ถ้าการเคลื่อนที่ภายในรูพรุนเป็นตัวควบคุมอัตราการดูดติดผิว อัตราการดูดติดผิวจะเป็นสัดส่วนผกผันกับเส้นผ่านศูนย์กลางของถ่านกัมมันต์

2.4.4.2 ลักษณะของสารถูกดูดติดผิว

ความสามารถในการละลายน้ำ ของสารถูกดูดติดผิวเป็นปัจจัยสำคัญในการดูดติดผิว การดูดติดผิวจะเพิ่มขึ้น เมื่อความสามารถในการละลายน้ำของสารถูกดูดติดผิวในตัวทำละลายลดลง เนื่องจากในการดูดติดผิวสารถูกดูดติดผิวจะต้องถูกแยกออกจากน้ำ โดยสารถูกดูดติดผิวที่ละลายน้ำได้ดีหรือแตกตัวเป็นอิออนได้ดีจะมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำสูงจึงเป็นการยากในการดูดติดผิว ดังนั้น สารที่ไม่ละลายน้ำ หรือละลายได้น้อยจะสามารถถูกดูดติดผิวได้ดี นอกจากความสามารถในการละลายแล้ว ขนาดโมเลกุลของสารถูกดูดติดผิวยังมีความสัมพันธ์กับการดูดติดผิว ซึ่งถ้าอัตราการเคลื่อนที่ภายในโพรงเป็นอัตราที่ควบคุมกลไกแล้ว ความสามารถในการดูดติดผิวจะแปรผกผันกับขนาดโมเลกุลของตัวละลาย ดังรูปที่ 2.14 อัตราการดูดติดผิวของ Sulfonate Alkylbenzenes ซึ่งมีขนาดโมเลกุลต่างๆ กัน โดยเมื่อน้ำหนักโมเลกุลมีขนาดมากขึ้นความสามารถในการดูดติดผิวจะลดลง เมื่อการเคลื่อนที่ภายในรูพรุนเป็นตัวควบคุมอัตราการดูดติดผิว (Weber, 1972)



รูปที่ 2.14 ผลของน้ำหนักโมเลกุลในการดูดติดผิว
ที่มา : Weber, 1972

2.4.4.3 พีเอช (pH)

พีเอชมีอิทธิพลต่อการดูดติดผิวเนื่องจากไฮโดรเจนอิออน (H^+) และไฮดรอกซิลอิออน (OH^-) การดูดติดผิวมีผลมาจากพีเอชของสารละลายกับประจุบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ นอกจากนี้พีเอชยังมีอิทธิพลต่อการแตกตัวของอิออน และการละลายน้ำของสารต่างๆ อีกด้วย

2.4.4.4 อุณหภูมิ

Weber (1972) กล่าวว่า การดูดติดผิวโดยทั่วไป เป็นกระบวนการคายความร้อน (Exothermic) ดังนั้น ความสามารถในการดูดติดผิวจะเพิ่มขึ้นเมื่อลดอุณหภูมิ แต่อัตราเร็วในการดูดติดผิวจะลดลง ในทางตรงข้ามเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นความสามารถในการดูดติดผิวจะลดลง แต่อัตราเร็วในการดูดติดผิวจะสูงขึ้น นอกจากนี้อุณหภูมิจะมีผลต่อความสามารถในการดูดติดผิว โดยเปลี่ยนความสามารถในการละลาย เช่น เมื่อเพิ่มอุณหภูมิซึ่งโดยปกติจะทำให้ความสามารถในการละลายสูงขึ้น มีผลทำให้ความสามารถในการดูดติดผิวลดลง

2.4.4.5 ความปั่นป่วน

ความเร็วในการดูดติดผิวขึ้นอยู่กับการแพร่ภายนอก และการแพร่ภายในซึ่งขึ้นกับความปั่นป่วนของระบบ ถ้าน้ำมีความปั่นป่วนต่ำ ชั้นฟิล์มของเหลวซึ่งล้อมรอบถ่านกัมมันต์จะมีความหนามากและเป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าไปหาถ่านกัมมันต์ ดังนั้นการแพร่ภายนอกเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดติดผิว ในทางตรงข้ามถ้าความปั่นป่วนสูงจะเกิดฟิล์มบางๆ ทำให้การแพร่ภายในเป็นปัจจัยกำหนดอัตราเร็วของการดูดติดผิว ความปั่นป่วน

ในถังดูดติดผิวคือ ความเร็วของน้ำที่ผ่านถังต่อหน่วยพื้นที่หน้าตัด ซึ่งตามทฤษฎีถ้าเพิ่มความเร็วจะทำให้อัตราเร็วในการดูดติดผิวสูงขึ้น เนื่องจากความปั่นป่วนสูงขึ้น

2.4.4.6 เวลาสัมผัส

เวลาสัมผัสเป็นพารามิเตอร์ที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการดูดติดผิวและอายุการใช้งานของถ่านกัมมันต์ Lee, Snoeyink และ Crittenden (1983) กล่าวว่า เวลาสัมผัสและความเข้มข้นของสารฮิวมิคเป็นปัจจัยสำคัญ ซึ่งมีอิทธิพลต่ออายุการใช้งานของชั้นถ่านกัมมันต์ โดยถ้าเวลาสัมผัสเพิ่มขึ้น และความเข้มข้นของน้ำเข้าลดลงแล้ว อายุการใช้งานของชั้นถ่านกัมมันต์จะนานขึ้น เวลาสัมผัสที่ใช้ในการลดสารอินทรีย์ในน้ำเสียขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์อื่น เช่น พื้นที่ผิวที่ใช้ในการดูดติดผิว ลักษณะขนาดรูพรุน ชนิดและขนาดโมเลกุลของสารถูกดูดติดผิวในสารละลาย และชนิดของถ่านกัมมันต์

2.4.4.7 พารามิเตอร์อื่นๆ

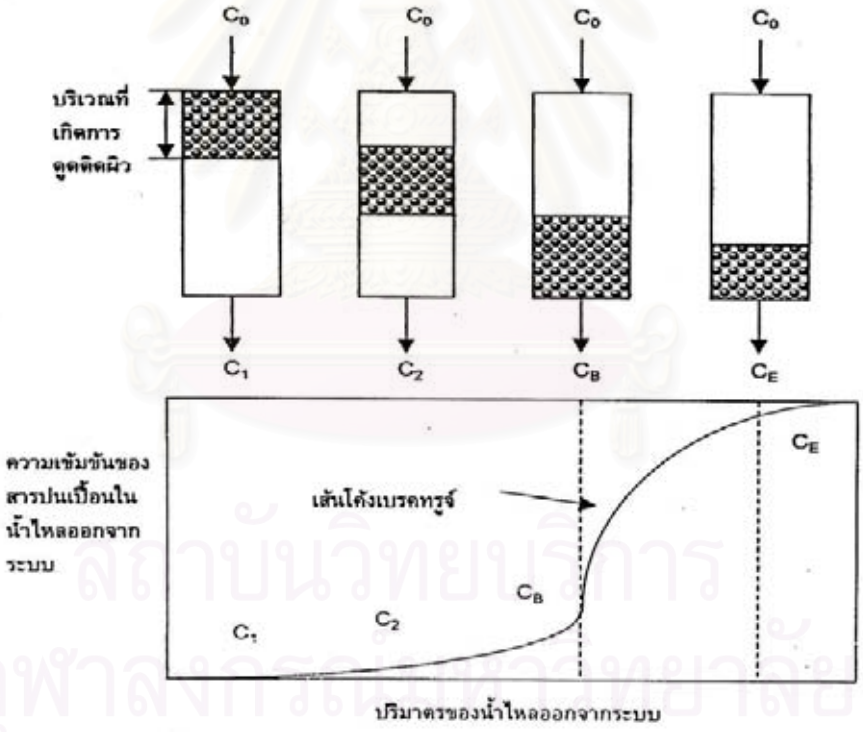
พารามิเตอร์อื่นๆ ที่เป็นปัจจัยและมีผลต่อการดูดติดผิวนอกเหนือจากพารามิเตอร์หลักที่กล่าวมาแล้ว ได้แก่ ความดัน (Pressure), อัตราการกรอง (Filtration Rate), ความเปียก (Wettability), ฝุ่น (Dustiness), อุณหภูมิที่ติดไฟ (Ignition Temperature), การนำไฟฟ้า (Electrical Conductivity), น้ำมันที่ถูกกักเก็บ (Oil Retention), ความชื้น (Moisture), ปริมาณเถ้า (Total Ash), ความต้านทานการสึกกร่อน (Resistance to Attrition), ความแข็ง (Hardness), สารอนินทรีย์ที่ละลายกรด (Acid-Soluble Inorganics) เป็นต้น

2.5 **ถังดูดติดผิวแบบแท่ง** (Adsorption Column Test)

การหาไอโซเทอมการดูดติดผิวนั้น เป็นการทดลองแบบชั่วคราว ซึ่งบอกให้ทราบได้ว่าการดูดติดผิวด้วยถ่านนั้นจะใช้ได้ผลดีหรือไม่ ซึ่งข้อมูลที่ได้นั้นยังไม่เพียงพอสำหรับการออกแบบระบบบำบัดโดยใช้การดูดติดผิวด้วยถ่านกัมมันต์ ดังนั้นจึงจำเป็นที่ต้องทำการทดลองแบบแท่งโดยใช้คอลัมน์ขนาดเล็กแทนถังบรรจุถ่านกัมมันต์ น้ำเสียไหลจะผ่านชั้นถ่านกัมมันต์ที่อยู่กับที่ ลักษณะการดูดติดผิวเริ่มเกิดขึ้นบริเวณส่วนบนของถังดูดติดผิวแบบแท่ง แล้วค่อยๆ เคลื่อนที่ลงสู่ส่วนล่างของชั้นถ่านกัมมันต์ จนกระทั่งหมดสภาพการดูดติดผิวที่ส่วนล่างของชั้นถ่านกัมมันต์ ดังนั้นความเข้มข้นของสิ่งสกปรกในน้ำเสียที่ผ่านการดูดติดผิวแล้วจะเพิ่มขึ้นตามเวลาหรือปริมาณน้ำเสีย จนในที่สุดความเข้มข้นของสิ่งสกปรกในน้ำเสียที่ผ่านถังดูดติดผิวแบบแท่งจะเท่ากับความเข้มข้นที่เข้าสู่ระบบ

รูปความสัมพันธ์ระหว่างอัตราส่วนความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในน้ำทิ้งที่ผ่านชั้นถ่านกัมมันต์แล้ว ต่อความเข้มข้นเริ่มต้น เทียบกับปริมาณน้ำที่ผ่านชั้นถ่านกัมมันต์ คือ เส้นโค้งที่เรียกว่าเส้นโค้งเบรคทรูจ์ (Breakthrough Curve) ณ จุดที่การดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์เริ่มทำงานไม่ได้ประสิทธิภาพ เรียกว่าจุดเริ่มหมดสภาพ และหลังจากจุดนี้ต่อไปเป็นเส้นตรงที่มีความชันเพิ่มขึ้น คือประสิทธิภาพการดูดติดผิวค่อยๆ ลดลง จนถ่านกัมมันต์หมดสภาพจนไม่สามารถบำบัดน้ำเสียได้อีก เส้นโค้งเบรคทรูจ์แสดงในรูปที่ 2.15 ที่จุด C_E ที่เรียกว่าจุดหมดสภาพ (Breakthrough Point) ระยะเวลานับจากเริ่มต้นการดูดติดผิวจนถึงจุดเริ่มหมดสภาพ เรียกว่า Breakpoint Time ซึ่งจะมีค่าลดลงถ้า

- ความสูงของชั้นถ่านลดลง
- เม็ดถ่านมีขนาดใหญ่ขึ้น
- อัตราการไหลของน้ำทิ้งเพิ่มขึ้น
- ความเข้มข้นของสารที่จะถูกดูดติดเพิ่มขึ้น



รูปที่ 2.15 ระบบดูดติดผิวแบบไหลต่อเนื่อง
ที่มา : เกรียงศักดิ์, 2542

2.6 การฟื้นสภาพถ่านกัมมันต์ (Regeneration)

เมื่อถ่านกัมมันต์ถูกใช้งานไปเป็นเวลานานๆ รูพรุนของถ่านจะถูกอุดตันด้วยโมเลกุลของสิ่งสกปรก ทำให้ถ่านหมดประสิทธิภาพในการดูดติดผิว เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีราคาค่อนข้างสูง ดังนั้นเพื่อที่จะลดราคาค่าใช้จ่ายในการกำจัดจะต้องนำถ่านดูดติดผิวที่หมดประสิทธิภาพ (Exhausted Carbon) มาฟื้นเพื่อสามารถนำกลับมาใช้งานอีก การฟื้นถ่านกัมมันต์โดยการนำถ่านไปกำจัดโมเลกุลของสิ่งสกปรกที่อุดอยู่ในรูของถ่านกัมมันต์อาจทำได้หลายวิธี ได้แก่ (Lyman, 1987)

1) การใช้ความร้อนในการฟื้นสภาพ (Thermal Reactivation)

วิธีนี้เป็นวิธีที่นิยมใช้กันมาก ถ่านกัมมันต์ที่หมดประสิทธิภาพแล้วจะรวมกับน้ำมีลักษณะข้น (Slurry) นำเข้ามาในระบบฟื้นคุณภาพ หลังจากนั้นทำการแยกน้ำ (Dewater) ออกจากถ่านกัมมันต์ แล้วส่งเข้าเตาเผาที่เรียกว่า Multiple Hearth Furnace หรือ Rotary Kiln ทำการเผาที่อุณหภูมิ 870-980 องศาเซลเซียส ระหว่างนี้ถ่านจะถูกทำให้แห้ง และการเผาไหม้ให้จะทำให้โมเลกุลของสิ่งสกปรกที่เป็นสารอินทรีย์บนผิวหน้า และในรูพรุนของเม็ดถ่านระเหยเป็นไอและถูกเผาสลายตัวไป ในขั้นตอนการเผานี้จะต้องควบคุมปริมาณออกซิเจนเพื่อให้ความร้อนทำลายโมเลกุลของสิ่งสกปรกที่ติดผิวถ่าน แต่ไม่ทำลายเนื้อถ่าน (Cheremisinoff and Morresi, 1978) หลังจากนั้นถ่านกัมมันต์ที่ร้อนจัดจะถูกทำให้เย็นโดยจุ่มลงในน้ำ (Quenching) แล้วนำไปล้างแยกเศษผงถ่านออกแล้วจึงสูบไปเก็บไว้หรือนำกลับไปใช้งาน การฟื้นคุณภาพของถ่านกัมมันต์จะใช้เวลาประมาณ 30 นาที และสิ้นเปลืองพลังงานประมาณ 4,000-5,000 บีทียูต่อถ่านหนึ่งปอนด์ ในแต่ละขั้นตอนถ่านจะสูญหายไปประมาณร้อยละ 4-9

2) การใช้ด่างในการฟื้นสภาพ (Alkaline Regeneration) วิธีนี้นิยมใช้กับสารถูกดูดติดผิว หรือสภาวะที่ใช้ในการดูดติดผิวที่เป็นกรด

3) การใช้กรดในการฟื้นสภาพ (Acid Regeneration) วิธีนี้นิยมใช้กับสารถูกดูดติดผิว หรือสภาวะที่ใช้ในการดูดติดผิวที่เป็นด่าง

4) การใช้ตัวทำละลายในการฟื้นสภาพ (Solvent Regeneration) วิธีนี้นิยมใช้กับสารถูกดูดติดผิวกลุ่มสารอินทรีย์

5) การใช้ไอน้ำในการฟื้นสภาพ (Steam Regeneration) วิธีนี้นิยมใช้กับสารถูกดูดติดผิวที่เป็นไอได้ง่าย

6) การฟื้นสภาพโดยวิธีทางเคมี (Biological Regeneration) วิธีนี้นิยมใช้กับสารถูกดูดติดผิวที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ เช่น สารอินทรีย์

2.7 มะขาม

มะขามมีชื่อสามัญภาษาอังกฤษคือ Tamarind มีชื่อทางพฤกษศาสตร์ว่า *Tamarind indica L.* อยู่ในวงศ์ Leguminodae ชื่อสุกล Tamarindes คำว่า "Tamarind" นั้นมาจาก Tamsbini และ Tamarul Hind ซึ่งหมายถึง Indian Date หรือ Date of India (บรรณ, 2532)

2.7.1 แหล่งกำเนิด

มะขามเป็นพืชที่มีถิ่นกำเนิดในเขตร้อนของแอฟริกาตะวันออก บริเวณแอบีสซีเนีย จนถึงบริเวณลุ่มน้ำแซมเบไซในอินเดียตอนใต้ มนุษย์เริ่มรู้จักปลูกมะขามเมื่อประมาณก่อนคริสต์ศตวรรษที่ 4 แพร่เข้ามาประเทศไทยจากประเทศพม่า และนำมาปลูกเป็นแห่งแรกที่อำเภอหล่มสัก จังหวัดเพชรบูรณ์

2.7.2 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

มะขามเป็นพืชที่มีใบผสม ผลัดใบแก่ และสลัดใบทิ้งในฤดูร้อน พอถึงต้นฤดูฝนจะแตกใบอ่อนขึ้นเต็มที่ พร้อมกับเริ่มออกดอก ประมาณเดือนเมษายน – ต้นเดือนพฤษภาคม เริ่มติดฝักอ่อนพอมองเห็นฝักได้ราวๆ ปลายเดือนพฤษภาคม – ต้นเดือนมิถุนายน และจะแก่จนเก็บได้ราวๆ ปลายเดือนธันวาคม – เดือนมิถุนายน

2.7.3 เมล็ดมะขาม

เมล็ดมะขามเมื่อเปลือกอ่อนจะมีสีขาว และเมื่อแก่จะเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเข้มเป็นมันเงา เนื้อในเมล็ดมีสีขาว ซึ่งประกอบด้วยเปลือกเมล็ด ร้อยละ 30.1 แป้ง ร้อยละ 51.47 ส่วนที่เหลือเป็นความชื้น แป้งในเมล็ดมะขามบางครั้งเรียกว่า TKP หรือ Tamarind Kernel Powder มีประโยชน์สามารถใช้บริโภคได้ เพราะมีคุณค่าทางอาหาร ใกล้เคียงกับแป้งข้าวเจ้าและข้าวสาลี นอกจากนั้นยังใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ เพราะแป้งเมล็ดมะขามประกอบด้วยสารโพลีแซคคาไรด์ชื่อเจลโลส (Jellose) ประมาณ ร้อยละ 60 และเมื่อนำไปผสมกับสารละลายบอแร็กซ์แล้วจะได้กาวที่มีความเหนียวสูง คุณสมบัติของแป้งในเมล็ดมะขามดังตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.11 ลักษณะโดยทั่วไปของแป้งในเมล็ดมะขาม

Description	Value
Colour	Light creamy
Viscosity	2,800 CPS in 3% solution
pH of 5% Slurry	6.35
Moisture	7.41%

ตารางที่ 2.11 ลักษณะโดยทั่วไปของแป้งในเมล็ดมะขาม(ต่อ)

Description	Value
Ash content	2.72%
Fat	6.12%
Starch content	48.3% by Mass on dry basis
Sieve value	100 mesh 100% w/w passing
	200 mesh 99% w/w passing

ที่มา : Prabhanjan และ Zakiuddin, 1995

2.8 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เทอดพงศ์ (2545) ศึกษาประสิทธิภาพในการลดค่าความสกปรกของน้ำชะมูลฝอย โดยใช้ดินที่มีส่วนผสมต่างๆกันเป็นวัสดุกรอง การทดลองใช้คอลัมน์พีวีซีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15 เมตร สูง 2.50 เมตร จำลองสภาพหลุมฝังกลบมูลฝอยที่มีดินชนิดต่างๆเป็นชั้นวัสดุกรอง 4 ประเภท บรรจุลงในคอลัมน์ลึก 0.80 เมตร โดยเติมน้ำลงในคอลัมน์เทียบเท่ากับความเข้มข้นของน้ำฝนที่ตกลงบนหลุมฝังกลบมูลฝอย 25, 50 และ 100 มิลลิเมตรต่อวัน ตามลำดับ จากผลการทดลองพบว่า ปริมาณน้ำฝนที่แตกต่างกันที่ตกลงบนหลุมฝังกลบจะส่งผลโดยตรงกับค่าความสกปรกของน้ำชะมูลฝอย โดยความเข้มข้นของน้ำชะมูลฝอยจะสูงขึ้นเมื่อมีปริมาณน้ำฝนน้อย และเจือจางเมื่อมีความเข้มฝนมากในช่วงเริ่มต้น หลังจากนั้นความเข้มข้นของน้ำชะมูลฝอยจะลดลงตามเวลาจนมีค่าใกล้เคียงกันในทุกปริมาณน้ำฝน ในกรณีที่มีการชะล้าง 50 มิลลิลิตรต่อวันมีประสิทธิภาพการกำจัดบีโอดี ความเข้มสี ไนโตรเจนทั้งหมด และแอมโมเนียไนโตรเจนเฉลี่ย ตลอดการทดลองเท่ากับร้อยละ 32.78, 48.93, 72.61 และ 50.19 ตามลำดับ

ธเรศ, ปนัดดา และวรรธนา (2545) ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำกากขี้แป้งจากโรงงานน้ำยางข้นมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์ โดยได้ศึกษาประสิทธิภาพของการกำจัดตะกั่วและปรอทในน้ำเสียสังเคราะห์เปรียบเทียบระหว่างถ่านกัมมันต์ที่จำหน่ายตามท้องตลาดทั่วไปกับถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกากขี้แป้งที่ใช้เกลือแกงเป็นสารกระตุ้น และทำการล้างสารกระตุ้นด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น ร้อยละ 5 เมื่อนำไปศึกษาลักษณะทางกายภาพ พบว่าถ่านขี้แป้งมีค่าไอโอดีนนัมเบอร์ 510 มิลลิกรัมไอโอดีนต่อกรัมถ่านกัมมันต์ และมีพื้นที่ผิว 566.39 ตารางเมตรต่อกรัม ผลการหาไอโซเทอมแบบฟรุนดิช ในการดูดซับตะกั่วและปรอท พบว่าที่พีเอช 4 และความเข้มข้น 10 มิลลิกรัม/ลิตร มีเปอร์เซ็นต์การกำจัดตะกั่วและปรอทดีที่สุด ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้จากกากขี้แป้งมีความสามารถในการดูดติดผิวตะกั่วและปรอทได้ 116.18 และ 18.78 มิลลิกรัมต่อกรัมถ่านกัม

มันต์ ตามลำดับ และถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายทั่วไป มีความสามารถในการดูดติดผิวตะกั่วและปรอทได้ 11.07 และ 98.85 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อกรัมถ่านกัมมันต์ตามลำดับ ส่วนการทดสอบแบบแท่งในคอลัมน์ได้ใช้ถ่านขี้แป้งที่มีดินเหนียวเป็นวัสดุเชื่อมประสาน และทำการป้อนน้ำเสียอย่างต่อเนื่องแบบไหลลลง ด้วยอัตราการไหล 3 แกลลอน/(นาที-ลูกบาศก์ฟุต) พบว่าถ่านกัมมันต์ที่ชั้นความสูง 30, 60, 90, 120 เซนติเมตร สามารถบำบัดตะกั่วในน้ำเสียได้ 5,865.58, 3,910.39, 3,909.50 และ 3,054.47 BV ตามลำดับ และสามารถบำบัดปรอทได้ 28.87, 16.04, 11.76 และ 9.62 BV ตามลำดับ สรุปได้ว่า ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากกากขี้แป้งมีความเหมาะสมในการกำจัดตะกั่วมากกว่าปรอท

ศิริพรรณ (2544) ศึกษาความสามารถของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตในประเทศไทยเพื่อใช้กำจัดความสกปรกในน้ำชะมูลฝอย ซึ่งวัดในรูปซีโอดีและสี โดยใช้ถ่านกัมมันต์ 3 ชนิด ได้แก่ ถ่านกัมมันต์จากไม้ กะลามะพร้าว และลิกไนต์ พบว่า ถ่านกัมมันต์จากไม้มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับใช้กำจัดซีโอดีและสีในน้ำชะมูลฝอย โดยมีความจุดูดติดผิว (K) ซีโอดี และสีเท่ากับ 0.13 มิลลิกรัมซีโอดีต่อกรัมถ่าน และ 0.041 หน่วย แพลทตินัมโคบอลต์ ตามลำดับ และ 1/n มีค่าเท่ากับ 0.9482 และ 0.9996 สำหรับการดูดติดผิวสีและซีโอดี ตามลำดับ ส่วนการศึกษาในถังดูดติดผิวแบบแท่ง พบว่า ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อระยะเวลาใช้งานของถ่านได้แก่ ความลึกของชั้นถ่าน, อัตราภาระบรรทุกผิว และความเข้มข้นสารถูกดูดติดผิว โดยถ่านจะมีระยะการใช้งานลดลงเมื่อความลึกของชั้นถ่านลดลง อัตราภาระบรรทุกผิว และความเข้มข้นสารถูกดูดติดผิวเพิ่มขึ้น สำหรับการทดลองเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างระยะเวลาใช้งาน (t) กับความลึกชั้นถ่าน (h) ในรูปสมการของ Adams&Bohart ได้ความสัมพันธ์ที่อัตราบรรทุกดูดติดผิว 0.3 ม.^{3}/ม.^{2}-ชม. เป็น t = 47.33h-8, อัตราภาระบรรทุกผิว 0.6 ม.^{3}/ม.^{2}-ชม. เป็น t = 22.67h-5 และอัตราภาระบรรทุกผิว 1.2 ม.^{3}/ม.^{2}-ชม.เป็น t = 10h-3

Chain และ Dewalle (1976) สรุปได้ว่า ระบบบำบัดทางชีววิทยามีความเหมาะสมที่สุดสำหรับบำบัดน้ำชะมูลฝอยจากบริเวณฝังกลบที่มีอายุไม่เกิน 5 ปี ส่วนวิธีการบำบัดทางฟิสิกส์ และเคมี จะบำบัดได้ดีในกรณีที่เป็นน้ำชะมูลฝอยจากหลุมฝังกลบที่มีอายุมากหรือผ่านการบำบัดมาแล้วโดยกระบวนการทางชีววิทยา ซึ่งการบำบัดด้วยถ่านกัมมันต์และกระบวนการแปรผันกลับจะสามารถทำการกำจัดสารอินทรีย์ได้ดีที่สุด ดังตารางที่ 2.12 แสดงถึงวิธีการกำจัดที่เหมาะสมโดยพิจารณาตามอายุและลักษณะสมบัติของน้ำชะมูลฝอย

ตารางที่ 2.12 ความสัมพันธ์ระหว่าง COD/TOC, BOD/COD, COD และอายุของหลุมฝังกลบต่อประสิทธิภาพในการลดสารอินทรีย์ในน้ำชะมูลฝอยของกระบวนการต่างๆ

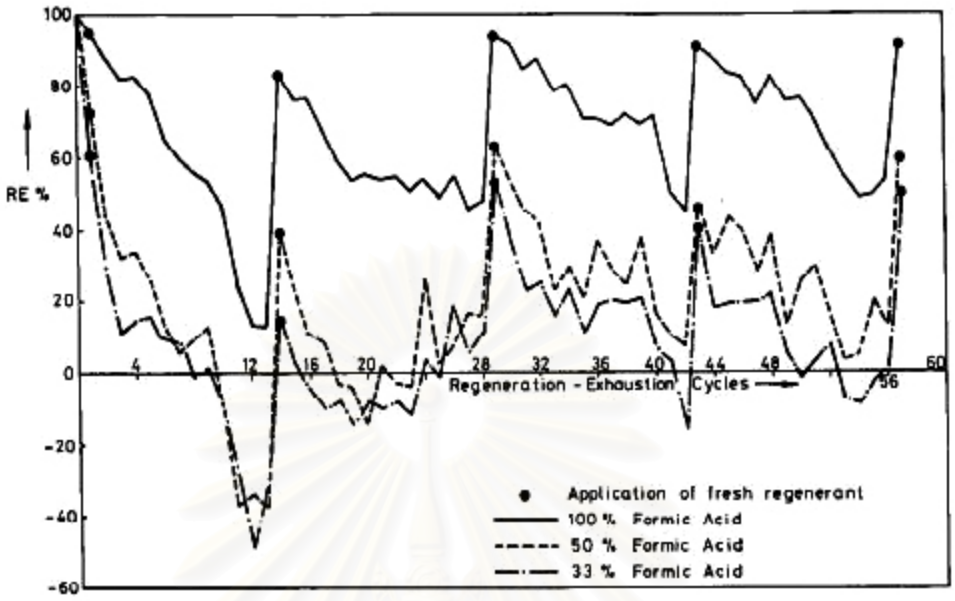
Characteristics	Range		
Age of Landfill	young (<5 yr)	medium (5 yr-10 yr)	old (>10 yr)
BOD/COD	>3.8	0.1-0.5	<0.1
COD/TOC	>3.8	2.0-3.8	<2.0
COD (mg/l)	>3.8	500-10,000	<500
Treatment method	Efficiency		
Biological treatment	ดี	พอใช้	ไม่ดี
Chemical precipitation	ไม่ดี	พอใช้	ไม่ดี
Chemical oxidation	ไม่ดี	พอใช้	พอใช้
Ozone	ไม่ดี	พอใช้	พอใช้
Reverse osmosis	พอใช้	ดี	ดี
Activated carbon	ไม่ดี	พอใช้	ดี
Ion exchange resins	ไม่ดี	พอใช้	พอใช้

ที่มา : Chain และ Dewalle (1976)

Kurniawan, Lo และ Chan (2006) ศึกษาการกำจัดซีโอดีและแอมโมเนียในน้ำชะมูลฝอยโดยใช้โอโซนร่วมกับถ่านกัมมันต์ โดยน้ำชะมูลฝอยจะถูกป้อนเข้าถังดูดติดผิวที่บรรจุถ่านกัมมันต์แบบไหลขึ้นอย่างต่อเนื่อง และจะถูกออกซิไดซ์ด้วยโอโซนบริเวณผิวหน้าด้านบนของชั้นถ่านกัมมันต์ ซึ่งมีการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นและพีเอชอย่างเหมาะสม พบว่าสามารถกำจัดซีโอดีได้ ร้อยละ 86 และแอมโมเนียได้ร้อยละ 92 หากใช้การออกซิไดซ์ด้วยโอโซนเพียงอย่างเดียวสามารถกำจัดซีโอดีร้อยละ 35 และแอมโมเนียได้ร้อยละ 50 ซึ่งมีความเข้มข้นของซีโอดีและแอมโมเนียเริ่มต้น เท่ากับ 8,000 และ 2,620 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นของซีโอดีและแอมโมเนียในน้ำที่ออกจากระบบ ยังเกินค่ามาตรฐานน้ำทิ้ง ดังนั้นจึงควรมีการบำบัดน้ำชะมูลฝอยขั้นต้นก่อนการบำบัดด้วยโอโซนร่วมกับถ่านกัมมันต์

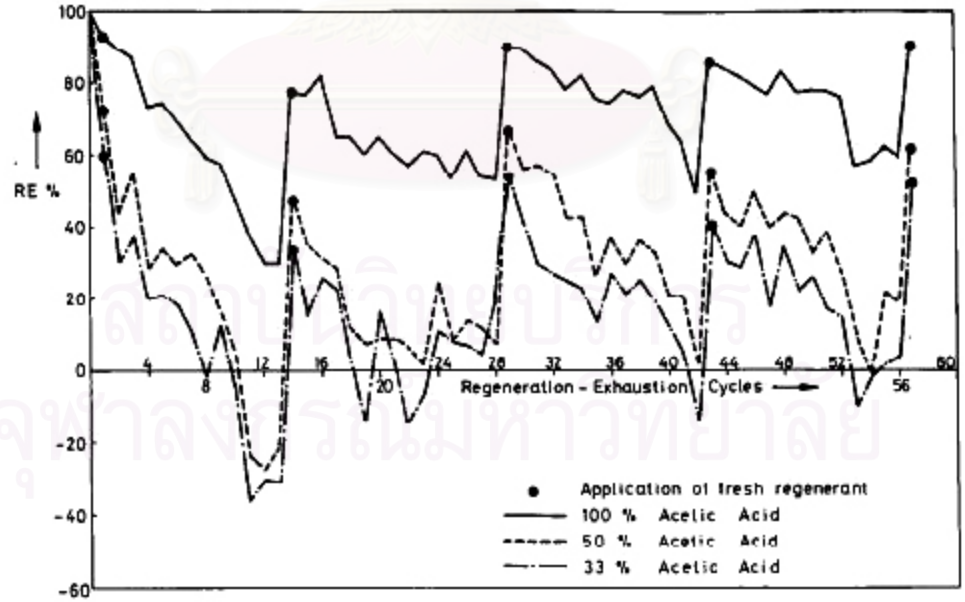
Martin และ N_G (1986) ศึกษาการฟื้นสภาพถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 400 ซึ่งผ่านการดูดติดผิวไนโตรเบนซิน, Rhodamine-B และกรดฮิวมิค ซึ่งมีมวลโมเลกุลต่างกันจากน้อยไปมากตามลำดับ การทดลองฟื้นสภาพถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดูดติดผิวไนโตรเบนซินนั้น ได้ทำการฟื้น

สภาพมากกว่า 50 รอบ โดยใช้กรดฟอร์มิกและกรดอะซิติก ในการล้างร่วมกับน้ำสะอาด กรดจะถูกหมุนเวียนกลับมาล้างใหม่ 13 รอบ จึงจะเปลี่ยนกรดใหม่ ได้ผลดังรูปที่ 2.16 – 2.17



รูปที่ 2.16 ประสิทธิภาพการฟื้นสภาพถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 400 ที่ผ่านการกำจัดไนโตร-เบนซิน ด้วยกรดฟอร์มิก

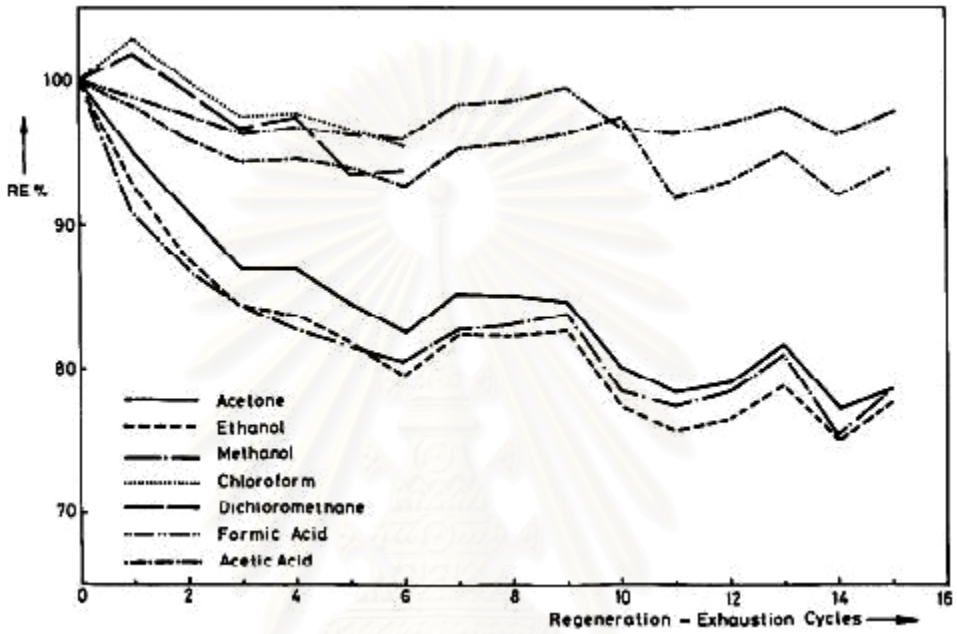
ที่มา : Martin และ N_G (1986)



รูปที่ 2.17 ประสิทธิภาพการฟื้นสภาพถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 400 ที่ผ่านการกำจัดไนโตร-เบนซิน ด้วยกรดอะซิติก

ที่มา : Martin และ N_G (1986)

สำหรับการฟื้นสภาพถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดูดติดผิว Rhodamine-B และกรดฮิวมิคนั้นจะใช้สารสำหรับล้างถ่านกัมมันต์ (Regenerant) หลายชนิด ซึ่งการฟื้นสภาพถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดูดติดผิว Rhodamine-B จะถูกนำมาฟื้นสภาพ 15 รอบ ได้ผลแสดงดังในรูปที่ 2.18 และถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดูดติดผิวกรดฮิวมิคจะถูกนำมาฟื้นสภาพ 6 รอบ ได้ประสิทธิภาพในการฟื้นสภาพแสดงดังในตารางที่ 2.13



รูปที่ 2.18 ประสิทธิภาพการฟื้นสภาพถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 400 ที่ผ่านการกำจัด Rhodamine-B

ที่มา : Martin และ N_G (1986)

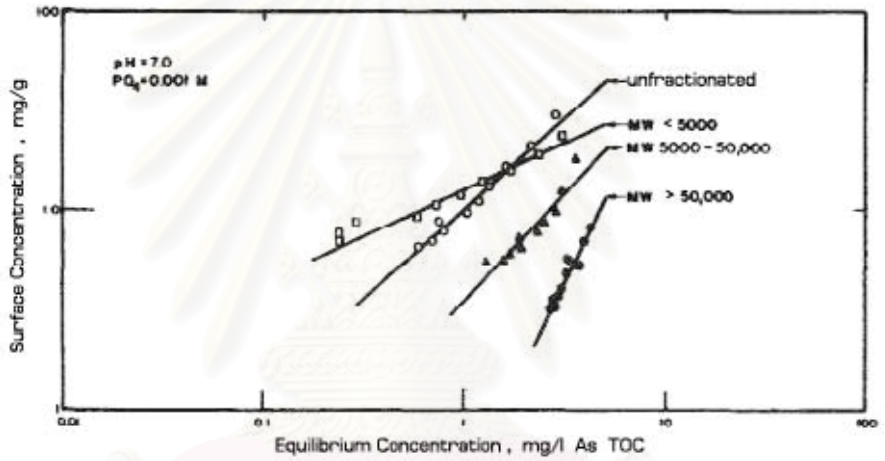
ตารางที่ 2.13 การฟื้นสภาพถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 400 ที่ผ่านการกำจัดกรดฮิวมิค

Regenerant	จำนวนครั้งในการฟื้นสภาพ – ประสิทธิภาพในการฟื้นสภาพ (%RE)											
	1		2		3		4		5		6	
	%RE	pH	%RE	pH	%RE	pH	%RE	pH	%RE	pH	%RE	pH
Acetone	10.7	5.3	0.0	5.2	0.0	4.7	-	-	-	-	-	-
Methanol	36.5	5.3	17.7	5.2	11.6	4.9	-	-	-	-	-	-
Ethanol	39.8	5.3	26.9	5.2	14.0	4.9	-	-	-	-	-	-
FormicAcid	165.7	3.0	165.7	3.0	154.3	2.9	165.7	3.0	178.0	2.9	153.3	2.9
Acetic Acid	171.0	3.2	154.3	3.2	136.6	3.1	154.3	3.2	154.3	3.1	135.5	3.1

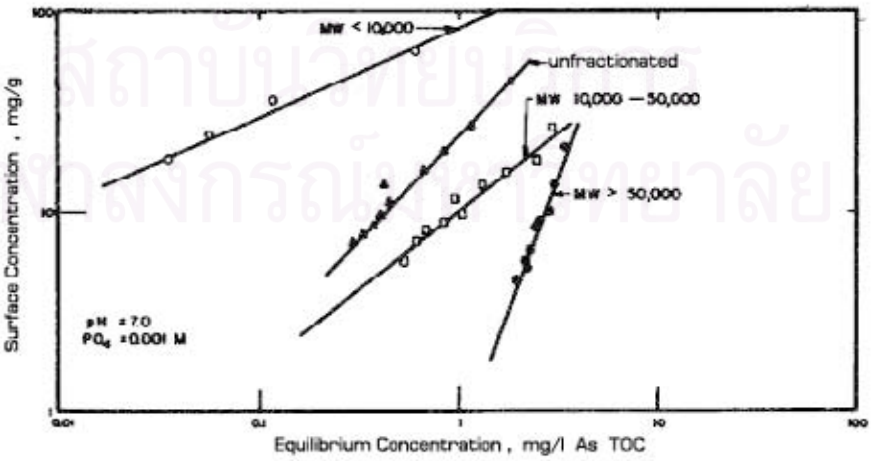
ที่มา : Martin และ N_G (1986)

จากผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่า สารที่จะนำมาฟื้นสภาพจะต้องมีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่าสารถูกดูดติดผิว เพื่อที่จะละลายการดูดติดผิวของสารชนิดนั้นๆ ซึ่งการใช้กรดกลุ่มอะลิฟาติก คาร์บอซิลิก (Aliphatic Carboxylic) นั้นได้ผลอย่างน่าพอใจในการฟื้นสภาพถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดูดติดผิวกรดฮิวมิคซึ่งมีมวลโมเลกุลขนาดใหญ่ โดยสามารถทำการฟื้นสภาพได้ 100 เปอร์เซ็นต์ ใน 6 ครั้งที่ทำการฟื้นสภาพ (ไม่มีการหมุนเวียนกรดกลับมาใช้)

McCreary และ Snoeyink (1980) ศึกษาไอโซเทอมการดูดติดผิวของกรดฮิวมิค และฟัลวิค โดยใช้ถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 400 พบว่า ขอบเขตของการดูดติดผิวลดลงเมื่อมวลโมเลกุลเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากโมเลกุลใหญ่ไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าสู่รูพรุนที่เล็กกว่าของคาร์บอน หรือขนาดรูพรุนที่โมเลกุลขนาดใหญ่เข้าได้มีจำนวนน้อย ผลไอโซเทอมแสดงดังรูปที่ 2.19 และรูปที่ 2.20



รูปที่ 2.19 ไอโซเทอมการดูดติดผิวของกรดฟัลวิคที่มวลโมเลกุลต่างกัน
ที่มา : McCreary และ Snoeyink, 1980



รูปที่ 2.20 ไอโซเทอมการดูดติดผิวของกรดฮิวมิคที่มวลโมเลกุลต่างกัน
ที่มา : McCreary และ Snoeyink, 1980

Morawe, Ramteke และ Vogelpohl (1995) ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสี, ซีโอดี และสารอินทรีย์กลุ่มฮาโลเจน (AOX) ในน้ำชะมูลฝอย โดยบำบัดทางชีววิทยาร่วมกับการใช้ถ่านกัมมันต์ในถังดูดติดผิวแบบแท่ง จำนวน 2 คอลัมน์ ซึ่งเรียงต่อกันแบบอนุกรม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 60 มิลลิเมตร และสูง 1.25 เมตร บรรจุถ่าน Calgon Filtrasorb 400 โดยป้อนน้ำเสียที่ผ่านการย่อยสลายทางชีววิทยาแล้ว เข้าสู่คอลัมน์แบบไหลขึ้นอย่างต่อเนื่อง ใช้เวลาในการทดลองจนกระทั่งถึงจุดยุติทั้งหมด 45 วัน พบว่าสามารถกำจัดสีและซีโอดี ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถกำจัดฮาโลเจนให้เหลือต่ำกว่ามาตรฐานได้ (0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร) ซึ่งจากการศึกษาถึงค่าคงที่การดูดติดผิวน้ำชะมูลฝอยของถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 400 พบว่ามีการดูดติดผิวแบบหลายชั้น (Multilayers) ได้ประสิทธิภาพการกำจัดน้ำชะมูลฝอยดังตารางที่ 2.14

ตารางที่ 2.14 คุณสมบัติของน้ำเสียก่อนเข้าระบบและจุดแรกของน้ำเสียที่ออกจากระบบ

Parameter	Concentration		Unit
	Influent	Effluent	
Colour	yellowish red	colourless	-
pH	7.5	8.53 – 8.66	-
Total Suspended solid	non-detected	non-detected	-
COD	879 - 940	80.4	mg/l
Nitrate	1,082 – 1,159	1,022	mg/l
Nitrite	4.9 – 6.4	4.2	mg/l
Phosphate	41.38	non-detected	mg/l
BOD	3.2 – 3.6	1.2	mg/l
AOX	2.6 – 2.0	0.47 – 0.41	mg/l

ที่มา : Morawe, Ramteke และ Vogelpohl (1995)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 3

แผนการทดลองและการดำเนินการวิจัย

การศึกษาครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลอง (Experimental Research) ทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ (Laboratory Scale) ณ ห้องปฏิบัติการมูลฝอย (Solid Waste Laboratory) ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.1 แผนการทดลอง

การวิจัยนี้จะทำการศึกษาความสามารถในการดูดติดผิว และประสิทธิภาพในการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยด้วยกระบวนการดูดติดผิว โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเมล็ดมะขาม ซึ่งจะแบ่งเป็น 5 ขั้นตอน (รูปที่ 3.1)

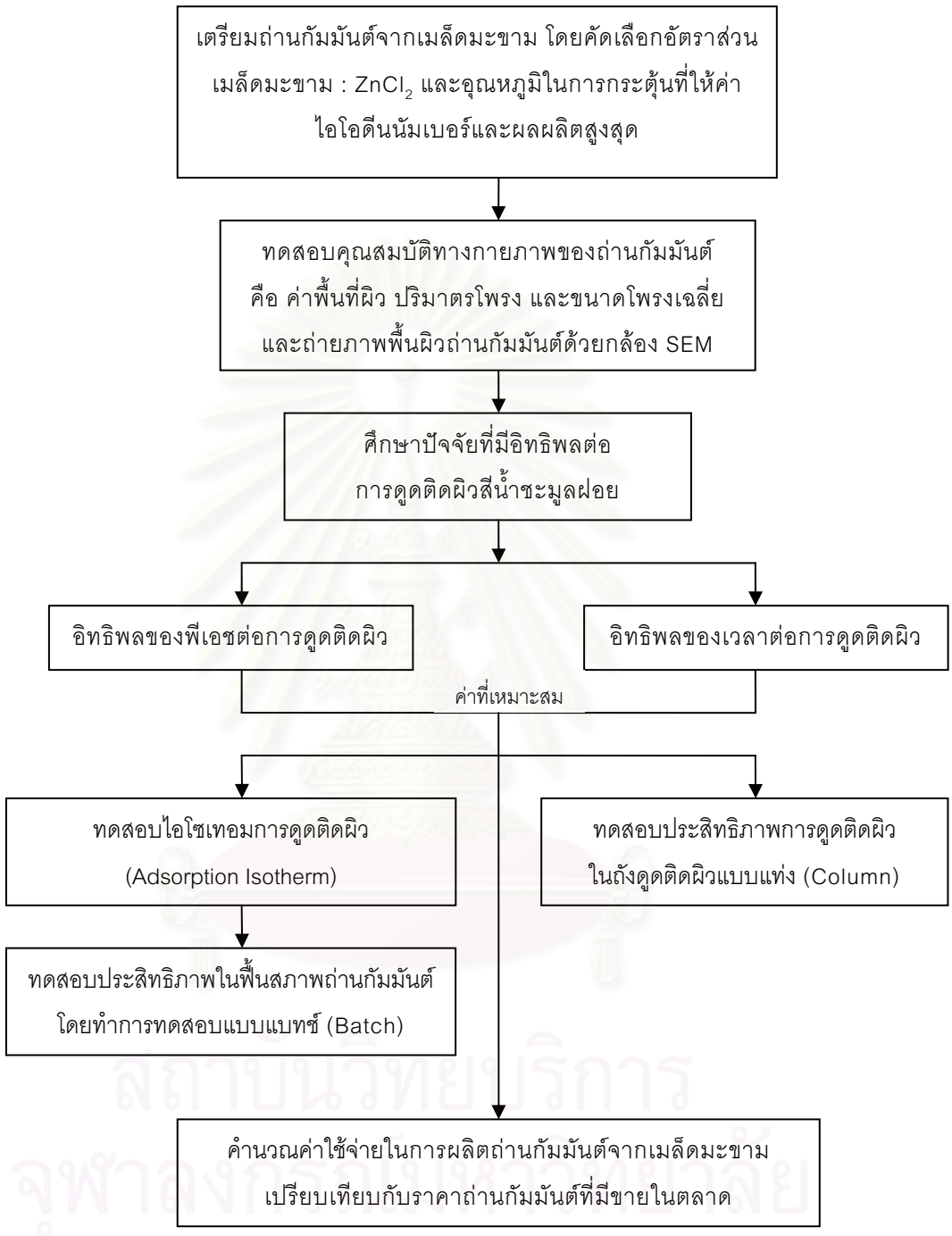
ขั้นตอนแรก การเตรียมถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามโดยทำการคัดเลือกอัตราส่วนโดยน้ำหนักของเมล็ดมะขามต่อซิงค์คลอไรด์ และอุณหภูมิในการกระตุ้นที่ทำให้ถ่านกัมมันต์มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์และผลผลิตสูงสุด และศึกษาลักษณะทางกายภาพที่สำคัญของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตได้

ขั้นตอนที่สอง การศึกษาความสามารถในการดูดติดผิวสีน้ำชะมูลฝอยของถ่านกัมมันต์ที่ได้จากขั้นตอนแรก โดยศึกษาถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดติดผิว และทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช และแลงมัวร์ โดยทำการทดสอบแบบแบทช์ (Batch Test)

ขั้นตอนที่สาม การฟื้นสภาพถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดูดติดสีน้ำชะมูลฝอย และนำมากำจัดสีน้ำชะมูลฝอยอีกครั้ง โดยทำการทดสอบแบบแบทช์ (Batch Test) เปรียบเทียบความสามารถในการดูดติดผิวสีน้ำชะมูลฝอยก่อนการฟื้นสภาพ

ขั้นตอนที่สี่ การศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานของถ่านกัมมันต์ในถังดูดติดผิวแบบแท่ง (Adsorption Column Test) โดยทำการป้อนน้ำชะมูลฝอยเข้าถังอย่างต่อเนื่อง

ขั้นตอนที่ห้า คำนวณค่าใช้จ่ายในการผลิตถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามเปรียบเทียบกับราคาถ่านกัมมันต์ที่มีจำหน่ายในตลาด



รูปที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

3.2 วิธีการดำเนินการวิจัย

3.2.1 การเตรียมถ่านกัมมันต์ เพื่อคัดเลือกอัตราส่วนตัวกระตุ้นและอุณหภูมิในการกระตุ้นที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์และการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์

ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม และปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการเตรียมถ่านกัมมันต์ คือ ผลของอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา และอัตราส่วนโดยน้ำหนักของเมล็ดมะขามต่อสารละลายซิงค์คลอไรด์ซึ่งใช้เป็นตัวกระตุ้น

1) นำเมล็ดมะขามมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส จากนั้นนำมาเผาคาร์บอไนซ์ แบบจำกัดอากาศ ที่อุณหภูมิ 200 – 400 องศาเซลเซียส และเวลาต่างๆ กัน หาค่าร้อยละผลผลิตเมล็ดมะขาม เลือกอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุด
2) บดถ่านเมล็ดมะขาม จนสามารถร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 8 เมซ และค้างบนตะแกรงเบอร์ 20 เมซ (0.85 – 2.36 มิลลิเมตร) และนำมาแช่สารละลายซิงค์คลอไรด์เข้มข้น ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ที่อัตราส่วน 1:0, 1:1, 1:2, 1:3 และ 1:4 โดยน้ำหนักของเมล็ดมะขามต่อซิงค์คลอไรด์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมาอบให้แห้ง
3) แยกถ่านเมล็ดมะขามเป็นสองส่วนทำการบรรจุถ่านเมล็ดมะขามลงในภาชนะดินเผา ปิดฝาเพื่อป้องกันอากาศภายนอกเข้า แล้วนำเข้าสู่กระบวนการเผากระตุ้นในเตาเผาที่อุณหภูมิ 500, 600, 700 และ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง
4) นำถ่านกัมมันต์ที่ได้มาล้างสารซิงค์คลอไรด์ที่ตกค้างออก โดยส่วนที่หนึ่งล้างด้วยน้ำสะอาด ส่วนที่สองจะล้างเพิ่มด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้นร้อยละ 5 แล้วล้างตามด้วยน้ำกลั่นจนค่าพีเอชคงที่สภาพเป็นกลางหรือมีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 6.5 – 7.5 นำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศา-เซลเซียส แล้วทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น นำมาชั่งน้ำหนักหาร้อยละผลผลิต
5) บดถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามให้ละเอียดจนสามารถร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 325 เมซ (0.045 มิลลิเมตร) แล้วนำมาวิเคราะห์ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ตาม ASTM D4607 – 94 แสดงดังในภาคผนวก ข. เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการดูดติดผิว เลือกถ่านกัมมันต์มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์และร้อยละผลผลิตที่

เหมาะสมมาใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพการดูดติดผิวสีน้ำชะมูลฝอยในขั้นอื่นๆ ต่อไป

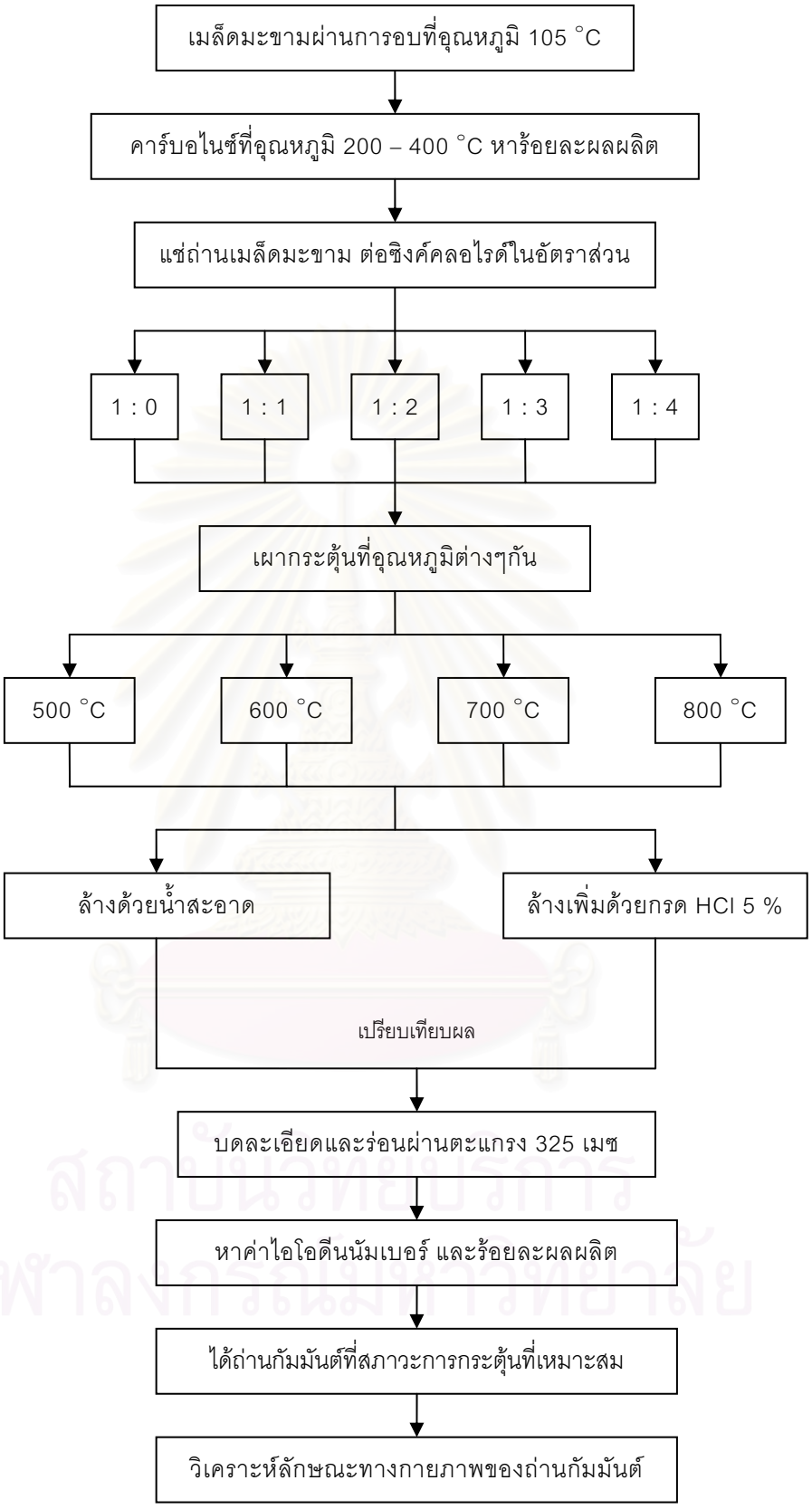
6) ศึกษาสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของถ่านกัมมันต์ที่ได้ ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 การวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของถ่านกัมมันต์

ลักษณะทางกายภาพ	หน่วย	วิธีการวิเคราะห์
พื้นที่ผิว	m^2/g	N_2 – Bet (Brunauer-Emmeit Teller)
ปริมาตรโพรง	ml/g	N_2 – Bet (Brunauer-Emmeit Teller)
ขนาดโพรงเฉลี่ย	A°	N_2 – Bet (Brunauer-Emmeit Teller)
ความชื้น	%	Thermal Gravimetric Analaysis
ขี้เถ้า	%	Thermal Gravimetric Analaysis
สารอินทรีย์ระเหย	%	Thermal Gravimetric Analaysis
คาร์บอนคงตัว	%	Thermal Gravimetric Analaysis

7) ถ่ายภาพลักษณะโครงสร้าง พื้นที่ผิว ของถ่านกัมมันต์ที่ได้ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope: SEM) ขั้นตอนการทดลองแสดงดัง รูปที่ 3.2

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.2 ขั้นตอนการหาอัตราส่วนตัวกระตุ้นต่อปริมาณถ่านเมล็ดมะขามและอุณหภูมิในการกระตุ้นที่เหมาะสมต่อประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์

3.2.2 การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม

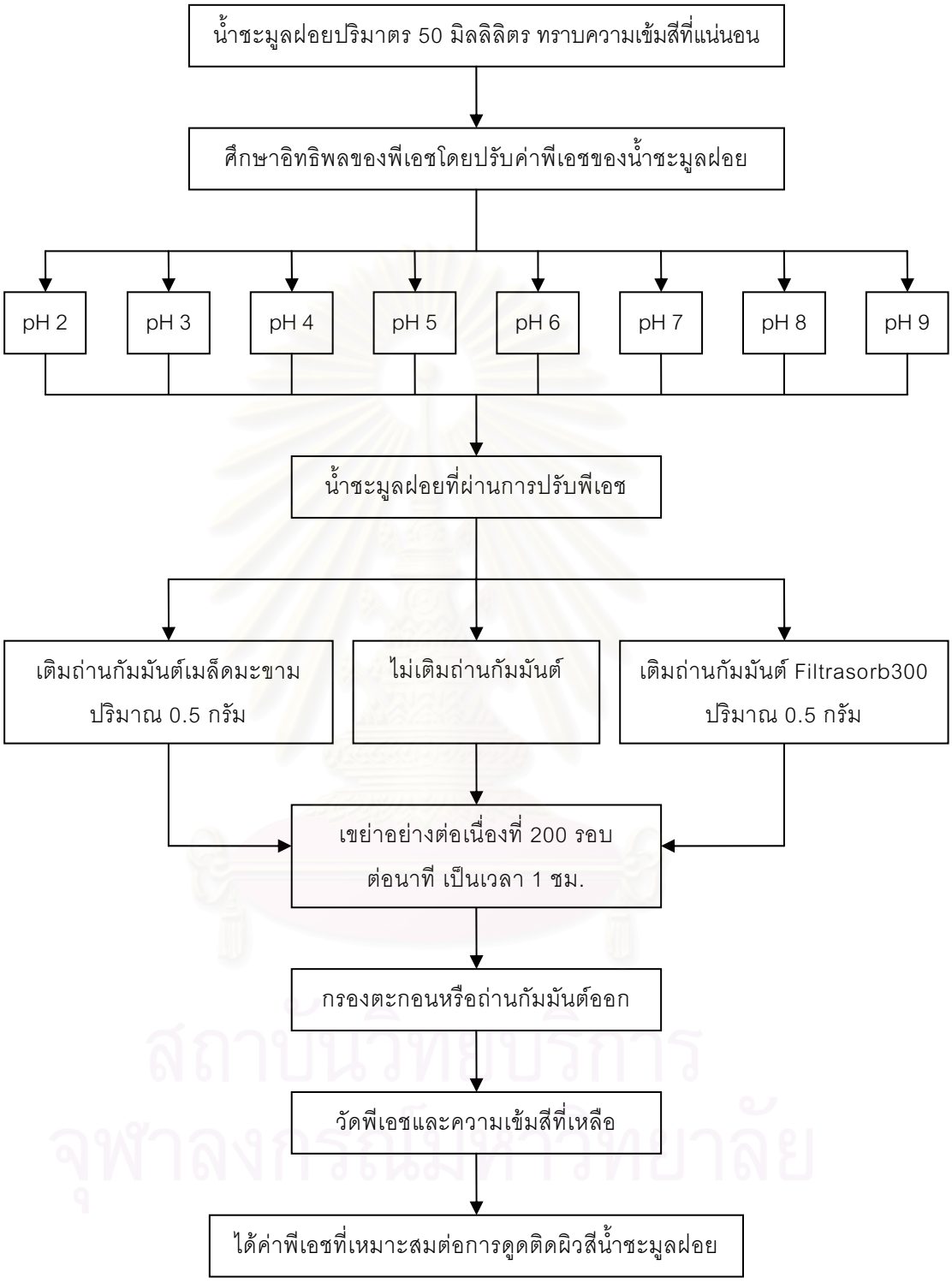
ศึกษาความสามารถในการดูดติดผิวสีน้ำชะมูลฝอยของถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม โดยใช้การทดลองแบบแบทช์ (Batch Test) และศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิว คือ อิทธิพลของพีเอช, อิทธิพลของเวลาสัมผัส และทำการทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์

3.2.2.1 การเตรียมน้ำชะมูลฝอย

1) น้ำชะมูลฝอยที่ใช้ในงานวิจัยเก็บจากบ่อพักน้ำชะมูลฝอย สถานที่ฝังกลบมูลฝอยเทศบาลตำบลแสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี เก็บรักษาตัวอย่างน้ำก่อนทำการวิเคราะห์ไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อชะลอปฏิกิริยาทางชีวเคมี
2) นำน้ำชะมูลฝอยมากรองผ่านกระดาษกรอง GF/C (ขนาดเฉลี่ยของรูพรุน 1.2 ไมครอน)
3) วิเคราะห์ความเข้มสีด้วยเครื่องสเปคโตรโฟโตมิเตอร์ ผลที่ได้แสดงในหน่วยของแพลทตินัมโคบอลต์ (Pt-Co) วิธีการวิเคราะห์แสดงในภาคผนวก ก.

3.2.2.2 อิทธิพลของพีเอชต่อการดูดติดผิว

1) นำน้ำชะมูลฝอยที่เตรียมได้จากขั้นที่ 3.2.2.1 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร มาปรับค่าพีเอชให้เท่ากับ 2,3,4,5,6,7,8 และ 9 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือสารละลายกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) เข้มข้น 1 นอร์มัล
2) นำน้ำชะมูลฝอยที่ปรับค่าพีเอชให้เท่ากับ 2,3,4,5,6,7,8 และ 9 แล้ว ปริมาตร 50 มิลลิลิตร มาใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร แบ่งการทดลองออกเป็นสองชุด
3) ชุดแรกนำไปเขย่าบนเครื่องเขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำมากรองตะกอนด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 5 วัดค่าพีเอชและความเข้มสีที่เหลือ เพื่อหาร้อยละการกำจัดสีที่เกิดจากการปรับพีเอช
4) ชุดที่สองจะเติมถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม ขนาด 325 เมช ปริมาณ 0.5 กรัม ลงในขวดแต่ละใบ และนำไปเขย่าบนเครื่องเขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เช่นเดียวกัน
5) แยกถ่านกัมมันต์ออก โดยนำไปกรองผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 5 วัดค่าพีเอชและความเข้มสีที่เหลือเพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดสีที่เกิดจากการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง
6) ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนแรก โดยเปลี่ยนเป็นถ่าน Filtrasorb 300 แล้วเปรียบเทียบเลือกค่าพีเอชที่ดีสุด ขั้นตอนการทดลองดังรูปที่ 3.3

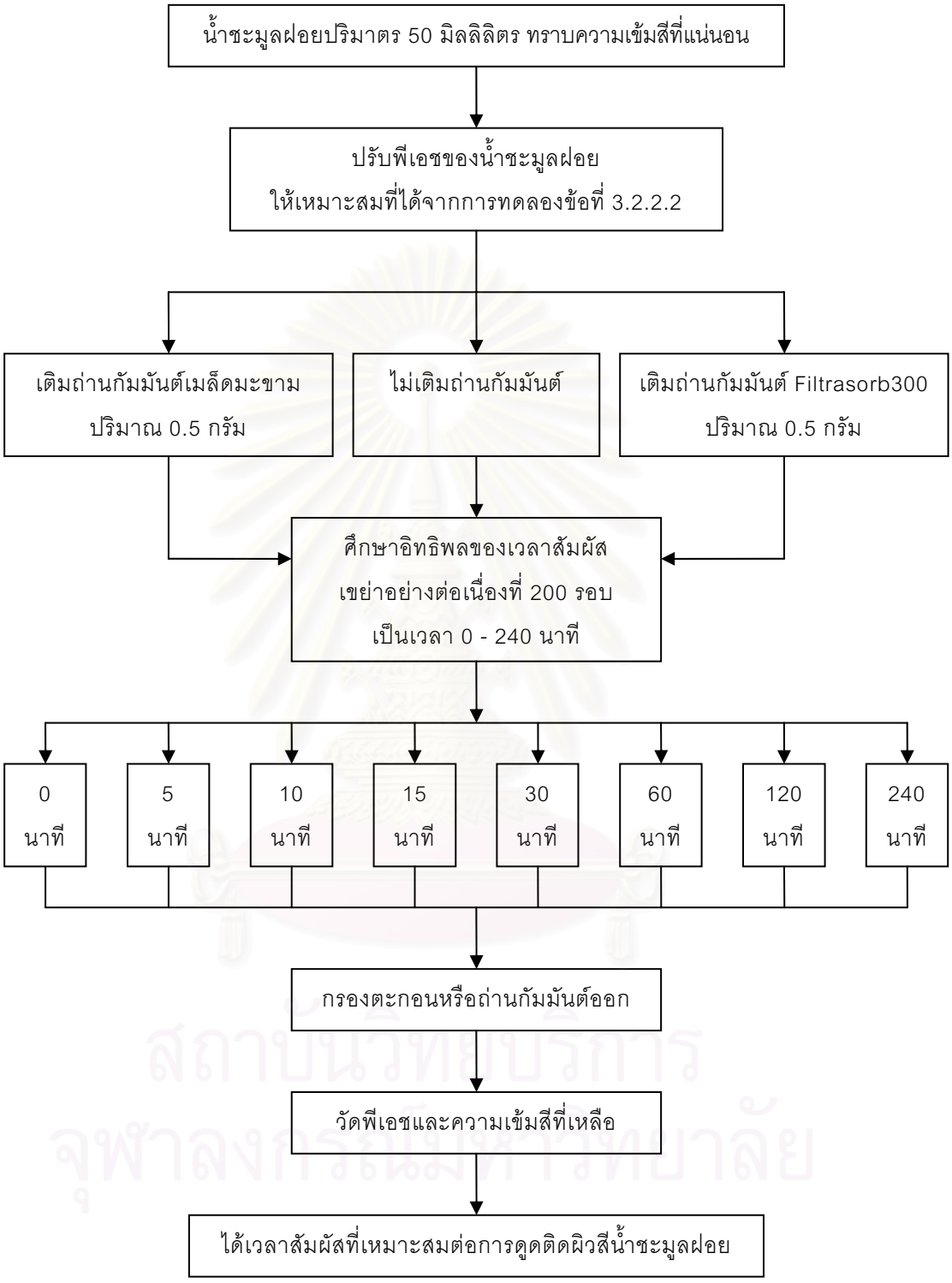


รูปที่ 3.3 ขั้นตอนการศึกษาอิทธิพลของพีเอชต่อการดูดติดผิว

3.2.2.3 อิทธิพลของเวลาสัมผัสต่อการดูดติดผิว

1) นำน้ำชะมูลฝอย ที่เตรียมได้จากขั้นที่ 3.2.2.1 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 มิลลิลิตร ปรับพีเอชให้มีค่าที่เหมาะสมซึ่งหาได้จากขั้นที่ 3.2.2.2 แบ่งการทดลองออกเป็นสองชุด
2) ชุดแรกนำไปเขย่าบนเครื่องเขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 0, 5, 10, 15, 30, 60, 120 และ 240 นาที แล้วนำมากรองตะกอนออกด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 5 วัดค่าพีเอชและความเข้มสีที่เหลือ เพื่อหาร้อยละการตกตะกอนของน้ำชะมูลฝอย
3) ชุดที่สองจะเติมถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม ขนาด 325 เมซ ปริมาณ 0.5 กรัม ลงในขวดแต่ละใบ และนำไปเขย่าบนเครื่องเขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา เป็นเวลา 0, 5, 10, 15, 30, 60, 120 และ 240 นาที เช่นเดียวกัน
4) แยกถ่านกัมมันต์ออก โดยนำไปกรองผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 5 วัดพีเอช และความเข้มสีที่เหลืออยู่ ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง
5) ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนแรก โดยเปลี่ยนเป็นถ่าน Filtrasorb 300 แล้วเปรียบเทียบเลือกเวลาสัมผัสที่ดีที่สุด ขั้นตอนการทดลองดังรูปที่ 3.4

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



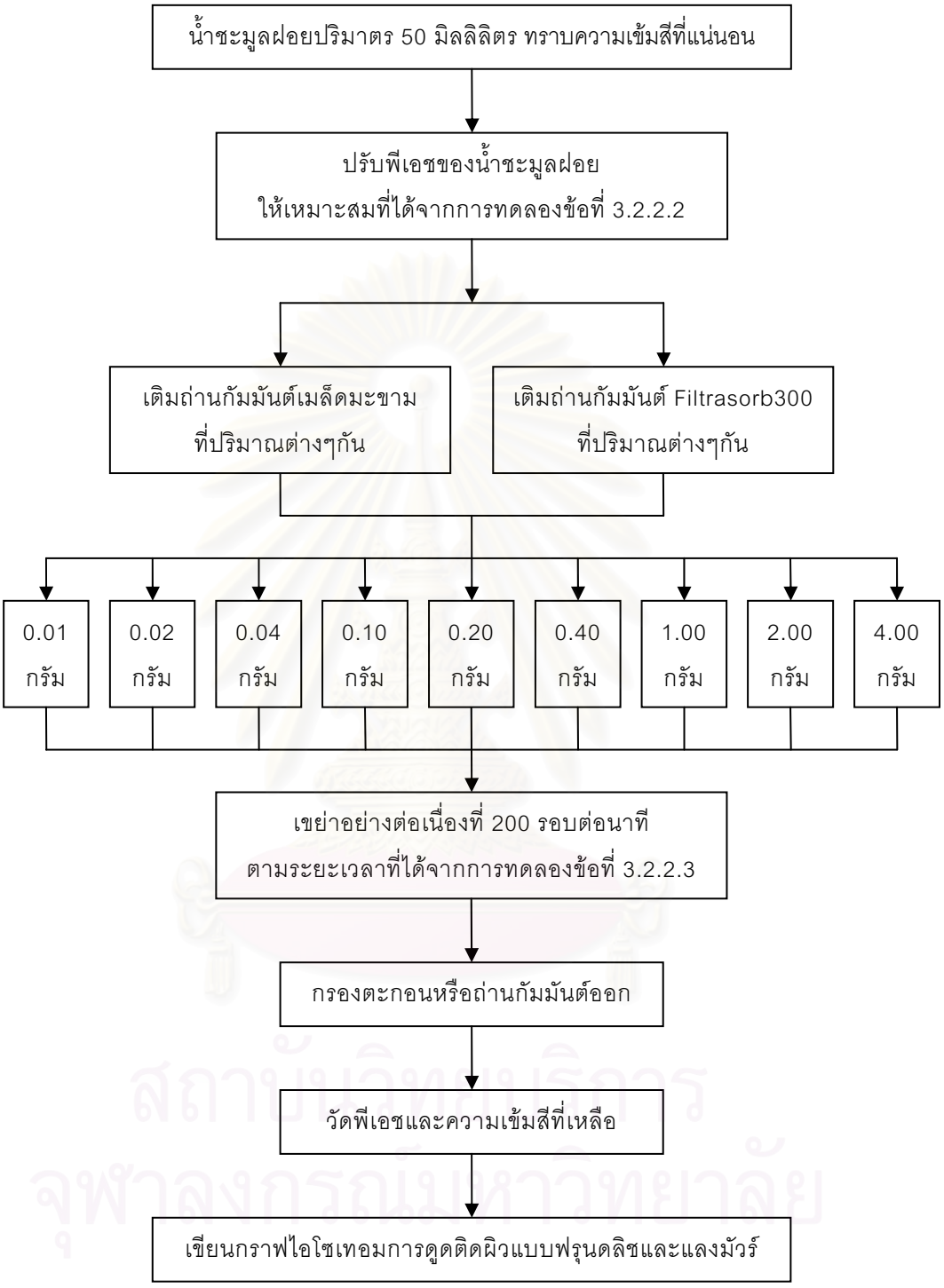
รูปที่ 3.4 ขั้นตอนการศึกษาอิทธิพลของเวลาสัมผัสต่อการดูดติดผิว

3.2.2.4 การทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์

ทำการทดสอบตามมาตรฐาน ASTM D 3860 – 890 (Standard Practice for Determination of Adsorptive Capacity of Activated Carbon by Aqueous Phase Isotherm Technique)

1) นำน้ำชะมูลฝอย ที่ทราบความเข้มสีแน่นอน และมีค่าพีเอชที่เหมาะสมจากข้อที่ 3.2.2.2 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2) เติมถ่านกัมมันต์ ขนาด 325 เมช ปริมาณ 0.01, 0.02, 0.04, 0.1, 0.2, 0.4, 1.0, 2.0 และ 4.0 กรัม ลงในขวดแต่ละใบตามลำดับ นำขวดไปเขย่าบนเครื่องเขย่า ที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที ตามระยะเวลาที่เหมาะสมซึ่งหาได้จากข้อที่ 3.2.2.3
3) แยกถ่านกัมมันต์ออกโดยนำไปกรองผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 5 วัดค่าพีเอช และความเข้มสีที่เหลืออยู่ ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง
4) นำค่าที่ได้มาเขียนกราฟไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิชและแลงมัวร์
5) ทำการทดลองซ้ำตั้งแต่ขั้นตอนแรก โดยเปลี่ยนเป็นถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 เปรียบเทียบผลที่ได้ ขั้นตอนการทดลองดังรูปที่ 3.5

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



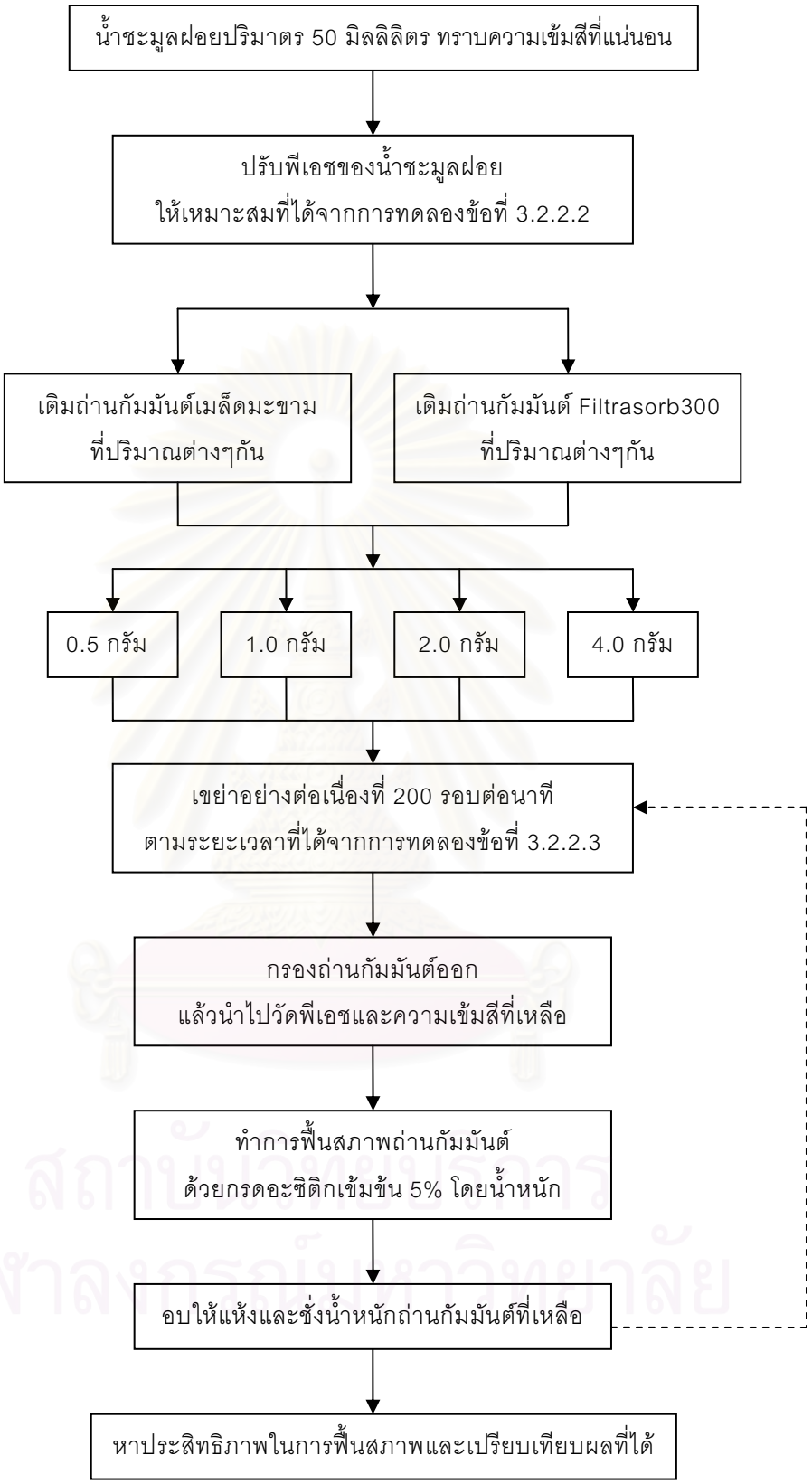
รูปที่ 3.5 ขั้นตอนการทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์

3.2.3 การศึกษาประสิทธิภาพในการฟื้นสภาพถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอย

ทำการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดติดผิวสีน้ำชะมูลฝอยระหว่างถ่านกัมมันต์ก่อนและหลังการฟื้นสภาพ (Regeneration) เพื่อหาประสิทธิภาพในการฟื้นสภาพ

1) นำน้ำชะมูลฝอย ที่ทราบความเข้มสีแน่นอน และมีค่าพีเอชที่เหมาะสม จากข้อที่ 3.2.2.2 ปริมาตร 50 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร
2) เติมถ่านกัมมันต์ขนาด 325 เมซ ปริมาณ 0.5, 1.0, 2.0, 4.0 กรัม ลงในขวดแต่ละใบ นำขวดไปเขย่าบนเครื่องเขย่า ที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที ตามระยะเวลาที่เหมาะสมซึ่งหาได้จากข้อที่ 3.2.2.3
3) แยกถ่านกัมมันต์ออกโดยนำไปกรองผ่านกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 5 วัดค่าพีเอชของน้ำชะมูลฝอยแล้วนำน้ำชะมูลฝอยไปวัดความเข้มสีที่เหลืออยู่
4) นำถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดูดติดผิวแล้วมาฟื้นสภาพโดยนำถ่านกัมมันต์มาล้างด้วยสารละลายกรดอะซิติก (CH_3COOH) เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และล้างตามด้วยน้ำกลั่น จากนั้นนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส แล้วทำให้เย็นในเดสิเคเตอร์ นำถ่านกัมมันต์มาชั่งน้ำหนักที่เหลือ
5) นำมาดูดติดผิวสีน้ำชะมูลฝอยและทำการฟื้นสภาพอีก 2 รอบ ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง หาประสิทธิภาพในการฟื้นสภาพ แล้วเปลี่ยนเป็นถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 เปรียบเทียบผลที่ได้ ขั้นตอนการทดลองดังรูปที่ 3.6

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



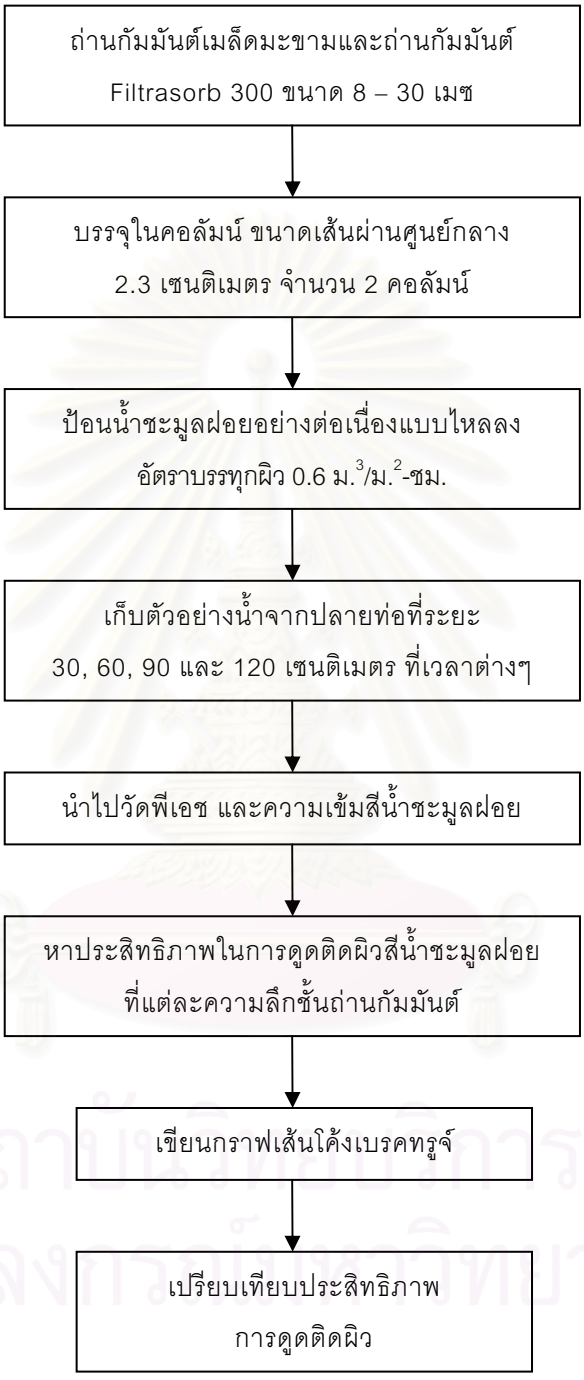
รูปที่ 3.6 ขั้นตอนการศึกษาประสิทธิภาพในการฟื้นสภาพถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอย

3.2.4 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยของถ่านกัมมันต์โดยการทดลองแบบต่อเนื่องในถังดูดติดผิวแบบแท่ง (Column Test)

ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยของถ่านกัมมันต์โดยใช้ถังดูดติดผิวแบบแท่ง (Column Test) โดยนำถ่านกัมมันต์มาบรรจุในถังดูดติดผิวแบบแท่งแล้วป้อนน้ำชะมูลฝอยไหลลงอย่างต่อเนื่อง

1) นำถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามและถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 มาคัดขนาดให้อยู่ในช่วง 8 - 30 เมช (0.59 - 2.36 มิลลิเมตร)
2) บรรจุถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามและถ่านกัมมันต์ Fiiltrasorb 300 ลงในถังดูดติดผิวแบบแท่ง ที่เป็นท่ออะคิริกใส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.3 เซนติเมตร เจาะรูเพื่อเก็บตัวอย่างน้ำที่ระดับความลึกของชั้นถ่านกัมมันต์ที่ 30, 60, 90 และ 120 เซนติเมตร บันทึกน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ที่ใช้บรรจุในคอลัมน์สูง 120 เซนติเมตร จำนวน 2 คอลัมน์ ดังรูปที่ 3.8
3) ทำการป้อนน้ำชะมูลฝอยที่ทราบความเข้มสีแน่นอน และมีค่าพีเอชที่เหมาะสมจากข้อที่ 3.2.2.2 ด้วยอัตราบรรทุกทางชลศาสตร์ เท่ากับ 0.6 ม.^{3}/ม.^{2}-ชม. เก็บตัวอย่างน้ำชะมูลฝอยที่ปลายคอลัมน์ทั้ง 2 คอลัมน์ ทุกๆ ชั่วโมงในช่วงแรก และอีกทุกๆ 2 - 4 ชั่วโมง ตามลำดับ จนกว่าค่าความเข้มสีที่วิเคราะห์ได้จะมีค่าใกล้เคียงกับความเข้มสีน้ำเข้า จึงยุติการทดลอง
4) นำน้ำชะมูลฝอยที่เก็บได้ไปวัดค่าพีเอช และความเข้มสีที่เหลือ
5) ทำการวิเคราะห์ข้อมูลหาประสิทธิภาพการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอย เปรียบเทียบระหว่างถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม และถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 ขั้นตอนการทดลองดังรูปที่ 3.7

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.7 ขั้นตอนการทดสอบประสิทธิภาพถ่านโดยใช้ถังดูดติดผิวแบบแท่ง

รูปที่ 3.8 ระบบถังดูดติดผิวแบบแท่งที่ใช้ในการทดลอง

3.2.5 การคำนวณค่าใช้จ่ายในการผลิตถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม

คำนวณค่าใช้จ่ายเบื้องต้นที่ใช้ในการผลิตถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามและนำมาเปรียบเทียบกับราคาของถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 โดยแบ่งค่าใช้จ่ายเป็น

1) ราคาเมล็ดมะขาม
2) ราคาซิงค์คลอไรด์ที่ใช้ในการกระตุ้น
3) ราคาค่าไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิต

3.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.3.1 อุปกรณ์สำหรับการผลิตถ่านกัมมันต์

- ตู้อบความร้อน : WTB Blinder, Germany
- เตาเผา : Valcan Box Furnace, Model 3-1750.USA.
- ภาชนะดินเผาสำหรับบรรจุวัสดุที่จะเผา
- ชุดกรองสุญญากาศ
- เครื่องบดละเอียด : Herzog, Model HSM 100H Germany
- ตะแกรงคัดขนาดเบอร์ 8, 20, 30, 325 mesh

3.3.2 อุปกรณ์สำหรับใช้ทดลองในห้องปฏิบัติการ

- เครื่องชั่งแบบละเอียด 4 ตำแหน่ง : AND HM-300 Japan
- เครื่องเขย่า (Shaker)
- เครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง : Desktop pH Meter PHL-20 ,DDK
- กระดาษกรอง Whatman No.5, No.42, GFC
- ชุดเครื่องแก้วอื่นๆ ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

3.3.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์

- Scanning Electron Microscope (SEM): JEOL, JSM-5410LV Scanning Microscope. Japan.
- Thermo Gravimetric Analysis (TGA): NETZSCH, STA-409 C/CD
- เครื่องวัดพื้นที่ผิว (BET): Micromeritics, ASAP 2000. Germany.
- ครูซิเบลพอร์ชเลน

3.3.4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวัดสี

- เครื่องวัดการดูดกลืนแสง ใช้เครื่อง UV/Visible Spectrophotometer รุ่น Helios Alpha สามารถวัดได้ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 200 ถึง 1,000 นาโนเมตร นำค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ที่ได้มาเปรียบเทียบกับกราฟ ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงกับหน่วยแพลทตินัมโคบอลต์ของสี

3.3.5 อุปกรณ์สำหรับใช้ในการทดลองแบบแท่ง (Column Test)

- ถังดูดติดผิวแบบแท่ง เส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 2.3 เซนติเมตร สูง 120 เซนติเมตร จำนวน 2 คอลัมน์ มีวาล์วเปิด-ปิด สำหรับเก็บน้ำตัวอย่างที่ชั้นความสูงเริ่มต้นและ 30 , 60 , 90 , 120 เซนติเมตร
- ถังเก็บน้ำชะมูลฝอย เป็นถังที่ใช้สำหรับเติมน้ำชะมูลฝอยและสูบน้ำชะมูลฝอยขึ้นไปสู่ถังพักน้ำชะมูลฝอย
- ถังพักน้ำชะมูลฝอย สำหรับพักน้ำชะมูลฝอยที่ถูกปั๊มขึ้นมาจากถังเก็บน้ำชะมูลฝอย มีวาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำชะมูลฝอยเข้าไปสู่ถังดูดติดแบบแท่ง
- เครื่องสูบน้ำ ใช้ปั๊มจุ่ม (Submerge Pump)
- สายยางพลาสติก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผลการทดลอง

จากการดำเนินการทดลองในห้องปฏิบัติการตามขั้นตอนที่ได้กล่าวมาแล้วในบทที่ 3 ผู้วิจัยได้นำเสนอผลการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ แยกเป็นแต่ละการทดลองตามลำดับ ดังนี้

4.1 การเตรียมถ่านกัมมันต์และการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิต

เมล็ดมะขามที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการเตรียมถ่านกัมมันต์นั้นหาได้โดยทั่วไป เนื่องจากเป็นสิ่งเหลือทิ้งจากการบริโภค และสามารถหาซื้อได้ที่ปากคลองตลาด ในราคากิโลกรัมละ 8 บาท โดยเมล็ดมะขามจะผ่านการแช่เย็นเพื่อป้องกันมอดและแมลงต่างๆก่อนนำมาขาย ดังนั้นจึงต้องนำมาล้างและอบให้แห้งก่อนที่จะนำมาเตรียมถ่านกัมมันต์ มีลักษณะดังรูปที่ 4.1

รูปที่ 4.1 เมล็ดมะขามที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์

4.1.1 ผลของอุณหภูมิและเวลาในการเผาต่อร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์

เมล็ดมะขามจะถูกนำไปเผาคาร์บอไนซ์ที่ช่วงอุณหภูมิ 200 – 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 -150 นาที จากนั้นจะนำถ่านเมล็ดมะขามที่ได้มาชั่งน้ำหนัก เพื่อคำนวณหาค่าร้อยละผลผลิตและทำการคัดเลือกสภาวะที่เหมาะสมที่สุด ได้ผลดังตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.2

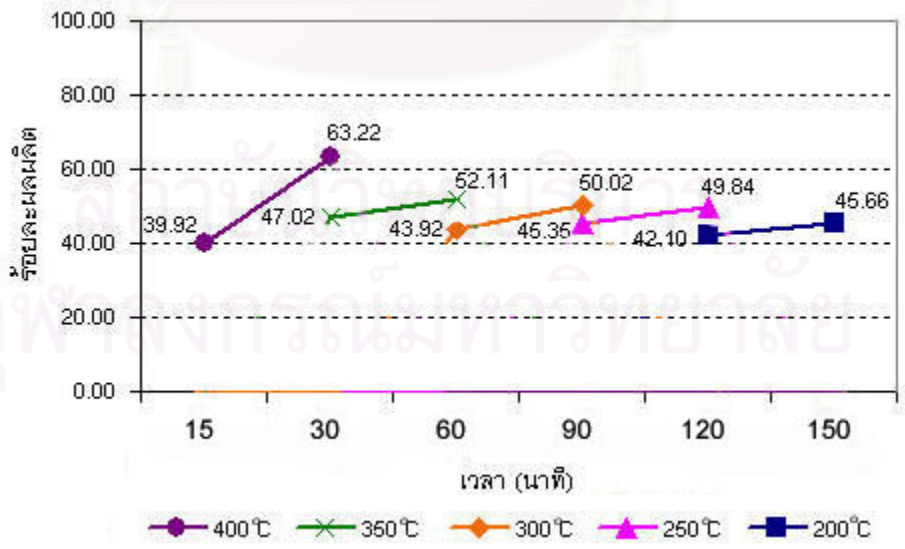
ตารางที่ 4.1 ร้อยละผลผลิตถ่านเมล็ดมะขามหลังจากเผาที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

อุณหภูมิที่เผา (°C)	เวลาที่เผา (นาที)	น้ำหนักก่อนเผา (กรัม)	น้ำหนักหลังเผา (กรัม)	ผลผลิต (%)	เฉลี่ย (%)	หมายเหตุ
200	120	40.069	18.576	46.36	45.56	
	120	40.105	17.950	44.76		
	150	40.008	16.980	42.44	42.10	
	150	40.027	16.713	41.75		

ตารางที่ 4.1 ร้อยละผลผลิตถ่านเมล็ดมะขามหลังจากเผาที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ (ต่อ)

อุณหภูมิที่เผา (°C)	เวลาที่เผา (นาที)	น้ำหนักก่อนเผา (กรัม)	น้ำหนักหลังเผา (กรัม)	ผลผลิต (%)	เฉลี่ย (%)	หมายเหตุ
250	90	40.053	20.154	50.32		
	90	40.088	19.785	49.35	49.84	
	120	40.106	18.452	46.01		
	120	40.072	17.910	44.69	45.35	
300	60	40.108	20.188	50.33		
	60	40.082	19.926	49.71	50.02	
	90	40.075	17.359	43.32		
	90	40.091	17.852	44.53	43.92	
350	30	40.024	20.825	52.03		เลือกใช้
	30	40.051	20.906	52.20	52.11	
	60	40.062	18.232	45.51		
	60	40.006	19.416	48.53	47.02	
400	15	40.014	24.906	62.24		ยังไม่
	15	40.004	25.682	64.20	63.22	เป็นถ่าน
	30	40.065	15.866	39.60		
	30	40.070	16.124	40.24	39.92	

หมายเหตุ : การเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที พบว่าเมล็ดมะขามยังไหม้เป็นถ่านไม่หมด



รูปที่ 4.2 ร้อยละผลผลิตถ่านเมล็ดมะขามหลังจากเผาที่อุณหภูมิและเวลาต่างๆ

ผลที่ได้จากการเตรียมถ่านเมล็ดมะขาม จากตารางที่ 4.1 และรูปที่ 4.2 พบว่า ร้อยละผลผลิตของถ่านที่ได้จะลดลง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเผาสูงขึ้น เนื่องจากในเมล็ดมะขามนอกจากจะมีเจลโลส (Jellose) เป็นองค์ประกอบหลักแล้ว ยังมีสารประกอบอื่นๆ อีกมากมาย เช่น เซลลูโลส ลิกนิน สารที่สามารถสกัดได้ (Extractives) เช่น เทอร์พีน (Terpenes) แทนนิน (Tannins) กรดไขมัน (Fatty Acid) และเรซิน (Resins) เป็นต้น ซึ่งสารเหล่านี้จะมีอุณหภูมิในการสลายตัวแตกต่างกัน (Orfao, Antunes และ Figueiredo, 1999) เมื่อเผาเมล็ดมะขามสารเหล่านี้ก็จะเริ่มสลายตัว หากใช้อุณหภูมิและเวลาในการเผาเพิ่มขึ้นสารที่สลายตัวก็มีจำนวนมากขึ้น จึงทำให้ถ่านจากการเผาที่อุณหภูมิสูง มีร้อยละผลผลิตลดลง

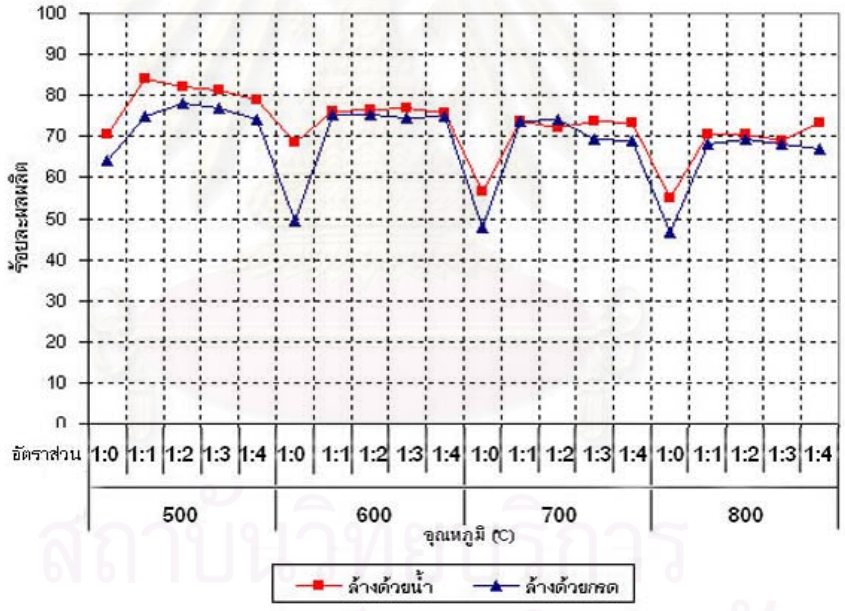
ถ่านเมล็ดมะขามที่เตรียมได้มีค่าร้อยละผลผลิตสูงสุด เท่ากับร้อยละ 52.11 จากการเผาที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที และร้อยละผลผลิตมีค่าต่ำสุดเพียงร้อยละ 39.92 จากการเผาที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที สำหรับการเผาอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที ซึ่งได้ผลผลิตสูงถึงร้อยละ 63.22 นั้น ไม่ได้นำมาพิจารณาในการคัดเลือกสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านเมล็ดมะขามก่อนนำไปกระตุ้น เนื่องจากเมล็ดมะขามยังไหม้เป็นถ่านไม่หมด ดังนั้นจึงเลือกสภาวะการเผาที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ซึ่งให้ค่าร้อยละผลผลิตสูงสุด มาใช้ในการศึกษาขั้นต่อไป

4.1.2 ผลของอัตราส่วนวัตถุดิบต่อสารกระตุ้นและอุณหภูมิในการเผาต่อร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม

ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามที่นำมาใช้ในการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอย ถูกเตรียมโดยใช้สารซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) เป็นสารกระตุ้น ซึ่งต้องทำการหาอัตราส่วนของสารละลายซิงค์คลอไรด์ต่อถ่านเมล็ดมะขามที่เหมาะสม โดยนำถ่านเมล็ดมะขามมาบดจนสามารถร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 8 เมซ และค้างบนตะแกรงเบอร์ 20 เมซ (0.85 - 2.36 มิลลิเมตร) เพื่อเพิ่มพื้นที่ในการซึมแพร่ของสารละลายซิงค์คลอไรด์เข้าสู่เนื้อถ่าน ทำการทดลองโดยแช่ถ่านในสารละลายซิงค์คลอไรด์ เข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ที่อัตราส่วนต่างๆกัน คือ 1:0, 1:1, 1:2, 1:3 และ 1:4 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาอบไล่น้ำ และนำไปบรรจุลงในภาชนะดินเผา ทำการเผากระตุ้นที่ช่วงอุณหภูมิ 500 – 800 องศาเซลเซียส รอให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปล้างสารเคมีออกด้วยน้ำร้อนแล้วทิ้งไว้หนึ่งคืน และทำการเปรียบเทียบวิธีการล้างถ่านกัมมันต์ โดยแบ่งเป็น การล้างด้วยน้ำสะอาดเพียงอย่างเดียวกับการล้างเพิ่มด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก อบให้แห้งและชั่งน้ำหนักของถ่านกัมมันต์ สามารถคำนวณหาค่าร้อยละผลผลิตได้ดังตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.3 (ผลการทดลองโดยละเอียดในภาคผนวก ค.)

ตารางที่ 4.2 ร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากเมล็ดมะขาม

อุณหภูมิ (°C)	อัตราส่วนน้ำหนัก ถ่านมะขาม: $ZnCl_2$	ร้อยละผลผลิตเฉลี่ย ล้างน้ำ	ร้อยละผลผลิตเฉลี่ย ล้างกรด	อุณหภูมิ (°C)	อัตราส่วนน้ำหนัก ถ่านมะขาม: $ZnCl_2$	ร้อยละผลผลิตเฉลี่ย ล้างน้ำ	ร้อยละผลผลิตเฉลี่ย ล้างกรด
500	1 : 0	70.40	64.12	600	1 : 0	71.54	49.34
	1 : 1	84.21	74.93		1 : 1	76.29	75.24
	1 : 2	82.22	78.09		1 : 2	76.36	75.25
	1 : 3	81.13	76.97		1 : 3	76.93	74.69
	1 : 4	78.77	74.09		1 : 4	75.83	74.98
700	1 : 0	56.62	47.67	800	1 : 0	55.04	46.70
	1 : 1	73.76	73.68		1 : 1	70.59	68.22
	1 : 2	72.26	74.15		1 : 2	70.60	69.49
	1 : 3	73.87	69.19		1 : 3	68.79	68.22
	1 : 4	73.28	69.09		1 : 4	73.13	66.87



รูปที่ 4.3 ร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากเมล็ดมะขาม

จากข้อมูลที่ได้พบว่าได้ร้อยละผลผลิตถ่านกัมมันต์ลดลง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผากระตุ้นให้สูงขึ้นตามลำดับ มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 55.04 – 84.21 ส่วนการเผาที่อุณหภูมิเดียวกันแต่อัตราส่วนสารกระตุ้นต่างกัน พบว่าที่อัตราส่วนถ่านเมล็ดมะขามต่อซิงค์คลอไรด์เป็น 1:0 คือไม่มีการแช่สารละลายซิงค์คลอไรด์เลย จะได้ค่าร้อยละผลผลิตต่ำกว่าที่อัตราส่วนอื่นๆ ทั้งนี้เพราะว่า

ในขณะที่เผากระตุ้น ซิงค์คลอไรด์จะช่วยรักษาเนื้อถ่านเม็ดมะขามไว้ ดังนั้น ที่อัตราส่วน 1:1, 1:2, 1:3 และ 1:4 ร้อยละผลผลิตที่ได้จึงมีค่ามากกว่า และมีค่าใกล้เคียงกันในแต่ละอุณหภูมิการเผา

จากการสังเกตพบว่าหลังแช่ถ่านเมล็ดมะขามในสารละลายซิงค์คลอไรด์ที่อัตราส่วน 1:2 ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมงแล้ว พบว่าสารละลายซิงค์คลอไรด์จะมีสีน้ำตาลเข้มมากกว่าที่อัตราส่วนอื่นๆ ด้วย แสดงว่าที่อัตราส่วนนี้ซิงค์คลอไรด์สามารถซึมแพร่เข้าสู่เนื้อถ่านและทดแทนที่ได้ดีที่สุด

การล้างถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ด้วยน้ำร้อนและน้ำสะอาดหลายๆครั้ง แล้วนำมาล้างเพิ่มด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก พบว่าได้ผลผลิตโดยรวมอยู่ในช่วงร้อยละ 46.70 – 78.09 เมื่อเปรียบเทียบกับการล้างด้วยน้ำสะอาดเพียงอย่างเดียว พบว่าร้อยละผลผลิตที่ได้จากการล้างเพิ่มด้วยกรดเจือจางนี้จะมีค่าต่ำกว่าเล็กน้อย เป็นเพราะว่าสิ่งเจือปนต่างๆ ที่ตกค้างอยู่ในโพรงของถ่านกัมมันต์ถูกล้างออกมาได้มากขึ้นกว่าการล้างด้วยน้ำสะอาดเพียงอย่างเดียว

4.1.3 ผลของอัตราส่วนวัตถุดิบต่อสารกระตุ้นและอุณหภูมิในการเผาต่อค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม

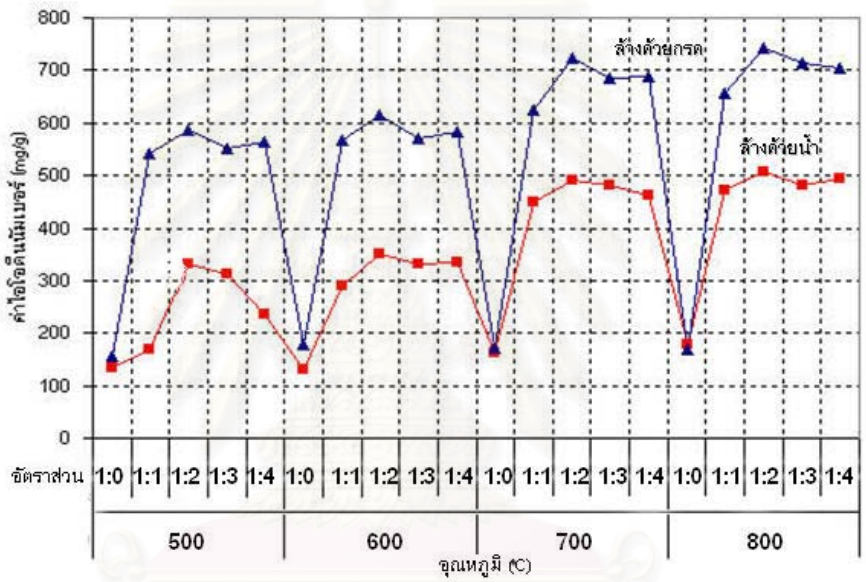
เมื่อนำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากการเผากระตุ้นที่อุณหภูมิและเวลาในเหมาะสมมาทำการหาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ ตามมาตรฐาน ASTM D4607-94 ซึ่งเป็นดัชนีชี้วัดที่ใช้บ่งบอกถึงความสามารถดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์และมีความสัมพันธ์โดยตรงกับค่าพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์นั้นด้วย ผลการทดลองหาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ดังตารางที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 (ผลการทดลองโดยละเอียดในภาคผนวก ค.)

ตารางที่ 4.3 ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากเมล็ดมะขาม

อุณหภูมิ	อัตราส่วนน้ำหนัก	Iodine Number เฉลี่ย (mg/g)		อุณหภูมิ	อัตราส่วนน้ำหนัก	Iodine Number เฉลี่ย (mg/g)	
(°C)	ถ่านมะขาม: $ZnCl_2$	ล้างน้ำ	ล้างกรด	(°C)	ถ่านมะขาม: $ZnCl_2$	ล้างน้ำ	ล้างกรด
500	1 : 0	133	156	600	1 : 0	132	180
	1 : 1	169	541		1 : 1	289	567
	1 : 2	330	588		1 : 2	352	614
	1 : 3	312	551		1 : 3	330	570
	1 : 4	236	564		1 : 4	334	582

ตารางที่ 4.3 ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากเมล็ดมะขาม (ต่อ)

อุณหภูมิ (°C)	อัตราส่วนน้ำหนัก ถ่านมะขาม: $ZnCl_2$	Iodine Number เฉลี่ย (mg/g)		อุณหภูมิ (°C)	อัตราส่วนน้ำหนัก ถ่านมะขาม: $ZnCl_2$	Iodine Number เฉลี่ย (mg/g)	
		ล้างน้ำ	ล้างกรด			ล้างน้ำ	ล้างกรด
700	1 : 0	164	171	800	1 : 0	180	169
	1 : 1	450	624		1 : 1	473	656
	1 : 2	491	724		1 : 2	508	742
	1 : 3	482	684		1 : 3	481	713
	1 : 4	462	681		1 : 4	494	703



รูปที่ 4.4 ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากเมล็ดมะขาม

จากผลการทดลอง พบว่า ถ่านกัมมันต์จะให้ค่าไอโอดีนนัมเบอร์สูงสุดที่การกระตุ้นด้วยอัตราส่วนถ่านเมล็ดมะขามต่อซิงค์คลอไรด์โดยน้ำหนัก คือ 1:2 และเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบการล้างด้วยน้ำสะอาดกับการล้างเพิ่มด้วยกรดไฮโดรคลอริก เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก พบว่าการล้างด้วยน้ำสะอาดจะให้ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ เท่ากับ 508 มิลลิกรัมต่อกรัม ขณะที่การล้างเพิ่มด้วยกรด จะให้ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ เท่ากับ 742 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งมีค่ามากกว่าค่ามาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมของประเทศไทยตาม มอก.900-2532 ได้กำหนดไว้ว่า ถ่านกัมมันต์แบบผงและแบบเม็ดนั้น ต้องมีค่าไอโอดีนนัมเบอร์ ไม่น้อยกว่า 600 มิลลิกรัมต่อกรัม และสามารถหาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่าน Filtrasorb 300 ได้ เท่ากับ 982 มิลลิกรัมต่อกรัม

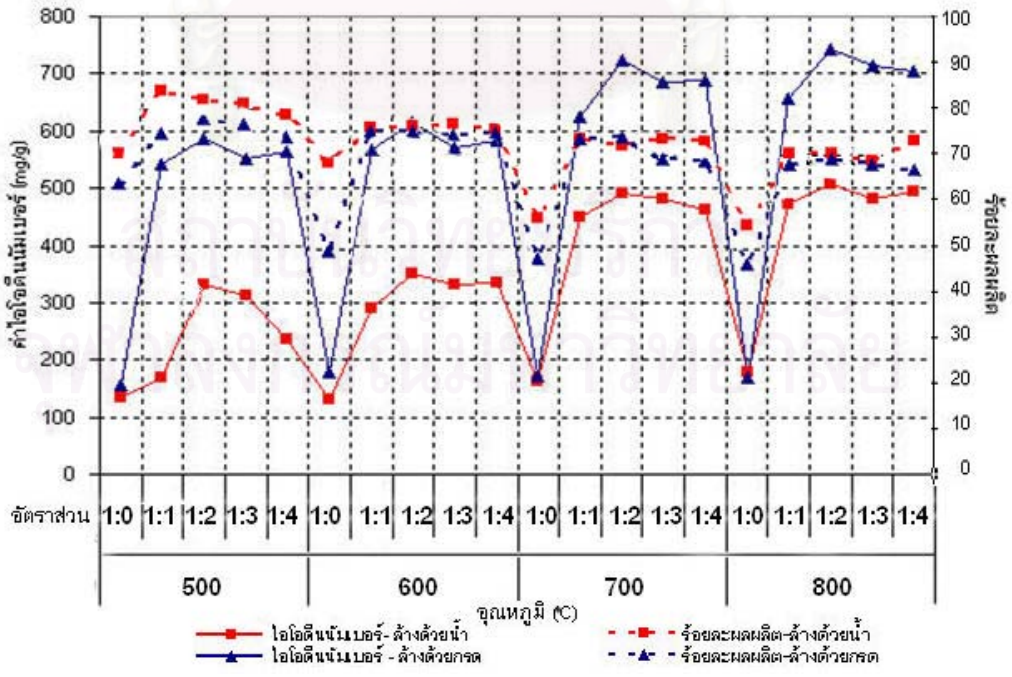
เมื่อเปรียบเทียบวิธีการล้างถ่านกัมมันต์ด้วยน้ำสะอาดเทียบกับการล้างเพิ่มด้วยกรด พบว่าค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์ที่ล้างเพิ่มด้วยกรดจะมีค่ามากกว่า ซึ่งจากการนำ

ถ่านกัมมันต์ไปวิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ Thermal Gravimetric Analaysis (TGA) พบว่าการล้างด้วยกรดนั้นจะช่วยลดปริมาณสารอินทรีย์ระเหยและขี้เถ้าที่ยังคงมีค้างอยู่ในถ่านกัมมันต์ได้ ทำให้สัดส่วนปริมาณคาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้น ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้นด้วย ดังนั้นค่าไอโอดีนนัมเบอร์จึงสูงกว่าการล้างด้วยน้ำสะอาดเพียงอย่างเดียว ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.4 (กราฟผลการวิเคราะห์ในภาคผนวก ช.)

ตารางที่ 4.4 ผลการวิเคราะห์ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ด้วยเครื่อง TGA

ผลการวิเคราะห์	ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม	
	ล้างด้วยน้ำสะอาด	ล้างด้วยกรด HCl 5%
ร้อยละความชื้น	3.79	17.20
ร้อยละสารอินทรีย์ระเหย	47.17	10.51
ร้อยละคาร์บอนคงตัว	43.22	66.31
ร้อยละเถ้า	3.86	2.09

การพิจารณาเลือกสภาวะในการเตรียมถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสม จะพิจารณาจากค่าไอโอดีนนัมเบอร์รวมทั้งค่าร้อยละผลผลิต และอัตราส่วนโดยน้ำหนักของสารซิงค์คลอไรด์ที่ใช้ในกระตุ้นประกอบด้วย ดังนั้น จากข้อมูลในตารางที่ 4.2 และ 4.3 เมื่อนำมาสร้างกราฟร่วมกัน จะได้กราฟดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 ร้อยละผลผลิตและค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้

จากข้อมูลในตารางที่ 4.2 และ 4.3 รวมทั้งกราฟเปรียบเทียบผลผลิตและค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ แสดงให้เห็นว่าที่อัตราส่วนการกระตุ้นถ่านเมล็ดมะขามต่อซิงค์คลอไรด์โดยน้ำหนัก เท่ากับ 1:2 จะทำให้ค่าไอโอดีนนัมเบอร์สูงสุดทุกอุณหภูมิการเผา แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของสารกระตุ้นขึ้นเป็น 1:3 และ 1:4 พบว่าค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านที่เตรียมได้มีค่าลดลง แสดงว่าการเพิ่มปริมาณสารกระตุ้นไม่สามารถทำให้ถ่านมีประสิทธิภาพสูงขึ้น แต่จะทำให้รูพรุนใหญ่ขึ้น ซึ่งส่งผลให้มีพื้นที่ผิวลดลงตามไปด้วย เช่นเดียวกับการศึกษาของ ลลิดา นิทัศน-จารุกุล (2544) ก็พบว่าค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรจะเพิ่มขึ้น เมื่อมีการเติมสารกระตุ้นจนถึงอัตราส่วนหนึ่ง และจะลดลงเมื่ออัตราส่วนเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณของสารกระตุ้นที่มากเกินไป จึงทำให้รูพรุนมีขนาดใหญ่ขึ้น และมีพื้นที่ผิวสำหรับการดูดติดลดลง

เมื่อเปรียบเทียบค่าไอโอดีนนัมเบอร์ ร้อยละผลผลิต และอัตราส่วนการกระตุ้น พบว่าที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักถ่านเมล็ดมะขามต่อซิงค์คลอไรด์ เท่ากับ 1:2 เผาที่อุณหภูมิ 800 องศา-เซลเซียส และล้างเพิ่มด้วยกรดจะให้ค่าไอโอดีนนัมเบอร์สูงสุด เท่ากับ 742 มิลลิกรัมต่อกรัม ได้ผลผลิตร้อยละ 69.49 ส่วนการกระตุ้นที่อัตราส่วนโดยน้ำหนัก 1:2 และเผาที่อุณหภูมิ 700 องศา-เซลเซียส และล้างด้วยกรด จะให้ค่าไอโอดีนนัมเบอร์เท่ากับ 724 มิลลิกรัมต่อกรัม ได้ผลผลิตร้อยละ 74.15 ดังนั้นเมื่อพิจารณาแล้ว จึงเลือกใช้อัตราส่วนการกระตุ้น เท่ากับ 1:2 ที่อุณหภูมิเผา 700 องศาเซลเซียสในการทดลองขั้นต่อไป เนื่องจากค่าไอโอดีนนัมเบอร์ไม่แตกต่างกับการเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียสมากนัก และยังได้ร้อยละผลผลิตที่สูงกว่าอีกด้วย

ลักษณะของถ่านเมล็ดมะขามที่ยังไม่ได้กระตุ้นและหลังกระตุ้นเป็นถ่านกัมมันต์แล้วเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 ดังรูปที่ 4.6

รูปที่ 4.6 ถ่านเมล็ดมะขามก่อนกระตุ้นและหลังกระตุ้นเปรียบเทียบกับถ่าน Filtrasorb 300

4.1.4 ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของถ่านกัมมันต์

ลักษณะทางกายภาพที่สำคัญของถ่านกัมมันต์ คือ โครงสร้างพื้นที่ผิวและความพรุนของถ่าน ซึ่งสามารถทดสอบได้ โดยใช้เครื่อง Specific Surface Area Analyzer ด้วยวิธี BET (Brunauer-Emmeit Teller) ได้ผลการวิเคราะห์ดังตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 ผลการวิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิว ปริมาตรโพรง และขนาดโพรงเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์

คุณสมบัติ	ถ่านเมล็ดมะขาม	ถ่านกัมมันต์ เมล็ดมะขาม	ถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300
พื้นที่ผิว (m^2/g)	0.0121	522.81	719.36
ปริมาตรโพรง (ml/g)	0.000012	0.243139	0.33253
ขนาดโพรงเฉลี่ย (A°)	ไม่สามารถหาได้	14.651	14.8101

หมายเหตุ : 1) ถ่านเมล็ดมะขาม คือ ถ่านที่ผ่านการเผาคาร์บอไนซ์ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส

2) ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม คือ ถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกระตุ้น ที่อัตราส่วนน้ำหนักเมล็ดมะขาม : $ZnCl_2$ เท่ากับ 1:2 เผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส และล้างด้วยกรด HCl ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

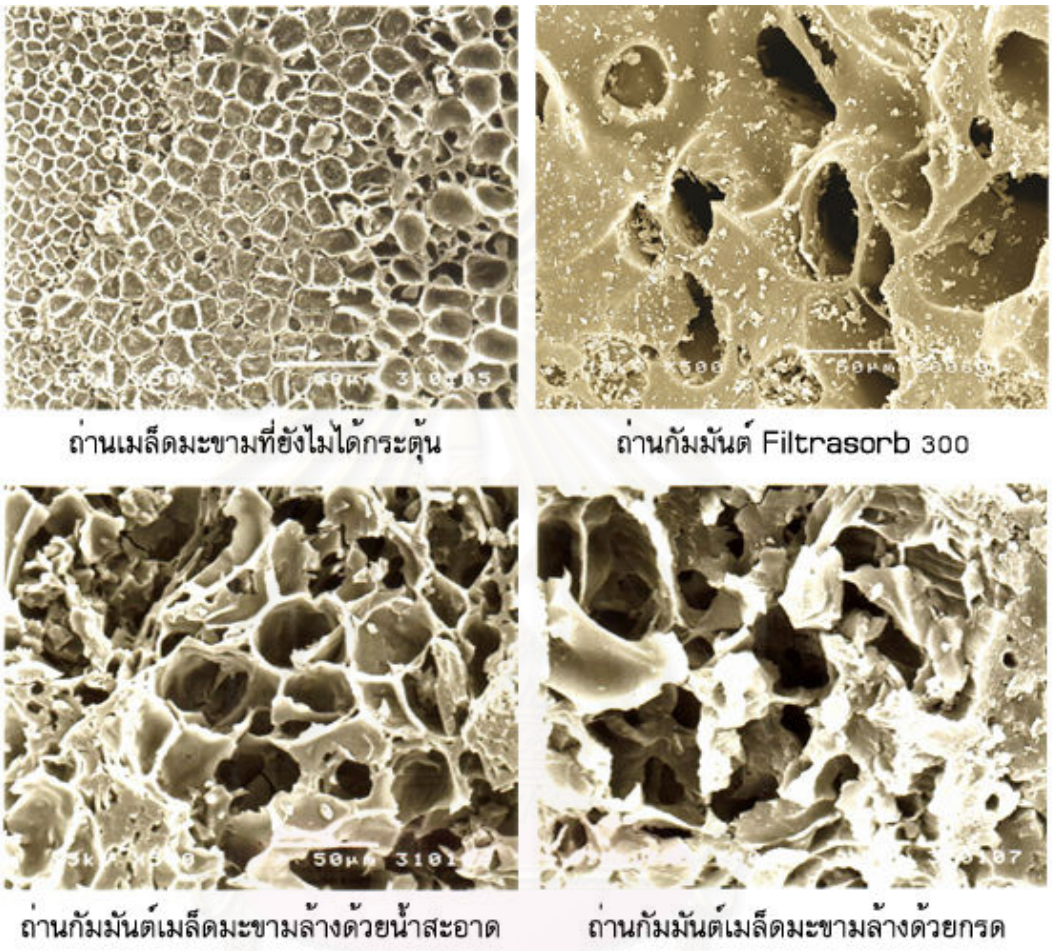
3) ถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 คือ ถ่านกัมมันต์ที่มีขายตามท้องตลาดผลิตจากถ่านหิน

จากตารางที่ 4.5 จะเห็นได้ว่า ถ่านเมล็ดมะขามก่อนกระตุ้น มีค่าพื้นที่ผิวน้อยมาก เท่ากับ 0.0121 ตารางเมตรต่อกรัม แต่เมื่อนำมากระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์และเผาด้วยอุณหภูมิที่เหมาะสมแล้ว พบว่าจะให้ค่าพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้นเป็น 522.81 ตารางเมตรต่อกรัม ซึ่งยังน้อยกว่าถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 ที่มีค่าพื้นที่ผิว เท่ากับ 719.36 ตารางเมตรต่อกรัม

สำหรับปริมาตรโพรงของถ่านเมล็ดมะขามก่อนการกระตุ้นนั้นพบว่ามีค่าน้อยมาก เช่นเดียวกันกับค่าพื้นที่ผิว และหลังจากกระตุ้นเป็นถ่านกัมมันต์จะมีปริมาตรโพรงเพิ่มขึ้น เท่ากับ 0.243139 มิลลิลิตรต่อกรัม แต่ยังน้อยกว่าปริมาตรโพรงของถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 อยู่เล็กน้อย ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.332530 มิลลิลิตรต่อกรัม ส่วนขนาดโพรงเฉลี่ยพบว่าถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามมีขนาดโพรงเฉลี่ยใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 เท่ากับ 14.6510 อังสตรอม และ 14.8101 อังสตรอม ตามลำดับ (ผลการวิเคราะห์โดยละเอียดในภาคผนวก ซ.)

จากผลการวิเคราะห์หาค่า พื้นที่ผิว ปริมาตรโพรง และขนาดโพรงเฉลี่ย ของถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามที่เตรียมได้ เปรียบเทียบกับก่อนและหลังการกระตุ้น และเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 ซึ่งเป็นถ่านที่มีจำหน่ายตามท้องตลาดทั่วไป ได้ผลการวิเคราะห์สอดคล้องกับการหาค่าไอโอดีนนัมเบอร์และจากการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM)

ทำให้เห็นถึงลักษณะโครงสร้างพื้นที่ผิวของถ่านเมล็ดมะขามที่เปลี่ยนไปได้อย่างชัดเจนหลังการกระตุ้น เปรียบเทียบกับลักษณะโครงสร้างพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 มีลักษณะดังรูปที่ 4.7



รูปที่ 4.7 ภาพถ่ายลักษณะพื้นผิวถ่านกัมมันต์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ด้วยกำลังขยาย 500 เท่า

4.2 ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม

ขั้นตอนนี้เป็นการนำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มาศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิวสีน้ำชะมูลฝอย ได้แก่ พีเอช เวลาสัมผัส และหาไอโซเทอมการดูดติดผิว โดยทำการทดลองแบบแบทช์ (Batch Test) ซึ่งน้ำชะมูลฝอยที่ใช้ในการทดลอง เก็บจากบ่อพักน้ำชะมูลฝอยก่อนเข้าสู่ระบบบำบัดของสถานที่ฝังกลบมูลฝอยเทศบาลตำบลแสนสุข อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี โดยใช้วิธีเก็บแบบจ้วง (Grab Sample) และเก็บรักษาตัวอย่างน้ำก่อนทำการวิเคราะห์ไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อชะลอปฏิกิริยาทางชีวเคมีก่อนวิเคราะห์ค่าความเข้มสีและพารามิเตอร์ต่างๆ ได้ดังตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ค่าพารามิเตอร์ของน้ำชะมูลฝอยที่ใช้ในการวิจัย

พารามิเตอร์	ค่าเฉลี่ย	หน่วย
Colour	2,444.45	Pt-Co
Temperature	27	°C
pH	8.05	-
TSS	140	mg/l
TDS	7,800	mg/l
BOD	143	mg/l
COD	1,389	mg/l
TKN	1,367	mg/l
Salinity	7.93	ppt
Zn	189	mg/l
Cu	98	mg/l
As	19	mg/l
P	121	mg/l
Pb	21	mg/l
Hg	3.8	mg/l

หมายเหตุ : ทำการวิเคราะห์ เมื่อวันที่ 29 เมษายน 2548

4.2.1 ผลของค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการดูดติดผิวสีน้ำชะมูลฝอย

การศึกษาถึงอิทธิพลของพีเอชที่มีผลต่อการดูดติดผิว จะแบ่งน้ำชะมูลฝอยที่ทราบความเข้มสีเริ่มต้นออกเป็นสองชุด ทำการปรับพีเอชตั้งแต่ 2 – 9 ของน้ำชะมูลฝอยทั้งสองชุดเหมือนกัน ชุดแรกจะนำไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยไม่มีการเติมถ่านกัมมันต์ เพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดสีที่เกิดจากการปรับพีเอช ส่วนชุดที่สองจะเติมถ่านกัมมันต์ ปริมาณ 0.5 กรัม และนำไปเขย่าที่ความเร็วและเวลาเดียวกัน เพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดสีที่เกิดจากการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์

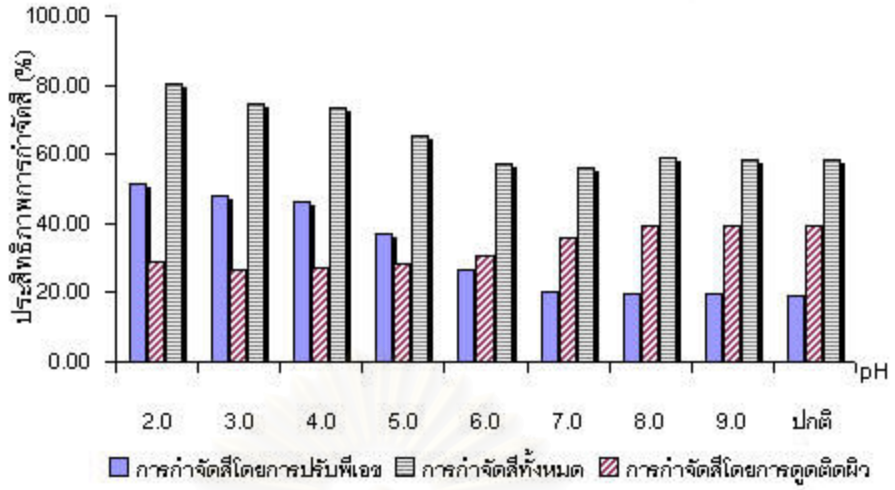
วัดความเข้มสีน้ำชะมูลฝอยเริ่มต้นในการทดลองโดยใช้ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม ครั้งที่หนึ่ง เท่ากับ 2,444.45 แพลทตินัม-โคบอลต์ ครั้งที่สอง เท่ากับ 2,391.32 แพลทตินัม-โคบอลต์ และครั้งที่สาม เท่ากับ 2,397.29 แพลทตินัม-โคบอลต์ ส่วนการทดลองโดยใช้ถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 มีความเข้มสีน้ำชะมูลฝอยเริ่มต้น ครั้งที่หนึ่ง เท่ากับ 1,955.71 แพลทตินัม-

โคบอลต์ ครั้งที่สอง เท่ากับ 1,946.98 แพลทตินัม-โคบอลต์ และครั้งที่สาม เท่ากับ 2,043.05 แพลทตินัม-โคบอลต์ ผลการทดลองดังตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.8 – 4.9 (ผลการทดลองโดยละเอียดในภาคผนวก ง.)

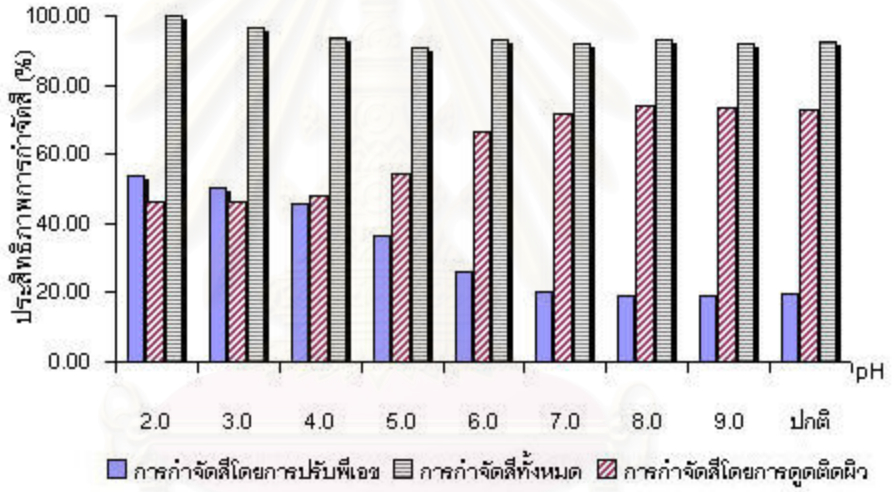
ตารางที่ 4.7 ประสิทธิภาพการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยที่พีเอชต่างๆ

ชนิด ถ่านกัมมันต์	pH **เริ่มต้น**	pH **สุดท้าย**	**ความเข้มสีที่เหลือ** (Pt-Co)			**ค่าเฉลี่ย** (%)	
			ครั้งที่ 1	**ครั้งที่** 2	**ครั้งที่**3	**การกำจัดสีทั้งหมด**	**การดูดติดผิว**
เมล็ดมะขาม (0.50 g.)	2	4.90-5.08	485.46	463.56	480.64	80.24	28.78
	3	5.60-5.79	606.30	620.68	615.10	74.53	26.33
	4	6.38-6.43	595.26	661.61	655.29	73.55	27.39
	5	7.11-7.17	805.31	830.72	864.18	65.42	28.28
	6	8.03-8.08	1,030.49	1,065.65	981.91	57.44	30.77
	7	8.39-8.43	1,050.67	1,079.66	1,045.21	56.09	35.78
	8	9.33-9.39	982.17	1,009.86	976.22	58.96	39.27
	9	9.42-9.46	1,012.60	987.21	996.13	58.58	39.03
	ปกติ	9.32-9.42	982.82	1,006.77	1,035.35	58.17	39.25
Filtrasorb 300 (0.50 g.)	2	5.01-5.06	0.00	0.00	0.00	100.00	46.33
	3	5.61-5.70	75.48	70.89	71.53	96.33	46.14
	4	6.40-6.44	118.21	133.03	124.42	93.68	47.99
	5	7.20-7.24	183.12	179.87	185.88	90.77	54.08
	6	8.09-8.17	139.39	157.99	121.06	92.94	66.75
	7	9.19-9.32	155.85	158.76	155.30	92.09	71.74
	8	9.73-9.77	141.65	143.76	142.07	92.81	73.85
	9	9.75-9.85	149.73	155.01	163.17	92.13	73.31
	ปกติ	9.44-9.60	151.83	150.82	149.75	92.39	72.93
ไม่เติม ถ่านกัมมันต์	2	4.84-4.91	1,170.83	1,167.14	1,173.28	51.45	-
	3	5.53-5.61	1,250.47	1,246.86	1,249.10	48.20	-
	4	6.32-6.38	1,295.75	1,300.02	1,297.91	46.16	-
	5	7.03-7.07	1,529.65	1,501.12	1,515.57	37.14	-
	6	7.80-7.91	1,768.73	1,764.00	1,770.90	26.67	-
	7	8.85-8.91	1,923.02	1,919.08	1,921.07	20.31	-
	8	9.66-9.71	1,933.18	1,921.35	1,954.24	19.68	-
	9	9.65-9.67	1,935.31	1,972.39	1,910.63	19.55	-
	ปกติ	9.61-9.71	1,923.10	1,955.32	1,984.95	18.92	-

หมายเหตุ : ค่าพีเอชปกติมีค่าอยู่ในช่วง 7.88 - 8.13



รูปที่ 4.8 ประสิทธิภาพการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยที่พีเอชต่างๆโดยใช้ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม



รูปที่ 4.9 ประสิทธิภาพการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยที่พีเอชต่างๆโดยใช้ถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300

จากข้อมูลในตารางที่ 4.7 และรูปที่ 4.8 – 4.9 พบว่าการดูดติดผิวสีน้ำชะมูลฝอยด้วยถ่านกัมมันต์ที่พีเอชต่างๆ มีรายละเอียด ดังนี้

ประสิทธิภาพการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยโดยการปรับพีเอช พบว่าจะมีค่าสูงขึ้นเมื่อปรับค่าพีเอชให้ต่ำลง โดยสามารถกำจัดสีได้มากที่สุดที่พีเอช 2 ได้ประมาณร้อยละ 50 และกำจัดสีได้ต่ำสุดที่พีเอช 9 ประมาณร้อยละ 18 ซึ่งความเข้มสีที่ลดลงหลังจากปรับพีเอชของน้ำชะมูลฝอยนั้นเกิดจากการตกตะกอนของสารประกอบต่างๆ ในน้ำชะมูลฝอย การตกตะกอนของน้ำชะมูลฝอยที่วัดได้ในแต่ละครั้งจะไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของน้ำชะมูลฝอยที่เก็บมาในครั้งนั้นๆ

การใช้ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามกำจัดสีน้ำชะมูลฝอย หลังทำการปรับพีเอชตั้งแต่ 2 – 9 พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดสีทั้งหมดลดลงตามค่าพีเอชของน้ำชะมูลฝอย อยู่ในช่วงร้อยละ 56.09 – 80.24 เมื่อนำค่าร้อยละการกำจัดสีทั้งหมดนี้ มาลบกับร้อยละการกำจัดสีที่ได้จากการปรับพีเอช จะได้เป็นค่าร้อยละการดูดติดผิวสีน้ำชะมูลฝอยของถ่านกัมมันต์ จากการคำนวณพบว่าร้อยละการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามอยู่ในช่วง 26.33 – 39.27 ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่พีเอชเท่ากับ 8 จะมีประสิทธิภาพการดูดติดผิวดีที่สุด เท่ากับ 39.27

ประสิทธิภาพการกำจัดสีทั้งหมดนั้น ส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากการตกตะกอน ดังนั้นเมื่อพิจารณาถึงค่าประสิทธิภาพการดูดติดผิวและการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยทั้งหมดที่พีเอช 2 – 9 แล้ว พบว่าที่พีเอชเท่ากับ 8 มีความเหมาะสมในการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอย โดยมีค่าการดูดติดผิวสูงถึงร้อยละ 39.27 ในขณะที่สามารถกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยทั้งหมดได้ เท่ากับ ร้อยละ 58.96 ซึ่งยังมีค่าต่ำกว่าการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยที่ค่าพีเอชต่ำกว่านี้ (พีเอช 2 - 5) แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาถึงการนำไปใช้งานจริง การปรับพีเอชให้ต่ำกว่า 6 จำเป็นต้องใช้สารปรับพีเอชจำนวนมาก ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้ จึงพิจารณาการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยที่พีเอช 6 – 9 และพบว่าที่พีเอช 8 มีความเหมาะสมที่สุดต่อการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม

สำหรับการใช้ถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 ดูดติดผิวน้ำชะมูลฝอย หลังทำการปรับพีเอชตั้งแต่ 2 – 9 พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดสีทั้งหมดมากกว่าการใช้ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามและมีค่าลดลงตามค่าพีเอชของน้ำชะมูลฝอย อยู่ในช่วงร้อยละ 90.77 – 100.00 และมีค่าร้อยละการดูดติดผิว อยู่ในช่วง 46.14 – 73.85 เมื่อพิจารณาจากทั้งค่าประสิทธิภาพการดูดติดผิวและการกำจัดสีที่พีเอช 6 – 9 แล้ว จากรูปที่ 4.9 จะเห็นได้ว่าที่พีเอชเท่ากับ 8 มีความเหมาะสมในการดูดติดผิวสีน้ำชะมูลฝอยด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดนี้มากที่สุด โดยร้อยละการดูดติดผิว เท่ากับ 73.85 ในขณะที่การกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยทั้งหมดสูงถึงร้อยละ 92.81

สำหรับค่าพีเอชที่เพิ่มขึ้นหลังการเขย่า เกิดจากถ่านกัมมันต์ที่มีสภาพเป็นเบส และอาจเกิดจากการเปลี่ยนรูปของ Organic Nitrogen ไปเป็น Ammonia Nitrogen (NH_3-N) รวมทั้งกรดไขมันระเหย (Volatile Fatty Acid, VFA) ในน้ำชะมูลฝอยที่ระเหยออกหลังจากการเขย่าเป็นเวลานาน จึงทำให้ค่าพีเอชเพิ่มสูงขึ้น

4.2.2 ผลของเวลาที่เหมาะสมต่อการดูดติดผิวสีน้ำชะมูลฝอย

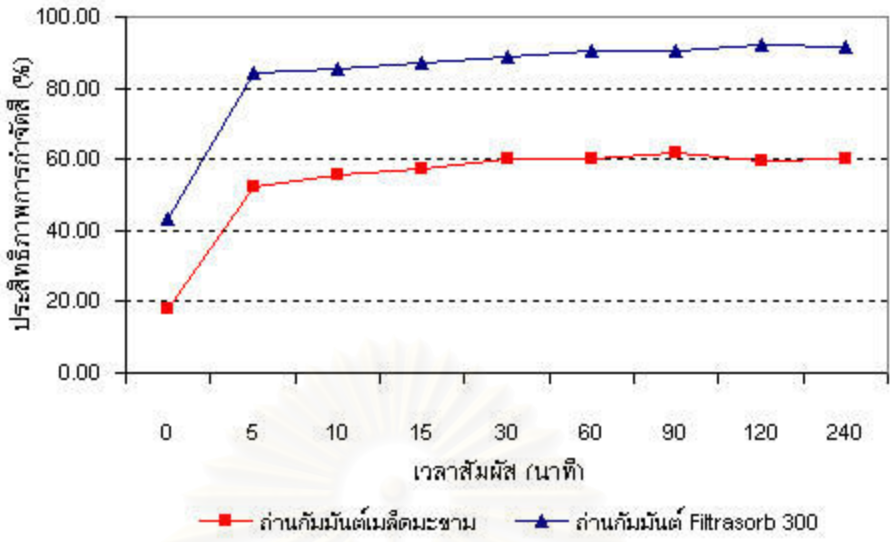
การศึกษาถึงอิทธิพลของเวลาที่มีผลต่อการดูดติดผิว จะแบ่งน้ำชะมูลฝอยที่ทราบความเข้มสีเริ่มต้นออกเป็นสองชุด ทำการปรับพีเอชของน้ำชะมูลฝอยทั้งสองชุดเหมือนกัน ให้มีค่าพีเอชเท่ากับ 8 ชุดแรกจะนำไปเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 0, 5, 10, 15, 30, 60, 120 และ 240 นาที โดยไม่มีการเติมถ่านกัมมันต์ เพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดสีที่เกิดจากการ

ปรับพีเอช ส่วนชุดที่สองจะเติมถ่านกัมมันต์ ปริมาณ 0.5 กรัม และนำไปเขย่าที่ความเร็วและเวลาเดียวกัน เพื่อหาประสิทธิภาพการกำจัดสีที่เกิดจากการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์

วัดความเข้มสีน้ำชะมูลฝอยเริ่มต้นในการทดลองโดยใช้ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม ครั้งที่หนึ่ง เท่ากับ 2,408.71 แพลทตินัม-โคบอลต์ ครั้งที่สอง เท่ากับ 2,455.94 แพลทตินัม-โคบอลต์ ครั้งที่สาม เท่ากับ 2,431.89 แพลทตินัม-โคบอลต์ ส่วนการทดลองโดยใช้ถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 มีความเข้มสีน้ำชะมูลฝอยเริ่มต้น ครั้งที่หนึ่ง เท่ากับ 1,890.05 แพลทตินัม-โคบอลต์ ครั้งที่สอง เท่ากับ1,900.62 แพลทตินัม-โคบอลต์ ครั้งที่สาม เท่ากับ 1,857.13 แพลทตินัม-โคบอลต์ และปรับค่าพีเอชเท่ากับ 8 ผลการทดลองที่ได้ดังตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.10 (ผลการทดลองโดยละเอียดในภาคผนวก ง.)

ตารางที่ 4.8 ประสิทธิภาพการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยที่เวลาสัมผัสต่างๆ

ชนิดถ่านกัมมันต์	**เวลา (นาที)**	pH **สุดท้าย**	**ความเข้มสีที่เหลือ** (Pt-Co)			**ค่าเฉลี่ย** (%)	
			ครั้งที่ 1	**ครั้งที่** 2	**ครั้งที่**3	**การกำจัดสีทั้งหมด**	**การดูดติดผิว**
เมล็ดมะขาม (0.50 g.)	0	8.12-8.20	1,972.66	2,082.16	1,943.96	17.80	11.31
	5	8.35-8.41	1,175.94	1,124.23	1,179.80	52.30	38.26
	10	8.40-8.44	1,075.73	1,069.04	1,093.83	55.61	41.09
	15	8.59-8.64	1,018.35	998.72	1,079.11	57.56	37.43
	30	8.85-8.90	987.67	962.59	973.01	59.93	38.77
	60	9.34-9.35	972.17	959.86	966.22	60.27	37.74
	90	9.36-9.41	923.08	934.68	930.82	61.78	40.26
	120	9.46-9.49	987.82	970.09	977.46	59.77	37.55
	240	9.47-9.57	975.33	971.42	969.97	60.02	38.25
Filtrasorb 300 (0.50 g.)	0	9.03-9.09	1,153.33	1,073.15	991.47	43.04	36.62
	5	9.03-9.09	297.14	298.87	300.85	84.12	68.47
	10	9.15-9.20	275.16	271.32	272.95	85.49	69.50
	15	9.21-9.28	247.75	250.05	246.98	86.81	66.16
	30	9.36-9.39	211.62	211.49	210.69	88.78	68.72
	60	9.63-9.68	177.21	176.29	176.38	90.62	70.30
	90	9.74-9.78	175.07	176.04	175.51	90.67	68.92
	120	9.78-9.80	149.72	149.09	148.55	92.08	71.09
	240	9.75-9.81	154.26	155.80	153.78	91.79	70.71



รูปที่ 4.10 ประสิทธิภาพการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยที่เวลาสัมผัสต่างๆ

จากข้อมูลในตารางที่ 4.8 และรูปที่ 4.10 พบว่า อัตราการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเวลาสัมผัสเท่ากับ 5 นาที สังเกตได้จากความชันของกราฟ และลักษณะของกราฟที่มีแนวโน้มคล้ายคลึงกันของถ่านกัมมันต์ทั้งสองชนิด สำหรับถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามพบว่ามีการกำจัดสีสูงสุดเท่ากับ ร้อยละ 61.78 ที่ระยะเวลาสัมผัส 90 นาที เมื่อเพิ่มระยะเวลาสัมผัสเป็น 120 และ 240 นาที ประสิทธิภาพการกำจัดสีจะมีค่าลดลงเล็กน้อย คือร้อยละ 59.77 และ 60.02 ตามลำดับ ส่วนค่าพีเอชของน้ำชะมูลฝอยหลังเขย่าจะเพิ่มขึ้นจาก 8 เป็น 9 เมื่อใช้ระยะเวลาสัมผัสนานขึ้น ค่าพีเอชก็จะสูงขึ้นตามลำดับ แสดงว่าระยะเวลาสัมผัสที่แตกต่างกันมีผลกระทบต่อค่าพีเอชของน้ำชะมูลฝอย เนื่องจากการเปลี่ยนรูปของ Organic Nitrogen ไปเป็น Ammonia Nitrogen และการระเหยของกรดไขมัน (VFA) ดังที่ได้กล่าวไปแล้วในหัวข้อที่ 4.2.1

สำหรับถ่าน Filtrasorb 300 พบว่าสามารถกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยได้สูงสุด เท่ากับ ร้อยละ 92.08 ที่ระยะเวลาสัมผัส 120 นาที และมีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อเพิ่มระยะเวลาเป็น 240 นาที ส่วนค่าพีเอชของน้ำชะมูลฝอยหลังเขย่าพบว่าพีเอชของน้ำชะมูลฝอยเพิ่มขึ้นจาก 8 เป็น 9 เช่นเดียวกับการทดลองโดยใช้ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม

ดังนั้น จึงสามารถสรุปได้ว่าระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมของการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยด้วยถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม คือ 90 นาที และเวลาสัมผัสที่เหมาะสมของการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยด้วยถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 คือ 120 นาที

4.2.3 ผลการทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์

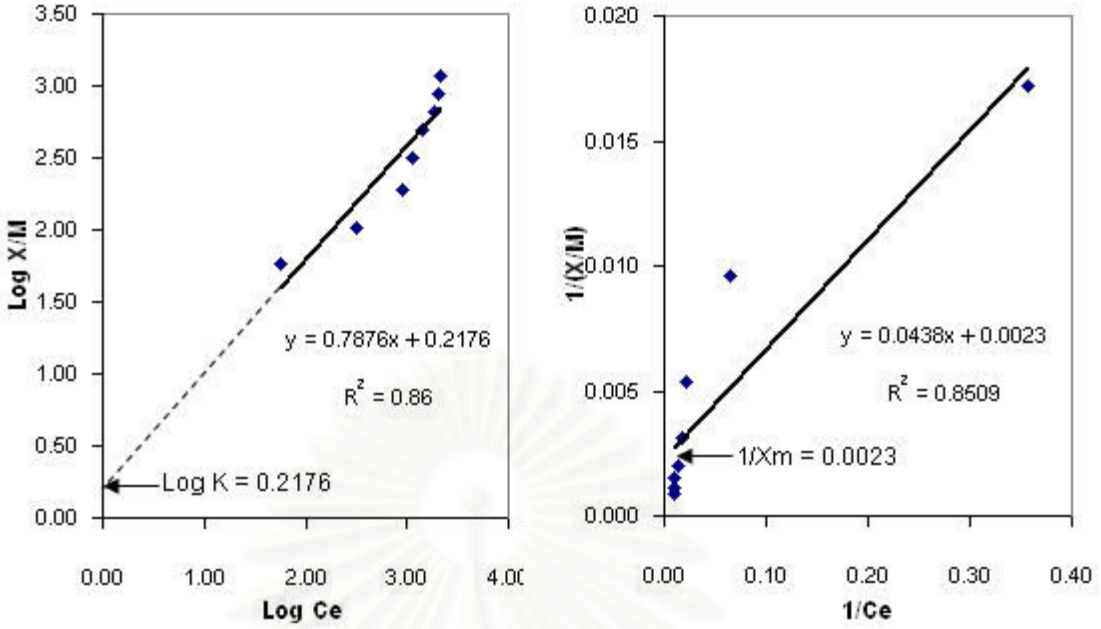
การทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิว ทดลองโดยนำน้ำชะมูลฝอยปริมาตร 50 มิลลิลิตร มาปรับค่าพีเอชให้เท่ากับ 8 มาใส่ลงในขวดทดลอง เติมถ่านกัมมันต์ ขนาด 325 เมช (0.045 มิลลิเมตร) ปริมาณ 0.01, 0.02, 0.04, 0.1, 0.2, 0.4, 1.0, 2.0 และ 4.0 กรัม ลงในขวดทดลองแต่ละใบ นำไปเขย่าบนเครื่องเขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลาที่ได้จากขั้นตอนการหาเวลาสัมผัสที่มีร้อยละการกำจัดสีดีที่สุด (ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม เท่ากับ 90 นาที ส่วนถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 เท่ากับ 120 นาที) กรองถ่านกัมมันต์ออก แล้วนำน้ำชะมูลฝอยไปวัดความเข้มสีที่เหลือ นำค่าที่ได้มาเขียนกราฟสมการไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช (Freundlich Isotherm) และแลงมัวร์ (Langmuir Isotherm) ได้ดังตารางที่ 4.9 – 4.11 และรูปที่ 4.11 – 4.12

ตารางที่ 4.9 การทดสอบไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชและแลงมัวร์ของถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม

น้ำหนักถ่าน, M (g.)	pH หลังเขย่า	สีเริ่มต้น (Pt-Co)	สีที่จุดสมดุลเฉลี่ย, Ce (Pt-Co/l)	สีที่กำจัดได้, X (Pt-Co)	X/M (Pt-Co/g.Carbon)	1/(X/M)	1/Ce
0	9.52-9.56	2,386.85	2,386.85	-	-	-	-
0.01	9.54-9.56	2,386.85	2,151.17	11.78	1,178.40	0.0008	0.0093
0.02	9.56-9.59	2,386.85	2,038.37	17.42	871.20	0.0011	0.0098
0.04	9.52-9.55	2,386.85	1,857.03	26.49	662.28	0.0015	0.0108
0.1	9.51-9.55	2,386.85	1,391.13	49.79	497.86	0.0020	0.0144
0.2	9.48-9.52	2,386.85	1,113.69	63.66	318.29	0.0031	0.0180
0.4	9.40-9.44	2,386.85	889.20	74.88	187.21	0.0053	0.0225
1.0	9.33-9.34	2,386.85	312.03	103.74	103.74	0.0096	0.0641
2.0	9.26-9.31	2,386.85	56.15	116.54	58.27	0.0172	0.3562

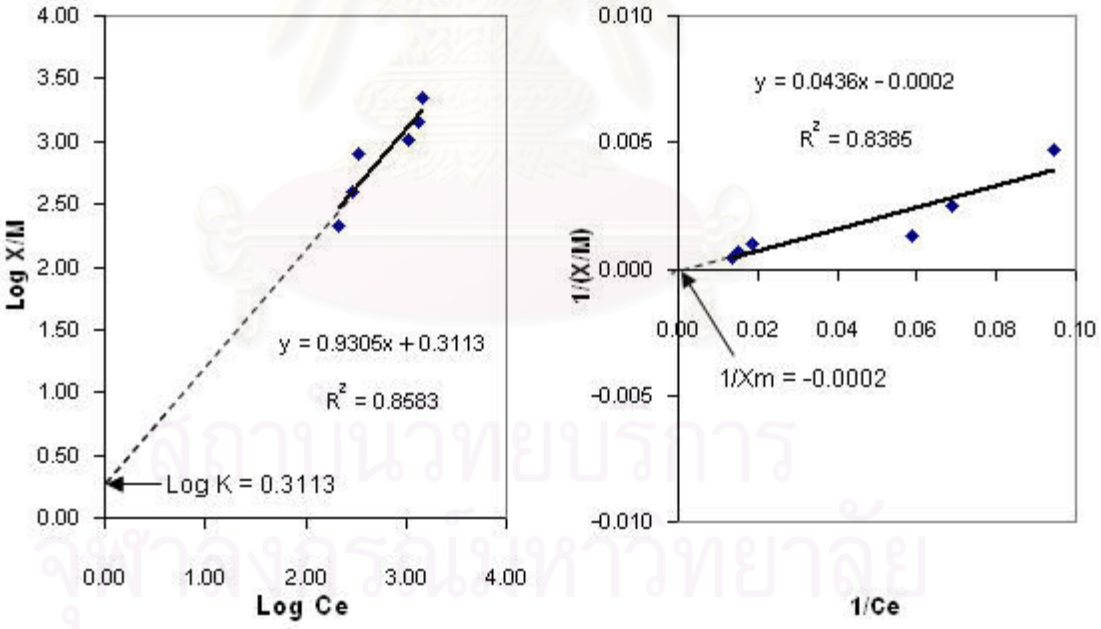
ตารางที่ 4.10 การทดสอบไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชและแลงมัวร์ของถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300

น้ำหนักถ่าน, M (g.)	pH หลังเขย่า	สีเริ่มต้น (Pt-Co)	สีที่จุดสมดุลเฉลี่ย, Ce (Pt-Co/l)	สีที่กำจัดได้, X (Pt-Co)	X/M (Pt-Co/g.Carbon)	1/(X/M)	1/Ce
0	9.62-9.66	1,902.39	1,902.39	-	-	-	-
0.01	9.62-9.67	1,902.39	1,452.62	22.49	2,248.88	0.0004	0.0138
0.02	9.64-9.64	1,902.39	1,331.68	28.54	1,426.78	0.0007	0.0150
0.04	9.61-9.65	1,902.39	1,067.57	41.74	1,043.53	0.0010	0.0187
0.1	9.61-9.69	1,902.39	341.01	78.07	780.69	0.0013	0.0587
0.2	9.71-9.73	1,902.39	289.96	80.62	403.11	0.0025	0.0690
0.4	9.69-9.71	1,902.39	211.92	84.52	211.31	0.0047	0.0944



(ก) ไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช (ข) ไอโซเทอมแบบแลงมัวร์

รูปที่ 4.11 การทดสอบไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชและแลงมัวร์ของถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม



(ก) ไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช (ข) ไอโซเทอมแบบแลงมัวร์

รูปที่ 4.12 การทดสอบไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชและแลงมัวร์ของถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300

ตารางที่ 4.11 ค่าคงที่ของไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชและแลงมัวร์

ชนิดถ่านกัมมันต์	K	1/n	$1/X_m$	$1/bX_m$
เมล็ดมะขาม	1.65	0.7876	0.0023	0.0438
Filtrasorb 300	2.05	0.9305	-0.0002	0.0436

การทดลองหาไอโซเทอมการดูดติดผิวตามมาตรฐาน ASTM D3860 – 890 (Standard Practice for Determination of Adsorptive Capacity of Activated Carbon by Aqueous Phase Isotherm Technique) ได้กำหนดน้ำหนักในการทดลองเป็น 10 ค่าน้ำหนักคือ 0.00, 0.01, 0.02, 0.04, 0.10, 0.20, 0.40, 1.00, 2.00, และ 4.00 กรัม แต่เมื่อทำการทดลองพบว่าเมื่อใช้ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามน้ำหนัก 4.00 กรัม กำจัดสีน้ำชะมูลฝอยแล้ว ไม่สามารถตรวจวัดความเข้มสีที่เหลืออยู่ได้ เนื่องจากน้ำชะมูลฝอยใสไม่มีสี ทั้งนี้เกิดจากการดูดติดผิวร่วมกับการตกตะกอน จึงทำการลดปริมาณถ่านที่ใช้ในการทดลองเหลือเพียง 9 ค่า ตั้งแต่ 0.00 – 2.00 กรัม สำหรับถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 ก็เช่นเดียวกัน เมื่อทำการทดลองแล้วพบว่าสามารถใช้น้ำหนักในการทดลองได้ 7 ค่าคือตั้งแต่ 0.00 – 0.40 กรัม

จากผลการทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 4.9 ถึงตารางที่ 4.11 พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของถ่านกัมมันต์ ความเข้มสีน้ำชะมูลฝอยที่เหลืออยู่หลังจากเขย่าจะลดลง สำหรับการหาไอโซ-เทอมการดูดติดผิวสีน้ำชะมูลฝอยด้วยถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม ได้ผลการทดลอง ดังตารางที่ 4.9 เมื่อนำข้อมูลมาวาดกราฟไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช (รูปที่ 4.11 ก.) สามารถคำนวณหาสมการเส้นตรงได้ คือ $y = 0.7876x + 0.2176$ มีค่า $R^2 = 0.86$ มีค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดติดผิว (K) เท่ากับ 1.65 แพลทตินัม-โคบอลต์ต่อกรัมถ่านกัมมันต์ และมีค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานในการดูดติดผิว (1/n) เท่ากับ 0.7876 ส่วนไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชของถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 (รูปที่ 4.12 ก.) สามารถคำนวณหาสมการเส้นตรงได้เท่ากับ $y = 0.9305x + 0.3113$ มีค่า $R^2 = 0.8583$ มีค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดติดผิว (K) เท่ากับ 2.05 แพลทตินัม-โคบอลต์ต่อกรัมถ่านกัมมันต์ และมีค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานในการดูดติดผิว (1/n) เท่ากับ 0.9305

เมื่อเปรียบเทียบไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชของถ่านกัมมันต์ทั้งสองชนิดพบว่ามีค่า 1/n ต่ำกว่า 1 แสดงว่าถ่านกัมมันต์ทั้งสองชนิดสามารถดูดติดผิวได้ดี โดยถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 จะมีค่า K และ 1/n มากกว่าถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม ซึ่งค่า K และ 1/n แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการดูดติดผิว ถ้าค่า K และ 1/n มีค่ามากก็แสดงว่าถ่านกัมมันต์ชนิดนั้น มีความสามารถในการดูดติดผิวสูง ดังนั้น ถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 จึงมีความสามารถในการดูดติดผิวสีน้ำชะมูลฝอยมากกว่าถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม

สำหรับไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ของถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม (รูปที่ 4.11 ข.) สามารถคำนวณหาสมการเส้นตรงได้ เท่ากับ y = 0.0438x + 0.0023 มีค่า R^2 = 0.8509, $1/X_m$ เท่ากับ 0.0023 แพลทตินัม-โคบอลต์ต่อกรัมถ่านกัมมันต์ และ $1/bX_m$ เท่ากับ 0.0438 และไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ของถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 (รูปที่ 4.12 ข.) สามารถคำนวณหาสมการเส้นตรงได้เท่ากับ y = 0.0436x – 0.0002 มีค่า R^2 = 0.8385, $1/X_m$ เท่ากับ -0.0002 แพลทตินัม-โคบอลต์ต่อกรัมถ่านกัมมันต์ และ $1/bX_m$ เท่ากับ 0.0436 เมื่อเปรียบเทียบไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ของถ่านกัมมันต์ทั้งสองชนิด พบว่า ถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 มีค่า $1/bX_m$ใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม แต่มีค่า $1/X_m$ น้อยกว่า สรุปได้ว่าถ่านกัมมันต์ทั้งสองชนิดมีขีดจำกัดในการดูดติดผิวใกล้เคียงกัน แต่มีพลังงานในการดูดติดผิวต่ำกว่าถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม

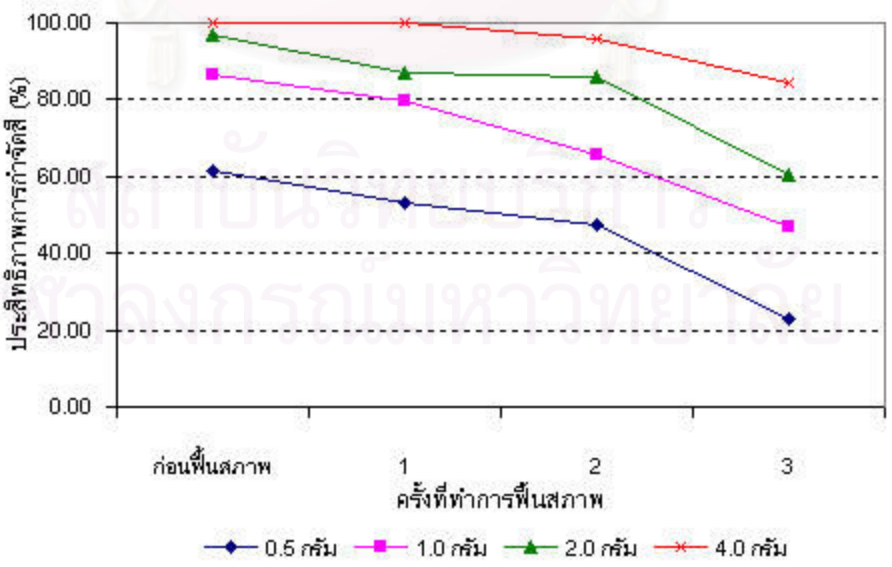
จากผลการศึกษาไอโซเทอมทั้งสองแบบ พบว่าสมการไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชมีความเหมาะสมที่จะนำมาทำนายกลไกการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยมากกว่าสมการแบบแลงมัวร์ เนื่องจากค่า R^2 มีค่ามากกว่า ซึ่งผลที่ได้จากการศึกษาไอโซเทอมการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ทั้งสองแบบพบว่ามีความสอดคล้องกับ ผลการหาค่าไอโอดีนนัมเบอร์, พื้นที่ผิว, ประสิทธิภาพการดูดติดผิวสีน้ำชะมูลฝอย และประสิทธิภาพการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยของถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 ซึ่งมีค่าสูงกว่าถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามทั้งสิ้น

4.3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการฟื้นสภาพถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอย

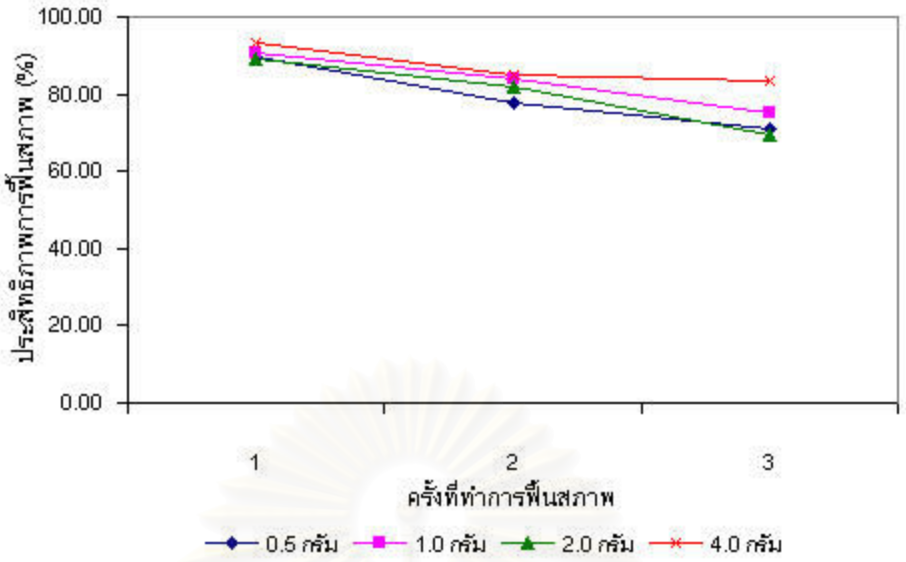
ทำการทดลองโดยนำน้ำชะมูลฝอยปริมาตร 50 มิลลิลิตร มาปรับค่าพีเอชให้เท่ากับ 8 มาใส่ลงในขวดทดลอง เติมถ่านกัมมันต์ขนาด 325 เมซ ปริมาณ 0.5, 1.0, 2.0, 4.0 กรัม ลงในขวดทดลองแต่ละใบ นำขวดไปเขย่าบนเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลาที่ได้จากขั้นตอนการหาเวลาสัมผัสที่มีร้อยละการกำจัดสีดีที่สุด (ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม เท่ากับ 90 นาที ส่วนถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 เท่ากับ 120 นาที) จากนั้นกรองถ่านกัมมันต์ออก วัดค่าพีเอชและความเข้มสีที่เหลือ แล้วนำถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกำจัดสีมาล้างด้วยสารละลายกรดอะซิติก (CH_3COOH) เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ตามด้วยน้ำกลั่น นำไปอบให้แห้ง ชั่งน้ำหนักที่เหลือ และนำมาดูดติดผิวสีน้ำชะมูลฝอยอีกครั้ง และทำการฟื้นสภาพซ้ำอีก 2 รอบ เพื่อหาประสิทธิภาพในการฟื้นสภาพถ่านกัมมันต์ ผลการทดลองที่ได้ดังตารางที่ 4.12 – 4.13 และรูปที่ 4.13 – 4.16

ตารางที่ 4.12 ประสิทธิภาพการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยหลังฟื้นสภาพและประสิทธิภาพในการฟื้นสภาพถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม

ครั้งที่	น้ำหนักถ่าน (g.)	pH หลังเขย่า	ร้อยละ		ประสิทธิภาพ (%)	
			การกำจัดสี	การดูดติดผิว	การฟื้นสภาพ	เฉลี่ย
ก่อนฟื้นสภาพ	0.5	9.35-9.42	61.56	42.18	-	-
	1.0	9.23-9.30	86.59	67.22	-	
	2.0	9.18-9.24	97.09	77.71	-	
	4.0	9.13-9.17	100.00	80.63	-	
1	0.5	9.38-9.43	53.28	33.26	89.70	90.67
	1.0	9.29-9.31	79.89	59.87	90.44	
	2.0	9.24-9.28	87.00	66.97	89.29	
	4.0	9.18-9.25	100.00	79.98	93.25	
2	0.5	9.41-9.43	47.46	26.88	77.89	82.02
	1.0	9.33-9.38	65.57	44.13	83.76	
	2.0	9.25-9.30	85.81	62.76	81.70	
	4.0	9.21-9.22	95.88	73.70	84.74	
3	0.5	9.40-9.48	22.95	4.47	70.75	74.69
	1.0	9.32-9.36	46.97	27.18	75.30	
	2.0	9.29-9.33	60.17	39.98	69.31	
	4.0	9.20-9.25	84.27	63.75	83.40	



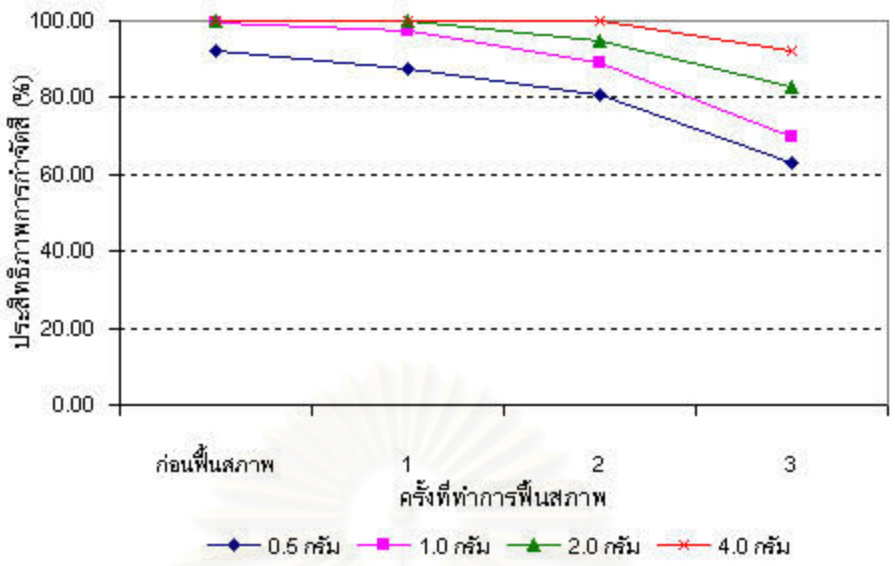
รูปที่ 4.13 ประสิทธิภาพการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยหลังการฟื้นสภาพถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม



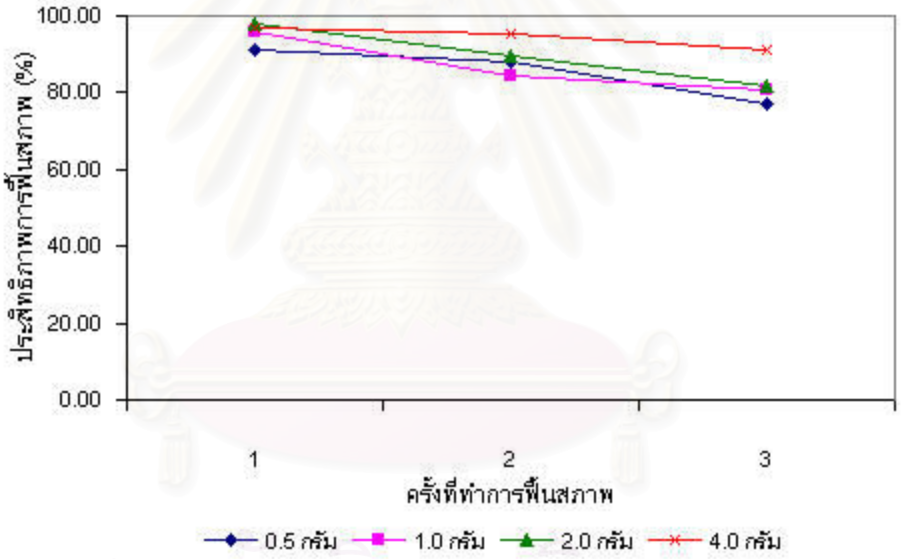
รูปที่ 4.14 ประสิทธิภาพในการฟื้นสภาพถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม

ตารางที่ 4.13 ประสิทธิภาพการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยหลังฟื้นสภาพและประสิทธิภาพในการฟื้นสภาพถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300

ครั้งที่	น้ำหนักถ่าน (g.)	pH หลังเขย่า	ร้อยละ		ประสิทธิภาพ (%)	
			การกำจัดสี	การดูดติดผิว	การฟื้นสภาพ	เฉลี่ย
ก่อนฟื้นสภาพ	0.5	9.67-9.71	92.08	72.41	-	-
	1.0	9.69-9.74	99.67	80.00	-	
	2.0	9.69-9.73	100.00	80.33	-	
	4.0	9.76-9.78	100.00	80.33	-	
1	0.5	9.64-9.72	87.47	67.67	91.13	95.47
	1.0	9.65-9.73	97.44	77.64	95.95	
	2.0	9.71-9.82	100.00	80.20	98.08	
	4.0	9.77-9.83	100.00	80.20	96.70	
2	0.5	9.61-9.69	80.47	59.28	88.03	89.32
	1.0	9.61-9.68	89.13	67.19	84.51	
	2.0	9.68-9.70	94.81	73.22	89.48	
	4.0	9.76-9.84	100.00	78.31	95.27	
3	0.5	9.57-9.64	62.85	42.29	77.22	82.78
	1.0	9.59-9.60	69.80	47.37	80.96	
	2.0	9.63-9,69	82.87	61.94	82.00	
	4.0	9.70-9.74	92.39	71.40	90.96	

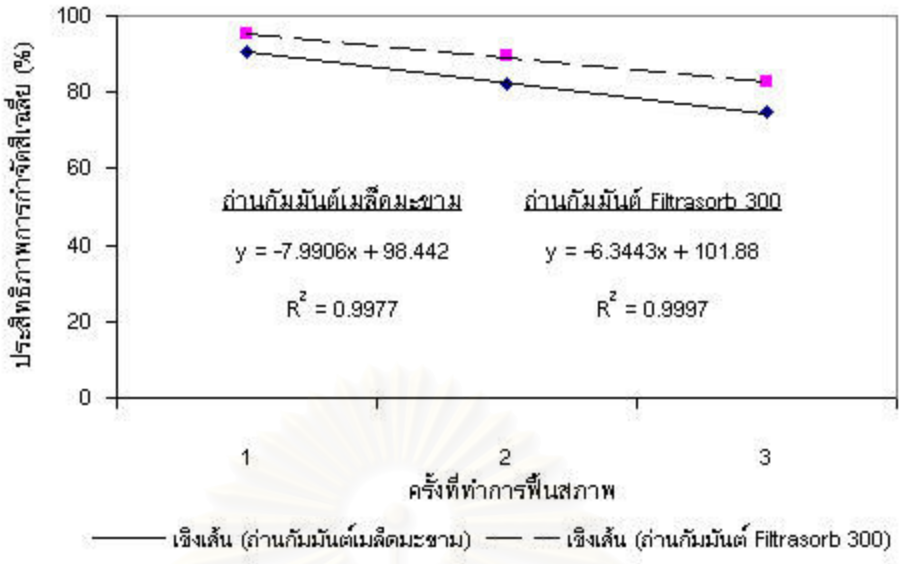


รูปที่ 4.15 ประสิทธิภาพการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยหลังการฟื้นสภาพถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300



รูปที่ 4.16 ประสิทธิภาพในการฟื้นสภาพถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300

จากผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 4.12 - 4.13 ผลที่ได้หลังจากการนำถ่านกัมมันต์มากำจัดสีอีกครั้ง พบว่ามีประสิทธิภาพลดลงตามลำดับครั้งที่ฟื้นสภาพ โดยถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามมีประสิทธิภาพในการฟื้นสภาพเฉลี่ยในครั้งแรก เท่ากับ ร้อยละ 90.67 ครั้งที่สอง เท่ากับ ร้อยละ 82.02 และครั้งที่สาม เท่ากับ ร้อยละ 74.69 ตามลำดับ ส่วนถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 พบว่ามีประสิทธิภาพในการฟื้นสภาพเฉลี่ยในครั้งแรก เท่ากับ ร้อยละ 95.47 ครั้งที่สอง เท่ากับ ร้อยละ 89.32 และครั้งที่สาม เท่ากับ ร้อยละ 82.78 ตามลำดับ



รูปที่ 4.17 แนวโน้มของประสิทธิภาพในการฟื้นสภาพถ่านกัมมันต์

เมื่อนำประสิทธิภาพในการฟื้นสภาพถ่านกัมมันต์เฉลี่ยมาพิจารณาถึงจำนวนครั้งที่จะสามารถทำการฟื้นสภาพได้ โดยเขียนเส้นแนวโน้มของประสิทธิภาพการฟื้นสภาพของถ่านกัมมันต์ทั้งสองชนิด ดังรูปที่ 4.17 พบว่าถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม สามารถคำนวณสมการเส้นตรงได้เท่ากับ $y = -7.9906x + 98.442$ ค่า $R^2 = 0.9977$ เมื่อแทนค่า y เท่ากับศูนย์ ก็จะได้จำนวนครั้งที่สามารถทำการฟื้นสภาพได้ เท่ากับ 12 ครั้ง ถึงจุดนี้ถ่านกัมมันต์จะหมดประสิทธิภาพการใช้งาน ส่วนถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 สามารถคำนวณสมการเส้นตรงได้เท่ากับ $y = -6.3443 + 101.88$ ค่า $R^2 = 0.9997$ สามารถทำการฟื้นสภาพได้ เท่ากับ 16 ครั้ง ซึ่งจะเห็นได้ว่าถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 สามารถทำการฟื้นสภาพได้ดีกว่าถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 ซึ่งผลิตจากถ่านหินบิทูมินัส (Bituminous Coal) มีความคงตัวมากกว่าถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม เพราะหลังจากนำไปล้างด้วยกรดอะซิติกเจือจาง ทำให้พื้นที่ผิวบางส่วนถูกทำลายพร้อมๆกับการหลุดออกของโมเลกุลสิ่งสกปรกของน้ำชะมูลฝอย แต่ยังคงมีบางส่วนที่ติดค้างอยู่ภายในรูพรุนของถ่าน ดังนั้นประสิทธิภาพการกำจัดสีจึงลดลงตามลำดับครั้งที่ฟื้นสภาพ และปริมาณถ่านกัมมันต์หลังการฟื้นสภาพก็จะลดลงอย่างไม่คงที่ ขึ้นอยู่กับวิธีการล้างและเครื่องมือที่ใช้ในการล้างถ่านกัมมันต์ด้วย

4.4 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยของถ่านกัมมันต์โดยการทดลองแบบต่อเนื่องในถังดูดติดผิวแบบแท่ง

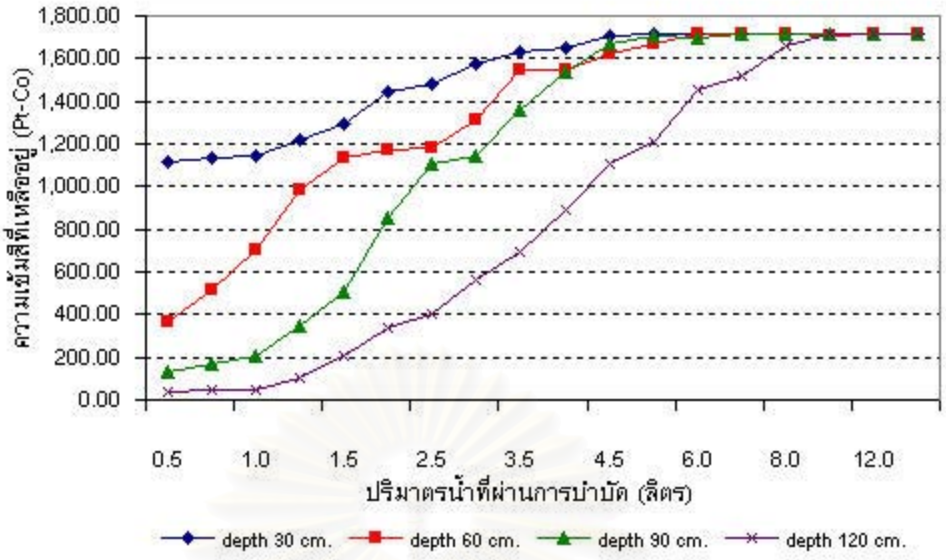
การทดลองขั้นนี้เป็นการศึกษาความสามารถในการใช้งานของถ่านกัมมันต์ โดยนำถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามที่เตรียมได้จากสภาวะที่เหมาะสม มาใช้เป็นตัวดูดติดผิวเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 ที่มีขนาดเท่ากันคือ 8 – 30 เมช (0.59 – 2.36 มิลลิเมตร) บรรจุลงในถังดูดติดผิวแบบแท่ง (Column Test) ที่เป็นท่ออะคริลิกใสมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.3 เซนติเมตร และมีการเจาะรูเพื่อเก็บตัวอย่างน้ำชะมูลฝอยที่ระดับความลึกของชั้นถ่านกัมมันต์ เท่ากับ 30, 60, 90 และ 120 เซนติเมตร น้ำหนักของและปริมาตรของชั้นถ่านกัมมันต์ดังตารางที่ 4.14

ตารางที่ 4.14 ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามที่บรรจุลงในถังดูดติดผิวแบบแท่ง

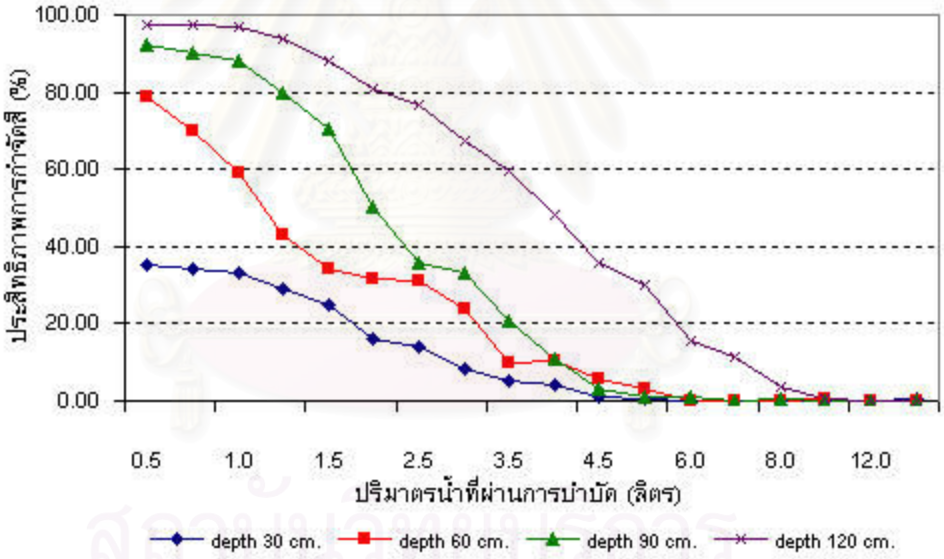
ความลึกของชั้นถ่าน (ซม.)	ปริมาตรของชั้นถ่าน (ลิตร)	น้ำหนัก (กรัม)
30	0.1245	49.24
60	0.2490	98.48
90	0.3735	147.72
120	0.4983	196.96

ทำการป้อนน้ำสะอาดผ่านถังดูดติดผิวเพื่อไล่ฟองอากาศเป็นเวลาหนึ่งวัน จากนั้นปั๊มน้ำชะมูลฝอยที่มีความเข้มสีเริ่มต้นเท่ากับ 1,719.38 แพลทตินัม-โคบอลต์ ที่ผ่านการปรับพีเอชเท่ากับ 8 เข้าสู่ถังพักน้ำเสียด้านบน (ดูรูปที่ 3.8) แล้วปล่อยน้ำชะมูลฝอยเข้าสู่ถังดูดติดผิวแบบแท่ง โดยควบคุมอัตราบรรทุกทางชลศาสตร์ เท่ากับ 0.6 ม.^{3}/ม.^{2}-ชม. และมีระบบปั๊มน้ำเสียหมุนเวียนอย่างต่อเนื่อง

เก็บตัวอย่างของน้ำชะมูลฝอยที่ระดับความลึกของชั้นถ่านกัมมันต์ เท่ากับ 30, 60, 90 และ120 เซนติเมตร ทุกชั่วโมงในช่วงแรกและอีกทุกๆ 2 – 4 ชั่วโมง ตามลำดับ จนกว่าค่าความเข้มสีที่วิเคราะห์ได้จะมีค่าใกล้เคียงกับความเข้มสีน้ำเข้า ผลการทดลองดังรูปที่ 4.18 – 4.19 (ตารางผลการทดลองแสดงในภาคผนวก ฉ.)



รูปที่ 4.18 ความเข้มสีน้ำชะมูลฝอยที่ผ่านถังดูดติดผิวแบบแท่งบรรจุถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามที่ระดับความลึก 30, 60, 90 และ120 เซนติเมตร อัตราบรรทุกทางชลศาสตร์ 0.6 ม.^{3}/ม.^{2}-ซม.



รูปที่ 4.19 ประสิทธิภาพการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยที่ผ่านถังดูดติดผิวแบบแท่งบรรจุถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามที่ระดับความลึก 30, 60, 90 และ120 เซนติเมตร อัตราบรรทุกทางชลศาสตร์ 0.6 ม.^{3}/ม.^{2}-ซม.

เนื่องจากมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมไม่มีการกำหนดค่าของสีในน้ำทิ้งไว้แน่นอน เพียงแต่บอกไว้ว่าต้องมีสีไม่เป็นที่พึงรังเกียจ ทำให้ไม่สามารถกำหนดจุด Breakthrough ได้ การยุติการทดลองจะหยุดเมื่อค่าความเข้มสีในน้ำออกใกล้เคียงกับความเข้มสีในน้ำเข้า จากรูปที่ 4.18 – 4.19 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยของถ่านกัมมันต์

เมล็ดมะขามจะลดลงเรื่อยๆตามปริมาตรน้ำชะมูลฝอยที่ผ่านการบำบัด เนื่องจากพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ถูกใช้งานและหมดประสิทธิภาพลง ในช่วงระยะแรกของการทดลองจะเห็นว่าถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีสูงและจะลดลงอย่างรวดเร็วจนเกือบคงที่ โดยดูจากความชันของเส้นกราฟในรูปที่ 4.18 – 4.19 ซึ่งเส้นกราฟจะมีความชันสูงในช่วงแรก จากนั้นความชันจะลดลงจนเกือบเป็นศูนย์ในช่วงสุดท้ายของการทดลอง

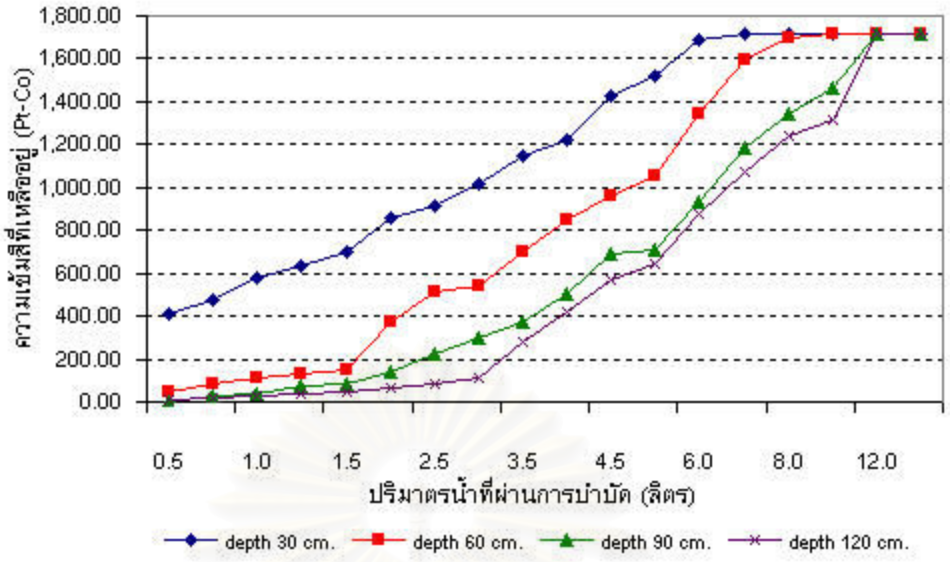
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการกำจัดสีกับความลึกของชั้นถ่านกัมมันต์ พบว่าถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามจะมีประสิทธิภาพการกำจัดสีสูงตามระดับความลึกชั้นถ่าน ซึ่งสังเกตได้จากรูปที่ 4.19 จะเห็นได้ว่าเส้นกราฟที่ความลึก 120 เซนติเมตร อยู่เหนือเส้นกราฟที่ความลึกอื่นๆรองลงมา ได้แก่ ที่ระดับ 90, 60 และ 30 เซนติเมตร ตามลำดับ เนื่องจากมีปริมาณถ่านกัมมันต์มากกว่า และมีเวลาสัมผัสของน้ำชะมูลฝอยที่นานกว่าด้วย จึงทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีดียิ่งขึ้น

สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยโดยใช้ถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 ในถังดูดติดผิวแบบแท่ง ซึ่งได้ดำเนินการทดลองในลักษณะเดียวกันกับถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม ควบคุมอัตราบรรทุกทางชลศาสตร์ 0.6 ม.^{3}/ม.^{2}-ชม. และน้ำชะมูลฝอยมีค่าพีเอชเท่ากับ 8 มีน้ำหนักของและปริมาตรของชั้นถ่านกัมมันต์ดังตารางที่ 4.15

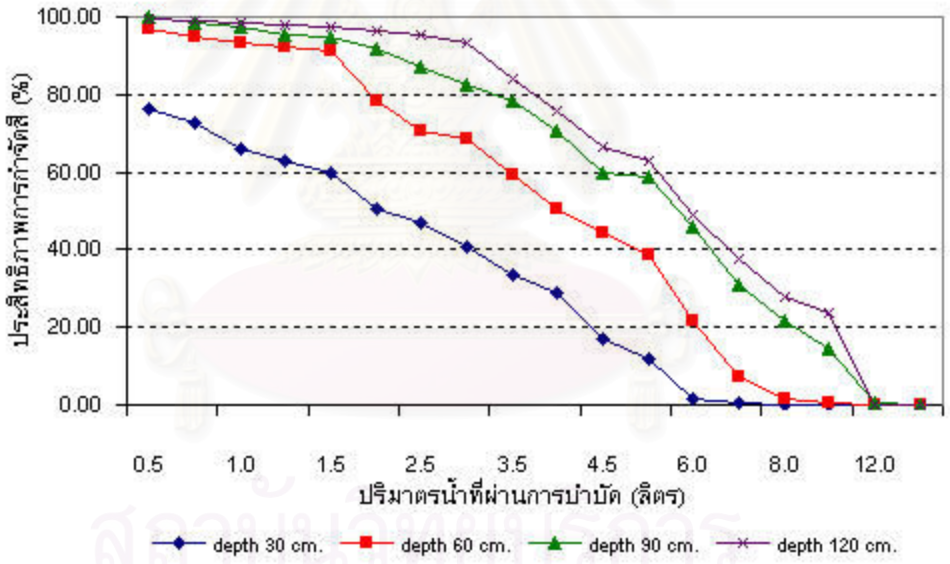
ตารางที่ 4.15 ถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 ที่บรรจุลงในถังดูดติดผิวแบบแท่ง

ความลึกของชั้นถ่าน (ซม.)	ปริมาตรของชั้นถ่าน (ลิตร)	น้ำหนัก (กรัม)
30	0.1245	84.80
60	0.2490	169.61
90	0.3735	254.42
120	0.4983	339.22

เก็บตัวอย่างน้ำเสียที่ระดับความลึกของชั้นถ่านกัมมันต์ คือ 30, 60, 90 และ 120 เซนติเมตร ทุกชั่วโมงในช่วงแรก และอีกทุกๆ 2 – 4 ชั่วโมง ตามลำดับ จนกว่าค่าความเข้มสีที่วิเคราะห์ได้จะมีค่าใกล้เคียงกับความเข้มสีน้ำเข้า ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.20 – 4.21



รูปที่ 4.20 ความเข้มสีน้ำชะมูลฝอยที่ผ่านถังดูดติดผิวแบบแท่งบรรจุถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 ที่ระดับความลึก 30, 60, 90 และ120 เซนติเมตร อัตราบรรทุกทางชลศาสตร์ 0.6 ม.^{3}/ม.^{2}-ชม.



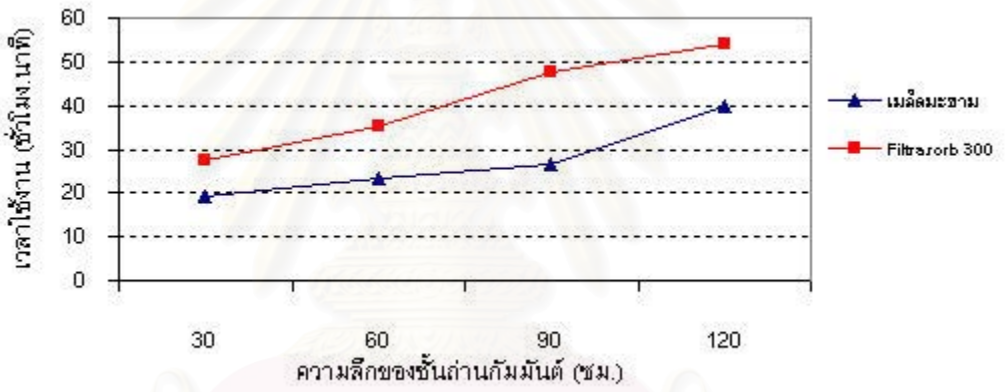
รูปที่ 4.21 ประสิทธิภาพการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยที่ผ่านถังดูดติดผิวแบบแท่งบรรจุถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 ที่ระดับความลึก 30, 60, 90 และ120 เซนติเมตร อัตราบรรทุกทางชลศาสตร์ 0.6 ม.^{3}/ม.^{2}-ชม.

จากรูปที่ 4.20 – 4.21 พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยของถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 จะลดลงเรื่อยๆ ตามปริมาตรน้ำชะมูลฝอยที่ผ่านการบำบัด เช่นเดียวกับถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่ระดับความลึกของชั้นถ่าน 120 เซนติเมตร จะมีประสิทธิภาพในการกำจัดสีสูงสุด และจะลดลงที่ระดับ 90, 60 และ 30 เซนติเมตร ตามลำดับ เนื่องจากมีปริมาณ

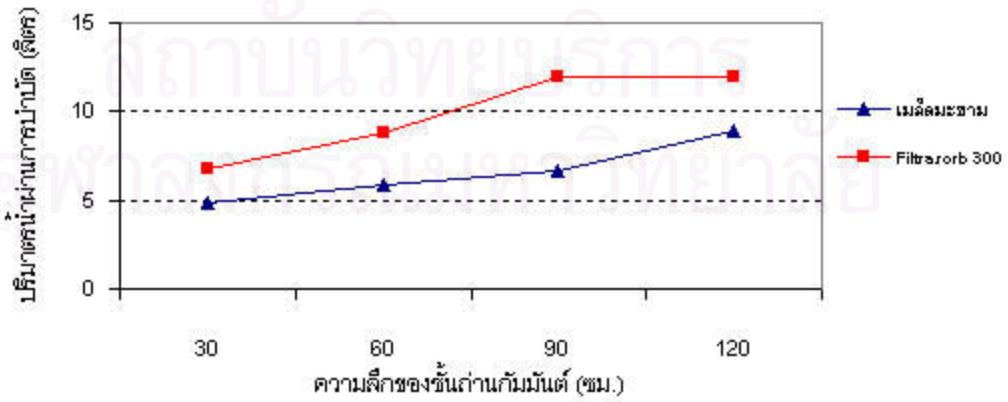
ถ่านกัมมันต์มากกว่าและมีเวลาสัมผัสของน้ำชะมูลฝอยที่นานกว่าด้วย จึงทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีดียิ่งขึ้น

ตารางที่ 4.16 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้งานของถังดูดติดผิวแบบแท่งที่บรรจุถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามและถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 ที่จุดยุติ

ความลึกชั้นถ่านกัมมันต์ (ซม.)	ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม		ถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300	
	เวลาใช้งาน (ชั่วโมง.นาที)	ปริมาตรน้ำชะมูลฝอย (ลิตร)	เวลาใช้งาน (ชั่วโมง.นาที)	ปริมาตรน้ำชะมูลฝอย (ลิตร)
30	19.43	4.85	27.33	6.82
60	23.55	5.88	35.42	8.84
90	26.56	6.63	47.80	11.93
120	39.80	8.94	54.09	11.94

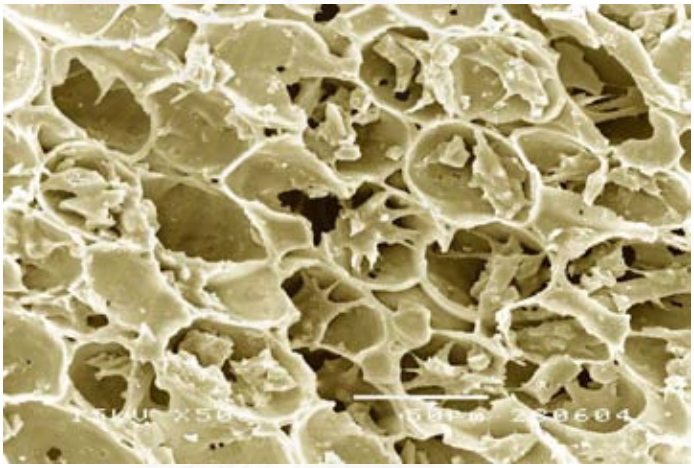


รูปที่ 4.22 เปรียบเทียบเวลาการใช้งานของถังดูดติดผิวแบบแท่งที่บรรจุถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามและถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300

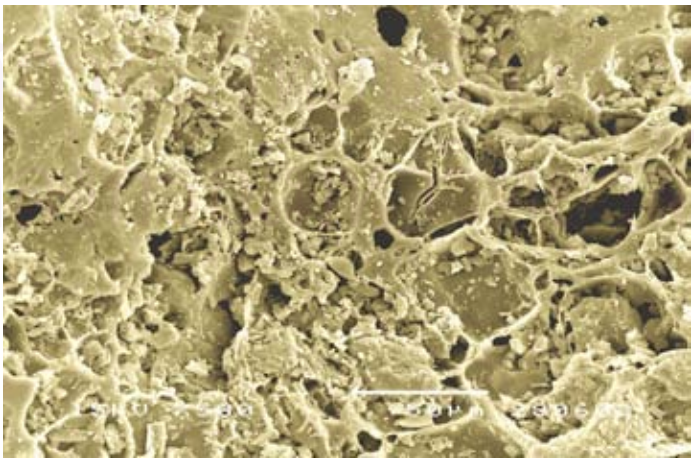


รูปที่ 4.23 เปรียบเทียบปริมาตรน้ำชะมูลฝอยที่ผ่านการบำบัดด้วยถังดูดติดผิวแบบแท่งที่บรรจุถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามและถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองในตารางที่ 4.16 และรูปที่ 4.22 – 4.23 พบว่าประสิทธิภาพการบำบัดด้วยถังดูดติดผิวแบบแท่งที่บรรจุถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 และถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญในระยะเวลาการใช้งาน และปริมาตรน้ำชะมูลฝอยที่บำบัดได้ โดยถังดูดติดผิวแบบแท่งที่บรรจุถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 จะมีประสิทธิภาพการใช้งานในการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยซึ่งมีค่าพีเอชเท่ากับ 8 รับอัตราบรรทุกทางชลศาสตร์ของน้ำชะมูลฝอยที่ 0.6 ม.^{3}/ม.^{2}-ชม. ได้ดีกว่าถังดูดติดผิวแบบแท่งที่บรรจุถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามที่สภาวะเดียวกัน และเมื่อนำถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยในถังดูดติดผิวแบบแท่งมาถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) แล้ว พบว่ามีลักษณะของการดูดติดผิวสีน้ำชะมูลฝอย แสดงดังในรูปที่ 4.24 – 4.25



รูปที่ 4.24 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ของถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามที่ผ่านการดูดติดผิวสีน้ำชะมูลฝอยในถังดูดติดผิวแบบแท่งที่กำลังขยาย 500 เท่า



รูปที่ 4.25 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ของถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 ที่ผ่านการดูดติดผิวสีน้ำชะมูลฝอยในถังดูดติดผิวแบบแท่งที่กำลังขยาย 500 เท่า

4.5 ผลการคำนวณค่าใช้จ่ายในการผลิตถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม

จากการเผาคาร์บอไนซ์เมล็ดมะขามได้ผลผลิต เท่ากับร้อยละ 52.11 และเมื่อนำถ่านที่ได้มากระตุ้นเป็นถ่านกัมมันต์ได้ผลผลิต เท่ากับร้อยละ 74.15 ดังนั้นเมล็ดมะขามจะถูกผลิตเป็นถ่านกัมมันต์ได้เท่ากับ (52.11 x 74.15) /100 = 38.64% สามารถประมาณค่าใช้จ่ายในการผลิตต่อผลผลิตถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม 1 กิโลกรัม ได้ดังนี้

1) เมล็ดมะขาม หาซื้อได้ที่ปากคลองตลาดในราคากิโลกรัมละ 8 บาท ต้องใช้จำนวนเท่ากับ 100 / 38.64 = 2.59 กิโลกรัม ดังนั้น คิดเป็นค่าใช้จ่าย 20.70 บาท

2) เตาเผา ใช้ในการเผาคาร์บอไนซ์เป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ซึ่งได้ร้อยละผลผลิตถ่านเมล็ดมะขาม เท่ากับ ร้อยละ 52.11 ดังนั้นจะเหลือถ่านสำหรับเตรียมในขั้นตอนการกระตุ้น เท่ากับ 1.35 กิโลกรัม เผากระตุ้นที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ดังนั้นสามารถคำนวณค่าใช้จ่ายในการเผาแบ่งออกเป็นสองขั้นตอน คือ

2.1 การเผาคาร์บอไนซ์ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 30 นาที แต่ต้องใช้เวลาในการรอให้ความร้อนถึงจุดที่ต้องการอีกประมาณ 15 นาที ดังนั้นใช้เวลาทั้งหมด 45 นาที เตาเผาใช้ไฟฟ้าประมาณ 3.52 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง คิดเป็นหน่วยไฟฟ้าที่ใช้ 2.64 กิโลวัตต์

2.2 การเผากระตุ้นที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 1 ชั่วโมง แต่ต้องใช้เวลาในการรอให้ความร้อนถึงจุดที่ต้องการอีกประมาณ 1 ชั่วโมง ดังนั้นใช้เวลาทั้งหมด 2 ชั่วโมง เตาเผาใช้ไฟฟ้าประมาณ 3.52 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง คิดเป็นหน่วยไฟฟ้าที่ใช้ 7.04 กิโลวัตต์

รวมหน่วยไฟฟ้าที่ใช้ เท่ากับ 2.64 + 7.04 = 9.68 กิโลวัตต์ และค่าไฟฟ้าโดยประมาณเท่ากับ 1.8 บาทต่อกิโลวัตต์ ดังนั้นคิดเป็นค่าใช้จ่าย 17.42 บาท

3) ซิงค์คลอไรด์เกรดการค้า จากปริมาณถ่านเมล็ดมะขามก่อนนำเผากระตุ้น เท่ากับ (2.59 x 52.11) /100 = 1.35 กิโลกรัม และสัดส่วนถ่านเมล็ดมะขาม : ซิงค์คลอไรด์ เท่ากับ 1:2 จะต้องใช้ซิงค์คลอไรด์ 2.7 กิโลกรัม เพื่อผลิตถ่านกัมมันต์ 1 กิโลกรัม ซึ่งซิงค์คลอไรด์ราคากิโลกรัมละ 55 บาท ดังนั้นคิดเป็นค่าใช้จ่าย 148.5 บาท

ค่าใช้จ่ายทั้งหมด = ค่าเมล็ดมะขาม + ค่าไฟฟ้า + ค่าซิงค์คลอไรด์

= 20.70 + 17.42 + 148.5

= 186.62 บาท

ดังนั้น เมื่อรวมจำนวนเงินค่าใช้จ่ายทั้งหมด เท่ากับ 186.62 บาท ต่อการผลิตถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม 1 กิโลกรัม หรือคิดเป็นราคา 73.71 บาท ต่อผลผลิตถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม 1 ลิตร

จากข้อมูลการทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยของถ่านกัมมันต์ในถังดูดติดผิวแบบแท่ง พบว่า ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามและถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 ที่ปริมาตรชั้นถ่าน 0.4983 ลิตร เท่ากัน สามารถบำบัดสีน้ำชะมูลฝอยได้ 8.94 ลิตร และ 11.94 ลิตร ตามลำดับ

ดังนั้น ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม 1 ลิตร จะสามารถบำบัดสีน้ำชะมูลฝอย ได้ 17.94 ลิตร ส่วนถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 1 ลิตร จะสามารถบำบัดสีน้ำชะมูลฝอย ได้ 23.96 ลิตร โดยถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 มีประสิทธิภาพการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยดีกว่าถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม เท่ากับ [(23.96 – 17.94) /23.96] x 100 = 25.12%

สรุปได้ว่า ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามมีราคาต้นทุนในการผลิตลิตรละ 73.71 บาท ถูกกว่าถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 ซึ่งขายในท้องตลาดราคาลิตรละ 150.00 บาท แต่ถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยที่ดีกว่าร้อยละ 25.12 ทั้งนี้ยังไม่ได้คิดค่าแรงงาน ค่าการตลาด และค่าการบำบัดน้ำเสียที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม ซึ่งจะทำให้ต้นทุนในการผลิตถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามสูงขึ้น

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความสามารถในการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอย โดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเมล็ดมะขาม เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 ซึ่งเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีขายตามท้องตลาดทั่วไป สามารถสรุปได้ดังนี้

5.1.1 ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม

การเตรียมถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม โดยทำการเผาคาร์บอไนซ์ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที ได้ผลผลิตสูงสุดเท่ากับ ร้อยละ 52.11 กระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนักของถ่านเมล็ดมะขามต่อสารละลายซิงค์คลอไรด์ 1:2 และเผากระตุ้นที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส แบบจำกัดอากาศเป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มาล้างสารเคมีออกด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก และน้ำร้อนหลายๆ ครั้ง จะได้ถ่านกัมมันต์ที่มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์ เท่ากับ 724 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีพื้นที่ผิวซึ่งเป็นคุณสมบัติสำคัญในการดูดติดผิว เท่ากับ 522.81 ตารางเมตรต่อกรัม น้อยกว่าถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 ซึ่งมีค่าไอโอดีนนัมเบอร์ เท่ากับ 982 มิลลิกรัมต่อกรัม และมีพื้นที่ผิวเท่ากับ 719.36 ตารางเมตรต่อกรัม

5.1.2 ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิวสีน้ำชะมูลฝอยของถ่านกัมมันต์

1) ค่าพีเอชที่เหมาะสม

ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม : ทำการทดลองที่พีเอช 2 - 9 พบว่าค่าพีเอชมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดติดผิวสีน้ำชะมูลฝอย โดยมีการดูดติดผิวสูงสุดที่พีเอช 8 เท่ากับ ร้อยละ 39.27 และเกิดการตกตะกอนจากการปรับพีเอช เท่ากับ ร้อยละ 19.68 คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดสีทั้งหมด เท่ากับ ร้อยละ 58.96

ถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 : ทำการทดลองที่พีเอช 2 - 9 พบว่าค่าพีเอชมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดติดผิวสีน้ำชะมูลฝอย โดยมีการดูดติดผิวสูงสุดที่พีเอช 8 เท่ากับ ร้อยละ 73.85 และเกิดการตกตะกอนจากการปรับพีเอช เท่ากับ ร้อยละ 18.96 คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัดสีทั้งหมด เท่ากับ ร้อยละ 92.81

2) เวลาสัมผัสที่เหมาะสม

ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม : ทำการทดลองที่ระยะเวลาสัมผัส 0 – 240 นาที พบว่าถ่านกัมมันต์จะมีการดูดติดผิวอย่างรวดเร็ว โดยที่ระยะเวลาสัมผัส 5 – 240 นาที มีผลต่อการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยไม่มากนัก อยู่ในช่วงร้อยละ 52.80 – 61.78 และมีการกำจัดสีมากที่สุดที่ระยะเวลาสัมผัส 90 นาที เท่ากับร้อยละ 61.78

ถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 : ทำการทดลองที่ระยะเวลาสัมผัส 0 – 240 นาที พบว่าถ่านกัมมันต์จะมีการดูดติดผิวอย่างรวดเร็ว โดยที่ระยะเวลาสัมผัส 5 – 240 นาที มีผลต่อการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยไม่มากนัก อยู่ในช่วงร้อยละ 84.12 – 92.08 และมีการกำจัดสีมากที่สุดที่ระยะเวลาสัมผัส 120 นาที เท่ากับร้อยละ 92.08

3) ไอโซเทอมการดูดติดผิว

จากผลการศึกษาโดยใช้สมการไอโซเทอมการดูดติดผิวในการทำนายประสิทธิภาพการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยโดยใช้ถ่านกัมมันต์ พบว่า ไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชมีค่า R^2 มากกว่าไอโซ-เทอมแบบแลงมัวร์ ดังนั้นไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชจึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาเป็นตัวแทนในการทำนายกลไกการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยมากกว่าไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ ซึ่งจากการคำนวณพบว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากเมล็ดมะขาม ซึ่งมีค่ามีค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดติดผิว (K) เท่ากับ 1.65 แพลทตินัม-โคบอลต์ต่อกรัมถ่านกัมมันต์ และมีค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานในการดูดติดผิว (1/n) เท่ากับ 0.7876 ซึ่งน้อยกว่าถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 มีค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดติดผิว (K) เท่ากับ 2.05 แพลทตินัม-โคบอลต์ต่อกรัมถ่านกัมมันต์ และมีค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานในการดูดติดผิว (1/n) เท่ากับ 0.9305 ตามลำดับ

สามารถเขียนสมการไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชของถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามได้ เท่ากับ $X/M = 1.65\ Ce^{0.7876}$ และถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 เท่ากับ $X/M = 2.05\ Ce^{0.9305}$

5.1.3 ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการฟื้นสภาพถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอย

การฟื้นสภาพถ่านกัมมันต์โดยการนำมาล้างด้วยกรดอะซิติกเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก โดยทำการทดลอง 3 ครั้ง พบว่าถ่านกัมมันต์ทั้งสองชนิดมีประสิทธิภาพในการฟื้นสภาพใกล้เคียงกัน โดยถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามนั้นมีประสิทธิภาพในการฟื้นสภาพเฉลี่ยลดลงตามลำดับครั้งที่ทำการฟื้นสภาพ โดยในครั้งแรกมีประสิทธิภาพในการฟื้นสภาพ เท่ากับ ร้อยละ 90.67 ครั้งที่สอง เท่ากับ ร้อยละ 82.02 และครั้งที่สาม เท่ากับ ร้อยละ 74.69 ส่วนถ่านกัมมันต์

Filtrasorb 300 พบว่ามีประสิทธิภาพในการฟื้นสภาพเฉลี่ยในครั้งแรก เท่ากับ ร้อยละ 95.47 ครั้งที่สอง เท่ากับ ร้อยละ 89.32 และครั้งที่สาม เท่ากับ ร้อยละ 82.78 ตามลำดับ และเมื่อคำนวณหาแนวโน้มของจำนวนครั้งที่สามารถทำการฟื้นสภาพได้ พบว่าถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามสามารถทำการฟื้นสภาพได้ 12 ครั้ง ส่วนถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 สามารถทำการฟื้นสภาพได้ 16 ครั้ง ตามลำดับ

5.1.4 ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยของถ่านกัมมันต์ในถังดูดติดผิวแบบแท่ง

ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามที่บรรจุลงในถังดูดติดผิวแบบแท่ง ที่มีระดับความสูง 120 เซนติเมตร ป้อนน้ำชะมูลฝอยที่มีค่าพีเอชเริ่มต้น เท่ากับ 8 ด้วยอัตราบรรทุกทางชลศาสตร์ เท่ากับ 0.6 ม.^{3}/ม.^{2}-ชม. โดยเก็บตัวอย่างน้ำชะมูลฝอยที่ระดับความลึก 30, 60, 90 และ 120 เซนติเมตร พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีที่จุดยุติจะมีระยะเวลาการใช้งาน 19.43, 23.55, 26.56 และ 39.80 ชั่วโมง ตามลำดับ เมื่อคำนวณเป็นปริมาตรของน้ำชะมูลฝอยที่ไหลผ่านจะได้เท่ากับ 4.85, 5.88, 6.63 และ 8.94 ลิตร

ถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 ที่บรรจุลงในถังดูดติดผิวแบบแท่ง ระดับความสูง 120 เซนติเมตร ป้อนน้ำชะมูลฝอยที่มีค่าความเข้มสีเท่ากับ 1,719.38 แพลทตินัม-โคบอลต์ ค่าพีเอชเริ่มต้นเท่ากับ 8 ด้วยอัตราบรรทุกทางชลศาสตร์ เท่ากับ 0.6 ม.^{3}/ม.^{2}-ชม. โดยเก็บตัวอย่างน้ำชะมูลฝอยที่ระดับความลึก 30, 60, 90 และ 120 เซนติเมตร พบว่ามีประสิทธิภาพการกำจัดสีที่จุดยุติ จะมีระยะเวลาการใช้งาน 27.33, 35.42, 47.80 และ 54.09 ชั่วโมง ตามลำดับ เมื่อคำนวณเป็นปริมาตรของน้ำชะมูลฝอยที่ไหลผ่านจะได้เท่ากับ 6.82, 8.84, 11.93 และ 11.94 ลิตร

5.1.5 ผลการคำนวณค่าใช้จ่ายในการผลิตถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม

จากผลการศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) ในอัตราส่วน 1:2 และเผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นสภาวะที่ถูกเลือกใช้ในการเตรียมถ่านกัมมันต์ พบว่าได้ผลผลิตโดยรวมเท่ากับร้อยละ 38.64 ดังนั้นการที่จะผลิตถ่านกัมมันต์ให้ได้ 1 กิโลกรัม จะต้องใช้เมล็ดมะขามเท่ากับ 2.59 กิโลกรัม มีค่าใช้จ่ายในการผลิตเบื้องต้นซึ่งคิดจากค่าเมล็ดมะขาม ค่าไฟฟ้าของเตาเผา และค่าสารซิงค์คลอไรด์ เท่ากับ 186.62 บาท หรือคิดเป็นราคาค่าใช้จ่ายเท่ากับ 73.71 บาท ต่อผลผลิตถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม 1 ลิตร ถูกกว่าถ่าน Filtrasorb 300 ซึ่งขายในท้องตลาดราคาลิตรละ 150.00 บาท แต่ถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยที่ดีกว่าถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามร้อยละ 25.12

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) ศึกษาการเตรียมถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามที่กระตุ้นด้วยสารกระตุ้นอื่นๆ เช่น เกลือแกง (NaCl), กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) และอื่นๆ ซึ่งมีราคาถูกกว่าซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$) เพื่อลดต้นทุนในการผลิตถ่านกัมมันต์

2) ศึกษาวิธีการฟื้นสภาพถ่านกัมมันต์เพิ่มเติม ในการวิจัยครั้งนี้ได้ใช้กรดอะซิติก ($C_2H_4O_2$) เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักในการล้าง ควรจะมีการทดลองใช้กรดชนิดอื่นๆ และทดลองใช้ความเข้มข้นต่างๆกัน หรือใช้วิธีการฟื้นสภาพถ่านกัมมันต์ด้วยความร้อน แล้วทำการเปรียบเทียบคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ได้หลังการฟื้นสภาพ

3) ศึกษาการบำบัดน้ำชะมูลฝอยเบื้องต้นก่อนเข้าระบบดูดติดผิวแบบแท่ง เช่น การทำให้ตกตะกอนโดยใช้สารโคแอกกูแลนท์ หรือใช้วิธีบำบัดทางชีววิทยาก่อนการดูดติดผิวด้วยถ่านกัมมันต์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

เกรียงศักดิ์ อุดมสินโรจน์. วิศวกรรมประปา. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพมหานคร: มิตรนราการพิมพ์, 2542.

เกศรา นุตาลัย. รายงานการวิจัยการผลิตถ่านกัมมันต์จากดินพรุในห้องปฏิบัติการ. รายงานฉบับที่ 1 โครงการวิจัยที่ ภ30-14 โครงการวิจัยและพัฒนาดินพรุเพื่อประโยชน์ทางอุตสาหกรรม, กรุงเทพมหานคร: สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2531.

เทอดพงศ์ ศรีสุขพันธุ์. การศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำชะมูลฝอยโดยใช้ดินและปุ๋ยหมักเป็นวัสดุกรอง. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2545.

ธเรศ ศรีสถิตย์, ปนัดดา คำรัตน์ และวรรธนา วงศ์สุด. ประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากกากขี้แป้งของโรงงานน้ำยางข้น ในการกำจัดตะกั่วและปรอทในน้ำเสียสังเคราะห์. วารสารวิจัยสภาวะแวดล้อม 25 (2546): 1-14.

บรรณ บูรณะชนบท. สวนมะขามหวาน. พิมพ์ครั้งที่ 1. นนทบุรี: ศูนย์ผลิตตำราเกษตรเพื่อชนบท, 2532.

มั่นสิน ตัลฑุลเวศม์. วิศวกรรมการประปา เล่ม 2. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.

ลลิดา นิทัศนจารุกุล. การกำจัดตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการดูดติดผิวโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, สหสาขาวิทยาศาสตร์สภาวะแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย , 2544.

ศิริพรรณ พันพา.ประสิทธิภาพการลดสีและซีโอดีในน้ำชะมูลฝอยด้วยถ่านกัมมันต์ที่ผลิตในประเทศ. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2544.

อธิชัย นพแก้ว. การใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดติดผิวโลหะหนักจากน้ำชะมูลฝอยที่ผ่านบ่อเก็บกัก. วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.

อุตสาหกรรม, กระทรวง. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. กรุงเทพมหานคร: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2532. (อัดสำเนา)

ภาษาอังกฤษ

American Public Health Association. Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water 20th Edition. Washington DC, 1998.

American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Color of Clear Liquids, ASTM D1209. Annual Book of ASTM standard 06,04. Philadelphia: ASTM, 2000.

Andreottola, G., and Cannas, P. Chemical and biological characteristics of landfill leachate. , pp. 65-88. in Christensen, T.H.; Cossan, R. and Stegman, R. Land of waste :Leachate. Elsevier science publishers. 1992.

Artiola, F.J., and Fuller, W.H. Humic substances in landfill leachates. Journal of environmental quality II (1982): 663-669.

Chain, E.S.K., and Dewalle, F.B. Sanitary landfill leachate and their treatment. Journal of environmental engineering division, ASCE 102 (1976): 411-431. Cited in Ingkaphak S. Performance of COD and color removal from landfill leachate by adsorption process. Master's Thesis, Chulalongkorn University, Bangkok, 1996.

Chain, E.S.K., and Dewalle, F.B. Evalution of leachate treatment vol.2 : Biological and physical-chemical processes. USEPA.EPA-600/2-77-186 b (1977): 245.

Cheremisinoff, P.N., and Morresi. Carbon adsorption Handbook. Michigan: Ann Arbor Science, 1978.

Christensen, T.H.; Cossu, R.; and Stegmann, R. Landfilling of waste : Leachate. England: Elsevier science publishers, 1992.

Cossu, R., Serra, R., and Muntoni, A. Physio-chemical treatment of leachate., pp. 265-304. in Christensen, T.H. Cossu, R. and Stegmann, R. Landfill of waste : Leachate. England: Elsevier science publishers, 1992.

Eckenfelder, W.W. Applications of adsorption to wastewater treatment. Tennessee: Enviro Press, 1981.

Faust, S.D., and Aly, O.M. Adsorption process of water treatment. United States of America: Butterworth Publishes, 1987.

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

Hassler, J.W. Purification with activated carbon. 3rd ed. New York: Chemical Publishing, 1974.

Kang, K.H., Shin, H.S., and Park, H. Characterization of humic substance present in landfill leachates with different landfill ages and its implication. Water Research No.36 (March 2002): 4023-4032.

King, P.H., and Elassen, R.E. Integrated Solid Waste management. Consulting edition. Singapore: McGraw-Hill, 1993.

Kurniawan, T.A., Lo, W.H., and Chan, G.Y. Degradation of recalcitrant compounds from stabilization landfill leachate using acombination of ozone-GAC adsorbtion treatment. Journal of Hazardous Materials (March 2006)

Lee, M.C., Snoeyink, V.L., and Crittenden ,J.C. Activated carbon adsorption of humic substrates. JAWWA 73,8 (August 1981): 440-454.

Lee, M.C.; Snoeyink, V.L.; and Crittenden, J.C. Activated carbon beds to remove humic substantces. Journal of environmental engineering division, ASCE 109,3 (June 1983): 631-645.

Lema, J.M., Mendez, R., and Blazgnez. Characteristics of landfill leachates and alternatives for their treatment : a review water. Air and soil pollution 40 (1988): 223-250.

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

Martin, R.J., and N_G, W.J. The repeated exhaustion and chemical regeneration of activated carbon. Water Research 21,8 (1986): 961-965

McCreary, J.J., and Snoeyink, V.L. Characterization and activated carbon adsorption several humic substance. Water Research 14,2 (February 1980): 157-160.

Mihelcic, R.J. Fundamentals of environmental engineering. New York: John Wiley and Sons, 1999.

Morewe, B., Ramteke, D.S., and Vogelpohl, A. Activated carbon column performance studies of biologically treated landfill leachate. Chemical Engineering and Processing 34 (1995): 299-303

Neufeld, R.D., and Yodnane, P. Enhanced wastewater purification via the addition of granular coals and chars to activated sludge. Journal of water pollution control federation 50,3 (1978): 559-568.

Orfao, J. J. M., Antunes, F. J. A., and Figueiredo, J. L. Pyrolysis kinetics of lignocellulosic materials three independent reactions model. Fuel 78 (1999): 349-358.

Prabhanjan, H., and Zakiuddin Ali, S. Studies on rheological properties of tamarind kernel powder, its derivatives and their blends with maize starch. Elsevier Science 28,3 (November 1995): 245-253.

Randtke, S.J., and Snoeyink, V.L. Evaluating GAC adsorptive capacity. JAWWA 75 (1993): 406- 413.

Smisek, M., and Cernyn, S. Activated carbon manufacture properties and application. Czechoslovakia: Prague Elsevier, 1970.

Stegmann, R. Landfill water balance in dynatechy. Internation symposium on anaerobic digestion. 3rd Edition. Boston: Cambridge, 1983.

Stevenson, F.J. Humus chemistry: Genesis, composition, reactions. New York: John Wiley and Sons, 1982.

Qasim, S., and Walter, C. Sanitary landfill leachate : generation, control, and treatment. California: Lancaster technomic Publishing, 1994.

Tchobanoglous, G.H., Theisen, and Vilgil, S.A. Intergrated solid waste management. International edition. Singapore: McGraw-Hill Book, 1993.

Valencia, G., and Gloyna, E.F. On the synthesis of activated column design data. Texas: Bureau of Engineering Research., 1972, p.235. Cited in Ingkaphak S. Performance of COD and color removal from landfill leachate by adsorption process. Master's Thesis, Chulalongkorn University, Bangkok, 1996.

Weber, W.J. Physicochemical processes for water quality control. United States of America: John Wiley and Sons, 1972.

Yehaskel, A. Activated carbon : Manufacture and regeneration. New Jersey: Noyes data Corporation, 1978.

ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.

วิธีการวัดสีของน้ำในหน่วยแพลทตินัมโคบอลต์ (Pt-Co)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิธีการวัดสีของน้ำในหน่วยแพลทตินัมโคบอลต์ (Standard Test Method for Color of Clear Liquids, ASTM D1209-00)

1) เครื่องมือ

1.1 เครื่องสเปคโครโฟโตมิเตอร์ (Spectrophotometer) กับ Absorption Cell ขนาดความกว้าง 10 มิลลิเมตร และสามารถวัดได้ที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 200 ถึง 1,000 นาโนเมตร

1.2 ระบบกรอง

- Filtration Flasks ขนาด 500 มิลลิลิตร
- Bushner Funnel No.180/70
- กระดาษกรอง Glass Fiber Filter GF/C (ขนาดรูพรุน 1.2 ไมครอน)

2) วิธีการ

การวัดสีในหน่วยแพลทตินัมโคบอลต์ ใช้สำหรับการวัดสีของน้ำที่เกิดจากสารอินทรีย์ตามธรรมชาติ ซึ่งสามารถเตรียมสารละลายมาตรฐานแพลทตินัมโคบอลต์ เพื่อใช้เปรียบเทียบสีมาตรฐานในหน่วย แพลทตินัมโคบอลต์ (Pt-Co Unit) กับค่าแอบซอบแบนซ์ (Absorbance) ที่วิเคราะห์ได้จากเครื่องสเปคโตรโฟโตรมิเตอร์ ดังนี้

2.1 วิธีเตรียมสารละลายมาตรฐานแพลทตินัม-โคบอลต์

- ละลายสารโพแทสเซียมคลอโรแพลทติเนท (Potassium Choroplatinate, K_2PtCl_6) 1.246 กรัม และผลึกโคบอลต์คลอไรด์ (Cobalt Chloride, $CoCl_2.H_2O$) 1 กรัม ในน้ำกลั่นที่มีกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (HCl) อยู่ 100 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรของสารละลายให้เป็น 1 ลิตร จะได้สารละลายที่มีความเข้มสี 500 หน่วย
- เจือจางสาระลายมาตรฐานที่เตรียมได้จากขั้นแรก ดังตารางที่ ก.1

ตาราง ก.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานสีที่ความเข้มสีต่างๆ

จำนวนมิลลิลิตรของสารละลายมาตรฐาน เจือจางด้วยน้ำกลั่น ให้เป็น 50 มิลลิลิตร	สีในหน่วยแพลทตินัม-โคบอลต์ (Pt-Co)
0	0
2.5	25
5	50
10	100
15	150
20	200
25	250

ตาราง ก.1 การเตรียมสารละลายมาตรฐานสีที่ความเข้มสีต่างๆ (ต่อ)

จำนวนมิลลิลิตรของสารละลายมาตรฐาน เจือจางด้วยน้ำกลั่น ให้เป็น 50 มิลลิลิตร	สีในหน่วยแพลทตินัม-โคบอลต์ (Pt-Co)
30	300
35	350
40	400
45	450
50	500

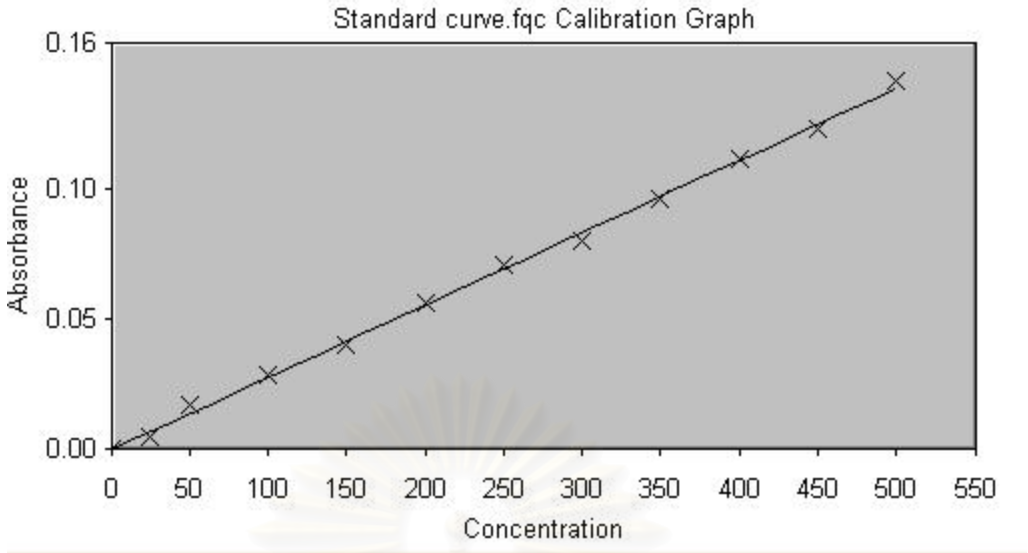
2.2 นำสารละลายมาตรฐานแพลทตินัมโคบอลต์ ซึ่งมีความเข้มของสีแตกต่างกัน จาก 0 ถึง 500 ไปอ่านค่าแอบซอบแบนซ์ (Absorbance) จากเครื่องสเปคโตรโฟโตรมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 455 นาโนเมตร ซึ่งเป็นความยาวคลื่นที่โดมิแนนท์สูงสุดสำหรับสีของน้ำซะมูลฝอย สร้างกราฟมาตรฐานระหว่างค่าแอบซอบแบนซ์กับค่าความเข้มสีในหน่วยแพลทตินัมโคบอลต์ เพื่อใช้เทียบความเข้มสีของน้ำตัวอย่าง ได้ดังรูปที่ ก.1 – ก.2

A = 0.0003 x Conc (Factor = 3600.2324)
Selected Fit : Linear to Zero
Coefficient : 0.998220
Sum of Residuals : (<0.0001)

Standard	Conc.	Use	455.0nm	Errors
Standard01	0.000	Yes	0.000	None
Standard02	25.000	Yes	0.005	None
Standard03	50.000	Yes	0.017	None
Standard04	100.000	Yes	0.029	None
Standard05	150.000	Yes	0.040	None
Standard06	200.000	Yes	0.056	None
Standard07	250.000	Yes	0.071	None
Standard08	300.000	Yes	0.080	None
Standard09	350.000	Yes	0.097	None
Standard10	400.000	Yes	0.111	None
Standard11	450.000	Yes	0.123	None
Standard12	500.000	Yes	0.142	None

All calculations have been performed to double precision as defined by ANSI/IEEE STD 754-1985 but have been rounded for display purposes.

รูปที่ ก.1 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสีหน่วยแพลทตินัมโคบอลต์ (Pt-Co) กับค่าแอบซอบ-แบนซ์ (Absorbance) ที่ความยาวคลื่น 455 นาโนเมตร



รูปที่ ก.2 ความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มสีหน่วยแพลทตินัมโคบอลต์ (Pt-Co) กับค่าแอบซอบ-แบนซ์ (Absorbance) ที่ความยาวคลื่น 455 นาโนเมตร

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข.

วิธีการหาค่าไอโอดีนนัมเบอร์

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิธีการหาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ (Standard Test Method for Determination of Iodine Number of Activated Carbon, ASTM D4607-94)

1) **เครื่องมือ**

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

2) **สารเคมี และวิธีเตรียม**

2.1 สารละลายกรดไฮโดรคลอริก ร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก

- ผสมกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นจำนวน 70 มิลลิลิตร ลงในน้ำกลั่น 550 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน

2.2 สารละลายมาตรฐานโพแตสเซียมไอโอเดต 0.1 นอร์มัล

- ชั่งโพตัสเซียมไอโอเดต (Primary Standard Grade Potassium Iodate, KIO_3) ที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 110 ± 5 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น จำนวน 3.5667 ± 0.1 มิลลิกรัม ละลายในน้ำกลั่นปริมาณ 100 มิลลิลิตร ถ่ายสารละลายลงในขวดปรับปริมาตร (Volumetric Flask) ขนาด 1 ลิตร ทำให้เจือจางด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1,000 ลิตร

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 (Volumn 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 ผสมให้เข้ากันเติมน้ำกลั่น 2-5 มิลลิลิตร คนให้ของแข็งละลาย ค่อยๆเติมน้ำทีละน้อย (ครั้งละประมาณ 5 มิลลิลิตร) จนกระทั่งได้สารละลายประมาณ 40 มิลลิลิตร ทิ้งสารละลายไว้อย่างน้อย 4 ชั่วโมง คนเป็นระยะ เพื่อให้แน่ใจว่าของแข็งละลายหมด

ถ่ายสารละลายลงในขวดปรับปริมาตร (Volumetric Flask) ขนาด 1 ลิตรทำให้เจือจางด้วยน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร เก็บสารละลายนี้ไว้ในขวดสีชา ตรวจสอบความเข้มข้นกับสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต 0.1 N

2.5 สารละลายแป้ง

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

3) การตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลาย

3.1 การตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต

ใช้ปิเปตดูดสารละลายโปแตสเซียมไอโอเดต (KIO_3) 25 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ เติมโปแตสไอโอไดน์ (KI) 2.0 ± 0.01 กรัม เขย่าจนละลาย ปิเปตกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 5 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ แล้วไตเตรตทันทีทันทีด้วยสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต 0.1 N เมื่อสีของสารละลายไอโอดีนจางลงจนกระทั่งเป็นสีเหลืองอ่อน (ใกล้ถึงจุด End Point) หยดน้ำแป้ง 2-3 หยด สารละลายเป็นสีน้ำเงิน ไตเตรตต่อจนสารละลายไม่มีสี บันทึกปริมาตรของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ใช้ ทำการไตเตรตซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้ง คำนวณหาความเข้มข้นสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตโดยใช้สูตร

$$N_1 = (P \times R)/S$$

เมื่อ N_1 = ความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต, นอร์มัล

P = ปริมาตรของสารละลายโปแตสเซียมไอโอเดต, มิลลิลิตร

R = ความเข้มข้นของสารละลายโปแตสเซียมไอโอเดต, นอร์มัล

S = ปริมาตรสารละลายโซเดียไธโอซัลเฟตที่ใช้, มิลลิลิตร

3.2 การตรวจสอบความเข้มข้นของสารละลายไอโอดีน

ใช้ปิเปตดูดสารละลายไอโอดีน 25 มิลลิลิตร ใส่ในขวดรูปชมพู่ แล้วไตเตรตทันทีด้วยสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟต 0.1 N เมื่อสีของสารละลายไอโอดีนจางลงจนกระทั่งเป็นสีเหลืองอ่อน (ใกล้ถึงจุด End Point) หยดน้ำแป้ง 2-3 หยด สารละลายจะเป็นสีน้ำเงิน ไตเตรตต่อจนได้สารละลายไม่มีสี บันทึกปริมาตรของสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ใช้ ทำการไตเตรตซ้ำอย่างน้อย 3 ครั้ง คำนวณหาความเข้มข้นสารละลายไอโอดีนโดยใช้สูตร

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

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 มาอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 145 ถึง 155 °C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง แล้วทิ้งให้เย็นในถังดูดความชื้น (ตามวิธีของ Standard test Methods for Moisture in Activated Carbon, ASTM D2867)

4.3 ประมาณค่า Iodine Number ของถ่านตัวอย่าง เพื่อนำไปคำนวณหา Carbon Dosages หรือค่าน้ำหนักของถ่านที่จะใช้ในการทดลอง 3 ค่าน้ำหนัก โดยใช้สูตรในข้อที่ 5.2 (หรือตามค่าประมาณน้ำหนักตัวอย่างในตารางที่ ข.1) ชั่งถ่านที่อบแห้งแล้วตามน้ำหนักที่คำนวณได้ ในขวดรูปชมพู่ ขนาด 250 มิลลิลิตร

4.4 ปิเปต 5% สารละลายกรดไฮโดรคลอริก ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่แต่ละใบ ปิดจุก เขย่าเบาๆเพื่อให้ตัวอย่างเปียกทั่ว เปิดฝา แล้วนำไปตั้งบน Hot Plate ในตู้ดูดควัน ให้ความร้อนของเหลวในภาชนะ ทิ้งให้เดือดต่อประมาณ 30 ± 12 วินาที เพื่อไล่ซัลเฟอร์ในตัวอย่าง หลังจากนั้นนำตัวอย่างออก แล้วทิ้งให้เย็นจนถึงอุณหภูมิห้อง

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

4.6 ปิเปตสารละลายที่กรองได้ 50 มิลลิลิตร ลงในขวดรูปชมพู่ ไตเตรตสารละลายด้วยสารละลายมาตรฐานโซเดียมไธโอซัลเฟต 0.1 N จนกระทั่งสารละลายเป็นสีเหลืองอ่อน เติมสารละลายน้ำแป้งลงไป 2 มิลลิลิตรแล้วไตเตรต่อจนกระทั่งสารละลายในขวดชมพู่ไม่มีสี บันทึกปริมาตรสารละลายโซเดียมไธโอซัลเฟตที่ใช้

5) การคำนวณ

5.1 การคำนวณหาค่า Iodine Number ใช้สูตร

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

โดยที่

X/M = Iodine Adsorption per Gram of Carbon (มิลลิกรัมต่อกรัม)

A = $(N_2 \times 12{,}693)$ เมื่อ N_2 = ความเข้มข้นไอโอดีน (นอร์มัล)

B = $(N_1 \times 126.93)$ เมื่อ N_1 = ความเข้มข้น $Na_2S_2O_3$ (นอร์มัล)

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

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

โดยที่

M = น้ำหนักของถ่าน (กรัม)

A = $N_2 \times 12{,}693$

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 ข.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	1,550	0.729	0.639	0.549
350	3.258	2.829	2.430	1,600	0.706	0.619	0.531
400	2.824	2.475	2.126	1,650	0.684	0.600	0.515
450	2.510	2.200	1.890	1,700	0.664	0.582	0.500
500	2.259	1.980	1.701	1,750	0.645	0.566	0.486
550	2.054	1.800	1.546	1,800	0.628	0.550	0.472
600	1.883	1.650	1.417	1,850	0.610	0.535	0.460
650	1.738	1.523	1.308	1,900	0.594	0.521	0.447
700	1.614	1.414	1.215	1,950	0.579	0.508	0.436
750	1.506	1.320	1.134	2,000	0.565	0.495	0.425
800	1.412	1.237	1.063	2,050	0.551	0.483	0.415
850	1.329	1.164	1.000	2,100	0.538	0.471	0.405
900	1.255	1.100	0.945	2,150	0.525	0.460	0.396
950	1.189	1.042	0.895	2,200	0.513	0.450	0.388
1,000	1.130	0.990	0.850	2,250	0.502	0.440	0.378
1,050	1.076	0.943	0.810	2,300	0.491	0.430	0.370
1,100	1.027	0.900	0.773	2,350	0.481	0.421	0.362
1,150	0.982	0.861	0.739	2,400	0.471	0.412	0.354
1,200	0.941	0.825	0.709	2,450	0.461	0.404	0.347
1,250	0.904	0.792	0.680	2,500	0.452	0.396	0.340
1,300	0.869	0.761	0.654	2,550	0.443	0.388	0.333
1,350	0.837	0.733	0.630	2,600	0.434	0.381	0.327
1,400	0.807	0.707	0.607	2,650	0.426	0.374	0.321
1,450	0.799	0.683	0.586	2,700	0.418	0.367	0.315
1,500	0.753	0.666	0.567	2,750	0.411	0.360	0.309

ภาคผนวก ค.

ผลการเตรียมถ่านกัมมันต์และศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิต

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.1 ผลผลิตถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามโดยการล้างด้วยน้ำสะอาดและล้างเพิ่มด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 5% โดยน้ำหนัก

อุณหภูมิ	อัตราส่วน	ล้างด้วยน้ำสะอาด				ล้างเพิ่มด้วยกรด HCl 5%			
(°C)	ถ่าน : $ZnCl_2$	น้ำหนักก่อนเผา (g)	น้ำหนักหลังเผา (g)	%ผลผลิต	%ผลผลิตเฉลี่ย	น้ำหนักก่อนเผา (g)	น้ำหนักหลังเผา (g)	%ผลผลิต	%ผลผลิตเฉลี่ย
500	1 : 0	20.0325	14.1250	70.51	70.40	20.0492	12.6493	63.09	64.12
	1 : 0	20.0509	14.0937	70.29		20.0838	13.0843	65.15	
	1 : 1	20.1038	16.8931	84.03	84.21	20.1038	15.0891	75.06	74.93
	1 : 1	20.0322	16.9053	84.39		20.0819	15.0221	74.80	
	1 : 2	20.0043	16.5656	82.81	82.22	20.0388	15.6885	78.29	78.09
	1 : 2	20.0812	16.3922	81.63		20.0286	15.6002	77.89	
	1 : 3	20.0846	16.4198	81.75	81.13	20.0856	15.1174	75.26	76.97
	1 : 3	20.1032	16.1844	80.51		20.1101	15.8217	78.68	
	1 : 4	20.0632	15.7327	78.42	78.77	20.0842	14.6771	73.08	74.09
	1 : 4	20.0089	15.8319	79.12		20.0215	15.0366	75.10	
600	1 : 0	20.0173	15.5446	77.66	71.54	20.1099	9.6422	47.95	49.34
	1 : 0	20.0004	13.0851	65.42		20.0917	10.1930	50.73	
	1 : 1	20.1029	15.5507	77.36	76.29	20.0730	14.9008	74.23	75.24
	1 : 1	20.0045	15.0483	75.22		20.1026	15.3276	76.25	
	1 : 2	20.1837	15.7581	78.07	76.36	20.0832	15.1193	75.28	75.25
	1 : 2	20.1001	15.0040	74.65		20.0860	15.1080	75.22	
	1 : 3	20.0234	15.3994	76.91	76.93	20.0612	14.8482	74.01	74.69
	1 : 3	20.0030	15.3929	76.95		20.0271	15.0935	75.37	
	1 : 4	20.0112	15.0519	75.22	75.83	20.0118	14.7948	73.93	74.98
	1 : 4	20.0088	15.2953	76.44		20.1003	15.2822	76.03	

ตารางที่ ค.1 ผลผลิตถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขามโดยการล้างด้วยน้ำสะอาดและล้างเพิ่มด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 5% โดยน้ำหนัก (ต่อ)

อุณหภูมิ	อัตราส่วน	ล้างด้วยน้ำสะอาด				ล้างเพิ่มด้วยกรด HCl 5%			
(°C)	ถ่าน : $ZnCl_2$	น้ำหนักก่อนเผา (g)	น้ำหนักหลังเผา (g)	%ผลผลิต	%ผลผลิตเฉลี่ย	น้ำหนักก่อนเผา (g)	น้ำหนักหลังเผา (g)	%ผลผลิต	%ผลผลิตเฉลี่ย
700	1 : 0	20.0054	11.6425	58.20	56.62	20.0807	9.2627	46.13	47.67
	1 : 0	20.0075	11.0128	55.04		20.0788	9.8813	49.21	
	1 : 1	20.0008	14.5704	72.85	73.76	20.0612	14.5227	72.39	73.68
	1 : 1	20.0091	14.9410	74.67		20.0475	15.0292	74.97	
	1 : 2	20.0832	14.5754	72.57	72.26	20.0180	15.6996	78.43	74.15
	1 : 2	20.0140	14.3991	71.95		20.0128	13.9835	69.87	
	1 : 3	20.1002	14.8068	73.67	73.87	20.0735	13.9512	69.50	69.19
	1 : 3	20.0921	14.8832	74.07		20.0063	13.7802	68.88	
	1 : 4	20.0079	14.8716	74.33	73.28	20.1201	13.8802	68.99	69.09
	1 : 4	20.0871	14.5092	72.23		20.0185	13.8515	69.19	
800	1 : 0	20.0008	10.7482	53.74	55.04	20.0421	9.1715	45.76	46.70
	1 : 0	20.0450	11.2936	56.34		20.0008	9.5281	47.64	
	1 : 1	20.0920	14.0531	69.94	70.59	20.0051	13.4732	67.35	68.22
	1 : 1	20.0006	14.2477	71.24		20.0862	13.8778	69.09	
	1 : 2	20.0438	14.2514	71.10	70.60	20.0006	14.1908	70.95	69.49
	1 : 2	20.0137	14.0293	70.10		20.0299	13.6260	68.03	
	1 : 3	20.0993	14.0138	69.72	68.79	20.1036	13.3760	66.54	68.22
	1 : 3	20.0578	13.6107	67.86		20.0017	13.9821	69.90	
	1 : 0	20.0054	11.6425	58.20	56.62	20.0807	9.2627	46.13	47.67
	1 : 0	20.0075	11.0128	55.04		20.0788	9.8813	49.21	

ตารางที่ ค.2 ผลการหาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม เผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และล้างด้วยน้ำสะอาด

อัตราส่วน	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			C		Iodine Number		
ถ่าน : $ZnCl_2$	น้ำหนักถ่าน (g)	$Na_2S_2O_3$ (ml)	X/M	น้ำหนักถ่าน (g)	$Na_2S_2O_3$ (ml)	X/M	C1	C2	ครั้งที่ 1 (mg/g)	ครั้งที่ 2 (mg/g)	เฉลี่ย (mg/g)
1 : 0	2.259	22.25	286.84	2.259	22.00	289.93	0.045	0.044	146	120	133
	1.980	23.80	305.40	1.980	23.55	308.93	0.048	0.047			
	1.701	25.50	327.59	1.701	25.05	334.97	0.051	0.050			
1 : 1	2.259	21.30	298.59	2.259	21.55	295.50	0.043	0.043	174	164	169
	1.980	23.70	306.81	1.980	23.85	304.70	0.047	0.048			
	1.701	24.90	337.44	1.701	25.05	334.97	0.050	0.050			
1 : 2	2.259	15.90	289.93	2.259	15.55	369.66	0.032	0.031	326	333	330
	1.980	19.80	308.93	1.980	19.60	364.64	0.040	0.039			
	1.701	21.10	334.97	1.701	20.75	405.56	0.042	0.042			
1 : 3	2.259	15.50	370.28	2.259	16.05	363.48	0.031	0.032	317	306	312
	1.980	19.00	373.10	1.980	19.55	365.34	0.038	0.039			
	1.701	20.20	414.59	1.701	20.60	408.03	0.040	0.041			
1 : 4	2.259	18.70	330.73	2.259	18.45	333.82	0.037	0.037	234	238	236
	1.980	21.60	336.43	1.980	21.20	342.07	0.043	0.042			
	1.701	22.60	375.19	1.701	22.50	376.84	0.045	0.045			

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ค.3 ผลการหาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม เผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส และล้างด้วยน้ำสะอาด

อัตราส่วน	**ครั้งที่ 1**			**ครั้งที่ 2**			C		Iodine Number		
ถ่าน : $ZnCl_2$	**น้ำหนักถ่าน (g)**	$Na_2S_2O_3$ (ml)	X/M	**น้ำหนักถ่าน (g)**	$Na_2S_2O_3$ (ml)	X/M	C1	C2	**ครั้งที่ 1 (mg/g)**	**ครั้งที่ 2 (mg/g)**	**เฉลี่ย (mg/g)**
1 : 0	2.259	21.70	293.64	2.259	22.00	289.93	0.043	0.044	135	128	132
	1.980	23.45	310.34	1.980	23.40	311.04	0.047	0.047			
	1.701	24.90	337.44	1.701	25.15	333.33	0.050	0.050			
1 : 1	2.259	15.55	369.66	2.259	15.15	374.61	0.031	0.030	287	291	289
	1.980	17.00	401.30	1.980	16.65	406.24	0.034	0.033			
	1.701	19.55	425.26	1.701	19.05	433.47	0.039	0.038			
1 : 2	2.259	14.90	289.93	2.259	14.35	384.50	0.030	0.029	352	351	352
	1.980	16.45	311.04	1.980	16.95	402.01	0.033	0.034			
	1.701	20.40	333.33	1.701	20.00	417.88	0.041	0.040			
1 : 3	2.259	15.60	369.05	2.259	15.65	368.43	0.031	0.031	332	328	330
	1.980	18.90	374.51	1.980	18.65	378.03	0.038	0.037			
	1.701	21.25	397.36	1.701	21.20	398.18	0.043	0.042			
1 : 4	2.259	15.20	373.99	2.259	15.00	376.46	0.030	0.030	331	336	334
	1.980	17.80	390.02	1.980	17.65	392.14	0.036	0.035			
	1.701	20.60	408.03	1.701	20.45	410.49	0.041	0.041			

ตารางที่ ค.4 ผลการหาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม เผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส และล้างด้วยน้ำสะอาด

อัตราส่วน	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			C		Iodine Number		
ถ่าน : $ZnCl_2$	น้ำหนักถ่าน (g)	$Na_2S_2O_3$ (ml)	X/M	น้ำหนักถ่าน (g)	$Na_2S_2O_3$ (ml)	X/M	C1	C2	ครั้งที่ 1 (mg/g)	ครั้งที่ 2 (mg/g)	เฉลี่ย (mg/g)
1 : 0	2.259	20.75	305.38	2.259	20.40	309.71	0.042	0.041	157	171	164
	1.980	22.00	330.79	1.980	21.70	335.02	0.044	0.043			
	1.701	24.05	351.39	1.701	23.85	354.67	0.048	0.048			
1 : 1	2.259	9.30	446.92	2.259	9.55	443.83	0.019	0.019	453	447	450
	1.980	12.10	470.41	1.980	12.40	466.18	0.024	0.025			
	1.701	14.70	504.88	1.701	15.05	499.14	0.029	0.030			
1 : 2	2.259	8.50	309.71	2.259	8.15	461.14	0.017	0.016	486	496	491
	1.980	10.40	335.02	1.980	10.10	498.62	0.021	0.020			
	1.701	13.00	354.67	1.701	12.65	538.54	0.026	0.025			
1 : 3	2.259	8.80	453.10	2.259	8.45	457.43	0.018	0.017	476	487	482
	1.980	10.60	491.57	1.980	10.25	496.50	0.021	0.021			
	1.701	13.60	522.94	1.701	13.10	531.15	0.027	0.026			
1 : 4	2.259	9.10	449.40	2.259	8.90	451.87	0.018	0.018	460	464	462
	1.980	11.60	477.46	1.980	11.55	478.17	0.023	0.023			
	1.701	14.90	501.60	1.701	14.65	505.71	0.030	0.029			

ตารางที่ ค.5 ผลการหาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม เผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และล้างด้วยน้ำสะอาด

อัตราส่วน	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			C		Iodine Number		
ถ่าน : $ZnCl_2$	น้ำหนักถ่าน (g)	$Na_2S_2O_3$ (ml)	X/M	น้ำหนักถ่าน (g)	$Na_2S_2O_3$ (ml)	X/M	C1	C2	ครั้งที่ 1 (mg/g)	ครั้งที่ 2 (mg/g)	เฉลี่ย (mg/g)
1 : 0	2.259	20.50	308.48	2.259	20.45	309.09	0.041	0.041	187	173	180
	1.980	21.85	332.90	1.980	21.80	333.61	0.044	0.044			
	1.701	24.20	348.93	1.701	23.95	353.03	0.048	0.048			
1 : 1	2.259	8.20	460.52	2.259	8.00	462.99	0.016	0.016	471	475	473
	1.980	11.15	483.81	1.980	10.90	487.33	0.022	0.022			
	1.701	16.10	481.90	1.701	15.85	486.01	0.032	0.032			
1 : 2	2.259	7.60	309.09	2.259	8.00	462.99	0.015	0.016	515	500	508
	1.980	9.55	333.61	1.980	10.00	500.03	0.019	0.020			
	1.701	12.00	353.03	1.701	12.55	540.18	0.024	0.025			
1 : 3	2.259	8.50	456.81	2.259	8.60	455.58	0.017	0.017	481	480	481
	1.980	10.10	498.62	1.980	10.15	497.91	0.020	0.020			
	1.701	14.40	509.81	1.701	14.40	509.81	0.029	0.029			
1 : 4	2.259	7.40	470.41	2.259	7.25	472.27	0.015	0.015	491	496	494
	1.980	10.20	497.21	1.980	10.00	500.03	0.020	0.020			
	1.701	14.25	512.27	1.701	13.95	517.20	0.029	0.028			

ตารางที่ ค.6 ผลการหาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม เผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส และล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 5%

อัตราส่วน	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			C		Iodine Number		
ถ่าน : $ZnCl_2$	น้ำหนักถ่าน (g)	$Na_2S_2O_3$ (ml)	X/M	น้ำหนักถ่าน (g)	$Na_2S_2O_3$ (ml)	X/M	C1	C2	ครั้งที่ 1 (mg/g)	ครั้งที่ 2 (mg/g)	เฉลี่ย (mg/g)
1 : 0	2.259	19.45	321.45	2.259	19.65	318.98	0.039	0.039	153	158	156
	1.980	20.55	351.24	1.980	20.60	350.53	0.041	0.041			
	1.701	22.40	378.48	1.701	22.65	374.37	0.045	0.045			
1 : 1	2.259	5.70	491.43	2.259	5.50	493.90	0.011	0.011	539	543	541
	1.980	8.50	521.18	1.980	8.35	523.30	0.017	0.017			
	1.701	11.65	554.95	1.701	11.45	558.24	0.023	0.023			
1 : 2	2.259	5.60	318.98	2.259	5.85	489.57	0.011	0.012	590	586	588
	1.980	7.55	350.53	1.980	7.60	533.88	0.015	0.015			
	1.701	9.70	374.37	1.701	9.90	583.68	0.019	0.020			
1 : 3	2.259	5.95	488.33	2.259	6.25	484.63	0.012	0.013	554	548	551
	1.980	8.30	524.00	1.980	8.60	519.77	0.017	0.017			
	1.701	10.85	568.09	1.701	11.00	565.63	0.022	0.022			
1 : 4	2.259	5.10	498.84	2.259	4.90	501.31	0.010	0.010	562	566	564
	1.980	8.00	528.23	1.980	7.85	530.35	0.016	0.016			
	1.701	10.50	573.83	1.701	10.30	577.12	0.021	0.021			

ตารางที่ ค.7 ผลการหาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม เผาที่อุณหภูมิ 600 องศาเซลเซียส และล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 5%

อัตราส่วน	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			C		Iodine Number		
ถ่าน : $ZnCl_2$	น้ำหนักถ่าน (g)	$Na_2S_2O_3$ (ml)	X/M	น้ำหนักถ่าน (g)	$Na_2S_2O_3$ (ml)	X/M	C1	C2	ครั้งที่ 1 (mg/g)	ครั้งที่ 2 (mg/g)	เฉลี่ย (mg/g)
1 : 0	2.259	19.20	324.55	2.259	19.00	327.02	0.038	0.038	176	183	180
	1.980	21.30	340.66	1.980	21.15	342.78	0.043	0.042			
	1.701	22.40	378.48	1.701	22.25	380.94	0.045	0.045			
1 : 1	2.259	4.20	509.97	2.259	4.35	508.11	0.008	0.009	568	566	567
	1.980	7.00	542.34	1.980	7.20	539.52	0.014	0.014			
	1.701	10.55	573.01	1.701	10.60	572.19	0.021	0.021			
1 : 2	2.259	4.50	327.02	2.259	4.15	510.59	0.009	0.008	609	619	614
	1.980	6.70	342.78	1.980	6.40	550.80	0.013	0.013			
	1.701	9.00	380.94	1.701	8.65	604.20	0.018	0.017			
1 : 3	2.259	3.75	515.53	2.259	4.10	511.20	0.008	0.008	575	565	570
	1.980	4.80	573.36	1.980	5.20	567.72	0.010	0.010			
	1.701	10.70	570.55	1.701	11.20	562.34	0.021	0.022			
1 : 4	2.259	5.80	490.19	2.259	6.00	487.72	0.012	0.012	586	578	582
	1.980	7.80	531.05	1.980	8.00	528.23	0.016	0.016			
	1.701	9.75	586.15	1.701	10.00	582.04	0.020	0.020			

ตารางที่ ค.8 ผลการหาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม เผาที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส และล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 5%

อัตราส่วน	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			C		Iodine Number		
ถ่าน : $ZnCl_2$	น้ำหนักถ่าน (g)	$Na_2S_2O_3$ (ml)	X/M	น้ำหนักถ่าน (g)	$Na_2S_2O_3$ (ml)	X/M	C1	C2	ครั้งที่ 1 (mg/g)	ครั้งที่ 2 (mg/g)	เฉลี่ย (mg/g)
1 : 0	2.259	19.75	317.75	2.259	19.80	317.13	0.040	0.040	170	172	171
	1.980	21.40	339.25	1.980	21.40	339.25	0.043	0.043			
	1.701	23.10	366.99	1.701	23.20	365.34	0.046	0.046			
1 : 1	2.259	3.50	518.62	2.259	3.65	516.77	0.007	0.007	628	619	624
	1.980	5.80	559.26	1.980	6.00	556.44	0.012	0.012			
	1.701	8.25	610.77	1.701	8.55	605.85	0.017	0.017			
1 : 2	2.259	2.65	317.13	2.259	2.70	528.51	0.005	0.005	718	729	724
	1.980	4.35	339.25	1.980	4.30	580.42	0.009	0.009			
	1.701	6.10	365.34	1.701	6.00	647.71	0.012	0.012			
1 : 3	2.259	2.20	534.69	2.259	2.05	536.54	0.004	0.004	680	688	684
	1.980	3.90	586.06	1.980	3.70	588.88	0.008	0.007			
	1.701	6.65	637.04	1.701	6.40	641.14	0.013	0.013			
1 : 4	2.259	3.25	521.71	2.259	3.30	521.09	0.007	0.007	679	682	681
	1.980	5.15	568.43	1.980	5.20	567.72	0.010	0.010			
	1.701	7.05	630.47	1.701	7.00	631.29	0.014	0.014			

ตารางที่ ค.9 ผลการหาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม เผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 5%

อัตราส่วน	ครั้งที่ 1			ครั้งที่ 2			C		Iodine Number		
ถ่าน : $ZnCl_2$	น้ำหนักถ่าน (g)	$Na_2S_2O_3$ (ml)	X/M	น้ำหนักถ่าน (g)	$Na_2S_2O_3$ (ml)	X/M	C1	C2	ครั้งที่ 1 (mg/g)	ครั้งที่ 2 (mg/g)	เฉลี่ย (mg/g)
1 : 0	2.259	20.40	309.71	2.259	20.25	311.57	0.041	0.041	171	167	169
	1.980	21.70	335.02	1.980	21.50	337.84	0.043	0.043			
	1.701	23.85	354.67	1.701	23.60	358.78	0.048	0.047			
1 : 1	2.259	3.30	521.09	2.259	3.20	522.33	0.007	0.006	654	657	656
	1.980	5.20	567.72	1.980	5.10	569.13	0.010	0.010			
	1.701	7.65	620.62	1.701	7.55	622.26	0.015	0.015			
1 : 2	2.259	2.20	311.57	2.259	2.55	530.36	0.004	0.005	745	738	742
	1.980	3.90	337.84	1.980	4.25	581.12	0.008	0.009			
	1.701	5.35	358.78	1.701	5.90	649.35	0.011	0.012			
1 : 3	2.259	2.90	526.04	2.259	2.60	529.75	0.006	0.005	715	710	713
	1.980	4.80	573.36	1.980	4.70	574.77	0.010	0.009			
	1.701	6.15	645.25	1.701	5.90	649.35	0.012	0.012			
1 : 4	2.259	3.20	522.33	2.259	3.55	518.00	0.006	0.007	716	690	703
	1.980	5.10	569.13	1.980	5.60	562.08	0.010	0.011			
	1.701	6.30	642.78	1.701	6.80	634.58	0.013	0.014			

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ง.

ผลการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.1 ผลการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยด้วยถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามที่ pH ต่างๆ

pH	การทดลอง	น้ำหนักถ่าน (g.)			pH สุดท้าย			ความเข้มสีก่อนเขย่า (Pt-Co)			สีที่เหลือหลังตกตะกอน (Pt-Co)			สีที่เหลือทั้งหมด (Pt-Co)		
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3
2	Blank	-	-	-	4.88	4.84	4.91	2,444.45	2,391.32	2,397.29	1,170.83	1,167.14	1,173.28	-	-	-
	Sample	0.5001	0.5000	0.5003	4.90	4.93	5.08	2,444.45	2,391.32	2,397.29	-	-	-	485.46	463.56	480.64
3	Blank	-	-	-	5.54	5.53	5.61	2,444.45	2,391.32	2,397.29	1,250.47	1,246.86	1,249.10	-	-	-
	Sample	0.5008	0.5011	0.5013	5.60	5.74	5.79	2,444.45	2,391.32	2,397.29	-	-	-	606.30	620.68	615.10
4	Blank	-	-	-	6.32	6.38	6.35	2,444.45	2,391.32	2,397.29	1,295.75	1,300.02	1,297.91	-	-	-
	Sample	0.5012	0.5002	0.5014	6.38	6.41	6.43	2,444.45	2,391.32	2,397.29	-	-	-	595.26	661.61	655.29
5	Blank	-	-	-	7.07	7.03	7.03	2,444.45	2,391.32	2,397.29	1,529.65	1,501.12	1,515.57	-	-	-
	Sample	0.5001	0.5000	0.5004	7.11	7.12	7.17	2,444.45	2,391.32	2,397.29	-	-	-	805.31	830.72	864.18
6	Blank	-	-	-	7.90	7.91	7.80	2,444.45	2,391.32	2,397.29	1,768.73	1,764.00	1,770.90	-	-	-
	Sample	0.5007	0.5008	0.5003	8.03	8.03	8.08	2,444.45	2,391.32	2,397.29	-	-	-	1,030.49	1,065.65	981.91
7	Blank	-	-	-	8.85	8.88	8.91	2,444.45	2,391.32	2,397.29	1,923.02	1,919.08	1,921.07	-	-	-
	Sample	0.5012	0.5006	0.5016	8.41	8.43	8.39	2,444.45	2,391.32	2,397.29	-	-	-	1,050.67	1,079.66	1,045.21
8	Blank	-	-	-	9.66	9.71	9.68	2,444.45	2,391.32	2,397.29	1,933.18	1,921.35	1,954.24	-	-	-
	Sample	0.5009	0.5001	0.5013	9.39	9.33	9.38	2,444.45	2,391.32	2,397.29	-	-	-	982.17	1,009.86	976.22
9	Blank	-	-	-	9.67	9.65	9.67	2,444.45	2,391.32	2,397.29	1,935.31	1,972.39	1,910.63	-	-	-
	Sample	0.5000	0.5004	0.5011	9.46	9.45	9.42	2,444.45	2,391.32	2,397.29	-	-	-	1,012.60	987.21	996.13
ปกติ	Blank	-	-	-	9.61	9.67	9.71	2,444.45	2,391.32	2,397.29	1,923.10	1,955.32	1,984.95	-	-	-
	Sample	0.5003	0.5003	0.5007	9.32	9.40	9.42	2,444.45	2,391.32	2,397.29	-	-	-	982.82	1,006.77	1,035.35

หมายเหตุ : pH ปกติ มีค่า 7.88 - 8.13

ตารางที่ ง.2 ผลการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยด้วยถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 ที่ pH ต่างๆ

pH	การทดลอง	น้ำหนักถ่าน (g.)			pH สุดท้าย			ความเข้มสีก่อนเขย่า (Pt-Co)			สีที่เหลือหลังตกตะกอน (Pt-Co)			สีที่เหลือทั้งหมด (Pt-Co)		
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3
2	Blank	-	-	-	4.88	4.90	4.87	1,955.71	1,946.98	2,043.05	910.07	926.04	917.20	-	-	-
	Sample	0.5007	0.5004	0.5000	5.01	5.05	5.06	1,955.71	1,946.98	2,043.05	-	-	-	0.00	0.00	0.00
3	Blank	-	-	-	5.53	5.61	5.45	1,955.71	1,946.98	2,043.05	996.75	978.38	984.78	-	-	-
	Sample	0.5007	0.5000	0.5001	5.64	5.70	5.61	1,955.71	1,946.98	2,043.05	-	-	-	75.48	70.89	71.53
4	Blank	-	-	-	6.34	6.38	6.34	1,955.71	1,946.98	2,043.05	1,030.08	1,097.55	1,101.14	-	-	-
	Sample	0.5008	0.5001	0.5009	6.40	6.44	6.43	1,955.71	1,946.98	2,043.05	-	-	-	118.21	133.03	124.42
5	Blank	-	-	-	7.02	7.03	7.07	1,955.71	1,946.98	2,043.05	1,254.62	1,287.21	1,219.00	-	-	-
	Sample	0.5001	0.5004	0.5000	7.20	7.24	7.20	1,955.71	1,946.98	2,043.05	-	-	-	183.12	179.87	185.88
6	Blank	-	-	-	7.90	7.91	7.80	1,955.71	1,946.98	2,043.05	1,496.36	1,414.82	1,475.63	-	-	-
	Sample	0.5002	0.5009	0.5003	8.13	8.09	8.17	1,955.71	1,946.98	2,043.05	-	-	-	139.39	157.99	121.06
7	Blank	-	-	-	8.90	8.87	8.87	1,955.71	1,946.98	2,043.05	1,557.80	1,571.95	1,604.90	-	-	-
	Sample	0.5002	0.5006	0.5010	9.19	9.23	9.32	1,955.71	1,946.98	2,043.05	-	-	-	155.85	158.76	155.30
8	Blank	-	-	-	9.66	9.68	9.63	1,955.71	1,946.98	2,043.05	1,604.29	1,578.93	1,634.56	-	-	-
	Sample	0.5011	0.5009	0.5003	9.75	9.77	9.73	1,955.71	1,946.98	2,043.05	-	-	-	141.65	143.76	142.07
9	Blank	-	-	-	9.66	9.62	9.68	1,955.71	1,946.98	2,043.05	1,612.13	1,578.60	1,634.82	-	-	-
	Sample	0.5013	0.5004	0.5007	9.85	9.75	9.83	1,955.71	1,946.98	2,043.05	-	-	-	149.73	155.01	163.17
ปกติ	Blank	-	-	-	9.23	9.34	9.47	1,955.71	1,946.98	2,043.05	1,596.42	1,586.49	1,604.41	-	-	-
	Sample	0.5008	0.5007	0.5006	9.44	9.52	9.60	1,955.71	1,946.98	2,043.05	-	-	-	151.83	150.82	149.75

หมายเหตุ : pH ปกติ มีค่า 7.83 - 8.0

ตารางที่ ง.3 ผลการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยด้วยถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามที่เวลาสัมผัสต่างๆกัน

เวลา (นาที)	การทดลอง	น้ำหนักถ่าน (g.)			pH สุดท้าย			ความเข้มสีก่อนเขย่า (Pt-Co)			สีที่เหลือหลังตกตะกอน (Pt-Co)			สีที่เหลือทั้งหมด (Pt-Co)		
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3
0	Blank	-	-	-	8.10	8.08	8.04	2,408.71	2,455.94	2,431.89	2,396.95	2,419.84	2,006.22	-	-	-
	Sample	0.5008	0.5011	0.5005	8.12	8.20	8.16	2,408.71	2,455.94	2,431.89	-	-	-	1,972.66	2,082.16	1,943.96
5	Blank	-	-	-	8.87	8.80	9.02	2,408.71	2,455.94	2,431.89	2,124.25	2,048.78	2,097.85	-	-	-
	Sample	0.5004	0.5001	0.5002	8.41	8.35	8.39	2,408.71	2,455.94	2,431.89	-	-	-	1,175.94	1,124.23	1,179.80
10	Blank	-	-	-	8.85	8.93	9.04	2,408.71	2,455.94	2,431.89	2,090.30	2,014.28	2,131.13	-	-	-
	Sample	0.5001	0.5000	0.5006	8.40	8.44	8.40	2,408.71	2,455.94	2,431.89	-	-	-	1,075.73	1,069.04	1,093.83
15	Blank	-	-	-	9.04	9.12	9.12	2,408.71	2,455.94	2,431.89	1,957.61	1,904.90	1,964.07	-	-	-
	Sample	0.5007	0.5002	0.5000	8.64	8.59	8.64	2,408.71	2,455.94	2,431.89	-	-	-	1,018.35	998.72	1,079.11
30	Blank	-	-	-	9.23	9.28	9.29	2,408.71	2,455.94	2,431.89	1,924.87	1,914.35	1,912.74	-	-	-
	Sample	0.5006	0.5005	0.5001	8.86	8.85	8.90	2,408.71	2,455.94	2,431.89	-	-	-	987.67	962.59	973.01
60	Blank	-	-	-	9.64	9.55	9.58	2,408.71	2,455.94	2,431.89	1,895.68	1,877.96	1,878.20	-	-	-
	Sample	0.5003	0.5001	0.5006	9.35	9.35	9.34	2,408.71	2,455.94	2,431.89	-	-	-	972.17	959.86	966.22
90	Blank	-	-	-	9.53	9.66	9.60	2,408.71	2,455.94	2,431.89	1,907.34	1,921.19	1,897.65	-	-	-
	Sample	0.5007	0.5002	0.5000	9.36	9.41	9.40	2,408.71	2,455.94	2,431.89	-	-	-	923.08	934.68	930.82
120	Blank	-	-	-	9.68	9.57	9.70	2,408.71	2,455.94	2,431.89	1,875.56	1,912.63	1,887.25	-	-	-
	Sample	0.5002	0.5004	0.5009	9.48	9.46	9.49	2,408.71	2,455.94	2,431.89	-	-	-	987.82	970.09	977.46
240	Blank	-	-	-	9.72	9.67	9.76	2,408.71	2,455.94	2,431.89	1,894.45	1,893.75	1,919.50	-	-	-
	Sample	0.5010	0.5007	0.5009	9.55	9.47	9.57	2,408.71	2,455.94	2,431.89	-	-	-	975.33	971.42	969.97

ตารางที่ ง.4 ผลการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยด้วยถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 ที่เวลาสัมผัสต่างๆกัน

เวลา (นาที)	การทดลอง	น้ำหนักถ่าน (g.)			pH สุดท้าย			ความเข้มสีก่อนเขย่า (Pt-Co)			สีที่เหลือหลังตกตะกอน (Pt-Co)			สีที่เหลือทั้งหมด (Pt-Co)		
		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3
0	Blank	-	-	-	8.01	8.01	8.06	1,890.05	1,900.62	1,857.13	1,795.03	1,723.39	1,765.82	-	-	-
	Sample	0.5012	0.5006	0.5011	9.04	9.09	9.03	1,890.05	1,900.62	1,857.13	-	-	-	1,153.33	1,073.15	991.47
5	Blank	-	-	-	8.81	8.85	8.85	1,890.05	1,900.62	1,857.13	1,597.26	1,602.07	1,564.77	-	-	-
	Sample	0.5009	0.5001	0.5004	9.04	9.09	9.03	1,890.05	1,900.62	1,857.13	-	-	-	297.14	298.87	300.85
10	Blank	-	-	-	8.95	8.96	8.93	1,890.05	1,900.62	1,857.13	1,622.68	1,577.94	1,544.34	-	-	-
	Sample	0.5007	0.5008	0.5006	9.15	9.16	9.20	1,890.05	1,900.62	1,857.13	-	-	-	275.16	271.32	272.95
15	Blank	-	-	-	9.07	9.10	9.11	1,890.05	1,900.62	1,857.13	1,487.12	1,478.06	1,515.50	-	-	-
	Sample	0.5001	0.5013	0.5017	9.21	9.28	9.26	1,890.05	1,900.62	1,857.13	-	-	-	247.75	250.05	246.98
30	Blank	-	-	-	9.27	9.24	9.28	1,890.05	1,900.62	1,857.13	1,486.30	1,529.05	1,499.57	-	-	-
	Sample	0.5007	0.5008	0.5003	9.36	9.39	9.37	1,890.05	1,900.62	1,857.13	-	-	-	211.62	211.49	210.69
60	Blank	-	-	-	9.58	9.57	9.60	1,890.05	1,900.62	1,857.13	1,517.01	1,509.64	1,473.90	-	-	-
	Sample	0.5012	0.5010	0.5004	9.68	9.63	9.64	1,890.05	1,900.62	1,857.13	-	-	-	177.21	176.29	176.38
90	Blank	-	-	-	9.65	9.65	9.64	1,890.05	1,900.62	1,857.13	1,476.61	1,480.05	1,462.18	-	-	-
	Sample	0.5008	0.5011	0.5014	9.75	9.74	9.78	1,890.05	1,900.62	1,857.13	-	-	-	175.07	176.04	175.51
120	Blank	-	-	-	9.65	9.66	9.60	1,890.05	1,900.62	1,857.13	1,505.19	1,478.54	1,478.26	-	-	-
	Sample	0.5008	0.5003	0.5009	9.78	9.80	9.79	1,890.05	1,900.62	1,857.13	-	-	-	149.72	149.09	148.55
240	Blank	-	-	-	9.64	9.67	9.63	1,890.05	1,900.62	1,857.13	1,500.54	1,458.07	1,498.03	-	-	-
	Sample	0.5011	0.5008	0.5009	9.75	9.80	9.81	1,890.05	1,900.62	1,857.13	-	-	-	154.26	155.80	153.78

ตารางที่ ง.5 ผลการทดสอบไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชและแลงมัวร์ของถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม

น้ำหนักถ่าน (g.)	pH			ความเข้มสีเริ่มต้น (Pt-Co)	ความเข้มสีที่จุดสมดุล,		ความเข้มสีที่จุดสมดุล, เฉลี่ย, Ce (Pt-Co/l)	แปลงหน่วยเป็น Pt-Co	ความเข้มสีที่กำจัดได้,	X/M (Pt-Co/ g.Carbon)	1/(X/M)	1/Ce	Log X/M	Log Ce
	In	Out1	Out2		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2								
0.00	8.04	9.52	9.56	2,386.85	2,386.85	2,386.85	2,386.85	119.34	-	-	-	-	-	-
0.01	8.04	9.54	9.56	2,386.85	2,154.98	2,147.36	2,151.17	107.56	11.78	1,178.40	0.0008	0.0093	3.0713	3.3327
0.02	8.04	9.56	9.59	2,386.85	2,031.63	2,045.11	2,038.37	101.92	17.42	871.20	0.0011	0.0098	2.9401	3.3093
0.04	8.04	9.52	9.55	2,386.85	1,847.30	1,866.75	1,857.03	92.85	26.49	662.28	0.0015	0.0108	2.8210	3.2688
0.1	8.04	9.51	9.55	2,386.85	1,384.32	1,397.94	1,391.13	69.56	49.79	497.86	0.0020	0.0144	2.6971	3.1434
0.2	8.04	9.48	9.52	2,386.85	1,118.99	1,108.38	1,113.69	55.68	63.66	318.29	0.0031	0.0180	2.5028	3.0468
0.4	8.04	9.40	9.44	2,386.85	892.17	886.22	889.20	44.46	74.88	187.21	0.0053	0.0225	2.2723	2.9490
1.0	8.04	9.33	9.34	2,386.85	312.26	311.79	312.03	15.60	103.74	103.74	0.0096	0.0641	2.0160	2.4942
2.0	8.04	9.26	9.31	2,386.85	55.75	56.54	56.15	2.81	116.54	58.27	0.0172	0.3562	1.7654	1.7493
4.0	8.04	9.17	9.20	2,386.85	0.00	0.00	0.00	0.00	119.34	29.84	0.0335	-	1.4747	-

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ง.6 ผลการทดสอบไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชและแลงมัวร์ของถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300

น้ำหนักถ่าน (g.)	pH			ความเข้มสีเริ่มต้น (Pt-Co)	ความเข้มสีที่จุดสมดุล,		ความเข้มสีที่จุดสมดุล, เฉลี่ย, Ce (Pt-Co/l)	แปลงหน่วยเป็น Pt-Co	ความเข้มสีที่กำจัดได้,	X/M (Pt-Co/ g.Carbon)	1/(X/M)	1/Ce	Log X/M	Log Ce
	In	Out1	Out2		ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2								
0.00	8.02	9.62	9.66	1,902.39	1,902.39	1,902.39	1,902.39	95.12	-	-	-	-	-	-
0.01	8.02	9.62	9.67	1,902.39	1,447.05	1,458.18	1,452.62	72.63	22.49	2,248.88	0.0004	0.0138	3.3520	3.1622
0.02	8.02	9.64	9.64	1,902.39	1,336.31	1,327.05	1,331.68	66.58	28.54	1,426.78	0.0007	0.0150	3.1544	3.1244
0.04	8.02	9.65	9.61	1,902.39	1,076.81	1,058.33	1,067.57	53.38	41.74	1,043.53	0.0010	0.0187	3.0185	3.0284
0.1	8.02	9.61	9.69	1,902.39	337.28	344.73	341.01	17.05	78.07	780.69	0.0013	0.0587	2.8925	2.5328
0.2	8.02	9.73	9.71	1,902.39	278.40	301.51	289.96	14.50	80.62	403.11	0.0025	0.0690	2.6054	2.4623
0.4	8.02	9.69	9.71	1,902.39	212.55	211.28	211.92	10.60	84.52	211.31	0.0047	0.0944	2.3249	2.3262
1.0	8.02	9.75	9.74	1,902.39	0.00	0.00	0.00	0.00	95.12	95.12	0.0105	-	1.9783	-
2.0	8.02	9.84	9.85	1,902.39	0.00	0.00	0.00	0.00	95.12	47.56	0.0210	-	1.6772	-
4.0	8.02	9.91	9.90	1,902.39	0.00	0.00	0.00	0.00	95.12	23.78	0.0421	-	1.3762	-

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ.

ผลการฟื้นสภาพถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการดูดติดผิวสีน้ำชะมูลฝอย

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ จ.1 ผลการฟื้นสภาพถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามที่ผ่านการดูดติดสีน้ำชะมูลฝอย

ครั้งที่ทำการฟื้นสภาพ	น้ำหนักถ่าน (g.)			pHหลังเขย่า			สีก่อนเขย่า (Pt-Co)			สีหลังเขย่า (Pt-Co)			ประสิทธิภาพเฉลี่ย (%)	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	การกำจัดสี	การฟื้นสภาพ
ก่อนฟื้นสภาพ	0.5007	0.5012	0.5003	9.35	9.38	9.42	2,378.40	2,375.35	2,359.44	928.63	871.91	933.84	61.56	-
	1.0027	1.0043	1.0065	9.23	9.30	9.28	2,378.40	2,375.35	2,359.44	292.34	344.17	317.16	86.59	-
	2.0024	2.0010	2.0088	9.18	9.24	9.20	2,378.40	2,375.35	2,359.44	66.41	58.54	82.20	97.09	-
	4.0094	4.0035	4.0096	9.13	9.17	9.16	2,378.40	2,375.35	2,359.44	0.00	0.00	0.00	100.00	-
	Blank			9.59	9.53	9.58	2,378.40	2,375.35	2,359.44	1,884.63	1,899.02	1,951.09	19.37	-
1	0.4963	0.4872	0.4855	9.43	9.38	9.34	2,403.67	2,341.92	2,390.21	1,121.74	1,081.02	1,131.26	53.28	89.70
	0.9792	0.9728	0.9690	9.29	9.29	9.31	2,403.67	2,341.92	2,390.21	454.60	482.55	497.46	79.89	90.44
	1.9934	1.9825	1.9947	9.24	9.28	9.24	2,403.67	2,341.92	2,390.21	318.66	310.31	298.78	87.00	89.29
	3.8232	3.7004	3.6872	9.18	9.25	9.18	2,403.67	2,341.92	2,390.21	0.00	0.00	0.00	100.00	93.25
	Blank			9.65	9.63	9.64	2,403.67	2,341.92	2,390.21	1,867.08	1,922.23	1,916.39	20.02	-
2	0.4023	0.4192	0.3936	9.41	9.43	9.42	2,440.19	2,393.22	2,416.76	1,302.77	1,262.93	1,244.02	47.46	77.89
	0.9552	0.9473	0.9528	9.33	9.33	9.38	2,440.19	2,393.22	2,416.76	842.28	826.82	827.15	65.57	83.76
	1.6481	1.6833	1.6037	9.30	9.26	9.25	2,440.19	2,393.22	2,416.76	319.49	332.00	376.99	85.81	81.70
	3.2521	3.3944	3.2568	9.21	9.22	9.21	2,440.19	2,393.22	2,416.76	99.13	86.95	112.53	95.88	84.74
	Blank			9.66	9.67	9.59	2,440.19	2,393.22	2,416.76	1,846.92	1,914.70	1,918.50	21.64	-
3	0.3750	0.3821	0.3806	9.48	9.43	9.40	2,404.06	2,346.93	2,462.05	1,896.22	1,821.86	1,837.91	22.95	70.75
	0.8753	0.8934	0.8736	9.36	9.33	9.32	2,404.06	2,346.93	2,462.05	1,231.86	1,312.40	1,278.72	46.97	75.30
	1.4984	1.5261	1.5690	9.29	9.33	9.33	2,404.06	2,346.93	2,462.05	929.03	978.33	963.79	60.17	69.31
	3.0532	3.1953	3.0948	9.21	9.25	9.20	2,404.06	2,346.93	2,462.05	375.89	379.62	378.56	84.27	83.40
	Blank			9.58	9.55	9.65	2,404.06	2,346.93	2,462.05	1,895.85	1,920.11	1,888.16	20.88	-

ตารางที่ จ.2 ผลการฟื้นสภาพถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 ที่ผ่านการดูดติดสีน้ำชะมูลฝอย

ครั้งที่ทำการฟื้นสภาพ	น้ำหนักถ่าน (g.)			pHหลังเขย่า			สีก่อนเขย่า (Pt-Co)			สีหลังเขย่า (Pt-Co)			ประสิทธิภาพเฉลี่ย (%)	
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	การกำจัดสี	การฟื้นสภาพ
ก่อนฟื้นสภาพ	0.5041	0.5020	0.5011	9.71	9.67	9.68	1,859.44	1,803.91	1,847.82	147.40	129.61	159.84	92.08	-
	1.0004	1.0032	1.0107	9.74	9.69	9.69	1,859.44	1,803.91	1,847.82	0.00	10.18	7.82	99.67	-
	2.0010	2.0103	2.0060	9.69	9.73	9.70	1,859.44	1,803.91	1,847.82	0.00	0.00	0.00	100.00	-
	4.0029	4.0081	4.0027	9.76	9.78	9.77	1,859.44	1,803.91	1,847.82	0.00	0.00	0.00	100.00	-
	Blank			9.71	9.70	9.64	1,859.44	1,803.91	1,847.82	1,451.09	1,522.81	1,451.23	19.67	-
1	0.4810	0.4702	0.4883	9.72	9.64	9.68	1,890.21	1,795.83	1,803.01	212.10	247.46	226.73	87.47	91.13
	0.9916	0.9793	0.9871	9.73	9.70	9.65	1,890.21	1,795.83	1,803.01	40.68	60.32	38.88	97.44	95.95
	1.9716	1.9434	1.9868	9.71	9.80	9.82	1,890.21	1,795.83	1,803.01	0.00	0.00	0.00	100.00	98.08
	3.9076	3.8953	3.8149	9.83	9.80	9.77	1,890.21	1,795.83	1,803.01	0.00	0.00	0.00	100.00	96.70
	Blank			9.58	9.62	9.57	1,890.21	1,795.83	1,803.01	1,472.23	1,444.28	1,483.46	19.80	-
2	0.4501	0.4532	0.4591	9.61	9.69	9.64	1,816.76	1,833.77	1,875.93	328.29	394.01	356.96	80.47	88.03
	0.9452	0.8803	0.9017	9.66	9.68	9.61	1,816.76	1,833.77	1,875.93	200.41	191.74	208.60	89.13	84.51
	1.8705	1.8970	1.8012	9.70	9.68	9.69	1,816.76	1,833.77	1,875.93	89.28	101.83	95.45	94.81	89.48
	3.7142	3.7804	3.5750	9.76	9.78	9.84	1,816.76	1,833.77	1,875.93	0.00	0.00	0.00	100.00	95.27
	Blank			9.60	9.63	9.68	1,816.76	1,833.77	1,875.93	1,418.50	1,446.83	1,462.22	21.69	-
3	0.4330	0.4146	0.4295	9.57	9.60	9.64	1,862.05	1,819.92	1,789.84	673.86	694.72	663.80	62.85	77.22
	0.9225	0.9104	0.9020	9.60	9.59	9.59	1,862.05	1,819.92	1,789.84	558.20	520.77	572.84	69.80	80.96
	1.7534	1.6893	1.7396	9.69	9.68	9.63	1,862.05	1,819.92	1,789.84	303.05	321.99	312.08	82.87	82.00
	3.6778	3.5271	3.6860	9.74	9.70	9.71	1,862.05	1,819.92	1,789.84	153.22	120.61	142.70	92.39	90.96
	Blank			9.68	9.66	9.59	1,862.05	1,819.92	1,789.84	1,458.16	1,411.80	1,472.12	20.62	-

ภาคผนวก ฉ.

การกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยของถ่านกัมมันต์โดยการทดลองแบบต่อเนื่องในถังดูดติดผิวแบบแท่ง

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ฉ.1 ผลการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยของถ่านกัมมันต์โดยการทดลองแบบต่อเนื่องในถังดูดติดผิวแบบแท่ง ที่ระดับ 30 เซนติเมตร

เวลา (ชั่วโมง)	น้ำเสียที่ผ่านการบำบัด (ลิตร)	ปริมาตรถ่านกัมมันต์ (ลิตร)	Bed Volume (BV)	ความเข้มสี (เข้า) (Pt-Co)	ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม			ถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300		
					pH (ออก)	ความเข้มสี(ออก) (Pt-Co)	การกำจัดสี (%)	pH (ออก)	ความเข้มสี(ออก) (Pt-Co)	การกำจัดสี (%)
2	0.499	0.125	4.01	1,719.38	8.21	1,111.05	35.38	8.84	409.44	76.19
3	0.749	0.125	6.01	1,719.38	8.26	1,130.82	34.23	8.80	472.02	72.55
4	0.998	0.125	8.02	1,719.38	8.63	1,146.34	33.33	9.04	582.65	66.11
5	1.248	0.125	10.02	1,719.38	8.59	1,216.72	29.23	9.25	633.70	63.14
6	1.498	0.125	12.02	1,719.38	8.53	1,295.50	24.65	9.26	694.83	59.59
8	1.997	0.125	16.03	1,719.38	8.71	1,440.47	16.22	9.29	854.64	50.29
10	2.496	0.125	20.04	1,719.38	8.44	1,480.23	13.91	9.19	912.39	46.93
12	2.995	0.125	24.05	1,719.38	8.61	1,573.85	8.46	9.25	1,017.57	40.82
14	3.494	0.125	28.05	1,719.38	8.78	1,628.11	5.31	9.33	1,145.46	33.38
16	3.994	0.125	32.06	1,719.38	8.97	1,646.09	4.26	9.44	1,221.86	28.94
18	4.493	0.125	36.07	1,719.38	8.98	1,703.54	0.92	9.27	1,427.33	16.99
20	4.992	0.125	40.08	1,719.38	8.71	1,712.60	0.39	9.27	1,515.76	11.84
24	5.990	0.125	48.09	1,719.38	8.92	1,717.27	0.12	9.32	1,689.91	1.71
28	6.989	0.125	56.11	1,719.38	8.85	1,715.76	0.21	9.34	1,714.01	0.31
32	7.987	0.125	64.12	1,719.38	8.86	1,717.28	0.12	9.34	1,718.03	0.08
36	8.986	0.125	72.14	1,719.38	8.85	1,715.43	0.23	9.41	1,719.03	0.02
48	11.981	0.125	96.18	1,719.38	8.81	1,716.83	0.15	9.45	1,715.56	0.22
60	14.976	0.125	120.23	1,719.38	8.85	1,713.99	0.31	9.46	1,718.67	0.04

ตารางที่ ฉ.2 ผลการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยของถ่านกัมมันต์โดยการทดลองแบบต่อเนื่องในถังดูดติดผิวแบบแท่ง ที่ระดับ 60 เซนติเมตร

เวลา (ชั่วโมง)	น้ำเสียที่ผ่านการบำบัด (ลิตร)	ปริมาตรถ่านกัมมันต์ (ลิตร)	Bed Volume (BV)	ความเข้มสี (เข้า) (Pt-Co)	ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม			ถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300		
					pH (ออก)	ความเข้มสี(ออก) (Pt-Co)	การกำจัดสี (%)	pH (ออก)	ความเข้มสี(ออก) (Pt-Co)	การกำจัดสี (%)
2	0.499	0.249	2.00	1,719.38	8.16	364.25	78.81	9.17	50.99	97.03
3	0.749	0.249	3.01	1,719.38	8.12	519.43	69.79	9.28	88.12	94.87
4	0.998	0.249	4.01	1,719.38	8.39	700.26	59.27	9.39	113.73	93.39
5	1.248	0.249	5.01	1,719.38	8.40	982.07	42.88	9.57	129.64	92.46
6	1.498	0.249	6.01	1,719.38	8.49	1,135.78	33.94	9.49	149.54	91.30
8	1.997	0.249	8.02	1,719.38	8.60	1,172.94	31.78	9.60	371.63	78.39
10	2.496	0.249	10.02	1,719.38	8.42	1,181.39	31.29	9.42	508.51	70.42
12	2.995	0.249	12.02	1,719.38	8.60	1,313.25	23.62	9.60	544.14	68.35
14	3.494	0.249	14.03	1,719.38	8.49	1,549.35	9.89	9.49	697.37	59.44
16	3.994	0.249	16.03	1,719.38	8.51	1,545.57	10.11	9.51	848.63	50.64
18	4.493	0.249	18.04	1,719.38	8.55	1,618.31	5.88	9.55	959.46	44.20
20	4.992	0.249	20.04	1,719.38	8.60	1,664.28	3.20	9.60	1,050.79	38.89
24	5.990	0.249	24.05	1,719.38	8.59	1,715.80	0.21	9.69	1,343.02	21.89
28	6.989	0.249	28.06	1,719.38	8.56	1,716.35	0.18	9.64	1,598.44	7.03
32	7.987	0.249	32.06	1,719.38	8.64	1,717.04	0.14	9.64	1,692.90	1.54
36	8.986	0.249	36.07	1,719.38	8.60	1,710.93	0.49	9.60	1,712.92	0.38
48	11.981	0.249	48.10	1,719.38	8.65	1,718.34	0.06	9.71	1,716.68	0.16
60	14.976	0.249	60.12	1,719.38	8.62	1,715.20	0.24	9.80	1,719.20	0.01

ตารางที่ ฉ.3 ผลการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยของถ่านกัมมันต์โดยการทดลองแบบต่อเนื่องในถังดูดติดผิวแบบแท่ง ที่ระดับ 90 เซนติเมตร

เวลา (ชั่วโมง)	น้ำเสียที่ผ่านการบำบัด (ลิตร)	ปริมาตรถ่านกัมมันต์ (ลิตร)	Bed Volume (BV)	ความเข้มสี (เข้า) (Pt-Co)	ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม			ถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300		
					pH (ออก)	ความเข้มสี(ออก) (Pt-Co)	การกำจัดสี (%)	pH (ออก)	ความเข้มสี(ออก) (Pt-Co)	การกำจัดสี (%)
2	0.499	0.374	1.34	1,719.38	7.73	133.22	92.25	9.82	4.16	99.76
3	0.749	0.374	2.00	1,719.38	7.89	172.11	89.99	9.93	25.26	98.53
4	0.998	0.374	2.67	1,719.38	7.69	204.66	88.10	9.96	40.96	97.62
5	1.248	0.374	3.34	1,719.38	8.16	346.05	79.87	9.84	76.07	95.58
6	1.498	0.374	4.01	1,719.38	8.10	506.61	70.54	9.91	85.52	95.03
8	1.997	0.374	5.34	1,719.38	7.97	852.97	50.39	9.96	143.88	91.63
10	2.496	0.374	6.68	1,719.38	7.88	1,106.55	35.64	9.88	221.20	87.13
12	2.995	0.374	8.01	1,719.38	7.94	1,146.45	33.32	10.12	298.06	82.66
14	3.494	0.374	9.35	1,719.38	7.38	1,361.34	20.82	10.07	372.20	78.35
16	3.994	0.374	10.69	1,719.38	8.05	1,536.18	10.66	10.13	506.88	70.52
18	4.493	0.374	12.02	1,719.38	8.04	1,666.68	3.07	9.95	687.06	60.04
20	4.992	0.374	13.36	1,719.38	8.11	1,705.82	0.79	10.11	712.04	58.59
24	5.990	0.374	16.03	1,719.38	8.05	1,698.60	1.21	10.06	929.18	45.96
28	6.9888	0.374	18.70	1,719.38	8.16	1,716.44	0.17	10.14	1,188.20	30.89
32	7.9872	0.374	21.37	1,719.38	8.20	1,714.00	0.31	9.98	1,346.31	21.70
36	8.9856	0.374	24.04	1,719.38	8.20	1,716.92	0.14	10.05	1,467.92	14.63
48	11.9808	0.374	32.06	1,719.38	8.28	1,718.06	0.08	10.08	1,714.10	0.31
60	14.976	0.374	40.07	1,719.38	8.37	1,719.21	0.01	9.93	1,718.56	0.05

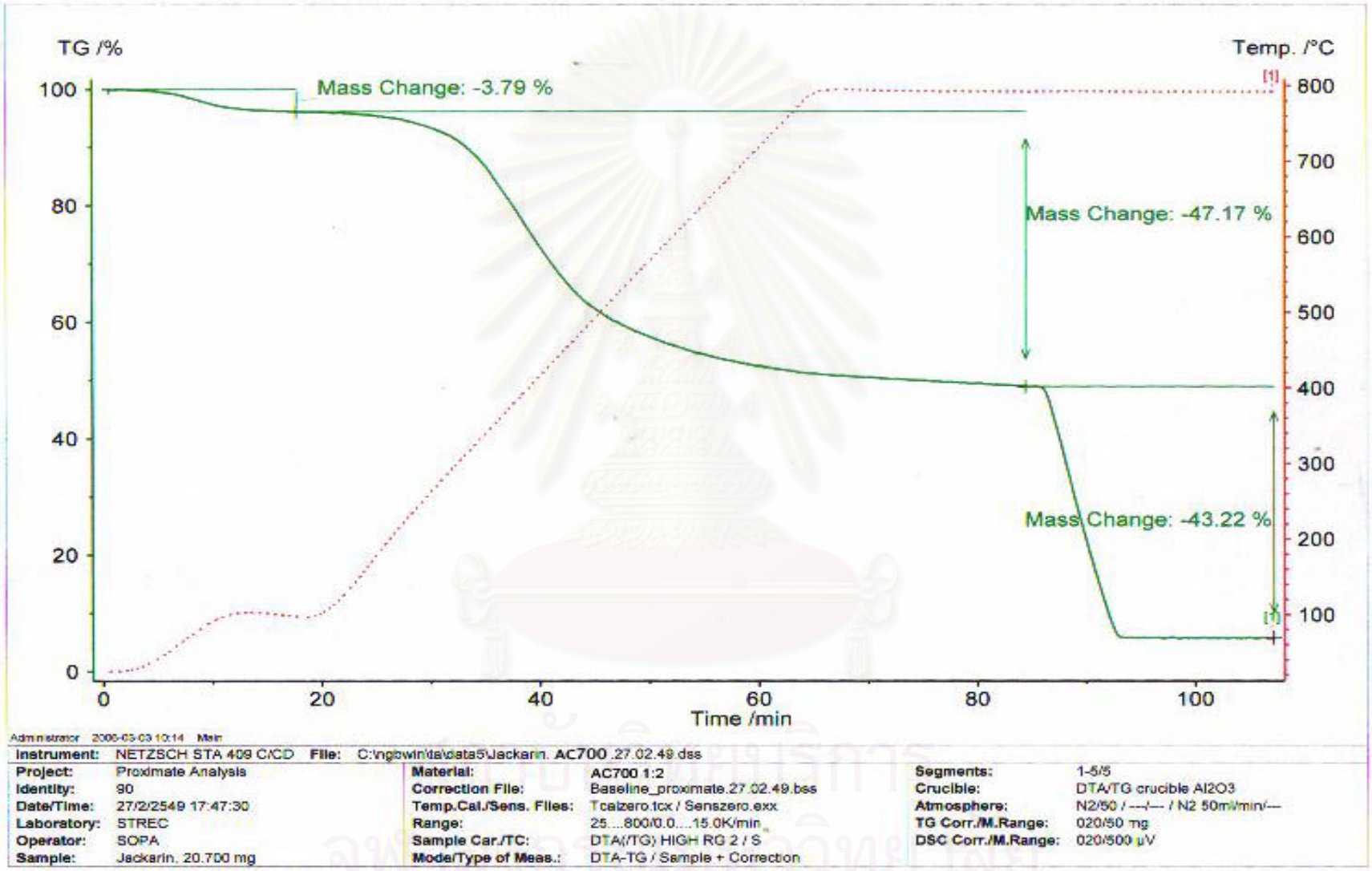
ตารางที่ ฉ.4 ผลการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยของถ่านกัมมันต์โดยการทดลองแบบต่อเนื่องในถังดูดติดผิวแบบแท่ง ที่ระดับ 120 เซนติเมตร

เวลา (ชั่วโมง)	น้ำเสียที่ผ่านการบำบัด (ลิตร)	ปริมาตรถ่านกัมมันต์ (ลิตร)	Bed Volume (BV)	ความเข้มสี (เข้า) (Pt-Co)	ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม			ถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300		
					pH (ออก)	ความเข้มสี(ออก) (Pt-Co)	การกำจัดสี (%)	pH (ออก)	ความเข้มสี(ออก) (Pt-Co)	การกำจัดสี (%)
2	0.499	0.498	1.00	1,719.38	7.84	42.14	97.55	10.04	8.92	99.48
3	0.749	0.498	1.50	1,719.38	7.93	45.24	97.37	10.03	16.24	99.06
4	0.998	0.498	2.00	1,719.38	7.84	50.68	97.05	9.94	28.17	98.36
5	1.248	0.498	2.51	1,719.38	7.72	107.13	93.77	9.95	38.54	97.76
6	1.498	0.498	3.01	1,719.38	7.90	207.26	87.95	10.06	43.38	97.48
8	1.997	0.498	4.01	1,719.38	7.92	333.07	80.63	9.99	63.10	96.33
10	2.496	0.498	5.01	1,719.38	7.97	404.33	76.48	10.10	83.26	95.16
12	2.995	0.498	6.01	1,719.38	8.02	562.58	67.28	10.02	114.01	93.37
14	3.494	0.498	7.02	1,719.38	8.13	695.67	59.54	10.13	277.04	83.89
16	3.994	0.498	8.02	1,719.38	8.11	889.47	48.27	10.14	417.25	75.73
18	4.493	0.498	9.02	1,719.38	8.17	1,106.95	35.62	9.97	573.35	66.65
20	4.992	0.498	10.02	1,719.38	8.17	1,206.08	29.85	10.17	639.89	62.78
24	5.990	0.498	12.03	1,719.38	8.22	1,448.90	15.73	10.02	881.27	48.74
28	6.9888	0.498	14.03	1,719.38	8.19	1,519.26	11.64	9.94	1,073.07	37.59
32	7.9872	0.498	16.04	1,719.38	8.24	1,656.77	3.64	10.04	1,240.65	27.84
36	8.9856	0.498	18.04	1,719.38	8.24	1,712.77	0.38	10.11	1,312.62	23.66
48	11.9808	0.498	24.06	1,719.38	8.21	1,719.33	0.00	10.15	1,715.36	0.23
60	14.976	0.498	30.07	1,719.38	8.27	1,719.12	0.02	10.06	1,719.14	0.01

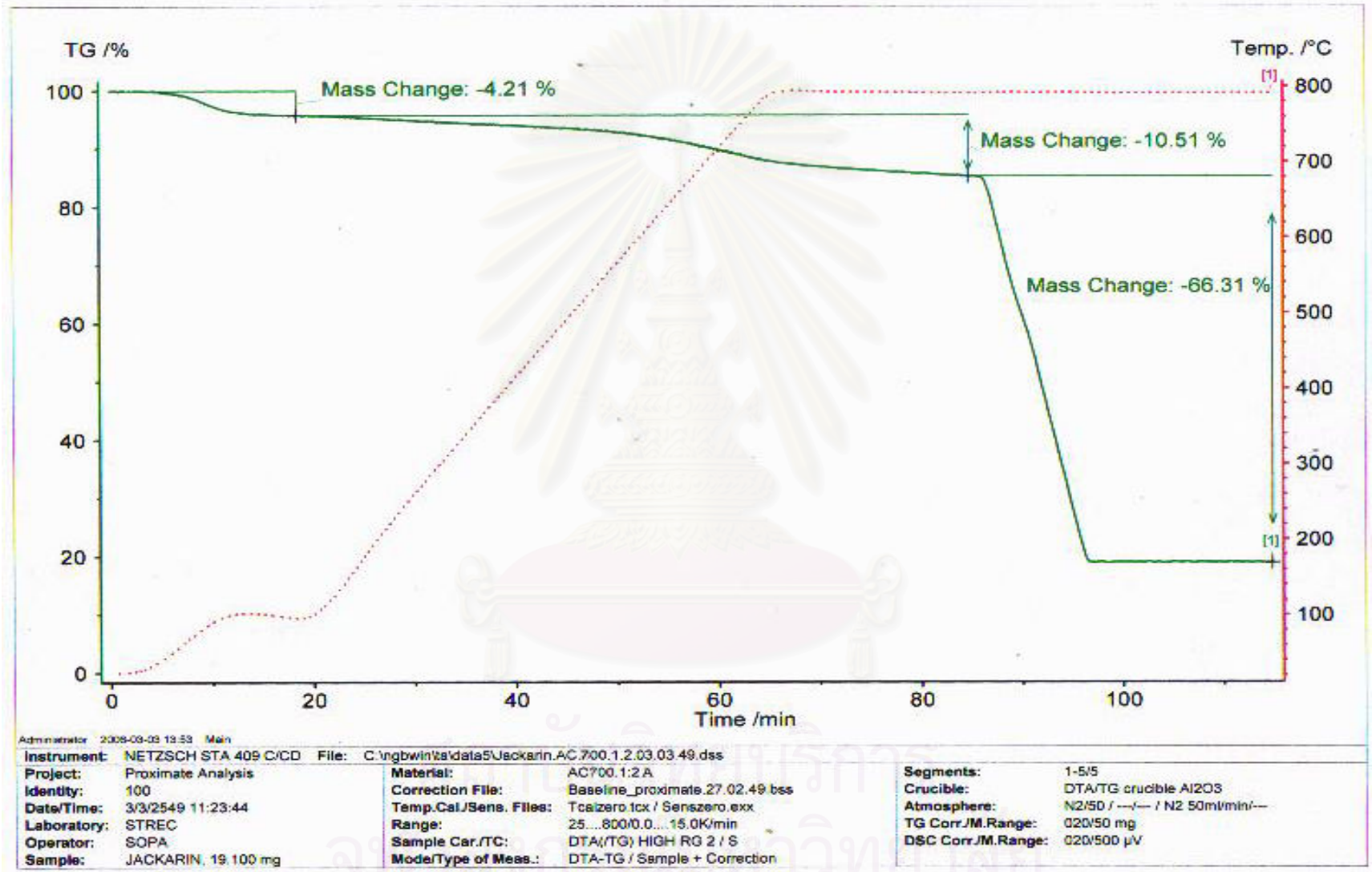
ภาคผนวก ซ.

ผลการวิเคราะห์ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามด้วยเครื่องมือ Thermal Gravimetric Analysis

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ ช.1 ผลการวิเคราะห์ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามที่ล้างด้วยน้ำสะอาดด้วยเครื่องมือ Thermal Gravimetric Analysis



รูปที่ ช.2 ผลการวิเคราะห์ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามที่ล้างด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น ร้อยละ5 ด้วยเครื่องมือ Thermal Gravimetric Analysis

ภาคผนวก ซ.

ผลการวิเคราะห์โครงสร้างพื้นที่ผิวและความพรุนของถ่านกัมมันต์ด้วยวิธี BET (Brunauer-Emmeit-Teller)

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

1) ผลการวิเคราะห์โครงสร้างพื้นที่ผิวและความพรุนของถ่านเมล็ดมะขามก่อนการกระตุ้น

Micromeritics Instrument Corporation

ASAP 2000 V3.03 A PAGE 12

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER: AICL /4
SAMPLE ID: char350
SUBMITTER:
OPERATOR:
UNIT NUMBER: 1
ANALYSIS GAS: Nitrogen

START 12:13:18 03/15/06
COMPL 13:57:00 03/15/06
REPRT 14:54:08 03/15/06
SAMPLE WT: 0.3124 g
FREE SPACE: 47.2522 cc
EQUIL INTRVL: 10 sec

GUMMARY REPORT

AREA

BET SURFACE AREA:	0.3041	sq. m/g
SINGLE POINT SURFACE AREA AT P/Po 0.1999:	0.2682	sq. m/g
BJH CUMULATIVE ADSORPTION SURFACE AREA OF PORES BETWEEN 17.0000 AND 3000.0000 A DIAMETER:	0.8857	sq. m/g
MICROPORE AREA:	0.0121	sq. m/g

VOLUME

SINGLE POINT TOTAL PORE VOLUME OF PORES LESS THAN 25512.2129 A DIAMETER AT P/Po 0.9992:	0.000442	cc/g
BJH CUMULATIVE ADSORPTION PORE VOLUME OF PORES BETWEEN 17.0000 AND 3000.0000 A DIAMETER:	0.000442	cc/g
MICROPORE VOLUME:	0.000012	cc/g

PORE SIZE

AVERAGE PORE DIAMETER (4V/A BY BET):	58.0781	A
BJH ADSORPTION AVERAGE PORE DIAMETER (4V/A):	19.9750	A

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

2) ผลการวิเคราะห์โครงสร้างพื้นที่ผิวและความพรุนของถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม

Micromeritics Instrument Corporation

ASAP 2000 V3.03 A PAGE 14

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER: AICL /2
SAMPLE ID: teac
SUBMITTER:
OPERATOR:
UNIT NUMBER: 1
ANALYSIS GAS: Nitrogen

START 11:09:15 03/09/06
COMPL 14:49:23 03/09/06
REPRT 14:20:35 03/14/06
SAMPLE WT: 0.3528 g
FREE SPACE: 43.1819 cc
EQUIL INTRVL: 10 sec

SUMMARY REPORT

AREA

BET SURFACE AREA:	642.6873	sq. m/g
LANGMUIR SURFACE AREA:	849.3243	sq. m/g
SINGLE POINT SURFACE AREA AT P/Po 0.2024:	662.4981	sq. m/g
BJH CUMULATIVE ADSORPTION SURFACE AREA OF PORES BETWEEN 17.0000 AND 3000.0000 A DIAMETER:	54.8274	sq. m/g
BJH CUMULATIVE DESORPTION SURFACE AREA OF PORES BETWEEN 17.0000 AND 3000.0000 A DIAMETER:	63.9456	sq. m/g
MICROPORE AREA:	522.8148	sq. m/g

VOLUME

SINGLE POINT TOTAL PORE VOLUME OF PORES LESS THAN 1253.4298 A DIAMETER AT P/Po 0.9843:	0.311087	cc/g
BJH CUMULATIVE ADSORPTION PORE VOLUME OF PORES BETWEEN 17.0000 AND 3000.0000 A DIAMETER:	0.040872	cc/g
BJH CUMULATIVE DESORPTION PORE VOLUME OF PORES BETWEEN 17.0000 AND 3000.0000 A DIAMETER:	0.043259	cc/g
MICROPORE VOLUME:	0.243139	cc/g

PORE SIZE

AVERAGE PORE DIAMETER (4V/A BY LANGMUIR):	14.6510	A
BJH ADSORPTION AVERAGE PORE DIAMETER (4V/A):	29.8914	A
BJH DESORPTION AVERAGE PORE DIAMETER (4V/A):	27.0800	A

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3) ผลการวิเคราะห์โครงสร้างพื้นที่ผิวและความพรุนของถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300

Micromeritics Instrument Corporation

ASAP 2000 V3.03 A PAGE 14

SAMPLE DIRECTORY/NUMBER: AICL /3
SAMPLE ID: f300
SUBMITTER:
OPERATOR:
UNIT NUMBER: 1
ANALYSIS GAS: Nitrogen

START 10:00:41 03/14/06
COMPL 13:28:28 03/14/06
REPRT 14:35:10 03/14/06
SAMPLE WT: 0.2834 g
FREE SPACE: 47.6170 cc
EQUIL INTRVL: 10 sec

SUMMARY REPORT

AREA

BET SURFACE AREA:	1116.3854	sq. m/g
LANGMUIR SURFACE AREA:	1496.5913	sq. m/g
SINGLE POINT SURFACE AREA AT P/Po 0.2081:	1129.5889	sq. m/g
BJH CUMULATIVE ADSORPTION SURFACE AREA OF PORES BETWEEN 17.0000 AND 3000.0000 A DIAMETER:	199.7386	sq. m/g
BJH CUMULATIVE DESORPTION SURFACE AREA OF PORES BETWEEN 17.0000 AND 3000.0000 A DIAMETER:	215.2837	sq. m/g
MICROPORE AREA:	719.3677	sq. m/g

VOLUME

SINGLE POINT TOTAL PORE VOLUME OF PORES LESS THAN 1259.8231 A DIAMETER AT P/Po 0.9844:	0.554117	cc/g
BJH CUMULATIVE ADSORPTION PORE VOLUME OF PORES BETWEEN 17.0000 AND 3000.0000 A DIAMETER:	0.138683	cc/g
BJH CUMULATIVE DESORPTION PORE VOLUME OF PORES BETWEEN 17.0000 AND 3000.0000 A DIAMETER:	0.145225	cc/g
MICROPORE VOLUME:	0.332530	cc/g

PORE SIZE

AVERAGE PORE DIAMETER (4V/A BY LANGMUIR):	14.8101	A
BJH ADSORPTION AVERAGE PORE DIAMETER (4V/A):	27.8130	A
BJH DESORPTION AVERAGE PORE DIAMETER (4V/A):	26.9830	A

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายจักริน นักไร่ เกิดเมื่อวันที่ 2 พฤศจิกายน พ.ศ. 2524 ที่จังหวัดพะเยา สำเร็จการศึกษาระดับมัธยมศึกษาปีที่ 6 ที่โรงเรียนพะเยาพิทยาคม จังหวัดพะเยา ปีการศึกษา 2543 สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปีการศึกษา 2547 และได้เข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต ที่ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2547

สถาบันวิทยบริการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย