

ขนาดรูปเล่มที่เหมาะสมของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด  
สำหรับการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งของกระบวนการซักรีด



นางสาว ภัทรนฤณ บุษสาย

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

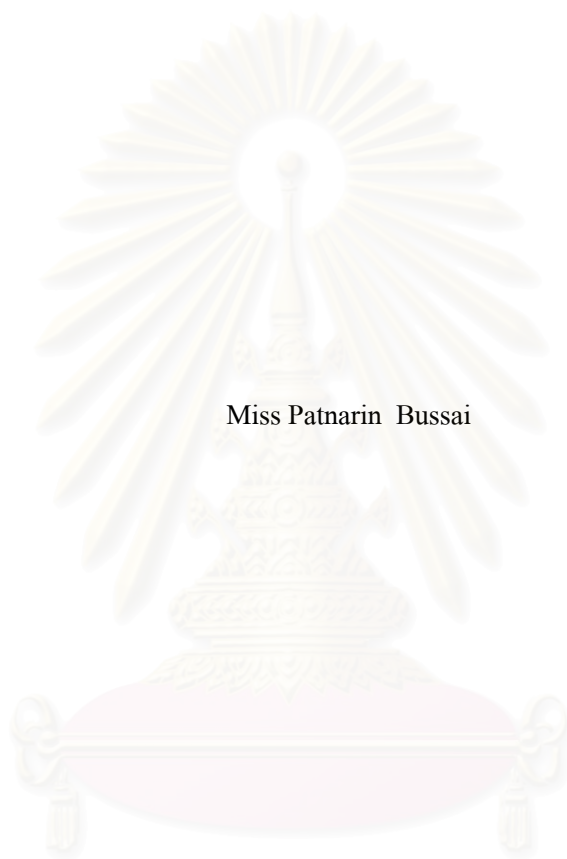
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2547

ISBN 974 - 17 - 6864 - 8

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

OPTIMUM PORE SIZE OF GRANULAR ACTIVATED CARBON  
FOR IMPROVEMENT OF LAUNDRY EFFLUENT QUALITY



Miss Patnarin Bussai

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

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

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2004

ISBN 974 - 17 - 6864 - 8



ภัทรันถน บุษสาย : ขนาดรูพรุนที่เหมาะสมของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดสำหรับการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งของกระบวนการซักกรีด (OPTIMUM PORE SIZE OF GRANULAR ACTIVATED CARBON FOR IMPROVEMENT OF LAUNDRY EFFLUENT QUALITY) อ. ที่ปรึกษา : ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต รัตนธรรมสกุล, 189 หน้า. ISBN 974 - 17 - 6864 - 8

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาผลของขนาดรูพรุนที่มีต่อความจุดูดซับของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดรวมทั้งพิจารณาถึงคุณภาพน้ำทิ้งของโรงงานซักกรีดที่ผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์แล้ว ในด้านศักยภาพสำหรับการนำกลับมาใช้ใหม่ได้

การศึกษาที่ใช้ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดที่มีขนาดรูพรุน 4 ขนาด อยู่ในช่วง 404 – 26,640 อังสตรอม โดยการทดลองประกอบด้วย การทดลองในแบบกะเพื่อศึกษาถึงผลของพีเอชที่มีต่อการดูดซับ และทดลองเพื่อหาค่าความจุดูดซับสูงสุดจากไอโซเทอร์มของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ขนาดรูพรุน รวมทั้งการทดลองในแบบคอลัมน์เพื่อศึกษาถึงผลของระยะเวลาสัมผัส และขนาดรูพรุนที่มีผลต่อความจุดูดซับของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ขนาดรูพรุน

ผลการศึกษาพบว่า พีเอชในช่วง 5.0 ถึง 9.5 ไม่แสดงผลอย่างเด่นชัดต่อความจุดูดซับ ทีโอซี ซีไอดี และสีของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ขนาดรูพรุน ความจุดูดซับสูงสุดในรูปของทีโอซี ซีไอดี และสี (ในหน่วยของเอดีเอ็มไอ) ของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ขนาดรูพรุน มีค่าแตกต่างกันไป โดยถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดรูพรุน 1,781 อังสตรอม (พื้นที่ผิว 967 ตร.ม./ก.) ให้ความจุดูดซับสูงสุดในรูปของทีโอซีและซีไอดีสูงสุดคือ 62.52 และ 80.69 มก./ก.ของถ่านกัมมันต์ ค่าความจุดูดซับตรงมาคือถ่านกัมมันต์ขนาดรูพรุน 516 อังสตรอม (พื้นที่ผิว 1030 ตร.ม./ก.) ขนาดรูพรุน 404 อังสตรอม (พื้นที่ผิว 862 ตร.ม./ก.) และขนาดรูพรุน 26,640 อังสตรอม (พื้นที่ผิว 763 ตร.ม./ก.) ตามลำดับ โดยขึ้นอยู่กับขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์เป็นหลัก ส่วนในกรณีของสีความจุดูดซับจะแปรผันตามขนาดของรูพรุนเป็นสำคัญ โดยถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดรูพรุนใหญ่ที่สุดคือ 26,640 อังสตรอมมีความจุดูดซับในรูปของสีสูงที่สุดคือ 16.1 เอดีเอ็มไอ/ก.ของถ่านกัมมันต์ ตามด้วยขนาด 1,781, 516 และ 404 อังสตรอมตามลำดับ กลไกการดูดซับของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ขนาดรูพรุนสามารถอธิบายได้ด้วยฟรอนคลิชไอโซเทอม

ในการทดลองแบบคอลัมน์ที่กำหนดให้ทีโอซีที่ 6 มก./ล. เป็นเบรคทราพารามิเตอร์พบว่า ค่าความจุดูดซับของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ขนาดรูพรุน มีแนวโน้มเหมือนกับการทดลองไอโซเทอม กล่าวคือขนาดรูพรุน 1,781 อังสตรอม ยังคงมีความจุดูดซับสูงสุดโดยมีปริมาตรเบรคทราเท่ากับ 1800 ปริมาตรเบด ที่ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที เมื่อระยะเวลาสัมผัสลดลงเป็น 30 และ 15 นาที ค่าความจุดูดซับจะมีค่าลดลง โดยมีปริมาตรเบรคทราเพียง 800 และ 400 ปริมาตรเบด ตามลำดับ ดังนั้น แสดงว่าระยะเวลาสัมผัสของน้ำกับถ่านกัมมันต์ต้องนานเพียงพอที่จะให้กลไกดูดซับสามารถเกิดขึ้นได้ดี เมื่อพิจารณาน้ำที่ผ่านการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ พบว่า มีคุณภาพใกล้เคียงกับน้ำดิบของโรงงานซักกรีด ยกเว้นค่าโคลิฟอร์มทั้งหมดที่มีค่าสูงกว่า ดังนั้นจึงมีศักยภาพในการนำกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการซักกรีดได้ ถ้าหากมีการฆ่าเชื้อโรคก่อน ผลการประเมินทางเศรษฐศาสตร์พบว่า จะเสียค่าใช้จ่ายของถ่านกัมมันต์เท่ากับ 10.80 บาทต่อลูกบาศก์เมตรของน้ำ

ภาควิชา .....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....

ลายมือชื่อนิสิต .....

สาขาวิชา .....วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม.....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา .....

ปีการศึกษา .....2547.....

## 4670425221 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEY WORD : LAUNDRY EFFLUENT / IMPROVEMENT OF EFFLUENT QUALITY / ADSORPTION / GRANULAR ACTIVATED CARBON / PORE SIZE

PATNARIN BUSSAI : OPTIMUM PORE SIZE OF GRANULAR ACTIVATED CARBON FOR IMPROVEMENT OF LAUNDRY EFFLUENT QUALITY. THESIS ADVISER : ASST. PROF. CHAVALIT RATANATAMSKUL, Ph.D. 189 pp. ISBN 974 - 17 - 6468 – 8

The aim of this research was to investigate the adsorption capacity of organic carbon by granular activated carbon (GAC) of various pore sizes and to determine the potential and possibility for improving laundry effluent quality by GAC for wastewater reclamation in laundry process.

Four different pore-sizes from 404 to 26,640 Å of the GAC were used in this study. The experiments consisted of both batch and column tests. The batch tests concentrated on the effect of pH on adsorption capacity and isotherm investigation for all four pore sizes, whereas the column test intended to determine the effects of contact time and pore size on adsorption capacity.

The results from batch experiment reveal that pH between 5.0 and 9.5 did not show any significant impact on adsorption capacity for all four pore sizes in term of TOC, COD, and color (in ADMI unit). Maximum adsorption capacity in terms of TOC, COD, and color varied notably depending on pore size and surface area. The GAC with 1,781 Å pore size (967 m<sup>2</sup>/g surface area) had the highest TOC and COD adsorption capacity of 62.52 and 80.69 mg/g, respectively, followed by the GAC with 516 Å pore size (1030 m<sup>2</sup>/g surface area), 404 Å pore size (862 m<sup>2</sup>/g surface area), and 26,640 Å pore size (763 m<sup>2</sup>/g surface area), correspondingly, which depends largely on pore size and surface area of the GAC. However, for adsorbates that causing color, the adsorption capacity varied principally with pore size. The GAC with the largest pore size of 26,640 Å had the highest color adsorption capacity at 16.05 ADMI/g. GAC followed by the GAC with 1,781, 516, and 404 Å pore sizes, respectively. Adsorption isotherm for all GACs tested could be described by Freundlich Isotherm.

In column study with the set breakthrough TOC of 6 mg/l, the trend of adsorption capacity of all four different GACs was very similar to those in batch study, i.e., the 1,781 Å had the highest adsorption capacity. Contact time was another important factor which affected the breakthrough volume, i.e., the breakthrough volume decreased from 1800 BV at 60 minutes of contact time to 800 and 400 BV at 30 and 15 minutes, respectively. This implies that the adsorption phenomenon occurred was not rapid; therefore, the longer contact time was, the better adsorption could be obtained. The quality of column effluent was comparable to raw water of the laundry factory except for the coliform bacteria. Therefore, the activated carbon treated laundry effluent has potential to be reclaimed in the laundry process after disinfection. The estimated GAC cost for secondary effluent reclamation from the laundry factory is 10.80 baht per cubic meter.

Department ....Environmental Engineering....

Student’s Signature.....

Field of Study...Environmental Engineering....

Advisor’s Signature.....

Academic year.....2004.....

## กิตติกรรมประกาศ

การทำวิทยานิพนธ์นี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี ผู้วิจัยต้องขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต รัตนธรรมสกุล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำปรึกษา และข้อคิดเห็นต่าง ๆ ตลอดจนช่วยตรวจทานแก้ไขวิทยานิพนธ์ จนกระทั่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี ขอขอบพระคุณ ประธานกรรมการ อาจารย์ ดร. ชัยพร ภูประเสริฐ กรรมการ รองศาสตราจารย์ วงศ์พันธ์ ลิ้มปเสนีย์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. วิบูลย์ลักษณ์ ฟังรัมย์ สำหรับคำแนะนำ และข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์ในการปรับปรุงวิทยานิพนธ์

ขอขอบพระคุณ ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้ความอนุเคราะห์ใช้ห้องปฏิบัติการวิจัย เพื่อทำการทดลองประกอบการทำวิทยานิพนธ์ และสถานที่ในการติดตั้งแบบจำลอง รวมทั้งอำนวยความสะดวกตลอดระยะเวลาที่ดำเนินการทดลอง ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. จินต์ อโณทัย อาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่เอื้อเฟื้อสารเคมีบางส่วนในการทดลอง รวมทั้งให้คำปรึกษา คำแนะนำ ข้อคิดเห็นต่าง ๆ และแนวคิดที่เป็นประโยชน์ในการทำวิจัยตลอดระยะเวลาที่ดำเนินการวิจัยนี้ ขอขอบพระคุณ คุณพิระดา ว่องเกษญา และคุณจงกลณี ประดิษฐ์พงษ์ เจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการประจำภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ให้คำแนะนำในการใช้เครื่องมือ และอำนวยความสะดวกในการใช้ห้องปฏิบัติการวิจัย และ คุณกัมพล อนานนท์ ช่างเทคนิคประจำภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ที่ช่วยซ่อมแซมอุปกรณ์ และอำนวยความสะดวกในการหยิบยืมเครื่องมือที่ใช้ในการทดลอง

ขอขอบพระคุณห้างหุ้นส่วนจำกัด โรงงานซักรีดฟอกซินไฉ้อีว และ คุณวีระศักดิ์ กิมเรศ หัวหน้าช่าง ที่ให้ความอนุเคราะห์น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดขั้นที่สองของโรงงาน เพื่อนำมาใช้เป็นน้ำทิ้งตลอดการทดลอง ขอขอบพระคุณ บริษัท คาร์โบกาญจน์ จำกัด และ คุณชูพงศ์ พโนคม ที่ให้ความอนุเคราะห์ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด เพื่อนำมาใช้ตลอดการทดลอง ขอขอบพระคุณ ฝ่ายเทคโนโลยีวัสดุ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ที่ให้ความอนุเคราะห์ลดหย่อนค่าตรวจวิเคราะห์ขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดที่ใช้ในการทดลอง

ขอขอบคุณเพื่อน พี่ และน้อง ๆ ที่ได้ให้คำแนะนำและความช่วยเหลือเรื่องข้อมูลต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่องานวิจัย และทุกท่านที่ผู้วิจัยไม่สามารถ จะกล่าวนามในที่นี้ได้ครบทั้งหมด

สุดท้ายนี้ ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง บิดา มารดา ครู อาจารย์ และญาติพี่น้อง ทุก ๆ คน ที่อบรมสั่งสอน และเป็นกำลังใจแก่ผู้วิจัยเสมอมา ทำให้การวิจัยในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยดี

ประโยชน์อันใดที่เกิดจากวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ย่อมเป็นผลมาจากความกรุณาของท่านดังกล่าวข้างต้น ผู้วิจัยใคร่ขอขอบพระคุณอย่างสูงไว้ ณ โอกาสนี้



## สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฎ
สารบัญรูป.....	ฅ
บทที่ 1 บทนำ	
1.1 บทนำ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	2
1.3 ขอบเขตงานวิจัย.....	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	
2.1 กระบวนการซักกรีด.....	3
2.1.1 อุปกรณ์ในกระบวนการซักกรีด.....	3
2.1.2 สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการซักกรีด.....	4
2.1.3 กระบวนการซักกรีด.....	5
2.1.4 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม.....	7
2.2 การนำน้ำทิ้งกลับมาใช้ใหม่.....	9
2.2.1 การนำกลับมาใช้ทางอ้อม.....	9
2.2.2 การนำกลับมาใช้โดยตรง.....	10
2.3 การดูดติดผิวด้วยถ่านกัมมันต์.....	14
2.3.1 ถ่านกัมมันต์.....	16
2.3.2 กลไกการดูดติดผิว.....	19
2.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิว.....	19
2.3.4 ไอโซเทอร์มของการดูดติดผิว.....	21
2.3.5 ความจุการดูดติดผิว.....	24
2.3.6 การดูดติดผิวในคอลัมน์.....	24
2.3.7 ความจุการดูดติดผิวเบรกทรู.....	26

2.4 งานวิจัยที่ผ่านมา.....	26
2.4.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้ง เพื่อนำน้ำกลับมาใช้ใหม่.....	26
2.4.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับ.....	30
บทที่ 3 การดำเนินการวิจัย	
3.1 แผนการวิจัย.....	35
3.2 การเตรียมอุปกรณ์และติดตั้งอุปกรณ์เครื่องมือ.....	36
3.2.1 ถ่านกัมมันต์.....	36
3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ และทดสอบแบบทีละเท (Batch).....	36
3.2.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งด้วยถ่านกัมมันต์ ในการทดสอบแบบคอลัมน์ (Column).....	36
3.3 ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งจากกระบวนการซักรีด.....	38
3.4 กำหนดค่า และประเภทตัวแปร.....	38
3.4.1 การทดลองชุดที่ 1 การศึกษาหาเวลาของการดูดซับ จนถึงสภาวะสมดุล (Equilibrium Time) ของถ่านกัมมันต์ แบบเกล็ด เมื่อมีขนาดรูพรุนแตกต่างกัน.....	38
3.4.2 การทดลองชุดที่ 2 การศึกษาผลของพีเอชที่มีต่อการดูดซับ ของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด ที่มีขนาดรูพรุนแตกต่างกัน.....	39
3.4.3 การทดลองชุดที่ 3 การทดลองหาค่าไอโซเทอม (Isotherm Test) ของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด เมื่อมีขนาดรูพรุนแตกต่างกัน โดยเลือกค่าพีเอชที่เหมาะสม.....	40
3.4.4 การทดลองชุดที่ 4 การศึกษาสภาวะการดำเนินงานของ ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดที่ขนาดรูพรุนเหมาะสม ซึ่งให้ความสามารถ ในการดูดซับสูงสุด ในแบบคอลัมน์ที่มีการไหลแบบต่อเนื่อง.....	41
3.4.5 การทดลองชุดที่ 5 ศึกษาหาความสามารถในการดูดซับ ของถ่านกัมมันต์ที่ขนาดรูพรุนแตกต่างกัน 3 ขนาดที่เหลือ ในแบบคอลัมน์ที่มีการไหลแบบต่อเนื่อง โดยเลือก ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสม.....	42



3.5	ขั้นตอนการทดลอง.....	43
3.5.1	การทดลองชุดที่ 1 ศึกษาหาเวลาของการดูดติดผิว จนถึงสภาวะสมดุล (Equilibrium Time) ของถ่านกัมมันต์ แบบเกล็ด เมื่อมีขนาดรูพรุนแตกต่างกัน.....	43
3.5.2	การทดลองชุดที่ 2 ศึกษาผลของพีเอชที่มีต่อการดูดติดผิว ของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด ที่มีขนาดรูพรุนแตกต่างกัน.....	45
3.5.3	การทดลองชุดที่ 3 ทดลองหาค่าไอโซเทอม (Isotherm Test) ของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด เมื่อมีขนาดรูพรุนแตกต่างกัน โดยเลือกค่าพีเอชที่เหมาะสม.....	47
3.5.4	การทดลองชุดที่ 4 ศึกษาหาสภาวะการดำเนินงานของ ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดที่มีขนาดรูพรุนที่เหมาะสมซึ่ง ให้ความสามารถในการดูดติดผิวสูงสุด ในแบบคอลัมน์ ที่มีการไหลแบบต่อเนื่อง.....	49
3.5.5	การทดลองชุดที่ 5 ศึกษาหาความสามารถในการดูดติดผิว ของถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดรูพรุนแตกต่างกัน 3 ขนาดที่เหลือ ในแบบคอลัมน์ที่มีการไหลแบบต่อเนื่อง โดยเลือก ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสม.....	50
3.6	วิธีการวัดพารามิเตอร์ต่าง ๆ.....	54
บทที่ 4	ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง.....	55
4.1	ลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการทดลอง.....	55
4.2	ลักษณะน้ำทิ้งที่ใช้ในการทดลอง.....	57
4.3	ผลการทดสอบหาเวลาของการดูดติดผิวจนถึงสภาวะสมดุล (Equilibrium Time) ของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด เมื่อมีขนาดรูพรุนแตกต่างกัน.....	57
4.4	ผลการทดสอบผลของพีเอชที่มีต่อการดูดติดผิว ของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด ที่มีขนาดรูพรุนแตกต่างกัน.....	60
4.5	ผลการทดลองหาค่าไอโซเทอร์มของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด เมื่อมีขนาดรูพรุนแตกต่างกัน โดยเลือกค่าพีเอชที่เหมาะสม.....	62

4.6 ผลการหาสภาวะการดำเนินงานของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด ที่มีขนาดรูพรุนที่เหมาะสม ในแบบคอลัมน์ที่มีการไหลแบบต่อเนื่อง.....	73
4.6.1 การกำจัดทีโอซี.....	74
4.6.2 การกำจัดซีโอดี.....	79
4.6.3 การกำจัดสี.....	83
4.6.4 การกำจัดความกระด้าง (Total Hardness).....	88
4.6.5 ปริมาณโคลิฟอร์มทั้งหมด (Total Coliform).....	89
4.6.6 การกำจัดความขุ่น (Tuibidity).....	92
4.6.7 พีเอช.....	93
4.7 ผลการศึกษาหาความสามารถในการดูดซับของถ่านกัมมันต์ ที่มีขนาดรูพรุนแตกต่างกัน 3 ขนาดที่เหลือ ในแบบคอลัมน์ที่มีการไหล แบบต่อเนื่อง โดยเลือกระยะเวลาสัมพัทธ์ที่เหมาะสม.....	94
4.7.1 การกำจัดทีโอซี.....	94
4.7.2 การกำจัดซีโอดี.....	98
4.7.3 การกำจัดสี.....	103
4.7.4 การกำจัดความกระด้าง (Total Hardness).....	107
4.7.5 ปริมาณโคลิฟอร์มทั้งหมด (Total Coliform).....	108
4.7.6 การกำจัดความขุ่น.....	109
4.7.7 พีเอช.....	110
4.8 ประเมินค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้ง และพิจารณาความเหมาะสมของระบบในการนำมาใช้งานจริง.....	111
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	114
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	114
5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยต่อไป.....	115
รายการอ้างอิง.....	116
ภาคผนวก.....	121
ภาคผนวก ก. มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งประเภทต่าง ๆ.....	122
ภาคผนวก ข. ลักษณะสมบัติถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการทดลอง.....	132

ภาคผนวก ค. ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดขึ้นที่สองของโรงซักรีด.....	134
ภาคผนวก ง. ข้อมูลดิบของการทดลอง.....	136
ภาคผนวก จ. สีของน้ำภายหลังการดูดติดผิว.....	163
ภาคผนวก ฉ. การคำนวณปริมาณสารคูบ์ฟเฟอร์ทางทฤษฎี.....	172
ภาคผนวก ช. กราฟไอโซเทอร์มตามความสัมพันธ์แบบแลงมัวร์ไอโซเทอร์ม.....	177
ภาคผนวก ซ. การคำนวณความจุดูดติดผิวสูงสุด.....	181
ภาคผนวก ฌ. การคำนวณความจุดูดติดผิวในแบบคอลัมน์.....	185
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	189



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 2.1 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียก่อน และน้ำทิ้งหลังผ่านระบบบำบัดของ โรงซักรีด..... 9

ตารางที่ 2.2 ลักษณะสมบัติทั่วไปของถ่านกัมมันต์.....18

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษาการดูดติดผิวจนถึงสภาวะสมดุล (Equilibrium Time) ของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด เมื่อมีขนาดรูพรุนแตกต่างกัน.....38

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษาผลของพีเอชที่มีต่อการดูดติดผิว ของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด ที่มีขนาดรูพรุนแตกต่างกัน.....39

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองหาค่าไอโซเทอม (Isotherm Test) ของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด เมื่อมีขนาดรูพรุนแตกต่างกัน โดยเลือกค่าพีเอชที่เหมาะสม..... 40

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษาหาสภาวะการดำเนินงาน ของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด ที่มีขนาดรูพรุนที่เหมาะสม ให้ความสามารถในการดูดติดผิวสูงสุด ในแบบคอลัมน์ ที่มีกรไหลแบบต่อเนื่อง.....41

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษาหาความสามารถในการดูดติดผิว ของถ่านกัมมันต์ที่ขนาดรูพรุนแตกต่างกัน 3 ขนาดที่เหลือ ในแบบคอลัมน์ที่มีกรไหลแบบต่อเนื่อง โดยเลือกระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสม..... 42

ตารางที่ 3.6 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ..... 54

ตารางที่ 4.1 ขนาดรูพรุน พื้นที่ผิว และไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์ ที่ใช้ในการทดลอง..... 55

ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยลักษณะสมบัติน้ำทิ้งที่ใช้ในการทดลอง เมื่อผ่านการบำบัดขั้นที่สองของโรงซักรีดที่ศึกษา..... 57

ตารางที่ ก.1 มาตรฐานน้ำทิ้งสำหรับการรูดสนามหญ้าและสิ่งปลูกสร้าง.....123

ตารางที่ ก.2 มาตรฐานน้ำทิ้งลงบ่อบาดาล.....124

ตารางที่ ก.3 มาตรฐานน้ำทิ้งปล่อยเคมลงในบึงสาธารณะ..... 125

ตารางที่ ก.4 มาตรฐานน้ำทิ้งปล่อยลงเลี้ยงสัตว์น้ำ..... 125

ตารางที่ ก.5 มาตรฐานน้ำทิ้งสำหรับเลี้ยงสัตว์.....125

ตารางที่ ก.6 มาตรฐานคุณภาพน้ำบาดาลที่ใช้บริโภค..... 126

ตารางที่ ก.7	มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภค.....	127
ตารางที่ ก.8	มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน.....	129
ตารางที่ ข.1	ลักษณะสมบัติถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการทดลอง.....	133
ตารางที่ ค.1	ลักษณะสมบัติน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดขั้นที่สอง ของโรงซักรีด.....	135
ข้อมูลดิบของการทดสอบหาเวลาของการดูดซับผิวจนถึงสภาวะสมดุล (Equilibrium Time)		
ตารางที่ ง.1	ถ่านกัมมันต์เอ.....	137
ตารางที่ ง.2	ถ่านกัมมันต์บี.....	137
ตารางที่ ง.3	ถ่านกัมมันต์ซี.....	137
ตารางที่ ง.4	ถ่านกัมมันต์ดี.....	138
ข้อมูลดิบของการทดสอบผลของพีเอชที่มีต่อการดูดซับผิว		
ตารางที่ ง.5	ถ่านกัมมันต์เอ บี ซี และดี.....	139
ข้อมูลดิบของการทดลองหาค่าไอโซเทอร์ม โดยเลือกค่าพีเอชที่เหมาะสม		
ตารางที่ ง.6	ถ่านกัมมันต์เอ (26,640 อังสตรอม) กับการดูดซับทีโอซี.....	140
ตารางที่ ง.7	ถ่านกัมมันต์บี (1,781 อังสตรอม) กับการดูดซับทีโอซี.....	141
ตารางที่ ง.8	ถ่านกัมมันต์ซี (516 อังสตรอม) กับการดูดซับทีโอซี.....	142
ตารางที่ ง.9	ถ่านกัมมันต์ดี (404 อังสตรอม) กับการดูดซับทีโอซี.....	143
ตารางที่ ง.10	ถ่านกัมมันต์เอ (26,640 อังสตรอม) กับการดูดซับซีโอดี.....	144
ตารางที่ ง.11	ถ่านกัมมันต์บี (1,781 อังสตรอม) กับการดูดซับซีโอดี.....	145
ตารางที่ ง.12	ถ่านกัมมันต์ซี (516 อังสตรอม) กับการดูดซับซีโอดี.....	146
ตารางที่ ง.13	ถ่านกัมมันต์ดี (404 อังสตรอม) กับการดูดซับซีโอดี.....	147
ตารางที่ ง.14	ถ่านกัมมันต์เอ (26,640 อังสตรอม) กับการดูดซับดี.....	148
ตารางที่ ง.15	ถ่านกัมมันต์บี (1,781 อังสตรอม) กับการดูดซับดี.....	149
ตารางที่ ง.16	ถ่านกัมมันต์ซี (516 อังสตรอม) กับการดูดซับดี.....	150
ตารางที่ ง.17	ถ่านกัมมันต์ดี (404 อังสตรอม) กับการดูดซับดี.....	151
ข้อมูลดิบของการหาสภาวะการดำเนินงาน ในแบบคอลัมน์ที่มีการไหลแบบต่อเนื่อง		
ตารางที่ ง.18	ระยะเวลาสัมผัส 15 นาที.....	152
ตารางที่ ง.19	ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที.....	153
ตารางที่ ง.20	ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที.....	155
ตารางที่ ง.21	ถ่านกัมมันต์ชนิดเอ (ขนาดรูพรุน 26,640 อังสตรอม).....	158

ตารางที่ ง.22	ถ่านกัมมันต์ชนิดซี (ขนาดรูพรุน 516 อังสตรอม).....	159
ตารางที่ ง.23	ถ่านกัมมันต์ชนิดดี (ขนาดรูพรุน 404 อังสตรอม).....	161



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## สารบัญรูป

	หน้า
รูปที่ 2.1	ขั้นตอนของการซักรีด..... 6
รูปที่ 2.2	ขั้นตอนการปล่อยน้ำเสียของกระบวนการซักของโรงซักรีดที่ทำการศึกษา..... 8
รูปที่ 2.3	การนำน้ำกลับมาใช้ทางอ้อม..... 9
รูปที่ 2.4	ขั้นตอนของการบำบัดสำหรับการนำน้ำไปใช้ประโยชน์ต่าง ๆ..... 11
รูปที่ 2.5	การนำน้ำทิ้งที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพแล้ว ไปใช้ในด้านต่าง ๆ ของประเทศญี่ปุ่น..... 15
รูปที่ 2.6	การนำน้ำทิ้งที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพแล้ว ไปใช้ในด้านต่าง ๆ ของเมืองแคลิฟอร์เนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา..... 15
รูปที่ 2.7	ลักษณะทั่วไปของคอลัมน์บรรจุถ่านกัมมันต์..... 18
รูปที่ 2.8	ลักษณะกราฟของไอโซเทอร์มตามทฤษฎีของ Freundlich..... 22
รูปที่ 2.9	ลักษณะกราฟของไอโซเทอร์มตามทฤษฎีของ Langmuir..... 23
รูปที่ 2.10	การหาความจุการดูดติดผิว..... 24
รูปที่ 2.11	การเคลื่อนตัวของขอบเขตการดูดติดผิว (Adsorption zone) สำหรับชั้นสารดูดติดผิวที่อยู่กับที่ ซึ่งมีทิศทางไหลลงล่าง..... 25
รูปที่ 2.12	ลักษณะของ Breakthrough Curve สำหรับชั้นถ่านดูดติดผิวที่อยู่กับที่..... 25
รูปที่ 2.13	ขั้นตอนการบำบัดน้ำที่มาจากการอาบน้ำและซักล้างเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ของประเทศฮ่องกง..... 30
รูปที่ 3.1	แผนผังการดำเนินการวิจัย..... 35
รูปที่ 3.2	แผนภาพของคอลัมน์ที่ใช้ทดสอบ..... 37
รูปที่ 3.3	แผนภาพการหาเวลาดูดติดผิวจนถึงสภาวะสมดุลของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด..... 44
รูปที่ 3.4	แผนภาพการหาพีเอชที่เหมาะสมของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดที่มี ขนาดรูพรุนแตกต่างกัน 4 ขนาด..... 46
รูปที่ 3.5	แผนภาพการทดลองหาค่าไอโซเทอร์ม เพื่อหาถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด ที่มีขนาดรูพรุนเหมาะสมให้ความสามารถในการดูดติดผิวสูงสุด..... 48
รูปที่ 3.6	แผนภาพการทดลองหาสภาวะการดำเนินงานในการทดลองแบบคอลัมน์ ของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิดที่มีขนาดรูพรุนที่เหมาะสม ( $d_{optimum}$ )..... 51
รูปที่ 3.7	แผนภาพการทดลองความสามารถในการดูดติดผิวสำหรับการทดลอง แบบคอลัมน์ของถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดรูพรุนแตกต่างกัน 3 ขนาดที่เหลือ..... 53

รูปที่ 4.1	ไอโอดีนนมเบอร์ กับขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์.....	56
รูปที่ 4.2	ผลการทดสอบหาระยะเวลาในการดูดติดผิวจนถึงสภาวะสมดุล ของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ขนาดรูพรุน.....	58
รูปที่ 4.3	สีของน้ำภายหลังการดูดติดผิว (0 1 2 4 8 12 และ 24 ชม. ตามลำดับ).....	59
รูปที่ 4.4	พีเอชตลอดระยะเวลาดำเนินการทดลองจนถึงสภาวะสมดุล.....	60
รูปที่ 4.5	ผลการทดลองหาผลของพีเอชที่มีต่อการดูดติดผิว ของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ขนาดรูพรุน.....	61
รูปที่ 4.6	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุการดูดติดผิว กับปริมาณของสารต่างๆ ที่เหลืออยู่ ณ จุดสมดุล.....	64
รูปที่ 4.7	พรุนดลิกซ์ไอโซเทอร์มของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ขนาดรูพรุนในรูปของทีไอซี.....	65
รูปที่ 4.8	พรุนดลิกซ์ไอโซเทอร์มของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ขนาดรูพรุนในรูปของซีไอดี.....	66
รูปที่ 4.9	พรุนดลิกซ์ไอโซเทอร์มของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ขนาดรูพรุนในรูปของสี.....	67
รูปที่ 4.10	ค่าความจุการดูดติดทีไอซีสูงสุด.....	69
รูปที่ 4.11	ค่าความจุการดูดติดซีไอดีสูงสุด.....	70
รูปที่ 4.12	ค่าความจุการดูดติดสีสูงสุด.....	71
รูปที่ 4.13	Glass bead ที่บรรจุภายในคอลัมน์ที่ใช้ในการทดสอบ.....	74
รูปที่ 4.14	ลักษณะการกระจายตัวของสีภายในคอลัมน์ที่ใช้การทดสอบ.....	75
รูปที่ 4.15	คอลัมน์ที่ใช้ทดสอบหาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสม.....	76
รูปที่ 4.16	ทีไอซีของน้ำที่ออกจากคอลัมน์ กับระยะเวลาการดำเนินการ.....	77
รูปที่ 4.17	ทีไอซีของน้ำที่ออกจากคอลัมน์ กับปริมาตรเบด.....	77
รูปที่ 4.18	ปริมาณทีไอซีที่สะสมในคอลัมน์ของถ่านกัมมันต์บี.....	78
รูปที่ 4.19	ค่าความจุดูดติดทีไอซีของถ่านกัมมันต์บีในการทดลองแบบคอลัมน์.....	79
รูปที่ 4.20	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุดูดติดผิว กับระยะเวลาสัมผัส.....	80
รูปที่ 4.21	ซีไอดีของน้ำที่ออกจากคอลัมน์ กับระยะเวลาการดำเนินการ.....	80
รูปที่ 4.22	ซีไอดีของน้ำที่ออกจากคอลัมน์ กับปริมาตรเบด.....	81
รูปที่ 4.23	ปริมาณซีไอดีที่สะสมในคอลัมน์ของถ่านกัมมันต์บี.....	82
รูปที่ 4.24	ค่าความจุดูดติดซีไอดี ของถ่านกัมมันต์บีในการทดลองแบบคอลัมน์.....	82
รูปที่ 4.25	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุดูดติดซีไอดี กับระยะเวลาสัมผัส.....	83
รูปที่ 4.26	ปริมาณสีของน้ำที่ออกจากคอลัมน์ กับระยะเวลาการดำเนินการ.....	84
รูปที่ 4.27	ปริมาณสีของน้ำที่ออกจากคอลัมน์ กับปริมาตรเบด.....	84

รูปที่ 4.28	ปริมาณสีที่สะสมในคอแลมน์ของถ่านกัมมันต์บี.....	85
รูปที่ 4.29	ค่าความจุดูดติดสีของถ่านกัมมันต์บีในการทดลองแบบคอแลมน์.....	86
รูปที่ 4.30	ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุดูดติด ซีไอดี กับระยะเวลาสัมผัส.....	86
รูปที่ 4.31	การดูดติดผิวในแบบคอแลมน์ โดยเกิด mass transfer zone ขึ้น.....	87
รูปที่ 4.32	ปริมาณความกระด้าง เทียบกับปริมาตรเบด.....	88
รูปที่ 4.33	ปริมาณโคลิฟอร์มทั้งหมด เทียบกับระยะเวลาการดำเนินงาน.....	90
รูปที่ 4.34	ปริมาณโคลิฟอร์มทั้งหมด เทียบกับปริมาตรเบด.....	90
รูปที่ 4.35	อุณหภูมิตลอดระยะเวลาการดำเนินการทดลอง หาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสม.....	91
รูปที่ 4.36	ปริมาณความขุ่น เทียบกับระยะเวลาการดำเนินการ.....	92
รูปที่ 4.37	ปริมาณความขุ่น เทียบกับปริมาตรเบด.....	92
รูปที่ 4.38	พีเอชเทียบกับระยะเวลาในการดำเนินการ.....	93
รูปที่ 4.39	คอแลมน์ที่ใช้ทดสอบถ่านกัมมันต์ขนาดรูพรุนที่เหลือ 3 ขนาดรูพรุน.....	95
รูปที่ 4.40	ทีไอซีของน้ำที่ออกจากคอแลมน์ กับระยะเวลาการดำเนินการ.....	95
รูปที่ 4.41	ทีไอซีของน้ำที่ออกจากคอแลมน์ กับปริมาตรเบด.....	96
รูปที่ 4.42	ปริมาณทีไอซีที่สะสมในคอแลมน์ของถ่านกัมมันต์เอ ซี และดี.....	97
รูปที่ 4.43	ค่าความจุดูดติดทีไอซีของถ่านกัมมันต์เอ บี ซี และดี ในการทดลองแบบคอแลมน์.....	97
รูปที่ 4.44	ขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ กับค่าความจุดูดติดทีไอซี ของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด.....	98
รูปที่ 4.45	ขนาดรูพรุนในช่วง 0 – 2,000 อังสตรอม กับค่าความจุดูดติดทีไอซี.....	99
รูปที่ 4.46	พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ กับค่าความจุดูดติดทีไอซี.....	99
รูปที่ 4.47	ซีไอดีของน้ำที่ออกจากคอแลมน์ กับระยะเวลาการดำเนินการ.....	100
รูปที่ 4.48	ซีไอดีของน้ำที่ออกจากคอแลมน์ กับปริมาตรเบด.....	100
รูปที่ 4.49	ปริมาณซีไอดีที่สะสมในคอแลมน์ของถ่านกัมมันต์เอ ซี และดี.....	101
รูปที่ 4.50	ค่าความจุดูดติดซีไอดีของถ่านกัมมันต์เอ ซี และดี ของการทดลองแบบคอแลมน์.....	101
รูปที่ 4.51	ขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ กับค่าความจุดูดติดซีไอดี ของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด.....	102

รูปที่ 4.52	ค่าความจุดูดซับซีโอดีในแบบคอลัมน์ กับขนาดรูพรุนในช่วง 0 – 2,000 อังสตรอม.....	102
รูปที่ 4.53	ค่าความจุดูดซับ ซีโอดี ในแบบคอลัมน์กับพื้นที่ผิว.....	103
รูปที่ 4.54	ปริมาณสีของน้ำที่ออกจากคอลัมน์ กับระยะเวลาการดำเนินการ.....	104
รูปที่ 4.55	ปริมาณสีของน้ำที่ออกจากคอลัมน์ กับปริมาตรเบด.....	104
รูปที่ 4.56	ปริมาณสีที่สะสมในคอลัมน์ของถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิด.....	105
รูปที่ 4.57	ค่าความจุดูดซับสีของถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิด ในการทดลองแบบคอลัมน์.....	105
รูปที่ 4.58	ขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ กับค่าความจุดูดซับสี ของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด.....	106
รูปที่ 4.59	ค่าความจุดูดซับสีในแบบคอลัมน์ กับขนาดรูพรุนในช่วง 0 – 2,000 อังสตรอม.....	106
รูปที่ 4.60	ค่าความจุดูดซับสีในแบบคอลัมน์ กับพื้นที่ผิว.....	107
รูปที่ 4.61	ปริมาณความกระด้าง เทียบกับระยะเวลาการดำเนินงาน.....	108
รูปที่ 4.62	ปริมาณโคลิฟอร์มทั้งหมด เทียบกับระยะเวลาการดำเนินงาน.....	109
รูปที่ 4.63	ปริมาณความขุ่น เทียบกับระยะเวลาการดำเนินการ.....	109
รูปที่ 4.64	พีเอช เทียบกับระยะเวลาในการดำเนินการ.....	110
สีของน้ำภายหลังการดูดซับสี		
การทดลองเพื่อหาระยะเวลาอิ่มตัวในการดูดซับสี		
รูปที่ จ.1	ถ่านกัมมันต์เอ.....	164
รูปที่ จ.2	ถ่านกัมมันต์บี.....	164
รูปที่ จ.3	ถ่านกัมมันต์ซี.....	165
รูปที่ จ.4	ถ่านกัมมันต์ดี.....	165
การทดลองเพื่อหาผลของพีเอชที่มีต่อการดูดซับสี		
รูปที่ จ.5	พีเอช 5.....	166
รูปที่ จ.6	พีเอช 6.5.....	166
รูปที่ จ.7	พีเอช 9.5.....	167
การทดลองเพื่อหาไอโซเทอร์มของถ่านกัมมันต์		
0, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.8 กรัม		
รูปที่ จ.8	ถ่านกัมมันต์เอ.....	168
รูปที่ จ.9	ถ่านกัมมันต์บี.....	168

รูปที่ จ.10	ถ่านกัมมันต์ซี.....	169
รูปที่ จ.11	ถ่านกัมมันต์ดี.....	169
การทดลองเพื่อหาไอโซเทอร์มของถ่านกัมมันต์		
0, 1, 3, 5, 10, 15 และ 20 กรัม		
รูปที่ จ.12	ถ่านกัมมันต์เอ.....	170
รูปที่ จ.13	ถ่านกัมมันต์บี.....	170
รูปที่ จ.14	ถ่านกัมมันต์ซี.....	171
รูปที่ จ.15	ถ่านกัมมันต์ดี.....	172
รูปที่ ช.1	แลงมัวร์ไอโซเทอร์มของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ขนาดรูปทรงแบบ TOC.....	178
รูปที่ ช.2	แลงมัวร์ไอโซเทอร์มของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ขนาดรูปทรงแบบ COD.....	179
รูปที่ ช.3	แลงมัวร์ไอโซเทอร์มของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ขนาดรูปทรงแบบซี.....	180



# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 บทนำ

ปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญของมนุษย์ประกอบด้วยหลายอย่าง เช่น เสื้อผ้าเครื่องนุ่งห่ม ยารักษาโรค อาหาร เป็นต้น โดยสิ่งที่ถือได้ว่าเป็นปัจจัยพื้นฐานที่สำคัญของมนุษย์อีกสิ่งหนึ่งคือ น้ำ เนื่องจากมนุษย์มีการนำน้ำมาใช้ประโยชน์ในกิจกรรมประจำวัน และกิจกรรมต่าง ๆ มากมาย เช่น การอุปโภคบริโภค เกษตรกรรม อุตสาหกรรม เป็นต้น โดยในปัจจุบันได้มีการเพิ่มขึ้นของประชากร และอุตสาหกรรมอย่างต่อเนื่อง เป็นผลให้ความต้องการการใช้น้ำสูงขึ้น รวมทั้งแหล่งน้ำต่าง ๆ ได้เกิดการปนเปื้อนเพิ่มขึ้นมาก และในบางสภาวะอาจเกิดความแห้งแล้ง กับแหล่งน้ำนั้น ๆ ได้ ทำให้เกิดข้อจำกัดทางด้านปริมาณและคุณภาพของแหล่งน้ำธรรมชาติทั้งแหล่งน้ำผิวดินและแหล่งน้ำใต้ดิน เป็นผลให้ปัญหาการขาดแคลนน้ำมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น จนกลายเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นกับหลาย ๆ ประเทศ

ดังนั้นน้ำที่ออกจากระบบบำบัดน้ำเสียซึ่งมีคุณภาพได้ตามเกณฑ์มาตรฐานของทางราชการจึงเป็นแหล่งน้ำที่น่าสนใจอีกแหล่งหนึ่ง โดยเป็นการนำน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียมาบำบัดอีกครั้งหนึ่งด้วยระบบการบำบัดเพิ่มเติม เพื่อเป็นการปรับปรุงคุณภาพน้ำสำหรับนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ ทำให้สามารถช่วยแก้ปัญหาการขาดแคลนน้ำได้ดี นอกจากนี้การนำน้ำทิ้งกลับมาใช้ใหม่ ยังช่วยลดปริมาณน้ำทิ้งที่ต้องระบายลงสู่แหล่งน้ำ เป็นผลให้ลดปัญหามลพิษทางน้ำได้อีกด้วย โดยการปรับปรุงน้ำเพื่อกลับมาใช้ใหม่ จะขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการนำน้ำดังกล่าวไปใช้งาน เช่น ในกรณีของการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ตามบ้านเรือนนิยมใช้เป็น น้ำรดต้นไม้ น้ำล้างพื้น เป็นต้น ในกรณีของโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่จะใช้น้ำดังกล่าวเป็น น้ำไหลเวียนในหอทำน้ำเย็น น้ำเติมหม้อไอน้ำ หรือนำน้ำกลับมาใช้ในส่วนหนึ่งส่วนใดของกระบวนการผลิต อุตสาหกรรมซักรีด ถือได้ว่าเป็นอุตสาหกรรมที่ได้เริ่มเกิดขึ้นอย่างแพร่หลายในประเทศไทย และเป็นอุตสาหกรรมที่ใช้น้ำในปริมาณที่ค่อนข้างมาก จนน้ำกลายเป็นตัวแปรสำคัญของอุตสาหกรรมประเภทนี้ เป็นผลให้ค่าใช้จ่ายในด้านต้นทุนของน้ำที่ใช้ในการซักรีดสูงตามไปด้วย โดยปริมาณน้ำที่ใช้มากนี้เป็นผลให้ปริมาณน้ำเสียที่ปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมมีปริมาณน้ำมากเช่นกัน รวมทั้งหากน้ำเสียที่ปล่อยออกยังมีค่าพารามิเตอร์ที่ไม่เหมาะสม เช่น มีปริมาณของสี สารอินทรีย์ละลาย อยู่ในปริมาณมากอาจทำให้เป็นอันตรายต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมได้ทั้งทางตรงและทางอ้อม

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นในการนำน้ำทิ้งของโรงงานซักรีดที่ผ่านการบำบัดทางชีวภาพแล้วไปปรับปรุงต่อด้วยกระบวนการดูดซับ เพื่อให้มีคุณภาพน้ำที่ดีพอสามารถนำน้ำเหล่านั้นกลับมาใช้ใหม่ได้ โดยจากการศึกษาเกี่ยวกับถ่านกัมมันต์พบว่า ถ่านกัมมันต์มีคุณสมบัติในการดูดซับสีได้ดี รวมทั้งสารอินทรีย์ได้เป็นอย่างดี ซึ่งชี้ความสามารถในการดูดซับสารอินทรีย์แต่ละประเภท



ของถ่านกัมมันต์นั้น จะแตกต่างกันตามขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์(Cheremisinoff และ Ellerbusch, 1978) ทำให้ขนาดรูพรุนเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่งานวิจัยนี้ทำการทดสอบเพื่อหาขนาดรูพรุนที่เหมาะสม นอกจากนี้พบว่ากระบวนการดูดซับของถ่านกัมมันต์เป็นวิธีการที่มีความเป็นไปได้ และน่าเชื่อถือพอที่จะนำมาใช้เป็นกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ได้ (Urano, 1966) ดังนั้นจึงพิจารณาเลือกการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์มาใช้ประโยชน์ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้ง เพื่อให้มีศักยภาพน้ำทิ้งกลับมาใช้ใหม่ ทำให้งานวิจัยนี้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการประยุกต์ใช้จริงในระบบบำบัดน้ำเสียที่เพิ่มเติมด้วยระบบนำน้ำทิ้งกลับมาใช้ใหม่ของกระบวนการซักรีดต่อไปได้

## 1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 เพื่อศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดในด้านขนาดรูพรุน และพื้นที่ผิว ของการกำจัดมลสารอินทรีย์ในน้ำทิ้งจากกระบวนการซักรีด โดยทดลองแบบกะ (Batch)

1.2.2 เพื่อศึกษาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการออกแบบคอลัมน์ถ่านกัมมันต์ ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งจากกระบวนการซักรีด

1.2.3 เพื่อศึกษาถึงความเหมาะสมในด้านประสิทธิภาพ และค่าใช้จ่ายในกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งโรงงานซักรีดเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่

## 1.3 ขอบเขตงานวิจัย

งานวิจัยนี้จะทำการศึกษาในขอบเขตดังนี้

2.2.1 ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดที่มีขายในท้องตลาด ซึ่งมีขนาดรูพรุนแตกต่างกัน 4 ขนาดรูพรุน ได้แก่ 26,640 1,781 516 และ 404 อังสตรอม (พื้นที่ผิวเท่ากับ 763 967 1,030 และ 862 ตร.ม./ก. ตามลำดับ)

2.2.2 คอลัมน์ที่ใช้เป็นขนาดห้องปฏิบัติการ (lab – scale) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.40 ซม. สูง 120 ซม.

2.2.3 ทำการศึกษาที่อุณหภูมิห้อง โดยทำการศึกษาระหว่างเดือนตุลาคม 2547 ถึงเดือนมกราคม 2548

2.2.4 น้ำที่ใส่ทดลองเป็นน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดขั้นที่สองของโรงงานซักรีด โดยเป็นน้ำทิ้งจากโรงงานซักรีดแห่งหนึ่งในเขตสวนหลวง ซึ่งเป็นโรงงานซักรีดขนาดกลาง มีอัตราการปล่อยน้ำทิ้งจากบ่อขัดแต่ง (polishing pond) ของระบบบ่อเติมอากาศประมาณ 800 ลบ.ม./วัน

2.2.5 ทำการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการของภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### 2.1 กระบวนการซักกรีด (โครงการฉลากเขียว, 2541 และ เพ็ญรุ่ง, 2528)

ตั้งแต่โบราณได้มีการซักกรีดด้วยแรงงานคน ต่อมาในสมัยปฏิวัติอุตสาหกรรมได้มีผู้คิดค้นประดิษฐ์เครื่องท่อนแรงขึ้นเมื่อปี ค.ศ. 1907 เป็นถังไม้เลียนแบบวิธีการซักผ้าที่ใช้ไม้ฟาดให้มีแกนสำหรับฟาดแล้วใช้มือหมุนทำให้สะดวกมากขึ้น หลังจากนั้นได้เริ่มวิวัฒนาการเพิ่มเป็นที่รีดน้ำสะอาดอีก 13 ปีต่อมาได้เริ่มให้มอเตอร์แทนมือหมุน จนถึงปี ค.ศ. 1939 ได้มีการพัฒนามากขึ้นเป็นเครื่องที่มีระบบการทำงานอัตโนมัติมากขึ้น จนถึงปัจจุบันที่มีการปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของเครื่อง สามารถตั้งโปรแกรมซักให้เหมาะสมกับเนื้อผ้าได้ เมื่อถึงยุคของการซักผ้าโดยใช้เครื่องได้เข้ามาแพร่หลายในเมืองไทย เริ่มมีการพัฒนาจากการรับจ้างซักผ้าด้วยมือ เป็นการรับจ้างซักด้วยเครื่อง แต่เนื่องจากเครื่องที่ใช้ตามบ้านเป็นเครื่องขนาดเล็ก (Domestic use) มีข้อจำกัดในด้านกำลังความสามารถของเครื่องที่ไม่สามารถซักผ้าชิ้นใหญ่ ๆ เช่น ผ้าห่ม ผ้าปูที่นอนหรือผ้าม่านได้สะอาดเท่าที่ควรและความจุของเครื่องก็มีจำกัด พร้อมทั้งยังต้องอาศัยความร้อนธรรมชาติในการตากผ้าให้แห้งอีกด้วย ปัจจุบันจึงได้มีร้านค้าที่ให้บริการซักกรีดเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก เพื่อสนองตอบต่อความต้องการของผู้บริโภคที่มีระดับปานกลางขึ้นไป เนื่องจากมีการลงทุนต่ำ แต่จำนวนร้านบริการซักอบรีดจะมีไม่แน่นอนขึ้นอยู่กับฤดูกาล จากข้อมูลสถิติกิจการที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพตามกฎหมายว่าด้วยการสาธารณสุข ในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานคร ประจำปีงบประมาณ 2539 โดยกองอนามัยสิ่งแวดล้อม สำนักอนามัยกรุงเทพมหานคร พบว่ามีกิจการซักกรีด อัดกลีบ กัดสีผ้า โดยใช้เครื่องจักร 467 ราย ซึ่งโดยปกติจะสามารถแบ่งบริการการซักได้ตามขนาดของเครื่องจักร ทำให้สามารถแบ่งได้ 3 ประเภทคือ

- การรับจ้างซักผ้าตามบ้าน มักใช้มือซักหรือใช้เครื่องซักผ้าขนาดไม่เกิน 5 กิโลกรัม
- ร้านบริการซักน้ำ ใช้เครื่องซักผ้าขนาด 5 – 20 กิโลกรัม
- บริการซักน้ำขนาดอุตสาหกรรม ใช้เครื่องซักผ้าขนาด 20 กิโลกรัมขึ้นไป

#### 2.1.1 อุปกรณ์ในกระบวนการซักกรีด

กระบวนการซักกรีดได้มีการใช้เครื่องมือต่าง ๆ ในการซักกรีดเป็นจำนวนมาก ซึ่งอุปกรณ์ในการซักกรีดมีดังนี้

### 2.1.1.1 อุปกรณ์จัดรอยเปื้อน (spotting board)

ประกอบด้วยโต๊ะ ปืนฉีดลมหรือไอน้ำ และเครื่องดูดสูญญากาศ (vacuum) เพื่อจัดรอยเปื้อนบางชนิดที่ติดมากับเนื้อผ้า

### 2.1.1.2 เครื่องซักผ้า (washing machine)

ประกอบด้วยสิ่งอำนวยความสะดวกต่าง ๆ ในการเติมน้ำยา การทำน้ำร้อน และการนำไอน้ำมาใช้ ต้มน้ำเพื่อความสะดวกของการซักผ้า เครื่องแบบใหม่ที่นิยมใช้ในประเทศไทยปัจจุบันเป็นแบบอุโมงค์ (continuous batch tunnel washer) คือมีระบบการทำงานอย่างต่อเนื่องด้วยเครื่องควบคุม การทำงานแบบอัตโนมัติตั้งแต่การใส่ผ้าเข้าเครื่องจนถึงสิ้นสุดกระบวนการซัก

### 2.1.1.3 เครื่องอบแห้ง (tumbler dryer)

ทำหน้าที่ในการอบผ้าให้แห้ง เครื่องอบผ้าจะรับงานต่อจากเครื่องซักผ้า โดยการคัดแยกผ้าออกตามชนิดเพื่อนำไปอบ แล้วจึงนำไปรีดได้

### 2.1.1.4 เครื่องเป่าหุ่่น (form finisher)

สามารถเป่าลมและไอน้ำ นำมาใช้ในธุรกิจซักรีดเพื่อความไวและช่วยให้งานมีมาตรฐาน

### 2.1.1.5 อุปกรณ์รีดผ้า

อุปกรณ์รีดผ้าได้แก่ เตารีดแบบมือจับ (iron) และเครื่องอัดรีด (press) หรือเครื่องปั๊มผ้า ซึ่งจะช่วยให้รีดผ้าได้เร็ว มีประสิทธิภาพและได้มาตรฐาน ลดปัญหาการเสียหายที่เกิดกับเนื้อผ้าให้น้อยลง

### 2.1.1.6 เครื่องกำเนิดไอน้ำ (steam boiler)

เป็นตัวหลักในการผลิตไอน้ำเพื่อจ่ายไปยังส่วนต่าง ๆ ให้กับเครื่องจักรที่ต้องการใช้ไอน้ำ เช่น เครื่องซักรีด เครื่องรีด เครื่องอบผ้า เตารีด และอุปกรณ์จัดรอยเปื้อน

### 2.1.1.7 เครื่องปั๊มลม (air compressor)

มีหน้าที่ผลิตลมให้กับเครื่องจักรต่าง ๆ ที่ต้องการใช้ลมในการควบคุมระบบการทำงานของเครื่องให้ทำงานตามขั้นตอนที่วางไว้ โดยเครื่องซัก เครื่องรีด ต้องใช้ลมเป็นแรงดันของเครื่องจักร

## 2.1.2 สารเคมีที่ใช้ในกระบวนการซักรีด

สารเคมีที่นำมาใช้ในกระบวนการซักได้แก่

### 2.1.2.1 สารซักฟอก (laundry detergent)

เป็นสารเคมีที่ช่วยขจัดสิ่งสกปรกที่ติดอยู่กับผ้า ขจัดคราบฝังในให้ออกจากเนื้อผ้า และสามารถลดแรงตึงผิวของน้ำทำให้สารเคมีซึมเข้าเนื้อผ้าได้รวดเร็วขึ้นและยังป้องกันสิ่งสกปรกกลับมาเกาะเนื้อผ้าอีก โดยสารที่ใช้ในการซักจะแตกต่างกันในแต่ละโรงซักรีด

### 2.1.2.2 สารเสริมความเป็นด่าง (alkaline builder)

เป็นสารเคมีที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของสารซักฟอกในการซักผ้าให้ดีขึ้น สารพวกนี้มีความแรงกว่าสารเคมีที่ใช้ซักทั่ว ๆ ไป ใช้กับผ้าที่สกปรกมาก สารเสริมด่างนี้จะทำงานได้ดีในน้ำร้อน

### 2.1.2.3 สารฟอกขาว (bleaching agent)

เป็นสารเคมีที่มีส่วนประกอบของคลอรีน หรือ เปอร์ออกไซด์ (peroxide) หรือ เปอร์บอเรต (perborate) หรือ เปอร์แอซิติกแอซิด (peracetic acid) หรือ เปอร์คาร์บอเนต (percarbonate) ใช้ฟอกขาวผ้าและฟอกสีของรายเปื้อนต่าง ๆ ให้หลุดออก

### 2.1.2.4 สารสะเทินด่าง

เป็นพวกกรดอ่อน ๆ (sour) เช่น กรดโซเดียมของกรดฟลูออไรด์ กรดโซเดียม-ซิติโคฟลูออไรด์ กรดซिटริก ใช้ทำลายความเป็นด่างตกค้างอยู่กับผ้าให้เป็นกลาง

### 2.1.2.5 สารปรับสภาพผ้า (fabric softening agent)

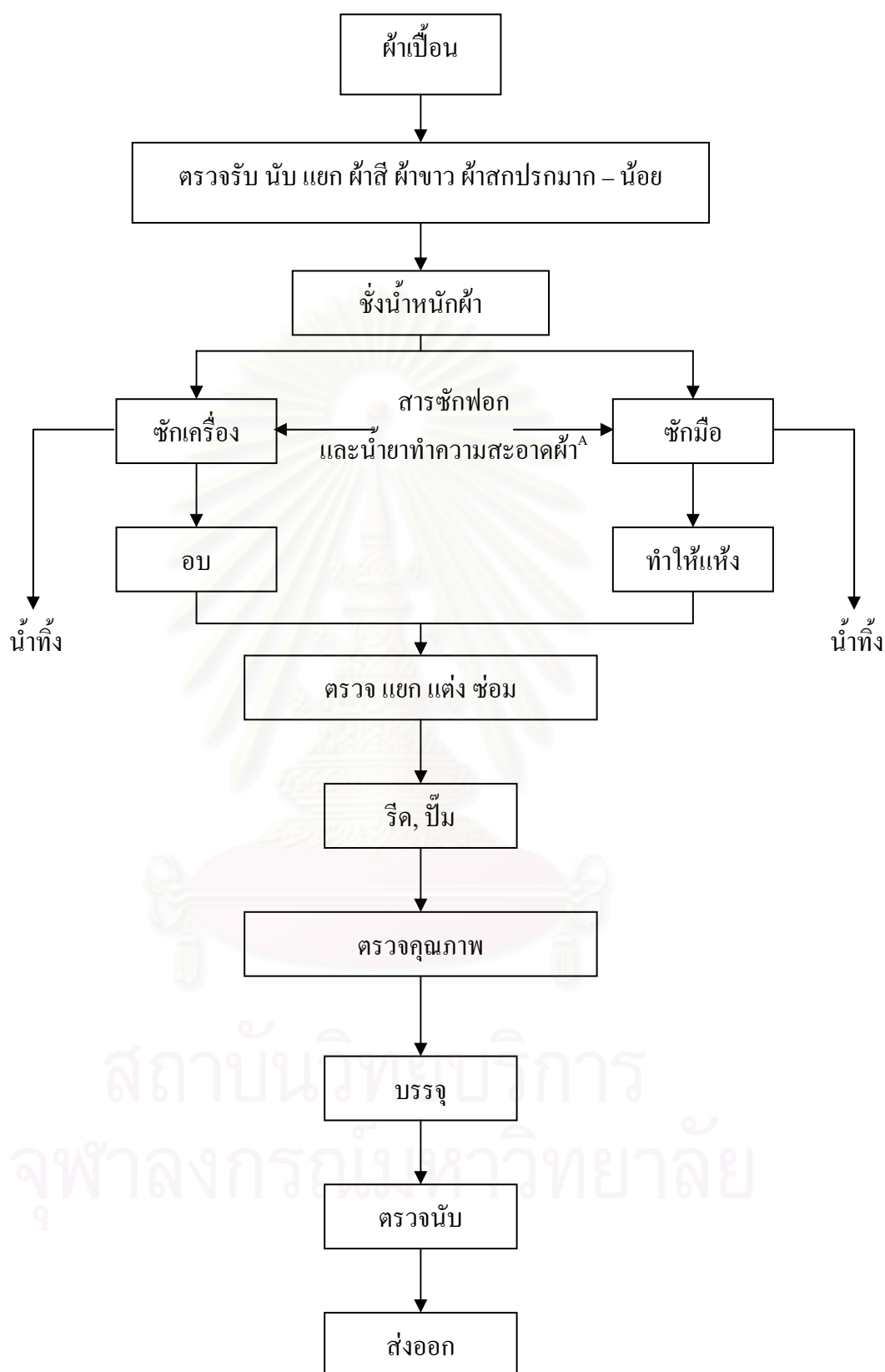
เป็นสารที่ช่วยปรับสภาพของผ้าให้นุ่ม ช่วยทำให้ผ้าฟู นุ่ม และรีดง่าย นอกจากนี้ยังช่วยยืดอายุผ้าให้คงทน ใช้ได้กับทั้งผ้าสีและผ้าขาว โดยใช้หลังจากการซักด้วยสารซักฟอกแล้ว ใส่น้ำล้างครั้งสุดท้าย

## 2.1.3 กระบวนการซักรีด (โครงการฉลาดเขียว, 2541)

กระบวนการหรือขั้นตอนของการซักรีด สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 2.1

### 2.1.3.1 เตรียมเสื้อผ้าก่อนนำลงซัก

โดยผ้าที่นำมาซักต้องผ่านขั้นตอนการทำ เครื่องหมาย (marking - in) เพื่อแยกชนิดของผ้าที่นำมาซักเช่น ผ้าที่มีคราบเปื้อนซึ่งไม่สามารถซักล้างออกด้วยสารซักฟอกธรรมดา จะต้องนำไปทำความสะอาดเฉพาะจุด (spotting) ด้วยสารเคมีเฉพาะอย่างก่อนที่จะนำไปซัก หรือแยกผ้าที่สกปรกมาก หรือผ้าที่เนื้อหนา ผ้าสี และผ้าขาวออกจากกัน หรือแยกซักคนละถัง แล้วจึงนำเสื้อผ้าไปซังนำหนัก แล้วจึงนำไปซักตามชนิดของผ้า



รูปที่ 2.1 ขั้นตอนของการซักรีด (โครงการฉลาดเขียว, 2541)

หมายเหตุ : A = ขึ้นกับโรงซักรีด



### 2.1.3.2 การทำความสะอาดเสื้อผ้า

นำผ้าเข้าถังซัก เลือกใช้น้ำตามปริมาณผ้าที่ใส่ลงในถังซัก และเติมสารซักฟอกตามต้องการ (สารซักฟอกแต่ละโรงซักரிคจะมีลักษณะแตกต่างกัน)

### 2.1.3.3 การรีด

หลังจากการซักแล้ว จะนำผ้าที่ถูกทำให้แห้งแล้วมารีดโดยใช้เครื่องอัดรีดผ้าให้เรียบหรือเตารีดมือตามความเหมาะสมของผ้า ก่อนทำการรีด ผ้าทั้งหมดจะถูกตรวจโดยคนแต่งผ้า (spotter) ซึ่งจะใช้สารเคมีทำความสะอาดเฉพาะจุด จากนั้นตรวจสอบความเรียบร้อยของเสื้อผ้า เช่น การซ่อมกระดุม ความเรียบร้อยของขอบแขน ชายเสื้อ

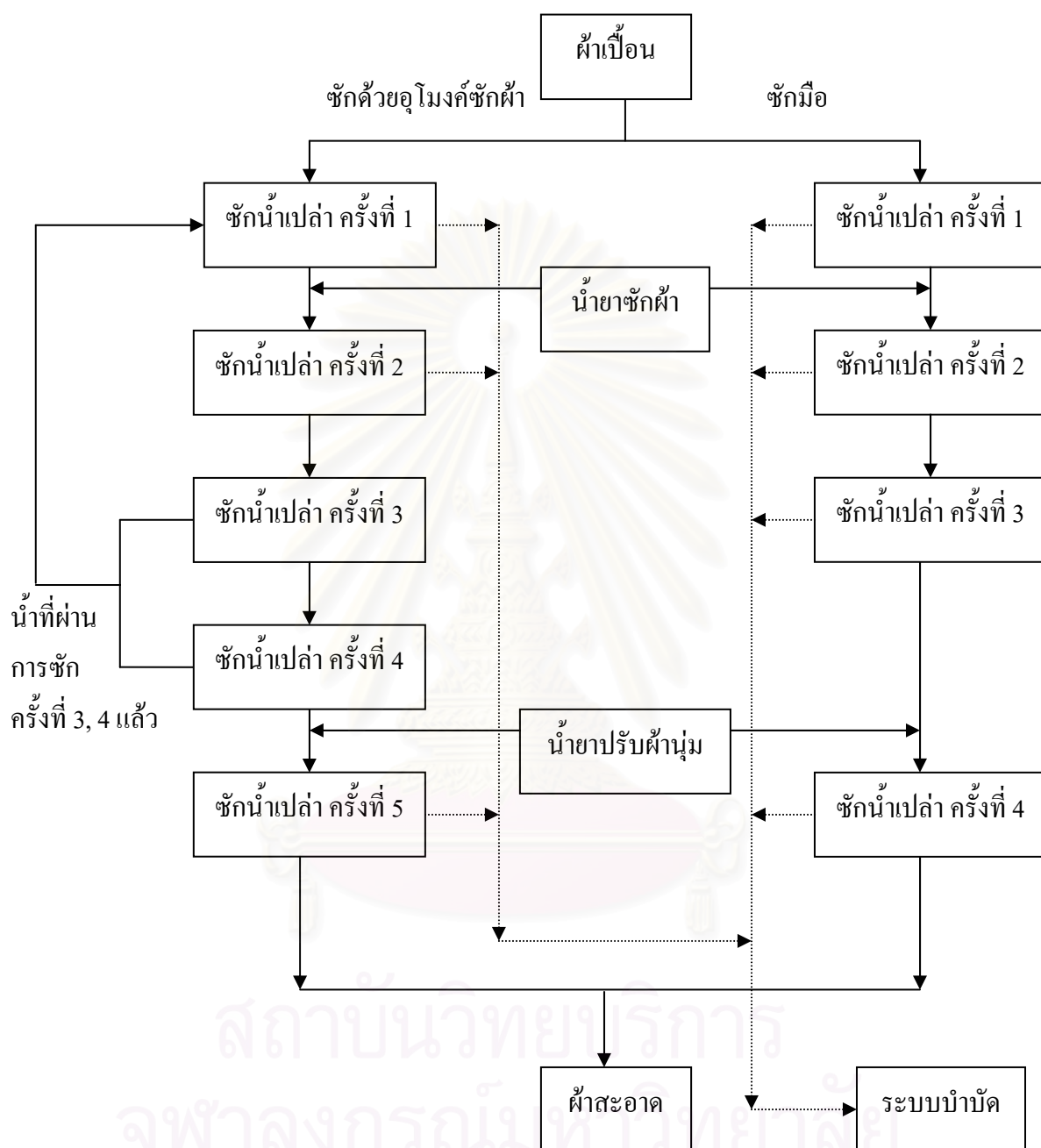
### 2.1.4 ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

ผลกระทบของกระบวนการซักรีดต่อสิ่งแวดล้อม สามารถแบ่งได้เป็น 2 ระยะ คือ ในระหว่างการซัก และภายหลังการซัก ซึ่งในระหว่างการซักจะมีการใช้ทรัพยากร เช่น ไฟฟ้า น้ำ และสารซักฟอก เพื่อทำให้เสื้อผ้าสะอาด และมีการใช้ไฟฟ้าหรือก๊าซ ในการอบและรีดผ้า ซึ่งจะมีการใช้ทรัพยากรในปริมาณมาก สำหรับหลังการซัก จะมีการปล่อยน้ำเสียออกสู่สิ่งแวดล้อมปริมาณมากเช่นเดียวกัน ก่อให้เกิดมลพิษต่อแหล่งน้ำได้

โรงซักรีดที่ผู้วิจัยทำการศึกษา น้ำเสียส่วนใหญ่เป็นน้ำเสียที่มีการปล่อยออกอย่างต่อเนื่อง ซึ่งมาจากการกระบวนการซักภายใน โรงงาน อาจมีน้ำเสียจากการล้างพื้น โรงงานข้างเป็นครั้งคราว (ลักษณะแบบทีละเท) โดยมีระบบบำบัดน้ำเสียแบบสระเติมอากาศ (Aerated Lagoon) ระยะเวลาพักพักชลศาสตร์ 3 วัน และเพิ่มเติมด้วยบ่อขัดแต่ง (polishing pond) ซึ่งมีอัตราการปล่อยน้ำทิ้งออกจากระบบบำบัดประมาณ 800 ลบ.ม./วัน โดยขั้นตอนการปล่อยน้ำเสียของกระบวนการซักของโรงซักรีดที่ศึกษา แสดงดังรูปที่ 2.2

ผู้วิจัยได้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำเสียก่อน และน้ำทิ้งหลังผ่านระบบบำบัดของโรงซักรีดที่ผู้วิจัยทำการศึกษาเป็นจำนวน 3 ครั้ง เพื่อวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของน้ำ ซึ่งแสดงดังตารางที่ 2.1 โรงซักรีดที่ผู้วิจัยทำศึกษานี้ได้มีการใช้สารซักฟอกหลายชนิด โดยองค์ประกอบของสารซักฟอกที่ใช้ เช่น Nonylphenol ethoxylate (CAS NO 9016-45-9), Sodium dodecylbenzenesulfonate (CAS NO 25155-30-0) และ Triethanolamine (CAS NO 120-71-6) ซึ่งเป็นน้ำยาซักผ้าชนิดเข้มข้น Dimethyldialkylammonium chlorides (CAS 61789-80-8) ซึ่งเป็นน้ำยาปรับผ้านุ่มชนิดเข้มข้น ดังนั้นจึงคาดการณ์ว่าสารประกอบในสารซักฟอก และน้ำยาเหล่านี้จะปนเปื้อนลงสู่ น้ำเสียก่อนการบำบัด และเมื่อน้ำเสียเหล่านี้ผ่านการย่อยสลายทางชีวภาพแบบใช้ออกซิเจน ด้วยระบบแบบสระเติมอากาศของโรงงานแล้ว เป็นผลให้สารประกอบข้างต้นถูกเปลี่ยนรูปไปมากทำให้น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้วไม่สามารถคาดการณ์ได้ รวมทั้งมีความยุ่งยากซับซ้อนมากในการวิเคราะห์สารผลิตภัณฑ์ และ ขนาดโมเลกุลที่เหลืออยู่ในน้ำทิ้งได้





รูปที่ 2.2 ขั้นตอนการปล่อยน้ำเสียของกระบวนการซักของโรงซักรีดที่ทำการศึกษา

ตารางที่ 2.1 ลักษณะสมบัติของน้ำเสียก่อน และน้ำทิ้งหลังผ่านระบบบำบัดของโรงซักกรีด

พารามิเตอร์	หน่วย	น้ำเสีย		น้ำทิ้ง	
		ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD
พีเอช	-	8	0.26	8.3	0.16
สี	เอดีเอ็มไอ	224	48.3	32	2.5
ความกระด้างทั้งหมด	มก./ล. ในรูป CaCO <sub>3</sub>	115	2.5	120	8.2
บีโอดี	มก./ล.	52	6.6	13	2.4
ซีโอดี	มก./ล.	168	36.5	36	1.7
ทีโอดี	มก./ล.	72	5.8	15	0.9
โคลิฟอร์มทั้งหมด	เอ็มพีเอ็น/100มล.	-	-	790	20.5

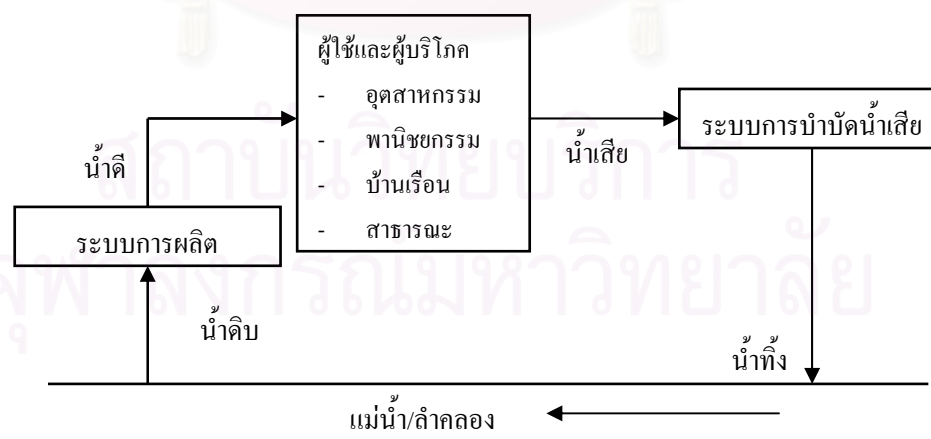
หมายเหตุ: ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำทิ้งสิ้น 3 ตัวอย่าง

## 2.2 การนำน้ำทิ้งกลับมาใช้ใหม่ (สุคนชวรรณ, 2544 และ อัมพวัน, 2539)

การนำน้ำทิ้งกลับมาใช้ใหม่นั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบใหญ่ ๆ ดังนี้

### 2.2.1 การนำกลับมาใช้ทางอ้อม (Indirect Reuse)

วิธีการนี้เป็นการทิ้งน้ำทิ้งลงไปสู่แม่น้ำลำคลอง แล้วระบบการผลิตน้ำประปาจะนำน้ำในแม่น้ำลำคลอง ผลิตน้ำใช้และบริโภค จ่ายไปให้ผู้ใช้และผู้บริโภค ซึ่งเมื่อใช้แล้วจะกลายเป็นน้ำเสีย ทำให้ต้องได้รับการบำบัดก่อนที่จะทิ้งกลับลงสู่แม่น้ำลำคลองอีกครั้งหนึ่ง ดังแสดงในรูปที่ 2.3



รูปที่ 2.3 การนำน้ำทิ้งกลับมาใช้ทางอ้อม (สุคนชวรรณ, 2544)

วิธีการนี้จะไม่ได้ช่วยประหยัดทางเศรษฐกิจและลดปริมาณน้ำทิ้งหรือจำนวนมลพิษ แต่น้ำทิ้งและจำนวนมลพิษส่วนหนึ่งก็ยังคงถูกนำมาหมุนเวียนใช้ใหม่อีกด้วย

### 2.2.2 การนำกลับมาใช้โดยตรง

วิธีการนี้จะเป็นการเก็บกักน้ำทิ้งเอาไว้ใช้ประโยชน์โดยไม่ทิ้งไป ซึ่งจะให้ประโยชน์ทางเศรษฐกิจ และลดปริมาณน้ำทิ้งหรือจำนวนมลพิษได้มากที่สุด โดยการนำกลับมาใช้โดยตรงนี้ ต้องมีการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งก่อนนำน้ำทิ้งเหล่านั้นกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่นั้น จะคล้ายกับกระบวนการที่ใช้ในการผลิตน้ำสะอาดและการบำบัดน้ำเสีย การเลือกวิธีการปรับปรุงคุณภาพน้ำจะขึ้นอยู่กับคุณภาพของน้ำทิ้งที่จะเข้าระบบและจุดมุ่งหมายของการนำกลับมาใช้ วิธีการปรับปรุงคุณภาพน้ำที่เลือกใช้นั้นจะต้องสามารถปรับปรุงคุณภาพน้ำออกให้มีคุณภาพเป็นที่ยอมรับและสามารถนำกลับมาใช้ได้โดยไม่เป็นอันตรายต่อผู้ใช้ รวมทั้งควรพิจารณาถึงความคุ้มค่าในทางเศรษฐศาสตร์ด้วย (Lu และ Leung, 2003) กระบวนการที่ใช้กันอยู่ทั่วไปมีอยู่หลากหลาย ซึ่งแต่ละกระบวนการจะผลิตน้ำได้คุณภาพต่างกัน และให้ความเหมาะสมสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ที่แตกต่างกันด้วย ดังแสดงในรูปที่ 2.4

การนำน้ำทิ้งกลับมาใช้ใหม่โดยตรงนี้ จะใช้ได้ทั้งทางด้านกลีกรกรรม พาณิชยกรรม อุตสาหกรรมและสาธารณะประโยชน์

#### 2.2.2.1 การใช้น้ำทิ้งสำหรับการกลีกรกรรม

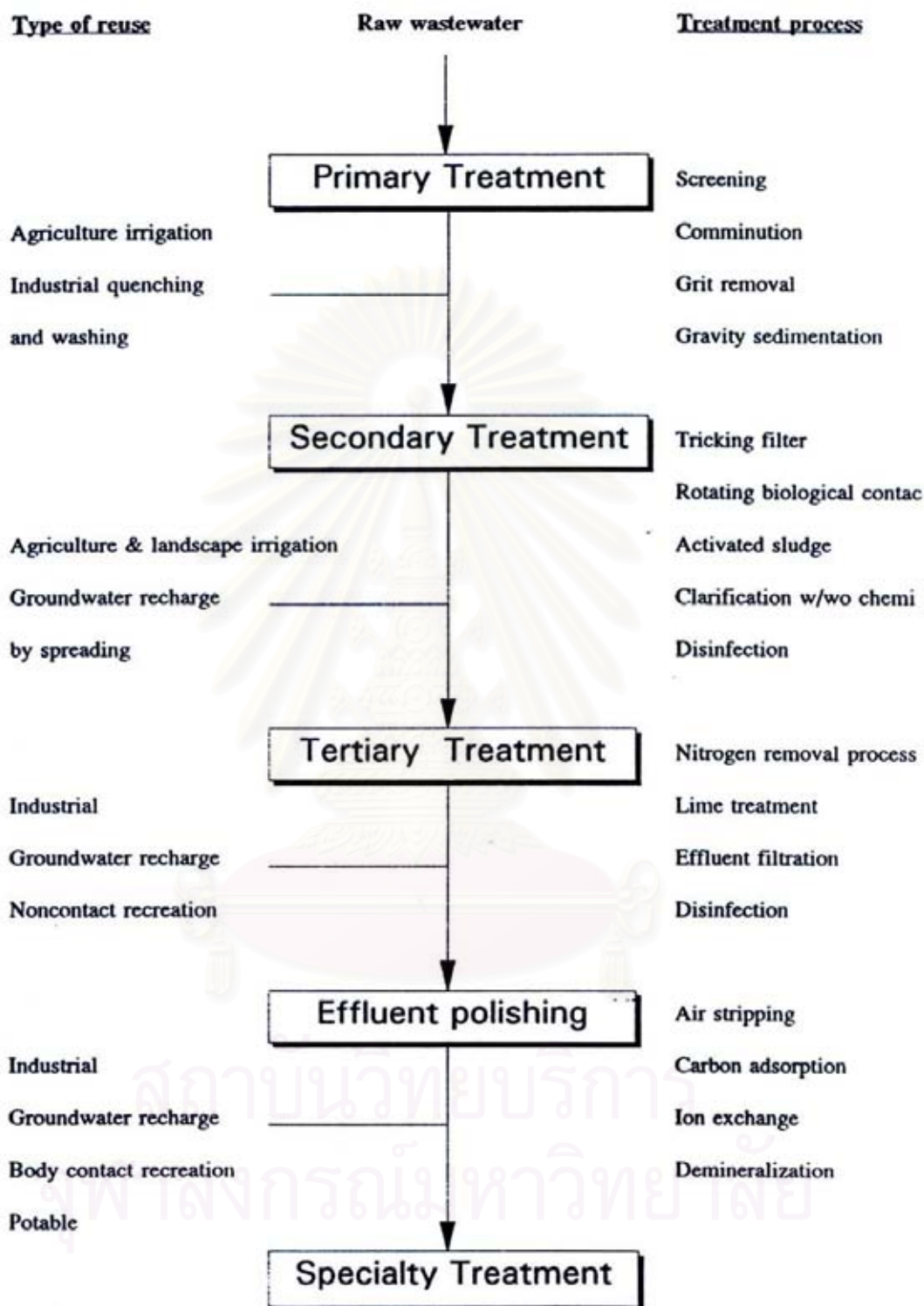
การใช้น้ำทิ้งสำหรับการกลีกรกรรมนั้นให้ผลประโยชน์หลายอย่างพร้อมกันคือน้ำทิ้งปกติจะมีคุณค่าของปุ๋ย เช่นสารไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ส่วนผลเสียของการใช้น้ำทิ้ง เช่น ถ้าน้ำนั้นได้รับการบำบัดไม่ถูกต้องก็อาจจะมีเชื้อโรคหรือสารอันตรายเจือปนอยู่โดยเฉพาะพวกสารโลหะหนักซึ่งจะแทรกซึมเข้าไปในพืชได้และเป็นอันตรายต่อผู้บริโภค

#### 2.2.2.2 การใช้น้ำทิ้งสำหรับการรดสนามหญ้าและสวนหย่อม

การนำน้ำทิ้งหมุนเวียนมาใช้รดสนามหญ้าและสวนหย่อมนี้ได้รับความนิยมกันมากในต่างประเทศ โดยเฉพาะสหรัฐอเมริกา ตัวอย่างของสถานที่เหล่านี้คือ สนามกอล์ฟ สวนสาธารณะ เป็นต้น การใช้น้ำทิ้งนี้ต้องคำนึงถึงความเข้มข้นของสารต่าง ๆ โดยเฉพาะพวกแบคทีเรียชนิด ฟีคัล โคลิฟอร์ม (fecal coliform bacteria) มาตรฐานน้ำทิ้งสำหรับการรดสนามหญ้าและสวนหย่อมแสดงไว้ใน ภาคผนวก ก ตารางที่ ก.1

#### 2.2.2.3 การใช้น้ำทิ้งสำหรับการก่อสร้าง

การนำน้ำทิ้งมาใช้ในการก่อสร้างนี้ สามารถนำมาใช้ผสมคอนกรีต การรดน้ำเพื่อป้องกันฝุ่นละอองในบริเวณการก่อสร้างหรือการรดน้ำเพื่อเพิ่มเติมความชื้นในการสร้างถนน เป็น



รูปที่ 2.4 ขั้นตอนของการบำบัดสำหรับการนำน้ำทิ้งไปใช้ประโยชน์ต่าง ๆ (Montgomery, 1985)

ต้น มาตรฐานน้ำทิ้งชนิดนี้ยังไม่ได้รับการกำหนด แต่คุณสมบัติหลักที่ควรพิจารณาก่อนนำมาใช้คือ

ฟิเอช ควรอยู่ระหว่าง 6.0 – 9.0 ถ้าค่าฟิเอช ต่ำเกินไปจะมีผลเสียต่อความแข็งแรงของคอนกรีต

สารคลอไรด์ ถ้ามีสารคลอไรด์มากเกินไป (มากกว่า 1,000 มก./ล.) จะทำให้น้ำกร่อย

ทีดีเอส ถ้า ทีดีเอส สูงเกินไป (2,000 – 5,000 มก./ล.) ก็อาจมีผลต่อความแข็งแรงของคอนกรีตเช่นกัน

สารแวนดอลอยและความขุ่น ถ้าน้ำมีสิ่งสกปรกเจือปนทำให้มีสารแวนดอลอยและความขุ่นสูง (มีสารแวนดอลอย มากกว่า 30 มก./ล. และความขุ่นมากกว่า 10 มก./ล.) ไม่เหมาะสมสำหรับผสมคอนกรีต

น้ำมันและไขมัน ถ้าน้ำมีน้ำมันและไขมันเจือปนอยู่จะไม่เหมาะสมสำหรับงานคอนกรีต

#### 2.2.2.4 การใช้น้ำทิ้งปล่อยเติมลงในน้ำบาดาล

จุดประสงค์ในการปล่อยเติมน้ำทิ้งลงในน้ำบาดาลนั้นคือ การเติมเพื่อช่วยชะลอการลดลงของระดับน้ำใต้ดิน ป้องกันไม่ให้น้ำทะเลหนุนเข้ามาในน้ำจืดใต้บาดาลตามบริเวณชายฝั่งทะเล เพื่อป้องกันไม่ให้พื้นดินทรุดตัวลง และเติมเพื่อเพิ่มแหล่งน้ำสำหรับการใช้และการบริโภค

การปล่อยเติมน้ำทิ้งลงในน้ำใต้บาดาล อาจทำได้โดยการปล่อยน้ำทิ้งลงในบึงหรือคลองไหลวนเวียนที่สร้างขึ้นมาและปล่อยให้น้ำทิ้งไหลซึมลงไปตามธรรมชาติ วิธีนี้เหมาะสำหรับระดับน้ำบาดาลที่ไม่ค่อยลึกมากนัก คุณภาพของน้ำทิ้งที่จะปล่อยเติมลงในน้ำบาดาลนั้นจะต้องคำนึงถึงการปลอดเชื้อโรค มีทีดีเอส และโลหะหนักต่ำ ต้องไม่มีจุลินทรีย์ มาตรฐานน้ำทิ้งที่จะปล่อยเติมในน้ำบาดาลแสดงไว้ใน ภาคผนวก ก ตารางที่ ก.2

#### 2.2.2.5 การใช้น้ำทิ้งมาหมุนเวียนใช้ใหม่ในการอุตสาหกรรม

การอุตสาหกรรมเป็นแหล่งที่เกิดน้ำเสียจำนวนมาก การนำน้ำทิ้งมาหมุนเวียนใช้ใหม่จะสามารถช่วยลดปริมาณน้ำทิ้งที่ปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมได้มาก และเป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในการผลิตด้วย น้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมสามารถที่จะนำมาหมุนเวียนใช้ได้หลายอย่าง เช่น ในการลดความร้อนของระบบปรับอากาศ น้ำหล่อเย็น น้ำป้อนหรือน้ำเลี้ยงหม้อต้มไอน้ำ

น้ำใช้ในระบบการผลิต น้ำใช้สำหรับการทำความสะอาด น้ำใช้ในระบบป้องกันไฟไหม้ น้ำสำหรับรดสนามหญ้าและสวนหย่อมรอบ ๆ โรงงาน เป็นต้น

สำหรับน้ำทิ้งที่จะนำมาใช้เป็นน้ำใช้ในหม้อต้มไอน้ำและน้ำใช้ในระบบการผลิต โดยเฉพาะในส่วนของระบบการผลิตที่ใช้ล้างหรือผสมผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ไม่ควรมีน้ำทิ้งที่มาจากระบบบำบัดน้ำโสโครก เพราะมีผลกระทบต่อด้านจิตวิทยาต่อผู้ใช้หรือผู้บริโภค รวมทั้งมีพวกแบคทีเรียและจุลินทรีย์ที่สามารถทำให้เกิดผลเสียต่อกระบวนการผลิตได้ และควรผ่านการกรองเอาสารละลายต่าง ๆ ออกแล้ว ซึ่งจะเป็นน้ำที่มีคุณภาพค่อนข้างดี สามารถนำมาหมุนเวียนใช้ได้อย่างไม่น่ารังเกียจได้

รวมทั้งน้ำทิ้งที่จะนำมาใช้ในหอหล่อเย็นนั้น ต้องคำนึงถึงปัญหา 3 อย่าง คือ การเกิดตะกรัน การเกิดสนิม และการเกิดตะไคร่น้ำ จะทำให้ระบบแลกเปลี่ยนความร้อนเกิดปัญหาขึ้นได้

#### 2.2.2.6 การใช้น้ำทิ้งปล่อยลงในบึงสาธารณะ

น้ำทิ้งที่ใช้ในบึงสาธารณะนี้จะต้องมีคุณภาพค่อนข้างดี ใสสะอาด ไม่มีสีหรือกลิ่น และต้องเป็นน้ำที่ปลอดภัยปราศจากเชื้อโรค ค่าพีเอชต้องเหมาะสม ไม่ทำให้ระคายเคือง โดยจะเติมน้ำทิ้งลงในบึงสาธารณะนี้เพื่อเพิ่มปริมาณน้ำ มาตรฐานของน้ำทิ้งปล่อยเติมลงในบึงสาธารณะแสดงไว้ในภาคผนวก ก ตารางที่ ก.3

#### 2.2.2.7 การใช้น้ำทิ้งเลี้ยงสัตว์น้ำ

น้ำทิ้งที่ปล่อยลงในบึงเลี้ยงสัตว์น้ำหรือปล่อยลงในแม่น้ำลำคลอง เพื่อใช้ในการประมง และเพื่อเป็นการเพิ่มปริมาณการไหลของน้ำในแม่น้ำ น้ำทิ้งต้องมีคุณภาพดีไม่เป็นที่รังเกียจ รวมทั้งไม่ควรมีคลอรีน เพราะจะสามารถทำอันตรายต่อสัตว์น้ำบางอย่างได้ เช่น สัตว์น้ำที่ยังไม่เจริญเติบโตเต็มที่ นอกจากนี้ไม่ควรมีโลหะหนักและยาฆ่าแมลงเพราะสามารถทำอันตรายได้เช่นกัน มาตรฐานน้ำทิ้งสำหรับเลี้ยงสัตว์น้ำแสดงไว้ในภาคผนวก ก ตารางที่ ก.4

#### 2.2.2.8 การใช้น้ำทิ้งเพื่อเลี้ยงสัตว์

น้ำทิ้งที่ใช้นี้ต้องพิจารณาถึงปริมาณของเกลือแร่ที่ละลายอยู่ในน้ำ เช่น คลอไรด์ ซัลเฟต ไบคาร์บอเนต โซเดียม ซึ่งจะมีผลทำให้ค่าทีดีเอสสูงได้ หากค่าทีดีเอสประมาณ 1,000 มก./ล. สามารถนำมาเลี้ยงสัตว์เลี้ยงได้ แต่หากสูงกว่านี้อาจทำให้เกิดปัญหาต่อระบบการย่อยอาหารของสัตว์ได้ มาตรฐานน้ำทิ้งสำหรับเลี้ยงสัตว์แสดงไว้ในภาคผนวก ก ตารางที่ ก.5



### 2.2.2.9 การนำน้ำทิ้งมาใช้ดีมและบริโภค

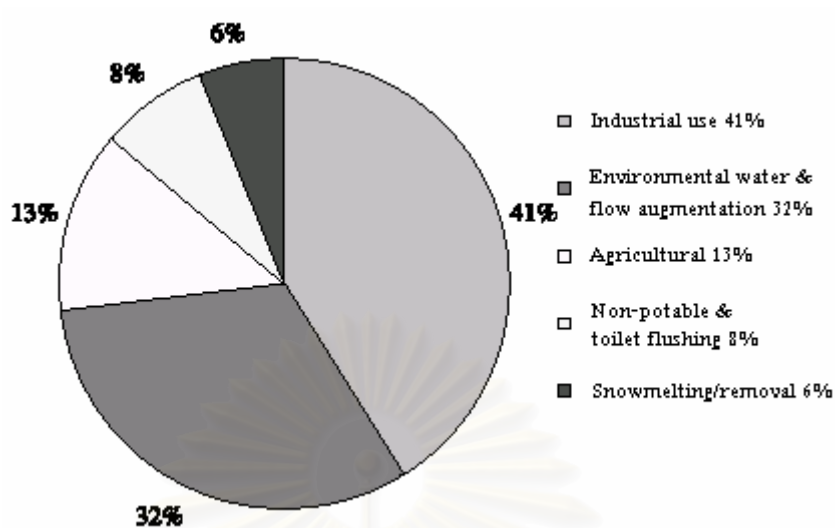
การนำน้ำทิ้งมาใช้ดีมและบริโภคนั้น ยังไม่เป็นที่ยอมรับของคนส่วนใหญ่ ซึ่งความจริงแล้วน้ำทิ้งที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพ 2 - 3 ขั้นตอนนั้นเป็นน้ำที่เกือบจะบริสุทธิ์ สามารถที่จะใช้ดีมและบริโภคได้โดยไม่เป็นพิษ หรือเป็นอันตรายต่อร่างกาย มาตรฐานคุณภาพ น้ำบาดาลที่ใช้บริโภค และมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภคแสดงไว้ใน ภาคผนวก ก ตารางที่ ก.6 และ ก.7 ตามลำดับ

จากประโยชน์ของการนำน้ำทิ้งกลับมาใช้ใหม่ในด้านต่าง ๆ ข้างต้นแล้ว ทำให้เริ่มมีการนำน้ำทิ้งกลับมาใช้ใหม่มากขึ้น โดยการนำน้ำทิ้งกลับมาใช้ใหม่ในต่างประเทศนั้นได้เริ่มมีการนำน้ำทิ้งกลับมาใช้ใหม่แล้วหลายประเทศ เช่น จากการศึกษาของ Al-Sulaim และ Asano (2000) พบว่าในประเทศญี่ปุ่นได้มีการนำน้ำทิ้งกลับมาใช้ใหม่ในหลายด้าน โดยมีปริมาณน้ำทิ้งที่นำกลับมาใช้ใหม่ประมาณ  $100 \times 10^6$  ลบ.ม./ปี ซึ่งจะนำกลับมาใช้ใหม่ในด้านอุตสาหกรรมมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2.5 สำหรับประเทศสหรัฐอเมริกา นั้น ได้มีการนำน้ำทิ้งกลับมาใช้ใหม่เช่นกัน โดยที่เมืองแคลิฟอร์เนีย มีการนำน้ำทิ้งกลับมาใช้ใหม่ปริมาณประมาณ  $432 \times 10^6$  ลบ.ม./ปี ซึ่งจะนำกลับมาใช้ใหม่ในด้านเกษตรกรรมมากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 2.6

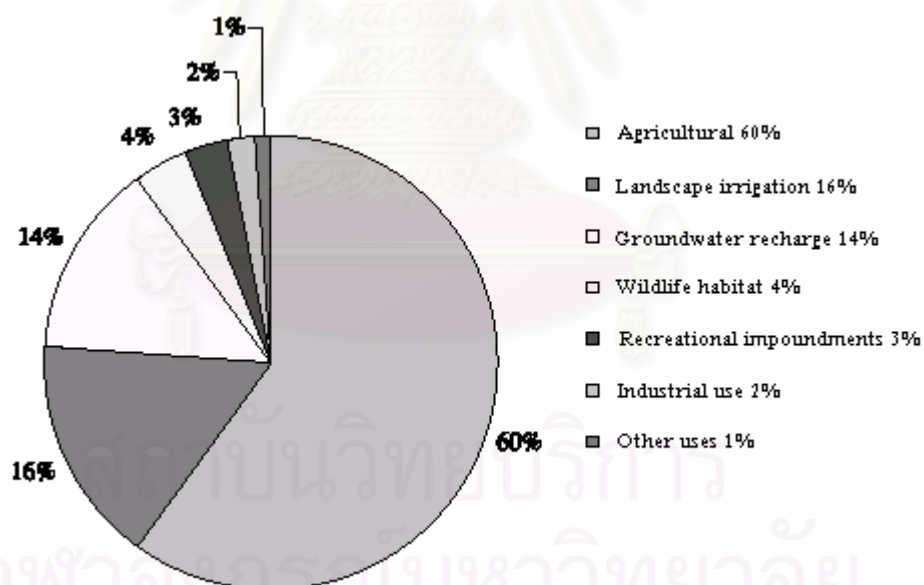
สำหรับการนำน้ำทิ้งกลับมาใช้ใหม่ในประเทศไทยนั้น เทคโนโลยีการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ในประเทศไทย ยังไม่แพร่หลายมากนัก นอกจากนี้ยังไม่มีรายงานการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของระบบการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ อย่างไรก็ตามการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ของประเทศไทยมีแนวโน้มสูงขึ้น เนื่องจากภาวะการขาดแคลนน้ำและปัญหาแหล่งน้ำที่มีคุณภาพน้ำต่ำลงซึ่งมีสาเหตุหนึ่งเกิดจากการสูบน้ำบาดาลขึ้นมาใช้มากเกินไปของโรงงานอุตสาหกรรมในกรุงเทพฯ สมุทรปราการ สมุทรสาคร และปทุมธานี ก่อให้เกิดปัญหาแผ่นดินทรุดและคุณภาพน้ำลดลงเนื่องจากปริมาณเกลือที่มากขึ้น รวมทั้งอีกสาเหตุหนึ่งเกิดจากมีการเพิ่มขึ้นของปริมาณประชากรที่มากขึ้นมาก ตัวอย่างการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ในประเทศไทยได้แก่ ปี 1978 พบว่ามีการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่ ในอุตสาหกรรมการผลิตสัปรดกระป๋องเพื่อใช้เป็นน้ำล้างวัตถุดิบ (สมนึก, 2538)

## 2.3 การดูดติดผิวด้วยถ่านกัมมันต์

การดูดติดผิวเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นระหว่าง 2 สถานะ เช่น ของเหลว - ของแข็ง, ก๊าซ - ของแข็ง โดยมีการสะสมตัวของสารที่ถูกดูดติดผิว (Adsorbate) อยู่ที่ผิวของสารที่เป็นสารดูดติดผิว (Adsorbent) กระบวนการดูดติดผิวเป็นกระบวนการบำบัดขั้นที่ 3 สำหรับการกำจัดมลสารที่ความเข้มข้นต่ำ โดยการดูดติดผิวสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ขั้นตอน (Cheremisinoff และ Ellerbusch, 1978) คือ การดูดติดทางฟิสิกส์ (physisorption) และการดูดติดทางเคมี (Chemisorption) เมื่อโมเลกุลของสารใด ๆ ในของเหลวหรือก๊าซเคลื่อนที่มาสัมผัสบริเวณผิวของของแข็งซึ่งเป็นผล-



รูปที่ 2.5 การนำน้ำทิ้งที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพแล้ว ไปใช้ในด้านต่าง ๆ ของประเทศจอร์แดน (Al-Sulaim และ Asano, 2000)



รูปที่ 2.6 การนำน้ำทิ้งที่ผ่านการปรับปรุงคุณภาพแล้ว ไปใช้ในด้านต่าง ๆ ของเมืองแคลิฟอร์เนีย ประเทศสหรัฐอเมริกา (Al-Sulaim และ Asano, 2000)

จากแรงดึงดูดของสารดูดติดผิวที่มีต่อ โมเลกุลนั้นมากกว่าพลังงานจลน์ของโมเลกุลของสารนั้น โดย โมเลกุลของสารนั้น ๆ จะเกาะติดกับโมเลกุลของของแข็งด้วยแรงแรงแวลเดอร์วัลส์ ซึ่งเป็นการดูดติดผิว

ทางฟิสิกส์ มีการเกาะตัวของโมเลกุลของของเหลวเป็นชั้น ๆ โดยการดูดติดผิวทางฟิสิกส์นี้ จะสามารถแปรสภาพกลับไปมาได้ (Reversible) หลังจากนั้นจะทำให้เกิดปฏิกิริยาระหว่างโมเลกุลของสารดูดติดผิวและสารถูกดูดติด-ผิว กลายเป็นสารประกอบเคมีใหม่ขึ้น ซึ่งเป็นการดูดติดผิวทางเคมี โดยเมื่อเกิดแล้วจะคงรูปไม่สามารถเปลี่ยนกลับไปได้ (Irreversible)

สารที่ใช้เป็นสารดูดติดผิว เช่น ถ่านกัมมันต์(Activated carbon), โลหะออกไซด์, โลหะไฮดรอกไซด์, คาร์บอนเนต, ดินเหนียว, ขี้เถ้าลอย (Fly ash) เป็นต้น

### 2.3.1 ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์มีลักษณะเหมือนแกรไฟต์ (Graphite) ที่เป็นส่วนประกอบของหัวดินสอ และเพชร เนื่องจากมีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักเช่นเดียวกัน แต่ถ่านกัมมันต์จะมีรูปร่างแบบ random imperfect structure ซึ่งแตกต่างจากเพชร และแกรไฟต์ โดยถ่านกัมมันต์จะมีรูพรุนมาก ซึ่งรูพรุนนี้มีขนาดตั้งแต่ที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่าไปจนถึงขนาดเล็กระดับโมเลกุล การที่ถ่านกัมมันต์มีรูพรุนมากนั้นเป็นผลทำให้ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวและมีความสามารถในการดูดติดผิวสูงมากตามไปด้วย โดยถ่านกัมมันต์จะมีพื้นที่ผิวอยู่ในช่วงประมาณ 500 – 1,400 ตร.ม./กรัมถ่านกัมมันต์ (Cheremisinoff และEllerbusch, 1978) ดังนั้นหากถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวประมาณ 1,000 ตร.ม./กรัมถ่านกัมมันต์ แสดงว่าถ่านกัมมันต์ปริมาณ 5 กรัมจะมีพื้นที่ผิวประมาณเท่ากับสนามฟุตบอล ทำให้เห็นได้ว่า ถ่านกัมมันต์นั้นเป็นสารที่มีพื้นที่ผิวสูงมาก

การดูดติดผิวบนรูพรุนของคาร์บอนนั้นได้เริ่มมีมาก่อนคริสตกาล (ซงซัย, 2527) ได้มีชาวอียิปต์โบราณ ใช้กกพาไพรัสเป็นวัตถุดิบ ต่อมาชาวกรีกและชาวโรมันใช้เพื่อวัตถุประสงค์ทางการแพทย์ หลังจากนั้นในศตวรรษที่ 10 ถ่านก็เริ่มถูกนำมาใช้ในการดูดติดผิวเพื่อวัตถุประสงค์ต่าง ๆ อย่างแพร่หลาย เช่น ในศตวรรษที่ 10 ได้มีการนำถ่านมาใช้ในงานฟอกสีของอุตสาหกรรมน้ำตาล ต่อมาในปี 1785 สามารถกำจัดสีในน้ำโดยใช้ถ่านได้ และในปี 1860 ประเทศอังกฤษได้มีการนำถ่านมากำจัดรสและกลิ่นจากน้ำดื่ม ซึ่งเป็นจุดเริ่มต้นของการพัฒนาการผลิตน้ำประปาและการบำบัดน้ำเสียโดยอาศัยถ่านสำหรับทั้งในชุมชนและอุตสาหกรรม

ถ่านกัมมันต์สามารถผลิตได้จากวัตถุดิบหลายชนิด แต่ต้องมีคาร์บอนเป็นส่วนประกอบหลัก โดยวัตถุดิบที่ต่างกันจะทำให้พื้นที่ผิว และคุณสมบัติของถ่านกัมมันต์แตกต่างกันออกไปตามวัสดุที่ใช้ในการผลิต ตัวอย่างของวัตถุดิบที่ใช้ผลิตถ่านกัมมันต์ เช่น ไม้ชนิดต่าง ๆ กะลามะพร้าว ขางพารา เปลือกถั่ว กากชานอ้อย ขี้เถ้า กระจูดสัตว์ ถ่านพีช หรือกากของผลิตภัณฑ์ทางปิโตรเลียม โดยจะผ่านกระบวนการเพื่อทำให้เกิดรูพรุนจำนวนมากที่ผิว

ลักษณะสมบัติทั่วไปของถ่านกัมมันต์สำหรับการใช้งาน (Cheremisinoff และEllerbusch, 1978) เช่น

- พื้นที่ผิว (Surface area) ซึ่งกำหนดขีดความสามารถในการดูดซับ
  - ความหนาแน่นประจักษ์ (Apparent density) ซึ่งบอกถึงโอกาสสูญเสียจากการใช้งาน
  - ขนาดประสิทธิผล (Effective size) ซึ่งกำหนดสภาพทางชลศาสตร์
  - ปริมาตรรูพรุน (Pore volume) ซึ่งกำหนดการดูดซับผิวของโมเลกุล
  - ขนาดรูพรุน (Pore size) ซึ่งกำหนดขีดจำกัดในการดูดซับโมเลกุลจำเพาะบางชนิด
- เมื่อพิจารณาในด้านของขนาดรูพรุน จะสามารถแบ่งขนาดรูพรุนได้ตามมาตรฐานของ

IUPAC (Rodrigues , LeVan และTondeur ; 1988) ออกได้เป็น 3 ช่วงคือ

ขนาดรูพรุนใหญ่	มีขนาดรูพรุนเฉลี่ย	มากกว่า 500	อังสตรอม
ขนาดรูพรุนกลาง	มีขนาดรูพรุนเฉลี่ย	20 – 500	อังสตรอม
ขนาดรูพรุนเล็ก	มีขนาดรูพรุนเฉลี่ย	น้อยกว่า 20	อังสตรอม

โดยโมเลกุลของสารที่ถูกดูดซับจะเคลื่อนที่ไปเกาะอยู่รอบนอกของถ่านกัมมันต์ก่อนจะฟุ้งกระจายเข้าไปในรูพรุนใหญ่ แล้วจึงเคลื่อนที่เข้าไปในรูพรุนกลาง และเล็กต่อไป โดยจะเคลื่อนที่เข้ารูพรุนเล็กได้ต่อเมื่อสารที่ถูกดูดซับนั้นไม่ใหญ่กว่าขนาดรูพรุนเล็ก ดังนั้นอัตราการดูดซับผิวจึงถูกควบคุมด้วยอัตราการฟุ้งกระจายของโมเลกุลเข้าไปในรูพรุนของถ่าน

ถ่านกัมมันต์สามารถแบ่งตามลักษณะทางกายภาพโดยอาศัยขนาดออกได้เป็น 2 แบบ ได้แก่

- ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด (Granular Activated Carbon: GAC) มี 2 ลักษณะ คือ ถ่านเม็ดแบบกลม ซึ่งผลิตโดยการบดอัดถ่านให้ได้ตามขนาดที่ต้องการ และถ่านแบบแท่งซึ่งผลิตโดยการอัดถ่านผงให้เป็นเส้นยาวแล้วตัดตามขนาดที่ต้องการ ปกติถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดมีขนาด อยู่ในช่วง 0.2 – 5 มม. ใช้ได้กับของเหลว และก๊าซ
- ถ่านกัมมันต์แบบผง (Powder Activated Carbon: PAC) ซึ่งละเอียดเหมือนผงแป้ง โดยจะบดเพื่อให้มีอำนาจเพิ่มขึ้น ปกติถ่านกัมมันต์แบบผงมีขนาดเล็กกว่า 0.18 มม. โดยส่วนใหญ่ใช้กับของเหลว

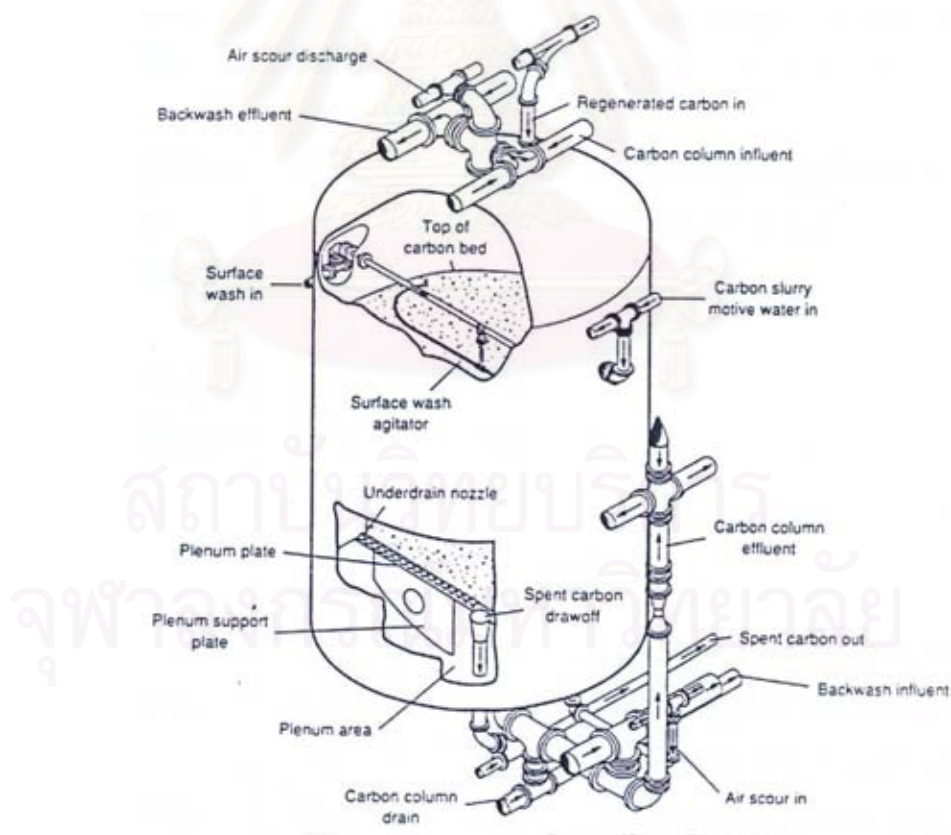
ซึ่งคุณสมบัติทั่วไปของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดและแบบผง แสดงดังตารางที่ 2.2

การใช้ถ่านกัมมันต์ในการบำบัดน้ำเสีย มักนิยมใช้ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดบรรจุในคอลัมน์ เช่น ในประเทศญี่ปุ่นได้มีระบบบำบัดน้ำเสียประมาณ 200 แห่งที่มีการใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดในการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งให้ผลดีในการบำบัด (Urano, 2001) โดยจะปล่อยให้ น้ำเสียไหลผ่านชั้นถ่านซึ่งอยู่กับที่ (fixed-bed column) แบบไหลลง (downflow) ในขณะที่น้ำเสียไหลผ่านชั้นของถ่านอนุภาคในน้ำเสียก็จะถูกดูดซับผิวของถ่านกัมมันต์ไว้ได้ ลักษณะทั่วไปของคอลัมน์บรรจุถ่านกัมมันต์ดังแสดงในรูปที่ 2.7 ซึ่งการใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดนี้เมื่อขีดความสามารถในการดูดซับผิวของถ่านกัมมันต์ลดลง จะสามารถนำไปฟื้นฟูอำนาจในการดูดซับผิวโดยการใช้ความร้อนสูงที่เรียกว่า Regeneration และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้อีก แต่สำหรับประเทศไทยยังไม่สามารถทำ

ตารางที่ 2.2 ลักษณะสมบัติทั่วไปของถ่านกัมมันต์ (Metcalf และEddy, 2003)

Parameter	Unit	Type of Activated Carbon <sup>a</sup>	
		Granular carbon	Powder carbon
Total Surface area	m <sup>2</sup> /g	700 – 1300	800 – 1800
Bulk density	kg/m <sup>3</sup>	400 – 800	360 – 740
Particle density , wetted in water	kg/l	1.0 – 1.5	1.3 – 1.4
Particle size range	mm (µm)	0.1 – 2.36	(5 – 50)
Effective size	Mm	0.6 – 0.9	NA
Uniformity Coefficient	UC	≤1.9	NA
Iodine number	-	600 – 1,100	800 – 1,200
Abrasion number	Minimum	75 – 85	70 – 80

หมายเหตุ: a ขึ้นอยู่กับบริษัทผู้ผลิต



รูปที่ 2.7 ลักษณะทั่วไปของคอลัมน์บรรจุถ่านกัมมันต์ (fixed – bed column)

(Metcalf และEddy, 1991)



การฟื้นฟูอำนาจในการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ได้ (อัมพวัน, 2539) ดังนั้นจึงใช้วิธีการเปลี่ยนเอาถ่านกัมมันต์ใหม่ทดแทนถ่านกัมมันต์ที่หมดสภาพการดูดติดผิว

การดูดติดผิวด้วยถ่านกัมมันต์สามารถกำจัดสารประกอบอินทรีย์ในน้ำเสียบางส่วนที่ไม่สามารถถูกย่อยสลายได้ทางชีวภาพ ซึ่งอาจมีบางส่วนที่ก่อให้เกิดพิษรวมทั้งกลิ่น รส และสีที่ไม่สามารถกำจัดด้วยวิธีทั่วไปได้ สำหรับประสิทธิภาพในการดูดติดผิวสารอินทรีย์ในน้ำเสียของถ่านกัมมันต์ขึ้นกับพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ รวมทั้งลักษณะทางเคมีของผิวถ่านกัมมันต์ซึ่งสัมพันธ์กับแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุล ดังนั้นความสามารถในการดูดติดผิวจะขึ้นอยู่กับลักษณะของถ่านกัมมันต์และของสารที่จะถูกดูดติดผิวร่วมกัน

โดยการใช้ถ่านกัมมันต์ในการดูดติดผิวนั้น เป็นวิธีการที่มีการนำมาใช้ในการบำบัดสารอินทรีย์กันเป็นจำนวนมาก (Chen, 1999) ซึ่งจากการศึกษาของ Kim และคณะ (2002) พบว่าถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดที่ใช้ในการกำจัดสารอินทรีย์ (วัดในรูปของ ทีไอซี) สามารถประมาณค่าที่ไอซีที่เหลือหลังผ่านการดูดติดผิวด้วยถ่านกัมมันต์แล้วมีค่าประมาณ 5.5 มก./ล.

### 2.3.2 กลไกการดูดติดผิว

ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ

- การถ่ายเทมวลสารผ่านชั้นของเหลวรอบอนุภาคของสารดูดติดผิว หรือการเคลื่อนที่ของโมเลกุลของตัวถูกละลายเข้าหาสารดูดติดผิว
- การแพร่ภายนอก (External Diffusion or Film Diffusion) เมื่อ โมเลกุลของตัวถูกละลายเข้ามาถึงสารดูดติดผิว หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นการขนถ่ายใหญ่ (Macro Transport) โดยสารดูดติดผิวในสภาวะปกติจะมีฟิล์มของของเหลวหุ้มไว้โดยรอบผิวของสารดูดติดผิว
- การแพร่ภายใน (Internal Diffusion or Pore Diffusion) เนื่องจากสารดูดติดผิวมีพื้นที่ผิวส่วนใหญ่อยู่ในรูหรือโพรง หรือช่องว่างภายใน โมเลกุลของตัวถูกละลายจึงต้องแทรกตัวเข้าไปให้ถึงช่องว่างภายในของสารดูดติดผิว หรืออาจกล่าวได้ว่าเป็นการขนถ่ายจิ๋ว (Micro Transport) จึงทำให้เกิดการดูดติดผิวขึ้น

### 2.3.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดผิว (Cheremisinoff และEllerbusch, 1978 และ มั่นสิน, 2542)

#### 2.3.3.1 ธรรมชาติของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดติดผิว

- พื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุน

ขีดความสามารถในการดูดติด (Adsorptive Capacity) จะเพิ่มขึ้นเมื่อพื้นที่ผิวของโมเลกุลที่เป็นตัวดูดติดมากขึ้น ส่วนโครงสร้างของรูพรุนก็มีส่วนช่วยให้พื้นที่ผิว



มีความสามารถในการดูดติดผิวเพิ่มขึ้น เพราะถ้าขนาดโมเลกุลของสารที่ถูกดูดติดสามารถเข้าไปในรูพรุนของโมเลกุลของตัวดูดติดได้ การดูดติดก็จะเพิ่มขึ้น

- **ขนาดของตัวดูดติดผิว**

อัตราเร็วในการดูดติดผิวจะมีค่าลดลงเมื่อขนาดของตัวดูดติดผิวเพิ่มขึ้น

### 2.3.3.2 ธรรมชาติของโมเลกุลของสารที่ถูกดูดติดผิว

- **ความสามารถในการละลาย**

สารที่ละลายน้ำได้ (หรือแตกตัวเป็นไอออน) ย่อมมีแรงยึดเหนี่ยวกับน้ำได้อย่างเหนียวแน่นจึงเป็นสารที่ยากต่อการดูดติด สารที่ไม่ละลายน้ำหรือละลายน้ำได้น้อยมักสามารถเกาะติดบนผิวคาร์บอนได้ดี แต่ก็ไม่เป็นจริงเสมอไป เนื่องจากสารที่ละลายน้ำได้น้อยหลายชนิดก็สามารถเกาะติดคาร์บอนได้ยาก แต่สารที่ละลายน้ำได้ดีก็อาจเกิดการดูดติดผิวได้ง่าย

- **น้ำหนักโมเลกุลและขนาดโมเลกุล**

เป็นสิ่งที่สำคัญมากต่อการดูดติดผิว โดยการดูดติดผิวจะเกิดขึ้นได้ดีที่สุดเมื่อมีสารขนาดเล็กกว่าโพรงเล็กน้อย (พอดีที่จะสามารถเข้าโพรงได้) ซึ่งโมเลกุลขนาดเล็กสามารถถูกดูดเข้าไปในโพรงของตัวดูดติดผิวได้ดีกว่าโมเลกุลขนาดใหญ่

### 2.3.3.3 ธรรมชาติของน้ำเสีย

- **อุณหภูมิ**

จะมีผลต่ออัตราและขีดความสามารถในการดูดติดผิว โดยอัตราเร็วจะเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอุณหภูมิ สำหรับขีดความสามารถในการดูดติดผิวจะเป็นอัตราส่วนผกผันกับอุณหภูมิ เพราะการดูดติดผิวจะเป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อน

- **พีเอช**

โดยพีเอชจะมีผลต่อการแตกตัวเป็นไอออนและการละลายน้ำของสาร ทำให้มีผลการดูดติดผิวด้วย

นอกจากนี้ยังมีปัจจัยที่สำคัญในการกำหนดอัตราเร็วและขีดความสามารถในการดูดติดผิวอีกคือ

- **ความปั่นป่วน**

หากน้ำมีความปั่นป่วนต่ำ ฟิล์มน้ำที่ล้อมรอบสารดูดติดผิวจะมีความหนาอยู่มาก เพราะไม่ได้ถูกรบกวนจึงทำให้เป็นอุปสรรคต่อการเคลื่อนที่ของโมเลกุลเข้าหาสารดูดติดผิว หากให้น้ำมีความปั่นป่วนสูง ทำให้การเคลื่อนตัวเข้าไปหาสารดูดติดผิวทำได้รวดเร็วกว่าเป็นผลให้การแพร่ในรูพรุนเป็นตัวกำหนดอัตราเร็วในการดูดติดผิว ด้วยเหตุนี้ ในกรณีความปั่นป่วนสูง

อัตราเร็วในการดูดติดจะขึ้นกับการแพร่ในรูพรุน และหากมีความปั่นป่วนต่ำ อัตราเร็วในการดูดติดจะขึ้นกับการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มของน้ำที่ล้อมรอบถ่านกัมมันต์อยู่

#### - ระยะเวลาในการดูดติด

จะต้องให้มีเวลาในการดูดติด หรือเวลาในการสัมผัสมากพอที่จะให้เกิดการดูดติดผิวจนเข้าสู่สภาวะสมดุลได้ ซึ่งเวลาสัมผัสนี้จะหมายถึงระยะเวลาสัมผัสในถังเปล่า (Empty Bed Contact Time: EBCT) หรือเวลากักในถังเปล่า (Empty Bed Detention Time: EBDT) โดยจะมีความสัมพันธ์กับการกำหนดความลึกของชั้นถ่านกัมมันต์

โดยในการออกแบบคอลัมน์สำหรับการดูดติดผิวด้วยถ่านกัมมันต์ควรมีเวลาสัมผัสในถังเปล่าอยู่ระหว่าง 7.5 – 30 นาที (Kawamura, 1991) ถ้าเลือกใช้เวลาสัมผัสสั้นจะสามารถกำจัดสารประกอบที่ถูกดูดติดผิวได้ง่าย แต่หากเลือกใช้เวลาสัมผัสนานจะสามารถกำจัดสารประกอบอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้ดีและดูดติดผิวได้ยาก

### 2.3.4 ไอโซเทอร์มของการดูดติดผิว

กระบวนการดูดติดผิวจะเกิดขึ้นไปเรื่อย ๆ โดยสารที่ถูกดูดติดผิว และมีการคายการดูดติดผิวไปพร้อม ๆ กัน ซึ่งสมดุลจะเกิดขึ้นเมื่ออัตราการดูดติดผิวและการคายการดูดติดผิวเท่ากัน ที่จุดนี้ความเข้มข้นของสารที่ถูกดูดติดผิวในน้ำเท่ากับความเข้มข้นในสารดูดติดผิว ที่อุณหภูมิคงที่หนึ่ง ๆ เราใช้อิโซเทอร์มของการดูดติดผิว (Adsorption Isotherm) เป็นตัวแทนในการอธิบายความสมดุลที่เกิดขึ้นนั้น

ไอโซเทอร์มของการดูดติดผิวเป็นค่าคงที่แสดงถึงความจุของสารดูดติดผิวที่สามารถดูดติดผิวเอาสารต่าง ๆ ไว้ ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในการออกแบบหาปริมาณของสารดูดติดผิวหรือถ่านกัมมันต์ที่จะใช้ในการดูดติดผิว ค่าไอโซเทอร์มการดูดติดผิวของสารต่าง ๆ จะหาได้จากการทดลองเท่านั้น โดยจะนำข้อมูลของการดูดติดผิวที่ได้จากการทดลองไปสร้างกราฟ แล้วลากเส้นผ่านจุดที่ได้จากการทดลองทั้งหมดเรียกว่า ไอโซเทอร์มของการดูดติดผิว ซึ่งจะมีประโยชน์ในการหาความสามารถของสารดูดติดผิวหรือถ่านกัมมันต์ และเปรียบเทียบชนิดของสารดูดติดผิวเพื่อหาชนิดของสารดูดติดผิวที่ดีที่สุด

ดังนั้น ไอโซเทอร์มของการดูดติดผิวคือ ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณของสารที่ถูกดูดติดผิวต่อหน่วยน้ำหนักของสารดูดติดผิว และค่าความเข้มข้นของสารนั้นที่ยังเหลืออยู่ในน้ำ ที่อุณหภูมิคงที่ โดยไอโซเทอร์มของการดูดติดผิวนั้นมีหลายชนิด เนื่องจากมีหลายทฤษฎีได้อธิบายเกี่ยวกับสมดุลของการดูดติดผิวที่เกิดขึ้น แต่สมการที่ใช้เป็นเครื่องมือสำหรับอธิบายสมบัติการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในงานบำบัดน้ำและน้ำเสียบ่อยที่สุด คือ Freundlich และ Langmuir Isotherm

### 2.3.4.1 Freundlich Isotherm (Metcalf and Eddy, 1991)

สมการการดูดซับของ Freundlich แสดงได้ดังสมการที่ 2.1 หรือ 2.2 ดังนี้

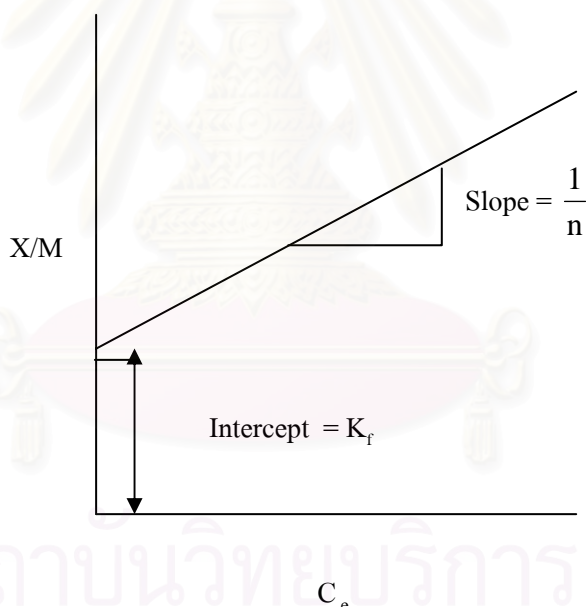
$$X / M = K_f C^{1/n} \quad (2.1)$$

$$\text{Log}(X / M) = \text{log}K_f + (1/n)\text{log}C \quad (2.2)$$

โดยที่

X	=	ปริมาณของสิ่งที่ถูกดูดซับ (adsorbate)
M	=	น้ำหนักของถ่านกัมมันต์ (adsorbent)
C	=	ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับที่เหลื่ออยู่ในน้ำที่จุดสมดุล
$K_f, n$	=	ค่าคงที่

นำ  $\text{log}(X / M)$  และ  $\text{log}C$  ไปสร้างกราฟธรรมดาจะได้ดังรูปที่ 2.8 มีค่าความชันเท่ากับ  $1/n$  และจุดตัดแกน y เท่ากับ  $\text{log}K_f$



รูปที่ 2.8 ลักษณะกราฟของไอโซเทอร์มตามทฤษฎีของ Freundlich

### 2.3.4.2 Langmuir Isotherm (Metcalf and Eddy, 1991)

สมการของ Langmuir มีสมมติฐานของทฤษฎีนี้คือ

- แต่ละพื้นที่ของตัวดูดซับเหมาะกับโมเลกุลที่เป็นโมโนเลเยอร์ (monolayer)
- พลังงานของการดูดซับจะเหมือนกันทุก ๆ พื้นที่ของตัวดูดซับ

- โมเลกุลที่จะถูกดูดซับผิวไม่สามารถที่จะย้ายข้ามผิวหรือเกิดปฏิกิริยากับโมเลกุลข้างเคียงได้

จากสมมุติฐานต่าง ๆ สามารถเขียนเป็นสมการ Langmuir ดังสมการที่ 2.3, 2.4 และ 2.5 ดังนี้

$$X / M = (abC) / (1 + bC) \quad (2.3)$$

$$1/(X/M) = [(1/ab) \times (1/C)] + (1/a) \quad (2.4)$$

$$C / (X / M) = ((1 / a) \times C) + (1 / ab) \quad (2.5)$$

โดยที่

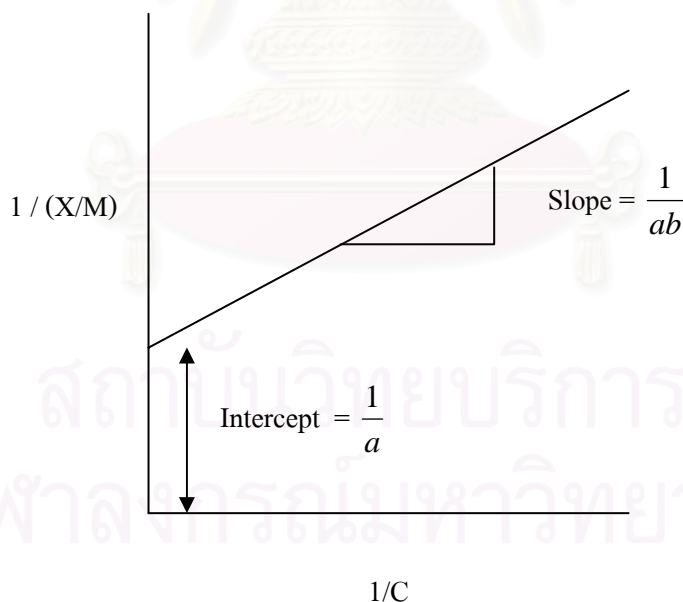
X = ปริมาณของตัวที่ถูกดูดซับ (adsorbate)

M = น้ำหนักของถ่านกัมมันต์ (adsorbent)

C = ความเข้มข้นของตัวที่ถูกดูดซับที่เหลื่ออยู่ในน้ำที่จุดสมดุล

a, b = ค่าคงที่

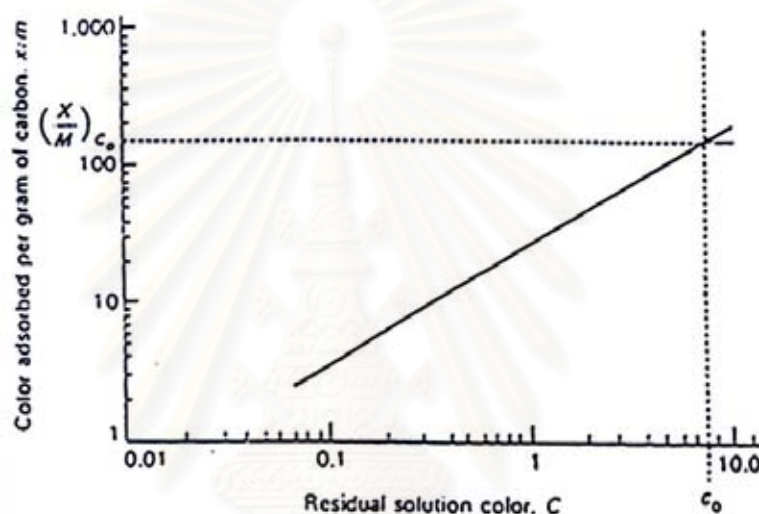
นำ  $1 / (X / M)$  และ  $1/C$  ไปสร้างกราฟธรรมดาจะได้ดังรูปที่ 2.9 มีค่าความชันเท่ากับ  $1 / ab$  และจุดตัดแกน y เท่ากับ  $1 / a$



รูปที่ 2.9 ลักษณะกราฟของไอโซเทอร์มตามทฤษฎีของ Langmuir

### 2.3.5 ความจุการดูดติดผิว (Metcalf และ Eddy, 1991)

ความจุการดูดติดผิวประมาณค่าได้จากข้อมูลของไอโซเทอร์ม เมื่อนำข้อมูลของไอโซเทอร์มมาพล็อตกราฟไอโซเทอร์มได้ดังแสดงในรูปที่ 2.10 ความจุการดูดติดผิวสามารถประมาณได้จากการลากเส้นแนวตั้งซึ่งเป็นค่าความเข้มข้นเริ่มต้น ( $C_0$ ) ไปตัดกับเส้นกราฟไอโซเทอร์มแล้วลากเส้นแนวนอนไปยังสเกลจะได้ค่าที่แสดงปริมาณทั้งหมดโดยน้ำหนักของตัวดูดติดผิวที่ถูกดูดติดต่อน้ำหนักของสารดูดติดผิวหรือถ่านกัมมันต์ เมื่อสารดูดติดผิวอยู่ที่จุดสมดุลกับความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวดูดติด

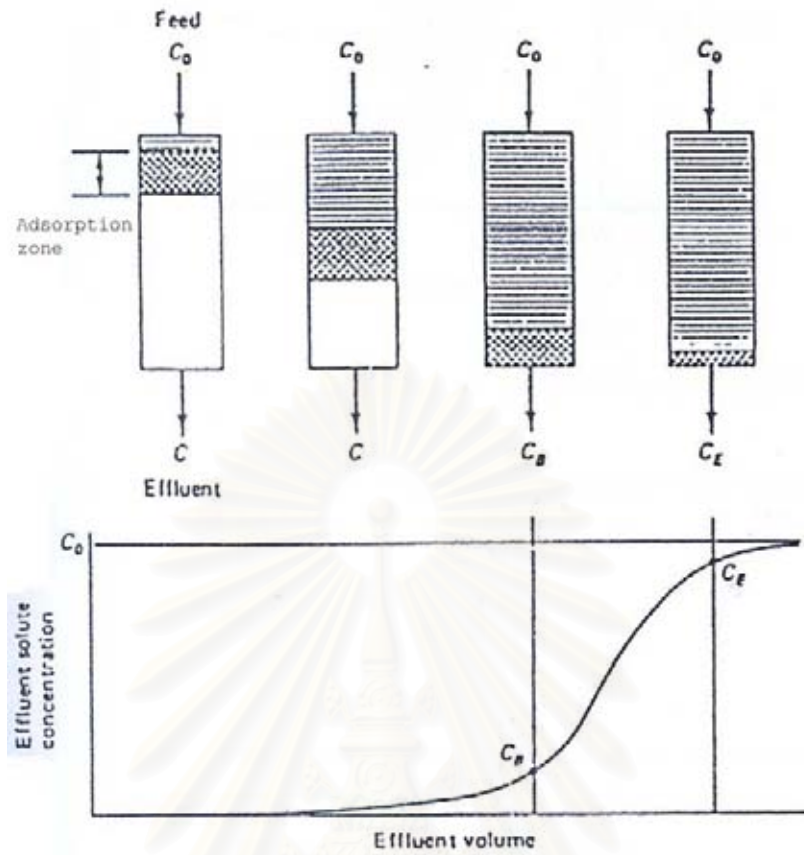


รูปที่ 2.10 การหาความจุการดูดติดผิว (Metcalf and Eddy, 1991)

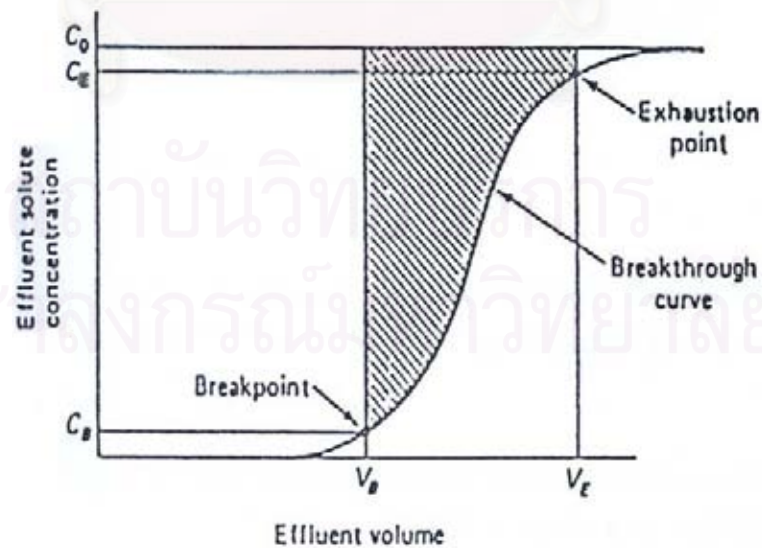
### 2.3.6 การดูดติดผิวในคอลัมน์

เมื่อนำน้ำที่ผ่านชั้นของตัวดูดติดผิวหรือถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์ สารดูดติดผิวชั้นบนจะหมดประสิทธิภาพก่อน และชั้นของสารดูดติดผิวที่หมดประสิทธิภาพจะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามเวลาดังแสดงในรูปที่ 2.11 ดังนั้นความเข้มข้นในน้ำที่ผ่านการดูดติดผิวแล้ว จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลา จนในที่สุดความสกปรกในน้ำที่จะเริ่มหลุดออกมาจากคอลัมน์ จุดนี้เรียกว่า จุดที่ถ่านหมดประสิทธิภาพ (break point) ดังนั้นผลจากการดูดติดผิวในคอลัมน์สามารถแสดงผลได้ในลักษณะของกราฟที่เรียกว่า breakthrough curve ดังรูปที่ 2.12 ซึ่งเป็นกราฟที่สามารถแสดงเวลาในการใช้งานของสารดูดติดผิวจนจะหมดประสิทธิภาพ โดยเวลาจะนับจากการเริ่มต้นของการดูดติดผิวจนถึงจุดที่สารดูดติดผิวหรือถ่านกัมมันต์หมดประสิทธิภาพเรียกระยะเวลาช่วงนี้ว่าระยะเวลาในการทำงาน (service time) โดยระยะเวลาในการทำงานจะมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ

- เพิ่มความสูงของคอลัมน์ เพื่อให้ชั้นของสารดูดติดผิวมีมากขึ้น



รูปที่ 2.11 การเคลื่อนตัวของขอบเขตการดูดซับ (Adsorption zone) สำหรับชั้นสารดูดซับที่อยู่กับที่ ซึ่งมีทิศทางไหลลงล่าง (Suntorm, 1979)



รูปที่ 2.12 ลักษณะของ Breakthrough Curve สำหรับชั้นถ่านดูดซับที่อยู่กับที่ (Suntorm, 1979)



- ลดอัตราการไหล
- ลดความเข้มข้นของสารในน้ำที่เข้าสู่คอลัมน์
- ลดขนาดของเม็ดสารดูดซับ เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการดูดซับ

### 2.3.7 ความจุการดูดซับเบรกทรู (Metcalf and Eddy, 1991)

ความจุการดูดซับเบรกทรู ( $X/M$ )<sub>b</sub> ของสารดูดซับหรือถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์ จะมีค่าน้อยกว่าความจุการดูดซับที่หาได้จากไอโซเทอร์มซึ่งถือได้ว่าเป็นค่าความจุการดูดซับทางทฤษฎี ( $X/M$ )<sub>0</sub> โดยความจุการดูดซับเบรกทรูของคอลัมน์แบบคอลัมน์เดี่ยวนี้ จะมีค่าประมาณ 25 – 50 เปอร์เซ็นต์ของค่าความจุการดูดซับทางทฤษฎี

จากค่าความจุการดูดซับเบรกทรูนี้ทำให้สามารถคำนวณหาเวลาที่ทำให้เกิดการเบรกทรู ( $t_b$ ) ได้ดังสมการที่ 2.6 หรือ 2.7

$$(X/M)_b = X_b/M_c = Q \times (C_1 - (C_b/2)) \times (t_b/M_c) \quad (2.6)$$

$$\text{หรือ } t_b = [(X/M)_b \times M_c] / [Q \times (C_1 - (C_b/2))] \quad (2.7)$$

โดยที่

$(X/M)$	=	ความจุการดูดซับเบรกทรู
$X_b$	=	น้ำหนักของตัวดูดซับ ณ จุดเบรกทรู
$M_c$	=	น้ำหนักของสารดูดซับ หรือถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์
$Q$	=	อัตราการไหลของน้ำผ่านคอลัมน์
$C_1$	=	ความเข้มข้นเริ่มต้นของตัวดูดซับ
$C_b$	=	ความเข้มข้นของตัวดูดซับ ณ จุดเบรกทรู
$t_b$	=	เวลาที่ทำให้เกิดการเบรกทรู

## 2.4 งานวิจัยที่ผ่านมา

### 2.4.1 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งเพื่อนำน้ำกลับมาใช้ใหม่

สมนึก จารุติลกกุล (2538) งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาสถานะที่เหมาะสมของการปรับปรุงน้ำทิ้งที่ผ่านกระบวนการตะกอนเร่งเพื่อให้ได้คุณภาพเป็นน้ำดื่มหรือหล่อเย็น โดยใช้วิธีการกรองด้วยวัสดุ 2 ชนิด การแลกเปลี่ยนไอออน และการเติมคลอรีน ผลการศึกษาพบว่า สถานะที่เหมาะสมของการกรอง คือ ชั้นทรายมีความสูง 20 ซม. ชั้นแอนทราไซด์มีความสูง 40 ซม. และมีอัตราการไหลของน้ำเข้า 20 ลบ.ม./ตร.ม. – ซม. สถานะที่เหมาะสมของการแลกเปลี่ยนไอออน คือ ชั้นเรซินสูง 90 ซม. และมีอัตราการไหลของน้ำเข้า 10 ลบ.ม./ตร.ม. – ซม. สถานะที่เหมาะสมของการเติมคลอรีน คือ เดิมโซเดียมไฮโปคลอไรต์ 2.7 – 3.0 มก./ล. สุกทำน้ำที่ผ่านการเติมโซเดียม-

ไฮโปคลอไรด์เพื่อกำจัดจุลินทรีย์ทั้งหมดและเชื้อคอลิฟอร์ม เป็นน้ำที่มีคุณภาพ เหมาะต่อการดื่มในหอหล่อเย็นได้

**อัมพวัน พงศ์สิทธิ์ศักดิ์ (2539)** งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความคุ้มค่าของการบำบัดน้ำเสียเพื่อใช้ใหม่ โดยใช้การกรอง การดูดซับและการใช้เมมเบรน ผลการศึกษาพบว่า การดูดซับสามารถลดค่า ซีโอดี แอมโมเนีย ไนเตรต และฟอสฟอรัสได้ดีที่สุด และเมื่อพิจารณาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์พบว่า วิธีการบำบัดที่คุ้มค่าที่สุดคือ การกรอง น้ำที่ผ่านการกรองสามารถนำกลับมาใช้ในระบบปรับอากาศอาคารสำนักงานที่มีขนาดตั้งแต่ 50,000 ตร.ม.ขึ้นไป โดยจะให้ผลตอบแทนการลงทุนไม่น้อยกว่า 11.5% ที่อัตราดอกเบี้ย 8% และคืนทุนในระยะเวลา 5 ปี 9 เดือน เสียค่าใช้จ่ายดำเนินงานและบำรุงรักษารายปีประมาณ 9.8 บาท/ลบ.ม.

**อุดมพล พิชนไพบุลย์ และ พรทิพย์ โชคลุชาติ (2542)** งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำน้ำทิ้งจาก บ่อบำบัดน้ำเสียมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์กลับมาใช้ใหม่ ผลการศึกษาเบื้องต้นพบว่า มีความเป็นไปได้ในการนำน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจากบ่อบำบัดน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่ในระดับ การอุปโภค โดยใช้รดน้ำต้นไม้ในบริเวณสนามหญ้าของพื้นที่ใกล้เคียงกับบ่อบำบัดน้ำเสีย ผลการศึกษาพบว่า ปริมาณสารอินทรีย์ในรูป BOD<sub>5</sub> และปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนมีค่าลดลงประมาณร้อยละ 44.8 และ 66.6 ตามลำดับ และค่าพีเอชลดลงจาก 7.0 เป็น 6.9

**ชัยโชติ ฤทัยวัฒน์ และ พูนศิริ ลิขานานทวงศ์ (2543)** งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาหาแนวทางในการลดสีของน้ำจาก โรงงานฟอกย้อมที่ผ่านกระบวนการบำบัดวิธีตะกอนเร่งมาแล้ว โดยออกซิเดชันด้วยเพนตอนรีเอเจนต์เพื่อนำกลับมาใช้ประโยชน์ ผลการศึกษาพบว่า สภาวะที่เหมาะสมและใช้ค่าใช้จ่ายหลังการบำบัดน้อยที่สุดคือ ที่พีเอช 4 ปริมาณเฟอร์รัสซัลเฟต 100 มก./ล. และปริมาณไฮโดรเจน-เปอร์ออกไซด์ 27.5 มก./ล. สำหรับน้ำที่มีความเข้มข้นสีประมาณ 400 เอดีเอ็มไอ ซึ่งสามารถลดสีได้มากกว่าร้อยละ 90 นอกจากนี้ยังสามารถลดค่า ซีโอดี และค่า BOD ให้ต่ำลงได้เช่นกัน จากผลการทดลองสามารถคำนวณค่าใช้จ่ายในการบำบัดได้เท่ากับ 5.37 บาท/ลบ.ม. และน้ำที่ผ่านการปรับปรุงสามารถนำไปใช้ป็นน้ำเข้าหอหล่อเย็นได้

**พิไลพรรณ ท้อสุวรรณ (2544)** งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความเป็นไปได้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำหลังผ่านการบำบัดด้วยกระบวนการแบบตะกอนเร่ง ของโรงงานย้อมผ้าเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ โดยการกำจัดสีย้อมด้วยวิธีเพนตอนรีเอเจนต์ และสารละลายโพแทสเซียมเปอร์มันганต์ กำจัดเหล็ก หลังจากนั้นนำมาปรับปรุงคุณภาพโดยผ่านถ่านกัมมันต์ เรซินแลกเปลี่ยนไอออน และ

เมมเบรน ผลการศึกษาพบว่า น้ำหลังผ่านการกำจัดสีด้วยวิธีเฟนตอนรีเอเจนต์ และเหล็กด้วยสารละลายโพแทสเซียมเปอร์มังกานेट สามารถนำไปใช้เป็นน้ำล้างพื้นโรงงาน น้ำซักโครก น้ำรดต้นไม้ และสามารถนำไปใช้ในระบบน้ำหล่อเย็นแบบผ่านครั้งเดียวได้ และหากเป็นการกำจัดสีและเหล็ก แล้วตามด้วยถ่านกัมมันต์ จะช่วยลดความกระด้างจาก 83.04 ให้เหลือ 2.08 มก./ล. ในรูปหินปูน และปริมาณแคลเซียมจาก 68.51 ให้เหลือ 0 มก./ล. ในรูปหินปูน แต่ค่าพีเอชจะสูงขึ้นเป็น 9.45 ส่วนน้ำที่ผ่านการแลกเปลี่ยนไอออนและเมมเบรน มีคุณสมบัติเหมาะสมในการนำไปใช้ในกระบวนการผลิต หอหล่อเย็น และหม้อไอน้ำได้

**ศุคนธรธรณ หวานแก้ว (2544)** งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการนำน้ำทิ้งที่ผ่านระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่งของโรงงานฆ่าไก่เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ โดยกระบวนการปรับปรุงคุณภาพที่ใช้ ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย ถ่านกัมมันต์ ออสโมซิสผกกลับ และ/หรือเรซินแลกเปลี่ยนไอออนแบบกรดแก่ เรซินแลกเปลี่ยนไอออนแบบด่างแก่ เรซินแลกเปลี่ยนไอออนแบบผสม และระบบการฆ่าเชื้อด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ต ผลการศึกษาคุณภาพน้ำหลังผ่านถ่านกัมมันต์และออสโมซิสผกกลับ สามารถนำไปใช้ในหอหล่อเย็น หม้อไอน้ำ โดยเติมสารเคมีเพิ่มเติมเพื่อเป็นการป้องกันและควบคุมการเกิดตะกอน และสามารถนำไปใช้ในกระบวนการผลิตได้ ส่วนน้ำที่ผ่านเรซินแลกเปลี่ยนไอออนแบบกรดแก่ เรซินแลกเปลี่ยนไอออนแบบด่างแก่ และเรซินแลกเปลี่ยนไอออนแบบผสม มีคุณสมบัติเทียบเท่าน้ำปราศจากไอออน ค่าดำเนินการสำหรับการกรองโดยใช้ ออสโมซิสผกกลับและระบบแลกเปลี่ยนไอออนมีค่าเท่ากับ 5 และ 44 บาท/ลบ.ม. ส่วนค่าก่อสร้างการผลิตน้ำ 720 ลบ.ม./วัน เป็น 5.9 และ 8.2 ล้านบาท ตามลำดับ

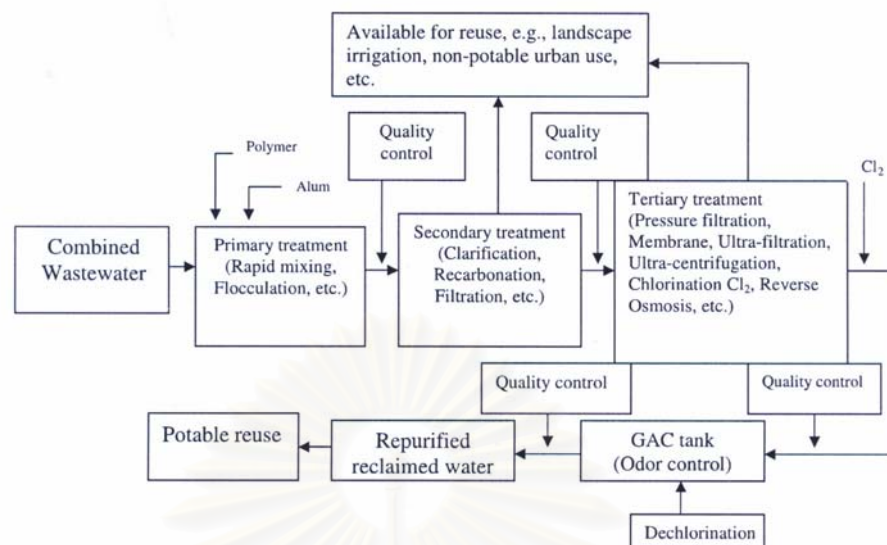
**Georage และ Franklin (1991)** รายงานการนำน้ำกลับมาใช้ใหม่เริ่มครั้งแรกในปี 1926 ที่ Grand Canyon National Park รัฐ Arizona น้ำดังกล่าวใช้ผสมกับน้ำดิบเพื่อใช้เป็น น้ำใช้ในห้องน้ำ น้ำลดสนามหญ้า และน้ำหล่อเย็น ในปี 1942 ได้เริ่มมีการเติมคลอรีนในน้ำที่นำกลับมาใช้ใหม่ที่ Bethehem Steel Company, Maryland นอกจากนี้การนำน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่ก็ประสบความสำเร็จในอีกหลายพื้นที่ เช่น เมือง Chaute รัฐ Kansas ประเทศสหรัฐอเมริกา

**Bergna และคณะ (1999)** งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาใช้ถ่านกัมมันต์ในการบำบัดน้ำเสียจากโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอขั้นสุดท้าย โดยการบำบัดร่วมกับการกรองทราย การรวมตะกอนและการออกซิไดซ์ด้วย โอโซน ผลการศึกษาพบว่า ถ่านกัมมันต์สามารถบำบัดค่าซีโอดีและสีได้ดีที่สุด

ในการทำงานร่วมกับระบบกรองทราย และการรวมตะกอนจะให้ประสิทธิภาพต่ำสุดในการทำงานร่วมกับระบบการกรองทราย และโอโซนเนชั่น

**Abulnour และคณะ (2002)** งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงการบำบัดน้ำจากการเกษตรกรรม โดยการแยกเกลือออกเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ในประเทศอียิปต์ ซึ่งจะทำการเปรียบเทียบในด้านของราคาต้นทุน และราคาค่าดำเนินการรายปี ของวิธีการบำบัดทั้ง 5 แบบ คือ 1. ใช้ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon, AC)/ อุนตราฟิลเตรชัน (Ultrafiltration, UF)/ รีแอสออสโมซิส (Reverse osmosis, RO) 2. UF/อิเล็กโตร-ไดอะไลซิส รีเวอร์ซัล (Electrodialysis reversal, EDR)/RO 3. AC/EDR/การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion exchange, IE) 4. ไมโครฟิลเตรชัน (Microfiltration, MF)/UF/RO1/RO2 และ 5. ทรายกรองช้า (Slow sand filter, SSF)/AC/IE ในการบำบัดน้ำปริมาตร 100,000 ลบ.ม./วัน ผลการศึกษาพบว่า ระบบบำบัดมีค่าใช้จ่ายในด้านราคาต้นทุนเรียงจากน้อยไปมากดังนี้ AC/UF/RO, MF/UF/RO1/RO2, SSF/AC/IE, AC/EDR/IE และ UF/EDR/RO ตามลำดับ ค่าดำเนินการต่อปีเรียงจากน้อยไปมากดังนี้ MF/UF/RO1/RO2, AC/UF/RO, UF/EDR/RO, AC/EDR/IE และ SSF/AC/IE ดังนั้นเมื่อทำการสรุปค่าใช้จ่ายทั้งหมดพบว่า ระบบที่มีค่าใช้จ่ายถูกที่สุด คือ MF/UF/RO1/RO2 มีราคาค่าใช้จ่ายเท่ากับ 0.94 LE/ลบ.ม. รวมทั้งสามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้หมด และเมื่อปริมาณน้ำมีค่าความเค็มปานกลางคือประมาณ 1,400 พีพีเอ็ม ทำให้การดำเนินการไม่ต้องทำการฟื้นฟูสภาพเมมเบรนบ่อยมากนัก รวมทั้งน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว จะมีความปลอดภัยและสามารถนำไปใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้

**Lu และ Leung (2003)** งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงความเป็นไปได้ในการนำน้ำทิ้งมาใช้ใหม่ในประเทศฮ่องกง เนื่องจากแหล่งน้ำดิบไม่เพียงพอต่อความต้องการของประชาชน ทำให้เริ่มมีการวางแผนการนำน้ำทิ้งชุมชนซึ่งเป็นแหล่งน้ำทิ้งส่วนใหญ่ของฮ่องกง (53% ของน้ำทิ้งทั้งหมด) กลับมาใช้ใหม่โดยเฉพาะน้ำเสียในส่วนของ การอาบน้ำ และการซักล้าง ผลการศึกษาพบว่าการหาแหล่งน้ำดิบใหม่จากการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งชุมชน โดยใช้เมมเบรนจะมีราคาต่อหน่วยประมาณ 5.3 ดอลลาร์ฮ่องกงต่อลบ.ม. ซึ่งถูกกว่าการนำแหล่งน้ำดิบจากการปรับปรุงคุณภาพน้ำทะเลโดยใช้เมมเบรน และการเพิ่มพื้นที่รับน้ำฝน ซึ่งจะมีราคาต่อหน่วยเท่ากับ 7.7 และ 9.1 ดอลลาร์ฮ่องกงต่อลบ.ม. ตามลำดับ แต่การใช้น้ำทิ้งเป็นแหล่งน้ำดิบใหม่อาจต้องอาศัยเวลาในการให้ประชาชนและสังคมยอมรับ สำหรับวิธีการบำบัดน้ำทิ้งในส่วนของน้ำที่มาจาก การอาบน้ำ และซักล้างเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ของประเทศฮ่องกง มีขั้นตอนดังแสดงในรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 ขั้นตอนการบำบัดน้ำที่มาจาก การอาบน้ำและซักล้างเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่  
ของประเทศฮ่องกง (Lu และ Leung, 2003)

#### 2.4.2 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ถ่านกัมมันต์เป็นตัวดูดซับ

**ชัชวาล เจริญสุทธิกุล และคณะ (2539)** งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสังเคราะห์จากโรงงานฟอกย้อม โดยใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด และใช้สีย้อม 3 ประเภทคือ สีรีแอกตีฟ สีแอสิด และสีแวนด์ ผลการศึกษาพบว่า ไม่สามารถบำบัดน้ำเสียสีแวนด์ได้ แต่สามารถบำบัดน้ำเสียสีรีแอกตีฟ และสีแอสิดได้ดี โดยมีประสิทธิภาพการบำบัด 56 – 85% และ 30 – 48% ตามลำดับ สำหรับการทดลองในแบบคอลัมน์โดยใช้อัตราการไหล 0.25 – 1.00 ล./นาที เวลาสัมผัสขณะถึงเปล่า (empty bed contact time: EBCT) 5 – 20 นาที ผลการศึกษาจะให้ประสิทธิภาพเริ่มต้น 100% เท่ากัน แต่หากอัตราการไหลต่ำ ถ่านกัมมันต์จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดโดยรวมสูง และมีอายุการใช้งานที่นานกว่าเมื่อทำการทดลองที่อัตราการไหลสูง

**วณัฏฐิ์ ประยูรพรหม (2539)** งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเปรียบเทียบผลการกำจัดสี โดยใช้ถ่านกัมมันต์เม็ดที่มีขนาดรูพรุนต่างกัน 4 ค่า และใช้สีย้อม 4 ประเภทคือ สีรีแอกตีฟ สีโคเรคต์ สีอะโซอิก และสีดิสเพส โดยทำการศึกษาถึงอิทธิพลของความเข้มข้นสีรวมทั้งศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างไอโอดีนนัมเบอร์และโมลาสนัมเบอร์ที่มีต่อการกำจัดสี น้ำเสียที่ใช้เป็นน้ำเสียสังเคราะห์ ผลการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพการกำจัดสีแปรผันตามไอโอดีนนัมเบอร์ เช่นเดียวกับโมลาส-นัมเบอร์ ผลจากฟรอนคลิซไอโซเทอร์มแสดงได้ว่า ถ่านกัมมันต์เม็ดที่มีขนาดรูพรุนที่ใหญ่ที่สุด



จะให้ผลการกำจัดสีที่ดีที่สุด สำหรับค่าความเข้มข้นสีสูงที่สุดจะให้ค่าความจุการดูดติดผิวมากที่สุดของการกำจัดสีทุกชนิด การใช้ถ่านกัมมันต์เม็ดกำจัดสีเหมาะสำหรับสีรีแอกทีฟและสีไดเรกต์ ส่วนสีอะโซอิกและสีดิสเพิสจะเกิดการอุดตันได้

**วิวรรณ ขจรเกียรติคุณ (2539)** งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการใช้ถ่านกัมมันต์ในดูดติดผิวโดยใช้ถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดและขี้เลื่อย ในการกำจัดสีและลดค่าซีโอดีจากน้ำเสียโรงงานฟอกย้อม ผลการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพในการดูดติดผิวจะแตกต่างกันไปตามชนิดและปริมาณของสีย้อม ถ่านกัมมันต์จะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดสีและซีโอดีได้ใกล้เคียงกับขี้เลื่อย แต่เมื่อเทียบค่าการดูดติดผิวของสี และซีโอดีต่อน้ำหนักแล้ว พบว่าขี้เลื่อยจะมีค่าสูงกว่าถ่านกัมมันต์ประมาณ 1.55 – 2.89 เท่า และ 1.39 – 2.44 เท่าตามลำดับ

**ต่อตระกูล วัฒนวรกิจกุล (2545)** งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำด้วยถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด โดยศึกษาในด้านชนิดของถ่านกัมมันต์ และเวลาสัมผัสต่อการทำงานของระบบต้นแบบ ซึ่งใช้น้ำที่ผ่านการกรองมาแล้วด้วยถังกรองทราย ผลการศึกษาพบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตในประเทศไทยรุ่น CGC – 11 เหมาะสมในการใช้งานมากกว่า ถ่านกัมมันต์ที่ผลิตในต่างประเทศรุ่น BG – 816 เนื่องจากค่าใช้จ่ายต่อหน่วยในการกำจัดสารอินทรีย์น้อยกว่า ในขณะที่ให้ประสิทธิภาพการกำจัดต่างกันเล็กน้อย และด้านระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสม พบว่าให้ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำที่เวลาสัมผัส 20 นาทีและ 30 นาทีไม่ต่างกันมาก เพราะเวลาสัมผัส 20 นาทีเพียงพอที่จะทำให้กลไกในการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์เกิดขึ้นได้ แต่เมื่อพิจารณาค่าใช้จ่ายต่อหน่วยในการกำจัดสารอินทรีย์ เวลาสัมผัสที่ 20 นาทีจะมีค่าใช้จ่ายต่อหน่วยต่ำกว่าเวลาสัมผัสที่ 30 นาที

**Lafrance และ Mazet (1985)** งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงการกำจัดกรดฮิวมิกในน้ำที่มีสารทำความสะอาด โดยใช้การดูดติดผิวด้วยผงถ่านกัมมันต์ ซึ่งจะทำให้การศึกษาถึงผลของความเข้มข้นของสารทำความสะอาดโซเดียมไตรฟอสเฟต (sodium triphosphate, STP) และค่าพีเอชที่มีผลต่อการดูดติดผิวของผงถ่านกัมมันต์ในการกำจัดกรดฮิวมิก ผลการศึกษาพบว่า ที่ค่าพีเอชเริ่มต้น 5 ใส่ผงถ่านกัมมันต์ 500 มก./ล. สามารถกำจัดกรดฮิวมิกได้ 93% ในน้ำทิ้งที่ไม่มีสารทำความสะอาด แต่หากน้ำมีสารทำความสะอาดอยู่ 0.2 – 1.0 มิลลิโมล จะทำให้กำจัดกรดฮิวมิกได้มากขึ้น และเมื่อนำผลการทดลองไปหาไอโซเทอร์มจะได้ไอโซเทอร์มตามทฤษฎีของ Freundlich สำหรับการทดสอบผลของพีเอชพบว่า ความสามารถในการกำจัดกรดฮิวมิกจะเพิ่มขึ้นเมื่อพีเอชมีค่าลดลง



**Semmens และคณะ (1986)** งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของค่าพีเอชที่มีต่อการดูดติดผิวด้วยถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด ในการกำจัด ทีโอซี ในการทดลองแบบคอลัมน์ ผลการศึกษาพบว่าหากค่าพีเอชมีค่าลดลงจะทำให้ค่าความสามารถในการดูดติดผิวสูงขึ้น ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการกำจัด ทีโอซี สูงขึ้นด้วย

**Adam และ Clark (1991)** งานวิจัยที่ศึกษาการประเมินราคาทั้งในด้านการก่อสร้างวิธีการเดินระบบทางด้านเวลาสัมพัทธ์ และวิธีการใช้ถ่านกัมมันต์ ได้สรุปว่าในการกำจัดสารอินทรีย์ทั่วไปควรใช้เวลาสัมพัทธ์ประมาณ 10 – 20 นาที ส่วนสารอินทรีย์ที่ดูดติดยากควรใช้เวลาสัมพัทธ์นานขึ้นเท่าตัว โดยสามารถใช้ระยะเวลาสัมพัทธ์ประมาณ 30 – 40 นาทีได้

**Oxenford และ Lykins (1991)** ได้สรุปการประชุมที่ว่าด้วยการออกแบบและการใช้ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด โดยที่ประชุมได้สรุปว่าการใช้ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดเป็นเทคโนโลยีที่เหมาะสมที่สุดขณะนี้ในการกำจัดสารอินทรีย์ โดยมีผลพลอยได้จากการฆ่าเชื้อโรค อนุภาครังสี และสารอินทรีย์

**Najm และคณะ (1998)** งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาหาผลของขนาดถ่านกัมมันต์ชนิดผงที่มีต่อการกำจัด 2,4,6 - Trichlorophenol ผลการศึกษาจากค่าไอโซเทอร์มแสดงได้ว่า ผลของขนาดผงถ่านกัมมันต์ไม่มีผลต่อความสามารถในการดูดติดผิว แต่จะมีผลต่ออัตราเร็วในการดูดติดผิว หากขนาดของผงถ่านกัมมันต์ลดลง จะทำให้อัตราเร็วในการดูดติดผิวสูงขึ้นได้

**Chen (1999)** งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำดื่ม โดยการใช้ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดในการดูดติดผิว ซึ่งใช้ถ่านกัมมันต์รุ่น G - 840 ทำจากกะลามะพร้าว มีขนาดเม็ดอยู่ในช่วง 0.84 – 1.68 มม. โดยทำการทดลอง ณ อุณหภูมิ  $25 \pm 1^{\circ}\text{C}$  (ยกเว้นในการทดลองหาผลของอุณหภูมิ) แล้ววัดปริมาณสารอินทรีย์ในรูป ทีโอซี ผลการศึกษาพบว่าการทดลองแบบกะ เมื่อใส่ถ่านมากขึ้น จะมีประสิทธิภาพในการกำจัด ทีโอซี สูงขึ้น และหากปรับพีเอชของน้ำให้ต่ำลง จะทำให้มีประสิทธิในการกำจัด ทีโอซี สูงขึ้น โดยหากจะให้กำจัด ทีโอซี ได้เพิ่มขึ้น 30% จะต้องทำการปรับพีเอชให้ลดลง จากพีเอช 8 (พีเอชของน้ำเริ่มต้น) ไปเป็นพีเอช 2 รวมทั้งหากอุณหภูมิของการดูดติดผิวลดลง จะทำให้ความสามารถในการดูดติดผิวเพิ่มขึ้นได้ และเมื่อนำผลการทดลองหาค่าไอโซเทอร์มจะได้ไอโซเทอร์มตามทฤษฎีของ Freundlich สำหรับการทดลองแบบคอลัมน์มีการใช้อัตราการไหล 4 ค่าได้แก่ 4.2 7.0 14.1 และ 29.9 มล./นาที

จะได้ระยะเวลาที่ถึงเบรกทรูเท่ากับ 216 132 84 และ 47 ชม. ตามลำดับ แสดงได้ว่าที่อัตราการไหลสูงขึ้น ระยะเวลาในการถึงเบรกทรูจะเร็วขึ้นได้

**Matsuo และ Nishi (2000)** งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาถึงการกำจัด ทีโอซี ในน้ำเสียจากการซักกรีด โดยการใช้ถ่านกัมมันต์ในการกรอง ซึ่งจะใช้น้ำจากการซักกรีดปริมาตร  $2 \times 10^{-2}$  ลบ.ม. โดยมีอัตราการไหลเท่ากับ  $1.5 \times 10^{-3}$  ลบ.ม./นาทิต ผลการศึกษาพบว่า จะใช้เวลาประมาณ 5 ชม. ในการลด ทีโอซี จาก 100 พีพีเอ็ม เป็น 10 พีพีเอ็ม และหลังจากการนำถ่านกัมมันต์ไปฟื้นฟูสภาพแล้วนำกลับมาใช้ใหม่จะทำให้ผลการกำจัด ทีโอซี ลดลง หากมีการนำไปฟื้นฟูสภาพมากครั้งขึ้น จะทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัด ทีโอซี ลดลงไปเรื่อย ๆ

**Wu และคณะ (2005)** งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเปรียบเทียบความจุดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ที่สังเคราะห์จากเปลือกถั่วพิทาชิโอด้วยการกระตุ้นด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) มีขนาดรูพรุนเท่ากับ 2 นาโนเมตร และกระตุ้นด้วยไอน้ำ มีขนาดรูพรุนมากกว่า 3.2 นาโนเมตร ซึ่งถ่านกัมมันต์ที่ทำการทดสอบมีพื้นที่อยู่ในช่วง 731 - 1,687 ตร.ม./กรัม ในการดูดติดเมทิลีนบลู (Methylene blue) เบสิกบราว 1 (basic brown 1) อะซิเดบลู 74 (acid blue 74) 2,4-ไดคลอโรฟีนอล (2,4-dichlorophenol) 4-โคลโลฟีนอล (4-chlorophenol) และฟีนอล (phenol) ผลการทดลองพบว่า การดูดติดไม่ได้ขึ้นกับพื้นที่ผิวเพียงอย่างเดียว แต่จะขึ้นกับขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ โดยจะต้องมีขนาดรูพรุนที่เหมาะสม พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำ ซึ่งมีขนาดรูพรุนมากกว่า 3.2 นาโนเมตร จะมีความจุดูดติดสูงกว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วย KOH ซึ่งมีขนาดรูพรุน 2.2 นาโนเมตร เมื่อมวลโมเลกุลของสารนั้นมีค่าสูง เช่นพวกสีต่าง ๆ โดยค่าความจุดูดติดของสารโมเลกุลสูงจะขึ้นกับขนาดรูพรุนมากกว่าพื้นที่ผิว แต่สำหรับสารที่มีมวลโมเลกุลต่ำ ถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำ และ KOH ซึ่งมีขนาดรูพรุนต่างกัน ให้ค่าความจุดูดติดไม่ต่างกัน แม้ว่าถ่านกัมมันต์ที่กระตุ้นด้วยไอน้ำมีขนาดรูพรุนใหญ่กว่าก็ตาม ดังนั้นค่าความจุดูดติดผิวมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ผิว และขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ทั้งสองพารามิเตอร์

จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้นเป็นผลให้การวิจัยนี้เล็งเห็นถึงความสำคัญของการนำน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งถือได้ว่าเป็นวิธีการปรับปรุงคุณภาพน้ำที่มีค่าใช้จ่ายที่ต่ำกว่าการปรับปรุงคุณภาพน้ำทะเล และการเพิ่มพื้นที่รับน้ำฝนเพื่อนำน้ำมาใช้ประโยชน์ (ผลการศึกษาของ Lu และ Leung, 2003) รวมทั้งได้มีการวิจัยเพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำจากแหล่งน้ำทิ้งต่างๆ ให้มีคุณสมบัติเหมาะสมในการนำกลับไปใช้ใหม่มากขึ้น ซึ่งการใช้ถ่านกัมมันต์ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งเป็นวิธีการหนึ่งที่ใช้กันค่อนข้างมาก เนื่องจากน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว

สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้หลายด้านเช่น น้ำรดน้ำต้นไม้ น้ำล้างรถ เป็นต้น อีกทั้งหากนำน้ำเหล่านี้มาปรับปรุงต่อด้วยเมมเบรน(ออสโมซิสผันกลับ) จะสามารถนำกลับไปใช้ใหม่ในหอหล่อเย็น และหม้อไอน้ำได้ (ผลการศึกษาของ สุคนชวรรณ หวานแก้ว, 2544) ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้น้ำผ่านกัมมันต์แบบเกลือในการดูดติดผิว เพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงซักรีด อีกทั้งเป็นน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดทางชีวภาพแล้ว และมีอัตราส่วนค่าบีโอดี และซีโอดีค่อนข้างต่ำ เป็นผลให้ถ่านกัมมันต์น่าจะเป็นทางเลือกหนึ่งที่มีความเหมาะสม

นอกจากนั้นงานวิจัยข้างต้น ได้แสดงให้เห็นได้ว่า ขนาดรูพรุน และพื้นที่ผิวเป็นตัวแปรสำคัญในการดูดติดสารต่างๆ ของถ่านกัมมันต์แบบเกลือ เช่น การศึกษาของ วจน์ศิริ ประยูรพรหม (2539) และ Wu และคณะ (2005) ส่งผลให้งานวิจัยนี้ได้ให้ความสำคัญกับขนาดรูพรุน และพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์เป็นสำคัญ เมื่อพิจารณาในด้านคอลัมน์พบว่า ระยะเวลาสัมผัส เป็นอีกตัวแปรหนึ่งที่มีความสำคัญในการดูดติดผิว (ผลการศึกษาของ ต่อตระกูล วัฒนวรกิจกุล, 2545) เป็นผลทำให้มีการศึกษาถึงระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมของคอลัมน์การดูดติดผิวด้วยถ่านกัมมันต์กับน้ำทิ้งโรงซักรีดครั้งนี้ด้วย



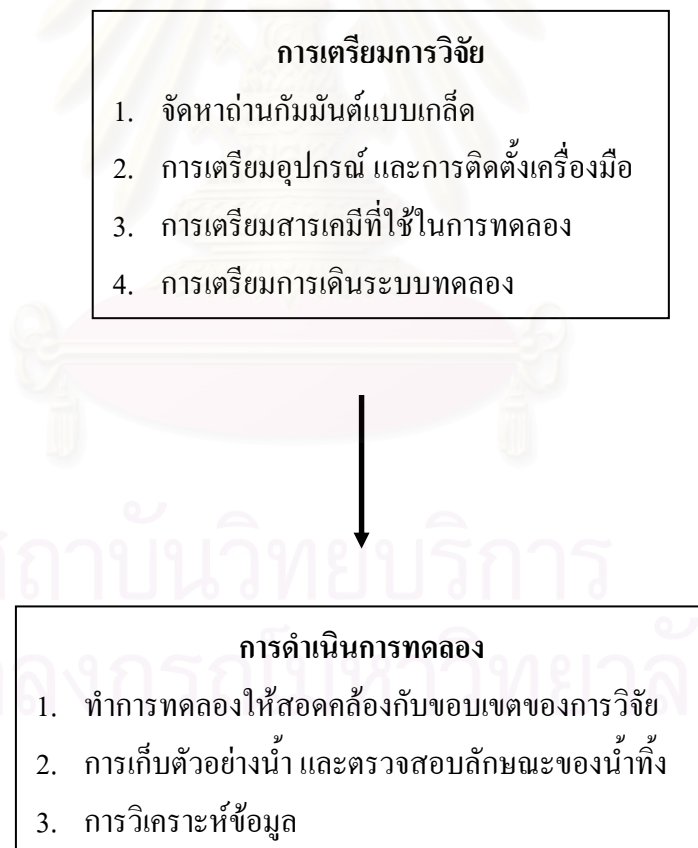
สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### บทที่ 3

#### การดำเนินการวิจัย

##### 3.1 แผนการวิจัย

การศึกษารูปแบบการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งของโรงงานซักรีดที่ผ่านการบำบัดทางชีวภาพแล้ว เพื่อให้มีศักยภาพในการนำกลับมาใช้ใหม่ จะทำการทดลองโดยกระบวนการดูดติดผิว ซึ่งตัวอย่างน้ำทิ้งที่ใช้ในการทดลองจะใช้น้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดทางชีวภาพแบบสระเติมอากาศ (Aerated Lagoon) การดำเนินการวิจัยนี้จะทำการศึกษา ณ ห้องปฏิบัติการของภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี โดยมีแผนการดำเนินการวิจัย ดังรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แผนผังการดำเนินการวิจัย

### 3.2 การเตรียมอุปกรณ์และติดตั้งอุปกรณ์เครื่องมือ

#### 3.2.1 ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดที่ใช้ในการวิจัยนี้ เป็นถ่านกัมมันต์ที่มีขายในท้องตลาด ของบริษัท คาร์โบแกมมอนด์ จำกัด ซึ่งเป็นถ่านกัมมันต์ที่สามารถผลิตได้ภายในประเทศไทย มีขนาดรูพรุนหลายขนาด ทำการวิเคราะห์ขนาดรูพรุนด้วยเครื่องวัดขนาดรูพรุน โดยใช้วิธี Mercury Porosimetry ซึ่งวิเคราะห์ที่ฝ่ายเทคโนโลยีวัสดุ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย โดยมีขนาดรูพรุนแตกต่างกัน 4 ขนาด คือ 404 516 1,781 และ 26,640 อังสตรอม ซึ่งลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังภาคผนวก ข.

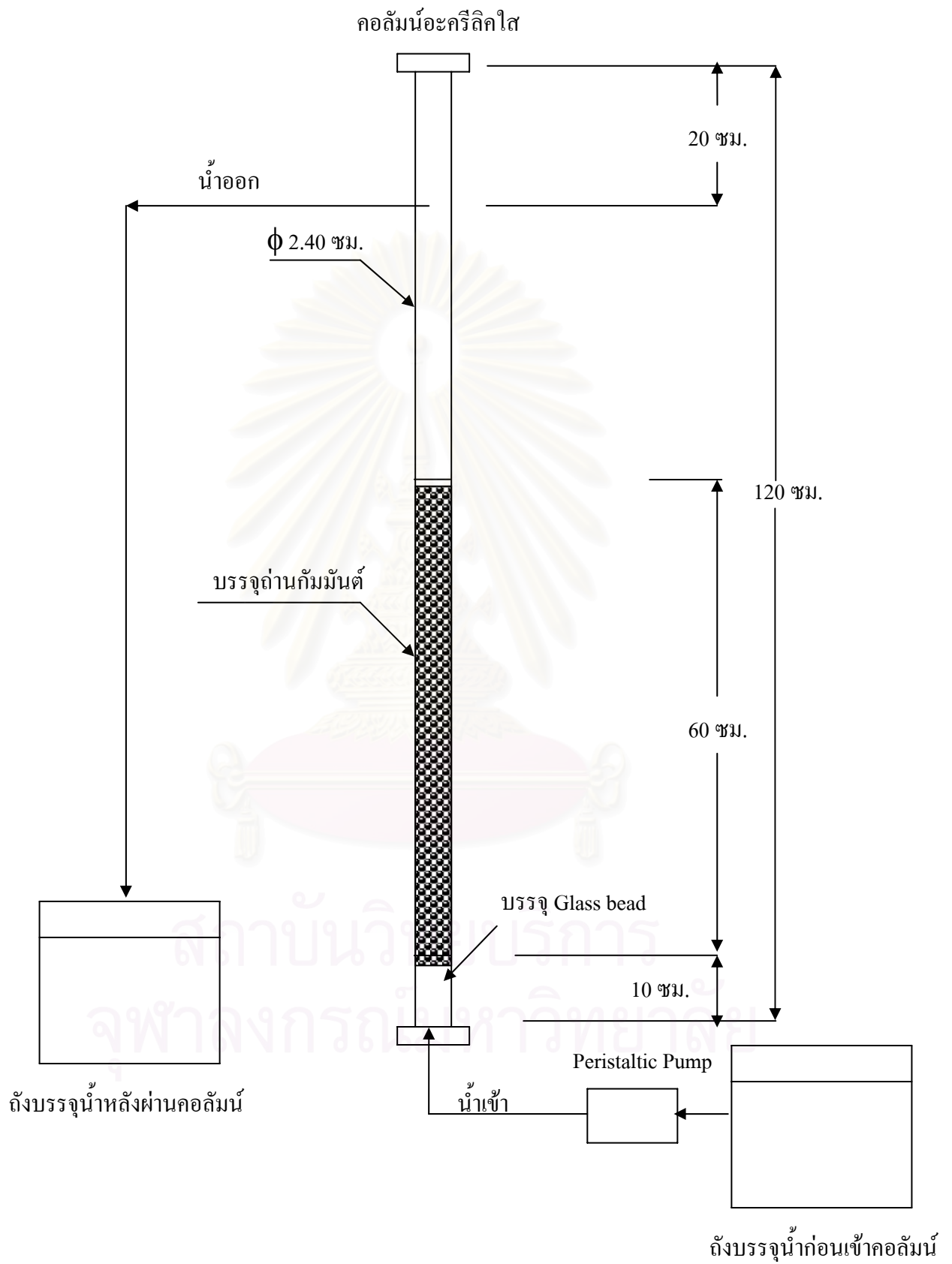
#### 3.2.2 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ และทดสอบแบบกะ (Batch)

- 3.2.2.1 เครื่องเขย่า (Shaker)
- 3.2.2.2 เครื่องวิเคราะห์ที่ไอซี (TOC analyzer)
- 3.2.2.3 เครื่อง UV Spectrophotometer
- 3.2.2.4 เครื่องวัดพีเอช (pH meter)
- 3.2.2.5 หลอดย่อยสลาย (Digestion vessels) ซึ่งเป็นแก้วทำด้วยบอโรซิลิเกต ขนาด  $25 \times 150$  มม.
- 3.2.2.6 ชุดเครื่องแก้วต่าง ๆ เช่น บีกเกอร์ ขวดรูปชมพู่
- 3.2.2.7 เครื่องวัดความขุ่น

#### 3.2.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งด้วยถ่านกัมมันต์ ในการทดสอบแบบคอลัมน์ (Column)

3.2.3.1 คอลัมน์ทำด้วยอะคริลิกใส เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.40 ซม. มีพื้นที่หน้าตัด 4.52 ตร.ซม. มีความสูงของคอลัมน์เท่ากับ 120 ซม. แสดงดังรูปที่ 3.2 บรรจุถ่านกัมมันต์สูง 60 ซม. ซึ่งมีปริมาตรเท่ากับ 0.27 ลิตร โดยบรรจุถ่านกัมมันต์เอ 58 กรัม ถ่านกัมมันต์บี 132 กรัม ถ่านกัมมันต์ซี 144 กรัม และถ่านกัมมันต์ดี 142 กรัม

- 3.2.3.3 ถังบรรจุน้ำก่อนเข้าคอลัมน์
- 3.2.3.4 ถังบรรจุน้ำหลังผ่านคอลัมน์
- 3.2.3.5 ปัมป์แบบปริคน้ำเพื่อสูบน้ำเข้าคอลัมน์ถ่านกัมมันต์



รูปที่ 3.2 แผนภาพของคอถัมน้ที่ใช้ทดสอบ



### 3.3 ลักษณะน้ำทิ้งจากกระบวนการซักรีด

ได้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดขั้นที่สองจากโรงงานซักรีด ซึ่งเป็นโรงงานซักรีดที่จัดเป็นโรงงานจำพวกที่ 3 ตามพระราชบัญญัติโรงงาน พ.ศ. 2535 เป็นจำนวน 6 โรงงาน นำมาวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ได้ลักษณะน้ำทิ้งดังแสดงในภาคผนวก ค. ตารางที่ ค.1 พบว่า บางโรงงานยังคงมีค่าพารามิเตอร์ที่สูงกว่ามาตรฐานน้ำทิ้งของโรงงานอุตสาหกรรมอยู่ ดังนั้นในการศึกษานี้จะพิจารณาเลือกน้ำทิ้งจากโรงงานที่สามารถบำบัดน้ำทิ้งได้ตามมาตรฐานน้ำทิ้งของกรมโรงงานอุตสาหกรรมมาปรับปรุงโดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดต่อไป เพียงโรงงานเดียว ได้แก่ โรงงานที่ 1

### 3.4 กำหนดค่า และประเภทตัวแปร

**3.4.1 การทดลองชุดที่ 1** ศึกษาหาเวลาของการดูดซับจนถึงสภาวะสมดุล (Equilibrium Time) ของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด เมื่อมีขนาดรูพรุนแตกต่างกัน ตัวแปรต่าง ๆ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษาการดูดซับจนถึงสภาวะสมดุล (Equilibrium Time) ของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด เมื่อมีขนาดรูพรุนแตกต่างกัน

ตัวแปร	พารามิเตอร์
<b>ตัวแปรอิสระ</b> ขนาดรูพรุน 4 ขนาด (อังสตรอม)	404 516 1,781 และ 26,640
<b>ตัวแปรคงที่</b> 1. ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งเริ่มต้น - ความเข้มข้นของพารามิเตอร์ต่าง ๆ - ปริมาตรน้ำ 2. ปริมาณของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ (Carbon dosage) 3. รอบการเขย่า 4. พีเอชของน้ำทิ้งเริ่มต้น 5. อุณหภูมิ	ทีไอซี ซีไอดี สี และพีเอช 150 มล. 5 กรัม 250 รอบต่อนาที 8.3 อุณหภูมิห้อง
<b>ตัวแปรตาม</b> 1. ลักษณะสมบัติของน้ำหลังทำการทดลอง - ความเข้มข้นของพารามิเตอร์คุณภาพน้ำ ที่เหลือ ณ เวลาต่าง ๆ 2. เวลาของการดูดซับจนถึงสภาวะสมดุล	ทีไอซี ซีไอดี สี และพีเอช 24 ชม.

### 3.4.2 การทดลองชุดที่ 2 ศึกษาผลของพีเอชที่มีต่อการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด ที่มีขนาดรูพรุนแตกต่างกัน

ตัวแปรต่าง ๆ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.2

ตารางที่ 3.2 ตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษาผลของพีเอชที่มีต่อการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด ที่มีขนาดรูพรุนแตกต่างกัน

ตัวแปร	พารามิเตอร์
<b>ตัวแปรอิสระ</b>	
1. พีเอชของน้ำทิ้ง 4 ค่า	5.0 6.5 8.1 และ 9.5
2. ขนาดรูพรุน 4 ขนาด (อังสตรอม)	404 516 1,781 และ 26,640
<b>ตัวแปรคงที่</b>	
1. ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งเริ่มต้น	
- ความเข้มข้นของพารามิเตอร์ต่าง ๆ	ทีโอซี ซีโอดี สี และพีเอช
- ปริมาณน้ำ	150 มล.
2. ปริมาณของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ (Activated Carbon dosage)	5 กรัม
3. รอบการเขย่า	250 รอบต่อนาที
4. เวลาของการดูดติดผิวจนถึงสภาวะสมดุล	24 ชม.
5. อุณหภูมิ	อุณหภูมิห้อง
<b>ตัวแปรตาม</b>	
1. ลักษณะสมบัติของน้ำหลังทำการทดลอง	
- ความเข้มข้นของพารามิเตอร์คุณภาพน้ำที่เหลือ ณ สภาวะสมดุล	ทีโอซี ซีโอดี สี และพีเอช
2. ประสิทธิภาพในการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์	-

### 3.4.3 การทดลองชุดที่ 3 ทดลองหาค่าไอโซเทอม (Isotherm Test) ของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด เมื่อมีขนาดรูพรุนแตกต่างกัน โดยเลือกค่าพีเอชที่เหมาะสม

ตัวแปรต่าง ๆ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการทดลองหาค่าไอโซเทอม (Isotherm Test) ของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด เมื่อมีขนาดรูพรุนแตกต่างกัน โดยเลือกค่าพีเอชที่เหมาะสม

ตัวแปร	พารามิเตอร์
<b>ตัวแปรอิสระ</b> 1. ขนาดรูพรุน 4 ขนาด (อังสตรอม) 2. ปริมาณของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ (Carbon dosage) 12 ค่า (กรัม)	404 516 1,781 และ 26,640 0.02 0.05 0.1 0.2 0.4 0.6 0.8 1 3 5 10 15 และ 20
<b>ตัวแปรคงที่</b> 1. ลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งเริ่มต้น - ความเข้มข้นของพารามิเตอร์ต่าง ๆ - ปริมาณน้ำ 2. รอบการเขย่า 3. เวลาของการดูดติดผิวจนถึงสถานะสมดุล 4. พีเอชที่เหมาะสมของน้ำทิ้งเริ่มต้น 5. อุณหภูมิ	ทีไอซี ซีไอดี ซี และพีเอช 150 มล. 250 รอบต่อนาที 24 ชม. 8.3 (พีเอชของน้ำทิ้ง) อุณหภูมิห้อง
<b>ตัวแปรตาม</b> 1. ลักษณะสมบัติของน้ำหลังทำการทดลอง - ความเข้มข้นของพารามิเตอร์คุณภาพน้ำที่เหลือ ณ สถานะสมดุล 2. ความสามารถในการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดรูพรุนแตกต่างกัน ทั้ง 4 ขนาด	ทีไอซี ซีไอดี ซี และพีเอช -

**3.4.4 การทดลองชุดที่ 4 ศึกษาหาสภาวะการดำเนินงานของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด ที่มีขนาดรูพรุนที่เหมาะสม ให้ความสามารถในการดูดติดผิวสูงสุด (จากผลการทดลองชุดที่ 3) ในแบบคอลัมน์ที่มีการไหลแบบต่อเนื่อง**

ตัวแปรต่าง ๆ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.4

ตารางที่ 3.4 ตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษาหาสภาวะการดำเนินงานของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด ที่มีขนาดรูพรุนที่เหมาะสม ให้ความสามารถในการดูดติดผิวสูงสุด ในแบบคอลัมน์ที่มีการไหลแบบต่อเนื่อง

ตัวแปร	พารามิเตอร์
<b>ตัวแปรอิสระ</b> 1. เวลาสัมผัสของน้ำ 3 ค่า 2. อัตราการไหลของน้ำเข้าคอลัมน์ 3 ค่า	15 30 และ 60 นาที 1.09 0.54 และ 0.27 ล./ชม.
<b>ตัวแปรคงที่</b> 1. ถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดรูพรุนให้ความสามารถในการดูดติดผิวสูงสุด ( $d_{optimum}$ ) 2. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์ 3. ความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ 4. พีเอชที่เหมาะสมของน้ำทิ้งเริ่มต้น 5. อุณหภูมิ	ถ่านกัมมันต์บี (ปริมาณ 132 กรัม แต่ละคอลัมน์) 2.40 ซม. 60 ซม. 8.3 (พีเอชของน้ำทิ้ง) อุณหภูมิห้อง
<b>ตัวแปรตาม</b> 1. ลักษณะสมบัติของน้ำหลังทำการทดลอง - ความเข้มข้นของพารามิเตอร์คุณภาพน้ำที่เหลือ ณ เวลาต่าง ๆ 2. ประสิทธิภาพในการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์	ทีโอซี ซีไอดี สี ความกระด้างทั้งหมด ความขุ่น โคลิฟอร์มทั้งหมด พีเอช และอุณหภูมิ

3.4.5 การทดลองชุดที่ 5 ศึกษาหาความสามารถในการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ ที่ขนาดรูพรุนแตกต่างกัน 3 ขนาดที่เหลือ ในแบบคอลัมน์ที่มีการไหลแบบต่อเนื่อง โดยเลือก ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสม (จากผลการทดลองชุดที่ 4)

ตัวแปรต่าง ๆ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษาหาความสามารถในการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ที่ ขนาดรูพรุนแตกต่างกัน 3 ขนาดที่เหลือ ในแบบคอลัมน์ที่มีการไหลแบบต่อเนื่อง โดยเลือกระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสม

ตัวแปร	พารามิเตอร์
<b>ตัวแปรอิสระ</b> ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดที่มีขนาดรูพรุนแตกต่างกัน ที่เหลือทั้ง 3 ขนาด (อังสตรอม)	ถ่านกัมมันต์เอ ซี และดี (ขนาดรูพรุน 26,640 516 404 อังสตรอม)
<b>ตัวแปรคงที่</b> 1. ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอลัมน์ 2. ความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ 3. พีเอชที่เหมาะสมของน้ำทิ้งเริ่มต้น 4. อัตราการไหลของน้ำเข้าคอลัมน์ 5. ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสม 6. อุณหภูมิ	2.40 ซม. 60 ซม. 8.3 (พีเอชของน้ำทิ้ง) 0.27 ล./ชม. 60 นาที อุณหภูมิห้อง
<b>ตัวแปรตาม</b> 1. ลักษณะสมบัติของน้ำหลังทำการทดลอง - ความเข้มข้นของพารามิเตอร์คุณภาพน้ำ ที่เหลือ ณ เวลาต่าง ๆ 2. ประสิทธิภาพในการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์	ทีโอซี ซีโอดี สี ความกระด้างทั้งหมด ความขุ่น โคลิฟอร์มทั้งหมด พีเอช และอุณหภูมิ -

### 3.5 ขั้นตอนการทดลอง

#### 3.5.1 การทดลองชุดที่ 1 ศึกษาหาเวลาของการดูดติดผิวจนถึงสถานะสมดุล (Equilibrium Time) ของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดที่มีขนาดรูพรุนแตกต่างกัน

3.5.1.1 นำน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดทางชีวภาพมาแล้ว นำมาวิเคราะห์ปริมาณ สี ทีโอซี ซีไอดี และ พีเอช เพื่อเป็นลักษณะน้ำทิ้งก่อนการทำการวิจัย

3.5.1.2 เติมตัวอย่างน้ำทิ้งปริมาณ 150 มล. ซึ่งควบคุมพีเอชให้คงที่ด้วยสาร บัฟเฟอร์ และเติมถ่านกัมมันต์จำนวน 5 กรัม ลงในขวดรูปชมพูนขนาด 250 มล. และปิดปากขวดด้วยพลาสติกใส ทำเช่นเดียวกันทั้งหมด 6 ขวด ซึ่งมีอีก 1 ขวดที่เป็นตัวควบคุม โดยเหมือนกับในกลุ่ม การทดลอง แต่ไม่ใช่ถ่านกัมมันต์

3.5.1.3 นำขวดรูปชมพู่ทั้งหมด 7 ขวดใส่ในเครื่องเขย่า ที่มีรอบการเขย่าเท่ากับ 250 รอบต่อนาที

3.5.1.4 ทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่ผ่านการเขย่าแล้ว ณ เวลา 1 2 4 8 12 และ 24 ชม. ตามลำดับ หรือ ณ เวลาที่เหมาะสม ทำการแยกถ่านกัมมันต์ออกจากน้ำก่อน โดยการดูดน้ำเฉพาะ ส่วนที่เป็นน้ำใสหลังจากทิ้งให้ถ่านกัมมันต์จมตัวประมาณ 5 นาที จึงนำมากรอง เพื่อกำจัด ถ่านกัมมันต์ออกจากน้ำ ก่อนที่จะนำไปวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ

3.5.1.5 นำเฉพาะส่วนที่เป็นน้ำทิ้งที่ผ่านการจมน้ำแล้ว ณ เวลาที่เก็บต่าง ๆ มาวิเคราะห์ปริมาณ สี ทีโอซี ซีไอดี และ พีเอช

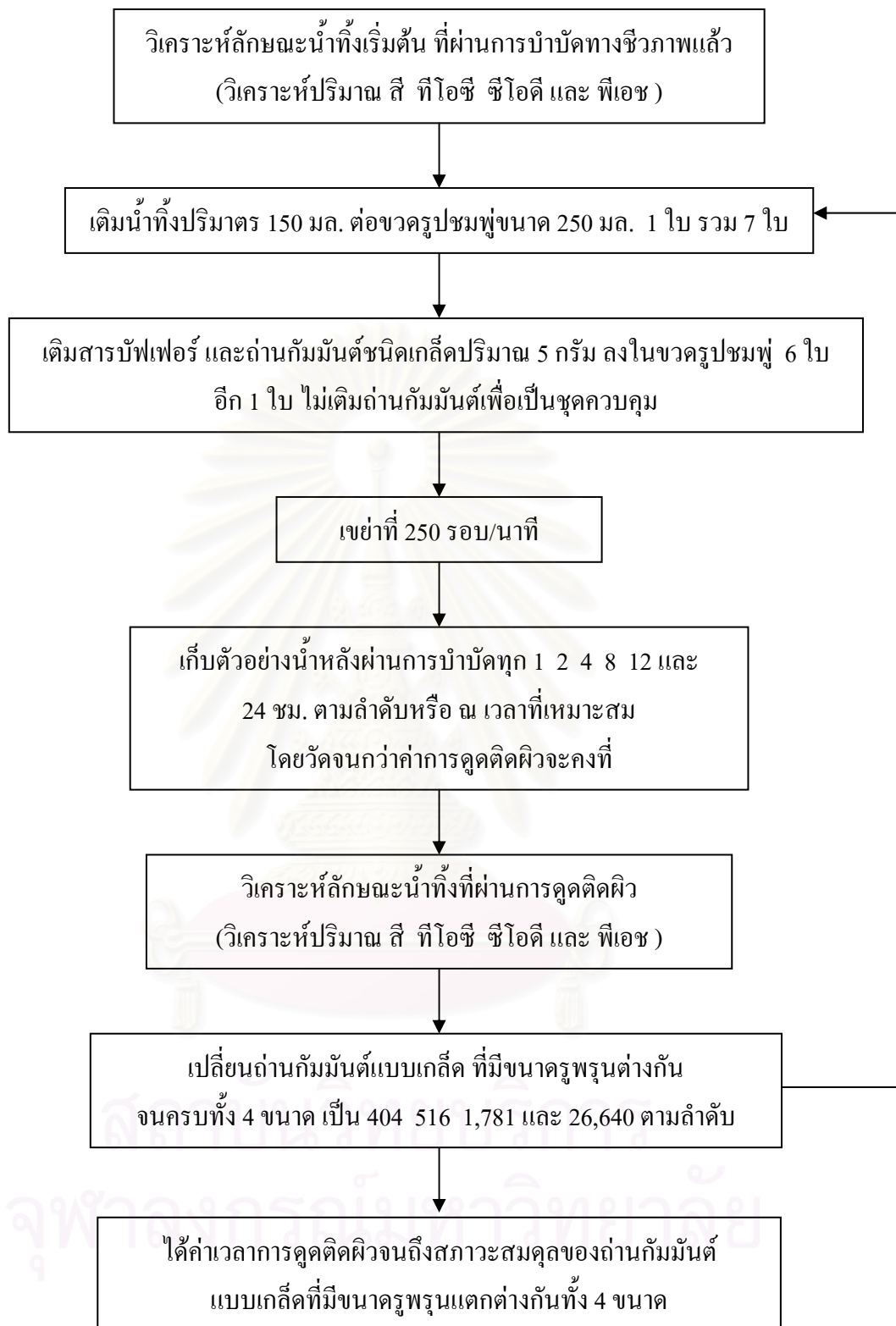
3.5.1.6 นำข้อมูลที่ได้ไปพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่ออกกับ ระยะเวลา แล้วหาค่าเวลาของการดูดติดผิวถึงสถานะสมดุล (Equilibrium Time)

3.5.1.7 ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 3.5.1.2 ถึง 3.5.1.6 แต่เปลี่ยนถ่านกัมมันต์ ให้มีขนาดรูพรุนครบทั้ง 4 ขนาด

สามารถอธิบายขั้นตอนการทดลองชุดที่ 1 ได้ดังรูปที่ 3.3

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 3.3 แผนภาพการหาเวลาการดูดติดผิวจนถึงสถานะสมดุลของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด

### 3.5.2 การทดลองชุดที่ 2 ศึกษาผลของพีเอชที่มีต่อการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด ที่มีขนาดรูพรุนแตกต่างกัน

3.5.2.1 นำน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดทางชีวภาพมาแล้ว นำมาวิเคราะห์ปริมาณ สี ทีโอซี ซีไอดี และ พีเอช เพื่อเป็นลักษณะน้ำทิ้งก่อนการทำการวิจัย

3.5.2.2 เติมตัวอย่างน้ำทิ้งปริมาณ 150 มล. ลงในขวดรูปชมพูนขนาด 250 มล. จำนวน 8 ขวด

4.5.2.3 นำน้ำทิ้งในขวดรูปชมพู่ทั้ง 8 ใบ ไปเติมสารบัพเฟอร์และปรับพีเอชให้ได้ค่าพีเอช 5.0 6.5 8.1 และ 9.5 อย่างละ 2 ขวด ตามลำดับ

3.5.2.4 เติมถ่านกัมมันต์จำนวน 5 กรัม ลงในขวดรูปชมพูนขนาด 250 มล. และปิดปากขวดด้วยพลาสติกใส ทำเช่นเดียวกันทั้งหมด 4 ขวด (พีเอช 5.0 6.5 8.1 และ 9.5) ซึ่งมีอีก 4 ขวด (พีเอช 5.0 6.5 8.1 และ 9.5) ที่เป็นชุดควบคุมโดยเหมือนกับในกลุ่มการทดลอง แต่ไม่ได้ถ่านกัมมันต์

3.5.2.5 นำขวดรูปชมพู่ทั้งหมด 8 ขวดใส่ในเครื่องเขย่า ที่มีรอบการเขย่าเท่ากับ 250 รอบต่อนาที

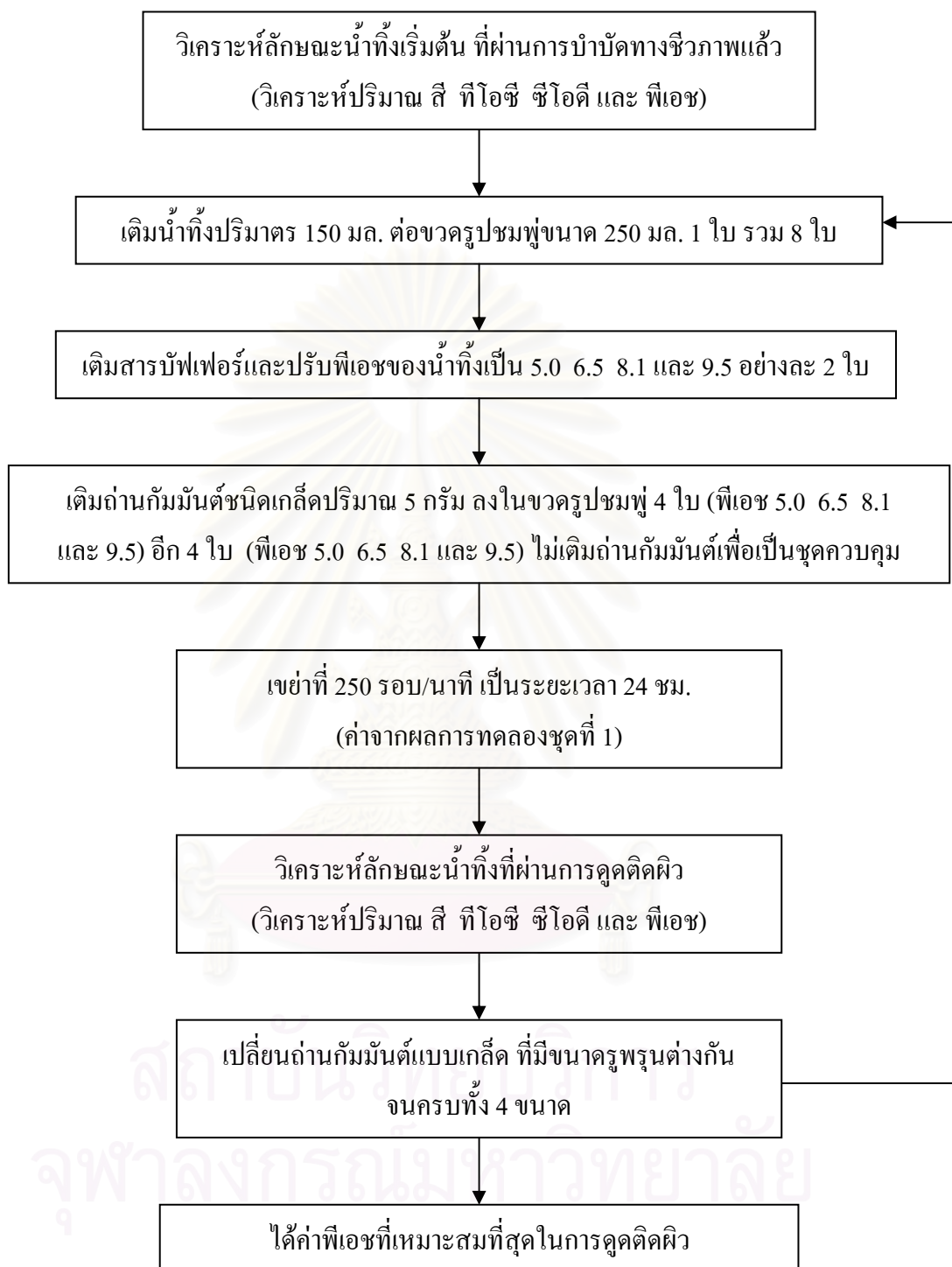
3.5.2.6 ทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่ผ่านการเขย่าแล้ว ที่ระยะเวลา 24 ชั่วโมง (ค่าจากผลการทดลองชุดที่ 1) โดยจะทำการแยกถ่านกัมมันต์ออกจากน้ำก่อน โดยการดูดน้ำใสหลังจากทิ้งให้ถ่านกัมมันต์จมตัวประมาณ 5 นาที จึงนำมากรอง เพื่อกำจัดถ่านกัมมันต์ออกจากน้ำ ก่อนที่จะนำไปวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ

3.5.2.7 นำเฉพาะส่วนที่เป็นน้ำทิ้งที่ผ่านการจมน้ำแล้ว ณ เวลาที่การดูดติดผิวถึงจุดสถานะสมดุล มาวิเคราะห์ปริมาณ สี ทีโอซี ซีไอดี และ พีเอช

3.5.2.8 ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 3.5.2.2 ถึง 3.5.2.7 แต่เปลี่ยนถ่านกัมมันต์ให้มีขนาดรูพรุนครบทั้ง 4 ขนาด

3.5.1.8 พิจารณาผลการทดลองเพื่อเลือกค่าพีเอชที่เหมาะสม ในการนำมาใช้ปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้ง

สามารถอธิบายขั้นตอนการทดลองชุดที่ 2 ได้ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แผนภาพการหาพีเอชที่เหมาะสมของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดที่มี  
ขนาดรูพรุนแตกต่างกัน 4 ขนาด

### 3.5.3 การทดลองชุดที่ 3 ทดลองหาค่าไอโซเทอร์ม (Isotherm Test) ของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดที่มีขนาดรูพรุนแตกต่างกัน โดยเลือกค่าพีเอชที่เหมาะสม

3.5.3.1 นำน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดทางชีวภาพมาแล้ว มาวิเคราะห์ปริมาณ สี ทีไอซี ซีไอดี และ พีเอช เพื่อเป็นลักษณะน้ำทิ้งก่อนการทำการวิจัย

3.5.3.2 เติมตัวอย่างน้ำทิ้งปริมาณ 150 มล. เติมสารบัฟเฟอร์และปรับพีเอชของน้ำทิ้งให้ได้ค่าพีเอชที่เหมาะสม (จากผลการทดลองที่ได้จากการทดลองชุดที่ 2) และเติมถ่านกัมมันต์จำนวน 0.02 0.05 0.1 0.2 0.4 0.6 0.8 1 3 5 10 15 และ 20 กรัม ลงในขวดรูปชมพูนขนาด 250 มล. และปิดปากขวดด้วยพลาสติกใส ซึ่งมีอีก 1 ขวดเป็นตัวควบคุมโดยเหมือนกับในกลุ่มการทดลองแต่ไม่ใส่ถ่านกัมมันต์

3.5.3.3 นำขวดรูปชมพู่ทั้งหมด 14 ขวดใส่ในเครื่องเขย่า ที่มีรอบการเขย่าเท่ากับ 250 รอบต่อนาที

3.5.3.4 ทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่ผ่านการเขย่าแล้ว ที่ระยะเวลา 24 ชั่วโมง (ค่าจากการทดลองชุดที่ 1) โดยจะทำการแยกถ่านกัมมันต์ออกจากน้ำก่อน โดยการดูดน้ำใสหลังจากทิ้งให้ถ่านกัมมันต์จมตัวประมาณ 5 นาที จึงนำมากรอง เพื่อกำจัดถ่านกัมมันต์ออกจากน้ำ ก่อนที่จะนำไปวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ

3.5.3.5 นำเฉพาะส่วนที่เป็นน้ำทิ้งที่ผ่านการจมน้ำแล้ว ณ เวลาที่การดูดติดผิวถึงจุดสถานะสมดุล มาวิเคราะห์ปริมาณ สี ทีไอซี ซีไอดี และ พีเอช

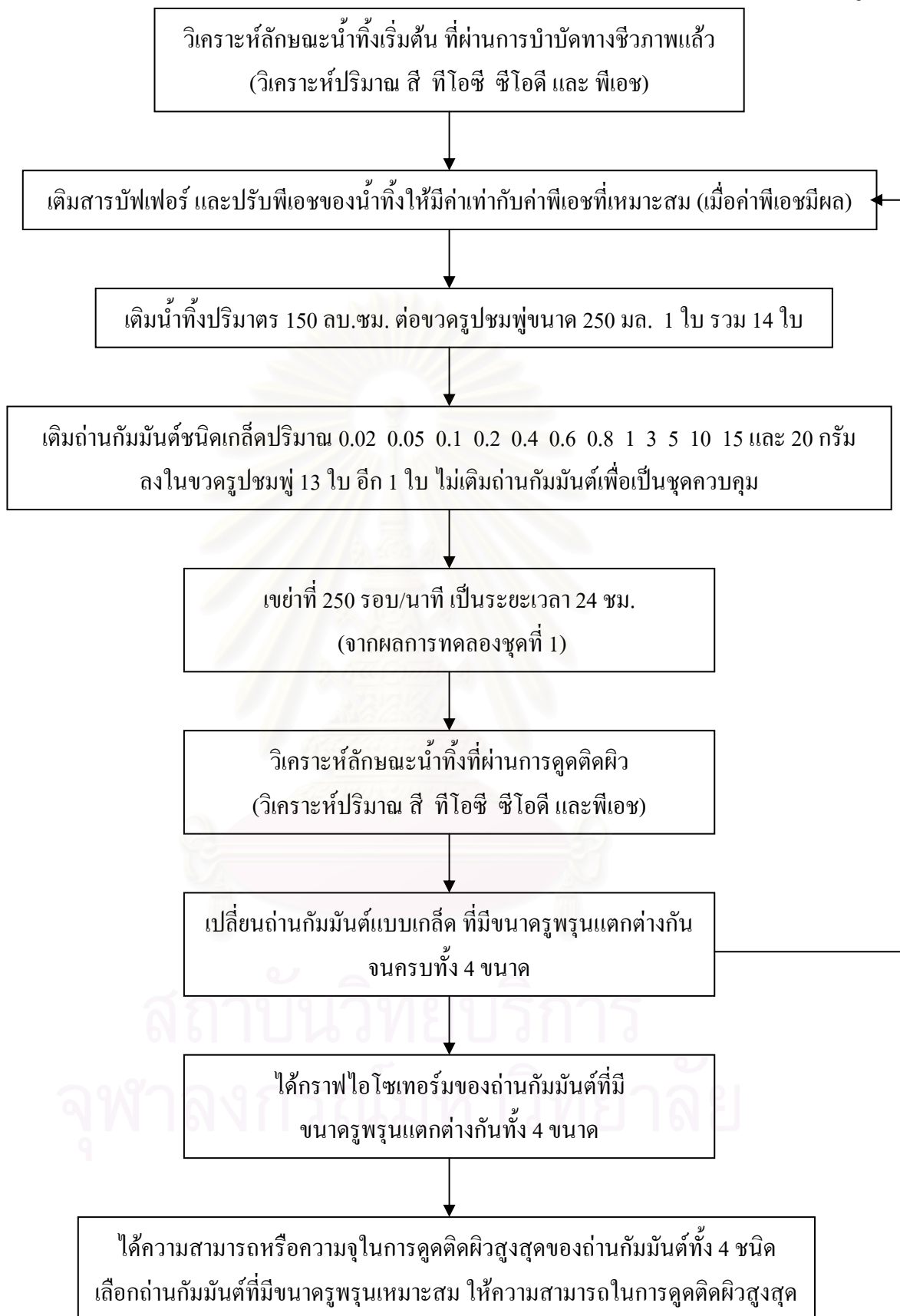
3.5.3.6 นำข้อมูลที่ได้ไปพล็อตกราฟหาไอโซเทอร์มของการดูดติดผิว

3.5.3.7 ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 3.5.3.2 ถึง 3.5.3.6 แต่เปลี่ยนถ่านกัมมันต์ให้มีขนาดรูพรุนครบทั้ง 4 ขนาด

3.5.3.8 เลือกถ่านกัมมันต์ที่ขนาดรูพรุนให้ความสามารถในการดูดติดผิวดีที่สุด เพื่อนำไปทำการทดลองในขั้นต่อไป

สามารถอธิบายขั้นตอนการทดลองชุดที่ 3 ได้ดังรูปที่ 3.5

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.5 แผนภาพการทดลองหาค่าไอโซเทอร์ม เพื่อหาถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด  
ที่มีขนาดรูพรุนเหมาะสมให้ความสามารถในการดูดซับผิวสูงสุด

### 3.5.4 การทดลองชุดที่ 4 ศึกษาหาสภาวะการดำเนินงานของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด ที่มีขนาดรูพรุนที่เหมาะสม ให้ความสามารถในการดูดติดผิวสูงสุด ในแบบคอลัมน์ที่มีการไหลแบบต่อเนื่อง

3.5.4.1 นำน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดทางชีวภาพมาแล้ว มาวิเคราะห์ปริมาณ สี ความขุ่น ทีไอซี ซีไอดี ความกระด้างทั้งหมด โคลิฟอร์มทั้งหมด และ พีเอช เพื่อเป็นลักษณะ น้ำทิ้งก่อนการทำการวิจัย

3.5.4.2 ปรับพีเอชของน้ำทิ้งให้ได้ค่าพีเอชเท่ากับค่าพีเอชที่เหมาะสม (ผลการทดลองที่ได้จากการทดลองชุดที่ 2)

3.5.4.3 นำถ่านชนิดเกล็ดที่ขนาดรูพรุนเหมาะสม ( $d_{optimum}$ ) ให้ความสามารถในการดูดติดผิวสูงสุดมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งในคอลัมน์ (ผลการทดลองที่ได้จากการทดลองชุดที่ 3) นำมาแช่ในน้ำปราศจากไอออน

3.5.4.4 นำถ่านกัมมันต์ค่อย ๆ บรรจุลงในคอลัมน์อะคริลิกใส เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.40 ซม. มีพื้นที่หน้าตัด 4.52 ตร.ซม. มีความสูงของคอลัมน์เท่ากับ 120 ซม. ซึ่งจะทำการบรรจุ ถ่านกัมมันต์ทีละน้อยเพื่อให้ถ่านกัมมันต์อัดตัวแน่น จนได้ความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์เท่ากับ 60 ซม. ทั้ง 3 คอลัมน์ โดยขณะบรรจุถ่านกัมมันต์ควรแช่อยู่ในน้ำปราศจากไอออนตลอดเวลาเพื่อ ป้องกันอากาศที่สามารถแทรกตัวอยู่ตามรูพรุนของถ่านกัมมันต์ เพราะถ้าอากาศแทรกอยู่จะมีผล ทำให้เกิดแรงดันจากอากาศภายในคอลัมน์กับการไหลของน้ำ ทำให้ประสิทธิภาพของการไหล ไม่ได้ตามที่กำหนดไว้โดยกำหนดให้คอลัมน์ทั้ง 3 คอลัมน์ มีเวลาในการสัมผัสน้ำ (empty bed contact time) เท่ากับ 15 30 และ 60 นาที ตามลำดับ

3.5.4.5 ปล่อยน้ำทิ้งผ่านคอลัมน์ทั้ง 3 คอลัมน์ โดยน้ำที่ผ่านคอลัมน์จะผ่าน Glass bead เพื่อให้กระจายน้ำเข้าคอลัมน์เป็นไปอย่างสม่ำเสมอโดยเป็นการไหลจากด้านล่าง ขึ้นด้านบน และเพื่อให้ทั่วบริเวณผิวหน้าของถ่านกัมมันต์ ซึ่งในการปล่อยน้ำทิ้งผ่านคอลัมน์ทั้ง 3 คอลัมน์ จะมีอัตราไหลเท่ากับ 1.09 0.54 และ 0.27 ล./ชม. ตามลำดับ

3.5.4.6 เก็บตัวอย่างน้ำโดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำทุกวัน เพื่อนำไปวิเคราะห์ ทีไอซี เก็บตัวอย่างทุก 2 วัน เพื่อนำไปวิเคราะห์ ปริมาณสี ความขุ่น ซีไอดี ความกระด้างทั้งหมด อุณหภูมิ และ พีเอช และเก็บตัวอย่างทุก 7 วัน เพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณ โคลิฟอร์มทั้งหมด โดยจะทำการเก็บตัวอย่างน้ำจนกว่าน้ำที่ออกจะมีค่า ทีไอซี เกินกว่า 6 มก.ต่อล. ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของ น้ำประปาซึ่งผู้ทดลองได้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำประปาจำนวน 3 ครั้ง พบว่ามีค่าทีไอซีใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเฉลี่ย เท่ากับ 6 มก./ล.

3.5.4.7 นำข้อมูลที่ได้ไปพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่ออก กับระยะเวลาในการดำเนินระบบ และปริมาณน้ำที่ผ่านคอลัมน์ ณ ระยะเวลาสัมผัสน้ำที่แตกต่างกัน เพื่อเปรียบเทียบผลของการดูดติดผิวที่ระยะเวลาสัมผัสน้ำที่แตกต่างกัน



3.5.4.8 พิจารณาระยะเวลาสัมผัสน้ำที่เหมาะสม และสามารถให้ค่าความจุดูดติด สี, ทีไอซี และ ซีไอดี สูงสุด

สามารถอธิบายขั้นตอนการทดลองชุดที่ 4 ได้ดังรูปที่ 3.6

**3.5.5 การทดลองชุดที่ 5 ศึกษาหาความสามารถในการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ที่ขนาดรูพรุนแตกต่างกัน 3 ขนาดที่เหลือ ในแบบคอลัมน์ที่มีการไหลแบบต่อเนื่อง โดยเลือกระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสม (จากผลการทดลองชุดที่ 4)**

3.5.5.1 นำน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดทางชีวภาพมาแล้ว มาวิเคราะห์ปริมาณ สี ความขุ่น ทีไอซี ซีไอดี ความกระด้างทั้งหมด โคลิฟอร์มทั้งหมด และ พีเอช เพื่อเป็นลักษณะน้ำทิ้งก่อนการทำการวิจัย

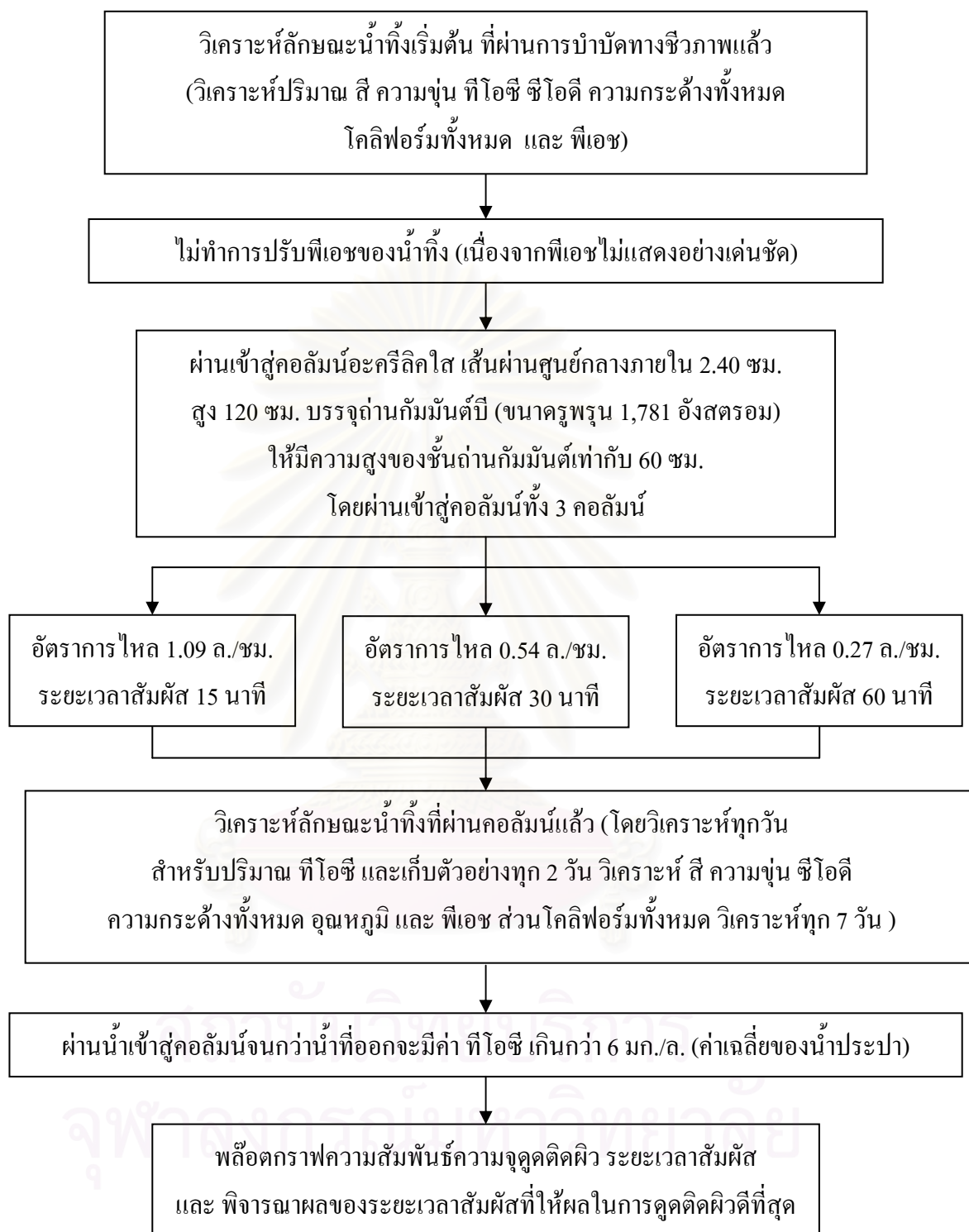
3.5.5.2 ปรับพีเอชของน้ำทิ้งให้ได้ค่าพีเอชเท่ากับค่าพีเอชที่เหมาะสม (เมื่อค่าพีเอชมีผล จากผลการทดลองที่ได้จากการทดลองชุดที่ 2)

3.5.5.3 นำถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดที่ขนาดรูพรุนแตกต่าง 3 ขนาดที่เหลือ มาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งในคอลัมน์ นำมาแช่ในน้ำปราศจากไอออน

3.5.5.4 นำถ่านกัมมันต์ค่อย ๆ บรรจุลงในคอลัมน์อะคริลิกใส เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.40 ซม. มีพื้นที่หน้าตัด 4.52 ตร.ซม. มีความสูงของคอลัมน์เท่ากับ 120 ซม. ซึ่งจะทำให้การบรรจุถ่านกัมมันต์ที่ละเอียด เพื่อให้ถ่านกัมมันต์อัดตัวแน่น จนได้ความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์เท่ากับ 60 ซม. ทั้ง 3 คอลัมน์ โดยขณะบรรจุถ่านกัมมันต์ควรแช่อยู่ในน้ำปราศจากไอออนตลอดเวลา เพื่อป้องกันอากาศที่สามารถแทรกตัวอยู่ตามรูพรุนของถ่านกัมมันต์ เพราะถ้าอากาศแทรกอยู่จะมีผลทำให้เกิดแรงต้านจากอากาศภายในคอลัมน์กับการไหลของน้ำ ทำให้ประสิทธิภาพของการไหลไม่ได้ตามที่กำหนดไว้โดยกำหนดให้คอลัมน์ทั้ง 3 คอลัมน์ มีเวลาในการสัมผัสน้ำ (empty bed contact time) เท่ากับระยะเวลาสัมผัสน้ำที่เหมาะสม (จากผลการทดลองชุดที่ 4)

3.5.5.5 ปล่อยน้ำทิ้งผ่านคอลัมน์ทั้ง 3 คอลัมน์ โดยน้ำที่ผ่านคอลัมน์จะผ่าน Glass bead เพื่อให้กระจายน้ำเข้าคอลัมน์เป็นไปอย่างสม่ำเสมอโดยเป็นการไหลจากด้านล่างขึ้นด้านบน และเพื่อให้ทั่วบริเวณผิวหน้าของถ่านกัมมันต์ ซึ่งในการปล่อยน้ำทิ้งผ่านคอลัมน์ทั้ง 3 คอลัมน์ จะมีอัตราไหลเท่ากับอัตราการไหลที่เหมาะสม (จากการทดลองชุดที่ 4)

3.5.5.6 เก็บตัวอย่างน้ำโดยทำการเก็บตัวอย่างน้ำทุกวัน เพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณทีไอซี เก็บตัวอย่างทุก 2 วัน เพื่อวิเคราะห์ สี ความขุ่น ซีไอดี ความกระด้างทั้งหมด อุณหภูมิ และ พีเอช และทุก 7 วัน เพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณโคลิฟอร์มทั้งหมด โดยจะทำการเก็บตัวอย่างน้ำจนกว่าน้ำที่ออกจะมีค่า ทีไอซี เกินกว่า 6 มก.ต่อล. (ค่าเฉลี่ยของน้ำประปา)



รูปที่ 3.6 แผนภาพการทดลองหาสภาวะการดำเนินงานในการทดลองแบบคอลัมน์  
ของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดชนิดที่มีขนาดรูพรุนที่เหมาะสม ( $d_{\text{optimum}}$ )

3.5.5.7 นำข้อมูลที่ได้ไปเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเข้มข้นที่ออก  
กับระยะเวลาในการดำเนินระบบ และปริมาตรน้ำที่ผ่านคอลัมน์ ของถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดรูพรุน  
แตกต่างกันทั้ง 3 ขนาด เพื่อเปรียบเทียบผลของการดูดติดผิวที่ขนาดรูพรุนแตกต่างกัน

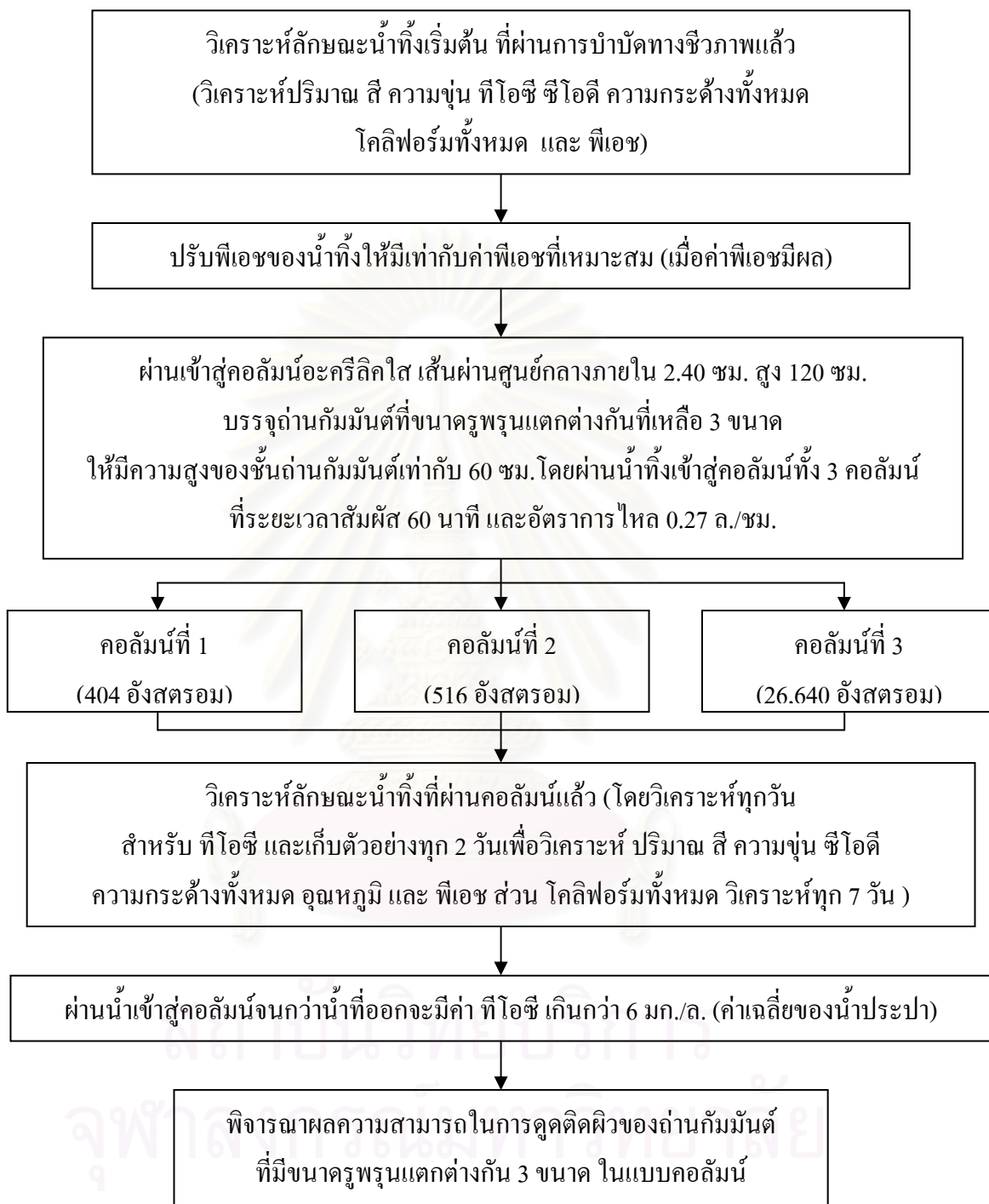
3.5.5.8 พิจารณาความสามารถในการดูดติดผิว ด้านการลดปริมาณ สี ทีไอซี  
และ ซีไอซี ของทั้ง 3 คอลัมน์

3.5.5.9 คำนวณค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้ง และพิจารณาความเหมาะสม  
ของระบบในการนำมาใช้งานจริง

สามารถอธิบายขั้นตอนการทดลองชุดที่ 5 ได้ดังรูปที่ 3.7



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.7 แผนภาพการทดลองความสามารถในการดูดซับสำหรับการทดลองแบบคอลัมน์  
ของถ่านกัมมันต์ที่ขนาดรูพรุนแตกต่างกัน 3 ขนาดที่เหลือ

### 3.6 วิธีกรวัดพารามิเตอร์ต่าง ๆ

ตารางที่ 3.6 การวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่าง ๆ

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์
พีเอช	pH Meter
อุณหภูมิ	Thermometer
ความขุ่น	Turbidity meter
สี	UV-Spectrophotometer
ซีโอดี	Closed Reflux , Titrimetric Method
ทีโอซี	TOC analyzer
ความกระด้างทั้งหมด	EDTA Titrimetric Method
โคลิฟอร์มทั้งหมด	MPN Method

อ้างอิงจาก: Standard methods for the examination of water and wastewater 19<sup>th</sup> Edition 1995

## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 4.1 ลักษณะสมบัติของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการทดลอง

การทดลองนี้ใช้ถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด (Granular activated carbon , GAC) โดยได้ทำการคัดขนาดของถ่านกัมมันต์ให้มีขนาด 8×30 mesh sizes หรือมีขนาดประมาณ 2.38 – 0.6 มิลลิเมตร ซึ่งทางบริษัท คาร์โบกาญจน์ จำกัด ได้เอื้อเฟื้อในการจัดเตรียมถ่านกัมมันต์ในช่วงดังกล่าวสำหรับใช้งานวิจัยนี้ ทั้งนี้เพื่อให้การกระจายขนาดของถ่านกัมมันต์มีความใกล้เคียงกัน ทำให้ง่ายต่อการเปรียบเทียบ ผลการทดลองสำหรับขนาดรูพรุน พื้นที่ผิว และไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ดที่ใช้ในการทดลองนี้ แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ขนาดรูพรุน พื้นที่ผิว และไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการทดลอง

ถ่านกัมมันต์	เอ	บี	ซี	ดี
ขนาดรูพรุน (อังสตรอม)	26,640	1,781	516	404
พื้นที่ผิวทั้งหมด (ตร.ม./ก.)	763	967	1,030	862
ไอโอดีนนัมเบอร์ (มก./ก.)	922	976	1172	1015

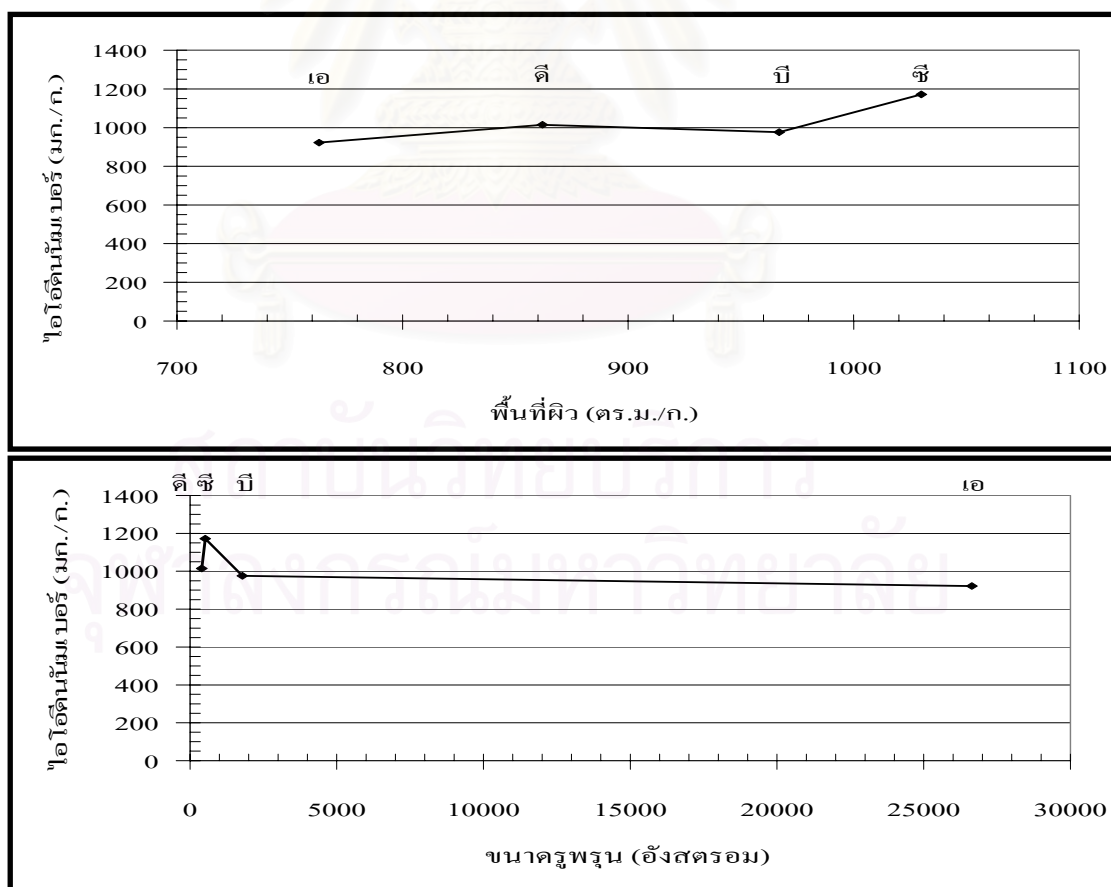
จากมาตรฐานของ IUPAC (International Union of Pure and Applied Chemists) (Rodrigues, LeVan และTondeur ; 1988) สามารถแบ่งขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ได้เป็น 3 ช่วงคือ

ขนาดรูพรุนใหญ่	มีขนาดรูพรุนเฉลี่ย	มากกว่า 500	อังสตรอม
ขนาดรูพรุนกลาง	มีขนาดรูพรุนเฉลี่ย	20 – 500	อังสตรอม
ขนาดรูพรุนเล็ก	มีขนาดรูพรุนเฉลี่ย	น้อยกว่า 20	อังสตรอม

ดังนั้น เมื่อพิจารณาขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ขนาด พบว่า ถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการทดลองนี้มีขนาดรูพรุนเฉลี่ยเป็นขนาดรูพรุนกลาง คือ ถ่านกัมมันต์ดี ส่วนถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดรูพรุนใหญ่ คือถ่านกัมมันต์เอ บี และซี ทั้งนี้ไม่ได้มีการศึกษากับถ่านกัมมันต์ขนาดรูพรุนเล็ก เนื่องจากถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดรูพรุนเล็กนั้น ไม่พบว่ามีขายในท้องตลาดทั่วไปเนื่องจากมีการใช้งานน้อย



เมื่อพิจารณาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ (ไอโอดีนนัมเบอร์คือ ปริมาณไอโอดีนในหน่วย มิลลิกรัมที่ถูกดูดคิดโดยถ่านกัมมันต์ 1 กรัม) กับขนาดรูพรุน และพื้นที่ผิว พบว่า ไอโอดีนนัมเบอร์ ไม่ได้แปรผันตามขนาดรูพรุนเสมอไป แต่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ แสดงดังรูปที่ 4.1 ทั้งนี้คาดว่าเกิดจากขนาดโมเลกุลของไอโอดีนมีขนาดเท่ากับ 2.64 อังสตรอม (Physics และ Astronomy online, 1995) ซึ่งมีขนาดเล็กมาก และเล็กกว่าขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ขนาดรูพรุน ดังนั้นจึงสามารถเคลื่อนที่เข้าสู่ภายในรูพรุนของถ่านกัมมันต์ได้ เป็นผลให้พื้นที่ผิวซึ่งส่วนใหญ่อยู่ภายในรูพรุนของถ่านกัมมันต์ เป็นตัวแปรที่มีนัยสำคัญมากขึ้น ทำให้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูง มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์สูงตามไปด้วย อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ดังกล่าวไม่จำเป็นต้องเป็นจริงเสมอไป จาก ASTM Standards D 4607 (1994) ระบุไว้ในวิธีทดสอบมาตรฐานของการหาไอโอดีนนัมเบอร์ว่า ไอโอดีนนัมเบอร์ไม่ได้แสดงโดยตรงถึงความสามารถในการดูดคิดสารอื่นๆ ของถ่านกัมมันต์ ค่าไอโอดีนนัมเบอร์สามารถใช้เป็นค่าประมาณของพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์บางชนิดได้ อย่างไรก็ตาม ความสัมพันธ์ระหว่างค่าไอโอดีนนัมเบอร์และพื้นที่ผิวไม่สามารถแจกแจงได้ในรูปแบบสัดส่วนโดยตรงเสมอไป เพราะการดูดคิดขึ้นอยู่กับ วัตถุประสงค์ที่นำมาทำเป็นถ่านกัมมันต์ วิธีในการกระตุ้น และการกระจายขนาดของรูพรุนของถ่านกัมมันต์



รูปที่ 4.1 ไอโอดีนนัมเบอร์ กับขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์

#### 4.2 ลักษณะน้ำทิ้งที่ใช้ในการทดลอง

ผู้วิจัยได้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดทางชีวภาพขั้นที่สอง(สระเติมอากาศ และ บ่อขังแดง) จาก โรงงานซักรีด โดยได้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำทิ้งจำนวน 3 ครั้ง ก่อนเริ่มทำการทดลอง ซึ่งพบว่าลักษณะสมบัติของน้ำทิ้งใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเฉลี่ยดังแสดงในตารางที่ 4.2 เมื่อพิจารณาถึงระยะเวลาที่กักพักชลศาสตร์ที่นานมากประมาณ 3 วันในสระเติมอากาศของโรงงานร่วมกับค่าบีโอดี มีค่ามากและต่ำกว่าซีโอดีเกือบ 3 เท่า (อัตราส่วนซีโอดีและบีโอดี เท่ากับ 2.77) ซึ่งให้เห็นว่า สารอินทรีย์ที่เหลืออยู่ในน้ำทิ้งนี้ส่วนใหญ่เป็นสารที่ย่อยสลายได้ยากทางชีวภาพ ดังนั้นวิธีการบำบัดขั้นต่อไปจึงควรใช้กระบวนการอื่น ๆ คือกระบวนการทางเคมีหรือเคมีฟิสิกส์นอกเหนือจากทางชีวภาพ ซึ่งในกรณีนี้ต้องการลดสารอินทรีย์ ในรูปของทีโอซีเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดปัญหาในการนำกลับไปใช้ใหม่ในกระบวนการซักรีด การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์จึงเป็นแนวทางเลือกหนึ่งที่มีความเหมาะสม

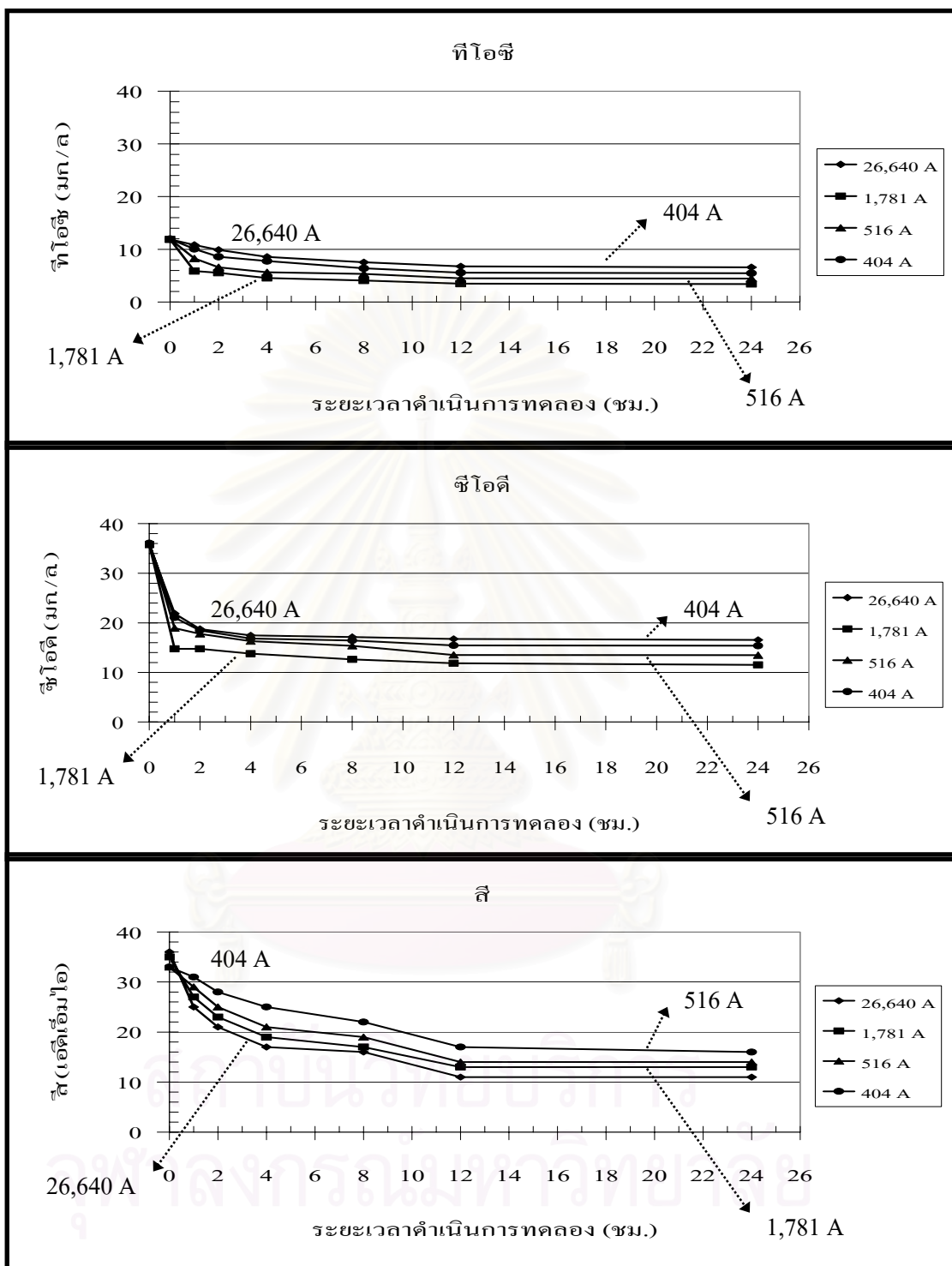
ตารางที่ 4.2 ค่าเฉลี่ยลักษณะสมบัติน้ำทิ้งที่ใช้ในการทดลอง เมื่อผ่านการบำบัดขั้นที่สอง ของโรงซักรีดที่ศึกษา

พารามิเตอร์	หน่วย	ค่าเฉลี่ย	SD
พีเอช	-	8.3	0.16
ดี	เอดีเอ็มไอ	32	2.5
ความกระด้างทั้งหมด	มก./ล. ในรูป CaCO <sub>3</sub>	120	8.2
บีโอดี	มก./ล.	13	2.4
ซีโอดี	มก./ล.	36	1.7
ทีโอซี	มก./ล.	15	0.9
ปริมาณ โคลิฟอร์มทั้งหมด	เอ็มพีเอ็น/100มล.	790	20.5

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำทิ้งสิ้น 3 ตัวอย่าง

#### 4.3 ผลการทดสอบหาเวลาของการดูดซับผิวจนถึงสภาวะสมดุล (Equilibrium Time) ของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด เมื่อมีขนาดรูพรุนแตกต่างกัน

ผลการทดสอบหาเวลาของการดูดซับผิวจนถึงสภาวะสมดุลได้แสดงไว้ดังรูปที่ 4.2 (ข้อมูลดิบแสดงไว้ในภาคผนวก ง.) พบว่าระยะเวลาเข้าสู่สภาวะสมดุลของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ขนาดรูพรุนทั้งในด้าน ทีโอซี ซีโอดี และดี คือ ระยะเวลา 24 ชั่วโมง แต่รูปแบบของการลดลงของ ทีโอซี ซีโอดี และดีแตกต่างกันพอสมควร โดยในกรณีของทีโอซีและดีมีการลดลงอย่างช้า ๆ ในขณะที่ซีโอดีจะเป็นการลดลงอย่างรวดเร็วใน 1 ชั่วโมงแรก หลังจากนั้นจะมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก แสดงได้ว่า ถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ขนาดรูพรุนสามารถดูดซับผิวสารอินทรีย์ที่มีค่าซีโอดีสูงได้อย่างรวดเร็ว



รูปที่ 4.2 ผลการทดสอบหาระยะเวลาในการดูดติดผิวจนถึงภาวะสมดุล  
ของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ขนาดรูปทรง

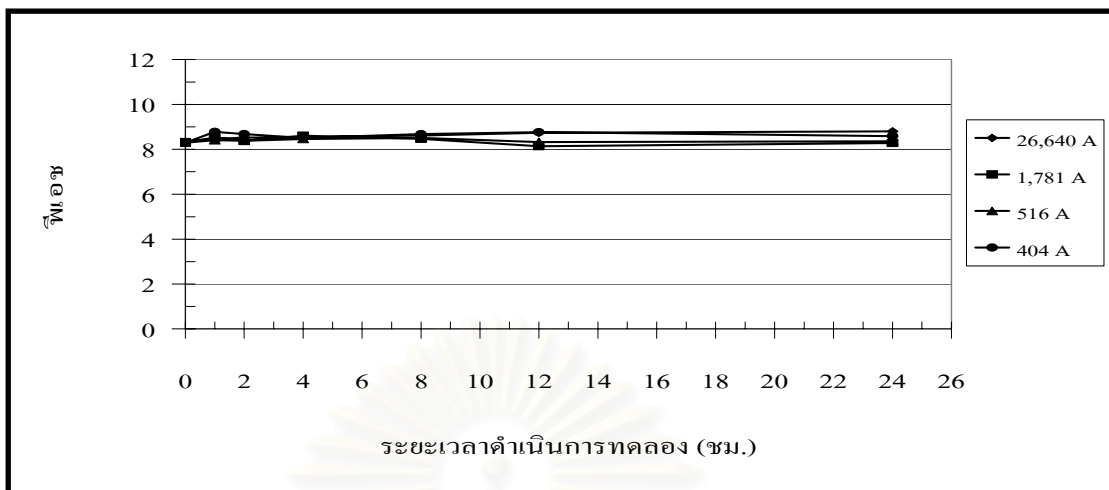
นอกจากนี้พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดสีที่เวลาต่าง ๆ จะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นเมื่อ ขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์มีขนาดใหญ่ขึ้น แต่เมื่อพิจารณาจากลักษณะทางกายภาพของน้ำ ภายหลังจากดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ขนาดรูพรุน พบว่า ลักษณะของน้ำที่ผ่านการบำบัดจาก ถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ขนาดรูพรุน มีลักษณะใส ไม่มีสี เหมือนกันในทุกขนาดรูพรุน แสดงตัวอย่างดัง รูปที่ 4.3 และสำหรับรูปของสีทุกขนาดรูพรุนแสดงในภาคผนวก จ. รูปที่จ.1 – จ.4



รูปที่ 4.3 สีของน้ำภายหลังจากดูดติดผิว (0 1 2 4 8 12 และ 24 ชม. ตามลำดับ)

สำหรับการทดลองในการหาระยะเวลาการดูดติดผิวจนถึงสภาวะสมดุล ได้ทำการควบคุม ค่าพีเอชของการทดลองไว้ด้วยการเติมฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ที่มีความเข้มข้นบัฟเฟอร์ (Buffer Intensity) เท่ากับ 0.05 โมลาร์ (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ฉ.) ซึ่งในที่นี้ได้กำหนดให้ค่าพีเอช สามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงไปได้ไม่เกิน  $\pm 0.50$  ดังนั้นค่าพีเอชในการทดลองนี้ตั้งแต่ เริ่มการทดลองจนถึงระยะเวลา ณ จุดสมดุล จะมีค่าอยู่ในช่วง  $8.3 \pm 0.5$  (พีเอชของน้ำที่จริง) แสดง ดังรูปที่ 4.4

จากผลการทดลองหาระยะเวลาในการดูดติดผิวจนถึงสภาวะสมดุลของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ขนาดรูพรุนพบว่า เมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ความเข้มข้นของสารต่าง ๆ ในน้ำที่มีแนวโน้ม ลดลง และเริ่มคงที่เมื่อถึงระยะเวลาที่อิ่มตัวของการดูดติดผิว ซึ่งคือระยะเวลา ณ จุดสมดุล ดังนั้น ระยะเวลาในการดูดติดจึงมีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัด หากทำการทดลองโดยไม่คำนึงถึง ระยะเวลา ณ จุดสมดุลแล้ว ผลการทดลองที่ได้อาจคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริงได้ ซึ่งจากการ ทดลองจะมีระยะเวลาในการดูดติด ที่ไอซี ซีไอดี และสี จนถึงจุดสมดุลเป็นระยะเวลาประมาณ



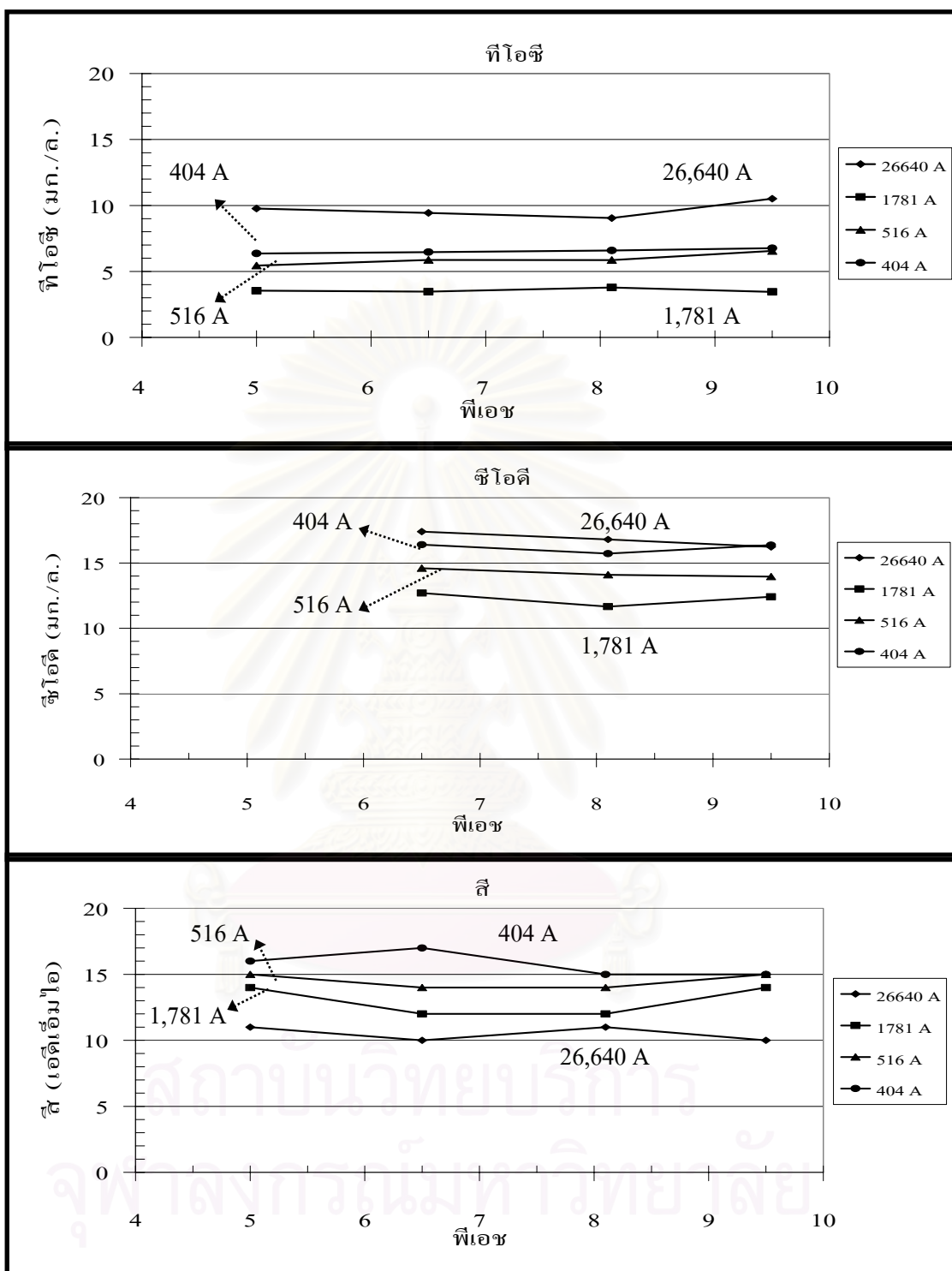
รูปที่ 4.4 พีเอชตลอดระยะเวลาดำเนินการทดลองจนถึงสภาวะสมดุล

24 ชั่วโมงทั้ง 4 ขนาดรูปทูน ดังนั้นในการทดลองขึ้นไปจะทำการเก็บตัวอย่างน้ำที่ 24 ชั่วโมง เพื่อให้มั่นใจว่าการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ได้เข้าสู่สภาวะสมดุลแล้ว

#### 4.4 ผลการทดสอบผลของพีเอชที่มีต่อการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด ที่มีขนาดรูปทูนแตกต่างกัน

สำหรับการทดลองหาผลของพีเอชที่มีต่อการดูดติดผิว ได้ทำการทดลองปรับค่าพีเอชของน้ำทิ้งจากการซักกรีที่ผ่านการบำบัดขั้นที่สองมาแล้วทั้งหมด 4 ค่า คือ 5.0 6.5 8.1 (พีเอชของน้ำทิ้งเริ่มต้น) และ 9.5 ตามลำดับ ทั้งนี้ในทุกค่าพีเอชที่ได้ทำการปรับค่าได้ทำการควบคุมพีเอชของน้ำทิ้งด้วยการเติมบัฟเฟอร์ชนิดต่างๆ ที่มีความเข้มข้นบัฟเฟอร์ (Buffer Intensity) เท่ากับ 0.05 โมลาร์ (รายละเอียดการคำนวณแสดงในภาคผนวก ก) ซึ่งในที่นี้ได้กำหนดให้ค่าพีเอชสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงไปได้ไม่เกิน  $\pm 0.5$  ภายในระยะเวลา 24 ชั่วโมง (ระยะเวลาถึงจุดสมดุล)

ผลการทดลองผลของพีเอชที่มีต่อการดูดติด ทีโอซี ซีโอดี และสี ของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ขนาดรูปทูนนั้นแสดงดังรูปที่ 4.5 พบว่าถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ขนาดรูปทูนให้ผลการดูดติด ทีโอซี ซีโอดี และสี ที่มีแนวโน้มเดียวกันคือ ไม่แตกต่างกันมากเมื่อพีเอชเปลี่ยนแปลงระหว่าง 5.0 ถึง 9.5 สำหรับค่าซีโอดี ที่พีเอช 5 ซึ่งใช้โซเดียมไนไตรท์ ( $\text{NaNO}_2$ ) เป็นบัฟเฟอร์ โดยโซเดียมไนไตรท์ มีความเข้มข้นที่ต่ำกว่าให้เกิดซีโอดีสูงกว่าซีโอดีของน้ำทิ้งมาก เนื่องจากไนไตรท์สามารถถูกออกซิไดซ์ไปเป็นไนเตรตได้ด้วยโพแทสเซียมไดโครเมต เป็นผลให้ค่าซีโอดีของพีเอช 5 ในทุกขนาดรูปทูนของถ่านกัมมันต์มีความแปรปรวนค่อนข้างมาก จึงไม่ได้แสดงผลไว้ในที่นี้ อย่างไรก็ตาม



รูปที่ 4.5 ผลของฟิเอชที่มีต่อการดูดคิดผิวของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ขนาดรูพรุน



ตามเนื่องจาก การทดลองนี้มุ่งเน้นที่จะใช้ที่ไอซีเป็นพารามิเตอร์ศึกษาหลักจึงไม่ส่งผลต่อการศึกษามากนัก

การที่ความสามารถในการดูดติดที่ไอซี, ซีไอดี และสีที่แต่ละพีเอชมีค่าแตกต่างกันไม่มากนัก ซึ่งให้เห็นเป็นนัยว่า สารอินทรีย์ในน้ำทิ้งอาจมีการเปลี่ยนรูปน้อย ในช่วงพีเอช 5.0 – 9.5 จึงทำให้พีเอชในช่วงดังกล่าวไม่มีผลต่อความแตกต่างของความจุดูดติดผิวดังที่แสดงในรูปที่ 4.5 ผลดังกล่าวสอดคล้องกับผลการทดลองของ Martin และ Iwugo (1979) ซึ่งเป็นการทดลองบำบัดน้ำทิ้งสังเคราะห์ที่ผ่านการบำบัดทางชีวภาพแล้วด้วยถ่านกัมมันต์ พบว่า พีเอชที่ทำการศึกษา 3 ค่า (3, 7 และ 10) ไม่ได้แสดงผลอย่างเด่นชัดต่อความแตกต่างในการดูดติดสารอินทรีย์ละลายน้ำ โดยประสิทธิภาพในการดูดติดผิวมีค่าใกล้เคียงกัน เท่ากับร้อยละ 30, 24 และ 28 ตามลำดับ และจากการศึกษาต่อมาของ Martin และ Iwugo (1982) ซึ่งเป็นการทดลองบำบัดน้ำทิ้งจริงที่ผ่านการบำบัดทางชีวภาพแล้วด้วยเช่นกัน พบว่า พีเอชที่ทำการศึกษา (5, 7 และ 9) ไม่มีผลต่อการดูดติดสารอินทรีย์ละลายน้ำ โดยประสิทธิภาพในการดูดติดผิวมีค่าใกล้เคียงกัน และมีค่าเท่ากับร้อยละ 55, 53 และ 54 ตามลำดับ ดังนั้นในการทดลองสำหรับการหาไอโซเทอร์มจึงไม่ได้ทำการปรับพีเอชของน้ำทิ้งเริ่มต้น

สำหรับผลการดูดติดสีของถ่านกัมมันต์ที่ค่าพีเอชต่าง ๆ เมื่อพิจารณาจากลักษณะทางกายภาพของน้ำภายหลังการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ขนาดรูพรุนที่ค่าพีเอช 5.0, 6.5, 8.1 และ 9.5 พบว่า ลักษณะของน้ำที่ผ่านการบำบัดจากถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ขนาดรูพรุน ณ ค่าพีเอชต่าง ๆ มีลักษณะไม่แตกต่างกันคือ ใส ไม่มีสี ดังแสดงในภาคผนวก ข รูปที่ ข.5 – ข.7

สรุปผลการทดลองเพื่อหาผลของพีเอชที่มีต่อการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ขนาดรูพรุน แสดงได้ว่าพีเอชไม่ส่งผลทำให้เกิดความแตกต่างต่อการดูดติดผิวด้วยถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ขนาดรูพรุน ทำให้ค่าการดูดติดที่ได้ในแต่ละพีเอชมีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก และผลการดูดติดที่ไอซี, ซีไอดี และสี ที่พีเอชต่างๆ ให้ประสิทธิภาพในการดูดติดผิวไม่แตกต่างกับค่าพีเอชเริ่มต้นของน้ำทิ้งก่อนปรับพีเอช ทำให้สามารถสรุปค่าพีเอชที่น่าจะเป็นพีเอชที่มีความเหมาะสมมากที่สุดเพื่อการนำไปทดลองในขั้นต่อไป (การทดลองเพื่อหาไอโซเทอร์ม และการทดลองในแบบคอลัมน์) คือพีเอชของน้ำทิ้งเริ่มต้น (พีเอชประมาณ 8.1 – 8.3) โดยไม่ได้มีการปรับพีเอชของน้ำทิ้งก่อนการทดลองเพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายในการเติมสารเคมีเพื่อการปรับพีเอชของน้ำทิ้งด้วย

#### 4.5 ผลการทดลองหาค่าไอโซเทอร์มของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด เมื่อมีขนาดรูพรุนแตกต่างกัน โดยเลือกค่าพีเอชที่เหมาะสม

ผลการทดลองหาค่าไอโซเทอร์มเมื่อพิจารณาในลักษณะของการดูดติดทางฟิสิกส์ (physisorption) โดยพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุการดูดติดผิว และปริมาณของสาร

ต่างๆ ที่เหลืออยู่ ณ จุดสมดุล ดังแสดงดังรูปที่ 4.6 พบว่า เส้นไอโซเทอร์มของถ่านกัมมันต์เอ บี ซี และดี มีลักษณะเป็นไอโซเทอร์มของการดูดติดทางกายภาพแบบอ่อน (weak adsorbent – adsorbate) กล่าวคือ ต้องมีการเพิ่มปริมาณของถ่านกัมมันต์ในปริมาณที่มากเพื่อให้สามารถดูดติดสารที่ต้องการกำจัดให้ได้ในปริมาณที่มากตามไปด้วย รวมทั้งการดูดติด ทีโอซี ซีโอดี และสีของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิดนี้ ไม่ได้เป็นการดูดติดแบบโมโนเลเยอร์ (monolayer) และมัลติเลเยอร์ (multilayer) (Rodrigues, LeVan และ Tondeur ; 1988) นอกจากนี้ยังสามารถพิจารณาผลของไอโซเทอร์มในลักษณะของสมการไอโซเทอร์มต่างๆ ได้ดังนี้

เมื่อพิจารณาผลการทดลองหาค่าไอโซเทอร์มโดยอธิบายด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ ไอโซเทอร์ม 2 แบบคือ ฟรูนลิชไอโซเทอร์ม และแลงมัวร์ไอโซเทอร์ม สำหรับฟรูนลิชไอโซเทอร์ม และแลงมัวร์ไอโซเทอร์ม สามารถหาสมการความสัมพันธ์ได้ตามวิธี ในหัวข้อที่ 2.3.4.1 และ 2.3.4.2 ตามลำดับ

ผลการทดลองหาไอโซเทอร์มของทีโอซี สำหรับฟรูนลิชไอโซเทอร์มแสดงในรูปที่ 4.7 ได้สมการความสัมพันธ์ตามฟรูนลิชไอโซเทอร์มดังนี้

ฟรูนลิชไอโซเทอร์มของถ่านกัมมันต์เอ ดังสมการที่ 4.1

$$X/M = 2 \times 10^{-6} C_e^{6.1583} \quad (4.1)$$

ฟรูนลิชไอโซเทอร์มของถ่านกัมมันต์บี ดังสมการที่ 4.2

$$X/M = 0.0071 C_e^{3.4418} \quad (4.2)$$

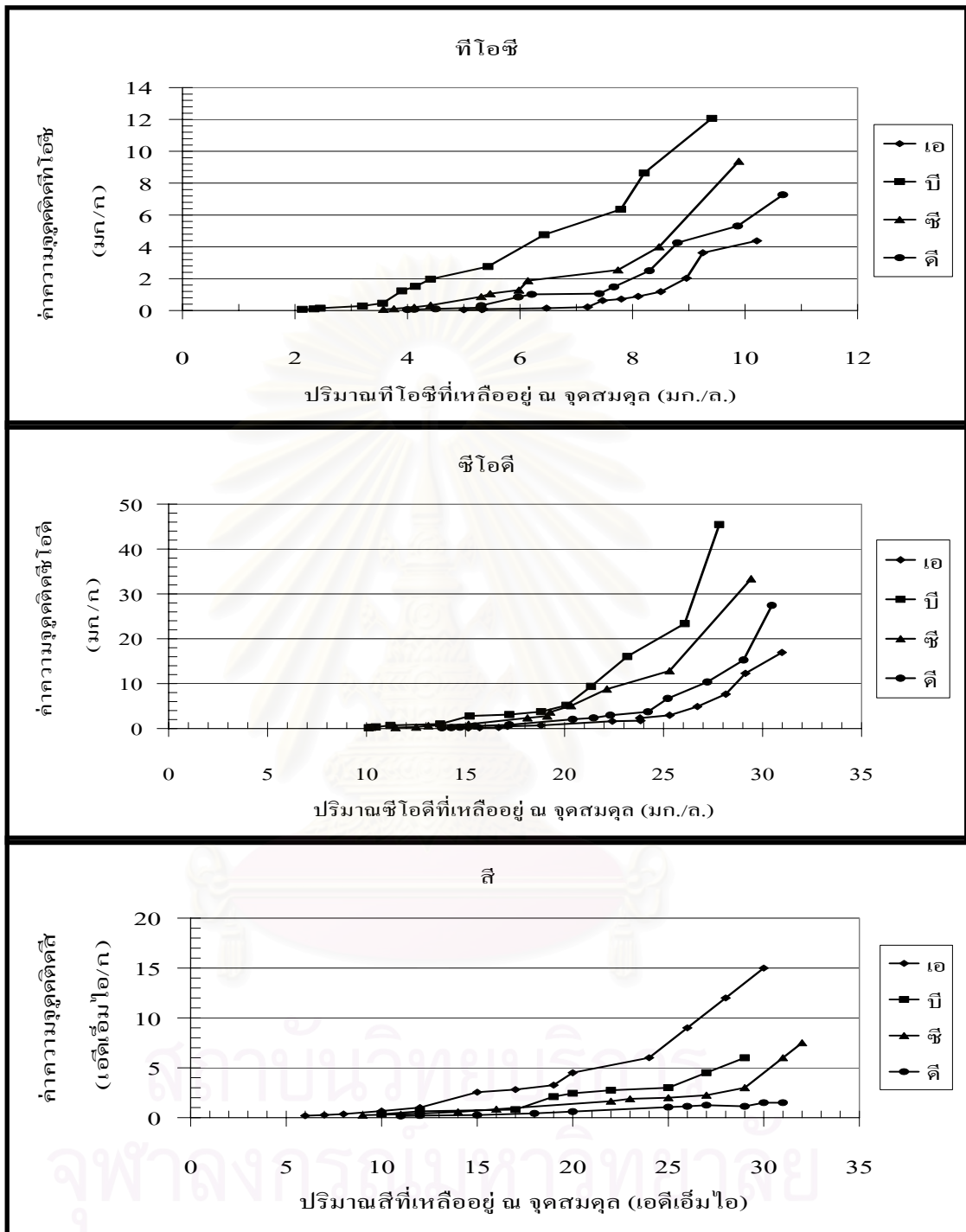
ฟรูนลิชไอโซเทอร์มของถ่านกัมมันต์ซี ดังสมการที่ 4.3

$$X/M = 0.0004 C_e^{4.3436} \quad (4.3)$$

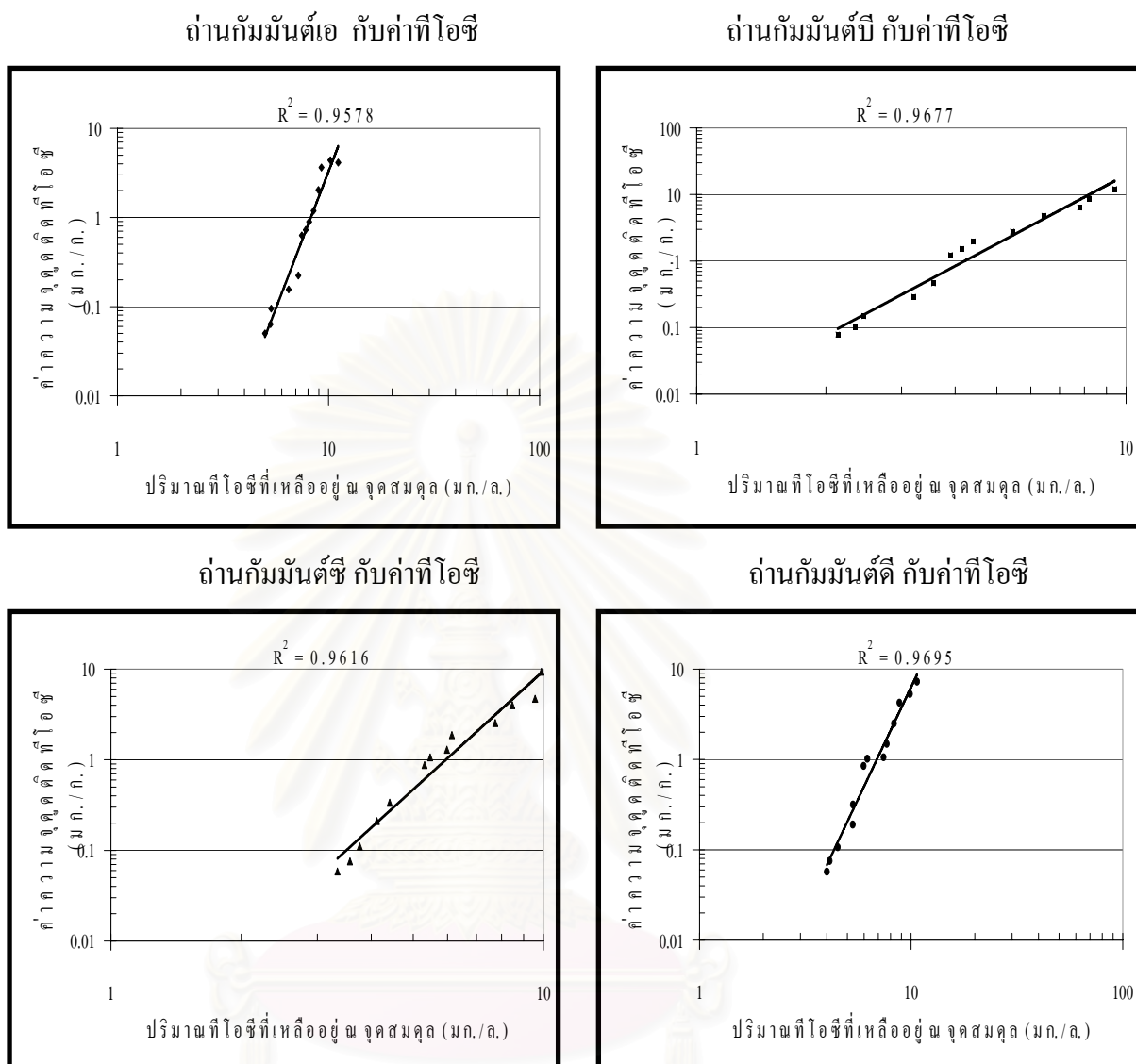
ฟรูนลิชไอโซเทอร์มของถ่านกัมมันต์ดี ดังสมการที่ 4.4

$$X/M = 7 \times 10^{-5} C_e^{4.9468} \quad (4.4)$$

จากสมการความสัมพันธ์ตามฟรูนลิชไอโซเทอร์มที่ได้ พบว่าถ่านกัมมันต์บี มีความสามารถในการดูดติดผิวต่อหน่วยน้ำหนักของถ่านกัมมันต์มากที่สุด รองลงคือถ่านกัมมันต์ซี ดี และเอตามลำดับ สำหรับแลงมัวร์ไอโซเทอร์ม แสดงในภาคผนวก รูปที่ ข.1 พบว่าผลการทดลองไม่สามารถอธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์แบบแลงมัวร์ไอโซเทอร์ม แสดงได้ว่า การดูดติดโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่เป็นทีโอซีที่ผิวหน้าของถ่านกัมมันต์ไม่น่าจะเป็นแบบโมโนเลเยอร์ (monolayer) ทำให้ผลการทดลองการดูดติดทีโอซีของถ่านกัมมันต์ใช้การอธิบายความสัมพันธ์ตามแบบฟรูนลิชไอโซเทอร์มทั้ง 4 ขนาดรูป



รูปที่ 4.6 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุการดูดติดผิว กับปริมาณของสารต่างๆ  
ที่เหลืออยู่ ณ จุดสมดุล



รูปที่ 4.7 ฟรอนคลิซไอโซเทอร์มของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ขนาดรูพรุนในรูปของที่ไอโอดี

ผลการทดลองหาไอโซเทอร์มของซีไอโอดี สำหรับฟรอนคลิซไอโซเทอร์มแสดงในรูปที่ 4.8 ได้สมการความสัมพันธ์ตามฟรอนคลิซไอโซเทอร์มดังนี้  
ฟรอนคลิซไอโซเทอร์มของถ่านกัมมันต์เอ ดังสมการที่ 4.5

$$X/M = 5 \times 10^{-9} C_e^{6.3366} \quad (4.5)$$

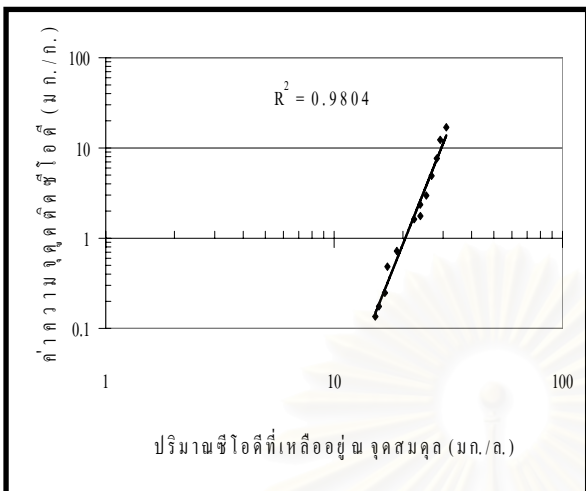
ฟรอนคลิซไอโซเทอร์มของถ่านกัมมันต์บี ดังสมการที่ 4.6

$$X/M = 3 \times 10^{-6} C_e^{4.8566} \quad (4.6)$$

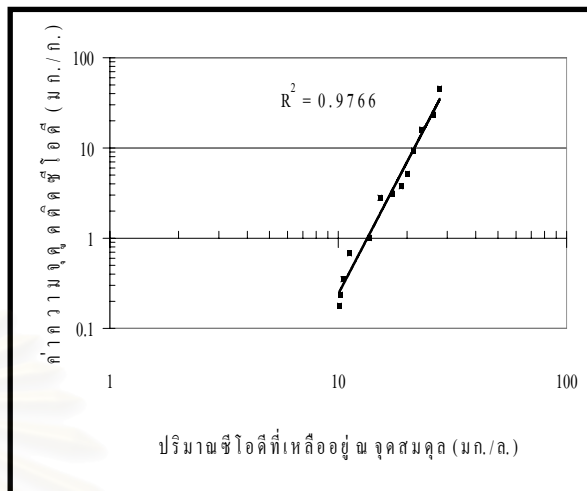
ฟรอนคลิซไอโซเทอร์มของถ่านกัมมันต์ซี ดังสมการที่ 4.7

$$X/M = 1 \times 10^{-6} C_e^{4.9744} \quad (4.7)$$

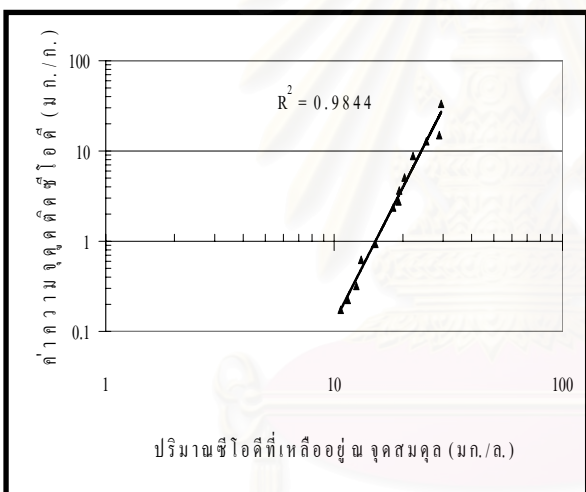
ถ่านกัมมันต์เอ กับค่าซีไอดี



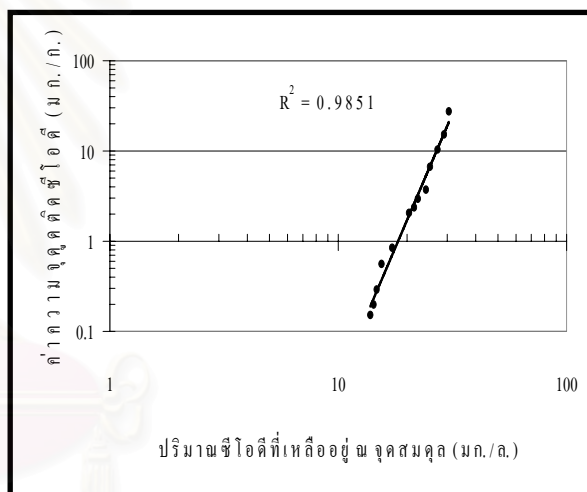
ถ่านกัมมันต์บี กับค่าซีไอดี



ถ่านกัมมันต์ซี กับค่าซีไอดี



ถ่านกัมมันต์ดี กับค่าซีไอดี



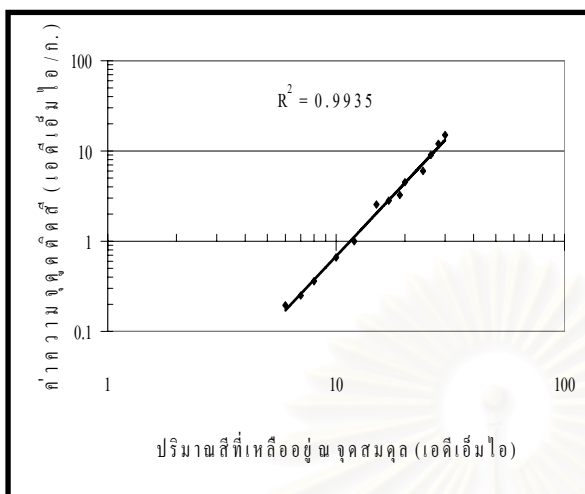
รูปที่ 4.8 ฟรอนคลิซไอโซเทอร์มของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ขนาดรูพรุนในรูปของซีไอดี

ฟรอนคลิซไอโซเทอร์มของถ่านกัมมันต์ดี ดังสมการที่ 4.8

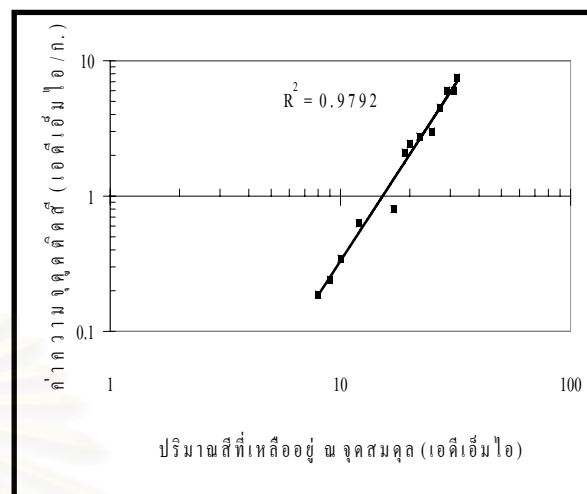
$$X/M = 3 \times 10^{-8} C_e^{5.9339} \quad (4.8)$$

จากสมการความสัมพันธ์ตามฟรอนคลิซไอโซเทอร์มที่ได้ พบว่าถ่านกัมมันต์บีมีความสามารถในการดูดซับซีไอดีต่อหน่วยน้ำหนักของถ่านกัมมันต์มากที่สุด รองลงคือถ่านกัมมันต์ซี ดี และเอตามลำดับ สำหรับแลงมัวร์ไอโซเทอร์ม แสดงในภาคผนวก ข. รูปที่ ข.2 พบว่า ผลการทดลองไม่สามารถอธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์แบบแลงมัวร์ไอโซเทอร์ม แสดงได้ว่า การดูดซับโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่เป็นซีไอดี ที่ผิวหน้าของถ่านกัมมันต์ไม่น่าจะเป็นแบบโมโนเลเยอร์ (monolayer)

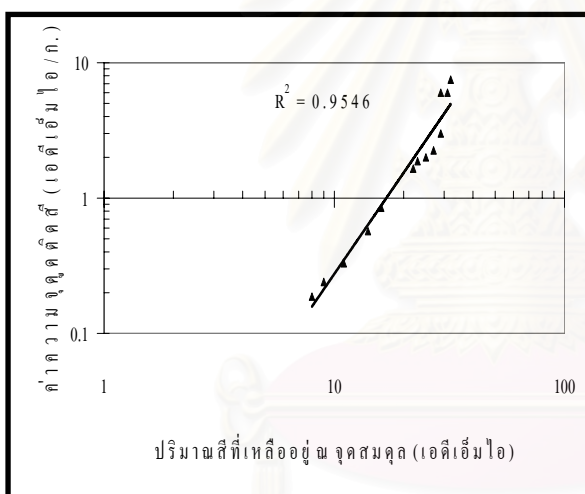
ถ่านกัมมันต์เอ กับสี



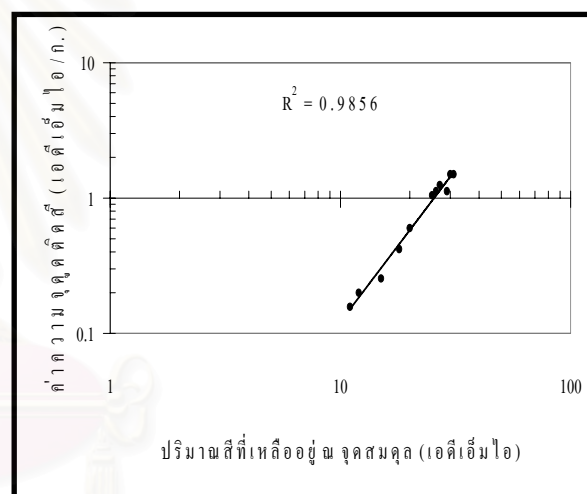
ถ่านกัมมันต์บี กับสี



ถ่านกัมมันต์ซี กับสี



ถ่านกัมมันต์ดี กับสี



รูปที่ 4.9 ฟรอนคลิชไอโซเทอร์มของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ขนาดรูพรุนในรูปของ สี

ดังนั้นผลการทดลองการดูดซับสีโอดีของถ่านกัมมันต์จะได้อธิบายความสัมพันธ์แบบฟรอนคลิชไอโซเทอร์มทั้ง 4 ขนาดรูพรุน

ผลการทดลองหาไอโซเทอร์มของสีสำหรับฟรอนคลิชไอโซเทอร์มแสดงในรูปที่ 4.9 ได้สมการความสัมพันธ์ตามฟรอนคลิชไอโซเทอร์มดังนี้

ฟรอนคลิชไอโซเทอร์มของถ่านกัมมันต์เอ ดังสมการที่ 4.9

$$X/M = 0.0014C_c^{2.6969} \quad (4.9)$$

ฟรอนคลิชไอโซเทอร์มของถ่านกัมมันต์บี ดังสมการที่ 4.10



$$X/M = 0.0008C_e^{2.6164} \quad (4.10)$$

ฟรุคตลิซไอโซเทอร์มของถ่านกัมมันต์ซี ดังสมการที่ 11

$$X/M = 0.0009C_e^{2.4817} \quad (4.11)$$

ฟรุคตลิซไอโซเทอร์มของถ่านกัมมันต์ดี ดังสมการที่ 4.12

$$X/M = 0.0007C_e^{2.2458} \quad (4.12)$$

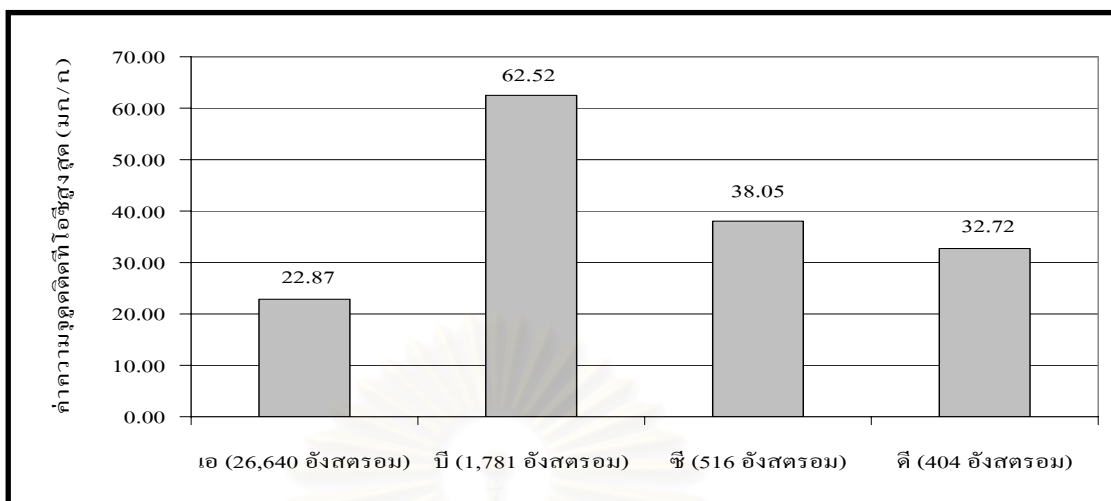
จากสมการความสัมพันธ์ตามฟรุคตลิซไอโซเทอร์มที่ได้ พบว่าถ่านกัมมันต์เอ มีความสามารถในการดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของถ่านกัมมันต์มากที่สุด สำหรับถ่านกัมมันต์บี ซี และดีมีค่าความจุดูดซับไม่แตกต่างกันมากนัก แต่เมื่อพิจารณาลักษณะทางกายภาพของน้ำที่ผ่านการดูดซับแล้ว พบว่า ไม่มีลักษณะแตกต่างทางกายภาพ คือน้ำมีลักษณะใส ไม่มีสีเหมือนกันทั้ง 4 ชนิดฟรุคตลิซ ดังแสดงในภาคผนวก จ. รูปที่ จ.8 – จ.15

สำหรับแลงมัวร์ไอโซเทอร์ม แสดงในภาคผนวก ข. รูปที่ ข.3 พบว่าผลการทดลองไม่สามารถอธิบายได้ด้วยความสัมพันธ์แบบแลงมัวร์ไอโซเทอร์ม แสดงได้ว่าการดูดซับโมเลกุลสี่ที่ผิวหน้าของถ่านกัมมันต์ไม่น่าจะเป็นแบบโมโนเลเยอร์ (monolayer) ทำให้ผลการทดลองการดูดซับสี่ของถ่านกัมมันต์ใช้การอธิบายความสัมพันธ์แบบฟรุคตลิซไอโซเทอร์มทั้ง 4 ชนิดฟรุคตลิซ

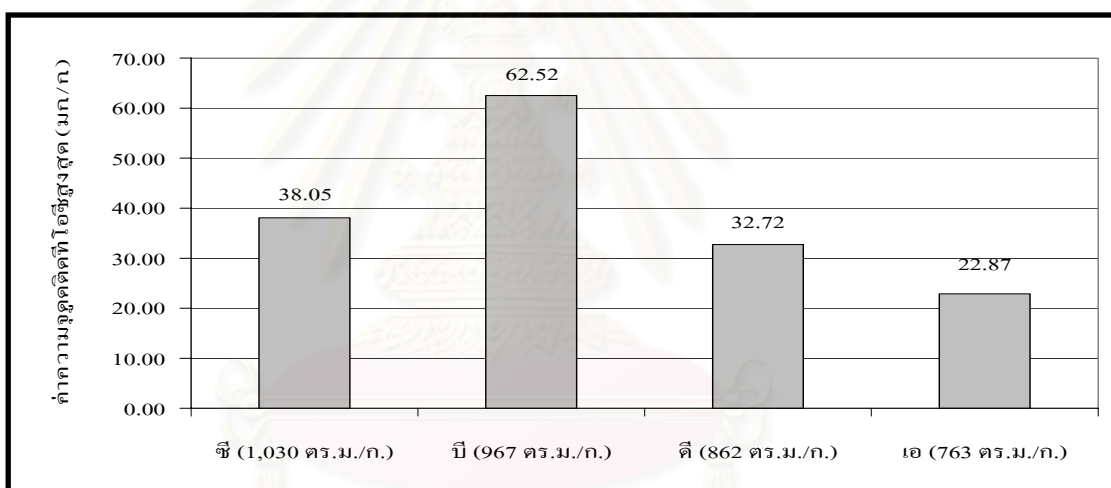
จากสมการฟรุคตลิซไอโซเทอร์มที่ได้สามารถคำนวณหาความจุดูดซับผิวสูงสุดในรูปของทีโอซี, ซีโอดี และสี่ โดยสมมติให้ถ่านกัมมันต์เข้าสู่ภาวะสมดุลกับทีโอซี ซีโอดี และสี่เริ่มต้นของน้ำทิ้ง (การคำนวณแสดงในภาคผนวก ข) ผลที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 4.10 4.11 และ 4.12 ตามลำดับค่าที่ได้สามารถนำไปใช้เปรียบเทียบแนวโน้มกับค่าความจุการดูดซับของการทดลองแบบคอลัมน์ต่อไป

เมื่อเปรียบเทียบความจุในการดูดซับผิวสูงสุดของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิดฟรุคตลิซ พบว่าถ่านกัมมันต์บี (1,781 A° 967 ตร.ม./ก.) มีความจุการดูดซับต่อหน่วยน้ำหนักของถ่านกัมมันต์มากที่สุดในด้านารดูดซับทีโอซี และซีโอดี ตามด้วยถ่านกัมมันต์ซี (516 A° 1,030 ตร.ม./ก.) ดี (404 A° 862 ตร.ม./ก.) และเอ (26,640A° 763 ตร.ม./ก.) ตามลำดับ

จากการศึกษาของ Wu และคณะ, 2005 พบว่า การที่โมเลกุลของสารต่างๆ จะถูกดูดซับที่ผิวบนถ่านกัมมันต์ได้ขึ้นนั้น ไม่ได้ขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวเพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นอยู่กับขนาดฟรุคตลิซของถ่านกัมมันต์ และโมเลกุลของสารนั้นๆ ต้องมีขนาดที่สัมพันธ์กัน รวมทั้งการศึกษาพบว่า การดูดซับสารที่มีมวลโมเลกุลต่ำ หรือมีขนาดโมเลกุลเล็ก หากถ่านกัมมันต์นั้นมีขนาดฟรุคตลิซที่ใหญ่ แต่มีพื้นที่ผิวน้อย การดูดซับก็เกิดขึ้นได้ไม่ดี ทำให้ถ่านกัมมันต์ที่จะสามารถดูดซับสารได้ดี ต้องมีทั้งขนาดฟรุคตลิซที่เหมาะสม และมีพื้นที่ผิวที่มากด้วย นอกจากนี้จากการศึกษาของ Forwalt และ Huthchin , 1996 พบว่า ความจุดูดซับผิวจะขึ้นกับขนาดของสารที่ต้องการดูดซับกับขนาดฟรุคตลิซของถ่านกัมมันต์ซึ่งต้องมีความเหมาะสมกัน



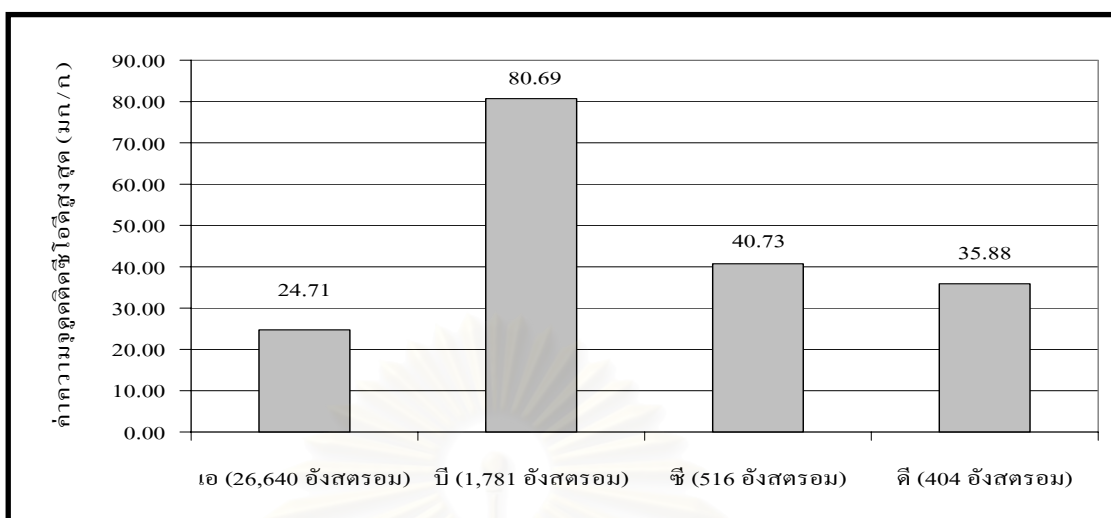
ก.



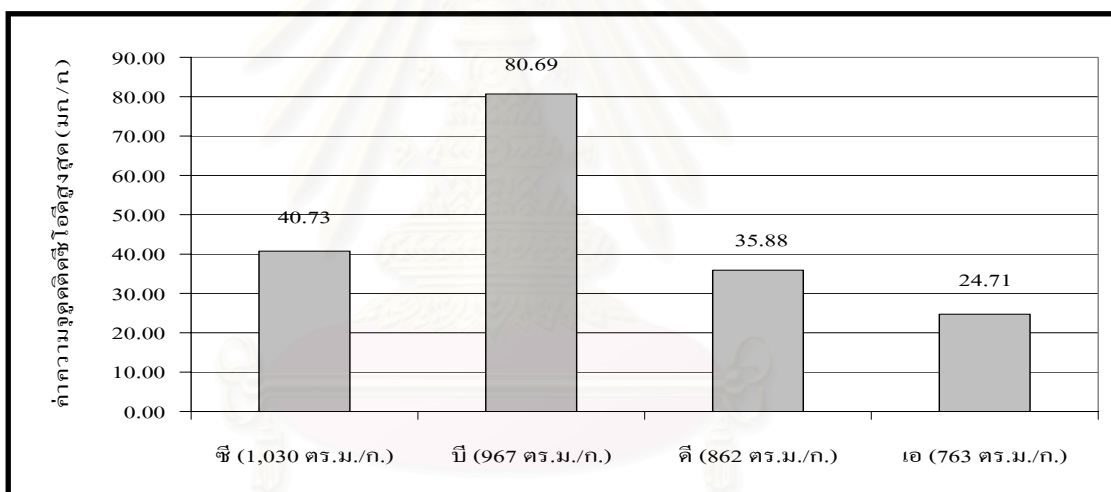
ข.

รูปที่ 4.10 ความจุรูดคิดที่ไอซีสูงสุด ก. เปรียบเทียบกับขนาดรูพรุน ข. เปรียบเทียบกับพื้นที่ผิว

จากผลการศึกษข้างต้นนี้ สามารถนำมาใช้อธิบายผลที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ กล่าวคือ สารอินทรีย์ที่อยู่ในน้ำส่วนใหญ่จะมีขนาดโมเลกุลเล็กกว่า  $1,781 \text{ \AA}$  ค่อนข้างมาก (เนื่องจากน้ำที่ผ่านการกระบวนการบำบัดทางชีวภาพแล้ว ทำให้ยากต่อการคาดการณ์ถึงสารผลิตภัณฑ์สุดท้ายที่หลงเหลืออยู่ รวมทั้งขนาดโมเลกุลที่แท้จริง) ถ่านกัมมันต์ซี ( $516 \text{ \AA}$ ) และดี ( $404 \text{ \AA}$ ) มีขนาดรูพรุนใกล้เคียงกัน จึงทำให้ผลของขนาดรูพรุนที่มีต่อความสามารถในการเข้าถึงของสารอินทรีย์น้อยมาก เมื่อเทียบกับพื้นที่ผิวสำหรับการดูดซับ ดังนั้นถ่านกัมมันต์ซีซึ่งมีพื้นที่ผิวสูงกว่าถ่านกัมมันต์ดี จึงมีความจุรูดคิดผิวสูงกว่า อีกทั้งสอดคล้องกับค่าไอไอคีนัมเบอร์ เนื่องจากไอไอคีนมีขนาดโมเลกุล

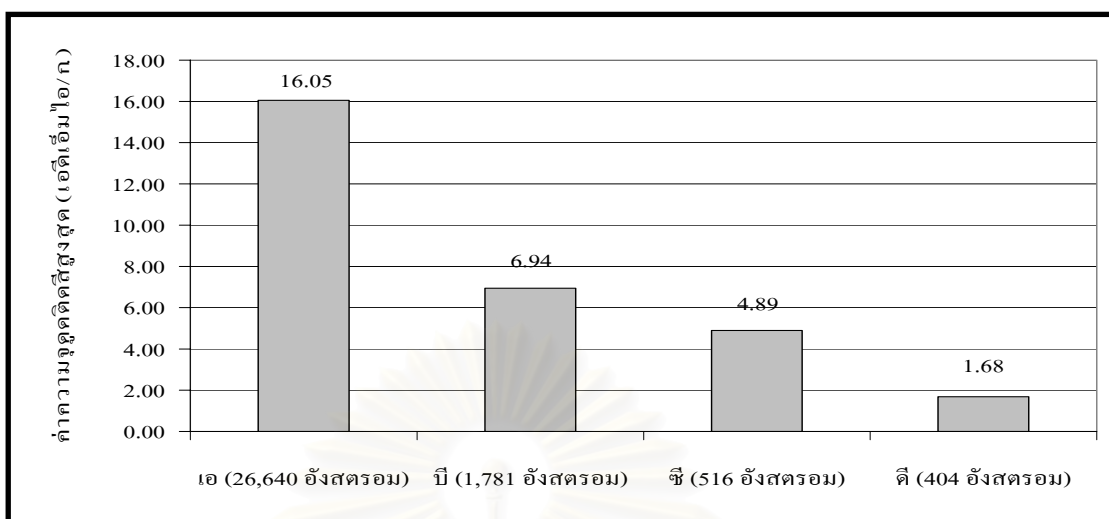


ก.

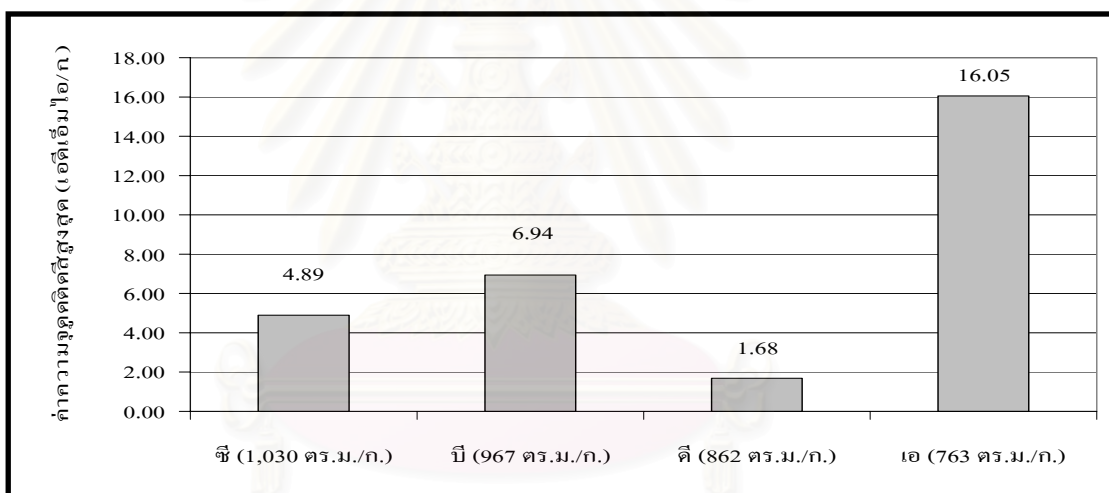


ข.

รูปที่ 4.11 ความจุการดูดติดซีไอดีสูงสุด ก. เปรียบเทียบกับขนาดรูพรุน ข. เปรียบเทียบกับพื้นที่ผิว  
 เล็กกว่าขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์มากดังที่ได้กล่าวมาแล้ว อย่างไรก็ตามก็มีความสัมพันธ์ดังกล่าวไม่  
 จำเป็นต้องเป็นจริงเสมอไปดังที่ได้กล่าวมาแล้ว เป็นผลให้ถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูงกว่าจะมี  
 แนวโน้มของไอโอดีนนัมเบอร์สูงกว่าด้วยเช่นกัน ส่วนในกรณีของถ่านกัมมันต์บีที่มีความจุดูดติด  
 ฝิวสูงสุดถึงแม้ว่าจะมีพื้นที่ผิวต่ำกว่าถ่านกัมมันต์ซีเพราะรูพรุนของถ่านกัมมันต์บีมีขนาดใหญ่กว่า  
 ถึง 3 เท่า ทำให้สารอินทรีย์ที่มีขนาดใหญ่กว่า 516 Å สามารถเคลื่อนที่เข้าไปในรูพรุนได้ดีกว่าเมื่อ  
 เทียบกับถ่านกัมมันต์ซี และด้วยสมมติฐานที่โมเลกุลส่วนใหญ่มีขนาดเล็กกว่า 1,781 Å มากดังที่ได้  
 กล่าวมาแล้ว จึงทำให้ไม่เกิดการอุดตันในรูพรุน ดังนั้นความจุดูดติดฝิวของถ่านกัมมันต์บีเมื่อเทียบ



ก.



ข.

รูปที่ 4.12 ความจุการดูดซับสูงสุด ก.เปรียบเทียบกับขนาดรูพรุน ข.เปรียบเทียบกับพื้นที่ผิว

กับถ่านกัมมันต์ซึ่งขึ้นอยู่กับทั้งขนาดรูพรุนและพื้นที่ผิว โดยผลการทดลองที่ได้ชี้ให้เห็นว่าผลด้านบวกที่เกิดขึ้นจากขนาดรูพรุนที่ใหญ่มีมากกว่าผลด้านลบที่เกิดจากพื้นที่ผิวที่ต่ำกว่า ส่วนในกรณีของถ่านกัมมันต์เอ (26,640 A°) ซึ่งมีขนาดรูพรุนใหญ่มากจึงทำให้สารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลใหญ่ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นสารที่ก่อให้เกิดสี ไม่สามารถเคลื่อนที่เข้าไปในรูพรุนของถ่านกัมมันต์อื่นๆ ได้ดี แต่สามารถเคลื่อนที่เข้าสู่รูพรุนของถ่านกัมมันต์เอได้ อย่างไรก็ตามก็ตีขนาดโมเลกุลสีเหล่านี้ว่าจะมีขนาดใกล้เคียงกับขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์เอ จึงทำให้เกิดการอุดตันอย่างรวดเร็ว เป็นผลให้พื้นที่ผิวภายในรูพรุนบางส่วนไม่ถูกใช้งาน การดูดซับสารอินทรีย์ส่วนใหญ่ที่มีโมเลกุลขนาดเล็กจึง

เกิดขึ้นได้น้อย ดังจะเห็นได้จากถ่านกัมมันต์เอมีพื้นที่ผิวน้อยกว่าถ่านกัมมันต์บีเพียงร้อยละ 20 แต่ความจุดูดซับดีกว่าถึงร้อยละ 60 ดังนั้นถ่านกัมมันต์บีจึงมีคุณสมบัติเหมาะสมที่สุดในการดูดซับทีโอซีและซีโอดีในน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วของโรงชักรีดที่ศึกษา

เมื่อพิจารณาความจุการดูดซับของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ขนาดรูพรุนพบว่า ถ่านกัมมันต์เอ มีความจุการดูดซับสูงสุด รองลงมาคือถ่านกัมมันต์บี, ซี และดีตามลำดับ แม้ถ่านกัมมันต์เอจะมีพื้นที่ผิวดำที่สุด

จากการศึกษาของ Wu และคณะ, 2005 พบว่า การดูดซับสารที่มีมวลโมเลกุลสูง หรือมีโมเลกุลขนาดใหญ่ จะสามารถดูดซับบนถ่านกัมมันต์ที่มีรูพรุนขนาดใหญ่ได้ดีที่สุด ในขณะที่พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์นั้นไม่แตกต่างกันมาก (731 – 1,687 ตร.ม./ก.) ดังนั้น แม้พื้นที่ผิวเพิ่มมากขึ้น ความจุการดูดซับไม่ได้เพิ่มขึ้นตาม

ดังนั้นจากงานวิจัยข้างต้น สามารถอธิบายผลการทดลองได้ดังนี้ ถ่านกัมมันต์เอมีขนาดรูพรุนที่ใหญ่ที่สุดในการทดลอง แสดงได้ว่าโมเลกุลสีในน้ำที่จากการชักรีดที่ผ่านการบำบัดขั้นที่สองแล้ว มีขนาดโมเลกุลส่วนใหญ่ใหญ่กว่าขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ในน้ำที่อื่น ๆ และมีขนาดโมเลกุลไม่ใหญ่กว่าขนาดของรูพรุน 26,640 Å มากนัก ทำให้โมเลกุลของสีสามารถเคลื่อนที่เข้าสู่รูพรุนของถ่านกัมมันต์เอได้ เป็นผลให้สามารถเกิดการดูดซับได้ดี

แต่สำหรับถ่านกัมมันต์บี ซีและดีมีประสิทธิภาพในการดูดซับโมเลกุลของสีได้ต่ำ เนื่องจากโมเลกุลของสีมีขนาดใหญ่กว่ารูพรุนของถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ขนาด (1,718 516 และ 404 Å) มาก จึงทำให้โมเลกุลสีเคลื่อนที่เข้าสู่รูพรุนของถ่านกัมมันต์ทั้งสามได้ยาก เป็นผลให้ความสามารถในการดูดซับผิวของถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ขนาดรูพรุนต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมาของวิวรรณ, 2539 และ วจน์ศิริ, 2539 ดังนั้นในการพิจารณาเลือกถ่านกัมมันต์เพื่อให้มีค่าดูดซับผิวสูงสุดนั้น ควรมีการพิจารณาถึงขนาดรูพรุนที่เหมาะสม และพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ควบคู่กันไป โดยมีขนาดโมเลกุลของสารอินทรีย์ที่ต้องการกำจัดเป็นตัวแปรร่วม

เมื่อพิจารณาในภาพรวมของถ่านกัมมันต์ที่ให้ความจุในการดูดซับผิวสูงสุดเพื่อการนำไปทดลองในแบบคอลัมน์ต่อไปนั้น เลือกใช้ถ่านกัมมันต์บี (1,781 Å) ที่ให้ความจุการดูดซับทีโอซีและซีโอดีสูงสุด ถึงแม้จะมีค่าความจุการดูดซับรองจากถ่านกัมมันต์เอ แต่เนื่องจากเมื่อพิจารณาถึงลักษณะทางกายภาพของน้ำภายหลังผ่านการดูดซับผิวแล้วไม่สามารถสังเกตเห็นความแตกต่างด้วยสายตา คือมีลักษณะใส ไม่มีสีในทุกขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์

ดังนั้นเมื่อพิจารณาถึงการนำน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้วไปใช้ใหม่ หากน้ำมีลักษณะใส ไม่มีสีแล้ว ย่อมไม่เป็นที่น่ารังเกียจ แต่ควรมีการพิจารณาถึงค่าสารอินทรีย์เป็นหลัก เนื่องจากหากมีปริมาณสารอินทรีย์หลงเหลืออยู่ในน้ำมาก สารอินทรีย์อาจทำให้มีปัญหาเกี่ยวกับเชื้อฟ้าที่ผ่านกระบวนการชักรีดได้ รวมทั้งเมื่อทำการฆ่าเชื้อโรคด้วยคลอรีนเพื่อสุขอนามัย (เป็นวิธีที่ใช้ในการ

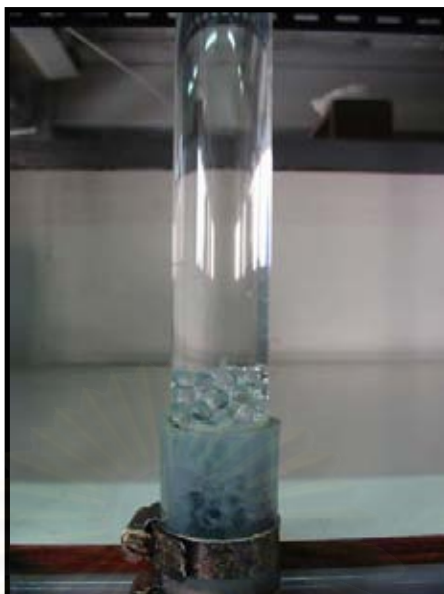
ผลิตน้ำประปาในปัจจุบัน) อาจก่อให้เกิดสารไตรฮาโลมีเทน ซึ่งทำให้เป็นอันตรายต่อสุขภาพ ดังนั้นการทดลองแบบคอลัมน์เพื่อหาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมจึงเลือกใช้ถ่านกัมมันต์บีในการทดลองขั้นต่อไป อีกทั้งเมื่อพิจารณาในด้านราคาถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิดพบว่า ราคาถ่านกัมมันต์บีมีราคาถ่านกัมมันต์เท่ากับ 40 บาท/กก. ถ่านกัมมันต์ ในขณะที่ถ่านกัมมันต์เอ ซี และดี มีราคาถ่านกัมมันต์เท่ากับ 50 บาท/กก. ถ่านกัมมันต์ เท่ากันทั้ง 3 ชนิดถ่านกัมมันต์ เป็นผลให้ราคาถ่านกัมมันต์บีมีราคาต่ำที่สุด จึงทำให้ปัจจัยด้านราคาถ่านกัมมันต์ไม่มีผลต่อการเลือกใช้ถ่านกัมมันต์ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานซักรีดในแบบคอลัมน์ต่อไป

#### 4.6 ผลการหาสภาวะการดำเนินงานของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดที่มีขนาดรูพรุนที่เหมาะสมในแบบคอลัมน์ที่มีการไหลแบบต่อเนื่อง

การทดลองแบบคอลัมน์นี้ ได้ใช้คอลัมน์เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 เซนติเมตร สูง 120 เซนติเมตร เป็นการไหลจากด้านล่างขึ้นด้านบน (Upflow) โดยด้านล่างคอลัมน์ได้บรรจุ Glass bead ความสูง 10 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 4.13 เพื่อให้การกระจายตัวของน้ำที่ไหลผ่านเข้าสู่คอลัมน์ สามารถเกิดการกระจายตัวได้ดี ทำให้ถ่านกัมมันต์ที่บรรจุภายในคอลัมน์สามารถเกิดการดูดติดผิวได้อย่างเต็มประสิทธิภาพทั่วทั้งผิวหน้าตัด โดยพฤติกรรมของของไหลที่เข้าสู่คอลัมน์สำหรับการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.14 โดยได้ทำการผสมเมธาบลู (Methylene Blue) ความเข้มข้น 0.5 กรัม/ลิตร แล้วทำการสูบลูเข้าสู่คอลัมน์จากด้านล่างสู่ด้านบนของคอลัมน์ ซึ่งผ่านชั้นของ Glass Bead เพื่อให้เกิดการกระจายตัวที่ดี จากรูปที่ 4.14 พบว่าลักษณะการกระจายตัวของเมธาบลูภายในคอลัมน์มีลักษณะการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ และทั่วทั้งผิวหน้าตัดคอลัมน์ แสดงได้ว่า พฤติกรรมของของไหลเมื่อเข้าสู่ภายในคอลัมน์จะมีลักษณะสม่ำเสมอ และทั่วถึง

การทดลองชุดนี้ใช้คอลัมน์จำนวน 3 คอลัมน์ ภายในบรรจุถ่านกัมมันต์บีทั้ง 3 คอลัมน์ มีความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด 60 เซนติเมตร และกำหนดระยะเวลาสัมผัสแตกต่างกัน 3 ค่าคือ 15 30 และ 60 นาที โดยกำหนดให้ค่าที่ไอซีที่เหลืออยู่ในน้ำที่ออกจากคอลัมน์ไม่เกิน 6 มก./ล. ซึ่งเป็นค่าที่ไอซีเฉลี่ยของน้ำประปา เป็นเกณฑ์มาตรฐาน คอลัมน์ที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.15



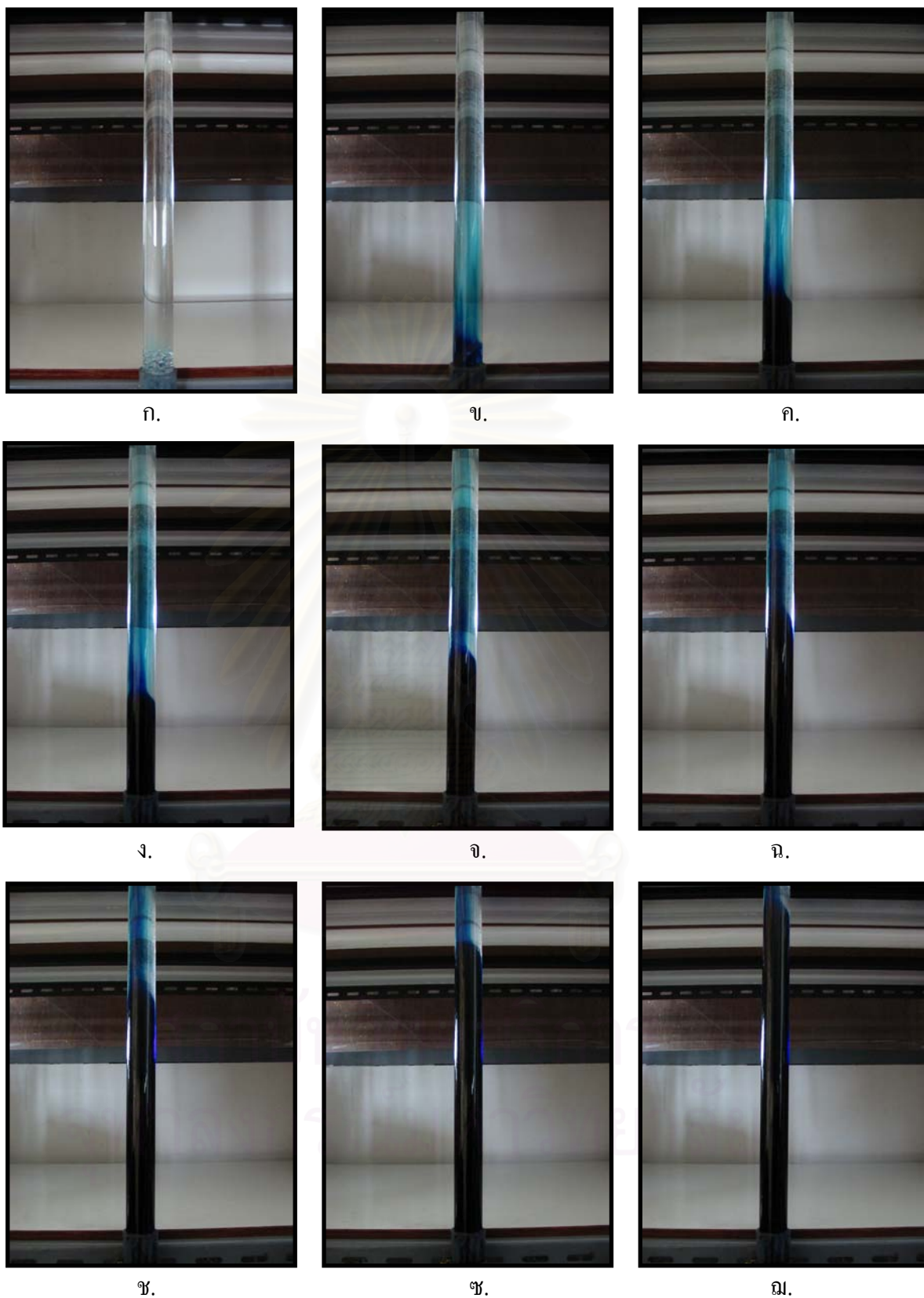


รูปที่ 4.13 Glass bead ที่บรรจุภายในคอลัมน์ที่ใช้ในการทดสอบ

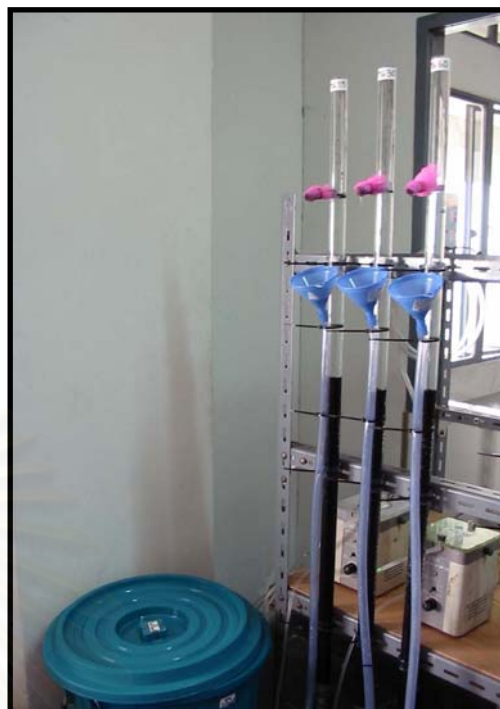
#### 4.6.1 การกำจัดที่ไอซี

ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.16 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ไอซีที่เหลืออยู่ในน้ำที่ออกจากคอลัมน์ เทียบกับระยะเวลาการดำเนินการ และรูปที่ 4.17 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ไอซีที่เหลืออยู่ในน้ำที่ออกจากคอลัมน์ เทียบกับปริมาตรเบด ซึ่งปริมาตรเบดเป็นพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพเนื่องจากผลของการทดลองมาจากคอลัมน์ที่มีอัตราการไหลที่ต่างกัน (Vernon, 1990)

จากรูปที่ 4.16 พบว่า คอลัมน์ที่ระยะเวลาสัมผัส 15 นาที มีค่าที่ไอซีของน้ำออกเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ อย่างเป็นขั้นบันได และมีค่าที่ไอซีสูงกว่าค่าที่ไอซีในน้ำที่ออกจากคอลัมน์ที่ระยะเวลาสัมผัส 30 และ 60 นาที และเมื่อกำหนดให้ในน้ำที่ออกจากคอลัมน์มีค่าที่ไอซีเท่ากับ 6 มก./ล. (ค่าเฉลี่ยของน้ำประปา) เป็นเกณฑ์ พบว่า จะมีค่าที่ไอซีเกิน 6 มก./ล. ที่ 110 ชั่วโมง หลังจากชั่วโมงที่ 110 ไปแล้วค่าที่ไอซีของน้ำที่ออกมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และจนกระทั่งที่เวลาประมาณ 900 ชั่วโมง มีค่าที่ไอซีที่ออกเท่ากับที่ไอซีของน้ำเข้า แสดงได้ว่าคอลัมน์ไม่สามารถกำจัดที่ไอซีได้อีกหรือเกิดเบรคทฤษฎี เช่นเดียวกับระยะเวลาสัมผัส 30 และ 60 นาที พบว่าในช่วงระยะแรกความสามารถในการกำจัดที่ไอซีที่เวลาสัมผัสทั้งสองมีความแตกต่างกัน โดยระยะเวลาสัมผัส 30 นาที จะมีค่าปริมาณที่ไอซีที่ออกจากคอลัมน์สูงกว่าค่าที่ไอซีที่ออกจากระยะเวลาสัมผัส 60 นาที อยู่ทุก ๆ ชั่วโมง แต่หลังจากชั่วโมงที่ 400 ไปแล้ว ค่าที่ไอซีของน้ำที่ออกจากคอลัมน์ที่ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที มีค่าที่ไอซีมากกว่าคอลัมน์ที่ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที อย่างเห็นได้ชัด และมีค่าที่ไอซีมากกว่า 6 มก./ล. ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของน้ำประปา ในขณะที่คอลัมน์ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที ยังคงมีค่าที่ไอซี



รูปที่ 4.14 ลักษณะการกระจายตัวของสีภายในคอลัมน์ที่ใช้การทดสอบ

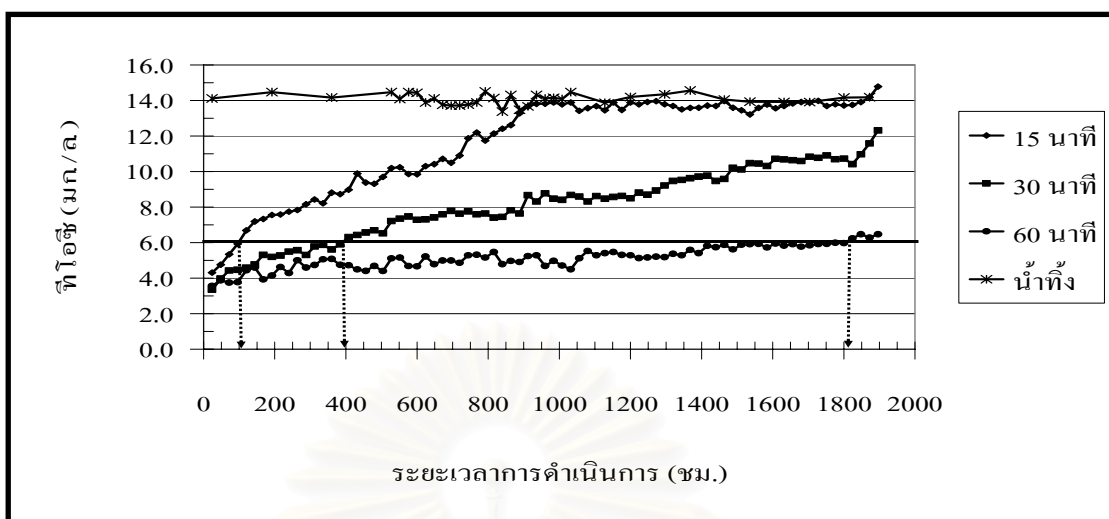


ก. คอลัมน์ก่อนการปกคลุมด้วยถุงดำ

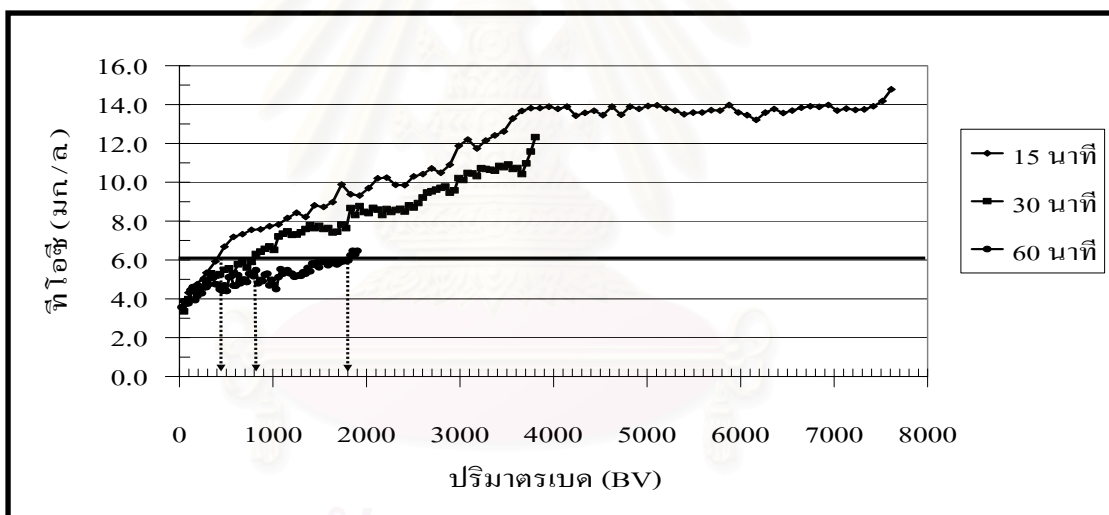


ข. คอลัมน์ภายหลังการปกคลุมด้วยถุงดำ

รูปที่ 4.15 คอลัมน์ที่ใช้ทดสอบหาระยะเวลาสัมพัทธ์ที่เหมาะสม



รูปที่ 4.16 ทีโอซีของน้ำที่ออกจากคอลัมน์ กับระยะเวลาการดำเนินการ



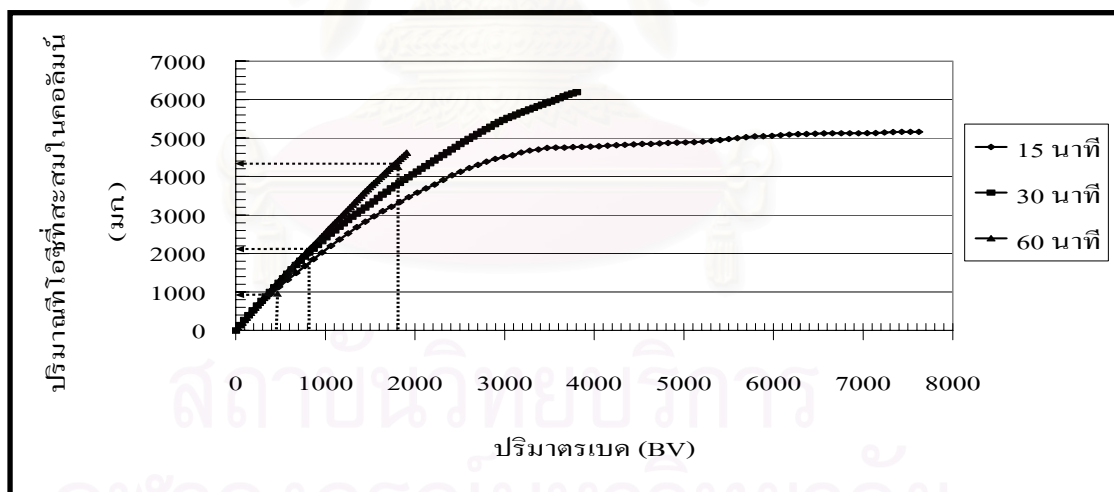
รูปที่ 4.17 ทีโอซีของน้ำที่ออกจากคอลัมน์ กับปริมาตรเบด

ต่ำกว่า 6 มก./ล. อยู่จนกระทั่งชั่วโมงที่ 1,400 ชั่วโมงจึงเริ่มมีค่าทีโอซีสูงขึ้นเข้าใกล้ 6 มก./ล. จนกระทั่งที่ชั่วโมงที่ 1,810 ค่าทีโอซีของน้ำที่ออกจากคอลัมน์มีค่ามากกว่า 6 มก./ล. ซึ่งนับว่าระยะเวลาในการดำเนินการที่ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที ยาวกว่าที่ 30 และ 15 นาทีประมาณ 4.5 และ 18 เท่าตามลำดับ

จากรูปที่ 4.17 ปริมาตรเบดในช่วงแรกจนถึงประมาณที่ 400 BV ทั้ง 3 คอลัมน์ มีปริมาณทีโอซีที่ออกจากคอลัมน์ใกล้เคียงกัน แต่หลังจากผ่านช่วง 440 BV ไปแล้ว ที่ระยะเวลาสัมผัส 15 นาที

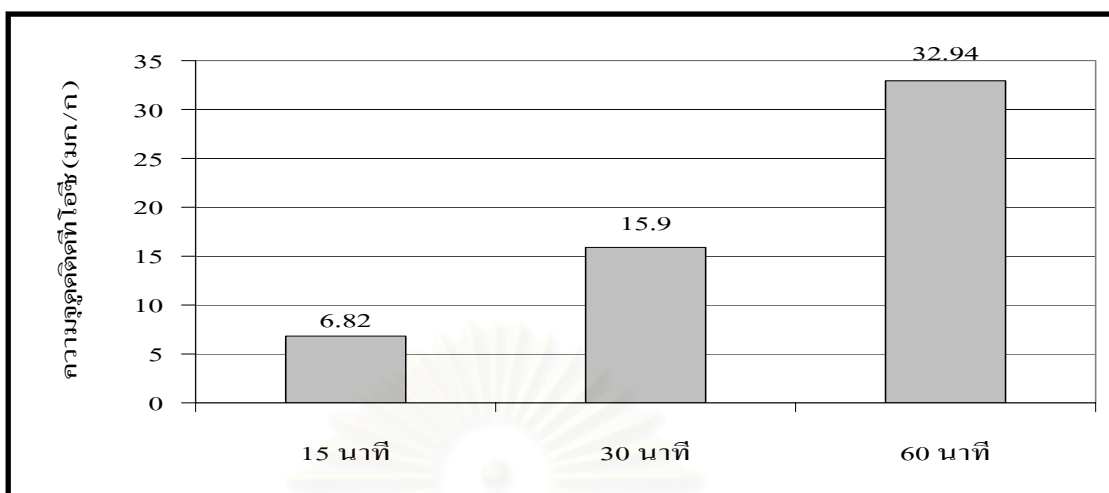
มีค่าที่ไอซีที่ออกจากคอลัมน์เพิ่มขึ้นมาก จนมีค่ามากกว่าค่าที่ไอซีที่ออกจากคอลัมน์ที่ระยะเวลาสัมผัส 30 และ 60 นาที จนกระทั่งที่ปริมาตรเบดเท่ากับ 3,500 BV ที่ระยะเวลาสัมผัส 15 นาที ไม่สามารถกำจัดที่ไอซีได้อีกต่อไป สำหรับระยะเวลาสัมผัส 30 นาที มีค่าที่ไอซีของน้ำที่ออกใกล้เคียงกับระยะเวลาสัมผัส 60 นาทีในช่วงแรกของปริมาตรเบดจนกระทั่งที่ปริมาตรเบด 800 BV ค่าที่ไอซีของน้ำที่ออกมีค่าสูงกว่าระยะเวลาสัมผัส 60 นาที จากการกำหนดให้ค่าที่ไอซีของน้ำที่ออกจากคอลัมน์มีค่าไม่เกิน 6 มก./ล. ดังนั้นที่ปริมาตรเบด ณ ค่าที่ไอซีมากกว่า 6 มก./ล. ที่ระยะเวลาสัมผัส 15 30 และ 60 นาที เท่ากับ 400 800 และ 1,800 BV ตามลำดับ

ดังนั้นเมื่อพิจารณาปริมาตรเบดเทียบกับปริมาณที่ไอซีที่สะสมอยู่ในคอลัมน์ดังแสดงในรูปที่ 4.18 พบว่า ที่ระยะเวลาสัมผัส 15 30 และ 60 นาที เมื่อมีค่าปริมาตรเบดจนกระทั่งมีค่าที่ไอซีเกินกว่า 6 มก./ล. จะมีปริมาณที่ไอซีสะสมในคอลัมน์ เท่ากับ 900 2,100 และ 4,350 มก. ดังนั้นเมื่อพิจารณาถึงความสามารถในการกำจัดที่ไอซี โดยดูจากค่ามวลของสารดูดซับต่อมวลของถ่าน ณ ระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 15 30 และ 60 นาที เท่ากับ 6.82 15.90 และ 32.94 มก./ก. ตามลำดับ (การคำนวณแสดงดังภาคผนวก ณ) หรือแสดงดังรูปที่ 4.19 พบว่า ยิ่งเพิ่มระยะเวลาสัมผัสให้มากขึ้น ความจุการดูดซับจะมีความสูงขึ้นไปตาม เนื่องจากยิ่งระยะเวลาสัมผัสนานขึ้นการดูดซับที่ไอซีของถ่านกัมมันต์จะสามารถเกิดได้อย่างสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น



รูปที่ 4.18 ปริมาณที่ไอซีที่สะสมในคอลัมน์ของถ่านกัมมันต์บี





รูปที่ 4.19 ความจูดูดิตทีโอซีของถ่านกัมมันต์บีในการทดลองแบบคอลัมน์  
จนกระทั่งที่โอซีของน้ำออกมีค่ามากกว่า 6 มก./ล.

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ความจูดูดิตทีโอซีกับระยะเวลาสัมผัส สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.20 พบว่า มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง ได้สมการ 4.13 คือ

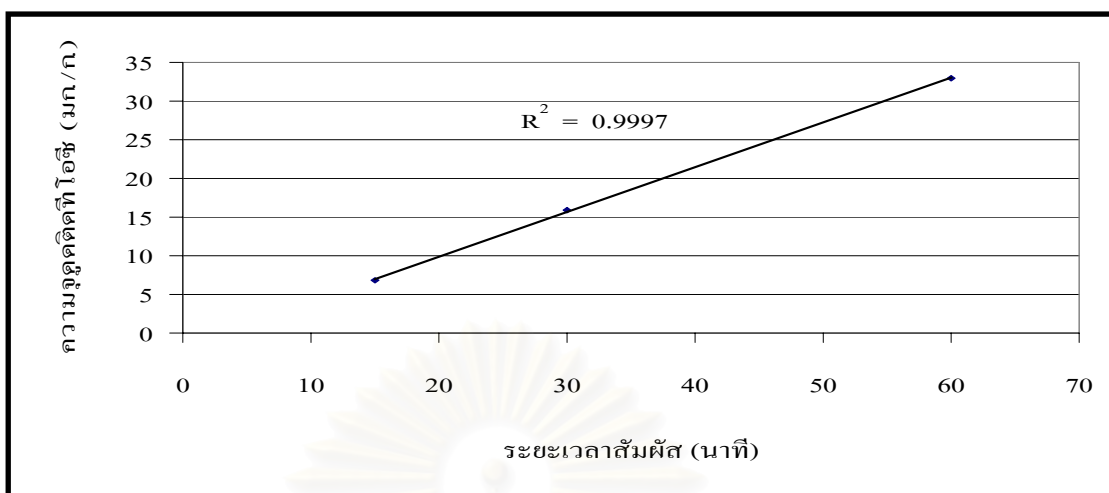
$$\begin{aligned}
 X/M_{\text{TOC}} &= 0.5787\tau - 1.7 & (4.13) \\
 \text{เมื่อ } X/M_{\text{TOC}} &= \text{ค่าความจูดูดิตทีโอซี (มก./ก.)} \\
 \tau &= \text{ระยะเวลาสัมผัส (นาที)}
 \end{aligned}$$

พิจารณาค่า Regression ที่ได้มีค่าสูงใกล้เคียงกับ 1 คือเท่ากับ 0.9997 ซึ่งแสดงแนวโน้มความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจูดูดิตทีโอซี กับระยะเวลาสัมผัสได้ดี ในช่วงเวลาสัมผัส 15 ถึง 60 นาที อย่างไรก็ตามการดังกล่าวอาจไม่สามารถใช้ครอบคลุมถึงระยะเวลาสัมผัสนอกเหนือจากช่วงที่ศึกษา

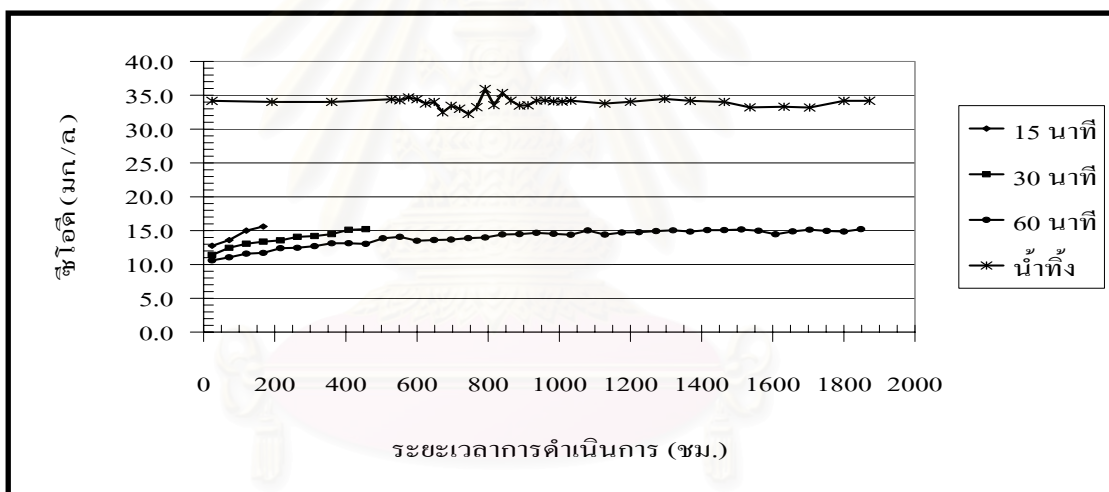
#### 4.6.2 การกำจัดซีโอดี

ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.21 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีโอดี ที่เหลืออยู่ในน้ำที่ออกจากคอลัมน์ เทียบกับระยะเวลาการดำเนินการ และรูปที่ 4.22 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีโอดีที่เหลืออยู่ในน้ำที่ออกจากคอลัมน์ เทียบกับปริมาตรเบด โดยจะวิเคราะห์ซีโอดีในน้ำออกจนกระทั่งที่โอซีของน้ำออกมีค่ามากกว่า 6 มก./ล.



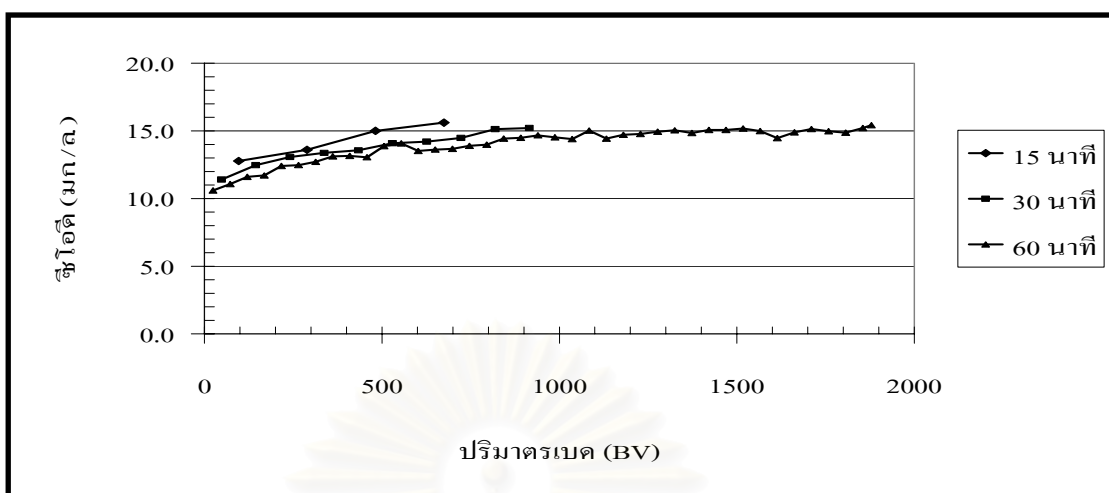


รูปที่ 4.20 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุดูดซับผิว กับระยะเวลาสัมพัทธ์



รูปที่ 4.21 ซีไอซีของน้ำที่ออกจากคอลัมน์ กับระยะเวลาการดำเนินการ จนกระทั่งน้ำออกมีค่าที่ไอซีมากกว่า 6 มก./ล.

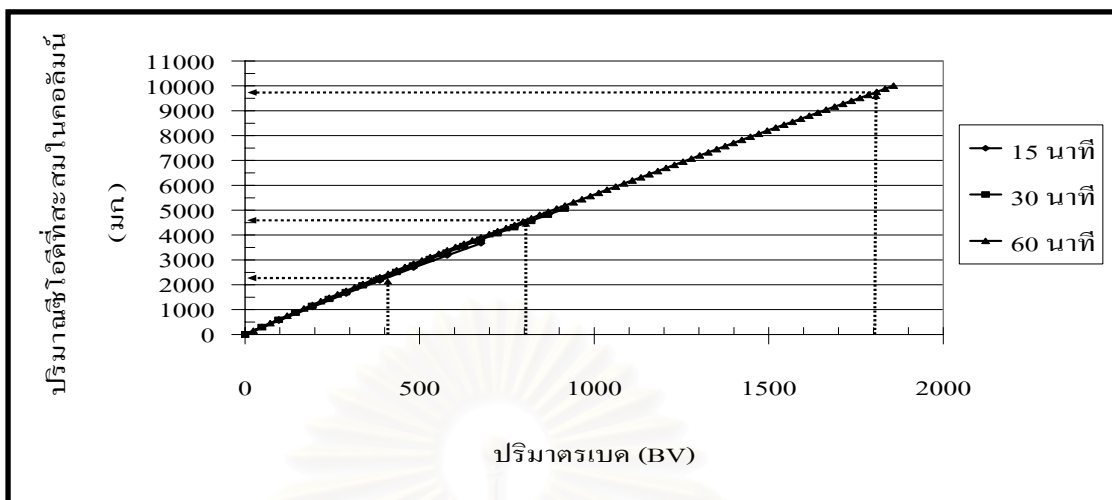
จากรูปที่ 4.21 พบว่า การกำจัดซีไอซีของคอลัมน์ทั้ง 3 คอลัมน์มีแนวโน้มเดียวกับการกำจัดที่ไอซี โดยที่ระยะเวลาสัมพัทธ์ 15 นาทีจะมีแนวโน้มของการหลุดออกของค่าซีไอซีเร็วกว่า หรือมีค่าซีไอซีในน้ำที่ออกจากคอลัมน์สูงกว่าระยะเวลาสัมพัทธ์ที่ 30 และ 60 นาที ซึ่งแตกต่างกับระยะเวลาสัมพัทธ์ที่ 30 และ 60 นาที มีแนวโน้มการหลุดออกของซีไอซีแบบช้า ๆ



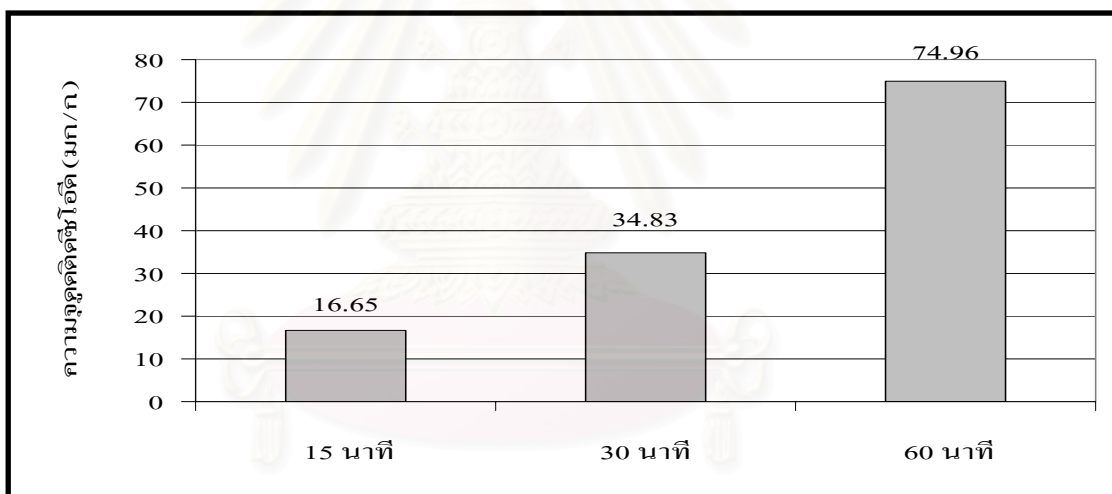
รูปที่ 4.22 ซีโอดีของน้ำที่ออกจากคอลัมน์ กับปริมาณแรงดัน กระทั่งน้ำออกมีค่าที่ไอซีมากกว่า 6 มก./ล.

จากรูปที่ 4.22 ปริมาณแรงดันในช่วงแรกจนถึงประมาณ 300 BV ระยะเวลาสัมผัส 15 นาที มีปริมาณซีโอดีที่ออกจากคอลัมน์มากกว่าที่ระยะเวลาสัมผัส 30 และ 60 ตามลำดับ และเมื่อผ่านที่ 300 BV ไปแล้วที่ระยะเวลาสัมผัส 15 นาที มีค่าซีโอดีที่ออกจากคอลัมน์เพิ่มขึ้นมาก สำหรับระยะเวลาสัมผัส 30 นาที มีค่าซีโอดีของน้ำที่ออกสูงกว่าระยะเวลาสัมผัส 60 นาที เมื่อพิจารณา ณ ปริมาณแรงดันพบว่า ในทุกๆ ปริมาณแรงดัน คอลัมน์ที่ระยะเวลาสัมผัส 15 นาที มีค่าซีโอดีในน้ำออกสูงที่สุด และรองลงมาคือระยะเวลาสัมผัส 30 และ 60 นาทีตามลำดับ

ดังนั้นเมื่อพิจารณาปริมาณแรงดันเทียบกับปริมาณซีโอดีที่สะสมอยู่ในคอลัมน์ดังแสดงในรูปที่ 4.23 พบว่า ที่ระยะเวลาสัมผัส 15 30 และ 60 นาที เมื่อมีค่าปริมาณแรงดัน กระทั่งมีค่าที่ไอซีเกินกว่า 6 มก./ล. จะมีปริมาณซีโอดีสะสมในคอลัมน์ เท่ากับ 2,200 4,600 และ 9,900 มก. ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อพิจารณาถึงความสามารถในการกำจัดซีโอดี โดยดูจากค่ามวลของสารดูดซับต่อมวลของถ่าน ระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 15 30 และ 60 นาที เท่ากับ 16.65 34.83 และ 74.96 มก./ก. ตามลำดับ (การคำนวณแสดงดังภาคผนวก ฉ) หรือแสดงดังรูปที่ 4.24 พบว่า ยิ่งเพิ่มระยะเวลาสัมผัสให้มากขึ้น ความจุการดูดซับซีโอดีจะมีค่าสูงขึ้นตาม เนื่องจากยิ่งระยะเวลาสัมผัสนานขึ้นการดูดซับสารอินทรีย์ของถ่านกัมมันต์จะสามารถเกิดได้อย่างสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น



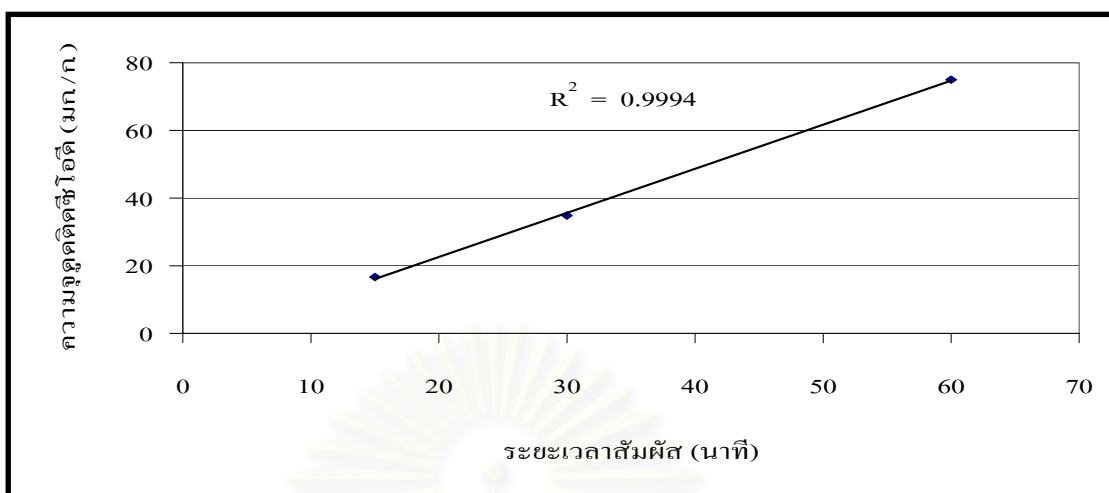
รูปที่ 4.23 ปริมาณซีไออดีที่สะสมในคอลัมน์ของถ่านกัมมันต์บี



รูปที่ 4.24 ค่าความจุจุดติดซีไออดีของถ่านกัมมันต์บีในการทดลองแบบคอลัมน์  
จนกระทั่งค่าที่ไอซีของน้ำออกมีค่ามากกว่า 6 มก./ล.

ดังนั้นพบว่า ค่าความจุจุดติดซีไออดีแบบคอลัมน์ที่ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที เป็นระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสม และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ความจุจุดติดซีไออดี กับระยะเวลาสัมผัสสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.25 พบว่ามีความสัมพันธ์เป็นลักษณะเส้นตรง และได้สมการ 4.14 คือ

$$\begin{aligned}
 X/M_{\text{COD}} &= 1.3018\tau - 3.415 & (4.14) \\
 \text{เมื่อ } X/M_{\text{COD}} &= \text{ค่าความจุจุดติดซีไออดี (mg./g.)} \\
 \tau &= \text{ระยะเวลาสัมผัส (นาที)}
 \end{aligned}$$



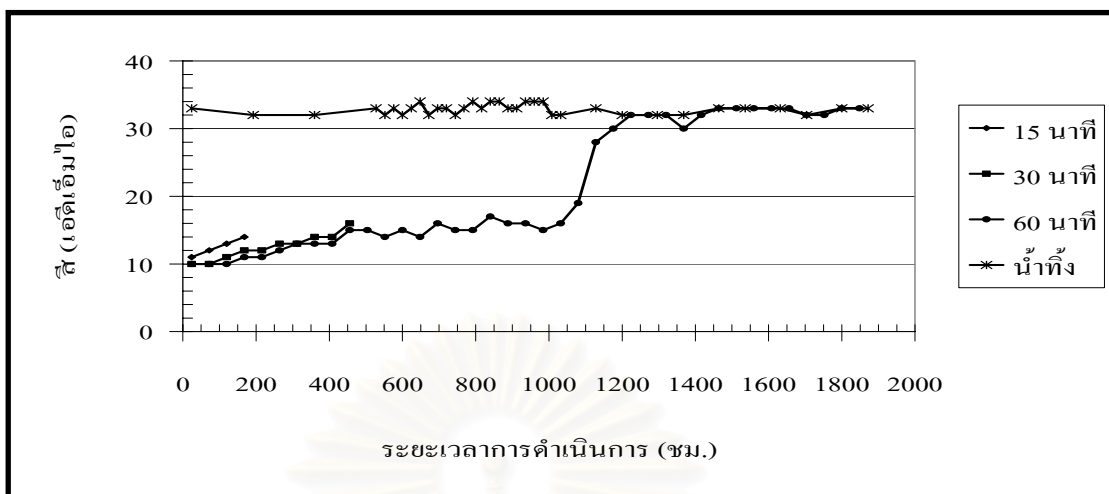
รูปที่ 4.25 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุดูดซับไอโอดี กับระยะเวลาสัมพัทธ์

พิจารณาค่า Regression ที่ได้มีค่าสูงใกล้เคียงกับ 1 คือเท่ากับ 0.9994 ซึ่งแสดงแนวโน้มของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุดูดซับไอโอดี กับระยะเวลาสัมพัทธ์ได้ดีเช่นเดียวกับค่าความจุดูดซับไอโอดี

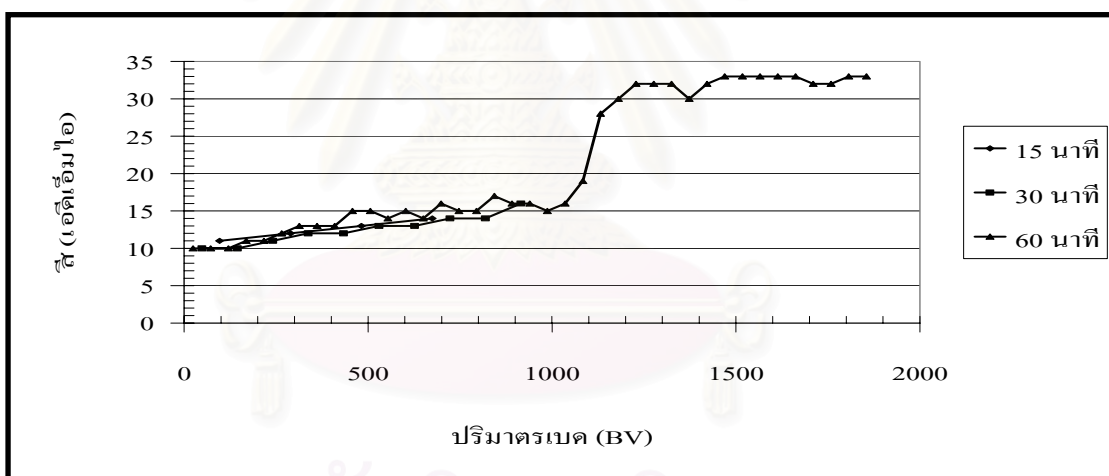
#### 4.6.3 การกำจัดสี

ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.26 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสีที่เหลืออยู่ในน้ำที่ออกจากคอลัมน์ เทียบกับระยะเวลาการดำเนินการ และรูปที่ 4.27 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสีที่เหลืออยู่ในน้ำที่ออกจากคอลัมน์ เทียบกับปริมาตรเบด โดยจะวิเคราะห์สี จนกระทั่งน้ำออกมีค่าที่ไอโอดีมากกว่า 6 มก./ล.

จากรูปที่ 4.26 พบว่า คอลัมน์ที่ระยะเวลาสัมพัทธ์ 15 นาที มีปริมาณสีในน้ำที่ออกจากคอลัมน์สูงกว่าที่ระยะเวลาสัมพัทธ์ 30 และ 60 นาทีอย่างเห็นได้ชัด แต่สำหรับ ระยะเวลาสัมพัทธ์ 30 นาทีที่มีปริมาณสีที่ออกใกล้เคียงกับที่ระยะเวลาสัมพัทธ์ 60 นาที และเมื่อพิจารณาที่ระยะเวลาสัมพัทธ์ 60 นาที พบว่า ปริมาณสีของน้ำที่ออกจากคอลัมน์ยังคงมีปริมาณสีที่น้อย จนกระทั่งชั่วโมงที่ 1,000 เริ่มมีการหลุด ออกของสีเพิ่มมากขึ้น เมื่อผ่านชั่วโมงที่ 1,200 ชั่วโมงไปแล้ว คอลัมน์ที่ระยะเวลาสัมพัทธ์ที่ 60 นาที มีปริมาณของสีที่ออกเท่ากับปริมาณของสีที่เข้าสู่คอลัมน์ ดังนั้นแสดงได้ว่า คอลัมน์ไม่สามารถกำจัดสีได้อีกต่อไป แต่ในขณะที่ยังคงสามารถกำจัดไอโอดี และซีไอโอดีได้อยู่ แสดงได้ว่า ถ่านกัมมันต์บีนี้มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีภายใต้การดำเนินการแบบคอลัมน์น้อยกว่าที่ไอโอดี และซีไอโอดี



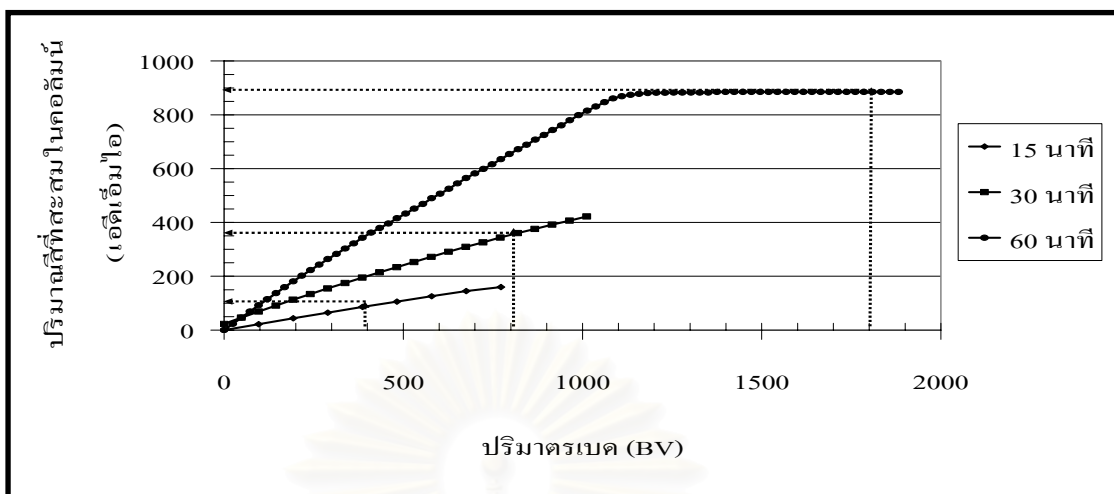
รูปที่ 4.26 ปริมาณสีของน้ำที่ออกจากคอลัมน์ กับระยะเวลาการดำเนินการ  
จนกระทั่งน้ำออกมีค่าที่ไอซีมากกว่า 6 มก./ล.



รูปที่ 4.27 ปริมาณสีของน้ำที่ออกจากคอลัมน์ กับปริมาตรเบด  
จนกระทั่งน้ำออกมีค่าที่ไอซีมากกว่า 6 มก./ล.

จากรูปที่ 4.27 พบว่า ที่ปริมาตรเบดในช่วงแรกยังคงมีปริมาณสีที่ออกจากทั้ง 3 ระยะเวลาสัมผัสใกล้เคียงกัน ในขณะที่ระยะเวลาสัมผัส 60 นาทีพบว่า เริ่มมีการหลุดออกของสีมากขึ้นที่ปริมาตรเบด 1,000 BV จนกระทั่งคอลัมน์ไม่สามารถกำจัดสีได้อีกที่ 1,200 BV เป็นต้นไป

ดังนั้นเมื่อพิจารณาปริมาตรเบดเทียบกับปริมาณสีที่สะสมอยู่ในคอลัมน์ ดังแสดงในรูปที่ 4.28 พบว่า ที่ระยะเวลาสัมผัส 15 30 และ 60 นาที เมื่อมีค่าปริมาตรน้ำที่ให้ได้จนกระทั่งมีค่าที่ไอซีเกินกว่า 6 มก./ล. จะมีปริมาณสีสะสมในคอลัมน์ เท่ากับ 95 360 และ 890 เอ็ดเอ็มไอ ตามลำดับ



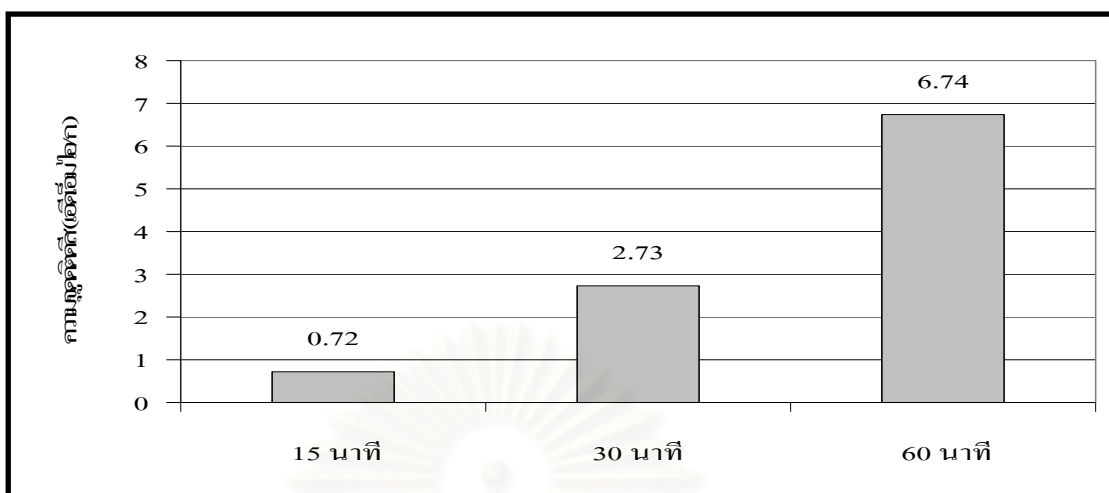
รูปที่ 4.28 ปริมาณสีที่สะสมในคอลัมน์ของถ่านกัมมันต์ปี

ดังนั้นเมื่อพิจารณาถึงความสามารถในการกำจัดสีโดยดูจากค่ามวลของสารดูดติดผิวต่อมวลของถ่าน ณ ระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 15 30 และ 60 นาที เท่ากับ 0.72 2.73 และ 6.74 เออีเอ็มไอ/ก. ตามลำดับ (การคำนวณแสดงดังภาคผนวก ฉ) หรือแสดงดังรูปที่ 4.29 พบว่า ยิ่งเพิ่มระยะเวลาสัมผัสให้มากขึ้น ความจุการดูดติดผิวจะมีค่าสูงขึ้นตาม เนื่องจากยิ่งระยะเวลาสัมผัสนานขึ้นการดูดติดสีของถ่านกัมมันต์จะสามารถเกิดได้อย่างสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ดังนั้นพบว่า ค่าความจุดูดติดสีแบบคอลัมน์ ที่ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที เป็นระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมสามารถทำให้ถ่านที่บรรจุภายในคอลัมน์สามารถถูกใช้ได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ และเมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ความจุดูดติดสีกับระยะเวลาสัมผัส สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 4.30 พบว่ามีความสัมพันธ์เป็นลักษณะเส้นตรง และได้สมการที่ 4.15 คือ

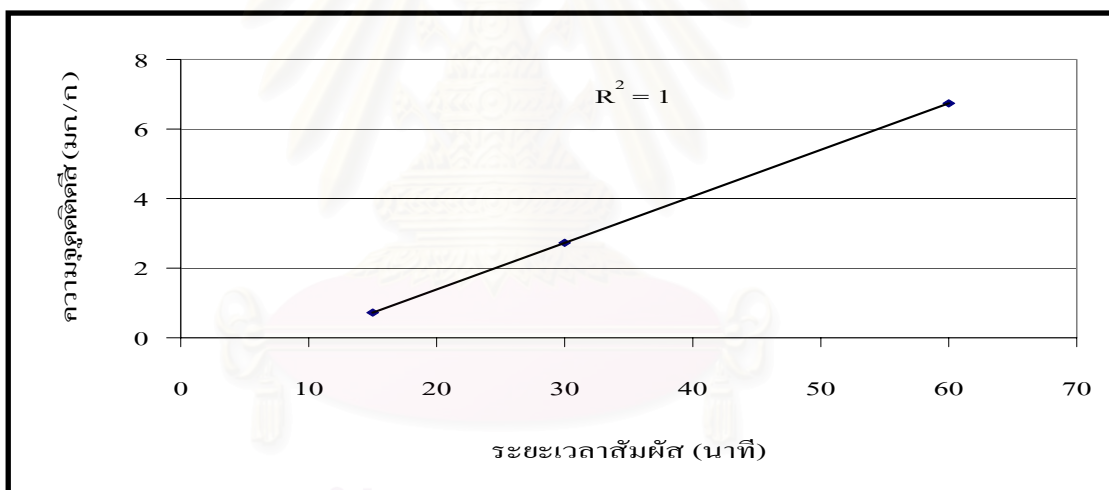
$$\begin{aligned}
 \frac{X}{M}_{\text{Color}} &= 0.1338\tau - 1.285 & (4.15) \\
 \text{เมื่อ } \frac{X}{M}_{\text{Color}} &= \text{ค่าความจุดูดติดสี (เออีเอ็มไอ / ก.)} \\
 \tau &= \text{ระยะเวลาสัมผัส (นาที)}
 \end{aligned}$$

พิจารณาค่า Regression ที่ได้มีค่าเท่ากับ 1 ซึ่งแสดงแนวโน้มของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุดูดติดสี กับระยะเวลาสัมผัสได้ดีมาก เช่นเดียวกับค่าที่ไอซี และซีไอดี



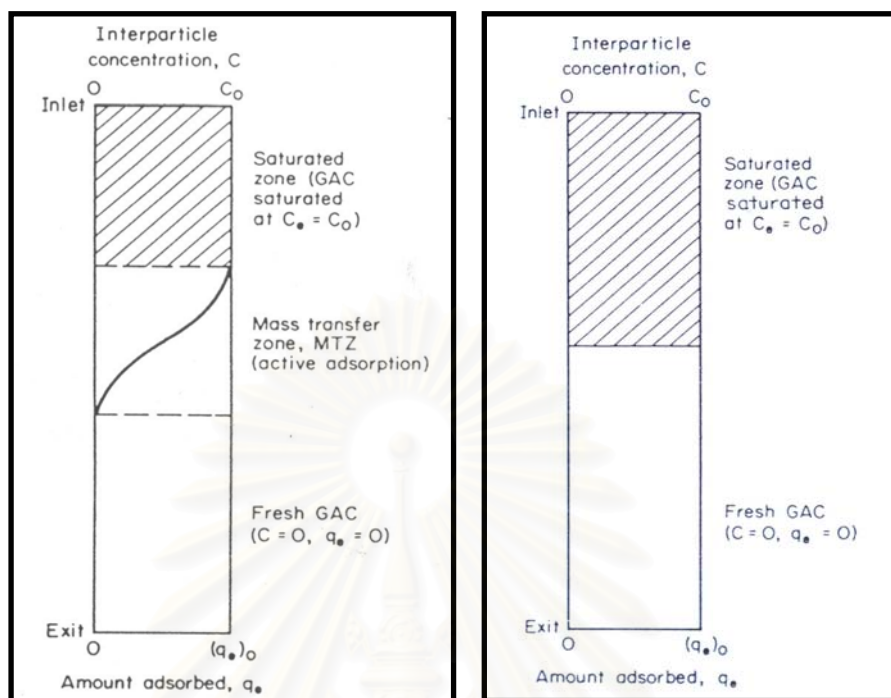


รูปที่ 4.29 ค่าความจุดูดซับของถ่านกัมมันต์บีในการทดลองแบบคอลัมน์  
จนกระทั่งค่าที่ไอซีของน้ำออกมีค่าเท่ากับ 6 มก./ล.



รูปที่ 4.30 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุดูดซับ ซีไอดี กับระยะเวลาสัมผัส

ดังนั้นจากค่าความจุดูดซับที่ไอซี, ซีไอดี และสีแบบคอลัมน์พบว่า การทดลองในคอลัมน์จะเกิดโซนการถ่ายเทมวล (Mass transfer zone, MTZ) ดังแสดงในรูปที่ 4.31 (ก.) โดยโซนการถ่ายเทมวลนั้นขึ้นกับอัตราการไหลของสารที่ต้องการดูดซับผ่านคอลัมน์ และความเร็วในการดูดซับผิว หากอัตราการไหลเข้าสู่คอลัมน์เร็ว เป็นผลให้โซนการถ่ายเทมวลมีความยาวเพิ่มมากขึ้น ซึ่งแสดงได้ว่า กลไกการดูดซับเกิดขึ้นได้ไม่ดี หรือระยะเวลาสัมผัสของน้ำกับถ่านกัมมันต์ไม่เพียงพอให้เกิดกลไกการดูดซับผิวได้ แต่หากมีอัตราการไหลเข้าสู่คอลัมน์ช้า ทำให้สารที่ต้องการดูดซับมีเวลาเพียงพอให้เกิดการดูดซับผิวที่ดีได้ เป็นผลให้ความยาวของโซนการถ่ายเทมวลลดลง ทำให้สามารถ



รูปที่ 4.31 การดูดซับในแบบคอลัมน์ โดยเกิด mass transfer zone ขึ้น

(ก.) คอลัมน์ที่มี mass transfer zone (ข.) คอลัมน์ที่ไม่มี mass transfer zone

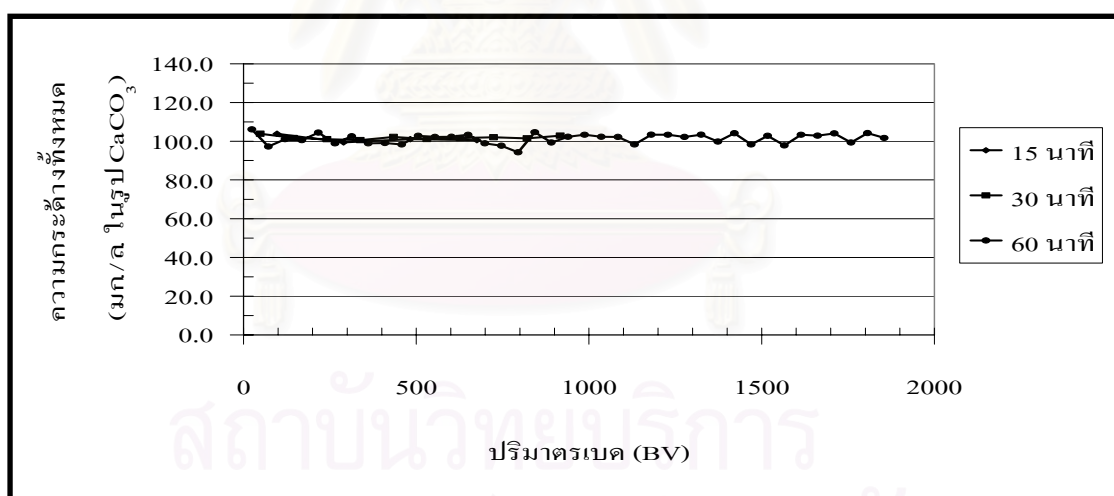
ใช้ถ่านกัมมันต์ได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ โดยหากมีอัตราการไหลเข้าสู่คอลัมน์ที่ช้ามาก จะเป็นผลให้กลไกการดูดซับเกิดขึ้นได้ดี หรือถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์ถูกใช้ไปทั่วทั้งคอลัมน์อย่างเต็มประสิทธิภาพ เป็นผลให้ความยาวของโซนการถ่ายเทมวลมีค่าลดลง จนมีค่าเป็นศูนย์ได้ ดังแสดงในรูปที่ 4.31 (ข.) (Vernon, 1990) แสดงได้ว่า อัตราการไหล หรือระยะเวลาสัมผัส มีผลโดยตรงต่อโซนการถ่ายเทมวล เมื่ออัตราการไหลของน้ำหรือของเหลวที่มีความหนืดต่ำ ผ่านคอลัมน์ หากเป็นการไหลผ่านชั้นถ่านกัมมันต์ด้วยอัตราการไหลเร็ว จะเป็นการลดระยะเวลาสัมผัส (เมื่อให้ปริมาณน้ำในคอลัมน์เท่ากัน) โซนการถ่ายเทมวลจะมีความยาวเคลื่อนที่หลุดออกมาจากคอลัมน์ ซึ่งจะมีความเข้มข้นหลุดออกมาได้ง่ายขณะที่ถ่านยังไม่ได้ใช้ประสิทธิภาพในการดูดซับอย่างเต็มที่ (คือ ความยาวของโซนการถ่ายเทมวลมีความยาวมากกว่าความยาวของคอลัมน์) ดังนั้นในระยะเวลาสัมผัสสูงๆจะมีผลให้สามารถใช้ประโยชน์จากถ่านได้สมบูรณ์มากขึ้น (Frank อ้างในอรภัทร, 2540)

จากผลการทดลองแสดงได้ว่า ที่ระยะเวลาสัมผัส 15 นาที ซึ่งเป็นระยะเวลาสัมผัสที่เร็วที่สุด ทำให้กลไกของการดูดซับมีเวลาในการดูดซับไม่เพียงพอ ส่งผลให้มีความยาวของโซนการถ่ายเทมวลมีความยาวมาก ทำให้ถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์ส่วนใหญ่ยังถูกใช้ไปในการดูดซับ

ยังไม่เต็มประสิทธิภาพ และเมื่อระยะเวลาผ่านไปทำให้ความยาวของโซนการถ่ายเทมวลมีความยาวมากกว่าคอลัมน์ เป็นผลให้เริ่มมีการหลุดออกของ ทีโอซี ซีไอดี และสีเพิ่มมากขึ้น ซึ่งค่าความจุการดูดซับจึงมีค่าต่ำกว่าที่ระยะเวลาสัมผัส 30 และ 60 นาที แต่ที่ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที ความยาวของโซนการถ่ายเทมวลมีค่าลดลง เนื่องจากมีอัตราการไหลที่ช้ากว่า ในคอลัมน์อื่น ๆ เป็นผลให้ถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์สามารถถูกใช้ไปได้อย่างเต็มที่ทั่วทั้งคอลัมน์ ดังนั้นค่าความจุการดูดซับที่ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที จึงมีค่าสูงที่สุด

#### 4.6.4 การกำจัดความกระด้าง (Total Hardness)

ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.32 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความกระด้างที่เหลืออยู่ในน้ำที่ออกจากคอลัมน์ เทียบกับปริมาณเบด พบว่า ปริมาณความกระด้างของน้ำที่ออกจากคอลัมน์ในทุกระยะเวลาสัมผัสมีค่าไม่แตกต่างกัน รวมทั้งเมื่อปริมาตรเบดเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ไม่พบว่ามี การเพิ่มขึ้น หรือลดลงของปริมาณความกระด้างของน้ำออก และเมื่อพิจารณาค่าความกระด้างของน้ำที่เข้าสู่คอลัมน์ (ประมาณ 109 มก./ล.) พบว่า คอลัมน์ทั้ง 3 คอลัมน์มีการกำจัดความกระด้างได้เพียงเล็กน้อย



รูปที่ 4.32 ปริมาณความกระด้าง เทียบกับปริมาตรเบด

จนกระทั่งน้ำออกมีค่าทีโอซีมากกว่า 6 มก./ล.

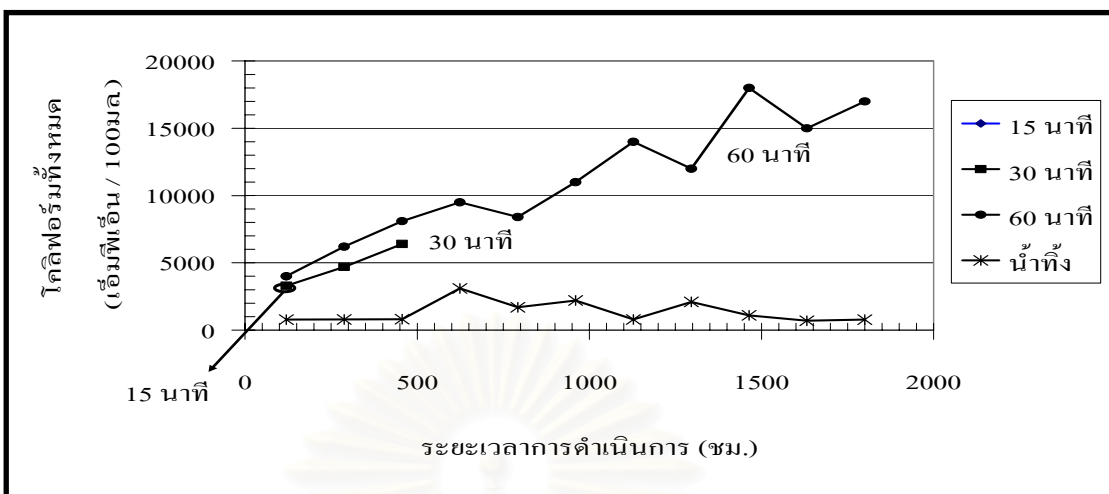
ดังนั้น ระยะเวลาสัมผัสที่เพิ่มขึ้น ไม่ได้เพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดความกระด้าง เนื่องจาก การดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์นั้น มีความเหมาะสมในการกำจัดสารอินทรีย์มากกว่า การกำจัดความกระด้าง เมื่อพิจารณาถึงความเหมาะสมของน้ำภายหลังจากผ่านคอลัมน์ การดูดซับที่ ยังคงมีค่าความกระด้างสูงนั้น หากต้องการนำน้ำที่ผ่านการดูดซับแล้ว ไปใช้ใหม่ในการซักล้าง

ไม่พบว่ามีปัญหาในการซักรีด เนื่องจากโรงงานซักรีดทุกโรงงานมีระบบกำจัดความกระด้างของน้ำก่อนเข้าสู่กระบวนการซักรีด เพราะในโรงงานซักรีดจะมีการใช้หม้อต้มไอน้ำ เป็นตัวหลักในการผลิตไอน้ำเพื่อจ่ายไปยังส่วนต่าง ๆ ให้กับเครื่องจักรที่ต้องการใช้ไอน้ำ เช่น เครื่องซักรีด เครื่องรีด เครื่องอบผ้า เตารีด และอุปกรณ์จักรอยเป็อน รวมทั้งลักษณะของน้ำดิบก่อนเข้าสู่ระบบกำจัดความกระด้างนั้น ผู้ทดลองได้ทำการเก็บตัวอย่างน้ำดิบของโรงงานซักรีดเป็นจำนวน 3 ครั้ง ซึ่งมีค่าประมาณ 119 มก./ล. ในรูป  $\text{CaCO}_3$  ดังนั้น ค่าความกระด้างของน้ำที่ผ่านการบำบัดมีค่าใกล้เคียงกับน้ำดิบที่โรงงานซักรีดใช้อยู่ ดังนั้นค่าความกระด้างที่ถ่านกัมมันต์กำจัดไม่ได้เมื่อนำไปผ่านเข้าสู่การกำจัดความกระด้างของโรงงานซักรีดแล้ว จึงไม่ก่อให้เกิดปัญหาต่อการนำน้ำไปใช้ใหม่เป็นผลให้หากต้องการจะนำน้ำเหล่านี้ไปใช้ใหม่ จึงควรมีการกำจัดความกระด้างของน้ำทิ้งก่อนการนำไปใช้งาน โดยควรเพิ่มกระบวนการอื่นเพื่อกำจัดความกระด้าง เช่นการแลกเปลี่ยนไอออน

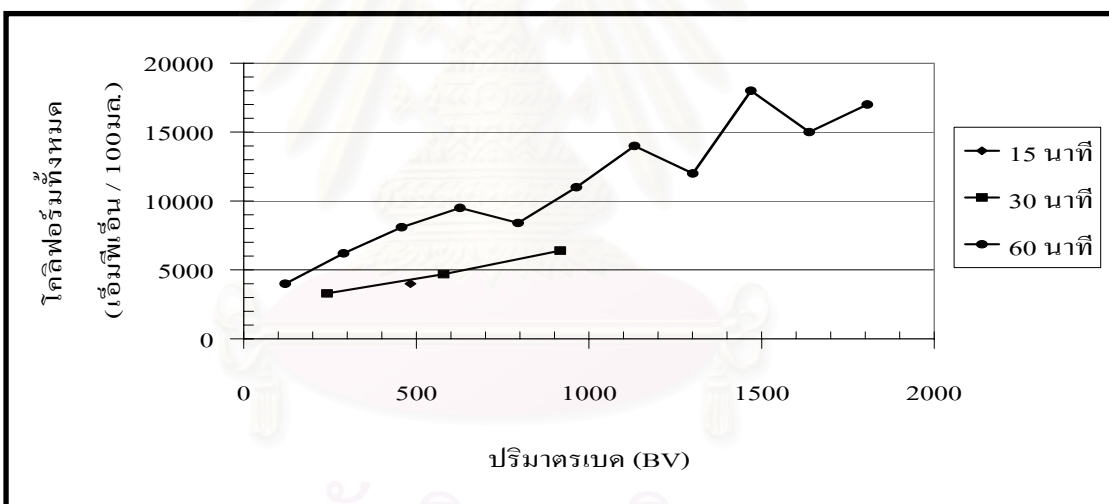
#### 4.6.5 ปริมาณโคลิฟอร์มทั้งหมด (Total Coliform)

ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.33 และ 4.34 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโคลิฟอร์มทั้งหมดในน้ำออก เทียบกับระยะเวลาการดำเนินการ และปริมาณเบดตามลำดับ พบว่า เมื่อระยะเวลาการดำเนินการเพิ่มมากขึ้น ปริมาณโคลิฟอร์มทั้งหมดของน้ำที่ออกจากคอลัมน์มีปริมาณเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่องในทุกระยะเวลาสัมผัส รวมทั้งเมื่อเปรียบเทียบปริมาณโคลิฟอร์มในน้ำออก กับระยะเวลาสัมผัสพบว่า ระยะเวลาสัมผัสเพิ่มมากขึ้น ปริมาณโคลิฟอร์มทั้งหมดเพิ่มมากขึ้นไปด้วย และเมื่อพิจารณาเปรียบเทียบปริมาณโคลิฟอร์มในน้ำที่เข้าสู่คอลัมน์ พบว่าในน้ำออกมีปริมาณโคลิฟอร์มสูงกว่าปริมาณในน้ำเข้า แสดงได้ว่าการเจริญเติบโตของโคลิฟอร์มในคอลัมน์เนื่องจากคอลัมน์มีระยะเวลาที่กักเก็บน้ำไว้ในคอลัมน์ 15 30 และ 60 นาที ทำให้โคลิฟอร์มในน้ำเข้าสามารถเจริญเติบโต เพิ่มจำนวนมากขึ้นกว่าน้ำทิ้งที่เข้าสู่คอลัมน์ได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการฆ่าเชื้อโรคของน้ำที่ออกจากคอลัมน์ถ่านกัมมันต์ก่อนนำไปใช้จริง (Vernon, 1990)

จากการศึกษาของ Symons และคณะ (1981) อ้างถึงใน Vernon, 1990 รายงานว่า จะพบปริมาณโคลิฟอร์มในน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดมีค่าสูงกว่าปริมาณโคลิฟอร์มในน้ำเข้า เมื่ออุณหภูมิของน้ำมีค่ามากกว่า 10 องศาเซลเซียส ซึ่งการทดลองได้กำหนดให้มีระยะเวลาสัมผัส 12 นาที และใช้ความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์ 60 เซนติเมตร ดังนั้นจากการทดลองอุณหภูมิตลอดการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.35 พบว่าอุณหภูมิโดยเฉลี่ยตลอดการทดลองประมาณ 29 องศาเซลเซียส จึงเป็นผลให้ปริมาณโคลิฟอร์มในน้ำออกมีค่ามากกว่าในน้ำที่เข้าสู่คอลัมน์ถ่านกัมมันต์บิรวมทั้งมีรายงานซึ่งอ้างถึงใน Vernon, 1990 ว่า พบโคลิฟอร์ม เช่น *Citrobacter freundii*, *Enterobacter cloacae* และ *Klebsiella pneumonia* บนชั้นของถ่านกัมมันต์ชนิดเกล็ด ดังนั้น USEPA

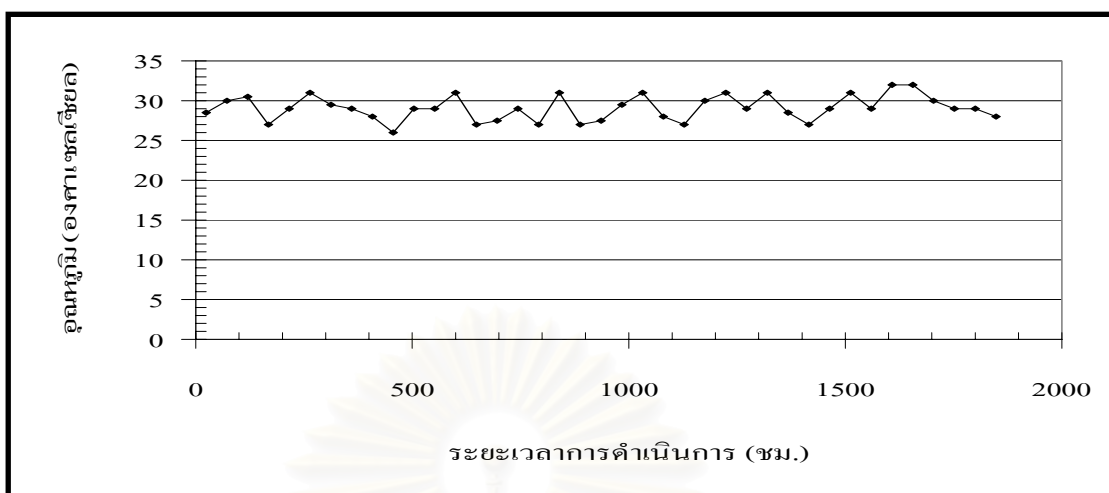


รูปที่ 4.33 ปริมาณ โคลิฟอร์มทั้งหมด เทียบกับระยะเวลาการดำเนินการ  
จนกระทั่งน้ำออกมีค่าที่ไอซีมากกว่า 6 มก./ล.



รูปที่ 4.34 ปริมาณ โคลิฟอร์มทั้งหมด เทียบกับปริมาณเบด  
จนกระทั่งน้ำออกมีค่าที่ไอซีมากกว่า 6 มก./ล.

(United States Environmental Protection Agency) ได้กำหนดไว้ว่าน้ำที่ผ่านการดูดติดด้วยถ่านกัมมันต์แล้วควรมีการฆ่าเชื้อโรคต่อไป (post – disinfection)



รูปที่ 4.35 อุณหภูมิตลอดระยะเวลาการดำเนินการทดลองหาระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสม

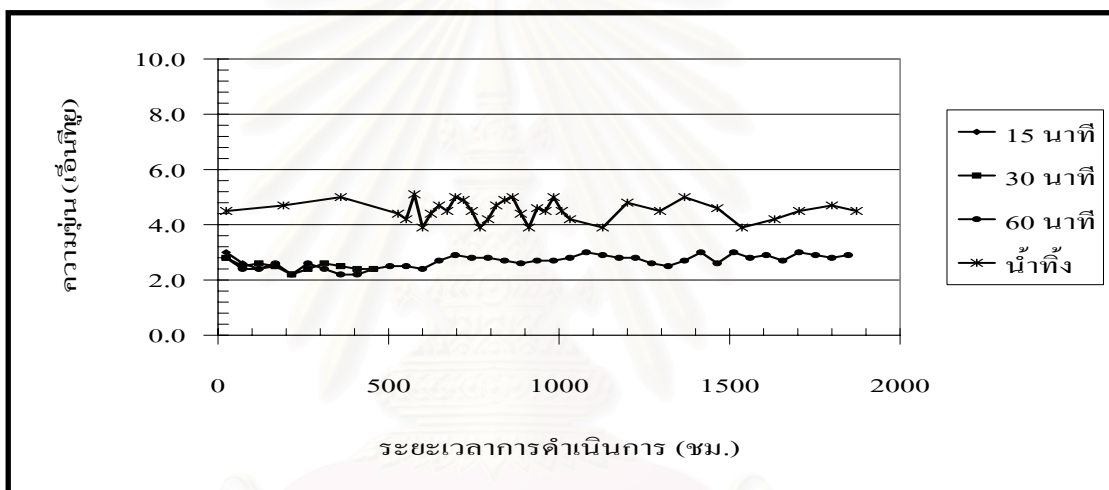
จากรูปที่ 4.34 เปรียบเทียบปริมาณ โคลิฟอร์มในน้ำออก กับระยะเวลาสัมผัสพบว่า เมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มมากขึ้น ปริมาณโคลิฟอร์มในน้ำออกมีค่าเพิ่มมากขึ้นตาม เนื่องจากยิ่งระยะเวลาสัมผัสมาก หรือมีระยะเวลาเก็บกักมาก โคลิฟอร์มทั้งหมดก็จะสามารถเจริญเติบโต และเพิ่มจำนวนได้มากขึ้น แต่จากการรายงานของ Van der Kooij (1983) อ้างถึงใน Vernon, 1990 พบว่า การเพิ่มระยะเวลาสัมผัสโดยการลดอัตราการไหลให้ต่ำลง บางครั้งอาจเป็นการลดปริมาณโคลิฟอร์ม หรือในบางครั้งอาจเป็นการเพิ่มปริมาณโคลิฟอร์มได้เช่นกัน ซึ่งจากผลการทดลองเป็นการเพิ่มปริมาณโคลิฟอร์ม ดังนั้นน้ำที่ผ่านการดูดติดด้วยถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดแล้ว หากต้องการนำน้ำเหล่านั้นไปใช้ใหม่ควรมีการฆ่าเชื้อโรคก่อนนำไปใช้จริง

เมื่อพิจารณาปริมาณโคลิฟอร์มที่เพิ่มขึ้นมากในน้ำที่ผ่านออกจากคอลัมน์ อาจทำให้เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพได้บ้าง อย่างไรก็ตามการลดปริมาณสารอินทรีย์ในคอลัมน์จากปริมาณโคลิฟอร์มที่เพิ่มมากขึ้น คาดว่าไม่ใช่กลไกหลักในการลดปริมาณสารอินทรีย์ในคอลัมน์ เนื่องจากน้ำทิ้งจากโรงงานชักรีดนี้ เป็นน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดทางชีวภาพแล้ว และเมื่อพิจารณาถึงระยะเวลาที่กักพัชลศาสตร์ที่นานมากประมาณ 3 วัน ในสภาวะเดิมอากาศของโรงงานร่วมกับค่าบีโอดีที่มีค่าต่ำมากและต่ำกว่าซีโอดีเกือบ 3 เท่า (อัตราส่วนซีโอดีและบีโอดี เท่ากับ 2.77) ซึ่งให้เห็นว่าสารอินทรีย์ที่เหลืออยู่ในน้ำทิ้งนี้ส่วนใหญ่เป็นสารที่ย่อยสลายได้ค่อนข้างยากทางชีวภาพ นอกจากนี้ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุดูดติด ทีโอซี, ซีโอดี และสีของคอลัมน์ที่ระยะเวลาสัมผัสต่าง ๆ มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง จากเหตุผลดังกล่าว จึงกล่าวได้ว่ากลไกที่เกิดขึ้นในการลดปริมาณสารอินทรีย์ในคอลัมน์คือ กลไกของการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์เป็นหลัก

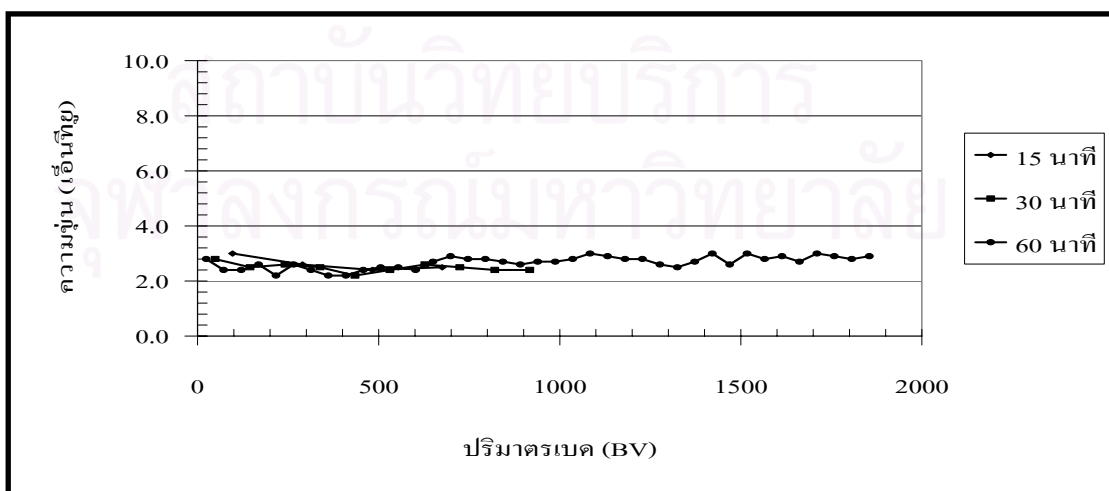


#### 4.6.6 การกำจัดความขุ่น (Turbidity)

ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.36 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความขุ่นในน้ำออกเทียบกับระยะเวลาการดำเนินการ พบว่า ที่ระยะเวลาสัมผัส 15 30 และ 60 นาที มีปริมาณความขุ่นในน้ำที่ออกใกล้เคียงกันค่อนข้างมาก จากผลการทดลองรูปที่ 4.37 เมื่อพิจารณา ณ จุดปริมาตรเบคให้ค่าที่โอซี มากกว่า 6 มก./ล. พบว่า ที่ปริมาตรเบค 400 BV ของระยะเวลาสัมผัส 15 นาที ถึงแม้จะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดที่โอซีได้ต่ำลง แต่ยังคงมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นที่ใกล้เคียงกับระยะเวลาสัมผัส 30 และ 60 นาที เช่นเดียวกับที่ปริมาตรเบค 800 BV ของระยะเวลาสัมผัส 30 นาที รวมทั้งที่ระยะเวลาสัมผัสที่ 15 30 และ 60 นาที จะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นไม่ต่างกัน โดยความขุ่นที่ถูกกำจัดได้นี้ เกิดขึ้นจากกลไกการกรองภายในคอลัมน์



รูปที่ 4.36 ปริมาณความขุ่น เทียบกับระยะเวลาการดำเนินการ

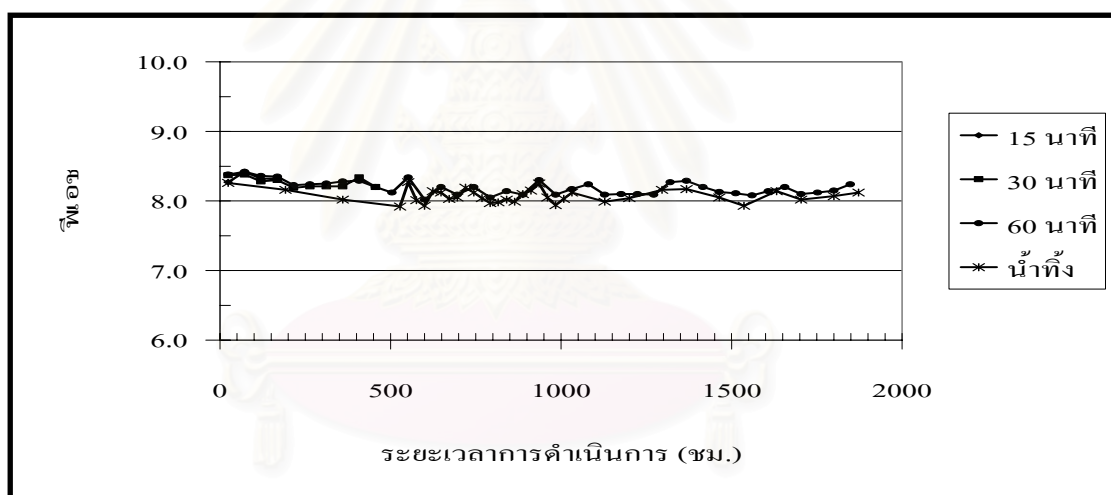


รูปที่ 4.37 ปริมาณความขุ่น เทียบกับปริมาตรเบค

เมื่อพิจารณาถึงคุณภาพของน้ำภายหลังการดูดติดเพื่อนำน้ำเหล่านี้ไปใช้ใหม่ พบว่าไม่เกิดปัญหาในการนำไปใช้ในกระบวนการซักрид เนื่องจากลักษณะน้ำดิบที่โรงงานซักридใช้ส่วนใหญ่มีปริมาณความขุ่นประมาณ 2 เอ็นทียู และลักษณะน้ำทิ้งที่ผ่านคอลัมน์ของถ่านกัมมันต์มีค่าความขุ่นส่วนใหญ่ประมาณ 2.5 เอ็นทียู ดังนั้นจึงไม่น่าจะเกิดปัญหากับกระบวนการซักридหากนำน้ำเหล่านี้ไปใช้งานซักридจริง

#### 4.6.7 พีเอช

ค่าพีเอชตลอดการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.38 พบว่า ค่าพีเอชของน้ำที่ออกมีค่าสูงกว่าพีเอชของน้ำเข้าเล็กน้อย เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีความเป็นเบสเล็กน้อย และน้ำทิ้งที่ทำการทดลองไม่ได้มีการใส่บัพเฟอร์ แต่หากพิจารณาถึงลักษณะของน้ำที่นำไปใช้ในการซักрид โรงงานซักридส่วนใหญ่จะมีการปรับพีเอชของน้ำก่อนนำไปใช้ซักридให้มีค่าประมาณ 7 ก่อน ดังนั้นค่าพีเอชที่เพิ่มขึ้นมีค่าเฉลี่ยอยู่ประมาณ 8 ทำให้อาจต้องมีการปรับค่าพีเอชเล็กน้อยก่อนนำไปซักридต่อไป



รูปที่ 4.38 พีเอชเทียบกับระยะเวลาในการดำเนินการ

ดังนั้นจากผลการทดลองในการหาสภาวะที่เหมาะสมของคอลัมน์ เมื่อใช้ถ่านกัมมันต์บีพบว่า เมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มมากขึ้น มีผลให้ระยะเวลาที่จะมีค่าที่ไอซีมากกว่า 6 มก./ล. หลุดออกจากคอลัมน์นั้นมีระยะเวลานานมากขึ้น เนื่องจากถ่านกัมมันต์ภายในคอลัมน์สามารถเกิดกลไกการดูดติดผิวได้ทัน เป็นผลให้ถ่านกัมมันต์สามารถถูกใช้ได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ และเมื่อพิจารณาในด้านเศรษฐศาสตร์พบว่า เมื่อระยะเวลาสัมผัสเพิ่มมากขึ้น จะมีผลโดยตรงต่อค่าใช้จ่ายรายปีซึ่งจะทำให้เป็นการลดค่าการดำเนินงาน เนื่องจากระยะเวลาในการเปลี่ยนถ่านกัมมันต์ใหม่เมื่อถ่านกัมมันต์ให้ค่าที่ไอซีเกินกว่า 6 มก./ล. นั้น มีระยะเวลานานมากขึ้น

แต่จะมีผลทำให้ต้องมีการใช้คอลัมน์ขนาดใหญ่ หากต้องการให้ที่ระยะเวลาสัมพัทธ์นาน แต่ให้ปริมาณน้ำที่ผ่านคอลัมน์ในปริมาณที่เท่ากับระยะเวลาสัมพัทธ์สั้น ระยะเวลาการดำเนินการเดียวกัน จึงทำให้มีราคาต้นทุนสูง

แต่จากผลการทดลอง สังเกตได้ว่าปริมาณน้ำที่ผ่านคอลัมน์ที่ระยะเวลาสัมพัทธ์ 60 นาที จะมีการหลุดออกของทีโอซีใกล้เคียง 6 มก./ล.นั้น ให้ปริมาณน้ำที่มากกว่าระยะเวลาสัมพัทธ์ 15 และ 30 นาทีมาก เมื่อพิจารณาแล้ว ระยะเวลาสัมพัทธ์ที่ 60 นาที จึงเป็นระยะเวลาสัมพัทธ์ที่เหมาะสมในแบบคอลัมน์ โดยใช้ระยะเวลาสัมพัทธ์ที่ 60 นาทีในการทดลองเปรียบเทียบแนวโน้มของการดูดติดของถ่านกัมมันต์อื่นต่อไป

#### 4.7 ผลการศึกษาหาความสามารถในการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ที่ขนาดรูพรุนแตกต่างกัน 3 ขนาดที่เหลือ ในแบบคอลัมน์ที่มีการไหลแบบต่อเนื่อง โดยเลือกระยะเวลาสัมพัทธ์ที่เหมาะสม

การทดลองแบบคอลัมน์นี้ ได้ใช้คอลัมน์เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 เซนติเมตร สูง 120 เซนติเมตร เป็นการไหลจากด้านล่างขึ้นด้านบน (Upflow) โดยด้านล่างคอลัมน์ได้บรรจุ Glass bead ความสูง 10 เซนติเมตร เพื่อให้การกระจายตัวของน้ำที่ไหลผ่านเข้าสู่คอลัมน์สามารถเกิดการกระจายตัวได้ดี

การทดลองชุดนี้ใช้คอลัมน์จำนวน 3 คอลัมน์ ภายในบรรจุถ่านกัมมันต์เอ ซี และดี ทั้ง 3 คอลัมน์ มีความสูงของชั้นถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด 60 เซนติเมตร และกำหนดระยะเวลาสัมพัทธ์เท่ากับ 60 นาที โดยกำหนดให้ค่าทีโอซีที่เหลืออยู่ในน้ำที่ออกจากคอลัมน์ไม่เกิน 6 มก./ล. เป็นเกณฑ์มาตรฐาน คอลัมน์ที่ใช้ในการทดสอบแสดงดังรูปที่ 4.39

##### 4.7.1 การกำจัดทีโอซี

ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.40 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าทีโอซีที่เหลืออยู่ในน้ำที่ออกจากคอลัมน์ เทียบกับระยะเวลาการดำเนินการ และรูปที่ 4.41 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าทีโอซีที่เหลืออยู่ในน้ำที่ออกจากคอลัมน์ เทียบกับปริมาตรเบด (Beb Volume, BV)

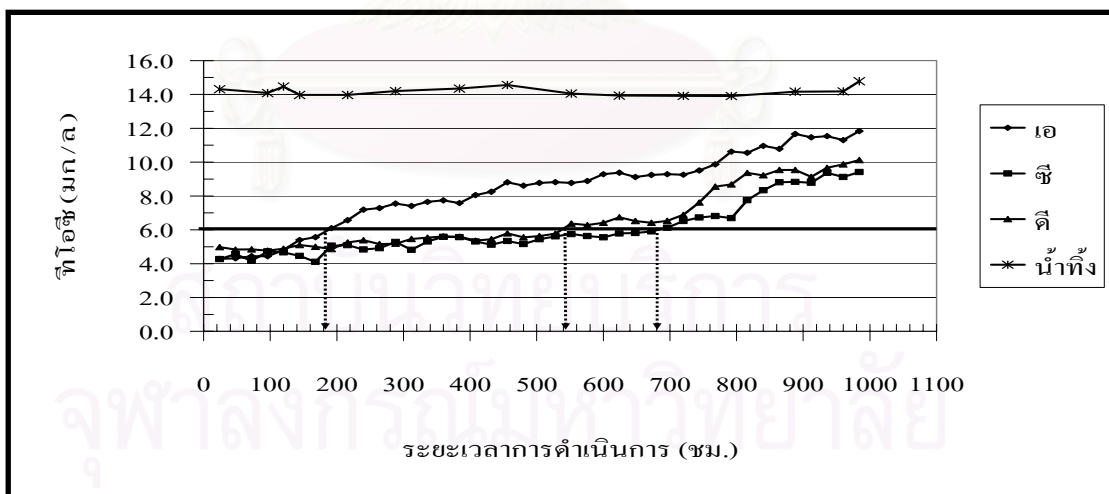
จากรูปที่ 4.40 พบว่า คอลัมน์ถ่านกัมมันต์เอ มีค่าทีโอซีของน้ำออกเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ อย่างเป็นขั้นได้ชัด และมีค่าทีโอซีสูงกว่าค่าทีโอซีในน้ำที่ออกจากคอลัมน์ถ่านกัมมันต์ซี และดี และเมื่อกำหนดให้ในน้ำที่ออกจากคอลัมน์มีค่าทีโอซีเท่ากับ 6 มก./ล. เป็นเกณฑ์ พบว่า จะมีค่าทีโอซีเกิน 6 มก./ล. ที่ 190 ชั่วโมง หลังจากชั่วโมงที่ 190 ไปแล้วค่าทีโอซีของน้ำที่ออกมีค่าเพิ่มขึ้นอยู่ตลอดเวลา แต่สำหรับถ่านกัมมันต์ซี และดี พบว่าในช่วงระยะเวลา 540 ชั่วโมงแรก ความสามารถในการกำจัดทีโอซีที่เวลาสัมพัทธ์ทั้งสองมีความใกล้เคียงกัน แต่หลังจากชั่วโมงที่ 540



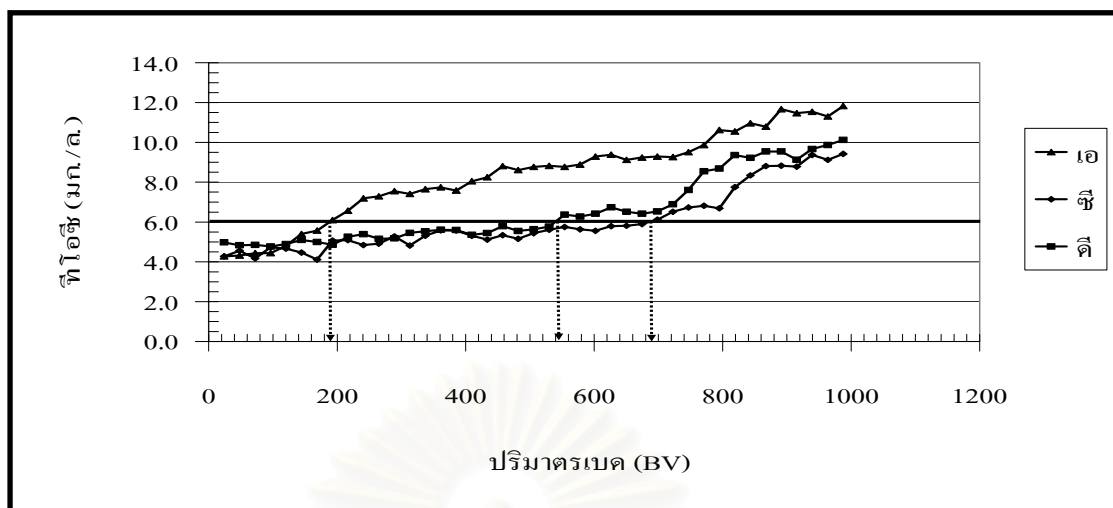
ก. คอลัมน์ก่อนการปกคลุมด้วยถุงดำ

ข. คอลัมน์ภายหลังจากการปกคลุมด้วยถุงดำ

รูปที่ 4.39 คอลัมน์ที่ใช้ทดสอบถ่านกัมมันต์ขนาดรูพรุนที่เหลือ 3 ขนาดรูพรุน



รูปที่ 4.40 ทีโอซีของน้ำที่ออกจากคอลัมน์ กับระยะเวลาการดำเนินการ



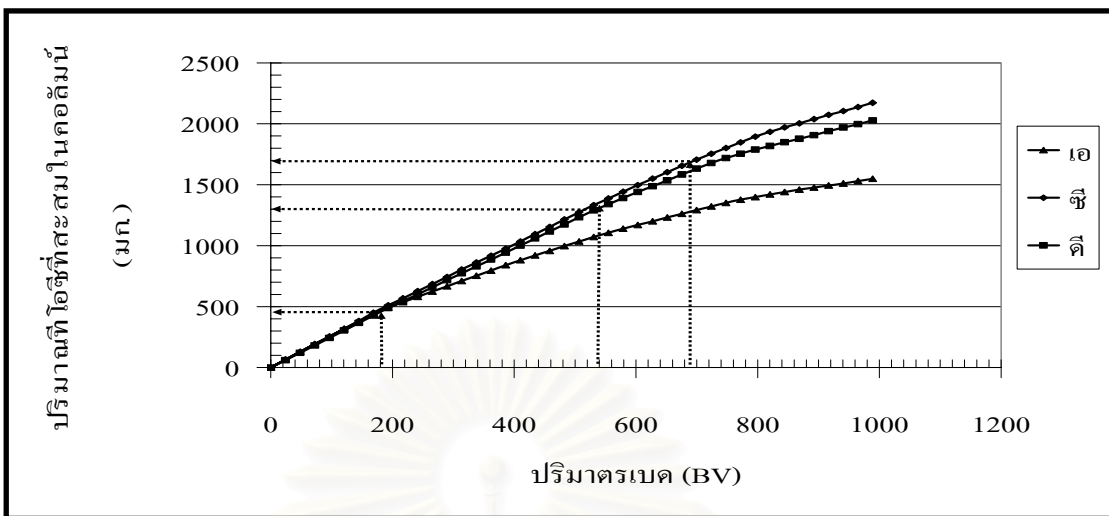
รูปที่ 4.41 ทีไอซีของน้ำที่ออกจากคอลัมน์ กับปริมาณเบด

ไปแล้ว ค่าทีไอซีของน้ำที่ออกจากคอลัมน์ถ่านกัมมันต์ซี มีค่าทีไอซีมากกว่าคอลัมน์ถ่านกัมมันต์ซี อย่างเห็นได้ชัด และมีค่าทีไอซีมากกว่า 6 มก./ล. ในขณะที่คอลัมน์ถ่านกัมมันต์ซียังคงมีค่าทีไอซี ต่ำกว่า 6 มก./ล. อยู่จนกระทั่งถึงชั่วโมงที่ 680 ค่าทีไอซีของน้ำที่ออกจากคอลัมน์มีค่ามากกว่า 6 มก./ล.

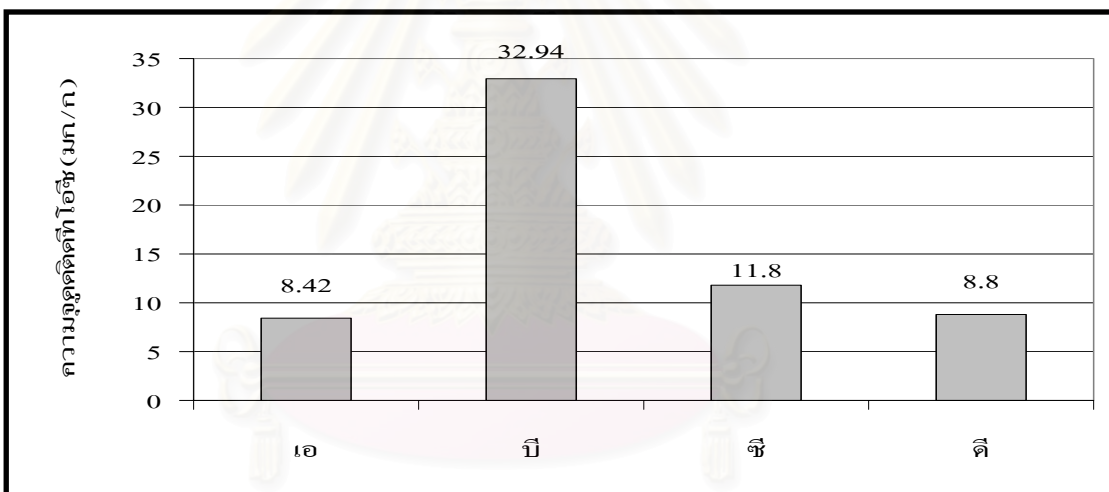
จากรูปที่ 4.41 ปริมาตรเบดในช่วงแรกจนถึงประมาณที่ 185 BV ทั้ง 3 คอลัมน์ มีปริมาณ ทีไอซีที่ออกจากคอลัมน์ใกล้เคียงกัน แต่หลังจากผ่านช่วง 185 BV ไปแล้ว ที่ถ่านกัมมันต์เอ มีค่า ทีไอซีที่ออกจากคอลัมน์เพิ่มขึ้นมาก จนมีค่ามากกว่าค่าทีไอซีที่ออกจากถ่านกัมมันต์ซี และดี สำหรับถ่านกัมมันต์ดี มีค่าทีไอซีของน้ำที่ออกใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์ซี ในช่วงแรกของปริมาตร น้ำจนกระทั่งที่ปริมาตรน้ำ 540 BV ค่าทีไอซีของน้ำที่ออกมีค่าสูงกว่าถ่านกัมมันต์ซี จากการ กำหนดให้ค่าทีไอซีของน้ำที่ออกจากคอลัมน์มีค่าไม่เกิน 6 มก./ล. ดังนั้นที่ปริมาตรเบด ณ ค่าทีไอซี มากกว่า 6 มก./ล ของถ่านกัมมันต์เอ ซี และดี เท่ากับ 185 540 และ 685 BV ตามลำดับ

ดังนั้นเมื่อพิจารณาปริมาตรเบดเทียบกับปริมาณทีไอซีที่สะสมอยู่ในคอลัมน์ดังแสดงในรูป ที่ 4.42 พบว่า คอลัมน์ของถ่านกัมมันต์เอ ซี และดี เมื่อมีค่าปริมาตรน้ำที่ให้ได้จนกระทั่งมีค่าทีไอซี เกินกว่า 6 มก./ล. จะมีปริมาณทีไอซีสะสมในคอลัมน์ เท่ากับ 490 1,700 และ 1,250 มก. (การคำนวณแสดงในภาคผนวก ฉ) ดังนั้นเมื่อพิจารณาถึงความสามารถในการกำจัดทีไอซี โดยดู จากค่ามวลของสารดูดซับต่อมวลของถ่านกัมมันต์เอ ซี และดี เท่ากับ 8.42 11.80 และ 8.80 มก./ก. ตามลำดับ หรือเมื่อเปรียบเทียบถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด ได้ดังรูปที่ 4.43 พบว่า ค่าความจุการ ดูดซับของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด มีแนวโน้มเดียวกันกับค่าความจุการดูดซับที่ได้จากการ ทดลองในแบบที่ละเท





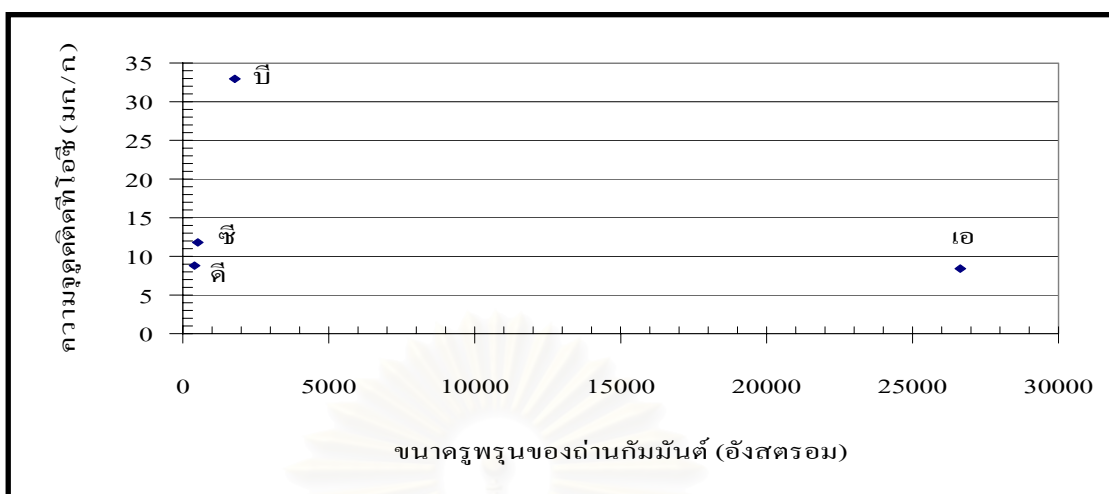
รูปที่ 4.42 ปริมาณที่ไอซีที่สะสมในคอลัมน์ของถ่านกัมมันต์เอ บี ซี และดี



รูปที่ 4.43 ค่าความจุดูดซับที่ไอซีของถ่านกัมมันต์เอ บี ซี และดีในการทดลองแบบคอลัมน์ จนกระทั่งค่าที่ไอซีของน้ำออกมีค่าเท่ากับ 6 มก./ล.

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดรูพรุน กับค่าความจุดูดซับผิวของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด ได้ดังรูปที่ 4.44 พบว่า เมื่อพิจารณาขนาดรูพรุนถ่านกัมมันต์บีให้ค่าความจุดูดซับที่ไอซีในแบบคอลัมน์ที่สูงมาก และสูงที่สุดในทั้ง 4 ชนิดของถ่านกัมมันต์ รวมทั้งขนาดรูพรุนของ ถ่านกัมมันต์เอ มีขนาดรูพรุนที่ค่อนข้างใหญ่มาก อยู่ในช่วงของขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์อื่นๆ นอกจากนี้ ถ่านกัมมันต์เอปัจจุบันไม่ได้มีการผลิตเพิ่มเติมแล้ว ดังนั้นในการเปรียบเทียบหาความสัมพันธ์จึงทำการเปรียบเทียบขนาดรูพรุนเฉพาะในช่วง 0 – 2,000 อังสตรอม ได้กราฟความสัมพันธ์ ดังแสดง





รูปที่ 4.44 ขนาดอนุพูนของถ่านกัมมันต์ กับค่าความจุจุดติดที่ไอซีของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด

ในรูปที่ 4.45 และจากกราฟจะได้รับความสัมพันธ์เป็นสมการเส้นตรงที่ 4.16 คือ

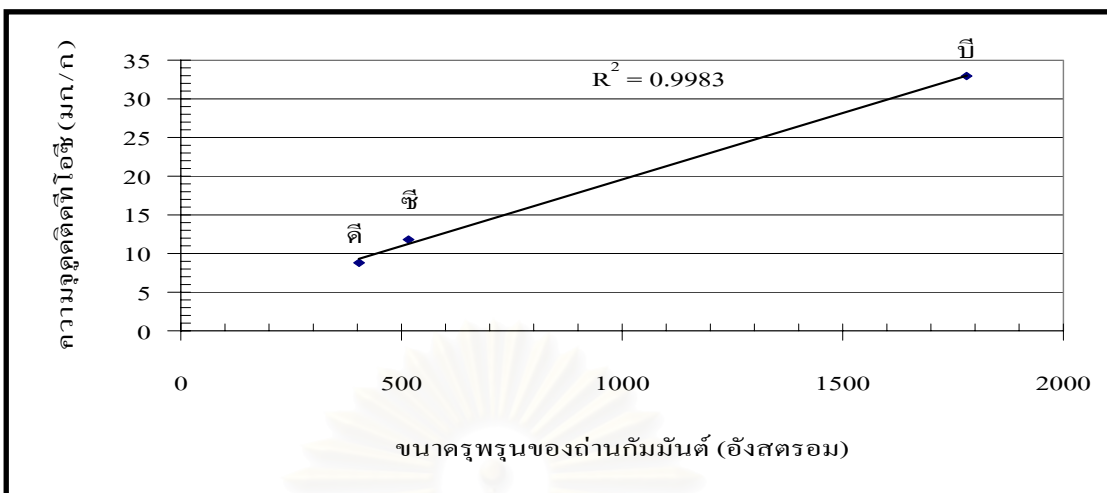
$$\begin{aligned} X/M_{\text{TOC}} &= 0.0174(A) + 2.012 & (4.16) \\ \text{เมื่อ } X/M_{\text{TOC}} &= \text{ค่าความจุจุดติดที่ไอซี (มก./ก.)} \\ A &= \text{ขนาดอนุพูนของถ่านกัมมันต์ (A')} \end{aligned}$$

พิจารณาค่า Regression ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับ 1 คือเท่ากับ 0.9966 ซึ่งแสดงแนวโน้มของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุจุดติดที่ไอซี กับขนาดอนุพูนในช่วง 0 – 2,000 ได้ดี

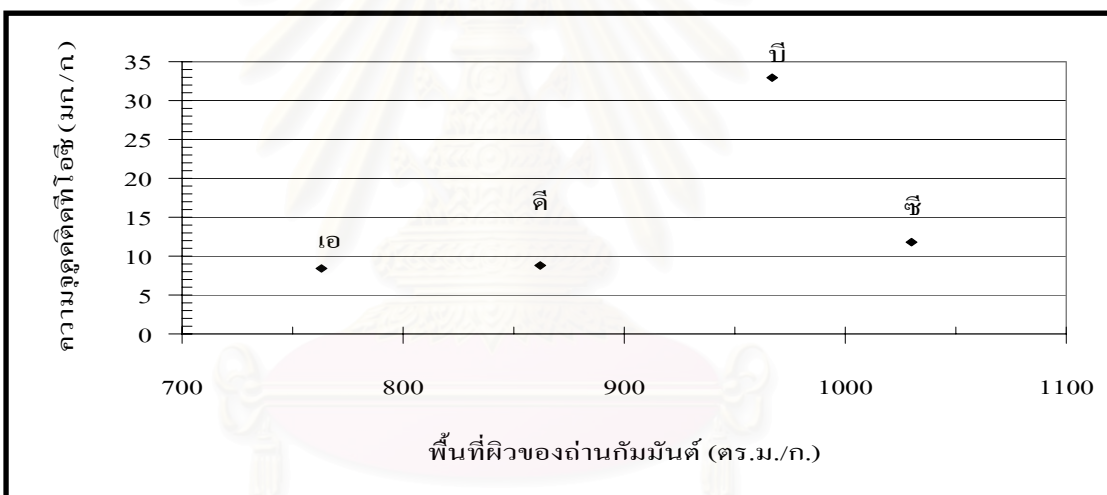
เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบพื้นที่ผิว กับค่าความจุจุดติดที่ไอซีในแบบคอลัมน์ของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด พบว่า ถ่านกัมมันต์บีเม็ดจะมีพื้นที่ผิวน้อยกว่าถ่านกัมมันต์ซี แต่ให้ค่าความจุจุดติดผิวสูงกว่าซีมาก เนื่องจากในการพิจารณาค่าความจุจุดติดผิวไม่ได้ขึ้นกับพื้นที่ผิวเพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นกับขนาดอนุพูนของถ่านกัมมันต์ด้วย ดังที่กล่าวมาแล้ว ดังนั้นจากกราฟรูปที่ 4.46 พบว่า พื้นที่ผิว กับค่าความจุจุดติดที่ไอซีไม่ได้แปรผันตามกันเสมอไป ควรมีการพิจารณาขนาดอนุพูน และพื้นที่ผิวไปพร้อมกัน

#### 4.7.2 การกำจัดซีไอดี

ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.47 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดีที่เหลืออยู่ในน้ำ ที่ออกจากคอลัมน์ เทียบกับระยะเวลาการดำเนินการ และรูปที่ 4.48 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างค่าซีไอดีที่เหลืออยู่ในน้ำ ที่ออกจากคอลัมน์ เทียบกับปริมาตรเบด



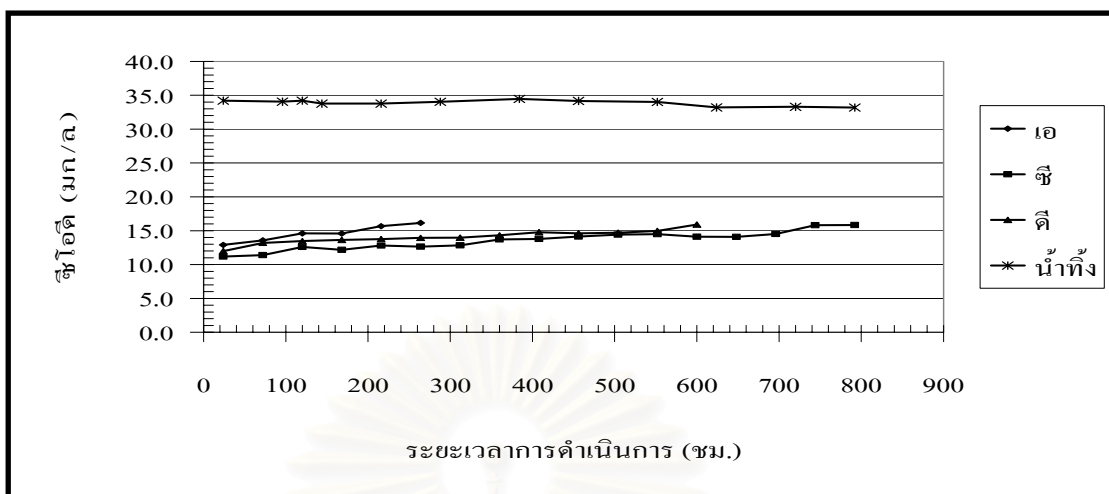
รูปที่ 4.45 ขนาดรูปพรุนในช่วง 0 – 2,000 อังสตรอม กับค่าความจุดูดซับที่ไอซี



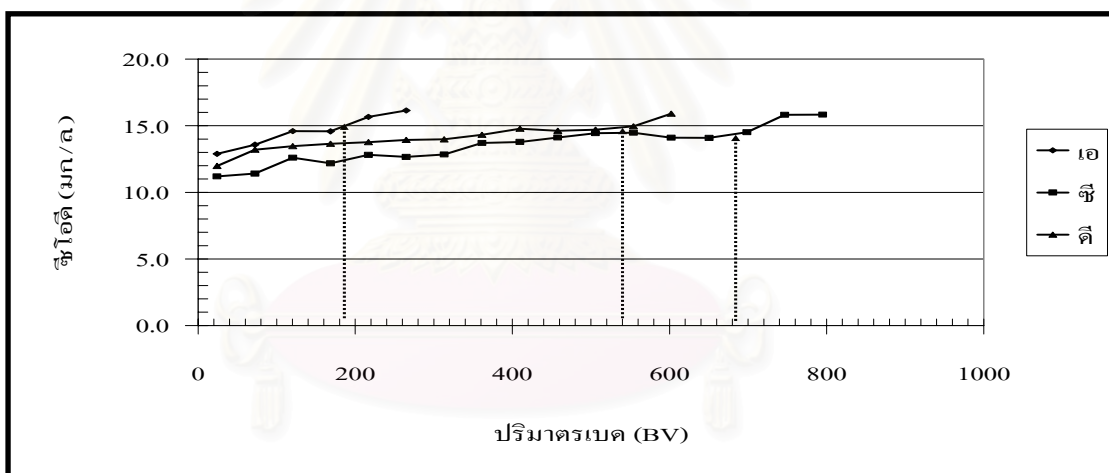
รูปที่ 4.46 พื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ กับค่าความจุดูดซับที่ไอซี

จากรูปที่ 4.47 พบว่า การกำจัด ซีไอดี ของคอลัมน์ทั้ง 3 คอลัมน์มีแนวโน้มเดียวกับการกำจัดที่ไอซี โดยที่คอลัมน์ของถ่านกัมมันต์เองจะมีปริมาณซีไอดีในน้ำออกมากกว่าปริมาณซีไอดีในน้ำออกของถ่านกัมมันต์ซี และดี ในทุก ๆ ชั่วโมงการดำเนินการ

จากรูปที่ 4.48 ปริมาตรเบคในช่วงแรกจนถึงประมาณที่ 185 BV ของถ่านกัมมันต์เอมีปริมาณซีไอดีที่ออกจากคอลัมน์มากกว่าถ่านกัมมันต์ซี และดี ไม่มากนัก แต่หลังจากผ่านช่วง 185 BV ไปแล้วถ่านกัมมันต์เอมีค่าซีไอดีที่ออกจากคอลัมน์เพิ่มขึ้นมาก สำหรับถ่านกัมมันต์ดีมีค่าซีไอดีของน้ำที่ออกใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์ซี ในช่วงแรกของปริมาตรน้ำจนกระทั่งที่ปริมาตรน้ำ 540 BV ค่าซีไอดีของน้ำที่ออกมีค่าสูงกว่าถ่านกัมมันต์ซีอย่างเห็นได้ชัดเมื่อพิจารณา ณ ปริมาตรเบคเดียวกัน



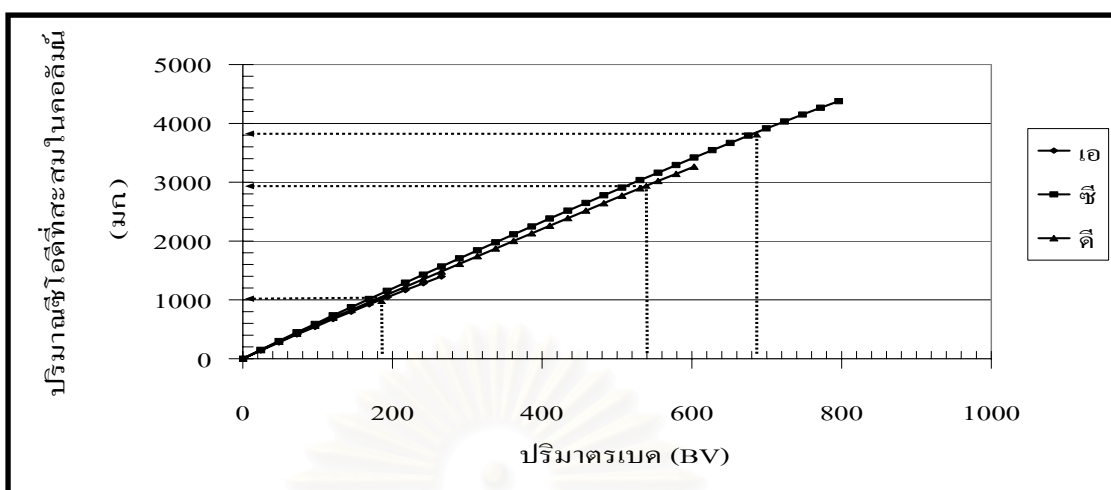
รูปที่ 4.47 ซีโอดีของน้ำที่ออกจากคอลัมน์ กับระยะเวลาการดำเนินการ  
จนกระทั่งน้ำออกมีค่าที่ไอซีมากกว่า 6 มก./ล.



รูปที่ 4.48 ซีโอดีของน้ำที่ออกจากคอลัมน์ กับปริมาตรเบด  
จนกระทั่งน้ำออกมีค่าที่ไอซีมากกว่า 6 มก./ล.

พบว่า ในทุกๆ ปริมาตรเบดของถ่านกัมมันต์เอมีค่าซีโอดีในน้ำออกสูงที่สุด และรองลงมาคือ ถ่านกัมมันต์ดี และซีตามลำดับ

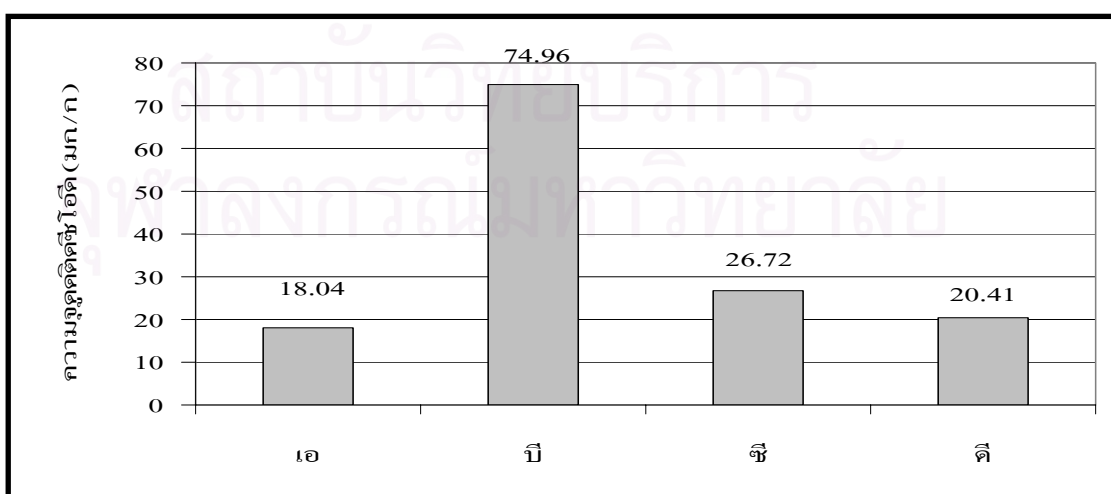
ดังนั้นเมื่อพิจารณาปริมาตรเบดเทียบกับปริมาณซีโอดีที่สะสมอยู่ในคอลัมน์ดังแสดงในรูปที่ 4.49 พบว่า ถ่านกัมมันต์เอ ซี และดี เมื่อมีค่าปริมาตรน้ำที่ให้ได้จนกระทั่งมีค่าที่ไอซีเกินกว่า 6 มก./ล. จะมีปริมาณซีโอดีสะสมในคอลัมน์ เท่ากับ 1,050 3,850 และ 2,900 มก. ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อพิจารณาถึงความสามารถในการกำจัดซีโอดี โดยดูจากค่ามวลของสารดูดติดผิวต่อมวลของถ่าน-



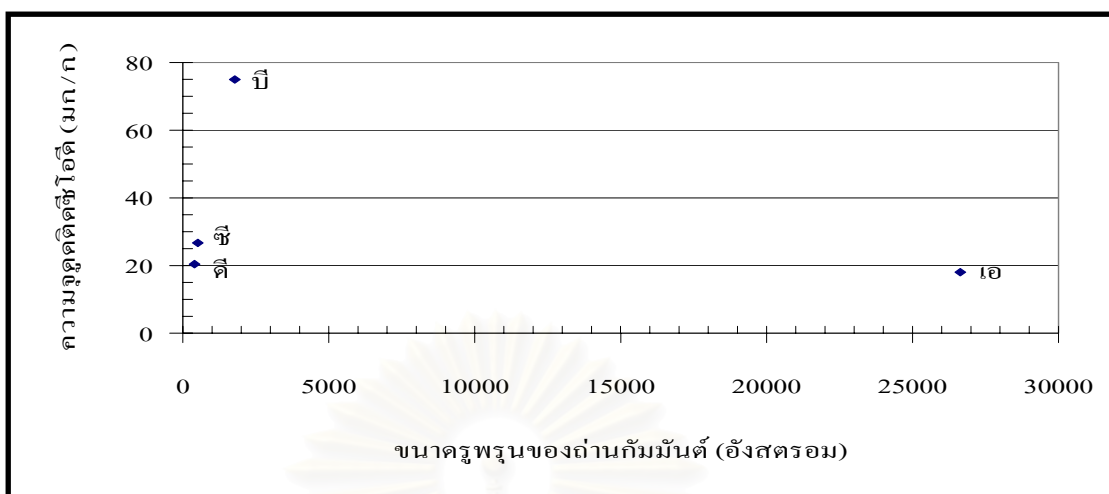
รูปที่ 4.49 ปริมาณซีไออดีที่สะสมในคอลัมน์ของถ่านกัมมันต์เอ ซี และดี

ถ่านกัมมันต์เอ ซี และดี ตามลำดับ เท่ากับ 18.04 26.72 และ 20.41 มก./ก. ตามลำดับ (การคำนวณแสดงในภาคผนวก ฉ) หรือเมื่อเปรียบเทียบถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด ได้ดังรูปที่ 4.50 พบว่า ค่าความจุการดูดซับซีไออดีของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด มีแนวโน้มเดียวกันกับค่าความจุการดูดซับซีไออดีในแบบคอลัมน์ที่สูงมาก และสูงที่สุดในทั้ง 4 ชนิดของถ่านกัมมันต์ รวมทั้งขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์เอมีขนาดรูพรุนที่ค่อนข้างใหญ่มาก ซึ่งมีขนาดรูพรุนที่อยู่นอกช่วงของขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์อื่น นอกจากนี้ถ่านกัมมันต์เอปัจจุบัน ไม่ได้มีการผลิตเพิ่มเติมแล้ว ดังนั้นในการเปรียบเทียบหา

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดรูพรุน กับค่าความจุการดูดซับซีไออดีของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด ดังแสดงในรูปที่ 4.51 พบว่า เมื่อพิจารณาขนาดรูพรุนถ่านกัมมันต์บีให้ค่าความจุการดูดซับซีไออดีในแบบคอลัมน์ที่สูงมาก และสูงที่สุดในทั้ง 4 ชนิดของถ่านกัมมันต์ รวมทั้งขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์เอมีขนาดรูพรุนที่ค่อนข้างใหญ่มาก ซึ่งมีขนาดรูพรุนที่อยู่นอกช่วงของขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์อื่น นอกจากนี้ถ่านกัมมันต์เอปัจจุบัน ไม่ได้มีการผลิตเพิ่มเติมแล้ว ดังนั้นในการเปรียบเทียบหา



รูปที่ 4.50 ค่าความจุการดูดซับซีไออดีของถ่านกัมมันต์เอ ซี และดีของการทดลองแบบคอลัมน์



รูปที่ 4.51 ขนาดรุกรุ่นของถ่านกัมมันต์ กับค่าความจุคุดคิตซีไอดีของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด

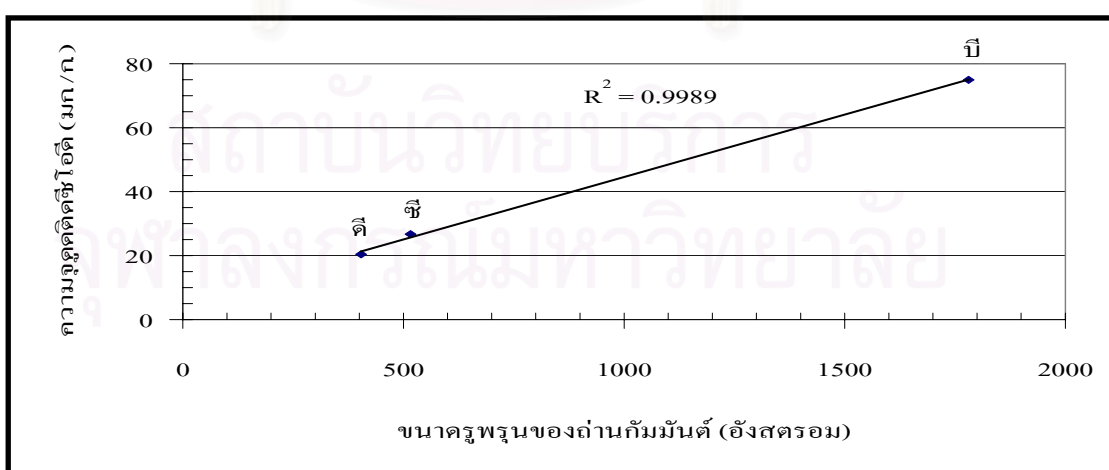
ความสัมพันธ์จึงทำการเปรียบเทียบขนาดรุกรุ่นเฉพาะในช่วง 0 - 2,000 อังกฤษ ได้กราฟความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 4.52 และจากกราฟได้ความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง สมการที่ 4.17 คือ

$$X/M_{\text{COD}} = 0.039(A) + 5.584 \quad (4.17)$$

เมื่อ  $X/M_{\text{COD}}$  = ค่าความจุคุดคิตซีไอดี (mg/L.)

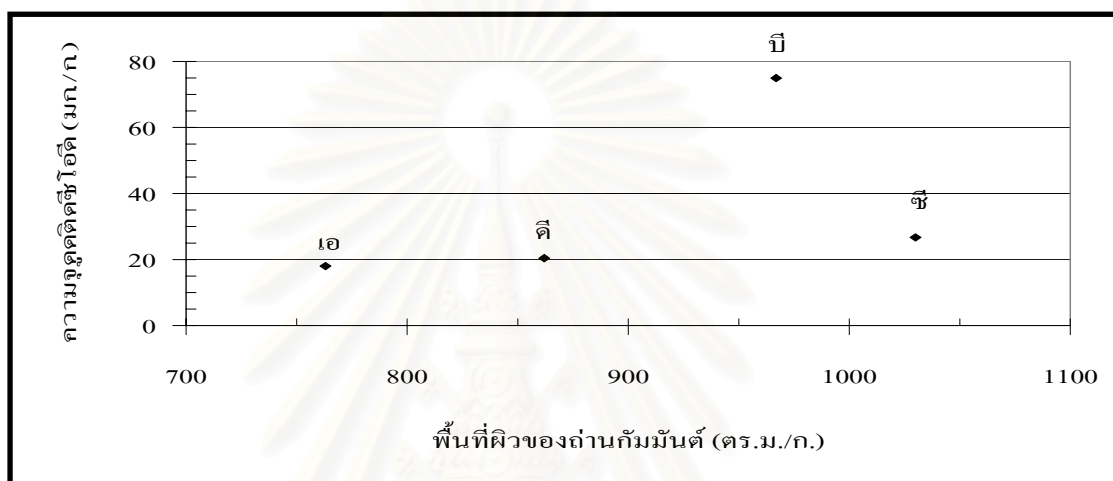
$A$  = ขนาดรุกรุ่นของถ่านกัมมันต์ ( $A^\circ$ )

พิจารณาค่า Regression ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับ 1 คือเท่ากับ 0.9989 ซึ่งแสดงแนวโน้มของความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุคุดคิตซีไอดี กับขนาดรุกรุ่นในช่วง 0-2,000 ได้ดี



รูปที่ 4.52 ค่าความจุคุดคิตซีไอดีในแบบคอลัมน์ กับขนาดรุกรุ่นในช่วง 0 - 2,000 อังกฤษ

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบพื้นที่ผิว กับค่าความจุจุดติดซีโอดีในแบบคอลัมน์ ของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด พบว่า ถ่านกัมมันต์บีแมนจะมีพื้นที่ผิวน้อยกว่าถ่านกัมมันต์ซี แต่ให้ค่าความจุจุดติดซีโอดีสูงกว่าซีมาก เนื่องจากการพิจารณาค่าความจุจุดติดผิวไม่ได้ขึ้นกับพื้นที่ผิวเพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นกับขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ด้วย ดังที่กล่าวมาแล้ว ดังนั้นจากกราฟรูปที่ 4.53 พบว่า พื้นที่ผิว กับค่าความจุจุดติดซีโอดีไม่ได้แปรผันตามกันเสมอไป ควรมีการพิจารณาขนาดรูพรุน และพื้นที่ผิวไปพร้อมกัน



รูปที่ 4.53 ค่าความจุจุดติดซีโอดีในแบบคอลัมน์กับพื้นที่ผิว

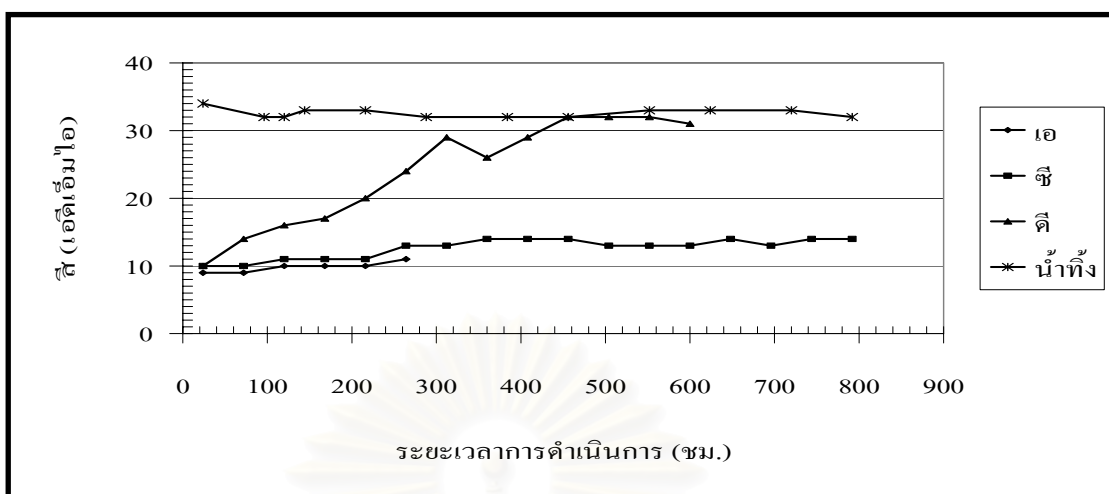
#### 4.7.3 การกำจัดสี

ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.54 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณสี ที่เหลืออยู่ในน้ำ ที่ออกจากคอลัมน์ เทียบกับระยะเวลาการดำเนินการ และรูปที่ 4.55 เป็นความสัมพันธ์ระหว่าง ปริมาณสีที่เหลืออยู่ในน้ำที่ออกจากคอลัมน์ เทียบกับปริมาตรเบด

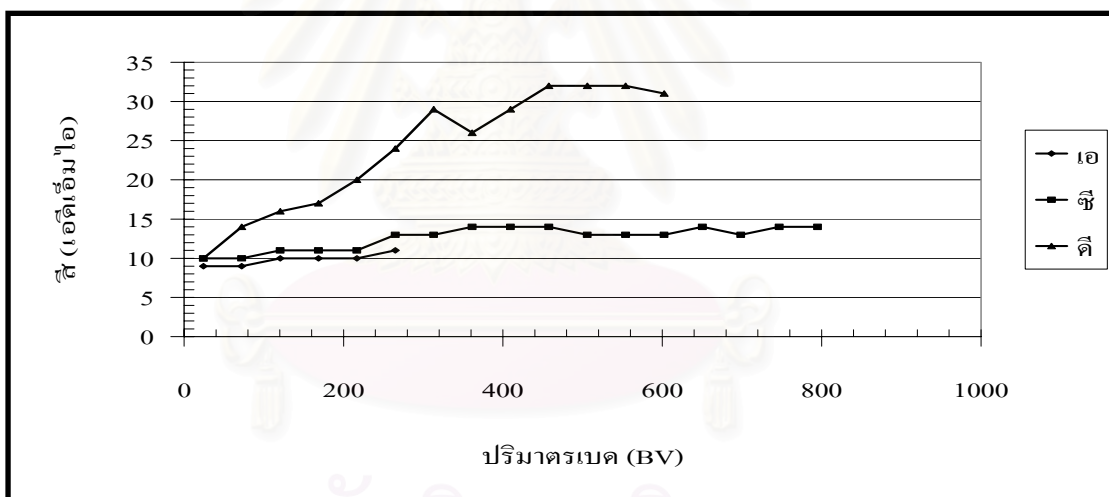
จากรูปที่ 4.54 พบว่าถ่านกัมมันต์ดีจะมีการหลุดออกของสีในน้ำที่ผ่านคอลัมน์เร็วกว่า ในถ่านกัมมันต์อื่น โดยมีการหลุดออกเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนมีค่าเข้าใกล้ปริมาณสีในน้ำเข้า จนกระทั่ง ที่ ชั่วโมงที่ 460 ถ่านกัมมันต์ดีมีปริมาณสีของน้ำที่ผ่านคอลัมน์เท่ากับปริมาณของสีในน้ำ ที่เข้าสู่คอลัมน์ แต่สำหรับถ่านกัมมันต์เอ และซีมีปริมาณของสีในน้ำที่ผ่านคอลัมน์ใกล้เคียงกัน โดยถ่านกัมมันต์ซีมีปริมาณสีในน้ำที่ผ่านคอลัมน์มากกว่าเล็กน้อย

จากรูปที่ 4.55 พบว่าถ่านกัมมันต์ดีจะให้ปริมาณเบดจนกระทั่งถ่านกัมมันต์ไม่สามารถ กำจัดสีได้อีก เมื่อปริมาตรเบดเท่ากับ 500 BV และในทุกๆ ปริมาตรน้ำพบว่า ถ่านกัมมันต์เอจะมีการ กำจัดสีได้มากกว่าถ่านกัมมันต์ซี ซึ่งในขณะที่ถ่านกัมมันต์เอจะมีการกำจัด ทีโอซี และซีโอดี ได้ น้อยกว่าถ่านกัมมันต์ซี



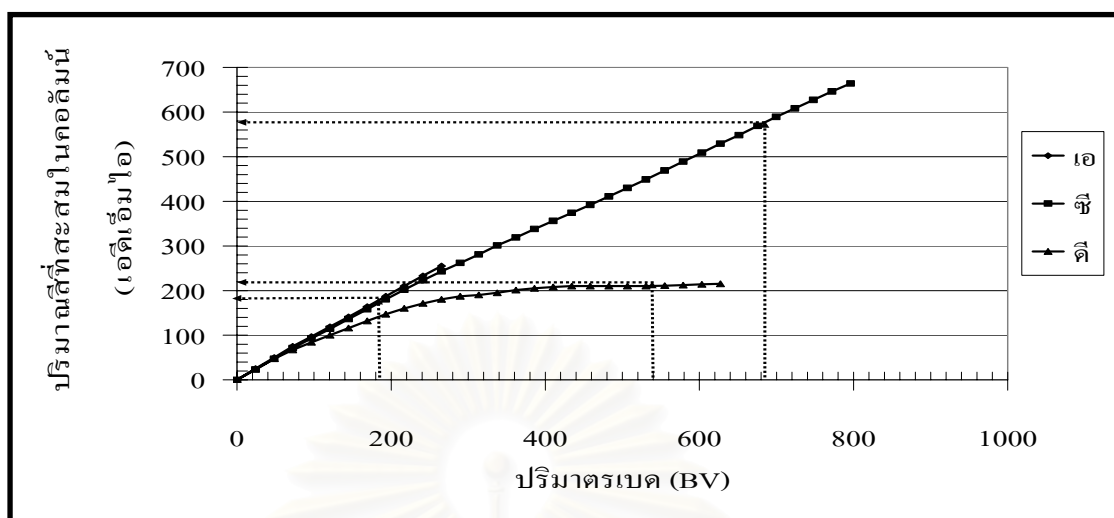


รูปที่ 4.54 ปริมาณสีของน้ำที่ออกจากคอลัมน์ กับระยะเวลาการดำเนินการ จนกระทั่งน้ำออกมีค่าที่ไอซีมากกว่า 6 มก./ล.



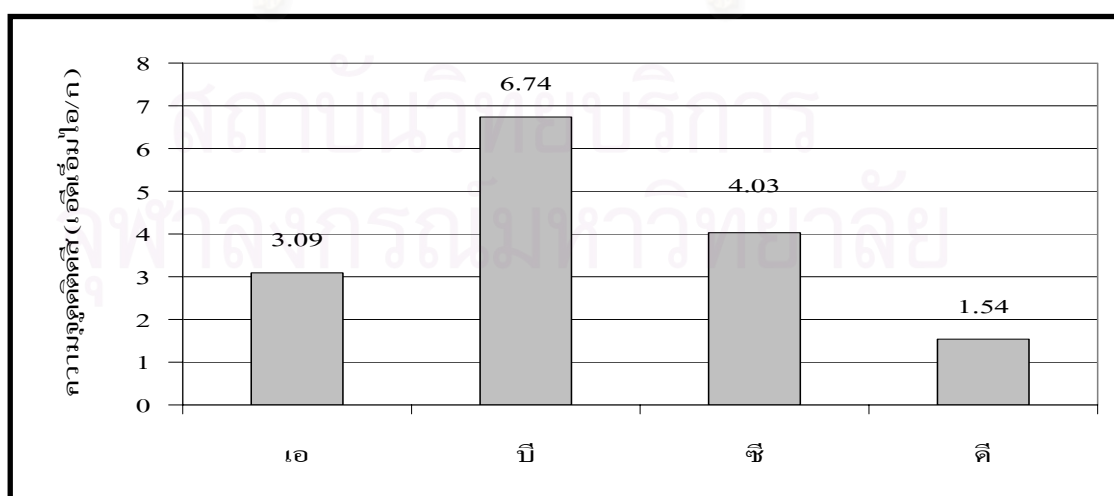
รูปที่ 4.55 ปริมาณสีของน้ำที่ออกจากคอลัมน์ กับปริมาณเบด จนกระทั่งน้ำออกมีค่าที่ไอซีมากกว่า 6 มก./ล.

ดังนั้นเมื่อพิจารณาปริมาณเบดเทียบกับปริมาณสีที่สะสมอยู่ในคอลัมน์ ดังแสดงในรูปที่ 4.56 พบว่า คอลัมน์ถ่านกัมมันต์เอ ซี และดี เมื่อมีค่าปริมาณน้ำที่ให้ได้จนกระทั่ง มีค่าที่ไอซีเกินกว่า 6 มก./ล. จะมีปริมาณสีสะสมในคอลัมน์ เท่ากับ 180 580 และ 220 เอดีเอ็มไอ ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อพิจารณาถึงความสามารถในการกำจัดสีโดยดูจากค่ามวลของสารดูดติดผิวต่อมวลของถ่านกัมมันต์เอ ซีและดี เท่ากับ 3.09 4.03 และ 1.54 เอดีเอ็มไอ/ก. ตามลำดับ (การคำนวณแสดงใน



รูปที่ 4.56 ปริมาณสีที่สะสมในคอลัมน์ของถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิด

ภาคผนวก ฉ) หรือเมื่อเปรียบเทียบถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด ได้ดังรูปที่ 4.57 พบว่า ค่าความจุการดูดซับของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด ถ่านกัมมันต์บีมีค่าความจุดูดซับสีในแบบคอลัมน์สูงกว่าถ่านกัมมันต์เอ แต่ในแบบที่ละเทถ่านกัมมันต์เอจะให้ค่าความจุดูดซับสีสูงที่สุด เนื่องจาก ฉ ปริมาณน้ำที่ทำให้ค่าที่ไอซีของน้ำ ที่ออกจากคอลัมน์ของถ่านกัมมันต์เอให้ปริมาณน้ำที่ออก ฉ ค่าที่ไอซีเกิน 6 มก./ล. น้อยกว่าในคอลัมน์ของถ่านกัมมันต์บี ในขณะที่ถ่านกัมมันต์เอยังคงมีความสามารถในการดูดซับสีได้อีก ดังนั้นเป็นผลให้ ฉ ปริมาณน้ำที่เบรคทुरु (มีค่าที่ไอซีเกินกว่า 6 มก./ล.) ถ่านกัมมันต์เอจะให้ค่าความจุดูดซับสีต่ำกว่าถ่านกัมมันต์บี

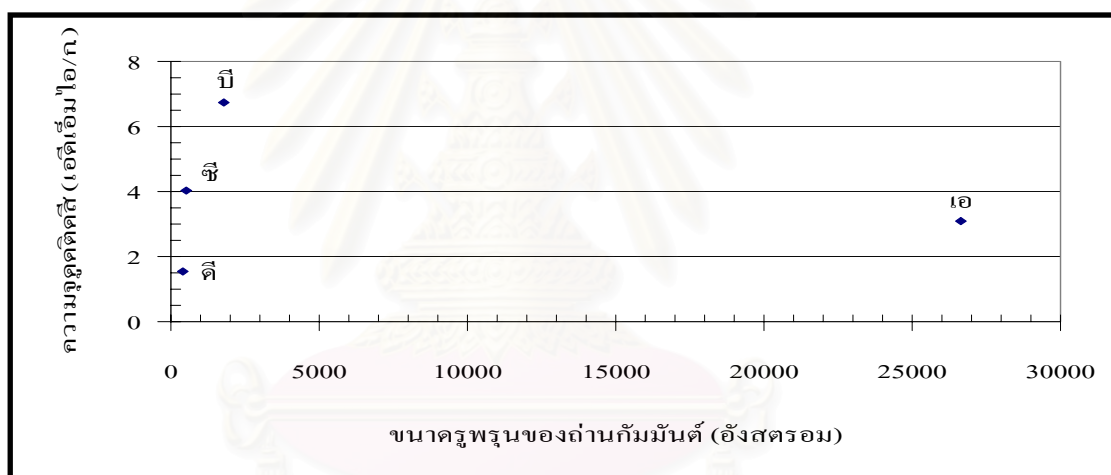


รูปที่ 4.57 ค่าความจุดูดซับสีของถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิด ในการทดลองแบบคอลัมน์

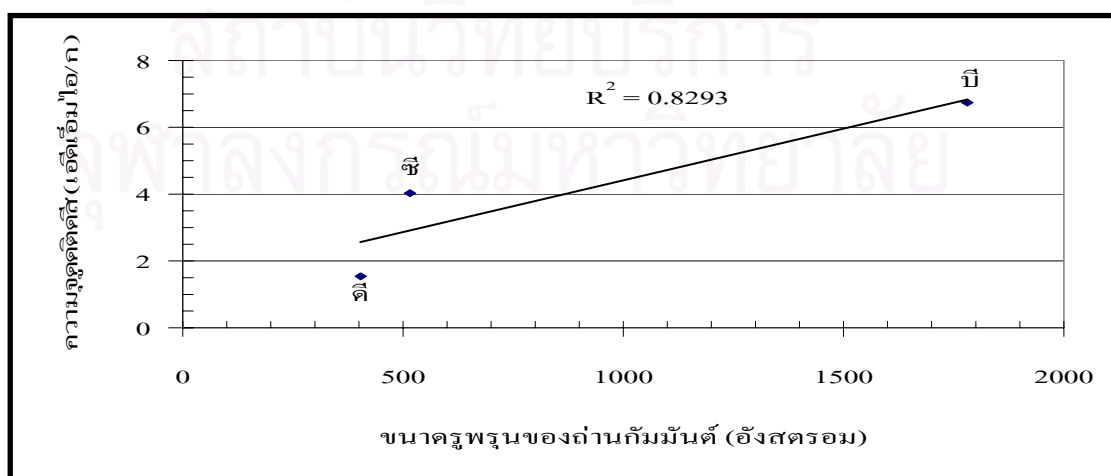
เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างขนาดรูพรุน กับค่าความจุคูดิตติพิวของถ่านกัมมันต์ ทั้ง 4 ชนิด ได้ดังรูปที่ 4.58 พบว่า เมื่อพิจารณาขนาดรูพรุนถ่านกัมมันต์เอมีขนาดรูพรุนที่ค่อนข้างใหญ่มากอยู่นอกช่วงของขนาดรูพรุนถ่านกัมมันต์อื่น นอกจากนี้ถ่านกัมมันต์เอปัจจุบันไม่ได้มีการผลิตเพิ่มเติมแล้ว ดังนั้นในการเปรียบเทียบหาความสัมพันธ์จึงทำการเปรียบเทียบขนาดรูพรุนเฉพาะในช่วง 0 – 2,000 อังสตรอม ได้กราฟความสัมพันธ์ดังแสดงในรูปที่ 4.59 และจากกราฟ จะได้ความสัมพันธ์เป็นสมการเส้นตรงที่ 4.18 คือ

$$\begin{aligned} X/M_{\text{Color}} &= 0.0031 (A) + 1.3149 & (4.18) \\ \text{เมื่อ } X/M_{\text{Color}} &= \text{ค่าความจุคูดิตติ (เอดีเอ็มไอ/ก.)} \\ A &= \text{ขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ (Å)} \end{aligned}$$

พิจารณาค่า Regression ที่ได้มีเท่ากับ 0.8293 ซึ่งแสดงแนวโน้มของความสัมพัทธ์ระหว่างค่าความจุคูดิตติกับขนาดรูพรุนในช่วง 0 – 2,000 ได้ดีพอใช้

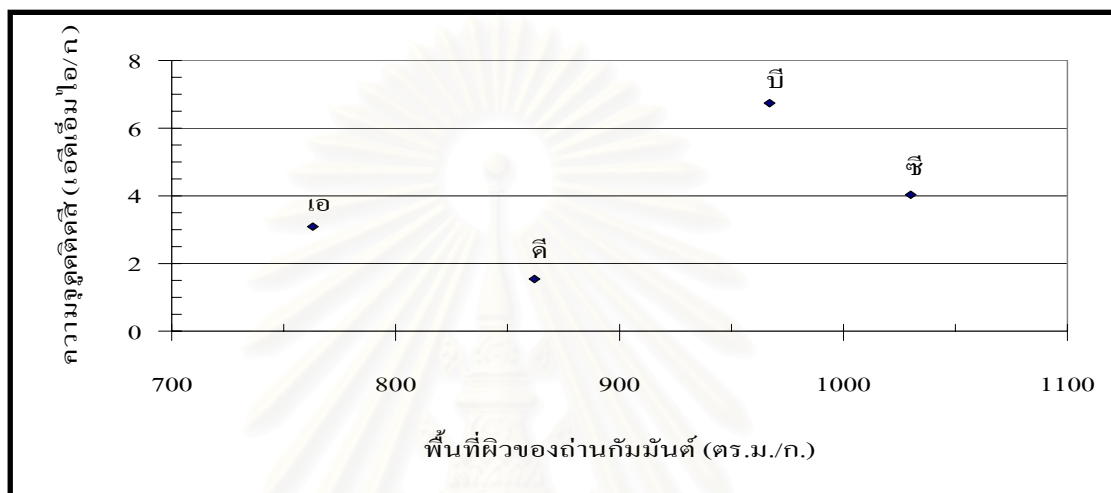


รูปที่ 4.58 ขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ กับค่าความจุคูดิตติของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด



รูปที่ 4.59 ค่าความจุคูดิตติในแบบคอลัมน์ กับขนาดรูพรุนในช่วง 0 – 2,000 อังสตรอม

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบพื้นที่ผิว กับค่าความจุดูดติดสีในแบบคอลัมน์ ของถ่านกัมมันต์ ทั้ง 4 ชนิด ดังรูปที่ 4.60 พบว่า ค่าความจุดูดติดสีในแบบคอลัมน์ของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด ไม่ได้แปรผันตามกัน เนื่องจากการพิจารณาค่าความจุดูดติดสีต่าง ๆ ไม่ได้ขึ้นกับพื้นที่ผิว อย่างเดียว แต่ขึ้นกับขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์ด้วย และหากพิจารณาในแบบคอลัมน์จะพบว่า ขึ้นกับปริมาตรน้ำ ณ จุดที่ทำให้เกิดเบรคทฤษฎีด้วยเช่นเดียวกัน จากที่กล่าวแล้วข้างต้น

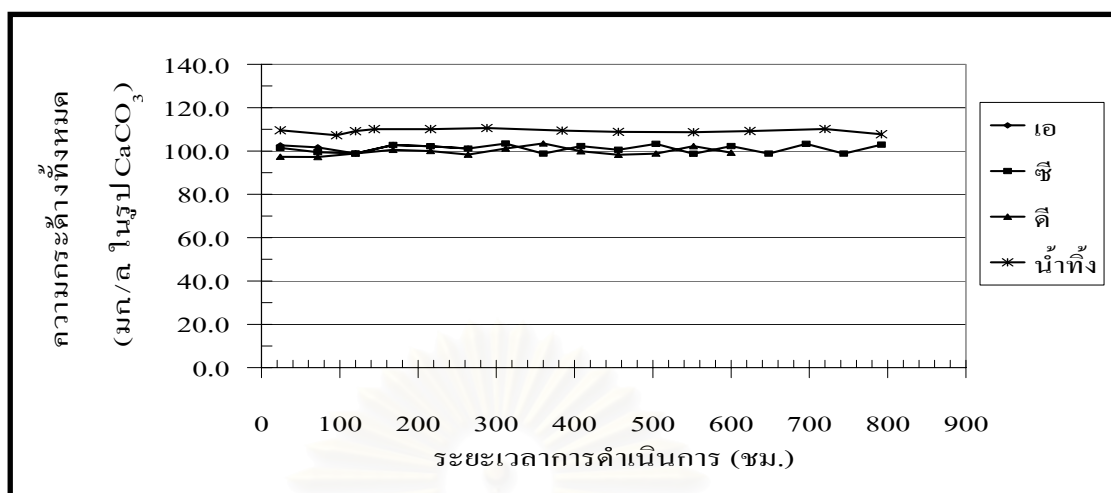


รูปที่ 4.60 ค่าความจุดูดติดสีในแบบคอลัมน์ กับพื้นที่ผิว

ดังนั้นจากค่าความจุดูดติด ที่ไอซี ซีไอดี และสีแบบคอลัมน์ของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิด พบว่า ค่าความจุการดูดติดสีในแบบคอลัมน์มีแนวโน้มเดียวกับค่าความจุการดูดติดสีในแบบกะยกเว้นความจุดูดติดสี เนื่องจากถ่านกัมมันต์เอให้ปริมาตรน้ำที่ผ่านคอลัมน์ ณ จุดเบรคทฤษฎีน้อยกว่า ถ่านกัมมันต์อื่นมาก แต่เมื่อพิจารณาถ่านกัมมันต์ที่ให้ค่าความจุดูดติด ที่ไอซี ซีไอดี และสีสูงอยู่นั้น ยังคงเป็นถ่านกัมมันต์บี เนื่องจากมีขนาดรูพรุนที่ใหญ่ พร้อมทั้งมีพื้นที่ผิวสูงตามไปด้วย

#### 4.7.4 การกำจัดความกระด้าง (Total Hardness)

ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.61 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความกระด้างที่เหลืออยู่ในน้ำที่ออกจากคอลัมน์ เทียบกับระยะเวลาการดำเนินการ พบว่า ปริมาณความกระด้างของน้ำที่ออกจากคอลัมน์ในทุกขนาดรูพรุนของถ่านกัมมันต์มีค่าไม่แตกต่างกัน รวมทั้งเมื่อระยะเวลาการดำเนินการเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ไม่พบว่ามีค่าเพิ่มขึ้น หรือลดลงของปริมาณความกระด้างของน้ำออก และเมื่อพิจารณาค่าความกระด้างของน้ำที่เข้าสู่คอลัมน์ พบว่า คอลัมน์ทั้ง 3 คอลัมน์ มีการกำจัดความกระด้างได้เพียงเล็กน้อย เช่นเดียวกับผลการทดลองของถ่านกัมมันต์บี ในทุกระยะเวลาสัมผัส



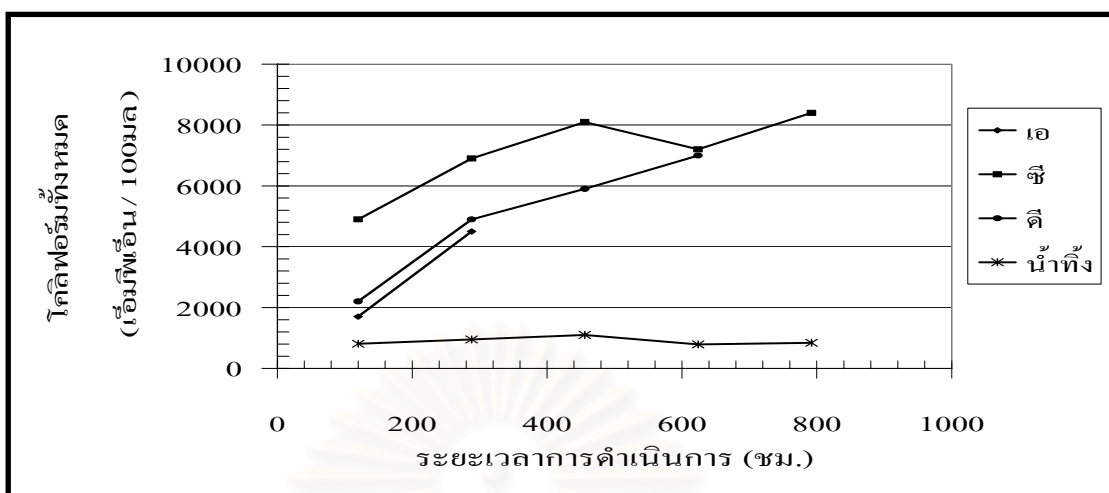
รูปที่ 4.61 ปริมาณความกระด้าง เทียบกับระยะเวลาการดำเนินงาน

#### 4.7.5 ปริมาณโคลิฟอร์มทั้งหมด (Total Coliform)

ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.62 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณโคลิฟอร์มทั้งหมดในน้ำออก เทียบกับระยะเวลาการดำเนินการ พบว่า เมื่อระยะเวลาการดำเนินการเพิ่มมากขึ้น ปริมาณโคลิฟอร์มทั้งหมดของน้ำที่ออกจากคอลัมน์มีปริมาณเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่องในทุกคอลัมน์ของถ่านกัมมันต์ รวมทั้งเมื่อเปรียบเทียบปริมาณโคลิฟอร์มในน้ำออก กับน้ำเข้าสู่คอลัมน์ พบว่า ในน้ำออกมีปริมาณโคลิฟอร์มสูงกว่าปริมาณในน้ำเข้า แสดงได้ว่าการเจริญเติบโตของโคลิฟอร์มในทุกคอลัมน์ของถ่านกัมมันต์ เนื่องจากคอลัมน์ทั้ง 3 มีระยะเวลาที่เก็บน้ำไว้ในคอลัมน์ 60 นาที ทำให้โคลิฟอร์มในน้ำทิ้งสามารถเจริญเติบโต เพิ่มจำนวนมากขึ้นกว่าน้ำทิ้งที่เข้าสู่คอลัมน์ได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการฆ่าเชื้อโรคของน้ำที่ออกจากคอลัมน์ถ่านกัมมันต์ก่อนนำไปใช้จริง

เมื่อพิจารณาปริมาณโคลิฟอร์มที่เพิ่มขึ้นมากในน้ำที่ผ่านออกจากคอลัมน์ อาจทำให้เกิดการย่อยสลายทางชีวภาพได้บ้าง แต่จากเหตุผลดังที่ได้กล่าวมาแล้ว แสดงได้ว่า กลไกที่เกิดขึ้นเพื่อลดปริมาณสารอินทรีย์ในคอลัมน์คือ กลไกการดูดซับของถ่านกัมมันต์เป็นหลัก

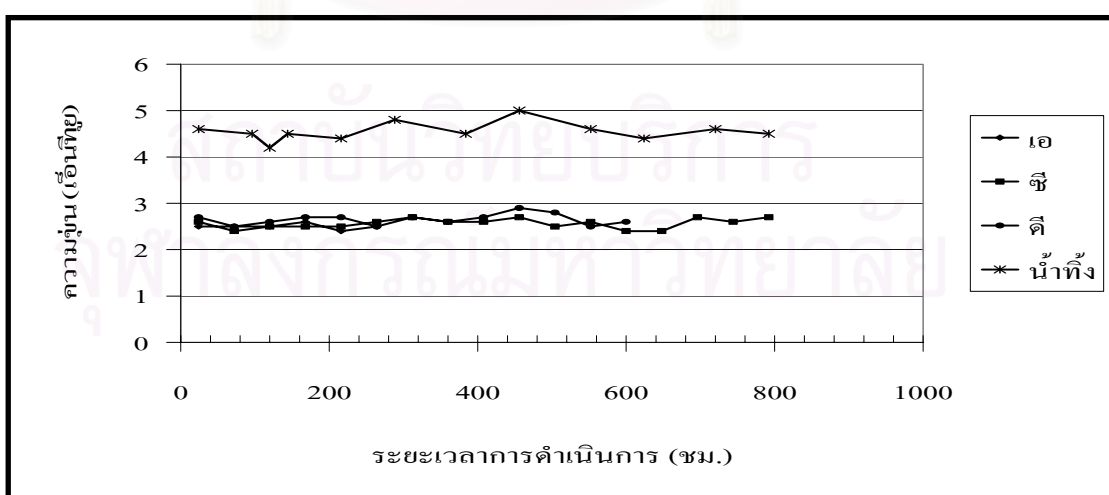
นอกจากนี้พบว่า ปริมาณโคลิฟอร์มที่เพิ่มขึ้นจะแปรผันตามพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ (พื้นที่ผิวมากที่สุดคือ ถ่านกัมมันต์ซี รองลงมาคือ ถ่านกัมมันต์ดี และเอ ตามลำดับ) คาดว่า เมื่อผ่านน้ำทิ้งเข้าสู่คอลัมน์ โคลิฟอร์มในน้ำทิ้งจะสามารถเกาะติดอยู่กับถ่านกัมมันต์ภายในคอลัมน์ได้ เป็นผลให้หากถ่านกัมมันต์ที่มีพื้นที่ผิวสูง โคลิฟอร์มจะมีโอกาสเกาะติดบนถ่านกัมมันต์ และเจริญเติบโตเพิ่มจำนวนมากขึ้นได้ เมื่อระยะเวลาดำเนินการนานขึ้น โคลิฟอร์มที่เกาะติดจะเกิดการหลุดออก และมีการหลุดออกอย่างต่อเนื่อง ทั้งนี้เนื่องจากโคลิฟอร์มที่เกาะติดเริ่มมีการตายเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 4.62 ปริมาณโคลิฟอร์มทั้งหมด เทียบกับระยะเวลาการดำเนินงาน

#### 4.7.6 การกำจัดความขุ่น

ผลการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.63 เป็นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณความขุ่นในน้ำออก เทียบกับระยะเวลาการดำเนินงาน พบว่า ถ่านกัมมันต์เอ ซี และดี มีปริมาณความขุ่นในน้ำที่ออกใกล้เคียงกันค่อนข้างมาก เมื่อพิจารณา ณ จุดที่น้ำผ่านคอลัมน์ให้ค่าที่ไอซีมากกว่า 6 มก./ล. พบว่า ที่ชั่วโมงที่ 200 ของคอลัมน์ถ่านกัมมันต์เอ ถึงแม้จะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดที่ไอซีได้ต่ำลง แต่ยังคงมีประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นที่ใกล้เคียงถ่านกัมมันต์ซี เช่นเดียวกับถ่านกัมมันต์ดี ซึ่งกลไกการกำจัดความขุ่นคือ กลไกการกรองเช่นกัน



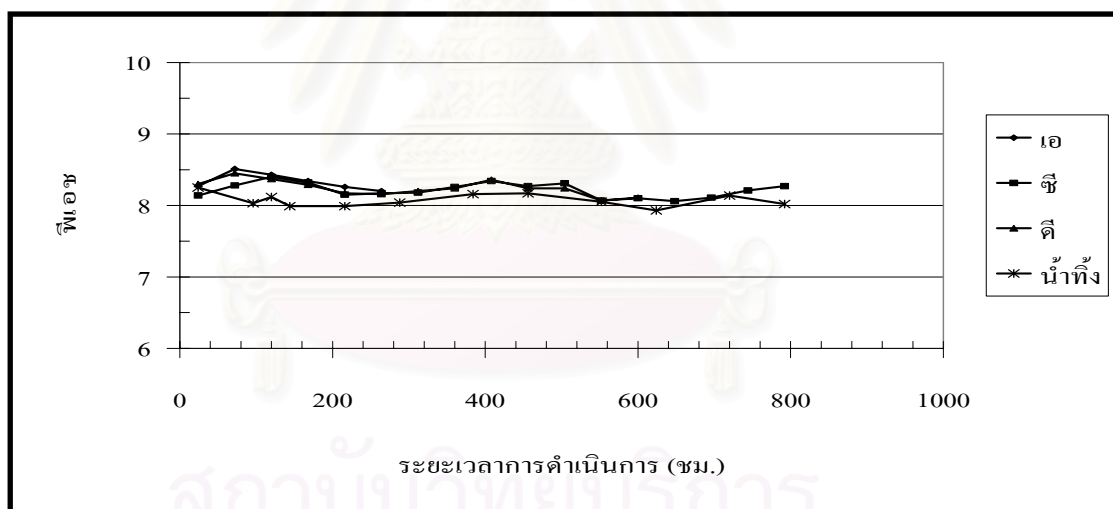
รูปที่ 4.63 ปริมาณความขุ่น เทียบกับระยะเวลาการดำเนินงาน



ดังนั้น หากพิจารณาในด้านของการกำจัดความขุ่น ถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ชนิดให้ประสิทธิภาพในการกำจัดความขุ่นได้ใกล้เคียงกัน และเมื่อพิจารณาถึงการนำไปใช้งานในกระบวนการชักรีด พบว่า ลักษณะน้ำดิบที่ใช้ในการชักรีดมีค่าความขุ่นประมาณ 2 เอ็นทียู และลักษณะน้ำที่ผ่านคอลัมน์ถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 คอลัมน์ มีค่าความขุ่นประมาณ 2.5 เอ็นทียู ดังนั้นค่าความขุ่นของน้ำที่ผ่านการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ทั้ง 3 ขนาดรูพรุนมีค่าใกล้เคียงกับค่าความขุ่นของน้ำดิบ ทำให้หากนำน้ำเหล่านี้ไปใช้ใหม่ในการชักรีด จึงไม่น่าเกิดปัญหาเกี่ยวกับการชักรีด

#### 4.7.7 พีเอช

ค่าพีเอชตลอดการทดลองแสดงดังรูปที่ 4.64 พบว่า ค่าพีเอชของน้ำที่ออกมีค่าสูงกว่าพีเอชของน้ำเข้าเล็กน้อย เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีความเป็นเบสเล็กน้อย และน้ำทิ้งที่ทำการทดลองไม่ได้มีการใส่บัพเฟอร์ แต่หากพิจารณาถึงลักษณะของน้ำที่นำไปใช้ในการชักรีด โรงงานชักรีดส่วนใหญ่จะมีการปรับพีเอชของน้ำก่อนนำไปใช้ชักรีดให้มีค่าประมาณ 7 ก่อน ดังนั้นค่าพีเอชที่เพิ่มขึ้นมีค่าเฉลี่ยอยู่ประมาณ 8 ทำให้อาจต้องมีการปรับค่าพีเอชเล็กน้อยก่อนนำไปชักรีดต่อไป



รูปที่ 4.64 พีเอช เทียบกับระยะเวลาในการดำเนินการ

ดังนั้นจากผลการทดลองในแบบคอลัมน์พบว่า หากกำหนดให้น้ำออกมีค่าที่ไอซีสูงสุดได้ไม่เกิน 6 มก./ล. ถ่านกัมมันต์บีจะให้ค่าความจุดูดติด ที่ไอซี, ซีไอดี และสีสูงกว่าถ่านกัมมันต์อื่น เนื่องจากเป็นถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดรูพรุนที่ใหญ่เหมาะสม (1,781 อังสตรอม) กับลักษณะของน้ำทิ้ง โรงงานชักรีด ในขณะที่มีพื้นที่ผิวที่สูงตามไปด้วย รวมทั้งเมื่อพิจารณาพารามิเตอร์อื่น เช่น ความขุ่น ความกระด้าง และคลอริฟอร์มทั้งหมด จะมีค่าใกล้เคียงกับถ่านกัมมันต์อื่น แต่เมื่อพิจารณาถึงลักษณะน้ำดิบของโรงงานชักรีดพบว่า ค่าความขุ่น และความกระด้างของน้ำดิบ

กับลักษณะของน้ำที่ผ่านการบำบัดด้วยถ่านกัมมันต์มีค่าใกล้เคียงกัน เป็นผลให้หากนำไปใช้ใหม่ในการซักกรีดไม่น่าก่อให้เกิดผลกระทบต่อการใช้กรีด แต่ปริมาณของโคลิฟอร์มทั้งหมดนั้นมีปริมาณที่สูงมาก ดังนั้น หากจะนำถ่านกัมมันต์ไปใช้ในระบบการนำน้ำที่โรงงานซักกรีดกลับมาใช้ใหม่จริง ควรมีระบบการฆ่าเชื้อโรคเพิ่มเติมต่อจากกระบวนการดูดติดผิวด้วยถ่านกัมมันต์แบบเกลือ เพื่อเป็นการลดปริมาณโคลิฟอร์มทั้งหมดในน้ำ ทำให้เมื่อนำน้ำเหล่านั้นไปใช้ใหม่จะไม่ก่อให้เกิดโรค หรือผลร้ายต่อผู้ซัก และผ้าที่ทำการซักด้วย นอกจากนี้พบว่า ถ่านกัมมันต์บีจะเป็นถ่านกัมมันต์ที่ให้ปริมาณเบคได้มากที่สุด (1,800 BV) รองลงมาคือ ถ่านกัมมันต์ซี ดี และเอ ตามลำดับ แสดงได้ว่า ระยะเวลาของถ่านกัมมันต์ที่ต้องทำการเปลี่ยนเมื่อหมดสภาพ ในการดูดติดถ่านกัมมันต์บีจะมีระยะเวลาในการใช้ถ่านกัมมันต์นานที่สุด ทำให้เมื่อเปรียบเทียบทางด้านเศรษฐศาสตร์พบว่า ถ่านกัมมันต์บีจะมีค่าการดำเนินงาน และบำรุงรักษาต่ำกว่าถ่านกัมมันต์อื่น ดังนั้นถ่านกัมมันต์บีที่น่าจะมีความเหมาะสมในการนำไปใช้งานจริง และกำหนดให้ระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 60 นาที คือถ่านกัมมันต์บี (ขนาดรูพรุนเท่ากับ 1,781 อังสตรอม)

#### 4.8 ประเมินค่าใช้จ่ายในการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้ง และพิจารณาความเหมาะสมของระบบในการนำมาใช้งานจริง

จากผลการทดลองพบว่า ถ่านกัมมันต์บี ขนาดรูพรุน 1,781 อังสตรอม และมีพื้นที่ผิวเท่ากับ 967 ตร.ม./ก. ที่ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที เมื่อกำหนดให้น้ำที่ออกมีค่าที่ไอซีได้มากที่สุด 6 มก./ล. จะสามารถให้ปริมาณเบคได้มากที่สุด (1,800 BV) ในขณะที่ระยะเวลาสัมผัส 15 และ 30 นาที ให้ปริมาณเบคได้เพียง 400 และ 800 BV เท่านั้น เห็นได้ชัดว่าที่ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที ให้ปริมาณเบคได้มากกว่าค่อนข้างมาก

ดังนั้นเมื่อพิจารณาในด้านเศรษฐศาสตร์พบว่า ที่ระยะเวลาสัมผัส 15 และ 30 นาที จะมีราคาค่าการบำรุงรักษา และค่าการดำเนินการสูงกว่าที่ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที เนื่องจากต้องมีการเปลี่ยนถ่านกัมมันต์ภายในคอลัมน์บ่อยครั้ง เป็นผลให้ต้องเสียค่าใช้จ่ายจำนวนมากในการซื้อถ่านกัมมันต์ใหม่ แต่เมื่อพิจารณาในด้านราคาต้นทุนการก่อสร้างคอลัมน์ พบว่า หากต้องการให้ที่ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที สามารถให้ปริมาณน้ำที่ออกได้เพิ่มมากขึ้น อาจต้องมีการเพิ่มขนาดคอลัมน์ เป็นผลให้ราคาต้นทุนสูงขึ้นได้ แต่จะสามารถลดราคาค่าการบำรุงรักษา และค่าใช้จ่ายในการซื้อถ่านกัมมันต์มาเปลี่ยนบ่อยครั้งได้ ซึ่งเป็นการลดราคาค่าใช้จ่ายรายปีของระบบได้เป็นอย่างดี ดังนั้นจากการพิจารณาพบว่า ที่ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที จึงเป็นระยะเวลาสัมผัสที่มีความเหมาะสมมากที่สุดในการนำมาใช้งานจริง

เมื่อพิจารณาด่านกัมมันต์เอ ซี และดี จะให้ปริมาตรเบดเท่ากับ 185 540 และ 685 BV ตามลำดับ เป็นผลให้ด่านกัมมันต์บี สามารถให้ปริมาตรเบดจนกระทั่งที่ไอซีน้ำออกมากกว่า 6 มก./ล. ได้มากที่สุด

ดังนั้นเมื่อพิจารณาในด้านราคาด่านกัมมันต์ในท้องตลาดพบว่า ราคาด่านกัมมันต์บีมีราคาด่านกัมมันต์เท่ากับ 40 บาท/กก.ด่านกัมมันต์ ในขณะที่ด่านกัมมันต์เอ ซี และดี มีราคาด่านกัมมันต์เท่ากับ 50 บาท/กก.ด่านกัมมันต์ เท่ากันทั้ง 3 ชนิดด่านกัมมันต์ เป็นผลให้ราคาด่านกัมมันต์บีมีราคาต่ำที่สุด

จากการพิจารณาพบว่า ด่านกัมมันต์บี ที่ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที จึงเป็นด่านกัมมันต์และระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมสำหรับการนำไปใช้จริง

เมื่อพิจารณาราคาค่าใช้จ่ายต่อปริมาตรเบด ในที่นี้จะทำการพิจารณาในด้านของราคาด่านกัมมันต์บีที่ใช้ในการดำเนินระบบ เนื่องจากหากมีการก่อสร้างเพื่อนำระบบนี้ไปใช้งานจริงต้องมีราคาค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นอีกมากเช่น ในด้านค่าก่อสร้างคอกลิ้มน์ ค่าจ้างคนงาน ค่าเครื่องสูบน้ำ เป็นต้น ซึ่งในการทดลองนี้ไม่ได้มีการพิจารณาถึง เป็นเพียงการประเมินราคาค่าใช้จ่าย จากการทดลองในระดับขนาดห้องปฏิบัติการเท่านั้น

ราคาด่านกัมมันต์บี 40 บาท / กิโลกรัม

คอกลิ้มน์ : เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.4 ซม. สูง 120 ซม. บรรจุด่านกัมมันต์สูง 60 ซม.

∴ ปริมาตรด่านกัมมันต์ในคอกลิ้มน์เท่ากับ

0.27 ล.

ความหนาแน่นปรากฏของด่านกัมมันต์บีเท่ากับ 0.486 ก./มล.

∴ ปริมาณด่านกัมมันต์บีในคอกลิ้มน์เท่ากับ

132 กรัม

∴ ค่าใช้จ่ายของด่านกัมมันต์ในคอกลิ้มน์เท่ากับ

5.28 บาท

ปริมาตรเบดจนกระทั่งมีค่าที่ไอซี มากกว่า 6 มก./ล.

1,800 BV

∴ ปริมาณน้ำจนกระทั่งมีค่าที่ไอซีมากกว่า 6 มก./ล.

490 ลิตร

∴ ค่าใช้จ่ายด่านกัมมันต์ต่อปริมาตรน้ำที่ได้เท่ากับ

0.011 บาท / ลิตร

หรือ เท่ากับ

10.80 บาท / ลบ.ม.

การประเมินราคาค่าใช้จ่ายเริ่มต้นเป็นเพียงการประเมินจากราคาค่าถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการดำเนินระบบเท่านั้น ดังนั้นหากมีการนำระบบนี้ไปใช้งานจริง ควรมีการศึกษาในด้านราคาค่าก่อสร้าง ค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากการเดินระบบต่าง ๆ เช่น ค่าจ้างคนงาน ค่าบำรุงรักษาระบบ ค่าเครื่องสูบน้ำ และค่าไฟฟ้า เป็นต้น



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## บทที่ 5

### สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

#### 5.1 สรุปผลการวิจัย

ผลการทดลองเพื่อศึกษาถึงขนาดรูปทรงที่เหมาะสมของถ่านกัมมันต์แบบเกล็ด สำหรับการปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดขั้นที่สองแล้วจากโรงงานซักรีด สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังต่อไปนี้

1. ขนาดรูปทรง และพื้นที่ผิวมีผลต่อการกำจัดมลสารอินทรีย์ โดยถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดรูปทรงที่ค่อนข้างใหญ่ และพื้นที่ผิวสูง (ถ่านกัมมันต์บี ขนาดรูปทรง 1,781 A° และ พื้นที่ผิว 967 ตารางเมตรต่อกรัม) มีความจุดูดติดทีโอซี และซีโอดีสูง ส่วนถ่านกัมมันต์ที่มีขนาดรูปทรงใหญ่ (ถ่านกัมมันต์เอ ขนาดรูปทรงใหญ่ที่สุด) มีความจุดูดติดซีสูง เนื่องจากโมเลกุลของสีส่วนใหญ่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ โดยการดูดติดผิวเป็นไปตามความสัมพันธ์แบบฟรอนดลิชไอโซ เทอร์ม

2. ผลการทดสอบผลของพีเอชที่มีต่อการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ขนาดรูปทรง พบว่า พีเอชไม่แสดงผลอย่างเด่นชัดต่อการดูดติดผิวทั้งในรูปของทีโอซี ซีโอดี และสี ทำให้พีเอชที่มีความเหมาะสมมากที่สุดในการใช้งานคือ พีเอชของน้ำทิ้งเริ่มต้น

3. ระยะเวลาสัมผัสที่เหมาะสมในการเดินระบบแบบคอลัมน์ คือ 60 นาที เนื่องจากระบบมีค่าความจุดูดติดทีโอซี, ซีโอดี และสี สูงกว่าการเดินระบบที่เวลาสัมผัส 15 และ 30 นาที รวมทั้งความสัมพันธ์ระหว่างค่าความจุดูดติดทั้ง ทีโอซี ซีโอดี และสี กับระยะเวลาสัมผัสมีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง

4. ค่าความจุดูดติดผิวในแบบคอลัมน์ของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ขนาดรูปทรงมีแนวโน้มเดียวกับในแบบกะ คือ ถ่านกัมมันต์บีจะให้ความจุดูดติดทีโอซีสูงสุด

5. จากการประเมินทางด้านเศรษฐศาสตร์พบว่า ถ่านกัมมันต์บีที่ระยะเวลาสัมผัสที่ 60 นาที จะมีค่าใช้จ่ายในรูปของถ่านกัมมันต์เท่ากับ 10.80 บาทต่อลูกบาศก์เมตรของน้ำที่ผลิต (คิดที่ราคาถ่านกัมมันต์บีเท่ากับ 40 บาท / กก.)

6. คุณภาพน้ำภายหลังจากการดูดติดด้วยถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดแล้วพบว่า มีค่าทีโอซี ความกระด้าง และความขุ่นใกล้เคียงกับน้ำประปา และน้ำดิบของโรงงานซักรีด รวมทั้งน้ำที่ผ่านการดูดติดแล้วมีลักษณะใส ไม่มีสี ดังนั้นน้ำที่ผ่านการบำบัดแล้ว เมื่อนำกลับมาใช้ใหม่ในกระบวนการซักรีด ไม่น่าจะก่อให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับการซักรีด แต่ต้องมีกระบวนการกำจัดความกระด้าง และการฆ่าเชื้อโรคก่อนที่จะนำไปใช้จริง เพื่อป้องกันปัญหาที่จะตามมาในการซักรีดได้

## 5.2 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยต่อไป

1. ศึกษา และพัฒนาขนาดรูปทรง ให้มีความจำเพาะในการดูดซับสารหนึ่ง ๆ เพื่อให้มีประสิทธิภาพ หรือความจุดูดซับสูงสุด
2. ศึกษาหาขนาดโมเลกุลของสารในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดทางชีวภาพแบบใช้อากาศของโรงงานซักรีด
3. ศึกษาการใช้ถ่านกัมมันต์แบบผงสำหรับปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งโรงงานซักรีด
4. ศึกษาการนำถ่านกัมมันต์แบบเกล็ดปรับปรุงคุณภาพน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดแล้วจากโรงงานซักรีดเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ให้มีการนำมาใช้จริง รวมทั้งควรมีการศึกษาในด้านการก่อสร้าง ราคาก่อสร้าง ค่าใช้จ่ายในการเดินระบบ ค่าใช้จ่ายในการบำรุงรักษาระบบ และจุดคุ้มทุนทางด้านเศรษฐศาสตร์
5. ศึกษาถึงการฟื้นฟูสภาพของถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้ว หรือวิธีการกำจัดถ่านกัมมันต์ที่ใช้แล้ว เนื่องจากอาจเป็นการช่วยลดค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นของระบบได้
6. ศึกษาการนำน้ำทิ้งกลับมาใช้ใหม่จากอุตสาหกรรมอื่น ๆ เพื่อให้สามารถใช้ทรัพยากรน้ำได้อย่างมีคุณค่ามากที่สุด และเป็นการช่วยลดปัญหาน้ำเสียด้วย



## รายการอ้างอิง

### ภาษาไทย

- โครงการชลากเขี้ยว, คณะกรรมการ. ข้อกำหนดชลากเขี้ยว สำหรับบริการชักน้ำและบริการชักแห้ง. กรุงเทพมหานคร: สำนักงานเลขานุการโครงการชลากเขี้ยว สถาบันสิ่งแวดล้อมไทยและสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2541.
- ชัชวาลย์ เจริญสุทธิกุล, รณฤทธิ์ ไพรสันต์, และ วัฒนานครณ์ เมฆรัสมิ. การบำบัดน้ำเสียเคราะห์โดยใช้ถ่านกัมมันต์. รายงานโครงการวิจัย, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2539.
- ชัยโชค ฤทัยวัฒน์, และ พูนศิริ ลิขนานนทวงศ์. การบำบัดน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจากกระบวนการตะกอนเร่งจากโรงงานฟอกย้อมเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่. รายงานโครงการวิจัย, ภาควิชาเคมี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2543.
- ณรงค์ วุฑฒเสถียร. การปรับสภาพน้ำสำหรับอุตสาหกรรม. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: บริษัท ส.เอเชียเพรส จำกัด, 2540.
- ต่อตระกูล วัฒนารกิจกุล. การกำจัดสารอินทรีย์ละลายน้ำด้วยถ่านกัมมันต์แบบเกร็ด. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2545.
- ธงชัย พรรณสวัสดิ์. การกำจัดสีของน้ำเสียจากโรงงานย้อมผ้าโดยวิธี PACT รายงานการวิจัยขั้นสมบูรณ์. กรุงเทพมหานคร: ภาควิชาวิศวกรรมสุขาภิบาล และสถาบันวิจัยและพัฒนา คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2527.
- พิไลพรรณ ท้อสุวรรณ. การปรับปรุงคุณภาพน้ำหลังการบำบัดของโรงงานย้อมผ้าเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาเคมี บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2544.
- เพ็ญรุ่ง จุริมาศ. การตลาดของธุรกิจบริการซักอบรีดโดยใช้เครื่องในเขตกรุงเทพมหานคร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, ภาควิชาบริหารธุรกิจ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2528.
- ไพศาล วีรกิจ. การนำน้ำทิ้งมาหมุนเวียนใช้ใหม่. วารสารวิชาการ APHEIT JOURNAL 4 2 (2541): 30 – 39.
- มันสิน ดัฒนกุลเวศม์. วิศวกรรมการประปา. เล่มที่ 2. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2542.

- วจน์ศิริ ประยูรพรหม. ขนาดรูปทรงที่เหมาะสมของถ่านกัมมันต์เม็ดเล็กสำหรับการกำจัดสีจากน้ำเสียโรงงานย้อมผ้า. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
- วิวรรณ จจรเกียรติคุณ. การใช้ถังกรองดูดซับในการบำบัดสีจากน้ำเสียโรงงานฟอกย้อมสิ่งทอในการบำบัดขั้นสุดท้าย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, สาขาวิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2539.
- สมนึก จารุคิลกกุล. การบำบัดน้ำที่ออกจากกระบวนการสกัดกัมมันต์เพื่อใช้เป็นน้ำเติมหอหล่อเย็น. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.
- สุคนชวรรณ หวานแก้ว. การปรับปรุงคุณภาพน้ำหลังการบำบัดของโรงงานฆ่าไก่เพื่อกลับมาใช้ใหม่. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาเคมี บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2544.
- อรภัทร พฤตปาโมกข์. การกำจัดคลอรีนออกจากน้ำโดยการดูดซับด้วยคาร์บอนกัมมันต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.
- อัมพวัน พงศ์สิทธิศักดิ์. ความคุ้มค่าของการนำน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่สำหรับอาคารสูง โดยการกรองตรง หรือการดูดซับผิว หรือการกรองด้วยแผ่นเยื่อกรอง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต, ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539.
- อุดมผล พิษณุไพบูลย์, และ พรทิพย์ โชคสุชาติ. การตรวจสอบการใช้น้ำและศึกษาความเป็นไปได้ของการนำน้ำทิ้งจากบ่อบำบัดน้ำเสียมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์กลับมาใช้ใหม่. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 5, หน้า 13 – 18. 24 – 26 มีนาคม 2542 ณ โรงแรมแอมบาสซาเดอร์ซิตี จอมเทียน จังหวัดชลบุรี.

## ภาษาอังกฤษ

- Abulnour, A.G., Sorour, M.H., and Talaat, H.A. Comparative economics for desalting of agricultural drainage water (ADW). Desalination 152 (2002): 353 – 357.
- Adam, Q.J., and Clark, M.R. Evaluating the costs of packed – tower aeration and GAC for controlling selected organics. Journal AWWA 83 1 (1991): 49 – 57.
- Al-Sulaim, J., and Asano, T. Wastewater reclamation and reuse. New Age International Ltd, 2000.
- APHA, AWWA, and WPCF. Standard methods for the examination of water and wastewater. Washington: American Public Health Association, 1995.
- ASTM Standards D 4607. Standard Test Method for Determination of Iodine Number of Activated Carbon, 1994.
- Bergna, G., Bianchi, R., and Malpei, F. GAC Adsorption of ozonated secondary textile effluent for industrial water reuse. Water Science and Technology 40 4 – 5 (1991): 435 – 442.
- Chen, P.H. Removing aquatic organic substances by anion-exchange resin and activated carbon. Environment International 25 5 (1999): 655 – 662.
- Cheremisinoff, P.N., and Ellerbusch, F. Carbon adsorption handbook. Michigan: Ann Arbor Science Publishers. Inc., 1978.
- Colp, R.L., and Wesner, G.M. Handbook of advanced wastewater treatment. 2 edition. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1985.
- Forwalt, H.J., and Hutchins, R.A. Purifying liquids with activated carbon. Chemical Engineering 11 (1996): 179 – 184.
- Frank, L.S. A step-by-step approach to process evaluation and application. Adsorption Technology. New York and Basel: Marcel Dekker, อ้างถึงใน อรรถภัทร พลุดปาโมกษ์. การกำจัดคลอรีนออกจากน้ำโดยการดูดซับด้วยคาร์บอนกัมมันต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2540.
- George, T., and Franklin, L.B. Wastewater engineering treatment, disposal and reuse. 1991, อ้างถึงใน สมนึก จารุติลกุล. การบำบัดน้ำที่ออกจากกระบวนการสกัดกัมมันต์เพื่อใช้เป็นน้ำเติมหอหล่อเย็น. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาวิศวกรรมเคมี บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2538.

- Kawamura, S. Integrated design of water treatment facilities. New York: John Wiley & sons, 1991.
- Kim, S.L., Paul, J.C., and Ting, Y.P. Study on feed pretreatment for membrane filtration of secondary effluent. Separation and Purification Technology 29 (2002): 171 – 179.
- Lafrance, P., and Mazet, M. Adsorption of humic acids onto powdered activated carbon. The influence of sodium triphosphate. Water Research 19 8 (1985): 1059 – 1064.
- Lee, M.C., Snoeyink, V.L., and Crittenden, J.C. Activated carbon adsorption of humic substances. Journal AWWA 73 1 (1981): 440, อ้างถึงใน Vernon, L. S. Water Quality and Treatment. 4<sup>th</sup>ed. New York: McGraw – Hill, 1990.
- Lu, W., and Leung, A. Y.T. A preliminary study on potential of developing shower/laundry wastewater reclamation and reuse system. Chemosphere 52 (2003): 1451 – 1459.
- Martin R. J., and Iwugo K.O. Studies on residual organics in biological plant effluents and their treatment by the activated carbon adsorption process. Publ. Hlth Engr 7 (1979): 61 – 69 and 94.
- Martin R.J., and Iwugo K.O. The effects of pH and suspended solids in the removal of organics from waters and wastewaters by the activated carbon adsorption process. Water Research 16 (1982): 73 – 82.
- Matsuo, T., and Nishi, T. Activated carbon filter treatment of laundry waste water in nuclear power plants and filter recovery by heating in vacuum. Carbon 38 (2000): 709 – 714.
- Metcalf and Eddy. Wastewater engineering treatment disposal and reuse. International editions. Civil Engineering Series. Singapore: McGraw – Hill Co., 1991.
- Metcalf and Eddy. Wastewater engineering treatment disposal and reuse. 4 editions. New York: McGraw – Hill Co., 2003.
- Montgomery, J.M. Water treatment principle and design. New York: John Wiley & Sons, 1985.
- Naomi, I.N., Snoeyink, V.L., Suidan, M.T., Lee, C.H., and Richard, Y. Effect of particle size and background nature organics on the adsorption efficiency of PAC. Journal AWWA 82 (1990): 65 – 72.
- Oxenford, L.J., and Lykins, W.B. Conference summary: Practical aspects of the design and use of GAC. Journal AWWA 83 1 (1991): 58 – 64.

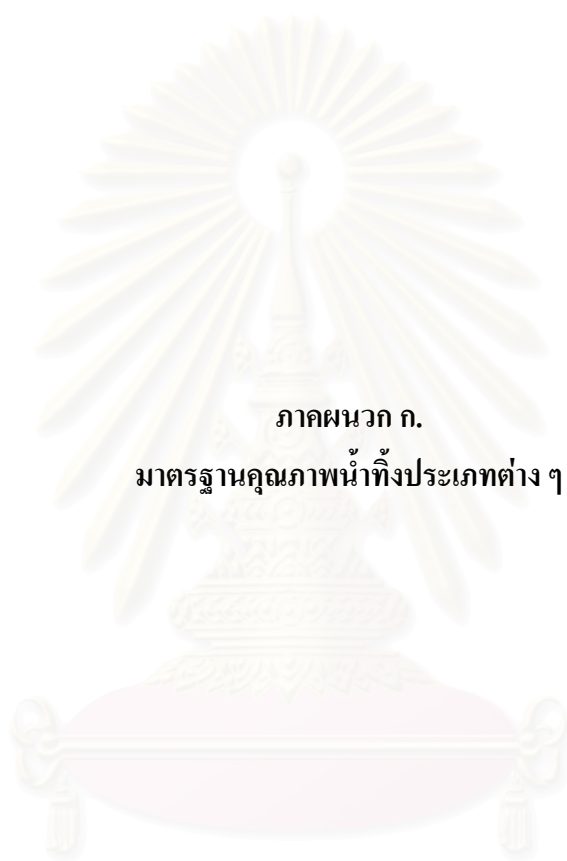
- Physics and Astronomy online. Atomic Radius of Iodine[online] Available: <http://www.physlink.com/Reference/ChemicalElements/iodine.cfm>[2005, April 30].
- Rodrigues, A.E., LeVan, M.D., and Tondeur, D. Adsorption: Science and Technology. Portugal: NATO ASI Series, 1988.
- Semmens, M.J., Norgaard, G.E., Hohenstein, G., and Staples, A.B. Influence of pH on the removal of organics by granular activated carbon. Journal AWWA 78 (1986): 89 – 93.
- Snoeyink V.L., and Jenkins D. Water Chemistry. New York: John Wiley and Sons., 1980.
- Sunstorm, D.W., and Klei, H.B. Wastewater treatment. Department of chemical engineering: Englewood Cliffs Prentice – Hall, 1979.
- Symons, J.M., Stevens, A.A., Clark, R.M., Geldreich, E.E., Love, O.T., and DeMarco, J. Treatment techniques for controlling trihalomethanes in drinking water. U.S. Environmental Protection Agency. EPA-600/2-81-156, 1981 อ้างถึงใน Vernon, L. S. Water Quality and Treatment. 4<sup>th</sup> ed. New York: McGraw – Hill, 1990.
- Urano, K. Water reuse with granular activated carbon. Desalination 23 (1966): 533 – 540.
- Van der Kooij D. Biological process in carbon filters. Activated carbon in drinking water technology. KIWA/AWWARF Report. Denver, Colo., 1983 อ้างถึงใน Vernon, L. S. Water Quality and Treatment. 4<sup>th</sup> ed. New York: McGraw – Hill, 1990.
- Vernon, L. S. Water Quality and Treatment. 4<sup>th</sup> ed. New York: McGraw – Hill, 1990.
- Wu, F.C., Tseng, R.L., and Hu, C.C. Comparisons of pore properties and adsorption performance of KOH-activated and steam-activated carbons. Microporous and mesoporous materials 80 (2005): 95 – 106.



ภาคผนวก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





ภาคผนวก ก.  
มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งประเภทต่าง ๆ

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก.1 มาตรฐานน้ำทิ้งสำหรับการรคสนามหญ้าและสิ่งปลูกสร้าง  
ตามมาตรฐานของ USEPA (ไพศาล, 2541)

สาร	ความเข้มข้น , มก./ล	สาร	ความเข้มข้น , มก./ล
TDS	1,200	Iron	5.0
Aluminum	5.0	Lead	5.0
Arsenic	0.1	Lithium	2.5
Bacteria	≤ 2.2 MPN/100 ml	Manganese	0.2
Fecal Coliforms		Molybdenum	0.01
BOD <sub>5</sub>	20	Nickel	0.2
Boron	0.75	Oil	0
Cadmium	0.01	pH	6.0-9.0
Chloride	100	Phenols	50
Chromium	0.1	Selenium	0.02
Cobalt	0.05	Sulfate	200
Copper	0.2	Vanadium	0.1
Fluoride	1.0	Zinc	2.0

ตาราง ก.2 มาตรฐานน้ำทิ้งลงบ่อบาดาล (ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 5, 2521)

ดัชนีคุณภาพน้ำ	หน่วย	ค่ามาตรฐาน (เกณฑ์กำหนดสูงสุด)
สี (Colour)	ปลาตินัม โคบอลต์ (Platinum Cobalt)	50
ความขุ่น (Turbidity)	หน่วยความขุ่น (JTU)	50
ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)	-	5.0-9.2
ปริมาณสารทั้งหมด (Total Solids)	มก./ล. (mg/l)	2,000
บีโอดี (BOD)	มก./ล. (mg/l)	40
น้ำมันและไขมัน (Oil and Grease)	มก./ล. (mg/l)	5.0
คลอรีนอิสระ (Free Chlorine)	มก./ล. (mg/l)	5.0
ทองแดง (Cu)	มก./ล. (mg/l)	1.5
สังกะสี (Zn)	มก./ล. (mg/l)	1.5
โครเมียม (Cr)	มก./ล. (mg/l)	2.0
สารหนู (As)	มก./ล. (mg/l)	0.05
ไซยาไนด์ (CN)	มก./ล. (mg/l)	0.2
ปรอท (Hg)	มก./ล. (mg/l)	0.002
ตะกั่ว (Pb)	มก./ล. (mg/l)	0.1
แคดเมียม (Cd)	มก./ล. (mg/l)	0.1
บาเรียม (Ba)	มก./ล. (mg/l)	1.0

ที่มา: ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 5 (พ.ศ. 2521) ออกตามความในพระราชบัญญัติน้ำบาดาล พ.ศ. 2520 ตีพิมพ์ในหนังสือราชกิจจานุเบกษา เล่ม 95 ตอนที่ 66 ลงวันที่ 27 มิถุนายน 2521

ตาราง ก.3 มาตรฐานน้ำทิ้งปล่อยเติมลงในบึงสาธารณะ ตามมาตรฐาน USEPA  
(ไพศาล, 2541)

สาร	ความเข้มข้น,มก./ล.	สาร	ความเข้มข้น,มก./ล.
Bacteria		Oil	0
Total coliforms	≤ 2.2 MPN/100 ml	Dissolved oxygen	2.0 min
BOD <sub>5</sub>	5	PH	6.5-8.3
Floating scum	0	Suspended Solids	5
Odor	None	Turbidity	1 NTU

ตาราง ก.4 มาตรฐานน้ำทิ้งปล่อยลงเลี้ยงสัตว์น้ำ ตามมาตรฐาน USEPA (ไพศาล, 2541)

สาร	ความเข้มข้น,มก./ล.	สาร	ความเข้มข้น,มก./ล.
Ammonia	1.0	TDS	1,000
Carbon dioxide	12.0	Detergents	0.2
Copper	0.02	Dissolved oxygen	2.0 min
Arsenic	1.0	DDT	0.002
Selenium	0.1	Endrin	0.004
Cyanide	0.012	Malathion	0.1
Phenols	0.02	pH	6.5-8.5

ตาราง ก.5 มาตรฐานน้ำทิ้งสำหรับเลี้ยงสัตว์ ตามมาตรฐาน USEPA (ไพศาล, 2541)

สาร	ความเข้มข้น,มก./ล.	สาร	ความเข้มข้น,มก./ล.
Alkalinity	30-130	Fluoride	2.0
Aluminum	5.0	Lead	0.1
Arsenic	0.2	Mercury	0.001
Bacteria		Nitrate as N	100
Total coliforms	≤ 5,000 MPN/100 ml	Nitrite as N	10
Fecal coliforms	≤ 1,000 MPN/100 ml	Oil	0
Boron	5.0	PH	6.0-9.0
Cadmium	0.05	Selenium	0.05
Chromium	1.0	TDS	1,000
Cobalt	1.0	Vanadium	0.1
Copper	0.5	Zinc	5.0

## ตาราง ก.6 มาตรฐานคุณภาพน้ำบาดาลที่ใช้บริโภค

(ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 4, 2521)

คุณลักษณะ	ดัชนีคุณภาพ	หน่วย	ค่ามาตรฐาน	
			เกณฑ์กำหนด ที่เหมาะสม	เกณฑ์อนุโลม สูงสุด
ทาง กายภาพ	สี (Colour)	ปลาตินัม-โคบอลต์	5	50
	ความขุ่น (Turbidity)	หน่วยความขุ่น	5	20
	ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	-	7.0 – 8.5	6.5 – 9.2
ทางเคมี	เหล็ก (Fe)	มก./ล.	ไม่เกิน 0.5	1.0
	แมงกานีส (Mn)	มก./ล.	ไม่เกิน 0.3	0.5
	ทองแดง (Cu)	มก./ล.	ไม่เกิน 1.0	1.5
	สังกะสี	มก./ล.	ไม่เกิน 5.0	15.0
	ซัลเฟต	มก./ล.	ไม่เกิน 200	250
	คลอไรด์	มก./ล.	ไม่เกิน 200	600
	ฟลูออไรด์	มก./ล.	ไม่เกิน 1.0	1.5
	ไนเตรด	มก./ล.	ไม่เกิน 45	45
	ความกระด้างทั้งหมด	มก./ล.	ไม่เกิน 300	500
	ความกระด้างถาวร	มก./ล.	ไม่เกิน 250	250
	ปริมาณสารทั้งหมด	มก./ล.	ไม่เกิน 750	1,500
สารพิษ	สารหนู	มก./ล.	ต้องไม่มีเลย	0.05
	ไซยาไนด์	มก./ล.	ต้องไม่มีเลย	0.2
	ตะกั่ว	มก./ล.	ต้องไม่มีเลย	0.05
	ปรอท	มก./ล.	ต้องไม่มีเลย	0.001
	แคดเมียม	มก./ล.	ต้องไม่มีเลย	0.01
	ซิลิเนียม	มก./ล.	ต้องไม่มีเลย	0.01
ทางแบคทีรี	Standard Plate Count	โคโลนี/ลบ.ชม.	ไม่เกิน 500	-
	Most Probable Number (MPN)	เอ็ม.พี.เอ็น ต่อ 100 ลบ.ชม.	น้อยกว่า 2.2	-
	E.coli	-	ต้องไม่มีเลย	-

ที่มา: ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 4 (พ.ศ. 2521) ออกตามความในพระราชบัญญัติน้ำบาดาล พ.ศ. 2520 เรื่อง กำหนดหลักเกณฑ์และมาตรการในทางวิชาการสำหรับการป้องกันด้านสาธารณสุขและป้องกันสิ่งแวดล้อมเป็นพิษ ตีพิมพ์ในหนังสือราชกิจจานุเบกษา เล่ม 95 ตอนที่ 66 ลงวันที่ 27 มิถุนายน 2521

ตาราง ก.7 มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภค  
(ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 332, 2521)

คุณลักษณะ	1 ดัชนีคุณภาพ	หน่วย	2 เกณฑ์กำหนดสูงสุด	3* เกณฑ์อนุโลมสูงสุด
1. ทางกายภาพ	สี	ปลาตินัม-โคบอลต์	5	15
	รส	-	ไม่เป็นที่รังเกียจ	ไม่เป็นที่รังเกียจ
	กลิ่น	-	ไม่เป็นที่รังเกียจ	ไม่เป็นที่รังเกียจ
	ความขุ่น	ซีลิกา สเกล ยูนิต์	5	20
	ความเป็นกรด-ด่าง	-	6.5-8.5	ไม่เกิน 9.2
2. ทางเคมี	ปริมาณสารทั้งหมด	มก./ล.	500	1,500
	เหล็ก	มก./ล.	0.5	1.0
	แมงกานีส	มก./ล.	0.3	0.5
	เหล็กและแมงกานีส	มก./ล.	0.5	1.0
	ทองแดง	มก./ล.	1.0	1.5
	สังกะสี	มก./ล.	5.0	15.0
	แคลเซียม	มก./ล.	75**	200
	แมกนีเซียม	มก./ล.	50	150
	ซัลเฟต	มก./ล.	200	250***
	คลอไรด์	มก./ล.	250	600
	ฟลูออไรด์	มก./ล.	0.7	1.0
	ไนเตรด	มก./ล.	45	45
	อัลคิลเบนซิลซัลโฟเนต	มก./ล.	0.5	1.0
	ฟีนอลิกซับสแตนซ์	มก./ล.	0.001	0.002
3. สารเป็นพิษ	ปรอท	มก./ล.	0.001	-
	ตะกั่ว	มก./ล.	0.05	-
	อาร์เซนิก	มก./ล.	0.05	-
	ซิลิเนียม	มก./ล.	0.01	-
	โครเมียม	มก./ล.	0.05	-
	ไซยาไนด์	มก./ล.	0.2	-
	แคดเมียม	มก./ล.	0.01	-
	บาเรียม	มก./ล.	1.0	-
4. จุลชีววิทยา	Standard Plate Count	โคโลนี/ลบ.ชม.	500	
	Most Probable Number (MPN)	โคลิฟอร์มออร์แกนิกซ์/100 ลบ.ชม.	น้อยกว่า 2.2	
	E.coli		ไม่มี	



ที่มา: ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ฉบับที่ 332 (พ.ศ. 2521) ออกตามความในพระราชบัญญัติมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม พ.ศ. 2521 เรื่อง กำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมน้ำบริโภค ตีพิมพ์ในหนังสือราชกิจจานุเบกษา เล่ม 95 ตอนที่ 68 ลงวันที่ 4 กรกฎาคม 2521

หมายเหตุ

\* เกณฑ์ที่อนุโลมให้สูงสุดตามสดมภ์ที่ 3 นั้น เป็นเกณฑ์ที่อนุญาตให้สำหรับน้ำประปาหรือน้ำบาดาลที่มีความจำเป็นต้องให้บริโภคเป็นการชั่วคราว และน้ำที่มีคุณลักษณะอยู่ระหว่างเกณฑ์ของสดมภ์ที่ 2 กับสดมภ์ที่ 3 นั้นไม่ใช่ น้ำที่ให้เครื่องหมายมาตรฐานได้

\*\* หากแคลเซียมมีปริมาณสูงกว่าที่กำหนด และแมกนีเซียมมีปริมาณต่ำกว่าที่กำหนดในมาตรฐาน ให้พิจารณาแคลเซียมและแมกนีเซียมในเทอมของความกระด้างทั้งหมด ถ้ารวมความกระด้างทั้งหมด เพื่อคำนวณเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต มีปริมาณต่ำกว่า 300 มิลลิกรัม/ลิตร ให้ถือว่าน้ำนั้นเป็นไปตามมาตรฐาน การแบ่งระดับความกระด้างของน้ำดังต่อไปนี้

0 – 75.1 มิลลิกรัม/ลิตร เรียกว่า น้ำอ่อน

75 – 150 มิลลิกรัม/ลิตร เรียกว่า น้ำกระด้างปานกลาง

150 – 300 มิลลิกรัม/ลิตร เรียกว่า น้ำกระด้าง

300 มิลลิกรัม/ลิตร ขึ้นไป เรียกว่า น้ำกระด้างมาก

\*\*\* หากซัลเฟต มีปริมาณถึง 250 มิลลิกรัมต่อลิตร แมกนีเซียมต้องมีปริมาณไม่เกิน 30 มิลลิกรัม/ลิตร

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตาราง ก.8 มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน

(ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 8, 2537)

ลำดับ	คุณภาพน้ำ	ค่าทางสถิติ	หน่วย	เกณฑ์กำหนดสูงสุด ตามการแบ่งประเภทคุณภาพน้ำตามการใช้ประโยชน์				
				ประเภท	ประเภท	ประเภท	ประเภท	ประเภท
				1	2	3	4	5
1.	สี กลิ่นและรส		-	๖	๖	๖	๖	-
2.	อุณหภูมิ		๑๖	๖	๖	๖	๖	-
3.	ความเป็นกรด-ด่าง		-	๖	5.0-9.0	5.0-9.0	5.0-9.0	-
4.	ออกซิเจนละลาย	P20	มก./ล.	๖	6.0	4.0	2.0	-
5.	บีโอดี	P80	มก./ล.	๖	1.5	2.0	4.0	-
6.	แบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์มทั้งหมด	P80	เอ็มพีเอ็น/มล.	๖	5,000	20,000	-	-
7.	แบคทีเรียกลุ่มฟีคอลโคลิฟอร์ม	P80	เอ็มพีเอ็น/มล.	๖	1,000	4,000	-	-
8.	ไนเตรดในหน่วยไนโตรเจน		มก./ล.	๖	5.0	5.0	5.0	-
9.	แอมโมเนียในหน่วยไนโตรเจน		มก./ล.	๖	0.5	0.5	0.5	-
10.	ฟีนอล		มก./ล.	๖	0.005	0.005	0.005	-
11.	ทองแดง		มก./ล.	๖	0.1	0.1	0.1	-
12.	นิกเกิล		มก./ล.	๖	0.1	0.1	0.1	-
13.	แมงกานีส		มก./ล.	๖	1.0	1.0	1.0	-
14.	สังกะสี		มก./ล.	๖	1.0	1.0	1.0	-
15.	แคดเมียม		มก./ล.	๖	0.005*	0.005*	0.005*	-
					0.05**	0.05**	0.05**	-
16.	โครเมียมชนิดเฮกซะวาเลนต์		มก./ล.	๖	0.05	0.05	0.05	-
17.	ตะกั่ว		มก./ล.	๖	0.05	0.05	0.05	-
18.	ปรอททั้งหมด		มก./ล.	๖	0.002	0.002	0.002	-
19.	สารหนู		มก./ล.	๖	0.01	0.01	0.01	-
20.	ไซยาไนด์		มก./ล.	๖	0.005	0.005	0.005	-
21.	กัมมันตภาพรังสี							
	-ค่ารังสีแอลฟา		เบคเคอเรล/ล.	๖	0.1	0.1	0.1	-
	-ค่ารังสีเบตา		เบคเคอเรล/ล.	๖	1.0	1.0	1.0	-
22.	สารฆ่าศัตรูพืชและสัตว์ชนิดที่มีคลอรีนทั้งหมด		มก./ล.	๖	0.05	0.05	0.05	-
23.	ดีดีที		ไมโครกรัม/ล.	๖	1.0	1.0	1.0	-
24.	บีเอชซีชนิดอัลฟา		ไมโครกรัม/ล.	๖	0.02	0.02	0.02	-

ตาราง ก.8 (ต่อ) มาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน

(ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 8, 2537)

ลำดับ	คุณภาพน้ำ	ค่าทางสถิติ	หน่วย	เกณฑ์กำหนดสูงสุด ตามการแบ่งประเภทคุณภาพน้ำตามการใช้ประโยชน์				
				ประเภท	ประเภท	ประเภท	ประเภท	ประเภท
				1	2	3	4	5
25.	คลอรีน		ไมโครกรัม/ล.	๕	0.1	0.1	0.1	-
26.	อัลตรีน		ไมโครกรัม/ล.	๕	0.1	0.1	0.1	-
27.	เฮปตาคลอโรและเฮปตาคลออีพอกไซด์		ไมโครกรัม/ล.	๕	0.2	0.2	0.2	-
28.	เอนดริน		ไมโครกรัม/ล.	๕	ไม่สามารถตรวจพบได้ตามวิธีการตรวจสอบที่กำหนด			-

ที่มา: ประกาศคณะกรรมการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ฉบับที่ 8 (พ.ศ. 2537) ออกตามความในพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 เรื่อง กำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำในแหล่งน้ำผิวดิน ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษาประกาศทั่วไป เล่ม 11 ตอนที่ 16ง ลงวันที่ 24 กุมภาพันธ์ 2537

หมายเหตุ

1. การแบ่งประเภทแหล่งน้ำผิวดิน

ประเภทที่ 1 ได้แก่ แหล่งน้ำที่คุณภาพน้ำมีสภาพตามธรรมชาติโดยปราศจากน้ำที่มาจากกิจกรรมทุกประเภท และสามารถเป็นประโยชน์เพื่อ

- การอุปโภคและบริโภค โดยต้องผ่านการฆ่าเชื้อโรคตามปกติก่อน
- การขยายพันธุ์ตามธรรมชาติของสิ่งมีชีวิตระดับพื้นฐาน
- การอนุรักษ์ระบบนิเวศน์ของแหล่งน้ำ

ประเภทที่ 2 ได้แก่ แหล่งน้ำที่ได้รับน้ำที่มาจากกิจกรรมบางประเภท และสามารถเป็นประโยชน์เพื่อ

- การอุปโภคและบริโภค โดยต้องผ่านการฆ่าเชื้อโรคตามปกติ และผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำ
- การอนุรักษ์สัตว์น้ำ
- การประมง
- การว่ายน้ำและกีฬาทางน้ำ

ประเภทที่ 3 ได้แก่ แหล่งน้ำที่ได้รับน้ำที่มาจากกิจกรรมบางประเภท และสามารถเป็นประโยชน์เพื่อ

- การอุปโภคและบริโภคโดยต้องผ่านการฆ่าเชื้อโรคตามปกติ และผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำทั่วไปก่อน
- การเกษตร

ประเภทที่ 4 ได้แก่ แหล่งน้ำที่ได้รับน้ำทิ้งจากกิจกรรมบางประเภท และสามารถเป็นประโยชน์เพื่อ

- การอุปโภคและบริโภคต้องผ่านการฆ่าเชื้อโรคตามปกติ และผ่านกระบวนการปรับปรุงคุณภาพน้ำเป็นพิเศษก่อน
- การอุตสาหกรรม

ประเภทที่ 5 ได้แก่ แหล่งน้ำที่ได้รับน้ำทิ้งจากกิจกรรมบางประเภท และสามารถเป็นประโยชน์เพื่อการคมนาคม

2. กำหนดค่ามาตรฐานในแหล่งน้ำประเภทที่ 2 – 4 สำหรับแหล่งน้ำประเภทที่ 1 ให้เป็นไปตามธรรมชาติ และแหล่งน้ำประเภทที่ 5 ไม่กำหนดค่า

3. ค่า DO เป็นเกณฑ์มาตรฐานต่ำสุด

ธ เป็นไปตามธรรมชาติ

ช อุณหภูมิของน้ำจะต้องไม่สูงกว่าอุณหภูมิตามธรรมชาติเกิน 3 องศาเซลเซียส

\* น้ำที่มีความกระด้างในรูปของ  $\text{CaCO}_3$  ไม่เกินกว่า 100 มิลลิกรัม/ลิตร

\*\* น้ำที่มีความกระด้างในรูปของ  $\text{CaCO}_3$  เกินกว่า 100 มิลลิกรัม/ลิตร

P20 ค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 20 จากจำนวนตัวอย่างน้ำทั้งหมดที่เก็บมาตรวจอย่างต่อเนื่อง

P80 ค่าเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 80 จากจำนวนตัวอย่างน้ำทั้งหมดที่เก็บมาตรวจอย่างต่อเนื่อง

MPN เอ็ม.พี.เอ็น หรือ Most Probable Number

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ข.

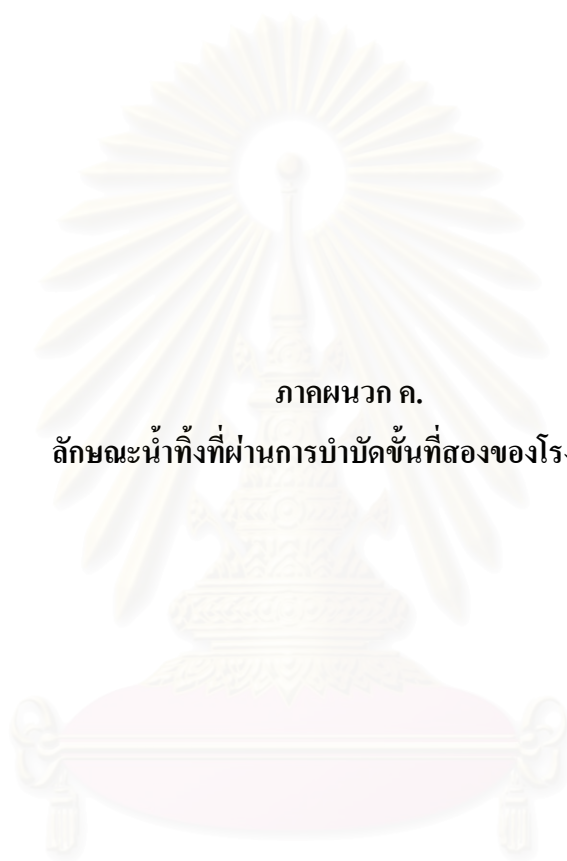
ลักษณะสมบัติอันกำมั้นต์ที่ใช้ในการทดลอง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ ข.1 ลักษณะสมบัติถ่านกัมมันต์ที่ใช้ในการทดลอง

ถ่านกัมมันต์	เอ	บี	ซี	ดี
วัตถุดิบ	ไม้ยางพารา	ถ่านหินบิทูมินัส	กะลาปาล์ม	กะลามะพร้าว
ขนาดรูพรุน (อังสตรอม)	26640	1781	516	404
พื้นที่ผิว (ตร.ม./ก.)	763	967	1030	862
ความหนาแน่น ปรากฏ (ก./มล.)	0.209	0.486	0.529	0.522
ซีเถ้า (% โดยน้ำหนัก)	11.5	4.9	10.3	1.5
ไอโอดีนนัมเบอร์ (มก./ก.)	922	976	1172	1015





ภาคผนวก ค.

ลักษณะน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดขั้นที่สองของโรงซักรีด

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

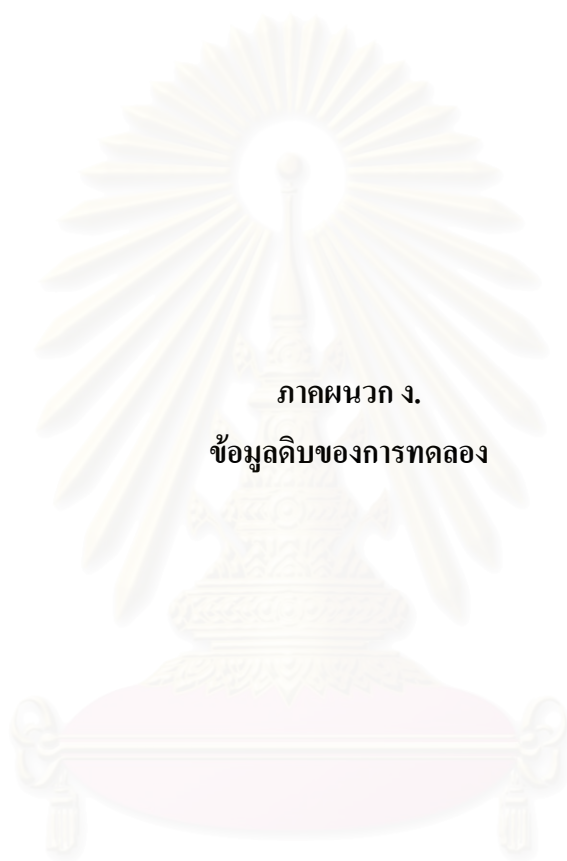
ตารางที่ ค.1 ลักษณะสมบัติน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดขั้นที่สองของโรงซักรีด

	โรงงานที่ 1 <sup>A</sup> (โรงงานที่ศึกษา)		โรงงานที่ 2 <sup>B</sup>		โรงงานที่ 3 <sup>B</sup>		โรงงานที่ 4 <sup>B</sup>		โรงงานที่ 5 <sup>B</sup>		โรงงานที่ 6 <sup>B</sup>		มาตรฐานน้ำทิ้ง โรงงานอุตสาหกรรม <sup>C</sup>
	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	ค่าเฉลี่ย	SD	
พีเอช	8.3	0.16	8.12	0.17	7.47	0.06	8.3	0.06	7.14	0.07	7.76	0.14	5.5 – 9
สี (เอ็ดเอ็ม ไอ)	32	2.5	55	7	42	2.5	67	5.5	62	7	34	1.5	ไม่เป็นที่น่ารังเกียจ
ทีโอซี (มก./ล.)	15	0.9	67	5	22	0.5	78	11	67	4.5	57	4	ไม่ได้กำหนด
บีโอดี (มก./ล.)	13	2.4	32	1.5	28	3	84	6	47	1.5	42	3.5	< 20
ซีโอดี (มก./ล.)	36	1.7	77	4.5	53	1.5	138	12.5	120	2.5	114	4.5	< 120
ความกระด้างทั้งหมด (มก./ล. ในรูป CaCO <sub>3</sub> )	120	8.2	142	4.5	120	2.5	156	9.5	110	3	110	9	ไม่ได้กำหนด
ปริมาณโคลิฟอร์มทั้งหมด (เอ็มพีเอ็น/100มล.)	790	20.5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	ไม่ได้กำหนด

หมายเหตุ : A = ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำทิ้งสิ้น 3 ครั้ง

B = ค่าเฉลี่ยจากการวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำทิ้งสิ้น 2 ครั้ง

C = แหล่งที่มา : ประกาศกระทรวงวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีและสิ่งแวดล้อม ฉบับที่ 3 (พ.ศ. 2539) เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากแหล่งกำเนิดประเภท โรงงานอุตสาหกรรมและนิคมอุตสาหกรรม ลงวันที่ 3 มกราคม 2539 ตีพิมพ์ในราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 113 ตอนที่ 13ง ลงวันที่ 13 กุมภาพันธ์ 2539



ภาคผนวก ง.  
ข้อมูลดิบของการทดลอง

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## ข้อมูลดิบของการทดสอบหาเวลาของการดูดติดผิวจนถึงภาวะสมดุล (Equilibrium Time)

ตารางที่ ง.1 ถ่านกัมมันต์เอ

Time (min)	parameter	TOC	COD	Color	pH
0		11.88	35.77	36	8.32
1		10.83	21.87	25	8.47
2		9.89	18.75	21	8.52
4		8.57	17.47	17	8.54
8		7.53	17.12	16	8.62
12		6.76	16.76	11	8.74
24		6.58	16.56	11	8.80

ตารางที่ ง.2 ถ่านกัมมันต์บี

Time (min)	parameter	TOC	COD	Color	pH
0		11.88	35.77	35	8.32
1		5.86	14.76	27	8.52
2		5.55	14.76	23	8.39
4		4.56	13.78	19	8.61
8		4.08	12.63	17	8.47
12		3.49	11.85	13	8.34
24		3.42	11.52	13	8.38

ตารางที่ ง.3 ถ่านกัมมันต์ซี

Time (min)	parameter	TOC	COD	Color	pH
0		11.94	36.06	33	8.30
1		8.26	18.93	29	8.41
2		6.58	17.77	25	8.38
4		5.63	16.31	21	8.46
8		5.35	15.35	19	8.51
12		4.49	13.51	14	8.33
24		4.46	13.47	14	8.36

ข้อมูลดิบของการทดสอบหาเวลาของการดูดติดผิวจนถึงสภาวะสมดุล (Equilibrium Time) (ต่อ)  
 ตารางที่ ง.4 ถ่านกัมมันต์ดี

Time (min)	parameter	TOC	COD	Color	pH
0		11.94	36.06	33	8.30
1		10.07	21.07	31	8.78
2		8.59	18.47	28	8.68
4		7.77	16.82	25	8.51
8		6.39	16.45	22	8.68
12		5.58	15.45	17	8.77
24		5.47	15.38	16	8.59

สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

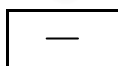
ข้อมูลดิบของการทดลองผลของพีเอชที่มีต่อการดูดติดผิว  
ตารางที่ 3.5 ผ่านกัมมันต์เอ บี ซี และดี

Initial				
pH	5.0	6.5	8.1	9.5
TOC (mg/l)	16.23	15.39	15.47	16.61
COD (mg/l)		37.20	36.16	37.42
Color (ADMI)	38	32	33	34

GAC	A (26640 A°)				B (1781 A°)			
pH	5.0	6.5	8.1	9.5	5.0	6.5	8.1	9.5
TOC (mg/l)	9.61	9.86	9.73	10.53	3.24	3.28	3.18	3.45
COD (mg/l)	—	17.40	16.80	16.23	—	12.70	11.66	12.41
Color (ADMI)	11	10	11	10	14	12	12	14

GAC	C (516 A°)				D (404 A°)			
pH	5.0	6.5	8.1	9.5	5.0	6.5	8.1	9.5
TOC (mg/l)	5.45	6.39	5.86	6.55	6.36	6.47	5.95	6.76
COD (mg/l)	—	14.60	14.10	13.96	—	16.40	15.72	16.37
Color (ADMI)	15	14	14	15	16	17	15	15

หมายเหตุ :



= ความเข้มข้นโซเดียมไนไตรท์ที่ใช้ก่อให้เกิดซีไอดีสูงกว่า  
ซีไอดีของน้ำทิ้งมากเป็นผลให้ค่าซีไอดีมีความแปรปรวน  
ค่อนข้างมาก จึงไม่ได้แสดงผลไว้ในที่นี้

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ข้อมูลดิบของการทดลองหาค่าไอโซเทอร์ม โดยเลือกค่าพีเอชที่เหมาะสม  
 ตารางที่ ง.6 ถ่านกัมมันต์เอ (26,640 อังสตรอม) กักการดูดซับ TOC

Carbon (g.)	TOC (mg/l)	1/ce	X/m (mg/g)	1/(X/m)
0	11.67			
0.02	11.12	0.090	4.125	0.242
0.05	10.21	0.098	4.380	0.228
0.1	9.25	0.108	3.630	0.275
0.2	8.96	0.112	2.033	0.492
0.4	8.50	0.118	1.189	0.841
0.6	8.10	0.123	0.893	1.120
0.8	7.80	0.128	0.726	1.378
1	7.47	0.134	0.630	1.587
3	7.20	0.139	0.224	4.474
5	6.47	0.155	0.156	6.410
10	5.35	0.187	0.095	10.549
15	5.32	0.188	0.064	15.748
20	5.00	0.200	0.050	19.990

สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข้อมูลดิบของการทดลองหาค่าไอโซเทอร์ม โดยเลือกค่าพีเอชที่เหมาะสม (ต่อ)

ตารางที่ ง.7 ถ่านกัมมันต์บี (1,781 อังสตรอม) กับการดูดติด TOC

Carbon (g.)	TOC (mg/l)	1/ce	X/m (mg/g)	1/(X/m)
0	11.78			
0.02	9.41	0.106	12.075	0.083
0.05	8.21	0.122	8.640	0.116
0.1	7.79	0.128	6.360	0.157
0.2	6.43	0.156	4.763	0.210
0.4	5.43	0.184	2.764	0.362
0.6	4.41	0.227	1.970	0.508
0.8	4.14	0.242	1.519	0.658
1	3.90	0.256	1.233	0.811
3	3.56	0.281	0.462	2.165
5	3.20	0.313	0.290	3.454
10	2.45	0.408	0.149	6.720
15	2.34	0.427	0.102	9.785
20	2.13	0.469	0.079	12.735

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข้อมูลดิบของการทดลองหาค่าไอโซเทอร์ม โดยเลือกค่าพีเอชที่เหมาะสม (ต่อ)

ตารางที่ ง.8 ถ่านกัมมันต์ซี (516 อังstrom) กับการดูดติด TOC

Carbon (g.)	TOC (mg/l)	1/ce	X/m (mg/g)	1/(X/m)
0	11.14			
0.02	9.89	0.101	9.375	0.107
0.05	9.57	0.104	4.710	0.212
0.1	8.47	0.118	4.005	0.250
0.2	7.74	0.129	2.550	0.392
0.4	6.14	0.163	1.875	0.533
0.6	5.98	0.167	1.290	0.775
0.8	5.47	0.183	1.063	0.941
1	5.31	0.188	0.875	1.144
3	4.41	0.227	0.337	2.972
5	4.12	0.243	0.211	4.748
10	3.76	0.266	0.111	9.033
15	3.57	0.280	0.076	13.210
20	3.34	0.299	0.059	17.094

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข้อมูลดิบของการทดลองหาค่าไอโซเทอร์ม โดยเลือกค่าพีเอชที่เหมาะสม (ต่อ)

ตารางที่ ง.9 ถ่านกัมมันต์ดี (404 อังstrom) กับการดูดติด TOC

Carbon (g.)	TOC (mg/l)	1/ce	X/m (mg/g)	1/(X/m)
0	11.64			
0.02	10.67	0.094	7.275	0.137
0.05	9.87	0.101	5.310	0.188
0.1	8.80	0.114	4.260	0.235
0.2	8.30	0.120	2.505	0.399
0.4	7.67	0.130	1.489	0.672
0.6	7.41	0.135	1.058	0.946
0.8	6.21	0.161	1.018	0.982
1	5.97	0.168	0.851	1.176
3	5.31	0.188	0.317	3.160
5	5.30	0.189	0.190	5.258
10	4.50	0.222	0.107	9.337
15	4.12	0.243	0.075	13.298
20	4.00	0.250	0.057	17.452

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข้อมูลดิบของการทดลองหาค่าไอโซเทอร์ม โดยเลือกค่าพีเอชที่เหมาะสม (ต่อ)

ตารางที่ ง.10 ถ่านกัมมันต์เอ (26,640 อังสตรอม) กับการดูดติด COD

Carbon (g.)	COD (mg/l)	1/ce	X/m (mg/g)	1/(X/m)
0	33.24			
0.02	30.98	0.032	16.950	0.059
0.05	29.14	0.034	12.300	0.081
0.1	28.14	0.036	7.650	0.131
0.2	26.71	0.037	4.898	0.204
0.4	25.31	0.040	2.974	0.336
0.6	23.81	0.042	2.358	0.424
0.8	23.84	0.042	1.763	0.567
1	22.41	0.045	1.625	0.616
3	18.81	0.053	0.722	1.386
5	17.12	0.058	0.484	2.068
10	16.68	0.060	0.248	4.026
15	15.71	0.064	0.175	5.705
20	15.14	0.066	0.136	7.366

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข้อมูลดิบของการทดลองหาค่าไอโซเทอร์ม โดยเลือกค่าพีเอชที่เหมาะสม (ต่อ)

ตารางที่ ง.11 ถ่านกัมมันต์ปี (1,781 อังสตรอม) กับการดูดติด COD

Carbon (g.)	COD (mg/l)	1/ce	X/m (mg/g)	1/(X/m)
0	33.87			
0.02	27.81	0.036	45.450	0.022
0.05	26.07	0.038	23.400	0.043
0.1	23.17	0.043	16.050	0.062
0.2	21.34	0.047	9.398	0.106
0.4	20.10	0.050	5.164	0.194
0.6	18.82	0.053	3.763	0.266
0.8	17.21	0.058	3.124	0.320
1	15.21	0.066	2.799	0.357
3	13.72	0.073	1.008	0.993
5	11.21	0.089	0.680	1.471
10	10.47	0.096	0.351	2.849
15	10.24	0.098	0.236	4.232
20	10.11	0.099	0.178	5.612

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ข้อมูลดิบของการทดลองหาค่าไอโซเทอร์ม โดยเลือกค่าพีเอชที่เหมาะสม (ต่อ)

ตารางที่ ง.12 ถ่านกัมมันต์ซี (516 อังstrom) กับการดูดติด COD

Carbon (g.)	COD (mg/l)	1/ce	X/m (mg/g)	1/(X/m)
0	33.87			
0.02	29.42	0.0340	33.3750	0.0300
0.05	28.87	0.0346	15.0000	0.0667
0.1	25.31	0.0395	12.8400	0.0779
0.2	22.14	0.0452	8.7975	0.1137
0.4	20.33	0.0492	5.0775	0.1969
0.6	19.28	0.0519	3.6475	0.2742
0.8	19.13	0.0523	2.7638	0.3618
1	18.13	0.0552	2.3610	0.4235
3	15.15	0.0660	0.9360	1.0684
5	13.12	0.0762	0.6225	1.6064
10	12.51	0.0799	0.3204	3.1211
15	11.47	0.0872	0.2240	4.4643
20	10.68	0.0936	0.1739	5.7496

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข้อมูลดิบของการทดลองหาค่าไอโซเทอร์ม โดยเลือกค่าพีเอชที่เหมาะสม (ต่อ)

ตารางที่ ง.13 ถ่านกัมมันต์ดี (404 อังสตรอม) กับการดูดติด COD

Carbon (g.)	COD (mg/l)	1/ce	X/m (mg/g)	1/(X/m)
0	34.13			
0.02	30.47	0.033	27.450	0.036
0.05	29.04	0.034	15.270	0.065
0.1	27.21	0.037	10.380	0.096
0.2	25.21	0.040	6.690	0.149
0.4	24.21	0.041	3.720	0.269
0.6	22.31	0.045	2.955	0.338
0.8	21.47	0.047	2.374	0.421
1	20.41	0.049	2.058	0.486
3	17.21	0.058	0.846	1.182
5	15.47	0.065	0.560	1.786
10	14.72	0.068	0.291	3.435
15	14.28	0.070	0.199	5.038
20	13.81	0.072	0.152	6.562

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข้อมูลดิบของการทดลองหาค่าไอโซเทอร์ม โดยเลือกค่าพีเอชที่เหมาะสม (ต่อ)

ตารางที่ ง.14 ถ่านกัมมันต์เอ (26,640 อังสตรอม) กับการดูดติดสี

Carbon (g.)	Color (ADMI)	1/ce	X/m (mg/g)	1/(X/m)
0	32			
0.02	30	0.033	15.00	0.067
0.05	28	0.036	12.00	0.083
0.1	26	0.038	9.00	0.111
0.2	24	0.042	6.00	0.167
0.4	20	0.050	4.50	0.222
0.6	19	0.053	3.25	0.308
0.8	17	0.059	2.81	0.356
1	15	0.067	2.55	0.392
3	12	0.083	1.00	1.000
5	10	0.100	0.66	1.515
10	8	0.125	0.36	2.778
15	7	0.143	0.25	4.000
20	6	0.167	0.20	5.128

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข้อมูลดิบของการทดลองหาค่าไอโซเทอร์ม โดยเลือกค่าพีเอชที่เหมาะสม (ต่อ)

ตารางที่ ง.15 ถ่านกัมมันต์บี (1,781 อังสตรอม) กับการดูดติดสี

Carbon (g.)	Color (ADMI)	1/ce	X/m (mg/g)	1/(X/m)
0	33			
0.02	32	0.031	7.50	0.133
0.05	31	0.032	6.00	0.167
0.1	29	0.034	6.00	0.167
0.2	27	0.037	4.50	0.222
0.4	25	0.040	3.00	0.333
0.6	22	0.045	2.75	0.364
0.8	20	0.050	2.44	0.410
1	19	0.053	2.10	0.476
3	17	0.059	0.80	1.250
5	12	0.083	0.63	1.587
10	10	0.100	0.35	2.899
15	9	0.111	0.24	4.167
20	8	0.125	0.19	5.333

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข้อมูลดิบของการทดลองหาค่าไอโซเทอร์ม โดยเลือกค่าพีเอชที่เหมาะสม (ต่อ)

ตารางที่ ง.16 ถ่านกัมมันต์ซี (516 อังสตรอม) กับการดูดติดสี

Carbon (g.)	Color (ADMI)	1/ce	X/m (mg/g)	1/(X/m)
0	33			
0.02	32	0.031	7.50	0.133
0.05	31	0.032	6.00	0.167
0.1	29	0.034	6.00	0.167
0.2	29	0.034	3.00	0.333
0.4	27	0.037	2.25	0.444
0.6	25	0.040	2.00	0.500
0.8	23	0.043	1.88	0.533
1	22	0.045	1.65	0.606
3	16	0.063	0.85	1.176
5	14	0.071	0.57	1.754
10	11	0.091	0.33	3.030
15	9	0.111	0.24	4.167
20	8	0.125	0.19	5.333

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข้อมูลดิบของการทดลองหาค่าไอโซเทอร์ม โดยเลือกค่าพีเอชที่เหมาะสม (ต่อ)

ตารางที่ ง.17 ถ่านกัมมันต์ดี (404 อังสตรอม) กับการดูดติดสี

Carbon (g.)	Color (ADMI)	1/ce	X/m (mg/g)	1/(X/m)
0	32			
0.02	32			
0.05	32			
0.1	31	0.032	1.500	0.667
0.2	30	0.033	1.500	0.667
0.4	29	0.034	1.125	0.889
0.6	27	0.037	1.250	0.800
0.8	26	0.038	1.125	0.889
1	25	0.040	1.050	0.952
3	20	0.050	0.600	1.667
5	18	0.056	0.420	2.381
10	15	0.067	0.255	3.922
15	12	0.083	0.200	5.000
20	11	0.091	0.158	6.349

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ข้อมูลดิบของการหาสถานะการดำเนินงาน ในแบบคอลัมน์ที่มีการไหลแบบต่อเนื่อง

ตารางที่ ง.18 ระยะเวลาสัมผัส 15 นาที

Time	TOC	pH	COD	Color	Turbidity	Total Hardness	Total Coliform
hr.	mg/l		mg/l	ADMI	NTU	mg/l as CaCO <sub>3</sub>	MPN
24	4.31	8.27	12.77	11	3	103.87	
48	4.76						
72	5.34	8.42	13.60	12	2.6	99.45	
96	5.93						
120	6.69	8.32	15.00	13	2.4	101.10	$4.0 \times 10^3$
144	7.19						
168	7.33	8.32	15.61	14	2.5	100.53	
Time	TOC	Time	TOC	Time	TOC	Time	TOC
hr.	mg/l	hr.	mg/l	hr.	mg/l	hr.	mg/l
192	7.55	624	10.30	1056	13.42	1488	13.59
216	7.58	648	10.42	1080	13.57	1512	13.45
240	7.74	672	10.71	1104	13.68	1536	13.21
264	7.83	696	10.49	1128	13.45	1560	13.58
288	8.16	720	10.90	1152	13.89	1584	13.77
312	8.43	744	11.87	1176	13.47	1608	13.56
336	8.21	768	12.20	1200	13.89	1632	13.69
360	8.81	792	11.74	1224	13.78	1656	13.83
384	8.73	816	12.14	1248	13.92	1680	13.91
408	8.98	840	12.41	1272	13.96	1704	13.88
432	9.89	864	12.61	1296	13.79	1728	13.98
456	9.38	888	13.28	1320	13.69	1752	13.69
480	9.31	912	13.67	1344	13.50	1776	13.79
504	9.70	936	13.81	1368	13.58	1800	13.72
528	10.20	960	13.82	1392	13.59	1824	13.75
552	10.24	984	13.89	1416	13.71	1848	13.91
576	9.86	1008	13.78	1440	13.69	1872	14.18
600	9.85	1032	13.89	1464	13.97	1896	14.78

ข้อมูลดิบของการหาสถานะการดำเนินงาน ในแบบคอลัมน์ที่มีการไหลแบบต่อเนื่อง (ต่อ)

ตารางที่ ง.19 ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที

Time	TOC	pH	COD	Color	Turbidity	Total Hardness	Total Coliform
hr.	mg/l		mg/l	ADMI	NTU	mg/l as CaCO <sub>3</sub>	MPN
24	3.35	8.37	11.40	10	2.8	103.87	
48	3.98						
72	4.43	8.38	12.47	10	2.5	101.66	
96	4.47						
120	4.59	8.28	13.07	11	2.6	101.10	$3.3 \times 10^3$
144	4.77						
168	5.31	8.30	13.37	12	2.5	100.53	
192	5.20						
216	5.27	8.19	13.56	12	2.2	102.21	
240	5.49						
264	5.57	8.21	14.09	13	2.4	101.12	
288	5.30						$4.7 \times 10^3$
312	5.78	8.21	14.20	13	2.6	101.58	
336	5.87						
360	5.61	8.21	14.48	14	2.5	102.05	
384	5.90						
408	6.31	8.34	15.12	14	2.4	101.47	
432	6.43						
456	6.57	8.20	15.21	16	2.4	102.87	$6.4 \times 10^3$

ข้อมูลดิบของการหาสถานะการดำเนินงาน ในแบบคอลัมน์ที่มีการไหลแบบต่อเนื่อง (ต่อ)

ตารางที่ ง.19 ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที (ต่อ)

Time	TOC	Time	TOC	Time	TOC
hr.	mg/l	hr.	mg/l	hr.	mg/l
480	6.69	960	8.77	1440	9.47
504	6.52	984	8.47	1464	9.58
528	7.21	1008	8.41	1488	10.21
552	7.35	1032	8.68	1512	10.11
576	7.47	1056	8.59	1536	10.47
600	7.29	1080	8.31	1560	10.45
624	7.31	1104	8.62	1584	10.31
648	7.42	1128	8.47	1608	10.72
672	7.59	1152	8.57	1632	10.68
696	7.79	1176	8.63	1656	10.64
720	7.63	1200	8.49	1680	10.59
744	7.76	1224	8.81	1704	10.83
768	7.59	1248	8.70	1728	10.77
792	7.64	1272	8.93	1752	10.91
816	7.41	1296	9.21	1776	10.69
840	7.45	1320	9.47	1800	10.73
864	7.82	1344	9.53	1824	10.42
888	7.64	1368	9.62	1848	10.97
912	8.67	1392	9.71	1872	11.58
936	8.31	1416	9.77	1896	12.32

ข้อมูลดิบของการหาสถานะการดำเนินงาน ในแบบคอลัมน์ที่มีการไหลแบบต่อเนื่อง (ต่อ)

ตารางที่ ง.20 ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที

Time	TOC	pH	COD	Color	Turbidity	Total Hardness	Total Coliform
hr.	mg/l		mg/l	ADMI	NTU	mg/l as CaCO <sub>3</sub>	MPN
24	3.57	8.38	10.60	10	2.8	106.08	
48	3.88						
72	3.75	8.42	11.07	10	2.4	97.24	
96	3.77						
120	4.44	8.36	11.60	10	2.4	101.10	$4.0 \times 10^3$
144	4.60						
168	3.93	8.35	11.70	11	2.6	100.53	
192	4.15						
216	4.63	8.23	12.41	11	2.2	104.43	
240	4.29						
264	5.01	8.24	12.47	12	2.6	98.88	
288	4.60						$6.2 \times 10^3$
312	4.74	8.25	12.71	13	2.4	102.51	
336	5.06						
360	5.08	8.28	13.12	13	2.2	98.89	
384	4.75						
408	4.73	8.29	13.15	13	2.2	99.12	
432	4.49						
456	4.41	8.20	13.05	15	2.4	98.30	$8.1 \times 10^3$
480	4.69						
504	4.40	8.12	13.87	15	2.5	102.82	
528	5.11						
552	5.16	8.34	14.07	14	2.5	102.23	
576	4.68						
600	4.67	8.02	13.51	15	2.4	102.25	
624	5.22						$9.5 \times 10^3$
648	4.79	8.20	13.62	14	2.7	103.36	
672	4.99						
696	4.99	8.09	13.67	16	2.9	98.87	

ข้อมูลดิบของการหาสถานะการดำเนินงาน ในแบบคอลัมน์ที่มีการไหลแบบต่อเนื่อง (ต่อ)

ตารางที่ ง.20 ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที (ต่อ)

Time	TOC	pH	COD	Color	Turbidity	Total Hardness	Total Coliform
hr.	mg/l		mg/l	ADMI	NTU	mg/l as CaCO <sub>3</sub>	MPN
720	4.86						
744	5.29	8.20	13.89	15	2.8	97.72	
768	5.32						
792	5.16	8.05	13.98	15	2.8	94.23	$8.4 \times 10^3$
816	5.47						
840	4.79	8.14	14.43	17	2.7	104.67	
864	4.97						
888	4.91	8.09	14.49	16	2.6	99.34	
912	5.24						
936	5.29	8.30	14.67	16	2.7	102.24	
960	4.69						$1.1 \times 10^4$
984	4.98	8.09	14.53	15	2.7	103.32	
1008	4.71						
1032	4.50	8.17	14.39	16	2.8	102.25	
1056	5.12						
1080	5.53	8.24	15.02	19	3	102.23	
1104	5.29						
1128	5.41	8.09	14.42	28	2.9	98.29	$1.4 \times 10^4$
1152	5.47						
1176	5.31	8.10	14.71	30	2.8	103.42	
1200	5.29						
1224	5.13	8.10	14.77	32	2.8	103.32	
1248	5.17						
1272	5.21	8.09	14.93	32	2.6	102.23	
1296	5.18						$1.2 \times 10^4$
1320	5.37	8.27	15.04	32	2.5	103.42	
1344	5.29						
1368	5.59	8.29	14.84	30	2.7	99.82	
1392	5.41						

ข้อมูลดิบของการหาสถานะการดำเนินงาน ในแบบคอลัมน์ที่มีการไหลแบบต่อเนื่อง (ต่อ)  
 ตารางที่ ง.20 ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที (ต่อ)

Time	TOC	pH	COD	Color	Turbidity	Total Hardness	Total Coliform
hr.	mg/l		mg/l	ADMI	NTU	mg/l as CaCO <sub>3</sub>	MPN
1416	5.82	8.20	15.07	32	3	104.11	
1440	5.74						
1464	5.87	8.13	15.07	33	2.6	98.30	$1.8 \times 10^4$
1488	5.62						
1512	5.88	8.11	15.17	33	3	102.78	
1536	5.91						
1560	5.93	8.08	14.98	33	2.8	97.86	
1584	5.73						
1608	5.95	8.14	14.46	33	2.9	103.31	
1632	5.83						$1.5 \times 10^4$
1656	5.91	8.20	14.89	33	2.7	102.84	
1680	5.77						
1704	5.85	8.10	15.13	32	3	104.04	
1728	5.92						
1752	5.93	8.12	14.97	32	2.9	99.37	
1776	5.99						
1800	5.97	8.15	14.87	33	2.8	104.21	$1.7 \times 10^4$
1824	6.24						
1848	6.47	8.24	15.21	33	2.9	101.67	
1872	6.28						
1896	6.47						



ข้อมูลดิบของการหาสถานะการดำเนินงาน ในแบบคอลัมน์ที่มีการไหลแบบต่อเนื่อง (ต่อ)  
 ตารางที่ ง.21 ถ่านกัมมันต์ชนิดเอ (ขนาดรูพรุน 26,640 อังสตรอม)

Time	TOC	pH	COD	Color	Turbidity	Total Hardness	Total Coliform
hr.	mg/l		mg/l	ADMI	NTU	mg/l as CaCO <sub>3</sub>	MPN
24	4.28	8.27	12.89	9	2.5	102.58	
48	4.32						
72	4.44	8.51	13.58	9	2.5	101.68	
96	4.44						
120	4.81	8.43	14.60	10	2.5	98.90	$1.7 \times 10^3$
144	5.40						
168	5.57	8.34	14.58	10	2.6	102.76	
192	6.10						
216	6.57	8.26	15.67	10	2.4	102.21	
240	7.19						
264	7.29	8.20	16.15	11	2.5	101.12	
288	7.55						$4.5 \times 10^3$
Time	TOC	Time	TOC	Time	TOC		
hr.	mg/l	hr.	mg/l	hr.	mg/l		
312	7.41	552	8.77	792	10.62		
336	7.65	576	8.89	816	10.55		
360	7.74	600	9.29	840	10.96		
384	7.58	624	9.38	864	10.79		
408	8.05	648	9.12	888	11.67		
432	8.25	672	9.24	912	11.47		
456	8.81	696	9.29	936	11.54		
480	8.61	720	9.26	960	11.30		
504	8.77	744	9.51	984	11.83		
528	8.82	768	9.87				

ข้อมูลดิบของการหาสถานะการดำเนินงาน ในแบบคอลัมน์ที่มีการไหลแบบต่อเนื่อง (ต่อ)  
ตารางที่ ง.22 ถ่านกัมมันต์ชนิดซี (ขนาดรูพรุน 516 อังสตรอม)

Time	TOC	pH	COD	Color	Turbidity	Total Hardness	Total Coliform
hr.	mg/l		mg/l	ADMI	NTU	mg/l as CaCO <sub>3</sub>	MPN
24	4.27	8.14	11.20	10	2.6	101.50	
48	4.56						
72	4.17	8.28	11.41	10	2.4	99.45	
96	4.73						
120	4.67	8.40	12.60	11	2.5	98.90	$4.9 \times 10^3$
144	4.46						
168	4.11	8.32	12.18	11	2.5	102.76	
192	5.07						
216	5.09	8.15	12.81	11	2.5	102.21	
240	4.84						
264	4.91	8.17	12.66	13	2.6	101.12	
288	5.28						$6.9 \times 10^3$
312	4.82	8.18	12.84	13	2.7	103.44	
336	5.31						
360	5.58	8.26	13.71	14	2.6	98.82	
384	5.57						
408	5.31	8.34	13.78	14	2.6	102.24	
432	5.12						
456	5.34	8.27	14.12	14	2.7	100.58	$8.1 \times 10^3$
480	5.16						
504	5.44	8.31	14.44	13	2.5	103.32	
528	5.61						
552	5.75	8.07	14.48	13	2.6	98.67	
576	5.63						
600	5.56	8.10	14.11	13	2.4	102.27	
624	5.79						$7.2 \times 10^3$
648	5.81	8.06	14.09	14	2.4	98.82	
672	5.90						
696	6.12	8.11	14.51	13	2.7	103.32	

ข้อมูลดิบของการหาสถานะการดำเนินงาน ในแบบคอลัมน์ที่มีการไหลแบบต่อเนื่อง (ต่อ)  
 ตารางที่ ง.22 ถ่านกัมมันต์ชนิดซี (ขนาดรูพรุน 516 อังstrom) (ต่อ)

Time	TOC	pH	COD	Color	Turbidity	Total Hardness	Total Coliform
hr.	mg/l		mg/l	ADMI	NTU	mg/l as CaCO <sub>3</sub>	MPN
720	6.52						
744	6.73	8.21	15.82	14	2.6	98.82	
768	6.82						
792	6.69	8.27	15.83	14	2.7	102.94	$8.4 \times 10^3$
816	7.75						
840	8.34						
864	8.81						
888	8.83						
912	8.78						
936	9.37						
960	9.12						
984	9.42						

สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ข้อมูลดิบของการหาสถานะการดำเนินงาน ในแบบคอลัมน์ที่มีการไหลแบบต่อเนื่อง (ต่อ)  
 ตารางที่ ง.23 ถ่านกัมมันต์ชนิดดี (ขนาดรูพรุน 404 อังสตรอม)

Time	TOC	pH	COD	Color	Turbidity	Total Hardness	Total Coliform
hr.	mg/l		mg/l	ADMI	NTU	mg/l as CaCO <sub>3</sub>	MPN
24	4.98	8.30	11.98	10	2.7	97.35	
48	4.83						
72	4.85	8.45	13.20	14	2.5	97.24	
96	4.77						
120	4.89	8.37	13.47	16	2.6	98.90	$2.2 \times 10^3$
144	5.10						
168	5.00	8.29	13.64	17	2.7	100.53	
192	4.86						
216	5.26	8.17	13.76	20	2.7	99.99	
240	5.39						
264	5.16	8.16	13.93	24	2.5	98.34	
288	5.18						$4.9 \times 10^3$
312	5.46	8.20	13.98	29	2.7	101.15	
336	5.54						
360	5.61	8.24	14.32	26	2.6	103.47	
384	5.60						
408	5.36	8.36	14.77	29	2.7	99.89	
432	5.44						
456	5.79	8.24	14.62	32	2.9	98.30	$5.9 \times 10^3$
480	5.55						
504	5.64	8.24	14.71	32	2.8	98.82	
528	5.77						
552	6.37	8.07	14.96	32	2.5	102.25	
576	6.28						
600	6.42	8.11	15.91	31	2.6	99.24	
624	6.74						$7.0 \times 10^3$

ข้อมูลดิบของการหาสถานะการดำเนินงาน ในแบบคอลัมน์ที่มีการไหลแบบต่อเนื่อง (ต่อ)  
 ตารางที่ ง.23 ถ่านกัมมันต์ชนิดดี (ขนาดรูพรุน 404 อังสตรอม) (ต่อ)

Time	TOC
hr.	mg/l
648	6.52
672	6.42
696	6.53
720	6.89
744	7.61
768	8.55
792	8.68
816	9.36
840	9.22
864	9.54
888	9.54
912	9.13
936	9.67
960	9.87
984	10.12

สถาบันวิทยบริการ  
 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก จ  
สีของน้ำภายหลังการดูดติดผิว

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



การทดลองเพื่อหาระยะเวลาอิ่มตัวในการดูดซับ  
ณ เวลาต่าง ๆ คือ 0, 1, 2, 4, 8, 12 และ 24 ชั่วโมง ตามลำดับ



รูปที่ จ.1 ถ่านกัมมันต์เอ (ขนาดรูพรุน  $26,640 \text{ \AA}^{\circ}$ )



รูปที่ จ.2 ถ่านกัมมันต์บี (ขนาดรูพรุน  $1,781 \text{ \AA}^{\circ}$ )

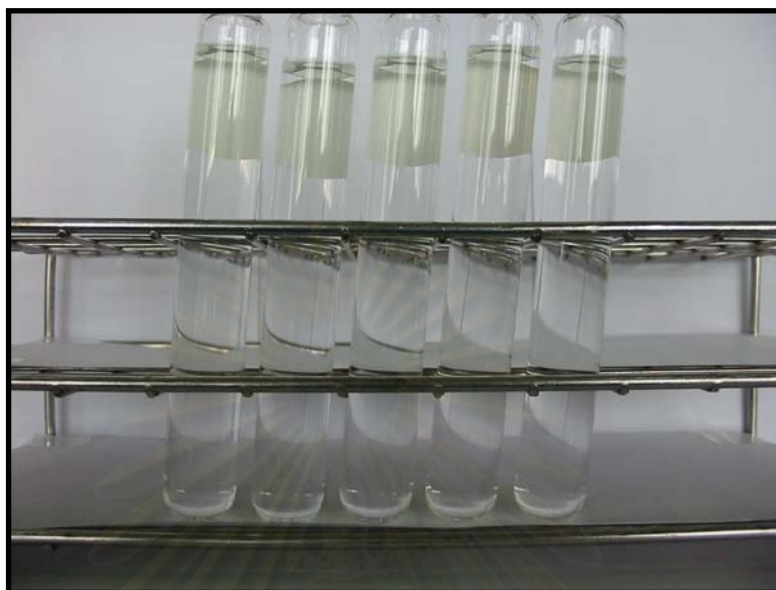


รูปที่ จ.3 ถ่านกัมมันต์ซี (516 A°)

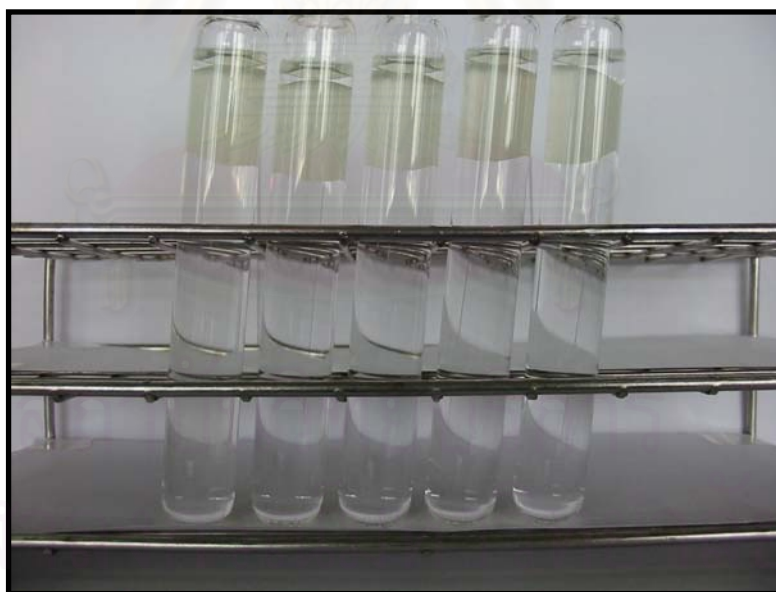


รูปที่ จ.4 ถ่านกัมมันต์ดี (404 A°)

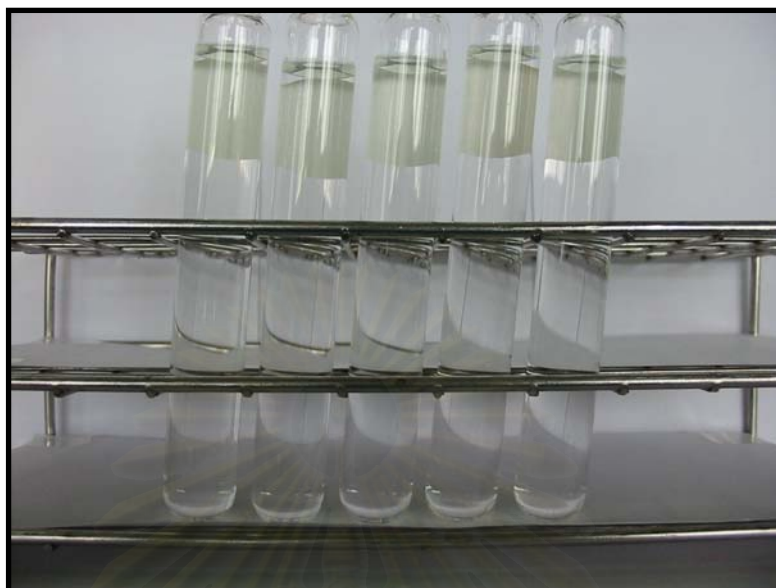
การทดลองเพื่อหาผลของพีเอชที่มีต่อการดูดติดผิว  
ณ ค่าพีเอชต่าง ๆ



รูปที่ จ.5 ที่พีเอช 5 (พีเอชน้ำทิ้งก่อนปรับ และพีเอช 5 ของถ่านกัมมันต์เอ บี ซี และดี ตามลำดับ)



รูปที่ จ.6 ที่พีเอช 6.5 (พีเอชน้ำทิ้งก่อนปรับ และพีเอช 6.5 ของถ่านกัมมันต์เอ บี ซี และดี ตามลำดับ)



รูปที่ จ.7 ที่พีเอช 9.5 (พีเอชน้ำที่กึ่งก่อนปรับ และพีเอช 9.5 ของถ่านกัมมันต์เอ บี ซี และดี ตามลำดับ)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

การทดลองเพื่อหาไอโซเทอร์มของถ่านกัมมันต์  
ณ กรัมถ่านกัมมันต์ต่าง ๆ คือ  
0, 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.8 กรัม ตามลำดับ

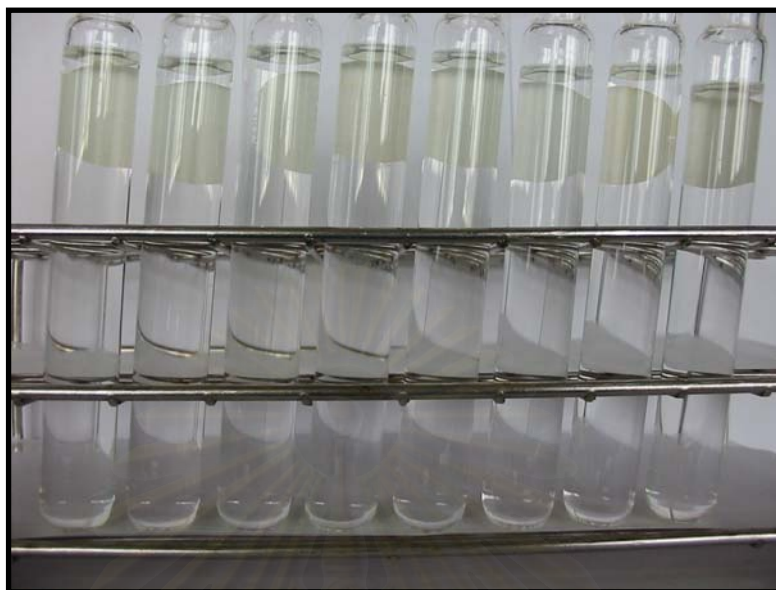


รูปที่ จ.8 ถ่านกัมมันต์ชนิดเอ (ขนาดรูพรุน 26,640 Å<sup>๒</sup>)



รูปที่ จ.9 ถ่านกัมมันต์ชนิดบี (ขนาดรูพรุน 1,781 Å<sup>๒</sup>)





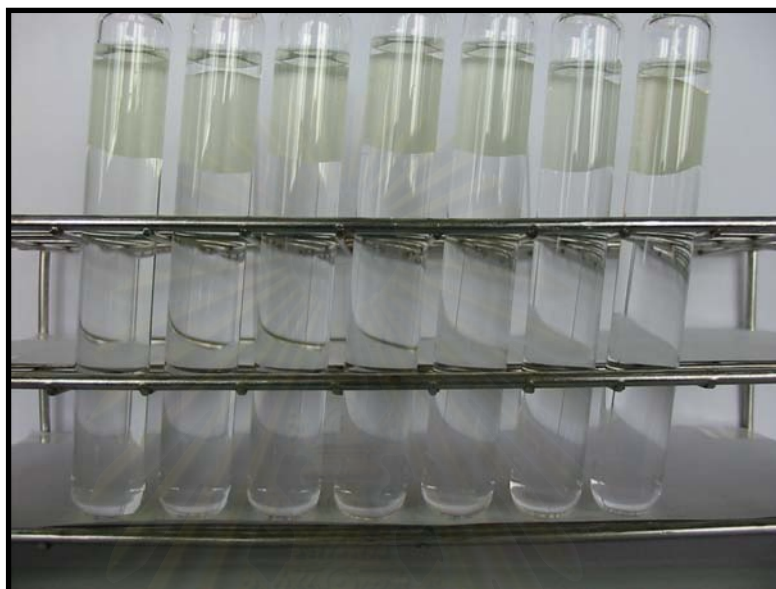
รูปที่ จ.10 ถ่านกัมมันต์ชนิดซี (516 A°)



รูปที่ จ.11 ถ่านกัมมันต์ชนิดดี (404 A°)



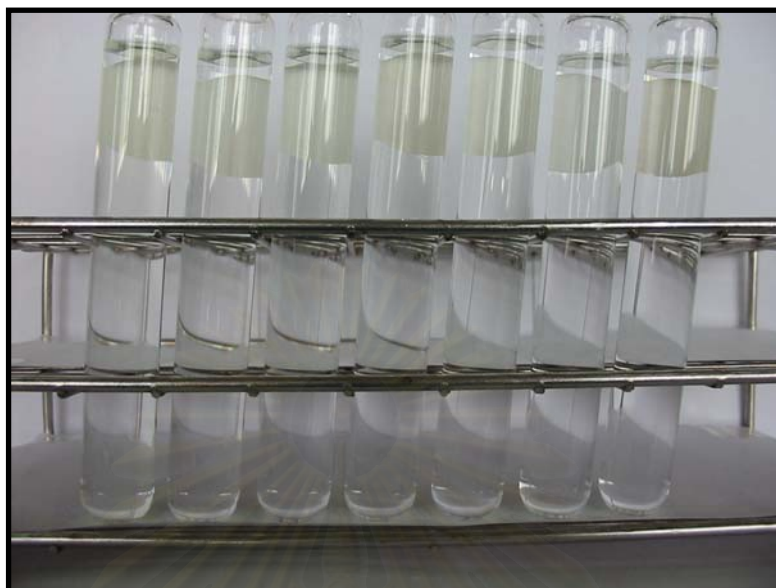
การทดลองเพื่อหาไอโซเทอร์มของถ่านกัมมันต์ (ต่อ)  
ณ กรัมถ่านกัมมันต์ต่าง ๆ คือ  
0, 1, 3, 5, 10, 15 และ 20 กรัม ตามลำดับ



รูปที่ จ.12 ถ่านกัมมันต์ชนิดเอ (ขนาดรูพรุน 26,640 Å<sup>๓</sup>)



รูปที่ จ.13 ถ่านกัมมันต์ชนิดบี (ขนาดรูพรุน 1,781 Å<sup>๓</sup>)



รูปที่ จ.14 ถ่านกัมมันต์ชนิดซี (516 A°)



รูปที่ จ.15 ถ่านกัมมันต์ชนิดดี (404 A°)



ภาคผนวก จ.

การคำนวณปริมาณสารคู่บัฟเฟอร์ทางทฤษฎี

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รายการการคำนวณปริมาณสารคู่บัฟเฟอร์ที่ใช้ในการทดลอง ณ ค่าพีเอชต่าง ๆ กำหนดให้การทดลองนี้ใช้สารคู่บัฟเฟอร์ ดังนี้

#### พีเอช 5.0

ใช้โซเดียมไนไตรท์ ( $\text{NaNO}_2$ ) กับ กรดไนตริก ( $\text{HNO}_2$ ) เนื่องจากเป็นสารคู่บัฟเฟอร์ที่มีค่าการแตกตัว หรือ  $\text{pK}_a$  เท่ากับ 4.5

#### พีเอช 6.5 และ 8.1

ใช้โซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{NaH}_2\text{PO}_4$ ) และ ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{Na}_2\text{HPO}_4$ ) เนื่องจากเป็นสารคู่บัฟเฟอร์ที่มีค่าการแตกตัว เท่ากับ 7.2

#### พีเอช 9.5

ใช้โซเดียมไบคาร์บอเนต ( $\text{NaHCO}_3$ ) และ โซเดียมคาร์บอเนต ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) เนื่องจากเป็นสารคู่บัฟเฟอร์ที่มีค่าการแตกตัว เท่ากับ 10.3

$$\text{จากสูตร} \quad \text{pH} = \text{pK}_a + \log\left(\frac{[\text{Salt}]}{[\text{Acid}]}\right)$$

#### พีเอช 5.0

$$\text{แทนค่า} \quad 5.0 = 4.5 + \log\left(\frac{[\text{NaNO}_2]}{[\text{HNO}_2]}\right)$$

$$\therefore \frac{[\text{NaNO}_2]}{[\text{HNO}_2]} = 3.16$$

#### พีเอช 6.5

$$\text{แทนค่า} \quad 6.5 = 7.2 + \log\left(\frac{[\text{Na}_2\text{HPO}_4]}{[\text{NaH}_2\text{PO}_4]}\right)$$

$$\therefore \frac{[\text{Na}_2\text{HPO}_4]}{[\text{NaH}_2\text{PO}_4]} = 0.2$$

#### พีเอช 8.1

$$\text{แทนค่า} \quad 8.1 = 7.2 + \log\left(\frac{[\text{Na}_2\text{HPO}_4]}{[\text{NaH}_2\text{PO}_4]}\right)$$

$$\therefore \frac{[\text{Na}_2\text{HPO}_4]}{[\text{NaH}_2\text{PO}_4]} = 7.94$$

#### พีเอช 9.5

$$\text{แทนค่า} \quad 9.5 = 10.3 + \log\left(\frac{[\text{Na}_2\text{CO}_3]}{[\text{NaHCO}_3]}\right)$$

$$\therefore \frac{[\text{Na}_2\text{CO}_3]}{[\text{NaHCO}_3]} = 0.15$$

ได้กำหนดให้นำสามารถเกิดการเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชได้ไม่เกิน 1 พีเอช เมื่อมีการเติมกรดแก่ไปทำให้มีค่าความเข้มข้นกรดเป็น 0.05 โมลาร์ (Buffer Intensity ( $\beta$ ) เท่ากับ 0.05)

$$\text{จากสูตร} \quad \beta = 2.3 ([\text{H}^+] + [\text{OH}^-] + \alpha_1 \alpha_2 C_{T,A})$$

## พีเอช 5.0

$$\begin{aligned}
 \text{กำหนด} & \quad \alpha_1 = 0.24 & \alpha_2 = 0.76 \text{ (Snoeyink และ Jenkins, 1980)} \\
 \text{แทนค่า} & \quad 0.05 & = 2.3 \{10^{-5} + 10^{-9} + (0.24 \times 0.76 \times C_{T,A})\} \\
 \therefore C_{T,A} & & = \mathbf{0.119 \text{ โมลาร์}}
 \end{aligned}$$

## พีเอช 6.5

$$\begin{aligned}
 \text{กำหนด} & \quad \alpha_1 = 0.834 & \alpha_2 = 0.166 \text{ (Snoeyink และ Jenkins, 1980)} \\
 \text{แทนค่า} & \quad 0.05 & = 2.3 \{10^{-6.5} + 10^{-7.5} + (0.834 \times 0.166 \times C_{T,A})\} \\
 \therefore C_{T,A} & & = \mathbf{0.157 \text{ โมลาร์}}
 \end{aligned}$$

## พีเอช 8.1

$$\begin{aligned}
 \text{กำหนด} & \quad \alpha_1 = 0.114 & \alpha_2 = 0.886 \text{ (Snoeyink และ Jenkins, 1980)} \\
 \text{แทนค่า} & \quad 0.05 & = 2.3 \{10^{-8.1} + 10^{-5.9} + (0.114 \times 0.886 \times C_{T,A})\} \\
 \therefore C_{T,A} & & = \mathbf{0.215 \text{ โมลาร์}}
 \end{aligned}$$

## พีเอช 9.5

$$\begin{aligned}
 \text{กำหนด} & \quad \alpha_1 = 0.86 & \alpha_2 = 0.14 \text{ (Snoeyink และ Jenkins, 1980)} \\
 \text{แทนค่า} & \quad 0.05 & = 2.3 \{10^{-9.5} + 10^{-4.5} + (0.86 \times 0.14 \times C_{T,A})\} \\
 \therefore C_{T,A} & & = \mathbf{0.18 \text{ โมลาร์}}
 \end{aligned}$$

ดังนั้น ต้องเติมสารคู่บัฟเฟอร์ปริมาณดังนี้

$$\begin{aligned}
 \text{จากมวลโมเลกุลของ NaNO}_2 & = 23 + 14 + (16 \times 2) \\
 & = 69
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{จากมวลโมเลกุลของ HNO}_2 & = 1 + 14 + (16 \times 2) \\
 & = 47
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{จากมวลโมเลกุลของ Na}_2\text{HPO}_4 & = (23 \times 2) + 1 + 31 + (16 \times 4) \\
 & = 142
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{จากมวลโมเลกุลของ NaH}_2\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O} & = 23 + (1 \times 2) + 31 + (16 \times 4) + 18 \\
 & = 138
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{จากมวลโมเลกุลของ NaHCO}_3 & = 23 + 1 + 12 + (16 \times 3) \\
 & = 84
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{จากมวลโมเลกุลของ Na}_2\text{CO}_3 & = (23 \times 2) + 12 + (16 \times 3) \\
 & = 106
 \end{aligned}$$

## พีเอช 5.0

$$\begin{aligned}
 \text{จาก } [\text{NaNO}_2] / [\text{HNO}_2] &= 3.16 \\
 \therefore [\text{NaNO}_2] &= 3.16 [\text{HNO}_2] \\
 \text{จาก } C_{T,A} &= 0.119 \quad \text{โมลาร์} \\
 \therefore [\text{NaNO}_2] + [\text{HNO}_2] &= 0.119 \\
 3.16 [\text{HNO}_2] + [\text{HNO}_2] &= 0.119 \\
 [\text{HNO}_2] &= 0.119 / 4.16 \\
 &= 0.029 \quad \text{โมลาร์} \\
 \therefore \text{เติม } [\text{HNO}_2] &= 0.029 \times 47 \\
 &= 1.34 \quad \text{กรัม/ลิตร} \\
 \therefore [\text{NaNO}_2] &= 0.119 - 0.029 \\
 &= 0.09 \quad \text{โมลาร์} \\
 \therefore \text{เติม } [\text{NaNO}_2] &= 0.09 \times 69 \\
 &= 6.21 \quad \text{กรัม/ลิตร}
 \end{aligned}$$

## พีเอช 6.5

$$\begin{aligned}
 \text{จาก } [\text{Na}_2\text{HPO}_4] / [\text{NaH}_2\text{PO}_4] &= 0.2 \\
 \therefore [\text{Na}_2\text{HPO}_4] &= 0.2[\text{NaH}_2\text{PO}_4] \\
 \text{จาก } C_{T,A} &= 0.157 \quad \text{โมลาร์} \\
 \therefore [\text{Na}_2\text{HPO}_4] + [\text{NaH}_2\text{PO}_4] &= 0.157 \\
 0.2[\text{NaH}_2\text{PO}_4] + [\text{NaH}_2\text{PO}_4] &= 0.157 \\
 [\text{NaH}_2\text{PO}_4] &= 0.157 / 1.2 \\
 &= 0.131 \quad \text{โมลาร์} \\
 \therefore \text{เติม } \text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O} &= 0.131 \times 138 \\
 &= 18.06 \quad \text{กรัม/ลิตร} \\
 \therefore [\text{Na}_2\text{HPO}_4] &= 0.157 - 0.131 \\
 &= 0.026 \quad \text{โมลาร์} \\
 \therefore \text{เติม } \text{Na}_2\text{HPO}_4 &= 0.026 \times 142 \\
 &= 3.69 \quad \text{กรัม/ลิตร}
 \end{aligned}$$

## พีเอช 8.1

$$\begin{aligned}
 \text{จาก } [\text{Na}_2\text{HPO}_4] / [\text{NaH}_2\text{PO}_4] &= 7.94 \\
 \therefore [\text{Na}_2\text{HPO}_4] &= 7.94 [\text{NaH}_2\text{PO}_4]
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 \text{จาก } C_{T,A} &= 0.215 && \text{โมลาร์} \\
 \therefore [\text{Na}_2\text{HPO}_4] + [\text{NaH}_2\text{PO}_4] &= 0.215 \\
 7.94 [\text{NaH}_2\text{PO}_4] + [\text{NaH}_2\text{PO}_4] &= 0.215 \\
 [\text{NaH}_2\text{PO}_4] &= 0.215 / 8.94 \\
 &= 0.024 && \text{โมลาร์} \\
 \therefore \text{เติม } \text{NaH}_2\text{PO}_4 \bullet \text{H}_2\text{O} &= 0.024 \times 138 \\
 &= 3.32 && \text{กรัม/ลิตร} \\
 \therefore [\text{Na}_2\text{HPO}_4] &= 0.215 - 0.024 \\
 &= 0.191 && \text{โมลาร์} \\
 \therefore \text{เติม } \text{Na}_2\text{HPO}_4 &= 0.191 \times 142 \\
 &= 27.12 && \text{กรัม/ลิตร}
 \end{aligned}$$

#### พีเอช 9.5

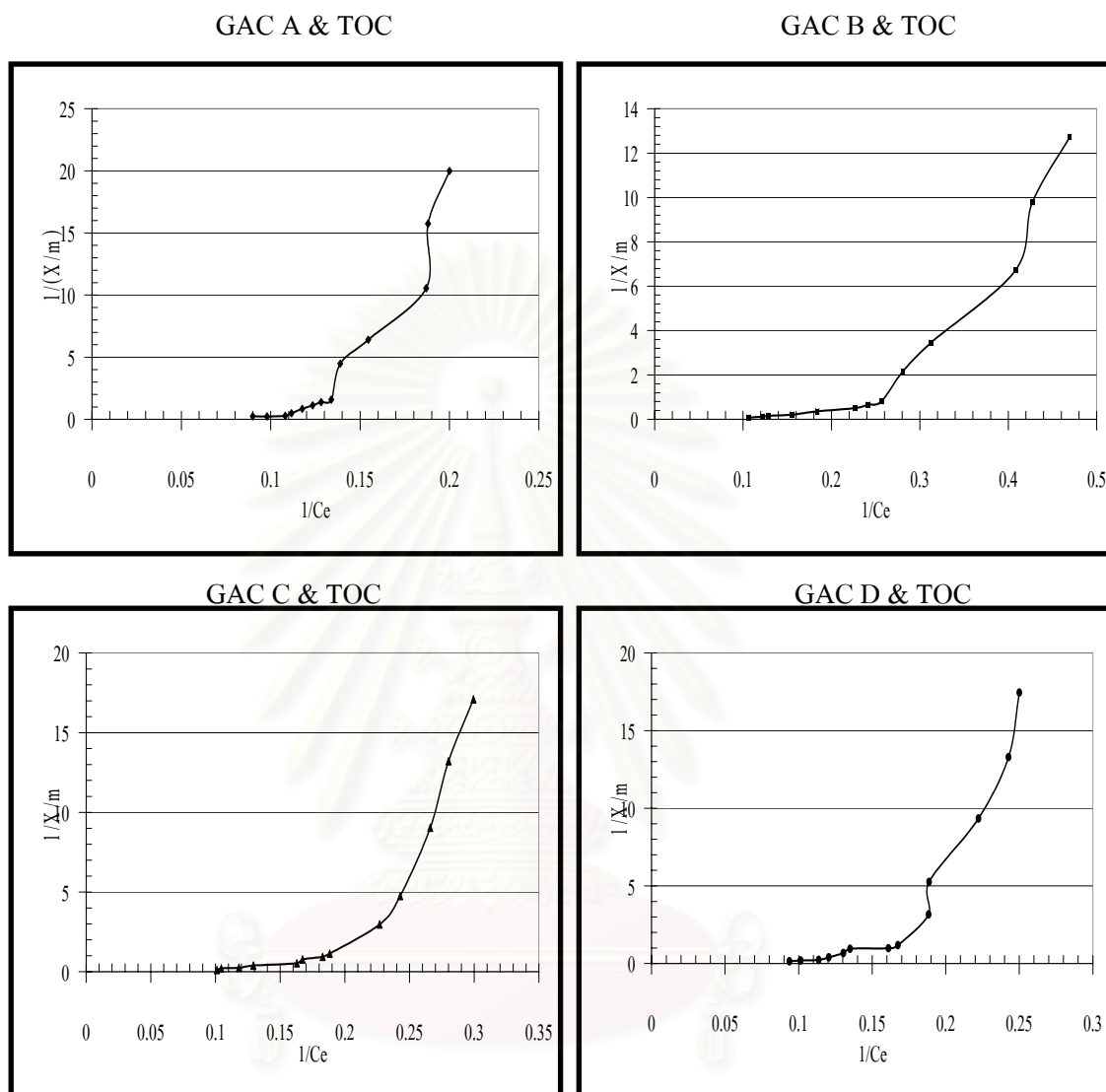
$$\begin{aligned}
 \text{จาก } [\text{Na}_2\text{CO}_3] / [\text{NaHCO}_3] &= 0.15 \\
 \therefore [\text{Na}_2\text{CO}_3] &= 0.15 [\text{NaHCO}_3] \\
 \text{จาก } C_{T,A} &= 0.18 && \text{โมลาร์} \\
 \therefore [\text{Na}_2\text{CO}_3] + [\text{NaHCO}_3] &= 0.18 \\
 0.15 [\text{NaHCO}_3] + [\text{NaHCO}_3] &= 0.18 \\
 [\text{NaHCO}_3] &= 0.18 / 1.15 \\
 &= 0.16 && \text{โมลาร์} \\
 \therefore \text{เติม } \text{NaHCO}_3 &= 0.16 \times 84 \\
 &= 13.44 && \text{กรัม/ลิตร} \\
 \therefore [\text{Na}_2\text{CO}_3] &= 0.18 - 0.16 \\
 &= 0.02 && \text{โมลาร์} \\
 \therefore \text{เติม } \text{Na}_2\text{CO}_3 &= 0.02 \times 106 \\
 &= 2.12 && \text{กรัม/ลิตร}
 \end{aligned}$$



ภาคผนวก ช.

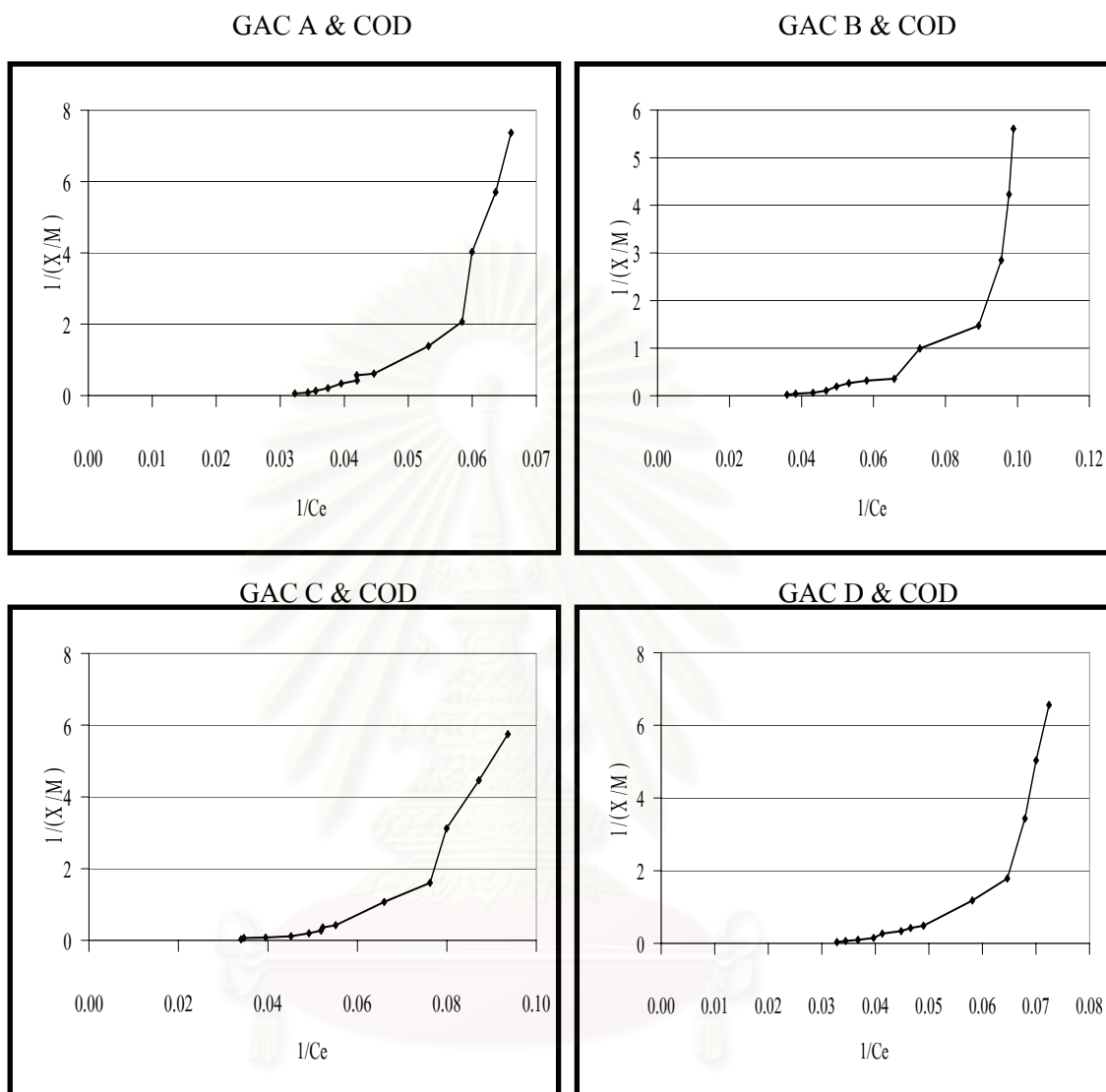
กราฟไอโซเทอร์มตามความสัมพันธ์แบบแลงมัวร์ไอโซเทอร์ม

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



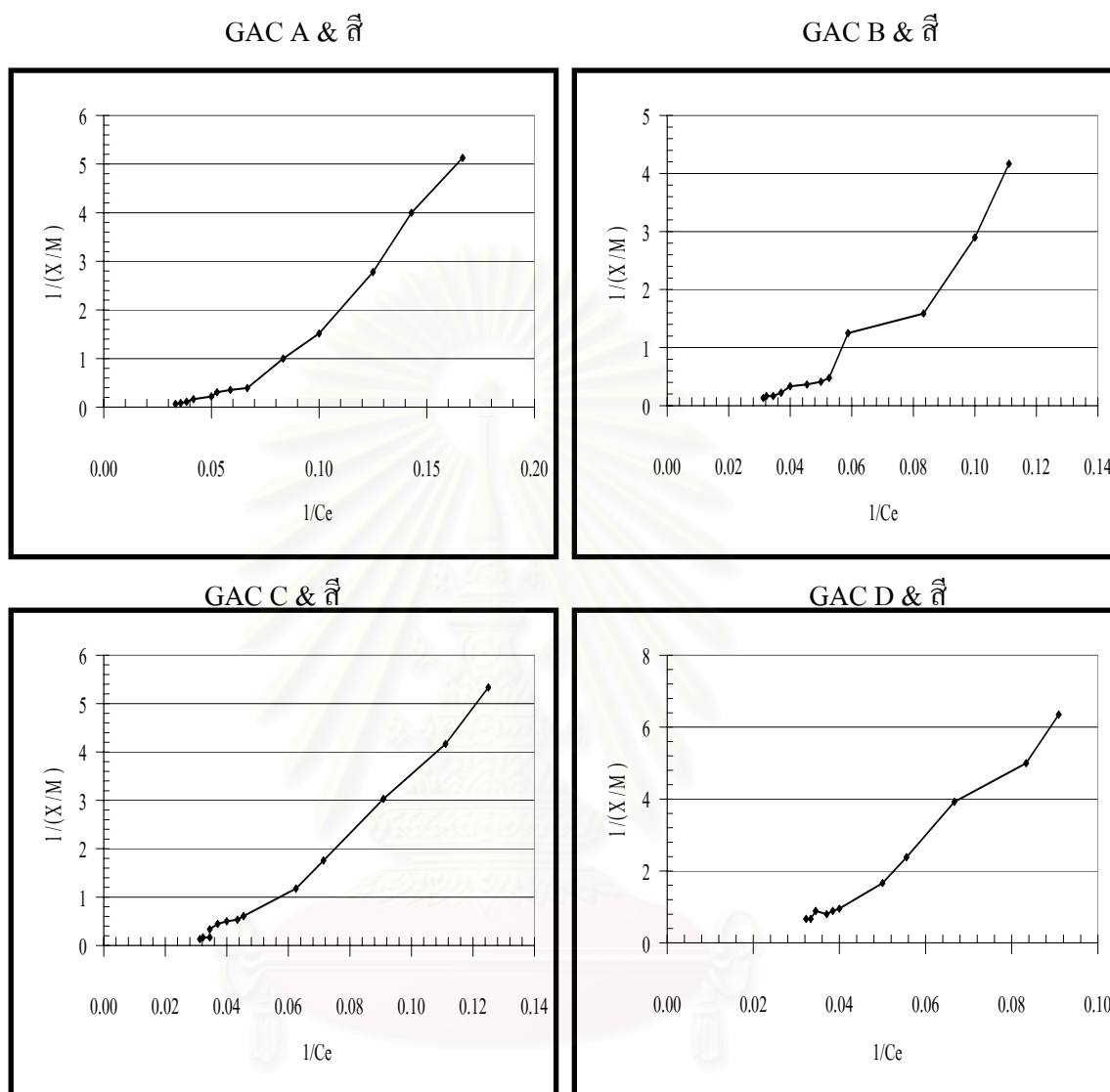
รูปที่ ๑.๑ แล่งมัวร์ไอโซเทอร์มของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ขนาดรูพรุนในรูปของ TOC

ดังนั้น จากลักษณะแล่งมัวร์ไอโซเทอร์มของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ขนาดรูพรุน ในรูปของทีโอซี กราฟไม่มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง ดังนั้นความสัมพันธ์แบบแล่งมัวร์ไอโซเทอร์มไม่สามารถอธิบายผลการทดลองนี้ได้



รูปที่ ช.2 แลغمัวร์ไอโซเทอร์มของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิดครุพูนในรูปของ COD

ดังนั้น จากลักษณะแลغمัวร์ไอโซเทอร์มของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิดครุพูน ในรูปของ ซีไอดี กราฟไม่มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง ดังนั้นความสัมพันธ์แบบแลغمัวร์ไอโซเทอร์มไม่สามารถอธิบายผลการทดลองนี้ได้



รูปที่ 3.3 แล่งมัวร์ไอโซเทอร์มของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิดรูปของคี

ดังนั้น จากลักษณะแล่งมัวร์ไอโซเทอร์มของถ่านกัมมันต์ทั้ง 4 ชนิดรูปของคี กราฟไม่มีความสัมพันธ์เป็นเส้นตรง ดังนั้นความสัมพันธ์แบบแล่งมัวร์ไอโซเทอร์มไม่สามารถอธิบายผลการทดลองนี้ได้



ภาคผนวก ซ.  
การคำนวณความจุจุดตัดผิวสูงสุด

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



### การคำนวณค่าความจุกดติดผิวสูงสุด

โดยที่ไอซี ซีไอดี และสีเริ่มต้นของน้ำทิ้งเท่ากับ 14 มก./ล., 33.87 มก./ล. และ 32 เอดีเอ็มไอ

#### ค่าความจุกดติดที่ไอซีสูงสุด

ถ่านกัมมันต์เอ

จากสมการฟรอนคลิชไอโซเทอร์ม

$$X/M = 2 \times 10^{-6} C_e^{6.1583}$$

$$\begin{aligned} \therefore X/M &= 2 \times 10^{-6} (14)^{6.1583} \\ &= 22.87 \end{aligned}$$

มก./ก.ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์บี

จากสมการฟรอนคลิชไอโซเทอร์ม

$$X/M = 0.0071 C_e^{3.4418}$$

$$\begin{aligned} \therefore X/M &= 0.0071 (14)^{3.4418} \\ &= 62.52 \end{aligned}$$

มก./ก.ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ซี

จากสมการฟรอนคลิชไอโซเทอร์ม

$$X/M = 0.0004 C_e^{4.3436}$$

$$\begin{aligned} \therefore X/M &= 0.0004 (14)^{4.3436} \\ &= 38.05 \end{aligned}$$

มก./ก.ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ดี

จากสมการฟรอนคลิชไอโซเทอร์ม

$$X/M = 7 \times 10^{-5} C_e^{4.9468}$$

$$\begin{aligned} \therefore X/M &= 7 \times 10^{-5} (14)^{4.9468} \\ &= 32.72 \end{aligned}$$

มก./ก.ถ่านกัมมันต์

### ค่าความจุจุดตัดซีไอดีสูงสุด

ถ่านกัมมันต์เอ

จากสมการฟรอนคลิชไอโซเทอร์ม

$$X/M = 5 \times 10^{-9} C_e^{6.3366}$$

$$\begin{aligned} \therefore X/M &= 5 \times 10^{-9} (33.87)^{6.3366} \\ &= 24.71 \end{aligned}$$

มก./ก.ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์บี

จากสมการฟรอนคลิชไอโซเทอร์ม

$$X/M = 3 \times 10^{-6} C_e^{4.8566}$$

$$\begin{aligned} \therefore X/M &= 3 \times 10^{-6} (33.87)^{4.8566} \\ &= 80.69 \end{aligned}$$

มก./ก.ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ซี

จากสมการฟรอนคลิชไอโซเทอร์ม

$$X/M = 1 \times 10^{-6} C_e^{4.9744}$$

$$\begin{aligned} \therefore X/M &= 1 \times 10^{-6} (33.87)^{4.9744} \\ &= 40.73 \end{aligned}$$

มก./ก.ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์ดี

จากสมการฟรอนคลิชไอโซเทอร์ม

$$X/M = 3 \times 10^{-8} C_e^{5.9339}$$

$$\begin{aligned} \therefore X/M &= 3 \times 10^{-8} (33.87)^{5.9339} \\ &= 35.88 \end{aligned}$$

มก./ก.ถ่านกัมมันต์

### ค่าความจุจุดตัดอีสูงสุด

ถ่านกัมมันต์เอ

จากสมการฟรอนคลิชไอโซเทอร์ม

$$X/M = 0.0014 C_e^{2.6969}$$

$$\begin{aligned} \therefore X/M &= 0.0014 (32)^{2.6969} \\ &= 16.05 \end{aligned}$$

เอดีเอ็มไอ/ก.ถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์บี

จากสมการฟรอนคลิชไอโซเทอร์ม

$$X/M = 0.0008C_e^{2.6164}$$

$$\therefore X/M = 0.0008(32)^{2.6164}$$

$$= 6.94 \quad \text{เอดีเอ็มไอ/ก.ถ่านกัมมันต์}$$

ถ่านกัมมันต์ซี

จากสมการฟรอนคลิชไอโซเทอร์ม

$$X/M = 0.0009C_e^{2.4817}$$

$$\therefore X/M = 0.0009(32)^{2.4817}$$

$$= 4.89 \quad \text{เอดีเอ็มไอ/ก.ถ่านกัมมันต์}$$

ถ่านกัมมันต์ดี

จากสมการฟรอนคลิชไอโซเทอร์ม

$$X/M = 0.0007C_e^{2.2458}$$

$$\therefore X/M = 0.0007(32)^{2.2458}$$

$$= 1.68 \quad \text{เอดีเอ็มไอ/ก.ถ่านกัมมันต์}$$

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ภาคผนวก ฉ.

การคำนวณความจุดูดติดผิวในแบบคอลัมน์

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### การคำนวณค่าความจุดูดติดผิวในแบบคอลัมน์

#### ค่าความจุดูดติดของถ่านกัมมันต์ ในคอลัมน์

$$\begin{aligned} \text{ความจุดูดติดในคอลัมน์} &= \frac{\text{ปริมาณที่สะสมในคอลัมน์ (X)}}{\text{ปริมาณถ่านกัมมันต์ในคอลัมน์ (M)}} \\ (\text{จนกระทั่งน้ำออกมีที่ไอซีมากกว่า 6 มก./ล.}) \end{aligned}$$

#### ค่าความจุดูดติดของถ่านกัมมันต์บี ในแบบคอลัมน์

$$\text{ปริมาณถ่านกัมมันต์บีในคอลัมน์} = 132.07 \quad \text{ก.}$$

#### ค่าความจุดูดติดที่ไอซี

$$\begin{aligned} \text{ระยะเวลาสัมผัส 15 นาที} \\ \text{มีปริมาณที่ไอซีสะสมในคอลัมน์} &= 900 \quad \text{มก.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore \text{ค่าความจุดูดติดที่ไอซี ที่ 15 นาที} &= 900 / 132.07 \\ &= 6.82 \quad \text{มก./ก.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที} \\ \text{มีปริมาณที่ไอซีสะสมในคอลัมน์} &= 2100 \quad \text{มก.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore \text{ค่าความจุดูดติดที่ไอซี ที่ 30 นาที} &= 2100 / 132.07 \\ &= 15.90 \quad \text{มก./ก.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ระยะเวลาสัมผัส 60 นาที} \\ \text{มีปริมาณที่ไอซีสะสมในคอลัมน์} &= 4350 \quad \text{มก.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore \text{ค่าความจุดูดติดที่ไอซี ที่ 60 นาที} &= 4350 / 132.07 \\ &= 32.94 \quad \text{มก./ก.} \end{aligned}$$

#### ค่าความจุดูดติดซีโอดี

$$\begin{aligned} \text{ระยะเวลาสัมผัส 15 นาที} \\ \text{มีปริมาณซีโอดีสะสมในคอลัมน์} &= 2200 \quad \text{มก.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore \text{ค่าความจุดูดติดซีโอดี ที่ 15 นาที} &= 2200 / 132.07 \\ &= 16.65 \quad \text{มก./ก.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{ระยะเวลาสัมผัส 30 นาที} \\ \text{มีปริมาณซีโอดีสะสมในคอลัมน์} &= 4600 \quad \text{มก.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \therefore \text{ค่าความจุดูดติดซีโอดี ที่ 30 นาที} &= 4600 / 132.07 \\ &= 34.83 \quad \text{มก./ก.} \end{aligned}$$

ระยะเวลาสัมพัทธ์ 60 นาที			
มีปริมาณซีไอดีสะสมในคอถัมน์	=	9900	มก.
∴ ค่าความจุดูดติดซีไอดี ที่ 60 นาที	=	9900 / 132.07	
	=	74.96	มก./ก.

### ค่าความจุดูดติดซีไอดี

ระยะเวลาสัมพัทธ์ 15 นาที			
มีปริมาณซีไอดีสะสมในคอถัมน์	=	95	เอดีเอ็มไอ
∴ ค่าความจุดูดติดซีไอดี ที่ 15 นาที	=	95 / 132.07	
	=	0.72	เอดีเอ็มไอ/ก.
ระยะเวลาสัมพัทธ์ 30 นาที			
มีปริมาณซีไอดีสะสมในคอถัมน์	=	360	เอดีเอ็มไอ
∴ ค่าความจุดูดติดซีไอดี ที่ 30 นาที	=	360 / 132.07	
	=	2.73	เอดีเอ็มไอ/ก.
ระยะเวลาสัมพัทธ์ 60 นาที			
มีปริมาณซีไอดีสะสมในคอถัมน์	=	890	เอดีเอ็มไอ
∴ ค่าความจุดูดติดซีไอดี ที่ 60 นาที	=	890 / 132.07	
	=	6.74	เอดีเอ็มไอ/ก.

### ค่าความจุดูดติดของถ่านกัมมันต์เอ ซี และดี ในแบบคอถัมน์

ปริมาณถ่านกัมมันต์เอในคอถัมน์	=	58.19	ก.
ปริมาณถ่านกัมมันต์ซีในคอถัมน์	=	144.07	ก.
ปริมาณถ่านกัมมันต์ดีในคอถัมน์	=	142.07	ก.

### ค่าความจุดูดติดทีไอซี

ถ่านกัมมันต์เอ			
มีปริมาณทีไอซีสะสมในคอถัมน์	=	490	มก.
∴ ค่าความจุดูดติดทีไอซี ถ่านกัมมันต์เอ	=	490 / 58.19	
	=	8.42	มก./ก.
ถ่านกัมมันต์ซี			
มีปริมาณทีไอซีสะสมในคอถัมน์	=	1700	มก.
∴ ค่าความจุดูดติดทีไอซี ถ่านกัมมันต์ซี	=	1700 / 144.07	
	=	11.80	มก./ก.



ถ่านกัมมันต์ดี			
มีปริมาณที่ไอซีสะสมในคอลัมน์	=	1250	มก.
∴ ค่าความจุดูดติดที่ไอซี ถ่านกัมมันต์ดี	=	1250 / 142.07	
	=	8.80	มก./ก.

#### ค่าความจุดูดติดซีโอดี

ถ่านกัมมันต์เอ			
มีปริมาณซีโอดีสะสมในคอลัมน์	=	1050	มก.
∴ ค่าความจุดูดติดซีโอดี ถ่านกัมมันต์เอ	=	1050 / 58.19	
	=	18.04	มก./ก.

ถ่านกัมมันต์ซี			
มีปริมาณซีโอดีสะสมในคอลัมน์	=	3850	มก.
∴ ค่าความจุดูดติดซีโอดี ถ่านกัมมันต์ซี	=	3850 / 144.07	
	=	26.72	มก./ก.

ถ่านกัมมันต์ดี			
มีปริมาณซีโอดีสะสมในคอลัมน์	=	2900	มก.
∴ ค่าความจุดูดติดซีโอดี ถ่านกัมมันต์ดี	=	2900 / 142.07	
	=	20.41	มก./ก.

#### ค่าความจุดูดติดลี

ถ่านกัมมันต์เอ			
มีปริมาณลีสะสมในคอลัมน์	=	180	เอดีเอ็มไอ
∴ ค่าความจุดูดติดลี ถ่านกัมมันต์เอ	=	180 / 58.19	
	=	3.09	เอดีเอ็มไอ/ก.

ถ่านกัมมันต์ซี			
มีปริมาณลีสะสมในคอลัมน์	=	580	เอดีเอ็มไอ
∴ ค่าความจุดูดติดลี ถ่านกัมมันต์ซี	=	580 / 144.07	
	=	4.03	เอดีเอ็มไอ/ก.

ถ่านกัมมันต์ดี			
มีปริมาณลีสะสมในคอลัมน์	=	220	เอดีเอ็มไอ
∴ ค่าความจุดูดติดลี ถ่านกัมมันต์ดี	=	220 / 142.07	
	=	1.54	เอดีเอ็มไอ/ก.

### ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาว ภัทธน์ถนุ บุษสาย เกิดเมื่อวันที่ 28 สิงหาคม พ.ศ. 2525 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ในปีการศึกษา 2545 และเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อ พ.ศ. 2546



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย