

# การกำจัดสีจากน้ำชะมูลฝอยโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม

## Color Removal from Leachate Using Activated Carbon from Tamarind Seeds

Thares Srisatit and Jakkarin Nakrai

ธเรศ ศรีสถิตย์ และ จักกริน นกไร่

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330

E-mail: fentss@eng.chula.ac.th

### บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถในการดูดซับสีของน้ำชะมูลฝอยโดยใช้ถ่านกัมมันต์ที่เตรียมจากเมล็ดมะขาม ที่ผ่านกระบวนการกระตุ้นทางเคมีโดยใช้สารซิงค์คลอไรด์ ( $ZnCl_2$ ) เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์เกรดการค้า (Filtrisorb 300) ผลการทดลองในขั้นเตรียมถ่านพบว่าถ่านกัมมันต์ที่ผลิตจากเมล็ดมะขามมีค่าไอโอดีนนัมเบอร์ 724 มิลลิกรัมต่อกรัม พื้นที่ผิว 849.32 ตารางเมตรต่อกรัม น้อยกว่าถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 ที่มีค่าไอโอดีนนัมเบอร์ 982 มิลลิกรัมต่อกรัม พื้นที่ผิว 1,496.59 ตารางเมตรต่อกรัม และจากการทดลองแบบแบทช์เพื่อศึกษาถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการดูดซับสีของน้ำชะมูลฝอยโดยใช้ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามพบว่าที่พีเอช 8 และเวลาสัมผัส 90 นาที มีความเหมาะสมมากที่สุด การทดสอบไอโซเทอมการดูดซับสี สามารถอธิบายได้ด้วยไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช โดยมีค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับสี ( $K$ ) เท่ากับ 1.65 แพลทดินัม-โคบอลต์ต่อกรัมถ่าน และ  $1/n$  มีค่าเท่ากับ 0.7876 ส่วนถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 พบว่ามีค่า  $K$  เท่ากับ 2.05 แพลทดินัม-โคบอลต์ต่อกรัมถ่าน และ  $1/n$  มีค่าเท่ากับ 0.9305 ผลของการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์ทั้งสองชนิด โดยล้างถ่านกัมมันต์ด้วยกรดอะซิติก ( $CH_3COOH$ ) เข้มข้นร้อยละ 5 พบว่ามีประสิทธิภาพลดลงตามลำดับครั้งที่ฟื้นฟูสภาพ ส่วนการทดลองแบบต่อเนื่องโดยใช้ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามบรรจุในถังดูดซับสีแบบแท่ง เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.3 เซนติเมตร ป้อนน้ำชะมูลฝอยแบบไหลลงอย่างต่อเนื่องที่อัตราการไหล 0.6 ลิตร/วินาที และทำการเก็บตัวอย่างที่ชั้นความสูง 30, 60, 90 และ 120 เซนติเมตร สามารถบำบัดน้ำเสียได้ 4.85, 5.88, 6.63, 8.94 ลิตร ตามลำดับ ส่วนถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 สามารถบำบัดน้ำเสียได้ 6.82, 8.84, 11.93, 11.94 ลิตร ตามลำดับ

คำสำคัญ: ถ่านกัมมันต์ เมล็ดมะขาม น้ำชะมูลฝอย สี

The purpose of this research is to study the color removal from landfill leachate by using activated carbon from tamarind seeds. They were made by chemical activated process by using zinc chloride ( $ZnCl_2$ ) and washed by 5% hydrochloric acid (HCl) and then compared the efficiency with commercial activated carbon (Filtrisorb 300). The results in the carbon preparation showed that the activated carbon from tamarind seed had iodine number 724 mg/g and surface area 849.32  $m^2/g$ . Both characteristics were less than Filtrisorb 300 activated carbon which had the iodine number 982 mg/g and surface area 1,496.59  $m^2/g$ . In batch experiment, the factor effecting on leachate adsorption efficiency was studied by tamarind seed activated carbon, the results showed that the best adsorption efficiency of both types were at pH 8 and contact time at 90 minutes. From adsorptive isotherm test, the results can be explained by Freundlich isotherm, with adsorptive capacity constant (K) of 1.65 pt-co/g-carbon and the value of  $1/n$  was 0.7876. The Filtrisorb 300 activated carbon with K of 2.05 pt-co/g-carbon obtained the value of  $1/n$  at 0.9305. From efficiency in both activated carbon regeneration test, which washed by 5% acetic acid ( $CH_3COOH$ ) had reduced efficiency by the time of regeneration. In continuous studies, activated carbon from tamarind seeds was used for packing in the column with 2.3 centimeters in diameter. Leachate, which was fed continuously down flow with 0.6  $m^3/m^2-hr$  and collected at the height level of 30, 60, 90 and 120 centimeters, can remove the color of leachate 4.85, 5.88, 6.63, 8.94 liters, respectively. The Filtrisorb 300 activated carbon can remove the color of leachate 6.82, 8.84, 11.93, 11.94 liters respectively.

**Keywords:** activated carbon, tamarind seeds, landfill leachate, color

## คำนำ

น้ำชะมูลฝอยเกิดขึ้นจากปฏิกิริยาทางเคมีและชีวภาพในหลุมฝังกลบมูลฝอย น้ำชะมูลฝอยมักมีสีน้ำตาลดำที่เกิดจากสารประกอบฮิวมิก (humic substance) ซึ่งสีของน้ำชะมูลฝอยนั้นนอกจากจะก่อให้เกิดความรู้สึกพึงรังเกียจต่อผู้ที่พบเห็นแล้ว หากน้ำชะมูลฝอยมีความเข้มข้นของสีสูงปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำจะขัดขวางการเดินทางของแสงแดดลงสู่แหล่งน้ำ เกิดผลกระทบต่อระบบนิเวศน์ในน้ำ กรณีสถานที่ฝังกลบมีอายุมาก ลักษณะน้ำชะมูลฝอย

ประกอบด้วยสารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อนที่มีมวลโมเลกุลสูง มีการย่อยสลายโดยวิธีทางชีวภาพได้ยาก จึงเหมาะที่จะบำบัดโดยวิธีทางกายภาพเคมี [1]

ถ่านกัมมันต์สามารถผลิตได้จากวัตถุดิบที่มีส่วนประกอบของคาร์บอน เช่น ถ่านแอนทราไซต์ บิทูมินัส ลิกไนต์ ถ่านพีส และวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร โดยนำมาเผาเป็นถ่านจากนั้นจะนำมากระตุ้นโดยวิธีทางกายภาพหรือโดยวิธีทางเคมี เช่น การกระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์ เพอร์ริกคลอไรด์ โซเดียมคลอไรด์ ฯลฯ เพื่อให้ถ่านกัมมันต์มีพื้นที่ผิวเพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับสี

ต่างๆ สูงขึ้น [2] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำเมล็ดมะขามที่สามารถหาได้ในท้องถิ่นมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่านกัมมันต์ อันจะเป็นการแปรรูปวัสดุที่มีราคาถูกให้เป็นวัสดุที่มีมูลค่าและคุณค่าสูงขึ้น โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม และนำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้มากำจัดสีน้ำชะมูลฝอย โดยศึกษาถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีอิทธิพลต่อการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอย และศึกษาประสิทธิภาพในการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์

### อุปกรณ์และวิธีการ

ขั้นตอนที่ 1 การเตรียมถ่านกัมมันต์ การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิต และการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของถ่านกัมมันต์

ผลของอุณหภูมิและเวลาในการเผาถ่านบอไนซ์ (carbonization)

นำเมล็ดมะขามมาอบให้แห้งและเผาถ่านบอไนซ์แบบจำกัดอากาศ ให้เป็นถ่านที่อุณหภูมิ 200-400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15-150 นาที ชั่งน้ำหนักถ่าน หาค่าร้อยละผลผลิตเมล็ดมะขามเลือกอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุด

ผลของอัตราส่วนสารกระตุ้นและอุณหภูมิในการเผากระตุ้น

นำถ่านเมล็ดมะขามที่เตรียมได้จากสภาวะที่เหมาะสม มาบดคัดขนาด 8-20 เมช (0.85-2.36 มิลลิเมตร) และนำมาแช่สารละลายซิงค์คลอไรด์เข้มข้น ร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก ที่อัตราส่วน 1:0, 1:1, 1:2, 1:3 และ 1:4 โดยน้ำหนักของเมล็ดมะขามต่อสารซิงค์คลอไรด์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำมาอบให้แห้ง แยกถ่านเมล็ดมะขามเป็นสองส่วนก่อนนำเข้าสู่

กระบวนการเผากระตุ้นในเตาเผาที่อุณหภูมิ 500, 600, 700 และ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำถ่านกัมมันต์ที่ได้มาล้างสารเคมีออก โดยถ่านกัมมันต์ส่วนที่หนึ่งจะล้างด้วยน้ำสะอาด ส่วนที่สองจะล้างเพิ่มด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก (HCl) เข้มข้นร้อยละ 5 แล้วล้างตามด้วยน้ำกลั่นจนค่าพีเอชของที่สภาพเป็นกลาง นำไปอบให้แห้ง ทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น นำมาชั่งน้ำหนัก หาร้อยละผลผลิต นำถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้ และถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 ซึ่งเป็นถ่านที่มีขายในท้องตลาดที่นำมาจากถ่านหินบิทูมินัส (bituminous coal) และเป็นที่ยอมรับใช้ในกระบวนการบำบัดน้ำเสีย มาวิเคราะห์ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ [3] เพื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติของถ่านทั้งสองชนิด

ศึกษาคุณสมบัติและลักษณะทางกายภาพของถ่านกัมมันต์

ทำการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพได้แก่พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน ขนาดของรูพรุนเฉลี่ย ร้อยละเถ้า ร้อยละความชื้น ปริมาณคาร์บอนคงตัวทั้งหมด ปริมาณสารอินทรีย์ระเหย และถ่ายภาพพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ที่ได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (scanning electron microscope)

ขั้นตอนที่ 2 การศึกษาความสามารถและปัจจัยที่มีผลต่อการดูดติดสีน้ำชะมูลฝอยของถ่านกัมมันต์

ในขั้นตอนนี้จะทำการศึกษาความสามารถในการดูดติดสีน้ำชะมูลฝอยของถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 โดยน้ำชะมูลฝอยที่ใช้ในงานวิจัยเก็บจากบ่อบำบัดน้ำชะมูลฝอย สถานที่ฝังกลบมูลฝอยเทศบาลตำบลแสนสุข อ.บางพระ จ.ชลบุรี วัดความเข้มข้นสีด้วยเครื่อง

สเปคโตรโฟโตมิเตอร์โดยเปรียบเทียบกับความเข้มข้นของสารละลายในหน่วยแพลททินัม-โคบอลต์ (Pt-Co) ซึ่งเตรียมจากสารโพแทสเซียมคลอโรแพลททินเนท ( $K_2PtCl_6$ ) และผลึกโคบอลต์คลอไรด์ ( $CoCl_2 \cdot 6H_2O$ ) แล้วเจือจางตามอัตราส่วนของความเข้มข้น [4]

#### อิทธิพลของพีเอชต่อการดูดติดผิว

นำน้ำชะมูลฝอยปริมาตร 50 มิลลิลิตร มาปรับค่าพีเอชตั้งแต่ 2-9 เดิมถ่านกัมมันต์ ขนาด 325 เมช ปริมาณ 0.5 กรัม และนำไปเขย่าบนเครื่องเขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นกรองถ่านกัมมันต์ออก วัดค่าพีเอชและความเข้มข้นที่เหลือ

#### อิทธิพลของเวลาสัมผัสต่อการดูดติดผิว

นำน้ำชะมูลฝอยปริมาตร 50 มิลลิลิตร มาปรับค่าพีเอชให้เท่ากับค่าพีเอชที่ได้จากขั้นตอนการหาพีเอชที่มีร้อยละการกำจัดสีดีที่สุดมาใส่ลงในขวดทดลอง เดิมถ่านกัมมันต์ ขนาด 325 เมช ปริมาณ 0.5 กรัม และนำไปเขย่าบนเครื่องเขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 0, 5, 10, 15, 30, 60, 120 และ 240 นาที จากนั้นกรองถ่านกัมมันต์ออก วัดค่าพีเอชและความเข้มข้นที่เหลือ

#### การทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์

นำน้ำชะมูลฝอยปริมาตร 50 มิลลิลิตร มาปรับค่าพีเอชให้เท่ากับค่าพีเอชที่ได้จากขั้นตอนการหาพีเอชที่มีร้อยละการกำจัดสีดีที่สุด เดิมถ่านกัมมันต์ ขนาด 325 เมช ปริมาณ 0.01, 0.02, 0.04, 0.1, 0.2, 0.4, 1.0, 2.0 และ 4.0 กรัม ลงในขวดแต่ละใบตามลำดับ [5] นำไปเขย่าบนเครื่องเขย่าด้วยความเร็ว 200 รอบต่อ

นาที เป็นเวลาที่ได้จากขั้นตอนการหาเวลาสัมผัสที่มีร้อยละการกำจัดสีดีที่สุด กรองถ่านกัมมันต์ออกแล้ว นำน้ำชะมูลฝอยไปวัดปริมาณสีที่เหลือ นำค่าที่ได้มาเขียนกราฟสมการไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช (freundlich isotherm) และแลงมัวร์ (langmuir isotherm)

#### ขั้นตอนที่ 3 การศึกษาประสิทธิภาพในการฟื้นสภาพถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอย

นำน้ำชะมูลฝอยปริมาตร 50 มิลลิลิตร มาปรับค่าพีเอชให้เท่ากับค่าพีเอชที่ได้จากขั้นตอนการหาพีเอชที่มีร้อยละการกำจัดสีดีที่สุด มาใส่ลงในขวดทดลอง เดิมถ่านกัมมันต์ขนาด 325 เมช ปริมาณ 0.5, 1.0, 2.0, 4.0 กรัม ลงในขวดแต่ละใบ นำขวดไปเขย่าบนเครื่องเขย่า ที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที เป็นเวลาที่ได้จากขั้นตอนการหาเวลาสัมผัสที่มีร้อยละการกำจัดสีดีที่สุด จากนั้นกรองถ่านกัมมันต์ออก วัดค่าพีเอชและความเข้มข้นที่เหลือ แล้วนำถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการกำจัดสีมาล้างด้วยสารละลายกรดอะซิติก ( $CH_3COOH$ ) เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ตามด้วยน้ำกลั่น นำไปอบให้แห้ง ชั่งน้ำหนักที่เหลือ และนำมาดูดติดผิวสีน้ำชะมูลฝอยอีกครั้ง และทำการฟื้นสภาพซ้ำอีก 2 รอบ เพื่อหาประสิทธิภาพในการฟื้นสภาพถ่านกัมมันต์

#### ขั้นตอนที่ 4 การศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยของถ่านกัมมันต์โดยการทดลองแบบต่อเนื่องในถังดูดติดผิวแบบแท่ง (column test)

นำถ่านกัมมันต์มาคัดขนาดให้อยู่ในช่วง 8-30 เมช (0.59-2.36 มิลลิเมตร) มาบรรจุลงในถังดูดติดผิวแบบแท่ง ที่เป็นท่ออะคริลิกใส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 2.3 เซนติเมตร เจาะรูเพื่อเก็บตัวอย่างน้ำที่ระดับความลึกของชั้นถ่านกัมมันต์ที่ 30.

60, 90 และ 120 เซนติเมตร บันที่ก้นน้ำหนักของ ถ่านกัมมันต์ที่ใช้บรรจุในคอลัมน์สูง 120 เซนติเมตร จำนวน 2 คอลัมน์ จากนั้นทำการป้อนน้ำชะมูลฝอยที่ ทราบความเข้มข้นแน่นอน และมีค่าพีเอชที่ได้จาก ขั้นตอนการหาพีเอชที่มีร้อยละการกำจัดสีกี่ที่สุด ด้วยอัตราบรรจุทางชลศาสตร์ เท่ากับ  $0.6 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{-ชม}$ . เก็บตัวอย่างน้ำชะมูลฝอยที่ปลายคอลัมน์ทั้ง 2 คอลัมน์ ทุกๆ ชั่วโมงในช่วงแรก และอีกทุกๆ 2-4 ชั่วโมง ความลำดับ จนกว่าค่าความเข้มข้นที่วิเคราะห์ได้จะมีค่า ใกล้เกี่ยวกับความเข้มข้นน้ำเข้า จึงยุติการทดลอง วัดค่าพีเอชและความเข้มข้นที่เหลือแล้วสร้างกราฟ breakthrough curve

### ผลการทดลองและวิจารณ์

#### ผลของอุณหภูมิและเวลาในการเผาคาร์บอนในซ์ต่อค่า ร้อยละผลผลิตของถ่านเมล็ดมะขาม

จากการนำเมล็ดมะขามไปเผาแบบจำกัด อากาศที่อุณหภูมิ 200-400 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15-150 นาที ให้เป็นถ่านก่อนนำไปกระตุ้น พบว่าได้ ถ่านเมล็ดมะขามที่ได้มีผลผลิตสูงสุด เท่ากับร้อยละ 52.11 จากการเผาที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็น เวลา 30 นาที โดยร้อยละผลผลิตของถ่านที่ได้จะ ลดลง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิและเวลาที่ใช้ในการเผาสูงขึ้น เนื่องจากในเมล็ดมะขามนอกจากจะมีสารเจลาติน (jellöse) เป็นองค์ประกอบหลักแล้ว [6] ยังมี สารประกอบอื่นๆ หลายชนิด ซึ่งมีการสลายตัวที่ อุณหภูมิแตกต่างกัน หากใช้อุณหภูมิและเวลาในการ เผาเพิ่มขึ้นสารที่สลายตัวก็จะมีจำนวนมากขึ้น [7]

#### ผลของอัตราส่วนสารกระตุ้นและอุณหภูมิในการเผา กระตุ้นต่อค่าร้อยละผลผลิตของถ่านกัมมันต์

การทดลองหาอัตราส่วนการกระตุ้นและ อุณหภูมิในการเผาที่เหมาะสม พบว่าผลผลิตจะลดลง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการเผาให้สูงขึ้น การเผากระตุ้นที่ อุณหภูมิเดียวกันแต่อัตราส่วนตัวกระตุ้นต่างกัน ที่อัตราส่วนถ่านเมล็ดมะขามต่อซิงค์คลอไรด์เป็น 1:0 คือไม่มีการแพร่สารละลายซิงค์คลอไรด์เลย จะให้ค่า ร้อยละผลผลิตต่ำกว่าที่อัตราส่วนอื่นๆ ทั้งนี้เพราะว่า ในขณะที่เผากระตุ้น ซิงค์คลอไรด์จะช่วยรักษาเนื้อ ถ่านเมล็ดมะขามไว้ ดังนั้น ที่อัตราส่วน 1:1, 1:2, 1:3 และ 1:4 ร้อยละผลผลิตที่ได้จึงมีค่ามากกว่า และมีค่า ใกล้เคียงกันในแต่ละอุณหภูมิการเผา และพบว่า การ ล้างด้วยกรดจะทำให้ค่าร้อยละผลผลิตลดลงเล็กน้อยเมื่อ เทียบกับการล้างด้วยน้ำสะอาดเพียงอย่างเดียว

#### ผลของอัตราส่วนสารกระตุ้นและอุณหภูมิในการเผา กระตุ้นต่อค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์

ถ่านกัมมันต์จะให้ค่าไอ โอดีนนัมเบอร์ สูงสุดที่การกระตุ้นด้วยอัตราส่วนถ่านเมล็ดมะขาม ต่อซิงค์คลอไรด์โดยน้ำหนัก คือ 1:2 และเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบการล้างด้วย น้ำสะอาดกับการล้างเพิ่มด้วยกรดไฮโดรคลอริก เข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก พบว่าการล้างด้วย น้ำสะอาดจะให้ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ เท่ากับ 508 มิลลิกรัมต่อกรัม ขณะที่การล้างเพิ่มด้วยกรดจะให้ค่า ไอโอดีนนัมเบอร์ เท่ากับ 724 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งยังมีค่าต่ำกว่าค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่าน Filtrasorb 300 เท่ากับ 982 มิลลิกรัมต่อกรัม

ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์ที่ล้าง  
 เพิ่มด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น ร้อยละ 5 โดย  
 น้ำหนัก จะมีค่ามากกว่าถ่านกัมมันต์ที่ล้างด้วย  
 น้ำสะอาดเพียงอย่างเดียว จากการนำถ่านกัมมันต์ไป  
 วิเคราะห์ด้วยเครื่องมือ Thermal Gravimetric Analysis  
 (TGA) พบว่าการล้างด้วยกรดนั้นจะช่วยลดปริมาณ  
 สารอินทรีย์ระเหยและขี้เถ้าที่ยังคงมีค้างอยู่ใน  
 ถ่านกัมมันต์ได้ ทำให้สัดส่วนปริมาณคาร์บอนคงตัว  
 เพิ่มขึ้น ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ผิวที่เพิ่มขึ้น  
 ด้วย ดังนั้นค่าไอโอดีนนัมเบอร์จึงสูงกว่าการล้างด้วย  
 น้ำสะอาดเพียงอย่างเดียว

เมื่อเปรียบเทียบค่าไอโอดีนนัมเบอร์ ร้อยละ  
 ผลผลิต และอัตราส่วนการกระตุ้น พบว่าที่อัตราส่วน  
 โดยน้ำหนักถ่านเมล็ดมะขามต่อซิงค์คลอไรด์ เท่ากับ  
 1:2 เเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส และล้างเพิ่ม  
 ด้วยกรดจะให้ค่าไอโอดีนนัมเบอร์สูงสุด เท่ากับ 742  
 มิลลิกรัมต่อกรัม ได้ผลผลิตร้อยละ 69.49 ส่วนการ  
 กระตุ้นที่อัตราส่วนโดยน้ำหนัก 1:2 และเผาที่อุณหภูมิ  
 700 องศาเซลเซียสและล้างด้วยกรด จะให้ค่า  
 ไอโอดีนนัมเบอร์เท่ากับ 724 มิลลิกรัมต่อกรัม ได้

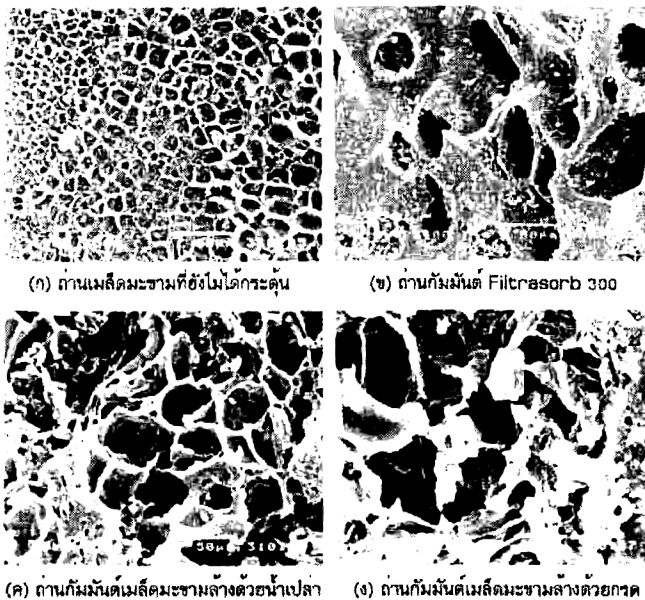
ผลผลิตร้อยละ 74.15 ดังนั้นเมื่อพิจารณาแล้ว พบว่าที่  
 อัตราส่วนการกระตุ้น เท่ากับ 1:2 ที่อุณหภูมิเผา 700  
 องศาเซลเซียส มีความเหมาะสมมากที่สุดสำหรับการ  
 เตรียมถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม เนื่องจากค่า  
 ไอโอดีนนัมเบอร์ไม่แตกต่างกับการเผาที่อุณหภูมิ  
 800 องศาเซลเซียสมากนัก และได้ร้อยละผลผลิตที่  
 สูงกว่าอีกด้วย

ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพของถ่านกัมมันต์

การศึกษาลักษณะทางกายภาพที่สำคัญของ  
 ถ่านกัมมันต์อันได้แก่ พื้นที่ผิว ปริมาตรโพรง และ  
 ขนาดของโพรงเฉลี่ย โดยใช้เครื่องวิเคราะห์พื้นที่ผิว  
 ด้วยวิธี BET (Brunauer Emmet Teller) ผลการ  
 วิเคราะห์ดังตารางที่ 1 และทำการศึกษาโครงสร้าง  
 พื้นที่ผิวและโพรงของถ่านเมล็ดมะขาม เปรียบเทียบ  
 ระหว่างก่อนและหลังการกระตุ้นที่อัตราส่วนถ่าน  
 เมล็ดมะขามต่อซิงค์คลอไรด์ เท่ากับ 1:2 และเผาที่  
 อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ด้วย  
 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (scanning electron  
 microscope) มีลักษณะดังรูปที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์ค่าพื้นที่ผิว ปริมาตรโพรง และขนาดโพรงเฉลี่ยของถ่านกัมมันต์

คุณสมบัติ	ถ่านเมล็ดมะขาม	ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม	ถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300
พื้นที่ผิว (m <sup>2</sup> /g)	0.0121	849.32	1,496.59
ปริมาตรโพรง (ml/g)	0.000012	0.311087	0.554117
ขนาดโพรงเฉลี่ย (Å)	ไม่สามารถหาได้	14.6510	14.8101



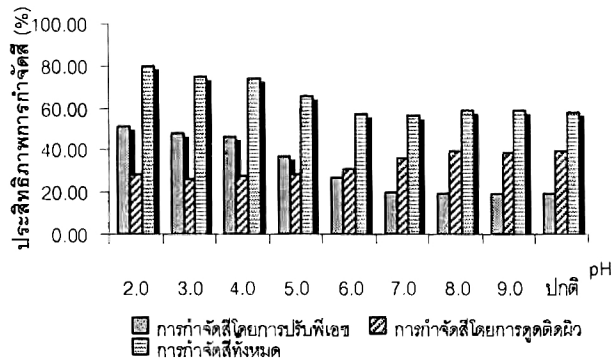
รูปที่ 1 ภาพถ่ายด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (SEM) ของถ่านกัมมันต์ที่กำลังขยาย 500 เท่า

จากตารางที่ 1 และรูปที่ 1 พบว่าก่อนทำการกระตุ้น ถ่านเมล็ดมะขามจะมีโพรงขนาดเล็ก (รูปที่ 1ก.) หลังจากนำไปกระตุ้นด้วยสารละลายซิงค์คลอไรด์แล้ว ปริมาณของโพรงจะมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีจำนวนเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด (รูปที่ 1ค.) ส่วนถ่านกัมมันต์ที่ผ่านการล้างเพิ่มด้วยกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้นร้อยละ 5 จะมีขนาดโพรงใหญ่ขึ้น (รูปที่ 1ง.) ซึ่งสอดคล้องกับผลการหาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านกัมมันต์

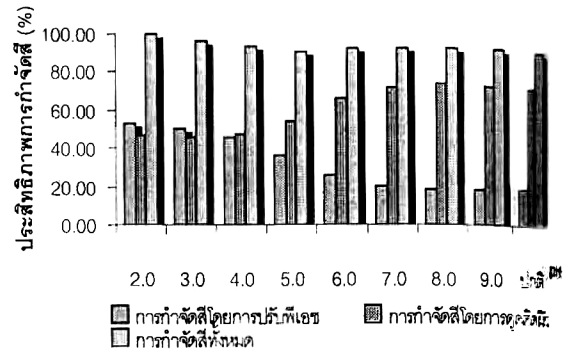
#### ผลของค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีน้ำชะมูลฝอย

ผลการศึกษาค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีทั้งหมดนั้นส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากการตกตะกอนเมื่อปรับพีเอชของน้ำชะมูลฝอย ดังนั้นเมื่อพิจารณาถึงค่าประสิทธิภาพการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยด้วยถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม

ที่พีเอช 2-9 แล้ว พบว่าที่พีเอชเท่ากับ 8 มีความเหมาะสมในการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอย โดยมีค่าการดูดซับสีสูงถึงร้อยละ 39.27 ในขณะที่สามารถกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยทั้งหมดได้ เท่ากับร้อยละ 58.96 ซึ่งยังมีค่าต่ำกว่าการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยที่ค่าพีเอชต่ำกว่านี้ (พีเอช 2-5) แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาถึงการนำไปใช้งานจริง การปรับพีเอชให้ต่ำกว่า 6 จำเป็นต้องใช้สารปรับพีเอชจำนวนมาก ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงพิจารณาการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยที่พีเอช 6-9 และพบว่าที่พีเอช 8 มีความเหมาะสมที่สุดต่อการดูดซับสีของถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม ส่วนถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 พบว่าที่พีเอชเท่ากับ 8 มีความเหมาะสมในการดูดซับสีน้ำชะมูลฝอยมากที่สุดเช่นเดียวกับถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม โดยมีร้อยละการดูดซับสี เท่ากับร้อยละ 73.85 ในขณะที่การกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยทั้งหมดสูงถึงร้อยละ 92.81 ดังรูปที่ 2



(ก) ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม



(ข) ถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300

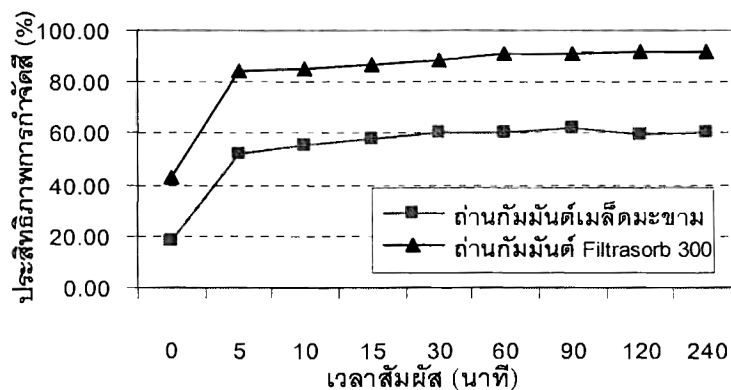
หมายเหตุ: พีเอชปกติ คือ ค่าพีเอชที่วัดได้ก่อนการปรับพีเอชมีค่าอยู่ในช่วง 7.88-8.13

## รูปที่ 2 ประสิทธิภาพการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยที่พีเอชต่างๆ

ผลของเวลาที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีน้ำชะมูลฝอย

การศึกษาถึงอิทธิพลของเวลาที่มีผลต่อการดูดซับพบว่า อัตราการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อเวลาสัมผัสเท่ากับ 5 นาที สังเกตได้จากความชันของกราฟ และลักษณะของกราฟที่มี

แนวโน้มคล้ายคลึงกันของถ่านกัมมันต์ทั้งสองชนิด สำหรับถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามมีการกำจัดสีสูงสุดเท่ากับ ร้อยละ 61.78 ที่ระยะเวลาสัมผัสเท่ากับ 90 นาที ส่วนถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 พบว่ามีกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยสูงสุดเท่ากับ ร้อยละ 92.08 ที่ระยะเวลาสัมผัส 120 นาที ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ประสิทธิภาพการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยที่เวลาสัมผัสต่างๆ



## ผลการทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์

ผลการศึกษาไอโซเทอมการดูดติดผิวของถ่านกัมมันต์สามารถหาค่าคงที่ของสมการไอโซเทอมการดูดติดผิวแบบฟรุนดลิช (freundlich isotherm) และแลงมัวร์ (langmuir isotherm) ได้ดังตารางที่ 2

จากผลการศึกษาโดยใช้สมการไอโซเทอมการดูดติดผิวในการทำนายประสิทธิภาพการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยโดยใช้ถ่านกัมมันต์ พบว่า ไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชมีค่า  $R^2$  มากกว่าไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ ดังนั้นไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชจึงมีความเหมาะสมที่จะนำมาเป็นตัวแทนในการทำนายผลการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยมากกว่าไอโซเทอมแบบ

แลงมัวร์ ซึ่งจากการคำนวณพบว่าถ่านกัมมันต์ที่เตรียมได้จากเมสส์คมะขาม ซึ่งมีค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดติดผิว (K) เท่ากับ 1.65 แพลทตินัม-โคบอลต์ต่อกรัมถ่านกัมมันต์ และมีค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานในการดูดติดผิว (1/n) เท่ากับ 0.7876 ซึ่งน้อยกว่าถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 มีค่าคงที่สัมพันธ์กับความสามารถในการดูดติดผิว (K) เท่ากับ 2.05 แพลทตินัม-โคบอลต์ต่อกรัมถ่านกัมมันต์ และมีค่าคงที่สัมพันธ์กับพลังงานในการดูดติดผิว (1/n) เท่ากับ 0.9305 ตามลำดับ

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

ตารางที่ 2 ค่าคงที่ของไอโซเทอมแบบฟรุนดลิชและแลงมัวร์

ชนิดถ่านกัมมันต์	ไอโซเทอมแบบฟรุนดลิช			ไอโซเทอมแบบแลงมัวร์		
	K	1/n	$R^2$	1/Xm	1/bXm	$R^2$
เมสส์คมะขาม	1.65	0.7876	0.86	0.0023	0.0438	0.85
Filtrasorb 300	2.05	0.9305	0.86	-0.0002	0.0436	0.83

## ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการฟื้นฟูสภาพถ่านกัมมันต์

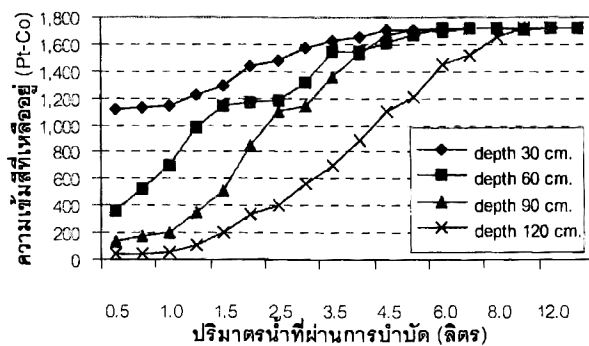
ผลการทดลองพบว่าถ่านกัมมันต์ทั้งสองชนิดมีประสิทธิภาพในการฟื้นฟูสภาพใกล้เคียงกัน โดยถ่านกัมมันต์ทั้งสองชนิดมีประสิทธิภาพในการฟื้นฟูสภาพเฉลี่ยลดลงตามลำดับครั้งที่ทำการฟื้นฟูสภาพ สาเหตุที่ทำให้ประสิทธิภาพในการฟื้นฟูสภาพลดลง เกิดจากโปรงของถ่านกัมมันต์บางส่วนถูกทำลายจากการล้างด้วยกรดอะซิติก ( $CH_3COOH$ ) [8]

และยังคงมีโมเลกุลของสีน้ำชะมูลฝอยที่ล้างออกไม่หมดติดค้างอยู่บ้าง สำหรับถ่านกัมมันต์เมสส์คมะขามในครั้งแรกมีประสิทธิภาพในการฟื้นฟูสภาพ เท่ากับ ร้อยละ 90.67 ครั้งที่สอง เท่ากับ ร้อยละ 82.02 และครั้งที่สาม เท่ากับ ร้อยละ 74.69 ส่วนถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 พบว่ามีประสิทธิภาพในการฟื้นฟูสภาพเฉลี่ยในครั้งแรก เท่ากับ ร้อยละ 95.47 ครั้งที่สอง เท่ากับ ร้อยละ 89.32 และครั้งที่สาม เท่ากับ ร้อยละ 82.78 ตามลำดับ และเมื่อกำหนดหาแนวโน้มของ

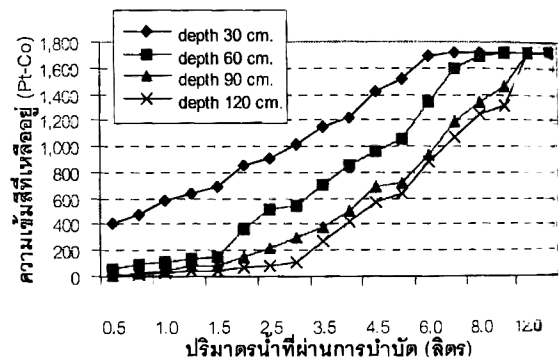
จำนวนครั้งที่สามารถทำการฟื้นฟูสภาพได้ พบว่า ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามสามารถทำการฟื้นฟูสภาพได้ 12 ครั้ง ส่วนถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 สามารถทำการฟื้นฟูสภาพได้ 16 ครั้ง ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 ซึ่งผลิตจากถ่านหินบิทูมินัส (bituminous coal) มีความคงตัวมากกว่า ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม

### ผลการศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยของถ่านกัมมันต์ในถังดูดติดผิวแบบแท่ง

สามารถเขียนเส้นโค้งเบรคทรูระหว่างความเข้มข้นน้ำชะมูลฝอยที่เหลืออยู่กับปริมาณน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด ดังรูปที่ 4



(ก) ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม



(ข) ถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300

### รูปที่ 4 ความเข้มข้นน้ำชะมูลฝอยที่ผ่านถังดูดติดผิวแบบแท่งบรรจุถ่านกัมมันต์

เนื่องจากมาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมไม่มีการกำหนดค่าของสีในน้ำทิ้งไว้แน่นอน เพียงแต่บอกไว้ว่าต้องมีสีไม่เป็นที่พึงรังเกียจ [9] ทำให้ไม่สามารถกำหนดจุด Breakthrough ได้ การยุติการทดลองจะหยุดเมื่อค่าความเข้มข้นน้ำออกใกล้เคียงกับความเข้มข้นน้ำเข้า จากการทดลองพบว่าความเข้มข้นน้ำชะมูลฝอย

ที่ผ่านถังดูดติดผิวแบบแท่งจะสูงขึ้นเรื่อยๆ ตามปริมาณน้ำชะมูลฝอยที่ผ่านการบำบัด (รูปที่ 4) เนื่องจากพื้นที่ผิวของถ่านกัมมันต์ถูกใช้งานและหมดประสิทธิภาพลง สามารถสรุปปริมาณน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดและเวลาการใช้งานของถังดูดติดผิวแบบแท่งจนกระทั่งถึงจุดที่ถ่านหมดสภาพในการใช้งานที่ชั้นความลึกต่างๆ ได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้งานของถ่านกัมมันต์ที่บรรจุลงในถังดูดติดผิวแบบแท่ง

ความลึกชั้น ถ่านกัมมันต์ (ซม.)	ถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม		ถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300	
	เวลาใช้งาน	ปริมาณน้ำเสีย (ลิตร)	เวลาใช้งาน	ปริมาณน้ำเสีย (ลิตร)
30	19 ชั่วโมง 26 นาที	4.85	27 ชั่วโมง 20 นาที	6.82
60	23 ชั่วโมง 33 นาที	5.88	35 ชั่วโมง 25 นาที	8.84
90	26 ชั่วโมง 34 นาที	6.63	47 ชั่วโมง 48 นาที	11.93
120	39 ชั่วโมง 48 นาที	8.94	54 ชั่วโมง 5 นาที	11.94

จากตารางที่ 3 พบว่าประสิทธิภาพการใช้งานของถังดูดติดผิวแบบแท่งที่บรรจุถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามและถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 ที่จุกยุดิมีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนทั้งเวลาการใช้งาน ปริมาณน้ำเสียที่ผ่านการบำบัด โดยถังดูดติดผิวแบบแท่งที่บรรจุถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 จะให้ผลของการใช้งานกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยได้ดีกว่าถังดูดติดผิวแบบแท่งที่บรรจุถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขาม

#### สรุป

จากการศึกษาการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากเมล็ดมะขาม พบว่าสามารถเตรียมได้โดยนำเมล็ดมะขามไปเผาคาร์บอนไนซ์ที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำไปแช่ในสารละลายซิงค์คลอไรด์ที่อัตราส่วนโดยน้ำหนัก 1:2 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง อบให้แห้ง แล้วนำไปเผากระตุ้นแบบจำกัดอากาศ ที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส จะได้ค่าไอโอดีนนัมเบอร์ของถ่านที่เตรียมได้เท่ากับ 724 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งสูงกว่า

ข้อกำหนดของมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมที่กำหนดมาตรฐานของถ่านกัมมันต์ที่ผลิตเพื่อจำหน่ายจะต้องมีค่าไอโอดีนนัมเบอร์ไม่ต่ำกว่า 600 มิลลิกรัมต่อกรัม [10]

ผลที่ได้จากการทดสอบไอโซเทอมการดูดติดผิวและการทดลองแบบต่อเนื่องในถังดูดติดผิวแบบแท่ง พบว่ามีความสอดคล้องกับผลการหาค่าไอโอดีนนัมเบอร์ พื้นที่ผิว ประสิทธิภาพการดูดติดผิวสีน้ำชะมูลฝอย และประสิทธิภาพการกำจัดสีน้ำชะมูลฝอยของถ่านกัมมันต์ Filtrasorb 300 ซึ่งมีค่าสูงกว่าถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามทั้งสิ้น แต่เนื่องจากถ่านเมล็ดมะขามมีต้นทุนการผลิตที่ต่ำกว่า จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำถ่านกัมมันต์เมล็ดมะขามมาพัฒนาเพื่อนำไปใช้งานจริงต่อไป

#### กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่กรุณามอบทุนอุดหนุนการศึกษา การวิจัย และขอขอบคุณหน่วยวิจัยการจัดการของเสีย

อุตสาหกรรม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
ที่สนับสนุนสถานที่และอุปกรณ์การทดลองในการ  
วิจัยครั้งนี้

### เอกสารอ้างอิง

- [1] Qasim, S. and Walter, C. 1994. Sanitary landfill leachate : generation, control, and treatment, Lancaster technomic Publishing, United States of America.
- [2] ลลิตา นิตสันจากรุกุล. 2544. การกำจัดตะกั่วจากน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยกระบวนการดูดซับผิวโดยใช้ถ่านกัมมันต์จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [3] American Society for Testing and Materials. 2000. Standard Test Method for Determination of Iodine Number of Activated Carbon, ASTM D4670, Annual Book of ASTM standard, United States of America.
- [4] American Society for Testing and Materials. 2000. Standard Test Method for Color of Clear Liquids, ASTM D1209. Annual Book of ASTM standard, United States of America.
- [5] American Society for Testing and Materials. 2000. Standard Practice for Determination of Adsorptive Capacity of Activated Carbon by Aqueous Phase Isotherm Technique, ASTM D3860-890, Annual Book of ASTM standard, United States of America.
- [6] บรรณ นูระณะชนบท. สวณมะขามหวาน. 2532. พิมพ์ครั้งที่ 1. นนทบุรี: ศูนย์ผลิตตำราเกษตรเพื่อชนบท.
- [7] Orfao, J.J.M., Antunes, F.J.A. and Figueiredo, J.L. 1999. Pyrolysis kinetics of lignocellulosic materials three independent reactions model, Fuel, Vol.78, 349-358.
- [8] Martin, R.J. and NG. W.J. 1986. The repeated exhaustion and chemical regeneration of activated carbon, Water Res. 21(8), 961-965.
- [9] อุตสาหกรรม, กระทรวง. กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2545. ตำราระบบบำบัดมลพิษน้ำ. กรุงเทพมหานคร: สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย.
- [10] อุตสาหกรรม, กระทรวง. 2532. มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. กรุงเทพมหานคร สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม.