

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม  
โดยถ่านกัมมันต์และสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสีย  
แบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์

Comparison of Dyes Adsorption Efficiency  
by Activated Carbon and Sludge from Activated  
Sludge Wastewater Treatment

Prangsiri Srisuppuch Patiparn Punyapalakul and Pisut Painmanakul<sup>\*</sup>

ปรางศิริ ศรีสุภพัชร ปฏิภาณ ปัญญาพลกุล และ พิสุทธิ์ เพียรมนกุล<sup>\*</sup>

ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพฯ 10330

<sup>\*</sup>E-mail : pisut.p@chula.ac.th, pisut114@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพและปรากฏการณ์การดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟ และสีย้อมเบสิก โดยใช้สารดูดซับ ได้แก่ สลัดจ์แห่งจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอกทิเวเต็ดสลัดจ์ เปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ชนิดผงเกรดการค้า โดยประเด็นที่ศึกษาได้แก่ ผลของการปรับปรุงสภาพพื้นผิวของสารดูดซับด้วยกรด และด่าง และผลกระทบของสารลดแรงตึงผิวที่มีต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมในสารดูดซับ ผลการวิจัยพบว่า สลัดจ์และ ถ่านกัมมันต์มีอันดับปฏิกิริยาการดูดซับสีย้อมที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาอันดับสองเหมือน สีย้อมรีแอกทีฟถูกดูดซับได้ดีที่สุดด้วยถ่านกัมมันต์กระตุ้นต่าง และในสลัดจ์พบว่าดูดซับ ได้ดีด้วยสลัดจ์กระตุ้นด่าง ในขณะที่สีย้อมเบสิกถูกดูดซับ ได้ดีที่สุดด้วยถ่านกัมมันต์กระตุ้นกรด และในสลัดจ์พบว่าดูดซับ ได้ดีด้วยสลัดจ์กระตุ้นกรด ซึ่งสอดคล้องกับผลของค่า pH Point of Zero Charge ( $pH_{pzc}$ ) ที่พบว่าสลัดจ์ และถ่านกัมมันต์ ที่ถูกกระตุ้นด้วยกรดมีค่า  $pH_{pzc}$  น้อยกว่าพีเอช 7 ซึ่งส่งผลให้มีประจุลบที่พื้นผิวสารดูดซับ จึงสามารถดูดซับสีย้อมเบสิกที่มีประจุบวกได้ดี ในทางตรงข้ามสลัดจ์ และถ่านกัมมันต์ ที่ถูกกระตุ้นด้วยด่างสามารถดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟที่มีประจุเป็นลบได้ดี ไอโซเทอมในการดูดซับสีย้อมของสลัดจ์และถ่านกัมมันต์สามารถอธิบายได้ตามแบบจำลอง ไอโซเทอมของแลงมัวร์เป็นส่วนใหญ่ และนอกจากนี้การมีอยู่ของสารลดแรงตึงผิวส่งผลทำให้การดูดซับสีย้อมเบสิก และสีย้อมรีแอกทีฟในถ่านกัมมันต์ลดลงประมาณ 26% และ 17% ตามลำดับ และในสลัดจ์ลดลงประมาณ 4% และ 37% ตามลำดับ

คำสำคัญ : การดูดซับ; สลัดจ์; ถ่านกัมมันต์; สีย้อมรีแอกทีฟ; สีย้อมเบสิก; สารลดแรงตึงผิว

## Abstract

This research was studied on a utilization of sludge as an adsorbent by comparing the adsorption efficiencies and phenomena obtained with reactive and basic dyes. An activated sludge from wastewater treatment system and commercial-grade powder activated carbon were used as adsorbents. Effect of surface treatment by acid and base on dye adsorption capacities was studied including the effect of nonionic surfactant. The results showed that the adsorption kinetic rate was fitted to pseudo-second order. The reactive dye had more potential to be adsorbed after using basic treatment on activated carbon and also on sludge as adsorbents. Moreover, the basic dye had the highest adsorption efficiency obtained with acid treatment on activated carbon, whereas, sludge had the highest basic dye adsorption efficiency after acid treatment. It was found that sludge and activated carbon treated by acid solution had lower  $pH_{PZC}$ : that can increased adsorption capacities of basic dye. On contrary, sludge and activated carbon treated by basic solution had higher  $pH_{PZC}$ : that can increased adsorption capacities of reactive dye. The Langmuir isotherm model was well described for dye adsorption. Moreover, the presence of nonionic surfactant (TX-100) could affect to adsorption efficiencies of basic and reactive dyes on activated carbon by decreasing adsorption efficiency to 26 and 17 percent respectively. While, reactive and basic dyes adsorption on sludge in the presence of nonionic surfactant (TX-100) were decreasing approximately 4 and 37 percent, respectively.

**Keywords :** Adsorption; sludge; activated carbon; reactive dyes; basic dyes; surfactant

## บทนำ

น้ำเสียสีข้อมสามารถถูกกำจัดได้ด้วยกระบวนการดูดซับโดยใช้ถ่านกัมมันต์ แต่เนื่องจากถ่านกัมมันต์มีราคาสูง และมีค่าใช้จ่ายในการฟื้นฟูสภาพ ดังนั้นจึงได้มีการศึกษาค้นคว้าเพื่อหาวัสดุเหลือใช้ต่างๆ ที่หาง่ายและราคาถูกมาเป็นสารดูดซับทดแทนถ่านกัมมันต์มากขึ้น โดยศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับ ซึ่งอาศัยหลักการพื้นฐานจากปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับที่ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมของระบบ ลักษณะโครงสร้างทางกายภาพ และทางเคมีทั้งของสารดูดซับและสารถูกดูดซับ รวมทั้งการกระตุ้นสารดูดซับซึ่งการกระตุ้นสารดูดซับทำให้ความสามารถในการดูดซับสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มพื้นที่ผิวและการทำให้ผิวมีความว่องไวในการดูดซับมากขึ้น และเป็นการกำจัดอินทรีย์วัตถุหรืออนินทรีย์วัตถุต่างๆ ซึ่งเป็นสารปนเปื้อนออกจากบริเวณที่ทำหน้าที่ดูดซับ ซึ่งการกระตุ้นสารดูดซับทางเคมีโดยการกระตุ้นด้วยกรด

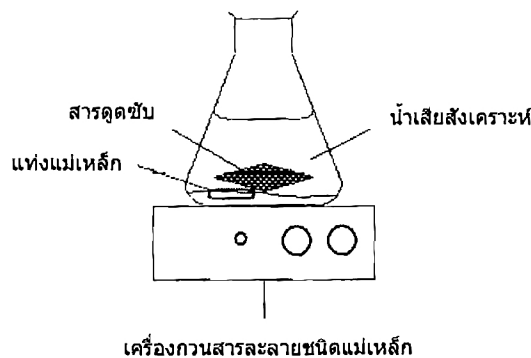
และต่างจะมีผลทำให้สมบัติของสารดูดซับเปลี่ยนไปเกิดมีประจุบนพื้นผิวที่เปลี่ยนไปซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ

โดยงานวิจัยครั้งนี้จะทำการศึกษาโดยใช้สัลดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียชุมชนแบบตะกอนเร่งที่ย่อยแล้วมาเป็นสารดูดซับ เนื่องจากสัลดจ์ดังกล่าวเป็นสิ่งที่เหลือทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสีย และยังคงนำไปกำจัดซึ่งเสียค่าใช้จ่ายในการจัดการ ดังนั้นการนำสัลดจ์กลับมาใช้สำหรับเป็นสารดูดซับจึงเป็นการนำกลับมาใช้ประโยชน์และประหยัดค่าใช้จ่ายในการจัดการสัลดจ์อีกด้วย ซึ่งงานวิจัยนี้จะทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดสีข้อมรีแอกทีฟ และสีข้อมเบสิก โดยใช้สัลดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียเป็นสารดูดซับเปรียบเทียบกับถ่านกัมมันต์ โดยศึกษาปัจจัยทางเคมี (การกระตุ้นสารดูดซับด้วยกรดและด่าง) ที่มีผลต่อการดูดซับ ศึกษาจลนศาสตร์ และความสามารถในการดูดซับ รวมทั้งศึกษาผลกระทบของสารลดแรงตึงผิวต่อประสิทธิภาพ

การดูดซับสีข้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ด้วย จากการศึกษา งานวิจัยต่างๆที่ผ่านมาพบว่ามีการศึกษาการนำสลัดจ์มาใช้เป็นสารดูดซับซึ่งสลัดจ์สามารถดูดซับสีข้อมประจุบวกได้ดี ส่วนถ่านกัมมันต์สามารถดูดซับสีข้อมประจุลบได้ดีเนื่องจากขนาดของอนุสมบัติทางพื้นผิวและรูพรุนเหมาะสม [1] สลัดจ์กระตุ้นต่างสามารถดูดซับโลหะหนักได้ดีกว่าสลัดจ์กระตุ้นกรด [2] และสารลดแรงตึงผิวชนิดมีประจุมีผลต่อการดูดซับสีข้อมชนิดมีประจุในกรณีที่มีแรงปฏิริยาในการดูดซับชนิดเดียวกัน [3] ในงานวิจัยนี้จึงได้นำสลัดจ์และถ่านกัมมันต์ชนิดผงมาปรับปรุงสภาพพื้นผิวด้วยกรด และด่างเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการดูดซับและคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวกลางดูดซับรวมถึงวิเคราะห์แรงและปรากฏการณ์ในการดูดซับ โดยทำการดูดซับสีข้อมชนิดมีประจุ รวมทั้งศึกษาผลของสารลดแรงตึงผิวต่อประสิทธิภาพการดูดซับ

### อุปกรณ์และวิธีการ

โมเดลในการทดลองใช้ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ใส่ น้ำเสียสังเคราะห์และสารดูดซับ แล้วทำการปั่นกวนโดยเครื่องกวนสารละลายชนิดแม่เหล็กดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพการดูดซับ (ควบคุมอุณหภูมิที่ 25 องศาเซลเซียสและความแรงประจุที่ 0.01 โมลาร์)

### การเตรียมสารดูดซับ และน้ำเสียสังเคราะห์

วัสดุที่ใช้สำหรับเป็นสารดูดซับได้แก่ ถ่านกัมมันต์ชนิดผง และสลัดจ์จากระบบบำบัดน้ำเสียจากลานตากตะกอน ซึ่งเป็นสลัดจ์ที่ข่อยแล้วด้วยระบบไร้ออกซิเจนจากโรงควบคุมคุณภาพน้ำหนองแขม โดยทำการปรับปรุงพื้นผิวของสลัดจ์ด้วยวิธีการกระตุ้นด้วยกรดและด่างรวมทั้งสิ้น 3 ชนิด ได้แก่ สลัดจ์กระตุ้นด้วยกรด (A-Sludge) สลัดจ์กระตุ้นด้วยด่าง (B-Sludge) และสลัดจ์ไม่ถูกกระตุ้น (D-Sludge) โดย D-Sludge สามารถเตรียมได้โดยวิธีการของ Gulnaz [4] โดยนำก้อนสลัดจ์จากลานตากตะกอนมาบดจนเป็นเนื้อเดียวกัน ล้างด้วยน้ำกลั่น 2 รอบ แล้วนำไปอบให้แห้งในตู้อบควบคุมอุณหภูมิที่ 105 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ สำหรับ A-Sludge สามารถเตรียมตามวิธีของ Thuy [5] โดยนำสลัดจ์ไม่ถูกกระตุ้น ผสมกับกรดไนตริกความเข้มข้น 60 เปอร์เซ็นต์ และผสมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ 2 นอร์มอล สำหรับ A-Sludge และ B-Sludge ตามลำดับ ตั้งทิ้งไว้ 5 ชั่วโมง แล้วล้างออกด้วยน้ำดีไอออสจากนั้นนำไปอบที่ 105 องศาเซลเซียส จนได้น้ำหนักคงที่ นำสลัดจ์แต่ละชนิดนำมาร่อนคัดขนาดผ่านตะแกรงเบอร์ 200 จะได้ขนาดอนุภาคน้อยกว่า 0.075 มิลลิเมตร

ถ่านกัมมันต์ชนิดผง (PAC) ที่ใช้เป็นถ่านกัมมันต์ชนิดผงเกรดการค้า (Shirasagi S-10) จากบริษัท EnviroChemicals Ltd. นำมาปรับปรุงคุณสมบัติของพื้นผิวโดยการกระตุ้นกรดและด่างเช่นเดียวกัน ทำให้ได้ถ่านกัมมันต์เพิ่มขึ้นอีก 2 ชนิด คือ ถ่านกัมมันต์ชนิดผงกระตุ้นด้วยกรด (A-PAC) และถ่านกัมมันต์ชนิดผงกระตุ้นด้วยด่าง (B-PAC) ซึ่งทำการปรับปรุงพื้นผิวเช่นเดียวกับการสังเคราะห์ตาม A-Sludge และ B-Sludge ตามลำดับ ดังนั้นสารดูดซับที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีทั้งหมด 6 ชนิด ได้แก่ ถ่านกัมมันต์ชนิดผงเกรดการค้า (PAC) ถ่านกัมมันต์ชนิดผงกระตุ้นด้วยกรด (A-PAC) ถ่านกัมมันต์ชนิดผงกระตุ้นด้วยด่าง (B-PAC) สลัดจ์กระตุ้นด้วยกรด (A-Sludge) สลัดจ์กระตุ้นด้วยด่าง (B-Sludge) และสลัดจ์ไม่ถูกกระตุ้น (D-Sludge)

ในงานวิจัยนี้ น้ำเสียสังเคราะห์เตรียมจากสีย้อม 2 ชนิด คือ สีย้อมรีแอกทีฟโทนสีดำ (Reactive Black 5; RB5) และสีย้อมเบสิกโทนสีเหลือง (Basic yellow 1; BY1) และใช้สารลดแรงตึงผิวชนิด Iso-Octylphenol Ethoxylate (Triton X-100; TX-100) เป็นสารลดแรงตึงผิวประเภทไม่มีประจุ โดยน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองมี 3 ประเภท คือ น้ำเสียสังเคราะห์สีย้อม น้ำเสียสังเคราะห์สารลดแรงตึงผิว และน้ำเสียสังเคราะห์สีย้อมผสมสารลดแรงตึงผิว

### การศึกษาการดูดซับ

เตรียมสารละลายน้ำเสียสังเคราะห์ด้วยน้ำกลั่นให้มีความเข้มข้นที่ต้องการ ใส่ในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร ปริมาณ 100 มิลลิลิตร เติมสารดูดซับในสารละลายน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ถ่านกัมมันต์ 0.07 กรัมต่อลิตร ส่วนสลัดจ์ใช้ 2 กรัมต่อลิตร ควบคุมพีเอชเท่ากับ 7 และค่าความแรงไอออนเท่ากับ 0.01 โมลาร์โดยฟอสเฟตบัฟเฟอร์ นำไปปั่นกวนด้วยเครื่องกวนสารละลายชนิดแม่เหล็กโดยควบคุมที่ 350 รอบต่อนาที ควบคุมอุณหภูมิเท่ากับ 25±2 องศาเซลเซียส เก็บตัวอย่างตามเวลาที่ทำการศึกษา นำตัวอย่างที่ได้กรองเพื่อแยกสาร

ดูดซับออกด้วยกระดาษกรองใยแก้ว GF/C นำตัวอย่างสารละลายไปวิเคราะห์ความเข้มข้นของสีย้อมและสารลดแรงตึงผิวด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV/Visible spectrophotometer รุ่น Helios Alpha ยี่ห้อ Thermo Electron Corporation) โดยสีย้อม BY1 RB5 และ TX-100 วัดด้วยความยาวคลื่น 412 597 และ 275 นาโนเมตร ตามลำดับ และตรวจวัดด้วยเครื่อง High Performance Liquid Chromatography (HPLC รุ่น 1100 ยี่ห้อ Agilent) โดยต่อกับ UV/ Visible detector ใช้ความยาวคลื่น 275 นาโนเมตร และคอลัมน์ชนิด 10 µm-Lichrosorb-NH<sub>2</sub> เพื่อแยก TX-100 จากสีย้อมและหาปริมาณ TX-100 ที่เหลืออยู่ [6] โดยค่าความสามารถในการดูดซับคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$q = \frac{(C_0 - C_e) V}{m} \quad (1)$$

ค่า q คือปริมาณสารถูกดูดซับต่อปริมาณสารดูดซับ (มก./ก.) C<sub>0</sub> คือความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้น (มก./ล.) C<sub>e</sub> คือความเข้มข้นของสีย้อมที่สภาวะสมดุล (มก./ล.) V คือปริมาณสารละลาย (ลิตร) และ m คือปริมาณสารดูดซับ (กรัม) จากนั้นทำการเปรียบเทียบไอโซเทอมการดูดซับที่เหมาะสมสำหรับอธิบายกระบวนการดูดซับ โดยไอโซเทอมที่ใช้ได้แก่ ไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ และไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิชดังสมการที่ (2) และ (3) ตามลำดับ

$$\frac{1}{q} = \left(\frac{1}{q_m}\right) + \left(\frac{1}{C_e}\right) \left(\frac{1}{bq_m}\right) \quad (2)$$

$$\log q = \log K + \frac{1}{n} \log C_e \quad (3)$$

โดย ค่า q<sub>m</sub> และ b คือปริมาณสารถูกดูดซับต่อปริมาณสารดูดซับที่สภาวะสมดุล (มก./ก.) และค่าคงที่ของไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ ตามลำดับ ในขณะที่ ค่า K และ 1/n คือค่าคงที่ไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนดลิช ตามลำดับ

## ผลการทดลองและวิจารณ์

### ผลการศึกษาคุณสมบัติของสารดูดซับ

ผลของค่าพีเอชที่ Point of Zero Charge ( $pH_{PZC}$ ) พบว่า D-Sludge A-Sludge และ B-Sludge มีค่า  $pH_{PZC}$  เท่ากับ 6.7 2.73 และ 7.68 ตามลำดับ และค่า  $pH_{PZC}$  ของ PAC A-PAC และ B-PAC มีค่าเท่ากับ 7.08 4.26 และ 7.69 ตามลำดับ จากงานวิจัยของ Wang [7] ระบุว่าสไลด์จ์ชั้นที่สองมีพื้นที่ผิวจำเพาะ 83-152 ตร.ม./ก. และจากงานวิจัยของ Thuy [5] ระบุว่าถ่านกัมมันต์ (Shirasagi S-10) มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 980 ตร.ม./ก. โดยการปรับปรุงถ่านกัมมันต์ด้วยกรดและด่างไม่มีผลต่อกระทบต่อพื้นที่ผิวและโครงสร้างของรูพรุนอย่างมีนัยสำคัญ จากผลการวิเคราะห์ด้วย FT-IR พบว่า D-Sludge และ B-Sludge มีหมู่ฟังก์ชันใกล้เคียงกันโดย B-Sludge มีปริมาณหมู่ฟังก์ชันลดลงจาก D-Sludge เล็กน้อย โดยหมู่ฟังก์ชันหลักที่พบได้แก่ หมู่ O-H Polymer,  $CH_2$ , C=O, COO, C-N และหมู่อะลิเฟติก C-O ซึ่งหมู่ฟังก์ชันของ B-sludge มีหมู่แอซิดลดลงซึ่งเป็นไปตามค่า  $pH_{PZC}$  ของสารดูดซับ ส่วน A-Sludge พบว่ามีหมู่ฟังก์ชันเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นของหมู่ OH และ CHO ซึ่งเป็นหมู่แอซิด และมีหมู่ฟังก์ชันลดลงซึ่งเป็นหมู่ของ O-H (Polymer) COO, C=O C-N และหมู่อะลิเฟติก C-O ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับค่า  $pH_{PZC}$  ของ A-Sludge ที่มีค่าเป็นกรด และจากงานวิจัยของ Thuy [5]

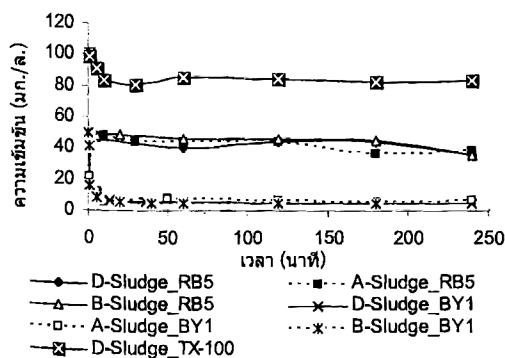
ระบุว่า การปรับปรุงถ่านกัมมันต์ชนิดผงเกรดการค้า (Shirasagi S-10) ด้วยกรด ( $HNO_3$ ) ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของพวกหมู่แอซิดิก และการปรับปรุงถ่านกัมมันต์ด้วยด่าง (NaOH) ทำให้เกิดการลดลงของหมู่คาร์บอกซิลิก คาร์บอนิวต์ ซึ่งสอดคล้องกับค่า  $pH_{PZC}$  ของสารดูดซับ ดังนั้นสรุปได้ว่าการปรับปรุงพื้นผิวสารดูดซับด้วยกรดและด่างส่งผลต่อหมู่ฟังก์ชันบนพื้นผิวสารดูดซับประเภทสไลด์จ์ และถ่านกัมมันต์ในลักษณะเดียวกัน

### ผลการศึกษาจลนศาสตร์

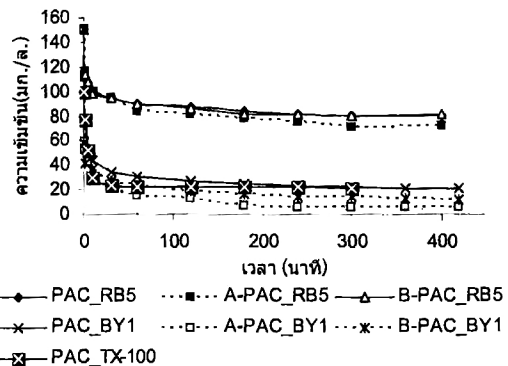
ผลการศึกษาจลนศาสตร์ของสีย้อมทั้ง 2 ชนิด พบว่าเวลาที่ใช้ในการดูดซับสีย้อมของสารดูดซับประเภทสไลด์จ์ และถ่านกัมมันต์ สมดุลที่เวลาประมาณ 60 และ 360 นาที ตามลำดับ สำหรับจลนศาสตร์ของสารลดแรงตึงผิว (TX-100) พบว่าเวลาที่ใช้ในการดูดซับของสไลด์จ์ และถ่านกัมมันต์ สมดุลที่เวลาประมาณ 60 นาที แสดงดังรูปที่ 2 (ก) และ (ข) ตามลำดับ โดยอันดับปฏิกิริยาของสีย้อมที่เกิดขึ้นเป็นอันดับสองเสมือนซึ่งได้มาจากสมการ (4) โดยให้ค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.9215-1.0000 ซึ่งบ่งบอกถึงกระบวนการดูดซับที่เกิดขึ้นเป็นกระบวนการทางเคมีที่เกิดจากประจุของสารดูดซับและสารถูกดูดซับ [4]

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e} + \frac{t}{q_e} \quad (4)$$

(ก)



(ข)

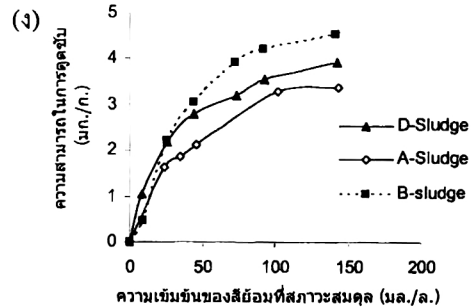
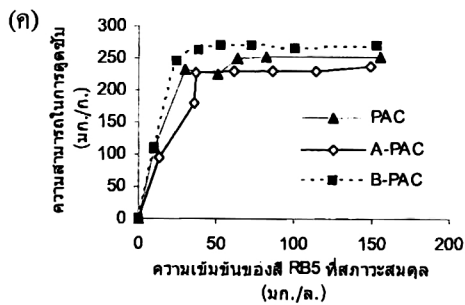
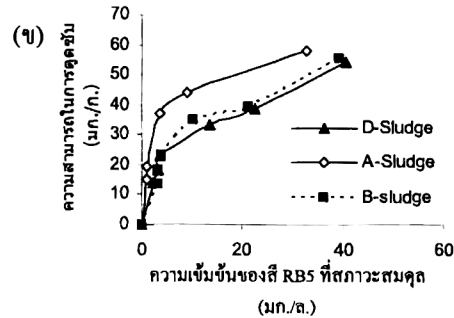
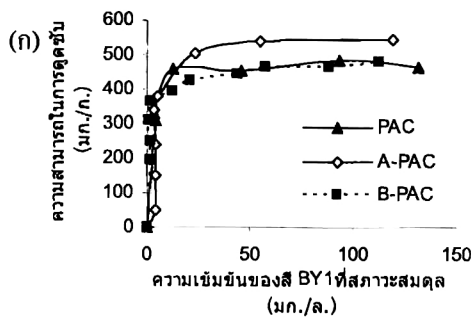


รูปที่ 2 จลนศาสตร์การดูดซับของสีย้อมทีพี สียอบลิก และสารลดแรงตึงผิว โดยใช้สไลด์จ์ที่สถานะต่างๆ (ก) และถ่านกัมมันต์ที่สถานะต่างๆ (ข) (ที่พีเอช 7 อุณหภูมิ 25 °C และความแรงไอออน 0.01 โมลาร์)

**ผลการปรับปรุงพื้นผิวสารดูดซับด้วยกรดและค่าต่อประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม**

สารละลายที่พีเอช 7 สี BY1 ถูกดูดซับได้ดีด้วย A-PAC ตามด้วย B-PAC และ PAC โดยมีความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 552.79 500.00 และ 454.55 มก./ก. ตามลำดับ ดังรูปที่ 3 (ก) ส่วนของสลัดจ์พบว่าดูดซับได้ดีด้วย A-Sludge ตามมาด้วย B-Sludge และ D-Sludge โดยมีความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 60.61 54.31 และ 54.30 มก./ก. ตามลำดับ ดังรูปที่ 3 (ข) สำหรับสี RB5 พบว่าดูดซับได้ดีด้วย B-PAC ตามด้วย PAC และ A-PAC โดยมีความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 270.27 256.41 และ 243.90 มก./ก. ตามลำดับ ดังรูปที่ 3 (ค) ส่วนของสลัดจ์พบว่าดูดซับได้ดีด้วย B-Sludge ตามด้วย D-Sludge และ A-Sludge โดยมี

ความสามารถในการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 6.35 4.59 และ 4.31 มก./ก. ตามลำดับ ดังรูปที่ 3 (ง) ซึ่งปรากฏการณ์ดังกล่าวเป็นไปตามผลของ  $pH_{PZC}$  คือ A-Sludge และ A-PAC มีค่า  $pH_{PZC}$  น้อยกว่า พีเอช 7 ซึ่งส่งผลให้มีประจุลบที่พื้นผิวสารดูดซับ [5] จึงสามารถดูดซับสี BY1 ที่มีประจุบวกได้ดี ในทางตรงข้าม B-Sludge และ B-PAC มี  $pH_{PZC}$  มากกว่าพีเอช 7 ซึ่งสามารถดูดซับสี RB5 ที่มีประจุเป็นลบได้ดี แต่สังเกตได้ว่าในกรณีการดูดซับด้วยสลัดจ์พบว่าความสามารถในการดูดซับสีย้อมทั้ง 2 ชนิดค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับสารดูดซับประเภทอานกัมมันต์ ซึ่งน่าจะเป็นผลจากพื้นที่ผิวจำเพาะของสลัดจ์ที่มีค่าน้อยกว่า นอกจากนี้เนื่องจากหมู่ฟังก์ชันที่เกิดจากการกระตุ้นด้วยกรดและด่างมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยจึงส่งผลให้ความสามารถในการดูดซับแตกต่างกันน้อยมาก



**รูปที่ 3** เปรียบเทียบการดูดซับสี BY1 โดยถ่านกัมมันต์ชนิดต่างๆ (ก) และสลัดจ์ชนิดต่างๆ (ข) และการดูดสี RB5 โดยถ่านกัมมันต์ชนิดต่างๆ (ค) และสลัดจ์ชนิดต่างๆ (ง) (ที่พีเอช 7 อุณหภูมิ 25 °C และความแรงไอออน 0.01 โมลาร์)

## ไอโซเทอมการดูดซับสีย้อม

ไอโซเทอมการดูดซับของ D-Sludge A-Sludge และ B-Sludge ในการดูดซับสี RB5 และ BY1 สามารถอธิบายได้ทั้งไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ และแบบฟรุนคลิช เนื่องจากทั้ง 2 ไอโซเทอมให้ค่า  $R^2$  สูงและใกล้เคียงกัน โดยสำหรับการดูดซับสี RB5 พบว่า D-Sludge และ B-Sludge มีค่า  $R^2$  0.9938 และ 0.9961 ตามลำดับ เป็นไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ และในส่วนของ A-Sludge เป็นไอโซเทอมการดูดซับแบบฟรุนคลิชโดยมีค่า  $R^2$  0.9811 สำหรับไอโซเทอมการดูดซับสี BY1 ปรากฏว่า D-Sludge และ A-Sludge เป็นไอโซเทอมแบบแลงมัวร์ โดยมีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.964 และ 0.9574 ตามลำดับ ส่วน B-Sludge เป็นไอโซเทอมแบบฟรุนคลิช โดยมีค่า  $R^2$  เท่ากับ 0.821 ในส่วนของ PAC A-PAC และ B-PAC ไอโซเทอมในการดูดซับสี RB5 ให้ค่า  $R^2$  ต่ำทั้ง 2 ไอโซเทอม โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.5523-0.1926 และสำหรับไอโซเทอมการดูดซับสี BY1 พบว่า PAC A-PAC และ B-PAC มีค่าไอโซเทอมการดูดซับแบบแลงมัวร์ โดยมีค่า  $R^2$  0.9856-0.9119

จากไอโซเทอมแบบแลงมัวร์และอันดับปฏิกิริยาอันดับสองเสมือนอาจสรุปได้ว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นบนพื้นผิวของถ่านกัมมันต์ (PAC A-PAC และ B-PAC) เป็นแบบชั้นเดียวและเป็นการดูดซับทางเคมี ส่วนสัจที่ทำการศึกษาพบว่ามีแรงปฏิกิริยาก่อนข้างต่ำและมีรูปแบบการดูดซับหลากหลายขึ้นอยู่กับชนิดของมลสารและพื้นผิวของตัวกลางดูดซับ

## ผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับสารลดแรงตึงผิว (TX-100)

ผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับ TX-100 พบว่า PAC และ D-Sludge มีค่าความสามารถในการดูดซับเท่ากับ 263.16 และ 28.09 มก./ก. ตามลำดับรูปที่ 4 ซึ่งเป็นไปตามค่าพื้นที่ผิวจำเพาะของสารดูดซับ โดยค่าความสามารถในการดูดซับ TX-100 นี้จะนำไปใช้เปรียบเทียบกับค่าการดูดซับของ TX-100 ที่ผสมกับสีย้อมต่อไป

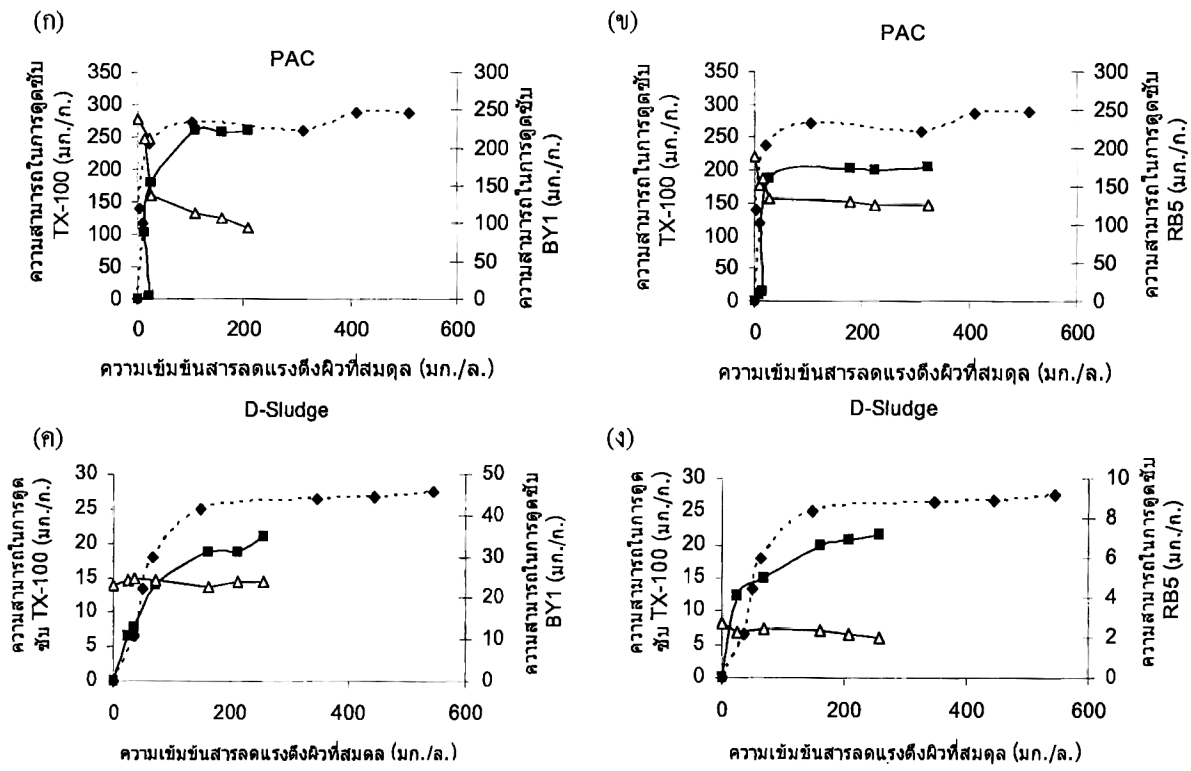
## ผลการศึกษาผลกระทบของสารลดแรงตึงต่อการดูดซับสีย้อม

เนื่องจากการประยุกต์ใช้กระบวนการดูดซับด้วยสารดูดซับที่กระตุ้นด้วยกรดและด่างนั้น พบว่ามีค่าความสามารถในการดูดซับไม่แตกต่างจากสารดูดซับที่ไม่ถูกกระตุ้น และเพื่อเป็นการตัดค่าใช้จ่ายด้านสารเคมีที่ใช้ในการกระตุ้นสารดูดซับ ดังนั้นจึงเลือกใช้สารดูดซับที่ไม่ถูกกระตุ้น (PAC และ D-Sludge) ในการศึกษาผลกระทบของสารลดแรงตึงต่อการดูดซับสีย้อม ผลการศึกษาจากรูปที่ 4 (ก) พบว่าเมื่อความเข้มข้นของ TX-100 เพิ่มขึ้นส่งผลให้ PAC มีประสิทธิภาพในการดูดซับ BY1 ลดลง และค่าความสามารถในการดูดซับ TX-100 ในขณะที่มีสีย้อม BY1 ผสมอยู่ด้วยมีค่าใกล้เคียงกับความสามารถในการดูดซับ TX-100 เมื่อไม่มีสีย้อมผสม แสดงให้เห็นว่า PAC เลือกที่จะดูดซับ TX-100 มากกว่าสีย้อม BY1 โดยพบว่าประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม BY1 มีค่าลดลงประมาณ 26% สำหรับประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม RB5 ของ PAC แสดงดังรูปที่ 4 (ข) พบว่าเมื่อความเข้มข้นของ TX-100 เพิ่มขึ้นส่งผลให้ PAC มีประสิทธิภาพในการดูดซับ RB5 ลดลง โดยค่าความสามารถในการดูดซับสีย้อม RB5 สูงสุดลดลงประมาณ 17% แสดงให้เห็นว่า TX-100 ส่งผลต่อการดูดซับสีย้อม RB5 ด้วย PAC ซึ่งการลดลงของประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมทั้ง 2 ชนิด อาจเกิดจากโดยโครงสร้างของ TX-100 ในส่วนไม่มีขั้ว (hydrophobic) เข้าไปอยู่บนพื้นผิวและรูพรุนของ PAC จนเต็มทำให้ขัดขวางการดูดซับสีย้อมบนพื้นผิว [6]

จากรูปที่ 4 (ค) พบว่าเมื่อความเข้มข้นของ TX-100 เพิ่มขึ้นส่งผลให้ D-Sludge ดูดซับสีย้อม BY1 ลดลงเล็กน้อย โดยมีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม BY1 ไม่แตกต่างจากการดูดซับโดยไม่มีการผสมของ TX-100 โดยประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม BY1 เมื่อมี TX-100 ผสมอยู่มีค่าลดลงเพียง 4% ทั้งนี้ ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม BY1 ที่เปลี่ยนแปลงเล็กน้อยนั้นแสดงให้เห็นว่า สารดูดซับเลือกที่จะดูดซับสีย้อม BY1 มากกว่า

TX-100 เนื่องจากแรงที่ใช้ในการดูดซับสีย้อม BY1 และ TX-100 มีความแตกต่างกัน โดย D-Sludge ดูดซับสีย้อม BY1 ด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ร่วมกับแรงดึงดูดระหว่างประจุ แต่ดูดซับ TX-100 ด้วยแรงแวนเดอร์วาลส์ร่วมกับแรงจากพันธะไฮโดรเจน จึงมีการแข่งขันเพียงแรงแวนเดอร์วาลส์เท่านั้น และด้วยสมบัติของ D-Sludge มีหมู่ฟังก์ชันที่หลากหลายและมีแนวโน้มประจุเป็นลบซึ่งสีย้อม BY1 เป็นสีย้อมประจุบวก รวมทั้งมีขนาดโมเลกุลที่เล็กกว่า TX-100 (ขนาดโมเลกุลของ TX-100 และ BY1 เท่ากับ  $3.43 \times 0.49 \text{ nm}^2$  และ  $1.44 \times 0.64 \text{ nm}^2$  ตามลำดับ) จึงเคลื่อนที่เข้าสู่พื้นที่ผิวภายในสารดูดซับได้มากกว่า ทำให้สีย้อม BY1 ถูกดูดซับได้ดีใกล้เคียงกับกรณีไม่ผสม TX-100 ในส่วนการดูดซับสีย้อม RB5 ดังแสดงใน

รูปที่ 4 (ง) พบว่า D-Sludge มีความสามารถในการดูดซับสีย้อม RB5 ที่ผสม TX-100 ลดลงประมาณ 37% โดยประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดของ TX-100 ในขณะที่มีสีย้อม RB5 ผสมลดลง เนื่องจากมีแรงที่ใช้ในการดูดซับสีย้อม RB5 และ TX-100 ที่เป็นแรงชนิดเดียวกันคือ แรงแวนเดอร์วาลส์ และแรงจากพันธะไฮโดรเจน แต่การดูดซับสีย้อม RB5 มีแรงระหว่างประจุร่วมด้วย ดังนั้น ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อม RB5 ที่ลดลงเกิดจากการแข่งขันกันระหว่างสีย้อม RB5 และ TX-100 ด้วยการเกิดพันธะไฮโดรเจนโดยส่วนที่ชอบน้ำของ TX-100 ดูดซับบนพื้นผิวของ D-Sludge ทำให้ขัดขวางการดูดซับสีย้อม RB5 [6]



รูปที่ 4 เปรียบเทียบผลของสารลดแรงดึงผิวต่อการดูดซับสีย้อมโดยใช้ถ่านกัมมันต์และสลัดจ์โดย —△— คือความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมื่อผสมกับ TX-100 โดยใช้สีย้อมความเข้มข้นคงที่ 75 และ 50 มก./ล. สำหรับ PAC และ D-Sludge ตามลำดับ —■— คือความสามารถในการดูดซับสารลดแรงดึงผิวเมื่อผสมกับสีย้อม และ -○- คือความสามารถในการดูดซับสารลดแรงดึงผิวเมื่อไม่ผสมสีย้อม



## สรุป

D-Sludge A-Sludge และ B-Sludge สามารถดูดซับสีย้อมเบสิกได้ดีกว่าสีย้อมรีแอกทีฟ โดยกระบวนการดูดซับของสไลด์จ์อธิบายได้จากไอโซเทอมของแลงมัวร์ และปฏิกิริยาอันดับสองเสมือนเป็นส่วนใหญ่ โดยที่ A-Sludge ดูดซับสีย้อมรีแอกทีฟได้ดี ส่วน B-Sludge ดูดซับสีย้อมเบสิกได้ดี ซึ่งเป็นไปตามค่า  $pH_{pzc}$  แต่อย่างไรก็ตามความสามารถในการดูดซับสีย้อมทั้ง 2 ชนิดยังมีประสิทธิภาพต่ำกว่าการดูดซับด้วยสารดูดซับประเภทถ่านกัมมันต์ และสารลดแรงตึงผิวมีผลทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมเบสิก และสีย้อมรีแอกทีฟด้วย PAC ลดลงประมาณ 26% และ 17% ตามลำดับ และส่งผลให้การดูดซับสีย้อมเบสิกและสีย้อมรีแอกทีฟด้วย D-Sludge ลดลงประมาณ 4% และ 37% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า PAC และ D-Sludge เลือกดูดซับ TX-100 มากกว่าสีย้อม เนื่องจากแรงที่ใช้ในการดูดซับสีย้อมและสารลดแรงตึงผิวเป็นแรงชนิดเดียวกัน จึงเกิดการแข่งกันในการดูดซับ

## กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับเงินสนับสนุนบางส่วนจากทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์สำหรับนิสิต บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## เอกสารอ้างอิง

[1] Martin, J.M., Artola, A., Balaguer, D.M. and Rigola, M. 2003. Activated carbons developed

from surplus sewage sludge for the removal of dyes from dilute aqueous solutions. Chem. Eng. J. 94: 231-239.

- [2] Al-Qodah, Z. 2006. Biosorption of heavy metal ions from aqueous solutions by activated sludge. Desalination. 196: 164-176.
- [3] Punyapalakul, P. and Takizawa, S. 2006. Selective adsorption of nonionic surfactant on hexagonal mesoporous silicates (HMSs) in the presence of ionic dyes. Water Res. 40: 3177-3184.
- [4] Gulnaz, O., Kaya, A. and Dincer, S. 2006. The reuse of dried activated sludge for adsorption of reactive dye. J. Hazard Mater. 134: 190-196.
- [5] Thuy, Q. 2006. Effect of acid/base treatment of powdered activated carbon on adsorption and membrane fouling in PAC-Microfiltration system (PAC-MF). Doctoral dissertation, Department of Engineering, Graduate School, The University of Tokyo.
- [6] Punyapalakul, P. 2004. Removal of alkylphenol polyethoxylates using hexagonal mesoporous silicate. Doctoral dissertation, Department of Engineering, Graduate School, The University of Tokyo.
- [7] Wang, J., Huang, C.P., Allen, H.E., Cha., D.K. and Kim, D.W. 1998. Adsorption Characteristics of dye onto sludge particulates. J. Colloid. Interf. Sci. 208: 518-528.