

การขจัดสีฟอกย้อมในน้ำทิ้งอุตสาหกรรมโดยกระบวนการดูดซับด้วยฟังไจ

Treatment of Industrial Textile Wastewater with Fungal Biosorption

พิชญพงษ์ บัวแก้ว¹ สาโรจน์ ศิริคันสนียกุล² วิรัตน์ วาณิชศรีรัตนาน² และวีรานุช หลาง³

Pichpong Buakaew¹, Sarote Sirisansaneeyakul², Wirat Vanichsiratana² and Weeranuch Lang³

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ทำการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับทางชีวภาพของสีฟอกย้อมจากโรงงานอุตสาหกรรมด้วยมวลชีวภาพของฟังไจในระบบการเลี้ยงแบบเบ็ดเสร็จโดยการใช้แบบจำลองไอโซเทอมและจลนพลศาสตร์ ทำการคัดเลือกมวลชีวภาพเส้นใยรา 5 ชนิด เพื่อการดูดซับสีย้อมประเภทรีแอกทีฟที่มีโครงสร้างทางเคมีต่างกัน 2 ชนิด ได้แก่ โครงสร้างแบบอะไซคลอไซมาซอล เรด อาร์จีบี (RR) และโครงสร้างแบบแอนทราควิโนนคือสีชิบาร์คอนเทอร์คอย (CT) พบว่าเชื้อรา *Rhizopus arrhizus* TISTR3610 มีความสามารถในการดูดซับได้ดีที่สุด จากนั้นทำการตรึงสปอร์แรงจีโอสปอร์ของเชื้อรา *R. arrhizus* ในเม็ดเจลไคโตซาน นำไปเลี้ยงในอาหารเหลวที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน มวลชีวภาพราที่ตรึงในเม็ดเจลไคโตซานถูกนำมาฆ่าด้วยการนึ่งที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที ค่าประสิทธิภาพการดูดซับ (q) สูงสุดที่ค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายเท่ากับ 3 ค่าประสิทธิภาพดูดซับสูงสุด (Q_0) เท่ากับ 198.14 และ 76.84 มิลลิกรัม/ลิตร สำหรับสี RR และ CT ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ข้อมูลการทดลองที่สมมูลการดูดซับของสีย้อมรีแอกทีฟ 2 ชนิด ที่ความเข้มข้นสี RR เริ่มต้นเท่ากับ 44, 93, 144, 252 และ 318 มิลลิกรัม/ลิตร และสี CT เริ่มต้น เท่ากับ 31, 58, 89 และ 117 มิลลิกรัม/ลิตร แล้วนำมาวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองการดูดซับ 3 แบบจำลอง พบว่าแบบจำลองของเรดลิก-เพทเทอร์สัน มีความสอดคล้องกับข้อมูลจากการทดลองมากกว่าแบบจำลองของแลงเมียร์และฟรอยลิตซ์ ข้อมูลจลนพลศาสตร์การดูดซับพบว่าสอดคล้องกับสมการ pseudo-second order มากที่สุด ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ (D) สามารถคำนวณจากแบบจำลองแกนหัดตัว พบว่าค่า D ของแบบจำลองแกนหัดตัวอยู่ในช่วง 1.3×10^{-5} ถึง 1.5×10^{-6} ลูกบาศก์เซนติเมตร/นาที และ 3.2×10^{-6} ถึง 1.5×10^{-6} ลูกบาศก์เซนติเมตร/นาที สำหรับสี RR และ CT ตามลำดับ และตัวหะที่มีประสิทธิภาพการชะสูงที่สุด คือ 0.1 M NaOH มีเปอร์เซ็นต์การชะสี RR และ CT เท่ากับ 64.6 % และ 81.44% ตามลำดับ

คำสำคัญ : การดูดซับทางชีวภาพ ระบบเบ็ดเสร็จ สีรีแอกทีฟ ไอโซเทอม จลนพลศาสตร์

¹ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จ. นครปฐม 73140

Department of Science, Faculty of Arts and Science, Kasetsart University, Kamphaengsaen Campus, Nakhon Pathom 73140

² ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Department of Biotechnology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok 10900

³ โครงการจัดตั้งสาขาจุลชีววิทยา คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จ. นครปฐม 73140

Department of Microbiology, Faculty of Arts and Science, Kasetsart University, Kamphaengsaen Campus, Nakhon Pathom 73140

ABSTRACT

In this study, industrial textile dye biosorption potential for fungal biomass used under batch conditions was investigated using kinetics and isotherm models. Screening of 5 fungal types for the biosorption of two different chemical structures of reactive dyes as azo dye (Remazol Red RGB; RR) and anthraquinone dye (Cibacon Turquoise; CT) was studied. *Rhizopus arrhizus* TISTR3610 exhibited the most preferential dye biosorption. The sporangiospores of *R. arrhizus* were immobilized in chitosan beads and then grown in liquid medium at 30°C for 5 days. The chitosan immobilized and grown fungal beads were autoclaved at 110°C for 10 min and freeze-dried. The highest dye uptake (q) was found in an acidic solution at pH = 3. Maximum dye uptake (Q_0) was found to be 198.14 mgL⁻¹ and 76.84 mgL⁻¹ of RR and CT respectively at 30°C. The biosorption data of reactive dyes at initial concentrations of RR is 44, 93, 144, 252 and 318 mgL⁻¹, and initial concentrations of CT is 31, 58, 89 and 117 mgL⁻¹ on the heat inactivated *R. arrhizus*-chitosan beads were analyzed using three popular adsorption isotherms and correlated in order with Redlich-Peterson > Langmuir isotherms > Freundlich model. The pseudo second-order kinetics was found to have the best fit with the experimental data. The diffusivities (D) of the dyes in the *R. arrhizus*-chitosan beads were calculated using the intraparticle diffusion, and the D values were in the ranges of 1.3x10⁻⁵ - 1.5x10⁻⁶ and 3.2x10⁻⁶ - 1.5x10⁻⁶ cm²min⁻¹ for RR and CT, respectively. And highest efficiency desorption solution is 0.1 M NaOH (64.60% and 81.44% for RR and CT respectively)

Keywords : Biosorption, Batch, Reactive dyes, Isotherm model, Kinetic model

คำนำ

อุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นอุตสาหกรรมหลักที่สำคัญของประเทศไทย เนื่องจากมีการส่งออกสินค้าจากอุตสาหกรรมสิ่งทอในปริมาณมากในแต่ละปี กระบวนการผลิตในโรงงานมีความจำเป็นต้องใช้น้ำมากถึง 1,300 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน จึงก่อให้เกิดปัญหาภาวะมลพิษทางน้ำ เนื่องจากน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมยังคงมีสีปนเปื้อนอยู่ในปริมาณมาก อันเป็นผลจากเทคโนโลยีในปัจจุบันไม่สามารถใช้สีย้อมหรือพิมพ์ผ้าได้หมดร้อยเปอร์เซ็นต์ ซึ่งสีย้อมผ้าแทบทุกชนิดมีส่วนประกอบที่เป็นพิษ บางชนิดมีโครงสร้างทางเคมีเป็นพวกแอมโรมาติกเอมีน (aromatic amine) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็ง นอกจากนี้สีที่ปนเปื้อนลงไปในแหล่งน้ำยังมีผลต่อการบำบัดการสังเคราะห์แสงของแพลงก์ตอนและพืชน้ำในแหล่งน้ำ อันจะมีผลกระทบต่อห่วงโซ่อาหารของสิ่งมีชีวิตในระบบนิเวศโดยตรง และยังก่อให้เกิดทัศนียภาพที่ไม่ชวนมอง น้ำทิ้งที่ระบายออกจากโรงงานสู่แม่น้ำลำคลองหรือแหล่งน้ำธรรมชาติจึงควรได้รับการบำบัดให้ได้มาตรฐานก่อนปล่อยออกมา อย่างไรก็ตามวิธีการบำบัดซึ่งมีอยู่หลายวิธีในปัจจุบัน เช่น การใช้โอโซน (ozone treatment) มีความยุ่งยากและเสียค่าใช้จ่ายสูง ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาพัฒนาวัสดุดูดซับชีวภาพ โดยใช้มวลชีวภาพของจุลินทรีย์ที่ทำให้อยู่ในสภาพไร้ชีวิตให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อม และมีคุณสมบัติคงทนเหมาะสมสำหรับนำกลับมาใช้ได้อีกหลายครั้งด้วยการตรึงให้อยู่ในรูปเม็ดเจลไคโตซาน ซึ่งไคโตซานเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถสังเคราะห์ได้ง่าย จากไคตินที่เป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่มีปริมาณมากเป็นอันดับที่

สองรองจากเซลลูโลส รวมถึงการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสี ไอโซเทอมจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ และการชะเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่

ในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการขจัดสีย้อมผ้า ด้วยเทคนิคการดูดซับโดยใช้มวลชีวภาพฟังไจ เป็นวัสดุดูดซับและเป็นแนวทางในการบำบัดแหล่งน้ำเสียจากโรงงานทอผ้าหรือโรงงานที่ใช้สีย้อมและศึกษา ปัจจัยที่มีผลต่อการดูดซับสีย้อม ได้แก่ พีเอชและชนิดของตัวทำละลายที่มีผลต่อการปรับสภาพมวลชีวภาพและ เม็ดเจลมวลชีวภาพตรึงเพื่อการดูดซับและการคายสีย้อมผ้า

อุปกรณ์และวิธีการ

1. การเตรียมสารละลายสีรีแอกทีฟ

สารละลายสีรีแอกทีฟที่นำมาทำการทดลอง ได้แก่ Remazol Red EGB (RR) และ Cibacon Turquoise (CT) เตรียมโดยการละลายผงสี ชนิดละ 1 กรัมในน้ำกลั่นปราศจากอิออน (deionized water) ปรับปริมาณให้ได้ 100 มิลลิลิตร

2. การคัดเลือกมวลชีวภาพรา

นำสปอร์รา 5 สายพันธุ์ ได้แก่ *Trichoderma* sp., *Rhizopus arrhizus* TISTR3610, *Penicillium* sp., *Aspergillus oryzae*, และ *A. niger* มาเลี้ยงในอาหารเหลว TGY บ่มในเครื่องเขย่า (100 rpm) เป็นเวลา 5 วัน หนึ่งฆ่าเชื้อที่ 121 °C เป็นเวลา 15 นาที นำไประเหยแห้ง จากนั้นบดให้ละเอียดและร่อนผ่านตะแกรงที่มีรูขนาด 210 ไมโครเมตร นำผงราที่ได้ไปใส่ในสารละลายสี RR และ CT ปริมาตร 20 มิลลิลิตร บ่มในเครื่องเขย่า (100 rpm) เป็นเวลา 6 ชั่วโมง วัดการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 532 และ 667 นาโนเมตร ตามลำดับ

3. การหาค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายสีที่เหมาะสมต่อการดูดซับ

นำมวลชีวภาพราผงที่คัดเลือกแล้วทดสอบดูดซับสารละลายสี RR และ CT ที่ความเข้มข้น 150 มิลลิลิตร/ลิตร ปริมาตร 20 มิลลิลิตร หาค่าความเป็นกรด-ด่างตั้งแต่ pH 3, 4, 5, 6, 7 และ 8 บ่มในเครื่องเขย่า (100 rpm) เป็นเวลา 6 ชั่วโมง วัดการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

4. การผลิตมวลชีวภาพฟังไจไรซ์วิตตรึงด้วยเม็ดเจลไคโตซาน

เลี้ยงเชื้อราที่คัดเลือกแล้วจากข้อ 2 บนข้าวโคจิ ในตู้บ่มที่อุณหภูมิ 30 °C เป็นเวลา 5 วัน จากนั้นนำ สปอร์เชื้อรามารวมสารแขวนลอยที่มีความเข้มข้นของสปอร์ไม่ต่ำกว่า 10^8 สปอร์/มิลลิลิตร ใช้สารแขวนลอย สปอร์ 1.0 มิลลิลิตร ผสมกับสารละลายไคโตซานความเข้มข้น 2.5 % w/v (ที่ละลายในสารละลายกรดแอสติก 0.05 M) ปริมาตร 9.0 มิลลิลิตร ที่ผ่านการนึ่งฆ่าเชื้อแล้วที่อุณหภูมิ 100°C เป็นเวลา 10 นาที ผสมให้เข้ากัน แล้วหยด สารผสมนี้ลงในสารละลายไตรพอลิฟอสเฟตความเข้มข้น 3 % w/v ที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้ว ปั่นกวนผสมเพื่อให้เม็ด เจลไคโตซานคงตัวและมีลักษณะเป็นเม็ดกลม เป็นเวลา 4 ชั่วโมง เก็บเม็ดเจลไคโตซาน โดยล้างด้วยน้ำกลั่นที่ ผ่านการฆ่าเชื้อแล้ว ด้วยวิธีปลอดเชื้อ จากนั้นเลี้ยงเม็ดเจลในอาหารเหลว potato dextrose broth (PDB) นำไป เลี้ยงในเครื่องเขย่าที่ความเร็วรอบ 100 rpm ที่อุณหภูมิ 30 °C เป็นเวลา 5 วัน เก็บเกี่ยวโดยนำเม็ดเจลไคโตซานที่

เลี้ยงไปหนึ่งสัปดาห์ที่อุณหภูมิ 100 °C เป็นเวลา 10 นาที นำไปล้างด้วยน้ำกลั่น จากนั้นนำไปแช่เยือกแข็ง (freeze dry) ที่อุณหภูมิ -70 °C เป็นเวลา 6 ชั่วโมง นำไปประเหยให้แห้งด้วยความเย็นและใช้เป็นวัสดุดูดซับต่อไป

5. แบบจำลองสมดุลการดูดซับและจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ

ทดสอบความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายสี RR และ CT ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ (มิลลิกรัม/ลิตร) ในขวดรูปชมพูนขนาด 125 มิลลิเมตร ปริมาตร 50 มิลลิเมตร ปรับค่า pH ให้เหมาะสมตามที่ได้ทดลองในข้อที่ 3 โดยใส่เม็ดเจลดริง 0.05 มิลลิกรัม เขย่าในเครื่องเขย่า ที่ 100 rpm ที่อุณหภูมิ 30 °C เก็บตัวอย่างครั้งละ 1 มิลลิตร 2 ชั่วโมง วัดการดูดกลืนแสงสารละลายหลังการดูดซับ ด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์

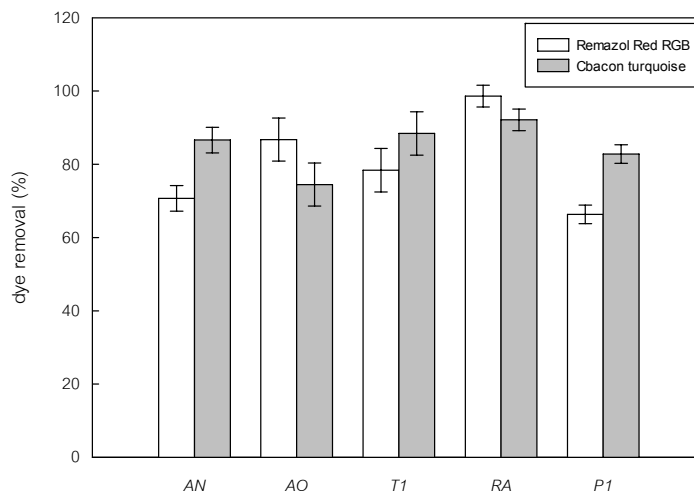
6. การทดสอบหาตัวชะสีที่ดูดซับบนเม็ดราไรชีวิต

สารละลายที่นำมาทำการทดสอบการชะ ได้แก่ 0.1 M HCl, 1 M HCl, 0.1 M NaOH และ 1 M NaOH โดยหลังจากการทดสอบการดูดซับสีทั้งสี RR และ CT จนถึงสภาวะสมดุลแล้ว เตรียมสารละลายที่ทดสอบการชะลงในขวดรูปชมพู่ ใส่เม็ดราไรชีวิตที่ดูดซับสีแล้วลงในสารละลายที่เตรียมไว้ เขย่าที่ 120 rpm เก็บตัวอย่างตามเวลาที่กำหนด 2 ชั่วโมง แล้วนำไปทำการวัดการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโทรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 532 และ 667 นาโนเมตร ตามลำดับ

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. การคัดเลือกมวลชีวภาพรา

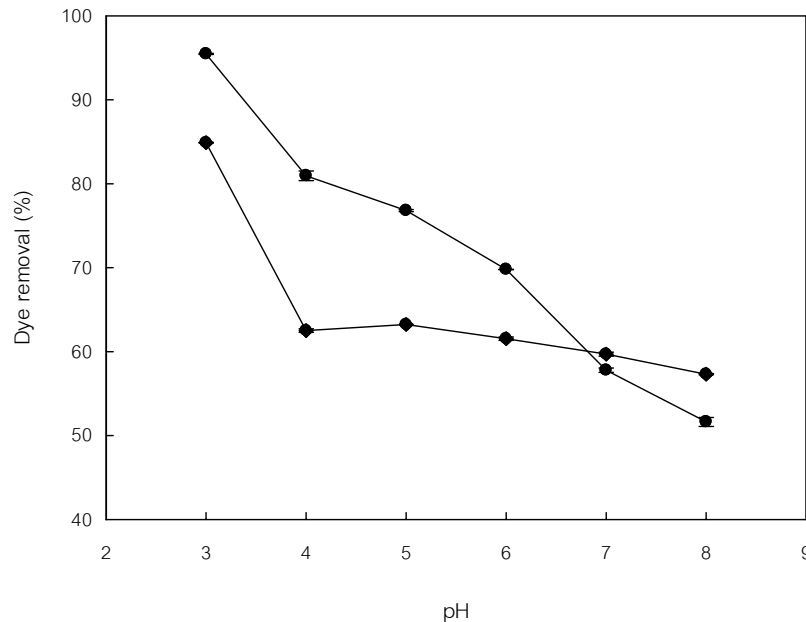
จากการเปรียบเทียบความสามารถในการดูดซับของมวลชีวภาพราทั้ง 5 สายพันธุ์ ได้แก่ *A. niger*, *Aspergillus oryzae*, *Trichoderma* sp., *Rhizopus arrhizus* TISTR3610 และ *Penicillium* sp. พบว่า เปอร์เซ็นต์การดูดซับสี RR เท่ากับ 70, 86, 78, 98 และ 66 เปอร์เซ็นต์ และดูดซับสี CT เท่ากับ 86, 74, 88, 92 และ 82 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นว่า *R. arrhizus* TISTR3610 มีประสิทธิภาพในการดูดซับสี RR และ CT ได้สูงที่สุด เท่ากับ 98% และ 92% ตามลำดับ (ภาพที่ 1) จึงเลือกใช้ *R. arrhizus* TISTR3610 ในการผลิตเป็นเม็ดมวลชีวภาพราไรชีวิตในการทดลองอื่นต่อไป



รูปที่ 1 การดูดซับสีของมวลชีวภาพรา 5 สายพันธุ์

2. การหาค่าความเป็นกรด-ด่างของสารละลายสีที่เหมาะสมต่อการดูดซับ

จากการทดสอบการดูดซับสี RR และ CT ของมวลชีวภาพราวมวง *R. arrhizus* TISTR3610 ที่ความเป็นกรด-ด่าง 3, 4, 5, 6, 7 และ 8 พบว่าการดูดซับของสี RR เท่ากับ 95, 81, 77, 70, 58 และ 51 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ และการดูดซับสี CT เท่ากับ 84, 62, 63, 61, 59 และ 57 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ที่ความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 3 มวลชีวภาพราวมวงมีประสิทธิภาพการดูดซับสูงสุดทั้ง 2 สี (ภาพที่ 2) จึงเลือกใช้ค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 3 ในการทดสอบการดูดซับต่อไป



รูปที่ 2 การดูดซับสีของมวลชีวภาพราวมวง *R. arrhizus* TISTR3610 ที่ความเป็นกรด-ด่าง 3-8

3. แบบจำลองสมดุลการดูดซับและจลนพลศาสตร์การดูดซับสีย้อม

การดูดซับสี RR และ CT ด้วยมวลชีวภาพราวมวงไร้อชีวิตที่ตรึงในเม็ดเจลไคโตซานที่ประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เชิงเส้น (ตารางที่ 1) สามารถอธิบายได้ด้วยไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์ ฟรอยลิกและเรดลิช-เพทเทอร์สัน โดยแบบจำลองที่สอดคล้องกับผลการทดลองที่สุดได้แก่ แบบจำลองของเรดลิช-เพทเทอร์สัน ที่ระดับความเชื่อมั่น 0.9804 และ 0.9947 ของสี RR (ตารางที่ 1-1) และ CT (ตารางที่ 1-2) ตามลำดับ ดังนั้นจึงอธิบายการดูดซับสีบนเม็ดเจลไคโตซานว่าเป็นแบบที่สอดคล้องทั้งแบบวิวิธพันธ์ (Heterogeneous adsorption surface พื้นผิวไม่เป็นเนื้อเดียวกันตลอด) และแบบชั้นเดียวที่มีความสม่ำเสมอ

จากการศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับทั้งสี RR และ CT ด้วยมวลชีวภาพราวมวงที่ตรึงด้วยไคโตซานจากการสังเกตจากค่าระดับความเชื่อมั่น (r^2) พบว่า ไม่สอดคล้องกับปฏิกิริยา Pseudo-first order (ตารางที่ 2 และ 3) แต่จะสอดคล้องกับแบบ Pseudo-second order (ตารางที่ 2 และ 3) แสดงว่าอัตราการดูดซับขึ้นอยู่กับกำลังสองของบริเวณเกิดพันธะที่ว่าง อัตราการดูดซับเกี่ยวข้องกับปฏิกิริยาทางเคมี ซึ่งเกี่ยวกับแรงในการแลกเปลี่ยนหรือใช้อิเล็กตรอนระหว่างสารที่ถูกดูดซับและวัสดุดูดซับร่วมกัน

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ไอโซเทอมของแลงเมียร์ ฟรอยลิด และเรดริช-เพทเทอร์สัน ที่ประมาณค่าด้วยวิธีวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เชิงเส้น

ตารางที่ 1-1 สี Remazol Red RGB

Langmuir constants		Freundlich constants		Redlich-peterson constant	
Q_0	198.14	K_F	96.85	K_p	1740.50
b	0.8389	N	6.1144	α_p	15.5814
				β	0.8706
Nonnormalized RMS	16.6036	Nonnormalized RMS	12.8923	Nonnormalized RMS	8.3996
r^2	0.9482	r^2	0.9506	r^2	0.9804

ตารางที่ 1-2 สี Cibacon Turquoise

Langmuir constants		Freundlich constants		Redlich-peterson constant	
Q_0	76.84	K_F	21.57	K_p	11.76
b	0.1314	N	3.4698	α_p	0.2107
				β	0.9149
Nonnormalized RMS	0.1817	Nonnormalized RMS	3.2893	Nonnormalized RMS	1.1629
r^2	0.9998	r^2	0.9518	r^2	0.9947

ตารางที่ 2 แสดงพารามิเตอร์ทางจลพลศาสตร์ของแบบจำลอง pseudo-first order และ pseudo-second order ของ Remazol Red RGB ที่ประมาณค่าด้วยวิธีวิเคราะห์ที่การถดถอยแบบไม่เชิงเส้น

Initial dye concentration (mg/l)	$q_{eq}(exp)$ (mg/g)	First-order rate			second-order rate			
		$q_{eq}(theo)$ (mg/g)	constant $K_{1,ad}$ (min^{-1})	r^2	RMS	constant $K_{2,ad}$ (g/(mg min))	r^2	RMS
44	44.08	43.75	1.9×10^{-2}	0.9221	1.3804	8.2×10^{-4}	0.9890	0.8812
93	92.83	90.48	8.1×10^{-3}	0.9563	3.6292	1.1×10^{-4}	0.9970	1.1445
144	141.08	151.91	2.6×10^{-3}	0.9935	3.0123	1.0×10^{-5}	0.9971	2.1622
252	193.19	250.85	1.5×10^{-3}	0.9963	3.5693	2.5×10^{-6}	0.9942	4.5555
318	201.83	190.51	6.4×10^{-3}	0.9756	11.668	3.6×10^{-6}	0.8901	30.8203

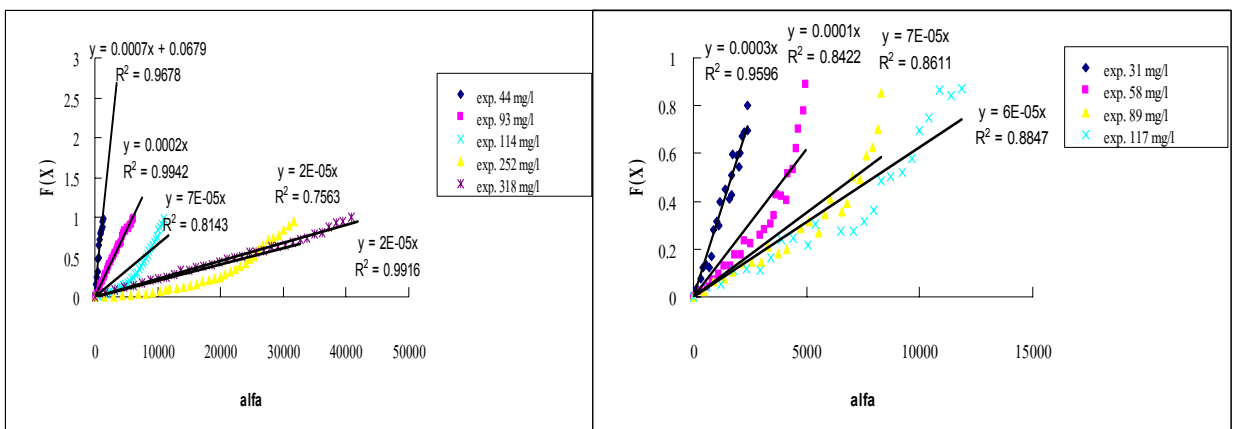
ตารางที่ 3 พารามิเตอร์ทางจลพลศาสตร์ของแบบจำลอง pseudo-first order และ pseudo-second order ของ Cibacon turquoise ที่ประมาณค่าด้วยวิธีวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เชิงเส้น

Initial dye concentration (mg/l)	$q_{eq}(exp)$ (mg/g)	First-order rate			Second-order rate			
		$q_{eq}(theo)$ (mg/g)	constant $K_{1,ad}$ (mg/g)	r^2	RMS	constant $K_{2,ad}$ (g/(mg min))	r^2	RMS
31	26.94	25.67	6.4×10^{-3}	0.9407	1.4673	2.4×10^{-4}	0.9638	1.0633
58	46.45	44.53	4.4×10^{-3}	0.9454	2.6197	7.9×10^{-5}	0.9646	1.9885
89	61.04	56.31	4.9×10^{-3}	0.9124	4.2229	7.6×10^{-5}	0.9371	3.3102
117	66.66	63.41	5.3×10^{-3}	0.9066	4.8630	7.6×10^{-5}	0.9314	3.8479

4. การดูดซับถูกควบคุมด้วยการแพร่ (Diffusion controlled biosorption)

4.1 แบบจำลองแกนหดตัว (Shrinking core model)

ผลจากการพลอตระหว่างค่า X ต่อ α และ $F(X)$ ต่อ α ที่ความเข้มข้นสีเริ่มต้นต่าง ๆ พบว่าความสัมพันธ์ของการเกิดปฏิกิริยาเป็นแบบการพลอตระหว่าง $F(X)$ ต่อ α โดยสังเกตจากค่าความน่าเชื่อถือ (R^2) มีค่าเข้าใกล้ 1.0 มากกว่าการพลอตระหว่าง X ต่อ α จากรูปที่ 3 ซึ่งจะเห็นได้ว่าความชันของเส้นกราฟลดลงเมื่อความเข้มข้นของ RR และ CT เพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นถึงการดูดซับถูกควบคุมด้วยการแพร่จากบริเวณภายในอนุภาคมวลชีวภาพราไรโซวิตมากกว่าชั้นฟิล์มรอบนอกอนุภาค แล้วนำมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ผ่าน (diffusivity) พบว่า มีค่าลดลงเมื่อความเข้มข้นของสีเพิ่มขึ้น แสดงว่า เมื่อความเข้มข้นของสีเพิ่มขึ้นการแพร่ภายในอนุภาคเกิดขึ้นช้าลง ดังตารางที่ 4-1 และ 4-2



รูปที่ 3 แบบจำลองแกนหดตัวของ การควบคุมการแพร่ภายในอนุภาค สี RR และ CT

ตารางที่ 4 การคำนวณค่า Diffusivity โดยใช้แบบจำลองแกนหดตัว (SCM model) ของการแพร่จากภายในอนุภาค

ตารางที่ 4-1 สี Remazol Red RGB

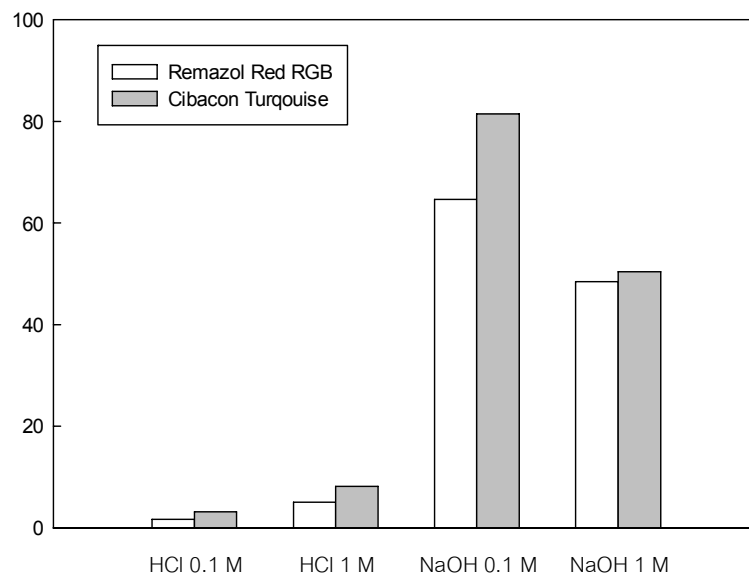
Initial dye concentration (C_0) (mg/L)	Slope	C^0 (mg/cm ³)	Diffusivity (D) (cm ² /min)
44	8×10^{-4}	1.453	1.3×10^{-5}
93	2×10^{-4}	3.059	7.0×10^{-6}
144	7×10^{-5}	4.649	3.7×10^{-6}
252	2×10^{-5}	6.367	1.4×10^{-6}
318	2×10^{-5}	6.652	1.5×10^{-6}

ตารางที่ 4-2 สี Cibacon Turquoise

Initial dye concentration (mg/L)	Slope	C ⁰ (mg/cm ³)	Diffusivity (cm ² /min)
31	3x10 ⁻⁴	0.937	3.2 x 10 ⁻⁶
58	1x10 ⁻⁴	1.615	1.8 x 10 ⁻⁶
89	7x10 ⁻⁵	2.123	1.7 x 10 ⁻⁶
117	6x10 ⁻⁵	2.318	1.5 x 10 ⁻⁶

5. การทดสอบตัวชะสีบนเม็ดราไรโซวิต

การทดสอบตัวชะ พบว่า สารละลาย 0.1 M HCl, 1 M HCl, 0.1 M NaOH และ 1 M NaOH มีเปอร์เซ็นต์การชะสี RR เท่ากับ 1.69, 5.06, 64.61 และ 48.46 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ สำหรับสี CT เท่ากับ 3.21, 8.16, 81.44 และ 50.43 ตามลำดับ จะเห็นว่าตัวชะที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดของสีทั้ง 2 ชนิด คือ 0.1 M NaOH รูปที่ 4 จึงสามารถนำไปใช้เป็นตัวชะต่อไป



รูปที่ 4 เปอร์เซ็นต์การชะของตัวชะต่าง ๆ ของสี RR และ CT

สรุปผลการทดลอง

มวลชีวภาพราที่มีความสามารถในการดูดซับสี RR และสี CT มากที่สุด คือ *Rhizopus arrhizus* TISTR3610 จึงถูกนำมาใช้ในการดูดซับสีทั้ง 2 สีในการทดลอง และการดูดซับสี RR และ CT เกิดขึ้นได้ดีที่ pH เท่ากับ 3 การดูดซับสามารถใช้แบบจำลองสมการดูดซับของแลงเมียร์ ฟรอยลิตและเรดลิช-เพทเทอร์สัน อธิบายได้ โดยแบบจำลองของเรดลิช-เพทเทอร์สัน สามารถอธิบายได้ดีที่สุด คือการดูดซับที่เกิดขึ้นจะเป็นการดูดซับแบบผิวชั้นเดียวและหลายชั้น จนพลศาสตร์การดูดซับเป็นแบบ pseudo second order kinetic แสดงว่าการดูดซับที่เกิดขึ้นถูกควบคุมด้วยการแพร่จากภายนอกสู่ภายในมวลชีวภาพราตรังไรโซวิตและมีข้อจำกัดของการแพร่ภายในมากกว่าชั้นฟิล์ม และสารละลายที่มีประสิทธิภาพชะสี ได้มากที่สุด คือ 0.1 M NaOH

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณโครงการจัดตั้งสาขาจุลชีววิทยา คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ที่ให้ความอนุเคราะห์ในด้านสถานที่ทำงานวิจัย งานวิจัยนี้ได้รับความสนับสนุนจากทุนอุดหนุนงานวิจัยของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

- ประวัชรกรณ์ สาทิตคุณ. 2545. การกำจัดสีในน้ำเสียจากโรงงานสีออกกโดยใช้ซีโอไลต์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพมหานคร. 154 น.
- Aksu, Z. Application of biosorption for the removal of organic pollutants: a review. Process Biochem 2005. 40, 997-1026.
- Bailey E.S., Olin T.J., Bricka M. and Adrian D.D. 1999. A review of potentially low-cost sorbents for heavy metals. Wat. Res. 33, 2469-79.