

การบำบัดน้ำเสียที่มีสีย้อมโรดามีน บี ปนเปื้อนโดยใช้สาหร่าย *Spirulina platensis* ที่ตรึงในอัลจิเนต

Bioremediation of Wastewater Contaminated with Dyes, Rhodamine B

Using Alginate Immobilized Cell of *Spirulina platensis*

วิลาลินี ศรีพุทโธ^{1*} บุพผา จงพัฒน์² และสุนิรัตน์ เรืองสมบุญ¹Wilasinee Sriputtho ^{1*}, Buppha Jongput ², and Suneerat Ruangsomboon¹

Received date: 16 ธ.ค. 65 Revised date: 8 มิ.ย. 66 Accepted date: 14 มิ.ย. 66

DOI: <https://doi.org/10.55003/kmaj.2024.04.29.009>

บทคัดย่อ

การบำบัดน้ำเสียที่มีสีย้อมโรดามีน บี ปนเปื้อนโดยใช้สาหร่าย *Spirulina platensis* ที่ตรึงในอัลจิเนต โดยศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อม ได้แก่ พีเอช ระยะเวลา ปริมาณตัวดูดซับ และความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้น พบว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมคือพีเอช 2 โดยดูดซับได้ 0.86 ± 0.00 มิลลิกรัมต่อกรัม การดูดซับเกิดอย่างรวดเร็วและถึงจุดสมดุลที่ 180 นาที โดยมีค่าการดูดซับ 1.24 ± 0.00 มิลลิกรัมต่อกรัม ปริมาณตัวดูดซับ ที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ค่าการดูดซับของสาหร่ายลดลง ส่วนการเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมส่งผลให้ค่าการดูดซับ ของสาหร่ายเพิ่มขึ้น การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับของสีย้อมพบว่าสอดคล้องกับไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ โดยมีค่าการดูดซับสูงสุด (q_m) เท่ากับ 52.70 ± 3.18 มิลลิกรัมต่อกรัม การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับสอดคล้องกับปฏิกิริยาอันดับสองเหมือน และมีขั้นกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับคือการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มและการแพร่เข้าภายในเซลล์ชั้นสอง จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าสาหร่าย *S. platensis* ที่ตรึงเซลล์ในอัลจิเนตสามารถประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่มีสีย้อมโรดามีน บี ปนเปื้อนได้

คำสำคัญ : การตรึงเซลล์ สไปรูลิน่า สีย้อมโรดามีน บี การบำบัดน้ำเสีย การดูดซับ

Abstract

Bioremediation of wastewater contaminated with rhodamine B dyes using alginate immobilized cell of *Spirulina platensis* was studied. Factors affecting the dye adsorption such as pH, contact time, adsorbent dose, and initial dye concentration were investigated. The results showed that the optimum pH for dye adsorption was at 2 with an adsorption capacity of 0.86 ± 0.00 mg/g. The adsorption was very rapid and reached equilibrium within 180 min with an adsorption capacity of 1.24 ± 0.00 mg/g. Dye adsorption capacity by this alga was reduced at high adsorbent dose whereas the increase of initial concentration of dye increased the adsorption capacity. The adsorption isotherm correlated with Langmuir with the maximum adsorption capacity (q_m) of 52.70 ± 3.18 mg/g. Adsorption kinetic correlated with pseudo-second order. The adsorption rate limiting step were film diffusion rate and secondary rate of intraparticle diffusion. This study suggested that alginate immobilized cell of *S. platensis* can be applied for treatment of wastewater contaminated with rhodamine B.

Keyword : immobilized cell, *Spirulina platensis*, rhodamine B dye, wastewater treatment, adsorption

¹ หลักสูตรวิทยาศาสตรการประมง สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตสัตว์และประมง คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

² ศูนย์วิจัยร่วมภาครัฐและเอกชน คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

¹Program in Fisheries Science. Division of Animal Production Technology and Fishery, School of Agricultural Technology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok. 10520

²Public-Private Collaborative Research Center, School of Agricultural Technology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok. 10520

*Corresponding author, E-mail: 62040359@kmitl.ac.th

คำนำ

ปัจจุบันสีย้อมสังเคราะห์ได้ถูกนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น สิ่งทอ ยาง กระจก พลาสติก เครื่องหนัง อาหาร ยา ปิโตรเคมี สีย้อม และเครื่องสำอาง (Al Hamadi et al., 2017; Kankiliç, 2022) การมีสีย้อมตกค้างในแหล่งน้ำธรรมชาตินอกจากจะทำให้แหล่งน้ำขาดความสวยงามแล้ว ยังลดการส่องผ่านของแสงลงแหล่งน้ำ กิจกรรมการสังเคราะห์ด้วยแสง และความสามารถในการละลายของก๊าซจากบรรยากาศสู่ผิวน้ำ (Deniz & Kepekci, 2015) นอกจากนี้สีย้อมส่วนใหญ่เป็นสารประกอบอะโรมาติกเชิงซ้อนซึ่งมีความเป็นพิษและเป็นสารก่อมะเร็งในสิ่งมีชีวิต ด้วยเหตุนี้สีย้อมจึงกลายเป็นหนึ่งในแหล่งกำเนิดมลพิษทางน้ำที่สำคัญ ซึ่งก่อให้เกิดความเสี่ยงต่อสุขภาพมนุษย์และสิ่งมีชีวิตในน้ำ (Wan Ngah et al., 2011) สีย้อมโรตามิน บี เป็นสีย้อมชนิดหนึ่งที่มีการใช้เป็นปริมาณมาก โดยสีย้อมนี้ละลายน้ำได้ดี นิยมใช้ในอุตสาหกรรมประเภทสิ่งทออย่างแพร่หลาย จึงมีการปนเปื้อนของสีย้อมนี้ในแหล่งน้ำซึ่งทำให้เกิดการระคายเคืองต่อผิวหนัง ตา ระบบทางเดินหายใจ เป็นสารก่อมะเร็ง สร้างความเสียหายต่อระบบสืบพันธุ์ และความเป็นพิษเรื้อรังในมนุษย์และสัตว์ (Duarte Neto et al., 2018) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องกำจัดสีย้อมโรตามิน บี ออกจากน้ำเสียก่อนที่จะปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ

วิธีในการกำจัดสีย้อมออกจากน้ำเสียมีด้วยกันหลายวิธี เช่น การใช้โอโซน (ozone treatment) การตะกอน (coagulation) การแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) การกรองผ่านเยื่อกรอง (membrane filtration) และ การออกซิเดชัน (oxidation) แต่วิธีเหล่านี้มีค่าใช้จ่ายสูง ไม่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และประสิทธิภาพไม่สูง (Salleh et al., 2011) นอกจากนี้วิธีที่กล่าวมาข้างต้นยังมีอีกหนึ่งวิธีที่นิยมนำมาใช้ในการกำจัดสีย้อม ได้แก่ การดูดซับทางชีวภาพ (biosorption) เนื่องจากมีต้นทุนต่ำและไม่ซับซ้อน ตัวดูดซับทางชีวภาพที่นิยมมีหลายชนิดเช่น พืช แบคทีเรีย เชื้อรา และสาหร่าย มีการศึกษาที่ใช้สาหร่ายในการดูดซับสีย้อม เช่น *Chlorella vulgaris*, *Lyngbya lagerheimii*, *Nostoc lincki*, *Oscillatoria rubescens*, *Elakatothrix viridis* และ *Volvox aureus* พบว่ามีความสามารถในการดูดซับ สีย้อมได้ดี (El-sheekh et al., 2009)

สาหร่าย *Spirulina platensis* เป็นสาหร่ายขนาดเล็กที่จัดอยู่ในกลุ่มไซยาโนแบคทีเรีย (cyanobacteria) หรือ สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (blue-green algae) ส่วนใหญ่เพาะเลี้ยงทั่วโลก มีจำหน่ายปริมาณมากและค่อนข้างถูก (Cardoso et al., 2012) นอกจากนี้ยังมีการใช้สาหร่ายชนิดนี้ในการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยการปล่อยแก๊สที่ ออกจากโรงงานอุตสาหกรรมหรือ โรงไฟฟ้าลงสู่บ่อเพาะเลี้ยงสาหร่าย ซึ่งช่วยเพิ่มชีวมวลและลดต้นทุนการผลิตสาหร่ายได้มาก (Ruangsomboon et al., 2019) โดยสาหร่าย *Spirulina platensis* เป็นแหล่งโปรตีนทางเลือกสำหรับอาหารมนุษย์และอาหารสัตว์ นอกจากโปรตีนแล้วยังมีพอลิแซ็กคาไรด์ ไขมัน แร่ธาตุ วิตามิน และสารประกอบอื่น ๆ (Mahdieh et al., 2012) ซึ่งสารเหล่านี้ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันและประจุที่หลากหลาย เช่น คาร์บอกซิล ไฮดรอกซิล ฟอสเฟต ซัลเฟต และหมู่อื่น ๆ ช่วยในการยึดจับกับสีย้อมของสาหร่าย *S. platensis* (Nicoletti, 2016) มีการรายงานไว้ว่าสาหร่าย *S. platensis* สามารถกำจัดสีย้อมได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Al Hamadi et al., 2017; Cardoso et al., 2012; Deniz & Kepekci, 2015) แต่จากปัญหาความยุ่งยากในการแยกเซลล์สาหร่ายออกจากน้ำเสียหลังจากการนำไปใช้เป็นตัวดูดซับทำได้ยาก เนื่องจากเซลล์ที่มีขนาดเล็ก จึงได้นำเทคนิคการตรึงเซลล์มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาการเก็บเกี่ยวเซลล์สาหร่าย โดยเลือกใช้อัลจินเตมาเป็นวัสดุตรึงเซลล์ เนื่องจากเป็นสารราคาถูกและสามารถตรึงเซลล์ ได้ง่าย นอกจากนี้ในทศวรรษที่ผ่านมาอัลจินเตได้ถูกนำมาใช้กำจัดมลพิษต่าง ๆ เช่น สีย้อม และโลหะหนัก (Kaushal & Tiwari, 2010; Li et al., 2021) มีรายงานว่าสาหร่าย *Spirulina* sp. ที่ตรึงเซลล์กับอัลจินเตสามารถดูดซับสีย้อม azo ได้ดี (Saloglu & Sahin, 2021)

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของสาหร่าย *S. platensis* ที่ตรึงเซลล์ในอัลจินเต ในการดูดซับสีย้อมโรตามิน บี โดยศึกษาปัจจัยที่เหมาะสมต่อการดูดซับ ได้แก่ พีเอช ระยะเวลา ปริมาณตัวดูดซับ และความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม และศึกษาไอโซเทอร์มและจลนพลศาสตร์การดูดซับเพื่อใช้เป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้จริงสำหรับกำจัดสีย้อมในน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม

วิธีการศึกษา

การเตรียมสาหร่าย

สาหร่าย *S. platensis* แห่ง ได้รับการสนับสนุนจากโรงไฟฟ้าบางปะกงจากโครงการการดูดซับคาร์บอนไดออกไซด์โดยใช้สาหร่ายสไปรูลิน่า บดสาหร่ายให้ละเอียดและร่อนด้วยตะแกรงขนาด 0.25 มิลลิเมตร และตรึงสาหร่ายในเม็ดอัลจิเนต (alginate beads) โดยละลายโซเดียมอัลจิเนตในน้ำและผสมสาหร่ายลงไป คนให้เข้าเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นใช้หลอดดูดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2.0 มิลลิเมตร ดูดส่วนผสมดังกล่าวไปหยดในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ ที่ไว้ไม่ต่ำกว่า 30 นาที นำมาล้างด้วยน้ำที่ปราศจากไอออนจนสะอาด และนำไปใช้ทดสอบ สีย้อม ที่ใช้ในการทดลองคือ สีเบสิก (basic dye) ชนิดโรดามีน บี (rhodamine B)

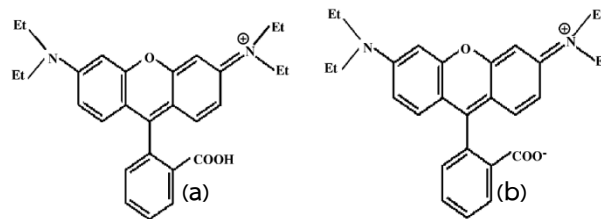


Figure 1 Chemical structure of rhodamine B dye: (a) Cationic form and (b) Zwitterionic form

การหาระดับพีเอช ระยะเวลา ปริมาณสาหร่าย และความเข้มข้นสีย้อมที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อมโรดามีน บี

ละลายสีย้อมโรดามีน บี ในน้ำที่ปราศจากไอออนให้ได้ความเข้มข้นที่ต้องการ จากนั้นศึกษาการดูดซับสีย้อม ที่พีเอชของสารละลาย 2-8 นำผลพีเอชที่สาหร่ายดูดซับสีย้อมได้ดีที่สุดไปใช้ในการทดลองขั้นต่อไป หาระยะเวลาเข้าสู่จุดสมดุลของการดูดซับ และวิเคราะห์ปริมาณสีย้อมที่เหลือในสารละลายในช่วงระยะเวลา 0-360 นาที นำผลระยะเวลาที่เข้าสู่สมดุลการดูดซับไปใช้ในการทดลองขั้นต่อไป ทดลองผันแปรปริมาณสาหร่ายระหว่าง 2-10 กรัมต่อลิตร และนำผลที่ดีที่สุดไปใช้ในขั้นถัดไป จากนั้นทดลองผันแปรของความเข้มข้นของสีย้อมใช้สีย้อม 20-100 มิลลิกรัมต่อลิตร

ปรับระดับพีเอชของสารละลายสีย้อมให้ได้ระดับพีเอชที่ต้องการโดยใช้ HNO_3 0.1 โมลต่อลิตร และ NaOH 0.1 โมลต่อลิตร จากนั้นนำสารละลายสีย้อมปริมาตร 10 มิลลิลิตร บรรจุในขวดรูปชมพู่ขนาด 125 มิลลิลิตร ใส่สาหร่ายที่ตรึงในเม็ดอัลจิเนตที่เตรียมไว้ข้างต้นลงในสารละลายสีย้อมแล้วนำไปเขย่าบนเครื่องเขย่า (shaker) ที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 180 นาที หลังจากนั้นแยกวิเคราะห์ปริมาณสีย้อมที่เหลือในสารละลาย โดยวิเคราะห์ปริมาณ สีย้อมด้วยเครื่อง spectrophotometer (Genesys 20 Thermo Spectronic) ที่ความยาวคลื่น 553 นาโนเมตร และคำนวณปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับต่อปริมาณสาหร่าย หรือค่าการดูดซับ (adsorption capacity, q_e มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม) ดังสมการ $q_e = (C_0 - C_e)/W$

เมื่อ C_0 คือ ความเข้มข้นตั้งต้นของสีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร), C_e คือ ความเข้มข้นสุดท้ายของสีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร), V คือ ปริมาตรของสารละลายสีย้อม (ลิตร) และ W คือ ปริมาณน้ำหนักแห้งของสาหร่าย (กรัม)

คำนวณเปอร์เซ็นต์การดูดซับ (% adsorption) ดังสมการ $\text{adsorption (\%)} = (C_0 - C_e)/C_0 \times 100$

เมื่อ C_0 คือ ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในน้ำเสียที่จุดเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร), C_t คือ ความเข้มข้นของสารปนเปื้อนในน้ำเสียที่ระยะเวลาต่าง ๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับและจลนพลศาสตร์การดูดซับ (adsorption isotherm and kinetics)

เตรียมสารละลายสีย้อมที่พีเอชเหมาะสม ใส่สาหร่ายที่ตรึงเซลล์ในรูปเม็ดอัลจิเนตปริมาณ 2 กรัมต่อลิตร สารละลายสีย้อม 200 มิลลิลิตร ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม 20-100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส วิเคราะห์ปริมาณสีย้อมที่เหลือในสารละลายที่จุดสมดุล และทำนายลักษณะการดูดซับสีย้อมของสาหร่ายโดยนำค่าที่ได้ไปคำนวณโดยใช้สมการการดูดซับของแลงเมียร์และสมการการดูดซับของฟรุนดลิช (Volesky & Holan, 1995) สมการของแลงเมียร์ $1/q_e = (1/(K_s q_m))(1/C_e) + (1/q_m)$

เมื่อ q_e คือ ปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัมสาหร่าย), q_m คือ ปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับได้สูงที่สุดโดยสาหร่าย (มิลลิกรัมต่อกรัมสาหร่าย), K_s คือ ค่าคงที่ในการดูดซับสีย้อมของสาหร่ายซึ่งสัมพันธ์ระหว่างความชอบ (สัมพรรคของ

แร่ธาตุ) ระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ (ลิตรต่อมิลลิกรัม) และ C_e คือ ปริมาณสีย้อมที่เหลือในสารละลายที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

ส่วนสมการของฟรอนดลิช มีรูปสมการคือ $q_e = K_f C_e^{1/n}$

เมื่อ K_f และ $1/n$ เป็นค่าคงที่ของการดูดซับ ซึ่งค่า K_f และ $1/n$ เป็นดัชนีของประสิทธิภาพในการดูดซับ (adsorption capacity index) และความหนาแน่นในการดูดซับ (adsorption intensity) ตามลำดับ

การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ โดยใส่สาหร่ายที่ตรึงเซลล์ในรูปเม็ดอัลจิเนต 2 กรัมต่อลิตร ในสารละลายสีย้อมที่ระดับความเข้มข้น 20-100 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระดับอุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส วิเคราะห์ปริมาณสีย้อมที่เหลือในสารละลายที่เวลา 0-180 นาที จากนั้นศึกษาอันดับของปฏิกิริยา (order of reaction) โดยการคำนวณปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน (psuedo first order) ดังสมการ $\log(q_e - q_t) = \log(q_e) - (k_1/2.303)t$

เมื่อ q_e คือ ปริมาณสารปนเปื้อนที่ถูกดูดซับบนเซลล์สาหร่ายที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร), q_t คือ ปริมาณสารปนเปื้อนที่ถูกดูดซับบนเซลล์สาหร่ายที่เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร) และ k_1 คือ ค่าคงที่ของการดูดซับแบบ psuedo first-order (ลิตรต่อมิลลิกรัมต่อเวลา)

ส่วนการคำนวณปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน (psuedo second-order) ดังสมการ $t/q_t = (1/k_2 q_e^2 + 1/q_e)t$

เมื่อ q_e คือ ปริมาณสารปนเปื้อนที่ถูกดูดซับบนเซลล์สาหร่ายที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร), q_t คือ ปริมาณสารปนเปื้อนที่ถูกดูดซับบนเซลล์สาหร่ายที่เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร) และ k_2 คือ ค่าคงที่ของการดูดซับแบบ psuedo second-order (กรัมต่อมิลลิกรัมต่อเวลา)

และขั้นกำหนดอัตราเร็วของปฏิกิริยา (rate of limiting step) คำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้ $q = k_1 t^{0.5}$

เมื่อ q คือ ปริมาณของสารปนเปื้อนที่ถูกดูดซับต่อกรัมของสาหร่ายที่เวลาใด ๆ และ t คือ เวลาในการดูดซับที่เวลาใด ๆ

การวิเคราะห์ปริมาณสีย้อมและการวิเคราะห์ข้อมูล

ทำการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design ; CRD) ทดลอง 4 ซ้ำต่อชุดการทดลองวิเคราะห์ความแปรปรวนของชุดการทดลองโดยวิธี One way ANOVA และวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างชุดทดลองโดยวิธี Turkey's Honestly Significant Different (HSD) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ($p < 0.05$) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับคอมพิวเตอร์ (IBM SPSS statistics 28.0)

ผลการศึกษาและวิจารณ์

ผลของระดับพีเอชของสารละลายที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อม

ค่าพีเอชของสารละลายมีบทบาทสำคัญในกระบวนการดูดซับ เนื่องจากมีผลต่อการแตกตัวของสีย้อมและบริเวณตำแหน่งที่ทำหน้าที่จับกับสีย้อมบนผิวเซลล์สาหร่าย จากการทดลองใช้สาหร่าย *S. platensis* ที่ตรึงในอัลจิเนตดูดซับ สีย้อมโรดามีน บี พบว่าสามารถดูดซับสีย้อมได้สูงที่สุดที่ระดับพีเอชของสารละลายเท่ากับ 2 มีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับเท่ากับ 86.34 ± 0.13 เปอร์เซ็นต์ หรือมีปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับต่อปริมาณสาหร่ายเท่ากับ 0.86 ± 0.00 มิลลิกรัมต่อกรัม โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับระดับพีเอช 3-8 (Table 1)

ซึ่งที่ค่าพีเอชต่ำ (พีเอช 2) สีย้อมโรดามีน บี มีประจุเป็นบวก และโมเลกุลของสีย้อมอยู่ในรูปมอนอเมอร์ (monomer) ดังนั้นสีย้อมจึงจับกับหมู่ฟังก์ชันที่เป็นประจุลบบนผิวเซลล์สาหร่าย และสามารถแพร่เข้าสู่พื้นผิวภายใน รูพรุนของสาหร่ายได้ง่าย ซึ่งหมู่ฟังก์ชันที่มีประจุลบนี้มาจากคาร์บอกซิเลตและโปรตีนที่ผิวเซลล์สาหร่าย ที่ให้หมู่ฟังก์ชัน COO^- , OH^- , SO_4^{2-} และ NH_2^- เป็นต้น แต่ที่ค่าพีเอชสูงกว่า 2 โมเลกุลของสีย้อมในสารละลายจะแสดงลักษณะเป็นสวิตเตอร์ไอออน (zwitterion) คือสีย้อมแสดงประจุบวกและประจุลบอยู่ในหนึ่งโมเลกุล (Figure 1b) สีย้อมจึงเกิดการรวมตัวกันเอง ทำให้โมเลกุลของสีย้อมมีขนาดใหญ่ขึ้น (dimer) จึงไม่สามารถแพร่เข้าสู่พื้นผิวภายในรูพรุนของสาหร่ายได้ การดูดซับสีย้อมจึงลดลง ซึ่งรูปแบบสวิตเตอร์ไอออนของสีย้อมเกิดจากการรวมตัวกันของหมู่คาร์บอกซิล (carboxyl group) และหมู่แซนเทน (xanthene group) ที่อยู่ในโมเลกุลของสีย้อม (Gad & El-Sayed, 2009) ดังนั้น จึงเลือกใช้พีเอชของสารละลายเท่ากับ 2 ในการทดลองขั้นต่อไป ส่วนการเปลี่ยนแปลงของพีเอชหลัง การดูดซับพบว่าค่าพีเอชมีค่าสูงกว่าค่าพีเอชเริ่มต้นระหว่าง 2-5 แต่ค่าพีเอชเริ่มต้นระหว่าง 7-8 กลับมีค่าลดลง แสดงว่าอาจมีความเป็นไปได้ของการปล่อย OH^- จากสาหร่ายสู่สารละลายหรือเกิดการดูดซับ H^+ จากสารละลายกับผิวเซลล์สาหร่ายซึ่งเป็นประจุลบจึงทำ

ให้พีเอชเพิ่มขึ้น ส่วนที่พีเอช 7-8 สีย้อมแตกตัวอยู่ในรูปทั้งบวกและลบจึงเป็นไปได้ว่าประจุบวกของสีย้อมมีการจับกับ OH^- ที่มีอยู่มากกว่าที่พีเอชต่ำด้วยจึงทำให้ค่าพีเอชลดลง

Table 1 Effect of pH on rhodamine B adsorption capacity of immobilized cell *Spirulina platensis* (algae 10 g/L, exposure time 180 min, initial dye concentration 10 mg/L, n=4)

Initial pH	Adsorption (%)	q_e (mg/g)	Final pH
2	86.34±0.13 ^a	0.86±0.00 ^a	3.07±0.01
3	75.05±1.49 ^b	0.75±0.01 ^b	5.15±0.18
4	70.72±0.72 ^{bcd}	0.71±0.01 ^{bcd}	5.99±0.03
5	67.53±0.30 ^{cd}	0.68±0.00 ^{cd}	6.28±0.01
6	65.90±0.89 ^d	0.66±0.01 ^d	6.25±0.01
7	70.43±2.40 ^{bcd}	0.70±0.02 ^{bcd}	6.38±0.02
8	71.71±0.46 ^{bc}	0.72±0.00 ^{bc}	6.42±0.01

^{a-e} Different superscript letters in each column are significantly different ($P<0.05$).

ผลของระยะเวลาที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อม

ปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับขึ้นอยู่กับระยะเวลาที่สาหร่ายสัมผัสกับสารละลาย โดยทั่วไปการดูดซับสีย้อมจะเกิดขึ้นรวดเร็วในช่วงแรกจากนั้นการดูดซับจะเริ่มช้าลง และปริมาณการดูดซับจะเริ่มคงที่จนเข้าสู่จุดสมดุลการดูดซับ (equilibrium adsorption) ณ จุดสมดุล ระยะเวลาจะไม่มีผลกระทบใด ๆ ต่อการดูดซับ แม้ว่าเวลาจะเพิ่มขึ้น แต่การดูดซับจะไม่เพิ่มขึ้นอีก ดังนั้นการทราบจุดสมดุลในการดูดซับที่เหมาะสมจะทำให้ตัวดูดซับมีความสามารถในการดูดซับได้สูงสุด การศึกษาผลของระยะเวลาในการดูดซับสีย้อมโรดามีน บี ที่ระยะเวลา 0-360 นาที พบว่าสาหร่าย *S. platensis* ที่ตรึงเซลล์ในอัลจิเนต ดูดซับสีย้อมโรดามีน บี ได้อย่างรวดเร็วในช่วง 60 นาทีแรก แล้วค่อย ๆ เพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ จนกระทั่งเริ่มเข้าสู่จุดสมดุลเมื่อเข้าสู่เวลาที่ 180 (Figure 2) ซึ่งที่จุดสมดุลสาหร่ายสามารถดูดซับสีย้อมได้ถึง 1.24±0.00 มิลลิกรัมต่อกรัม หรือคิดเป็นเปอร์เซ็นต์การดูดซับเท่ากับ 88.81±0.01 เปอร์เซ็นต์ ทั้งนี้การดูดซับสีย้อมของสาหร่าย *S. platensis* เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรกสามารถอธิบายได้ว่าพื้นผิวภายนอกของสาหร่ายก่อนเกิด การดูดซับยังปราศจากโมเลกุลของสีย้อม จึงสามารถดูดซับสีย้อมไว้บนผิวเซลล์ภายนอกของสาหร่ายได้ง่ายและรวดเร็ว เมื่อระยะเวลาผ่านไปช่วงหนึ่ง พื้นที่ผิวเซลล์ภายนอกของสาหร่ายถูกปกคลุมไปด้วยโมเลกุล ของสีย้อมจนหมด จากนั้นโมเลกุลของสีย้อมจะแพร่เข้าไปยังพื้นที่ผิวเซลล์ภายในของสาหร่ายซึ่งเกิดขึ้นช้ากว่าขั้นตอนแรกข้างต้น จนกระทั่งเกิดการอิ่มตัวทำให้โมเลกุลของสีย้อมไม่สามารถเข้าไปในรูพรุนของสาหร่ายได้ และเข้าสู่จุดสมดุลการดูดซับ (Al Hamadi et al., 2017) ดังนั้นการดูดซับสีย้อมโรดามีน บี ด้วยสาหร่าย *S. platensis* ที่ตรึงเซลล์ในอัลจิเนตจะเข้าสู่จุดสมดุลที่เวลา 180 นาที

เมื่อเปรียบเทียบผลของระยะเวลาในการดูดซับสีย้อมโรดามีน บี ด้วยสาหร่าย *S. platensis* ที่ตรึงเซลล์ ในอัลจิเนตจากการทดลองนี้กับตัวดูดซับอื่น ๆ (Table 2) พบว่าสาหร่าย *S. platensis* ที่ตรึงเซลล์ในอัลจิเนตมีระยะเวลาเข้าสู่จุดสมดุลเช่นเดียวกันหรือใกล้เคียงกับตัวดูดซับอื่น ๆ แสดงให้เห็นว่าสีย้อมโรดามีน บี มีระยะเวลา สู่จุดสมดุลอยู่ในช่วง 120-180 นาที

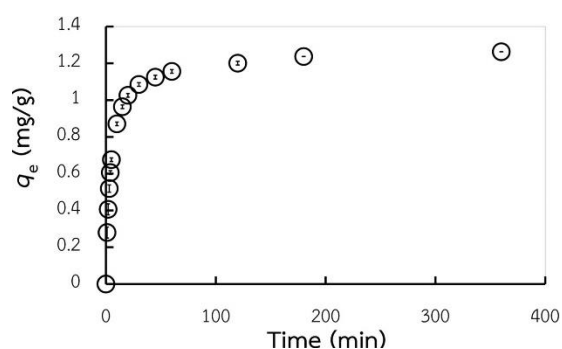


Figure 2 Effect of contact time on rhodamine B adsorption capacity of immobilized cell

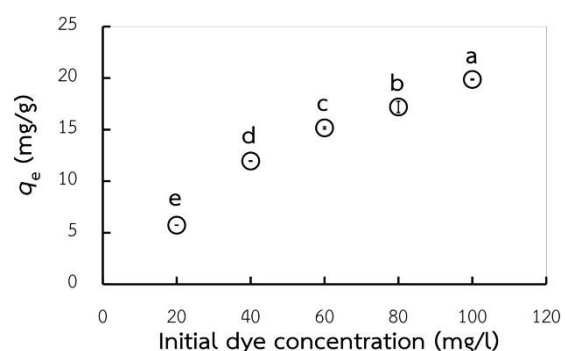


Figure 3 Effect of initial concentration on rhodamine B adsorption capacity of immobilized cell

Spirulina platensis (alga 10 g/L, pH 2,
initial dye concentration 10 mg/L, n=4)

Spirulina platensis (algae 2 g/L, pH 2, exposure
time 180 min, n=4)

^{a-e} Different letters on each marker are significantly
different ($P<0.05$).

Figure 3 Effect of initial concentration on rhodamine B adsorption capacity of immobilized cell *Spirulina platensis*
(algae 2 g/L, pH 2, exposure time 180 min, n=4)

^{a-e} Different letters on each marker are significantly different ($P<0.05$).

Table 2 Equilibrium time of rhodamine B adsorption on various adsorbents

Adsorbents	Equilibrium time (min)	References
<i>Turbinaria conoides</i> (brown algae)	180	Hii et al. (2009)
<i>Chlorella pyrenoidosa</i> (green algae)	120	Da Rosa et al. (2018)
alginate immobilized cell of <i>S. platensis</i>	180	This study

ผลของปริมาณสาหร่ายที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อม

การศึกษาผลของปริมาณสาหร่ายที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อมโรดามีน บี โดยผันแปรสาหร่าย 2-10 กรัมต่อลิตร พบว่าปริมาณสาหร่ายที่เหมาะสมคือ 2 กรัมต่อลิตร โดยพบว่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมเพิ่มขึ้นจาก 51.91 ± 0.27 เป็น 87.01 ± 0.06 เปอร์เซ็นต์ เมื่อปริมาณสาหร่ายเพิ่มขึ้นจาก 2 เป็น 10 กรัมต่อลิตร ซึ่งเป็นผลมาจากการเพิ่มพื้นที่ผิวเซลล์ของตัวดูดซับทำให้จับกับสีย้อมได้มากขึ้น อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณสาหร่ายสูงกว่า 2 กรัมต่อลิตร ค่าปริมาณของสีย้อมที่ถูกดูดซับได้ต่อปริมาณสาหร่าย (q_e) กลับลดลง โดยมีค่าการดูดซับลดลงจาก 3.62 ± 0.02 เหลือ 1.21 ± 0.00 มิลลิกรัมต่อกรัม เมื่อปริมาณสาหร่ายเพิ่มขึ้นจาก 2 เป็น 10 กรัมต่อลิตร (Table 3) เนื่องจากการเพิ่มปริมาณสาหร่ายทำให้โมเลกุลของสีย้อมที่อยู่ในสารละลายไม่เพียงพอที่จะครอบคลุมบริเวณที่เกิดการแลกเปลี่ยนประจุทั้งหมด (exchangeable sites) ของผิวเซลล์สาหร่ายและสาหร่ายเกิดการเกาะกลุ่มกันทำให้ผิวเซลล์สาหร่ายบางส่วนไม่สัมผัสสีย้อมที่ซึมเข้าในเม็ดบีดจึงไม่สามารถจับสีย้อมได้เป็นผลให้ปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับต่อสาหร่าย 1 กรัมลดลง ผลการทดลองครั้งนี้ให้ผลในแนวโน้มเดียวกับการทดลองของ Gunasundari et al. (2020) ได้มีการใช้สาหร่าย *S. platensis* ดูดซับสีย้อม naphthol green-B (ซึ่งเป็นสีย้อมประเภทแอซิด) ที่ปริมาณตัวดูดซับที่แตกต่างกัน 0.5-3.5 กรัมต่อลิตร พบว่าเมื่อปริมาณสาหร่ายเพิ่มขึ้นทำให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อมเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณของสีย้อมที่ถูกดูดซับต่อปริมาณสาหร่าย (q_e) ลดลง

ผลของความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นต่อประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมของสาหร่าย

ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับของสาหร่าย สีย้อมที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นทำให้สาหร่ายดูดซับสีย้อมปริมาณต่อ 1 กรัมของสาหร่ายได้เพิ่มมากขึ้น พบว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม 100 มิลลิกรัมต่อลิตร สาหร่ายสามารถดูดซับสีย้อมได้สูงสุด 19.87 ± 0.05 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับทุกระดับความเข้มข้น (Figure 3) และเมื่อเปรียบเทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม 20 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าสาหร่ายสามารถดูดซับสีย้อมได้สูงสุด 5.73 ± 0.01 มิลลิกรัมต่อกรัม ซึ่งความสามารถในการดูดซับสีย้อมลดลง เมื่อเทียบกับความเข้มข้นสูงสุดที่ 100 มิลลิกรัมต่อลิตร ทั้งนี้เป็นเพราะเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้น มีผลทำให้ปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากการเพิ่มความเข้มข้นของสีย้อมส่งผลให้เกิดความแตกต่างระหว่าง ความเข้มข้นของสีย้อมในสารละลายกับบริเวณผิวเซลล์สาหร่ายเพิ่มสูงขึ้น จึงเกิดพลังงานในการผลักของสีย้อมสู่เซลล์สาหร่ายมากขึ้น ซึ่งให้ผลการทดลองที่มีแนวโน้มเดียวกับการใช้สาหร่าย *Scenedesmus regularis* ในการดูดซับสีย้อม methylene blue (Kankilic, 2022)

Table 3 Effect of adsorbent dose on rhodamine B adsorption capacity of immobilized cell *Spirulina platensis*
(pH 2, exposure time 180 min, initial dye concentration 10 mg/L, n=4)

Adsorbent dose (g/L)	Adsorption (%)	q_e (mg/g)
2	51.91 ± 0.27^e	3.62 ± 0.02^a
4	69.92 ± 0.50^d	2.44 ± 0.02^b
6	78.67 ± 0.20^c	1.83 ± 0.00^c

8	84.07±0.27 ^b	1.47±0.00 ^d
10	87.01±0.06 ^a	1.21±0.00 ^e

^{a-e} Different superscript letters in each column are significantly different ($P<0.05$).

ผลการศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ

การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับเพื่อทำนายลักษณะการดูดซับของสาหร่าย ซึ่งจะพิจารณาไอโซเทอร์ม การดูดซับจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r^2) ที่มีค่าใกล้เคียง 1 มากที่สุด เมื่อคำนวณการดูดซับด้วยสมการการดูดซับของแลงเมียร์และสมการการดูดซับของฟรุนดลิช (Table 4) หากพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (r^2) พบว่า ค่า r^2 จากสมการไอโซเทอร์มของแลงเมียร์และฟรุนดลิช เท่ากับ 0.985 และ 0.950 (Table 4) ตามลำดับ ซึ่งค่า r^2 จากสมการ ไอโซเทอร์มของแลงเมียร์มีค่าใกล้เคียง 1 มากกว่า แสดงว่าการดูดซับสีย้อมโรดามีน บี โดยใช้สาหร่าย *S. platensis* สอดคล้องกับไอโซเทอร์มของแลงเมียร์มากกว่าฟรุนดลิช ซึ่งกล่าวได้ว่าโมเลกุลที่ถูกดูดซับบนตำแหน่งดูดซับเป็นแบบชั้นเดียว (monolayer) โดยแต่ละตำแหน่งที่เกิดการดูดซับจะมีลักษณะเหมือนกัน (homogeneous surface) ตัวดูดซับมีพลังงานในการดูดซับเท่ากันทุกตำแหน่งที่เกิดการดูดซับ และไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาระหว่างตัวถูกดูดซับ บนตำแหน่งดูดซับที่อยู่ใกล้เคียงกันได้ (Saadi et al., 2015) และจากสมการไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์มีค่าการดูดซับสูงสุด (q_m) ของสาหร่าย *S. platensis* เท่ากับ 52.70±3.18 มิลลิกรัมต่อกรัม (Table 4)

Table 4 Langmuir and Freundlich isotherm parameters for the adsorption of rhodamine B by immobilized cell of *Spirulina platensis* (algae 2 g/L, pH 2, exposure time 180 min, Temp 25 °C, n=4)

Parameters	Langmuir isotherm			Freundlich isotherm		
	q_m (mg/g)	K_s (L/mg)	r^2	K_f	n	r^2
	52.70±3.18	0.01±0.00	0.985	1.64±0.14	1.42±0.03	0.950

การใช้สาหร่าย *Spirulina* sp. ตรึงในอัลจิเนตดูดซับสีย้อม azo tartrazine, carmoisine และ Allura Red พบว่ามีการดูดซับแบบแลงเมียร์เช่นกัน โดยมีค่าการดูดซับสูงสุด 76.92, 50.00 และ 71.42 มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ (Saloglu & Sahin, 2021) การดูดซับสีย้อม C.I. Basic Red 46 โดยใช้ *S. platensis* ดูดซับได้ 25.46 มิลลิกรัมต่อกรัม (Deniz & Kepekci, 2015)

ผลการศึกษาแบบจำลองจลนพลศาสตร์การดูดซับสีย้อม

จลนพลศาสตร์การดูดซับ (adsorption kinetics) เป็นการศึกษาอัตราเร็วของการดูดซับ (rate of reaction) ก่อนการดูดซับเข้าสู่ภาวะสมดุลด้วยการหาอันดับของปฏิกิริยา (order of reaction) การหาขั้นกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ (rate limiting step) และค่าคงที่ของอัตราเร็วของการดูดซับ (rate constant) เพื่อศึกษาปัจจัยความเข้มข้นเริ่มต้นของสารตั้งต้นที่มีผลต่ออัตราเร็วของการดูดซับสำหรับนำไปเป็นข้อมูลในการออกแบบ และประยุกต์ใช้ตัวดูดซับให้เหมาะสมกับการใช้งานระบบต่าง ๆ เช่น batch reactors และ fixed beds เป็นต้น (Ruangsomboon, 2006)

การพิจารณาอันดับของปฏิกิริยาการดูดซับจะพิจารณาจากค่าความสัมพันธ์ (r^2) ของอัตราเร็วของปฏิกิริยากับความเข้มข้นของตัวทำปฏิกิริยา พบว่าค่าความสัมพันธ์ของสมการแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเสมือน (pseudo second-order) ให้ผลการทดลองสอดคล้องมากกว่าสมการแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเสมือน (pseudo first-order) (Table 5) ซึ่งมีผลการทดลองในแนวโน้มเดียวกับการทดลองของ Saloglu & Sahin (2021) ได้มีการใช้สาหร่าย *Spirulina* sp. ที่ตรึงเซลล์ในอัลจิเนตดูดซับสีย้อม azo tartrazine, carmoisine และ Allura Red พบว่ามีอันดับปฏิกิริยาการดูดซับเป็นอันดับสองเสมือนเช่นเดียวกัน นั่นคืออัตราเร็วของปฏิกิริยาเป็นปฏิกิริยากับกำลังสองของความเข้มข้นเริ่มต้นของสาร ดังนั้นเมื่อเพิ่มตัวดูดซับเข้าสู่ระบบหนึ่งเท่าจะดูดซับสีย้อมเพิ่มขึ้นเป็นกำลังสอง ซึ่งแสดงให้เห็นว่าหากมีการนำสาหร่าย *S. platensis* ที่ตรึงในอัลจิเนตไปประยุกต์ใช้ดูดซับสีย้อมโรดามีน บี ในระบบบำบัดน้ำเสีย การใช้สาหร่ายปริมาณมากย่อมส่งผลให้อัตราการดูดซับเกิดได้เร็วเพิ่มขึ้นเป็นกำลังสองของปริมาณสาหร่ายที่เพิ่มและทำให้ระยะเวลาในการบำบัดสีย้อมในบ่อบำบัดน้ำเสียลดลงสามารถปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งน้ำทิ้งหรือแหล่งรับน้ำธรรมชาติได้เร็วมากขึ้น

ขั้นกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับคือขั้นควบคุมอัตราเร็วของกระบวนการทั้งหมด จากกลไกการดูดซับซึ่งเป็นการแพร่หรือเคลื่อนที่ของสีย้อมเข้าไปในสาหร่าย มีการเกิดเป็นขั้นตอน 4 ขั้นตอนย่อยติดต่อกัน คือ 1) การเคลื่อนที่ของสีย้อม (bulk transport) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นเร็วที่สุด ซึ่งเกิดการเคลื่อนที่ของสีย้อมจากสารละลายไปยังผิวฟิล์มน้ำที่ล้อมรอบสาหร่าย 2) การ

เคลื่อนที่ผ่านชั้นฟิล์ม (film transport) เป็นการเคลื่อนที่ของสีย้อมข้ามฟิล์มน้ำไปยังผิวของสาหร่าย 3) การเคลื่อนที่ภายในอนุภาค (intraparticle transport) เป็นการเคลื่อนที่ของสีย้อมเข้าไปภายในรูพรุนของสาหร่าย และ 4) การดูดซับ (adsorption) เป็นการดูดซับระหว่างสีย้อมกับ active sites บนผิวสาหร่ายซึ่งเกิดขึ้นเร็วมาก (Agrawal, 1990) แต่ละขั้นตอนจะมีอัตราการเกิดปฏิกิริยาเร็วหรือช้าแตกต่างกัน โดยขั้นตอนที่เกิดช้ามากที่สุดจะเป็นขั้นกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับ (rate determining step)

Table 5 The order of rhodamine B adsorption by immobilized cell of *Spirulina platensis* (algae 2 g/l, pH 2, exposure time 180 min, Temp 25 °C, n=4)

Dye concentration (mg/l)	Pseudo-first order		Pseudo-second order	
	k (min ⁻¹)	r ²	k (g/mg min)	r ²
20	2.165	0.978	15.805	0.986
40	2.971	0.989	5.704	0.990
60	3.040	0.993	5.623	0.991
80	2.556	0.982	5.754	0.992
100	2.303	0.976	4.521	0.991

ผลของขั้นกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับพบว่ามีการแพร่ของของเหลวผ่านชั้นฟิล์ม (film diffusion) และขั้นการแพร่เข้าสู่ภายในรูพรุน (intra-particle diffusion) เกิดการดูดซับในช่วงที่สอง (secondary rate) เนื่องจากอัตราเร็วของการดูดซับมีค่าการดูดซับใน initial rate สูงกว่า secondary rate (Table 6) ในการศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าขั้นกำหนดอัตราเร็วของปฏิกิริยาคือการแพร่ผ่านชั้นฟิล์มและการแพร่เข้าสู่ภายในเซลล์ชั้นสอง ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Nithya et al. (2019) ซึ่งใช้ *S. platensis* ดูดซับโครเมียมพบว่าขั้นกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับมีทั้งขั้นการแพร่ของของเหลวผ่านชั้นฟิล์มและขั้นการแพร่เข้าสู่ภายในรูพรุนเช่นเดียวกัน ดังนั้นหากมีการนำสาหร่ายในการทดลองนี้ไปใช้บำบัดน้ำเสียจริง จะสามารถแก้ไขขั้นกำหนดอัตราเร็วของการดูดซับได้โดยการเพิ่มการหมุนเวียนของน้ำหรือการกวนน้ำเพื่อให้สีย้อมแพร่ผ่านชั้นฟิล์มได้เร็วขึ้น และอาจมีการปรับสภาพของสาหร่ายเพื่อเพิ่มรูพรุน (เช่น การอบด้วยความร้อนสูง) เพื่อเพิ่มความเร็วในการแพร่เข้าสู่ภายในเซลล์

จากผลการศึกษาทั้งหมดแสดงให้เห็นทราบว่า *S. platensis* ที่ตรึงในอัลจิเนต มีกลไกการดูดซับสีย้อมโรดามีน บี แบบแลกเปลี่ยนประจุของหมู่ฟังก์ชันที่ผนังเซลล์สาหร่ายกับประจุของสีย้อมในสารละลาย และมีการดูดซับแบบ monolayer บนหมู่ฟังก์ชันแบบ homogenous binding site (Langmuir Isotherm) โดยการดูดซับสีย้อม เป็นปฏิกิริยาอันดับสองเสมือนเมื่อนำไปใช้บำบัดน้ำเสียจริงการเพิ่มปริมาณสาหร่ายในบ่อบำบัดจะทำให้ความเร็วในการดูดซับสีย้อมเพิ่มได้รวดเร็วมากขึ้นเป็นกำลังสองของจำนวนสาหร่าย

Table 6 Effects of initial rhodamine B concentration on dye adsorption rate in film diffusion and intraparticle diffusion (algae 2 g/l, pH 2, exposure time 180 min, Temp 25 °C, n=4)

Dye concentration (mg/l)	Film diffusion	Intraparticle diffusion	
	Initial rate (min ⁻¹)	Initial rate (mg/g biomass/min ^{0.5})	Secondary rate (mg/g biomass/min ^{0.5})
20	0.009	0.532	0.332
40	0.011	1.512	0.632
60	0.010	1.696	1.055
80	0.008	2.033	1.258
100	0.008	2.925	1.486

สรุปผลการศึกษา

สาหร่าย *S. platensis* ที่ตรึงในอัลจิเนต มีความสามารถในการดูดซับสีย้อมโรดามีน บี ได้ดีที่ระดับพีเอชของสารละลายเท่ากับ 2 ระยะเวลาสูงสุดในการดูดซับที่ 180 นาที ซึ่งการเพิ่มความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมจะทำให้ มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมสูงมากขึ้น ไอโซเทอร์มการดูดซับสีย้อมโรดามีน บี โดยสาหร่ายชนิดนี้สอดคล้องกับ ไอโซเทอร์มการดูดซับของแลงเมียร์ซึ่ง

แสดงลักษณะการดูดซับบนพื้นผิวสาหร่ายเป็นแบบชั้นเดียว และจลนพลศาสตร์การดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับสองเหมือน คือเมื่อเพิ่มตัวดูดซับเข้าสู่ระบบหนึ่งเท่าจะดูดซับสีย้อมเพิ่มขึ้นเป็นกำลังสอง ดังนั้นจึงเป็นทางเลือกที่ดีในการนำมาใช้เป็นตัวดูดซับทางชีวภาพสำหรับบำบัดน้ำเสียที่มีสีย้อมปนเปื้อนต่อไปในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีการผลิตสัตว์และประมง คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือวิเคราะห์ อุปกรณ์สารเคมี และสถานที่ สำหรับการดำเนินงานวิจัยจนส่งผลให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- Agrawal, G. L. (1990). **Basic Chemical Kinetics**. Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited.
- Al Hamadi, A., Uraz, G., Katircioglu, H., & Osmanaoglu, Ö. (2017). Adsorption of azo dyes from textile wastewater by *Spirulina platensis*. **Eurasian Journal of Environmental Research**, 1(1), 19-27.
- Cardoso, N. F., Lima, E. C., Royer, B., Bach, M. V., Dotto, G. L., Pinto, L. A. A., & Calvete, T. (2012). Comparison of *Spirulina platensis* microalgae and commercial activated carbon as adsorbents for the removal of Reactive Red 120 dye from aqueous effluents. **Journal of Hazardous Materials**, 241-242, 146-153.
- Da Rosa, A. L. D., Carissimi, E., Dotto, G. L., Sander, H., & Feris, L. A. (2018). Biosorption of rhodamine B dye from dyeing stones effluents using the green microalgae *Chlorella pyrenoidosa*. **Journal of Cleaner Production**, 198, 1302-1310.
- Deniz, F., & Kepekci, R. A. (2015). Bioremediation of contaminated water with unnatural dye using blue-green alga *Spirulina platensis*. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, 34(5), 1414-1419.
- Duarte Neto, J. F., Pereira, I. D. S., da Silva, V. C., Ferreira, H. C., Neves, G. de A., & Menezes, R. R. (2018). Study of equilibrium and kinetic adsorption of rhodamine B onto purified bentonite clays. **Cerâmica**, 64, 598-607.
- El-Sheekh, M. M., Gharieb, M. M., & Abou-El-Souod, G. W. (2009). Biodegradation of dyes by some green algae and cyanobacteria. **International Biodeterioration & Biodegradation**, 63(6), 699-704.
- Gad, H. M. H. & El-Sayed, A. A. (2009). Activated carbon from agricultural by-products for the removal of Rhodamine-B from aqueous solution. **Journal of Hazardous Materials**, 168(2-3), 1070-1081.
- Gunasundari, E., Senthil Kumar, P., Rajamohan, N., & Vellaichamy P. (2020). Feasibility of naphthol green-B dye adsorption using microalgae: thermodynamic and kinetic analysis. **Desalination and Water Treatment**, 192, 358-370.
- Hii, S. L., Yong, S. Y. & Wong, C. L. (2009). Removal of rhodamine B from aqueous solution by sorption on *Turbinaria conoides* (Phaeophyta). **Journal of Applied Phycology**, 21(5), 625-631.
- Kankılıç, G. B. (2022). *Scenedesmus regularis*: An alternative biosorbent for the efficient and fast removal of methylene blue. **Global NEST Journal**, 24(3), 465-473.
- Kaushal M., & Tiwari, A. (2010). Removal of rhodamine-B from aqueous solution by adsorption onto crosslinked alginate beads. **Journal of Dispersion Science and Technology**, 31(4), 438-441.
- Li, H., Jin, R., Hu, H., Kalkhajeh, Y. K., Zhao, Y., Gao, Y., & Zhang, B. (2021). Adsorption of As(III), Pb(II), and Zn(II) from Wastewater by Sodium Alginate Modified Materials. **Journal of Analytical Methods in Chemistry**, 2021, 11.
- Mahdieh, M., Zolanvari, A., Azimee, A. S., & Mahdieh, M. (2012). Green biosynthesis of silver nanoparticles by *Spirulina platensis*. **Scientia Iranica**, 19(3), 926-929.
- Nicoletti, M. (2016). Microalgae nutraceuticals. **Foods**, 5(3), 54-62.
- Nithya, K., Sathish, A., Pradeep, K., & Baalaji, S. K. (2019). Algal biomass waste residues of *Spirulina platensis* for chromium adsorption and modeling studies. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, 7(5). <http://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103273>.
- Ruangsomboon, S. (2006). **Biosorption of Heavy Metal from Wastewater by Algae**. King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang. (in Thai).
- Ruangsomboon, S., Kitprasoet S., Chongphat B., & Deemak J. (2019). Innovative cultivation of *Spirulina* supplemented with flue gas from feed mill and powerplant. In **The 9th National Conference on Algae and Plankton**, pp. 93-100. Kasetsart University. (in Thai).
- Saadi, R., Saadi, Z., Fazaali, R., & Fard, N. E. (2015). Monolayer and multilayer adsorption isotherm models for sorption from aqueous media. **Korean Institute of Chemical Engineers**, 32(5), 787-799.
- Salleh, M. A. M., Mahmoud, D. K., Karim, W. A. W. A., & Idris, A. (2011). Cationic and anionic dye adsorption by agricultural solid wastes: A comprehensive review. **Desalination**, 280(1-3), 1-13.

- Saloglu, D. & Sahin, O. I. (2021). Removal of azo dyes – tartrazine, carmoisine, and allura red—from wastewater using *Spirulina* biomass-immobilized alginate beads: equilibrium, kinetics, thermodynamics, desorption, and reusability. **Desalination and Water Treatment**, 220, 431–445.
- Volesky, B., & Holan, Z. R. (1995). Biosorption of heavy metals. **Biotechnology Progress**, 11, 235-250.
- Wan Ngah, W. S., Teong, L. C., & Hanafiah, M. A. K. M. (2011). Adsorption of dyes and heavy metal ions by chitosan composites: A review. **Carbohydrate Polymers**, 83(4), 1446–1456.