

## การดูดซับสีย้อมเบสิค และ รีแอคทีฟ โดยใช้ไซยาโนแบคทีเรีย *Nostoc muscorum* ที่มีชีวิต Biosorption of Basic and Reactive Dyes by Living Cyanobacterium *Nostoc muscorum*

สุนีรัตน์ เรืองสมบูรณ์<sup>1</sup>

### บทคัดย่อ

การคัดเลือกไซยาโนแบคทีเรียที่ดูดซับสีย้อมเบสิค (malachite green) และ รีแอคทีฟ (benefix blue และ benefix red) ได้ดีที่สุดในระดับห้องปฏิบัติการ จากไซยาโนแบคทีเรียที่มีชีวิต 8 สกุล (*Hapalosiphon* sp., *Phormidium angustissimum*, *Fischerella* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Nostoc muscorum*, *Calothrix marchica*, *Oscillatoria limnetica* และ *Gloeocapsa gelatinosa*) พบว่า *N. muscorum* มีความสามารถในการดูดซับสีย้อมได้สูงและง่ายต่อการกำจัดออกจากระบบบำบัดน้ำเสีย ดังนั้นจึงได้นำ *N. muscorum* มาศึกษาหาค่าสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมและไอโซเทอร์มการดูดซับสีย้อม พบว่าไซยาโนแบคทีเรียสามารถดูดซับสีย้อม malachite green และ benefix blue ได้สูงที่สุดเมื่อสารละลายสีย้อมมีพีเอช 7 และ 2 โดยดูดซับได้  $5.71 \pm 0.14$  และ  $124.84 \pm 6.04$  มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ โดยสูงกว่าและมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับพีเอชระดับอื่น ๆ ระยะเวลาเข้าสู่จุดสมดุลในการดูดซับของ malachite green คือ 6 ชั่วโมง มีการดูดซับ  $89.49 \pm 9.16$  มิลลิกรัมต่อกรัม สีย้อม benefix blue คือ 24 ชั่วโมง มีการดูดซับ  $336.73 \pm 8.60$  มิลลิกรัมต่อกรัม ปริมาณการดูดซับสีย้อมต่อกรัมของไซยาโนแบคทีเรีย ( $q_{eq}$ ) จะมากขึ้นเมื่อจำนวนไซยาโนแบคทีเรียลดลง และความเข้มข้นตั้งต้นของสีย้อมเพิ่มขึ้น โดยการดูดซับสีย้อม malachite green และ benefix blue ของ *N. muscorum* เป็นไปตามสมการการดูดซับของ Langmuir adsorption isotherm โดยมีค่าการดูดซับ malachite green และ benefix blue สูงสุด ( $Q_{max}$ )  $267.68 \pm 5.26$  และ  $322.80 \pm 6.01$  มิลลิกรัมต่อกรัม

**คำสำคัญ :** นอสตอค ไซยาโนแบคทีเรีย มาลาโคไทกรีน สีย้อม การบำบัดสีย้อม

### Abstract

To find out the best cyanobacteria for basic dye (malachite green) and reactive dye (benefix blue and benefix red) removal, dye sorption ability of 8 genera of living cyanobacteria (*Hapalosiphon* sp., *Phormidium angustissimum*, *Fischerella* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Nostoc muscorum*, *Calothrix marchica*, *Oscillatoria limnetica* and *Gloeocapsa gelatinosa*) was studied in laboratory. The result showed that *N. muscorum* had high dyes removal ability and easy to remove from wastewater treatment system. Then the optimum condition and adsorption isotherm of dyes by living *N. muscorum* were studied. The optimum pH for malachite green and benefix blue removal by *N. muscorum* was 7 and 2 with significantly higher removal ability than others pH ( $5.71 \pm 0.14$  and  $124.84 \pm 6.04$  mg/g, respectively),. The equilibrium time for malachite green and benefix blue removal was 6 and 24 h with removal ability of  $89.49 \pm 9.16$  and  $336.73 \pm 8.60$  mg/g, respectively. The dyes adsorption capacity ( $q_{eq}$ ) was increased when the biomass of *N. muscorum* decreased and initial dye concentration increased. The adsorption of malachite green and benefix blue

<sup>1</sup> หลักสูตรวิทยาศาสตร์การประมง ภาควิชาเทคโนโลยีการผลิตสัตว์และประมง คณะเทคโนโลยีการเกษตร

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

by *N. muscorum* fitted to Langmuir adsorption isotherm with the maximum uptake capacity ( $Q_{max}$ ) of  $267.68 \pm 5.26$  and  $322.80 \pm 6.01$  mg/g.

**Keywords :** *Nostoc*, cyanobacteria, malachite green, dye, dye treatment

## คำนำ

สีย้อมเป็นสีสังเคราะห์มีการใช้ในอุตสาหกรรมหลายประเภทเช่น สิ่งทอ พลาสติก อาหาร เครื่องสำอาง และมีปริมาณการใช้สีย้อมเพิ่มมากขึ้นตามการเพิ่มผลผลิต การผลิตสีย้อมทั่วโลกมีมากถึงเจ็ดแสนตันต่อปี ซึ่งประมาณ 10-15 เปอร์เซ็นต์ ของสีย้อมที่ผลิตขึ้นทั้งหมดนี้ถูกปล่อยลงสู่แหล่งน้ำโดยไม่มีการกำจัดออกจากน้ำทิ้ง (Aksu and Tezer, 2005; Mishra and Tripathy, 1993) โดยสีย้อมจะมีความคงตัวอยู่ในแหล่งน้ำ ไม่ย่อยสลายตามธรรมชาติ (Bhattacharyya and Sharma, 2005) ทำให้มีปริมาณ BOD, COD ในน้ำสูงขึ้น (Bekci, 2009) สีย้อมบางชนิดมีความเป็นพิษต่อสัตว์น้ำ โดยเฉพาะสีย้อมมาลาไคท์กรีน (malachite green) ซึ่งมีการสะสมและตกค้างในสัตว์น้ำ เมื่อมนุษย์นำมาบริโภคจะทำให้มีความเสี่ยงต่อการเกิดโรคมะเร็ง (El-Sheekh *et al.*, 2009) มีอาการหายใจผิดปกติ คลื่นไส้อาเจียน หากร่างกายสะสมสารเหล่านี้เข้าไปมากๆ อาจมีอาการเป็นอัมพาตที่แขนขา ส่งผลต่อระบบประสาททั้งแบบเฉียบพลันและเรื้อรัง (กรมประมง, 2548) ดังนั้นจึงถือเป็นสารต้องห้าม ไม่ให้มีตกค้างในสัตว์น้ำ นอกจากนี้สารที่ได้จากการสลายตัวของสีย้อมผิวบางชนิด ถูกจัดเป็นสารก่อมะเร็งในกระเพาะปัสสาวะคน (กรีนพีซเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ประจำประเทศไทย, 2553) ดังนั้นการกำจัดสีย้อมจากน้ำทิ้งก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะจึงเป็นเรื่องที่จำเป็นอย่างมาก (Vijayaraghavan and Yun, 2008)

น้ำทิ้งที่มาจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีสีย้อมปนเปื้อนในความเข้มข้นสูง เมื่อลงสู่แหล่งน้ำจะทำให้แหล่งน้ำเปลี่ยนสี (Mohan *et al.*, 2002) สีย้อมเพียง 1 มิลลิกรัมต่อลิตร จะทำให้น้ำมีสีเข้มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเจน โดยสีจะบังการส่องของแสงลงในแหล่งน้ำทำให้พืชน้ำไม่สามารถสังเคราะห์แสงได้ และสีย้อมยังเป็นพิษต่อสัตว์น้ำโดยตรง เพราะมีโลหะต่าง ๆ และคลอไรด์ ฯลฯ ปะปนอยู่ (Mittal *et al.*, 2005)

สีย้อมมีสามกลุ่มหลักคือ basic, acid และ reactive ซึ่งทั้งสามกลุ่มมีคุณสมบัติที่แตกต่างกัน โดยได้มีการหาวิธีลดปริมาณสีย้อมจากน้ำเสียหลายวิธี เช่น วิธีการใช้โอโซน การกรองด้วยเยื่อกรอง การแลกเปลี่ยนไอออน และการตกตะกอน ซึ่งล้วนมีราคาสูงและมีการสร้างของเสียที่เป็นพิษปริมาณมากหลังการบำบัด ซึ่งยากในการนำไปกำจัดต่อไป (Vijayaraghavan and Yun, 2008) โดยวิธีหนึ่งซึ่งเป็นทางเลือกในการบำบัดสีย้อมและได้รับความนิยมในปัจจุบัน ได้แก่วิธีการดูดซับชีวภาพ (biosorption) โดยได้มีความพยายามในการหาตัวดูดซับที่ต้นทุนต่ำ คักยภาพในการดูดซับสูง ซึ่งพบว่าสาหร่ายเป็นตัวดูดซับที่ได้รับความนิยม เพราะมีปริมาณมากในธรรมชาติ เพาะเลี้ยงได้ง่าย วัฏจักรชีวิตสั้น และมีรายงานว่าสาหร่ายขนาดเล็กหลายชนิดมีความสามารถในการกำจัดสีย้อมได้ดี เป็นตัวดูดซับทางชีวภาพที่มีราคาถูก (Khataee *et al.*, 2010; Pandey *et al.*, 2007) โดยสาหร่ายที่มีชีวิตจะดูดซับสีย้อมได้ดีกว่าสาหร่ายที่ตาย เพราะมีกลไกการทำงานของเซลล์ช่วยในการดูดซับ แต่พบปัญหาคือสาหร่ายขนาดเล็กเมื่อดูดซับสีย้อมเสร็จแล้ว การแยกสาหร่ายออกจากน้ำเสียทำได้ยาก

ความสามารถในการดูดซับสีย้อมของสาหร่ายส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับหมู่ฟังก์ชันที่ผิวเซลล์ของสาหร่าย โดยผิวเซลล์ของสาหร่ายที่มีกลุ่มประจุบวกจะจับกับสีย้อมแอนไอออนที่มีโครงสร้างเป็นประจุลบ เช่น หมู่ซัลเฟต หรือ ซัลโฟเนต ได้อย่างเสถียร (Marungrueng and Pavasant, 2007) ได้มีการใช้สาหร่ายและไซยาโนแบคทีเรียหลายชนิดในการดูดซับสีย้อม เช่น *Chlorella vulgaris*, *Lyngbya lagerlerimi*, *Nostoc lincki*, *Oscillatoria rubescens*, *Elakatothrix viridis* และ *Volvox aureus* ซึ่งพบว่ามีความสามารถในการกำจัดสีย้อมได้ดี (El-sheekh *et al.*, 2009)

ไซยาโนแบคทีเรีย (cyanobacteria) หรืออีกชื่อเรียกหนึ่งคือ สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (blue-green algae) มีความสามารถในการเป็นตัวดูดซับที่ดี (El-sheekh *et al.*, 2009; Ertugrul *et al.*, 2008; Karacakaya *et al.*, 2009; Mona *et al.*, 2011; Ruangsomboon *et al.*, 2013; Ruangsomboon, 2015) โดยไซยาโนแบคทีเรียหลายชนิดมีการเจริญเติบโตเป็นกลุ่มเซลล์ขนาดใหญ่ ทำให้เมื่อนำไปบำบัดน้ำเสียหรือดูดซับสารที่เป็นอันตรายจากน้ำเสียแล้วสามารถกำจัดออกจากระบบได้ง่าย จึงเป็นที่นิยมใช้มากกว่าสาหร่ายขนาดเล็ก ที่กำจัดออกจากระบบบำบัดได้ยาก โดยการที่ตัวดูดซับจะแสดงประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับสีย้อมนั้น จำเป็นต้องอยู่ในสภาวะที่เหมาะสมต่อการทำงานของสาหร่ายมากที่สุด โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อการทำงานของตัวดูดซับที่สำคัญที่สุดคือ ระยะเวลาในการดูดซับ รองลงมาคือ ความเข้มข้นของตัวถูกดูดซับหรือสีย้อม พีเอชของสารละลาย ปริมาณสาหร่ายหรือตัวดูดซับ และอุณหภูมิ ตามลำดับ (Khataee *et al.*, 2011)

การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของไซยาโนแบคทีเรียที่มีชีวิต ในการดูดซับสีย้อมกลุ่ม basic และ reactive โดยทำการหาปัจจัยที่เหมาะสมในการที่จะทำใหไซยาโนแบคทีเรียสามารถดูดซับสีย้อมได้สูงที่สุด และศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับเพื่อเป็นข้อมูลในการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียที่เหมาะสมต่อไป

## อุปกรณ์และวิธีการ

### 1. การเตรียมไซยาโนแบคทีเรีย

เพาะเลี้ยงไซยาโนแบคทีเรีย 8 สกุล ได้แก่ *Hapalosiphon* sp., *Phormidium angustissimum*, *Fischerella* sp., *Mastigocladopsis* sp., *Nostoc muscorum*, *Calothrix marchica*, *Oscillatoria limnetica* และ *Gloeocapsa gelatinosa* (เชื้อสายพันธุ์จากสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย) ด้วยสูตรอาหาร BG-11 ในห้องปฏิบัติการ ได้รับแสงจากหลอดฟลูออเรสเซนต์ 12 ชั่วโมง ความเข้มแสง 200 ลักซ์ อุณหภูมิ 25±1 องศาเซลเซียส มีการให้อากาศเพื่อให้ไซยาโนแบคทีเรียหมุนเวียน เมื่อไซยาโนแบคทีเรียเจริญเติบโตเข้าสู่ระยะ late exponential phase ทำการเก็บเซลล์ไซยาโนแบคทีเรีย ล้างด้วยน้ำกลั่น และนำไปใช้ทดสอบการดูดซับสีย้อม สีย้อมที่ใช้ในการทดลอง คือสีเบสิก (basic dye) malachite green ใช้ในอุตสาหกรรมย้อมเส้นใยสังเคราะห์ และสีรีแอคทีฟ (reactive dye) benfix blue, benfix red ใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลส

### 2. การคัดเลือกไซยาโนแบคทีเรียที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมสูงสุด

นำไซยาโนแบคทีเรียแต่ละชนิด ปริมาณ 0.1 กรัม/น้ำหนักสด ทำการทดสอบการดูดซับสีย้อม ในกลุ่มเบสิก และกลุ่มรีแอคทีฟ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ที่ระดับความเข้มข้น 10 และ 60 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (ไม่ปรับระดับพีเอช) ทดลองในพลาสติกขนาด 125 มิลลิลิตร เขย่าบน shaker ความเร็ว 120 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 25±2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง โดยจะมีการเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (สีย้อมที่ไม่มีไซยาโนแบคทีเรีย) เมื่อครบเวลาที่กำหนดนำไซยาโนแบคทีเรียออกจากสารละลายและนำไซยาโนแบคทีเรียไปอบเพื่อหาน้ำหนักแห้ง และวัดปริมาณสีย้อมที่เหลือในสารละลาย

### 3. การศึกษาระดับพีเอช ระยะเวลา ปริมาณตัวดูดซับ และความเข้มข้นของสีย้อมตั้งต้นที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อม

ใส่ไซยาโนแบคทีเรียที่เตรียมไว้ปริมาณ 10 กรัมต่อลิตรในสารละลายสีย้อมที่มีระดับพีเอชแตกต่างกันระหว่าง 2-8 วัดปริมาณสีย้อมที่ระยะเวลา 72 ชั่วโมง นำค่าพีเอชที่เหมาะสมมาศึกษาเพื่อหาระยะเวลาการเข้าสู่จุดสมดุลของการดูดซับ โดยวิเคราะห์ปริมาณสีย้อมที่เหลือในสารละลายในช่วงระยะเวลา 0-120 ชั่วโมง การศึกษาผลของปริมาณไซยาโนแบคทีเรียใช้ 0.5-6 กรัม/น้ำหนักสดต่อลิตร การศึกษาผลของความเข้มข้นสีย้อมใช้สีย้อม 10-1000 มิลลิกรัมต่อลิตร

ปรับระดับที่เอชของสารละลายสีย้อมเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยใช้  $\text{HNO}_3$  0.1 โมลต่อลิตร และ  $\text{NaOH}$  0.1 โมลต่อลิตร จากนั้นนำสารละลายสีย้อมปริมาตร 10 มิลลิตร บรรจุในขวดรูปชมพูนขนาด 125 มิลลิตร ใส่ไซยาโนแบคทีเรีย ในสารละลายสีย้อมแล้วนำไปเขย่าบนเครื่องเขย่า (shaker) ที่ความเร็ว 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 180 นาที (ยกเว้นการศึกษาเรื่องระยะเวลา) หลังจากนั้นแยกไซยาโนแบคทีเรียออกจากสารละลายสีย้อมวิเคราะห์ปริมาณสีย้อมที่เหลือในสารละลาย รายงานปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับต่อปริมาณไซยาโนแบคทีเรีย ( $q_{eq}$  มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อกรัม) ดังสมการ

$$q_{eq} = V(C_0 - C_{eq})/M$$

เมื่อ  $V$  คือ ปริมาตรของสารละลายสีย้อม (มิลลิลิตร)

$C_0$  คือ ความเข้มข้นตั้งต้นของสีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$C_{eq}$  คือ ความเข้มข้นสุดท้ายของสีย้อม (มิลลิกรัมต่อลิตร)

$M$  คือ ปริมาณน้ำหนักสดของสาหร่าย (กรัม)

#### 4. การศึกษาไอโซเทอร์มการดูดซับ

เตรียมสารละลายสีย้อมที่พอเหมาะสมควรใส่ไซยาโนแบคทีเรียปริมาณ 10 กรัมต่อลิตร สารละลายสีย้อม 10 มิลลิลิตร ที่ความเข้มข้น 10-1000 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส วิเคราะห์ปริมาณสีย้อมที่เหลือในสารละลายที่จุดสมดุล และทำนายลักษณะการดูดซับสีย้อมของไซยาโนแบคทีเรียโดยนำค่าที่ได้ไปคำนวณโดยใช้สมการการดูดซับของ Langmuir และ Freundlich (Volesky and Holan, 1995)

$$\text{สมการ Langmuir } 1/q_{eq} = (1/(K_a Q_{max})) (1/C_{eq}) + (1/Q_{max})$$

เมื่อ  $q_{eq}$  คือ ปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อกรัมสาหร่าย)

$Q_{max}$  คือ ปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับได้สูงที่สุดโดยสาหร่าย (มิลลิกรัมต่อกรัมสาหร่าย)

$K_a$  คือ ค่าคงที่ในการดูดซับสีย้อมของสาหร่ายซึ่งสัมพันธ์ระหว่างความชอบ (สัมพรรคของแร่ธาตุ) ระหว่างตัวดูดซับและตัวถูกดูดซับ (ลิตรต่อมิลลิกรัม)

$C_{eq}$  คือ ปริมาณสีย้อมที่เหลือในสารละลายที่จุดสมดุล (มิลลิกรัมต่อลิตร)

ส่วนสมการของ Freundlich มีรูปสมการคือ  $q_{eq} = K_f C_{eq}^{1/n}$  เมื่อ  $K_f$  และ  $1/n$  เป็นค่าคงที่ของการดูดซับ ซึ่งค่า  $K_f$  และ  $1/n$  เป็นดัชนีของประสิทธิภาพในการดูดซับ (adsorption capacity index) และความหนาแน่นในการดูดซับ (adsorption intensity) ตามลำดับ

#### 5. การวิเคราะห์ปริมาณสีย้อมและการวิเคราะห์ข้อมูล

วิเคราะห์ปริมาณสีย้อม ด้วยเครื่อง spectrophotometer (Genesys 20 Thermo Spectronic) โดยทำการทดสอบหาค่าความยาวคลื่นที่อ่านค่าสีย้อมแต่ละชนิดได้สูงสุด ซึ่งผลพบว่าสีย้อม malachite green วัดที่ความยาวคลื่น 618 นาโนเมตร สีย้อม benefix blue วัดที่ความยาวคลื่น 665 นาโนเมตร และสีย้อม benefix red วัดที่ความยาวคลื่น 513 นาโนเมตร ทำการทดลองแบบสุ่มตลอด (completely randomized design) ทำการทดลอง 3 ซ้ำต่อชุดการทดลอง วิเคราะห์ความแปรปรวนของชุดทดลองโดยวิธี One-way ANOVA และวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยข้อมูลโดยวิธี Duncan's new multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับคอมพิวเตอร์

### ผลการทดลองและวิจารณ์

#### 1. การคัดเลือกชนิดไซยาโนแบคทีเรียที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมได้สูงสุด

ในการคัดเลือกไซยาโนแบคทีเรียที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับสีย้อมแต่ละชนิดนั้น พิจารณาจากค่าการดูดซับ ซึ่งมีหน่วยเป็น มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง เนื่องจากไซยาโนแบคทีเรียแต่ละชนิดมีความสามารถในการ

ดูดซับสีย้อมแต่ละประเภทแตกต่างกัน จากการทดลองพบว่า *N. muscorum* มีการดูดซับ malachite green สูงที่สุด  $58.05 \pm 2.26$  มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ส่วน *Phormidium* sp. ดูดซับ benefix blue ได้สูงที่สุด  $57.12 \pm 3.67$  มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง โดยมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับไซยาโนแบคทีเรียชนิดอื่น ๆ ส่วนการดูดซับ benefix red พบว่า *Mastigocladopsis* sp. สามารถดูดซับได้สูงที่สุด  $18.40 \pm 1.50$  มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง (Table 1) โดยพบว่าไซยาโนแบคทีเรียในการทดลองนี้ทุกชนิด ดูดซับ benefix red ได้ต่ำมาก จึงไม่ใช่ตัวดูดซับที่เหมาะสมสำหรับสีย้อมนี้ จึงไม่ทำการศึกษาสีย้อมชนิดนี้ต่อ

ส่วนสีย้อม malachite green และ benefix blue ไซยาโนแบคทีเรียสามารถดูดซับได้สูง โดยเมื่อพิจารณาเพื่อเลือกไซยาโนแบคทีเรียชนิดเดียวในการศึกษาต่อพบว่า *N. muscorum* เป็นตัวดูดซับสีย้อมทั้งสองชนิดนี้ได้ดี เพราะเลี้ยงได้ง่าย และหลังการดูดซับสีย้อมยังสามารถกำจัดทิ้งได้ง่ายเนื่องจากลักษณะของ *N. muscorum* จะเจริญเติบโตสานกันเป็นแผ่น ทำให้ง่ายต่อการเก็บเกี่ยว จึงเลือกไซยาโนแบคทีเรียชนิดนี้เพื่อศึกษาการกำจัดสีย้อมในขั้นต่อไป

ได้มีการรายงานการดูดซับสีย้อมโดยไซยาโนแบคทีเรียชนิดอื่น ๆ เช่นการทดลองของ Sadettin and Dönmez (2006, 2007) ได้มีการทดสอบการดูดซับสีย้อม reactive black โดยไซยาโนแบคทีเรีย *Synechococcus* sp. และ *Phormidium* sp. พบว่ามีค่าการดูดซับสูงสุดอยู่ที่ 10.50 และ 3.15 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ

**Table 1** Dyes removal ability (mg/g DW) of 8 genera of cyanobacteria.

Cyanobacteria	Malachite green	Benefix blue	Benefix red
<i>Hapalosiphon</i> sp.	$14.44 \pm 1.41^D$	$38.81 \pm 1.70^C$	$10.20 \pm 0.62^B$
<i>Phormidium angustissimum</i>	$29.09 \pm 2.20^C$	$57.12 \pm 3.67^A$	$16.23 \pm 1.04^A$
<i>Fischerella</i> sp.	$22.83 \pm 1.86^C$	$38.60 \pm 2.63^C$	$10.54 \pm 1.18^B$
<i>Mastigocladopsis</i> sp.	$16.23 \pm 1.25^D$	$48.16 \pm 3.47^B$	$18.40 \pm 1.50^A$
<i>Nostoc muscorum</i>	$58.05 \pm 2.26^A$	$42.95 \pm 2.71^B$	$8.80 \pm 1.02^B$
<i>Calothrix marchica</i>	$52.26 \pm 3.92^A$	$22.20 \pm 1.46^D$	$0.00 \pm 0.00^E$
<i>Oscillatoria limnetica</i>	$25.96 \pm 1.71^C$	$18.13 \pm 1.54^E$	$5.33 \pm 0.96^C$
<i>Gloeocapsa gelatinosa</i>	$41.66 \pm 3.19^B$	$25.33 \pm 1.23^D$	$1.40 \pm 0.90^D$

The different superscript letters in each column are significantly different ( $p < 0.05$ ).

## 2. ระดับพีเอชที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อม

ค่าพีเอชเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อคุณสมบัติทางเคมีของสารละลาย เช่น การรวมตัวของไอออน ปฏิกริยา รีดอกซ์ และการตกตะกอน อีกทั้งยังส่งผลต่อการปรับตัวของตัวดูดซับที่มีชีวิตและความสามารถในการดูดซับอีกด้วย พีเอชไม่เพียงส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับทางชีวภาพแต่ยังส่งผลต่อความสามารถในการละลายของสีจากการทดลองใช้ไซยาโนแบคทีเรีย *N. muscorum* (เซลล์ที่มีชีวิต) ในการดูดซับสีย้อม พบว่าไซยาโนแบคทีเรียมีการดูดซับ malachite green ได้ดีที่สุดในสารละลายที่มี pH 7 ซึ่งมีค่าการดูดซับอยู่ที่  $24.29 \pm 0.26$  เปอร์เซ็นต์ หรือ  $5.71 \pm 0.14$  มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับระดับพีเอชอื่น ๆ ส่วน benefix blue มีค่าการดูดซับสูงที่สุดในสารละลาย pH 2 มีค่าการดูดซับอยู่ที่  $84.86 \pm 0.83$  เปอร์เซ็นต์ หรือ  $124.84 \pm 6.04$  มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับระดับพีเอชอื่น ๆ (Table 2)

Daneshvar *et al.* (2007) ได้กล่าวว่า malachite green ซึ่งเป็น basic dye เมื่อละลายน้ำจะแตกตัวให้ไอออน

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

บวก และพบว่าที่ระดับ pH ที่สูงกว่า pH 3 จะส่งผลให้บริเวณผิวหน้าของไฮยาโนแบคทีเรียมีประจุลบ จึงส่งผลให้เกิดแรงดึงดูดระหว่างประจุตรงข้ามกันระหว่างสีย้อมกับไฮยาโนแบคทีเรีย ดังนั้นสีย้อม malachite green จึงถูกดูดซับได้ดีที่ระดับพีเอชสูง แต่เมื่อสูงมากเกินไป (pH 8) อาจทำให้เกิดการตกตะกอนของสีย้อม จึงมีค่าการดูดซับต่ำลง

สีย้อม benefix blue เป็นประเภท reactive dye ซึ่งเป็นสีที่ละลายน้ำได้ประจุลบ และหมู่ฟังก์ชันที่ผิวไฮยาโนแบคทีเรียจะมีประจุบวกมากกว่าพีเอชต่ำกว่า 3 และเมื่อพีเอชสูงกว่า 3 จะมีประจุลบมากขึ้น ดังนั้นเมื่อ pH ต่ำจะทำให้ปริมาณกลุ่มประจุบวกที่บริเวณผิวหน้าของไฮยาโนแบคทีเรียเพิ่มมากขึ้นทำให้จับกับประจุลบของสีย้อมได้ดี เนื่องจากเกิดแรงดึงดูดที่มากขึ้น นั่นจึงทำให้การดูดซับ benefix blue ซึ่งเป็นประจุลบ เกิดได้ดีที่พีเอชต่ำสุดนั่นเอง

ค่าพีเอชมีอิทธิพลต่อการแตกตัวของสารละลายสีย้อม เมื่อพีเอชต่ำลงจะทำให้เพิ่มปริมาณกลุ่มประจุบวก ( $H^+$ ) และ hydronium ions ( $H_3O^+$ ) ที่บริเวณผิวเซลล์ของไฮยาโนแบคทีเรียและเกิดปฏิกิริยสัมพันธ์ (interaction) กับหมู่ฟังก์ชันประจุลบของสีย้อมได้มาก ทำให้เกิดแรงดึงดูดที่มากขึ้น คุณสมบัตินี้จะทำให้ไฮยาโนแบคทีเรียเพิ่มความสามารถในการดูดซับประจุลบที่สูงขึ้นเมื่ออยู่ในระดับพีเอชที่ต่ำ ดังนั้นค่า pH ในสารละลายจึงเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมกระบวนการดูดซับโดยค่า pH เริ่มต้นของสารละลายมีอิทธิพลมากกว่าพีเอชสุดท้าย (Ozer *et al.*, 2006 a, b)

Table 2 Dyes removal ability of *N. muscorum* under different pH.

pH	Removal (%)		$q_{eq}$ (mg/g DW)	
	Malachite green	Benefix blue	Malachite green	Benefix blue
2	5.15±0.11 <sup>D</sup>	84.86±0.83 <sup>A</sup>	0.69±0.04 <sup>D</sup>	124.84±6.04 <sup>A</sup>
3	16.93±1.45 <sup>C</sup>	59.34±1.70 <sup>B</sup>	3.35±0.37 <sup>C</sup>	86.18±5.41 <sup>B</sup>
4	1.46±1.55 <sup>E</sup>	19.04±1.75 <sup>C</sup>	0.18±0.18 <sup>D</sup>	5.40±0.42 <sup>C</sup>
5	21.72±0.00 <sup>B</sup>	0 <sup>D</sup>	4.32±0.26 <sup>B</sup>	0 <sup>D</sup>
6	21.86±0.52 <sup>B</sup>	0 <sup>D</sup>	4.43±0.34 <sup>B</sup>	0 <sup>D</sup>
7	24.29±0.26 <sup>A</sup>	0 <sup>D</sup>	5.71±0.14 <sup>A</sup>	0 <sup>D</sup>
8	7.08±0.70 <sup>D</sup>	0 <sup>D</sup>	0.43±0.06 <sup>D</sup>	0 <sup>D</sup>

The different superscript letters in each column are significantly different ( $p < 0.05$ ).

### 3. ระยะเวลาที่เหมาะสมต่อการดูดซับสีย้อม

เมื่อเกิดการดูดซับสีย้อมจะเคลื่อนที่ออกจากสารละลายไปเกาะบนผิวไฮยาโนแบคทีเรียจึงทำให้ความเข้มข้นของสีย้อมที่ผิวหน้าของไฮยาโนแบคทีเรียเพิ่มขึ้น และการดูดซับจะดำเนินเช่นนี้ไปเรื่อยๆ จนถึงสภาวะสมดุลการดูดซับ (equilibrium adsorption) คืออัตราการดูดซับ (adsorption) เท่ากับอัตราการคายการดูดซับ (desorption) ณ สภาวะสมดุล ความเข้มข้นของตัวถูกละลายในสารละลายกับความเข้มข้นของตัวถูกละลายที่ผิวหน้าของตัวดูดซับจะคงที่ ดังนั้นจึงต้องทราบจุดสมดุลในการดูดซับ เพื่อกำหนดเวลาให้ตัวดูดซับแต่ละประเภทสัมผัสกับสารละลายสีย้อมได้อย่างเหมาะสม

ระยะเวลาในการสัมผัสที่เหมาะสมระหว่างไฮยาโนแบคทีเรียและสารละลายสีย้อมที่ระดับ pH ที่เหมาะสมในการดูดซับ (ผลจากขั้นก่อนหน้านี) พบว่าไฮยาโนแบคทีเรีย *N. muscorum* สามารถดูดซับสีย้อมได้อย่างรวดเร็วในช่วงชั่วโมงแรกที่สัมผัสกับสารละลายสีย้อม (Figure 1A) และเริ่มช้าลงเมื่อเวลาผ่านไปจนเริ่มเข้าสู่จุดสมดุลของการดูดซับ โดย malachite green มีระยะเวลาสู่จุดสมดุลของการดูดซับที่ 6 ชั่วโมง มีการดูดซับที่ 89.49±9.16 มิลลิกรัม

ต่อกรัม คิดเป็นการดูดซับ  $98.19 \pm 0.39$  เปอร์เซ็นต์ และ benefix blue มีระยะเวลาสู่จุดสมดุลการดูดซับที่ 24 ชั่วโมง (Figure 1B) โดยมีการดูดซับที่  $336.73 \pm 8.60$  มิลลิกรัมต่อกรัม คิดเป็นการดูดซับ  $92.75 \pm 0.78$  เปอร์เซ็นต์ การที่ไซยาโนแบคทีเรียสามารถดูดซับสีย้อมได้อย่างรวดเร็วในช่วงแรกเนื่องจากตำแหน่งที่ทำหน้าที่จับบนผิวเซลล์ไซยาโนแบคทีเรียนั้นยังว่างอยู่ จากนั้นการดูดซับเริ่มช้าลงเพราะตำแหน่งที่จับเริ่มเหลือน้อยลงและเมื่อตำแหน่งที่จับทุกตำแหน่งจับสีย้อมได้เต็มจึงถึงจุดสมดุลของการดูดซับ (Gueguez *et al.*, 2009)

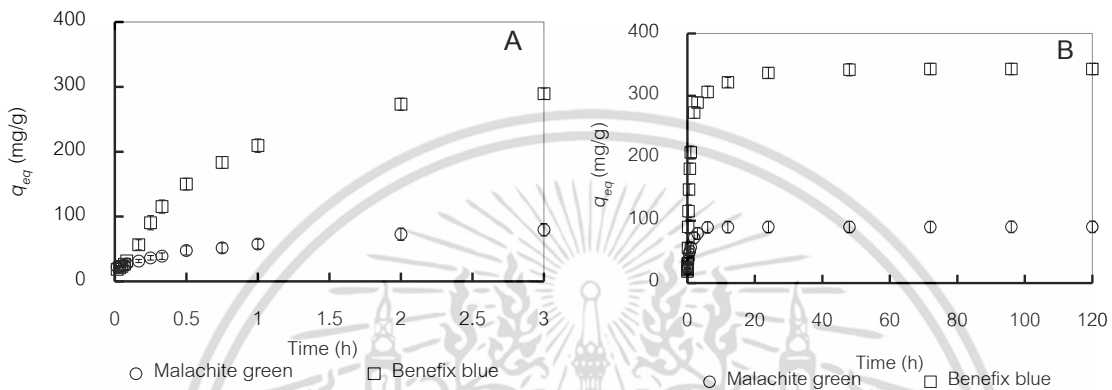


Figure 1 Dyes removal ability of *N. muscorum* at various exposure times (A-exposure time 0-3 h, B-exposure time 0-120 h).

จากผลการทดลองของ Sadettin and Dönmez (2007) ได้มีการทดสอบการดูดซับสีย้อม reactive black B และ remazol blue โดยใช้ไซยาโนแบคทีเรีย *Phormidium* sp. พบว่าการดูดซับเข้าสู่จุดสมดุลที่ 144 และ 72 ชั่วโมง โดยมีเปอร์เซ็นต์การดูดซับสีย้อม 90 และ 80 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

#### 4. ปริมาณไซยาโนแบคทีเรียที่เหมาะสมในการดูดซับ

การทดสอบปริมาณไซยาโนแบคทีเรียที่เหมาะสมในการดูดซับสีย้อม โดยใช้ไซยาโนแบคทีเรีย *N. muscorum* 0.5-6 กรัม/น้ำหนักสต่อลิตร พบว่าปริมาณไซยาโนแบคทีเรียที่ 1 กรัมต่อลิตร สามารถกำจัด malachite green ได้สูงสุด  $97.88 \pm 0.31$  เปอร์เซ็นต์ แต่ไม่มีความแตกต่างทางสถิติกับที่จำนวนเซลล์ 1.5-6 กรัมต่อลิตร และกำจัด benefix blue ได้สูงสุด  $98.09 \pm 0.62$  เปอร์เซ็นต์ โดยไม่มีความแตกต่างทางสถิติกับที่จำนวนเซลล์ 0.5-3.0 กรัมต่อลิตร

ส่วนปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับต่อกรัมของไซยาโนแบคทีเรีย ( $q_{eq}$ ) พบว่าไซยาโนแบคทีเรียที่จำนวนเซลล์ต่ำสุดคือ 0.5 กรัมต่อลิตร มีปริมาณการดูดซับสีย้อมสูงที่สุดคือ ดูดซับ malachite green และ benefix blue ได้  $45.42 \pm 4.26$  และ  $235.10 \pm 18.36$  มิลลิกรัมต่อกรัม ตามลำดับ โดยสูงกว่าและมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับที่จำนวนเซลล์ระดับอื่น ๆ (Table 3) โดยเมื่อจำนวนเซลล์สาหร่ายเพิ่มจาก 0.5 เป็น 6 กรัมต่อลิตร พบว่าความสามารถในการดูดซับสีย้อม malachite green และ benefix blue ลดลงประมาณ 10 และ 8 เท่า ตามลำดับ จากการทดลองของ Ozer *et al.* (2005) ใช้สาหร่าย *Enteromorpha prolifera* ในการดูดซับสีย้อมแอซิด AB324 และ AR337 ที่ปริมาณตัวดูดซับที่แตกต่างกัน 0.5-3.0 กรัมต่อลิตร พบว่าเมื่อปริมาณสาหร่ายเพิ่มขึ้นทำให้เปอร์เซ็นต์การดูดซับเพิ่มขึ้น แต่ปริมาณการดูดซับสีย้อมต่อน้ำหนักสาหร่ายแห้งลดลงเช่นเดียวกัน

Table 3 Dyes removal ability of *N. muscorum* at various biomass concentrations.

Cyanobacterial biomass (g/l)	Removal (%)		$q_{eq}$ (mg/g DW)	
	Malachite green	Benefix blue	Malachite green	Benefix blue
0.5	94.80±1.64 <sup>B</sup>	95.32±2.04 <sup>AB</sup>	45.42±4.26 <sup>A</sup>	235.10±18.36 <sup>A</sup>
1.0	97.88±0.31 <sup>A</sup>	98.09±0.62 <sup>A</sup>	25.83±1.58 <sup>B</sup>	140.82±2.97 <sup>B</sup>
1.5	97.04±0.59 <sup>A</sup>	96.88±0.73 <sup>AB</sup>	17.71±0.95 <sup>C</sup>	98.77±2.55 <sup>C</sup>
2.0	97.68±0.12 <sup>A</sup>	93.43±2.59 <sup>B</sup>	14.24±0.51 <sup>CD</sup>	73.21±2.81 <sup>D</sup>
2.5	97.63±0.27 <sup>A</sup>	96.94±0.24 <sup>AB</sup>	9.27±0.14 <sup>DE</sup>	65.56±0.57 <sup>D</sup>
3.0	96.32±0.10 <sup>AB</sup>	94.44±0.23 <sup>AB</sup>	8.42±0.12 <sup>E</sup>	58.89±2.91 <sup>D</sup>
6.0	97.22±0.37 <sup>A</sup>	85.32±0.51 <sup>C</sup>	4.46±0.12 <sup>E</sup>	29.24±1.03 <sup>E</sup>

The different superscript letters in each column are significantly different ( $p < 0.05$ ).

ปริมาณไซยาโนแบคทีเรียที่แตกต่างกันมีผลทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับสีย้อมแตกต่างกัน โดยเมื่อปริมาณไซยาโนแบคทีเรียเพิ่มมากขึ้นมีผลทำให้ปริมาณสีย้อมที่ถูกดูดซับเทียบต่อน้ำหนักไซยาโนแบคทีเรีย ( $q_{eq}$ ) มีค่าลดลง เนื่องจากปริมาณไซยาโนแบคทีเรียที่มีน้อยทำให้เซลล์กระจายห่างกัน พื้นที่ผิวหรือตำแหน่งในการยึดจับของไซยาโนแบคทีเรียจึงสัมผัสกับสีย้อมได้มากขึ้น ส่วนปริมาณตัวดูดซับที่มากขึ้นทำให้เกิดการชนกันหรือขัดกันของผนังเซลล์ของตัวดูดซับ ทำให้ตำแหน่งในการยึดจับของไซยาโนแบคทีเรียบางส่วนไม่สามารถจับกับโมเลกุลของสีย้อมได้ (Ozer *et al.*, 2005)

##### 5. ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นต่อการดูดซับสีย้อม

ความเข้มข้นของสีย้อมเริ่มต้นส่งผลต่อความสามารถในการดูดซับของไซยาโนแบคทีเรีย โดยสีย้อมที่ความเข้มข้นเพิ่มขึ้นทำให้ไซยาโนแบคทีเรียดูดซับสีย้อมปริมาณต่อ 1 กรัมของไซยาโนแบคทีเรียได้เพิ่มมากขึ้น พบว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม malachite green และ benefix blue 1000 มิลลิกรัมต่อลิตร *N. muscorum* สามารถกำจัดสีย้อมได้ 51.35±3.30 และ 64.87±2.28 เปอร์เซ็นต์ โดยเทียบเป็น 918.50±14.63 และ 1133.62±102.91 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ โดยแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับทุกระดับความเข้มข้น (Figure 2) และเมื่อเปรียบเทียบกับความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อมที่ 10 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า *N. muscorum* สามารถกำจัดสีย้อม malachite green และ benefix blue ได้ 97.26±0.23 และ 99.34±0.23 เปอร์เซ็นต์ หรือ 17.77±1.52 และ 24.75±1.27 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ซึ่งความสามารถในการดูดซับสีย้อมเมื่อเทียบกับที่ความเข้มข้นสูงสุคนั้นลดลงประมาณ 52 และ 46 เท่า ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นเพราะเมื่อความเข้มข้นของสีย้อมมีมาก จะทำให้เกิดพลังงานในการผลักของสีย้อมสู่เซลล์ไซยาโนแบคทีเรียมากขึ้น และอาจมีการเกาะตัวของสีย้อมที่ผิวเซลล์ไซยาโนแบคทีเรีย ทำให้สีย้อมถูกกำจัดไปจากสารละลายมากขึ้น

ผลการทดลองครั้งนี้ให้ผลในแนวโน้มเดียวกับการทดลองของ Sadettin and Dönmez (2007) ได้มีการใช้ไซยาโนแบคทีเรีย *Synechococcus* sp. ในการดูดซับสีย้อม remazol blue และ reactive red RB ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสีย้อม 15 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าสามารถกำจัดสีย้อมออกจากสารละลายได้ 66.9 และ 39.6 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเป็น 53 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถดูดซับสีย้อมได้เพียง 9.6 และ 13.0 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

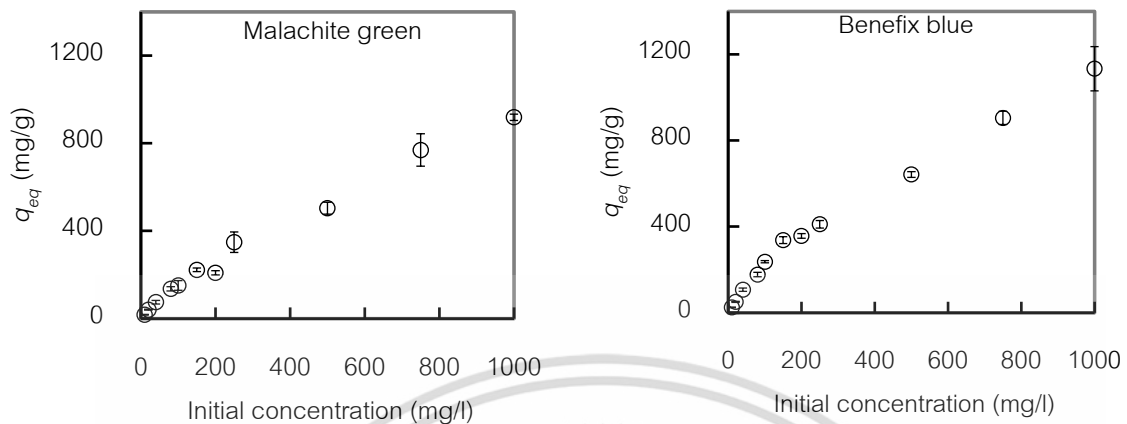


Figure 2 Dyes removal ability of *N. muscorum* at various dye concentrations.

## 6. ไอโซเทอร์มในการดูดซับสีย้อม

ไอโซเทอร์มการดูดซับ (adsorption isotherm) จากสมการของ Langmuir และ Freundlich เป็นค่าที่ใช้อธิบายกลไกการดูดซับสีย้อมและประเมินประสิทธิภาพสูงสุดในการดูดซับสีย้อมของไซยาโนแบคทีเรีย จากการทดลองพบว่า การดูดซับสีย้อมของ *N. muscorum* มีค่าความสัมพันธ์ ( $r^2$ ) ของสมการการดูดซับของ Langmuir adsorption isotherm มากกว่า Freundlich adsorption isotherm (Table 4) ดังนั้นจึงสันนิษฐานได้ว่าการดูดซับสีย้อมโดยไซยาโนแบคทีเรียสกุลนี้มีค่าความสัมพันธ์ตามทฤษฎีการดูดซับของ Langmuir ซึ่งกล่าวไว้ว่าการดูดซับสีย้อมจะเกิดที่ผิวเซลล์เป็นการดูดซับเพียงชั้นเดียว (monolayer) และเกิดการดูดซับบนตำแหน่งดูดซับซึ่งมีความเหมือนกัน (homogenous binding site) (Padmesh *et al.*, 2006) การดูดซับสีย้อมของ *N. muscorum* จากสมการไอโซเทอร์มการดูดซับของ Langmuir มีค่าการดูดซับสูงสุด ( $Q_{max}$ ) สำหรับสีย้อม malachite green และ benefix blue เท่ากับ  $267.68 \pm 51.26$  และ  $322.80 \pm 6.01$  มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ

Table 4 Langmuir and Freundlich isotherm parameters for the adsorption of dyes by *N. muscorum*.

	Langmuir			Freundlich	
	$Q_{max}$	$K_a$	$r^2$	$n$	$r^2$
Malachite green	$267.68 \pm 51.26^B$	$0.22 \pm 0.02^A$	0.989	$2.18 \pm 0.07^A$	0.915
Benefix blue	$322.80 \pm 6.01^B$	$0.71 \pm 0.34^A$	0.958	$2.39 \pm 0.08^A$	0.947

The different superscript letters in each column are significantly different ( $p < 0.05$ ).

โดยได้มีรายงานการดูดซับสีย้อมโดยตัวดูดซับชนิดอื่น ๆ ไว้เช่น การศึกษาของ Sadettin and Dönmez (2007) พบว่าการใช้ *Phormidium* sp. ในการดูดซับสีย้อม reactive black B และ remazol blue มีค่าการดูดซับสูงสุด ( $Q_{max}$ ) 14.17 และ 14.7 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ ส่วนการดูดซับสีย้อม acid red 337 และ acid blue 324 โดยสาหร่ายสีเขียว *Enteromorpha prolifera* ดูดซับได้ 55.1 และ 59.2 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ (Ozer *et al.*, 2005) การดูดซับสีย้อม acid blue 329 และ acid blue 290 โดยสาหร่าย *Spirogyra rhizopus* ดูดซับได้ 367.00 และ 1360.60 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ (Ozer *et al.*, 2006b) และมีรายงานการใช้พืชน้ำ

จีดขนาดใหญ่ *Azolla rongpong* ดูดซับสีย้อม acid dye ได้แก่ acid red 88, acid green 3, acid orange 7 และ acid blue 15 พบว่าการดูดซับสูงสุดมีค่าเท่ากับ 81.30, 83.33, 76.92 และ 76.34 มิลลิกรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ (Padmesh *et al.*, 2006) โดยความสามารถในการดูดซับสีย้อมของสาหร่ายแต่ละชนิดจะขึ้นกับชนิดและจำนวนของหมู่ฟังก์ชันที่ผิวเซลล์ของสาหร่าย ซึ่งจะแตกต่างกันไปในสาหร่าย (Marungrueng and Pavasant, 2007)

จากทุกขั้นตอนการศึกษาพบว่าไซยาโนแบคทีเรีย *N. muscorum* สามารถดูดซับสีย้อม benifex blue ซึ่งเป็นสีย้อม reactive ที่แตกตัวแล้วให้ประจุลบ ได้สูงกว่าสีย้อม malachite green ซึ่งเป็นสีย้อม basic ที่แตกตัวแล้วให้ประจุบวก แสดงให้ทราบว่าหมู่ฟังก์ชันของไซยาโนแบคทีเรีย ที่ทำหน้าที่จับประจุต่าง ๆ ในสารละลายนั้น น่าจะเป็นหมู่ฟังก์ชันที่มีประจุบวกจำนวนมากกว่าประจุลบ ซึ่งอาจได้แก่กรดอะมิโนที่มีในไซยาโนแบคทีเรีย ซึ่งจะแตกตัวให้ประจุบวกนั่นเอง ส่วนของไขมันที่อยู่บนผนังเซลล์นั้นจะประกอบด้วย phosphonate และ phosphodiester ซึ่งแตกตัวให้ประจุลบ จึงไม่ส่งผลช่วยในการดูดซับประจุลบของสีย้อมและควรมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงสาหร่ายชนิดอื่นที่ดูดซับสีย้อมประเภทอื่นได้ดี เพื่อการนำไปใช้จริง เพราะในระบบบำบัดน้ำเสียจริงนั้น มีสีย้อมรวมกันหลายประเภท จึงควรมีการใช้ *N. muscorum* ร่วมกับสาหร่ายชนิดอื่น เพื่อสามารถกำจัดสีย้อมทุกประเภทออกจากน้ำเสียได้ด้วย จึงจะทำให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดได้สูงสุด

### สรุปผลการทดลอง

ไซยาโนแบคทีเรีย *N. muscorum* ที่มีชีวิต มีความสามารถในการดูดซับสีย้อม malachite green และ benifex blue ได้สูง โดยสามารถดูดซับสีย้อม benifex blue ซึ่งเป็นสีย้อมกลุ่ม reactive ได้ดีกว่า ใช้ระยะเวลาในการดูดซับสีย้อมทั้งสองชนิดจนเข้าสู่จุดสมดุลสั้น ซึ่งการเพิ่มความเข้มข้นตั้งต้นของสีย้อมหรือปริมาณตัวดูดซับ จะทำให้มีประสิทธิภาพในการดูดซับสีย้อมสูงมากขึ้น ค่าความสามารถสูงสุดในการดูดซับสีย้อมของไซยาโนแบคทีเรียชนิดนี้มีค่าที่สูง จึงเป็นตัวเลือกที่ดีในการนำมาเป็นตัวดูดซับทางชีวภาพสำหรับบำบัดน้ำเสียที่มีสีย้อมปนเปื้อน ต่อไปในอนาคต

### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากเงินรายได้ หลักสูตรวิทยาศาสตร์การประมง สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตสัตว์และประมง คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

### เอกสารอ้างอิง

- กรมประมง. 2548. มาลาไคท์ กรีน (Malachite Green; MG). ศูนย์วิจัยและตรวจสอบคุณภาพสัตว์น้ำ และผลิตภัณฑ์สัตว์น้ำสมุทรศาสตร์. กรมประมง. สมุทรศาสตร์.
- กรีนพีซเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ประจำประเทศไทย. 2553. “เจ้าพระยาปนเปื้อนสารเคมีอันตราย”. [online]. Available; <http://www.chemtrack.org/News-Detail.asp?TID=7&ID=522>
- Ruangsomboon, S., L. Wongrat, S. Choochote, M. Ganmanee and A. Saparnklang. 2013. Effects of low pH and Pb<sup>2+</sup> stress on living cyanobacterium, *Phormidium angustissimum* West & G.S.West : A test of its feasibility as a living biosorbent. *Journal of Applied Phycology*. 25:905-911.
- Ruangsomboon S. 2015. Enhanced production of polysaccharides and protein content in cyanobacterium, *Oscillatoria limnetica* as a defense mechanism against low pH and Pb<sup>2+</sup>. *Chiang Mai Journal of Science*. 42:34-43.
- Sadettin, S. and G. Dönmez. 2007. Simultaneous bioaccumulation of reactive dye and chromium (VI) by using thermophile *Phormidium* sp. *Enzyme and Microbial Technology*. 41:175-180.
- Sadettin, S. and G. Dönmez. 2006. Bioaccumulation of reactive dyes by thermophilic cyanobacteria. *Process Biochemistry*. 41:836-841.

เอกสารนี้เป็นเอกสารที่สงวนไว้สำหรับการใช้งานเพื่อการศึกษาเท่านั้น ไม่อนุญาตให้นำไปใช้ประโยชน์ด้านการค้า ไม่ว่าจะกรณีใดๆ ทั้งสิ้น อีกทั้งห้ามมิให้ตัดแปลงเนื้อหา และต้องอ้างอิงถึงเจ้าของเอกสารทุกครั้งที่มีการนำไปใช้

- Aksu, Z. and S. Tezer. 2005. Biosorption of reactive dyes on the green alga *Chlorella vulgaris*. Process Biochemistry. 40:1347-1361.
- Bekçi, Z., Y. Seki, and L. Cavas. 2009. Removal of malachite green by using an invasive marine alga *Caulerpa racemosa* var. *cylindracea*. Journal of Hazardous Materials. 161:1454-1460.
- Bhattacharyya, K.G. and A. Sharma. 2005. Kinetics and thermodynamics of methylene blue adsorption on neem (*Azadirachta indica*) leaf powder. Dyes and Pigments. 65:51-59.
- Daneshvar, N., M. Ayazloo, A.R. Khataee and M. Pourhassan. 2007. Biological decolorization of dye solution containing malachite green by microalgae *Cosmarium* sp. Bioresource Technology. 98:1176-1182.
- El-Sheekh, M., M.M. Gharieb and G.W. Abou-El-Souod. 2009. Biodegradation of dyes by some green algae and cyanobacteria. International Biodeterioration & Biodegradation. 63:699-704.
- Ertugrul, S., M. Bakir and G. Donmez. 2008. Treatment of dye-rich wastewater by an immobilized thermophilic cyanobacterial strain: *Phormidium* sp. Ecological Engineering. 32:244-248.
- Guezguez, I., S. Dridi-Dhauadi and F. Mhenni. 2009. Sorption of yellow 59 on *Posidonia oceanica*, a non-conventional biosorbent : comparison with activated carbons. Industrial crops and products. 29:197-204.
- Karacakaya, P., N.K. Kilic, E. Duygu and G. Dönmez. 2009. Stimulation of reactive dye removal by cyanobacteria in media containing triacanol hormone. Journal of Hazardous Materials. 172:1635-1639.
- Khataee, A.R., G. Dehghan, E. Ebadi, M. Zarei and M. Pourhassa. 2010. Biological treatment of a dye solution by Macroalgae *Chara* sp.: Effect of operational parameters, intermediates identification and artificial neural network modeling. Bioresource Technology. 101:2252-2258.
- Khataee, A.R., M. Zarei, G. Dehghan, E. Ebadi and M. Pourhassan. 2011. Biotreatment of a triphenylmethane dye solution using a *Xanthophyta* alga : modeling of key factors by neural network. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers. 42:380-386.
- Marungrueng, K. and P. Pavasant. 2007. High performance biosorbent (*Caulerpa lentillifera*) for basic dye removal. Bioresource Technology. 98:1567-1572.
- Mishra, G. and M. Tripathy. 1993. A critical review of the treatment for decolourization of textile effluent. Colourage. 40:35-38.
- Mittal, A., L. Krishnan and V.K. Gupta. 2005. Removal and recovery of malachite green from wastewater using an agricultural waste material, de-oiled soya. Separation and Purification Technology. 43:125-133.
- Mohan, S.V., N.C. Rao and J. Karthikeyat. 2002. Adsorption of direct azo dye from aqueous phase onto coal based sorbents; a kinetic and mechanistic study. Journal of Hazardous Materials. 90:189-204.
- Mona, S., A. Kaushik, C.P. Kaushik. 2011. Biosorption of reactive dye by waste biomass of *Nostoc linckia*. Ecological Engineering. 37:1589-1594.
- Ozer, A., G. Akkaya and M. Turabik. 2005. The biosorption of Acid Red 337 and Acid Blue 324 on *Enteromorpha prolifera*: The application of nonlinear regression analysis to dye biosorption. Chemical Engineering Journal. 112:181-190.
- Ozer, A., G. Akkaya and M. Turabik. 2006a. The removal of Acid Red 274 from wastewater: Combined biosorption and bioaggregation with *Spirogyra rhizopus*. Dyes and Pigments. 71:83-89.
- Ozer, A., G. Akkaya and M. Turabik. 2006b. Biosorption of Acid Blue 290 (AB 290) and Acid Blue 324 (AB 324) dyes on *Spirogyra rhizopus*. Journal of Hazardous Materials B. 135:355-364.
- Padmesh, T.V.N., K. Vijayaraghavan, G. Sekaran and M. Velan. 2006. Application of *Azolla rongpong* on biosorption of acid red 88, acid green 3, acid orange 7 and acid blue 15 from synthetic solutions. Chemical Engineering Journal. 122:55-63.
- Pandey A, P. Singh and L. Iyengar. 2007. Bacterial decolourisation and degradation of azo dyes. International Biodeterioration Biodegradation. 59:73-84.
- Vijayaraghavan, K. and Y.S. Yun. 2008. Biosorption of C.I. Reactive Black 5 from aqueous solution using acid-treated biomass of brown seaweed *Laminaria* sp. Dyes and Pigments. 76:726-732.
- Volesky, B. and Z.R. Holan. 1995. Biosorption of heavy metals. Biotechnology Progress. 11:235-250.