วารสารวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมไทย ปีที่ 31 ฉบับที่ 1 : หน้า 19-27 (2560)
www.eeat.or.th

การกำจัดสีแอซิดบลู 80 ด้วยแลคเคสหยาบในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเยื่อกรอง

Removal of Acid Blue 80 using Crude Laccase in Membrane Bioreactor

Karnika Ratanapongleka*[*] and Narisa Thaweechai**
กรรณิกา รัตนพงศ์เลขา*[*] และ นริศา ทวีชัย**
*ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อุบลราชธานี 34190
**สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี อุบลราชธานี 34190
[*]E-mail : k_ratanapongleka@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาเสถียรภาพของเอนไซม์แลคเคสหยาบ ผลของความเข้มข้นสีแอซิดบลู 80 และผลของอัตราการไหลของสารที่มีต่อการกำจัดสีในถังปฏิกรณ์เยื่อกรองและถังปฏิกรณ์ชีวภาพเยื่อกรอง โดยเยื่อกรองอัลตร้าที่ใช้เป็นเยื่อกรองทำจากโพลิอีเทอร์ซัลโฟนขนาด 10 kDa ดำเนินระบบการไหลแบบไหลตามขวาง ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าเยื่อกรองอัลตร้าที่ใช้ร่วมกับถังปฏิกรณ์สามารถกักเอนไซม์ไว้ในระบบได้มากกว่าร้อยละ 70 ที่อัตราการไหลของสารเข้าระบบ 300 mL/min เวลา 240 นาที เมื่อพิจารณาผลของการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นสีย้อมพบว่าการเพิ่มความเข้มข้นสีย้อมทำให้ค่าการกำจัดสีย้อมในถังปฏิกรณ์ทั้ง 2 แบบลดลง และการเพิ่มอัตราการไหลของสารส่งผลให้ค่าการกำจัดสีย้อมลดลง เมื่อเปรียบเทียบการกำจัดสีย้อมที่เวลา 240 นาที ความเข้มข้นสีย้อม 30 mg/L และอัตราการไหลของสาร 300 mL/min มีค่าร้อยละ 47.87 และร้อยละ 94.25 สำหรับถังปฏิกรณ์เยื่อกรองและถังปฏิกรณ์ชีวภาพเยื่อกรองตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการใช้ถังปฏิกรณ์ชีวภาพเยื่อกรองซึ่งบรรจุเอนไซม์แลคเคสหยาบช่วยให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมสูงขึ้น

คำสำคัญ : ถังปฏิกรณ์ชีวภาพเยื่อกรอง; แลคเคสหยาบ; การกำจัดสีย้อม; แอซิดบลู 80

Abstract

This research aims to study the stability of crude laccase, the effects of Acid Blue 80 concentration and the flow rate on dye removal in a membrane reactor and a membrane bioreactor. The ultrafiltration membrane used was made from polyethersulfone with a molecular weight cut-off of 10 kDa. The operational system was crossflow filtration mode. The results showed that the use of the ultrafiltration membrane combined with the reactor retained more than 70% of the enzyme in the system at the substance flow rate of 300 mL/min for 240 minutes. Increasing dye concentration resulted in reductions of dye removal in both reactors. Increasing in substance flow rate decreased dye removal. At 240 minutes, dye concentration of 30 mg/L, and substance flow rate of 300 mL/min, the removals were approximately 47.87% and 94.25% for the membrane reactor and membrane bioreactor respectively. The results indicated that the use of the membrane bioreactor containing crude laccase yielded higher dye removal efficiency.

Keywords : Membrane Bioreactor; Crude Laccase; Dye Removal; Acid Blue 80

บทนำ

ปัจจุบันสีย้อมถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะอุตสาหกรรมสิ่งทอมีการใช้น้ำและสารเคมีเป็นจำนวนมาก น้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมนี้จะมีปริมาณสารเคมีตกค้างสูงและมีสีที่ค่อนข้างกำจัดได้ยาก พบว่าประมาณร้อยละ 10-15 ของสีที่ใช้จะปนเปื้อนออกมากับน้ำทิ้งของกระบวนการ [1] สีย้อมที่นิยมใช้ส่วนใหญ่ได้จากการสังเคราะห์มากกว่าจากธรรมชาติ เนื่องจากสีย้อมสังเคราะห์มีการผลิตและมีคุณภาพที่แน่นอน ติดทนทาน ละลายน้ำได้ดี ดูดซับกับเส้นใยได้ง่าย มีความเสถียรต่อแสง ความร้อน สารออกซิไดซ์ต่างๆ ได้ดีกว่า สีเหล่านี้ยังมีโครงสร้างซับซ้อน ความคงตัวสูง ยากต่อการย่อยสลาย และสามารถบดบังแสง ทำให้ปริมาณแสงส่องผ่านลงไปในแหล่งน้ำได้น้อยลง ส่งผลต่อกระบวนการสังเคราะห์แสง การเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิตในน้ำและปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำลดลง ทำให้ระบบนิเวศวิทยาในน้ำเสียสมดุล นอกจากนี้ยังพบว่าสีสังเคราะห์หลายชนิดที่เตรียมจากกลุ่มเบนซีน หรือกลุ่มสารประกอบอะโรมาติก มีความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตในน้ำ และเป็นสารก่อมะเร็ง (toxic carcinogenic) ดังนั้นจึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องกำจัดสีย้อมที่ปนเปื้อนออกมาก่อนปล่อยลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติต่อไป

แอซิดบลู 80 เป็นสีย้อมที่ถูกจัดอยู่ในกลุ่มของแอนทราควิโนน นิยมนำไปใช้ย้อมเส้นใยเซลลูโลสบริสุทธิ์ เช่น ปอ ป่าน ไนลอน ใยขนแกะ และไหม นอกจากนี้ยังถูกใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมย้อมผ้า อาหารเครื่องสำอาง กระดาษ ผลิตภัณฑ์หนังฟอก เป็นต้น สีแอซิดบลู 80 เป็นสีที่มีสมบัติละลายน้ำได้ดี เป็นเกลือของกรดกำมะถัน มีความทนทานต่อการซักล้างและทนต่อการย่อยสลายสูง ทำให้ต้องมีการศึกษาแนวทางในการพัฒนาวิธีการย่อยสลายสีในกลุ่มนี้

จากการศึกษาวิธีการกำจัดสีย้อมทางกายภาพและทางเคมี เช่น การใช้กระบวนการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ เบนโทไนท์ และแร่ดินธรรมชาติ [2] การสร้างและรวมตะกอน (Coagulation and Flocculation) การแลกเปลี่ยนไอออน (Ion-exchange) พบว่าวิธีการเหล่านี้ก่อให้เกิดปริมาณตะกอนมากและยากต่อการจัดการเนื่องจากความเป็นพิษของสารยังคงเหลืออยู่ [3] นอกจากนี้ยังมีวิธีการใช้โอโซน (Ozonation) การออกซิเดชั่นและคลอริเนชั่น (Oxidation and Chlorination) [4, 5] และวิธีการทางอิเล็คโตเคมิคัล (Electrochemical method) [6, 7] พบว่าประสิทธิภาพการกำจัดสีด้วยวิธีการเหล่านี้ไม่ดีเท่าที่ควรเมื่อเทียบกับค่าใช้จ่ายในการลงทุนและดำเนินการที่สูง ในขณะที่กระบวนการทางชีวภาพโดยอาศัยตัวเร่งทางชีวภาพ เช่น จุลินทรีย์ หรือเอนไซม์ เป็นอีกทางเลือกที่น่าสนใจ อย่างไรก็ตามนอกจากจะพบสีย้อมในน้ำทิ้งแล้วยังอาจจะพบการ

เจือปนของสารฆ่าแมลงในกลุ่มออแกโนคลอไรด์ โลหะหนัก และพิกเมนต์ โดยสารเหล่านี้สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตและเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ และเมื่อจุลินทรีย์ทำการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนพบว่าสารประกอบไนโตรเจนที่อยู่ในสีย้อมจะถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นอะโรมาติกเอไมด์ที่มีความเป็นพิษสูงขึ้น ส่งผลให้การทำงานของจุลินทรีย์ลดลง [8] การนำเอนไซม์มาประยุกต์ใช้ในการกำจัดสีย้อมแทนจุลินทรีย์สามารถช่วยลดปัญหาดังกล่าว นอกจากนี้เอนไซม์ยังมีความจำเพาะเจาะจงต่อสารตั้งต้น ทำงานได้ถึงแม้จะมีสารพิษเจือปนและสามารถทนต่อสภาวะแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลง [3] และเอนไซม์ยังช่วยเปลี่ยนรูปโครงสร้างของสีให้มีความเป็นพิษลดลง เมื่อปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมสามารถถูกย่อยสลายได้สมบูรณ์ด้วยจุลินทรีย์ในธรรมชาติ

แลคเคสเป็นเอนไซม์ที่สามารถเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชั่นของสับสเตรทได้หลากหลาย เช่น สารประกอบโพลีฟีนอล ไดเอมีน อะโรมาติกเอไมด์ และสารอนินทรีย์บางชนิด อย่างไรก็ตามการนำเอนไซม์มาใช้มีข้อจำกัดคือเอนไซม์มีราคาแพง ขั้นตอนการแยกและสกัดเอนไซม์ยุ่งยากจึงมีความพยายามในการนำเอนไซม์กลับมาใช้ใหม่โดยอาศัยการกักเอนไซม์ไว้ในชุดเยื่อกรอง และผ่านน้ำที่มีการปนเปื้อนสีย้อมเข้าไปบำบัด ทำให้เอนไซม์มีคุณสมบัติเสมือนเอนไซม์ในรูปอิสระ ไม่กระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานของเอนไซม์ การดำเนินระบบสามารถทำได้อย่างต่อเนื่อง เอนไซม์ไม่สูญหายไปกับน้ำที่ผ่านระบบ และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะศึกษาการกำจัดสีแอซิดบลู 80 ด้วยแลคเคสในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเยื่อกรอง (Membrane Bioreactor; MBR) เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสีย้อม และอัตราการไหลของระบบ และเปรียบเทียบผลการกำจัดสีที่เกิดขึ้นในถังปฏิกรณ์เยื่อกรอง (Membrane Reactor; MR)

อุปกรณ์และวิธีการ

การเตรียมสารละลายสีย้อม

สีย้อมที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็นสีแอซิดบลู 80 น้ำหนักโมเลกุล 678.69 g/mol จาก บริษัท Sigma-Aldrich (USA) เตรียมสารละลายสีย้อมโดยนำผงสีมาละลายในน้ำกลั่นให้ได้ความเข้มข้นที่ต้องการ

การเพาะเลี้ยงเชื้อและสกัดเอนไซม์แลคเคสหยาบ

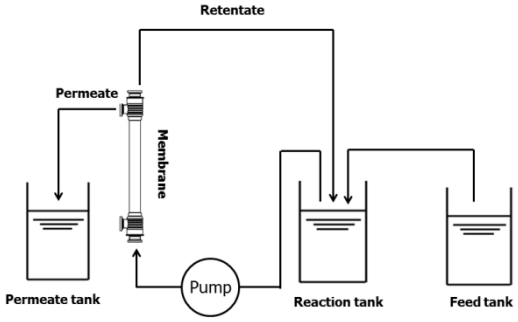
เอนไซม์แลคเคสหยาบสกัดจาก *Lentinus polychrous* Lev. โดยนำเชื้อดังกล่าวมาเลี้ยงบนอาหารเลี้ยงเชื้อ PDA 14 วัน เมื่อครบระยะเวลา เปลี่ยนมาเลี้ยงบนอาหารแข็งแกลบและรำต่อจนครบ 14 วัน จากนั้นนำเชื้อที่เจริญบนอาหารมาเติมน้ำในอัตราส่วน 1:3 กวนผสม 45 นาที กรองผ่านผ้าขาวบาง แล้วนำสารละลายที่ได้ไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 6,000 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 25 ^{0}C 10 นาที จะได้สารละลายใสแยกส่วนกับตะกอน สารละลายส่วนใสที่ได้คือเอนไซม์แลคเคสหยาบ

การติดตั้งชุดถังปฏิกรณ์ชีวภาพเยื่อกรอง

ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเยื่อกรอง (รูปที่ 1) ประกอบด้วยเยื่อกรองอัลตร้าฟิวเตรชั่นโมดูลแบบเส้นใยกลวง (ผลิตจากโพลิอีเทอร์ซัลโฟน พื้นที่หน้าตัด 1000 cm^2 ขนาดคัดกรองโมเลกุล 10 kDa) ถังป้อนสาร (feed tank) ขนาด 2 L ถังปฏิกิริยา (reaction tank) ขนาด 2 L ถังเพอมิเอท (permeate tank) ขนาด 2 L และปั๊ม ในการทำงานของระบบเริ่มจากสารละลายในถังป้อนเคลื่อนมาผสมกับเอนไซม์ในถังปฏิกิริยา และถูกปั๊มผ่านเยื่อกรองอัลตร้าฟิวเตรชั่น สารละลายที่ผ่านเยื่อกรองเรียกว่าเพอมิเอท (permeate) ส่วนสารละลายที่ไม่ผ่านเยื่อกรองเรียกว่ารีเทนเทท (retentate) โดยรีเทนเททจะไหลกลับสู่ถังปฏิกิริยาและจะวนในระบบอีกครั้ง

การศึกษาเสถียรภาพของแลคเคสหยาบในระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเยื่อกรอง

เตรียมบัฟเฟอร์ปริมาตร 500 mL ผสมกับแลคเคสหยาบ 0.125 U/mL ปริมาตร 500 mL เติมลงในถังปฏิกิริยา และเติมบัฟเฟอร์ลงถังป้อนสารเข้าในระบบ ซึ่งจะป้อนสารเข้าสู่ระบบอย่างต่อเนื่อง ปรับอัตราการไหลของระบบที่ 300, 400 และ 500 mL/min ดำเนินการทดสอบเก็บตัวอย่างสารละลายในส่วนของรีเทนเททและเพอมิเอทมาวิเคราะห์ค่ากิจกรรมการทำงานของเอนไซม์และปริมาณโปรตีน



รูปที่ 1 ระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเยื่อกรอง

การศึกษาผลของความเข้มข้นของสีย้อมและอัตราการไหลที่มีต่อการกำจัดสีย้อมในถังปฏิกรณ์เยื่อกรอง

เตรียมสารละลายสีย้อมความเข้มข้น 10, 20, 30, 40, 50 mg/L ในบัฟเฟอร์ค่าความเป็นกรดด่างเท่ากับ 7 เติมลงในถังปฏิกรณ์เยื่อกรองตามลำดับ ทำการเดินระบบถังปฏิกรณ์เยื่อกรอง ควบคุมอัตราการไหลของสารที่เข้าระบบ 300 mL/min เก็บตัวอย่างทุก 30 นาที จนครบ 4 ชั่วโมง นำตัวอย่างมาวิเคราะห์ความเข้มข้นของสีย้อม สำหรับการศึกษาอัตราการไหลทำโดยเตรียมสารละลายสีย้อมความเข้มข้น 30 mg/L ค่าความเป็นกรดด่างเท่ากับ 7 เติมลงในถังปฏิกรณ์เยื่อกรอง ทำการเดินระบบถังปฏิกรณ์เยื่อกรอง ปรับอัตราการไหลของสารที่เข้าระบบ 300, 400, 500, 600 และ 700 mL/min ทำการเดินระบบถังปฏิกรณ์เยื่อกรอง เก็บตัวอย่างทุก 30 นาที จนครบ 4 ชั่วโมง นำตัวอย่างมาวิเคราะห์ความเข้มข้นของสีย้อม

การศึกษาผลของความเข้มข้นของสีย้อมและอัตราการไหลที่มีต่อการกำจัดสีย้อมในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเยื่อกรอง

เติมสารละลายสีย้อมปริมาตร 500 mL ที่ความเข้มข้น 30, 40 และ 50 mg/L ค่าความเป็นกรดด่างของสารละลายสีย้อมเท่ากับ 7 ลงในถังปฏิกิริยาที่บรรจุแลคเคสหยาบ 0.125 U/mL ปริมาตร 500 mL และเติมสารละลายสีย้อมลงถังป้อนสารเข้าในระบบ ซึ่งจะป้อนสารเข้าสู่ระบบอย่างต่อเนื่อง จากนั้นดำเนินระบบด้วยอัตราการไหลของสารที่เข้าระบบ 300 mL/min เก็บตัวอย่างมาวิเคราะห์ความเข้มข้นของสีย้อมทุก 30 นาที จนครบ 4 ชั่วโมง สำหรับการศึกษาอัตราการไหลทำโดยเตรียมสารละลายสีที่ความเข้มข้น 30 mg/L ความเป็นกรดด่างเท่ากับ 7 เติมลงในถังปฏิกิริยาที่บรรจุเอนไซม์แลคเคสหยาบ ดำเนินการทดลองเช่นเดียวกันโดยปรับอัตราการไหลของสารเข้าระบบเป็น 300, 400, 500, 600 และ 700 mL/min

สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมคำนวณได้จากร้อยละของผลต่างของความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้นและความเข้มข้นสีย้อมในเพอมิเอทเทียบกับความเข้มข้นสีย้อมเริ่มต้น

การตรวจวิเคราะห์ผล

การวิเคราะห์กิจกรรมการทำงานของแลคเคสใช้ 2,2′-azino-bis (3-ethylbenzthiazoline-6-sulfonate (ABTS) เป็นสับสเตรท โดยผสมสารละลายตัวอย่างกับ 0.1 M โซเดียมอะซิเตทบัฟเฟอร์ pH 4.5 และ 10 mM ABTS เขย่า แล้วนำไปแช่ในอ่างควบคุมอุณหภูมิที่ 30 ^{0}C เป็นเวลา 10 นาที และหยุดปฏิกิริยาด้วย TCA (80%w/v) แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 420 nm การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนโดยวิธี Bradford [9] โดยนำสารละลายตัวอย่างผสมกับ Bradford reagent แล้วไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 595 nm เปรียบเทียบกับกราฟโปรตีนมาตรฐาน สำหรับการวิเคราะห์ความเข้มข้นของสีย้อมแอซิดบลู 80 ทำด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ที่ความยาวคลื่น 626 nm ซึ่งเป็นความยาวคลื่นสูงสุดที่แสงดูดกลืนได้

ผลการทดลองและวิจารณ์

การทดลองแบ่งออกเป็น 3 ส่วนคือ การศึกษาเสถียรภาพของแลคเคสหยาบในระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเยื่อกรอง การศึกษาผลของความเข้มข้นของสีย้อมที่มีต่อการกำจัดสีย้อมและการศึกษาผลของอัตราการไหลของสารที่มีต่อการกำจัดสีย้อมในถังปฏิกรณ์เยื่อกรอง

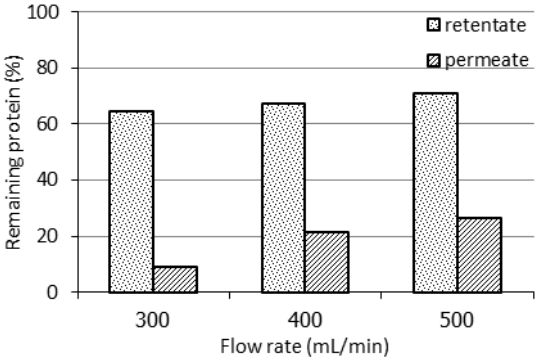
(Membrane Reactor; MR) และในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเยื่อกรอง (Membrane Bioreactor; MBR)

เสถียรภาพของแลคเคสในระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเยื่อกรอง

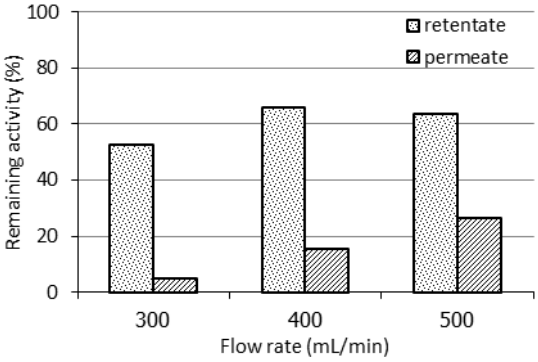
จากการศึกษาเสถียรภาพของแลคเคสในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเยื่อกรอง พบว่าการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลส่งผลต่อการคงอยู่ของเอนไซม์ในระบบเป็นอย่างยิ่ง โดยเมื่อเพิ่มอัตราการไหลจะทำให้โปรตีนหลุดออกจากระบบเพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ปริมาณของโปรตีนที่เหลือในรีเทนเททมีค่าใกล้เคียงกัน (รูปที่ 2) และเมื่อพิจารณาค่ากิจกรรมการทำงานของเอนไซม์พบว่าแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับปริมาณโปรตีน กล่าวคือที่เวลา 240 นาที มีเอนไซม์แลคเคสเหลือในส่วนรีเทนเททระหว่างร้อยละ 59.20-63.66 และมีเอนไซม์บางส่วนหลุดออกจากระบบร้อยละ 4.96-26.42 (รูปที่ 3) จะเห็นว่าปริมาณโปรตีนและเอนไซม์ในรีเทนเททและเพอมิเอทหายไปบางส่วน ทั้งนี้อาจจะถูกดูดซับที่บริเวณผิวหน้าของแผ่นเยื่อกรอง และยังพบว่าปริมาณโปรตีนที่หลุดออกมาในเพอมิเอทมีค่ามากกว่าค่ากิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ โดยในงานวิจัยของ [10] พบว่าเอนไซม์แลคเคสมีน้ำหนักโมเลกุล 45 kDa ซึ่งขนาดของเอนไซม์มีขนาดใหญ่กว่าขนาดรูพรุนของแผ่นเยื่อกรอง (10 kDa) ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าปริมาณโปรตีนที่พบในเพอมิเอทมากกว่าเอนไซม์แลคเคสส่วนหนึ่งอาจเป็นโปรตีนหรือเอนไซม์ชนิดอื่นที่ปนในสารละลายเอนไซม์นี้

ผลของความเข้มข้นของสีย้อมและอัตราการไหลที่มีต่อการกำจัดสีย้อมในถังปฏิกรณ์เยื่อกรอง

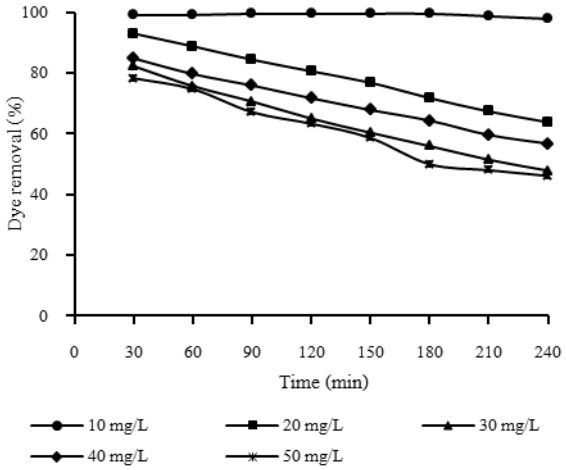
จากรูปที่ 4 พบว่าเมื่อเวลาในการดำเนินระบบมากขึ้นค่าการกำจัดสีย้อมลดลง แสดงให้เห็นว่าสารละลายสีย้อมหลุดออกนอกระบบโดยผ่านเยื่อกรองได้มากขึ้น และเมื่อพิจารณาถึงความเข้มข้นของสีย้อมต่อการกำจัดสีย้อมในเพอมิเอท พบว่าที่เวลา 240 นาที ค่าการกำจัดสีย้อมเท่ากับร้อยละ 97.87, 63.79, 47.87, 56.78 และ 46.12 ที่ความเข้มข้นของสีย้อม 10, 20, 30, 40 และ 50 mg/L ตามลำดับ จะเห็นว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสีย้อมส่งผลต่อการกำจัดสีย้อมโดยเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสีย้อมจะทำให้สารละลายสีย้อมถูกกำจัดด้วยเยื่อกรองได้น้อยลง ส่งผลให้ร้อยละการกำจัดสีย้อมในเพอมิเอทลดลง ซึ่งอาจกล่าวได้ว่าความเข้มข้นของสีย้อมที่มากขึ้น ทำให้เกิดการสะสมของสีย้อมบริเวณผิวหน้าของแผ่นเยื่อกรอง เมื่อเวลาเพิ่มขึ้นการสะสมของสีย้อมบริเวณผิวหน้าของแผ่นเยื่อกรองยิ่งเพิ่มขึ้น ส่งผลให้บริเวณดังกล่าวมีความเข้มข้นสูงขึ้นจึงเกิดการแพร่ของสีย้อมจากบริเวณที่มีความเข้มข้นมากไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นน้อย ทำให้สีย้อมหลุดออกจากระบบเพิ่มมากขึ้น



รูปที่ 2 ร้อยละปริมาณโปรตีนที่เหลือที่เวลา 240 นาที



รูปที่ 3 ร้อยละค่ากิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ที่เหลือที่เวลา 240 นาที



รูปที่ 4 การกำจัดสีย้อมด้วยถังปฏิกรณ์เยื่อกรองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสีย้อม

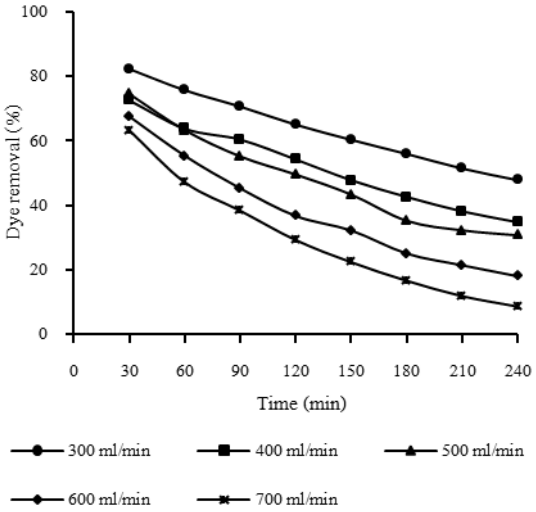
เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของสารเข้าระบบ (รูปที่ 5) พบว่าการกำจัดสีย้อมมีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการสะสมของอนุภาคสีย้อมที่ผิวหน้าเยื่อกรองส่งผลให้ความเข้มข้นของสีย้อมบริเวณดังกล่าวสูงขึ้นเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น เมื่อความเข้มข้นของสีย้อมที่ผิวหน้าเยื่อกรองและเพอมิเอทมีความแตกต่างกันมากจะส่งผลให้สีย้อมแพร่ผ่านเยื่อกรองได้มากขึ้นทำให้ค่าการกำจัดสีย้อมลดลง และผลการศึกษายังแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มอัตราการไหลของสารเข้าระบบส่งผลให้สีย้อมหลุดออกมาในเพอมิเอทมากขึ้น ทำให้ร้อยละการกำจัดสีย้อมมีแนวโน้มลดลง โดยเมื่อเวลาดำเนินระบบผ่านไป 240 นาที พบว่าสีย้อมถูกกำจัดไปร้อยละ 47.87, 34.83, 30.76, 18.09 และ 8.68 ที่อัตราการไหลของสารเข้าระบบเท่ากับ 300, 400, 500, 600 และ 700 mL/min ตามลำดับ ซึ่งอาจเกิดจากการเพิ่มอัตราการไหลทำให้ความดันในระบบเพิ่มขึ้น ส่งผลให้แรงดันส่งผ่านเพอมิเอทเร็วขึ้น การสะสมสีย้อมที่ผิวหน้าเยื่อกรองมากขึ้นและแพร่ผ่านออกมาในเพอมิเอทเพิ่มขึ้น ทำให้ร้อยละการกำจัดสีย้อมลดลง

ผลของความเข้มข้นของสีย้อมและอัตราการไหลที่มีต่อการกำจัดสีย้อมในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเยื่อกรอง

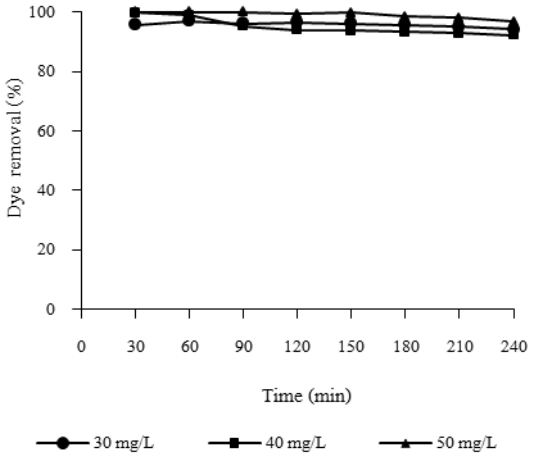
เนื่องจากผลการกำจัดสีย้อมที่ความเข้มข้น 10 และ 20 mg/L ในระบบถังปฏิกรณ์เยื่อกรองให้ผลการกำจัดค่อนข้างดี จึงไม่นำค่าความเข้มข้นของสีย้อมทั้งสองค่านี้มาศึกษาในระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเยื่อกรอง

ผลการศึกษาพบว่าค่าการกำจัดสีย้อมของแต่ละความเข้มข้นเมื่อระยะเวลาในการเดินระบบมากขึ้นมีการเปลี่ยนแปลงไม่มากแต่มีแนวโน้มลดลงเมื่อเวลาเพิ่มขึ้น โดยเมื่อเดินระบบเป็นเวลา 240 นาที สามารถกำจัดสีย้อมได้ถึงร้อยละ 94.25, 92.12 และ 96.69 ที่ความเข้มข้นสี 30, 40 และ 50 mg/L ตามลำดับ โดยค่าการกำจัดสีย้อมที่ได้พบว่าไม่แตกต่างกันมาก เนื่องจากเอนไซม์มีปริมาณมากพอที่จะเข้าทำปฏิกิริยากับสีย้อมในระบบ นอกจากนี้ผลการศึกษายังแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าการกำจัดสีย้อมด้วยถังปฏิกรณ์ชีวภาพเยื่อกรองสามารถกำจัดสีย้อมได้มากกว่าร้อยละ 90 ทั้งนี้เป็นผลจากการทำงานของเอนไซม์แลคเคส

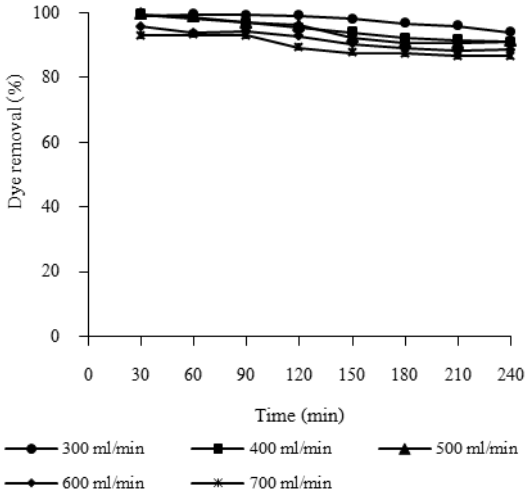
เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของสารเข้าระบบต่อการกำจัดสีย้อม (รูปที่ 7) พบว่าการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของสารเข้าระบบส่งผลต่อการกำจัดสีย้อม โดยเมื่อเวลาดำเนินระบบผ่านไป 240 นาที พบว่าสีย้อมถูกกำจัดไปร้อยละ 94.00, 91.04, 91.20, 88.57 และ 86.59 ที่อัตราการไหลของสารเข้าระบบเท่ากับ 300, 400, 500, 600 และ 700 mL/min ตามลำดับ จะเห็นว่าการเพิ่มอัตราการไหลของสารเข้าระบบทำให้การกำจัดสีย้อมลดลง ซึ่งเป็นผลจากการเพิ่มอัตราการไหลทำให้ความดันในระบบเพิ่มขึ้น ส่งผลให้แรงดันส่งผ่านเพอมิเอทเร็วขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มอัตราการไหลทำให้ระยะเวลาสัมผัสระหว่างสีย้อมและเอนไซม์ลดลง การเกิดปฏิกิริยาจึงลดลง เหลือสีย้อมสะสมในระบบและบริเวณผิวหน้าเยื่อกรองมากขึ้น และเมื่อเวลาในการดำเนินระบบเพิ่มขึ้นการสะสมของสีย้อมบริเวณผิวหน้าของแผ่นเยื่อกรองยิ่งเพิ่มขึ้น ส่งผลให้บริเวณดังกล่าวมีความเข้มข้นสูงขึ้น จึงเกิดการแพร่ของสีย้อมจากบริเวณที่มีความเข้มข้นมากไปยังบริเวณที่มีความเข้มข้นน้อย ทำให้สีย้อมหลุดออกจากระบบเพิ่มมากขึ้น ค่าการกำจัดสีย้อมจึงลดลง



รูปที่ 5 การกำจัดสีย้อมด้วยถังปฏิกรณ์เยื่อกรองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของสารเข้าระบบ

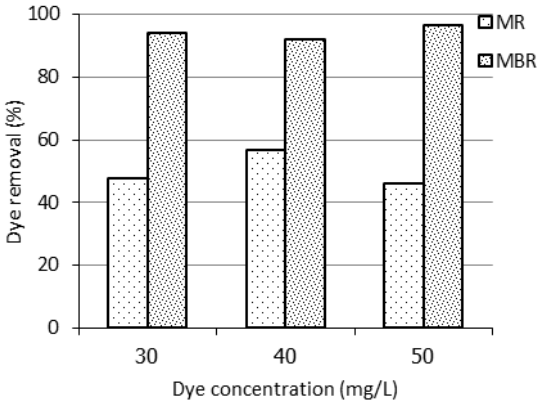


รูปที่ 6 การกำจัดสีย้อมด้วยถังปฏิกรณ์ชีวภาพเยื่อกรองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสีย้อม

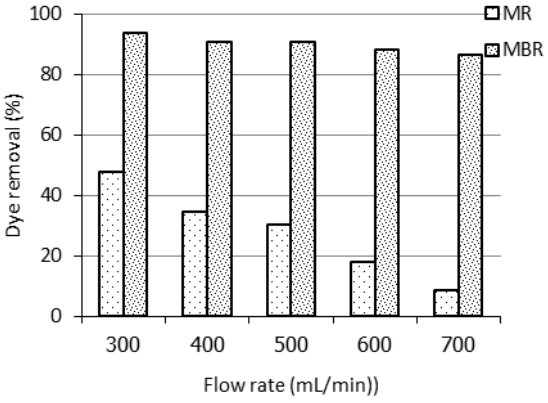


รูปที่ 7 การกำจัดสีย้อมด้วยถังปฏิกรณ์ชีวภาพเยื่อกรองเมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของสารเข้าระบบ

การกำจัดสีแอซิดบลู 80 ด้วยถังปฏิกรณ์เยื่อกรอง (MR) และถังปฏิกรณ์ชีวภาพเยื่อกรอง (MBR) ถูกนำมาเปรียบเทียบ พบว่าเมื่อมีการเติมแลคเคสลงไปใน MBR ส่งผลให้การกำจัดสีย้อมเพิ่มขึ้นเป็น 1.96, 1.62 และ 2.09 เท่าของการกำจัดด้วย MR ที่ความเข้มข้นสี 30, 40 และ 50 mg/L ตามลำดับ (รูปที่ 8) ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการใช้ MBR ที่มีการเติมแลคเคสหยาบลงไปในระบบสามารถกำจัดสีย้อมได้เป็นอย่างดีเมื่อเทียบกับการกำจัดโดยใช้เยื่อกรองเพียงอย่างเดียว เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของสารเข้าระบบ เปรียบเทียบการกำจัดสีย้อมด้วย MR และ MBR (รูปที่ 9) พบว่าการกำจัดสีย้อมด้วย MBR เพิ่มขึ้นเป็น 1.96, 2.61, 2.96, 4.08 และ 9.97 เท่าของ MR เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหล 300, 400, 500, 600 และ 700 mL/min ตามลำดับ จะเห็นว่าอัตราการไหลของระบบส่งผลการกำจัดสีย้อม โดยการกำจัดสีย้อมด้วย MR มีค่าลดลงอย่างมาก เนื่องจากที่อัตรา



รูปที่ 8 การกำจัดสีย้อมด้วย MR และ MBR ที่ 240 นาที เมื่อเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสีย้อม



รูปที่ 9 การกำจัดสีย้อมด้วย MR และ MBR ที่ 240 นาที เมื่อเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของระบบ

การไหลสูงๆ ทำให้ปริมาณสีย้อมผ่านระบบมากขึ้น เกิดการสะสมตัวของสีย้อมบริเวณผิวหน้ามากขึ้น เมื่อความเข้มข้นบริเวณดังกล่าวมีค่ามากจะทำให้เกิดการแพร่ของสารไปยังเพอมิเอทได้มากขึ้นด้วย ส่วนการกำจัดสีย้อมด้วย MBR มีค่าต่างกันไม่มากเนื่องจากการทำงานของเอนไซม์แลคเคส

สรุป

การศึกษาประสิทธิภาพกำจัดสีย้อมในถังปฏิกรณ์ชีวภาพเยื่อกรอง พบว่าระบบสามารถกักเก็บแลคเคสได้มากกว่าร้อยละ 70 และกำจัดสีย้อมได้ดีกว่าในถังปฏิกรณ์เยื่อกรอง 2 เท่าโดยเฉลี่ย แสดงให้เห็นว่าสามารถนำแลคเคสมาประยุกต์ใช้กับระบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพเยื่อกรอง และนำไปใช้ในการบำบัดน้ำเสียที่ปนเปื้อนสีย้อมได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณหลักสูตรบัณฑิตศึกษา สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมเคมี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี ที่ให้ความอนุเคราะห์สารเคมี เครื่องมือ สถานที่วิจัย ตลอดจนสนับสนุนการนำเสนอผลงานวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

[1] Kunamneni, A., Ghazi, I., Camarero, S., Ballesteros, A., Plou, F.J. and Alcalde, M. 2008. Decolorization of synthetic dyes by laccase immobilized on epoxy-activated carriers. Process Biochem. 43: 169-178.

[2] Robinson, T., McMullan, G., Marchant, R. and Nigam, P. 2001. Remediation of dyes in textile effluent: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. Bioresource Technol. 77: 247-255.

[3] Katuri, K.P., Venkata Mohan, S., Sridhar, S., Pati, B.R. and Sarma, P.N. 2009. Laccase-membrane reactors for decolorization of an acid azo dye in aqueous phase: Process optimization. Water Res. 43: 3647-3658.

[4] Ciardelli, G. and Ranieri, N. 2001. The treatment and reuse of wastewater in the textile industry by means of ozonation and electroflocculation. Water Res. 35: 567-572.

[5] Konsowa, A.H. 2003. Decolorization of wastewater containing direct dye by ozonation in a batch bubble column reactor. Desalination. 158: 233-240.

[6] Lin, S.H. and Peng, C.F. 1996. Continuous treatment of textile wastewater by combined coagulation, electrochemical oxidation and activated sludge. Water Res. 30: 587-592.

[7] Rodŕguez Couto, S. 2009. Dye removal by immobilised fungi. Biotchnol. Adv. 27: 227-235.

[8] Zouari-Mechichi, H., Mechichi, T., Dhouib, A., Sayadi, S., Marťnez, A.T. and Marťnez, M.J. 2006. Laccase purification and characterization from *Trametes trogii* isolated in Tunisia: decolorization of textile dyes by the purified enzyme. Enzyme Microb. Tech. 39: 141-148.

[9] Bradford, M.M. 1976. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. Anal. Biochem. 72: 248-254.

[10] Suwannawong, P., Khammuang, S. and Sarnthima, R. 2010. Decolorization of rhodamine B and congo red by partial purified laccase from *Lentinus polychrous* Lév. Biochem Tech. 2: 182-186.