



การกำจัดแมงกานีสในน้ำใต้ดินโดยเซลล์ดักติดด้วยแบรียมแอลจิเนตเติมผงถ่านกัมมันต์ Manganese removal from groundwater using powdered activated carbon-added barium alginate entrapped cells

นครินทร์ เทอดเกียรติกุล¹ สุมนา สิริพัฒนานกุล-ราษฎร์ภักดี^{1,2*}

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ และศูนย์วิจัยด้านการจัดการสิ่งแวดล้อมและสารอันตราย มหาวิทยาลัยขอนแก่น ขอนแก่น 40002

² ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย (ศสอ.) กรุงเทพมหานคร 10330

Nakharin Therdkiattikul¹ Sumana Siripattanakul-Ratpukdi^{1,2*}

¹ Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering and Research Center for Environmental and Hazardous Substance Management, Khon Kaen University, Khon Kaen 40002, Thailand

² Center of Excellence on Hazardous Substance Management (HSM), Bangkok 10330, Thailand

* Corresponding author

E-mail: sumana.r@kku.ac.th; Telephone: 0 4320 2571

วันที่รับบทความ 10 พฤศจิกายน 2562; วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 3 มกราคม 2563; วันที่ตอบรับบทความ 20 กุมภาพันธ์ 2563

บทคัดย่อ

การปนเปื้อนของแมงกานีสในน้ำใต้ดินก่อให้เกิดปัญหาต่อการอุปโภคและบริโภคน้ำ งานวิจัยนี้ศึกษาการกำจัดแมงกานีสในน้ำใต้ดินด้วยเซลล์จุลินทรีย์ดักติด การศึกษามุ่งเน้นการหาอิทธิพลของปริมาณถ่านกัมมันต์และความหนาแน่นของเซลล์จุลินทรีย์ในวัสดุติดต่อการกำจัดแมงกานีส การทดลองคัดเลือกแบคทีเรีย *Streptomyces violaceus* strain SBP1 สำหรับการออกซิเดชันแมงกานีสทางชีวภาพ และการดักติดเซลล์ใช้แบรียมแอลจิเนตเป็นวัสดุติดติดโดยมีการปรับปรุงวัสดุด้วยการเติมผงถ่านกัมมันต์ การศึกษาทดลองแบ่งออกเป็น 3 ส่วน อันได้แก่ 1) การกำจัดแมงกานีสด้วยวัสดุแบรียมแอลจิเนตเติมผงถ่านกัมมันต์ (ร้อยละ 1 5 และ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร) 2) การกำจัดแมงกานีสโดยเซลล์ดักติดด้วยแบรียมแอลจิเนตเติมผงถ่านกัมมันต์ที่มีความหนาแน่นของเซลล์จุลินทรีย์ในวัสดุต่าง ๆ (100 200 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร) และ 3) การศึกษาลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของเซลล์ดักติดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผลการศึกษาพบว่าความหนาแน่นของเซลล์จุลินทรีย์และการเติมผงถ่านกัมมันต์มีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสอย่างชัดเจน วัสดุแบรียมแอลจิเนตเติมผงถ่านกัมมันต์ร้อยละ 5 มีประสิทธิภาพในการกำจัดแมงกานีสสูงที่สุด (ร้อยละ 42) เซลล์ดักติดด้วยแบรียมแอลจิเนตเติมผงถ่านกัมมันต์ หนาแน่นของเซลล์จุลินทรีย์ 200 มิลลิกรัมต่อลิตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดแมงกานีสดีที่มากที่สุด (ร้อยละ 51) ผลการศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคพบว่าผงถ่านกัมมันต์และเซลล์จุลินทรีย์กระจายตัวทั่ววัสดุ จากผลการวิจัยนี้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการประยุกต์ใช้เซลล์ดักติดเพื่อการผลิตน้ำประปาได้ในอนาคต

คำสำคัญ

แมงกานีส น้ำใต้ดินสังเคราะห์ เซลล์ดักติด แบรียมแอลจิเนต การเติมถ่านกัมมันต์

Abstract

Manganese contamination causes problem for water consumption. This research aims to investigate manganese removal using entrapped microbial cells. The influence of an activated carbon content and a microbial cell density in entrapment material on manganese removal was focused. *Streptomyces violaceus* strain SBP1 (a biological manganese-

oxidizing bacterium) and barium alginate supplemented with powdered activated carbon (entrapment material) were chosen. The experiment divided into 3 parts, including 1) manganese removal by barium alginate supplemented with powdered activated carbon (1, 5, and 10%, w/v), 2) manganese removal by the powdered activated carbon-barium alginate-entrapped cells at different microbial cell densities (100, 200, and 500 mg/L), and 3) entrapped cell micro-structural investigation using scanning electron microscope. The result showed that microbial cell density and powdered activated carbon supplement obviously affected manganese removal efficiency. Barium alginate with 5% powdered activated carbon supplement provided the highest manganese removal (42%). The powdered activated carbon-barium alginate-entrapped cells at microbial cell density of 200 mg/L gave the best manganese removal (51%). Micro-structural observation showed that powdered activated carbon and microbial cells distributed over the material. These results could be used as a fundamental information for entrapped cell application for water treatment system in the future.

Keywords

manganese; synthetic groundwater; entrapped cells; barium alginate; activated carbon supplement

1. บทนำ

น้ำใต้ดินเป็นแหล่งน้ำดิบที่สำคัญสำหรับการนำมาผลิตน้ำเพื่อใช้ในการอุปโภคและบริโภคของมนุษย์ เช่น น้ำประปา น้ำใช้อุตสาหกรรม และน้ำใช้สำหรับการเกษตร น้ำใต้ดินทั่วไปอุดมไปด้วยแร่ธาตุหลายชนิด อาทิ เหล็ก แมงกานีส [1] จากรายงานในอดีตพบการปนเปื้อนของเหล็กและแมงกานีสในน้ำใต้ดินในประเทศไทยสูงถึง 52 และ 16 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ [2] ทั้งนี้กระบวนการกำจัดเหล็กและแมงกานีสในน้ำที่นิยมใช้ในการปฏิบัติงานจริง ได้แก่ การออกซิเดชันทางเคมี (Chemical oxidation) หรือการเติมอากาศ (Aeration) [3] กระบวนการดังกล่าวสามารถกำจัดเหล็กได้ดีมากแต่สามารถกำจัดแมงกานีสได้เพียงบางส่วน ซึ่งน้ำที่มีแมงกานีสเจือปนสามารถก่อให้เกิดสีในน้ำหรือตกตะกอนก่อให้เกิดการอุดตันภายในท่อน้ำประปา ตลอดจนเป็นอันตรายต่อระบบประสาทของสิ่งมีชีวิตหากได้รับในปริมาณที่สูง [4] โดยในประเทศไทยกำหนดให้แมงกานีสเจือปนในน้ำประปาได้ไม่เกิน 0.3 มิลลิกรัมต่อลิตร [5]

กระบวนการออกซิเดชันแมงกานีสทางชีวภาพ (Biological manganese oxidation) เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่มีประสิทธิภาพและสามารถนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับระบบการปรับปรุงคุณภาพน้ำที่มีอยู่แล้ว กระบวนการดังกล่าวมีข้อดีหลายประการ อาทิ ค่าใช้จ่ายต่ำ ไม่มีการใช้สารเคมีอันตราย และเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ซึ่งในระบบผลิตน้ำทั่วไปการกำจัดทางชีวภาพสามารถเกิดขึ้นเองในระบบกรอง

น้ำ (Filter) โดยจุลชีพเจริญเป็นฟิล์มชีวภาพ (Biofilm) บนวัสดุกรอง (Filter medium) ระบบกรองชีวภาพ (Biofiltration) นี้สามารถกำจัดสารเจือปนที่มากับน้ำใต้ดินได้หลายชนิดรวมถึงแมงกานีส [6] แต่อย่างไรก็ตามการกำจัดสารเจือปนทางชีวภาพอาจมีประสิทธิภาพไม่สูงนัก เนื่องจากจุลชีพที่สามารถกำจัดสารเจือปนได้อาจมีจำนวนน้อย

สำหรับแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสทางชีวภาพมีหลายวิธีการ โดยวิธีการที่มีการใช้งานอย่างแพร่หลาย ได้แก่ เทคนิคการเติมเซลล์ (Cell augmentation) [7] โดยเทคนิคการเติมเซลล์เป็นการเติมจุลชีพที่มีความจำเพาะและจำนวนที่เพียงพอต่อการกำจัดสารที่ต้องการ เทคโนโลยีดังกล่าวถูกใช้กันมากสำหรับการกำจัดสารปนเปื้อนทั้งที่เป็นสารอินทรีย์พิษและโลหะในระบบบำบัดน้ำเสียและการฟื้นฟูพื้นที่ปนเปื้อน [8] นอกจากนี้งานวิจัยในอดีตยังรายงานว่าการเติมเซลล์ในรูปเซลล์ดักติด (Entrapped cells) ด้วยไฮโดรเจล (Hydrogel) เป็นวิธีหนึ่งที่ช่วยให้จุลชีพมีประสิทธิภาพในการกำจัดมลสารสูงขึ้น [9-10] กล่าวคือ จุลชีพได้รับการปกป้องจากความเครียดทางสิ่งแวดล้อม (Environmental stress) เช่น สภาวะที่มีอุณหภูมิสูงหรือต่ำมาก หรือสภาวะที่มีสารพิษ ส่งผลให้การกำจัดสารปนเปื้อนเพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน [11] ที่ผ่านมามีงานวิจัยที่ประสบความสำเร็จในการใช้เซลล์ดักติดกำจัดสารปนเปื้อนหลายชนิด เช่น แอมโมเนียไนโตรเจน สีเมทิลีน บลู และสารเพนตะคลอโรฟีนอล [11-13]

ปัจจุบันยังไม่มีงานวิจัยที่ประยุกต์ใช้เทคนิคการเติมเซลล์ในรูปเซลล์ดักติดเพื่อส่งเสริมการกำจัดแอมโมเนียทางชีวภาพด้วยเหตุผลดังกล่าวงานวิจัยนี้จึงมีเป้าหมายในการศึกษาการกำจัดแอมโมเนียในน้ำใต้ดินด้วยเซลล์ดักติด โดยจุลชีพที่ใช้เป็นแหล่งเซลล์เติม (Augmented culture) ได้แก่ แบคทีเรีย *Streptomyces violaceus* strain SBP1 (SBP1) เป็นจุลชีพที่คัดแยกมาจากแหล่งน้ำปนเปื้อนแอมโมเนียในอำเภอบ้านไผ่ จังหวัดขอนแก่น ประเทศไทย [14] ส่วนการดักติดเซลล์ใช้วัสดุแบเรียมแอลจิเนตเป็นวัสดุดักติดเนื่องจากมีความแข็งแรงทนทาน และนิยมใช้ทั่วไป [10] นอกจากนี้ยังได้ปรับปรุงวัสดุดักติดให้มีคุณสมบัติเป็นวัสดุดูดซับประสิทธิภาพสูงด้วยการเติมผงถ่านกัมมันต์ การศึกษาครอบคลุมการกำจัดแอมโมเนียด้วยแบเรียมแอลจิเนตเติมผงถ่านกัมมันต์อัตราส่วนต่าง ๆ การกำจัดแอมโมเนียด้วยเซลล์ดักติดที่ความหนาแน่นของเซลล์จุลชีพต่อวัสดุดักติดต่าง ๆ และการศึกษาลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของเซลล์ดักติดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ซึ่งผลจากงานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการเตรียมใช้เซลล์ดักติดเพื่อกำจัดแอมโมเนียในระบบผลิตน้ำใช้หรือน้ำประปา

2. ระเบียบวิธีวิจัย

2.1 การเตรียมเซลล์จุลชีพ

การเตรียมเซลล์จุลชีพเริ่มต้นจากการเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อตามสูตรของ [15] ซึ่งประกอบด้วย $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 0.0154 กรัมต่อลิตร $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.001 กรัมต่อลิตร Hepes buffer 2.383 กรัมต่อลิตร Peptone 1 กรัมต่อลิตร และ Yeast extract 0.25 กรัมต่อลิตร จากนั้นฆ่าเชื้อด้วยหม้อนึ่งความดันไอน้ำที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที แล้วจึงเติมแบคทีเรีย SBP1 ลงในอาหารเลี้ยงเชื้อด้วยอัตราส่วนหัวเชื้อต่ออาหารเลี้ยงเชื้อ 1 ต่อ 10 โดยปริมาตร และเขย่าด้วยความเร็ว 150 รอบต่อนาที ด้วยเครื่องเขย่าแบบหมุนที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง (เพื่อให้เข้าสู่ช่วงท้ายของระยะเอ็กซ์โปเนนเชียล (Exponential phase)) จากนั้นวัดปริมาณเซลล์จุลชีพในขวดหัวเชื้อในรูปปริมาณของแข็งแขวนลอย (Mixed liquor Suspended Solids (MLSS)) แล้วจึงนำอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีเซลล์จุลชีพไปปั่นเหวี่ยงที่

ความเร็วรอบ 6,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที หัวเชื้อเข้มข้นนี้ใช้การศึกษาในรูปเซลล์อิสระและเซลล์ดักติดในขั้นต่อไป

2.2 การเตรียมน้ำใต้ดินสังเคราะห์

การเตรียมน้ำใต้ดินสังเคราะห์จากสูตรที่มีรายงานในอดีต [16] ประกอบด้วย K_2HPO_4 0.0001 กรัมต่อลิตร Na_2SO_4 0.01 กรัมต่อลิตร NaHCO_3 0.008 กรัมต่อลิตร $\text{MnSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ 0.0154 กรัมต่อลิตร $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.00005 กรัมต่อลิตร $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 0.00067 กรัมต่อลิตร $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ 0.02 กรัมต่อลิตร NH_4Cl 0.002 กรัมต่อลิตร peptone 1 กรัมต่อลิตร และ Yeast extract 0.25 กรัมต่อลิตร จากนั้นฆ่าเชื้อด้วยหม้อนึ่งความดันไอน้ำที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที น้ำใต้ดินสังเคราะห์ดังกล่าวมีความเข้มข้นแอมโมเนีย 5 มิลลิกรัมต่อลิตร

2.3 การเตรียมวัสดุดักติดและเซลล์ดักติด

การเตรียมวัสดุดักติดเริ่มต้นจากการเตรียมสารละลายโซเดียมแอลจิเนตร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร (ในกรณีแบบเติมผงถ่านกัมมันต์ (ถ่านกัมมันต์ที่ใช้เป็นเกรดการค้าสำหรับระบบกรองน้ำใช้ โดยมีค่าไอโอดีนนมเบอร์ 900 มิลลิกรัมต่อกรัม และขนาดอนุภาคเฉลี่ย 60 ถึง 125 ไมโครเมตร) ให้เติมผงถ่านกัมมันต์ตามสัดส่วนที่กล่าวไว้ในหัวข้อต่อไป) ต่อมาทวนส่วนผสมและให้ความร้อนเป็นเวลา 30 นาที นำไปเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นหยดโซเดียมแอลจิเนตลงในสารละลายแบเรียมคลอไรด์ร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ตั้งทิ้งไว้ให้แอลจิเนตขึ้นรูปในสารละลายแบเรียมคลอไรด์ต่อเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วจึงล้างด้วยน้ำกลั่น 3 รอบ [17] ตัวอย่างดังกล่าวเรียกว่า BA

การเตรียมเซลล์ดักติดมีขั้นตอนคล้ายกับการเตรียมวัสดุดักติด ยกเว้นมีขั้นตอนการเติมเซลล์ SBP1 หลังจากละลายผงโซเดียมแอลจิเนต โดยปริมาณแบคทีเรียให้เติมตามสัดส่วนที่กล่าวไว้ในหัวข้อต่อไป

2.4 การกำจัดแอมโมเนียด้วยวัสดุดักติดเติมผงถ่านกัมมันต์อัตราส่วนต่าง ๆ

การกำจัดแอมโมเนียด้วยวัสดุดักติด (BA) และวัสดุดักติดเติมผงถ่านกัมมันต์ (ผงถ่านกัมมันต์ร้อยละ 1 5 และ 10 โดย

น้ำหนักต่อปริมาตร ตัวอย่างดังกล่าวเรียกว่า BAAC1 BAAC5 และ BAAC10 ตามลำดับ) เริ่มต้นจากการเติมวัสดุตกติดตามวิธีการจากหัวข้อ 2.3 ลงในน้ำใต้ดินสังเคราะห์จากข้อที่ 2.2 ด้วยอัตราส่วน 1 ต่อ 10 และเขย่าที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที ด้วยเครื่องเขย่าแบบหมุนที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นเก็บตัวอย่างน้ำที่เวลา 0 6 12 24 36 และ 48 ชั่วโมง และวัดความเข้มข้นของแมงกานีส ค่าที่ได้จากการทดลองนี้นำมาคำนวณหาร้อยละการกำจัดแมงกานีสดังแสดงในสมการที่ 1 จากนั้นนำค่าที่ได้ดังกล่าวมาหาความสัมพันธ์ของการกำจัดแมงกานีสทางสถิติ โดยคัดเลือกร้อยละของการเติมผงถ่านกัมมันต์ที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการทดลองข้อที่ 2.5 ต่อไป การศึกษานี้ทดลองจำนวน 3 รอบ เพื่อหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$$\text{Manganese removal (\%)} = \left(\frac{\text{Mn}_0 - \text{Mn}_t}{\text{Mn}_0} \right) \times 100 \quad (1)$$

โดย Mn_0 คือ ค่าความเข้มข้นของแมงกานีสเริ่มต้น (มิลลิกรัมต่อลิตร) และ Mn_t คือ ค่าความเข้มข้นของแมงกานีสคงเหลือจากการทดลอง ณ เวลาใด ๆ (มิลลิกรัมต่อลิตร)

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบในชุดทดลองการกำจัดแมงกานีสด้วยเซลล์ตกติดที่ความหนาแน่นของเซลล์จุลชีพต่อวัสดุตกติดต่าง ๆ

ชุดที่	ชื่อ	รายละเอียด	เซลล์จุลชีพ (มิลลิกรัมต่อลิตร)	ปริมาณน้ำ 30 มิลลิตร		ปริมาณน้ำปนเปื้อน (มิลลิตร)
				แบเรียมแอลจิเนต (กรัม)	ผงถ่านกัมมันต์ (กรัม)	
1	EC-0	เซลล์ตกติดด้วยแบเรียมแอลจิเนตที่ความหนาแน่นของเซลล์จุลชีพต่างกัน	0	0.9	0	300
2	EC-100		100	0.9	0	300
3	EC-200		200	0.9	0	300
4	EC-500		500	0.9	0	300
5	ECAC-0	เซลล์ตกติดด้วยแบเรียมแอลจิเนตเติมผงถ่านกัมมันต์ที่ความหนาแน่นของเซลล์จุลชีพต่างกัน	0	0.9	ร้อยละที่เหมาะสม จากการทดลองที่ 2.4	300
6	ECAC-100		100	0.9		300
7	ECAC-200		200	0.9		300
8	ECAC-500		500	0.9		300

2.6 การศึกษาลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของเซลล์ตกติดด้วยกล่องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

การศึกษาลักษณะโครงสร้างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดเป็นการศึกษาลักษณะพื้นผิวภายในของเซลล์ตกติดเต็มและไม่เต็มผงถ่านกัมมันต์ ซึ่งขั้นตอนการ

2.5 การกำจัดแมงกานีสด้วยเซลล์ตกติดที่ความหนาแน่นของเซลล์จุลชีพต่อวัสดุตกติดต่าง ๆ

การกำจัดแมงกานีสด้วยเซลล์ตกติดที่ความหนาแน่นของเซลล์จุลชีพต่อวัสดุตกติดต่าง ๆ ประกอบด้วย การทดลอง 8 ชุดทดลอง (ตารางที่ 1) การศึกษานี้ทดลองจำนวน 3 รอบ เพื่อหาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน ขั้นตอนการทดลองเป็นไปตามลักษณะที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.4 ค่าที่ได้จากการทดลองนี้นำมาคำนวณหาร้อยละการกำจัดแมงกานีส (สมการที่ 1) และหาค่าจลนศาสตร์ของการกำจัดแมงกานีสด้วยแบคทีเรีย SBP1 ตามกฎอัตราการเกิดปฏิกิริยาอันดับที่ 0 1 และ 2

นอกจากการทดลองที่แสดงรายละเอียดไว้ในตารางที่ 1 ยังได้ศึกษาทดลองการกำจัดแมงกานีสด้วยเซลล์อิสระ 200 มิลลิกรัม-MLSS ต่อลิตร (การเตรียมเซลล์จุลชีพเป็นไปตามหัวข้อที่ 2.1 ขั้นตอนการทดลองเป็นไปตามลักษณะที่กล่าวไว้ในหัวข้อ 2.4) เพิ่มเติมเพื่อใช้ในการเปรียบเทียบผลการทดลองด้วย

เตรียมเป็นแบบเดียวกัน ได้แก่ 1) นำตัวอย่างที่ได้จากข้อที่ 2.3 แخل่งในสารละลายแบเรียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จำนวน 5 ครั้ง ครั้งละ 15 นาที 2) แخل่งในสารละลายแบเรียมคลอไรด์ที่ผสมสารกลูตาร์แอลดีไฮด์ (Glutaraldehyde) ความเข้มข้นร้อยละ 2.5 โดย

ปริมาตรต่อปริมาตร จากนั้นเก็บในอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน 3) แช่ลงในสารละลายแบเรียมคลอไรด์ความเข้มข้นร้อยละ 3 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จำนวน 3 ครั้ง ครั้งละ 15 นาที 4) แช่เอธานอลความเข้มข้นร้อยละ 30 50 70 80 90 และ 99 ตามลำดับ โดยใช้เวลา 15 นาทีต่อรอบ 5) ทำแห้งแบบวิกฤต (Critical point dryer) (Quorum, K850, Canada) จากนั้นนำไปเคลือบด้วยทอง (Cressington, 108 auto, England) และส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (1450VP, Zeiss LEO, USA)

2.7 วิธีการวิเคราะห์ตัวอย่าง

การหาปริมาณความเข้มข้นของเซลล์จุลินทรีย์จากข้อที่ 2.1 อ้างอิงวิธีการวิเคราะห์ MLSS ด้วยการชั่งน้ำหนักตามวิธีมาตรฐาน 2540D [18] เริ่มต้นจากการอบกระดาศกรองที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง จากนั้นนำน้ำตัวอย่างจากการเลี้ยงเชื้อเซลล์จุลินทรีย์ 100 มิลลิลิตร หยดลงบนกระดาศกรองใยแก้ว GF/C ขนาด 1.2 ไมครอน (Whatman, UK) และนำกระดาศกรองไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1.5 ชั่วโมง อีกครั้ง

สำหรับการวิเคราะห์ปริมาณแมงกานีสอ้างอิงตามวิธีมาตรฐาน 3030E ซึ่งประกอบด้วยการย่อยสารคาร์บอนในน้ำตัวอย่างด้วยกรดไนตริกเข้มข้น และวิเคราะห์แมงกานีสด้วยเครื่องวัดการดูดกลืนแสงของอะตอม (Atomic absorption spectrophotometer (AAS)) (AAnalyst™ 800, Perkin Elmer, Singapore) [18] การย่อยเริ่มต้นจากนำน้ำตัวอย่างที่ได้จากข้อที่ 2.4 และ 2.5 กรองด้วยวัสดุกรองแบบไมลอน ขนาด 0.22 ไมครอน (Agela Technologies, USA) จากนั้นใส่ในตัวอย่าง 25 มิลลิลิตร ลงในบีกเกอร์และวางลงบนแผ่นให้ความร้อน ต้มจนน้ำระเหยจนเหลือปริมาตร 5 มิลลิลิตร จากนั้นเติมกรดไนตริกเข้มข้นลงไป 10 มิลลิลิตร แล้วต้มต่อจนเหลือปริมาตร 5 มิลลิลิตร 2 รอบ จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำปราศจากไอออนให้ปริมาตรสุดท้ายเป็น 25 มิลลิลิตร (การย่อยอาจต้องเติมกรดหลายครั้ง โดยสังเกตจากตัวอย่างไม่ปรากฏควันสีน้ำตาล) แล้วจึงนำตัวอย่างที่ผ่านการย่อยไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง AAS

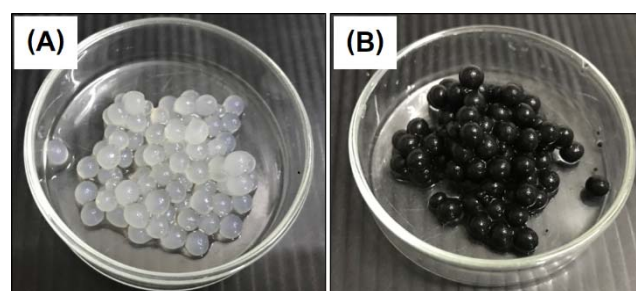
2.8 การวิเคราะห์ทางสถิติ

คำร้อยละการกำจัดการกำจัดแมงกานีสวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติด้วย one-way ANOVA และหาความแปรปรวนของข้อมูลและเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของค่าสังเกตระหว่างคู่ด้วยวิธี the Duncan's multiple range test โดยใช้ค่านัยสำคัญทางสถิติที่ระดับร้อยละ 95 ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติ STATA (STATA, Version 14, USA)

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

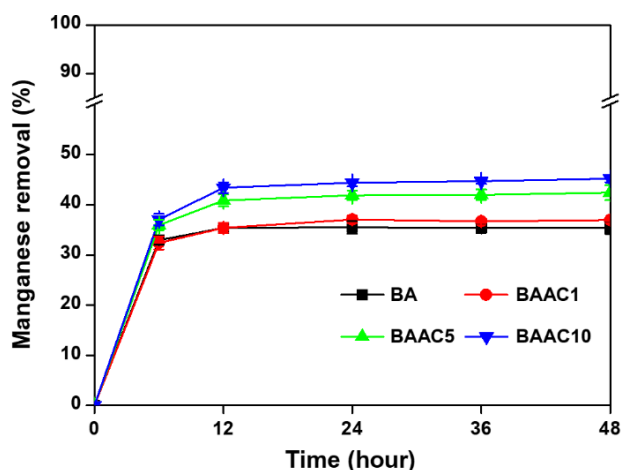
3.1 การกำจัดการกำจัดด้วยวัสดุตกติดเติมผงถ่านกัมมันต์

BA BAAC1 BAAC5 และ BAAC10 มีรูปร่างเป็นทรงกลมคล้ายเม็ดสาคู มีสีขาวขุ่นในตัวอย่าง BA (รูปที่ 1A) และมีสีดำในตัวอย่าง BAAC1 BAAC5 และ BAAC10 (รูปที่ 1B) ซึ่งตัวอย่าง BA BAAC1 BAAC5 และ BAAC10 มีขนาด 4.02 ± 0.071 4.05 ± 0.065 4.06 ± 0.054 และ 4.37 ± 0.170 มิลลิเมตร (ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน) ตามลำดับ ทั้งนี้ขนาดของวัสดุตกติดทั้งหมดใกล้เคียงกัน แต่ในตัวอย่าง BAAC10 มีขนาดใหญ่กว่าวัสดุอื่น ๆ เล็กน้อย เนื่องจากผงถ่านกัมมันต์ทำให้สารละลายโซเดียมแอลจิเนตมีความหนืดเพิ่มขึ้น จึงทำให้ค่าเฉลี่ยของ BAAC10 เพิ่มขึ้น



รูปที่ 1 (A) แบเรียมแอลจิเนต (B) แบเรียมแอลจิเนตเติมผงถ่านกัมมันต์

สำหรับผลการกำจัดการกำจัดแมงกานีสด้วยวัสดุตกติดต่าง ๆ พบว่าค่าแมงกานีสในน้ำลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 12 ชั่วโมงแรก แล้วจึงเริ่มคงที่ (รูปที่ 2) โดยเมื่อสิ้นสุดการทดลองที่ระยะเวลา 48 ชั่วโมง ชุดทดลองวัสดุตกติด BA BAAC1 BAAC5 และ BAAC10 มีคำร้อยละการกำจัดการกำจัดแมงกานีสเท่ากับ 35.36 ± 1.24 36.94 ± 0.14 42.40 ± 1.50 และ 45.20 ± 0.73 (ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน) ตามลำดับ

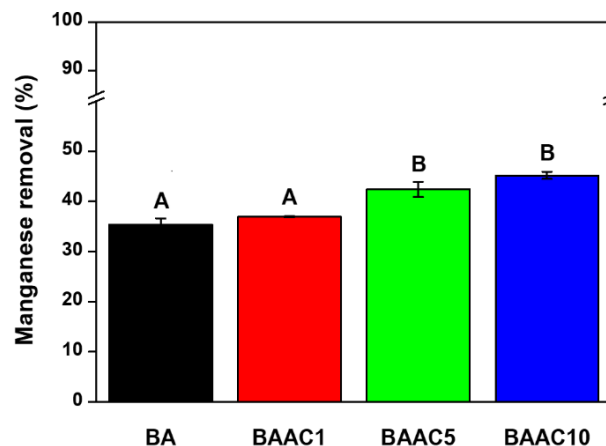


รูปที่ 2 การกำจัดแมงกานีสของวัสดุักติดและวัสดุักติดเติมผงถ่านกัมมันต์

เมื่อเปรียบเทียบผลการกำจัดแมงกานีสของวัสดุต่าง ๆ ทางสถิติดังแสดงในรูปที่ 3 พบว่าร้อยละการกำจัดแมงกานีสของ BA กับ BAAC1 (แทนด้วย A) และ BAAC5 กับ BAAC10 (แทนด้วย B) ไม่มีความต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ กล่าวคือ ชุดทดลอง BA (ไม่เติมผงถ่านกัมมันต์) วัสดุแบเรียม แอลจิเนตสามารถดูดซับแมงกานีสได้ประมาณร้อยละ 35 ปรากฏการณ์การดูดซับสารปนเปื้อนด้วยวัสดุักติดได้มีรายงานไว้ในงานวิจัยในอดีตเช่นกัน [19] แต่ในชุดทดลอง BAAC1 ปริมาณผงถ่านกัมมันต์น้อยจนทำให้ประสิทธิภาพการดูดซับแมงกานีสเพิ่มขึ้นน้อยมากจนไม่มีนัยสำคัญ (รูปที่ 3) เมื่อเติมผงถ่านกัมมันต์มากขึ้นในชุดการทดลอง BAAC5 และ BAAC10 ประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีสเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ (ประมาณร้อยละ 42-45) ซึ่งการเติมผงถ่านกัมมันต์ส่งผลให้ดูดซับสารปนเปื้อนเพิ่มสูงขึ้น [20] ผลการศึกษาครั้งนี้สอดคล้องกับงานวิจัยในอดีตที่พบว่ามีการใช้วัสดุักติดเติมผงถ่านกัมมันต์ในการกำจัดโลหะหนักอย่างมีประสิทธิภาพ เช่น สังกะสี (Zn^{2+}) และแคดเมียม (Cd^{2+}) [21,22]

ผลจากการทดลองขั้นตอนนี้สามารถกล่าวได้ว่าการเติมผงถ่านกัมมันต์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสารปนเปื้อนได้ โดยในการศึกษานี้วัสดุักติดเติมผงถ่านกัมมันต์ร้อยละ 5 หรือตัวอย่าง BAAC5 มีประสิทธิภาพในการกำจัดแมงกานีสสูงและมีความเหมาะสมในเชิงปฏิบัติ โดยวัสดุไม่ได้มีความหนืดมากส่งผลให้ผลิตได้ง่าย และเติมผงถ่านกัมมันต์ไม่

มากจึงมีความเหมาะสมในเชิงเศรษฐศาสตร์ด้วยเช่นกัน สำหรับงานในขั้นตอนต่อไปได้เลือกวัสดุ BAAC5 ในการผลิตเซลล์ักติด



รูปที่ 3 การเปรียบเทียบการกำจัดแมงกานีสเฉลี่ยของ BA BAAC1 BAAC5 และ BAAC10

3.2 การกำจัดแมงกานีสด้วยเซลล์ักติดที่มีความหนาแน่นของเซลล์จุลชีพต่อวัสดุักติดต่าง ๆ

การศึกษานี้เป็นการทดลองโดยชุดทดลองที่มีเซลล์จุลชีพปริมาณ 100 200 และ 500 มิลลิกรัม-MLSS ต่อลิตร (คิดจำนวนแบคทีเรีย SBP1 ประมาณ 1 ถึง 5×10^4 ซีเอฟยูต่อมิลลิลิตร) ในการทดลองนี้มุ่งเน้นการเปรียบเทียบผลการกำจัดแมงกานีสด้วยเซลล์ักติดเติม (ผงถ่านกัมมันต์ร้อยละ 5) และไม่เติมผงถ่านกัมมันต์ที่มีความหนาแน่นของเซลล์จุลชีพต่าง ๆ และวัสดุักติดที่ไม่เติมเซลล์จุลชีพ (EC-0 และ ECAC-0) โดยมีเซลล์อิสระศึกษาคู่ขนานไปด้วย

จากการทดลองเซลล์ักติด EC-0 พบว่ากำจัดแมงกานีสได้ร้อยละ 37 ขณะที่ EC-100 EC-200 และ EC-500 กำจัดแมงกานีสได้ร้อยละ 46 49 และ 46 ตามลำดับ (ตารางที่ 2) โดยผลจากการทดลองดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าเซลล์จุลชีพช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดแมงกานีส ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยในอดีตที่พบว่าการใช้เซลล์จุลชีพร่วมกับแอลจิเนตสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสารพิษ อาทิ แคดเมียม (Cd^{2+}) และนิเกิล (Ni^{2+}) [23,24] จากการทดลองด้วยเซลล์ักติดที่มีความหนาแน่นของเซลล์จุลชีพต่างกันพบว่าชุดการทดลอง EC-200

มีการกำจัดแอมโมเนียที่ดีที่สุด ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า แม้ชุดการทดลอง EC-500 มีเซลล์จุลชีพมากที่สุดแต่เซลล์ดักติดที่สัดส่วนดังกล่าวอาจมีความหนาแน่นมากเกินไปและส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการแพร่และการสัมผัสสารผ่านวัสดุพรุน (วัสดุคักติด) [25]

ส่วนเซลล์ดักติดเติมผงถ่านกัมมันต์ ECAC-0 พบว่ากำจัดแอมโมเนียได้ร้อยละ 43 ขณะที่ ECAC-100 ECAC-200 และ ECAC-500 กำจัดแอมโมเนียได้ร้อยละ 48 51 และ 46 ตามลำดับ (ตารางที่ 2) โดยผลจากการทดลองดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าเซลล์จุลชีพช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนีย และจากการทดลองด้วยเซลล์ดักติดเติมผงถ่านกัมมันต์ที่ความหนาแน่นของเซลล์จุลชีพต่างกันพบว่าชุดการทดลอง ECAC-200 มีการกำจัดแอมโมเนียที่ดีที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับชุดการทดลองก่อนหน้านี้ โดยเซลล์ดักติดที่ความหนาแน่นของเซลล์จุลชีพ 500 มิลลิกรัม-MLSS ต่อลิตร มีประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียต่ำกว่าเซลล์ดักติดที่ความหนาแน่นของเซลล์จุลชีพ 200 มิลลิกรัม-MLSS ต่อลิตร (ตารางที่ 2) ความหนาแน่นของเซลล์จุลชีพที่มากเกินไปร่วมกับผงถ่านกัมมันต์ในเซลล์ดักติดอาจส่งผลโดยตรงต่อการแพร่ของสาร ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดไม่ดีขึ้น [25,26]

แนวโน้มการกำจัดแอมโมเนียของเซลล์อิสระ 200 มิลลิกรัม-MLSS ต่อลิตร พบว่าร้อยละการกำจัดแอมโมเนียมีค่าน้อยในช่วง 12 ชั่วโมงแรก หลังจากนั้นร้อยละการกำจัดแอมโมเนียมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 12 ถึง 36 ชั่วโมง และคงที่ในช่วง 36 ถึง 48 ชั่วโมง (รูปที่ 4) สอดคล้องกับหลักการเจริญเติบโตของเซลล์จุลชีพ กล่าวคือ ช่วงแรกเซลล์จุลชีพมีอัตราการเจริญเติบโตต่ำในระยะพัก (Lag phase) จากนั้นเซลล์จุลชีพมีอัตราการเติบโตอย่างต่อเนื่องและรวดเร็วในระยะเอ็กซ์โปเนนเชียล (Exponential phase) และคงที่ในระยะคงที่ (Stationary phase) เมื่อสิ้นสุดการทดลอง (48 ชั่วโมง) เซลล์อิสระมีค่าการกำจัดแอมโมเนียร้อยละ 57

ตารางที่ 2 การกำจัดแอมโมเนียต่อความหนาแน่นของเซลล์จุลชีพ

ชุดที่	ชื่อชุดการทดลอง	ร้อยละประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนีย ณ เวลา 48 ชั่วโมง (ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน)
1	EC-0	36.71 $\pm$ 1.33
2	EC-100	45.95 $\pm$ 1.66
3	EC-200	48.65$\pm$1.89
4	EC-500	46.30 $\pm$ 1.56
5	ECAC-0	42.80 $\pm$ 1.06
6	ECAC-100	48.16 $\pm$ 1.10
7	ECAC-200	51.07$\pm$1.66
8	ECAC-500	46.29 $\pm$ 1.23

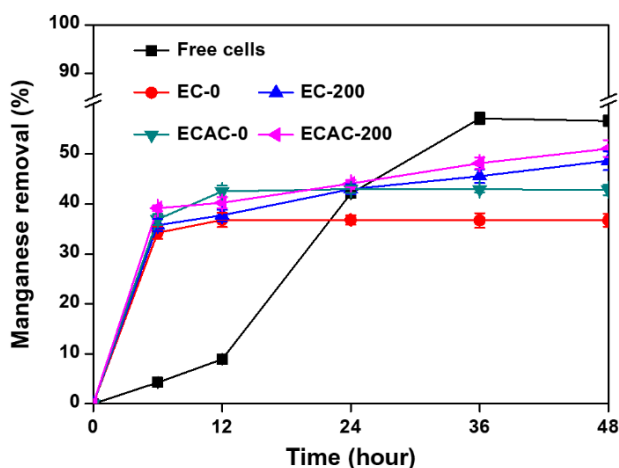
ส่วนแนวโน้มการกำจัดแอมโมเนียของชุดการทดลอง EC-0 และ ECAC-0 มีร้อยละการกำจัดแอมโมเนียอย่างรวดเร็วและคงที่ในช่วง 12 ชั่วโมงแรก ซึ่งแสดงให้เห็นว่ากระบวนการดูดซับสิ้นสุดแล้ว ขณะที่เวลา 12 ชั่วโมง ชุดการทดลอง EC-200 และ ECAC-200 มีร้อยละการกำจัดแอมโมเนียใกล้เคียง EC-0 และ ECAC-0 แต่หลังจากนั้น (24 ถึง 48 ชั่วโมง) พบว่าชุดการทดลอง EC-200 และ ECAC-200 มีร้อยละการกำจัดแอมโมเนียที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ (รูปที่ 4) ซึ่งเป็นผลจากกระบวนการทางชีวภาพของเซลล์จุลชีพที่เกิดขึ้นในเซลล์ดักติด ทั้งนี้เซลล์จุลชีพที่อยู่ในวัสดุคักติดอาจได้รับสัมผัสแอมโมเนียสูงกว่าเซลล์อิสระเนื่องจากมีข้อจำกัดเรื่องการแพร่ของสารผ่านวัสดุพรุนเป็นเหตุให้กระบวนการทางชีวภาพของเซลล์ดักติดเกิดได้ช้ากว่าเซลล์อิสระ [25,26]

โดยภาพรวมเมื่อเปรียบเทียบแนวโน้มการกำจัดแอมโมเนียด้วยเซลล์อิสระและเซลล์ดักติด (EC-200 และ ECAC-200) พบว่าเซลล์ดักติดกำจัดแอมโมเนียได้รวดเร็วกว่า (รูปที่ 4) เนื่องจากกระบวนการดูดซับเกิดขึ้นเร็วกว่ากระบวนการทางชีวภาพ ดังนั้นในแง่ของการประยุกต์ใช้งานจริงการใช้เซลล์ดักติดมีข้อดีในการออกแบบและใช้งานระบบที่มีระยะเวลาในการบำบัดน้ำ (Hydraulic retention time) สั้น รวมทั้งสามารถออกแบบให้เป็นระบบที่มีถึงปฏิกรณ์ขนาดเล็กได้

สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนีย ณ เวลา 48 ชั่วโมง ของชุดทดลองเซลล์ดักติดต่าง ๆ (EC-200 และ ECAC-200) เมื่อเปรียบเทียบกับเซลล์อิสระ 200 มิลลิกรัม-

MLSS ต่อลิตร พบว่าเซลล์อิสระมีค่าการกำจัดแอมโมเนียสูงกว่า EC-200 และ ECAC-200 เล็กน้อย (รูปที่ 4) เนื่องจากแอมโมเนียมีโอกาสสัมผัสกับเซลล์จุลินทรีย์ได้มากกว่าเซลล์ดักติด แต่ในแง่ของการประยุกต์ใช้งานจริงเซลล์ดักติดมีศักยภาพในการกำจัดมลสารในสิ่งแวดล้อมซึ่งอาจมีสารเจือปนหลายชนิด หรือมีความเครียดจากสิ่งแวดล้อม (Environmental stress) ได้มากกว่า [27,28]

ผลการศึกษาในรูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่าเซลล์จุลินทรีย์ในรูปแบบเซลล์ดักติดสามารถเจริญเติบโตและกำจัดแอมโมเนียได้ดี เซลล์จุลินทรีย์สามารถกำจัดแอมโมเนียได้ด้วยกระบวนการออกซิเดชันทางชีวภาพ (Biological oxidation) จากงานวิจัยในอดีตระบุว่าเซลล์จุลินทรีย์สามารถเปลี่ยนรูปแอมโมเนียละลายน้ำ (Mn^{2+}) เป็นรูปของแข็ง (Mn^{3+} หรือ Mn^{4+}) ดังนั้นผลการทดลองนี้คาดการณ์ว่าแอมโมเนีย Mn^{2+} ที่ถูกกำจัดได้เปลี่ยนรูปเป็นแอมโมเนีย Mn^{3+} และ Mn^{4+} [3,14] การใช้งานเซลล์ดักติดด้วยแบคทีเรียแอโรบิกเติมผงถ่านกัมมันต์เป็นการปรับปรุงคุณภาพน้ำที่ใช้กระบวนการดูดซับร่วมกับการเปลี่ยนรูปทางชีวภาพ (Bio-transformation) ส่งผลให้ชุดการทดลองดังกล่าวมีประสิทธิภาพสูง การศึกษาอัตราการเกิดปฏิกิริยาพบว่าโดยภาพรวมแล้วการกำจัดแอมโมเนียในการศึกษานี้เป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับที่ 2 (ตารางที่ 3) โดยค่าที่ได้จากการศึกษาสามารถนำไปเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการศึกษาและออกแบบการทดลองต่อไป



รูปที่ 4 การกำจัดแอมโมเนียของเซลล์อิสระ (Free cells) วัสดุดักติด (EC-0 และ EC-200) และเซลล์ดักติด (ECAC-0 และ ECAC-200)

ตารางที่ 3 จลนศาสตร์การกำจัดแอมโมเนีย

ชุดที่	ชื่อชุดการทดลอง	สมการจลนศาสตร์ ^a	R ²	ค่าคงที่จลนศาสตร์ ^b
1	EC-0	$Y=0.248x+0.016$	0.83	0.248
2	EC-100	$Y=0.260x+0.019$	0.81	0.260
3	EC-200	$Y=0.267x+0.019$	0.81	0.267
4	EC-500	$Y=0.273x+0.018$	0.82	0.273
5	ECAC-0	$Y=0.319x+0.015$	0.90	0.319
6	ECAC-100	$Y=0.337x+0.023$	0.82	0.337
7	ECAC-200	$Y=0.295x+0.022$	0.78	0.294
8	ECAC-500	$Y=0.264x+0.019$	0.81	0.264

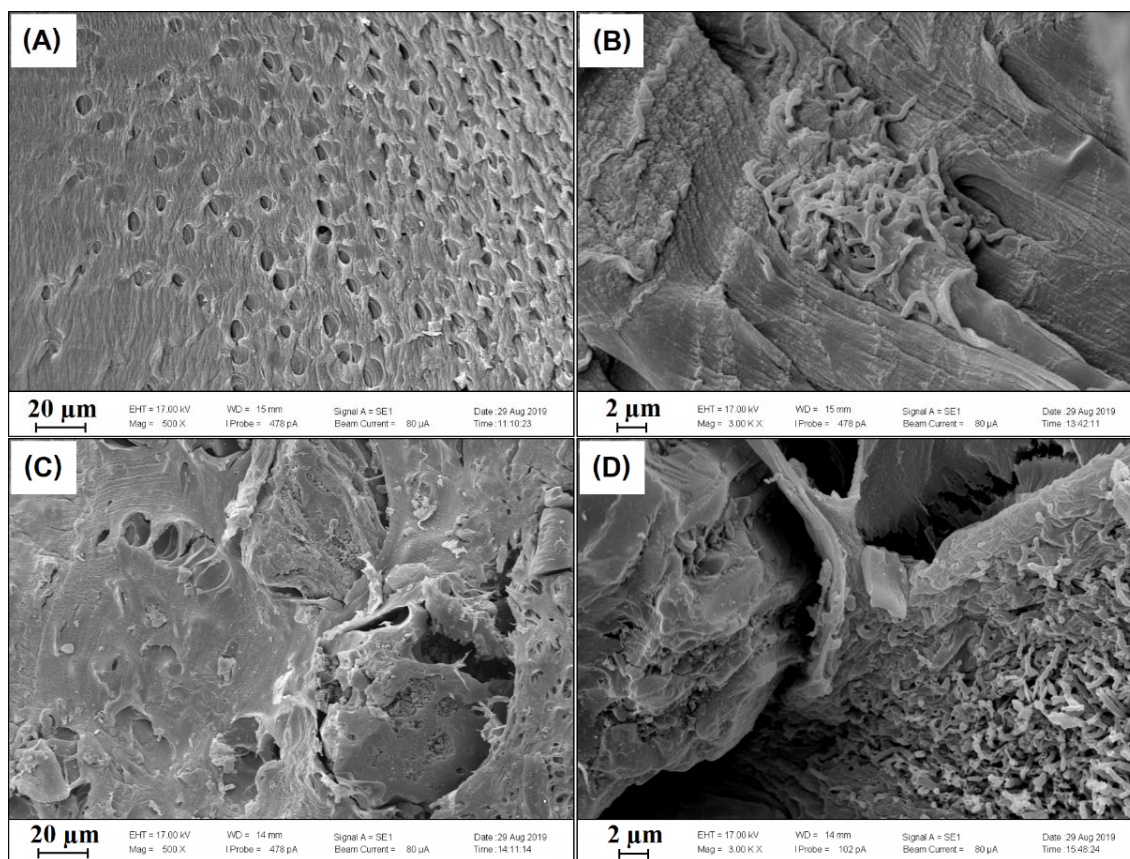
หมายเหตุ : ^a สมการจลนศาสตร์ โดย X คือ เวลา (วัน) Y คือ 1/ความเข้มข้นของแอมโมเนีย (มิลลิกรัมต่อลิตร)

: ^b ค่าคงที่จลนศาสตร์ของปฏิกิริยาอันดับที่ 2 (ลิตรต่อมิลลิกรัม-วัน)

3.3 ลักษณะโครงสร้างระดับจุลภาคของเซลล์ดักติด

การศึกษาโครงสร้างระดับจุลภาคของเซลล์ดักติดเติมและไม่เติมผงถ่านกัมมันต์ เพื่อศึกษาผลกระทบของผงถ่านกัมมันต์ต่อโครงสร้างของแบคทีเรียแอโรบิกเติม (รูปที่ 5) จากรูปที่ 5A และ 5B พื้นผิวภายในเซลล์ดักติดด้วยแบคทีเรียแอโรบิกเติมมีผิวเรียบและมีรูพรุนจำนวนมากกระจายทั่วไปอย่างสม่ำเสมอ เป็นผลที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาเชื่อมแบบไขว้ (Cross-linking) ระหว่างไซโตพลาสซึมและแบคทีเรียคลอไรด์เกิดเป็นโครงสร้างตาข่าย 3 มิติ [12] และเมื่อขยายภาพโครงสร้างเป็น 3,000 เท่า พบว่าเซลล์แบคทีเรีย SBP1 ถูกดักติดกระจายตัวอยู่ทั้งบริเวณภายนอกและภายในรูของโครงสร้างตาข่ายเป็นจำนวนมาก ซึ่งลักษณะเซลล์แบคทีเรีย SBP1 เป็นแบบแท่ง (รูปที่ 5B)

ส่วนลักษณะโครงสร้างเซลล์ดักติดด้วยแบคทีเรียแอโรบิกเติมผงถ่านกัมมันต์เป็นดังรูปที่ 5C และ 5D พื้นผิวภายในเซลล์ดักติดด้วยแบคทีเรียแอโรบิกเติมผงถ่านกัมมันต์มีความขรุขระเนื่องจากผงถ่านกัมมันต์แทรกตัวตามโครงตาข่ายแบคทีเรียแอโรบิกเติม แต่ทั้งนี้ผงถ่านกัมมันต์ไม่ได้ทำปฏิกิริยาเชื่อมแบบไขว้โดยตรงกับแบคทีเรียแอโรบิกเติม ดังนั้นคาดการณ์ว่าผงถ่านกัมมันต์ไม่ได้ส่งผลกระทบต่อความแข็งแรงของวัสดุดักติด (รูปที่ 5C) ส่วนการกระจายของแบคทีเรียมีลักษณะคล้ายกับเซลล์ดักติดด้วยแบคทีเรียแอโรบิกเติมทั่วไป (รูปที่ 5D)



รูปที่ 5 ลักษณะภายในของเซลล์ดักติด EC-200 (A) กำลังขยาย 500 เท่า (B) กำลังขยาย 3,000 เท่า และลักษณะภายในของเซลล์ดักติดเติมผงถ่านกัมมันต์ ECAC-200 (C) กำลังขยาย 500 เท่า (D) กำลังขยาย 3,000 เท่า

4. สรุปผลการวิจัย

แบเรียมแอลจิเนตเติมผงถ่านกัมมันต์สามารถใช้เป็นวัสดุดักติดเซลล์จุลชีพเพื่อกำจัดแอมโมเนียในน้ำใต้ดินสังเคราะห์ แบคทีเรียที่ศึกษาครั้งนี้ คือ *Streptomyces violaceus* strain SBP1 ซึ่งสามารถออกซิเดชันแอมโมเนียได้ จากการทดลองพบว่าวัสดุแบเรียมแอลจิเนตเติมผงถ่านกัมมันต์ในสัดส่วนร้อยละ 5 มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับการกำจัดแอมโมเนีย (ร้อยละการกำจัดแอมโมเนียเท่ากับ 42) เมื่อเติมจุลชีพ ณ ความหนาแน่นของเซลล์จุลชีพ 200 มิลลิกรัม-MLSS ต่อลิตร พบว่าการกำจัดแอมโมเนียมีประสิทธิภาพดีที่สุด (ร้อยละการกำจัดแอมโมเนีย 51) จลนศาสตร์การกำจัดแอมโมเนียเป็นไปตามปฏิกิริยาอันดับที่ 2 โดยมีค่าคงที่จลนศาสตร์สูงสุด 0.337 ลิตรต่อมิลลิกรัม-วัน ผลการศึกษาเซลล์ดักติดในระดับจุลภาคพบว่าเซลล์ดักติดเติมผงถ่านกัมมันต์มีความพรุนและขรุขระ และผงถ่านกัมมันต์กระจายตัวทั่ววัสดุ ส่วนเซลล์จุลชีพก็

กระจายตัวเกาะติดตามผิวของวัสดุอย่างชัดเจน ผลการศึกษานี้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการประยุกต์ใช้เซลล์ดักติดเพื่อกำจัดแอมโมเนียในระบบผลิตน้ำใช้หรือน้ำประปา ในอนาคตควรมีการศึกษาปัจจัยแวดล้อมหรือปริมาณเซลล์จุลชีพที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้งานจริงต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษานี้เป็นส่วนหนึ่งของทุนวิจัยทุนพัฒนานักวิจัยรุ่นกลาง (เมธีวิจัย สกว.) (รหัสทุน RSA6080054) และทุนวิจัยสำหรับคณาจารย์บัณฑิตศึกษาเพื่อให้สามารถรับนักศึกษาที่มีความสามารถและศักยภาพสูงเข้าศึกษาในหลักสูตรและทำวิจัยในสาขาที่อาจารย์มีความเชี่ยวชาญ ประจำปีการศึกษา 2559 (รหัสทุน GS 591JT212) นอกจากนี้การศึกษานี้ยังได้รับทุนสนับสนุนบางส่วนและความอนุเคราะห์ใช้สถานที่และเครื่องมือต่าง ๆ จากศูนย์วิจัยด้าน

การจัดการสิ่งแวดล้อมและสารอันตรายมหาวิทยาลัยขอนแก่น และศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย (ศสอ.)

เอกสารอ้างอิง

- [1] Patil DS, Chavan SM, Oubagaranadin JUK. A review of technologies for manganese removal from wastewaters. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2016; 4(1): 468-487.
- [2] PCD (Pollution Control Department), *Thailand state of pollution report 2015*. Bangkok: Pollution Control Department, Ministry of Natural Resources and Environment; 2015.
- [3] Tobiasson EJ, Bazilio A, Goodwill J, Mai X, Nguyen C. Manganese removal from drinking water sources. *Current Pollution Reports*. 2016; 2(3): 168-177.
- [4] Bjørklund G, Chartrand MS, Aaseth J. Manganese exposure and neurotoxic effects in children. *Environmental Research*. 2017; 155: 380-384.
- [5] WHO (World Health Organization). *Guidelines for drinking water quality*. Geneva: WHO Press; 1998.
- [6] Zhu XI, Getting T, Bruce D. Review of biologically active filters in drinking water applications. *Journal of American Water Works Association*. 2010; 102(12): 67-77.
- [7] สุมณา ราษฎร์รักดี. เทคโนโลยีชีวภาพสิ่งแวดล้อม. ขอนแก่น: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น; 2558.
- [8] Siripattanakul S, Khan E. *Emerging Environmental Technologies Volume 2*. New York: Springer; 2010.
- [9] Kourkoutas Y, Bekatorou A, Banat IM, Marchant R, Koutinas AA. Immobilization technologies and support materials suitable in alcohol beverages production: A review. *Food Microbiology*. 2004; 21(4): 377-397.
- [10] Mørch YA, Donati I, Strand BL, Skjåk-Braek G. Effect of Ca^{2+} , Ba^{2+} , and Sr^{2+} on alginate microbeads. *Biomacromolecules*. 2006; 7(5): 1471-1480.
- [11] Hill CB, Khan E. A comparative study of immobilized nitrifying and co-immobilized nitrifying and denitrifying bacteria for ammonia removal of sludge digester supernatant. *Water, Air, and Soil Pollution*. 2008; 195(1-4): 23-33.
- [12] Hassan AF, Abdel-Mohsen AM, Fouda MMG. Comparative study of calcium alginate, activated carbon, and their composite beads on methylene blue adsorption. *Carbohydrate Polymers*. 2014; 102(1): 192-198.
- [13] Jittawattananarat R, Kostarelos K, Khan E. Immobilized-cell-augmented activated sludge process for treating wastewater containing hazardous compounds. *Water Environment Research*. 2007; 79(5): 461-471.
- [14] Therdkittikul N, Taweetanawanit P, Ratpukdi-Siripattanakul S. Screening of manganese-oxidizing bacteria from sand filter and soil, Khon Kaen, Thailand. *IWA World Water Congress & Exhibition 2018*. Tokyo: IWA Publishing; 2018. 109.
- [15] Cerrato JM, Falkinham JO, Dietrich AM, Knocke WR, McKinney CW, Pruden A. Manganese-oxidizing and -reducing microorganisms isolated from biofilms in chlorinated drinking water systems. *Water Research*. 2010; 44(13): 3935-3945.
- [16] Ito A, Miura J-I, Ishikawa N, Umita T. Biological oxidation of arsenite in synthetic groundwater

- using immobilised bacteria. *Water Research*. 2012; 46(15): 4825-4831.
- [17] Siripattanakul-Ratpukdi S, Tongkliang T. Municipal wastewater treatment using barium alginate entrapped activated sludge: adjustment of utilization conditions. *International Journal of Chemical Engineering and Applications*. 2012; 3(5): 328-332.
- [18] APHA (American Public Health Association), AWWA (American Water Works Association), WEF (Water Environment Federation). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 23rd ed. Washington, DC: APHA, AWWA, WEF; 2017.
- [19] Wang B, Wan Y, Zheng Y, Lee X, Liu T, Yu Z, Huang J, Ok YS, Chen J, Gao B. Alginate-based composites for environmental applications: a critical review. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. 2019; 49(4): 318-356.
- [20] Park HG, Kim TW, Chae MY, Yoo I-K. Activated carbon-containing alginate adsorbent for the simultaneous removal of heavy metals and toxic organics. *Process Biochemistry*. 2007; 42(10): 1371-1377.
- [21] Choi J-W, Yang K-S, Kim D-J, Lee CE. Adsorption of zinc and toluene by alginate complex impregnated with zeolite and activated carbon. *Current Applied Physics*. 2009; 9(3): 694-697.
- [22] Sigdel A, Jung W, Min B, Lee M, Choi U, Timmes T, Kimb S-J, Kang C-U, Kumar R, Jeon B-H. Concurrent removal of cadmium and benzene from aqueous solution by powdered activated carbon impregnated alginate beads. *Catena*. 2017; 147: 101-107.
- [23] Arica MY, Bayramoglu G, Yilmaz M, Bektaş S, Genç O. Biosorption of Hg^{2+} , Cd^{2+} , and Zn^{2+} by Ca-alginate and immobilized wood-rotting fungus *Funalia trogii*. *Journal of Hazardous Materials*. 2004; 109(1-3): 191-199.
- [24] Bayramoglu G, Yakup Arica M. Construction a hybrid biosorbent using *Scenedesmus quadricauda* and ca-alginate for biosorption of Cu(II), Zn(II) and Ni(II): Kinetics and equilibrium studies. *Bioresource Technology*. 2009; 100(1): 186-193.
- [25] Pramanik S, Khan E. Effects of cell entrapment on growth rate and metabolic activity of mixed cultures in biological wastewater treatment. *Enzyme and Microbial Technology*. 2008; 43 : 245-251.
- [26] Sheeja RY, Murugesan T. Studies on biodegradation of phenol using response surface methodology. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. 2002; 77(11): 1219-1230.
- [27] Taweetanawanit P, Ratpukdi T, Siripattanakul-Ratpukdia S. Performance and kinetics of triclocarban removal by entrapped *Pseudomonas fluorescens* strain MC46. *Bioresource Technology*. 2019; 274: 113-119.
- [28] Siripattanakul-Ratpukdi S, Wirojanagud W, McEvoy J, Khan E. Effect of cell-to-matrix ratio in polyvinyl alcohol immobilized pure and mixed cultures for atrazine degradation. *Water, Air, and Soil Pollution*. 2008; 8: 257-266.