

ผลของสารเมลานอยดินต่อประสิทธิภาพ
ของระบบย่อยแอนแอโรบิก

Effects of Melanoidins on the Efficiency
of Anaerobic Digestion

บุญชัย วิจิตรเสถียร¹ วัชรพล วงศ์เลิศอารักษ์^{2*}
และ วิมลมาศ บุญยั้งยืน²

Boonchai Wichitsathian¹, Watcharapol Wonglertarak^{2*}
and Wimonmas Boonyungyuen²

Received: 30 January 2024

Revised: 14 May 2024

Accepted: 8 July 2024

บทคัดย่อ

สารเมลานอยดิน (Melanoidins) มีสีน้ำตาลเข้มถึงดำ เป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการควบแน่นของน้ำตาลกลูโคสและหมู่อะมิโนที่ผลิตโดยปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่มีเอนไซม์ โดยเมลานอยดินส่วนใหญ่พบในน้ำทิ้งของอุตสาหกรรมที่มีกระบวนการหมักและกลั่นที่ใช้กากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบ ซึ่งอุตสาหกรรมเหล่านี้มักนิยมใช้ระบบย่อยแอนแอโรบิกในการบำบัดขั้นต้นเพื่อลดค่าสารอินทรีย์ในน้ำเสีย และจะมีผลพลอยได้จากก๊าซชีวภาพซึ่งสามารถนำมาเป็นพลังงานทดแทนได้ หากสารเมลานอยดินมีปริมาณมากเกินไปสารเมลานอยดินจะส่งผลเสียต่อจุลินทรีย์ที่ผลิตสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile fatty acid, VFA) ทำให้สารอินทรีย์ระเหยง่ายลดลงส่งผลให้การสร้างก๊าซชีวภาพลดลงด้วย จึงจำเป็นต้องมีการควบคุมปริมาณสารเมลานอยดินให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมให้ระบบมีประสิทธิภาพสูงสุด จากผลการศึกษาการประเมินความเป็นพิษของสารเมลานอยดินพบว่าที่ความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน 10,000 mg/L มีค่าศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดเท่ากับ

¹ สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา ประเทศไทย 30000

¹ School of Environmental Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima, Thailand 30000

² สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและการจัดการภัยพิบัติ มหาวิทยาลัยมหิดลวิทยาเขตกาญจนบุรี กาญจนบุรี ประเทศไทย 71150

² Environmental Engineering and Disaster Management Program, Mahidol University Kanchanaburi campus, Kanchanaburi, Thailand 71150

* ผู้แทนประสานงาน (Corresponding author) e-mail: w_watcharapol@hotmail.com

0.162 L/kg COD_{remove} โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดค่าซีโอดีคิดเป็นร้อยละ 80 เมื่อความเข้มข้นของเมลานอยดินมากกว่า 10,000 mg/l พบว่าปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพลดลงเนื่องจากเมลานอยดินมีคุณสมบัติในการยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพ

คำสำคัญ: เมลานอยดิน การย่อยสลายแบบแอนแอโรบิก การยับยั้ง ก๊าซชีวภาพ

ABSTRACT

Melanoidins are dark brown to black substances formed from the condensation of glucose and amino groups, produced through non-enzymatic browning reactions. These melanoidins are predominantly found in wastewater from industries involving fermentation and distillation processes that use molasses as a raw material. These industries commonly use anaerobic digestion systems for primary treatment to reduce organic compounds in the wastewater, producing biogas as a byproduct that can be utilized as a renewable energy source. However, excessive amounts of melanoidins can negatively impact the microorganisms that produce volatile fatty acids (VFA), leading to a decrease in these acids and consequently reducing biogas production. Therefore, it is necessary to control the concentration of melanoidins to maintain optimal system efficiency. Studies assessing the toxicity of melanoidins have shown that at a concentration of 10,000 mg/L, melanoidins have a maximum biogas production potential of 0.162 L/kg COD_{remove}, with an 80% COD removal efficiency. When the concentration of melanoidins exceeds 10,000 mg/L, biogas production decreases due to the inhibitory effects of melanoidins on the growth of microorganisms essential for biogas production.

Keywords: Melanoidins; Anaerobic Digestion; Inhibition; Biogas

บทนำ

สารเมลานอยดิน (Melanoidins) เป็นสารประกอบสีน้ำตาลที่พบในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมที่มีกระบวนการหมักและกลั่นที่ใช้กากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบ โดยของเสียดังกล่าวเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการควบแน่นของน้ำตาลกลูโคสและหมู่อะมิโนที่ผลิตโดยปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลที่ไม่มีเอนไซม์เข้ามาเกี่ยวข้อง สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ คาราเมลไลเซชันเป็นปฏิกิริยาที่อาศัยความร้อนในการแยกสลายโมเลกุล (thermolysis) เกิดพอลิเมอร์ของสารประกอบคาร์บอนได้เป็นสีน้ำตาลโดยมีน้ำตาลเท่านั้นที่เป็นสารตั้งต้นของปฏิกิริยา และปฏิกิริยาเมลลาร์ดเป็นปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลแบบไม่ใช้เอนไซม์แบบหนึ่งโดยการเปลี่ยนสีเป็นผลมาจากปฏิกิริยาของหมู่คาร์บอนิล (carbonyl group) และหมู่อะมิโนที่เป็นอิสระซึ่งนำไปสู่การเกิดเม็ดสีของเมลานอยดิน [1] เมลานอยดินมักพบในน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมประเภทอุตสาหกรรมสุรา อุตสาหกรรมการแปรรูปเบเกอรี่ีสต์ อุตสาหกรรมผลิตเบียร์และอุตสาหกรรมการผลิตอาหาร [2] ซึ่งสารดังกล่าวจะประกอบไปด้วยไอออนลบมีน้ำหนักโมเลกุลสูงและมีสารประกอบไนโตรเจน สำหรับแนวทางในการกำจัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมประเภทดังกล่าวมีหลากหลายกระบวนการ ได้แก่ กระบวนการดูดซับ

(Adsorption Process) กระบวนการตกตะกอนทางเคมี กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้าและกระบวนการโอโซนออกซิเดชัน เป็นต้น ซึ่งแต่ละกระบวนการนั้นมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันออกไป กระบวนการตกตะกอนด้วยไฟฟ้ามีประสิทธิภาพกำจัดสสารเมลานอยดินและค่าซีโอดี (COD) ในน้ำเสียคิดเป็นร้อยละ 90 และ 45 ตามลำดับ ปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการนี้คือปัญหาของการเคลือบผิวงานเพื่อเพิ่มความต้านทานต่อการกัดกร่อน (Passivation) ของขั้วไฟฟ้าซึ่งเป็นปัญหาต่อค่ากระแสไฟในกระบวนการตกตะกอนทางเคมีไฟฟ้า [3] กระบวนการตกตะกอนทางเคมีมีประสิทธิภาพกำจัดสสารเมลานอยดินและค่าซีโอดีคิดเป็นร้อยละ 90 และ 70 ตามลำดับ ปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการนี้คือค่าใช้จ่ายสูงในเรื่องของสารเคมีและการกำจัดกากตะกอน อีกทั้งสารเมลานอยดินที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะไม่สามารถกำจัดได้ด้วยการตกตะกอนทางเคมี [3] กระบวนการออกซิเดชันด้วยโอโซนมีประสิทธิภาพกำจัดสสารเมลานอยดินและค่าซีโอดีคิดเป็นร้อยละ 80 และน้อยกว่าร้อยละ 25 ตามลำดับ ปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการนี้คือโอโซนไม่ทำลายสารประกอบโพลีเมอร์สีน้ำตาลเป็นสารประกอบที่มีขนาดเล็กได้ [4] แต่โดยทั่วไปน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเหล่านี้นักใช้ระบบแอนแอโรบิกซึ่งมีประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์ในรูปบีโอดีและซีโอดีของน้ำทิ้งคิดเป็นร้อยละ 70-90 แต่อย่างไรก็ตามยังคงมีสีน้ำตาลของสารเมลานอยดินหลงเหลืออยู่ โดยทั่วไประบบบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพจะสามารถย่อยสลายสารเมลานอยดินได้เพียงร้อยละ 6-7 เท่านั้น [5, 6] โดยสารดังกล่าวเป็นสารที่ย่อยสลายด้วยกระบวนการทางชีวภาพได้ยาก มีความเป็นพิษและส่งผลกระทบต่อการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบบำบัดน้ำเสียได้ ซึ่งสารดังกล่าวมีคุณสมบัติในการยับยั้งการเติบโตของจุลินทรีย์ ก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก และนอกจากนี้เมลานอยดินยังเป็นอันตรายต่อสุขภาพโดยถ้าหากมีสารเมลานอยดินปริมาณมากกว่า 16 กรัมต่อลิตรจะส่งผลเสียต่อจุลินทรีย์ที่ผลิตสารอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile fatty acid, VFA) และเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นทำให้ค่าเมลานอยดินเพิ่มขึ้นทำให้ระบบสามารถสร้างมีเทนได้น้อยลง [7] ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีความสนใจเพื่อศึกษาหาความเป็นพิษของสารเมลานอยดินที่ความเข้มข้นต่างๆ ที่จะส่งผลต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบแอนแอโรบิก ซึ่งจากงานวิจัยนี้สามารถทราบถึงปริมาณที่สารเมลานอยดินส่งผลต่อระบบบำบัดน้ำเสียแบบแอนแอโรบิก และหาปริมาณที่เหมาะสมของสารเมลานอยดินเพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด โดยนำผลการศึกษาที่ได้มาควบคุมปริมาณของสารเมลานอยดินที่ส่งเข้าระบบผลิตก๊าซชีวภาพ โดยเฉพาะในกลุ่มโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ที่ใช้น้ำตาลเป็นองค์ประกอบในการผลิตหลักทำให้เกิดน้ำเสียที่มีค่าซีโอดีสูง

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมสารละลายเมลานอยดินสังเคราะห์

การเตรียมสารละลายเมลานอยดินที่ใช้ในการศึกษาอ้างอิงวิธีการเตรียมสารจากงานวิจัยที่ผ่านมาโดยมีรายละเอียดการเตรียมดังนี้ ชั่ง D-Glucose 4.5 กรัม Glycine 1.88 กรัม Sodium bicarbonate 0.42 กรัม ละลายในน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร คนจนสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำสารละลายไปต้มให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 7 ชั่วโมงโดยปิดภาชนะที่บรรจุสารละลายให้มิดชิดเพื่อป้องกันการระเหยของสารละลาย จากนั้นตั้งทิ้งไว้จนเย็นที่อุณหภูมิห้องและเติมน้ำกลั่นอีก 100 มิลลิลิตรจะได้สารละลายได้ความเข้มข้นของเมลานอยดินเท่ากับ 20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร [8-11]

2. การศึกษาความเป็นพิษของสารเมลานอยดินในระบบย่อยแอนแอโรบิก

ในการศึกษานี้เป็นการทดสอบหาศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพโดยใช้วิธีการ Biochemical Methane Potential (BMP) ที่สภาวะมาตรฐาน โดยทำการศึกษาหาอัตราส่วนในการเพิ่มศักยภาพการผลิต

ก๊าซชีวภาพระหว่างวัสดุหมักรวมทั้ง 2 ชนิด คือเมลานอยดินสังเคราะห์ที่ความเข้มข้นระหว่าง 5,000-25,000 มิลลิกรัมต่อลิตรและน้ำเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษานี้มาจากโรงงานอุตสาหกรรมแป้งมันโคราช โดยการหมักแบบไร้ออกซิเจนในการหาอัตราส่วนทำการทดลองโดยเดินระบบแบบกะซึ่งประกอบด้วยชุดหมักก๊าซชีวภาพมีปริมาตร 500 มิลลิตรและชุดวัดปริมาณก๊าซชีวภาพ ตลอดการทดลองก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจะถูกระบายออกจากขวดหมักมาแทนที่น้ำที่อยู่ในขวด เป็นการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการหมักโดยอาศัยหลักการแทนที่น้ำตามรูปที่ 1 จากนั้นนำมาคำนวณเพื่อประเมินศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพโดยสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (1)

$$\text{Biogas yield (l/kg TCOD}_{\text{removal}}) = (\text{ปริมาณก๊าซสะสม (l)}) / (\text{COD}_{\text{in}} - \text{COD}_{\text{out}} \text{ (kg)}) \quad (1)$$

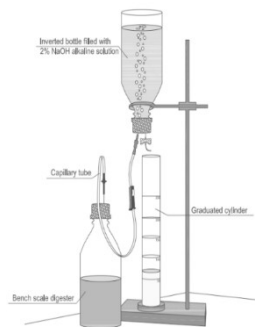


Figure 1 BMP experimental set for this study

3.วิธีการวิเคราะห์ที่ใช้ในการวิจัย

สำหรับพารามิเตอร์ที่ใช้ในการพิจารณาประสิทธิภาพจะพิจารณาจากค่าความเข้มข้นปริมาณซีโอดีทั้งหมด (TCOD) และค่าความเข้มข้นซีโอดีละลายน้ำ (SCOD) โดยอ้างอิงวิธีการวิเคราะห์ของ American Public Health Association [13] ส่วนค่า BOD วิเคราะห์โดยใช้เครื่องมือ Oxitop รุ่น Control OC 110 และใส่ตัวยับยั้งการเกิดปฏิกิริยา Nitrification สำหรับการศึกษาครั้งนี้จะทำการแบ่งสัดส่วนสารอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายได้วิธีทางชีวภาพด้วยวิธีกายภาพเคมี ซึ่งการแบ่งสัดส่วนด้วยวิธีนี้เป็นการแยกด้วยวิธีการกรอง โดยสามารถแยกสัดส่วนออกเป็นสารอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายได้อย่างรวดเร็ว (Readily biodegradable organic substrate: S_5) สารอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายได้ช้า (Slowly biodegradable organic substrate: X_5) สารอินทรีย์ละลายน้ำที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ (Inert soluble organic matter: S_1) และอนุภาคสารอินทรีย์ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ (Inert particle organic matter: X_1) จากการวิเคราะห์ค่าบีโอดี 5 วันของบีโอดีทั้งหมดและบีโอดีละลายน้ำและซีโอดีทั้งหมดและซีโอดีละลายน้ำเพื่อนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณ ดังสมการที่ 2 – 5 ตามลำดับ

$$S_5 = \text{SBOD} \quad (2)$$

$$X_5 = \text{TBOD} - \text{SBOD} \quad (3)$$

$$S_1 = \text{SCOD} - \text{SBOD} \quad (4)$$

$$X_1 = \text{TCOD} - \text{SCOD} - (\text{TBOD} - \text{SBOD}) \quad (5)$$

ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

1. ผลการวิเคราะห์สารละลายสีเมลานอยดินสังเคราะห์

ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของเมลานอยดินสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดลองมีสภาพเป็นด่าง ค่า pH อยู่ที่ 8 - 8.3 ปริมาณสารอินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบในรูปของซีโอดีทั้งหมด (TCOD) ซีโอดีละลายน้ำ (SCOD) บีโอดีทั้งหมด (TBOD₂₀) บีโอดีละลายน้ำ (SBOD₂₀) ของแข็งทั้งหมด (total Solid, TS) ของแข็งระเหยได้ (Total Volatile Solid, TVS) เหนี่ยวนำกับ 27,600 22,800 15,800 13,320 38,540 และ 35,680 มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ สำหรับค่าสัดส่วนสารอินทรีย์เมื่อแบ่งสัดส่วนสารอินทรีย์ออกเป็นซับสเตรตที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่าย (S_s) ซับสเตรตที่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ช้า (X_s) สารอินทรีย์ละลายน้ำที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ (S_i) และอนุภาคสารอินทรีย์ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ (X_i) สามารถอธิบายหลักการของกระบวนการย่อยสลายของสารอินทรีย์ได้คือ เมื่อเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์จะถูกไฮโดรไลซิสได้ให้กลายเป็นซับสเตรตที่สามารถย่อยได้ง่าย (S_s) เมื่อซับสเตรตดังกล่าวถูกย่อยโดยจุลินทรีย์ในระบบจะถูกย่อยสลายได้เร็วกว่าเพื่อนำไปใช้ในการบำรุงรักษาเซลล์ทำให้อัตราการตายของจุลินทรีย์ลดลง สำหรับซับสเตรตที่ได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ช้า (X_s) จะถูกนำไปใช้ในการเจริญเติบโต ซึ่งจากรูปที่ 2 แสดงให้เห็นว่าส่วนใหญ่สารอินทรีย์ของสารละลายสีเมลานอยดินสังเคราะห์เป็นสารละลายโดยพิจารณาจากค่า $S_s + S_i$ ของเริ่มต้นมีค่าสัดส่วนดังกล่าวคิดเป็นร้อยละ 82.61 และสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ง่าย (S_s) คิดเป็นร้อยละ 48.26 แสดงให้เห็นว่าสารละลายเมลานอยดินสังเคราะห์ดังกล่าวสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้

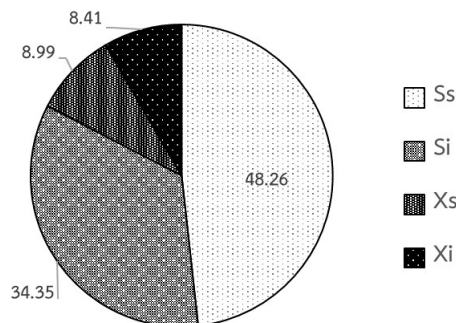


Figure 2 COD fraction of synthetic melanoidin solution

2. ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ของเมลานอยดินในระบบย่อยแอนแอโรบิก

ในการวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุผสม ชุดการทดลองควบคุมสำหรับศึกษากระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพแบบแอนแอโรบิกสำหรับความเข้มข้นของสารเมลานอยดินสังเคราะห์ ซึ่งมีค่าความเข้มข้นของสารเมลานอยดินอยู่ที่ 5,00, 10,000 15,000 20,000 และ 25,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีผลการศึกษาดังแสดงในตารางที่ 1 และมีรายละเอียดผลการศึกษาดังนี้

2.1 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

จากการทดลองค่าพีเอชของวัสดุผสมก่อนการทดลองในทุกอัตรามีค่าอยู่ในช่วง 7-7.21 ซึ่งค่าพีเอช

6.8 -7.2 ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทน [14] ถ้าค่าพีเอชสูงหรือต่ำกว่านี้ประสิทธิภาพของระบบจะลดลงและถ้าพีเอชต่ำกว่า 6.6 หรือสูงกว่า 7.6 ประสิทธิภาพของระบบจะลดลงอย่างรวดเร็ว เพราะที่สภาวะนี้จะเป็นอันตรายต่อจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนทำให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายกรดอินทรีย์ระเหยง่ายของจุลินทรีย์กลุ่มนี้ลดลง ส่งผลให้ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายเกิดการสะสมเพิ่มมากขึ้น ค่าพีเอชจึงลดลงอย่างรวดเร็ว ถ้าพีเอชต่ำกว่า 6.5 จะทำให้ Methanogenic bacteria หยุดการเจริญเติบโต จากการวิเคราะห์ค่าพีเอชของวัสดุหมักเมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่าในแต่ละอัตราส่วนผสมมีค่าพีเอชลดลงเมื่อเทียบกับค่าพีเอชก่อนการทดลอง อาจเนื่องมาจากในช่วงดำเนินการทดลองจุลินทรีย์ชนิดสร้างกรดในระบบจะย่อยสลายสารอินทรีย์เปลี่ยนเป็น VFA เกิดขึ้นในระบบโดยที่ความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน 5,000 10,000 15,000 20,000 และ 25,000 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าพีเอชหลังการทดสอบเท่ากับ 8.05 7.82 6.81 5.16 และ 4.86 ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าและต่ำกว่าช่วงค่าที่เหมาะสม แต่เมื่อพิจารณาในส่วนของอัตราส่วน VFA/Alkalinity ร่วมด้วยพบว่าที่ความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน 5,000 มิลลิกรัมต่อลิตรมีค่าต่ำกว่าค่าที่แนะนำคือ 0.4-0.8 แสดงให้เห็นว่าในระบบย่อยสลายแบบแอนแอโรบิกเกิดบัฟเฟอร์สูงจึงไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของจุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทน ในขณะที่ความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน 15,000-25,000 มิลลิกรัมต่อลิตรมีค่าสูงกว่าค่าที่แนะนำจึงส่งผลกระทบต่อการทำงานของจุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทน

Table 1 Characteristics of organic substances on inlet and outlet for the BMP test

Parameter		Concentration of synthetic melanoidin (mg/l)				
		5,000 (N=3)	10,000 (N=3)	15,000 (N=3)	20,000 (N=3)	25,000 (N=3)
pH	Inlet	7.00	7.10	7.13	7.15	7.21
	Outlet	8.05	7.82	6.81	5.16	4.86
Alkalinity (mg/l as CaCO ₃)	Inlet	1,100	1,100	1,100	1,100	1,150
	Outlet	500	650	800	650	700
VFA (mg/l as CH ₃ COOH)	Inlet	935	584	623	584	623
	Outlet	155.84	506.49	2,064.94	2,454.55	2,805.3
TCOD (mg/l)	Inlet	88,000	11,600	14,800	16,800	20,400
	Outlet	2,800	3,600	7,600	9,200	12,400
SCOD (mg/l)	Inlet	4,400	7,800	8,400	10,800	12,800
	Outlet	2,400	3,000	4,400	7,400	8,800
Total solids, TS (mg/l)	Inlet	7,580	10,800	13,813	13,606	15,806
	Outlet	2,800	3,195	4,980	7,685	8,890
Total volatile solids, TVS (mg/l)	Inlet	5,466.67	8,280	11,100	11,560	13,266
	Outlet	1,420	1,970	3,555	6,200	7,430

2.2 ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอทีในระบบย่อยแอนแอโรบิก

จากการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดค่า TCOD และ SCOD สูงสุดที่ความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เนื่องจากในการศึกษานี้เป็นการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบกะ (Batch) จึงมีการเติมวัสดุหมักเพียงครั้งเดียวในวันแรกที่เริ่มเดินระบบและในแต่ละ Batch มีการเติมเมลานอยดินสังเคราะห์ปริมาณที่แตกต่างกันซึ่งหมายถึงการเพิ่มปริมาณสารอินทรีย์ที่แตกต่างกันด้วย โดยปริมาณ

สารอินทรีย์ในรูป TCOD และ SCOD จะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามปริมาณเมลานอยดินสังเคราะห์ที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นเมื่อจุลินทรีย์ทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยกระบวนการต่างๆเพื่อเปลี่ยนเป็นก๊าซชีวภาพและนำไปใช้ในการเจริญเติบโตเพื่อสร้างเซลล์ใหม่ ทำให้ปริมาณสารอินทรีย์ถูกนำไปใช้อย่างต่อเนื่อง โดยจุลินทรีย์จะใช้สารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ง่ายก่อนจึงจะย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ย่อยได้ยาก ซึ่งสอดคล้องกับผลอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพในช่วงแรกของการศึกษา อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นทุกชุดการทดลองของการศึกษา หลังจากนั้นจะมีการเกิดก๊าซชีวภาพลดลงในทุกชุดการทดลองโดยอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพเริ่มช้าลง ทั้งนี้เนื่องมาจากมีปริมาณสารอินทรีย์เหลือน้อยลงและย่อยสลายยากเพิ่มสูงขึ้น ในส่วนของประสิทธิภาพของการบำบัด TCOD และ SCOD ของการศึกษาทุก Batch อยู่ในช่วงร้อยละ 40 - 80 แสดงดังรูปที่ 3

2.3 ประสิทธิภาพการของแข็งในระบบย่อยแอมโมโรบิก

จากการศึกษาพบว่าประสิทธิภาพการกำจัดค่าของแข็งในรูป TS และ VS มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณความเข้มข้นของเมลานอยดินสังเคราะห์ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งที่ความเข้มข้นของเมลานอยดินสังเคราะห์ที่มีปริมาณค่า TS สูงจะต้องใช้ระยะเวลาในการเกิดกระบวนการ Hydrolysis เมลานอยดินสังเคราะห์เป็นสารอินทรีย์ที่ยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ดังนั้นในการทดลองอัตราส่วนที่มีการเติมเมลานอยดินสังเคราะห์ที่สูงจะส่งผลทำให้ระยะเวลาในการย่อยสลายนาน สอดคล้องกับอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพที่มีการเติมปริมาณความเข้มข้นของเมลานอยดินสังเคราะห์ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากวัตถุดิบที่เข้าระบบย่อยแอมโมโรบิกอยู่ในระบบนานทำให้เกิดกระบวนการ hydrolysis ได้นานและสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้เพิ่มขึ้น เมื่อระยะเวลาผ่านไปปริมาณสารอินทรีย์และ TS จะลดลงเนื่องจากถูกจุลินทรีย์ย่อยสลายสารอาหารอย่างต่อเนื่องทำให้ปฏิกิริยาเกิดขึ้นช้าลงไปเรื่อยๆ เมื่อปริมาณสารอินทรีย์ในระบบลดลงจึงไม่เพียงพอต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในระบบ สำหรับประสิทธิภาพการกำจัด TS และ VS ที่ความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน 10,000 mg/L มีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งสูงสุดคิดเป็นร้อยละ 70.46 และ 76.21 ตามลำดับแสดงดังรูปที่ 4

3. ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพสะสมจากการย่อยสลายในระบบแอมโมโรบิก

สำหรับการย่อยสลายในระบบแอมโมโรบิกที่สภาวะความเข้มข้นของสารเมลานอยดินที่ต่างกัน จากผลการศึกษาพบว่าปริมาณก๊าซชีวภาพสูงสุดเกิดที่สภาวะความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยสามารถเกิดก๊าซชีวภาพประมาณ 0.162 ลิตรต่อกิโลกรัม ซีไอทีที่ถูกกำจัด ($\text{L/kg COD}_{\text{remove}}$) จากรูปที่ 5 ที่ความเข้มข้นของสารเมลานอยดินเพิ่มขึ้น ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพจะเพิ่มขึ้น และเมื่อความเข้มข้นของเมลานอยดินที่มากกว่า 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตรปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพจะลดลงเรื่อยๆ เนื่องจากความเข้มข้นของเมลานอยดินส่งผลกระทบต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ เนื่องจากจะยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพ สารเมลานอยดินเป็นสารที่ย่อยสลายได้ยากด้วยกระบวนการทางชีวภาพ เนื่องจากสารเมลานอยดินมีคุณสมบัติในการยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก [2] โดยสารเมลานอยดินจะยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการสลายโปรตีนของจุลินทรีย์รวมถึงมีคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระ [15, 16] และมีความเป็นไปได้ว่าสารเมลานอยดินเป็นสารที่ทำให้เกิดพิษต่อสารพันธุกรรมเป็นผลมาจากสารประกอบเชิงซ้อนของ melanoidin-metal เช่น Cu^{2+} เนื่องจากความรุนแรงของโลหะที่ลดรูปในสารประกอบเชิงซ้อนสามารถฉีกเกลียวดีเอ็นเอได้ทำให้เกิดความเป็นพิษต่อพันธุกรรมในเซลล์สิ่งมีชีวิต [17] จึงก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อสิ่งมีชีวิตขนาดเล็ก [2]

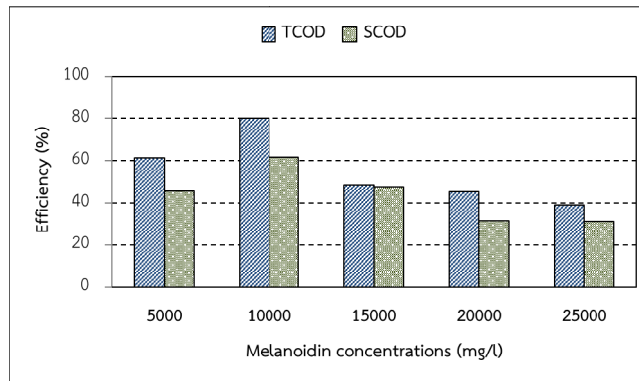


Figure 3 Efficiency of COD removal at various melanoidin concentrations

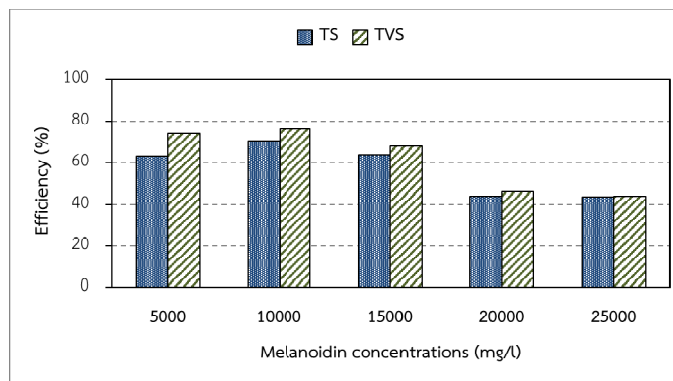


Figure 4 Efficiency of Solid removal at various melanoidin concentrations

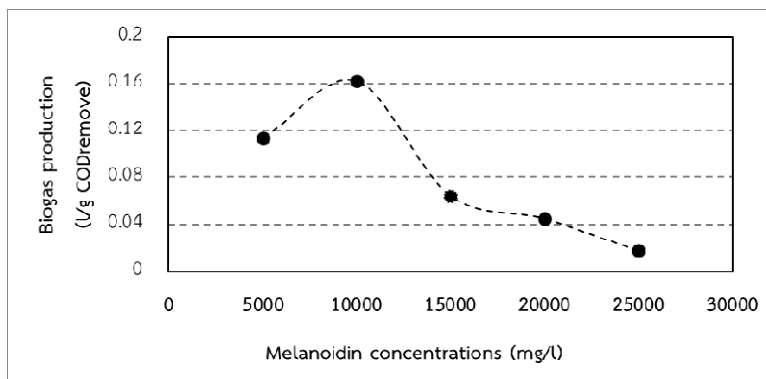


Figure 5 Potential of biogas generation at various melanoidin concentrations

สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาผลของความเป็นพิษของสารเมลานอยดินโดยใช้วิธีการประเมินศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทน (Biochemical Methane Potential, BMP) ที่ความเข้มข้นของสารเมลานอยดินในช่วง 5,000-25,000 มิลลิกรัมต่อลิตร จากผลการทดลองพบว่าสภาพแวดล้อมในระบบย่อยแอนแอโรบิกมีค่าพีเอชเฉลี่ยอยู่ในช่วง 4.86-8.05 ค่า Alkalinity เฉลี่ยอยู่ในช่วง 500-700 mg/l as CaCO_3 และค่า VFA เฉลี่ยอยู่ในช่วง 155.84-2805.3 mg/l as CH_3COOH โดยที่สัดส่วนค่า VFA/Alkalinity เฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.3-4.0 สำหรับประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในระบบย่อยแอนแอโรบิกพบว่าสามารถกำจัดค่า TCOD อยู่ในช่วงร้อยละ 39.21-80 ค่า SCOD อยู่ในช่วงร้อยละ 31.25-61.54 และค่า TS อยู่ในช่วงร้อยละ 43.76-70.42 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพพบว่าศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนอยู่ในช่วง 0.017-0.162 $\text{L/kg COD}_{\text{remove}}$ และจากการประเมินความเป็นพิษของสารเมลานอยดินพบว่าที่ความเข้มข้นของสารเมลานอยดิน 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตรมีค่าศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดเท่ากับ 0.162 $\text{L/kg COD}_{\text{remove}}$ โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัด TCOD, SCOD, TS และ VS เท่ากับร้อยละ 80, 61.54, 70.42 และ 76.21 ตามลำดับ เมื่อความเข้มข้นของเมลานอยดินมากกว่า 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพลดลงเนื่องจากเมลานอยดินมีคุณสมบัติในการยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ นางสาวเบญจมาภรณ์ เหลียวสูง นายกิตติศักดิ์ พันธุ์สุข และนางสาวสุกัญญา เทพรักษา นักศึกษาที่มวิจัยที่คอยช่วยเหลือในการทดลองครั้งนี้จนสำเร็จจุลวง และขอขอบคุณผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่คอยแนะนำแนวทางอันเป็นประโยชน์ทั้งทางด้านวิชาการและด้านการทำวิจัยจนทำให้บทความฉบับนี้มีความสมบูรณ์

References

- [1] Broadhurst, H. A. (2002). *Modeling Adsorption of Cane Sugar Solution Colorant in Packed-Bed Ion Exchangers*, (Master thesis, Louisiana State University).
- [2] Ojijo, V.O., et al. (2009). Adsorption of Melanoidin on Activated Carbon: Equilibrium, Kinetics and Thermodynamics Studies. In *International Conference on Chemical Engineering and Technology 2009* (p.285-294). August, 2009, Singapore.
- [3] Liakos, T. I. & Lazaridis, N. K. (2014). Melanoidins removal from simulated and real wastewaters by coagulation and electro-flotation. *Chemical Engineering Journal*, 242, 269–272.
- [4] Coca, M., et al. (2004). Study of colored components formed in sugar beet processing. *Food Chemistry*, 86(3), 421-433.
- [5] Gonzalez, T., et al. (2000). Pyrolysis/gas chromatography/mass spectrometry monitoring of fungal-biotreated distillery wastewater using *Trametes* sp.I-62 (CECT 20197). *Rapid Communications in Mass Spectrometry*, 14(15), 1417-1424.
- [6] Kaushik, et al. (2017). Activated carbon from sugarcane bagasse ash for melanoidins

- p>recovery.
- Journal of Environmental Management*
- , 200, 29-34.
- [7] Jun, Y., et al. (2019). Influence of melanoidins on acidogenic fermentation of food waste to produce volatility fatty acids. *Bioresource Technology*, 284, 121-127.
- [8] Bernardo, E. C., et al. (1997). Decolorization of molasses wastewater using activated carbon prepared from cane bagasse. *Carbon*, 35(9), 1217-1221.
- [9] Yaylayan, V. A. & Kaminsky, E. (1998). Isolation and structural analysis of Maillard polymers: caramel and melanoidins formation in glycine/glucose model system. *Food Chemistry*, 63(1), 25-31.
- [10] Kotsiopoulou, et al. (2016). Melanoidin chromophores and betaine osmoprotectant separation from aqueous solutions. *Journal of Molecular Liquids*, 216, 496-502.
- [11] Liakos, T. I., & Lazaridis, N. K. (2016). Melanoidin removal from molasses effluents by adsorption. *Journal of Water Process Engineering*, 10, 154-164.
- [12] Giovanni, E., et al. (2012). Bio-Methane Potential Tests To Measure The Biogas Production From The Digestion and Co-Digestion of Complex Organic Substrates. *The Open Environmental Engineering Journal*, 5, 1-8.
- [13] APHA, AWWA, and WEF. (2017). *Standard methods for the examination of the water and wastewater*. 23rd ed. Washington D.C.: American Public Health Association.
- [14] Ramezani, A., et al. (2011). Removal of melanoidin from molasses spent wash using fly ash–clay adsorbents. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 28, 1035–1041.
- [15] Borrelli, R. C., et al. (2002). Characterisation of melanoidins from a glucose–glycine model system. *European Food Research and Technology*, 215, 210–215.
- [16] Kim, J. S., & Lee, Y. S. (2009). Enolization and racemization reactions of glucose and fructose on heating with amino-acid enantiomers and the formation of melanoidins as a result of the Maillard reaction. *Amino Acids*, 36(3), 465-474.
- [17] Cammerer, B., et al. (2002). Carbohydrate structures as part of the melanoidin skeleton. *International Congress Series*, 1245, 269-273.