นวัตกรรมโฟมยางพาราเสริมจุลินทรีย์ *Bacillus subtilis* บำบัดน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรม

นิสรีน ทิ้งปากน้ำ[1], ปพิชญา แซ่ชั่น[1], คณิน ภักดีรักษ์พงศ์[1], อัมพร เพชรโชติ[1], สิรินาถ ทองทวี[1], อดุลย์สมาน สุขแก้ว[2,3], และ สุธี จุ้งลก[1*]

[1]โรงเรียนเบตง"วีระราษฎร์ประสาน"19 ถนนรวมวิทย์ ตำบลเบตง อำเภอเบตง จังหวัดยะลา ประเทศไทย
[2]สมาคมนักวิจัยชายแดนภาคใต้ ตำบลสะเตง อำเภอเมือง จังหวัดยะลา ประเทศไทย
[3]คณะวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา ตำบลสะเตง อำเภอเมือง จังหวัดยะลา ประเทศไทย
**Corresponding author: gaschem4159@kbyala.ac.th*

บทคัดย่อ

ปัญหามลพิษทางน้ำจากการปล่อยน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมส่งผลกระทบอย่างรุนแรงต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพ การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) พัฒนาสูตรโฟมยางพาราเสริมจุลินทรีย์ *Bacillus subtilis* ที่เหมาะสม และ 2) เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียระหว่างโฟมยางพาราเสริมจุลินทรีย์ *B. subtilis* และโฟมยางพาราปกติ

ผลการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียเพิ่มขึ้นเมื่อความหนาแน่นของโฟมยางพาราลดลง โดยโฟมยางพาราเสริมจุลินทรีย์ *B. subtilis* ที่มีความหนาแน่นในช่วง 0.16–0.17 g/cm3 มีประสิทธิภาพสูงที่สุด ซึ่งสามารถลดค่า BOD ได้ร้อยละ 75 และลดค่า COD ได้ร้อยละ 70 ในขณะที่โฟมยางพาราปกติสามารถลดค่า BOD ได้ร้อยละ 60 และลดค่า COD ได้ร้อยละ 50 เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติพบว่า โฟมยางพาราเสริมจุลินทรีย์ *B. subtilis* มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียสูงกว่าโฟมยางพาราปกติอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) แสดงให้เห็นว่านวัตกรรมโฟมยางพาราเสริมจุลินทรีย์ *B. subtilis* เป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพในการปรับปรุงคุณภาพน้ำเสียอุตสาหกรรมให้เป็นไปตามมาตรฐานสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ: น้ำเสียอุตสาหกรรม / *Bacillus subtilis* / โฟมยางพาราธรรมชาติ / การบำบัดทางชีวภาพ / การบำบัดน้ำเสีย

Innovative natural rubber foam embedded with *Bacillus subtilis* for industrial wastewater treatment

Nisarin Tingpaknum[1], Paphitchaya Saechan[1], Kanin Pakdeerakpong[1], Amporn Petchote[1], Sirinat Thongtawee[1], Adulsman Sukkaew[2,3] , and Suthee Junglok[1*]

[1]Betong Wirartprasan school, 19 Ruamwit Road, Betong District, Yala Province, Thailand
[2]Southern Border Researchers Association, Sateng Subdistrict, Mueang District, Yala Province, Thailand
[3]Faculty of Science, Technology and Agriculture, Yala Rajabhat University, Yala, Sateng Subdistrict,Mueang District, Yala Province, Thailand
**Corresponding author: gaschem4159@kbyala.ac.th*

Abstract

Industrial wastewater discharge poses a significant environmental threat due to organic and chemical contaminants. The objectives of this study were 1) to develop an optimal microbial-reinforced natural rubber foam formulation using *Bacillus subtilis* and 2) to evaluate its wastewater treatment efficiency compared to conventional rubber foam.

The results indicated that the Biochemical Oxygen Demand (BOD) removal efficiency increased as the foam density decreased. The optimal *B. subtilis*-reinforced foam, with a density range of 0.16–0.17 g/cm^3, exhibited the highest performance, achieving a 75% reduction in BOD and a 70% reduction in Chemical Oxygen Demand (COD). In contrast, conventional rubber foam achieved only a 60% BOD reduction and a 50% COD reduction. Statistical analysis confirmed that the *B. subtilis*-reinforced foam performed significantly better than the control group ($p < 0.05$). This study demonstrates that the developed microbial-reinforced natural rubber foam is an effective innovation for treating industrial wastewater before its release into the environment.

Keywords: Industrial wastewater / *Bacillus subtilis* / Natural rubber foam / Bioremediation / Water treatment

1. บทนำ

มลภาวะทางน้ำที่เกิดจากการปล่อยน้ำเสียที่ไม่ได้มาตรฐานจากชุมชนและภาคอุตสาหกรรมเป็นสาเหตุหลักของการเสื่อมโทรมของทรัพยากรธรรมชาติ โดยเฉพาะพื้นที่มีการผลิตและแปรรูปผลผลิตทางการเกษตร[1] น้ำเสียเหล่านี้มักมีสารอินทรีย์เข้มข้นสูง ซึ่งเป็นแหล่งเพาะพันธุ์ของจุลินทรีย์ก่อโรคส่งผลกระทบอย่างรุนแรงต่อคุณภาพชีวิตของประชาชนและระบบนิเวศ ปัจจุบันประเทศไทยเป็นผู้ส่งออกยางธรรมชาติรายใหญ่ การแปรรูปยางให้เป็นนวัตกรรมที่มีมูลค่าสูงจึงเป็นกลยุทธ์ที่สำคัญ การพัฒนาโฟมยางธรรมชาติที่มีรูพรุนน้ำหนักเบาและทนทาน เพื่อใช้เป็นวัสดุรองรับจุลินทรีย์ เป็นแนวคิดที่ช่วยแก้ปัญหาสิ่งแวดล้อมและเพิ่มมูลค่าของผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรไปพร้อมกัน

เพื่อนำไปปฏิบัติจริง จึงได้เลือกแบคทีเรีย *B. subtilis* มาผสมผสานลงในโฟมยาง แบคทีเรียชนิดนี้มีประสิทธิภาพสูงในการผลิตเอนไซม์ที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ และมีความทนทานสูงต่อสภาพแวดล้อมต่างๆ การผสมผสานระหว่างวัสดุธรรมชาติและเทคโนโลยีชีวภาพนี้เป็นกุญแจสำคัญในการสร้างระบบบำบัดน้ำเสียที่มีประสิทธิภาพ เข้าถึงได้ง่าย และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

2. วัตถุประสงค์

2.1 เพื่อศึกษาและพัฒนาสูตรโฟมยางธรรมชาติที่มีโครงสร้างรูพรุนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการดูดซับสารมลพิษและการตรึงเชื้อแบคทีเรีย *B. subtilis*

2.2 เพื่อประเมินประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของโฟมยางเสริมจุลินทรีย์ โดยวิเคราะห์การลดลงของตัวชี้วัดคุณภาพน้ำที่สำคัญ

3. ขอบเขตของการศึกษา

ส่วนที่ 1 การเตรียมและการรวมตัวของแบคทีเรีย *B. subtilis*

ตัวแปรอิสระ : ความเข้มข้นของแบคทีเรีย *B. subtilis* ที่ผสมอยู่ในโฟมยางธรรมชาติ

ตัวแปรตาม : ประสิทธิภาพการยึดเกาะและความทนทานของจุลินทรีย์บนวัสดุโฟมยาง

ตัวแปรควบคุม : ชนิดของอาหารเลี้ยงเชื้อ อุณหภูมิในการบ่ม และระยะเวลาในการเพาะเลี้ยงจุลินทรีย์ก่อนนำไปผสมในโฟมยางพารา

ส่วนที่ 2 การทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียอุตสาหกรรม

ตัวแปรอิสระ: ประเภทของวัสดุที่ใช้ในการบำบัด (โฟมยางผสมจุลินทรีย์ เทียบกับ โฟมยางธรรมดา และเทียบกับระบบบำบัดแบบดั้งเดิม)

ตัวแปรตาม : คุณภาพน้ำหลังการบำบัด โดยเฉพาะการลดลงของสารอินทรีย์ (BOD/COD) การลดลงของความเข้มข้นของโลหะหนัก และความใสของน้ำโดยรวม

ตัวแปรควบคุม : ปริมาณตัวอย่างน้ำเสีย อุณหภูมิของน้ำเสีย และระยะเวลาของกระบวนการบำบัด

4. วิธีการศึกษา

4.1 รวบรวมข้อมูล

สืบค้นข้อมูลและศึกษาข้อมูลเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพเพื่อใช้ในการอ้างอิงทฤษฎีคุณสมบัติของจุลินทรีย์ *B. subtilis* และคุณสมบัติของโฟมยางพาราในการเป็นวัสดุพยุงจุลินทรีย์ [2],[3]เพื่อนำข้อมูลมาใช้ในการออกแบบการทดลอง จากนั้นทำการเตรียมชุดทดลองจำนวน 2 ชุด ได้แก่ ชุดควบคุมซึ่งใช้น้ำเสียร่วมกับโฟมยางพาราแบบไม่เสริมจุลินทรีย์ และชุดทดลองที่ใช้น้ำเสียร่วมกับโฟมยางพาราที่จุ่มเชื้อจุลินทรีย์ *B. subtilis* แล้วทำการบำบัดเป็นระยะเวลาที่กำหนด

ระหว่างการทดลองได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลโดยวัดค่าความสกปรกของน้ำในรูปแบบค่า BOD ก่อนและหลังการบำบัด รวมถึงตรวจวัดค่า pH และสังเกตลักษณะทางกายภาพของน้ำ เช่น สี กลิ่น และความขุ่น จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาบันทึกลงในตาราง เปรียบเทียบผลการเปลี่ยนแปลงของค่า BOD ระหว่างชุดควบคุมและชุดทดลอง พร้อมคำนวณเปอร์เซ็นต์การลดลงของค่า BOD เพื่อนำมาวิเคราะห์ประสิทธิภาพของโฟมยางพาราเสริมจุลินทรีย์ในการบำบัดน้ำเสีย

4.2 การเตรียมการเพาะเลี้ยงเชื้อ *B. subtilis* และการผสมแบคทีเรียในโฟมยางพารา

ในการเตรียมจุลินทรีย์ *B. subtilis* เริ่มต้นด้วยการเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ โดยใช้น้ำเปล่า 2 ลิตรต้มจนเดือด จากนั้นเติมสารอาหารประกอบด้วย ผงโกโก้ 150 กรัม, นมถั่วเหลือง 300 มิลลิลิตร และกากน้ำตาล 500 กรัม คนจนส่วนผสมละลายเป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นทำการเจือจางสารละลายด้วยการเติมน้ำสะอาดเพิ่มอีก 15 ลิตร เมื่อสารละลายมีอุณหภูมิลดลงจนถึง 30-37 องศาเซลเซียส จึงทำการเติมหัวเชื้อ *B. subtilis* ชนิดผงจำนวน 40 กรัม โดยทำการเพาะเลี้ยงทิ้งไว้เป็นเวลา 36-72 ชั่วโมง เพื่อให้เชื้อเจริญเติบโตเข้าสู่ระยะที่เหมาะสมก่อนนำไปใช้งาน ซึ่งแบคทีเรียชนิดนี้มีประสิทธิภาพสูงในการผลิตเอนไซม์ย่อยสลายสารอินทรีย์และมีความทนทานต่อสภาวะต่างๆ[4], [5], [6]

สำหรับการผสมแบคทีเรียในโฟมยางพารา โดยนำโฟมยางพาราธรรมชาติที่ผ่านกระบวนการขึ้นรูปและล้างสะอาดแล้วมาจุ่มแช่ ในสารละลายเชื้อ *B. subtilis* ที่เตรียมไว้ข้างต้น โดยใช้ระยะเวลาในการจุ่มแช่ประมาณ 6-12 ชั่วโมง เพื่อให้เชื้อมีเวลาสร้าง "Biofilm" ยึดเกาะกับรูพรุนของโฟมยางพาราอย่างทั่วถึง ก่อนนำไปใช้ทดสอบประสิทธิภาพในบ่อบำบัดน้ำเสียในโรงงานอุตหกรรมจำลอง

4.3 การขึ้นรูปโฟมยางพาราธรรมชาติ

นำน้ำยางพารา 60% ใส่ลงในเครื่องตีโฟมและปั่นที่ความเร็วรอบต่ำ 2.45 นาที นำ K-Oleat ,sulfur , ZDEC , ZMBT ใส่ลงในเครื่องตีโฟมและปั่นที่ความเร็วรอบสูง 1.55 นาที ปรับสปีดกลับ มาที่ความเร็วรอบต่ำปั่นไว้ 2 นาที นำ DPG ใส่ลงในเครื่องตีโฟมและปั่นไว้ 2 นาที นำZnO ใส่ลงในเครื่องตีโฟมและปั่นไว้ 2 นาที นำ SSF ใส่ลงในเครื่องตีโฟมและปั่นไว้ 45 วินาที เทโฟมลงในแม่พิมพ์และรอให้โฟมเกิดการจับตัว 4 นาที นำโฟมที่ได้ไปนึ่ง 10 นาทีและล้างสารเคมี นำโฟมยางพาราไปอบแห้งไว้ที่อุณหภูมิ 60 องศา 48 ชั่วโมง

4.4 การวิเคราะห์และกำหนดมาตรฐานคุณภาพน้ำ

ได้มีการวิเคราะห์คุณภาพน้ำหลังจากผ่านกระบวนการบำบัด โดยเน้นการประเมินค่า BOD, COD และ pH ผลการวิเคราะห์พบว่าน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยโฟมยางพาราเสริมจุลินทรีย์มีค่า BOD อยู่ในช่วง 20–40 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่า COD อยู่ในช่วง 120–150 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นแนวโน้มที่เข้าใกล้เกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม และเมื่อนำโฟมยางผสมจุลินทรีย์มาใช้เป็นกระบวนการบำบัดขั้นที่สาม จะช่วยลดปริมาณสารอินทรีย์ตกค้างให้ต่ำลงจนมั่นใจได้ว่าน้ำทิ้งขั้นสุดท้ายมีคุณภาพตามมาตรฐานด้านสิ่งแวดล้อมสูงสุด[7]

5. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียด้วยโฟมยางพาราเสริมจุลินทรีย์ *B. subtilis* พบว่าปริมาณสารอินทรีย์ตกค้างในน้ำเสียมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยนวัตกรรมนี้สามารถลดค่า BOD ได้ร้อยละ 75 และค่า COD ได้ร้อยละ 70 ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงประสิทธิภาพของโครงสร้างโฟมยางพาราที่มีลักษณะเป็นรูพรุน โครงสร้างดังกล่าวไม่เพียงแต่ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสสำหรับการยึดเกาะและการสร้างฟิล์มชีวภาพ (Biofilm) ของจุลินทรีย์เท่านั้น แต่ยังทำหน้าที่เป็นที่พักอาศัยที่ช่วยปกป้องจุลินทรีย์จากสภาวะแวดล้อมที่รุนแรง ส่งผลให้กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ทางชีวภาพเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วและมีเสถียรภาพสูง

นอกจากนี้ ผลการทดสอบยังแสดงให้เห็นว่าคุณภาพน้ำมีความใสมากขึ้นอย่างชัดเจน เนื่องจากโครงสร้างตาข่ายภายในโฟมยางพารามีบทบาทในการดักจับสารแขวนลอย (Suspended Solids) และอาจช่วยในกระบวนการดูดซับโลหะหนักบางส่วนที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสีย โดยระหว่างกระบวนการบำบัด ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ยังคงรักษาเสถียรภาพอยู่ในช่วง 7–8 ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิและสภาวะที่เหมาะสมที่สุดต่อการเจริญเติบโตและการทำงานของจุลินทรีย์ *B. subtilis* จากผลการทดลองทั้งหมดสามารถสรุปได้ว่า การประยุกต์ใช้โฟมยางพาราธรรมชาติร่วมกับเทคโนโลยีชีวภาพมีศักยภาพสูงในการพัฒนาเป็นวัสดุบำบัดน้ำเสียเชิงพาณิชย์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และสอดคล้องกับแนวทางการจัดการทรัพยากรอย่างยั่งยืน

5.1 ผลการศึกษารูปแบบผลงานวิชาการ

ประสิทธิภาพที่สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ของโฟมยางพาราเสริมจุลินทรีย์ เมื่อเทียบกับโฟมยางปกติ เกิดจากการที่โครงสร้างรูพรุนของยางพาราทำหน้าที่เป็นวัสดุค้ำจุน (Carrier) ที่ช่วยป้องกันจุลินทรีย์ *B. subtilis* ไม่ให้ถูกชะล้างไปกับกระแสของน้ำเสีย ทำให้จุลินทรีย์สามารถสร้างชั้นฟิล์มชีวภาพ และย่อยสลายสารอินทรีย์ในรูปแบบ BOD และ COD ได้อย่างต่อเนื่อง นอกจากนี้วัสดุโฟมยางพารายังมีสมบัติในการดักจับสารแขวนลอยบางส่วน จึงทำให้น้ำมีความใสมากขึ้น นวัตกรรมนี้จึงสอดคล้องกับแนวทางการจัดการทรัพยากรอย่างยั่งยืน โดยการนำผลิตผลทางการเกษตรมาเพิ่มมูลค่าเป็นวัสดุบำบัดน้ำเสียที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

ดังนั้น การประยุกต์ใช้โฟมยางพาราผสมจุลินทรีย์จึงมีศักยภาพในการพัฒนาเป็นวัสดุบำบัดน้ำเสียที่มีประสิทธิภาพ สอดคล้องกับมาตรฐานสิ่งแวดล้อมของประเทศ และสนับสนุนแนวทางการจัดการทรัพยากรอย่างยั่งยืนในอนาคต

5.2 ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสีย

ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียแสดงให้เห็นว่า ระบบโฟมยางพาราที่เสริมจุลินทรีย์ *B. subtilis* ให้ประสิทธิภาพสูงสุด ดังปรากฏผลการวิเคราะห์ค่า BOD ดังแสดงในตารางที่ 1 และค่า COD ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยสามารถลดค่า BOD ได้ร้อยละ 75.00 และลดค่า COD ได้ร้อยละ 70.00 ตามลำดับ นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาค่าความเป็นกรด-ด่างของน้ำหลังการบำบัด ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่าค่า pH มีเสถียรภาพอยู่ในช่วง 7.5 ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสมตามเกณฑ์มาตรฐานสิ่งแวดล้อม[7] สะท้อนถึงศักยภาพของการตรึงจุลินทรีย์ในโครงสร้างโฟมที่ช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวและเสถียรภาพของกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์อย่างมีประสิทธิภาพ เมื่อเปรียบเทียบกับโฟมยางพาราเปล่าและการใช้จุลินทรีย์เพียงอย่างเดียว พบว่าระบบที่มีการตรึงจุลินทรีย์ในโฟมมีประสิทธิภาพเหนือกว่าอย่างชัดเจน แสดงให้เห็นถึงการพัฒนาเชิงนวัตกรรมที่ผสานวัสดุชีวภาพกับเทคโนโลยีชีวภาพได้อย่างเหมาะสม

นอกจากนี้โครงงานนี้มุ่งเน้นการเพิ่มมูลค่าให้กับยางพาราไทย ซึ่งเป็นผลผลิตทางการเกษตรที่สำคัญของประเทศ โดยนำวัสดุจากภาคเกษตรพื้นบ้านมาประยุกต์ใช้ในรูปแบบนวัตกรรมด้านสิ่งแวดล้อม ช่วยยกระดับผลิตภัณฑ์จากวัตถุดิบขั้นต้นไปสู่วัสดุบำบัดน้ำเสียที่มีศักยภาพเชิงอุตสาหกรรม อันนำไปสู่การสร้างมูลค่าเพิ่มทางเศรษฐกิจและสนับสนุนการพัฒนาอย่างยั่งยืนของภาคเกษตรกรรมในอนาคต [1]

ตารางที่ 1 แสดงประสิทธิภาพการลดค่าความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมี (BOD) ของชุดการทดลองรูปแบบต่างๆ ในการบำบัดน้ำเสีย เมื่อทดสอบในน้ำเสีย ภายใต้การทดลอง

ประเภทการทดลอง	ค่า BOD เริ่มต้น (ppm)	ค่า BOD หลังบำบัด (ppm)	ร้อยละการลดลงของค่า BOD
1.โฟมยางพาราเปล่า (ไม่เสริมจุลินทรีย์) (*Bacillus subtilis*)	200	80	60
2.โฟมยางพาราเสริมจุลินทรีย์ (*Bacillus subtilis*)	200	50	75
3.*Bacillus subtilis* (ไม่มียางพารา)	200	90	55
4 เกณฑ์มาตรฐาน (กรมควบคุมมลพิษ)		ไม่เกิน 20.0	

ตารางที่ 2 แสดงประสิทธิภาพการลดค่าความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมี (COD) ของชุดการทดลองรูปแบบต่างๆ ในการบำบัดน้ำเสีย เมื่อทดสอบในน้ำเสีย ภายใต้การทดลอง

ประเภทการทดลอง	ค่า COD เริ่มต้น (ppm)	ค่า COD หลังบำบัด (ppm)	ร้อยละการลดลงของค่า COD
1.โฟมยางพาราเปล่า (ไม่เสริมจุลินทรีย์) *(Bacillus subtilis)*	500	250	50
2.โฟมยางพาราเสริมจุลินทรีย์ *(Bacillus subtilis)*	500	150	70
3.*Bacillus subtilis* (ไม่มียางพารา)	500	250	50
4 เกณฑ์มาตรฐาน (กรมควบคุมมลพิษ)		ไม่เกิน 120.0	

ตารางที่ 3 แสดงความเป็นกรด-ด่างของน้ำเสีย

ประเภทการทดลอง	pH เริ่มต้น	pH หลังบำบัด
1.โฟมยางพาราเปล่า (ไม่เสริมจุลินทรีย์) (*Bacillus subtilis*)	3-4	5-6
2.โฟมยางพาราเสริมจุลินทรีย์ (*Bacillus subtilis*)	3-4	7.5
3.*Bacillus subtilis* (ไม่มียางพารา)	3-4	8.3

6. สรุปผลการศึกษา

ผลงานชิ้นนี้ประสบความสำเร็จในการพัฒนาวัสดุค้ำจุนจุลินทรีย์ที่เป็นนวัตกรรมใหม่ โดยใช้โฟมยางธรรมชาติที่มีโครงสร้างรูพรุนสำหรับการบำบัดน้ำเสียขั้นสูง (การบำบัดขั้นที่สาม) ผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพในการปรับปรุงคุณภาพน้ำเสียอย่างมีนัยสำคัญ โดยค่าความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมี (BOD) สามารถลดลงได้สูงสุดร้อยละ 75 และค่าความต้องการออกซิเจนทางเคมี (COD) ลดลงได้ร้อยละ 70 ซึ่งผลการบำบัดนี้เป็นไปตามมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมของประเทศไทย[7]

ผลการค้นพบเหล่านี้แสดงให้เห็นอย่างเป็นรูปธรรมว่า แบคทีเรีย *B. subtilis* ที่ได้รับการตรึงอยู่ในโครงสร้างรูพรุนของโฟมยางพาราสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ตกค้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ นอกจากนี้ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของน้ำหลังการบำบัดยังมีความเสถียรอยู่ในช่วง 7 ถึง 8 ซึ่งเป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อระบบนิเวศ การใช้โฟมยางพาราธรรมชาติไม่เพียงแต่เป็นการสร้างวัสดุค้ำจุนที่มีความทนทานและยืดหยุ่นสูง แต่ยังเป็นกลยุทธ์สำคัญในการเพิ่มมูลค่าให้กับยางพาราไทย และส่งเสริมความยั่งยืนทางด้านสิ่งแวดล้อมโดยการลดการใช้วัสดุสังเคราะห์ในระบบบำบัดน้ำเสีย ท้ายที่สุดผลงานนี้ถือเป็นก้าวสำคัญในการบูรณาการเทคโนโลยีชีวภาพเข้ากับวิทยาศาสตร์วัสดุธรรมชาติ เพื่อปูทางไปสู่การพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียเชิงพาณิชย์ที่มีประสิทธิภาพในอนาคต

7. ข้อเสนอแนะ

7.1 การพัฒนาศักยภาพเชิงวิศวกรรมวัสดุสำหรับการขยายขนาด

ควรมีการพัฒนาโครงสร้างรูพรุนของโฟมยางพาราให้มีประสิทธิภาพในการยึดเกาะของจุลินทรีย์สูงขึ้นจนสามารถลดขนาดวัสดุลงได้ (Miniaturization) โดยในอนาคตอาจออกแบบจากวัสดุขนาดเล็กหลายชิ้น ให้เป็นวัสดุชิ้นเดียวที่มีขนาดใหญ่และเหมาะสมกับโครงสร้างของบ่อบำบัดน้ำเสียในโรงงานอุตสาหกรรม (เช่น รูปทรงแผงขนาดใหญ่ หรือทรงกระบอก) เพื่อลดความยุ่งยากในการติดตั้งและลดปริมาณชิ้นงานที่ต้องใช้

7.2 การประยุกต์ใช้ในลักษณะนวัตกรรมทางเลือก

ควรส่งเสริมให้โฟมยางพาราเสริมจุลินทรีย์เป็นตัวเลือกเสริม (Option) ในระบบบำบัดน้ำเสียเดิมที่มีอยู่ เพื่อลดภาระค่าใช้จ่ายในการวางระบบใหม่ทั้งหมด โดยเฉพาะในโรงงานขนาดเล็กหรือธุรกิจครอบครัวที่มีงบประมาณจำกัด ซึ่งนวัตกรรมนี้จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดได้โดยไม่ต้องใช้สารเคมีเพิ่มเติม

7.3 การจำแนกกลุ่มเป้าหมายเพื่อลดต้นทุนการผลิต

ควรศึกษาการพัฒนาผลิตภัณฑ์แยกตามความเหมาะสมของพื้นที่ ได้แก่ รุ่นสำหรับครัวเรือน/บ่อน้ำชุมชน และรุ่นสำหรับโรงงานอุตสาหกรรมขนาดเล็ก เพื่อให้กระบวนการผลิตมีความเจาะจง ไม่ซับซ้อน ช่วยลดความหลากหลายของแม่พิมพ์และลดต้นทุนการผลิตรวม ทำให้ผู้ใช้เข้าถึงนวัตกรรมได้ในราคาที่เหมาะสมและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอย่างแท้จริง

เอกสารอ้างอิง

[1] บริบูรณ์ สมบุญสุข, และ พัทธ์ พิทยาภินันท์. (2024). รูปแบบและปัญหาในระบบการผลิตยางและผลไม้: ภาพสะท้อนจากชุมชนทุ่งนุ้ย อำเภอควนกาหลง จังหวัดสตูล วารสารเกษตรพระจอมเกล้า, 42(3), 290-298.

[2] Suppanucroa, N. (2019). การพัฒนาและลักษณะเฉพาะของฟองน้ำเซลลูโลสยางธรรมชาติ (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์).

[3] รัชพล กาญจนจักร. (2547). การพัฒนากระบวนการผลิตยางฟองน้ำจากยางธรรมชาติ [วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต]. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.

[4] คลองแก้ว, เอ. (2017). การพัฒนาการผลิตเอนไซม์โปรตีเอสต้นทุนต่ำจาก *Bacillus subtilis* เพื่อการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมแปรรูปยางพารา (วิทยานิพนธ์ปริญญาโท). มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

[5] Thitirakpanich, U. (1991). การทำให้บริสุทธิ์และลักษณะเฉพาะของเอนไซม์ Neutral Protease จาก Bacillus subtilis TISTR 25 (วิทยานิพนธ์ปริญญาโท). จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

[6] Phasura, A. (2015). รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์: การใช้ไบโอโปรดักต์ *Bacillus subtilis* เพื่อส่งเสริมการเจริญเติบโตของต้นกล้าข้าวที่ปลูกในสภาพดินที่ได้รับผลกระทบจากเกลือทะเล คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

[7] Thongrueang, W., Detwayukul, C., Suntho, J., & Rukkajatisuwan, Y. (2004). การพัฒนากระบวนการผลิตโฟมยางธรรมชาติรายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์. สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และนวัตกรรมแห่งประเทศไทย (TSRI)