

บทที่ 5

สรุปและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

การวิจัยนี้มุ่งเน้นการเพิ่มมูลค่าของเสียและการพัฒนาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากกากตะกอนส่วนเกินในอุตสาหกรรมกระดาษรีไซเคิล โดยใช้แนวทางการย่อยสลายร่วมแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Co-digestion: AnCoD) ระหว่างกากตะกอนปฐุมภูมิ (PS) และกากตะกอนทุติยภูมิ (SS) ภายใต้ระบบถังกวนสมบูรณ์แบบสองขั้นตอน (Two-stage CSTR) การศึกษานี้ครอบคลุมการประเมินทั้งด้านกายภาพและชีวเคมี การวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ และการประเมินศักยภาพการขยายขนาดในเชิงเศรษฐศาสตร์และเทคโนโลยีเพื่อการประยุกต์ใช้จริงในระดับอุตสาหกรรม

5.1.1 ศักยภาพของระบบย่อยสลายร่วมแบบไม่ใช้ออกซิเจนของกากตะกอน (Anaerobic Co-digestion)

การผสมกากตะกอน PS และกากตะกอน SS แสดงให้เห็นว่าการใช้กากตะกอนเพียงชนิดเดียวไม่สามารถให้ผลที่มีประสิทธิภาพต่อการผลิตก๊าซชีวภาพได้อย่างเต็มที่ เนื่องจากขาดความสมดุลทางอาหาร การทดลองพบว่า จากการเพิ่มสัดส่วนผสมของกากตะกอน SS มีสัดส่วนที่เหมาะสมที่สุดคือสัดส่วนผสมกากตะกอน PS:SS ที่ 1 ต่อ 3 ซึ่งสามารถปรับค่า C/N ratio ลงได้แต่อย่างไรก็ตาม ยังไม่อยู่ในช่วง 20 ถึง 30 ที่เหมาะสมต่อการเจริญของจุลินทรีย์เมทาโนเจนในสัดส่วนนี้ยังทำให้ระยะเวลา lag phase สั้นลงเหลือเพียง 1.6 วัน และมีความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพสูงสุดถึงร้อยละ 57.55 แสดงให้เห็นว่าการผสมกากตะกอนอย่างสมดุลสามารถเร่งกระบวนการและเพิ่มศักยภาพการผลิตพลังงานได้จริง

5.1.2 ผลลัพธ์จากการทดลองแบบกะและการเดินระบบ Two-stage CSTR

การทดลองแบบกะยืนยันว่า PS:SS ในอัตราส่วน 1 ต่อ 3 สามารถสร้างอัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงถึง 1,750 มิลลิลิตรต่อวัน ซึ่งสูงกว่าการใช้กากตะกอนชนิดเดียวอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตาม จุดเด่นที่แท้จริงคือการใช้ระบบ Two-stage CSTR ที่แบ่งการทำงานออกเป็นสองถัง โดยถังแรกเน้นการย่อยสลายเชิงไฮโดรไลซิสและกรดสร้าง ขณะที่ถังที่สองเน้นกระบวนการ acetogenesis และ

methanogenesis การแยกหน้าที่เช่นนี้ทำให้ระบบมีความเสถียรและทนทานมากขึ้น สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ต่อเนื่องสูงถึง 3,060 mL/day และมีการกำจัดสารอินทรีย์ระเหยง่าย (TVS removal) ในช่วงร้อยละ 84 ถึง 99 โดยสารตั้งต้นถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซชีวภาพเพียงร้อยละ 12 ของคาร์บอนที่เข้าระบบ ซึ่งสะท้อนถึงการย่อยสลายที่ยังไม่สมบูรณ์ แต่อย่างไรก็ตาม การทดลองในระบบ Two-stage CSTR สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และเพิ่มอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจากระบบแบบขั้นตอนเดียวในการทดลองระบบแบบกะอย่างมีนัยสำคัญ

5.1.3 บทบาทของชุมชนจุลินทรีย์ในความสำเร็จของระบบ

การวิเคราะห์องค์ประกอบจุลินทรีย์ในระบบเผยให้เห็นความเชื่อมโยงระหว่างนิเวศวิทยาจุลินทรีย์กับสมรรถนะของถังย่อย โดยในถังที่ 1 พบ *Bacillus cereus* ที่เจริญเติบโตได้ดีซึ่งช่วยเร่งการสลายเส้นใยลิกโนเซลลูโลสที่ย่อยสลายยาก ขณะที่ในถังที่ 2 พบ *Bacillus megaterium* และ *Bacillus firmus* ที่มีบทบาทสำคัญในการเปลี่ยนกรดไขมันระเหยง่ายไปสู่ก๊าซมีเทน โครงสร้างของชุมชนจุลินทรีย์ที่แตกต่างแต่เสริมกันนี้เป็นรากฐานที่ทำให้ระบบ Two-stage CSTR มีเสถียรภาพสูงและสามารถรองรับความผันผวนของสภาวะการเดินระบบได้

5.1.4 ความเป็นไปได้เชิงเศรษฐศาสตร์และสิ่งแวดล้อม

เมื่อพิจารณาการประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรม พบว่าทั้งการผลิตก๊าซชีวภาพและเชื้อเพลิง RDF มีความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ ในด้านก๊าซชีวภาพ ระบบต้องใช้พลังงานไฟฟ้าภายนอกเพียง 3.9 เมกะวัตต์ชั่วโมงต่อวัน แต่สามารถผลิตพลังงานเพียงพอสำหรับใช้ในโรงงานเอง ลดการพึ่งพาเชื้อเพลิงฟอสซิลและช่วยเสริมความมั่นคงด้านพลังงาน ขณะที่ RDF มีต้นทุนการลงทุนเริ่มต้นที่ต่ำกว่า โดยมีค่าประมาณ 55.2 ล้านบาท แต่มีระยะเวลาคืนทุนที่มากกว่าอายุโครงการ แม้ต้องมีการจัดการด้านการปรับสภาพกากตะกอนเพิ่มเติม แต่ก็มีข้อได้เปรียบในการจัดการกากตะกอนปริมาณมากได้รวดเร็ว ทั้งสองทางเลือกยังช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้อย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับการฝังกลบแบบดั้งเดิม และสนับสนุนแนวทางเศรษฐกิจหมุนเวียนและคาร์บอนต่ำของประเทศ

5.1.5 ข้อเสนอเชิงวิชาการและการประยุกต์ใช้

การศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่า การย่อยสลายร่วมของกากตะกอน PS และกากตะกอน SS ภายใต้ระบบ Two-stage CSTR ไม่เพียงแต่เพิ่มผลผลิตก๊าซชีวภาพ แต่ยังสามารถสร้างระบบที่เสถียรและยืดหยุ่นมากขึ้นด้วย การบูรณาการข้อมูลเชิงวิศวกรรม จุลินทรีย์ เศรษฐศาสตร์ และสิ่งแวดล้อมทำให้ยืนยันได้ว่ากระบวนการนี้สามารถขยายผลไปสู่การใช้งานจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ทั้งในรูปแบบการใช้ก๊าซชีวภาพภายในโรงงานและการผลิต RDF เพื่อนำไปใช้ในอุตสาหกรรมใกล้เคียง จึงสามารถสรุปได้ว่า งานวิจัยนี้ไม่เพียงเป็นการแก้ปัญหาการจัดการกากตะกอนเท่านั้น แต่ยังเป็นแนวทางสู่การพัฒนาอุตสาหกรรมกระดาษที่สอดคล้องกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืนและเศรษฐกิจหมุนเวียนในอนาคต

5.2 ข้อจำกัดของงานวิจัย

สำหรับการทดลองดำเนินการในระดับห้องปฏิบัติการ แม้จะสามารถควบคุมตัวแปรต่าง ๆ ได้ส่วนหนึ่ง แต่ยังไม่สามารถสะท้อนความซับซ้อนและความแปรผันของระบบในระดับอุตสาหกรรมได้อย่างครบถ้วน อีกทั้ง ข้อเสนอแนะที่ควรมีระบบระบายกากตะกอนส่วนเกิน เพื่อควบคุมค่า MLVSS และ F/M ratio เป็นเพียงข้อเสนอเชิงเทคนิคจากผลการทดลอง ยังไม่มีการทดลองใช้งานจริงเพื่อยืนยันประสิทธิผล นอกจากนี้ การวิเคราะห์ชุมชนจุลินทรีย์ด้วยเทคนิค MALDI-TOF MS แม้จะแสดงให้เห็นการจัดชั้นหน้าที่และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของแบคทีเรียระหว่าง CSTR 1 และ CSTR 2 อย่างชัดเจน แต่ยังมีข้อจำกัดสำคัญคือไม่สามารถตรวจหาและระบุชนิดของจุลินทรีย์กลุ่ม methanogen (archaea) ได้โดยตรง เช่น *Methanosarcina* หรือ *Methanobacterium* ซึ่งมีบทบาทสำคัญในกระบวนการสร้างก๊าซชีวภาพ ส่งผลให้ไม่สามารถอธิบายความเชื่อมโยงระหว่างโครงสร้างชุมชนจุลินทรีย์กับประสิทธิภาพการผลิตมีเทนได้อย่างสมบูรณ์ จึงควรมีการเสริมด้วยเทคนิคระดับโมเลกุล เช่น การวิเคราะห์ยีนจำเพาะ (*mcrA*) หรือการทำ high-throughput sequencing เพื่อเพิ่มความแม่นยำในการประเมินบทบาทของ methanogen และยืนยันผลในระบบอุตสาหกรรมต่อไป

5.3 ข้อเสนอแนะเชิงกลยุทธ์สำหรับการประยุกต์ใช้และพัฒนางานวิจัยในอนาคต

5.3.1 การปรับปรุงการดำเนินงาน (Operational Improvement)

ควรนำระบบการระบายกากตะกอนส่วนเกิน (sludge wasting) มาใช้ในระบบ CSTR เพื่อควบคุมความเข้มข้นของมวลชีวภาพ (MLVSS) ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม และรักษาระดับค่า F/M ratio ที่สมดุล สิ่งนี้จะช่วยป้องกันปัญหาการสะสมของสารยับยั้ง ลดความเสี่ยงจากความไม่เสถียรในการเดินระบบ และรับประกันการผลิตก๊าซชีวภาพในระยะยาวอย่างมีประสิทธิภาพและยั่งยืน ซึ่งเป็นการแก้ไขข้อจำกัดที่พบจากการทดลองเดินระบบต่อเนื่องโดยตรง

5.3.2 การบูรณาการระบบแบบไฮบริด

(Hybrid Integration for Resource Maximization)

ควรมีการศึกษาและพัฒนาระบบไฮบริด เช่น การนำกากตะกอนที่เหลือจากกระบวนการย่อยสลาย (digestate) มาผลิตเป็นเชื้อเพลิง RDF ควบคู่ไปกับการผลิตก๊าซชีวภาพ กลยุทธ์นี้จะช่วยเพิ่มการใช้ประโยชน์จากทรัพยากรให้เต็มประสิทธิภาพ สร้างรายได้หลากหลายช่องทาง และเพิ่มความยืดหยุ่นในการจัดการกากตะกอน ทั้งยังสามารถปรับใช้ได้ตามสถานการณ์และความต้องการพลังงานของโรงงาน

5.3.3 การจัดการธาตุอาหารและการหมุนเวียนทรัพยากร

(Nutrient Management and Circular Economy Pathway)

จากการวิเคราะห์สมดุลมวลสารของระบบ พบว่ามีการสะสมของธาตุไนโตรเจน (N) และฟอสฟอรัส (P) ในส่วนของกากตะกอนเหลว (liquid digestate) ในปริมาณสูง ซึ่งหากไม่ได้รับการจัดการอย่างเหมาะสมอาจกลายเป็นปัญหาสิ่งแวดล้อม ข้อเสนอแนะเชิงกลยุทธ์คือ ควรศึกษาการนำธาตุอาหารดังกล่าวกลับมาใช้ในรูปของ ปุ๋ยชีวภาพหรือสารปรับปรุงดิน เพื่อลดการพึ่งพาปุ๋ยเคมี สนับสนุนการปิดวงจรทรัพยากร และสร้างมูลค่าเพิ่มตามหลักการเศรษฐกิจหมุนเวียนอย่างแท้จริง อีกทั้งยังสามารถเชื่อมโยงกับการทำ LCA (Life Cycle Assessment) และการประเมิน SROI (Social Return on Investment) เพื่อแสดงให้เห็นถึงผลกระทบเชิงบวกต่อสิ่งแวดล้อมและสังคมได้อย่างครบวงจร