

บุญสิตา นามมะนะ: การเพิ่มมูลค่าของเสียและการพัฒนาประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทน  
จากกากตะกอนส่วนเกินด้วยระบบย่อยสลายร่วมแบบไม่ใช้ออกซิเจนในอุตสาหกรรม  
กระดาษรีไซเคิล

(WASTE VALORIZATION AND ENHANCEMENT OF BIOMETHANE PRODUCTION  
EFFICIENCY FROM EXCESS SLUDGE THROUGH ANAEROBIC CO-DIGESTION IN  
THE RECYCLED PAPER INDUSTRY)

อาจารย์ที่ปรึกษา: ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พัทรินทร์ ราชู , 276 หน้า.

คำสำคัญ : ระบบย่อยสลายร่วมแบบไม่ใช้ออกซิเจน/การผลิตก๊าซชีวภาพ/จลนพลศาสตร์/กากตะกอน  
จากโรงงานกระดาษรีไซเคิล/การย่อยสลายกากตะกอน

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มมูลค่าของเสียและเสริมสร้างประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทน  
จากกากตะกอนส่วนเกินที่เกิดขึ้นในกระบวนการบำบัดน้ำเสียของอุตสาหกรรมกระดาษรีไซเคิล  
ซึ่งประกอบด้วยกากตะกอนปฐมภูมิ (Primary Sludge: PS) ที่มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนสูง  
และย่อยสลายได้ยาก และกากตะกอนทุติยภูมิ (Secondary Sludge: SS) ที่อุดมด้วยธาตุอาหาร  
แต่มีค่า C/N ต่ำ การย่อยสลายกากตะกอนเชิงเดี่ยวส่งผลให้การผลิตก๊าซชีวภาพไม่มีประสิทธิภาพ  
งานวิจัยจึงมุ่งเน้นการย่อยสลายร่วมแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Co-digestion: AnCoD)  
โดยพัฒนาและทดสอบระบบถังกวนสมบูรณ์แบบสองขั้นตอน (Two-stage Continuous Stirred  
Tank Reactor: Two-stage CSTR) เพื่อเพิ่มเสถียรภาพและศักยภาพการผลิตพลังงานทดแทน

การดำเนินวิจัยประกอบด้วย 4 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ (1) การประเมินผลของสัดส่วนผสมของ  
กากตะกอน PS ต่อกากตะกอน SS (PS:SS) ต่อความสามารถในการย่อยสลายทางชีวภาพ  
(2) การทดสอบศักยภาพการเกิดก๊าซมีเทนทางชีวเคมี (Biochemical Methane Potential: BMP)  
และการวิเคราะห์จลนพลศาสตร์ (3) การเดินระบบ Two-stage CSTR เพื่อประเมินประสิทธิภาพ  
และเสถียรภาพการทำงาน และ (4) การประเมินศักยภาพการขยายขนาดสู่ระดับอุตสาหกรรม  
ทั้งด้านเทคโนโลยีและเศรษฐศาสตร์ ผลการทดลองแบบกะพบว่าสัดส่วนผสมกากตะกอน PS:SS  
ที่ 1:3 ให้ผลดีที่สุด ทั้งในด้านประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์และการผลิตก๊าซมีเทน  
โดยมีระยะเวลาไฮโดรไลซิสสั้นที่สุดเพียง 1.6 วัน ซึ่งมีสัดส่วนความสามารถในการย่อยสลาย  
สารอินทรีย์ทางชีวภาพสูงถึงร้อยละ 57.55 และอัตราการผลิตมีเทนสูงสุด 1,750 มิลลิลิตรต่อวัน  
การเดินระบบ Two-stage CSTR พบว่าการแยกหน้าที่การทำงานทำให้การทำงานมีเสถียรภาพ  
มากขึ้น โดยเพิ่มปริมาณก๊าซชีวภาพสูงสุดเป็น 3,060 มิลลิลิตรต่อวัน พร้อมทั้งสามารถกำจัด  
สารอินทรีย์ในรูปของแข็งระเหยง่ายทั้งหมด (Total Volatile Solids: TVS) ได้ร้อยละ 84 ถึง 99 และ

สารอินทรีย์คาร์บอนถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปก๊าซชีวภาพร้อยละ 12 การวิเคราะห์ชุมชนจุลินทรีย์ยืนยันการแบ่งหน้าที่อย่างชัดเจน โดย *Bacillus cereus* ที่เจริญเติบโตได้ดีในถังที่ 1 ทำหน้าที่ส่งเสริมกระบวนการไฮโดรไลซิสและการสร้างกรด ส่วน *Bacillus megaterium* และ *Bacillus firmus* ในถังที่ 2 ทำหน้าที่ส่งเสริมการย่อยกรดไขมันระเหยง่ายเป็นอะซิเตตและก๊าซไฮโดรเจนที่เป็นสารตั้งต้นในการผลิตมีเทน

การประเมินศักยภาพการขยายสู่ระดับอุตสาหกรรม พบว่ากากตะกอนส่วนเกินสามารถผลิตได้ทั้งก๊าซชีวภาพและเชื้อเพลิงขยะ (Refuse-derived Fuel: RDF) โดยการผลิตก๊าซชีวภาพมีค่าใช้จ่ายไฟฟ้าภายนอกเพียง 3.9 เมกะวัตต์ชั่วโมงต่อวัน ให้ระยะเวลาคืนทุนเพียง 3 ปี ในขณะที่การผลิต RDF แม้จะมีความคุ้มค่าในด้านการลงทุน แต่มีระยะเวลาคืนทุนยาวนานกว่าอายุโครงการมาก ทั้งนี้ สถานการณ์ทั้งสองทางเลือกช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและสนับสนุนเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) ของอุตสาหกรรมกระดาษรีไซเคิล โดยงานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่าการผสมกากตะกอน PS และกากตะกอน SS ในสัดส่วนที่เหมาะสมและการใช้ระบบ Two-stage CSTR สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนส่วนเกินได้อย่างมีนัยสำคัญ อีกทั้ง ยังมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์และมีศักยภาพในการขยายสู่ระดับอุตสาหกรรม

สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม  
ปีการศึกษา 2568

ลายมือชื่อนักศึกษา ..... *บุณลิตา ทวณะ*  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา ..... *ธีรสิน วัช*  
ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ..... *ช.อ.*

BOONSITA NAMMANA: WASTE VALORIZATION AND ENHANCEMENT OF  
BIOMETHANE PRODUCTION EFFICIENCY FROM EXCESS SLUDGE THROUGH  
ANAEROBIC CO-DIGESTION IN THE RECYCLED PAPER INDUSTRY  
THESIS ADVISOR: ASST. PROF. PATCHARIN RACHO , 276 PP.

Keywords : Anaerobic co-digestion/Biogas production/Biokinetics/Recycled paper mill  
sludge/Sludge digestion

This study aimed to valorize waste and enhance the efficiency of methane production from excess sludge generated in the wastewater treatment processes of the paper industry. The sludge consists of primary sludge (PS), which is recalcitrant with a high carbon-to-nitrogen (C/N) ratio, and secondary sludge (SS), which is nutrient-rich but has a low C/N ratio. Using each sludge type alone results in poor biogas yields; therefore, this research focused on anaerobic co-digestion (AnCoD) of PS and SS, and developed a two-stage continuously stirred tank reactor (Two-stage CSTR) to improve stability and performance of the process.

The research was conducted in four phases: (1) evaluation of the effect of PS:SS sludge ratios on biodegradability; (2) determination of biochemical methane potential (BMP) and biokinetics; (3) operation of a Two-stage CSTR to assess stability and efficiency; and (4) techno-economic assessment of scaling up the system for industrial application. Batch experiments revealed that the PS:SS sludge ratio of 1:3 achieved the most favorable results both in terms of organic matter biodegradation efficiency and methane production, with the shortest hydrolysis period (1.6 days), organic matter biodegradation reaching 57.55%, and a maximum methane production rate of 1,750 mL/day. The Two-stage CSTR further improved process performance: task separation between reactors enhanced operational stability, increased a maximum methane output to 3,060 mL/day, achieved total volatile solids (TVS) removal of 84–99%, and converted 12% of organic carbon into biogas. Microbial community analysis confirmed functional specialization, with *Bacillus cereus* dominating the first reactor to support hydrolysis and acidogenesis, while *Bacillus megaterium* and *Bacillus firmus* prevailed in the second reactor to drive acetogenesis and methanogenesis.

At the industrial scale potential assessment, results indicated that excess sludge can be converted into both biogas and refuse-derived fuel (RDF). Biogas production required only 3.9 MWh/day of external electricity, resulting in a payback period of only 3 years, while RDF, although economically viable, had a payback period much longer than the project's lifespan. Both pathways demonstrated substantial potential to reduce greenhouse gas emissions and to promote circular economy practices in the paper industry. In conclusion, this study demonstrates that the combination of PS sludge and SS sludge at an optimal ratio, coupled with the use of a Two-stage CSTR, significantly improves anaerobic digestion efficiency, stabilizes process performance, and enhances methane yields. Techno-economic evaluation confirms the feasibility and sustainability of scaling.

School of Environmental Engineering  
Academic Year 2025

Student's Signature ..... B. Nammana .....

Advisor's Signature ..... P. Racho. .....

Co-advisor's Signature ..... B. Widitsathin .....