การศึกษากระบวนการที่เหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ
จากวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง และการประเมินการปลดปล่อย
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากการผลิตไฟฟ้า

ณัฐวรรณ สืบนันตา

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
มหาวิทยาลัยแม่โจ้
พ.ศ. 2564

การศึกษากระบวนการที่เหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ จากวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง และการประเมินการปลดปล่อย ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากการผลิตไฟฟ้า

ณัฐวรรณ สีบนันตา

MAEJO UNIVERSITY
มหาวิทยาลัยแม่โจ้

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร
ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการ มหาวิทยาลัยแม่โจ้
พ.ศ. 2564

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้

การศึกษากระบวนการที่เหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ
จากวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง และการประเมินการปลดปล่อย
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากการผลิตไฟฟ้า

ณัฐวรรณ สืบนันตา

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

พิจารณาเห็นชอบโดย **อาจารย์ที่ปรึกษา**

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รจพรรณ นิรัญศิลป์)
วันที่...................เดือน..................พ.ศ. ....

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธเนศ ไชยชนะ)
วันที่...................เดือน..................พ.ศ. ....

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฐูปน ชื่นบาล)
วันที่...................เดือน..................พ.ศ. ....

ประธานอาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตร ....
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รจพรรณ นิรัญศิลป์)
วันที่...................เดือน..................พ.ศ. ....

สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการรับรองแล้ว ....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ญาณิน โอภาสพัฒนกิจ)
รองอธิการบดี ปฏิบัติการแทน
อธิการบดี มหาวิทยาลัยแม่โจ้
วันที่...................เดือน..................พ.ศ. ....

ชื่อเรื่อง การศึกษากระบวนการที่เหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ จากวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง และการประเมินการปลดปล่อย ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากการผลิตไฟฟ้า

ชื่อผู้เขียน นางสาวณัฐวรรณ สืบนันตา

ชื่อปริญญา วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รจพรรณ นิรัญศิลป์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพโดยใช้เศษวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ 4 ส่วนซึ่งประกอบด้วย ต้นข้าวโพด ใบข้าวโพด เปลือกข้าวโพด และซังข้าวโพดหมักร่วมกับกากตะกอนในระบบบำบัดน้ำเสียฟาร์มสุกร และศึกษาอัตราส่วนของสารตั้งต้นต่อหัวเชื้อ (S/I) การผลิตก๊าซชีวภาพใช้อัตราส่วนดังนี้คือ 50:50, 60:40, 70:30 และ 80:20 gVS L^{-1} ตามลำดับ การศึกษานี้ดำเนินการภายใต้สภาวะการย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจน ด้วยกระบวนการหมักแบบ BMP ขนาด 1,000 mL มีปริมาตรการทำงาน 400 mL ที่อุณหภูมิ 35 ± 2 ℃ ในห้องบ่มเพาะระยะเวลาการหมัก 50 days และกำหนดความเข้มข้นเริ่มต้นของหัวเชื้อภายในขวดคือ 6.00 g L^{-1} ผลการศึกษานี้แสดงศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากส่วนประกอบของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ที่แตกต่างกัน 4 ชนิด ประกอบด้วย ต้น ใบ เปลือก และซัง โดยมีผลการทดลองดังต่อไปนี้ อัตราส่วน VS/TS ของต้น ใบ เปลือก และซังข้าวโพด แสดงให้เห็นถึงความสามารถในการย่อยได้ทางชีวภาพมีค่าสูงถึง 0.875, 0.884, 0.940 และ 0.940 ตามลำดับ และผลการผลิตก๊าซชีวภาพสะสมสูงที่สุด คือ ซัง ใบ เปลือก และปริมาณต่ำสุดคือต้นข้าวโพด มีค่าเท่ากับ 10,228, 8,550, 6,615 และ 753 mL ตามลำดับ และมีปริมาณก๊าซชีวภาพให้ผลผลิตต่อวันคือ 256, 214, 165 และ 19 mL/day ตามลำดับ ค่าเฉลี่ยของผลผลิตมีเทนของต้น ใบ เปลือก และซัง ใน 50 days เท่ากับ 11.40, 396.50, 308.20 และ 397.00 $m^3/tonVS_{added}$ ตามลำดับ และปริมาณสัดส่วนของก๊าซมีเทนมีค่าเท่ากับ 11.7, 50.66, 47.11 และ 59.10% ตามลำดับ งานวิจัยนี้พบว่าซังข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มีการผลิตก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุด 10,228 mL ผลผลิตก๊าซชีวภาพต่อวัน 256 mL/day และมีปริมาณสัดส่วนของก๊าซมีเทนสูงสุดที่ 59.10% ดังนั้นซังข้าวโพดเลี้ยงสัตว์จึงมีศักยภาพสูงสุดในการผลิตก๊าซชีวภาพ เมื่อนำผลผลิตก๊าซชีวภาพที่สูงที่สุดมาประเมินการผลิตไฟฟ้า โดยคิดจากค่าปริมาณก๊าซชีวภาพที่ 1 m^3 ต่อปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ต่ำสุด 0.71 kWh และสูงสุดที่ 1.4 kWh ได้พลังงานกระแสไฟฟ้ามีค่า

เท่ากับ 188.18 kWh/ton$_{maize\ residues}$ และ 263.64 kWh/ton$_{maize\ residues}$ ตามลำดับ ผลผลิตจากก๊าซชีวภาพต่อปีได้ปริมาณไฟฟ้าคือ 826.08 kWh/ton$_{maize\ residues}$ การประเมินการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากก๊าซชีวภาพที่ใช้ในกระบวนการผลิตไฟฟ้าสามารถลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการผลิตไฟฟ้ามีค่าเท่ากับ 147.94 kgCO$_{2eq}$/ton$_{maize\ residues}$ ในงานวิจัยแสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนของเสียไปเป็นพลังงาน สามารถลดคาร์บอนได้มากถึง 1.04 ton/ton$_{maize\ residues}$

คำสำคัญ : ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ, วัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดเลี้ยงสัตว์, ระบบการหมักแบบไร้อากาศ, การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

Title	A STUDY OF SUITABLE PROCESS FOR BIOGAS PRODUCTION FROM MAIZE RESIDUES AND CO_2 EMISSION ASSESSMENT FROM ELECTRICITY GENERATION
Author	Miss Nuttawan Suebnanta
Degree	Master of Engineering in Renewable Energy Engineering
Advisory Committee Chairperson	Assistant Professor Dr. Rotjapun Nirunsin

ABSTRACT

The main purpose of this research is to study the biomethane potential by using 4 different maize residues, namely stalks, leaves, husks, and cobs as the substrates. In addition, the anaerobically inoculum derived from a swine farm was used as an inoculum. The ratios of the substrate and the inoculum (S/I) were varied as 50:50, 60:40, 70:30, and 80:20 (volatile solid (VS) basis) to investigate the optimal condition for biogas production. The experiments were conducted using the 1000 mL serum bottles with 400 mL of working volume as the reactors. The experiments were conducted in batch mode with a controlled temperature of 35 ± 2 °C (mesophilic condition) for 50 days and all the experiments were triplicated. The initial VS concentration of the inoculum was fixed at 6.00 g L^{-1}. The VS/total solid (TS) ratios of the stalks, leaves, husks, and cobs were 0.875, 0.884, 0.940, and 0.940, respectively indicating high organic contents of the substrates. Also, the cumulative biogas productions were 753, 8,550, 6,615 and 10,228 mL, and the daily biogas yields were 19, 214, 165, and 256 mL/day of the stalks, leaves, husks, and cobs, respectively. Besides, the average methane yield of the stalks, leaves, husks, and cobs at the end of the experiments (the S/I ratio of 80:20) were 11.40, 396.50, 308.20, and 397.00 $m^3/tonVS_{added}$, respectively. Likewise, the average methane composition of 11.7, 50.66, 47.11, and 50.91% were investigated for the stalks, leaves, husks, and cobs,

respectively. In conclusion, this work found that the cobs of the maize residues with the S/I of 80:20 presented the highest potential with the maximum daily biogas yield, the cumulative biogas production, and the average methane percentage, among others. Later, when the highest biogas yield was used to estimate electricity generation, the minimum of 0.71 kWh and a maximum of 1.40 kWh of electricity could be generated, leading to the minimum and maximum electricity productions of 188.18 kWh/ton$_{\text{maize residues}}$ and 263.64 kWh/ton$_{\text{maize residues}}$, respectively and the electricity produced from the generated biogas was 826.08 kWh/ton$_{\text{maize residues}}$. Finally, The CO_2 emissions of 147.94 kgCO_2eq/ton$_{\text{maize residues}}$ could be reduced from electricity generation. This research successfully presented the carbon reduction up to 1.04 ton/ton$_{\text{maize residues}}$ by converting waste to energy.

Keywords : Biomethane potential, Maize residues, Anaerobic digestion, Carbon dioxide Emission

MAEJO UNIVERSITY

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับการสนับสนุน ความช่วยเหลือ การชี้แนะแนวทาง และความร่วมมือเป็นอย่างดีจากบุคคลหลายท่าน ดังต่อไปนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รจพรรณ นิรัญศิลป์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก รวมถึงผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธเนศ ไชยชนะ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฐปน ชื่นบาล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม และอาจารย์ ดร. ชยานนท์ สวัสดีนฤนาท ที่กรุณาให้คำปรึกษา คำชี้แนะ และแนวทางการแก้ปัญหา รวมทั้งให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ตลอดมา อีกทั้งยังช่วยตรวจทานวิทยานิพนธ์ให้มีความถูกต้อง และสมบูรณ์ยิ่งขึ้น ขอขอบพระคุณ ศาสตราจารย์ ดร.สุเมธ ไชยประพัทธ์ ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยระบบพลังงานมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้ให้เกียรติมาเป็นประธานสอบป้องกันวิทยานิพนธ์ ตลอดจนได้ให้คำแนะนำในการแก้ไขวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ให้มีความถูกต้องและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ขอขอบพระคุณ คณาจารย์ทุกท่าน ที่ประสิทธิ์ประสาทวิชาความรู้ให้แก่ผู้วิจัยตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน ตลอดจนบุคลากรจากทั้งวิทยาลัยพลังงานทดแทน และบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ให้ความร่วมมือ และช่วยเหลือผู้วิจัยในด้านเอกสาร และการดำเนินการต่าง ๆ มาโดยตลอด ขอขอบพระคุณวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ อุปกรณ์ ในการก่อเกิดความรู้และการดำเนินงานวิจัยจนสำเร็จลุล่วง และขอขอบพระคุณ สถาบันวิจัย และพัฒนาพลังงานนครพิงค์ มช.ที่ได้ให้โอกาสสนับสนุนสถานที่ในการทำวิจัย รวมถึงบุคลากรทุกคนในแผนกการวิเคราะห์และทดสอบผล ที่ให้คำแนะนำ รวมทั้งความรู้ในด้านระบบผลิตก๊าซชีวภาพตลอดจนให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือ และอุปกรณ์ในการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ และขอขอบพระคุณฟาร์มสุกร ของคณะสัตว์ศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่ได้อนุเคราะห์กากตะกอนมูลสุกรจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ขอขอบพระคุณทุนสนับสนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาจากวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ “โครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทนในกลุ่มประเทศอาเซียน สำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา” ประจำปี 2561

ท้ายที่สุดนี้ต้องขอขอบพระคุณ บิดา ลุง ป้า ปู่ ย่า รวมถึงทุกคนในครอบครัวที่ได้ให้กำลังใจและทุนสนับสนุนวิทยานิพนธ์ ตลอดจนครอบครัวจากแล็บชีวภาพ พี่ เพื่อน น้อง ๆ วิทยาลัยพลังงานทดแทน รวมไปถึงบุคคลอันเป็นที่รักยิ่ง และทุกคนที่มีส่วนในการช่วยเหลือ ให้กำลังใจ จึงทำให้การทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ซึ่งมีคุณค่ากับผู้วิจัยเป็นอย่างสูง

ณัฐวรรณ สืบนันตา

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย .... ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ .... จ
กิตติกรรมประกาศ .... ช
สารบัญ .... ซ
สารบัญตาราง .... ฎ
สารบัญภาพ .... ฐ
อักษรย่อและสัญลักษณ์ .... ฒ
บทที่ 1 ที่มาและความสำคัญ 1
วัตถุประสงค์ 3
ขอบเขตการศึกษา 3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 4
บทที่ 2 ทฤษฎีและการตรวจสอบเอกสาร 5
ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ 5
พลังงานก๊าซชีวภาพ 9
ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน 35
พลังงานชีวมวล 38
พลังงานไฟฟ้า 41
สถานการณ์ก๊าซเรือนกระจก 45
การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการหมักก๊าซชีวภาพ 46
เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง 52
บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย 61

การเก็บตัวอย่างวัสดุหมัก....61
ขั้นตอนการดำเนินการระบบผลิตก๊าซชีวภาพ....63
ขั้นตอนการศึกษาศักยภาพการเกิดก๊าซมีเทนทางชีวภาพ....67
ขั้นตอนการประเมินปริมาณไฟฟ้าเบื้องต้นโดยใช้ก๊าซชีวภาพ....68
ขั้นตอนการประเมินการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการผลิตไฟฟ้า....70
การประเมินการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการผลิตไฟฟ้า....72
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล....76
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเบื้องต้นของวัตถุดิบในการศึกษาศักยภาพการผลิต ก๊าซชีวภาพ....76
ผลการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของวัตถุดิบต่อหัวเชื้อ....84
ผลของการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ และก๊าซมีเทน....103
ผลของการประเมินปริมาณการผลิตไฟฟ้าเบื้องต้นโดยใช้ก๊าซชีวภาพ....113
ผลการประเมินการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์....115
บทที่ 5 สรุปผลการทำวิจัย และข้อเสนอแนะ....122
สรุปผลการทำวิจัย....122
ข้อเสนอแนะ....124
บรรณานุกรม....125
ภาคผนวก....139
ภาคผนวก ก การผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง....140
ภาคผนวก ข คุณลักษณะหลังสิ้นสุดกระบวนการของการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ....141
ภาคผนวก ค การคำนวณศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ....143
ภาคผนวก ง การประเมินการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก....152
ภาคผนวก จ การประเมินการผลิตก๊าซชีวภาพ ไฟฟ้าในเชิงทฤษฎี....158
ภาคผนวก ฉ บทความวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่ในระดับนานาชาติ....161
ประวัติผู้วิจัย....170

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1 ความเข้มข้นของไอออนบวกที่กระตุ้นและยับยั้งปฏิกิริยา 18

ตารางที่ 2 การเพิ่มความเป็นพิษของไอออนแต่ละชนิด 19

ตารางที่ 3 การลดความเป็นพิษของไอออนแต่ละชนิด 19

ตารางที่ 4 โลหะหนักที่พบในระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ 21

ตารางที่ 5 ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ยับยั้งการทำงานของระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ 21

ตารางที่ 6 การสะสมของโลหะหนักในระบบถังหมักแบบไม่ใช้อากาศ 22

ตารางที่ 7 ระดับความเป็นพิษของแอมโมเนียมไอออน 23

ตารางที่ 8 ค่า ΔG° ในการรีดิวซ์ซัลเฟต และสร้างมีเทน 24

ตารางที่ 9 ข้อดีและข้อจำกัด/ข้อเสียของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ 34

ตารางที่ 10 อัตราการให้ก๊าซมีเทนของชีวมวล 36

ตารางที่ 11 พลังงานชีวมวลที่ผลิตจากชีวมวลประเภทต่าง ๆ ของโลก ในปี ค.ศ.2020 38

ตารางที่ 12 ปริมาณผลผลิตทางการเกษตรเป็นชีวมวล 39

ตารางที่ 13 ศักยภาพชีวมวลในการผลิตไฟฟ้า 40

ตารางที่ 14 ข้อดีข้อเสียของการผลิตกระแสไฟฟ้า 43

ตารางที่ 15 วิธีวิเคราะห์องค์ประกอบของหัวเชื้อจุลินทรีย์ 62

ตารางที่ 16 วิธีวิเคราะห์องค์ประกอบของต้น ใบ เปลือก และซังข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ 63

ตารางที่ 17 วิธีการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของกระบวนการ 67

ตารางที่ 18 รายการข้อมูลที่ต้องใช้คำนวณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 75

ตารางที่ 19 คุณลักษณะเชิงปริมาณของเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง 78

ตารางที่ 20 คุณลักษณะทางเคมีของเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง 80

ตารางที่ 21 คุณลักษณะเบื้องต้นของหัวเชื้อจุลินทรีย์กากตะกอนมูลสุกร 82

ตารางที่ 22 แสดงค่า ALK ก่อนเข้าระบบและหลังออกผลิตก๊าซชีวภาพ 91
ตารางที่ 23 แสดงค่ากรดไขมันระเหยง่ายก่อนเข้าระบบ และหลังออกผลิตก๊าซชีวภาพ.................. 93
ตารางที่ 24 พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ทางกายภาพของเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง 104
ตารางที่ 25 ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพทางทฤษฎี 105
ตารางที่ 26 ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง S/I 50:50.............. 106
ตารางที่ 27 ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง S/I 60:40.............. 107
ตารางที่ 28 ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง S/I 70:30.............. 108
ตารางที่ 29 ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง S/I 80:20.............. 109
ตารางที่ 30 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เปรียบเทียบกับวัตถุดิบชนิดต่าง ๆ.... 110
ตารางที่ 31 ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ต่อไร่ ในพื้นที่ภาคเหนือ 112
ตารางที่ 32 ปริมาณการผลิตไฟฟ้าโดยใช้ปริมาณก๊าซชีวภาพในงานวิจัย แบบ BMP Test........... 113
ตารางที่ 33 รายการข้อมูลที่ต้องใช้คำนวณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์...................... 116
ตารางที่ 34 การประเมินการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก... 120
ตารางที่ 35 คุณลักษณะหลังสิ้นสุดกระบวนการของการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ 141
ตารางที่ 36 ค่าความร้อนสุทธิของเชื้อเพลิง 152
ตารางที่ 37 ค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิส 155
ตารางที่ 38 การประเมินการผลิตก๊าซชีวภาพและไฟฟ้าในเชิงทฤษฎี... 158
ตารางที่ 39 ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ต่อไร่ ในพื้นที่ภาคเหนือ 159
ตารางที่ 40 การประเมินการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก... 160

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1 ข้อมูลพื้นฐานด้านการผลิตของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ 6

ภาพที่ 2 ภาพผลการสำรวจชีวมวลข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ 7

ภาพที่ 3 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะที่ไร้อากาศ............ 12

ภาพที่ 4 ถังหมักแบบ UASB 31

ภาพที่ 5 ถังหมักแบบ CSTR............ 32

ภาพที่ 6 ระบบผลิตก๊าซแบบ ASBR 33

ภาพที่ 7 ระบบไฟฟ้าของประเทศไทย 42

ภาพที่ 8 แสดงปริมาณและสัดส่วนการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทย............ 46

ภาพที่ 9 ผลการประเมินการลดก๊าซเรือนกระจกจากมาตรภาคพลังงาน............ 47

ภาพที่ 10 การคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการหมักแบบไร้อากาศ 48

ภาพที่ 11 ผลผลิตของก๊าซมีเทนจำเพาะ 52

ภาพที่ 12 ผลของการผลิตก๊าซชีวภาพข้าวโพดร่วมกับของเสียกลีเซอรอล 54

ภาพที่ 13 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดจากการหมักมูลโคและการหมักมูลโคร่วมกับหญ้าข้าวนก 55

ภาพที่ 14 ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพจากนมหมดอายุในอัตราส่วนต่าง ๆ............ 56

ภาพที่ 15 เปรียบเทียบปริมาณ CH_4 และ CO_2 ในสภาวะการย่อยสลายแบบไร้อากาศ 58

ภาพที่ 16 แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 64

ภาพที่ 17 แบบจำลองระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบ BMP............ 68

ภาพที่ 18 ภาพรวมระบบการผลิตไฟฟ้าจากก๊าซชีวภาพ 69

ภาพที่ 19 แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย 69

ภาพที่ 20 ข้อมูลนำเข้าการคำนวณปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์............ 70

ภาพที่ 21 หลักการคำนวณปริมาณก๊าซเรือนกระจก 73

ภาพที่ 22 ค่าศักยภาพในการทำให้เกิดสภาวะวะโลกร้อนของก๊าซเรือนกระจกแต่ละชนิด 73
ภาพที่ 23 เศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งก่อนปรับสภาพแบบ Pre-acidification 77
ภาพที่ 24 เศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งหลังปรับสภาพแบบ Pre-acidification 77
ภาพที่ 25 ค่าความเป็นกรด-ด่างภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ 85
ภาพที่ 26 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ.. 87
ภาพที่ 27 ประสิทธิภาพการกำจัดปริมาณของแข็งทั้งหมดภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ 89
ภาพที่ 28 ประสิทธิภาพการกำจัดปริมาณของแข็งระเหยง่ายภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ............. 90
ภาพที่ 29 ค่า VFA/ALK Ratio ก่อนเข้าระบบผลิตก๊าซชีวภาพ 94
ภาพที่ 30 ค่า VFA/ALK Ratio ภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพหลังสิ้นสุดกระบวนการ 94
ภาพที่ 31 ปริมาณของก๊าซชีวภาพรายวันที่เกิดขึ้นภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ 96
ภาพที่ 32 ปริมาณของก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้นภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ 97
ภาพที่ 33 สัดส่วนของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ.. 100
ภาพที่ 34 ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ 102

อักษรย่อและสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ย่อมาจาก	ความหมาย
AD	Anaerobic Digestion	กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศ
ALK	Alkalinity	สภาพความเป็นด่าง
BMP	Biochemical Methane Potential	ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน
CH_4	Methane Gas	ก๊าซมีเทน
CO_2	Carbon Dioxide Gas	ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์
COD	Chemical Oxygen Demand	ปริมาณออกซิเจนที่สารเคมีใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์
C/N Ratio	Carbon to Nitrogen Ratio	อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน
H_2	Hydrogen Gas	ก๊าซไฮโดรเจน
H_2S	Hydrogen Sulfide	ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์
HRT	Hydraulic Retention Time	ระยะเวลาการเก็บกักน้ำ
ISR	Inoculum to Substrate Ratio	อัตราส่วนหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัตถุดิบตั้งต้น
%MC	Moisture Content	ความชื้น
N	Nitrogen	ไนโตรเจน
N_2	Nitrogen Gas	ก๊าซไนโตรเจน
SMY	Specific Methane Yield	ผลผลิตก๊าซมีเทนจำเพาะ
SRT	Solids Retention Time	ระยะเวลาการเก็บกักของแข็ง
Temp	Temperature	อุณหภูมิ
TS	Total Solids	ของแข็งทั้งหมด
VFA	Volatile Fatty Acid	กรดไขมันระเหยง่าย
VFA_{inlet}	Volatile Fatty Acid inlet	กรดไขมันระเหยง่ายก่อนเข้าระบบ
VFA_{outlet}	Volatile Fatty Acid outlet	กรดไขมันระเหยง่ายหลังออกระบบ
VS	Volatile Solids	ของแข็งระเหย

บทที่ 1
ที่มาและความสำคัญ

ในปัจจุบันปริมาณความต้องการด้านการใช้พลังงานเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มของประชากร เนื่องจากนำไปใช้ในกิจกรรมเพื่อพัฒนา และเป็นปัจจัยในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจของประเทศ (รพีพัฒน์, และคณะ, 2560) ซึ่งในชีวิตประจำวันมีความต้องการที่พึ่งพาการแปรรูปพลังงานในรูปแบบต่าง ๆ อาทิเช่น การแปรรูปถ่านใช้ทดแทนฟืน การแปรรูปพลังงานฟอสซิสเป็นก๊าซธรรมชาติ น้ำมัน ถ่านหิน และไฟฟ้า และการเปลี่ยนพลังงานไฟฟ้าให้ไปเป็นสิ่งอำนวยความสะดวกต่าง ๆ เช่น เครื่องปรับอากาศ เตาอบ เชื้อเพลิง (กลิ่นประทุม., 2559) ฟอสซิลยังคงมีบทบาทสำคัญในการดำรงชีวิตของประชากรและการพัฒนาเศรษฐกิจของประเทศต่าง ๆ ทั่วโลก แต่เนื่องจากปัญหาราคาน้ำมันที่ปรับตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง (รพีพัฒน์, และคณะ, 2560) อีกทั้งปัญหาปริมาณเชื้อเพลิงฟอสซิลที่คาดการณ์ว่ากำลังจะหมดไป ทำให้ทุกประเทศที่นำเข้าและใช้น้ำมันเป็นเชื้อเพลิงหลักได้ตระหนักถึงปัญหาการขาดแคลนพลังงานที่กำลังจะเกิดขึ้น ดังนั้น เมื่อมีความต้องการด้านพลังงานเพิ่มขึ้นจึงมีความจำเป็นต้องหาแหล่งพลังงานทางเลือกใหม่ เพื่อมาทดแทนพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลที่มีอยู่เดิมและพลังงานทางเลือกที่เข้ามาจะมีบทบาทสำคัญในการแก้ปัญหาพลังงานในอนาคต ก๊าซชีวภาพจัดอยู่ในพลังงานหมุนเวียนและเป็นพลังงานทางเลือกหนึ่งที่สามารถใช้ลดปัญหาพลังงานที่กำลังจะเกิดขึ้นได้ (สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานมหาวิทยาลัยเชียงใหม่., 2561) ซึ่งในการผลิตก๊าซชีวภาพในประเทศไทยสามารถผลิตได้จากน้ำเสียของโรงงานอุตสาหกรรมทางการเกษตร ขยะมูลฝอย ฟาร์มเลี้ยงสัตว์ และวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

เนื่องด้วยประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่น่าสนใจเป็นอย่างมาก (ชนกพร วงษ์วัน., 2558) สามารถนำมาใช้เป็นแหล่งวัตถุดิบเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพได้แต่ต้องคำนึงถึงความคุ้มค่าและศักยภาพที่สามารถนำมาใช้ในการผลิตได้ (ธัชกร และคณะ, 2563) อาทิ เศษไม้ ขี้เลื่อย หญ้า กากอ้อย แกลบ ลำต้น เปลือก และซังของข้าวโพด เป็นต้น โดยวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเหล่านั้นยังคงมีศักยภาพในการเปลี่ยนรูปไปเป็นแหล่งพลังงาน แต่มักพบว่าเกษตรกรไม่ได้ให้ความสนใจกับเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร และไม่ถูกนำมาใช้ประโยชน์ เกษตรกรทั่วไปมักใช้วิธีรัดกิ่ง ก้านใบ และกองรวมไว้ ก่อนที่จะเผาทิ้งเพื่อความสะดวกในการเพาะปลูกสำหรับการเพาะปลูกรอบถัดไป จากรายงานของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ ได้รายงาน

จำนวนพื้นที่เพาะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ทั้งหมด 6,809,848 ไร่ เกษตรกรจะปลูกข้าวโพดเพื่อนำเมล็ดขายเพียงอย่างเดียว เนื่องมาจากเกษตรกรไม่ทราบแนวทางในการจัดการวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ดังนั้นเมื่อเก็บเกี่ยวฝักข้าวโพดแล้วเกษตรกรปล่อยให้ลำต้นข้าวโพดแห้งตายอยู่ในบริเวณแปลงเพาะปลูกก่อให้เกิดวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรขึ้นในปริมาณมาก เช่น ลำต้น เปลือก และซังข้าวโพด จึงใช้ลักษณะการเผาทำลายเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง ส่งผลกระทบในด้านมลพิษทางอากาศ เกิดหมอกควันขึ้นในบริเวณที่มีการเผาทำลาย ดังนั้นการนำวัสดุเหลือทิ้งดังกล่าวมาแปรรูปเป็นพลังงานจึงเป็นวิธีการหนึ่งในการแก้ปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม และยังเป็นการเพิ่มมูลค่าของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรได้อีกด้วย ซึ่งจากการสำรวจในปี 2562 มี ปริมาณชีวมวลที่เหลือใช้ถึง 5,091,690 ton/year โดยส่วนมากเป็นวัตถุดิบเหลือทิ้งของข้าวโพดประเภท ซังและลำต้น (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน., 2563) ดังนั้นข้าวโพดนับเป็นชีวมวลชนิดหนึ่งของประเทศไทยที่มีความเหมาะสมที่จะนำมาผลิตก๊าซชีวภาพ เพื่อนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนในประเทศไทย และยังเป็นการลดภาระในการกำจัดได้อีกด้วยข้าวโพดมีลักษณะเป็นเส้นใยในรูปของโพลีแซคาไรด์ขนาดใหญ่ประกอบด้วย น้ำตาลกลูโคสจับกันเป็นสายยาว (Ratanatamskul., 2016) หากผ่านกระบวนการย่อยแล้วจะได้เซลลูโลส สามารถนำไปผลิตเป็นก๊าซชีวภาพได้ อย่างไรก็ดี กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากเซลลูโลสยังต้องคำนึงถึงศักยภาพต้นทุน และความคุ้มค่าในการผลิตเพื่อนำไปใช้เป็นแหล่งผลิตก๊าซชีวภาพที่สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าได้ (Thanh. P.M., 2016)

ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะนำเศษวัสดุเหลือทิ้งจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ที่เหลือทิ้งจากโรงสีและแปลงเกษตร มาผ่านกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยใช้วัสดุเหลือทิ้งจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์จะประกอบไปด้วย ลำต้น ใบ เปลือก และซังของข้าวโพดลี้ยงสัตว์ซึ่งกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจะทำการย่อยสลายแบบร่วมกับกากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลสุกรซึ่งลักษณะของกระบวนการหมักจะเป็นการหมักแบบกะ โดยใช้กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศ ศึกษาความเป็นไปได้ของการผลิตไฟฟ้าโดยกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งร่วมกับการประเมินการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ อีกทั้งสามารถเพิ่มมูลค่าให้วัสดุเหลือจากทิ้งข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ เป็นการเพิ่มทางเลือกของการผลิตก๊าซชีวภาพให้มีความหลากหลาย และเป็นแนวทางส่งเสริมให้เกษตรกรสามารถลดรายจ่ายด้านพลังงาน จากการนำข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มาเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อใช้ผลิตไฟฟ้าได้ในอนาคต

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง
2. เพื่อประเมินปริมาณการผลิตไฟฟ้าโดยใช้ก๊าซชีวภาพจากวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง
3. เพื่อประเมินการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 Emission) จากกระบวนการการผลิตไฟฟ้าโดยใช้ก๊าซชีวภาพจากวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง

ขอบเขตการศึกษา

1. วัตถุดิบที่ใช้ในการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ คือ เศษวัสดุเหลือทิ้งจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ซึ่งจะทำการหมักแยกแต่ละประเภท ได้แก่ ต้น (Maize Stalks), ใบ (Maize Leaves), เปลือก (Maize Husks), และซัง (Maize Cobs)
2. ขนาดของชุดทดสอบศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งด้วยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้อากาศ ขนาด 1 L
3. การปรับสภาพ ต้น ใบ เปลือก และซังของวัสดุเหลือทิ้งจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ด้วยกระบวนการ Pre-acidification เป็นระยะเวลา 72 hr
4. หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพคือ กากตะกอนมูลสุกรจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพ
5. การย่อยสลายภายใต้อุณหภูมิสภาวะแวดล้อม
6. กระบวนการป้อนสารอินทรีย์แบบกะ (Batch Fermentation)
7. ชุดการทดลอง 1 ครั้ง ใช้ระยะเวลาในการทดลอง 50 days
8. การประเมินศักยภาพการผลิตไฟฟ้าจากก๊าซชีวภาพจะใช้ผลจากการทบทวนวรรณที่เกี่ยวข้องในการพิจารณา
9. การประเมินการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 Emission) จากการผลิตไฟฟ้าโดยใช้ก๊าซชีวภาพที่ผลิตจากวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งจากการผลิตไฟฟ้าโดยใช้ก๊าซชีวภาพที่ผลิตจากวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง
10. การประเมินการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 Emission) จะใช้ค่า CO_2 Emission factor เทียบเท่าในการพิจารณา

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากงานวิจัย มีด้านต่าง ๆ ดังนี้

ทางด้านวิชาการ

1. ทำให้เกิดองค์ความรู้เกี่ยวกับระบบหรือกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดเลี้ยงเลี้ยงสัตว์ โดยกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศแบบ BMP Test
2. ทำให้เกิดการพัฒนาต้นแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ขั้นตอนหรือวิธีการใช้ประโยชน์จากการนำ ต้น ใบ เปลือก และซังที่เป็นวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งให้ได้ประโยชน์สูงสุด
3. ทำให้ได้แนวทางของศักยภาพหัวเชื้อที่สามารถผลิตชีวภาพหมักร่วมกับวัสดุเหลือทิ้งจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์
4. ทำให้เกิดองค์ความรู้ในการพัฒนาแหล่งพลังงานทดแทนในรูปแบบของพลังงานก๊าซชีวภาพในระบบการจัดการวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง และผลงานวิจัยสามารถใช้เป็นแหล่งเรียนรู้ให้แก่เกษตรกร ชุมชนใกล้เคียง และอุตสาหกรรม ในการนำไปเป็นต้นแบบสำหรับใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพ

ทางด้านพลังงาน

1. สนับสนุนนโยบายจากรัฐบาลในด้านการใช้เชื้อเพลิงที่ได้จากพลังงานทดแทน
2. ใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนในการผลิตไฟฟ้า

ทางด้านเศรษฐกิจ

1. ลดต้นทุนการใช้เชื้อเพลิง เนื่องจากสามารถใช้ก๊าซชีวภาพไปทดแทนถ่านหินที่ใช้ผลิตไฟฟ้าได้
2. สร้างมูลค่าให้กับขยะอินทรีย์หรือเศษวัสดุเหลือทิ้ง
3. เป็นแนวทางส่งเสริม สร้างรายได้ และทางเลือกให้กับเกษตรกร

ทางด้านสิ่งแวดล้อม

1. ลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และคาร์บอนแบล็คในกระบวนการผลิตไฟฟ้าจากถ่านหินได้ อันเป็นเหตุของการเกิดภาวะเรือนกระจก และอุณหภูมิโลกสูงขึ้น
2. ลดการปลดปล่อยก๊าซชนิดต่าง ๆ ที่เกิดจากการเผาออกสู่สิ่งแวดล้อม ทำให้ลดปัญหามลภาวะทางอากาศได้
3. ลดปัญหาควันไฟจากการเผาต้น ซังข้าวโพด ทำให้สภาพแวดล้อมดีขึ้น

บทที่ 2

ทฤษฎีและการตรวจสอบเอกสาร

ในงานวิจัยนี้จะกล่าวถึงทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ ความหมายของก๊าซชีวภาพ หลักการผลิตก๊าซชีวภาพ กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ ระบบการป้อนสารอินทรีย์ เทคโนโลยีระบบการผลิตก๊าซชีวภาพ ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน ประโยชน์ของก๊าซชีวภาพ การนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์ รวมถึงเอกสารงานวิจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการศึกษาและการดำเนินงานวิจัย โดยทฤษฎีและเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของไทยที่มีการใช้บริโภคภายในประเทศและส่งออกมาอย่างยาวนาน รวมถึงเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญ ต่ออุตสาหกรรมอาหารสัตว์ โดยแต่ละปีไทยมีการส่งออกอาหารสัตว์เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ยังเป็นวัตถุดิบสำคัญของอุตสาหกรรมในประเทศที่มีความสามารถในการรับซื้อ ผลผลิตจากเกษตรกร ซึ่งแต่ละปีการผลิตเกษตรกรส่วนใหญ่จะทำการเพาะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ 2 ฤดูคือ ข้าวโพดฤดูฝน จะปลูกในช่วงมีนาคม-ตุลาคม และเก็บเกี่ยวผลผลิตประมาณ เดือนมิถุนายน – มกราคม ของปีถัดไป ส่วนข้าวโพดฤดูแล้ง จะเริ่มในเดือนพฤศจิกายน – กุมภาพันธ์ของปีถัดไป และเก็บเกี่ยวในช่วงเดือนมีนาคม - เมษายน ของปีถัดไป

ในส่วนของการเชื่อมโยงกับอุตสาหกรรมต่อเนื่อง ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์สามารถนำไปแปรรูปเพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มได้หลากหลายโดยเฉพาะในอุตสาหกรรมการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์อาหารสัตว์ โดยการพัฒนาและวิจัยเพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มจากเมล็ดข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในอุตสาหกรรมอื่น อาทิ อุตสาหกรรมแป้งข้าวโพด น้ำมันข้าวโพด เอทานอล (พลังงานทดแทน) รวมถึงพลาสติกชีวภาพยังมีน้อย (สำนักการค้าสินค้ากรมเจรจาการค้าระหว่างประเทศ , 2563)

สถานการณ์โลก ปี 2559 - 2563 ผลผลิตข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ของโลกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเป็นจำนวน 1,014.20 Million tons โดยในปี 2559 เพิ่มขึ้นเป็น 1,104.01 Million tons และในปี 2563 เพิ่มขึ้น 1.71% ต่อปี โดยสหรัฐอเมริกาซึ่งเป็นผู้ผลิตรายใหญ่ของโลกผลิตได้ลดลงจาก 366.29 Million tons ในปี 2562 เหลือ 350.01 Million tons และในปี 2563 หรือลดลงร้อยละ 4.44%

นอกจากนี้ ปี 2559 – 2563 การส่งออกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น 145.24 Million tons โดยในส่วนของปี 2559 เพิ่มขึ้นเป็น 170.84 Million tons และในปี 2563 เพิ่มขึ้น 3.30% ต่อปี และด้านการส่งออกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในปี 2563 ลดลง 171.03 Million tons คิดเป็นอัตราส่วน 0.11% (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2563)

ข้อมูลพื้นฐานด้านการผลิต

รายการ	2558/59	2559/60	2560/61	2561/62	2562/63	อัตราการเติบโตเฉลี่ย (ร้อยละ)
เนื้อที่เพาะปลูก (ล้านไร่)	6.59	6.49	6.58	6.87	6.82	**0.69**
ผลผลิต (ล้านตัน)	4.03	4.39	4.82	4.99	4.69	**3.08**
ผลผลิตต่อไร่ (กก.)	612	676	733	727	688	**2.37**
ใช้ในประเทศ (ล้านตัน)	7.59	7.82	8.08	8.24	8.44	**2.15**
ราคาที่เกษตรกรขายได้ (บาท/กก.)						
	2557/58	2558/59	2559/60	2560/61	2561/62	อัตราการเติบโตเฉลี่ย (ร้อยละ)
- เกษตรกรขายได้	7.31	7.73	6.86	6.25	7.96	**1.72**
- ราคารับซื้อหน้าโรงงาน	9.39	9.02	8.27	9.05	9.41	**0.04**
ราคาส่งออก	2557/58	2558/59	2559/60	2560/61	2561/62	
- ราคาโลก (ตลาดชิคาโก) (บาท/ตัน)	4,925	5,313	4,935	4,593	4,591	**-1.39**
- ราคาส่งออก F.O.B.	9,675	9,437	8,543	9,410	9,730	**0.11**

ภาพที่ 1 ข้อมูลพื้นฐานด้านการผลิตของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

ที่มา : สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, (2563)

แนวโน้มสถานการณ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ของไทย ปี 2563

แนวโน้มสถานการณ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ของไทย ด้านการผลิต โดยกระทรวงเกษตรและสหกรณ์คาดการณ์ผลผลิตข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ปี 2563 เนื้อที่เพาะปลูกมี 6.82 Million rai ลดลงจาก 6.87 Million rai ในปี 2562 คิดเป็น 0.73% เนื่องจากประสบปัญหาหนอนกระทู้ ข้าวโพดลายจุดระบาด เกษตรกรจึงปรับเปลี่ยนเนื้อที่ไปปลูกพืชอื่น และปล่อยที่ว่างบางส่วน สำหรับผลผลิตต่อไร่จาก 727 kg/rai ลดลงเหลือ 688 kg/rai และในปี 2563 ลดลง 5.36% ทั้งนี้ สำหรับแนวโน้มในปี 2564 คาดว่าเนื้อที่เพาะปลูกมี 6.77 Million rai ลดลง 6.82 Million rai ประกอบกับยังไม่มีโครงการส่งเสริมให้ปลูกข้าวโพดฤดูแล้งหลังนาเพิ่มจากภาครัฐ สำหรับผลผลิตต่อไร่คาดว่าเพิ่มขึ้นจาก 688 kg/rai เป็น 710 kg/rai ในปี 2563/64 หากสภาพอากาศเอื้ออำนวย มีปริมาณน้ำเพียงพอต่อการเจริญเติบโต และคาดว่าจะสามารถควบคุมการระบาดของหนอนกระทู้ข้าวโพดลายจุดได้ ส่งผลให้ปริมาณผลผลิตรวมจะเพิ่มขึ้นจาก 4.69 Million tons เป็น 4.81 Million tons และในปี 2564 เพิ่มขึ้น 2.56% ตามความต้องการใช้ คาดว่า ในปี 2564 จะมีความต้องการใช้เพิ่มขึ้นเนื่องจากการ

ขยายตัวของภาคอุตสาหกรรมเลี้ยงสัตว์ และคาดว่าการส่งออกจะมีแนวโน้มลดลง แต่การนำเข้ามีแนวโน้มใกล้เคียงกับปีที่ผ่านมา เนื่องจากผลผลิตข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ภายในประเทศมีไม่เพียงพอต่อความต้องการใช้ในอุตสาหกรรมเลี้ยงสัตว์ ส่งผลให้ต้องนำเข้าจากประเทศเพื่อนบ้าน โดยเฉพาะ จาก สปป. ลาว กัมพูชา และเมียนมา โดยปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการผลิต และการตลาด พื้นที่ปลูกไม่เหมาะสม อาทิ อยู่ในพื้นที่ป่า ซึ่งปัจจุบันภาคเอกชนมีมาตรการไม่รับซื้อข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในพื้นที่ไม่มีเอกสารสิทธิหรือพื้นที่ป่า จึงอาจส่งผลให้การปลูกในพื้นที่ดังกล่าวมีแนวโน้มลดลงปัญหาภัยธรรมชาติ เนื่องจากพื้นที่ปลูกมากกว่า 90% อยู่นอกเขตชลประทาน และอาศัยน้ำฝนในการเพาะปลูกอย่างเดียว การเกิดปัญหาภัยแล้ง และภาวะฝนทิ้งช่วง อาจส่งผลต่อปริมาณผลผลิตข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ การนำเข้าจากประเทศเพื่อนบ้าน โดยเฉพาะในช่วง เดือน สิงหาคม - ธันวาคม ซึ่งเป็นช่วงที่ผลผลิตในประเทศออกสู่ตลาดมาก อาจส่งผลกระทบต่อราคาภายในประเทศ และการนำเข้าพืชทดแทน คือ ข้าวสาลี ซึ่งมีราคาถูกมาใช้ทดแทนข้าวโพดเลี้ยงสัตว์บางส่วนในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ อาจส่งผลกระทบต่อราคาข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ที่เกษตรกรขาย

สถานการณ์ปัจจุบันส่งผลให้ปริมาณความต้องการบริโภคสินค้าปศุสัตว์ทั้งในและต่างประเทศเพิ่มขึ้น ทำให้เกษตรกรขยายการผลิต ซึ่งส่งผลให้ความต้องการใช้ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เพื่อผลิตอาหารสัตว์เพิ่มขึ้น การปิดด่านพรมแดนของไทยกับประเทศเพื่อนบ้าน อาจส่งผลกระทบต่อการนำเข้าข้าวโพดเลี้ยงสัตว์จากประเทศเพื่อนบ้าน ประกอบกับที่ผลผลิตภายในประเทศลดลง เนื่องจากภาวะภัยแล้ง จึงอาจส่งผลให้ไทยมีผลผลิตข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ไม่เพียงพอต่อความต้องการใช้ภายในประเทศ

ภาพที่ 2 ภาพผลการสำรวจชีวมวลข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

ที่มา : สำนักวิจัยค้นคว้าพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, (2556)

โดยประเทศไทยมีจุดแข็งในด้านการวิจัยและพัฒนาพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ และเทคโนโลยีการผลิตเมล็ดพันธุ์นอกจากนี้ไทยยังมีเทคโนโลยีในการผลิตอาหารสัตว์ที่ดีที่สุดในโลกประเทศหนึ่ง โดยข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ของไทยปลอดการดัดแปลงทางพันธุกรรม และมีจุดอ่อนคือ ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ถือเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของไทยที่มีการใช้บริโภคภายในประเทศและส่งออกมาอย่างยาวนาน แต่พื้นที่การเพาะปลูกและผลผลิตภายในประเทศ ได้ลดลงไปมากจากหลายสาเหตุ ในขณะที่ความต้องการผลผลิตเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์อาหารสัตว์ และเพื่อการส่งออกมีเพิ่มขึ้นมาโดยตลอด ไทยจึงต้องพึ่งพาการนำเข้าจากต่างประเทศ โดยมีการนำเข้าเพิ่มขึ้นทุกปี แต่ก็ยังประสบปัญหาผลผลิตที่ไม่ได้มาตรฐานและไม่ปลอดภัยเท่าที่ควรโอกาส ไทยเป็นแหล่งผลิตเมล็ดพันธุ์ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ที่สำคัญในภูมิภาคอาเซียน โดยข้าวโพดเลี้ยงสัตว์สามารถนำไปแปรรูปเพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มได้หลากหลาย เช่น พลาสติกชีวภาพ (ผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม) เอทานอล (พลังงานทดแทน) เป็นต้น

พลังงานก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพ คือ ก๊าซที่เกิดขึ้นจากการหมักของสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ (Anaerobic Digestion) โดยทั่วไปก๊าซชีวภาพจะหมายถึงก๊าซมีเทนที่ได้จากการหมักสารอินทรีย์ และกระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่สามารถเกิดขึ้นได้เองจากการทับถมกันของขยะมูลฝอย กองมูลสัตว์ (Wong, M., 2020) องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพส่วนใหญ่เป็นก๊าซมีเทน (CH_4) คิดเป็น 50 – 70 % และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) คิดเป็น 30 - 40 % ส่วนที่เหลือเป็นก๊าซชนิดอื่น ๆ เช่น ไฮโดรเจน (H_2) ออกซิเจน (O_2) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ไนโตรเจน (N_2) และไอน้ำ (Akindele O., and et.al., 2018) การผลิตก๊าซชีวภาพนอกจากกำจัดของเสียแล้วยังเป็นการทำลายเชื้อโรคได้อีกด้วย การใช้ก๊าซชีวภาพเป็นการจัดการของเสียที่ได้รับการสนับสนุน เนื่องจากเป็นกระบวนการช่วยลดก๊าซเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศซึ่งเป็นสาเหตุของภาวะโลกร้อนมากไปกว่านี้การเผาไหม้ก๊าซชีวภาพถือเป็นการเผาไหม้ที่สะอาด (พัชรี อินธนู, 2560) นอกจากนั้น กระบวนการหมักแบบไร้ออกซิเจนยังจะลดปริมาณสารอินทรีย์ในรูป COD (Chemical Oxygen Demand) และ BOD (Biogical Oxygen Demand) ที่มีอยู่ในสารหมักลงได้ 50-70 % ซึ่งเป็นวิธีการบำบัดน้ำเสียและลดมลภาวะด้วยเทคโนโลยีก๊าซชีวภาพ ซึ่งให้ประโยชน์ถึง 3 ประการ คือ ให้พลังงานในรูปของก๊าซชีวภาพ ลดปัญหามลภาวะและสภาพแวดล้อม และกากที่ผ่านการย่อยสลายแล้วสามารถนำไปใช้เป็นปุ๋ยอินทรีย์ในสภาพปุ๋ยน้ำ และปุ๋ยแห้ง เพื่อการปรับปรุงบำรุงดินได้ดี (กระทรวงพลังงาน, 2564) โดยก๊าซชีวภาพมีองค์ประกบหลักของ ก๊าซมีเทน เป็นหลัก มีคุณสมบัติติดไฟได้ดี จึงนำก๊าซชีวภาพไปใช้เป็นแหล่งเชื้อเพลิงเผื่อผลิตพลังงาน ภายใต้ 3 รูปแบบหลัก คือ ผลิตพลังงานความร้อน ผลิตพลังงานกลหรือไฟฟ้า และการผลิตพลังงานร่วมได้ทั้งไฟฟ้าและความร้อนด้วยเหตุนี้ ก๊าซชีวภาพ จึงเป็นพลังงานหมุนเวียนชนิดหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ทดแทนก๊าซธรรมชาติ ก๊าซหุงต้ม และน้ำมันเชื้อเพลิงได้เป็นอย่างดี เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิง ใช้ในการเผาไหม้ให้ความร้อน ใช้ทดแทนน้ำมันเตาในหม้อต้มไอน้ำ ใช้เดินเครื่องยนต์สันดาปภายใน รวมถึงใช้เดินเครื่องยนต์ผลิตกระแสไฟฟ้า จึงจัดเป็นพลังงานทางเลือก

เชื้อเพลิงก๊าซชีวภาพประกอบด้วยพลังงานจากก๊าซที่ได้จากน้ำเสียทั้งจากกลุ่มอุตสาหกรรมบางประเภทและกลุ่มของเสียจากฟาร์มสัตว์ เช่น ฟาร์มหมู ฟาร์มไก่ เป็นต้น เชื้อเพลิงก๊าซชีวภาพนี้นอกจากการพัฒนาพลังงานเพื่อใช้แล้วยังเป็นการกำจัดของเสียที่จุดผลิตหรือที่จุดกำเนิด (คู่มือการลงทุนโรงไฟฟ้าก๊าซชีวภาพจากพืชพลังงาน., 2556) ดังนั้น การใช้เชื้อเพลิงก๊าซจึงมีทั้งผลดีต่อระบบ

ของโรงงานหรือผู้ประกอบการในการทำลายของเสียหรืออุตสาหกรรมทางการเกษตร เช่น ฟาร์มเลี้ยงสัตว์ขนาดใหญ่ โรงงานแปรรูปผลิตผลทางการเกษตร เช่น โรงงานแปรรูปมันสำปะหลัง โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ โรงงานผลไม้กระป๋อง โรงงานน้ำตาล โรงงานผลิตแอลกอฮอล์ รวมถึงโรงฆ่าสัตว์ และขยะชุมชน เป็นต้น (Akindele O., and et.al., 2018) นอกจากนี้ยังทำให้เกิดพลังงานที่สามารถใช้ประโยชน์ได้ รวมทั้งยังไม่มีค่าใช้จ่ายของการขนส่งอีกด้วยปกติเชื้อเพลิงเหลวจะติดไฟง่ายกว่าเชื้อเพลิงแข็ง โดยสามารถฉีดเป็นฝอยละอองเข้าผสมกับอากาศได้อย่างทั่วถึง และสม่ำเสมอกว่าเข้าผสมกับอากาศ เป็นการเน้นถึงลักษณะของก๊าซชีวภาพเป็นของเหลว ก๊าซชีวภาพเป็นสิ่งที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติจากกระบวนการย่อยสลายอินทรีย์ด้วยวิธีทางชีววิทยา (Biological Treatment) ในสภาวะที่ไร้อากาศของก๊าซชีวภาพประกอบไปด้วยก๊าซหลายชนิด ส่วนใหญ่ประกอบด้วย 3 ส่วน ดังนี้

1) ก๊าซมีเทน ประมาณ 50-70%
2) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ประมาณ 30-50%
3) ส่วนที่เหลือเป็นก๊าซอื่น ๆ เช่น แอมโมเนีย ไฮโดรเจนซัลไฟด์ และไอน้ำ

ระบบก๊าซชีวภาพที่ใช้อย่างแพร่หลายมีหลายวิธีด้วยกัน ขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของน้ำเสีย/ของเสีย โดยสรุปเทคโนโลยีที่ใช้ในประเทศไทย ตามแหล่งที่มาของของเสีย/น้ำเสีย

หลักการผลิตก๊าซชีวภาพ

หลักการย่อยสลายสารอินทรีย์เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพมีดังต่อไปนี้ สารอินทรีย์จะถูกย่อยสลายโดยกลุ่มจุลินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศหรือไร้อากาศโดยสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมันจะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์กลุ่มที่เปลี่ยนสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ให้เป็นกรดอินทรีย์ขนาดเล็ก เช่น น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว กรดอะมิโน และกรดไขมัน ตามลำดับ จากนั้นกลุ่มแบคทีเรียที่สร้างกรดอะซิติกจะเปลี่ยนกรดอินทรีย์ขนาดเล็กให้เป็นกรดอะซิติก และก๊าซไฮโดรเจน ส่วนขั้นตอนสุดท้ายกลุ่มแบคทีเรียที่สร้างมีเทนจะเปลี่ยนกรดอะซิติกและก๊าซไฮโดรเจนให้กลายเป็นก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งก๊าซดังกล่าวที่เกิดขึ้นจะลอยตัวขึ้นเหนือผิวน้ำ (Arif, D. and et al., 2016) และจะถูกรวบรวมนำไปใช้ผลิตเป็นพลังงานทดแทนต่อไป

กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์

กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพในสภาวะที่มีอากาศ และ กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพในสภาวะที่ไร้อากาศ

1) กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะที่มีอากาศ (Aerobic Digestion)

การย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะที่มีอากาศจะอาศัยจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์เพื่อเปลี่ยนเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีความเสถียรขึ้น เช่น ก๊าซมีเทน และก๊าซอีเทน (ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, 2562) โดยมีก๊าซออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนจะได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์ และจุลินทรีย์จะได้รับประโยชน์ คือ ได้พลังงานจากการย่อยสลาย และได้แหล่งคาร์บอนเพื่อนำไปใช้ในการสร้างเซลล์ใหม่ มากไปกว่านี้ก๊าซออกซิเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนที่ดีจึงทำให้พลังงานที่ได้จากการย่อยสลายสูงส่งผลให้การย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจนเกิดเซลล์ใหม่ขึ้นเป็นจำนวนมาก ส่วนสารอินทรีย์ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้จะคงอยู่ในวัฏภาคของเหลว (Hartung C.and et.al., 2020) ปฏิกิริยาในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะที่มีอากาศแสดงดังสมการ 2.1

$$\text{สารอินทรีย์} + \text{ออกซิเจน} + \text{สารอาหาร} \longrightarrow \text{เซลล์ใหม่} + \text{สารอินทรีย์} + CO_2 + H_2O + NH_4^{+} + SO_4^{2-} + \text{Heat}$$

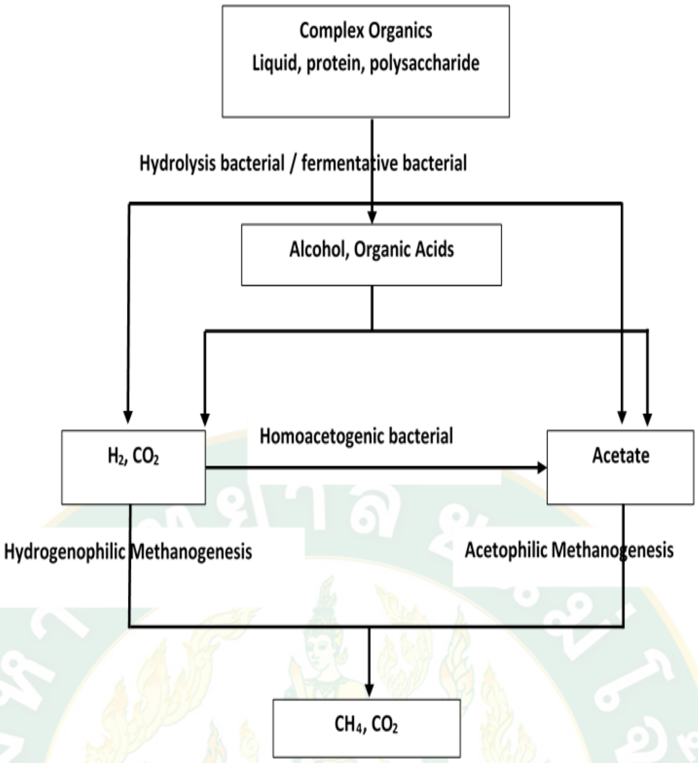
สมการที่ 2.1

2) กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะที่ไร้อากาศ (Anaerobic Digestion)

การย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะที่ไร้อากาศเป็นกระบวนการเปลี่ยนสารอินทรีย์เป็นก๊าซชีวภาพในสภาวะที่ไร้อากาศ ดังสมการ 2.2 (ภาพที่ 3)

$$\text{อินทรีย์สาร} + \text{จุลินทรีย์} \longrightarrow CH_4 + CO_2 + NH_3 + H_2 + H_2S$$

สมการที่ 2.2



ภาพที่ 3 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะที่ไร้อากาศ

กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะที่ไร้อากาศ จะประกอบด้วยขั้นตอน 4 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 ขั้นตอนไฮโดรไลซิส เป็นขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ให้มีขนาดเล็กลง จนเป็นโมเลกุลเชิงเดี่ยว ด้วยเอมไซม์เอกซ์ตราเซลลูลาร์ (Extra Cellular Enzyme) มาช่วยสลายโครงสร้างสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ให้แตกลงเป็นโมเลกุลเชิงเดี่ยว เช่น การย่อยสลายแป้งเป็นน้ำตาลกลูโคส การย่อยสลายไขมันเป็นกรดไขมัน และการย่อยโปรตีนเป็นกรดอะมิโน แบคทีเรียที่ใช้ในกระบวนการนี้คือ ไฮโดรไลติกแบคทีเรีย (Hydrolytic Bacteria) (Benedikt H. and et.al., 2020)

ขั้นตอนที่ 2 ขั้นตอนอะซิโดเจนนิซิส เป็นขั้นตอนที่อาศัยแบคทีเรียเป็นส่วนใหญ่โดยกรดอะมิโน และน้ำตาลถูกย่อยสลายผ่านกระบวนการหมักสารอินทรีย์ซึ่งทำหน้าที่เป็นทั้งตัวให้และตัวรับอิเล็กตรอน ผลผลิตหลักของปฏิกิริยานี้ คือ สารกลางที่จะถูกย่อยสลายได้ต่อไป (Intermediary Degradative Products) (Benedikt H. and et.al., 2020) เช่น กรดโพรไพโอนิก (Propionic Acid) กรดบิวทิริก (Butyric Acid) เป็นต้น และสารตั้งต้นโดยตรงของการผลิตมีเทน (Direct Ethane Precursors) คือ กรดอะซีติก (Acetic Acid) และก๊าซไฮโดรเจน แต่อย่างไรก็ตาม

ผลผลิตของก๊าซไฮโดรเจนมีเพียงเล็กน้อยซึ่งได้มาจากการปล่อยไฮโดรเจนออก (Dehydrogenation) ของไพรูเวท นอกจากนี้ผลผลิตของปฏิกิริยานี้ ได้แก่ แอลกอฮอล์ และคีโตน เช่น เอทานอล เมทานอล กลีเซอรอล อะซิโตน อะซิเตต และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แบคทีเรียที่เกี่ยวข้องในปฏิกิริยานี้เรียกว่า อะซิโดจินิกแบคทีเรีย (Acidogenic Bacteria)

ขั้นตอนที่ 3 ขั้นตอนอะซิโตเจนนิซิส (Acetogenesis) เป็นขั้นตอนการเปลี่ยนกรดอินทรีย์ขนาดเล็ก (Volatile Fatty Acid) และสารตัวกลางอื่น ๆ ได้แก่ กรดโพรไพโอนิก กรดบิวทิริก และแอลกอฮอล์ เป็นสารประกอบอะซิเตต ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากการทำงานของอะซิโตจินิกแบคทีเรีย (Acetogenic Bacteria) หรือแบคทีเรียที่สร้างอะซิเตต (Acetate) และไฮโดรเจน (H_2-producing Bacteria) ซึ่งได้แก่ Syntrobacter Wolinii และ Syntrophomonas Wolfei (Benedikt H. and et.al., 2020) โดยแบคทีเรียกลุ่มนี้ต้องอาศัยสภาวะของความดันไฮโดรเจนต่ำ (Low Hydrogen Tensions) สำหรับเปลี่ยนรูปกรดอินทรีย์ขนาดเล็ก ในกรณีที่ความดันไฮโดรเจนสูงการเกิดสารประกอบอะซิเตตจะลดลงและสารอินทรีย์จะถูกเปลี่ยนเป็นกรดโพรไพโอนิก กรดบิวทิริก และเอทานอลมากกว่าก๊าซมีเทน

เชื้อแบคทีเรียชนิดอะซิโตจินิก และเมทาโนเจน (Methanogen) มีความสัมพันธ์ที่ให้ประโยชน์ซึ่งกันและกัน คือ เมทาโนเจนจะช่วยให้เกิดความดันของก๊าซไฮโดรเจนต่ำ ดังนั้นในขั้นตอนอะซิโตเจนนิซิสถือเป็นขั้นตอนที่สำคัญในการสะสมของกรดอินทรีย์ขนาดเล็ก และก๊าซไฮโดรเจนหากมีการสะสมในปริมาณสูงพอจะไปยับยั้งขั้นตอนต่อไปจนทำให้การทำงานของแบคทีเรียชนิดอะซิโตจินิกเกิดขึ้นได้ดี (Metcalf., 2003) (สมการ 2.3 ถึง 2.5)

$CH_3COOH + 2H_2 \longrightarrow CH_3CH_2OH + H_2O$ สมการที่ 2.3

(กรดอะซิติก) → (เอทานอล)

$CH_3CH_2COOH + 2H_2O \longrightarrow CH_3COOH + CO_2 + 3H_2$ สมการที่ 2.4

(กรดโพรไพโอนิก) → (กรดอะซิติก)

$CH_3CH_2CH_2COOH + 2H_2O \longrightarrow 2CH_3COOH + 2H_2$ สมการที่ 2.5

(กรดบิวทิริก) → (กรดอะซิติก)

ขั้นตอนที่ 4 ขั้นตอนเมทาโนเจนนิซิส (Methanogenesis) เป็นขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทน โดยแบคทีเรียกลุ่มเมทาโนเจน ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มย่อย ดังนี้

ไฮโดรจิโนโทรฟิคเมทาโนเจน (Hydrogenotrophic Methanogens) เป็นแบคทีเรียที่เปลี่ยนก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซมีเทน เรียกปฏิกิริยานี้ว่าปฏิกิริยารีดักชันของคาร์บอนไดออกไซด์ (Reduction of CO_2) (สมการ 2.6) แบคทีเรียเมทาโนเจนจะช่วยรักษาระดับความดันไฮโดรเจนให้อยู่ในระดับต่ำซึ่งจำเป็นสำหรับการเปลี่ยนกรดอินทรีย์ขนาดเล็ก และแอลกอฮอล์เป็นกรดอะซิติก

$$CO_2 + 4H_2 \longrightarrow CH_4 + 2H_2O \quad \text{สมการที่ 2.6}$$

อะซีโตโทรฟิคเมทาโนเจน (Acetotrophic Methanogens) หรืออะซีโตคลาสติกเมทาโนเจน (Acetoclastic Methanogens) เป็นแบคทีเรียที่เปลี่ยนกรดอะซิติกให้เป็นก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เรียกปฏิกิริยานี้ว่า ปฏิกิริยาอะซีโตคลาสติก (Acetoclastic Reaction) (สมการ 2.7)

$$CH_3COOH \longrightarrow CH_4 + CO_2 \quad \text{สมการที่ 2.7}$$

แบคทีเรียกลุ่มอะซีโตโทรฟิคเมทาโนเจนมีอัตราการเจริญเติบโตช้าคือใช้เวลา 2-3 days ในการเพิ่มจำนวนเซลล์เป็น 2 เท่า ขณะที่เมทาโนเจนกลุ่มที่สร้างกรดมีอัตราการเจริญเติบโตเร็ว คือ ใช้เวลาประมาณ 2-3 h ในการเพิ่มจำนวนเซลล์เป็น 2 เท่า แบคทีเรียกลุ่มอะซิโตคลาสติกนี้แบ่งออกเป็น 2 จีนัส คือ เมทาโนซาร์ไซนา (Methanosarcina) และเมทาโนทริค (Methanothrix)

ก๊าซมีเทนที่เป็นผลผลิตจากการเปลี่ยนรูปของกรดอะซิติกมีปริมาณสูงกว่าคิดเป็น 66.67 % ส่วนที่เหลือมาจากปฏิกิริยาการรีดักชันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์โดยก๊าซไฮโดรเจนคิดเป็น 33.33 %

ปัจจัยที่มีผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ

ปัจจัยที่มีผลต่อระบบสามารถจำแนกออกเป็น 2 ลักษณะ คือ

1) ปัจจัยทางด้านสภาพแวดล้อม ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง อุณหภูมิ ความเป็นด่าง สารพิษ สารยับยั้งปฏิกิริยา และลักษณะของของเสีย

2) ปัจจัยที่เกี่ยวข้องการกับเดินระบบ ได้แก่ การกวนผสม อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์และเวลากักเก็บ

1. ค่าความเป็นกรด–ด่าง (pH)

แบคทีเรียสร้างมีเทน (Methanogens) จะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า pH มากที่สุด โดยขั้นตอนกระบวนการการผลิตก๊าซชีวภาพ (Methanogenesis) จะเกิดขึ้นได้ดีที่ค่า pH มีค่า

อยู่ในช่วง 6.8 ถึง 7.2 และค่า pH ที่เหมาะสมมีค่าเท่ากับ 7.0 (Venelin H. and et.al., 2020) ทั้งนี้ ประสิทธิภาพของระบบจะมีค่าลดลงเมื่อค่า pH ต่ำกว่า 6.2 ในระหว่างที่แบคทีเรียชนิดที่สร้างกรด (Acidogens) สามารถอาศัยอยู่ในสภาพที่ ค่า pH ระหว่าง 5.0 ถึง 8.0 นอกจากนี้ค่า pH ยังส่งผลทางอ้อมต่อแบคทีเรียสร้างมีเทน โดยจะส่งผลต่อความเข้มข้น และไอออนของสารต่าง ๆ เช่น กรดไขมันระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid) แอมโมเนีย และไฮโดรเจนซัลไฟด์ ซึ่งจะมีความเป็นพิษต่อแบคทีเรียแตกต่างกัน ในการออกแบบระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ บางครั้งได้แยกขั้นตอนของการสร้างกรด และการสร้างมีเทนออกจากกัน (Two-stage Anaerobic Reactor) เพื่อที่จะทำให้สามารถย่อยสลายน้ำเสียที่มีองค์ประกอบของเซลลูโลสหรือส่วนที่มีองค์ประกอบเป็นไฟเบอร์บางส่วนก่อน เช่น การหมักขยะอินทรีย์ เป็นต้น (Venelin H. and et.al., 2020)

2. กรดไขมันระเหยง่าย (VFA) และสภาพความเป็นด่าง (ALK)

ปริมาณ VFA และปริมาณ ALK เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมากต่อการทำงานของแบคทีเรียในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้อากาศ ซึ่งต้องอาศัยแบคทีเรียสองพวกทำงานร่วมกันอย่างต่อเนื่อง ความเป็นกรดในระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศจะมาจากกรดคาร์บอนิค และกรดไขมันระเหยง่าย โดยกรดไขมันระเหยง่ายจะมีผลต่อระบบบำบัดมากกว่ากรดคาร์บอนิค ปกติปริมาณ VFA ในรูปของกรดอะซิติก (CH_3COOH) ควรมีค่าอยู่ในช่วง 50 ถึง 500 mg/L หากปริมาณ VFA ในรูปของกรดอะซิติกมีค่ามากกว่า 2,000 mg/L จะทำให้ประสิทธิภาพของระบบผลิตก๊าซชีวภาพลดลง และถ้าระบบมีปริมาณ VFA ในรูปของกรดอะซิติกมีค่าตั้งแต่ 8,000 ถึง 10,000 mg/L ขึ้นไป จะมีผลทำให้เกิดความเป็นพิษต่อระบบโดยตรง (กระทรวงพลังงาน, 2557)

ดังนั้น ภายในระบบจะต้องมีการรักษาสมดุลของระบบให้มีปริมาณการสร้างกรดไขมันระเหยง่ายให้เท่ากับหรือต่ำกว่าอัตราการใช้ไปเพื่อสร้างก๊าซมีเทน แต่ถ้ามีการสร้างกรดไขมันระเหยง่ายมากเกินไปจะส่งผลให้ pH ของระบบต่ำ เกิดการยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียสร้างมีเทน ซึ่งเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นได้บ่อยในระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ ในบางครั้งไม่สามารถลดปริมาณการสร้างกรดไขมันระเหยง่ายได้ การป้องกันปัญหาที่เกิดขึ้นจากการสร้างกรดมากเกินไปโดยการปรับให้ระบบมีบัฟเฟอร์ที่เพียงพอเพื่อป้องกันการลดลงอย่างรวดเร็วของ pH ในระบบ ทั้งนี้ปริมาณ ALK ในระบบจะเป็นตัวบ่งชี้ถึงบัฟเฟอร์ที่มีอยู่ในระบบ โดยปริมาณ ALK ในถังหมักแบบไม่ใช้อากาศจะอยู่ในรูปของไบคาร์บอเนต (Hartung, C., and et.al., 2020) ซึ่งจะทำหน้าที่ในการสะเทินคาร์บอนไดออกไซด์ และกรดไขมันระเหยง่ายในระบบเพื่อให้ pH เป็นกลางสำหรับปริมาณ ALK น้อยที่สุดในการป้องกันไม่ให้

เกิดการเปลี่ยนแปลงของปริมาณ VFA อย่างรวดเร็ว มีค่าเท่ากับปริมาณด่างไบคาร์บอเนตที่ใช้ในการสะเทินกรดคาร์บอนิครวมกับปริมาณด่างไบคาร์บอเนตเพื่อใช้ในการสะเทินกรดไขมันระเหยง่าย (Venelin, H., and et.al., 2020)

สำหรับปริมาณด่างที่ต้องการเพื่อใช้ในการสะเทินกรดคาร์บอนิค ขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลายของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในน้ำ ซึ่งความสามารถในการละลายจะสอดคล้องกับความดันย่อย (Partial Pressure) ของคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งหากถังปฏิกิริยามีการระบายก๊าซที่ดี การสะสมของคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบจะมีไม่มากนัก ย่อมทำให้ความต้องการด่างเพื่อสะเทินกรดคาร์บอนิคมีค่าไม่สูงนักหรือค่าไม่เปลี่ยนแปลงมาก ส่วนปริมาณด่างเพื่อใช้ในการสะเทินกรดไขมันระเหยง่ายจะมีค่าเท่ากับปริมาณ VFA

ในบางครั้งการหาปริมาณด่างที่ต้องการจากปริมาณกรดไขมันระเหยง่าย และกรดคาร์บอนิคในน้ำอาจทำให้การควบคุมระบบทำได้ล่าช้า แก้ไขปัญหาได้ไม่ทันท่วงที ดังนั้นจะประเมินปริมาณด่างที่ต้องเติมจากสัดส่วนระหว่างปริมาณกรดไขมันระเหยง่าย และปริมาณด่างที่มีอยู่ในระบบ หากอัตราส่วนของ VFA/ALK ในรูปของไบคาร์บอนเนต มีค่าน้อยกว่า 0.4 แสดงว่าระบบมีกำลังบัฟเฟอร์สูง หากอัตราส่วนดังกล่าวมีค่าสูงกว่า 0.8 (Ratanatamskul., 2016) แสดงว่ากำลังบัฟเฟอร์ของระบบมีค่าต่ำมากซึ่งค่า pH สามารถที่จะลดลงได้อย่างรวดเร็ว นอกจากจะเปรียบเทียบในรูปของปริมาณ VFA กับปริมาณ ALK การควบคุมปริมาณบัฟเฟอร์ในระบบอาจจะวัดในรูปของค่า ALK กับ COD โดยสัดส่วนระหว่างปริมาณ ALK กับ COD (ALK/COD) ของน้ำเข้าไม่ควรสูงกว่า 0.4 แต่การวัดในวิธีของสัดส่วนดังกล่าวไม่ค่อยได้รับความนิยมเท่ากับในรูปแบบ VFA/ALK ซึ่งปริมาณ ALK ภายในระบบหมักแบบไม่ใช้อากาศมาได้จากหลายแหล่ง เช่น อาจมาจากเกลือของแอมโมเนีย จำพวกแอมโมเนียมไบคาร์บอเนต (NH_4HCO_3) และแอมโมเนียอะซิเตต (CH_3COONH_4) ซึ่งกลไกดังกล่าวสามารถเกิดขึ้นได้เอง เนื่องจาก Alanine และ Glycine จะมีอยู่ในน้ำทิ้งที่มีโปรตีนผสมอยู่ (Hartung C., and et.al., 2020) ดังสมการที่ 2.8

$$CH_3\text{-}CH(NH_2)\text{-}COOH + 2CH_2(NH_2)COOH + 5H_2O \longrightarrow 3CH_4 + CO_2 + NH_4HCO_3$$

Alanine Glycine Bicarbonate Alkalinity สมการที่ 2.8

ถ้ากระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศเป็นไปอย่างสมบูรณ์ แอมโมเนียไบคาร์บอเนตจะเป็นตัวควบคุมการเปลี่ยนแปลงของค่า pH โดยจะทำหน้าที่เป็นตัวบัฟเฟอร์ ซึ่งจะลดสภาพความเป็นกรดอันเนื่องมาจากกรดไขมันระเหยง่ายดังแสดงในสมการที่ 2.9 - 2.11

$$C_6H_{12}O_6 \xrightarrow{\text{Acid Formers}} 3CH_3COOH \qquad \text{สมการที่ 2.9}$$

$$3CH_3COOH + 3NH_4HCO_3 \xrightarrow{\text{Intermediate}} 3CH_3COONH_4 + 3H_2 + 3CO_2 \qquad \text{สมการที่ 2.10}$$

$$3CH_2COONH_4 + 3H_2O \xrightarrow{\text{Methane Formers}} 3CH_4 + 3NH_4HCO_3 \qquad \text{สมการที่ 2.11}$$

จากสมการที่ 2.9 ถึง 2.11 ถ้าในน้ำเสียมีปริมาณของไนโตรเจนที่เพียงพอ และมีกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่สิ้นสุดอย่างสมบูรณ์แล้วจะได้แอมโมเนียมไบคาร์บอเนต ซึ่งเป็นบัฟเฟอร์ที่ทำปฏิกิริยากับปริมาณ VFA ที่เกิดจากขั้นตอนการสร้างกรดอินทรีย์ และจะได้แอมโมเนียมอะซิเตต (CH_3COONH_4) ซึ่งจะถูกนำไปย่อยสลายโดยกระบวนการของแบคทีเรียที่สร้างมีเทนให้กลายเป็นก๊าซมีเทนต่อจากนั้นจะได้องค์ประกอบของแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตกลับคืนมา แต่ถ้าปริมาณของไบคาร์บอเนตบัฟเฟอร์ไม่เพียงพอที่จะทำปฏิกิริยากับกรดไขมันระเหยง่ายแล้ว จะส่งผลทำให้ได้ค่า VFA มีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นทำให้ค่า pH ลดต่ำลง จนกระทั่งแบคทีเรียสร้างมีเทนไม่สามารถย่อยสลายแอมโมเนียมอะซิเตตได้ ซึ่งพบว่าการเปลี่ยนแปลงค่า pH ยังขึ้นอยู่กับปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ที่เกิดขึ้นในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้อากาศอีกด้วย

สำหรับปริมาณความเป็นด่างที่มีอยู่ในระบบนั้นได้พบความสัมพันธ์ระหว่างค่า pH และปริมาณไบคาร์บอเนตที่เหมาะสม ซึ่งจากการทำการทดลอง (Zangta S., and et.al., 2019) พบว่าปริมาณ ALK ไม่ควรต่ำกว่า 1,000 mg/L ในรูปของหินปูน เพื่อป้องกันไม่ให้ค่า pH ภายในระบบมีค่าลดต่ำลงจนเป็นอันตรายต่อแบคทีเรียในระบบ ในกรณีที่ความเป็นด่างมีไม่เพียงพอก็จำเป็นต้องเติมสารเคมีลงไปโดยปริมาณสารเคมีที่เติมขึ้นอยู่กับขนาดของถังปฏิกิริยา

3. สารพิษ และสารยับยั้งปฏิกิริยา

น้ำเสียที่จะบำบัดด้วยกรรมวิธีทางชีววิทยาไม่ควรมีสารที่เป็นพิษอยู่ ซึ่งสารที่เป็นพิษอาจอยู่ได้ทั้งในรูปของสารอินทรีย์หรืออนินทรีย์ ทั้งนี้ผลของสารพิษมีตั้งแต่พิษโดยตรง (Toxic) ลงไปถึงแค่เพียงยับยั้ง (Inhibited) การทำงานของแบคทีเรีย โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลของสารพิษที่มีต่อแบคทีเรียที่สร้างมีเทน เนื่องจากแบคทีเรียสร้างมีเทนจะมีความไวต่อสิ่งที่มารบกวน โดยสารที่เป็นพิษหรือสารที่ยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียในระบบบำบัดน้ำทิ้งทางชีววิทยาแบบไม่ใช้อากาศแบ่งออกได้เป็น 4 กลุ่ม ดังต่อไปนี้ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2563)

1) ไอออนบวก

ไอออนบวกที่เป็นพิษต่อแบคทีเรียในระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศได้แก่ โซเดียม (Na^+) โพแทสเซียม (K^+) แมกนีเซียม (Mg^{2+}) และแคลเซียม (Ca^{2+}) ซึ่งธาตุเหล่านี้หากมีความเข้มข้นที่พอเหมาะจะเป็นธาตุที่มีประโยชน์ต่อแบคทีเรีย แต่ถ้ามีมากเกินความจำเป็นจะเกิดเป็นพิษต่อแบคทีเรียได้ ปกติไอออนบวกที่มีวาเลนซีสูง (มีประจุบวกสูง) จะมีความเป็นพิษมากกว่าไอออนบวกที่มีวาเลนซีต่ำ ระดับความเป็นพิษของไอออนบวกต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 1 (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2563)

ตารางที่ 1 ความเข้มข้นของไอออนบวกที่กระตุ้นและยับยั้งปฏิกิริยา

ชนิดของไอออนบวก	ความเข้มข้น (mg/L)		
	กระตุ้น	ยับยั้งปานกลาง	ยับยั้งมาก
Na^+	100 – 200	3,500 – 5,500	>8,000
K^+	200 – 400	2,500 – 4,500	>12,000
Ca^{2+}	100 – 200	2,500 – 4,500	>8,000
Mg^{2+}	75 – 150	1,000 – 1,500	>3,000

ที่มา : กรมโรงงานอุตสาหกรรม, (2563)

พิษของไอออนบวกสามารถลดลงได้ (Antagonism) เมื่ออยู่ร่วมกับธาตุอื่น ๆ ในปริมาณที่เหมาะสม เช่น พิษของ Na^+ มีความเข้มข้น 3,500 mg/L สามารถทำให้ลดลงได้ ถ้าในระบบมี Mg^{2+} และ Ca^{2+} ที่มีความเข้มข้นอยู่ระหว่าง 50 ถึง 1,000 mg/L แต่ในทางตรงกันข้ามไอออนบางชนิดจะไปเพิ่มความเป็นพิษให้มากขึ้นเมื่ออยู่ร่วมกัน (Synergism) การลดหรือเพิ่มความเป็นพิษของไอออนบวกแต่ละชนิด (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2563) ดังแสดงได้ตามตารางที่ 2 และตารางที่ 3

ตารางที่ 2 การเพิ่มความเป็นพิษของไอออนแต่ละชนิด

ไอออนที่เป็นพิษ	ไอออนเสริมความเป็นพิษ
Ammonium (NH_4^+)	Calcium, Magnesium, Potassium
Calcium (Ca^{2+})	Ammonium, Magnesium
Magnesium (Mg^{2+})	Ammonium, Calcium
Potassium (K^+)	None
Sodium (Na^+)	Ammonium, Calcium, Magnesium

ที่มา : กรมโรงงานอุตสาหกรรม, (2563)

ตารางที่ 3 การลดความเป็นพิษของไอออนแต่ละชนิด

ไอออนที่เป็นพิษ	ไอออนเสริมความเป็นพิษ
Ammonium (NH_4^+)	Sodium
Calcium (Ca^{2+})	Sodium, Potassium
Magnesium (Mg^{2+})	Sodium, Potassium
Potassium (K^+)	Ammonium, Calcium,
Sodium (Na^+)	Magnesium Sodium, Potassium

ที่มา : Chayanon S., and et.al., (2019)

4. อุณหภูมิสำหรับกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ

ช่วงของอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของแบคทีเรียแบบไร้อากาศสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง คือ

ช่วงเทอร์โมฟิลิก (Thermophilic Range) จะมีอุณหภูมิประมาณ 50 ถึง 65 °C โดยเรียกแบคทีเรียที่ทำงานในช่วงอุณหภูมินี้ว่า Thermophilic Bacteria

ช่วงมีโซฟิลิก (Mesophilic Range) จะมีอุณหภูมิประมาณ 20 ถึง 45 °C โดยเรียกแบคทีเรียที่ทำงานในช่วงอุณหภูมินี้ว่า Mesophilic Bacteria

ช่วงไซโครฟิลิก (Psychrophillic Range) จะมีอุณหภูมิประมาณ 5 ถึง 15 °C โดยเรียกแบคทีเรียที่ทำงานในช่วงอุณหภูมินี้ว่า Psychrophillic Bacteria

สำหรับกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ การทำงานของแบคทีเรียจะอยู่ในช่วงมีโซฟิลิก และเทอร์โมฟิลิก การบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศในช่วงเทอร์โมฟิลิก แบคทีเรียจะมีอัตราการย่อยสลาย

สารอินทรีย์ และการผลิตก๊าซชีวภาพสูงกว่าในช่วงมีโซฟิลิก โดยสามารถทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้เร็วกว่าช่วงมีโซฟิลิคประมาณ 20 - 50 % ดังนั้นสำหรับในต่างประเทศที่อยู่ในเขตหนาวจึงต้องเพิ่มอุณหภูมิให้กับน้ำทิ้ง แต่สำหรับประเทศไทยนั้นระบบบำบัดจะทำงานอยู่ในช่วงมีโซฟิลิกได้เอง โดยไม่ต้องใช้ความร้อนช่วย แม้ว่าประสิทธิภาพของระบบในช่วงมีโซฟิลิกจะด้อยกว่า แต่เมื่อเปรียบเทียบในเรื่องของค่าใช้จ่าย พบว่าค่าใช้จ่ายในการทำความร้อนจะแพงมาก ทำให้ผู้ออกแบบในประเทศไทยไม่นิยมที่จะออกแบบระบบบำบัดให้อยู่ในช่วงเทอร์โมฟิลิก

นอกจากนี้แบคทีเรียยังมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เนื่องจากการลดหรือการเพิ่มอุณหภูมิเพียง 2 ℃ ถึง 3 ℃ มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของก๊าซมีเทนอย่างมาก การรักษาอุณหภูมิของระบบให้มีความสม่ำเสมอ จึงมีความสำคัญมากกว่าการควบคุมให้ระบบมีอุณหภูมิอยู่ในจุดที่ให้อัตราการย่อยสลายสูงสุด (กระทรวงพลังงาน, 2557)

5. โลหะหนักในระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ

โลหะหนักที่เป็นพิษต่อแบคทีเรียในระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศได้แก่ แมงกานีส (Mn) สังกะสี (Zn) แคดเมียม (Cd) นิกเกิล (Ni) โคบอลต์ (Co) ทองแดง (Cu) และโครเมียม (Cr) ซึ่งจะอยู่ในน้ำทิ้งในรูปของไอออน ทั้งนี้โลหะหนักที่อาจพบส่วนมากในระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ ดังแสดงในตารางที่ 4 โดยทองแดง (Cu^{2+}) จะมีผลต่อระบบผลิตก๊าซชีวภาพมากที่สุด ทั้งนี้ค่าความเป็นพิษของสารประกอบโลหะหรือไอออนโลหะหนักจะขึ้นอยู่กับระดับพลังศักย์ทางไฟฟ้า ค่า pH และ Ionic Strength ของระบบ เนื่องจากโลหะหนักแต่ละชนิดสามารถที่จะรวมตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับแอมโมเนีย คาร์บอเนต ซัลไฟด์ และฟอสเฟตได้ (Chayanon S., and et.al., 2019) ดังนั้นจึงเป็นการยากในการประเมินความเป็นพิษของโลหะหนักแต่ละชนิด ดังแสดงในตารางที่ 4 แสดงถึงความเป็นพิษของโลหะหนักบางชนิด ส่วนในตารางที่ 5 แสดงถึงการสะสมของโลหะหนักในตำแหน่งต่าง ๆ ในเซลล์ ความเป็นพิษของโลหะหนักสามารถลดลงได้ ถ้าน้ำเสียมีปริมาณของซัลไฟด์ (S^{-2}) ที่พอเหมาะ เนื่องจากว่าซัลไฟด์สามารถรวมกับโลหะหนักเป็นเกลือของโลหะหนักซึ่งไม่ละลายน้ำได้ ยกเว้นในกรณีของโครเมียม เนื่องจากโครเมียมที่มีประจุบวกหก (Cr^{6+}) จะถูกรีดิวซ์ให้เป็นโครเมียมที่มีประจุบวกสาม (Cr^{3+}) ซึ่งโครเมียมจะไม่ละลายน้ำในช่วงของค่า pH ของระบบถังหมักแบบไม่ใช้อากาศ จึงไม่ก่อให้เกิดความเป็นพิษ

ตารางที่ 4 โลหะหนักที่พบในระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ

พบมาก	**พบบ่อย**	**ไม่ค่อยพบ**
Cadmium (Cd^{2+})	Arsenic (As)	Aluminum (Al)
Chromium (Cr^{2+})	Iron (Fe)	Cobalt (Co)
Copper (Cu^{2+})	Manganese (Mn)	Molybdenum (Mo)
Lead (Pb^{2+})	Mercury (Hg)	Selenium (Se)
Nickel (Ni^{2+})	Silver (Ag)	Tin (Sn)
Zinc (Zn^{2+})		

ที่มา : Riazi. M.R., (2018)

สำหรับการใช้ซัลไฟด์เพื่อลดความเป็นพิษของโลหะหนัก จะใช้ความเข้มข้น 0.5 mg ในการตกตะกอนโลหะหนัก 1.0 mg แต่การเติมซัลไฟด์อาจก่อให้เกิดปัญหาต่อระบบ เนื่องจากตัวของซัลไฟด์เอง ซึ่งความเป็นพิษของซัลไฟด์จะอธิบายในหัวข้อต่อไป สำหรับการควบคุมไม่ให้เกิดพิษเนื่องจากการเติมซัลไฟด์ลงไปมากเกินไปทำได้สองวิธีด้วยกัน โดยวิธีแรกให้ทำการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพอย่างต่อเนื่อง และทำการหยุดเติมซัลไฟด์ทันทีเมื่อตรวจพบก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ หรือ ใช้อิเลคโทรดแบบ Silver-Silver Sulfide วัดปริมาณของซัลไฟด์ที่ละลายอยู่ในน้ำ โดยจะวัดออกมาในรูปของ $p_S^{(-\log [S-2])}$ (Jimmy A. and et.al., 2019)

ตารางที่ 5 ความเข้มข้นของโลหะหนักที่ยับยั้งการทำงานของระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ

โลหะหนัก	**ความเข้มข้น (mg/L)**
Arsenic (As)	0.5 - 1.0
Cadmium (Cd)	0.01 - 0.02
Chromium (Cr^{6+})	1.0 - 1.5
Copper (Cu)	0.5 - 1.0
Nickel (Ni)	1.0 - 2.0
Zinc (Zn)	0.5 - 1.0

ที่มา : M.R. riazi, (2018)

ตารางที่ 6 การสะสมของโลหะหนักในระบบถังหมักแบบไม่ใช้อากาศ

โลหะหนัก	ปริมาณการเติม (mg/L)	ความเข้มข้นของโลหะหนักในระบ mg/L	รูปแบบการสะสมของโลหะหนักในระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ (mg/L)			
			ในสารละลาย	ในสารไม่ละลายน้ำ	Extra Cellular	Intra Cellular
โครเมียม	1,200 (P)	41 - 158	0.065 -0.11	10 - 97	0.20 - 0.35	25 - 120
(Cr^{+3})	500 (S)	53 - 412	0.065 - 0.02	10 - 156	0.09 - 0.14	35 - 224
	100 (S)	57 – 106	0.065 - 0.10	18 - 33	0.10 - 0.14	34 - 80
โครเมียม	1,200 (P)	49 - 232	0.065 - 0.25	3 - 55	0.14 - 0.18	48 - 91
(Cr^{+6})	500 (S)	49 - 274	0.065 - 0.65	13 - 146	0.09 - 0.14	30 - 126
	100 (S)	46 – 84	0.065 - 0.065	1 - 23	0.09 - 0.14	34 - 72
ทองแดง	1,200 (P)	15 - 59	0.036 - 0.036	5 - 34	0.05 - 0.07	6 - 20
(Cu)	500 (S)	11 - 73	0.036 - 0.036	4 - 48	0.05 - 0.12	6 - 18
	100 (S)	16 – 22	0.02 - 0.03	7 - 12	0.10 - 0.17	9 - 10
นิกเกิล	1,200 (P)	5 - 31	0.12 - 0.42	2 - 23	0.04 - 0.26	3 - 10
(Ni)	500 (S)	4 - 42	0.14 - 1.22	1 - 31	0.02 - 0.23	2 - 8
	100 (S)	4 – 9	0.12 - 0.53	2 - 6	0.05 - 0.11	1 - 3

หมายเหตุ : (P)-Pulse feed, (S)-Step feed ที่มา : Jimmy A. and et.al., (2019)

1) แอมโมเนีย

แอมโมเนียที่เกิดขึ้นในกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศ เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีไนโตรเจนรวมอยู่ เช่นโปรตีนหรือปุ๋ยยูเรียเป็นต้น และได้ผลผลิตในรูปของแอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) หรือแอมโมเนีย (NH_3) ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่า pH ของระบบ ดังแสดงในสมการที่ 2.12

$$NH_4^+ \longleftrightarrow NH_3 + H^+ \qquad \text{สมการที่ 2.12}$$

ปริมาณของแอมโมเนียไอออนจะมีความสัมพันธ์กับค่า pH เมื่อ pH มีค่าประมาณ 7.0 ความเข้มข้นของแอมโมเนียจะมีประมาณ 1 % ของแอมโมเนียทั้งหมด โดยจะมีความเข้มข้นของแอมโมเนียมากขึ้นเมื่อค่า pH สูงขึ้น สำหรับความเป็นพิษของแอมโมเนียนั้น พบว่า แอมโมเนียจะเป็นพิษต่อแบคทีเรียมากกว่าแอมโมเนียมไอออน โดยพบว่าแอมโมเนียจะเป็นพิษต่อแบคทีเรียเมื่อมีความเข้มข้นมากกว่า 150 mg/L ในขณะที่แบคทีเรียสามารถทนต่อความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออนได้สูงถึง

3,000 mg/L ดังนั้นการรักษาค่า pH ให้มีค่าประมาณ 7.0 หรือต่ำกว่า ทำให้แอมโมเนียทั้งหมดอยู่ในรูปของแอมโมเนียมไอออนซึ่งเป็นพิษต่อระบบน้อยกว่า ดังแสดงในตารางที่ 7 แสดงระดับความเป็นพิษของแอมโมเนียมที่ความเข้มข้นต่าง ๆ สำหรับการลดพิษของแอมโมเนียไนโตรเจนทำได้โดยการเจือจางน้ำเสียหรือทำการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนในน้ำทิ้งก่อนเข้าสู่ระบบบำบัดน้ำเสียเช่น ใช้กระบวนการ Ammonia Stripping เป็นต้น

ตารางที่ 7 ระดับความเป็นพิษของแอมโมเนียมไอออน

แอมโมเนียมไนโตรเจน, NH_4^+-N (mg/L)	**ผลต่อระบบ**
50 - 200	ปริมาณพอเหมาะ
200 - 1,000	ยังไม่เกิดผลชัด
1,500 - 3,000	เริ่มยับยั้งเมื่อมีค่าความเป็นความกรด-ด่าง สูงกว่า 7.0
>3,000	เป็นพิษโดยตรง

ที่มา : Jimmy A. and et.al., (2019)

2) ซัลเฟต (SO_4^{2-})

พิษของซัลไฟด์ต่อแบคทีเรียเกิดขึ้นเนื่องจากน้ำทิ้งที่เข้าสู่ระบบมีปริมาณซัลไฟด์สูง การย่อยสลายซัลเฟต (SO_4^{2-}) หรือโปรตีนในน้ำทิ้ง โดยซัลเฟตในน้ำเสียมีทั้งที่อยู่ในรูปของสารที่ละลายน้ำได้และไม่ละลายน้ำ ขึ้นอยู่กับไอออนประจุบวกที่ซัลเฟตรวมอยู่ โดยส่วนที่มีการรวมกับโลหะหนักจะตกตะกอน ส่วนที่เหลือจะละลายน้ำหรืออยู่ในรูปของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) และเมื่อละลายน้ำสามารถเปลี่ยนเป็นกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ความเข้มข้นของซัลไฟด์ละลายน้ำที่แบคทีเรียสามารถทนได้อยู่ระหว่าง 50 ถึง 160 mg/L และจะเกิดความเป็นพิษขึ้น เมื่อมีความเข้มข้นมากกว่า 200 mg/L วิธีซึ่งสามารถลดความเป็นพิษของซัลไฟด์ลงได้ โดยการทำให้ซัลไฟด์ตกตะกอน ซึ่งการเจือจางน้ำทิ้งหรือการแยกซัลไฟด์ออกจากน้ำทิ้งก่อนเข้าสู่ระบบบำบัด (Richard. E. S. and et.al., 2021)

การที่น้ำเสียมีปริมาณของซัลเฟตมากเช่น น้ำเสียจากโรงงานน้ำยางข้น ปริมาณของซัลเฟตที่มีมากเกินไปจะทำให้มีแบคทีเรียที่สามารถรีดิวซ์ซัลเฟตให้เป็นซัลไฟด์ (Sulfate-Reducing Bacteria, SRB) เช่น Desulfovibrio, Desulfotomaculum เจริญเติบโตได้ดี แบคทีเรียในกลุ่มของ SRB จะใช้ซัลเฟต (SO_4^{2-}) เป็นตัวรับอิเล็คตรอนตัวสุดท้าย และเปลี่ยนเป็นซัลไฟด์ การที่น้ำเสียมีซัลเฟตมากส่งผลให้แบคทีเรียสร้างมีเทนทำงานได้น้อยลงทำให้การผลิตก๊าซมีเทนลดน้อยลง แต่จะได้

ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่มีกลิ่นเหม็นแทนที่ ซึ่งการอธิบายจะอาศัยการเปรียบเทียบกลไกการเกิดปฏิกิริยารีดิวซ์ซัลเฟตและการสร้างมีเทนในรูปของอุณหพลศาสตร์ ดังแสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ค่า ΔG° ในการรีดิวซ์ซัลเฟต และสร้างมีเทน

ปฏิกิริยา	**ΔG° (kJ)**
1. $4H_2 + SO_4^{2-} + H^+ \longrightarrow HS^- + 4H_2O$	-152.2
2. $4H_2 + HCO_3^- + H^+ \longrightarrow CH_4 + 3H_2O$	-135.6
3. $CH_3COO^- + SO_4^{2-} + H^+ \longrightarrow 2HCO_3^- + H_2S$	-47.6
4. $CH_3COO + H_2O \longrightarrow HCO_3^- + CH_4$	-31.0
5. $4CH_2CH_2COO^- + 3\ SO_4^{2-} \longrightarrow 4CH_3COO^- + 4HCO_3^- + 3HS^- + H^+$	-150.6
6. $CH_3CH_2COO^- + 3H_2O \longrightarrow CH_3COO^- + 4HCO_3^- + H^+ + H_2$	-76.1
7. $4CH_3CH_2COO^- + 12H_2O \longrightarrow 4CH_3COO^- + HCO_3^- + H^+ + 3CH_4$	-102.4

ที่มา : Jimmy. A. and et.al., (2019)

จากตารางที่ 8 จะเห็นว่าเมื่อทำการเปรียบเทียบการเกิดปฏิกิริยาการรีดิวซ์ซัลเฟต และการสร้างมีเทน โดยใช้สารตั้งต้นชนิดเดียวกันคือไฮโดรเจน และกรดอะซิติก ในปฏิกิริยาที่รีดิวซ์ซัลเฟตเป็นซัลไฟด์ (ปฏิกิริยาที่ 1 และปฏิกิริยาที่ 3) โดยใช้ไฮโดรเจน และกรดอะซิติกเป็นสารตั้งต้นตามลำดับจะมีค่าพลังงานเสรีของกิ๊บส์ (Gibbs Free Energy, ΔG°) ที่ต่ำกว่าในปฏิกิริยาที่สร้างมีเทน (ปฏิกิริยาที่ 2 และปฏิกิริยาที่ 4) แสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาการรีดิวซ์ซัลเฟตเป็นปฏิกิริยาที่ให้พลังงานมากกว่า ดังนั้นจึงสามารถเกิดปฏิกิริยาขึ้นได้ง่ายกว่าปฏิกิริยาการสร้างมีเทน การที่น้ำเสียมีซัลเฟตในปริมาณที่สูงจึงทำให้ได้ผลผลิตที่เป็นก๊าซมีเทน ลดน้อยลง เนื่องจากสารตั้งต้นถูกใช้ไปในการรีดิวซ์ซัลเฟตมากกว่าการสร้างมีเทน ผลผลิตที่ได้จึงเป็นก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่มีกลิ่นเหม็น และที่ค่า pH ต่ำอาจเป็นพิษต่อแบคทีเรียได้ (กระทรวงพลังงาน, 2562)

แต่หากพิจารณาในแง่ของการย่อยสลายกรดโพรพิออนิกเป็นกรดอะซิติกแล้ว (ปฏิกิริยาที่ 5 และปฏิกิริยาที่ 7) พบว่าการรีดิวซ์ซัลเฟตที่เกิดขึ้น สามารถลดการสะสมของกรดโพรพิออนิกในระบบได้ ดังนั้นการที่มีซัลเฟตในน้ำเสียจึงมิได้ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดค่า COD ความเป็นพิษของซัลเฟตที่มีต่อระบบมีความสัมพันธ์กับค่า pH โดยที่ค่า pH อยู่ในช่วง 6.4 ถึง 7.2 ไฮโดรเจนซัลไฟด์สามารถยับยั้งการทำงานของระบบได้ 50% เมื่อมีความเข้มข้นของไฮโดรเจนซัลไฟด์ 250 mg/L

ในขณะที่ไฮโดรเจนซัลไฟด์เพียง 90 mg/L สามารถส่งผลในการยับยั้งการทำงานของระบบได้เท่ากัน เมื่อค่า pH มีค่าอยู่ในช่วง 7.8 - 8.0 (วชิรา ดาวสุด และคณะ 2561)

6. สารอาหารในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ

สารอาหารที่แบคทีเรียต้องการเพื่อการเจริญเติบโต นอกจากธาตุคาร์บอน และธาตุไฮโดรเจน แล้วยังมีธาตุไนโตรเจน ธาตุซัลเฟอร์ ธาตุฟอสฟอรัส ธาตุโพแทสเซียม และธาตุแคลเซียม นอกจากนี้ ยังมีธาตุที่จำเป็นในปริมาณน้อยมาก เช่น เหล็ก, แมงกานีส, สังกะสี, โคบอลต์, ซิลิเนียม, ทังเสตน และนิเกิล เป็นต้น (Jimmy. A. M.-R. and et.al., 2019) อีกด้วย โดยสารอาหารแบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ สารอาหารหลัก (Macronutrients) และ สารอาหารรอง (Micronutrients)

สารอาหารหลัก

สารอาหารหลัก เป็นสารอาหารที่ต้องการในปริมาณมากเพื่อใช้ในการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย ได้แก่ สารประกอบไนโตรเจน (N), สารประกอบฟอสฟอรัส (P) และ คาร์บอน (C) โดยทั่วไปต้องการในปริมาณตามอัตราส่วนระหว่าง COD:N:P เท่ากับ 100:2:0.2 ซึ่งส่วนมากในน้ำเสีย หรือเศษอาหารมักมีสารประกอบไนโตรเจน และสารประกอบฟอสฟอรัสเพียงพอ ดังนั้นจึงจำเป็นต้อง มีการตรวจสอบสัดส่วน COD:N:P ถ้าพบว่ามีสารอาหารไม่เพียงพอก็จำเป็นต้องเติมเพื่อเพิ่ม สารอาหารหลักทั้งสอง (Lalita S., 2017)

สารอาหารรอง

สารอาหารรอง ได้แก่ moderate nutrients และ micronutrients โดยในส่วน moderate nutrients ได้แก่ โซเดียม (Na) โพแทสเซียม (K) และ แมกนีเซีย (Mg) แบคทีเรียมีความต้องการในปริมาณปานกลางเพื่อใช้ในการสร้างเซลล์ใหม่และการทำงานของเซลล์ ส่วน micronutrients เป็นสารอาหารที่แบคทีเรียมีความต้องการในปริมาณต่ำน้อย (ppb) เพื่อใช้ในการสร้างน้ำย่อยต่าง ๆ ของเชื้อจุลินทรีย์ (enzymes) ได้แก่ โลหะหนักที่มีประจุสองบวก (2^+) หรือเรียกว่า divalent metal โลหะหนักที่เป็นพิษต่อแบคทีเรีย ได้แก่ แมงกานีส (Mn), สังกะสี (Zn), แคดเมียม (Cd), นิเกิล (Ni) , โคบอลต์ (Co), ทองแดง (Cu) และโครเมียม (Cr) เป็นต้น โลหะหนักเหล่านี้จะอยู่ในรูปของไอออน โดยทั่วไปในน้ำเสียต่าง ๆ มักมีปริมาณทั้ง Moderate Nutrients และ Micronutrients เพียงพอแต่ ในระบบย่อยสลายแบบปราศจากออกซิเจนอิสระจะมีการผลิตก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) จากการ ย่อยสลายสารโปรตีนที่มีองค์ประกอบของธาตุซัลเฟอร์ และจากสารซัลเฟต โดยไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ เกิดขึ้นส่วนหนึ่งจะละลายน้ำและส่วนที่เหลือจะหลุดออกมาอยู่ในก๊าซที่ผลิตได้สัดส่วนของ

ไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ละลายน้ำจะสูงขึ้นเมื่อค่า pH สูงขึ้น โดยไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ละลายน้ำจะแตกตัวให้ซัลไฟด์ไอออนซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาได้ดีมากกับสารอาหารที่ต้องการในปริมาณน้อยที่เป็นกลุ่มโลหะหนักประจุสองบวกจนเกิดการตกตะกอนของโลหะซัลไฟด์ต่างๆ จนกระทั่งเป็นเหตุทำให้เกิดการขาดแคลนสารอาหารที่ต้องการในปริมาณน้อยบางสารได้ และจะทำให้ประสิทธิภาพของแบคทีเรียลดต่ำลง (Ratanatamskul., 2016) อย่างไรก็ตามในขยะอินทรีย์ และน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไปจะมีสารอาหารเหล่านี้ในระดับที่สมดุลพอเพียง เพราะฉะนั้นในการหมักจึงไม่จำเป็นต้องเติมสารอาหารใด ๆ ลงไป

7. อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์

อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate, OLR) เป็นปัจจัยอย่างหนึ่งที่จะมีผลต่อประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายในระบบ และเป็นตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการออกแบบระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศอีกด้วย เนื่องจากการเปลี่ยนสารอินทรีย์ในระบบให้กลายเป็นก๊าซมีเทน ต้องมีความเข้มข้นของแบคทีเรียในปริมาณพอเหมาะกับปริมาณสารอินทรีย์ จึงจะทำให้แบคทีเรียมีการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ หากมีการป้อนสารอินทรีย์เข้าระบบมากเกินไปจะทำให้การย่อยสลายสารอินทรีย์ลดลง เนื่องจากแบคทีเรียบางส่วนถูกทำลายไปเพราะสภาพที่ไม่สมดุล ในทางตรงกันข้ามหากมีการป้อนสารอินทรีย์เข้าระบบน้อยเกินไป จะทำให้การใช้ถังหมักไม่เต็มประสิทธิภาพไม่คุ้มค่าในการลงทุน และยังส่งผลให้แบคทีเรียในระบบปรับตัวเข้ากับสภาพสารอินทรีย์ที่มีปริมาณต่ำ ผลที่อาจจะตามมา คือ ระบบอาจจะล้มเหลวได้เช่นกัน ค่าของอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์จะแตกต่างไปตามธรรมชาติและชนิดของน้ำเสีย จึงจำเป็นต้องปรับค่าอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ในการเดินระบบให้เหมาะสมกับน้ำเสียที่ใช้ด้วย สำหรับอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่จะใช้เป็นเกณฑ์ในการออกแบบระบบ หาได้จากการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการหรือจากระบบจริงที่มีผู้เดินระบบสำเร็จมาแล้ว (Jimmy and et al., 2019)

8. ระยะเวลาเก็บกัก

ระยะเวลาเก็บกักในระบบของกระบวนการหมักแบบไม่ใช้อากาศ หมายถึงเวลากักเก็บแบคทีเรีย (Solid Retention Time, SRT) หรือเวลากักเก็บของเหลว (Hydraulic Retention Time, HRT) อยู่ในระบบจนกระทั่งหลุดออกมาจากระบบ ซึ่งการควบคุมระบบนิยมใช้ค่าเวลาการกักเก็บของเหลว เนื่องจากคำนวณได้ง่ายกว่า การควบคุมเวลาเก็บกักในการเดินระบบมีความสำคัญเนื่องจากถ้าเวลาเก็บกักยาวนานเกินไปก็จะทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง เพราะต้องใช้ถัง

หมักขนาดใหญ่ ในทางตรงกันข้ามหากใช้เวลาเก็บกักสั้นเกินไป แบคทีเรียก็จะเจริญเติบโตไม่ทัน เกิดการหลุดออกจากระบบแบคทีเรียจำนวนมาก ซึ่งส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานของระบบลดลง การควบคุมเวลาเก็บกักที่เหมาะสมช่วยให้แบคทีเรียที่อยู่ในระบบมีปริมาณคงที่หรือมีปริมาณเพิ่มขึ้น ระยะเวลาเก็บกักเป็นค่าที่ขึ้นอยู่กับปัจจัยสภาพแวดล้อมภายในระบบและลักษณะของของเสียที่ป้อนเข้าสู่ระบบ รวมไปถึงชนิดของแบคทีเรียในระบบเป็นสำคัญ (กระทรวงพลังงาน, 2563)

ระบบการป้อนสารอินทรีย์

การป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบหมักหรือถังปฏิกิริยาจำแนกตามลักษณะการป้อนสามารถแบ่งได้เป็น 3 วิธี ดังต่อไปนี้

1) **ระบบแบบกะ (Batch Fermentation)**

เป็นลักษณะการป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบหมักหรือถังปฏิกิริยาเพียงครั้งเดียวให้เต็มระบบในการเริ่มต้นระบบ (Holm-Niels J.B., and et.al., 2019) หลังจากเริ่มต้นระบบจะทำการปล่อยให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียในระบบ และจะไม่มีการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มเข้าสู่ระบบอีกสามารถสังเกตการย่อยสลายสารอินทรีย์จนหมด ซึ่งสังเกตได้จากไม่มีก๊าซเกิดขึ้น จึงถ่ายหรือสูบตะกอนทิ้งไป แล้วทำการเติมสารอินทรีย์เข้าไปใหม่ ระบบนี้เหมาะสมกับวัตถุดิบที่มีปริมาณมาก แต่ต้องใช้ระยะเวลาในการดำเนินระบบนาน ระบบการหมักแบบนี้ประสิทธิภาพจะไม่ดีนักและความเสถียรภาพของระบบไม่คงที่ เนื่องจากปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นไม่สม่ำเสมอ

2) **ระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-Continuous Fermentation)**

เป็นลักษณะการป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบหมัก หรือถังปฏิกิริยาในลักษณะเป็นช่วง ๆ แต่สม่ำเสมอ โดยทำการป้อนสารอินทรีย์เข้า และถ่ายวัสดุหมักออกที่ผ่านการกำจัดสารอินทรีย์ แล้วออกจากระบบหรือถังปฏิกิริยา (Holm-Niels J.B., and et.al., 2019) ระบบนี้เหมาะสมสำหรับใช้ในกรณีที่มีวัตถุดิบเป็นประจำ และถังหมักหรือถังปฏิกิริยาจะมีท่อป้อนวัตถุดิบลงในระบบ และท่อสำหรับให้วัตถุดิบเก่าในระบบที่ผ่านการย่อยสลายแล้วไหลล้นออกมา ปกติจะเติมสารอินทรีย์ทุกวัน วันละครั้ง การหมักแบบนี้จะส่งผลดีต่อการทำงานของแบคทีเรีย เนื่องจากช่วยให้เกิดสภาวะคงตัวของระบบเพราะแบคทีเรียในกลุ่มที่สร้างมีเทนไวต่อการเปลี่ยนแปลงต่อความเข้มข้นของสารอาหาร ช่วยลดปัญหาการเพิ่มสารอาหารเข้าสู่ระบบอย่างกะทันหัน (วชิรา ดาวสุด, 2561) มีผลทำให้ประสิทธิภาพของระบบดี มีปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นค่อนข้างสม่ำเสมอและนิยมใช้ทั่วไป

3) ระบบแบบต่อเนื่อง (Continuous Fermentation)

เป็นลักษณะการป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบหมักหรือถังหมักปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา วัตถุดิบที่หมักจะถูกย่อยสลายภายในระบบหมักหรือถังปฏิกิริยาช่วงเวลาหนึ่งและถูกถ่ายออกจากระบบหมักหรือถังปฏิกิริยาอย่างต่อเนื่องเช่นเดียวกัน ประสิทธิภาพของระบบจะสูงที่สุดแต่การเติมวัตถุดิบตลอดเวลาด้วยอัตราคงที่นั้น จำเป็นต้องมีเครื่องสูบวัตถุดิบ ดังนั้นในทางปฏิบัติระบบนี้อาจจะมีความยุ่งยาก เมื่อนำไปใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพขนาดเล็กในชนบทไม่มีความเหมาะสมเนื่องจากต้นทุนและระบบค่อนข้างยุ่งยาก (วรพจน์ รัตนพันธุ์, 2560)

เทคโนโลยีระบบการผลิตก๊าซชีวภาพ

สำหรับเทคโนโลยีของการผลิตก๊าซชีวภาพ เป็นระบบที่ออกแบบซึ่งอาศัยกลุ่มของแบคทีเรียชนิดที่ไม่ต้องการออกซิเจนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยระบบหรือบ่อหมักจะทำหน้าที่ควบคุมให้เกิดสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมทำให้ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นภายในระบบ โดยใช้เวลาหมักนานประมาณ 20 - 50 days จึงจะก่อให้เกิดก๊าซชีวภาพ โดยระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่นิยมใช้มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) ระบบตกตะกอนแบบไร้อากาศไหลขึ้น (Up Flow Anaerobic Sludge Blanket, UASB)

ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบแบบตกตะกอนแบบไร้อากาศไหลขึ้นเป็นระบบหนึ่งของการบำบัดทางชีววิทยาที่ได้รับความสนใจ และมีการพัฒนาประสิทธิภาพอย่างต่อเนื่องโดยอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์แขวนลอยซึ่งสามารถพัฒนาให้จุลินทรีย์รวมตัวกันในลักษณะเม็ดตะกอนได้ (Granule) และระบบแบบตกตะกอนแบบไร้อากาศไหลขึ้นจะอาศัยการกวนผสมจากการป้อนสารอินทรีย์จากด้านล่างไหลขึ้นสู่ด้านบน และการกวนผสมที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของก๊าซที่ผลิตได้จาการย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยตะกอนจุลินทรีย์จะถูกแยกออกจากสารอินทรีย์ด้วยอุปกรณ์แยกของแข็ง-ก๊าซ-ของเหลว (Solid-Liquid-Gas Separator) ทำให้สามารถรักษาประสิทธิภาพของจุลินทรีย์ไว้ในระบบได้ (บริษัท กรีนไลฟ์ เทคโนโลยี, 2562)

ส่วนประกอบของระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบตกตะกอนแบบไร้อากาศไหลขึ้น

ส่วนประกอบของถังปฏิกรณ์แบบตกตะกอนแบบไร้อากาศไหลขึ้น ได้แบ่งเป็น 2 ส่วนหลัก คือ ส่วนถังหมักที่มีระบบการกระจายสารอินทรีย์ อยู่ทางส่วนด้านล่างของถัง และส่วนตกตะกอนซึ่งรวมการแยกก๊าซออกบริเวณด้านบนของถังโดยมีกลไกและลักษณะการทำงานดังนี้

ส่วนถังหมัก

เป็นส่วนที่เกิดปฏิกิริยาจะอยู่ทางด้านล่างของถังหมักซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยการไหลของสารอินทรีย์ในถังจะเป็นการไหลจากด้านล่างขึ้นด้านบน โดยมีการป้อนสารอินทรีย์เข้าทางด้านล่างของถังหมัก ซึ่งการป้อนสารอินทรีย์เข้าถังหมักเป็นไปอย่างต่อเนื่องและสม่ำเสมอ การเลี้ยงจุลินทรีย์ในถังหมักจะควบคุมให้เกิดเป็นชั้นตะกอนสะสมโดยสารอินทรีย์ที่ผ่านหมักแล้วจะไหลผ่านชั้นตะกอนของจุลินทรีย์ที่รวมกันเป็นเม็ดตะกอน และเม็ดตะกอนที่มีความหนาแน่นสูงจะจมลงอยู่ด้านล่าง และมีการจัดเรียงตัวจากขนาดใหญ่ขึ้นไปหาเล็ก กลุ่มเชื้อจุลินทรีย์ที่มีความหนาแน่นต่ำ คือ เชื้อจุลินทรีย์ที่มีความเร็วในการจมตัวต่ำ และฟุ้งกระจายขึ้นมา จนกลายเป็นชั้นตะกอนแขวนลอย ส่วนฟองก๊าซที่เกิดขึ้นและการไหลของสารอินทรีย์จากด้านล่างจะช่วยทำให้เกิดการผสมกันในถังปฏิกรณ์

ส่วนตกตะกอนและการแยกก๊าซ

เป็นส่วนที่ทำหน้าที่ควบคุมและลดจำนวนเซลล์ของเชื้อจุลีนทรีย์ที่ถูกชะล้างออกไป รวมทั้งทำหน้าที่รวบรวมก๊าซที่เกิดขึ้น เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป จึงมีการติดตั้งอุปกรณ์แยกก๊าซออกจากสารอินทรีย์และจุลีนทรีย์ (ที่อยู่ในรูปตะกอนแขวนลอย) ไว้ด้านบนของถังปฏิกรณ์ซึ่งจะเรียกว่าเป็นอุปกรณ์ Gas-Solid Separator หรือ GSS โดยการออกแบบจะขึ้นอยู่กับขนาดและรูปร่างของถังปฏิกรณ์ อุปกรณ์ GSS อาศัยหลักการออกแบบเช่นเดียวกับการแยกของเหลวออกจากก๊าซโดยอาศัยหลักการการเคลื่อนที่ของของไหลที่สามารถไหลเลี้ยวเบนไปมาได้ ในขณะที่ก๊าซมีการลอยตัวจากด้านล่างขึ้นสู่ด้านบนเป็นแนวเส้นตรงเท่านั้น ยกเว้นมีสิ่งกีดขวาง มาเปลี่ยนทิศทางการลอยตัวขึ้นของก๊าซ เมื่อก๊าซผ่านพ้นสิ่งกีดขวางนั้นแล้วจะเคลื่อนที่เป็นแนวเส้นตรงดังเดิม ดังนั้น จึงนำหลักการนี้มาออกแบบเครื่อง GSS เพื่อทำให้กระแสของสารอินทรีย์ และกระแสของก๊าซมาพบกันจนเกิดการแยกกระแสของสารอินทรีย์ และกระแสของก๊าซ และสามารถแยกตะกอนจุลีนทรีย์ออกจากสารอินทรีย์ได้ด้วยการตกตะกอนของจุลินทรีย์ที่ไหลขึ้นมาในขณะที่มีความปั่นป่วนต่ำ (บริษัท กรีนไลฟ์ เทคโนโลยี, 2562)

องค์ประกอบของระบบแบบตกตะกอนแบบไร้อากาศไหลขึ้น

องค์ประกอบของระบบแบบตกตะกอนแบบไร้อากาศไหลขึ้น แบ่งออกเป็น 4 องค์ประกอบ ดังนี้

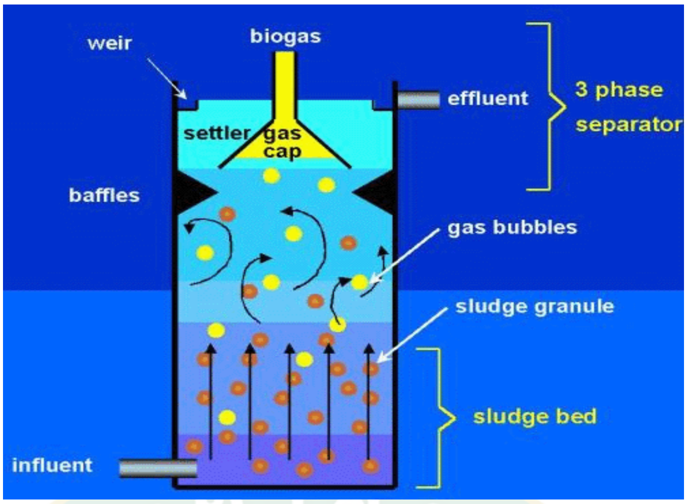
1) องค์ประกอบของตะกอนชั้นล่าง (Sludge Bed) เป็นชั้นตะกอนจุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการตกตะกอนสูงและมีความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์สูง

2) องค์ประกอบของชั้นตะกอนลอย (Sludge Blanket) เป็นชั้นที่ตะกอนจุลินทรีย์ลอยฟุ้งกระจาย เนื่องจากการป้อนเข้าของสารอินทรีย์และก๊าซที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์

3) อุปกรณ์แยกของแข็ง และก๊าซออกจากของเหลว เรียกว่า Gas-Liquid-Solid Separator (GLSS) เป็นอุปกรณ์ที่ทำหน้าที่ในการแยกก๊าซออกจากของผสมระหว่างก๊าซ ของเหลวและของแข็ง (ตะกอนจุลินทรีย์) โดยจุลินทรีย์ที่ถูกแยกจะตกกลับเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ ขณะที่สารอินทรีย์ที่ผ่านการหมักจะไหลออกสู่ส่วนระบายทางด้านบนของถังหมัก และก๊าซจะถูกรวบรวมเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

4) อุปกรณ์สำหรับการตกตะกอน (Settlement Compartment) ในส่วนนี้ตะกอนจุลินทรีย์ที่แยกออกจากสารอินทรีย์จะตกลงสู่ด้านล่างของถังปฏิกรณ์ตามแรงโน้มถ่วงของโลกที่เกิดจากน้ำหนักของตะกอนจุลินทรีย์เอง ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเม็ดตะกอนคายก๊าซที่เป็นตัวพาให้เคลื่อนที่ขึ้นสู่ด้านบนของถังปฏิกรณ์ออกไปแล้ว ทำให้สูญเสียแรงดันที่เกิดจากการเคลื่อนที่ของก๊าซไป ทำให้แรงโน้มถ่วงที่เกิดจากเม็ดตะกอนเองมากกว่าแรงลอยตัวเม็ดตะกอนจึงตกกลับเข้าสู่ส่วนล่างของถังปฏิกรณ์ตามเดิมนั่นเอง (บริษัท กรีนไลฟ์ เทคโนโลยี, 2562)

ระบบแบบตกตะกอนแบบไร้อากาศไหลขึ้นเป็นระบบที่ไม่ต้องอาศัยตัวกลางสำหรับให้จุลินทรีย์ยึดเกาะและอุปกรณ์ในการกวนผสมภายในถังปฏิกรณ์จึงทำให้ลดค่าใช้จ่าย โดยข้อเสียของระบบแบบตกตะกอนแบบไร้อากาศไหลขึ้นที่สำคัญคือความยุ่งยาก และความซับซ้อน ของการเริ่มต้นดำเนินระบบ และการสร้างเม็ดตะกอนจุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพสูงจะส่งผลต่อประสิทธิภาพ และเสถียรภาพของระบบได้ ซึ่งจะนำไปสู่ความล้มเหลวของระบบในที่สุด โดยปัจจัยส่งเสริมกระบวนการเกิดตะกอนจุลินทรีย์ เช่น คุณภาพตะกอนจุลินทรีย์เริ่มต้น อุณหภูมิ องค์ประกอบของสารอินทรีย์ สารอาหาร ธาตุอาหาร สารมลพิษ การกวนผสม และอัตราการป้อนสารอินทรีย์ เป็นต้น (บริษัท กรีนไลฟ์ เทคโนโลยี, 2562)



ภาพที่ 4 ถังหมักแบบ UASB (Up Flow Anaerobic Sludge Blanket, UASB)

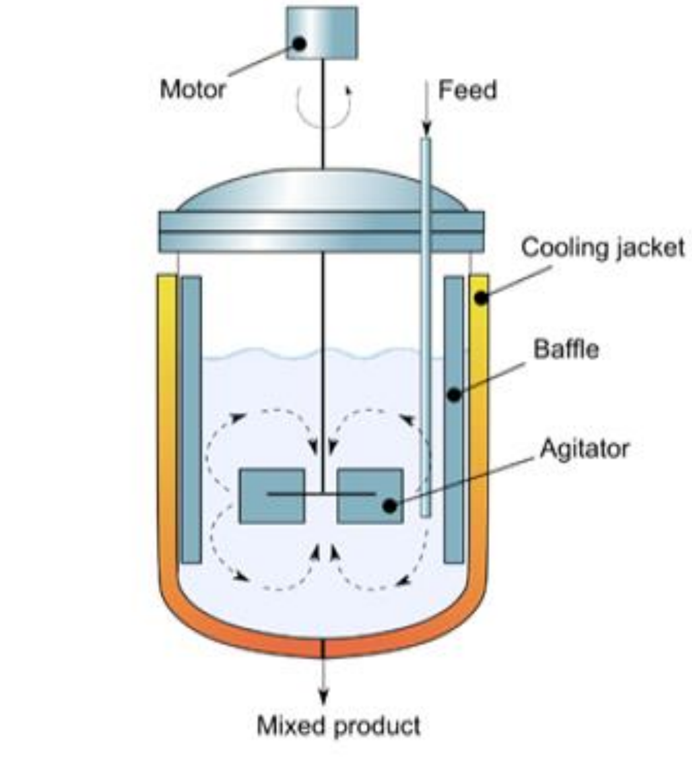
ที่มา : บริษัท กรีนไลฟ์ เทคโนโลยี, (2562)

2) ระบบถังกวนสมบูรณ์แบบไม่ใช้อากาศ (Continuous Stirred Tank Reactor ,CSTR)

ระบบถังกวนสมบูรณ์แบบไม่ใช้อากาศ จัดเป็นถังปฏิกรณ์ที่มีความเข้มข้นของสารละลายเท่ากันทุกจุด (Completely Mixed) ซึ่งถังปฏิกรณ์ชนิดนี้เป็นถังปฏิกรณ์ในอุดมคติ (Ideal Reactor) และส่วนใหญ่มักจะถูกนำไปเป็นต้นแบบของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศจึงทำให้ระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศนี้เป็นระบบที่เก่าแก่ที่สุดโดยถังกวนสมบูรณ์นี้ถูกพัฒนาขึ้นจากถังย่อยตะกอนสารอินทรีย์ซึ่งเป็นถังหมักแบบธรรมดา (Conventional Anaerobic Digester) ที่มีประสิทธิภาพต่ำและมีการกวนผสมที่ไม่ดีจึงทำให้ระยะเวลาในการย่อยสลายยาวนานดังนั้นจึงมีการเพิ่มหน่วยกวน (ใบกวน) เพื่อช่วยจุลินทรีย์จนทำให้อัตราการย่อยสลายดีขึ้น ภาพที่ 5 ตัวอย่างใบกวนในถังหมักแบบถังกวนสมบูรณ์แบบไม่ใช้อากาศ CSTR เช่น แบบเกียว (แบบสกรู หรือ ใช้การแพร่ผ่านของก๊าซ) เพิ่มประสิทธิภาพและเพิ่มโอกาสในการสัมผัสกันของสารอาหารในสารอินทรีย์หรือจากถังย่อยสลัดจ์ (Septic Tank) กับจุลินทรีย์จนทำให้อัตราการย่อยสลายดีขึ้น (ภาพที่ 5) (บริษัท เนทเวิร์คกิ้ง เทคโนโลยี, 2562) ตัวอย่างใบกวนเช่นแบบเกียว (Paddle) แบบสกรู (Screw) หรือ ใช้การแพร่ผ่านของก๊าซ (Gas Diffuser)

ถังปฏิกรณ์ชนิดนี้มีระยะเวลาในการกักเก็บของของแข็ง (Solid Retention Time) เท่ากับระยะเวลาการกักเก็บสารอินทรีย์ (Hydraulic Retention Time) จึงเหมาะสมกับสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยากและสารอินทรีย์ที่มีปริมาณของแข็งสูงรวมไปถึงสารอินทรีย์ที่มีสารพิษปนอยู่ สารพิษ

โดยทั่วไปมักเป็นสารเร่งการตกตะกอนในระบบบำบัดน้ำเสีย (แสวง เกิดประทุม, 2562) เนื่องจากต้องการระยะเวลาในการย่อยสลายดังนั้นขนาดของถังหมักจึงมีขนาดใหญ่และถังปฏิกรณ์ชนิดนี้มีการกวนแบบต่อเนื่องจึงทำให้สารพิษถูกเจือจางลงโดยไม่ก่อให้เกิดผลเสียต่อจุลินทรีย์ (บริษัท เนทเวิร์คกิ้ง เทคโนโลยี, 2562) ข้อดี และข้อจำกัดหรือข้อเสียระบบถังกวนสมบูรณ์แบบไม่ใช้อากาศ แสดงดังตารางที่ 9

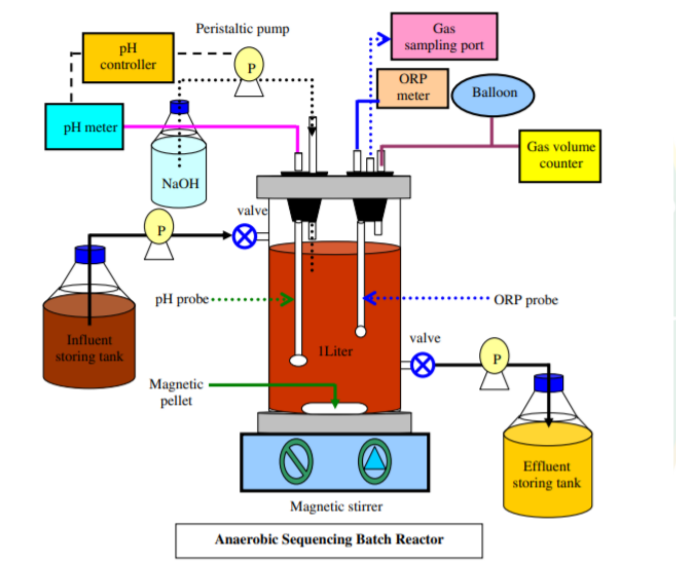


ภาพที่ 5 ถังหมักแบบ CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor ,CSTR)

ที่มา : บริษัท เนทเวิร์คกิ้ง เทคโนโลยี, (2562)

3) ระบบผลิตก๊าซถังหมักตะกอนแบบไม่ใช้อากาศ (Anaerobic Sequencing Batch Reactor, ASBR)

ระบบถังหมักตะกอนแบบไม่ใช้อากาศ มีลักษณะคล้ายบ่อหมักไม่ใช้อากาศ แต่มีขนาดเล็กและมีการเลี้ยงตะกอนหัวเชื้อที่เข้มข้นกว่าบ่อหมักธรรมดา โดยการเลี้ยงตะกอนหัวเชื้อเข้มข้นเริ่มต้นจากการเติมตะกอนหัวเชื้อลงไปในถังปฏิกรณ์และเชื้อจุลินทรีย์ในตะกอนหัวเชื้อจะค่อยๆเพิ่มจำนวนมากขึ้นด้วยการแบ่งเซลล์ จำนวนจุลินทรีย์จะเพิ่มเป็น 2 เท่า (กรมควบคุมมลพิษ,2562) ถังถังหมักตะกอนแบบไม่ใช้อากาศ มีระยะเวลาการกักเก็บสารอินทรีย์ (τ) 2 วัน ขณะที่ถังหมักแบบธรรมดามีเวลากักเก็บสารอินทรีย์ประมาณ 10 - 30 วัน



ภาพที่ 6 ระบบผลิตก๊าซแบบ ASBR (Anaerobic Sequencing Batch Reactor, ASBR)

ที่มา : บริษัท เนทเวิร์คกิ้ง เทคโนโลยี, (2562)

ภาพที่ 6 เป็นระบบการป้อนสารอินทรีย์ของระบบถังหมักตะกอนแบบไม่ใช้อากาศ คล้ายกับระบบแบบตกตะกอนแบบไร้อากาศไหลขึ้นแต่มีความแตกต่างกัน คือ ระบบแบบตกตะกอนแบบไร้อากาศไหลขึ้นสามารถรับสารอินทรีย์ได้เพียง 50% ของสารอินทรีย์ทั้งหมดและการทำงานเป็นแบบต่อเนื่อง ในขณะที่ระบบถังหมักตะกอนแบบไม่ใช้อากาศ ทำงานแบบกะ (Batch) กล่าวคือในแต่ละวันจะใช้เวลาในการป้อนสารอินทรีย์เข้าถังถังหมักตะกอนแบบไม่ใช้อากาศ 23 hr (กรมควบคุมมลพิษ,2562) หลังจากนี้จะเกิดการตกตะกอนของตะกอนหัวเชื้อ (Settle) และสารอินทรีย์ที่ผ่านการหมักจะถูกระบายออกภายในเวลา 1 hr (Decant) ก่อนที่จะรับสารอินทรีย์ในวันถัดไป ข้อดี และข้อจำกัด/ข้อเสียของระบบถังหมักตะกอนแบบไม่ใช้อากาศ แสดงดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ข้อดีและข้อจำกัด/ข้อเสียของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

ระบบผลิตก๊าซชีวภาพ	ข้อดี	ข้อจำกัด/ข้อเสีย
ระบบแบบแบบตกตะกอนแบบไร้อากาศไหลขึ้น	1.สามารถใช้กับสารอินทรีย์ที่มีปริมาณของแข็งสูง 2.ไม่เกิดปัญหาการอุดตันของถังปฏิกรณ์ เนื่องจากแบคทีเรียจะรวมกันเป็นเม็ดที่แน่นและตกตะกอนได้ดี 3.สามารถหยุดระบบได้ทันทีที่ต้องการ และพร้อมทำงานต่อได้อย่างมีประสิทธิภาพดังเดิม ในเวลาประมาณ 2 week (บริษัท กรีนไลฟ์ เทคโนโลยี, 2562)	1.สารอินทรีย์ป้อนเข้าระบบควรมีสารแขวนลอยต่ำ 2.อาศัยระบบการป้อนสารอินทรีย์และระบบการแยกก๊าซออกจากสารอินทรีย์และจุลินทรีย์ (GSS) ที่มีประสิทธิภาพสูง 3.ควบคุมยากเนื่องจากต้องการให้ตะกอนของจุลินทรีย์อยู่ในระบบโดยไม่ถูกชะล้างออกไปโดยเฉพาะชั้นตะกอนลอย (บริษัท กรีนไลฟ์ เทคโนโลยี, 2562)
ระบบแบบถังกวนสมบูรณ์แบบไม่ใช้อากาศ	1.สามารถใช้กับสารอินทรีย์ที่มีสารแขวนลอยสูงได้ 2.มีประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยเฉพาะน้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่มีปริมาณของแข็งแขวนลอยสูง เนื่องจากมีหน่วยการกวนผสม (แสวง, 2562)	1.ต้องการแหล่งพลังงานในหน่วยการกวนผสม 2.น้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมที่ผ่านการหมักมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูง 3.เกิดการสูญเสียจุลินทรีย์ในปริมาณมาก (แสวง, 2562)
ระบบแบบถังหมักตะกอนแบบไม่ใช้อากาศ	1.อาศัยตะกอนหัวเชื้อที่เป็นเม็ดและไม่จำเป็นต้องเลี้ยงเป็นเม็ดตะกอน (Granule) เหมือนระบบแบบตกตะกอนแบบไร้อากาศไหลขึ้น 2.สามารถใช้กับสารอินทรีย์ที่มีตะกอน 3.การติดตั้งและการออกแบบระบบสามารถทำได้ง่าย (กรมควบคุมมลพิษ , 2562)	1.เหมาะสำหรับอุตสาหกรรมขนาดเล็ก (กรมควบคุมมลพิษ, 2562)

ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน

ศักยภาพการผลิตมีเทน (Biochemical Methane Potential, BMP) คือ กระบวนการเติมวัตถุดิบพร้อมกับเชื้อจุลินทรีย์เพียงครั้งเดียวภายใต้กระบวนการไร้ออกซิเจน ซึ่งจะทำให้ทราบถึงปริมาณการเกิดต่อวันต่อปริมาณวัตถุดิบที่เติม และจำนวนวันทั้งหมดที่มีการเกิด จำนวนวันที่วัตถุดิบจะหมักย่อยได้หมด โดยแสดงในรูปของปริมาณก๊าซมีเทนเกิดขึ้นทั้งหมดต่อ gCOD หรือ gVS จากของวัตถุดิบที่เข้าสู่ระบบหมัก (สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์, 2560) ค่า BMP ที่ได้จะแสดงถึงศักยภาพการผลิตมีเทนสูงสุด และประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ของระบบหมักชีวภาพจากวัตถุดิบในแต่ละชนิด โดยสมการที่ใช้ในการคำนวณหาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน มีรายละเอียดดังนี้

การคำนวณหาปริมาณของแข็งระเหยง่ายที่ถูกย่อยสลาย

$$VS_{Removal} = VS_{In} - VS_{Out}$$ สมการที่ 2.12

เมื่อ $VS_{Removal}$ คือ ค่าของแข็งระเหยที่ถูกกำจัด, mg/L

VS_{In} คือ ค่าของแข็งระเหยเข้าระบบ, mg/L

VS_{Out} คือ ค่าของแข็งระเหยออกระบบ, mg/L

การคำนวณหาปริมาณ COD ที่ถูกย่อยสลาย

$$COD_{Removal} = COD_{In} - COD_{Out}$$ สมการที่ 2.13

เมื่อ $COD_{Removal}$ คือ ค่าความสกปรกที่ถูกกำจัด, mg/L

COD_{In} คือ ค่าความสกปรกเข้าระบบ, mg/L

COD_{Out} คือ ค่าความสกปรกออกระบบ, mg/L

ประสิทธิภาพในการกำจัดค่าความสกปรกของเสีย (% $COD_{Removal}$)

$$\%\ COD_{Removal} = [(COD_{in} - COD_{out}) / COD_{in}] \times 100$$ สมการที่ 2.14

เมื่อ $\%COD_{Removal}$ คือ ประสิทธิภาพในการกำจัดค่าความสกปรกของเสีย, %

COD_{in} และ COD_{out} เป็นค่าเริ่มต้นและค่าสุดท้ายของ COD

การหาค่าอัตราการผลิตก๊าซมีเทนของจุลินทรีย์ (Specific Methane Yield)

อัตราการผลิตก๊าซมีเทนของจุลินทรีย์ = ปริมาณก๊าซมีเทน (L)/น้ำหนักของ COD ที่ถูกย่อยสลาย (kg)

สมการที่ 2.15

1) การหาศักยภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ให้ก๊าซมีเทน (%BMP)

%BMP = (อัตราการผลิตก๊าซมีเทนของจุลินทรีย์/ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นตามทฤษฎี) x 10

สมการที่ 2.16

จากทฤษฎี COD 1 g เปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทน 395 ml (35 C° ,1 atm) (Speece, 1996)

$$\frac{BMP(mlCH_4)}{gCOD} = \frac{Biogas\ Production(L) \times CH_4(\%)}{(COD_{in} - COD_{out})(mg/L)}$$ สมการที่ 2.17

2) ศักยภาพในการให้พลังงานของก๊าซชีวภาพ

ในงานวิจัยกล่าวถึงการผลิตไฟฟ้าด้วยก๊าซชีวภาพ สิ่งแรกที่ควรคำนึงถึง คือแหล่งพลังงานที่จะนำมาเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้า จากที่ได้กล่าวมาแล้วข้างต้นว่าประเทศไทยมีศักยภาพด้านพลังงานชีวมวล ดังนั้นชีวมวลจึงเป็นแหล่งที่น่าสนใจในการนำมาผลิตกระแสไฟฟ้า จากที่ได้กล่าวมาข้างต้น โดยองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพนั้นจะมีก๊าซมีเทนเป็นหลักที่ให้พลังงาน ซึ่งชีวมวลต่างชนิดกันให้ปริมาณก๊าซมีเทนที่ต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 10

ตารางที่ 10 อัตราการให้ก๊าซมีเทนของชีวมวล

ลำดับ	**วัตถุดิบ**	**ผลผลิตก๊าซมีเทน (m^3CH_4/kg VS)**	**อ้างอิง**
1	เศษอาหาร 40% + น้ำเสียฟาร์มสุกร 60%	0.533	สถาบันวิจัยและพัฒนา
2	หญ้าเนเปีย 30% + น้ำเสียฟาร์มสุกร 70%	0.334	พลังงาน
3	ฟางข้าว 40% + น้ำเสียฟาร์มสุกร 60%	0.527	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
4	ต้นข้าวโพด 40% + น้ำเสียฟาร์มสุกร 60%	0.477	(2562)
5	เปลือกกล้วย	0.201	Clarke, W. P. (2017)
6	ของเสียจากมะละกอ	0.169	Nalathambi,V. (2015)
7	เปลือกแครอท	0.307	Clarke, W. P. (2017)
8	ก้านกล้วย และ กล้วยดิบ	0.408	Clarke, W. P. (2017)

ลำดับ	วัตถุดิบ	ผลผลิตก๊าซมีเทน (m^3CH_4/kg VS)	อ้างอิง
9	ของเสียจากมันฝรั่ง	0.321	Parawira, W. (2014)
10	ฟางข้าว	0.360	Eko Heryadi (2019)
11	ชานอ้อย	0.263	
12	เปลือกข้าวโพด	0.307	Malinee, L. (2019)
13	มันสำปะหลัง	0.294	
14	เปลือกถั่ว	0.214	
15	เปลือกมะม่วง	0.370	Nalathambi, V.
16	เปลือกหน่อไม้ฝรั่ง	0.219	(2015)
17	เนื้อแอปเปิ้ล	0.308	
18	ถั่วเขียว	0.310	Nalathambi, V.
19	ข้าวโพด	0.287	(2015)
20	แอพพิคอต	0.286	
21	บีตรูต	0.263	
22	สับปะรด	0.335	Paepatung, N. (2019)

พลังงานชีวมวล

ชีวมวล หมายถึง สิ่งที่ได้จากสิ่งมีชีวิตหรือองค์ประกอบของสิ่งมีชีวิตหรืออินทรีย์สารต่าง ๆ เช่น ไม้ยืนต้น พืชที่มีส่วนประกอบเป็นแป้งและน้ำตาล วัชพืช ของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมที่เกี่ยวเนื่องการเกษตร มูลสัตว์ ตลอดจนขยะที่มีอยู่ทั่วไป (สุธรรม ปทุมสวัสดิ์, 2560) โดยสารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติ และสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ เช่น เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร หรือกากจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมการเกษตร (มูลนิธิพลังงานเพื่อสิ่งแวดล้อม, 2564)

พลังงานชีวมวลจัดเป็นพลังงานหมุนเวียนประเภทหนึ่งโดยเป็นการใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์ทางอ้อม พืชที่มีคลอโรฟิลล์จับพลังงานจากแสงอาทิตย์แล้วเปลี่ยนเป็นพลังงานเคมีเพื่อไปใช้ในการสร้างอาหารจากคาร์บอนไดออกไซด์และนำ กระบวนการดังกล่าวเรียกว่า การสังเคราะห์ด้วยแสง แหล่งพลังงานประเภทชีวมวล ปริมาณชีวมวลที่ผลิตได้ในโลกคิดเป็นพลังงานเฉลี่ยปีละประมาณ 3,000 hJ แต่นำไปเป็นพลังงานได้ 2% (Hartung C., and et.al., 2020) ศักยภาพของพลังงานชีวมวลในประเทศต่าง ๆ มีค่าแตกต่างกันขึ้นอยู่กับลักษณะภูมิประเทศ สิ่งแวดล้อม องค์ประกอบของสังคม และความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ ได้มีการประมาณว่าในปี ค.ศ. 2020 พลังงานที่ผลิตจากชีวมวลจะมีปริมาณครึ่งหนึ่งของพลังงานทั้งหมดที่ใช้ในโลก แนวโน้มพลังงานชีวมวลที่ผลิตได้จากแหล่งชีวมวลประเภทต่าง ๆ ดังแสดงในตารางที่ 11

ตารางที่ 11 พลังงานชีวมวลที่ผลิตจากชีวมวลประเภทต่าง ๆ ของโลก ในปี ค.ศ.2020

ชีวมวล	**พลังงานที่ผลิตได้ (MJ/year)**
พืชพลังงาน	128
มูลสัตว์	24
เศษไม้	14
ฟางข้าว	13
กากอ้อย	12
ไม้	10

ที่มา : Hartung C., and et.al. (2020)

ศักยภาพพลังงานชีวมวล

ชีวมวลนับเป็นแหล่งพลังงานที่มีศักยภาพสำหรับประเทศไทย เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ดังนั้นจึงมีชีวมวลซึ่งเป็นผลผลิตและผลพลอยได้จากวัสดุเหลือทางการเกษตร แต่ในปัจจุบันการนำชีวมวลมาใช้เป็นเชื้อเพลิงยังมีอยู่น้อย ปริมาณชีวมวลจากเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่ผลิตภายในประเทศจะแปรผันและขึ้นอยู่กับปริมาณผลผลิตทางการเกษตรของประเทศ ดังแสดงในตารางที่ 12 แสดงจำนวนพื้นที่เพาะปลูกพืชผลทางการเกษตร ซึ่งจากสถิติการเกษตรของประเทศไทย สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรและสหกรณ์ เมื่อนำมาคำนวณสัดส่วนของการเปลี่ยนแปลง ปริมาณผลผลิตทางการเกษตรเป็นชีวมวล ดังแสดงในตารางที่ 12

ตารางที่ 12 ปริมาณผลผลิตทางการเกษตรเป็นชีวมวล

ชนิด	เนื้อที่เพาะปลูก (Thousand Rai)	เนื้อที่เก็บเกี่ยว (Thousand Rai)	ผลผลิต (Thousand tons)
ข้าว	69,031	65,184	30,896
อ้อย	6,703	ไม่มีข้อมูล	49,834
มันสำปะหลัง	7,111	6,717	18,462
ปาล์ม	ไม่มีข้อมูล	851	2,101
ข้าวโพด	6,594	6,447	3,878
สับปะรด	620	620	2,015
ไม้ยางพารา	13,324	10,363	2,917

ที่มา : สำนักเศรษฐกิจการเกษตร, (2562)

บริษัท Black and Veatch ได้ศึกษาชีวมวล 9 ชนิด ได้แก่ แกลบ ชานอ้อย กากปาล์ม เศษไม้ กาบมะพร้าว ซังข้าวโพด ส่าเหล้า กากมันสำปะหลัง และขี้เลื่อยโดยทำการศึกษาถึงปริมาณคงเหลือของชีวมวล การกระจายตัว กำลังการผลิต การคาดการณ์ผลผลิตในอนาคต อุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง ราคา และความเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้าซึ่งข้อมูลศักยภาพของชีวมวลดังแสดงไว้ในตารางที่ 13

ตารางที่ 13 ศักยภาพชีวมวลในการผลิตไฟฟ้า

รายการ	**แกลบ**	**กากปาล์ม**	**กากอ้อย**	**เศษไม้และขี้เลื่อย**
ปริมาณผลผลิต (Billion tons/year)	20	2.2	50	5.80
ปริมาณชีวมวลเหลือใช้ (Billion tons/year)	2.30 - 3.70	0.41 - 0.74	2.25 - 3.50	1.80
ค่าความร้อนสูงสุด (kJ/kg)	9,800	14,050	14,100	15,500
ปริมาณไฟฟ้าที่ผลิตได้ (MW)	234 - 375	33 - 53	160 - 248	118

ที่มา : Black and Veatch., (2562)

การผลิตไฟฟ้าจากชีวมวล

พลังงานไฟฟ้าจากชีวมวล เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า เช่น การเผาไหม้โดยตรง (Direct Fired) แก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) การย่อยสลายแบบไร้อากาศ เป็นต้น เมื่อกล่าวถึงโรงไฟฟ้าชีวมวลในประเทศไทยส่วนมากเป็นการใช้ระบบการเผาไหม้โดยตรง (Direct Fired) โดยนำเชื้อเพลิงชีวมวลมาเผาไหม้โดยตรงในหม้อไอน้ำ (Boiler) และถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นให้แก่น้ำในหม้อไอน้ำกลายเป็นไอน้ำ และมีความดันสูง ซึ่งไอน้ำนี้จะถูกนำไปปั่นกังหันอีกทีต่ออยู่กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้กระแสไฟฟ้าออกมา นอกเหนือจากการผลิตไฟฟ้าเพียงอย่างเดียวแล้ว ในโรงงานอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น โรงน้ำตาล โรงกระดาษ ใช้ประโยชน์จากไอน้ำไปในขั้นตอนการผลิตของโรงงานด้วย ซึ่งการผลิตไอน้ำและไฟฟ้าร่วมกันนี้ เรียกว่าระบบผลิตไฟฟ้า และความร้อนร่วม (Cogeneration) สำหรับระบบแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification) นั้นเป็นการเปลี่ยนชีวมวลให้กลายเป็นก๊าซซึ่งเป็นส่วนผสมของไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ และมีเทน ในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูงและมีปริมาณออกซิเจนต่ำ ก๊าซที่ได้มานี้จะถูกส่งไปป้อนเครื่องยนต์เบนซินหรือเครื่องยนต์ดีเซลดัดแปลงเพื่อไปหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ระบบแก๊สซิฟิเคชันนี้เป็นระบบผลิตไฟฟ้าขนาดเล็ก เหมาะสำหรับชุมชนหรืออุตสาหกรรมขนาดเล็กแต่ปัญหาของระบบนี้คือน้ำมันดิน (Tar) ที่ออกมาพร้อมกับก๊าซจากการเผาไหม้ ระบบที่ดีจะต้องมีระบบจัดการน้ำมันดินที่มีประสิทธิภาพจึงไม่ทำให้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าเสียหาย

พลังงานไฟฟ้า

พลังงานไฟฟ้า คือ กำลังไฟฟ้าที่นำไปใช้ในระยะเวลาหนึ่งมีหน่วยวัดเป็นวัตต์ชั่วโมง (Wh) หรือ ยูนิต ใช้แทนด้วยตัว W ไฟฟ้าลัดวงจรหรือไฟฟ้าช็อต คือ การที่ไฟฟ้าไหลผ่านจากสายไฟฟ้าเส้นหนึ่งไปยังอีกเส้นหนึ่ง โดยไม่ผ่านเครื่องใช้ไฟฟ้าหรือโหลดใด ๆ สาเหตุส่วนใหญ่เกิดจากฉนวนของสายไฟฟ้าชำรุด และมาสัมผัสกันจึงมีความร้อนสูง มีประกายไฟ ทำให้เกิดเพลิงไหม้ได้ถ้าบริเวณนั้นมีวัสดุไวไฟ ไฟฟ้าดูด หมายถึง การที่มีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกาย ซึ่งจะทำให้เกิดอาการกล้ามเนื้อแข็งเกร็ง หัวใจทำงานผิดจังหวะ เต้นอ่อนลงจนหยุดเต้น และเสียชีวิตในที่สุด แต่อย่างไรก็ตามความรุนแรงของอันตรายจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับปริมาณของกระแส เวลาและเส้นทางที่กระแสไฟฟ้าไหลผ่าน ไฟฟ้ารั่ว หมายถึง สายไฟฟ้าเส้นที่มีไฟจะไหลไปสู่ส่วนที่เป็นโลหะของเครื่องใช้ไฟฟ้า ถ้าไม่มีสายดินก็จะทำให้ได้รับอันตราย แต่ถ้ามีสายดินก็จะทำให้กระแสไฟฟ้าที่ไหลอยู่นั้นไหลลงดินแทนไฟฟ้าเกิน หมายถึง การใช้ไฟฟ้าเกินกว่าขนาดของอุปกรณ์ตัดตอนทางไฟฟ้า ทำให้มีการปลดวงจรไฟฟ้าอาการนี้สังเกตได้คือจะเกิดหลังจากที่ได้เปิดใช้ไฟฟ้าสักครู่หรืออาจนานหลายนาทีจึงจะตรวจสอบเจอ (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2563)

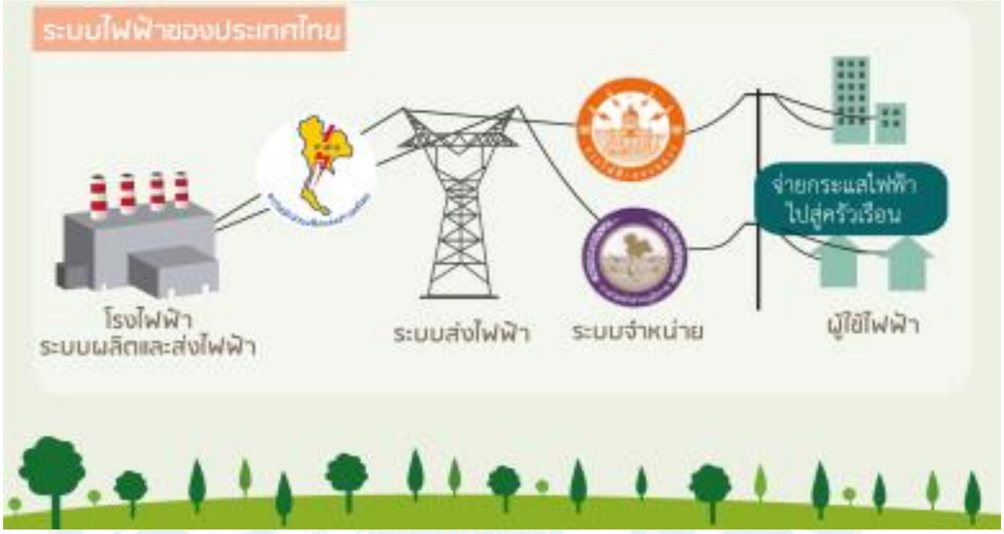
พลังงานไฟฟ้าเป็นปัจจัยที่สำคัญในการดำเนินชีวิตและการพัฒนาประเทศ ที่ผ่านมาความต้องการใช้ไฟฟ้าของประเทศไทยเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องประมาณ 4 - 5% ต่อปี ซึ่งสอดคล้องกับจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้น และการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจ ปัจจุบันพลังงานไฟฟ้าได้เข้ามามีบทบาทต่อการดำรงชีวิตประจำวันอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ รวมทั้งเป็นปัจจัยสำคัญในการขับเคลื่อนเศรษฐกิจของประเทศมากขึ้น โดยในปี พ.ศ. 2562 ประเทศไทยมีการใช้ไฟฟ้าเป็นอันดับที่ 24 ของโลก ซึ่งเป็นที่น่ากังวลว่าพลังงานไฟฟ้าจะเพียงพอต่อความต้องการใช้ไฟฟ้าในอนาคตหรือไม่ ดังนั้นความมั่นคงทางพลังงานไฟฟ้าจึงมีประเด็นสำคัญที่ควรรู้ ดังนี้

สัดส่วนการผลิตไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงประเภทต่าง ๆ ของประเทศไทย

การผลิตไฟฟ้าของประเทศไทยมีการใช้เชื้อเพลิงที่หลากหลาย ซึ่งได้มาจากแหล่งเชื้อเพลิงทั้งภายในและภายนอกประเทศ จากข้อมูลปี พ.ศ. 2562 พบว่า ประเทศไทยมีการผลิตไฟฟ้าจากก๊าซธรรมชาติเป็นส่วนใหญ่ คิดเป็น 69.19% ของการผลิตไฟฟ้าทั้งหมด รองลงมา คือถ่านหินนำเข้าและถ่านหินในประเทศ (ลิกไนต์) 18.96% พลังงานหมุนเวียน 11.02% น้ำมันเตา และน้ำมันดีเซล 0.75% และมีการนำเข้าไฟฟ้าจากมาเลเซีย 0.07%

สภาพปัจจุบันและแนวโน้มการใช้พลังงานไฟฟ้า

กำลังการผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย ในปี พ.ศ. 2563 มีจำนวนรวมทั้งสิ้น 38,774 MW แบ่งเป็นกำลังการผลิตภายในประเทศ 35,387 MW คิดเป็น 91.26 % และกำลังผลิตที่มีสัญญาซื้อไฟฟ้าจากต่างประเทศอีก 3,387 MW คิดเป็น 8.74 % โดยมีความต้องการไฟฟ้าสูงสุดที่ 27,346 MW ซึ่งความต้องการไฟฟ้ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกปีตามสภาพภูมิอากาศ จำนวนประชากรที่เพิ่มสูงขึ้น และการขยายตัวทางเศรษฐกิจและอุตสาหกรรม (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2563)



ภาพที่ 7 ระบบไฟฟ้าของประเทศไทย

ที่มา : การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, (2563)

ระบบผลิตไฟฟ้า

พลังงานไฟฟ้าที่ใช้กันตามบ้านเรือนส่วนใหญ่มาจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้าในโรงไฟฟ้า ซึ่งผลิตกระแสไฟฟ้าโดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำแม่เหล็กไฟฟ้า พบว่าเมื่อนำแท่งแม่เหล็กเคลื่อนที่เข้าใกล้ขดลวดที่ปลายทั้งสองต่อเข้ากับ เครื่องกัลวานอมิเตอร์ เข็มกัลวานอมิเตอร์จะกระดิกได้ แสดงว่ามีกระแสไฟฟ้าผ่าน แต่เมื่อแท่งแม่เหล็กหยุด เข็มกัลวานอมิเตอร์จะกระดิกอีกแต่คนละทาง ถ้าเคลื่อนที่แท่งแม่เหล็กเข้าออกด้วยความเร็วที่ไม่เท่ากัน ปริมาณกระแสไฟฟ้าก็จะแตกต่างกันด้วย คือ ถ้าแม่เหล็กเคลื่อนที่เร็วกระแสไฟฟ้าที่เกิดในขดลวดก็จะมีปริมาณมากกว่าแท่ง แม่เหล็กเคลื่อนที่ช้า ถ้ากลับขั้วแท่งแม่เหล็กที่เคลื่อนที่เข้าหาขดลวดทิศทางของกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจะตรงกันข้ามกับตอนแรก จากหลักการนี้นักวิทยาศาสตร์ใช้ประดิษฐ์เครื่องกำเนิดไฟฟ้าได้ 2 ประเภท (Jimmy. A., and et al., 2019)

MAEJO UNIVERSITY

เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดกระแสไฟฟ้าตรง (Direct Current Generators)

ประกอบด้วยขดลวดทองแดงที่สามารถหมุนได้คล่องตัวในสนามแม่เหล็กโดยที่ปลาย ทั้งสองของขดลวดสัมผัสกับวงแหวนผ่าซีก ซึ่งเป็นจุดที่จะนำกระแสไฟฟ้าไปใช้กับเครื่องใช้ต่าง ๆ เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดนี้มักคุ้นเคย เพราะเป็นอุปกรณ์ที่ใช้เป็นแหล่งผลิตกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในรถยนต์ เรียกว่า C. Generator แต่ในปัจจุบันไม่ค่อยใช้ เพราะข้อเสียที่ต้องใช้เวลานานมากที่ให้ประจุไฟฟ้ากับหม้อแบตเตอรี่

1) เครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดกระแสไฟฟ้าสลับ (Alternating Current Generator)

ใช้หลักการเดียวกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้าชนิดกระแสไฟฟ้าตรง แตกต่างกันที่ใช้วงแหวนสองวงต่อเข้าที่ปลายลวดทั้งสองของขดลวดทองแดงแทนวงแหวนผ่าซีก ถ้าต่อไฟฟ้าที่ได้จากเครื่องกำเนิดกระแสไฟฟ้าชนิดนี้ให้กับหลอดไฟจะเห็นว่า หลอดไฟจะสว่างสลับกับมืดเป็นจังหวะ ทั้งนี้เนื่องจากกระแสไฟฟ้าที่ออกมามีปริมาณทั้งบวก และลบในช่วงเวลาหนึ่ง ถ้าหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเร็ว การกระพริบของหลอดไฟจะเร็วตามไปด้วย ถ้าหมุนช้าหลอดไฟก็จะกระพริบช้า การเปลี่ยนกระแสไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจากไฟฟ้ากระแสสลับเปลี่ยนมาเป็นกระแสไฟฟ้าตรงทำได้ง่ายกว่ากระแสไฟฟ้าตรงมาเป็นกระแสไฟฟ้าสลับ (Arif, D. and et al., 2016)

2) ข้อดีข้อเสียของระบบผลิตไฟฟ้า

การเปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของการผลิตกระแสไฟฟ้า โดยใช้พลังงานชนิดต่าง ๆ เช่น เชื้อเพลิงฟอสซิล เชื้อเพลิงชีวมวล ก๊าซชีวภาพ เป็นต้น ดังแสดงในตารางที่ 14

ตารางที่ 14 ข้อดีข้อเสียของการผลิตกระแสไฟฟ้า

แหล่งพลังงาน	ข้อดี	ข้อเสีย
นิวเคลียร์	-ราคาต่ำ สำหรับกำลังการผลิตสูง -ไม่ก่อให้เกิดก๊าซเรือนกระจก	-เงินลงทุนในการก่อสร้างสูง -ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการจัดเก็บ และการจัดการกับแท่งเชื้อเพลิงที่ใช้แล้ว
ถ่านหิน	-ราคาไม่แพงเหมาะกับการใช้ปริมาณมาก ๆ -มีการจ้างงานจำนวนมาก	-ต้องมีการนำเข้าจากต่างประเทศ -ทำให้เกิดมลภาวะในอากาศเนื่องจากการเผาไหม้ เช่น CO_2 SO_2 และ NO_3 -เกิดปัญหากับสุขภาพกับแหล่งชุมชน -กากของแข็งที่เหลือจากการเผาไหม้เป็น เถ้า มีปริมาณมาก

แหล่งพลังงาน	ข้อดี	ข้อเสีย
พลังงานน้ำ	-ไม่เกิดมลภาวะทางอากาศ -เป็นพลังงานที่ไม่หมด	-มีความจำกัดเรื่องสถานที่ตั้งโรงไฟฟ้าพลังงานน้ำ -เป็นการทำลายป่าไม้ทางอ้อม -ใช้พื้นที่มาก -เงินลงทุนในการก่อสร้างสูง
แสงอาทิตย์	-ไม่เกิดมลภาวะทางอากาศ	-ใช้พื้นที่มาก ราคาแพง -ต้องมีแหล่งเก็บพลังงาน
เชื้อเพลิงชีวมวล (เผาไหม้)	-เพิ่มรายได้ให้เกษตรกร -ลดการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล	-ต้องมีระบบบำบัดมลพิษอากาศ -ต้องมีระบบบำบัดน้ำเสีย -มีข้อจำกัดวัตถุดิบไม่ควรมีความร้อนสูง
ชีวมวล (หมักก๊าซชีวภาพ)	-การติดตั้งใช้เวลาน้อย -เครื่องยนต์ก๊าซสันดาปภายในการซ่อมบำรุงรักษาทำได้ง่าย -การรื้อถอนเคลื่อนย้ายสะดวกไม่มีข้อจำกัดเรื่องวัตถุดิบ -มีผลพลอยได้จากระบบหมักก๊าซชีวภาพ และเพิ่มรายได้ให้เกษตรกร	-เงินลงทุนสูง

ที่มา : การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, (2563)

สถานการณ์ก๊าซเรือนกระจก

ประเทศไทยเป็นหนึ่งในกลุ่มประเทศกำลังพัฒนาได้ให้ความสาคัญประเด็นเกี่ยวกับ การเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศและการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมีการทบทวนมาตราการ และสร้างข้อกาหนดเพื่อร่วมลดปัญหาดังกล่าว มีการจัดทำแผน และยุทธศาสตร์การพัฒนาสู่สังคมคาร์บอนต่ำ (Thailand Research Fund, 2014) และมีการจัดทาพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 12 พ.ศ. 2560 - 2564 มีวัตถุประสงค์เพื่อรักษาและฟื้นฟูทรัพยากรธรรมชาติและคุณภาพสิ่งแวดล้อมให้สามารถสนับสนุนการเติบโตที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และการมีคุณภาพชีวิตที่ดีของประชาชน จากปริมาณความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในประเทศและหลายหน่วยงานมีมาตรการในการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (แผนพัฒนาเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ ฉบับที่ 12, 2560) จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่าจะใช้วิธีการการประเมินปริมาณก๊าซเรือนกระจกขององค์กรเป็นเครื่องมือที่ใช้สำหรับการประเมินการปล่อยปริมาณก๊าซเรือนกระจกขององค์กร

การประเมินการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก ซึ่งสามารถดำเนินการประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจกครอบคลุมทุกองค์กร โดยจะแสดงปริมาณการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกขององค์กร (Thailand Greenhouse Gas Management Organization) เป็นปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า (tCO_{2eq}) เมื่อทราบถึงปริมาณก๊าซเรือนกระจกและแหล่งปล่อยก๊าซเรือนกระจกขององค์กรจะนำข้อมูลที่ได้มาทำการลดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก ก๊าซเรือนกระจกที่เชื่อว่าเป็นสาเหตุของโลกร้อนแบ่ง 4 กลุ่ม

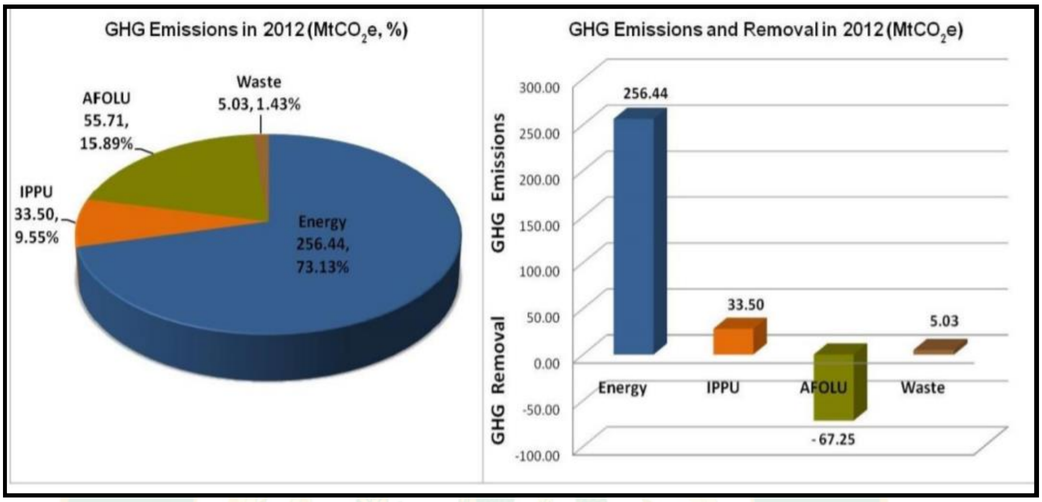
1) **ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์** เกิดจากการเผาไหม้ในหลายรูปแบบ เช่น การใช้น้ำมันเชื้อเพลิงในโรงงานอุตสาหกรรมในรถยนต์ ในการหุงต้ม การเผาป่า การทำปศุสัตว์ การเลี้ยงสัตว์ การทำฟาร์ม

2) **ก๊าซมีเทน** เกิดจากการย่อยสลายของซากสิ่งมีชีวิตทั้งพืชและสัตว์ เช่น การทำนาข้าว และปศุสัตว์การเผาไหม้ของซากพืชหรือสัตว์การเผาไหม้ของถ่านหิน น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ

3) **กลุ่มของสารประกอบคลอโรฟลูออโรคาร์บอน** เกิดจากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น สารทำความสะอาดอุปกรณ์ไฟฟ้า แผงวงจรไฟฟ้า วงจรคอมพิวเตอร์ ชิ้นส่วนรถยนต์เครื่องใช้ในชีวิตประจำวัน

4) **ก๊าซไนตรัสออกไซด์** เกิดจากการย่อยสลายของซากพืชซากสัตว์อุตสาหกรรมที่ใช้กรดไนตริกเป็นขบวนการผลิต เช่นในอุตสาหกรรมผลิตเส้นใยไนลอน อุตสาหกรรมเคมี อุตสาหกรรม

พลาสติก ก๊าซเรือนกระจกที่ถูกควบคุมโดยพิธีสารเกียวโต มี 6 ชนิด โดยจะต้องเป็นก๊าซที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์ (Anthropogenic Greenhouse Gas Emission) เท่านั้น ได้แก่ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ก๊าซมีเทน (CH_4) ก๊าซไนตรัสออกไซด์ (N_2O) ก๊าซไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน (HFC) ก๊าซเพอร์ฟลูออโรคาร์บอน (PFC) และ ก๊าซซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์ (SF_6)



ภาพที่ 8 แสดงปริมาณและสัดส่วนการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของประเทศไทย ปี ค.ศ. 2021

การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการหมักก๊าซชีวภาพ

การหมักแบบไร้อากาศเป็นเทคโนโลยีที่มีศักยภาพมากในการบำบัดขยะอินทรีย์สำหรับประเทศกำลังพัฒนาในภูมิภาคเอเชียเพราะเป็นวิธีที่มีประสิทธิผลดีที่สุดเนื่องจากสามารถรวบรวมก๊าซชีวภาพมาผลิตพลังงานความร้อนหรือไฟฟ้าได้และมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อย การคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการหมักแบบไร้อากาศต้องคำนวณทั้งปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล (ไฟฟ้าและน้ำมันดีเซล) ในกิจกรรมต่าง ๆ ของการหมักแบบไร้อากาศ และปริมาณการปล่อยก๊าซมีเทนจากการรั่วไหลของถังหมักแบบไร้อากาศ (Reactor) โดยใช้ค่าเริ่มต้น ของ IPCC (2006) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2 $kgCH_4/ton_{maize\ residue}$ และมีค่าความร้อน (Calorific Value) ของก๊าซชีวภาพที่ได้จากการหมักแบบไร้อากาศ อยู่ในช่วง 20 - 25 MJ/m^3 จึงสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานความร้อนหรือไฟฟ้าทดแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลและสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ เทคโนโลยีในการผลิตพลังงานมีหลากหลายรูปแบบ เช่น การเผาไหม้เพื่อผลิตไฟฟ้าโดยใช้เครื่องยนต์ขนาดเล็ก (น้อยกว่า 200 kW) หรือเครื่องยนต์สันดาปภายในขนาดใหญ่ (ขนาดสูงสุด1.5 MW) (Poschl. M., and et.al., 2019)

สรุปผลการประเมินการลดก๊าซเรือนกระจกจากมาตรการภาคพลังงาน ปี พ.ศ. 2557

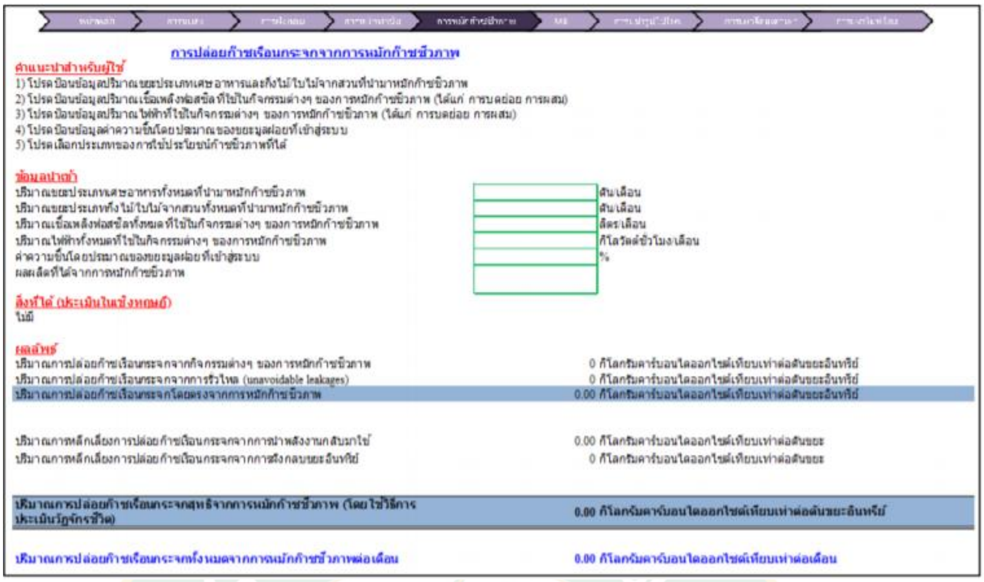
มาตรการ	ปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ลดได้ ($MtCO_2$)
1. มาตรการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน ประเภทพลังงานธรรมชาติ (แสงอาทิตย์ ลม พลังน้ำ)	4.04
2. มาตรการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานทดแทน ประเภทพลังงานชีวภาพ (ชีวมวล ชีวภาพ ขยะ)	8.65
3. มาตรการผลิตความร้อนจากพลังงานทดแทน ประเภทพลังงานธรรมชาติ (แสงอาทิตย์)	0.01
4. มาตรการผลิตความร้อนจากพลังงานทดแทน ประเภทพลังงานชีวภาพ (ชีวมวล ชีวภาพ ขยะ)	19.10
5. มาตรการใช้ไบโอดีเซลในภาคการขนส่ง	2.84
6. มาตรการใช้เอทานอลในภาคการขนส่ง	2.55
7. มาตรการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตพลังงานไฟฟ้าของ กฟผ.	0.28
รวม	37.47 (คิดเป็น 10%)

ภาพที่ 9 ผลการประเมินการลดก๊าซเรือนกระจกจากมาตรภาคพลังงาน

ที่มา : องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน)

การหมักแบบไร้อากาศช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการฝังกลบขยะอินทรีย์ ในทำนองเดียวกันกับการหมักทำปุ๋ย โดยผู้ใช้งานโปรแกรมต้องป้อนข้อมูลรายเดือน เช่น ปริมาณขยะอินทรีย์ การใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลและไฟฟ้าของโรงหมักแบบไร้อากาศ ค่าความชื้นโดยประมาณของของผสมที่เข้าสู่ระบบ (ของผสมประกอบด้วยขยะอินทรีย์และน้ำ) ประเภทของผลผลิตที่ได้จากการหมักแบบไร้อากาศ (พลังงานไฟฟ้าหรือความร้อน) ดังแสดงในภาพที่ 9

การวิเคราะห์ปริมาณความชื้นในของเหลวที่เข้าสู่ระบบสามารถทำได้โดยอบตัวอย่างที่อุณหภูมิ 105 - 110 ℃ เป็นเวลา 24 h การวิเคราะห์ตัวอย่างเป็นเรื่องยุ่งยากสำหรับองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น ดังนั้นอาจใช้ค่าประมาณการสัดส่วนของของขยะอินทรีย์ต่อน้ำแทน เช่น ขยะเศษผัก 1 ton (ค่าความชื้น 60 %) กับน้ำ 1 ton เมื่อนำมาผสมกันแล้วจะมีปริมาณน้ำ 1.6 ton คิดเป็นค่าความชื้น 80 %



ภาพที่ 10 การคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการหมักแบบไร้อากาศ

ที่มา : องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก (องค์การมหาชน)

การคำนวณเบื้องต้นต้องเลือกประเภทการใช้ประโยชน์ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ว่าใช้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้าหรือความร้อน โปรแกรมจะคำนวณปริมาณพลังงานที่ผลิตได้ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลและการใช้ไฟฟ้าในการดำเนินงานสามารถคำนวณโดยใช้สมการดังนี้ (ไม่คิดการปล่อยก๊าซมีเทนและก๊าซไนตรัสออกไซด์จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลเนื่องจากมีปริมาณเล็กน้อยมาก)

$$Emissions_{operation} = (FC \times NCV_{FF} \times EFCO_2) + (EC \times EF_{el}) \qquad \text{สมการที่ 2.18}$$

โดยที่

$Emissions_{operation}$ การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการดำเนินงาน ($kgCO_2/ton_{maize\ residue}$)

FC ปริมาณเชื้อเพลิงฟอสซิลที่ใช้ในการดำเนินงาน (Mass or Volume/$ton_{maize\ residue}$)

NCV_{FF} ค่าความร้อนสุทธิของเชื้อเพลิงฟอสซิลที่ใช้ (MJ/Mass or Volume)

$EFCO_2$ ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล ($kgCO_2$/MJ)

EC ปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ในการดำเนินงาน (MWh/$ton_{maize\ residue}$)

EF_{el} ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย ($kgCO_2$/MWh)

- ปริมาณการปล่อยก๊าซมีเทนจากการรั่วไหลของถังหมักแบบไร้อากาศ สามารถคำนวณโดยใช้สมการ ดังนี้

$$Emissions_{treatment} = ECH_4 \times DM \times 1000 \times GWPCH_4$$ สมการที่ 2.19

โดยที่

$Emissions_{treatment}$ การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการหมักขยะอินทรีย์ ($kgCO_2/ton_{organic\ waste}$)

$E\ CH_4$ การปล่อยก๊าซมีเทนจากการรั่วไหลของถังหมักแบบไร้อากาศ ($kgCH_4/kg_{organic\ waste}$)

DM เปอร์เซ็นต์ของขยะอินทรีย์แห้งในขยะอินทรีย์ที่นำมาหมัก (%) (DM =100 - % ของน้ำในขยะอินทรีย์ที่น้ำมาหมัก)

1000 ค่าการแปลงหน่วยที่ใช้ในการคำนวณปริมาณขยะอินทรีย์แห้งต่อขยะอินทรีย์

$GWPCH_4$ ค่าศักยภาพในการทำให้โลกร้อน (ก๊าซมีเทนมีค่า 21เท่าของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยคิด ช่วงเวลา 100 years)

- ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการหมักแบบไร้อากาศสามารถคำนวณโดยใช้สมการ ดังนี้

ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมด = การปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากการดำเนินงาน + การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการรั่วไหลของถังหมักแบบไร้อากาศ

- ปริมาณการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตไฟฟ้าโดยใช้ก๊าซชีวภาพที่ได้จากการหมักแบบไร้อากาศ สามารถคำนวณโดยใช้สมการ

$$Avoidance\ GHG_{electricity} = C_{biogas} \times PCH_4 \times ECH_4 \times CF_{energy} \times E_{powerplant} \times EF_{el}$$

สมการที่ 2.20

โดยที่

$Avoidance\ GHG_{electricty}$ ปริมาณการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตไฟฟ้าโดยใช้ก๊าซชีวภาพ ($kgCO_2/ton_{maize\ residue}$)

C_{biogas} ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้ต่อตันขยะอินทรีย์ ($m^3/ton_{maize\ residue}$)

PCH_4 เปอร์เซ็นต์ของมีเทนในก๊าซชีวภาพ (%)

$E_{powerplant}$ ประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้า (%)

ECH_4 ปริมาณพลังงานของก๊าซมีเทน (MJ/m^3)

CF_{energy} ค่าการแปลงหน่วยที่ใช้ในการแปลงพลังงานของก๊าซมีเทนเป็นไฟฟ้า (3.6 MJ/kWh)

EF_{el} ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย ($kgCO_2/MWh$)

- ปริมาณการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตความร้อนโดยใช้ก๊าซชีวภาพที่ได้จากการหมักแบบไร้อากาศ สามารถคำนวณโดยใช้สมการ ดังนี้

$$\text{Avoidance } GHG_{thermal} = C_{biogas} \times PCH_4 \times ECH_4 \times EFCO_2 \qquad \text{สมการที่ 2.21}$$

โดยที่

Avoidance $GHG_{thermal}$ ปริมาณการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตความร้อนโดยใช้ก๊าซชีวภาพ ($kgCO_{2eq}/ton_{maize\ residue}$)

C_{biogas} ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้ต่อตันขยะอินทรีย์ ($m^3/ton_{maize\ residue}$)

PCH_4 เปอร์เซ็นต์ของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพ (%)

ECH_4 ปริมาณพลังงานของก๊าซมีเทน (MJ/m^3)

$EFCO_2$ ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกของก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) ($kgCO_2/MJ$) (โปรแกรมคำนวณโดยกำหนดสมมติฐานว่าใช้ก๊าซชีวภาพแทน LPG)

- ปริมาณการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการลดการฝังกลบขยะอินทรีย์สามารถคำนวณได้โดยใช้แบบจำลองของ IPCC

ปริมาณการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดสามารถคำนวณโดยใช้สมการ

ปริมาณการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมด ($kgCO_{2eq}/ton_{maize\ residue}$) = ปริมาณการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตพลังงาน + ปริมาณการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการลดการฝังกลบขยะอินทรีย์

- ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิจากการหมักแบบไร้อากาศสามารถคำนวณโดยใช้สมการ

ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิจากการหมักแบบไร้อากาศ
($kgCO_2/ton_{maize\ residue}$) = ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมด – ปริมาณการลดก๊าซเรือนกระจกทั้งหมด

ในทำนองเดียวกับการหมักทำปุ๋ย หากปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิมีค่าเป็นบวก จะหมายความว่าการหมักแบบไร้อากาศยังทำให้เกิดปัญหาการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ และต้องปรับปรุงประสิทธิภาพของการผลิตพลังงานให้ดีขึ้น หากค่าเป็นลบจะชี้ให้เห็นว่าการหมักแบบไร้อากาศสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ปริมาณการปล่อย/การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกรายเดือนจากการหมักแบบไร้อากาศ สามารถคำนวณโดยใช้สมการ ดังนี้

ปริมาณการปล่อย/การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกรายเดือน
($kgCO_{2eq}$ /month) = ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่อตันขยะอินทรีย์ ($kgCO_{2eq}/ton_{maize\ residue}$) × ปริมาณขยะอินทรีย์ที่นำมาหมักแบบไร้อากาศต่อเดือน ($ton_{maize\ residue}$ /month)

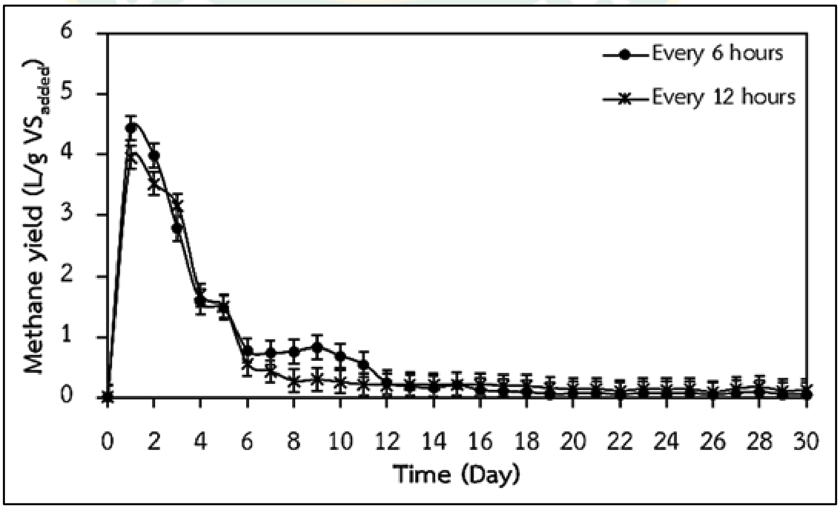
เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สำหรับหัวข้อวิจัยในครั้งนี้การตรวจเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง แบ่งออกเป็น 6 หัวข้อเรื่อง ดังนี้คือ

1) การปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบ 2) กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพแบบการหมักร่วมในระบบการหมักแบบไร้อากาศ 3) การผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร 4) ศักยภาพการผลิตมีเทน (BMP) 5) เทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าจากกระบวนการการผลิตก๊าซชีวภาพ และ 6) การปลดปล่อยการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการผลิตไฟฟ้าโดยใช้ก๊าซชีวภาพ มีข้อมูลดังต่อไปนี้

1) การปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบ

(ศศิธร ใสปา, รจพรรณ นิรัญศิลป์ และคณะ, 2563.) ศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรในอุตสาหกรรมแปรรูปข้าวโพดหวาน และศึกษาระยะเวลาการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง จากการศึกษาพบว่าที่อัตรากวนผสมและหมุนเวียนตะกอนทุก ๆ 6 และ 12 h มีปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อวันเฉลี่ยเท่ากับ 283.34 และ 240.63 L/day ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของระบบเท่ากับ 9,060.86 L และ 7,688.11 L สัดส่วนของก๊าซมีเทนสูงสุดเท่ากับ 58.4 % และ 59.6 % และศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนเฉลี่ยเท่ากับ 0.688 L CH_4/gVS added และ 0.564 L CH_4/gVS added ซึ่งผลงานวิจัยนี้สามารถกำจัดที่มีวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรในปริมาณมากได้



ภาพที่ 11 ผลผลิตของก๊าซมีเทนจำเพาะ

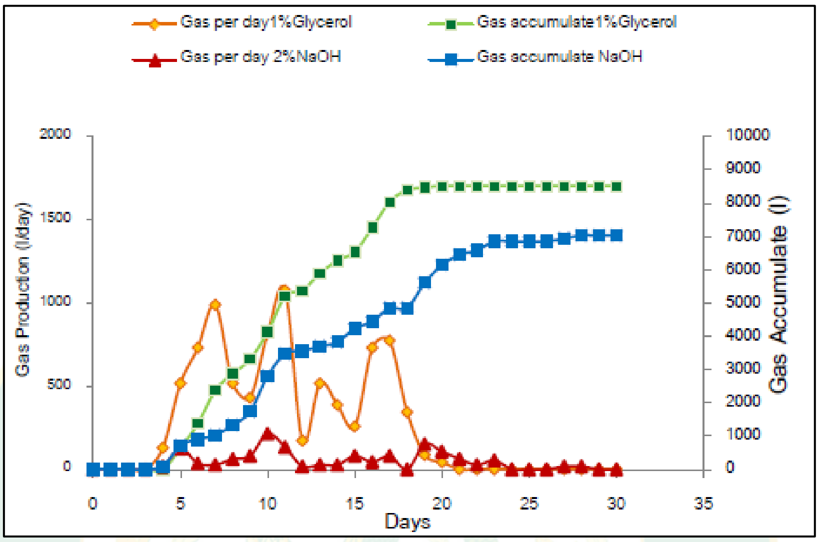
ที่มา : ศศิธร ใสปา, รจพรรณ นิรัญศิลป์ และคณะ, (2563)

(ธัญพิชชา บุญบาง, รจพรรณ นิรัญศิลป์ และคณะ, 2559). ศึกษาเปรียบเทียบการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตเส้นขนมจีนหมักร่วมกับจุลินทรีย์อีเอ็มชนิดน้ำอีเอ็มชนิดก้อน และมูลโค โดยทำการทดลองหมักในสภาวะไร้อากาศในถังหมักแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch) ใช้ถังหมักขนาด 20 L ระยะเวลาในหมัก 15 days ศึกษาการใช้จุลินทรีย์อีเอ็มในการหมักร่วมกับน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเส้นขนมจีนและได้นำจุลินทรีย์อีเอ็มซึ่งมีทั้งชนิดน้ำ และชนิดก้อนหมักร่วมกับน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเส้นขนมจีน เนื่องจากจุลินทรีย์อีเอ็มซึ่งเป็นเทคโนโลยีชีวภาพที่สามารถกำจัดค่า COD ในน้ำเสียได้เป็นเพื่อช่วยการบำบัดน้ำเสียและลดกลิ่นอันไม่พึงประสงค์โดยเปรียบเทียบชนิด และปริมาณที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้ในการหมักก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียจากกระบวนการผลิตขนมจีน และคาดว่าปริมาณที่เหมาะสมที่สุดที่ใช้ในการหมักก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียจากกระบวนการผลิตขนมจีน จะสามารถลดกลิ่นจากการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียขนมจีน และผลิตก๊าซชีวภาพให้มีประสิทธิภาพที่ดีมากขึ้น จากการศึกษาพบว่า น้ำเสียจากกระบวนการผลิตเส้นขนมจีน 10 L ร่วมกับจุลินทรีย์อีเอ็มน้ำ 2 L และมูลโค 3 L มีประสิทธิภาพในการเกิดก๊าซชีวภาพมากที่สุดในปริมาตร 3.31 L/day ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม 27.81 L มีองค์ประกอบของก๊าซมีเทน 62.39% และมีประสิทธิภาพในการกำจัด COD, TS เท่ากับ 85.77% และ 80.12% ตามลำดับ ซึ่งมีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด

(ภาวิณี เพ็ชรนก, 2560) ทำการศึกษาการผลิตน้ำตาลจากพืชลิกโนเซลลูโลสเหลือทิ้งทางการเกษตรจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ โดยทำการศึกษาการปรับสภาพทางเคมีด้วยกรด (กรดซัลฟิวริกและกรดไฮโดรคลอริก) และด่าง (โซเดียมไฮดรอกไซด์และโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์) ที่ระดับความเข้มข้นตั้งแต่ 1%, 2%, 3% และ 4% จากการศึกษาพบว่า พบว่าการปรับสภาพด้วยด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น 2% ส่งผลทำให้มีปริมาณน้ำตาลทั้งหมดเพิ่มสูงถึงที่ความเข้มข้น 83.17 g/L และ 64.69 g/L ตามลำดับ ดังนั้นจากผลการวิจัยทั้งหมดยืนยันได้ว่า ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มีศักยภาพในการผลิตน้ำตาลได้ในปริมาณมากและเพียงพอที่จะนำน้ำตาลที่ผลิตขึ้นมาใช้ในการผลิตพลังงานทดแทนได้เป็นอย่างดี

(ชนกพร วงษ์วัน, 2558) ศึกษาผลของการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยวิธีการแช่ด้วยสารละลายด่าง (NaOH) และการใช้ความร้อน ผลการทดลอง พบว่า การหมักร่วมของต้นข้าวโพดที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกซ์เข้มข้น 2% สามารถผลิตก๊าซชีวภาพทั้งหมดได้ 0.2 m^3/kg $VS_{removol}$ และเมื่อเปรียบเทียบกับต้นข้าวโพดที่ไม่มีการปรับสภาพ สามารถผลิตก๊าซ

ชีวภาพได้เพียง 0.1 m^3/kg $VS_{removol}$ และเมื่อนำกลีเซอรอลที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลมาหมักร่วมกับข้าวโพดที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายด่าง (NaOH) จะช่วยเพิ่มสารอินทรีย์ในระบบทำให้เกิดการผลิตก๊าซชีวภาพสูงขึ้น โดยสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ถึง 0.24 m^3/kg $VS_{removol}$



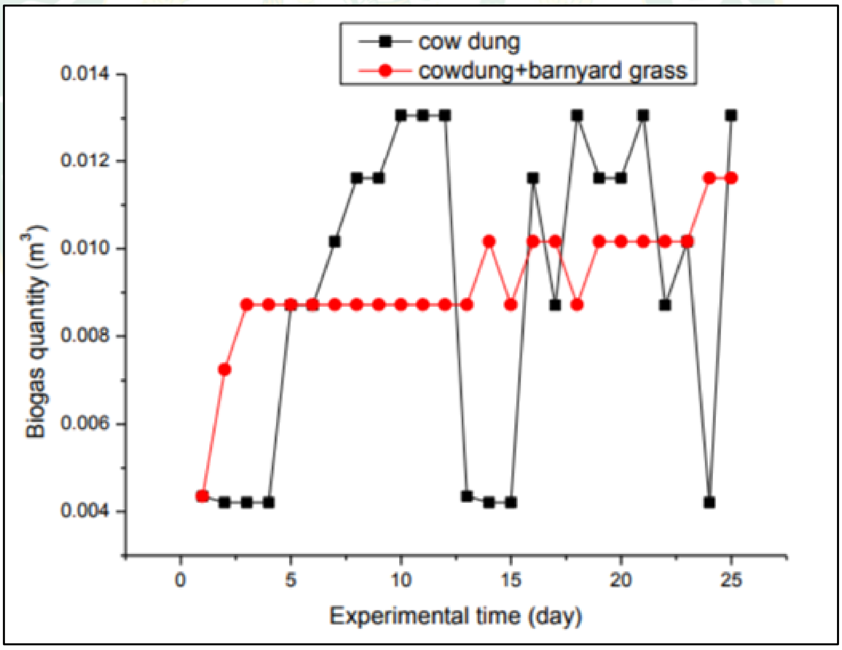
ภาพที่ 12 ผลของการผลิตก๊าซชีวภาพข้าวโพดร่วมกับของเสียกลีเซอรอล

ที่มา : ชนกพร วงษ์วัน, (2558)

(นฤมล เซาะกระโทก, 2556) ที่ได้ทำการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็งร่วมกับกากตะกอนดีแคนเตอร์ของโรงงานอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์ม โดยกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ จากการศึกษาพบว่า การหมักร่วมมีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนมากกว่าการหมักด้วยน้ำเสียเพียงอย่างเดียว การหมักร่วมโดยใช้น้ำเสีย 180 mL กับกากตะกอน 10 g ที่อุณหภูมิ 35 ± 1 °C เป็นอัตราส่วนที่ดีที่สุด ซึ่งให้ค่าศักยภาพผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด 0.0351 L CH_4/g $TCOD_{Removal}$ และมีประสิทธิภาพการบำบัด T_{COD}, S_{COD}, TS และ VS เท่ากับ 76.2%, 83.6%, 43.2% และ 56.8% ตามลำดับ ส่วนการผลิตก๊าซชีวภาพแบบต่อเนื่องด้วยเครื่องปฏิกิริยาแบบ CSTR ที่ระยะเวลาการเก็บกัก 20 days ใช้ระยะเวลาการกวน 24 h สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 2.88 L/day องค์ประกอบของก๊าซมีเทน 64.6% ผลิตก๊าซมีเทนได้สูงสุด 1.86 L/day และศักยภาพผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด 0.292 L CH_4/g $TCOD_{Removal}$ ซึ่งสูงกว่าระยะเวลาการกวน 12 h ประมาณ 1.4 เท่า

2) กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพแบบการหมักร่วมในระบบการหมักแบบไร้อากาศ

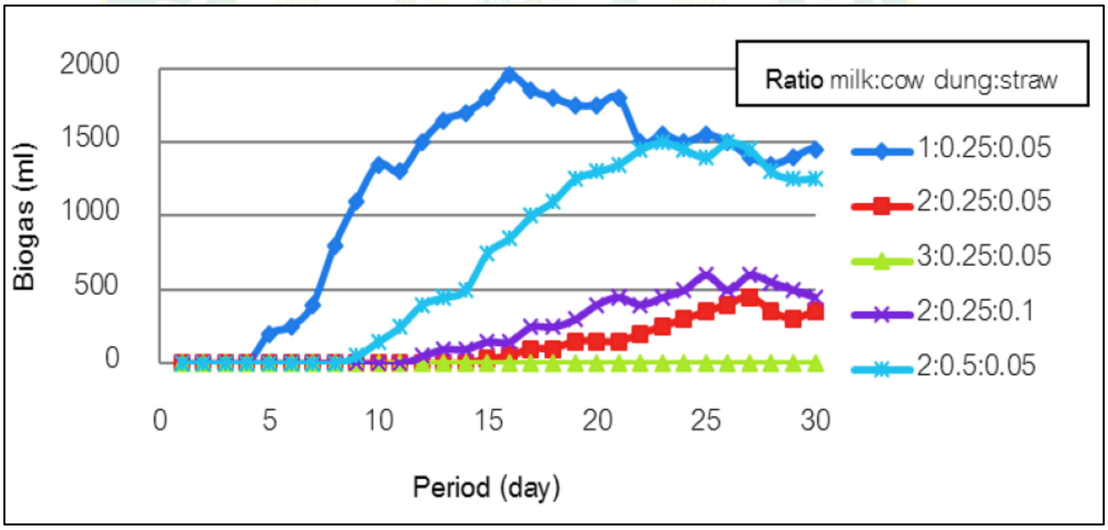
(เพชรรัตน์ ใจบุญ, 2558) งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการเกิดก๊าซชีวภาพจากมูลสัตว์ 3 ชนิด ได้แก่ มูลสุกร มูลโค และมูลนกกระทา รวมทั้งการศึกษาการเกิดก๊าซชีวภาพจากมูลสัตว์ทั้ง 3 ชนิดร่วมกับหญ้าข้าวนก โดยใช้ถังหมักขนาด 200 L ในอัตราส่วนมูลสัตว์ต่อน้ำ 1:1 และอัตราส่วนมูลสัตว์ต่อน้ำต่อหญ้าข้าวนก 5:3:2 ผลการทดลองพบว่า ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการหมักมูลนกกระทามีปริมาณก๊าซชีวภาพมากที่สุดคือ 0.10 m^3 รองลงมา ได้แก่ มูลสุกรคือ 0.01 m^3 และมูลโคคือ 0.009 m^3 ตามลำดับ สำหรับการหมักก๊าซชีวภาพจากมูลสัตว์ 3 ชนิดร่วมกับหญ้าข้าวนกมีปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการหมักมูลนกกระทา มูลสุกร และมูลโค คือ 0.01 m^3 0.009 m^3 และ 0.007 m^3 ตามลำดับ ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดจากการหมักมูลโคและการหมักมูลโคร่วมกับหญ้า ข้าวนกแสดงดังภาพที่ 13 เมื่อน้ำก๊าซชีวภาพจากการหมักมูลสัตว์ 3 ชนิดไปทดสอบหาค่าความร้อนในการต้มน้ำ ความร้อนสูงสุดของน้ำต้มคือ 17.16 kJ และ 15.48 kJ



ภาพที่ 13 ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดจากการหมักมูลโคและการหมักมูลโคร่วมกับหญ้าข้าวนก ระยะเวลา 25 days

ที่มา : เพชรรัตน์ ใจบุญ, (2558)

(บุญสม และคณะ, 2556) ได้ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากนมหมดอายุ โดยทำการหมักร่วมกับมูลโคและฟางข้าว โดยทำการหมักในอัตราส่วนที่แตกต่างกันในถังหมักขนาด 3 L อัตราส่วนนมหมดอายุ มูลโค ฟางข้าว มีอัตราส่วนดังต่อไปนี้ 1:0.25:0.05, 2:0.25:0.05, 3:0.25:0.05 โดยทำการหมักแบบเติมวัตถุดิบครั้งเดียวภายใต้สภาวะไร้อากาศที่อุณหภูมิแวดล้อมปกติ ทำการเก็บปริมาณก๊าซชีวภาพด้วยการแทนที่น้ำ และวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซชีวภาพ ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี จากการทดลองพบว่า อัตราส่วนนมหมดอายุ/มูลโค/ฟางข้าว ที่ 1:0.25:0.05 ให้ก๊าซชีวภาพสูงสุดผลการผลิตก๊าซชีวภาพแสดงดังภาพที่ 14 เนื่องจากใช้ระยะเวลาในการเกิดก๊าซชีวภาพเร็วกว่าทุกผลการทดลองโดยใช้ระยะเวลา 15 days ได้ร้อยละมีเทนโดยเฉลี่ย 63% ปริมาณก๊าซชีวภาพโดยเฉลี่ยมากที่สุด 1875 mL/day ค่า pH ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 7.5 - 8.0 หากน้ำนมหมดอายุ 1 ton สามารถผลิตก๊าซชีวภาพโดยเฉลี่ย 3.75 m^3 ได้ค่าความร้อน 80.63 MJ/ m^3 เนื่องจาก อัตราส่วนดังกล่าวมีความเหมาะสมของสารอินทรีย์ที่จำเป็นต่อการที่แบคทีเรียนำมาใช้ในการสร้างกรด และสร้างมีเทน



ภาพที่ 14 ปริมาณการเกิดก๊าซชีวภาพจากนมหมดอายุในอัตราส่วนต่าง ๆ

ที่มา : บุญสม และคณะ, (2556)

3) การผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร และกลุ่มพืชพลังงาน

(Yeqing Li and et al., 2014) ได้ทำการศึกษาการย่อยสลายโดยการหมักร่วมของมูลไก่และซัง ข้าวโพดในถังหมักแบบแบทช์และแบบ CSTR ทำการหมักในถังหมักแบบแบทช์ขนาด 1 L ที่อุณหภูมิ ในการหมัก 35 °C อัตราส่วนของมูลไก่ต่อซังข้าวโพดคือ 1:1.4 โดยกำหนดเงื่อนไขการศึกษาเบื้องต้น คือใช้ VS 3 gVS/L, วัดส่วน C/N 20 ระยะเวลาในการหมัก 30 days สามารถ

ผลิตก๊าซชีวภาพได้ 281 mL/g VS_{added} ถังหมักแบบ CSTR ขนาด 11 L พื้นที่ในการหมัก 9 L อัตราส่วนของมูลไก่ต่อซัง ข้าวโพดคือ 1:1.4, VS 3 gVS/L, C/N radio 20 สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 233 mL/gVS_{added} พบว่า การหมักแบบแบทซ์สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ดีกว่าการหมักแบบ CSTR

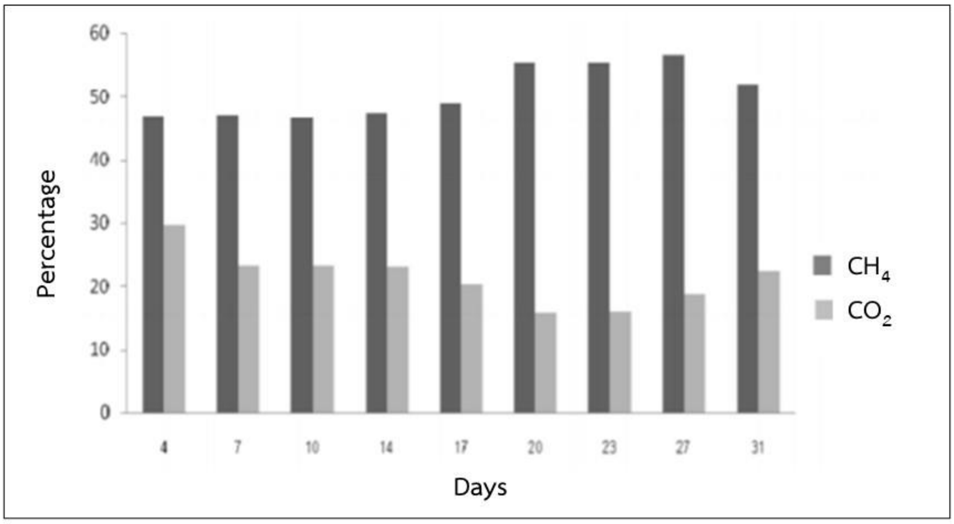
(Yun Hu and et al., 2015) ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการหมักก๊าซชีวภาพของซังข้าวโพดในระบบการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการปรับสภาพซังข้าวโพดก่อนการหมัก สภาวะการหมัก TS 17.6% VS 22.1 - 35.9%, สัดส่วน C/N 30 เฮมิเซลลูโลส 19.8 - 27.2% และเซลลูโลส 22.3 - 35.4% จากการทดลองพบว่า ซังข้าวโพดหวานสามารถนำมาใช้ในการนำมาเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพได้ และหลังจากทำการปรับสภาพได้ 3 days พบว่ามีปริมาณลดลงของลิกนินเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส 8.1 - 19.4% สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้เพิ่มขึ้น 70.4% และเมื่อเทียบกับซังข้าวโพดที่ไม่ได้รับการปรับสภาพ พบว่า ผลิตมีเทนได้เพิ่มขึ้น 66.3%

4) ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน

(นิลวรรณ, 2559) ทำการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนของหญ้าเนเปียร์พันธุ์แคระภายใต้ การปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายด่าง เพื่อให้เห็นถึงศักยภาพในการใช้เป็นพืชพลังงานทางเลือก ในอนาคตใช้หญ้าเนเปียร์แคระที่มีอายุราว 2 month ภายหลังการเก็บเกี่ยวจากทุ่งหญ้าจะถูกน่ามาบดลดขนาดประมาณ 2 mm. ในการวิจัยทำการศึกษา BMP ของหญ้าเนเปียร์แคระที่สภาวะต่างๆ ทำการปรับสภาพเบื้องต้นใช้สารละลายด่าง 2 ชนิด คือ สารละลายโซดาไฟและน้ำปูนขาวความเข้มข้น 1 % w/v ด้วยเวลา 1 และ 2 hr ทุกการทดลอง ทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ (Lab-Scale) ที่สภาวะ บรรยากาศอุณหภูมิ 27 °C ความดัน 1 atm จากการทดลองพบว่า หญ้าเนเปียร์พันธุ์แคระที่ไม่ผ่าน การปรับสภาพด้วยสารเคมีมีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนอยู่ที่ 0.181 และ 0.273 m^3 /$kgVS_{add}$ ตามลำดับ เมื่อผ่านการปรับสภาพด้วยการแช่สารละลายโซดาไฟเข้มข้น 1%w/v นาน 1 hr คิดเป็น ประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้นถึง 30% สำหรับการปรับสภาพด้วยน้ำปูนขาวให้ผลใกล้เคียงกับการทดลอง หญ้าสด ปริมาณผลผลิตก๊าซชีวภาพสะสมของหญ้าเนเปียร์แคระที่สภาวะต่าง ๆ

(Assadawut and et al., 2016) ทำการศึกษาปริมาณ BMP จากการหมักร่วมของของเสียจากการขับถ่าย และเศษผักในระบบการย่อยสลายแบบไร้อากาศ โดยการเติมวัตถุดิบเข้าสู่ระบบเพียงครั้งเดียว ที่สัดส่วนการหมักของของเสียจากการขับถ่ายต่อเศษผัก 70:30 โดยน้ำหนัก จากการทดลอง

พบว่าค่า pH ลดลงในช่วงระยะเวลาย่อยสลาย 7 วันแรก และจะเข้าสู่สภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลาย ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้นเป็น 2,184 L คิดเป็นองค์ประกอบก๊าซมีเทน 56.5% แสดงดังภาพที่ 15 ในระยะเวลาการย่อยสลายทั้งหมด 31 days ค่า BMP ที่ได้จากการทดลองคิดเป็น 34.55 mLCH_4/g $COD_{removal}$ และ 0.38 gCH_4-COD/gVSS ประสิทธิภาพการกำจัดค่า COD สูงสุด 94 %



ภาพที่ 15 เปรียบเทียบปริมาณ CH_4 และ CO_2 ในสภาวะการย่อยสลายแบบไร้อากาศ

ที่มา : Assadawut and et al., (2016)

5) เทคโนโลยีการผลิตไฟฟ้าจากกระบวนการการผลิตก๊าซชีวภาพ

(กุลธิดา สว่างพล และคณะ, 2556) ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ของการผลิตไฟฟ้าโดยใช้ก๊าซชีวภาพจากเซลลูโลส มีวัตถุประสงค์ในการศึกษาความเป็นไปได้ของการผลิตไฟฟ้าโดยใช้ก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรคือลิกโนเซลลูโลส โดยเริ่มจากการคัดเลือกแหล่งวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรพวกลิกโนเซลลูโลสที่มีศักยภาพสูง จากนั้นเลือกกระบวนการปรับสภาพ กระบวนการไฮโดรไลซิส และถังปฏิกรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูงตามลำดับ การผลิตไฟฟ้าพิจารณาที่เครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพ 5 ขนาดที่อยู่ในช่วงประมาณ 200 ถึง 2,000 kW การคิดต้นทุนไฟฟ้าต่อหน่วยแบ่งเป็น 2 กรณีได้แก่ กรณีมีการปรับสภาพ และไม่มีการปรับสภาพวัตถุดิบตั้งต้น ผลการประเมินพบว่า ฟางข้าว ยอดและใบอ้อยมีศักยภาพสูง จึงนำมาใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพ และได้เลือกวิธีปรับสภาพแบบระเบิดด้วยไอน้ำ และกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์สำหรับการเปลี่ยนวัตถุดิบตั้งต้นไปเป็นน้ำตาล กรณีมีการปรับสภาพวัตถุดิบตั้งต้น ใช้ถังปฏิกรณ์แบบ UASFF ใน

การผลิตก๊าซชีวภาพ คำนวณต้นทุนไฟฟ้าต่อหน่วยของเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพขนาด 187 ถึง 1,966 kW ได้ สำหรับยอดฟางข้าว และใบอ้อยมีค่าเท่ากับ 9.29 ถึง 4.77 bath/kWh สำหรับยอดฟางข้าว และใบอ้อยมีค่าเท่ากับ 11.29 ถึง 6.21 bath/kWh ตามลำดับ เนื่องจากกระบวนการปรับสภาพมีต้นทุนค่อนข้างสูงจึงส่งผลต่อการคำนวณต้นทุนไฟฟ้าสูงกว่าอัตราราคารับซื้อไฟฟ้า รวมอัตราส่วนเพิ่ม สำหรับกรณีไม่มีการปรับสภาพวัตถุดิบตั้งต้น เลือกใช้ถังปฏิกรณ์แบบกวนต่อเนื่อง ในการผลิตก๊าซชีวภาพ การคำนวณต้นทุนไฟฟ้าต่อหน่วยของเครื่องยนต์ก๊าซชีวภาพขนาด 187 ถึง 1,966 kW ได้8.17 ถึง 4.55 bath/kWh สำหรับฟางข้าว และ ใบอ้อยมีค่าเท่ากับ 9.37 ถึง 5.39 bath/kWh ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าอัตราการรับซื้อไฟฟ้าเช่นกัน เพื่อเป็นการส่งเสริมการผลิตไฟฟ้าจากก๊าซชีวภาพที่ได้จากชีวมวลประเภทลิกโนเซลลูโลส อัตรารับซื้อไฟฟ้าควรจะมีค่าสูงกว่าค่าต้นทุนไฟฟ้า ดังนั้น อัตราส่วนเพิ่มสำหรับก๊าซชีวภาพที่ผลิตจากชีวมวลประเภทลิกโนเซลลูโลส ควรจะมีค่าสูงกว่าค่าที่ให้ในปัจจุบัน

(William G. M and et.al., 2018) ทำการศึกษาวัฏจักรชีวิตของการผลิตพลังงานโดยได้นำเสนอในรูปพลังงานก๊าซชีวภาพ โดยศึกษาจากถังหมักแบบไม่ใช้อากาศซึ่งใช้น้ำเสียจากฟาร์มปศุสัตว์ขนาดเล็ก จากผลการประเมินตลอด วัฏจักรชีวิตแสดงให้เห็นถึงผลกระทบสู่สิ่งแวดล้อม และผลกระทบจากระบบผลิตพลังงาน จากผลดังกล่าวนั้นยังเปรียบเทียบการผลิตพลังงานทางเลือกอื่น ๆ และการใช้ประโยชน์จากก๊าซชีวภาพซึ่งถือเป็นก๊าซเรือนกระจก ซึ่งเป็นการลดการใช้พลังงานเชื้อเพลิงฟอสซิล โดยส่วนหลักจะเป็นทางเลือกในการใช้ทดแทนน้ำมันแก๊สโซลีน และจากกระบวนการผลิตปุ๋ยจากขั้นตอนการหมักแบบไร้อากาศ ในระหว่างระยะในการผลิตก๊าซชีวภาพ ยังพบ การปลดปล่อยแอมโมเนียและในอนาคตต้องมีการดำเนินการและแนวทางในการควบคุมการปลดปล่อยมลพิษ

6) การปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการผลิตไฟฟ้าโดยใช้ก๊าซชีวภาพ

(Xiaolong W. and et.al., 2019) ก๊าซชีวภาพมีบทบาทและหน้าที่สำคัญในการผลิตพลังงานและป้องกันมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งในขณะนี้กำลังมีการพัฒนาและขยายตัวเป็นวงกว้างอยากมาในประเทศจีน ในช่วง 10 ปี ที่ผ่านมานี้ภาคเกษตรกรรมของจีน มีการพัฒนาที่รวดเร็วรวบถึงมีการขยายตัวของพื้นที่เพาะปลูกและปศุสัตว์ จากการศึกษาในเบื้องต้นของการประเมินวัฏจักรชีวิต (LCA) ในส่วนการประเมินและวิเคราะห์ผลขั้นตอนทั้งหมดของโครงการผลิตก๊าซชีวภาพในประเทศจีน โดยทำการศึกษาเปรียบเทียบในทางเศรษฐศาสตร์และสมรรถภาพความหลากหลาย

ของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ และการเพิ่มขึ้นของระบบผลิตไฟฟ้าจากก๊าซชีวภาพ จากการค้นคว้าดังกล่าวนี้ชี้ให้เห็นว่า อัตราการนำกลับมาเป็นพลังงานจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพ มีน้อยกว่าระบบผลิตพลังงานแบบเก่าเป็นอย่างมากในปัจจุบัน ประสิทธิภาพพลังงานจากระบบผลิตแก๊สชีวภาพขนาดใหญ่มีมากกว่าระบบผลิตก๊าซชีวภาพขนาดเล็กถึง 77.9 % ถึง 95.6 % แต่ระบบผลิตก๊าซชีวภาพขนาดใหญ่มีค่าการปลดปล่อยมลพิษสูงกว่าระบบผลิตก๊าซชีวภาพขนาดเล็กอยู่ 125.7 - 172.7 ton ระบบผลิตก๊าซชีวภาพมีระยะเวลาในการเดินระบบ 1.16 - 11.87 ton มากกว่าระบบผลิตพลังงานทางเลือกอื่น แต่ยังน้อยกว่าระบบผลิตก๊าซชีวภาพขนาดเล็กอยู่ 66.0 ถึง 74.4% เนื่องจากวัตถุดิบส่วนที่ป้อนเข้ามีจำนวนไม่เพียงพอ และค่าใช้จ่ายในการดำเนินการติดตั้งเครื่องมือในขั้นตอนการหมักแบบไร้อากาศและขั้นตอนการผลิตไฟฟ้ามีเงินลงทุนที่สูงมาก ยิ่งไปกว่านั้นในทางเศรษฐศาสตร์ และประสิทธิภาพจากการผลิตไฟฟ้าจากก๊าซชีวภาพก็ยิ่งแย่ลงกว่าประสิทธิภาพของการผลิตก๊าซชีวภาพ ดังนั้น Xiaolong Wang และคณะ จึงได้เสนอแนวทางในการพัฒนาอย่างยั่งยืนสาหรับระบบผลิตก๊าซชีวภาพขนาดใหญ่ ซึ่งต้องมีการปรับปรุงมาตรการโดยทำการวัดผลได้ 1.กำหนดความเหมาะสมของปริมาณและอัตราส่วนของวัตถุดิบ 2. ลดค่าใช้จ่ายในการติดตั้งเครื่องมือสำหรับการหมักแบบไร้อากาศ และ เจนเนอเรเตอร์ 3. นำไฟฟ้าที่ผลิตได้มาใช้ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

บทที่ 3
วิธีดำเนินงานวิจัย

ในบทนี้จะกล่าวถึงขั้นตอน และวิธีการดำเนินงานวิจัย โดยงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งและทำการหมักร่วมกับจุลินทรีย์ โดยการย่อยสลายไม่ใช้อากาศ ซึ่งมีขั้นตอนและวิธีการทดลองดังต่อไปนี้

การเก็บตัวอย่างวัสดุหมัก

1. การเก็บตัวอย่างกากตะกอนมูลสุกรสำหรับเป็นหัวเชื้อ (Inoculum) ในการหมัก

สำหรับหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ จะทำการเลือกใช้กากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลสุกร ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากคณะสัตว์ศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยแม่โจ้ นำตะกอนหัวเชื้อมากำจัดเศษหินดินและทรายด้วยการร่อนผ่านตะแกรงขนาด 250 mesh จากนั้นนำกากตะกอนหัวเชื้อที่ได้วิเคราะห์องค์ประกอบของหัวเชื้อจุลินทรีย์ดังนี้ วิเคราะห์ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total Solid, TS) ปริมาณของแข็งระเหยง่าย (Volatile Solid, VS) ความชื้น (Moisture Content) ค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ปริมาณสารอินทรีย์ (Chemical Oxygen Demand, COD) วิเคราะห์ปริมาณสัดส่วนของคาร์บอน/ไนโตรเจน (C/N Ratio), ปริมาณด่างไบคาร์บอเนต (Alkalinity, ALK) และปริมาณกรดไขมันระเหยง่าย (Volatiles Fatty Acid, VFA) โดยทำการทดลองซ้ำตัวอย่างละ 3 ครั้ง และหาค่าเฉลี่ยจากผลการวิเคราะห์ รายละเอียดการวิเคราะห์องค์ประกอบของหัวเชื้อจุลินทรีย์ดังแสดงในตารางที่ 15

การวิเคราะห์หาปริมาณของแข็งทั้งหมดในตะกอนหัวเชื้อ (Total Solid, TS)

$$\text{ปริมาณของแข็งทั้งหมด (mg/L)} = \frac{\text{น้ำหนักก่อนอบ (g)} - \text{น้ำหนักหลังอบ (g)}}{\text{ปริมาตรเศษอาหาร (mL)}} \times 10^6$$ สมการที่ 3.1

การวิเคราะห์หาปริมาณสารอินทรีย์ระเหยง่ายในตะกอนหัวเชื้อ (Volatile Solid, VS)

$$\text{ปริมาณสารอินทรีย์ทั้งหมด (mg/L)} = \frac{\text{น้ำหนักหลังอบที่ 105°C (g)} - \text{น้ำหนักหลังเผาที่ 550°C (g)}}{\text{ปริมาตรเศษอาหาร (mL)}} \times 10^6$$

สมการที่ 3.2

ตารางที่ 15 วิธีวิเคราะห์องค์ประกอบของหัวเชื้อจุลินทรีย์

พารามิเตอร์	วัตถุประสงค์	วิธีการวิเคราะห์
1. ค่าความชื้น (%)	ค่าความชื้นในวัตถุดิบ	APAC 1995
2. ค่า pH	ความเป็นกรด-ด่างของระบบ	Digital pH Meter
3. ปริมาณ TS (mg/L)	สัดส่วนของแข็งในวัตถุดิบ	APHA 2540
4. ปริมาณ VS (mg/L)	สัดส่วนสารอินทรีย์ในวัตถุดิบ	APHA 2540
5. อัตราส่วน C/N Ratio	ปริมาณคาร์บอน/ไนโตรเจน	Singh and Prerna (2009)
6. ปริมาณ COD (mg/L)	ปริมาณสารอินทรีย์	APHA 5220
7. ปริมาณ ALK (mg $CaCO_3$/L)	ปริมาณด่างไบคาร์บอเนต	APHA 2310
8. ปริมาณ VFA (mg CH_3COOH/L)	ปริมาณกรดไขมันระเหยง่าย	APHA 2310

2. วัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง

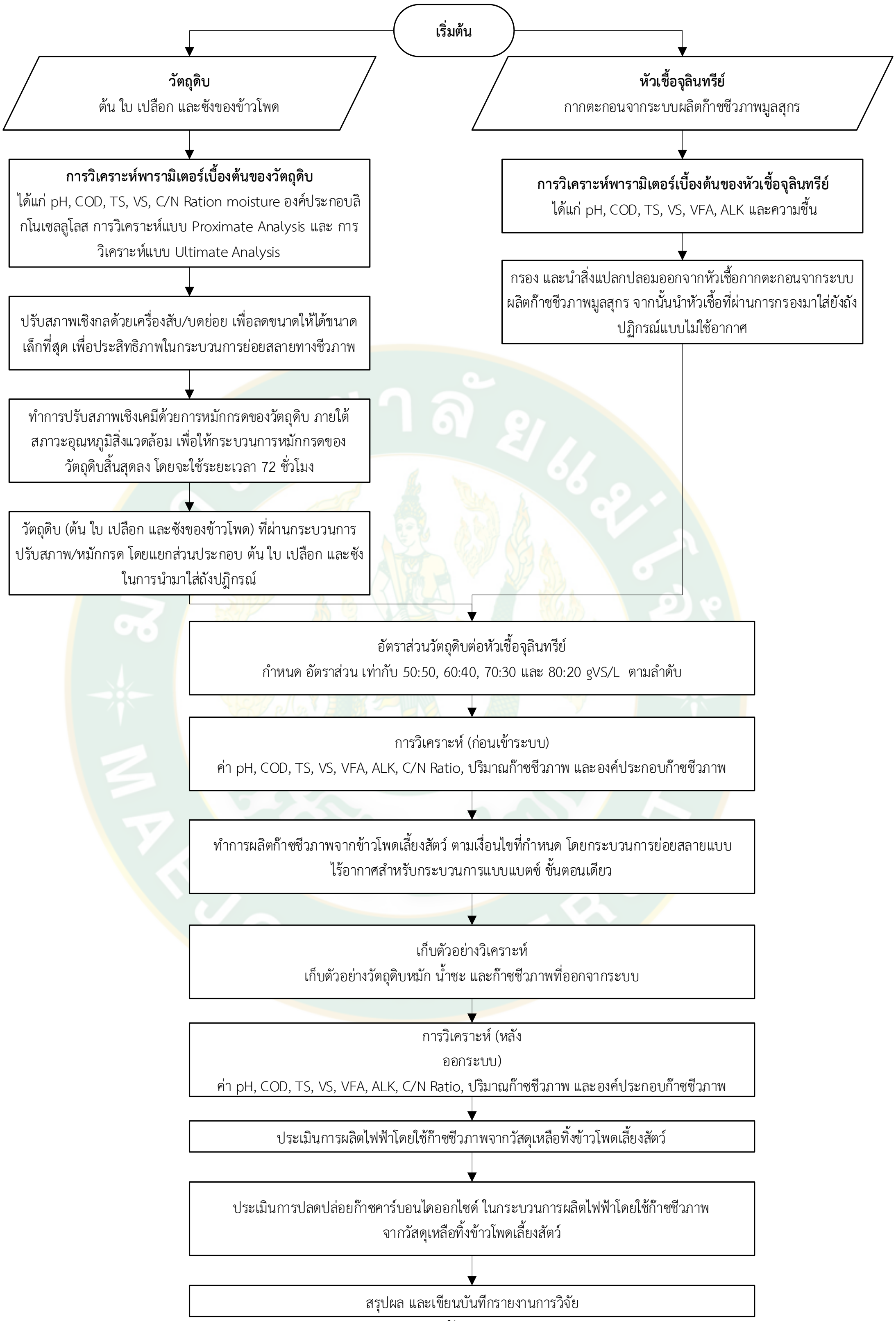
เศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง ประเภทต้น (Maize Stalks), ใบ (Maize Leaves), เปลือก (Maize Husks), และซัง (Maize Cobs) ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากแปลงเกษตรและโรงสีข้าว มีลักษณะค่าความชื้นสูง โดยเตรียม ต้น ใบ เปลือก และซังข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ปรับสภาพเชิงกลด้วยการสับเพื่อลดขนาดให้ขนาดเล็กที่สุด เพื่อประสิทธิภาพในกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ สำหรับวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบของต้น ใบ เปลือก และซังข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ จะมีวิธีการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 16 โดยทำการทดลองซ้ำตัวอย่างละ 3 ครั้ง และหาค่าเฉลี่ยจากผลการวิเคราะห์

ตารางที่ 16 วิธีวิเคราะห์องค์ประกอบของต้น ใบ เปลือก และซังข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

พารามิเตอร์	วัตถุประสงค์	วิธีการวิเคราะห์
1. ปริมาณ TS (mg/L)	สัดส่วนของแข็งในวัตถุดิบ	APHA 2540
2. ปริมาณ VS (mg/L)	สัดส่วนสารอินทรีย์ในวัตถุดิบ	APHA 2540
3. อัตราส่วน C/N ratio	ปริมาณคาร์บอน/ไนโตรเจน	(Metcalf and Eddy, 2014)
4. Proximate analysis	องค์ประกอบค่าความชื้น, ค่าคาร์บอนคงตัว, สารระเหย และ ขี้เถ้า	ASTM D3172-3173,7582
5. Ultimate analysis	องค์ประกอบของคาร์บอน, ไฮโดรเจน, ไนโตรเจน, ออกซิเจน และ ซัลเฟอร์	ASTM D5373
6. เซลลูโลส (%dry basis)	องค์ประกอบของเซลลูโลส	(Metcalf and Eddy, 2014)
7. เฮมิเซลลูโลส (%dry basis)	องค์ประกอบของเฮมิ-เซลลูโลส	(Metcalf and Eddy, 2014)
8. ลิกนิน (%dry basis)	องค์ประกอบของลิกนิน	(Metcalf and Eddy, 2014)

ขั้นตอนการดำเนินการระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

การดำเนินการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพโดยการหมักร่วมของเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง (ต้น ใบ เปลือก และซัง) ร่วมกับกากตะกอนมูลสุกรจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพเป็นหัวเชื้อ (Inoculum) ภายใต้สภาวะการหมักแบบไร้อากาศ เพื่อเป็นแนวทางในการหาสภาวะที่เหมาะสม รายละเอียดของการดำเนินการวิจัยแสดงดังภาพที่ 16 และมีขั้นตอนดังต่อไปนี้



ภาพที่ 16 แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1) วัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 เศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งจากแปลงเกษตร ซึ่งประกอบไปด้วย ต้น และใบ เศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งจากโรงสี ซึ่งประกอบไปด้วย เปลือก และซัง ส่วนที่ 2 กากตะกอนมูลสุกรจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ คือ กากตะกอนจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลสุกร ซึ่งได้รับความอนุเคราะห์จากคณะสัตว์ศาสตร์ และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยแม่โจ้ โดยนำกากตะกอนจุลินทรีย์บริเวณบ่อล้นจากบ่อระบบผลิตก๊าซชีวภาพมูลสุกร ซึ่งหัวเชื้อกากตะกอนที่ได้มาจะทำการหมักในถังหมักก๊าซชีวภาพขนาด 5 L ก่อนนำหัวเชื้อไปใช้งาน เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพให้กับกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะการหมักย่อยแบบไร้อากาศก่อนนำเข้าระบบ

2) เมื่อผ่านกระบวนการหมักแล้วสังเกตเห็นปริมาณของก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นจึงจะนำหัวเชื้อจุลินทรีย์มาใช้งานได้ ระยะเวลาการเตรียมหัวเชื้อจุลินทรีย์จะมีระยะเวลาประมาณ 1 สัปดาห์

3) นำต้น ใบ ซัง และเปลือก ของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ที่มีขนาดประมาณ 10–15 cm มาทำการปรับสภาพเชิงกลด้วยเครื่องสับ/บดย่อย เพื่อลดขนาดให้ได้ขนาดเล็กที่สุด เพื่อให้มีพื้นที่สำหรับกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์ทำงานได้ดีขึ้น จากนั้นก่อนการนำวัสดุหมักที่ผ่านกระบวนการสับ/บดย่อย เข้าระบบจะต้องทำการหมักกรดของวัสดุหมักก่อน เพื่อให้กระบวนการเกิดกรดของวัตถุดิบหมักสิ้นสุดลง เป็นระยะเวลา 1–2 สัปดาห์ (ศศิธร ใสปา, 2562) (จินดา สนิมวงศ์ ณ อยุธยา, 2559) เพื่อป้องกันการสะสมของกรดภายในระบบ ซึ่งการสะสมของกรดเหล่านี้จะส่งผลโดยตรงทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพลดต่ำลง

4) จากนั้นเมื่อวัตถุดิบต่าง ๆ ได้มีการเตรียมความพร้อมในการนำเข้ากระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพแล้ว โดยการนำวัตถุดิบใส่ยังระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบ BMP Test โดยใช้จะวัตถุดิบทำการหมักแยกแต่ละประเภท ได้แก่ ต้น ใบ เปลือก และซัง

5) จากนั้นทำการป้อนหัวเชื้อกากตะกอนจุลินทรีย์ที่ได้ทำการเตรียมเชื้อเอาไว้เบื้องต้นมาใส่ยังระบบบริเวณด้านล่างของถังปฏิกิริยา โดยสัดส่วนระหว่างวัสดุหมักกับหัวเชื้อจุลินทรีย์จะทำการกำหนดให้มีค่าเท่ากับ 50:50, 60:40, 70:30 และ 80:20 $gVSL^{-1}$ ตามลำดับ (โดยทำการทดลองซ้ำแต่เปลี่ยนวัสดุหมัก ได้แก่ ต้น ใบ เปลือก และซัง)

6) จากนั้นให้ทำการปิดระบบผลิตก๊าซชีวภาพ เพื่อเตรียมการดำเนินการผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งกระบวนการทดลองจะใช้ระยะเวลาของแต่ละการทดลอง 50 วัน ต่อการทดลอง

1 เงื่อนไข โดยระบบดังกล่าวเป็นระบบการป้อนสารอินทรีย์แบบครั้งเดียว (Batch Fermentation) โดยระบบจะมีระบบการกวนผสมโดยกระบวนการเขย่า เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

7) หาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทน (Biochemical Methane Potential, BMP) ที่สภาวะมาตรฐาน โดยทำการศึกษาหาอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดในการเพิ่มศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพระหว่างวัสดุหมักร่วมทั้ง 2 ชนิดคือ เศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งและกากตะกอนมูลสุกรจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการหมักแบบไร้อากาศ ในการหาอัตราส่วนทำการทดลองโดยเดินระบบแบบ Batch ซึ่งประกอบด้วยชุดหมักก๊าซชีวภาพปริมาตร 1000 mL และชุดวัดปริมาณก๊าซชีวภาพ โดยก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจะถูกระบายออกจากขวดหมักมาแทนที่น้ำที่อยู่ในชุดวัดปริมาณก๊าซ เป็นการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการหมักโดยอาศัยหลักการแทนที่น้ำ

8) ตั้งชุดการทดลอง ในบริเวณที่โล่งแจ้ง ซึ่งมีแสงแดดส่องทั่วถึงตลอดทั้งวัน เพื่อให้อุณหภูมิภายในถังปฏิกิริยาอยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับการทำงานของหัวเชื้อกากตะกอนจุลินทรีย์

9) เมื่อทำการวัดปริมาตรก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นของระบบเรียบร้อยแล้วให้ทำการวัดองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ โดยใช้เครื่องวัดก๊าซชีวภาพ GAS ANALYZER PORTABLE ยี่ห้อ GEOTECH รุ่น BIOGAS 5000 ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

10) การเก็บจะเก็บตัวอย่าง เพื่อนำตัวอย่างไปทำการวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่สำคัญในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ โดยวัตถุดิบที่จะนำไปผลิตก๊าซชีวภาพต้องทำการวิเคราะห์องค์ประกอบของวัตถุดิบก่อนเริ่มระบบ เพื่อใช้ในการวิเคราะห์อัตราการป้อนวัตถุดิบเข้าระบบ คือ ค่า COD pH สารระเหยง่าย และปริมาณของแข็งทั้งหมด ของวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยมีการหาค่าความชื้น วิเคราะห์ Ultimate/Proximate สำหรับวิธีการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพแบบ BMP Test โดยทำการทดลองซ้ำตัวอย่างละ 3 ครั้ง และหาค่าเฉลี่ยจากผลการวิเคราะห์ ซึ่งจะมีวิธีการวิเคราะห์ ดังแสดงในตารางที่ 17

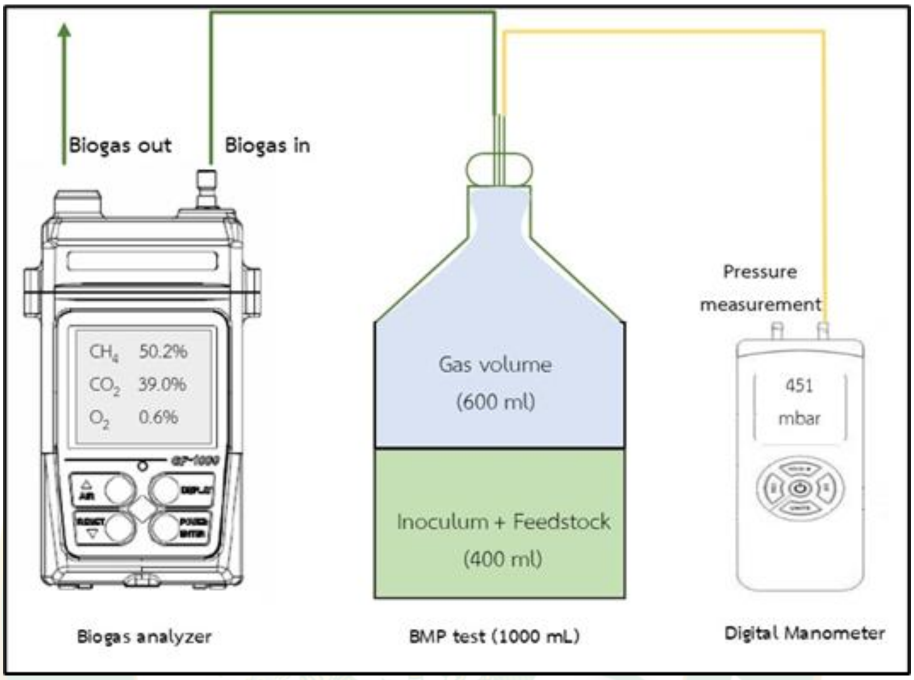
ตารางที่ 17 วิธีการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของกระบวนการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง

พารามิเตอร์	ตัวอย่าง	ความถี่	วิธีการวิเคราะห์
1. ค่า pH	วัสดุหมัก	Before, After	Digital pH Meter
2. ปริมาณ COD (mg/L)	วัสดุหมัก	Before, After	APHA 5220
3. ปริมาณ TS (mg/L)	วัสดุหมัก	Before, After	APHA 2540
4. ปริมาณ VS (mg/L)	วัสดุหมัก	Before, After	APHA 2540
5. ปริมาณ ALK (mg $CaCO_3$/L)	วัสดุหมัก	Before, After	APHA 2310
6. ปริมาณ VFA (mg CH_3COOH/L)	วัสดุหมัก	Before, After	APHA 2310
7. อัตราส่วน C/N ratio	วัสดุหมัก	Before, After	Thermocouple
8. อุณหภูมิภายในระบบ (°C)	ระบบ	daily	
9. ปริมาณก๊าซชีวภาพ	ก๊าซชีวภาพ	daily	Gas Counter
10. องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ	ก๊าซชีวภาพ	daily	Biogas Analyzer

ขั้นตอนการศึกษาศักยภาพการเกิดก๊าซมีเทนทางชีวภาพ (Biochemical Methane Potential, BMP)

การศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากตัวอย่างเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง ได้ทำการศึกษาภายใต้วิธีการประยุกต์มาตรฐาน VDI 4630 ทำการทดลองโดยกำหนดอัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อ (S/I) เท่ากับ 1.0, 1.5, 2.3 และ 4.0 (โดยน้ำหนักของแข็งระเหย ชุดการทดลองแบบกะ (Batch Fermentation) โดยหมักในขวดดูแรนขนาด 1,000 ml ซึ่งมีปริมาตรการหมัก 400 ml กำหนดปริมาตรเชื้อตั้งต้น 6 gVS_{add} L^{-1} จากนั้นเติมเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งที่ต้องการศึกษา จากนั้นเติมน้ำกลั่น และสารอาหารเสริมจนมีปริมาตร 400 ml แสดงดังภาพที่ 17 จากนั้นปรับค่า pH ของเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งให้อยู่ในช่วง 7.0-7.2 และมีการไล่อากาศ (ออกซิเจน) ที่อยู่ภายในขวดด้วยก๊าซไนโตรเจน ก่อนปิดฝาขวดให้สนิท โดยไม่มีการเปิดฝาจนจบกระบวนการหมัก แล้วนำไปบ่มในสภาวะไร้อากาศที่ห้องควบคุมอุณหภูมิ โดยควบคุมอุณหภูมิในการหมักที่ 35 ± 2 °C ระยะเวลาการหมัก 50 days และตรวจวัดก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นทุกวัน ด้วยอุปกรณ์วัดความดันยี่ห้อ KIMO รุ่น MP 112 เพื่อนำมาคำนวณกลับเป็นปริมาตรก๊าซชีวภาพ และวัดสัดส่วนก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น

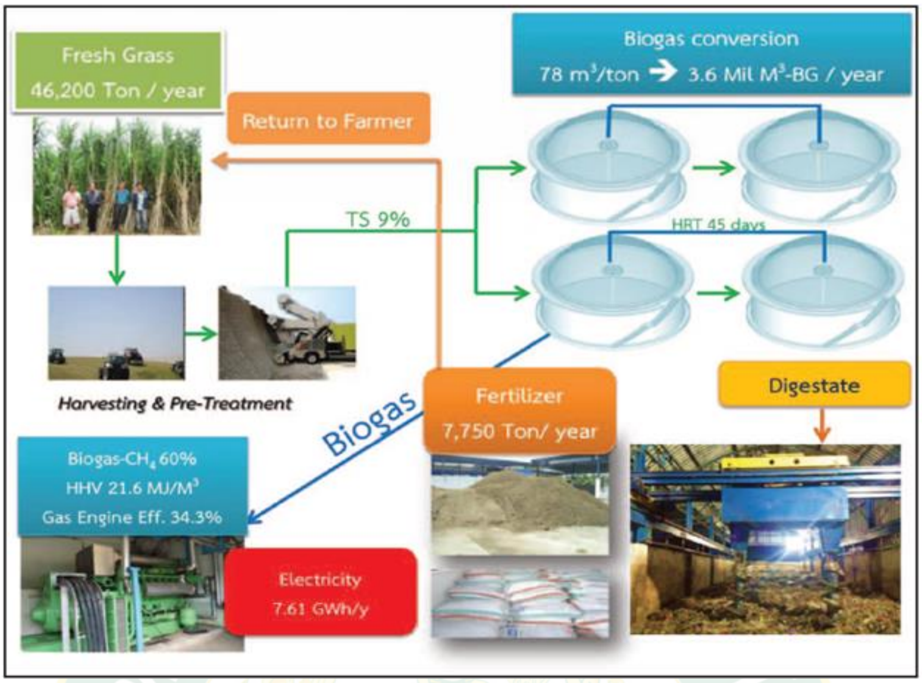
ด้วยเครื่องวัดองค์ประกอบก๊าซแบบพกพายี่ห้อ GA2000, Geotechnical Instruments และในการวัดแต่ละวันจะทำการเขย่าผสมของเสียวันละครั้งก่อนวัดปริมาณก๊าซชีวภาพ โดยทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ รวมถึงชุดควบคุมที่มีเฉพาะหัวเชื้อ และทำการวิเคราะห์ผล



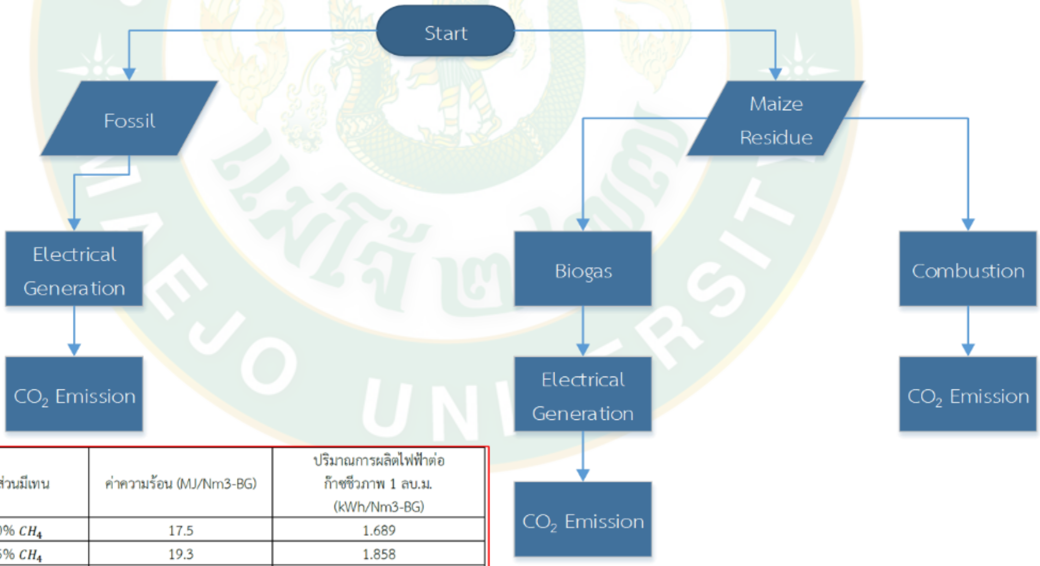
ภาพที่ 17 แบบจำลองระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบ BMP

ขั้นตอนการประเมินปริมาณไฟฟ้าเบื้องต้นโดยใช้ก๊าซชีวภาพ จากเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง

สำหรับการประเมินปริมาณการผลิตไฟฟ้าเบื้องต้น โดยใช้ก๊าซชีวภาพจากเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งจะทำการประเมินปริมาณการผลิตไฟฟ้าโดยใช้ปริมาณก๊าซชีวภาพทางทฤษฎี และใช้ผลการวิเคราะห์ของการทดลองที่ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพที่ดีที่สุดในเงื่อนไขของงานวิจัยที่ศึกษาอัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพแบบ BMP Test คืออัตราส่วนที่ดีที่สุด และใช้วัตถุดิบ ต้น ใบ เปลือก และซัง ไปพิจารณาถึงผลผลิตศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพทั้ง 4 ส่วน โดยจะนำปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้ในหน่วย $m^3/tonVS_{added}$ ไปคำนวณพลังงานไฟฟ้า โดยคิดจากปริมาณก๊าซชีวภาพที่ 1 m^3 ต่อปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ต่ำสุด 0.71 kWh และที่สูงที่สุด 1.40 kWh โดยอัตราการทดแทนการใช้ก๊าซชีวภาพนี้ได้นำข้อมูลจากกรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงานกระทรวงพลังงาน



ภาพที่ 18 ภาพรวมระบบการผลิตไฟฟ้าจากก๊าซชีวภาพ



สัดส่วนมีเทน	ค่าความร้อน (MJ/Nm3-BG)	ปริมาณการผลิตไฟฟ้าต่อก๊าซชีวภาพ 1 ลบ.ม. (kWh/Nm3-BG)
50% CH_4	17.5	1.689
55% CH_4	19.3	1.858
60% CH_4	21.0	2.027

ภาพที่ 19 แผนภาพแสดงขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

ขั้นตอนการประเมินการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการผลิตไฟฟ้า (CO_2 Emission)

การหมักแบบไร้อากาศช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการฝังกลบขยะอินทรีย์ ในทำนองเดียวกันกับการหมักก๊าซชีวภาพ โดยผู้จัดทำจะต้องป้อนข้อมูลรายเดือน เช่น ปริมาณขยะอินทรีย์ การใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล และไฟฟ้าของโรงหมักก๊าซชีวภาพแบบไร้อากาศ ค่าความชื้นโดยประมาณของของผสมที่เข้าสู่ระบบ (ของผสมประกอบด้วยขยะอินทรีย์และน้ำ) ประเภทของผลผลิตที่ได้จากการหมักแบบไร้อากาศ (พลังงานไฟฟ้าหรือความร้อน) ดังแสดงในภาพที่ 20

ข้อมูลนำเข้า		
ปริมาณขยะประเภทเศษอาหารทั้งหมดที่นำมาหมักก๊าซชีวภาพ	0	ตัน/ปี
ปริมาณขยะประเภทกิ่งไม้/ใบไม้จากสวนทั้งหมดที่นำมาหมักก๊าซชีวภาพ	35319.9	ตัน/ปี
ปริมาณเชื้อเพลิงฟอสซิลทั้งหมดที่ใช้ในกิจกรรมต่างๆ ของการหมักก๊าซชีวภาพ	330	ลิตร/ปี
ปริมาณไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ในกิจกรรมต่างๆ ของการหมักก๊าซชีวภาพ	63360	กิโลวัตต์ชั่วโมง/ปี
ค่าความชื้นโดยประมาณของขยะมูลฝอยที่เข้าสู่ระบบ	19	%
ผลผลิตที่ได้จากการหมักก๊าซชีวภาพ	การใช้ก๊าซชีวภาพในการผลิตไฟฟ้า	
สิ่งที่ได้ (ประเมินในเชิงทฤษฎี)		
ไฟฟ้า	826.08	กิโลวัตต์ชั่วโมง/ตันของขยะอินทรีย์
ผลลัพธ์		
ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมต่างๆ ของการหมักก๊าซชีวภาพ	1.04	กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อตันขยะอินทรีย์
ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการรั่วไหล (unavoidable leakages)	34.02	กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อตันขยะอินทรีย์
ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยตรงจากการหมักก๊าซชีวภาพ	35.06	กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อตันขยะอินทรีย์
ปริมาณการหลีกเลี่ยงการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตไฟฟ้า	467.56	กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อตันขยะ
ปริมาณการหลีกเลี่ยงการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการฝังกลบขยะอินทรีย์	0.00	กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อตันขยะ
<<<ค่าการหลีกเลี่ยงการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการลดการฝังกลบขยะอินทรีย์จะปรากฏเมื่อท่านกรอกข้อมูลประเภทบ่อฝังกลบในแผ่นงานการฝังกลบแล้ว		
ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิจากการหมักก๊าซชีวภาพ (โดยใช้วิธีการประเมินวัฏจักรชีวิต)	**-432.50**	**กิโลกรัมคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อตันขยะอินทรีย์**
การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดจากการหมักก๊าซชีวภาพต่อปี	**-15275.96**	**ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าต่อปี** ค่าลบหมายถึงปริมาณที่ลดได้มากกว่าที่ปล่อยออก

ภาพที่ 20 ข้อมูลนำเข้าการคำนวณปริมาณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

จากนั้นเลือกประเภทการใช้ประโยชน์ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ว่าใช้ในการผลิตพลังงานไฟฟ้าหรือความร้อน คำนวณปริมาณพลังงานที่ผลิตได้ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิลและการใช้ไฟฟ้าในการดำเนินงานสามารถคำนวณโดยใช้สมการดังนี้

$$Emissions_{operation} = (FC \times NCV_{FF} \times EFCO_2) + (EC \times EF_{el}) \qquad \text{สมการที่ 3.3}$$

โดยที่

$Emissions_{operation}$ การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการดำเนินงาน ($kgCO_2/ton_{maize\ residue}$)

FC ปริมาณเชื้อเพลิงฟอสซิลที่ใช้ในการดำเนินงาน (Mass or Volume/$ton_{maize\ residue}$)

NCV_{FF} ค่าความร้อนสุทธิของเชื้อเพลิงฟอสซิลที่ใช้ (MJ/Mass or Volume)

$EFCO_2$ ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล ($kgCO_2$/MJ)

EC ปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ในการดำเนินงาน (MWh/$ton_{maize\ residue}$)

EF_{el} ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย ($kgCO_2/MWh$)

- ปริมาณการปล่อยก๊าซมีเทนจากการรั่วไหลของถังหมักแบบไร้อากาศ สามารถคำนวณโดยใช้สมการ ดังนี้

$$Emissions_{treatment} = ECH_4 \times DM \times 1000 \times GWP\ CH_4$$ สมการที่ 3.4

โดยที่

$Emissions_{treatment}$ การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการหมักขยะอินทรีย์ ($kgCO_2/ton_{maize\ residue}$)

ECH_4 การปล่อยก๊าซมีเทนจากการรั่วไหลของถังหมักแบบไร้อากาศ ($kgCH_4/kg_{dried\ maize\ residue}$)

DM เปอร์เซ็นต์ของขยะอินทรีย์แห้งในขยะอินทรีย์ที่นำมาหมัก (%) (DM =100 – ร้อยละของน้ำในขยะอินทรีย์ที่น้ำมาหมัก)

1000 ค่าการแปลงหน่วยที่ใช้ในการคำนวณปริมาณขยะอินทรีย์แห้งต่อขยะอินทรีย์

$GWPCH_4$ ค่าศักยภาพในการทำให้โลกร้อน (ก๊าซมีเทนมีค่า 21 เท่าของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยคิด ช่วงเวลา 100 ปี)

- ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการหมักแบบไร้อากาศสามารถคำนวณโดยใช้สมการ ดังนี้

ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมด = การปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากการดำเนินงาน + การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการรั่วไหลของถังหมักแบบไร้อากาศ

- ปริมาณการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตไฟฟ้าโดยใช้ก๊าซชีวภาพที่ได้จากการหมักแบบไร้อากาศ สามารถคำนวณโดยใช้สมการ

$$Avoidance\ GHG_{electricity} = C_{biogas} \times PCH_4 \times ECH_4 \times CF_{energy} \times E_{powerplant} \times Ef_{el}$$

สมการที่ 3.5

โดยที่

$Avoidance\ GHG_{electricty}$ ปริมาณการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตไฟฟ้าโดยใช้ก๊าซชีวภาพ ($kgCO_2/ton_{maize\ residue}$)

C_{biogas} ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้ต่อตันขยะอินทรีย์ ($m^3/ton_{maize\ residue}$)

PCH_4 เปอร์เซ็นต์ของมีเทนในก๊าซชีวภาพ (%)

ECH_4 ปริมาณพลังงานของก๊าซมีเทน (MJ/m^3)

CF_{energy} ค่าการแปลงหน่วยที่ใช้ในการแปลงพลังงานของก๊าซมีเทนเป็นไฟฟ้า (3.6 MJ/kWh)

$E_{powerplant}$ ประสิทธิภาพของโรงไฟฟ้า (%)

EF_{el} ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย ($kgCO_2$/MWh)

●ปริมาณการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตความร้อนโดยใช้ก๊าซชีวภาพที่ได้จากการหมักแบบไร้อากาศ สามารถคำนวณโดยใช้สมการ ดังนี้

$$\text{Avoidance GHG}_{thermal} = C_{biogas} \times PCH_4 \times ECH_4 \times EFCO_2$$ สมการที่ 3.6

โดยที่ $\text{Avoidance GHG}_{thermal}$ ปริมาณการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตความร้อนโดยใช้ก๊าซชีวภาพ ($kgCO_2/ton_{maize\ residue}$)

C_{biogas} ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้ต่อตันขยะอินทรีย์ (($m^3/ton_{maize\ residue}$))

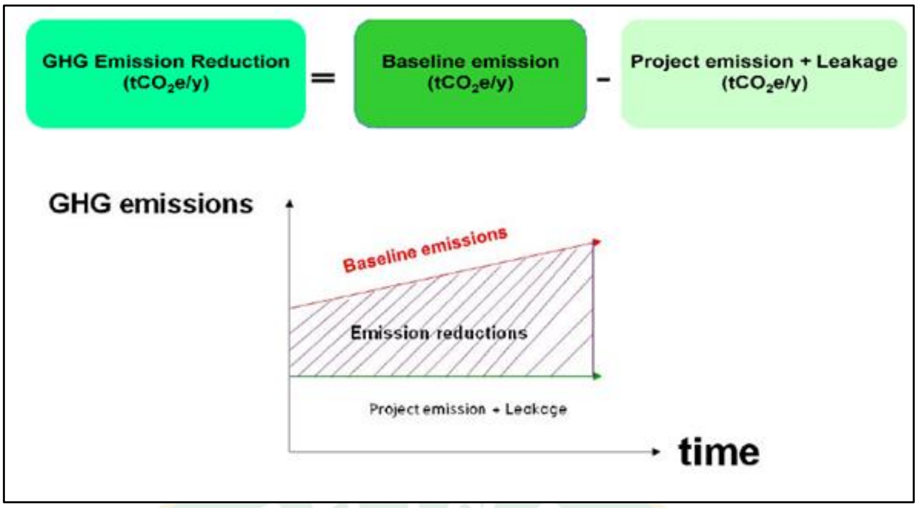
PCH_4 เปอร์เซ็นต์ของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพ (%)

ECH_4 ปริมาณพลังงานของก๊าซมีเทน (MJ/m^3)

$EFCO_2$ ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกของก๊าซปิโตรเลียมเหลว (LPG) ($kgCO_2$/MJ) (โปรแกรมคำนวณโดยกำหนดสมมติฐานว่าใช้ก๊าซชีวภาพแทน LPG)

การประเมินการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการผลิตไฟฟ้า

การคำนวณปริมาณการลดก๊าซเรือนกระจกจะคิดจากส่วนต่างของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในกรณีฐาน (Baseline Emission, BE) และผลรวมของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการดำเนินงาน (Project Emission, PE) กับการปล่อยก๊าซเรือนกระจกนอกโครงการ แสดงดังภาพที่ 21 โดยปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ลด/ดูดกลับ ได้มีหน่วยเป็น ตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า ค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่ใช้ในการคำนวณ BE, PE และ LE ต้องเป็นค่าที่ตรวจวัด/บันทึกในช่วงเวลาเดียวกัน โดยกำกับในปี (Year)



ภาพที่ 21 หลักการคำนวณปริมาณก๊าซเรือนกระจก

ที่มา : Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC (2013 - 2014)

ก๊าซเรือนกระจกแต่ละชนิดมีค่าศักยภาพในการทำให้โลกร้อนที่แตกต่างกัน ดังนั้นในการคำนวณปริมาณก๊าซเรือนกระจกจึงให้คำนวณเป็นปริมาณเทียบเท่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้ค่าศักยภาพในการทำให้เกิดสภาวะโลกร้อนของก๊าซแต่ละชนิดเป็นตัวคูณ (Global Warming Potential, GWP) สำหรับค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อนตามรายงานของคณะกรรมการระหว่างรัฐบาลว่าด้วยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอากาศ (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) ซึ่ง IPCC เป็นหน่วยงานที่สนับสนุนข้อมูลเชิงวิทยาศาสตร์ในการดำเนินการเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ค่าศักยภาพในการทำให้เกิดสภาวะโลกร้อนแสดงดังภาพที่ 22

ก๊าซเรือนกระจก	สูตรเคมี	ค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อนในช่วงเวลา 100 ปี		
		รายงานฉบับที่ 2 (Second Assessment Report: SAR)	รายงานฉบับที่ 4 (Fourth Assessment Report: AR4)	รายงานฉบับที่ 5 (Fifth Assessment Report: AR5)
คาร์บอนไดออกไซด์	CO_2	1	1	1
มีเทน	CH_4	21	25	28
ไนตรัสออกไซด์	N_2O	310	298	265
ไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน	HFCs	140-11,700	124-14,800	4-12,400
เปอร์ฟลูออโรคาร์บอน	PFCs	6,500-9,200	7,390-12,200	6,630-11,100
ซัลเฟอร์เฮกซะฟลูออไรด์	SF_6	23,900	22,800	23,500
ไนโตรเจนไตรฟลูออไรด์	NF_3	-	17,200	16,100

ภาพที่ 22 ค่าศักยภาพในการทำให้เกิดสภาวะโลกร้อนของก๊าซเรือนกระจกแต่ละชนิด

ที่มา : Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC (2013 - 2014)

สำหรับการประเมินการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 Emission) จากกระบวนการการผลิตไฟฟ้าโดยใช้ก๊าซชีวภาพจากวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง ได้ศึกษาข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 Emission Factor) ซึ่งเปลี่ยน ข้อมูลจากกิจกรรมต่าง ๆ ให้เป็น ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในหน่วย kg CO_2-eq ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ทำการศึกษาในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ หน่วยของ Functional Unit คือ kgCO_2-eq /การผลิตก๊าซชีวภาพ 1 m^3 และในกระบวนผลิตไฟฟ้า หน่วยของ Functional Unit คือ kgCO_2-eq /การผลิตไฟฟ้า 1 kWh แสดงกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ ไปจนถึงกระบวนการผลิตไฟฟ้า โดยกระบวนการหมักก๊าซชีวภาพแบบไร้อากาศเป็นเทคโนโลยีที่มีศักยภาพมากในการบำบัดขยะอินทรีย์เป็นวิธีที่มีประสิทธิผลดีที่สุดเนื่องจากสามารถรวบรวมก๊าซชีวภาพมาผลิตพลังงานความร้อนหรือไฟฟ้าได้ และมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อย การคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการหมักแบบ ไร้อากาศต้องคำนวณทั้งปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล (ไฟฟ้าและน้ำมันดีเซล) ในกิจกรรมต่าง ๆ ของการหมักแบบไร้อากาศ และปริมาณการปล่อยก๊าซมีเทนจากการรั่วไหลของถังหมักแบบไร้อากาศ โดยใช้ค่าเริ่มต้นของ (IPCC, 2006) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2 kgCH_4/kg$_{\text{dried mass}}$ และก๊าซชีวภาพที่ได้จากการหมักแบบไร้อากาศต้องมีค่าความร้อน (Calorific Value) อยู่ในช่วง 20-25 MJ/m^3 (คู่มือการลงทุนโรงไฟฟ้าก๊าซชีวภาพจากพืชพลังงาน ปี 2562) จึงสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานความร้อนหรือไฟฟ้าทดแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล และสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ เทคโนโลยีในการผลิตพลังงานมีหลากหลายรูปแบบ เช่น การเผาไหม้เพื่อผลิตไฟฟ้าโดยใช้เครื่องยนต์ขนาดเล็ก (น้อยกว่า 200 kW) หรือเครื่องยนต์สันดาปภายในขนาดใหญ่ (ขนาดสูงสุด 1.5 MW) (Poschl and et.al., 2016)

การวิเคราะห์ด้านการประเมินการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 Emission) โดยระบบที่ใช้จะอ้างอิงระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบ CSTR โดยจะเริ่มกำหนดข้อมูลรายปี เช่น ปริมาณวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร การใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลที่ใช้ในการบดย่อยการผสม และไฟฟ้าของระบบหมักแบบไร้อากาศ ค่าความชื้นโดยประมาณของของผสมวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่เข้าสู่ระบบ (ของผสมประกอบด้วยวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร และน้ำ) ประเภทของผลผลิตที่ได้จากการหมักแบบไร้อากาศ (พลังงานไฟฟ้าหรือความร้อน) แสดงดังตารางที่ 18

ตารางที่ 18 รายการข้อมูลที่ต้องใช้คำนวณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ CO_2 Emission

รายละเอียด การผลิตก๊าซชีวภาพแบบไร้อากาศ (Anaerobic Digestion)	ค่า (หน่วย)	
ปริมาณวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งส่วนที่นำมาหมักแบบไร้อากาศ	35,319	ton/year
ปริมาณเชื้อเพลิงฟอสซิลที่ใช้ในการดำเนินงาน*	330	L/year
ปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ในการดำเนินงาน	63,360	kWh/year
ระยะเวลาเดินระบบ CSTR*	330	days
ค่าความชื้นโดยประมาณของขยะอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบ	19	%

*(พฤกษ์ อักกะรังสี และ วราวุธ วิลาวรรณ. 2559)

ข้อมูลนำเข้า

ปริมาณเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งทั้งหมดที่นำมาหมักก๊าซชีวภาพ	35,319.9	ton/year
ปริมาณเชื้อเพลิงฟอสซิลทั้งหมดที่ใช้ในการหมักก๊าซชีวภาพ	330	L/year
ปริมาณไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ในกิจกรรมต่าง ๆ ของการหมักก๊าซชีวภาพ	63,360	kWh/year
ระยะเวลาเดินระบบ CSTR	330	days/year
ค่าความชื้นโดยประมาณของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ที่เข้าสู่ระบบ	19	%

(ข้อมูลการนำเข้า อ้างอิงมาจาก คู่มือการลงทุนโรงไฟฟ้าก๊าซชีวภาพจากพืชพลังงาน ปี 2562 และ ปริมาณการนำเข้าวัสดุจากโครงการการประเมินศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรในภาคเหนือ ปี 2559)

ในการคำนวณหาปริมาณวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง และกากตะกอนมูลสุกร ที่ป้อนเข้าระบบต่อวันนั้น อ้างอิงผลจากการทดสอบจากงานวิจัยที่ได้ทำการทดสอบการหมักไร้อากาศแบบ BMP Test เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพมากที่สุด มาทำการคำนวณเพื่อหาปริมาณวัตถุดิบต่อวัน โดยอัตราส่วนที่ดีที่สุดของเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งต่อกากตะกอนมูลสุกร คือ อัตราส่วนของซังข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ต่อกากตะกอนมูลสุกรที่ 80:20 gVS L^{-1} เป็นอัตราส่วนและวัตถุดิบที่ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพที่สูงที่สุด โดยจะนำปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้การหมักแบบไร้อากาศช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการฝังกลบขยะอินทรีย์ (พฤกษ์ อักกะรังสี และ วราวุธ วิลาวรรณ, 2556)

บทที่ 4
ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

สำหรับการศึกษากระบวนการที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง และการประเมินการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการผลิตไฟฟ้า สามารถแบ่งหัวข้อในการวิเคราะห์ผลการทดลองออกเป็น 5 หัวข้อ ดังนี้

หัวข้อที่ 1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเบื้องต้นของวัตถุดิบที่ใช้ในการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งด้วยกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ

หัวข้อที่ 2 ผลของอัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อที่ใช้ศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง

หัวข้อที่ 3 ผลของการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง

หัวข้อที่ 4 ผลของการประเมินปริมาณการผลิตไฟฟ้าโดยใช้ก๊าซชีวภาพจากวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง

หัวข้อที่ 5 ผลการประเมินการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 Emission) จากกระบวนการการผลิตไฟฟ้าโดยใช้ก๊าซชีวภาพจากวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเบื้องต้นของวัตถุดิบในการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งด้วยกระบวนการหมักไร้อากาศแบบ BMP Test (Biomethane Potential)

สำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบเบื้องต้นของวัตถุดิบที่ใช้ในการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งด้วยกระบวนการหมักแบบไร้อากาศแบบ BMP Test (Biomethane Potential) ขนาด 1000 mL โดยใช้วัตถุดิบหลักประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 เศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง (ใช้ในส่วนของ ต้น ใบ เปลือก และซัง) และส่วนที่ 2 คือ หัวเชื้อกากตะกอนมูลสุกรจากระบบการผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกร

องค์ประกอบเบื้องต้นของเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง

ก่อนการนำวัตถุดิบไปวิเคราะห์องค์ประกอบเบื้องต้นและคุณลักษณะทางเคมีได้มีการปรับสภาพวัตถุดิบด้วยวิธี Pre-acidification จากงานวิจัยของ Michel and et al., (2017) ได้ศึกษาผลการปรับสภาพวัตถุดิบด้วยวิธี Pre-acidification ส่งผลให้ค่า pH ที่เป็นด่างประมาณ 8.00 - 8.90 มี

ความเป็นกรดที่มากขึ้น เนื่องจากกระบวนการ Pre-acidification เป็นการเปลี่ยนสารชีวโมเลกุลของวัตถุดิบให้กลายเป็นกรดอินทรีย์ขนาดเล็กด้วยวิธีธรรมชาติ อีกทั้งยังเป็นการลดขั้นตอนของการสร้างกรดอินทรีย์ภายในขวดปฏิกรณ์ให้ระยะเวลาสั้นลง ทั้งนี้เพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยกระบวนการปรับสภาพดังกล่าวจะไม่มีการใช้สารเคมีหรือสารเร่งปฏิกิริยาใด ๆ ทั้งสิ้น เพื่อลดต้นทุนในการผลิต สำหรับลักษณะทางกายภาพของเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งก่อนและหลังปรับสภาพแบบ Pre-acidification แสดงดังภาพที่ 23 - 24 ประกอบไปด้วย ต้น ใบ เปลือก และซัง โดยลักษณะทางกายภาพของสีโดยรวมของ ต้น ใบ เปลือก และซัง ก่อนการปรับสภาพเป็นสีเหลืองอ่อน เมื่อผ่านกระบวนการปรับสภาพ ลักษณะทางกายภาพเป็นสีเหลืองเข้ม สีน้ำตาลเข้ม และการปรับสภาพเชิงกลด้วยวิธีการลดขนาดของวัตถุดิบทั้ง 4 ประเภทให้มีขนาดประมาณ 1 - 5 mm โดยอ้างอิงขนาดของวัตถุดิบจาก The German Standard (VDI 4630, 2016)

(ก) ต้นข้าวโพด (ข) ใบข้าวโพด (ค) เปลือกข้าวโพด (ง) ซังข้าวโพด

ภาพที่ 23 เศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งก่อนปรับสภาพแบบ Pre-acidification

(ก) ต้นข้าวโพด (ข) ใบข้าวโพด (ค) เปลือกข้าวโพด (ง) ซังข้าวโพด

ภาพที่ 24 เศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งหลังปรับสภาพแบบ Pre-acidification

สำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบเบื้องต้นของเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพ Pre-acidification โดยการวิเคราะห์คุณลักษณะเชิงปริมาณของเศษวัสดุ

ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง ได้แก่ ความชื้น (Moisture Content) ปริมาณสารระเหย (Volatile Matters) ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon) เถ้า (Ash) องค์ประกอบธาตุของแต่ละชนิด (Carbon, C), (Hydrogen H), (Nitrogen, N), (Sulfur, S), (Oxygen, O) และค่าความร้อน (Net Heating Value) ซึ่งมีผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 19 การวิเคราะห์คุณลักษณะทางเคมี ได้แก่ ค่า pH (Potental of Hydrogen ion, pH), ของแข็งรวม (Total Solid, TS), ของแข็งระเหย (Volatile Solid, VS), สภาพความเป็นกรด (Volatle Fatty Acid, VFA), สภาพความเป็นด่าง (Alkalinity, ALK) และอัตราส่วนสภาพความเป็นกรดต่อสภาพความเป็นด่าง (VFA/ALK ratio) ซึ่งมีผลการวิเคราะห์แสดงดังตารางที่ 19

ตารางที่ 19 คุณลักษณะเชิงปริมาณของเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง

วัตถุดิบ /คุณสมบัติ	**หน่วย**	**เศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง**			
		ต้น	**ใบ**	**เปลือก**	**ซัง**
Moisture Content	(%wt.)	9.83	12.26	11.02	9.24
Volatile	(%wt.)	72.92	67.23	73.72	73.16
Fixed Carbon	(%wt.)	15.77	11.89	13.90	16.04
Ash	(%wt.)	1.48	8.62	1.36	1.57
Carbon (C)	(%wt.)	42.83	37.84	41.85	43.16
Hydrogen (H)	(%wt.)	5.92	5.65	6.05	6.03
Nitrogen (N)	(%wt.)	0.34	1.47	0.22	0.52
Sulfur (S)	(%wt.)	<0.01	0.083	<0.01	<0.01
Oxygen (O)	(%wt.)	43.65	41.37	45.57	44.62
Net Heating Value (NHV)	(kcal/kg)	3,366	2,981	3,244	3,356
C/N	-	125.96	25.69	191.97	82.53

ผลการวิเคราะห์เชิงปริมาณของเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง มีปริมาณความชื้นของวัตถุดิบต้น ใบ เปลือก และซังข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ มีค่าอยู่ในช่วง 9.24 - 12.26%wt ซึ่งค่าความชื้นที่ได้ค่อนข้างต่ำ เนื่องจากตัววัตถุดิบที่นำมาเป็นชีวมวลที่เกิดขึ้นจากของเสียทางการเกษตรส่งผลให้มี

ปริมาณน้ำหรือความชื้นที่อยู่ภายในวัตถุดิบมีปริมาณที่ต่ำ ทั้งนี้ปริมาณความชื้นจะมีผลต่อปริมาณสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว เถ้า ปริมาณสารอินทรีย์ (C, H, O, N และ S) และค่าความร้อน (Jimmy A. M.-R. and et.al., 2019) และเมื่อเปรียบเทียบค่าความร้อนทั้งหมดแต่ละส่วนของวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งแสดงในตารางที่ 19 จะเห็นได้ว่า ต้น เปลือก และซังของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ให้ค่าความร้อนที่มากกว่าใบข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ เนื่องจากองค์ประกอบภายในของชีวมวลแตกต่างกัน โดยต้น เปลือก และซังข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มีองค์ประกอบที่เผาไหม้ได้มากกว่า เช่น สารที่ระเหยมีค่าเท่ากับ 72.92, 73.72 และ 73.16%wt ตามลำดับ โดยที่ใบข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มีปริมาณสารระเหยเท่ากับ 67.23%wt และมีปริมาณคาร์บอนคงตัวของ ต้น เปลือก และซัง ที่มากกว่า ใบ คือ 42.83, 41.85 และ 43.16%wt ตามลำดับ เนื่องมาจากสารระเหย ปริมาณคาร์บอนคงตัว ไฮโดรเจน และกำมะถัน ถือเป็นองค์ประกอบที่ทำปฏิกิริยากับออกซิเจนแล้วให้พลังงานความร้อน (สุเมธ ไชยประพัทธ์ และคณะ, 2560) ทั้งนี้ใบมีปริมาณเถ้าที่มากกว่าเศษวัสดุของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ส่วนอื่น ๆ โดยมีปริมาณเถ้ามากถึง 8 เท่า ซึ่งองค์ประกอบในเถ้าเป็นองค์ประกอบที่เผาไหม้ไม่ได้จึงไม่ให้พลังงาน

จากการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีขององประกอบธาตุแต่ละส่วนของเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งพบว่า C, H, N และ O มีเปอร์เซ็นต์ไม่ต่างกัน โดยมีค่าประมาณ 37.84 - 43.16, 5.65 - 6.05, 0.22 -1.47 และ 41.36-45.56% ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 19 เพราะฉะนั้นทุกส่วนของวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งสามารถนำไปผลิตก๊าซชีวภาพได้ แต่ทั้งนี้ปริมาณของก๊าซชีวภาพที่ได้ยังต้องคำนึงถึงค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพอีกด้วย จึงได้นำแต่ละส่วนของเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งไปวิเคราะห์คุณลักษณะทางเคมี ประกอบไปด้วยค่า pH, TS, VS, VS/TS Ratio, VFA, ALK และ VFA/ALK ตามลำดับ จะดังแสดงในตารางที่ 20

ตารางที่ 20 คุณลักษณะทางเคมีของเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง

วัตถุดิบ /คุณสมบัติ	หน่วย	เศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง			
		ต้น	**ใบ**	**เปลือก**	**ซัง**
COD	mg/L	40,281	43,619	62,007	34,782
pH	-	6.27	7.24	7.07	7.95
TS	mg/L	99,698	273,627	269,997	380,621
VS	mg/L	87,270	241,976	253,748	357,613
VS/TS	-	0.87	0.88	0.93	0.93
VFA	mg CH_3COOH/L	1,209.83	637.41	436.28	668.35
ALK	mg$CaCO_3$/L	2,967.63	3,205.57	3,243.74	3,058.54
VFA/ALK	mgCH_3COOH/mg$CaCO_3$	0.41	0.20	0.29	0.22

จากตารางที่ 20 การวิเคราะห์คุณลักษณะทางเคมีของเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง รายละเอียดของวัตถุดิบประกอบไปด้วยส่วนที่ 1 ค่า pH ในวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งที่ผ่านการปรับสภาพด้วยการหมักกรดมีค่า pH ลดลง โดยวัตถุดิบกลุ่ม ใบ เปลือก และซังข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มีค่า pH อยู่ในช่วงความเป็นกลางประมาณ 7.07 - 7.95 โดยที่ค่า pH หลังผ่านกระบวนการปรับสภาพของต้นข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ คือ 6.27 ค่อนข้างเป็นกรด แต่ทั้งนี้ ค่า pH ของวัตถุดิบทุกประเภทมีค่าคือ 6.27 - 7.95 ยังอยู่ในช่วงที่สามารถใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Ratchapol P., (2015) พบว่าค่า pH ส่งผลต่อการทำงานของเชื้อแบคทีเรีย โดยแบคทีเรียจำพวก Methanogenic ทำหน้าที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซมีเทนส่วนใหญ่เจริญเติบโตได้ดีในสภาวะไร้ออกซิเจน ค่า pH ที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 6.5 - 7.9 ซึ่งถ้าค่า pH สูงหรือต่ำกว่านี้ แบคทีเรียจะทนต่อการเปลี่ยนสภาวะแวดล้อมได้น้อยและมีอัตราการเจริญเติบโตช้าก็จะส่งผลให้ผลิตก๊าซมีเทนได้น้อย และประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพได้ลดลง และส่วนที่ 2 คือปริมาณ TS และ VS โดยอัตราส่วน VS/TS ของ ต้น ใบ เปลือก และซัง มีค่าเท่ากับ 0.87, 0.88, 0.93 และ 0.93 ตามลำดับ พบว่าอัตราส่วน VS/TS ดังกล่าว เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมต่อการนำมาเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยค่าที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วง 0.69 - 0.95 โดยค่าที่ให้ห้ผลผลิตก๊าซชีวภาพมากที่สุดเท่ากับ 0.95 (Metcalf and Eddy., 2020)

สำหรับสัดส่วนกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพความเป็นด่าง โดยค่า VFA และ ALK เป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญมากต่อการทำงานของแบคทีเรียในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ซึ่งต้องอาศัยแบคทีเรีย 2 พวกทำงานร่วมกันอย่างต่อเนื่อง โดยปกติปริมาณ VFA จะอยู่ในรูปของกรดอะซิติก (CH_3COOH) ควรมีค่าอยู่ในช่วง 50 - 500 mg/L (Pakarinen and et. al., 2019) หากปริมาณVFA ในรูปของกรดอะซิติกมีค่ามากกว่า 2,000 mg/L จะทำให้ประสิทธิภาพของระบบผลิตก๊าซชีวภาพลดลง ส่วนค่าความเป็นด่างไม่ควรต่ำกว่า 1,000 mg $CaCO_3$/L เพื่อป้องกันไม่ให้ค่า pH ภายในระบบมีค่าลดต่ำลงจนเป็นอันตรายต่อแบคทีเรียในระบบ คุณลักษณะทางเคมีบางประการต่าง ๆ ดังที่กล่าวมาข้างต้นนั้นจัดเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่ใช้ในการประเมินลักษณะเบื้องต้นของเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง เพื่อนำเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งไปใช้ประโยชน์สำหรับการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพรูปแบบต่าง ๆ (Eskicioglu G., 2019) ในที่นี้ได้ยกตัวอย่างเฉพาะการนำเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งไปใช้เพื่อการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยปริมาณ TS สามารถนำไปใช้ในการประเมินขนาดของถังปฏิกรณ์ที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ เถ้าเป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงปริมาณสารอนินทรีย์ ปริมาณของแข็งระเหย และอินทรีย์คาร์บอน ส่วนค่า COD เป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงปริมาณสารอินทรีย์ในรูปแบบต่าง ๆ และค่าไนโตรเจนรวม เป็นพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงปริมาณสารอาหาร (Jameson F.and Huihuang H. D., 2019) ทั้งนี้ปริมาณสารอินทรีย์ และปริมาณสารอาหารเป็นพารามิเตอร์สำคัญที่ต้องพิจารณาร่วมกันในลักษณะของอัตราส่วนที่เหมาะสม เนื่องจากเป็นปัจจัยสำคัญในการควบคุมกระบวนการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์แบบไม่ใช้อากาศให้เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งอัตราส่วนที่ต้องคำนึงถึงคือ อัตราส่วน C : N หรือ อัตราส่วน COD : N โดยมีอัตราส่วนที่เหมาะสม คือ 500 - 1000 : 15 - 20 และ 100 : 5 ตามลำดับ (Deublein S., 2016) เมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษานี้พบว่า เศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งที่สภาวะต่าง ๆ มีอัตราส่วน C : N คือ 1000 : 4 - 9 : 0 และอัตราส่วน COD : N คือ 100 : 0.3 : 0 แสดงให้เห็นว่าหากนำเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งที่สภาวะต่าง ๆ ไปใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพจำเป็นต้องเติมไนโตรเจนให้เพียงพอและเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์แบบไม่ใช้อากาศ (Jutaporn, C.and Jiraporn, Paoaiang,. 2018)

ผลของหัวเชื้อจุลินทรีย์กากตะกอนมูลสุกร

สำหรับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเบื้องต้นของวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ เพื่อศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งด้วยกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ขนาด 1000 mL โดยวัตถุดิบหลักที่ใช้ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ ประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 หัวเชื้อจุลินทรีย์ กากตะกอนมูลสุกรจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพ แสดงดังในตารางที่ 20 และส่วนที่ 2 เศษวัสดุเหลือทิ้งจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ซึ่งจะทำการหมักแยกแต่ละประเภท ได้แก่ ต้น ใบ เปลือก และซัง แสดงดังในตารางที่ 21 ผลการวิเคราะห์สมบัติและองค์ประกอบทางเคมีกายภาพของวัตถุดิบ มีรายละเอียดต่าง ๆ ซึ่งสามารถอธิบายรายละเอียดได้ดังนี้

ตารางที่ 21 คุณลักษณะเบื้องต้นของหัวเชื้อจุลินทรีย์กากตะกอนมูลสุกร

คุณสมบัติ	**หน่วย**	**ปริมาณ**
pH		7.24
Moisture Content (MC)	(%wt.)	14.52
Chemical Oxygen Demand (COD)	mg/L	67,119.27
Total Solid (TS)	mg/L	71,959.00
Volatile Solid (VS)	mg/L	56,937.00
VS/TS ratio		0.79
Volatile Fatty Acid (VFA)	$mgCH_3COOH/L$	417.72
Alkalinity (ALK)	$mgCaCO_3/L$	3,028.24
VFA/ALK ratio	$mgCH_3COOH/mgCaCO_3$	0.14

จากตารางที่ 21 การวิเคราะห์คุณลักษณะของหัวเชื้อจุลินทรีย์กากตะกอนมูลสุกร รายละเอียดของหัวเชื้อประกอบไปด้วยส่วนที่ 1 ค่า pH มีค่าเท่ากับ 7.24 พบว่า ค่าดังกล่าวมีค่าที่ค่อนข้างเป็นกลาง เนื่องมาจากกากตะกอนมูลสุกรที่ใช้ในงานวิจัยนี้ได้มาจาก กากตะกอนของโรงงานผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลสุกร จากนั้นได้ทำการเตรียมหัวเชื้อจุลินทรีย์กากตะกอนมูลสุกรโดยการหมักที่อุณหภูมิ 35 °C เป็นระยะเวลา 7 วัน (Abu-farhan., 2558) ทั้งนี้เพื่อให้หัวเชื้อจุลินทรีย์กากตะกอนมูลสุกรพร้อมสำหรับการนำไปใช้งานจากงานวิจัยของ (Chatlada P., 2020) พบว่า การ

หมักหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ค่า pH เป็นเบสนั้น ทำให้ค่า pH ที่เข้าสู่ระบบมีสภาพความเป็นเบสต่ำลง โดยในระยะแรกของกระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพมีขั้นตอนการสร้างกรดที่เรียกว่า Acidogenesis และ Acetogenesis ที่ทำหน้าที่เปลี่ยนสารอินทรีย์โมเลกุลเล็กเป็นกรดอินทรีย์ซึ่งควรมีค่า pH อยู่ในช่วง 6.5 - 7.5 (Annop N., 2018) ค่า pH ที่ใช้ในงานวิจัยนี้สอดคล้องกับคุณสมบัติของกากตะกอนมูลสุกรที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มเมทาโนเจนซึ่งเป็นจุลินทรีย์กลุ่มหลักในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ

ส่วนที่ 2 ค่า COD มีค่าเท่ากับ 67,119.27 mg/L พบว่า ค่าดังกล่าวบ่งบอกถึงศักยภาพในการนำหัวเชื้อจุลินทรีย์มาเป็นหัวเชื้อในการเดินระบบ โดยค่า COD เหมาะสมต่อการนำมาผลิตก๊าซชีวภาพ และให้ค่าความคุ้มทุนต่อการลงทุนของระบบผลิตก๊าซชีวภาพควรมีค่าไม่ต่ำกว่า 1,200 mg/L (Abu-farhan., 2019)

ส่วนที่ 3 ปริมาณ TS และปริมาณ VS โดยกากตะกอนมูลสุกรมีปริมาณ TS เท่ากับ 71,959 mg/L และปริมาณ VS มีค่าเท่ากับ 56,937 mg/L และอัตราส่วนของ VS/TS มีค่าเท่ากับ 0.79 พบว่าอัตราส่วนของ VS/TS ดังกล่าวเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมต่อการนำมาเป็นหัวเชื้อจุลินทรีย์ในการผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (M.S. F. and et.al., 2010) โดยอัตราส่วนของ VS/TS ของกากตะกอนจุลินทรีย์ในบ่อหมักแบบไร้อากาศควรจะมีค่าอยู่ในช่วง 0.70 - 0.85 อีกทั้งยังพบว่าเมื่อระบบมีการเพิ่มอัตราส่วน VS/TS ให้สูงขึ้นระบบสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงขึ้นเช่นกัน และจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบยังสามารถรักษาเสถียรภาพในระบบในคงที่ได้อย่างต่อเนื่อง (Dalkilic K., 2015)

และส่วนที่ 4 ปริมาณ VFA และปริมาณ ALK โดยหัวเชื้อในงานวิจัยนี้มีค่า VFA เท่ากับ 471.72 mgCH_3COOH/L จากรายงานของกรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ได้ศึกษาและสาธิตการผลิตก๊าซชีวภาพจากชีวมวล รายงานว่าโดยทั่วไปค่าความเข้มข้นของปริมาณ VFA การย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนควรมีค่าประมาณ 500 mg/L ซึ่งถ้าหากมีค่ามากกว่า 2,000 mg/L จะทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง และจะส่งผลให้ระบบย่อยอาหารแบบไม่ใช้ออกซิเจนจะไม่สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้เนื่องจากเป็นพิษต่อหัวเชื้อ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2562) และ ค่า ALK ของกากตะกอนมูลสุกรเท่ากับ 3,028.24 mg/L ซึ่งค่า ALK ที่เหมาะสมควรอยู่ในช่วง 1,000 - 5,000 mg$CaCO_3$/L สำหรับระบบย่อยอาหารแบบไม่ใช้ออกซิเจน และสำหรับอัตราส่วน ค่า VFA/ALK มีค่าเท่ากับ 0.14 พบว่าค่าดังกล่าวอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการนำมาผลิต

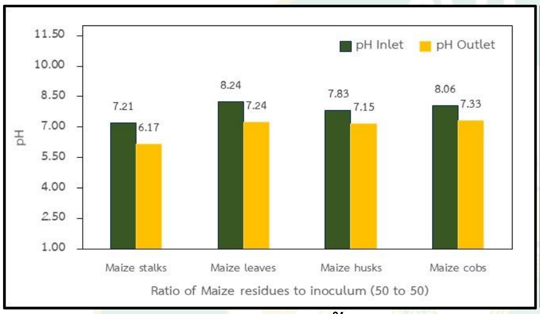
ก๊าซชีวภาพ คือ ไม่เกิน 0.4 ซึ่งแสดงถึงกำลังในการบัฟเฟอร์สูง หากอัตราส่วนดังกล่าวมีค่าสูงกว่า 0.8 แสดงว่ากำลังบัฟเฟอร์ของระบบมีค่าต่ำมาก โดยอัตราการบัฟเฟอร์ของระบบที่มีค่าน้อยกว่า 0.4 จะส่งผลทำให้ระบบสามารถรักษาเสถียรภาพในการทำงาน โดยไม่จำเป็นต้องเติมสารเคมีใด ๆ (Odhner P.B. and et. al., 2020) ดังนั้นหัวเชื้อจุลินทรีย์กากตะกอนมูลสุกรจึงเหมาะสำหรับใช้ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพแบบ BMP Test.

ผลการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมของวัตถุดิบต่อหัวเชื้อที่ใช้ศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง

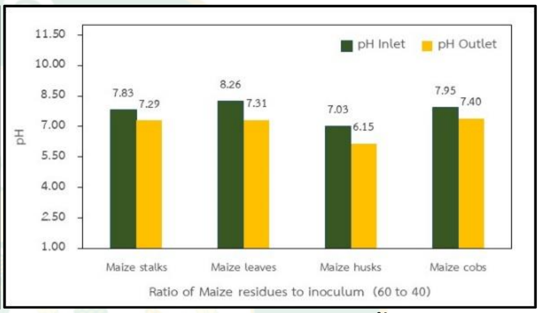
การศึกษานี้เป็นการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการเพิ่มศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งกับมูลสุกรในระบบหมักแบบกะ (BMP Test) คือการเติมวัสดุหมักเพียงครั้งเดียวในตอนเริ่มต้นการทดลอง ศึกษาที่วัตถุดิบหมักของเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งแต่ละส่วนที่ต่างกันคือ ต้น ใบ เปลือก และซัง ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการภายในห้องปฏิบัติการที่มีการควบคุมอุณหภูมิ 35 ± 2 °C โดยผสมวัตถุดิบหมักกับมูลสุกรในอัตราส่วนน้ำหนักของแข็งระเหยต่อปริมาตร ของปริมาตรใช้งานที่ใช้ทำการทดลองด้วยอัตราส่วนดังนี้ 50:50, 60:40, 70:30 และ 80:20 gVS L^{-1} โดยใช้หัวเชื้อกากตะกอนมูลสุกรเริ่มต้นเท่ากับ 6 gVS L^{-1} ของแข็งระเหยของปริมาตรใช้งาน ระยะเวลาที่ใช้ในการหมัก 50 days วัดปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นทุกวันด้วยอุปกรณ์วัดความดันยี่ห้อ KIMO รุ่น MP 112 เพื่อนำมาคำนวณกลับเป็นปริมาตรของก๊าซชีวภาพและวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ด้วยเครื่องวัดองค์ประกอบก๊าซแบบพกพายี่ห้อ GAS DATA GFM SERIES หลังจากสิ้นสุดการทดลอง ทำการวัดค่าคุณลักษณะทางเคมีของตัวอย่างและศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนจากการคำนวณค่า BMP (Biomethane Potential) เพื่อประเมินศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนของตัวอย่างที่นำมาหมักด้วยระบบไร้อากาศ โดยจะแสดงในรูปของปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นทั้งหมดต่อมิลลิกรัมของแข็งระเหยของตัวอย่างที่ถูกย่อยสลายไป โดยวิธีวิเคราะห์ BMP ดัดแปลงมาจากวิธีมาตรฐาน VDI (VDI-4630, 2016) มีผลการศึกษาดังต่อไปนี้

ค่าความเป็นความกรด-ด่าง (pH) จากกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง

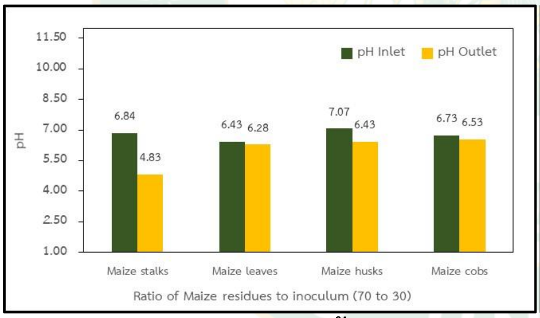
สำหรับค่าความเป็นความกรด-ด่าง หรือค่า pH ของระบบแสดงถึงความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน (H^+) หรือไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) ที่บ่งบอกถึงสภาพความเป็นกรดหรือเบสของสารละลาย โดยค่า pH ที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตก๊าซชีวภาพคือ ระหว่าง 6.5 - 7.5 (จรูญ อินเอก และคณะ, 2563) โดยผลของค่า pH ของการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งมีผลดังต่อไปนี้



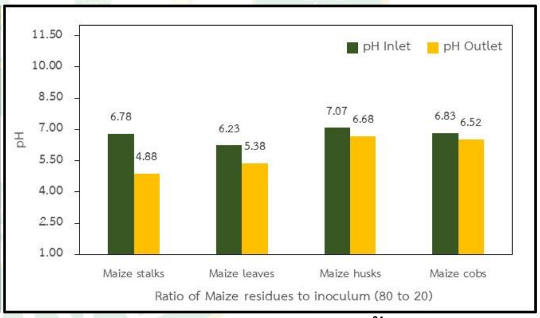
(ก) อัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อ 50 : 50



(ข) อัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อ 60 : 40



(ค)อัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อ 70 : 30



(ง) อัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อ 80 : 20

ภาพที่ 25 ค่าความเป็นกรด-ด่างภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งที่อัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อแตกต่างกัน

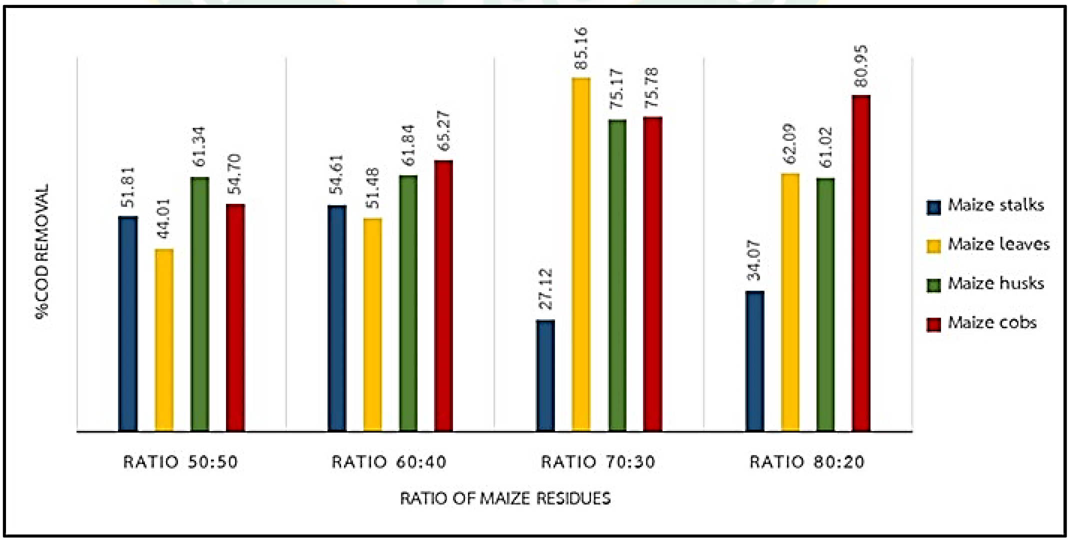
จากภาพที่ 25 เป็นผลการทดลองของ ค่า pH ในการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง โดยค่า pH ของทุก ๆ เงื่อนไขการทดลอง มีการแปรผกผันค่อนข้างน้อยโดยพิจารณาจากค่า pH ก่อนเข้าระบบหมัก อยู่ในช่วง 6.23 - 8.26 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย (Akindele and et.al., 2018) ที่ทำการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากการย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจนร่วมกับซังข้าวโพดมูลสุกร และสัตว์ปีก ได้ผลการทดลองว่า ค่า pH ที่เหมาะสมสามารถผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมของข้าวโพดกับมูลสุกร อยู่ในช่วง 6.90 – 8.20 อย่างไรก็ตามช่วงระยะเวลา

การหมักมีค่า pH ลดลง เนื่องจากเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ให้อยู่ในรูปของกรดอินทรีย์ระเหยง่าย โดยช่วงการหมักอยู่ขั้นตอนของการไฮโดไลซิส (Guangyin and et al., 2019) ทั้งนี้ในงานวิจัยผลของค่า pH ของระบบหมักหลังผ่านกระบวนการย่อยสลาย 50 days ของ ต้น ใบ เปลือก และซังข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ที่อัตราส่วนแตกต่างกันนั้น มีค่า pH อยู่ในช่วง 6.38 - 7.40 อยู่ในช่วงที่เป็นผลดีต่อเชื้อจุลินทรีย์ โดยในช่วงหลังสิ้นสุดการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการที่ให้ค่า pH ค่อนข้างเป็นเบสนั้นเป็นผลจากความเข้มข้นของแอมโมเนียที่เกิดขึ้นในระบบมากขึ้นตามการย่อยสลาย โดยมีไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ค่า pH หลังสิ้นสุดกระบวนการมีค่าอยู่ระหว่าง 6.8 - 8.0 (Sawatdeenarunat and et.al.,. 2017) ยกเว้นแต่ที่อัตราส่วน S/I เท่ากับ 70:30 และ 80:20 gVS L^{-1} ของต้นข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มีค่า pH หลังสิ้นสุดกระบวนการมีสภาพความเป็นกรดสูง คือ 4.83 และ 4.88 ตามลำดับ ทั้งนี้ค่า pH ที่เป็นกรดสูงส่งผลให้มีค่า $COD_{removal}$ ต่ำมาก (ภาพที่ 24) เนื่องจาก ค่า pH ที่เป็นกรดสูงทำให้แบททีเรียชนิด Methanogenic ที่ทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์ และทำให้เกิดการผลิตก๊าซมีเทนส่วนใหญ่นั้นเกิดการยับยั้งการทำปฏิกิริยา ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Chen and et.al., 2019) ได้ทำการศึกษาปัจจัยค่าความเป็นกรดด่างที่ส่งผลต่อระบบผลิตก๊าซชีวภาพ โดยพบว่าค่า pH ในถังปฏิกรณ์ขึ้นอยู่กับช่วงของการหมักเพราะในช่วงแรกจุลินทรีย์ที่สร้างกรดจะสร้างกรดเป็นจำนวนมาก และส่งผลทำให้ค่า pH ลดลง ซึ่งถ้าหากค่า pH ลดลงต่ำกว่า 5.0 ก็จะหยุดกระบวนการย่อยสลายทั้งหมดหรืออีกนัยหนึ่งก็คือ จุลินทรีย์ในกลุ่ม Methanogen ไม่สามารถเจริญเติบโตต่อไปได้หากค่า pH ต่ำกว่า 5.0

ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี ($COD_{removal}$) จากกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง

สำหรับการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบผลิตก๊าซชีวภาพส่วนใหญ่จะพิจารณาจากการค่า $COD_{removal}$ ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ โดยค่า $COD_{removal}$ จะบ่งบอกถึงประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรย์ที่เกิดขึ้นภายในกระบวนการการผลิตก๊าซ และระบบผลิตก๊าซชีวภาพได้ โดยค่า COD และ ค่า $COD_{removal}$ ของการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง มีผลดังต่อไปนี้

ผลของปริมาณสารอินทรีย์ในรูปของค่า COD พบว่า องค์ประกอบของ ค่า COD ขาเข้าของต้น ใบ เปลือก และซัง ทั้ง 4 อัตราส่วน คือ 50:50, 60:40, 70:30 และ 80:20 gVS L^{-1} มีค่าอยู่ในช่วง 19,675 - 162,380 mg/L โดยที่ใบ และเปลือกข้าวโพดที่มีอัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อ 70:30 gVSL^{-1} มีค่า COD ขาเข้ามากที่สุด คือ 162,380 และ 84,569 mg/L ตามลำดับ นอกจากนี้ค่า COD เป็นปริมาณที่บ่งบอกถึงปริมาณสารอินทรีย์ทั้งที่ย่อยสลายได้ง่าย และย่อยสลายได้ยาก ที่สามารถถูกออกซิไดซ์ได้โดยสารเคมี ซึ่งแสดงถึงปริมาณสารอินทรีย์สูงสุดของวัสดุตั้งต้นที่สามารถเปลี่ยนเป็นก๊าซชีวภาพได้ โดยแสดงถึงความต้องการปริมาณออกซิเจนของน้ำเสียที่สามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ต่าง ๆ ไปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และน้ำ (Annop N., 2018) ทำให้สามารถประเมินถึงปริมาณก๊าซชีวภาพสูงสุดที่สามารถผลิตได้จากวัสดุตั้งต้น (Wellinger and et al., 2013)



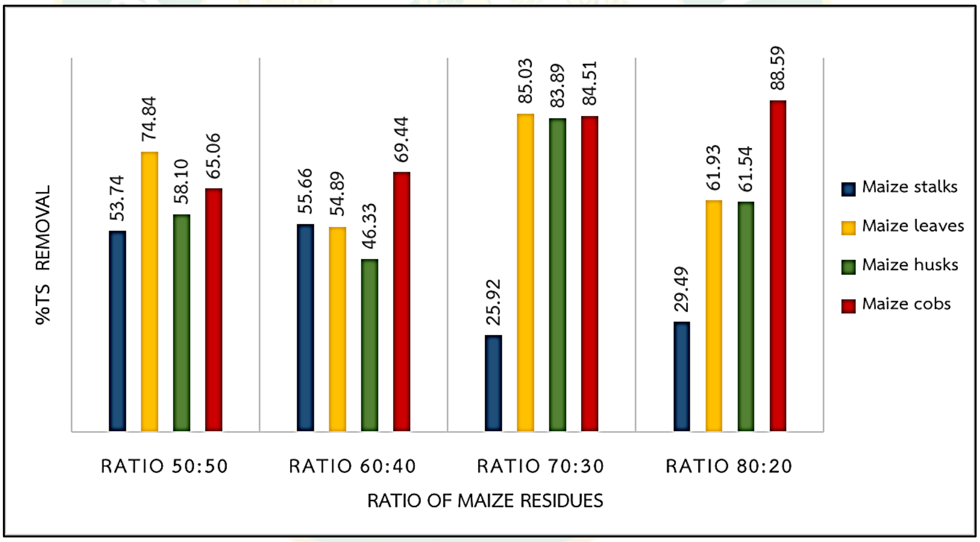
ภาพที่ 26 ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดีภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง

จากภาพที่ 26 พบว่าทั้ง 16 เงื่อนไขการทดลองที่ได้ทำการกำหนดอัตราส่วนของวัตถุดิบต่อหัวเชื้อ โดยแยกหมักแต่ละส่วนได้แก่ ต้น ใบ เปลือก และซังของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์หมักร่วมกับกากตะกอนมูลสุกรทั้ง 4 อัตราส่วน คือ 50:50, 60:40, 70:30 และ 80:20 gVS L^{-1} เมื่อเปรียบเทียบค่า $COD_{removal}$ ภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ จะเห็นได้ว่าผลของค่า $COD_{removal}$ แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ คือ กลุ่มที่อาศัยความสามารถของหัวเชื้อในการผลิตก๊าซชีวภาพที่อัตราส่วนต่อหัวเชื้อ (S/I) เท่ากับ 50:50 และ 60:40 โดยวัตถุดิบที่หมักทั้ง 4 ส่วน ได้แก่ ต้น ใบ เปลือก และซัง มีปริมาณ $COD_{removal}$ อยู่ในช่วงที่ใกล้เคียงกันคือ 44.01- 65.27%$COD_{removal}$ และกลุ่มที่อาศัยความสามารถของตัววัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพ (S/I 70:30 และ S/I 80:20) สังเกตุได้จากเมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนของวัตถุดิบต่อหัวเชื้อ วัตถุดิบที่มีประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์มีค่าสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด คือ เปลือก (85.16 และ 62.09%$COD_{removal}$) ซัง (75.78 และ80.95%$COD_{removal}$) โดยเปลือกและซังที่นำไปวิเคราะห์มีความต้องการปริมาณ O_2 ที่ใช้ในการออกซิไดซ์ในการสลายสารอินทรีย์ รวมไปถึงความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ดีนั่นเอง แต่ในทางกลับกันต้นข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มีค่า $COD_{removal}$ ที่ลดลงคือ 27.12 และ 34.07%$COD_{removal}$ ตามลำดับ เนื่องจากต้น มีลักษณะแข็งมีปริมาณลิกนิน และเซลลูโลสสูง สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Dawid and et.al., 2020) ที่มีการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เทียบกับผลผลิตมีเทน และค่าพลังงานโดยกระบวนการหมักก๊าซชีวภาพ โดยพบว่า ต้นข้าวโพด มีปริมาณเซลลูโลสและลิกนิน สูงกว่า ซัง ใบและเปลือก และงานวิจัยของ (Menardo and et.al., 2015) ได้รายงานปริมาณเซลลูโลสใน ต้น ใบ เปลือก และซังข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ และปริมาณลิกนิน โดยส่วนองค์ประกอบหลักของชีวมวล (เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน) เป็นปัจจัยสำคัญในขั้นตอนแรกของการย่อยสลาย (ไฮโดรไลซิส) แบบไม่ใช้ออกซิเจน ส่วนประกอบหลักคือคาร์โบไฮเดรต (เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส) ของสารอินทรีย์ถูกย่อยสลายทางชีวภาพ แต่แบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจนไม่สามารถย่อยสลายลิกนินได้ซึ่งส่งผลทำให้ผลผลิตของก๊าซชีวภาพลดลง และปริมาณ $COD_{removal}$ ลดลง โดยวัสดุลิกโนเซลลูโลสที่มีปริมาณลิกนินต่ำกว่าอาจส่งผลเชิงบวกต่อการแปรสภาพทางชีวภาพและส่งผลให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพสูงขึ้น สรุปได้ว่าเมื่อสิ้นสุดกระบวนใบข้าวโพดมีปริมาณ $COD_{removal}$ ที่สูงสุด คือ 85.16%$COD_{removal}$ แสดงให้เห็นว่าเมื่อระยะเวลากักเก็บนานขึ้นจะส่งผลให้จุลินทรีย์มีระยะเวลาในการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้นานขึ้น ค่า $COD_{removal}$ นั้นจึงสูงตามไปด้วย สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Fezzani and Ben C., 2018) ศึกษาการหมักร่วมระหว่างน้ำเสียจากโรงงานน้ำมันมะกอกกับของเสียที่เป็นของแข็งที่ HRT ที่มากสุด ให้ค่า

$COD_{removal}$ สูงที่สุดโดยสามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้ถึง 89 % แต่อย่างไรก็ตามเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งที่จัดเป็นวัสดุที่มีองค์ประกอบส่วนใหญ่ คือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งเป็นสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยากโดยจุลินทรีย์ ดังนั้นก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจึงอาจมีปริมาณต่ำกว่าค่าที่คาดการณ์ได้จากปริมาณ COD

ประสิทธิภาพการบำบัดปริมาณของแข็งทั้งหมด ($TS_{Removal}$) และปริมาณของแข็งระเหยง่าย ($VS_{Removal}$) จากกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง

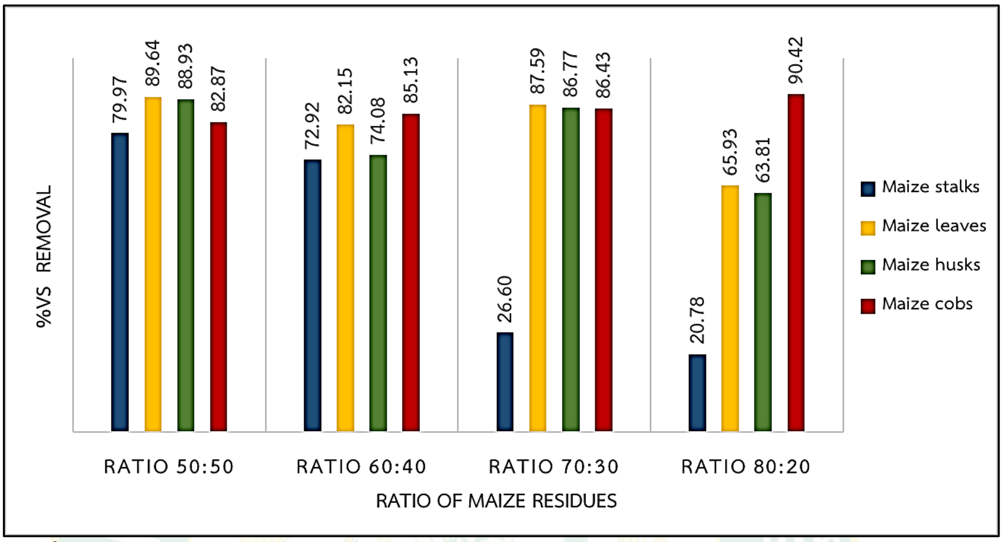
สำหรับการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบผลิตก๊าซชีวภาพส่วนใหญ่จะพิจารณาจากปริมาณ TS และ VS ซึ่งเป็นค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ โดยปริมาณ $TS_{removal}$ และ $VS_{removal}$ ภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง มีผลดังต่อไปนี้



ภาพที่ 27 ประสิทธิภาพการกำจัดปริมาณของแข็งทั้งหมดภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง

ผลของปริมาณ $TS_{removal}$ และปริมาณ $VS_{removal}$ ในระบบการผลิตก๊าซชีวภาพ ระยะเวลาการหมัก 50 days ในระบบการหมักแบบการป้อนวัตถุดิบตั้งต้นเพียงครั้งเดียว แสดงดังภาพที่ 27 โดยค่า TS แสดงถึงปริมาณของแข็งทั้งหมดซึ่งเป็นสารที่เหลืออยู่ในภาชนะหลังจากระเหยน้ำออกจากวัสดุหมักแล้วนำไปอบแห้งในตู้อบซึ่งจะรวมทั้งส่วนที่ละลายได้ในน้ำซึ่งส่วนมากได้แก่ กรดอินทรีย์และสารอินทรีย์บางอย่าง เช่น น้ำตาล (ArifD. et al., 2016) และค่า TS จะบ่งบอกถึงลักษณะในการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในระบบว่ามีประสิทธิภาพในการย่อยสลายหรือลดปริมาณของเสียใน

กระบวนการหมักแบบไร้อากาศ และ ภาพที่ 28 แสดงถึงค่า VS ของแข็งระเหยได้ซึ่งได้จากการนำค่า TS ไปเผาที่อุณหภูมิสูงจะทำให้ทราบถึงปริมาณสารอินทรีย์ที่อยู่ในวัสดุหมัก (Holm-Nielsen J.B., 2019)



ภาพที่ 28 ประสิทธิภาพการกำจัดปริมาณของแข็งระเหยง่ายภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการ การศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง

จากภาพที่ 27 และภาพที่ 28 เป็นผลการทดลองปริมาณ $TS_{removal}$ และปริมาณ $VS_{removal}$ ที่อัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อ 50:50, 60:40, 70:30 และ 80:20 gVS L^{-1} พบว่าที่อัตราส่วนของวัตถุดิบต่อหัวเชื้อ 50:50 และ 60:40 gVS L^{-1} ประสิทธิภาพของค่า $TS_{removal}$ และ $VS_{removal}$ ของต้น ใบ เปลือก และซังข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ยังคงมีค่าที่อยู่ในกลุ่มใกล้เคียงกัน นั่นก็คือ 53.74 - 74.84% และ 79.97 - 89.64% ต่อมาเมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อที่อัตราส่วน 70:30 gVS L^{-1} จะเห็นได้ว่าเมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อประสิทธิภาพของการกำจัดสารอินทรีย์ในวัตถุดิบที่มีปริมาณของแข็งระเหยง่ายสูงนั้นจะส่งผลให้มีประสิทธิภาพการกำจัดที่ลดลง จากการหมักเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ร่วมกับกากตะกอนมูลสุกรในสภาวะที่ไร้อากาศ เมื่อเพิ่มอัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อพบว่าซังข้าวโพดที่อัตราส่วน 80:20 gVS L^{-1} มีปริมาณ $VS_{removal}$ สูงที่สุด คือ 90.42 % $VS_{removal}$ เช่นเดียวกับ ปริมาณ $COD_{removal}$ (แสดงดังภาพที่ 26) แต่ในทางตรงกันข้ามผลของต้นข้าวโพดที่อัตราส่วน 70:30 และ 80:20 gVS L^{-1} มีปริมาณ $TS_{removal}$ ต่ำที่สุดเนื่องมาจากมีปริมาณการป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบในปริมาณมากส่งผลให้เชื้อจุลินทรีย์ย่อยสลายเป็นกรดไขมันระเหยง่ายได้ในปริมาณสูง ส่งผลให้ค่า pH หลังสิ้นสุดกระบวนการลดลงอย่างรวดเร็ว (แสดงดังภาพที่ 25) ทำให้เกิด

สภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน ปริมาณของแข็งทั้งหมดในระบบหมักจึงถูกย่อยสลายเปลี่ยนไปเป็นสารอื่นได้น้อยลง (Sawatdeenarunat C. and et.al., 2017)

โดยปริมาณ VS $_{removal}$ ของวัตถุดิบที่ผ่านการย่อยสลายในการทดลองระบบแบบ BMP Test สามารถบ่งบอกประสิทธิภาพการย่อยสลายของแบคทีเรียในการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยระบบหมักร่วมของวัตถุดิบจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์กับกากตะกอนมูลสุกรได้ (รัชพล พะวงศ์รัตน์.และคณะ, 2559) โดยทั่วไปธรรมชาติของเชื้อจุลินทรีย์จะย่อยสารอินทรีย์ที่สลายง่ายก่อน หลังจากนั้นจะย่อยสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยาก

กรดไขมันระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid) และสภาพความเป็นด่าง (Alkalinity) ของการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง

ปริมาณกรดไขมันระเหยง่าย และสภาพความเป็นด่างจะแสดงถึงสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับบัฟเฟอร์ ทำให้ทราบถึงความสามารถในการรักษาค่า pH และ Buffering Capacity ภายในระบบซึ่งจะมีผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของแบคทีเรียในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Akindele O., 2018) โดยค่า ALK ของวัสดุหมักก่อนเข้าระบบผลิตก๊าซชีวภาพ และหลังออกระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ที่อัตราส่วน S/I เท่ากับ 50:50, 60:40, 70:30 และ 80:20 gVS L^{-1} ดังแสดงในตารางที่ 22 มีผลดังต่อไปนี้

ตารางที่ 22 แสดงค่า ALK ก่อนเข้าระบบและหลังออกผลิตก๊าซชีวภาพ

S/I	**S/I 50:50**		**S/I 60:40**		**S/I 70:30**		**S/I 80:20**	
Maize residues	ALK_{inlet}	ALK_{outlet}	ALK_{inlet}	ALK_{outlet}	ALK_{inlet}	ALK_{outlet}	ALK_{inlet}	ALK_{outlet}
Maize Stalks	3,251	4,116	3,731	4,549	2,968	1,347	3,139	1,286
Maize Leaves	3,561	4,345	4,010	4,808	3,206	2,426	3,082	1,699
Maize Husks	2,903	3,415	2,960	3,054	3,244	1,336	3,098	1,012
Maize Cobs	3,224	3,206	3,012	3,092	3,059	1,340	3,063	844

ผลการทดลองของปริมาณ ALK ที่เกิดขึ้นตลอดช่วงการทดลองโดยที่อัตราส่วน S/I เท่ากับ 50:50 และ 60:40 gVS L^{-1} โดยมีผลการทดลองค่า ALK ขาเข้าของต้น ใบ เปลือก และซังของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ต่อหัวเชื้อมีค่าไม่แตกต่างกัน โดยมีช่วงของค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2,900 – 3,500 mg/L และ 2,900-4,000 mg/L ตามลำดับ และเมื่อสิ้นสุดกระบวนการมีค่า ALK สูงขึ้นในขาออกที่สภาวะคงที่ (แสดงดังตารางที่ 21) จากงานวิจัยของ (McCarty., 2018) กล่าวว่าปริมาณ ALK ในระบบไม่ควร มีค่าต่ำกว่า 1,000 mg/L ซึ่งจากผลการทดลองที่ได้มีค่า ALK ของขาออกที่มากกว่า 1,000 mg/L โดยช่วงค่าเฉลี่ย ALK ในขาออกที่อัตราส่วน S/I เท่ากับ 50:50 และ 60:40 gVS L^{-1} มีปริมาณ ALK เท่ากับ 3,200 - 4,300 mg/L และ 3,000-4,800 mg/L ตามลำดับ โดยปริมาณ ALK ที่เกิดขึ้นในระบบนั้นส่วนหนึ่งมาจากหัวเชื้อกากตะกอนมูลสุกรที่ช่วยรักษาสภาพความเป็นด่างให้อยู่ในระดับที่สามารถต้านทานการเปลี่ยนแปลงค่า pH ในระบบได้ ต่อมาเมื่อเพิ่มอัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อที่อัตราส่วน S/I เท่ากับ 70:30 และ 80:20 gVS L^{-1} พบว่าค่า ALK ขาเข้ามีค่าใกล้เคียงกันคืออยู่ในช่วง 2,900 - 3,200 mg/L และ 3,000 - 3,100 mg/L ตามลำดับ แต่เมื่อวิเคราะห์ค่า ALK ขาออกพบว่ามีค่าน้อยกว่าขาเข้า โดยมีค่าเท่ากับ 1,300 -2,400 mg/L และ 800 - 1,600 mg/L ตามลำดับ โดยค่า ALK มีความสำคัญต่อการหมักวัสดุที่มีค่าความเป็นกรดสูง เพราะทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ควบคุมค่า pH ของระบบไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงมากหลังจากมีการเติมวัสดุหมักเข้าไปในระบบ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2562)

สำหรับปริมาณ VFA นี้เกิดจากการทำงานของแบคทีเรียพวกสร้างกรดซึ่งจะถูกนำไปใช้โดยแบทที่เรียพวกสร้างก๊าซมีเทน พบว่าการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของปริมาณ VFA ในการทดลองสามารถพิจารณาสภาพการทำงานของระบบร่วมกับตัวแปรควบคุมอื่น ๆ เช่น ปริมาณ ALK อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งปริมาณ VFA เป็นตัวแปรที่มีการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนกว่าตัวแปรอื่น ๆ หากมีการเปลี่ยนชนิดของสารอินทรีย์ หรือ อัตราส่วนของวัตถุดิบต่อหัวเชื้อ เป็นต้น โดยปริมาณ VFA ของวัสดุหมักก่อนเข้าระบบ และหลังออกระบบ ที่อัตราส่วน S/I เท่ากับ 50:50, 60:40, 70:30 และ 80:20 gVS L^{-1} ดังแสดงในตารางที่ 23 มีผลดังต่อไปนี้

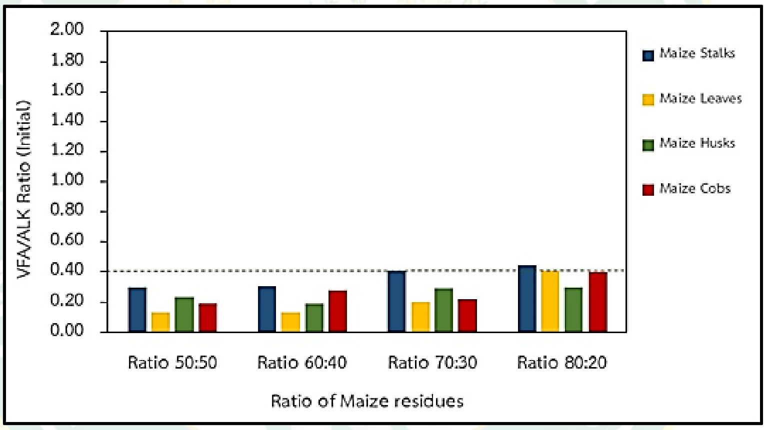
ตารางที่ 23 แสดงค่ากรดไขมันระเหยง่ายก่อนเข้าระบบ และหลังออกผลิตก๊าซชีวภาพ

S/I	50:50		60:40		70:30		80:20	
Maize residues	VFA_{inlet}	VFA_{outlet}	VFA_{inlet}	VFA_{outlet}	VFA_{inlet}	VFA_{outlet}	VFA_{inlet}	VFA_{outlet}
Maize Stalks	966	339	1,125	577	1,210	1,262	1,400	2,230
Maize Leaves	461	423	522	481	637	331	1,247	1,241
Maize Husks	679	664	563	885	436	244	916	380
Maize Cobs	609	568	835	742	668	197	1,219	209

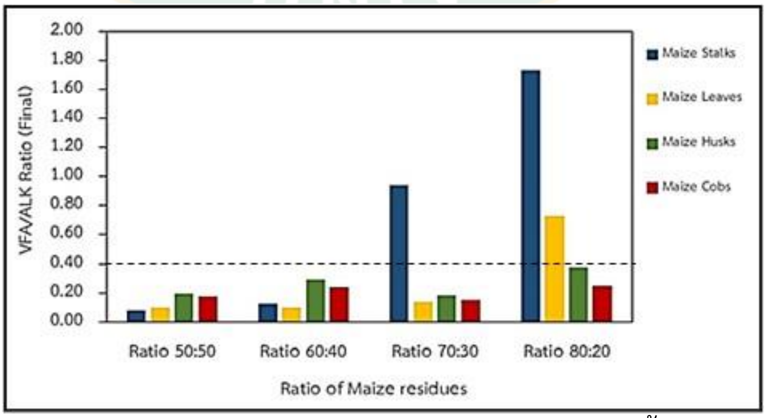
จากตารางที่ 23 เป็นผลการทดลองของปริมาณ VFA ที่เกิดขึ้นตลอดช่วงของการทดลองในก่อนเข้าระบบและหลังออกระบบก๊าซชีวภาพ พบว่าปริมาณ VFA_{inlet} ของ วัตถุดิบ ต้น ใบ เปลือก และซัง ที่อัตราส่วน S/I เท่ากับ 50:50 โดยมีค่าเฉลี่ยในช่วง 461 - 965 mg/L ที่อัตราส่วน 60:40 มีค่าอยู่ในช่วง 522 - 1,125 mg/L อัตราส่วน 70:30 มีค่าอยู่ในช่วง 436 - 1,209 mg/L และอัตราส่วน 80:20 gVS L^{-1} มีค่าอยู่ในช่วง 915 - 1,400 mg/L และมีปริมาณ VFA_{outlet} ของวัตถุดิบ ต้น ใบ เปลือก และซัง ที่อัตราส่วนเดียวกัน มีค่า VFA_{outlet} เฉลี่ยในช่วง 339 - 664 mg/L, 481 - 742 mg/L ,197 – 1261 mg/L และ 208 – 2,230 mg/L ตามลำดับ จะเห็นได้ว่า VFA_{outlet} ของวัตถุดิบ ต้น ใบ เปลือก และซังที่อัตราส่วน S/I เท่ากับ 50:50 และ 60:40 gVS L^{-1} มีค่า VFA_{outlet} ที่น้อยกว่า VFA_{inlet} ซึ่งแสดงถึงปริมาณกรดที่สะสมในระบบ และการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ดี (Sawatdeenarunat and et.al., 2017) แต่ในทางกลับกันที่อัตราส่วน S/I เท่ากับ 70:30 และ 80:20 gVS L^{-1} วัตถุดิบต้นข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มีปริมาณ VFA_{outlet} ที่มากกว่า VFA_{inlet} เนื่องมาจากต้นข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ไม่สามารถย่อยสลายเป็นสารอินทรีย์ได้จึงเกิดปริมาณ VFA สะสมในระบบที่เพิ่มสูงขึ้นส่งผลให้ค่า pH ลดลงทำให้เกิดอันตรายต่อแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน ต่อมาเมื่อพิจารณาที่อัตราส่วนเดียวกัน ซังข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มีปริมาณ VFA_{outlet} น้อยที่สุด เนื่องจากว่าค่า VFA เป็นค่าของกรดไขมันโมเลกุลสั้นที่เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในขั้นตอนการไฮโดรไลซิส และการสร้างกรด

ของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรด เช่น กรดอะซิติก กรดโพรไพโอนิค และกรดบิวทิริค ซึ่งจะถูกจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนนำไปใช้เป็นสารอาหารและแหล่งพลังงาน (นฤมล เซาะกระโทก, 2556)

สำหรับกระบวนการในขวดปฏิกรณ์นอกจากจะวิเคราะห์ค่า pH, VFA และ ALK ยังพิจารณาถึงอัตราส่วนของปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพความเป็นด่าง ซึ่งค่าอัตราส่วน VFA/ALK ในกระบวนการควรมีค่าน้อยกว่า 0.4 แสดงให้เห็นว่าในกระบวนการยังมีสภาพบัฟเฟอร์สูงหรือมีความความสามารถในการเปลี่ยนแปลงค่า pH ได้ดี แต่ถ้าอัตราส่วน VFA/ALK มีค่ามากกว่า 0.8 นั้นแสดงว่าในกระบวนการมีสภาพบัฟเฟอร์ต่ำมากส่งผลให้ค่า pH สามารถที่จะลดลงได้อย่างรวดเร็ว เป็นผลทำให้เกิดการยับยั้งการทำงานของเชื้อแบคทีเรียในกลุ่มสร้างมีเทน (คู่มือความรู้เกี่ยวกับการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียเพื่อผลิตก๊าซเบื้องต้น, 2562) โดยค่าอัตราส่วน VFA/ALK ก่อนเข้าระบบ และออกระบบ แสดงดังภาพที่ 29 และ 30 ตามลำดับ



ภาพที่ 29 ค่า VFA/ALK Ratio ก่อนเข้าระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการ
การศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง



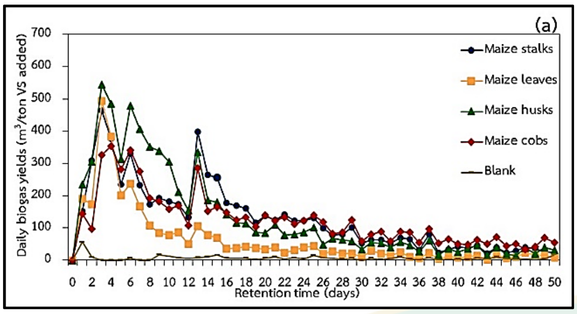
ภาพที่ 30 ค่า VFA/ALK Ratio ภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพหลังสิ้นสุดกระบวนการ
การศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง

จากภาพที่ 29 และภาพที่ 30 ค่า VFA/ALK ก่อนเข้าระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการ การศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง พบว่าอัตราส่วน VFA/ALK เป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการย่อยโปรตีนแบบไม่ใช้ออกซิเจน ดังนั้นค่าที่เหมาะสมควรต่ำกว่า 0.4 ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจนและลดเวลาในการย่อยเนื่องจากการสะสม (Sawatdeenarunat and et. al., 2017) ปริมาณ VFA เริ่มต้นควรอยู่ระดับต่ำของอัตราส่วน S/I ในช่วง 0.4 - 0.6 อาจเป็นช่วงที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการย่อยสลายข้าวโพดแบบไม่ใช้ออกซิเจน เพื่อให้ได้ผลผลิตก๊าซชีวภาพ และปริมาณก๊าซมีเทนที่สูงเช่นเดียวกับระยะเวลาที่ย่อยสลายภายในระบบ อัตราส่วน VFA/ALK และอัตราส่วน TS/VS เริ่มต้นสามารถนำมาใช้เพื่อปรับปรุงเสถียรภาพของกระบวนการ และสามารถใช้อัตราส่วน VFA/ALK และอัตราส่วน S/I เพื่อสามารถระบุอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Flavia and et.al, 2017) ได้ทำการศึกษาผลการผลิตก๊าซมีเทน และปริมาณ VFA ในการย่อยฟางข้าวแบบไม่ใช้ออกซิเจนภายใต้สภาวะกึ่งแห้งและเปียก พบว่าอัตราส่วน VFA/ALK เป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการย่อยโปรตีนแบบไม่ใช้ออกซิเจน ดังนั้นค่าที่เหมาะสมควรต่ำกว่า 0.4 ซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจน และลดเวลาในการย่อย เนื่องจากการสะสมปริมาณกรดไขมันเริ่มต้นควรอยู่ระดับต่ำของอัตราส่วน S/I ในช่วง 0.4 - 0.6 เป็นช่วงที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการย่อยสลายข้าวโพดแบบไม่ใช้ออกซิเจน

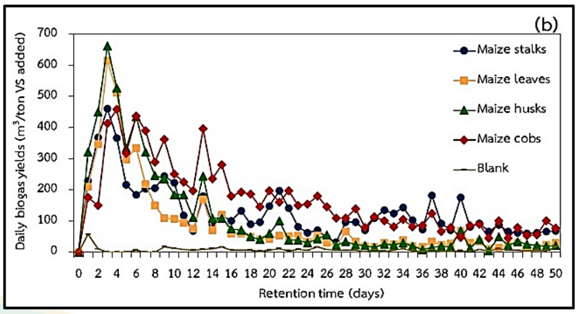
ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวัน ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม และสัดส่วนของก๊าซมีเทน ที่เกิดขึ้นภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

จากผลการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการเพิ่มศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งกับกากตะกอนมูลสุกรในระบบหมักแบบแบทซ์ (BMP Test) โดยศึกษาที่วัตถุดิบหมักของเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งแต่ละส่วนที่ต่างกัน คือ ต้น ใบ เปลือก และซังข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ และศึกษาอัตราส่วนวัตถุดิบหมักต่อหัวเชื้อที่ต่างกัน โดยมีอัตราส่วนดังนี้ 50:50, 60:40, 70:30 และ 80:20 g VS L^{-1} ระยะเวลาการย่อยสลายทั้งหมด 50 days ผลที่ได้จากการทดลอง คือ ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวัน ดังแสดงในภาพที่ 31 และปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม ดังแสดงในภาพที่ 32 โดยที่ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้นภายในระบบ ทำโดยวัดปริมาตรก๊าซชีวภาพในทุกวัน จากนั้นนำปริมาตรก๊าซชีวภาพที่วัดได้ไปคำนวณ ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมระยะเวลา 50 days ของการย่อยสลายในระบบการหมักเปรียบเทียบกับชุดควบคุม จากนั้นนำ

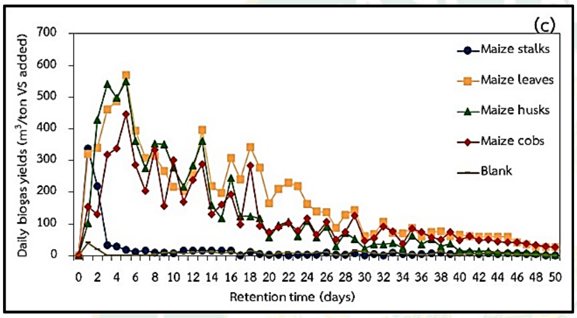
ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมมาทำสถิติเป็นกราฟโดยจะได้ กราฟแสดงปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพของแต่ละวัตถุดิบป้อนเข้า ดังแสดงไว้ในภาพที่ 31



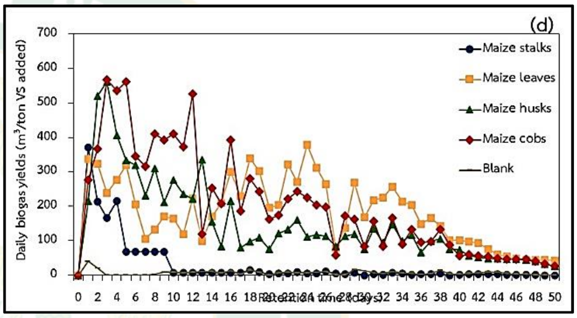
(a) อัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อ 50 : 50



(b) อัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อ 60 : 40



(c) อัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อ 70 : 30

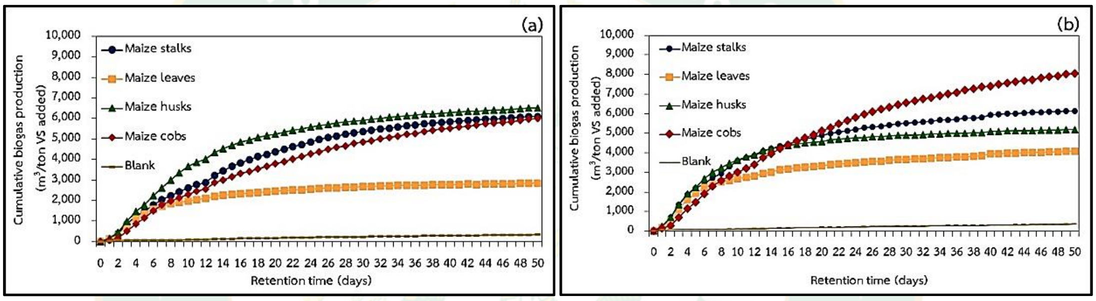


(d) อัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อ 80 : 20

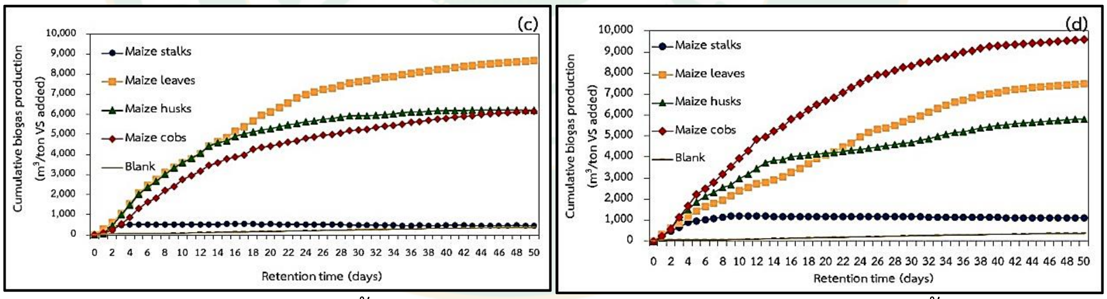
ภาพที่ 31 ปริมาณของก๊าซชีวภาพรายวันที่เกิดขึ้นภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง

จากภาพที่ 31 ปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นรายวันของการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งที่อัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อแตกต่างกัน โดยผลของวัตถุดิบต่อหัวเชื้อที่อัตราส่วน 50:50 และ 60:40 g VS L^{-1} พบว่าเปลือกของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ทั้ง 2 อัตราส่วน มีปริมาตรก๊าซชีวภาพในแต่ละวันเกิดขึ้นมากที่สุด เมื่อเทียบกับวัสดุส่วนอื่น ๆ คือ ต้น ใบ และซังของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ โดยในช่วง 0 - 1 วันแรกของการย่อยสลายสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ในปริมาณน้อยซึ่งอาจเป็นผลมาจากหัวเชื้อและวัตถุดิบอยู่ในช่วงระยะการปรับตัว (ฐูปน ชื่นบาล และคณะ, 2557) หลังจากนั้นปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันได้เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในวันที่ 2-3 ของการย่อยสลาย และมีปริมาตรก๊าซชีวภาพรายวันมากที่สุดในวันที่ 4 - 6 วันของการย่อยสลาย คือ 353 - 662 mL/day และหลังจากวันที่ 6 ของการย่อยสลายจะเห็นว่าปริมาณก๊าซชีวภาพเริ่มลดลง จนมีปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันคงที่ ตั้งแต่วันที่ 30 จนกระทั่งสิ้นสุดการทดลองในวันที่ 50 ของการย่อยสลาย เป็นผลจากสัดส่วนของสารอินทรีย์ และปริมาณอินทรีย์คาร์บอนที่ถูกจุลินทรีย์ใช้เป็นอาหารในวัสดุ

ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง และกากตะกอนมูลสุกร ที่ป้อนเข้าสู่ระบบหมักย่อยในปริมาณที่เหมาะสม เพื่อเป็นแหล่งอาหารในการสร้างเซลล์ใหม่ (สุเมธ ไชยประพัทธ์ และคณะ, 2560) ทำให้สามารถสร้างปฏิกิริยาอะซิโดเจนีซีส (Acidogenesis) การสร้างกรดโดยเปลี่ยนสารอินทรีย์โมเลกุลเดี่ยวในวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง ให้กลายเป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่าย โดยจุลินทรีย์ในกลุ่ม Fermentative Bacteria หรือ Acid Forming Bacteria ซึ่งเป็นแบคทีเรียสร้างกรดทำหน้าที่ในการดูดซึมสารอินทรีย์โมเลกุลเล็ก ทำให้กระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2564) เซลลูโลสในวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งจะถูกไฮโดรไลซ์กลายเป็นกลูโคสเพื่อเปลี่ยนปฏิกิริยาเปลี่ยนกรดอินทรีย์ไปเป็นมีเทน และเกิดการรีดิวซ์ CO_2 และ H_2 ทำให้เกิดก๊าซชีวภาพในระบบได้ (Jimmy and et.al. 2019)



(a)อัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อ 50 : 50 (b)อัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อ 60 : 40



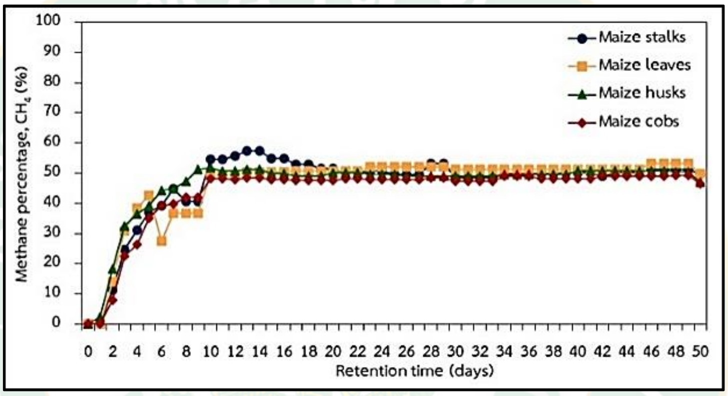
(c) อัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อ 70 : 30 (d)อัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อ 80 : 20

ภาพที่ 32 ปริมาณของก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้นภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง

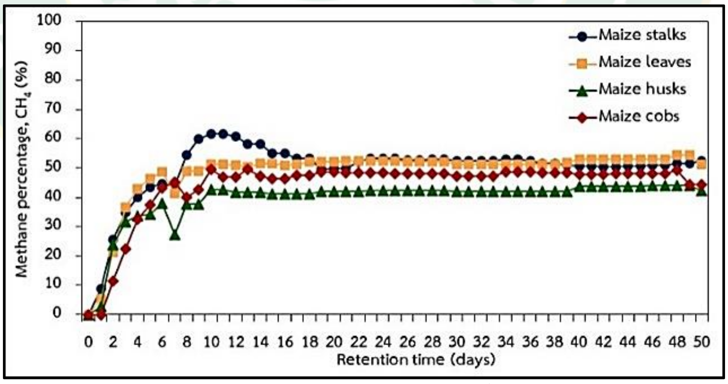
จากภาพที่ 32 เป็นผลของปริมาณของก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้นภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง จะเห็นได้ว่าแนวโน้มในช่วงวันที่ 1 - 15 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเพิ่มขึ้นของวัตถุดิบ ใบ เปลือก และซังทุก ๆ อัตราส่วน มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมขึ้นอย่างรวดเร็ว ยกเว้นวัตถุดิบในส่วนของต้นที่อัตราส่วน S/I เท่ากับ 70:30 และ 80:20 gVS L^{-1} ที่มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมคงที่ และในช่วงที่ 16 - 30 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมค่อย ๆ เพิ่มขึ้น และ

หลังจากวันที่ 30 เป็นต้นไป ปริมาณก๊าซชีวภาพเริ่มมีแนวโน้มเข้าสู่สภาวะคงที่ในทุกอัตราส่วน ยกเว้นที่อัตราส่วน S/I เท่ากับ 70:30 และ 80:20 g VS L^{-1} ของวัตถุดิบประเภทต้นจะเข้าสู่สภาวะคงที่ตั้งแต่ช่วงแรกของการทดลอง จะเห็นได้ว่าอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในช่วง 15 วันแรกเพิ่มสูงขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับสัดส่วนของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพ (แสดงดังภาพที่ 33) เพิ่มสูงขึ้นด้วย จึงส่งผลทำให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มสูงขึ้นตามด้วย (Lalita Sinchai, 2017) เนื่องมาจากเชื้อจุลินทรีย์ในระบบอยู่ในช่วงปรับตัวให้เหมาะสมกับวัตถุดิบหมัก และทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ย่อยง่ายก่อน เพื่อใช้ในการเจริญเติบโตและสร้างเซลล์ใหม่ จากนั้นจะทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ย่อยยากต่อไป โดยในระบบหมักในอัตราส่วนที่มีการเติมข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในแต่ละส่วนเข้าไปนั้น จุลินทรีย์ทำการย่อยสลาย และสร้างเซลล์ใหม่เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ (สุเมธ ไชยประพัทธ์ และคณะ, 2560) แสดงดังภาพที่ 32 (c) และ (d) พบว่าเมื่อมีการเพิ่มอัตราส่วนของวัตถุดิบต่อหัวเชื้อ ตัววัตถุดิบในส่วนของซังข้าวโพดมีศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงที่สุด แต่ต้นข้าวโพดกลับมีศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพลดต่ำลง ทั้งนี้ผลของการเพิ่มอัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อมีผลต่อการเพิ่มอัตราผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งจะต้องเพิ่มในอัตราส่วนให้เหมาะสม เพราะปริมาณสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากนั้นเมื่ออยู่ในระบบเป็นเวลานานจะทำให้จุลินทรีย์มีประสิทธิภาพน้อยลงและย่อยสลายยาก และทั้งนี้ในระบบเป็นการเดินระบบแบบแบทซ์ ซึ่งมีการเติมสารตั้งต้นหรือวัตถุดิบหมักเพียงครั้งเดียวจุลีนทรีย์จึงต้องการปริมาณของวัตถุดิบหมักที่เพียงพอต่อความสามารถการย่อยสลาย ในส่วนของต้นข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ซึ่งเป็นส่วนที่ปริมาณลิกนินสูงที่สุด (Ratchapol P., 2558) ซึ่งลิกนินเป็นส่วนที่ป้องกันเซลลูโลสเพื่อไม่ให้ย่อยสลายได้ง่าย เมื่อพิจารณาการหมักร่วมระหว่างเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งกับกากตะกอนมูลสุกร ในทุกอัตราส่วนมีการผลิตก๊าซชีวภาพสะสมเกิดขึ้น แต่อัตราส่วนที่มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุด คือ อัตราส่วน S/I เท่ากับ 80:20 gVS L^{-1} ระหว่างซังข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ต่อกากตะกอนมูลสุกรสามารถผลิตก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุด 10,228 mL ที่อัตราส่วน S/I เท่ากับ 60:40 g VS L^{-1} และ 70:30 gVS L^{-1} มีค่าเท่ากับ 8,514 และ 6,321 mL รองลงมาคือใบข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ได้น้อยที่สุด คือต้นข้าวโพด ทั้งนี้จะเห็นได้ว่าเมื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบแต่ละส่วนของข้าวโพด ในการเติมวัตถุดิบเข้าไปในระบบจะเป็นการช่วยเพิ่มอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพแต่ต้องมีอยู่ในปริมาณที่เหมาะสมต่อการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน (พัทธกมล สมบุตร, 2561)

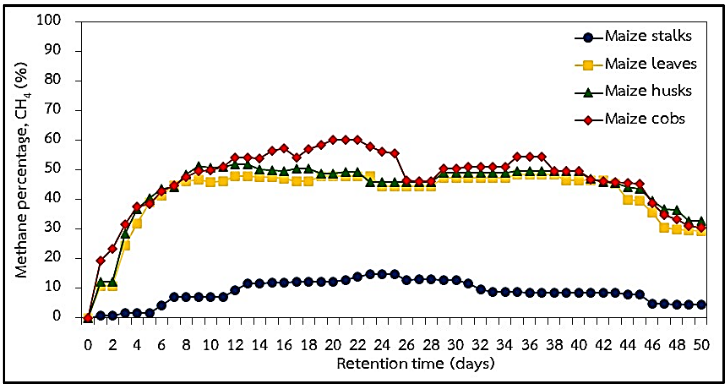
โดยองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพจะประกอบไปด้วยก๊าซมีเทนประมาณ 50% - 80% ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ประมาณ 30% - 50% ส่วนที่เหลือเป็นก๊าซอื่น ๆ เช่น แอมโมเนีย ไฮโดรเจนซัลไฟด์ และไอน้ำ เป็นต้น (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2564) โดยก๊าซชีวภาพที่มีสัดส่วนของก๊าซมีเทนที่สูงมากกว่า 50% สามารถจุดติดไฟได้ดี และสามารถนำไปใช้เป็นแหล่งเชื้อเพลิง เพื่อผลิตพลังงานความร้อน ผลิตพลังงานกล และผลิตพลังงานไฟฟ้า เป็นต้น (Jimmy A. and et.al., 2019) โดยสัดส่วนของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งที่อัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อต่างกัน จะแสดงในภาพที่ 33



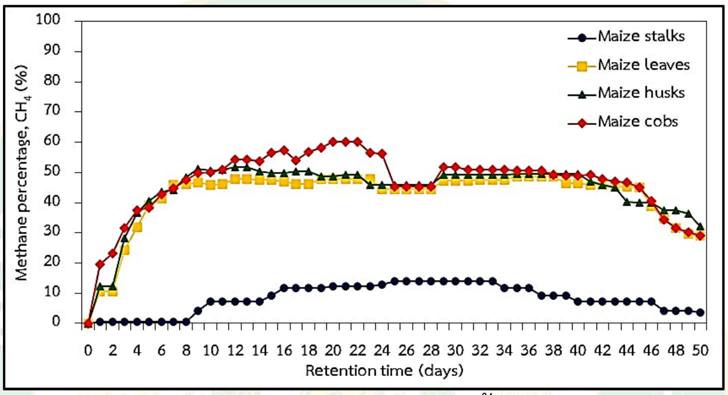
(a) อัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อ 50 : 50



(b) อัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อ 60 : 40



(c) อัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อ 70 : 30



(d) อัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อ 80 : 20

ภาพที่ 33 สัดส่วนของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งที่อัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อต่างกัน

เมื่อพิจารณาภาพที่ 33 (a) และ ภาพ (b) เป็นผลของสัดส่วนก๊าซมีเทน ที่อัตราส่วนวัตถุดิบข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ต่อหัวเชื้อที่อัตราส่วน เท่ากับ 50:50 และ 60:40 gVS L^{-1} ตามลำดับ พบว่า วัตถุดิบทั้ง 4 ส่วนต้น ใบ เปลือก และซัง มีการให้อัตราการเฉลี่ยของก๊าซมีเทนในแต่ละวันใกล้เคียงกัน โดยในช่วง 1 - 9 วันแรกปริมาณก๊าซมีเทนเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง และเริ่มเข้าสู่สภาวะคงที่ตั้งแต่วันที่ 10 ของการทดลองจนสิ้นสุดการทดลองที่ 50 วัน ต่อมาเมื่อพิจารณาภาพที่ 33 (c) และ (d) ซึ่งเป็นการเพิ่มอัตราส่วนวัตถุดิบข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ต่อหัวเชื้อที่อัตราส่วน S/I เท่ากับ 70:30 และ 80:20 gVS L^{-1} ตามลำดับ พบว่า ใบ เปลือกและซัง มีความสามารถในการผลิตก๊าซมีเทนทั้งนี้ในช่วงวันที่ 1-9 อัตราการผลิตก๊าซมีเทนยังคงเพิ่มสูงขึ้น เช่นเดียวกับที่อัตราส่วน S/I เท่ากับ 50:50 และ 60:40 gVS L^{-1} แต่พบว่าวัตถุดิบของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ประเภท ต้น มีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนต่ำลงมาอย่างชัดเจน สังเกตุได้จากช่วงวันที่ 1-9 วันแรกของการทดลองอัตราการเกิดก๊าซมีเทนไม่มีเกิดขึ้น ทั้งนี้การเกิดก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนซึ่งต้องอาศัยแบคทีเรียในกลุ่มที่สร้างมีเทน มากกว่า 1 ชนิด

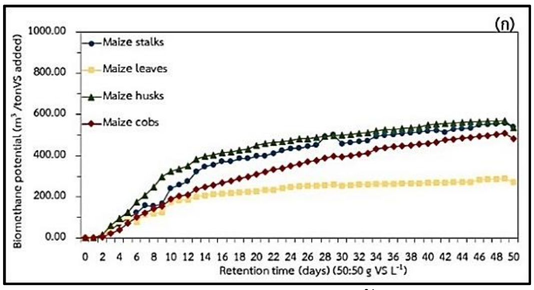
จากงานวิจัยของ Bohn and et.al., (2017) ได้กล่าวถึงความหลากหลายของแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดกรดแลคติค ในตัวอย่างการตรวจสอบหมักก๊าซชีวภาพ ซึ่งจากทดลองพบว่า ความแตกต่างของปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น เป็นผลจากปัจจัยความสัมพันธ์ของปริมาณสารอินทรีย์ของเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งและจุลินทรีย์ในกากตะกอนมูลสุกรที่ป้อนเข้าสู่ระบบหมักย่อย และทำให้เกิดความหลากหลายของแบคทีเรียในการส่งผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ (Jayaweera D. and et.al., 2017) ได้แสดงข้อมูลในรายงานซึ่งส่วนหนึ่ง พบว่ามีรายงานอัตราส่วน C/N ratio ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ คือประมาณ 20 - 32 ถ้าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน สูงมากไนโตรเจนจะถูก Methanogen นำไปใช้เพื่อเสริมโปรตีนให้ตัวเองและจะหมดอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ได้ก๊าซน้อย ดังนั้นอัตราส่วน S/I เท่ากับ 80:20 gVS L^{-1} ของซังข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ต่อกากตะกอนมูลสุกร เป็นอัตราส่วนที่ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสูงที่สุด เนื่องจากมีปริมาณสารอินทรีย์ในระบบมากกว่าหัวเชื้อ หรือกล่าวอีกนัยยะนึงได้ว่าการใช้ซังข้าวโพดเลี้ยงสัตว์สามารถบำบัดเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งได้มากที่สุด เมื่อเทียบกับส่วนอื่น ๆ คือ ต้น ใบ และเปลือก และทั้งนี้ยังอัตราส่วน S/I เท่ากับ 80:20 gVS L^{-1} นี้ยังมีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ชนิดสร้างกรดและชนิดสร้างมีเทนในระบบหมักแบบไร้ออกซิเจนมากที่สุด (Akindele and et.al., 2018)

ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนหาได้จากการนำก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นวิเคราะห์หาสัดส่วนของก๊าซมีเทน จากนั้นนำค่าปริมาณก๊าซมีเทนสะสมทั้งหมดของตัวอย่างลบด้วยปริมาณก๊าซมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากหัวเชื้อตั้งต้นเพียงอย่างเดียวแล้วนำมาคำนวณหาค่าศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนในหน่วยของปริมาตรก๊าซมีเทนที่ผลิตได้ทั้งหมดต่อหนึ่งหน่วยกรัมของปริมาณของแข็งระเหยของวัตถุดิบที่หมักย่อย ดังแสดงสมการที่ 4.1

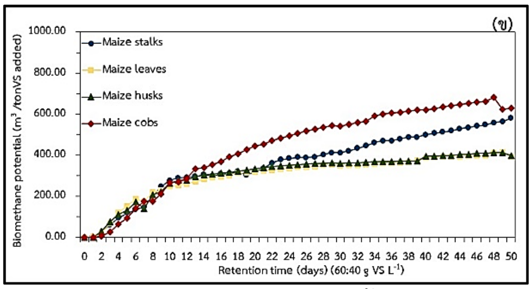
ศักยภาพก๊าซมีเทน ($mLCH_4/g_{VSadded}$) = ปริมาณก๊าซมีเทน (mL)/ของแข็งที่ป้อนเข้า (g)

สมการที่ 4.1

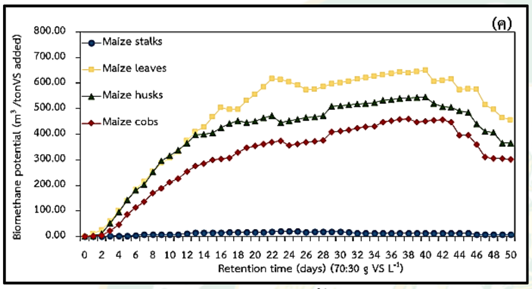
จากการทดลองศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักร่วมระหว่างเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งกับกากตะกอนมูลสุกร แสดงดังภาพที่ 34



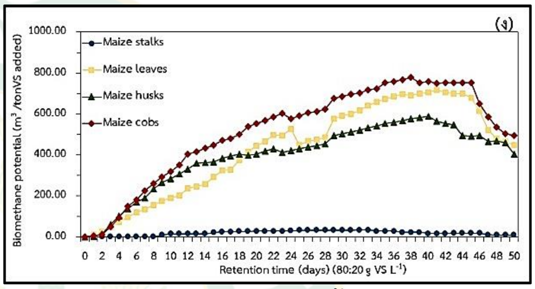
(ก) อัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อ 50 : 50



(ข) อัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อ 60 : 40



(ค) อัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อ 70 : 30



(ง) อัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อ 80 : 20

ภาพที่ 34 ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งที่อัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อแตกต่างกัน

ผลการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักร่วมระหว่างเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งกับกากตะกอนมูลสุกร โดยใช้ส่วนของ ต้น ใบ เปลือก และซังข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ต่อกากตะกอนมูลสุกรที่อัตราส่วนแตกต่างกันดังนี้ 50:50, 60:40, 70:30 และ 80:20 gVS.L^{-1} พบว่าที่อัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อเท่า ๆ กัน วัตถุดิบทุกส่วนยังมีความสามารถในการผลิตก๊าซได้ โดยสังเกตุได้จากภาพที่ 34 (a) และ (b) ซึ่งวัตถุดิบ ต้น ใบ เปลือกและซัง มีศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนได้ กล่าวคือปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นเพิ่มสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาในการหมักผ่านไปในช่วง 1 – 6 วันแรก การทดลองทั้ง 4 วัตถุดิบ ซึ่งสอดคล้องกับค่า pH หลังสิ้นสุดการทดลอง (แสดงดังภาพที่ 28) ค่า pH ของระบบหมักหลังผ่านกระบวนการย่อยสลาย 50 วัน ของ ต้น ใบ เปลือก และซังข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ที่อัตราส่วนแตกต่างกันมีค่า pH อยู่ในช่วง 6.38 - 7.40 อยู่ในช่วงที่เป็นผลดีต่อเชื้อจุลินทรีย์ชนิดสร้างก๊าซมีเทน (Jimmy A. M.-R. and et.al., 2019) ต่อมาเมื่อมีการเติมวัตถุดิบเพิ่มเข้าระบบที่อัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อเท่ากับ 70:30 และ 80:20 gVS.L^{-1} แสดงดังภาพที่ 34 (c) และ (d) จากภาพพบว่าที่อัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อ 80:20 gVS.L^{-1} วัตถุดิบส่วนของซังข้าวโพดผสมกับกากตะกอนมูลสุกร

สามารถให้ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนเฉลี่ยได้สูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 10,288 mL/gVS_{added} และวัตถุดิบส่วนของต้นข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ให้ค่าศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนเฉลี่ยได้ต่ำสุดเท่ากับ 1,495 mL/gVS_{added} ทั้งนี้เนื่องจากค่า pH ของวัสดุหมักส่วนของต้นข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ หลังการทดลองนั้นมีค่า pH เท่ากับ 5.88 ซึ่งเป็นกรดนั้นจึงส่งผลให้วัตถุดิบในส่วนของต้นข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ได้ก๊าซมีเทนที่ต่ำที่สุด และเมื่อเปรียบเทียบค่า pH หลังการทดลองของเปลือก ใบ และซังข้าวโพดมีค่า pH เป็นกลาง คือประมาณ 7.15 - 7.68 ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมต่อการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์ในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ (Richard E. S. and et.al., 2021)

ผลของการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ และก๊าซมีเทนจากเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง

สำหรับการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง จะทำการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพทางทฤษฎี และจากผลการศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งด้วยกระบวนการ BMP Test ทำโดยการนำวัตถุดิบแต่ละส่วนของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ คือ ต้น ใบ เปลือก และซังข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ มาทำการหมักแยกประเภทกัน โดยหมักร่วมกับกากตะกอนมูลสุกรที่อัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อดังนี้ 50:50, 60:40, 70:30 และ 80:20 $gVSL^{-1}$ ระยะเวลาการย่อยสลายทั้งหมด 50 days ซึ่งได้ผลการศึกษาดังต่อไปนี้

ประเมินศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพทางทฤษฎีของเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง

สำหรับการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง ประเมินศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพทางทฤษฎีของวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งทั้ง 4 ส่วน ในหน่วย $m^3/ton_{maize\ residue}$ และสัดส่วนการผลิตก๊าซมีเทน ได้จากสมการดังต่อไปนี้

สมการ By Boyle modified the chemical reaction

$$A + C_1B \rightarrow C_2C + C_3D + C_4E + C_5F$$

สมการที่ 4.2

$$C_aH_bO_cN_dS_e + \left(a - \frac{b}{4} - \frac{c}{2} + \frac{3d}{4} + \frac{e}{2}\right)H_2O \rightarrow \left(\frac{a}{2} + \frac{b}{8} - \frac{c}{4} - \frac{3d}{8} + \frac{e}{4}\right)CH_4 + \left(\frac{a}{2} - \frac{b}{8} + \frac{c}{4} + \frac{3d}{8} + \frac{e}{4}\right)CO_2$$
$$+ dNH_3 + eH_2S$$

สมการที่ 4.3

จากสมการที่ 4.2 เมื่อค่า A, B คือ สารตั้งต้น และ ค่า C, D, E และ F คือ ผลิตภัณฑ์ และจากสมการที่ 4.3 ค่า C, H, O, N และ S พารามิเตอร์ดังกล่าว ได้นำมาจากการวิเคราะห์ทางกายภาพ (Proximate Analysis) ของเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งทั้ง 4 ส่วน จากนั้นคำนวณของสารตั้งต้น ได้ค่า a b c d และ e ซึ่งจะแสดงดังตารางที่ 24

ตารางที่ 24 พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ทางกายภาพของเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง

Parameter		Maize residues			
		Maize Stalks	Maize Leaves	Maize Husks	Maize
Element (%wt)	C	42.827	37.843	41.850	43.163
	H	5.917	5.655	6.053	6.033
	O	43.654	41.365	45.566	44.620
	N	0.009	1.473	0.218	0.523
	S	0.340	0.083	0.009	0.009
molar mass	a	3.5659	3.15077	3.48439	3.59371
	b	5.87062	5.61068	6.00556	5.98571
	c	2.72855	2.58547	2.84805	2.78892
	d	0.00064	0.10516	0.01556	0.03734
	e	0.01060	0.00259	0.00028	0.00028

จากตารางที่ 24 เป็นผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ C, H, O, N และ S ของเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งทั้ง 4 ส่วน เป็นการกำหนดค่าตั้งต้น โดยทั่วไปจะมีส่วนของเซลล์พืชที่จะไม่เปลี่ยนแปลงทางชีวภาพภายใต้เงื่อนไขที่ทำการทดสอบซึ่งจะขึ้นอยู่กับตัวแปรหลายกลุ่ม ซึ่งทางทฤษฎีการหาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน สามารถคำนวณจากองค์ประกอบธาตุ C, N, O, N และ S (สุเมธ ไชยประพัทธ์ และคณะ, 2558) ดังที่กล่าวไปในข้างต้นในการวิเคราะห์ก๊าซชีวภาพทางทฤษฎีในสมการที่ 4.2 จากนั้นนำค่า C, H, O, N และ S ไปคำนวณ molar mass โดยคิดจากมวลโมเลกุลของสารตั้งต้นแต่ละตัว โดยที่ค่า a , b, c, d และ e คือ molar mass ของคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน ไนโตรเจน และซัลเฟอร์ ตามลำดับ เมื่อได้ molar mass ได้นำค่าดังกล่าวไปคำนวณในสมการที่ 4.3 จะได้ปริมาณก๊าซชีวภาพ ที่ประกอบไปด้วย ก๊าซมีเทน, ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์,

ก๊าซแอมโมเนีย และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ จากนั้นนำไปคิดศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพปริมาณก๊าซชีวภาพลูกบาศก์เมตรต่อตันตัวอย่าง (ธเนศ ไชยชนะ และคณะ, 2562) แสดงดังตารางที่ 25

ตารางที่ 25 ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพทางทฤษฎี

วัตถุดิบ	**ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ (m^3/ton ตัวอย่าง)**
ต้น	192.55
ใบ	178.53
เปลือก	192.90
ซัง	195.10

จากผลการประเมินศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งด้วยกระบวนการ BMP Test ทำโดยการนำวัตถุดิบแต่ละส่วนของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ คือ ต้น ใบ เปลือก และซัง มาทำการหมักแยกประเภทกัน โดยหมักร่วมกับกากตะกอนมูลสุกรที่อัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อดังนี้ 50:50 60:40 70:30 และ 80:20 gVS L^{-1} ระยะเวลาการย่อยสลายทั้งหมด 50 days ได้ผลการศึกษาว่า อัตราส่วนของวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งต่อกากตะกอนมูลสุกรที่อัตราส่วน (S/I) 80:20 gVS L^{-1} ของซัง มีศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพดีที่สุด โดยตัวแปรที่ได้ศึกษาจากข้างต้นนั้น (pH, VFA/ALK, TS, VS และ COD) บ่งบอกถึงความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์ของระบบโดยการย่อยสลายได้ ผลการประเมินศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพทางทฤษฎีที่ได้นำค่ามาจากการวิเคราะห์ทางกายภาพ (Proximate Analysis) ของเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งทั้ง 4 ส่วน ได้ผลแสดงดังตารางที่ 24 ซึ่งเป็นผลคำนวณจากสมการ Stoichiometric ของการย่อยสลายแบบไร้อากาศของวัสดุหมัก โดยวิธีการนี้อนุมานว่า VS ของวัสดุหมักทั้งหมดสามารถเปลี่ยนเป็นก๊าซชีวภาพได้ 100 % (สุเมธ ไชยประพัทธ์ และคณะ 2558) จากการประเมินตามสมการพบว่าศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพทางทฤษฎีของวัตถุดิบส่วนของซังข้าวโพดเลี้ยงสัตว์สามารถให้ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงสุดเท่ากับ 195.10 $m^3/ton_{maize\ residues}$ และรองลงมา คือ เปลือก ต้น และใบข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ให้ค่าศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพได้ต่ำสุด เท่ากับ 192.90, 192.55 และ 178.53 $m^3/ton_{maize\ residues}$ ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นการจำลองจากผลทางกายภาพของเศษวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดเลี้ยงสัตว์การผลิตก๊าซชีวภาพยังต้องคำนึงถึงปัจจัยแวดล้อมต่าง ๆ อีกด้วย

ตารางที่ 26 ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง S/I 50:50

วัตถุดิบ	ก๊าซมีเทน	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ		ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน *	
	ค่าเฉลี่ยตลอดการทดลอง	ต่อตันของแข็งระเหย	ต่อตันตัวอย่าง	ต่อตันของแข็งระเหย	ต่อตันตัวอย่าง
	%	$m^3/tonVS_{added}$	$m^3/ton_{maize\ residue}$	$m^3\ CH_4/ton\ VS_{added}$	$m^3\ CH_4/ton_{maize\ residue}$
ต้น	59.30	1090.20	95.10	646.30	56.40
ใบ	59.10	542.50	131.30	320.90	77.64
เปลือก	59.00	1138.90	289.00	672.30	170.58
ซัง	55.80	1040.90	372.20	580.80	207.69

หมายเหตุ : *คำนวณจากเปอร์เซ็นต์มีเทนเฉลี่ย

จากผลการประเมินศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งที่อัตราส่วนต่าง ๆ มีผลดังนี้ ตารางที่ 26 เป็นผลการศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งที่อัตราส่วน S/I เท่ากับ 50:50 gVS L^{-1} ด้วยวัตถุดิบ ต้น ใบ เปลือก และซังข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มีก๊าซมีเทนเฉลี่ยตลอดการทดลองมีค่าเท่ากับ 59.30, 59.10, 59.00 และ 55.80% ตามลำดับ เมื่อนำไปคำนวณศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพต่อตันตัวอย่าง ของ ต้น ใบ เปลือก และซังมีค่าเท่ากับ 95.10, 131.30, 289.00 และ 372.00 m^3/ton และเมื่อไปคิดกับปริมาณก๊าซมีเทนเฉลี่ยจะได้ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนต่อตันของตัวอย่าง ของ ต้น ใบ เปลือก และซัง มีค่าเท่ากับ 56.40, 77.64, 170.58 และ 207.69 $m^3\ CH_4$/ton ซึ่งปริมาณศักยภาพของก๊าซมีเทนจะสอดคล้องกับปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ (สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2561)

ตารางที่ 27 ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง S/I 60:40

วัตถุดิบ	ก๊าซมีเทน	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ		ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน *	
	ค่าเฉลี่ยตลอดการทดลอง	ต่อตันของแข็งระเหย	ต่อตันตัวอย่าง	ต่อตันของแข็งระเหย	ต่อตันตัวอย่าง
	%	$m^3/tonVS_{added}$	$m^3/ton_{maize\ residue}$	$m^3\ CH_4/ton\ VS_{added}$	$m^3\ CH_4/ton_{maize\ residue}$
ต้น	63.20	738.10	64.40	466.80	40.74
ใบ	61.80	511.90	123.90	316.50	76.58
เปลือก	50.20	628.20	159.40	315.30	80.01
ซัง	55.90	946.00	338.30	189.10	189.09

หมายเหตุ : *คำนวณจากเปอร์เซ็นต์มีเทนเฉลี่ย

ผลการศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งที่อัตราส่วน S/I เท่ากับ 60:40 $gVS\ L^{-1}$ ด้วยวัตถุดิบ ต้น ใบ เปลือก และซัง ดังแสดงในตารางที่ 27 พบว่า ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพต่อตันตัวอย่าง ของ ต้น ใบ เปลือก และซัง มีค่าเท่ากับ 64.40, 123.90, 159.40 และ 338.30 m^3/tonตัวอย่าง และก๊าซมีเทนเฉลี่ยตลอดการทดลองมีค่าเท่ากับ 63.20, 61.80, 50.20 และ 55.90% ตามลำดับ เมื่อนำปริมาณก๊าซมีเทนเฉลี่ยไปคำนวณหาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนต่อตันของตัวอย่าง ต้น ใบ เปลือก และซัง มีค่าเท่ากับ 40.74, 76.58, 80.01 และ 189.09 m^3CH_4/ton โดยศักยภาพก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับปริมาณมีเทนที่ผลิตได้ในระบบ

ตารางที่ 28 ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง S/I 70:30

วัตถุดิบ	ก๊าซมีเทน	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ		ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน *	
	ค่าเฉลี่ยตลอดการทดลอง	ต่อตันของแข็งระเหย	ต่อตันตัวอย่าง	ต่อตันของแข็งระเหย	ต่อตันตัวอย่าง
	%	$m^3/tonVS_{added}$	$m^3/ ton_{maize\ residue}$	$m^3\ CH_4/ton\ VS_{added}$	$m^3\ CH_4/\ ton_{maize\ residue}$
ต้น	11.10	68.90	6.00	7.60	0.67
ใบ	59.60	619.80	150.00	369.60	89.43
เปลือก	56.10	486.20	123.40	272.50	69.15
ซัง	53.20	458.10	163.80	243.60	87.10

หมายเหตุ : *คำนวณจากเปอร์เซ็นต์มีเทนเฉลี่ย

ผลการศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งที่อัตราส่วน S/I เท่ากับ 70:30 $gVS\ L^{-1}$ ด้วยวัตถุดิบ ต้น ใบ เปลือก และซัง ดังแสดงในตารางที่ 28 พบว่า ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพต่อตันตัวอย่าง ของ ต้น ใบ เปลือก และซัง มีค่าเท่ากับ 6.00, 150.00, 123.40 และ 163.80 m^3/ton และก๊าซมีเทนเฉลี่ยตลอดการทดลองมีค่าเท่ากับ 11.10, 59.60, 56.10 และ 53.20% ตามลำดับ เมื่อนำปริมาณก๊าซมีเทนเฉลี่ยไปคำนวณหาศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนต่อตันของตัวอย่าง ต้น ใบ เปลือก และซัง มีค่าเท่ากับ 0.67, 89.43, 69.15 และ 87.10 m^3CH_4/ton

ตารางที่ 29 ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง S/I 80:20

วัตถุดิบ	ก๊าซมีเทน	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ		ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน *	
	ค่าเฉลี่ยตลอดการทดลอง	ต่อตันของแข็งระเหย	ต่อตันตัวอย่าง	ต่อตันของแข็งระเหย	ต่อตันตัวอย่าง
	%	$m^3/tonVS_{added}$	$m^3/ton_{maize\ residue}$	$m^3\ CH_4/ton\ VS_{added}$	$m^3\ CH_4/ton_{maize\ residue}$
ต้น	10.50	108.40	9.50	11.40	0.99
ใบ	53.70	670.50	162.20	396.50	95.90
เปลือก	56.00	550.60	139.70	308.20	78.21
ซัง	59.10	741.20	265.00	397.70	142.22

หมายเหตุ : *คำนวนจากเปอร์เซ็นต์มีเทนเฉลี่ย

ทั้งนี้การประเมินผลการวิจัยพบว่าอัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อทีดีที่สุดของศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ คือ 80:20 gVS L^{-1} และเมื่อเปรียบเทียบวัตถุทั้ง 4 ส่วน พบว่าวัตถุดิบส่วนของซังข้าวโพดเลี้ยงสัตว์สามารถให้ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงสุดเท่ากับ 265.00 $m^3/ton_{maize\ residues}$ และรองลงมาคือ ใบ เปลือก และต้นข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ให้ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพได้ต่ำสุดเท่ากับ 162.20, 139.70 และ 9.50 $m^3/ton_{maize\ residues}$ ตามลำดับ จากตารางที่ 26 -29 เป็นผลของการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งที่อัตราส่วนแตกต่างกันคือ 50:50, 60:40, 70:30 และ 80:20 gVS L^{-1} เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของวัตถุดิบต่อหัวเชื้อที่ดีที่สุดในการเลือกเพื่อประเมินศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ จากการศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมเมื่อทำการทดลองเพื่อวิเคราะห์หาอัตราส่วนที่เหมาะสมรวมถึงปัจจัยที่คัดกรองแล้ว พบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมที่ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพที่สูงที่สุด คือ อัตราส่วนของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ต่อกากตะกอนมูลสุกร เท่ากับ 80:20 gVS L^{-1} โดยมีปริมาณก๊าซมีเทนเฉลี่ยตลอดการทดลองเท่ากับ 53.70%CH_4 ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพ 265.00 $m^3/tonVS_{added}$ ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณก๊าซชีวภาพทางทฤษฎีเมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุดิบ ต้น ใบ และเปลือกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์กับวัตถุดิบชนิดต่าง ๆ กับงานวิจัยอื่น ๆ แสดงดังตารางที่ 30 (คู่มือการลงทุนโรงไฟฟ้าก๊าซชีวภาพจากพืชพลังงาน ปี 2562)

ตารางที่ 30 อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เปรียบเทียบกับวัตถุดิบชนิดต่าง ๆ

รายการวัตถุดิบ	Moisture Content of Fresh Mass (%)	**สัดส่วนของแข็งระเหยง่าย(%VS of Fresh mass)**	**อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ (m^3CH_4/kgVS$_{added}$)**	**อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ (m^3-BG/ton-Fresh Mass$_{added}$)**
คู่มือการลงทุนโรงไฟฟ้าก๊าซชีวภาพจากพืชพลังงาน ปี2562				
ปุ๋ยขี้หมู	-	24.84	0.13	58.71
ปุ๋ยคอก	-	13.37	0.18	44.73
ฟางข้าว	59.40	32.31	0.34	199.73
ทะลายปาล์มเปล่า	65.70	31.73	0.37	213.46
เปลือกสับปะรด	91.00	8.42	0.40	61.24
กากมันสาปะหลัง	81.60	18.04	0.37	121.36
ผักตบชวา	91.27	7.36	0.35	46.84
ดีแคนเตอร์เค้กของปาล์มน้ำมัน	76.70	19.43	0.37	130.71
ธูปฤๅษี	85.97	12.20	0.35	77.64
ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์	-	27.08	0.34	167.40
หญ้าเนเปียร์	79.23	21.34	0.30	116.40
งานวิจัยนี้				
ต้นข้าวโพดเลี้ยงสัตว์	3.51	12.51	0.01	9.46
ใบข้าวโพดเลี้ยงสัตว์	1.39	20.35	0.40	162.25
เปลือกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์	1.41	12.37	0.31	139.72
ซังข้าวโพดเลี้ยงสัตว์	1.23	20.45	0.40	265.05

จากตารางที่ 30 เป็นของอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ แสดงการเปรียบเทียบวัตถุดิบชนิดต่าง ๆ กับวัตถุดิบที่ใช้ในงานวิจัย พบว่าผลของอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวัตถุดิบข้าวโพดเลี้ยงสัตว์จากการทดลองนี้เมื่อเทียบกับงานวิจัย (คู่มือการลงทุนโรงไฟฟ้าก๊าซชีวภาพจากพืชพลังงาน ปี 2562)

มีค่าอยู่ในกลุ่มเดียวกัน แต่ทั้งนี้พบว่าในตารางที่ 30 ซังข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เมื่อเทียบกับทะลายปาล์มเปล่า วัตถุดิบส่วนของซังข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มีศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพที่สูง คือ มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 265.05 m^3-BG/ton-Fresh $Mass_{added}$ และเมื่อวิเคราะห์ถึงปริมาณของวัตถุดิบที่เหลืองทิ้ง ระยะเวลาการปรับสภาพ ก่อนนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพนั้น ซังข้าวโพดสามารถเป็นทางเลือกที่ดีที่สุดได้ (Haipeng Xu., 2019) ดังนั้นหลังจากการประเมินศักยภาพการผลิตก๊าซชวภาพจะได้อัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อที่ดีที่สุด และนำค่าของอัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อที่ดีที่สุดและปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งดังกล่าวมาทำการประเมินปริมาณการผลิตไฟฟ้าเบื้องต้นโดยใช้ปริมาณก๊าซชีวภาพที่สูงที่สุดในการทดลองเพื่อหาปริมาณการผลิตฟ้าเบื้องต้น และประเมินการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 Emission) จากกระบวนการการผลิตไฟฟ้าโดยใช้ก๊าซชีวภาพจากวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง

ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในหน่วยพื้นที่ต่อไร่ ของภาคเหนือ

จากข้อมูลพื้นที่ปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในปี พ.ศ. 2559/2560 ของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร พบว่าภาคเหนือมีพื้นที่เพาะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ประมาณ 3,184,402 rai คิดเป็น 70% ของพื้นที่รวมทั้งประเทศ การพิจารณาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ สามารถพิจารณาโดยใช้หลักการเชิงทฤษฎีที่มีการย่อยสลายและเกิดเป็นก๊าซ 100% ทั้งนี้ในการวิจัยผลิตก๊าซชีวภาพโดยวิธีการ BMP (Biochemical Method Potential) พบว่าประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 25.01% โดยเกิดจากการจัดการวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดเลี้ยงสัตว์โดยการทิ้งในที่โล่ง และการไถกลบโดย จากพื้นที่ในภาคเหนือทั้งหมด พบว่าศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ 195.71 m^3/rai ซึ่งคิดเป็นศักยภาพพลังงานเฉลี่ย 900.67 MJ/rai ดังแสดงในตารางที่ 31 เมื่อพิจารณาพื้นที่ภาคเหนือพบว่าพื้นที่เพาะปลูกทั้งหมด 3,184,402 rai มีศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ 623,235,110 m^3 ทดแทนการใช้ก๊าซหุงต้ม 6,375,944,470 เมื่อก๊าซชีวภาพ 1 m^3มีค่าความร้อนเทียบเท่าทดแทนก๊าซหุงต้ม (LPG) 0.46 kg (ภาคผนวก จ)

ตารางที่ 31 ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ต่อไร่ ในพื้นที่ภาคเหนือ

จังหวัด (ภาคเหนือ)	พื้นที่เพาะปลูก (Rai)	ปริมาณข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ (kg/rai)	ปริมาณชีวมวลที่ยังไม่ได้ใช้ประโยชน์ (kg/year)	ปริมาณชีวมวลที่ยังไม่ได้ใช้ประโยชน์ (ton/year)	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ (m^3/year)
เชียงใหม่	176,700	119,979,300	59,989,650	59,990	34,582,833
เชียงราย	405,848	275,570,792	137,785,396	137,785	79,430,525
ลำปาง	183,694	124,728,226	62,364,113	62,364	35,951,664
ลำพูน	81,153	55,102,887	27,551,444	27,551	15,882,856
น่าน	732,914	497,648,606	248,824,303	248,824	143,442,234
แพร่	279,452	189,747,908	94,873,954	94,874	54,692,937
พะเยา	254,110	172,540,690	86,270,345	86,270	49,733,128
แม่ฮ่องสอน	59,426	40,350,254	20,175,127	20,175	11,630,557
ตาก	527,859	358,416,261	179,208,131	179,208	103,309,903
สุโขทัย	61,607	41,831,153	20,915,577	20,916	12,057,412
พิษณุโลก	238,284	161,794,836	80,897,418	80,897	46,635,744
อุตรดิตถ์	183355	124,498,045	62,249,023	62,249	35,885,316
รวม	3,184,402	2,162,208,958	1,081,104,479	1,081,104	623,235,110

ผลของการประเมินปริมาณการผลิตไฟฟ้าเบื้องต้นโดยใช้ก๊าซชีวภาพจากวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง

สำหรับการประเมินปริมาณการผลิตไฟฟ้าเบื้องต้น โดยใช้ก๊าซชีวภาพจากเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งจะทำการประเมินปริมาณการผลิตไฟฟ้าโดยใช้ปริมาณก๊าซชีวภาพจากผลการวิเคราะห์ของการทดลองที่ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพที่ดีที่สุดในเงื่อนไขของงานวิจัยที่ศึกษาอัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพแบบ BMP Test คืออัตราส่วน S/I เท่ากับ 80:20 gVS L^{-1} โดยใช้วัตถุดิบ ต้น ใบ เปลือก และซังข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ไปพิจารณาถึงผลผลิตศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพทั้ง 4 ส่วน โดยจะนำปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้ในหน่วย $m^3/tonVS_{added}$ ไปคำนวณพลังงานไฟฟ้า โดยคิดจากปริมาณก๊าซชีวภาพที่ 1 m^3 ต่อปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ต่ำสุด 0.71 kWh และที่สูงที่สุด 1.40 kWh โดยอัตราการทดแทนการใช้ก๊าซชีวภาพนี้ได้นำข้อมูลจากกรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน แสดงดังตารางที่ 32

ตารางที่ 32 ปริมาณการผลิตไฟฟ้าโดยใช้ปริมาณก๊าซชีวภาพในงานวิจัย แบบ BMP Test

วัตถุดิบ	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ($m^3/ton_{maize\ residue}$)	การทดแทนไฟฟ้า kWh/ton	
		ก๊าซชีวภาพ 1 m^3 : การผลิตกระแสไฟฟ้า 0.71 kWh*	ก๊าซชีวภาพ 1 m^3 : การผลิตกระแสไฟฟ้า 1.40 kWh*
ต้น	9.46	6.71	9.40
ใบ	162.25	115.20	161.28
เปลือก	139.72	99.20	138.88
ซัง	265.05	188.18	263.46

*หมายเหตุ : ข้อมูลการทดแทนไฟฟ้าจากกรมพัฒนาพลังงานทดแทนกระทรวงพลังงาน

จากตารางที่ 32 เป็นผลของการประเมินปริมาณการผลิตไฟฟ้าเบื้องต้นด้วยระบบหมักไร้อากาศแบบ BMP โดยใช้อัตราส่วน S/I เท่ากับ 80:20 gVS L^{-1} วัตถุดิบ ต้น ใบ เปลือก และซังของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ได้นำปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้มาประเมินการผลิตไฟฟ้า โดยคิดจากปริมาณก๊าซชีวภาพที่ 1 m^3 ต่อปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ต่ำสุด 0.71 kWh และที่สูงที่สุด 1.40 kWh ได้ผลดังนี้ ต้นข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ให้ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ 9.46 $m^3/ton_{maize\ residue}$ เมื่อนำไปคิดปริมาณกระแสไฟฟ้าต่ำสุดได้ 6.71 kWh/ton และปริมาณกระแสไฟฟ้าสูงสุดได้ 9.40 kWh/ton ต่อมาเมื่อ

นำปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้จากใบข้าวโพดเลี้ยงสัตว์นำไปคิดปริมาณกระแสไฟฟ้าต่ำสุดได้ 115.20 kWh/ton และปริมาณกระแสไฟฟ้าสูงสุดได้ 161.28 kWh/ton และเมื่อนำปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้จากซังข้าวโพดเลี้ยงสัตว์นำไปคิดปริมาณกระแสไฟฟ้าต่ำสุดได้ 118.18 kWh/ton และปริมาณกระแสไฟฟ้าสูงสุดได้ 263.46 kWh/ton พบว่า อัตราการใช้ก๊าซชีวภาพแปรผันตามการเพิ่มขึ้นของกระแสไฟฟ้า กล่าวคือ เมื่อมีการผลิตไฟฟ้าที่กำลังวัตต์เพิ่มขึ้นเครื่องยนต์ก็จะใช้ก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย (วัฒนณรงค์ มากพันธ์ และคณะ 2019) ที่ระบุว่าเครื่องยนต์แก๊สโซลีนขนาด 5 hp เมื่อผลิตกระแสฟ้า 3 kW จะใช้ก๊าซชีวภาพ 1.2-1.4 m^3/h และจากงานวิจัย (ปริพัฒน์ และสุภาภรณ์, 2555) ได้รายงานว่าการใช้ก๊าซชีวภาพ 1 m^3 ที่ผลิตจากขยะอินทรีย์สามารถนำมาผลิตกระแสไฟฟ้าได้ 0.71 - 1.40 kW อย่างไรก็ดี ในงานวิจัยนี้เป็นเพียงการประเมินปริมาณการผลิตไฟฟ้าเบื้องต้นจากก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้เท่านั้น

ผลการประเมินการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 Emission) จากกระบวนการการผลิตไฟฟ้าโดยใช้ก๊าซชีวภาพจากวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง

สำหรับการประเมินการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 Emission) จากกระบวนการการผลิตไฟฟ้าโดยใช้ก๊าซชีวภาพจากวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง ได้ศึกษาข้อมูลค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 Emission Factor) ซึ่งเปลี่ยน ข้อมูลจากกิจกรรมต่าง ๆ ให้เป็น ปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในหน่วย kg CO_2-eq ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ทำการศึกษาในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ หน่วยของ Functional Unit คือ kgCO_2-eq /การผลิตก๊าซชีวภาพ 1 m^3 และในกระบวนผลิตไฟฟ้า หน่วยของ Functional unit คือ kgCO_2-eq /การผลิตไฟฟ้า 1 kWh แสดงกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ ไปจนถึงกระบวนการผลิตไฟฟ้า โดยกระบวนการหมักก๊าซชีวภาพแบบไร้อากาศเป็นเทคโนโลยีที่มีศักยภาพมากในการบำบัดขยะอินทรีย์เป็นวิธีที่มีประสิทธิผลดีที่สุด เนื่องจากสามารถรวบรวมก๊าซชีวภาพมาผลิตพลังงานความร้อนหรือไฟฟ้าได้ และมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อย การคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการหมักแบบ ไร้อากาศต้องคำนวณทั้งปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล (ไฟฟ้าและน้ำมันดีเซล) ในกิจกรรมต่าง ๆ ของการหมักแบบไร้อากาศ และปริมาณการปล่อยก๊าซมีเทนจากการรั่วไหลของถังหมักแบบไร้อากาศ โดยใช้ค่าเริ่มต้นของ (IPCC, 2006) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2 $kgCH_4/kg_{dried\ mass}$ก๊าซชีวภาพที่ได้จากการหมักแบบไร้อากาศมีค่าความร้อน (Calorific Value) อยู่ในช่วง 20-25 MJ/m^3 (คู่มือการลงทุนโรงไฟฟ้าก๊าซชีวภาพจากพืชพลังงาน ปี 2562) จึงสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานความร้อนหรือไฟฟ้าทดแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลและสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้ เทคโนโลยีในการผลิตพลังงานมีหลากหลายรูปแบบ เช่น การเผาไหม้เพื่อผลิตไฟฟ้าโดยใช้เครื่องยนต์ขนาดเล็ก (น้อยกว่า 200 kW) หรือเครื่องยนต์สันดาปภายในขนาดใหญ่ (ขนาดสูงสุด 1.5 MW) (Pöschl and et.al., 2016)

ในการคำนวณหาปริมาณวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง และกากตะกอนมูลสุกร ที่ป้อนเข้าระบบต่อวันนั้น อ้างอิงผลจากการทดสอบจากงานวิจัยที่ได้ทำการทดสอบการหมักไร้อากาศแบบ BMP Test เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพมากที่สุด มาทำการคำนวณเพื่อหาปริมาณวัตถุดิบต่อวัน โดยอัตราส่วนที่ดีที่สุดของเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งต่อกากตะกอนมูลสุกร คือ อัตราส่วนของซังข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ต่อกากตะกอนมูลสุกรที่ 80:20 gVS L^{-1}

เป็นอัตราส่วน และวัตถุดิบที่ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพที่สูงที่สุด โดยจะนำปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ การหมักแบบไร้อากาศช่วยลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการฝังกลบขยะอินทรีย์ (พฤกษ์ อักกะรังสี และ วราวุธ วิลาวรรณ, 2556)

การวิเคราะห์ด้านการประเมินการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 Emission) โดยระบบที่ใช้จะอ้างอิงระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบ CSTR โดยจะเริ่มกำหนดข้อมูลรายปี เช่น ปริมาณวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร การใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลที่ใช้ในการบดย่อยการผสม และไฟฟ้าของระบบหมักแบบไร้อากาศ ค่าความชื้นโดยประมาณของของผสมวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่เข้าสู่ระบบ (ของผสมประกอบด้วยวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร และน้ำ) ประเภทของผลผลิตที่ได้จากการหมักแบบไร้อากาศ (พลังงานไฟฟ้าหรือความร้อน) แสดงดังตารางที่ 33

ตารางที่ 33 รายการข้อมูลที่ต้องใช้คำนวณการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์CO_2 Emission

การผลิตก๊าซชีวภาพแบบไร้อากาศ (Anaerobic digestion)		
ปริมาณวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งส่วนที่นำมาหมักแบบไร้อากาศ	35,319	ton/year
ปริมาณเชื้อเพลิงฟอสซิลที่ใช้ในการดำเนินงาน*	330	L/year
ปริมาณไฟฟ้าที่ใช้ในการดำเนินงาน	63,360	kWh/year
ระยะเวลาเดินระบบ CSTR*	330	days
ค่าความชื้นโดยประมาณของขยะอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบ	19%	

(ที่มา: ระบบ CSTR จากพฤกษ์ อักกะรังสี และ วราวุธ วิลาวรรณ. 2559)

ข้อมูลนำเข้า

ปริมาณเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งทั้งหมดที่นำมาหมักก๊าซชีวภาพ	35,319.9	ton/year
ปริมาณเชื้อเพลิงฟอสซิลทั้งหมดที่ใช้ในกิจกรรมต่างๆของการหมักก๊าซชีวภาพ	330	L/year
ปริมาณไฟฟ้าทั้งหมดที่ใช้ในกิจกรรมต่าง ๆ ของการหมักก๊าซชีวภาพ	63,360	kWh/year
ระยะเวลาเดินระบบ CSTR	330	days/year
ค่าความชื้นโดยประมาณของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ที่เข้าสู่ระบบ	19	%

(ข้อมูลการนำเข้า อ้างอิงมาจาก คู่มือการลงทุนโรงไฟฟ้าก๊าซชีวภาพจากพืชพลังงาน ปี 2562 และปริมาณการนำเข้าวัสดุจากโครงการการประเมินศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรในภาคเหนือ ปี 2559)

ผลผลิตที่ได้จากการหมักก๊าซชีวภาพ

การใช้ก๊าซชีวภาพในการผลิตไฟฟ้า = 826.08 $kWh/ton_{maize\ residues}$

ผลลัพธ์

ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมต่าง ๆ ของการหมักก๊าซชีวภาพ

= 1.04 $kgCO_{2eq}/ton_{maize\ residues}$

ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการรั่วไหล (Unavoidable Leakages)

= 34.02 $kgCO_{2eq}/ton_{maize\ residues}$

ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยตรงจากการหมักก๊าซชีวภาพ

= 35.06 $kgCO_{2eq}/ton_{maize\ residues}$

ปริมาณการหลีกเลี่ยงการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตไฟฟ้า

= 147.94 $kgCO_{2eq}/ton_{maize\ residues}$

ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิจากการหมักก๊าซชีวภาพ (ใช้วิธีการประเมินวัฏจักรชีวิต)

= -432.50 $kgCO_{2eq}/ton_{maize\ residues}$

การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดจากการหมักก๊าซชีวภาพต่อปี

= -3,986.83 $tonCO_{2eq}/Year$

<<<ค่าลบหมายถึงปริมาณที่ลดได้มากกว่าที่ปล่อยออก

การคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการหมักก๊าซชีวภาพด้วยวัสดุเหลือทิ้งทางเกษตรกลุ่มข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ แสดงผลการคำนวณดังข้างต้น โดยคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากกิจกรรมต่าง ๆ ของการหมักก๊าซชีวภาพ ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการรั่วไหล (Unavoidable Leakages) ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยตรงจากการหมักก๊าซชีวภาพ ปริมาณการหลีกเลี่ยงการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตไฟฟ้า ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกสุทธิจากการหมักก๊าซชีวภาพ และการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดจากการหมักก๊าซชีวภาพต่อปี การคำนวณปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการหมักเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มีค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกเท่ากับ 1.04 $kgCO_{2eq}/ton_{maize\ residues}$ และมีปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยตรงจากการหมักก๊าซชีวภาพเท่ากับ 35.06 $kgCO_{2eq}/ton_{maize\ residues}$ และการนำวัสดุมาทำการผลิตก๊าซชีวภาพแทนการเผากลบสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกทั้งหมดต่อปีได้เท่ากับ 3,986.83 ton $CO_{2eq}/Year$

การคำนวณปริมาณก๊าซชีวภาพและไฟฟ้าที่ผลิตได้และการลดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

1. ค่า Default ค่าเฉลี่ยปริมาณการปล่อยก๊าซมีเทน (CH_4) จากการหมักแบบไร้อากาศ

เมื่อมี CH_4 2 $kgCH_4/kg_{dried\ mass}$

2. การประเมินการผลิตก๊าซชีวภาพและไฟฟ้าในเชิงทฤษฎี

การผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง 265.05 $m^3/ton_{maize\ residues}$

(ค่าจากงานวิจัยนี้)

ปริมาณมีเทนในก๊าซชีวภาพ (%CH_4) 59.01 %

ค่าความร้อนของมีเทน 21.6 MJ/m^3

(คู่มือการลงทุนโรงไฟฟ้าก๊าซชีวภาพจากพืชพลังงาน ปี2562)

ปริมาตรของ CH_4 ทั้งหมด

= ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ x (100-%ความชื้น)/(100*%CH_4/100)

= 256.05 x (100-19)/(100 x 59.01/100)

= 126.88 $m^3/ton_{maize\ residues}$

ปริมาตรของ CH_4 ที่ปล่อยออกสู่บรรยากาศ

= ปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการรั่วไหล/21/0.67

= 34.02/21/0.67

= 2.42 $m^3CH_4/ton_{maize\ residues}$

ปริมาตรของ CH_4 ที่รวบรวมได้

= ปริมาตรของ CH_4 ทั้งหมด-ปริมาตรของ CH_4 ที่ปล่อยออกสู่บรรยากาศ

= 126.88 – 2.42

= 124.46 $m^3CH_4/ton_{maize\ residues}$

ปริมาณพลังงานที่ได้จากก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้

= ปริมาตรของ CH_4 ที่รวบรวมได้ x ค่าความร้อนของมีเทน

= 2,688.43 $MJ/ton_{maize\ residues}$

ประเภทของการใช้ประโยชน์ก๊าซชีวภาพ

การใช้ก๊าซชีวภาพในการผลิตความร้อน ปริมาณที่ใช้แทนที่ เท่ากับ 207.44 $m^3BG/ton_{maize\ residues}$

การใช้ก๊าซชีวภาพในการผลิตไฟฟ้า ปริมาณที่ใช้แทนที่ เท่ากับ 261.37 $kWh/ton_{maize\ residues}$

ผลการประเมินการผลิตก๊าซชีวภาพและไฟฟ้าในเชิงทฤษฎีและการประเมินการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก โดยนำผลผลิตก๊าซชีวภาพจากการผลิตก๊าซชีวภาพของเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้งมีค่าเท่ากับ 265.05 $m^3/ton_{maize\ residues}$ (ค่าจากงานวิจัยนี้) ซึ่งในก๊าซชีวภาพมีปริมาณมีเทน (% CH_4) เท่ากับ 59.01% และค่าความร้อนของก๊าซมีเทน 21.6 MJ/m^3 (คู่มือการลงทุนโรงไฟฟ้าก๊าซชีวภาพจากพืชพลังงาน ปี 2562) เมื่อมาคำนวณหาปริมาตรของ CH_4 ทั้งหมด จะได้ค่าเท่ากับ 126.88 $m^3/ton_{maize\ residues}$ และเมื่อนำปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการรั่วไหล จะได้ปริมาตรของ CH_4 ที่ปล่อยออกสู่บรรยากาศมีค่าเท่ากับ 2.42 m^3 $CH_4/ton_{maize\ residues}$ ต่อมาเมื่อนำปริมาตรของ CH_4 ทั้งหมดมาหักลบกับปริมาตรของ CH_4 ที่ปล่อยออกสู่บรรยากาศ จะได้ปริมาตรของ CH_4 ที่รวบรวมโดยมีค่าเท่ากับ 124.46 m^3 $CH_4/ton_{maize\ residues}$ และเมื่อนำปริมาตรของก๊าซมีเทนที่รวบรวมมาคูณกับค่าความร้อนของก๊าซมีเทนจะได้ปริมาณพลังงานที่ได้จากก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2,688.43 MJ/ $ton_{maize\ residues}$ ต่อมานำค่าที่ได้ไปประเมินการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยจะกล่าวในลำดับต่อไป

3. การประเมินการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

ศักยภาพในการแทนที่ LPG

= ปริมาณพลังงานที่ได้จากก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ ÷ 26.62

= 100.99 L/ $ton_{maize\ residues}$

ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกของ LPG

= 0.063 $kgCO_2/MJ$ (อ้างอิงข้อมูลจาก IGES 2564)

การใช้ก๊าซชีวภาพในการผลิตความร้อน

การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตก๊าซชีวภาพและการลดการใช้ LPG

=ปริมาณพลังงานที่ได้จากก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ x ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกของ LPG

= 2,688.43 x 0.063

= 169.37 $kgCO_{2eq}/ton_{maize\ residues}$

การใช้ก๊าซชีวภาพในการผลิตไฟฟ้า

การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตไฟฟ้า

= 147.94 $kgCO2_{eq}/ton_{maize\ residues}$

(GHG_Simulation-Version_II-edited-Thai-11Nov2013)

ตารางที่ 34 การประเมินการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

การประเมินการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก		
ศักยภาพในการแทนที่ LPG	100.99	$L/\ ton_{maize\ residues}$
ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกของ LPG	0.063	$kgCO_2/MJ$
การใช้ก๊าซชีวภาพในการผลิตความร้อน		
การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตก๊าซชีวภาพและการลดการใช้ LPG	169.37	$kgCO_{2eq}/ton_{maize\ residues}$
การใช้ก๊าซชีวภาพในการผลิตไฟฟ้า		
การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตไฟฟ้า	147.94	$kgCO_{2eq}/ton_{maize\ residues}$

จากตารางที่ 34 ผลการประเมินการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกโดยจำลองการใช้ก๊าซชีวภาพในการผลิต 2 รูปแบบ คือ การใช้ก๊าซชีวภาพในการผลิตความร้อน และการใช้ก๊าซชีวภาพในการผลิตไฟฟ้า เพื่อดูปริมาณการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก พบว่าปริมาณก๊าซเรือนกระจกที่ปลดปล่อยจากการใช้ก๊าซชีวภาพในการผลิตความร้อนมีค่าเท่ากับ 169.37 $kgCO_{2eq}/ton_{maize\ residues}$ ซึ่งก๊าซชีวภาพมีศักยภาพในการแทนที่ LPG ได้ที่ 100.99 $L/ton_{maize\ residues}$ และการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตไฟฟ้าได้เท่ากับ 147.94 $kgCO_{2eq}/\ ton_{maize\ residues}$ ซึ่งจะเห็นได้ว่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการใช้ก๊าซชีวภาพในการผลิตความร้อนมีมากกว่า นอกจากนี้ในการนำก๊าซชีวภาพมาผลิตกระแสไฟฟ้ามีประสิทธิภาพสูงกว่าการใช้ก๊าซชีวภาพในการผลิตความร้อน (วัฒนณรงค์ มากพันธ์ และคณะ, 2561) จะเห็นได้ว่าระบบการกำจัดขยะมีการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

ออกมาเป็นจำนวนมาก ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไนตรัสออกไซด์ผลิตจากการเผาในที่โล่งแจ้ง ขณะที่ก๊าซมีเทน (ซึ่งมีศักยภาพมากกว่าก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ 21 เท่าในรอบ 100 ปี) เป็นผลพลอยได้จากการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนภายในการหมักวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ซึ่งก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในพื้นที่กำจัดวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประมาณ 3 - 4% ของการปล่อย GHG ทั่วโลก (Eggleston and et.al., 2006, IPCC Guidelines) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ (ธนวรกฤต และ คณะ, 2562) ศึกษาการประเมินก๊าซเรือนกระจกของเทศบาลตำบลแม่ทะ จังหวัดลำปาง ครอบคลุมกิจกรรมการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในปี 2562 ประกอบด้วย การเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล มีเทนจากกำจัดของเสียและขยะ การรั่วไหลของสารทำความเย็นการใช้ไฟฟ้า และการใช้กระดาษ ผลการประเมินพบว่า การกำจัดขยะแบบเทกองของเทศบาลมีค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกมากที่สุด โดยมีสัดส่วนสูงถึง 96.53% ซึ่งพบว่ามาจากมีเทนที่เกิดจากการย่อยสลายของอินทรียวัตถุแบบไม่ใช้ออกซิเจน ทั้งนี้จึงสรุปได้ว่าทางเลือกในการใช้ก๊าซชีวภาพเพื่อบำบัดและกำจัดขยะวัสดุเหลือทิ้งทางเกษตรหรือขยะอินทรย์เพื่อเปลี่ยนเป็นพลังงานสามารถลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากหลุบฝังกลบจากการเผา และชดเชยการปล่อยก๊าซจากโรงไฟฟ้าเชื้อเพลิงฟอสซิลได้ ซึ่งในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าการเปลี่ยนของเสียไปเป็นพลังงานสามารถลดคาร์บอนมากถึง 1.04 ตันต่อตันของวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ โดยสามารถหลีกเลี่ยงการปล่อยก๊าซมีเทนจากหลุมฝังกลบ และชดเชยการปล่อยมลพิษจากโรงไฟฟ้าเชื้อเพลิงฟอสซิลได

บทที่ 5

สรุปผลการทำวิจัย และข้อเสนอแนะ

สรุปผลการทำวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดเลี้ยงสัตว์หมักร่วมกับกากตะกอนมูลสุกรในระบบหมักแบบกะ (BMP Test) ขนาด 1000 mL โดยวิธีวิเคราะห์ BMP Test ดัดแปลงมาจากวิธีมาตรฐาน VDI (VDI-4630, 2016) ศึกษาวัตถุดิบหมักของเศษวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดเลี้ยงสัตว์แต่ละส่วนที่ต่างกันคือ ต้น ใบ เปลือก และ ซัง จากนั้นศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่างวัตถุดิบหมักกับการตะกอนมูลสุกรในอัตราส่วนน้ำหนักของแข็งระเหยต่อปริมาตรของปริมาตรใช้งานที่ใช้ทำการทดลอง ด้วยอัตราส่วนดังนี้ 50:50, 60:40, 70:30 และ 80:20 gVS L^{-1} ใช้หัวเชื้อกากตะกอนมูลสุกรเริ่มต้นเท่ากับ 6 gVS L^{-1} ของแข็งระเหยของปริมาตรใช้งาน ซึ่งงานวิจัยนี้ได้ดำเนินการภายในห้องปฏิบัติการที่มีการควบคุมอุณหภูมิ 35±2 °C ระยะเวลาที่ใช้ในการหมัก 50 days โดยสามารถสรุปผลการศึกษาดังต่อไปนี้

ส่วนที่ 1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเบื้องต้นของวัตถุดิบที่ใช้ในการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ พบว่า ต้น ใบ เปลือก และซังข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มีอัตราส่วน VS/TS เท่ากับ 0.87, 0.88, 0.93 และ 0.93 ตามลำดับ โดยค่า VS/TS ทั้ง 4 ส่วน อยู่ในช่วงที่เหมาะสม คือ มีค่ามากกว่า 0.70 ส่วนหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในงานวิจัย พบว่าอัตราส่วน VS/TS อยู่ในช่วงที่เหมาะสม คือมีค่ามากกว่า 0.70 และอัตราส่วน VFA/ALK อยู่ในช่วงที่เหมาะสม คือ มีค่าน้อยกว่า 0.40 ซึ่งเหมาะต่อการนำมาเป็นหัวเชื้อในการผลิตก๊าซชีวภาพ

ส่วนที่ 2 ผลของอัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อที่ใช้ศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ พบว่าทั้ง 16 เงื่อนไขการทดลองที่ได้ทำการกำหนดอัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อ โดยแยกหมักแต่ละส่วนได้แก่ ต้น ใบ เปลือก และซังของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์หมักร่วมกับกากตะกอนมูลสุกรทั้ง 4 อัตราส่วน พบว่า อัตราส่วนวัตถุดิบต่อหัวเชื้อที่ดีที่สุด คือ 80:20 gVS L^{-1} และมีส่วนประกอบของวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ที่ดีที่สุด คือซังข้าวโพดโดยมี ปริมาณ $COD_{removal}$ ที่สูงที่สุด คือ 75.78 และ 80.95%$COD_{removal}$ และมีปริมาณ $TS_{removal}$ เท่ากับ 88.59%$TS_{removal}$ และมีปริมาณ $VS_{removal}$ เท่ากับ 90.42%$VS_{removal}$ ทำให้ปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อวัน และก๊าซชีวภาพสะสม เท่ากับ 255.70 mL/day และ 10,228.02 mL สัดส่วนของก๊าซมีเทนสูงสุด และสัดส่วนของก๊าซมีเทนเฉลี่ย เท่ากับ 60.21 % และ 59.10 % ตามลำดับ รวมถึง

ให้ผลผลิตของก๊าซมีเทนจำเพาะ เท่ากับ 0.3977 $mLCH_4/kgVS_{added}$ เมื่อศึกษาผลของการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ด้วยกระบวนการ BMP Test เมื่อเปรียบเทียบวัสดุหมักแต่ละส่วนได้แก่ ต้น ใบ เปลือก และซังของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์หมักร่วมกับกากตะกอนมูลสุกรที่อัตราส่วน (S/I) เท่ากับ 80:20 gVS L^{-1} ได้ผลการศึกษาว่า ซังข้าวโพดมีศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพดีที่สุดมีค่าเท่ากับ 265.0 m^3/ton และมีศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน 142.22 m^3/ton

ส่วนที่ 3 ผลของการประเมินปริมาณการผลิตไฟฟ้าโดยใช้ก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ โดยวัตถุดิบ ต้น ใบ เปลือก และซัง ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ โดยมีผลของศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพดังนี้ คือ 9.46, 162.25, 139.72 และ 265.05 $m^3/ton_{maize\ residues}$ เมื่อนำมาประเมินการผลิตไฟฟ้าโดยใช้ผลก๊าซชีวภาพที่สูงสุดของซังข้าวโพด 265.05 $m^3/ton_{maize\ residues}$ มาคิดอัตราการทดแทนไฟฟ้าที่ 0.71 kWh และ 1.40 kWh ได้ปริมาณการผลิตไฟฟ้าโดยใช้ปริมาณก๊าซชีวภาพดังนี้ คือ 188.18 kWh/ton และ 263.46 kWh/ton

ส่วนที่ 4 ผลของประเมินการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2 Emission) จากกระบวนการการผลิตไฟฟ้าโดยใช้ก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ผลจากการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง 265.05 $m^3/ton_{maize\ residues}$ มีปริมาณมีเทนในก๊าซชีวภาพ 59.10 % ค่าความร้อนของมีเทน 21.6 MJ/m^3 จะได้ปริมาตรของก๊าซมีเทนทั้งหมดเท่ากับ 126.88 $m^3/ton_{maize\ residues}$ โดยปริมาตรของก๊าซมีเทนที่ปล่อยออกสู่บรรยากาศ 2.42 $m^3CH_4/ton_{maize\ residues}$ และมีปริมาณพลังงานที่ได้จากก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ 2,688.43 $MJ/ton_{maize\ residues}$ เมื่อใช้ก๊าซชีวภาพในการผลิตไฟฟ้าการลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากการผลิตไฟฟ้า มีค่าเท่ากับ 147.94 $kgCO_2eq/ton_{maize\ residues}$ การเปลี่ยนเศษวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เพื่อเป็นพลังงานด้วยกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ สามารถลดคาร์บอนมากถึง 1.04 ตันต่อตันของวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดเลี้ยงสัตว์

ข้อเสนอแนะ

1. การบดย่อยวัตถุดิบในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพควรทำให้วัตถุดิบมีขนาดเล็กที่สุดจะช่วยให้การย่อยสลายได้ดีขึ้น

2. การผลิตพลังงานทดแทนจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร สามารถดำเนินการได้จริง และมีความเป็นไปได้ในการช่วยลดปริมาณคาร์บอนเหลือทิ้ง ดังนั้นควรมีการสร้างพื้นที่นำร่องในการพิจารณาในการผลิตพลังงานทดแทนจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร และทำการวิเคราะห์พัฒนาเป็นชุมชนคาร์บอนต่ำต่อไป

3. โดยปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ประเมินได้สามารถใช้เป็นแนวทางในการเลือกใช้วัตถุดิบสำหรับใช้ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ แต่ต้องคำนึงถึงอัตราการผลิตไฟฟ้าที่แท้จริงก่อนนำไปใช้งาน

4. งานวิจัยนี้ทำการศึกษาศักยภาพของวัตถุดิบที่นำมาผลิตพลังงานทดแทนและประเมินศักยภาพการผลิตกระแสไฟฟ้า ดังนั้นไม่ได้มีการประเมินต้นทุนการผลิตไฟฟ้าสำหรับโรงไฟฟ้าที่ใช้วัสดุชีวมวลเป็นเชื้อเพลิง ดังนั้นสำหรับผู้ประกอบการหรือผู้ที่สนใจในการผลิตไฟฟ้าโดยใช้วัสดุเหลือทิ้งจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เป็นเชื้อเพลิง ต้องทำการศึกษาข้อมูลด้านการลงทุนอื่น ๆ เพิ่มเติม อาทิ ต้นทุนการขนส่งเชื้อเพลิง ต้นทุนโรงไฟฟ้า ขึ้นอยู่กับขนาดกำลังผลิต ต้นทุนการจัดการด้านสิ่งแวดล้อม ต้นทุนด้านการรับซื้อไฟฟ้า เป็นต้น

5. ระบบควรมีการศึกษาการนำกากตะกอนที่เกิดจากระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์ต่อในด้านอื่น ๆ เช่น การผลิตปุ๋ยชีวภาพ หรือ การนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลทั้งอัดเม็ดหรืออัดแท่ง เป็นต้น เพื่อเป็นการจัดการวัสดุเหลือทิ้งของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์อย่างครบวงจร

บรรณานุกรม

Akindele O., Kamoru B.And Et.Al., 2018. **Biogas Production From Anaerobic Co–Digestion Of Corn Cobs, Pig And Poultry Droppings.** ABUAD Journal Of Engineering Research And Development (AJERD) ISSN: 2645-2685. Volume 1, Issue 2, 273-282.

Al Seadi, T., And Holm Nielsen J., 2014. **Utilization Of Waste From Food And Agriculture: Solid Waste: Assessment, Monitoring And Remediation**. Waste Management Series 4. ELSEVIER; ISBN 0080443214, 735-754.

American Public Health Association., 2017. **American Water Worksassociation, And Water Environment Federation: Standard Methods For The Examination Of Water And Wastewater,**^{23th} Ed.;:Washingtion, DC, 2017.

Annop N., 2018. **Final Report Of Evaluation Of Technology And Potential Of Agricultural Waste And Energy Crop For Biogas Production In Thailand**. Pilot Plant Development And Training Institute, National Research Council Of Thailand, Pp.1-67. (In Thai)

APHA, AWWA, WEF., 2017. **Standard Methods For The Examination Of Water And Wastewater**, (23nd Ed.). Washington, DC: American Public Health Association; American Water Works Association; Water Environment Federation.

Arif, D. Et Al., 2016. **Enhanced Electricity Production From Rice Straw.** Energy Procedia Volume 142, December 2017, Pages 271-277.

Ayhan, D., Osman, T., And Durmas, K., 2016. **Biogas Production From Municipal Sewage Sludge (Mss)**. Journal Of Energy Sources. 38 (20), 3027–3033.

Benedikt H., And Et.Al., 2020. **Biomethane Potential Test: Influence Of Inoculum And The Digestion System.** Applied Sciences. 2020, 10, 2589; Doi:10.3390/App10072589

Bolzonella, D., Fatone, F., Pavan, P. And Cecchi, F., 2015. **Anaerobic Fermentation Of Organic Municipal Solid Wastes For The Production Of Soluble Organic Compounds.** Industrial & Engineering Chemistry Research. 44 (10), 3412–3418.

Cai, J., He, P., Wang, Y., Shao, L., And Lu, F., 2016. **Effects And Optimization Of The Use Of Biochar In Anaerobic Digestion Of Food Wastes.** Waste Management. Res. 34,409–416.

Chanokphon Wan., 2015. **Biogas Production From Combined Fermentation Of Pretreatment Corn Plants Together With Glycerol Waste.** National Academic Conference, Kasetsart University. The 9th Kamphaengsaen Campus 1837.

Chayanon S. And Et.Al., 2019. **Biogas Production From Industrial Effluents.** Biofuels: Alternative Feedstocks And Conversion Processes For The Production Of Liquid And Gaseous Biofuels # 2019 Elsevier Inc. All Rights Reserved.

Chayanon, S., And Et. Al., 2019 **Anaerobic Digestion Of Hydrothermally -Pretreated Lignocellulosic Biomass: Influence Of Pretreatment Temperatures, Inhibitors And Soluble Organics On Methane Yield.** Bioresource Technology. Bioresource Technology 284, 128–138.

Chen, C., Zheng, D., Liu, Deng, L., Long, Y., And Fan, Z., 2015. **Continuous Dry Fermentation Of Swine Manure For Biogas Production.** Waste Management. 38, 436-442.

D.K. Tetteh And Et. Al., 2017. **Biochemical Methane Potential (BMP) Of Miscanthus Fuscus For Anaerobic Digestion.** International Journal Of Scientific And Research Publications, Volume 7, Issue 12, December 2017 .ISSN 2250-3153.

Dalkilic, K., 2015. **Biogas Production From Chicken Manure At Different Organic Loading Rate In Mesophillic–Thermophillic Temperature Two-Stage.** Bioscience And Bioengineering. 120. P. 315-322.

E. K. Tetteh And Et Al., 2017. **Biochemical Methane Potential (BMP) Of Miscanthus Fuscus For Anaerobic Digestion.** International Journal Of Scientific And Research Publications, Volume 7, Issue 12, December 2017 .ISSN 2250-3153.

Eggleston, H.S., Buendia, L., Miwa, K., Ngara, T. And Tanabe, K., (Eds), 2016, **Ipcc Guidelines For National Greenhouse Gas Inventories, The National Greenhouse Gas Inventories Programme, Institute For Global Environmental Strategies (IGES)**, Kanagawa, **20** P.

Eze J. I., And Ojike O., 2012. **Anaerobic Production Of Biogas From Maize Wastes. International**. Journal Of The Physical Sciences Vol. 7(6), Pp. 982 - 987, DOI: 10.5897/IJPS11.1519. Academic Journals. ISSN 1992 – 1950.

Fdez, G., Álvarez, G., Sales, D., And Romero, G., 2012. **Dry-Thermophilic Anaerobic Digestion Of Organic Fraction Of Municipal Solid Waste: Methane Production Modeling**. Waste Management 32 (3), 382–388.

Feodorov, V. Modern., 2016. **Technologies Of Treatment And Stabilization For Sewage Sludge From Water Treatment** Plant. Agric. Agric. Sci. Procedia 2016, 10, 417–430.

Haipeng Xu A,B., 2019. **Methane Production From The Anaerobic Digestion Of Substrates From Corn Stover Differences Between The Stem Bark, Stem Pith, And Leaves.** Science Of The Total Environment 694 133641.

Hartung C. And Et. Al., 2020. **Suitability Of Paludiculture Biomass As Biogas Substrate Biogas Yield And Long-Term Effects On Anaerobic Digestion** Renewable Energy 159 (2020) 64-71

Holm-Nielsen, J.B., Seadi, T.A., And Oleskowicz-Popiel, P., 2019. **The Future Of Anaerobic Digestion And Biogas Utilization**. Bioresource Technology. Vol. 100.Pp. 5478-5484.

Iheanyi, O, O.; Ogunnusi, T.; Et Al., 2019. **Utilization Of Food Wastes For Sustainable Development**. Electronic Journal Of Environmental, Agricultural And Food Chemistry. January 2009. ISSN: 1579-4377.

Illmer, P., And Gstraunthaler, G., 2019. **Effect Of Seasonal Changes In Quantities Of Biowaste On Full Scale Anaerobic Digester Performance**. Waste Management. 29 (1), 162–167.

Jameson Filer, Huihuang H. Ding And Et.Al., 2019**. Biochemical Methane Potential (BMP) Assay Method For Anaerobic Digestion** Research. School Of Engineering, University Of Guelph, 50 Stone Road E., Guelph, ON N1G 2W1, Canada. Water 2019, 11, 921.

Jameson, F. And Et. Al., 2019. **Biochemical Methane Potential (BMP) Assay Method For Anaerobic Digestion Research.** Water 2019,11, 921;Doi:10.3390W11050921.

Jimmy Anderson M.-R. And Et.Al., 2019. **Effect Of Co-Digestion Of Milk-Whey And Potato Stem On Heat And Power Generation Using Biogas As An Energy Vector: Techno-Economic Assessment.** Applied Energy 241 (2019) 504–518

Jiying Zhu, Caixia Wan, And Yebo Li., 2010. **Enhanced Solid-State Anaerobic Digestion Of Corn Stover By Alkaline Pretreatment**. Bioresource Technology. 101:7523-7528.

Jutaporn, C., Churat, T., And Jiraporn, P., 2018. **Determining Optimization Of Factors Affecting Biogas Production By Co-Digestion Of Sweet Corncob Waste With Wastewater Using Response Surface Methodology.** Journal Of Renewable Energy And Smart Grid Technology. 13 (1), January - June 2018

Lalita Sinchai., 2017. **Potential Of Biogas Production From Co-Digestion Of The Domestic Wastewater And Food Waste**. Thesis. Master Of Science In Environmental Management. Prince Of Songkhla University.

M.S. Fountoulakis,I. Petousi, T. Manios., 2010**. Co-Digestion Of Sewage Sludge With Glycerol To Boost Biogas Production**. Waste Management 30: 1849–1853.

Mahar, R.B., N.D., Coverting Jamshoro, Pakistan., 2017. **Economic And Environmental Feasibility And Recommendation On Policies For The Pilot Scale Project Of Biogas Plant**. Institute Of Environmental Engineering And Management Mehran University Of Engineering And Technology. Waste Agricultural Biomass Into Energy Source. Pp. 2-4.

Meixia, Z., Guangminsg, Z., Panyue, Z., Shiyang, F., Shuguang, J., Dan, W., And Wei, F., 2014. **Anaerobic Digestion Of Corn Stovers For Methane Production In A Novel Bionic Reactor.** Bioresource Technology. 166, 606-609.

Metcalf And Eddy., 2014. **Wastewater Engineering: Treatment And Resource Recovery / Metcalf & Eddy I AECOM,** Disposal, Reuse. 4rd, Edition. Mcgraw-Hill, New York.

Michel, S., Stijn, W.H., Van, H., Sander, H., Han, V., And Katleen, R., 2017. **Laccase Enzyme Detoxifies Hydrolysates And Improves Biogas Production From Hemp Straw And Miscanthus**. Bioresource Technology. 244 (1), 597-604.

Nirmala M. And Janya S.A., 2013. **User Manual Estimation Tool For Greenhouse Gas (GHG) Emissions From Municipal Solid Waste (MSW) Management In A Life Cycle Perspective**. This Tool Is Developed Under The Project Of Measurement, Reporting And Verification (MRV) For Low Carbon Development In Asia (FY2013).

Odhner, P.B., Horvath, G.IS., Kabir, H.B.M.M., Schabbauer, H.B.A., And Grontmij., 2012. **Biogas From Lignocellulosic Biomass**. Report SGC 247 The Swedish Gas Center, Pp. 1-20.

P.M. Thanh And Et Al., 2016. **Trace Metal Speciation And Bioavailability In Anaerobic Digestion: A Review**. Biotechnology Advances. Volume 34, Issue 2, March–April 2016, Pages 122-136.

Pakarinen, A., Maijala, P., Stoddard, F.L., Santanen, A., Tuomainen, P., Kymalainen, M., And Viikari, L., 2011. **Evaluation Of Annual Bioenergy Crops In The Boreal Zone For Biogas And Ethanol Production**. Biomass And Bioenergy, Vol. 35, Pp. 3071-3078.

Piyawadee, S., And Alissara R., 2011. **Biological Hydrogen Production From Sweet Sorghum Syrup By Mixed Cultures Using An Anaerobic Sequencing Batch Reactor (ASBR).** International Journal Of Hydrogen Energy. 36, 8765 -8773.

Poschl, M., Ward, S. And Owende, P., 2010. **Evaluation Of Energy Efficiency Of Various Biogas Production And Utilization Pathways**. Applied Energy, 87, 11, Pp. 3305-3321.

Ratanatamskul, C., And Manpetch, P., 2016.**Comparative Assessment Of Prototype Digester Configuration For Biogas Recovery From Anaerobic Co-Digestion Of Food Waste And Rain Tree Leaf As Feedstock**. International Biodeterioration & Biodegradation, (113), 367-37.

Ratanatamskul, C., Onnum, G. And Yamamoto, K., 2016. **A Prototype Single-Stage Anaerobic Digester For Co-Digestion Of Food Waste And Sewage Sludge From High-Rise Building For On-Site Biogas Production**. International Biodeterioration And Biodegradation. 95, 176-180.

Richard E. Speece And Nuri A., 2021. **Two-Phase, Two-Stage, And Single-Stage Anaerobic Process Comparison.** Journal Of Environmental Engineering 127(3)

Sawatdeenarunat, C., Sung, S., And Khanal, S.K., 2017. **Enhanced Volatile Fatty Acids Production During Anaerobic Digestion Of Lignocellulosic Biomass Via Micro-Oxygenation**. Bioresource Technology, 237, 139-145.

Selvam, A., Xu, S., Gu, Y., And Wong, W. C., 2010. **Food Waste Decomposition In Leach Bed Reactor: Role Of Neutralizing Solutions On The Leachate Quality**. Bioresource Technology. 101 (6), 1707–1714.

Sopee, P., And Nutthanicha, S., 2017. **Methane Production Potential From Anaerobic Co-Digestions Of Different Animal Dungs And Sweet Corn Residuals**. Energy Procedia. 138, 943–948.

VDI-4630., 2006. **Fermentation Of Organic Materials: Characterization Of The Substrate, Sampling, Collection Of Material Data, Fermentation Tests**. Verlag Des Vereins Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 92 P.

Venelin H. And Et.Al., 2020. **Biomethane Production Using Ultrasound Pre-Treated Maize Stalks With Subsequent Microalgae Cultivation**. BIOTECHNOLOGY & BIOTECHNOLOGICAL EQUIPMENT 2020, VOL. 34, NO. 1, 800–809

Wanqin, Z., Quanyuan, W. And Et Al., 2014. **Batch Anaerobic Co-Digestion Of Pig Manure With Dewatered Sewage Sludge Under Mesophilic Conditions.** Applied Energy. 128, 175–183.

Wanqin, Z., Quanyuan, W., Shubiao, W., Dandan, Q., Wei, L., Zhuang, Z., And Renjie, D., 2014. **Batch Anaerobic Co-Digestion Of Pig Manure With Dewatered Sewage Sludge Under Mesophilic Conditions**. Applied Energy. 128, 175–183.

William G. Mezzullo, Marcelle C. Mcmanus, And Geoff P. Hammond., 2012. **Life Cycle Assessment Of A Small-Scale Anaerobic Digestion Plant From Cattle Waste**. Applied Energy. 102: 657-664

Wong, M., 2020. **Anaerobic Digestion Of Pig Manure Mixed With Sewage Sludge.** Biological Wastes. 31(3), 223-230.

Xiaolong Wang, Yuanquan Chen, Peng Sui, Wangsheng Gao, Feng Qin, Xia Wu, And Jing Xiong., 2013. **Efficiency And Sustainability Analysis Of Biogas And Electricity Production From A Large-Scale Biogas Project In China: An Energy Evaluation Based On LCA.** Journal Of Cleaner Production. Xxx: 1-12.

Yeqing Li And Et. Al., 2013 **.Evaluating Methane Production From Anaerobic Mono-And Codigestion Of Kitchen Waste, Corn Stover, And Chicken Manure.** Energy & Fuels.

Young, H., Kyung, S., And Richard, E., 2012. **Pre-Acidification In Anaerobic Sludge Bed Process Treating Brewery Wastewater.** Journal Of Bioscience And Bioengineering. 35, 4267-4276.

Yu, H., And Fang, P., 2012. **Acidogenesis Of Dairy Wastewater At Various Ph Levels. Water Science And Technology**. 45 (10), 201–206.

Zangta S. And Et.Al., 2019. **Anaerobic Digestion Of Starch Wastewater: The Effect Of Ph And Oxidation Reduction Potential On The Reactor Performance.** Asian Journal Of Applied Research For Community Development And Empowerment. Vol 3 (2019), No.1

Zieminski, K., And Frac, M., 2012. **Methane Fermentation Process As Anaerobic Digestion Of Biomass: Transformations, Stages And Microorganisms**. African Journal Of Biotechnology, Vol. 11, Pp. 4127-4139.

โฉมศรี ศิริวงศ์., 2558. **The Use And Toxicity Of The Filler Reinforcement In Rubber Industry.** Kku Science Journal. Volume 43, Number 4. Kku Sci. J. 43(4) 579-594 (2015).

ไชยวัฒน์ จวงทอง., 2562. **The System Of Electricity Generation From Biogas Sewage For Community.** วารสารวิทยาลัยบัณฑิตเอเซีย ปีที่ 9 ฉบับพิเศษ (เดือนพฤศจิกายน 2562)

กรมโรงงานอุตสาหกรรม., 2563. **คู่มือการปฏิบัติงานเกี่ยวกับการออกแบบ การผลิต การควบคุมคุณภาพการใช้ก๊าซชีวภาพ (Biogas) สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม**. (พิมพ์ครั้งที่ 1). 75/6 ถนนพระรามที่ 6 แขวงทุ่งพญาไท เขตราชเทวี กรุงเทพฯ 10400.

กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม., 2563. **การบำบัดน้ำเสีย.** [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา : http://www.pcd.go.th/info_serv/water_regain.html. สืบค้นเมื่อวันที่ 28 มิถุนายน 2563.

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน., 2563 **แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก พ.ศ.2561 – 2580 (AEDP2018)** กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ตุลาคม 2563

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน., 2563. **พลังงานชีวมวล.** กลุ่มพลังงานชีวมวล สำนักวิจัยค้นคว้าพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน,

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน., 2564. **โครงการศึกษาและสาธิตการผลิตก๊าซชีวภาพจากชีวมวล.** [ระบบออนไลน์] แหล่งที่มา http://webkc.dede.go.th/Testmax/node/196 (สืบค้นเมื่อวันที่ 10 มกราคม 2564)

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน., 2564. **พลังงานชีวมวล.** กรุงเทพฯ :สำนักถ่ายทอดและเผยแพร่เทคโนโลยี กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน.กระทรวงพลังงาน

กลิ่นประทุม ปัญญาปิง วรวุธ กันอินสรา นุรักษ์ แสนพรหม และเอกราช คำปัญญา., 2555. **ศักยภาพการย่อยสลายให้ก๊าซมีเทนของเศษก้านและใบไม้หลายชนิด.** Journal of Community Development Research 2012; 5(1).

กิตติญา กฤติยรังสิต., 2554. **การวิเคราะห์ต้นทุนและผลตอบแทนของโรงไฟฟ้าก๊าซชีวภาพ.** วิทยานิพนธ์, วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ปีการศึกษา 2554.

กุลธิดา สว่างพล และ คณะ. (2556). การศึกษาความเป็นไปได้ของการผลิตไฟฟ้าโดยใช้ก๊าซชีวภาพจากเซลลูโลส.วารสารวิจัยและพัฒนา มจธ. ปีที่ 36 ฉบับที่ 4 ตุลาคม - ธันวาคม 2556.

คู่มือการลงทุนโรงไฟฟ้าก๊าซชีวภาพจากพืชพลังงาน., 2556. **ศูนย์บริการข้อมูลโครงการศึกษา วิจัยต้นแบบวิสาหกิจชุมชนพลังงานสีเขียวจากพืชพลังงาน (ก๊าซชีวภาพจากพืชพลังงาน).** พิมพ์ครั้งที่ 1 ตุลาคม 2556. พิมพ์ที่ หจก.มิตรภาพการพิมพ์ 1995. เลขที่ 17 ถนนพระรามที่ 1 แขวงรองเมือง เขตปทุมวัน กรุงเทพ 10330

ชนกพร วงษ์วัน., 2558. **การผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมของต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นร่วมกับของเสียกลีเซอรอล Biogas Production From Co-Digestion Of Pretreatedcorn Stalk And Glycerol Waste**. การประชุมวิชาการแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 9 1837.

ฐปน ชื่นบาล และคณะ., 2557.**ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักร่วมของมูลสุกรและหญ้าเนเปียร์หมัก.** ภาควิชาเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่

ดร. สาโรช บุญยกิจสมบัติ., 2563 ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. **พลังงานทดแทนก๊าซชีวภาพ (Biogas)** แหล่งที่มา:http://digital.lib.kmutt.ac.th/magazine/issue8/article1.html. สืบค้นเมื่อวันที่ 22 มิถุนายน 2563

ธเนศ ไชยชนะ และคณะ., 2562 **การลดปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการกำจัดวัสดุเหลือทิ้ง ของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ โดยการแปรรูปเป็นพลังงานทดแทน.** รายงานการวิจัย โครง

การศึกษากระบวนการที่เหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซชีวภา
จากวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง และการประเมินการปลดป
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จากการผลิตไฟฟ้า

ณัฐวรรณ สืบนันตา

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
มหาวิทยาลัยแม่โจ้
พ.ศ. 2564

การวิจัย การพัฒนาเศรษฐกิจจากรากฐานความหลากหลายทางชีวภาพ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้. 2562

ธนวรกฤต โอฬารธนพร และคณะ., 2562.**การประเมินก๊าซเรือนกระจกและแนวทางการลดก๊าซเรือนกระจกของเทศบาลตาบลแม่ทะ จังหวัดลำปาง.** Industrial Technology Lampang Rajabhat University Journal.วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปางปีที่ 13 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม 2563

ธัชกร และคณะ., 2563 **การศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียภาคอุตสาหกรรม** วารสารวิจัยพลังงาน ปี ที่11 ฉบับที่1 (มกราคม-มิถุนายน) 2557

ธัญพิชชา บุญบาง, รจพรรณ นิรัญศิลป์ และ คณะ., 2559. **การผลิตก๊าซชีวภาพจากน้าเสียจากกระบวนการผลิตเส้นขนมจีนโดยการบ้าบัดน้ำเสียจากจุลินทรีย์ (อีเอ็ม).** การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 12 .คณะวิทยาศาสตร์ ร่วมกับ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ “อุตสาหกรรม-พลังงาน เพื่ออนาคตประเทศไทย”ปี 2559

บริษัท เนทเวิร์คกิ้ง เทคโนโลยี., **ระบบผลิตแก๊สชีวภาพแบบถังกวนสมบูรณ์แบบไม่ใช้อากาศ และระบบผลิตแก๊สชีวภาพแบบแบบตกตะกอนแบบไร้อากาศไหลขึ้น.** [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา : http://www.fristweb. net/handsite/biogas/cstr.html. สืบค้นเมื่อวันที่ 25 มิถุนายน 2563.

บริษัท กรีนไลฟ์ เทคโนโลยี., **ระบบแบบตกตะกอนแบบไร้อากาศไหลขึ้น**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา : http://www.greenlife.co.th/news2.php? topic=24. สืบค้นเมื่อวันที่ 25 มิถุนายน 2563.

ปริพัฒน์ จึงชัยชนะ และสุภวัตน์ วิวรรธ์ภัทรกิจ., 2555. **ประเมินศักยภาพการผลิตไฟฟ้าด้วย Biogas จากขยะกรณีศึกษา ตลาดไท.** วิจัยพลังงาน, 9(1):73-83.

ปิยชาติ ศิลปะสุวรรณ., 2557. **เรื่อง ขยะมูลฝอยชุมชน ปัญหาใหญ่ประเทศกำลังเผชิญ (Municipal Solid Waste : The Significant Problem Of Thailand)** บทความวิชาการ. ปฏิบัติการกลุ่มงานติดตามและประมวลผลงานของวุฒิสภา สำนักวิชาการ สำนักงานเลขาธิการวุฒิสภา ปีที่ 4 ฉบับที่ 7 เดือนเมษายน 2557.

พฤกษ์ อักกะรังสี และ วราวุธ วิลาวรรณ., 2556. **การผลิตก๊าซชีวภาพจากการย่อยสลายร่วมของหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 และมูลไก่ไข่โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์** มหาวิทยาลัยเชียงใหม่/เชียงใหม่.

พัชรี อินธนู. จิตติยา แทนคำ., 2560. **การย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้อากาศของสารอินทรีย์ประเภทเศษอาหารเข้มข้นในกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพ.** วารสารวิชาการและวิจัย มทร.พระนคร. Vol 11. No 1. (2017): มกราคม - มิถุนายน 2560.

พัทธกมล สมบุตร., 2561. **ศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากผักตบชวาผสมกับกากเบียร์โดย ถังหมักไร้อากาศสองขั้นตอน** รายงานการวิจัย มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม ปี 2561

มูลนิธิเกษตรรักษ์สิ่งแวดล้อม., 2560. **ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ สถานการณ์/การเผาและแนวทางจัดการเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร.มูลนิธิเกษตรรักษ์สิ่งแวดล้อม (ประเทศไทย)**. [ระบบออนไลน์]. http://www.aecth.org/upload/13823/Q8ru0PsGgR.pdf. สืบค้นเมื่อวันที่ 25 มกราคม 2564.

รพีพัฒน์ และคณะ., 2560. **นโยบายพลังงานทดแทนเพื่อความมั่นคงของชาติ Renewable Energyfor National Security.** เอกสารทบทวนเชิงนโยบายด้านความมั่นคง (NDC Security Review) วิทยาลัยป้องกันราชอาณาจักร สถาบันวิชาการป้องกันประเทศ.ฉบับที่ 1 / มกราคม 2560

ลวรรณ ไชยทนุ., 2552. **การวิเคราะห์ประสิทธิภาพและเศรษฐศาสตร์ของการใช้ระบบหมักแบบไร้อากาศแบบถังกวนต่อเนื่องในสภาวะเทอร์โมฟิลิก เพื่อบำบัดของเสียจากฟาร์มสุกร**. วิทยานิพนธ์. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. บัณฑิตวิทยาลัย. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

วชิรา ดาวสุด และคณะ., 2561 **Biogas Production And Modeling Of UASB With Microbial Immobilization Of Organic Waste** รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้ .มหาวิทยาลัยบูรพา 2561.

วัฒนณรงค์ มากพันธ์ และสมพงศ์ โอทอง., 2019. **Greenhouse Gas Emissions from Municipal Solid Waste Management Case Study: Nakhon Si Thammarat Municipality Landfill.** Research Article Received: September 12, 2019;

ศศิธร ใสปา, รจพรรณ นิรัญศิลป์ และคณะ., 2563. **การศึกษาระยะเวลาการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวาน**

ด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง วารสารวิชาการโรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า CRMA Journalปีที่ 18 (2563) VOL.18 (2020)

ศศิธร ใสปา., 2562. **ต้นแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง.** วิทยานิพนธ์. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน,มหาวิทยาลัยแม่โจ้.

สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานมหาวิทยาลัยเชียงใหม่., 2561. **เทคโนโลยีก๊าซชีวภาพจากพืชพลังงาน** (CMU-CSTR Technology). [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา http://www.erdi.cmu.ac.th/m/index.php. สืบค้นเมื่อวันที่ 22 มกราคม 2564.

สุเมธ ไชยประพัทธ์ และคณะ., 2558. โครงการ **การประเมินศักยภาพการเพิ่มอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการหมักร่วมและอัตราการทดแทนเชื้อเพลิงไม้ฟืนของสหกรณ์ผลิตยางแผ่นรมควัน (ระยะที่ 2).**รายงานฉบับสมบูรณ์. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.)

สุเมธ ไชยประพัทธ์ และคณะ., 2560. **การผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษเหลือกล้วยเล็บมือนางด้วยระบบหมักความเข้มข้นสูงสำหรับการผลิตกล้วยอบ.**รายงานโครงการวิจัยสมบูรณ์มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่ ปี 2560

องอาจ ส่องสี., 2555. **การผลิตก๊าซชีวภาพเป็นแหล่งพลังงานทดแทนน้ำมันเชื้อเพลิงเครื่องยนต์เล็กเพื่อการเกษตรสำหรับเกษตรกรรายย่อย.** รายงานฉบับสมบูรณ์กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, คลินิกเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาน่าน จ.น่าน, 77 หน้า

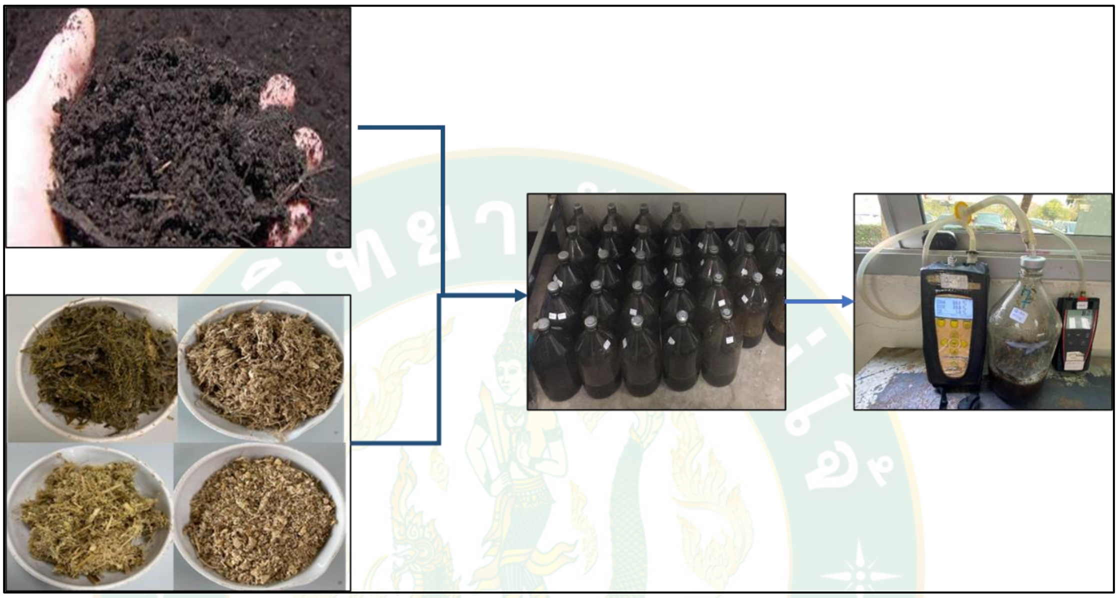
อภิชาติ ศรีภัย., 2554. **ผลของระยะเวลากักเก็บต่อการสร้างกรดไขมันระเหยได้ จากต้นข้าวโพดหมัก โดยจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักของโคนม** การประชุมวิชาการ มหาวิทยาลัยขอนแก่นประจำ ปี 2554“การพัฒนาอนาคตชนบทไทย : ฐานรากที่มั่นคงเพื่อการพัฒนาประเทศอย่างยั่งยืน” 27-29 มกราคม 2554

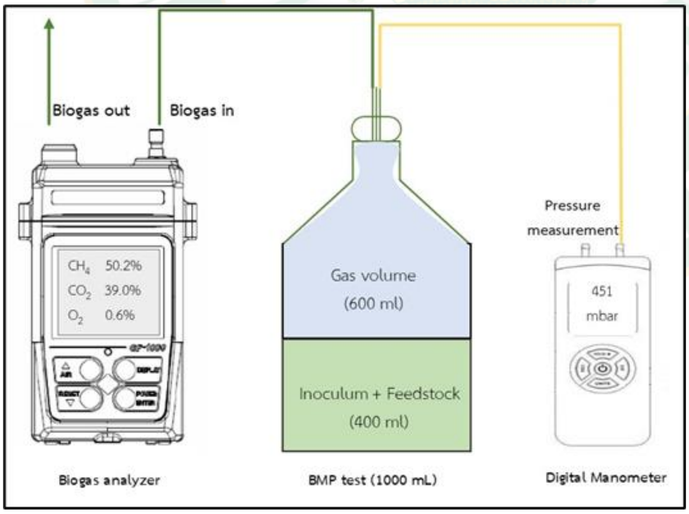
ภาคผนวก

ภาคผนวก ก

การผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง

ด้วยกระบวนการหมักแบบไร้อากาศแบบ BMP Test ขนาด 1,000 mL





ภาคผนวก ข

คุณลักษณะหลังสิ้นสุดกระบวนการของการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง

ตารางที่ 35 คุณลักษณะหลังสิ้นสุดกระบวนการของการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง

Characteristic	Unit	Substrates: inoculum															
		Maize Stalks				Maize Leaves				Maize Husks				Maize Cobs			
		50:50	60:40	70:30	80:20	50:50	60:40	70:30	80:20	50:50	60:40	70:30	80:20	50:50	60:40	70:30	80:20
$COD_{removal}$	%	51.81	54.61	57.35	12.60	44.01	51.48	61.37	62.09	61.34	61.84	75.17	61.02	54.70	65.27	67.98	80.95
$VS_{removal}$	%	79.97	72.92	26.60	20.78	89.64	82.15	87.59	65.93	88.93	74.08	86.77	63.81	86.18	87.86	86.43	90.42
Daily biogas	ml/day	164	133	24	37	81	92	214	231	171	113	168	190	156	170	158	256
Cumulative methane production	ml_n/gVS	6,541	6,643	951	1,495	3,255	4,607	8,554	9,253	6,834	5,653	6,709	7,599	6,246	8,514	6,321	10,288
$CH_{4\ average}$	%	59.30	63.20	11.10	10.50	59.10	56.26	59.60	59.10	59.00	50.20	56.10	56.00	55.80	55.90	46.60	53.70
CH_4 yield	$m^3\ CH_4$/ton VS_{add}	646.3	466.8	7.6	11.4	320.9	316.5	369.4	396.5	289.0	315.3	272.5	308.2	580.8	528.8	213.3	397.7
Biogas yield	m^3/tonVS_{add}	1,090.2	738.1	68.9	108.4	542.5	511.9	619.8	670.5	1,138.9	628.2	486.2	550.6	1,040.9	946.0	458.1	741.2

Characteristic	Unit	Substrates: inoculum															
		Maize Stalks				Maize Leaves				Maize Husks				Maize Cobs			
		50:50	60:40	70:30	80:20	50:50	60:40	70:30	80:20	50:50	60:40	70:30	80:20	50:50	60:40	70:30	80:20
pH_{Inlet}	-	7.21	7.83	6.84	6.78	8.24	8.26	6.23	6.23	7.83	7.03	7.07	7.07	8.06	7.95	6.73	6.73
pH_{Outlet}	-	6.17	7.29	4.83	4.88	7.24	7.31	8.28	5.38	7.15	6.15	8.43	7.68	7.33	7.4	8.43	8.2
COD removal	%	51.81	54.61	57.35	12.6	44.01	51.48	61.37	62.09	61.34	61.84	75.17	61.02	54.7	65.27	67.98	80.95
VS removal	%	79.97	72.92	26.6	20.78	89.64	82.15	87.59	65.93	88.93	74.08	86.77	63.81	86.18	87.86	86.43	90.42
VFA/ALK_{Inlet}		0.3	0.3	0.33	0.4	0.13	0.13	0.2	0.4	0.23	0.39	0.13	0.3	0.19	0.28	0.19	0.39
VFA/ALK_{Outlet}		0.08	0.12	0.93	1.73	0.09	0.1	0.14	0.73	0.19	0.28	0.18	0.37	0.18	0.24	0.15	0.25
Daily biogas	ml/day	164	133	24	37	81	92	214	231	171	113	168	190	156	170	158	256
Cumulative methane production	ml_n/gVS	6,541	6,643	951	1,495	3,255	4,607	8,554	9,253	6,834	5,653	6,709	7,599	6,246	8,514	6,321	10,288
CH_4 average	%	59.3	63.2	11.1	10.5	59.1	61.8	59.6	59.1	59	50.2	56.1	56	55.8	55.9	46.6	53.7
CH_4 yield	$m^3CH_4/ton\ VS_{add}$	646.3	466.8	7.6	11.4	320.9	316.5	369.4	396.5	289	315.3	272.5	308.2	580.8	528.8	213.3	397.7
Biogas yield	$m^3/tonVS_{add}$	1,090.20	738.1	68.9	108.4	542.5	511.9	619.8	670.5	1,138.90	628.2	486.2	550.6	1,040.90	946	458.1	741.2

ภาคผนวก ค

การคำนวณศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ

การคำนวณขาเข้าของ (Biomethane Potential, BMP Test)

กำหนดให้ Seed มีคามเข้มข้นที่ 1.5 -2.0 %

กำหนดให้ Seed มีคามเข้มข้นที่ 1.5 -2.0 %

Vs Sample / Vs Seed = อัตราส่วนที่กำหนด

Vs Sample*ml Sample / Vs seed * ml Seed

อัตราส่วนที่กำหนด
1.0
1.5
2.3
4.0

คำนวณ	หน่วย		
Seed	%of400ml	1.5	2
	ml	400	400
	g VS Seed	6	8
Seed			
	mg/L	56910	56910
ใช้ Seed	ml	105.43	140.57

อัตราส่วน	sample	seed		
	1	1	6	6
	1.5	1	9	6
	2.3	1	13.8	6
	4	1	24	6

ratio 1 to 1							
seed	mg/L			g or ml	3 ซ้ำ	เติมสารอาหาร	
mg/L	56,910	1000	6	105.43			
blank				294.57			
sample							
ใบ	241,976	1000	6	24.80	74	270	811
ต้น	87,270	1000	6	68.75	206	226	679
เปลือก	253,748	1000	6	23.65	71	271	814
ซัง	357,613	1000	6	16.78	50	278	835

ratio 2.3 to 1						
seed	mg/L			g or ml	3ซ้ำ	เติมสารอาหาร
mg/L	56,910	1000	6	105.43		
						6
sample						
ใบ	241,976	1000	13.8	57.03	171	238
ต้น	87,270	1000	13.8	158.13	474	137
เปลือก	253,748	1000	13.8	54.38	163	241
ซัง	357,613	1000	13.8	38.59	116	256

ratio 1.5 to 1							
seed	mg/L			g or ml		เติมสารอาหาร	
mg/L	56,910	1000	6	105.43			
sample							
ใบ	241,976	1000	9	37.19	112	258	773
ต้น	87,270	1000	9	103.13	309	192	576
เปลือก	253,748	1000	9	35.47	106	260	779
ซัง	357,613	1000	9	25.17	76	270	809

ratio 4 to 1						
seed	mg/L			g or ml		เติมสารอาหาร
mg/L	56,910	1000	6	105.43		
sample						
ใบ	241,976	1000	24	99.18	298	196
ต้น	87,270	1000	24	275.01	825	20
เปลือก	253,748	1000	24	94.58	284	200
ซัง	357,613	1000	24	67.11	201	228

	TS	99,698	ปริมาณของแข็งทั้งหมด		สรุปBMPต้นข้าวโพด S/I 50:50	
	VS	87,270	ปริมาณของแข็งระเหยง่าย			
	ปริมาณที่ใช้	68.75	g			
ตารางคำนวน						
	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (ml_n)	% มีเทนเฉลี่ย	VS added g	1 ton ตย มี VS เท่ากับ (ton)	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ต่อตัน VS $m^3/tonVS_{added}$	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ต่อตันตัวอย่าง (m^3/tonตัวอย่าง)
ซ้ำ 1	6,717	58.8	6.0	0.0873	1119	97.7
ซ้ำ 2	6,130	59.6	6.0	0.0873	1022	89.2
ซ้ำ 3	6,777	59.5	6.0	0.0873	1130	98.6
เฉลี่ย	6,541	59.3	6.0	0.0873	1090	95.1
หมายเหตุ :	1 ml/gVS เท่ากับ 1 m^3/tonVS					
	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม	% มีเทน	VS added g	1 ton ตย มี VS เท่ากับ	ศักยภาพการผลิต $m^3/kgVS_{added}$	ปริมาณก๊าซที่ผลิตได้ (m^3/tonตัวอย่าง)
ซ้ำ 1	6,717	58.8	6.0	0.0873	1.119	97.7
ซ้ำ 2	6,130	59.6	6.0	0.0873	1.022	89.2
ซ้ำ 3	6,777	59.5	6.0	0.0873	1.130	98.6
เฉลี่ย	6,541	59.3	6.0	0.0873	1.090	95.1
	% มีเทน	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ		ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน *		
	ค่าเฉลี่ยตลอดการทดลอง	ต่อตันของแข็งระเหย $m^3/tonVS_{added}$	ต่อตันตัวอย่าง (m^3/tonตัวอย่าง)	ต่อตันของแข็งระเหย m^3 CH_4/ton VS_{added}	ต่อตันตัวอย่าง m^3 CH_4/ton ตัวอย่าง	ต่อตันของแข็งระเหย m^3CH_4/kg VS_{added}
	59.3	1090.2	95.1	646.3	56.4023	0.6463
	หมายเหตุ : *คำนวนจากเปอร์เซนต์มีเทนเฉลี่ย					

สรุปBMP ใบข้าวโพด S/I 50:50

TS	273,627	ปริมาณของแข็งทั้งหมด	
VS	241,976	ปริมาณของแข็งระเหยง่าย	
ปริมาณที่ใช้	24.80	g	

ตารางคำนวน

	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (ml_n)	% มีเทนเฉลี่ย (50วันของการทดลอง)	VS added (g)	1 ton ตย มี VS เท่ากับ (ton)	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ต่อตัน VS (m^3/tonVS$_{added}$)	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ต่อตันตัวอย่าง (m^3/tonตัวอย่าง)
ซ้ำ 1	3,366	60.1	6.0	0.2420	561	135.7
ซ้ำ 2	3,200	58.6	6.0	0.2420	533	129.0
ซ้ำ 3	3,199	58.8	6.0	0.2420	533	129.0
เฉลี่ย	3,255	59.1	6.0	0.2420	542	131.3

หมายเหตุ : 1 ml/gVS เท่ากับ 1 m^3/tonVS

	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม	% มีเทนเฉลี่ย	VS added (g)	1 ton ตย มี VS เท่ากับ	ศักยภาพการผลิต (m^3/kgVS$_{added}$)	ปริมาณก๊าซที่ผลิตได้ (m^3/tonตัวอย่าง)
ซ้ำ 1	3,366	60.1	6.0	0.2420	0.561	135.7
ซ้ำ 2	3,200	58.6	6.0	0.2420	0.533	129.0
ซ้ำ 3	3,199	58.8	6.0	0.2420	0.533	129.0
เฉลี่ย	3,255	59.1	6.0	0.2420	0.5425	131.3

% มีเทน ค่าเฉลี่ยตลอดการทดลอง	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ต่อตันของแข็งระเหย (m^3/tonVS$_{added}$)	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ต่อตันตัวอย่าง (m^3/tonตัวอย่าง)	ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน * ต่อตันของแข็งระเหย (m^3 CH_4/ton VS$_{added}$)	ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน * ต่อตันตัวอย่าง (m^3 CH_4/ton ตัวอย่าง)	ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน * ต่อตันของแข็งระเหย (m^3CH_4/kg VS$_{added}$)
59.1	542.5	131.3	320.9	77.6	0.3209

หมายเหตุ : *คำนวนจากเปอร์เซนต์มีเทนเฉลี่ย

สรุปBMP เปลือกข้าวโพด S/I 50:50

TS	269,997	ปริมาณของแข็งทั้งหมด	
VS	253,748	ปริมาณของแข็งระเหยง่าย	
ปริมาณที่ใช้	23.65	g	

ตารางคำนวน

	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (ml_n)	% มีเทนเฉลี่ย (50วันของการทดลอง)	VS added (g)	1 ton ตย มี VS เท่ากับ (ton)	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ต่อตัน VS (m^3/tonVS$_{added}$)	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ต่อตันตัวอย่าง (m^3/tonตัวอย่าง)
ซ้ำ 1	6,744	59.3	6.0	0.2537	1124	285.2
ซ้ำ 2	6,792	58.7	6.0	0.2537	1132	287.2
ซ้ำ 3	6,965	59.1	6.0	0.2537	1161	294.6
เฉลี่ย	6,834	59.0	6.0	0.2537	1139	289.0

หมายเหตุ : 1 ml/gVS เท่ากับ 1 m^3/tonVS

	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม	% มีเทนเฉลี่ย	VS added (g)	1 ton ตย มี VS เท่ากับ	ศักยภาพการผลิต (m^3/kgVS$_{added}$)	ปริมาณก๊าซที่ผลิตได้ (m^3/tonตัวอย่าง)
ซ้ำ 1	6,744	59.3	6.0	0.2537	1.124	285.2
ซ้ำ 2	6,792	58.7	6.0	0.2537	1.132	287.2
ซ้ำ 3	6,965	59.1	6.0	0.2537	1.161	294.6
เฉลี่ย	6,834	59.0	6.0	0.2537	1.1389	289.0

% มีเทน ค่าเฉลี่ยตลอดการทดลอง	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ต่อตันของแข็งระเหย (m^3/tonVS$_{added}$)	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ต่อตันตัวอย่าง (m^3/tonตัวอย่าง)	ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน * ต่อตันของแข็งระเหย (m^3 CH_4/ton VS$_{added}$)	ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน * ต่อตันตัวอย่าง (m^3 CH_4/ton ตัวอย่าง)	ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน * ต่อตันของแข็งระเหย (m^3CH_4/kg VS$_{added}$)
59.0	1138.9	289.0	672.3	170.6	0.6723

หมายเหตุ : *คำนวนจากเปอร์เซนต์มีเทนเฉลี่ย

TS	380,621	ปริมาณของแข็งทั้งหมด		สรุปBMP ซังข้าวโพด S/I 50:50
VS	357,613	ปริมาณของแข็งระเหยง่าย		
ปริมาณที่ใช้	16.78	g		

ตารางคำนวน

	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (ml_n)	% มีเทนเฉลี่ย (50วันของการทดลอง)	VS added g	1 ton ตย มี VS เท่ากับ (ton)	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ต่อตัน VS $m^3/tonVS_{added}$	ต่อตันตัวอย่าง (m^3/tonตัวอย่าง)
ซ้ำ 1	6,022	55.6	6.0	0.3576	1004	358.9
ซ้ำ 2	6,359	55.7	6.0	0.3576	1060	379.0
ซ้ำ 3	6,356	56.1	6.0	0.3576	1059	378.8
เฉลี่ย	6,246	55.8	6.0	0.3576	1041	372.2

หมายเหตุ : 1 ml/gVS เท่ากับ 1 m^3/tonVS

	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม	% มีเทนเฉลี่ย	VS added g	1 ton ตย มี VS เท่ากับ	ศักยภาพการผลิต $m^3/kgVS_{added}$	ปริมาณก๊าซที่ผลิตได้ (m^3/tonตัวอย่าง)
ซ้ำ 1	6,022	55.6	6.0	0.3576	1.004	358.9
ซ้ำ 2	6,359	55.7	6.0	0.3576	1.060	379.0
ซ้ำ 3	6,356	56.1	6.0	0.3576	1.059	378.8
เฉลี่ย	6,246	55.8	6.0	0.3576	1.0409	372.2

% มีเทน ค่าเฉลี่ยตลอดการทดลอง	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ต่อตันของแข็งระเหย $m^3/tonVS_{added}$	ต่อตันตัวอย่าง (m^3/tonตัวอย่าง)	ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน * ต่อตันของแข็งระเหย m^3 CH_4/ton VS_{added}	ต่อตันตัวอย่าง m^3 CH_4/ton ตัวอย่าง	ต่อตันของแข็งระเหย m^3CH_4/kg VS_{added}
55.8	1040.9	372.2	580.8	207.7	0.5808

หมายเหตุ : *คำนวนจากเปอร์เซนต์มีเทนเฉลี่ย

TS	99,698	ปริมาณของแข็งทั้งหมด		
VS	87,270	ปริมาณของแข็งระเหยง่าย		สรุปBMPต้นข้าวโพด S/I 60:40
ปริมาณที่ใช้	103.13	g		

ตารางคำนวน

	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (ml_n)	% มีเทนเฉลี่ย	VS added g	1 ton ตย มี VS เท่ากับ (ton)	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ต่อตัน VS $m^3/tonVS_{added}$	ต่อตันตัวอย่าง (m^3/tonตัวอย่าง)
ซ้ำ 1	6,962	61.9	9.0	0.0873	774	67.5
ซ้ำ 2	6,389	64.0	9.0	0.0873	710	61.9
ซ้ำ 3	6,578	63.8	9.0	0.0873	731	63.8
เฉลี่ย	6,643	63.2	9.0	0.0873	738	64.4

หมายเหตุ : 1 ml/gVS เท่ากับ 1 m^3/tonVS

	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม	% มีเทน	VS added g	1 ton ตย มี VS เท่ากับ	ศักยภาพการผลิต $m^3/kgVS_{added}$	ปริมาณก๊าซที่ผลิตได้ (m^3/tonตัวอย่าง)
ซ้ำ 1	6,962	61.9	9.0	0.0873	0.774	67.5
ซ้ำ 2	6,389	64.0	9.0	0.0873	0.710	61.9
ซ้ำ 3	6,578	63.8	9.0	0.0873	0.731	63.8
เฉลี่ย	6,643	63.2	9.0	0.0873	0.738	64.4

% มีเทน ค่าเฉลี่ยตลอดการทดลอง	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ต่อตันของแข็งระเหย $m^3/tonVS_{added}$	ต่อตันตัวอย่าง (m^3/tonตัวอย่าง)	ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน * ต่อตันของแข็งระเหย m^3 CH_4/ton VS_{added}	ต่อตันตัวอย่าง m^3 CH_4/ton ตัวอย่าง	ต่อตันของแข็งระเหย m^3CH_4/kg VS_{added}
63.2	738.1	64.4	466.8	40.7353	0.4668

หมายเหตุ : *คำนวนจากเปอร์เซนต์มีเทนเฉลี่ย

	TS	273,627	ปริมาณของแข็งทั้งหมด			
	VS	241,976	ปริมาณของแข็งระเหยง่าย		สรุปBMPใบข้าวโพด S/I 60:40	
	ปริมาณที่ใช้	37.19	g			
ตารางคำนวณ						
	ปริมาณก๊าซ ชีวภาพสะสม (ml_n)	% มีเทนเฉลี่ย (50วันของการทดลอง)	VS added g	1 ton ตย มี VS เท่ากับ (ton)	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ต่อตัน VS m^3/tonVS$_{added}$	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ต่อตันตัวอย่าง (m^3/tonตัวอย่าง)
ซ้ำ 1	4,936	62.9	9.0	0.2420	548	132.7
ซ้ำ 2	4,594	62.3	9.0	0.2420	510	123.5
ซ้ำ 3	4,292	60.2	9.0	0.2420	477	115.4
เฉลี่ย	4,607	61.8	9.0	0.2420	512	123.9
หมายเหตุ :	1 ml/gVS เท่ากับ 1 m^3/tonVS					
	ปริมาณก๊าซ ชีวภาพสะสม	% มีเทนเฉลี่ย	VS added g	1 ton ตย มี VS	ศักยภาพการผลิต m^3/kgVS$_{added}$	ปริมาณก๊าซที่ผลิตได้ (m^3/tonตัวอย่าง)
ซ้ำ 1	4,936	62.9	9.0	0.2420	0.548	132.7
ซ้ำ 2	4,594	62.3	9.0	0.2420	0.510	123.5
ซ้ำ 3	4,292	60.2	9.0	0.2420	0.477	115.4
เฉลี่ย	4,607	61.8	9.0	0.2420	0.5119	123.9
	% มีเทน ค่าเฉลี่ยตลอดการทดลอง	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ต่อตันของแข็งระเหย m^3/tonVS$_{added}$	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ต่อตันตัวอย่าง (m^3/tonตัวอย่าง)	ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน * ต่อตันของแข็ง m^3 CH_4/ton VS$_{added}$	ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน * ต่อตันตัวอย่าง m^3 CH_4/ton ตัวอย่าง	ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน * ต่อตันของแข็งระเหย m^3 CH_4/kg VS$_{added}$
	61.8	511.9	123.9	316.5	76.6	0.3165
	หมายเหตุ : *คำนวนจากเปอร์เซนต์มีเทนเฉลี่ย					

	TS	269,997	ปริมาณของแข็งทั้งหมด			
	VS	253,748	ปริมาณของแข็งระเหยง่าย		สรุปBMPเปลือกข้าวโพด S/I 60:40	
	ปริมาณที่ใช้	35.47	g			
ตารางคำนวณ						
	ปริมาณก๊าซ ชีวภาพสะสม (ml_n)	% มีเทนเฉลี่ย (50วันของการทดลอง)	VS added g	1 ton ตย มี VS เท่ากับ (ton)	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ต่อตัน VS m^3/tonVS$_{added}$	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ต่อตันตัวอย่าง (m^3/tonตัวอย่าง)
ซ้ำ 1	5,881	50.5	9.0	0.2537	653	165.8
ซ้ำ 2	5,878	50.3	9.0	0.2537	653	165.7
ซ้ำ 3	5,201	49.8	9.0	0.2537	578	146.6
เฉลี่ย	5,653	50.2	9.0	0.2537	628	159.4
หมายเหตุ :	1 ml/gVS เท่ากับ 1 m^3/tonVS					
	ปริมาณก๊าซ ชีวภาพสะสม	% มีเทนเฉลี่ย	VS added g	1 ton ตย มี VS เท่ากับ	ศักยภาพการผลิต m^3/kgVS$_{added}$	ปริมาณก๊าซที่ผลิตได้ (m^3/tonตัวอย่าง)
ซ้ำ 1	79	50.5	9.0	0.2537	0.009	2.2
ซ้ำ 2	64	50.3	9.0	0.2537	0.007	1.8
ซ้ำ 3	63	49.8	9.0	0.2537	0.007	1.8
เฉลี่ย	69	50.2	9.0	0.2537	0.0076	1.9
	% มีเทน ค่าเฉลี่ยตลอดการทดลอง	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ต่อตันของแข็งระเหย m^3/tonVS$_{added}$	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ต่อตันตัวอย่าง (m^3/tonตัวอย่าง)	ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน * ต่อตันของแข็งระเหย m^3 CH_4/ton VS$_{added}$	ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน * ต่อตันตัวอย่าง m^3 CH_4/ton ตัวอย่าง	ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน * ต่อตันของแข็งระเหย m^3 CH_4/kg VS$_{added}$
	50.2	628.2	159.4	315.3	80.0	0.3153
	หมายเหตุ : *คำนวนจากเปอร์เซนต์มีเทนเฉลี่ย					

	TS	380,621	ปริมาณของแข็งทั้งหมด			
	VS	357,613	ปริมาณของแข็งระเหยง่าย		สรุปBMPซังข้าวโพด S/I 60:40	
	ปริมาณที่ใช้	25.17	g			
ตารางคำนวน						
	ปริมาณก๊าซ ชีวภาพสะสม (ml_n)	% มีเทนเฉลี่ย (50วันของการทดลอง)	VS added g	1 ton ตย มี VS เท่ากับ (ton)	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ต่อตัน VS $m^3/tonVS_{added}$	ต่อตันตัวอย่าง (m^3/tonตัวอย่าง)
ซ้ำ 1	8,680	56.0	9.0	0.3576	964	344.9
ซ้ำ 2	8,877	56.2	9.0	0.3576	986	352.7
ซ้ำ 3	7,986	55.4	9.0	0.3576	887	317.3
เฉลี่ย	8,514	55.9	9.0	0.3576	946	338.3
หมายเหตุ :	1 ml/gVS เท่ากับ 1 m^3/tonVS					
	ปริมาณก๊าซ ชีวภาพสะสม	% มีเทนเฉลี่ย	VS added g	1 ton ตย มี VS เท่ากับ	ศักยภาพการผลิต $m^3/kgVS_{added}$	ปริมาณก๊าซที่ผลิตได้ (m^3/tonตัวอย่าง)
ซ้ำ 1	8,680	56.0	9.0	0.3576	0.964	344.9
ซ้ำ 2	8,877	56.2	9.0	0.3576	0.986	352.7
ซ้ำ 3	7,986	55.4	9.0	0.3576	0.887	317.3
เฉลี่ย	8,514	55.9	9.0	0.3576	0.9460	338.3
	% มีเทน ค่าเฉลี่ยตลอดการทดลอง	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ต่อตันของแข็งระเหย $m^3/tonVS_{added}$	ต่อตันตัวอย่าง (m^3/tonตัวอย่าง)	ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน * ต่อตันของแข็งระเหย m^3 CH_4/ton VS_{added}	ต่อตันตัวอย่าง m^3 CH_4/ton ตัวอย่าง	ต่อตันของแข็งระเหย m^3CH_4/kg VS_{added}
	55.9	946.0	338.3	528.8	189.1	0.5288
	หมายเหตุ : *คำนวนจากเปอร์เซนต์มีเทนเฉลี่ย					

	TS	99,698	ปริมาณของแข็งทั้งหมด			
	VS	87,270	ปริมาณของแข็งระเหยง่าย		สรุปBMPต้นข้าวโพด S/I 70:30	
	ปริมาณที่ใช้	158.13	g			
ตารางคำนวน						
	ปริมาณก๊าซ ชีวภาพสะสม (ml_n)	% มีเทนเฉลี่ย	VS added g	1 ton ตย มี VS เท่ากับ (ton)	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ต่อตัน VS $m^3/tonVS_{added}$	ต่อตันตัวอย่าง (m^3/tonตัวอย่าง)
ซ้ำ 1	1,190	11.1	13.8	0.0873	86	7.5
ซ้ำ 2	722	11.3	13.8	0.0873	52	4.6
ซ้ำ 3	941	10.9	13.8	0.0873	68	6.0
เฉลี่ย	951	11.1	13.8	0.0873	69	6.0
หมายเหตุ :	1 ml/gVS เท่ากับ 1 m^3/tonVS					
	ปริมาณก๊าซ ชีวภาพสะสม	% มีเทน	VS added g	1 ton ตย มี VS เท่ากับ	ศักยภาพการผลิต $m^3/kgVS_{added}$	ปริมาณก๊าซที่ผลิตได้ (m^3/tonตัวอย่าง)
ซ้ำ 1	1,190	11.1	13.8	0.0873	0.086	7.5
ซ้ำ 2	722	11.3	13.8	0.0873	0.052	4.6
ซ้ำ 3	941	10.9	13.8	0.0873	0.068	6.0
เฉลี่ย	951	11.1	13.8	0.0873	0.069	6.0
	% มีเทน ค่าเฉลี่ยตลอดการทดลอง	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ต่อตันของแข็งระเหย $m^3/tonVS_{added}$	ต่อตันตัวอย่าง (m^3/tonตัวอย่าง)	ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน * ต่อตันของแข็งระเหย m^3 CH_4/ton VS_{added}	ต่อตันตัวอย่าง m^3 CH_4/ton ตัวอย่าง	ต่อตันของแข็งระเหย m^3CH_4/kg VS_{added}
	11.1	68.9	6.0	7.6	0.6676	0.0076
	หมายเหตุ : *คำนวนจากเปอร์เซนต์มีเทนเฉลี่ย					

	TS	273,627	ปริมาณของแข็งทั้งหมด			
	VS	241,976	ปริมาณของแข็งระเหยง่าย		สรุปBMPใบข้าวโพด S/I 70:30	
	ปริมาณที่ใช้	57.03	g			
ตารางคำนวน						
	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (ml_n)	% มีเทนเฉลี่ย (40วันของการทดลอง)	VS added g	1 ton ตย มี VS เท่ากับ (ton)	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ต่อตัน VS m^3/tonVS$_{added}$	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ต่อตันตัวอย่าง (m^3/tonตัวอย่าง)
ซ้ำ 1	8,468	58.9	13.8	0.2420	614	148.5
ซ้ำ 2	8,455	60.0	13.8	0.2420	613	148.2
ซ้ำ 3	8,738	59.9	13.8	0.2420	633	153.2
เฉลี่ย	8,554	59.6	13.8	0.2420	620	150.0
หมายเหตุ :	1 ml/gVS เท่ากับ 1 m^3/tonVS					
	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม	% มีเทนเฉลี่ย	VS added g	1 ton ตย มี VS เท่ากับ	ศักยภาพการผลิต m^3/kgVS$_{added}$	ปริมาณก๊าซที่ผลิตได้ (m^3/tonตัวอย่าง)
ซ้ำ 1	8,468	58.9	13.8	0.2420	0.614	148.5
ซ้ำ 2	8,455	60.0	13.8	0.2420	0.613	148.2
ซ้ำ 3	8,738	59.9	13.8	0.2420	0.633	153.2
เฉลี่ย	8,554	59.6	13.8	0.2420	0.6198	150.0

% มีเทน ค่าเฉลี่ยตลอดการทดลอง	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ต่อตันของแข็งระเหย m^3/tonVS$_{added}$	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ต่อตันตัวอย่าง (m^3/tonตัวอย่าง)	ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน * ต่อตันของแข็งระเหย m^3 CH_4/ton VS$_{added}$	ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน * ต่อตันตัวอย่าง m^3 CH_4/ton ตัวอย่าง	ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน * ต่อตันของแข็งระเหย m^3CH_4/kg VS$_{added}$
59.6	619.8	150.0	369.6	89.4	0.3696

หมายเหตุ : *คำนวนจากเปอร์เซนต์มีเทนเฉลี่ย

	TS	269,997	ปริมาณของแข็งทั้งหมด			
	VS	253,748	ปริมาณของแข็งระเหยง่าย		สรุปBMPเปลือกข้าวโพด S/I 70:30	
	ปริมาณที่ใช้	54.38	g			
ตารางคำนวน						
	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (ml_n)	% มีเทนเฉลี่ย (40วันของการทดลอง)	VS added g	1 ton ตย มี VS เท่ากับ (ton)	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ต่อตัน VS m^3/tonVS$_{added}$	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ต่อตันตัวอย่าง (m^3/tonตัวอย่าง)
ซ้ำ 1	6,935	56.0	13.8	0.2537	503	127.5
ซ้ำ 2	6,781	56.4	13.8	0.2537	491	124.7
ซ้ำ 3	6,411	55.7	13.8	0.2537	465	117.9
เฉลี่ย	6,709	56.1	13.8	0.2537	486	123.4
หมายเหตุ :	1 ml/gVS เท่ากับ 1 m^3/tonVS					
	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม	% มีเทนเฉลี่ย	VS added g	1 ton ตย มี VS เท่ากับ	ศักยภาพการผลิต m^3/kgVS$_{added}$	ปริมาณก๊าซที่ผลิตได้ (m^3/tonตัวอย่าง)
ซ้ำ 1	6,935	56.0	13.8	0.2537	0.503	127.5
ซ้ำ 2	6,781	56.4	13.8	0.2537	0.491	124.7
ซ้ำ 3	6,411	55.7	13.8	0.2537	0.465	117.9
เฉลี่ย	6,709	56.1	13.8	0.2537	0.4862	123.4

% มีเทน ค่าเฉลี่ยตลอดการทดลอง	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ต่อตันของแข็งระเหย m^3/tonVS$_{added}$	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ต่อตันตัวอย่าง (m^3/tonตัวอย่าง)	ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน * ต่อตันของแข็งระเหย m^3 CH_4/ton VS$_{added}$	ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน * ต่อตันตัวอย่าง m^3 CH_4/ton ตัวอย่าง	ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน * ต่อตันของแข็งระเหย m^3CH_4/kg VS$_{added}$
56.1	486.2	123.4	272.5	69.1	0.2725

หมายเหตุ : *คำนวนจากเปอร์เซนต์มีเทนเฉลี่ย

	TS	380,621	ปริมาณของแข็งทั้งหมด		สรุปBMPซังข้าวโพด S/I 70:30	
	VS	357,613	ปริมาณของแข็งระเหยง่าย			
	ปริมาณที่ใช้	38.59	g			
ตารางคำนวน						
	ปริมาณก๊าซ ชีวภาพสะสม (ml$_n$)	% มีเทนเฉลี่ย (40วันของการทดลอง)	VS added g	1 ton ตย มี VS เท่ากับ (ton)	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ต่อตัน VS m^3/tonVS$_{added}$	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ต่อตันตัวอย่าง (m^3/tonตัวอย่าง)
ซ้ำ 1	5,898	46.7	13.8	0.3576	427	152.9
ซ้ำ 2	6,651	46.3	13.8	0.3576	482	172.4
ซ้ำ 3	6,414	46.7	13.8	0.3576	465	166.2
เฉลี่ย	6,321	46.6	13.8	0.3576	458	163.8
หมายเหตุ :	1 ml/gVS เท่ากับ 1 m^3/tonVS					
	ปริมาณก๊าซ ชีวภาพสะสม	% มีเทนเฉลี่ย	VS added g	1 ton ตย มี VS เท่ากับ	ศักยภาพการผลิต m^3/kgVS$_{added}$	ปริมาณก๊าซที่ผลิตได้ (m^3/tonตัวอย่าง)
ซ้ำ 1	5,898	53.3	13.8	0.3576	0.427	152.9
ซ้ำ 2	6,651	53.3	13.8	0.3576	0.482	172.4
ซ้ำ 3	6,414	52.9	13.8	0.3576	0.465	166.2
เฉลี่ย	6,321	53.2	13.8	0.3576	0.4581	163.8
	% มีเทน ค่าเฉลี่ยตลอดการทดลอง	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ต่อตันของแข็งระเหย m^3/tonVS$_{added}$	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ต่อตันตัวอย่าง (m^3/tonตัวอย่าง)	ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน * ต่อตันของแข็งระเหย m^3 CH_4/ton VS$_{added}$	ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน * ต่อตันตัวอย่าง m^3 CH_4/ton ตัวอย่าง	ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน * ต่อตันของแข็งระเหย m^3 CH_4/kg VS$_{added}$
	46.6	458.1	163.8	213.3	76.3	0.2133
	หมายเหตุ : *คำนวนจากเปอร์เซนต์มีเทนเฉลี่ย					

	TS	99,698	ปริมาณของแข็งทั้งหมด		สรุปBMPต้นข้าวโพด S/I 80:20	
	VS	87,270	ปริมาณของแข็งระเหยง่าย			
	ปริมาณที่ใช้	158.13	g			
ตารางคำนวน						
	ปริมาณก๊าซ ชีวภาพสะสม (ml$_n$)	% มีเทนเฉลี่ย	VS added g	1 ton ตย มี VS เท่ากับ (ton)	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ต่อตัน VS m^3/tonVS$_{added}$	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ต่อตันตัวอย่าง (m^3/tonตัวอย่าง)
ซ้ำ 1	1,561	10.3	13.8	0.0873	113	9.9
ซ้ำ 2	1,322	11.0	13.8	0.0873	96	8.4
ซ้ำ 3	1,603	10.1	13.8	0.0873	116	10.1
เฉลี่ย	1,495	10.5	13.8	0.0873	108	9.5
หมายเหตุ :	1 ml/gVS เท่ากับ 1 m^3/tonVS					
	ปริมาณก๊าซ ชีวภาพสะสม	% มีเทน	VS added g	1 ton ตย มี VS เท่ากับ	ศักยภาพการผลิต m^3/kgVS$_{added}$	ปริมาณก๊าซที่ผลิตได้ (m^3/tonตัวอย่าง)
ซ้ำ 1	1,561	10.3	13.8	0.0873	0.113	9.9
ซ้ำ 2	1,322	11.0	13.8	0.0873	0.096	8.4
ซ้ำ 3	1,603	10.1	13.8	0.0873	0.116	10.1
เฉลี่ย	1,495	10.5	13.8	0.0873	0.108	9.5
	% มีเทน ค่าเฉลี่ยตลอดการทดลอง	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ต่อตันของแข็งระเหย m^3/tonVS$_{added}$	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ต่อตันตัวอย่าง (m^3/tonตัวอย่าง)	ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน * ต่อตันของแข็งระเหย m^3 CH_4/ton VS$_{added}$	ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน * ต่อตันตัวอย่าง m^3 CH_4/ton ตัวอย่าง	ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน * ต่อตันของแข็งระเหย m^3 CH_4/kg VS$_{added}$
	10.5	108.4	9.5	11.4	0.9910	0.0114
	หมายเหตุ : *คำนวนจากเปอร์เซนต์มีเทนเฉลี่ย					

	TS	273,627	ปริมาณของแข็งทั้งหมด			
	VS	241,976	ปริมาณของแข็งระเหยง่าย		สรุปBMPใบข้าวโพด S/I 80:20	
	ปริมาณที่ใช้	57.03	g			
ตารางคำนวน						
	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (ml_n)	% มีเทนเฉลี่ย (50วันของการทดลอง)	VS added g	1 ton ตย มี VS เท่ากับ (ton)	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ต่อตัน VS $m^3/tonVS_{added}$	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ต่อตันตัวอย่าง (m^3/tonตัวอย่าง)
ซ้ำ 1	12,016	58.6	13.8	0.2420	871	210.7
ซ้ำ 2	2,725	59.2	13.8	0.2420	197	47.8
ซ้ำ 3	13,019	59.7	13.8	0.2420	943	228.3
เฉลี่ย	9,253	59.1	13.8	0.2420	671	162.2
หมายเหตุ :	1 ml/gVS เท่ากับ 1 m^3/tonVS					
	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม	% มีเทนเฉลี่ย	VS added g	1 ton ตย มี VS เท่ากับ	ศักยภาพการผลิต $m^3/kgVS_{added}$	ปริมาณก๊าซที่ผลิตได้ (m^3/tonตัวอย่าง)
ซ้ำ 1	12,016	58.6	13.8	0.2420	0.871	210.7
ซ้ำ 2	2,725	59.2	13.8	0.2420	0.197	47.8
ซ้ำ 3	13,019	59.7	13.8	0.2420	0.943	228.3
เฉลี่ย	9,253	59.1	13.8	0.2420	0.6705	162.2
	% มีเทน ค่าเฉลี่ยตลอดการทดลอง	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ต่อตันของแข็งระเหย $m^3/tonVS_{added}$	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ต่อตันตัวอย่าง (m^3/tonตัวอย่าง)	ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน * ต่อตันของแข็งระเหย m^3 $CH_4/ton\ VS_{added}$	ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน * ต่อตันตัวอย่าง m^3 CH_4/ton ตัวอย่าง	ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน * ต่อตันของแข็งระเหย $m^3CH_4/kg\ VS_{added}$
	59.1	670.5	162.2	396.5	95.9	0.3965
	หมายเหตุ : *คำนวนจากเปอร์เซนต์มีเทนเฉลี่ย					

	TS	269,997	ปริมาณของแข็งทั้งหมด			
	VS	253,748	ปริมาณของแข็งระเหยง่าย		สรุปBMPเปลือกข้าวโพด S/I 80:20	
	ปริมาณที่ใช้	54.38	g			
ตารางคำนวน						
	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (ml_n)	% มีเทนเฉลี่ย (50วันของการทดลอง)	VS added g	1 ton ตย มี VS เท่ากับ (ton)	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ต่อตัน VS $m^3/tonVS_{added}$	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ต่อตันตัวอย่าง (m^3/tonตัวอย่าง)
ซ้ำ 1	10,437	56.0	13.8	0.2537	756	191.9
ซ้ำ 2	5,658	56.3	13.8	0.2537	410	104.0
ซ้ำ 3	6,700	55.7	13.8	0.2537	486	123.2
เฉลี่ย	7,599	56.0	13.8	0.2537	551	139.7
หมายเหตุ :	1 ml/gVS เท่ากับ 1 m^3/tonVS					
	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม	% มีเทนเฉลี่ย	VS added g	1 ton ตย มี VS เท่ากับ	ศักยภาพการผลิต $m^3/kgVS_{added}$	ปริมาณก๊าซที่ผลิตได้ (m^3/tonตัวอย่าง)
ซ้ำ 1	10,437	56.0	13.8	0.2537	0.756	191.9
ซ้ำ 2	5,658	56.3	13.8	0.2537	0.410	104.0
ซ้ำ 3	6,700	55.7	13.8	0.2537	0.486	123.2
เฉลี่ย	7,599	56.0	13.8	0.2537	0.5506	139.7
	% มีเทน ค่าเฉลี่ยตลอดการทดลอง	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ต่อตันของแข็งระเหย $m^3/tonVS_{added}$	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ต่อตันตัวอย่าง (m^3/tonตัวอย่าง)	ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน * ต่อตันของแข็งระเหย m^3 $CH_4/ton\ VS_{added}$	ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน * ต่อตันตัวอย่าง m^3 CH_4/ton ตัวอย่าง	ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน * ต่อตันของแข็งระเหย $m^3CH_4/kg\ VS_{added}$
	56.0	550.6	139.7	308.2	78.2	0.3082
	หมายเหตุ : *คำนวนจากเปอร์เซนต์มีเทนเฉลี่ย					

	TS	380,621	ปริมาณของแข็งทั้งหมด			
	VS	357,613	ปริมาณของแข็งระเหยง่าย		สรุปBMPซังข้าวโพด S/I 80:20	
	ปริมาณที่ใช้	38.59	g			
ตารางคำนวน						
	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม (ml_n)	% มีเทนเฉลี่ย (40วันของการทดลอง)	VS added g	1 ton ตย มี VS เท่ากับ (ton)	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ต่อตัน VS $m^3/tonVS_{added}$	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ ต่อตันตัวอย่าง (m^3/tonตัวอย่าง)
ซ้ำ 1	10,777	53.9	13.8	0.3576	781	279.3
ซ้ำ 2	9,391	53.8	13.8	0.3576	681	243.4
ซ้ำ 3	10,516	53.3	13.8	0.3576	762	272.5
เฉลี่ย	10,228	53.7	13.8	0.3576	741	265.0
หมายเหตุ :	1 ml/gVS เท่ากับ 1 m^3/tonVS					
	ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม	% มีเทนเฉลี่ย	VS added g	1 ton ตย มี VS เท่ากับ	ศักยภาพการผลิตก๊าซ $m^3/kgVS_{added}$	ปริมาณก๊าซที่ผลิตได้ (m^3/tonตัวอย่าง)
ซ้ำ 1	10,777	53.9	13.8	0.3576	0.781	279.3
ซ้ำ 2	9,391	53.8	13.8	0.3576	0.681	243.4
ซ้ำ 3	10,516	53.3	13.8	0.3576	0.762	272.5
เฉลี่ย	10,228	53.7	13.8	0.3576	0.7412	265.0

	% มีเทน	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ		ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน *		
	ค่าเฉลี่ยตลอดการทดลอง	ต่อตันของแข็งระเหย $m^3/tonVS_{added}$	ต่อตันตัวอย่าง (m^3/tonตัวอย่าง)	ต่อตันของแข็งระเหย m^3 CH_4/ton VS_{added}	ต่อตันตัวอย่าง m^3 CH_4/ton ตัวอย่าง	ต่อตันของแข็งระเหย m^3CH_4/kg VS_{added}
	53.7	741.2	265.0	397.7	142.2	0.3977

หมายเหตุ : *คำนวนจากเปอร์เซนต์มีเทนเฉลี่ย

MAEJO UNIVERSITY

ภาคผนวก ง

การประเมินการลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก

ตารางที่ 36 ค่าความร้อนสุทธิของเชื้อเพลิง

ประเภท (หน่วย)	กิโลแคลอรี่/หน่วย (kcal/unit)	ตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ/ล้านหน่วย (toe/10^6 UNIT)	เมกะจูล/หน่วย (MJ/UNIT)	พันบีทียู/หน่วย (10^3 Btu/UNIT)	TYPE (UNIT)
พลังงานเชิงพาณิชย์					COMMERCIAL ENERGY
1. น้ำมันดิบ (ลิตร)	8680	860.00	36.33	34.44	1. CRUDE OIL (litre)
2. คอนเดนเสท (ลิตร)	7900	782.72	33.07	31.35	2. CONDENSATE (litre)
3. ก๊าซธรรมชาติ					3. NATURAL GAS
3.1 ชื้น (ลูกบาศก์ฟุต)	248	24.57	1.04	0.98	3.1 WET (scf.)
3.2 แห้ง (ลูกบาศก์ฟุต)	244	24.18	1.02	0.97	3.2 DRY (scf.)
4. ผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียม					4. PETROLEUM PRODUCTS
4.1 ก๊าซปิโตรเลียมเหลว (ลิตร)	6360	630.14	26.62	25.24	4.1 LPG (litre)
4.2 น้ำมันเบนซิน (ลิตร)	7520	745.07	31.48	29.84	4.2 GASOLINE (litre)
4.3 น้ำมันเครื่องบิน (ลิตร)	8250	817.40	34.53	32.74	4.3 JET FUEL (litre)
4.4 น้ำมันก๊าด (ลิตร)	8250	817.40	34.53	32.74	4.4 KEROSENE (litre)
4.5 น้ำมันดีเซล (ลิตร)	8700	861.98	36.42	34.52	4.5 DIESEL (litre)
4.6 น้ำมันเตา (ลิตร)	9500	941.24	39.77	37.70	4.6 FUEL OIL (litre)
4.7 ยางมะตอย (ลิตร)	9840	974.93	41.19	39.05	4.7 BITUMEN (litre)
4.8 ปิโตรเลียมโค้ก (กก.)	8400	832.26	35.16	33.33	4.8 PETROLEUM COKE (kg.)

ประเภท (หน่วย)	กิโลแคลอรี่/หน่วย (kcal/unit)	ตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ/ล้านหน่วย (toe/10^6 UNIT)	เมกะจูล/หน่วย (MJ/UNIT)	พันบีทียู/หน่วย (10^3 Btu/UNIT)	TYPE (UNIT)
5. ไฟฟ้า (กิโลวัตต์ชั่วโมง)	860	85.21	3.60	3.41	5. ELECTRICITY (kWh)
6. ไฟฟ้าพลังน้ำ (กิโลวัตต์ชั่วโมง)	2236	221.54	9.36	8.87	6. HYDROELECTRICITY (kWh)
7. พลังงานความร้อนใต้พิภพ (กิโลวัตต์ชั่วโมง)	9500	941.24	39.77	37.70	7. GEOTHERMAL (kWh)
8. ถ่านหินนำเข้า (กก.)	6300	624.19	26.37	25.00	8. COAL IMPORT (kg.)
9. ถ่านโค๊ก (กก.)	6600	653.92	27.63	26.19	9. COKE (kg.)
10. แอนทราไซต์ (กก.)	7500	743.09	31.40	29.76	10. ANTRACITE (kg.)
11. อีเทน (กก.)	11203	1110.05	46.89	44.45	11. ETHANE (kg.)
12. โปรเพน (กก.)	11256	1115.34	47.11	44.67	12. PROPANE (kg.)
13. ลิกไนต์					13. LIGNITE
13.1 ลี้ (กก.)	4400	435.94	18.42	17.46	13.1 LI (kg.)
13.2 กระบี่ (กก.)	2600	257.60	10.88	10.32	13.2 KRABI (kg.)
13.3 แม่เมาะ (กก.)	2500	247.70	10.47	9.92	13.3 MAE MOH (kg.)
13.4 แจ้คอน (กก.)	3610	357.67	15.11	14.32	13.4 CHAE KHON (kg)
พลังงานใหม่และหมุนเวียน					**NEW & RENEWABLE ENERGY**
1. ฟืน (กก.)	3820	378.48	15.99	15.16	1. FUEL WOOD (kg.)
2. ถ่าน (กก.)	6900	683.64	28.88	27.38	2. CHARCOAL (kg.)
3. แกลบ (กก.)	3440	340.83	14.40	13.65	3. PADDY HUSK

ประเภท (หน่วย)	กิโลแคลอรี่/หน่วย (kcal/unit)	ตันเทียบเท่าน้ำมันดิบ/ล้านหน่วย (toe/10^6 UNIT)	เมกะจูล/หน่วย (MJ/UNIT)	พันบีทียู/หน่วย (10^3 Btu/UNIT)	TYPE (UNIT)
					(kg.)
4. กากอ้อย (กก.)	1800	178.34	7.53	7.14	4. BAGASSE (kg.)
5. ขยะ (กก.)	1160	114.93	4.86	4.60	5. GARBAGE (kg.)
6. ขี้เลื่อย (กก.)	2600	257.60	10.88	10.32	6. SAW DUST (kg.)
7. วัสดุเหลือใช้ (กก.)	3030	300.21	12.68	12.02	7. AGRICULTURAL WASTE (kg.)
8. ก๊าซชีวภาพ (ลูกบาศก์เมตร)	5000	495.39	20.93	19.84	8. BIOGAS (m)

(ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทน และอนุรักษ์พลังงาน, 2560)

MAEJO UNIVERSITY

ตารางที่ 37 ค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงฟอสซิล

Fuel		Default carbon content (kg/GJ)	Default carbon oxidation factor	Effective CO_2 emission factor (kg/TJ)		
				Default Emission Factor	95% confidence interval	
		A	B	C = A*B*44/12*1000	Lower	Upper
Crude Oil		20.0	1	73300	71100	75500
Orimulsion		21.0	1	77000	69300	85400
Natural Gas Liquids		17.5	1	64200	58300	70400
Gasoline	Motor Gasoline	18.9	1	69300	67500	73000
	Aviation Gasoline	19.1	1	70000	67500	73000
	Jet Gasoline	19.1	1	70000	67500	73000
Jet Kerosene		19.5	1	71500	69700	74400
Other Kerosene		19.6	1	71900	70800	73700
Shale Oil		20.0	1	73300	67800	79200
Gas/ Diesel Oil		20.2	1	74100	72600	74800
Residual Fuel Oil		21.1	1	77400	75500	78800
Liquefied Petroleum Gases		17.2	1	63100	61600	65600
Ethane		16.8	1	61600	56500	68600
Naphtha		20.0	1	73300	69300	76300
Bitumen		22.0	1	80700	73000	89900
Lubricants		20.0	1	73300	71900	75200
Petroleum Coke		26.6	1	97500	82900	115000
Refinery Feedstocks		20.0	1	73300	68900	76600
Other Oil	Refinery Gas	15.7	1	57600	48200	69000
	Paraffin Waxes	20.0	1	73300	72200	74400
	White Spirit and SBP	20.0	1	73300	72200	74400
Other Petroleum Products		20.0	1	73300	72200	74400
Anthracite		26.8	1	98300	94600	101000
Coking Coal		25.8	1	94600	87300	101000
Other Bituminous Coal		25.8	1	94600	89500	99700
Sub-Bituminous Coal		26.2	1	96100	92800	100000

Fuel		Default carbon content (kg/GJ)	Default carbon oxidation factor	Effective CO_2 emission factor (kg/TJ)		
				Default Emission Factor	95% confidence interval	
		A	B	C = A*B*44/ 12*1000	Lower	Upper
Lignite		27.6	1	101000	90900	115000
Oil Shale and Tar Sands		29.1	1	107000	90200	125000
Brown Coal Briquettes		26.6	1	97500	87300	109000
Patent Fuel		26.6	1	97500	87300	109000
Coke	Coke Oven Coke and Lignite Coke	29.2	1	107000	95700	119000
	Gas Coke	29.2	1	107000	95700	119000
Coal Tar		22.0	1	80700	68200	95300
Derived Gases	Gas Works Gas	12.1	1	44400	37300	54100
	Coke Oven Gas	12.1	1	44400	37300	54100
	Blast Furnace Gas	70.8	1	260000	219000	308000
	Oxygen Steel Furnace Gas	49.6	1	182000	145000	202000
Natural Gas		15.3	1	56100	54300	58300
Municipal Wastes (non-biomass fraction)		25.0	1	91700	73300	121000
Industrial Wastes		39.0	1	143000	110000	183000
Waste Oils		20.0	1	73300	72200	74400
Peat		28.9	1	106000	100000	108000
Solid Biofuels	Wood/ Wood Waste	30.5	1	112000	95000	132000
	Sulphitelyes (Black Liquor)	26.0	1	95300	80700	110000
	Other Primary Solid Biomass	27.3	1	100000	84700	117000
	Charcoal	30.5	1	112000	95000	132000
Liquid Biofuels	Biogasoline	19.3	1	70800	59800	84300
	Biodiesels	19.3	1	70800	59800	84300
	Other Liquid Biofuels	21.7	1	79600	67100	95300

Fuel			Default carbon content (kg/GJ)	Default carbon oxidation factor	Effective CO_2 emission factor (kg/TJ)		
					Default Emission Factor	95% confidence interval	
			A	B	C = A*B*44/ 12*1000	Lower	Upper
Gas	Biomass	Landfill Gas	14.9	1	54600	46200	66000
		Sludge Gas	14.9	1	54600	46200	66000
		Other Biogas	14.9	1	54600	46200	66000
Other	non-fossil	Municipal Wastes (biomass fraction)	27.3	1	100000	84700	117000

ที่มา : IPCC, 2006 (IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Volume 2: Energy Table 1.4)

MAEJO UNIVERSITY

ภาคผนวก จ

การประเมินการผลิตก๊าซชีวภาพ ไฟฟ้าในเชิงทฤษฎี

ตารางที่ 38 การประเมินการผลิตก๊าซชีวภาพและไฟฟ้าในเชิงทฤษฎี

ค่า Default ค่าเฉลี่ยปริมาณการปล่อยก๊าซมีเทน (CH_4) จากการหมักแบบไร้อากาศ		
CH_4	2	$gCH_4/kg_{dried\ mass}$
การประเมินการผลิตก๊าซชีวภาพและไฟฟ้าในเชิงทฤษฎี		
การผลิตก๊าซชีวภาพจากขยะประเภทวัสดุข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เหลือทิ้ง	265.05	$m^3/ton_{dried\ mass}$
ปริมาณมีเทนในก๊าซชีวภาพ	59.10	%
ค่าความร้อนของมีเทน	21.6	MJ/ m^3
ปริมาตรของก๊าซมีเทนทั้งหมด	126.88	$m^3/ton_{maize\ residues}$
ปริมาตรของก๊าซมีเทนที่ปล่อยออกสู่บรรยากาศ	2.42	$m^3CH_4\ /ton_{maize\ residues}$
ปริมาตรของก๊าซมีเทนที่รวบรวมได้	124.46	$m^3CH_4\ /ton_{maize\ residues}$
ปริมาณพลังงานที่ได้จากก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้	2688.43	$MJ/ton_{maize\ residues}$
ประเภทของการใช้ประโยชน์ก๊าซชีวภาพ		
	ปริมาณที่แทนที่	หน่วย
การใช้ก๊าซชีวภาพในการผลิตความร้อน	207.44	$m^3Biogas/ton_{maize\ residues}$
การใช้ก๊าซชีวภาพในการผลิตไฟฟ้า	261.37	$Kw.hr/ton_{maize\ residues}$

*ค่า Default ค่าเฉลี่ยปริมาณการปล่อยก๊าซมีเทน (CH_4) จากการหมักแบบไร้อากาศ

ตารางที่ 39 ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ต่อไร่ ในพื้นที่ภาคเหนือ

จังหวัด (ภาคเหนือ)	พื้นที่เพาะปลูก (Rai)	ปริมาณข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ (kg/rai)	ปริมาณชีวมวลที่ยังไม่ได้ใช้ประโยชน์ (kg/year)	ปริมาณชีวมวลที่ยังไม่ได้ใช้ประโยชน์ (ton/year)	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ (m^3/year)	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ (m^3/ton)
เชียงใหม่	176,700	119,979,300	59,989,650	59,990	34,582,833	576.48
เชียงราย	405,848	275,570,792	137,785,396	137,785	79,430,525	576.48
ลำปาง	183,694	124,728,226	62,364,113	62,364	35,951,664	576.48
ลำพูน	81,153	55,102,887	27,551,444	27,551	15,882,856	576.48
น่าน	732,914	497,648,606	248,824,303	248,824	143,442,234	576.48
แพร่	279,452	189,747,908	94,873,954	94,874	54,692,937	576.48
พะเยา	254,110	172,540,690	86,270,345	86,270	49,733,128	576.48
แม่ฮ่องสอน	59,426	40,350,254	20,175,127	20,175	11,630,557	576.48
ตาก	527,859	358,416,261	179,208,131	179,208	103,309,903	576.48
สุโขทัย	61,607	41,831,153	20,915,577	20,916	12,057,412	576.48
พิษณุโลก	238,284	161,794,836	80,897,418	80,897	46,635,744	576.48
อุตรดิตถ์	183355	124,498,045	62,249,023	62,249	35,885,316	576.48
รวม	3,184,402	2,162,208,958	1,081,104,479	1,081,104	623,235,110	

จังหวัด (ภาคเหนือ)	ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ (m^3/ton)	ทดแทนการใช้ก๊าซหุงต้ม (kgLPG/m3)	ผลประหยัดจากการทดแทนก๊าซหุงต้ม (Baht/kgLPG)	ทดแทนการใช้ไฟฟ้า kWh/m3	ผลประหยัดจากการทดแทนไฟฟ้า Baht/kWh
เชียงใหม่	576.48	15,908,103	353,796,219	41,499,400	175,127,468
เชียงราย	576.48	36,538,042	812,606,044	95,316,630	402,236,179
ลำปาง	576.48	16,537,765	367,799,902	43,141,997	182,059,226
ลำพูน	576.48	7,306,114	162,487,972	19,059,427	80,430,784
น่าน	576.48	65,983,428	1,467,471,433	172,130,681	726,391,474
แพร่	576.48	25,158,751	559,530,623	65,631,524	276,965,033
พะเยา	576.48	22,877,239	508,789,798	59,679,754	251,848,563
แม่ฮ่องสอน	576.48	5,350,056	118,985,253	13,956,669	58,897,142
ตาก	576.48	47,522,555	1,056,901,632	123,971,884	523,161,349
สุโขทัย	576.48	5,546,409	123,352,143	14,468,894	61,058,732
พิษณุโลก	576.48	21,452,442	477,102,311	55,962,892	236,163,405
อุตรดิตถ์	576.48	16,507,246	367,121,142	43,062,380	181,723,243
รวม		286,688,151	6,375,944,470	747,882,132	3,156,062,597

*ก๊าซชีวภาพ 1 m3 มีค่าความร้อนเทียบเท่า : ทดแทนก๊าซหุงต้ม (LPG) 0.46 kg

*ก๊าซหุงต้ม 15 kg (ราคาควบคุม) 333.62 บาท

*ก๊าซหุงต้ม 1 kg (ราคาควบคุม) 22.24 บาท

*ก๊าซชีวภาพ 1 m3 มีค่าความร้อนเทียบเท่า : ทดแทนไฟฟ้า 1.2 kW

*ก๊าซหุงต้ม 1 kW (ราคาควบคุม) 4.22 บาท/kW

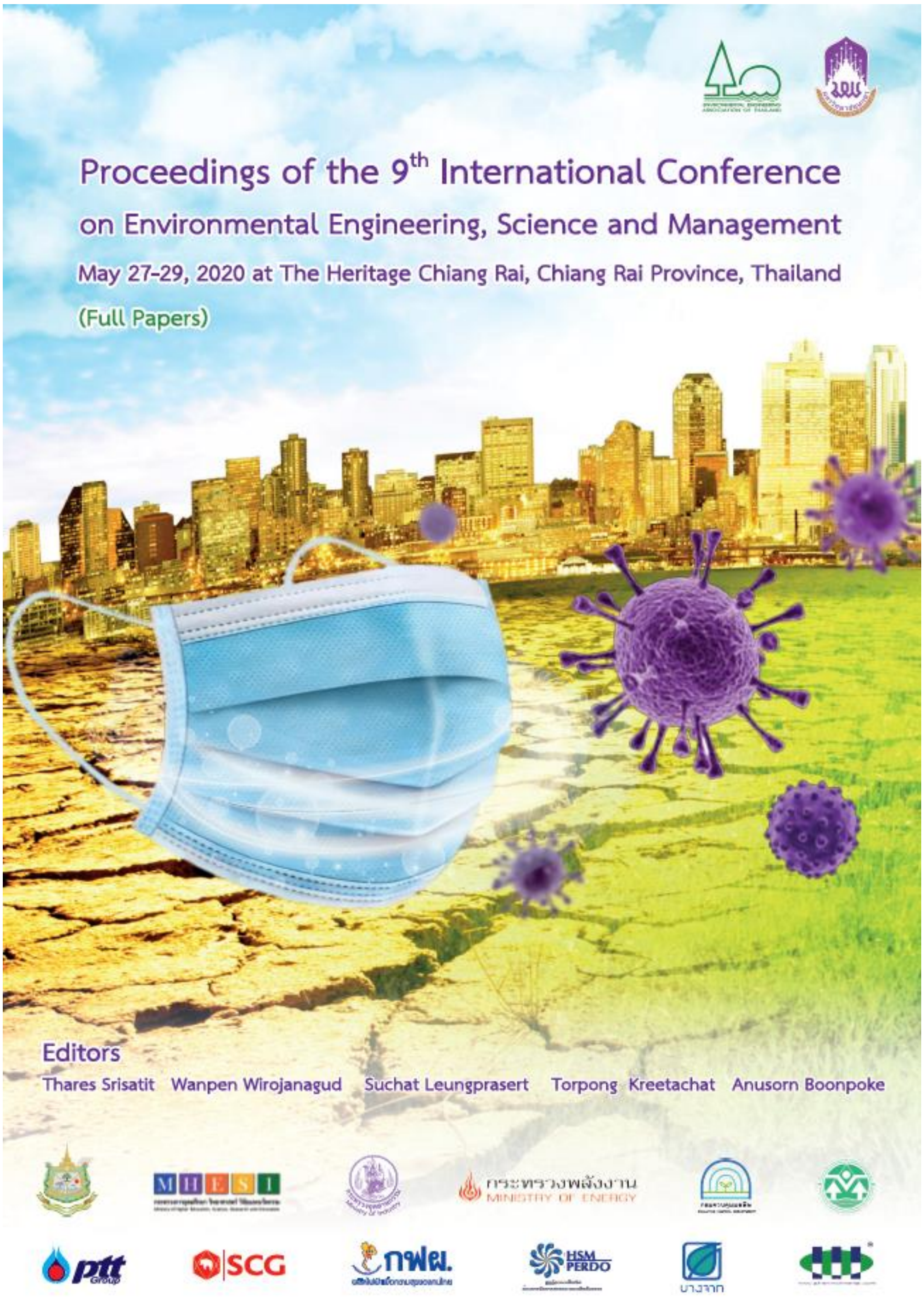
การประเมินการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

ตารางที่ 40 การประเมินการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

การประเมินการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก		
ศักยภาพในการแทนที่ LPG	100.99	L/ $ton_{maize\ residues}$
ค่าสัมประสิทธิ์การปล่อยก๊าซเรือนกระจกของ LPG	0.063	kg CO_2/MJ
การใช้ก๊าซชีวภาพในการผลิตความร้อน		
การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตก๊าซชีวภาพและการลดการใช้ LPG	169.37	kg CO_{2eq}/$ton_{maize\ residues}$
การใช้ก๊าซชีวภาพในการผลิตไฟฟ้า		
การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกจากการผลิตไฟฟ้า	147.94	kg CO_{2eq}/ $ton_{maize\ residues}$

MAEJO UNIVERSITY

ภาคผนวก ฉ
บทความวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่ในระดับนานาชาติ



CONTENTS

ORAL

I 002 **1**
Decolorization and COD Reduction of Effluent from Biogas Chamber by Electro-Fenton Process
Preenaphan Tanteerapolchai, Paiboon Sreearunothai, Korakot Sombatmankhong and Maythee Saisriyoot

I 003 **9**
Cultivation of *Chlorella sp.* in Chicken Farm Biogas Effluent for CO_2 and Nutrient Removal
Kamoldara Reansuwan, Saoharit Nitayavardhana and Sirichai Koonaphapdeelert

I 004
Suitable Electric Canal Bus for Bangkok: First Preview **15**
Oravit Hemachudha and Chugiat Wichiencharoen

I 050
Development of Activated Carbons from Rubber Wood Using Microwave Induced Phosphoric Acid Activation **277**
Panatda Klingklay, Kittipong Kunchariyakun, Weerawut Chaiwat and Suthatip Sinyoung

I 055
Environmental Health Needs Assessment for Local Government Flood Response in Nakhon Si Thammarat, Thailand **283**
Jariya Matrongduang, Nutta Taneepanichskul, Wandee Sirichokchatchawan, Suthirat Kittipongvises, Athit Phetrak and Jenyuk Lohwacharin

I 056
Assessment of Biomethane Potential (BMP) from Different Kinds of Maize Residue Component **288**
Nuttawan Suebnanta, Rotjapun Nirunsin, Tanate Chaichana and Thapana Cheunbarn

I 057
Development of Proactive and Holistic Air Quality Management Approach for Factories **295**
Sudjit Karuchit, Nares Chuersuwan, Nirun Kongritti and Tananchai Wannasook

I 058
Adsorption of Mercury by Metal-Organic Frameworks in Saline Phase **302**
Korfun Borisutsawad, Chalita Ratanatawanate and Patiparn Punyapalakul

Assessment of Biomethane Potential (BMP) from Different Kinds of Maize Residue Component

Nuttawan Suebnanta[1], Rotjapun Nirunsin[2*], Tanate Chaichana[2] and Thapana Cheunbarn[3]

[1]Graduate student; [2]Assistant Professor, Department of Renewable Energy Engineering, School of Renewable Energy, Maejo University Chiang Mai 50290, Thailand [3]Assistant Professor, Faculty of Science, Maejo University Chiang Mai 50290, Thailand.
**Phone: 091-479-7152, Fax: 053-875-599, E-mail: rotjapun@gmail.com*

ABSTRACT
The air pollution caused by burning agricultural waste has been a major problem in the countryside for a long time, because it is considered to be the source of harmful fine particles such as PM 2.5. Biogas system is an attractive technology which converts waste to energy to be used as fuel. The objective of this research was to study the biomethane potential from four different kinds of maize residue component, consisting of the stalks, leaves, husks, and cobs, fermented with pig manure sludge. Biogas production experiment was conducted in glass bottles (1,000 ml) with 400 ml working volume. Then, 6 g VS L^{-1} of the inoculum was added in the bottles with substrate to inoculum ratio of 70:30 g VS L^{-1} (S/I ratio 2.3). All experiments were done under mesophilic condition (35 ± 2°C) with 40 days retention time and all of them were replicated three times. The VS/TS ratios of stalk, leaves, husks and cobs, indicated bio-digestibility of the digesters, which reached high value of 0.875, 0.884, 0.940 and 0.940, respectively.The highest cumulative biogas productions from leaves, husks, cobs and stalks were of 8,550, 6,615, 5,882 and 753 ml, accordingly. In addition, the highest daily biogas yield from the substrates such as leaves, husks, cobs and stalks were 214, 165 and 147 and 19 ml/day, respectively. The average of methane yield of stalk, leaves, barks and cobs in 40 days were 0.0004, 0.3075, 0.2373 and 0.1985 $m^3/kg\ VS_{added}$, and the average of mathane percentage were 11.7, 50.66, 47.11 and 44.97 respectively. This research found that the maize leaves have the highest cumulative biogas productionof 8,550 ml the daily biogas yield 214 ml/day and the highest methane percentage of 50.66. Therefore, the leaves have the highest potential for biogas production.

Keywords : biomethane potential; maize residue; biogas production; agricultural wastes

INTRODUCTION

Energy has become an essential element in our daily life, however, this energy is depleting due to overconsumption by human. Therefore, the alternative energy is investigated such as solar energy, wind energy and biogas production [1]. The biogas production is the most attractive alternative energy due to its continuous production. Biogas production in Thailand could be produced from wastewater from industrial plants, agricultural waste, animal farms and agricultural wastes, etc. Agricultural waste materials such as wood waste, grass, bagasse, rice husk, corn husk and corn cobs, could be used as the source of raw materials for biogas production [1]. Those agricultural wastes, especially corn cobs or maize residues, have the potential to transform into an energy source in terms of quantity and quality. In the past, farmers have always used a burning method to eliminate them because it is easier and faster than other methods, however, at the present, burning is concerned as it the main cause of pm 2.5 problems in Thailand.The method that is commonly used to produce biogas is biological process via anaerobic fermentation. The anaerobic fermentation consists of four steps [1] which are hydrolysis, acidogenesis, acetogenesis and methanogenesis, respectively. In hydrolysis, a large molecule (carbohydrate, protein and lipid) are broken down into small molecules (sugar, amino acid and fatty acid). The second step is acidogenesis, where small molecule are further converted to organic acid, for example, acetic acid, propionic acid, butyric acid, valeric acid and lactic acid. Most organic acids are fermented and acetic acid is the main product under acetogenesis. Finally, the methane gas (CH_4) is produced under methanogenesis step by methanogens [2].

Therefore, the objective of this research is to study the biomethane potential from four different kinds of maize residue components consisting of the stalks, leaves, husks, and cobs for investigate proper condition of biogas production from maize residue and to generate useful results for better alternative solutions to the farmers in eliminating maize residues instead of burning and as a means to reduce energy costs.

METHODOLOGY

1. Inoculum and Substrate Preparation

The inoculum in this study was pig manure sludge [3] in anaerobic digester tank, collected from a biogas plant in Chiang Mai, Thailand. The characteristics of inoculum was shown in Table 1.

Table 1. The characteristics of inoculum.

Characteristic	Unit	Value
Total Solid (TS)	mg/l	75,702
Volatile Solid (VS)	mg/l	56,937

In this study, substrates were four different kinds of maize residues such as stalks, leaves, husks and cobs. They were grinded with a blender at 14,000 rpm for 15 minutes into small pieces about 1-5 mm in length [4]. After that the biomass was pre-acidified at ambient temperature for 72 hours to enhance hydrolysis, acidogenesis and subsequently methanogenesis [2]. It was kept at below 4 °C before use. The characteristics of the studied maize residues were shown in Table 2.

A.Corn Stalks B. Corn Leaves

C. Corn husks D. Corn Cobs

Figure 1. The Maize residues (A.corn stalks, B.corn leaves C.corn husks and D.corn cobs) after pre-acidify.

Table 2. The characteristics of maize residues used in the experiment.

	Maize residues			
	Stalks	Leaves	Husks	Cobs
Proximate Analysis				
TS (mg/L)	99,698	273,627	269,997	380,621
VS (mg/L)	87,270	241,976	253,748	357,613
VS/TS ratios	0.875	0.884	0.940	0.940
MC (%wt.)	9.83	12.26	11.02	9.24
VM (%wt.)	72.92	67.23	73.72	73.16
FC (%wt.)	15.77	11.89	13.90	16.04
Ash (%wt.)	1.48	8.62	1.36	1.57
Ultimate Analysis				
C (%wt.)	42.827	37.843	41.850	43.163
H (%wt.)	5.917	5.655	6.053	6.033
N (%wt.)	0.340	1.473	0.218	0.523
S (%wt.)	<0.01	0.083	<0.01	<0.01
O (%wt.)	43.654	41.365	45.566	44.620
HHV (kcal/kg)	3,366	2,981	3,244	3,356

2. Biomethane Potential (BMP Test)

For this part, the setting up of BMP test was shown as figure 2 and described as the following. Initially, four different kinds of maize residues components (stalks, leaves, husks and cobs) were added in glass bottles (1,000 ml) with 400 ml of working volume. After that, 6 g VS L^{-1} of the inoculum was added in the bottles [5] with the ratio substrate to inoculum of 70:30 g VS L^{-1} (S/I ratio 2.3) and then nutrient solution was mixed into experimental bottles until total volume reached 400 ml. Next, the alkalinity of the samples was adjusted to pH value of approximately 7.00 with sodium bicarbonate ($NaHCO_3$). Finally, the residual oxygen was removed by the addition of nitrogen gas (N_2) [4,5]. Then it was sealed with a septum and a rubber cap. All experiments were done under mesophilic condition (35 ± 2°C) [5] for 40 days retention time and all of them were replicated for three times.

Figure 2. Biomethane Potential (BMP Test)

3. Analytical Methods
The total solids (TS), volatile solids (VS), COD and total alkalinity of the maize residues and inoculum were measured according to the APHA standard methods [6]. All parameter analysis was triplicated to ensure the precision.

Quantity of biogas productions was determined via measurement of gas pressure using a Digital Manometer (DM9200) and Biogas analyzer (Gas data version GFM406) was used to measure for gas compositions.

RESULT AND DISCUSSION

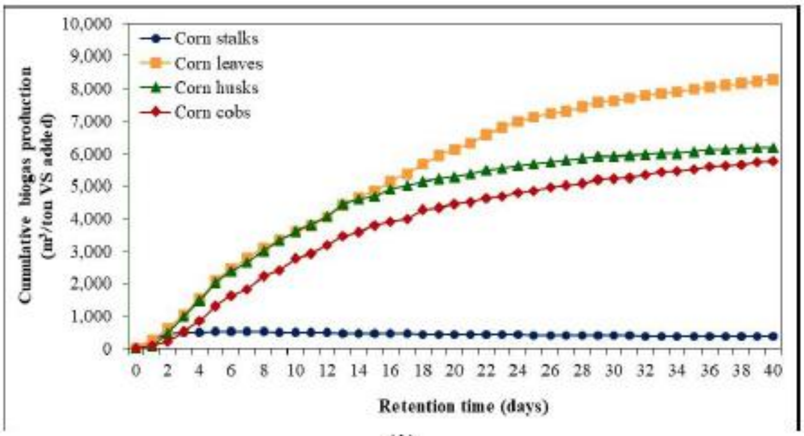
1. The characteristics of substrate and inoculum
Characteristics of maize residues were determined by using proximate and ultimate analysis. The results were shown in table 2, the VS/TS ratios of stalks, leaves, husks and cobs indicated the bio-digestibility of each digester bottles that had high value of 0.875, 0.884, 0.940 and 0.940, respectively. Basically, a substrate with VS/TS ratio over 0.80 was considered as the potential feedstock for anaerobic digestion [7]. The ultimate analysis showed percentage of chemical elemental compositions. Carbon (C) amount is major elemental composition that showed potential of substrate . The percentage of carbon composition in the stalks , leaves, husks and cobs were 42.827, 37.843, 41.850 and 43.163, respectively. All values were in the range of 37.80 - 45.00 %. Solid waste which had a high percentage of carbon validated sufficient potential to be substrate in anaerobic digestion process. Hence, the proximate and ultimate result analysis of the maize residues guarantees that all four different kinds of maize residues could be used as the substrate in biogas production [8].
The important operating parameter such as COD, TS, and VS removal efficiency were study to indicate the reactor performance and were shown in the table 3, The final VS removal efficiency of stalks, leaves, husks and cobs were 26.60%, 87.59%, 86.77% and 86.43% respectively. The initial pH ranges of 5.80 to 7.10 as observed in Table 3 also suggested the better performance of anaerobic digestion of maize residues and pig manure sludge in biogas production [9], the final pH ranges of 4.71 to 6.45 also reported that methanogenesis in anaerobic digester occured efficiency at pH 6.5 – 8.2 while hydrolysis and acidogenesis had high efficiency for operating at pH 5.5 and 6.5 [9,10]. So, the appropriate value of pH ranges of substrates enhanced biogas production.

Table 3. Biogas and Methane Yields of Different Substrates in Biomethane Potential Assays.

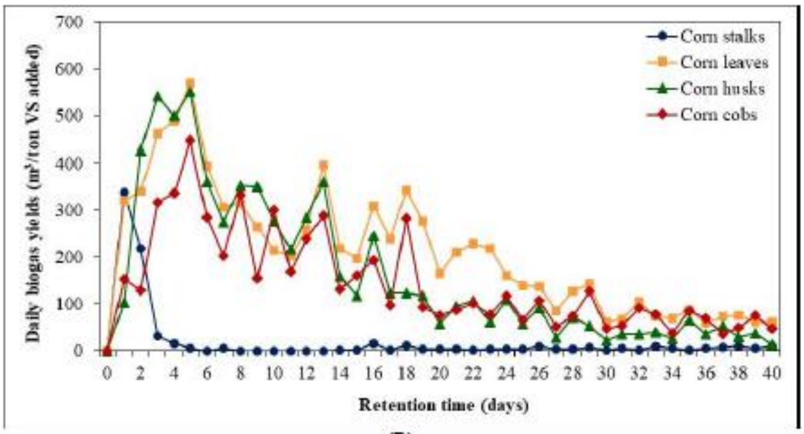
Parameter	Maize residues			
	Stalks	Leaves	Husks	Cobs
Biogas yield (m^3/kg VS_{added})	0.0873	0.6195	0.4793	0.4262
Methane yield (m^3/kg VS_{added})	0.0004	0.3075	0.2373	0.1985
CH_4 (%)	11.70	50.66	47.11	44.97
Initial pH	5.84	6.23	7.07	6.73
Final pH	4.71	6.07	6.45	6.17
VS removal (%)	26.60	87.59	86.77	86.43
COD removal (%)	57.35	85.16	75.17	67.98

2. Biomethane potential

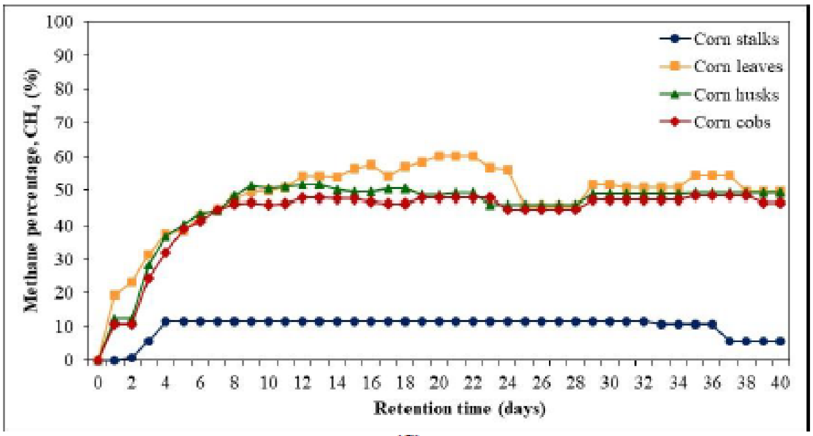
Cumulative biogas production and methane percentage of BMP test from different kinds of maize residue components fermented for 40 days were shown in Figure 3 (A) and (B), respectively. The highest cumulative biogas productions from leaves, husks, cobs and stalks are of 8,550, 6,615, 5,882 and 753 ml, respectively. All the data increased exponentially in the initial phase of anaerobic digestion, which corresponded to the hydrolysis, acidogenesis and acetogenesis stages that converted rapidly to biodegradable organic matter, namely acetic acid [11] and then methanogens created methane from the final products of acetogenesis as well as from some of the intermediate products from hydrolysis and acidogenesis in the final stage of anaerobic digestion or Methanogenesis. However, when the experiment exceeded 30 days, the reaction rates started to be stable as the easily degradable components depleted [1]. In addition, the highest daily biogas yield from the substrates such as leaves, husks, cobs and stalks were 214, 165 and 147 and 19 ml/day, respectively. In which the daily biogas yields correlate positively to the cumulative biogas productions [12].



(A)



(B)



(C)

Figure 3. Cumulative biogas production (A) Methane percentage (B) and Dally biogas yields (C) of maize residue components in biomethane potential test.

The average of methane yield from maize residues such as stalks, leaves, husks and cobs in 40 days were 0.0004, 0.3075, 0.2373, and 0.1985 m3/kg VS_{added}, respectively. The average methane percentages in 40 days were 11.7, 50.66, 47.11 and 44.97 respectively. Due to the differences in chemical composition, the stalks, leaves, husks and cobs of maize residue, resulted in highly different performance in the anaerobic digestion via biomethane potential [12]. The maize leaves had the highest methane yield and methane percentage, but the maize stalk had lowest cumulative biogas production, methane yield and methane percentage [11], because stalks had higher lignin and cellulose content, they degraded slower than the leaves, husks and cobs. The leaves had the highest degradation rate because of its high content of soluble components and hemicellulose.

CONCLUSION

This research work presented the biomethane potential from four different kinds of maize residue components such as stalks, leaves, husks and cobs, with substrate to inoculum ratio of 70:30 gVS L^{-1}.This research found that the maize leaves had the highest cumulative biogas production of 8,550 ml, the daily biogas yield of 214 ml/day and highest methane percentage of 50.66. Therefore, the leaves have the highest potential for biogas production.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to gratefully acknowledge the following supporters of this research; School of Renewable Energy at Maejo University, Graduate School at Maejo University and National Research Council of Thailand (NRCT). We likewise greatly appreciate the critical and constructive comments from the anonymous reviewers, which have helped improve this manuscript.

REFERENCES

[1] Chanokphon Wan. 2015. Biogas production from combined fermentation of pretreatment corn plants together with glycerol waste. National Academic Conference, Kasetsart University. The 9th Kamphaengsaen Campus 1837.

[2] Chen, C., Zheng, D., Liu, Deng, L and et. 2015. Continuous Dry Fermentation of Swine Manure for Biogas Production. Waste Management. 38: 436-442.

[3] Feodorov, V. Modern Technol.ogies of Treatment and Stabilization for Sewage Sludge from Water Treatment Plant. Agric. Agric. Sci. Procedia 2016, 10, 417–430.

[4] Jameson Filer, Huihuang H. Ding and et. 2019.Biochemical Methane Potential (BMP) Assay Method for Anaerobic Digestion Research. School of Engineering, University of Guelph, 50 Stone Road E., Guelph, ON N1G 2W1, Canada. Water 2019, 11, 921.

[5] Wanqin, Z., Quanyuan, W. and et.,2014. Batch Anaerobic Co-Digestion of Pig Manure with Dewatered Sewage Sludge Under Mesophilic Conditions. Applied Energy. 128, 175–183.

[6] American Public Health Association, American Water WorksAssociation, and Water Environment Federation: Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater,23th ed.;:Washingtion, DC, 2017.

[7] Yu, H., and Fang, P. 2002. Acidogenesis Of Dairy Wastewater at Various pH Levels. Water Science and Technology. 45 (10), 201–206.

[8] Yeqing Li et. Al. 2013 .Evaluating Methane Production from Anaerobic Mono- and Codigestion of Kitchen Waste, Corn Stover, and Chicken Manure. Energy & Fuels.

[9] Akindele OKEWALE, Kamoru BABAYEMI, Olusola ADESINA. 2018. Biogas Production from Anaerobic Co–Digestion of Corn Cobs, Pig and Poultry Droppings. ABUAD Journal of Engineering Research and Development (AJERD) ISSN: 2645-2685. Volume 1, Issue 2, 273-282.

[10] Eze J. I.1,2* and Ojike O.1, 2012.Anaerobic production of biogas from maize wastes. International.Journal of the Physical Sciences Vol. 7(6), pp. 982 - 987, DOI: 10.5897/IJPS11.1519. Academic Journals. ISSN 1992 – 1950.

[11] E. K. Tetteh4 and et. 2017. Biochemical Methane Potential (BMP) of Miscanthus Fuscus for Anaerobic Digestion. International Journal of Scientific and Research Publications, Volume 7, Issue 12, December 2017 .ISSN 2250-3153.

[12] Haipeng Xu a,b 2019. Methane production from the anaerobic digestion of substrates from corn Stover Differences between the stem bark, stem pith, and leaves. Science of the Total Environment 694 133641.

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	ณัฐวรรณ สืบนันตา
เกิดเมื่อ	15 พฤษภาคม 2539
ประวัติการศึกษา	ระดับปริญญาตรี ปีที่สำเร็จการศึกษา 2561 หลักสูตร วิทยาศาสตรบัณฑิต (เคมีอุตสาหกรรมและเทคโนโลยีสิ่งทอ) สถาบัน มหาวิทยาลัยแม่โจ้
ประวัติการทำงาน	งานวิจัย 1) ผลของอัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่อซัลไฟด์ไอออนในกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพ ซึ่งได้รับความร่วมมือจากสาขาเคมีอุตสาหกรรมและเทคโนโลยีสิ่งทอ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ 2) การวิเคราะห์คุณภาพวัตถุดิบเพื่อใช้ในการผลิตกระดาษและวิเคราะห์คุณภาพของกระดาษ ซึ่งได้รับความร่วมมือทั้งสาขาเคมีอุตสาหกรรมและเทคโนโลยีสิ่งทอ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ และ บริษัท ปัญจพล พัลพ์ อินดัสตรี้ จำกัด (มหาชน) และ บริษัท ปัญจพล เปเปอร์ อินดัสตรี้ จำกัด ทุนการศึกษา 1) ทุนสนับสนุนการศึกษา โครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทน ในกลุ่มประเทศอาเซียน สำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ประจำปีงบประมาณ 2560-2561 ประเภทที่ 1 (อุดหนุนเต็มจำนวน) จำนวนเงินสนับสนุน 480,000 บาท จากวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ 2) ทุนสนับสนุนการวิจัยจาก สำนักงานประสานงานโครงการวิจัยพัฒนาเศรษฐกิจจากฐานความหลากหลายทางชีวภาพ ประจำปีงบประมาณ 2562