

ต้นแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวาน
ด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง



ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
มหาวิทยาลัยแม่โจ้
พ.ศ. 2562

ต้นแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวาน
ด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

สำนักบริหารและพัฒนาระบบการผลิตพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2562

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้

ต้นแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวาน
ด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง

ศศิธร ไสปลา

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รจพรธม นีร์ฤศิลป์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จุฑาภรณ์ ชนะถาวร)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิกราน หอมดวง)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รุปน ชื่นบาล)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ประธานอาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตร

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธเนศ ไชยชนะ)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

สำนักบริหารและพัฒนาวิชาการรับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.ญาณิน โอภาสพัฒนกิจ)

รักษาการแทนรองอธิการบดี ปฏิบัติการแทน

อธิการบดีมหาวิทยาลัยแม่โจ้

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ชื่อเรื่อง	ต้นแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวาน ด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง
ชื่อผู้เขียน	นางสาวศศิธร ไสปลา
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รจพรรณ นิรัฐศิลป์

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาระบบการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวาน โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ ขนาด 1,000 L ทำการศึกษาในระดับ Pilot Scale ภายใต้สภาวะการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนแบบแห้ง ที่อุณหภูมิตามสภาพแวดล้อมในช่วง 31.88–36.66 °C ค่าของแข็งเริ่มต้นทั้งหมด (TS) เท่ากับ 25% (w/v) ระบบมีลักษณะการป้อนวัสดุหมักแบบกะ (Batch Fermentation) วัตถุดิบที่ใช้คือ วัสดุเหลือทิ้งของข้าวโพดหวาน ประกอบไปด้วย ชัง เปลือก และเมล็ดคัดทิ้งในสัดส่วน 54:44:2 (w/w) หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้คือ กากตะกอนน้ำเสียและกากตะกอนมูลสุกรในสัดส่วน 1:2 (v/v) อัตราส่วนของวัตถุดิบต่อหัวเชื้อจุลินทรีย์ (F/I Ratio) เท่ากับ 1 kg : 4 L เป็นระยะเวลาในการทดลองจำนวน 30 days โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 4 ส่วน ประกอบด้วย ส่วนที่ 1 การศึกษาผลของการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบด้วยต่าง NaOH 2% (w/v) เป็นระยะเวลา 48 h และด้วยกระบวนการแบบ Pre-acidification เป็นระยะเวลา 72 h จากการศึกษาพบว่า การปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบด้วยด้วยกระบวนการแบบ Pre-acidification เป็นระยะเวลา 72 h ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดค่า COD, TS และ VS ได้ดีกว่าการปรับสภาพด้วยต่าง NaOH 2% (w/v) เป็นระยะเวลา 48 h เท่ากับ 56.84%, 41.96% และ 39.81% ตามลำดับ ส่วนที่ 2 การศึกษาผลของระยะเวลาการกวนผสมและการหมุนเวียนตะกอนที่เหมาะสม โดยระบบมีการกวนและไม่กวนผสมภายในระบบ สำหรับการกวนผสมจะทำการกำหนดอัตราการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนทุก ๆ 3, 6 และ 12 h จากการศึกษาพบว่า ที่อัตราการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนทุก ๆ 3 h ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดค่า COD, TS และ VS ดีที่สุด เท่ากับ 85.42%, 62.92% และ 64.59% ตามลำดับ อีกทั้งยังมีปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อวัน และก๊าซชีวภาพสะสมมากที่สุด เท่ากับ 293.36 L/day และ 9,094.24 L สัดส่วนของก๊าซมีเทนสูงสุด และสัดส่วนของก๊าซมีเทนเฉลี่ยมากที่สุด เท่ากับ 59.6% และ 49.5% ตามลำดับ รวมถึงให้ผลผลิตของก๊าซมีเทนจำเพาะเฉลี่ย เท่ากับ 0.771 L CH₄/gVS_{added} ส่วนที่ 3 การออกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งของข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง จากผลการศึกษาพบว่า

ลักษณะของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ชนิดสมการถดถอยแบบโพลิโนเมียล (Polynomial Regressions) กำลัง 5 จะให้ค่า R^2 มีค่าเท่ากับ 0.998 โดยแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรต้นในแนวแกน X (Time, Day) ที่มีความสัมพันธ์ต่อตัวแปรตามในแนวแกน Y (Biogas Accumulation, Liter) อย่างมีนัยสำคัญ โดยจะมีลักษณะของสมการ ดังนี้ $Y = 0.005X^5 - 0.451X^4 + 15.247X^3 - 249.291X^2 + 2,104.425X + 278.354$ และส่วนที่ 4 การวิเคราะห์หาต้นทุนพลังงานต่อหน่วยของระบบการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งของข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง โดยต้นทุนการผลิตก๊าซหุงต้มต่อหน่วยของระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่ให้ค่าน้อยที่สุดคือ การกวนผสมและหมუნเวียนทุกๆ 6 ชั่วโมง มีค่าเท่ากับ 17.47 Baht/kg LPG โดยให้ต้นทุนการผลิตก๊าซหุงต้มต่อหน่วยของการผลิตก๊าซหุงต้มถูกกว่าอัตราการกวนผสมและหมუნเวียนทุก ๆ 3 h มากถึง 5.79% ดังนั้นในการพิจารณาถึงความเหมาะสมของกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้งจะเลือกการเลือกอัตราการกวนผสมและหมუნเวียนตะกอนทุก ๆ 6 h โดยอัตราการกวนผสมของระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่ค่าของแข็งทั้งหมด (TS) ที่มากกว่า 20% ไม่จำเป็นต้องกวนผสมตลอดเวลา แต่เพียงต้องกวนเป็นครั้งคราว เพื่อให้สารอินทรีย์กับจุลินทรีย์ได้เกิดการผสมกันเข้ากันมากยิ่งขึ้น เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพได้อีกทางหนึ่ง

คำสำคัญ : ก๊าซชีวภาพ, ระบบการหมักแบบแห้ง, ระยะเวลาการกวนผสมและการหมუნเวียนตะกอน, ต้นทุนการผลิตก๊าซหุงต้มต่อหน่วย

Title	A PROTOTYPE OF BIOGAS PRODUCTION SYSTEM FROM SWEET CORN WASTE BY DRY FERMENTATION
Author	Miss Sasithorn Saipa
Degree	Master of Engineering in Renewable Energy Engineering
Advisory Committee Chairperson	Assistant Professor Dr. Rotjapun Nirunsin

ABSTRACT

This research aims to study the biogas production from sweet corn waste by using the pilot-scale complete stirred tank reactor (CSTR) with the total volume of 1,000 L. The reactor was operated as dry anaerobic digestion at an ambient temperature ranging between 31.88 and 36.66 °C. The substrate used in this study was the mixture of corn cobs, corn husks and corn seeds at the ratio of 54:44:2 by weight and was fed in a batch mode. The inoculum was the mixture of anaerobic sludge and pig manure at the ratio of 1:2 (v/v). The ratio between feed and inoculum (F/I Ratio) was set as 1 kg : 4 L to shorten the start-up period in batch fermentation system. The initial total solid (TS) of the feedstock was 25%, and hydraulic retention time (HRT) was 30 days. The experiments were divided into 4 parts. The first part is to study the biomass pretreatments (i.e. using NaOH 2% (w/v) for 48 h and pre-acidification for 72 h) to enhance the methane production. According to the results from the experiments, it was found that the pre-acidification for 72 h showed a significant higher efficiency of COD, TS and VS removal compared to those of the pretreatment with NaOH 2% (w/v) (56.84%, 41.96% and 39.81%, respectively). The 2nd part was to study the effects of mixing time and circulating sludge frequency on biogas production. The mixing and recirculation intervals were set to be non-mixing as a control condition, and mixing every 3, 6 and 12 h for 10 minutes between 6.00 am to 6.00 pm. The results indicated that mixing and sludge recirculating every 3 h showed the highest efficiency with COD, TS and VS removal of 85.42%, 62.92% and

64.59%, respectively. The average biogas production and biogas accumulation were 293.36 L/day and 9,094.24 L, respectively. The maximum and the average of methane contents were 59.6% and 49.5%, respectively. The specific methane yield was 0.771 L CH₄/g VS_{added}. In Part 3, the mathematical was developed to explain the correlation between biogas accumulation (Y-axis) and operating time (X axis). That selected operating condition was the operating pattern the presented the highest biogas accumulation at the retention time of 30 days (i.e. mixing and circulation rate for every 3 h). According to studies, it was found that the 5th degree polynomial regression was the best model to explain the results from the study with the R² high as 0.998. The prediction equation was $Y = 0.005X^5 - 0.451X^4 + 15.247X^3 - 249.291X^2 + 2,104.425X + 278.354$. The final part of this research is to analyze the unit cost of the LPG produced from biogas production from sweet corn waste by anaerobic dry fermentation. The lowest LPG cost per unit of LPG produced from the anaerobic dry fermentation of the sweet corn wastes was 17.47 Baht/kg LPG which was obtained at the mixing and recirculation rate at every 6 h, which is lower than that of the mixing and recirculation rate every 3 h up to 5.79%. Therefore, when considering the appropriate mixing and sludge recirculation frequencies, the mixing and recirculation rate interval of every 6 h could be the best operating condition. In conclusion, the intermittent mixing and recirculation rate might be the better reactor operation of anaerobic dry fermentation of the sweet corn waste with total solid content (TS) being more than 20% in enhancing biogas production compared to continuous mixing.

Keywords : Biogas, Dry Fermentation, Mixing and Recirculating Rate, Levelized LPG Cost Per Unit

กิตติกรรมประกาศ

สำหรับการจัดทำเล่มวิทยานิพนธ์ฉบับสมบูรณ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงผ่านไปได้ด้วยดีต้องขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รจพรธม นิธิยุทิสศิลป์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก รวมถึง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จุฑาภรณ์ ชนะถาวร ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิกราน หอมดวง และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ฐปน ชื่นบาล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษา คำชี้แนะ และแนวทางการแก้ปัญหา รวมทั้งให้กำลังใจในการทำวิทยานิพนธ์ตลอดมา อีกทั้งยังช่วยตรวจทาน แก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้มีความถูกต้องและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.สุเมธ ไชยประพัทธ์ ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยระบบพลังงาน มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้ให้เกียรติมาเป็นประธานสอบป้องกันวิทยานิพนธ์ ตลอดจนได้ให้คำแนะนำในการแก้ไขวิทยานิพนธ์เล่มนี้ให้มีความถูกต้องและสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น

ขอขอบพระคุณ บริษัท ชันสวีท จำกัด (มหาชน) ที่ได้ให้โอกาสและทุนสนับสนุนในการทำวิจัยร่วมกับสถานประกอบการ รวมถึงบุคลากรทุกคนในแผนกระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่ให้คำแนะนำ รวมทั้งความรู้ในด้านระบบผลิตก๊าซชีวภาพตลอดจนให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ และขอขอบพระคุณเจ้าของฟาร์มจำเริญสุวรรณ ฟาร์มสุกรขนาดกลางในเขตพื้นที่อำเภอแม่วาง จังหวัดเชียงใหม่ ที่ได้อนุเคราะห์กากตะกอนมูลสุกรจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบ Modified Cover Lagoon (MCL)

ขอขอบพระคุณทุนอุดหนุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาจากวิทยาลัยพลังงาน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ “โครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทนในกลุ่มประเทศอาเซียนสำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา” ประจำปี 2560 ขอขอบพระคุณทุนการศึกษาระดับบัณฑิตศึกษาจากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้ “ทุนศิษย์ก้นกุฏิ” ประจำปี 2560 และขอขอบพระคุณทุนสนับสนุนการวิจัยแผนงานเสริมสร้างศักยภาพและพัฒนานักวิจัยรุ่นใหม่ตามทิศทางยุทธศาสตร์การวิจัยและนวัตกรรมประเภทบัณฑิตศึกษา ประจำปี 2562 จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

และท้ายที่สุดนี้ต้องขอขอบพระคุณ บิดา มารดา ปู่ ย่า ตา ยาย รวมถึงทุกคนในครอบครัวที่ได้ให้กำลังใจ และทุนสนับสนุนในการทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้ ตลอดจนพี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ทุกคนที่มีส่วนคอยช่วยเหลือและให้กำลังใจทำให้การทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ช
สารบัญ.....	ซ
สารบัญภาพ	ฎ
สารบัญภาพภาคผนวก	ฅ
สารบัญตาราง.....	ณ
อักษรย่อและสัญลักษณ์.....	ด
บทที่ 1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย.....	1
วัตถุประสงค์	3
ขอบเขตการศึกษา	3
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและการตรวจสอบเอกสาร	6
ความหมายของก๊าซชีวภาพ	6
องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ.....	8
ขั้นตอนและปฏิกิริยาในการเกิดก๊าซชีวภาพ	9
ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ	11
ระบบการป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบ	18
เทคโนโลยีที่ใช้ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร	19
ประโยชน์ของก๊าซชีวภาพ	20
ข้าวโพดหวาน.....	21

การปรับสภาพเบื้องต้นของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส	26
พืชหมัก.....	29
มูลสุกร.....	30
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์.....	32
การวิเคราะห์ต้นทุนและผลตอบแทนทางพลังงาน	32
การตรวจสอบเอกสาร.....	35
บทที่ 3 อุปกรณ์และวิธีการวิจัย.....	45
การเตรียมวัตถุดิบ	45
การออกแบบเบื้องต้นระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวาน ด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง.....	49
การสร้างระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง ..	57
การทดสอบการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบตั้งต้นที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ จากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง	58
การทดสอบการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ จากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง	60
บทที่ 4 ผลการวิจัยและวิจารณ์	63
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเบื้องต้นของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพ จากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง ขนาด 1,000 L	63
ผลของการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบตั้งต้นที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ จากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง	66
ผลของการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ จากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง.....	79
ผลของการออกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของต้นแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพ จากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง	93
ผลการวิเคราะห์ต้นทุนของพลังงานต่อหน่วยของต้นแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพ จากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง	95

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	99
สรุปผลการวิจัย.....	99
ข้อเสนอแนะ	101
บรรณานุกรม.....	102
ภาคผนวก ก การสร้างระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวาน ด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง ขนาด 1,000 L.....	112
ภาคผนวก ข บทความวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่ในระดับชาติและนานาชาติ	122
ประวัติผู้วิจัย.....	136



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 ปริมาณการใช้และการผลิตพลังงานเชิงพาณิชย์ขั้นต้น	1
2 วงจรของกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพและการนำก๊าซชีวภาพไปใช้งาน	7
3 ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกาศ	9
4 ถังกวนผสมที่มีการใช้ใบพัดในการกวนผสม (Mechanical Mixing).....	15
5 ถังกวนผสมที่มีการใช้ระบบสูบน้ำเสียหมุนเวียนภายในถังปฏิกรณ์	15
6 ถังกวนผสมที่อาศัยก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์เป็นตัวกวนผสม.....	16
7 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบถังกวนผสมบูรณ (CSTR).....	19
8 องค์ประกอบต่าง ๆ ของต้นข้าวโพดหวาน	22
9 โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุเหลือทิ้งประเภทลิกโนเซลลูโลส	23
10 โครงสร้างของเซลลูโลส	24
11 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส	25
12 โครงสร้างของลิกนิน.....	25
13 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของพืชประเภทหญ้าในระหว่างการปรับสภาพเบื้องต้น	26
14 กระบวนการปรับสภาพเบื้องต้นของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส. 27	
15 กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส	30
16 วัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวาน.....	46
17 หัวเชื้อจุลินทรีย์.....	47
18 การออกแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง ขนาด 1,000 L	49
19 ลักษณะของถังปฏิกรณ์ตามมุมต่าง ๆ (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านบน	50
20 ลักษณะของระบบกวนผสมและหมุนเวียนตะกอน.....	52

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
21	ทิศทางการกวนผสมภายในถังปฏิกรณ์ 53
22	(ก) ลักษณะของแนวท่อที่ใช้ในการหมุนเวียนตะกอน (ข) ลักษณะของเครื่องวัดอุณหภูมิ 54
23	ประเภทของปั๊มให้เหมาะสมกับการใช้งาน สำหรับหมุนเวียนตะกอน 54
24	Pump Performance Curve (พิจารณาเลือกปั๊มให้เหมาะสมกับการใช้งาน)..... 55
25	ลักษณะของการทำงานของระบบเก็บก๊าซชีวภาพ 57
26	ระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง ขนาด 1,000 L 57
27	แผนภาพแสดงขั้นตอนการทดสอบผลของการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบที่ส่งผลต่อ กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ..... 59
28	แผนภาพแสดงขั้นตอนการทดสอบผลของการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนที่ส่งผลต่อ กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ..... 61
29	อุณหภูมิภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลการปรับสภาพเบื้องต้นของ วัตถุดิบ 67
30	ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษา ผลการ ปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบ 68
31	ค่ากรดไขมันระเหยง่าย (VFA) ภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษา ผลการ ปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบ 69
32	ค่าสภาพความเป็นด่าง (ALK) ภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษา ผลการ ปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบ 70
33	ค่า VFA/ALK Ratio ภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษา ผลการปรับ สสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบ 71
34	ประสิทธิภาพในการกำจัดค่า COD, TS และ VS ภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของ กระบวนการศึกษาผลการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบ 72

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
35 ปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อวันภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบ	74
36 ปริมาณของก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้นภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบ	75
37 สัดส่วนของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษา ผลการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบ	75
38 ปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบ	76
39 ปริมาณของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อวันภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบ	77
40 ปริมาณของก๊าซมีเทนสะสมภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษา ผลการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบ	77
41 ผลผลิตของก๊าซมีเทนจำเพาะภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบ	78
42 อุณหภูมิภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลของการกวนผสมและหมუნเวียนตะกอน	80
43 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลของการกวนผสมและหมუნเวียนตะกอน	81
44 ค่ากรดไขมันระเหยง่าย (VFA) ภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลของการกวนผสมและหมუნเวียนตะกอน	82
45 ค่าสภาพความเป็นด่าง (ALK) ภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลของการกวนผสมและหมუნเวียนตะกอน	83
46 ค่าอัตราส่วน VFA/ALK ภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลของการกวนผสมและหมუნเวียนตะกอน	84

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่	หน้า
47	ประสิทธิภาพในการกำจัดค่า COD, TS และ VS ภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของ กระบวนการศึกษาผลของการกวนผสมและหมუნเวียนตะกอน 85
48	ของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อวันภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลของ การกวนผสมและหมუნเวียนตะกอน 87
47	ของก๊าซชีวภาพสะสมภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลของการกวน ผสมและหมუნเวียนตะกอน 88
48	สัดส่วนของก๊าซมีเทนภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลของการกวน ผสมและหมუნเวียนตะกอน 89
49	ปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผล ของการกวนผสมและหมუნเวียนตะกอน 90
50	ปริมาณของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อวันภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษา ผลของการกวนผสมและหมუნเวียนตะกอน 91
51	ปริมาณของก๊าซมีเทนสะสมภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลของ การกวนผสมและหมუნเวียนตะกอน 91
52	ผลผลิตของก๊าซมีเทนจำเพาะภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลของ การกวนผสมและหมუნเวียนตะกอน 92
55	ปริมาณของก๊าซชีวภาพสะสมที่ได้จากการทดลองเทียบกับสมการแบบจำลองทาง คณิตศาสตร์..... 94
56	ผลผลิตก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อปีของระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวาน 96

สารบัญภาพภาคผนวก

ภาพภาคผนวกที่	หน้า
1 ลักษณะของเหล็กกล่องที่จะใช้ทำเป็นฐานรองรับถังปฏิกรณ์	113
2 การตัดเหล็กด้วยแท่นตัดไฟเบอร์	114
3 การเชื่อมฐานรองรับถังปฏิกรณ์ตามแบบที่ได้ออกแบบไว้	114
4 การเตรียมฐานรองรับถังปฏิกรณ์.....	115
5 การเจาะรูของถังปฏิกรณ์ (ตัวถังปฏิกรณ์)	115
6 การเจาะรูของถังปฏิกรณ์ (ฝาถังปฏิกรณ์)	116
7 การประกอบฝาถังปฏิกรณ์.....	116
8 การเตรียมพื้นที่วางฐานรองรับน้ำหนัก.....	117
9 การประกอบตัวถังปฏิกรณ์และฝาถังเข้าด้วยกัน.....	117
10 การเชื่อมอุปกรณ์ต่าง ๆ เข้าด้วยกัน	118
11 การติดตั้งเครื่องวัดอุณหภูมิบริเวณข้างถังปฏิกรณ์	118
12 การเชื่อมมอเตอร์กวนผสมเข้ากับคานรองรับน้ำหนัก	119
13 ทางออกของตะกอนที่ใช้ในการหมนเวียนตะกอน.....	120
14 การติดตั้งระบบหมนเวียนตะกอนเข้ากับถังปฏิกรณ์	120
15 การประกอบอุปกรณ์ของถังเก็บก๊าซชีวภาพ.....	121
16 การลำเลียงก๊าซชีวภาพจากถังปฏิกรณ์สู่ถังเก็บก๊าซชีวภาพ	121

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ.....	8
2	องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร.....	23
3	มาตรฐานน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรขนาดต่าง ๆ ของกรมควบคุมมลพิษ	31
4	วิธีวิเคราะห์คุณลักษณะของวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวาน	46
5	วิธีวิเคราะห์คุณลักษณะของหัวเชื้อจุลินทรีย์	48
6	วิธีการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพด หวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง	62
7	คุณลักษณะของวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวาน.....	63
8	คุณลักษณะของหัวเชื้อจุลินทรีย์	65
9	การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตก๊าซหุงต้ม (LPG) ต่อหน่วย	97

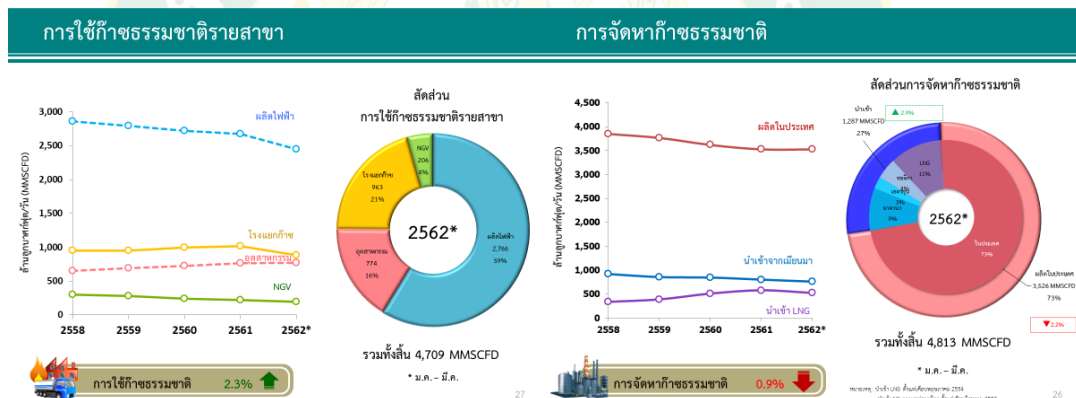
อักษรย่อและสัญลักษณ์

สัญลักษณ์	ย่อมาจาก	ความหมาย
AD	Anaerobic Digestion	กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกาศ
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 ₂ S	Hydrogen Sulphide	ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์
HT	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
VS	Volatile Solids	ของแข็งระเหย

บทที่ 1

ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

ปัจจุบันทั่วโลก รวมถึงประเทศไทยต่างกำลังประสบปัญหาการขาดแคลนทางด้านพลังงาน อาทิ พลังงานในรูปแบบของไฟฟ้า และพลังงานในรูปแบบของความร้อน ซึ่งตรงกันข้ามกับความ ต้องการใช้พลังงานที่มีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ตามการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากร อีกทั้งยังเป็นผลมาจากการขยายตัวในด้านต่าง ๆ อาทิ การเจริญเติบโตทางด้านเศรษฐกิจ ด้านสังคม และด้าน วัฒนธรรม สำหรับประเทศไทยในปี พ.ศ. 2561 มีแนวโน้มของปริมาณการใช้และการผลิตก๊าซ ธรรมชาติตั้งแต่เดือนมกราคมจนถึงเดือนธันวาคม มีที่เพิ่มสูงขึ้น 2.3% ในทางตรงกันข้าม กลับพบว่า การจัดหาก๊าซธรรมชาติใช้เองภายในประเทศกลับมีปริมาณที่ลดลง 0.9% (สำนักงานนโยบายและ แผนพลังงาน, 2562) ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ปริมาณการใช้และการผลิตพลังงานเชิงพาณิชย์ขั้นต้น

ที่มา : สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (2562)

จากสถานการณ์การใช้พลังงานและความต้องการใช้พลังงานในรูปแบบของพลังงานฟอสซิลที่เพิ่มสูงขึ้นในปัจจุบัน ทำให้คาดการณ์ได้ว่าในอนาคตแหล่งพลังงานฟอสซิลอาจจะไม่เพียงพอต่อความต้องการ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2557) ดังนั้นเพื่อให้มีพลังงานไว้ใช้เพียงพอต่อความต้องการในอนาคต จึงจำเป็นต้องหาแหล่งพลังงานใหม่หรือแหล่งพลังงานทดแทนจากแหล่งทรัพยากรทางธรรมชาติที่มีอยู่อย่างไม่จำกัด และมีเพียงพอในแต่ละแหล่งพื้นที่ โดยแหล่งพลังงานทดแทนเหล่านี้ ได้แก่ พลังงานน้ำ พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานชีวมวล และพลังงานชีวภาพ เป็นต้น (กระทรวงพลังงาน, 2558) โดยพลังงานทดแทนถือเป็นพลังงาน

ทางเลือกที่ทั่วโลกกำลังให้ความสำคัญ ประเทศไทยก็ถือเป็นอีกหนึ่งในหลาย ๆ ประเทศที่ให้ความสำคัญในเรื่องของการใช้พลังงานทดแทนที่เพิ่มมากขึ้น ลดการใช้พลังงานในรูปแบบของพลังงานฟอสซิล โดยปริมาณของการใช้พลังงานทดแทนภายในประเทศไทยโดยเฉพาะพลังงานทดแทนทางเชื้อเพลิงชีวภาพ ซึ่งประกอบด้วย ชีวมวล เอทานอล ไบโอดีเซล และก๊าซชีวภาพ ได้รับความนิยมน้อยแพร่หลาย (กระทรวงพลังงาน, 2558) เนื่องจากการนำวัสดุเหลือทิ้งทางภาคการเกษตรและภาคอุตสาหกรรมมาใช้ประโยชน์ เพื่อลดปัญหาการกำจัดวัสดุเหลือทิ้งทางภาคการเกษตรอย่างไม่ถูกวิธีรวมถึงการจัดการปริมาณของวัสดุเหลือทิ้งที่มากเกินไปจนไม่สามารถหาวิธีกำจัดได้และการนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตเชื้อเพลิงทางชีวภาพประเภทก๊าซชีวภาพเป็นอีกหนึ่งในวิธีการจัดการและแก้ปัญหาข้างต้นได้เป็นอย่างดี โดยพลังงานก๊าซชีวภาพเป็นกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะการหมักแบบไม่ใช้ออกาศ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553) โดยใช้แบคทีเรียไม่ต้องการออกซิเจนในการทำปฏิกิริยาทำให้เกิดเป็นก๊าซชีวภาพขึ้น โดยก๊าซชีวภาพดังกล่าวจะให้ผลผลิตหลักเป็นก๊าซมีเทน 50–70% (นคร ทิพย์าวงศ์, 2553) ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในด้านการให้ความร้อน เพื่อทดแทนก๊าซหุงต้ม น้ำมันเชื้อเพลิง รวมถึงด้านการผลิตไฟฟ้า (กัญญาภัค ตาจันทร์, 2556) โดยจากการสำรวจข้อมูลพื้นฐานของโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปข้าวโพดหวานในเขตพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ พบว่าปริมาณของข้าวโพดหวานที่ใช้ในการกระบวนการแปรรูปในช่วงปี พ.ศ. 2557–2560 มีปริมาณโดยเฉลี่ยวันละ 100 ton (ข้าวโพดหวานสด) โดยจากการผลิตอย่างต่อเนื่องตลอดเวลาทำให้เกิดของเสียจำนวนมาก ซึ่งสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ ประเภทที่ 1 คือ วัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวาน และประเภทที่ 2 คือ น้ำเสีย โดย วัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวาน เมื่อแยกองค์ประกอบแล้วพบว่ามีสัดส่วนของ ชัง เปลือก และเมล็ดข้าวโพดคั่วที่เท่ากับ 55:44:2 (w/w) ซึ่งชังเหลือทิ้งบางส่วนจะถูกนำไปบีบให้แห้ง เพื่อลดค่าความชื้น แล้วนำไปใช้เป็นแหล่งเชื้อเพลิงในหม้อต้มไอน้ำของโรงงานอุตสาหกรรม รวมถึงส่วนของเปลือกและเมล็ดข้าวโพดคั่วที่บางส่วนจะถูกนำไปจำหน่ายให้แก่เกษตรกร เพื่อใช้เป็นอาหารสัตว์ในราคาตันละ 500 Baht ซึ่งโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปข้าวโพดหวานในเขตพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ ยังมีความต้องการในการศึกษาเพื่อหาวิธีการจัดการวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานที่มีปริมาณมากด้วยเทคโนโลยีพลังงานที่ให้ผลผลิตด้านพลังงานที่มีประสิทธิภาพและยั่งยืน สำหรับของเสียประเภทที่ 2 คือ น้ำเสีย ปริมาณวันละ 1,000 m³ โดยในปัจจุบันน้ำเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตจะถูกบำบัดด้วยกระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกาศและแบบใช้ออกาศ โดยระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้ออกาศดังกล่าวสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ประมาณวันละ 2,000 m³ และเมื่อเปลี่ยนรูปแบบของก๊าซชีวภาพไปเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยใช้เครื่องยนต์ต้นกำลังขนาด 1 MW สามารถผลิตพลังงานไฟฟ้าได้ประมาณ 4,400 kW-h หรือเดินเครื่องยนต์ได้ประมาณ 4–5 h/day ในการนำพลังงานนั้นกลับมาใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมข้าวโพดหวาน

ดังนั้นจากข้อมูลดังกล่าวเบื้องต้น ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะนำวัสดุเหลือทิ้งจากข้าวโพดหวานมาผลิตด้วยเทคโนโลยีระบบผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนแบบแห้ง โดยมุ่งเน้นไปที่การทดสอบการผลิตในถังปฏิกรณ์ ขนาด 1000 L เพื่อนำข้อมูลไปประยุกต์ใช้กับการใช้งานเดินระบบจริงในถังปฏิกรณ์ขนาดใหญ่ตามความต้องการของผู้ประกอบการ และทำการศึกษาผลของระยะเวลาการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอน ซึ่งเป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนแบบแห้ง โดยผลงานวิจัยที่เกิดขึ้นจะเป็นแนวทางการจัดการวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยเทคโนโลยีก๊าซชีวภาพอย่างมีประสิทธิภาพเกิดประโยชน์สูงสุด และสามารถประยุกต์ใช้กับวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานทั้งในภาคเกษตรกรรม และภาคอุตสาหกรรมต่อไป

วัตถุประสงค์

1. เพื่อออกแบบและสร้างต้นแบบระบบการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง
2. เพื่อศึกษาผลของระยะเวลาการกวนผสมและการหมุนเวียนตะกอนที่เหมาะสม สำหรับกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งของข้าวโพดหวาน
3. เพื่อวิเคราะห์หาต้นทุนพลังงานต่อหน่วยและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งของข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง

ขอบเขตการศึกษา

การศึกษาเรื่อง ต้นแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง มีขอบเขตในการวิจัยดังนี้

1. ขนาดของถังปฏิกรณ์ของต้นแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง ขนาด 1,000 L
2. วัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพคือ วัสดุเหลือทิ้งจากข้าวโพดหวาน ประเภทซัง เปลือก และเมล็ดที่คั่วทิ้งของบริษัท ชันสวีท จำกัด (มหาชน)
3. การปรับสภาพซัง เปลือกและเมล็ดคั่วทิ้งข้าวโพดหวาน จะทำการปรับสภาพด้วย 2 วิธีการ คือ การปรับสภาพด้วยต่าง NaOH 2% (w/v) เป็นระยะเวลา 48 h และกระบวนการปรับสภาพแบบ Pre-acidification เป็นระยะเวลา 72 h
4. หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพคือ กากตะกอนน้ำเสียจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบ Anaerobic Filter (AF) ของบริษัท ชันสวีท จำกัด (มหาชน) ร่วมกับกากตะกอนมูล

สุกรจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบ Modified Cover Lagoon (MCL) ของฟาร์มสุกรขนาดกลางในเขตอำเภอแม่วาง จังหวัดเชียงใหม่

5. ระบบมีการกวนและไม่กวนผสมภายในระบบ สำหรับการกวนผสมจะทำการกำหนดอัตราการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนทุก ๆ 3, 6 และ 12 h โดยแต่ละรอบจะกวนผสมและหมุนเวียนรอบละ 10 min

6. การย่อยสลายภายใต้อุณหภูมิสถานะแวดล้อม

7. กระบวนการป้อนสารอินทรีย์แบบกะ (Batch Fermentation)

8. ระยะเวลาในการทดลอง 30 days

9. ทำการวิเคราะห์หาต้นทุนทางพลังงานต่อหน่วยและแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของระบบการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งของข้าวโพดหวาน

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

ประโยชน์ที่จะได้รับที่มีผลต่อการอนุรักษ์พลังงานและสิ่งแวดล้อม โดยงานวิจัยดังกล่าวคาดหวังว่าประโยชน์ในด้านต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. ทางด้านวิชาการ

- ทำให้เกิดองค์ความรู้เกี่ยวกับระบบหรือกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษวัสดุเหลือทิ้งของข้าวโพดหวาน โดยกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนแบบแห้ง

- ทำให้เกิดการพัฒนาด้านแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ขั้นตอนหรือวิธีการใช้ประโยชน์จากการนำ ซัง เปลือก เมล็ดคัดทิ้งที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมข้าวโพดบรรจุกระป๋องให้ได้ประโยชน์สูงสุด

- ทำให้ได้แนวทางของศักยภาพหัวข้อแต่ละชนิดที่สามารถผลิตชีวภาพหมักร่วมกับวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมข้าวโพดบรรจุกระป๋อง

- ทำให้เกิดองค์ความรู้ในการพัฒนาแหล่งพลังงานทดแทนในรูปแบบของพลังงานก๊าซชีวภาพในระบบการจัดการวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมข้าวโพดบรรจุกระป๋อง และผลงานวิจัยสามารถใช้เป็นแหล่งเรียนรู้ให้แก่ชุมชนใกล้เคียงหรือในอุตสาหกรรมเอง ในการนำไปเป็นต้นแบบสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพใช้เอง

2. ทางด้านสิ่งแวดล้อม

- ลดความรุนแรงของปัญหาการเผาวัสดุเหลือทิ้งการเกษตรในแปลงข้าวโพดหวาน ซึ่งนำไปสู่การลดปัญหามลพิษทางอากาศจากหมอกควันของภาคเหนือ

- ได้แนวทางที่สามารถบูรณาการความรู้ทางด้านวิชาการของพลังงานในรูปแบบของพลังงาน ก๊าซชีวภาพ การจัดการ และใช้ประโยชน์จากของเสี้ยวสุดเหลือทิ้งของข้าวโพดหวานซึ่งมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมโดยตรง

3. ทางด้านเศรษฐกิจ

- ได้แนวทางในการใช้เสี้ยวสุดเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมข้าวโพดบรรจุกระป๋องให้เกิดประโยชน์สูงสุดในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพโดยการหมักแบบแห้ง

- ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้สามารถนำมาเป็นแนวทางในการทดแทน ก๊าซหุงต้ม น้ำมันดีเซล น้ำมันเบนซิน น้ำมันเตา ฟืนไม้ อีกทั้งยังสามารถนำมาผลิตเป็นไฟฟ้าใช้ภายในโรงงานหรือขายให้การไฟฟ้าได้ เพื่อเป็นแนวทางในการลดต้นทุนในการผลิตอีกทางหนึ่ง

- เกษตรกรผู้ปลูกข้าวโพดหวาน และข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ สามารถจำหน่ายผลผลิตให้แก่หน่วยงานเอกชน โรงงานอุตสาหกรรม ที่มีนโยบายซื้อผลผลิตข้าวโพดในพื้นที่ปลอดการเผาเสี้ยวสุดเหลือทิ้งจากข้าวโพด

- ผลผลิตที่ได้หลังผ่านกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ เมื่อมีการจัดการของเสี้ยวที่ถูกรวบรวมของเสี้ยวเหล่านี้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ เช่น ปุ๋ยหมัก ปุ๋ยแห้ง อาหารสัตว์ (เคี้ยวเอื้อง) ชีวมวล และถ่านอัดแท่ง เป็นต้น เพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าของเสี้ยวในการลดต้นทุนในการผลิตอีกทางหนึ่ง

4. ทางด้านสังคม

- ลดปัญหาการเผาเสี้ยวสุดเหลือทิ้งการเกษตรในแปลงข้าวโพดหวาน รวมถึงเป็นการส่งเสริมให้ประชาชนในภาคเหนือตระหนักถึงปัญหามลพิษหมอกคด days ที่เกิดจากการเผา โดยมีการร่วมมือกันในการพัฒนาชุมชนให้เข้มแข็ง พึ่งตนเองได้ และสร้างคุณภาพชีวิตที่ดีให้แก่ชุมชน

- ทำให้ชุมชนเกิดองค์ความรู้ในเรื่องของการพัฒนาเพิ่มมูลค่าของเสี้ยวที่ผ่านกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพแล้ว ให้มีมูลค่าที่เพิ่มสูงขึ้น

บทที่ 2

ทฤษฎีและการตรวจสอบเอกสาร

การศึกษาทฤษฎีและการตรวจสอบเอกสารที่เกี่ยวข้องประกอบไปด้วย กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพภายใต้สภาวะการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกาศ ปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ ปริมาณของศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน รวมถึงการนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์ และในส่วนของ การตรวจสอบเอกสารจะกล่าวถึงงานวิจัยที่ทำการศึกษาระบบการผลิตก๊าซชีวภาพหมักแบบกะ ชนิดแห้งหมักร่วมกับวัตถุดิบแต่ละชนิด การปรับสภาพวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรด้วยกระบวนการต่าง ๆ กระบวนการผลิตชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งจากข้าวโพดหวานหมักร่วมกับมูลสัตว์ เพื่อใช้เป็นแนวทางในการศึกษาวิจัย การกำหนดตัวแปร ปัจจัยในการศึกษาวิจัยในครั้งนี้ โดยทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง และการตรวจสอบเอกสารมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ความหมายของก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพ (Biogas) หมายถึง ก๊าซที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติสามารถเกิดขึ้นได้ในหลุมขยะ กองมูลสัตว์ และก้นบ่อแหล่งน้ำนิ่ง จากการหมักย่อยสลายของสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไม่ใช้ออกาศ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553) โดยทั่วไปกระบวนการเกิดก๊าซมีเทนจากการหมักของสารอินทรีย์ จะมีกระบวนการเกิดดังแสดงในสมการที่ 1



สมการที่ 1

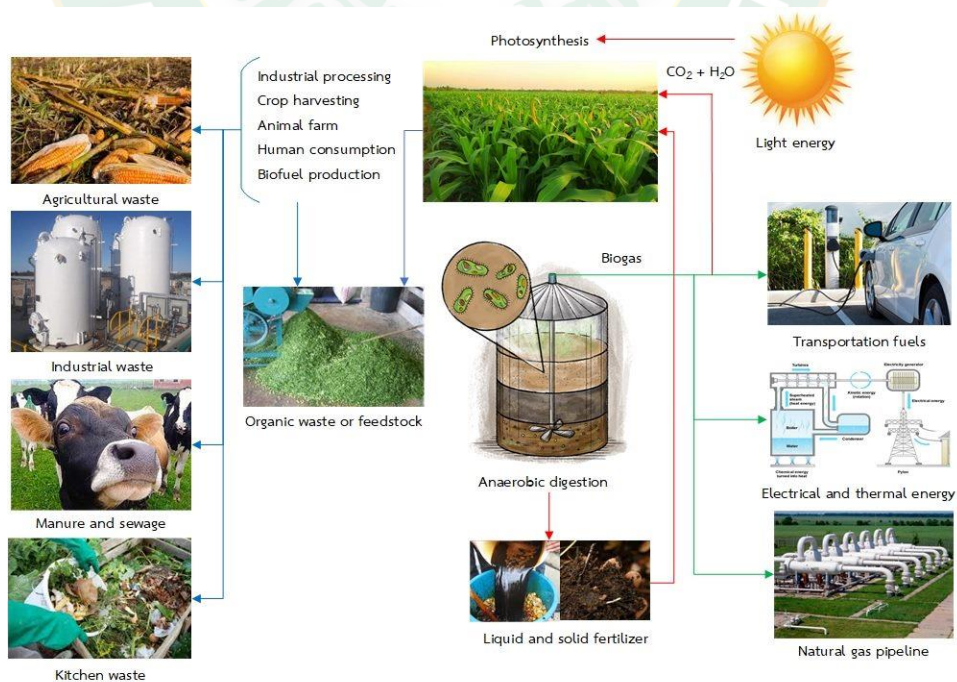
กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกาศประกอบด้วยกลไก 2 ขั้นตอน ได้แก่

1) การย่อยสลายเข้มข้น (Intensive rotting phase) กลไกนี้จะเกิดขึ้นในช่วงเวลา 24 ชั่วโมงแรก que เริ่มต้นการหมักและในช่วงนี้อุณหภูมิของการหมักเริ่มสูงขึ้นถึง 45 °C ดังนั้นช่วง 24 ชั่วโมงแรกนี้จึงเป็นช่วงที่เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยอาศัยเชื้อแบคทีเรียประเภทมีโซฟิลิค (Mesophilic) หลังจากครบ 24 ชั่วโมงแรก อุณหภูมิของการหมักจะสูงขึ้นถึง 75 °C และเป็นช่วงที่ การย่อยสลายสารอินทรีย์จะเกิดขึ้นจากเชื้อแบคทีเรียประเภทเทอร์โมฟิลิค (Thermophilic) อีกทั้งที่ อุณหภูมิสูงจะทำให้เชื้อโรคที่อยู่ในระบบหมักส่วนใหญ่ตายได้ ระยะเวลาของการเกิดกลไกนี้จะใช้เวลา ประมาณ 3-6 weeks หรือตั้งแต่ 1-5 days ซึ่งขึ้นอยู่กับกระบวนการหมักและองค์ประกอบของสาร ป้อนที่ใช้หมัก

2) การย่อยสลายขั้นสุดท้าย (Final rotting phase) หลังจากการย่อยสลายเข้มข้นในขั้นแรกเสร็จสิ้นแล้ว อุณหภูมิของสารหมักจะค่อย ๆ ลดลงจนเหลืออุณหภูมิประมาณ 30 °C สารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยาก เช่น พวกเซลลูโลสจะถูกย่อยสลายในขั้นตอนนี้ และจะใช้เวลาดั้งแต่ 3 เดือนขึ้นไปจนถึง 1 year โดยการย่อยสลายในขั้นตอนนี้จะมีกลุ่มเชื้อแบคทีเรียพวกรา ได้แก่ ฟังไจ (Fungi) และ แอคติโนมัยซิส (Actinomycetes) ช่วยในการย่อยสลายสารที่ย่อยสลายยากที่เหลืออยู่ในระบบ

โดยในปัจจุบันกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพเป็นอีกหนึ่งวิธีในการผลิตพลังงานทดแทนจากชีวมวล สำหรับกระบวนการย่อยแบบไม่ใช้อากาศสามารถแบ่งออกได้ 2 ประเภทหลักๆ คือ แบบแห้ง (Dry Digestion) และแบบเปียก (Wet Digestion) ซึ่งมีการควบคุมการป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบให้มีปริมาณของแข็งทั้งหมดของระบบ (Total Solid Content) ประมาณ 20-40% และน้อยกว่า 20% ตามลำดับ (นคร ทิพยาวงศ์, 2553)

กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้อากาศ (Anaerobic digestion) จะย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลใหญ่และมีความซับซ้อน ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน ด้วยอาศัยเชื้อแบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจน คือ เชื้อแบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจนในการหายใจ และสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีอัตราส่วนไนโตรเจนต่อคาร์บอนสูง ผลผลิตที่ได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้อากาศ เรียกว่า ก๊าซชีวภาพ (Biogas) กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศประกอบด้วยกระบวนการทางจุลชีววิทยา (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2550) ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 วงจรของกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพและการนำก๊าซชีวภาพไปใช้งาน

องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพ เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน (Anaerobic Process) โดยแบคทีเรียไม่ต้องการออกซิเจน (Anaerobic Bacteria) ทำให้เกิดผลผลิตของก๊าซชีวภาพจะอยู่ในรูปของก๊าซผสมประกอบไปด้วยก๊าซหลายชนิด ดังแสดงในภาพที่ 4 ซึ่งส่วนใหญ่ประกอบด้วย 3 ส่วนดังนี้

ก๊าซมีเทน (CH_4) ประมาณ 50-70%

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ประมาณ 30-50%

ส่วนที่เหลือเป็นก๊าซอื่น ๆ เช่น แอมโมเนีย (NH_3) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) และไอน้ำ (H_2O) ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยก๊าซชีวภาพสามารถนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนได้ ปัจจุบันสารอินทรีย์ที่นิยมนำมาผ่านกระบวนการนี้แล้วให้ก๊าซชีวภาพ คือ น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น โรงงานแป้งมันสำปะหลัง โรงงานเบียร์ โรงงานผลไม้กระป๋อง เป็นต้น รวมทั้งน้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์ จากกระบวนการดังกล่าวมีค่า Chemical Oxygen Demand (COD) ลดลงมากกว่า 80% และได้ก๊าซชีวภาพ 0.3-0.5 m^3/kg COD ที่ถูกกำจัด โดยปกติระบบผลิตก๊าซชีวภาพจะมีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนอยู่ประมาณ 60-65% ซึ่งสามารถนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์ในรูปของพลังงานได้ เช่น การนำไปเผาเพื่อใช้ประโยชน์จากความร้อนโดยตรงสำหรับขับเคลื่อนเครื่องยนต์สันดาปภายใน หรือใช้ในการผลิตไอน้ำและกระแสไฟฟ้า เป็นต้น (กระทรวงพลังงาน, 2558)

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

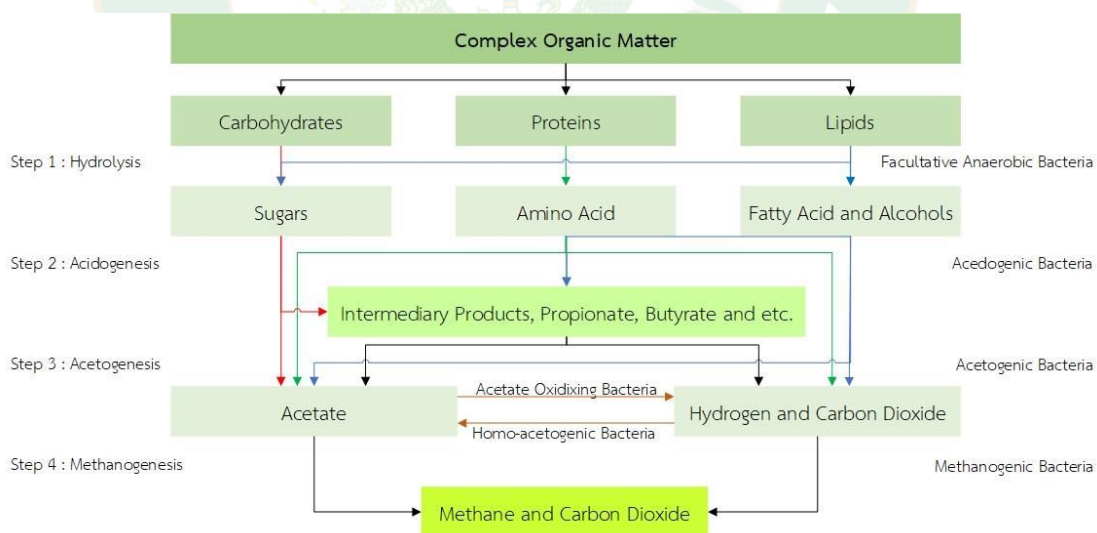
องค์ประกอบ	ความเข้มข้น (%v/v)
CH_4	50-70
CO_2	30-50
H_2O	0-10
N_2	0-5
O_2	0-2
NH_3	0-1
H_2S	50-10,000 ppm

ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน (2557)

ขั้นตอนและปฏิกิริยาในการเกิดก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพเกิดจากกระบวนการย่อยสลายทางชีววิทยาแบบไม่ใช้ออกาศ (Anaerobic Process) เป็นกระบวนการย่อยสลายทางชีววิทยาที่ใช้แบคทีเรียชนิดไม่ใช้ออกาศหลายกลุ่ม ทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลใหญ่และสลับซับซ้อนอันได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีนและไขมัน โดยกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกาศมีกระบวนการที่สลับซับซ้อนมาก โดยปฏิกิริยาทางชีวเคมีเกิดขึ้นนับร้อยกระบวนการ ซึ่งต้องอาศัยเอนไซม์หรือตัวเร่งปฏิกิริยาช่วยในการเข้าทำปฏิกิริยาด้วย แม้ว่าการศึกษาเกี่ยวกับระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกาศจะมีการศึกษากันมาอย่างยาวนาน แต่ในปัจจุบันการศึกษาทางด้านนี้ก็ยังไม่หยุดนิ่ง ยังคงมีการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้ทราบถึงกลไกและลักษณะการทำงานของแบคทีเรีย จะทำให้การออกแบบและควบคุมระบบเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2556)

สารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสียจะเป็นสารประกอบจำพวก โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมันทั้งที่อยู่ในรูปของของแข็งและสารละลาย กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกาศสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอน ดังแสดงในภาพที่ 3 ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้



ภาพที่ 3 ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกาศ

ขั้นตอนที่ 1 ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

ปฏิกิริยานี้จะเกิดภายนอกเซลล์ของเชื้อแบคทีเรีย ซึ่งเป็นกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ที่มีโครงสร้างซับซ้อน เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน ให้กลายเป็นสารประกอบ

ไฮโดรคาร์บอนโมเลกุลเล็ก ได้แก่ น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว กรดอะมิโน และกรดไขมัน ตามลำดับ โดยอาศัยเอนไซม์ของจุลินทรีย์พวก Hydrolytic Microorganisms ปล่อยออกมาภายนอกเซลล์ เรียกว่า Extracellular Enzyme ความเร็วของกระบวนการย่อยสลายขึ้นอยู่กับเอนไซม์ที่ถูกปล่อยออกมาจากแบคทีเรีย รวมถึงความเข้มข้นของสารอินทรีย์ ความเข้มข้นของเอนไซม์ อุณหภูมิ และการสัมผัสระหว่างเอนไซม์กับสารอินทรีย์ เป็นต้น (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2533)

ขั้นตอนที่ 2 ปฏิกริยาอะซิโตเจเนซิส (Acidogenesis)

ในขั้นตอนนี้ สารอินทรีย์โมเลกุลเล็กซึ่งเป็นสารผลิตภัณฑ์ของการย่อยในขั้นตอนแรก เช่น พวกน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว กรดอะมิโน และกรดไขมัน ถูกเปลี่ยนเป็นกรดอินทรีย์ชนิดโมเลกุลเล็ก เช่น กรดอะซิติก (Acetic Acid) กรดโพรไพโอนิก (Propionic Acid) กรดวาเลอริก (Valeric Acid) และกรดแลคติก (Lactic Acid) โดยแบคทีเรียสร้างกรด มีชื่อว่า Acidogenesis Bacteria หรือ Obligate หรือ Facultative Anaerobes ซึ่งชนิดของผลิตภัณฑ์ที่ได้นั้นจะขึ้นอยู่กับตัวแปร 2 คือ ชนิดของสารตั้งต้นและความดันย่อย (Partial Pressure) ของแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น โดยมีกรดอะซิติกปริมาณที่มากที่สุด มีการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนในกระบวนการนี้ด้วย แบคทีเรียสร้างกรดจะมีอัตราการเจริญเติบโตสูงและทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมได้ดีกว่าแบคทีเรียสร้างมีเทน เนื่องจากกระบวนการสร้างมีเทนส่วนใหญ่เกี่ยวข้องโดยตรงกับกรดอะซิติก แต่กรดไขมันระเหยง่ายที่ได้จากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์มีหลายชนิด ซึ่งบางชนิดแบคทีเรียสร้างมีเทนไม่สามารถนำไปใช้ในกระบวนการสร้างมีเทนได้ โดยเฉพาะกรดไขมันระเหยง่ายขนาดใหญ่ ในรูปของกรดโพรไพโอนิก กรดบิวทิริก เป็นต้น ทำให้เกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ประเภทนี้ในระบบ ระบบจะทำการรักษาสมดุลโดยเข้าสู่กระบวนการอะซิโตเจเนซิส (ชลลดา แดงประดับ, 2554)

ขั้นตอนที่ 3 ปฏิกริยาอะซิโตเจเนซิส (Acetogenesis)

เป็นปฏิกริยาต่อเนื่องจากปฏิกริยาอะซิโตเจเนซิส นั่นคือ เปลี่ยนผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกริยาอะซิโตเจเนซิส เป็นกรดอะซิติก ด้วยเชื้อแบคทีเรียชนิด Acetogenic Bacteria ขั้นตอนอะซิโตเจเนซิสถือว่าเป็นขั้นตอนที่สำคัญมาก เนื่องจากเป็นขั้นตอนที่ช่วยป้องกันไม่ให้เกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนอะซิโตเจเนซิส ในระบบหากเกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ส่งผลทำให้เกิดสภาวะที่มีความเป็นกรดต่างสูงและจะไปยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อแบคทีเรีย และประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพต่ำในที่สุดขั้นตอนนี้เป็นการเปลี่ยนกรดไขมันระเหยง่ายที่มีขนาดใหญ่ให้กลายเป็นกรดอะซิติก เพื่อลดการสะสมของกรดอินทรีย์ในระบบ (ทวินันท์ สเลอาด, 2554)

ขั้นตอนที่ 4 ปฏิกริยาเมทาโนเจนนิซิส (Methanogenesis)

เป็นปฏิกริยาที่เกิดขึ้นโดยแบคทีเรียกลุ่มเมทาโนเจน (Methanogens) ซึ่งมีทั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวกและแกรมลบที่มีรูปร่างแตกต่างกัน ทำหน้าที่เปลี่ยนกรดอะซิติกและไฮโดรเจนให้กลายเป็นมีเทน (CH_4) เชื้อแบคทีเรียกลุ่มนี้ เรียกว่า เมทาโนเจน

แบคทีเรียที่เป็นตัวสร้างมีเทนเจริญเติบโตได้ช้าและสภาพแวดล้อมมีผลต่อการเจริญเติบโตค่อนข้างมาก ช่วงค่า pH ที่เหมาะสมต่อการทำงานของแบคทีเรียประมาณ 6.8–7.2 นอกจากนี้ อุณหภูมิก็มีผลต่ออัตราการเจริญเติบโตเช่นกัน อีกทั้งแบคทีเรียในกลุ่มนี้ต้องการสารอาหารที่โครงสร้างไม่ซับซ้อนในการดำรงชีพ ดังนั้นการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในกลุ่มการสร้างมีเทนจึงขึ้นอยู่กับการทำงานของทุกกลุ่มแบคทีเรียที่สัมพันธ์กัน (นิลวรรณ ไชยทนต์ และพฤกษ์ อักกะรังสี, 2552)

ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ

ปัจจัยที่มีผลต่อระบบสามารถจำแนกออกเป็น 2 ลักษณะ คือ

ปัจจัยที่ 1 ปัจจัยทางด้านสภาพแวดล้อม ได้แก่ พีเอช อุณหภูมิ ความเป็นด่าง สารพิษ สารยับยั้งปฏิกริยาและลักษณะของของเสีย

ปัจจัยที่ 2 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการกับเดินระบบ ได้แก่ การกวนผสม อัตราการระบรทุก สารอินทรีย์และเวลากักเก็บ

1. ความเป็นกรด-ด่าง (pH)

แบคทีเรียสร้างมีเทน (Methanogens) จะมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า pH มากที่สุด ค่า pH ในถังหมักขึ้นอยู่กับช่วงของการหมักด้วย เพราะในช่วงแรกแบคทีเรียที่สร้างกรดจะสร้างกรดเป็นจำนวนมาก และทำให้ค่า pH ลดลง ซึ่งถ้าหาก pH ลดลงต่ำกว่า 5.0 ก็จะหยุดกระบวนการย่อยสลายและการหมักทั้งหมด โดยจุลินทรีย์กลุ่ม Methanogen นั้นอ่อนไหวต่อความเป็นกรดต่างมาก และจะไม่เจริญเติบโตหาก pH ต่ำกว่า 6.2 (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553) ในช่วงท้ายของกระบวนการความเข้มข้นของ NH_4 จะมากขึ้นตามการย่อยสลายไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่า pH เพิ่มขึ้นโดยอาจเกิน 8.0 จนกระทั่งระบบผลิตเริ่มมีความเสถียร pH จะอยู่ระหว่าง 6.8–7.2 (ทรงวุฒิ นิรัฐศิลป์, 2555) โดยขั้นตอนการเกิดก๊าซชีวภาพ (Methanogenesis) จะเกิดขึ้นได้ดีที่สุด เมื่อค่า pH 6.8–7.2 โดยค่า pH ที่ยอมรับได้ของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ คือ ระหว่าง 6.5–7.5 (ภาวิณี เพ็ชรนง, 2560)

2. กรดไขมันระเหยง่าย (Acidity) และค่าอัลคาลินิตี (Alkalinity)

กรดไขมันระเหยง่ายในระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะการหมักแบบไร้อากาศเป็นค่าของกรดอินทรีย์โมเลกุลสั้นที่เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในขั้นตอนการไฮโดรไลซิส และการสร้างกรดของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรด เช่น กรดอะซิติก กรดโพรไพโอนิก และกรดบิวทิริก ซึ่งจะถูกจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนนำไปใช้เป็นสารอาหารและแหล่งพลังงาน โดยปกติกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในระบบควรมีความเข้มข้นของกรดอะซิติกประมาณ 50–500 mg/L ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายจะมีส่วนสำคัญต่อค่า pH คือ เมื่อมีปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายสูงขึ้นค่า pH จะต่ำลงเกิดความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ ระดับของกรดอะซิติกมีค่าเกิน 800 mg/L หรืออัตราส่วนของกรดโพรไพโอนิกต่อกรดอะซิติกเกิน 1.4 จะทำให้ระบบเกิดความล้มเหลวได้ (กัญญาภักค์ ตาจันทิก, 2556) แต่ถ้าในระบบมีบัฟเฟอร์ที่ดีการล้มเหลวของระบบจะไม่เกิดขึ้น การแก้ไขความเป็นพิษของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายทำได้โดยลดอัตราการป้อนสารอินทรีย์ลง การเติมสารปรับสภาพ และเพิ่มระยะเวลาในการกักเก็บ (มนตรี ปัญญาทอง และกฤตภาค บูรณวิทย์, 2557)

ค่าอัลคาลินิตีในระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไม่ใช้อากาศนั้นมีความสำคัญต่อการหมักวัสดุที่มีความเป็นกรดสูง เพราะทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ควบคุมค่า pH ของระบบไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงมากหลังจากมีการเติมวัสดุหมัก ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูปของไบคาร์บอเนตที่เกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างแอมโมเนียกับคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ให้อยู่ในรูปของแอมโมเนียมไบคาร์บอเนต ค่าอัลคาลินิตีเป็นค่าที่บ่งบอกถึงความเป็นบัฟเฟอร์ที่ดีให้แก่ระบบที่จะควบคุมค่า pH ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ เมื่อความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายภายในระบบเพิ่มสูงขึ้น ความเป็นต่างไบคาร์บอเนตก็จะถูกทำลายไป การทำลายความสามารถในการทำเป็นบัฟเฟอร์เป็นสาเหตุทำให้ค่า pH ลดลง โดยทั่วไปแล้วระบบหมักในสภาวะไร้อากาศควรมีค่าอัลคาลินิตีประมาณ 1,000–5,000 mg/L (CaCO_3) (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2556)

3. อุณหภูมิ (Temperature)

ช่วงของอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของแบคทีเรียแบบไร้อากาศสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ช่วง คือ

ช่วงที่ 1 ช่วงเทอร์โมฟิลิก (Thermophilic Range) จะมีอุณหภูมิประมาณ 50–65 °C โดยเรียกแบคทีเรียที่ทำงานในช่วงอุณหภูมินี้ว่า Thermophilic Bacteria

ช่วงที่ 2 ช่วงมีโซฟิลิก (Mesophilic Range) จะมีอุณหภูมิประมาณ 20–45 °C โดยเรียกแบคทีเรียที่ทำงานในช่วงอุณหภูมินี้ว่า Mesophilic Bacteria

ช่วงที่ 3 ช่วงไซโครฟิลิก (Psychophilic Range) จะมีอุณหภูมิประมาณ 5–15 °C โดยเรียกแบคทีเรียที่ทำงานในช่วงอุณหภูมินี้ว่า Psychophilic Bacteria

สำหรับระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศจะมีช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ 2 ช่วงที่จะทำให้เกิดก๊าซมีเทนขึ้นในระบบได้ดีคือ ช่วง 30–38 °C และช่วง 48–57 °C (Aditi et al., 2018) อย่างไรก็ตามการเดินระบบในช่วงอุณหภูมิสูง มีข้อเสียที่ Thermophilic Bacteria ทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ไม่ดีเท่ากับ Mesophilic Bacteria จึงมีความเสี่ยงต่อการล้มเหลวของระบบสูง และการเดินระบบที่อุณหภูมิสูงยังสิ้นเปลืองพลังงานในการควบคุมอุณหภูมิของถังปฏิกริยาด้วย (อภิชาติ ศรีภักย์, 2555)

4. สารพิษ (Toxic) และสารยับยั้งปฏิกริยา (Inhibited)

น้ำเสียที่จะบำบัดด้วยกรรมวิธีทางชีววิทยาไม่ควรมีสารที่เป็นพิษอยู่ ซึ่งสารที่เป็นพิษอาจอยู่ได้ทั้งในรูปของสารอินทรีย์หรืออนินทรีย์ ทั้งนี้ผลของสารพิษมีตั้งแต่พิษโดยตรง (Toxic) ลงไปถึงแค่เพียงยับยั้ง (Inhibited) การทำงานของแบคทีเรีย โดยเฉพาะอย่างยิ่งผลของสารพิษที่มีต่อแบคทีเรียที่สร้างมีเทน เนื่องจากแบคทีเรียสร้างมีเทนจะมีความไวต่อสิ่งที่มีารบกวน โดยสารที่เป็นพิษหรือสารที่ยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียในระบบบำบัดน้ำเสียทางชีววิทยาแบบไม่ใช้อากาศ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2556) ดังต่อไปนี้ คือ ประจุแร่ โลหะหนัก สารซักฟอก เป็นสารพิษที่ยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในถังหรือบ่อหมักปริมาณประจุแร่หรือแร่ธาตุเพียงเล็กน้อย เช่น โซเดียม โปแตสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม แอมโมเนีย ซัลเฟอร์ จะกระตุ้นการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ แต่ถ้ามีความเข้มข้นสูงจะเริ่มเป็นสารพิษต่อจุลินทรีย์ ซึ่งจะกระทบต่ออัตราการผลิตก๊าซ ตัวอย่างเช่น ถ้ามีแอมโมเนีย 50–200 mg/L จะช่วยกระตุ้นการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ แต่ถ้ามีความเข้มข้นสูงถึง 1,500 mg/L จะเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ เช่นเดียวกัน โลหะหนัก อย่างทองแดง นิกเกิล โครเมียม สังกะสี ตะกั่ว เป็นต้น ในปริมาณน้อย ๆ เป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย แต่ถ้าเข้มข้นเกินไปก็จะเป็นพิษ รวมทั้งสารซักฟอก (Detergents) สบู่ สารปฏิชีวนะ สารละลายอินทรีย์ จะยับยั้ง กิจกรรมของแบคทีเรียในการผลิตก๊าซมีเทน จึงไม่ควรเติมหรือให้สารเหล่านี้เข้าไปในบ่อหมัก (ปฏิกรูป ผลจันทร์ และภัทรวดี สุขสุวรรณ, 2557)

5. สารอาหาร (Nutrients)

สำหรับในเซลล์แบคทีเรียทุกชนิดจะประกอบไปด้วยธาตุที่สำคัญคือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส ออกซิเจนและซัลเฟอร์ โดยแบคทีเรียที่ไม่ใช้อากาศต้องการปริมาณไนโตรเจนต่อน้ำหนักเซลล์เท่ากับ 9.4 (Cell Weight/N = 9.4) ในขณะที่แบคทีเรียชนิดไม่ใช้อากาศจะสร้าง

เซลล์เพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมากได้ เมื่อมีอัตราส่วนของธาตุไนโตรเจนต่อคาร์บอน (N/C) ในสารอาหาร ประมาณ 0.0620 และยังต้องการธาตุฟอสฟอรัสเท่ากับ 1/7 ของปริมาณธาตุไนโตรเจนที่ประกอบใน เซลล์ ดังนั้นน้ำทิ้งควรมีสารอาหารที่เพียงพอแก่การเจริญเติบโตของแบคทีเรีย โดยทั่วไปความ ต้องการธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัสจะอยู่ในอัตราส่วน 11:2 ดังนั้นถ้าปริมาณแบคทีเรียที่เกิดขึ้นมี ประมาณ 0.1 kg : 1 kg BOD ที่ถูกย่อยสลาย อัตราส่วน BOD:N:P จะเท่ากับ 100.0:1.1:0.2 ซึ่งต่ำกว่าอัตราส่วนที่ใช้ในการย่อยสลายแบบใช้ออกซิเจนอิสระ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 100:5:1 ดังนั้นในน้ำเสียที่มี สารอาหารต่ำแต่มีสารอินทรีย์หรือค่าซีโอดีสูง เช่นน้ำเสียจากโรงงานน้ำอัดลม จึงสามารถที่จะใช้ ระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศได้โดยไม่ต้องมีการเติมสารอาหารเพิ่มเติม (กรมพัฒนาพลังงาน ทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2557)

6. อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N Ratio)

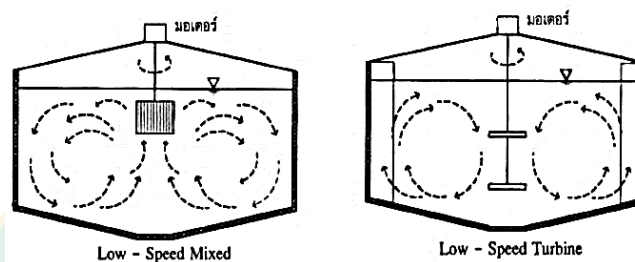
โดยทั่วไปสารอินทรีย์คาร์บอนทั้งหมด (Total Organic Carbon, TOC) โพรตีนทั้งหมด (Total Kjeldahl Nitrogen, TKN) และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N Ratio) ถือเป็นตัวแปร พื้นฐานในการอธิบายลักษณะของวัตถุดิบหมัก สำหรับผลิตก๊าซชีวภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง C/N Ratio ที่เป็นพารามิเตอร์ที่มีความสำคัญเป็นอย่างมากและใช้ในการประเมินกระบวนการย่อยสลาย แบบไม่ใช้อากาศ โดยอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่สามารถใช้ผลิตก๊าซชีวภาพคือ ตั้งแต่ 8-35 แต่ที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจะอยู่ในช่วง 20-35 (Wang et al., 2017; Marta-Alvarez et al., 2014) ซึ่งอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่สูงหรือต่ำเกินไปอาจส่งผลให้เกิด กระบวนการสร้างกรด (Acidification) หรือกระบวนการยับยั้งของแอมโมเนีย (Ammonia Inhibition) ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพทำให้เกิดสภาวะล้นเหลวได้ โดยอัตราส่วนคาร์บอนต่อ ไนโตรเจนที่สูงมากเกินไปจะส่งผลทำให้ไนโตรเจนถูกแบคทีเรียกลุ่มเมทาโนเจนนำไปใช้ เพื่อ เสริมสร้างโปรตีนให้กับตัวเอง และส่งผลทำให้มีปริมาณของก๊าซชีวภาพที่ลดลงอย่างรวดเร็ว

7. การกวนผสม (Mixing)

การกวนผสมทำให้สารอินทรีย์และจุลินทรีย์หรือแบคทีเรียในถังปฏิกรณ์ผสมกันอย่างทั่วถึง เป็นสิ่งสำคัญที่มีความสำคัญเป็นอย่างมาก เพื่อให้การเกิดปฏิกิริยาทางชีวเคมีในระบบผลิตก๊าซ ชีวภาพแบบสมบูรณ์มากที่สุด แต่ก็ยังเป็นสิ่งที่ยากมากที่จะเกิดขึ้นอย่างไรก็ตาม หากระบบการบำบัด หรือถังปฏิกรณ์มีการกวนผสมอย่างทั่วถึงอาจจะทำให้จุลินทรีย์หรือแบคทีเรียสามารถสัมผัสกับ สารอินทรีย์มากขึ้นและทั่วถึงขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพของระบบบำบัดสูงขึ้น การกวนผสมของ สารอินทรีย์ในถังปฏิกรณ์มีหลายวิธี แต่มีข้อจำกัดอยู่ที่การกวนผสมจะต้องไม่ก่อให้เกิดสภาวะมีการ เติมออกซิเจนเข้าสู่ระบบ การกวนผสมที่นิยมใช้กันอยู่ 3 วิธี ดังนี้

วิธีที่ 1 การกวนผสมโดยใช้เครื่องมือกล (Mechanical Mixing)

การกวนผสมโดยใช้เครื่องมือกล เช่น ใบพัด (Impeller) ซึ่งใบพัดที่จะเลือกใช้ก็จะต้องมีลักษณะที่แตกต่างกันออกไปตามวัตถุประสงค์ เช่น ใบพัดแบบ Puddle หรือ Turbine อย่างไรก็ตามในการกวนผสมให้สารอินทรีย์ผสมเป็นเนื้อเดียวกันจะต้องใช้พลังงานค่อนข้างสูง หากถังมีขนาดใหญ่มากจะต้องใช้พลังงานมากขึ้น เพื่อให้เกิดการกวนผสมอย่างสมบูรณ์ ดังแสดงในภาพที่ 4

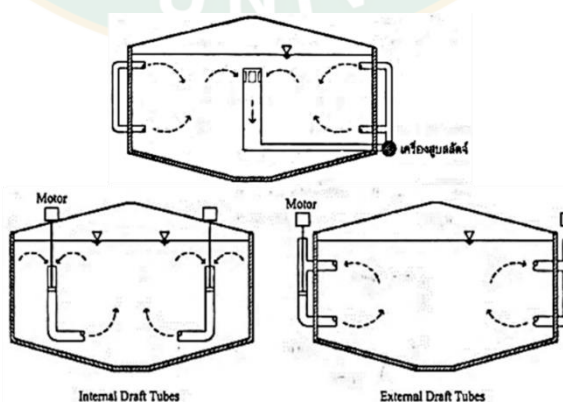


ภาพที่ 4 ถังกวนผสมที่มีการใช้ใบพัดในการกวนผสม (Mechanical Mixing)

ที่มา: สันทัด ศิริอนันต์ไพบูลย์ (2552)

วิธีที่ 2 การกวนผสมโดยใช้การสูบลมหรือการดูดอากาศของเหลวภายในถังปฏิกิริยาให้เกิดการหมุนเวียน (Mixing by Recirculation of Organic (Liquid))

วิธีการนี้จะง่ายมาก และใช้พลังงานไม่สูงนักแต่ประสิทธิภาพในการกวนผสมจะไม่สูงมากนัก โดยเป็นการตั้งเครื่องสูบลมภายในถังปฏิกิริยาออกทางด้านล่างของถังปฏิกิริยา และป้อนกลับเข้าทางด้านบนของถังปฏิกิริยา ทำให้เกิดการหมุนเวียน และกวนผสมของสารอินทรีย์ภายในถังปฏิกิริยา ซึ่งมีวิธีนี้จะเป็นการเพิ่มปริมาณของจุลินทรีย์ไปช่วยย่อยสลายสารอินทรีย์ และป้องกันการสูญเสียจุลินทรีย์ที่จะออกจากระบบของถังปฏิกิริยา ดังแสดงในภาพที่ 5

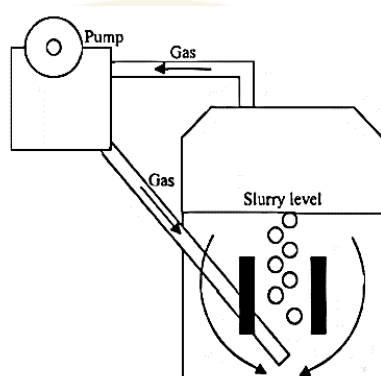


ภาพที่ 5 ถังกวนผสมที่มีการใช้ระบบสูบน้ำเสียหมุนเวียนภายในถังปฏิกิริยา

ที่มา: สันทัด ศิริอนันต์ไพบูลย์ (2552)

วิธีที่ 3 การผสมโดยการนำก๊าซที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในถังปฏิกรณ์มาใช้ในการกวนผสม (Mixing by Producing Gas)

วิธีการกวนผสมแบบนี้จะอาศัยก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ ซึ่งมีทั้ง H_2 , CO_2 , CH_4 , H_2S และก๊าซอื่น ๆ เป็นตัวช่วยทำให้เกิดการผสม โดยจะเป็นการดึงก๊วต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นภายในระบบของถังปฏิกรณ์บางส่วนกลับเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ ทำให้เกิดการแปรปรวน หรือการกวนผสมของสารอินทรีย์ และกากตะกอนจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ ดังแสดงในภาพที่ 6 ซึ่งวิธีการนี้น่าจะได้ผลดีที่จะเป็นการรักษาสภาพแบบไม่ใช้ออกซิเจนในถังหมักได้อย่างดีวิธีหนึ่ง



ภาพที่ 6 ถังกวนผสมที่อาศัยก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์เป็นตัวกวนผสม

ที่มา: สันทัด ศิริอนันต์ไพบูลย์ (2552)

8. อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate)

อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate, OLR) เป็นปัจจัยอย่างหนึ่งที่จะมีผลต่อประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายในระบบ และเป็นตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการออกแบบระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนอีกด้วย เนื่องจากการเปลี่ยนสารอินทรีย์ในระบบให้กลายเป็นก๊าซมีเทน ต้องมีความเข้มข้นของแบคทีเรียในปริมาณพอเหมาะเท่ากับปริมาณสารอินทรีย์ จึงจะทำให้แบคทีเรียมีการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ หากมีการป้อนสารอินทรีย์เข้าระบบมากเกินไปจะทำให้การย่อยสลายสารอินทรีย์ลดลง เนื่องจากแบคทีเรียบางส่วนถูกทำลายไปเพราะสภาพที่ไม่สมดุล ในทางตรงกันข้ามหากมีการป้อนสารอินทรีย์เข้าระบบน้อยเกินไป จะทำให้การใช้ถังหมักไม่เต็มประสิทธิภาพไม่คุ้มค่าในการลงทุนและยังส่งผลให้แบคทีเรียในระบบปรับตัวเข้ากับสภาพสารอินทรีย์ที่มีปริมาณต่ำ ผลที่อาจจะตามมาคือ ระบบอาจจะล้มเหลวได้เช่นกัน อย่างไรก็ตามค่าของอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์จะแตกต่างกันไปตามธรรมชาติและชนิดของน้ำเสีย จึงจำเป็นต้องปรับค่าอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ในการเดินระบบให้เหมาะสมกับน้ำเสียที่ใช้ด้วย สำหรับอัตราการ

บรรทุกสารอินทรีย์ที่จะใช้เป็นเกณฑ์ในการออกแบบระบบ หาได้จากการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการหรือจากระบบจริงที่มีผู้เดินระบบสำเร็จมาแล้ว (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2557)

9. ระยะเวลาเก็บกัก (Retention Time)

ระยะเวลาเก็บกักในระบบของกระบวนการหมักแบบไม่ใช้อากาศ หมายถึงเวลาเก็บกักแบบที่เรีย (Solid Retention Time, SRT) หรือเวลาเก็บกักของเหลว (Hydraulic Retention Time, HT) อยู่ในระบบจนกระทั่งหลุดออกมาจากระบบ ซึ่งการควบคุมระบบนิยมใช้ค่าเวลาการกักเก็บของเหลว (HT) เนื่องจากคำนวณได้ง่ายกว่า การควบคุมเวลาเก็บกักในการเดินระบบมีความสำคัญ เนื่องจากถ้าเวลาเก็บกักยาวนานเกินไปจะทำให้สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการก่อสร้าง เพราะต้องใช้ถังหมักขนาดใหญ่ ในทางตรงกันข้ามหากใช้เวลาเก็บกักสั้นเกินไป แบบที่เรียก็จะเจริญเติบโตไม่ทัน เกิดการหลุดออกจากระบบแบบที่เรียจำนวนมาก ซึ่งส่งผลทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานของระบบลดลง (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2557) ระยะเวลาในการกัก เก็บส่วนใหญ่จะประมาณ 14–60 days ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ คือ ค่าปริมาณของแข็ง อุณหภูมิ และประเภทของบ่อหมัก รวมถึงปริมาณสารอินทรีย์ที่เติม (จุฬารัตน์ ชนะถาวร, 2560)

10. โลหะบางชนิด

สำหรับระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ นอกจากธาตุอาหารหลักอันได้แก่ คาร์บอน ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส แบบที่เรียสร้างมีเทนยังต้องการธาตุอาหารเสริมประเภทโลหะอื่นๆ ในปริมาณเล็กน้อย ซึ่งสารที่มักทำการเติมลงไปในระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศคือ นิกเกิลและโคบอลต์ ซึ่งพบว่าหากระบบมีธาตุโลหะเหล่านี้ในปริมาณที่น้อยเกินไป ประสิทธิภาพในการทำงานของระบบจะลดลง โดยการขาดธาตุโลหะเหล่านี้จะส่งผลต่อการทำงานของแบบที่เรียสร้างมีเทนเท่านั้น แต่ไม่มีผลกระทบต่อการทำงานของแบบที่เรียสร้างกรด (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2557)

ระบบการป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบ

การป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบหมักหรือถังปฏิกริยาจำแนกตามลักษณะการป้อนสามารถแบ่งได้เป็น 3 วิธี ดังต่อไปนี้

1. ระบบแบบกะ (Batch Fermentation)

ระบบการป้อนแบบกะเป็นลักษณะการป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบหมักหรือถังปฏิกริยาเพียงครั้งเดียวให้เต็มระบบในการเริ่มต้นระบบ (วรพจน์ รัตนพันธุ์, 2550) หลังจากเริ่มต้นระบบจะทำการปล่อยให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียในระบบ และจะไม่มีสารอินทรีย์เพิ่มเข้าสู่ระบบอีกสามารถสังเกตการย่อยสลายสารอินทรีย์จนหมด ซึ่งสังเกตได้จากไม่มีก๊าซเกิดขึ้น จึงถ่ายหรือสูบลบทิ้งไป แล้วทำการเติมสารอินทรีย์เข้าไปใหม่ ระบบนี้เหมาะสมกับวัตถุดิบที่มีปริมาณมาก แต่ต้องใช้ระยะเวลาในการดำเนินระบบนาน ระบบการหมักแบบนี้ประสิทธิภาพจะไม่ดีนักและความเสถียรภาพของระบบไม่คงที่ เนื่องจากปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นไม่สม่ำเสมอ

2. ระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous Fermentation)

ระบบการป้อนแบบกึ่งต่อเนื่องเป็นลักษณะการป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบหมัก หรือถังปฏิกริยาในลักษณะเป็นช่วง ๆ แต่สม่ำเสมอ โดยทำการป้อนสารอินทรีย์เข้า และถ่ายวัสดุหมักออกที่ผ่านการกำจัดสารอินทรีย์ แล้วออกจากระบบหรือถังปฏิกริยา (สุดารัตน์ ภัคดี, 2551) ระบบนี้เหมาะสมสำหรับใช้ในกรณีที่มีวัตถุดิบเป็นประจำ และถังหมักหรือถังปฏิกริยาจะมีท่อป้อนวัตถุดิบลงในระบบ และท่อสำหรับให้วัตถุดิบเก่าในระบบที่ผ่านการย่อยสลายแล้วไหลล้นออกมา ปกติจะเติมสารอินทรีย์ทุกวัน วันละครั้งการหมักแบบนี้จะส่งผลดีต่อการทำงานของแบคทีเรีย เนื่องจากช่วยให้เกิดสภาวะคงตัวของระบบ เพราะแบคทีเรียในกลุ่มที่สร้างมีเทนไวต่อการเปลี่ยนแปลงต่อความเข้มข้นของสารอาหาร ช่วยลดปัญหาการเพิ่มสารอาหารเข้าสู่ระบบอย่างกะทันหัน (วรพจน์ รัตนพันธุ์, 2550) มีผลทำให้ประสิทธิภาพของระบบดี มีปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นค่อนข้างสม่ำเสมอและนิยมใช้ทั่วไป

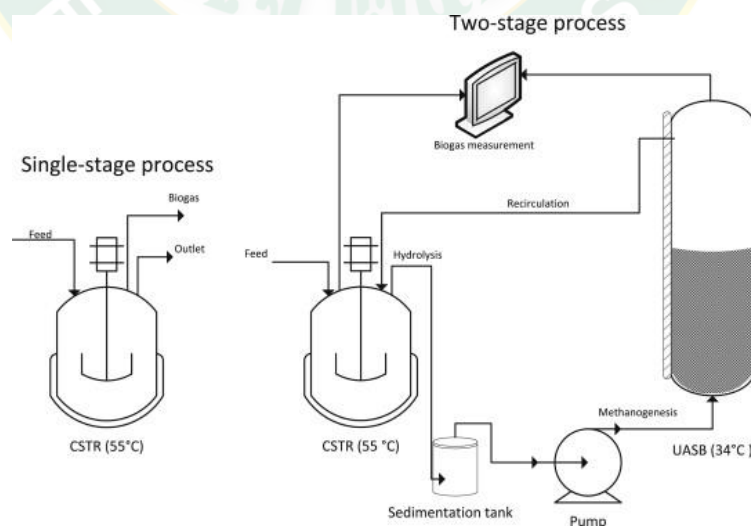
3. ระบบแบบต่อเนื่อง (Continuous Fermentation)

ระบบการป้อนแบบต่อเนื่องเป็นลักษณะการป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบหมักหรือถังหมักปฏิกริยาอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา วัตถุดิบที่หมักจะถูกย่อยสลายภายในระบบหมักหรือถังปฏิกริยาช่วงเวลาหนึ่งและถูกถ่ายออกจากระบบหมักหรือถังปฏิกริยาอย่างต่อเนื่องเช่นเดียวกัน ประสิทธิภาพของระบบจะสูงที่สุดแต่การเติมวัตถุดิบตลอดเวลาด้วยอัตราคงที่นั้น จำเป็นต้องมีเครื่องสูบลบวัตถุดิบ ดังนั้นในทางปฏิบัติระบบนี้อาจจะมีความยุ่งยาก เมื่อนำไปใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพขนาดเล็กในชนบทไม่มีความเหมาะสมเนื่องจากต้นทุนและระบบค่อนข้างยุ่งยาก (วรพจน์ รัตนพันธุ์, 2550)

เทคโนโลยีที่ใช้ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

สำหรับเทคโนโลยีของการผลิตก๊าซชีวภาพ เป็นระบบที่ออกแบบซึ่งอาศัยกลุ่มของแบคทีเรียชนิดที่ไม่ต้องการออกซิเจนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยระบบหรือบ่อหมักจะทำหน้าที่ควบคุมให้เกิดสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมทำให้ปฏิกิริยาเคมีเกิดขึ้นภายในระบบ โดยใช้เวลาหมักนานประมาณ 20-50 days จึงจะก่อให้เกิดก๊าซชีวภาพ โดยระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่นิยมใช้ สำหรับกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง คือ .แบบ Completely Stirred Tank Reactor, CSTR โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ระบบบำบัดแบบ Completely Stirred Tank Reactor ดังแสดงในภาพที่ 7 เป็นระบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศที่มีการเลี้ยงตะกอนแบบเชื้อแขวนลอย โดยมีเครื่องกวนเพื่อทำให้แบคทีเรียและน้ำเสียผสมกันได้อย่างทั่วถึง ไม่เกิดการไหลลัดทางหรือมีบริเวณที่ไม่ได้รับสารอินทรีย์ ระบบบำบัดน้ำเสียลักษณะนี้เหมาะกับน้ำเสียที่มีสารแขวนลอยสูง นอกจากนี้การที่ระบบมีการกวนผสมกันอย่างทั่วถึงทั้งถังสามารถช่วยลดความรุนแรงของสารพิษที่อาจหลุดเข้ามาในระบบได้ เนื่องจากเกิดการเจือจางโดยน้ำเสียที่อยู่ในถัง (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2557) แต่อย่างไรก็ตาม การที่ระบบมีเวลาเก็บกักตะกอนเท่ากับเวลากักเก็บน้ำ ทำให้มีความสามารถในการรับสารอินทรีย์ได้ต่ำเมื่อเทียบกับระบบบำบัดน้ำเสียที่มีอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์สูงในแบบอื่นๆ ทั้งนี้หากต้องการเพิ่มปริมาณน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบจำเป็นต้องขยายถังปฏิกิริยาให้ใหญ่ขึ้นหรือสร้างถังใหม่ (Solmaz et al., 2014)



ภาพที่ 7 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบถังกวนสมบูรณ์ (CSTR)

ที่มา: Solmaz et al. (2014)

ประโยชน์ของก๊าซชีวภาพ

การทำระบบผลิตก๊าซชีวภาพก่อให้เกิดประโยชน์ทั้งในด้านการอนุรักษ์พลังงาน การอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมและการเกษตร นอกจากนี้ ยังให้ผลตอบแทนในรูปแบบต่าง ๆ อีกมากมาย (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2557) ดังต่อไปนี้

1. การอนุรักษ์พลังงาน ก๊าซชีวภาพ 1 m³ สามารถทดแทนพลังงานในรูปแบบต่าง ๆ ได้ดังนี้ ก๊าซมีเทนประมาณ 60% ได้ค่าความร้อน 20.93 MJ/m³ สามารถใช้ทดแทนน้ำมันเตาได้ 0.55 L ก๊าซปิโตรเลียมเหลว 0.46 kg ดีเซล 0.60 L และเบนซิน 0.67 L ซึ่งเทียบเท่าพลังงานไฟฟ้า 1.2–2.2 kWh โดยสามารถให้พลังงานความร้อนได้สูงถึงประมาณ 9,000 kcal/m³ หรือ 21,000 kJ/m³

2. การอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม การใช้เทคโนโลยีก๊าซชีวภาพในการจัดการน้ำเสียในฟาร์มเลี้ยงสัตว์ก่อให้เกิดประโยชน์ด้านสิ่งแวดล้อม ดังนี้

- ลดปัญหามลพิษทางน้ำ โดยสามารถบำบัดและลดสารปนเปื้อนของสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้ตามที่กฎหมายกำหนด

- ลดปัญหากลิ่นเหม็นและแมลง

- ลดการปล่อยก๊าซมีเทนสู่บรรยากาศ เป็นการช่วยลดอัตราการเกิดภาวะเรือนกระจก ซึ่งเป็นต้นเหตุให้อุณหภูมิของโลกสูงขึ้น

3. การเกษตร การใช้เทคโนโลยีก๊าซชีวภาพในการจัดการน้ำเสียในฟาร์มเลี้ยงสัตว์ ก่อให้เกิดประโยชน์ด้านการเกษตร ดังนี้

- ผลิตปุ๋ยอินทรีย์เพื่อใช้ในการเพาะปลูกและปรับปรุงดิน ทั้งในรูปปุ๋ยแห้งและปุ๋ยน้ำได้เป็นอย่างดี

- การย่อยสลายอินทรีย์แบบไร้อากาศทำให้ปริมาณเชื้อโรคที่เป็นสาเหตุของโรคพืช บางชนิดลดลงและมีส่วนทำลายการงอกของเมล็ดพืชอีกด้วย

4. การจ้างงาน เป็นการส่งเสริมให้คนไทยมีงานทำทั้งในระยะสั้น (ระยะก่อสร้างระบบ) และระยะยาว (ระยะการใช้งานของระบบ) โดยในระยะการใช้งานของระบบจะมีการจ้างงานที่สม่ำเสมอตลอดอายุการใช้งานของระบบ

5. การเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากร การใช้เทคโนโลยีที่มีการจัดการของเสียอย่างครบวงจร ภายในฟาร์มและมีการใช้ประโยชน์จากผลพลอยได้อย่างคุ้มค่าหรือมีการปล่อยของเสียออกสู่สิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด (Waste Minimize) ถือเป็นการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

ข้าวโพดหวาน

1. ความหมายของข้าวโพดหวาน

ข้าวโพดหวาน (Sweet Corn) เป็นพืชตระกูลหญ้าวงศ์ (Family) กรามีนีอี (Gramineae) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า ซี เมย์ส แซคคาราตา (*Zea mas saccharata*) นิยมปลูกกันอย่างแพร่หลาย ซึ่งเป็นพืชชนิดหนึ่งในกลุ่มหญ้าประเภทลิโนเซลลูโลส ใช้สำหรับรับประทานฝักสด ให้ความหวานสูง ไขมันต่ำ ข้าวโพดหวานเป็นพืชอาหารเศรษฐกิจที่มีความสำคัญของประเทศข้าวโพดหวานเป็นพืชอายุสั้น ให้ผลตอบแทนค่อนข้างสูง สามารถจำหน่ายได้ทั้งตลาดบริโภคสดและส่งโรงงาน ส่วนใหญ่จะนำมาปรุงเป็นอาหาร ของหวานหรือแปรรูปได้หลากหลาย รวมถึงการนิยมนำรับประทานเป็นอาหาร โดยตรงด้วยการต้มหรือคั่ว นอกจากนี้ยังสามารถนำไปแปรรูปได้หลายรูปแบบ เช่น ข้าวโพดหวานบรรจุกระป๋องทั้งฝักหรือบรรจุกระป๋องเฉพาะเมล็ด ทำข้าวโพดแช่แข็ง ครีมข้าวโพดหวาน ซึ่งกลายเป็นสินค้าส่งออกของประเทศไทยในปัจจุบัน ข้าวโพดสามารถปลูกได้กว้างขวางทั่วโลก โดยประเทศไทยมีแหล่งเพาะปลูกสำคัญ ได้แก่ ภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคใต้ เป็นต้น (มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2558)

2. ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของข้าวโพดหวาน

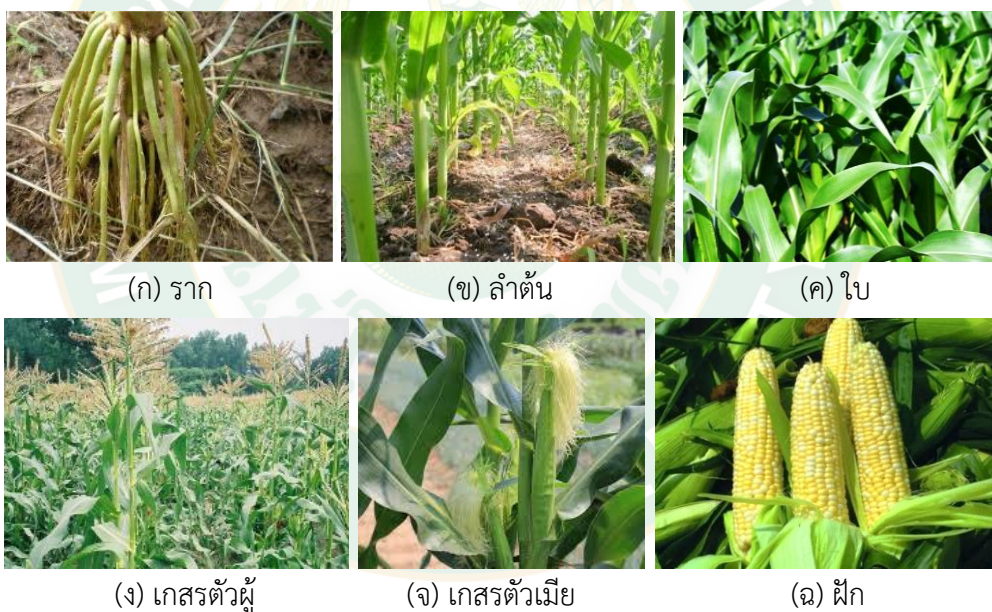
ข้าวโพดหวานเป็นล้มลุกใบเลี้ยงเดี่ยว อายุสั้น จัดอยู่ในตระกูล Gramineae เป็นพืชตระกูลเดียวกับหญ้าที่ผสมข้ามพันธุ์ มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Zea mays Line. Var Saccharata*. โดยลักษณะทั่วไปและทางพฤกษศาสตร์ (มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2558) ดังนี้

1) ราก ข้าวโพดหวานเป็นพืชไม่มีรากแก้ว มีเพียงระบบรากฝอยที่เจริญจาก 2 ส่วน คือ รากส่วนที่หนึ่ง เจริญมาจากคัพภะ เรียกว่า Primary root เป็นรากที่พัฒนาจาก Radical มีรากแขนงที่แตกออกจาก Primary root เรียกว่า Lateral root และระบบรากที่เกิดขึ้นจาก Scutellar node เรียกว่า seminal root รากทั้งหมดจะเติบโตในระยะเวลาสั้นในระยะที่ข้าวโพดหวานเป็นต้นกล้า และจะตายเมื่อต้นข้าวโพดเจริญเติบโตมากขึ้น ส่วนที่ 2 เป็นรากที่เจริญจากลำต้น เรียกว่า Adventitious root โดยแตกออกจากส่วนข้อช่วงข้อล่างของลำต้น (มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2558)

2) ลำต้น ข้าวโพดมีลำต้นแข็ง ใสนั่นไม่กลวง มีความยาวตั้งแต่ 30 cm จนถึง 8 m แล้วแต่ชนิดของพันธุ์ ตามลำต้นมีข้อ (Node) และปล้อง (Internode) ปล้องที่อยู่บนดินและใกล้ผิวดินสั้น และจะค่อยๆยาวขึ้นไปทางด้านปลาย ปล้องเหนือพื้นดินจะมีจำนวนประมาณ 8-20 ปล้อง ข้าวโพดส่วนมากมีลำต้นสดสีเขียว (มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2558)

3) ใบ ใบข้าวโพดมีลักษณะยาวรี คล้ายพีชตระกูลหญ้าทั่วไป กระจุกด้วยตัวใบ กาบใบ และซี่งใบ ลักษณะของใบรวมทั้งสีของใบแตกต่างกันไปแล้วแต่ชนิดของพันธุ์ บางพันธุ์ใบสีเขียว บางพันธุ์ใบสีม่วง และบางพันธุ์ใบลาย จำนวนใบอาจมีตั้งแต่ 8-48 ใบ (มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2558)

4) ดอก ข้าวโพดจัดเป็นพวกโมโนอิคีเชียส (Monoecious) คือ มีดอกตัวผู้และดอกตัวเมียแยก อยู่ในต้นเดียวกัน ช่อตัวผู้อยู่ด้านบน (Tassel) อยู่ตอนบนสุดของลำต้น ดอกตัวผู้ดอกหนึ่งจะมีอับเกสร (Anther) 3 อับ แต่ละอับจะมีเรณูเกสร (Pollen grain) ประมาณ 2,500 เม็ด ดอกพวกนี้พร้อมที่จะผสมพันธุ์ หรือรับละอองเกสรได้เมื่อเส้นไหมโผล่ออกมา หลังจากได้รับการผสมเส้นไหมจะแห้งเหี่ยว และรังไข่เจริญเติบโตเป็นเมล็ด ช่อดอกตัวเมียที่รับการผสมแล้วเรียกว่า ฝัก (Ear) แต่ละฝักอาจมีเมล็ดมากถึง 1,000 เม็ด แกนกลางของฝักเรียกว่า ชัง (Cob) และส่วนที่ห่อหุ้มชังเรียกว่า เปลือกองค์ประกอบต่าง ๆ ของต้นข้าวโพดหวาน (มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2558) ดังแสดงในภาพที่ 8



ภาพที่ 8 องค์ประกอบต่าง ๆ ของต้นข้าวโพดหวาน

3. องค์ประกอบของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส

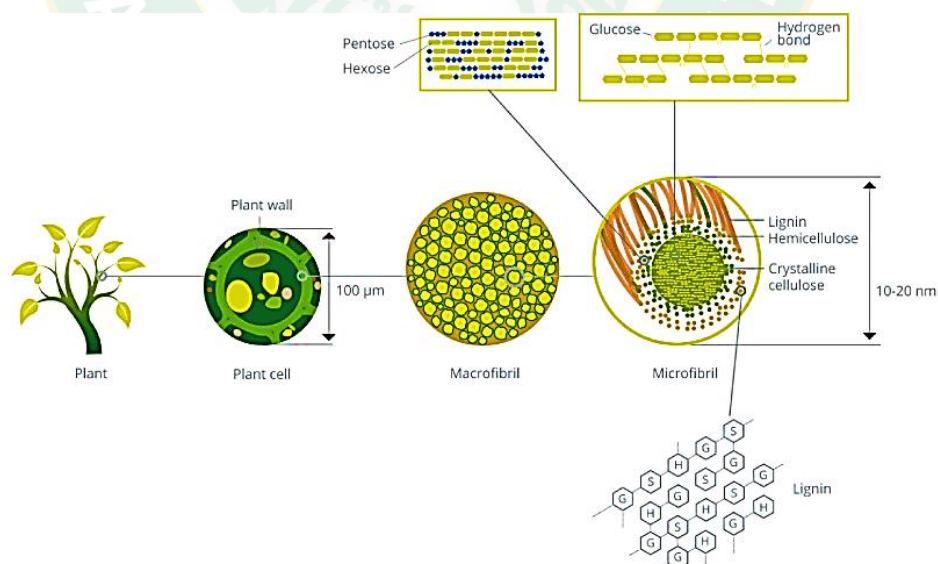
โดยทั่วไปองค์ประกอบของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส ประกอบด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน โดยอัตราส่วนของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน จะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับประเภทและแหล่งที่มาของวัสดุลิกโนเซลลูโลส ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งส่วนใหญ่จะพบเซลลูโลสประมาณ 40-60% เฮมิเซลลูโลสประมาณ 20-30% และลิกนิน ประมาณ 15-30% ซึ่ง

ลักษณะองค์ประกอบของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลสจะมีลักษณะ ดังแสดงในภาพที่ 9

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

ชนิดของชีวมวล	วัสดุเหลือทิ้ง	เซลลูโลส (%)	เฮมิเซลลูโลส (%)	ลิกนิน (%)
วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร	ฟางข้าวสาลี	30	50	15
	ฟางข้าวบาเลย์	33-40	20-35	8-17
	ซังข้าวโพด	39-42	22-28	18-22
	เปลือกถั่ว	25-30	25-30	30-40
พืชพลังงาน	ทะลายปาล์มเปล่า	41	24	21.2
	หญ้าสวีตซ์แกรส	45	31.4	12
ของเสียจากอุตสาหกรรม	ของเสียจากกระดาษ	60-70	10-20	5-10
	ของแข็งจากน้ำเสีย	8-15	0	0

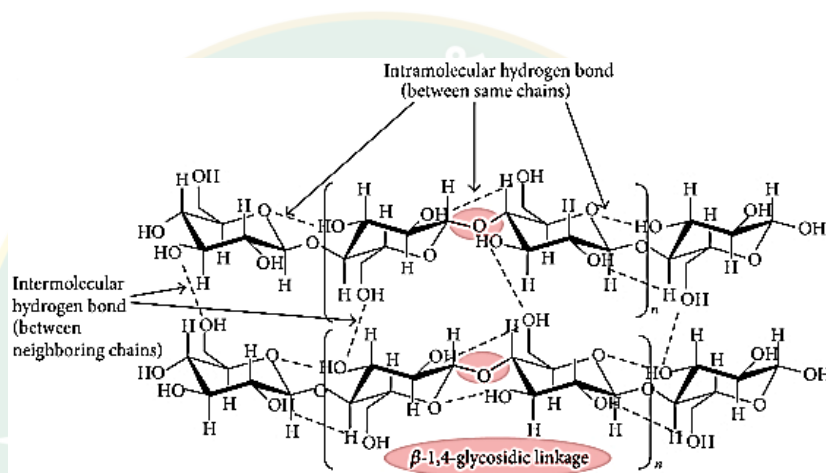
ที่มา: Lee et al. (2014)



ภาพที่ 9 โครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของวัสดุเหลือทิ้งประเภทลิกโนเซลลูโลส

ที่มา: Schulze et al. (2016)

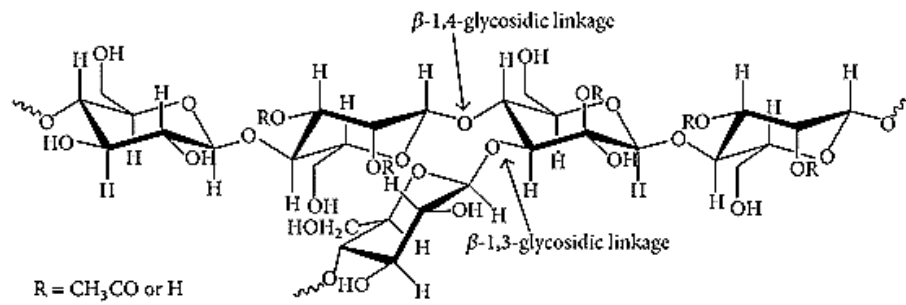
(ก) เซลลูโลส (Cellulose) เป็นโฮโมโพลิเมอร์มีลักษณะเป็นเส้นตรง ไม่มีกิ่งก้าน ประกอบด้วยหน่วยย่อยคือ เบต้า-D-กลูโคไพรานอส (β -D-Glucopyranose) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเบต้า 1,4-ไกลโคซิดิก (β -1,4-Glycosidic Bond) เกิดเป็นโพลิเมอร์กลูแคน (Glucan) มีความยาวตามธรรมชาติประมาณ 10,000 หน่วย ยึดเหนี่ยวกันด้วยพันธะไฮโดรเจน โดยทั่วไปในธรรมชาติพบเซลลูโลส 2 แบบ คือ Crystalline Cellulose และ Amorphous Cellulose โดยส่วนของ Crystalline Cellulose จะถูกย่อยสลายด้วยเอนไซม์ยากกว่า Amorphous Cellulose สำหรับโครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส (รัชพล พวงศรีรัตน์, 2558) ดังแสดงในภาพที่ 10



ภาพที่ 10 โครงสร้างของเซลลูโลส

ที่มา: Lee et al. (2014)

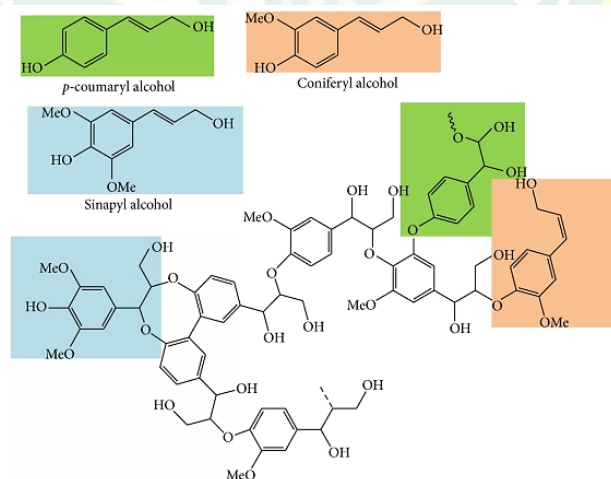
(ข) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) เป็นองค์ประกอบชนิดหนึ่งในวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลส เป็นเฮเทอโรโพลิเมอร์ของน้ำตาลชนิดต่าง ๆ หลายชนิดผสมกัน เช่น กลูโคส แมนโนส ไชโลส และอะราบิโนส ซึ่งพบอยู่ในรูปโพลิเมอร์ไซแลน แมนแนน กาแลกแตน และอะราบิแนน (Chihe et al., 2019) มีความยาวเฉลี่ยประมาณ 150 หน่วย โดยในพอลิเมอร์ไวแลน ดี-ไชโลสมีปริมาณมากที่สุดคือ 85-93 ส่วนองค์ประกอบอื่น เช่น กลูโคส กรดกลูควิโรนิก กรดกาแลคตุโรนิก จะพบปริมาณน้อย โดยไชโลสที่พบจะเชื่อมด้วยพันธะ β -1,4-glycosidic สำหรับโครงสร้างทางเคมีของไซแลน (รัชพล พวงศรีรัตน์, 2558) ดังแสดงในภาพที่ 11



ภาพที่ 11 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส

ที่มา: Lee et al. (2014)

(ค) ลิกนิน (Lignin) เป็นสารประกอบประเภทอะโรมาติกที่พบในส่วนผนังเซลล์ของพืช พบในปริมาณที่แตกต่างไปตามชนิดของพืช ในธรรมชาติลิกนินเป็นส่วนป้องกันเซลลูโลสไม่ให้ถูกย่อยสลายได้ง่ายโดยเอนไซม์ของจุลินทรีย์ ลิกนินเป็นเฮเทอโรพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างแบบ 3 มิติ ไม่แตกสลายประกอบด้วยสารประกอบอะโรมาติก 3 ชนิด ประกอบด้วย Tran-*p*-coumaryl Alcohol, Trans-coniferyl Alcohol และ Trans-*p*-sinapyl Alcohol (Chihe et al., 2019) นอกจากนี้โมเลกุลของลิกนินยังเชื่อมต่อกับสารประกอบอะโรมาติกอื่นอีกมากมาย เช่น Vanillin และ Syringaldehyde สูตรโครงสร้างของ Tran-*p*-coumaryl Alcohol, Trans-coniferyl Alcohol และ Trans-*p*-sinapyl Alcohol ดังแสดงในภาพที่ 12

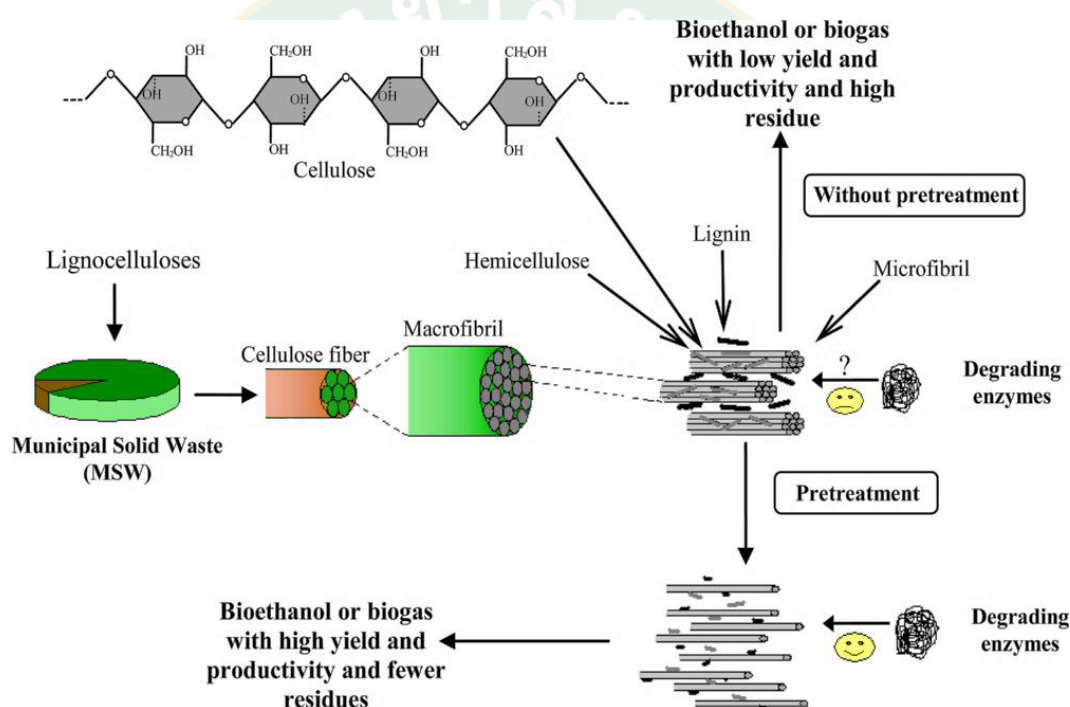


ภาพที่ 12 โครงสร้างของลิกนิน

ที่มา: Lee et al. (2014)

การปรับสภาพเบื้องต้นของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส

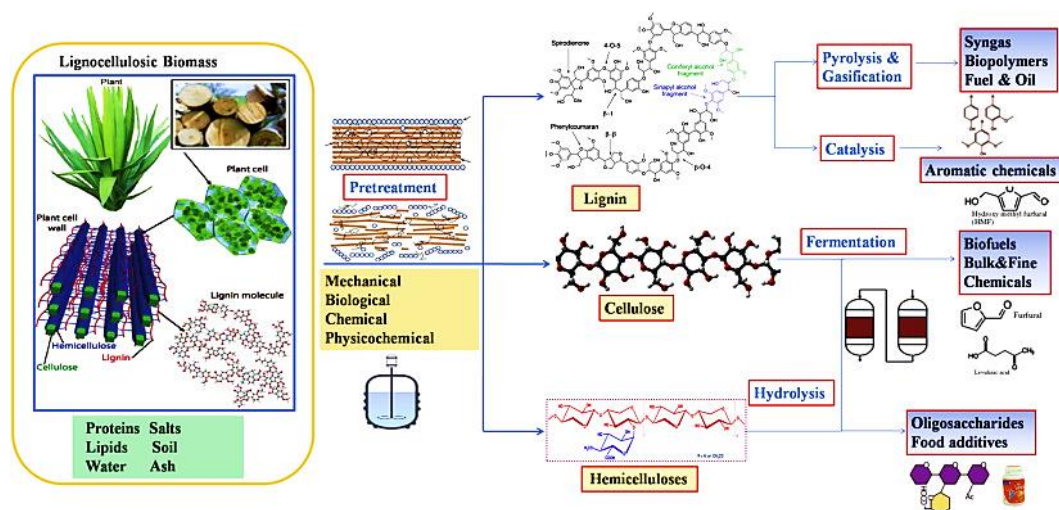
สำหรับกระบวนการปรับสภาพวัตถุดิบจะกระตุ้นให้มีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางด้านกายภาพ คือ ทำให้ชั้นเมทริกซ์ของวัสดุลิกโนเซลลูโลสถูกทำลายซึ่งมีผลทำให้เอนไซม์สามารถทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ (Gunther & Lucy, 2013) ในการศึกษาจะแสดงให้เห็นถึงการปรับสภาพมีความสำคัญจะเป็นตัววัดความสำเร็จของเทคโนโลยีในการแปลงเซลลูโลส เนื่องจากเป็นตัวช่วยแสดงให้เห็นถึงความคุ้มค่าทางพาณิชย์ในการเปลี่ยนเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสที่สามารถเปลี่ยนให้เป็นสารตั้งต้นสำหรับกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพได้ ดังแสดงในภาพที่ 13



ภาพที่ 13 การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในของพืชประเภทหญ้าในระหว่างการปรับสภาพเบื้องต้น

ที่มา: Zhao and Xia (2009)

จุดประสงค์ของการปรับสภาพวัตถุดิบ คือ เป็นการกำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลส ลดความเป็นผลึกของเซลลูโลสและเพิ่มความพรุนความวัสดุ ซึ่งกระบวนการปรับสภาพวัตถุดิบ ดังแสดงในภาพที่ 14 สามารถแบ่งได้เป็น 4 วิธีหลักดังนี้



ภาพที่ 14 กระบวนการปรับสภาพเบื้องต้นของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส

ที่มา: Yun et al. (2015)

1. วิธีทางกายภาพ (Physical Pre-treatment)

สำหรับการปรับสภาพด้วยวิธีการทางกายภาพส่วนใหญ่จะนิยมใช้แรงทางกลเป็นวิธีการทำให้วัตถุดิบมีขนาดเล็กจะสามารถทำได้หลายวิธีเช่น การทุบ การบด การม่ การเขย่าวัตถุดิบ เป็นต้น ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดการลดผลึก (Cellulose Crystallinity) และเพิ่มพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาให้มากขึ้น ความสามารถในการลดขนาดจะขึ้นอยู่กับขนาดสุดท้ายของวัสดุและคุณสมบัติของวัสดุนั้น และด้วยวิธีการใช้ความร้อนเป็นการปรับสภาพของวัตถุดิบ เพื่อทำลายเนื้อเยื่อของเซลลูโลส ซึ่งโดยส่วนใหญ่มักจะใช้อุณหภูมิมากกว่า 150–180 °C แต่ต้องทำให้วัสดุมีขนาดที่เล็กลงก่อนเข้าสู่กระบวนการย่อยวัตถุดิบทางความร้อน (ภาวิณี เพ็ชรนง, 2560)

2. วิธีการทางเคมี (Chemical Pre-treatment)

สำหรับการปรับสภาพด้วยวิธีการทางเคมีที่นิยมใช้มากที่สุดคือ การทำปฏิกิริยาด้วยการใช้ต่าง ซึ่งกระบวนการปรับสภาพวัตถุดิบมีผลต่อวัสดุจำพวกลิกโนเซลลูโลส และผลของต่างที่ใช้ในกระบวนการแปลงสภาพจะขึ้นอยู่กับปริมาณของลิกนินที่มีอยู่ในวัสดุนั้นด้วย กลไกการทำงานของต่างนั้นเชื่อว่าจะไปเพิ่มการพองตัวภายในโมเลกุลภายในต่อสายพันธะภายในของไซแลนในเฮมิเซลลูโลส ความพรุนของวัสดุจะเพิ่มขึ้นได้ เมื่อทำการกำจัดสายโซ่ที่เชื่อมต่อกภายใน การใช้ต่างเจือจางในวัสดุลิกโนเซลลูโลสมีผลทำให้เกิดการบวมภายในเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสในการทำปฏิกิริยาทำให้วัสดุมีความพรุนเพิ่มขึ้นได้ ลดความเป็นโครงสร้างผลึกของเซลลูโลส ลดระดับความเป็นพอลิเมอร์ขนาดใหญ่

และสามารถแยกสายโครงสร้างระหว่างลิกนินและ คาร์โบไฮเดรต และเป็นการแยกองค์ประกอบหรือทำลายโครงสร้างของลิกนิน สำหรับการใช้อย่างต่างเพื่อปรับสภาพมักจะไม่มียาฆ่าเชื้อราในน้ำหมักเนื้ออ่อนทำไม่เนื้อแข็ง ดังนั้นต่างที่นิยมใช้ในการแยกลิกนินได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) และแอมโมเนียไฮดรอกไซด์ (NH₄OH) (ภาวิณี เพ็ชรนวก, 2560)

4. วิธีการทางชีวภาพ (Biological Pre-treatment)

วิธีการทางชีวภาพเป็นวิธีการที่ใช้จุลินทรีย์ ซึ่งจุลินทรีย์เหล่านี้สามารถใช้ในการปรับสภาพวัตถุดิบประเภทลิกนินเซลลูโลสและยังเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในย่อยวัตถุดิบด้วยเอนไซม์ ในการใช้จุลินทรีย์ในการปรับสภาพซึ่งรวมทั้งย่อยลิกนินและเฮมิเซลลูโลสด้วยส่วนเซลลูโลสถูกย่อยน้อยมาก ซึ่งเซลลูโลสมีความต้านทานในการถูกจุลินทรีย์ย่อยของจุลินทรีย์ได้มากกว่าส่วนอื่นๆ ของลิกนินเซลลูโลส มีการใช้จุลินทรีย์ Brown, White, และ Soft-rot Fungi ซึ่งจุลินทรีย์ดังกล่าวเป็นจุลินทรีย์ที่มีประสิทธิภาพสูงในการปรับสภาพด้วยกระบวนการทางชีวภาพ เมื่อวัตถุดิบประเภทลิกนินเซลลูโลสถูกปรับสภาพจะทำให้โครงสร้างความเป็นผลึกลดลง ซึ่งง่ายต่อกระบวนการย่อยสลายวัตถุดิบประเภทลิกนินเซลลูโลสด้วยกรดหรือเอนไซม์ต่อไป (Kumar et al., 2011)

สำหรับวิธีการปรับสภาพแบบทางชีวภาพถือเป็นหนึ่งในวิธีที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในระดับอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ซึ่งวิธีการดังกล่าวเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า พืชหมัก (Silage) โดยเป็นวิธีการรักษาพืช ซึ่งทำการหมักร่วมโดยใช้แบคทีเรียกลุ่มผลิตกรดแลคติก เพื่อเปลี่ยนคาร์โบไฮเดรตที่ละลายในน้ำ (Water Soluble Carbohydrate, WSC) ไปเป็นกรดอินทรีย์ที่อยู่ในรูปของกรดแลคติก ส่วนใหญ่จะเกิดภายใต้สภาวะการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการหมักจะสามารถอยู่ได้นาน โดยคุณค่าทางอาหารจะไม่เปลี่ยนแปลงซึ่งส่วนใหญ่นิยมนำพืชประเภทลิกนินเซลลูโลสมาเป็นส่วนประกอบหลัก เนื่องจากหาง่ายและต้นทุนในการผลิตต่ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่งการสร้างแลคติกในพืชหมักอีกทั้งยังส่งผลให้ค่า pH ของพืชหมักลดลงต่ำกว่า 4 การที่ค่า pH มีค่าความเป็นกรดสูงส่งผลให้จำนวนจุลินทรีย์ที่ไม่เป็นประโยชน์ต่อกระบวนการหมักลดลง (Mishima et al., 2006) ดังนั้นในปัจจุบันจึงนิยมทำการเติมแบคทีเรียกลุ่มกรดแลคติกลงไปในพืชหมัก เพื่อเร่งกระบวนการหมักให้เร็วขึ้น (ภาวิณี เพ็ชรนวก, 2560)

พืชหมัก

พืชหมัก หมายถึง พืชที่เก็บเกี่ยวในขณะที่มีความชื้นเหมาะสม นำมาผ่านกระบวนการหมักในสภาวะการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนและเก็บถนอมไว้ในสภาพหมัก เมื่อพืชสภาพสดเปลี่ยนเป็นพืชหมักจะสามารถเก็บไว้ได้นาน โดยคุณค่าทางอาหารไม่เปลี่ยนแปลง พืชเกือบทุกชนิด หญ้า ต้นข้าวโพด ข้าวฟ่างหรือธัญพืชต่าง ๆ รวมทั้งวัชพืชสามารถทำการหมักได้ทั้งสิ้น (Mishima et al., 2006) การที่พืชสดเปลี่ยนสภาพเป็นพืชหมักนั้นต้องอาศัยจุลินทรีย์เป็นตัวช่วยที่สำคัญ ซึ่งจุลินทรีย์เหล่านี้จะมีอยู่ตามธรรมชาติและติดอยู่กับพืชที่จะนำมาหมัก อาจมีทั้งชนิดที่ต้องการออกซิเจน ไม่ต้องการออกซิเจน และกลุ่มที่เจริญอยู่ได้ในสภาวะที่มีหรือไม่มีออกซิเจน จุลินทรีย์เหล่านี้จะก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในพืชที่กำลังหมักได้รับความนิยม เพื่อใช้ในการถนอมพืชอาหารสัตว์ สำหรับเก็บไว้ใช้ในฤดูแล้งที่มีพืชอาหารสดไม่เพียงพอ (มนตรี ปัญญาทอง และกฤตภาค บุรณวิทย์, 2557)

โดยกระบวนการหมักพืช สามารถแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยา ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 ขั้นตอนการย่อยสลายด้วยสภาวะแบบใช้ออกซิเจน ซึ่งยังคงมีช่องว่างของอากาศที่อยู่ระหว่างอนุภาคและค่า pH ยังคงเดิม ซึ่งทำให้จุลินทรีย์ที่ใช้ออกซิเจนสามารถผลิตเอนไซม์ออกมาย่อยสลายและทำงานได้จนกว่าอากาศภายในภาชนะจะหมด โดยจะเกิดขึ้นในระยะ 1-2 วันแรก

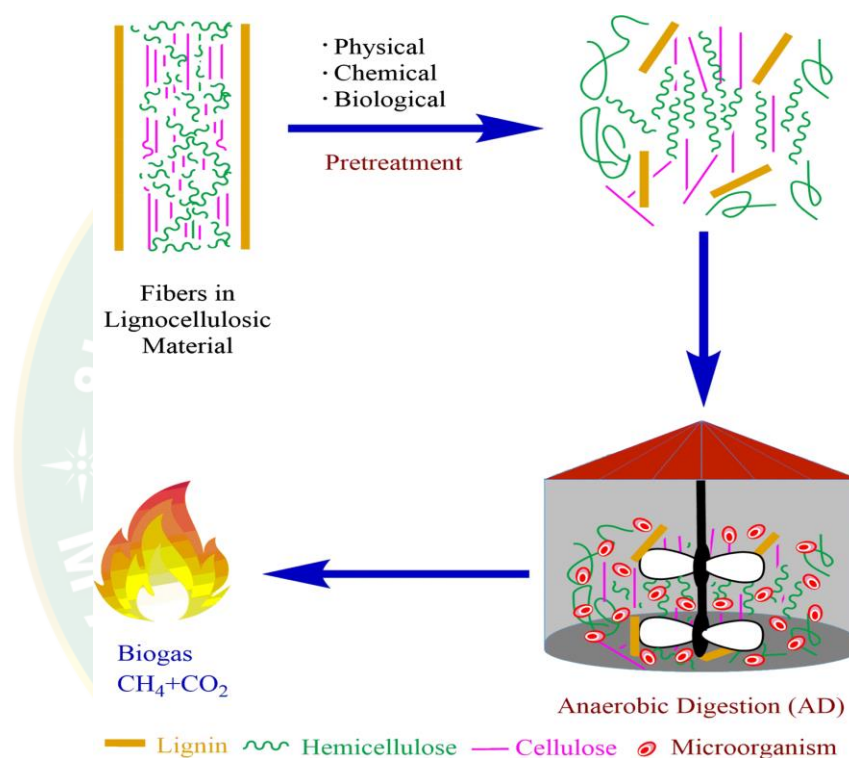
ขั้นตอนที่ 2 ขั้นตอนการผลิตกรดแลคติกด้วยสภาวะการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยใช้แบคทีเรียกลุ่มผลิตกรดแลคติก ซึ่งจะเกิดขึ้นในวันที่ 3 ของการหมัก ทำให้ค่า pH ลดลงอยู่ในช่วง 4.2-6.0 หลังจากผลิตกรดแลคติกอย่างต่อเนื่องเป็นระยะเวลา 7-14 days หรือมากกว่าจะทำให้ค่า pH ลดลงต่ำกว่า 4.0 ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกถึงจำนวนจุลินทรีย์ที่ไม่เป็นประโยชน์ต่อกระบวนการหมักลดลง

ขั้นตอนที่ 3 ขั้นตอนที่มีความเสถียรในระหว่างการเก็บรักษาของพืชหมักจะมีการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยและมีความเสถียร เมื่อเก็บรักษาภายในภาชนะที่ปิดสนิทภายใต้สภาวะการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน

ขั้นตอนที่ 4 ขั้นตอนการนำพืชหมักไปใช้จะทำให้พืชหมักเกิดการสัมผัสกับอากาศทำให้แบคทีเรียในกลุ่มที่ใช้ออกซิเจน เช่น ยีสต์ รา เกิดการทำให้พืชหมักเน่าเสียของชั้นผิวหน้าและเกิดการสูญเสียคุณค่าของอาหาร ความเป็นกรด อีกทั้งยังอาจจะสูญเสียในระหว่างขั้นตอนเหล่านี้ขึ้นอยู่กับการจัดการในแต่ละขั้นตอน

สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ได้เลือกใช้กระบวนการปรับสภาพของวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรใช้กระบวนการปรับสภาพด้วย 2 วิธีการ ประกอบด้วย ทางเคมี (Chemical Pre-treatment) และทางชีวภาพ (Biological Pre-treatment) ดังแสดงในภาพที่ 15 โดยกระบวนการปรับสภาพแบบ Pre-

acidification คือ กระบวนการปรับสภาพให้วัสดุหมักเกิดกระบวนการหมักกรดก่อนหรือการเปลี่ยนสารอาหารตั้งต้นจำพวก น้ำตาล กรดอะมิโน กรดไขมัน เป็นต้น ให้กลายเป็นกรดอินทรีย์ชนิดโมเลกุลเล็ก เช่น กรดอะซิติก (Acetic Acid) กรดโพรไพโอนิก (Propionic Acid) กรดวาเลอริก (Valeric Acid) และกรดแลคติก (Lactic Acid) โดยกรดที่เกิดขึ้นทั้งหมดมีส่วนของกรดอะซิติกสูงสุด และมีการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นในขั้นตอนนี้ด้วย แบคทีเรียสร้างกรดมีอัตราการเจริญเติบโตสูงและทนทานต่อสภาพแวดล้อมได้ดี (ธนพร วิชัย และวรรัตน์ ปีตรประกบ, 2554)



ภาพที่ 15 กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส

ที่มา: Yun Hu et al. (2015)

มูลสุกร

ของเสียที่เกิดจากการเลี้ยงสุกร สำหรับฟาร์มสุกรจากข้อมูลการสำรวจอัตราการใช้น้ำและอัตราการเกิดน้ำเสียจากการเลี้ยงสุกร พบว่าสุกรพ่อ-แม่พันธุ์มีการใช้และอัตราการเกิดน้ำเสีย โดยเฉลี่ยต่อตัวสุกรในรอบวันมากที่สุด รองลงมา คือสุกรขุนและสุกรอนุบาล ตามลำดับ สำหรับค่าความสกปรกของน้ำเสียในรูปของค่า BOD พบว่าสุกรขุนก่อให้เกิดน้ำเสียที่มีค่าความสกปรกของน้ำเสียใน

รูปปีโอดีมากที่สุด รองลงมาคือ สุกรอนุบาล และสุกรพ่อ-แม่พันธุ์ ตามลำดับ ซึ่งของเสียที่เกิดจากฟาร์มสุกรประกอบด้วย มูลสุกรและของเสียที่เป็นของแข็งอื่น ๆ (สำนักจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ, 2556) ดังนี้

1. มูลสุกร มูลสุกรประกอบด้วยกากอาหารที่ย่อยไม่ได้ เช่น ส่วนที่เป็นของแข็งพวกเยื่อใยหรือส่วนที่ย่อยได้แต่ไม่ถูกดูดซึมและสิ่งที่ปล่อยออกมาจากร่างกายสัตว์ โดยเฉพาะจากกระบวนการเดินอาหาร เช่น เยื่อบุผนังลำไส้ เยื่อเมือก น้ำย่อย แร่ธาตุ แบคทีเรีย เป็นต้น ในมูลสุกรจะประกอบด้วยน้ำ 65–85% อินทรีย์วัตถุ 10–20% และอนินทรีย์วัตถุ 10% โดยอายุและน้ำหนักของสุกรมีผลต่อปริมาณของสิ่งขับถ่ายด้วย

2. ของเสียที่เป็นของแข็งอื่น นอกจากมูลสุกรแล้วในกระบวนการผลิตสุกร เช่น การให้อาหาร การเลี้ยงดู การป้องกันโรค การผสมพันธุ์ การทำคลอดลูกสุกร ซึ่งในแต่ละขั้นตอนต่าง ๆ เหล่านี้ จะทำให้เกิดของเสียเกิดขึ้นอีกหลายชนิด เช่น เชื้อฉีดยา ถูใส่อาหาร ขวดยา ขวดน้ำเช็ดรก และซากสุกรที่ตาย เป็นต้น (กรมควบคุมมลพิษ, 2560)

สำหรับระบบการบำบัดน้ำเสียด้วยระบบผลิตก๊าซชีวภาพและระบบบำบัดขั้นสุดท้ายสามารถลดปริมาณสารอินทรีย์ได้มากถึง 98% ของน้ำเสียที่เข้าสู่ระบบ โดยจะมีค่า COD ออกจากระบบที่คาดไว้ไม่ควรเกิน 400 mg/L และมีค่า BOD น้อยกว่า 100 mg/L (สำนักจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ, 2556) ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานที่กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงวิทยาศาสตร์ฯ ได้ประกาศไว้ ดังแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดครบทุกขั้นตอนแล้ว สามารถหมุนเวียนกลับมาใช้ภายในฟาร์มเพื่อทำความสะอาดโรงเรือนเลี้ยงสัตว์ได้ ซึ่งจะเป็นการช่วยลดปริมาณการใช้น้ำบาดาลและลดค่าใช้จ่ายภายในฟาร์มได้อีกทางหนึ่งด้วย

ตารางที่ 3 มาตรฐานน้ำทิ้งจากฟาร์มสุกรขนาดต่าง ๆ ของกรมควบคุมมลพิษ

ดัชนีวัดคุณภาพน้ำ	หน่วย	เกณฑ์มาตรฐานสูงสุด	
		ฟาร์มขนาดใหญ่	ฟาร์มขนาดกลาง
pH	-	5.5-9.0	5.5-9.0
BOD	mg/L	60	100
COD	mg/L	300	400
SS	mg/L	150	150
TKN	mg/L	120	150

ที่มา: สำนักจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ (2556)

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

แบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะใช้การพิจารณาด้วยกระบวนการวิเคราะห์การถดถอย (Regression Analysis) โดยการวิเคราะห์การถดถอยเป็นกระบวนการทางสถิติ เพื่อให้ได้สมการถดถอย สำหรับการทำนายปรากฏการณ์ต่าง ๆ สิ่งที่ถูกทำนาย เรียกว่า ตัวแปรเกณฑ์และตัวแปรตาม ตัวแปรทำนาย คือ ตัวแปรอิสระ ในกระบวนการนี้ตัวแปรตามจะมีเพียงตัวเดียว ส่วนตัวแปรอิสระหรือตัวแปรทำนายจะมีกี่ตัวก็ได้ ถ้าหากมีตัวเดียวจะเรียกว่า การถดถอยอย่างง่าย (Simple Regression) หากมีมากกว่า 1 ตัวแปรขึ้นไป จะเรียกว่า การถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression) (ธีรวัฒน์ นาคะบุตร, 2546) ผลของการศึกษาจะทำให้ทราบถึง

- (1) ขนาดของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระที่มีต่อตัวแปรตาม
- (2) แบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตาม

ในการวิเคราะห์การถดถอย มักเรียกตัวแปรอิสระนี้ว่า ตัวแปรทำนาย (Predictor) หรือตัวแปรกระตุ้น (Stimulus Variable) ส่วนตัวแปรตามมักเรียกว่า ตัวแปรตอบสนอง (Response Variable) หรือตัวแปรเกณฑ์ (Criterion Variable)

การวิเคราะห์การถดถอยมีหลายชนิดขึ้นอยู่กับลักษณะของตัวแปรตามรูปแบบความสัมพันธ์ และการกำหนดตัวแปรอิสระ ซึ่งโดยทั่วไปสามารถแบ่งการวิเคราะห์การถดถอยได้ 2 ประเภท คือ

ประเภทที่ 1 การวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้น (Linear Regression) เป็นการวิเคราะห์การถดถอยที่ตัวแปรอิสระส่วนใหญ่เป็นตัวแปรเชิงปริมาณ ส่วนตัวแปรตามจะต้องเป็นตัวแปรเชิงปริมาณเท่านั้น รูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตามสามารถแทนได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ที่เป็นเชิงเส้น (Linear Model)

ประเภทที่ 2 การวิเคราะห์การถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linear Regression) เป็นการวิเคราะห์การถดถอยที่รูปแบบของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรตามสามารถแทนได้ด้วยสมการทางคณิตศาสตร์ที่ไม่เป็นเชิงเส้น (Non-Linear Model)

การวิเคราะห์ต้นทุนและผลตอบแทนทางพลังงาน

การวิเคราะห์ต้นทุนและผลตอบแทนทางพลังงานเป็นวิธีการที่จะแสดงให้เห็นว่าการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพและประหยัดภายใต้จุดมุ่งหมายหรือความต้องการในรูปแบบที่สะดวกต่อการวิเคราะห์โครงการจะมีการประเมินถึงผลตอบแทน (Benefit) และค่าใช้จ่าย (Cost) ต่าง ๆ ของแต่ละโครงการ ถ้าผลตอบแทนมีค่ามากกว่าค่าใช้จ่าย แสดงว่าโครงการนั้นเป็นโครงการที่มี

ผลตอบแทนคุ้มค่า การวิเคราะห์โครงการจึงมีส่วนช่วยต่อการตัดสินใจที่จะใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ

เครื่องมือหรือเกณฑ์ในการประเมินความคุ้มค่าด้านเศรษฐศาสตร์การประเมินหาความคุ้มค่าของโครงการทางด้านเศรษฐศาสตร์ การประเมินโครงการในการศึกษาครั้งนี้จะเป็นการวัดความคุ้มค่าของโครงการในการลงทุนในระดับเอกชนเท่านั้น โดยมีวิธีการวิเคราะห์ดังนี้

1. ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period, PB)

การวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุนมาทำการร่วมพิจารณา ซึ่งเป็นการพิจารณามูลค่าการลงทุนเบื้องต้นทั้งหมด เปรียบเทียบกับมูลค่าผลตอบแทนที่ได้จากการลงทุนต่อปี ดังแสดงในสมการที่ 2 และ 3 ดังต่อไปนี้

$$PB = \ln(v) / B \quad \text{สมการที่ 2}$$

$$B = EC \times W_{\text{Biogas}} \times t_{\text{OP}} \quad \text{สมการที่ 3}$$

เมื่อ	$\ln(V)$	คือ ค่าใช้จ่ายการลงทุนติดตั้งของโครงการ, Baht
	B	คือ มูลค่าผลตอบแทนต่อปี, Baht/y
	EC	คือ อัตราการรับซื้อก๊าซหุงต้มต่อหน่วย, Baht/kg LPG
	W_{Biogas}	คือ ปริมาณการผลิตก๊าซหุงต้มของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ, kg LPG
	t_{OP}	คือ เวลาในการทำงานต่อปี, h/y

2. ค่าใช้จ่ายในการผลิตก๊าซหุงต้มต่อปี (Production LPG Cost)

สำหรับการใช้พลังงานก๊าซชีวภาพ เพื่อทดแทนก๊าซหุงต้มสิ่งที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ คือ ค่าใช้จ่ายในการผลิตก๊าซหุงต้ม ซึ่งขึ้นกับชนิดของพลังงานทดแทน ดังนั้นในการคิดต้นทุนการผลิตก๊าซชีวภาพต่อหน่วยของโครงการ ต้องนำค่าใช้จ่ายในการผลิตไปพิจารณา ดังแสดงในสมการที่ 4 และ 5 ดังต่อไปนี้

$$B = (EC \times W_{\text{Biogas}} \times t_{\text{OP}}) - PEC \quad \text{สมการที่ 4}$$

$$B = (EC \times W_{\text{Biogas}} \times t_{\text{OP}}) - (\dot{C}_{\text{Fuel}} \times M_{\text{Biogas}} \times t_{\text{OP}}) - \dot{Z}_{\text{OM}} \quad \text{สมการที่ 5}$$

เมื่อ	\dot{C}_{Fuel}	คือ ต้นทุนค่าใช้จ่ายด้านพลังงานในการผลิตก๊าซหุงต้ม, Baht/kg LPG
	M_{Biogas}	คือ ปริมาณเชื้อเพลิงในการผลิตก๊าซหุงต้มต่อปี, kg LPG/y

\dot{Z}_{OM} คือ อัตราค่าการบำรุงรักษาต่อปี, Baht/y

3. ค่าต้นทุนการผลิตก๊าซหุงต้มต่อหน่วย (Levelized LPG Cost)

ค่าต้นทุนการผลิตก๊าซหุงต้มต่อหน่วย (Levelized LPG Cost) แทนได้ ซึ่งสามารถประเมินได้จากปัจจัยต่าง ๆ เช่น ค่าอัตราส่วนลด (Discount rate, r) ค่าดอกเบี้ยของธนาคาร ค่าเงินเพื่อและค่าเสียโอกาส เป็นต้น เนื่องจากการประเมินค่าต้นทุนการผลิตก๊าซหุงต้มต่อหน่วย โดยไม่พิจารณาระยะเวลาการรับซื้อไฟฟ้าหรือระยะเวลาการคืนทุน ดังนั้นต้องใช้สมการต่อไปนี้ในการวิเคราะห์ค่าต้นทุนการผลิตก๊าซหุงต้มต่อหน่วย ดังแสดงในสมการที่ 6

$$LEC = [\ln(V) + \sum_{t=1}^N (PEC / (1 + r)^t)] / [\sum_{t=1}^N ((W_{\text{Biogas}} \times t_{\text{Op}}) / (1 + r)^t)] \quad \text{สมการที่ 6}$$

เมื่อ N คือ อายุการใช้งานของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ, y

r คือ อัตราส่วนลด %

โดยอัตราส่วนลดจะอ้างอิงมาจากธนาคารกรุงไทย ปี 2562 มีค่าเท่ากับ 6.87%

สำหรับความคุ้มค่าของระบบผลิตก๊าซชีวภาพจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์หลักประกอบไปด้วย ก๊าซชีวภาพ ตะกอนชีวภาพ (ส่วนเกินที่ต้องระบายทิ้ง) น้ำเสียหรือสารอินทรีย์ที่ออกจากระบบ ในการพิจารณาจากการลงทุนก่อสร้างและการติดตั้งระบบก๊าซชีวภาพ จะต้องพิจารณามูลค่าของผลิตภัณฑ์เหล่านี้ด้วย โดยทางเลือกในการใช้ผลิตภัณฑ์จากระบบผลิตก๊าซชีวภาพนอกจากระบบบำบัดขั้นต้นและระบบบำบัดหลักแล้ว จะต้องมียุทธศาสตร์บำบัดขั้นหลัง หรือทางเลือกการใช้ผลิตภัณฑ์จากระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งแต่ละทางเลือกจะทำให้ผลิตภัณฑ์มีมูลค่าแตกต่างกัน (กัญญาภักค์ ตาจันทร์ทิพย์, 2556) ประกอบไปด้วย

- 1) บำบัดน้ำเสีย และใช้ตะกอนแห้งเป็นปุ๋ยอินทรีย์
- 2) ใช้น้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดขั้นหลัง และตากตะกอนแห้งในพื้นที่เพาะปลูก
- 3) ใช้น้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดขั้นหลัง และตะกอนในการเพาะสาหร่ายและเลี้ยงปลา
- 4) ใช้น้ำที่ผ่านกระบวนการบำบัดขั้นหลังในพื้นที่เกษตรกรรมโดยตรง
- 5) ปรับปรุงคุณภาพตะกอนแห้งเป็นปุ๋ยอัดเม็ด

การตรวจสอบเอกสาร

สำหรับการตรวจสอบเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยในหัวข้อเรื่อง ต้นแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง จะแบ่งออกเป็น 5 หัวข้อ ดังนี้คือ 1. การปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบ 2. กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพแบบการหมักร่วม 3. การผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพด 4. ระยะเวลาการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ และ 5. ลักษณะของระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบแห้ง ซึ่งงานวิจัยที่เกี่ยวข้องต่าง ๆ มีข้อมูลดังต่อไปนี้

1. การปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบ

ภาวิณี เพ็ชรนวก (2560) ได้ทำการศึกษาการผลิตน้ำตาลจากพืชประเภทลิกโนเซลลูโลสเหลือทิ้งทางการเกษตรจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ โดยทำการศึกษาการปรับสภาพทางเคมีด้วยสารละลายกรด (H_2SO_4 และ HCl) และด้วยสารละลายด่าง ($NaOH$ และ KOH) ที่ระดับความเข้มข้นตั้งแต่ 1%, 2%, 3% และ 4% (w/v) ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่า การปรับสภาพด้วย $NaOH$ 2% (w/v) ส่งผลทำให้มีปริมาณน้ำตาลทั้งหมดเพิ่มสูงถึงที่ความเข้มข้น 83.17 g/L และ 64.69 g/L ตามลำดับ ดังนั้นจากผลการวิจัยทั้งหมดยืนยันได้ว่า ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มีศักยภาพในการผลิตน้ำตาลได้ในปริมาณมากและเพียงพอที่จะนำน้ำตาลที่ผลิตขึ้นมาใช้ในการผลิตพลังงานทดแทนได้เป็นอย่างดี

อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ และชนกพร วงษ์วัน (2555) ได้ทำการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมของต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นร่วมกับของเสียกลีเซอรอล ปรับสภาพเบื้องต้นด้วย $NaOH$ 2% (w/v) เป็นระยะเวลา 48 h ที่อุณหภูมิห้อง ($25-35\text{ }^{\circ}C$) โดยใช้ระบบหมักแบบไม่ใช้อากาศแบบกวนสมบูรณ์ (ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20 cm สูง 40 cm ตัวถังหมักทำจากอะคริลิกใส ซึ่งติดตั้งมอเตอร์และใบพัดกวนอัตราเร็ว 50 rpm ผลการทดลอง พบว่าการใช้ของเสียกลีเซอรอลที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซลเป็นสารหมักร่วมกับต้นข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพเบื้องต้นด้วย $NaOH$ 2% (w/v) สามารถผลิตก๊าซชีวภาพทั้งหมด $0.2\text{ m}^3/kg\text{ VS}_{removed}$ เมื่อเทียบกับต้นข้าวโพดที่ไม่มีการปรับสภาพ สามารถผลิตได้เพียง $0.1\text{ m}^3/kg\text{ VS}_{removed}$

ณัฐวดี ดุษฎี และคณะ (2557) ที่ได้ทำการศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากพืชพลังงานโดยใช้เทคโนโลยีการหมักในสภาวะแบบไร้อากาศแบบแห้งที่มีระบบการหมุนเวียนตะกอนและทำการปรับสภาพต้นข้าวโพดด้วย $NaOH$ และการต้ม จากการศึกษาพบว่า ต้นข้าวโพดไม่ผ่านการปรับสภาพมีศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ 12.9 L/kg ต้นข้าวโพดสด ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการปรับสภาพด้วย $NaOH$ 2% (w/v) เป็นระยะเวลา 48 h และการนำไปต้มที่ $100\text{ }^{\circ}C$ เป็นระยะเวลา 1 h เท่ากับ 15.2 และ 13.5 L/kg ต้นข้าวโพดสด

กิตติยา ป้อมเงิน และคณะ (2559) ได้ทำการศึกษาศึกษากายภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจาก ผักตบชวาที่ผ่านและไม่ผ่านการปรับสภาพด้วยการนึ่ง เป็นเวลา 60 min เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการหมักแบบกะ โดยควบคุมปริมาตรรวมที่ใช้หมักเท่ากับ 0.25 L ใช้ ผักตบชวาร่วมกับมูลวัวในอัตราส่วน 1:4 (w/w) อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N Ratio) เท่ากับ 17.96:1.00 ที่อุณหภูมิ 33 °C เป็นเวลา 40 days จากการศึกษาพบว่า การปรับสภาพมีผลต่อโครงสร้างของผักตบชวา และองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใย โดยหลังการปรับสภาพพบว่ามี เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน คิดเป็น 41.61%, 16.27% และ 12.53% (w/w) ตามลำดับ โดยการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพของ ผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพมีปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมสูงสุด 175.67 mL และ สูงกว่าผักตบชวาที่ไม่ผ่านการปรับสภาพโดยมีปริมาณแก๊สชีวภาพสะสม 57.00 mL

กิตติยา ป้อมเงิน และคณะ (2560) ได้ทำการศึกษาการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพต้นธูปฤาษีโดยวิธีการทางกายภาพร่วมกับทางเคมีเพื่อการผลิตก๊าซชีวภาพคือ การปรับสภาพด้วยการนึ่ง การปรับสภาพด้วยการนึ่งตามด้วย NaOH และการปรับสภาพด้วยหม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูงร่วมกับ NaOH พบว่าการปรับสภาพด้วยหม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูงร่วมกับ NaOH 4% (w/v) ให้ องค์ประกอบทางเคมีเหมาะสมคือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน คิดเป็น 59.07%, 12.15% และ 11.52% (w/w) ตามลำดับ เมื่อทำการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการหมักแบบกึ่งกะ เป็นระยะเวลา 39 days ที่อุณหภูมิ 32 °C โดยควบคุมปริมาตรรวมที่ใช้หมักเท่ากับ 0.25 L ที่อัตราส่วน ธูปฤาษีต่อมูลวัว 1:3 อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N Ratio) เท่ากับ 20.75 โดยในตอนเริ่มต้นระบบสารอินทรีย์จะถูกแบ่งเติมในขวดรูปชมพู่ในปริมาณที่แตกต่างกัน คือ 75%, 50%, และ 25±2% พบว่า ธูปฤาษีที่ผ่านวิธีการปรับสภาพด้วยหม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูงร่วมกับ NaOH 4% (w/v) ร่วมกับ มูลวัว ซึ่งถูกแบ่งเติมสัดส่วน 25±2% (w/w) ให้ปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมสูงสุดเท่ากับ 434.70 mL ได้สัดส่วนของก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบในสัดส่วน 48.74% และ 2.49% ตามลำดับ จากการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการปรับสภาพและการแบ่งเติมปริมาณสารอินทรีย์ที่เหมาะสมสามารถเพิ่มศักยภาพในการใช้ประโยชน์จากต้นธูปฤาษีในการผลิตแก๊สมีเทน

Ignatius and Jabakumar (2011) ได้ทำการศึกษาผลกระบวนการ Pre-hydrolysis ของ ขยะอินทรีย์เหลือทิ้งในครัวเรือนที่ส่งผลต่อผลผลิตก๊าซชีวภาพ โดยทำการศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 2 ค่า คือ 34 และ 42 °C ที่ระยะเวลาการ Pre-hydrolysis เป็นระยะเวลา 24, 48 และ 72 h จาก การศึกษาพบว่าในช่วงอุณหภูมิ 42 °C และระยะเวลา 72 h สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดค่า COD ได้มากที่สุดถึง 14.4%

Chihe et al. (2019) ได้ทำการศึกษาผลของการปรับสภาพข้าวและสาหร่ายด้วยจุลินทรีย์ และกระบวนการ Pre-acidification ของกระบวนการผลิตก๊าซมีเทนและก๊าซไฮโดรเจน โดยทำการ กำหนดระยะเวลาของกระบวนการ Pre-acidification อยู่ในช่วง 12, 24, 48, 72 และ 144 h

ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่าที่ระยะเวลา 144 h ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนและก๊าซไฮโดรเจนมากที่สุด เฉลี่ยเท่ากับ 223.1 ± 8.8 mL/g VS แต่อย่างไรก็ตามเมื่อเทียบกับระยะเวลา 72 h ซึ่งใช้เวลาน้อยกว่าหลายเท่าตัวแต่กลับได้ปริมาณของก๊าซมีเทนและก๊าซไฮโดรเจนที่ไม่ต่างกันเฉลี่ยเท่ากับ 183.7 ± 1.4 mL/g VS

Michel et al. (2017) ได้ทำการศึกษากการใช้เอนไซม์เป็นตัวช่วยในกระบวนการย่อยสลาย เพื่อเพิ่มศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากฟางข้าวและหญ้ามีสแคนทัส โดยศึกษาที่ระยะเวลาการปรับสภาพที่แตกต่างกัน คือ 0, 6 และ 24 h จากการศึกษาพบว่าที่ระยะเวลาการปรับสภาพ 24 h ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพมากที่สุด ซึ่งก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้มีปริมาณเพิ่มขึ้นมากถึง $25 \pm 2\%$ เมื่อเทียบกับไม่มีการปรับสภาพ อีกทั้งยังฟางข้าวและหญ้ามีสแคนทัสที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพยังสามารถรักษาโปรตีนในรูปของแอมโมเนียไนโตรเจน ($\text{NH}_3\text{-N}$) ไว้ได้อีกด้วย

Yun et al. (2015) ได้ทำการศึกษากการปรับสภาพซังข้าวโพดด้วยกระบวนการ Liquid Fraction of Digestate (LFD) ทำการกำหนดระยะเวลาการปรับสภาพ 1, 3, 5 และ 7 days จากการศึกษาพบว่าที่ระยะเวลา 3 days สามารถผลิตสัดส่วนของก๊าซมีเทนและศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพมากที่สุดเท่ากับ 70.4% และ 66.3% ตามลำดับ อีกทั้งยังใช้เวลาในการย่อยสลายอินทรีย์ที่สั้นลงมากถึง 41.7% เมื่อเทียบกับซังข้าวโพดที่ไม่ได้ทำการปรับสภาพ

ชลลดา แดงประดับ (2554) ที่ได้ทำการศึกษากงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลของเวลาเก็บกักต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากต้นข้าวโพดหมัก โดยกระบวนการไม่ใช้อากาศแบบสองขั้นตอนที่ประกอบด้วยถังสร้างกรดในสภาวะเทอร์โมฟิลิกและถังสร้างมีเทนที่อุณหภูมิห้องในระดับห้องปฏิบัติการ โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วน ส่วนแรกทำการทดลองโดยกำหนดให้ระยะเวลาเก็บกักรวม เท่ากับ 20 days โดยการแปรค่าระยะเวลาเก็บกัก 3 ค่าที่แตกต่างกันในถังสร้างกรด คือ 1, 2 และ 3 days ร่วมกับถังสร้างมีเทน คือ 19, 18 และ 17 days ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่า ถังสร้างกรดที่เวลาเก็บกัก 1 day มีปริมาณกรดไขมันระเหยสูงที่สุด สำหรับถังสร้างมีเทน ปริมาณก๊าซมีเทนที่ได้จากถังสร้างมีเทนที่เวลาเก็บกัก 19 days (0.249 ± 0.032 NL $\text{CH}_4/\text{g VS}_{\text{added}}$) มีค่ามากกว่าค่าที่ได้จากถังสร้างมีเทนที่เวลาเก็บกัก 18 days (0.182 ± 0.088 NL $\text{CH}_4/\text{g VS}_{\text{added}}$) และ 17 days (0.174 ± 0.035 NL $\text{CH}_4/\text{g VS}_{\text{added}}$) อย่างมีนัยสำคัญ

2. กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพแบบการหมักรวม

จूरีย์ ช่วยชาติ (2555) ได้ทำการศึกษากการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนดีแคเตอร์โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มร่วมกับมูลสุกร โดยใช้อัตราส่วนของน้ำกากตะกอนดีแคเตอร์ 0.5 mg ต่อมูลสุกร 10%, 20%, 30%, 40% และ 50% (w/w) ทั้งนี้ได้ทำการหมักแบบไม่ใช้อากาศ เป็นระยะเวลา

12 days ณ อุณหภูมิห้อง และได้ทำการวัดค่า pH จากน้ำตัวอย่างและปริมาตรทุก ๆ 3 days พบว่าการหมักกากตะกอนดีแคนเตอร์ร่วมกับมูลสุกรที่อัตราส่วนมูลสุกร 10% (w/w) จะมีปริมาณของก๊าซชีวภาพต่อ days สูงสุด รองลงมาคือ 40% และ 30% ตามลำดับ

ชาญ แซ่ม้า (2553) ได้ทำการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากพืชผักร่วมกับส่วนผสมของมูลสุกรและมูลโค โดยทำการผสมระหว่างพืชผักต่อมูลสัตว์ที่ 60:40 (w/w) ทำการศึกษาที่ระยะเวลา 12 days ทั้งนี้ได้ทำการเก็บก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ทุก ๆ 3 days จากผลการศึกษาดังกล่าว พบว่าที่อัตราส่วนการผสมของมูลสุกรต่อมูลโคที่ 70:30 (w/w) ที่อัตราส่วนการผสมที่สามารถให้ปริมาณสะสมสูงสุดที่ 1,100 mL

จรรยา อินเอก (2553) ได้ทำการศึกษาการเปรียบเทียบปริมาตรของก๊าซชีวภาพที่ได้จากการหมักมูลสุกรร่วมกับใบยางพาราและมูลสุกรร่วมกับทางปาล์มที่อัตราส่วน 15:1 kg โดยทำการหมักในถังขนาด 150 L ณ อุณหภูมิห้อง ทั้งนี้ได้ทำการเติมวัสดุหลังจากการหมักไปแล้ว 3 days และได้ทำการศึกษาเป็นระยะเวลา 15 days จากผลการศึกษา พบว่าการหมักมูลสุกรร่วมกับทางปาล์มมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดเท่ากับ 91.68 L ตามลำดับ สัดส่วนของก๊าซมีเทนมีค่าสูงกว่า 60%

รุ่งนภา เนินหาด (2553) ได้ทำการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษผักร่วมกับมูลสุกรภายในขวดขนาด 1 L ระบบการหมักแบบกะ ในสภาวะการหมักแบบไม่ใช้อากาศ ณ อุณหภูมิห้อง โดยใช้ระยะเวลาในการทดลอง 12 days ทั้งนี้ใช้เศษผัก 150 g ร่วมกับมูลสุกรที่ 10%, 20%, 30%, 40% และ 50% (w/w) อีกทั้งมีการใช้ลูกโป่งเพื่อทำการเก็บชีวภาพที่ผลิตได้ทุก ๆ 3 days จากการศึกษาในข้างต้น พบว่าที่อัตราส่วนการผสมระหว่างเศษผักร่วมกับมูลสุกรที่ 50% (w/w) สามารถให้ปริมาณชีวภาพสะสมสูงสุดที่ 1,248 mL

Kun et al. (2018) ได้ทำการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากซังข้าวโพด (CS) เปลือกแอปเปิ้ล (AP) เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ภายใต้สภาวะการหมักแบบกะและแบบกึ่งต่อเนื่อง แบบไม่ใช้อากาศ ในระดับห้องปฏิบัติการของมูลไก่ (CM) และมูลสุกร (PM) จากผลการศึกษาพบว่าอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับอัตราส่วน CM/CS, CM/AP, PM/CS และ PM/AP มีค่าเท่ากับ 4:1, 2:1, 4:1 และ 4:1 ตามลำดับ สำหรับการหมักแบบกึ่งกะของการหมักแบบชนิดเดียว อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ที่มากกว่า 2.4 g VS/L-day อย่างไรก็ตามสำหรับการหมักร่วมของ CM/AP อัตราส่วน 2:1 ที่อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 4.8 g VS/L-day จะให้ผลผลิตของก๊าซมีเทนมากที่สุด เท่ากับ 0.34 L/g VS_{added}

3. การผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพด

โสภี พันอินทร์ (2560) ได้ทำการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งของข้าวโพดหวานร่วมกับมูลสัตว์ โดยการย่อยสลายในสภาวะไร้อากาศแบบหมักแห้งขนาด 30 L ภายใต้อุณหภูมิ

37±2 °C ที่ค่าของแข็งทั้งหมดเท่ากับ (TS) 25±2% (w/w) และมีค่า pH 6.8–7.2 โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการแบ่งการศึกษาออกเป็น 4 ส่วนคือ ส่วนที่ 1 ปัจจัยความแตกต่างของชนิดมูลสัตว์ (มูลสุกร มูลวัว และมูลแพะ) ส่วนที่ 2 อัตราส่วนระหว่างมูลสัตว์และเปลือกข้าวโพดที่เหมาะสม (100:0, 75:25, 50:50, 25:75 และ 0:100) ส่วนที่ 3 อัตราส่วนผสมของข้าวโพดหวานที่เหมาะสมโดยทำการผลิตในถังขนาดหมัก 1 L และส่วนที่ 4 ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพแบบกะและแบบกึ่งต่อเนื่องในถังหมักขนาด 30 L จากการศึกษาพบว่า การหมักร่วมมูลแพะกับซัง+เปลือก+เมล็ด (ที่อัตราส่วน 25:75) ให้อัตราการผลิตก๊าซมีเทนของจุลินทรีย์ที่ 0.084 mL CH₄/gCOD_{removed} ความเข้มข้นก๊าซมีเทนเท่ากับ 67.93% นอกจากนี้ จากการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพแบบเติมกึ่งต่อเนื่องและแบบกะ โดยการหมักร่วมเปลือกข้าวโพดหวานกับมูลแพะที่อัตราส่วน 25:75 พบว่า การหมักแบบเติมกึ่งต่อเนื่องให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพสูงกว่าแบบกะ ให้ค่าเฉลี่ยความเข้มข้นของก๊าซมีเทนเท่ากับ 58.87% อัตราการผลิตก๊าซมีเทนของจุลินทรีย์ 0.87 mL CH₄/g COD_{removed} ความเข้มข้นก๊าซมีเทนสูงสุดเท่ากับ 77.20%

Yun et al. (2015) ได้ทำการศึกษาการผลิตชีวภาพโดยการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนของซังข้าวโพดด้วยการปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพซังข้าวโพด TS เท่ากับ 17.6% , VS เท่ากับ 22.1–35.9% , C/N Ratio เท่ากับ 30 เซมิเซลลูโลส 19.8–27.2% และเซลลูโลส 22.3–35.4% จากการศึกษาพบว่า หลังจากทำการปรับสภาพซังข้าวโพด 3 days พบว่ามีปริมาณลดลงของลิกนิน เซลลูโลส และเอมิเซลลูโลส 8.1–19.4% สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้เพิ่มขึ้น 70.4% เมื่อทำการเปรียบเทียบกับซังข้าวโพดที่ไม่ได้รับการปรับสภาพมีศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ 66.3%

Meixia et al. (2014) ได้ทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการผลิตก๊าซชีวภาพจากซังข้าวโพดสำหรับการผลิตก๊าซมีเทน โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบ Bionic คือ ถังปฏิกรณ์ที่ได้ทำการจำลองการย่อยสลายแบบสัตว์เคี้ยวเอื้อง โดยใช้ปริมาณของซังข้าวโพดเท่ากับ 100 g ร่วมกับหัวเชื้อจุลินทรีย์ 1,000 mL จากการศึกษาพบว่าระบบสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงสุด 265.5 mL/g VS_{added} และผลิตก๊าซมีเทนได้ถึง 63.3% ของปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้

จุฑาภรณ์ ชนะถาวร และพัชรี อินธนู (2560) ได้ทำการการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมของเสียโรงงานอุตสาหกรรมข้าวโพดหวานกระป๋อง โดยการหมักร่วมของซังข้าวโพดหวาน (CC) และน้ำเสียจากกระบวนการบิอัดซังข้าวโพดหวาน (SCMP) ในระดับห้องปฏิบัติการแบบกะ ปริมาตรการใช้งาน 15 L ภายใต้สภาวะการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน ทำการศึกษาปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) เท่ากับ 8–13% และเปรียบเทียบการหมักโดยใช้หัวเชื้อที่แตกต่างกัน 2 แหล่ง คือ หัวเชื้อจากฟาร์มสุกรท้องถิ่นเลี้ยง โดยใช้อาหารธรรมชาติในท้องถิ่น และหัวเชื้อจากฟาร์มสุกรแม่พันธุ์เลี้ยงโดยใช้อาหารสำเร็จรูป ทำการทดลองภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้อง (28±3 °C) ระยะเวลาการหมัก

20 days จากการศึกษาพบว่า การหมักที่ปริมาณของแข็งเริ่มต้นทั้งหมด 11% ในระบบการป้อน วัตถุประสงค์ตั้งต้นในครั้งแรก ให้ปริมาณผลผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด คิดเป็นผลผลิตก๊าซชีวภาพเฉลี่ย 4.28 L/day ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม 85.6 L ผลผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดที่ 6.94 mL CH₄/g VS_{Removal} องค์ประกอบของก๊าซมีเทนสูงสุด 83.5% ให้ประสิทธิภาพการกำจัด COD และ TS สูงสุด 65.12% และ 54.25±2% ตามลำดับ และการหมักเดี่ยวของหัวเชื้อจากจากฟาร์มสุกรท้องถิ่นให้ค่าผลผลิตของ ก๊าซชีวภาพสูงกว่าระบบการหมักของหัวเชื้อจากฟาร์มสุกรแม่พันธุ์

4. ระยะเวลาการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

ชุนันต์ภักดิ์ มณีศรี และเสนีย์ กาญจนวงศ์ (2558) ได้ทำการศึกษาค้นคว้าของแหล่งตะกอนและ อัตราการหมุนเวียนน้ำต่อการผลิตกรดอินทรีย์จากผักตบชวาในการย่อยสลายไร้ออกซิเจนแบบแห้ง แบ่งเป็น 2 การทดลอง คือ ศึกษาศักยภาพการผลิตกรดอินทรีย์จากผักตบชวาในการทดลองแบบเท และในระดับต้นแบบ โดยผักตบชวาจะมีขนาด 1–2 inch ใช้ตะกอนที่มาจากแหล่งต่าง ๆ ได้แก่ น้ำ ตะกอนส่วนเกินที่เหลือทิ้งจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพของฟาร์มสุกร น้ำที่ผ่านระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ฟาร์มสุกร และน้ำอุปโภค (ผสมเชื้อจุลินทรีย์ตั้งต้นจากตะกอนบ่อ CMU-CD ในอัตราส่วน 2:1) การ ทดลองแบบเทจะบรรจุผักตบชวา 500 g เติมตะกอนจากแหล่งต่าง ๆ ปริมาตร 250 mL/day ด้วย อัตราหมุนเวียนตะกอนที่ 40 mL/min ที่ระยะเวลา 12.50, 62.5.13, 187.50 และ 250.00 min/days พบว่า มีอัตราการผลิตกรดอินทรีย์สูงสุด ที่ระยะเวลาการหมุนเวียนตะกอน 187.5 min ที่ อัตรา 808 mg VS/day สำหรับในระดับต้นแบบขนาด 100 L เติมผักตบชวาปริมาณ 10 kg ใช้ ตะกอนปริมาตร 5 L เมื่อเปรียบเทียบแหล่งตะกอน พบว่าการใช้น้ำตะกอนเจือจางจากบ่อหมัก และ น้ำที่ผ่านระบบผลิตก๊าซชีวภาพฟาร์มสุกรสามารถผลิตกรดอินทรีย์ได้ดีกว่าน้ำอุปโภค

ภัทรวดี สุขสุวรรณ (2557) ได้ทำการศึกษาค้นคว้าของระยะเวลาการกวนผสมและความเข้มข้น ของของแข็งทั้งหมดของหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ต่อประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยใช้ถึง ปฏิกรณ์แบบกวนผสมระดับห้องปฏิบัติการขนาดปริมาตรใช้งาน 28 L เติมน้ำที่อัตรากระ บรทุกสารอินทรีย์ 1.5 kg VS/m³-day ทำการทดลองภายใต้สภาวะมีไซฟิสิก 35±2 °C การทดลอง ออกแบบตามทฤษฎี Full Factorial Design แบบ 2 ระดับ โดยแต่ละปัจจัยกำหนดให้มีค่าต่ำและสูง คือ ระยะเวลาการกวนผสมเท่ากับ 0, 5, 45 และ 53 min/h และความเข้มข้นของของแข็งทั้งหมด ของหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 เท่ากับ 2%, 4% และ 14% จากการศึกษาพบว่า สภาวะการทดลองที่ ระยะเวลาการกวนผสม 53 min/h และที่ค่าความเข้มข้นของของแข็งของหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 เท่ากับ 14% มีปริมาณก๊าซมีเทนจำเพาะสูงสุดเท่ากับ 0.2688±0.0065 L CH₄/g VS_{added} และปริมาณก๊าซ ชีวภาพที่ผลิตได้สูงสุดเท่ากับ 88±1.9 L/ปริมาณหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ที่ใช้เท่ากับ 1 kg

Libin et al. (2015) ได้ทำการศึกษาช่วงเวลาที่เหมาะสมในการกวน เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการก่อตัวเป็นชั้นของซังข้าวโพด ซึ่งระบบทำการกำหนดระยะเวลาการกวนทุก ๆ 10, 6 และ 2 h ตลอด 24 h โดยระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุประเภทของแข็งไม่มีระบบการกวนผสมภายในระบบ จะทำให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพลดลงมากถึง 81.87–87.90% จากการศึกษาพบว่าที่ระยะเวลาการกวนผสมทุก ๆ 2 h สามารถลดการก่อตัวของชั้นซังข้าวโพดได้มากที่สุด

Ratanatamskul and Saleart (2016) ได้ทำการศึกษาผลของอัตราการหมุนเวียนตะกอน และระยะเวลาการกวนผสมที่ส่งผลกระทบต่อสมรรถนะในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยใช้ถังปฏิกรณ์ ขนาด 1 ลูกบาศก์เมตร ควบคุมอุณหภูมิในช่วงเมโสฟิลิก 35 ± 2 °C ระยะเวลาการเก็บกัก 40 days และอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (OLR) เท่ากับ $5.83 \text{ kg COD/m}^3\text{-day}$ กำหนดอัตราการหมุนเวียนตะกอนได้แตกต่างกันคือ 50% และ 100% ที่ระยะเวลา 30, 60 และ 90 min จากการศึกษาพบว่าที่ระยะเวลาการป้อนสารอินทรีย์ใน 2 daysแรก อัตราหมุนเวียนสูงถึง 100% สามารถรักษาเสถียรภาพของค่า pH ภายในระบบได้ เนื่องจากค่าสภาพด่าง (ALK) มีค่าสูงขึ้น แต่สำหรับอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดที่อัตราการหมุนเวียนตะกอน 50% ที่อัตราการไหล $24.0 \text{ m}^3/\text{day}$ เมื่อเทียบกับ $22.5 \text{ m}^3/\text{day}$ ที่อัตราหมุนเวียน 100% พบว่าสามารถผลิตก๊าซมีเทนความเข้มข้นเท่ากับ 54.1% และ 60% ตามลำดับ อีกทั้งยังที่ระยะเวลาการกวนผสม 60 min พบว่าระบบมีประสิทธิภาพกำจัด COD สูงสุดเท่ากับ 90% และสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงที่สุดเท่ากับ $0.71 \text{ m}^3/\text{kg COD kg}$ ที่ค่าความเข้มข้นของก๊าซมีเทน เท่ากับ 61.6%

Kaparaju et al. (2008) ที่ได้ทำการศึกษาผลของการกวนผสมในถังหมักแบบไม่ใช้อากาศ ด้วยถังปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ กระบวนการป้อนสารอินทรีย์แบบกะจากมูลสัตว์ โดยทำการประเมินการทดลองในระดับห้องทดลองและระดับปฏิบัติการจริง ควบคุมอุณหภูมิที่ 55 °C โดยศึกษารูปแบบการกวน 3 รูปแบบ คือ การกวนอย่างต่อเนื่อง (ควบคุม), การกวนน้อยที่สุด (ผสมเป็นระยะเวลา 10 min ก่อนทำการกวนผสม) และการผสมแบบไม่ต่อเนื่อง (ผสมเป็นระยะเวลา 2 h หยุด 2 h ก่อนทำการกวนผสม) สำหรับในระดับห้องปฏิบัติการจะใช้ถังขนาด 4 L ซึ่งทำการป้อนสารอินทรีย์ 12 h/ครั้ง จากการศึกษาพบว่า ปริมาณของก๊าซมีเทนการกวนน้อยที่สุดและการผสมแบบไม่ต่อเนื่องจะช่วยเพิ่มอัตราการผลิตก๊าซมีเทนได้มากถึง 1.3% และ 12.5% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับการกวนแบบต่อเนื่อง และการศึกษาในระดับปฏิบัติการจริงจะใช้ถังขนาด 800 L ทำการป้อนสารอินทรีย์ 8 h/ครั้ง ซึ่งค่าเฉลี่ยของอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพแบบการกวนแบบไม่ต่อเนื่องสามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้มากถึง 7.0% เมื่อเทียบกับการกวนแบบต่อเนื่อง จากการศึกษาในครั้งนี้ชี้ให้เห็นว่ารูปแบบของการกวนผสม และแรงของการกวนผสมมีผลต่อการย่อยสลายของมูลสัตว์ในภาวะแบบไม่ใช้อากาศ

Karim et al. (2003) ที่ได้ทำการศึกษาผลของรูปแบบการกวนผสมและการหมุนเวียนตะกอน โดยใช้ถังหมักจะทำการป้อนสารอินทรีย์ในอัตราค่าของแข็งทั้งหมด (TS) เท่ากับ 5% และ

10% ตามลำดับ ทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ โดยมีปริมาตรใช้งานจริง เท่ากับ 3.73 L ควบคุมอุณหภูมิที่ 55 ± 2 °C ระยะเวลาการเก็บกัก เท่ากับ 16.2 days ส่งผลให้มีอัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์ (OLR) เท่ากับ 3.08 และ 6.21 kg/L-day ค่าของแข็งทั้งหมด (TS) เท่ากับ 5% และ 10% ตามลำดับ จากผลการศึกษาพบว่า ถึงที่มีการกวนผสมและไม่มีการกวนผสมก่อนข้างใกล้เคียงกันที่ค่า TS = 5% ซึ่งสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ในอัตราเท่ากับ 0.84–0.94 L/day และมีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนเท่ากับ 0.26–0.31 L CH₄/g VS_{added} ทั้งนี้อาจจะเป็นเพราะค่าความเข้มข้นของค่า TS = 5% ที่ต่ำส่งผลทำให้อัตราการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนอาจจะเป็นเพียงพอที่จะทำให้เกิดก๊าซชีวภาพได้ง่าย อย่างไรก็ตามผลของการกวนผสมและรูปแบบของการกวนผสมก็จะประสบความสำเร็จได้ในกรณีที่มีค่า TS เท่ากับ 10% ที่มีระบบการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอน โดยใช้ใบพัดกวนและหมุนเวียนก๊าซชีวภาพ ซึ่งสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ประมาณ 29%, 22% และ 15% ตามลำดับ มากกว่าถึงที่ไม่มีระบบการกวนผสม การหลุดออก และการสะสมตัวของของแข็งภายในถังหมักไม่ได้มีผลในกรณีที่ค่า TS = 5% แต่กลับมีผลอย่างมีนัยสำคัญในกรณีของถังที่มีค่า TS = 10% ดังนั้น การกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนจะเกิดผลอย่างมากในถังหมักที่มีสารอินทรีย์ที่มีค่าความเข้มข้นมาก ๆ

5. ลักษณะของระบบผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง

ณัฐภูมิ ดุษฎี และคณะ (2557) ได้ทำการศึกษากการผลิตก๊าซชีวภาพจากพืชพลังงาน โดยใช้เทคโนโลยีการหมักในสภาพไร้อากาศแบบแห้งที่มีการหมุนเวียนตะกอน ขนาด 1,000 L จากการศึกษาพบว่าเทคโนโลยีการหมักในสภาพไร้อากาศแบบแห้งที่มีการหมุนเวียนตะกอนทำให้ ระบบมีขนาดเล็ก มีการใช้พลังงานต่ำในการหมุนเวียนตะกอน เมื่อเทียบกับระบบกวนต่อเนื่อง สามารถใช้ได้กับวัตถุดิบที่มีอัตราส่วนของแข็งสูงมากกว่า 30% และมีประสิทธิภาพในการลดปริมาณ COD, TS และ VS ได้มากกว่า 80% แนวทางการปรับสภาพที่เหมาะสมของหญ้าเนเปียร์และต้นข้าวโพด คือ การแช่ใน NaOH 2% และ NaOH 3% (w/v) เป็นระยะเวลา 72 h ตามลำดับ ก๊าซชีวภาพที่ประเมินได้ทางทฤษฎีมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบ 54.82% และ 54.76% ตามลำดับ และปริมาณก๊าซชีวภาพสูงสุด 369.45 และ 357.52 L/kg สำหรับหญ้าเนเปียร์และต้นข้าวโพด ตามลำดับ ประสิทธิภาพในระบบการผลิตก๊าซชีวภาพ ที่มีการหมุนเวียนตะกอนเป็นช่วงๆ เข้าเย็นที่ระยะเวลาการกักเก็บ 60 days พบว่า ระบบสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 31.7 และ 48.2 L/kg-ต้นสด หรือ 427.9 L/kg-VS และ 301.2 L/kg-VS ในข้าวโพดและหญ้าเนเปียร์ ตามลำดับ โดยวัดค่าก๊าซมีเทนสูงสุดได้ 50–52% และระบบมีประสิทธิภาพในการลดค่า COD, TS และ VS เท่ากับ 60.45%, 87.2% และ 85.9% ในข้าวโพด และ 79.4%, 88.1% และ 82.9% ในหญ้า ตามลำดับ

Elsamadony and Tawfik (2015) ได้ทำการศึกษากการผลิตประเมิณผลในระยะเวลาของ Mesophilic Up-flow โดยใช้ถังปฏิกริยาแบบกวนผสมเป็นระยะ ๆ (UISTR) สำหรับการผลิต

ไฮโดรเจนจากสารอินทรีย์ของขยะมูลฝอยที่ได้รับจากเทศบาล สำหรับการตรวจสอบ UISTR ดำเนินการที่แตกต่างกันจำนวน 5 ครั้ง ระยะเวลาการเก็บกัก (HTs) 10.0, 7.5, 5.0, 3.0 และ 2.0 days ซึ่งสอดคล้องกับอัตราภาระบรทุกสารอินทรีย์ (OLRs) 18.1, 26.2, 41.3, 61.0 และ 97.2 g COD/L-day ตามลำดับ โดยการผลิตก๊าซไฮโดรเจนปริมาตรสูงสุดมีค่าเท่ากับ 2.20 ± 0.19 L/day และสำหรับอัตราผลตอบแทนที่ 2.05 ± 0.33 mol H₂/mol Carbohydrate ระยะเวลาการเก็บกัก (HTs) เท่ากับ 3 day และอัตราภาระบรทุกสารอินทรีย์ (OLR) เท่ากับ 61.0 g COD/L-day แสดงให้เห็นถึงสัดส่วนที่สูงขึ้นของ SCOD/TCOD เท่ากับ 0.46 ± 0.08 และขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางด้านล่างของ 307.6 μ m สามารถทำการย่อยสลายลงได้ 72.0% สำหรับการแปลงสภาพของคาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมันที่สูงสุดเท่ากับ $68.2 \pm 13.0\%$, $37.5 \pm 6.7\%$ และ $48.6 \pm 4.7\%$ ตามลำดับ ที่ HT เท่ากับ 10 days และค่า OLR เท่ากับ 18.1 g COD/L-day

Chen et al. (2015) ได้ทำการศึกษาระบบผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักแบบแห้งต่อเนื่อง โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบ Down Plug-flow Anaerobic Reactor (DPAR) ซึ่งถูกออกแบบเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ของกระบวนการหมักแบบแห้งต่อเนื่อง โดยไม่ทำการกวนเพิ่มเติมภายในระบบ การใช้ปุ๋ยมูลสุกรสดเป็นวัตถุดิบที่มีความเข้มข้นของแข็งทั้งหมด (TS) เท่ากับ 20%, 25%, 30% และ 35% ตามลำดับ มีความเสถียรปริมาตรอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ 2.40, 1.92, 0.911 และ 0.644 L/day ก๊าซชีวภาพและอัตราผลตอบแทนของ 0.665, 0.532, 0.252 และ 0.178 L/g VS_{added} ตามลำดับ และอัตราการย่อยสลาย TS เป็น 46.5%, 45.4%, 53.2% และ 55.6% ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่าที่ค่า TS = 25% จะให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพปริมาตรสูงสุดเท่ากับ 2.34 L/day ก๊าซชีวภาพและอัตราผลตอบแทน 0.649 L/g VS การทดลองแสดงให้เห็นว่าสภาพคล่องความเข้มข้นของ TS ย่อยสลายอาจจะน้อยกว่า 15.8% และอัตราการไหลของน้ำมากกว่า 0.98 m/s เมื่อความเข้มข้นของวัตถุดิบ TS น้อยกว่า 35% ซึ่งการย่อยสลายอาจจะออกจากโรงพยาบาลได้อย่างง่ายดายจาก DPAR ดังนั้นจึงเป็นไปได้ที่จะดำเนินการหมักแห้งอย่างต่อเนื่องใน DPAR ใช้ปุ๋ยคอกสุกรสดเป็นวัตถุดิบที่มีความเข้มข้น TS น้อยกว่า 35% ในขณะที่ความเข้มข้นของวัตถุดิบ TS ไม่ควรเกิน 30% เพื่อให้เกิดอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ และผลผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุด

Regina et al. (2017) ได้ทำการศึกษาระบบผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักแบบแห้งโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบ Plug Flow ซึ่งระบบได้รับการพัฒนาสำหรับกระบวนการย่อยอาหารแห้งอย่างต่อเนื่องและมีประสิทธิภาพได้รับการตรวจสอบโดยใช้ปุ๋ยคอกได้รับการรักษาด้วยฟางเพียงที่ปริมาณของแข็งทั้งหมดเท่ากับ 22% ซึ่งถังปฏิกรณ์ที่ถูกพัฒนาขึ้นใหม่นี้ได้ทำงานและประสบความสำเร็จภายในระยะเวลา 230 days ที่เพิ่มอัตราภาระบรทุกอินทรีย์ 2.8, 4.2 และ 6.0 g VS/L-day และการเก็บรักษาครั้งที่ 60, 40 และ 28 days ตามลำดับ ที่อัตราภาระบรทุกสารอินทรีย์ได้ถึง 4.2 g VS/L-day ให้เสถียรภาพกระบวนการที่ดีกว่ามีอัตราผลตอบแทนก๊าซมีเทนถึง 0.163 L CH₄/g

VS_{Removal}-day ซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงเป็น 56% ของผลผลิตทางทฤษฎี เพิ่มขึ้นต่อไปของอัตราภาระอินทรีย์ 6 g VS/L-day ที่เกิดจากความไม่แน่นอนของกระบวนการที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งระเหย (VS) ที่ต่ำกว่าที่เป็นของแข็งทั้งหมด (TS) ของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ



บทที่ 3

อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

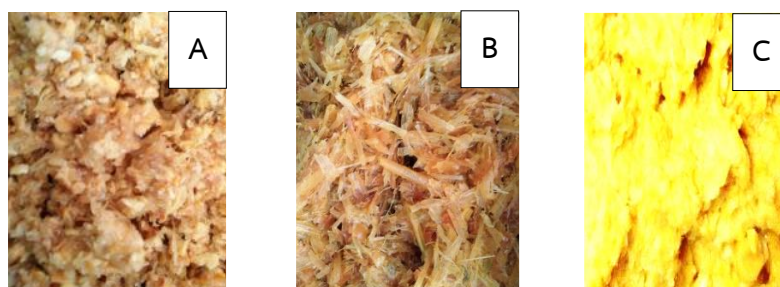
สำหรับขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้มีจุดประสงค์ เพื่อศึกษากระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งของข้าวโพดหวาน โดยใช้กระบวนการย่อยสลายไม่ใช้ออกซิเจนแบบแห้ง ซึ่งในบทนี้จะกล่าวถึงวัตถุดิบและการออกแบบวิธีการดำเนินงานวิจัย เพื่อให้งานวิจัยเป็นไปตามวัตถุประสงค์ที่วางไว้ ดังนี้

การเตรียมวัตถุดิบ

วัตถุดิบที่ใช้ในการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้ แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 วัสดุเหลือทิ้งของข้าวโพดหวาน และส่วนที่ 2 หัวเชื้อจุลินทรีย์ โดยรายละเอียดต่าง ๆ สามารถอธิบายได้ดังนี้

1. วัสดุเหลือทิ้งของข้าวโพดหวาน

สำหรับวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวาน ประกอบด้วย ชัง เปลือก และเมล็ดคั่วคั่ว โดยชังข้าวโพดหวาน มีลักษณะค่าความชื้นสูง สีเหลืองอ่อน ขนาด 10–15 cm แทนด้วยสัญลักษณ์ A เปลือกข้าวโพดหวานมีลักษณะค่าความชื้นสูง สีเขียวอ่อน ขนาด 12–18 cm แทนด้วยสัญลักษณ์ B และเมล็ดคั่วคั่วซึ่งได้จากระบวนการแยกเมล็ดที่ไม่ได้มาตรฐานโรงงานออกจากกระบวนการผลิต โดยเมล็ดข้าวโพดหวานมีลักษณะสีเหลืองเข้ม ขนาด 3–5 cm เกิดจากเมล็ดแตกหัก เมล็ดลีบ และเมล็ดบางส่วนเสียหายจากการถูกแมลงกัด แทนด้วยสัญลักษณ์ C จากนั้นจะนำวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานทำการปรับสภาพเบื้องต้นด้วยกระบวนการปรับสภาพเชิงกลผ่านการสับหรือบดย่อยด้วยเครื่องสับหรือบดย่อยทางการเกษตรให้ได้ขนาดของวัสดุหมักขนาดประมาณ 5–10 mm ดังแสดงในภาพที่ 26 (ข) เพื่อให้มีพื้นที่การย่อยสลายของจุลินทรีย์ทำงานได้ดีขึ้น จากนั้นจะนำวัสดุหมักที่ได้หลังจากกระบวนการปรับสภาพเชิงกลไปทำกระบวนการปรับสภาพด้วยวิธีการ 2 แบบ คือ แบบต่าง NaOH 2% (w/v) เป็นระยะเวลา 48 h จะใช้สัญลักษณ์เป็น NaOH48 และด้วยกระบวนการแบบ Pre-acidification เป็นระยะเวลา 72 h จะใช้สัญลักษณ์เป็น Pre-A72 โดยกระบวนการแบบ Pre-acidification คือ การปรับสภาพให้วัสดุหมักเกิดกระบวนการหมักกรดก่อน โดยจะใช้ระยะเวลาประมาณ 72 h ดังแสดงในภาพที่ 16



(ก) หลังปรับสภาพ NaOH 2% เป็นระยะเวลา 48 h



(ข) หลังปรับสภาพ Pre-acidification เป็นระยะเวลา 72 h

ภาพที่ 16 วัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวาน

สำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบของวัสดุเหลือทิ้งของข้าวโพดหวานจะมีการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ โดยทำการทดลองซ้ำตัวอย่างละ 3 ครั้ง และหาค่าเฉลี่ยจากผลการวิเคราะห์ โดยมีรายละเอียด การวิเคราะห์องค์ประกอบของวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวาน ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 วิธีวิเคราะห์คุณลักษณะของวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวาน

พารามิเตอร์	หน่วย
Moisture	%
pH	-
TS	mg/g
VS	mg/g
C/N ratio	-
Cellulose	%
Hemicellulose	%

พารามิเตอร์	หน่วย
Lignin	%

2. หัวเชื้อจุลินทรีย์

หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักแห้งจะใช้หัวเชื้อจุลินทรีย์จากกากตะกอนจุลินทรีย์น้ำเสียจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบ Anaerobic Filter (AF) จากบริษัท ชันสวีท จำกัด (มหาชน) ดังแสดงในภาพที่ 17 (ก) ร่วมกับกากตะกอนมูลสุกรจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบ Modified Cover Lagoon (MCL) จากฟาร์มสุกรขนาดกลางในเขตพื้นที่อำเภอแม่วาง จังหวัดเชียงใหม่ ดังแสดงในรูปที่ 17 (ข) โดยสัดส่วนผสมระหว่างกากตะกอนน้ำเสียต่อกากตะกอนมูลสุกร คือ 1:2 (v/v) โดยก่อนนำวัสดุหมักหลักคือ วัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานจำพวก ชังเปลือก และเมล็ดคั่วทิ้ง เข้าระบบจะต้องทำการปรับสภาพหัวเชื้อจุลินทรีย์ โดยการนำหัวเชื้อจุลินทรีย์เข้าระบบผลิตก๊าซชีวภาพก่อน เพื่อให้หัวเชื้อจุลินทรีย์เกิดกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพให้สิ้นสุดกระบวนการก่อนเป็นระยะเวลา 7 days เพื่อลดผลกระทบต่อหัวเชื้อที่จะส่งผลกระทบต่อปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแห้ง



(ก) กากตะกอนน้ำเสีย

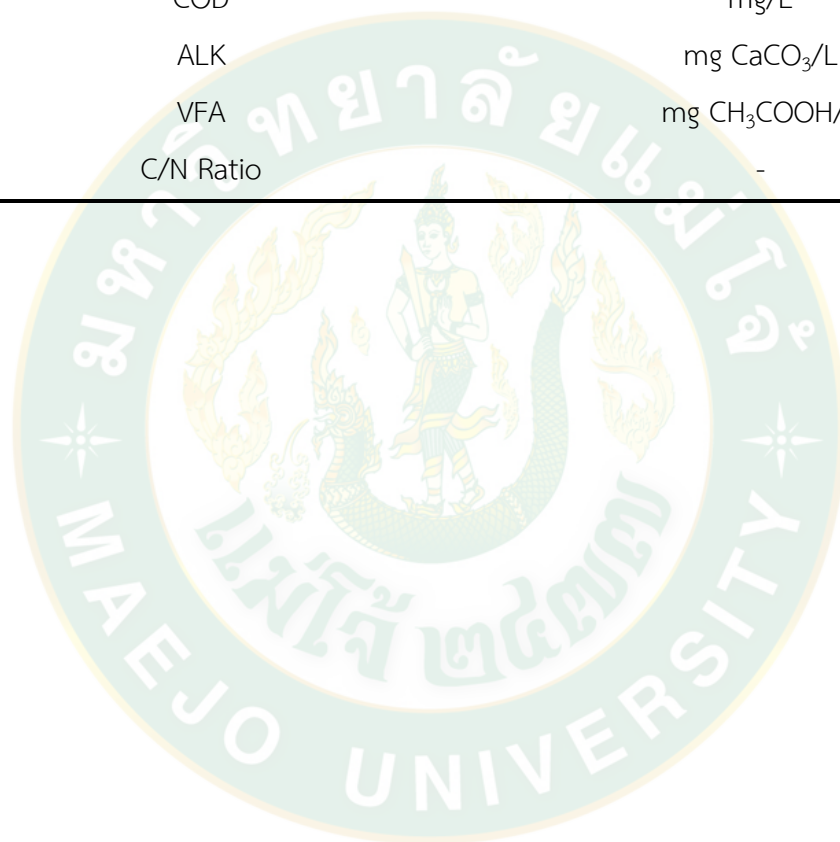
(ข) กากตะกอนมูลสุกร

ภาพที่ 17 หัวเชื้อจุลินทรีย์

ทั้งนี้ก่อนทำการป้อนกากตะกอนจุลินทรีย์ จะต้องทำการแยกเศษวัสดุอื่น ๆ ที่ติดมากับตัวหัวเชื้อออกก่อน และทำการการบดตัวหัวเชื้อ เพื่อให้ตัวหัวเชื้อมีลักษณะละเอียด นำไปสู่การกระจายตัวของจุลินทรีย์ที่อยู่ภายในหัวเชื้อได้ดียิ่งขึ้น และยังเป็นการป้องกันการอุดตันของเศษภายในอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการเวียนตะกอนอีกทางหนึ่ง และมีการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ โดยทำการทดลองซ้ำตัวอย่างละ 3 ครั้ง และหาค่าเฉลี่ยจากผลการวิเคราะห์ โดยรายละเอียดการวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการของหัวเชื้อจุลินทรีย์ ดังแสดงในตารางที่ 5

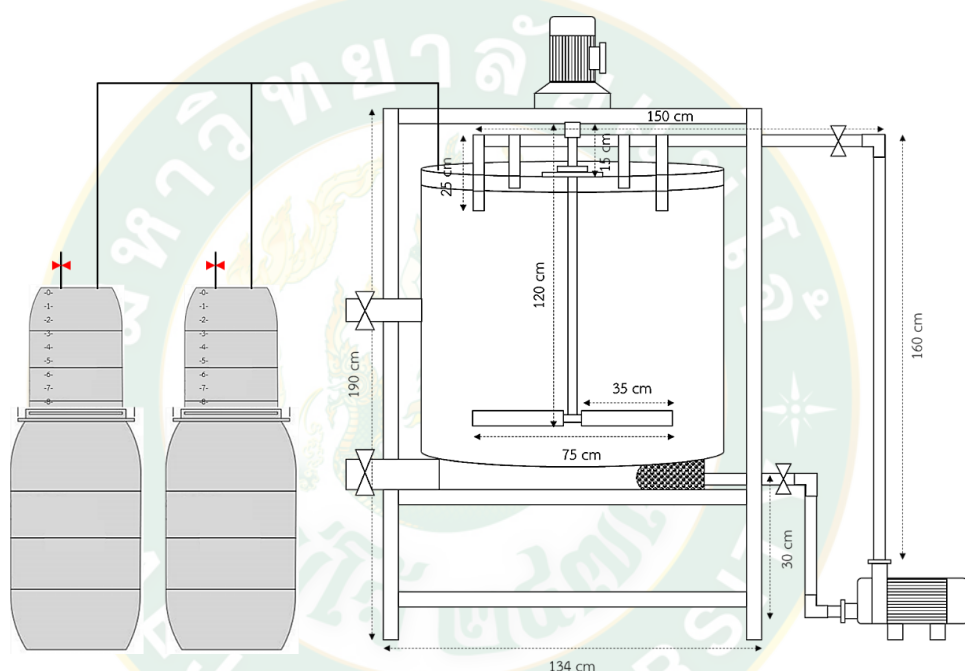
ตารางที่ 5 วิธีวิเคราะห์คุณลักษณะของหัวเชื้อจุลินทรีย์

พารามิเตอร์	หน่วย
Moisture	%
pH	-
TS	mg/L
VS	mg/L
COD	mg/L
ALK	mg CaCO ₃ /L
VFA	mg CH ₃ COOH/L
C/N Ratio	-



การออกแบบเบื้องต้นระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวาน ด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง

สำหรับการออกแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง ขนาด 1,000 L ดังแสดงในภาพที่ 18 จะแบ่งออกเป็น 3 ส่วนหลัก คือ ส่วนที่ 1 ถึงปฏิกรณ์ด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง ส่วนที่ 2 ระบบการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอน และส่วนที่ 3 ระบบเก็บก๊าซชีวภาพ โดยมีขั้นตอนการออกแบบระบบดังต่อไปนี้

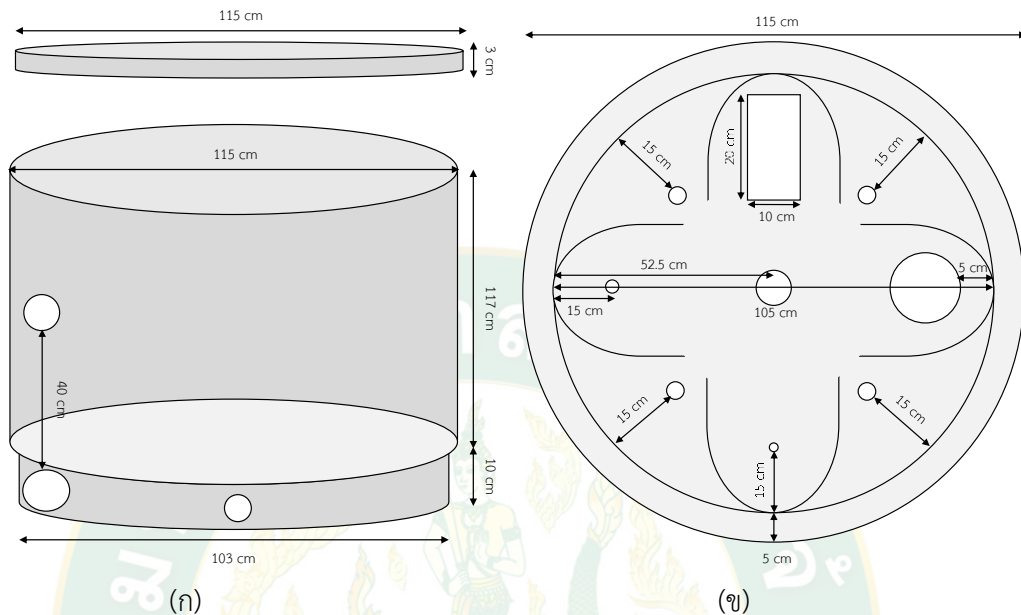


ภาพที่ 18 การออกแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง ขนาด 1,000 L

ส่วนที่ 1 ถังปฏิกรณ์ด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง ขนาด 1,000 L

สำหรับถังปฏิกรณ์ของระบบผลิตก๊าซชีวภาพจะออกแบบให้มีลักษณะของถังปฏิกรณ์เป็นทรงกระบอกและบริเวณของก้นถังเป็นก้นกลม ซึ่งลักษณะของถังแบบนี้จะส่งผลโดยตรงทำให้วัตถุดิบที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพสามารถกวนผสมเข้ากันอย่างทั่วถึงและไปในทิศทางเดียวกัน โดยขนาดของถังปฏิกรณ์ที่ใช้จะมีปริมาตรโดยรวม เท่ากับ 1,000 L ดังแสดงในภาพที่ 19 อีกทั้งยังพบว่ากระบวนการหมักและการย่อยสลายของจุลินทรีย์ทำให้เกิดสารประกอบอินทรีย์ที่มีฤทธิ์เป็นกรดหลากหลายชนิด ภายในสภาวะการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนทำให้ความเป็นกรดภายใน

ระบบสูงทำให้เกิดปฏิกิริยาการกักความร้อนของวัสดุที่ใช้สร้าง ดังนั้นถึงปฏิกรณ์ที่ใช้ต้องมีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของกระบวนการทางเคมี



ภาพที่ 19 ลักษณะของถังปฏิกรณ์ตามมุมต่าง ๆ (ก) ด้านหน้า (ข) ด้านบน

ส่วนที่ 1 ฝาถังปฏิกรณ์

- 1) ช่องหมุนเวียนตะกอน ขนาด 1 inch จำนวน 4 ช่อง เพื่อเพิ่มพื้นที่สัมผัสของกากตะกอน จุลินทรีย์และวัสดุเหลือทิ้งข่าวโพทหวานให้ทั่วถึงถังปฏิกรณ์มากขึ้น
- 2) ช่องสังเกตลักษณะของวัสดุหมักและการทำงานของระบบกวนผสมและหมุนเวียนตะกอน ภายในถังปฏิกรณ์ ขนาด 10 x 5 inch จำนวน 1 ช่อง เพื่อใช้ดูลักษณะทางกายภาพภายในวัตุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ
- 3) ช่องทางเข้า เพื่อป้อนวัสดุหมักเข้าระบบ ขนาด 4 inch จำนวน 1 ช่อง เพื่อใช้เป็นช่องป้อนวัตุดิบ ซึ่งการที่ใช้ท่อขนาดใหญ่ เนื่องจากให้ง่ายต่อการเติมวัตุดิบเข้าสู่ถังปฏิกรณ์
- 4) ช่องวัดอุณหภูมิ ขนาด 5 mm จำนวน 1 ช่อง เพื่อใช้เป็นทางเข้าของสายเทอร์โมมิเตอร์ที่ใช้ในการวัดอุณหภูมิที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์
- 5) ช่องสอดแท่งใบพัดกวนผสม ขนาด 42 mm จำนวน 1 ช่อง เพื่อใช้เป็นทางเชื่อมระหว่างถังปฏิกรณ์กับมอเตอร์กวนผสมเข้าด้วยกัน
- 6) ช่องทางออกของก๊าซชีวภาพ ขนาด 1/2 inch จำนวน 1 ช่อง เพื่อใช้เป็นทางลำเลียงของก๊าซชีวภาพมาเก็บยังถังเก็บก๊าซชีวภาพ

ส่วนที่ 2 ตัวถังปฏิกรณ์

- 1) ช่องทางออกของตะกอน ขนาด 1 inch จำนวน 1 ช่อง เพื่อใช้ในการการหมุนเวียนตะกอนภายในระบบ
- 2) ช่องทางออก ขนาด 4 inch จำนวน 1 ช่อง เพื่อใช้เป็นทางออกของวัสดุหมัก
- 3) ช่องเก็บตัวอย่างวัสดุหมัก ขนาด 2 inch จำนวน 1 ช่อง เพื่อใช้เก็บวัสดุหมัก สำหรับการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่สำคัญของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

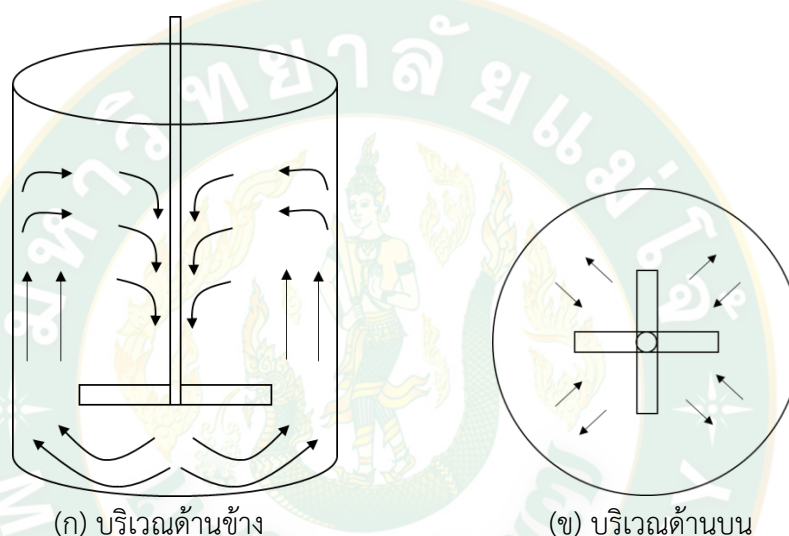
สำหรับการพิจารณาปริมาตรโดยรวมของวัตถุดิบที่ใช้หมักจะพิจารณาจากค่าความหนาแน่นของวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวาน ประกอบด้วย ชังข้าวโพดหวาน 282.38 kg/m^3 เปลือกข้าวโพดหวาน 81.16 kg/m^3 (Zhang et al., 2012) และเมล็ดคั่วทิ้งข้าวโพดหวาน 632.21 kg/m^3 (Javad et al., 2011) เมื่อทำการผสมเข้ากันด้วยอัตราส่วน 54:44:2 (w/w) จากนั้นจะนำวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานดังกล่าวใส่ถังปฏิกรณ์ โดยมีสัดส่วนของวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานต่อหัวเชื้ออากาศตะกอนจุลินทรีย์เท่ากับ 1 kg : 4 L จะทำให้ปริมาตรโดยรวมของวัตถุดิบที่ใช้หมัก มีค่าประมาณ 530 L ดังนั้นการพิจารณาปริมาตรของถังปฏิกรณ์จึงต้องมีค่ามากกว่า 530 L โดยปริมาตรรวมของถังปฏิกรณ์ที่เหมาะสม คือ 1,000 L ซึ่งโดยปกติแล้วพื้นที่ในการเก็บก๊าซชีวภาพที่เกิดจากถังปฏิกรณ์จะกำหนดให้เหลืออย่างน้อยประมาณ 20% ของปริมาตรของถังปฏิกรณ์ (ภัทรวิดี สุขสุวรรณ, 2557) โดยพื้นที่ในการเก็บก๊าซชีวภาพภายในถังปฏิกรณ์ที่ได้ทำการออกแบบไว้นั้นมีปริมาณมากกว่าปกติถึง 50% ซึ่งเพียงพอต่อการเก็บก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นภายในระบบ

ส่วนที่ 3 ระบบการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนภายในระบบ

สำหรับระบบการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนภายในระบบ ดังแสดงในภาพที่ 20 ซึ่งระบบจะทำการกำหนดระยะเวลาการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนทุก ๆ 0, 3, 6 และ 12 h แบบ Day Time ตั้งแต่เวลา 06.00–18.00 น. รอบละ 10 min โดยระบบมีการกวนผสมภายใน ซึ่งอัตราการหมุนของมอเตอร์กวนผสมไม่ควรเกิน 100 rpm เนื่องจากหากระบบกวนผสมมีอัตราการหมุนของมอเตอร์กวนผสมมากกว่านี้จะส่งผลโดยตรงทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพลดลง (ศักรินทร์ หมูเทพ, 2555) อีกทั้งยังอัตราการกวนผสมในช่วงนี้ยังจะส่งผลโดยตรงทำให้ได้ปริมาณก๊าซชีวภาพสูงสุด แต่อย่างไรก็ตามการใช้อัตราการกวนน้อยที่สุดจะดีกว่าการกวนแบบต่อเนื่องตลอดเวลา และการกวนช้าจะให้ผลดีกว่าการกวนเร็ว อีกทั้งจำนวนครั้งในการกวนจะขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่ใช้ในการย่อยสลายอีกด้วย (ปฏิรูป ผลจันทร์ และภัทรวิดี สุขสุวรรณ, 2557)

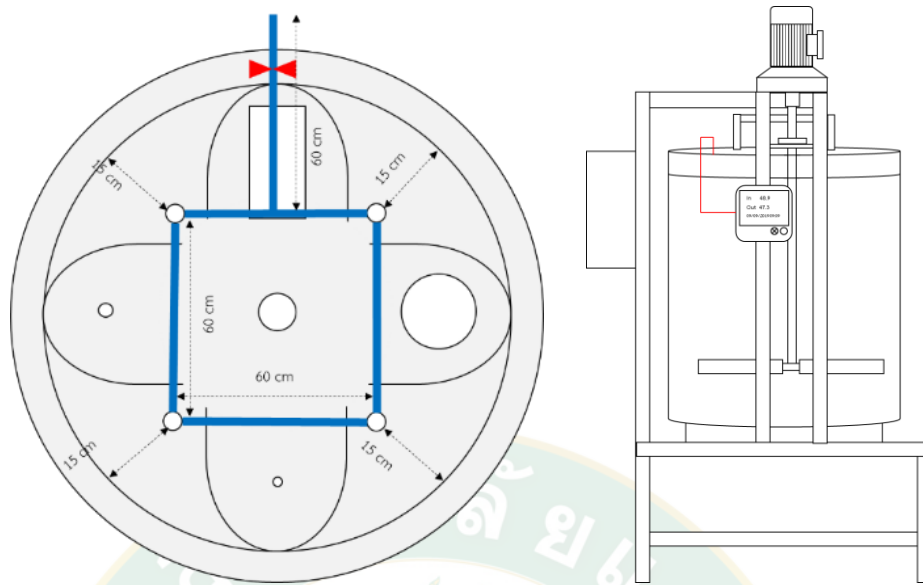
เพื่อลดปัญหาที่จะเกิดขึ้นกับมอเตอร์กวนผสมในกรณีที่ไหลของวัตถุดิบตั้งต้นประเภทของแข็งที่มีค่ามากกว่า 20% ให้สามารถกวนผสมได้ทั่วกันทั้งถังปฏิกรณ์

โดยการทดสอบนี้จะใช้ลักษณะของใบพัดกวนผสมที่ใช้ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานจะใช้ลักษณะของใบพัดแบบแกนตั้ง โดยมีลักษณะของใบพัดกวนผสมหมุนเอียง 45 องศา ที่ค่าความเร็วรอบ เท่ากับ 60 rpm โดยลักษณะของใบพัดกวนผสมเป็นแบบ Axial-Flow Impeller 45° Pitched (4 Blade) เป็นใบพัดกวนผสมที่เหมาะสมสำหรับการผสมการผสมของแข็งและของเหลวเข้าด้วยกันเป็นอย่างดี (เววมิกส์ , 2562) ดังแสดงในภาพที่ 21



ภาพที่ 21 ทิศทางการกวนผสมภายในถังปฏิกรณ์

สำหรับระบบหมุนเวียนตะกอนภายในระบบด้วยแรงส่งของปั๊ม เพื่อให้วัสดุเหลือทิ้งของข้าวโพดหวานได้สัมผัสกับกากตะกอนจุลินทรีย์มากยิ่งขึ้น ซึ่งมีแนวท่อหมุนเวียนตะกอน ดังแสดงในภาพที่ 22 (ก) ซึ่งลักษณะการวางท่อแบบนี้จะทำให้กากตะกอนที่ใช้หมุนเวียนสัมผัสกับวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานมากยิ่งขึ้น สำหรับการพิจารณากำลังของมอเตอร์ปั๊มที่จะใช้ในการหมุนเวียนตะกอนจะพิจารณาจาก Pump Performance Curve ดังแสดงในภาพที่ 23 และ 24 โดยจะเลือกที่อัตราการไหล เท่ากับ 100 L/min ที่กำลังส่งของปั๊มไม่ต่ำกว่า 3.1 m อีกทั้งยังระบบผลิตก๊าซชีวภาพยังจะต้องมีการวัดอุณหภูมิทั้งภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ และบริเวณรอบถังปฏิกรณ์ โดยใช้เครื่องวัดอุณหภูมิแบบ Digital ดังแสดงในภาพที่ 22 (ข)

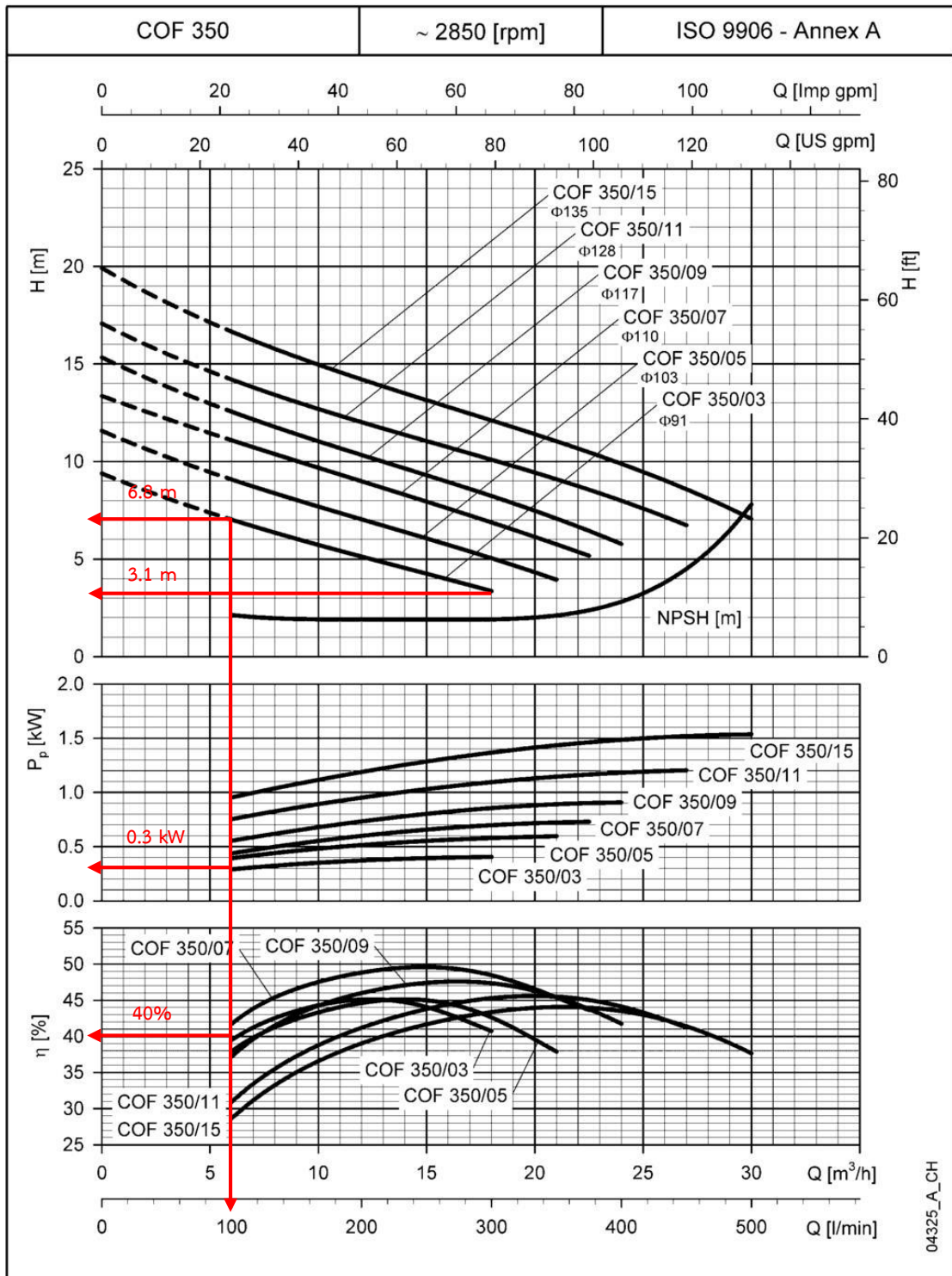


ภาพที่ 22 (ก) ลักษณะของแนวท่อที่ใช้ในการหมุนเวียนตะกอน (ข) ลักษณะของเครื่องวัดอุณหภูมิ

PUMP TYPE	RATED POWER		Q = DELIVERY																	
	l/min	0	100	120	160	200	240	280	300	350	375	400	450	500	600	650	700	800	900	
	m ³ /h	0	6	7,2	9,6	12	14,4	16,8	18	21	22,5	24	27	30	36	39	42	48	54	
	kW	HP	H = TOTAL HEAD IN COLUMN OF WATER (METRES)																	
CO(M) 350/03	0,37	0,5	9,5	6,8	6,3	5,5	4,8	4,1	3,4	3,0										
CO(M) 350/05	0,55	0,75	12,0	9,2	8,8	7,9	7,1	6,3	5,5	5,1	4,0									
CO(M) 350/07	0,75	1	13,7	11,2	10,8	9,9	9,1	8,2	7,4	6,9	5,8	5,3								
CO(M) 350/09	0,9	1,2	15,7	12,7	12,2	11,3	10,5	9,6	8,8	8,3	7,2	6,6	5,9							
CO(M) 350/11	1,1	1,5	17,3	14,3	13,8	12,9	12,0	11,2	10,5	10,1	9,1	8,6	8,0	6,8						
CO(M) 350/15	1,5	2	20,3	16,9	16,4	15,3	14,4	13,5	12,7	12,2	11,2	10,6	10,0	8,7	7,2					
CO(M) 500/15	1,5	2	16,0				13,4	12,8	12,3	12,0	11,3	10,9	10,5	9,8	9,0	7,4	6,6	5,8		
CO(M) 500/22	2,2	3	19,6				17,3	16,7	16,2	15,9	15,2	14,9	14,5	13,7	13,0	11,3	10,4	9,6	7,7	
CO 500/30	3	4	24,1				20,9	20,3	19,7	19,3	18,5	18,1	17,7	16,9	16,0	14,3	13,5	12,6	10,8	9,0
PUMP TYPE	MOTOR TYPE	INPUT POWER*	INPUT CURRENT*	CAPACIT.	PUMP TYPE	MOTOR TYPE	INPUT POWER*	INPUT CURRENT*	INPUT CURRENT*											
1 ~		kW	220-240 V A	μF / 450 V	3 ~		kW	220-240 V A	380-415 V A											
COM350/03	SM63BG/1045	0,63	2,82	14	C0350/03	SM63BG/304	0,64	2,53	1,46											
COM350/05	SM71BG/1055	0,88	4,25	16	C0350/05	SM71BG/305	0,79	2,70	1,56											
COM350/07	SM71BG/1075	1,02	4,67	20	C0350/07	SM80BG/307HE	0,98	3,10	1,79											
COM350/09	SM71BG/1095	1,21	5,46	25	C0350/09	SM80BG/311HE	1,12	3,60	2,08											
COM350/11	SM80BG/1115	1,75	7,85	30	C0350/11	SM80BG/311HE	1,67	4,90	2,83											
COM350/15	SM80BG/1155	2,04	9,21	40	C0350/15	PLM90BG/315	1,91	5,69	3,29											
COM500/15	SM80BG/1155	2,02	9,12	40	C0500/15	PLM90BG/315	1,89	5,62	3,25											
COM500/22	PLM90BG/1225	2,72	12,7	70	C0500/22	PLM90BG/322	2,66	8,27	4,78											
-	-	-	-	-	C0500/30	PLM90BG/330	3,80	11,4	6,57											

ภาพที่ 23 ประเภทของปั๊มให้เหมาะสมกับการใช้งาน สำหรับหมุนเวียนตะกอน

ที่มา : LOWARA (2019)



ภาพที่ 24 Pump Performance Curve (พิจารณาเลือกปั๊มให้เหมาะสมกับการใช้งาน)

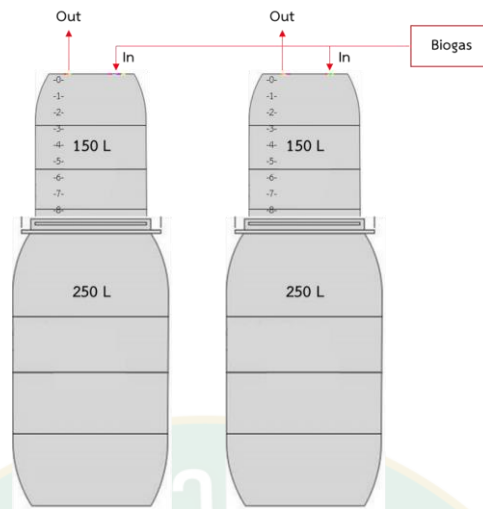
ที่มา : LOWARA (2019)

จากภาพที่ 24 พบว่าปั๊มที่เหมาะสมต่อการหมุนเวียนตะกอน คือ ปั๊มเหวี่ยง (Centrifugal Pump) ที่อัตราการไหล เท่ากับ 100 L/min รุ่น COF305/03 โดยจะให้ประสิทธิภาพ เท่ากับ 40% จะใช้กำลังไฟฟ้าส่ง เท่ากับ 0.3 kW กำลังส่งของปั๊มที่จุดต่ำสุดและสูงสุด เท่ากับ 3.1 และ 6.8 m ตามลำดับ โดยปั๊มชนิดดังกล่าวเป็นนิยมใช้อย่างกว้างขวางตามบ้านเรือน เกษตรกรรม และอุตสาหกรรม มีหลักการทำงานโดยใช้แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางของใบพัดปั๊มทำให้ของเหลวมีความเร็วเพิ่มขึ้น เป็นปั๊มสำหรับใช้งานทั่วไป เพื่อขนถ่ายของเหลวเข้าสู่อุปกรณ์ต่าง ๆ ภายในระบบ นอกจากนี้ระบบจะทำการนำหินกรวดขนาด 3-5 cm บรรจุใส่ถังตาข่าย จากนั้นจะนำมาใส่ถังทางกั้นทางออกของตะกอน เพื่อป้องกันการอุดตันของเศษวัสดุหมักขนาดใหญ่ไปอุดตันยังบริเวณของท่อ

ส่วนที่ 4 ระบบเก็บก๊าซชีวภาพ

การเก็บรวบรวมก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพอาศัยหลักการแทนที่ด้วยน้ำหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Water Replacement Method และแรงยกตัวของก๊าซชีวภาพ ซึ่งมีค่าหนาแน่นเบากว่าอากาศ ก๊าซชีวภาพในถังหมักทำให้ลอยตัวขึ้น ซึ่งวิธีการดังกล่าวนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย หลักการวัดปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นคือ ก๊าซชีวภาพจะไหลออกจากถังปฏิกรณ์มาเข้ายังถังเก็บก๊าซชีวภาพที่จุด In โดยระดับความสูงที่วัดได้บริเวณข้างถังสามารถนำมาคำนวณหาปริมาตรของอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน จากนั้นจะทำวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพด้วยการนำก๊าซชีวภาพที่ออกจากถังเก็บก๊าซชีวภาพที่จุด Out มาทำการวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเครื่อง Biogas Analyzer Geotech 5000 ซึ่งสามารถวิเคราะห์ก๊าซชีวภาพประกอบด้วย CH_4 , CO_2 , Bal. ในหน่วย % และ H_2S ในหน่วย ppm ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 25

สำหรับการพิจารณาปริมาตรของถังเก็บก๊าซชีวภาพที่เหมาะสมจะพิจารณาจากค่า BMP ของวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวาน พบว่า 1 kg-fresh สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ประมาณ 40 L ดังนั้นเมื่อเราทำการป้อนวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวาน 100 kg fresh จะสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงสุดเท่ากับ 4,000 L ดังนั้น ถ้าต้องการนำก๊าซชีวภาพมาใช้งานทุก ๆ 1 h ตลอดทั้งวันจะต้องใช้ถังเก็บก๊าซชีวภาพปริมาตรไม่น้อยกว่า 170 L ดังนั้นเราจึงเลือกใช้ถังเก็บก๊าซชีวภาพขนาด 150 L จำนวน 2 ถัง ซึ่งปริมาตรของถังเก็บก๊าซชีวภาพดังกล่าวมีปริมาตรที่เพียงพอต่อการเก็บก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง



ภาพที่ 25 ลักษณะของการทำงานของระบบเก็บก๊าซชีวภาพ

การสร้างระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง

สำหรับการสร้างระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง ขนาด 1,000 ลิตร จะสร้างตามแบบที่ได้ออกแบบไว้ข้างต้น ดังแสดงในภาพที่ 26

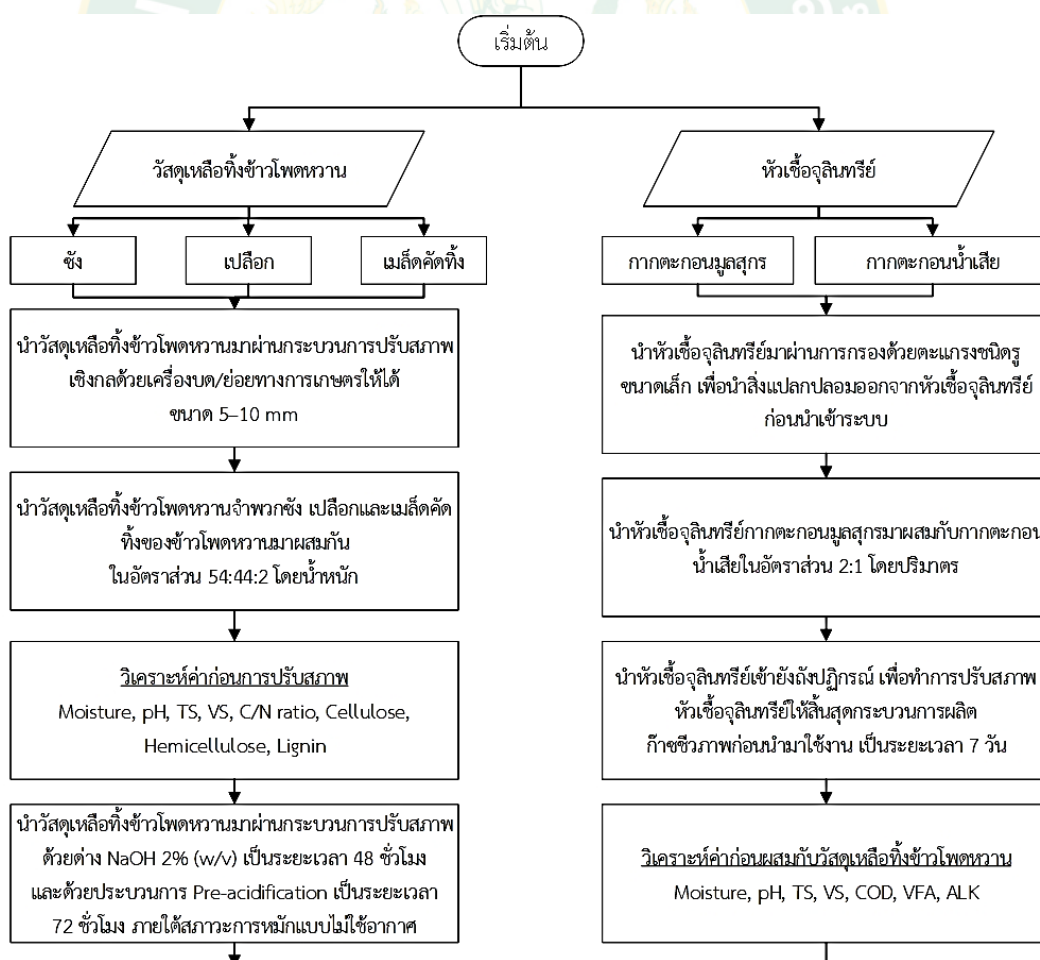


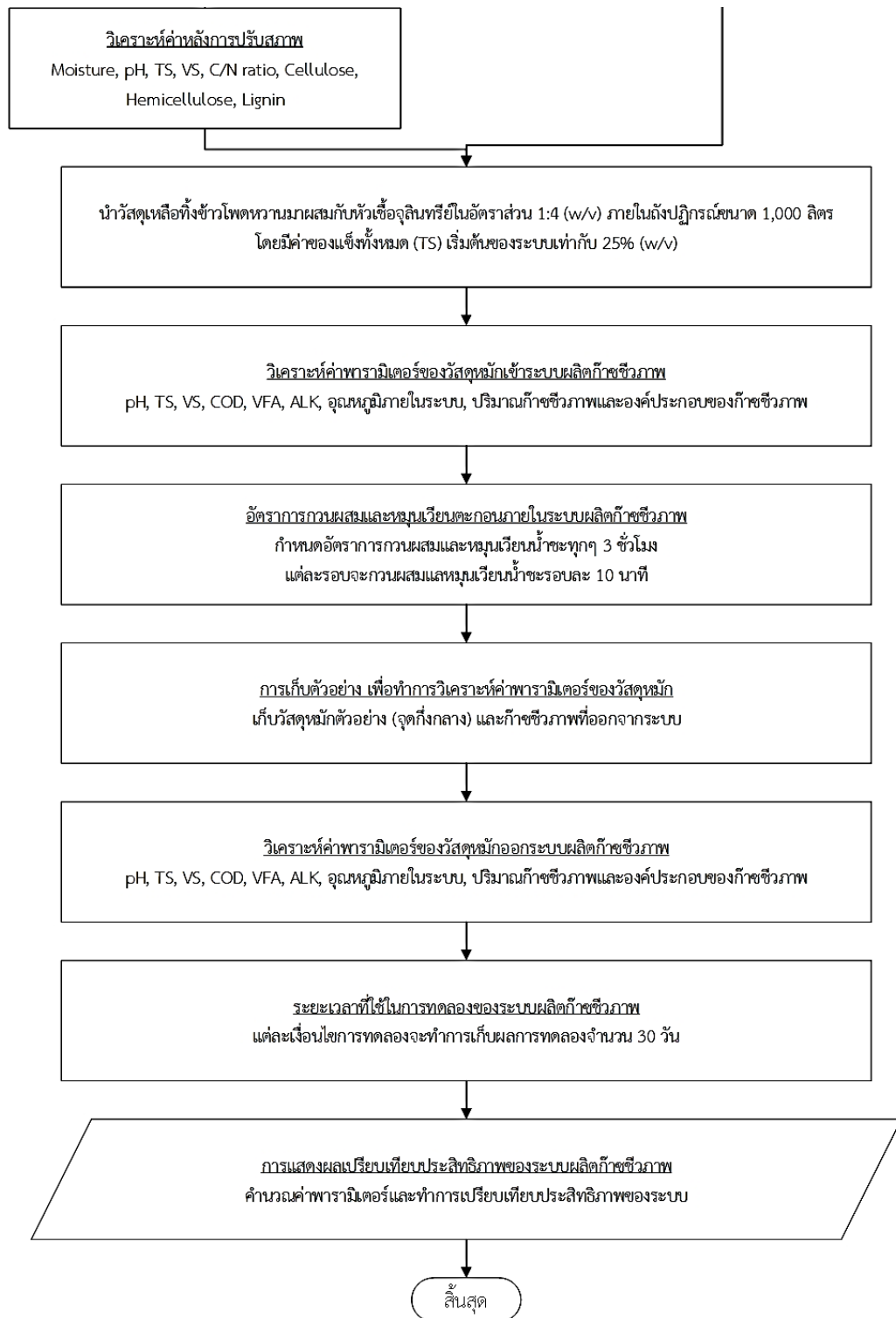
- | | | | |
|-------------------------|---------------------------|----------------|----------------------------|
| (1) Inlet port | (2) Outlet port | (3) Motor | (4) Spray |
| (5) Mixer | (6) Pump | (7) Gas outlet | (8) Effluent Sampling Port |
| (9) Biogas Storage Tank | (10) Biogas Sampling Port | | |

ภาพที่ 26 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง
ขนาด 1,000 L

การทดสอบการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบตั้งต้นที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ จากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง

สำหรับการทดสอบผลของการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบ ภายใต้หัวข้อเรื่อง ต้นแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง ขนาด 1,000 L ปริมาตรใช้งานจริง 500 L ค่าความเข้มข้นของแข็งทั้งหมด (TS) เริ่มต้นเท่ากับ 25% (w/v) ลักษณะการป้อนสารอินทรีย์แบบกะ ระยะเวลาการทดลอง 30 days โดยการทดลองจะทำการแบ่งการทดลองออกเป็น 2 เงื่อนไขการทดลอง ภายใต้การศึกษาการปรับสภาพด้วยต่าง NaOH 2% (w/v) เป็นระยะเวลา 48 h และด้วยกระบวนการแบบ Pre-acidification เป็นระยะเวลา 72 h กำหนดอัตราการกวนผสมและหมุนเวียนน้ำทุก ๆ 3 h รอบละ 10 min ความเร็วรอบ เท่ากับ 60 rpm แบบ Day time (06.00–18.00 น.) โดยมีขั้นตอนการทดสอบผลของการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ ดังแสดงในภาพที่ 27

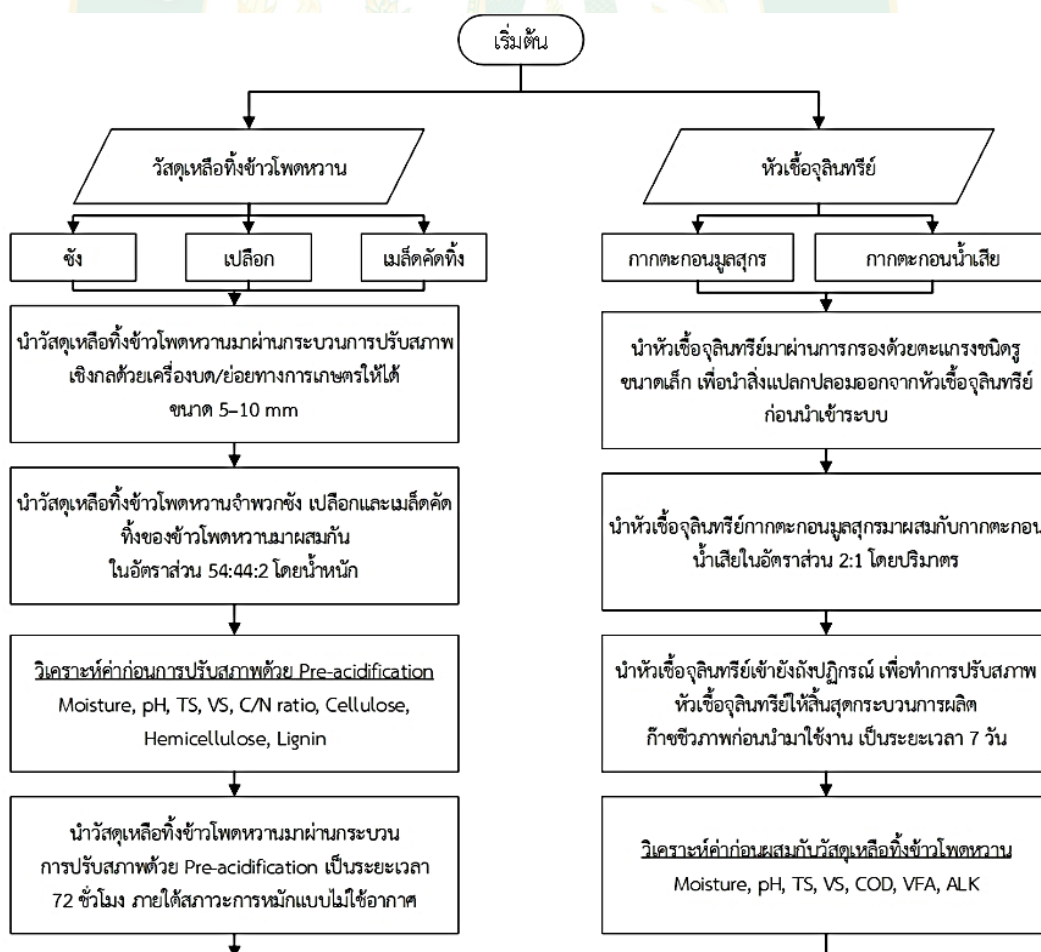


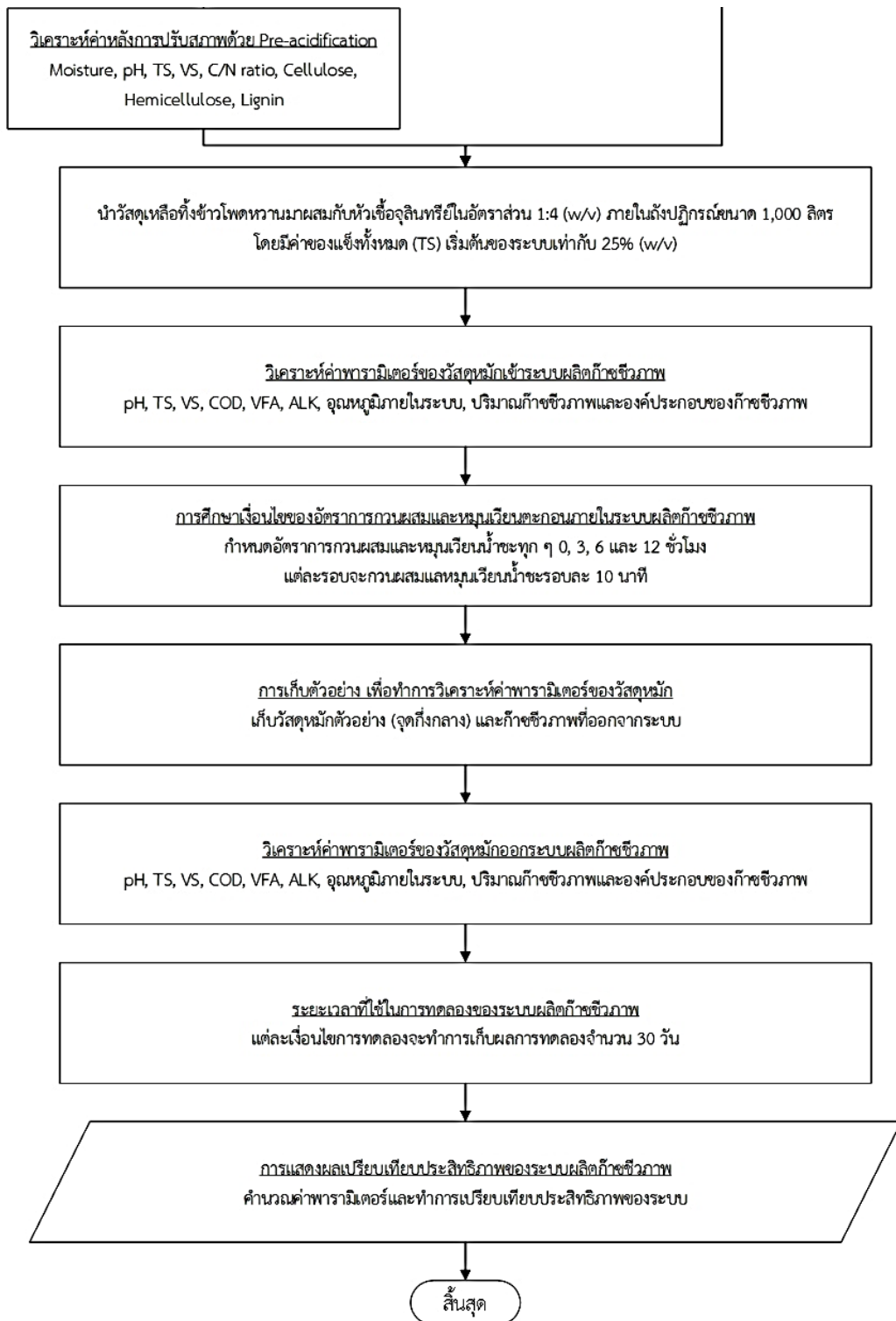


ภาพที่ 27 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทดสอบผลของการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ

การทดสอบการกวนผสมและหมუნเวียนตะกอนที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ จากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง

สำหรับการทดสอบผลของการกวนผสมและหมუნเวียนตะกอน ภายใต้หัวข้อเรื่อง ต้นแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง ขนาด 1,000 L ปริมาตรใช้งานจริง 500 L ค่าความเข้มข้นของแข็งทั้งหมด (TS) เริ่มต้นเท่ากับ 25% (w/v) ลักษณะการป้อนสารอินทรีย์แบบกะ ระยะเวลาการทดลอง 30 days โดยการทดลองจะทำการแบ่งการทดลองออกเป็น 4 เงื่อนไขการทดลอง โดยวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานจะทำการปรับสภาพด้วยกระบวนการแบบ Pre-acidification เป็นระยะเวลา 72 h โดยระบบจะมีการกวนและไม่กวนผสมภายในระบบ สำหรับการกวนผสมจะทำการกำหนดอัตราการกวนผสมและหมუნเวียนตะกอนทุก ๆ 3, 6 และ 12 h โดยแต่ละรอบจะกวนผสมและหมუნเวียนตะกอน รอบละ 10 min ความเร็วรอบ เท่ากับ 60 rpm แบบ Day time (06.00–18.00 น.) โดยมีขั้นตอนการทดสอบผลของอัตราการกวนผสมและหมუნเวียนตะกอนที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ ดังแสดงในภาพที่ 28





ภาพที่ 28 แผนภาพแสดงขั้นตอนการทดสอบผลของการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ

สำหรับวิธีการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง จะทำการวิเคราะห์ซ้ำตัวอย่างละ 3 ครั้ง และหาค่าเฉลี่ยจากผลการวิเคราะห์ ซึ่งจะมีวิธีการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 วิธีการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ของกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง

พารามิเตอร์	หน่วย	ตัวอย่าง	ความถี่
pH	-	วัสดุหมัก	1 day
COD	mg/L	วัสดุหมัก	3 days
TS	mg/g	วัสดุหมัก	3 days
VS	mg/g	วัสดุหมัก	3 days
ALK	mg CaCO ₃ /L	วัสดุหมัก	3 days
VFA	mg CH ₃ COOH/L	วัสดุหมัก	3 days
Temperature	°C	ภายในระบบ	3 days
Biogas Volume	L	ก๊าซชีวภาพ	1 day
Biogas Composition	%	ก๊าซชีวภาพ	1 day

บทที่ 4

ผลการวิจัยและวิจารณ์

สำหรับการศึกษากระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง สามารถแบ่งหัวข้อในการวิเคราะห์ผลการทดลองออกเป็น 5 หัวข้อ ดังนี้

หัวข้อที่ 1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเบื้องต้นของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง

หัวข้อที่ 2 ผลของการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง

หัวข้อที่ 3 ผลของการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง

หัวข้อที่ 4 การวิเคราะห์หาต้นทุนทางพลังงานต่อหน่วยของต้นแบบผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง

หัวข้อที่ 5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของต้นแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเบื้องต้นของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง ขนาด 1,000 L

สำหรับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเบื้องต้นของวัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง ขนาด 1,000 L จะใช้วัตถุดิบหลักในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ ประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 วัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวาน ดังแสดงในตารางที่ 7 และส่วนที่ 2 หัวเชื้อจุลินทรีย์ ดังแสดงในตารางที่ 8 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเบื้องต้นของวัตถุดิบมีรายละเอียดต่าง ๆ สามารถอธิบายได้ดังนี้

ตารางที่ 7 คุณลักษณะของวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวาน

คุณสมบัติ	หน่วย	ก่อนปรับสภาพ	ปรับสภาพด้วย NaOH 2% ระยะเวลา 48 h	ปรับสภาพด้วย Pre-acidification ระยะเวลา 72 h
pH	-	6.75	7.14*	3.76

คุณสมบัติ	หน่วย	ก่อนปรับสภาพ	ปรับสภาพด้วย	ปรับสภาพด้วย
			NaOH 2% ระยะเวลา 48 h	Pre-acidification ระยะเวลา 72 h
MC	%	69.09	71.24	69.11
TS	mg/g	309.05	287.57	308.91
VS	mg/g	260.76	249.75	269.42
VS/TS Ratio	-	0.84	0.87	0.87
C/N Ratio	-	32.64	27.28	32.55
Cellulose	%	30.16	35.72	24.52
Hemicellulose	%	40.08	20.44	32.63
Lignin	%	5.56	1.82	4.08

หมายเหตุ : เนื่องจากกระบวนการปรับสภาพด้วยด่าง NaOH นั้น จะส่งผลโดยตรงทำให้วัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานค่า pH มีค่าเป็นเบสแก่ ดังนั้นจึงต้องทำการล้างด้วยน้ำสะอาด เพื่อลดค่า pH ที่เป็นเบสสูงให้มีค่าใกล้เคียงกับค่า pH ที่เป็นกลางให้มากที่สุด

จากตารางที่ 7 การวิเคราะห์ค่าทางเคมีของวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานทั้งก่อนและหลังการปรับสภาพด้วยกระบวนการแบบ NaOH48 และที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพแบบ Pre-A72 ประกอบไปด้วยส่วนที่ 1 ค่า pH มีค่าเท่ากับ 6.75, 7.14 และ 3.76 ตามลำดับ ก่อนการปรับสภาพมีค่า pH ที่ค่อนข้างเป็นกลาง เนื่องจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานที่ได้ทำการเก็บตัวอย่างนั้นเกิดจากขั้นตอนของกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมแปรรูปข้าวโพดหวานโดยตรง และหลังการปรับสภาพแบบ NaOH48 มีค่า pH ที่ค่อนข้างเป็นเบส เนื่องจากการปรับสภาพดังกล่าวจะใช้เบสแก่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาในการทำลายพันธะโครงสร้างของสารประกอบประเภทลิกโนเซลลูโลสให้มีขนาดของโมเลกุลเล็กลง (กิตติยา บ่อมเงิน และคณะ, 2560) เพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่ในการนำสารอินทรีย์ไปใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพให้ง่ายมากขึ้น และหลังการปรับสภาพแบบ Pre-A72 มีค่า pH ที่ค่อนข้างเป็นกรด เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวเป็นการเปลี่ยนแปลงสารชีวโมเลกุลของวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานให้กลายเป็นกรดอินทรีย์ขนาดเล็กด้วยวิธีการทางธรรมชาติ อีกทั้งยังเป็นการลดขั้นตอนของการสร้างกรดอินทรีย์ภายในถังปฏิกรณ์ให้สั้นลง เพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยกระบวนการปรับสภาพดังกล่าวจะไม่มีการใช้จุลินทรีย์เร่งปฏิกิริยาหรือใช้สารเคมีใด ๆ เพื่อลดต้นทุนในการผลิต (Michel et al., 2017) ส่วนที่ 2 ค่า TS ค่าเท่ากับ 30.91%, 28.76% และ 30.89% ตามลำดับ และค่า VS มีค่าเท่ากับ 26.08%, 24.98% และ 26.94%

ตามลำดับ โดยอัตราส่วน VS/TS มีค่าเท่ากับ 0.84, 0.87 และ 0.87 ตามลำดับ พบว่าค่า VS/TS Ratio ดังกล่าวเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมต่อการนำมาเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยค่า VS/TS Ratio ควรอยู่ในช่วง 0.69–0.95 โดยจะให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพมากที่สุดคือ 0.95 (Aditi et al., 2018) และส่วนที่ 3 ค่า C/N Ratio มีค่าเท่ากับ 32.64, 27.28 และ 32.55 พบว่า สัดส่วนผสมของวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานที่เกิดจากปริมาณเหลือทิ้งจริงของบริษัท ชันสวีท จำกัด (มหาชน) มีความเหมาะสมต่อการนำมาเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ โดย C/N Ratio ของวัตถุดิบตั้งต้นที่สามารถนำมาผลิตก๊าซชีวภาพคือ ตั้งแต่ 8–35 (Meixia et al., 2014; Zhang et al., 2014) แต่ที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจะอยู่ในช่วง 20–35 สำหรับ C/N Ratio ที่เหมาะสมมากที่สุดต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ คือ 23 (นิลวรรณ ไชยทนต์ และ พงษ์ อักกะรังสี, 2552) ซึ่งถ้าหากมากกว่านี้จะส่งผลทำให้มีสัดส่วนปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มสูงขึ้น และถ้าหากว่าน้อยกว่านี้จะส่งผลทำให้มีสัดส่วนของก๊าซอื่น ๆ ที่มีองค์ประกอบเป็นไนโตรเจนและไฮโดรเจนมากขึ้นเช่นกัน (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี, 2560)

ตารางที่ 8 คุณลักษณะของหัวเชื้อจุลินทรีย์

คุณสมบัติ	หน่วย	ปริมาณ
pH	-	7.72
Moisture Content	%	90.23
Chemical Oxygen Demand (COD)	mg/L	98,258.17
Total Solids (TS)	mg/L	97,682.54
Volatile Solids (VS)	mg/L	81,425.68
VS/TS Ratio	-	0.73
Volatile Fatty Acid (VFA)	mg CH ₃ COOH/L	1,042.17
Alkalinity (ALK)	mg CaCO ₃ /L	4,685.76
VFA/ALK Ratio	mg CH ₃ COOH/ mg CaCO ₃	0.25
C/N Ratio	-	9.13

จากตารางที่ 8 การวิเคราะห์ค่าทางเคมีของหัวเชื้อจุลินทรีย์ ประกอบไปด้วยส่วนที่ 1 ค่า pH มีค่าเท่ากับ 7.72 พบว่าค่าดังกล่าวมีค่าที่ค่อนข้างเป็นเบสอ่อน เนื่องมาจากอัตราส่วนผสมระหว่างกากตะกอนมูลสุกรกับกากตะกอนน้ำเสียเท่ากับ 2:1 ซึ่งคุณสมบัติของกากตะกอนมูลสุกรเกิดจากการชะล้างคอกหมูด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ของฟาร์มหมู โดยโซเดียมไฮดรอกไซด์มีค่า pH ที่

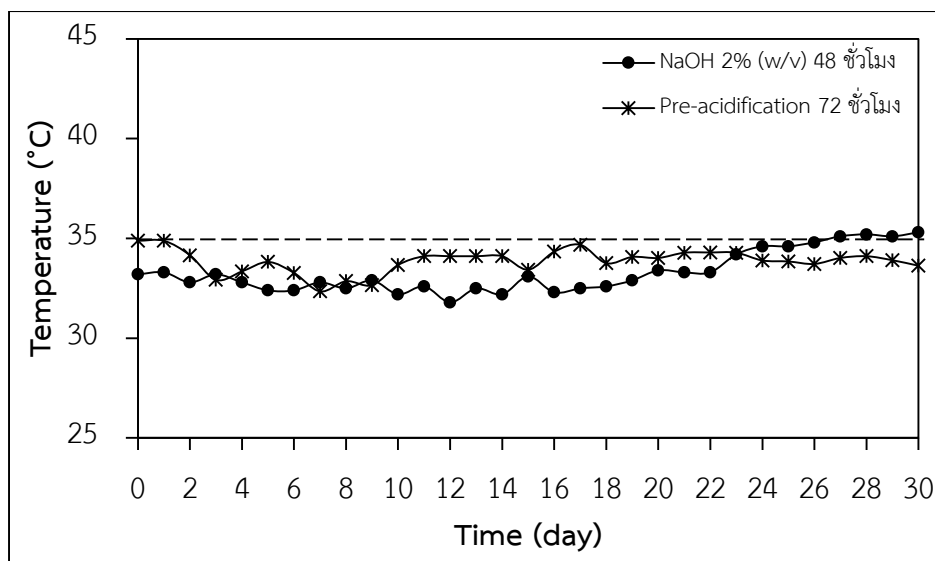
เป็นเบสแก่จึงส่งผลทำให้ค่าสูงกว่าปกติเพียงเล็กน้อย สำหรับค่า pH ที่เหมาะสมต่อจุลินทรีย์ใช้ในการดำรงชีวิตและใช้ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพคือ ควรอยู่ในช่วง 6.5–7.8 (นงลักษณ์ นิธิกุลรัตน และคณะ, 2559) ส่วนที่ 2 ค่า COD มีค่าเท่ากับ 98,258.17 mg/L พบว่าค่า ดังกล่าวยังบ่งบอกถึงศักยภาพในการนำหัวเชื้อจุลินทรีย์มาเป็นหัวเชื้อในการเดินระบบ โดยค่า COD ที่เหมาะสมต่อการนำมาผลิตก๊าซชีวภาพและให้ค่าความคุ้มค่าต่อการลงทุนของระบบผลิตก๊าซชีวภาพควรมีค่าไม่ต่ำกว่า 1,200 mg/L (นคร ทิพยาวงศ์, 2553) ส่วนที่ 3 ค่า VS/TS Ratio มีค่าเท่ากับ 0.73 (อัจฉริยา เจริญวัย, 2556) อีกทั้งยังพบว่าเมื่อระบบมีการเพิ่ม ค่า VS/TS Ratio ให้สูงขึ้นระบบสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงขึ้น และจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบยังสามารถรักษาเสถียรภาพในระบบในคงที่ได้อย่างต่อเนื่อง ส่วนที่ 4 ค่า VFA/ALK Ratio มีค่าเท่ากับ 0.25 พบว่าค่าดังกล่าวอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการนำมาผลิตก๊าซชีวภาพ (Wang et al., 2016) และส่วนที่ 5 ค่า C/N Ratio มีค่าเท่ากับ 9.13 พบว่า ค่าดังกล่าวมีค่าที่ค่อนข้างต่ำ แต่ก็ยังอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการนำมาเป็นหัวเชื้อในการเดินระบบผลิตก๊าซชีวภาพ (Meixia et al., 2014; Zhang et al., 2014)

ผลของการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบตั้งต้นที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ จากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง

สำหรับการศึกษาผลของการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบด้วยต่าง NaOH 2% เป็นระยะเวลา 48 h และด้วยกระบวนการแบบ Pre-acidification เป็นระยะเวลา 72 h ที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง โดยมีผลการวิเคราะห์ค่าดังต่อไปนี้

1. อุณหภูมิภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของการศึกษาการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบ

สำหรับค่าอุณหภูมิภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพมีผลโดยตรงต่อจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ เพื่อให้เกิดกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งจุลินทรีย์จะทำงานได้ดีที่อุณหภูมิประมาณ 35 ± 2 °C ฉะนั้น เพื่อให้การทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มนี้ดำเนินการไปได้ด้วยดี ส่งผลทำให้เกิดก๊าซชีวภาพในปริมาณมากจะต้องรักษาอุณหภูมิภายในถังปฏิกรณ์ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อกระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพ (Pennapa et al., 2017) และที่อุณหภูมิช่วงเทอร์โมฟิลิคจะสูงกว่าที่ช่วงอุณหภูมิเมโซฟิลิค แต่ระบบการย่อยแบบไม่ใช้อากาศที่มีอุณหภูมิสูงจะมีข้อเสียคือ ช่วงอุณหภูมิเทอร์โมฟิลิคจะทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิได้ไม่ดีเท่ากับช่วงอุณหภูมิเมโซฟิลิค (กิตติยา ป้อมเงิน และคณะ, 2559) การที่จะควบคุมระบบจึงมีความเสี่ยงสูงต่อการล้มเหลวของระบบและยังสิ้นเปลืองพลังงาน ในการควบคุมอุณหภูมิของระบบอีกด้วย (Aditi et al., 2018)

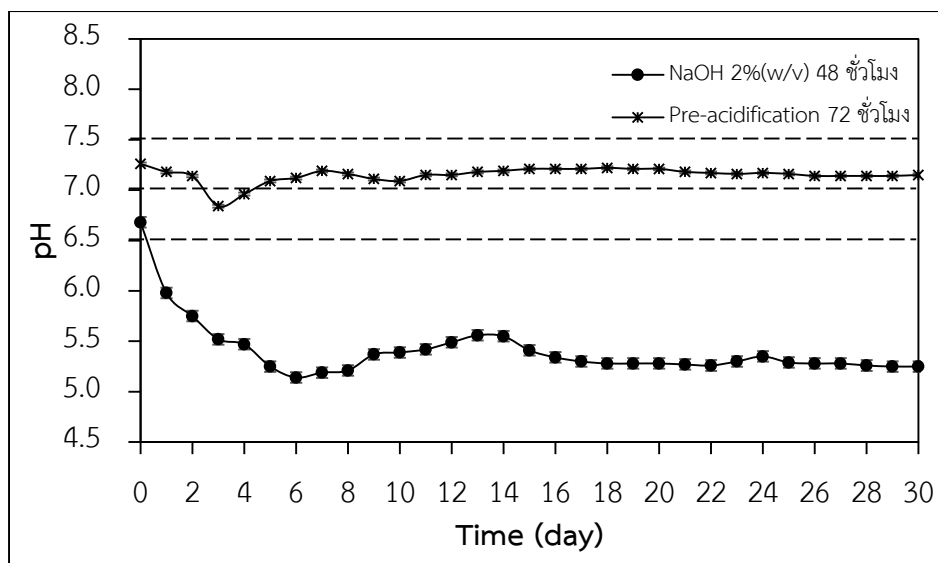


ภาพที่ 29 อุณหภูมิภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบ

จากภาพที่ 29 อุณหภูมิภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบด้วยวิธีการ 2 แบบ คือ NaOH48 และ Pre-A72 ตามลำดับ มีค่าอยู่ในช่วง 31.80–35.30 °C และ 32.35–34.88 °C ตามลำดับ โดยทั้ง 2 เงื่อนไขการทดลองมีค่าอุณหภูมิภายในระบบที่ใกล้เคียงกัน คือ อยู่ในช่วง 30–37 °C ซึ่งอุณหภูมิภายในระบบจะแปรผันตามอุณหภูมิของสภาวะแวดล้อม โดยอุณหภูมิภายในถังปฏิกรณ์เป็นอุณหภูมิที่ค่อนข้างเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ โดยทั่วไปแล้วอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตในช่วงเมโซฟิลิก (Mesophilic Range) ช่วงอุณหภูมิ 20–45 °C โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพมากที่สุดคือ 37 °C (Guangying et al., 2010)

2. ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของการศึกษการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบ

สำหรับค่าความเป็นความกรด-ด่าง (pH) ของระบบแสดงถึงความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน (H^+) หรือไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) ที่บ่งบอกถึงสภาพความเป็นกรดหรือเบสของสารละลาย โดย ค่า pH ที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตก๊าซชีวภาพคือ ระหว่าง 6.5–7.5 (จรรยา อินเอก และคณะ, 2553) โดยผลการศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบมีผลดังต่อไปนี้



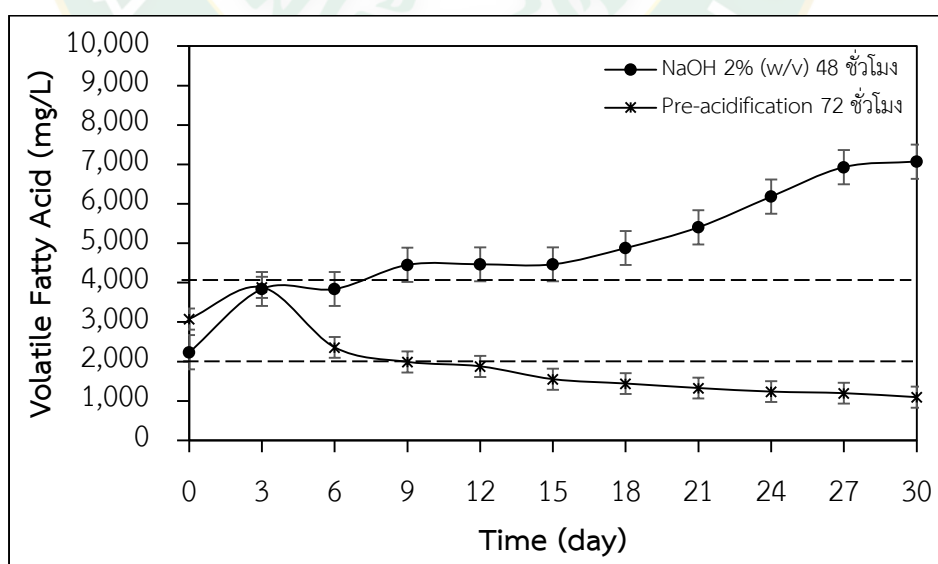
ภาพที่ 30 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบ

จากภาพที่ 30 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบด้วยวิธีการ 2 แบบ คือ NaOH48 และ Pre-A72 ตามลำดับ มีค่าอยู่ในช่วง 5.14–6.68 และ 6.84–7.26 ตามลำดับ สำหรับค่า pH ของการปรับสภาพแบบ NaOH48 จะมีค่า pH ลดต่ำลงจาก 6.68 ลดลงมากที่สุดในวันที่ 6 มีค่าเท่ากับ 5.14 และมีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลา 30 days เท่ากับ 5.41 โดยกระบวนการปรับสภาพดังกล่าวส่งผลโดยตรงทำให้โครงสร้างภายในวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานถูกย่อยให้เป็นสารอินทรีย์ขนาดเล็ก คือ กรดอินทรีย์ระเหยง่ายได้ง่าย ซึ่งง่ายต่อการที่หัวเชื้อจุลินทรีย์จะนำไปใช้ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ แต่เนื่องด้วยการป้อนสารอินทรีย์เข้าระบบมากเกินไป ไม่เหมาะสมต่อการทำงานของหัวเชื้อจุลินทรีย์จึงส่งผลทำให้ระบบเกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายขึ้น (Sawatdeenarunat et al., 2017) จึงทำให้ค่า pH ลดลงอยู่ในช่วง 4–5 (กิตติยา ป้อมเงิน และคณะ, 2560) ซึ่งค่า pH ที่ต่ำกว่า 6.2 จะส่งผลโดยตรงทำให้ประสิทธิภาพของระบบผลิตก๊าซชีวภาพจะลดลงอย่างรวดเร็ว (กัญญาภัค ตาจันทร์, 2556) และค่า pH ของการปรับสภาพแบบ Pre-A72 มีค่า pH อยู่ในช่วง 6.5–7.5 และมีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลา 30 days เท่ากับ 7.14 โดยกระบวนการดังกล่าวเป็นกระบวนการสร้างกรดอินทรีย์ระเหยง่ายของวัสดุเหลือทิ้งประเภทลิกโนเซลลูโลส (ชลลดา แดงประดับ, 2554) โดยเมื่อทำการป้อนวัตถุดิบดังกล่าวเข้าสู่ถังปฏิกรณ์แล้วนั้น จะส่งผลโดยตรงทำให้ไม่ก่อให้เกิดกระบวนการสะสมของกรดอินทรีย์ขึ้นภายในระบบ อีกทั้งยังพบว่าระบบสามารถรักษาเสถียรภาพของค่า pH ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ (ทวิวัฒน์ สเลอาด, 2554) สำหรับ

ค่า pH ในถังปฏิกรณ์ขึ้นอยู่กับช่วงของการหมัก เพราะในช่วงแรกจุลินทรีย์ที่สร้างกรดจะสร้างกรดเป็นจำนวนมาก และทำให้ค่า pH ลดลง ซึ่งถ้าหาก pH ลดลงต่ำกว่า 5.0 ก็จะหยุดกระบวนการย่อยสลายทั้งหมด (โสภี พันอินทร์, 2560) หรืออีกนัยหนึ่งก็คือ จุลินทรีย์ในกลุ่ม Methanogen ไม่สามารถเจริญเติบโตต่อไปได้หากค่า pH ต่ำกว่า 6.5 ในช่วงสุดท้ายของกระบวนการ ความเข้มข้นของแอมโมเนีย จะมากขึ้นตามการย่อยสลายไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ค่า pH เกิน 8.0 จนกระทั่งระบบผลิตเริ่มมีความเสถียรค่า pH จะอยู่ระหว่าง 6.8–8.0 (Chen et al., 2010)

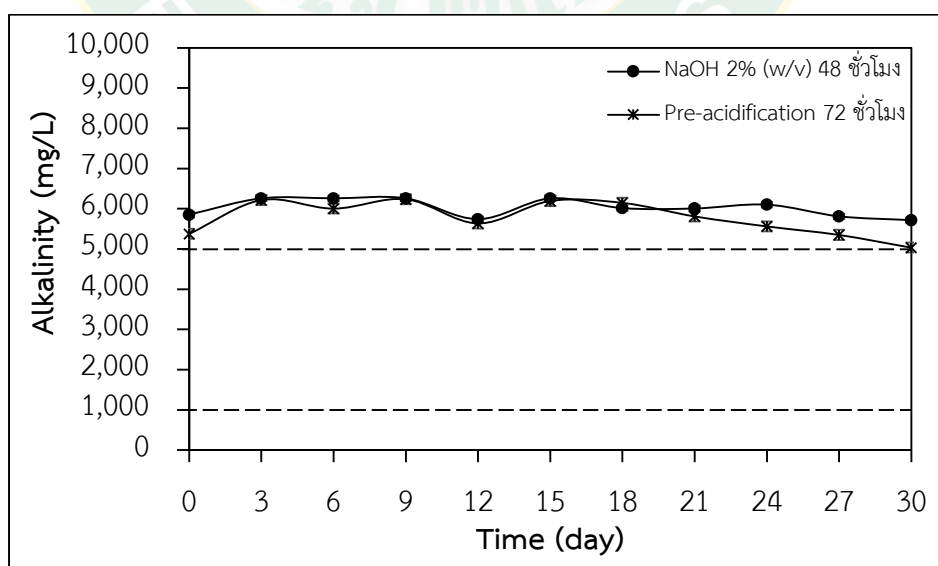
3. กรดไขมันระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid) และสภาพความเป็นด่าง (Alkalinity) ของการศึกษาระบบปรับปรุงเบื้องต้นของวัตถุดิบ

สำหรับค่าสภาพความเป็นด่าง (ALK) มีความสำคัญต่อการหมักวัสดุที่มีค่าความเป็นกรดสูง เพราะทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ควบคุมค่า pH ของระบบไม่ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงมากหลังจากมีการเติมวัสดุหมัก (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2557) และส่วนของกรดไขมันระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid) เป็นค่าของกรดไขมันโมเลกุลสั้นที่เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในขั้นตอนการไฮโดรไลซิส และการสร้างกรดของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรด เช่น กรดอะซิติก กรดโพรไพโอนิก และกรดบิวทิริก ซึ่งจะถูกจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนนำไปใช้เป็นสารอาหารและแหล่ง (นฤมล เสาะกระโทก, 2556) ค่ากรดไขมันระเหยง่าย (VFA) ภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลการปรับปรุงเบื้องต้นของวัตถุดิบมีผลดังต่อไปนี้



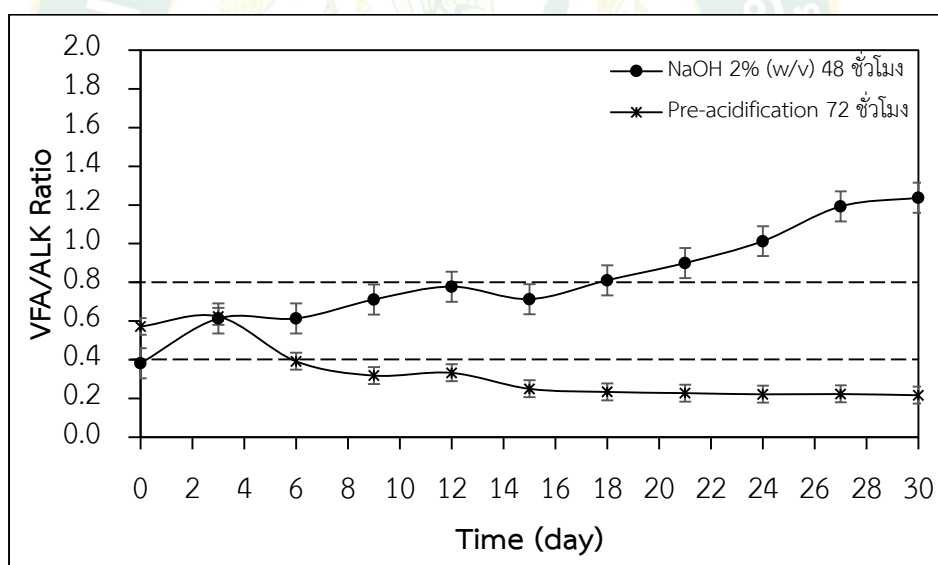
ภาพที่ 31 ค่ากรดไขมันระเหยง่าย (VFA) ภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลการปรับปรุงเบื้องต้นของวัตถุดิบ

จากภาพที่ 31 ค่ากรดไขมันระเหยง่าย (VFA) ภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบด้วยวิธีการ 2 แบบ คือ NaOH48 และ Pre-A72 ตามลำดับ มีค่าอยู่ในช่วง 2,235.61–7,070.69 และ 1,094–3,879.45 mg/L ตามลำดับ และมีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลา 30 days เท่ากับ 4,888.31 และ 1,911.43 mg/L ตามลำดับ สำหรับค่า VFA ของการปรับสภาพแบบ NaOH48 ค่า VFA ที่เพิ่มมากขึ้นจนทำให้เกิดการสะสมของกรด โดยมีค่ามากที่สุดในวันที่ 30 มีค่าเท่ากับ 7,070.69 mg/L (Sawatdeenarunat et al., 2017) เนื่องจากหลังกระบวนการปรับสภาพด้วยวิธีการดังกล่าวค่า pH มีค่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อกระบวนการหมักแล้วนั้น เมื่อทำการนำวัสดุหมักเข้ายังถังปฏิกรณ์ กลับพบว่าวัสดุหมักเกิดกระบวนการสร้างกรดอินทรีย์ระเหยง่ายภายในระบบแทนจึงก่อให้เกิดสภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ (กิตติยา ป้อมเงิน, 2559; Sawatdeenarunat et al, 2017) ถ้าระบบผลิตก๊าซชีวภาพเกิดการสะสมของกรดไขมันระเหยง่าย (VFA) ในปริมาณที่มากเกินไปกว่า 2,000 mg/L จะส่งผลโดยตรงไปยังยังการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่ม Methanogen (Guangyin et al., 2010) ส่วนกระบวนการปรับสภาพแบบ Pre-A72 มีค่า VFA ที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยค่า VFA ของกระบวนการปรับสภาพดังกล่าวจะมีปริมาณสูงที่สุดในวันที่ 3 มีค่าเท่ากับ 3,879.45 mg/L เนื่องจากในช่วงแรกของกระบวนการย่อยสลายจะเกิดกระบวนการสร้างกรดไขมันระเหยง่าย เพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ แต่เมื่อเข้าสู่วันที่ 6 พบว่าค่า VFA กลับเข้าสู่สภาวะคงที่ (อภิชาติ ศรีภักดิ์, 2555) ซึ่งทำให้ไม่มีผลกระทบต่อการทำงานของจุลินทรีย์จำพวก Methanogen (นฤมล เชาวะกระโทก, 2556)



ภาพที่ 32 ค่าสภาพความเป็นด่าง (ALK) ภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบ

จากภาพที่ 32 ค่าสภาพความเป็นด่าง (ALK) ภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบด้วยวิธีการ 2 แบบ คือ NaOH48 และ Pre-A72 ตามลำดับ มีค่าอยู่ในช่วง 5,715.34–6,260.73 และ 5,035.94–6,237.39 mg/L ตามลำดับ และมีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลา 30 days เท่ากับ 6,026.64 และ 5,779.83 mg/L ตามลำดับ ซึ่งทั้ง 2 เงื่อนไขการทดลอง มีค่าที่ค่อนข้างใกล้เคียงกัน อยู่ในช่วง 5,000–6,500 mg/L โดยค่า ALK เป็นตัวแสดงให้เห็นถึงปริมาณสารบัพเฟอร์ภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งจะช่วยในการรักษาและป้องกันจุลินทรีย์ประเภทสร้างมีเทนให้ทนต่อสภาพความเป็นกรดที่เกิดจากกรดไขมันระเหยง่ายของวัตถุดิบตั้งต้น ค่าสภาพความเป็นด่างยังมีข้อดีคือ ถึงแม้ระบบจะมีปริมาณของกรดไขมันสูงถึง 5,000 mg/L CH_3COOH ก็จะไม่ส่งผลของกระบวนการทำงานของจุลินทรีย์ (ทวินันท์ สเลอาด, 2554) ถ้าปริมาณของค่าสภาพความเป็นด่างทั้งหมดเพียงพอต่อระบบผลิตก๊าซชีวภาพ และค่าสภาพความเป็นด่างที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพคือ ควรมีค่ามากกว่า 1,000 mg/L จึงจะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพในการบัพเฟอร์สูง (กระทรวงพลังงาน, 2558)



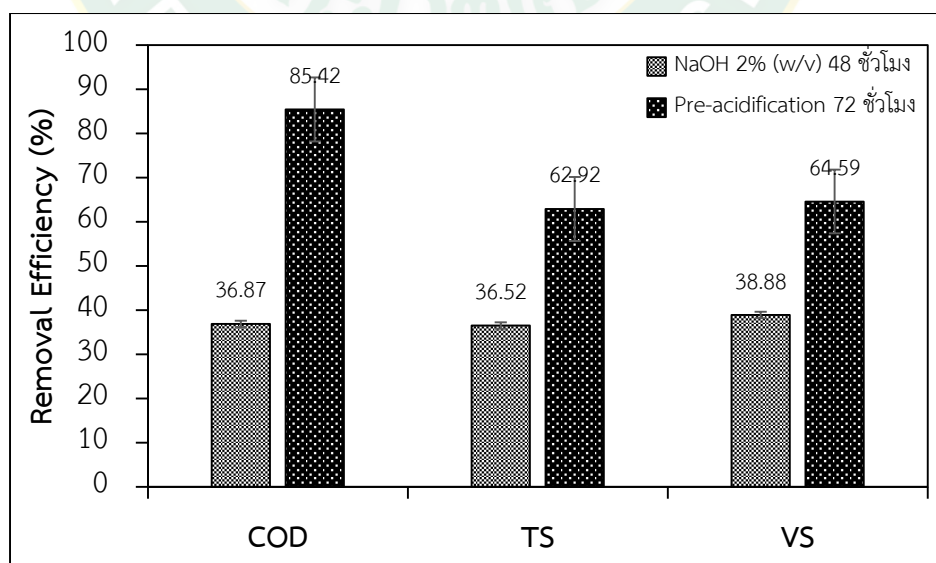
ภาพที่ 33 ค่า VFA/ALK Ratio ภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบ

จากภาพที่ 33 ค่า VFA/ALK Ratio ภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบด้วยวิธีการ 2 แบบ คือ NaOH48 และ Pre-A72 ตามลำดับ มีค่าอยู่ในช่วง 0.38–1.24 และ 0.22–0.62 ตามลำดับ และมีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลา 30 days เท่ากับ 0.81 และ 0.33 ตามลำดับ สำหรับค่า VFA/ALK Ratio ของการปรับสภาพแบบ NaOH48 มีค่าที่

ค่อนข้างสูง ซึ่งแปรผันโดยตรงกับค่า VFA ข้างต้น และสำหรับ VFA/ALK Ratio ของการปรับสภาพแบบ Pre-A72 มีค่าที่อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่ออัตราการบัพเฟอร์ของระบบ คือ ไม่เกิน 0.4 อีกทั้งยังทำให้ระบบมีเสถียรภาพในการทำงานของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ โดยไม่จำเป็นต้องเติมสารเคมีใด ๆ (จรรยา อินเอก และคณะ, 2553) โดยค่า VFA/ALK Ratio มีความสัมพันธ์โดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงของค่า pH หากอัตราส่วนของกรดไขมันระเหยง่ายต่อสภาพความเป็นต่างในรูปของไบคาร์บอเนต (VFA/ALK) มีค่าน้อยกว่า 0.4 แสดงว่ากำลังในการบัพเฟอร์สูง หากอัตราส่วนดังกล่าวมีค่าสูงกว่า 0.8 แสดงว่ากำลังบัพเฟอร์ของระบบมีค่าต่ำมาก (สุดารัตน์ ภัคดี, 2551)

4. ประสิทธิภาพในการกำจัดค่า COD, TS และ VS ของการศึกษารูปแบบการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบ

สำหรับการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบผลิตก๊าซชีวภาพส่วนใหญ่จะพิจารณาจากการกำจัดค่า COD, TS และ VS ตามลำดับ โดยค่า COD บ่งบอกถึงความต้องการปริมาณออกซิเจนของน้ำเสียที่สามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ต่าง ๆ ไปเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553) ค่า TS บ่งบอกถึงลักษณะในการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในระบบว่ามีประสิทธิภาพในการย่อยสลายหรือลดปริมาณของเสียในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้อากาศ และค่า VS บ่งบอกถึงปริมาณสารอินทรีย์ที่อยู่ในวัสดุหมัก (ทวินนท์ สเลอาด, 2554; ญัฐวุฒิ ดุษฎี และคณะ, 2557) โดยประสิทธิภาพในการกำจัดค่า COD, TS และ VS ภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบมีผลดังต่อไปนี้

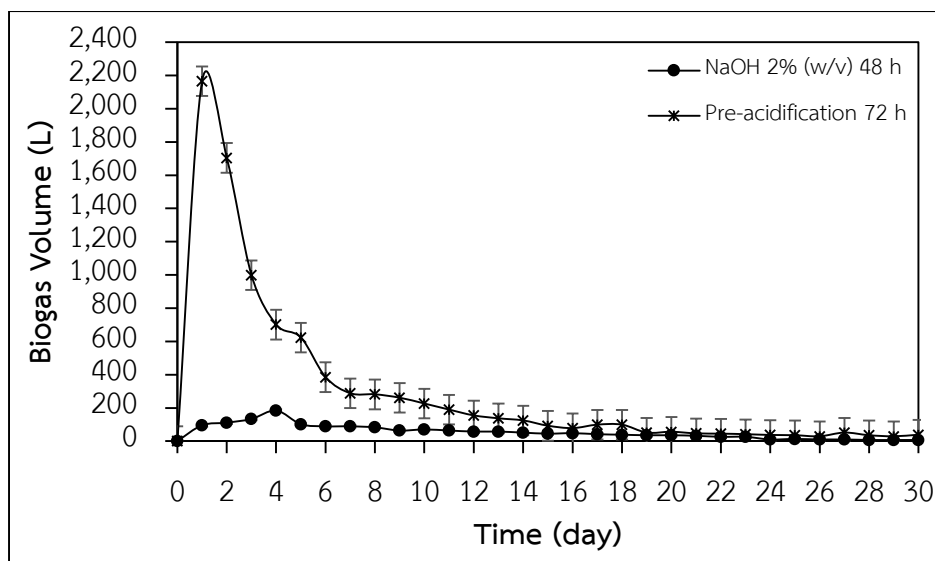


ภาพที่ 34 ประสิทธิภาพในการกำจัดค่า COD, TS และ VS ภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบ

จากภาพที่ 34 ประสิทธิภาพในการกำจัดค่า COD, TS และ VS ภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบด้วยวิธีการ 2 แบบ คือ NaOH48 และ Pre-A72 ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดค่า COD, TS และ VS ของกระบวนการปรับสภาพแบบ NaOH48 มีค่าเท่ากับ 36.87%, 36.52% และ 38.88% ตามลำดับ และด้วยกระบวนการแบบ Pre-acidification เป็นระยะเวลา 72 h มีค่าเท่ากับ 85.42%, 62.92% และ 64.59% ตามลำดับ โดยกระบวนการปรับสภาพแบบ Pre-A72 จะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดค่า COD, TS และ VS ตามลำดับ ได้ดีกว่าการปรับสภาพด้วยต่าง NaOH48 h เท่ากับ 56.84%, 41.96% และ 39.81% ตามลำดับ อีกทั้งยังพบว่ากระบวนการปรับสภาพแบบ Pre-A72 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดค่า COD, TS และ VS ได้มากขึ้นถึง 20% เนื่องจากกระบวนการปรับสภาพแบบ Pre-A72 เป็นกระบวนการสร้างกรด ซึ่งอยู่ในขั้นตอน Hydrolysis และ Acidogenesis ของกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานก่อนนำเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ เมื่อภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพสามารถกำจัดค่า COD, TS และ VS ที่สูงแสดงให้เห็นถึงปริมาณของจุลินทรีย์ในกลุ่ม Methanogen ที่มีอยู่ภายในระบบ ซึ่งเพียงพอที่นำกรดไขมันระเหยง่ายไปใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ (นิลวรรณ ไชยทนต์, 2552) และมีอัตราส่วนระหว่างหัวเชื้อจุลินทรีย์ต่อวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานที่ความเหมาะสมต่อกระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะการหมักแบบไม่ใช้ออกาศด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง (ชลลดา แดงประดับ, 2554) โดยปกติแล้วกระบวนการปรับสภาพทางเคมีจะให้ประสิทธิภาพในการกำจัดค่า COD, TS และ VS ที่สูงกว่ากระบวนการปรับสภาพทางชีวภาพ แต่เนื่องด้วยระบบทำการป้อนอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ที่มากเกินไปกว่าจุลินทรีย์กลุ่ม Methanogen จะสามารถนำสารอินทรีย์เหล่านี้ไปใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพได้หมดก่อให้เกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ขึ้น จึงทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัด COD, TS และ VS ตามลำดับ ของระบบมีค่าที่ต่ำกว่ากระบวนการปรับสภาพทางชีวภาพ (Sawatdeenarunat et al., 2017)

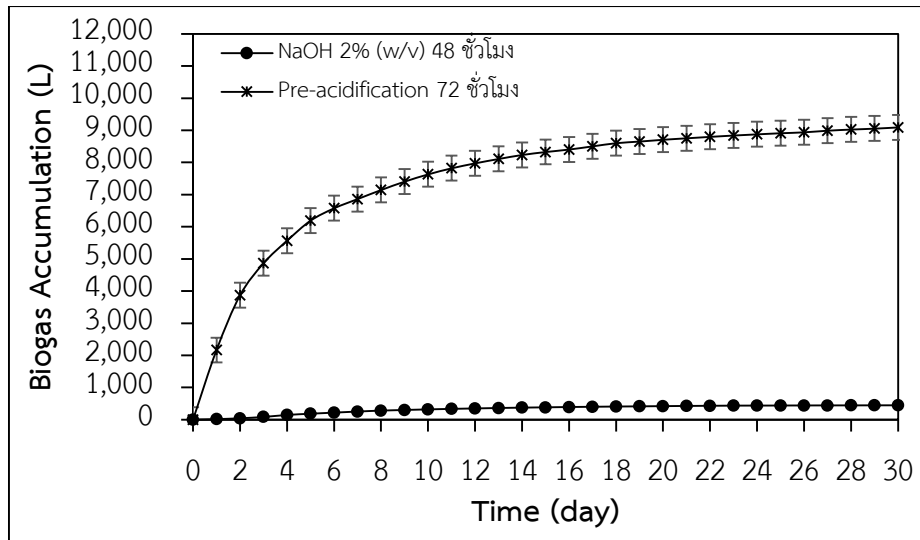
5. ปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อวัน ก๊าซชีวภาพสะสม และสัดส่วนของก๊าซมีเทน ของการศึกษากการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบ

สำหรับก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อวันและสัดส่วนของก๊าซมีเทนของระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้งของกระบวนการศึกษาผลการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบมีผลดังต่อไปนี้



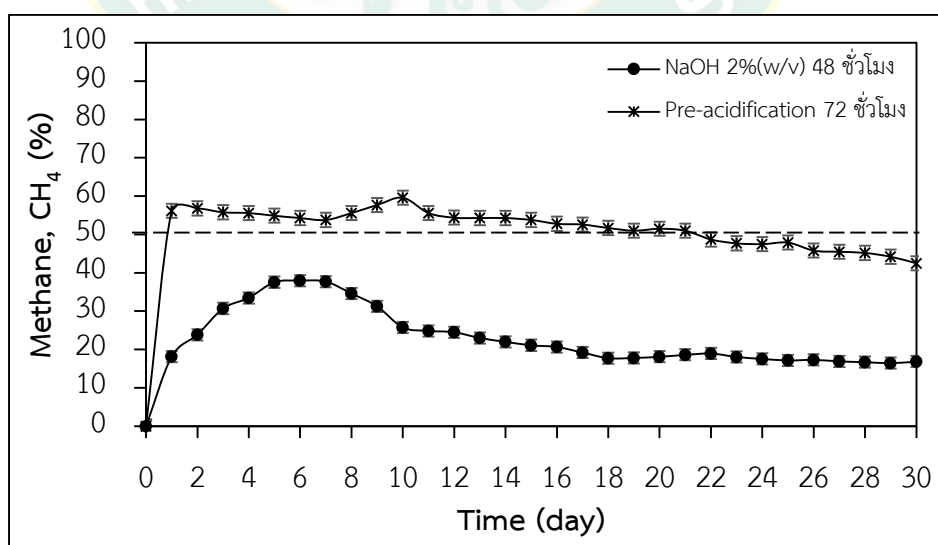
ภาพที่ 35 ปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อวันภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบ

จากภาพที่ 35 ปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อวันภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบด้วยวิธีการ 2 แบบ คือ NaOH48 และ Pre-A72 ตามลำดับ จากการศึกษพบว่า ปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อวันของการปรับสภาพแบบ NaOH48 มีค่าอยู่ในช่วง 6.36–184.40 L/day และมีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลา 30 days เท่ากับ 54.47 L/day และด้วยกระบวนการแบบ Pre-A72 มีค่าเท่ากับ 28.61–2,066.51 L/day และมีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลา 30 days เท่ากับ 303.14 L/day โดยปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละวันของกระบวนการปรับสภาพแบบ Pre-A72 จะให้ปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อวันมากกว่ากระบวนการปรับสภาพแบบ NaOH48 มากถึง 82.03% ซึ่งปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นได้รับผลโดยตรงมาจากค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของระบบข้างต้น อาทิ pH, VFA, ALK, COD, TS และ VS ตามลำดับ โดยปริมาณของก๊าซชีวภาพทั้ง 2 เงื่อนไขการทดลองจะลดต่ำลงในวันที่ 4 และจะเข้าสู่สภาวะคงที่ในช่วงหลังวันที่ 18 ซึ่งกระบวนการหมักเป็นแบบกะ สารอินทรีย์ถูกจุลินทรีย์ใช้ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพไปจนหมดจะส่งผลโดยตรงทำให้ปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อวันลดลงตามไปด้วย (นิลวรรณ ไชยทนต์, 2552)



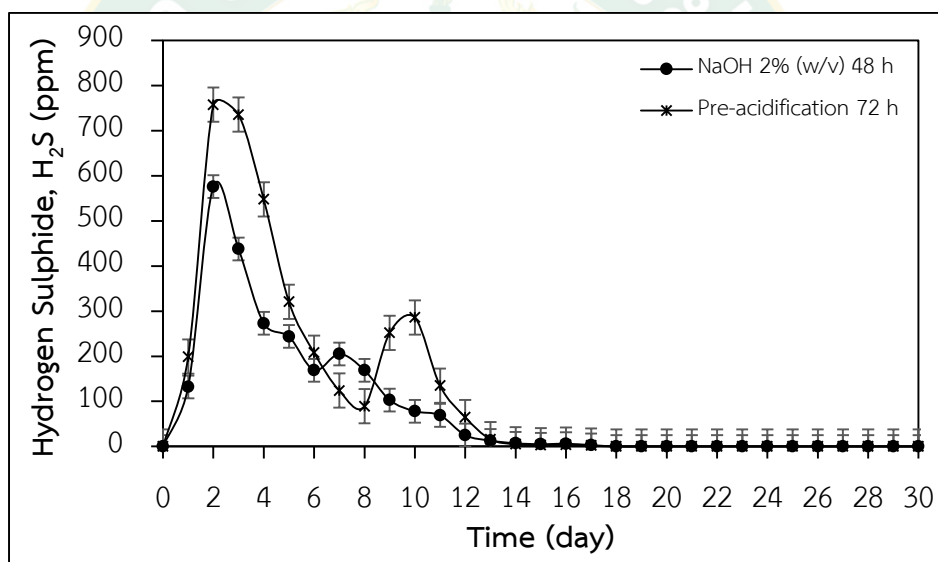
ภาพที่ 36 ปริมาณของก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้นภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบ

จากภาพที่ 36 ปริมาณของก๊าซชีวภาพสะสมภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบด้วยวิธีการ 2 แบบ คือ NaOH48 และ Pre-A72 ตามลำดับ จากการศึกษพบว่า ปริมาณของก๊าซชีวภาพสะสมทั้งหมดตลอดระยะเวลา 30 days มีค่าเท่ากับ 1,634.13 และ 9,094.24 L ตามลำดับ โดยปริมาณของก๊าซชีวภาพสะสมจะแปรผันโดยตรงกับปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อวัน



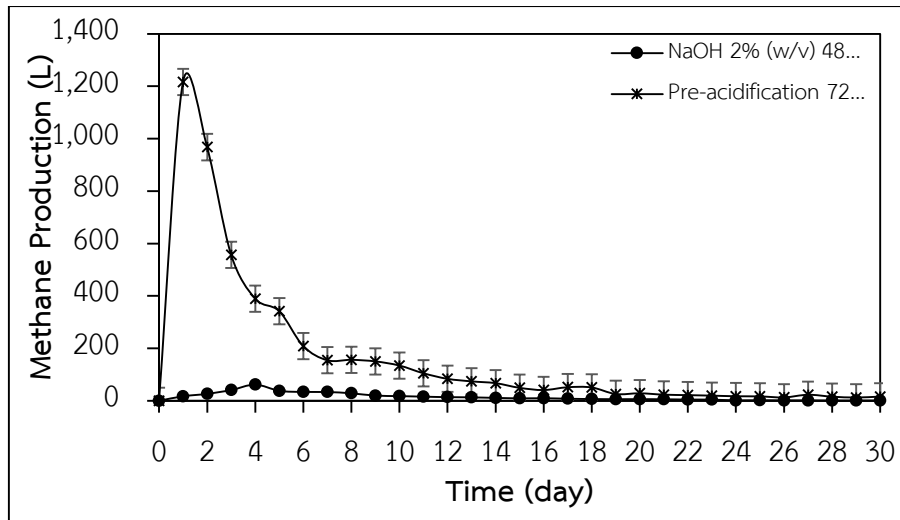
ภาพที่ 37 สัดส่วนของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบ

จากภาพที่ 37 สัดส่วนของก๊าซมีเทนภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบด้วยวิธีการ 2 แบบ คือ NaOH48 และ Pre-A72 ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่า สัดส่วนของก๊าซมีเทนของการปรับสภาพแบบ NaOH48 และด้วยกระบวนการแบบ Pre-A72 อยู่ในช่วง 16.5–37.9 และ 42.5–59.6 ตามลำดับ และมีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลา 30 days เท่ากับ 22.9 และ 50.9 ตามลำดับ โดยสัดส่วนก๊าซมีเทนของกระบวนการปรับสภาพแบบ Pre-A72 จะให้สัดส่วนมากกว่า 50% ซึ่งเป็นตัวบ่งบอกถึงศักยภาพในการนำก๊าซมีเทนที่ได้ไปใช้ประโยชน์ภายในระบบการผลิตกระแสไฟฟ้าใช้ภายในโรงงานและขายให้กับการไฟฟ้า เพื่อลดต้นทุนการผลิตของสถานประกอบการได้อย่างทางหนึ่ง (นฤมล เสาะกระโทก, 2556) อีกทั้งยังการแยกกระบวนการหมักกรด และกระบวนการหมักมีเทนแยกออกจากกันจะทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนจะยิ่งเพิ่มสูงขึ้น อยู่ในช่วง 80–90% (นิลวรรณ ไชยทนต์, 2552)



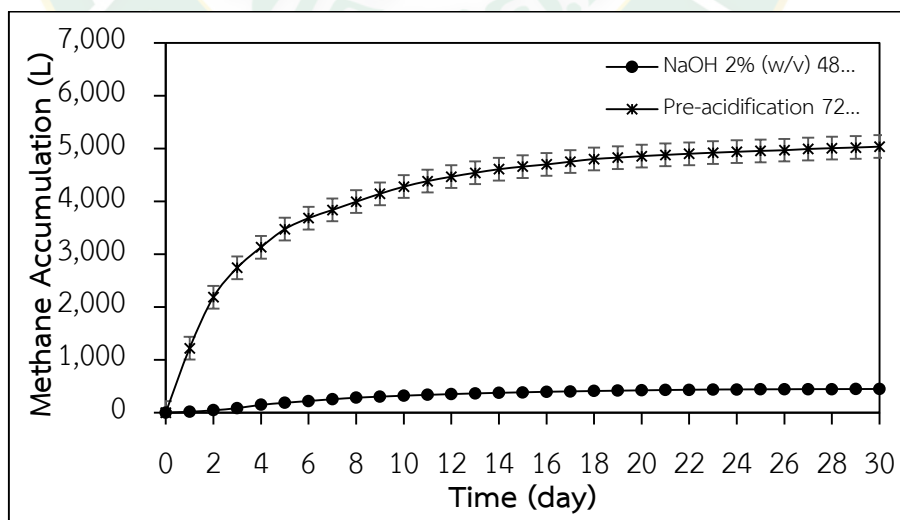
ภาพที่ 38 ปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบ

จากภาพที่ 38 ปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบด้วยวิธีการ 2 แบบ คือ NaOH48 และ Pre-A72 ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่า ปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ของการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบด้วยต่าง NaOH 2% (w/v) เป็นระยะเวลา 48 h และด้วยกระบวนการแบบ Pre-acidification เป็นระยะเวลา 72 h อยู่ในช่วง 0–576 และ 0–758 ppm ตามลำดับ และมีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลา 30 days เท่ากับ 82 และ 121 ppm ตามลำดับ ซึ่งปริมาณในช่วง 3 วันแรกของการทดลอง หลังจากนั้นจะมีปริมาณลดลงอย่างเห็นได้ชัด



ภาพที่ 39 ปริมาณของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อวันภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบ

จากภาพที่ 39 ปริมาณของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อวันภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบด้วยวิธีการ 2 แบบ คือ NaOH48 และ Pre-A72 ตามลำดับ มีค่าอยู่ในช่วง 1.05–61.68 และ 12.65–1,216.77 L/day ตามลำดับ และมีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลา 30 days เท่ากับ 14.35 และ 162.50 ตามลำดับ โดยปริมาณของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อวันจะแปรผันโดยตรงตามสัดส่วนของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อวัน

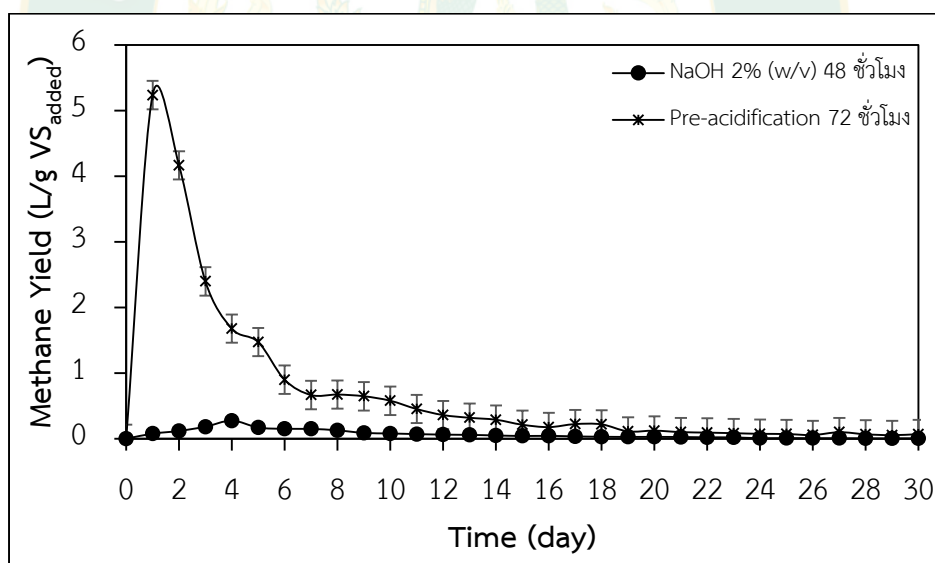


ภาพที่ 40 ปริมาณของก๊าซมีเทนสะสมภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบ

จากภาพที่ 40 ปริมาณของก๊าซมีเทนสะสมภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบด้วยวิธีการ 2 แบบ คือ NaOH48 และ Pre-A72 ตามลำดับ ตลอดระยะเวลา 30 days มีค่าเท่ากับ 444.85 และ 5,037.35 L ตามลำดับ ซึ่งปริมาณของก๊าซมีเทนสะสมตลอดระยะเวลา 30 days แปรผันโดยตรงกับปริมาณของก๊าซมีเทนที่ผลิตได้ต่อวันของระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง (อรทัยชวาลภาฤทธิ์ และคณะ, 2555; อภิชาติ ศรีภักย์, 2555)

6. ผลผลิตของก๊าซมีเทนจำเพาะของการศึกษาการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบ

สำหรับผลผลิตของก๊าซมีเทน คือ ปริมาณของก๊าซมีเทนต่อการย่อยสลายของสารอินทรีย์ต่อหน่วย โดยในขั้นตอนนี้จะทำการพิจารณาปริมาณของผลผลิตของก๊าซมีเทนต่อหน่วยของแข็งระเหยง่าย (VS) เนื่องจากวัตถุดิบที่ได้ทำการผลิตก๊าซชีวภาพเป็นของแข็ง คือ วัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวาน ซึ่งทำการกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยมีการกำหนดของแข็งทั้งหมดของระบบเท่ากับ 25% (w/v) โดยผลการศึกษาปริมาณผลผลิตของก๊าซมีเทนมีผลดังต่อไปนี้



ภาพที่ 41 ผลผลิตของก๊าซมีเทนจำเพาะภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบ

จากภาพที่ 41 ผลผลิตของก๊าซมีเทนจำเพาะภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบด้วยวิธีการ 2 แบบ คือ NaOH48 และ Pre-A72 ตามลำดับ มีค่าอยู่ในช่วง 0.005–0.274 และ 0.054–5.235 L/g VS_{added} ตามลำดับ และมีค่าเฉลี่ย

ตลอดระยะเวลา 30 days เท่ากับ 0.064 และ 0.699 L/g VS_{added} ตามลำดับ โดยกระบวนการปรับสภาพแบบ Pre-A72 จะให้ศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนที่สูงกว่ากระบวนการปรับสภาพแบบ NaOH48 เนื่องจากกระบวนการปรับสภาพแบบ Pre-A72 ไม่มีกระบวนการปรับสภาพของค่า pH ด้วยน้ำสะอาด เพื่อให้ค่า pH อยู่ในช่วง 7-8 เหมือนกับกระบวนการปรับสภาพด้วยด่างจึงส่งผลทำให้สารอาหารที่อยู่ในวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานยังคงมีอยู่มากกว่าถึง 50% (กิตติยา ป้อมเงิน, 2559; ณัฐวุฒิ ดุษฎี และคณะ, 2557)

7. สรุปผลการทดสอบกระบวนการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบตั้งต้น

สำหรับผลของการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบตั้งต้นด้วยวิธีการ 2 แบบ คือ NaOH48 และ Pre-A72 ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่ากระบวนการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบแบบ Pre-A72 มีค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ รวมทั้งผลผลิตของก๊าซชีวภาพและสัดส่วนของก๊าซมีเทนที่ดีกว่ากระบวนการปรับสภาพแบบ NaOH48 อีกทั้งยังพบว่ากระบวนการดังกล่าวยังสามารถลดปริมาณการใช้น้ำสะอาดในการปรับสภาพค่า pH ของการปรับสภาพแบบ NaOH48 ได้อีกทางหนึ่งด้วย ดังนั้นในขั้นตอนการศึกษาผลของการกวนผสมและหมวนเวียนตะกอนที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้งจะใช้กระบวนการปรับสภาพด้วยกระบวนการแบบ Pre-A72 ในการปรับสภาพเบื้องต้นของวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวาน เพื่อใช้เป็นสารอินทรีย์ตั้งต้นในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งของข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้งต่อไปอย่างมีประสิทธิภาพ

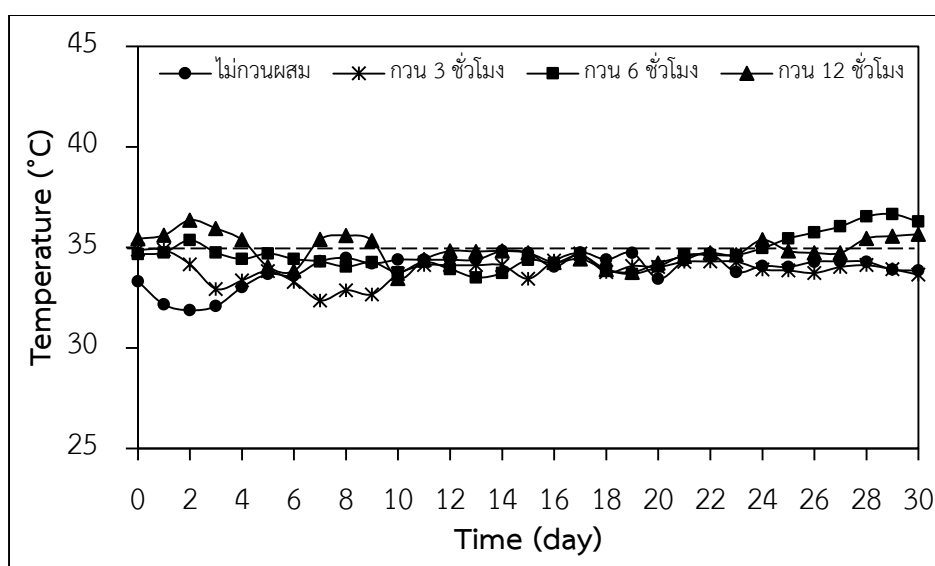
ผลของการกวนผสมและหมวนเวียนตะกอนที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ จากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง

สำหรับการศึกษาผลของการกวนผสมและหมวนเวียนตะกอน โดยระบบมีการกวนและไม่กวนผสมภายในระบบ สำหรับการกวนผสมจะทำการกำหนดอัตราการกวนผสมและหมวนเวียนตะกอนทุก ๆ 3, 6 และ 12 h ที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง โดยมีผลการวิเคราะห์ค่าดังต่อไปนี้

1. อุณหภูมิภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของการศึกษาผลของการกวนผสมและหมวนเวียนตะกอน

สำหรับค่าอุณหภูมิภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพมีผลโดยตรงต่อจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ เพื่อให้เกิดกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งจุลินทรีย์จะทำงานได้ดีที่อุณหภูมิประมาณ 35 ± 2 °C ฉะนั้น เพื่อให้การทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มนี้ดำเนินการไปได้ด้วยดี ส่งผลทำให้เกิดก๊าซ

ชีวภาพในปริมาณมากจะต้องรักษาอุณหภูมิภายในถังปฏิกรณ์ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อกระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพ (Pennapa et al., 2017) โดยผลของการศึกษาอุณหภูมิภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ เจือ้นไขภายในระบบมีการกวนและไม่กวนผสมภายในระบบ สำหรับการกวนผสมจะทำการกำหนดอัตราการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนทุก ๆ 3, 6 และ 12 h โดยแต่ละรอบจะกวนผสมและหมุนเวียนรอบละ 10 min มีผลดังต่อไปนี้

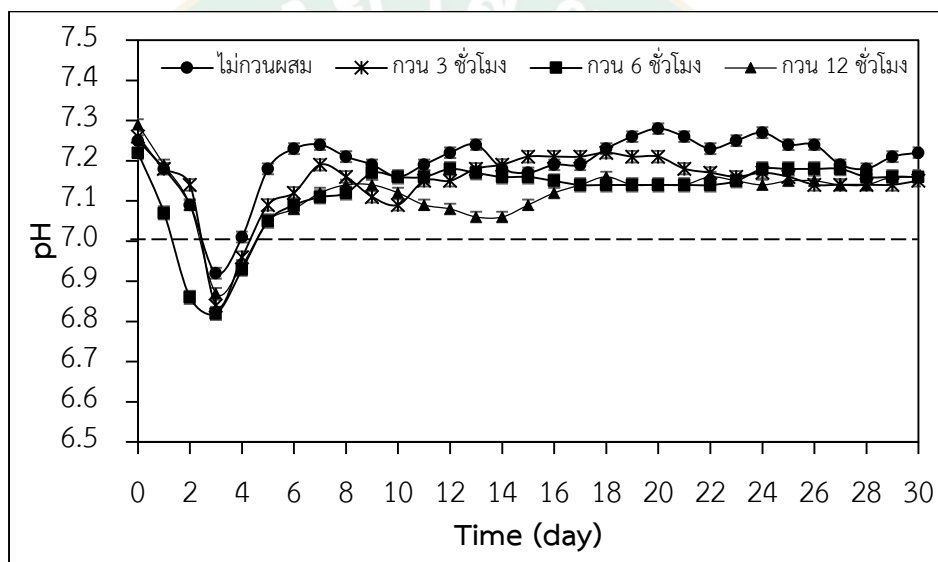


ภาพที่ 42 อุณหภูมิภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลของการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอน

จากภาพที่ 42 อุณหภูมิภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลของการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอน จากการศึกษาพบว่า อุณหภูมิภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของการศึกษาผลของการไม่กวนผสมและการกวนผสมทุก ๆ 3, 6 และ 12 h มีค่าอยู่ในช่วง 31.88–34.82 °C, 32.35–34.88 °C, 33.52–36.66 °C และ 33.45–36.35 °C ตามลำดับ และมีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลา 30 days เท่ากับ 32.89 °C, 32.89 °C, 33.79 °C และ 34.14 °C ตามลำดับ โดยทั้ง 4 เงื่อนไขการทดลองมีค่าอุณหภูมิภายในระบบที่ใกล้เคียงกัน คือ อยู่ในช่วง 31.88–36.66 °C ซึ่งอุณหภูมิภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพจะแปรผันโดยตรงตามอุณหภูมิของสภาวะแวดล้อม โดยอุณหภูมิภายในถังปฏิกรณ์เป็นอุณหภูมิที่ค่อนข้างเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ โดยทั่วไปแล้วอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตในช่วงเมโซฟิลิก (Mesophilic Range) ซึ่งอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 25–45 °C (กิตติยา ป้อมเงิน และคณะ, 2560) ซึ่งถ้าหากอุณหภูมิต่ำกว่า 25 °C จะทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพลดลงมากถึง 50% (Leenawat et al., 2016)

2. ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของการศึกษาผลของการกวนผสมและหมუნเวียนตะกอน

สำหรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของระบบแสดงถึงความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน (H^+) หรือไฮโดรเนียมไอออน (H_3O^+) ที่บ่งบอกถึงสภาพความเป็นกรดหรือเบสของสารละลาย โดย ค่า pH ที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตก๊าซชีวภาพคือ ระหว่าง 6.5–7.5 (จรรยา อินเอก และคณะ, 2553) โดยผลของการศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่างของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ เงื่อนไขภายในระบบมีการกวนและไม่กวนผสมภายในระบบ สำหรับการกวนผสมจะทำการกำหนดอัตราการกวนผสมและหมუნเวียนตะกอนทุก ๆ 3, 6 และ 12 h โดยแต่ละรอบจะกวนผสมและหมუნเวียนรอบละ 10 min มีผลดังต่อไปนี้



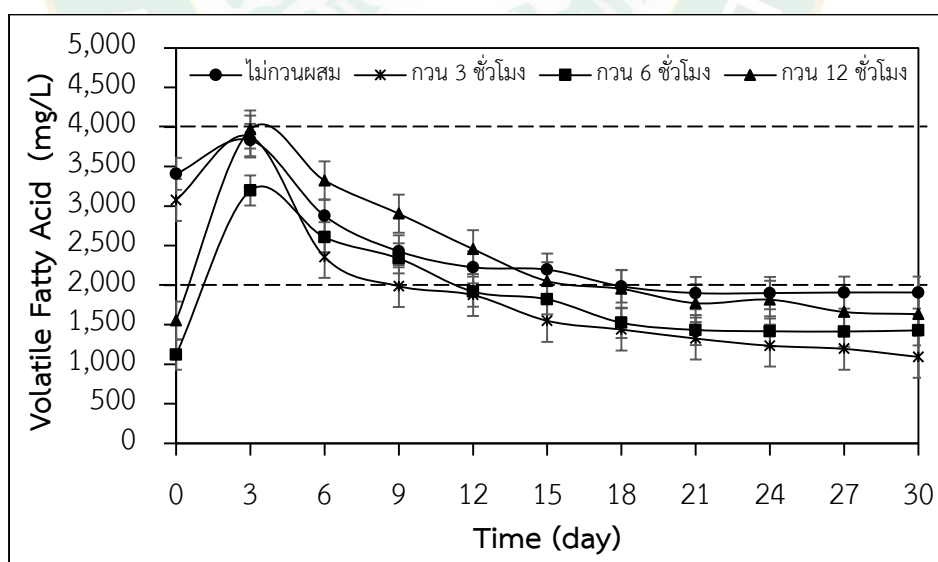
ภาพที่ 43 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลของการกวนผสมและหมუნเวียนตะกอน

จากภาพที่ 43 พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของการศึกษาผลของการไม่กวนผสมและการกวนผสมทุก ๆ 3, 6 และ 12 h มีค่าอยู่ในช่วง 6.92–7.28, 6.84–7.26, 6.82–7.22 และ 6.87–7.29 ตามลำดับ และมีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลา 30 days เท่ากับ 6.97, 7.02, 7.09 และ 7.27 ตามลำดับ ซึ่งทั้ง 4 เงื่อนไขของการทดลองอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อจุลินทรีย์ใช้ในการดำรงชีวิตและใช้ในกระบวนการผลิตก๊าซมีเทน โดยค่า pH จะอยู่ในช่วง 6.5–7.5 ซึ่งถ้าหากค่า pH สูงหรือต่ำกว่านี้ จะทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดต่ำลง โดยค่า pH ต่ำกว่า 6.2 จะทำให้ประสิทธิภาพลดลงอย่างรวดเร็ว เพราะการที่สภาวะเป็นกรดนั้นจะเป็นอันตรายต่อแบคทีเรียที่สร้างมีเทน (Chile et al., 2019) โดยในวันที่ 1–3 ของการทดลองของทั้ง 4 เงื่อนไขการทดลอง มีค่า pH ที่ลดลงอย่างรวดเร็ว

อันเนื่องมาจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพด้วยกระบวนการหมักกรด ก่อนได้เปลี่ยนสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ให้กลายเป็นกรดไขมันระเหยง่ายขนาดเล็ก เพื่อเปลี่ยนไปเป็น สารตั้งต้นในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ จึงส่งผลทำให้ค่า pH ลดลงในช่วงแรกของการทดลอง (สุตารัตน์ ภักดี, 2551) หลังจากนั้นทั้ง 4 เงื่อนไขการทดลองจะเข้าสู่สภาวะคงที่โดยอัตราการกวน ผสมและหมุนเวียนตะกอนทุก ๆ 3 และ 6 ชั่วโมง สามารถรักษาเสถียรภาพของค่า pH ให้คงที่อยู่ที่ ในช่วง 6.8–7.2 (โสภี พันอินทร์, 2560) ได้ดีกว่าการไม่กวนผสมและกวนผสมทุก ๆ 12 ชั่วโมง

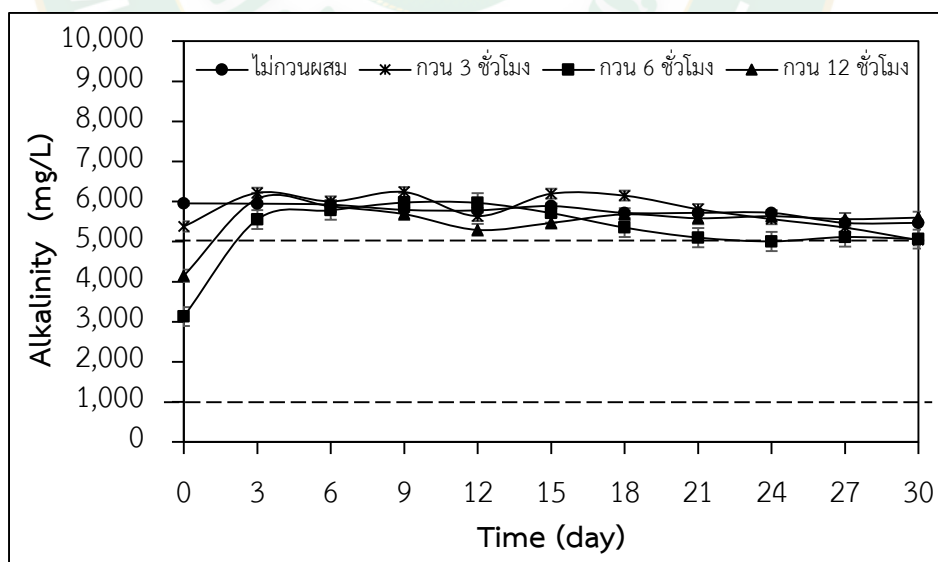
3. กรดไขมันระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid) และสภาพความเป็นด่าง (Alkalinity) ของ การศึกษาผลของการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอน

สำหรับค่าสภาพความเป็นด่าง (ALK) มีความสำคัญต่อการหมักวัสดุที่มีค่าความเป็นกรดสูง เพราะทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ควบคุมค่า pH ของระบบ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์ พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2557) และส่วนของกรดไขมันระเหยง่าย (Volatile Fatty Acid) เป็นค่า ของกรดไขมันโมเลกุลสั้นที่เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ (นฤมล เชาวกระโทก, 2556) ค่ากรด ไขมันระเหยง่าย (VFA) และสภาพความเป็นด่าง (ALK) ของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ เงื่อนไขภายใน ระบบมีการกวนและไม่กวนผสมภายในระบบ สำหรับการกวนผสมจะทำการกำหนดอัตราการกวน ผสมและหมุนเวียนตะกอนทุก ๆ 3, 6 และ 12 h โดยแต่ละรอบจะกวนผสมและหมุนเวียนรอบละ 10 min มีผลดังต่อไปนี้



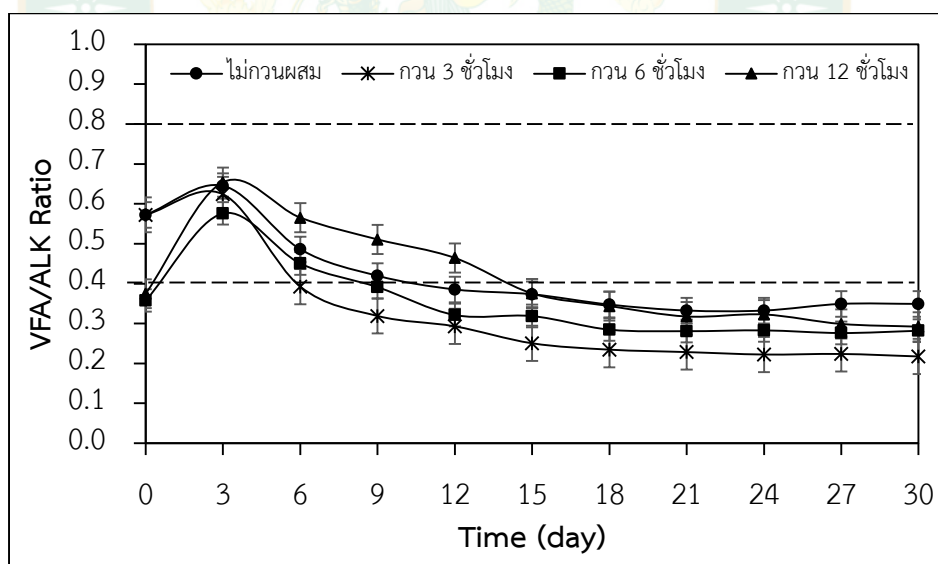
ภาพที่ 44 ค่ากรดไขมันระเหยง่าย (VFA) ภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลของการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอน

จากภาพที่ 44 ค่ากรดไขมันระเหยง่าย (VFA) ภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลของการกวนผสมและหมუნเวียนตะกอน จากการศึกษาพบว่าค่า VFA ของการศึกษาผลของการไม่กวนผสมและการกวนผสมทุก ๆ 3, 6 และ 12 h มีค่าอยู่ในช่วง 1,900.22–3,835.27, 1,094.50–3,879.45, 1,120.39–3,197.94 และ 1,554.85–3,969.36 mg/L ตามลำดับ และมีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลา 30 days เท่ากับ 2,416.02, 1,838.27, 1,911.43, และ 2,282.38 mg/L ตามลำดับ โดยจะเห็นได้ว่าในช่วง 1–3 วันแรกของการทดลอง พบว่าค่า VFA ทั้ง 4 เงื่อนไขของการทดลองมีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากเป็นช่วงที่จุลินทรีย์ปรับตัวให้เข้ากับสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบ และหลังจากที่จุลินทรีย์สามารถปรับตัวเข้ากับระบบได้ ค่า VFA จะเข้าสู่สภาวะที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ คือ มีค่าต่ำกว่า 2,000 mg/L (จุฑาภรณ์ ชนะถาวร, 2560) อีกทั้งยังเมื่อทำการเปรียบเทียบค่า VFA เฉลี่ยตลอดระยะเวลา 30 days ของทั้ง 4 เงื่อนไขของการทดลองจากมากไปหาน้อยตามลำดับ คือ ไม่กวนผสมและกวนผสมและหมუნเวียนตะกอนทุก ๆ 12, 6 และ 3 h พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการกวนผสมและหมუნเวียนตะกอนจะสามารถลดปริมาณของ VFA ได้ เนื่องจากจุลินทรีย์สามารถนำกรดไขมันระเหยง่ายไปใช้เป็นสารตั้งต้นในกระบวนการผลิตมีเทนได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Zhou, 2012; ปฎิรูป ผลจันทร์ และคณะ, 2557) อีกทั้งยังการที่ระบบไม่เกิดการสะสมของค่า VFA ภายในถังปฏิกรณ์แสดงให้เห็นถึงจุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่สร้างกรดและจุลินทรีย์ที่สร้างมีเทนสามารถอยู่ร่วมกันได้อย่างสมดุลและมีประสิทธิภาพ (อภิชาติ ศรีภักย์, 2555)



ภาพที่ 45 ค่าสภาพความเป็นด่าง (ALK) ภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลของการกวนผสมและหมუნเวียนตะกอน

จากภาพที่ 45 ค่าสภาพความเป็นด่าง (ALK) ภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลของการกวนผสมและหมუნเวียนตะกอน จากการศึกษาพบว่า ค่า ALK ของการศึกษาผลของการไม่กวนผสมและการกวนผสมทุก ๆ 3, 6 และ 12 h มีค่าอยู่ในช่วง 5,468.06–5,955.14, 5,035.94–6,237.39, 3,130.11–5,975.12 และ 4,149.22–6,067.54 mg/L ตามลำดับ และมีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลา 30 days เท่ากับ 5,761.44, 5,779.83, 5,250.30 และ 5,510.52 mg/L ตามลำดับ โดยค่า ALK ของทั้ง 4 เงื่อนไขมีแนวโน้มที่ใกล้เคียงกัน อยู่ในช่วง 3,000–6,000 mg/L CaCO_3 โดยอัตราการกวนผสมและหมუნเวียนตะกอนทุก ๆ 3 และ 6 h สามารถรักษาเสถียรภาพของค่า ALK ให้คงที่และมีค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยค่า ALK ที่เหมาะสมต่อระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ควรอยู่ในช่วง 1,000–5,000 mg/L CaCO_3 (ชลลดา แดงประดับ, 2554) อีกทั้งยังค่า ALK ยังบ่งบอกถึงปริมาณสารบัพเฟอร์ภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งจะช่วยในการรักษาและป้องกันจุลินทรีย์ประเภทสร้างมีเทนให้ทนทานต่อสภาพความเป็นกรดที่เกิดจากกรดไขมันระเหยง่ายของวัตถุดิบตั้งต้น ค่าสภาพความเป็นด่างยังมีข้อดีคือ ถึงแม้ระบบจะมีปริมาณของกรดไขมันสูงถึง 5,000 mg/L CH_3COOH ก็จะไม่มีผลของกระบวนการทำงานของจุลินทรีย์ ถ้าปริมาณของค่าสภาพความเป็นด่างทั้งหมดเพียงพอต่อระบบผลิตก๊าซชีวภาพ (ทวิรัตน์ สเลอาด, 2554)



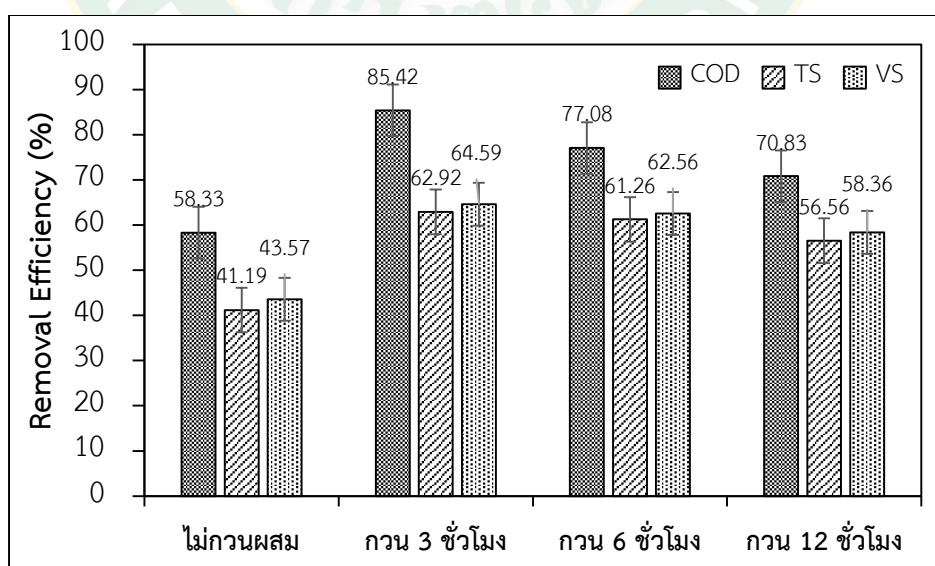
ภาพที่ 46 ค่าอัตราส่วน VFA/ALK ภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลของการกวนผสมและหมუნเวียนตะกอน

จากภาพที่ 46 ค่าอัตราส่วน VFA/ALK ภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลของการกวนผสมและหมუნเวียนตะกอน จากการศึกษาพบว่า ค่าอัตราส่วน VFA/ALK ของ

การศึกษาผลของการไม่กวนผสมและการกวนผสมทุก ๆ 3, 6 และ 12 h มีค่าอยู่ในช่วง 0.33–0.64, 0.22–0.62, 0.28–0.58 และ 0.29–0.65 ตามลำดับ และมีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลา 30 days เท่ากับ 0.42, 0.33, 0.35 และ 0.41 ตามลำดับ โดยค่าอัตราส่วน VFA/ALK จะแปรผันโดยตรงกับค่า VFA อีกทั้งยังพบว่าที่อัตราการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนทุกๆ 3 และ 6 h สามารถรักษาเสถียรภาพในการทำงานของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ โดยไม่จำเป็นต้องเติมสารเคมีใดๆ โดยค่า VFA/ALK Ratio มีความสัมพันธ์โดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงของค่า pH โดยอัตราส่วน VFA/ALK ที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ คือ ควรมีค่าต่ำกว่า 0.4 แต่ไม่ควรเกิน 0.8 (สุदारัตน์ ภัคดี, 2551) โดยค่า VFA/ALK Ratio มีค่าน้อยกว่า 0.4 แสดงว่ากำลังในการบัพเฟอร์สูง หากอัตราส่วนดังกล่าวมีค่าสูงกว่า 0.8 แสดงว่ากำลังบัพเฟอร์ของระบบมีค่าต่ำมาก ค่า pH สามารถที่จะลดลงได้อย่างรวดเร็วอีกด้วย (Meixia et al., 2014)

4. ประสิทธิภาพในการกำจัดค่า COD, TS และ VS ของการศึกษาผลของการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอน)

ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์เป็นตัวบ่งบอกถึงประสิทธิภาพในการทำงานของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ โดยการทดลองในครั้งนี้จะทำการวิเคราะห์ค่า COD, TS และ VS ตามลำดับ ทุก ๆ 3 days ตลอดระยะเวลา 30 days เจือไนภายในระบบมีการกวนและไม่กวนผสมภายในระบบ สำหรับการกวนผสมจะทำการกำหนดอัตราการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนทุก ๆ 3, 6 และ 12 h โดยแต่ละรอบจะกวนผสมและหมุนเวียนรอบละ 10 min มีผลดังต่อไปนี้

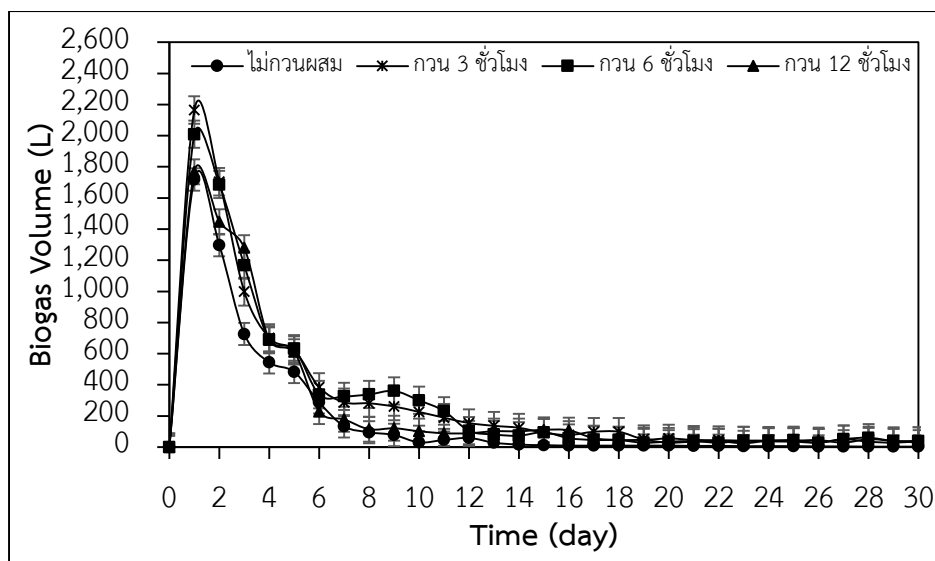


ภาพที่ 47 ประสิทธิภาพในการกำจัดค่า COD, TS และ VS ภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลของการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอน

จากภาพที่ 47 ประสิทธิภาพในการกำจัดค่า COD, TS และ VS ภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลของการกวนผสมและหมუნเวียนตะกอน จากการศึกษาพบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดค่า COD, TS และ VS สูงที่สุดของการศึกษาผลของการไม่กวนผสมและการกวนผสมทุก ๆ 3, 6 และ 12 h ตลอดระยะเวลา 30 days คือ การกวนผสมและหมუნเวียนตะกอน ทุก ๆ 3 h มีค่าเท่ากับ 85.42%, 62.92% และ 64.59% ตามลำดับ รองลงมาคือ ทุก ๆ 6, 12 h และไม่กวนผสม ตามลำดับ อีกทั้งยังพบว่าระบบผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง เมื่อระบบมีอัตราการกวนผสมและหมუნเวียนตะกอนที่มีความถี่เพิ่มมากขึ้นจะยิ่งทำให้ระบบสามารถกำจัดค่า COD, TS และ VS ได้เพิ่มมากขึ้น หรืออาจจะอธิบายได้ว่าการที่ระบบมีการกวนผสมภายในระบบสามารถลดปัญหาการเกิดชั้นตะกอนลอยได้ หรือซึ่งการกวนผสมทำให้สารอินทรีย์และจุลินทรีย์หรือแบคทีเรียในถังปฏิกรณ์ผสมกันอย่างทั่วถึงเป็นสิ่งสำคัญที่มีความสำคัญเป็นอย่างมาก โดยภายในถังปฏิกรณ์มีการกวนผสมอย่างทั่วถึงอาจจะทำให้จุลินทรีย์หรือแบคทีเรียสามารถสัมผัสกับสารอินทรีย์มากขึ้นและทั่วถึงขึ้น (Ratanatamskul and Saleart, 2016) อีกทั้งยังการกวนผสมสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์เพิ่มมากขึ้นถึง 20% เมื่อเทียบกับระบบที่ไม่มีการกวนผสมภายในระบบ

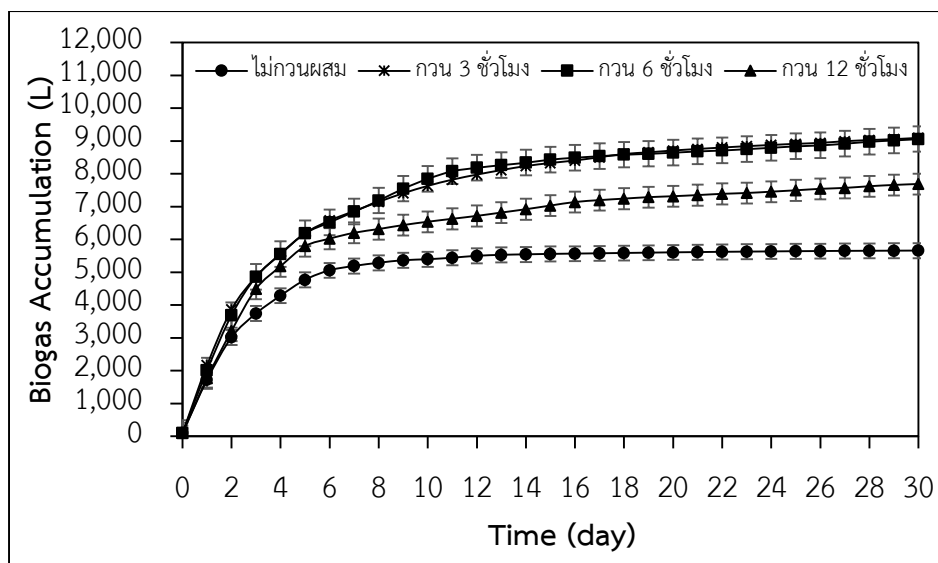
5. ปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อวัน ก๊าซชีวภาพสะสม และสัดส่วนของก๊าซมีเทน ของ การศึกษาผลของการกวนผสมและหมუნเวียนตะกอน

สำหรับก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อวันและสัดส่วนของก๊าซมีเทนของระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้งของกระบวนการศึกษาผลของการกวนและหมუნเวียนตะกอน โดยก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นส่วนมากจะประกอบด้วย ก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยปริมาณของก๊าซมีเทนที่ผลิตได้จะขึ้นอยู่กับชนิด และปริมาณของสารอินทรีย์ที่นำมาเป็นสารตั้งต้นในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ รวมถึงความสมดุล และเสถียรภาพของระบบ และปริมาณของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญในการตรวจสอบประสิทธิภาพของระบบ โดยระบบกำหนดให้มีการกวนผสมและไม่กวนผสมภายในระบบ สำหรับการกวนผสมจะทำการกำหนดอัตราการกวนผสมและหมუნเวียนตะกอนทุก ๆ 3, 6 และ 12 h โดยแต่ละรอบจะกวนผสมและหมუნเวียนรอบละ 10 min มีผลดังต่อไปนี้



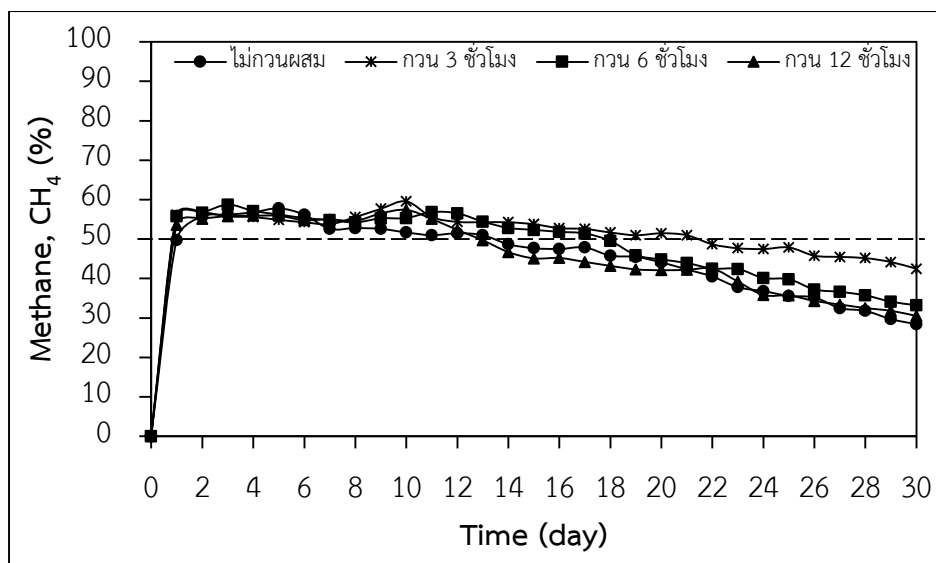
ภาพที่ 48 ปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อวันภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลของการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอน

จากภาพที่ 48 ปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อวันของการศึกษาผลของการไม่กวนผสมและการกวนผสมทุก ๆ 3, 6 และ 12 h มีค่าอยู่ในช่วง 3.18–1,718.39, 28.61–2,165.07, 28.61–2,009.29 และ 24.62–1,768.51 L/day ตามลำดับ และมีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลา 30 days ของการทดลอง เท่ากับ 188.58, 303.14, 302.03 และ 256.27 L/day ตามลำดับ ซึ่งปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นได้รับผลโดยตรงมาจากค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญของระบบข้างต้น อาทิ pH, VFA, ALK, COD, TS และ VS ตามลำดับ โดยปริมาณของก๊าซชีวภาพจะลดต่ำลงในวันที่ 3 ของทั้ง 4 เงื่อนไขการทดลอง และจะเข้าสู่สภาวะคงที่ในช่วงหลังวันที่ 12 ของทั้ง 4 เงื่อนไขการทดลอง เนื่องมาจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพนี้ใช้กระบวนการหมักแบบกะ ซึ่งเมื่อสารอินทรีย์ถูกจุลินทรีย์ใช้ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพไปจนหมดจะส่งผลโดยตรงทำให้ปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อ days ลดลงตามไปด้วย (นิลวรรณ ไชยทนต์, 2559) อีกทั้งยังระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุประเภทของแข็งไม่มีระบบการกวนผสมภายในระบบจะทำให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพลดลงมากถึง 80% (Libin et al., 2015)



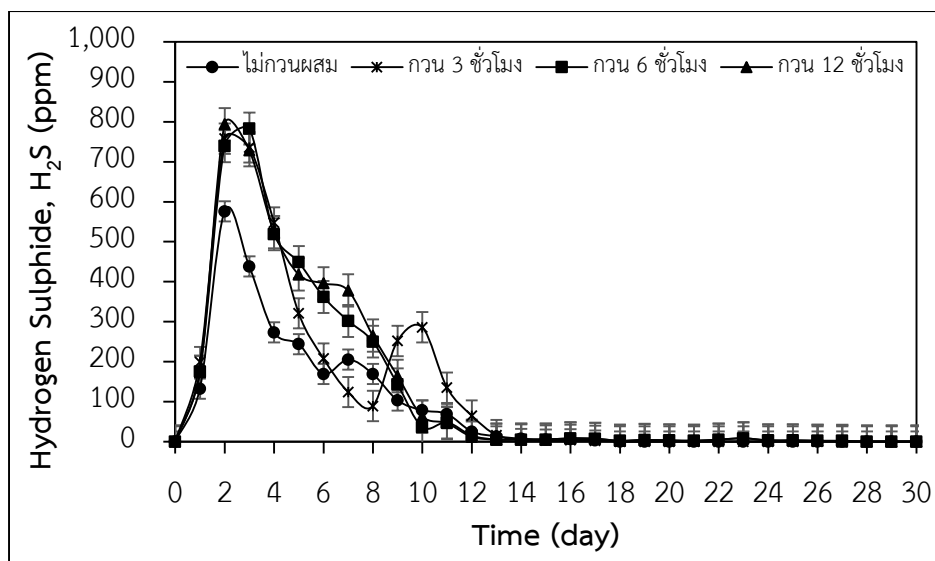
ภาพที่ 49 ปริมาณของก๊าซชีวภาพสะสมภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลของการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอน

จากภาพที่ 49 ปริมาณของก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลา 30 days ของการศึกษาคผลของการไม่กวนผสมและการกวนผสมทุก ๆ 3, 6 และ 12 h มีค่าเท่ากับ 5,657.48, 9,094.25, 9,060.86 และ 7,688.12 L ตามลำดับ โดยปริมาณของก๊าซชีวภาพสะสมมากที่สุด คือ กวนทุก ๆ 3 h รองลงมาคือ ทุก ๆ 6, 12 h และไม่กวนผสม ตามลำดับ เนื่องจากภายในระบบมีการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนส่งผลทำให้สารอินทรีย์มีการสัมผัสกับจุลินทรีย์ได้มากกว่าการที่ระบบไม่มีการกวนผสม โดยการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนทุก 3, 6 และ 12 h สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพได้มากกว่าระบบที่ไม่มีการกวนผสม เท่ากับ 60.75%, 60.16% และ 35.89% ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าเมื่อทำการเพิ่มอัตราการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนมากยิ่งขึ้นส่งผลโดยตรงทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้มากยิ่งขึ้นจึงทำให้มีอัตราการผลิตของก๊าซชีวภาพมากขึ้นถึงแม้ปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับปริมาณของสารอินทรีย์ที่เข้าระบบก็ตาม (ทวินันท์ สเลอาด, 2554)



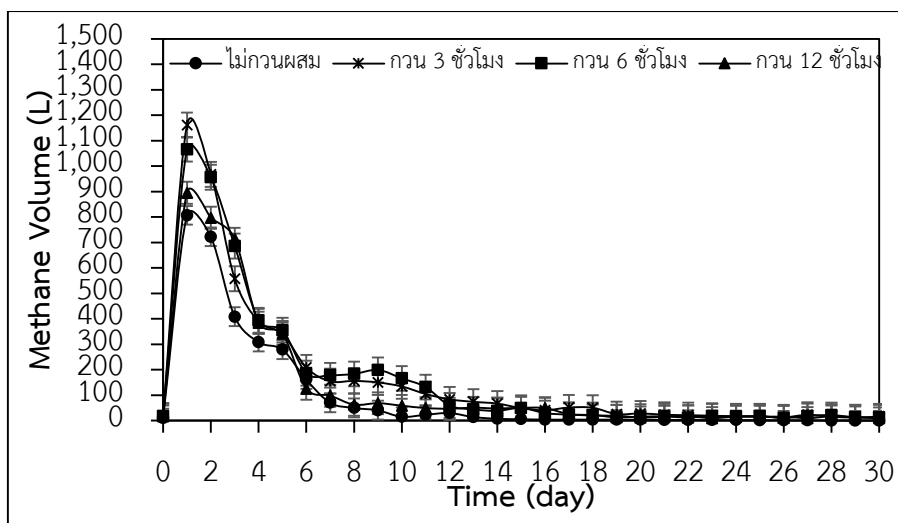
ภาพที่ 50 สัดส่วนของก๊าซมีเทนภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลของการกวนผสมและหมუნเวียนตะกอน

จากภาพที่ 50 สัดส่วนของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นของการศึกษาผลของการไม่กวนผสมและการกวนผสมทุก ๆ 3, 6 และ 12 h มีค่าอยู่ในช่วง 28.4–57.7%, 42.5–59.6%, 33.2–58.7% และ 30.5–57.4% ตามลำดับ และมีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลา 30 days เท่ากับ 43.2%, 50.9%, 49.8% และ 44.9% ตามลำดับ โดยความเข้มข้นของก๊าซมีเทนจะคงที่ในช่วง 1–14 วันของการทดลอง จากนั้นความเข้มข้นของก๊าซมีเทนจะเริ่มลดลงเรื่อย ๆ ความเข้มข้นของมีเทนจากการทดลองจะเกิดขึ้นระยะเวลาสั้น เนื่องจากเป็นการหมักแบบกะ (Yeqing et al., 2014) ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์ออกมาในรูปของก๊าซชีวภาพ (Stewart and Marcos, 2017) เมื่อระยะเวลาผ่านไปทำให้ปริมาณสารอินทรีย์ภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพลดลง (โสภี พันอินทร์, 2560; ชลลดา แดงประดับ, 2554) โดยที่อัตราการกวนผสมและหมუნเวียนตะกอนทุก ๆ 3 h สามารถรักษาเสถียรภาพของสัดส่วนของก๊าซมีเทนให้อยู่ในช่วง 50% ได้ดีกว่าการกวนผสมและหมუნเวียนตะกอนทุก ๆ 6, 12 h และไม่กวนผสม ตามลำดับ เนื่องจากการที่สารอินทรีย์สัมผัสกับจุลินทรีย์มากยิ่งขึ้นส่งผลโดยตรงทำให้จุลินทรีย์สามารถนำสารตั้งต้นจำพวกกรดอินทรีย์ระเหยง่ายไปใช้ในกระบวนการผลิตก๊าซมีเทนได้อย่างมีประสิทธิภาพ และลดกระบวนการสะสมของกรดอินทรีย์ภายในระบบได้อีกทางหนึ่งด้วย (ทวินันท์ สเลอาด, 2554)



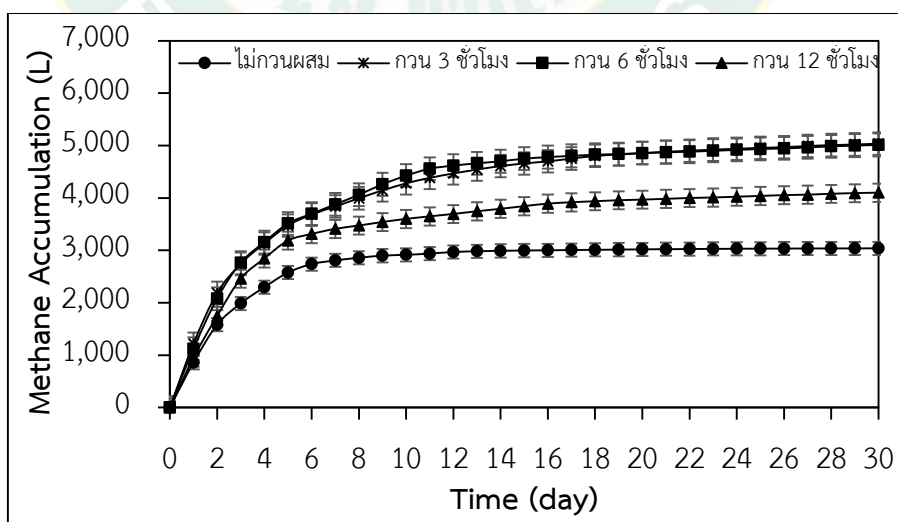
ภาพที่ 51 ปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลของการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอน

จากภาพที่ 51 ปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ของการศึกษาผลของการไม่กวนผสมและการกวนผสมทุก ๆ 3, 6 และ 12 h มีค่าอยู่ในช่วง 0-576, 0-758, 0-783 และ 0-794 ppm ตามลำดับ และมีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลา 30 days เท่ากับ 78.59, 117.31, 121.59 และ 126.16 ppm ตามลำดับ โดยทั้ง 4 เงื่อนไขของการทดลองจะมีปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์สูงในช่วง 3 วันแรกของการทดลอง หลังจากนั้นจะมีปริมาณลดลงอย่างเห็นได้ชัด จนในวันที่ 12 ของทั้ง 4 เงื่อนไขการทดลอง ปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์จะลดลงเท่ากับ 0 ppm เนื่องจากสารอินทรีย์จำพวก ลิกโนเซลลูโลสเป็นสารตั้งต้นที่มีองค์ประกอบของซัลเฟอร์ที่ต่ำจึงทำให้ปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นภายในระบบมีค่าที่ค่อนข้างต่ำมากกว่าสารตั้งต้นประเภทของเหลว จำพวก น้ำเสีย เป็นต้น (Ramakrishnan and Surampalli, 2012)



ภาพที่ 52 ปริมาณของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อวันภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลของการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอน

จากภาพที่ 52 ปริมาณของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อวันของการศึกษาผลของการไม่กวนผสมและการกวนผสมทุก ๆ 3, 6 และ 12 h มีค่าอยู่ในช่วง 0.90–855.76, 12.65–1,216.77, 10.64–1,121.18 และ 8.85–947.92 L/day ตามลำดับ และมีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลา 30 days เท่ากับ 94.92, 157.51, 156.84 และ 128.49 L/day ตามลำดับ ซึ่งปริมาณของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจะแปรผันโดยตรงกับสัดส่วนของก๊าซมีเทนที่ผลิตได้

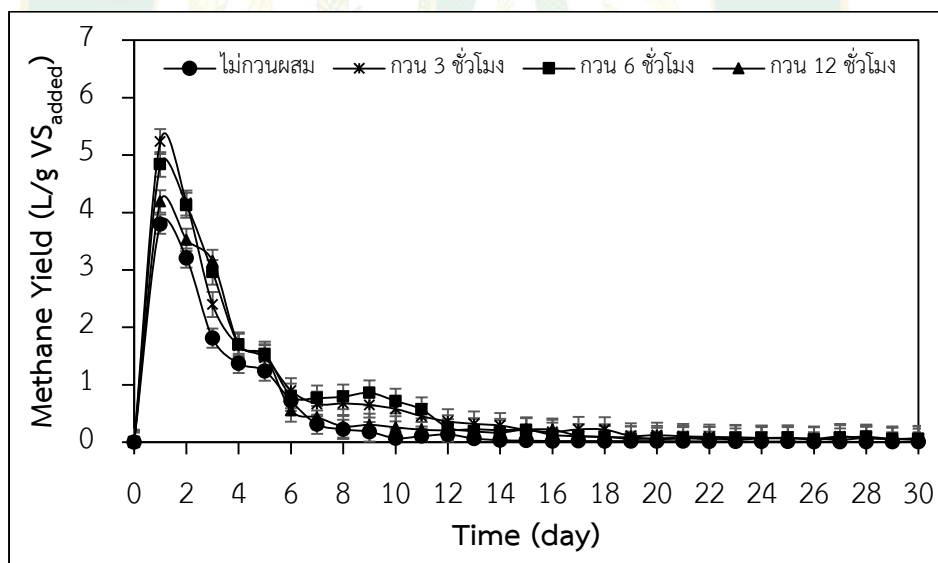


ภาพที่ 53 ปริมาณของก๊าซมีเทนสะสมภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษาผลของการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอน

จากภาพที่ 53 ปริมาณของก๊าซมีเทนสะสมตลอดระยะเวลา 30 days ของการศึกษารวมของการไม่กวนผสมและการกวนผสมทุก ๆ 3, 6 และ 12 h มีค่าเท่ากับ 3,037.41, 5,037.35, 5,012.75 และ 4,099.54 L ตามลำดับ ซึ่งปริมาณของก๊าซมีเทนสะสมจะแปรผันโดยตรงกับปริมาณของก๊าซมีเทนที่สามารถผลิตได้ โดยที่อัตราการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนทุก ๆ 3 h จะให้ปริมาณของก๊าซมีเทนสะสมมากที่สุด อีกทั้งยังมีค่าใกล้เคียงกันกับอัตราการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนทุก ๆ 6 h

6. ผลผลิตของก๊าซมีเทนจำเพาะของการศึกษารวมของการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอน

สำหรับผลผลิตของก๊าซมีเทนจำเพาะ คือ ปริมาณของก๊าซมีเทนต่อการย่อยสลายของสารอินทรีย์ต่อหน่วย โดยในขั้นตอนนี้จะทำการพิจารณาปริมาณของผลผลิตของก๊าซมีเทนต่อหน่วยของแข็งระเหยง่าย (VS) เนื่องจากวัตถุประสงค์ที่ได้ทำการผลิตก๊าซชีวภาพเป็นของแข็ง คือ วัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวาน โดยมีเงื่อนไขภายในระบบมีการกวนและไม่กวนผสมภายในระบบ สำหรับการกวนผสมจะทำการกำหนดอัตราการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนทุก ๆ 3, 6 และ 12 h โดยแต่ละรอบจะกวนผสมและหมุนเวียนรอบละ 10 min มีผลดังต่อไปนี้



ภาพที่ 54 ผลผลิตของก๊าซมีเทนจำเพาะภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพของกระบวนการศึกษารวมของการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอน

จากภาพที่ 54 ผลผลิตของก๊าซมีเทนจำเพาะของการศึกษารวมของการไม่กวนผสมและการกวนผสมทุก ๆ 3, 6 และ 12 h มีค่าอยู่ในช่วง 0.004–3.797, 0.054–5.235, 0.712–4.837 และ 0.039–4.192 L CH₄/g VS_{added} ตามลำดับ และมีค่าเฉลี่ยตลอดระยะเวลา 30 days เท่ากับ 0.415,

0.771, 0.692 และ 0.580 L CH₄/g VS_{added} ตามลำดับ โดยอัตราของการกวนผสมที่ให้ผลผลิตของก๊าซมีเทนมากที่สุดคือ การกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนทุก ๆ 3 h ซึ่งโดยปกติแล้วของผลผลิตของก๊าซมีเทนจำเพาะที่เกิดจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพแบบ Pre-A72 จะอยู่ในช่วง 0.174–2.249 L CH₄/g VS_{added} (ภัทรวดี สุขสุวรรณ, 2557 และ Karim et al., 2003) โดยผลผลิตของก๊าซมีเทนจำเพาะจะแปรผันโดยตรงกับปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อวัน สัดส่วนของก๊าซมีเทน รวมถึงปริมาณของสารอินทรีย์ระเหยได้ที่เข้ายังระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งปริมาณของสารอินทรีย์ระเหยได้ของวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานที่ผ่านการปรับสภาพแบบ Pre-A72 จุลินทรีย์สามารถนำสารอินทรีย์เหล่านี้ไปใช้ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพทำให้ผลผลิตของก๊าซมีเทนจำเพาะมีค่าที่สูงอย่างเห็นได้ชัด

7. สรุปผลการทดสอบผลของการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอน

สำหรับการศึกษาผลของการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง ระบบมีการกวนและไม่กวนผสมภายในระบบ สำหรับการกวนผสมจะทำการกำหนดอัตราการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนทุก ๆ 3, 6 และ 12 h โดยแต่ละรอบจะกวนผสมและหมุนเวียนรอบละ 10 min จากการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์สำคัญ สำหรับกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพข้างต้น สามารถสรุปได้ว่าเงื่อนไขที่สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้มากที่สุดคือ อัตราการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนทุก ๆ 3 h โดยแต่ละรอบจะกวนผสมและหมุนเวียนรอบละ 10 min ความเร็วรอบ เท่ากับ 60 rpm ตั้งแต่เวลา 06.00–18.00 น. แบบ Day Time ทำการศึกษาในระดับ Pilot Scale ภายใต้อุณหภูมิสภาพแวดล้อม อีกทั้งยังพบว่า การกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนของค่าของแข็งทั้งหมด (TS) ที่มากกว่า 20% ไม่จำเป็นต้องกวนผสมตลอดเวลา แต่เพียงต้องกวนเป็นครั้งคราว เพื่อให้สารอินทรีย์กับจุลินทรีย์ได้เกิดการผสมกันเข้ากันมากยิ่งขึ้น เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพได้อีกทางหนึ่ง

ผลของการออกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของต้นแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพ จากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง

สำหรับการออกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะพิจารณาถึงปริมาณของก๊าซชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้นตลอดระยะเวลา 30 days เพื่อการทำนายถึงปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น สำหรับการพิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในครั้งนี้จะพิจารณาเฉพาะเงื่อนไขที่ให้ผลผลิตของก๊าซชีวภาพสะสมมากที่สุด คือ เงื่อนไขการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนทุก ๆ 3 h โดยใช้ลักษณะของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ชนิดสมการถดถอยแบบพหุนาม (Polynomial Regressions) ซึ่ง

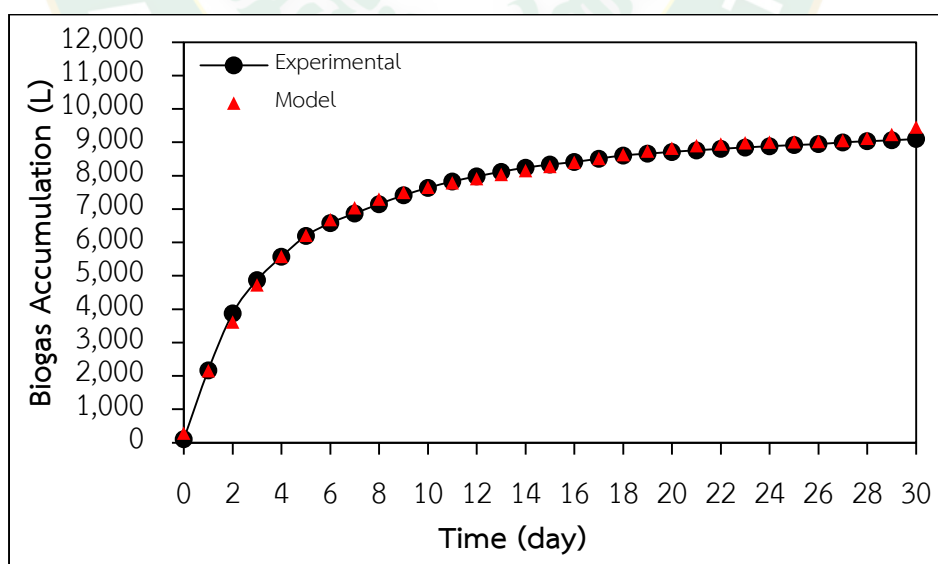
หลังทำการทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยใช้สมการแบบโพลิโนเมียล กำลัง 2, 3, 5 และ 6 พบว่าที่แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ชนิดโพลิโนเมียล กำลัง 5 จะให้ค่า R^2 ใกล้เคียง 1.000 มากที่สุด (นงลักษณ์ วิรัชชัย, 2553) โดย R^2 มีค่าเท่ากับ 0.998 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรต้นในแนวแกน X ที่มีความสัมพันธ์ต่อตัวแปรตามในแนวแกน Y อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งสมการที่ได้จากการทำแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ จะแสดงดังในสมการที่ 8 ดังนี้

$$Y = 0.005X^5 - 0.451X^4 + 15.247X^3 - 249.291X^2 + 2,104.425X + 278.354$$

สมการที่ 8

โดย Y คือ ปริมาณของก๊าซชีวภาพสะสม, L
X คือ เวลา, day

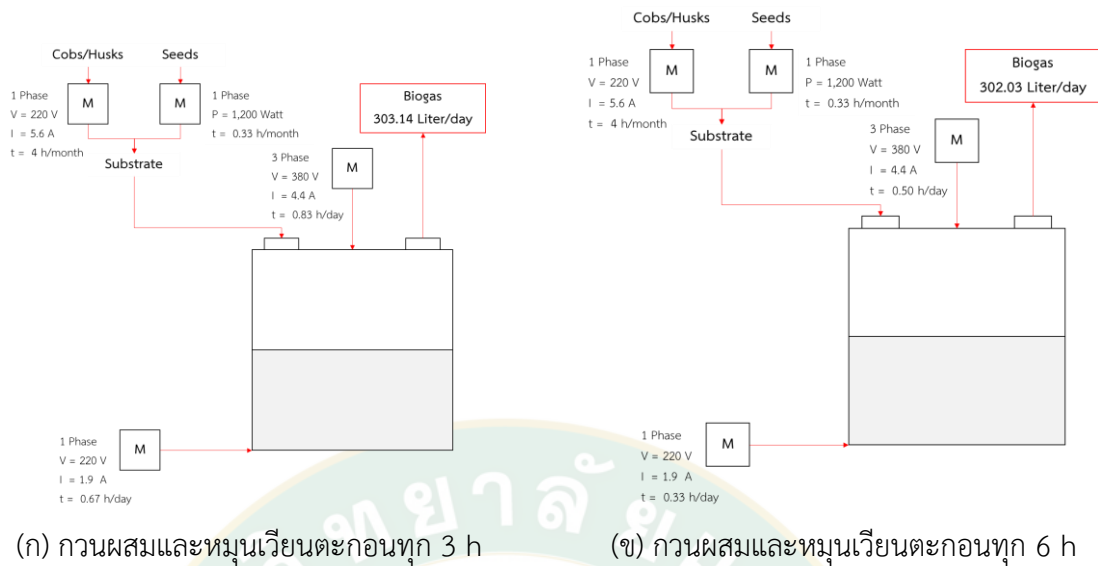
สำหรับการพิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์จะทำการเปรียบเทียบปริมาณของก๊าซชีวภาพสะสมที่ได้จากการทดลองเทียบกับค่าที่ได้จากการออกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ดังแสดงในภาพที่ 55 พบว่าค่าที่ได้จากการออกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีค่าที่ใกล้เคียงกันกับแบบจำลอง ดังนั้นรูปแบบของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์นี้สามารถนำมาใช้ในการทำนายปริมาณของก๊าซชีวภาพสะสมที่จะเกิดขึ้นของระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งของข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้งได้อย่างมีนัยสำคัญ



ภาพที่ 55 ปริมาณของก๊าซชีวภาพสะสมที่ได้จากการทดลองเทียบกับสมการแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ผลการวิเคราะห์ต้นทุนของพลังงานต่อหน่วยของต้นแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพ จากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง

สำหรับการวิเคราะห์ต้นทุนพลังงานต่อหน่วยของต้นแบบระบบการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวาน ด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง จะทำการวิเคราะห์ตั้งแต่ต้นทุนของการก่อสร้างระบบ ต้นทุนวัตถุดิบ ต้นทุนทางพลังงาน จนถึงผลตอบแทนที่ได้รับจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพ จะทำการวิเคราะห์เฉพาะเงื่อนไขการทดลองที่ให้ผลผลิตของก๊าซชีวภาพที่ดีที่สุด ในเงื่อนไขของการทดลองผลการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง เมื่อพิจารณาถึงผลผลิตของก๊าซชีวภาพของทั้ง 4 เงื่อนไขการทดลอง คือ ระบบมีการกวนและไม่กวนผสมภายในระบบ สำหรับการกวนผสมจะทำการกำหนดอัตราการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนทุก ๆ 3, 6 และ 12 h โดยแต่ละรอบจะกวนผสมและหมุนเวียนรอบละ 10 min ตั้งแต่เวลา 06.00–18.00 น. แบบ Day Time พบว่าที่เงื่อนไขการทดลองการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนทุก ๆ 3 และ 6 h ตามลำดับ มีปริมาณของผลผลิตของก๊าซชีวภาพสะสมตลอดระยะเวลา 30 days ที่ใกล้เคียงกัน เท่ากับ 9,094.25 และ 9,060.86 L ตามลำดับ เมื่อทำการเพิ่มความถี่ของการกวนผสมทุก ๆ 6 h เป็นทุก ๆ 3 h สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นได้เพียง 0.37% เท่านั้น ซึ่งระบบการผลิตก๊าซชีวภาพนี้จะเน้นไปในเรื่องของการนำก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ไปทดแทนก๊าซหุงต้มเป็นหลัก ดังนั้นจึงต้องทำการเปรียบเทียบต้นทุนพลังงานต่อหน่วยของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ 2 เงื่อนไขคือ การกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนทุก ๆ 3 และ 6 h ดังแสดงในภาพที่ 56 เพื่อวิเคราะห์หาต้นทุนการผลิตก๊าซหุงต้มต่อหน่วยของการผลิตจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักแห้งที่เหมาะสม โดยมีรายละเอียดการพิจารณาดังต่อไปนี้



ภาพที่ 56 ผลผลิตก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อปีของระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวาน

อายุการใช้งานของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ	10	years
ระยะเวลาการทำงานของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ	300	days/year
ค่าบำรุงรักษาระบบผลิตก๊าซชีวภาพ	10,000	Baht/year
ค่าจ้างผู้ดูแลระบบผลิตก๊าซชีวภาพ (เต็มสารอาหารเข้าสู่ระบบ)		
จำนวน 1 คน ค่าแรง 100 Baht/day	30,000	Baht/year
ราคาชุดถังปฏิกรณ์ของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ	46,000	Baht
ผลตอบแทนที่ได้จากระบบผลิตก๊าซชีวภาพ		
ปุ๋ยชีวภาพ ลิตรละ 30 Baht ผลิตได้ 10 L/day	90,000	Baht/year
ก๊าซชีวภาพ ($\text{CH}_4 = 60\%$) มีค่าความร้อน	20.93	MJ/m^3
ทดแทนก๊าซหุงต้ม (LPG)	0.46	kg LPG/m^3
ราคาก๊าซหุงต้ม (LPG)	24	Baht/kg LPG
ราคาค่าไฟฟ้าต่อหน่วย (การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, 2562)	4.21	Baht/kW-h

ตารางที่ 9 การวิเคราะห์ต้นทุนการผลิตก๊าซหุงต้ม (LPG) ต่อหน่วย

การวิเคราะห์	รายการ	ปริมาณ		หน่วย
		3 h	6 h	
อายุการใช้งานของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ (N)		10.00	10.00	Year
ระยะเวลาการทำงานของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ (t_{op})		300.00	300.00	days/year
อัตราดอกเบี้ยส่วนลด (r)		10.00	10.00	month/year
		6.87	6.87	%
ค่าใช้จ่ายในการผลิตก๊าซชีวภาพ	ค่าบำรุงรักษาระบบผลิตก๊าซชีวภาพ	10,000.00	10,000.00	Baht/year
ต่อปี (PEC_1)	ค่าจ้างผู้ดูแลระบบผลิตก๊าซชีวภาพ	30,000.00	30,000	Baht/year
	มูลค่าไฟฟ้าที่ใช้ของระบบผลิตก๊าซชีวภาพ	7,793.30	4,463.35	Baht/year
	มูลค่ารวมของค่าใช้จ่ายในการผลิตก๊าซชีวภาพต่อปี	47,793.30	44,463.35	Baht/year
ผลตอบแทนที่ได้จากระบบผลิต	ปุ๋ยชีวภาพ	900,000.00	900,000.00	Baht/year
ก๊าซชีวภาพต่อปี (PEC_2)	ก๊าซหุงต้ม	2,928.33	2,917.61	kg LPG/year
	มูลค่ารวมของผลตอบแทนต่อปี	70,279.98	70,022.64	Baht/year
		970,279.98	970,022.64	Baht/year
		922,486.67	925,559.28	Baht/year
ต้นทุนการผลิตเชื้อเพลิงก๊าซหุงต้มตลอดอายุการใช้งาน		337,706.66	314,177.28	Baht
ผลรวมอัตราการผลิตก๊าซหุงต้มตลอดอายุการใช้งาน		20,691.55	20,615.78	Kg LPG

การวิเคราะห์	รายการ		ปริมาณ		หน่วย
	3 h	6 h	3 h	6 h	
ต้นทุนการผลิตก๊าซหุงต้มต่อหน่วยของการผลิต			18.54	17.47	Baht/kg LPG
$LEC = [\ln(V) + \sum_{t=1}^N (PEC_1 / (1 + r)^t)] / [\sum_{t=1}^N ((W_{\text{Biogas}} \times t_{\text{OP}}) / (1 + r)^t)]$					

จากตารางที่ 9 เมื่อทำการเปรียบเทียบต้นทุนพลังงานต่อหน่วยของการผลิตก๊าซหุงต้มจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง 2 เpsilon คือ การคำนวณผลสมและหมุนเวียนระยะก่อนทุก ๆ 3 และ 6 h จากการศึกษาพบว่าต้นทุนการผลิตก๊าซหุงต้มต่อหน่วยจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมีค่าเท่ากับ 18.54 และ 17.47 Baht/kg LPG ตามลำดับ และมีต้นทุนของก๊าซหุงต้มที่ถูกกว่าราคาของก๊าซหุงต้มตามท้องตลาดมากถึง 5.46 และ 6.53 Baht/kg LPG โดยสามารถพิจารณาได้ว่าถึงแม้จะสนใจการคำนวณผลสมและหมุนเวียนทุก ๆ 3 h จะให้ปริมาณของก๊าซชีวภาพมากกว่าการคำนวณผลสมและหมุนเวียนทุก ๆ 6 h แต่เมื่อทำการพิจารณาถึงต้นทุนการผลิตก๊าซหุงต้มต่อหน่วยกลับพบว่าที่อัตราการการคำนวณผลสมและหมุนเวียนทุก ๆ 6 h จะมีต้นทุนการผลิตก๊าซหุงต้มต่อหน่วยถูกกว่าอัตราการคำนวณผลสมและหมุนเวียนทุก ๆ 3 h มากถึง 5.79% ดังนั้นในความเหมาะสมของการเลือกอัตราการการคำนวณผลสมและหมุนเวียนระยะก่อนของระบบผลิตก๊าซชีวภาพด้วยการหมักแห้งจะเลือกใช้อัตราการการคำนวณผลสมและหมุนเวียนทุก ๆ 6 h

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษากระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวาน โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ ขนาด 1,000 L ทำการศึกษาในระดับ Pilot Scale ภายใต้สภาวะการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนแบบแห้ง ที่อุณหภูมิตามสภาพแวดล้อม ค่าของแข็งเริ่มต้นทั้งหมด (TS) เท่ากับ 25% (w/v) ระบบมีลักษณะการป้อนวัสดุหมักแบบกะ (Batch Fermentation) วัตถุดิบที่ใช้คือ วัสดุเหลือทิ้งของข้าวโพดหวาน ประกอบไปด้วย ชัง เปลือก และเมล็ดคั่วทิ้งในสัดส่วน 54:44:2 (w/w) หัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้คือ กากตะกอนมูลสุกร และกากตะกอนน้ำเสียในสัดส่วน 2:1 (v/v) อัตราส่วนของวัตถุดิบต่อหัวเชื้อจุลินทรีย์ (F/I Ratio) เท่ากับ 1 kg : 4 L เป็นระยะเวลาในการทดลองจำนวน 30 days โดยมีองค์ประกอบของงานวิจัยทั้งหมด 5 ส่วน ประกอบไปด้วยส่วนที่ 1 ผลของการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบส่งผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวาน ด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง ส่วนที่ 2 ผลของการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง ส่วนที่ 3 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของต้นแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง ส่วนที่ 4 การวิเคราะห์หาต้นทุนทางพลังงานต่อหน่วยของต้นแบบผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง และส่วนที่ 5 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ในการลงทุนสร้างต้นแบบผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง ขนาด 1,000 L โดยสามารถสรุปผลการศึกษาดังนี้

ส่วนที่ 1 ผลของการปรับสภาพเบื้องต้นของวัตถุดิบจะใช้วิธีการในการปรับสภาพ แบ่งออกเป็น 2 กระบวนการ คือ การปรับสภาพเชิงเคมีด้วยด่าง NaOH 2% (w/v) เป็นระยะเวลา 48 h และการปรับสภาพด้วยกระบวนการแบบ Pre-acidification เป็นระยะเวลา 72 h โดยมีเงื่อนไขการทดลองตามอัตราการกวนผสมจะทำการกำหนดอัตราการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนทุก ๆ 3 h โดยแต่ละรอบจะกวนผสมและหมุนเวียนรอบละ 10 min ตั้งแต่เวลา 06.00–18.00 น. จากการศึกษาพบว่าที่การปรับสภาพแบบ Pre-acidification เป็นระยะเวลา 72 h ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดค่า COD, TS และ VS ดีที่สุด เท่ากับ 85.42%, 62.92% และ 64.59% ตามลำดับ ซึ่งมากกว่าการปรับสภาพด้วยด่าง NaOH 2% (w/v) เป็นระยะเวลา 48 h มากถึง 20% ซึ่งการปรับสภาพด้วยกระบวนการแบบ Pre-acidification เป็นระยะเวลา 72 h จะให้ปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อ

วัน และก๊าซชีวภาพสะสม เท่ากับ 293.36 L/day และ 9,094.24 L สัดส่วนของก๊าซมีเทนสูงสุด และ สัดส่วนของก๊าซมีเทนเฉลี่ย เท่ากับ 59.6% และ 49.5% ตามลำดับ รวมถึงให้ผลผลิตของก๊าซมีเทน จำเพาะ เท่ากับ 0.766 L CH₄/g VS_{added}

ส่วนที่ 2 ผลของการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนที่ส่งผลต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ จากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง โดยได้ทำการกำหนดให้มีการกวนและ ไม่กวนผสมภายในระบบ สำหรับการกวนผสมจะทำการกำหนดอัตราการกวนผสมและหมุนเวียน ตะกอนทุก ๆ 3, 6 และ 12 h โดยแต่ละรอบจะกวนผสมและหมุนเวียนรอบละ 10 min ตั้งแต่เวลา 06.00–18.00 น. แบบ Day Time จากการศึกษาพบว่าที่อัตราการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนทุก ๆ 3 h ให้ประสิทธิภาพในการกำจัดค่า COD, TS และ VS ดีที่สุด เท่ากับ 85.42%, 62.92% และ 64.59% ตามลำดับ อีกทั้งยังมีปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นต่อวัน และก๊าซชีวภาพสะสมมากที่สุด เท่ากับ 293.36 L/day และ 9,094.24 L สัดส่วนของก๊าซมีเทนสูงสุด และสัดส่วนของก๊าซมีเทนเฉลี่ย มากที่สุด เท่ากับ 59.6% และ 49.5% ตามลำดับ รวมถึงให้ผลผลิตของก๊าซมีเทนจำเพาะ เท่ากับ 0.766 L CH₄/g VS_{added}

ส่วนที่ 3 การออกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของต้นแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุ เหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง จะทำการพิจารณาเฉพาะเงื่อนไขที่ให้ผลผลิต ของก๊าซชีวภาพสะสมมากที่สุด ตลอดระยะเวลา 30 days คือ เงื่อนไขการกวนผสมและหมุนเวียน ตะกอนทุก ๆ 3 h เพื่อทำการออกแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่จะใช้ทำนายถึงปริมาณของก๊าซ ชีวภาพที่เกิดขึ้น จากการศึกษาพบว่าลักษณะของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ชนิด สมการถดถอย แบบโพลีโนเมียล (Polynomial Regressions) กำลัง 5 จะให้ค่า R² มีค่าเท่ากับ 0.998 ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ของตัวแปรต้นในแนวแกน X (Time, Day) ที่มีความสัมพันธ์โดยตรงต่อตัวแปร ตามในแนวแกน Y (Biogas Accumulation, L) อย่างมีนัยสำคัญ โดยจะมีลักษณะของสมการ ดังนี้
$$Y = 0.005X^5 - 0.451X^4 + 15.247X^3 - 249.291X^2 + 2,104.425X + 278.354$$

ส่วนที่ 4 การวิเคราะห์หาต้นทุนทางพลังงานต่อหน่วยของต้นแบบผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุ เหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง โดยต้นทุนการผลิตก๊าซหุงต้มต่อหน่วยของ ระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่ให้ค่าน้อยที่สุดคือ การกวนผสมและหมุนเวียนทุก ๆ 6 h มีค่าเท่ากับ 17.47 Baht/kg LPG โดยให้ต้นทุนการผลิตก๊าซหุงต้มต่อหน่วยถูกกว่าอัตราการกวนผสมและหมุนเวียนทุก ๆ 3 h มากถึง 5.79% ดังนั้นในการพิจารณาถึงความเหมาะสมของกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจาก วัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้งจะเลือกการเลือกอัตราการกวนผสมและ หมุนเวียนตะกอนทุก ๆ 6 h โดยอัตราการกวนผสมของระบบผลิตก๊าซชีวภาพที่ค่าของแข็งทั้งหมด (TS) ที่มากกว่า 20% ไม่จำเป็นต้องกวนผสมตลอดเวลา แต่เพียงต้องกวนเป็นครั้งคราว เพื่อให้

สารอินทรีย์กับจุลินทรีย์ได้เกิดการผสมกันเข้ากันมากยิ่งขึ้น เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพได้อีกทางหนึ่ง

ข้อเสนอแนะ

1. ระบบควรมีการศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานต่อหัวเชื้อภาคตะกอนจุลินทรีย์ที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ
2. ระบบควรมีการศึกษาผลของการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนแยกออกจากกัน เพื่อดูว่าระบบไหนให้ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพที่ดีกว่ากัน
3. ระบบควรมีการศึกษาผลของการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนแบบ 24 h/day เทียบกับการกวนผสมแบบ 12 h/day เพื่อดูว่าระบบไหนให้ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพที่ดีกว่ากัน
4. ระบบควรมีลักษณะของการป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง และแบบต่อเนื่อง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพให้สูงขึ้น
5. ระบบควรมีการศึกษาผลของระยะเวลาการเก็บกักของวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการแบบ Pre-acidification ที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ
6. ระบบควรมีการศึกษานำภาคตะกอนที่เกิดจากกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์ในด้านอื่น ๆ เช่น การผลิตปุ๋ยชีวภาพ หรือ การนำมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลทั้งอัดเม็ดหรืออัดแท่ง เป็นต้น เพื่อเป็นการจัดการวัสดุเหลือทิ้งของข้าวโพดหวานอย่างครบวงจร

บรรณานุกรม

- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2553. **คู่มือการปฏิบัติงานเกี่ยวกับการออกแบบ การผลิต การควบคุมคุณภาพและการใช้ก๊าซชีวภาพ (Biogas) สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม.** (พิมพ์ครั้งที่ 1). 75/6 ถนนพระรามที่ 6 แขวงทุ่งพญาไท เขตราชเทวี กรุงเทพฯ 10400.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. 2550. **เยาวชนไทยร่วมใจประหยัดพลังงาน อาคารอนุรักษ์พลังงานเฉลิมพระเกียรติ.** คัดมาจากเอกสารเผยแพร่โครงการประหยัดไฟฟ้า กำไร 2 ต่อ (ระยะที่ 2) 60 ล้านไทยลดใช้พลังงาน.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. 2556. **คู่มือไบโอแก๊สเซฟตี้.** (พิมพ์ครั้งที่ 1). ศูนย์บริการวิชาการด้านพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน 17 เซิงสะพานกษัตริย์ศึก แขวงรองเมือง เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 13030.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. 2557. **คู่มือการพัฒนาและการลงทุนผลิตพลังงานทดแทนชุดที่ 5 พลังงานก๊าซชีวภาพ.** (พิมพ์ครั้งที่ 1). บริษัท เอเบิลคอนซัลแตนท์ จำกัด ถนนนวลจันทร์ แขวงนวลจันทร์ เขตบึงกุ่ม กรุงเทพฯ 10230.
- กระทรวงพลังงาน. 2558. **แผนพัฒนาพลังงานทดแทนและพลังงานทางเลือก [ออนไลน์].** แหล่งที่มา. <http://www.dede.go.th/download/files/AEDP2015.pdf>. (27 พฤศจิกายน 2560).
- กิตติยา ป้อมเงิน, ประภา ชีวะสลามและรัชพล พะวงศรีรัตน์. 2559. **การผลิตแก๊สชีวภาพจากผักตบชวาที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพด้วยการนึ่งร่วมกับมูลวัวโดยกระบวนการหมักแบบกะ.** วารสารมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. ปีที่ 8 ฉบับที่ 3 กันยายน-ธันวาคม 2559. หน้า 129-139.
- กิตติยา ป้อมเงิน, ประภา ชีวะสลามและรัชพล พะวงศรีรัตน์. 2560. **การผลิตแก๊สชีวภาพจากต้นธูปฤาษีที่ผ่านการปรับสภาพ (*Typha angustifolia* L.) ร่วมกับมูลวัวโดยกระบวนการหมักแบบกึ่งกะ.** วารสารมหาวิทยาลัยศิลปากร. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. ปีที่ 4 ฉบับที่ 5 เดือน กันยายน-ตุลาคม 2560. หน้า 28-41.
- กัญญาภักดิ์ ตาจันทิก. 2556. **การประเมินการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ของการผลิตไฟฟ้าจากหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ด้วยการใช้ระบบหมักไร้อากาศแบบถังกวนสมบูรณ์.** วิทยานิพนธ์. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. บัณฑิตวิทยาลัย. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

- จุฑาภรณ์ ชนะถาวร. 2560. การผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมของวัสดุเหลือทิ้งคาร์บอนสูง และน้ำเสียจากการเตรียมเบตดิ่งไส้เดือน. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- จุฑาภรณ์ ชนะถาวร และพัชรี อินธนู. 2560. การใช้ประโยชน์จากของเสียอุตสาหกรรมข้าวโพดหวานกระป๋อง สำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ. การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 13. 31 พฤษภาคม–2 มิถุนายน 2560 ณ โรงแรม ดิเอ็มเพรส เชียงใหม่.
- จूरีย์ ช่วยชาติ. 2555. การผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนดีแคเตอร์โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มร่วมกับมูลสุกร. โรงเรียนบ้านคลองโตน อำเภอวังวิเศษ จังหวัดตรัง.
- จรรยา อินเอก, อำไพ กลีบทับลังค์และธีระพันธ์จุลแก้ว. 2553. การเปรียบเทียบปริมาณชีวภาพจากการหมักมูลสุกรร่วมกับใบยางพาราและมูลสุกรร่วมกับทางปาล์ม.
- ชาญ แซ่ม้า 2553. ผลิตชีวภาพจากพืชผักร่วมกับส่วนผสมของมูลสุกรและมูลโค. โรงเรียนบ้านตากประชาวิทยาการ อำเภอบ้านตาก จังหวัดตาก.
- ชมนันท์ มณีศรี และเสนีย์ กาญจนวงศ์. 2558. ผลของแหล่งตะกอนและอัตราการการหมุนเวียนต่อการผลิตกรดอินทรีย์จากผักตบชวาในการย่อยสลายไร้ออกซิเจนแบบแห้ง. การประชุมสัมมนาเชิงวิชาการรูปแบบพลังงานทดแทนสู่ชุมชนแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 8.
- ชลลดา แดงประดับ. 2554. ผลของเวลาเก็บกักต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากต้นข้าวโพดหมัก โดยกระบวนการไร้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
- ณัฐวุฒิ คุชฎี, กมลดารา เจริญสุวรรณ, ชินอรส ศรีศิริ, อัครินทร์ อินทนิเวศน์, ฐปน ชื่นบาล, กิตติกร สาสุจิตต์ และอัญชลี สายเขียว. 2557. การศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากพืชพลังงานโดยใช้เทคโนโลยีการหมักในสภาพไร้อากาศแบบแห้งที่มีการหมุนเวียนตะกอน. การศึกษาวิจัยเชิงเทคนิค. ศูนย์วิจัยพลังงาน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่.
- ทวิพันธ์ สเลอาด. 2554. ผลของเวลาการกวนผสมและการเวียนตะกอนต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหาร โดยระบบหมักแบบไร้อากาศแบบแห้งในขนาดใช้งานจริง. วิทยานิพนธ์. วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ทรงวุฒิ นิรัญศิลป์. 2555. คู่มือแนะนำการติดตั้งและใช้งานระบบการผลิตก๊าซชีวภาพจากขยะอินทรีย์. งานบริการและวิจัยด้านพลังงาน, ศูนย์ฝึกศึกษาบุคลากรด้านปิโตรเลียมและพลังงานทหาร, กรมการพลังงานทหาร, หน้า 2–22.
- ธนาคารกรุงไทย. 2562. อัตราดอกเบี้ยเงินกู้. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <https://www.ktb.co.th/th/rates>. (24 กันยายน 2562).

- ธนพร วิชัย และวรวรรตน์ ปัตร์ประกร. 2554. การผลิตกรดแลคติกจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรโดย *Lactobacillus caseisubsp. rhamnosus* ในการเพาะเลี้ยงแบบอาหารเหลว. การประชุมวิชาการนานาชาติวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย ครั้งที่ 21 10-11 พฤศจิกายน 2554, อำเภอหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา.
- นคร ทิพย์าวงศ์. 2553. เทคโนโลยีการแปลงสภาพชีวมวล. สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น).
 นงลักษณ์ นิธิกุลรัตนนา, วิบูลย์ลักษณ์ ฟังรัมย์ และสรวิศ เผ่าทองสุข. 2559. การผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนอินทรีย์ของระบบหมุนเวียนน้ำ สำหรับการเลี้ยงสัตว์น้ำ. วารสารวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมไทย. ปีที่ 30 ฉบับที่ 3, หน้า 47-55.
- นิลวรรณ ไชยหนู. 2552. การวิเคราะห์ประสิทธิภาพและเศรษฐศาสตร์ของการใช้ระบบหมักแบบไร้อากาศแบบถังกวนต่อเนื่องในสถานะเทอร์โมฟิลิก เพื่อบำบัดของเสียจากฟาร์มสุกร. วิทยานิพนธ์. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. บัณฑิตวิทยาลัย. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- นิลวรรณ ไชยหนู และพุกษ์ อักกะรังสี. 2552. ต้นแบบของการใช้ระบบหมักไร้อากาศแบบถังกวนต่อเนื่องในสถานะเทอร์โมฟิลิก สำหรับบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกร. การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 23. 4-7 พฤศจิกายน 2552 จังหวัดเชียงใหม่. หน้า 1-9.
- นฤมล เชาะกระโทก. 2556. การผลิตชีวภาพจากตะกอนดีแคเตอร์ของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบร่วมกับน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็ง. วิทยานิพนธ์ วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ปฎิรูป ผลจันทร์ และภัทรวดี สุขสุวรรณณ์. 2557. ผลของชนิดและปริมาณมูลสัตว์ ระยะเวลาในการกวนผสม และค่าความเข้มข้นของแข็งต่อประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ภัทรวดี สุขสุวรรณณ์. 2557. ผลของระยะเวลาการกวนผสมและความเข้มข้นของของแข็งทั้งหมดต่อประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 โดยถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์. วิทยานิพนธ์. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. บัณฑิตวิทยาลัย. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ภาวิณี เพ็ชรนก. 2560. อิทธิพลของการปรับสภาพวัสดุเหลือทิ้งจากข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในสถานะกรดและต่างที่มีผลต่อน้ำตาล สำหรับการผลิตเอทานอล. การประชุมวิชาการเครือข่ายพลังงานแห่งประเทศไทยครั้งที่ 13.

- มนตรี ปัญญาทอง และกฤตภาค บุรณวิทย์. 2557. **ความสัมพันธ์ของอินทรีย์วัตถุกับค่าความเป็นกรดของพีชหมักบางชนิด**. วารสารนเรศวรพะเยา ปีที่ 7 ฉบับที่ 2 พฤษภาคม-สิงหาคม 2557.
- มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์. 2560. **คู่มือการถ่ายทอดเทคโนโลยีการผลิตก๊าซชีวภาพสู่ชุมชน เพื่อแก้ปัญหาการกำจัดผักตบชวาอย่างยั่งยืน**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา. http://www.thai-explore.net/file_upload/submitter/file_doc/445.pdf. (25 สิงหาคม 2561).
- มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2558. **บทปฏิบัติการที่ 4 ข้าวโพด (Corn)**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา. <http://agron.agri.kps.ku.ac.th/index.php/th/2015-04-20-02-02-25/30-economic-crops/70-economic-crops-corn.com>. (11 ตุลาคม 2562).
- รุ่งนภา เนินหาด. 2553. **การศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษผักร่วมกับมูลสุกร**. โรงเรียนดัดดรุณี อำเภอเมือง จังหวัดฉะเชิงเทรา.
- รัชพล พวงศรีรัตน์. 2558. **กระบวนการปรับสภาพเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส**. Veridian E-Journal, Science and Technology Silpakorn University. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ปีที่ 2 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม-มิถุนายน 2558. หน้า 143-157.
- วรพจน์ รัตนพันธุ์. 2550. **สภาวะการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตเส้นขนมจีนโดยระบบแบบแอนแอร์โรบิคคอนแทค**. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- เววมิกส์. 2562. **ส่วนประกอบของเครื่องกวนผสม และการไหลของเหลว**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.wellmix.net/wellmix/dt02.html>. (12 กันยายน 2562).
- ไวท์เอ็มเคสโตร. 2562. **แท่นตัดไฟเบอร์ 14" (355 mm) รุ่น MT241 ยี่ห้อ Maktec (JP) W/14 CUTTING WHEEL 2 0 0 0 W**. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา <http://www.whitemktstore.com/article/2299/AD-maktec-jp-w-14-cutting-wheel-2000w>. (24 กันยายน 2562).
- ระวีวรรณ แก้วกล้า. 2538. **การผลิตเอทานอลจากฟางข้าว**. วิทยานิพนธ์ปรัชญามหาบัณฑิต ภาควิชาเคมีเทคนิค มหาวิทยาลัยจุฬาลงกรณ์.
- รัชพล พวงศรีรัตน์. 2558. **กระบวนการปรับสภาพเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส**. Veridian E-Journal, Science & Technology Silpakorn University. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. ปีที่ 2 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม-มิถุนายน 2558. หน้า 2408-1248.

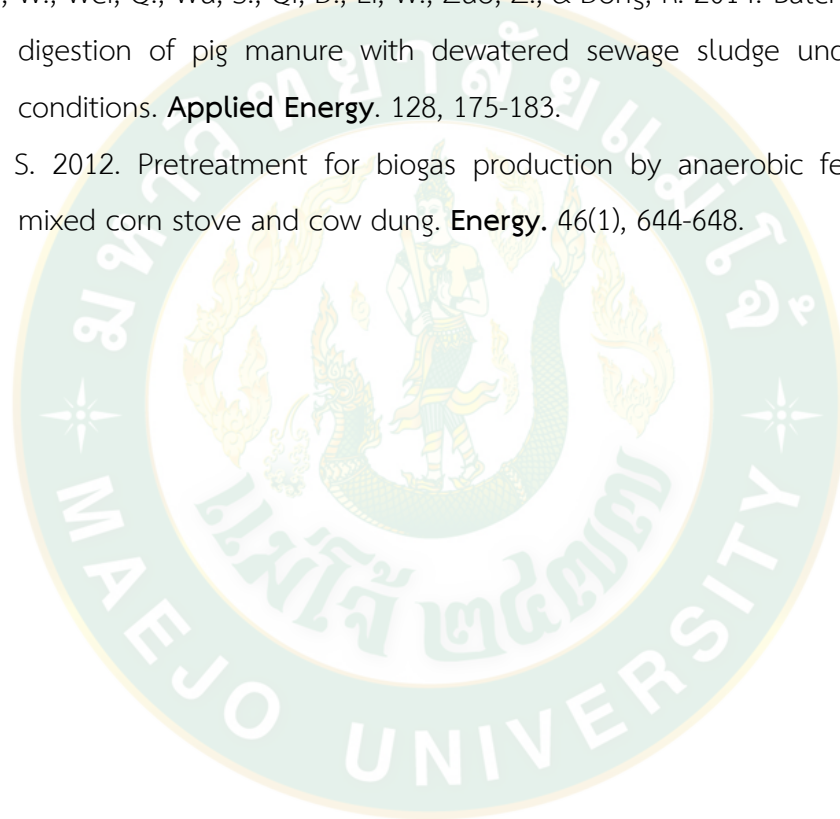
- ศักรินทร์ ทุมเทพ. 2555. ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลไก่เนื้อด้วยระบบถังกวนสมบูรณ์. วิทยานิพนธ์. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. บัณฑิตวิทยาลัย. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- สันทัด ศิริอนันต์ไพบูลย์. 2552. ระบบบำบัดน้ำเสีย : การเลือกใช้ การออกแบบ การควบคุม และ การแก้ปัญหา. กรุงเทพฯ : ท้อป. จำนวน 544 หน้า
- สุदारัตน์ ภักดี. 2551. การผลิตก๊าซชีวภาพจากกากถั่วและน้ำเสียจากโรงงานวันเส้นโดยใช้ กระบวนการย่อยสลายภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน. วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- สำนักจัดการคุณภาพน้ำ กรมควบคุมมลพิษ. 2556. คู่มือวิธีการหรือเทคโนโลยีที่เหมาะสมสำหรับ การเลี้ยงสุกรประเภทค. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา . <http://www.pcd.go.th/public/Publications/template/smallfarm56.pdf>. (19 กรกฎาคม 2562).
- สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. 2562. สถานการณ์พลังงานของประเทศไทย. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา. <http://www.eppo.go.th/index.php/th/energy-information>. (13 เมษายน 2562).
- สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 2562. วัสดุอ้างอิงเพื่อการ ตรวจวัด ปริมาณ ก๊าซมีเทนใน อากาศ. [ออนไลน์]. แหล่งที่มา . <http://www.nimt.or.th/etrm/upload/basicdescription.pdf>. (11 ตุลาคม 2562).
- โสภี พันอินทร์. 2560. การผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งของข้าวโพดหวานร่วมกับมูลสัตว์. วิศวกรรมพลังงานทดแทนมหาบัณฑิต. วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- อรทัย ชวาลภาฤทธิ์ และชนกพร วงษ์วัน. 2555. การผลิตชีวภาพจากการหมักร่วมของต้นข้าวโพด ที่ปรับสภาพเบื้องต้นร่วมกับของเสียกลีเซอรอล การประชุมวิชาการแห่งชาติ. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 9.
- อภิชาติ ศรีภัย. 2555. ผลของระยะเวลาการเก็บกักส่วนของเหลวต่อการสร้างกรดไขมันระเหยง่าย จากต้นข้าวโพดหมัก โดยจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักของโคมนม สำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ. วิทยานิพนธ์. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. บัณฑิตวิทยาลัย. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- Aditi, D., Tanvi, G., Abhilash, K.T., Julie, M., Kylie, F., & Rajesh, K.S. 2018. Thermophilic anaerobic digestion: enhanced and sustainable methane production from co-digestion of food and lignocellulosic wastes. *Energy*. 11(2058). 1-13.
- Chen, C., Deng, L.W., Liu, G. & Zheng, D. 2015. Continuous dry fermentation of swine manure for biogas production. *Waste Management*. 38, 436-442.

- Chile, S., Ao, X., Qian, F., Yun, H., Richen, L. & Jerry D.M. 2019. Effects of pre-treatment and biological acidification on fermentative hydrogen and methane co-production. **Energy Conversion and Management**. 185, 431-441.
- Elsamadony, M., & Tawfik, A. 2015. Dry anaerobic co-digestion of organic fraction of municipal waste with paperboard mill sludge and gelatin solid waste for enhancement of hydrogen production. **Bioresource Technology**. 191, 157-165.
- Guangyin, C., Zheng, Z., Shiguan, Y., Caixia, F., Xingxing, Z., & Yan, L. 2010. Experimental co-digestion of corn stalk and vermicompost to improve biogas production. **Waste Management**, 30(10), 1834-1840.
- Gunther, B., & Lucy F. 2013. Storage and pre-treatment of substrates for biogas production. **The biogas handbook**. University of Natural Resources and Life Sciences, Austria. 85-103.
- Ignatius, E., & Jabakumar, A.P. 2011. Optimization of pre-hydrolysis conditions for the production of biogas. Thesis (Sustainable Technology and Industrial Biotechnology). School of Engineering. University of Borås, Sweden.
- Javad, T., Asghar, M., & Naser, A. 2011. Some mechanical and physical properties of Kaparaju, P., Buendia, I., Ellegaard, L., & Angelidakia, I. 2008. Effects of mixing on methane production during thermophilic anaerobic digestion of manure: lab-scale and pilot-scale studies. **Bioresource technology**. 99(11), 4919-4928.
- Karim, K., Hoffmann, R., Klasson, T., & Al-Dahhan, M. H. 2005. Anaerobic digestion of animal waste: Waste strength versus impact of mixing. **Bioresource technology**. 96(16), 1771-1781.
- Kumar S, Singh, S.P., Misha, I.M. & Adhikari, D.K. 2011. Continuous ethanol production by *Kluyveromyces* sp. IIPE453 immobilized on bagasse chips in packed bed reactor. **Journal of Petroleum Technology and Alternative Fuels**, 2(1), 1-6.
- Kun, L., Ronghou, L., Shaofeng, C., Qiong, Y., & Ruijie, M. 2018. Anaerobic co-digestion of animal manures with corn stover or apple pulp for enhanced biogas production. **Renewable Energy**. 118, 335-342.

- Lee, H. V., Hamid, A.B. & Zai, S.K. 2014. Conversion of lignocellulosic biomass to nanocellulose: structure and chemical process. **Hindawi Publishing Corporation Scientific World Journal**. 2, 1-20.
- Leenawat, A., Pasakorn, J., Atip, L., Filemon, R., Khanita, K. 2016. Effect of temperature on increasing biogas production from sugar industrial wastewater treatment by uasb process in pilot scale. **Energy Procedia**. 100, 30-33.
- Libin, T., Dexun, Z., Hairong, Y., Linfeng, W., Xin, Z., & Xiujin L. 2015. Identifying proper agitation interval to prevent floating layers formation of corn stover and improve biogas production in anaerobic digestion. **Bioresource Technology**. 186, 1-7.
- LOWARA. 2019. Centrifugal Pump CO Series. [Online]. Resource. https://brownbros.com.au/files/Brochures/BROCHURE_Lowara_CO_series.pdf. (10 October 2019).
- Marta-Alvarez, J., Dosta, J., Romeo-Güiza, M.S., Fonoll, X., Peces, M. & Aстал, S. 2014. A critical review on anaerobic Co-digestion achievements between 2010 and 2013. **Renewable and Sustainable Energy Review**, 36, 412-427.
- Meixia, Z., Guangming, Z., Panyue, Z., Shiyang, F., Shuguang, J., Dan, W., & Wei, F. 2014. Anaerobic digestion of corn stovers for methane production in a novel bionic reactor. **Bioresource Technology**. 166, 606-609.
- Michel, S., Stijn, W.H., Van, H., Sander, H., Han, V., & Katleen, R. 2017. Laccase enzyme detoxifies hydrolysates and improves biogas production from hemp straw and miscanthus. **Bioresource Technology**. 244(1), 597-604.
- Mishima, D., M. Tateda., M. Ike & M, Fujita. 2006. Comparative study on chemical pretreatments to accelerate enzymatic hydrolysis of aquatic macrophyte biomass used in water purification processes. **Bioresource Technology**. 97(16), 2166-2172.
- Pennapa, T., Apichit, T., & Itthichai, P. 2017. Overview of biogas production potential from industry sector to produce compressed bio-methane gas in Thailand. **Energy Procedia**, 138, 919-924.

- Ramakrishnan, A., & Surampalli, R.Y. 2012. Comparative performance of UASB and anaerobic hybrid reactors for the treatment of complex phenolic wastewater. **Bioresource Technology**. 123, 352-359.
- Ratanatamskul, C., & Saleart, T. 2016. Effects of sludge recirculation rate and mixing time on performance of a prototype single-stage anaerobic digester for conversion of food wastes to biogas and energy recovery. **Environmental Science and Pollution Research**. 23 (8), 7092-7098.
- Regina, J., Patinvoh, Adib Kalantar Mehjerdi, Ilona Horvath, Mohammad J., Taherzadeh. 2017. Dry fermentation of manure with straw in continuous plug flow reactor, Reactor development and process stability at different loading rates. **Bioresource Technology**, 224, 197-205.
- 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.
- Schulze, P., A. Seidel-Morgenstern, H. Lorenz, M. Leschinsky & G. Unkelbach. 2016. Advanced Process for Precipitation of Lignin from Ethanol Organosolv Spent Liquors. **Bioresource Technology**. 199, 128-134.
- Solmaz, A., Karthik, R., & Mohammad, J. 2014. A comparative study between single- and two-stage anaerobic digestion processes: Effects of organic loading rate and hydraulic retention time. **International Biodeterioration & Biodegradation**. 95(A), 181-188.
- Stewart, O., & Marcos, S. 2017. Media filters: trickling filters and anaerobic filters. Global water pathogen project part four. Management of risk from excreta and wastewater.
- Wang, R., Dungait, J.A.J., Buss, H.L., Yang, S., Zhang, Y. & Xu, Z. 2017. Base cations and micronutrients in soil aggregates as affected by enhanced nitrogen & water inputs in a semi-arid steppe grassland. **Science Total Environmental**, 575, 564-572.
- Yeqing, L., Yanfen, g H., Chenyu, Z., Chang, C., & Guangqing, L. 2014. Anaerobic co-digestion of chicken manure and corn stover in batch & continuously stirred tank reactor (CSTR). **Bioresource Technology**, 156, 342-347.

- Yun, H., Yunzhi, P., Hairong, Y., Dexun, Z., Yanping, L., Baoning, Z., Wachemo, A., Chufo, M., & Jaffar, X. 2015. Promoting anaerobic biogasification of corn stover though biological pretreatment by liquid fraction of digestate (LFD). **Bioresource Technology**. 175, 167-173.
- Zhao, J., & Xia, L. 2009. Simultaneous saccharification and fermentation of Alkaline-pretreated corn stover to ethanol using a recombinant yeast strain. **Fuel Processing Technology**, 90, 1193–1197.
- Zhang, W., Wei, Q., Wu, S., Qi, D., Li, W., Zuo, Z., & Dong, R. 2014. Batch anaerobic co-digestion of pig manure with dewatered sewage sludge under mesophilic conditions. **Applied Energy**. 128, 175-183.
- Zhou, S. 2012. Pretreatment for biogas production by anaerobic fermentation of mixed corn stove and cow dung. **Energy**. 46(1), 644-648.





ภาคผนวก



ภาคผนวก ก

การสร้างระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวาน

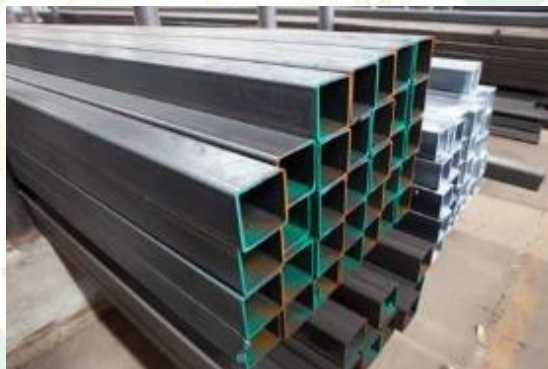
ด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง ขนาด 1,000 L

1. การสร้างต้นแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง ขนาด 1,000 L

สำหรับการสร้างระบบผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง โดยแบ่งระบบออกเป็น 4 ส่วนหลัก คือ ส่วนที่ 1 ฐานรองรับถังปฏิกรณ์ ส่วนที่ 2 ถังปฏิกรณ์ด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง ส่วนที่ 3 ระบบการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอน และส่วนที่ 4 ระบบเก็บก๊าซชีวภาพ โดยมีขั้นตอนการสร้างระบบดังต่อไปนี้

ส่วนที่ 1 ฐานรองรับถังปฏิกรณ์ด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง ขนาด 1,000 L

ขั้นตอนที่ 1 การทำฐานเหล็กรองรับถังผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง ขนาด 1,000 L จะทำการตามแบบที่ได้ออกแบบไว้ โดยจะใช้เหล็กกล่องขนาด 2 inch x 2 inch ดังแสดงในภาพภาคผนวกที่ 1



ภาพภาคผนวกที่ 1 ลักษณะของเหล็กกล่องที่จะใช้ทำเป็นฐานรองรับถังปฏิกรณ์

ขั้นตอนที่ 2 ทำการตัดเหล็กกล่อง ขนาด 2 inch x 2 inch ตามขนาดที่ได้ออกแบบไว้ด้วยแท่นตัดไฟเบอร์ Maktec รุ่น MT 241 ขนาด 14 inch ดังแสดงในภาพภาคผนวกที่ 2 ซึ่งมีคุณสมบัติใช้กำลังไฟฟ้าขนาด 2,000 Watt ความเร็วรอบ เท่ากับ 3,800 rpm ซึ่งสามารถตัดเหล็กหรือโลหะตามขนาดที่ต้องการ รูปทรงออกแบบใหม่ แข็งแรงทนทาน ใช้งานง่าย ด้ามจับถนัดมือ และฉนวน 2 ชั้น (ไวท์เอ็มเคสโตร์, 2562)



ภาพภาคผนวกที่ 2 การตัดเหล็กด้วยแท่นตัดไฟเบอร์

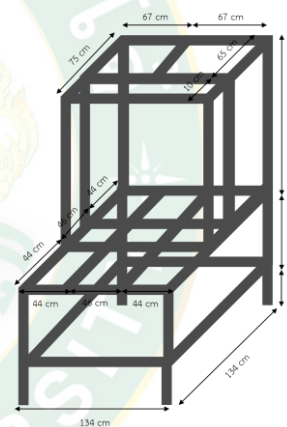
ขั้นตอนที่ 3 ทำการเชื่อมเหล็กกล่องเข้าด้วยกัน โดยใช้วิธีการเชื่อมแบบไฟฟ้าให้ได้ขนาดฐานตามที่ได้ออกแบบไว้ด้วยการเชื่อมเหล็ก ดังแสดงในภาพภาคผนวกที่ 3



(ก) การเตรียมเหล็ก



(ข) การเชื่อมเหล็ก



(ค) แบบฐานรองรับน้ำหนัก

ภาพภาคผนวกที่ 3 การเชื่อมฐานรองรับถังปฏิกรณ์ตามแบบที่ได้ออกแบบไว้

ขั้นตอนที่ 4 เมื่อทำการเชื่อมฐานรองรับเสร็จแล้ว ก็จะทำทาสีเคลือบให้ทั่วทุกส่วนของฐานเหล็ก เพื่อป้องกันการเกิดสนิมของเหล็ก จากนั้นก็จะพักทิ้งไว้ให้แห้งเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ดังแสดงในภาพภาคผนวกที่ 4



(ก) การทำสี่เหลี่ยมเหล็ก



(ข) การตากฐานรองรับให้แห้ง



(ค) ฐานรับรองที่ตากแห้งแล้ว

ภาพภาคผนวกที่ 4 การเตรียมฐานรองรับถังปฏิกรณ์

ส่วนที่ 2 ถังปฏิกรณ์ด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง ขนาด 1,000 L

ขั้นตอนที่ 1 ทำการเจาะถังไฟเบอร์กลาสบริเวณด้านข้างของถังด้วยตัวเจาะ เพื่อทำทางออกของวัสดุหมัก ขนาด 4 inch และทางออกของวัสดุหมักที่จะใช้ในการวิเคราะห์ค่าพารามอเตอร์ ขนาด 2 inch รวมถึงทางออกของกากตะกอนจุลินทรีย์ที่จะใช้ สำหรับหมุนเวียนตะกอน ขนาด 1 inch จากนั้นจะทำการนำท่อ PVC มาใส่ยังรูที่ทำการเจาะไว้แล้ว ดังแสดงในภาพภาคผนวกที่ 5



(ก) การเจาะรูช่องทางออก



(ข) การนำท่อมาเชื่อมกับถังด้านนอก

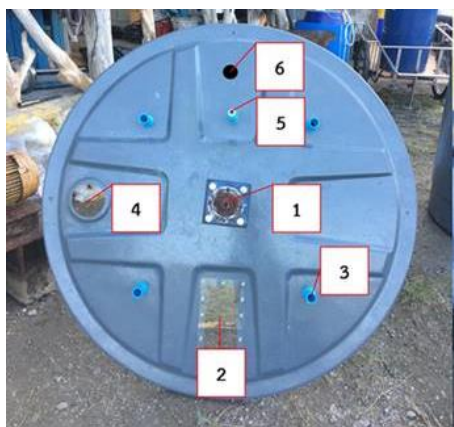


(ค) การนำท่อมาเชื่อมกับถัง

ภาพภาคผนวกที่ 5 การเจาะรูของถังปฏิกรณ์ (ตัวถังปฏิกรณ์)

ขั้นตอนที่ 2 ทำการเจาะรูบริเวณฝาของถังปฏิกรณ์ เพื่อใช้เป็นจุดต่าง ๆ ประกอบไปด้วย หมายเลข 1 รูเชื่อมฝาถังปฏิกรณ์กับมอเตอร์กวนผสม หมายเลข 2 ช่องดูการทำงานภายในของถังปฏิกรณ์ หมายเลข 3 รูหมุนเวียนตะกอน หมายเลข 4 รูป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบ หมายเลข 5

รูทางออกของก๊าซชีวภาพภายในถังปฏิกรณ์ และหมายเลข 6 รูวัดค่าอุณหภูมิภายในถังปฏิกรณ์
 ดังแสดงในภาพภาคผนวกที่ 6



(ก) การเจาะรูบริเวณฝาถังปฏิกรณ์ (ข) ลักษณะของการประกอบที่วัดอุณหภูมิ
 ภาพภาคผนวกที่ 6 การเจาะรูของถังปฏิกรณ์ (ฝาถังปฏิกรณ์)

ขั้นตอนที่ 3 การประกอบชิ้นส่วนต่าง ๆ บริเวณของฝาถังปฏิกรณ์เข้าด้วยกัน ตามรูปที่ได้ทำการ
 การเจาะไว้ และตามแบบที่ได้ออกแบบไว้ข้างต้น ดังแสดงในภาพภาคผนวกที่ 7



(ก) บริเวณด้านนอก

(ข) บริเวณด้านนอก

ภาพภาคผนวกที่ 7 การประกอบฝาถังปฏิกรณ์

ขั้นตอนที่ 4 ทำการเคลื่อนย้ายฐานรองรับถังปฏิกรณ์ไปยังบริเวณที่มีแสงแดดส่องผ่านอย่าง
 ทั้งถึงตลอดทั้งวัน ดังแสดงในภาพภาคผนวกที่ 8



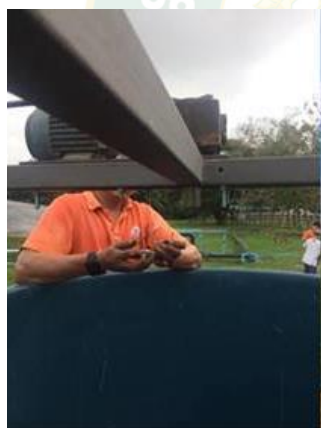
(ก) การเตรียมพื้นที่วางฐานรองรับน้ำหนัก



(ข) การเคลื่อนย้ายฐานถึงปฏิกรณ์

ภาพภาคผนวกที่ 8 การเตรียมพื้นที่วางฐานรองรับน้ำหนัก

ขั้นตอนที่ 5 ทำการประกอบตัวถังปฏิกรณ์และฝาถังเข้าด้วยกัน โดยใช้กาวเชื่อมชนิดแบบติดแน่น เพื่อป้องกันการรั่วไหลของอากาศเข้าไปยังถังปฏิกรณ์ ดังแสดงในภาพภาคผนวกที่ 9



(ก) ประกอบมอเตอร์เข้ากับคาน



(ข) ประกอบมอเตอร์กับตัวถัง



(ค) ประกอบตัวถังและฝาถัง

ภาพภาคผนวกที่ 9 การประกอบตัวถังปฏิกรณ์และฝาถังเข้าด้วยกัน

ขั้นตอนที่ 6 จากนั้นทำการนำกาวซิลิโคนชนิดติดแน่นมาทาขอบ ๆ บริเวณรอยต่อ หรือจุดต่าง ๆ ที่คิดว่าจะมีการรั่วไหลของอากาศเข้าไปยังระบบ เพื่อป้องกันการรั่วไหลของอากาศเข้าไปยังถังปฏิกรณ์ ดังแสดงในภาพภาคผนวกที่ 10



(ก) การเชื่อมต่อ



(ข) การเชื่อมต่อสายเข้ากับถังปฏิกรณ์



(ค) การทากาวซิลิโคน

ภาพภาคผนวกที่ 10 การเชื่อมอุปกรณ์ต่าง ๆ เข้าด้วยกัน

ขั้นตอนที่ 7 ทำการประกอบเทอร์โมมิเตอร์ไว้บริเวณด้านข้างของถังปฏิกรณ์ เพื่อเอาไว้ใช้ดูค่าของอุณหภูมิ ซึ่งเครื่องวัดจะตัวบ่งบอกถึงวันและเวลาภายในเครื่อง ดังแสดงในภาพภาคผนวกที่ 11 โดยใช้เครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นในอากาศ ชนิด HTC-2 แบบดิจิตอล แบบ LCD Electronic Temperature Humidity Meter Digital Thermometer Hygrometer Weather Station Alarm Clock HTC-2

1) ช่วงอุณหภูมิที่สามารถวัดค่าได้ อยู่ในช่วง $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ถึง $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ที่ความละเอียด $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ และค่าความคาดเคลื่อน $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$

2) ช่วงความชื้นสัมพัทธ์ที่สามารถวัดค่าได้ อยู่ในช่วง $0-99\% \text{ RH}$ ที่ค่าความละเอียด $1\% \text{ RH}$ และค่าความคาดเคลื่อน $\pm 5\% \text{ RH}$



ภาพภาคผนวกที่ 11 การติดตั้งเครื่องวัดอุณหภูมิบริเวณข้างถังปฏิกรณ์

ส่วนที่ 3 ระบบการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนภายในระบบ

ระบบกวนผสมจะใช้มอเตอร์กวนผสม ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใบกวน เท่ากับ 75 cm ความหนา เท่ากับ 3 mm ทำมุมเอียง เท่ากับ 45 องศา กำลังไฟฟ้าที่ใช้ เท่ากับ 0.37 kW ความเร็วรอบ เท่ากับ 60 rpm แรงม้า เท่ากับ 0.5 Hp ความต่างศักย์ไฟฟ้า เท่ากับ 380 V ชนิด 3 Phase ค่าความถี่ เท่ากับ 50 Hz ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแกนใบกวน เท่ากับ 1½ inch

ระบบการหมุนเวียนตะกอนจะใช้มอเตอร์ปั๊ม กำลังไฟฟ้าที่ใช้ เท่ากับ 0.75 kW แรงม้า เท่ากับ 0.5 Hp ความต่างศักย์ไฟฟ้า เท่ากับ 220 V ชนิด 1 Phase ค่าความถี่ เท่ากับ 50 Hz อัตราการไหล เท่ากับ 100 L/min ระยะส่งสูง เท่ากับ 30 m แรงดันการใช้งาน เท่ากับ 8 bar ขนาดท่อดูด เท่ากับ 1 นิ้ว ขนาดท่อส่ง เท่ากับ 1 นิ้ว

ขั้นตอนที่ 1 ทำการเชื่อมต่อมอเตอร์กวนผสมเข้ากับถังปฏิกรณ์บริเวณด้านบนของถังปฏิกรณ์ ด้วยการนำมอเตอร์กวนผสมมาวางไว้บนคานของฐานรองรับ จากนั้นทำการเชื่อมต่อเข้าด้วยเพลลาที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแกน เท่ากับ 45 mm โดยทำการยึดระหว่างฝาถังปฏิกรณ์ด้วยน็อต ดังแสดงในภาพภาคผนวกที่ 12



(ก) การเชื่อมมอเตอร์เข้ากับคาน (ข) การติดตั้งชุดมอเตอร์กวนผสมเข้ากับถังปฏิกรณ์

ภาพภาคผนวกที่ 12 การเชื่อมมอเตอร์กวนผสมเข้ากับคานรองรับน้ำหนัก

ขั้นตอนที่ 2 ทางตะกอนออกถังปฏิกรณ์ เพื่อใช้ในการหมุนเวียนตะกอนภายในระบบจะมีการนำก้อนหินกรวดขนาด 3–5 cm มาบรรจุให้อยู่ภายในตาข่ายสีฟ้า แล้ววางอยู่บริเวณด้านหน้าทางออกของกากตะกอนที่จะใช้หมุนเวียนตะกอน ดังแสดงในภาพภาคผนวกที่ 13



(ก) รูทางออกของตะกอน



(ข) ก้อนหินตะกอนที่บรรจุในตาข่ายสีฟ้า

ภาพภาคผนวกที่ 13 ทางออกของตะกอนที่ใช้ในการหมุนเวียนตะกอน

ขั้นตอนที่ 3 เมื่อระบบทำการปิดฝาถังแบบสนิทแล้ว จะทำการประกอบระบบหมุนเวียนตะกอนด้วยท่อ PVC ขนาด 1 inch เข้ากับมอเตอร์ปั๊ม เพื่อเชื่อมต่อกับท่อหมุนเวียนตะกอนภายในถังปฏิกรณ์ ตามแบบที่ได้ออกแบบไว้ ดังแสดงในภาพภาคผนวกที่ 14



ภาพภาคผนวกที่ 14 การติดตั้งระบบหมุนเวียนตะกอนเข้ากับถังปฏิกรณ์

ส่วนที่ 4 ระบบเก็บก๊าซชีวภาพ

สำหรับการเก็บรวบรวมก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพอาศัยหลักการแทนที่ด้วยน้ำหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Water Replacement Method ซึ่งมีวิธีการสร้างดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 ทำการเจาะรูบริเวณก้นถัง 150 L จำนวน 2 รู ขนาด 1/2 inch ด้วยสว่านเจาะ โดยมีระยะห่างจากจุดกึ่งกลางถัง เท่ากับ 10 cm จากนั้นจะนำเกลียวในและเกลียวนอก ขนาด 1/2 inch มาใส่ยังรูที่ได้ทำการเจาะแล้ว เพื่อทำเป็นช่องทางเข้าและออกของระบบเก็บก๊าซชีวภาพ

จากนั้นจะนำถังขนาด 250 L มาเป็พื้นฐานแล้วนำถัง 150 L หันคล่ำเข้าไปยังถังขนาด 200 L ดังแสดงในภาพภาคผนวกที่ 15



(ก) การเจาะรูบริเวณก้นถัง



(ข) การประกอบถังเก็บก๊าซชีวภาพ

ภาพภาคผนวกที่ 15 การประกอบอุปกรณ์ของถังเก็บก๊าซชีวภาพ

ขั้นตอนที่ 2 ทำการเชื่อมต่อถังเก็บก๊าซชีวภาพเข้ากับถังปฏิกรณ์ด้วยสายยางขนาด 3/8 inch จากช่องท่อทางเข้าถังเก็บก๊าซชีวภาพ โดยจะต้องมีวาล์วปิดกั้น เพื่อใช้สำหรับการวัดปริมาณของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น ซึ่งทุกครั้งที่ทำการวัดปริมาณของก๊าซชีวภาพจะต้องทำการปิดวาล์วทุกครั้ง โดยก่อนกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจะต้องนำน้ำสะอาดมาใส่ยังบริเวณถัง ขนาด 250 L เพื่อป้องกันการรั่วไหลของก๊าซชีวภาพออกจากระบบเก็บก๊าซชีวภาพ ดังแสดงในภาพภาคผนวกที่ 16

ดังนั้นเมื่อนำส่วนต่าง ๆ ประกอบด้วยฐานรองรับถังปฏิกรณ์ จำนวน 1 ชั้น ถังปฏิกรณ์ขนาด 1,000 L จำนวน 1 ถัง ระบบการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอน และถังเก็บก๊าซชีวภาพขนาด 150 L จำนวน 2 ถัง มาประกอบเข้าด้วยกันจะทำให้เกิดเป็นระบบการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยกระบวนการหมักแห้งที่มีระบบการกวนผสมและหมุนเวียนตะกอนภายในระบบ



(ก) จุดทางออกของก๊าซชีวภาพ



(ข) ท่อลำเลียงก๊าซชีวภาพจากถังปฏิกรณ์สู่ถังเก็บก๊าซชีวภาพ

ภาพภาคผนวกที่ 16 การลำเลียงก๊าซชีวภาพจากถังปฏิกรณ์สู่ถังเก็บก๊าซชีวภาพ



ภาคผนวก ข

บทความวิจัยที่ได้รับการเผยแพร่ในระดับชาติและนานาชาติ





CERTIFICATE

This is to certify that

Miss Sasitporn Saispa

Presented this paper entitled

Dry Anaerobic Digestion of Sweet Corn Waste: Pilot Scale Study

The 8th International Conference on Environmental Engineering, Science and Management

May 23-24, 2019 at The Twin Towers Hotel Bangkok, Thailand

May 23, 2019

Prof. Dr. Tharees Srisattit

President of Environmental Engineering Association of Thailand



กระทรวงพลังงาน
MINISTRY OF ENERGY



Room 6 Kasatsuk 2 (Floor 4th)

Moderator : Assoc. Prof. Dr. Wanpen Wirojanagud

13.40–14.00 23R6–01	Rapid Screening of Fromaldehyde Pollution in Water Using Red, Green Blue System and Smart Phone Reading <u>Thirasant Boonupara</u> and Puangrat Kajitvichyanukul	15
14.00–14.20 23R6–02	Improving Fuel Potential of Para Rubber Wood Bottom Ash as Charcoal Briquette with Co-Extruded Materials <u>Wattana Sriket</u> , Wichairat Kaewjuea and Thaniya Kaosol	17
14.20–14.40 23R6–03	Dry Anaerobic Digestion of Sweet Corn Waste: Pilot Scale Study <u>Sasithorn Saipa</u> , Rotjapun Nirunsin and Chayanon Sawatdeenarunat	19
14.40–15.00 23R6–04	Hydrogen Peroxide Production in <i>Anubias</i> (<i>Anubias Bacteri</i>), <i>Amazon</i> (<i>Echinodorus Ozelot</i>) and <i>Green Cabomba</i> (<i>Combomba Caroliniana</i>) by Induction of 17 α -Ethinylestradiol <u>Suwiya Suttakun</u> , Parinda Thayanukul and Surapong Rattanakul	21

15.00–15.20 Coffee Break

Moderator : Assoc. Prof. Dr. Vissana Meeyoo

15.20–15.40 23R6–05	Duration of Elevated Starting Temperature Influencing Food Waste Composting <u>Panuch Kanong</u> and Jareerat Sakulrat	23
15.40–16.00 23R6–06	Effect of PVA Gel Coated with Ferrihydrite on Propionic Acid Removal for Application in Anaerobic Wastewater Treatment <u>Kannidtha Hanvajanawong</u> , Jenyuk Lohwacharin and Benjaporn Suwannasilp	24
16.00–16.20 23R6–07	Photocatalytic Conversion of CO ₂ to Fuel Using Pt/TiO ₂ Nano-Photocatalyst Sirithida Suwannapum, Nichanan Takahashi and Nurak Grisdanuruk	27

Dry Anaerobic Digestion of Sweet Corn Waste: Pilot Scale Study

Sasithorn Saipa¹, Rotjapun Nirunsin^{2*} and Chayanon Sawatdeenarunat³

¹Graduate student; ²Assistance professor, Department of Renewable Energy Engineering
School of Renewable Energy, Maejo University Chiang Mai 50290, Thailand,

³Lecturer, Asian Development College for Community Economy and Technology,
Chiang Mai Rajabhat University, Chiang Mai 50300, Thailand

*Phone: 081-805-6559, Fax: 053-875-599, E-mail: rotjapun_energy@hotmail.com

ABSTRACT

Sweet corn wastes (i.e. corn cobs, corn husks, and corn seeds) are an appropriate substrate for anaerobic digestion to produce gaseous biofuels such as biogas. In this study, the pilot-scale dry anaerobic digestion was performed in batch mode. Corn cobs, corn husks and corn seeds were chopped with an agricultural cutting machine to approximately 5–10 mm length and pre-acidified at ambient temperature for 72 h. The proportion of corn cobs, corn husks and corn seeds were 54:44:2 by weight. Ratio of substrate and inoculum (S/I) was 1:6 (w/v) with an initial total solid content of 20%. The reactor was operated at ambient temperature. The results showed that the removal efficiency of COD, TS and VS were 83.33%, 61.58% and 62.77%, respectively. pH ranged between 6.78 and 7.24 and the temperature was between 24.3 and 44.3°C which indicates mesophilic condition. The accumulated and daily biogas production were 3,327.38 and 419.66 liters, respectively. The accumulated and daily methane production were 1,672.88 and 228.72 liters, respectively. In addition, the average biogas and methane yield were 0.59 and 0.30 L/g VS_{added}, respectively. The biogas compositions at the optimal condition were 56.8% methane (CH₄), 43.1% carbon dioxide (CO₂), 0.1% oxygen (O₂) and 78 ppm hydrogen sulphide (H₂S). The information obtained from this study could effectively use as a guideline for operating a dry anaerobic digester of sweet corn wastes.

Keywords: Dry anaerobic digestion, Sweet corn waste, Biogas

INTRODUCTION

Sweet corn waste (SCW), an organic fraction from corn processing factory, are one of appropriate substrates for gaseous biofuels (i.e. biogas) production via anaerobic digestion (AD) (Polprasert, 2007). AD is a complex and multi-stage biochemical process to produce energy-rich biogas in absence of oxygen. The produce biogas could be further served as an environment-friendly biofuel to produce heat and electricity. Moreover, excess sludge withdrawn from an anaerobic digester can be used as an organic fertilizer and soil condiment with inactivated pathogen (Bolzonella and et al., 2005). Typically, AD can be categorized to three main groups based on input total solid (TS) (i.e. wet AD with less than 10% TS, semi-dry AD with 10–20% TS, and dry AD with more than 20% TS) (Sopee and Nutthanicha. 2017). Among these processes, dry AD is appropriate technology for SCW, which typically has TS content between 20 and 40%. This technology requires small digester, less dilution water, and low operating and maintenance cost (Sopee and Nutthanicha. 2017). Moreover, co-digestion between SCW, a carbon-rich substrate, and a high nutrient substrate such as animal manures can enhance biogas yield (Chen and et al., 2015).

~2~

The objective of this research is to study the performance of pilot-scale dry anaerobic digestion to reflect the real business scale.

METHODOLOGY

1. Dry anaerobic digester

The digester used in this study consists of three main parts namely the main reactor, the sludge recirculation system, and the biogas storage tank as presented in figure 1. The main reactor was made of fiberglass with the effective volume of 600 L which can handle the SCW up to 200 kg.

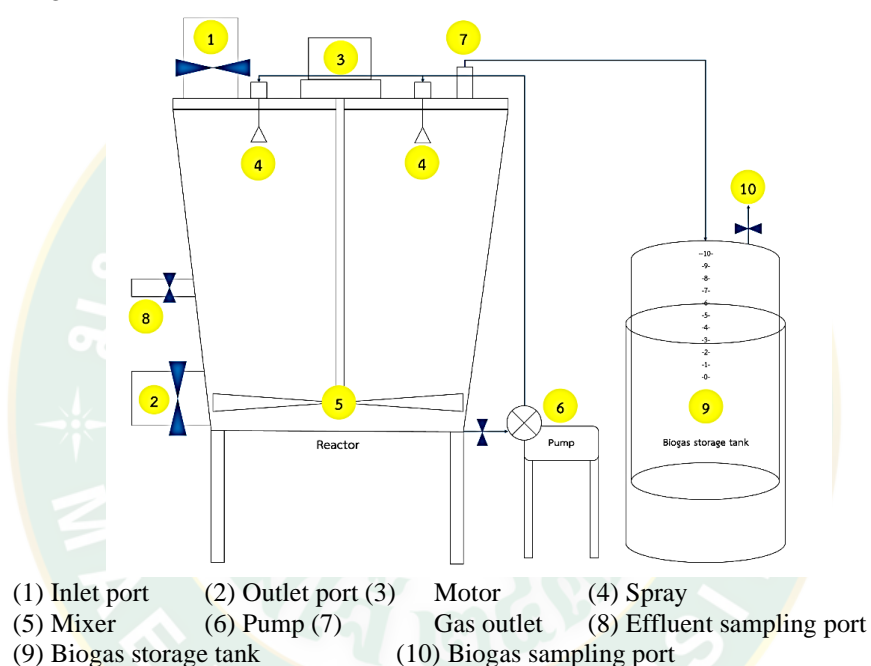


Figure 1 Schematic of dry anaerobic digester

The excess sludge was recirculated using a centrifugal pump from the bottom to spray on the top of the reactor for maintaining effective microorganisms. The 250-liter biogas storage tank was made of high-density polyethylene. The water replacement method was used for quantifying the produced biogas volume.

2. Experimental procedure

The digester contents were stirred for 15 minutes every 3 h between 6.00 am to 6.00 pm by a motor to ensure the homogeneity of the reactor contents and to prevent organic acids accumulation in the digester which may result the reactor failure. The sludge recirculation was performed using the centrifugal pump operated at 60 rpm. The substrates used in this study were the mixture of corn cobs, corn husks and corn seeds at the ratio of 54:44:2 by weight. The inoculum was the mixture of anaerobic sludge and pig manure at the ratio of 1:2 (v/v). The ratio of substrate and inoculum (S/I) was 1:6 (w/v) to shorten the start-up period. The initial TS of the feedstock was 20%, and hydraulic retention time (HT) was 30 days (Fdez and et al., 2012).

~3~

The operating parameters (i.e. pH, COD, TS, VS, VFA and ALK) were measured at the beginning and during the experiment. The produced biogas was measured by water replacement method and the biogas composition was analyzed using portable gas check (Geotech, Biogas 5000). The experiment was performed for 30 days.

2.1 Substrate

The SCW (i.e. corn cobs, corn husks and corn seeds) was collected from Sun Sweet Co., Ltd, Chiang Mai Thailand (98°50'53.4'' E). The biomass was chopped with an agricultural cutting machine to approximately 5-10 mm length. After that it was pre-acidified at ambient temperature for 72 h to enhance hydrolysis and acidogenesis of AD (Sopee and Nutthanicha, 2017; Chen and et al., 2015). The liquid and solid portions from the pretreatment was analyzed for pH, total solids (TS), volatile solids (VS) and Carbon to Nitrogen (C/N) ratio.

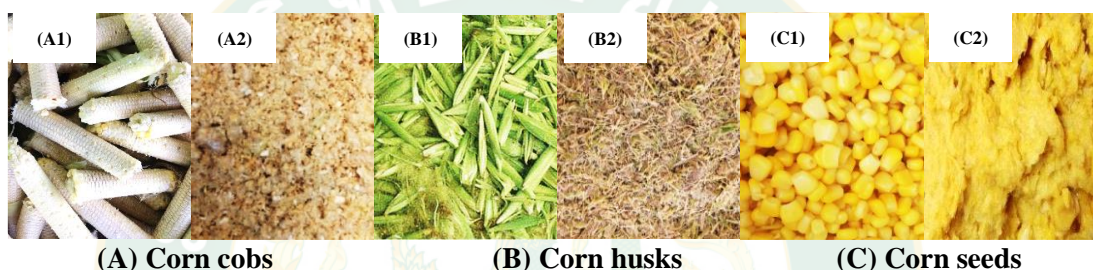


Figure 2 The sweet corn waste (corn cobs, corn husk and corn seeds) before and after pre-acidify.

2.2 Inoculum

The anaerobic sludge withdrawn from the anaerobic filter digester fed with wastewater from Sun Sweet Public Co., Ltd, Chiang Mai Thailand (98°50'53.4'' E) and the sludge from the anaerobic digester of pig manure from the small-scale pig farm was mixed at the ration of 1:2 by volume (Wong, 1990; Wanqin and et al., 2014) and used as the inoculum in this study as shown in figure 3. The inoculum was filtered through a 1 mm mesh to screen out the inert material. The prepared inoculum was then stored in an anaerobic condition until gas production was not detected to remove the organic compounds. Then pH, moisture content, TS, VS, volatile fatty acid (VFA) and Alkalinity (ALK) were analyzed prior to the experiments for characterizing the inoculum.



Figure 3 Inoculum

3. Analytical methods

Daily biogas production was quantified using water replacement method. The biogas composition was analyzed using portable gas check (Geotech, Biogas 5000). The operating parameters were analyzed following the standard methods: pH (APHA 4500), COD (APHA 5220), TS (APHA 2540), VS (APHA 2540), VFA (APHA 2310) and ALK (APHA 2310). All parameter analysis was triplicated to ensure the precision.

RESULTS AND DISCUSSIONS

1. Characteristics of the substrate and inoculum

1.1 Substrate

The characteristic of corn cobs, corn husks and corn seeds are shown in Table 1. All biomass contains high VS, representing organic matters, of 51%, 28%, and 53% of total weight, respectively. The VS/TS ratios of corn cobs, corn husks and corn seeds are another indicator to evaluate the biodegradability were also high as 0.957, 0.923 and 0.974, respectively. Typically, a substrate with VS/TS ratio more than 0.80 is concerned as a potential feedstock for anaerobic digestion (Wanqin and et al., 2014; Illmer and Gstraunthaler, 2009). The C/N ratio, indicating a proper amount of macro nutrients to facilitate microbial growth, is one of the important operating the parameter for AD. From table 1, the C/N ratios of corn cobs, corn husks and corn seeds were 36.02, 47.40 and 18.97, respectively which fall in the recommended range of 9–30 for AD process [3,9].

Table 1 Characteristics of the sweet corn waste

Properties	Unit	Biomass		
		Corn cobs	Corn husks	Corn seeds
Total solids (TS)	g/kg	530.78	302.47	548.89
Volatile solids (VS)	g/kg	508.48	279.19	534.75
VS/TS ratio	-	0.957	0.923	0.974
C/N ratio	-	36.02	47.40	18.97

1.2 Inoculum

The characteristics of inoculum e.g. anaerobic sludge and pig manure are presented in Table 2. The anaerobic sludge and pig manure had VS of 103.75 and 113.71 g VS/L, respectively. The VS/TS ratio of anaerobic sludge and pig manure were 0.876 and 0.839, respectively. (Selvam, 2010; Ratanatamskul and et al., 2014)

The volatile fatty acid (VFA) of anaerobic sludge and pig manure were quite high as 1,068.29 and 3,073.82 mg CH₃COOH/L, respectively, as indicated in table 2. Generally, VFA concentration in anaerobic digestion should not exceed 2,000 mg CH₃COOH/L but the maximum concentration could be high as 5,000 mg CH₃COOH/L. The inoculum was kept in the anaerobic condition to decrease the excess VFA for a week until the produced biogas was not detected. Alkalinity (ALK) of anaerobic sludge and pig manure were 1,626.42 and 4,445.58 mg CaCO₃/L, respectively. The optimum Alkalinity (ALK) should be in range of 1,000–5,000 mg CaCO₃/L for anaerobic digestion process.

~5~

Table 2 Characteristics of inoculum (Anaerobic sludge and pig manure)

Properties	Unit	Inoculum	
		Anaerobic sludge	Pig manure
pH	-	6.89	7.72
Moisture content	%	88.20	86.45
Total solids (TS)	g/L	117.96	135.49
Volatile solids (VS)	g/L	103.75	113.71
VS/TS ratio	-	0.876	0.839
Volatile fatty acid (VFA)	mg CH ₃ COOH/L	1,068.29	4,073.82
Alkalinity (ALK)	mg CaCO ₃ /L	1,626.42	5,445.58
VFA/ALK ratio	mg CH ₃ COOH/ mg CaCO ₃	0.657	0.748

2. Dry anaerobic digestion reactor performance

The important operating parameter such as COD, TS, and VS removal efficiency were study to indicate the reactor performance.

The VS and COD, typically, represent the organic matters of the solid and liquid portion of the feedstock, respectively

At the beginning of reactor operation, the substrate and inoculum were fed into the anaerobic reactor. The TS of the feed stock is set to 20%. The COD, TS and VS were analyzed every 3 days to investigate the removal efficiencies as presented in figure 4. The final COD, TS and VS removal efficiencies were 83.33%, 61.58% and 62.77%, respectively. The ambient temperature was in the mesophilic condition during the experimental period and ranges between 24.3 and 44.3°C (Yu and Fang, 2002; Ayhan and et al., 2016).

The statistical regression was used to studied to predict COD, TS and VS removal efficiency. The experimental data was fitted with Linear Regression as shown in Figure 4. The equations were $y = 2.7273x + 7.197$, $y = 1.9398x + 6.0117$ and $y = 1.9638x + 4.1281$ for COD, TS, and VS removal efficiencies, respectively. The high R-squares (R^2) of COD, TS and VS removal efficiency were highs as 0.9847, 0.9711 and 0.9823, respectively. The $R^2 > 0.8$ for all prediction model indicated the linear relationship between removal efficiency and reactor operating time. These equations could predict COD, TS and VS efficiency removal within 30 days of dry anaerobic digestion in this study efficiently (Jutaporn and et al., 2018).

~6~

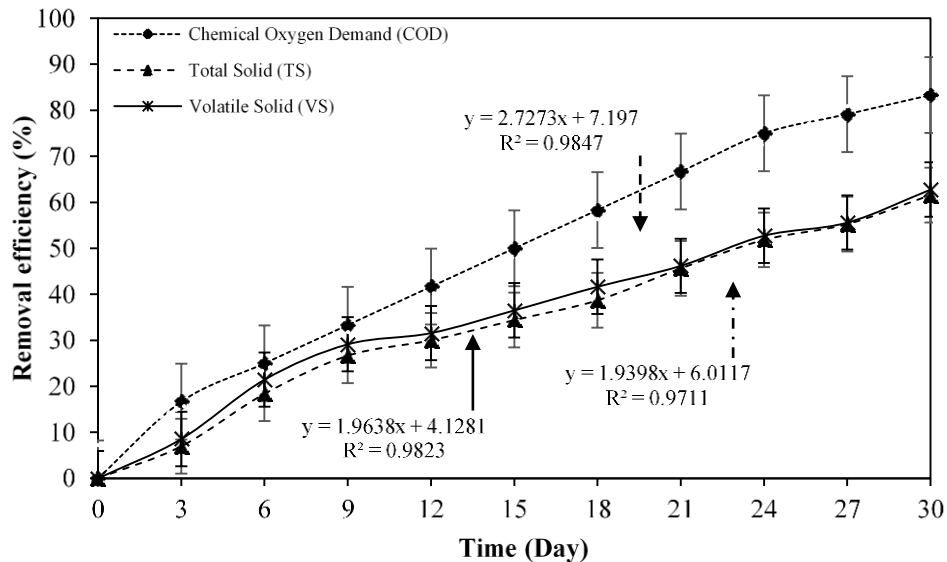


Figure 4 COD, TS, and VS removal efficiency

3. pH and VFA/ALK ratio

pH is one of the key factors reflexing system performances as it has strong correlation with volatile fatty acid (VFA) and Alkalinity (ALK) of the system. The optimum pH for anaerobic digestion were recommended to be 5.5 and 8.5 (Ratanatamskul, 2014). pH in this study was stable and vary between 6.78 and 7.24 as illustrated in figure 5 which effectively facilitate the methanogen growth. The pH decreasing at day 3 resulted VFA/ALK ratio rising to 0.64 which more than recommended VFA/ALK ratio of 0.4 (Yu and Fang, 2002; Ayhan and et al., 2016). This might be from the adaptation of methanogen, and the hydrolysis and acidogenesis of the high biodegradable portion of the feed stock during the start-up period (Ratanatamskul and et al., 2014). The pH was then start increasing from day 4 and become stable during the experimental period. The average VFA and ALK in the system were 1,120.39 mg CH₃COOH/L and 3,130.11 mg CaCO₃/L, respectively. The VFA/ALK ratio was maintained between 0.20 and 0.30 which lower than the recommended value of 0.4. Moreover, the reactor didn't show any failure sign during the 30 days period. The high Alkalinity of the system might help maintaining the system performance (Aura and et al., 2017; Voça and et al., 2005).

~7~

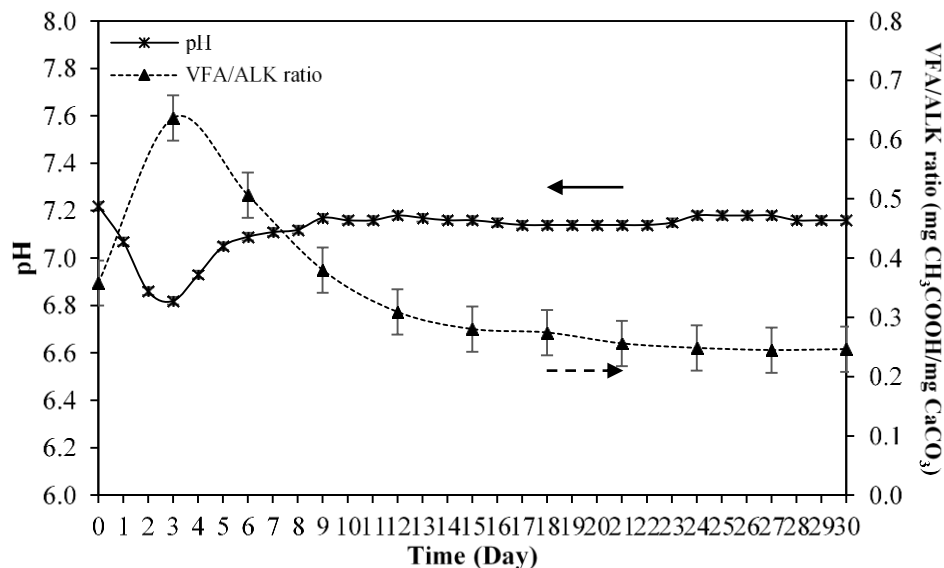


Figure 5 pH value and the VFA/ALK ratio for dry anaerobic digester

4. Biogas production, methane production, and biogas composition

The accumulated and the daily biogas production were 3,327.38 liters and 419.66 liters, respectively as presented in figure 6. The average biogas yield in the system was 0.59 L/g VS_{added}.

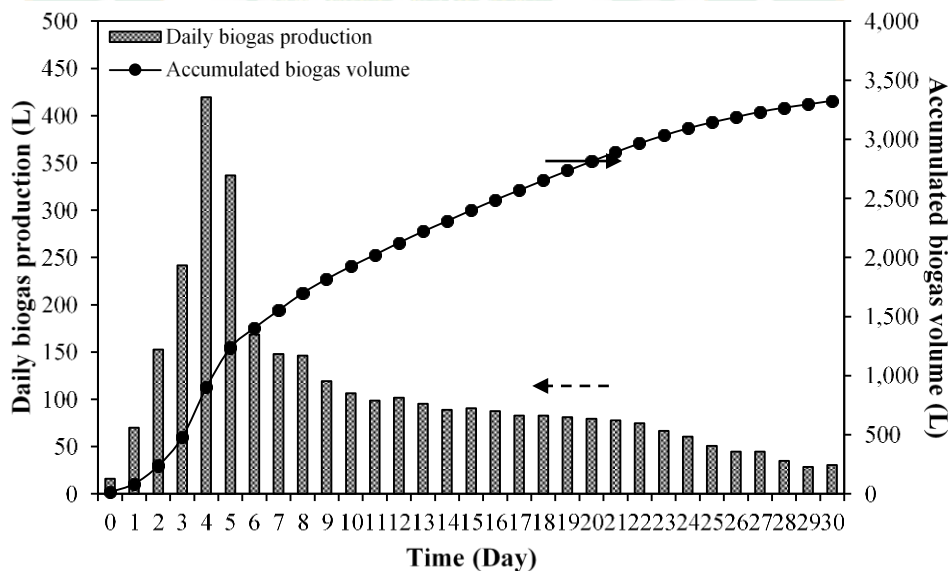


Figure 6 Daily biogas production and accumulated biogas volume for dry anaerobic digester

In the same trend, the accumulated and daily methane yield were 1,672.88 liters and 228.72 liters, respectively. The methane yield and methane percentage are shown in Figure 3.

~8~

The maximum methane yield was observed at day 4 of 1.25 L/g VS_{added} and the average methane yield was 0.30 L/g VS_{added}. It should be notice that the sharp increasing of methane yield was presented at the beginning stage (day 1 to 4) and it gradually decreased from day 6 and reach the minimum methane yield and percentage at the end of the experiment. The decreasing of the availability of the substrate might play a key role in this the phenomena (Erwin and Abdul, 2016).

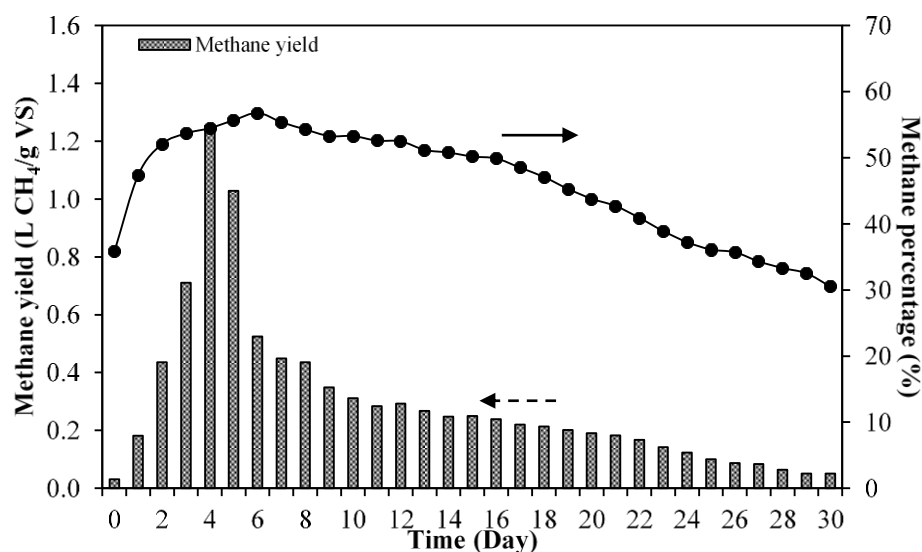


Figure 7 Methane yield and methane percentage for dry anaerobic digester

The biogas composition was analysed every day and the results indicated that in average biogas consists of methane, carbon dioxide, oxygen, and others of 46.0%, 37.8%, 1.3% and 14.9% by volume, respectively, and hydrogen sulphide was 45.3 ppm. The characteristics of the produced biogas are shown in Table 3. The methane percentage is similar to that reported by other studies using lignocellulosic feedstock (Ziana and Rajesh, 2015; Berlian and et al., 2013).

Table 3 The biogas component of dry anaerobic digestion

Gas	Unit	Volume
Methane (CH ₄)	%(v/v)	30.5–56.8
Carbon dioxide (CO ₂)	%(v/v)	24.6–45.3
Oxygen (O ₂)	%(v/v)	0.0–5.5
Hydrogen sulphide (H ₂ S)	ppm	0–394

CONCLUSION

The dry anaerobic reactor was operated in batch mode using pilot-scale reactor for 30 days and SCW was used as the sole feedstock. The reactor performance is stable without any signs of failure. The methane content is in a typical range of AD of lignocellulosic biomass. The design and operating procedures of this research could be used as a basic guideline to scale the dry anaerobic digestion technology up to the business-scale dry AD of SCW or could be transferred the technology to be used with the other lignocellulosic feedstock, effectively.

~9~

However, the continuous study is required to confirm the performance of a business-scale digester.

ACKNOWLEDGEMENT

The authors would like to gratefully acknowledge the following supporters of this research; Sun Sweet Public Co., Ltd, 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

- Aura, R., John, Á., Edwin, R., Paola, A., Angélica, S., Iván, C., Martha, A., and Mario, H. 2017. Evaluation of the Biochemical Methane Potential of Pig Manure, Organic Fraction of Municipal Solid Waste and Cocoa Industry Residues in Colombia. The Italian Association of Chemical Engineering. Available
- Ayhan, D., Osman, T., and Durmas, K. 2016. Biogas Production from Municipal Sewage Sludge (MSS). 2016. *Journal of Energy Sources*. 38 (20): 3027–3033.
- Berlian, S., Sukandar, S., and Panjaitan, D. 2013. Biogas Recovery from Anaerobic Digestion Process of Mixed Fruit-Vegetable Wastes. *International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application*. *Energy Procedia*. 32: 176–182.
- Bolzonella, D., Fatone, F., Pavan, P. & Cecchi, F. 2005. Anaerobic fermentation of organic municipal solid wastes for the production of soluble organic compounds. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 44 (10): 3412–3418.
- 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.
- Department of Alternative Energy Development and Efficiency. Biogas production from industrial waste. Available online: <http://weben.dede.go.th/webmax/content/biogas-production-industrial-waste-0>. (March 19, 2019)
- Erwin, R., and Abdul, W. 2016. Design and Testing of Mini-Size Biogas Plant. 6th Asian Physic: Symposium. *Journal of Physics: Conference Series* 739.
- 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.
- Illmer, P., and Gstraunthaler, G. 2009. Effect of Seasonal Changes in Quantities of Biowaste On Full Scale Anaerobic Digester Performance. *Waste Management*. 29 (1): 162–167.
- Jutaporn, C., Churat, T., and Jiraporn, Paoaiang. 2018. Determining Optimization of Factors Affecting Biogas Production by Co-Digestion of Sweet Corn cob Waste with Wastewater Using Response Surface Methodology. *Journal of Renewable Energy and Smart Grid Technology*. 13 (1), January - June 2018. online: www.aidic.it/cet. (March 19, 2019).
- Polprasert, C., 2007. *Organic Waste Recycling Technology and Management Third Edition*. Environmental Engineering and Management Field Asian Institute of Technology, Bangkok Thailand.
- Ratanatamskul, C., Onnum, G. and Yamamoto, K. 2014. 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.

~10~

- 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.
- Voća, N., Krička, T., Čosić, T., Rupiće, V., Jukić, Z., and Kalambura, S. 2005. Digested Residue as a Fertilizer After the Mesophilic Process of Anaerobic Digestion. *International Journal of Plant Soil Environmental*. 51 (6): 262–266.
- 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.
- Wong, M. 1990. Anaerobic Digestion of Pig Manure Mixed with Sewage Sludge. *Biological Wastes*. 31(3): 223-230.
- Yu, H., and Fang, P. 2002. Acidogenesis Of Dairy Wastewater at Various pH Levels. *Water Science and Technology*. 45 (10): 201–206.
- Ziana, Z., and Rajesh, P. 2015. Production and Analysis of Biogas from Kitchen Waste. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*. 2 (4): 622-632.

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นางสาวศศิธร ไสปลา
เกิดเมื่อ	10 มีนาคม 2538
ประวัติการศึกษา	ระดับปริญญาตรี ปีที่สำเร็จการศึกษา 2560 หลักสูตร วิทยาศาสตร์บัณฑิต (พลังงานทดแทน) (เกียรตินิยมอันดับ 1) สถาบัน มหาวิทยาลัยแม่โจ้
ประวัติการทำงาน	งานวิจัยร่วมกับสถานประกอบการ 1) การผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียในกระบวนการตัดเมล็ดข้าวโพด ซึ่งได้รับความร่วมมือทั้งวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ และบริษัท ชันสวีท จำกัด (มหาชน) 2) การผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียในกระบวนการผลิตเส้นขนมจีน ซึ่งได้รับความร่วมมือทั้งวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ และกลุ่มพัฒนาสตรีหมู่บ้านห้วยน้ำรินของโครงการแปรรูปผลิตภัณฑ์จากข้าว (เส้นขนมจีน) บ้านห้วยน้ำริน 3) การผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารอินทรีย์เหลือทิ้งของโรงเรียนบ้านต้นผึ้ง ตำบลเหมืองแก้ว อำเภอแม่ริม จังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งได้รับความร่วมมือจากวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ 4) การผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารอินทรีย์เหลือทิ้งของโรงเรียนบ้านศรีบุญเรือง ตำบลป่าไผ่ อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งได้รับความร่วมมือจากวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้
ทุนการศึกษา	1) ทุนสนับสนุนการศึกษา โครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทน ในกลุ่มประเทศอาเซียน สำหรับนักศึกษาระดับปริญญาตรี ประจำปีงบประมาณ 2557 ทุนเพชรพลังงาน (เรียนดี) จำนวนเงินสนับสนุน 5,000 บาท จากวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ 2) ทุนสนับสนุนการศึกษา โครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทน ในกลุ่มประเทศอาเซียน สำหรับนักศึกษาระดับปริญญาตรี ประจำปีงบประมาณ 2558 ทุนเพชรพลังงาน (เรียนดี) จำนวน

เงินสนับสนุน 5,000 บาท จากวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้

3) ทนสนับสนุนการศึกษา โครงการผลิตและพัฒนาศักยภาพบัณฑิตทางด้านพลังงานทดแทน ในกลุ่มประเทศอาเซียน สำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา ประจำปีงบประมาณ 2559-2560 ประเภทที่ 1 (อุดหนุนเต็มจำนวน) จำนวนเงินสนับสนุน 380,320 บาท จากวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้

4) ทนสนับสนุนการศึกษา วิจัย พัฒนาเทคโนโลยีอนุรักษ์พลังงานและพลังงานทดแทน ประจำปีงบประมาณ 2559 จำนวนเงินสนับสนุน 40,000 บาท จากกองนโยบายและแผนพลังงาน สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน (สนพ.) หัวข้อเรื่อง การผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียในกระบวนการตัดเมล็ดข้าวโพด

5) ทนการศึกษา ศิษย์ก้นกุฎี ประจำปีงบประมาณ 2560 จำนวนเงินสนับสนุน 36,000 บาท จากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้ (ทุนการศึกษาที่มุ่งเน้นให้สำหรับนักศึกษาที่มีผลการเรียนดีและมีศักยภาพในระดับบัณฑิตศึกษา เพื่อสร้างผลงานวิจัยที่มีคุณภาพให้แก่มหาวิทยาลัยแม่โจ้)

6) ทุนแผนงานเสริมสร้างศักยภาพและพัฒนานักวิจัยรุ่นใหม่ ตามทิศทางยุทธศาสตร์การวิจัยและนวัตกรรม: ประเภทบัณฑิตศึกษา (ระดับปริญญาโท) ประจำปี 2562 จำนวนเงินสนับสนุน 67,500 บาท จากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) หัวข้อเรื่อง ต้นแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษวัสดุเหลือทิ้งข้าวโพดหวานด้วยกระบวนการหมักแบบแห้ง