

การผลิตแก๊สชีวภาพจากต้นธูปฤาษีที่ผ่านการปรับสภาพ (*Typha angustifolia* L.)  
ร่วมกับมูลวัวโดยกระบวนการหมักแบบกึ่งกะ\*

Biogas Production from Pretreated Cattail (*Typha angustifolia* L.)  
with Cow Dung by Fed-Batch Fermentation Process

กิตติยา ป้อมเงิน (Kittiya Pomngern)\*\*

ประภา โഴ๊ะสลาม (Prapa Soh-salam)\*\*\*

รัชพล พะวงศ์รัตน์ (Ratchapol Pawongrat)\*\*\*\*

บทคัดย่อ

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพต้นธูปฤาษีโดยวิธีการทางกายภาพร่วมกับทางเคมีเพื่อการผลิตแก๊สชีวภาพคือ การปรับสภาพด้วยการนึ่ง, การปรับสภาพด้วยการนึ่งตามด้วยสารละลายต่าง และการปรับสภาพด้วยหม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูงร่วมกับสารละลายต่าง พบว่าการปรับสภาพด้วยหม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูงร่วมกับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ให้องค์ประกอบทางเคมีเหมาะสมคือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน คิดเป็นร้อยละ 59.07, 12.15 และ 11.52 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เมื่อทำการศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพด้วยการหมักแบบกึ่งกะ เป็นระยะเวลา 39 วัน ที่อุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียส โดยควบคุมปริมาตรรวมที่ใช้หมักเท่ากับ 0.25 ลิตร ที่อัตราส่วนธูปฤาษีต่อมูลวัว 1:3 อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 20.75 โดยในตอนเริ่มต้นระบบสารอินทรีย์จะถูกแบ่งเติมในขวดรูปชมพู่ในปริมาณที่แตกต่างกัน คือ ร้อยละ 75, 50 และ 25 พบว่า ธูปฤาษีที่ผ่านวิธีการปรับสภาพด้วยหม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูงร่วมกับสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ร่วมกับมูลวัว ที่ถูกแบ่งเติมร้อยละ 25 ให้ปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมสูงสุดเท่ากับ 434.70 มิลลิลิตร มีแก๊สมีเทนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบ คิดเป็นร้อยละ 48.74 และ 2.49 ตามลำดับ จากการศึกษาี้แสดงให้เห็นว่าการปรับสภาพและการแบ่งเติมปริมาณสารอินทรีย์ที่เหมาะสมสามารถเพิ่มศักยภาพในการใช้ประโยชน์จากต้นธูปฤาษีในการผลิตแก๊สมีเทน

คำสำคัญ : แก๊สชีวภาพ การปรับสภาพทางกายภาพร่วมกับทางเคมี ธูปฤาษี มูลวัว การหมักแบบกึ่งกะ

\* บทความนี้เป็นส่วนหนึ่งของวิทยานิพนธ์การผลิตแก๊สชีวภาพจากวัชพืชน้ำโดยกระบวนการหมักแบบกะและกึ่งกะ

This article is part of master thesis, Biogas Production from Aquatic Weed Plants by Batch and Fed-Batch Fermentation

\*\* นักศึกษา, หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขา คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน

Master's degree students, Bioproduct Science Program, Faculty of Liberal Arts and Science, Kasetsart University, Kamphaeng Saen Campus

\*\*\* อาจารย์, หลักสูตรวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน

Lecturer, Environmental Science and Technology Program, Faculty of Liberal Arts and Science, Kasetsart University, Kamphaeng Saen Campus

\*\*\*\* อาจารย์, หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขา คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน email: faasrpp@ku.ac.th  
Lecturer, Bioproduct Science Program, Faculty of Liberal Arts and Science, Kasetsart University, Kamphaeng Saen Campus

## Abstract

The optimal pretreated condition of cattail by physicochemical pretreatment methods for biogas production was investigated, such as steam-pretreated, steam- pretreated after that alkali pretreated and autoclave combined with alkali pretreated cattail. The results showed that the pretreatment by autoclave combined with sodium hydroxide 4% (w/v) gave the optimal chemical content of cellulose, hemicellulose and lignin with 59.07, 12.15 and 11.52 (w/w), respectively. The biogas production in fed-batch digestion for 39 days at 32°C with 0.25 L of total fermentation volume was conducted and the initial ratio of cattail to cow dung was 1:3 with C:N ratio of 20.75. In start-up state, organic matter was fed to the Erlenmeyer flask of different rate (75, 50 and 25%). The autoclave combined with alkali pretreated (4% NaOH) cattail to cow dung and organic matter was fed of rate 25% showed the 434.70 ml of biogas quantity and 48.74% of methane and 2.49% of carbon dioxide content. Therefore, the process of optimal condition of pretreated cattail and organic matter could enhance the increase of methane production.

**Keywords :** Biogas, physicochemical pretreatment, cat tail, cow dung, fed-batch

## บทนำ

ธูปฤาษี (Cattail) มีชื่อวิทยาศาสตร์คือ *Typha angustifolia* L. อยู่ในวงศ์ Typhaceae จัดเป็นวัชพืชชนิดหนึ่งที่สามารถเจริญเติบโตได้อย่างรวดเร็ว อีกทั้งยังมีการขยายพันธุ์ที่ง่ายจึงทำให้มีปริมาณเพิ่มมากขึ้นจนกลายเป็นขยะวัชพืช(ถูกรมรมง ปลัดสงคราม,2555) เป็นอุปสรรคกีดขวางการไหลของน้ำและยังทำให้แหล่งน้ำตื้นเขิน ซึ่งส่งผลกระทบต่อชีวิตความเป็นอยู่ของมนุษย์จนกระทั่งปัจจุบันนี้ยังไม่มียุทธศาสตร์ที่จะกำจัดวัชพืชได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งการจัดการที่ผ่านมามีได้เพียงแค่ว่าแก้ปัญหาเฉพาะหน้าโดยการใช้เครื่องจักรกลและการใช้สารเคมี แต่ก็ยังไม่สามารถที่จะกำจัดให้หมดไปได้อย่างจริงจัง ทำให้เกษตรกรต้องเสียค่าใช้จ่ายจำนวนมากในการกำจัดวัชพืชและการใช้สารเคมียังก่อให้เกิดสารพิษตกค้างในน้ำซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยอยู่ในน้ำ

สืบเนื่องจากการเจริญเติบโตทางด้านเศรษฐกิจอย่างรวดเร็ว และการเพิ่มขึ้นของประชากรโลกนำไปสู่ความต้องการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ปริมาณเชื้อเพลิงลดน้อยลง และราคาพลังงานปรับตัวสูงขึ้น ทำให้มีการพัฒนาหาแหล่งพลังงานที่ยั่งยืนเพื่อลดการพึ่งพาพลังงานเชื้อเพลิงฟอสซิล และลดการปล่อยแก๊สเรือนกระจก แก๊สชีวภาพ (Biogas) จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ แก๊สชีวภาพมีแก๊สมีเทน ( $CH_4$ ) เป็นองค์ประกอบหลักเป็นพลังงานสะอาดสามารถนำไปเป็นเชื้อเพลิงหุงต้ม ผลิตไฟฟ้า หรือผลิตความร้อนได้ โดยแก๊สมีเทน 1 ลูกบาศก์เมตร สามารถทดแทนแก๊สหุงต้มได้ประมาณ 0.46 กิโลกรัม หรือผลิตไฟฟ้าได้ประมาณ 2.09 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง ส่งผลให้สามารถลดค่าใช้จ่ายในครัวเรือนได้ การผลิตแก๊สชีวภาพสามารถทำได้จากวัตถุดิบหลายแหล่ง อาทิเช่น การผลิตแก๊สชีวภาพจากชีวมวล (Biomass) ซึ่งเป็นแหล่งวัตถุดิบที่มีมากในประเทศ โดยเฉพาะวัตถุดิบเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น ฟางข้าว ชังข้าวโพด ชานอ้อย เป็นต้น และวัชพืชน้ำ เช่น ผักตบชวา จอก ธูปฤาษี เป็นต้น ซึ่งวัสดุเหล่านี้ภายในโครงสร้างจะมีองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใย คือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ที่สามารถถูกนำมาใช้เพื่อผลิตแก๊สชีวภาพได้ (รัชพล พวงวงศ์รัตน์, 2554) โดยนิยมนำมาหมักร่วมกับของเสียจากปศุสัตว์ เช่น มูลวัว เนื่องจากมีเชื้อจุลินทรีย์จำนวนมากที่เหมาะสมต่อการผลิตแก๊สชีวภาพ แต่เนื่องจากโครงสร้างองค์ประกอบทางเคมีที่ซับซ้อนจึงมีความจำเป็นต้องผ่านการขึ้นตอนปรับ

สภาพ (pretreatment) ซึ่งในการผลิตแก๊สชีวภาพนั้นจะช่วยลดลิกนินซึ่งเป็นตัวขัดขวางกระบวนการหมักให้เป็นไปได้ซ้ำ ส่งผลให้ได้ปริมาณแก๊สชีวภาพลดลง การปรับสภาพนั้นสามารถทำได้หลายวิธีการโดยอาจจะใช้วิธีการทางกายภาพ เช่น การบด การใช้ไอน้ำแรงดันสูง วิธีการทางเคมี เช่น การใช้กรดหรือด่าง วิธีการทางชีวภาพ เช่น การใช้เอนไซม์ หรือเชื้อจุลินทรีย์ หรือการใช้ร่วมกันในวิธีการดังกล่าวข้างต้น (รัชพล พะวงศรีรัตน์, 2558) ส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพเพิ่มขึ้นได้ ทั้งนี้กระบวนการหมักที่เหมาะสมจะช่วยให้ประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพได้มากขึ้น โดยพบว่าการหมักแบบกึ่งกะ (Fed-batch fermentation) ซึ่งเป็นกระบวนการหมักที่มีการเติมสารอินทรีย์เพิ่มลงไปในระบบหมักเป็นระยะๆ เพื่อให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตและใช้สารอาหารได้อย่างเต็มที่ นอกจากนี้ยังช่วยลดปัญหาความเข้มข้นของสารอาหารเริ่มต้นสูง

ดังนั้นผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาศักยภาพและการใช้ประโยชน์จากรูปภาชีที่ผ่านการปรับสภาพโดยวิธีการทางกายภาพร่วมกับทางเคมีร่วมกับมูลวัวเพื่อผลิตแก๊สชีวภาพด้วยกระบวนการหมักแบบกึ่งกะเพื่อจะสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาพลังงานที่ยั่งยืน และช่วยกำจัดวัชพืชได้ในเวลาเดียวกันได้ในอนาคต

## วิธีการศึกษา

### 1. การเตรียมตัวอย่างต้นรูปภาชี และการเตรียมมูลวัว

เก็บตัวอย่างใบและลำต้นของรูปภาชี (จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน) นำมาผึ่งแดด 1-2 วัน จากนั้นนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60-70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นนำมาบดเพื่อลดขนาด (ประมาณ 1-2 มิลลิเมตร) ด้วยเครื่องบด (รุ่น RT04A) ทำการวิเคราะห์หองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยเริ่มต้น ได้แก่ ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน

เก็บตัวอย่างมูลวัวเนื้อ (จากมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน) นำมาผึ่งแดด 1-2 วัน จากนั้นนำมาบดเพื่อลดขนาด ทำการวิเคราะห์ค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C:N ratio) และเก็บตัวอย่างมูลวัวไว้ในถุงพลาสติกที่มิดชิดเพื่อใช้ในการศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพต่อไป

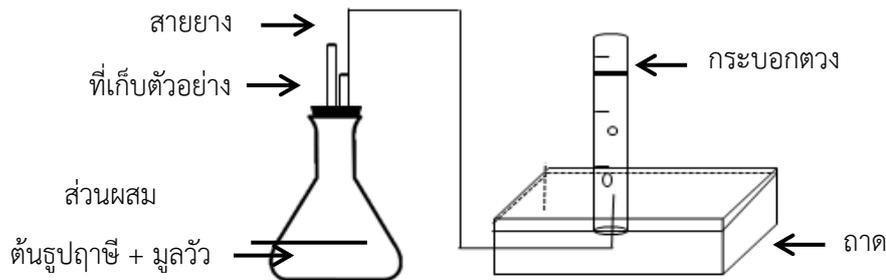
### 2. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพต้นรูปภาชีโดยวิธีทางกายภาพร่วมกับทางเคมี

นำตัวอย่างรูปภาชีที่ผ่านการลดขนาด จำนวน 10 กรัม มาทำการปรับสภาพโดยวิธีทางกายภาพร่วมกับทางเคมีโดยดัดแปลงมาจากวิธีการของ Singh and Bishnoi (2013) แบ่งเป็น 3 วิธีการ คือ (A) การปรับสภาพด้วยการนึ่ง โดยให้ไอน้ำร้อน ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 และ 60 นาที (B) การปรับสภาพด้วยการนึ่งโดยให้ไอน้ำร้อน ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 และ 60 นาที ตามด้วยสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ร้อยละ 2 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร และ (C) การปรับสภาพด้วยหม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูง (autoclave) ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 15 นาที ร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 2, 4 และ 6 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จากนั้นทำการวิเคราะห์หองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยหลังผ่านการปรับสภาพ ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ดัดแปลงมาจากวิธีการของ AOAC (1980) และศึกษาโครงสร้างทางกายภาพของเส้นใยของรูปภาชีหลังผ่านการปรับสภาพโดยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, SEM) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพเพื่อใช้ในการศึกษาผลการผลิตแก๊สชีวภาพต่อไป

### 3. การศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพจากต้นรูปภาชีร่วมกับมูลวัวโดยกระบวนการหมักแบบกึ่งกะ

การผลิตแก๊สชีวภาพจากต้นรูปภาชีร่วมกับมูลวัวโดยกระบวนการหมักแบบกึ่งกะ ในชุดอุปกรณ์การผลิตแก๊สชีวภาพ ดัดแปลงมาจากวิธีการของกิตติยา ป้อมเงิน และคณะ (2559) (ภาพที่ 1) นำต้นรูปภาชีที่ผ่านการปรับสภาพใส่ลงในพลาสติกขนาด 0.5 ลิตร ควบคุมปริมาตรภายในถังหมักที่ 0.25 ลิตร โดยอัตรา ส่วนต้นรูปภาชีต่อมูลวัว 1:3 อัตราส่วน

คาร์บอนต่อไนโตรเจน (C:N Ratio) เท่ากับ 20.75 ระยะเวลาในการหมัก 39 วัน ที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 32 องศาเซลเซียส) โดยสารอินทรีย์ (ต้นธูปฤาษีและมูลวัว) จะถูกเติมเข้าระบบทุกๆ 6 วัน เป็นเวลา 5 ครั้ง ในปริมาณที่แตกต่างกัน โดยแบ่งเติมเข้าระบบครั้งแรกร้อยละ 75, 50 และ 25 ตามลำดับ ทำการเก็บตัวอย่างโดยการวัดปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นโดยวิธีการแทนที่น้ำทุกๆ 3 วัน วิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊ส ได้แก่ แก๊สมีเทน ( $CH_4$ ) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) และวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง



ภาพที่ 1 ชุดอุปกรณ์การผลิตแก๊สชีวภาพ

#### 4. การวิเคราะห์

การวิเคราะห์องค์ประกอบเคมีของเส้นใยของต้นธูปฤาษีก่อนและหลังการปรับสภาพ ดัดแปลงมาจากวิธีการของ AOAC (1980) วิเคราะห์โครงสร้างทางกายภาพของเส้นใยของต้นธูปฤาษีก่อนและหลังการปรับสภาพโดยกล้อง SEM (ยี่ห้อ Camscan รุ่น MX 2000) วิเคราะห์องค์ประกอบของสารอินทรีย์โดยดัดแปลงมาจากวิธีการของอรรถยัชวาลภาฤทธิ์ (2545) ได้แก่ ปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) และปริมาณของแข็งระเหยง่ายได้ (VS) วิเคราะห์อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C:N ratio) วิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง โดยเครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH-meter) การวัดค่าซีโอดี (COD) ดัดแปลงมาจากวิธีการของมนัสสิน ตันจุลเวศม์ และมนักรักษ์ ตันจุลเวศม์ (2551) วัดอุณหภูมิ (T, °C) วัดปริมาณแก๊สโดยหลักการแทนที่น้ำ วิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สโดยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (Gas Chromatography, GC) (ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น GC-8A ที่สภาวะ detector ชนิด Thermal Conductivity Detector (TCD) ใช้ porapak Q 80/100) ได้แก่ ปริมาณแก๊สมีเทน ( $CH_4$ ) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) โดยดัดแปลงมาจากวิธีการของ สมจินตนา ลิ้มสุข และคณะ (2554)

#### 5. การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

ขั้นตอนในการวิจัยและผลการทดลองทำทั้งหมด 3 ซ้ำ วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) วิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้วิธี Duncan ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95.0 ( $p < 0.05$ )

### ผลการศึกษา

#### 1. ผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพต้นธูปฤาษีโดยวิธีทางกายภาพร่วมกับทางเคมี

จากผลการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพธูปฤาษีโดยวิธีทางกายภาพร่วมกับทางเคมี จากตารางที่ 1 พบว่าธูปฤาษีที่ผ่านการปรับสภาพด้วยหม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูง (Autoclave) ร่วมกับสารละลายด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ร้อยละ 2, 4 และ 6 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ส่งผลให้มีปริมาณเซลลูโลสเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับต้นธูปฤาษีที่ไม่ผ่านการปรับสภาพซึ่งแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) โดยพบว่าการปรับสภาพด้วยหม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูงร่วมกับสารละลายด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 4 และ 6 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีปริมาณเซลลูโลสสูงที่สุดซึ่งไม่แตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ( $p < 0.05$ ) คือร้อยละ  $59.07 \pm 0.20$  และ  $61.41 \pm 0.53$  เป็นไปในทำนองเดียวกันกับ

งานวิจัยของ Mao et al. (2015) ที่ศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรที่ผ่านการปรับสภาพพบว่าเมื่อปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในย่อยสลายสารอินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์พืช ทำให้โครงสร้างผนังเซลล์พืชอ่อนตัวลงและสามารถย่อยสลายได้ง่ายและความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เพิ่มขึ้นทำให้เซลล์ลูโลสเพิ่มขึ้น เป็นการส่งเสริมให้กระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาถึงต้นทุนในการปรับสภาพแล้วยังพบว่าการปรับสภาพด้วยหม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูงร่วมกับสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ ร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มีค่าใช้จ่ายในการปรับสภาพที่ต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับปรับสภาพด้วยหม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูงร่วมกับสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 6 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร แต่ให้ปริมาณเซลล์ลูโลสไม่แตกต่างกันและยังให้น้ำหนักตัวอย่างหายไปน้อยกว่า ดังนั้นจึงเลือกใช้ตัวอย่างรูปภาชนะที่ผ่านการปรับสภาพด้วยหม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูงร่วมกับสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร มาทำการศึกษามูลค่าการผลิตแก๊สชีวภาพโดยกระบวนการหมักแบบกึ่งกะในการทดลองขั้นต่อไป

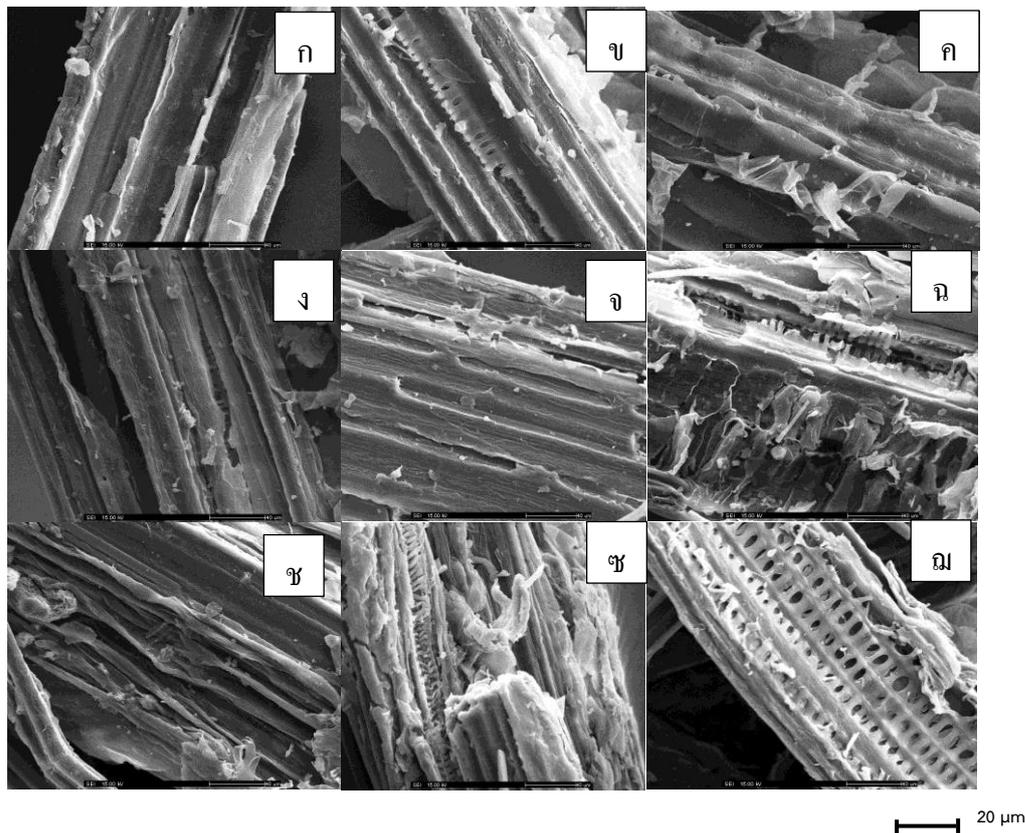
ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของต้นรูปภาชนะก่อนและหลังการปรับสภาพ

วิธีการปรับสภาพ	ร้อยละองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใย*			ร้อยละน้ำหนักตัวอย่างที่หายไป
	เซลลูโลส	เฮมิเซลลูโลส	ลิกนิน	
ไม่ผ่านการปรับสภาพ	52.84 ± 0.25 <sup>d</sup>	11.21 ± 0.75 <sup>c</sup>	13.05 ± 0.81 <sup>b</sup>	0.00 ± 0.00 <sup>s</sup>
นึ่ง 30 นาที	29.48 ± 0.54 <sup>g</sup>	10.38 ± 0.05 <sup>c</sup>	10.43 ± 0.30 <sup>d</sup>	9.66 ± 3.20 <sup>f</sup>
นึ่ง 60 นาที	34.80 ± 1.49 <sup>f</sup>	7.88 ± 2.07 <sup>d</sup>	3.67 ± 0.86 <sup>e</sup>	12.94 ± 0.94 <sup>e</sup>
นึ่ง 30 นาที + 2% NaOH	34.69 ± 1.82 <sup>f</sup>	7.30 ± 0.19 <sup>d</sup>	3.36 ± 1.51 <sup>e</sup>	44.89 ± 1.79 <sup>d</sup>
นึ่ง 60 นาที + 2% NaOH	36.04 ± 0.19 <sup>f</sup>	7.75 ± 0.67 <sup>d</sup>	2.98 ± 0.35 <sup>e</sup>	48.13 ± 2.21 <sup>c</sup>
Autoclave	42.04 ± 0.54 <sup>e</sup>	19.19 ± 0.04 <sup>a</sup>	17.93 ± 0.19 <sup>a</sup>	12.33 ± 1.19 <sup>e</sup>
Autoclave + 2% NaOH	55.02 ± 0.68 <sup>c</sup>	14.85 ± 0.77 <sup>b</sup>	12.80 ± 0.24 <sup>bc</sup>	49.45 ± 2.20 <sup>c</sup>
Autoclave + 4% NaOH	59.07 ± 0.20 <sup>ab</sup>	12.15 ± 1.52 <sup>c</sup>	11.52 ± 0.25 <sup>cd</sup>	55.23 ± 1.57 <sup>b</sup>
Autoclave + 6% NaOH	61.41 ± 0.53 <sup>a</sup>	10.83 ± 0.82 <sup>c</sup>	11.20 ± 0.56 <sup>d</sup>	58.18 ± 1.56 <sup>a</sup>

หมายเหตุ: a, b, c, ... เป็นค่าทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (p<0.05) โดยเปรียบเทียบข้อมูลในแนวตั้งของตาราง, \*ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ทั้งนี้จากผลการศึกษารูปภาชนะที่ผ่านการปรับสภาพของต้นรูปภาชนะยังสอดคล้องกับผลการศึกษาลักษณะโครงสร้างของเส้นใยของรูปภาชนะด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) (ภาพที่ 2) พบว่าการปรับสภาพมีผลต่อลักษณะโครงสร้างของเส้นใยของรูปภาชนะ คือรูปภาชนะที่ผ่านการปรับสภาพ (ภาพที่ 2 ข-ฉ) จะมีลักษณะโครงสร้างที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมคือโครงสร้างจะถูกทำลายได้มากกว่า และมีความพรุนมากกว่าเมื่อเทียบกับรูปภาชนะที่ไม่ผ่านการปรับสภาพ (ภาพที่ 2 ก) ทำให้เห็นโครงสร้างของเซลล์ของต้นรูปภาชนะที่ชัดเจนขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งวิธี การปรับสภาพด้วยหม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูงร่วมกับสารละลายต่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 4 และ 6 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร (ภาพที่ 2 ข-ฉ) จะเห็นลักษณะโครงสร้างของเซลล์ที่ชัดเจนยิ่งขึ้น อาจเป็นผลมาจากความร้อนและแรงดันของหม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูงร่วมกับการใช้สารละลายต่างที่มีความเข้มข้นสูง ต่างทำให้วัสดุเกิดการพองตัวและมีความพรุนเพิ่มขึ้น เนื่องจากช่วยกำจัดสายโซ่ที่เชื่อมต่อกันในโมเลกุลผลึกของเซลลูโลสให้ลดลง และช่วยแยกโครงสร้างระหว่างลิกนินและคาร์โบไฮเดรต

ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง (Brodeur et al., 2011) สอดคล้องกับรายงานวิจัยของ Lin et al. (2015) พบว่าการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์สามารถแยกกลีทินและเฮมิเซลลูโลสบางส่วนออกได้ ทำให้โครงสร้างของเซลล์พืชกระจายและมีพื้นที่ผิวมากขึ้น เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Taherdanak and Zilouei (2014) พบว่าการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ส่งผลให้โครงสร้างของเซลล์พืชบางส่วนถูกทำลายและทำให้วัสดุเกิดความพรุนช่วยให้จุลินทรีย์เข้าถึงวัสดุและย่อยสลายได้ง่ายกว่าการไม่ปรับสภาพ

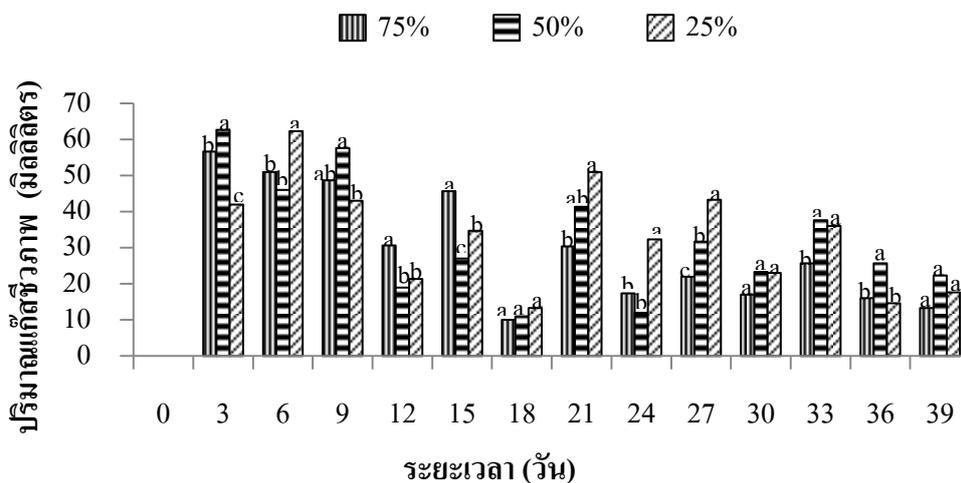


ภาพที่ 2 โครงสร้างทางกายภาพของเส้นใยของต้นธูปฤาษีด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 500 เท่า (ก) ไม่ผ่านการปรับสภาพ (ข) นึ่ง 30 นาที (ค) นึ่ง 60 นาที (ง) นึ่ง 30 นาที +2% NaOH (จ) นึ่ง 60 นาที +2% NaOH (ฉ) หม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูง (Autoclave) (ช) หม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูงร่วมกับ 2% NaOH (ซ) หม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูงร่วมกับ 4% NaOH (ฅ) หม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูงร่วมกับ 6% NaOH

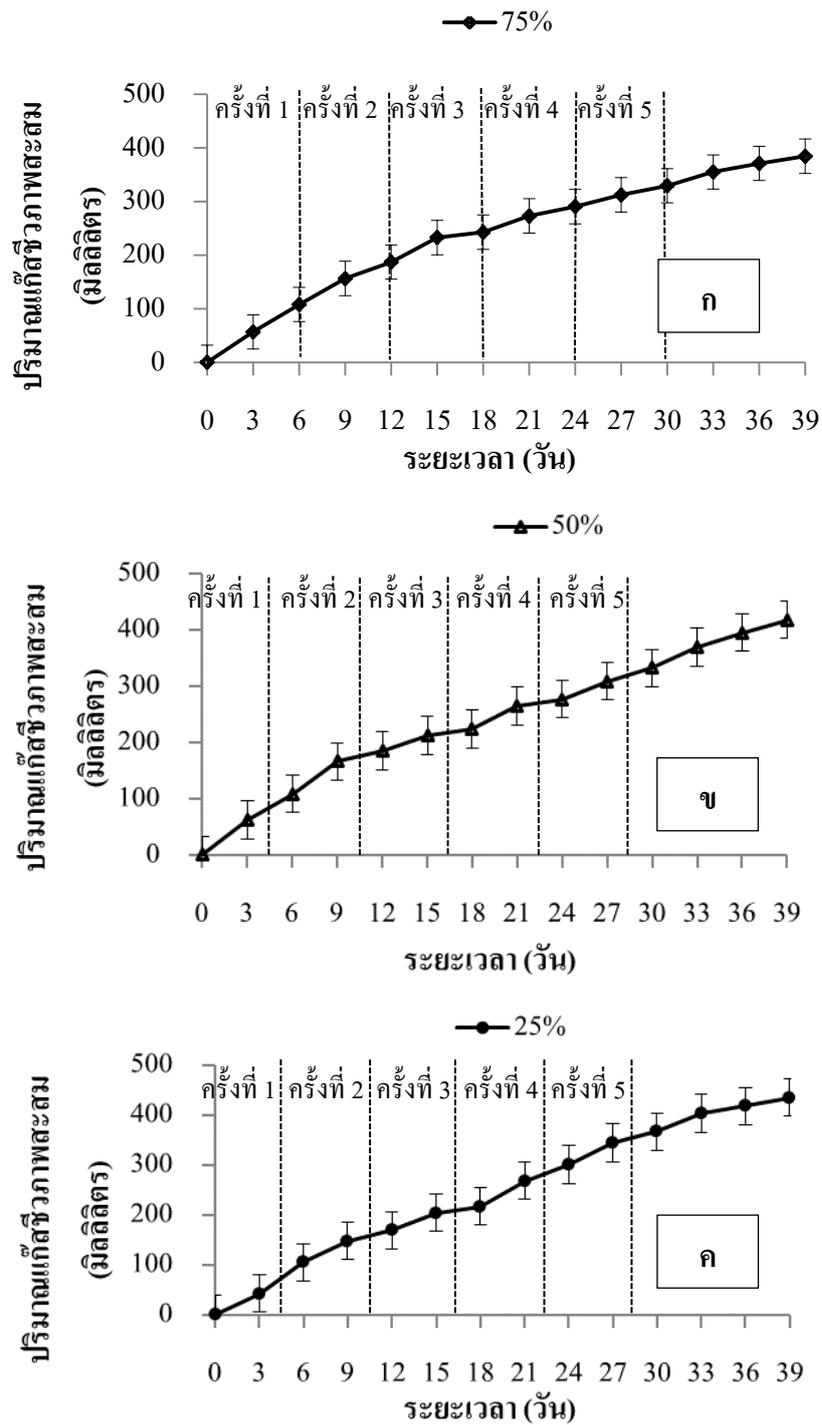
## 2. ผลการศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพจากต้นธูปฤาษีร่วมกับมูลวัวโดยกระบวนการหมักแบบกึ่งกะ

จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพต้นธูปฤาษีโดยวิธีทางกายภาพร่วมกับทางเคมีพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพต้นธูปฤาษีคือวิธีการใช้หม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูงร่วมกับสารละลายด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ดังนั้นจึงเลือกมาศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพต่อโดยหมักร่วมกับมูลวัวในอัตราส่วน 1:3 ในกระบวนการหมักแบบกึ่งกะ โดยปริมาณสารอินทรีย์จะถูกเติมเข้าระบบทุกๆ 6 วัน เป็นเวลา 5 ครั้ง ในปริมาณที่แตกต่างกันโดยแบ่งเติมเข้าระบบครั้งแรกร้อยละ 75, 50 และ 25 ตามลำดับ ภาพที่ 3 แสดงให้เห็นถึงปริมาณการผลิตแก๊สชีวภาพของต้นธูปฤาษีที่ผ่านการปรับสภาพร่วมกับมูลวัวโดยที่ปริมาณสารอินทรีย์จะถูกแบ่งเติมเข้าระบบครั้งแรกในปริมาณแตกต่างกัน พบว่าปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกแบ่งเติมเข้าระบบครั้งแรกร้อยละ 75, 50 และ 25 ในช่วง 6 วันแรกมีการผลิตแก๊สชีวภาพสูงสุดเท่ากับ 56.67, 62.7 และ 62.33 มิลลิลิตร ซึ่งเมื่อทำการศึกษาและวัดผลผลิตอย่างต่อเนื่องจะ

พบว่าหลังจากเติมสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบทุกๆ 6 วัน และวัดปริมาณแก๊สชีวภาพทุกๆ 3 วัน ปริมาณแก๊สชีวภาพมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เนื่องจากการแบ่งเติมสารอินทรีย์ลงไปในระบบซึ่งทำให้จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ได้เรื่อยๆ และแปรสภาพเป็นแก๊สมีเทนได้ (พรพิมล พันธสุนทร, 2558) ขณะที่การเติมสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบหมักเพียงครั้งเดียวทำให้จุลินทรีย์ย่อยสลายสารอินทรีย์และแปรสภาพเป็นแก๊สมีเทนได้ดีในช่วงแรก และเนื่องจากสารอาหารมีจำกัดต่อความต้องการของจุลินทรีย์ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพที่ลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของสมจินตนา ลิ้มสุข และคณะ (2554) และ Ruffino et al. (2015) ที่ศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพโดยกระบวนการหมักแบบกึ่งกะ พบว่าเมื่อมีการเติมสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบทำให้ค่าเฉลี่ยแก๊สชีวภาพเพิ่มขึ้นและเมื่อหยุดเติมสารอินทรีย์แก๊สชีวภาพจะมีค่าเฉลี่ยลดลง สืบเนื่องจากปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกแบ่งเติมเข้าระบบครั้งแรกที่ร้อยละ 25 มีแนวโน้มการผลิตแก๊สชีวภาพดีกว่าส่งผลให้มีแก๊สชีวภาพสะสมสูงสุดเท่ากับ 434.7 มิลลิลิตร รองลงมาคือที่ร้อยละ 50 และ 75 เท่ากับ 417.30 และ 384.30 มิลลิลิตร (ภาพที่ 4) เนื่องจากอัตราการใส่สารอินทรีย์ในครั้งแรกต่ำกว่าทำให้ประสิทธิภาพในการย่อยสลายของจุลินทรีย์ดีกว่าส่งผลให้ผลิตแก๊สชีวภาพได้ดีกว่า (Chulalaksananukul et al., 2012)

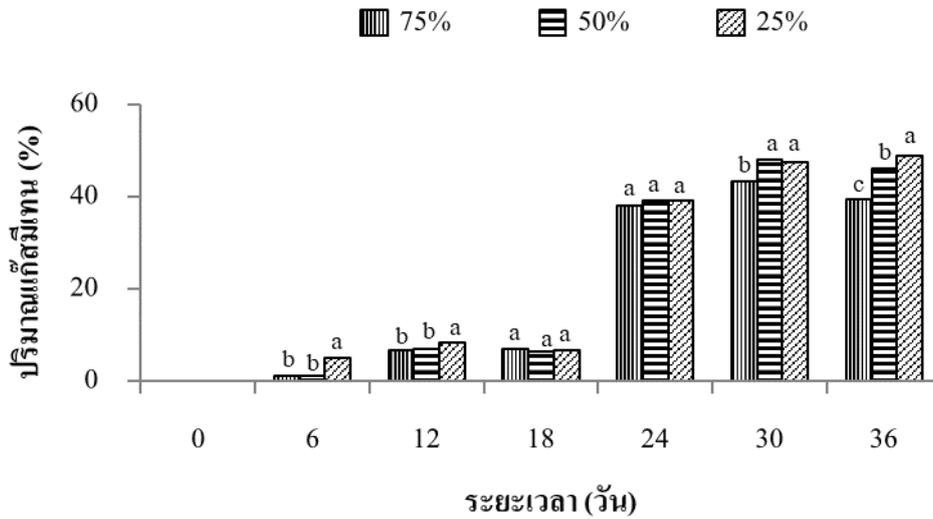


ภาพที่ 3 ปริมาณการผลิตแก๊สชีวภาพของต้นธูปฤาษีที่ผ่านการปรับสภาพร่วมกับมูลวัวในอัตราส่วน 1:3 โดยที่ปริมาณสารอินทรีย์จะถูก แบ่งเติมเข้าครั้งแรกในปริมาณแตกต่างกันในกระบวนการหมักแบบกึ่งกะ คือร้อยละ 75, 50 และ 25  
หมายเหตุ: a, b, c, ... แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $p < 0.05$ ) โดยเปรียบเทียบในชุดข้อมูลที่ ระยะเวลาเดียวกัน



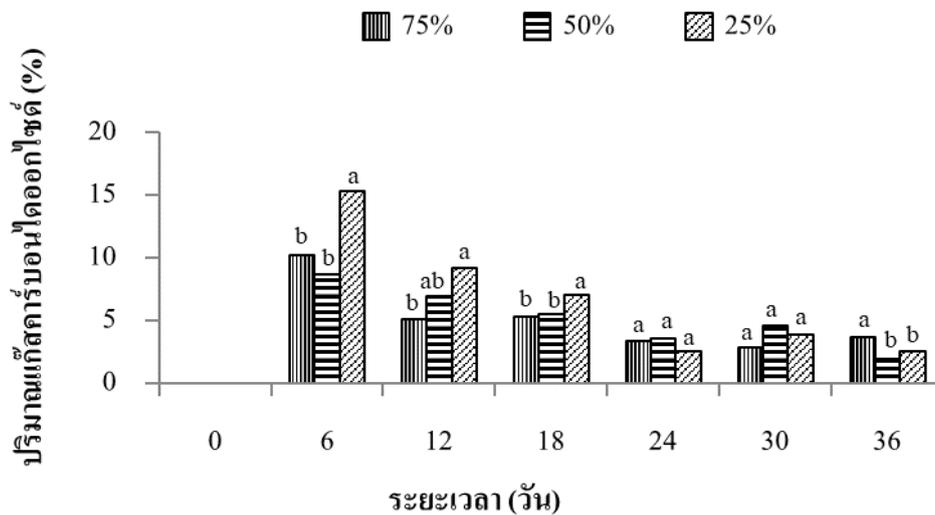
ภาพที่ 4 ปริมาณการผลิตแก็สชีวภาพสะสมของต้นรูกาซีที่ผ่านการปรับสภาพร่วมกับมูลวัวในอัตราส่วน 1:3 โดยที่ปริมาณสารอินทรีย์จะถูกแบ่งเติมเข้าครั้งแรกในปริมาณแตกต่างกันในกระบวนการหมักแบบกึ่งกะ (ก) ร้อยละ 75 (ข) ร้อยละ 50 (ค) ร้อยละ 25

และจากการวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สชีวภาพที่ได้ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี (ภาพที่ 5 และ 6) พบว่าในช่วงแรกของการผลิตแก๊สชีวภาพมีสัดส่วนของแก๊สมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) ต่ำ แต่สัดส่วนของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ค่อนข้างสูง เนื่องจากอยู่ในช่วงการย่อยสลายสารอินทรีย์ (hydrolysis) และผลิตกรดอินทรีย์ (acidogenesis) ทำให้ได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา (ธีรศานต์ อนันตพงศ์, 2556) หลังจากนั้นจึงเข้าสู่ช่วงการผลิตแก๊สมีเทน (methanogenesis) ทำให้สัดส่วนของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง เป็นผลมาจากแบคทีเรียกลุ่มเมทาโนเจนส์ทำการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของแก๊สให้กลายเป็นแก๊สมีเทน ทำให้สัดส่วนของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าน้อยลง ในขณะที่สัดส่วนของแก๊สมีเทนมีค่าเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการย่อยสลายที่นานขึ้น โดยหลังจากวันที่ 18 เป็นต้นไปจะเห็นได้ว่าแก๊สมีเทนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในทุกการทดลอง และในวันที่ 36 ปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกแบ่งเติมเข้าระบบครั้งแรกร้อยละ 25 ให้ค่าแก๊สมีเทนสูงสุดเท่ากับร้อยละ 48.74 ( $p < 0.05$ ) รองลงมาคือที่ร้อยละ 50 และ 75 คือเท่ากับร้อยละ 45.99 และ 39.29 เนื่องจากร้อยละของการเติมสารอินทรีย์ที่ในปริมาณที่สูง อาจส่งผลให้โอกาสที่สารอินทรีย์จะถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรียและแปรสภาพเป็นแก๊สมีเทนได้ต่ำกว่า โดยพบว่าสัดส่วนของแก๊สมีเทนที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของสมจินตนา ลีมสุข และคณะ (2554) ที่ศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารโดยกระบวนการหมักแบบกึ่งกะ ในถังหมักขนาด 200 ลิตร เป็นระยะเวลา 111 วัน พบว่าให้ค่าแก๊สมีเทนอยู่ในช่วงร้อยละ 47-60 แต่ให้ค่าแก๊สมีเทนสูงกว่าเมื่อเทียบกับงานวิจัยของ Chulalaksananukul et al. (2012) ที่ศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพจากเปลือกสับปะรดโดยกระบวนการหมักแบบกึ่งกะ ในถังหมักขนาด 6 ลิตร พบว่าให้ค่าแก๊สมีเทนร้อยละ 32.86 แต่ให้ค่าแก๊สมีเทนต่ำกว่าเมื่อเทียบกับงานวิจัยของ Velmurugan and Ramanujam (2011) ที่ได้ทำการศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษผักโดยใช้กระบวนการหมักแบบกึ่งกะในถังหมักขนาด 2 ลิตร เป็นระยะเวลา 30 วัน พบว่าให้ค่าแก๊สมีเทนเฉลี่ยร้อยละ 65 และผลผลิตแก๊สมีเทน 0.387 ลิตรมีเทนต่อกรัมของแข็งระเหย ส่วน Lin et al. (2012) ได้ทำการศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารโดยใช้กระบวนการหมักแบบกึ่งกะ เป็นระยะเวลา 60 วัน พบว่าให้ผลผลิตแก๊สมีเทนสูงสุดเท่ากับ 256 มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหย และจากรายงานวิจัยของ Ruffino et al. (2015) ซึ่งได้ทำการศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษผักโดยใช้กระบวนการหมักแบบกึ่งกะ ในถังหมักขนาด 6 ลิตร เป็นระยะเวลา 21 วัน พบว่าให้ค่าแก๊สมีเทนเฉลี่ยร้อยละ 53 ทั้งนี้สัดส่วนของแก๊สมีเทนที่ได้มีค่าต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับสัดส่วนแก๊สมีเทนตามทฤษฎีคือประมาณร้อยละ 50-70 (Karki et al. (2005) ทั้งนี้อาจเกิดจากประสิทธิภาพของระบบหมักที่เป็นไปอย่างไม่สมบูรณ์ มีการรวบรวมระบบหมักเนื่องจากการเก็บตัวอย่างวิเคราะห์ การที่วัสดุหมักอัดตัวกันแน่นเนื่องจากการกวนผสมตลอดเวลา รวมทั้งค่าความเป็นกรด-ด่าง และอุณหภูมิในการเดินระบบซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยาเคมีและอัตราเร็วของปฏิกิริยาทางชีวเคมีซึ่งมีผลต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยตรงทำให้สัดส่วนแก๊สมีเทนมีค่าค่อนข้างต่ำ



ภาพที่ 5 ปริมาณการผลิตแก๊สมีเทนของต้นรูปถั่วที่ผ่านการปรับสภาพร่วมกับมูลวัวในอัตราส่วน 1:3 โดยที่ปริมาณสารอินทรีย์จะถูกแบ่งเติมเข้าครั้งแรกในปริมาณแตกต่างกันในกระบวนการหมักแบบกึ่งกะ คือร้อยละ 75, 50 และ 25

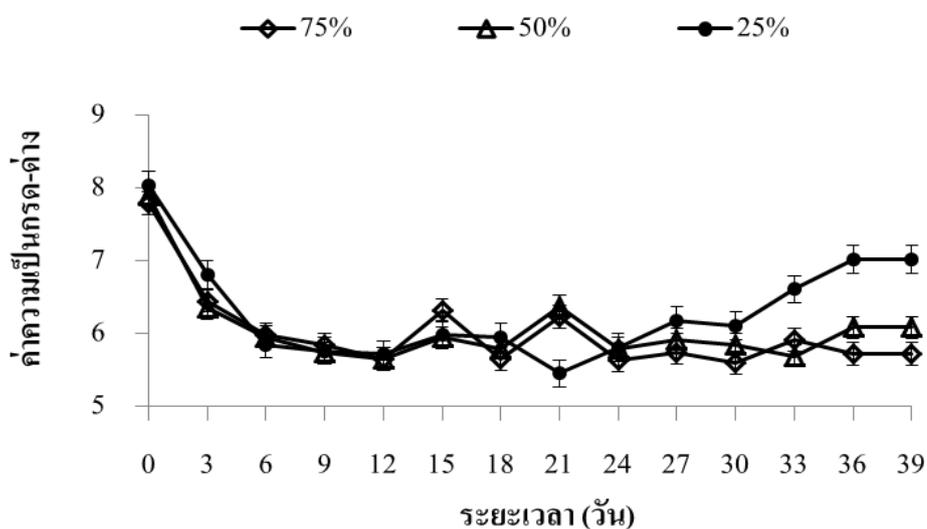
หมายเหตุ: a, b, c, ... แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $p < 0.05$ ) โดยเปรียบเทียบในชุดข้อมูลที่ระยะเวลาเดียวกัน



ภาพที่ 6 ปริมาณการผลิตแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ของต้นรูปถั่วที่ผ่านการปรับสภาพร่วมกับมูลวัวในอัตราส่วน 1:3 โดยที่ปริมาณสารอินทรีย์จะถูกแบ่งเติมเข้าครั้งแรกในปริมาณแตกต่างกันในกระบวนการหมักแบบกึ่งกะคือร้อยละ 75, 50 และ 25

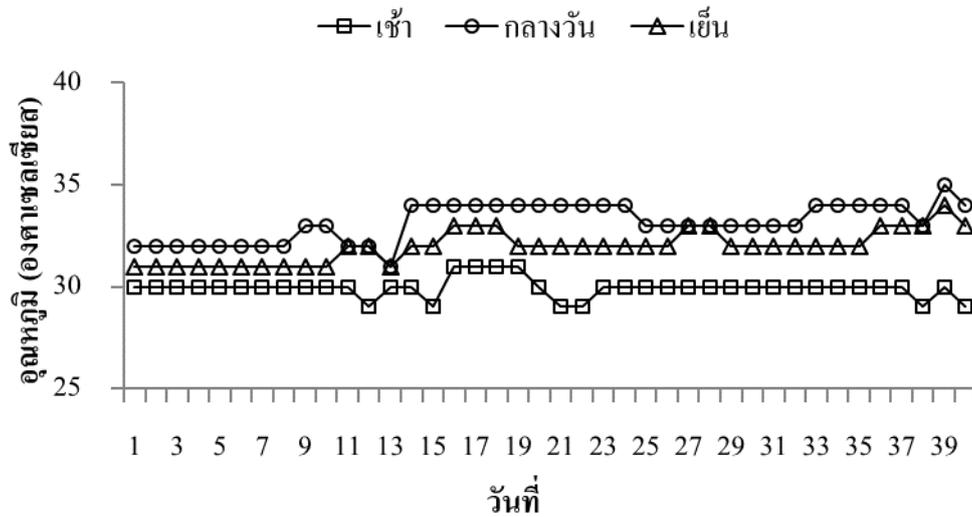
หมายเหตุ: a, b, c, ... แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $p < 0.05$ ) โดยเปรียบเทียบในชุดข้อมูลที่ระยะเวลาเดียวกัน

สำหรับค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) พบว่าปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกแบ่งเติมเข้าระบบครั้งแรกที่ร้อยละ 75, 50 และ 25 มีแนวโน้มค่าใกล้เคียงกันและเป็นไปในทำนองเดียวกัน (ภาพที่ 7) คือช่วง 6 วันแรกของการผลิตแก๊สชีวภาพมีค่าความเป็นกรด-ด่างลดลง ซึ่งเป็นไปตามทฤษฎีของปฏิกิริยาของกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศเมื่ออยู่ในช่วงการย่อยสลายสารอินทรีย์ (hydrolysis) ค่าความเป็นกรด-ด่างจะลดลง จากนั้นจะเข้าสู่ช่วงการผลิตแก๊สมีเทนของแบคทีเรีย (methanogenesis) ค่าความเป็นกรด-ด่างจึงมีค่าสูงขึ้น (Wang et al., 2013) และหลังจากมีเติมสารอินทรีย์ทุกๆ 6 วัน ค่าความเป็นกรด-ด่างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเกิดจากการเติมสารอินทรีย์เข้าระบบ ส่งผลดีต่อระบบช่วยรักษาค่าสภาพต่างๆที่เหมาะสมจึงช่วยให้สภาพแวดล้อมของการผลิตมีเทนยังเกิดได้ดี (ธีรศานต์ อนันตพงศ์, 2556) ซึ่งค่าความเป็นกรด-ด่างตลอดระยะเวลาในการผลิตแก๊สชีวภาพที่ร้อยละ 75, 50 และ 25 พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 5.60-7.80, 5.66-7.89 และ 5.45-8.03



ภาพที่ 7 ค่าความเป็นกรด-ด่าง ในระหว่างการผลิตแก๊สชีวภาพของต้นธูปฤาษีที่ผ่านการปรับสภาพร่วมกับมูลวัวในอัตราส่วน 1:3 โดยที่ปริมาณสารอินทรีย์จะถูกแบ่งเติมเข้าครั้งแรกในปริมาณแตกต่างกันในกระบวนการหมักแบบกึ่งกะคือร้อยละ 75, 50 และ 25

อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่ควบคุมอัตราเร็วของปฏิกิริยาทางชีวเคมีพบว่าในระหว่างการผลิตแก๊สชีวภาพโดยกระบวนการหมักแบบกึ่งกะมีอุณหภูมิเฉลี่ย 32 องศาเซลเซียส (ภาพที่ 8) ซึ่งอยู่ในช่วงมีโซฟิลิก (20-45 องศาเซลเซียส) เป็นช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย (พรพิมล พันธสุนทร, 2558) และจากการวิเคราะห์ปริมาณอินทรีย์วัตถุในตารางที่ 2 พบว่าปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกแบ่งเติมที่ร้อยละ 25 มีประสิทธิภาพในการบำบัดของแข็ง (TS) ของแข็งระเหยได้ (VS) และ COD เท่ากับ 46.53, 41.91 และ 56.54 กรัมต่อลิตร ซึ่งมีแนวโน้มที่ดีกว่าเมื่อเทียบกับที่ร้อยละ 100, 75 และ 50 ประสิทธิภาพการกำจัดค่า COD บวกถึงความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์ของเชื้อจุลินทรีย์ โดยปกติแล้วกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนจะสามารถลดค่า COD ได้



ภาพที่ 8 อุณหภูมิในระหว่างการผลิตแก๊สชีวภาพของรูปถ่ายซีที่ผ่านการปรับสภาพร่วมกับมูลวัวในอัตราส่วน 1:3 โดยที่ปริมาณสารอินทรีย์จะถูกแบ่งเติมเข้าครั้งแรกในปริมาณแตกต่างกันในกระบวนการหมักแบบกึ่งกะคือร้อยละ 75, 50 และ 25

ตารางที่ 2 ปริมาณ TS, VS และ COD ในวันแรกและวันสุดท้ายของการผลิตแก๊สชีวภาพจากต้นรูปถ่ายซีที่ผ่านการปรับสภาพร่วมกับมูลวัวในอัตราส่วน 1:3 โดยที่ปริมาณสารอินทรีย์จะถูกแบ่งเติมเข้าครั้งแรกในปริมาณแตกต่างกันในกระบวนการหมักแบบกึ่งกะคือร้อยละ 75, 50 และ 25

ร้อยละของตัวอย่าง	ตัวแปร (ก./ล.)	วันที่ 0	วันที่ 39	ร้อยละการกำจัด
75	TS	85.78 ± 1.00 <sup>a</sup>	62.56 ± 1.00 <sup>a</sup>	27.07 <sup>c</sup>
	VS	57.44 ± 1.40 <sup>a</sup>	36.00 ± 1.73 <sup>a</sup>	37.33 <sup>a</sup>
	COD	33.31 ± 2.10 <sup>a</sup>	18.30 ± 1.20 <sup>a</sup>	44.96 <sup>b</sup>
50	TS	85.11 ± 1.35 <sup>a</sup>	53.33 ± 1.76 <sup>b</sup>	37.34 <sup>b</sup>
	VS	63.11 ± 1.23 <sup>a</sup>	37.33 ± 2.17 <sup>a</sup>	40.85 <sup>a</sup>
	COD	31.31 ± 1.88 <sup>b</sup>	17.30 ± 1.04 <sup>a</sup>	44.63 <sup>b</sup>
25	TS	68.78 ± 0.51 <sup>b</sup>	36.78 ± 1.35 <sup>c</sup>	46.53 <sup>a</sup>
	VS	45.33 ± 1.67 <sup>b</sup>	26.33 ± 0.58 <sup>b</sup>	41.91 <sup>a</sup>
	COD	30.41 ± 2.06 <sup>b</sup>	13.18 ± 1.56 <sup>b</sup>	56.54 <sup>a</sup>

หมายเหตุ: a, b, c, ... เป็นค่าทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ( $p < 0.05$ ) โดยเปรียบเทียบในชุดข้อมูลที่ตัวแปรเดียวกัน, ค่าเฉลี่ย ± ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

### สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษาสถานะที่เหมาะสมในการปรับสภาพต้นรูปถ่ายซี พบว่าการปรับสภาพมีผลต่อโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยรูปถ่ายซี โดยวิธีการปรับสภาพรูปถ่ายซีที่เหมาะสมคือ วิธีการปรับสภาพด้วยหมอนึ่งไอน้ำแรงดันสูงร่วมกับโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 4 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร โดยมีปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินร้อยละ 59.07, 12.15 และ 11.52 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ และเมื่อนำไปศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพร่วมกับมูลวัวที่

อัตราส่วน 1:3 ในการหมักแบบกึ่งกะ พบว่าปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกแบ่งเติมเข้าระบบครั้งแรกร้อยละ 25 ให้ปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมสูงสุดเท่ากับ 434.70 มิลลิลิตร และแก๊สมีเทนร้อยละ 48.74 ดังนั้นกล่าวได้ว่าสภาวะในการปรับสภาพและการเติมปริมาณสารอินทรีย์ที่เหมาะสมมีผลต่อการการผลิตแก๊สชีวภาพ ทั้งนี้ยังจำเป็นต้องมีการศึกษาและพัฒนากระบวนการผลิตที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการหมักและเพิ่มปริมาณแก๊สมีเทน

### กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากศูนย์ส่งเสริมการวิจัยและถ่ายทอดเทคโนโลยี (ศสวท.) ประจำปีการศึกษา 2558 คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน และทุนสนับสนุนวิจัยหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ประจำปีการศึกษา 2559

### เอกสารอ้างอิง

#### ภาษาไทย

- กิตติยา บ่อมเงิน, ประภา โชะสลาม และรัชพล พะวงศรีรัตน์. (2559). “การผลิตแก๊สชีวภาพจากผักตบชวาที่ผ่านการปรับสภาพด้วยการนึ่งร่วมกับมูลวัวโดยกระบวนการหมักแบบกะ.”  
วารสารมหา วิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ 8, 3 (กันยายน-ธันวาคม): 76-86.
- ธีรศานต์ อนันตพงศ์. (2556). “การผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียชุมชนประเภทที่พักอาศัยร่วมกับเศษอาหาร.”  
วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- พรพิมล พันธุ์สุนทร. (2558). “การผลิตก๊าซชีวภาพจากตะกอนอินทรีย์ของระบบบำบัดน้ำเสียโรงงานแปงมัน  
สำหรับหลังแปรรูปโดยถังหมักไร้อากาศ.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- มันสิน ตันฑุลเวศม์ และ มันรัชช์ ตันฑุลเวศม์. (2551). **คู่มือวิเคราะห์คุณภาพน้ำ**. พิมพ์ครั้งที่ 5.  
โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.
- รัชพล พะวงศรีรัตน์. (2554). “การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมไฮโดรไลสเสทผักตบชวาโดยหม้อนึ่งไอน้ำ  
แรงดันสูงเพื่อผลิตเอทานอล.” Veridian E-Journal SU 4,1: 891-901.
- รัชพล พะวงศรีรัตน์. (2558). “กระบวนการปรับสภาพเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลจากวัสดุเหลือทิ้ง  
ทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส.” Veridian E-Journal SU 2, 1: 143-157.
- ฤธรรมรงค์ ปลัดสงคราม. (2555). “อิทธิพลของอัลคินิล ซัคซินิก แอนไฮไดรด์ แป้งดัดแปรประจุบวกและกรด  
ซัลฟิวริกต่อการผลิตกรดจากต้นพังหระและธูปฤาษี.” วิทยานิพนธ์ปริญญาโท,  
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- สมจินตนา ลิ้มสุข, ปุณยวี เพียรธรรม และอนุรักษ์ ปีติรักษ์สกุล. (2554). “การผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษ  
อาหารร่วมกับกลีเซอรอลดิบที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล.” วิศวกรรมสาร มช. 38, 2:  
101-110.
- อรทัย ขวาลภาฤทธิ์. (2545). **คู่มือวิเคราะห์น้ำและน้ำเสีย**. วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยในพระบรม  
ราชูปถัมภ์, กรุงเทพฯ.

### ภาษาต่างประเทศ

- AOAC. Association of Official Analytical Chemists. (1980). **Official methods of analysis**. 13<sup>th</sup> edn. AOAC, Washington, DC.
- Brodeur, Gary, Elizabeth Yau, Kimberly Badal, John Collier, K. B. Ramachandran and Subramanian Ramakrishnan. (2011). “Chemical and Physicochemical Pretreatment of Lignocellulosic Biomass: A Review.” **Enzyme Research** : 1-17.
- Chulalaksananukul, Suphang, Nusara Sinbuathong, and Warawut Chulalaksananukul. (2012). “Bioconversion of Pineapple Solid Waste under Anaerobic Condition through Biogas Production.” **KKU Res. J.** 7, 5: 734-742.
- Karki, Amrit B., Jagan N. Shrestha and Sundar Bajgain. (2005). “Biogas as renewable source of energy in Nepal theory and development.” BSP-Nepal., Kathmandu, Nepal.
- Lin, Richen, Jun Cheng, Wenlu Song, Lingkan Ding, Binfei Xie, Junhu Zhou and Kefa Cen. (2015). “Characterisation of water hyacinth with microwave-heated alkali pretreatment for enhanced enzymatic digestibility and hydrogen/methane fermentation.” **Bioresource Technology** 182: 1-7.
- Lin , Yunqin, Dehan Wang , Jiajin Liang and Guangpeng Li. (2012). “Mesophilic anaerobic co-digestion of pulp and paper sludge and food waste for methane production in a fed-batch basis.” **Environmental Technology** 33, 23: 2627-2633.
- Mao, Chunlan, Yongzhong Feng, Xiaojiao Wang and Guangxin Ren. (2015). “Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion.” **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 45: 540-555.
- Ruffino, Barbara, Silvia Fiore, Chiara Roati, Giuseppe Campo, Daniel Novarino and Mariachiara Zanetti. (2015). “Scale effect of anaerobic digestion tests in fed-batch and semi-continuous mode for the technical and economic feasibility of a full scale digester.” **Bioresource Technology** 182: 302-313.
- Singh, Anita and Narsi R. Bishnoi. (2013). “Comparative study of various pretreatment techniques for ethanol production.” **Industrial Crops and Products** 44: 283-289.
- Taherdanak, Mohsen and Hamid Zilouei. (2014). “Improving biogas production from wheat plant using alkaline pretreatment.” **Fuel** 115: 714-719.
- Velmurugan, B. and R. Alwar Ramanujam. (2011). “Anaerobic digestion of vegetable wastes For biogas production in a fed-batch reactor.” **Emerging Sciences** 1, 3: 478-486.
- Wang, Zhongjiang, Fuqing Xu and Yebo Li. (2013). “Effects of total ammonia nitrogen concentration on solid-state anaerobic digestion of corn stover.” **Bioresource Technology** 144: 281-287.