

การผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าในระบบหมักไร้อากาศแบบขั้นตอนเดียว

นางสาวณัฐกาญจน์ ชราปก

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2554

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บทคัดย่อและแฟ้มข้อมูลฉบับเต็มของวิทยานิพนธ์ตั้งแต่ปีการศึกษา 2554 ที่ให้บริการในคลังปัญญาจุฬาฯ (CUIR)

เป็นแฟ้มข้อมูลของนิสิตเจ้าของวิทยานิพนธ์ที่ส่งผ่านทางบัณฑิตวิทยาลัย

The abstract and full text of theses from the academic year 2011 in Chulalongkorn University Intellectual Repository (CUIR)

are the thesis authors' files submitted through the Graduate School.

BIOGAS PRODUCTION FROM GRASSES USING SINGLE STAGE
ANAEROBIC DIGESTION SYSTEM

Miss Nutakan Charapaka

A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Engineering Program in Environmental Engineering

Department of Environmental Engineering

Faculty of Engineering

Chulalongkorn University

Academic Year 2011

Copyright of Chulalongkorn University

หัวข้อวิทยานิพนธ์	การผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าในระบบหมักไร้อากาศแบบ ขั้นตอนเดียว
โดย	นางสาวณัฐกาญจน์ ชราพก
สาขาวิชา	วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชญ รัชฎาวงศ์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ น.สพ.ดร. จักรกริสน์ เนื่องจำนงค์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย อนุมัติให้รับวิทยานิพนธ์ฉบับนี้เป็นส่วน
หนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาโทบริหารบัณฑิต

..... คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
(รองศาสตราจารย์ ดร. บุญสม เลิศหิรัญวงศ์)

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร. ชวลิต รัตนธรรมสกุล)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชญ รัชฎาวงศ์)

..... อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ น.สพ.ดร. จักรกริสน์ เนื่องจำนงค์)

..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนัสกร ราชอาณาจักร)

..... กรรมการภายนอกมหาวิทยาลัย
(ดร. ณัฐสิทธิ์ เกียรติวัฒน์ชัย)

ณัฐกาญจน์ ชราภก : การผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าในระบบหมักไร้อากาศแบบขั้นตอนเดียว. (BIOGAS PRODUCTION FROM GRASSES USING SINGLE STAGE ANAEROBIC DIGESTION SYSTEM) อ. ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก: ผศ. ดร. พิษณุ รัชฎาวงศ์, อ. ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์ร่วม: ผศ.น.สพ.ดร. จักรกริสน์ เนื่องจำนงค์, 136 หน้า.

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนของหญ้าชนิดต่างๆ ในประเทศไทยด้วยวิธีบีเอ็มพีและศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบขั้นตอนเดียว สำหรับหญ้าที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์เป็นพืชพลังงานสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพได้ดีเนื่องจากหญ้ามีปริมาณผลผลิตต่อไร่สูง เจริญเติบโตและขยายพันธุ์ได้รวดเร็ว และทนต่อความแห้งแล้ง หญ้าที่ใช้ในการทดลองทั้ง 7 ชนิด ได้แก่ หญ้ารูซี่ หญ้ากินนีสีม่วง หญ้าอะตราตัม หญ้าพลีแกทูล์ม หญ้าไรด์ หญ้าเนเปียร์ยักษ์ และหญ้าแพงโกล่าซึ่งเก็บตัวอย่างหญ้าสดจากศูนย์วิจัยและพัฒนาอาหารสัตว์นครราชสีมา ต.ปากช่อง อ.ปากช่อง จ. นครราชสีมา

วิธีบีเอ็มพีเป็นการหาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนของหญ้าชนิดต่างๆ โดยทำการทดลองในขวดซีรัมสีชาขนาด 120 มิลลิลิตรที่ผสมสารละลายบัฟเฟอร์ (โซเดียมไบคาร์บอเนต) และหมักร่วมกับมูลวัว การทดลองรวมระยะเวลา 63 วันพบว่า หญ้ากินนีสีม่วงมีศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนสูงที่สุดมีค่า 0.170 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยและมีความเข้มข้นของก๊าซมีเทนระหว่างร้อยละ 35.78 - 63.54 และศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนของหญ้าแต่ละชนิดดังนี้ หญ้าไรด์ หญ้าแพงโกล่า หญ้าพลีแกทูล์ม หญ้าอะตราตัม หญ้ารูซี่ และหญ้าเนเปียร์ยักษ์ มีศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนที่ 0.144, 0.140, 0.131, 0.127, 0.115 และ 0.110 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย ตามลำดับ ขั้นที่สองเป็นการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพของหญ้าโดยถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบขั้นตอนเดียว โดยคัดเลือกหญ้ากินนีสีม่วงจากการทดลองบีเอ็มพีซึ่งมีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนดีที่สุด ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศเป็นแบบแบดซ์มีปริมาตร 2.5 ลิตร ระยะเวลาหมักรวมทั้งสิ้น 120 วัน โดยศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของถังปฏิกรณ์ที่มีอัตราการเวียนน้ำกลับที่แตกต่างกันคืออัตราเวียนน้ำกลับร้อยละ 25 (ปริมาตรน้ำชะที่เวียนกลับมีค่า 110 มิลลิลิตรต่อวัน) และร้อยละ 100 (ปริมาตรน้ำชะที่เวียนกลับมีค่า 430 มิลลิลิตรต่อวัน) ถังปฏิกรณ์ทั้งสองมีหญ้ากินนีสีม่วง 101.77±0.76 กรัมของของแข็งระเหย และมูลวัวสด 31.81±0.17 กรัมของของแข็งระเหย ผลการทดลองพบว่า ถังปฏิกรณ์ที่ 2 มีปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพมากกว่าถังปฏิกรณ์ที่ 1 ร้อยละ 10.81 และศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของถังปฏิกรณ์ที่ 1 และถังปฏิกรณ์ที่ 2 มีค่า 0.317 และ 0.353 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย ตามลำดับ ความเข้มข้นของก๊าซมีเทนของถังปฏิกรณ์ทั้งสองมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 28.47 - 64.92 ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าอัตราการเวียนน้ำกลับที่สูงขึ้นทำให้ระบบมีการผลิตก๊าซชีวภาพที่เพิ่มขึ้น

ภาควิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม...ลายมือชื่อนิสิต.....
 สาขาวิชา วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม...ลายมือชื่อ อ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์หลัก.....
 ปีการศึกษา.....2554.....ลายมือชื่อ อ.ที่ปริกษาวิทยานิพนธ์ร่วม.....

##5270281021 : MAJOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING

KEYWORDS : ANAEROBIC DIGESTION SYSTEM / BIOGAS / BIOCHEMICAL
METHAN POTENTIAL / GRASS

NUTAKAN CHARAPAKA : BIOGAS PRODUCTION FROM GRASSES USING
SINGLE STAGE ANAEROBIC DIGESTION SYSTEM. ADVISOR : ASST.PROF.
PICHAYA RACHDAWONG, Ph.D., CO-ADVISOR : ASST.PROF. CHACKRIT
NUENGJAMNONG, D.Tech. Sc., 136 pp.

The objectives of this study were to determine the Biochemical Methane Potential (BMP) of different grass species in Thailand and evaluate biogas production from grasses using a single stage anaerobic digestion. Grass can be used as energy crop for biogas production based on high biomass yield per rai, ability of regrowth and reproduction and drought resistance. The seven fresh grass species used in this experiment were Ruzi, Purple Guinea, Atratum, Plicatum, Rhodes, Pangola and King Napier cultivated at Nakhonratchasima Animal Nutrition Research and Development Center, Nakhonratchasima Province, Thailand.

The BMP assays were used to measure the methane potential of grass species. The assays were conducted in 120-mL serum bottles containing buffered medium (NaHCO_3) and inoculated with cow dung. For a 63 day incubation period, Purple Guinea yielded the highest amount of methane at $0.170 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg VS}$ added with methane percentages between 35.78 % and 63.54 %. In addition, Rhodes, Pangola, Plicatum, Atratum, Ruzi and King Napier had methane yields of 0.144, 0.140, 0.131, 0.127, 0.115 and $0.110 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg VS}$ added, respectively. Second step was the evaluation of biogas production from grasses using a single stage anaerobic reactor. Purple Guinea was selected from previous experiment based on the highest methane yield obtained in BMP assays. The assays were operated in batch reactor with the volume of 2.5 L, using an incubation period of 120 days. Two different recirculation rates were studied: 25 % recirculation (volume 110 mL/day) and 100 % recirculation (volume 430 mL/day) for reactor 1 and reactor 2, respectively. Both reactors were filled with $101.77 \pm 0.76 \text{ g VS}$ of Purple Guinea mixed with $31.18 \pm 0.17 \text{ g VS}$ of cow dung. The results demonstrated that reactor 2 had a higher total biogas production than reactor 1 (10.81%). Furthermore, reactor 1 and reactor 2 had biogas yields of 0.317 and $0.353 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg VS}$ added, respectively. The methane concentration of both reactors varied from 28.47 % to 64.92 %. Increasing the recirculation rate, therefore, enhanced biogas production from grasses using a single stage anaerobic digestion.

Department : Environmental Engineering.....

Student's Signature.....

Field of Study : Environmental Engineering.....

Advisor's Signature.....

Academic Year : 2011.....

Co-advisor's Signature.....

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงด้วยความกรุณาและความช่วยเหลือจากหลายฝ่าย ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิษณุ รัชฎาวงศ์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ น.สพ.ดร. จักรกริสน์ เนื่องจากรองรับอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ได้ให้คำแนะนำข้อคิดเห็น และตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์นี้จนเสร็จสมบูรณ์

กราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต รัตนธรรมสกุล ที่กรุณาเป็นประธานในการสอบวิทยานิพนธ์ และกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. มนัสกร ราชอาณาจักร และ ดร. ณัฐสิทธิ์ เกียรวัฒนีย์ชัย ที่กรุณาเป็นกรรมการในการสอบวิทยานิพนธ์

กราบขอบพระคุณ ศูนย์วิจัยและพัฒนาอาหารสัตว์นครราชสีมา ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการเก็บตัวอย่างหญ้ามาใช้ในงานวิจัย

กราบขอบพระคุณ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัยที่ให้เงินทุนสนับสนุนทุน 90 ปี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย รุ่นที่ 17 ครั้งที่ 1/2555 ภาคการศึกษาต้น ปีการศึกษา 2554 กองทุนรัชดาภิเษกสมโภช

กราบขอบพระคุณ สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ให้ทุนอุดหนุนวิทยานิพนธ์ ประเภทบัณฑิตศึกษา ประจำปี 2555 กลุ่มเรื่องการบริหารจัดการพลังงานและสร้างพลังงานทดแทน

กราบขอบพระคุณ คณาจารย์ นักวิทยาศาสตร์ และเจ้าหน้าที่ทุกท่าน ในหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ที่ให้ความกรุณาช่วยเหลือ และอำนวยความสะดวกในด้านต่างๆ

ขอขอบคุณ เพื่อนและรุ่นพี่ นิสิตปริญญาโททุกคน ที่ให้ความช่วยเหลือ ให้คำแนะนำ และให้กำลังใจเสมอมา

ท้ายที่สุดขอกราบขอบพระคุณ มารดา บิดา พี่สาว และครอบครัว ที่ให้ความรัก กำลังใจ และให้การสนับสนุนตลอดมาจนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ฅ
สารบัญภาพ.....	ฉ
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ.....	ฒ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา.....	1
1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	2
1.3 ขอบเขตของการวิจัย.....	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....	2
บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	3
2.1 ความสำคัญของพลังงานชีวมวล.....	3
2.1.1 ชีวมวล (Biomass).....	3
2.1.2 กระบวนการหมักเพื่อให้ได้ก๊าซมีเทน.....	3
2.2 หญ้าที่พบในประเทศไทย.....	4
2.3 องค์ประกอบทั่วไปของสารชีวมวล.....	6
2.3.1 เซลลูโลส (Cellulose).....	6
2.3.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose).....	7
2.3.3 ลิกนิน (Lignin).....	8
2.3.4 แป้ง (Starch).....	10
2.3.5 โปรตีน (Protein).....	10
2.3.6 สารอื่นๆ (Others).....	10
2.4 สารอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการชีวภาพ (Biodegradable Volatile Solids).....	11
2.5 การย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ (Anaerobic digestion).....	11
2.5.1 การย่อยสลายสารอินทรีย์ (Hydrolysis).....	12

2.5.2 การหมักกรดอินทรีย์ระเหยและการเปลี่ยนกรดอินทรีย์ ระเหยเป็นกรดแอซิดิก (Acidogenesis and Acetogenesis).....	13
2.5.3 การสร้างก๊าซมีเทน (Methanogenesis).....	13
2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ.....	14
2.7 การหมักแบบขั้นตอนเดียว (Conventional single stage digester).....	14
2.7.1 ระบบหมักแบบไร้อากาศขั้นตอนเดียวแบบเปียก.....	15
2.7.2 ระบบหมักแบบไร้อากาศขั้นตอนเดียวแบบแห้ง.....	15
2.8 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	17
2.8.1 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับองค์ประกอบของพืช ชีวมวลและมูลสัตว์.....	17
2.8.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับศักยภาพในการผลิตก๊าซ มีเทนด้วยวิธีบีเอ็มพี.....	21
2.8.3 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซชีวภาพของถัง ปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบขั้นตอนเดียว.....	23
2.8.4 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหมักมูลเวียนน้ำในระบบ หมักไร้อากาศ.....	26
บทที่ 3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	28
3.1 แผนการทดลอง.....	28
3.2 ตัวอย่างหญ้าที่ใช้ในงานวิจัย.....	29
3.2.1 การเก็บตัวอย่างหญ้า.....	29
3.2.2 ศึกษาองค์ประกอบของหญ้าที่ใช้ในการทดลอง.....	29
3.3 เชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในงานวิจัย.....	30
3.3.1 การเก็บตัวอย่างเชื้อจุลินทรีย์.....	30
3.3.2 ศึกษาองค์ประกอบของมูลวัวที่ใช้ในการทดลอง.....	31
3.4 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี.....	32
3.4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย.....	32
3.4.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทดลองที่ 1 ศึกษาศักยภาพ ในการผลิตก๊าซมีเทนด้วยวิธีบีเอ็มพีที่เกิดจากการย่อยสลายหญ้า ชนิดต่างๆ.....	32

3.4.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทดลองที่ 2 ศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบขั้นตอนเดียว.....	33
3.4.1.3 เครื่องมือและอุปกรณ์อื่น ๆ.....	37
3.4.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย.....	37
3.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	38
3.5.1 การทดลองที่ 1 ศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนด้วยวิธีบีเอ็มพี (Biochemical Methane Potential, BMP) ที่เกิดจากการย่อยสลายหญ้าชนิดต่างๆ.....	38
3.5.2 การทดลองที่ 2 ศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบขั้นตอนเดียว.....	42
บทที่ 4 ผลการวิเคราะห์ข้อมูล.....	45
4.1 องค์ประกอบของหญ้า.....	45
4.2 องค์ประกอบของมูลวัว.....	47
4.3 ผลการทดลองที่ 1 ศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนด้วยวิธีบีเอ็มพีที่เกิดจากการย่อยสลายหญ้าชนิดต่างๆ.....	48
4.3.1 ลักษณะหญ้าหมักของการทดลองที่ 1 เมื่อเริ่มต้นและสิ้นสุดการทดลอง.....	48
4.3.2 การผลิตก๊าซชีวภาพของการทดลองที่ 1.....	50
4.3.2.1 ก๊าซชีวภาพสะสมของการทดลองที่ 1.....	50
4.3.2.2 ก๊าซชีวภาพรายวันของการทดลองที่ 1.....	51
4.3.2.3 ก๊าซมีเทนของการทดลองที่ 1.....	53
4.3.4 สภาพแวดล้อมของการทดลองที่ 1.....	56
4.3.4.1 อุณหภูมิของการทดลองที่ 1.....	56
4.3.4.2 สีนํ้าหมักของการทดลองที่ 1.....	57
4.3.4.3 กลิ่นนํ้าหมักของการทดลองที่ 1.....	57
4.3.4.4 กรดอินทรีย์ระเหยของการทดลองที่ 1.....	58
4.3.4.5 ความเป็นด่างของการทดลองที่ 1.....	60
4.3.4.6 ความเป็นกรดด่างของการทดลองที่ 1.....	61
4.3.5 ผลคัดเลือกชนิดหญ้าสำหรับการทดลองที่ 2.....	63

	หน้า
4.4 ผลการทดลองที่ 2 ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของถังปฏิกรณ์ ไร้อากาศแบบขั้นตอนเดียว ไร้อากาศแบบขั้นตอนเดียว.....	64
4.4.1 หน้าที่กั้นนี้สีม่วง.....	64
4.4.2 มูลวัวสด.....	65
4.4.3 ลักษณะหน้าที่หมักของการทดลองที่ 2 เมื่อเริ่มต้นและสิ้นสุด การทดลอง.....	66
4.4.4 การปรับตัวของระบบของการทดลองที่ 2.....	67
4.4.5 ก๊าซชีวภาพของการทดลองที่ 2.....	68
4.4.5.1 ก๊าซชีวภาพสะสมของการทดลองที่ 2.....	69
4.4.5.2 ก๊าซชีวภาพรายวันของการทดลองที่ 2.....	70
4.4.5.3 ก๊าซมีเทนของการทดลองที่ 2.....	72
4.4.6 สภาพแวดล้อมของการทดลองที่ 2.....	74
4.4.6.1 อุณหภูมิของการทดลองที่ 2.....	74
4.4.6.2 สีนํ้าหมักของการทดลองที่ 2.....	75
4.4.6.3 กลิ่นนํ้าหมักของการทดลองที่ 2.....	75
4.4.6.4 กรดอินทรีย์ระเหยของการทดลองที่ 2.....	76
4.4.6.5 ความเป็นด่างของการทดลองที่ 2.....	78
4.4.6.6 ความเป็นกรดด่างของการทดลองที่ 2.....	80
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ.....	82
5.1 สรุปผลการวิจัย.....	82
5.1.1 สักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนของหมักชนิดต่างๆ.....	82
5.1.2 ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศ แบบขั้นตอนเดียวสำหรับหมัก.....	82
5.2 ข้อเสนอแนะ.....	84
รายการอ้างอิง.....	85
ภาคผนวก.....	90
ภาคผนวก ก ลักษณะประจำพันธุ์หมักที่ใช้ในงานวิจัย.....	91
ภาคผนวก ข ผลการทดลอง.....	101
ภาคผนวก ค การคำนวณ.....	131
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	136

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 ผลผลิตน้ำหนักรส (ตัน/ไร่/ปี) และผลผลิตน้ำหนักร้าง (ตัน/ไร่/ปี) ของหญ้าทั้ง 7 ชนิด.....	5
2.2 องค์ประกอบทางเคมีของหญ้า.....	6
2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ.....	14
2.4 ข้อดีและข้อเสียของระบบหมักแบบไร้อากาศขั้นตอนเดียวแบบเปียกและแบบแห้ง..	17
3.1 ตัวแปรที่ทำการวิเคราะห์หญ้า.....	30
3.2 อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของวัตถุดิบสารอินทรีย์.....	31
3.3 ตัวแปรที่ทำการวิเคราะห์มูลวัว.....	32
3.4 ขนาดตั้งปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลองที่ 2 ศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ.	34
3.5 ตัวแปรในการทดลองที่ 1 ศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนด้วยวิธีบีเอ็มพี.....	41
3.6 ตัวแปรในการทดลองที่ 2 ศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของถังปฏิกรณ์.....	44
4.1 องค์ประกอบพื้นฐานของหญ้า.....	45
4.2 องค์ประกอบทางเคมีของหญ้า.....	46
4.3 องค์ประกอบพื้นฐานของมูลวัวแห้ง.....	47
4.4 ของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยของการทดลองที่ 1 เมื่อเริ่มต้นและสิ้นสุดการทดลอง.....	48
4.5 แอมโมเนียใน ไตรเจนและซีโอดีรวมของการทดลองที่ 1 เมื่อเริ่มต้นและสิ้นสุดการทดลอง.....	49
4.6 อัตราการผลิตก๊าซมีเทนของการทดลองที่ 1 และสารอินทรีย์.....	54
4.7 เปรียบเทียบการผลิตก๊าซชีวภาพกับลักษณะทางกายภาพของหญ้า.....	55
4.8 ผลเปรียบเทียบการทดลองที่ 1 กับงานวิจัยที่ผ่านมา.....	55
4.9 องค์ประกอบของหญ้างินนี้สีม่วง.....	65
4.10 การเปรียบเทียบระหว่างมูลวัวแห้งกับมูลวัวสด.....	65
4.11 ลักษณะหญ้าหมักของการทดลองที่ 2 เมื่อเริ่มต้นและสิ้นสุดการทดลอง.....	66
4.12 ผลเปรียบเทียบการทดลองที่ 2 กับงานวิจัยที่ผ่านมา.....	74
ข-1.1 องค์ประกอบพื้นฐานของหญ้า.....	102
ข-1.2 องค์ประกอบทางเคมีของหญ้า.....	102

ตารางที่	หน้า
ข-2.1 ของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยของการทดลองที่ 1 เมื่อเริ่มต้นและสิ้นสุด การทดลอง.....	103
ข-2.2 แอมโมเนียในโตรเจนและซีโอดีรวมของการทดลองที่ 1 เมื่อเริ่มต้นและสิ้นสุด การทดลอง.....	103
ข-2.3 ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันของการทดลองที่ 1 ที่สภาวะมาตรฐาน.....	104
ข-2.4 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของการทดลองที่ 1 ที่สภาวะมาตรฐาน.....	107
ข-2.5 ร้อยละก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของการทดลองที่ 1.....	110
ข-2.6 อัตราการผลิตก๊าซมีเทนของการทดลองที่ 1.....	111
ข-2.7 ความเป็นกรดค้างของการทดลองที่ 1.....	113
ข-2.8 กรดอินทรีย์ระเหยของการทดลองที่ 1.....	113
ข-2.9 ความเป็นค้างของการทดลองที่ 1.....	115
ข-3.1 ลักษณะหุ้หมักของการทดลองที่ 2 เมื่อเริ่มต้นและสิ้นสุดการทดลอง.....	117
ข-3.2 ปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพรายวันของการทดลองที่ 2 ที่สภาวะมาตรฐาน.....	118
ข-3.3 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของการทดลองที่ 2 ที่สภาวะมาตรฐาน.....	121
ข-3.4 ร้อยละก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของการทดลองที่ 2.....	123
ข-3.5 ความเป็นกรดค้างของการทดลองที่ 2.....	124
ข-3.6 กรดอินทรีย์ระเหยของการทดลองที่ 2.....	125
ข-3.7 ความเป็นค้างของการทดลองที่ 2.....	127

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 ผลผลิตน้ำหนักรากเปียกของหญ้าในประเทศไทย.....	4
2.2 โครงสร้างของเซลล์ลูลอส.....	7
2.3 โครงสร้างของเฮมิเซลล์ลูลอสประเภทโตกลูโคแมนแนนและไซแลน.....	8
2.4 โครงสร้างของลิกนิน.....	9
2.5 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ.....	12
2.6 ลักษณะการกวนของระบบหมักแบบไร้อากาศขั้นตอนเดียวของถังปฏิกรณ์ Dranco..	16
2.7 ลักษณะการกวนของระบบหมักแบบไร้อากาศขั้นตอนเดียวของถังปฏิกรณ์ Kompogas.....	16
2.8 ลักษณะการกวนของระบบหมักแบบไร้อากาศขั้นตอนเดียวของถังปฏิกรณ์ Valorga.....	16
3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย.....	28
3.2 การแบ่งสี่ส่วนและเลือกสุ่มสองส่วนที่อยู่ตรงข้ามกัน.....	29
3.3 ขวดซีรัมสี่ขาขนาด 120 มิลลิลิตร.....	32
3.4 เครื่องวัดปริมาณก๊าซชีวภาพแบบท่อรูปตัวยู.....	33
3.5 ท่อนำก๊าซ (ขวา) และท่อกระจายน้ำ (ซ้าย).....	34
3.6 ท่อกระจายน้ำ.....	34
3.7 ท่อระบายน้ำ.....	35
3.8 ถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลองที่ 2 ศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ พร้อมอุปกรณ์เก็บก๊าซชีวภาพ.....	35
3.9 ขนาดถังปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลองที่ 2 ศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ พร้อมอุปกรณ์เก็บก๊าซชีวภาพ.....	36
3.10 ตัวอย่างการสร้างกราฟปริมาณก๊าซมีเทนสะสมตามระยะเวลาที่ทำการทดลอง.....	39
3.11 ขั้นตอนการทดลองที่ 1 ศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนด้วยวิธีบีเอ็มพี ตามวิธีของ Seppala และคณะ (2009).....	40
3.12 ขั้นตอนการทดลองที่ 2 ศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของถัง ปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบขั้นตอนเดียว.....	43
4.1 ก๊าซชีวภาพสะสมของหญ้าชนิดต่างๆ ที่สภาวะมาตรฐาน.....	50
4.2 ก๊าซชีวภาพรายวันของหญ้าชนิดต่างๆ ที่สภาวะมาตรฐาน.....	51

ภาพที่	หน้า
4.3 อุณหภูมิ.....	57
4.4 กรดอินทรีย์ระเหย.....	58
4.5 ความเป็นด่าง.....	60
4.6 ความเป็นกรดต่าง.....	62
4.7 หญ้ากินนีสีม่วง (<i>Panicum maximum</i> TD 58).....	64
4.8 ก๊าซชีวภาพรายวันของถังปฏิกรณ์ ที่สภาวะมาตรฐานและค่ากรดอินทรีย์ระเหย ก่อนการเวียนน้ำกลับของถังปฏิกรณ์.....	68
4.9 ก๊าซชีวภาพสะสมของถังปฏิกรณ์ ที่สภาวะมาตรฐาน.....	69
4.10 ก๊าซชีวภาพรายวันของถังปฏิกรณ์ ที่สภาวะมาตรฐาน.....	70
4.11 อุณหภูมิ.....	75
4.12 กรดอินทรีย์ระเหย.....	76
4.13 ความเป็นด่าง.....	78
4.14 ความเป็นกรดต่าง.....	80
ก-1 หญ้ารูซี่ (<i>Brachiaria ruziziensis</i>).....	92
ก-2 หญ้ากินนีสีม่วง (<i>Panicum maximum</i> TD 58).....	93
ก-3 หญ้าอะตราดัม (<i>Paspalum atratum</i>).....	95
ก-4 หญ้าพลิแคทูลัม (<i>Paspalum plicatulum</i>).....	96
ก-5 หญ้าโร้ด (<i>Chloris gayana</i>).....	97
ก-6 หญ้าเนเปียร์ยักษ์ (<i>Pennisetum purpureum</i> cv. KingGrass).....	99
ก-7 หญ้าแพงโกล่า (<i>Digitaria eriantha</i>).....	100
ข-3.1 ถังปฏิกรณ์ของการทดลองที่ 2 ในที่มีคของระบบหมักไร้อากาศแบบขั้นตอน เดียว พร้อมอุปกรณ์เก็บก๊าซชีวภาพ.....	129
ข-3.2 หญ้ากินนีสีม่วงหมักร่วมกับมูลวัวในถังปฏิกรณ์ของการทดลองที่ 2 ในระบบ หมักไร้อากาศแบบขั้นตอนเดียว พร้อมอุปกรณ์เก็บก๊าซชีวภาพ.....	129
ข-3.3 ลักษณะภายในถังปฏิกรณ์ของการทดลองที่ 2.....	130

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

CD	ชุดการทดลองมูลวัว
RG	ชุดการทดลองหญ้ารัฐผสมมูลวัว
KG	ชุดการทดลองหญ้ากินนี่สีม่วงผสมมูลวัว
AG	ชุดการทดลองหญ้าอะตราตัมผสมมูลวัว
PLG	ชุดการทดลองหญ้าพลิแคทูลัมผสมมูลวัว
ROG	ชุดการทดลองหญ้าไรด์ผสมมูลวัว
NG	ชุดการทดลองหญ้าเนเปียร์ยักษ์ผสมมูลวัว
PAG	ชุดการทดลองหญ้าแพงโกล่าผสมมูลวัว
Reactor 1	ถังปฏิกรณ์ที่ 1 อัตราการเวียนน้ำกลับร้อยละ 25
Reactor 2	ถังปฏิกรณ์ที่ 2 อัตราการเวียนน้ำกลับร้อยละ 100
Recirculation Day	วันที่มีการเวียนน้ำกลับ

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันประชากรมีความต้องการใช้พลังงานเพิ่มมากขึ้น เพื่อใช้ในกิจกรรมการพัฒนาและสร้างความเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจของประเทศ พลังงานส่วนใหญ่เป็นพลังงานที่ได้มาจากเชื้อเพลิงฟอสซิล แต่เนื่องจากเชื้อเพลิงฟอสซิลไม่สามารถผลิตขึ้นมาทดแทนได้ทันกับความต้องการของการใช้พลังงานที่เพิ่มขึ้นจึงทำให้เชื้อเพลิงฟอสซิลมีไม่เพียงพอกับความต้องการที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องหาพลังงานทางเลือกชนิดใหม่ขึ้นมาทดแทน พลังงานทางเลือกที่สามารถนำมาใช้ทดแทนเชื้อเพลิงฟอสซิลมีอยู่หลายชนิด เช่น พลังงานจากชีวมวลซึ่งเป็นพลังงานที่ได้จากอินทรีย์สารของพืชและสัตว์ต่างๆ ได้แก่ พืชเกษตรกรรม วัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตร เศษไม้ วัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรม และขยะมูลฝอย เป็นต้น ในปัจจุบันพลังงานจากชีวมวลได้รับความนิยมและความสนใจเป็นอย่างมากเนื่องจากเป็นพลังงานที่มีราคาถูกเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้พลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิล พร้อมทั้งทั้งประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมทำให้มีผลผลิตทางการเกษตรจำนวนมากส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตเชื้อเพลิงจากชีวมวลมีราคาไม่สูง นอกจากนี้การใช้เชื้อเพลิงจากชีวมวลสามารถช่วยรักษาสภาพแวดล้อมได้ ทำให้หลายประเทศมีการศึกษาเกี่ยวกับพลังงานจากชีวมวลกันมากขึ้น (กรมวิทยาศาสตร์บริการ, 2553) เนื่องจากประเทศไทยมีสภาพภูมิประเทศและภูมิอากาศที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืชส่งผลให้มีผลผลิตทางการเกษตรเป็นจำนวนมาก ดังนั้นการเลือกใช้พลังงานทดแทนจากพลังงานก๊าซชีวภาพของชีวมวลที่มีแหล่งผลิตพลังงานอยู่ภายในประเทศและมีผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมต่ำจึงเป็นทางเลือกที่ควรให้ความสำคัญในการพัฒนาศักยภาพและสร้างความเชื่อมั่นของการใช้พลังงานภายในประเทศ อีกทั้งยังลดความเสี่ยงต่อการพึ่งพาพลังงานภายนอก

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนของหญ้าชนิดต่างๆ ในประเทศไทย ด้วยวิธีบีเอ็มพีและศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของหญ้าในถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบขั้นตอนเดียว ซึ่งหญ้าสามารถนำมาใช้ประโยชน์เป็นพืชพลังงานสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพได้ดี เนื่องจากหญ้ามีปริมาณผลผลิตต่อไร่สูง เจริญเติบโตและขยายพันธุ์ได้รวดเร็ว รวมทั้งยังคงทนต่อความแห้งแล้ง ดังนั้นการนำหญ้าไปใช้เป็นพลังงานทางเลือกจึงควรทำการศึกษาต่อไป

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนของหญ้าชนิดต่างๆ ในประเทศไทยด้วยวิธีบีเอ็มพี (Biochemical Methane Potential, BMP)
2. ศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบขึ้นตอนเดียว สำหรับหญ้า

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

งานวิจัยนี้ทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ณ ห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย แบ่งการทดลองออกเป็นสองการทดลอง ดังนี้ การทดลองที่ 1 ศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนด้วยวิธีบีเอ็มพีที่เกิดจากการย่อยสลายหญ้าชนิดต่างๆ ในประเทศไทย การทดลองที่ 2 ศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบขึ้นตอนเดียว กำหนดขอบเขตของการวิจัยดังนี้

1. การศึกษาจะใช้หญ้าชนิดต่างๆ ในประเทศไทยจำนวนทั้งสิ้น 7 ชนิด ได้แก่ หญ้าธูซี่ (*Brachiaria ruziziensis*) หญ้ากินนีสีม่วง (*Panicum maximum* TD58) หญ้าอะตราตัม (*Paspalum atratum*) หญ้าพลิแคทูลัม (*Paspalum plicatulum*) หญ้าไร้ด (*Chloris gayana*) หญ้าเนเปียร์ยักษ์ (*Pennisetum purpureum* cv. KingGrass) และหญ้าแพงโกล่า (*Digitaria eriantha*; syn. *D. decumbens*)
2. ถังปฏิกรณ์จำลองที่ใช้คือถังปฏิกรณ์จำลองในระดับห้องปฏิบัติการ ปริมาตรถังปฏิกรณ์ 2.5 ลิตรและปริมาตรใช้งาน 1.0 ลิตร จำนวน 2 ถัง ควบคุมค่าของแข็งรวมในระบบให้มีค่าร้อยละ 15 ถังปฏิกรณ์ทำจากอะคริลิกและติดตั้งอุปกรณ์เก็บก๊าซชีวภาพโดยอาศัยหลักการแทนที่ของเหลว

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. ทราบถึงศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนของหญ้าชนิดต่างๆ ในประเทศไทย
2. ข้อมูลเปรียบเทียบความสามารถในการย่อยสลายได้ของหญ้าชนิดต่างๆ
3. นำข้อมูลที่ได้เป็นแนวทางสำหรับการออกแบบถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบขึ้นตอนเดียว สำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าเพื่อเป็นพลังงานทดแทน

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความสำคัญของพลังงานชีวมวล

2.1.1 ชีวมวล (Biomass)

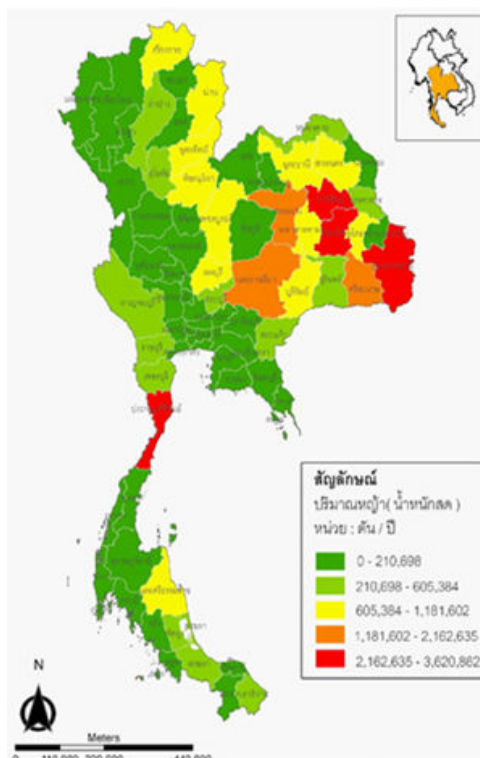
ชีวมวล หมายถึง วัสดุที่ได้จากธรรมชาติที่เป็นสิ่งมีชีวิตหรือส่วนประกอบของธรรมชาติ รวมทั้งสิ่งเหลือทิ้งจากสิ่งมีชีวิตที่สามารถสร้างทดแทนได้ โดยชีวมวลที่นำไปแปรรูปเป็นพลังงานส่วนใหญ่เป็นพืชหรือส่วนประกอบของพืช พืชจะใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการสังเคราะห์แสงและผลิตก๊าซออกซิเจน ดังนั้นเมื่อนำชีวมวลที่ได้จากพืชมาใช้เป็นพืชพลังงานทำให้ไม่มีการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มสู่ชั้นบรรยากาศ (กรมวิทยาศาสตร์บริการ, 2553)

2.1.2 กระบวนการหมักเพื่อให้ได้ก๊าซมีเทน

กระบวนการหมัก (Fermentation) เป็นการย่อยสลายชีวมวล การหมักเพื่อผลิตพลังงานจะเริ่มจากนำชีวมวล เช่น หญ้า มันสำปะหลัง กากของปาล์มน้ำมัน และสาหร่าย เป็นต้น มาทำการหมักแบบไร้อากาศเพื่อให้ได้สารโมเลกุลเล็ก เช่น ก๊าซมีเทน กระบวนการหมักแบบไร้อากาศจัดเป็นกระบวนการทางชีวเคมีที่เปลี่ยนสารประกอบอินทรีย์ไปเป็นก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ ปัจจัยสำคัญของการหมัก คือ ลักษณะของถังปฏิกรณ์ เวลา อัตราการป้อนสารชีวมวล ความเป็นกรดด่าง อุณหภูมิ ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ ความเข้มข้นของกรดไขมัน และส่วนประกอบของวัตถุดิบอื่นๆ

2.2 หญ้าที่พบในประเทศไทย

ประเทศไทยมีหญ้าขึ้นกระจายทั่วไปตามภูมิภาคต่างๆ ดังภาพที่ 2.1 โดยที่เป็นหญ้าที่ขึ้นเองตามธรรมชาติและหญ้าที่มีการปลูกขึ้นมาเพื่อใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ หญ้าที่นิยมปลูกในประเทศไทยแบ่งออกได้เป็นสองชนิดใหญ่ๆ คือ หญ้าอาหารสัตว์และหญ้าแฝก



ภาพที่ 2.1 ผลผลิตน้ำหนักรวมของหญ้าในประเทศไทย (สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน, 2552)

หญ้าอาหารสัตว์ที่นิยมปลูกในประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นหญ้าที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ เนื่องจากหญ้าที่นำเข้ามาได้มีการปรับตัวได้ดีและให้ผลผลิตที่สูงกว่าหญ้าพื้นเมือง หญ้าที่นิยมปลูกกันในปัจจุบัน ได้แก่ หญ้าขน หญ้ารูซี่ หญ้ากินนี หญ้าเนเปียร์ หญ้าพลิแคทูลัม หญ้าแพงโกล่า หญ้าอะตราตัม หญ้าซิกแนลเล็อย และหญ้าไรด์ เป็นต้น (สายัณห์ ทัดศรี, 2548)

ข้อมูลผลผลิตน้ำหนักรวม (ตัน/ไร่/ปี) ของกรมปศุสัตว์ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ พ.ศ. 2553 รายงานว่าหญ้าแพงโกล่ามีน้ำหนักรวมผลผลิตแห้งสูงที่สุด รองลงมาคือ หญ้าเนเปียร์ยักษ์ หญ้าอะตราตัม หญ้ากินนีสีม่วง หญ้ารูซี่ หญ้าไรด์ และ หญ้าพลิแคทูลัม ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ผลผลิตน้ำหนักรากสด (ตัน/ไร่/ปี) และผลผลิตน้ำหนักรากแห้ง (ตัน/ไร่/ปี) ของหญ้าทั้ง 7 ชนิด

ชนิดหญ้า	ผลผลิตน้ำหนักรากสด (ตัน/ไร่/ปี)	ผลผลิตน้ำหนักรากแห้ง (ตัน/ไร่/ปี)
หญ้ารูซี่ (Ruzi)	8.0 - 10.0	2.0 - 2.5
หญ่ากินนีสีม่วง (Purple Guinea)	10.0 - 12.0	2.5 - 3.0
หญ่าอะตราดัม (Atratum)	10.0 - 14.0	2.5 - 3.5
หญ่าพลิแคทูลัม (Plicatulum)	6.0 - 8.0	1.5 - 2.0
หญ่าไรด์ (Rhodes)	8.0 - 10.0	2.0 - 2.5
หญ่าเนเปียร์ยักษ์ (King Napier)	12.0 - 16.0	3.0 - 4.0
หญ่าแพงโกล่า (Pangola)	20.0 - 28.0	5.0 - 7.0

Powlson และคณะ (2005) พบว่าหญ่ามีศักยภาพที่จะเป็นพืชพลังงานได้ดี เนื่องจากมีปริมาณผลผลิตต่อพื้นที่ต่อเวลาสูง นอกจากนี้ยังช่วยเสริมสร้างอินทรีย์วัตถุในดิน โดยการสะสมของคาร์บอนในดินและเป็นการปรับปรุงคุณภาพดินในระยะยาวได้

Seppala และคณะ (2009) และ Weiland (2010) แนะนำว่าปัจจัยสำคัญในการเลือกพันธุ์หญ่าหรือพืชพลังงานสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ คือ ผลผลิตมวลชีวภาพต่อพื้นที่สูง ส่วนที่สามารถย่อยสลายได้ดีอยู่มากและมีความสามารถในการเจริญเติบโตสูงหลังการเก็บเกี่ยว นอกจากนี้ควรคำนึงถึงระยะการเก็บเกี่ยวที่เหมาะสมของหญ่าและความถี่ในการตัดต่อปี

Koch และคณะ (2009) ระบุว่าหญ่ามีศักยภาพสูงที่จะเป็นพืชพลังงานสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ เนื่องจากหญ่านั้นสามารถปลูกได้ตลอดทั้งปี

จากข้อมูลของกรมปศุสัตว์ ปี พ.ศ. 2553 รายงานว่าประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกหญ่าและพืชอาหารสัตว์ทั้งหมด 3,092,003 ไร่และพื้นที่ทุ่งหญ่าสาธารณะทั้งหมด 2,177,583 ไร่ ประเทศไทยจึงมีศักยภาพในการปลูกหญ่าอยู่มาก อีกทั้งภูมิประเทศและภูมิอากาศเหมาะสมในการเจริญเติบโตของหญ่า (กรมปศุสัตว์, 2553) ปัจจุบันหญ่าเริ่มมีบทบาทสำคัญมากขึ้นในด้านการนำมาใช้ผลิตพลังงานทดแทน

Nizami และคณะ (2009) ทำการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของหญ่าเพื่อใช้เป็นตัวชี้วัดการผลิตก๊าซชีวภาพในตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 องค์ประกอบทางเคมีของหญ้า (Nizami และคณะ, 2009)

องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ	องค์ประกอบทางเคมี	ปริมาณ
เซลลูโลส (ร้อยละ)	25 - 40	โพแทสเซียม (ร้อยละ)	1.51
เฮมิเซลลูโลส (ร้อยละ)	15 - 50	แคลเซียม (ร้อยละ)	1.91
ลิกนิน (ร้อยละ)	10 - 30	แมกนีเซียม (ร้อยละ)	0.26
เถ้า (ร้อยละ)	1.5	โบรอน (มก./กก.)	23
คาร์บอน (ร้อยละ)	49.93	ทองแดง (มก./กก.)	13
ไนโตรเจน (ร้อยละ)	2.05	เหล็ก (มก./กก.)	0.29
ไฮโดรเจน (ร้อยละ)	6.52	สังกะสี (มก./กก.)	72
ออกซิเจน (ร้อยละ)	41.49	โซเดียม (มก./กก.)	915

Uzodinma และ Ofoefule (2009) รายงานว่าสำหรับระบบการผลิตก๊าซชีวภาพของหญ้า ผลสมมูลสัตว์จะมีความเข้มข้นของปริมาณก๊าซมีเทนสูงและเกิดก๊าซมีเทนได้รวดเร็วกว่าระบบที่ใช้หญ้าเพียงอย่างเดียว ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากหญ้ามี่ปริมาณคาร์บอนเป็นองค์ประกอบที่สูงและผนังเซลล์ที่มีลิกโนเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบจึงทำให้มีปริมาณก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นได้ช้าและปริมาณต่ำจึงต้องอาศัยการหมักร่วมกับมูลสัตว์เพื่อเพิ่มศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทน

Fischer และ Krieg (2001) รายงานว่าการหมักไร้อากาศแบบแห้งร่วมกับมูลสัตว์ชนิดต่างๆ จะทำให้ระบบมีเสถียรภาพมากขึ้น

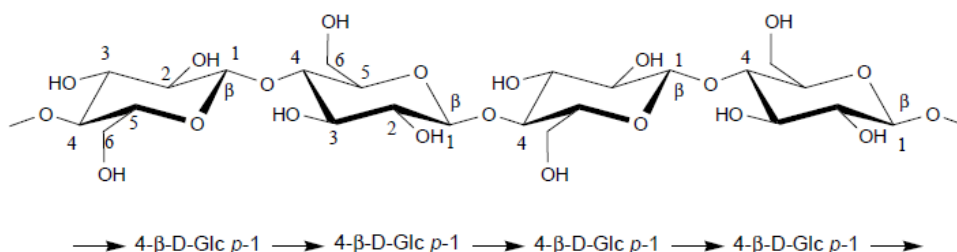
Lehtomaki และคณะ (2007) รายงานผลการทดลองการหมักแบบไร้อากาศโดยหมักมูลวัว ร่วมกับพืชพลังงานและของเสียที่เหลือจากการเกษตรให้อัตราการผลิตก๊าซมีเทนดีกว่าการหมักด้วยมูลสัตว์เพียงอย่างเดียว

2.3 องค์ประกอบทั่วไปของสารชีวมวล

2.3.1 เซลลูโลส (Cellulose)

เซลลูโลสเป็นคาร์โบไฮเดรตชนิดโพลีแซคคาไรด์ที่ประกอบไปด้วยโมโนเมอร์เพียงชนิดเดียวคือ ดีกลูโคส (D-glucose) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเบต้ากลูโคซิดิก (β -D-glucopyranose) ซึ่งมีสูตรโมเลกุลเป็น $(C_6H_{12}O_6)_n$ โดยเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบหลักที่พบในผนังเซลล์พืช มีหน้าที่ช่วยทำให้โครงสร้างของพืชมีความแข็งแรง โดยปกติทั่วไปเซลลูโลสที่ประกอบอยู่ในพืชจะมีปริมาณประมาณร้อยละ 40 - 50 โดยน้ำหนัก (Hodgson และคณะ, 2010; Yokoyama และ Matsumura,

2008) เซลลูโลสไม่ละลายน้ำและร่างกายของมนุษย์ไม่สามารถย่อยสลายได้แต่สำหรับกระเพาะของ วัว ควาย ม้า และสัตว์ที่กินจะมีจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายเซลลูโลสให้เป็นกลูโคสได้ เซลลูโลส เมื่อถูกย่อยจะแตกตัวออกให้น้ำตาลกลูโคสจำนวนมาก



ภาพที่ 2.2 โครงสร้างของเซลลูโลส (Laine, 2005)

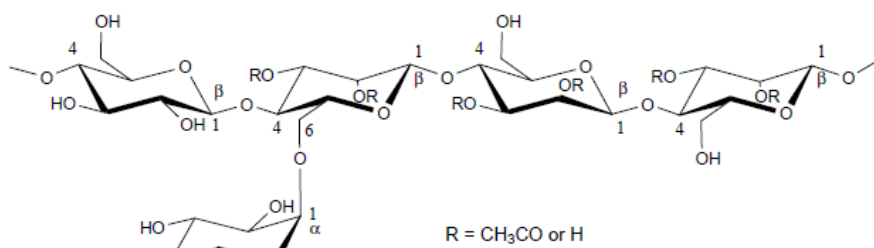
เซลลูโลสสามารถแบ่งได้ 3 ชนิดตามลักษณะการละลายในกรดหรือด่าง (ชินพร วงศ์วัฒน์ ไพบุลย์, 2551) คือ

1. แอลฟาเซลลูโลส เป็นเซลลูโลสที่แท้จริงที่ไม่สามารถละลายได้ในโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 17.5 ณ อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส
2. เบต้าเซลลูโลส เป็นเซลลูโลสที่สามารถละลายได้ในโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น ร้อยละ 17.5 ณ อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส
3. แกมมาเซลลูโลส เป็นเซลลูโลสที่สามารถละลายได้ดีในโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 17.5 ณ อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสและสารละลายกรดเจือจางแต่สามารถตกตะกอนได้โดยใช้แอลกอฮอล์

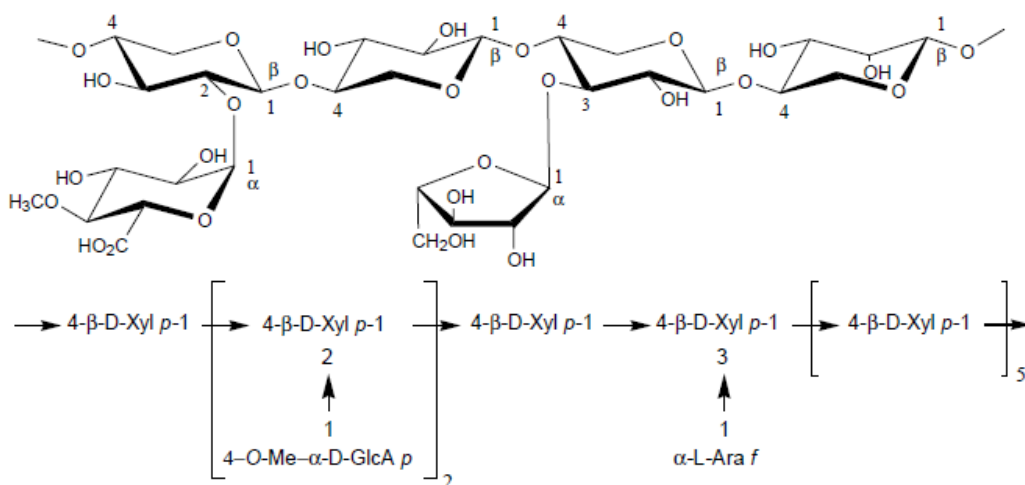
2.3.2 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose)

เฮมิเซลลูโลสเป็นสารประกอบโพลีแซ็กคาไรด์ที่ประกอบด้วยน้ำตาลโมโนแซ็กคาไรด์หลายชนิดประกอบอยู่ในโมเลกุลเดียวกัน ทำหน้าที่เชื่อมประสานกลุ่มเส้นใยเซลลูโลสร่วมกับ ลิกนินและเพกตินซึ่งประกอบกันเป็นโครงสร้างของผนังเซลล์ทำให้เซลล์พืชมีความแข็งแรงและคงรูป (วิรงรอง ทองดีสุนทร, 2548) โมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสสามารถถูกไฮโดรไลซ์ได้ง่ายโดย สารละลายกรดแล้วให้โมเลกุลของน้ำตาลที่มีขนาดเล็กลงคือ โมเลกุลเดี่ยวของน้ำตาลกลูโคส แมนโนส ไซโลส และอะราบิโนส โดยปกติเฮมิเซลลูโลสที่ประกอบอยู่ในพืชจะมีปริมาณประมาณร้อยละ 20 - 40 โดยน้ำหนัก (Hodgson และคณะ, 2010)

กลูโคแมนแนน



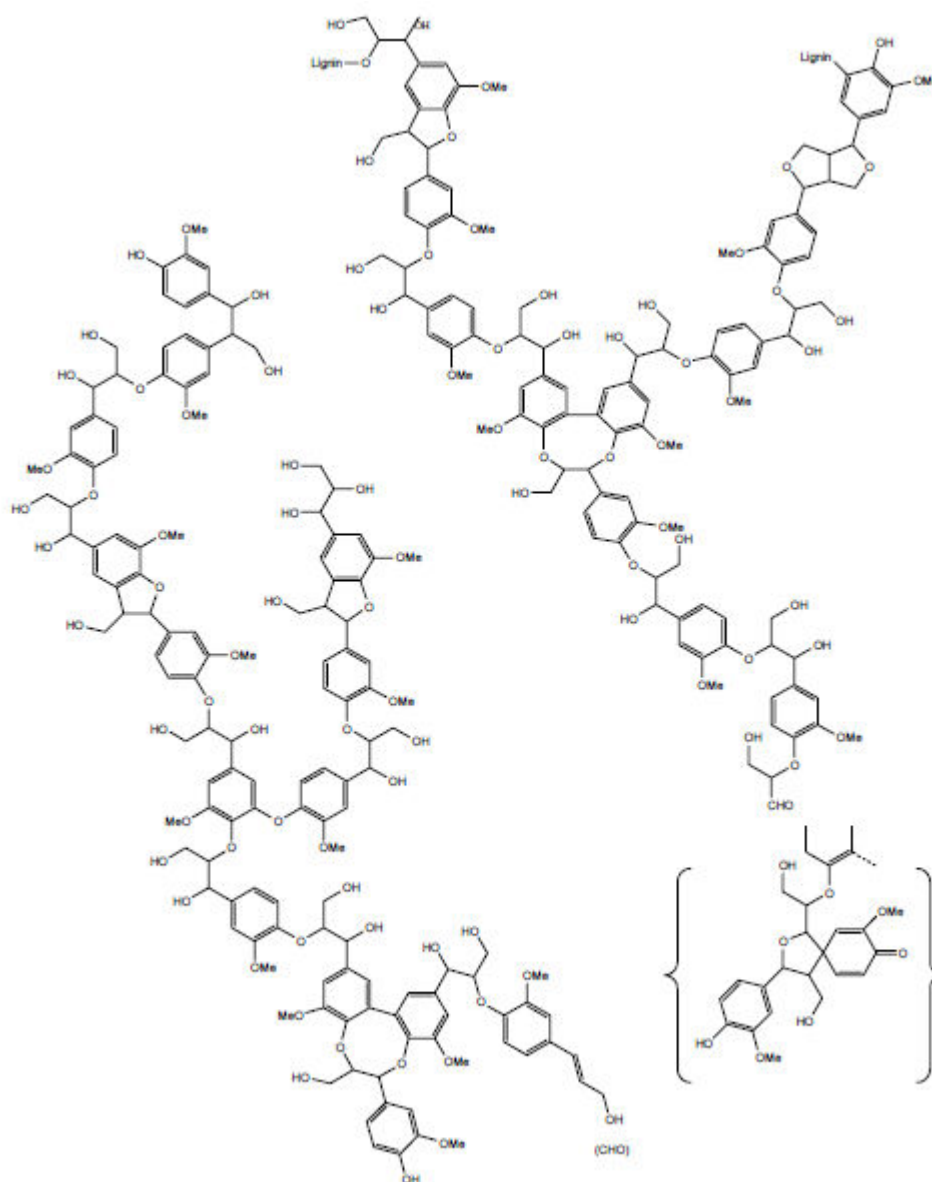
ไซแลน



ภาพที่ 2.3 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลสประเภทกลูโคแมนแนนและไซแลน (Laine, 2005)

2.3.3 ลิกนิน (Lignin)

ลิกนินคือสารประกอบโพลีเมอร์เชิงซ้อนมีน้ำหนักโมเลกุลสูง โดยปกติลิกนินที่ประกอบอยู่ในพืชมีปริมาณประมาณร้อยละ 27 - 32 โดยน้ำหนัก (Laine, 2005) พบอยู่ร่วมกับเซลลูโลสเป็นสารที่ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนรวมกันเป็นหน่วยย่อยหลายชนิดซึ่งเป็นสารอะโรมาติก ลิกนินทำหน้าที่เพิ่มความแข็งแรงให้กับลำต้น โดยการแทรกตัวเข้าไปในช่องว่างระหว่างเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสทำให้ลำต้นมีความแข็งแรง เนื่องจากลิกนินไม่สามารถละลายน้ำได้จึงทำให้พืชมีความแข็งแรงทนทาน ในพืชที่ยังอ่อนจะมีลิกนินน้อยและจะเพิ่มมากขึ้นเมื่อพืชเจริญเติบโตมากขึ้น โครงสร้างลิกนินจึงยากที่จะสลายโดยจุลชีพและสารเคมี



ภาพที่ 2.4 โครงสร้างของลิกนิน (Laine, 2005)

Owens และ Chynoweth (1993) รายงานว่าลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose complex) คือ โครงสร้างที่ซับซ้อนของผนังเซลล์พืชที่ประกอบไปด้วยลิกนิน เฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลส ซึ่งเป็นส่วนสร้างความแข็งแรงให้แก่ผนังเซลล์พืช โดยลิกนินเป็นตัวขัดขวางในกระบวนการหมักแบบ ไร้ออกซิเจน ในขณะที่เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสนั้นเป็นส่วนสามารถย่อยสลายได้ใน กระบวนการหมักแบบไร้ออกซิเจน ในกรณีที่มีปริมาณลิกนินอยู่มากจะทำให้ศักยภาพของการผลิต มีเทนมีค่าไม่สูง

2.3.4 แป้ง (Starch)

แป้งมีลักษณะคล้ายเซลลูโลส แป้งเป็น โพลีแซคคาไรด์ที่ประกอบด้วยยูนิตของดีกลูโคสแต่ถูกเชื่อมกันโดยพันธะแอลฟาไกลูโคไซด์ ความต่างของแป้งและเซลลูโลส คือโครงสร้างพันธะเซลลูโลสที่ไม่ละลายน้ำแต่บางส่วนของแป้งจะละลายในน้ำร้อนคืออะไมโล สำหรับส่วนที่ไม่ละลาย คืออะไมโลเพกซิน โดยแป้งมักถูกพบในเมล็ด ราก และลำต้น

2.3.5 โปรตีน (Protein)

โปรตีนเป็นสารประกอบโมเลกุลขนาดใหญ่ซึ่งกรดอะมิโนหลายตัวจะถูกโพลิเมอร์ไรซ์เข้าด้วยกัน มีคุณสมบัติต่างกันขึ้นอยู่กับชนิดของกรดอะมิโนและอัตราส่วนขององค์ประกอบของกรดอะมิโนและลำดับของโพลิเมอร์ไรเซชัน โปรตีนไม่ใช่สารประกอบพื้นฐานของสารชีวมวลและมีสัดส่วนน้อยกว่าสารชนิดอื่นๆ

2.3.6 สารอื่นๆ (Others)

สารอื่นๆ ได้แก่ สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ (Organic and Inorganic) ปริมาณของสารประกอบอินทรีย์อื่นๆ มีได้หลากหลายขึ้นอยู่กับชนิดของพืช สารอินทรีย์ที่มีจำนวนมากได้แก่ กลีเซอรอล ซูโครส เป็นต้น สารชีวมวลนั้นประกอบไปด้วยสารประกอบอินทรีย์โมเลกุลขนาดใหญ่และยังประกอบด้วยสารอนินทรีย์ เช่น จีเถ้าในจำนวนน้อย ธาตุโลหะพื้นฐาน เช่น โซเดียม โพแทสเซียม แมกนีเซียม แคลเซียม ฟอสฟอรัส ซิลิกอน อะลูมิเนียม และเหล็ก เป็นต้น

2.4 สารอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยกระบวนการชีวภาพ (Biodegradable Volatile Solids)

สารอินทรีย์ที่องค์ประกอบในชีวมวลสามารถแบ่งออกเป็นเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน แป้ง โปรตีน และสารอื่นๆ เป็นต้น โดยทั่วไปสารอินทรีย์ในชีวมวลส่วนใหญ่สามารถย่อยสลายด้วยกระบวนการทางชีวภาพได้ ซึ่งสารอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายด้วยกระบวนการทางชีวภาพแบ่งออกเป็นสองชนิดคือ ของแข็งระเหยง่ายที่ย่อยสลายได้ง่ายด้วยกระบวนการทางชีวภาพ (Biodegradable Volatile Solids, BVS) และของแข็งระเหยง่ายที่ย่อยสลายได้ยากด้วยกระบวนการทางชีวภาพ (Refractory Volatile Solids, RVS) โดยคำนวณจากปริมาณลิกนินของชีวมวล (Kayhanian และคณะ, 2007) ดังสมการ

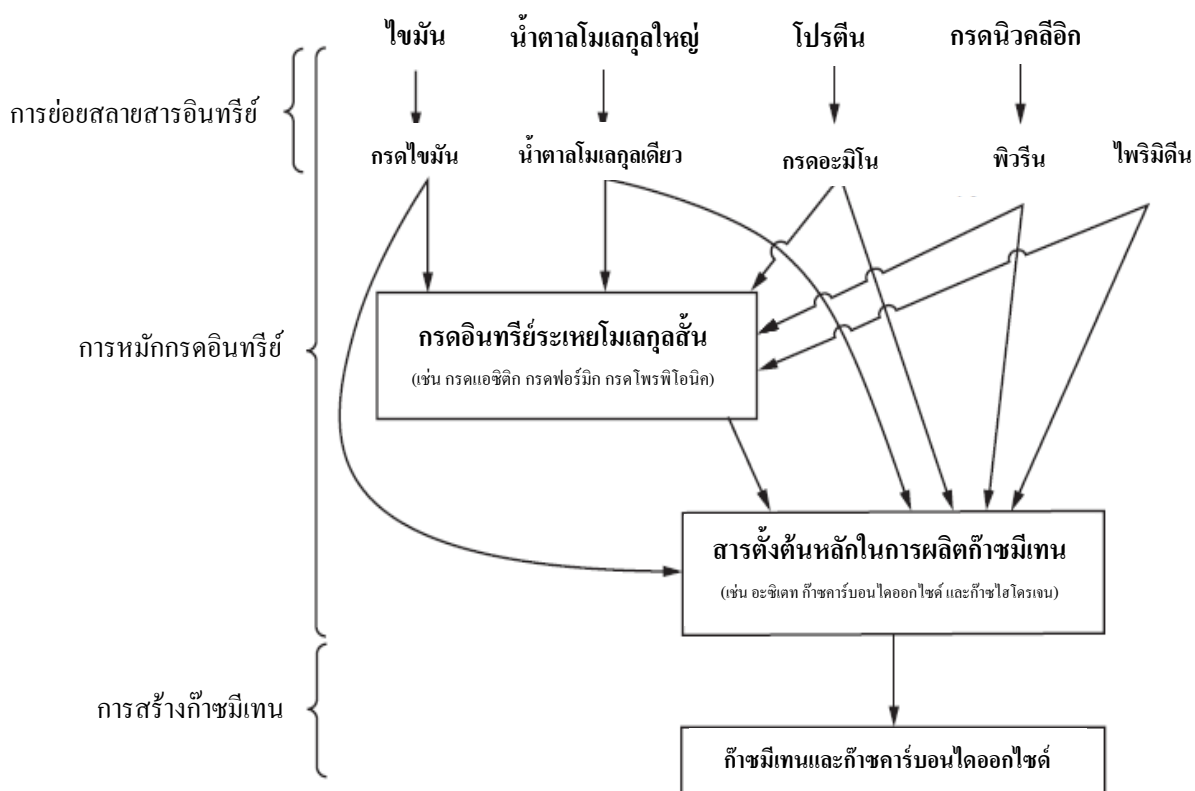
$$\text{BVS (ร้อยละ)} = 0.83 \times 0.028 \times \text{ลิกนิน (ร้อยละ)}$$

$$\text{RVS (ร้อยละ)} = 100 - \text{BVS}$$

Kayhanian และคณะ (2007) พบว่าถ้าปริมาณของแข็งระเหยง่ายที่ย่อยสลายได้ง่ายด้วยกระบวนการทางชีวภาพ (BVS) มีค่าสูงจะสามารถเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพแบบไร้อากาศได้ดี ทำให้สามารถผลิตก๊าซชีวภาพในปริมาณที่สูงขึ้น

2.5 การย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ (Anaerobic digestion)

การย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศเป็นกระบวนการทางชีววิทยาของการเปลี่ยนสารอินทรีย์ไปเป็นก๊าซชีวภาพในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน สามารถแบ่งขั้นตอนของกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศได้เป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้



ภาพที่ 2.5 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ (Kayhanian และคณะ, 2007)

2.5.1 การย่อยสลายสารอินทรีย์ (Hydrolysis)

การย่อยสลายสารอินทรีย์ คือกระบวนการแตกสลายโพลีเมอร์สารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อนและมีขนาดโมเลกุลใหญ่ทั้งที่สามารถละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน โดยจะถูกย่อยสลายให้มีขนาดเล็กลงและสามารถละลายน้ำได้โดยเอนไซม์ที่ขับออกมาสู่ภายนอกเซลล์ของจุลินทรีย์ได้สารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อนเป็นโมเลกุลเดี่ยวที่ละลายน้ำได้ เช่น กรดอะมิโน กลูโคส กรดไขมัน และกลีเซอรอล ในขั้นตอนนี้จะลดขนาดของสารอินทรีย์ลงเท่านั้น

2.5.2 การหมักกรดอินทรีย์ระเหยและการเปลี่ยนกรดอินทรีย์ระเหยเป็นกรดแอซิติก

(Acidogenesis and Acetogenesis)

สารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลเดี่ยวในขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์จะถูกจุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรด (Acidogenic Bacteria) कुछซึมผ่านเยื่อหุ้มเซลล์เข้าสู่เซลล์และใช้เป็นแหล่งคาร์บอนและแหล่งพลังงานโดยกระบวนการหมัก ผลของปฏิกิริยาจะได้กรดอินทรีย์ระเหยที่มีคาร์บอนไม่เกิน 5 อะตอม เช่น กรดแอซิติก (Acetic Acid) กรดฟอร์มิก (Formic Acid) กรดโพรพิโอนิก (Propionic Acid) กรดบิวทีริก (Butyric Acid) กรดไอโซบิวทีริก (Isobutyric Acid) กรดวาเลอริก (Valeric Acid) และกรดไอโซวาเลอริก (Isovaleric Acid) เป็นต้น นอกจากนี้ยังจะได้แอลกอฮอล์ ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ต่อมากรดอินทรีย์ระเหยที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอมจะถูกเปลี่ยนโดยจุลินทรีย์กลุ่มอะซีโตเจนิค (Acetogenic Bacteria) ให้กลายเป็นอะซิเตท (Acetate) ฟอร์มेट (Formate) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจนที่เป็นสารประกอบสำคัญในการสร้างก๊าซมีเทน

2.5.3 การสร้างก๊าซมีเทน (Methanogenesis)

จุลินทรีย์จะย่อยสลายกรดอินทรีย์ คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนจนได้ก๊าซชีวภาพโดยประมาณสองในสามของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นทั้งหมดมาจากการใช้อะซิเตท จุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน (Methanogenic Bacteria) สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ภายใต้สภาวะไร้อากาศเท่านั้นจึงมีความทนต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมได้ต่ำกว่าจุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรด โดยจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนสามารถเจริญเติบโตได้ดีในช่วงความเป็นกรดค่ามีค่า 7.0 - 7.8 ก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นนี้ไม่สามารถละลายน้ำได้จึงสามารถเก็บแล้วนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิง นอกจากนี้คาร์บอนไดออกไซด์บางส่วนจะออกไปในรูปของก๊าซและบางส่วนสามารถละลายน้ำแล้วทำปฏิกิริยากับไฮดรอกไซด์ไอออน (OH⁻) ในระบบเกิดเป็นไบคาร์บอเนตไอออน (HCO₃⁻)

2.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ

เนื่องจากในระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศประกอบด้วยจุลินทรีย์สองกลุ่มที่เกี่ยวข้องกัน ได้แก่ จุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรดและจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องรักษาสภาพแวดล้อมให้มีสภาพที่เหมาะสมที่จะทำให้จุลินทรีย์เหล่านี้อยู่ด้วยกันได้อย่างดี การที่จะควบคุมระบบให้ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพจะต้องทำให้จุลินทรีย์นี้อยู่ในสภาวะสมดุลกันซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ แสดงดังตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ

ปัจจัย	ค่าที่เหมาะสม	อ้างอิง
อุณหภูมิ (Temperature)	20 - 45 องศาเซลเซียส	Fernandez และคณะ, 2008
ความเป็นกรดด่าง (pH)	6.5 - 7.6	Rittmann และ McCarty, 2000
ความเป็นด่าง (Alkalinity)	1,000 - 5,000 มก./ล CaCO ₃	Rittmann และ McCarty, 2000
สารอาหาร (Nutrient)	มีสารอาหารหลักและรอง	Weiland, 2010
สัดส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจน ต่อฟอสฟอรัสต่อซัลเฟอร์ (COD:N:P:S)	800:5:1:0.5	Deublein และ Steinhauser, 2008
อัตราส่วนคาร์บอนต่อ ไนโตรเจน (C:N Ratio)	20:1 ถึง 30:1	Verma, 2002
ขนาดอนุภาคสารอินทรีย์ (Particle size)	10 - 30 มล.	Banks, 2007

2.7 การหมักแบบขั้นตอนเดียว (Conventional single stage digester)

การหมักแบบขั้นตอนเดียวเป็นระบบที่มีถังปฏิกรณ์เพียงถังเดียว จุลินทรีย์ทุกสายพันธุ์จึงต้องอยู่ร่วมกันดังนั้นการทำงานของจุลินทรีย์แต่ละกลุ่มจะต้องสัมพันธ์กัน

Weiland (2000) รายงานว่ากระบวนการบำบัดแบบไร้อากาศ (Anaerobic Treatment Processes) มีความเหมาะสมกับของเสียอินทรีย์จากการเกษตรและอุตสาหกรรมรวมทั้งของเสียอินทรีย์ในครัวเรือน เนื่องจากการย่อยสลายแบบไร้อากาศเป็นวิธีที่มีราคาถูกในการบำบัดของเสีย และสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ ส่วนที่เหลือจากการย่อยสลายสามารถนำมาทำเป็นปุ๋ยสำหรับ

กิจกรรมทางการเกษตร ดังนั้นเทคโนโลยีแบบไร้อากาศจึงเหมาะสำหรับการบำบัดของเสียร่วมกับการผลิตพลังงานทดแทน

Chen และคณะ (2010) รายงานว่าประโยชน์ของการหมักร่วมกันในระบบไร้อากาศมีข้อดีคือ มีศักยภาพในการเจือจางสารพิษที่อยู่ในระบบ สามารถปรับปรุงให้สารอาหารในระบบเกิดความสมดุลมากขึ้น เกิดการกระตุ้นการทำงานร่วมกันของเชื้อจุลินทรีย์ สามารถรับอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้ดีขึ้น และได้ผลผลิตที่เป็นก๊าซชีวภาพสูงขึ้น สำหรับอัตราส่วนหญ้าต่อมูลวัวที่เหมาะสมมีค่า 75:25 ของของแข็งระเหย

การหมักแบบไร้อากาศแบบขั้นตอนเดียวสามารถแบ่งออกเป็นสองระบบ คือระบบหมักแบบไร้อากาศขั้นตอนเดียวแบบเปียกและระบบหมักแบบไร้อากาศขั้นตอนเดียวแบบแห้ง ดังนี้

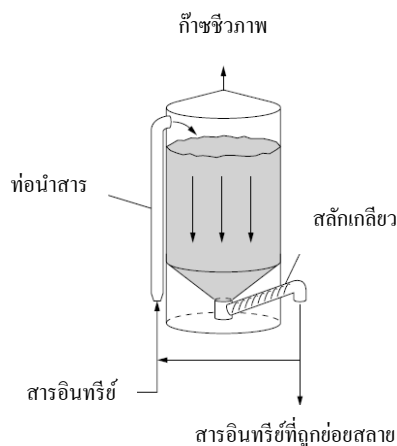
2.7.1 ระบบหมักแบบไร้อากาศขั้นตอนเดียวแบบเปียก

ระบบหมักแบบไร้อากาศขั้นตอนเดียวแบบเปียกมีค่าความเข้มข้นของของแข็งทั้งหมดในระบบต่ำกว่าร้อยละ 20 (Nizami และ Murphy, 2010) สารอินทรีย์ที่เข้าระบบและสภาพในถังจึงมีสภาพเหลวจนถึงขั้น รูปแบบถังที่นิยมใช้เป็นแบบถังกวนสมบูรณ์ ปัญหาที่สำคัญของระบบหมักไร้อากาศขั้นตอนเดียวแบบเปียก คือ มีการแยกชั้นของสารอินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ นอกจากนี้ระบบยังมีแนวโน้มที่จะเกิดปัญหาสภาพการไหลลัดวงจรภายในถังปฏิกรณ์ซึ่งจะมีผลต่อประสิทธิภาพการลดค่าภาระบรรทุกสารอินทรีย์ของระบบ

2.7.2 ระบบหมักแบบไร้อากาศขั้นตอนเดียวแบบแห้ง

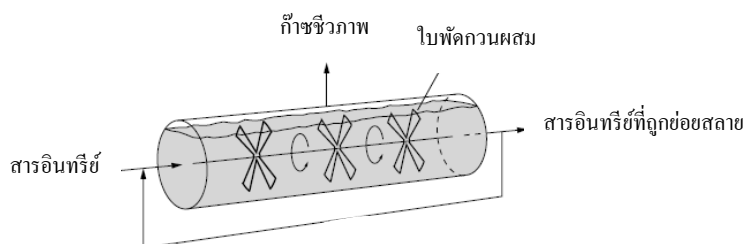
ระบบหมักแบบไร้อากาศแบบแห้งเป็นระบบหมักที่มีค่าความเข้มข้นของของแข็งรวมเข้าระบบอยู่ระหว่างร้อยละ 20 - 40 (Nizami และ Murphy, 2010) จากการศึกษาพบว่าปริมาณความเข้มข้นของของแข็งสูง ปริมาณก๊าซที่ผลิตได้ต่อปริมาตรถังปฏิกรณ์มีปริมาณมากขึ้น สารอินทรีย์ที่เข้าระบบมีลักษณะค่อนข้างแห้ง ในบางกรณีจะต้องมีการหมุนเวียนน้ำในระบบมาผสมรวมสารอินทรีย์เพื่อปรับค่าความเข้มข้นของของแข็งทั้งหมดให้เหมาะสมก่อนเข้าระบบ นอกจากนี้พบว่าระบบถังแบบปลั๊กโฟลว์ (Plug Flow) มีความเหมาะสมสำหรับลักษณะสารอินทรีย์ที่ค่อนข้างข้น โดยปัจจุบันมีระบบที่นิยมใช้คือ

ถังปฏิกรณ์ Dranco ใช้ระบบการกวนโดยการหมุนเวียนของเหลวที่ออกจากระบบมาผสมสารอินทรีย์ผ่านทางเครื่องสูบลำเข้าสู่ด้านบนของถัง



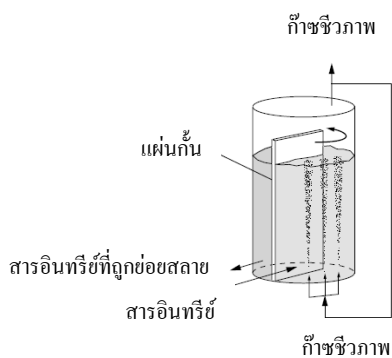
ภาพที่ 2.6 ลักษณะการกวนของระบบหมักแบบไร้อากาศชั้นตอนเดียวของถังปฏิกรณ์ Dranco (Kayhanian และคณะ, 2007)

ถังปฏิกรณ์ Kompogas ใช้ระบบใบพัดกวนในถังแบบปลั๊กโฟลว์ ในแนวนอนซึ่งระบบนี้จะช่วยให้สารอินทรีย์มีการผสมกันดีและมีการป้องกันการตกตะกอน



ภาพที่ 2.7 ลักษณะการกวนของระบบหมักแบบไร้อากาศชั้นตอนเดียวของถังปฏิกรณ์ Kompogas (Kayhanian และคณะ, 2007)

ถังปฏิกรณ์ Valorga ใช้ระบบถังแบบปลั๊กโฟลว์ ที่มีการกวนโดยใช้ก๊าซเป่าที่แรงดันสูงจากก้นถัง



ภาพที่ 2.8 ลักษณะการกวนของระบบหมักแบบไร้อากาศชั้นตอนเดียวของถังปฏิกรณ์ Valorga (Kayhanian และคณะ, 2007)

ตารางที่ 2.4 ข้อดีและข้อเสียของระบบหมักแบบไร้อากาศขั้นตอนเดียวแบบเปียกและแบบแห้ง (Nizami และ Murphy, 2010)

ระบบหมักแบบไร้อากาศขั้นตอนเดียวแบบเปียก	
ข้อดี	ระบบทำงานไม่ซับซ้อนจึงไม่ต้องควบคุมโดยผู้ชำนาญการ เครื่องจักรที่ใช้ในระบบมีต้นทุนต่ำ
ข้อเสีย	เกิดการแยกชั้นของสารอินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ เกิดปัญหาสภาพการไหลลัดวงจรภายในถังปฏิกรณ์ เกิดปัญหาต่อระบบการกวนและสร้างความเสียหายต่อเครื่องจักรและอุปกรณ์ในการกวน สิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการกำจัดฟองที่เกิดจากการแยกชั้น ใช้น้ำปริมาณมากในการผสมสารอินทรีย์ก่อนเข้าระบบ เกิดการยับยั้งด้วยแอมโมเนียระบบได้ง่าย
ระบบหมักแบบไร้อากาศขั้นตอนเดียวแบบแห้ง	
ข้อดี	รับภาระบรรทุกสารอินทรีย์ได้สูงและคงที่ตลอดสภาวะการทำงาน ประสิทธิภาพการลดของแข็งระเหยของระบบสูง
ข้อเสีย	อาจมีการหมุนเวียนน้ำในระบบเพราะสารอินทรีย์ที่เข้าระบบมีลักษณะค่อนข้างแห้ง ระบบทำงานค่อนข้างซับซ้อนต้องควบคุมโดยผู้ชำนาญการ

2.8 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.8.1 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับองค์ประกอบของพืชชีวมวลและมูลสัตว์

Chen และคณะ (2010) ศึกษาการย่อยสลายแบบไร้อากาศโดยใช้ระบบหมักหมักหัวคอดกราส (*S. alterniflora*) เพียงอย่างเดียว (Mono Digestion) ที่อัตราส่วนของแข็งระเหยเริ่มต้นร้อยละ 4 ร้อยละ 6 และร้อยละ 8 นอกจากนี้ยังศึกษาการย่อยสลายแบบไร้อากาศโดยใช้ระบบหมักหมักหัวคอดกราสร่วมกับมูลวัว (CoDigestion) ในอัตราส่วนของแข็งระเหยตั้งแต่ ร้อยละ 12.5 - 87.5 ดำเนินการทดลองในถังปฏิกรณ์ที่มีความจุ 1.0 ลิตร ภายใต้อุณหภูมิ 35 ± 1 องศาเซลเซียส เริ่มต้นการทดลองโดยการศึกษาองค์ประกอบของหัวคอดกราสมีปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ร้อยละ 34.04 29.85 และ 9.73 ของของแข็งรวม ตามลำดับ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของหัวคอดกราสและมูลวัว คือ 21.82 และ 13.43 ตามลำดับ ผลการทดลองของระบบหมักหมักหัวคอดกราสเพียงอย่างเดียวได้ผลดังนี้ ที่อัตราส่วนของแข็งระเหยเริ่มต้นร้อยละ 6 จะให้อัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงที่สุดคิดเป็น 0.189 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย มีความเข้มข้นของก๊าซมีเทนอยู่ถึง

ร้อยละ 63.29 เนื่องจากว่าอัตราการป้อนสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate, OLR) เป็นปัจจัยอย่างหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายในระบบและเป็นตัวแปรสำคัญที่ใช้ในการออกแบบบำบัดแบบไม่ใช้อากาศ จากการเปลี่ยนสารอินทรีย์ในระบบให้กลายเป็นก๊าซมีเทน ต้องมีความเข้มข้นของจุลินทรีย์ในปริมาณพอเหมาะกับการป้อนสารอินทรีย์จึงจะทำให้จุลินทรีย์มีการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ หากมีการป้อนสารอินทรีย์เข้าระบบมากเกินไปจะทำให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ลดลงเนื่องจากจุลินทรีย์บางส่วนถูกทำลายไป ในทางตรงกันข้ามหากมีการป้อนสารอินทรีย์เข้าระบบน้อยเกินไปจะทำให้การใช้ถังปฏิกรณ์ไม่เต็มประสิทธิภาพ จึงไม่คุ้มค่าในด้านการลงทุน ดังนั้นการศึกษาระบบย่อยสลายแบบไร้อากาศโดยใช้ระบบหมักหญ้าคอก กราสร่วมกับมูลวัวจึงเลือกอัตราส่วนของแฉ่งระเหยเริ่มต้นที่ร้อยละ 7 และผลการทดลองพบว่า ระบบสามารถเพิ่มอัตราการผลิตก๊าซมีเทนได้สูงขึ้นร้อยละ 7.09 - 44.26 เมื่อเปรียบเทียบกับระบบหมักหญ้าคอกกราฟเพียงชนิดเดียว และอัตราส่วนหญ้าคอกกราฟต่อมูลวัวที่เหมาะสมคือ 75:25 ของของแฉ่งระเหย โดยมีอัตราการผลิตก๊าซมีเทน 0.177 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแฉ่งระเหยซึ่งมีความเข้มข้นของก๊าซมีเทนอยู่ถึงร้อยละ 64.33 ในขณะที่ใช้หญ้าเพียงชนิดเดียวและมูลวัวเพียงชนิดเดียวจะมีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนเพียงแค่ 0.317 และ 0.112 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแฉ่งระเหย ตามลำดับ

Jagadabhi และคณะ (2008) ประเมินผลกระทบต่อการผลิตก๊าซมีเทนและประสิทธิภาพของการเวียนกลับของแฉ่งที่ผ่านการย่อยทั้งที่มีการบำบัดและไม่มีการบำบัดด้วยต่างก่อนเวียนของแฉ่งกลับเข้าระบบ รูปแบบของถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ที่หมักร่วมกันของหญ้าหมักและมูลวัว โดยมีอัตราส่วนหญ้าหมักต่อมูลวัวร้อยละ 30 และร้อยละ 70 ของของแฉ่งระเหย ตามลำดับถึงปฏิกรณ์มีขนาด 5 ลิตร ระยะเวลาเก็บกัก 20 วัน ซึ่งจุดประสงค์ของการบำบัดด้วยต่างเพื่อทำลายโครงสร้างที่เป็นผนังเซลล์พืช (Ligno-Cellulosic Structures) ที่เป็นตัวขัดขวางการย่อยสลายในขั้นตอนการย่อยสลายเพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพ ผลการศึกษารายการประกอบของหญ้า (ประกอบด้วยหญ้าทิโมที่ร้อยละ 75 และหญ้าเฟสคิวร้อยละ 25) ดังนี้ ของแฉ่งรวมร้อยละ 38 ของแฉ่งระเหยร้อยละ 35 ค่าทีเคเอ็น 18.4 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปของแฉ่งรวม ค่าแอมโมเนียไนโตรเจน 0.2 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปของแฉ่งรวม ค่าซีไอดีละลาย 55.2 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปของแฉ่งรวม และอัตราการผลิตก๊าซมีเทนมีค่า 0.376 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแฉ่งระเหย และผลการศึกษารายการประกอบของมูลวัว ดังนี้ ของแฉ่งรวมร้อยละ 6.5 ของแฉ่งระเหยร้อยละ 5.1 ค่าทีเคเอ็น 30.7 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปของแฉ่งรวมค่าแอมโมเนียไนโตรเจน 18.5 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปของแฉ่งรวม ค่าซีไอดีละลาย 492 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปของแฉ่งรวม และอัตราการผลิตก๊าซมีเทนมีค่า 0.309 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแฉ่งระเหย จากข้อมูลข้างต้นแสดงให้เห็นว่าหญ้ามีปริมาณสารที่มีองค์ประกอบของไนโตรเจนอยู่น้อย ทำให้ประสิทธิภาพของการผลิตก๊าซมีเทนไม่สูง ดังนั้น

จึงนำหญ้าหมักร่วมกับมูลวัวที่มีปริมาณสารที่มีองค์ประกอบของไนโตรเจนอยู่สูงเพื่อเป็นการเสริมให้ระบบมีการผลิตก๊าซมีเทนมากยิ่งขึ้น เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่า อัตราการผลิตก๊าซมีเทนมีค่า 0.108 - 0.185 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย การเวียนกลับของแข็งที่ผ่านการย่อยทั้งที่ผ่านการบำบัดและไม่มีการบำบัดด้วยค้างให้อัตราการผลิตก๊าซมีเทนมีค่ามีค่าลดลงร้อยละ 11 และร้อยละ 21 ตามลำดับ นอกจากนี้การเวียนกลับของของแข็งยังก่อให้เกิดปัญหาการลอยตัวของตะกอนในส่วนบนของถังปฏิกรณ์อีกด้วย

Lehtomaki และคณะ (2007) ศึกษาการหมักแบบไร้อากาศโดยหมักมูลวัวร่วมกับหญ้าหมักต้นบิท และฟางข้าวโอ๊ต ทำการทดลองในห้องปฏิบัติการโดยเติมอาหารแบบกึ่งต่อเนื่องในระบบปฏิกรณ์ถึงกวนสมบูรณ์ วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยครั้งนี้เพื่อประเมินความสามารถของการหมักร่วมกันของพืชพลังงาน (หญ้าหมัก) และของเสียที่เหลือจากการเกษตร (ต้นบิทและฟางข้าวโอ๊ต) ที่ผสมมูลวัว โดยหญ้าหมักและฟางข้าวโอ๊ตนำมาจากทางภาคกลางของประเทศฟินแลนด์ ในขณะที่ต้นบิทนำมาจากทางภาคใต้ของประเทศฟินแลนด์ ก่อนทำการทดลองหั่นพืชดังกล่าวด้วยเครื่องหั่นให้มีขนาดประมาณ 3 เซนติเมตร ขนาดของถังปฏิกรณ์ 5 ลิตรและปริมาตรของของเหลว 4 ลิตร ที่อัตราการระบายสารอินทรีย์ 2 กิโลกรัมของแข็งระเหยต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน พบว่าหญ้าหมัก ต้นบิท และฟางข้าวโอ๊ต มีอัตราการผลิตก๊าซมีเทน 0.268 0.299 และ 0.213 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยของ ตามลำดับ ผลของการหมักร่วมกันของมูลวัวกับพืชพลังงานและของเสียที่เหลือจากการเกษตรให้อัตราการผลิตมีเทนที่ดีกว่าการหมักด้วยมูลวัวเพียงอย่างเดียว (อัตราการผลิตก๊าซมีเทนของมูลวัวเพียงชนิดเดียวมีค่า 0.204 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยของมูลวัว)

Ofoefule และคณะ (2009) ศึกษาการเปรียบเทียบผลของวิธีการบำบัดเบื้องต้นที่แตกต่างกันของการผลิตก๊าซชีวภาพจากผักตบชวา โดยถังปฏิกรณ์ต้นแบบมีความจุ 212 ลิตร และวิธีการบำบัดเบื้องต้นแบ่งออกเป็น 3 วิธีดังนี้ (1) ผักตบชวาทากแห้งและหั่นให้มีขนาด 2 นิ้ว (2) ผักตบชวาทากแห้งและเติมโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (3) ผักตบชวาทากแห้งและผสมกับมูลวัว (4) ผักตบชวาสดซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวควบคุม การทดลองทั้งหมดถูกควบคุมให้อยู่ภายใต้การย่อยสลายแบบไร้อากาศเพื่อให้เกิดการผลิตก๊าซชีวภาพ เป็นเวลาทั้งสิ้น 32 วัน อุณหภูมิอยู่ในช่วง 25 - 36 องศาเซลเซียส ได้ผลการทดลองดังนี้ ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของ (3) มีค่าสูงสุดของวิธีการบำบัดเบื้องต้นคือ 356.30 ลิตรต่อมวลรวมของสารละลาย ในขณะที่ (2) มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมต่ำที่สุดของวิธีการบำบัดเบื้องต้นคือ 285.21 ลิตรต่อมวลรวมของสารละลาย สำหรับ (1) และ (4) มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม 292.41 และ 271.20 ลิตรต่อมวลรวมของสารละลายตามลำดับ ปริมาณก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีองค์ประกอบดังนี้ (1) (2) (3) และ (4) ประกอบไปด้วยก๊าซมีเทนร้อยละ 60.0 71.0 64.0 และ 65.0 ตามลำดับ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 39.94 28.94 35.94 และ 34.94

ตามลำดับ ผลการศึกษาโดยรวมพบว่าวิธีการบำบัดเบื้องต้นด้วยสารเคมีไม่ได้ทำให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับผักตบชวาสด (ตัวควบคุม) ถึงแม้ว่าวิธีการบำบัดเบื้องต้นด้วยสารเคมีจะทำให้มีร้อยละของการเกิดมีเทนสูงแต่ก็เป็นเพียงช่วงระยะเวลาสั้นๆ เท่านั้น ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าผักตบชวาไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมีในวิธีการบำบัดเบื้องต้น นอกจากนี้ยังพบว่าผักตบชวาเป็นสารชีวมวลที่ผลิตก๊าซชีวภาพได้ดีและสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้มีประสิทธิภาพมากขึ้นเมื่อผ่านวิธีการบำบัดเบื้องต้น โดยการอบแห้งและหมักร่วมกับมูลวัว

Pakarinen และคณะ (2008) ประเมินผลของเก็บรักษาหญ้าทั้งที่มีและไม่มีกรดไขมันไขมันชีวภาพร่วมกับจุลินทรีย์กรดแลคติก (Lactic Acid Bacteria) ในภูมิภาคอากาศแบบบอเรล (Boreal Conditions) ระยะเวลา 2 - 11 เดือนที่มีต่อผลผลิตก๊าซมีเทนและคุณสมบัติทางเคมีของหญ้า หญ้าที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ (1) หญ้าผสม (ร้อยละ 63 ของหญ้าทิมโมที่ ร้อยละ 17 ของหญ้าเรดโคลเวอร์ และร้อยละ 20 ของหญ้าเฟสทิว) (2) หญ้าไรย์ (Rye Grass) ทำการศึกษาทั้งในห้องปฏิบัติการในระบบปฏิกรณ์ถังแบบแบตช์ ดำเนินการทดลองในถังปฏิกรณ์ที่มีความจุ 1.0 ลิตร และปฏิบัติการภาคสนาม ได้ผลดังนี้ สักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนของ (1) และ (2) คือร้อยละ 87 และร้อยละ 91 สำหรับห้องปฏิบัติการ และร้อยละ 96 และร้อยละ 68 สำหรับภาคสนาม ตามลำดับ โดยปริมาณของแข็งเริ่มต้นจะมีผลต่อการผลิตมีเทนและคุณสมบัติทางเคมีของหญ้าหมัก โดยเฉพาะการสูญเสียของแข็งระเหยในระหว่างการเก็บรักษาเป็นปัจจัยสำคัญทำให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพมีค่าลดลง หลังจากเก็บรักษาหญ้าผ่านไป 6 เดือนร้อยละของการผลิตก๊าซมีเทนหายไปร้อยละ 37 และร้อยละ 52 ของหญ้าผสมและหญ้าไรย์ ตามลำดับ ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากเกิดการสูญเสียของแข็งระเหยหรืออาจเป็นเพราะเกิดการหมักในระหว่างระยะเวลาการเก็บรักษาโดยสังเกตได้จากค่าความเป็นกรดต่างที่เพิ่มขึ้นในช่วงการเก็บ และผลของการเติมเอนไซม์ชีวภาพร่วมกับจุลินทรีย์กรดแลคติกไม่มีส่วนช่วยในการรักษาไม่ให้ปริมาณก๊าซมีเทนลดลง จึงกล่าวได้ว่าวิธีการเก็บรักษาพืชพลังงานเพื่อใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพเป็นเรื่องที่สำคัญในการจัดการให้พืชพลังงานมีใช้ตลอดทั้งปี การหมักของหญ้าสำหรับการผลิตก๊าซมีเทนได้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการรักษาผลผลิตในระยะเวลา 11 เดือนในเขตในภูมิภาคอากาศแบบบอเรลภายใต้สภาพการเก็บรักษาที่เหมาะสม

Romano และคณะ (2009) ทำการศึกษาผลของการเติมเอนไซม์ประกอบด้วย เซลลูเลส (Cellulase) เฮมิเซลลูเลส (Hemicellulase) และเบต้ากลูโคซิเดส (β-Glucosidase) ให้กับระบบการย่อยแบบไร้อากาศ (Anaerobic Digestion Systems) โดยใช้ข้าวสาลี (Wheat Grass) เป็นชีวมวล โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบแบตช์ (Batch Reactor) ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส แบ่งการทดลองออกเป็นสามชุดการทดลอง ดังนี้ (1) เติมเอนไซม์ลงในถังปฏิกรณ์ย่อยสลายขั้นตอนเดียว (Single-Stage Digester) (2) เติมเอนไซม์ลงในขั้นตอนการบำบัดเบื้องต้นแล้วนำไปย่อยสลายต่อในถังปฏิกรณ์ย่อยสลายขั้นตอนเดียว (3) เติมเอนไซม์ลงในถังปฏิกรณ์ย่อยสลายแรกของระบบการย่อยสลายสอง

ขั้นตอน (Two-Stage Digestion System) วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วย One Way ANOVA ได้ผลการทดลองดังนี้ ผลของการทดลอง (2) หลังจากเติมเอนไซม์ลงในขั้นตอนการบำบัดเบื้องต้นทำให้ค่าซีโอไซด์ละลายมีปริมาณสูงขึ้นร้อยละ 94 เมื่อเทียบกับตัวควบคุมซึ่งถือว่าเป็นการเพิ่มปริมาณของสารตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพให้มีปริมาณก๊าซชีวภาพสูงขึ้นได้ ผลของการทดลอง (1) (2) และ (3) พบว่าการย่อยสลายแบบ ไร้อากาศของข้าวสาลีไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในการผลิตก๊าซชีวภาพหลังจากผ่านไป 14 วัน อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพและอัตราการผลิตก๊าซมีเทนอยู่ในช่วง 0.35 - 0.53 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย และ 0.15 - 0.29 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าผลของการเติมเอนไซม์ให้กับระบบการย่อยแบบไร้อากาศ (Anaerobic Digestion Systems) โดยใช้ข้าวสาลีเป็นชีวมวลไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทน

2.8.2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนด้วยวิธีบีเอ็มพี

Moody และคณะ (2009) ศึกษากระบวนการหาศักยภาพในการผลิตมีเทนด้วยวิธีบีเอ็มพีเพื่อใช้เป็นข้อมูลที่บ่งบอกความสามารถของการย่อยแบบไร้อากาศที่เกิดจากสารอินทรีย์ โดยให้เหตุผลว่าการใช้กระบวนการบีเอ็มพีนั้นมีราคาที่ถูกและสามารถทำซ้ำได้หลายครั้งเพื่อให้ได้ผลการย่อยแบบไร้อากาศและการผลิตก๊าซชีวภาพมีค่าแม่นยำและถูกต้องมากขึ้น ข้อมูลที่ได้จากกระบวนการบีเอ็มพีจะมีประโยชน์ในการประเมินศักยภาพการย่อยแบบไร้อากาศของสารอินทรีย์และเพิ่มประสิทธิภาพการออกแบบและการทำงานของย่อยสลายแบบไร้อากาศ จากผลการทดลองจะได้ค่าปริมาณของก๊าซมีเทนต่อปริมาณของแข็งระเหยของสารอินทรีย์ และปริมาณของก๊าซชีวภาพต่อปริมาณของแข็งระเหยของสารอินทรีย์ นอกจากนี้ยังสามารถพิจารณาถึงการย่อยสลายร่วม (Co-Digestion) ของสารอินทรีย์ต่างๆ ถึงประสิทธิภาพการย่อยสลายของสารใดที่อาจประสบความสำเร็จในการผลิตก๊าซมีเทนได้ดีเพื่อเป็นทางเลือกของแหล่งพลังงานใหม่ในอนาคต

Seppala และคณะ (2009) ทำการศึกษาศักยภาพในการผลิตมีเทนของหญ้า 4 ชนิดด้วยวิธีบีเอ็มพี ดังนี้ (1) หญ้าคอกฟุต (*Dactylis glomerata* L.) (2) หญ้าเฟสคิว (*Festuca arundinaceae* Schreb.) (3) หญ้ารีคานารี (*Phalaris arundinaceae* L.) (4) หญ้าทิมโมที (*Phleum pratense* L.) ที่สามารถปลูกได้ที่ภูมิอากาศแบบบอเรล (Boreal Conditions) ในประเทศฟินแลนด์ รวมถึงระยะเวลาเก็บเกี่ยวและจำนวนครั้งของการเก็บเกี่ยวต่อปีที่ส่งผลต่อการผลิตมีเทนของหญ้า โดยทำการทดลองในขวดปริมาตร 1.0 ลิตร (ทำการทดลองสามซ้ำ) ที่อุณหภูมิ 35 ± 1 องศาเซลเซียส ซึ่งผสมกับมูลวัว (Inoculums) ประมาณ 250 - 300 มิลลิลิตรในอัตราส่วนของแข็งระเหยของหญ้าต่อของแข็งระเหยมูลวัว ($VS_{\text{substrate}}/VS_{\text{inoculums}}$) เท่ากับ 1 จากนั้นปรับปริมาตรเป็น 750 มิลลิลิตรด้วยน้ำ

กลั่นหรือน้ำประปา และเติม โซเดียม ไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) 4 กรัมต่อลิตรเพื่อทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์ ไล่อากาศภายในขวดออกด้วยก๊าซไนโตรเจนเป็นเวลา 3 นาทีหลังจากนั้นปิดจุกให้แน่นด้วยฝาจุกยาง เก็บก๊าซทุก 2 - 3 ครั้งต่อสัปดาห์ด้วยถุงเก็บก๊าซ (Aluminum Gas Bags) จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาค่ามีเทนต่อไป ระยะเวลาในการเก็บก๊าซเป็นเวลา 75 - 95 วัน วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วย ANOVA โดยใช้โปรแกรม SPSS 16.0 พบว่าอัตราการผลิตก๊าซมีเทนของหญ้า 4 ชนิดมีค่าอยู่ระหว่าง 0.253 - 0.394 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแห้งระเหย ที่อัตราการผลิตก๊าซมีเทนเฉลี่ยของ (1) (2) และ (4) มีค่าการผลิตก๊าซมีเทนเฉลี่ยที่สูง 0.342 0.336 และ 0.335 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแห้งระเหยตามลำดับ แต่สำหรับ (3) มีค่าการผลิตก๊าซมีเทนเฉลี่ยที่ต่ำที่สุด 0.296 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแห้งระเหย อัตราการผลิตก๊าซมีเทนเฉลี่ยของการเก็บเกี่ยวครั้งแรก (Generative Growth Stage, 1st Harvest) จะมีค่าสูงกว่าอัตราการผลิตก๊าซมีเทนของการเก็บเกี่ยวครั้งที่สอง (Vegetative Growth Stage, 2nd Harvest) อย่างมีนัยสำคัญ สำหรับ (1) และ (3) ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากมีปริมาณผลผลิตชีวมวลต่อเฮกตาร์สูงกว่าส่งผลให้ผลผลิตแห้งที่เก็บเกี่ยวได้ในครั้งแรกมีค่าสูงกว่าและเมื่อพืชมีการเจริญเติบโตขึ้นสัดส่วนของผนังเซลล์ (เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน) จะมีการเปลี่ยนแปลงเพื่อสร้างความแข็งแรงของลำต้นทำให้ส่วนประกอบภายในของเซลล์ลดลง นอกจากนี้อาจขึ้นกับหญ้าแต่ละชนิดและสายพันธุ์ อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองนี้ไม่มีความแตกต่างของการผลิตก๊าซมีเทนของการเก็บเกี่ยวครั้งแรกกับครั้งที่สองอย่างมีนัยสำคัญของ (2) และ (4) Seppala และคณะ แนะนำว่าปัจจัยสำคัญในการเลือกพันธุ์หญ้าสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพคือ ผลผลิตชีวมวลต่อเฮกตาร์สูง มีส่วนที่สามารถย่อยสลายได้คืออยู่มาก และมีความสามารถในการเจริญเติบโต (Re-growth) หลังการเก็บเกี่ยวสูง นอกจากนี้ควรคำนึงถึงช่วง การเก็บเกี่ยวที่เหมาะสมของหญ้าทั้ง 4 ชนิดที่ทำการศึกษาคควรตัดประมาณ 2 ครั้งต่อปี

สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน (2552) ดำเนินโครงการศึกษาการเพิ่มศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของน้ำเสียจากฟาร์มสุกร โดยใช้การทดสอบด้วยวิธีบีเอ็มพี เพื่อหาชนิดของของเสียที่มีศักยภาพดีที่สุดในการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยทำการทดลองกับของเสียทั้งหมด 5 ชนิด คือ เศษอาหาร กลิเชอริน หญ้าเนเปียร์ ฟางข้าว และต้นข้าวโพด จากการวิเคราะห์หาคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของของเสียทั้ง 5 ชนิด พบว่าของเสียบางชนิด เช่น หญ้าเนเปียร์ ฟางข้าว และต้นข้าวโพด มีปริมาณเส้นใยสูง จึงทำการบำบัดเบื้องต้นก่อนนำไปทำการทดลอง และหลังจากนั้นจะต้องนำของเสียแต่ละการทดลองไปวิเคราะห์หาคุณสมบัติของเบื้องต้นอีกครั้งหนึ่ง เพื่อนำผลวิเคราะห์มาใช้ในการคำนวณปรับอัตราส่วนร้อยละของของแห้งระเหย ค่าของแห้งระเหยของสารอาหารต่อค่าของแห้งระเหยของเชื้อตั้งต้นมีค่าเท่ากับ 1:1 จากนั้นทำการผสมวัสดุหมักย่อยทั้งหมดซึ่งทำการทดลองจะใช้เชื้อตั้งต้นปริมาตร 100 มิลลิลิตร โดยใช้ขวดปริมาตร 1,000 มิลลิลิตรจากนั้นปรับปริมาตรการหมักจนครบ 800 มิลลิลิตรด้วยน้ำกลั่นและเติม โซเดียม ไบคาร์บอเนต 2.4 กรัมทุกขวด

การทดลองแล้วปรับพีเอชด้วยกรดซัลฟิวริกความเข้มข้น 2 นอร์มัลให้ค่าความเป็นกรดต่างอยู่ในช่วงประมาณ 7 จากนั้นไล่ออกซิเจนด้วยก๊าซไนโตรเจนบริสุทธิ์ร้อยละ 99.99 เป็นเวลา 3 นาที ก่อนปิดขวดทดลองแล้วจึงนำไปต่อเข้ากับอุปกรณ์ชุดเขย่า โดยควบคุมอุณหภูมิห้องทดลองอยู่ในช่วง 37 ± 2 องศาเซลเซียส จากนั้นดำเนินการทดลองและเก็บข้อมูลเป็นระยะเวลา 62 วัน จากการทดลองหาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนของของเสีย พบว่าของเสียทั้ง 5 ชนิด มีศักยภาพในการเพิ่มการผลิตก๊าซมีเทนสำหรับน้ำเสียฟาร์มสุกร ได้แก่ (1) เศษอาหารที่อัตราส่วนร้อยละ 60:40 ของของแข็งระเหย (2) กลิเซอรินที่อัตราส่วนร้อยละ 5:95 ของของแข็งระเหย (3) หนุ่เนเปียร์ที่อัตราส่วนร้อยละ 30:70 ของของแข็งระเหย (4) ฟางข้าวที่อัตราส่วนร้อยละ 60:40 ของของแข็งระเหย และ (5) ต้นข้าวโพดที่อัตราส่วนร้อยละ 60:40 ของของแข็งระเหย ซึ่งมีค่าอัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงกว่าการหมักย่อยเฉพาะน้ำเสียฟาร์มสุกรเพียงอย่างเดียว คือ 0.605 0.530 0.589 0.527 และ 0.477 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยที่ใส่เข้าระบบ ตามลำดับ คิดเป็นร้อยละการเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วงร้อยละ 5 - 25 เทียบกับค่าอัตราการผลิตก๊าซมีเทนของ น้ำเสียฟาร์มสุกรที่อัตราส่วนร้อยละ 100 ของของแข็งระเหย เท่ากับ 0.452 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยที่ใส่เข้าระบบ สามารถกล่าวได้ว่าการหมักน้ำเสียฟาร์มสุกรร่วมกับสารอินทรีย์อื่นๆ เป็นการส่งเสริมการเกิดปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้

2.8.3 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซชีวภาพของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบชั้นตอนเดียว

Ahn และคณะ (2010) ศึกษาอิทธิพลของมูลสัตว์ (มูลวัว มูลสุกร และมูลสัตว์ปีก) ต่อการย่อยสลายในระบบไร้อากาศแบบแห้ง (Dry Anaerobic Digestion) หมักร่วมกับหญ้าสวิตช์กราซ (SwitchGrass) โดยศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพ องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ ประสิทธิภาพในการกำจัดสารอาหาร และลักษณะน้ำชะสารอินทรีย์ เนื่องจากการย่อยสลายแบบไร้อากาศเป็นวิธีการทางชีวภาพที่สารอินทรีย์ไปเป็นก๊าซชีวภาพได้ซึ่งก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้สามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานทางเลือกทดแทน การย่อยสลายในระบบไร้อากาศแบบแห้ง (ของแข็งรวมมากกว่าร้อยละ 15) จะมีข้อได้เปรียบกว่าการย่อยสลายในระบบไร้อากาศแบบเปียก (ของแข็งรวมต่ำกว่าร้อยละ 10) ดังนั้น ปริมาตรของถังปฏิกรณ์จะมีขนาดเล็กกว่าส่งผลให้ลดการผลิตน้ำเสียจากระบบ ปริมาณน้ำเสียที่ต้องบำบัดจึงมีปริมาณน้อยลงและสามารถผลิตปุ๋ยที่ง่ายต่อการขนส่ง โดยดำเนินการทดลองในถังปฏิกรณ์ถุงพลาสติกที่อากาศไม่สามารถผ่านเข้าออกได้ มีความจุ 1.0 ลิตร ภายใต้อุณหภูมิสูง (55 องศาเซลเซียส) เติมน้ำในระบบไร้อากาศแบบแห้งโดยกำหนดปริมาณของแข็งรวมในระบบร้อยละ 15 โดยแบบการทดลองออกเป็น 3 การทดลอง ดังนี้ (1) มูลวัวหมักร่วมกับหญ้าสวิตช์กราซ (2) มูล

สุกรมักร่วมกับหญ้าสวิตซ์กราซ และ (3) มูลสัตว์ปีกหมักร่วมกับหญ้าสวิตซ์กราซ ทำการทดลอง สามซ้ำ ได้ผลการทดลอง ดังนี้ การทดลองในวันที่ 62 พบว่า (2) มีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็ง ระบายได้ร้อยละ 52.9 ในขณะที่ (1) และ (3) มีประสิทธิภาพการกำจัดของแข็งระบายได้เพียงร้อยละ 9.3 และร้อยละ 20.2 ตามลำดับ ตลอดระยะเวลา 62 วันพบว่า (2) มีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด คิดเป็น 0.337 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย ในทางกลับกัน (1) และ (3) กลับมีอัตราการ ผลิตก๊าซมีเทนที่ต่ำมากมีค่า 0.028 และ 0.002 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย ตามลำดับ แม้ว่ามูลวัวหมักร่วมกับหญ้าสวิตซ์กราซและมูลสัตว์ปีกหมักร่วมกับหญ้าสวิตซ์กราซจะมีอัตราการ ผลิตก๊าซมีเทนที่ต่ำแต่สามารถมีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงได้ถ้ามีการออกแบบถังปฏิกรณ์ที่ เหมาะสม มีการควบคุมปริมาณการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหย และค่าความเป็นกรด่างที่ลด ต่ำลง เป็นต้น เนื่องจากกรดอินทรีย์ระเหยและค่าความเป็นกรด่างเป็นปัจจัยสำคัญของการ เจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ผลิตก๊าซมีเทนในระบบ

Fernandez และคณะ (2008) ศึกษาอิทธิพลของปริมาณของแข็งรวมของการบำบัดแบบไร้อากาศที่อุณหภูมิปานกลาง (Anaerobic Mesophilic Treatment) ของขยะมูลฝอย (MSW) ในระบบ ปฏิกรณ์ถังแบบแบตช์ (Batch) ดำเนินการทดลองในถังปฏิกรณ์ที่มีความจุ 1.7 ลิตรในช่วงระยะเวลา 85 - 95 วัน โดยแบ่งปริมาณของแข็งรวมออกเป็นร้อยละ 20 (R20) (931.1 มิลลิกรัมคาร์บอนอินทรีย์ ละลายต่อลิตร) และร้อยละ 30 (R30) (1,423.4 มิลลิกรัมคาร์บอนอินทรีย์ละลายต่อลิตร) ได้ผลการ ทดลองดังนี้ ถังปฏิกรณ์ที่มีปริมาณของแข็งรวมของ R20 มีประสิทธิภาพสูงกว่า R30 อย่างมี นัยสำคัญ ประสิทธิภาพของการกำจัดคาร์บอนอินทรีย์ละลายของ R20 และ R30 มีค่าร้อยละ 67.53 และ 49.18 ตามลำดับ และปริมาณการผลิตก๊าซมีเทนรวมตลอดการทดลองคิดเป็น 7.01 และ 5.53 ลิตรของ R20 และ R30 ตามลำดับ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของสารตั้งต้น หรือปริมาณของแข็งรวมเริ่มต้นมีผลอย่างมากในปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทน

Heiermann และ Plochl (2004) ศึกษาการย่อยแบบไร้อากาศโดยเฉพาะพืชเกษตรกรรมที่ เกิดก๊าซชีวภาพ เพื่อตอบสนองความต้องการใช้พลังงานหมุนเวียนและเพิ่มทางเลือกให้แก่เกษตรกร ในด้านพลังงาน โดยดำเนินการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการมีจุดประสงค์เพื่อตรวจสอบ ความสามารถและความเหมาะสมของผลผลิตของพืชหลายชนิดในกระบวนการหมักแบบเปียก (Wet Fermentation) ภายใต้อุณหภูมิปานกลาง พืชเกษตรกรรมที่ใช้ในการทดลองคือ ข้าวบาร์เลย์ (*Hordeum vulgare*) ข้าวไรย์ (*Secale cereale*) และทริติเคลี (ซึ่งพืชลูกผสมระหว่างข้าวสาลีกับข้าว ไรย์, *X Triticosecale*) ที่เก็บเกี่ยวในระยะที่แตกต่างกัน 3 ระยะคือ ระยะน้ำนม (Milk Stage) ระยะ เมล็ดประกอบด้วยแป้งอ่อน (Dough Stage) และระยะบานเต็มที่ (Anthesis Stage) โดยเปรียบเทียบ พืชสดและพืชที่ผ่านการหมัก ทำการทดลองในถังปฏิกรณ์แบบแบตช์ โดยหั่นพืชเกษตรกรรมให้มี ขนาด 1 - 1.5 เซนติเมตรและเก็บไว้ที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียสก่อนทำการทดลอง ถังปฏิกรณ์มี

ขนาด 1.4 ลิตร ระยะเวลาการหมัก 28 วัน ได้ผลการทดลองดังนี้ ผลผลิตก๊าซชีวภาพสำหรับข้าวบาร์เลย์และข้าวไรย์ในระยะน้ำนมมีปริมาณสูงแต่สำหรับทรินิเคิลผลผลิตก๊าซชีวภาพในระยะบานเต็มที่จะมีค่าสูงกว่าระยะน้ำนม ที่เป็นเช่นนี้อาจเป็นเพราะอัตราส่วนของลำต้นต่อเมล็ดของทรินิเคิลนั้นมีอัตราส่วนไม่แน่นอน การทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่ำสุดจะอยู่ในระยะเมล็ดประกอบด้วยแป้งอ่อนของพืช ในส่วนของพืชที่ผ่านการหมักจะมีปริมาณก๊าซชีวภาพสูงกว่าพืชเกษตรกรรมแบบสดเพราะสามารถเกิดการย่อยสลายได้รวดเร็วกว่าเนื่องจากสารชีวเคมีที่ซับซ้อนสามารถถูกย่อยได้บางส่วนในขั้นตอนของกระบวนการหมักขึ้นต้น ในช่วงเวลาของการหมักสามารถเปลี่ยนน้ำตาลของสารอินทรีย์ให้กลายเป็นกรดแลคติกและสารอื่นๆ เช่น กรดโพรพิโอนิก กรดบิวทีริก และกรดแอสซิติค เป็นต้น ซึ่งสารดังกล่าวสามารถใช้เป็นสารตั้งต้นของกระบวนการผลิตมีเทน ความเข้มข้นของมีเทนเฉลี่ยในช่วงสามวันแรกของพืชเกษตรกรรมแบบสดและพืชเกษตรกรรมที่ผ่านการหมักมีค่าร้อยละ 46 และร้อยละ 47 ตามลำดับ และค่าความเข้มข้นจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนมีค่าสูงสุดประมาณร้อยละ 61 - 71 แต่สำหรับระยะเมล็ดประกอบด้วยแป้งอ่อนจะมีร้อยละมีเทนต่ำที่สุดทุกการทดลอง นอกจากนี้การผลิตก๊าซมีเทนจากพืชสดและพืชที่ผ่านการหมักพบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

Koch และคณะ (2009) ทำการศึกษากระบวนการหมักของหญ้าหมักชนิดเดียวในถังปฏิกรณ์วนเวียนแนวตั้งใน (Loop Reactor) ถึงปฏิกรณ์มีปริมาตร 50 ลิตร ทำการทดลองภายใต้อุณหภูมิ 38 องศาเซลเซียส พบว่าอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพมีค่า 0.50 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแห้งระเหย อัตราการผลิตก๊าซมีเทนมีค่า 0.26 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแห้งระเหย ความเข้มข้นของก๊าซมีเทนร้อยละ 52 ที่อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ 3.5 กิโลกรัมของแห้งระเหยต่อลูกบาศก์เมตร ประสิทธิภาพของการกำจัดของแห้งระเหยและซีโอดีมีค่า ร้อยละ 60 และ 75 ตามลำดับ ในขั้นตอนของการเดินระบบในถังปฏิกรณ์วนเวียนแนวตั้งต้องควบคุมปริมาณของแห้งไว้ที่ร้อยละ 12 เพื่อความเสถียรของระบบ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพและมีเทนในถังปฏิกรณ์วนเวียนแนวตั้งเป็นทางเลือกที่น่าสนใจสำหรับพืชพลังงาน

Uzodinma และ Ofoefule (2009) ศึกษาปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพของหญ้ากินนี (*Panicum maximum*) ที่ผสมกับมูลสัตว์ชนิดต่างๆ ในอัตราส่วน 1:1 เดินระบบด้วยถังปฏิกรณ์แบบแบตช์ ถึงปฏิกรณ์มีปริมาตร 50 ลิตร เวลาในการเดินระบบ 30 วัน ทำการทดลองในช่วงที่อุณหภูมิ 26.0 - 32.8 องศาเซลเซียส โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 5 การทดลองดังนี้ (1) หญ้าผสมมูลวัว (2) หญ้าผสมมูลสัตว์ปีก (3) หญ้าผสมมูลสุกร (4) หญ้าผสมมูลกระต่าย (5) หญ้าอย่างเดียว ได้ผลผลิตก๊าซชีวภาพรวมดังนี้ 225.80 152.00 169.70 232.00 และ 73.80 ลิตรต่อมวลรวมทั้งหมด ตามลำดับ และจุดวาบไฟของแต่ละการทดลองเกิดขึ้นในเวลาที่แตกต่างกันดังนี้ หญ้าผสมมูลกระต่ายสามารถผลิตก๊าซชีวภาพติดไฟได้ในวันที่ 6 หญ้าผสมมูลสัตว์ปีกและหญ้าผสมมูลวัวสามารถผลิตก๊าซ

ชีวภาพคิดไฟได้ในวันที่ 7 หน้ำผสมมูลสุกรสามารถผลิตก๊าซชีวภาพคิดไฟได้ในวันที่ 10 สำหรับ หน้ำเพียงอย่างเดียวสามารถผลิตก๊าซชีวภาพคิดไฟได้หลังจากวันที่ 21 จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าหน้ำผสมมูลกระท่ายและหน้ำผสมมูลวัวสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้มากเป็นสามเท่าของการผลิตก๊าซชีวภาพจากหน้ำเพียงอย่างเดียว จากจุดควาไฟฟ้าของแต่ละการทดลองสามารถบ่งบอกถึง ปริมาณความเข้มของกำซมีเทนในระบบ Uzodinma และ Ofoefule จึงรายงานว่สำหรับระบบการ ผลิตก๊าซชีวภาพของหน้ำที่ผสมมูลสัตว์จะมีความเข้มข้นของปริมาณกำซมีเทนสูงกว่าและเกิดกำซ มีเทนได้รวดเร็วกว่ระบบที่ใช้หน้ำเพียงอย่างเดียว ที่เป็นเช่นนี้อาจเนื่องมาจากหน้ำมีปริมาณ คาร์บอนเป็นองค์ประกอบที่สูงและผนังเซลล์ที่มีลิกโนเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบจึงทำให้มี ปริมาณกำซชีวภาพเกิดขึ้นได้ช้าและมีปริมาณต่ำจึงต้องอาศัยการหมักร่วมกับมูลสัตว์เพื่อเพิ่ม ศักยภาพในการผลิตกำซมีเทน

2.8.4 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการหมักน้ในในระบบหมักไร้อากาศ

Walker และคณะ (2009) เปรียบเทียบเสถียรภาพทางชีวภาพของขยะมูลฝอยชุมชน (OFMSW) ของการบำบัดแบบใช้อากาศ (Aerobic Treatments) และการบำบัดแบบไร้อากาศ (Anaerobic Treatments) โดยการศึกษาอัตราการย่อยสลายซึ่งผ่านทางค่าเทียบเท่าของการกำจัด อิเล็กตรอน ดำเนินการทดลองโดยแบ่งการทำลองออกเป็น 3 การทดลอง ดังนี้ (1) การหมักปุ้ในถัง (In-Vessel Composting) (2) การย่อยสลายแบบไร้อากาศอุณหภูมิสูงพร้อมทั้งการเวียนของเหลว กลั้บ (Thermophilic Anaerobic Digestion with Liquor Recycle) (3) รวมทั้งสองการทดลองไว้ ด้วยกัน และเปรียบเทียบอัตราการย่อยสลายโดยศึกษาจากการไหลของอิเล็กตรอน พบว่าการย่อย สลายแบบไร้อากาศอุณหภูมิสูงพร้อมทั้งการเวียนของเหลวกลั้บมีการไหลของอิเล็กตรอนได้เร็ว กว่าสองระบบที่เหลือ จึงทำให้สารอินทรีย์เปลี่ยนไปเป็นกำซชีวภาพได้เร็วกว่า นอกจากนี้ Walker และคณะ รายงานถึงข้อดีและข้อเสียของการหมักปุ้และการย่อยสลายแบบไร้อากาศ ดังนี้ การหมัก ปุ้มีข้อดีคือระบบไม่ซับซ้อนและราคาการก่อสร้างต่ำ แต่มีข้อเสียคือเกิดมลพิษทางกลิ่นในพื้นที่ กว้าง ไม่สามารถควบคุมการรั่วไหลของน้ำชะได้ ไม่สามารถควบคุมกำซมีเทนที่ผลิตได้ และ ระบบใช้พลังงานสูง ส่วนการย่อยสลายแบบไร้อากาศมีข้อดีคือ สามารถทำได้ในพื้นที่เล็ก ๆ ได้กำซ มีเทนเป็นผลผลิต และระบบใช้พลังงานต่ำ แต่มีข้อเสียคือ ระบบซับซ้อนและราคาในการก่อสร้าง สูง ปริมาณน้ำเสียมีความเข้มข้นสูง

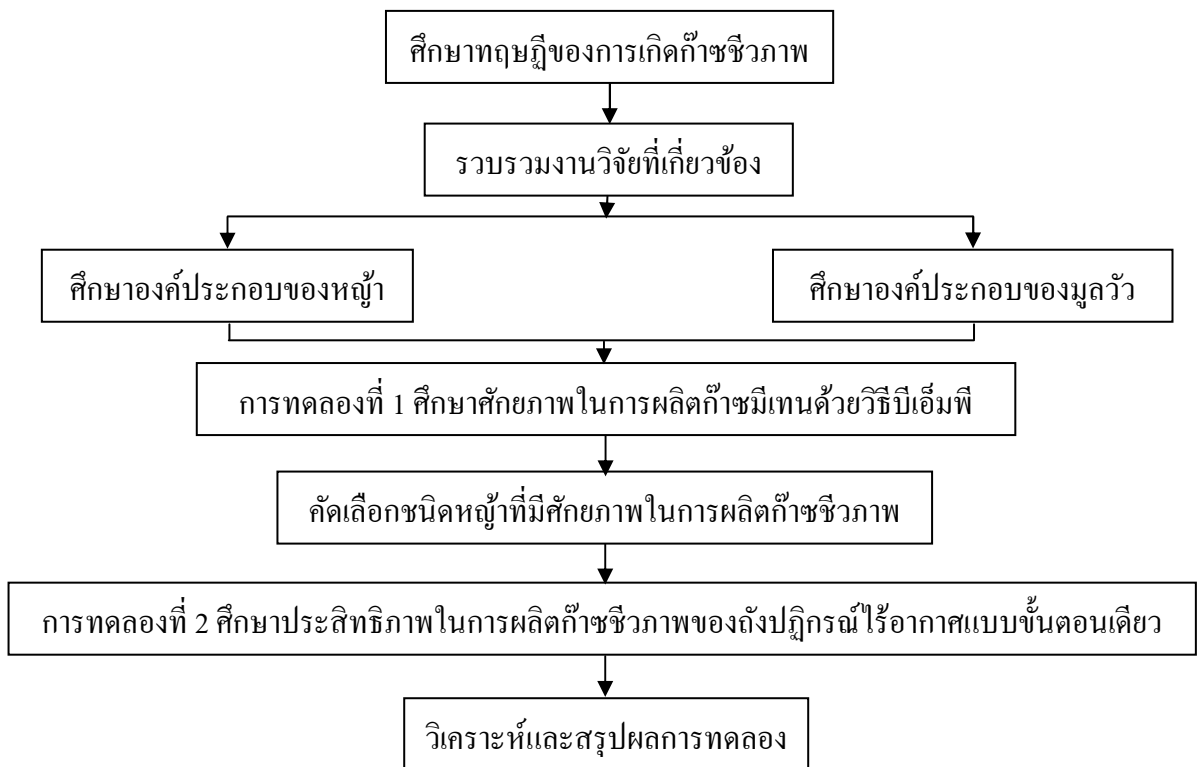
กฤษฎพล ใจจงรักษ์ (2546) ศึกษาแนวทางในการหมუნเวียนน้ำชะขยะเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายขยะอินทรีย์ โดยมีการสร้างระบบถังย่อยสลายขยะจำลองปริมาตร 88 ลิตรจำนวนสามถังที่มีแนวทางในการหมუნเวียนน้ำชะขยะที่แตกต่างกันแบ่งออกเป็น (1) การหมუნเวียนโดยมีการกำหนดปริมาณน้ำชะขยะที่แน่นอน (2) การหมუნเวียนโดยปรับไปตามปริมาณมวลชีโอดีและก๊าซมีเทน (3) การหมუნเวียนโดยผ่านระบบเพียงครั้งเดียว ผลการทดลองพบว่า การย่อยสลายขยะโดยมีการหมუნเวียนน้ำชะขยะมีปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้มากกว่าระบบที่ไม่มีการหมუნเวียนน้ำชะขยะ และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างระบบที่มีการหมუნเวียนน้ำชะขยะด้วยกันนั้นพบว่า การหมუნเวียนโดยปรับไปตามปริมาณมวลชีโอดีและก๊าซมีเทนให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพมากกว่าการหมუნเวียนโดยผ่านระบบเพียงครั้งเดียว โดยดำเนินการทดลองเป็นระยะเวลา 195 วัน ผลการทดลอง (1) (2) และ (3) มีปริมาณก๊าซชีวภาพรวมทั้งสิ้น 333.73 365.74 และ 184.33 ลิตรตามลำดับ สามารถกล่าวได้ว่าการหมუნเวียนน้ำชะขยะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพได้ เนื่องจากเป็นการเพิ่มความชื้นให้กับขยะที่อยู่ส่วนบนของถัง จุลินทรีย์จึงสามารถทำงานได้ดีขึ้นทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้น

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

3.1 แผนการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการแบ่งออกเป็นสองการทดลอง การทดลองที่ 1 ศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนด้วยวิธีบีเอ็มพีที่เกิดจากการย่อยสลายหญ้าชนิดต่างๆ ในประเทศไทยที่มีน้ำหนักผลผลิตแห้งคั่นต่อไร่ต่อปีสูง การทดลองที่ 2 ศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบขึ้นตอนเดียว ปริมาตร 2.5 ลิตร โดยศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ ณ ห้องปฏิบัติการ ณ ห้องปฏิบัติการวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย โดยแผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยแสดงดังนี้



ภาพที่ 3.1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

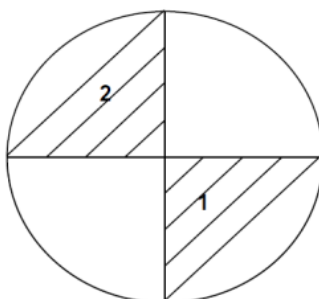
3.2 ตัวอย่างหญ้าที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.1 การเก็บตัวอย่างหญ้า

เก็บตัวอย่างหญ้าสดอายุประมาณ 45 วัน จำนวน 7 ชนิด ได้แก่ หญ้ารูซี่ (*Brachiaria ruziziensis*) หญ้ากินนีสีม่วง (*Panicum maximum* TD 58) หญ้าอะตราตัม (*Paspalum atratum*) หญ้าพลีแคลทูลัม (*Paspalum plicatulum*) หญ้าโรัด (*Chloris gayana*) หญ้าเนเปียร์ยักษ์ (*Pennisetum purpureum* cv. King Grass) และหญ้าแพงโกล่า (*Digitaria eriantha*) จากศูนย์วิจัยและพัฒนาอาหารสัตว์นครราชสีมา ต.ปากช่อง อ.ปากช่อง จ.นครราชสีมา โดยตัดตัวอย่างหญ้าให้สูงกว่าระดับผิวดิน 15 เซนติเมตร เก็บตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสเพื่อรอทำการทดลองต่อไป (Gunaseelan, 2009) สำหรับรายละเอียดของหญ้าแต่ละชนิดแสดงในภาคผนวก ก ลักษณะประจำพันธุ์หญ้าที่ใช้ในงานวิจัย

3.2.2 ศึกษาองค์ประกอบของหญ้าที่ใช้ในการทดลอง

การเตรียมตัวอย่างในห้องปฏิบัติการเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญและลดปริมาณตัวอย่างที่นำเข้าห้องปฏิบัติการให้เหลือปริมาณที่เพียงพอและเหมาะสมต่อการนำไปเป็นตัวอย่างวิเคราะห์ (Kumar และคณะ, 2009) วิธีการเตรียมตัวอย่างที่เป็นวิธีมาตรฐานและใช้ในการทดลองนี้ คือ การเตรียมตัวอย่างโดยใช้วิธีแบ่งออกเป็น 4 ส่วน (Quartering Method) โดยนำตัวอย่างหญ้ามารกระจายออกอย่างสม่ำเสมอในภาชนะแบน จากนั้นแบ่งเป็น 4 ส่วนเท่าๆ กัน นำสองส่วนที่อยู่ตรงข้ามกันมารวมกัน ส่วนอีกสองส่วนที่เหลือให้ทิ้งไปแล้วนำตัวอย่างหญ้าที่รวมกันมาทำการแบ่งเช่นเดิมจนได้ปริมาณตัวอย่างหญ้าที่ต้องการ



ภาพที่ 3.2 การแบ่งสี่ส่วนและเลือกคู่สองส่วนที่อยู่ตรงข้ามกัน

การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบในห้องปฏิบัติการ นอกจากจะต้องคำนึงถึงการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอของตัวอย่างแล้ว ยังต้องระมัดระวังไม่ให้ตัวอย่างเกิดการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบที่อาจเกิดจากความร้อนที่เกิดขึ้นในขณะบด ความชื้นในอากาศ การปนเปื้อนระหว่างตัวอย่างขณะเตรียมตัวอย่างการปนเปื้อนของโลหะบางชนิดจากอุปกรณ์เตรียมตัวอย่าง (Kumar และคณะ, 2009) จากนั้นนำตัวอย่างหญ้าแต่ละชนิดมาหั่นให้มีขนาดสม่ำเสมอประมาณ 10 มิลลิเมตร (Fernandez และคณะ, 2008) เพื่อให้ทำปฏิกิริยากับจุลินทรีย์ได้ง่ายและทั่วถึงแล้วศึกษาองค์ประกอบของหญ้าที่ใช้ในการทดลอง ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 ตัวแปรที่ทำการวิเคราะห์หญ้า

ตัวแปร	วิธีวิเคราะห์
ของแข็งทั้งหมด (Total Solids, TS)	AOAC, 1999 (Dried 105°C)
ความชื้น (Moisture Content)	AOAC, 1999 (Dried 105°C)
ของแข็งระเหย (Volatile Solids, VS)	AOAC, 1999 (Dried 550 - 600°C)
เถ้า (Ash)	AOAC, 1999 (Dried 550 - 600°C)
เซลลูโลส (Cellulose content)	TAPPI T203 cm - 99
เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose content)	TAPPI T203 cm - 99
ลิกนิน (Lignin content)	TAPPI T203 cm - 99
ซีโอดีรวม (Total COD)	Standard Method#5220C (Closed Reflux)
ความเป็นกรดต่าง (pH)	Electronic pH Meter

3.3 เชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในงานวิจัย

3.3.1 การเก็บตัวอย่างเชื้อจุลินทรีย์

เชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการวิจัยคือ ไข่มูลวัวพันธุ์โฮลส์ไตน์ฟรีเซียน (*Bos taurus*) ประเภทกินหญ้าเป็นหลักร่วมกับอาหารข้น โดยรวบรวมจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์ของคณะสัตวแพทยศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

3.3.2 ศึกษาองค์ประกอบของมูลวัวที่ใช้ในการทดลอง

โดยมูลวัวจะนำไปใช้เป็นหัวเชื้อของการทดลองที่ 1 และการทดลองที่ 2 ซึ่งกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศมีธาตุอาหารที่จำเป็น ได้แก่ คาร์บอนและไนโตรเจน ถ้ามีปริมาณไนโตรเจนน้อยเกินไป จุลินทรีย์จะไม่สามารถสร้างเอนไซม์ออกมาได้ซึ่งเอนไซม์นี้มีความสำคัญในการย่อยสลายคาร์บอน แต่ถ้ามีปริมาณไนโตรเจนมากเกินไป โดยเฉพาะอยู่ในรูปของแอมโมเนียจะไปยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ตามตารางที่ 3.2 มูลวัวมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศซึ่งอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนควรมีค่าอยู่ระหว่าง 20:1 ถึง 30:1 (Verma, 2002)

ตารางที่ 3.2 อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของวัตถุดิบสารอินทรีย์ (Karki และคณะ, 2005)

ชนิดสัตว์/ชนิดพืช	อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน
มูลเป็ด	8
มูลมนุษย์	8
มูลไก่	10
มูลแพะ	12
มูลสุกร	18
มูลแกะ	19
มูลวัว	24
มูลควาย	24
ผักตบชวา	25
มูลช้าง	43
ฟางข้าวโพด	60
ฟางข้าว	70
ฟางข้าวสาลี	90
ขี้เลื่อย	มากกว่า 200

จากตารางที่ 3.2 อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของมูลวัวอยู่ในช่วงที่เหมาะสมของการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศ ผู้วิจัยจึงนำมูลวัวมาใช้เป็นหัวเชื้อในงานวิจัยนี้ โดยศึกษาองค์ประกอบของมูลวัวที่ใช้ในการทดลอง ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 ตัวแปรที่ทำการวิเคราะห์มูลวัว

ตัวแปร	วิธีวิเคราะห์
ของแข็งทั้งหมด (Total Solids, TS)	AOAC, 1999 (Dried 105°C)
ความชื้น (Moisture Content)	AOAC, 1999 (Dried 105°C)
ของแข็งระเหย (Volatile Solids, VS)	AOAC, 1999 (Dried 550 - 600°C)
ปริมาณเถ้า (Ash)	AOAC, 1999 (Dried 550 - 600°C)
ซีโอดีรวม (Total COD)	Standard Method#5220C (Closed Reflux)
ความเป็นกรดต่าง (pH)	Electronic pH Meter
ความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชัน (ORP)	Electronic ORP Meter

3.4 เครื่องมือ อุปกรณ์ และสารเคมี

3.4.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

3.4.1.1 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทดลองที่ 1 ศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนด้วยวิธีบีเอ็มพีที่เกิดจากการย่อยสลายหญ้าชนิดต่างๆ

1. ขวดซีรัมสีชาขนาด 120 มิลลิลิตร
2. เครื่องวัดปริมาณก๊าซชีวภาพแบบท่อรูปตัวยู



ภาพที่ 3.3 ขวดซีรัมสีชาขนาด 120 มิลลิลิตร



ภาพที่ 3.4 เครื่องวัดปริมาณก๊าซชีวภาพแบบท่อรูปตัวยู

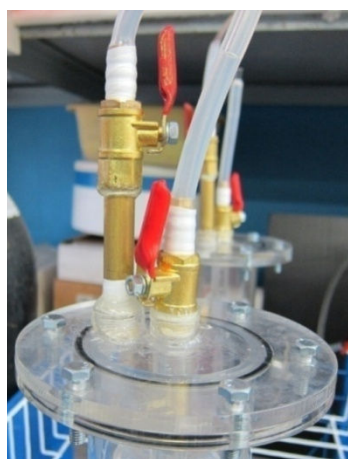
3.4.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการทดลองที่ 2 ศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบขึ้นตอนเดียว

1. ถังปฏิกรณ์ จำนวน 2 ถัง ถังปฏิกรณ์จำลองในระดับห้องปฏิบัติการ ปริมาตรถังปฏิกรณ์ 2.5 ลิตรและกำหนดปริมาตรใช้งาน 1.0 ลิตร จำนวน 2 ถัง ถังปฏิกรณ์ทำจากอะคริลิก ขนาดของถังปฏิกรณ์แสดงดังตารางที่ 3.4 โดยออกแบบถังปฏิกรณ์ให้มีอัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 12.5:1 เพื่อให้เกิดการย่อยสลายแบบปลັกโฟลว์ ตามทฤษฎีการย่อยสลายแบบปลັกโฟลว์จะมีอัตราส่วนความยาวต่อความกว้างของถังปฏิกรณ์ควรมีค่ามากกว่า 5:1 (Singh และ Prema, 2009) (Broughton, 2009) และติดตั้งชั้นกระจายน้ำเพื่อเวียนน้ำกลับเข้าระบบ โดยชั้นกระจายน้ำรูปกากบาทจะเชื่อมต่อกับฝาปิดบนถังปฏิกรณ์ และติดตั้งข้อต่อซึ่งต่อเข้ากับระบบเก็บก๊าซ ก้นถังปฏิกรณ์จะติดตั้งวาล์วเพื่อใช้ในการระบายและเก็บตัวอย่างน้ำชะ นอกจากนี้ก้นถังปฏิกรณ์จะปูด้วยตะแกรงพลาสติกและหินกรวดเพื่อป้องกันการอุดตันของชั้นระบายน้ำที่ก้นถังปฏิกรณ์

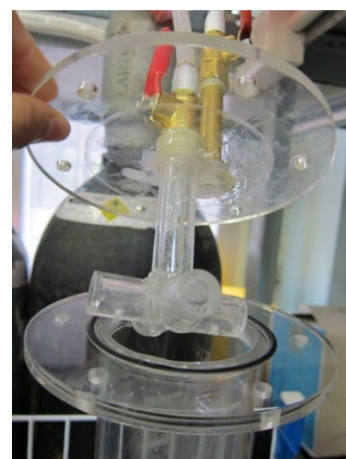
2. อุปกรณ์เก็บก๊าซชีวภาพ ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์จะรวบรวมและวัดโดยอาศัยหลักการแทนที่ของเหลวของก๊าซที่เกิดขึ้น โดยกระบอกเก็บก๊าซจะประกอบด้วยกระบอกดวงขนาด 500 มิลลิลิตร ประกบกลับด้านกับกระบอกดวงขนาด 1,000 มิลลิลิตรทำการปรับค่าความเป็นกรดต่างของน้ำให้ต่ำกว่า 3 โดยใช้โซเดียมซัลเฟต 20 กรัมผสมกับกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 5 มิลลิลิตรในน้ำ 100 มิลลิลิตร (Sawyer และคณะ, 2003) เพื่อป้องกันการละลายน้ำของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ตารางที่ 3.4 ขนาดตั้งปฏิบัติการที่ใช้ในการทดลองที่ 2 ศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ

ตั้งปฏิบัติการ	ขนาด (เซนติเมตร)
เส้นผ่านศูนย์กลางกลางภายนอกของถัง	7.0
เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของถัง	6.4
ความหนาของถัง	0.3
ความสูงของถัง	80
อัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง	12.5 (ไม่มีหน่วย)
เส้นผ่านศูนย์กลางฝาปิดถังบน/ล่าง	13.0
ชั้นกระจายน้ำห่างจากฝาปิด	5.0
เส้นผ่านศูนย์กลางกลางภายนอกของท่อกระจายน้ำ	1.0
ความยาวของท่อกระจายน้ำ	5.0
เส้นผ่านศูนย์กลางกลางภายนอกของท่อเก็บก๊าซ	1.0
เส้นผ่านศูนย์กลางกลางภายนอกของท่อระบายน้ำ	1.0
ชั้นกรวดสูง	5.0
ชั้นตะแกรงสูง	0.2



ภาพที่ 3.5 ท่อนำก๊าซ (ขวา) และท่อกระจายน้ำ (ซ้าย)



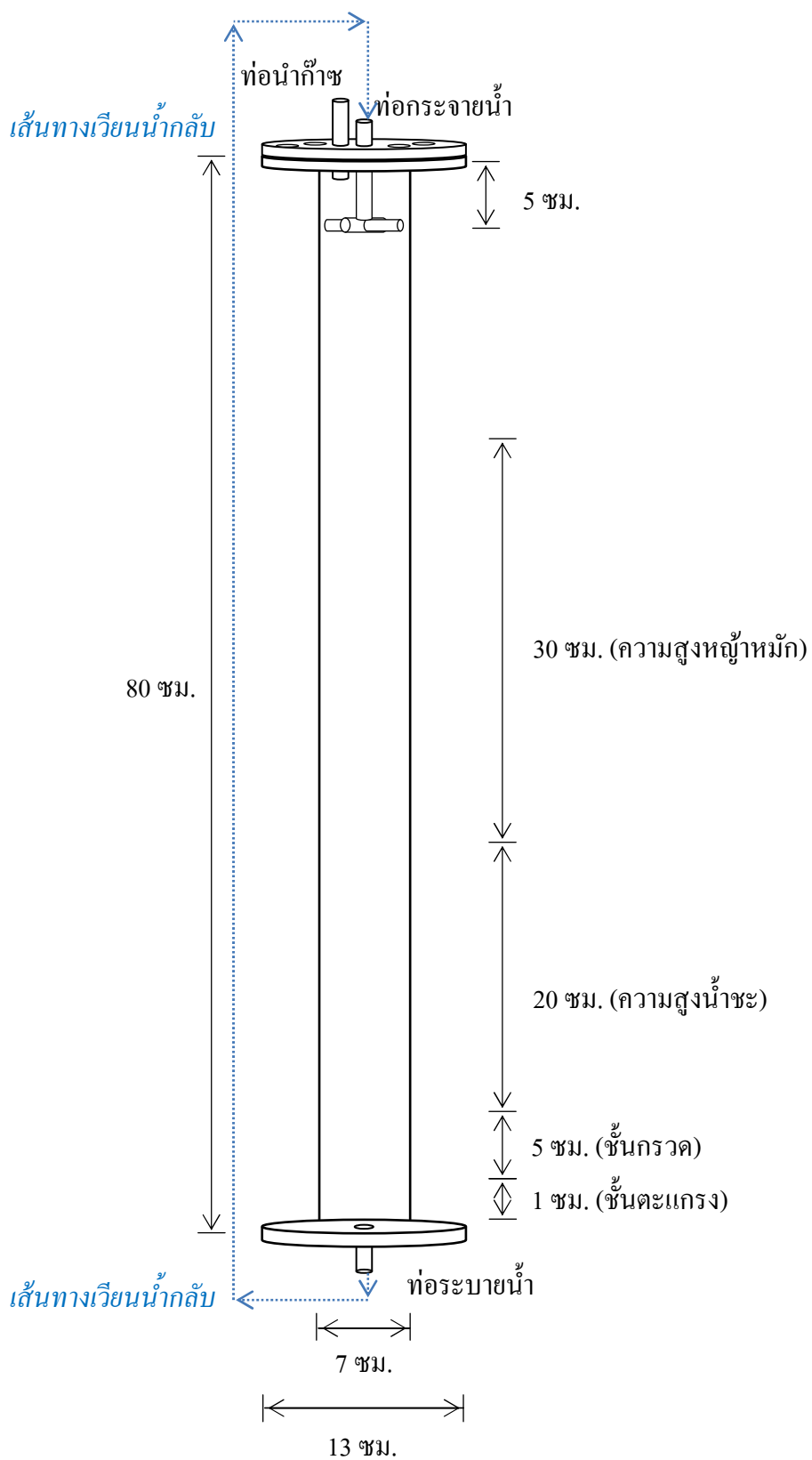
ภาพที่ 3.6 ท่อกระจายน้ำ



ภาพที่ 3.7 ท่อระบายน้ำ



ภาพที่ 3.8 ตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองที่ 2 ศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ พร้อมอุปกรณ์เก็บก๊าซชีวภาพ



ภาพที่ 3.9 ขนาดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองที่ 2 ศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ
 พร้อมอุปกรณ์เก็บก๊าซชีวภาพ

3.4.1.3 เครื่องมือและอุปกรณ์อื่น ๆ

1. เครื่องวัดความเป็นกรดด่าง
2. เทอร์โมมิเตอร์
3. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง
4. ตู้อบควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 103 - 105 องศาเซลเซียส
5. ตู้อบควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 150 องศาเซลเซียส
6. เตาเผาควบคุมอุณหภูมิได้ที่ 550 ± 50 องศาเซลเซียส
7. เครื่องอังไอน้ำ
8. เครื่องวัดการดูดกลืนแสง
9. เครื่องย่อยสลาย ชุดกลั่น และเครื่องดูดควัน
10. เครื่องปั่นกวน
11. เครื่องให้ความร้อนแบบแผ่น
11. เครื่องแก้วต่างๆ

3.4.2 สารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

1. แอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl)
2. โพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI)
3. กรดบอริก (H_3BO_3)
4. โซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3)
5. กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4)
6. โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)
7. ฟีนอล์ฟทาลีน ($\text{C}_{20}\text{H}_{14}\text{O}_4$)
8. เอทิลแอลกอฮอล์ ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)
9. บรอมครีซอลกรีน ($\text{C}_{21}\text{H}_{14}\text{Br}_4\text{O}_5\text{S}$)
10. เมทิลเรด ($\text{C}_{15}\text{H}_{15}\text{N}_3\text{O}_2$)
11. โพแทสเซียมซัลเฟต (K_2SO_4)
12. คอปเปอร์ (II) ซัลเฟต (CuSO_4)
13. โซเดียมไธโอซัลเฟตเพนตาไฮเดรต ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)
14. โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3)
15. เมทิลีนบลู ($\text{C}_{16}\text{H}_{18}\text{N}_3\text{S}$)

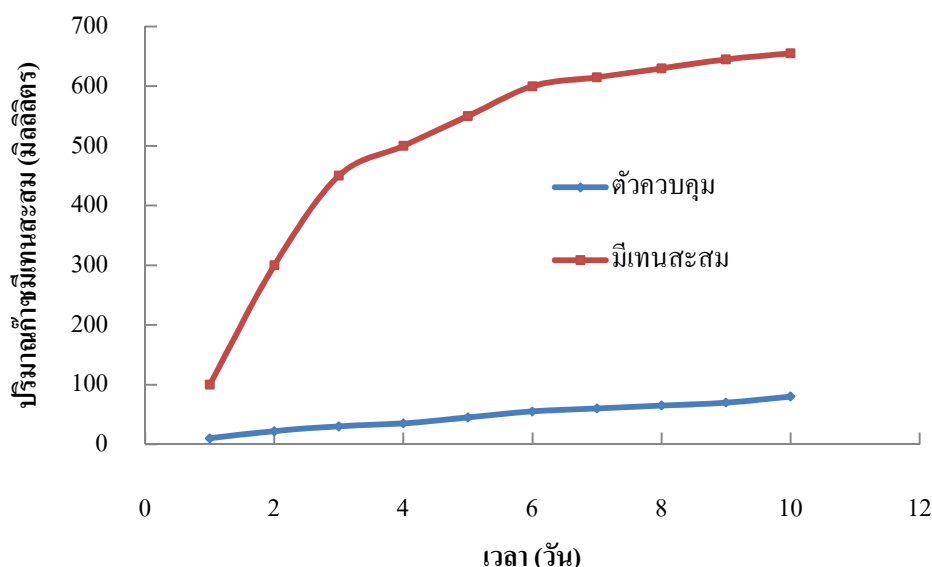
16. โพแทสเซียมไดโครมต ($K_2Cr_2O_7$)
17. เฟอรัสแอมโมเนียมซัลเฟต ($Fe(NH_4)(SO_4) \cdot 6H_2O$)
18. 1, 10 - ฟีนานโทรลีนโมโนไฮเดรต ($C_{12}H_8N_2 \cdot H_2O$)
19. เฟอรัสซัลเฟต ($FeSO_4 \cdot H_2O$)
20. แอมโมเนียมโมลิบเดท ($(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$)
21. แอนติโมนีโปตัสเซียมทาเทรท ($K(SbO) \cdot C_4H_4O_6 \cdot 1/2H_2O$)
22. แอสคอร์บิกแอซิด ($C_6H_8O_6$)
23. โพตัสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (KH_2PO_4)
24. เมอคิวริกซัลเฟต ($HgSO_4$)
25. ซิลเวอร์ซัลเฟต ($AgSO_4$)
26. ซิงค์ซัลเฟต ($ZnSO_4 \cdot 7H_2O$)
27. ไดโซเดียมเอทิลีนไดอะมีนเตตระอะซิเตตไดไฮเดรต ($C_{10}H_{18}N_2Na_2O_{10}$)
28. เมอคิวริกไอโอไดด์ (HgI_2)
29. โซเดียมซัลเฟต (Na_2SO_4)
30. ก๊าซไนโตรเจน (N_2)

3.5 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

3.5.1 การทดลองที่ 1 ศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนด้วยวิธีบีเอ็มพี (Biochemical Methane Potential, BMP) ที่เกิดจากการย่อยสลายหญ้าชนิดต่างๆ

วิธีบีเอ็มพีเป็นการหาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนของสารอินทรีย์ด้วยระบบแบบไร้อากาศในรูปของปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นทั้งหมดต่อกรัมของแข็งระเหยที่ใส่เข้าระบบ วิธีบีเอ็มพีทำได้โดยนำสารอินทรีย์ผสมกับเชื้อจุลินทรีย์ลงในขวดแล้วใส่ก๊าซออกซิเจนออกให้หมด จากนั้นปิดขวดให้สนิทและทำการวัดปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นจนกว่าระบบจะไม่มีก๊าซเกิดเพิ่มขึ้น จากนั้นนำปริมาณก๊าซมีเทนสะสมไปพล็อตกราฟแสดงปริมาณก๊าซมีเทนสะสมตามระยะเวลาที่ทำการทดลองและคำนวณค่าบีเอ็มพี โดยมีหน่วยคือ ลิตรของก๊าซมีเทนต่อกรัมของแข็งระเหยใส่เข้าระบบ ดังสมการ (Banks, 2007)

$$\text{บีเอ็มพี} = \frac{\text{ปริมาตรของก๊าซมีเทนชุดทดลอง (ลิตร)} - \text{ปริมาตรของก๊าซมีเทนชุดควบคุม (ลิตร)}}{\text{ปริมาณของแข็งระเหยที่ใส่เข้าระบบ (กรัม)}}$$



ภาพที่ 3.10 ตัวอย่างการสร้างกราฟปริมาณก๊าซมีเทนสะสมตามระยะเวลาที่ทำการทดลอง

การศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนมีจุดประสงค์เพื่อทราบว่าหญ้าแต่ละชนิดที่นำมาทดสอบสามารถย่อยสลายในสภาวะไร้อากาศและทราบศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อปริมาณหญ้าที่ทำการทดลอง โดยทำการทดลองในขวดซีรัมสีขาขนาด 120 มิลลิลิตร โดยแบ่งเป็น 8 ชุดการทดลองตามชนิดของหญ้าแต่ละชนิดและชุดควบคุมการทดลอง และเก็บตัวอย่างก๊าซชีวภาพโดยใช้เข็มสองปลาย ปลายด้านหนึ่งเสียบเข้ากับจุกยางของขวดซีรัมส่วนอีกด้านหนึ่งเสียบเข้ากับหลอดเก็บเลือดสุญญากาศและพันหลอดด้วยพาราฟินเพื่อป้องกันการปนเปื้อนจากอากาศภายนอกจากนั้นก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จะถูกวิเคราะห์โดยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี

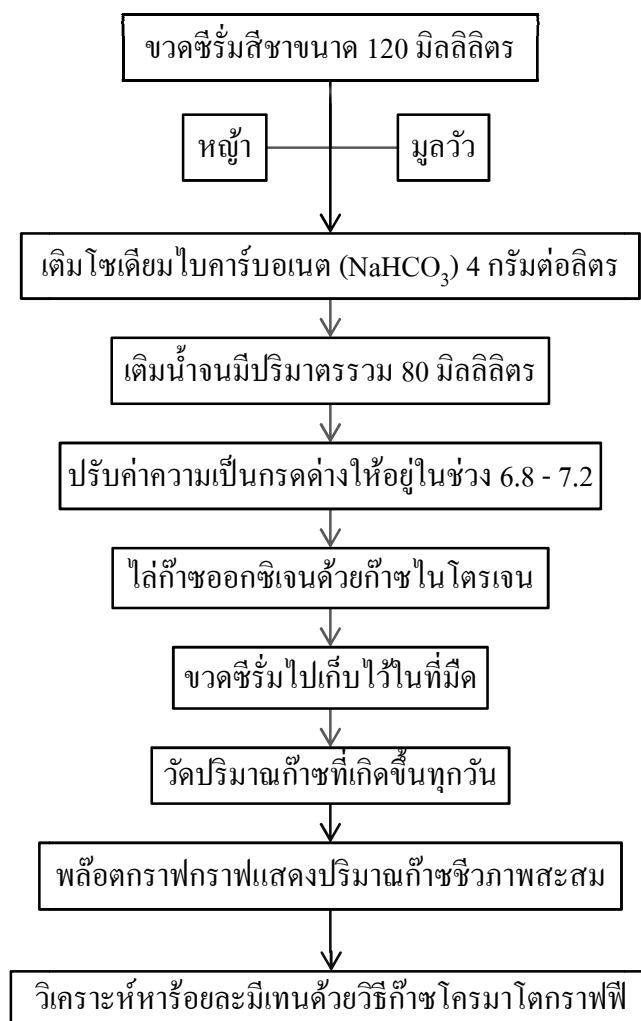
จำนวนชุดการทดลอง ประกอบด้วย

1. ชุดการทดลองหญ้า 7 ชุด ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง
2. ชุดควบคุมการทดลอง 1 ชุด ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

นำค่าปริมาณก๊าซมีเทนสะสมไปพล็อตกราฟแสดงปริมาณก๊าซมีเทนสะสมตามระยะเวลาที่ทำการทดลองและคำนวณค่าบีเอ็มพีแล้วหาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนด้วยวิธีบีเอ็มพีที่เกิดจากการย่อยสลายหญ้าชนิดต่างๆ และวิเคราะห์ตัวแปรต่างๆ โดยมีวิธีการทดลองตามวิธีของ Seppala และคณะ (2009) ดังนี้

1. นำหญ้าหั่นละเอียดขนาด 2 มิลลิเมตรและเก็บตัวอย่างไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส (Gunaseelan, 2009)
2. เติมมูลวัวในอัตราส่วนของแข็งระเหยของหญ้าต่อของแข็งระเหยมูลวัว เท่ากับ 1 ลงในขวดซีรัมสีขา

3. เติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) 4 กรัมต่อลิตร เพื่อทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์แล้วเติมน้ำจนมีปริมาตรรวม 80 มิลลิลิตร
4. ปรับค่าความเป็นกรดด่างให้อยู่ในช่วง 6.8 - 7.2
5. ไล่ออกซิเจนที่อยู่ภายในขวดด้วยก๊าซไนโตรเจน
6. นำขวดซีรัมสีชาไปเก็บไว้ในที่มืด (Deublein และ Steinhauser, 2008) และวัดปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นทุกวัน โดยการแทนที่ของเหลวจนกระทั่งระบบไม่มีก๊าซเกิดเพิ่มขึ้น
7. บันทึกข้อมูลของปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นและนำค่าปริมาณก๊าซมีเทนสะสมไปพล็อตกราฟแสดงปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมตามระยะเวลาที่ทำการทดลองเทียบกับเวลา รวมทั้งเก็บตัวอย่างก๊าซที่เกิดขึ้นในขวดซีรัมสีชาไปวิเคราะห์หาร้อยละมีเทนด้วยวิธีก๊าซโครมาโตกราฟี (Gas Chromatography)



ภาพที่ 3.11 ขั้นตอนการทดลองที่ 1 ศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนด้วยวิธีบีเอ็มพี ตามวิธีของ Seppala และคณะ (2009)

ตารางที่ 3.5 ตัวแปรในการทดลองที่ 1 ศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนด้วยวิธีบีเอ็มพี

ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ทำการควบคุม	
ปริมาณน้ำต่อมูลวัว	อัตราส่วน $VS_{\text{substrate}}/VS_{\text{inoculum}}$ เท่ากับ 1	
ปริมาตรรวม	80 มิลลิลิตร	
ของแข็งระเหยที่ใส่	ค่าเริ่มต้นเท่ากันทุกการทดลอง	
เวลาที่ใช้ในการทดลอง	63 วัน	
อุณหภูมิ	อุณหภูมิห้อง	
ตัวแปรตาม	วิธีวิเคราะห์	ความถี่ในการวิเคราะห์
ของแข็งทั้งหมด (Total Solids, TS)	Standard Method#2540B (Dried 103 - 105°C)	เริ่มต้นและสิ้นสุด
ของแข็งระเหย (Volatile Solids, VS)	Standard Method#2540B (Dried 500 - 600°C)	เริ่มต้นและสิ้นสุด
แอมโมเนียไนโตรเจน (NH ₃ -N)	Standard Method#4500 - NH ₃	เริ่มต้นและสิ้นสุด
ซีโอดีรวม (Total COD)	Standard Method#5220C (Closed Reflux)	เริ่มต้นและสิ้นสุด
ก๊าซชีวภาพ (Gas production)	Inverted Glass Cylinder Method	ทุกวัน
ความเข้มข้นของก๊าซมีเทน (Percent Methane)	Gas Chromatography	1 ครั้ง/สัปดาห์
ความเป็นกรดต่าง (pH)	Electronic pH meter	2 ครั้ง/สัปดาห์
กรดอินทรีย์ระเหย (VFA)	Standard Method#5560	2 ครั้ง/สัปดาห์
ความเป็นด่าง (Alkalinity)	Standard Method#2320B (Titration Method)	2 ครั้ง/สัปดาห์

3.5.2 การทดลองที่ 2 ศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบขั้นตอนเดียว

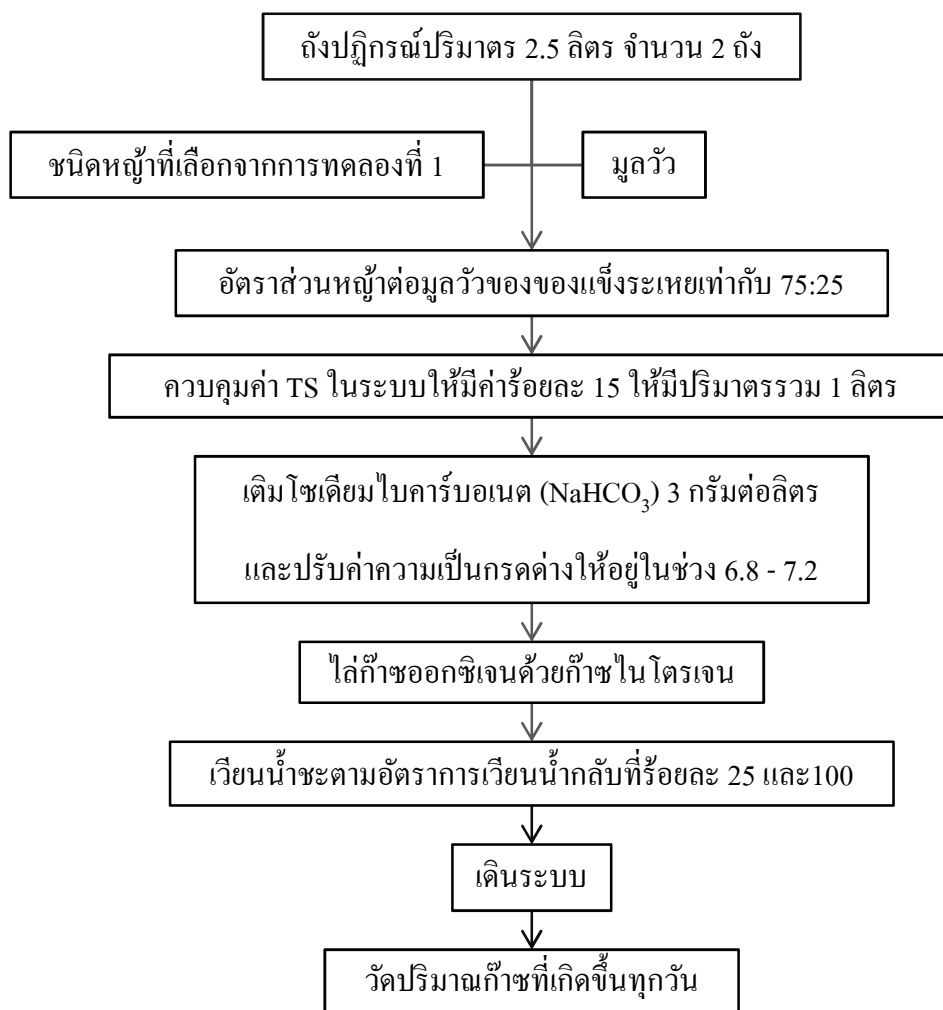
ถังปฏิกรณ์จำลองในระดับห้องปฏิบัติการ ปริมาตรถังปฏิกรณ์ 2.5 ลิตรและกำหนดปริมาตรใช้งาน 1.0 ลิตร จำนวน 2 ถัง โดยในถังปฏิกรณ์จะปล่อยให้ น้ำไหลซึมวิธีเวียนน้ำกลับมาโปรยในส่วนบนของถังปฏิกรณ์เพื่อเพิ่มความชื้นให้กับสารอินทรีย์ที่อยู่ส่วนบนของถังและลดการขาดแคลนปริมาณสารอินทรีย์ (Jagadabhi และคณะ, 2010) ทำให้จุลินทรีย์สามารถทำงานได้ดีขึ้น ส่งเสริมให้ประสิทธิภาพของระบบสูงขึ้น โดยทำให้เกิดการย่อยสลายมากขึ้นและเพิ่มความสามารถในการเกิดก๊าซชีวภาพได้เร็วขึ้น นอกจากนี้ถือเป็นกระบวนการที่มีเสถียรภาพสูงเนื่องจากระบบสามารถควบคุมอัตราการเวียนน้ำกลับได้เมื่อระบบมีสภาพเป็นกรดหรือด่างมากเกินไป (Fischer และ Krieg, 2001)

การทดลองกระบวนการย่อยสลายในถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบขั้นตอนเดียวมีจุดประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของถังปฏิกรณ์ที่มีอัตราการเวียนน้ำกลับที่แตกต่างกัน ดังนี้ อัตราเวียนน้ำกลับร้อยละ 25 และร้อยละ 100 โดยคัดเลือกตัวอย่างชนิดหญ้าจากการทดลองที่ 1 ซึ่งมีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนดีที่สุด จำนวนชุดการทดลองประกอบด้วยถังปฏิกรณ์ย่อยสลายแบบไร้อากาศแบบขั้นตอนเดียว ปริมาตรถังปฏิกรณ์ 2.5 ลิตรและปริมาตรใช้งาน 1.0 ลิตร จำนวน 2 ถังและเก็บตัวอย่างก๊าซชีวภาพโดยการใช้ถุงเก็บก๊าซขนาด 1.0 ลิตรหลังจากนั้นพันจุกเปิดปิดด้วยพาราฟินเพื่อป้องกันการปนเปื้อนจากอากาศภายนอก จากนั้นก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จะถูกวิเคราะห์โดยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี

โดยมีวิธีการทดลอง ดังนี้

1. เลือกตัวอย่างหญ้าจากการทดลองศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนด้วยวิธีบีเอ็มพีที่มีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนดีที่สุดนำหญ้ามาหั่นละเอียดให้มีขนาด 10 มิลลิเมตร (Banks, 2007) และเติมมูลวัวลงในถังปฏิกรณ์ โดยควบคุมค่าของแข็งรวมในระบบให้มีค่าร้อยละ 15 (Ahn และคณะ, 2010) ในอัตราส่วนหญ้าต่อมูลวัวของของแข็งระเหยเท่ากับ 75:25 (Chen และคณะ, 2010) ให้มีปริมาตรรวม 1.0 ลิตร
2. เติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) 3 กรัมต่อลิตร (Banks, 2007) เพื่อทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์และปรับค่าความเป็นกรดด่างให้อยู่ในช่วง 6.8 - 7.2 แล้วผสมให้เข้ากัน
3. ใส่ก๊าซออกซิเจนที่อยู่ภายในขวดด้วยก๊าซไนโตรเจน (Seppala และคณะ, 2009) และเก็บถังปฏิกรณ์ทั้งสองในที่มืด (Deublein และ Steinhauser, 2008)
4. เวียนน้ำชะตามอัตราการเวียนน้ำกลับที่ร้อยละ 25 และร้อยละ 100 จนถังปฏิกรณ์ทั้งสองไม่มีก๊าซเกิดเพิ่มขึ้น

5. เก็บตัวอย่างน้ำชะจากจุดเก็บน้ำชะที่กั้นถึงปฏิกรณ์ทั้งสองเพื่อวิเคราะห์ค่าตัวแปรต่างๆ
6. เมื่อถึงปฏิกรณ์ทั้งสองถึงไม่มีก๊าซเกิดขึ้น บันทึกข้อมูลของปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นเทียบกับเวลาและเก็บตัวอย่างก๊าซที่เกิดขึ้นตลอดการทดลองในถังปฏิกรณ์ไปวิเคราะห์หาร้อยละมีเทนด้วยวิธีก๊าซโครมาโตกราฟี



ภาพที่ 3.12 ขั้นตอนการทดลองที่ 2 ศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบขั้นตอนเดียว

ตารางที่ 3.6 ตัวแปรในการทดลองที่ 2 ศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของถังปฏิกรณ์

ตัวแปรควบคุม	ค่าที่ทำการควบคุม	
ปริมาณหญ้าและมูลวัว	ของแข็งรวมร้อยละ 15	
อัตราส่วนหญ้าต่อมูลวัวของของแข็งระเหย	75:25	
อัตราการเวียนน้ำกลับ	1. ร้อยละ 25 2. ร้อยละ 100	
เวลาที่ใช้ในการทดลอง	120 วัน	
อุณหภูมิ	อุณหภูมิห้อง	
ตัวแปรตาม	วิธีวิเคราะห์	ความถี่ในการวิเคราะห์
ของแข็งทั้งหมด (Total Solids, TS)	AOAC, 1999 (Dried 105°C)	เริ่มต้นและสิ้นสุด
ของแข็งระเหย (Volatile Solids, VS)	AOAC, 1999 (Dried 550 - 600°C)	เริ่มต้นและสิ้นสุด
ทีเคเอ็น* (Total Kjeldahl Nitrogen, TKN)	Standard Method#4500 - N _{org} C	เริ่มต้นและสิ้นสุด
ออร์โธฟอสเฟต* (Orthophosphate)	Standard Method#4500 - P	เริ่มต้นและสิ้นสุด
ความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชัน (ORP)	Electronic ORP Meter	เริ่มต้นและสิ้นสุด
ซีโอดีรวม* (Total COD)	Standard Method#5220C (Closed Reflux)	เริ่มต้นและสิ้นสุด
ก๊าซชีวภาพ (Gas production)	Inverted Glass Cylinder Method	ทุกวัน
ความเข้มข้นของก๊าซมีเทน (Percent Methane)	Gas Chromatography	1 ครั้ง/สัปดาห์
ความเป็นกรดต่าง* (pH)	Electronic pH Meter	2 ครั้ง/สัปดาห์
กรดอินทรีย์ระเหย* (VFA)	Standard Method#5560	2 ครั้ง/สัปดาห์
ความเป็นด่าง* (Alkalinity)	Standard Method#2320B (Titration Method)	2 ครั้ง/สัปดาห์

หมายเหตุ * เก็บตัวอย่างน้ำชะจากจุดเก็บน้ำชะที่ก้นถังปฏิกรณ์

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

4.1 องค์ประกอบของหญ้า

จากการวิเคราะห์เบื้องต้นของหญ้าทั้ง 7 ชนิด พบว่า หญ้าไร้ดมีปริมาณของแข็งทั้งหมด และของแข็งระเหยสูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 31.59±0.92 และร้อยละ 26.79±5.11 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ เนื่องจากหญ้าไร้ดมีลักษณะประจำพันธุ์ คือลำต้นแข็งตรง ขนาดใบยาวเรียว ความยาวเฉลี่ย 56.3 เซนติเมตร และความกว้างเฉลี่ย 1.3 เซนติเมตร (กรมปศุสัตว์, 2553) จึงทำให้หญ้าไร้ดมีปริมาณของแข็งทั้งหมดสูงกว่าหญ้าทั้ง 6 ชนิด โดยหญ้าทั้ง 7 ชนิดมีปริมาณของแข็งทั้งหมดอยู่ในช่วงร้อยละ 31.59±0.92 - 23.72±0.35 และของแข็งระเหยอยู่ในช่วงร้อยละ 26.79±5.11 - 20.02±4.35 โดยน้ำหนัก แสดงดังตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 องค์ประกอบพื้นฐานของหญ้า

ชนิดหญ้า	ของแข็งทั้งหมด (ร้อยละ)	ความชื้น (ร้อยละ)	ของแข็งระเหย (ร้อยละ)	เถ้า (ร้อยละ)	BVS (ร้อยละ)	RVS (ร้อยละ)
หญ้ารูซี่	27.14±2.13	72.86±2.13	23.92±1.35	3.22±1.35	39.20	60.80
หญ่ากินนีสีม่วง	29.35±0.84	70.65±0.84	25.60±0.33	3.74±0.33	49.25	50.75
หญ่าอะตราดัม	23.72±0.35	76.28±0.35	20.02±4.35	3.70±4.35	45.89	54.11
หญ่าพลีแคทูล์ม	27.40±0.39	72.60±0.39	24.13±0.83	3.28±0.83	37.77	62.23
หญ่าไร้ด	31.59±0.92	68.41±0.92	26.79±5.11	4.80±5.11	47.74	52.26
หญ่าเนเปียร์ยักษ์	28.07±1.05	71.93±1.05	23.72±3.45	4.36±3.45	44.66	55.34
หญ่าแพงโกล่า	29.37±0.24	70.63±0.24	25.98±5.50	3.39±5.50	50.72	49.28

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบพื้นฐานของหญ้าตารางที่ 4.1 พบว่าปริมาณของแข็งระเหยง่ายที่ย่อยสลายได้ง่ายด้วยกระบวนการทางชีวภาพ (BVS) มีค่าในช่วงร้อยละ 37.77 - 50.72 และ ปริมาณของแข็งระเหยง่ายที่ย่อยสลายได้ยากด้วยกระบวนการทางชีวภาพ (RVS) อยู่ในช่วงร้อยละ 49.28 - 62.23 เมื่อปริมาณของแข็งระเหยง่ายที่ย่อยสลายได้ง่ายด้วยกระบวนการทางชีวภาพ (BVS) มีค่าสูงจะสามารถเกิดการย่อยสลายทางชีวภาพแบบไร้อากาศได้ดีทำให้สามารถผลิตก๊าซ

ชีวภาพในปริมาณที่สูงขึ้น (Kayhanian และคณะ, 2007; Seppala และคณะ, 2009) สำหรับหญ้าแพง โกล่าและหญ้านิสนิม่วงมีปริมาณของแข็งระเหยง่ายที่ย่อยสลายได้ง่ายด้วยกระบวนการทางชีวภาพ (BVS) อยู่สูงเนื่องจากมีปริมาณร้อยละลิกนินที่ต่ำกว่าหญ้าชนิดอื่นซึ่งปริมาณลิกนินมีค่าร้อยละ 11.53 ± 0.23 และ 12.05 ± 0.08 ของหญ้าแพง โกล่าและหญ้านิสนิม่วง ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 องค์ประกอบทางเคมีของหญ้า

ชนิดหญ้า	เซลลูโลส (ร้อยละ)	เฮมิ เซลลูโลส (ร้อยละ)	ลิกนิน (ร้อยละ)	(C+H)/L	ซีโอดีรวม (มก./ล.)	ความ เป็นกรด ต่าง
หญ้ารูซี่	68.46 ± 0.15	15.89 ± 0.20	15.64 ± 0.23	5.39	$107,672 \pm 0$	6.7 ± 0.08
หญ้านิสนิม่วง	72.95 ± 0.23	14.99 ± 0.31	12.05 ± 0.08	7.30	$52,455 \pm 13,525$	8.2 ± 0.08
หญ้าอะตราดัม	73.68 ± 0.20	13.07 ± 0.08	13.25 ± 0.15	6.54	$41,412 \pm 11,713$	6.9 ± 0.08
หญ้าพลิแคทูลัม	71.03 ± 0.20	12.82 ± 0.35	16.15 ± 0.20	5.19	$46,934 \pm 6,763$	6.5 ± 0
หญ้าไร้ด	73.62 ± 0.20	13.79 ± 0.27	12.59 ± 0.08	6.94	$44,173 \pm 13,525$	5.9 ± 0.08
หญ้านเปียร์ยักซ์	72.40 ± 0.23	13.91 ± 0.31	13.69 ± 0.08	6.30	$59,358 \pm 8,946$	6.4 ± 0
หญ้าแพง โกล่า	76.75 ± 0.35	11.72 ± 0.58	11.53 ± 0.23	7.67	$95,248 \pm 5,857$	5.7 ± 0.08

ผลการวิเคราะห์ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน โดยวิธี TAPPI 203 cm-99 พบว่าหญ้ามี่ปริมาณเซลลูโลสร้อยละ 70 ปริมาณเฮมิเซลลูโลสร้อยละ 10 ปริมาณลิกนินร้อยละ 10 โดยน้ำหนักซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีหญ้าของ Nizami และคณะ (2009) แสดงดังตารางที่ 4.2 โดยโครงสร้างของผนังเซลล์พืชประกอบไปด้วยลิกนิน เฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลสรวมเรียกว่า ลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose) ซึ่งเป็นส่วนสร้างความแข็งแรงให้แก่ผนังเซลล์ โดยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสนั้นเป็นส่วนที่สามารถย่อยสลายได้ในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ในขณะที่ลิกนินเป็นตัวขัดขวางกระบวนการหมักไร้อากาศ (Owens และ Chynoweth, 1993) กรณีที่มีปริมาณลิกนินอยู่มากจะทำให้ศักยภาพของการผลิตก๊าซชีวภาพมีค่าลดลง (Seppala และคณะ, 2009) โดยสามารถวิเคราะห์ได้จากอัตราส่วนของผลรวมระหว่างเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสกับลิกนิน [(เซลลูโลส+เฮมิเซลลูโลส)/ลิกนิน, (C+H)/L] ในกรณีที่อัตราส่วนของผลรวมระหว่างเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสกับลิกนินมีค่าสูง กล่าวได้ว่าหญ้ามี่ปริมาณสารอินทรีย์ (เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส) ที่สามารถเปลี่ยนไปเป็นก๊าซชีวภาพได้สูง (Wang และคณะ, 1994) อัตราส่วนของผลรวมระหว่างเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสของหญ้ามี่แพง โกล่าและหญ้ามี่นิสนิม่วงมี

อัตราส่วนสูงสุดคือ 7.67 และ 7.30 ตามลำดับ แต่ทั้งนี้ศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพยังขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่นๆ ในระบบหมักไร้อากาศอีกเช่นกัน

การวิเคราะห์ซีไอโดยรวมเบื้องต้นของหญ้า ซึ่งวิเคราะห์โดยนำตัวอย่างหญ้าแต่ละชนิดมาหั่นให้ได้ขนาดประมาณ 0.5 เซนติเมตรจากนั้นคั้นน้ำหญ้าเพื่อเก็บส่วนที่เป็นของเหลวแล้วหาปริมาณซีไอโดยรวมของน้ำหญ้าที่คั้น ผลการทดลองพบว่าค่าซีไอโดยรวมของหญ้าขึ้นกับลักษณะทางกายภาพของแต่ละชนิด หญ้าที่มีสัดส่วนของใบต่อลำต้นโดยน้ำหนักที่สูงและใบมีลักษณะอ่อนนุ่มนั้นจะสามารถคั้นน้ำหญ้าออกมาได้ง่ายและมีความเข้มข้นของน้ำคั้นสูง ส่งผลให้ค่าซีไอโดยรวมมีปริมาณสูงกว่าหญ้าที่มีสัดส่วนของใบต่อลำต้นโดยน้ำหนักที่ต่ำ ใบมีลักษณะใบแข็ง มีขน และใบคม โดยหญ้าที่มีค่าซีไอโดยรวมสูงเป็นอันดับแรกๆ ของการทดลองคือ หญ้ารัฐซีและหญ้าแพงโกล่า มีปริมาณสูงถึง $107,672 \pm 0$ และ $95,248 \pm 5,857$ มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

4.2 องค์ประกอบของมูลวัว

งานวิจัยนี้ใช้มูลวัวเป็นหัวเชื้อจุลินทรีย์ของการทดลองที่ 1 และการทดลองที่ 2 เนื่องจากหญ้าทั้ง 7 ชนิดมีปริมาณเซลลูโลสอยู่สูงถึงร้อยละ $68.46 \pm 0.15 - 76.75 \pm 0.35$ โดยน้ำหนัก โดยทั่วไปเซลลูโลสไม่สามารถละลายน้ำและย่อยสลายได้ในร่างกายมนุษย์ แต่สำหรับวัวที่จัดอยู่ในจำพวกสัตว์แทะซึ่งในกระเพาะของวัวมีจุลินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายเซลลูโลสให้เป็นกลูโคสได้ (Koch และคณะ, 2009) เซลลูโลสเมื่อถูกย่อยสลายจะแตกตัวออกให้น้ำตาลกลูโคสจำนวนมากโดยเป็นสารตั้งต้นที่สำคัญในการสร้างก๊าซมีเทน องค์ประกอบพื้นฐานของมูลวัวแห่งแสดงดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 องค์ประกอบพื้นฐานของมูลวัวแห่ง

ตัวแปร	มูลวัวแห่ง
ของแข็งทั้งหมด (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	91.00 ± 0.67
ความชื้น (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	9.00 ± 0.67
ของแข็งระเหย (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	37.80 ± 0.81
เถ้า (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	53.2 ± 0.81
ซีไอโดยรวม (มก./ล.)	$2,110 \pm 0$
ความเป็นกรดต่าง	7.27 ± 0.22
ความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชัน (มิลลิโวลต์)	-85.83 ± 0.96

มูลวัวแห้งใช้เป็นตัวเชื้อจุลินทรีย์ของการทดลองที่ 1 ซึ่งมีค่าของแข็งทั้งหมดร้อยละ 91.00 ± 0.67 โดยน้ำหนักและความชื้นร้อยละ 9.00 ± 0.67 โดยน้ำหนัก สำหรับค่าความชื้นมีค่าต่ำ เพราะผู้วิจัยเก็บตัวอย่างเฉพาะมูลวัวแห้งสำหรับการทดลองที่ 1 เนื่องจากสะดวกต่อการเก็บรวบรวม กลิ่นไม่เหม็น และสะดวกต่อการขนส่งจึงส่งผลให้ให้มีปริมาณซีโอดีรวมค่าที่ $2,110 \pm 0$ มิลลิกรัมต่อลิตร

4.3 ผลการทดลองที่ 1 ศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนด้วยวิธีบีเอ็มพี (Biochemical Methane Potential, BMP) ที่เกิดจากการย่อยสลายหญ้าชนิดต่างๆ

4.3.1 ลักษณะหญ้าหมักของการทดลองที่ 1 เมื่อเริ่มต้นและสิ้นสุดการทดลอง

เมื่อเริ่มต้นจนถึงสิ้นสุดการทดลองรวมระยะเวลาทั้งสิ้น 63 วัน พบว่าลักษณะหญ้าหมักของการทดลองทั้ง 8 ชุดการทดลองมีการเปลี่ยนแปลงไป แสดงดังตารางที่ 4.4

ตารางที่ 4.4 ของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยของการทดลองที่ 1 เมื่อเริ่มต้นและสิ้นสุดการทดลอง

การทดลอง	ของแข็งทั้งหมด (มก./ล.)		ของแข็งระเหย (มก./ล.)	
	เริ่มต้น	สิ้นสุด	เริ่มต้น	สิ้นสุด
มูลวัว	93,870±34,705	37,507±5,894	23,695±1,485	31,467±5,984
หญ้ารูซี่ผสมมูลวัว	100,960±11,823	42,670±735	31,450±3,592	34,285±8,924
หญ่ากินนีสีม่วงผสมมูลวัว	87,860±47,235	45,003±4,114	29,640±16,461	30,010±2,057
หญ่าอะตราดัมผสมมูลวัว	69,460±19,573	32,067±3,519	21,650±4,186	24,230±2,270
หญ่าพลิแคทูลัมผสมมูลวัว	45,720±5,996	36,557±8,816	16,635±2,503	23,833±3,552
หญ่าไรด์ผสมมูลวัว	76,200±22,345	48,343±2,545	25,650±6,817	31,960±2,914
หญ่าเนเปียร์ยักษ์ผสมมูลวัว	44,380±15,274	36,997±5,651	14,910±6,845	27,133 ±4,490
หญ่าแพงโกล่าผสมมูลวัว	51,000±32,188	41,047±1,712	18,555±10,168	33,457±3,735

เมื่อเริ่มต้นการทดลองของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยมีค่าระหว่าง $45,720 \pm 5,996$ - $100,960 \pm 11,823$ และ $14,910 \pm 6,845$ - $31,450 \pm 3,592$ มิลลิกรัมต่อลิตรตามลำดับ เมื่อสิ้นสุดการทดลองของแข็งทั้งหมดมีค่าลดลงอยู่ระหว่าง $32,067 \pm 3,519$ - $48,343 \pm 2,545$ มิลลิกรัมต่อลิตรและของแข็งระเหยมีค่าเพิ่มสูงขึ้นมีค่าระหว่าง $23,833 \pm 3,552$ - $34,285 \pm 8,924$ มิลลิกรัมต่อลิตรเนื่องจาก

เกิดกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ (Hydrolysis) ซึ่งสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อนและมีขนาดโมเลกุลใหญ่จะถูกย่อยสลายให้มีขนาดเล็กลงส่งผลให้ของแข็งทั้งหมดมีค่าลดลงและของแข็งระเหยมีค่าสูงขึ้น (Broughton, 2009)

จากตารางที่ 4.5 เมื่อเริ่มต้นการทดลองค่าซีไอโดยรวมของชุดมูลวัวมีค่า $2,096 \pm 539$ มิลลิกรัมต่อลิตรและสิ้นสุดการทดลองมีค่าซีไอโดยรวมเพิ่มขึ้น $3,494 \pm 0$ มิลลิกรัมต่อลิตรซึ่งเกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศสามารถแบ่งขั้นตอนของกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศได้เป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้ การย่อยสลายสารอินทรีย์ การหมักกรดอินทรีย์ระเหย และการสร้างก๊าซมีเทน (Kayhanian และคณะ, 2007) โดยซีไอโดยรวมของชุดมูลวัวมีค่าเพิ่มขึ้นเนื่องจากเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์และเกิดการหมักกรดอินทรีย์ระเหยจึงมีการเปลี่ยนรูปสารอินทรีย์ให้เป็นกรดอินทรีย์ระเหยทำให้ความเข้มข้นของซีไอโดยรวมเพิ่มขึ้น แต่สำหรับชุดการทดลองหญ้าผสมมูลวัวทั้ง 7 ชุดมีค่าซีไอโดยรวมลดลงเนื่องจากการเปลี่ยนกรดอินทรีย์ระเหยไปเป็นก๊าซมีเทนในขั้นตอนการสร้างก๊าซมีเทนได้ดีกว่าในการทดลองมูลวัว (ชุดควบคุม)

ตารางที่ 4.5 แอมโมเนียไนโตรเจนและซีไอโดยรวมของการทดลองที่ 1 เมื่อเริ่มต้นและสิ้นสุดการทดลอง

การทดลอง	แอมโมเนียไนโตรเจน (มก./ล.)		ซีไอโดยรวม (มก./ล.)	
	เริ่มต้น	สิ้นสุด	เริ่มต้น	สิ้นสุด
มูลวัว	11±0	30±2.97	2,096±539	3,494±0
หญ้ารูซี่ผสมมูลวัว	39±0	39±5.94	4,573±1,078	1,671±0
หญ่ากินนีสีม่วงผสมมูลวัว	34±0	29±0.99	6,097±1,078	2,279±0
หญ่าอะตราดัมผสมมูลวัว	11±0	15±1.98	4,573±1,078	1,367±859
หญ่าพลิแกตุ้มผสมมูลวัว	14±0	8±3.96	4,573±1,078	1,367±859
หญ่าไร้ดผสมมูลวัว	22±0	15±1.98	4,192±0	2,583±859
หญ่าเนเปียร์ยักษ์ผสมมูลวัว	11±0	31±6.93	3,048±1,078	2,735±430
หญ่าแพงโกล่าผสมมูลวัว	15±0	28±6.93	4,001±1,617	3,494±1,719

สารอาหารที่จุลินทรีย์ในระบบหมักไร้อากาศจำเป็นต้องใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์และการสร้างเซลล์ส่วนใหญ่จะใช้ในรูปของสัดส่วนซีไอต่อไนโตรเจน (COD:N) มีค่าเท่ากับ 800:5 (Deublein และ Steinhauser, 2008) เมื่อเริ่มต้นการทดลองพบว่าสัดส่วนซีไอต่อไนโตรเจน (COD:N) ในน้ำชะของการทดลองมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 800:3.74 ซึ่งแอมโมเนียไนโตรเจนมีปริมาณสารอาหารต่ำกว่าปริมาณสารอาหารที่จำเป็นเล็กน้อยแต่เมื่อสิ้นสุดการทดลองสัดส่วนซีไอต่อ

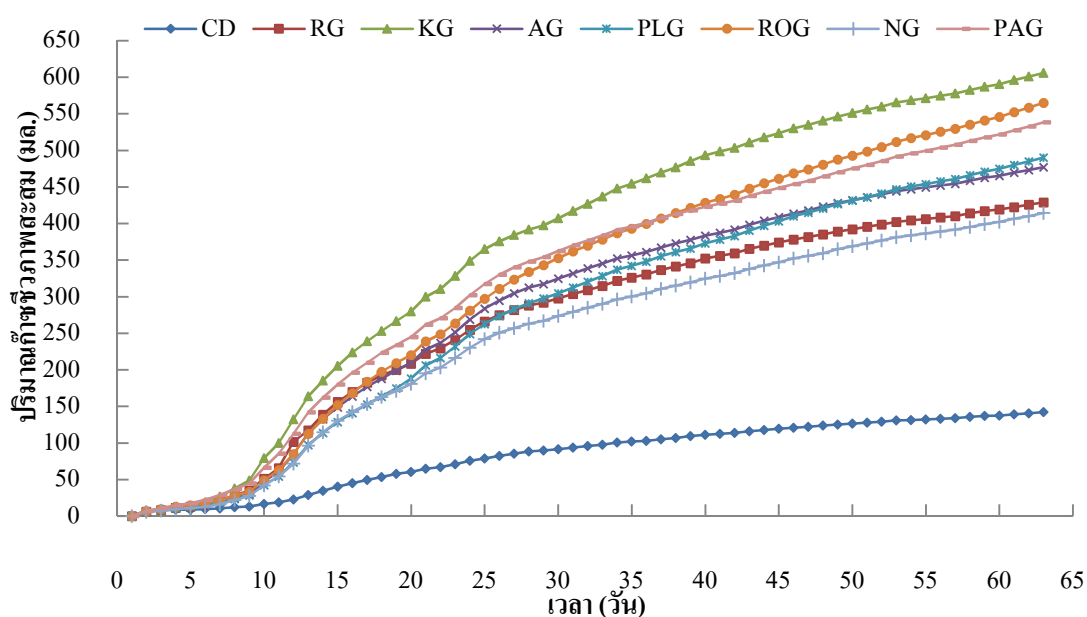
ไนโตรเจน (COD:N) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 800:8.66 แสดงให้เห็นว่าปริมาณสารอาหารแอมโมเนียไนโตรเจนมีค่าเพียงพอสำหรับใช้ในระบบหมักไร้อากาศตามอัตราส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจน (COD:N) ซึ่งมีค่า 800:5 (Deublein และ Steinhauser, 2008)

4.3.2 การผลิตก๊าซชีวภาพของการทดลองที่ 1

ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นเป็นตัวแปรสำคัญสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าในระบบหมักไร้อากาศ โดยวันที่ 63 เป็นวันสิ้นสุดการทดลองเนื่องจากปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นของวันที่ 63 มีปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพต่ำเฉลี่ยซึ่งมีปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพเพียงร้อยละ 13.42 เมื่อเทียบกับปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดของการทดลอง ดังนั้นจึงถือว่าระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Seppala และคณะ (2009), Gunaseelan (2004) และ Rincon และคณะ (2010) ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมและปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันของหญ้าชนิดต่างๆ ที่สภาวะมาตรฐาน แสดงดังภาพที่ 4.1 และภาพที่ 4.2 ตามลำดับ

4.3.2.1 ก๊าซชีวภาพสะสมของการทดลองที่ 1

ก๊าซชีวภาพสะสมที่ผลิตได้ของการทดลองทั้ง 8 ชุดการทดลอง พบว่าการทดลองชุดมูลวัว (ชุดควบคุม) มีก๊าซชีวภาพสะสม 142 ± 29 มิลลิลิตรและกลุ่มชุดหญ้าผสมมูลวัวมีก๊าซชีวภาพสะสมอยู่ในช่วง 414 ± 73 - 606 ± 65 มิลลิลิตร

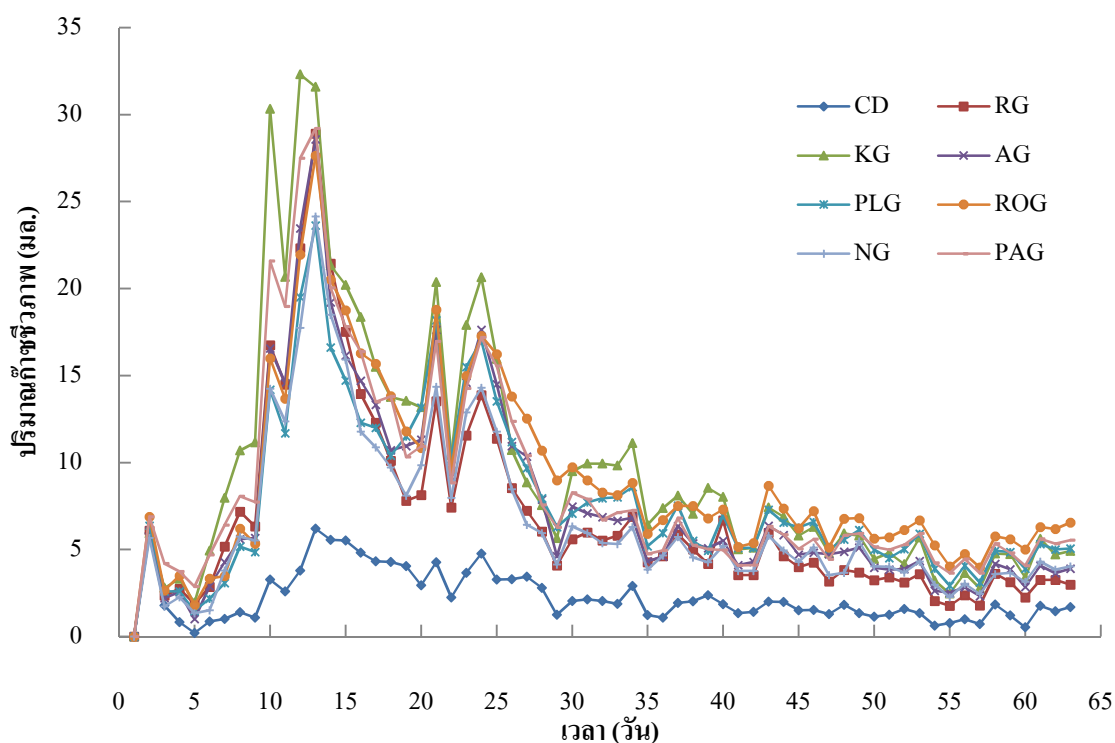


ภาพที่ 4.1 ก๊าซชีวภาพสะสมของหญ้าชนิดต่างๆ ที่สภาวะมาตรฐาน

เมื่อคำนวณก๊าซชีวภาพสะสมชุดหญ้าผสมมูลวัวเทียบกับชุดมูลวัว (ชุดควบคุม) ได้ปริมาณการเพิ่มขึ้นของก๊าซชีวภาพถึงร้อยละ 292 - 427 เมื่อเทียบกับชุดควบคุมซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Powlson และคณะ (2005) และ Koch และคณะ (2009) ที่ว่าหญ้ามักมีศักยภาพที่จะเป็นพืชพลังงานสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพได้ โดยสามารถเรียงลำดับปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดดังนี้ หญ้ากินนีสีม่วงผสมมูลวัว หญ้าไร้ดผสมมูลวัว หญ้าแพงโกล่าผสมมูลวัว หญ้าพลิแคทูลัมผสมมูลวัว หญ้าอะตราตัมผสมมูลวัว หญ้ารูซี่ผสมมูลวัว หญ้าเนเปียร์ยักษ์ผสมมูลวัว และมูลวัว (ชุดควบคุม) ซึ่งมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม 606 ± 65 565 ± 58 538 ± 61 490 ± 53 477 ± 64 429 ± 67 414 ± 73 และ 142 ± 29 มิลลิลิตร ตามลำดับ

4.3.2.2 ก๊าซชีวภาพรายวันของการทดลองที่ 1

ก๊าซชีวภาพรายวันสามารถอธิบายได้จากสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมภายในระบบเนื่องจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศเป็นกระบวนการทางชีววิทยาของการเปลี่ยนสารอินทรีย์ไปเป็นก๊าซชีวภาพในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจนที่มีจุลินทรีย์มาเกี่ยวข้องโดยสารอินทรีย์บางส่วนใช้เพื่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์และสารอินทรีย์บางส่วนใช้เพื่อสร้างก๊าซชีวภาพ ก๊าซชีวภาพรายวันสามารถอธิบายได้จากภาพที่ 4.2



ภาพที่ 4.2 ก๊าซชีวภาพรายวันของหญ้านิคต่างๆ ที่สภาวะมาตรฐาน

โดยมีรายละเอียด ดังนี้

วันที่ 1 ถึงวันที่ 9 ของการทดลองเริ่มต้นระบบโดยใส่หัวเชื้อจุลินทรีย์ (มูลวัว) และสารอินทรีย์ (หญ้า 7 ชนิด) ลงในขวดซีรัม ก๊าซชีวภาพรายวันของการทดลองทั้ง 8 ชุดมีค่าต่ำคิดเป็นก๊าซชีวภาพรายวันเฉลี่ย 3.62 ± 0.58 มิลลิลิตรต่อวัน ระหว่างวันที่ 5 ถึงวันที่ 9 กรดอินทรีย์ระเหยปริมาณเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว (ภาพที่ 4.4) ซึ่งค่ากรดอินทรีย์ระเหยที่มีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นเฉลี่ย 3.08 เท่าเมื่อเทียบกับค่ากรดอินทรีย์ระเหยเริ่มต้นจึงทำให้สภาพแวดล้อมไม่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ นอกจากนี้ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ยังมีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบสูงถึงร้อยละ 42.78 ± 2.30

วันที่ 10 ถึงวันที่ 18 ของการทดลองก๊าซชีวภาพรายวันของชุดการทดลองหญ้าผสมมูลวัวมีค่าสูงที่สุดโดยก๊าซชีวภาพรายวันเฉลี่ยมีค่า 17.98 ± 1.45 มิลลิลิตรต่อวันและการทดลองมูลวัว (ชุดควบคุม) มีค่า 4.49 ± 0.83 มิลลิลิตรต่อวัน ก๊าซชีวภาพของชุดการทดลองหญ้าผสมมูลวัวมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นเฉลี่ย 2.86 เท่าเมื่อเทียบระหว่างวันที่ 1 ถึงวันที่ 9 ของการทดลอง โดยกรดอินทรีย์ระเหยในระบะนี้มีปริมาณลดลงอย่างต่อเนื่องซึ่งสวนทางกับปริมาณก๊าซชีวภาพที่มีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นแสดงให้เห็นว่าเกิดย่อยสลายกรดอินทรีย์ระเหยเปลี่ยนไปเป็นก๊าซชีวภาพ สำหรับวันที่ 12 และวันที่ 13 ของการทดลอง พบว่าการทดลองชุดหญ้ากินีสีม่วงผสมมูลวัวมีปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้รายวันสูงสุดคือ 32.31 ± 0.38 มิลลิลิตร รองลงมาคือการทดลองชุดหญ้าแพงโกล่าผสมมูลวัว การทดลองชุดหญ้ารูซี่ผสมมูลวัว การทดลองชุดหญ้าอะตราดัมผสมมูลวัว การทดลองชุดหญ้าไรด์ผสมมูลวัว การทดลองชุดหญ้าฟลิแคทูลัมผสมมูลวัว การทดลองชุดหญ้าเนเปียร์ยักษ์ผสมมูลวัว และการทดลองมูลวัว (ชุดควบคุม) ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้มีค่า 29.21 ± 5.04 28.91 ± 2.24 28.58 ± 2.62 27.63 ± 0.50 23.63 ± 0.37 24.14 ± 0.94 และ 6.21 ± 1.40 มิลลิลิตร ตามลำดับ ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้มีปริมาณสูงสุดเนื่องจากสภาพแวดล้อมและสารอินทรีย์มีสภาพที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพซึ่งสังเกตได้จากความเข้มข้นก๊าซมีเทนเฉลี่ยเป็นองค์ประกอบสูงถึงร้อยละ 59.85 ± 3.96

สำหรับวันที่ 21 และวันที่ 24 ของการทดลองก๊าซชีวภาพรายวันมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้งซึ่งปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันเฉลี่ยมีค่า 17.12 ± 1.70 และ 16.84 ± 0.71 มิลลิลิตรต่อวัน ตามลำดับ เนื่องจากวันที่ 21 ของการทดลองกรดอินทรีย์ระเหยมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นเพราะเมื่อเวลาผ่านไปสารอินทรีย์บางส่วนถูกย่อยสลายด้วยกระบวนการทางชีวภาพได้มากขึ้นทำให้กรดอินทรีย์ระเหยเปลี่ยนไปเป็นก๊าซชีวภาพได้มากขึ้น ความเข้มข้นก๊าซมีเทนเฉลี่ยมีค่าร้อยละ 51.32 ± 2.04 ของการทดลองชุดหญ้าผสมมูลวัว จากนั้นปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันมีค่าค่อยๆ ลดลงอย่างต่อเนื่อง

วันที่ 40 จนถึงสิ้นสุดการทดลองปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันของ 8 ชุดการทดลองมีก๊าซชีวภาพรายวันเฉลี่ย 4.26 ± 0.66 มิลลิลิตรต่อวันซึ่งสารอินทรีย์ที่อยู่ภายในระบบถูกใช้ไปเกือบหมดโดยใน

ระบบมีปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยต่ำเฉลี่ย 483 ± 25 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดแอซิดิก และระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลโดยพิจารณาจากปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้มีค่าคงที่และมีค่าต่ำ

4.3.2.3 ก๊าซมีเทนของการทดลองที่ 1

ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นของ 8 ชุดการทดลองมีองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพไม่แตกต่างกัน โดยประกอบไปด้วย ก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซอื่นๆ

วันที่ 8 ของการทดลองก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้มีปริมาณก๊าซมีเทนเฉลี่ยของชุดการทดลองหญ้าผสมมูลวัวร้อยละ 34.84 ± 1.10 และการทดลองมูลวัว (ชุดควบคุม) มีค่าก๊าซมีเทนร้อยละ 23.74 ความเข้มข้นของก๊าซมีเทนของทั้ง 8 ชุดการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน นอกจากนี้ความเข้มข้นเฉลี่ยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ยังคงมีค่าสูงคือร้อยละ 42.26 ± 2.24 เนื่องจากสภาพแวดล้อมไม่เหมาะสมภายในระบบซึ่งผลการทดลองในระยะแรกนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Rincon และคณะ (2010)

วันที่ 14 ของการทดลองปริมาณก๊าซชีวภาพมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากสภาพแวดล้อมมีสภาพที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยมีความเข้มข้นของก๊าซมีเทนสูงสุดซึ่งมีค่าเฉลี่ย ร้อยละ 61.67 ± 0.86 ของชุดการทดลองหญ้าผสมมูลวัว นอกจากนี้ความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าลดลงเฉลี่ยที่ร้อยละ 25.26 ± 3.66

ตั้งแต่วันที่ 21 จนถึงสิ้นสุดการทดลองความเข้มข้นก๊าซมีเทนมีค่าลดลงเล็กน้อยและเริ่มคงที่ตลอดการทดลอง ก๊าซมีเทนของชุดการทดลองหญ้าผสมมูลวัวมีความเข้มข้นเฉลี่ยร้อยละ 50.73 ± 0.97 และก๊าซมีเทนของการทดลองมูลวัวมีค่า 35.65 ± 5.55 สำหรับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าลดลงเฉลี่ยที่ร้อยละ 25.24 ± 0.68 และ 37.40 ± 2.86 ของชุดการทดลองหญ้าผสมมูลวัวและการทดลองมูลวัว ตามลำดับ

เมื่อสิ้นสุดการทดลองของทั้ง 8 ชุดการทดลองนำค่าความเข้มข้นของก๊าซมีเทนมาคำนวณศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนในรูปของปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นทั้งหมดต่อกรัมของแข็งระเหยที่ใส่เข้าระบบของการทดลองทั้ง 8 ชุดดังนี้ ชุดมูลวัว (ชุดควบคุม) ชุดหญ้าสูงผสมมูลวัว ชุดหญ้ากিনিสีม่วงผสมมูลวัว ชุดหญ้าอะตราดผสมมูลวัว ชุดหญ้าพลิแคทูลัมผสมมูลวัว ชุดหญ้าไร้ดผสมมูลวัว ชุดหญ้าเนเปียร์ยักษ์ผสมมูลวัว และชุดหญ้าแพงโกล่าผสมมูลวัว มีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนคือ 0.088, 0.203, 0.259, 0.216, 0.219, 0.233, 0.199 และ 0.229 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 4.6 สรุปได้ว่าการทดลองชุดหญ้ากিনিสีม่วงผสมมูลวัวให้อัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงที่สุดคิดเป็น 0.259 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยและมีความเข้มข้นของก๊าซมีเทนสูงสุดที่ร้อยละ 63.54

ตารางที่ 4.6 อัตราการผลิตก๊าซมีเทนของการทดลองที่ 1 และสารอินทรีย์

การทดลองชุด	อัตราการผลิตก๊าซ		อัตราการผลิตก๊าซ มีเทน (ลบ.ม./กก. ของแข็งระเหย)
	มีเทน (ลบ.ม./กก. ของแข็งระเหย)	สารอินทรีย์	
ชุดมูลวัว (ชุดควบคุม)	0.088	มูลวัว	0.088
ชุดหญ้ารัฐผสมมูลวัว	0.203	หญ้ารูซี่	0.115
ชุดหญ่ากินนีสีม่วงผสมมูลวัว	0.259	หญ่ากินนีสีม่วง	0.170
ชุดหญ่าอะตราดัมผสมมูลวัว	0.216	หญ่าอะตราดัม	0.127
ชุดหญ่าพลิแคทูลัมผสมมูลวัว	0.219	หญ่าพลิแคทูลัม	0.131
ชุดหญ่าไรด์ผสมมูลวัว	0.233	หญ่าไรด์	0.144
ชุดหญ่าเนเปียร์ยักษ์ผสมมูลวัว	0.199	หญ่าเนเปียร์ยักษ์	0.110
ชุดหญ่าแพงโกล่าผสมมูลวัว	0.229	หญ่าแพงโกล่า	0.140

จากการทดลองเมื่อทราบศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนทั้ง 8 ชุดการทดลองแล้วสามารถคำนวณหาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนของหญ้าแต่ละชนิดได้ ดังนี้ หญ้ารูซี่ หญ่ากินนีสีม่วง หญ่าอะตราดัม หญ่าพลิแคทูลัม หญ่าไรด์ หญ่าเนเปียร์ยักษ์ และหญ่าแพงโกล่า มีศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทน ดังนี้ 0.115, 0.170, 0.127, 0.131, 0.144, 0.110 และ 0.140 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย ตามลำดับ

จากตารางที่ 4.7 ผลการเปรียบเทียบการผลิตก๊าซชีวภาพกับลักษณะของหญ้าพบว่าศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนของหญ้าขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายปัจจัย ดังนี้ ปริมาณของแข็งระเหย ปริมาณลิกนิน และปริมาณของแข็งระเหยง่ายที่ย่อยสลายได้ง่ายด้วยกระบวนการทางชีวภาพ จากผลการทดลองพบว่า หญ่ากินนีสีม่วง หญ่าไรด์ และหญ่าแพงโกล่า มีร้อยละของของแข็งระเหยและปริมาณของแข็งระเหยง่ายที่ย่อยสลายได้ง่ายด้วยกระบวนการทางชีวภาพ (BVS) ที่สูงกว่าหญ้าชนิดอื่นจึงส่งผลให้อัตราการผลิตก๊าซมีเทนมีค่าสูงเป็นลำดับต้นๆ นอกจากนี้หญ่าที่มีร้อยละของลิกนินเป็นองค์ประกอบสูงจะทำให้ให้ศักยภาพของการผลิตก๊าซชีวภาพมีค่าลดลง (Seppala และคณะ, 2009) เนื่องจากลิกนินเป็นตัวขัดขวางในกระบวนการหมักไร้อากาศ (Owens และ Chynoweth, 1993) จากผลการทดลอง หญ่าอะตราดัม หญ่าเนเปียร์ยักษ์ หญ้ารูซี่ และหญ่าพลิแคทูลัม มีปริมาณลิกนินระหว่างร้อยละ 13.25±0.15 - 16.15±0.20 ซึ่งถือว่าปริมาณลิกนินสูงกว่าหญ่ากินนีสีม่วง หญ่าไรด์ และหญ่าแพงโกล่า จึงทำให้ศักยภาพของการผลิตก๊าซมีเทนของหญ่าดังกล่าวมีค่าต่ำ

ตารางที่ 4.7 เปรียบเทียบการผลิตก๊าซชีวภาพกับลักษณะทางกายภาพของหญ้า

สารอินทรีย์	ก๊าซชีวภาพ สะสม (มิลลิลิตร)	อัตราการผลิต			
		ก๊าซมีเทน (ลบ.ม./กก. ของแข็งระเหย)	ของแข็งระเหย (ร้อยละ)	ลิกนิน (ร้อยละ)	BVS (ร้อยละ)
หญ้านิมนีสีม่วง	606±65	0.170	25.60±0.33	12.05±0.08	49.25
หญ้าไร้ด	565±58	0.144	26.79±5.11	12.59±0.08	47.74
หญ้าแพงโกล่า	538±61	0.140	25.98±5.50	11.53±0.23	50.72
หญ้าพลิแคทูลัม	490±53	0.131	24.13±0.83	16.15±0.20	37.77
หญ้าอะตราตัม	477±64	0.127	20.02±4.35	13.25±0.15	45.89
หญ้ารูซี่	429±67	0.115	23.92±1.35	15.64±0.23	39.20
หญ้าเนเปียร์ยักษ์	414±73	0.110	23.72±3.45	13.69±0.08	44.66

เมื่อนำผลการทดลองมาเปรียบเทียบกับงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าอัตราการผลิตก๊าซมีเทนมีค่าใกล้เคียงกันแสดงดังตารางที่ 4.8 ดังนี้

ตารางที่ 4.8 ผลเปรียบเทียบการทดลองที่ 1 กับงานวิจัยที่ผ่านมา

ชนิดสารอินทรีย์	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ระยะเวลา (วัน)	อัตราการผลิตก๊าซมีเทน (ลบ.ม./กก. ของแข็งระเหย)	ร้อยละก๊าซมีเทน (ร้อยละ)
1. หญ้าคอกฟุต หญ้าเฟสคิว หญ้าไร้ดคานารี และหญ้านิมนีสีม่วง (Seppala และคณะ, 2009)	35±1	75 - 95	0.296 - 0.342	-
2. หญ้าเนเปียร์ผสมหัวเชื้อจุลินทรีย์ (Gunaseelan, 2004)	35±1	100	0.342 - 0.372	-
3. ข้าวสาลีผสมหัวเชื้อจุลินทรีย์ ระบบเขย่าต่อเนื่อง 40 รอบต่อนาที (Rincon และคณะ, 2010)	35±2	96	0.311 - 0.360	37.40 - 65.00
4. หญ้าผสมมูลวัว (งานวิจัยนี้ การทดลองที่ 1)	30.98±0.27	63	0.199 - 0.259	21.58 - 63.54

อัตราการผลิตก๊าซมีเทนของการทดลองที่ 1 ค่าระหว่าง 0.199 - 0.259 ลูกบาศก์เมตรต่อ กิโลกรัมของแข็งระเหยซึ่งมีค่าต่ำกว่าการทดลองของ Seppala และคณะ (2009) เนื่องมาจากการทดลองของ Seppala และคณะ (2009) ทำการหมักหญ้าที่อุณหภูมิสูงกว่า (35 ± 1 องศาเซลเซียส) จึงทำให้จุลินทรีย์สามารถทำงานได้ดีกว่าแต่การควบคุมอุณหภูมินี้จะส่งผลต่อเสถียรภาพของจุลินทรีย์ และเป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายในการควบคุมระบบอีกด้วย แต่อัตราการผลิตก๊าซมีเทนของการทดลองทั้งสองมีค่าแตกต่างกันไม่มากอาจเนื่องมาจากของการทดลองที่ 1 ถูกหั่นละเอียดให้มีขนาด 2 มิลลิเมตรก่อนทำการทดลองให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสมากทำให้ระบบเกิดกระบวนการย่อยสลายได้เร็วขึ้นและสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้มากขึ้น (Broughton, 2009)

การทดลองชุดหญ้าเนเปียร์ยักษ์ผสมมูลวัวมีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนที่ 0.199 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยซึ่งมีค่าต่ำกว่าการทดลองของ Gunaseelan (2004) เนื่องจากการทดลองของ Gunaseelan (2004) เป็นการหมักแบบคัดแยกส่วนลำต้นและส่วนใบออกจากกันและมีการควบคุมอุณหภูมิที่สูงกว่า

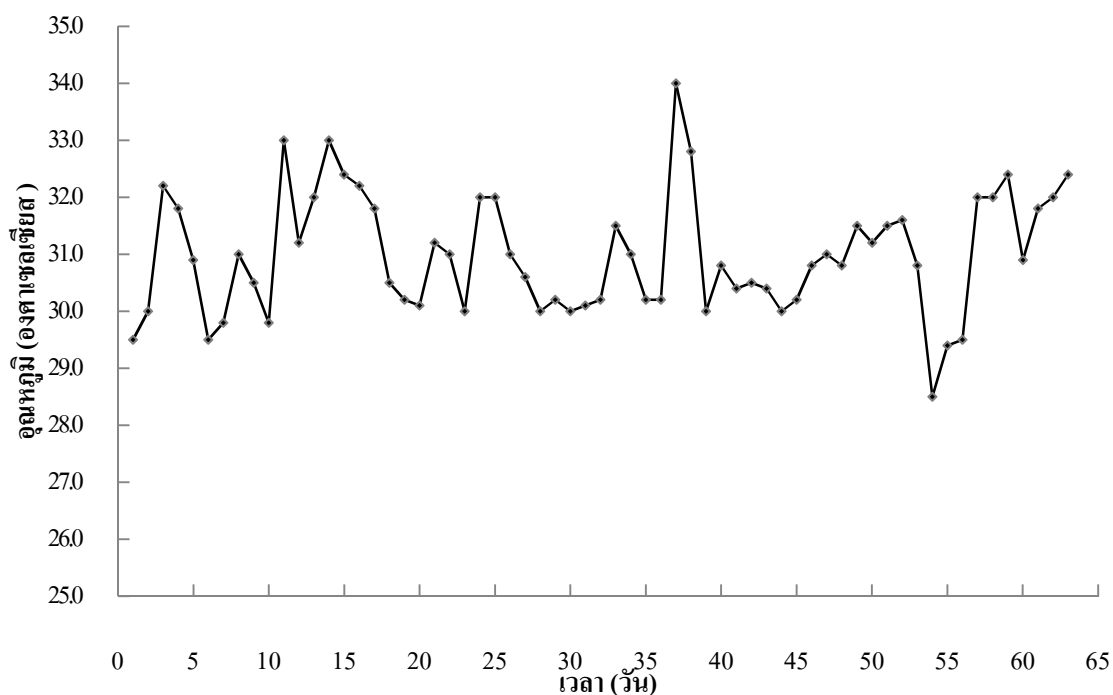
อัตราการผลิตก๊าซมีเทนของการทดลองที่ 1 มีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนต่ำกว่าการทดลองของ Rincon และคณะ (2010) เนื่องจากระบบของ Rincon และคณะ (2010) มีการกวนผสมตลอดเวลาเพื่อเพิ่มอัตราการเกิดปฏิกิริยาและความเป็นเนื้อเดียวกันภายในระบบ ความเข้มข้นของก๊าซมีเทนของ Rincon และคณะ (2010) มีความเข้มข้นก๊าซมีเทนอยู่ในช่วงร้อยละ 37.40 - 65.00 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับการทดลองที่ 1 ที่มีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 21.58 - 63.54

4.3.4 สภาพแวดล้อมของการทดลองที่ 1

4.3.4.1 อุณหภูมิของการทดลองที่ 1

อุณหภูมิเป็นตัวแปรที่สำคัญในระบบหมักไร้อากาศ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจะเพิ่มสูงขึ้น โดยจุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรดมีอุณหภูมิที่เหมาะสมในช่วง 25 - 35 องศาเซลเซียส และจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนมีอุณหภูมิที่เหมาะสมในช่วง 32 - 42 องศาเซลเซียส (Deublein และ Steinhäuser, 2008)

จากการศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนด้วยวิธีบีเอ็มพีของ 8 ชุดการทดลอง พบว่าอุณหภูมิห้องของการทดลองมีค่าอยู่ระหว่าง 28.50 - 34.00 องศาเซลเซียสและค่าอุณหภูมิเฉลี่ย 30.98 ± 0.27 องศาเซลเซียส แสดงดังภาพที่ 4.3 ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรดและจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน



ภาพที่ 4.3 อุณหภูมิ

4.3.4.2 สีนํ้าหมักของการทดลองที่ 1

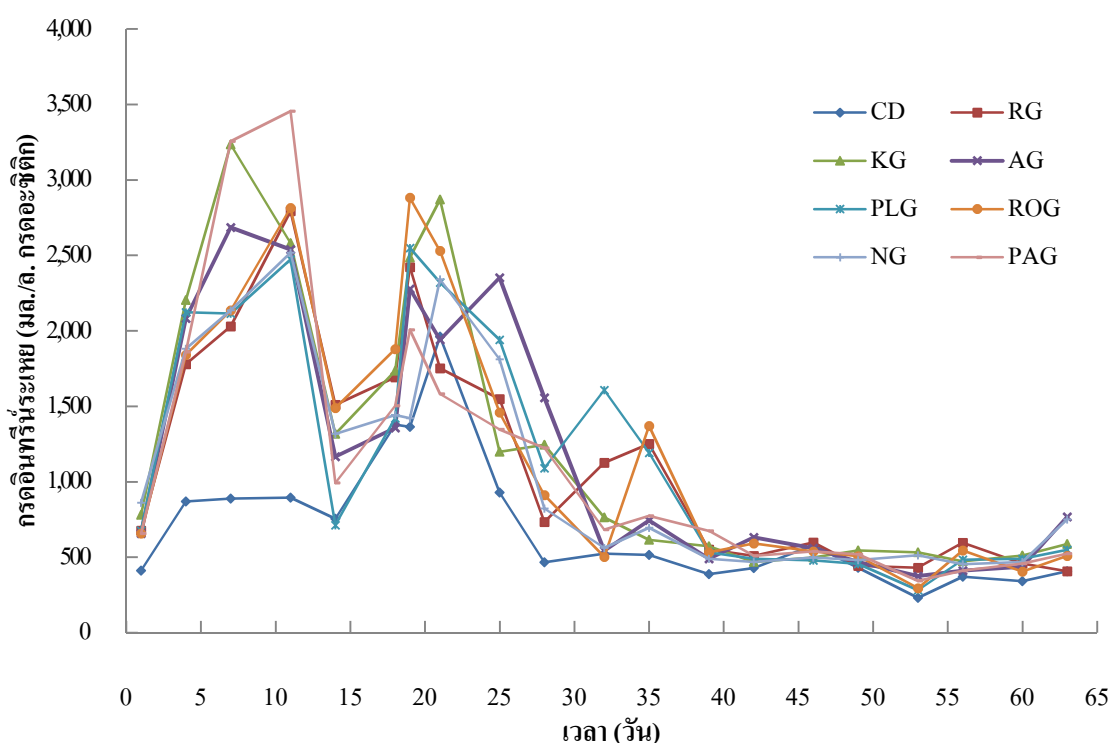
สีนํ้าหมักหญ้าในช่วงแรกของการทดลองทั้ง 8 ชุดการทดลองมีลักษณะคล้ายคลึงกันคือนํ้าหมักมีสีนํ้าตาลเช่นเดียวกับมูลวัวแห้งที่ใส่เข้าไป สำหรับชุดมูลวัว (ชุดควบคุม) มีตะกอนสีนํ้าตาลทางด้านล่างของขวดซีรัมและตะกอนขนาดเล็กสีนํ้าตาลแขวนลอยอยู่ด้านบน สำหรับชุดหญ้าผสมมูลวัวมีหญ้าแขวนลอยอยู่ทางด้านบนของขวดซีรัมและมีตะกอนสีนํ้าตาลรวมถึงตะกอนขนาดเล็กสีนํ้าตาลแขวนลอยอยู่ด้านบน หลังจากนั้นสีนํ้าหมักจะเริ่มมีสีนํ้าตาลเข้มขึ้นตามระยะเวลาการทดลองที่เพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากการสะสมตะกอนของโลหะซัลไฟด์ (S^2) เกิดเป็นสารประกอบซัลไฟด์ซึ่งไม่ละลายน้ำและมีค่า

4.3.4.3 กลิ่นนํ้าหมักของการทดลองที่ 1

กลิ่นนํ้าหมักหญ้าในช่วงแรกของการทดลองทั้ง 8 ชุดการทดลองมีกลิ่นไม่รุนแรงแต่สำหรับชุดหญ้าผสมมูลวัวมีกลิ่นเหม็นเขียวของหญ้าเล็กน้อย แต่หลังจากนั้นเมื่อกระบวนการย่อยสลายเข้าสู่การสร้างกรดมีการสะสมกรดอินทรีย์ทำให้กลิ่นเหม็นเปรี้ยวรุนแรงขึ้น และเมื่อสิ้นสุดการทดลองกลิ่นเหม็นเปรี้ยวของนํ้าหมักหญ้ามีกลิ่นลดลงเนื่องจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์เข้าสู่ขั้นตอนของการผลิตมีเทน ปริมาณกรดอินทรีย์จะลดลงกลิ่นจึงลดลงตามไปด้วย

4.3.4.4 กรดอินทรีย์ระเหยของการทดลองที่ 1

กรดอินทรีย์ระเหยมีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อระบบหมักไร้อากาศซึ่งกรดอินทรีย์ระเหยเกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรด ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยมีลักษณะเป็นไปในทิศทางเดียวกับค่าความเป็นกรดต่างที่เกิดขึ้นของ 8 ชุดการทดลอง สำหรับค่ากรดอินทรีย์ระเหยเริ่มต้นของชุดการทดลองหญ้าผสมมูลวัวทั้ง 7 ชุดมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 656 ± 232 - 861 ± 116 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดแอสติกและค่ากรดอินทรีย์ระเหยเริ่มต้นของการทดลองมูลวัว (ชุดควบคุม) มีค่า 410 ± 0 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดแอสติก แสดงดังภาพที่ 4.4



ภาพที่ 4.4 กรดอินทรีย์ระเหย

การวิเคราะห์กรดอินทรีย์ระเหยของการทดลองที่ 1 พบว่าในระบบหมักไร้อากาศมีค่ากรดอินทรีย์ระเหยสูงขึ้นในวันที่ 4 ดังนี้ ชุดการทดลองหญ้าผสมมูลวัวมีค่าอยู่ระหว่าง $1,789 \pm 229$ - $2,203 \pm 286$ มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดแอสติกและการทดลองมูลวัว (ชุดควบคุม) มีค่า 869 ± 57 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดแอสติก จากผลการทดลองคำนวณได้ว่าปริมาณการผลิตกรดอินทรีย์ระเหยของชุดการทดลองหญ้าผสมมูลวัวและการทดลองมูลวัว (ชุดควบคุม) มีค่าเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 2.77 และ 2.12 เท่าของปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยเริ่มต้นซึ่งเป็นผลมาจากขั้นตอนแรกคือการย่อยสลายสารอินทรีย์ซึ่งสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อนและมีขนาดโมเลกุลใหญ่จะถูกย่อยสลายให้มี

ขนาดเล็กถึง ขั้นตอนที่สองคือการหมักกรดอินทรีย์ระยะเหยซึ่งสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็กจะ ถูกย่อยสลายต่อจนได้กรดอินทรีย์ระยะเหย

วันที่ 7 และวันที่ 11 ของการทดลองกรดอินทรีย์ระยะเหยมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ค่าเฉลี่ย ของกรดอินทรีย์ระยะเหยมีค่าสูงถึง $2,512 \pm 239$ และ $2,738 \pm 164$ มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดแอสติก ตามลำดับ ระยะของระบบในช่วงนี้อยู่ในขั้นตอนที่สองคือการหมักกรดอินทรีย์ระยะเหยโดยสังเกตได้ จากเข้มข้นเฉลี่ยของก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์ยังมีค่าที่สูงมากมีค่าร้อยละ 42.26 ± 2.24 สำหรับวันที่ 7 ของการทดลองการทดลองชุดหญ้าแพงโกล่าผสมมูลวัวมีค่าของกรดอินทรีย์ระยะเหยสูงที่สุดคือ $3,254 \pm 120$ มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดแอสติกและค่าของกรดอินทรีย์ระยะเหยรองลงมาดังนี้ ชุดหญ้า กินนีสีม่วงผสมมูลวัว ชุดหญ้าอะตราดัมผสมมูลวัว ชุดหญ้าเนเปียร์ยักษ์ผสมมูลวัว ชุดหญ้าไร้ดผสม มูลวัว ชุดหญ้าพลิแคทูลัมผสมมูลวัว ชุดหญ้ารูซี่ผสมมูลวัว และชุดมูลวัว (ชุดควบคุม) มีค่า $3,233 \pm 897$ $2,684 \pm 60$ $2,134 \pm 179$ $2,134 \pm 60$ $2,113 \pm 120$ $2,029 \pm 239$ และ 888 ± 120 มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปกรดแอสติก ตามลำดับ และสำหรับวันที่ 11 ของการทดลองการทดลองชุดหญ้าแพงโกล่า ผสมมูลวัวมีค่าของกรดอินทรีย์ระยะเหยสูงที่สุดคือ $3,454 \pm 241$ มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดแอสติก และค่าของกรดอินทรีย์ระยะเหยรองลงมาดังนี้ ชุดหญ้าไร้ดผสมมูลวัว ชุดหญ้ารูซี่ผสมมูลวัว ชุดหญ้า กินนีสีม่วงผสมมูลวัว ชุดหญ้าอะตราดัมผสมมูลวัว ชุดหญ้าเนเปียร์ยักษ์ผสมมูลวัว ชุดหญ้าพลิแค ทูลัมผสมมูลวัว และชุดมูลวัว (ชุดควบคุม) มีค่า $2,814 \pm 362$ $2,793 \pm 60$ $2,580 \pm 181$ $2,537 \pm 203$ $2,516 \pm 0$ $2,473 \pm 0$ และ 895 ± 121 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดแอสติก ตามลำดับ

วันที่ 12 ถึงวันที่ 18 ของการทดลองกรดอินทรีย์ระยะเหยทุกชุดการทดลองมีค่าลดลงอย่าง มาก ค่าของกรดอินทรีย์ระยะเหยในวันที่ 14 ของการทดลองมีค่าลดลงระหว่าง 712 ± 183 - $1,510 \pm 122$ มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดแอสติก ค่ากรดอินทรีย์ระยะเหยมีค่าลดลงเนื่องจากเกิดย่อยสลายกรด อินทรีย์ระยะเหยเปลี่ยนไปเป็นก๊าซชีวภาพซึ่งในระยะนี้มีปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันเฉลี่ยของชุดการ ทดลองหญ้าผสมมูลวัวสูงที่สุด 18.29 ± 1.14 มิลลิลิตรต่อวันและการทดลองมูลวัว (ชุดควบคุม) มี ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันเฉลี่ย 4.93 ± 0.70 มิลลิลิตรต่อวัน โดยมีความเข้มข้นของก๊าซมีเทนสูงที่สุด ซึ่งมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 61.67 ± 0.86 และร้อยละ 47.11 ของชุดการทดลองหญ้าผสมมูลวัวและการ ทดลองมูลวัว (ชุดควบคุม) ตามลำดับ

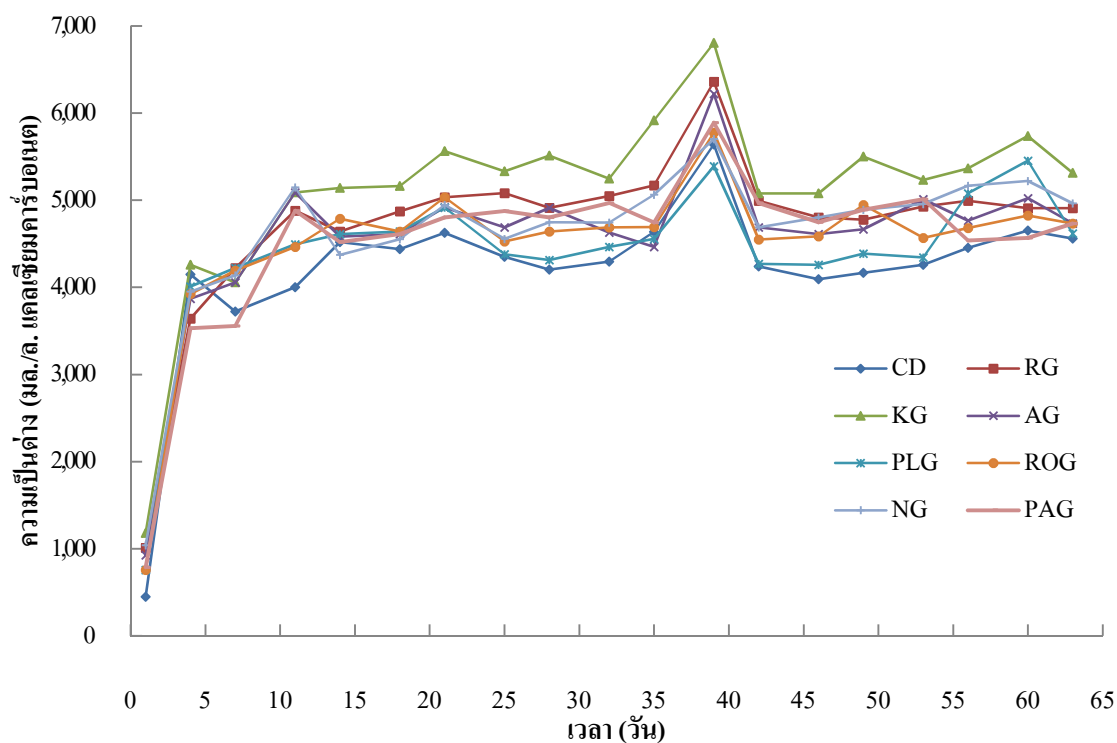
วันที่ 19 ถึงวันที่ 35 ของการทดลองกรดอินทรีย์ระยะเหยของชุดการทดลองหญ้าผสมมูลวัวมี ค่าเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้งเนื่องจากเมื่อเวลาผ่านไปสารอินทรีย์บางส่วนถูกย่อยสลายด้วยกระบวนการทาง ชีวภาพได้มากขึ้น โดยค่ากรดอินทรีย์ระยะเหยมีค่าอยู่ระหว่าง 502 ± 57 - $2,882 \pm 354$ มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปกรดแอสติก

วันที่ 39 จนถึงสิ้นสุดการทดลองระบบเข้าสู่สภาวะสมดุล กรดอินทรีย์ระยะเหยของการทดลอง ทั้ง 8 ชุดมีค่าค่อนข้างคงที่ โดยค่ากรดอินทรีย์ระยะเหยเฉลี่ยมีค่าอยู่ระหว่าง 231 ± 18 - 767 ± 0 มิลลิกรัม

ต่อลิตรในรูปกรดแอสติกและค่ากรดอินทรีย์ระเหยเฉลี่ยเท่ากับ 486 ± 41 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดแอสติก ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย ณ วันสิ้นสุดการทดลองมีค่าระหว่าง $407 \pm 0 - 767 \pm 0$ มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดแอสติก

4.3.4.5 ความเป็นต่างของการทดลองที่ 1

ความเป็นต่างในระบบแสดงถึงกำลังบัฟเฟอร์ (Buffer Capacity) ของการรองรับปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยที่เกิดขึ้น ในระบบที่มีกำลังบัฟเฟอร์ต่ำเมื่อปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยเพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้ความเป็นกรดต่างมีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วทำให้เกิดสภาวะไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ตลอดจนยับยั้งการเจริญเติบโตและจุลินทรีย์อาจไม่สามารถดำรงชีวิตอยู่ภายในระบบได้ เมื่อเริ่มต้นการทดลองจะเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) 3 กรัมต่อลิตรเข้าไปในระบบเพื่อเพิ่มกำลังบัฟเฟอร์ (Banks, 2007) สำหรับค่าเริ่มต้นของความเป็นต่างในชุดการทดลองหญ้าผสมมูลวัวทั้ง 7 ชุดมีค่าใกล้เคียงกันคือความเป็นต่างเฉลี่ย 924 ± 114 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปแคลเซียมคาร์บอเนตและค่าเริ่มต้นของความเป็นต่างในชุดมูลวัว (ชุดควบคุม) มีค่า 450 ± 318 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต แสดงดังภาพที่ 4.5



ภาพที่ 4.5 ความเป็นต่าง

การวิเคราะห์ความเป็นต่างของการทดลองที่ 1 พบว่าค่าความเป็นต่างสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในวันที่ 4 ของการทดลองโดยมีค่าอยู่ระหว่าง $3,531 \pm 15$ - $4,260 \pm 0$ มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปแบบแคลเซียมคาร์บอเนตและมีค่าความเป็นต่างเฉลี่ยมีค่า $3,917 \pm 258$ มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปแบบแคลเซียมคาร์บอเนต ค่าความเป็นต่างสูงขึ้นเนื่องจากสภาพแวดล้อมไม่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จึงมีปริมาณก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นองค์ประกอบสูงถึงร้อยละ 42.78 ± 2.30 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) บางส่วนจะอยู่ในรูปของก๊าซและบางส่วนจะละลายในน้ำ (H_2O) เกิดเป็นกรดคาร์บอนิก (H_2CO_3) ซึ่งกรดคาร์บอนิกจะแตกตัวได้ไฮโดรเจนไอออน (H^+) และไบคาร์บอเนตไอออน (HCO_3^-) โดยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ละลายในน้ำจะเพิ่มปริมาณความเป็นต่างในรูปแบบของไบคาร์บอเนตให้กับระบบ (Rittmann และ McCarty, 2000)

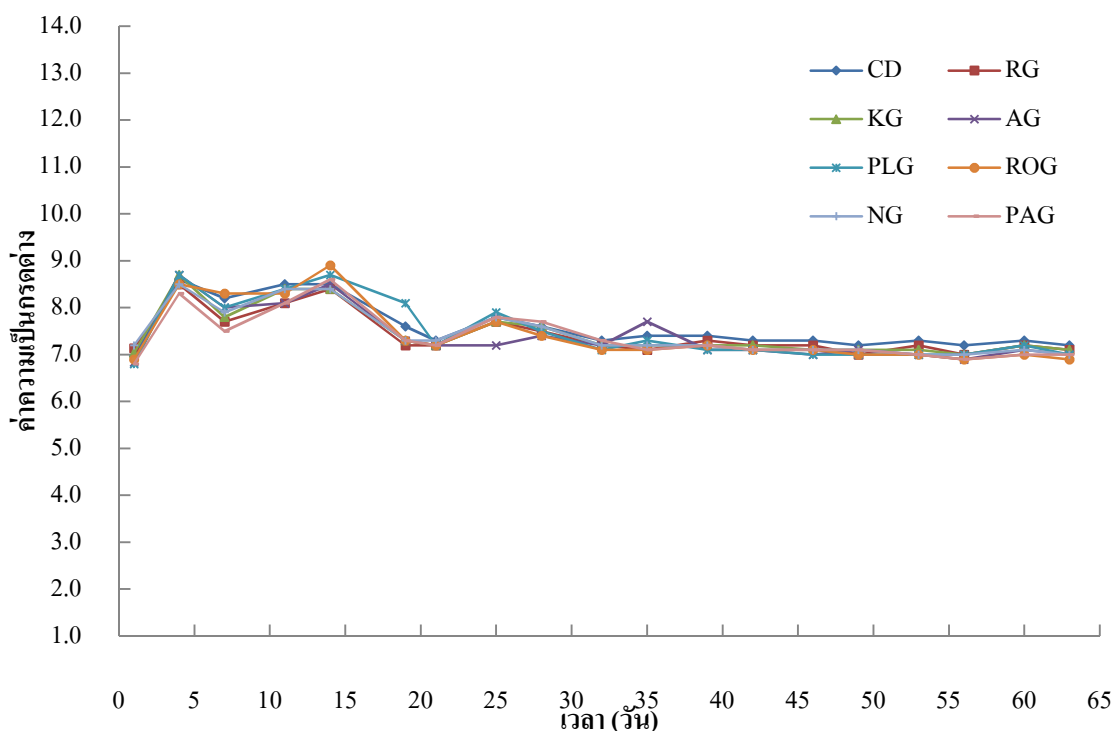
วันที่ 5 ถึงวันที่ 34 ของการทดลองความเป็นต่างมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยมีค่าอยู่ระหว่าง $3,556 \pm 0$ - $5,562 \pm 0$ มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปแบบแคลเซียมคาร์บอเนตและค่าความเป็นต่างเฉลี่ยมีค่า $4,667 \pm 12$ มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปแบบแคลเซียมคาร์บอเนต เมื่อสภาวะความเป็นต่างเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความเป็นกรดต่างมีความคงตัวสูงระบบจึงสามารถรับภาระได้มากขึ้นถึงแม้ว่าจะมีการผลิตกรดอินทรีย์ระเหยเพิ่มขึ้นปริมาณมาก ความเป็นกรดต่างในช่วงนี้ยังคงเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรดและจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนซึ่งค่าความเป็นกรดต่างมีค่าระหว่าง 7.5 - 8.9 (Ahn และคณะ, 2010)

หลังจากวันที่ 34 จนถึงสิ้นสุดการทดลองความเป็นต่างมีค่าค่อนข้างคงที่โดยมีค่าอยู่ระหว่าง $4,094 \pm 154$ - $6,806 \pm 2364$ มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปแบบแคลเซียมคาร์บอเนตและค่าความเป็นต่างเฉลี่ยมีค่า $4,945 \pm 101$ มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปแบบแคลเซียมคาร์บอเนต ความเป็นต่างมีค่าคงที่จนถึงสิ้นสุดการทดลอง

4.3.4.6 ความเป็นกรดต่างของการทดลองที่ 1

ความเป็นกรดต่างมีความสำคัญเป็นอย่างมากต่อระบบหมักไร้อากาศ โดยทั่วไปความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 6.5 - 7.6 (Rittmann และ McCarty, 2000) โดยจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนสามารถเจริญเติบโตได้ดีในช่วงความเป็นกรดต่าง 6.5 - 8.5 (Ahn และคณะ, 2010) เมื่อเริ่มต้นการทดลองจะเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) 4 กรัมต่อลิตร (Seppala และคณะ, 2009) เพื่อควบคุมความเป็นกรดต่างและทำหน้าที่เพิ่มกำลังบัฟเฟอร์ให้แก่อระบบ จากนั้นการทดลองทั้ง 8 ชุด จะไม่มีการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) เพิ่มเติมในระหว่างการทดลอง สำหรับค่าเริ่มต้นของความเป็นกรดต่างในการทดลองทั้ง 8 ชุดมีสภาพค่อนข้างเป็นกลาง โดยมีค่าความเป็นกรดต่างอยู่ระหว่าง 6.8 - 7.2 ซึ่งเป็นช่วงที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศ แสดงดังภาพที่ 4.6

การวิเคราะห์ความเป็นกรดต่างของการทดลองที่ 1 พบว่าค่าความเป็นกรดต่างสูงในวันที่ 4 ของการทดลองค่าความเป็นกรดต่างมีค่าสูงขึ้นมีค่าอยู่ระหว่าง 8.3 - 8.7 ซึ่งเป็นผลมาจากการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต



ภาพที่ 4.6 ความเป็นกรดต่าง

วันที่ 5 ถึงวันที่ 8 ของการทดลองความเป็นกรดต่างมีค่าลดต่ำลงระหว่าง 7.5 - 8.3 ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย เนื่องจากการผลิตกรดอินทรีย์ระเหยเพิ่มขึ้นอย่างมาก โดยก่อนเริ่มการทดลองปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยของชุดการทดลองหญ้าผสมมูลวัวมีค่าระหว่าง 656 ± 232 - 861 ± 116 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดแอสติกและการทดลองมูลวัว (ชุดควบคุม) กรดอินทรีย์ระเหยมีค่า 410 ± 0 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดแอสติก แต่สำหรับวันที่ 5 ถึงวันที่ 8 ของการทดลองปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยของชุดการทดลองหญ้าผสมมูลวัวมีค่าสูงขึ้นระหว่าง $2,089 \pm 239$ - $3,254 \pm 120$ มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดแอสติกและการทดลองมูลวัว (ชุดควบคุม) กรดอินทรีย์ระเหยมีค่า 888 ± 120 มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดแอสติก จากผลการทดลองคำนวณได้ว่าปริมาณการผลิตกรดอินทรีย์ระเหยของชุดการทดลองหญ้าผสมมูลวัวมีค่าเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 3.58 เท่าของปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยเริ่มต้น ดังนั้นจึงส่งผลให้ค่าความเป็นกรดต่างมีค่าลดต่ำลง

วันที่ 9 ถึงวันที่ 18 ของการทดลองความเป็นกรดต่างเริ่มมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอีกครั้งโดยมีค่าอยู่ระหว่าง 8.1 - 8.9 ค่าความเป็นกรดต่างมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากกรดอินทรีย์ระเหยมีปริมาณลดลงอย่างต่อเนื่องเพราะเกิดย่อยสลายกรดอินทรีย์ระเหยเปลี่ยนไปเป็นก๊าซชีวภาพ

วันที่ 19 ถึงวันที่ 39 ของการทดลองความเป็นกรดต่างมีค่าลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับวันที่ 9 ถึงวันที่ 18 โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 7.1 - 8.1 และค่าความเป็นกรดต่างเฉลี่ยเท่ากับ 7.3 ค่าความเป็นกรดต่างที่ลดต่ำลงเนื่องจากการผลิตกรดอินทรีย์ระเหยเพิ่มขึ้นจากสารอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายด้วยกระบวนการทางชีวภาพได้มากขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป

วันที่ 40 จนถึงสิ้นสุดการทดลองความเป็นกรดต่างมีค่าค่อนข้างเป็นกลางมีค่าอยู่ระหว่าง 6.9 - 7.3 และเมื่อสิ้นสุดการทดลองค่าความเป็นกรดต่างเฉลี่ยมีค่าค่อนข้างเป็นกลางโดยมีค่าเท่ากับ 7.08

4.3.5 ผลคัดเลือกชนิดหญ้าสำหรับการทดลองที่ 2

คัดเลือกชนิดหญ้าเพื่อนำมาเป็นสารชีวมวลในกระบวนการย่อยสลายในถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบขั้นตอนเดียวโดยศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของถังปฏิกรณ์ที่มีอัตราการเวียนน้ำกลับที่แตกต่างกันในสภาวะแบบตัวกลางคงที่ ชนิดหญ้าที่มีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงที่สุดของหญ้าทั้ง 7 ชนิดด้วยวิธีบีเอ็มพี พบว่าหญ้านิสีม่วงมีศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนสูงที่สุดมีค่า 0.170 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยซึ่งมีความเข้มข้นของก๊าซมีเทนสูงที่สุดที่ร้อยละ 63.54 และปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่ผลิตได้คือ 606 ± 65 มิลลิลิตร

4.4 ผลการทดลองที่ 2 ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบขั้นตอนเดียว

การทดลองนี้เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบขั้นตอนเดียว โดยคัดเลือกตัวอย่างชนิดหญ้าที่มีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนดีที่สุดของการทดลองที่ 1 คือหญ้างินนีสีม่วง ภายในถังปฏิกรณ์จะปล่อยให้น้ำไหลซึมด้วยวิธีเวียนน้ำกลับมาโปรยในส่วนบนของถังปฏิกรณ์ เป็นระยะเวลารวมทั้งสิ้น 120 วัน

4.4.1 หญ้างินนีสีม่วง

จากการวิเคราะห์เบื้องต้นของหญ้างินนีสีม่วงของการทดลองที่ 1 และการทดลองที่ 2 มีค่าใกล้เคียงกัน โดยปริมาณของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยของการทดลองที่ 2 มีค่าร้อยละ 32.38 ± 3.09 และร้อยละ 29.10 ± 0.69 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ สำหรับปริมาณซีโอดีรวมรวมของหญ้างินนีสีม่วงมีค่าระหว่าง $52,455 \pm 13,525$ - $52,899 \pm 11,097$ มิลลิกรัมต่อลิตร และความเป็นกรดต่างมีค่าระหว่าง 7.7 ± 0 - 8.2 ± 0.08 แสดงดังตารางที่ 4.9 และภาพที่ 4.7 สำหรับลักษณะของหญ้างินนีสีม่วง แสดงในภาคผนวก ก ลักษณะประจำพันธุ์หญ้าที่ใช้ในงานวิจัย



ภาพที่ 4.7 หญ้างินนีสีม่วง (*Panicum maximum* TD 58)

ตารางที่ 4.9 องค์ประกอบของหญ่ากินนี้สีม่วง

ตัวแปร	การทดลองที่ 1	การทดลองที่ 2
ของแข็งทั้งหมด (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	29.35±0.84	32.38±3.09
ความชื้น (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	70.65±0.84	67.62±3.09
ของแข็งระเหย (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	25.60±0.33	29.10±0.69
เถ้า (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	3.74±0.33	3.28±0.61
ซีโอดีรวม (มก./ล.)	52,455±13,525	52,899±11,097
ความเป็นกรดต่าง	8.2±0.08	7.7±0

4.4.2 มูลวัวสด

มูลวัวสดใช้เป็นหัวเชื้อจุลินทรีย์ของการทดลองที่ 2 โดยมีค่าของแข็งทั้งหมดร้อยละ 16.93±0.41 โดยน้ำหนักและมีค่าความชื้นร้อยละ 83.07±0.41 โดยน้ำหนัก การเติมมูลวัวสดเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ของการทดลองที่ 2 แทนที่จะเป็นมูลวัวแห้งเช่นเดียวกับการทดลองที่ 1 เนื่องจากการเติมมูลวัวสดเป็นการเพิ่มปริมาณจุลินทรีย์เพื่อใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ส่งผลให้ช่วยเพิ่มอัตราการย่อยสลายได้เร็วขึ้น โดยมูลวัวสดมีปริมาณซีโอดีรวมสูงถึง 140,950±22,193 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นกรดต่างของมูลวัวสดของการทดลองของ Deublein และ Steinhauser (2008) มีค่า 7.9 ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงความเป็นด่างเล็กน้อยเช่นเดียวกับค่าความเป็นกรดต่างของมูลวัวสดของการทดลองที่ 2 แสดงดังตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 การเปรียบเทียบระหว่างมูลวัวแห้งกับมูลวัวสด

ตัวแปร	มูลวัวแห้ง	มูลวัวสด
ของแข็งทั้งหมด (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	91.00±0.67	16.93±0.41
ความชื้น (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	9.00±0.67	83.07±0.41
ของแข็งระเหย (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	45.65±0.81	14.41±1.42
เถ้า (ร้อยละ โดยน้ำหนัก)	58.46±0.81	2.51±1.42
ซีโอดีรวม (มก./ล.)	2,110±0	140,950±22,193
ความเป็นกรดต่าง	7.27±0.22	8.4±0
ความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชัน (มิลลิโวลต์)	-85.83±0.96	-113.60±2.98

4.4.3 ลักษณะหญ้าหมักของการทดลองที่ 2 เมื่อเริ่มต้นและสิ้นสุดการทดลอง

ถึงปฏิกรณ์จำลองในระดับห้องปฏิบัติการ ปริมาตรถังปฏิกรณ์ 2.5 ลิตรและปริมาตรใช้งาน 1.0 ลิตร จำนวน 2 ถัง โดยในถังปฏิกรณ์จะปล่อยให้หญ้าไหลซึมเพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของถังปฏิกรณ์ที่มีอัตราการเวียนน้ำกลับที่แตกต่างกัน ดังนี้ อัตราเวียนน้ำกลับร้อยละ 25 และร้อยละ 100 และเก็บถังปฏิกรณ์ทั้งสองในที่มีซึ่งมีอัตราส่วนหญ้ากินนีสีม่วงต่อมูลวัวสดของของแข็งระเหยเท่ากับ 75:25 โดยใช้หญ้ากินนีสีม่วง 101.77 ± 0.76 กรัมของของแข็งระเหย (346.30 ± 2.61 กรัมโดยน้ำหนักเปียก) และมูลวัวสด 31.18 ± 0.17 กรัมของของแข็งระเหย (220.73 ± 1.21 กรัมโดยน้ำหนักเปียก) ซึ่งอัตราส่วนหญ้ากินนีสีม่วงต่อมูลวัวสดของของแข็งระเหยที่ 75:25 จะมีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนและความเข้มข้นของก๊าซมีเทนสูงที่สุด (Chen และคณะ, 2010)

เมื่อเริ่มต้นและสิ้นสุดการทดลองรวมระยะเวลา 120 วัน พบว่าลักษณะของหญ้าหมักภายในถังปฏิกรณ์ทั้งสองมีการเปลี่ยนแปลงไป แสดงดังตารางที่ 4.11 เบื้องต้นเริ่มต้นและสิ้นสุดของการทดลองที่ 2 เริ่มต้นการทดลองค่าของแข็งทั้งหมดมีค่าระหว่างร้อยละ 15.36 ± 0.51 - 16.20 ± 1.54 โดยน้ำหนัก จากการควบคุมค่าของแข็งรวมในระบบให้มีค่าร้อยละ 15 (Ahn และคณะ, 2010) และเมื่อสิ้นสุดการทดลองค่าของแข็งทั้งหมดมีค่าระหว่าง 12.73 ± 0.04 - 14.55 ± 0.86 ร้อยละ โดยน้ำหนัก ค่าของแข็งทั้งหมดเริ่มต้นและสิ้นสุดการทดลองมีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากตลอดการทดลองมีการควบคุมค่าของแข็งรวมให้คงที่

ตารางที่ 4.11 ลักษณะหญ้าหมักของการทดลองที่ 2 เมื่อเริ่มต้นและสิ้นสุดการทดลอง

ตัวแปร	ถังปฏิกรณ์ที่ 1		ถังปฏิกรณ์ที่ 2	
	เริ่มต้น	สิ้นสุด	เริ่มต้น	สิ้นสุด
ของแข็งทั้งหมด (ร้อยละ)	15.36 ± 0.51	14.55 ± 0.86	16.20 ± 1.54	12.73 ± 0.04
ของแข็งระเหย (ร้อยละ)	13.50 ± 0.17	11.53 ± 0.18	14.34 ± 1.15	9.94 ± 0.11
ทีเคเอ็น* (มก./ลิตร)	210 ± 98.99	188 ± 1.98	219 ± 74.24	179 ± 0
ออร์โทฟอสเฟต* (มก./ลิตร)	65 ± 5.50	60 ± 0.52	67 ± 3.52	61 ± 3.27
ความต่างศักย์ออกซิเดชัน				
รีดักชัน* (มิลลิโวลต์)	-113.6 ± 2.98	-228.7 ± 11.36	-119.0 ± 1.98	-249.0 ± 4.88
ซีไอโดยรวม* (มิลลิกรัมต่อลิตร)	$51,810 \pm 3,408$	$7,550 \pm 971$	$52,211 \pm 2,272$	$8,579 \pm 0$

หมายเหตุ * เก็บตัวอย่างน้ำชะจากจุดเก็บน้ำชะที่กั้นถังปฏิกรณ์

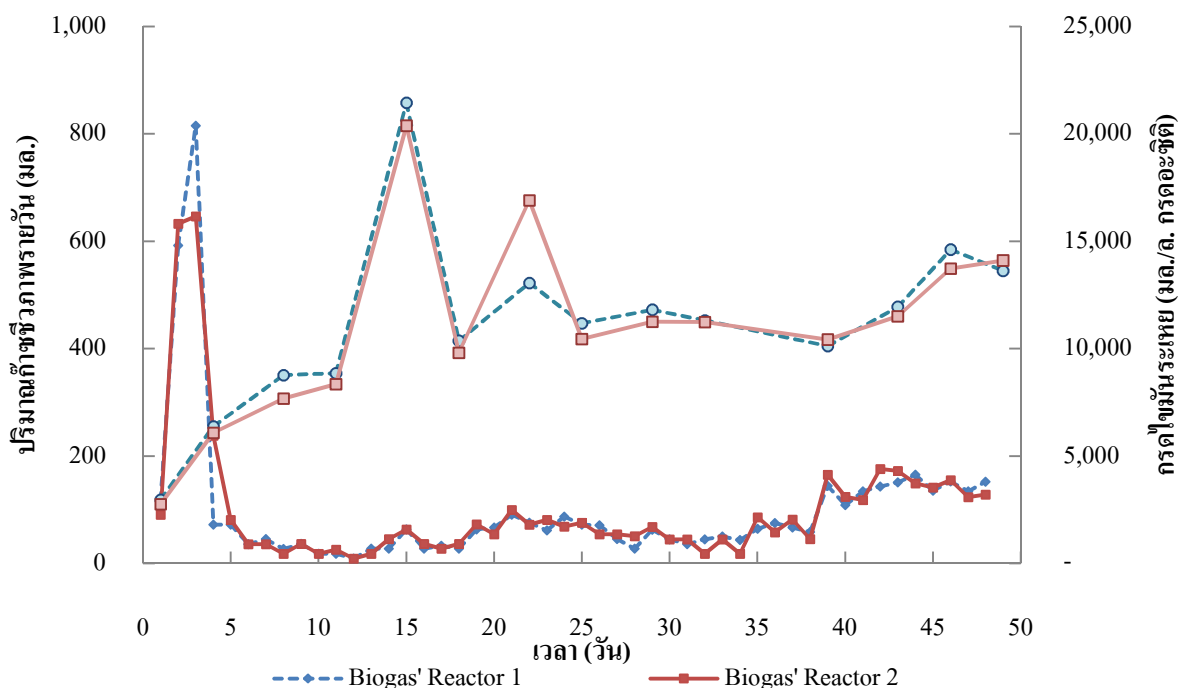
เมื่อสิ้นสุดการทดลองค่าซีโอดีรวมของถังปฏิกรณ์ที่ 1 และถังปฏิกรณ์ที่ 2 มีค่าซีโอดีรวมเหลือเพียง $7,550 \pm 971$ และ $8,579 \pm 0$ มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ และมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีร้อยละ 85.43 และ 83.57 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการเวียนน้ำกลับมีการกำจัดซีโอดีได้มาก ปริมาณซีโอดีจึงเป็นตัวแปรหนึ่งที่ใช้ในการคาดการณ์ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ โดยค่าซีโอดีบอกถึงปริมาณสารอินทรีย์ที่จุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ในการดำรงชีพเพื่อทำหน้าที่ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ สำหรับสัดส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส (COD:N:P) ของระบบหมักไร้อากาศควรมีค่า 800:5:1 (Deublein และ Steinhauser, 2008) เมื่อเริ่มต้นการทดลองพบว่าสัดส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส (COD:N:P) ในน้ำชะถังปฏิกรณ์ที่ 1 และถังปฏิกรณ์ที่ 2 มีค่าเท่ากับ 800:3.24:1.00 และ 800:3.36:1.03 ตามลำดับ ซึ่งที่เลอื่นมีปริมาณสารอาหารต่ำกว่าปริมาณสารอาหารที่จำเป็นเล็กน้อยแต่เมื่อสิ้นสุดการทดลองสัดส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส (COD:N:P) ในน้ำชะถังปฏิกรณ์ที่ 1 และถังปฏิกรณ์ที่ 2 มีค่าเท่ากับ 800:19.92:6.36 และ 800:16.69:5.69 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าปริมาณสารอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสมีค่าเพียงพอสำหรับใช้ในระบบหมักไร้อากาศแบบขั้นตอนเดียวตามอัตราส่วนซีโอดีต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส (COD:N:P) (Deublein และ Steinhauser, 2008)

ระบบหมักไร้อากาศที่มีประสิทธิภาพดีโดยทั่วไปควรมีค่าความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชันอยู่ในช่วง -300 ถึง -330 มิลลิโวลต์ (Deublein และ Steinhauser, 2008) แต่สำหรับถังปฏิกรณ์ที่ 1 และถังปฏิกรณ์ที่ 2 มีค่าความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชันอยู่ระหว่าง -229 ± 11.36 ถึง -249 ± 4.88 มิลลิโวลต์เมื่อสิ้นสุดการทดลองซึ่งถือว่ามีความสูงเล็กน้อยเมื่อเทียบกับค่าความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชันในช่วงระบบหมักไร้อากาศ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะเมื่อขณะทำการวัดค่าความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชันอากาศบางส่วนมีการแทรกซึมลงไปบนผิวหน้าของน้ำหมักส่งผลให้ค่าความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชันมีค่าสูงขึ้นกว่าที่ควรจะเป็นจริงภายในถังปฏิกรณ์

4.4.4 การปรับตัวของระบบของการทดลองที่ 2

ระยะเวลา 48 วันแรกของการทดลองที่ไม่มีการเวียนน้ำกลับของถังปฏิกรณ์ ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยและปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันมีการเปลี่ยนแปลงขึ้นลงอย่างมากในช่วงสามสัปดาห์แรกของการทดลอง หลังจากนั้นปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยและปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยและเริ่มคงที่ในวันที่ 48 ของการทดลอง แสดงดังภาพที่ 4.8 ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ว่าระบบเข้าสู่สภาพผู้สมดุลและจุลินทรีย์มีการปรับตัวให้เข้ากับลักษณะของอาหารได้มากพอที่จะย่อยสลายและเปลี่ยนรูปสารอินทรีย์เป็นกรดอินทรีย์ดังนั้นจึงเริ่มหมุนเวียนน้ำหมักกลับเข้าระบบตั้งแต่วันที่ 49 ของการทดลอง โดยเกณฑ์ในการเวียนน้ำกลับขึ้นอยู่กับปริมาณ

ก๊าซชีวภาพและปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย การทดลองที่ 2 จึงมีการเวียนน้ำกลับสัปดาห์ละประมาณ 2 ครั้งเพื่อป้องกันการผลิตกรดอินทรีย์ระเหยของขั้นตอนการหมักกรดอินทรีย์ระเหย (Acidogenesis) ที่มากกว่ากว่าการใช้กรดอินทรีย์ระเหยในขั้นตอนการสร้างก๊าซมีเทน (Methanogenesis)



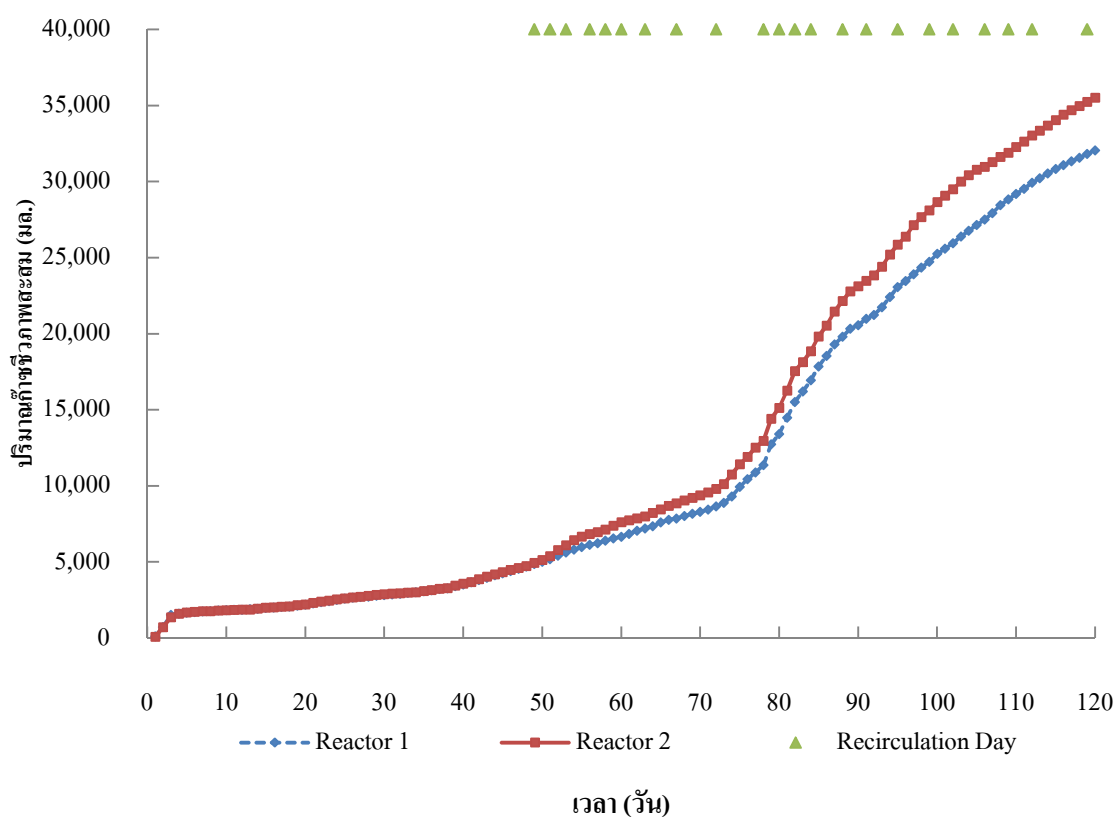
ภาพที่ 4.8 ก๊าซชีวภาพรายวันของถังปฏิกรณ์ ที่สภาวะมาตรฐานและค่ากรดอินทรีย์ระเหย ก่อนการเวียนน้ำกลับของถังปฏิกรณ์

4.4.5 ก๊าซชีวภาพของการทดลองที่ 2

ปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นของถังปฏิกรณ์จะเป็นตัวแปรสำคัญสำหรับแสดงความแตกต่างของการผลิตก๊าซชีวภาพของถังปฏิกรณ์ที่มีอัตราการเวียนน้ำกลับที่ต่างกันของถังปฏิกรณ์ที่ 1 และถังปฏิกรณ์ที่ 2 โดยวันที่ 120 เป็นวันสิ้นสุดการทดลองเนื่องจากปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นมีปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพต่ำซึ่งมีปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพต่ำกว่าร้อยละ 20 เมื่อเทียบกับปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดของการทดลอง ดังนั้นจึงถือว่าระบบเข้าสู่สภาวะสมดุลซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ Ahn และคณะ (2010) และ Lehtomaki และคณะ (2008) ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมและปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันของชุดถังปฏิกรณ์ทั้งสองที่สภาวะมาตรฐานแสดงดังภาพที่ 4.10 และภาพที่ 4.11 ตามลำดับ

4.4.5.1 ก๊าซชีวภาพสะสมของการทดลองที่ 2

ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมที่ผลิตได้ของถังปฏิกรณ์ทั้งสองชุดพบว่ามีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของถังปฏิกรณ์ที่ 1 และถังปฏิกรณ์ที่ 2 มีค่า $32,038 \pm 46$ และ $35,501 \pm 51$ มิลลิลิตร ตามลำดับ



ภาพที่ 4.9 ก๊าซชีวภาพสะสมของถังปฏิกรณ์ ที่สภาวะมาตรฐาน

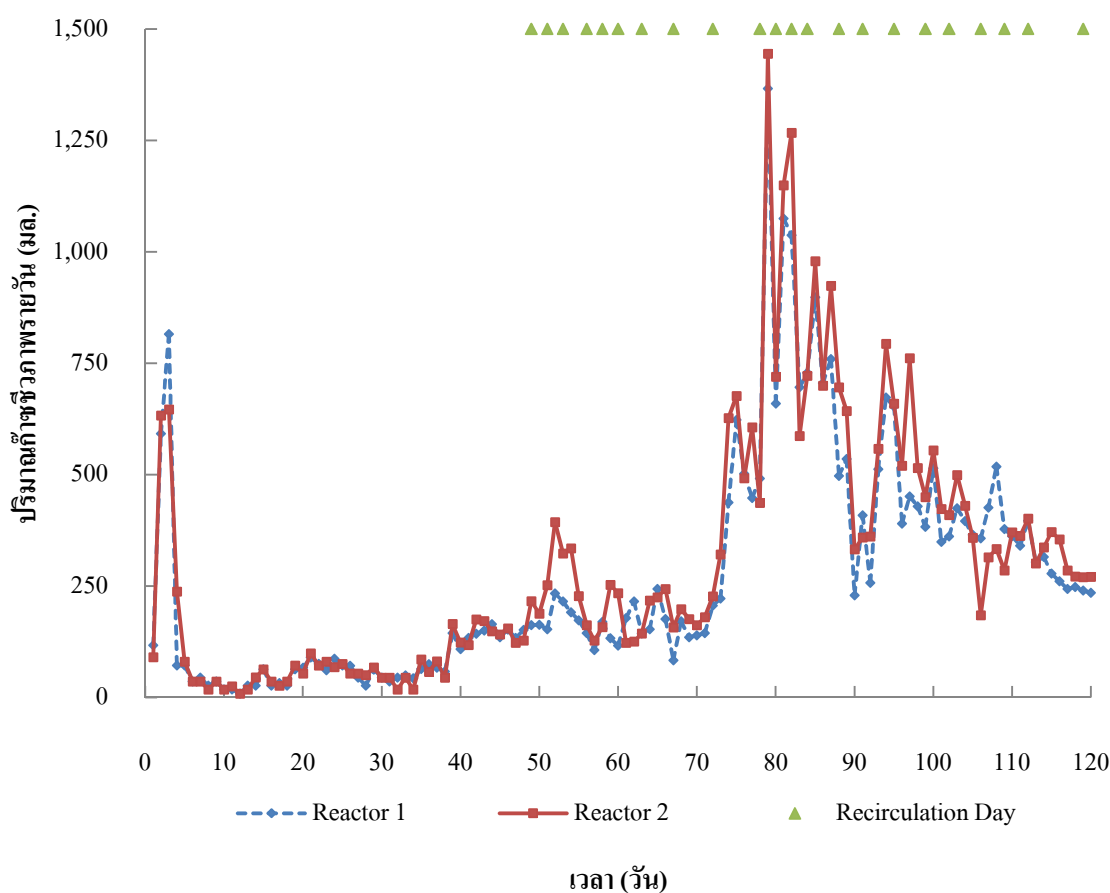
หลังจากการเวียนน้ำกลับในวันที่ 49 ของการทดลองในส่วนบนของถังปฏิกรณ์ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของถังปฏิกรณ์ที่ 1 และถังปฏิกรณ์ที่ 2 มีค่า $27,634 \pm 59$ และ $30,764 \pm 64$ มิลลิลิตร ตามลำดับ เนื่องจากวิธีเวียนน้ำกลับมาโปรยในส่วนบนของถังปฏิกรณ์ที่ 2 ซึ่งมีอัตราการเวียนกลับร้อยละ 100 จะช่วยเพิ่มความชื้นให้กับสารอินทรีย์ที่อยู่ส่วนบนของถังและลดการขาดแคลนปริมาณสารอินทรีย์ (Jagadabhi และคณะ, 2010) ทำให้ระบบสามารถทำงานได้มากขึ้นทำให้ประสิทธิภาพของระบบสูงขึ้น ดังนั้นจึงส่งเสริมให้เกิดการย่อยสลายของสารอินทรีย์มากขึ้นและเพิ่มความสามารถในการเกิดก๊าซชีวภาพได้เร็วขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถควบคุมสภาพเป็นกรดหรือด่างในระบบได้ทำให้ระบบมีเสถียรภาพที่ดีขึ้น (Fischer และ Krieg, 2001)

การผลิตก๊าซชีวภาพของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบขึ้นตอนเดียวชุดถังปฏิกรณ์ทั้งสองสามารถแบ่งระยะออกเป็น 3 ช่วง ดังนี้

1. ช่วงยับยั้งการผลิตก๊าซชีวภาพ (ตั้งแต่วันที่ 1 ถึงวันที่ 48 ของการทดลอง)
 2. ช่วงปรับสภาพแวดล้อมให้เหมาะสม (ตั้งแต่วันที่ 49 ถึงวันที่ 73 ของการทดลอง)
 3. ช่วงการผลิตก๊าซชีวภาพที่มีก๊าซมีเทนเป็นหลัก (ตั้งแต่วันที่ 74 ถึงสิ้นสุดการทดลอง)
- โดยระยะทั้งสามจะอธิบายในหัวข้อถัดไป

4.4.5.2 ก๊าซชีวภาพรายวันของการทดลองที่ 2

ชุดถังปฏิกรณ์ทั้งสองชุดเพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของถังปฏิกรณ์ซึ่งมีอัตราการเวียนน้ำกลับที่แตกต่างกันในสภาวะแบบตัวกลางคงที่ โดยก๊าซชีวภาพรายวันสามารถอธิบายได้จากระยะของการผลิตก๊าซชีวภาพของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบขึ้นตอนเดียวแสดงดังภาพที่ 4.11 แบ่งระยะออกเป็น 3 ช่วง ดังนี้



ภาพที่ 4.10 ก๊าซชีวภาพรายวันของถังปฏิกรณ์ ที่สภาวะมาตรฐาน

ช่วงที่ 1 ช่วงยับยั้งการผลิตก๊าซชีวภาพ ระยะเวลาสี่วันแรกของการทดลองปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพของทั้งสองถังปฏิกรณ์มีค่าสูงแต่ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้มีความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สูงที่ร้อยละ 40.59 และร้อยละ 42.27 ของถังปฏิกรณ์ที่ 1 และถังปฏิกรณ์ที่ 2 ตามลำดับ เนื่องจากสภาพแวดล้อมมีค่าไม่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซมีเทน ช่วงเวลาก่อนการเวียนน้ำกลับของถังปฏิกรณ์ระหว่างวันที่ 5 ถึงวันที่ 48 ของการทดลองปริมาณก๊าซชีวภาพของถังปฏิกรณ์ทั้งสองมีค่าน้อยและใกล้เคียงกัน ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันเฉลี่ยมีค่า 70 ± 13 และ 71 ± 14 มิลลิลิตรต่อวันของถังปฏิกรณ์ที่ 1 และถังปฏิกรณ์ที่ 2 ตามลำดับ เนื่องจากในวันที่ 8 ของการทดลองค่าความเป็นกรดต่างมีค่าต่ำลงมากซึ่งมีค่าระหว่าง 5.3 - 5.4 ซึ่งในกระบวนการการย่อยสลายแบบไร้อากาศ ถ้าค่าความเป็นกรดต่างต่ำกว่า 6.5 ประสิทธิภาพการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างก๊าซมีเทนจะลดลงอย่างมากและถ้าค่าความเป็นกรดต่างต่ำกว่า 5.0 จุลินทรีย์สร้างก๊าซมีเทนจะยับยั้งการเจริญเติบโตและตายในที่สุด (Ahn และคณะ, 2010) นอกจากนี้ปริมาณการสะสมกรดอินทรีย์ระเหยมีค่าสูงขึ้นเรื่อยจนกระทั่งกรดอินทรีย์ระเหยมีค่าสูงสุดในวันที่ 15 ของทั้งสองถังปฏิกรณ์ กรดอินทรีย์ระเหยมีค่า $21,455 \pm 1,385$ และ $20,377 \pm 0$ มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดอะซิติกของถังปฏิกรณ์ที่ 1 และถังปฏิกรณ์ที่ 2 ตามลำดับ จึงกล่าวได้ว่าสภาพแวดล้อมของช่วงที่ 1 ไม่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพดังนั้นจึงแก้ไขสภาพความเป็นกรดด้วยการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) โดยกำหนดให้ค่าความเป็นกรดต่างมีค่าเท่ากับ 7.5 ซึ่งโซเดียมไบคาร์บอเนตเป็นสารเคมีที่ใช้ควบคุมความเป็นกรดต่างและเพิ่มกำลังบัฟเฟอร์ให้แก่ระบบ

ช่วงที่ 2 ช่วงปรับสภาพแวดล้อมให้เหมาะสม หลังการเวียนน้ำกลับของถังปฏิกรณ์ระหว่างวันที่ 49 ถึงวันที่ 73 ของการทดลองเป็นช่วงปรับสภาพแวดล้อมให้เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ ก๊าซชีวภาพของถังปฏิกรณ์ทั้งสองมีค่าเพิ่มสูงขึ้นซึ่งก๊าซชีวภาพรายวันของถังปฏิกรณ์ที่ 1 มีค่าเฉลี่ย 165 ± 12 มิลลิลิตรต่อวันและก๊าซชีวภาพของถังปฏิกรณ์ที่ 2 มีค่าเฉลี่ย 211 ± 21 มิลลิลิตรต่อวัน ปริมาณก๊าซชีวภาพของถังปฏิกรณ์ที่ 2 มีค่ามากกว่าเล็กน้อยเนื่องมาจากเกิดการกระจายตัวของสารอินทรีย์และความชื้นที่มากกว่า นอกจากนี้ความเข้มข้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีค่าลดลงจากช่วงที่ 1 เหลือเพียงร้อยละ 27.57 ± 4.53 และร้อยละ 29.31 ± 8.97 ของถังปฏิกรณ์ที่ 1 และถังปฏิกรณ์ที่ 2 ตามลำดับ ในช่วงที่ 2 นี้จะทำการปรับค่าความเป็นกรดต่างและค่าความเป็นด่างให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ

ช่วงที่ 3 ช่วงการผลิตก๊าซชีวภาพที่มีก๊าซมีเทนเป็นหลัก ซึ่งหลังจากวันที่ 74 ของการทดลองปริมาณก๊าซชีวภาพของถังปฏิกรณ์ทั้งสองมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยก๊าซชีวภาพของวันที่ 74 ของการทดลองมีค่า 438 และ 627 มิลลิลิตรต่อวันของถังปฏิกรณ์ที่ 1 และถังปฏิกรณ์ที่ 2 ตามลำดับ จากนั้นก๊าซชีวภาพของถังปฏิกรณ์ทั้งสองมีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง สำหรับวันที่ 79 ของการทดลองถังปฏิกรณ์ทั้งสองมีปริมาณก๊าซชีวภาพสูงที่สุด คือ 1,367 และ 1,445 มิลลิลิตรต่อ

วันของถึงปฏิกรณ์ที่ 1 และถึงปฏิกรณ์ที่ 2 ตามลำดับ ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้มีปริมาณที่สูงขึ้น เนื่องจากในวันที่ 78 ของการทดลองกรดอินทรีย์ระเหยของทั้งสองถึงปฏิกรณ์มีปริมาณลดลงอย่างมากเนื่องจากกรดอินทรีย์ระเหยเปลี่ยนไปเป็นก๊าซชีวภาพในขั้นตอนของการสร้างก๊าซมีเทน ช่วงที่ 3 นี้ถือเป็นช่วงการผลิตก๊าซชีวภาพที่มีก๊าซมีเทนเป็นหลักเนื่องจากสภาพแวดล้อมและสารอินทรีย์สภาพที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพซึ่งสังเกตได้จากความเข้มข้นก๊าซมีเทนเฉลี่ยเป็นองค์ประกอบสูงถึงร้อยละ 62.96 ± 0.83 และ 63.75 ± 1.28 ของถึงปฏิกรณ์ที่ 1 และถึงปฏิกรณ์ที่ 2 ตามลำดับ โดยในช่วงที่ 3 นี้ถึงปฏิกรณ์ที่ 1 และถึงปฏิกรณ์ที่ 2 มีปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันเฉลี่ย 493 ± 70 และ 540 ± 79 มิลลิลิตรต่อวัน ตามลำดับ ถึงปฏิกรณ์ที่ 2 มีก๊าซชีวภาพรายวันสูงกว่าถึงปฏิกรณ์ที่ 1 ที่ร้อยละ 9.53 เนื่องจากการเวียนน้ำกลับของถึงปฏิกรณ์ที่มากกว่าเป็นการเพิ่มปริมาณการกระจายตัวของความชื้นให้กับส่วนบนของถึงซึ่งความชื้นเป็นปัจจัยสำคัญต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าถึงปฏิกรณ์ที่ 1 และถึงปฏิกรณ์ที่ 2 สามารถผลิตก๊าซชีวภาพในปริมาณที่ไม่แตกต่างกันมากนักเนื่องจากถึงปฏิกรณ์ที่ใช้ในการทดลองที่ 2 มีปริมาตรเล็กจึงไม่สามารถแสดงความแตกต่างของการผลิตก๊าซชีวภาพของถึงปฏิกรณ์ใ้อากาศแบบขั้นตอนเดียวได้อย่างชัดเจน

4.4.5.3 ก๊าซมีเทนของการทดลองที่ 2

ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จะถูกวิเคราะห์โดยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟฟี ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพมีค่าไม่แตกต่างกัน โดยประกอบไปด้วย ก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซอื่นๆ

เมื่อเปรียบเทียบการผลิตก๊าซมีเทนของถึงปฏิกรณ์ที่ 1 มีอัตราการเวียนน้ำกลับร้อยละ 25 และถึงปฏิกรณ์ที่ 2 มีอัตราการเวียนน้ำกลับร้อยละ 100 พบว่าอัตราการเวียนน้ำกลับที่มากขึ้นจากร้อยละ 25 ถึงร้อยละ 100 มีผลให้อัตราการผลิตก๊าซมีเทนเฉลี่ยเพิ่มขึ้น (วันที่ 47 ถึงวันที่ 120) คือ 22,681 และ 24,730 มิลลิลิตร ตามลำดับ ถึงปฏิกรณ์ที่ 2 ได้ปริมาณก๊าซมีเทนเพิ่มมากกว่าถึงปฏิกรณ์ที่ 1 ซึ่งสามารถสรุปได้ว่าอัตราการเวียนน้ำกลับที่สูงขึ้นทำให้ระบบมีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น

วันที่ 7 ของการทดลองก๊าซมีเทนเฉลี่ยของถึงปฏิกรณ์ทั้งสองมีค่าร้อยละ 29.29 ± 2.32 ความเข้มข้นของก๊าซมีเทนของถึงปฏิกรณ์ทั้งสองถึงปฏิกรณ์มีค่าใกล้เคียงกันและความเข้มข้นเฉลี่ยของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ยังมีค่าที่สูงมากมีค่าร้อยละ 41.43 ± 2.38 เนื่องจากสภาพแวดล้อมไม่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ สำหรับระหว่างวันที่ 15 ถึงวันที่ 46 ของการทดลองความเข้มข้นของก๊าซมีเทนของถึงปฏิกรณ์ทั้งสองถึงปฏิกรณ์มีค่าเพิ่มสูงขึ้นทีละน้อยแต่ปริมาณก๊าซชีวภาพของ

ถึงปฏิกรณ์ทั้งสองมีค่าน้อยและใกล้เคียงกันปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันเฉลี่ยมีค่า 78 ± 15 และ 80 ± 17 มิลลิลิตรต่อวันของถึงปฏิกรณ์ที่ 1 และถึงปฏิกรณ์ที่ 2 ตามลำดับ ส่งผลให้ปริมาณก๊าซมีเทนยังคงมีปริมาณที่ต่ำ าระยะดังกล่าวนี้จึงจัดอยู่ในช่วงยับยั้งการผลิตก๊าซชีวภาพ

ระหว่างวันที่ 60 ถึงวันที่ 75 ของการทดลองความเข้มข้นของก๊าซมีเทนมีค่าใกล้เคียงกัน โดยความเข้มข้นของก๊าซมีเทนของทั้งสองถึงปฏิกรณ์มีค่าเฉลี่ยสูงถึง 59.23 ± 4.97 และความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์มีค่าลดลงเรื่อยๆ เฉลี่ยที่ร้อยละ 28.44 ± 3.54 แสดงว่าหลังจากวันที่ 73 ของการทดลองถึงปฏิกรณ์ที่ 1 และถึงปฏิกรณ์ที่ 2 มีสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ

หลังจากวันที่ 75 จนถึงสิ้นสุดการทดลองอยู่ช่วงผลิตก๊าซชีวภาพ ความเข้มข้นก๊าซมีเทนมีค่าสูงขึ้นเล็กน้อยและเริ่มคงที่ตลอดการทดลอง ถึงปฏิกรณ์ที่ 1 และถึงปฏิกรณ์ที่ 2 มีก๊าซมีเทนเข้มข้นร้อยละ 62.96 ± 0.68 และ 63.75 ± 1.05 ตามลำดับ สำหรับความเข้มข้นของก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์มีค่าคงที่เฉลี่ยร้อยละ 28.69 ± 2.84 และ 27.23 ± 2.73 ของถึงปฏิกรณ์ที่ 1 และถึงปฏิกรณ์ที่ 2 ตามลำดับ

ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของถึงปฏิกรณ์ที่ 1 และถึงปฏิกรณ์ที่ 2 มีค่า $32,038 \pm 46$ และ $35,501 \pm 51$ มิลลิลิตรซึ่งถึงปฏิกรณ์ที่ 2 ให้ปริมาณการผลิตชีวภาพสูงกว่าถึงปฏิกรณ์ที่ 1 ถึงร้อยละ 10.81 และศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของถึงปฏิกรณ์มีค่า 0.317 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยของถึงปฏิกรณ์ที่ 1 และ 0.353 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยของถึงปฏิกรณ์ที่ 2 ความเข้มข้นของก๊าซมีเทนของถึงปฏิกรณ์ทั้งสองมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 28.47 - 64.92

ปริมาณก๊าซมีเทนของถึงปฏิกรณ์ที่ 1 และถึงปฏิกรณ์ที่ 2 มีค่า 26,114 และ 28,273 มิลลิลิตร ซึ่งถึงปฏิกรณ์ที่ 2 ให้ปริมาณการผลิตชีวภาพสูงกว่าถึงปฏิกรณ์ที่ 1 ถึงร้อยละ 8.27 และศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนของถึงปฏิกรณ์มีค่า 0.258 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยของถึงปฏิกรณ์ที่ 1 และ 0.281 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยของถึงปฏิกรณ์ที่ 2

เมื่อเปรียบเทียบงานวิจัยนี้กับงานวิจัยอื่นๆ พบว่าอัตราการผลิตก๊าซมีเทนมีค่าใกล้เคียงกัน แสดงดังตารางที่ 4.12 ดังนี้

ตารางที่ 4.12 ผลเปรียบเทียบการทดลองที่ 2 กับงานวิจัยที่ผ่านมา

ชนิดสารอินทรีย์	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)	ระยะเวลา (วัน)	อัตราการผลิตก๊าซมีเทน (ลบ.ม./กก. ของแข็งระเหย)	ร้อยละก๊าซมีเทน (ร้อยละ)
1. หญ้าสวิตช์กราชหมักร่วมกับมูลวัว มูลสุกร และมูลสัตว์ปีก (Ahn และคณะ, 2010)	55	62	0.002 - 0.337	40 - 65
2. หญ้าหมักภายในถังปฏิกรณ์แบบแบตช์ (Batch Leach Bed Reactor) ปริมาตรน้ำชะที่เวียนน้ำกลับ มีค่า 750 มิลลิลิตรต่อวัน (Lehtomaki และคณะ, 2008)	35±1	55	0.204	34 - 53
3. หญ้ากินนีสีม่วงหมักผสมมูลวัวในถังปฏิกรณ์แบบแบตช์ (งานวิจัยนี้ การทดลองที่ 2)	29.32±0.18	120	0.258 - 0.281	28.47 - 66.74

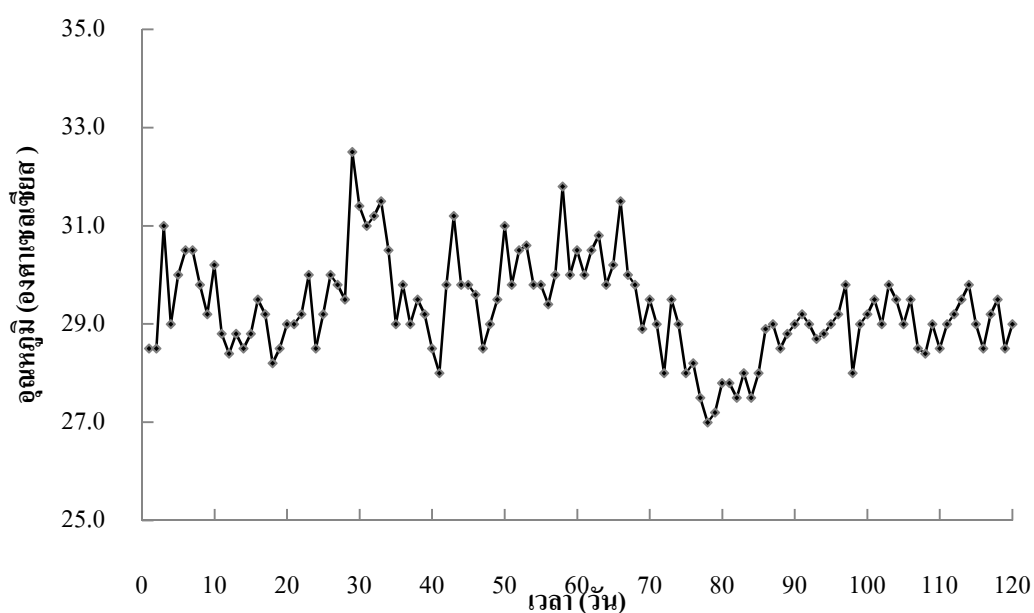
อัตราการผลิตก๊าซมีเทนของหญ้ากินนีสีม่วงหมักผสมมูลวัวในถังปฏิกรณ์แบบแบตช์ของการทดลองที่ 2 มีค่าอยู่ระหว่าง 0.258 - 0.281 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย พบว่าอัตราการผลิตก๊าซมีเทนของการทดลองที่ 2 มีค่าอยู่ในช่วงอัตราการผลิตก๊าซมีเทนของการทดลองของ Ahn และคณะ (2010) แต่ผลการทดลองหมักหญ้าสวิตช์กราชร่วมกับมูลวัวของ Ahn และคณะ (2010) มีค่าเพียง 0.028 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยจึงกล่าวได้ว่าหญ้ากินนีสีม่วงหมักร่วมกับมูลวัวมีศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนได้สูงกว่าหญ้าสวิตช์กราชร่วมกับมูลวัวเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Ahn และคณะ (2010)

อัตราการผลิตก๊าซมีเทนของการทดลองที่ 2 มีค่ามากกว่าอัตราการผลิตก๊าซมีเทนของ Lehtomaki และคณะ (2008) เนื่องจากอัตราการเวียนน้ำกลับที่สูงกว่า นอกจากนี้หญ้ากินนีสีม่วงให้ความเข้มข้นของก๊าซมีเทนสูงกว่าหญ้าหมักโดยมีค่าสูงถึงร้อยละ 66.74

4.4.6 สภาพแวดล้อมของการทดลองที่ 2

4.4.6.1 อุณหภูมิของการทดลองที่ 2

อุณหภูมิห้องของการทดลองมีค่าอยู่ระหว่าง 27.00 - 35.50 องศาเซลเซียสและค่าอุณหภูมิเฉลี่ย 29.32±0.18 องศาเซลเซียส แสดงดังภาพที่ 4.9 ซึ่งเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรดและจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน (Deublein และ Steinhauser, 2008)



ภาพที่ 4.11 อุณหภูมิ

4.4.6.2 สีนํ้าหมักของการทดลองที่ 2

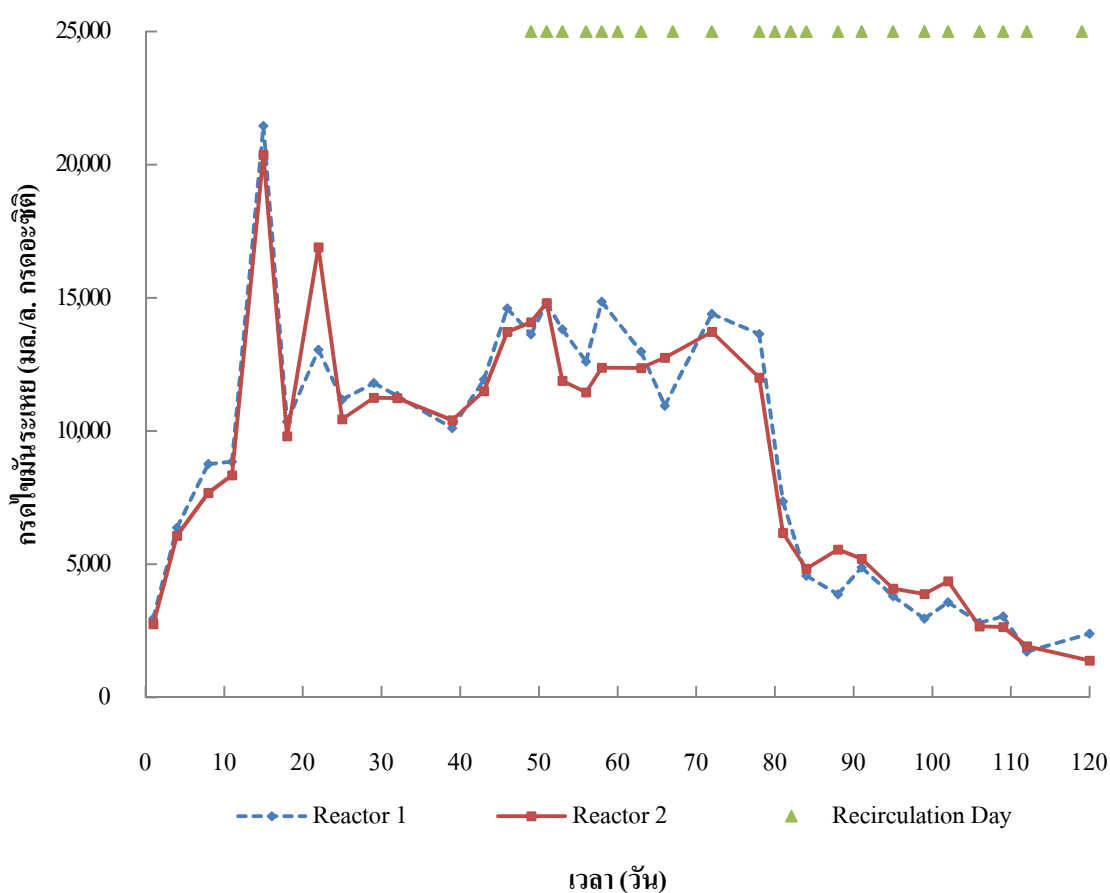
สีนํ้าหมักในช่วงแรกของการทดลองทั้งสองมีลักษณะเหมือนกันคือ นํ้าหมักมีสีนํ้าตาล เช่นเดียวกับมูลวัวสดที่ใส่เข้าไป ภายใต้นี้สีม่วงบางส่วนแขวนลอยทางด้านบนแต่บางส่วนตกตะกอนอยู่ด้านล่างและมีตะกอนสีนํ้าตาลทางด้านล่างของถังปฏิกรณ์ หลังจากนั้นสีนํ้าหมักจะเริ่มมีสีนํ้าตาลเข้มขึ้นตามระยะเวลาการทดลองที่เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการสะสมตะกอนของโลหะซัลไฟด์ (S^2) เกิดเป็นสารประกอบซัลไฟด์ซึ่งไม่ละลายนํ้าและมีสีดำหรือสีนํ้าตาลเข้ม

4.4.6.3 กลิ่นนํ้าหมักของการทดลองที่ 2

กลิ่นนํ้าหมักช่วงแรกของการทดลองทั้งสองชุดมีกลิ่นรุนแรงของมูลวัวสดและมีกลิ่นเหม็นเขียวของหญ้าเล็กน้อยปนกันแต่หลังจากนั้นเมื่อกระบวนการย่อยสลายเข้าสู่การสร้างกรด มีการสะสมกรดอินทรีย์และเกิดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ซึ่งเป็นผลมาจากซัลไฟด์ในรูปที่ละลายนํ้าได้ทำให้กลิ่นเหม็นเปรี้ยวรุนแรงขึ้นและเมื่อสิ้นสุดการทดลองกลิ่นนํ้าหมักมีกลิ่นเหม็นเปรี้ยวจะลดลงเนื่องจากกระบวนการย่อยสลายเข้าสู่ขั้นตอนของการผลิตมีเทนทำให้ปริมาณกรดอินทรีย์จะลดลงกลิ่นเหม็นเปรี้ยวจึงลดลงตามไปด้วยแต่ยังคงมีกลิ่นของมูลวัวอยู่

4.4.6.4 กรดอินทรีย์ระเหยของการทดลองที่ 2

กรดอินทรีย์ระเหยเป็นตัวแปรที่บอถึงสถานะการทำงานของระบบ ถ้าปฏิบัติการสร้างกรดอินทรีย์ไม่สมดุลกับย่อยสลายกรดอินทรีย์ไปเป็นก๊าซชีวภาพอาจทำให้เกิดการสะสมของกรดอินทรีย์และส่งผลให้ความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ในระบบสูงขึ้นอาจทำให้ระบบล้มเหลว สำหรับค่ากรดอินทรีย์ระเหยเริ่มต้นของการทดลองที่ 2 มีค่า $2,963 \pm 335$ และ $2,756 \pm 251$ มิลลิกรัมต่อลิตร ในรูปกรดอะซิติกของถังปฏิกรณ์ที่ 1 และถังปฏิกรณ์ที่ 2 ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 4.12



ภาพที่ 4.12 กรดอินทรีย์ระเหย

สำหรับระยะแรกของการทดลองจะเข้าสู่ช่วงที่ 1 ช่วงยับยั้งการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยระหว่างวันที่ 1 ถึงวันที่ 22 ของการทดลองกรดอินทรีย์ระเหยมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเนื่องจากเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์แล้วเปลี่ยนรูปสารอินทรีย์ไปเป็นกรดอินทรีย์ระเหยได้อย่างรวดเร็วจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ให้สารอินทรีย์ที่มีขนาดเล็กลงจากนั้นเกิดการหมักกรดอินทรีย์ระเหยซึ่งสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็กลงจะถูกย่อยสลายต่อจนได้กรดอินทรีย์ระเหยมีผลทำให้เกิดการ

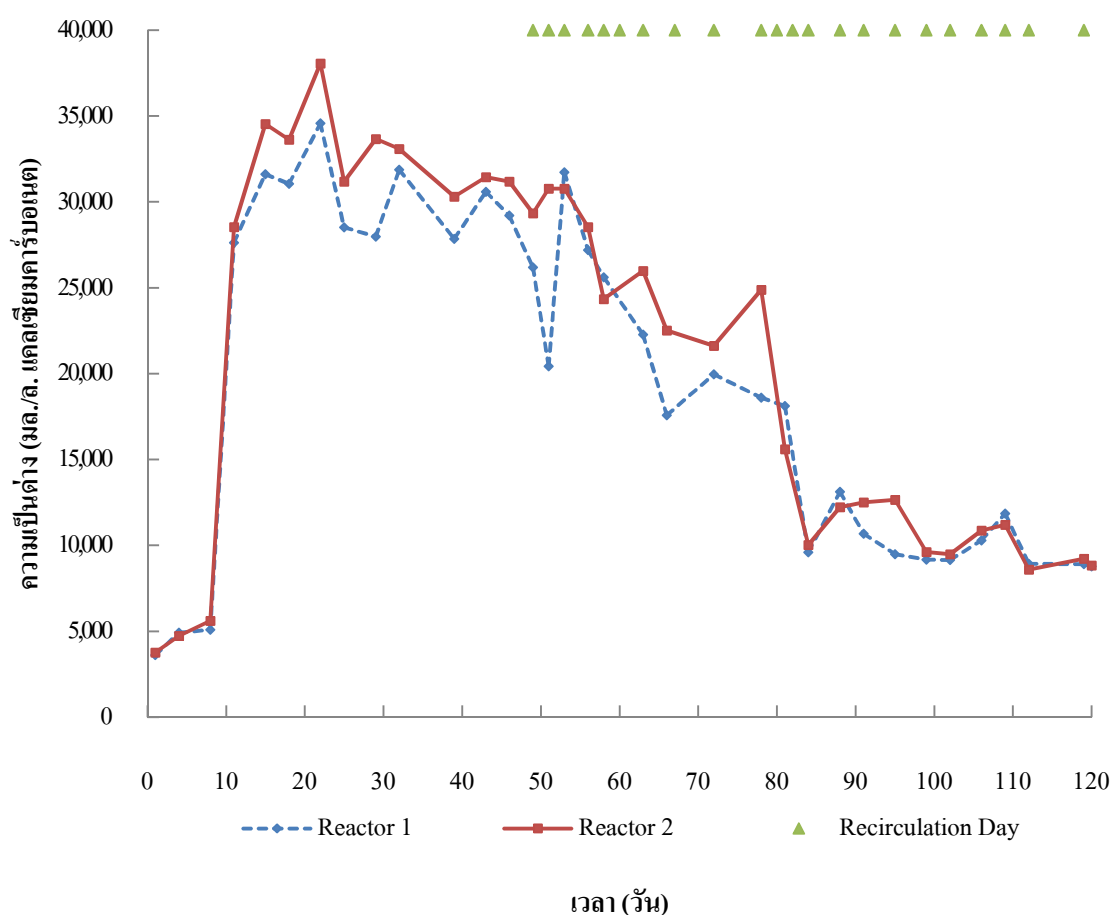
สะสมกรดอินทรีย์ระเหยสูงขึ้น โดยกรดอินทรีย์ระเหยมีค่าสูงสุดในวันที่ 15 ของทั้งสองถึงปฏิกรณ์ ซึ่งกรดอินทรีย์ระเหยมีค่า $21,455 \pm 1,385$ และ $20,377 \pm 0$ มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดอะซิติกของถึงปฏิกรณ์ที่ 1 และถึงปฏิกรณ์ที่ 2 ตามลำดับ โดยกรดอินทรีย์ระเหยที่มีค่าสูงนี้จะส่งผลให้ความเป็นกรดต่างมีค่าต่ำลงดังนั้นความเป็นกรดต่างที่ต่ำลงจึงเป็นตัวบ่งชี้การผลิตก๊าซชีวภาพ สำหรับวันที่ 23 ถึงวันที่ 43 ของการทดลองกรดอินทรีย์ระเหยมีแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยและเริ่มคงที่ ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ว่าระบบอาจเข้าสภาพสู่สมดุล โดยกรดอินทรีย์ระเหยเฉลี่ยมีค่า $11,272 \pm 610$ และ $10,977 \pm 224$ มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดอะซิติกของถึงปฏิกรณ์ที่ 1 และถึงปฏิกรณ์ที่ 2 ตามลำดับ แต่ในวันที่ 46 ของการทดลองกรดอินทรีย์ระเหยมีค่าเพิ่มสูงขึ้นเล็กน้อยดังนั้นทางผู้วิจัยจึงเริ่มหมุนเวียนน้ำหมักกลับเข้าระบบตั้งแต่วันที่ 49 ของการทดลอง

จากนั้นการทดลองจึงเข้าสู่ช่วงที่ 2 คือช่วงปรับสภาพแวดล้อมให้เหมาะสม เมื่อเริ่มเวียนน้ำกลับของถึงปฏิกรณ์ตั้งแต่วันที่ 49 ถึงวันที่ 73 ของการทดลองเพื่อปรับสภาพแวดล้อมให้เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยมีค่าคงที่ เนื่องจากวิธีการเวียนน้ำกลับมาโปรยใน ส่วนบนของถึงปฏิกรณ์เป็นการเพิ่มความชื้นให้กับสารอินทรีย์ที่อยู่ส่วนบนของถึงปฏิกรณ์ส่งเสริม ความเป็นเนื้อเดียวกันของหมักก้นนิสีม่วงและมูลวัวให้มากขึ้นซึ่งปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยของถึงปฏิกรณ์ที่ 1 และถึงปฏิกรณ์ที่ 2 มีค่าไม่แตกต่างกันมากนัก กรดอินทรีย์ระเหยเฉลี่ยมีค่า $13,551 \pm 72$ และ $12,937 \pm 68$ มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดอะซิติกของถึงปฏิกรณ์ที่ 1 และถึงปฏิกรณ์ที่ 2 ตามลำดับ แม้ว่าชุดถึงปฏิกรณ์ทั้งสองจะมีการเวียนน้ำกลับร้อยละที่แตกต่างกัน

เมื่อสภาพแวดล้อมในระบบมีความเหมาะสมแล้วจึงเข้าสู่ช่วงที่ 3 คือช่วงการผลิตก๊าซชีวภาพที่มีก๊าซมีเทนเป็นหลัก กรดอินทรีย์ระเหยของทั้งสองถึงปฏิกรณ์มีปริมาณลดลงเรื่อยๆ จนสิ้นสุดการทดลอง กรดอินทรีย์ระเหยมีปริมาณลดลงเนื่องมาจากระยะนี้เป็นช่วงการผลิตก๊าซชีวภาพที่มีก๊าซมีเทนเป็นหลัก ซึ่งกรดอินทรีย์ระเหยเปลี่ยนไปเป็นก๊าซชีวภาพอย่างรวดเร็ว ถึงปฏิกรณ์ที่ 1 และถึงปฏิกรณ์ที่ 2 มีปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันเฉลี่ย 493 ± 70 และ 540 ± 79 มิลลิลิตรต่อวัน ตามลำดับ และมีความเข้มข้นก๊าซมีเทนเฉลี่ยเป็นองค์ประกอบสูงถึงร้อยละ 62.96 ± 0.83 และ 63.75 ± 128 ของถึงปฏิกรณ์ที่ 1 และถึงปฏิกรณ์ที่ 2 ตามลำดับ ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยเมื่อสิ้นสุดการทดลองมีค่าต่ำกว่าปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยเริ่มต้น ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยเมื่อสิ้นสุดการทดลองมีค่า $2,4022 \pm 0$ และ $1,390 \pm 171$ มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดอะซิติกของถึงปฏิกรณ์ที่ 1 และถึงปฏิกรณ์ที่ 2 ตามลำดับ

4.4.6.5 ความเป็นต่างของการทดลองที่ 2

ความเป็นต่างในระบบแสดงถึงกำลังบัฟเฟอร์ของการรองรับปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยที่เกิดขึ้นสำหรับค่าเริ่มต้นของความเป็นต่างในถังปฏิกรณ์มีค่าใกล้เคียงกัน ความเป็นต่างมีค่า $3,618 \pm 323$ และ $3,771 \pm 108$ มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปแคลเซียมคาร์บอเนตของถังปฏิกรณ์ที่ 1 และถังปฏิกรณ์ที่ 2 ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 4.13 ความเป็นต่างในถังปฏิกรณ์มีค่าใกล้เคียงกันเนื่องจากการปรับความเป็นกรดต่างเมื่อเริ่มต้นการทดลองด้วยการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) 3 กรัมต่อลิตร (Banks, 2007) เพื่อทำหน้าที่เป็นบัฟเฟอร์และปรับค่าความเป็นกรดต่างให้อยู่ในช่วง 6.8 - 7.2



ภาพที่ 4.13 ความเป็นต่าง

หลังจากดำเนินการทดลองผ่านไปประมาณหนึ่งสัปดาห์ค่าความเป็นกรดต่างมีค่าต่ำลงมาก จึงแก้ไขสภาพความเป็นกรดด้วยการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) เพื่อควบคุมความเป็นกรดต่างและเพิ่มกำลังบัฟเฟอร์ในวันที่ 8 ของการทดลองโดยกำหนดให้ความเป็นกรดต่างมีค่า

เท่ากับ 7.5 หลังจากเติมโซเดียมไบคาร์บอเนตค่าความเป็นด่างของถังปฏิกรณ์ทั้งสองมีปริมาณเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วหลังจากนั้นความเป็นด่างมีค่าค่อยๆ คงที่ก่อนการเวียนน้ำกลับของถังปฏิกรณ์ โดยความเป็นด่างของถังปฏิกรณ์ที่ 1 จะมีค่าต่ำกว่าถังปฏิกรณ์ที่ 2 เล็กน้อยซึ่งมีค่าอยู่ระหว่าง $27,622 \pm 720$ - $38,066 \pm 745$ มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปแคลเซียมคาร์บอเนตและมีค่าความเป็นด่างเฉลี่ย $31,330 \pm 792$ มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปแคลเซียมคาร์บอเนตระหว่างวันที่ 11 ถึงวันที่ 48 ของการทดลอง เมื่อสภาวะความเป็นด่างเพิ่มขึ้นระบบจะสามารถรับภาระได้มากขึ้นถึงแม้ว่าในวันที่ 15 ของการทดลองจะมีการผลิตกรดอินทรีย์ระเหยเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็วแต่ความเป็นกรดต่างของระยะทั้งสองนี้ยังคงเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

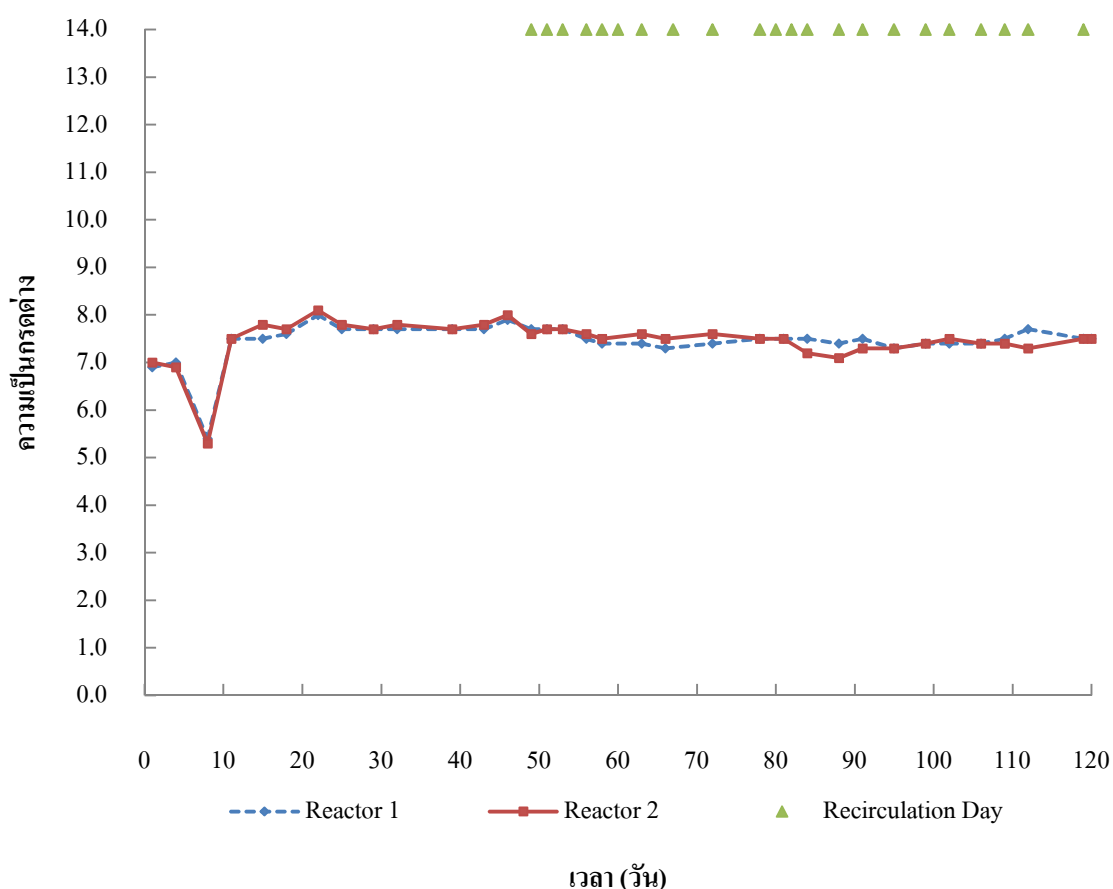
เมื่อเริ่มมีการเวียนน้ำกลับของถังปฏิกรณ์ (วันที่ 49 ถึงวันที่ 120) ความเป็นด่างมีค่าค่อยๆ ลดต่ำลงจนสิ้นสุดการทดลอง เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบค่าความเป็นด่างของถังปฏิกรณ์ที่ 1 และถังปฏิกรณ์ที่ 2 พบว่าค่าความเป็นด่างมีค่าใกล้เคียงกันซึ่งแสดงถึงความมีเสถียรภาพของระภายในถังปฏิกรณ์ โดยระหว่างวันที่ 49 ถึงวันที่ 83 ของการทดลองความเป็นด่างค่อยๆ ลดลงทีละน้อย เนื่องจากค่าความเป็นด่างที่วิเคราะห์ได้นั้นเป็นการเก็บตัวอย่างน้ำชะจากจุดเก็บน้ำชะที่กั้นถังปฏิกรณ์และเมื่อมีการเวียนน้ำกลับของถังปฏิกรณ์จะทำให้มีความเป็นเนื้อเดียวกันของสารอินทรีย์ของส่วนล่างและส่วนบนของถังปฏิกรณ์มากขึ้นซึ่งมีค่าระหว่าง $15,608 \pm 768$ - $31,724 \pm 574$ มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปแคลเซียมคาร์บอเนตและมีค่าความเป็นด่างเฉลี่ย $24,106 \pm 476$ มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต

สำหรับช่วงที่ 2 ซึ่งอยู่ในช่วงปรับสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมนี้จะทำการปรับค่าความเป็นกรดต่างและค่าความเป็นด่างให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ เนื่องจากค่าความเป็นกรดต่างและค่าความเป็นด่างที่วิเคราะห์ได้นั้นเป็นการเก็บตัวอย่างน้ำชะจากจุดเก็บน้ำชะที่กั้นถังปฏิกรณ์ทั้งสองอาจทำให้ผลการทดลองที่ได้ไม่สามารถเป็นตัวแทนของระบบทั้งหมดได้ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงใช้เวลาประมาณสามสัปดาห์ในการปรับสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ

หลังจากวันที่ 84 จนสิ้นสุดการทดลองความเป็นด่างมีค่าค่อนข้างคงที่จนสิ้นสุดการทดลอง เนื่องจากไม่มีการผลิตกรดอินทรีย์ระเหยของทั้งสองถังปฏิกรณ์ โดยมีค่าความเป็นด่างอยู่ระหว่าง $8,600 \pm 186$ - $13,118 \pm 194$ มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปแคลเซียมคาร์บอเนตและค่าความเป็นด่างเฉลี่ยมีค่า $10,236 \pm 509$ มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปแคลเซียมคาร์บอเนต

4.4.6.6 ความเป็นกรดต่างของการทดลองที่ 2

วิธีการเวียนน้ำกลับมาโปรยในส่วนบนของถังปฏิกรณ์จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมความเป็นกรดต่างนอกจากนี้ยังเป็นการเพิ่มจุลินทรีย์ให้กับส่วนบนของถังปฏิกรณ์ สำหรับค่าเริ่มต้นของความเป็นกรดต่างในถังปฏิกรณ์ทั้งสองชุดมีสภาพค่อนข้างเป็นกลาง โดยมีค่าความเป็นกรดต่างอยู่ระหว่าง 6.9 - 7.0 ซึ่งถือเป็นช่วงที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศ แสดงดังภาพที่ 4.14



ภาพที่ 4.14 ความเป็นกรดต่าง

เมื่อดำเนินการทดลองผ่านไปประมาณหนึ่งสัปดาห์ในวันที่ 8 ของการทดลองพบว่าค่าความเป็นกรดต่างมีค่าต่ำลงมากซึ่งมีค่าระหว่าง 5.3 - 5.4 สาเหตุมาจากการผลิตกรดอินทรีย์ระเหยที่สูงขึ้นอย่างมากซึ่งกรดอินทรีย์ระเหยมีค่าระหว่าง $7,680 \pm 236$ - $8,765 \pm 0$ มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดแอสซิติคในวันที่ 8 ของการทดลอง (ปริมาณการผลิตกรดอินทรีย์ระเหยเฉลี่ยเมื่อเริ่มต้นการทดลองมีค่าเพียง $2,860 \pm 293$ มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดแอสซิติค) จึงทำให้ระยะอยู่ในช่วงที่ 1 คือช่วงยับยั้ง

การผลิตก๊าซชีวภาพเนื่องจากสภาพแวดล้อมมีค่าไม่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซมีเทน กล่าวได้ว่า ความเป็นกรดต่ำและปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยมีความสัมพันธ์ซึ่งกันและกัน โดยในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศนี้ถ้าค่าความเป็นกรดต่ำกว่า 6.5 ประสิทธิภาพการทำงานของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างก๊าซมีเทนจะลดลงอย่างมากและถ้าค่าความเป็นกรดต่ำกว่า 5.0 จุลินทรีย์สร้างก๊าซมีเทนจะยับยั้งการเจริญเติบโตและตายในที่สุด (Ahn และคณะ, 2010) นอกจากนี้ถ้าค่าความเป็นกรดสูงกว่า 8.0 อัตราการผลิตก๊าซมีเทนจะมีค่าลดลงเช่นกัน ดังนั้นจึงแก้ไขสภาพความเป็นกรดด้วยการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) โดยกำหนดให้ค่าความเป็นกรดมีค่าเท่ากับ 7.5 ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับระบบหมักแบบไร้อากาศ ภายหลังจากการเติมโซเดียมไบคาร์บอเนต (วันที่ 11 ถึงวันที่ 48) ค่าความเป็นกรดของถังปฏิกรณ์ทั้งสองมีค่าสูงขึ้นเฉลี่ย 7.7 ± 0.1 ซึ่งเป็นผลมาจากกำลังบำบัดเฟออร์ที่มีประสิทธิภาพ แม้ว่าในขณะนั้นจะมีการผลิตกรดอินทรีย์ระเหยที่สูงถึง $20,377 \pm 0 - 21,455 \pm 1,385$ มิลลิกรัมต่อลิตรในรูปกรดแอสติกของวันที่ 15 ของการทดลอง

ภายหลังจากเวียนน้ำกลับความเป็นกรดมีค่าคงที่ในช่วง 7.3 - 7.7 และค่าความเป็นกรดต่ำเฉลี่ย 7.6 ± 0.1 ที่แสดงถึงความมีเสถียรภาพของระบบภายในถังปฏิกรณ์เนื่องจากวิธีเวียนน้ำกลับมาโปรยในส่วนบนของถังปฏิกรณ์จึงทำให้สารอินทรีย์มีความเป็นเนื้อเดียวกันส่งผลให้เกิดสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ เนื่องจากถังปฏิกรณ์ทั้งสองที่มีประสิทธิภาพสูงจึงทำให้ค่าความเป็นกรดมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก ถึงแม้จะมีการผลิตกรดอินทรีย์เพิ่มขึ้นภายในถังปฏิกรณ์ก็ตามระยะนี้จึงถือเป็นช่วงปรับสภาพแวดล้อมให้เหมาะสม

ตั้งแต่วันที่ 74 ถึงวันที่ 120 ของการทดลอง ระยะนี้เป็นช่วงที่ 3 คือช่วงการผลิตก๊าซชีวภาพที่มีก๊าซมีเทนเป็นหลักซึ่งกรดอินทรีย์ระเหยเปลี่ยนไปเป็นก๊าซชีวภาพอย่างรวดเร็ว ความเป็นกรดต่ำของถังปฏิกรณ์ทั้งสองมีค่าคงที่ในช่วง 7.1 - 7.7 และค่าความเป็นกรดต่ำเฉลี่ย 7.4 ± 0.1 ซึ่งจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนสามารถเจริญเติบโตได้ดีในช่วงความเป็นกรดต่ำ 6.5 - 8.5 (Ahn และคณะ, 2010) เนื่องจากสภาพแวดล้อมเหมาะสมต่อการผลิตก๊าซมีเทนส่งผลให้ถังปฏิกรณ์ที่ 1 และถังปฏิกรณ์ที่ 2 มีปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันเฉลี่ยสูงถึง 493 ± 70 และ 540 ± 79 มิลลิกรัมต่อวัน ตามลำดับ และมีความเข้มข้นก๊าซมีเทนเฉลี่ยเป็นองค์ประกอบสูงถึงร้อยละ 62.96 ± 0.83 และ 63.75 ± 1.28 ของถังปฏิกรณ์ที่ 1 และถังปฏิกรณ์ที่ 2 ตามลำดับ

ดังนั้นการควบคุมค่าความเป็นกรดต่ำจึงเป็นกลไกที่สำคัญในการควบคุมระบบ การเปลี่ยนแปลงความเป็นกรดต่ำจะขึ้นอยู่กับกำลังบำบัดเฟออร์ที่มีอยู่ในระบบ ถ้าในระบบมีปริมาณกำลังบำบัดเฟออร์เพียงพอการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรดต่ำอย่างรวดเร็วจะเป็นไปได้ยาก

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 ศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนของหญ้าชนิดต่างๆ

1. ก๊าซชีวภาพสะสมของการทดลองทั้ง 8 ชุดการทดลองมีดังนี้ การทดลองชุดมูลวัว (ชุดควบคุม) มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม 142 ± 29 มิลลิลิตรและกลุ่มชุดหญ้าผสมมูลวัวมีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมอยู่ในช่วง 414 ± 73 - 606 ± 65 มิลลิลิตร เรียงลำดับปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมสูงสุดดังนี้ หญ้ากินนีสีม่วงผสมมูลวัว หญ้าไร้ดผสมมูลวัว หญ้าแพงโกล่าผสมมูลวัว หญ้าพลิแคทูลัมผสมมูลวัว หญ้าอะตราตัมผสมมูลวัว หญ้ารูซี่ผสมมูลวัว หญ้าเนเปียร์ยักษ์ผสมมูลวัว และมูลวัว (ชุดควบคุม) มีปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม 606 ± 65 565 ± 58 538 ± 61 490 ± 53 477 ± 64 429 ± 67 414 ± 73 และ 142 ± 29 มิลลิลิตร ตามลำดับ

2. ศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนของหญ้าแต่ละชนิดมีดังนี้ หญ้ารูซี่ หญ้ากินนีสีม่วง หญ้าอะตราตัม หญ้าพลิแคทูลัม หญ้าไร้ด หญ้าเนเปียร์ยักษ์ และหญ้าแพงโกล่า มีศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนที่ 0.115 0.170 0.127 0.131 0.144 0.110 และ 0.140 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแห้งระเหย ตามลำดับ สรุปว่าหญ้ากินนีสีม่วงมีศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนสูงที่สุดมีค่า 0.170 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแห้งระเหยและมีความเข้มข้นของก๊าซมีเทนสูงสุดที่ร้อยละ 63.54

5.1.2 ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบขึ้นตอนเดียวสำหรับหญ้า

1. หญ้ากินนีสีม่วงถูกคัดเลือกจากการทดลองที่ 1 เพื่อนำมาเป็นสารชีวมวลในกระบวนการย่อยสลายในถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบขึ้นตอนเดียว โดยหญ้ากินนีสีม่วงมีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงที่สุดมีค่า 0.170 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแห้งระเหยซึ่งมีความเข้มข้นของก๊าซมีเทนสูงสุดที่ร้อยละ 63.54 เนื่องจากหญ้ากินนีสีม่วงมีปริมาณของแห้งระเหยง่ายที่ย่อยสลายได้ง่ายด้วยกระบวนการทางชีวภาพ (BVS) สูงถึงร้อยละ 49.25 และปริมาณลิกนินที่ต่ำกว่าหญ้าชนิดอื่นซึ่งมีค่าเพียงร้อยละ 12.05 ± 0.08 นอกจากนี้อัตราส่วนของผลรวมระหว่างเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสกับ

ลิกนิน ((C+H)/L) มีค่าสูงถึง 7.30 จึงส่งผลให้หญ้ากินนีสีม่วงมีปริมาณสารอินทรีย์ที่สามารถเปลี่ยนไปเป็นก๊าซชีวภาพได้สูง

2. ก๊าซชีวภาพของถังปฏิกรณ์ที่ 1 และถังปฏิกรณ์ที่ 2 พบว่าอัตราการเวียนน้ำกลับที่มากขึ้นจากร้อยละ 25 ของถังปฏิกรณ์ที่ 1 และร้อยละ 100 ของถังปฏิกรณ์ที่ 2 มีผลให้ปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นคือ $32,038 \pm 46$ มิลลิลิตรของถังปฏิกรณ์ที่ 1 และ $35,501 \pm 51$ มิลลิลิตรของถังปฏิกรณ์ที่ 2 ซึ่งเห็นได้ว่าถังปฏิกรณ์ที่ 2 มีปริมาณก๊าซชีวภาพมากกว่าถังปฏิกรณ์ที่ 1 คิดเป็นร้อยละ 10.81 และปริมาณก๊าซมีเทนของถังปฏิกรณ์ที่ 1 และถังปฏิกรณ์ที่ 2 มีค่า 26,114 และ 28,273 มิลลิลิตรตามลำดับ ซึ่งถังปฏิกรณ์ที่ 2 ให้ปริมาณการผลิตก๊าซมีเทนสูงกว่าถังปฏิกรณ์ที่ 1 ร้อยละ 8.27 ดังนั้นถังปฏิกรณ์ทั้งสองมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพและอัตราการผลิตก๊าซมีเทนระหว่าง 0.317 - 0.353 และ 0.251 - 0.280 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหย ตามลำดับ และความเข้มข้นของก๊าซมีเทนของถังปฏิกรณ์ทั้งสองมีค่าอยู่ระหว่างร้อยละ 28.47 - 64.92 ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าถังปฏิกรณ์ที่ 2 ให้อัตราการผลิตชีวภาพสูงกว่าถังปฏิกรณ์ที่ 1 เนื่องจากอัตราการเวียนน้ำกลับที่สูงกว่า

3. อัตราการการเวียนน้ำกลับที่ร้อยละ 100 ให้ปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนของถังปฏิกรณ์ดีกว่าอัตราการการเวียนน้ำกลับที่ร้อยละ 25 เนื่องจากอัตราการเวียนน้ำกลับของถังปฏิกรณ์เป็นการเพิ่มปริมาณการกระจายตัวของความชื้นให้กับส่วนบนของถังปฏิกรณ์และเป็นการเพิ่มโอกาสให้จุลินทรีย์ได้สัมผัสกับสารอินทรีย์นอกจากนี้ทำให้หญ้าและมูลวัวมีความเป็นเนื้อเดียวกันมากขึ้นจึงส่งผลให้กระบวนการย่อยสลายเกิดได้เร็วโดยเกณฑ์ในการเวียนน้ำกลับขึ้นอยู่กับปริมาณก๊าซชีวภาพและปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย ดังนั้นการทดลองที่ 2 จึงเวียนน้ำกลับสัปดาห์ละประมาณ 2 ครั้งเพื่อป้องกันการผลิตกรดอินทรีย์ระเหยของขั้นตอนการหมักกรดอินทรีย์ระเหย (Acidogenesis) ที่มากกว่าว่าการใช้กรดอินทรีย์ระเหยในขั้นตอนการสร้างก๊าซมีเทน (Methanogenesis)

4. การผลิตก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนของการทดลองไม่สามารถระบุความแตกต่างได้อย่างชัดเจนเนื่องจากถังปฏิกรณ์ที่มีปริมาตรเล็กเพียง 2.5 ลิตร (ปริมาตรใช้งาน 1.0 ลิตร) จึงไม่เกิดความแตกต่างด้านการกระจายตัวของความชื้นส่วนบนของถังปฏิกรณ์และปริมาณหญ้าที่ใส่ในถังปฏิกรณ์ก็มีปริมาณที่น้อยซึ่งมีปริมาณหญ้ากินนีสีม่วง 101.77 ± 0.76 กรัมของของแข็งระเหย หรือ 346.30 ± 2.61 กรัม โดยน้ำหนักเปียกของถังปฏิกรณ์ทั้งสอง

5.2 ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนในการผลิตก๊าซชีวภาพของหญ้าชนิดต่างๆ และศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบขั้นตอนเดียวมีข้อเสนอแนะต่างๆ เพื่อเป็นแนวทางในการทำการวิจัย ดังนี้

1. ควรศึกษาการปรับสภาพเบื้องต้นของหญ้า เช่น การปรับสภาพเบื้องต้นทางชีวภาพ การปรับสภาพเบื้องต้นเคมี การปรับสภาพเบื้องต้นกายภาพ เป็นต้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสลายโครงสร้างลิกโนเซลลูโลสให้ได้ เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสซึ่งเป็นสารอินทรีย์เริ่มต้นของกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ

2. ควรศึกษาแนวทางสำหรับการออกแบบถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบขั้นตอนเดียวสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าด้วยการเพิ่มขนาดของถังปฏิกรณ์ให้มีขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อให้เกิดความแตกต่างของการกระจายตัวของความชื้นที่กระจายตัวอยู่ในหญ้า โดยออกแบบถังปฏิกรณ์ให้มีอัตราส่วนความสูงต่อเส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 5:1 ถึง 12.5:1 ซึ่งจะเกิดการย่อยสลายแบบปลັกอ์โฟลว์ และเพิ่มปริมาณหญ้าที่ใส่ในถังปฏิกรณ์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ

3. ควรศึกษาความเหมาะสมของลักษณะพื้นที่เพาะปลูกและเลี้ยงสัตว์ของการผลิตก๊าซชีวภาพของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบขั้นตอนเดียวสำหรับหญ้าในด้านความเหมาะสมของขนาดพื้นที่ ขนาดโรงเรือน และชนิดปศุสัตว์ เป็นต้น

4. ควรวิเคราะห์ความคุ้มทุนและต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ในด้าน การเพาะปลูก การเก็บเกี่ยว กระบวนการผลิต และการขนส่ง เป็นต้น เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ที่หญ้าจะนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพจากชีวมวลให้ได้จริง

รายการอ้างอิง

ภาษาไทย

- กฤษพล ใจจรงค์. 2546. แนวทางในการหมักเนื้อมันน้ำชะขยะเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายขยะอินทรีย์. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาการจัดการสิ่งแวดล้อม (สหสาขาวิชา) บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ชินพร วงศ์วัฒนไพบูลย์. 2551. การผลิตเอทานอลจากหญ้าโดย *Saccharomyces cerevisiae* และ *Pichia stipitis*. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- ณัฐินี ตั้งวรเกษม. 2546. การไฮโดรไลซิสและการเกิดกรดของผลิตภัณฑ์ประเภทโครงไก่และกระดูกไก่จากโรงงานชำแหละไก่. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ปศุสัตว์, กรม. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 2547. พืชอาหารสัตว์พันธุ์ดี. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพมหานคร: ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย.
- ปศุสัตว์, กรม. กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. ข้อมูลจำนวนเกษตรกรและปศุสัตว์ในประเทศไทย ประจำปี 2553. [ออนไลน์]. 2553. แหล่งที่มา: http://www.dld.go.th/ict/th/images/stories/stat_web/yearly/2553/cultivatorarea_ket2.pdf [2553, มีนาคม 8]
- วิทยาศาสตร์บริการ, กรม. กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. พลังงานจากชีวมวล (Biomass energy). [ออนไลน์]. 2553. แหล่งที่มา: <http://siweb.dss.go.th/repack/fulltext/IR5.pdf> [2553, มีนาคม 8]
- วิรงรอง ทองดีสุนทร. 2548. การแยกเอมิเซลลูโลสจากผลมะละกอดิบและการตรวจหาน้ำตาลองค์ประกอบ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ, สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. โครงการศึกษาการเพิ่มศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของน้ำเสียจากฟาร์มสุกรในรูปแบบการหมักย่อยร่วมโดยถังปฏิกรณ์ UASB และ CSTR เพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ. [ออนไลน์]. 2552. แหล่งที่มา: <http://mix-waste.erdj.or.th/pdf/mix-waste.pdf> [2553, มีนาคม 8]
- สายัณห์ ทัดศรี. 2548. หญ้าอาหารสัตว์และหญ้าพื้นเมืองในประเทศไทย. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ภาษาอังกฤษ

- Ahn, H.K., Smith, M.C., Kondrad, S.L., and White, J.W. 2010. Evaluation of biogas production potential by dry anaerobic digestion of Switchgrass-Animal manure mixtures. Applied Biochemistry and Biotechnology 160: 965-975.
- AOAC, 1999. Association of Analytical Communities. Maryland, USA.
- APHA. 1998. American Public Health Association Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20th ed. Washington, DC: APHA and American Water Works Association and Water Environment Federation.
- Banks, C. 2007. D7: Kinetic data from a modified BMP test with uncoupling of solids and liquid retention times, Renewable energy from crops and agrowastes. School of Civil Engineering & the Environment, University of Southampton, UK.
- Broughton, A. D. 2009. Hydrolysis and Acidogenesis of Farm Dairy Effluent for Biogas Production at Ambient Temperatures. Master of Engineering in Environmental Engineering, Massey University.
- Chen, G., Zheng, Z., Yang, S., Fang, C., Zou, X., and Zhang, J. 2010. Improving conversion of *Spartina alterniflora* into biogas by co-digestion with cow feces. Fuel Processing Technology 91: 1416-1421.
- Doublein D., and Steinhauser A. 2008. Biogas from Waste and Renewable Resources. Hong Kong, Wiley-VCH.
- Fernandez, J., Perez, M., and Romero, L.I. 2008. Effect of substrate concentration on dry mesophilic anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW). Bioresource Technology 99: 6075-6080.
- Fischer, T., and Krieg, A. 2001. About dry fermentation in agriculture. Biogas Journal Nr 1: 12-16.
- Gunaseelan, V.N. 2004. Biochemical methane potential of fruits and vegetable solid waste feedstocks. Biomass and Bioenergy 26: 389-399.

- Gunaseelan, V.N. 2009. Biomass estimates, characteristics, biochemical methane potential, kinetics and energy flow from *Jatropha curcus* on dry lands. Biomass and Bioenergy 33: 589-596.
- Heiermann, M., and Plochl, M. 2004. Corps - a big potential for biogas production. World Renewable Energy Congress VIII.
- Hodgson, E.M., Lister, S.J., Bridgwater, A.V., Clifton-Brown, J., and Donnison, I.S. 2010. Genotypic and environmentally derived variation in the cell wall composition of miscanthus in relation to its use as a biomass feedstock. Biomass and Bioenergy 34: 652-660.
- Jagadabhi, P.S., Kaparaju, P., and Rintala, J. 2010. Effect of micro-aeration and leachate replacement on COD solubilization and VFA production during mono-digestion of grass-silage in one-stage leach-bed reactors. Bioresource Technology 101: 2818-2824.
- Jagadabhi, P.S., Lehtomaki, A., and Rintala, J. 2008. Co-digestion of grass silage and cow manure in a CSTR by re-circulation of alkali treated solids of the digestate. Environmental Technology 29: 1085-1093.
- Karki, A.B., Shrestha, J.N., and Bajgain, S. 2005. Biogas as renewable source of energy in Nepal theory and development. Kathmandu, BSP-Nepal.
- Kayhanian, M., Tchobanoglous, G., and Brown, R.C. 2007. Energy Conservation and Renewable Energy. Kentucky, Taylor & Francis Group/CRC Press.
- Koch, K., Wichern, M., Lubken, M., and Horn, H. 2009. Mono fermentation of grass silage by means of loop reactors. Bioresource Technology 100: 5934-5940.
- Kumar, S., Bhattacharyya, J.K., Vaidya, A.N., Chakrabarti, T., Devotta, S., and Akolkar, A.B. 2009. Assessment of the status of municipal solid waste management in metro cities, state capitals, class I cities, and class II towns in India: An insight. Waste Management 29: 883-895.
- Laine, C. 2005. Structures of hemicellulose and pectins in wood and pulp. Laboratory of Organic Chemistry. Department of Chemical Technology, Helsinki University of Technology, Finland.

- Lehtomaki, A., Huttunen, S., and Rintala, A. 2007. Laboratory investigations on co-digestion of energy crops and crop residues with cow manure for methane production: Effect of crop to manure ratio. Resources, Conservation and Recycling 51: 591-609.
- Lehtomaki, A., Huttunen, S., Lehtinen, T.M., and Rintala, J.A. 2008. Anaerobic digestion of Grass silage in batch leach bed processes for methane production. Bioresource Technology 99: 3267-3278.
- Moody, L., Burns, R., Wu-Haan, W., and Spajis, R. 2009. Use of biochemical methane potential (BMP) assays for predicting and enhancing anaerobic digester performance. 44th Croatian & 4th International Symposium on Agriculture : 930-934.
- Nizami, A.S., and Murphy, J.D. 2010. What type of digester configurations should be employed to produce biomethane from grass silage?. Renewable and Sustainable Energy Reviews 14: 1558-1568.
- Nizami, A.S., Korres, N.E., and Murphy, J.D. 2009. Review of the Integrated Process for the Production of Grass Biomethane. Environmental Science & Technology 43: 8496-8508.
- Ofoefule, A.U., Uzodinma, E.O., and Onukwuli, O.D. 2009. Comparative study of the effect of different pretreatment methods on biogas yield from water Hyacinth (*Eichhornia crassipes*). International Journal of Physical Sciences 4: 535-539.
- Owens, J.M., and Chynoweth, D.P. 1993. Biochemical methane potential of municipal solid waste (MSW) components. Water Science and Technology 24: 1-14.
- Pakarinen, O., Lehtomaki, A., Rissanen, S., and Rintala, J. 2008. Storing energy crops for methane production: Effects of solids content and biological additive. Bioresource Technology 99: 7074-7082.
- Powlson, D.S., Riche, A.B., and Shield, I. 2005. Biofuels and other approaches for decreasing fossil fuel emissions from agriculture. Applied Biologists 146: 193-201.
- Rincon, B., Banks, C.J., and Heaven, S. 2010. Biochemical methane potential of winter wheat (*Triticum aestivum* L.): Influence of growth stage and storage practice. Bioresource Technology 101: 8179-8184.

- Rittmann, B.E., and McCarty, P.L. 2000. Environmental biotechnology: Principles and applications. 1st ed. New York, McGraw-Hill.
- Romano, R.T., Zhang, R., Teter, S., and McGarvey, J.A. 2009. The effect of enzyme addition on anaerobic digestion of Jose Tall Wheat Grass. Bioresource Technology 100: 4564-4571.
- Sawyer, C.N., McCarty, P.L., and Parkin, G.F. 2003. Chemistry for environmental engineering and science. 5th ed. New York, McGraw-Hill.
- Seppala, M., Paavola, T., Lehtomak, A., and Rintala, J. 2009. Biogas production from boreal herbaceous grasses - Specific methane yield and methane yield per hectare. Bioresource Technology 100: 2952-2958.
- Singh, S.P., and Prerna, P. 2009. Review of recent advances in anaerobic packed-bed biogas reactors. Renewable and Sustainable Energy Reviews 13: 1569-1575.
- TAPPI. 2009. Method for determination of alpha-, beta- and gamma-cellulose in pulp. [online]. Available from: <http://www.tappi.org/content/tag/sarg/t203.pdf> [2011, March 8]
- Uzodinma, E.O., and Ofoefule, A.U. 2009. Biogas production from blends of field grass (*Panicum maximum*) with some animal wastes. International Journal of Physical Sciences 42: 091-095.
- Verma, S. 2002. Anaerobic digestion of biodegradable organic in municipal solid wastes. Department of Earth & Environmental Engineering, Columbia University, USA.
- Walker, L., and Charles, W., and Cord-Ruwisch, R. 2009. Comparison of static, in-vessel composting of MSW with thermophilic anaerobic digestion and combinations of the two processes. Bioresource Technology 100: 3799-3807.
- Weiland, P. 2000. Anaerobic waste digestion in Germany - Status and recent developments. Biodegradation 11: 415-421.
- Weiland, P. 2010. Biogas production: current state and perspectives. Applied Microbiology and Biotechnology 85: 849-860.
- Yokoyama, S., and Matsumura, Y. 2008. A guide for biomass production and utilization. The Asian Biomass Handbook, The Japan Institute of Energy, Japan.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
ลักษณะประจำพันธุ์หญ้าที่ใช้ในงานวิจัย

ลักษณะประจำพันธุ์หญ้าที่ใช้ในงานวิจัย (กรมปศุสัตว์, 2553)

1. หญ้ารูซี (*Brachiaria ruziziensis*)

หญ้ารูซี (Ruzi) มีถิ่นกำเนิดในทวีปแอฟริกาแถบประเทศคองโก นำเข้าครั้งแรกจากประเทศออสเตรเลียเมื่อปี พ.ศ. 2511 โดยฟาร์มโคนมไทยเดนมาร์กนำไปปลูกที่อำเภอมวกเหล็กและสถานีอาหารสัตว์ปากช่องแต่ไม่ได้มีการขยายพันธุ์มากนัก ต่อมาในปี พ.ศ. 2523 ศูนย์ขยายพันธุ์สัตว์ของกองอำนวยการกลางรักษาความปลอดภัยแห่งชาติได้นำเข้ามาอีกครั้งจากประเทศไอวอรีโคสต์ ปรากฏว่าหญ้ารูซีสามารถผลิตเมล็ดพันธุ์ได้ดี จึงขยายพันธุ์ในพื้นที่แปลงใหญ่เพิ่มขึ้นหลายแห่ง การผลิตเมล็ดหญ้ารูซีในประเทศไทยได้เริ่มขึ้นตั้งแต่ปี พ.ศ. 2525 โดยระยะแรกจะผลิตในสถานีอาหารสัตว์ของกรมปศุสัตว์ต่อมาได้ขยายการผลิตไปสู่เกษตรกรซึ่งพื้นที่การผลิตส่วนใหญ่จะอยู่ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ภายใต้การแนะนำของเจ้าหน้าที่กรมปศุสัตว์และเกษตรกรสามารถผลิตเมล็ดหญ้า รูซีได้เฉลี่ยสูงถึง 70 กิโลกรัมต่อไร่ เมล็ดมีคุณภาพดี มีความงอกสูงกว่าร้อยละ 70



ภาพที่ ก-1 หญ้ารูซี (*Brachiaria ruziziensis*) (กรมปศุสัตว์, 2553)

ลักษณะทั่วไป

เป็นหญ้าที่มีอายุหลายปีชอบอากาศในเขตร้อนและที่ฝนตกมากกว่า 1,000 มิลลิเมตรต่อปี ต้องการดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ขึ้นได้ในที่ดอนแต่ก็สามารถขึ้นได้ในดินอุดมสมบูรณ์ต่ำ ทนแล้งทนต่อการเหยียบย่ำของสัตว์ ต้นกิ่งเลื้อยกิ่งตั้งไม่ทนน้ำท่วมขัง ผลผลิตน้ำหนักแห้ง 2.0 - 2.5 ตันต่อไร่ต่อปี โปรตีนร้อยละ 7 - 10 มีคุณค่าทางอาหารสัตว์สูง สัตว์ชอบกิน ขยายพันธุ์ได้ด้วยเมล็ดและลำ

ต้น ลักษณะเด่นของหญ้าวัชพืชที่สามารถผลิตเมล็ดได้มากและเมล็ดมีความงอกสูงทำให้สะดวกต่อการขยายพันธุ์ด้วยเมล็ด นิยมปลูกเป็นแปลงหญ้าปล่อยสัตว์แทะเล็มหรือตัดให้สัตว์กิน

ลักษณะประจำพันธุ์

กองอาหารสัตว์ดำเนินการคัดเลือกพันธุ์หญ้าวัชพืชที่ศูนย์วิจัยและพัฒนาอาหารสัตว์ นครราชสีมา ได้ลักษณะที่ดีตรงตามสายพันธุ์ ลักษณะของหญ้าวัชพืชที่ควรเก็บไว้ทำพันธุ์ดังนี้

1. ทรงต้นค่อนข้างตั้งและกอแน่น หน่อของต้นด้านหน้ากอเอนทำมุมกับพื้นประมาณ 45 องศา
2. ใบรูปหอก กว้างและยาว ปลายใบเรียวแหลม
3. สีใบ สีใบเขียวตองอ่อน เป็นลักษณะเด่น
4. ขอบใบ มีสีม่วงหยุกเป็นคลื่น
5. ผิวใบ ผิวหน้าใบและหลังใบมีขนละเอียดหนาแน่น ผิวใบสัมผัสด้วยมือจะนุ่ม

2. หญ้ากินนีสีม่วง (*Panicum maximum* TD 58)

หญ้ากินนีสีม่วง (Purple Guinea) หรือแทนซาเนีย (Tanzania) แหล่งกำเนิดอยู่ที่แถบฝั่งตะวันออกของทวีปแอฟริกา นายกีส์ โรแบร์ที่ปรึกษากองอำนาจการกลางรักษาความปลอดภัยแห่งชาติได้นำเข้ามาจากประเทศไอเวอรี่โคสต์ ในปี พ.ศ. 2518 โดยใช้ชื่อพันธุ์ว่า เค187ปี ต่อมาเปลี่ยนเป็นทีดี-58 หญ้าตระกูลกินนีที่ใช้ในประเทศไทยมีหลายสายพันธุ์ เช่น หญ้ากินนีธรรมดา หญ้าแฮมิลกินนี (Hamil) หญ้าบอมบาซา (Mombaza) เป็นต้น



ภาพที่ ก-2 หญ้ากินนีสีม่วง (*Panicum maximum* TD 58) (กรมปศุสัตว์, 2553)

ลักษณะทั่วไป

เป็นหญ้าที่มีอายุหลายปี ต้นเป็นกอตั้งตรง แตกกอดี ใบใหญ่ ใบดกอ่อนนุ่ม เติบโตได้ในสภาพร่มเงา เหมาะสำหรับปลูกในเขตชลประทาน ผลผลิตน้ำหนักร้าง 2.5 - 3.0 ตันต่อไร่ต่อปี โปรีตินร้อยละ 8 - 10 มีการเจริญเติบโตแตกเป็นแขนงคล้ายกอตะไคร้ มีใบขนาดใหญ่ อ่อนนุ่ม ส่วนของข้อปล้อง กลุ่มดอก (Spikelet) และเมล็ดมีสีม่วงอมเขียว ให้ผลผลิตสูงและสัตว์ชอบกิน ทนต่อความแห้งแล้งได้ดี สามารถปลูกเป็นแปลงหญ้าปล่อยสัตว์ลงแทะเล็มหรือตัดสดให้สัตว์กินทนต่อการเหยียบย่ำ หากถูกไฟไหม้ส่วนของเหง้าจะยังมีชีวิตอยู่และสามารถแตกหน่อขึ้นมาใหม่ได้ ตอบสนองต่อน้ำและปุ๋ยในโตรเจนได้ดี สามารถปลูกได้เกือบทุกสภาพพื้นที่ซึ่งเป็นที่ดอนน้ำไม่ท่วมขังทนต่อสภาพดินเค็มได้เล็กน้อยและเจริญเติบโตได้ในสภาพร่มเงาสามารถปลูกร่วมกับไม้ยืนต้น เช่น มะพร้าวและยางพาราที่มีแสงแดดส่องถึงพื้นดินมากกว่าร้อยละ 50

ลักษณะประจำพันธุ์

กองอาหารสัตว์ดำเนินการคัดเลือกพันธุ์หญ้างิณีสีม่วงที่ศูนย์วิจัยและพัฒนาอาหารสัตว์ขอนแก่น โดยศึกษาร่วมกับไจก้า (Japan International Cooperation Agency, JICA) ประเทศญี่ปุ่น จนได้ลักษณะที่ดีตรงตามสายพันธุ์ ลักษณะของหญ้างิณีสีม่วงที่ควรเก็บไว้ทำพันธุ์ดังนี้

1. ทรงพุ่ม เป็นแบบกอตั้งคล้ายกอตะไคร้
2. ลำต้น มีการแตกแขนงจากตาที่ข้อ เริ่มแตกแขนงเมื่อพืชมีอายุประมาณ 3 สัปดาห์ ลำต้นมีข้อ 3 - 15 ข้อ มีสีม่วงอมเขียว
3. ใบ มีขนาดใหญ่ กว้าง 3.5 เซนติเมตรยาวสูงสุด 100 เซนติเมตร ใบอ่อนนุ่ม ส่วนของปลายใบจะโค้งงอเล็กน้อย ขอบใบมีสีม่วง
4. ช่อดอก เป็นแบบรวงข้าว ยาวประมาณ 47 - 51 เซนติเมตรกว้าง 25 เซนติเมตรกลุ่มดอกมีสีม่วง
5. การออกดอก เป็นพืชที่ตอบสนองต่อวันสั้น จะออกดอกประมาณปลายเดือนกันยายน
6. ใบธง กว้างประมาณ 1.6 เซนติเมตรและยาวประมาณ 16.9 เซนติเมตร
7. ความสูง จากโคนต้นถึงปลายช่อดอกอยู่ระหว่าง 109 - 345 เซนติเมตร
8. จำนวนหน่อต่อกอ ประมาณ 41 - 59 หน่อต่อกอ
9. จำนวนช่อดอกต่อกอ ประมาณ 38 - 48 ช่อดอกต่อกอ
10. ผลผลิตเมล็ดพันธุ์ ประมาณ 53 - 136 กรัมต่อต้น

3. หญ้าอะตราตัม (*Paspalum atratum*)

หญ้าอะตราตัมมีชื่อสามัญว่า หญ้าอะตราตัม โดยมหาวิทยาลัยอุบลราชธานีตั้งชื่อว่าหญ้าอุบลพาสพาลัม (บีอาร์เอ - 009610)



ภาพที่ ก-3 หญ้าอะตราตัม (*Paspalum atratum*) (กรมปศุสัตว์, 2553)

ลักษณะทั่วไป

เป็นพืชอายุหลายปี ต้นตั้งเป็นกอ กอใหญ่ ใบกว้าง ขอบใบคม ผลผลิตน้ำหนักแห้ง 2.5 - 3.5 ตันต่อไร่ต่อปี โปรตีนร้อยละ 7 - 8 หญ้าอะตราตัมมีโครโมโซม 4 ชุด (Tetraploid) สามารถเจริญเติบโตก่อนข้างดีในดินที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำทนต่อสภาพดินที่เป็นดินกรดทนแล้ง และทนต่อน้ำท่วมขังในฤดูฝนสามารถให้ผลผลิตได้ดีในฤดูแล้งหากมีการให้น้ำและปุ๋ยอย่างเหมาะสม ในการปลูกเพื่อผลิตเมล็ดพันธุ์ไม่ควรตัดหญ้าหลังจากเดือนมิถุนายนเพราะจะทำให้ไม่ติดเมล็ดและควรปลูกด้วยต้นกล้าที่เพาะไว้มีอายุอย่างน้อย 1 เดือน

ลักษณะประจำพันธุ์

กองอาหารสัตว์ ดำเนินการคัดเลือกพันธุ์หญ้าอะตราตัมที่ศูนย์วิจัยและพัฒนาอาหารสัตว์สระแก้วจนได้ลักษณะที่ตรงตามสายพันธุ์ ลักษณะของหญ้าอะตราตัมที่ควรเก็บไว้ทำพันธุ์ดังนี้

1. ต้น การเจริญแบบแตกกอ ความสูงของทรงพุ่มประมาณ 110 - 145 เซนติเมตร ความกว้างของทรงพุ่มประมาณ 80 - 92 เซนติเมตร ความสูงของต้น (วัดจากโคนต้นชิดผิวดินถึงปลายช่อดอก) ประมาณ 192 - 198 เซนติเมตร

2. ใบ ขอบใบคม กาบใบล่างมีขนปกคลุม ความกว้างของใบประมาณ 2.1 - 2.7 เซนติเมตร ความยาวของใบประมาณ 66 - 83 เซนติเมตร ความกว้างของใบธงประมาณ 1.6 - 2.0 เซนติเมตร ความยาวของใบธงประมาณ 10 - 13.4 เซนติเมตร
3. จำนวนต้น (หน่อ) ต่อกอประมาณ 81 - 90 ต้น (หน่อ)
4. ดอก เป็นแบบช่อดอกย่อย (Raceme) จำนวนช่อดอกต่อกอประมาณ 18 - 39 ช่อดอก จำนวนดอกย่อยต่อช่อดอกประมาณ 100 - 113 ดอก
5. เมล็ด สีของเมล็ดเมื่อแก่เต็มที่เป็นสีน้ำตาลแดง ผิวเมล็ดเรียบเป็นมันใน 1 กิโลกรัม มีเมล็ดประมาณ 302,000 - 396,000 เมล็ด น้ำหนัก 1,000 เมล็ดประมาณ 2.52 - 3.31 กรัม เมล็ดพันธุ์มีความงอกประมาณร้อยละ 80 ผลผลิตเมล็ดพันธุ์ประมาณ 80 - 85 กิโลกรัมต่อไร่ระยะพักตัว (Dormancy period) ประมาณ 4 - 6 เดือน

4. หญ้าพลิแคทูลัม (*Paspalum plicatulum*)

หญ้าพลิแคทูลัมเป็นพืชพื้นเมืองแถบร้อนของทวีปอเมริกา นิยมใช้ปลูกทางภาคใต้ของประเทศไทย เป็นแปลงหญ้าปล่อยให้สัตว์แทะเล็ม ตัดทำหญ้าแห้งและหญ้าหมัก เป็นพืชอายุหลายปี สามารถขึ้นได้ในดินทั่วไปจนถึงดินเหนียวที่มีการระบายน้ำไม่ดี



ภาพที่ ก-4 หญ้าพลิแคทูลัม (*Paspalum plicatulum*) (กรมปศุสัตว์, 2553)

ลักษณะทั่วไป

เป็นหญ้าอายุหลายปี ต้นตั้งเป็นกอ เจริญเติบโตได้ในดินทรายที่มีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ ทนต่อสภาพแห้งแล้ง ทนน้ำท่วมขัง ผลผลิตน้ำหนักแห้ง 1.5 - 2.0 ตันต่อไร่ต่อปี โปรตีนร้อยละ 7 - 8

ลักษณะประจำพันธุ์

กองอาหารสัตว์ดำเนินการคัดเลือกพันธุ์หญ้าพริแกลทูล้มที่ศูนย์วิจัยและพัฒนาอาหารสัตว์
นราธิวาสจนได้ลักษณะที่ดีตรงตามสายพันธุ์ ลักษณะของหญ้าพริแกลทูล้มที่ควรเก็บไว้ทำพันธุ์ดังนี้

1. มีการเจริญเติบโตแบบกอดตั้ง ลำต้นแบน มีความสูงเฉลี่ย 110 เซนติเมตร
2. โคนใบมีขนเล็กน้อยจำนวนแขนงเฉลี่ย 38 แขนงต่อต้น
3. ช่อดอกเป็นแบบรวงข้าว (Panicle) ยาวประมาณ 18 เซนติเมตร
4. มีจำนวนช่อดอกเฉลี่ย 36 ช่อดอกต่อต้น ประกอบด้วยช่อดอกย่อย 9 - 18 ช่อ

5. หญ้าไร้ด (*Chloris gayana*)

หญ้าไร้ดมีถิ่นกำเนิดอยู่ในทวีปแอฟริกา เป็นพืชข้ามปี มีไหล เจริญเติบโตเป็นกระจุก มีลำ
ต้นตรงหรือโค้งขึ้นเรื่อยๆ ขยายพันธุ์โดยใช้เมล็ดหรือลำต้น สืบพันธุ์โดยใช้เพศส่วนใหญเป็นการ
ผสมข้าม มีบางส่วนที่ผสมตัวเอง (ร้อยละ 1 - 4) แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มตามจำนวนโครโมโซม คือ
กลุ่มดิพลอยด์ (Diploids, $(2n = 20)$) ได้แก่ สายพันธุ์ *Katambora* *Gunsons Finecut* และ *Pioneer*
และกลุ่มเตตระพลอยด์ (Tetraploids, $(4n = 40)$) ได้แก่ สายพันธุ์ *Samford Boma* และ *Callide*



ภาพที่ ก-5 หญ้าไร้ด (*Chloris gayana*) (กรมปศุสัตว์, 2553)

ลักษณะทั่วไป

เป็นหญ้าอายุหลายปี ทนแล้งได้ดีทนต่อสภาพน้ำขังได้เป็นครั้งคราว ทนต่อการแทะเล็มได้ดีทนต่อสภาพดินเค็มได้ดีกว่าหญ้าอื่น ๆ หลายชนิด ผลผลิตน้ำหนักแห้ง 2.0 - 2.5 ตันต่อไร่ต่อปี โปรตีนร้อยละ 8 - 10 นิยมปลูกหญ้าไร้ดเป็นแปลงพืชอาหารสัตว์แบบปล่อยสัตว์เข้าแทะเล็ม เก็บสำรองเป็นหญ้าแห้ง หญ้าหมัก สามารถเจริญเติบโตได้ในดินหลายชนิดตั้งแต่ดินเหนียวจนถึงดินร่วนปนทราย ทนต่อสภาพแห้งแล้งได้ดีตอบสนองได้ดีต่อการให้น้ำ ทนน้ำแช่ขังได้บ้าง และหากถูกไฟไหม้ส่วนของเหง้าจะยังมีชีวิตอยู่และสามารถแตกหน่อขึ้นมาใหม่ได้ หญ้า ไร้ดมีคุณค่าทางอาหารสูง และสัตว์ชอบกิน ปลูกขยายพันธุ์ด้วยเมล็ด

ลักษณะประจำสายพันธุ์

กองอาหารสัตว์ ดำเนินการคัดเลือกหญ้าไร้ด พันธุ์เคลล์ไคด์ที่ศูนย์วิจัยและพัฒนาอาหารสัตว์ลำปางจนได้ลักษณะที่ตรงตามสายพันธุ์ ลักษณะของหญ้าไร้ดที่ควรเก็บไว้ทำพันธุ์ดังนี้

1. ความสูงลำต้น ค่อนข้างสูงกว่าสายพันธุ์อื่น ความสูงเมื่อออกดอกอยู่ในช่วง 163 - 213 เซนติเมตร ลำต้นค่อนข้างตั้งตรง
2. ขนาดลำต้น ค่อนข้างใหญ่ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง กลางลำต้น เฉลี่ย 5.50 ± 1.02 มิลลิเมตร
3. ขนาดใบ ความยาวเฉลี่ย 56.3 ± 9.2 เซนติเมตร และกว้าง 1.28 ± 1.17 เซนติเมตร
4. ช่อดอก ค่อนข้างยาว เฉลี่ย 58.1 ± 13.4 เซนติเมตร
5. สีของดอก มีสีเขียวอมเหลือง ถึงเขียวอมม่วง
6. ลักษณะการเจริญเติบโต เป็นกระจุก มีพื้นที่ว่างระหว่างกอเล็กน้อย ไม่แผ่ปกคลุมพื้นที่ ทั้งหมด
7. การออกดอก จะออกดอกในช่วงวันสั้น

6. หญ้าเนเปียร์ยักษ์ (*Pennisetum purpureum* cv. KingGrass)

แหล่งดั้งเดิมอยู่ในทวีปแอฟริกาเขตร้อน นำเข้ามาจากมาเลเซียเมื่อ พ.ศ. 2472 หญ้าชนิดนี้เจริญเติบโตได้ดีในที่ดอน



ภาพที่ ก-6 หญ้าเนเปียร์ยักษ์ (*Pennisetum purpureum* cv. KingGrass) (กรมปศุสัตว์, 2553)

ลักษณะทั่วไป

เป็นหญ้าที่มีอายุหลายปี สูง 3 - 4 เมตร ทุกสายพันธุ์เจริญเติบโตได้ดีในดินที่มีความอุดมสมบูรณ์สูงเหมาะสำหรับปลูกในเขตชลประทาน ผลผลิตน้ำหนักแห้ง 3.0 - 4.0 ตันต่อไร่ต่อปี โปรตีน ร้อยละ 8 - 10 ปลูกขยายพันธุ์ด้วยท่อน ช่อดอกสีน้ำตาลเหลืองเป็นรูปทรงกระบอกคล้ายหางกระรอก โคนกระบือชอบกิน ใช้ปลูกทำทุ่งสำหรับตัดเลี้ยงสัตว์ ไม่ทนต่อการเหยียบย่ำ ไม่ติดเมล็ด ดังนั้นการปลูกจึงใช้วิธีตัดลำต้นชำ พันธุ์เจริญเติบโตได้ดีในพื้นที่ที่มีการระบายน้ำค่อนข้างดี ชอบดินที่มีความอุดมสมบูรณ์สูงตอบสนองต่อการให้น้ำได้ดี เหมาะสำหรับการปลูกเพื่อตัดสดเลี้ยงสัตว์

7. หญ้าแพงโกล่า (*Digitaria eriantha*)

หญ้าแพงโกล่า หรือ แพนโกล่า (Pangola) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Digitaria eriantha* (ชื่อเดิมคือ *D. decumbens*) ถิ่นกำเนิดอยู่ในแถบแคว้นทรานสวาลตะวันออกทวีปแอฟริกา ชื่อดั้งเดิมที่รู้จักกันในแอฟริกาชื่อ หญ้าพงโกล่า (Pongola) นำเข้ามาปลูกในประเทศไทยครั้งแรก เมื่อปี พ.ศ. 2496 จากประเทศฟิลิปปินส์โดยกองอาหารสัตว์กรมปศุสัตว์ และในปี พ.ศ. 2526 กรมปศุสัตว์ นายเสรี เข

มะศิริ ได้นำเข้าหญ้าแพง โกล่าอีกหลายสายพันธุ์จากประเทศฟิลิปปินส์และไต้หวันแล้วปลูก ขยายพันธุ์ที่สถานีพืชอาหารสัตว์ปากช่องและแจกจ่ายไปยังแหล่งต่าง ๆ ทั่วประเทศ จนกระทั่งในปี พ.ศ. 2535 นายยู ที ชาวไต้หวันที่ทำงานอยู่กับบริษัทเจริญโภคภัณฑ์เมล็ดพันธุ์ได้นำหญ้าแพง โกล่า สายพันธุ์ 254เอ จากไต้หวันมาปลูกบริเวณจังหวัดกำแพงเพชร เพื่อผลิตหญ้าแห้งจำหน่ายทั้งในและ ต่างประเทศ ซึ่งต่อมาในปี พ.ศ. 2542 กรมปศุสัตว์ได้นำหญ้าแพง โกล่าสายพันธุ์นี้ไปเผยแพร่สู่ เกษตรกรและมีการใช้กันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน



ภาพที่ ก-7 หญ้าแพง โกล่า (*Digitaria eriantha*) (กรมปศุสัตว์, 2553)

ลักษณะทั่วไป

หญ้าแพง โกล่า เป็นหญ้าประเภทเลื้อย (Stoloniferous) อายุหลายปี มีลำต้นทอดนอนไป ตามพื้นผิวดิน มีรากเจริญออกมาตามข้อที่สัมผัสผิวดินและแตกหน่อเจริญเติบโตเป็นต้นใหม่ ต้นอ่อนจะตั้งตรง แต่เมื่ออายุมากขึ้นลำต้นจะทอดนอนไปตามผิวดิน ปกคลุมพื้นที่ได้หนาแน่น ลำต้นมี ขนาดเล็กสูง 40 - 60 เซนติเมตร ไม่มีขน ใบดก อ่อนนุ่ม มีลักษณะเล็กเรียวยาว ไม่สามารถผลิต เมล็ดพันธุ์ได้จึงขยายพันธุ์ด้วยท่อนพันธุ์ หญ้าแพง โกล่าเจริญเติบโตได้ดีในพื้นที่ชุ่มชื้นมีฝนตก เฉลี่ยมากกว่า 1,000 มิลลิเมตรต่อปี ขึ้นได้ในดินหลายชนิดตั้งแต่ดินทรายจนถึงดินเหนียวทนแล้งได้ ดีพอสมควรแต่สามารถเจริญเติบโตได้ในพื้นที่ชื้นและชุ่มน้ำทนน้ำท่วมขัง

หญ้าแพง โกล่าเป็นหญ้าให้ผลผลิตมาก ผลผลิตน้ำหนักแห้ง 5.0 - 7.0 ตันต่อไร่ต่อปี โปรตีน ร้อยละ 7 - 11 จึงควรปลูกในพื้นที่ที่สามารถให้น้ำและระบายน้ำได้สะดวก เหมาะสำหรับปลูกใน ดินที่มีความอุดมสมบูรณ์และสามารถระบายน้ำได้สะดวกตลอดทั้งปีจึงสามารถปลูกหญ้าแพง โกล่า ได้ทั้งในพื้นที่ลุ่ม และพื้นที่มีน้ำน้อยควรปลูกแบบที่ดอน

ภาคผนวก ข
ผลการทดลอง

ข-1 ผลการศึกษาองค์ประกอบของหญ้า

ตารางที่ ข-1.1 องค์ประกอบพื้นฐานของหญ้า

ชนิดหญ้า	TS*		MC*		VS*		Ash*		Total COD**		pH
	ค่าเฉลี่ย	C.V.	ค่าเฉลี่ย	C.V.	ค่าเฉลี่ย	C.V.	ค่าเฉลี่ย	C.V.	ค่าเฉลี่ย	C.V.	ค่าเฉลี่ย
หญ้ารูซี่	27.14	5.6	72.86	2.1	23.92	1.1	3.22	8.0	107,672	-	6.7
หญ่ากินนี้สีม่วง	29.35	2.0	70.65	0.8	25.60	0.3	3.74	1.8	52,455	18.2	8.2
หญ่่าอะ ตราคัม	23.72	1.0	76.28	0.3	20.02	3.6	3.70	19.7	41,412	20.0	6.9
หญ่่าพลิแกทูลัม	27.40	1.0	72.60	0.4	24.13	0.7	3.28	4.9	46,934	10.2	6.5
หญ่่าไร้ด	31.59	2.1	68.41	0.9	26.79	4.3	4.80	23.8	44,173	21.7	5.9
หญ่่าเนเป็รชั๊ก	28.07	2.6	71.93	1.0	23.72	2.9	4.36	15.7	59,358	10.7	6.4
หญ่่าแพงโกล่า	29.37	0.6	70.63	0.2	25.98	4.4	3.39	33.7	95,248	4.3	5.7
มูลวัวแห้ง	91.00	0.4	9.00	0.4	37.80	1.4	53.2	1.0	2,110	-	7.3
มูลวัวสด	16.93	1.2	83.07	0.3	14.41	0.8	2.51	4.8	140,950	7.9	8.4

หมายเหตุ C.V. (สัมประสิทธิ์การกระจาย, Coefficient of Variation) หน่วยร้อยละ

* หน่วย ร้อยละโดยน้ำหนัก

** หน่วย มิลลิกรัมต่อลิตร

ตารางที่ ข-1.2 องค์ประกอบทางเคมีของหญ้า

ชนิดหญ้า	เซลลูโลส*		เฮมิเซลลูโลส*		ลิกนิน*		(C+H)/L	BVS*		RVS*	
	ค่าเฉลี่ย	C.V.	ค่าเฉลี่ย	C.V.	ค่าเฉลี่ย	C.V.	ค่าเฉลี่ย	ค่าเฉลี่ย	C.V.	ค่าเฉลี่ย	C.V.
หญ่่ารูซี่	68.46	0.2	15.89	0.9	15.64	1.0	5.39	39.20	1.2	60.80	0.7
หญ่่ากินนี้สีม่วง	72.95	0.2	14.99	1.4	12.05	0.4	7.30	49.25	0.3	50.75	0.3
หญ่่าอะตราคัม	73.68	0.2	13.07	0.4	13.25	0.8	6.54	45.89	0.7	54.11	0.6
หญ่่าพลิแกทูลัม	71.03	0.2	12.82	1.9	16.15	0.9	5.19	37.77	1.1	62.23	0.6
หญ่่าไร้ด	73.62	0.2	13.79	1.4	12.59	0.4	6.94	47.74	0.3	52.26	0.3
หญ่่าเนเป็รชั๊ก	72.40	0.2	13.91	1.6	13.69	0.4	6.30	44.66	0.3	55.34	0.3
หญ่่าแพงโกล่า	76.75	0.3	11.72	3.5	11.53	1.4	7.67	50.72	0.9	49.28	0.9

หมายเหตุ C.V. (สัมประสิทธิ์การกระจาย, Coefficient of Variation) หน่วยร้อยละ

* หน่วย ร้อยละโดยน้ำหนัก

** หน่วย มิลลิกรัมต่อลิตร

ข-2 ผลการทดลองที่ 1 ศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนด้วยวิธีบีเอ็มพี (Biochemical Methane Potential, BMP) ที่เกิดจากการย่อยสลายหญ้าชนิดต่างๆ

ตารางที่ ข-2.1 ของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยของการทดลองที่ 1 เมื่อเริ่มต้นและสิ้นสุดการทดลอง

การทดลอง	ของแข็งทั้งหมด (มก./ล.)				ของแข็งระเหย (มก./ล.)			
	ก่อน		หลัง		ก่อน		หลัง	
	ค่าเฉลี่ย	C.V.	ค่าเฉลี่ย	C.V.	ค่าเฉลี่ย	C.V.	ค่าเฉลี่ย	C.V.
CD	93,870	18.49	37,507	11.11	23,695	3.13	31,347	13.50
RG	100,960	5.86	42,670	0.86	31,450	5.71	34,285	13.01
KG	87,860	26.88	45,003	6.46	29,640	27.77	30,010	4.85
AG	69,460	14.09	32,067	7.76	21,650	9.67	24,230	6.63
PLG	45,720	6.56	36,557	17.05	16,635	7.52	23,833	10.54
ROG	76,200	14.66	48,343	3.72	25,650	13.29	31,960	6.45
NG	44,380	17.21	36,997	10.80	14,910	22.95	27,133	11.70
PAG	51,000	31.56	41,047	2.95	18,555	27.40	33,457	7.89

หมายเหตุ C.V. (สัมประสิทธิ์การกระจาย, Coefficient of Variation) หน่วยร้อยละ

ตารางที่ ข-2.2 แอมโมเนียไนโตรเจนและซีโอดีรวมของการทดลองที่ 1 เมื่อเริ่มต้นและสิ้นสุดการทดลอง

การทดลอง	แอมโมเนียไนโตรเจน (มก./ล.)				ซีโอดีรวม (มก./ล.)			
	ก่อน		หลัง		ก่อน		หลัง	
	ค่าเฉลี่ย	C.V.	ค่าเฉลี่ย	C.V.	ค่าเฉลี่ย	C.V.	ค่าเฉลี่ย	C.V.
CD	11	-	30	4.99	2,096	12.86	3,494	-
RG	39	-	39	7.71	4,573	11.79	1,671	-
KG	34	-	29	1.70	6,097	8.84	2,279	-
AG	11	-	15	6.73	4,573	11.79	1,367	31.43
PLG	14	-	8	25.71	4,573	11.79	1,367	31.43
ROG	22	-	15	6.73	4,192	0.00	2,583	16.64
NG	11	-	31	11.12	3,048	17.68	2,735	7.86
PAG	15	-	28	12.53	4,001	20.20	3,494	24.60

หมายเหตุ C.V. (สัมประสิทธิ์การกระจาย, Coefficient of Variation) หน่วยร้อยละ

ตารางที่ ข-2.3 ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันของการทดลองที่ 1 ที่สภาวะมาตรฐาน

วันที่	อุณหภูมิ (°C)	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร/วัน)								
		<i>CD</i>	<i>RG</i>	<i>KG</i>	<i>AG</i>	<i>PLG</i>	<i>ROG</i>	<i>NG</i>	<i>PAG</i>	
9/5/2554	1	29.50	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10/5/2554	2	30.00	5.95	6.10	5.92	6.10	6.37	6.88	5.68	6.88
11/5/2554	3	32.20	1.79	2.36	2.80	2.21	2.59	2.65	1.73	4.20
12/5/2554	4	31.80	0.84	2.75	3.31	2.57	2.60	3.49	2.27	3.73
13/5/2554	5	30.90	0.21	1.89	1.95	1.02	1.47	1.80	1.35	2.87
14/5/2554	6	29.50	0.87	2.86	4.93	2.89	2.17	3.34	1.50	4.69
15/5/2554	7	29.80	1.02	5.17	7.96	4.27	3.07	3.49	3.79	6.40
16/5/2554	8	31.00	1.41	7.18	10.69	5.60	5.18	6.20	5.75	8.05
17/5/2554	9	30.50	1.08	6.33	11.15	5.67	4.86	5.34	5.52	7.74
18/5/2554	10	29.80	3.28	16.74	30.32	16.56	14.18	15.99	14.25	21.58
19/5/2554	11	33.00	2.59	14.48	20.67	14.57	11.69	13.68	12.37	18.97
20/5/2554	12	31.20	3.80	22.32	32.31	23.45	19.50	21.96	17.74	27.49
21/5/2554	13	32.00	6.21	28.91	31.60	28.58	23.63	27.63	24.14	29.21
22/5/2554	14	33.00	5.56	21.44	21.32	19.21	16.62	20.52	18.50	20.04
23/5/2554	15	32.40	5.51	17.52	20.20	16.15	14.72	18.74	15.91	17.82
24/5/2554	16	32.20	4.83	13.95	18.37	14.70	12.28	16.28	11.78	16.37
25/5/2554	17	31.80	4.33	12.30	15.50	13.32	12.00	15.67	10.87	13.49
26/5/2554	18	30.50	4.29	10.10	13.76	10.70	10.40	13.82	9.71	13.79
27/5/2554	19	30.20	4.05	7.80	13.54	10.95	11.50	11.80	8.10	10.32
28/5/2554	20	30.10	2.94	8.14	13.18	11.32	13.15	10.84	9.85	10.93
29/5/2554	21	31.20	4.28	13.52	20.37	17.62	18.19	18.79	14.36	16.96
30/5/2554	22	31.00	2.25	7.42	10.42	9.19	10.21	9.61	7.96	8.83
31/5/2554	23	30.00	3.66	11.56	17.90	14.60	15.50	14.99	12.88	14.27
1/6/2554	24	32.00	4.77	13.87	20.65	17.63	17.01	17.28	14.29	17.19
2/6/2554	25	32.00	3.28	11.37	15.96	14.50	13.52	16.23	11.79	15.54
3/6/2554	26	31.00	3.29	8.53	10.72	10.96	11.20	13.80	8.47	12.36

ตารางที่ ข-2.3 ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันของการทดลองที่ 1 ที่สภาวะมาตรฐาน (ต่อ)

วันที่	อุณหภูมิ (°C)	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร/วัน)								
		<i>CD</i>	<i>RG</i>	<i>KG</i>	<i>AG</i>	<i>PLG</i>	<i>ROG</i>	<i>NG</i>	<i>PAG</i>	
4/6/2554	27	30.60	3.45	7.22	8.84	10.34	9.68	12.53	6.41	10.40
5/6/2554	28	30.00	2.79	6.04	7.54	7.87	7.96	10.69	5.95	7.57
6/6/2554	29	30.20	1.26	4.08	5.64	4.62	6.30	8.97	4.14	6.27
7/6/2554	30	30.00	2.04	5.59	9.49	7.48	7.06	9.73	6.34	8.26
8/6/2554	31	30.10	2.13	5.97	9.94	7.09	7.72	8.98	5.94	7.90
9/6/2554	32	30.20	2.04	5.52	9.93	6.87	7.95	8.28	5.37	6.69
10/6/2554	33	31.50	1.88	5.80	9.83	6.66	8.01	8.13	5.32	7.11
11/6/2554	34	31.00	2.90	6.88	11.11	6.83	8.59	8.83	6.29	7.24
12/6/2554	35	30.20	1.23	4.26	6.42	4.32	5.19	5.91	3.84	4.74
13/6/2554	36	30.20	1.08	4.62	7.38	4.59	5.94	6.69	4.65	4.95
14/6/2554	37	34.00	1.93	5.87	8.09	6.34	7.53	7.50	5.72	6.82
15/6/2554	38	32.80	2.02	5.00	7.05	5.36	5.51	7.50	4.55	5.24
16/6/2554	39	30.00	2.37	4.17	8.53	5.08	4.93	6.79	4.26	5.02
17/6/2554	40	30.80	1.86	6.68	8.03	5.51	6.98	7.31	5.21	4.97
18/6/2554	41	30.40	1.35	3.54	5.01	4.11	5.10	5.16	3.78	4.08
19/6/2554	42	30.50	1.41	3.54	5.10	4.29	5.10	5.37	3.78	4.11
20/6/2554	43	30.40	2.01	5.97	7.41	6.36	7.29	8.67	5.79	6.33
21/6/2554	44	30.00	1.98	4.63	6.88	5.83	6.55	7.36	4.96	5.86
22/6/2554	45	30.20	1.50	3.99	5.79	4.71	6.27	6.21	4.29	5.04
23/6/2554	46	30.80	1.53	4.25	6.29	4.82	6.59	7.22	5.12	5.60
24/6/2554	47	31.00	1.29	3.17	4.79	4.73	5.03	5.12	3.53	4.43
25/6/2554	48	30.80	1.83	3.83	5.93	4.88	5.57	6.77	3.65	5.81
26/6/2554	49	31.50	1.34	3.68	5.80	5.11	6.13	6.81	5.47	5.92
27/6/2554	50	31.20	1.14	3.23	4.46	3.95	5.00	5.62	4.04	5.15
28/6/2554	51	31.50	1.26	3.41	4.81	3.86	4.51	5.71	4.00	4.99

ตารางที่ ข-2.3 ปริมาณก๊าซชีวภาพรายวันของการทดลองที่ 1 ที่สภาวะมาตรฐาน (ต่อ)

วันที่	อุณหภูมิ (°C)	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร/วัน)								
		<i>CD</i>	<i>RG</i>	<i>KG</i>	<i>AG</i>	<i>PLG</i>	<i>ROG</i>	<i>NG</i>	<i>PAG</i>	
29/6/2554	52	31.60	1.58	3.11	4.15	3.88	5.02	6.12	3.67	5.29
30/6/2554	53	30.80	1.35	3.59	5.69	4.34	5.90	6.68	4.31	5.93
1/7/2554	54	28.50	0.63	2.05	3.23	2.63	3.89	5.25	2.99	4.23
2/7/2554	55	29.40	0.78	1.78	2.47	2.53	2.92	4.03	2.26	3.64
3/7/2554	56	29.50	0.99	2.38	3.64	2.83	4.06	4.75	3.04	4.45
4/7/2554	57	32.00	0.72	1.79	2.77	2.33	3.10	3.97	2.45	3.64
5/7/2554	58	32.00	1.85	3.61	4.77	4.18	4.92	5.76	3.58	5.34
6/7/2554	59	32.40	1.22	3.13	4.74	3.87	4.86	5.60	3.67	4.80
7/7/2554	60	30.90	0.54	2.25	3.38	2.84	3.89	5.00	3.14	4.07
8/7/2554	61	31.80	1.76	3.25	5.61	4.06	5.31	6.30	4.30	5.61
9/7/2554	62	32.00	1.46	3.25	4.71	3.64	5.01	6.18	3.85	5.34
10/7/2554	63	32.40	1.70	2.98	4.92	3.90	5.07	6.56	4.02	5.54

ตารางที่ ข-2.4 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของการทดลองที่ 1 ที่สภาวะมาตรฐาน

วันที่	อุณหภูมิ (°C)	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)								
		<i>CD</i>	<i>RG</i>	<i>KG</i>	<i>AG</i>	<i>PLG</i>	<i>ROG</i>	<i>NG</i>	<i>PAG</i>	
9/5/2554	1	29.50	0	0	0	0	0	0	0	0
10/5/2554	2	30.00	6	6	6	6	6	7	6	7
11/5/2554	3	32.20	8	8	9	8	9	10	7	11
12/5/2554	4	31.80	9	11	12	11	12	13	10	15
13/5/2554	5	30.90	9	13	14	12	13	15	11	18
14/5/2554	6	29.50	10	16	19	15	15	18	13	22
15/5/2554	7	29.80	11	21	27	19	18	22	16	29
16/5/2554	8	31.00	12	28	38	25	23	28	22	37
17/5/2554	9	30.50	13	35	49	30	28	33	28	45
18/5/2554	10	29.80	16	51	79	47	42	49	42	66
19/5/2554	11	33.00	19	66	100	61	54	63	54	85
20/5/2554	12	31.20	23	88	132	85	74	85	72	113
21/5/2554	13	32.00	29	117	164	113	97	112	96	142
22/5/2554	14	33.00	35	139	185	133	114	133	115	162
23/5/2554	15	32.40	40	156	205	149	129	152	130	180
24/5/2554	16	32.20	45	170	224	164	141	168	142	196
25/5/2554	17	31.80	49	182	239	177	153	184	153	210
26/5/2554	18	30.50	54	192	253	188	163	197	163	223
27/5/2554	19	30.20	58	200	266	199	175	209	171	234
28/5/2554	20	30.10	61	208	279	210	188	220	181	245
29/5/2554	21	31.20	65	222	300	227	206	239	195	262
30/5/2554	22	31.00	67	229	310	237	216	249	203	270
31/5/2554	23	30.00	71	241	328	251	232	263	216	285
1/6/2554	24	32.00	76	255	349	269	249	281	230	302
2/6/2554	25	32.00	79	266	365	283	262	297	242	317
3/6/2554	26	31.00	82	275	375	294	274	311	251	330

ตารางที่ ข-2.4 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของการทดลองที่ 1 ที่สภาวะมาตรฐาน (ต่อ)

วันที่	อุณหภูมิ (°C)	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)								
		<i>CD</i>	<i>RG</i>	<i>KG</i>	<i>AG</i>	<i>PLG</i>	<i>ROG</i>	<i>NG</i>	<i>PAG</i>	
4/6/2554	27	30.60	86	282	384	305	283	323	257	340
5/6/2554	28	30.00	88	288	392	313	291	334	263	348
6/6/2554	29	30.20	90	292	398	317	298	343	267	354
7/6/2554	30	30.00	92	298	407	325	305	353	273	362
8/6/2554	31	30.10	94	304	417	332	312	362	279	370
9/6/2554	32	30.20	96	309	427	339	320	370	285	377
10/6/2554	33	31.50	98	315	437	345	328	378	290	384
11/6/2554	34	31.00	101	322	448	352	337	387	296	391
12/6/2554	35	30.20	102	326	454	356	342	393	300	396
13/6/2554	36	30.20	103	331	462	361	348	400	305	401
14/6/2554	37	34.00	105	336	470	367	356	407	311	408
15/6/2554	38	32.80	107	341	477	373	361	415	315	413
16/6/2554	39	30.00	109	346	485	378	366	421	319	418
17/6/2554	40	30.80	111	352	493	383	373	429	325	423
18/6/2554	41	30.40	112	356	498	387	378	434	328	427
19/6/2554	42	30.50	114	359	503	392	383	439	332	431
20/6/2554	43	30.40	116	365	511	398	390	448	338	437
21/6/2554	44	30.00	118	370	518	404	397	455	343	443
22/6/2554	45	30.20	119	374	524	409	403	461	347	448
23/6/2554	46	30.80	121	378	530	413	410	469	352	454
24/6/2554	47	31.00	122	381	535	418	415	474	356	458
25/6/2554	48	30.80	124	385	541	423	420	481	359	464
26/6/2554	49	31.50	125	389	546	428	427	487	365	470
27/6/2554	50	31.20	126	392	551	432	432	493	369	475
28/6/2554	51	31.50	128	396	556	436	436	499	373	480

ตารางที่ ข-2.4 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของการทดลองที่ 1 ที่สภาวะมาตรฐาน (ต่อ)

วันที่	อุณหภูมิ (°C)	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)								
		<i>CD</i>	<i>RG</i>	<i>KG</i>	<i>AG</i>	<i>PLG</i>	<i>ROG</i>	<i>NG</i>	<i>PAG</i>	
29/6/2554	52	31.60	129	399	560	440	441	505	377	486
30/6/2554	53	30.80	131	402	565	444	447	511	381	491
1/7/2554	54	28.50	131	404	569	447	451	517	384	496
2/7/2554	55	29.40	132	406	571	449	454	521	386	499
3/7/2554	56	29.50	133	408	575	452	458	525	389	504
4/7/2554	57	32.00	134	410	578	454	461	529	392	507
5/7/2554	58	32.00	136	414	582	459	466	535	395	513
6/7/2554	59	32.40	137	417	587	463	471	541	399	518
7/7/2554	60	30.90	137	419	590	465	475	546	402	522
8/7/2554	61	31.80	139	423	596	469	480	552	406	527
9/7/2554	62	32.00	141	426	601	473	485	558	410	533
10/7/2554	63	32.40	142	429	606	477	490	565	414	538

ตารางที่ ข-2.5 ร้อยละก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของการทดลองที่ 1

วันที่	ก๊าซมีเทน (ร้อยละ)								
	<i>CD</i>	<i>RG</i>	<i>KG</i>	<i>AG</i>	<i>PLG</i>	<i>ROG</i>	<i>NG</i>	<i>PAG</i>	
16/5/2554	8	23.74	34.87	35.78	32.48	35.89	34.28	36.45	34.15
22/5/2554	14	47.11	60.59	63.54	61.24	62.04	60.46	62.05	61.79
29/5/2554	21	21.58	46.75	51.46	52.78	49.66	52.25	50.87	55.44
6/6/2554	29	34.04	55.13	54.59	53.29	52.14	48.36	51.44	47.36
13/6/2554	36	36.25	54.71	58.31	54.17	56.13	56.27	53.19	55.03
19/6/2554	42	41.33	52.10	52.07	53.65	48.91	50.86	52.00	49.00
27/6/2554	50	38.07	49.63	50.24	48.20	50.26	47.10	46.70	44.05
4/7/2554	57	36.52	47.80	48.09	44.71	49.55	42.63	46.80	47.38
10/7/2554	63	41.78	52.11	53.98	47.96	50.06	49.01	51.05	50.64
วันที่	ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ร้อยละ)								
	<i>CD</i>	<i>RG</i>	<i>KG</i>	<i>AG</i>	<i>PLG</i>	<i>ROG</i>	<i>NG</i>	<i>PAG</i>	
16/5/2554	8	42.76	45.83	39.81	47.15	38.54	42.14	40.26	41.55
22/5/2554	14	32.16	21.77	22.45	19.85	17.32	20.63	20.48	16.35
29/5/2554	21	36.98	22.61	23.19	24.78	21.65	23.84	25.82	26.07
6/6/2554	29	42.39	25.55	24.76	26.29	26.78	24.31	25.99	23.61
13/6/2554	36	37.79	26.64	28.63	24.11	24.79	26.18	24.78	28.53
19/6/2554	42	35.22	20.18	27.84	23.79	24.62	27.34	25.11	29.84
27/6/2554	50	31.38	25.88	19.86	22.44	26.79	26.81	24.36	21.56
4/7/2554	57	37.94	26.64	28.59	19.25	28.04	26.57	24.03	27.19
10/7/2554	63	40.08	25.47	28.01	25.67	23.64	25.05	24.64	28.85

ตารางที่ ข-2.6 อัตราการผลิตก๊าซมีเทนของการทดลองที่ 1 และสารอินทรีย์

การทดลองชุด	อัตราการผลิตก๊าซมีเทน (ลบ.ม./กก. ของแข็งระเหย)	สารอินทรีย์	อัตราการผลิตก๊าซมีเทน (ลบ.ม./กก. ของแข็งระเหย)
<i>CD</i>	0.088	มูลวัว	0.088
<i>RG</i>	0.203	หญ้ารูชี	0.115
<i>KG</i>	0.259	หญ้ากินนีสีม่วง	0.170
<i>AG</i>	0.216	หญ้าอะตราดัม	0.127
<i>PLG</i>	0.219	หญ้าพลิแคทูลัม	0.131
<i>ROG</i>	0.233	หญ้าไร้ด	0.144
<i>NG</i>	0.199	หญ้าเนเปียร์ยักษ์	0.110
<i>PAG</i>	0.229	หญ้าแพง โกล่า	0.140

ตารางที่ ข-2.7 ความเป็นกรดต่างของการทดลองที่ 1

วันที่		ความเป็นกรดต่าง							
		<i>CD</i>	<i>RG</i>	<i>KG</i>	<i>AG</i>	<i>PLG</i>	<i>ROG</i>	<i>NG</i>	<i>PAG</i>
9/5/2554	1	7.0	7.1	7.0	6.8	6.8	6.9	7.2	6.8
12/5/2554	4	8.6	8.5	8.7	8.7	8.7	8.5	8.5	8.3
15/5/2554	7	8.2	7.7	7.8	8.0	8.0	8.3	7.9	7.5
19/5/2554	11	8.5	8.1	8.4	8.1	8.4	8.3	8.4	8.1
22/5/2554	14	8.5	8.4	8.4	8.5	8.7	8.9	8.4	8.6
27/5/2554	19	7.6	7.2	7.3	7.3	8.1	7.3	7.3	7.3
29/5/2554	21	7.3	7.2	7.2	7.2	7.2	7.2	7.3	7.2
2/6/2554	25	7.8	7.7	7.7	7.2	7.9	7.7	7.8	7.8
5/6/2554	28	7.6	7.5	7.6	7.4	7.5	7.4	7.6	7.7
9/6/2554	32	7.3	7.2	7.2	7.2	7.1	7.1	7.2	7.3
12/6/2554	35	7.4	7.1	7.2	7.7	7.3	7.1	7.2	7.1
16/6/2554	39	7.4	7.3	7.2	7.1	7.1	7.2	7.2	7.2
19/6/2554	42	7.3	7.2	7.2	7.1	7.1	7.1	7.1	7.1
23/6/2554	46	7.3	7.2	7.1	7.0	7.0	7.1	7.1	7.1
26/6/2554	49	7.2	7.0	7.1	7.1	7.0	7.0	7.1	7.1
30/6/2554	53	7.3	7.2	7.1	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0
3/7/2554	56	7.2	7.0	7.0	6.9	7.0	6.9	7.0	6.9
7/7/2554	60	7.3	7.2	7.2	7.1	7.2	7.0	7.1	7.0
10/7/2554	63	7.2	7.1	7.1	7.0	7.0	6.9	7.0	7.0

ตารางที่ ข-2.8 กรดอินทรีย์ระเหยของการทดลองที่ 1

วันที่	กรดอินทรีย์ระเหย (มก./ล. กรดแอสติก)								
	CD		RG		KG		AG		
	ค่าเฉลี่ย	C.V.	ค่าเฉลี่ย	C.V.	ค่าเฉลี่ย	C.V.	ค่าเฉลี่ย	C.V.	
9/5/2554	1	410	-	677	4.29	779	7.44	656	-
12/5/2554	4	869	3.29	1,779	6.43	2,203	6.49	2,082	1.37
15/5/2554	7	888	6.73	2,029	5.89	3,233	13.86	2,684	1.11
19/5/2554	11	895	6.73	2,793	1.08	2,580	3.51	2,537	5.94
22/5/2554	14	755	4.04	1,510	4.04	1,316	2.32	1,165	-
26/5/2554	18	1,378	4.29	1,692	12.22	1,733	1.70	1,357	10.88
27/5/2554	19	1,363	6.53	2,423	34.14	2,485	29.71	2,276	22.06
29/5/2554	21	1,961	7.60	1,750	22.15	2,868	16.64	1,940	27.67
2/6/2554	25	929	9.43	1,548	5.66	1,197	-	2,352	2.48
5/6/2554	28	467	6.74	734	4.29	1,245	20.20	1,556	-
9/6/2554	32	522	10.88	1,125	-	764	-	543	15.71
12/6/2554	35	516	10.88	1,250	6.73	615	4.56	744	9.43
16/6/2554	39	388	7.44	552	5.24	572	-	490	-
19/6/2554	42	428	6.73	509	5.66	469	6.15	632	13.69
23/6/2554	46	579	4.88	599	-	499	5.66	559	-
26/6/2554	49	430	8.32	443	4.04	544	3.29	468	3.82
30/6/2554	53	231	3.82	431	2.05	531	4.99	375	-
3/7/2554	56	370	7.86	596	14.63	473	-	411	7.07
7/7/2554	60	340	8.84	457	3.29	510	-	436	3.45
10/7/2554	63	407	-	618	1.79	587	9.43	767	-

หมายเหตุ C.V. (สัมประสิทธิ์การกระจาย, Coefficient of Variation) หน่วยร้อยละ

ตารางที่ ข-2.8 กรดอินทรีย์ระเหยของการทดลองที่ 1 (ต่อ)

วันที่	กรดอินทรีย์ระเหย (มก./ล. กรดแอซิดิก)								
	PLG		ROG		NG		PAG		C.V.
	ค่าเฉลี่ย	C.V.	ค่าเฉลี่ย	C.V.	ค่าเฉลี่ย	C.V.	ค่าเฉลี่ย	C.V.	
9/5/2554	1	677	4.29	656	17.68	861	6.73	656	-
12/5/2554	4	2,123	1.35	1,840	10.88	1,880	1.52	1,860	-
15/5/2554	7	2,113	2.83	2,134	1.40	2,134	4.20	3,254	1.84
19/5/2554	11	2,473	-	2,814	6.43	2,516	-	3,454	3.49
22/5/2554	14	712	12.86	1,489	22.55	1,316	2.32	992	6.15
26/5/2554	18	1,420	-	1,880	3.14	1,441	10.25	1,504	7.86
27/5/2554	19	2,548	6.96	2,882	6.15	1,420	-	2,005	-
29/5/2554	21	2,320	10.29	2,531	4.71	2,341	1.27	1,582	1.89
2/6/2554	25	1,940	-	1,458	25.30	1,811	3.63	1,347	4.88
5/6/2554	28	1,089	2.89	911	3.45	822	11.47	1,223	12.86
9/6/2554	32	1,608	3.54	502	5.66	563	10.10	683	8.32
12/6/2554	35	1,190	-	1,369	2.05	694	20.20	774	3.63
16/6/2554	39	531	10.88	531	10.88	490	11.79	674	4.29
19/6/2554	42	489	-	591	14.63	469	6.15	509	5.66
23/6/2554	46	479	-	539	5.24	499	5.66	539	5.24
26/6/2554	49	456	-	506	-	481	-	519	3.45
30/6/2554	53	281	3.14	294	9.03	512	10.35	344	2.57
3/7/2554	56	483	3.01	545	2.67	453	6.43	411	-
7/7/2554	60	489	-	404	-	467	-	457	3.29
10/7/2554	63	548	12.12	509	2.18	751	-	524	2.11

หมายเหตุ C.V. (สัมประสิทธิ์การกระจาย, Coefficient of Variation) หน่วยร้อยละ

ตารางที่ ข-2.9 ความเป็นต่างของการทดลองที่ 1

วันที่		ความเป็นต่าง (มก./ล. แคลเซียมคาร์บอเนต)							
		CD		RG		KG		AG	
		ค่าเฉลี่ย	C.V.	ค่าเฉลี่ย	C.V.	ค่าเฉลี่ย	C.V.	ค่าเฉลี่ย	C.V.
9/5/2554	1	450	35.36	1,012	15.71	1,181	6.73	928	4.29
12/5/2554	4	4,148	11.47	3,644	2.18	4,260	-	3,868	2.05
15/5/2554	7	3,722	2.11	4,222	-	4,056	5.81	4,056	1.94
19/5/2554	11	4,003	0.53	4,881	-	5,089	0.83	5,089	0.83
22/5/2554	14	4,521	2.77	4,640	0.90	5,142	-	4,580	0.91
26/5/2554	18	4,438	0.92	4,873	-	5,163	1.59	4,612	0.89
29/5/2554	21	4,625	1.79	5,035	1.64	5,562	-	4,918	1.68
2/6/2554	25	4,352	0.95	5,082	3.25	5,330	0.39	4,688	0.44
5/6/2554	28	4,203	1.84	4,913	-	5,513	1.40	4,913	-
9/6/2554	32	4,297	1.84	5,050	0.78	5,246	3.01	4,632	1.70
12/6/2554	35	4,638	1.63	5,171	1.46	5,917	1.27	4,464	2.11
16/6/2554	39	5,639	3.48	6,361	0.62	6,806	1.73	6,222	-
19/6/2554	42	4,241	1.86	4,994	0.79	5,078	1.55	4,688	3.37
23/6/2554	46	4,094	1.89	4,804	-	5,077	1.52	4,613	0.84
26/6/2554	49	4,167	1.89	4,778	-	5,500	1.43	4,667	-
30/6/2554	53	4,259	0.92	4,928	2.40	5,234	-	5,011	-
3/7/2554	56	4,452	-	4,994	0.81	5,365	1.50	4,766	0.85
7/7/2554	60	4,652	0.87	4,909	9.87	5,736	3.52	5,023	-
10/7/2554	63	4,561	1.79	4,908	1.66	5,312	-	4,734	-

หมายเหตุ C.V. (สัมประสิทธิ์การกระจาย, Coefficient of Variation) หน่วยร้อยละ

ตารางที่ ข-2.9 ความเป็นต่างของการทดลองที่ 1 (ต่อ)

วันที่		ความเป็นต่าง (มก./ล. แคลเซียมคาร์บอเนต)							
		PLG		ROG		NG		PAG	
		ค่าเฉลี่ย	C.V.	ค่าเฉลี่ย	C.V.	ค่าเฉลี่ย	C.V.	ค่าเฉลี่ย	C.V.
9/5/2554	1	759	5.24	759	5.24	1,040	3.82	787	-
12/5/2554	4	4,008	4.94	3,924	-	3,952	3.01	3,531	2.24
15/5/2554	7	4,222	-	4,195	2.81	4,139	2.85	3,556	-
19/5/2554	11	4,494	0.94	4,464	1.89	5,149	2.45	4,881	-
22/5/2554	14	4,610	-	4,787	1.75	4,374	1.91	4,521	2.77
26/5/2554	18	4,641	-	4,641	-	4,554	0.90	4,612	0.89
29/5/2554	21	4,918	1.68	5,035	-	4,947	0.84	4,801	3.45
2/6/2554	25	4,381	-	4,527	0.91	4,556	1.81	4,877	2.54
5/6/2554	28	4,312	1.79	4,640	1.66	4,749	1.63	4,804	-
9/6/2554	32	4,464	-	4,688	-	4,743	1.66	4,967	1.59
12/6/2554	35	4,558	2.48	4,691	-	5,064	1.49	4,744	1.59
16/6/2554	39	5,389	1.46	5,778	-	5,704	1.32	5,890	1.92
19/6/2554	42	4,269	0.92	4,548	0.87	4,688	-	4,967	1.59
23/6/2554	46	4,258	-	4,585	-	4,804	-	4,749	1.63
26/6/2554	49	4,389	1.79	4,945	1.59	4,889	-	4,889	-
30/6/2554	53	4,343	3.63	4,566	-	4,955	1.59	5,011	3.14
3/7/2554	56	5,080	-	4,680	-	5,166	0.78	4,538	0.89
7/7/2554	60	5,451	0.74	4,823	2.51	5,223	3.86	4,566	-
10/7/2554	63	4,619	-	4,734	-	4,965	-	4,734	-

หมายเหตุ C.V. (สัมประสิทธิ์การกระจาย, Coefficient of Variation) หน่วยร้อยละ

ข-3 ผลการทดลองที่ 2 ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบขึ้นตอนเดียว

ตารางที่ ข-3.1 ลักษณะหยาบๆของการทดลองที่ 2 เมื่อเริ่มต้นและสิ้นสุดการทดลอง

ตัวแปร	R1				R2			
	ก่อน		หลัง		ก่อน		หลัง	
	ค่าเฉลี่ย	C.V.	ค่าเฉลี่ย	C.V.	ค่าเฉลี่ย	C.V.	ค่าเฉลี่ย	C.V.
ของแข็งทั้งหมด (ร้อยละ)	15.36	2.37	14.55	2.95	16.20	5.03	12.73	0.14
ของแข็งระเหย (ร้อยละ)	13.50	0.13	11.53	0.11	14.34	0.92	9.94	0.07
ทีเคเอ็น (มก./ลิตร)	210	23.57	188	16.97	219	0.53	179	-
ออร์โทฟอสเฟต (มก./ลิตร)	65	4.25	60	0.44	67	2.62	61	2.66
ความต่างศักย์ออกซิเดชันรีดักชัน (มิลลิโวลต์)	-113.6	1.85	-228.7	3.51	-119.0	1.18	-249.0	1.39
ชีโอดีรวม (มก./ลิตร)	51,810	3.29	7,550	6.43	52,211	2.18	8,579	0.00

หมายเหตุ C.V. (สัมประสิทธิ์การกระจาย, Coefficient of Variation) หน่วยร้อยละ

ตารางที่ ข-3.2 ปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพรายวันของการทดลองที่ 2 ที่สภาวะมาตรฐาน

วันที่	อุณหภูมิ (°C)	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร/วัน)		วันที่	อุณหภูมิ (°C)	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร/วัน)			
		R1	R2			R1	R2		
27/9/2554	1	28.50	118	91	22/10/2554	26	30.00	71	54
28/9/2554	2	28.50	592	633	23/10/2554	27	29.80	45	54
29/9/2554	3	31.00	815	647	24/10/2554	28	29.50	27	51
30/9/2554	4	29.00	72	238	25/10/2554	29	32.50	63	68
1/10/2554	5	30.00	72	81	26/10/2554	30	31.40	45	45
2/10/2554	6	30.50	36	36	27/10/2554	31	31.00	36	45
3/10/2554	7	30.50	45	36	28/10/2554	32	31.20	45	18
4/10/2554	8	29.80	27	18	29/10/2554	33	31.50	50	45
5/10/2554	9	29.20	36	36	30/10/2554	34	30.50	43	18
6/10/2554	10	30.20	18	18	31/10/2554	35	29.00	64	86
7/10/2554	11	28.80	18	25	1/11/2554	36	29.80	75	58
8/10/2554	12	28.40	9	9	2/11/2554	37	29.00	67	81
9/10/2554	13	28.80	27	18	3/11/2554	38	29.50	59	45
10/10/2554	14	28.50	27	45	4/11/2554	39	29.20	145	165
11/10/2554	15	28.80	63	63	5/11/2554	40	28.50	109	124
12/10/2554	16	29.50	27	36	6/11/2554	41	28.00	134	118
13/10/2554	17	29.20	33	27	7/11/2554	42	29.80	143	176
14/10/2554	18	28.20	27	36	8/11/2554	43	31.20	151	172
15/10/2554	19	28.50	63	72	9/11/2554	44	29.80	165	149
16/10/2554	20	29.00	67	54	10/11/2554	45	29.80	135	142
17/10/2554	21	29.00	90	99	11/11/2554	46	29.60	152	155
18/10/2554	22	29.20	76	72	12/11/2554	47	28.50	134	123
19/10/2554	23	30.00	61	81	13/11/2554	48	29.00	152	128
20/10/2554	24	28.50	87	69	14/11/2554	49	29.50	162	217
21/10/2554	25	29.20	72	76	15/11/2554	50	31.00	163	189

ตารางที่ ข-3.2 ปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพรายวันของการทดลองที่ 2 ที่สภาวะมาตรฐาน (ต่อ)

วันที่	อุณหภูมิ (°C)	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร/วัน)		วันที่	อุณหภูมิ (°C)	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร/วัน)			
		R1	R2			R1	R2		
		16/11/2554	51			29.80	153	252	11/12/2554
17/11/2554	52	30.50	234	394	12/12/2554	77	27.50	448	607
18/11/2554	53	30.60	216	324	13/12/2554	78	27.00	491	437
19/11/2554	54	29.80	191	335	14/12/2554	79	27.20	1,367	1,445
20/11/2554	55	29.80	173	228	15/12/2554	80	27.80	660	720
21/11/2554	56	29.40	144	163	16/12/2554	81	27.80	1,075	1,150
22/11/2554	57	30.00	106	128	17/12/2554	82	27.50	1,037	1,267
23/11/2554	58	31.80	170	159	18/12/2554	83	28.00	697	587
24/11/2554	59	30.00	133	253	19/12/2554	84	27.50	729	722
25/11/2554	60	30.50	117	235	20/12/2554	85	28.00	898	980
26/11/2554	61	30.00	178	123	21/12/2554	86	28.90	705	700
27/11/2554	62	30.50	216	126	22/12/2554	87	29.00	759	924
28/11/2554	63	30.80	144	144	23/12/2554	88	28.50	497	696
29/11/2554	64	29.80	153	218	24/12/2554	89	28.80	536	643
30/11/2554	65	30.20	244	225	25/12/2554	90	29.00	230	333
1/12/2554	66	31.50	177	244	26/12/2554	91	29.20	409	360
2/12/2554	67	30.00	84	158	27/12/2554	92	29.00	258	362
3/12/2554	68	29.80	171	198	28/12/2554	93	28.70	512	558
4/12/2554	69	28.90	136	176	29/12/2554	94	28.80	673	794
5/12/2554	70	29.50	140	162	30/12/2554	95	29.00	654	660
6/12/2554	71	29.00	145	181	31/12/2554	96	29.20	390	520
7/12/2554	72	28.00	207	228	1/1/2555	97	29.80	452	762
8/12/2554	73	29.50	222	321	2/1/2555	98	28.00	429	515
9/12/2554	74	29.00	438	627	3/1/2555	99	29.00	383	450
10/12/2554	75	28.00	623	677	4/1/2555	100	29.20	515	555

ตารางที่ ข-3.2 ปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพรายวันของการทดลองที่ 2 ที่สภาวะมาตรฐาน (ต่อ)

วันที่	อุณหภูมิ (°C)		ก๊าซชีวภาพ		วันที่	อุณหภูมิ (°C)		ก๊าซชีวภาพ	
			(มิลลิลิตร/วัน)					(มิลลิลิตร/วัน)	
			R1	R2				R1	R2
5/1/2555	101	29.50	349	423	15/1/2555	111	29.00	341	363
6/1/2555	102	29.00	362	410	16/1/2555	112	29.20	397	402
7/1/2555	103	29.80	425	499	17/1/2555	113	29.50	304	301
8/1/2555	104	29.50	396	430	18/1/2555	114	29.80	316	337
9/1/2555	105	29.00	365	359	19/1/2555	115	29.00	278	372
10/1/2555	106	29.50	357	185	20/1/2555	116	28.50	261	355
11/1/2555	107	28.50	426	315	21/1/2555	117	29.20	244	285
12/1/2555	108	28.40	518	333	22/1/2555	118	29.50	248	272
13/1/2555	109	29.00	378	286	23/1/2555	119	28.50	240	271
14/1/2555	110	28.50	362	371	24/1/2555	120	29.00	235	271

ตารางที่ ข-3.3 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของการทดลองที่ 2 ที่สภาวะมาตรฐาน

วันที่	อุณหภูมิ (°C)	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)		วันที่	อุณหภูมิ (°C)	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)			
		R1	R2			R1	R2		
		27/9/2554	1			28.50	118	91	22/10/2554
28/9/2554	2	28.50	710	723	23/10/2554	27	29.80	2,697	2,726
29/9/2554	3	31.00	1,525	1,370	24/10/2554	28	29.50	2,724	2,776
30/9/2554	4	29.00	1,598	1,608	25/10/2554	29	32.50	2,786	2,844
1/10/2554	5	30.00	1,670	1,689	26/10/2554	30	31.40	2,831	2,889
2/10/2554	6	30.50	1,706	1,725	27/10/2554	31	31.00	2,867	2,934
3/10/2554	7	30.50	1,751	1,761	28/10/2554	32	31.20	2,912	2,952
4/10/2554	8	29.80	1,778	1,779	29/10/2554	33	31.50	2,962	2,997
5/10/2554	9	29.20	1,814	1,815	30/10/2554	34	30.50	3,005	3,015
6/10/2554	10	30.20	1,832	1,833	31/10/2554	35	29.00	3,070	3,101
7/10/2554	11	28.80	1,850	1,858	1/11/2554	36	29.80	3,144	3,158
8/10/2554	12	28.40	1,859	1,867	2/11/2554	37	29.00	3,211	3,240
9/10/2554	13	28.80	1,886	1,885	3/11/2554	38	29.50	3,270	3,285
10/10/2554	14	28.50	1,913	1,931	4/11/2554	39	29.20	3,414	3,450
11/10/2554	15	28.80	1,977	1,994	5/11/2554	40	28.50	3,523	3,574
12/10/2554	16	29.50	2,004	2,030	6/11/2554	41	28.00	3,657	3,692
13/10/2554	17	29.20	2,036	2,057	7/11/2554	42	29.80	3,801	3,868
14/10/2554	18	28.20	2,063	2,094	8/11/2554	43	31.20	3,951	4,040
15/10/2554	19	28.50	2,127	2,166	9/11/2554	44	29.80	4,116	4,189
16/10/2554	20	29.00	2,194	2,220	10/11/2554	45	29.80	4,252	4,331
17/10/2554	21	29.00	2,284	2,320	11/11/2554	46	29.60	4,404	4,486
18/10/2554	22	29.20	2,360	2,392	12/11/2554	47	28.50	4,538	4,609
19/10/2554	23	30.00	2,421	2,473	13/11/2554	48	29.00	4,690	4,737
20/10/2554	24	28.50	2,508	2,542	14/11/2554	49	29.50	4,852	4,954
21/10/2554	25	29.20	2,580	2,618	15/11/2554	50	31.00	5,016	5,142

ตารางที่ ข-3.3 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของการทดลองที่ 2 ที่สภาวะมาตรฐาน (ต่อ)

วันที่	อุณหภูมิ (°C)	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)		วันที่	อุณหภูมิ (°C)	ก๊าซชีวภาพ (มิลลิลิตร)			
		R1	R2			R1	R2		
		16/11/2554	51			29.80	5,169	5,395	11/12/2554
17/11/2554	52	30.50	5,403	5,789	12/12/2554	77	27.50	10,881	12,521
18/11/2554	53	30.60	5,619	6,113	13/12/2554	78	27.00	11,372	12,958
19/11/2554	54	29.80	5,810	6,448	14/12/2554	79	27.20	12,739	14,403
20/11/2554	55	29.80	5,983	6,676	15/12/2554	80	27.80	13,399	15,122
21/11/2554	56	29.40	6,128	6,839	16/12/2554	81	27.80	14,474	16,272
22/11/2554	57	30.00	6,234	6,967	17/12/2554	82	27.50	15,511	17,540
23/11/2554	58	31.80	6,404	7,125	18/12/2554	83	28.00	16,208	18,126
24/11/2554	59	30.00	6,537	7,378	19/12/2554	84	27.50	16,936	18,849
25/11/2554	60	30.50	6,654	7,613	20/12/2554	85	28.00	17,834	19,828
26/11/2554	61	30.00	6,833	7,736	21/12/2554	86	28.90	18,539	20,528
27/11/2554	62	30.50	7,049	7,862	22/12/2554	87	29.00	19,299	21,452
28/11/2554	63	30.80	7,192	8,006	23/12/2554	88	28.50	19,796	22,148
29/11/2554	64	29.80	7,346	8,224	24/12/2554	89	28.80	20,331	22,791
30/11/2554	65	30.20	7,590	8,449	25/12/2554	90	29.00	20,561	23,124
1/12/2554	66	31.50	7,766	8,693	26/12/2554	91	29.20	20,970	23,484
2/12/2554	67	30.00	7,850	8,851	27/12/2554	92	29.00	21,228	23,845
3/12/2554	68	29.80	8,021	9,049	28/12/2554	93	28.70	21,740	24,404
4/12/2554	69	28.90	8,157	9,226	29/12/2554	94	28.80	22,413	25,198
5/12/2554	70	29.50	8,297	9,388	30/12/2554	95	29.00	23,067	25,858
6/12/2554	71	29.00	8,442	9,569	31/12/2554	96	29.20	23,457	26,378
7/12/2554	72	28.00	8,648	9,797	1/1/2555	97	29.80	23,909	27,140
8/12/2554	73	29.50	8,870	10,118	2/1/2555	98	28.00	24,338	27,655
9/12/2554	74	29.00	9,308	10,745	3/1/2555	99	29.00	24,721	28,105
10/12/2554	75	28.00	9,931	11,422	4/1/2555	100	29.20	25,236	28,660

ตารางที่ ข-3.3 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของการทดลองที่ 2 ที่สภาวะมาตรฐาน (ต่อ)

วันที่	อุณหภูมิ		ก๊าซชีวภาพ		วันที่	อุณหภูมิ		ก๊าซชีวภาพ	
	(°C)	(°C)	(มิลลิลิตร)			(°C)	(°C)	(มิลลิลิตร)	
			R1	R2				R1	R2
5/1/2555	101	29.50	25,585	29,083	15/1/2555	111	29.00	29,515	32,635
6/1/2555	102	29.00	25,947	29,493	16/1/2555	112	29.20	29,912	33,037
7/1/2555	103	29.80	26,371	29,992	17/1/2555	113	29.50	30,216	33,339
8/1/2555	104	29.50	26,767	30,423	18/1/2555	114	29.80	30,532	33,676
9/1/2555	105	29.00	27,133	30,781	19/1/2555	115	29.00	30,810	34,047
10/1/2555	106	29.50	27,490	30,966	20/1/2555	116	28.50	31,071	34,402
11/1/2555	107	28.50	27,917	31,282	21/1/2555	117	29.20	31,315	34,688
12/1/2555	108	28.40	28,435	31,615	22/1/2555	118	29.50	31,563	34,959
13/1/2555	109	29.00	28,812	31,901	23/1/2555	119	28.50	31,803	35,230
14/1/2555	110	28.50	29,175	32,272	24/1/2555	120	29.00	32,038	35,501

ตารางที่ ข-3.4 ร้อยละก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ของการทดลองที่ 2

วันที่	ก๊าซมีเทน (ร้อยละ)		ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (ร้อยละ)	
	R1	R2	R1	R2
3/10/2554	7	28.47	30.11	40.59
11/10/2554	15	36.42	38.34	38.43
24/10/2554	28	35.05	38.69	35.55
11/11/2554	46	45.08	42.91	28.04
25/11/2554	60	56.74	55.18	25.97
10/12/2554	75	64.92	60.07	29.17
25/12/2554	90	63.62	64.63	26.80
12/1/2555	108	62.49	63.80	28.43
24/1/2555	120	62.76	62.82	31.64

ตารางที่ ข-3.5 ความเป็นกรดต่างของการทดลองที่ 2

วันที่	ความเป็นกรดต่าง		วันที่	ความเป็นกรดต่าง			
	R1	R2		R1	R2		
27/9/2554	1	6.9	7.0	23/11/2554	58	7.4	7.5
30/9/2554	4	7.0	6.9	28/11/2554	63	7.4	7.6
4/10/2554	8	5.4	5.3	1/12/2554	66	7.3	7.5
7/10/2554	11	7.5	7.5	7/12/2554	72	7.4	7.6
11/10/2554	15	7.5	7.8	13/12/2554	78	7.5	7.5
14/10/2554	18	7.6	7.7	16/12/2554	81	7.5	7.5
18/10/2554	22	8.0	8.1	19/12/2554	84	7.5	7.2
21/10/2554	25	7.7	7.8	23/12/2554	88	7.4	7.1
25/10/2554	29	7.7	7.7	26/12/2554	91	7.5	7.3
28/10/2554	32	7.7	7.8	30/12/2554	95	7.3	7.3
4/11/2554	39	7.7	7.7	3/1/2555	99	7.4	7.4
8/11/2554	43	7.7	7.8	6/1/2555	102	7.4	7.5
11/11/2554	46	7.9	8.0	10/1/2555	106	7.4	7.4
14/11/2554	49	7.7	7.6	13/1/2555	109	7.5	7.4
16/11/2554	51	7.7	7.7	16/1/2555	112	7.7	7.3
18/11/2554	53	7.7	7.7	23/1/2555	119	7.5	7.5
21/11/2554	56	7.5	7.6	24/1/2555	120	7.5	7.5

ตารางที่ ข-3.6 กรดอินทรีย์ระเหยของการทดลองที่ 2

วันที่		กรดอินทรีย์ระเหย (มก./ล. กรดแอสซิติค)			
		R1		R2	
		ค่าเฉลี่ย	C.V.	ค่าเฉลี่ย	C.V.
27/9/2554	1	2,963	5.7	2,756	4.6
30/9/2554	4	6,379	4.7	6,079	2.0
4/10/2554	8	8,765	0.0	7,680	1.5
7/10/2554	11	8,855	4.0	8,349	10.0
11/10/2554	15	21,455	3.2	20,377	0.0
14/10/2554	18	10,357	0.6	9,814	0.7
18/10/2554	22	13,058	3.1	16,909	8.5
21/10/2554	25	11,185	0.7	10,452	1.0
25/10/2554	29	11,802	8.4	11,255	2.8
28/10/2554	32	11,322	1.2	11,247	0.2
4/11/2554	39	10,115	1.1	10,417	0.5
8/11/2554	43	11,935	1.8	11,512	0.5
11/11/2554	46	14,604	1.8	13,731	0.4
14/11/2554	49	13,631	2.9	14,096	1.1
16/11/2554	51	14,810	0.3	14,810	0.0
18/11/2554	53	13,828	0.0	11,890	4.0
21/11/2554	56	12,614	0.2	11,455	0.4
23/11/2554	58	14,859	1.6	12,382	1.6
28/11/2554	63	12,984	1.6	12,378	2.0
1/12/2554	66	10,959	1.6	12,754	3.7
7/12/2554	72	14,401	0.7	13,733	0.2
13/12/2554	78	13,641	1.2	12,006	4.6
16/12/2554	81	7,360	3.3	6,185	12.5
19/12/2554	84	4,577	1.4	4,837	1.7
23/12/2554	88	3,871	0.5	5,554	5.1

หมายเหตุ C.V. (สัมประสิทธิ์การกระจาย, Coefficient of Variation) หน่วยร้อยละ

ตารางที่ ข-3.6 กรดอินทรีย์ระเหยของการทดลองที่ 2 (ต่อ)

วันที่	กรดอินทรีย์ระเหย (มก./ล. กรดแอสติก)				
	R1		R2		C.V.
	ค่าเฉลี่ย	C.V.	ค่าเฉลี่ย	C.V.	
26/12/2554	91	4,883	1.8	5,209	4.6
30/12/2554	95	3,804	1.0	4,085	0.0
3/1/2555	99	2,961	1.4	3,881	1.0
6/1/2555	102	3,578	5.1	4,362	2.8
10/1/2555	106	2,810	1.4	2,673	5.8
13/1/2555	109	3,048	2.9	2,644	1.7
16/1/2555	112	1,723	0.0	1,923	5.7
24/1/2555	120	2,402	0.9	1,390	6.1

หมายเหตุ C.V. (สัมประสิทธิ์การกระจาย, Coefficient of Variation) หน่วยร้อยละ

ตารางที่ ข-3.7 ความเป็นต่างของการทดลองที่ 2

วันที่		ความเป็นต่าง (มก./ถ. แคลเซียมคาร์บอเนต)			
		R1		R2	
		ค่าเฉลี่ย	C.V.	ค่าเฉลี่ย	C.V.
27/9/2554	1	3,618	4.5	3,771	1.4
30/9/2554	4	4,923	1.6	4,729	0.8
4/10/2554	8	5,092	3.5	5,602	2.8
7/10/2554	11	27,622	1.3	28,545	0.8
11/10/2554	15	31,620	1.4	34,550	0.3
14/10/2554	18	31,052	4.5	33,634	0.6
18/10/2554	22	34,576	1.3	38,066	1.0
21/10/2554	25	28,530	2.4	31,180	0.9
25/10/2554	29	27,988	1.1	33,670	2.9
28/10/2554	32	31,884	0.3	33,088	0.5
4/11/2554	39	27,855	1.0	30,307	0.6
8/11/2554	43	30,598	0.9	31,446	1.2
11/11/2554	46	29,211	1.9	31,184	0.6
14/11/2554	49	26,189	0.7	29,350	0.3
16/11/2554	51	20,422	1.9	30,771	1.3
18/11/2554	53	31,724	0.9	30,777	1.6
21/11/2554	56	27,206	1.0	28,543	0.3
23/11/2554	58	25,617	0.6	24,341	0.2
28/11/2554	63	22,270	0.8	25,981	1.4
1/12/2554	66	17,581	0.5	22,527	0.4
7/12/2554	72	19,971	1.4	21,630	1.7
13/12/2554	78	18,601	0.5	24,892	1.5
16/12/2554	81	18,119	0.5	15,608	2.5
19/12/2554	84	9,594	0.8	10,033	2.3
23/12/2554	88	13,118	0.7	12,225	3.2

หมายเหตุ C.V. (สัมประสิทธิ์การกระจาย, Coefficient of Variation) หน่วยร้อยละ

ตารางที่ ข-3.7 ความเป็นต่างของการทดลองที่ 2 (ต่อ)

วันที่	ความเป็นต่าง (มก./ต. แคลเซียมคาร์บอเนต)				
	R1		R2		
	ค่าเฉลี่ย	C.V.	ค่าเฉลี่ย	C.V.	
26/12/2554	91	10,677	3.4	12,500	1.5
30/12/2554	95	9,494	3.9	12,658	1.5
3/1/2555	99	9,164	3.1	9,626	7.7
6/1/2555	102	9,153	2.0	9,480	1.0
10/1/2555	106	10,286	1.8	10,872	2.5
13/1/2555	109	11,849	1.6	11,198	1.6
16/1/2555	112	8,929	6.2	8,600	1.1
23/1/2555	119	8,901	3.1	9,221	3.9
24/1/2555	120	8,773	1.0	8,837	2.0

หมายเหตุ C.V. (สัมประสิทธิ์การกระจาย, Coefficient of Variation) หน่วยร้อยละ



ภาพที่ ข-3.1 ถังปฏิกรณ์ของการทดลองที่ 2 ในที่มีดของระบบหมักไร้อากาศแบบขั้นตอนเดียว พร้อมอุปกรณ์เก็บก๊าซชีวภาพ (ชุดถังปฏิกรณ์ด้านขวาคือชุดถังปฏิกรณ์ที่ 1 และชุดถังปฏิกรณ์ด้านซ้ายคือชุดถังปฏิกรณ์ที่ 2)



ภาพที่ ข-3.2 หม้อกึ่งนึ่งสีม่วงหมักร่วมกับมูลวัวในถังปฏิกรณ์ของการทดลองที่ 2 ในระบบหมักไร้อากาศแบบขั้นตอนเดียว พร้อมอุปกรณ์เก็บก๊าซชีวภาพ (ชุดถังปฏิกรณ์ด้านขวาคือชุดถังปฏิกรณ์ที่ 1 และชุดถังปฏิกรณ์ด้านซ้ายคือชุดถังปฏิกรณ์ที่ 2)



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)

ภาพที่ ข-3.3 ลักษณะภายในถังปฏิกรณ์ของการทดลองที่ 2 (ก) ส่วนบนของถังปฏิกรณ์
 (ข) ส่วนกลางตอนบนของถังปฏิกรณ์ (ค) ส่วนกลางตอนล่างของถังปฏิกรณ์
 (ง) ส่วนล่างของถังปฏิกรณ์

ภาคผนวก ค
การคำนวณ

1. สัมประสิทธิ์การกระจาย (Coefficient of Variation)

การเปรียบเทียบการกระจายของชุดข้อมูล นิยมใช้ดัชนีการกระจาย หรือ ดัชนีการแปรผัน (Variability Indices) ดัชนีการกระจายที่นิยมใช้ คือ สัมประสิทธิ์การกระจาย โดยที่

$$\text{สัมประสิทธิ์การกระจาย (C.V.)} = \frac{\text{ค่าเฉลี่ย} \times 100 \%}{\text{ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน}}$$

ในกรณี ค่า C.V. < ร้อยละ 15 แสดงว่า ชุดข้อมูลมีการกระจายน้อย

ในกรณี ค่า C.V. > ร้อยละ 15 แสดงว่า ชุดข้อมูลมีการกระจายมาก

2. วิเคราะห์ร้อยละมีเทนด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี (Gas Chromatography)

การวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนในตัวอย่างจากก๊าซชีวภาพเพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ ณ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย โดยมีรายละเอียดของเครื่องอุปกรณ์ก๊าซโครมาโตกราฟี และสภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์ ดังนี้

- เครื่อง : Gas Chromatography MODEL TRACE GC
- ยี่ห้อ : THERMO FINNIGAN
- Detector : TCD Detector
- Column : SHIN CARBON (2 m. x 1/8")
- Carrier Gas : N₂ Flow Rate 25 mL/min
- Temperature Program Set 80 - 130 °C
- Inject Volume : 1 mL

3. ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน โดยวิธี TAPPI 203 cm-99

1. เตรียมสารละลาย

1.1 ชั่งชีวมวลหนักประมาณ 1.5 กรัม น้ำหนักแห้ง ในบีกเกอร์ขนาด 250 มิลลิลิตรแล้ว บันทึกรับน้ำหนักชีวมวลที่แน่นอน เติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 17.5 ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ปิดด้วยกระจกนาฬิกา จับเวลาทันทีที่เติมสารละลาย นำไปกวนบนเครื่องกวนสารเป็นเวลา 30 นาที เติมน้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร เมื่อครบเวลากวนให้เข้ากันตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 30 นาที

1.2 กรดสารละลายเพื่อแยกตะกอนออก โดยทิ้งสารละลายใส่ 10 มิลลิลิตรแรกของการกรด เก็บสารละลายใส่เพื่อนำไปวิเคราะห์ประมาณ 100 มิลลิลิตร

2. วิเคราะห์ปริมาณแอลฟา-เซลลูโลส (เซลลูโลส)

2.1 ปิเปตสารละลายจากข้อ 1.2 ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมตเข้มข้น 0.5 นอร์มัล 10 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน

2.2 ค่อยๆ เทกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 30 มิลลิลิตร โดยเอียงขวดทำมุม 45 องศา กับพื้นเพื่อป้องกันการเดือดอย่างรุนแรงของสารละลาย จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้เย็น

2.3 หยดเฟอโรอีน อินดิเคเตอร์ 2 - 4 หยด นำไปไตเตรตกับสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียซัลเฟตที่ทราบความเข้มข้นแน่นอน จนสารละลายเปลี่ยนจากสีเหลืองอมส้มเป็นสีน้ำตาลอมม่วง บันทึกปริมาตรสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียซัลเฟตที่ใช้ไป

2.4 เตรียมสารละลายแบลงค์ (Blank) โดยปิเปตโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 17.5 ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตรที่มีน้ำกลั่นบรรจุอยู่ 5 มิลลิลิตร แล้วทำวิธีเดียวกับสารละลายในข้อ 2.1 - 2.3

2.5 การคำนวณ ปริมาณแอลฟา-เซลลูโลส (เซลลูโลส)

$$\text{แอลฟา-เซลลูโลส (ร้อยละ)} = 100 - [6.85 (V_2 - V_1) \times N \times 20 / AW]$$

เมื่อ V_1 = ปริมาตรเฟอร์รัสแอมโมเนียซัลเฟตที่ใช้ในการไตเตรตกับสารตัวอย่าง, มิลลิลิตร

V_2 = ปริมาตรเฟอร์รัสแอมโมเนียซัลเฟตที่ใช้ในการไตเตรตกับแบลงค์, มิลลิลิตร

N = ความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียซัลเฟต, นอร์มัล

A = ปริมาตรสารละลายตัวอย่างที่ใช้ (มิลลิลิตร)

W = น้ำหนักชีวมวล (กรัม)

6.85 = มิลลิกรัมสมมูลของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียซัลเฟตที่ทำปฏิกิริยาพอดีกับเซลลูโลส

3. วิเคราะห์ปริมาณแกมมา-เซลลูโลส

3.1 ปิเปตสารละลายจากข้อ 1.2 ปริมาตร 50 มิลลิลิตรลงในกระบอกตวงที่มีจุกปิด เติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 3 นอร์มัล 50 มิลลิลิตรผสมให้เป็นเนื้อเดียวกัน ให้ความร้อน 70 - 90 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 - 3 นาที เพื่อให้ตกตะกอนอย่างสมบูรณ์แล้วกรองสารละลาย

3.2 ปิเปตสารละลายส่วนใส 10 มิลลิลิตร ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร เติมสารละลายโพแทสเซียมไดโครเมตเข้มข้น 0.5 นอร์มัล 10 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากัน

3.3 ค่อยๆ เทกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 30 มิลลิลิตร โดยเอียงขวดทำมุม 45 องศาขึ้นเพื่อป้องกันการเดือดอย่างรุนแรงของสารละลาย จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้เย็น

3.4 หยดเฟอโรอิน อินดิเคเตอร์ 2 - 4 หยด นำไปไตเตรตกับสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียซัลเฟตที่ทราบความเข้มข้นแน่นอน จนสารละลายเปลี่ยนจากสีเหลืองอมส้มเป็นสีน้ำตาลอมม่วง บันทึกปริมาตรสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียซัลเฟตที่ใช้ไป

3.5 เตรียมสารละลายแบลงค์ (Blank) โดยปิเปตโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 17.5 ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ใส่ขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตรที่มีน้ำกลั่นบรรจุอยู่ 5 มิลลิลิตร แล้วทำวิธีเดียวกับสารละลายในข้อ 3.2 - 3.4

3.6 การคำนวณ ปริมาณแกมมา-เซลลูโลส

$$\text{แกมมา-เซลลูโลส (ร้อยละ)} = [6.85 (V_4 - V_3) \times N \times 20 / AW]$$

เมื่อ V_3 = ปริมาตรเฟอร์รัสแอมโมเนียซัลเฟตที่ใช้ในการไตเตรตกับสารตัวอย่าง, มิลลิลิตร

V_4 = ปริมาตรเฟอร์รัสแอมโมเนียซัลเฟตที่ใช้ในการไตเตรตกับแบลงค์, มิลลิลิตร

N = ความเข้มข้นที่แน่นอนของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียซัลเฟต, นอร์มัล

A = ปริมาตรสารละลายตัวอย่างที่ใช้ (มิลลิลิตร)

W = น้ำหนักชีวมวล (กรัม)

6.85 = มิลลิกรัมสมมูลของสารละลายเฟอร์รัสแอมโมเนียซัลเฟตที่ทำปฏิกิริยาพอดีกับเซลลูโลส

4. วิเคราะห์ปริมาณเบต้า-เซลลูโลส (เฮมิเซลลูโลส)

4.1 การคำนวณ ปริมาณเบต้า-เซลลูโลส (เฮมิเซลลูโลส)

$$\text{เบต้า-เซลลูโลส (ร้อยละ)} = 100 - (\text{แอลฟา-เซลลูโลส} + \text{แกมมา-เซลลูโลส})$$

5. วิเคราะห์ปริมาณลิกนิน

5.1 การคำนวณ ปริมาณลิกนิน

$$\text{ปริมาณลิกนิน (ร้อยละ)} = 100 - \text{ร้อยละเซลลูโลส} - \text{ร้อยละเฮมิเซลลูโลส}$$

4. ปริมาณหญ้าและมูลวัวที่ใส่เข้าในถังปฏิกรณ์ของการทดลองที่ 2

โดยควบคุมค่าของแข็งรวมในระบบปให้มีค่าร้อยละ 15 (Ahn และคณะ, 2010) ในอัตราส่วนหญ้าต่อมูลวัวของของแข็งระเหยเท่ากับ 75:25 (Chen, 2010) ให้มีปริมาตรรวม 1.0 ลิตร

1. ปริมาณหญ้าที่ใส่เข้าในถังปฏิกรณ์ของการทดลองที่ 2

หญากินนี้สีม่วงมีปริมาณความชื้นที่ร้อยละ 67.62 และปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ร้อยละ 32.38

วิธีการคำนวณ

ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ 15 กรัม ต้องเติมน้ำ 85 มิลลิลิตร

ถ้าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ 32.38 กรัม ต้องเติมน้ำ $32.38 * 85 / 15 = 183.49$ มิลลิลิตร

หญ้า 100 กรัม ต้องเติมน้ำเพิ่มอีก $183.49 - 67.62 = 115.87$ มิลลิลิตร

น้ำหนักรวมทั้งหมด (หญ้า+น้ำ) = $100 + 115.87 = 215.87$ มิลลิลิตร

ดังนั้น

ต้องการปริมาตรหญ้าทั้งหมด 750 มิลลิลิตร

จะต้องใช้หญ้า $750 * 100 / 215.87 = 347.43$ กรัม

ต้องเติมน้ำ $750 * 115.87 / 215.87 = 402.57$ มิลลิลิตร

2. ปริมาณมูลวัวที่ใส่เข้าในถังปฏิกรณ์ของการทดลองที่ 2

มูลวัวมีปริมาณความชื้นที่ร้อยละ 83.07 และปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ร้อยละ 16.93

วิธีการคำนวณ

ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ 15 กรัม ต้องเติมน้ำ 85 มิลลิลิตร

ถ้าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ 16.93 กรัม ต้องเติมน้ำ $16.93 * 85 / 15 = 95.94$ มิลลิลิตร

มูลวัว 100 กรัม ต้องเติมน้ำเพิ่มอีก $95.94 - 83.07 = 12.87$ มิลลิลิตร

น้ำหนักรวมทั้งหมด (มูลวัว+น้ำ) = $100 + 12.87 = 112.87$ มิลลิลิตร

ดังนั้น

ต้องการปริมาตรมูลวัวทั้งหมด 250 มิลลิลิตร

จะต้องใช้มูลวัว $250 * 100 / 112.87 = 221.49$ กรัม

ต้องเติมน้ำ $250 * 12.87 / 112.87 = 28.51$ มิลลิลิตร

ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นางสาวณัฐกาญจน์ ชราพก เกิดวันที่ 19 กุมภาพันธ์ 2529 ที่จังหวัดกรุงเทพมหานคร เป็นบุตรของนายสมเกียรติ ชราพก และนางกรรณิการ์ ชราพก สำเร็จการศึกษาปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เมื่อปีการศึกษา 2550 หลังจบการศึกษาได้เข้าทำงานบริษัท เอกโค ประเทศไทย จำกัด ในฝ่ายควบคุมคุณภาพ ตำแหน่ง Supplier Development Engineering ตั้งแต่เดือนสิงหาคม 2551 ถึง พฤษภาคม 2552 จากนั้นเข้าศึกษาต่อในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตปีการศึกษา 2552 สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำเร็จการศึกษาในปีการศึกษา 2554 ผลงานวิชาการที่ได้รับการเผยแพร่ระดับนานาชาติเรื่อง Biochemical Methane Potential of Grass Species ในการประชุมวิชาการ The 4th AUN/SEED-Net Regional Conference on Global Environment and Seminar of NRCT- JSPS Asian Core Program ระหว่างวันที่ 18 - 19 มกราคม 2555 ณ โรงแรม ดิ เอ็มเมอร์รัล จังหวัดกรุงเทพมหานคร