



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์และฟางข้าวโดยการหมักร่วมกับมูลโค

Biogas Production from Napier Grass and Rice Straw by Co-Digestion with Cow Dung

นามผู้วิจัย นางสาวปิยณัฏฐ์ แสงศรี

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุชาติ เหลืองประเสริฐ, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์ณัฐรา สีนบัวทอง, วท.ด.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์สุริยะ สะวานนท์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุชาติ เหลืองประเสริฐ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

สืบศิริ มทวีสายเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์และฟางข้าวโดยการหมักร่วมกับมูลโค

Biogas Production from Napier Grass and Rice Straw by Co-Digestion with Cow Dung

โดย

นางสาวพิญญาณี แสงศรี

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2557

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

พิณานิ แสงศรี 2557: การผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์และฟางข้าวโดยการหมัก
ร่วมกับมูลโค ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) สาขา
วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุชาติ เหลืองประเสริฐ, Ph.D. 207 หน้า

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์และฟางข้าว โดยการหมัก
ร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ ทำการเดินระบบหมัก
ขั้นตอนเดียวแบบกึ่งต่อเนื่อง มีการเติมแบบไหลขึ้น ให้มีอัตราการไหล 125 มิลลิลิตรต่อวัน ทำการ
เติมสารอินทรีย์ทุก ๆ 5 วัน ใช้ถังหมักที่มีปริมาตรในการหมัก 5 ลิตร เป็นผลให้มีระยะเวลาเก็บกัก
40 วัน ทำการทดลองที่สภาวะอุณหภูมิห้อง (30 ± 1 องศาเซลเซียส) โดยมีค่าความเป็นกรด-ด่าง
เริ่มต้นในระบบหมัก คือ 7.5 พบว่าหญ้าเนเปียร์อายุการตัด 60 วัน (ความชื้น 83.93 เปอร์เซ็นต์) ที่
สัดส่วนหญ้าเนเปียร์ต่อมูลโคต่อน้ำ 10 : 10 : 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักสด หมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์
เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโค ได้ผลผลิตมีเทนสูงสุด 300 ลิตรต่อกิโลกรัมชีโอดีที่ถูกกำจัด หรือ 371
ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยที่ถูกกำจัด หรือ 194 ลิตรต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งหญ้าเนเปียร์ที่เติม
เข้าระบบ มีประสิทธิภาพการกำจัดชีโอดี 66.50 เปอร์เซ็นต์ และมีปริมาณมีเทนเฉลี่ย 52 เปอร์เซ็นต์
ส่วนการหมักด้วยฟางข้าว (ความชื้น 8.08 เปอร์เซ็นต์) ที่สัดส่วนฟางข้าวต่อมูลโคต่อน้ำ 1.75 : 10 :
88.25 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักสด ด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโค ได้ผลผลิตมีเทน
สูงสุด 260 ลิตรต่อกิโลกรัมชีโอดีที่ถูกกำจัด หรือ 331 ลิตรต่อกิโลกรัมของแข็งระเหยที่ถูกกำจัด
หรือ 168 ลิตรต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้งฟางข้าวที่เติมเข้าระบบ มีประสิทธิภาพการกำจัดชีโอดี 52.27
เปอร์เซ็นต์ และมีปริมาณมีเทนเฉลี่ย 44 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งการหมักโดยใช้มูลโคเป็นวัสดุหมักร่วม
ให้ผลผลิตมีเทนสูงกว่าการหมักโดยใช้สารตั้งต้นเพียงอย่างเดียว ทั้งการหมักด้วยหญ้าเนเปียร์และ
ฟางข้าว โดยการหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโค หญ้าเนเปียร์มีความเหมาะสม
ในการใช้เป็นสารตั้งต้นมากกว่าฟางข้าว และในทางกลับกันการหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจาก
กระเพาะหมักกระบือ ฟางข้าวมีความเหมาะสมในการใช้เป็นสารตั้งต้นมากกว่าหญ้าเนเปียร์ และ
ในระหว่างการหมักหญ้าเนเปียร์และฟางข้าวจำเป็นต้องควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่าง ในระบบให้
เป็นกลาง

Piyanee Sangsri 2014: Biogas Production from Napier Grass and Rice Straw by Co-Digestion with Cow Dung. Master of Engineering (Environmental Engineering), Major Field: Environmental Engineering, Department of Environmental Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Suchat Leungprasert, Ph.D. 207 pages.

The objective of this study was to investigate the co-digestion of napier grass and rice straw with cow dung by using ruminal microorganisms from cow and buffalo. The bioreactor working volume was 5 liters and were operated in a single-stage semi-continuous operation by a five day feeding at the rate of 625 ml/5 days, giving rise to the hydraulic retention times of 40 days. The system pH was start up at pH 7.5 and the experiments were performed at 30 ± 1 °C. The results found that napier grass at a cutting interval of 60 days (83.93 % moisture) gave the highest methane yield from co-digestion of napier grass with cow dung (napier grass : cow dung : water = 10 : 10 : 80 % by fresh weight) by using ruminal microorganisms from cow, that was 300 L at STP/kg Chemical Oxygen Demand (COD) degraded (or 371 L at STP/kg Total volatile solids (TVS) degraded and 194 L at STP/kg Total solids (TS) added). The extent of COD degradation was 66.50 % and methane content in biogas was 52 % . As for rice straw (8.08 % moisture) gave the highest methane yield from co-digestion of rice straw with cow dung (rice straw : cow dung : water = 1.75 : 10 : 88.25 % by fresh weight) by using ruminal microorganisms from cow, that was 260 L at STP/kg COD degraded (or 331 L at STP/kg TVS degraded and 168 L at STP/kg TS added). The extent of COD degradation was 52.27 % and methane content in biogas was 44 % . The results show that co-digestion gave higher yield than that of substrate alone for both napier grass and rice straw. By using ruminal microorganisms from cow, napier grass can be a good substrate. On the other hand, rice straw can be a good substrate for using ruminal microorganisms from buffalo. In operating the system for anaerobic digestion and co-digestion of napier grass and rice straw, pH adjustment to be neutral was needed.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่อง การผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์และฟางข้าวโดยการหมักร่วมกับมูลโคนี้ เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยเรื่องการผลิตก๊าซชีวภาพ (มีเทน) จากหญ้าเนเปียร์สดและฟางข้าวโดยใช้จุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักของโคเนื้อและกระบือ ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ผู้วิจัยได้รับความกรุณาและความช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่านได้แก่ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุชาติ เหลืองประเสริฐ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่คอยให้คำปรึกษา และแนะนำแนวทางที่เหมาะสมสำหรับการวิจัย ดร. นุชรา สีนบัวทอง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่คอยให้ความรู้ คำแนะนำ และแนวทางในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นในการวิจัยครั้งนี้ รวมทั้งแปลผลข้อมูลและให้ความช่วยเหลือด้านเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์และห้องปฏิบัติการ รองศาสตราจารย์ ดร. สุริยะ สะวานนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมและหัวหน้าโครงการวิจัย ที่คอยให้คำปรึกษา ความรู้ คำแนะนำ ตรวจสอบรูปเล่มวิทยานิพนธ์ รวมทั้งให้ความอนุเคราะห์ในการปลูกหญ้าเนเปียร์ เตรียมฟางข้าว เตรียมมูลโค และเตรียมเชื้อจุลินทรีย์สำหรับการวิจัยในครั้งนี้ ฝ่ายเครื่องมือและวิจัยทางวิทยาศาสตร์ สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่เอื้อเฟื้อในด้านสถานที่ และเครื่องมือสำหรับการวิจัย และรองศาสตราจารย์ ดร.สุธา ขาวเขียว ผู้ทรงคุณวุฒิจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่กรุณาให้คำแนะนำในการแก้ไขวิทยานิพนธ์ ให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

สุดท้ายผู้ต้องขอขอบพระคุณคณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่คอยสั่งสอน และให้ความรู้อันเป็นประโยชน์แก่ผู้วิจัย และขอขอบคุณครอบครัวที่คอยสนับสนุนด้านทุนการศึกษา เป็นกำลังใจ ทำให้การดำเนินการศึกษาสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ผู้วิจัยจึงขอขอบพระคุณทุกท่านมาไว้ ณ ที่นี้

พิชญ์ณี แสงศรี

พฤศจิกายน 2557

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(8)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(14)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	4
การตรวจเอกสาร	6
อุปกรณ์และวิธีการ	26
อุปกรณ์	26
วิธีการ	30
ผลและวิจารณ์	42
สรุปและข้อเสนอแนะ	83
สรุป	83
ข้อเสนอแนะ	85
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	86
ภาคผนวก	95
ภาคผนวก ก ผลการทดลอง	96
ภาคผนวก ข รายละเอียดการคำนวณ	175
ภาคผนวก ค การวิเคราะห์ตัวอย่าง	189
ภาคผนวก ง ภาพการทดลอง	198
ภาคผนวก จ รางวัลที่ได้รับจากการนำเสนอผลงานวิทยานิพนธ์	203
ประวัติการศึกษาและทำงาน	207

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ	7
2 ความเข้มข้นสูงสุดของแคลเซียม ทองแดง โพแทสเซียม และแมกนีเซียมที่ไม่เป็นอันตรายต่อจุลินทรีย์ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน	16
3 ปริมาณธาตุอาหารในหญ้าทั่วไป	18
4 องค์ประกอบของหญ้าเนเปียร์สดที่มีอายุการตัด 60 วัน	19
5 ส่วนผสมในแต่ละถังหมัก ของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 1 (ศึกษาสัดส่วนหญ้าเนเปียร์และหญ้าเนเปียร์ผสมมูลโค ที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ	33
6 ส่วนผสมในแต่ละถังหมัก ของทดลองชุดที่ 2 ระยะที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักหญ้าเนเปียร์และการหมักหญ้าเนเปียร์ร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ	36
7 ส่วนผสมในแต่ละถังหมัก ของการทดลองชุดที่ 2 ระยะที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักฟางข้าวและการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ	39
8 ลักษณะทั่วไปของหญ้าเนเปียร์และมูลโค	43
9 ลักษณะทั่วไปของเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักโค และเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักกระบือ	44
10 ลักษณะทั่วไปของสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์ของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 1 (ศึกษาสัดส่วนหญ้าเนเปียร์และหญ้าเนเปียร์ผสมมูลโคที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ) ในแต่ละถังหมัก	45
11 ปริมาตรก๊าซชีวภาพที่ได้และผลผลิตก๊าซชีวภาพของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 1 (ศึกษาสัดส่วนหญ้าเนเปียร์และหญ้าเนเปียร์ผสมมูลโคที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ) ในแต่ละถังหมัก	55
12 ลักษณะทั่วไปของสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์ของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักหญ้าเนเปียร์ และการหมักหญ้าเนเปียร์ร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก	57

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า	
13	ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้และผลผลิตก๊าซชีวภาพของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักหญ้าเนเปียร์ และการหมักหญ้าเนเปียร์ร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก	68
14	ลักษณะทั่วไปของฟางข้าว	69
15	ลักษณะทั่วไปของสารละลายผสมฟางข้าวของการทดลองชุดที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักฟางข้าว และการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก	72
16	ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้และผลผลิตก๊าซชีวภาพของการทดลองชุดที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักฟางข้าว และการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก	82
ตารางผนวกที่		
ก1	ค่า pH จากการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 1 (ศึกษาสัดส่วนหญ้าเนเปียร์และหญ้าเนเปียร์ผสมมูลโคที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ) ในแต่ละถังหมัก	97
ก2	ปริมาณก๊าซทั้งหมดที่ผลิตได้ ปริมาณก๊าซทั้งหมดที่ผลิตได้ที่ STP ปริมาณเปอร์เซ็นต์ มีเทน และปริมาณมีเทนที่ผลิตได้ที่ STP จากการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 1 (ศึกษาสัดส่วนหญ้าเนเปียร์และหญ้าเนเปียร์ผสมมูลโคที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ) ในแต่ละถังหมัก	101
ก3	ปริมาณมีเทนที่ผลิตได้รวมทุก 5 วัน (ที่ STP) จากการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 1 (ศึกษาสัดส่วนหญ้าเนเปียร์และหญ้าเนเปียร์ผสมมูลโคที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ) ในแต่ละถังหมัก	108
ก4	ค่า COD เฉลี่ยของสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์ที่เดิมเข้าระบบของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 1 (ศึกษาสัดส่วนหญ้าเนเปียร์และหญ้าเนเปียร์ผสมมูลโคที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ) ในแต่ละถังหมัก	109

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ก5	ค่า COD ของสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์ที่ออกจากระบบของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 1 (ศึกษาสัดส่วนหญ้าเนเปียร์และหญ้าเนเปียร์ผสมมูลโคที่ใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพ) ในแต่ละถังหมัก
ก6	ค่า TVS เกลี่ยของสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์ที่เดิมเข้าระบบของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 1 (ศึกษาสัดส่วนหญ้าเนเปียร์และหญ้าเนเปียร์ผสมมูลโคที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ) ในแต่ละถังหมัก
ก7	ค่า TVS เกลี่ยของสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์ที่ออกจากระบบของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 1 (ศึกษาสัดส่วนหญ้าเนเปียร์และหญ้าเนเปียร์ผสมมูลโคที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ) ในแต่ละถังหมัก
ก8	ค่า TS เกลี่ยของสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์ที่เดิมเข้าระบบของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 1 (ศึกษาสัดส่วนหญ้าเนเปียร์และหญ้าเนเปียร์ผสมมูลโคที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ) ในแต่ละถังหมัก
ก9	ค่า TS เกลี่ยของสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์ที่ออกจากระบบของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 1 (ศึกษาสัดส่วนหญ้าเนเปียร์และหญ้าเนเปียร์ผสมมูลโคที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ) ในแต่ละถังหมัก
ก10	ค่า pH จากการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักหญ้าเนเปียร์ และการหมักหญ้าเนเปียร์ร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก
ก11	ปริมาตรก๊าซทั้งหมดที่ผลิตได้ ปริมาตรก๊าซทั้งหมดที่ผลิตได้ที่ STP ปริมาณเปอร์เซ็นต์ มีเทน และปริมาณมีเทนที่ผลิตได้ที่ STP จากการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักหญ้าเนเปียร์ และการหมักหญ้าเนเปียร์ร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก
ก12	ปริมาณมีเทนที่ผลิตได้รวมทุก 5 วัน (ที่ STP) จากการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักหญ้าเนเปียร์ และการหมักหญ้าเนเปียร์ร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ก13 ค่า COD เฉลี่ยของสารละลายผสมหุ้หนาเปียรที่เคมเ้าระบบของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 2 (ศีกษาผลผลิตก้าชมิเทนจากการหมักหุ้หนาเปียร และการหมักหุ้หนาเปียรร่วกับมูลโค โดยเ้าเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถึงหมัก	135
ก14 ค่า COD ของสารละลายผสมหุ้หนาเปียรที่ออกจากระบบของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 2 (ศีกษาผลผลิตก้าชมิเทนจากการหมักหุ้หนาเปียร และการหมักหุ้หนาเปียรร่วกับมูลโค โดยเ้าเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถึงหมัก	136
ก15 ค่า TVS เฉลี่ยของสารละลายผสมหุ้หนาเปียรที่เคมเ้าระบบของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 2 (ศีกษาผลผลิตก้าชมิเทนจากการหมักหุ้หนาเปียร และการหมักหุ้หนาเปียรร่วกับมูลโค โดยเ้าเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถึงหมัก	137
ก16 ค่า TVS ของสารละลายผสมหุ้หนาเปียรที่ออกจากระบบของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 2 (ศีกษาผลผลิตก้าชมิเทนจากการหมักหุ้หนาเปียร และการหมักหุ้หนาเปียรร่วกับมูลโค โดยเ้าเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถึงหมัก	138
ก17 ค่า TS เฉลี่ยของสารละลายผสมหุ้หนาเปียรที่เคมเ้าระบบของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 2 (ศีกษาผลผลิตก้าชมิเทนจากการหมักหุ้หนาเปียร และการหมักหุ้หนาเปียรร่วกับมูลโค โดยเ้าเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถึงหมัก	139
ก18 ค่า TS ของสารละลายผสมหุ้หนาเปียรที่ออกจากระบบของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 2 (ศีกษาผลผลิตก้าชมิเทนจากการหมักหุ้หนาเปียร และการหมักหุ้หนาเปียรร่วกับมูลโค โดยเ้าเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถึงหมัก	140
ก19 ค่า pH จากการทดลองชุดที่ 2 (ศีกษาผลผลิตก้าชมิเทนจากการหมักฟางข้าว และการหมักฟางข้าวร่วกับมูลโค โดยเ้าเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถึงหมัก	150

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ก20 ปริมาตรก๊าซทั้งหมดที่ผลิตได้ ปริมาตรก๊าซทั้งหมดที่ผลิตได้ที่ STP ปริมาณเปอร์เซ็นต์ มีเทน และปริมาตรมีเทนที่ผลิตได้ที่ STP จากการทดลองชุดที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักฟางข้าว และการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก	153
ก21 ปริมาตรมีเทนที่ผลิตได้รวมทุก 5 วัน (ที่ STP) จากการทดลองชุดที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักฟางข้าว และการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก	159
ก22 ค่า COD เฉลี่ยของสารละลายผสมฟางข้าวที่เดิมเข้าระบบของการทดลองชุดที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักฟางข้าว และการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก	160
ก23 ค่า COD ของสารละลายผสมฟางข้าวที่ออกจากระบบของการทดลองชุดที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักฟางข้าว และการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก	161
ก24 ค่า TVS เฉลี่ยของสารละลายผสมฟางข้าวที่เดิมเข้าระบบของการทดลองชุดที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักฟางข้าว และการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก	162
ก25 ค่า TVS ของสารละลายผสมฟางข้าวที่ออกจากระบบของการทดลองชุดที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทน จากการหมักฟางข้าว และการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก	163

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่

หน้า

- ก26 คำ TS เฉลี่ยของสารละลายผสมฟางข้าวที่เดิมเข้าระบบของการทดลองชุดที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักฟางข้าว และการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก 164
- ก27 คำ TS ของสารละลายผสมฟางข้าวที่ออกจากระบบของการทดลองชุดที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักฟางข้าว และการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก 165

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน	10
2 เชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักของโคเนื้อ (ก) และเชื้อจุลินทรีย์ผสมจาก กระเพาะหมักของกระบือปลัก (ข)	27
3 หญ้าเนเปียร์สายพันธุ์ปากช่อง 1 ที่มีอายุการตัด 60 วัน (ก) และฟางข้าว (ข)	28
4 มูลโคเนื้อ	28
5 แผนภูมิการผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์และฟางข้าวโดยการหมักร่วมกับ มูลโค	29
6 ถังหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic reactor) และระบบเก็บก๊าซ (Gas collection system)	31
7 หญ้าเนเปียร์บดละเอียดขนาด 2 - 4 mm	32
8 ถังหมักและระบบเก็บก๊าซที่ใช้สำหรับการทดลอง	34
9 ฟางข้าวบดละเอียดผ่านตะแกรงขนาด 2 mm	38
10 ค่า pH ของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 1 (ศึกษาสัดส่วนหญ้าเนเปียร์และหญ้า เนเปียร์ผสมมูลโคที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ) ในแต่ละถังหมัก	48
11 ปริมาตรมีเทนรวมทุก 5 วัน ที่ผลิตได้ ของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 1 (ศึกษา สัดส่วนหญ้าเนเปียร์และหญ้าเนเปียร์ผสมมูลโคที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซ ชีวภาพ) ในแต่ละถังหมัก	51
12 ค่า pH ของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมัก หญ้าเนเปียร์ และการหมักหญ้าเนเปียร์ร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้น จากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก	60
13 ปริมาตรมีเทนรวมทุก 5 วัน ที่ผลิตได้ ของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 2 (ศึกษา ผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักหญ้าเนเปียร์ และการหมักหญ้าเนเปียร์ร่วมกับมูล โค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถัง หมัก	63
14 ค่า pH ของการทดลองชุดที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักฟางข้าว และ การหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโค และกระบือ) ในแต่ละถังหมัก	73

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
15	ปริมาตรมีเทนรวมทุก 5 วัน ที่ผลิตได้ ของการทดลองชุดที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักฟางข้าว และการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก	77
ภาพผนวกที่		
ก1	ปริมาตรก๊าซทั้งหมดที่ผลิตได้ (ml/day) ที่ STP ของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 1 (ศึกษาสัดส่วนหุ้ยานเปียร์และหุ้ยานเปียร์ผสมมูลโคที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ) ในแต่ละถังหมัก	112
ก2	ปริมาตรมีเทน (ml/day) ที่ STP ของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 1 (ศึกษาสัดส่วนหุ้ยานเปียร์และหุ้ยานเปียร์ผสมมูลโคที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ) ในแต่ละถังหมัก	113
ก3	ปริมาตรมีเทนรวมทุก 5 วัน (ml/5days) ที่ STP ของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 1 (ศึกษาสัดส่วนหุ้ยานเปียร์และหุ้ยานเปียร์ผสมมูลโคที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ) ในแต่ละถังหมัก	114
ก4	ผลผลิตมีเทน (L at STP/kg COD degraded) ที่ STP ของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 1 (ศึกษาสัดส่วนหุ้ยานเปียร์และหุ้ยานเปียร์ผสมมูลโคที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ) ในแต่ละถังหมัก	115
ก5	ผลผลิตมีเทน (L at STP/kg TVS degraded) ที่ STP ของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 1 (ศึกษาสัดส่วนหุ้ยานเปียร์และหุ้ยานเปียร์ผสมมูลโคที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ) ในแต่ละถังหมัก	116
ก6	ผลผลิตมีเทน (L at STP/kg TS degraded) ที่ STP ของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 1 (ศึกษาสัดส่วนหุ้ยานเปียร์และหุ้ยานเปียร์ผสมมูลโคที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ) ในแต่ละถังหมัก	117
ก7	ผลผลิตมีเทน (L at STP/kg COD added) ที่ STP ของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 1 (ศึกษาสัดส่วนหุ้ยานเปียร์และหุ้ยานเปียร์ผสมมูลโคที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ) ในแต่ละถังหมัก	118

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ก8 ผลผลิตมีเทน (L at STP/kg TVS added) ที่ STP ของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 1 (ศึกษาสัดส่วนหัวน้ำเนเปียร์และหัวน้ำเนเปียร์ผสมมูลโคที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ) ในแต่ละถังหมัก	119
ก9 ผลผลิตมีเทน (L at STP/kg TS added) ที่ STP ของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 1 (ศึกษาสัดส่วนหัวน้ำเนเปียร์และหัวน้ำเนเปียร์ผสมมูลโคที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ) ในแต่ละถังหมัก	120
ก10 ปริมาตรก๊าซทั้งหมดที่ผลิตได้ (ml/day) ที่ STP ของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักหัวน้ำเนเปียร์ และการหมักหัวน้ำเนเปียร์ร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก	141
ก11 ปริมาตรมีเทน (ml/day) ที่ STP ของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักหัวน้ำเนเปียร์ และการหมักหัวน้ำเนเปียร์ร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก	142
ก12 ปริมาตรมีเทนรวมทุก 5 วัน (ml/5days) ที่ STP ของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักหัวน้ำเนเปียร์ และการหมักหัวน้ำเนเปียร์ร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก	143
ก13 ผลผลิตมีเทน (L at STP/kg COD degraded) ที่ STP ของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักหัวน้ำเนเปียร์ และการหมักหัวน้ำเนเปียร์ร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก	144
ก14 ผลผลิตมีเทน (L at STP/kg TVS degraded) ที่ STP ของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักหัวน้ำเนเปียร์และการหมักหัวน้ำเนเปียร์ร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก	145

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ก15 ผลผลิตมีเทน (L at STP/kg TS degraded) ที่ STP ของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักหุ้ยานเปียร์และการหมักหุ้ยานเปียร์ร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก	146
ก16 ผลผลิตมีเทน (L at STP/kg COD added) ที่ STP ของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมัก หุ้ยานเปียร์และการหมักหุ้ยานเปียร์ร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้น จากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก	147
ก17 ผลผลิตมีเทน (L at STP/kg TVS added) ที่ STP ของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักหุ้ยานเปียร์และการหมักหุ้ยานเปียร์ร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก	148
ก18 ผลผลิตมีเทน (L at STP/kg TS added) ที่ STP ของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจาก การหมักหุ้ยานเปียร์และการหมักหุ้ยานเปียร์ร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก	149
ก19 ปริมาตรก๊าซทั้งหมดที่ผลิตได้ (ml/day) ที่ STP ของการทดลองชุดที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักฟางข้าว และการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก	166
ก20 ปริมาตรมีเทน (ml/day) ที่ STP ของการทดลองชุดที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักฟางข้าว และการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก	167
ก21 ปริมาตรมีเทนรวมทุก 5 วัน (ml/5days) ที่ STP ของการทดลองชุดที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักฟางข้าว และการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก	168

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ก22 ผลผลิตมีเทน (L at STP/kg COD degraded) ที่ STP ของการทดลองชุดที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักฟางข้าว และการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก	169
ก23 ผลผลิตมีเทน (L at STP/kg TVS degraded) ที่ STP ของการทดลองชุดที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักฟางข้าวและการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก	170
ก24 ผลผลิตมีเทน (L at STP/kg TS degraded) ที่ STP ของการทดลองชุดที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักฟางข้าว และการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก	171
ก25 ผลผลิตมีเทน (L at STP/kg COD added) ที่ STP ของการทดลองชุดที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักฟางข้าว และการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก	172
ก26 ผลผลิตมีเทน (L at STP/kg TVS added) ที่ STP ของการทดลองชุดที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักฟางข้าว และการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก	173
ก27 ผลผลิตมีเทน (L at STP/kg TS added) ที่ STP ของการทดลองชุดที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักฟางข้าว และการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก	174
ค1 ระบบเก็บก๊าซของการทดลอง	181
ง1 สถานที่ปลูกหญ้าเนเปียร์และนาข้าว (ก) และหญ้าเนเปียร์สับละเอียด (ข)	195
ง2 แหล่งเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการเริ่มต้นระบบจากโคเนื้อ (ก) และกระบือ (ข)	195
ง3 สารละลายผสมหญ้าเนเปียร์ต่อน้ำในสัดส่วน 10 : 90 % FW (ก) และสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์ต่อน้ำในสัดส่วน 20 : 80 % FW (ข)	196
ง4 สารละลายผสมหญ้าเนเปียร์ต่อมูลโคต่อน้ำในสัดส่วน 5 : 5 : 90 % FW (ก) และสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์ต่อมูลโคต่อน้ำในสัดส่วน 10 : 10 : 80 % FW (ข)	196

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ง5 สารละลายผสมฟางข้าวต่อน้ำในสัดส่วน 3.5 : 96.5 % FW (ก) และสารละลายผสมฟางข้าวต่อมูลโคต่อน้ำในสัดส่วน 1.75 : 10 : 88.25 % FW (ข)	197
ง6 ภาพด้านบนระบบเก็บก๊าซแบบแทนที่น้ำ (ก) และถังหมัก (ข)	197
ง7 จุดเก็บตัวอย่างก๊าซ (ก) และหลอดสูญญากาศที่ใช้เก็บตัวอย่างก๊าซ (ข)	198
ง8 การวิเคราะห์ค่า COD (ก) และการวิเคราะห์ปริมาณเปอร์เซ็นต์มีเทนด้วยเครื่อง Gas chromatograph (ข)	198
จ1 รางวัล Outstanding presentation/Contribution จากการนำเสนอบทความเรื่อง Methane production from napier grass by co-digestion with cow dung ในการประชุมวิชาการ Global Conference on Global Warming 2014 (GCGW-14) ซึ่งจัดขึ้นในวันที่ 25-29 พฤษภาคม 2557 ณ Peking University, Beijing, China	204
จ2 รางวัลเกียรติยศแก่นิสิตที่ได้รับรางวัลระดับนานาชาติ ประจำปีการศึกษา 2556 จากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ซึ่งจัดขึ้นในวันที่ 10 ตุลาคม 2557 ณ ห้องประชุมยงยุทธเจียมไชยศรี อาคารสารสนเทศ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์	205
จ3 ใบรับรองการนำเสนอบทความเรื่อง การผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์โดยการหมักร่วมกับมูลโค ในการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 13 ซึ่งจัดขึ้นในวันที่ 26 – 28 มีนาคม 2557 ณ โรงแรมเดอะ ทวิน ทาวเวอร์ รongเมือง กรุงเทพฯ	206

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

°C	=	degree Celsius
C	=	cow dung
CH ₄	=	methane
COD	=	chemical oxygen demand
DW	=	dry weight
FW	=	fresh weight
g	=	gram
HRT	=	hydraulic retention time
kg	=	kilogram
L	=	liter
m	=	meter
m ³	=	cubic meter
mm	=	millimeter
mg	=	milligram
MLVSS	=	mixed liquor volatile suspended solids
N	=	napier grass
OLR	=	organic loading rate
RB	=	ruminal microorganisms from buffalo
RC	=	ruminal microorganisms from cow
S	=	rice straw
STP	=	standard temperature and pressure
TVS	=	total volatile solids
TS	=	total solids
TKN	=	total Kjeldahl nitrogen
W	=	tap water

การผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์และฟางข้าวโดยการหมักร่วมกับมูลโค

Biogas Production from Napier Grass and Rice Straw

by Co-Digestion with Cow Dung

คำนำ

เนื่องจากความต้องการใช้ทรัพยากรด้านพลังงาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้พลังงานจากน้ำมันเชื้อเพลิงและก๊าซธรรมชาติในปัจจุบันมีแนวโน้มที่สูงขึ้น จึงทำให้ทรัพยากรธรรมชาติด้านพลังงานนั้นลดลงอย่างต่อเนื่อง น้ำมันเชื้อเพลิงและก๊าซธรรมชาติมีโอกาที่จะขาดแคลนได้ในอนาคต จึงมีความจำเป็น ที่จะต้องหาพลังงานจากแหล่งอื่นมาทดแทนการใช้น้ำมันเชื้อเพลิงและก๊าซธรรมชาติ โดยจะต้องเป็นพลังงานที่สะอาด เช่น พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานจากก๊าซชีวภาพ เป็นต้น ซึ่งพลังงานจากก๊าซชีวภาพนั้นได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง ในการนำมาใช้ทดแทนก๊าซธรรมชาติ การนำเทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพไปใช้ยังเป็นการลดการปล่อยมลภาวะ รวมถึงก๊าซเรือนกระจกออกสู่สิ่งแวดล้อม

ปัจจุบันรัฐบาลของหลาย ๆ ประเทศรวมถึงประเทศไทย มีการส่งเสริมการผลิตก๊าซชีวภาพ และสนับสนุนผู้ที่ทำการผลิตก๊าซชีวภาพในรูปแบบต่าง ๆ ซึ่งจำเป็นที่จะต้องหาสารอินทรีย์ที่นำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพที่มีความคุ้มค่า ดังนั้นการใช้สารอินทรีย์จากแหล่งธรรมชาติเพื่อนำมาผลิตก๊าซชีวภาพ อย่างเช่น หญ้าเนเปียร์ ที่สามารถปลูกได้ตลอดทั้งปีและให้ผลผลิตต่อไร่ต่อปีสูง จึงเป็นประเด็นที่ควรได้รับการศึกษาและพัฒนา โดยมีการทำการวิจัยหญ้าที่เหมาะสมเป็นพืชพลังงาน พบว่าหญ้าเนเปียร์มีโครงสร้างสารอาหารเหมาะต่อการเติบโตของจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดก๊าซ และมีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงกว่าหญ้าชนิดอื่น (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน, 2555; สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2548)

นอกจากหญ้าเนเปียร์แล้วนั้น ยังมีฟางข้าวซึ่งมีปริมาณมากกว่า 50 % ของวัสดุเศษเหลือทางการเกษตรทั้งหมด คิดเป็นปริมาณทั้งประเทศประมาณ 50 M ton/yr (กรมพัฒนาที่ดิน, 2551) โดยฟางข้าวเป็นของเหลือทิ้งที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตข้าว ซึ่งเป็นผลจากวิธีการเก็บเกี่ยวที่ใช้แรงคน ทำให้การเก็บรวบรวมเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ได้ยาก โดยยังไม่มีมีการนำไปใช้ประโยชน์ในเชิง

อุตสาหกรรมโดยเฉพาะการใช้เป็นเชื้อเพลิง สำหรับส่วนที่เหลือยังมีการเผาทำลายโดยเฉพาะต่อซังในแปลงนา ซึ่งก่อให้เกิดมลภาวะกับสิ่งแวดล้อมได้ (Khalid *et al.*, 2011; Salminen and Rintala, 2002)

การหมักก๊าซชีวภาพนั้นสามารถทำการหมักได้หลายรูปแบบ การหมักโดยมีวัสดุหมักร่วมก็เป็นการหมักอีกรูปแบบหนึ่ง ที่จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการหมักให้มีผลผลิตก๊าซชีวภาพที่เพิ่มขึ้นได้ โดยการหมักแบบร่วม (Co-digestion) เป็นการนำของเสียที่มีปัญหาในการจัดการ เช่น ขยะอินทรีย์ เศษอาหาร หรือขยะของเสียที่เกิดจากภาคการเกษตรหรืออุตสาหกรรม และเศษวัชพืชที่เหลือใช้ทางการเกษตร มาใช้เพื่อเป็นสารอินทรีย์ในการหมัก เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพได้มากขึ้น การหมักแบบร่วมได้กลายมาเป็นสิ่งที่ผู้ดำเนินการวิจัยให้ความสนใจมาก เนื่องจากการหมักร่วมนอกจากจะสามารถผลิตก๊าซชีวภาพเป็นพลังงานทดแทนได้มากขึ้นแล้ว การหมักร่วมนยังสามารถช่วยแก้ไขปัญหาด้านสิ่งแวดล้อมของสารอินทรีย์ที่ไม่สามารถหมักด้วยตัวเองได้อีกด้วย (Hartmann *et al.*, 2005; Lehtomaki *et al.*, 2007; Liew *et al.*, 2012; Macias-Corral *et al.*, 2008; Sitorusa *et al.*, 2013; Wua *et al.*, 2010; Ye *et al.*, 2013)

การเลือกใช้วัสดุหมักร่วมจากมูลสัตว์ เช่น โค และกระบือ จึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจ เนื่องจากโคและกระบือนั้นมีจุลินทรีย์ที่อยู่ภายในกระเพาะหมัก ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการหมักอาหารหยาบได้ดี และสามารถผลิตผลผลิตสุดท้ายหรือกรดอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ และจุลินทรีย์ในกระเพาะหมักสามารถหมักอาหารหยาบได้สูงถึง 50 - 80 % นอกจากนี้ภายในกระเพาะหมักของสัตว์เคี้ยวเอื้องยังมีจุลินทรีย์ที่สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้ดี ซึ่งโดยปกติแล้วโคที่โตเต็มทีนั้นจะมีการผลิตก๊าซมีเทนและปลดปล่อยออกมาจากกระเพาะหมักวันละประมาณ 300 - 600 L ขึ้นกับคุณภาพของอาหาร (สุริยะ, 2551) ดังนั้นเราอาจนำเอาจุลินทรีย์ผสม ที่อยู่ในกระเพาะหมักของโคและกระบือ ไปใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนจากหญ้าเนเปียร์หรือฟางข้าวได้

การทำให้กระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนมีประสิทธิภาพผลิตก๊าซชีวภาพได้นั้น สภาพแวดล้อมและปัจจัยต่าง ๆ ล้วนเป็นสิ่งจำเป็น เนื่องจากสภาวะแวดล้อมและปัจจัยต่าง ๆ นั้นมีอิทธิพลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ จึงจำเป็นต้องสร้างสภาพแวดล้อมภายในระบบให้เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย โดยกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพนั้น เป็นผลจากการทำงานของแบคทีเรียหลายชนิดที่เกี่ยวข้องกัน และแบคทีเรียที่ผลิตก๊าซมีเทนมีการเจริญเติบโตช้า มีความอ่อนไหวง่ายต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพทั้งทางกายภาพและทางเคมีภายในระบบเป็นอย่างมาก เพราะถ้าหากสภาพแวดล้อมไม่เหมาะสมจะทำให้แบคทีเรียผลิตก๊าซมีเทนลดลง นอกจากนั้นชนิด

ของระบบไม้อัดออกซิเจนที่ใช้ก็มีผลอย่างมากต่อคุณภาพของก๊าซชีวภาพ โดยปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพนั้น ได้แก่ สารอาหาร อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด – ด่าง (pH) ความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหย (Volatile fatty acid) ระยะเวลาการเก็บกัก (Hydraulic retention time) ความเข้มข้นของของแข็งในถังหมัก (Substrate solids content) สารเคมี ขาปฏิกิริยา และสารพิษต่าง ๆ (ธนิศา, 2540)



วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากพืชทางการเกษตรและวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์ผสม (Mixed culture) จากกระเพาะหมัก (Rumen) ของโคและกระบือโดยทำการเปรียบเทียบผลผลิตก๊าซมีเทน (Methane yield) ในการเดินระบบแบบ Single - stage semi - continuous anaerobic digestion

1.1 เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพจากพืชทางการเกษตร คือ

1.1.1 หญ้าเนเปียร์ (Napier grass)

1.1.2 หญ้าเนเปียร์ผสมมูลโค (Mixed slurry of napier grass and cow dung)

1.2 เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร คือ

1.2.1 ฟางข้าว (Rice straw)

1.2.2 ฟางข้าวผสมมูลโค (Mixed slurry of rice straw and cow dung)

2. เพื่อเปรียบเทียบผลผลิตก๊าซมีเทน (Methane yield) ระหว่าง

2.1 หญ้าเนเปียร์กับหญ้าเนเปียร์ผสมมูลโค

2.2 ฟางข้าวกับฟางข้าวผสมมูลโค

3. เปรียบเทียบผลผลิตก๊าซมีเทนระหว่างการผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์และการผลิตก๊าซชีวภาพจากฟางข้าว

ขอบเขตการวิจัย

1. การทดลองนี้ทำในระดับปฏิบัติการ (Lab scale) ความจุถังหมักประมาณ 5 L และมีการเก็บตัวอย่างก๊าซโดยการแทนที่น้ำ (Water displacement)

2. สารละลายผสม (Substrate slurry) ของการหมัก คือ หญ้าเนเปียร์ (Napier grass) สายพันธุ์ปากช่อง1 และฟางข้าว ที่ทำการหมักร่วมกับมูลโค (Cow dung)

3. เชื้อจุลินทรีย์ผสม (Mixed culture) จากกระเพาะหมัก (Rumen) โคและกระบือ
4. เติบระบบแบบ Single - stage semi - continuous anaerobic digestion



การตรวจเอกสาร

การตรวจเอกสารสำหรับการทำวิจัยในครั้งนี้ได้กล่าวถึงในเรื่องของก๊าซชีวภาพ กระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน ฐานเปปต์ ฟางข้าว และจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักของโคและกระบือ

ก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพ (Biogas) หมายถึง ก๊าซที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจนด้วยแบคทีเรีย 2 กลุ่ม คือ แบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด (Acid forming bacteria) ในที่นี้หมายถึง กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile fatty acid) และแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทน (Methane producing bacteria) โดยแบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด จะทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลใหญ่ ให้กลายเป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเล็กลง จากนั้นแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทนจะใช้สารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเล็กเป็นสารอาหารและย่อยสลายให้ผลผลิตหลักเป็นก๊าซมีเทน (CH_4) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) โดยมีก๊าซอื่น ๆ เกิดขึ้นในปริมาณเล็กน้อย เช่น ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) หรือก๊าซไข่เน่า และก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) เป็นต้น กระบวนการเกิดก๊าซชีวภาพต้องระวังไม่ให้อากาศเข้าไปสัมผัสกับแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทน เพราะจะทำให้ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนลดลง ก๊าซชีวภาพสามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติ เมื่อมีแบคทีเรียและสารอินทรีย์ อยู่ในสิ่งแวดล้อมในสภาวะที่เหมาะสมคือไม่มีอากาศ ในธรรมชาติ ก๊าซชีวภาพมักจะเกิดขึ้นบริเวณที่มีการหมัก เช่น ก้นบ่อ ก้นแม่น้ำ ก้นทะเลสาบ หนองน้ำ บึงและนาข้าวที่มีน้ำท่วมขัง เป็นต้น (กรมโรงงานอุตสาหกรรม , 2553)

ก๊าซชีวภาพประกอบไปด้วยก๊าซหลายชนิด ส่วนใหญ่เป็นก๊าซมีเทน ประมาณ 50 - 70 % และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ประมาณ 20 - 50 % ส่วนที่เหลือเป็นก๊าซอื่น ๆ เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ แอมโมเนีย (NH_3) และไอน้ำ (H_2O) นอกจากนี้ยังมีสิ่งปนเปื้อนอื่น ๆ เช่น ไซลอคเซน โฟม คราบ เมือก และตะกอน เป็นต้น บางครั้งอาจพบปริมาณก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) สูงถึง 1 % (10,000 part per million; ppm) ในกรณีที่น้ำเสียนั้นมีองค์ประกอบของสารซัลเฟต (SO_2) สูง (ตารางที่ 1)

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

Composition	Concentration
CH ₄	50 - 70 % (v/v)
CO ₂	20 - 50 % (v/v)
H ₂ O (Vapor)	0 - 10 % (v/v)
N ₂	0 - 5 % (v/v)
O ₂	0 - 2 % (v/v)
NH ₃	0 - 1 % (v/v)
H ₂ S	50 - 10,000 ppm

ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2553)

มีเทนเป็นก๊าซที่ให้พลังงานหลัก ส่วนออกซิเจนและไนโตรเจนนั้นอาจเกิดขึ้นได้ในกรณีที่มีการเติมอากาศเข้าระบบ ขณะที่ไฮโดรเจนซัลไฟด์นั้นแม้จะให้พลังงานแต่ก็มีผลเสียต่อระบบการใช้งาน เพราะเมื่อไฮโดรเจนซัลไฟด์รวมกับน้ำหรือความชื้นจะมีฤทธิ์เป็นกรด เกิดการกัดกร่อนอุปกรณ์ได้ นอกจากนั้นความชื้นยังทำให้เกิดคราบตะกอน เมื่อก หรือตะกอนจุลินทรีย์ที่อุปกรณ์ต่าง ๆ ได้ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553)

กระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน

1. กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน (Biological anaerobic process)

กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน เป็นวิธีการที่ใช้แบคทีเรียย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ ได้แก่ พวกลาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน ด้วยปฏิกิริยาทางจุลชีววิทยาแบบไม่ใช้ออกซิเจน จนทำให้มีโมเลกุลขนาดเล็กลงและในที่สุดเกิดเป็นก๊าซชีวภาพที่ประกอบไปด้วย ก๊าซมีเทน (CH₄) และคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ประมาณ 80 - 90 % ส่วนที่เหลือจะถูกนำไปสังเคราะห์สร้างเซลล์ใหม่สารอินทรีย์จึงมีปริมาณน้อยลง ซึ่งระบบการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนนี้เหมาะสมกับสภาพพื้นที่ที่มีสภาพอากาศร้อน เช่น ประเทศไทย เนื่องจากปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นต้องการอุณหภูมิที่ค่อนข้างสูง (เสริมพล และไชยยุทธ, 2527; ธนิตา, 2540)

โดยถ้าเป็นการบำบัดน้ำเสียนั้น น้ำเสียที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ ควรจะมีค่า COD มากกว่า 1,500 mg/L และมีอุณหภูมิสูง (25 - 35 °C) ถ้า น้ำเสียมีค่า COD ต่ำกว่า 1,500 mg/L การเลือกใช้ระบบที่ใช้ออกซิเจนจะมีความเหมาะสมมากกว่า (Metcalf and Eddy, 2003) กระบวนการย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจนนี้ได้มีการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายนานหลายปีเพื่อบำบัดของเสียอินทรีย์รวมถึงมูลสัตว์ (Chynoweth *et al.*, 1999; Burton and Turner, 2003) และบำบัดของเสียจากการเกษตร น้ำเสีย ขยะอินทรีย์จากอุตสาหกรรม ขยะมูลฝอยชุมชน เศษพืช และวัชพืช (Vandevivere, 1999) ก๊าซชีวภาพที่ผลิตในระหว่างการย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจนสามารถใช้เป็นแหล่งพลังงาน โดยทั่วไปนำไปใช้ให้ความร้อนและผลิตไฟฟ้า หรือเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพ (Murphy and Power, 2009)

2. ขั้นตอนในการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน

ขั้นตอนในการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนมี 4 ขั้นตอน (McCarty, 1964) ได้แก่

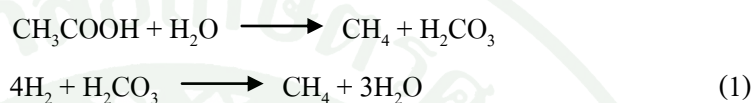
2.1 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ ให้มีขนาดเล็กลง (Hydrolysis) โดยสารประกอบอินทรีย์ที่ซับซ้อนทั้งสารที่ละลายน้ำได้และสารที่ละลายน้ำไม่ได้ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน จะถูกทำให้ละลายน้ำโดยเอนไซม์ที่ขับออกมาสู่ภายนอกเซลล์ (Extracellular enzyme) ของแบคทีเรียในกลุ่ม hydrolytic ซึ่งจะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา โดยในขั้นตอนนี้จะเป็นเพียงการเปลี่ยนสารประกอบอินทรีย์ที่มีโครงสร้างซับซ้อน ไปเป็นสารประกอบอินทรีย์อย่างง่าย ที่สามารถละลายน้ำได้ เช่น กลูโคส กรดอะมิโน กรดไขมัน และกลีเซอรอล ซึ่งการเปลี่ยนแปลงสารประกอบเชิงซ้อนให้เป็นสารพวกเชิงเดี่ยวอย่างง่ายเป็นขั้นตอนที่ช้าที่สุดในการผลิตก๊าซมีเทน

2.2 กระบวนการสร้างกรดอินทรีย์ (Acidogenesis) เป็นขั้นตอนของแบคทีเรียสร้างกรด (Acidogenic bacteria) โดยเปลี่ยนสารอินทรีย์ที่มาจากกระบวนการย่อยสลายของแบคทีเรียในขั้นแรกให้เป็นกรดอินทรีย์ กรดไขมันระเหยง่าย และสารอื่น

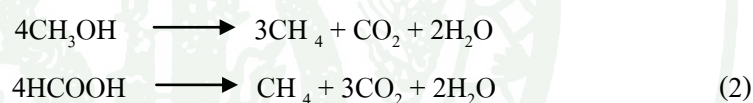
2.3 กระบวนการสร้างกรดอะซิติก (Acetogenesis) เป็นขั้นตอนของแบคทีเรียที่จะสร้างสารอะซิติกประเภทอะซิโตน (Acetone) จะเปลี่ยนสารประเภทกรดไขมันระเหยง่ายให้กลายเป็น

สารอะซิเตต ฟอร์เมต ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสารตั้งต้นของแบคทีเรียในขั้นตอนถัดไป

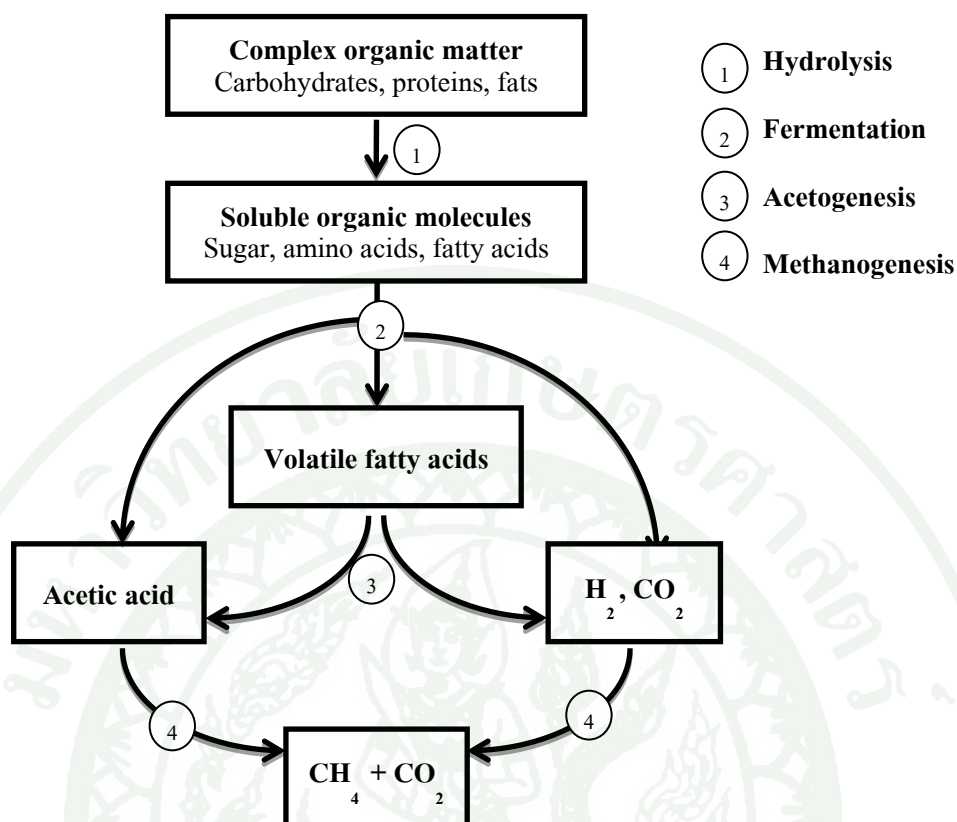
2.4 กระบวนการสร้างก๊าซมีเทน (Methanogenesis) กรดอะซิติกเกิดขึ้นในขั้นตอนสร้างกรดอะซิติก จะถูกแบคทีเรียในกลุ่ม Methanogenic bacteria ทำการย่อยสลายแล้วเปลี่ยนให้กลายเป็นก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ประมาณ 70 % ดังสมการ (1)



กรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่มีจำนวนคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม จะเปลี่ยนเป็นมีเทนไม่ได้โดยตรง ต้องเปลี่ยนให้เป็นกรดอะซิติกหรือไฮโดรเจนก่อน จึงจะสามารถผลิตมีเทนได้ นอกจากนี้แบคทีเรียอาจใช้สารตั้งต้น เช่น เมทานอล หรือกรดฟอร์มิก ในการผลิตมีเทน ดังสมการ (2)



โดยภาพรวมขั้นตอนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนทั้งหมด แสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน

ที่มา: Cooke (2013)

3. การหมักย่อยร่วม (Co - digestion)

การหมักย่อยร่วม คือการนำของเสียที่มีปัญหาในการจัดการ เช่น ขยะอินทรีย์ เศษอาหาร หรือขยะของเสียที่เกิดจากโรงงานเกษตรหรืออุตสาหกรรม และเศษวัชพืชที่เหลือใช้ทางการเกษตร ในบริเวณใกล้เคียงฟาร์มเลี้ยงสัตว์ มาใช้เพื่อเป็นสารอินทรีย์ในการหมักย่อย ทำให้เกิดประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพได้มากขึ้น การหมักย่อยร่วมในปัจจุบันได้กลายมาเป็นสิ่งที่ผู้ดำเนินการวิจัยให้ความสนใจมาก เนื่องจากการหมักย่อยร่วมนอกจากจะสามารถผลิตก๊าซชีวภาพเป็นพลังงานทดแทนได้ มากขึ้นแล้ว ยังสามารถแก้ไขปัญหาทางด้านสิ่งแวดล้อมของสารอินทรีย์ที่ไม่สามารถหมักย่อยด้วยตัวเองได้อีกทางหนึ่ง โดยพบว่าการหมักร่วมโดยใช้ของเสียที่เป็นของแข็ง จะมีความหลากหลายของสารอาหารและแบคทีเรียในของเสียที่แตกต่างกัน จะเพิ่มประสิทธิภาพใน

กระบวนการหมัก (Hartmann *et al.*, 2005) โดยมีการศึกษาของเสียพวกเศษใบไม้ เช่น หญ้าเนเปียร์ ฟางข้าว ข้าวโพด พบว่าช่วยเพิ่มศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของน้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงสุกร คิดเป็นร้อยละ 5 - 25 เมื่อเทียบกับการหมักย่อยเฉพาะน้ำเสียจากฟาร์มสุกรเพียงอย่างเดียว ปริมาณก๊าซมีเทนที่ได้จากการทดลองสามารถบ่งบอกชนิดของของเสียที่ให้ปริมาณก๊าซมีเทนได้ดีที่สุด หรือให้ปริมาณก๊าซมีเทนในปริมาณที่สามารถนำไปผลิตก๊าซชีวภาพได้ (สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2548) โดย Hills and Roberts (1981) แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มฟางข้าวสับในการหมักมูลโคแบบไม่ใช้ออกซิเจน ทำให้มีการผลิตก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น

นอกจากนี้ Ye *et al.* (2013) ได้ทำการศึกษาผลของอัตราส่วนวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพแบบไม่ใช้ออกซิเจนโดยใช้วัสดุหมักร่วมของฟางข้าวกับเศษอาหารและมูลสุกร มาทำการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนขั้นตอนเดียว (Single - stage anaerobic digestion) โดยเดินระบบแบบเติมครั้งเดียว (Batch operation) ที่อุณหภูมิปานกลาง (37 ± 1 °C) และมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ 54 g/L โดยคิดจากปริมาณ TVS ผลการศึกษาพบว่า อัตราส่วนที่เหมาะสมของเศษอาหารต่อมูลสุกรต่อฟางข้าวเป็น 0.4 : 1.6 : 1.0 ตามลำดับ ซึ่งอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) คือ 21.7 มีปริมาณมีเทน 45.9 - 70.0 % และอัตราการลดลงของ TVS เป็น 55.8 % มีผลผลิตก๊าซชีวภาพคือ 674.4 L/kg TVS ซึ่งสูงกว่าการย่อยสลายฟางข้าวหรือมูลสุกรเพียงอย่างเดียว

การศึกษาของ Macias-Corral *et al.* (2008) ได้ทำการศึกษาการย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจนของมูลโคนม (Cow manure) สารอินทรีย์ของขยะชุมชน (Organic fraction of municipal solid waste) และของเสียจากโรงงานฝ้ายฝ้าย (Cotton gin waste) ทำการหมักย่อยด้วยระบบการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนสองขั้นตอนในระดับต้นแบบ (Pilot scale) ขยะชุมชนและมูลโคถูกหมักย่อยแบบแยกเป็นชนิดเดียวและหมักย่อยแบบรวม ในการศึกษาการย่อยมูลโคพบว่าได้มีเทน 62 m³/ton DM ของ มูลโค การย่อยขยะชุมชนพบว่าได้มีเทน 37 m³/ton DM ของขยะ และการหมักย่อยมูลโคร่วมกับขยะชุมชนพบว่าได้มีเทน 172 m³/ton DM ของของเสีย ส่วนการหมักย่อยมูลโคร่วมกับของเสียจากโรงงานฝ้ายฝ้ายพบว่าได้มีเทน 87 m³/ton DM ของของเสีย การเปรียบเทียบการหมักแบบแยกชนิดของเสียกับการหมักย่อยแบบรวม แสดงให้เห็นว่าการหมักย่อยแบบรวมมีผลผลิตก๊าซมีเทนที่สูงกว่าการหมักย่อยแบบแยกชนิด นอกจากนี้การหมักย่อยแบบรวมของขยะชุมชนกับมูลโคยังส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของมวลสารอินทรีย์ที่สูงกว่ารวมทั้งยังเหลือของเสียที่ผ่านการหมักย่อยน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับหมักแบบแยกชนิด เช่นเดียวกับการศึกษาของ Jagadabhi *et al.* (2008) Lehtomaki *et al.* (2007), Liew *et al.* (2012), Sitorusa *et al.* (2013) และ Wua *et al.* (2010) ที่พบว่าหมักแบบรวมจะช่วยเพิ่มผลผลิตก๊าซมีเทน

4. สภาพแวดล้อมและปัจจัยต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ

การทำให้กระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนมีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพได้นั้น สภาพแวดล้อมและปัจจัยต่าง ๆ เป็นสิ่งจำเป็นเนื่องจากมีอิทธิพลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยจะต้องสร้างสภาพแวดล้อมภายในระบบให้มีความเหมาะสมกับการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย เนื่องจากกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพเป็นผลมาจากการทำงานของแบคทีเรียหลายชนิดที่เกี่ยวข้องกัน อีกทั้งจุลินทรีย์ที่ผลิตก๊าซมีเทนมีการเจริญเติบโตช้าและมีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพ ทั้งทางกายภาพและทางเคมีภายในระบบเป็นอย่างมาก เพราะถ้าหากสภาพแวดล้อมไม่เหมาะสมจะทำให้จุลินทรีย์ผลิตก๊าซลดลง นอกจากนั้นชนิดของระบบไม่ใช้ออกซิเจนที่ใช้ก็มีผลอย่างมากต่อคุณภาพของก๊าซชีวภาพ โดยปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพนั้นประกอบด้วยหลายปัจจัย (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553) ได้แก่

4.1 ความสัมพันธ์ของสารอาหารกับชนิดของกลุ่มจุลินทรีย์ที่เจริญเติบโตในระบบการหมัก ประสิทธิภาพในการย่อยสลายสารอาหารที่ต่างชนิดกันจะมีอัตราในการย่อยสลายที่แตกต่างกันไปด้วย โดยสารอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรต จะย่อยสลายได้เร็วกว่าพวกโปรตีนและไขมัน ในเซลล์จุลินทรีย์ประกอบด้วยธาตุสำคัญ คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส ออกซิเจน และซัลเฟอร์ จุลินทรีย์ที่ไม่ใช้ออกซิเจน ต้องการไนโตรเจนเทียบกับน้ำหนักเซลล์ 9.4 เท่า ในขณะที่จุลินทรีย์ชนิดไม่ใช้ออกซิเจนจะสร้างเซลล์เพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมากได้ จะต้องมีความธาตุไนโตรเจนต่อคาร์บอน (N/C) ในสารอาหารประมาณ 0.0620 และธาตุฟอสฟอรัส 1 ใน 7 เท่าของปริมาณธาตุไนโตรเจนที่ประกอบในเซลล์ ดังนั้นสารตั้งต้นที่ใช้ควรมีสารอาหารที่มีปริมาณเพียงพอแก่การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ โดยทั่วไปต้องการธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในอัตราส่วน 11 : 2 สัดส่วนที่เหมาะสมเพื่อให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์และผลิตก๊าซชีวภาพได้ดีควรมีสัดส่วนสารอินทรีย์ในรูป COD ต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส (COD : N : P) เท่ากับ 100 : 2.2 : 0.4 หรือสารอินทรีย์ในรูป BOD (Biochemical oxygen demand) ต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส (BOD : N : P) เท่ากับ 100 : 1.1 : 0.2 (สำนักวิจัย คำนวณพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, ม.ป.ป.)

4.2 อุณหภูมิ (Temperature) อุณหภูมิที่เหมาะสมกับการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนนั้นมี 2 ช่วง ได้แก่ ช่วง Mesophilic คือที่อุณหภูมิระหว่าง 30 - 35 °C และช่วง Thermophilic คือที่อุณหภูมิระหว่าง 50 - 65 °C โดยอุณหภูมิในช่วง 40 - 50 °C และอุณหภูมิต่ำกว่า 10 °C กลุ่มจุลินทรีย์ที่ผลิตก๊าซมีเทนจะถูกยับยั้ง และส่วนใหญ่จะเดินระบบที่อุณหภูมิ 30 - 35 °C มากกว่าที่

อุณหภูมิ 50 - 65 °C เนื่องจาก Thermophilic bacteria เป็นจุลินทรีย์ที่มีความอ่อนไหวง่ายต่อการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยทางสิ่งแวดล้อม จึงจะประสบปัญหาในการควบคุมระบบได้ยากกว่า Mesophilic bacteria

4.3 ค่า pH และความเข้มข้นของกรดระเหยง่าย (Volatile acid) เมื่อกระบวนการหมักเข้าสู่สภาพคงที่แล้ว จะเกิดความสมดุลของค่า pH เนื่องจากเกิดคาร์บอนไดออกไซด์ไบคาร์บอเนต ($\text{CO}_2\text{-HCO}_3$) และเกิดแอมโมเนีย ($\text{NH}_3\text{-NH}_4$) ทำให้สารละลายในถังหมักมีค่า pH ระหว่าง 7.0 - 8.5 ซึ่งเป็นค่า pH ที่วัดได้ในสารละลายในถังหมักก๊าซชีวภาพที่ทำงานเป็นปกติ ถ้าค่า pH ของสารละลายในถังหมักลดลงต่ำกว่า 6.2 จะหยุดยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ที่ผลิตก๊าซมีเทน เป็นผลทำให้การผลิตก๊าซมีเทนลดลง หรือไม่มีการผลิตก๊าซมีเทนเลย

ค่า pH ของวัสดุที่จะนำมาหมักควรมีค่าระหว่าง 6.0 - 7.0 โดยในช่วงแรกของการหมักนั้น ค่า pH จะลดลงจนต่ำกว่า 5.0 และเมื่อการหมักดำเนินต่อไปก็จะเกิดแอมโมเนียขึ้น ทำให้ค่า pH เพิ่มขึ้นจนเกิน 8 ซึ่งในช่วงนี้จุลินทรีย์ก็จะสร้างก๊าซมีเทนขึ้นมา ทำให้ค่า pH ลดลงจนอยู่ในช่วง 7.2 - 8.2 โดยกรมโรงงานอุตสาหกรรม (2553) ได้แนะนำค่า pH ที่เหมาะสมในการเดินระบบหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนควรอยู่ในช่วง 6.6 - 7.4 ซึ่งเป็นค่า pH ของระบบที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มผลิตก๊าซมีเทน ซึ่ง Zhang *et al.* (2007) ได้รายงานว่าการหมักของเสียในครัวเรือนที่ควบคุมค่า pH เป็น 7.0 ส่งผลให้มีอัตราการย่อยสลายและกระบวนการสร้างกรดอินทรีย์ที่ค่อนข้างสูง โดยในกรณีที่ต้องการควบคุมค่า pH ให้เหมาะสมกับระบบหมัก อาจจะใช้วิธีการเติมสารเคมี เช่น โซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) โซเดียม-ไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือโซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) เป็นต้น ไม่ควรใช้ปูนขาว (Ca(OH)_2) เติมลงระบบ เนื่องจากอาจจะทำให้เกิดการอุดตันในระบบได้

4.4 ระยะเวลาการเก็บกัก (Hydraulic retention time; HRT) เป็นระยะเวลาที่ให้อินทรีย์สารอินทรีย์ถูกผสมอยู่ในถังหมักก๊าซ เพื่อให้จุลินทรีย์ได้ย่อยสลายสารอินทรีย์ และใช้เป็นอาหารในการเพิ่มจำนวนจุลินทรีย์ให้มากขึ้น ก่อนที่จะถูกนำออกจากถังหมัก ซึ่งโดยปกติจะใช้เวลา 20 - 50 วัน ซึ่งมีการรวบรวมรายงานจากนักวิจัยอื่น พบว่า HRT การหมักของแข็งในถังหมักมีค่าอยู่ในช่วง 3 - 55 วัน โดยขึ้นอยู่กับประเภทของเสีย อุณหภูมิในการเดินระบบ และจำนวนขั้นตอนการหมัก (Hartmann and Ahring, 2006) HRT สำหรับถังหมักแบบ Continuous หรือ Semi - continuous สามารถคำนวณเป็นค่าเฉลี่ยได้ดังสมการ (3)

$$\text{HRT (day)} = \frac{\text{ปริมาตรถังหมัก (L)}}{\text{ปริมาณของเสียที่เติมเข้าถังหมักแต่ละวัน (L/day)}} \quad (3)$$

ถ้า HRT สั้นมากเกินไป ส่งผลให้การชะล้างของจุลินทรีย์ในถังหมักจะมีอัตราเร็วกว่าการสร้างจุลินทรีย์ใหม่ ทำให้ปฏิกิริยาการย่อยสลายหยุดชะงัก เนื่องจากปริมาณจุลินทรีย์ในถังหมักลดลงหรือหมดไป แต่ถ้า HRT มากเกินไป ถังหมักจะต้องมีปริมาตรใหญ่ขึ้น ทำให้ราคาค่าก่อสร้างสูงตามไปด้วย ตัวแปรที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับเวลาในถังหมักมี 2 ตัวแปร ได้แก่ ระยะเวลาเก็บกักตะกอน (Solid retention time; SRT) และ HRT โดยที่ SRT เป็นเวลาเฉลี่ยที่จุลินทรีย์อยู่ในถังปฏิกิริยา ส่วน HRT เป็นเวลาเฉลี่ยที่น้ำเสียอยู่ในถังปฏิกิริยา ตัวแปรทั้งสองนี้อาจจะสัมพันธ์กันหรือไม่ก็ได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะการเดินระบบ โดย Methane - forming bacteria ต้องการเวลาสำหรับการฟักตัวและเพิ่มจำนวนมากกว่าจุลินทรีย์กลุ่มที่ใช้ออกซิเจน

4.5 กรดไขมันระเหยง่าย (Volatile fatty acids; VFA) ปริมาณ VFA มีความสำคัญในการตรวจสอบสถานะสมดุลของระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน กรดไขมันระเหยง่าย ได้แก่ กรดอะซิติก กรดบิวทิริก และกรดโพรพิโอนิก เป็นต้น ผลผลิตเหล่านี้เป็นสารตัวกลางส่วนใหญ่ที่เกิดขึ้นในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจนของแบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด หากพบว่าปริมาณ VFA มีมากขึ้น มักเป็นสัญญาณเตือนถึงความล้มเหลวของระบบ ในระบบที่มีการสะสมของ VFA ในปริมาณมาก (มากกว่า 2,000 mg C₂H₄O₂/L) ช่วงแรกจะทำให้ค่า pH ของระบบลดลง และถ้ายังไม่มีการกำจัดปริมาณ VFA ให้น้อยลง ต่อมาค่า pH ของระบบก็จะลดต่ำลง และถ้าค่า pH ต่ำกว่า 6.5 จะเป็นอันตรายต่อแบคทีเรียกลุ่มที่ผลิตมีเทน หากยังไม่ทำการแก้ไขปล่อยให้ค่า pH ลดต่ำลงจนถึง 4.5 – 5.0 ก็จะทำให้ระบบเสียสมดุลและเป็นผลให้ระบบล้มเหลวได้ในสภาวะปกติปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายภายในถังหมักไม่ควรเกิน 2,000 mg C₂H₄O₂/L (สำนักวิจัย ค้นคว้าพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, ม.ป.ป.) วิธีการควบคุมระบบที่ดีที่สุด ควรให้มีค่าสัดส่วนระหว่างปริมาณ VFA ต่อค่า pH ไม่ควรเกิน 0.3 – 0.4 โดยจากการศึกษาของ Ye *et al.* (2013) ได้ทำการศึกษาเพื่อที่จะตรวจสอบผลของอัตราส่วนวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพแบบไม่ใช้ออกซิเจนโดยใช้วัสดุหมักร่วมของฟางข้าวกับเศษอาหารและมูลสุกร มาทำการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนขั้นตอนเดียว (Single - stage anaerobic digestion) โดยเดินระบบแบบเดิมครั้งเดียว (Batch operation) ที่อุณหภูมิปานกลาง (37 ± 1 °C) และมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ 54 g/L โดยคิดจากปริมาณ TVS พบว่า การผลิตก๊าซชีวภาพถูกจำกัดโดย VFA จะเกิดขึ้นเมื่อมีการใส่เศษอาหารในปริมาณที่มากกว่า 26 % ซึ่งจากการวิเคราะห์กรดไขมันระเหย ทำให้พบว่าในถังหมักมีการผลิตก๊าซชีวภาพเกิดขึ้นจริง

4.6 ความเข้มข้นของของแข็งในถังหมัก (Substrate solids content) ความเข้มข้นของของแข็งในถังหมักแบบ Continuous ควรมีค่าอยู่ระหว่าง 5 - 10 % และมีค่าประมาณ 25 % สำหรับถังหมักแบบ Batch เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการผลิตก๊าซชีวภาพ ความเข้มข้นของของแข็งในถังหมักมีมากไปหรือน้อยไปก็จะเกิดผลเสียคือ ถ้าความเข้มข้นของของแข็งเพิ่มมากเกินไป ก็จะทำให้เกิดการสะสมของกรดเพิ่มขึ้น (ค่า pH ลดต่ำลง) ทำให้กระบวนการหมักหยุดชะงัก เป็นผลทำให้ไม่มีการผลิตก๊าซ แต่ถ้าความเข้มข้นของของแข็งในถังหมักน้อยเกินไปก็จะทำให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพต่อปริมาตรของถังไม่มากเท่าที่ควรทำให้ได้ก๊าซน้อย โดยในการผลิตก๊าซชีวภาพจากพืชและของเหลือจากการเกษตร พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณสารตั้งต้นเป็น 40 % VS พบว่าอัตราการผลิตก๊าซมีเทนของจุลินทรีย์ลดลง 4 – 12 % (Lehtomäki, 2006)

4.7 สารเคมี ยาปฏิชีวนะ และสารพิษ โดยสารเคมีและยาปฏิชีวนะที่ใช้ในการเกษตร การดูแลรักษาสุขภาพสัตว์ การล้างคอก และกิจกรรมอื่น ๆ อาจมีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ ทั้งนี้เป็นเพราะสารเคมีและยาปฏิชีวนะบางอย่างเป็นอันตรายกับจุลินทรีย์ที่ผลิตก๊าซชีวภาพ ทำให้เกิดก๊าซชีวภาพน้อยลงหรือไม่เกิดเลย น้ำยาซักล้างและแร่ธาตุบางชนิด เช่น โซเดียม (Na) โพแทสเซียม (K) แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) แอมโมเนียม (NH_4^+) และซัลเฟอร์ (S) เป็นสารที่ทำให้เกิดพิษต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ภายในระบบ แต่โลหะหนักบางชนิด เช่น ทองแดง (Cu) นิกเกิล (Ni) โครเมียม (Cr) สังกะสี (Zn) และตะกั่ว (Pb) มีประโยชน์ต่อจุลินทรีย์ในปริมาณน้อยเท่านั้น เนื่องจากเป็นส่วนประกอบของเซลล์จุลินทรีย์ แต่ถ้ามีในปริมาณมากก็จะทำให้เกิดพิษได้ โดยลักษณะโครงสร้างพื้นฐานของเซลล์จุลินทรีย์มีน้ำเป็นองค์ประกอบประมาณ 80 % ส่วนที่เหลือ 20 % ประกอบด้วยอินทรีย์สาร 90 % และอนินทรีย์สาร 10 % สูตรโครงสร้างอย่างง่ายของเซลล์ ($\text{C}_5\text{H}_7\text{O}_2\text{N}$) จะมีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบอยู่ประมาณ 50 % แต่ถ้าพิจารณารวมฟอสฟอรัสด้วย สูตรโครงสร้างจะเปลี่ยนเป็น $\text{C}_{60}\text{H}_{87}\text{O}_{23}\text{N}_{12}\text{P}$ ซึ่งองค์ประกอบจะเปลี่ยนแปลงไปตามเวลาและชนิดของจุลินทรีย์ (Metcalf and Eddy, 2003)

ธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับการเติบโตของจุลินทรีย์สามารถแบ่งได้ 2 กลุ่ม คือ ธาตุอาหารหลัก (Macronutrient) และธาตุอาหารรอง (Micronutrient) ซึ่งธาตุอาหารหลักก็มีความสำคัญสำหรับการสังเคราะห์เซลล์ ได้แก่ คาร์บอน ไนโตรเจน ซัลเฟอร์ ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แมกนีเซียม แคลเซียม เหล็ก โซเดียม และคลอรีน ส่วนธาตุอาหารรอง ได้แก่ สังกะสี แมงกานีส โมลิบดีนัม ซีลีเนียม โคบอลต์ ทองแดง นิกเกิล และวิตามิน ซึ่งมีบทบาทในกระบวนการสันดาปและการทำงานของเอนไซม์ในเซลล์ สำหรับธาตุอาหารรองสามารถคำนวณความต้องการอย่างน้อยได้ โดยเหล็กมีความต้องการอย่างน้อยประมาณ 0.02 - 0.03 mg/g COD ส่วนแมงกานีส โมลิบดีนัม

ซีลีเนียม และ โคบอลต์ มีความต้องการอย่างน้อยประมาณ 0.003 - 0.004 mg/g COD (Rittmann and McCarty, 2001) โดยระดับความเข้มข้นสูงสุดของแคลเซียม ทองแดง โพแทสเซียม และแมกนีเซียมที่ไม่เป็นอันตรายต่อจุลินทรีย์ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ความเข้มข้นสูงสุดของแคลเซียม ทองแดง โพแทสเซียม และแมกนีเซียมที่ไม่เป็นอันตรายต่อจุลินทรีย์ในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน

Toxic	Concentration (mg/L)
Ca ²⁺	2,500
Cu	1
K ⁺	2,500
Mg ²⁺	1,000

ที่มา: กรมโรงงานอุตสาหกรรม (2553)

5. ระบบของการหมักก๊าซชีวภาพ

ระบบของการหมักก๊าซชีวภาพสามารถแบ่งตามรูปแบบในการเติมสารหมัก (สารอินทรีย์และน้ำ) ได้ 3 แบบ (Khalid, 2011) คือ

5.1 แบบเติมครั้งเดียว (Batch operation) โดยการเติมสารอินทรีย์ครั้งเดียว แล้วปล่อยให้สารอินทรีย์ถูกย่อยสลายจนหมดแล้วจึงเอาออก และเติมสารอินทรีย์ลงใหม่ ทำให้ประสิทธิภาพการเกิดก๊าซต่ำและปริมาณก๊าซไม่คงที่

5.2 แบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi - continuous operation) โดยการเติมสารอินทรีย์เป็นประจำวันเว้นวันหรือวันสองวัน ขึ้นอยู่กับสภาพสารอินทรีย์ที่มีและขนาดของบ่อหมัก ผลที่ได้มีประสิทธิภาพสูงกว่าการเดินระบบแบบเติมครั้งเดียว ปริมาณก๊าซที่ได้ค่อนข้างคงที่

5.3 แบบต่อเนื่อง (Continuous operation) เป็นการเติมสารอินทรีย์เข้าและนำเอาสารอินทรีย์ที่ถูกย่อยสลายแล้วออกอยู่ตลอดเวลา ด้วยอัตราการไหลเข้าและอัตราการไหลออกที่มีความคงที่ ประสิทธิภาพของระบบนี้จะสูงสุด เหมาะสมกับโรงงานอุตสาหกรรม ปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นค่อนข้างคงที่อยู่ตลอดเวลา

หญ้านเปียร์

หญ้าสามารถนำมาใช้ประโยชน์เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตก๊าซมีเทนเนื่องจากหญ้าให้ผลผลิตสูง โดยปริมาณ TVS ที่สูงในหญ้าจะมีความสัมพันธ์กับผลผลิตมีเทน (Hall, 1997; Murphy and Power, 2009; Seppala *et al.*, 2009) ธาตุอาหารที่มีในหญ้าทั่วไปแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งการศึกษาของ Gelegenis *et al.* (2007) พบว่าการเกิดก๊าซชีวภาพที่เพิ่มขึ้นมาจากการย่อยสลายของจุลินทรีย์ที่ใช้คาร์โบไฮเดรตจากวัตถุดิบซึ่งเป็นส่วนผสมหลักในการหมัก

หญ้านเปียร์สายพันธุ์ปากช่อง 1 (*Pennisetum purpureum* cv. Pakchong1) เป็นหญ้าลูกผสมเนเปียร์สายพันธุ์หนึ่ง ซึ่งเกิดจากการคัดเลือกปรับปรุงพันธุ์โดยกรมปศุสัตว์ (ไกรลาศ, 2554) ในระยะแรกได้มีการกระจายพันธุ์ไปสู่เกษตรกรอย่างไม่เป็นทางการและได้รับความนิยมเพิ่มมากขึ้นเนื่องจากมีการเจริญเติบโตเร็ว ให้ผลผลิตสูง ตอบสนองต่อการให้น้ำและปุ๋ย มีอายุหลายปี ทรงต้นเป็นกอตั้งตรง สูงประมาณ 2 - 4 m แดกกอดี และมีระบบรากแข็งแรง ชอบดินที่มีการระบายน้ำดี มีความอุดมสมบูรณ์ มีผลผลิตสูง สัตว์ชอบกิน และทำหญ้าหมักได้ดี โดยมีคุณค่าทางอาหารสูง ขยายพันธุ์โดยใช้ท่อนพันธุ์ เนื่องจากเป็นหญ้าที่ไม่ติดเมล็ด จึงไม่ปัญหาการเป็นวัชพืชในนาคนาด (สายัณห์ ทัดศรี, 2539)

พอลิเมอร์หลักที่สามารถพบในผนังเซลล์พืชพวกหญ้า และพางข้าว ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างที่แข็งแรงจะทำให้พืชมีรูปร่างและโครงสร้างที่มั่นคง (Perez *et al.*, 2002) ซึ่งจะค่อนข้างทนต่อการย่อยสลาย (Orr and Kirk, 2003) ส่วนที่เป็นเฮมิเซลลูโลสจะถูกย่อยได้ง่ายโดยเอนไซม์เฮมิเซลลูเลส (Hemicellulase enzymes) (Clavero and Razz, 2002) สำหรับลิกนินซึ่งเป็นส่วนที่ทนทานที่สุดในโครงสร้างคาร์โบไฮเดรตเพราะไม่สามารถละลายน้ำได้ตามธรรมชาติ ทนต่อการย่อยสลายของเชื้อจุลินทรีย์ และปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Lewis and Davin, 1998; Hendriks and Zeeman, 2009) ดังนั้นการย่อยสลายทางชีวภาพของหญ้าในถังหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนจะถูกจำกัดโดยความเข้มข้นที่สูงของเซลลูโลสและลิกนิน ซึ่งรวมกันเรียกว่า ลิกโนเซลลูโลส (Acid detergent fiber) (Lehtomaki and Bjornsson, 2006) โดย

ส่วนประกอบที่เป็นลิกโนเซลลูโลส จะมีผลต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ (Owen *et al.*, 1979; Chynoweth *et al.*, 1993; Cho *et al.*, 1995; Angelidaki and Sanders, 2004; Hansen *et al.*, 2004; Buffiere *et al.*, 2006; Gunaseelan, 2007) สำหรับหญ้าเนเปียร์อายุการตัด 60 วัน พบว่ามีปริมาณของ ลิกนิน 8.41 % วัตถุแห้ง (Dry matter; DM) เซลลูโลส 42.76 % DM เฮมิเซลลูโลส 20.83 % DM และลิกโนเซลลูโลส 48.9 % DM (Ansah *et al.*, 2010) โดยองค์ประกอบอื่นแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 3 ปริมาณธาตุอาหารในหญ้าทั่วไป

Composition	Unit	Value
C	%	49.93
N	%	2.05
P	%	1.51
Ca	%	1.91
Mg	%	0.26
Cu	mg/kg DW	13
Fe	mg/kg DW	0.29
Zn	mg/kg DW	72

ที่มา: Nizami *et al.* (2009)

หญ้าเนเปียร์สายพันธุ์ปากช่อง 1 มีคุณสมบัติเด่นคือมีผลผลิตสูง สามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตได้ทุก ๆ 2 เดือน มีผลผลิตพืชสดไม่น้อยกว่า 20 ton/Rai/crop โดยให้ตัดหญ้าใช้ประโยชน์ครั้งแรก หลังจากปลูกประมาณ 75 วัน จากนั้นตัดได้ทุกๆ 45 - 60 วัน การปลูกในพื้นที่ชลประทาน หรือใช้น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วจากโรงงานอุตสาหกรรม ตัดหญ้าได้ 5 - 6 times/yr ได้ผลผลิตน้ำหนัสดประมาณ 70 - 80 ton/Rai/yr (น้ำหนักแห้ง 9.5 - 11.5 ton/Rai/yr) (กมล, 2554) โดยการตัดหญ้าที่อายุต่างกันจะส่งผลทำให้องค์ประกอบและคุณภาพของหญ้าแตกต่างกัน พบว่าหญ้าเนเปียร์ที่อายุการตัด 30, 45 และ 60 วัน มีผลผลิต 2.5, 3.8 และ 5.4 ton DM/Rai/yr ตามลำดับ (บุญฤฯ และถาวร, 2534)

ตารางที่ 4 องค์ประกอบของหญ้าเนเปียร์สดที่มีอายุการตัด 60 วัน

Composition	% of TS*
Crude protein	10.6
Crude fat	1.2
Crude fiber	42.6
Ash	12.3
Soluble carbohydrate	33.3

หมายเหตุ * หญ้าเนเปียร์สดที่มีอายุการตัด 60 วัน มี TS 17.3 %

ที่มา: กมล (2554)

สำหรับในเขตชลประทานสามารถปลูกได้ตลอดปี ส่วนการปลูกโดยอาศัยน้ำฝนควรปลูกต้นฤดูฝน ในช่วงประมาณเดือนพฤษภาคมถึงเดือนกรกฎาคม โดยต้องมีการเตรียมดินสำหรับปลูกด้วยการไถกำจัดวัชพืช 2 ครั้ง ใส่ปุ๋ยรองพื้น โดยใช้ปุ๋ยคอกอัตรา 2,000 kg/Rai หรือ ใส่ปุ๋ยสูตร 15 - 15 - 15 อัตรา 50 kg/Rai จากนั้นจึงเตรียมท่อนพันธุ์สำหรับนำไปปลูกโดยใช้ต้นหญ้าอายุประมาณ 90 วัน ตัดเป็นท่อน ๆ ให้มีข้อติดอยู่ไม่น้อยกว่า 2 ข้อ นำไปขยายพันธุ์โดยใช้ระยะปลูกระหว่างแถว 120 cm ระหว่างต้น 80 cm ซึ่งต้นพันธุ์ 1 ไร่ สามารถปลูกได้ประมาณ 25 ไร่ หญ้าเนเปียร์สายพันธุ์ปากช่อง 1 ตอบสนองต่อการให้น้ำได้ดี ดังนั้นหากมีการให้น้ำแบบระบบพ่นฝอยทุก 3 - 5 วัน หรือปล่อยน้ำเข้าแปลงทุก 7 - 10 วัน สามารถผลิตหญ้าสดได้ตลอดทั้งปี สำหรับวิธีการเก็บเกี่ยวนั้นจะต้องตัดให้ชิดกับดิน เพื่อให้แตกหน่อจากใต้ดิน จะตั้งตัวได้เร็ว มีลำต้นที่สมบูรณ์ และให้ผลผลิตสูง โดยในกลุ่มหญ้าประเภทหญ้าตั้งต้นด้วยกัน หญ้าเนเปียร์ให้ผลผลิตต่อไร่สูงกว่าหญ้านิสิ่มวง และหญ้าเนเปียร์แคระ และเป็นที่ยอมรับกันโดยทั่วไปว่าหญ้าเนเปียร์เป็นหญ้าที่ให้ผลผลิตต่อไร่สูงเมื่อเทียบกับหญ้าชนิดอื่น (สายัณห์ ทัดศรี, 2539)

หญ้าเนเปียร์ช่วยเพิ่มศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของน้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงสุกร คิดเป็นร้อยละ 5 - 25 % เมื่อเทียบกับการหมักย่อยเฉพาะน้ำเสียจากฟาร์มสุกรเพียงอย่างเดียว (สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, 2548)

สุพล และ สมศักดิ์ (2557) หมักหญ้าเนเปียร์กับมูลไก่ โดยทำการหมักแบบสองขั้นตอน มี HRT 28 วัน ในถังหมักขนาด 200 L ใช้สัดส่วนหญ้าเนเปียร์ต่อมูลไก่ในสัดส่วน 1 : 1, 1 : 2 และ 1 :

4 ตามลำดับ ในรูปของ TVS เท่ากับ 0.49, 0.55 และ 0.80 kg TVS/m³·day ตามลำดับ ได้ผลผลิตก๊าซมีเทน 24.07, 36.18 และ 66.13 L at STP/kg TVS ที่เติมเข้าระบบตามลำดับ และมีปริมาณมีเทนเฉลี่ย 61.61 %

ฟางข้าว

ฟางข้าวซึ่งมีมากกว่า 50 % ของเศษวัสดุที่เหลือจากการเกษตรทั้งหมด คิดเป็นปริมาณทั้งประเทศประมาณ 50 M ton/yr (กรมพัฒนาที่ดิน, 2551) ในปี พ.ศ. 2552 ประเทศไทยผลิตข้าวได้ 31.28 M ton มีการส่งออก 10.22 M ton (สำนักงานคณะกรรมการการพัฒนากิจการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ, 2549) ข้าวจำนวนมหาศาลที่ประเทศไทยผลิตออกมาแต่ละปี หลังฤดูเก็บเกี่ยวนั้น ส่วนที่เหลือจากการเกี่ยวข้าวคือฟางข้าวที่มีจำนวนมากเช่นกัน โดยฟางข้าวที่ได้หลังจากปลูกข้าว นั้น เกษตรกรส่วนใหญ่ยังไม่มีการจัดการที่ดีและเหมาะสมเท่าที่ควร ไม่มีการนำไปใช้ประโยชน์ในเชิงอุตสาหกรรม สำหรับส่วนที่เหลือยังมีการนำไปเผาทำลายโดยเฉพาะต่อช่วงในแปลงนา ซึ่งจะก่อให้เกิดมลภาวะกับสิ่งแวดล้อมได้ (Khalid *et al.*, 2011; Salminen and Rintala, 2002; น้ำเพชร และสุภวัฒน์, 2555) ซึ่งนับว่าเป็นการสร้างมลภาวะทางอากาศ เป็นส่วนหนึ่งที่ส่งผลกระทบให้เกิดภาวะโลกร้อนจากภาคเกษตรกรรมอีกด้วย นอกจากนี้ยังพบว่าเมื่อฟางข้าวถูกเผาหรือไถกลบก็อาจก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศหรือทางน้ำ โดยการไถกลบอาจก่อให้เกิดการแพร่พันธุ์เห็ดราได้ (Kadam *et al.*, 2000)

สำหรับปริมาณฟางข้าวที่ประเทศไทยผลิตออกมาแต่ละปีมากถึง 50 - 60 M ton/yr และยังไม่มีการนำฟางข้าวไปใช้มากถึง 11.5 M ton (น้ำเพชร และสุภวัฒน์, 2555) โดยฟางข้าวเป็นของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตในภาคเกษตร ซึ่งเป็นผลจากวิธีการเก็บเกี่ยวที่ใช้แรงคน ทำให้การเก็บรวบรวมเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ได้ยาก ฟางข้าวส่วนใหญ่เป็นฟางข้าวเจ้า ลักษณะของฟางข้าวจะประกอบด้วยส่วนของใบ ลำต้น และรวงข้าว ที่เอาเมล็ดออกแล้ว มีสีเหลืองซีด โดยฟางข้าวจะประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นองค์ประกอบภายในเซลล์ (Cell content) 21 % และผนังเซลล์ (Cell wall) 79 % ซึ่งส่วนของผนังเซลล์ประกอบด้วยส่วนที่เป็นเซลลูโลส 33 % TS เฮมิเซลลูโลส 26 % TS ลิกนิน 7 % TS ซิลิกา 13 % TS (ปรีชา และทวีพร, 2551) และลิกโนเซลลูโลส 42.4 % TS (Animal Feed Resources Information System, 2012)

โดย Ye *et al.* (2013) ได้ทำการศึกษาผลของอัตราส่วนวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพแบบไม่ใช้ออกซิเจนโดยใช้วัสดุหมักร่วมของฟางข้าวกับเศษอาหารและมูลสุกร ทำการหมักแบบ

ขั้นตอนเดียว (Single - stage anaerobic digestion) โดยเดินระบบแบบเดิมครั้งเดียว (Batch operation) ที่อุณหภูมิปานกลาง ($37 \pm 1^{\circ}\text{C}$) และมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ 54 g/L โดยคิดจากปริมาณ TVS ผลการศึกษาพบว่า มีปริมาณมีเทน $45.9 - 70 \%$ และอัตราการลดลงของ TVS เป็น 55.8% มีผลผลิตก๊าซชีวภาพคือ $674.4 \text{ L at STP/kg TVS}$ ซึ่งสูงกว่าการย่อยสลายฟางข้าวหรือมูลสุกรเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ Hills and Roberts (1981) ยังแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มฟางข้าวในการหมักมูลโคแบบไม่ใช้ออกซิเจน ทำให้มีการผลิตก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น

การศึกษาของ Liew *et al.* (2012) ทำการหมักฟางข้าวสาเลแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Solid - state anaerobic digestion) ผลการศึกษาพบว่า ฟางข้าวสาเลให้ผลผลิตมีเทน $66.9 \text{ L at STP/kg TVS}$ โดยส่วนสำคัญในการผลิตมีเทนของฟางข้าวสาเลมาจากการย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส

การศึกษาของสถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (2548) ที่ประเมินศักยภาพความเป็นไปได้ของของเสียทั้ง 5 ชนิด ในการเพิ่มการผลิตก๊าซมีเทนของน้ำเสียจากฟาร์มสุกร คือ เศษอาหาร กลิเซอริน หนุ่เนเปียร์ ฟางข้าว และต้นข้าวโพด โดยคำนึงถึงปริมาณของเสียที่เหลือใช้ และปริมาณน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่มีอยู่ ของแต่ละภูมิภาคในประเทศไทย พบว่าโดยภาพรวมฟางข้าวที่อัตราส่วน 60% TVS จะมีศักยภาพในการเพิ่มการผลิตก๊าซมีเทนของน้ำเสียจากฟาร์มสุกรมากที่สุด รองลงมาคือหนุ่เนเปียร์ที่อัตราส่วน 30% TVS ต้นข้าวโพดที่อัตราส่วน 60% TVS และเศษอาหารที่อัตราส่วน 60% TVS ตามลำดับ

จากการพิจารณาฤดูการผลิตข้าว พบว่าชีวมวลจากการผลิตข้าว มีเพียง 8 เดือน คือช่วงเดือนมีนาคมถึงเดือนกรกฎาคม และเดือนตุลาคมถึงเดือนธันวาคม ทำให้ในการผลิตก๊าซชีวภาพจากฟางข้าวจำเป็นต้องมีการเก็บรักษาวัตถุดิบไว้ในฤดูกาลที่ไม่มีการเก็บเกี่ยวซึ่งในส่วนของฟางข้าวมีความเป็นไปได้เนื่องจากการเก็บรักษาฟางข้าวไม่มีผลต่อสมบัติทางเคมีและกายภาพ (น้ำเพชร และสุวัฒน์, 2555)

จุลินทรีย์จากกระเพาะหมักของโคและกระบือ

โคเนื้อและกระบือเป็นสัตว์เคี้ยวเอื้องที่มี 4 กระเพาะ คือ กระเพาะผ้ำจี๊ว (Rumen) หรือกระเพาะหมัก กระเพาะรังผึ้ง (Reticulum) กระเพาะสามสิบกลีบ (Omasum) และกระเพาะแท้ (Abomasum) กระเพาะสองส่วนแรก เรียกว่า เรติคูลัม - รูเมน (Reticulo - rumen) คิดเป็น 85% ของกระเพาะทั้งหมด และมีความสำคัญ เพราะกระบวนการหมักย่อยอาหารโดยจุลินทรีย์จะเกิดขึ้นตรง

บริเวณนี้ประมาณ 60 - 70 % การทำงานของจุลินทรีย์ในกระเพาะหมักมีความสำคัญในการผลิตเอนไซม์ เพื่อทำการย่อยอาหาร จุลินทรีย์จะถูกควบคุมโดยสมดุลของระบบนิเวศวิทยาในกระเพาะหมักภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน (Anaerobic condition) อุณหภูมิอยู่ในช่วง 39 - 40 °C สูงกว่าอุณหภูมิของร่างกายสัตว์เล็กน้อย เนื่องจากความร้อนที่เกิดจากกระบวนการหมักย่อย ค่า pH อยู่ในช่วง 6.5 - 7.0 และจุลินทรีย์ทำหน้าที่เปลี่ยนอาหารที่กินเข้าไปให้เป็นผลผลิตสุดท้ายที่เหมาะสมกับการที่สัตว์จะนำไปใช้ประโยชน์ในการเปลี่ยนเป็นเนื้อและนม เช่น อาหารคาร์โบไฮเดรตจะถูกย่อยได้ผลผลิตสุดท้าย ได้แก่ กรดไขมันระเหยได้ และกรดแลกติก ส่วนอาหาร โปรตีนจะถูกย่อยจนได้ผลผลิตสุดท้าย คือ แอมโมเนีย-ไนโตรเจน ($\text{NH}_3\text{-N}$) และอื่น ๆ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ก๊าซมีเทน นอกจากนี้จุลินทรีย์ยังสามารถสังเคราะห์กรดอะมิโนและวิตามินที่เป็นประโยชน์ต่อสัตว์ หลังจากผ่านกระบวนการหมักย่อยโดยจุลินทรีย์แล้ว ของเหลวเหล่านี้จะไหลสู่กระเพาะแท้และลำไส้เล็กตามลำดับ การย่อยในส่วนนี้คล้ายคลึงกับสัตว์กระเพาะเดี่ยว เซลล์ของจุลินทรีย์จะถูกย่อยในทางเดินอาหารจะกลายเป็นแหล่งโปรตีน (Microbial protein) ดังนั้นจุลินทรีย์ในกระเพาะหมักนับว่ามีความสำคัญมากในสัตว์เคี้ยวเอื้อง (นันทิกา และสุริพร, 2546; วรวิฒิ, 2541; Church, 1979; Van Soest, 1982)

การเจริญของจุลินทรีย์ในกระเพาะหมักมีปัจจัยหลายอย่างที่เกี่ยวข้อง เช่น ชนิดของอาหาร ระยะเวลาที่กินอาหารในระหว่างวัน ชนิดของสัตว์ ระยะการเจริญเติบโตของสัตว์ เป็นต้น นอกจากนี้แล้วลักษณะสภาพภายในกระเพาะหมักมีอิทธิพลต่อจุลินทรีย์ เช่น ความเข้มข้นของโภชนะที่อยู่ภายในกระเพาะหมัก (เมธา, 2533; Church, 1979; Van Soest, 1982)

ระบบการย่อยอาหารของสัตว์เคี้ยวเอื้องจะแตกต่างจากสัตว์ไม่เคี้ยวเอื้อง โดยเฉพาะการย่อยอาหารเชื้อยีสต์ที่สัตว์ไม่สามารถย่อยได้โดยอาศัยน้ำย่อยจากตัวของสัตว์เอง ดังนั้นการย่อยอาหารเชื้อยีสต์พวกนี้จึงจำเป็นต้องอาศัยน้ำย่อยจากสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ โดยเฉพาะพวกจุลินทรีย์ชนิดต่าง ๆ ที่อาศัยอยู่ในกระเพาะหมักในการย่อยเชื้อยีสต์ เพื่อให้สัตว์ได้รับสารอาหาร แร่ธาตุต่าง ๆ และวิตามินในการนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

จุลินทรีย์ในกระเพาะหมัก มีบทบาทสำคัญในกระบวนการเมแทบอลิซึมของสัตว์เคี้ยวเอื้อง ประชากรจุลินทรีย์ในกระเพาะหมักถูกควบคุมโดยความสมดุลของระบบนิเวศวิทยา ภายใต้สภาวะไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic) โดย Homeothermic metabolism ของตัวสัตว์เอง จุลินทรีย์ส่วนใหญ่เป็นพวกที่ไม่ต้องการออกซิเจน (Obligate anaerobes) จะอยู่ได้ในสภาพที่มีออกซิเจนอยู่บ้างแต่อาจมีบางพวกที่ใช้ออกซิเจนได้ (Facultative anaerobes) มีหน้าที่ใช้ออกซิเจนที่ติดเข้ามากับอาหารหรือ

เข้ามาขณะที่สัตว์เคี้ยวอาหารและกลืนอาหาร สามารถรักษาระดับของอุณหภูมิได้ และถูกควบคุมโดยกระบวนการ Homeothermic metabolism ของตัวสัตว์เอง นอกจากนั้นแล้วยังมีการแปรปรวนของระดับน้ำและอาหารที่ตกเข้าไปในกระเพาะหมัก การหมักอาหารจะเป็นการผลิตกรดไขมันระเหยง่าย ส่วนค่า pH ของกระเพาะหมักจะอยู่ในช่วง 6.0 - 7.0 และมีอุณหภูมิอยู่ที่ 39 °C ซึ่งค่อนข้างจะคงที่ (Van Soest, 1982) ในระบบการย่อยอาหารของสัตว์เคี้ยวเอื้อง จุลินทรีย์มีบทบาทที่สำคัญมาก ทั้งนี้เพราะ 70 – 85 % DM ที่ย่อยได้จะถูกย่อยในส่วนนี้

จุลินทรีย์ในกระเพาะหมักแบ่งได้ 3 กลุ่มใหญ่ คือ แบคทีเรีย โปรโตซัว และเชื้อรา จุลินทรีย์ในกระเพาะหมักส่วนใหญ่เป็นพวก Obligate anaerobes คือ จะอยู่ได้ในสภาพที่ไม่มีออกซิเจนอยู่บ้าง เพราะอาจถูกนำมาใช้ประโยชน์ในกระบวนการหมักโดยใช้เป็นตัวให้อิเล็กตรอน แต่การมีระดับของออกซิเจนมากเกินไปอาจจะเป็นพิษต่อจุลินทรีย์พวกนี้ได้ ระดับของออกซิเจนที่จะทำให้ความสมดุลเปลี่ยนแปลงไป รวมทั้งการสังเคราะห์ก๊าซมีเทนในกระเพาะหมักจุลินทรีย์กลุ่มที่ผลิตก๊าซมีเทนซึ่งอยู่ในกระเพาะหมักมีความสำคัญมากต่อความสมดุลของกระบวนการหมัก นอกจากนั้นยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่มีอิทธิพลอีกมากมาย

จุลินทรีย์ในกระเพาะหมักนั้นมีอยู่มากและต่างชนิดกัน ที่พบนั้นไม่ได้มีแหล่งกำเนิดเพียงในกระเพาะหมักเท่านั้น แต่อาจติดมากับอาหารหรือมาจากสิ่งแวดล้อมอื่น ๆ เนื่องจากสภาวะภายในกระเพาะหมักนั้นเป็นระบบไร้ออกซิเจนและมีการเปลี่ยนแปลงสูง จึงทำให้กลุ่มจุลินทรีย์ที่สามารถเจริญเติบโตได้ในสภาวะที่มีอาหาร (Substrate) และมีค่า pH ที่เหมาะสมเท่านั้น โดยเฉพาะจุลินทรีย์ที่มีอัตราการเจริญเติบโตสูง โดยทั่วไปแล้วในทางทฤษฎีอัตราการขยายตัวของจุลินทรีย์ควรจะสูงกว่าอัตราการไหลออกของของเหลวในกระเพาะหมัก เพราะทั้งแบคทีเรียและโปรโตซัวส่วนใหญ่จะเกาะติดอยู่กับอนุภาคของอาหาร โดยแบ่งกลุ่มของแบคทีเรียออกตามการใช้ประโยชน์ของอาหารดังนี้

1. แบคทีเรียที่ใช้เซลลูโลส (Cellulolytic bacteria) แบคทีเรียกลุ่มนี้มีความสามารถในการผลิตน้ำย่อยเซลลูเลส (Cellulase) ซึ่งเข้าย่อยสลายเซลลูโลส นอกจากนั้นอาจย่อยเซลโลไบโอส (Cellobiose) ซึ่งประกอบด้วยกลูโคส 2 ตัวจับกัน แบคทีเรียกลุ่มนี้มีมากที่สุดที่ในกระเพาะของสัตว์ที่ได้รับอาหารหญ้าเป็นหลัก ชนิดที่สำคัญมี *Fibrobacter succinogenes*, *Ruminococcus flavefaciens*, *R. albus* และ *Cillobacterium cellulosolvens* เป็นต้น

2. แบคทีเรียที่ใช้เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulolytic bacteria) โดยปกติแบคทีเรียที่ย่อยเซลลูโลสจะสามารถย่อยพวกเฮมิเซลลูโลสได้ด้วย แต่แบคทีเรียที่ย่อยเฮมิเซลลูโลสจะไม่สามารถย่อยเซลลูโลสได้ ชนิดที่สำคัญมี *Butyrivibrio fibrisolvens*, *Lachnospira multiparens* และ *Prevotella ruminicola* เป็นต้น

3. แบคทีเรียที่ใช้อะไมโลส (Amylolytic bacteria) แบคทีเรียพวกนี้มีเป็นจำนวนมากในกระเพาะหมักที่ได้รับอาหารชั้นพลังงานสูง มีอะไมโลสเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ ชนิดที่สำคัญมี *Bacteroides amylophilus*, *Succinimonas amylophilus*, *Butyrivibrio fibrisolvent*, *Selenomonas ruminantium*, *Streptococcus bovis* และ *Prevotella ruminicola* เป็นต้น จะเห็นว่าแบคทีเรียที่ย่อยสลายเซลลูโลสหลายสปีชีส์ที่สามารถย่อยคาร์โบไฮเดรตชนิดอื่นได้ แต่พวกที่ย่อยคาร์โบไฮเดรตโดยตรงไม่สามารถที่จะทำเช่นนั้นได้

4. แบคทีเรียที่ใช้กรด (Bacteria utilizing acids) มีแบคทีเรียหลายสปีชีส์ที่สามารถใช้กรดต่าง ๆ ได้เช่น กรด formic, acetic, malic, fumaric, lactic และ succinic และแบคทีเรียชนิดที่ใช้กรด lactic และ succinic คือ *Veillonella gazogenes*, *V. alcalescens*, *Propionic bacterium* sp., *Selenomonas ruminantium*, *Peptostreptococcus elsdenii*, และ *Selenomonas lantilytica* เป็นต้น

5. แบคทีเรียที่ใช้โปรตีน (Proteolytic bacteria) แบคทีเรียหลายสปีชีส์ที่ใช้กรดอะมิโนเป็นแหล่งพลังงานพื้นฐาน มีหลายชนิด คือ *Bacteroides amylophilus*, *Clostridium sporogens* และ *Bacillus licheniformis* เป็นต้น

6. แบคทีเรียที่ผลิตกรดแอมโมเนีย (Ammonia – producing bacteria) ตัวอย่างเช่น *Prevotella ruminicola*, *Selenomonas ruminantium*, *Peptostreptococcus elsdenii* และบางสายพันธุ์ของ *Butyrivibrio*

7. แบคทีเรียที่ผลิตมีเทน (Methanogenic bacteria) ชนิดที่สำคัญได้แก่ *Methanobacterium ruminantium* และ *M. formicium* เป็นต้น

8. แบคทีเรียที่ใช้ไขมัน (Lipolytic bacteria) แบคทีเรียหลายชนิดที่มีความสามารถใช้อกลีเซอรอล และย่อยกลีเซอรอลจากโมเลกุลของไขมัน

9. แบคทีเรียที่สังเคราะห์วิตามิน (Vitamin - synthesizing bacteria) เช่น *Selenomonas ruminativu*

ส่วนมากการย่อยสลายจะขึ้นอยู่กับกิจกรรมของจุลินทรีย์ (Orr and Kirk, 2003) โคและกระบือ มีจุลินทรีย์ที่อยู่ภายในกระเพาะหมัก ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการหมักย่อยอาหารหยาบได้ดี และสามารถผลิตผลผลิตสุดท้าย เช่น VFA หรือกรดอินทรีย์ชนิดต่าง ๆ โดยอาหารหยาบที่สัตว์กินเข้าไปนั้นจะอยู่ในกระเพาะหมักนานประมาณ 3 - 5 วันเท่านั้น และจุลินทรีย์ในกระเพาะหมักสามารถหมักอาหารหยาบได้สูงถึง 50 - 80 % โดยขึ้นอยู่กับคุณภาพของอาหารหยาบ และสารอาหารอื่น ๆ ที่มีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ นอกจากนี้ภายในกระเพาะหมักของสัตว์เคี้ยวเอื้องยังมีจุลินทรีย์ที่สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้ดี ซึ่งโดยปกติแล้วโคที่โตเต็มที่แล้ว จะมีการผลิตก๊าซมีเทนและปลดปล่อยออกมาจากกระเพาะหมักวันละประมาณ 300 - 600 L ขึ้นกับคุณภาพของอาหาร (สุริยะ, 2551) ดังนั้นจึงนำจุลินทรีย์ต่าง ๆ ที่อยู่ในกระเพาะหมักของโคหรือกระบือ ไปใช้เพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักหญ้าเนเปียร์หรือฟางข้าว เนื่องจากในระบบการหมักย่อยเพื่อผลิตก๊าซมีเทน เป็นกระบวนการหมักย่อยโดยจุลินทรีย์กลุ่มที่ไม่ใช้ออกซิเจน เช่นเดียวกันกับกระบวนการหมักย่อยสารอินทรีย์ภายในกระเพาะหมักของสัตว์เคี้ยวเอื้อง (สุริยะ, 2539) โดยการศึกษาของ Hu (2006) และ Albores *et al.* (2006) พบว่าของเหลวในกระเพาะหมักจะช่วยเพิ่มการสร้างกรดไขมัน (Fatty acid)

แต่อย่างไรก็ตามในการนำจุลินทรีย์จากกระเพาะหมัก มาใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนนี้ มีความจำเป็นอย่างยิ่ง ที่จะต้องมีการปรับสภาวะแวดล้อมภายใน ถังหมักเพื่อให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ เช่น การเพิ่มสารอาหารต่าง ๆ โดยมูลโคสามารถนำมาใช้ในการเพิ่มความสมดุลของสารอาหารให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ต่าง ๆ ในการหมักย่อยหญ้าเนเปียร์หรือฟางข้าว เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพได้ จากการศึกษาของ Hashimoto (1983) ใช้มูลสัตว์เป็นวัสดุหมักร่วมในการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน พบว่ามีการเพิ่มขึ้นของความสมดุลของจุลินทรีย์ มีความสามารถในการควบคุมค่า pH และการขาดสารอาหารได้เป็นอย่างดี

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์และวิธีการได้แบ่งเนื้อหาออกเป็นสองส่วน ได้แก่

อุปกรณ์

1. อุปกรณ์เครื่องแก้วพื้นฐานที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ
2. เครื่องมือพื้นฐานในห้องปฏิบัติการและเครื่องมือวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของสารตั้งต้น
ได้แก่
 - 2.1 COD reflux apparatus EV Gerhardt
 - 2.2 pH meter Cyber scan 500
 - 2.3 เครื่องย่อย (Block digestion unit) Gerhardt รุ่น KB 20 S
 - 2.4 เครื่องกลั่นอัตโนมัติ (Automatic distillator) Gerhardt Vapodest 20S
3. เครื่องมือที่มีความสลับซับซ้อนในห้องปฏิบัติการได้แก่
 - 3.1 Gas chromatograph (GC/TCD) ยี่ห้อ Shimadzu 14B โดยใช้ก๊าซอาร์กอน (Ar) เป็น
ก๊าซตัวพา (Carrier gas) และใช้ Column molecular sieve 13X ที่สภาวะดังต่อไปนี้
 - 3.1.1 สภาวะอุณหภูมิ Column 40 °C
 - 3.1.2 สภาวะอุณหภูมิ Injector 60 °C
 - 3.1.3 สภาวะอุณหภูมิ Detector 70 °C
 - 3.2 เครื่องวิเคราะห์โลหะหนัก (Atomic absorption spectrophotometer; AAS)
 - 3.3 เครื่องวัดค่าดูดกลืนแสง (Spectrophotometer) ยี่ห้อ LaboMed รุ่น 22RS
4. สารเคมีในการวิเคราะห์หาลักษณะสมบัติของสารตั้งต้นตามวิธีมาตรฐาน Standard
Methods for Examination of Water and Wastewater (APHA and AWWA, 2005)
5. อุปกรณ์ในการสร้างถังหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic process) ซึ่งมีการเก็บก๊าซ
โดยวิธีการแทนที่น้ำ (Water displacement) ได้แก่ ถังพลาสติกใสที่มีขนาดบรรจุ 6 L สายยาง ท่อน้ำแบบข้องอ จุกยาง ท่อพีวีซี หลอดแก้วแบบตรง หลอดแก้วแบบงอ และหลอด (ภาพที่ 6)

6. แหล่งเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นและสารตั้งต้น ที่ใช้สำหรับเป็นอาหารของเชื้อจุลินทรีย์ในระบบ จากภาควิชาสัตวบาล คณะเกษตรกำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ได้แก่

6.1 เชื้อจุลินทรีย์ผสม (Mixed culture) จากกระเพาะหมักของโคเนื้อ แสดงดังภาพที่ 2 (ก) ใช้สำหรับเป็นเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นในระบบ



(ก)



(ข)

ภาพที่ 2 เชื้อจุลินทรีย์ผสมจากกระเพาะหมักของโคเนื้อ (ก) และเชื้อจุลินทรีย์ผสมจากกระเพาะหมักของกระบือปลัก (ข)

6.2 เชื้อจุลินทรีย์ผสมจากกระเพาะหมักของกระบือปลัก ใช้สำหรับเป็นเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นในระบบ แสดงดังภาพที่ 2 (ข) ใช้สำหรับเป็นเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นในระบบ

6.3 หญ้าเนเปียร์ (Napier grass) สายพันธุ์ปากช่อง1 ที่มีอายุการตัด 60 วัน สำหรับใช้เป็นสารตั้งต้น แสดงดังภาพที่ 3 (ก)



(ก)



(ข)

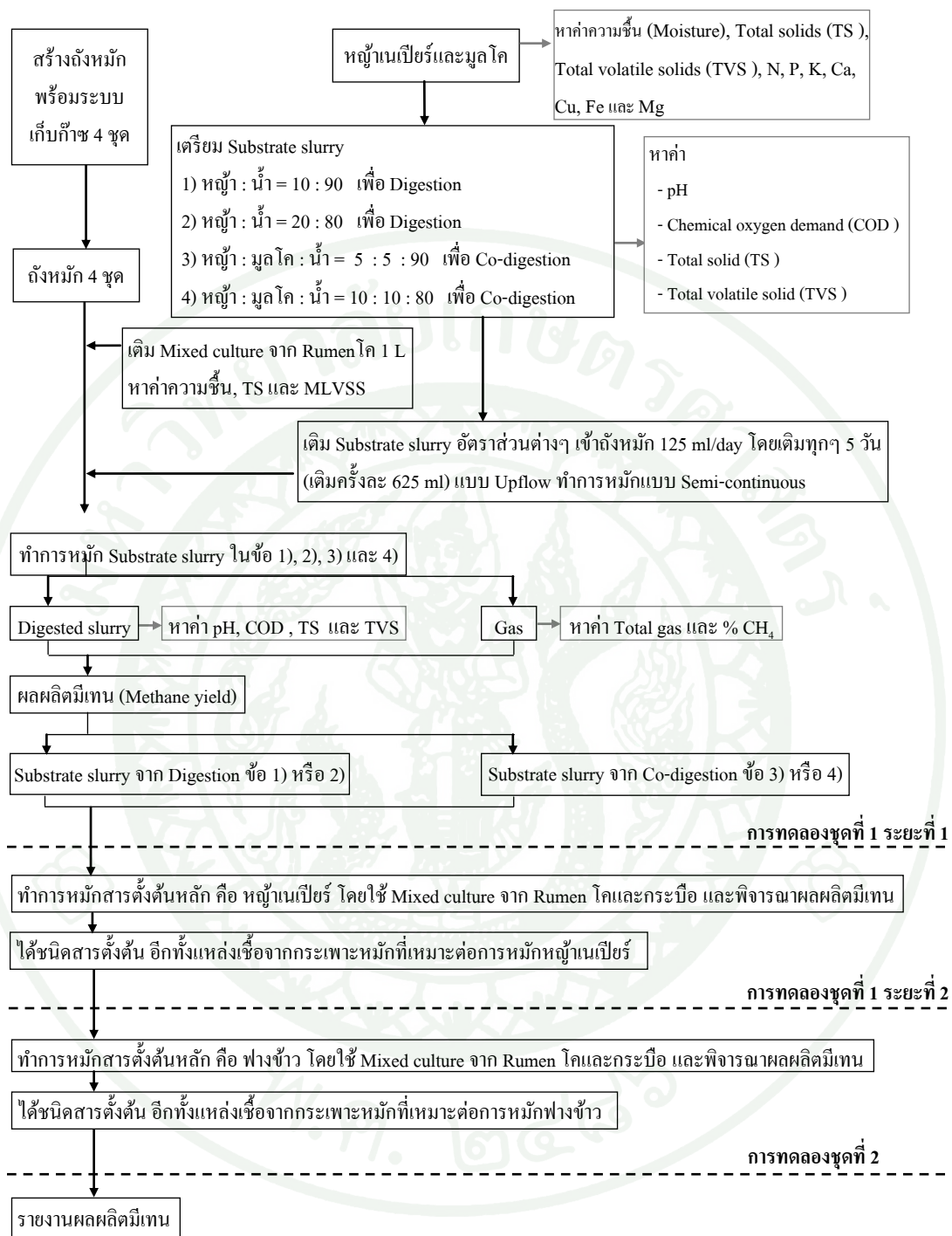
ภาพที่ 3 หญ้าเนเปียร์สายพันธุ์ปากช่อง1 ที่มีอายุการตัด 60 วัน (ก) และฟางข้าว (ข)

6.4 ฟางข้าว (Rice straw) สำหรับใช้เป็นสารตั้งต้น แสดงดังภาพที่ 3 (ข)

6.5 มูลโคเนื้อ (Cow dung) สำหรับใช้เป็นสารตั้งต้น แสดงดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 มูลโคเนื้อ



ภาพที่ 5 แผนภูมิการผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์และฟางข้าวโดยการหมักร่วมกับมูลโค

วิธีการ

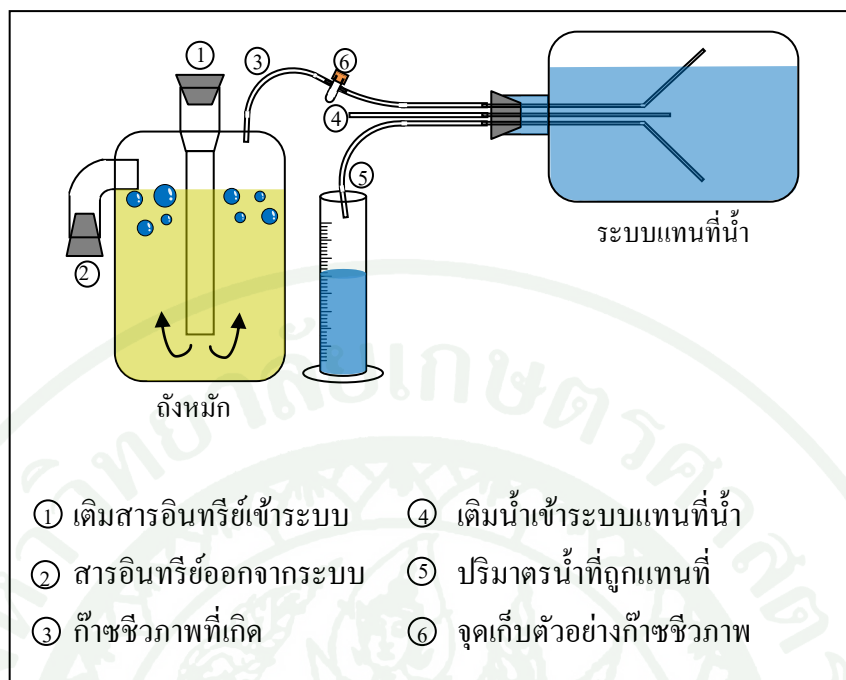
1. การสร้างถังหมักและระบบเก็บก๊าซ

สร้างถังหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic reactor) พร้อมระบบเก็บก๊าซ (Gas collection system) จำนวน 4 ชุด ในแต่ละชุดจะประกอบด้วยถังหมัก (Anaerobic reactor) ที่มีปริมาตรในการหมัก 5 L และถังเก็บก๊าซที่มีการเก็บตัวอย่างก๊าซโดยการแทนที่น้ำ (Water displacement) โดยมีที่ไว้สำหรับเก็บก๊าซตัวอย่างในการวิเคราะห์หาสัดส่วนก๊าซมีเทน (CH_4) เพื่อทำการเดินระบบให้เป็นแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi - continuous operation) ดังแสดงในภาพที่ 6

โดยถังหมักแบบไร้ออกซิเจน (Anaerobic digestion reactor) ใช้ถังพลาสติกขนาดบรรจุ 6 L เจาะรูด้านบนสำหรับต่อสายให้ก๊าซที่เกิดในระบบสามารถไปยังถังเก็บก๊าซได้ ส่วนถังเก็บก๊าซที่มีการเก็บตัวอย่างก๊าซโดยการแทนที่น้ำ ใช้ถังพลาสติกขนาดบรรจุ 6 L มาเติมน้ำกรดซัลฟิวริก 0.05 M โดยปิดปากถังด้วยจุกยาง ที่เจาะรูไว้ 3 รู ต่อเข้ากับหลอดแท่งแก้ว 3 แท่ง ที่เชื่อมกับสายยาง วางถังเก็บก๊าซในแนวนอน แท่งแก้วหลอดแรกเป็นทางน้ำออก แท่งแก้วมีลักษณะงอลงด้านล่างของถัง สายยางที่เชื่อมออกนอกถังจะใช้สำหรับวัดปริมาตรน้ำ แท่งแก้วที่สองอยู่ตรงกลางจะเชื่อมกับสายยางสำหรับเติมน้ำกรดซัลฟิวริก โดยหลอดแท่งแก้วจะมีลักษณะตรง แท่งแก้วที่สามเชื่อมกับสายก๊าซที่มาจากถังหมักเพื่อให้ก๊าซเข้ามาไล่ที่น้ำ แท่งแก้วจะงอขึ้นด้านบนของถัง ส่วนสายยางที่เชื่อมถังหมักกับถังเก็บก๊าซจะมีที่ไว้สำหรับเก็บตัวอย่างก๊าซไปวิเคราะห์หาปริมาณเปอร์เซ็นต์มีเทน แสดงดังภาพที่ 6

2. การเตรียมเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมัก (Rumen) โคและกระบือ

นำเชื้อจุลินทรีย์ที่ได้จากกระเพาะหมักของโคและกระบือ ที่กินฟางข้าวเป็นอาหารหลักผ่านทางช่องเปิดด้านข้างลำตัว แล้วนำมาวิเคราะห์หา ค่า pH ความชื้น (Moisture) TS (Total solids) และ MLVSS (Mixed liquor volatile suspended solids) โดยวิเคราะห์ตามวิธีมาตรฐาน Standard Methods for Examination of Water and Wastewater (APHA and AWWA, 2005)



ภาพที่ 6 ถังหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic reactor) และระบบเก็บก๊าซ (Gas collection system)

3. ศึกษาสัดส่วนหญ้าเนเปียร์และหญ้าเนเปียร์ผสมมูลโคที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ (การทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 1)

3.1 การเตรียมสารละลายผสม (Substrate slurry) หญ้าเนเปียร์ สำหรับการทดลอง

นำหญ้าเนเปียร์สายพันธุ์ปากช่อง 1 ที่มีอายุการตัด 60 วัน มาวัดความสูง จากนั้นนำมาวิเคราะห์หาค่าความชื้น, TS, TVS, ไนโตรเจนในรูป Total Kjeldahl nitrogen (TKN), ฟอสฟอรัส, โพแทสเซียม, แคลเซียม, ทองแดง, เหล็ก และแมกนีเซียม จากนั้นนำมาสับละเอียดและบดโดยเครื่องบดละเอียด ให้มีขนาด 2 - 4 mm เก็บในถุงพลาสติกที่ปิดสนิท ที่อุณหภูมิ 4 °C ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 หย้าเนเปียร์บดละเอียดขนาด 2 - 4 mm

นำมูลโค มาวิเคราะห์หา ค่า pH , ความชื้น, TS, TVS, ไนโตรเจนในรูป Total Kjeldahl nitrogen, ฟอสฟอรัส, โพแทสเซียม, แคลเซียม, ทองแดง, เหล็ก และแมกนีเซียม โดยการใช้วิธีมาตรฐาน Standard Methods for Examination of Water and Wastewater (APHA and AWWA, 2005)

จากนั้นนำหย้าเนเปียร์ที่บดละเอียดแล้วและมูลโค มาเตรียมสารละลายผสมกับน้ำประปา ตามอัตราส่วนต่าง ๆ โดยน้ำหนักสด (Fresh weight; FW) ดังต่อไปนี้

- 3.1.1 สารตั้งต้น 10 % FW ที่มีหย้าต่อน้ำในสัดส่วน 10 : 90 % FW
- 3.1.2 สารตั้งต้น 20 % FW ที่มีหย้าต่อน้ำในสัดส่วน 20 : 80 % FW
- 3.1.3 สารตั้งต้น 10 % FW ที่มีหย้าต่อมูลโคต่อน้ำในสัดส่วน 5 : 5 : 90 % FW
- 3.1.4 สารตั้งต้น 20 % FW ที่มีหย้าต่อมูลโคต่อน้ำในสัดส่วน 10 : 10 : 80 % FW

3.2 การเริ่มต้นระบบ (Start up)

เติมเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักโคลงในถังหมักแต่ละถัง ปริมาตรถังละ 1 L ในวันเริ่มต้นการหมักเพียงครั้งเดียว และเติมสารละลายผสมหย้าเนเปียร์ในสัดส่วนต่าง ๆ ที่เตรียมไว้ ปริมาตรถังละ 4 L ให้เต็มความจุถังหมักแต่ละถัง โดยใช้สัดส่วนดังตารางที่ 5 ปรับค่า pH เริ่มต้นใน

ระบบเป็น 7.5 แล้วปิดระบบโดยใช้จุกยาง และตั้งทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 5 วัน ก่อนทำการเดินระบบต่อไป

ตารางที่ 5 ส่วนผสมในแต่ละถังหมัก ของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 1 (ศึกษาสัดส่วนหุ้ยนเปียร์และหุ้ยนเปียร์ผสมมูลโคที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ

Parameter	Reactor			
	1	2	3	4
Mixed culture	RC	RC	RC	RC
Substrate	N : W	N : W	N : C : W	N : C : W
Ratio (% FW)	10 : 90	20 : 80	5 : 5 : 90	10 : 10 : 80

หมายเหตุ N คือหุ้ยนเปียร์, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค, RC คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักโค และ FW คือน้ำหนักสด

3.3 การเดินระบบ (Operation)

เติมสารละลายผสมหุ้ยนเปียร์ที่เตรียมไว้ในข้อ 3.1 ลงในถังหมักแต่ละถัง แบบไหลขึ้น (Upflow) โดยใช้สัดส่วนดังตารางที่ 5 ให้มีอัตราการไหล (Flow rate) 125 ml/day โดยถังหมักมีปริมาตรในการหมัก (Working volume) 5 L เป็นผลให้มี HRT 40 วัน โดยทำการเติมสารอินทรีย์ทุก ๆ 5 วัน คือเติมครั้งละ 625 ml ดังภาพที่ 8 ซึ่งจะนำสารละลายผสมหุ้ยนเปียร์ทั้ง 4 สัดส่วน ดังตารางที่ 5 ที่เติมลงระบบ มาวิเคราะห์หาค่า pH, COD (Chemical oxygen demand), TS และ TVS ตามวิธีมาตรฐาน Standard Methods for Examination of Water and Wastewater (APHA and AWWA, 2005) สำหรับใช้ในการคำนวณผลผลิตมีเทน โดยการเดินระบบจะทำให้สภาวะอุณหภูมิห้อง (30 ± 1 °C) โดยในช่วงระยะเวลาที่เดินระบบไม่มีการปรับค่า pH



ภาพที่ 8 ถังหมักและระบบเก็บก๊าซที่ใช้สำหรับการทดลอง

3.4 การเก็บผลการทดลอง

ทำการเก็บผลการทดลองเป็นเวลา 30 วัน โดยทำการเก็บข้อมูลในสภาวะคงที่ (Steady state) คือระยะเวลาที่มากกว่าระยะเวลาเก็บกัก และปริมาตรก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นมีความสม่ำเสมอ สำหรับการทดลองนี้ที่ศึกษาสัดส่วนหญ้าเนเปียร์และหญ้าเนเปียร์ผสมมูลโคที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ (การทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 1) สภาวะคงที่คือวันที่ 56 ถึงวันที่ 85 หลังจากเริ่มทำการเดินระบบ และเดินระบบเป็นระยะเวลาทั้งหมด 85 วัน โดยเก็บผลการทดลองดังนี้

3.4.1 บันทึกปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น (Total gas) ทุกวัน โดยการวัดปริมาตรน้ำที่ออกจากระบบเก็บก๊าซที่ถูกแทนที่ด้วยน้ำ ด้วยกระบอกตวง

3.4.2 เก็บตัวอย่างก๊าซบริเวณจุดเก็บตัวอย่างก๊าซ (จุดที่ 6 ดังแสดงในภาพที่ 6) เป็นเวลา 5 นาที โดยใช้หลอดสูญญากาศทำการเก็บทุกวัน และนำตัวอย่างก๊าซที่เก็บทุกวันไปหาปริมาณเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนด้วยเครื่อง Gas chromatograph (GC/TCD)

3.4.3 เก็บตัวอย่างของเหลวที่ออกจากระบบ (Digested slurry) ทุก ๆ 5 วัน เพื่อนำมาหา ค่า pH, COD, TS และ TVS ตามวิธีมาตรฐาน Standard Methods for Examination of Water and Wastewater (APHA and AWWA, 2005)

3.4.5 นำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาผลผลิตก๊าซมีเทน ในหน่วย L at STP/kg COD degraded, L at STP/kg TVS degraded และ L at STP/kg TS added โดยใช้ปริมาตรมีเทนที่ผลิตได้, ค่า COD ที่ถูกกำจัด, ค่า TVS ที่ถูกกำจัด และค่า TS ที่เติมเข้าระบบ ในการคำนวณ แสดงดังภาคผนวก ข

จากการทดลองข้อ 3. การทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 1 เพื่อศึกษาสัดส่วนหุ้ยานเปียร์และหุ้ยานเปียร์ผสมมูลโคที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ จะได้ผลผลิตก๊าซมีเทน และสัดส่วนสารละลายผสมหุ้ยานเปียร์ที่เหมาะสมในการหมักหุ้ยานเปียร์และการหมักหุ้ยานเปียร์ร่วมกับมูลโค ซึ่งจะนำสัดส่วนของสารละลายผสมหุ้ยานเปียร์ที่เหมาะสม ไปใช้ในการศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักหุ้ยานเปียร์และการหมักหุ้ยานเปียร์ร่วมกับมูลโคโดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ (การทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 2) ดังจะกล่าวในข้อ 4. ต่อไป

4. ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทน (Methane yield) จากการหมักหุ้ยานเปียร์ (Digestion) และการหมักหุ้ยานเปียร์ร่วมกับมูลโค (Co - digestion) โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ (การทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 2)

4.1 การเริ่มต้นระบบ (Start up)

4.1.1 เติมเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ ลงในถังหมักแต่ละถัง ปริมาตรถังละ 1 L โดยเติมในวันเริ่มต้นการหมักเพียงครั้งเดียว ดังตารางที่ 6

4.1.2 เติมสารละลายผสมหุ้ยานเปียร์ในสัดส่วนต่าง ๆ ที่เหมาะสม ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการทดลองในข้อ 3. ที่ศึกษาสัดส่วนหุ้ยานเปียร์และหุ้ยานเปียร์ผสมมูลโคที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ (การทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 1) โดยเติมปริมาตรถังละ 4 L ให้เต็มความจุถังหมักแต่ละถัง ดังตารางที่ 6 ปรับค่า pH ให้เป็น 7.5 ด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) แล้วปิดระบบด้วยจุกยางและตั้งทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 5 วัน ก่อนทำการเดินระบบต่อไป

ตารางที่ 6 ส่วนผสมในแต่ละถังหมัก ของทดลองชุดที่ 2 ระยะที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักหุ้ยเนเปียร์และการหมักหุ้ยเนเปียร์ร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ

Parameter	Reactor			
	1	2	3	4
Mixed culture	RC	RC	RB	RB
Substrate	N : W	N : C : W	N : W	N : C : W
Ratio* (% FW)	20 : 80	10 : 10 : 80	20 : 80	10 : 10 : 80

หมายเหตุ N คือหุ้ยเนเปียร์, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค, RC คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักโค, RB คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักกระบือ, FW คือน้ำหนักสด และ * สัดส่วนที่ใช้เป็นผลมาจากการศึกษาในข้อ 3. (การทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 1 ศึกษาสัดส่วนหุ้ยเนเปียร์และหุ้ยเนเปียร์ผสมมูลโคที่ใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพ)

4.2 การเดินระบบ (Operation)

เติมสารละลายผสมหุ้ยเนเปียร์ ลงในถังหมักแต่ละถัง โดยเติมแบบไหลขึ้น (Upflow) ใช้สัดส่วนดังตารางที่ 6 ให้มีอัตราการไหล (Flow rate) 125 ml/day โดยถังหมักมีปริมาตรในการหมัก (Working volume) 5 L เป็นผลให้มี HRT 40 วัน โดยทำการเติมสารอินทรีย์ทุก ๆ 5 วัน คือเติมครั้งละ 625 ml ซึ่งจะนำสารละลายผสมหุ้ยเนเปียร์ทั้ง 2 สัดส่วน ที่ใช้เติมลงระบบ มาวิเคราะห์หา ค่า pH, COD, TS และ TVS ตามวิธีมาตรฐานของ Standard Methods for Examination of Water and Wastewater (APHA and AWWA, 2005) สำหรับใช้ในการคำนวณผลผลิตมีเทน โดยการเดินระบบจะทำให้สภาวะอุณหภูมิห้อง (30 ± 1 °C) โดยในช่วงระยะเวลาที่เดินระบบมีการปรับค่า pH เมื่อค่า pH ในระบบมีค่าต่ำกว่า 7.5 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

4.3 การเก็บผลการทดลอง

ทำการเก็บผลการทดลองเป็นเวลา 35 วัน โดยทำการเก็บข้อมูลในสภาวะคงที่ (Steady state) สำหรับการทดลองนี้ที่ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักหุ้ยเนเปียร์ (Digestion) และการ

หมักหุ้ยเนเปียร์ร่วมกับมูลโค (Co - digestion) โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโค และกระบือ (การทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 2) สภาวะคงที่คือวันที่ 66 ถึงวันที่ 100 หลังจากเริ่มทำการเดินระบบ และเดินระบบเป็นระยะเวลาทั้งหมด 100 วัน โดยเก็บผลการทดลองดังนี้

4.3.1 บันทึกปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น (Total gas) ทุกวัน โดยการวัดปริมาตรน้ำ ที่ออกจากระบบเก็บก๊าซที่ถูกแทนที่ด้วยน้ำ (Water displacement) ด้วยกระบอกตวง

4.3.2 เก็บตัวอย่างก๊าซบริเวณจุดเก็บตัวอย่างก๊าซ (จุดที่ 6 ดังแสดงในภาพที่ 6) เป็นเวลา 5 นาที โดยใช้หลอดสุญญากาศทำการเก็บทุกวัน และนำตัวอย่างก๊าซที่เก็บทุกวันไปหาปริมาณเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนด้วยเครื่อง Gas chromatograph (GC/TCD)

4.3.3 เก็บตัวอย่างของเหลวที่ออกจากระบบ (Digested slurry) ทุก ๆ 5 วัน เพื่อนำมาหาค่า pH, COD, TS และ TVS ตามวิธีมาตรฐาน Standard Methods for Examination of Water and Wastewater (APHA and AWWA, 2005)

4.3.4 นำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาผลผลิตก๊าซมีเทน ในหน่วย L at STP/kg COD degraded, L at STP/kg TVS degraded และ L at STP/kg TS added โดยใช้ปริมาตรมีเทนที่ผลิตได้, ค่า COD ที่ถูกกำจัด, ค่า TVS ที่ถูกกำจัด และค่า TS ที่เติมเข้าระบบ ในการคำนวณ แสดงดังภาคผนวก ข

จากการทดลองข้อ 4. (การทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 2 เพื่อศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักหุ้ยเนเปียร์ และการหมักหุ้ยเนเปียร์ร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) จะได้ผลผลิตก๊าซมีเทนและสารละลายผสมหุ้ยเนเปียร์ที่เหมาะสมในการผลิตมีเทน จะนำสัดส่วนที่ให้ผลผลิตมีเทนสูงสุดไปใช้สำหรับการหมักฟางข้าว ด้วยการคำนวณสัดส่วนโดยน้ำหนักแห้งให้เท่ากัน ไปใช้ในการทดลองชุดที่ 2 (การหมักฟางข้าวและการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค) ดังจะกล่าวในข้อ 5. ต่อไป

5. ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทน (Methane yield) จากการหมักฟางข้าว (Digestion) และการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค (Co - digestion) โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ (การทดลองชุดที่ 2)

5.1 การเตรียมสารละลายผสม (Substrate slurry) จากฟางข้าว สำหรับการทดลอง

นำฟางข้าว (Rice straw) บดผ่านตะแกรงขนาด 2 mm มาวิเคราะห์หาค่าความชื้น, TS, TVS, ไนโตรเจนในรูป Total Kjeldahl nitrogen, ฟอสฟอรัส, โพแทสเซียม, แคลเซียม, ทองแดง, เหล็ก และแมกนีเซียม จากนั้นเก็บในถุงพลาสติกที่ปิดสนิท ที่อุณหภูมิ 4 °C ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 ฟางข้าวบดละเอียดผ่านตะแกรงขนาด 2 mm

เตรียมสารละลายผสม (Substrate Slurry) ของฟางข้าว ให้มีความเข้มข้นโดยน้ำหนักแห้งเทียบเท่ากับหญ้าเนเปียร์ ในสัดส่วนที่ให้ผลผลิตสูงสุด ซึ่งเป็นผลที่ได้มาจากการทดลองข้อ 4. (การทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 2 ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักหญ้าเนเปียร์ และการหมักหญ้าเนเปียร์ร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) โดยการเตรียมฟางข้าวบดต่อน้ำ ซึ่งเท่ากับหญ้าสดต่อน้ำในสัดส่วน 20 : 80 % FW (ในการทดลองข้อ 4.) คิดเป็นน้ำหนักฟางข้าวบด 3.5 g : น้ำ 96.5 ml และสำหรับฟางข้าวบดต่อมูลโคต่อน้ำ เท่ากับหญ้าสดต่อมูลโคต่อน้ำในสัดส่วน 10 : 10 : 80 % FW (ในการทดลองข้อ 4.) คิดเป็นน้ำหนักฟางข้าวบด 1.75 g : มูลโค 10 g : น้ำ 88.25 ml (วิธีคำนวณในภาคผนวก ข) จะได้สารละลายผสมฟางข้าวและมูลโค กับน้ำประปาในอัตราส่วนต่าง ๆ (โดยน้ำหนักสด) ดังต่อไปนี้

5.1.1 สารละลายผสมที่มีฟางข้าวต่อน้ำในสัดส่วน 3.5 : 96.5 % FW

5.1.2 สารละลายผสมที่มีฟางข้าวต่อมูลโคต่อน้ำในสัดส่วน 1.75 : 10 : 88.25 % FW

5.2 การเริ่มต้นระบบ (Start up)

5.2.1 เติมเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ ลงในถังหมักแต่ละถัง ปริมาตรถังละ 1 L โดยเติมในวันเริ่มต้นการหมักเพียงครั้งเดียว ดังตารางที่ 7

5.2.2 เติมสารละลายผสมฟางข้าวสัดส่วนต่าง ๆ ที่เหมาะสม ซึ่งเป็นผลที่ได้จากการทดลองในข้อ 4. (การทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 2) ปริมาตรถังละ 4 L ให้เต็มความจุถังหมักแต่ละถัง ดังตารางที่ 7 ปรับค่า pH เริ่มต้นในระบบให้เป็น 7.5 ด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) แล้วปิดระบบด้วยจุกยาง และตั้งทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 5 วัน ก่อนทำการเดินระบบต่อไป

ตารางที่ 7 ส่วนผสมในแต่ละถังหมัก ของการทดลองชุดที่ 2 ระยะที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักฟางข้าวและการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ)

Parameter	Reactor			
	1	2	3	4
Mixed culture	RC	RC	RB	RB
Substrate	S : W	S : C : W	S : W	S : C : W
Ratio* (% FW)	3.5 : 96.5	1.75 : 10 : 88.25	3.5 : 96.5	1.75 : 10 : 88.25

หมายเหตุ S คือฟางข้าว, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค, RC คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักโค, RB คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักกระบือ, FW คือน้ำหนักสด และ * สัดส่วนที่ใช้เป็นผลมาจากการศึกษาในข้อ 4. ซึ่งมีวิธีการคำนวณดังภาคผนวก ข

5.3 การเดินระบบ (Operation)

เดิมสารละลายผสมฟางข้าวลงในถังหมักแต่ละถัง โดยเดิมแบบไหลขึ้น (Upflow) ใช้สัดส่วนดังตารางที่ 7 ให้มีอัตราการไหล (Flow rate) 125 ml/day โดยถังหมักมีปริมาตรในการหมัก (Working volume) 5 L เป็นผลให้มี HRT 40 วัน โดยทำการเดิมสารอินทรีย์ทุก ๆ 5 วัน คือเดิมครั้งละ 625 ml ซึ่งจะนำสารละลายผสมฟางข้าวทั้ง 2 สัดส่วน ที่เดิมลงระบบ มาวิเคราะห์หา ค่า pH, COD, TS และ TVS ตามวิธีมาตรฐานของ Standard Methods for Examination of Water and Wastewater (APHA and AWWA, 2005) สำหรับใช้ในการคำนวณผลผลิตมีเทน โดยการเดินระบบ จะทำที่สภาวะอุณหภูมิห้อง (30 ± 1 °C) ในช่วงระยะเวลาที่เดินระบบมีการปรับค่า pH เมื่อค่า pH ในระบบมีค่าต่ำกว่า 7.5 ด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์

5.4 การเก็บผลการทดลอง

ทำการเก็บผลการทดลองเป็นเวลา 35 วัน โดยทำการเก็บข้อมูลในสภาวะคงที่ (Steady state) สำหรับการทดลองที่ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักฟางข้าว (Digestion) และการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค (Co - digestion) โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ (การทดลองชุดที่ 2) สภาวะคงที่คือวันที่ 41 ถึงวันที่ 75 หลังจากเริ่มทำการเดินระบบ และเดินระบบเป็นระยะเวลาทั้งหมด 75 วัน โดยเก็บผลการทดลองดังนี้

5.4.1 บันทึกปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น (Total gas) ทุกวัน โดยการวัดปริมาตรน้ำที่ออกจากระบบเก็บก๊าซที่ถูกแทนที่ด้วยน้ำ ด้วยกระบอกตวง

5.4.2 เก็บตัวอย่างก๊าซบริเวณจุดเก็บตัวอย่างก๊าซ (จุดที่ 6 ดังแสดงในภาพที่ 6) เป็นเวลา 5 นาที โดยใช้หลอดสุญญากาศทำการเก็บทุกวัน และนำตัวอย่างก๊าซที่เก็บทุกวันไปหาปริมาณเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทนด้วยเครื่อง Gas chromatograph (GC/TCD)

5.4.3 เก็บตัวอย่างของเหลวที่ออกจากระบบ (Digested slurry) ทุก ๆ 5 วัน เพื่อนำมาหา ค่า pH, COD, TS และ TVS ตามวิธีมาตรฐาน Standard Methods for Examination of Water and Wastewater (APHA and AWWA, 2005)

5.4.4 นำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาผลผลิตก๊าซมีเทน ในหน่วย L at STP/kg COD degraded, L at STP/kg TVS degraded และ L at STP/kg TS added โดยใช้ปริมาตรมีเทนที่ผลิตได้, ค่า COD ที่ถูกกำจัด, ค่า TVS ที่ถูกกำจัด และค่า TS ที่เติมเข้าระบบ ในการคำนวณดังกล่าว ข

จากการทดลองชุดที่ 2 เพื่อศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทน (Methane yield) จากการหมักฟางข้าว (Digestion) และการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค (Co - digestion) โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจาก กระเพาะหมักโคและกระบือ จะได้ผลผลิตก๊าซมีเทน และสารละลายผสมฟางข้าวที่เหมาะสมในการผลิตมีเทน

สถานที่และระยะเวลาทำการวิจัย

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ทำการหมักก๊าซชีวภาพ ณ งานเคมีและสิ่งแวดล้อม ฝ่ายเครื่องมือและวิจัยทางวิทยาศาสตร์ อาคารปฏิบัติการวิจัยกลาง สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน โดยใช้ระยะเวลาทั้งหมด 18 เดือน

ผลและวิจารณ์

จากการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์และฟางข้าวโดยการหมักร่วมกับมูลโค ได้แบ่งผลการศึกษาออกเป็น 3 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่หนึ่ง ผลการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 1 การศึกษาสัดส่วนหญ้าเนเปียร์และหญ้าเนเปียร์ผสมมูลโคที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ

ส่วนที่สอง ผลการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 2 การศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักหญ้าเนเปียร์ และการหมักหญ้าเนเปียร์ร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ

ส่วนที่สาม ผลการทดลองชุดที่ 2 การศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักฟางข้าว และการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ

1. ผลการศึกษาสัดส่วนหญ้าเนเปียร์และหญ้าเนเปียร์ผสมมูลโคที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ (การทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 1)

การศึกษาสัดส่วนหญ้าเนเปียร์และหญ้าเนเปียร์ผสมมูลโคที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ ใช้หญ้าเนเปียร์ที่มีอายุการตัด 60 วัน ทำการหมักร่วมกับมูลโคและใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคทำการเดินระบบหมักขึ้นตอนเดียวแบบกึ่งต่อเนื่อง (Single - stage semi - continuous anaerobic digestion) มีการเติมสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์แบบไหลขึ้น ให้มีอัตราการไหล 125 ml/day ทำการเติมสารอินทรีย์ทุก ๆ 5 วัน ใช้ถังหมักที่มีปริมาตรในการหมัก 5 L เป็นผลให้มี HRT 40 วัน ได้ผลการศึกษาดังต่อไปนี้

1.1 ลักษณะทั่วไปของหญ้าเนเปียร์สายพันธุ์ปากช่อง 1

หญ้าเนเปียร์อายุการตัด 60 วัน ที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในถังหมัก นำมาจากภาควิชาสัตวบาล คณะเกษตรกำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน มีผลผลิต 10

ton DM/Rai/yr มีความสูงเฉลี่ย 250 cm สับละเอียดและบดโดยเครื่องบดละเอียดขนาด 2 - 4 mm มีลักษณะทั่วไปแสดงดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 ลักษณะทั่วไปของหญ้าเนเปียร์และมูลโค

Parameter	Napier grass	Cow dung
Moisture (%)	83.93	76.22
Total solids (%)	16.07	23.78
Total volatile solids (%TS)	87.69	91.16
Nitrogen (TKN, mg/kg DW as N)	9,348	11,321
Phosphorus (PO_4^{3-} -P mg/kg DW as P)	56	206
Calcium (Ca, mg/kg DW)	750	3,618
Copper (Cu, mg/kg DW)	2.16	14.92
Iron (Fe, mg/kg DW)	93	384
Potassium (K, mg/kg DW)	30,249	7,888
Magnesium (Mg, mg/kg DW)	1,229	1,958

หมายเหตุ DW คือน้ำหนักแห้ง (Dry weight)

1.2 ลักษณะทั่วไปของมูลโคเนื้อ

มูลโคเนื้อที่ใช้เป็นวัสดุหมักร่วมในถังหมัก เป็นมูลโคสด นำมาจากฟาร์มโคเนื้อ ของ ภาควิชาสัตวบาล คณะเกษตรกำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน มีลักษณะทั่วไปแสดงดังตารางที่ 8

1.3 ลักษณะทั่วไปของเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักโค

เชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักของโคเนื้อใช้เป็นเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นในถังหมัก นำมาจากโคเนื้อที่เจาะกระเพาะ โดยให้ฟางข้าวเป็นอาหารหลัก ของภาควิชาสัตวบาล คณะเกษตรกำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน มีลักษณะทั่วไปแสดงดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ลักษณะทั่วไปของเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักโค และเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักกระบือ

Parameter	RC	RB
Moisture (%)	88.97	89.05
Total solids (%)	11.03	10.95
MLVSS (g/L)	13.44	11.65
Nitrogen (TKN, mg/kg DW as N)	13,691	8,948
Phosphorus (PO_4^{3-} -P mg/kg DW as P)	88	47
Calcium (Ca, mg/kg DW)	1,936	1,755
Copper (Cu, mg/kg DW)	3.22	5.73
Iron (Fe, mg/kg DW)	306	157
Potassium (K, mg/kg DW)	8,731	6,546
Magnesium (Mg, mg/kg DW)	739	783

หมายเหตุ RC คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักโค, RB คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักกระบือ, MLVSS คือมวลจุลินทรีย์ (Mixed liquor volatile suspended solids) และ DW คือน้ำหนักแห้ง (Dry weight)

1.4 ลักษณะทั่วไปของสารละลายผสม (Substrate slurry) หุ้เนเปียร์

การศึกษาสัดส่วนหุ้เนเปียร์และหุ้เนเปียร์ผสมมูลโคที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ จะใช้สารตั้งต้นได้แก่ ความเข้มข้นสารตั้งต้น 10 % FW แบ่งเป็นสารละลายผสมหุ้เนเปียร์เพียงอย่างเดียว 10 % FW และสารละลายผสมหุ้เนเปียร์กับมูลโคในสัดส่วน 5 : 5 % FW และความเข้มข้นสารตั้งต้น 20 % FW แบ่งเป็นสารละลายผสมหุ้เนเปียร์เพียงอย่างเดียว 20 % FW และสารละลายผสมหุ้เนเปียร์กับมูลโคในสัดส่วน 10 : 10 % FW มีลักษณะทั่วไปแสดงดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ลักษณะทั่วไปของสารละลายผสมหุ้ยนเปียร์ของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 1 (ศึกษาสัดส่วนหุ้ยนเปียร์และหุ้ยนเปียร์ผสมมูลโคที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ) ในแต่ละถังหมัก

Parameter	Reactor			
	1	2	3	4
Mixed culture	RC	RC	RC	RC
Substrate	N : W	N : W	N : C : W	N : C : W
Ratio (% FW)	10 : 90	20 : 80	5 : 5 : 90	10 : 10 : 80
Concentration (% FW)	10	20	10	20
COD (g/L)	15.75	27.04	26.84	32.93
TVS (g/L)	9.88	17.56	19.67	27.87
TS (g/L)	11.50	22.09	22.72	33.08
OLR (Kg COD /m ³ ·day)	0.39	0.68	0.67	0.82
pH of substrate slurry	7.36	7.44	7.91	7.95
Nitrogen (TKN, mg/L as N)	150.23	300.46	209.73	419.45
Phosphorus (PO ₄ ³⁻ -P, mg/L as P)	0.91	1.82	2.91	5.82
Calcium (Ca, mg/L)	12.06	24.11	49.05	98.10
Copper (Cu, mg/L)	0.03	0.07	0.19	0.39
Iron (Fe, mg/L)	1.49	2.97	5.31	10.61
Potassium (K, mg/L)	486.09	972.19	336.84	673.68
Magnesium (Mg, mg/L)	19.75	39.51	33.16	66.32
COD : N : P	100 : 1.0 : 0.01	100 : 1.9 : 0.01	100 : 1.3 : 0.02	100 : 2.7 : 0.04

หมายเหตุ N คือหุ้ยนเปียร์, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค, RC คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักโค, FW คือน้ำหนักสด

สารละลายผสมหุ้ยนเปียร์ที่ความเข้มข้นสารตั้งต้น 10 % FW (ถังหมักที่ 1 และ 3) แบ่งเป็นสารละลายผสมหุ้ยนเปียร์เพียงอย่างเดียว 10 % FW และสารละลายผสมหุ้ยนเปียร์กับมูลโคในสัดส่วน 5 : 5 % FW มีค่า COD 15.75 และ 26.84 g/L ตามลำดับ คิดเป็น OLR (Organic loading rate) 0.39 และ 0.67 kg COD/m³·day ตามลำดับ และที่ความเข้มข้นสารตั้งต้น 20 % FW (ถังหมักที่ 2 และ 4) แบ่งเป็นสารละลายผสมหุ้ยนเปียร์เพียงอย่างเดียว 20 % FW และสารละลาย

ผสมหญ้าเนเปียร์กับมูลโคในสัดส่วน 10 : 10 % FW มีค่า COD 27.04 และ 32.93 g/L ตามลำดับ คิดเป็น OLR 0.68 และ 0.82 kg COD/m³·day ตามลำดับ (วิธีการคำนวณแสดงดังภาคผนวก ข)

ค่า pH (ตารางที่ 10) ของสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์ ที่ความเข้มข้นสารตั้งต้น 10 % FW (ถังหมักที่ 1 และ 3) สารละลายผสมหญ้าเนเปียร์เพียงอย่างเดียว 10 % FW และสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์กับมูลโคในสัดส่วน 5 : 5 % FW มีค่า 7.36 และ 7.91 ตามลำดับ และที่ความเข้มข้นสารตั้งต้น 20 % FW (ถังหมักที่ 2 และ 4) สารละลายผสมหญ้าเนเปียร์เพียงอย่างเดียว 20 % FW และสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์กับมูลโคในสัดส่วน 10 : 10 % FW มีค่า 7.44 และ 7.95 ตามลำดับ ซึ่ง ค่า pH ของสารละลายผสมทั้ง 4 สัดส่วน มีค่าสูงกว่าค่าที่กำหนดไว้สำหรับการเดินระบบการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน เมื่อเปรียบเทียบกับกรมโรงงานอุตสาหกรรม (2553) ที่กล่าวว่า ค่า pH ของวัสดุที่จะนำมาหมักควรมีค่าระหว่าง 6.0 - 7.0

ค่าไนโตรเจนและฟอสฟอรัส (ตารางที่ 10) ของสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์แต่ละสัดส่วน พบว่าที่ความเข้มข้นสารตั้งต้น 10 % FW (ถังหมักที่ 1 และ 3) สารละลายผสมหญ้าเนเปียร์กับมูลโคในสัดส่วน 5 : 5 % FW (ถังหมักที่ 3) มีปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่สูงกว่าสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์เพียงอย่างเดียว 10 % FW (ถังหมักที่ 1) และที่ความเข้มข้นสารตั้งต้น 20 % FW (ถังหมักที่ 2 และ 4) เป็นเช่นเดียวกัน คือ สารละลายผสมหญ้าเนเปียร์กับมูลโคในสัดส่วน 10 : 10 % FW (ถังหมักที่ 4) มีปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่สูงกว่าสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์เพียงอย่างเดียว 20 % FW (ถังหมักที่ 2)

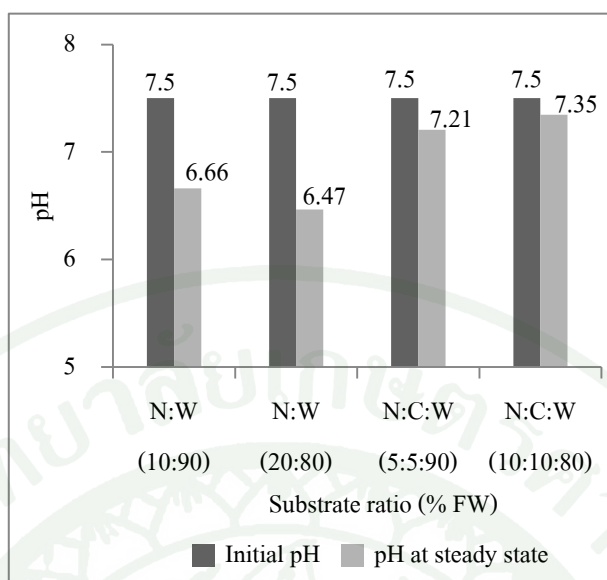
ค่า COD, ค่าไนโตรเจน และค่าฟอสฟอรัส (ตารางที่ 10) นำมาคำนวณสัดส่วนสารอินทรีย์ในรูป COD ต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส (COD : N : P) พบว่าที่ความเข้มข้นสารตั้งต้น 10 % FW (ถังหมักที่ 1 และ 3) สารละลายผสมหญ้าเนเปียร์กับมูลโคในสัดส่วน 5 : 5 % FW (ถังหมักที่ 3) มีสัดส่วน COD : N : P ใกล้เคียงกับสัดส่วนที่เหมาะสมมากกว่าสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์เพียงอย่างเดียว 10 % FW (ถังหมักที่ 1) และที่ความเข้มข้นสารตั้งต้น 20 % FW (ถังหมักที่ 2 และ 4) เป็นเช่นเดียวกันคือ สารละลายผสมหญ้าเนเปียร์กับมูลโคในสัดส่วน 10 : 10 % FW (ถังหมักที่ 4) มีสัดส่วน COD : N : P ใกล้เคียงกับสัดส่วนที่เหมาะสมมากกว่าสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์เพียงอย่างเดียว 20 % FW (ถังหมักที่ 2) สัดส่วนที่เหมาะสมสำหรับการย่อยสลายสารอินทรีย์ให้มีประสิทธิภาพและผลิตก๊าซชีวภาพได้ดี ควรจะมีสัดส่วน COD : N : P เท่ากับ 100 : 2.2 : 0.4 (สำนักวิจัย ค้นคว้าพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, ม.ป.ป.) การวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนและปริมาณฟอสฟอรัส แสดงให้เห็นว่าการใช้มูลโคเป็นวัสดุ

หมักร่วมจะช่วยเพิ่มปริมาณธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัสได้ เช่นเดียวกับการศึกษาของ Hashimoto (1983) ที่ใช้มูลสัตว์เป็นวัสดุหมักร่วมในการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน พบว่ามีการเพิ่มขึ้นของความสมดุลของจุลินทรีย์ มีความสามารถในการควบคุมค่า pH และการขาดสารอาหารลดลง

ปริมาณโพแทสเซียม แคลเซียม ทองแดง และแมกนีเซียม (ตารางที่ 10) พบว่าในสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์ทั้ง 4 สัตว์ส่วน มีปริมาณที่ไม่เป็นพิษต่อเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นในระบบ โดยมีค่าไม่เกินระดับความเข้มข้นสูงสุด (ตารางที่ 2) คือ 2500, 1, 250 และ 1000 mg/L ตามลำดับ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553) สำหรับปริมาณของเหล็กเมื่อคำนวณในรูปมิลลิกรัมต่อกรัม ซีโอดีสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์ทั้ง 4 สัตว์ส่วน มีค่า 9.44×10^{-8} , 1.10×10^{-7} , 1.98×10^{-7} และ 3.22×10^{-7} mg/g COD ตามลำดับ พบว่าสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์ที่ใช้เป็นสารตั้งต้นทั้ง 4 สัตว์ส่วน มีปริมาณที่ไม่เพียงพอสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ คือมีค่าต่ำกว่าปริมาณความต้องการอย่างน้อย 0.02 - 0.03 mg/g COD (Rittmann and McCarty, 2001) แต่เนื่องจากเหล็กเป็นธาตุอาหารรอง (Micronutrient) (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553) ซึ่งเป็นเพียงส่วนประกอบในหลาย ๆ ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ จึงไม่ได้มีการเพิ่มธาตุเหล็กลงในระบบสำหรับการทดลองนี้

1.5 ค่า pH

สำหรับค่า pH เริ่มต้นในระบบ มีการปรับค่าด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) เป็น 7.5 และในช่วงระยะเวลาที่เดินระบบไม่มีการปรับค่า pH อีก โดยค่า pH เฉลี่ยในช่วงสภาวะคงที่ (ภาพที่ 10) พบว่าถังหมักที่ใช้สารละลายผสมหญ้าเนเปียร์หมักร่วมกับมูลโค (ถังหมักที่ 3 และ 4) รักษาค่า pH ได้ดีกว่าถังหมักที่ใช้สารละลายผสมหญ้าเนเปียร์เพียงอย่างเดียว (ถังหมักที่ 1 และ 2) มีค่า pH อยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน คือ 6.6 - 7.4 (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553) แสดงให้เห็นว่ามูลโคช่วยให้เกิดความสมดุลของระบบเช่นเดียวกับการศึกษาของ Hashimoto (1983) ที่ใช้มูลสัตว์เป็นวัสดุหมักร่วมในการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน พบว่ามีความสามารถในการควบคุมค่า pH และเป็นไปในทิศทางเดียวกับการศึกษาของเสริมพล (2524) ที่พบว่าค่า pH ที่เหมาะสมกับระบบการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนอยู่ในช่วงระหว่าง 6.6 - 7.6 ถ้าค่า pH สูงหรือต่ำกว่านี้ประสิทธิภาพของระบบจะลดลง



ภาพที่ 10 ค่า pH ของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 1 (ศึกษาสัดส่วนหุ้ยนเปียร์และหุ้ยนเปียร์ผสมมูลโคที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ) ในแต่ละถังหมัก

หมายเหตุ N คือหุ้ยนเปียร์, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค และ FW คือน้ำหนักสด

1.6 ประสิทธิภาพในการกำจัด COD (Chemical oxygen demand)

ค่า COD ของสารละลายผสมหุ้ยนเปียร์ทั้ง 4 สัดส่วนที่เดิมเข้าระบบ (Substrate slurry) และค่า COD ของสารละลายผสมหุ้ยนเปียร์ทั้ง 4 สัดส่วนที่ออกจากระบบโดยผ่านการหมักแล้ว ดังแสดงในตารางที่ 11 และนำมาใช้ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการกำจัด COD (ภาคผนวก ข)

สารละลายผสมหุ้ยนเปียร์เพียงอย่างเดียว 10 % FW (ถังหมักที่ 1) มีค่า COD ที่เดิมเข้าระบบเฉลี่ย 15.75 g/L และค่า COD ที่ออกจากระบบเฉลี่ย 9.50 g/L (ตารางที่ 11) สามารถนำมาคำนวณประสิทธิภาพในการกำจัด COD ได้ดังต่อไปนี้

$$\text{ประสิทธิภาพการกำจัด COD (\%)} = \frac{[(15.75 - 9.50) \text{ g/L}] \times 100}{15.75 \text{ g/L}}$$

$$= 39.68 \%$$

จากการคำนวณของสารละลายผสมหมักเนเปียร์เพียงอย่างเดียว 10 % FW (ถังหมักที่ 1) จะได้ประสิทธิภาพในการกำจัด COD 39.68 % และสำหรับสารละลายผสมหมักเนเปียร์เพียงอย่างเดียว 20 % FW (ถังหมักที่ 2) สารละลายผสมหมักเนเปียร์กับมูลโคในสัดส่วน 5 : 5 % FW (ถังหมักที่ 3) และสารละลายผสมหมักเนเปียร์กับมูลโคในสัดส่วน 10 : 10 % FW (ถังหมักที่ 4) ใช้วิธีคำนวณเช่นเดียวกัน พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัด COD 38.91, 77.16 และ 65.26 % ตามลำดับ (ตารางที่ 11) ซึ่งประสิทธิภาพการกำจัดค่า COD ทำให้ทราบถึงความสามารถของเชื้อจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสารตั้งต้น โดยปกติแล้วกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนจะสามารถลดค่า COD ได้ดี (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553)

1.7 ประสิทธิภาพในการกำจัด TVS (Total volatile solids)

ค่า TVS ของสารละลายผสมหมักเนเปียร์ทั้ง 4 สัดส่วนที่เติมเข้าระบบ และค่า TVS ของสารละลายผสมหมักเนเปียร์ทั้ง 4 สัดส่วนที่ออกจากระบบโดยผ่านการหมักแล้วดังแสดงในตารางที่ 11 และนำมาใช้ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการกำจัด TVS (ภาคผนวก ข)

สารละลายผสมหมักเนเปียร์เพียงอย่างเดียว 10 % FW (ถังหมักที่ 1) มีค่า TVS ที่เติมเข้าระบบเฉลี่ย 9.88 g/L และค่า TVS ที่ออกจากระบบเฉลี่ย 6.68 g/L (ตารางที่ 11) สามารถนำมาคำนวณประสิทธิภาพในการกำจัด TVS ได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพการกำจัด TVS (\%)} &= \frac{[(9.88 - 6.68) \text{ g/L}] \times 100}{9.88 \text{ g/L}} \\ &= 32.39 \% \end{aligned}$$

จากการคำนวณสำหรับสารละลายผสมหมักเนเปียร์เพียงอย่างเดียว 10 % FW (ถังหมักที่ 1) จะได้ประสิทธิภาพในการกำจัด TVS 32.39 % และสำหรับสารละลายผสมหมักเนเปียร์เพียงอย่างเดียว 20 % (ถังหมักที่ 2) สารละลายผสมหมักเนเปียร์กับมูลโคในสัดส่วน 5 : 5 % FW (ถังหมักที่ 3) และสารละลายผสมหมักเนเปียร์กับมูลโคในสัดส่วน 10 : 10 % FW (ถังหมักที่ 4) ใช้วิธี

คำนวณ เช่นเดียวกัน พบว่ามีประสิทธิภาพในการกำจัด TVS 38.44, 73.61 และ 67.06 % ตามลำดับ (ตารางที่ 11)

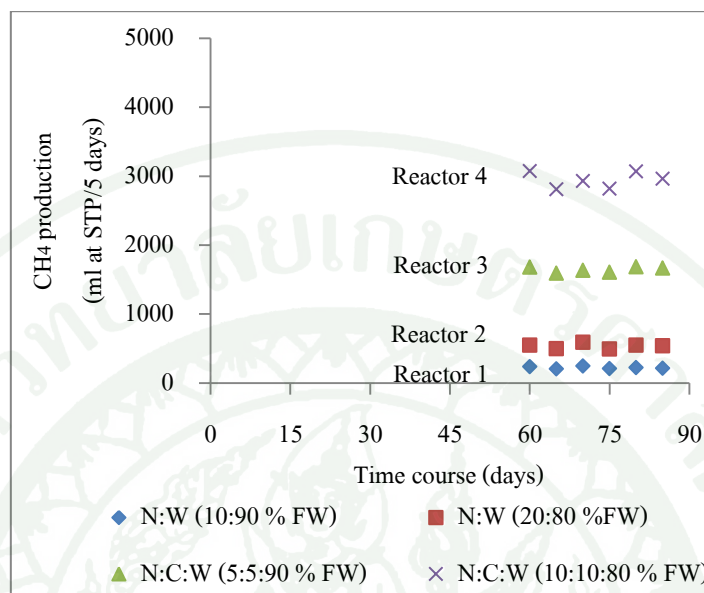
1.8 ก๊าซมีเทนที่ผลิตได้

เมื่อเดินระบบจนกระทั่งอยู่ในสภาวะคงที่ คือระยะเวลาที่มากกว่าระยะเวลาเก็บกาก และปริมาตรก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นมีความสม่ำเสมอคงที่ สำหรับการทดลองนี้ที่ศึกษาสัดส่วนหญ้าเนเปียร์และหญ้าเนเปียร์ผสมมูลโคที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ (การทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 1) สภาวะคงที่คือวันที่ 56 ถึงวันที่ 85 หลังจากเริ่มทำการเดินระบบ และเดินระบบเป็นระยะเวลาทั้งหมด 85 วัน ทำการเก็บผลการทดลองเป็นเวลาทั้งหมด 30 วัน โดยการวัดปริมาณน้ำโดยระบบเก็บก๊าซแบบแทนทีน้ำ และเก็บตัวอย่างก๊าซไปวิเคราะห์หาปริมาณเปอร์เซ็นต์มีเทนโดยวิธี Gas chromatography พบว่ามีก๊าซมีเทนเกิดขึ้น (ตารางผนวกที่ ก2) แสดงให้เห็นว่าหญ้าเนเปียร์และหญ้าเนเปียร์ผสมมูลโคสามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตมีเทนได้

จากปริมาณเปอร์เซ็นต์มีเทน (ตารางผนวกที่ ก2) พบว่าในสภาวะคงที่สารละลายผสมหญ้าเนเปียร์เพียงอย่างเดียว 10 % FW (ถังหมักที่ 1) มีปริมาณเปอร์เซ็นต์มีเทนเฉลี่ย 14.62 % และสำหรับสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์เพียงอย่างเดียว 20 % FW (ถังหมักที่ 2) สารละลายผสมหญ้าเนเปียร์กับมูลโคในสัดส่วน 5 : 5 % FW (ถังหมักที่ 3) และสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์กับมูลโคในสัดส่วน 10 : 10 % FW (ถังหมักที่ 4) มีปริมาณเปอร์เซ็นต์มีเทนเฉลี่ย 20.46, 41.07 และ 48.75 % ตามลำดับ (ดังตารางที่ 11) แสดงให้เห็นว่าที่ความเข้มข้นสารตั้งต้น 10 % FW (ถังหมักที่ 1 และ 3) การหมักโดยใช้สารละลายผสมหญ้าเนเปียร์กับมูลโค มีปริมาณเปอร์เซ็นต์มีเทนสูงกว่าการหมักโดยใช้สารละลายผสมหญ้าเนเปียร์เพียงอย่างเดียว และที่ความเข้มข้นสารตั้งต้น 20 % FW (ถังหมักที่ 2 และ 4) ก็ได้ผลเช่นเดียวกัน

ปริมาตรก๊าซทั้งหมดที่ผลิตได้มาจากการวัดปริมาณน้ำโดยระบบเก็บก๊าซแบบแทนทีน้ำ และปริมาณเปอร์เซ็นต์มีเทนที่ได้จากการวิเคราะห์โดยวิธี Gas chromatography จากนั้นนำมาคำนวณปริมาตรมีเทนที่เกิดขึ้นทุกวันที่สภาวะอุณหภูมิและความดันมาตรฐาน (Standard temperature and pressure; STP) คือสภาวะที่ 0 °C และความดัน 1 atm โดยปริมาตรมีเทนที่เกิดขึ้นทุกวันเท่ากับผลคูณของปริมาตรก๊าซทั้งหมดที่ผลิตได้ที่ STP กับปริมาณเปอร์เซ็นต์มีเทน และเมื่อนำปริมาตรมีเทนที่ผลิตได้ทุกวันมารวมในรอบทุก ๆ 5 วัน ที่มีการเติมสารอินทรีย์เข้าระบบ จะได้

ปริมาตรมีเทนรวมทุก 5 วัน (ตารางผนวกที่ ก3) และปริมาตรมีเทนรวมทุก 5 วัน ในช่วงสภาวะคงที่ (Steady state) แสดงดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 ปริมาตรมีเทนรวมทุก 5 วัน ที่ผลิตได้ ของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 1 (ศึกษาสัดส่วนหุ้ำนเนเปียร์และหุ้ำนเนเปียร์ผสมมูลโคที่ใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพ) ในแต่ละถังหมัก

หมายเหตุ N คือหุ้ำนเนเปียร์, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค, FW คือน้ำหนักสด

จากภาพที่ 11 จะเห็นได้ว่าการหมักโดยใช้สารละลายผสมหุ้ำนเนเปียร์เพียงอย่างเดียว (ถังหมักที่ 1 และ 2) การหมักด้วยสารละลายผสมหุ้ำนเนเปียร์เพียงอย่างเดียว 20 % FW (ถังหมักที่ 2) มีปริมาตรมีเทนรวมที่ผลิตได้สูงกว่า การหมักด้วยสารละลายผสมหุ้ำนเนเปียร์เพียงอย่างเดียว 10 % FW (ถังหมักที่ 1) สำหรับการหมักโดยใช้สารละลายผสมหุ้ำนเนเปียร์กับมูลโค (ถังหมักที่ 3 และ 4) ก็เป็นเช่นเดียวกันคือ การหมักด้วยสารละลายผสมหุ้ำนเนเปียร์กับมูลโคในสัดส่วน 10 : 10 % FW (ถังหมักที่ 4) มีปริมาตรมีเทนรวมที่ผลิตได้สูงกว่า สารละลายผสมหุ้ำนเนเปียร์กับมูลโคในสัดส่วน 5 : 5 % FW (ถังหมักที่ 3)

เมื่อเปรียบเทียบที่ความเข้มข้นของสารตั้งต้นเท่ากัน (ภาพที่ 11) จะเห็นได้ว่าที่สารตั้งต้น 10 % FW (ถังหมักที่ 1 และ 3) การหมักโดยใช้สารละลายผสมหุ้ำนเนเปียร์กับมูลโคในสัดส่วน 5 : 5 % FW (ถังหมักที่ 3) ให้ปริมาตรมีเทนรวมที่ผลิตได้สูงกว่าการหมักโดยใช้สารละลาย

ผสมหญ้าเนเปียร์เพียงอย่างเดียว 10 % FW (ถังหมักที่ 1) และที่สารตั้งต้น 20 % FW (ถังหมักที่ 2 และ 4) ก็ได้ผลการทดลองไปในทางเดียวกัน คือสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์กับมูลโคในสัดส่วน 10 : 10 % FW (ถังหมักที่ 4) มีปริมาณมีเทนรวมที่ผลิตได้สูงกว่าสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์เพียงอย่างเดียว 20 % FW (ถังหมักที่ 2)

1.9 ผลผลิตมีเทน (Methane yield)

เมื่อนำค่าปริมาณมีเทนรวมทุก 5 วัน (ตารางที่ 11) มาคำนวณหาผลผลิตมีเทน ในรูปของปริมาณมีเทนที่ผลิตได้ต่อ COD ที่ถูกกำจัด (L at STP/kg COD degraded) หรือต่อ TVS ที่ถูกกำจัด (L at STP/kg TVS degraded) หรืออาจแสดงในรูปปริมาณมีเทนที่ผลิตได้ต่อ TS ที่เติมเข้าระบบ (L at STP/kg TS added) โดยวิธีการคำนวณผลผลิตมีเทนแสดงดังภาคผนวก ข

1.9.1 ผลผลิตมีเทนในรูปของปริมาณมีเทนที่ผลิตได้ต่อ COD ที่ถูกกำจัด

จากการคำนวณผลผลิตมีเทนในรูปของปริมาณมีเทนที่ผลิตได้ต่อ COD ที่ถูกกำจัด สำหรับสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์เพียงอย่างเดียว 10 % FW (ถังหมักที่ 1) ได้ผลผลิตมีเทน 57 L at STP/kg COD degraded และสำหรับสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์เพียงอย่างเดียว 20 % FW (ถังหมักที่ 2) สารละลายผสมหญ้าเนเปียร์กับมูลโคในสัดส่วน 5 : 5 % FW (ถังหมักที่ 3) และสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์กับมูลโคในสัดส่วน 10 : 10 % FW (ถังหมักที่ 4) ใช้วิธีคำนวณเช่นเดียวกัน พบว่ามีผลผลิตมีเทน 76, 127 และ 219 L at STP/kg COD degraded ตามลำดับ (ตารางที่ 11)

เมื่อนำผลผลิตมีเทนในรูปของปริมาณมีเทนที่ผลิตได้ต่อ COD ที่ถูกกำจัดมาเปรียบเทียบกับผลการศึกษาของ McCarty (1964) ที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างก๊าซมีเทนกับปริมาณของ COD ที่ถูกกำจัดไว้คือ 1 g COD ที่ถูกกำจัดจะได้ก๊าซมีเทน 0.351 L ที่ STP ซึ่งคิดเป็นผลผลิตมีเทน 351 L at STP/kg COD degraded พบว่าผลผลิตมีเทนที่ผลิตได้จากการทดลองที่ 1 ระยะที่ 1 มีค่าต่ำกว่า เพราะพอลิเมอร์หลักที่พบในผนังเซลล์ของหญ้าเนเปียร์ ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน มีปริมาณสูง (Ansah *et al.*, 2010) ทำให้มีโครงสร้างที่แข็งแรง (Perez *et al.*, 2002) ก่อนข้างทนต่อการย่อยสลาย (Orr and Kirk, 2003) โดยส่วนที่เป็นลิกโนเซลลูโลส (ลิกนินจับตัวกับเซลลูโลส) จะย่อยสลายทางชีวภาพได้ยาก (Zhang and Zhang, 1999) เป็นสาเหตุที่ทำให้การย่อยสลายของเชื้อจุลินทรีย์ลดลง ส่งผลให้มีผลผลิตมีเทนต่ำกว่า

1.9.2 ผลผลิตมีเทนในรูปของปริมาตรมีเทนที่ผลิตได้ต่อ TVS ที่ถูกกำจัด

การคำนวณผลผลิตมีเทนในรูปของปริมาตรมีเทนที่ผลิตได้ ต่อ TVS ที่ถูกกำจัดของสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์เพียงอย่างเดียว 10 % FW (ถังหมักที่ 1) จะได้ผลผลิตมีเทน 112 L at STP/kg TVS degraded และสำหรับสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์เพียงอย่างเดียว 20 % FW (ถังหมักที่ 2) สารละลายผสมหญ้าเนเปียร์กับมูลโคในสัดส่วน 5 : 5 % FW (ถังหมักที่ 3) และสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์กับมูลโคในสัดส่วน 10 : 10 % FW (ถังหมักที่ 4) พบว่ามีผลผลิตมีเทน 119, 182, และ 252 L at STP/kg TVS degraded (ตารางที่ 11)

ผลผลิตมีเทนในรูปปริมาตรมีเทนต่อกิโลกรัม TVS ที่เติมเข้าระบบมีค่าสูงสุดจากการหมักโดยใช้สารละลายผสมหญ้าเนเปียร์กับมูลโคในสัดส่วน 10 : 10 % FW คิดเป็นสัดส่วน 87.69 : 91.16 หรือ 1 : 1.04 โดยปริมาตร TVS (ตารางที่ 7) ซึ่งมีผลผลิตมีเทน 169 L at STP/kg TVS added (ภาพผนวกที่ ก8) เมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาของ Lehtomaki *et al.* (2007) ที่ทำการหมักหญ้าร่วมกับมูลโคสัดส่วน 30 : 70 หรือ 1 : 2.33 โดยปริมาตร TVS ได้ผลผลิตมีเทน 268 L at STP/kg TVS added พบว่าผลผลิตมีเทนที่ได้จากการทดลองที่ 1 ระยะที่ 1 มีค่าต่ำกว่า เนื่องจากสัดส่วนมูลโคที่ใช้ในการทดลองมีปริมาณน้อยกว่าสัดส่วนมูลโคที่ใช้ในการศึกษาของ Lehtomaki *et al.* (2007) เพราะปริมาณมูลโคที่มากกว่าจะเพิ่มสารอาหารในระบบ (Shyam, 1994; Zhang and Zhang, 1999) แต่เมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาของสุพล และสมศักดิ์ (2557) ที่หมักหญ้าเนเปียร์กับมูลไก่ โดยทำการหมักแบบสองขั้นตอน ที่ HRT 28 วัน ในถังหมักขนาด 200 L ใช้สัดส่วนหญ้าเนเปียร์ต่อมูลไก่ 1 : 1 โดยมี OLR 0.49 kg TVS/m³·day ได้ผลผลิตมีเทน 24.07 L at STP/kg TVS added พบว่าการหมักหญ้า เนเปียร์ร่วมกับมูลโคมีผลผลิตมีเทนสูงกว่า แสดงให้เห็นว่ามูลโคมีความเหมาะสมที่จะนำมาเป็นวัสดุหมักร่วมกับหญ้าเนเปียร์มากกว่ามูลไก่

1.9.3 ผลผลิตมีเทนในรูปของปริมาตรมีเทนที่ผลิตได้ต่อ TS ที่เติมเข้าระบบ

สำหรับการคำนวณผลผลิตมีเทนในรูปของปริมาตรมีเทนที่ผลิตได้ต่อ TS ที่เติมเข้าระบบ ของสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์เพียงอย่างเดียว 10 % FW (ถังหมักที่ 1) จะได้ผลผลิตมีเทน 31 L at STP/kg TS added และสำหรับสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์เพียงอย่างเดียว 20 % FW (ถังหมักที่ 2) สารละลายผสมหญ้าเนเปียร์กับมูลโคในสัดส่วน 5 : 5 % FW (ถังหมักที่ 3) และสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์กับมูลโคในสัดส่วน 10 : 10 % FW (ถังหมักที่ 4) พบว่ามีผลผลิตมีเทน 36, 116, และ 142 L at STP/kg TS added ตามลำดับ (ตารางที่ 11)

จากผลการคำนวณผลผลิตมีเทนในรูปของปริมาตรมีเทนที่ผลิตได้ต่อ COD ที่ถูกกำจัด ปริมาตรมีเทนที่ผลิตได้ต่อ TVS ที่ถูกกำจัด และปริมาตรมีเทนที่ผลิตได้ต่อ TS ที่เติมเข้าระบบ พบว่าสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์กับมูลโคในสัดส่วน 10 : 10 % FW (ถังหมักที่ 4) ให้ผลผลิตมีเทนสูงสุด (ตารางที่ 11) ทั้งนี้เป็นเพราะมีค่า OLR สูงสุด คือ 0.82 kg COD/m³·day โดยมีค่า COD ค่า TVS และค่า TS ที่เติมเข้าระบบสูงสุด คือ 32.93, 27.87 และ 33.08 g/L โดยพบว่าปริมาณ TVS ที่สูงมีความสัมพันธ์กับผลผลิตมีเทน เช่นเดียวกับการศึกษาของ Yadavika *et al.* (2004) ที่พบว่า ปริมาณก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นตามค่า OLR ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากค่า OLR ที่เพิ่มขึ้นเป็นการเพิ่มปริมาณ ธาตุอาหารสำหรับการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทน ซึ่งทำให้มีสารอินทรีย์เพียงพอต่อการสร้างก๊าซชีวภาพได้ และยังสอดคล้องกับการศึกษาของ Hall (1997), Murphy and Power (2009) และ Seppala *et al.* (2009) รวมทั้งการใช้มูลโคเป็นวัสดุหมักร่วมซึ่งจะช่วยเพิ่มปริมาณธาตุอาหาร เช่นเดียวกับการศึกษาของ Shyam (1994) และ Zhang and Zhang (1999) ที่พบว่าสามารถเพิ่มธาตุอาหารในโตรเจนได้จากการใช้มูลสัตว์เป็นวัสดุหมักร่วม

ประสิทธิภาพในการกำจัด COD (ตารางที่ 11) ของสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์กับมูลโคใน สัดส่วน 5 : 5 % FW (ถังหมักที่ 3) มีประสิทธิภาพในการกำจัด COD สูงกว่าสารละลายผสมหญ้า เนเปียร์กับมูลโคในสัดส่วน 10 : 10 % FW (ถังหมักที่ 4) แต่เมื่อพิจารณาจากผลผลิตมีเทน พบว่า สารละลายผสมหญ้าเนเปียร์กับมูลโคในสัดส่วน 10 : 10 % FW (ถังหมักที่ 4) ให้ผลผลิตมีเทนที่สูง กว่า ทั้งนี้เพราะสารอินทรีย์อาจถูกจุลินทรีย์นำมาใช้เพื่อเปลี่ยนเป็นก๊าซชนิดอื่น เนื่องจากจุลินทรีย์ ที่ผลิตมีเทนจะใช้สารอินทรีย์เป็นสารอาหารและย่อยสลายให้ผลผลิตหลักเป็นก๊าซมีเทน (CH₄) และ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) โดยมีก๊าซอื่นเกิดขึ้นในปริมาณเล็กน้อย เช่น ก๊าซ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S) และก๊าซแอมโมเนีย (NH₃) เป็นต้น (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553)

จากผลการศึกษาสัดส่วนหญ้าเนเปียร์และหญ้าเนเปียร์ผสมมูลโคที่เหมาะสมในการผลิต ก๊าซชีวภาพ (การทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 1) พบว่าสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์กับมูลโคในสัดส่วน 10 : 10 % FW (ถังหมักที่ 4) ให้ผลผลิตมีเทนสูงสุด ซึ่งจะนำสัดส่วนนี้ไปใช้สำหรับการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 2 (ข้อ 2.) ต่อไป โดยเลือกสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์เพียงอย่างเดียว 20 % FW ไปใช้ในการทดลองด้วยเนื่องจากมีปริมาณสารตั้งต้น 20 % FW เท่ากัน

ตารางที่ 11 ปริมาตรก๊าซชีวภาพที่ได้และผลผลิตก๊าซชีวภาพของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 1
(ศึกษาสัดส่วนหุ้ยนเปียร์และหุ้ยนเปียร์ผสมมูลโคที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ) ในแต่ละถังหมัก

Parameter	Reactor			
	1	2	3	4
Mixed culture	RC	RC	RC	RC
Substrate	N : W	N : W	N : C : W	N : C : W
Ratio (% FW)	10 : 90	20 : 80	5 : 5 : 90	10 : 10 : 80
Concentration (% FW)	10	20	10	20
Flow rate (ml/day)	125	125	125	125
Flow rate (ml/5days)	625	625	625	625
HRT (day)	40	40	40	40
OLR (kg COD /m ³ ·day)	0.39	0.68	0.67	0.82
OLR (kg TVS /m ³ ·day)	0.25	0.44	0.49	0.70
MLVSS (g/L)	8.5	8.5	8.5	8.5
pH of substrate slurry	7.36	7.44	7.91	7.95
CH ₄ (ml/5days)	223	501	1647	2944
CH ₄ in biogas (%)	14.62	20.46	41.07	48.75
Initial COD (g/L)	15.75	27.04	26.84	32.93
COD at steady state (g/L)	9.50	16.52	6.13	11.44
COD degradation (%)	39.68	38.91	77.16	65.26
Initial TVS (g/L)	9.88	17.56	19.67	27.87
TVS at steady state (g/L)	6.68	10.81	5.19	9.18
TVS degradation (%)	32.39	38.44	73.61	67.06
Initial TS (g/L)	11.50	22.09	22.72	33.08
CH ₄ yield (L at STP/kg COD degraded)	57	76	127	219
CH ₄ yield (L at STP/kg TVS degraded)	112	119	182	252
CH ₄ yield (L at STP/kg TS added)	31	36	116	142

หมายเหตุ N คือหุ้ยนเปียร์, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค, RC คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักโค และ FW คือน้ำหนักสด

2. ผลการศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทน (Methane yield) จากการหมักหุ้ยนเปียร์ (Digestion) และการหมักหุ้ยนเปียร์ร่วมกับมูลโค (Co - digestion) โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระป๋อง (การทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 2)

การศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักหุ้ยนเปียร์ และการหมักหุ้ยนเปียร์ร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระป๋อง ใช้หุ้ยนเปียร์ที่มีอายุการตัด 60 วัน โดยการหมักร่วมกับมูลโค ทำการเดินระบบหมักขึ้นตอนเดียวแบบกึ่งต่อเนื่อง (Single - stage semi - continuous anaerobic digestion) มีการเติมสารละลายผสมหุ้ยนเปียร์ (Substrate slurry) 2 สัปดาห์ ที่ได้จากการทดลองในข้อ 1. (การทดลองที่ 1 ระยะที่ 1 การศึกษาสัดส่วนหุ้ยนเปียร์และหุ้ยนเปียร์ผสมมูลโคที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ) โดยเติมแบบไหลขึ้น ให้มีอัตราการไหล 125 ml/day ทำการเติมสารอินทรีย์ทุก ๆ 5 วัน ใช้ถังหมักที่มีปริมาตรในการหมัก 5 L เป็นผลให้มี HRT 40 วัน โดยหุ้ยนเปียร์และมูลโคที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะทั่วไปแสดงดังตารางที่ 8 และได้ผลการศึกษาดังต่อไปนี้

2.1 ลักษณะทั่วไปของเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักโคและกระป๋อง

เชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักของโคเนื้อและกระป๋อง ใช้เป็นเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นในถังหมัก นำมาจากโคเนื้อและกระป๋องที่ให้ฟางข้าวเป็นอาหารหลัก ของภาควิชาสัตวบาล คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน มีลักษณะทั่วไปแสดงดังตารางที่ 9

2.2 ลักษณะทั่วไปของสารละลายผสม (Substrate slurry) หุ้ยนเปียร์

การศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักหุ้ยนเปียร์ และการหมักหุ้ยนเปียร์ร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระป๋อง จะใช้สารตั้งต้นที่มีความเข้มข้น 20 % FW แบ่งเป็นสารละลายผสมหุ้ยนเปียร์เพียงอย่างเดียว 20 % FW และสารละลายผสมหุ้ยนเปียร์กับมูลโคในสัดส่วน 10 : 10 % FW มีลักษณะทั่วไปแสดงดังตารางที่ 12

สารละลายผสมหุ้ยนเปียร์เพียงอย่างเดียว 20 % FW (ถังหมักที่ 1 และ 3) มีค่า COD 26.08 g/L คิดเป็นค่า OLR (Organic loading rate) 0.42 Kg COD /m³·day ส่วนสารละลายผสมหุ้ยนเปียร์กับมูลโคในสัดส่วน 10 : 10 % FW (ถังหมักที่ 2 และ 4) มีค่า COD 31.25 g/L คิดเป็นค่า OLR 0.69 Kg COD /m³·day (วิธีการคำนวณแสดงดังภาคผนวก ข)

ตารางที่ 12 ลักษณะทั่วไปของสารละลายผสมหุ้ยนเปียร์ของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักหุ้ยนเปียร์ และการหมักหุ้ยนเปียร์ร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก

Parameter	Reactor			
	1	2	3	4
Mixed culture	RC	RC	RB	RB
Substrate	N : W	N : C : W	N : W	N : C : W
Ratio (% FW)	20 : 80	10 : 10 : 80	20 : 80	10 : 10 : 80
Concentration (% FW)	20	20	20	20
COD (g/L)	26.08	31.25	26.08	31.25
TVS (g/L)	16.68	27.72	16.68	27.72
TS (g/L)	22.76	32.14	22.76	32.14
OLR (Kg COD /m ³ ·day)	0.42	0.69	0.42	0.69
pH of substrate slurry	7.53	8.56	7.53	8.56
Nitrogen (TKN, mg/L as N)	300.46	419.45	300.46	419.45
Phosphorus (PO ₄ ³⁻ -P, mg/L as P)	1.82	5.82	1.82	5.82
Calcium (Ca, mg/L)	24.11	98.10	24.11	98.10
Copper (Cu, mg/L)	0.07	0.39	0.07	0.39
Iron (Fe, mg/L)	2.97	10.61	2.97	10.61
Potassium (K, mg/L)	972.19	673.68	972.19	673.68
Magnesium (Mg, mg/L)	39.51	66.32	39.51	66.32
COD : N : P	100 : 1.9 : 0.01	100 : 2.7 : 0.04	100 : 1.9 : 0.01	100 : 2.7 : 0.04

หมายเหตุ N คือหุ้ยนเปียร์, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค, RC คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักโค, RB คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักกระบือ และ FW คือน้ำหนักสด

ค่า pH (ตารางที่ 12) ของสารละลายผสมหุ้ยนเปียร์เพียงอย่างเดียว 20 % FW (ถังหมักที่ 1 และ 3) มีค่า 7.53 ส่วนสารละลายผสมหุ้ยนเปียร์กับมูลโคในสัดส่วน 10 : 10 % FW (ถังหมักที่ 2 และ 4) มีค่า pH 8.56 ซึ่ง ค่า pH ของสารละลายผสมทั้ง 2 สัดส่วน มีค่าสูง สำหรับการเดินระบบการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน เมื่อเปรียบเทียบกับกรมโรงงานอุตสาหกรรม (2553) ที่กล่าวว่าค่า pH ของวัสดุที่จะนำมาหมักควรมีค่าระหว่าง 6.0 - 7.0

ค่าไนโตรเจนและฟอสฟอรัส (ตารางที่ 12) ของสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์ทั้ง 2 สัดส่วน พบว่าสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์กับมูลโคในสัดส่วน 10 : 10 % FW (ถังหมักที่ 2 และ 4) มีปริมาณของธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่สูงกว่าสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์เพียงอย่างเดียว 20 % FW (ถังหมักที่ 1 และ 3)

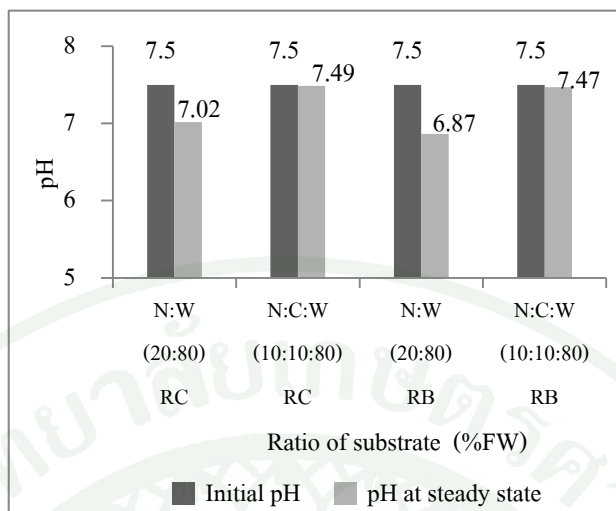
ค่า COD ค่าไนโตรเจน และค่าฟอสฟอรัส (ตารางที่ 12) นำมาคำนวณสัดส่วนสารอินทรีย์ในรูป COD ต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส (COD : N : P) พบว่าสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์กับมูลโคในสัดส่วน 10 : 10 % FW (ถังหมักที่ 2 และ 4) มีสัดส่วน COD : N : P ใกล้เคียงกับสัดส่วนที่เหมาะสมมากกว่าสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์เพียงอย่างเดียว 20 % FW (ถังหมักที่ 1 และ 3) ซึ่งสัดส่วนที่เหมาะสม สำหรับการย่อยสลายสารอินทรีย์ให้มีประสิทธิภาพและผลิตก๊าซชีวภาพได้ดี ควรจะมีสัดส่วน COD : N : P เท่ากับ 100 : 2.2 : 0.4 (สำนักวิจัย ค้นคว้าพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, ม.ป.ป.) จากการวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนและปริมาณฟอสฟอรัส แสดงให้เห็นว่าการใช้มูลโคเป็นวัสดุหมักร่วมจะช่วยเพิ่มปริมาณธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัสได้ เช่นเดียวกับการศึกษาของ Hashimoto (1983) ที่ใช้มูลสัตว์เป็นวัสดุหมักร่วมในการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งพบว่าการเพิ่มขึ้นของความสมดุลของจุลินทรีย์มีความสามารถในการควบคุมค่า pH และลดการขาดสารอาหารลง

ปริมาณโพแทสเซียม แคลเซียม ทองแดง และแมกนีเซียม (ตารางที่ 12) พบว่าในสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์ทั้ง 2 สัดส่วน มีปริมาณที่ไม่เป็นพิษต่อเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นในระบบ โดยมีค่าไม่เกินระดับความเข้มข้นสูงสุด (ตารางที่ 2) คือ 2500, 1, 250 และ 1000 mg/L ตามลำดับ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553) สำหรับปริมาณของเหล็กเมื่อคำนวณในรูปมิลลิกรัมต่อกรัมชีโอดีในสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์ทั้ง 2 สัดส่วน มีค่า 1.14×10^{-7} , 3.40×10^{-7} mg/g COD ตามลำดับ พบว่ามีปริมาณที่ไม่เพียงพอสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ คือมีค่าต่ำกว่าปริมาณความต้องการอย่างน้อย 0.02 - 0.03 มิลลิกรัมของเหล็กต่อกรัม COD (Rittmann and McCarty, 2001) แต่เนื่องจากเหล็กเป็นธาตุอาหารรอง (Micronutrient) (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553) ซึ่งเป็นเพียงส่วนประกอบในหลาย ๆ ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ จึงไม่ได้มีการเพิ่มธาตุเหล็กลงในระบบสำหรับการทดลองนี้

2.3 ค่า pH

สำหรับค่า pH เริ่มต้นในระบบ มีการปรับค่าด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) เป็น 7.5 เมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady state) และในช่วงระยะเวลาที่เดินระบบมีการปรับค่า pH เมื่อมีค่าต่ำกว่า 7.5 ด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนต พบว่าถังหมักที่ใช้สารละลายผสมหญ้าเนเปียร์หมักร่วมกับมูลโค (ถังหมักที่ 3 และ 4) รักษาสภาพ pH ได้ดีกว่าถังหมักที่ใช้สารละลายผสมหญ้าเนเปียร์เพียงอย่างเดียว (ถังหมักที่ 1 และ 2) (ภาพที่ 12)

สำหรับการหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโค (ถังหมักที่ 1 และ 2) ในการหมักหญ้าเนเปียร์เพียงอย่างเดียว (ถังหมักที่ 1) มีการปรับค่า pH จำนวน 4 ครั้ง และในการหมักหญ้าเนเปียร์ร่วมกับมูลโค (ถังหมักที่ 2) จำนวน 2 ครั้ง ส่วนการหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักกระบือ (ถังหมักที่ 3 และ 4) ในการหมักหญ้าเนเปียร์เพียงอย่างเดียว (ถังหมักที่ 3) มีการปรับค่า pH จำนวน 1 ครั้ง และในการหมักหญ้าเนเปียร์ร่วมกับมูลโค (ถังหมักที่ 4) ไม่มีการปรับค่า pH แสดงให้เห็นว่าการหมักหญ้าเนเปียร์ร่วมกับมูลโค (ถังหมักที่ 2 และ 4) มีการรักษาสภาพ pH ในระบบได้ดีกว่า (ภาพที่ 12) มีค่า pH อยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน คือ 6.6 - 7.4 (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553) แสดงให้เห็นว่ามูลโคช่วยให้เกิดความสะดวกของระบบเช่นเดียวกับการศึกษาของ Hashimoto (1983) ที่ใช้มูลสัตว์เป็นวัสดุหมักร่วมในการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน พบว่ามีความสามารถในการควบคุมค่า pH และเป็นไปในทิศทางเดียวกับการศึกษาของเสริมพล (2524) ที่พบว่าค่าความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมกับระบบการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนอยู่ในช่วงระหว่าง 6.6 - 7.6 ถ้าค่าความเป็นกรดต่างสูงหรือต่ำกว่านี้ประสิทธิภาพของระบบจะลดลง นอกจากนี้ในการศึกษาครั้งนี้ยังพบว่า การใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักกระบือ สามารถรักษาสภาพ pH ให้เหมาะสมกับการผลิตก๊าซชีวภาพได้ดีกว่าการใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคเนื้อ



ภาพที่ 12 ค่า pH ของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักหุ้หนาเนเปียร์และการหมักหุ้หนาเนเปียร์ร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก

หมายเหตุ N คือหุ้หนาเนเปียร์, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค, RC คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักโค, RB คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักกระบือ และ FW คือน้ำหนักสด

2.4 ประสิทธิภาพในการกำจัด COD (Chemical oxygen demand)

ค่า COD ของสารละลายผสมหุ้หนาเนเปียร์ที่เติมเข้าระบบ และค่า COD ของสารละลายผสมหุ้หนาเนเปียร์ที่ออกจากระบบโดยผ่านการหมักแล้ว ของแต่ละถังหมัก (ตารางที่ 13) นำมาใช้ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการกำจัด COD (ภาคผนวก ข)

การหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโค ในการหมักหุ้หนาเนเปียร์เพียงอย่างเดียว (ถังหมักที่ 1) มีค่า COD ที่เติมเข้าระบบเฉลี่ย 26.08 g/L และค่า COD ที่ออกจากระบบเฉลี่ย 8.61 g/L (ตารางที่ 13) สามารถนำมาคำนวณประสิทธิภาพในการกำจัด COD ได้ดังต่อไปนี้

$$\text{ประสิทธิภาพการกำจัด COD (\%)} = \frac{[(26.08 - 8.61) \text{ g/L}] \times 100}{26.08 \text{ g/L}}$$

$$= 66.99 \%$$

จากการคำนวณของการหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโค ในการหมัก
 หนุ่เนเปียร์เพียงอย่างเดียว (ถังหมักที่ 1) จะได้ประสิทธิภาพในการกำจัด COD 66.99 % และ
 สำหรับการหมักหนุ่เนเปียร์ร่วมกับมูลโค (ถังหมักที่ 2) จะได้ประสิทธิภาพในการกำจัด COD
 66.50 % ส่วนการหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักกระบือ ในการหมักหนุ่เนเปียร์
 เพียงอย่างเดียว (ถังหมักที่ 3) จะได้ประสิทธิภาพในการกำจัด COD 65.07 % และสำหรับการหมัก
 หนุ่เนเปียร์ร่วมกับมูลโค (ถังหมักที่ 2) จะได้ประสิทธิภาพในการกำจัด COD 80.42 % (ตารางที่
 13) ซึ่งประสิทธิภาพการกำจัดค่า COD ทำให้ทราบถึงความสามารถของเชื้อจุลินทรีย์ในการย่อย
 สลายสารอินทรีย์ในสารตั้งต้น โดยปกติแล้วกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนจะสามารถ
 ลดค่า COD ได้ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553)

2.5 ประสิทธิภาพในการกำจัด TVS (Total volatile solids)

ค่า TVS ของสารละลายผสมหนุ่เนเปียร์ที่เดิมเข้าระบบ และค่า TVS ของสารละลาย
 ผสมหนุ่เนเปียร์ที่ออกจากระบบโดยผ่านการหมักแล้ว ของแต่ละถังหมัก (ตารางที่ 13) นำมาใช้ใน
 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการกำจัด TVS (ภาคผนวก ข)

การหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโค ในการหมักหนุ่เนเปียร์เพียง
 อย่างเดียว (ถังหมักที่ 1) มีค่า TVS ที่เดิมเข้าระบบเฉลี่ย 16.68 g/L และค่า TVS ที่ออกจากระบบ
 เฉลี่ย 9.39 g/L (ตารางที่ 13) สามารถนำมาคำนวณประสิทธิภาพในการกำจัด TVS ได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพการกำจัด TVS (\%)} &= \frac{[(16.68 - 9.39) \text{ g/L}] \times 100}{16.68 \text{ g/L}} \\ &= 43.71 \% \end{aligned}$$

จากการคำนวณของการหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโค ในการหมัก
 หนุ่เนเปียร์เพียงอย่างเดียว (ถังหมักที่ 1) ได้ประสิทธิภาพในการกำจัด TVS 43.71 % และสำหรับ
 การหมักหนุ่เนเปียร์ร่วมกับมูลโค (ถังหมักที่ 2) ได้ประสิทธิภาพในการกำจัด TVS 60.57 % ส่วน
 การหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักกระบือ ในการหมักหนุ่เนเปียร์เพียงอย่างเดียว

(ถังหมักที่ 3) จะได้ประสิทธิภาพในการกำจัด TVS 44.00 % และสำหรับการหมักหุ้ยเนเปียร์ร่วมกับมูลโค (ถังหมักที่ 2) จะได้ประสิทธิภาพในการกำจัด TVS 58.37 % (ตารางที่ 13)

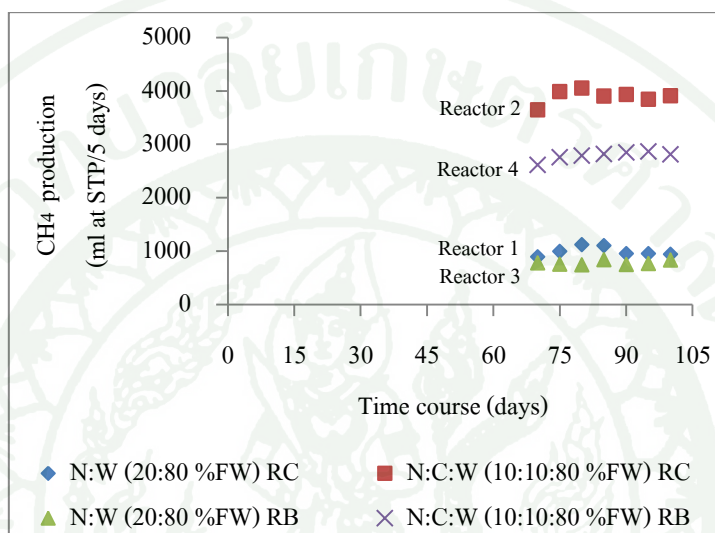
2.6 ก๊าซมีเทนที่ผลิตได้

เมื่อเดินระบบจนกระทั่งอยู่ในสภาวะคงที่ (Steady state) คือระยะเวลาที่มากกว่าระยะเวลาเก็บกักและปริมาตรก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นมีความสม่ำเสมอคงที่ สำหรับการทดลองที่ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักหุ้ยเนเปียร์ และการหมักหุ้ยเนเปียร์ร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ (การทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 2) สภาวะคงที่คือวันที่ 66 ถึงวันที่ 100 หลังจากเริ่มทำการเดินระบบ และเดินระบบเป็นระยะเวลาทั้งหมด 100 วันทำการเก็บผลการทดลองเป็นเวลาทั้งหมด 35 วัน โดยการวัดปริมาตรน้ำโดยระบบเก็บก๊าซแบบแทนที่น้ำ และเก็บตัวอย่างก๊าซเพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณเปอร์เซ็นต์มีเทนโดยวิธี Gas chromatography พบว่ามีก๊าซมีเทนเกิดขึ้น (ตารางผนวกที่ ก11) แสดงให้เห็นว่าหุ้ยเนเปียร์และหุ้ยเนเปียร์ผสมมูลโคสามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตมีเทนได้

จากปริมาณเปอร์เซ็นต์มีเทน (ตารางผนวกที่ ก11) ในสภาวะคงที่พบว่าการหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโค ในการหมักหุ้ยเนเปียร์เพียงอย่างเดียว (ถังหมักที่ 1) มีปริมาณเปอร์เซ็นต์มีเทนเฉลี่ย 26.05 % สำหรับการหมักหุ้ยเนเปียร์ร่วมกับมูลโค (ถังหมักที่ 2) มีปริมาณเปอร์เซ็นต์มีเทนเฉลี่ย 52.01 % ส่วนการหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักกระบือ ในการหมักหุ้ยเนเปียร์เพียงอย่างเดียว (ถังหมักที่ 3) มีปริมาณเปอร์เซ็นต์มีเทนเฉลี่ย 22.84 % และสำหรับการหมักหุ้ยเนเปียร์ร่วมกับมูลโค (ถังหมักที่ 4) มีปริมาณเปอร์เซ็นต์มีเทนเฉลี่ย 46.07 % (ตารางที่ 13) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโค ในการหมักหุ้ยเนเปียร์ร่วมกับมูลโค (ถังหมักที่ 2) มีปริมาณเปอร์เซ็นต์มีเทนเฉลี่ยสูงกว่าการหมักหุ้ยเนเปียร์เพียงอย่างเดียว (ถังหมักที่ 1) และในการหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักกระบือ (ถังหมักที่ 3 และ 4) ก็ได้ผลเช่นเดียวกัน และนอกจากนี้ยังพบว่าการใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคให้ปริมาณเปอร์เซ็นต์มีเทนสูงกว่าการใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักกระบือประมาณ 3 – 6 %

ปริมาตรก๊าซทั้งหมดที่ผลิตได้มาจากการวัดปริมาตรน้ำโดยระบบเก็บก๊าซแบบแทนที่น้ำ และปริมาณเปอร์เซ็นต์มีเทนที่ได้จากการวิเคราะห์โดยวิธี Gas chromatography จากนั้นนำมาคำนวณปริมาณมีเทนที่เกิดขึ้นทุกวันที่สภาวะอุณหภูมิและความดันมาตรฐาน (Standard

temperature and pressure; STP) คือสภาวะที่ 0 °C และความดัน 1 atm โดยปริมาตรมีเทนที่เกิดขึ้นทุกวันเท่ากับผลคูณของปริมาตรก๊าซทั้งหมดที่ผลิตได้ที่ STP กับปริมาณเปอร์เซ็นต์ และเมื่อนำปริมาตรมีเทนที่ผลิตได้ทุกวันมารวมในรอบทุก ๆ 5 วัน ที่มีการเติมสารอินทรีย์เข้าระบบ จะได้ปริมาตรมีเทนรวมทุก 5 วัน (ตารางผนวกที่ ก12) และปริมาตรมีเทนรวมทุก 5 วัน ในช่วงสภาวะคงที่ (ภาพที่ 13)



ภาพที่ 13 ปริมาตรมีเทนรวมทุก 5 วัน ที่ผลิตได้ ของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักหญ้าเนเปียร์ และการหมักหญ้าเนเปียร์ร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก

หมายเหตุ N คือหญ้าเนเปียร์, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค, RC คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักโค, RB คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักกระบือ และ FW คือน้ำหนักสด

การหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโค ในการหมักหญ้าเนเปียร์ร่วมกับมูลโค (ถังหมักที่ 2) มีปริมาณมีเทนรวมทุก 5 วัน สูงกว่าการหมักหญ้าเนเปียร์เพียงอย่างเดียว (ถังหมักที่ 1) และในการหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักกระบือ (ถังหมักที่ 3 และ 4) ก็ได้ผลเช่นเดียวกัน คือการหมักหญ้าเนเปียร์ร่วมกับมูลโค (ถังหมักที่ 4) มีปริมาณมีเทนรวมทุก 5 วัน สูงกว่าการหมักหญ้าเนเปียร์เพียงอย่างเดียว (ถังหมักที่ 3) แสดงในภาพที่ 13 และการใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคให้ปริมาณมีเทนรวมทุก 5 วัน สูงกว่าการใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักกระบือ

2.7 ผลผลิตมีเทน (Methane yield)

เมื่อนำค่าปริมาตรมีเทนรวมทุก 5 วัน (ตารางที่ 13) มาคำนวณหาผลผลิตมีเทน คือ ปริมาตรมีเทนที่ผลิตได้ต่อ COD ที่ถูกกำจัด (L at STP/kg COD degraded) หรือต่อ TVS ที่ถูกกำจัด (L at STP/kg TVS degraded) หรืออาจแสดงในรูปปริมาตรมีเทนที่ผลิตได้ต่อ TS ที่เติมเข้าระบบ (L at STP/kg TS added) โดยวิธีการคำนวณผลผลิตมีเทนแสดงดังภาคผนวก ข

2.7.1 ผลผลิตมีเทนในรูปของปริมาตรมีเทนที่ผลิตได้ต่อ COD ที่ถูกกำจัด

การคำนวณผลผลิตมีเทนในรูปของปริมาตรมีเทนที่ผลิตได้ต่อ COD ที่ถูกกำจัด สำหรับการหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโค ในการหมักหญ้าเนเปียร์เพียงอย่างเดียว (ถึงหมักที่ 1) ได้ผลผลิตมีเทน 91 L at STP/kg COD degraded และการหมักหญ้าเนเปียร์ร่วมกับมูลโค (ถึงหมักที่ 2) จะได้ผลผลิตมีเทน 300 L at STP/kg COD degraded สำหรับการหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักกระบือ ในการหมักหญ้าเนเปียร์เพียงอย่างเดียว (ถึงหมักที่ 3) ได้ผลผลิตมีเทน 73 L at STP/kg COD degraded และการหมักหญ้าเนเปียร์ร่วมกับมูลโค (ถึงหมักที่ 4) จะได้ผลผลิตมีเทน 177 L at STP/kg COD degraded (ตารางที่ 13)

เมื่อนำผลผลิตมีเทนในรูปของปริมาตรมีเทนที่ผลิตได้ต่อ COD ที่ถูกกำจัดมาเปรียบเทียบกับผลการศึกษาของ McCarty (1964) พบว่ามีค่าผลผลิตมีเทนที่ต่ำกว่า โดย McCarty (1964) ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างก๊าซมีเทนกับปริมาณของ COD ที่ถูกกำจัดไว้คือ 1 g COD ที่ถูกกำจัดจะได้ก๊าซมีเทน 0.351 L ที่ STP (ที่ 0 °C และความดัน 1 บรรยากาศ) ซึ่งคิดเป็นผลผลิตมีเทน 351 L at STP/kg COD degraded ทั้งนี้เพราะพอลิเมอร์หลักที่พบในผนังเซลล์ของหญ้าเนเปียร์ ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน มีปริมาณสูง (Ansah *et al.*, 2010) ทำให้มีโครงสร้างที่แข็งแรง (Perez *et al.*, 2002) ซึ่งจะค่อนข้างทนต่อการย่อยสลาย (Orr and Kirk, 2003) โดยเฉพาะอย่างยิ่งส่วนที่เป็นลิกโนเซลลูโลส (ลิกนินจับตัวกับเซลลูโลส) จะย่อยสลายทางชีวภาพได้ยาก (Zhang and Zhang, 1999) เป็นสาเหตุที่ทำให้การย่อยสลายต่ำ ส่งผลให้การทดลองที่ 1 ระยะที่ 2 นี้ มีผลผลิตมีเทนต่ำกว่า

2.7.2 ผลผลิตมีเทนในรูปของปริมาตรมีเทนที่ผลิตได้ต่อ TVS ที่ถูกกำจัด

การคำนวณผลผลิตมีเทนในรูปของปริมาตรมีเทนที่ผลิตได้ ต่อ TVS ที่ถูกกำจัด สำหรับการหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโค ในการหมักหุ้ญเนเปียร์เพียงอย่างเดียว (ถึงหมักที่ 1) จะได้ผลผลิตมีเทน 217 L at STP/kg TVS degraded และการหมักหุ้ญเนเปียร์ร่วมกับมูลโค (ถึงหมักที่ 2) จะได้ผลผลิตมีเทน 371 L at STP/kg TVS degraded สำหรับการหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักกระบือ ในการหมักหุ้ญเนเปียร์เพียงอย่างเดียว (ถึงหมักที่ 3) จะได้ผลผลิตมีเทน 169 L at STP/kg TVS degraded และการหมักหุ้ญเนเปียร์ร่วมกับมูลโค (ถึงหมักที่ 4) จะได้ผลผลิตมีเทน 275 L at STP/kg TVS degraded (ตารางที่ 13)

ผลผลิตมีเทนในรูปของปริมาตรมีเทนต่อกิโลกรัม TVS ที่เติมเข้าระบบ (L at STP/kg TVS added) (ภาพผนวกที่ ก17) มีค่าสูงสุด จากการหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโค โดยใช้สารละลายผสมหุ้ญเนเปียร์กับมูลโคในสัดส่วน 10 : 10 % FW (ถึงหมักที่ 2) คิดเป็นสัดส่วน 87.69 : 91.16 หรือ 1 : 1.04 โดยปริมาตร TVS (ตารางที่ 8) โดยมีผลผลิตมีเทน 225 L at STP/kg TVS added ซึ่งมีผลผลิตมีเทนน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาของ Lehtomaki *et al.* (2007) ที่ทำการหมักหุ้ญร่วมกับมูลโคสัดส่วน 30 : 70 หรือ 1 : 2.33 โดยปริมาตร TVS พบว่าได้ผลผลิตมีเทน 268 L at STP/kg TVS added ทั้งนี้เนื่องจากสัดส่วนมูลโคที่ใช้ในการทดลองมีปริมาณน้อยกว่าสัดส่วนมูลโคที่ใช้ในการศึกษาของ Lehtomaki *et al.* (2007) เพราะปริมาณมูลโคที่มากกว่าจะเพิ่มธาตุอาหารไนโตรเจนในระบบ (Shyam, 1994; Zhang and Zhang, 1999) แต่เมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาของสุพล และสมศักดิ์ (2557) ที่หมักหุ้ญเนเปียร์กับมูลไก่ โดยทำการหมักแบบสองขั้นตอน ใช้ระยะเวลาเก็บกัก 28 วัน ในถึงหมักขนาด 200 L ใช้สัดส่วนหุ้ญเนเปียร์ต่อมูลไก่ในสัดส่วน 1 : 1 ได้ผลผลิตก๊าซมีเทน 24.07 L at STP/kg TVS added พบว่าการหมักหุ้ญเนเปียร์ร่วมกับมูลโคมีผลผลิตมีเทนสูงกว่า แสดงให้เห็นว่ามูลโคมีความเหมาะสมที่จะนำมาเป็นวัสดุหมักร่วมกับหุ้ญเนเปียร์มากกว่ามูลไก่

2.7.3 ผลผลิตมีเทนในรูปของปริมาตรมีเทนที่ผลิตได้ต่อ TS ที่เติมเข้าระบบ

การคำนวณผลผลิตมีเทนในรูปของปริมาตรมีเทนที่ผลิตได้ ต่อ TS ที่เติมเข้าระบบ ของการหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโค ในการหมักหุ้ญเนเปียร์เพียงอย่างเดียว (ถึงหมักที่ 1) จะได้ผลผลิตมีเทน 70 L at STP/kg TS added และการหมักหุ้ญเนเปียร์ร่วมกับมูลโค (ถึงหมักที่ 2) จะได้ผลผลิตมีเทน 194 L at STP/kg TS added สำหรับการหมักด้วย

เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักกระบือ ในการหมักหญ้าเนเปียร์เพียงอย่างเดียว (ถังหมักที่ 3) จะได้ผลผลิตมีเทน 55 L at STP/kg TS added และการหมักหญ้าเนเปียร์ร่วมกับมูลโค (ถังหมักที่ 4) จะได้ผลผลิตมีเทน 138 L at STP/kg TS added (ตารางที่ 13)

สำหรับการหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโค เพื่อให้ได้ก๊าซมีเทนบริสุทธิ์ปริมาตร 1 m³ การหมักหญ้าเนเปียร์เพียงอย่างเดียว 20 % FW (ถังหมักที่ 1) จะต้องใช้หญ้าเนเปียร์สด 89.6 kg (คิดเป็นน้ำหนักแห้ง 14.4 kg) การหมักหญ้าเนเปียร์ผสมมูลโค 10 : 10 % FW (ถังหมักที่ 2) จะต้องใช้หญ้าเนเปียร์สด 13 kg ผสมกับมูลโค 13 kg (คิดเป็นน้ำหนักแห้งหญ้าเนเปียร์ 2.1 kg ผสมกับน้ำหนักแห้งมูลโค 3.1 kg) และสำหรับการหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักกระบือ เพื่อให้ได้ก๊าซมีเทนบริสุทธิ์ปริมาตร 1 m³ การหมักหญ้าเนเปียร์เพียงอย่างเดียว 20 % FW (ถังหมักที่ 3) จะต้องใช้หญ้าเนเปียร์สด 113.9 kg (คิดเป็นน้ำหนักแห้ง 18.3 kg) การหมักหญ้าเนเปียร์ผสมมูลโค 10 : 10 % FW (ถังหมักที่ 4) จะต้องใช้หญ้าเนเปียร์สด 18.2 kg ผสมกับมูลโค 18.2 kg (คิดเป็นน้ำหนักแห้งหญ้าเนเปียร์ 2.9 kg ผสมกับน้ำหนักแห้งมูลโค 4.3 kg) ดังนั้นจากการทดลองที่ 1 ระยะที่ 2 นี้ จะเห็นได้ว่าการใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโค ให้ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักหญ้าเนเปียร์หรือหญ้าเนเปียร์ร่วมกับมูลโค สูงกว่าการใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักกระบือ

จากน้ำหนักหญ้าเนเปียร์และมูลโคที่ใช้เพื่อผลิตก๊าซมีเทนบริสุทธิ์ปริมาตร 1 m³ พบว่าการหมักแบบร่วม (Co-digestion) ที่ผสมมูลโค มีข้อดี คือเป็นการลดการใช้สารตั้งต้นหลักคือหญ้าเนเปียร์ได้มาก เมื่อเทียบกับการทดลองที่ใช้สารตั้งต้นหลักเป็นหญ้าเนเปียร์เพียงอย่างเดียวที่ต้องใช้หญ้าเนเปียร์มากกว่า

จากผลการคำนวณผลผลิตมีเทนในรูปของปริมาตรมีเทนที่ผลิตได้ต่อ COD ที่ถูกกำจัด ปริมาตรมีเทนที่ผลิตได้ต่อ TVS ที่ถูกกำจัด และปริมาตรมีเทนที่ผลิตได้ต่อ TS ที่เติมเข้าระบบ พบว่าการหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโค โดยใช้หญ้าเนเปียร์ร่วมกับมูลโค (ถังหมักที่ 2) ให้ผลผลิตมีเทนสูงกว่า การหมักด้วยหญ้าเนเปียร์เพียงอย่างเดียว (ถังหมักที่ 1) (ตารางที่ 13) เพราะสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์ร่วมกับมูลโคมีค่า OLR, COD, TVS และ TS ที่เติมเข้าระบบสูงกว่าสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์เพียงอย่างเดียว และสำหรับการหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักกระบือ (ถังหมักที่ 3 และ 4) ก็ได้ผลการทดลองเช่นเดียวกัน โดยพบว่า ปริมาณ TVS ที่สูงมีความสัมพันธ์กับผลผลิตมีเทน เช่นเดียวกับการศึกษาของ Yadvika *et al.* (2004) ที่พบว่าปริมาณก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นตาม OLR ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจาก OLR ที่เพิ่มขึ้นเป็นการเพิ่ม

ปริมาณธาตุอาหารสำหรับการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทน ซึ่งทำให้มีสารอินทรีย์เพียงพอต่อการสร้างก๊าซชีวภาพได้ และยังสอดคล้องกับการศึกษาของ Hall (1997), Murphy and Power (2009) และ Seppala *et al.* (2009) รวมทั้งการใช้มูลโคเป็นวัสดุหมักร่วมซึ่งจะช่วยเพิ่มปริมาณธาตุอาหาร เช่นเดียวกับการศึกษาของ Shyam (1994) และ Zhang and Zhang (1999) ที่พบว่าสามารถเพิ่มธาตุอาหารในโตรเจนได้จากการใช้มูลสัตว์เป็นวัสดุหมักร่วม

การหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโค โดยใช้หญ้าเนเปียร์เพียงอย่างเดียว (ถังหมักที่ 1) มีประสิทธิภาพในการกำจัด COD สูงกว่าการหมักด้วยหญ้าเนเปียร์ร่วมกับมูลโค (ถังหมักที่ 2) แต่เมื่อพิจารณาจากผลผลิตมีเทน พบว่าการหมักด้วยหญ้าเนเปียร์ร่วมกับมูลโค (ถังหมักที่ 2) ให้ผลผลิตมีเทนสูงกว่า เช่นเดียวกับการหมักหญ้าเนเปียร์ร่วมกับมูลโคด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักกระบือ (ถังหมักที่ 4) ที่มีประสิทธิภาพในการกำจัด COD สูงกว่าการหมักหญ้าเนเปียร์ร่วมกับมูลโคด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโค (ถังหมักที่ 2) แต่เมื่อพิจารณาจากผลผลิตมีเทน พบว่าการหมักหญ้าเนเปียร์ร่วมกับมูลโคด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโค (ถังหมักที่ 2) ให้ผลผลิตมีเทนสูงกว่า (ตารางที่ 13) ทั้งนี้เพราะสารอินทรีย์อาจถูกจุลินทรีย์นำมาใช้เพื่อเปลี่ยนเป็นก๊าซชนิดอื่น เนื่องจากจุลินทรีย์ที่ผลิตมีเทนจะใช้สารอินทรีย์เป็นสารอาหารและย่อยสลายให้ผลผลิตหลักเป็นก๊าซมีเทน (CH_4) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) โดยมีก๊าซอื่นเกิดขึ้นในปริมาณเล็กน้อย เช่น ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) และก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) เป็นต้น (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553)

จากผลการศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักหญ้าเนเปียร์ และการหมักหญ้าเนเปียร์ร่วมกับ มูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ (การทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 2) พบว่าการหมักหญ้าเนเปียร์ร่วมกับมูลโคด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโค (ถังหมักที่ 2) ให้ผลผลิตมีเทนสูงสุด และจะนำไปใช้สำหรับการทดลองชุดที่ 2 (ข้อ 2.) ต่อไป ซึ่งจะเลือกสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์เพียงอย่างเดียว 20 % FW ไปใช้ในการทดลองด้วยเนื่องจากมีปริมาณสารตั้งต้น 20 % FW เท่ากัน โดยคำนวณสัดส่วนฟางข้าวให้เท่ากับสัดส่วนหญ้าเนเปียร์ ให้น้ำหนักแห้งเท่ากัน (ภาคผนวก ข)

ตารางที่ 13 ปริมาตรก๊าซชีวภาพที่ได้และผลผลิตก๊าซชีวภาพของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 2
(ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักหญ้าเนเปียร์ และการหมักหญ้าเนเปียร์ร่วมกับ
มูล โค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก

Parameter	Reactor			
	1	2	3	4
Mixed culture	RC	RC	RB	RB
Substrate	N : W	N : C : W	N : W	N : C : W
Ratio (% FW)	20 : 80	10 : 10 : 80	20 : 80	10 : 10 : 80
Concentration (% FW)	20	20	20	20
Flow rate (ml/day)	125	125	125	125
Flow rate (ml/5days)	625	625	625	625
Hydraulic retention time (day)	40	40	40	40
OLR (kg COD /m ³ ·day)	0.65	0.78	0.65	0.78
OLR (kg TVS /m ³ ·day)	0.42	0.69	0.42	0.69
MLVSS (g/L)	13.44	13.44	11.65	11.65
pH of substrate slurry	7.53	8.56	7.53	8.56
CH ₄ (ml/5days)	990	3892	777	2781
CH ₄ in biogas (%)	26.05	52.01	22.84	46.07
Initial COD (g/L)	26.08	31.25	26.08	31.25
COD at steady state (g/L)	8.61	10.47	9.11	6.12
COD degradation (%)	66.99	66.50	65.07	80.42
Initial TVS (g/L)	16.68	27.72	16.68	27.72
TVS at steady state (g/L)	9.39	10.93	9.34	11.54
TVS degradation (%)	43.71	60.57	44.00	58.37
Initial TS (g/L)	22.76	32.14	22.76	32.14
CH ₄ yield (L at STP/kg COD degraded)	91	300	73	177
CH ₄ yield (L at STP/kg TVS degraded)	217	371	169	275
CH ₄ yield (L at STP/kg TS added)	70	194	55	138

หมายเหตุ N คือหญ้าเนเปียร์, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค, RC คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักโค, RB คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักกระบือ และ FW คือน้ำหนักสด

3. ผลการศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทน (Methane yield) จากการหมักฟางข้าว (Digestion) และการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค (Co - digestion) โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้น (Mixed culture) จากกระเพาะหมักโคและกระบือ (การทดลองชุดที่ 2)

การศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักฟางข้าว และการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ ใช้ฟางข้าวที่บดละเอียดผ่านตะแกรงขนาด 2 mm โดยการหมักร่วมกับมูลโค ทำการเดินระบบหมักขึ้นตอนเดียวแบบกึ่งต่อเนื่อง (Single - stage semi - continuous anaerobic digestion) มีการเติมสารละลายผสมฟางข้าว 2 สัดส่วน ที่ได้จากการทดลองในข้อ 2. (การศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักหญ้าเนเปียร์ และการหมักหญ้าเนเปียร์ร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) โดยเติมแบบไหลขึ้น ให้มีอัตราการไหล 125 ml/day ทำการเติมสารอินทรีย์ทุก ๆ 5 วัน ใช้ถังหมักที่มีปริมาตรในการหมัก 5 L เป็นผลให้มี HRT 40 วัน โดยมูลโคที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะทั่วไป แสดงดังตารางที่ 8 และเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักของโคและกระบือ แสดงดังตารางที่ 9 ได้ผลการศึกษาดังต่อไปนี้

ตารางที่ 14 ลักษณะทั่วไปของฟางข้าว

Parameter	Rice straw
Moisture (%)	8.08
Total solids (%)	91.92
Total volatile solids (%TS)	85.99
Nitrogen (TKN, mg/kg DW as N)	9,888
Phosphorus (PO_4^{3-} -P mg/kg DW as P)	29
Calcium (Ca, mg/kg DW)	1,468
Copper (Cu, mg/kg DW)	0.12
Iron (Fe, mg/kg DW)	150
Potassium (K, mg/kg DW)	12,549
Magnesium (Mg, mg/kg DW)	1,534

หมายเหตุ DW คือน้ำหนักแห้ง (Dry weight)

3.1 ลักษณะทั่วไปของฟางข้าว (Rice straw)

ฟางข้าวที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในถังหมัก นำมาจากภาควิชาสัตวบาล คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน สับละเอียดและบดโดยเครื่องบดละเอียดให้ผ่านตะแกรงขนาด 2 mm มีลักษณะทั่วไปแสดงดังตารางที่ 14

3.2 ลักษณะทั่วไปของสารละลายผสม (Substrate slurry) ฟางข้าว

การศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักฟางข้าว และการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ ใช้สารตั้งต้นให้มีความเข้มข้นโดยน้ำหนักแห้งเทียบเท่ากับหญ้าเนเปียร์ (ภาคผนวก ข) ซึ่งเป็นผลที่ได้มาจากการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 2 (ข้อ 2.) โดยใช้สารตั้งต้น 2 สัดส่วน คือ สารละลายผสมฟางข้าวเพียงอย่างเดียว 3.5 % FW และสารละลายผสมฟางข้าวกับมูลโคในสัดส่วน 1.75 : 10 % FW มีลักษณะทั่วไปแสดงดังตารางที่ 15

สารละลายผสมฟางข้าวเพียงอย่างเดียว 3.5 % FW (ถังหมักที่ 1 และ 3) มีค่า COD 23.70 g/L คิดเป็นค่า OLR 0.59 kg COD /m³·day (วิธีการคำนวณแสดงดังภาคผนวก ข) ส่วนสารละลายผสมฟางข้าวกับมูลโคในสัดส่วน 1.75 : 10 % FW (ถังหมักที่ 2 และ 4) มีค่า COD 31.68 g/L คิดเป็นค่า OLR 0.79 kg COD /m³·day (ตารางที่ 15)

ค่า pH (ตารางที่ 15) ของสารละลายผสมฟางข้าวเพียงอย่างเดียว 3.5 % FW (ถังหมักที่ 1 และ 3) มีค่า 7.00 ส่วนสารละลายผสมฟางข้าวกับมูลโคในสัดส่วน 1.75 : 10 % FW (ถังหมักที่ 2 และ 4) มีค่า pH 7.89 ซึ่งค่า pH ของสารละลายผสมทั้ง 2 สัดส่วน มีค่าสูง สำหรับการเดินระบบการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน เมื่อเปรียบเทียบกับกรมโรงงานอุตสาหกรรม (2553) ที่กล่าวว่าค่า pH ของวัสดุที่จะนำมาหมักควรมีค่าระหว่าง 6.0 - 7.0

ค่าไนโตรเจนและฟอสฟอรัส (ตารางที่ 15) ของสารละลายผสมฟางข้าวทั้ง 2 สัดส่วน พบว่าสารละลายผสมฟางข้าวกับมูลโคในสัดส่วน 1.75 : 10 % FW (ถังหมักที่ 2 และ 4) มีปริมาณของธาตุอาหารไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่สูงกว่าสารละลายผสมฟางข้าวเพียงอย่างเดียว 3.5 % FW (ถังหมักที่ 1 และ 3)

ค่า COD ค่าไนโตรเจน และค่าฟอสฟอรัส (ตารางที่ 15) นำมาคำนวณสัดส่วนสารอินทรีย์ในรูป COD ต่อไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส (COD : N : P) พบว่าสารละลายผสมฟางข้าวกับมูลโคในสัดส่วน 1.75 : 10 % FW (ถังหมักที่ 2 และ 4) มีสัดส่วน COD : N : P ใกล้เคียงกับสัดส่วนที่เหมาะสมมากกว่าสารละลายผสมฟางข้าวเพียงอย่างเดียว 3.5 % FW (ถังหมักที่ 1 และ 3) สัดส่วนที่เหมาะสม สำหรับการย่อยสลายสารอินทรีย์ให้มีประสิทธิภาพและผลิตก๊าซชีวภาพได้ดี ควรจะมีสัดส่วน COD : N : P เท่ากับ 100 : 2.2 : 0.4 (สำนักวิจัย คำนวณพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, ม.ป.ป.) การวิเคราะห์ปริมาณไนโตรเจนและปริมาณฟอสฟอรัส แสดงให้เห็นว่าการใช้มูลโคเป็นวัสดุหมักจะช่วยเพิ่มปริมาณธาตุไนโตรเจนและฟอสฟอรัสได้ เช่นเดียวกับการศึกษาของ Hashimoto (1983) ที่ใช้มูลสัตว์เป็นวัสดุหมักร่วมในการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน พบว่ามีการเพิ่มขึ้นของความสมดุลของจุลินทรีย์ มีความสามารถในการควบคุมค่า pH และลดการขาดสารอาหารลง

ค่าโพแทสเซียม แคลเซียม ทองแดง และแมกนีเซียม (ตารางที่ 15) พบว่าในสารละลายผสมฟางข้าวทั้ง 2 สัดส่วน มีปริมาณที่ไม่เป็นพิษต่อเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นในระบบ โดยมีค่าไม่เกินระดับความเข้มข้นสูงสุด (ตารางที่ 2) คือ 2500, 1, 250 และ 1000 mg/L ตามลำดับ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553) สำหรับปริมาณของเหล็กเมื่อคำนวณในรูปมิลลิกรัมต่อกรัมชีโอดี พบว่าสารละลายผสมฟางข้าวที่ใช้เป็นสารตั้งต้นทั้ง 2 สัดส่วนมีค่า 2.04×10^{-7} และ 3.64×10^{-7} mg/g COD ตามลำดับ มีปริมาณที่ไม่เพียงพอสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ คือมีค่าต่ำกว่าปริมาณความต้องการอย่างน้อย 0.02 - 0.03 mg/g COD (Rittmann and McCarty, 2001) แต่เนื่องจากเหล็กเป็นธาตุอาหารรอง (Micronutrient) (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553) ซึ่งเป็นเพียงส่วนประกอบในหลาย ๆ ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ จึงไม่ได้มีการเพิ่มธาตุเหล็กลงในระบบสำหรับการทดลองนี้

ตารางที่ 15 ลักษณะทั่วไปของสารละลายผสมฟางข้าวของการทดลองชุดที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักฟางข้าว และการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก

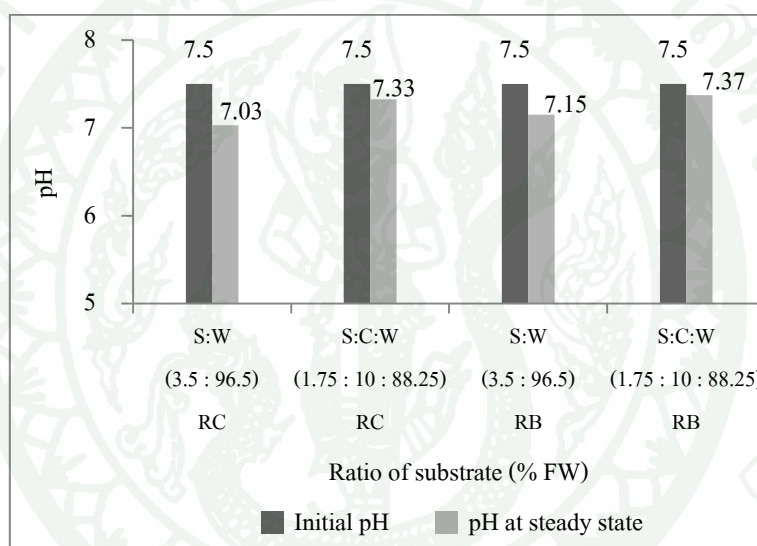
Reactor	1	2	3	4
Mixed culture	RC	RC	RB	RB
Substrate	S : W	S : C : W	S : W	S : C : W
Ratio (% FW)	3.5 : 96.5	1.75 : 10 : 88.25	3.5 : 96.5	1.75 : 10 : 88.25
COD (g/L)	23.70	31.68	23.70	31.68
TVS (g/L)	15.98	20.55	15.98	20.55
TS (g/L)	19.40	25.52	19.40	25.52
OLR (Kg COD /m ³ ·day)	0.59	0.79	0.59	0.79
pH of substrate slurry	7.00	7.89	7.00	7.89
Nitrogen (TKN, mg/L as N)	317.75	428.17	317.75	428.17
Phosphorus (PO ₄ ³⁻ -P, mg/L as P)	0.93	5.37	0.93	5.37
Calcium (Ca, mg/L)	47.16	109.63	47.16	109.63
Copper (Cu, mg/L)	0.004	0.357	0.004	0.357
Iron (Fe, mg/L)	4.83	11.54	4.83	11.54
Potassium (K, mg/L)	403.27	389.31	403.27	389.31
Magnesium (Mg, mg/L)	49.31	71.23	49.31	71.23
COD : N : P	100 : 2.0 : 0.01	100 : 2.7 : 0.03	100 : 2.0 : 0.01	100 : 2.7 : 0.03

หมายเหตุ S คือฟางข้าว, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค, RC คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักโค, RB คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักกระบือ และ FW คือน้ำหนักสด

3.3 ค่า pH

สำหรับค่า pH เริ่มต้นในระบบ มีการปรับค่าด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO₃) เป็น 7.5 และในช่วงระยะเวลาที่เดินระบบมีการปรับค่า pH เมื่อมีค่าต่ำกว่า 7.5 พบว่าถังหมักที่ใช้สารละลายผสมฟางข้าวหมักร่วมกับมูลโค (ถังหมักที่ 3 และ 4) รักษาสภาพ pH ได้ดีกว่าถังหมักที่ใช้สารละลายผสมฟางข้าวเพียงอย่างเดียว (ถังหมักที่ 1 และ 2) (ภาพที่ 14)

สำหรับการหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโค (ถังหมักที่ 1 และ 2) ในการหมักฟางข้าวเพียงอย่างเดียว (ถังหมักที่ 1) มีการปรับค่า pH จำนวน 2 ครั้ง และในการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค (ถังหมักที่ 2) ไม่มีการปรับค่า pH ส่วนการหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักกระบือ (ถังหมักที่ 3 และ 4) ในการหมักฟางข้าวเพียงอย่างเดียว (ถังหมักที่ 3) มีการปรับค่า pH จำนวน 2 ครั้ง และในการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค (ถังหมักที่ 4) จำนวน 1 ครั้ง (ตารางผนวกที่ ก19) แสดงให้เห็นว่าการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค (ถังหมักที่ 2 และ 4) มีการรักษาสภาพ pH ในระบบได้ดีกว่า (ภาพที่ 14) มีค่า pH อยู่ในช่วงที่เหมาะสมกับการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน คือ 6.6 - 7.4 (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553) แสดงให้เห็นว่ามูลโคช่วยให้เกิดความสมดุลของระบบ



ภาพที่ 14 ค่า pH ของการทดลองชุดที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักฟางข้าว และการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก

หมายเหตุ S คือฟางข้าว, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค, RC คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักโค, RB คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักกระบือ และ FW คือน้ำหนักสด

3.4 ประสิทธิภาพในการกำจัด COD (Chemical oxygen demand)

ค่า COD ของสารละลายผสมฟางข้าวที่เดิมเข้าระบบ และค่า COD ของสารละลายผสมฟางข้าวที่ออกจากระบบโดยผ่านการหมักแล้ว ในแต่ละถังหมัก(ตารางที่ 16) นำมาใช้ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการกำจัด COD (ภาคผนวก ข)

การหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโค ในการหมักฟางข้าวเพียงอย่างเดียว (ถังหมักที่ 1) มีค่า COD ที่เดิมเข้าระบบเฉลี่ย 23.70 g/L และค่า COD ที่ออกจากระบบเฉลี่ย 9.65 g/L (ตารางที่ 16) สามารถนำมาคำนวณประสิทธิภาพในการกำจัด COD ได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned}\text{ประสิทธิภาพการกำจัด COD (\%)} &= \frac{[(23.70 - 9.65) \text{ g/L}] \times 100}{23.70 \text{ g/L}} \\ &= 59.28 \%\end{aligned}$$

จากการคำนวณของการหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโค ในการหมักฟางข้าวเพียงอย่างเดียว (ถังหมักที่ 1) ได้ประสิทธิภาพในการกำจัด COD 59.28 % และสำหรับการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค (ถังหมักที่ 2) ได้ประสิทธิภาพในการกำจัด COD 52.27 % ส่วนการหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักกระบือ ในการหมักฟางข้าวเพียงอย่างเดียว (ถังหมักที่ 3) ได้ประสิทธิภาพในการกำจัด COD 59.79 % และสำหรับการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค (ถังหมักที่ 2) ได้ประสิทธิภาพในการกำจัด COD 48.55 % (ตารางที่ 16) ประสิทธิภาพการกำจัดค่า COD ทำให้ทราบถึงความสามารถของเชื้อจุลินทรีย์ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสารตั้งต้น โดยปกติแล้วกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนจะสามารถลดค่า COD ได้ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553)

3.5 ประสิทธิภาพในการกำจัด TVS (Total volatile solids)

ค่า TVS ของสารละลายผสมฟางข้าวที่เดิมเข้าระบบ และค่า TVS ของสารละลายผสมฟางข้าวที่ออกจากระบบโดยผ่านการหมักแล้ว ในแต่ละถังหมัก (ตารางที่ 16) นำมาใช้ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพในการกำจัด TVS (ภาคผนวก ข)

การหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโค ในการหมักฟางข้าวเพียงอย่างเดียว (ถังหมักที่ 1) มีค่า TVS ที่เติมเข้าระบบเฉลี่ย 15.98 g/L และค่า TVS ที่ออกจากระบบเฉลี่ย 5.10 g/L (ตารางที่ 16) สามารถนำมาคำนวณประสิทธิภาพในการกำจัด TVS ได้ดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{ประสิทธิภาพการกำจัด TVS (\%)} &= \frac{[(15.98 - 5.10) \text{ g/L}] \times 100}{15.98 \text{ g/L}} \\ &= 68.09 \% \end{aligned}$$

จากการคำนวณของการหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโค ในการหมักฟางข้าวเพียงอย่างเดียว (ถังหมักที่ 1) ได้ประสิทธิภาพในการกำจัด TVS 68.09 % และสำหรับการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค (ถังหมักที่ 2) ได้ประสิทธิภาพในการกำจัด TVS 63.26 % ส่วนการหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักกระบือ ในการหมักฟางข้าวเพียงอย่างเดียว (ถังหมักที่ 3) ได้ประสิทธิภาพในการกำจัด TVS 68.90 % และสำหรับการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค (ถังหมักที่ 4) ได้ประสิทธิภาพในการกำจัด TVS 64.91 % (ตารางที่ 16) ซึ่งพบว่ามีค่าสูงกว่าการศึกษาของ Ye *et al.* (2013) ที่หมักฟางข้าวเพียงอย่างเดียว 16.19 % FW ที่ HRT 45 วัน มีประสิทธิภาพการกำจัด TVS เพียง 51.53 % เช่นเดียวกับผลการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลสุกรในสัดส่วน 1 : 8.3 % FW ที่ HRT 45 วัน มีประสิทธิภาพการกำจัด TVS 55.03 % ซึ่งพบว่าการหมักของ Ye *et al.* (2013) มีประสิทธิภาพการกำจัด TVS ต่ำกว่า แสดงให้เห็นว่ามูลโคเหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นวัสดุหมักร่วมกับฟางข้าวได้ดีกว่ามูลสุกร

3.6 ก๊าซมีเทนที่ผลิตได้

เมื่อเดินระบบจนกระทั่งอยู่ในสภาวะคงที่ คือระยะเวลาที่มากกว่าระยะเวลาเก็บกักและปริมาตรก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นมีความสม่ำเสมอคงที่ สำหรับการทดลองนี้ที่ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักฟางข้าว และการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ (การทดลองชุดที่ 2) สภาวะคงที่คือวันที่ 41 ถึงวันที่ 75 หลังจากเริ่มทำการเดินระบบ และเดินระบบเป็นระยะเวลาทั้งหมด 75 วัน ทำการเก็บผลการทดลองเป็นเวลาทั้งหมด 35 วัน โดยการวัดปริมาณน้ำโดยระบบเก็บก๊าซแบบแทนที่น้ำ และเก็บตัวอย่างก๊าซไปวิเคราะห์หาปริมาณเปอร์เซ็นต์มีเทนโดยวิธี Gas chromatography พบว่ามีก๊าซมีเทนเกิดขึ้น (ตาราง

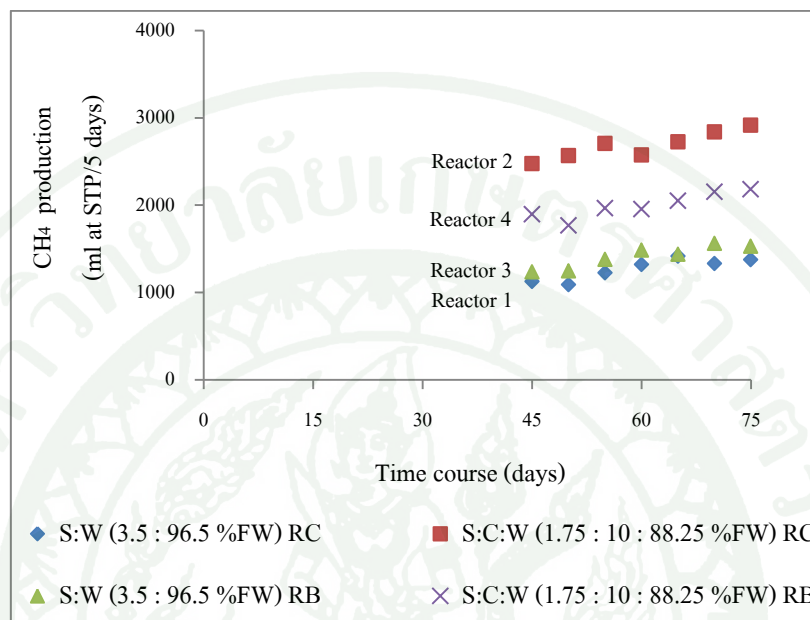
ผนวกที่ ก20) แสดงให้เห็นว่าฟางข้าวและฟางข้าวผสมมูลโคสามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตมีเทนได้

จากปริมาณเปอร์เซ็นต์มีเทน ในสภาวะคงที่พบว่า การหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโค ในการหมักฟางข้าวเพียงอย่างเดียว (ถังหมักที่ 1) มีปริมาณเปอร์เซ็นต์มีเทนเฉลี่ย 31.77 % และสำหรับการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค (ถังหมักที่ 2) มีปริมาณเปอร์เซ็นต์มีเทนเฉลี่ย 43.97 % ส่วนการหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักกระบือ ในการหมักฟางข้าวเพียงอย่างเดียว (ถังหมักที่ 3) มีปริมาณเปอร์เซ็นต์มีเทนเฉลี่ย 32.54 % และสำหรับการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค (ถังหมักที่ 2) มีปริมาณเปอร์เซ็นต์มีเทนเฉลี่ย 41.49 % (ตารางที่ 16) จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโค ในการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค (ถังหมักที่ 2) มีปริมาณเปอร์เซ็นต์มีเทนเฉลี่ยสูงกว่าการหมักฟางข้าวเพียงอย่างเดียว (ถังหมักที่ 1) และในการหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักกระบือ (ถังหมักที่ 3 และ 4) ก็ได้ผลเช่นเดียวกัน ซึ่งมีค่าต่ำกว่าการศึกษาของ Ye *et al.* (2013) หมักฟางข้าวเพียงอย่างเดียว 16.19 % FW และฟางข้าวร่วมกับมูลสุกรในสัดส่วน 1 : 8.3 % FW ที่ HRT 45 วัน ได้ปริมาณเปอร์เซ็นต์มีเทน 52.21 และ 57.45 % ตามลำดับ นอกจากนี้ในการทดลองครั้งนี้ยังพบว่าการใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักกระบือในการหมักฟางข้าวเพียงอย่างเดียว จะให้ปริมาณเปอร์เซ็นต์มีเทนสูงกว่าการใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคเนื้อ เนื่องจากจุลินทรีย์ผลิตมีเทนในกระเพาะหมักกระบืออาจจะมีประสิทธิภาพในการหมักย่อยฟางข้าวได้ดีกว่าจุลินทรีย์ในกระเพาะหมักโคเนื้อ

ปริมาตรก๊าซทั้งหมดที่ผลิตได้มาจากการวัดปริมาตรน้ำโดยระบบเก็บก๊าซแบบแทนทีน้ำ และปริมาณเปอร์เซ็นต์มีเทนที่ได้จากการวิเคราะห์โดยวิธี Gas chromatography จากนั้นนำมาคำนวณปริมาตรมีเทนที่เกิดขึ้นทุกวันที่สภาวะอุณหภูมิและความดันมาตรฐาน (Standard temperature and pressure; STP) คือสภาวะที่ 0 °C และความดัน 1 atm โดยปริมาตรมีเทนที่เกิดขึ้นทุกวันเท่ากับผลคูณของปริมาตรก๊าซทั้งหมดที่ผลิตได้ที่ STP กับปริมาณเปอร์เซ็นต์มีเทน และเมื่อนำปริมาตรมีเทนที่ผลิตได้ทุกวันมารวมในรอบทุก ๆ 5 วัน ที่มีการเติมสารอินทรีย์เข้าระบบ จะได้ปริมาตรมีเทนรวมทุก 5 วัน (ตารางผนวกที่ ก21) และปริมาตรมีเทนรวมทุก 5 วัน ในช่วงสภาวะคงที่ (ภาพที่ 15)

การหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโค ในการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค (ถังหมักที่ 2) มีปริมาณมีเทนรวมทุก 5 วัน สูงกว่าการหมักฟางข้าวเพียงอย่างเดียว (ถังหมักที่ 1) และใน

การหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักกระบือ (ถังหมักที่ 3 และ 4) ก็ได้ผลเช่นเดียวกัน คือการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค (ถังหมักที่ 4) มีปริมาณมีเทนรวมทุก 5 วัน สูงกว่าการหมัก ฟางข้าวเพียงอย่างเดียว (ถังหมักที่ 3) (ภาพที่ 15)



ภาพที่ 15 ปริมาณมีเทนรวมทุก 5 วัน ที่ผลิตได้ ของการทดลองชุดที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทน จากการหมักฟางข้าว และการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจาก กระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก

หมายเหตุ S คือฟางข้าว, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค, RC คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักโค, RB คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักกระบือ และ FW คือน้ำหนักสด

3.7 ผลผลิตมีเทน (Methane yield)

เมื่อนำค่าปริมาณมีเทนรวมทุก 5 วัน (ตารางที่ 16) ของการทดลองชุดที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักฟางข้าว และการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก มาคำนวณหาผลผลิตมีเทน คือ ปริมาณมีเทนที่ผลิตได้ต่อ COD ที่ถูกกำจัด (L at STP/kg COD degraded) หรือต่อ TVS ที่ถูกกำจัด (L at STP/kg TVS degraded) หรืออาจแสดงในรูปปริมาณมีเทนที่ผลิตได้ต่อ TS ที่เติมเข้าระบบ (L at STP/kg TS added) วิธีคำนวณผลผลิตมีเทนแสดงดังภาคผนวก ข

3.7.1 ผลผลิตมีเทนในรูปของปริมาตรมีเทนที่ผลิตได้ต่อ COD ที่ถูกกำจัด

จากการคำนวณผลผลิตมีเทนในรูปของปริมาตรมีเทนที่ผลิตได้ต่อ COD ที่ถูกกำจัด สำหรับการหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโค ในการหมักฟางข้าวเพียงอย่างเดียว (ถังหมักที่ 1) ได้ผลผลิตมีเทน 145 L at STP/kg COD degraded และการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค (ถังหมักที่ 2) ได้ผลผลิตมีเทน 260 L at STP/kg COD degraded สำหรับการหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักกระบือ ในการหมักฟางข้าวเพียงอย่างเดียว (ถังหมักที่ 3) ได้ผลผลิตมีเทน 159 L at STP/kg COD degraded และการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค (ถังหมักที่ 4) ได้ผลผลิตมีเทน 208 L at STP/kg COD degraded (ตารางที่ 16)

เมื่อนำผลผลิตมีเทนในรูปของปริมาตรมีเทนที่ผลิตได้ต่อ COD ที่ถูกกำจัดมาเปรียบเทียบกับผลการศึกษาของ McCarty (1964) พบว่ามีค่าผลผลิตมีเทนที่ต่ำกว่า โดย McCarty (1964) ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างก๊าซมีเทนกับปริมาณของ COD ที่ถูกกำจัดไว้คือ 1 kg COD ที่ถูกกำจัดจะได้ก๊าซมีเทน 351 L ที่ STP เพราะพอลิเมอร์หลักที่พบในผนังเซลล์ของฟางข้าว ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน มีปริมาณสูง (Animal Feed Resources Information System, 2012; ปรีชา และทวีพร, 2551) ทำให้มีโครงสร้างที่แข็งแรง จึงมีรูปร่างและโครงสร้างที่มั่นคง (Perez *et al.*, 2002) ทนต่อการย่อยสลาย (Orr and Kirk, 2003) โดยเฉพาะอย่างยิ่งส่วนที่เป็นลิกนิน เซลลูโลส (ลิกนินจับตัวกับเซลลูโลส) จะย่อยสลายทางชีวภาพได้ยาก (Zhang and Zhang, 1999) ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายของเชื้อจุลินทรีย์ลดลง ส่งผลให้มีผลผลิตมีเทนต่ำกว่า

3.7.2 ผลผลิตมีเทนในรูปของปริมาตรมีเทนที่ผลิตได้ต่อ TVS ที่ถูกกำจัด

การคำนวณผลผลิตมีเทนในรูปของปริมาตรมีเทนที่ผลิตได้ต่อ TVS ที่ถูกกำจัด สำหรับการหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโค ในการหมักฟางข้าวเพียงอย่างเดียว (ถังหมักที่ 1) ได้ผลผลิตมีเทน 187 L at STP/kg TVS degraded และการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค (ถังหมักที่ 2) ได้ผลผลิตมีเทน 331 L at STP/kg TVS degraded สำหรับการหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักกระบือ ในการหมักฟางข้าวเพียงอย่างเดียว (ถังหมักที่ 3) ได้ผลผลิตมีเทน 205 L at STP/kg TVS degraded และการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค (ถังหมักที่ 4) ได้ผลผลิตมีเทน 240 L at STP/kg TVS degraded (ตารางที่ 16)

ผลผลิตมีเทนในรูปของปริมาตรมีเทนต่อ TVS ที่เติมเข้าระบบมีค่าสูงสุด จากการหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโค โดยใช้สารละลายผสมฟางข้าวกับมูลโคในสัดส่วน 10 : 10 % FW (ถังหมักที่ 2) (ภาพผนวกที่ ก26) คิดเป็นสัดส่วน 85.99 : 91.16 หรือ 1 : 1.06 โดยปริมาตร TVS (ตารางที่ 8 และ 14) โดยมีผลผลิตมีเทน 209 L at STP/kg TVS added ซึ่งมีผลผลิตมีเทนน้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาของ Lehtomaki *et al.* (2007) ที่ทำการหมักหญ้าร่วมกับมูลโคสัดส่วน 30 : 70 หรือ 1 : 2.33 โดยปริมาตร TVS พบว่าได้ผลผลิตมีเทน 268 L at STP/kg TVS added ทั้งนี้เนื่องจากสัดส่วนมูลโคที่ใช้ในการทดลองมีปริมาณน้อยกว่าสัดส่วนมูลโคที่ใช้ในการศึกษาของ Lehtomaki *et al.* (2007) เพราะปริมาณมูลโคที่มากกว่าจะเพิ่มธาตุอาหารในระบบ (Shyam, 1994; Zhang and Zhang, 1999)

3.7.3 ผลผลิตมีเทนในรูปของปริมาตรมีเทนที่ผลิตได้ต่อ TS ที่เติมเข้าระบบ

สำหรับการคำนวณผลผลิตมีเทนในรูปของปริมาตรมีเทนที่ผลิตได้ต่อ TS ที่เติมเข้าระบบ ของการหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโค ในการหมักฟางข้าวเพียงอย่างเดียว (ถังหมักที่ 1) ได้ผลผลิตมีเทน 105 L at STP/kg TS added และการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค (ถังหมักที่ 2) ได้ผลผลิตมีเทน 168 L at STP/kg TS added สำหรับการหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักกระบือ ในการหมักฟางข้าวเพียงอย่างเดียว (ถังหมักที่ 3) ได้ผลผลิตมีเทน 116 L at STP/kg TS added และการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค (ถังหมักที่ 4) ได้ผลผลิตมีเทน 125 L at STP/kg TS added (ตารางที่ 16)

สำหรับการหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโค เพื่อให้ได้ก๊าซมีเทนบริสุทธิ์ปริมาตร 1 m³ การหมักฟางข้าวเพียงอย่างเดียว 20 % FW (ถังหมักที่ 1) ต้องใช้ฟางข้าว 10.3 kg (คิดเป็นน้ำหนักแห้ง 9.5 kg) การหมักฟางข้าวผสมมูลโค 1.75 : 10 %FW ต้องใช้ฟางข้าว 2.6 kg ผสมกับมูลโค 14.9 kg (คิดเป็นน้ำหนักแห้งฟางข้าว 2.4 kg ผสมกับมูลโค 3.6 kg) และสำหรับการหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักกระบือ เพื่อให้ได้ก๊าซมีเทนบริสุทธิ์ปริมาตร 1 m³ การหมักฟางข้าวเพียงอย่างเดียว 20 % FW (ถังหมักที่ 3) ต้องใช้ฟางข้าว 9.4 kg (คิดเป็นน้ำหนักแห้ง 8.6 kg) การหมักฟางข้าวผสมมูลโค 1.75 : 10 %FW ต้องใช้ฟางข้าว 3.5 kg ผสมกับมูลโค 20.1 kg (คิดเป็นน้ำหนักแห้งฟางข้าว 3.2 kg ผสมกับมูลโค 4.8 kg) นั้นแสดงให้เห็นว่าในการหมักฟางข้าวเพียงอย่างเดียว การใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักกระบือ จะมีประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนได้ดีกว่าการใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักของโคเนื่องส่วนการหมักฟางข้าวผสมมูลโค การใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักของโคเนื้อ จะมี

ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนได้ดีกว่าการใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักของกระบือ

จากน้ำหมักฟางข้าวและมูลโคที่ใช้เพื่อผลิตก๊าซมีเทนบริสุทธิ์ปริมาตร 1 m³ พบว่าการหมักแบบร่วม (Co-digestion) ที่ผสมมูลโค มีข้อดี คือเป็นการลดการใช้สารตั้งต้นหลักคือ ฟางข้าวได้มาก เมื่อเทียบกับการทดลองที่ใช้สารตั้งต้นหลักเป็นฟางข้าวเพียงอย่างเดียว ที่ต้องใช้ฟางข้าวมากกว่า

จากผลการคำนวณผลผลิตมีเทนในรูปของปริมาตรมีเทนที่ผลิตได้ต่อ COD ที่ถูกกำจัด ปริมาตรมีเทนที่ผลิตได้ต่อ TVS ที่ถูกกำจัด และปริมาตรมีเทนที่ผลิตได้ต่อ TS ที่เดิมเข้าระบบ พบว่าการหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโค โดยใช้ฟางข้าวร่วมกับมูลโค (ถังหมักที่ 2) ให้ผลผลิตมีเทนสูงกว่า การหมักด้วยฟางข้าวเพียงอย่างเดียว (ถังหมักที่ 1) (ตารางที่ 16) ทั้งนี้เพราะสารละลายผสมฟางข้าวร่วมกับมูลโคมีค่า OLR, COD, TVS และ TS ที่เดิมเข้าระบบสูงกว่าสารละลายผสมฟางข้าวเพียงอย่างเดียว และสำหรับการหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักกระบือ (ถังหมักที่ 3 และ 4) ก็ได้ผลการทดลองเช่นเดียวกัน โดยพบว่าค่า TVS ที่สูงมีความสัมพันธ์กับผลผลิตมีเทน เช่นเดียวกับการศึกษาของ Yadavika *et al.* (2004) ที่พบว่าปริมาณก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นตาม OLR ที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากค่า OLR ที่เพิ่มขึ้นเป็นการเพิ่มปริมาณธาตุอาหารสำหรับการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทน ซึ่งทำให้มีสารอินทรีย์เพียงพอต่อการสร้างก๊าซชีวภาพได้ และยังสอดคล้องกับการศึกษาของ Hall (1997), Murphy and Power (2009) และ Seppala *et al.* (2009) รวมทั้งการใช้มูลโคเป็นวัสดุหมักร่วมซึ่งจะช่วยเพิ่มปริมาณธาตุอาหาร เช่นเดียวกับการศึกษาของ Shyam (1994) และ Zhang and Zhang (1999) ที่พบว่าสามารถเพิ่มธาตุอาหารได้โดยใช้มูลสัตว์เป็นวัสดุหมักร่วม

การหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโค โดยใช้ฟางข้าวเพียงอย่างเดียว (ถังหมักที่ 1) มีประสิทธิภาพในการกำจัด COD สูงกว่าการหมักด้วยฟางข้าวร่วมกับมูลโค (ถังหมักที่ 2) แต่เมื่อพิจารณาจากผลผลิตมีเทน พบว่าการหมักด้วยฟางข้าวร่วมกับมูลโค (ถังหมักที่ 2) ให้ผลผลิตมีเทนสูงกว่า ซึ่งได้ผลการทดลองเช่นเดียวกับการหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักกระบือ (ถังหมักที่ 3 และ 4) (ตารางที่ 16) ทั้งนี้เพราะสารอินทรีย์อาจถูกจุลินทรีย์นำมาใช้เพื่อเปลี่ยนเป็นก๊าซชนิดอื่น เนื่องจากจุลินทรีย์ที่ผลิตมีเทนจะใช้สารอินทรีย์เป็นสารอาหารและย่อยสลายให้ผลผลิตหลักเป็นก๊าซมีเทน (CH₄) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) โดยมีก๊าซ

อื่นเกิดขึ้นในปริมาณเล็กน้อย เช่น ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) และก๊าซแอมโมเนีย (NH_3) เป็นต้น (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553)

จากผลการศึกษาข้อ 3. (การทดลองชุดที่ 2 ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักฟางข้าว และการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) พบว่าการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโคให้ผลผลิตมีเทนสูงกว่าการหมักฟางข้าวเพียงอย่างเดียว ซึ่งได้ผลเช่นเดียวกันทั้งการหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและการหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักกระบือ โดยการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโคด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโค (ถึงหมักที่ 2) ให้ผลผลิตมีเทนที่สูงสุด

เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองข้อ 2. (การทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 2 การศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักหญ้าเนเปียร์ และการหมักหญ้าเนเปียร์ร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) กับผลการทดลองข้อ 3. (การทดลองชุดที่ 2 การศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักฟางข้าว และการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ถ้าพิจารณาจากผลผลิตมีเทน พบว่าการหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโค หญ้าเนเปียร์มีความเหมาะสมในการใช้เป็นสารตั้งต้นมากกว่าฟางข้าว เนื่องจากหญ้าเนเปียร์ให้ผลผลิตมีเทนมากกว่า และในทางกลับกัน เมื่อพิจารณาจากการหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักกระบือ ฟางข้าวมีความเหมาะสมในการใช้เป็นสารตั้งต้นมากกว่าหญ้าเนเปียร์ เนื่องจากฟางข้าวให้ผลผลิตมีเทนมากกว่า (ตารางที่ 13 และ 16) ทั้งนี้เพราะจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักโค และกระบือ จะมีจำนวนและชนิดของเชื้อจุลินทรีย์ที่แตกต่างกัน (สุริยะ, 2551) แต่อย่างไรก็ตามถ้าเป็นการหมักร่วมระหว่างหญ้าเนเปียร์กับมูลโค หรือฟางข้าวกับมูลโค ควรใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นมาจากกระเพาะหมักของโคเนื้อ เพราะจะทำให้ได้ผลผลิตมีเทนสูงกว่าการใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักของกระบือ

ตารางที่ 16 ปริมาตรก๊าซชีวภาพที่ได้และผลผลิตก๊าซชีวภาพของการทดลองชุดที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักฟางข้าว และการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก

Parameter	Reactor			
	1	2	3	4
Mixed culture	RC	RC	RB	RB
Substrate	S : W	S : C : W	S : W	S : C : W
Ratio (% FW)	3.5 : 96.5	1.75 : 10 : 88.25	3.5 : 96.5	1.75 : 10 : 88.25
Concentration (% FW)	20	20	20	20
Flow rate (ml/day)	125	125	125	125
Flow rate (ml/5days)	625	625	625	625
Hydraulic retention time (day)	40	40	40	40
OLR (kg COD /m ³ ·day)	0.59	0.79	0.59	0.79
OLR (kg TVS /m ³ ·day)	0.40	0.51	0.40	0.51
MLVSS (g/L)	13.44	13.44	11.65	11.65
pH of substrate slurry	7.00	7.89	7.00	7.89
CH ₄ (ml/5days)	1270	2687	1412	1997
CH ₄ in biogas (%)	31.77	43.97	32.54	41.49
Initial COD (g/L)	23.70	31.68	23.70	31.68
COD at steady state (g/L)	9.65	15.12	9.53	16.30
COD degradation (%)	59.28	52.27	59.79	48.55
Initial TVS (g/L)	15.98	20.55	15.98	20.55
TVS at steady state (g/L)	5.1	7.55	4.97	7.21
TVS degradation (%)	68.09	63.26	68.90	64.91
Initial TS (g/L)	19.4	25.52	19.4	25.52
CH ₄ yield (L at STP/kg COD degraded)	145	260	159	208
CH ₄ yield (L at STP/kg TVS degraded)	187	331	205	240
CH ₄ yield (L at STP/kg TS added)	105	168	116	125

หมายเหตุ S คือฟางข้าว, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค, RC คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักโค, RB คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักกระบือ และ FW คือน้ำหนักสด

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

การผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์และฟางข้าว โดยการหมักร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ ทำการเดินระบบแบบ Single - stage semi - continuous anaerobic digestion มีการเติมสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์ และสารละลายผสมฟางข้าว แบบไหลขึ้น ให้มีอัตราการไหล 125 ml/day ทำการเติมสารอินทรีย์ทุก ๆ 5 วัน ใช้ถังหมักที่มีปริมาตรในการหมัก 5 L เป็นผลให้มี HRT 40 วัน ทำการทดลองที่สภาวะอุณหภูมิห้อง (30 ± 1 °C) โดยมีค่า pH เริ่มต้นในระบบหมัก คือ 7.5 ได้ผลดังนี้

1. หญ้าเนเปียร์ อายุการตัด 60 วัน มีความสูงเฉลี่ย 250 cm มีค่าความชื้น 83.93 % ค่า TS 16.07 % และค่า TVS 84.27 % TS มีค่าไนโตรเจน 9348 mg/kg DW as N มีค่าฟอสฟอรัส 56 mg/kg DW as P และมีปริมาณแคลเซียม ทองแดง เหล็ก โพแทสเซียม และแมกนีเซียม 750, 2, 93, 30249 และ 1229 mg/kg DW ตามลำดับ

ฟางข้าว มีค่าความชื้น 8.08 % ค่า TS 91.92 % และค่า TVS 85.99 % TS มีค่าไนโตรเจน 9888 mg/kg DW as N มีค่าฟอสฟอรัส 29 mg/kg DW as P และมีปริมาณแคลเซียม ทองแดง เหล็ก โพแทสเซียม และแมกนีเซียม 1468, 0.12, 150, 12549 และ 1534 mg/kg DW ตามลำดับ

ลักษณะทั่วไปของมูลโค มีค่าความชื้น 76.22 % ค่า TS 23.78 % และค่า TVS 91.16 % TS มีค่าไนโตรเจน 11321 mg/kg DW as N มีค่าฟอสฟอรัส 206 mg/kg DW as P และมีปริมาณแคลเซียม ทองแดง เหล็ก โพแทสเซียม และแมกนีเซียม 3618, 15, 384, 7888 และ 1958 mg/kg DW ตามลำดับ

2. หญ้าเนเปียร์และฟางข้าวสามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตก๊าซมีเทนได้ โดยเดินระบบแบบ Single - stage semi - continuous anaerobic digestion และจะต้องมีการปรับค่า pH ตลอดการเดินระบบ มิฉะนั้นระบบจะล้มเหลว

3. การหมักด้วยหญ้าเนเปียร์ ในการหมักสัดส่วนหญ้าเนเปียร์ต่อมูลโค 10 : 10 % FW (ความชื้น 83.93 %) ด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโค ได้ผลผลิตมีเทนสูงสุดเป็น 300 L at STP/kg COD degraded หรือ 371 L at STP/kg TVS degraded หรือ 194 L at STP/kg TS added และมีปริมาณเปอร์เซ็นต์มีเทนเฉลี่ย 52 %

การหมักการหมักด้วยฟางข้าว ในการหมักสัดส่วนฟางข้าวต่อมูลโค 1.75 : 10 % FW (ความชื้น 8.08 %) ด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโค ได้ผลผลิตมีเทนสูงสุดเป็น 260 L at STP/kg COD degraded หรือ 331 L at STP/kg TVS degraded หรือ 168 L at STP/kg TS added และมีปริมาณเปอร์เซ็นต์มีเทนเฉลี่ย 44 %

4. การหมักโดยใช้หญ้าเนเปียร์ผสมมูลโค (Co - digestion) ให้ผลผลิตมีเทนสูงกว่าการหมักโดยใช้หญ้าเนเปียร์เพียงอย่างเดียว เช่นเดียวกันกับการหมักโดยใช้ฟางข้าวผสมมูลโค ที่ให้ผลผลิตมีเทนสูงกว่าการหมักโดยใช้ฟางข้าวเพียงอย่างเดียว

5. การหมักแบบร่วมมือมีข้อดีถือเป็นการลดการใช้สารตั้งต้นหลัก โดยในการผลิตก๊าซมีเทนบริสุทธิ์ปริมาตร 1 m³ จากการหมักหญ้าเนเปียร์เพียงอย่างเดียว 20 % FW จะต้องใช้หญ้าเนเปียร์สด 89.6 kg (14.4 kg DW) เมื่อหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโค และใช้หญ้าเนเปียร์สด 113.9 kg (18.3 kg DW) เมื่อหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักกระบือ ส่วนการหมักด้วยหญ้าเนเปียร์ผสมมูลโค 10 : 10 % FW จะต้องใช้หญ้าเนเปียร์สด 13 kg (2.1 kg DW) ผสมกับมูลโค 13 kg (3.1 kg DW) เมื่อหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโค และใช้หญ้าเนเปียร์สด 18.2 kg (2.9 kg DW) ผสมกับมูลโค 18.2 kg (4.3 kg DW) เมื่อหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักกระบือ

ในการผลิตก๊าซมีเทนบริสุทธิ์ปริมาตร 1 m³ จากการหมักฟางข้าวเพียงอย่างเดียว 3.5 % FW จะต้องใช้ฟางข้าว 10.3 kg (9.5 kg DW) เมื่อหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโค และจะต้องใช้ฟางข้าว 9.4 kg (8.6 kg DW) เมื่อหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักกระบือ ส่วนการหมักฟางข้าวผสมมูลโค 1.75 : 10 % FW จะต้องใช้ฟางข้าว 2.6 kg (2.4 kg DW) ผสมกับมูลโค 14.9 kg (3.6 kg DW) เมื่อหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโค และใช้ฟางข้าว 3.5 kg (3.2 kg DW) ผสมกับมูลโค 20.1 kg (4.8 kg DW) เมื่อหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักกระบือ

6. การหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโค หญ้าเนเปียร์มีความเหมาะสมในการใช้เป็นสารตั้งต้นมากกว่าฟางข้าว และในทางกลับกัน เมื่อหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักกระบือ ฟางข้าวมีความเหมาะสมในการใช้เป็นสารตั้งต้นมากกว่าหญ้าเนเปียร์

7. การหมักร่วมระหว่างหญ้าเนเปียร์กับมูลโค หรือฟางข้าวกับมูลโค การใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักของโคเนื้อ จะทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนดีกว่าการใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะของกระบือ

ข้อเสนอแนะ

1. ควรมีการปรับสภาพสารตั้งต้น (Pre - treatment) ก่อนทำการหมัก หรืออาจทำการหมักด้วยระบบหมักแบบสองขั้นตอน (Two - stage anaerobic digestion) เพื่อเพิ่มผลผลิตมีเทน เนื่องจากหญ้าเนเปียร์และฟางข้าว มีปริมาณ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ที่สูง ทำให้มีโครงสร้างที่แข็งแรง ทนทานต่อการย่อยสลาย

2. การเพิ่มความเข้มข้นของสารตั้งต้นให้มากขึ้นอาจจะช่วยเพิ่มผลผลิตมีเทนได้ แต่จะต้องไม่มากเกินไปจนทำให้ระบบเกิดสภาพกรดสูง จนระบบล้มเหลว

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กมล ริมศิริ. 2554. **หญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1**. กองอาหารสัตว์ กรมปศุสัตว์ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์, กรุงเทพฯ.

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. 2556. **หญ้าเนเปียร์ พืชพลังงานสีเขียวพลังงานทดแทนที่น่าจับตามอง**. แหล่งที่มา: [http://webkc.dede.go.th/webmax/content/หญ้าเนเปียร์ - พืชพลังงานสีเขียว](http://webkc.dede.go.th/webmax/content/หญ้าเนเปียร์-พืชพลังงานสีเขียว), 5 พฤศจิกายน 2556.

กรมพัฒนาที่ดิน. 2551. **กระทรวงเกษตรและสหกรณ์การเกษตร : การใช้อินทรีย์วัตถุปรับปรุงดิน**. แหล่งที่มา: <http://www.ddd.go.th>, 15 ตุลาคม 2556.

กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2553. **คู่มือการปฏิบัติงานเกี่ยวกับการออกแบบ การผลิต การควบคุมคุณภาพ และการใช้ก๊าซชีวภาพ (Biogas) สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม**. กรุงเทพฯ.

ไกรลาส เขียวทอง. 2554. **คู่มือการปลูกหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1**. ศูนย์วิจัยและพัฒนาอาหารสัตว์ จังหวัดนครราชสีมา.

ชนิตา เกาศล. 2540. **สภาวะการทำงานที่เหมาะสมของถังหมักไร้อากาศในการบำบัดตะกอน**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นันทิกา เพียรผดุงสิทธิ์ และ สุริพร จุงจิตรดำรงค์. 2546. **ผลการเสริม Feed additive ในอาหารสมบูรณ์ต่อจำนวนจุลินทรีย์ในกระเพาะหมักของโคพันธุ์กำแพงแสน**. ปัญหาพิเศษปริญญาตรี, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

น้ำเพชร พันธุ์พัฒน์ และ สุภวัฒน์ วิวรรณภัทรกิจ. 2555. **ศึกษาศักยภาพการผลิตไฟฟ้าด้วยไบโอแก๊สที่ผลิตจากเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร**, น. 407-413. ใน การประชุมวิชาการสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 13. 4 - 5 เมษายน 2555, จังหวัดเชียงใหม่.

บุญญา วิไลพร และ ถาวร วินิจสานันท์. 2534. ผลตอบแทนจากการปลูกหญ้าเลี้ยงโคเนื้อ และโคนม
ในภาคอีสาน. เอกสารประกอบการบรรยาย ฉบับที่ 2 : การฝึกอบรม หลักสูตรอาหาร โค
เนื้อและโคนม. ศูนย์ส่งเสริมและฝึกอบรมการเกษตรแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม ระหว่างวันที่ 27 มีนาคม – 3 เมษายน 2534.

ปรีชา อินุรักษ์ และ ทวีพร เรืองพริ้ม. 2551. การเพิ่มศักยภาพการใช้ฟางข้าวเป็นอาหารสัตว์เคี้ยว
เอื้อง. พิมพ์ครั้งที่ 1. โรงพิมพ์สำนักส่งเสริมและฝึกอบรมกำแพงแสนมหาวิทยาลัย
เกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม.

เมธา วรรณพัฒน์. 2529. โภชนศาสตร์สัตว์เคี้ยวเอื้อง. ภาควิชาสัตวบาล คณะเกษตรศาสตร์,
มหาวิทยาลัยขอนแก่น.

วรวิทย์ จุฬาลักษณ์นกุล. 2541. จุลินทรีย์ในกระเพาะหมักสัตว์เคี้ยวเอื้อง. วารสารโคนม 17 (4):
60-62.

สายัณห์ ทัดศรี. 2539. ผลผลิตและคุณภาพของหญ้าเขตร้อนบางชนิด . วิทยาการเกษตรศาสตร์
สาขาวิทยาศาสตร์ 30: 293-302.

สุพล บ่อคุ้ม และสมศักดิ์ พิทักษานุรัตน์. 2557. อัตราการบรรทุกลูกสารอินทรีย์ของการหมักแบบไร้อากาศสองขั้นตอนต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ จากหญ้าเนเปียร์ปากช่อง1. การประชุมวิชาการ
เสนอผลงานวิจัยระดับบัณฑิตศึกษา ครั้งที่15 ,จังหวัดขอนแก่น, 28 มีนาคม 2557.

สุริยะ สะวานนท์. 2539. การศึกษาเปรียบเทียบการย่อยสลายมูลสุกรด้วยจุลินทรีย์อีเอ็มกับจุลินทรีย์
ผลิตมีเทน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุริยะ สะวานนท์. 2551. จุลินทรีย์วิทยาและเทคโนโลยีชีวภาพด้านจุลินทรีย์ในกระเพาะรูเมน.
ภาควิชาสัตวบาล คณะเกษตรกำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน
นครปฐม.

สำนักงานคณะกรรมการการพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ. 2549.โครงการสร้างมูลค่าเพิ่ม
สินค้าเกษตรโดยใช้การพัฒนาแบบ Zero Waste Industry. รายงานฉบับสมบูรณ์

สำนักวิจัย คำนวณพลังงาน (สวค.) กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. ม.ป.ป.

สารอาหาร (Nutrients). แหล่งที่มา: <http://www.kplworldtrading.com/product/biogas-bag>,
10 กรกฎาคม 2554.

เสริมพล รัตสุข และ ไชยยุทธ กลิ่นสุคนธ์. 2527. การกำจัดน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและแหล่ง
ชุมชน. สถาบันวิทยาศาสตร์ประยุกต์แห่งประเทศไทย. กรุงเทพฯ.

สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2548. โครงการศึกษาการเพิ่มศักยภาพการ
ผลิตก๊าซชีวภาพของน้ำเสียจากฟาร์มสุกรในรูปแบบการหมักย่อยร่วมโดยถังปฏิกรณ์
UASB และ CSTR เพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ. เชียงใหม่.

สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. 2548. อัตราส่วนของเสียผสม: เชื้อตั้งต้น.
แหล่งที่มา: <http://www.erdj.or.th>, 10 กรกฎาคม 2554.

Alborés, S., M.J. Pianzola, M. Soubes and M.P. Cerdeiras. 2006. Biodegradation of
agroindustrial wastes by *Pleurotus* spp for its use as ruminant feed. **Electronic Journal
of Biotechnology** 9: 0-0.

American Public Health Association, American Water Works Association, Water Pollution
Control Federation. 2005. **Standard Methods for the Examination of Water and
Wastewater**, 21th ed. American Public Health Association, Washington DC.

Angelidaki, I., and W. Sanders. 2004. Assessment of the anaerobic biodegradability of
macropollutants . **Reviews in Environmental Science and Biotechnology** 3: 117-129.

Animal Feed Resources Information System. 2012. **Napier grass**. Available Source:
<http://www.feedipedia.org/node/12365>, October 10, 2014.

- Ansah, T., E. Osafo and H.H. Hansen. 2010. Herbage yield and chemical composition of four varieties of Napier (*Pennisetum purpureum*) grass harvested at three different days after planting. **Agriculture and Biology Journal of North America** 1: 923-929.
- Buffiere, P., D. Loisel, N. Bernet and J.P. Delgenes. 2006. Towards new indicators for the prediction of solid waste anaerobic digestion properties. **Water Science and Technology** 53: 233-240.
- Burton, C.H. and C. Turner. 2003. Anaerobic treatment options for animal manures. In J.Beck, J. Martinez, W. Martens, O. Pahl, S. Piccinini and I. Svoboda I, eds. **Manure management-treatment strategies for sustainable agriculture**. Silsoe Research Institute, Silsoe, pp. 273–320.
- Cho, J.K., S.C. Park and H.N. Chang. 1995. Biochemical methane potential and solid state anaerobic digestion of Korean food wastes. **Bioresource Technology** 52: 245-253.
- Church, D. C. 1979. **Digestive physiology and nutrition of ruminants** . O & B Books, Inc. Corvallis, Oregon, U.S.A.
- Chynoweth, D., C. Turick, J. Owens, D. Jerger, and M. Peck. 1993. Biochemical methane potential of biomass and waste feedstocks. **Biomass and bioenergy** 5: 95-111.
- Chynoweth, D.P., A.C. Wilkie and J.M. Owens. 1999. Anaerobic treatment of piggery slurry-review. **Australasian Journal of Animal Sciences** 12: 607–628.
- Clavero, T., and R. Razz. 2002. Effect' s of biological additives on silage composition of Mott dwarf elephantgrass and animal performance. **Revista Científica - Facultad de Ciencias Veterinarias** 12 (4): 313-316.

- Cooke, R.L. 2013. **Aerobic and Anaerobic Digestion and Types of Decomposition**. Available
Source: <http://water.me.vccs.edu/courses/ENV149/lesson4b.htm>, October 10, 2014.
- Gelegenis, J., D. Georgakakis, I. Anglidaki and V. Mavris. 2007. Optimization of biogas
production by co-digesting whey with diluted poultry manure. **Renewable Energy** 32:
2147-2160
- Gunaseelan, V. N. 2007. Regression models of ultimate methane yields of fruit and vegetable
solid wastes, sorghum and napier grass on chemical composition. **Bioresource
Technology** 98: 1270-1277.
- Hall, D.O. 1997. Biomass energy in industrialised countries-a view of the future. **Forest Ecology
and Management** 91: 17-45.
- Hansen, T. L., J.E. Schmidt, I. Angelidaki, E. Marca, J.C. Jansen, H. Mosbæk and
T.H. Christensen. 2004. Measurement of Methane potentials of solid organic waste.
Waste Management 24 (4): 393-400.
- Hartmann, H. and B.K. Ahring. 2005. Anaerobic digestion of the organic fraction of municipal
solid waste: influence of co-digestion with manure. **Water Research** 3: 1543-1552.
- Hartmann, H. and B. Ahring. 2006. Strategies for the anaerobic digestion of the organic fraction
of municipal solid waste: an overview. **Water Science and Technology** 53 (8): 7-22.
- Hashimoto, A. G. 1983. Conversion of straw-manure mixtures to methane at mesophilic and
thermophilic temperatures. **Biotechnology and Bioengineering** 25 (1): 185-200.
- Hendriks, A. and G. Zeeman. 2009. Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic
biomass. **Bioresource Technology** 100: 10-18.

Hills, D. J. and D.W. Roberts. 1981. Anaerobic digestion of dairy manure and field crop residues. **Agricultural Wastes** 3 (3): 179-189.

Hu, Z. H. and H.Q. Yu. 2006. Anaerobic digestion of cattail by rumen cultures. **Waste Management** 26 (11): 1222–1228.

Jagadabhi, P. S., A. Lehtomäki and J. Rintala. 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 (10): 1085-1093.

Kadam, K. L., L. H. Forrest and W.A. Jacobson. 2000. Rice straw as a lignocellulosic resource: collection, processing, transportation, and environmental aspects . **Biomass and Bioenergy** 18: 369-389.

Khalid, A., M. Arshad, M. Anjum, T. Mahmood and L. Dawson. 2011. The anaerobic digestion of solid organic waste. **Waste Management** 31 (8): 1737-1744.

Lehtomäki, A. 2006. **Biogas production from energy crops and crop residues**. University of Jyväskylä.

Lehtomaki, A. and L. Bjornsson. 2006. Two-stage anaerobic digestion of energy crops: methane production, nitrogen mineralization and heavy metal mobilisation. **Environmental Technology** 27: 209–218.

Lehtomaki, A., S. Huttunen and J.A. Rintala. 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.

- Lewis, N.G. and L.B. Davin. 1998. The biochemical control of monolignol coupling and structure During lignan and lignin biosynthesis. *In* N.G. Lewis and S. Sarkanen, eds. Lignin and lignan biosynthesis. American Chemical Society, Washington, DC, pp. 334–361.
- Liew, L.N., J. Shi and Y. Li. 2012. Methane production from solid-state anaerobic digestion of lignocellulosic biomass. **Biomass and Bioenergy** 46: 125–132.
- Macias-Corral, M., Z. Samani, A. Hanson, G. Smith, P. Funk, H. Yu and J. Longworth. 2008. Anaerobic digestion of municipal solid waste and agricultural waste and the effect of co-digestion with dairy cow manure. **Bioresource Technology** 99: 8288–8293.
- McCarty, P.L. 1964. Anaerobic waste treatment fundamental part 1, 2, 3, 4. **Public Works** 95 (9): 107-115.
- Metcalf, I. N.C. and Eddy H. 2003. **Wastewater Engineering: Treatment and Reuse**. 4th ed. McGraw-Hill, New York.
- Murphy, J.D. and N.M. Power. 2009. An argument for using biomethane generated from grass as a biofuel in Ireland. **Biomass Bioenergy** 33: 504–512.
- Nizami, A. S., N.E. Korres and J.D. Murphy. 2009. Review of the integrated process for the production of grass biomethane. **Environmental science and technology** 43 (22): 8496-8508.
- Orr, R.M. and J.A. Kirk. 2003. Animal physiology and nutrition. *In* R.J. Soffe, ed. **Primrose McConnell's the agricultural notebook**, 20th ed. Blackwell Publishing, Oxford.
- Owen, W., D. Stuckey, J. Healy Jr, L. Young and P. McCarty. 1979. Bioassay for monitoring biochemical methane potential and anaerobic toxicity. **Water research** 13: 485-492.

- Perez, J., J. Munoz-Dorado, T. De-la-Rubia and J. Martinez. 2002. Biodegradation and biological treatments of cellulose, hemicellulose and lignin: an overview. **International Microbiology** 5: 53–63.
- Rittmann, B. E. and P. L. McCarty. 2001. **Environmental Biotechnology: Principles and Applications**. McGraw-Hill Book Co., New York.
- Salminen, E and J. Rintala. 2002. Anaerobic digestion of organic solid poultry slaughterhouse waste—a review. **Bioresource Technology** 83 (1): 13-26.
- Seppala, M., T. Paavola, A. Lehtomaki and J. Rintala. 2009. Biogas production from boreal herbaceous grasses-specific methane yield and methane yield per hectare. **Bioresource Technology** 100: 2952–2958.
- Shyam, M. and P. Sharma. 1994. Solid-state anaerobic digestion of cattle dung and agro-residues in small-capacity field digesters. **Bioresource Technology** 48: 203-207.
- Sitorus, B. and S.D. Panjaitan. 2013. Biogas recovery from anaerobic digestion process of mixed fruit -vegetable wastes. **Energy Procedia** 32: 176–182.
- Vandevivere, P. 1999. New and broad applications of anaerobic digestion. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology** 29: 151–173.
- Van Soest, P. J. 1982. **Nutrition Ecology of the Ruminant**. O&B Books, Inc. Corvallis, Oregon, U.S.A.
- Wu, X., W. Yao, J. Zhu and C. Miller. 2010. Biogas and CH₄ productivity by co-digesting swine manure with three crop residues as an external carbon source. **Bioresource Technology** 101: 4042–4047.

Yadvika, S., T. R. Sreekrishnan, S. Kohli and V. Rana 2004. Enhancement of biogas production from solid substrates using different techniques—a review. **Bioresource Technology** 95: 1-10.

Ye, J., D. Li, Y. Sun, G. Wang, Z. Yuan, F. Zhen and Y. Wang. 2013. Improved biogas production from rice straw by co-digestion with kitchen waste and pig manure. **Waste Management** 33 (12): 2653–2658.

Zhang, R., H. M. El-Mashad, K. Hartman, F. Wang, G. Liu, C. Choate and P. Gamble. 2007. Characterization of food waste as feedstock for anaerobic digestion. **Bioresource Technology** 98: 929-935.

Zhang, R. and Z. Zhang. 1999. Biogasification of rice straw with an anaerobic-phased solids digester system. **Bioresource Technology** 68: 235-245.



ภาคผนวก



ตารางผนวกที่ ก1 ค่า pH จากการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 1 (ศึกษาสัดส่วนหุ้เนเปียร์และหุ้เนเปียร์ผสมมูลโคที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ) ในแต่ละถังหมัก

Time course (days)	Reactor 1 N : W (10 : 90) ^a	Reactor 2 N : W (20 : 80) ^a	Reactor 3 N : C : W (5 : 5 : 90) ^a	Reactor 4 N : C : W (10 : 10 : 80) ^a	pH adjustment (Reactor/ g NaHCO ₃)
1	6.66	6.82	6.73	6.93	
2	6.63	6.81	6.75	6.89	-
3	6.58	6.82	6.63	6.88	-
4	6.60	6.83	6.60	6.87	-
5	6.59	6.90	6.69	6.92	-
6	6.52	6.83	6.65	6.89	-
7	6.52	6.82	6.61	6.81	-
8	6.44	6.71	6.79	6.56	-
9	6.42	6.74	6.78	6.54	-
10	6.49	6.74	6.60	6.83	-
11	6.41	6.60	6.55	6.71	-
12	6.30	6.55	6.51	6.72	-
13	7.50	7.45	7.55	7.57	-
14	7.58	7.50	7.61	7.60	-
15	7.71	7.62	7.68	7.63	-
16	7.51	7.46	7.64	7.52	-
17	7.54	7.48	7.60	7.54	-
18	7.51	7.46	7.55	7.48	-
19	7.74	7.59	7.74	7.62	-
20	7.89	7.66	7.85	7.70	-
21	7.63	7.47	7.71	7.64	-
22	7.50	7.38	7.62	7.50	-
23	7.45	7.36	7.59	7.43	-
24	7.42	7.35	7.58	7.46	-
25	7.51	7.44	7.66	7.52	-
26	7.43	7.35	7.58	7.41	-
27	7.39	7.34	7.55	7.34	-
28	7.34	7.29	7.49	7.36	-

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time course (days)	Reactor 1 N : W (10 : 90) ^a	Reactor 2 N : W (20 : 80) ^a	Reactor 3 N : C : W (5 : 5 : 90) ^a	Reactor 4 N : C : W (10 : 10 : 80) ^a	pH adjustment (Reactor/ g NaHCO ₃)
29	7.34	7.30	7.48	7.32	-
30	7.48	7.42	7.63	7.47	-
31	7.38	7.29	7.49	7.36	-
32	7.33	7.25	7.48	7.36	-
33	7.30	7.24	7.47	7.36	-
34	7.34	7.29	7.52	7.37	-
35	7.43	7.35	7.61	7.48	-
36	7.25	7.21	7.42	7.32	-
37	7.23	7.17	7.41	7.36	-
38	7.25	7.20	7.41	7.35	-
39	7.24	7.18	7.42	7.37	-
40	7.27	7.16	7.42	7.38	-
41	7.25	7.09	7.42	7.33	-
42	7.18	7.08	7.34	7.31	-
43	7.17	7.04	7.40	7.34	-
44	7.15	7.04	7.41	7.37	-
45	7.27	7.10	7.61	7.55	-
46	7.13	6.91	7.58	7.47	-
47	7.11	6.93	7.64	7.51	-
48	7.10	6.90	7.64	7.52	-
49	7.06	6.89	7.70	7.68	-
50	7.18	6.93	7.83	7.92	-
51	6.92	6.81	7.52	7.61	-
52	6.96	6.82	7.52	7.64	-
53	6.95	6.83	7.54	7.67	-
54	6.95	6.82	7.55	7.80	-
55	7.08	6.87	7.69	7.83	-
56	6.89	6.78	7.53	7.63	-
57	6.89	6.74	7.46	7.56	-

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time course (days)	Reactor 1 N : W (10 : 90) ^a	Reactor 2 N : W (20 : 80) ^a	Reactor 3 N : C : W (5 : 5 : 90) ^a	Reactor 4 N : C : W (10 : 10 : 80) ^a	pH adjustment (Reactor/ g NaHCO ₃)
58	6.91	6.71	7.43	7.53	-
59	6.79	6.68	7.41	7.50	-
60	6.89	6.76	7.58	7.71	-
61	6.84	6.73	7.38	7.44	-
62	6.80	6.64	7.28	7.35	-
63	6.78	6.63	7.29	7.40	-
64	6.79	6.62	7.29	7.45	-
65	6.91	6.67	7.51	7.58	-
66	6.82	6.53	7.36	7.43	-
67	6.72	6.49	7.20	7.29	-
68	6.66	6.41	7.07	7.25	-
69	6.63	6.41	7.06	7.23	-
70	6.76	6.44	7.37	7.55	-
71	6.59	6.35	7.10	7.24	-
72	6.49	6.33	7.07	7.20	-
73	6.45	6.33	7.05	7.18	-
74	6.44	6.32	7.01	7.15	-
75	6.58	6.24	7.20	7.32	-
76	6.60	6.32	7.01	7.24	-
77	6.61	6.34	7.02	7.24	-
78	6.59	6.35	7.03	7.23	-
79	6.54	6.32	7.02	7.23	-
80	6.53	6.31	7.14	7.30	-
81	6.52	6.31	7.25	7.21	-
82	6.42	6.30	7.02	7.22	-
83	6.43	6.29	7.01	7.23	-
84	6.49	6.30	7.03	7.22	-
85	6.45	6.30	7.03	7.29	-

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Time course (days)	Reactor 1 N : W (10 : 90) ^a	Reactor 2 N : W (20 : 80) ^a	Reactor 3 N : C : W (5 : 5 : 90) ^a	Reactor 4 N : C : W (10 : 10 : 80) ^a	pH adjustment (Reactor/ g NaHCO ₃)
Initial pH	7.50	7.50	7.50	7.50	-
pH at steady state ^b	6.66	6.47	7.21	7.35	-

หมายเหตุ ^a สัดส่วนเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักสด, ^b ระยะเวลาที่ระบบอยู่ในสภาวะคงที่ (Steady state) วันที่ 56 – 85, N คือหญ้าเนเปียร์, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค และ FW คือน้ำหนักสด

ตารางผนวกที่ ก2 ปริมาตรก๊าซทั้งหมดที่ผลิตได้ ปริมาตรก๊าซทั้งหมดที่ผลิตได้ที่ STP ปริมาณเปอร์เซ็นต์มีเทน และปริมาณมีเทนที่ผลิตได้ที่ STP จากการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 1 (ศึกษาสัดส่วนหุ้ยานเปียร์และหุ้ยานเปียร์ผสมมูลโคที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ) ในแต่ละถังหมัก

Time course (days)	Reactor 1				Reactor 2				Reactor 3				Reactor 4			
	N : W (10 : 90) ^a				N : W (20 : 80) ^a				N : C : W (5 : 5 : 90) ^a				N : C : W (10 : 10 : 80) ^a			
	Total gas	Total gas	CH ₄	CH ₄ ^c	Total gas	Total gas	CH ₄	CH ₄ ^c	Total gas	Total gas	CH ₄	CH ₄ ^c	Total gas	Total gas	CH ₄	CH ₄ ^c
	(ml/day)	(ml/day)	(%)	(ml/day)	(ml/day)	(ml/day)	(%)	(ml/day)	(ml/day)	(ml/day)	(%)	(ml/day)	(ml/day)	(ml/day)	(%)	(ml/day)
	at STP ^b			at STP	at STP ^b			at STP	at STP ^b			at STP	at STP ^b			at STP
1	1031	942	11.92	112	1093	999	15.70	157	671	613	6.67	41	343	314	2.72	9
2	510	466	11.22	52	580	530	15.34	81	440	402	12.34	50	460	420	13.72	58
3	580	530	14.35	76	603	551	16.63	92	512	468	12.88	60	476	435	14.75	64
4	373	341	9.49	32	444	406	6.42	26	393	359	8.96	32	246	225	8.85	20
5	410	375	6.48	24	403	368	2.45	9	405	370	2.95	11	279	255	2.32	6
6	275	251	2.62	7	375	343	1.17	4	236	216	1.80	4	209	191	2.15	4
7	179	164	7.45	12	395	361	10.30	37	198	181	7.85	14	273	250	8.06	20
8	248	227	8.40	19	538	492	16.50	81	250	229	8.45	19	234	214	8.49	18
9	130	119	8.21	10	420	384	15.30	59	245	224	9.65	22	224	205	12.44	25
10	157	144	8.27	12	444	406	13.51	55	230	210	12.83	27	280	256	14.55	37
11	96	88	6.57	6	620	567	17.46	99	196	179	9.23	17	291	266	10.37	28
12	232	212	7.83	17	997	911	14.07	128	145	133	12.51	17	459	420	17.24	72
13	118	108	7.33	8	347	317	14.12	45	232	212	12.46	26	314	287	17.14	49
14	183	167	7.21	12	239	218	14.34	31	180	165	12.53	21	210	192	17.35	33

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

Time	Reactor 1				Reactor 2				Reactor 3				Reactor 4			
course	N : W (10 : 90) ^a				N : W (20 : 80) ^a				N : C : W (5 : 5 : 90) ^a				N : C : W (10 : 10 : 80) ^a			
(days)	Total gas	Total gas	CH ₄	CH ₄ ^c	Total gas	Total gas	CH ₄	CH ₄ ^c	Total gas	Total gas	CH ₄	CH ₄ ^c	Total gas	Total gas	CH ₄	CH ₄ ^c
	(ml/day)	(ml/day)	(%)	(ml/day)	(ml/day)	(ml/day)	(%)	(ml/day)	(ml/day)	(ml/day)	(%)	(ml/day)	(ml/day)	(ml/day)	(%)	(ml/day)
	at STP ^b			at STP		at STP ^b		at STP		at STP ^b		at STP		at STP ^b		at STP
15	185	169	7.49	13	245	224	14.55	33	193	176	12.68	22	234	214	17.43	37
16	32	29	3.21	1	120	110	5.42	6	34	31	4.11	1	112	102	9.31	10
17	53	48	3.75	2	199	182	5.56	10	61	56	4.76	3	227	208	9.42	20
18	38	35	3.84	1	142	130	8.29	11	0	0	5.56	0	287	262	11.05	29
19	48	44	3.93	2	155	142	8.17	12	116	106	6.19	7	265	242	10.40	25
20	100	91	4.31	4	319	292	9.14	27	0	0	7.05	0	98	90	8.79	8
21	105	96	3.39	3	541	495	9.11	45	85	78	5.79	4	119	109	6.77	7
22	165	151	7.30	11	611	559	24.33	136	133	122	9.11	11	218	199	13.74	27
23	119	109	9.12	10	429	392	13.09	51	105	96	11.84	11	259	237	18.11	43
24	134	122	11.23	14	365	334	14.13	47	43	39	12.46	5	267	244	18.20	44
25	217	198	15.72	31	456	417	15.48	65	67	61	13.01	8	391	357	18.38	66
26	198	181	13.79	25	360	329	15.78	52	95	87	11.90	10	295	270	17.63	48
27	276	252	14.85	37	448	410	15.12	62	182	166	14.25	24	429	392	21.65	85
28	211	193	17.63	34	525	480	15.77	76	152	139	17.77	25	142	130	21.78	28
29	149	136	17.56	24	484	442	14.69	65	159	145	19.70	29	129	118	21.25	25

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

Time course (days)	Reactor 1				Reactor 2				Reactor 3				Reactor 4			
	N : W (10 : 90) ^a				N : W (20 : 80) ^a				N : C : W (5 : 5 : 90) ^a				N : C : W (10 : 10 : 80) ^a			
	Total gas	Total gas	CH ₄	CH ₄ ^c	Total gas	Total gas	CH ₄	CH ₄ ^c	Total gas	Total gas	CH ₄	CH ₄ ^c	Total gas	Total gas	CH ₄	CH ₄ ^c
	(ml/day)	(ml/day)	(%)	(ml/day)	(ml/day)	(ml/day)	(%)	(ml/day)	(ml/day)	(ml/day)	(%)	(ml/day)	(ml/day)	(ml/day)	(%)	(ml/day)
	at STP ^b			at STP		at STP ^b		at STP		at STP ^b		at STP		at STP ^b		at STP
30	216	197	13.80	27	332	303	14.58	44	212	194	17.64	34	398	364	19.14	70
31	273	250	9.70	24	708	647	15.89	103	238	218	12.84	28	365	334	17.94	60
32	238	218	12.67	28	634	580	18.58	108	228	208	16.20	34	465	425	22.68	96
33	339	310	16.88	52	645	590	17.25	102	276	252	20.44	52	510	466	24.79	116
34	267	244	13.65	33	474	433	15.66	68	266	243	17.17	42	579	529	19.06	101
35	249	228	14.62	33	424	388	15.50	60	229	209	21.82	46	385	352	21.27	75
36	353	323	13.60	44	819	749	22.86	171	339	310	17.32	54	566	517	27.06	140
37	231	211	15.76	33	323	295	22.36	66	221	202	21.93	44	578	528	30.11	159
38	320	293	19.84	58	433	396	18.59	74	315	288	23.70	68	634	580	32.36	188
39	192	176	20.80	37	225	206	18.48	38	236	216	25.49	55	436	399	33.20	132
40	211	193	22.17	43	340	311	21.98	68	281	257	34.32	88	626	572	35.86	205
41	195	178	14.42	26	658	601	19.59	118	379	346	24.53	85	698	638	35.73	228
42	298	272	19.45	53	534	488	22.31	109	527	482	33.38	161	881	805	38.88	313
43	289	264	21.19	56	656	600	19.74	118	494	452	35.18	159	937	857	39.47	338
44	232	212	21.32	45	486	444	19.34	86	642	587	37.41	220	983	899	41.97	377

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

Time	Reactor 1				Reactor 2				Reactor 3				Reactor 4			
course	N : W (10 : 90) ^a				N : W (20 : 80) ^a				N : C : W (5 : 5 : 90) ^a				N : C : W (10 : 10 : 80) ^a			
(days)	Total gas	Total gas	CH ₄	CH ₄ ^c	Total gas	Total gas	CH ₄	CH ₄ ^c	Total gas	Total gas	CH ₄	CH ₄ ^c	Total gas	Total gas	CH ₄	CH ₄ ^c
	(ml/day)	(ml/day)	(%)	(ml/day)	(ml/day)	(ml/day)	(%)	(ml/day)	(ml/day)	(ml/day)	(%)	(ml/day)	(ml/day)	(ml/day)	(%)	(ml/day)
	at STP ^b			at STP	at STP ^b			at STP	at STP ^b			at STP	at STP ^b			at STP
45	327	299	21.48	64	508	464	18.73	87	687	628	51.12	321	1052	962	45.13	434
46	352	322	15.34	49	998	912	19.78	180	856	782	40.64	318	1139	1041	51.31	534
47	453	414	18.51	77	878	803	18.83	151	1151	1052	55.39	583	1786	1633	53.65	876
48	275	251	16.31	41	494	452	17.73	80	1010	923	50.08	462	1423	1301	58.44	760
49	251	229	20.20	46	461	421	19.52	82	1023	935	60.27	564	1775	1623	61.03	990
50	210	192	19.24	37	381	348	19.28	67	895	818	48.20	394	1489	1361	63.04	858
51	227	208	16.56	34	439	401	20.31	82	692	633	40.55	257	1341	1226	53.31	653
52	477	436	18.73	82	585	535	20.81	111	1055	964	52.57	507	1576	1441	60.43	871
53	328	300	21.45	64	673	615	22.67	139	944	863	50.39	435	1632	1492	58.54	873
54	272	249	20.00	50	496	453	21.08	96	669	612	56.73	347	992	907	59.81	542
55	161	147	18.78	28	387	354	18.04	64	687	628	50.46	317	1093	999	58.81	588
56	334	305	12.39	38	498	455	18.34	83	833	761	40.72	310	1219	1114	56.51	630
57	431	394	16.23	64	673	615	22.39	138	1045	955	42.18	403	1388	1269	56.16	713
58	347	317	17.38	55	582	532	22.13	118	863	789	50.21	396	1336	1221	54.34	664
59	241	220	20.94	46	472	431	23.69	102	655	599	53.78	322	1251	1235	52.32	646

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

Time	Reactor 1				Reactor 2				Reactor 3				Reactor 4			
course	N : W (10 : 90) ^a				N : W (20 : 80) ^a				N : C : W (5 : 5 : 90) ^a				N : C : W (10 : 10 : 80) ^a			
(days)	Total gas	Total gas	CH ₄	CH ₄ ^c	Total gas	Total gas	CH ₄	CH ₄ ^c	Total gas	Total gas	CH ₄	CH ₄ ^c	Total gas	Total gas	CH ₄	CH ₄ ^c
	(ml/day)	(ml/day)	(%)	(ml/day)	(ml/day)	(ml/day)	(%)	(ml/day)	(ml/day)	(ml/day)	(%)	(ml/day)	(ml/day)	(ml/day)	(%)	(ml/day)
	at STP ^b			at STP		at STP ^b		at STP		at STP ^b		at STP		at STP ^b		at STP
60	256	234	15.55	36	395	361	18.14	65	810	740	34.14	253	1003	917	46.15	423
61	324	296	10.89	32	421	385	17.99	69	871	796	28.02	223	1216	1112	41.33	459
62	363	332	14.13	47	617	564	23.32	132	944	863	44.16	381	1470	1344	48.51	652
63	331	303	18.71	57	547	500	23.76	119	1035	946	30.88	292	1553	1420	51.22	727
64	282	258	13.71	35	564	516	20.43	105	968	885	46.53	412	1212	1108	36.71	407
65	362	331	9.74	32	349	319	18.53	59	808	739	38.90	287	1341	1226	46.25	567
66	231	211	12.93	27	487	445	18.21	81	768	702	29.13	205	1081	988	43.45	429
67	374	342	14.59	50	590	539	29.70	160	954	872	39.15	341	1388	1269	51.88	658
68	403	368	14.80	55	685	626	19.66	123	1034	945	47.37	448	1542	1410	46.68	658
69	384	351	20.88	73	440	402	21.72	87	963	880	37.55	331	1473	1346	48.22	649
70	289	264	15.93	42	377	345	19.05	66	856	782	40.04	313	1244	1137	47.05	535
71	264	241	9.68	23	496	453	10.72	49	612	559	33.75	189	1162	1062	41.47	440
72	365	334	14.12	47	582	532	27.32	145	835	763	38.21	292	1254	1146	46.22	530
73	355	325	15.63	51	655	599	20.67	124	943	862	47.91	413	1265	1156	49.17	569
74	323	295	19.43	57	588	537	21.44	115	980	896	51.29	459	1477	1350	59.36	801

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

Time course (days)	Reactor 1				Reactor 2				Reactor 3				Reactor 4			
	N : W (10 : 90) ^a				N : W (20 : 80) ^a				N : C : W (5 : 5 : 90) ^a				N : C : W (10 : 10 : 80) ^a			
	Total gas	Total gas	CH ₄	CH ₄ ^c	Total gas	Total gas	CH ₄	CH ₄ ^c	Total gas	Total gas	CH ₄	CH ₄ ^c	Total gas	Total gas	CH ₄	CH ₄ ^c
	(ml/day)	(ml/day)	(%)	(ml/day)	(ml/day)	(ml/day)	(%)	(ml/day)	(ml/day)	(ml/day)	(%)	(ml/day)	(ml/day)	(ml/day)	(%)	(ml/day)
	at STP ^b				at STP ^b				at STP ^b				at STP ^b			
75	294	269	11.11	30	417	381	14.88	57	647	591	43.49	257	1256	1148	41.58	477
76	291	266	10.32	27	484	442	15.23	67	743	679	30.21	205	1243	1136	47.11	535
77	393	359	15.43	55	565	516	25.98	134	852	779	38.32	298	1265	1156	50.32	582
78	364	333	16.32	54	675	617	20.44	126	1041	952	45.14	430	1354	1238	52.92	655
79	378	346	12.74	44	617	564	21.26	120	937	857	50.93	436	1493	1365	54.47	743
80	328	300	14.15	42	482	441	15.30	67	832	761	41.76	318	1231	1125	49.23	554
81	284	260	11.43	30	419	383	14.21	54	639	584	29.74	174	1249	1142	44.43	507
82	385	352	14.21	50	618	565	27.03	153	873	798	40.13	320	1391	1272	48.03	611
83	375	343	16.22	56	671	613	21.67	133	1078	985	47.32	466	1447	1323	51.19	677
84	323	295	12.39	37	458	419	23.43	98	939	858	50.47	433	1376	1258	50.64	637
85	274	250	16.71	42	368	336	17.19	58	735	672	40.63	273	1172	1071	49.46	530
Average ^d	332	303	14.62	45	526	481	20.46	100	870	795	41.07	329	1312	1202	48.75	589

ตารางผนวกที่ ก2 (ต่อ)

หมายเหตุ ^a สัดส่วน% FW, ^b วิธีคำนวณปริมาตรก๊าซทั้งหมดที่ผลิตได้ต่อวันที่ STP แสดงดังภาคผนวก ข, ^c ปริมาตรก๊าซมีเทนที่ผลิตได้ต่อวันมาจาก ผลคูณระหว่างปริมาตรก๊าซทั้งหมดกับเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทน, ^d ค่าเฉลี่ยในช่วงระยะเวลาที่ระบบอยู่ในสภาวะคงที่ (Steady state) วันที่ 56 - 85, N คือ Һุ้เเเปียะ, W คือน้ำประปา, C คือนมูโค และ FW คือน้ำหนักสด

ตารางผนวกที่ ก3 ปริมาตรมีเทนที่ผลิตได้รวมทุก 5 วัน^a (ที่ STP) จากการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 1
(ศึกษาสัดส่วนหุ้ยเอนเปียร์และหุ้ยเอนเปียร์ผสมมูลโคที่เหมาะสมในการผลิต
ก๊าซชีวภาพ) ในแต่ละถังหมัก

	(ml/5days)			
Time course	Reactor 1	Reactor 2	Reactor 3	Reactor 4
(days)	N : W (10 : 90) ^b	N : W (20 : 80) ^b	N : C : W (5 : 5 : 90) ^b	N : C : W (10 : 10 : 80) ^b
5	297	365	194	156
10	59	236	86	105
15	55	336	103	220
20	10	65	10	91
25	69	344	40	188
30	148	299	122	255
35	171	440	201	448
40	214	417	309	824
45	244	518	945	1690
50	250	561	2321	4019
55	258	492	1862	3527
60	239	548	1684	3075
65	203	499	1595	2812
70	247	591	1638	2930
75	208	493	1610	2818
80	224	548	1687	3070
85	214	539	1666	2962
Average ^c	223	536	1647	2944

หมายเหตุ ^a ปริมาตรมีเทนที่ผลิตได้ ในแต่ละรอบของการเติมสารละลายผสมหุ้ยเอนเปียร์ (มีการเติมทุก ๆ 5 วัน), ^b สัดส่วนเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักสด, ^c ค่าเฉลี่ยในช่วงระยะเวลาที่ระบบอยู่ในสภาวะคงที่ (Steady state) วันที่ 56 – 85, N คือหุ้ยเอนเปียร์, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค และ FW คือน้ำหนักสด

ตารางผนวกที่ ก4 ค่า COD เฉลี่ยของสารละลายผสมหุ้ยนเปียร์ที่เติมเข้าระบบของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 1 (ศึกษาสัดส่วนหุ้ยนเปียร์และหุ้ยนเปียร์ผสมมูลโคที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ) ในแต่ละถังหมัก

Reactor	Mixed culture	Substrate	Ratio (% FW)	COD (g/L)
1	RC	N : W	10 : 90	15.75
2	RC	N : W	20 : 80	27.04
3	RC	N : C : W	5 : 5 : 90	26.84
4	RC	N : C : W	10 : 10 : 80	32.93

หมายเหตุ N คือหุ้ยนเปียร์, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค, RC คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักโค และ FW คือน้ำหนักสด

ตารางผนวกที่ ก5 ค่า COD ของสารละลายผสมหุ้ยนเปียร์ที่ออกจากระบบของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 1 (ศึกษาสัดส่วนหุ้ยนเปียร์และหุ้ยนเปียร์ผสมมูลโคที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ) ในแต่ละถังหมัก

(g/L)				
Time course (days)	Reactor 1 N : W (10 : 90) ^a	Reactor 2 N : W (20 : 80) ^a	Reactor 3 N : C : W (5 : 5 : 90) ^a	Reactor 4 N : C : W (10 : 10 : 80) ^a
60	9.19	17.28	7.48	13.44
65	10.56	16.64	6.51	12.59
70	9.39	15.47	5.98	10.46
75	9.39	15.79	5.12	10.99
80	9.93	17.46	5.86	11.08
85	8.55	16.47	5.84	10.11
Average	9.50	16.52	6.13	11.44

หมายเหตุ ^a สัดส่วนเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักสด, N คือหุ้ยนเปียร์, W คือน้ำประปา และ C คือมูลโค

ตารางผนวกที่ 6 ค่า TVS เฉลี่ยของสารละลายผสมเหี่ยวเนเปียร์ที่เติมเข้าระบบของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 1 (ศึกษาสัดส่วนเหี่ยวเนเปียร์และเหี่ยวเนเปียร์ผสมมูลโคที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ) ในแต่ละถังหมัก

Reactor	Mixed culture	Substrate	Ratio (% FW)	TVS (g/L)
1	RC	N : W	10 : 90	9.88
2	RC	N : W	20 : 80	17.56
3	RC	N : C : W	5 : 5 : 90	19.67
4	RC	N : C : W	10 : 10 : 80	27.87

หมายเหตุ N คือเหี่ยวเนเปียร์, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค, RC คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักโค และ FW คือน้ำหนักสด

ตารางผนวกที่ 7 ค่า TVS ของสารละลายผสมเหี่ยวเนเปียร์ที่ออกจากระบบของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 1 (ศึกษาสัดส่วนเหี่ยวเนเปียร์และเหี่ยวเนเปียร์ผสมมูลโคที่ใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพ) ในแต่ละถังหมัก

(g/L)				
Time course (days)	Reactor 1 N : W (10 : 90) ^a	Reactor 2 N : W (20 : 80) ^a	Reactor 3 N : C : W (5 : 5 : 90) ^a	Reactor 4 N : C : W (10 : 10 : 80) ^a
60	8.08	12.74	6.98	12.08
65	5.14	9.70	4.24	6.70
70	5.22	9.12	3.96	7.32
75	6.30	9.62	5.88	9.40
80	7.68	12.12	5.34	9.86
85	7.62	11.52	4.74	9.68
Average	6.68	10.81	5.19	9.18

หมายเหตุ ^a สัดส่วนเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักสด, N คือเหี่ยวเนเปียร์, W คือน้ำประปา และ C คือมูลโค

ตารางผนวกที่ 8 ค่า TS เฉลี่ยของสารละลายผสมหุ้ยนเปียร์ที่เติมเข้าระบบของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 1 (ศึกษาสัดส่วนหุ้ยนเปียร์และหุ้ยนเปียร์ผสมมูลโคที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ) ในแต่ละถังหมัก

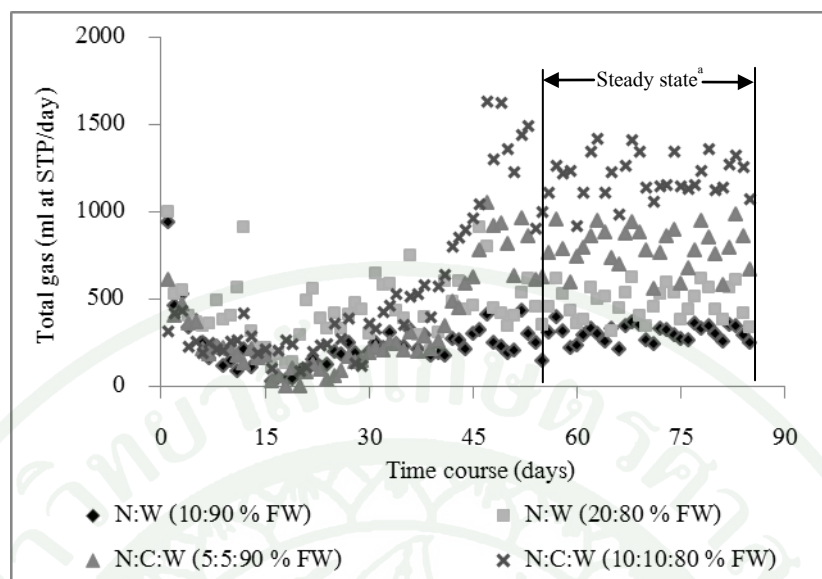
Reactor	Mixed culture	Substrate	Ratio (% FW)	TS (g/L)
1	RC	N : W	10 : 90	11.50
2	RC	N : W	20 : 80	22.09
3	RC	N : C : W	5 : 5 : 90	22.72
4	RC	N : C : W	10 : 10 : 80	33.08

หมายเหตุ N คือหุ้ยนเปียร์, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค, RC คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักโค และ FW คือน้ำหนักสด

ตารางผนวกที่ 7 ค่า TS ของสารละลายผสมหุ้ยนเปียร์ที่ออกจากระบบของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 1 (ศึกษาสัดส่วนหุ้ยนเปียร์และหุ้ยนเปียร์ผสมมูลโคที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ) ในแต่ละถังหมัก

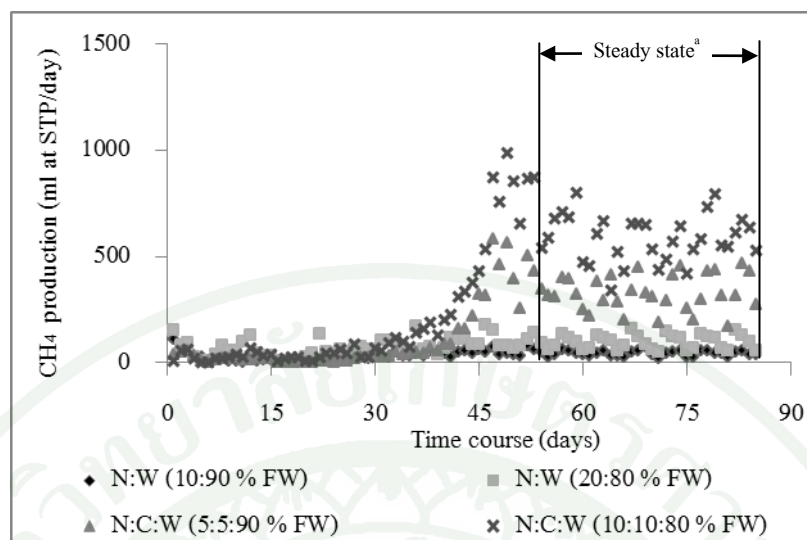
Time course (days)	Reactor 1	Reactor 2	Reactor 3	Reactor 4
	N : W (10 : 90) ^a	N : W (20 : 80) ^a	N : C : W (5 : 5 : 90) ^a	N : C : W (10 : 10 : 80) ^a
60	8.92	17.14	12.88	18.48
65	8.28	18.32	14.70	18.46
70	8.92	18.88	14.66	18.92
75	8.38	16.32	14.12	19.54
80	9.58	17.50	13.30	19.54
85	9.46	17.16	13.54	19.74
Average	8.93	17.56	13.87	19.12

หมายเหตุ ^a สัดส่วนเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักสด, N คือหุ้ยนเปียร์, W คือน้ำประปา และ C คือมูลโค



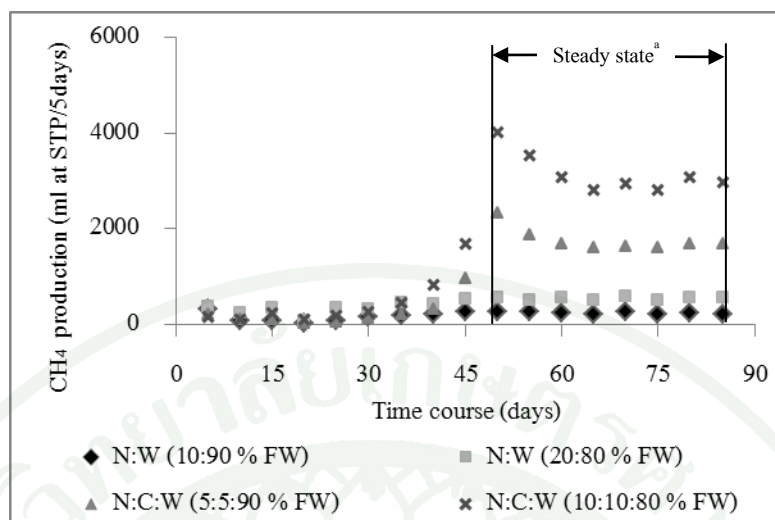
ภาพผนวกที่ ก1 ปริมาณก๊าซทั้งหมดที่ผลิตได้ (ml/day) ที่ STP ของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 1 (ศึกษาสัดส่วนหุ้เนเปียร์และหุ้เนเปียร์ผสมมูลโคที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ) ในแต่ละถังหมัก

หมายเหตุ ^a ระยะเวลาที่ระบบอยู่ในสภาวะคงที่ (Steady state) วันที่ 56 – 85, N คือหุ้เนเปียร์, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค และ FW คือน้ำหนักสด



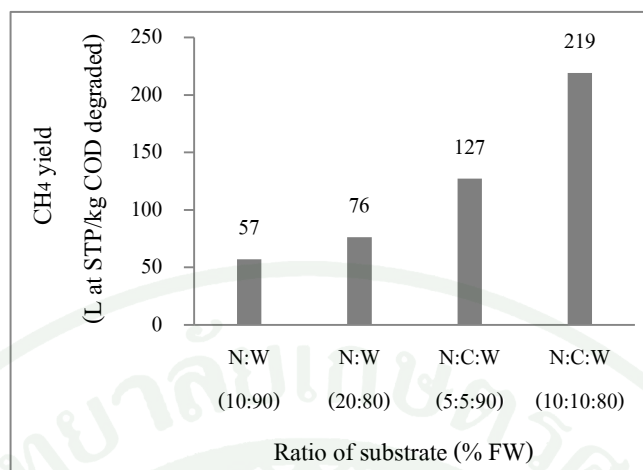
ภาพผนวกที่ ๒ ปริมาตรมีเทน (ml/day) ที่ STP ของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 1 (ศึกษาสัดส่วน
 หญ้าเนเปียร์และหญ้าเนเปียร์ผสมมูลโคที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ) ในแต่
 ละถังหมัก

หมายเหตุ ^a ระยะเวลาที่ระบบอยู่ในสภาวะคงที่ (Steady state) วันที่ 56 – 85, N คือหญ้าเนเปียร์,
 W คือน้ำประปา, C คือมูลโค และ FW คือน้ำหนักสด



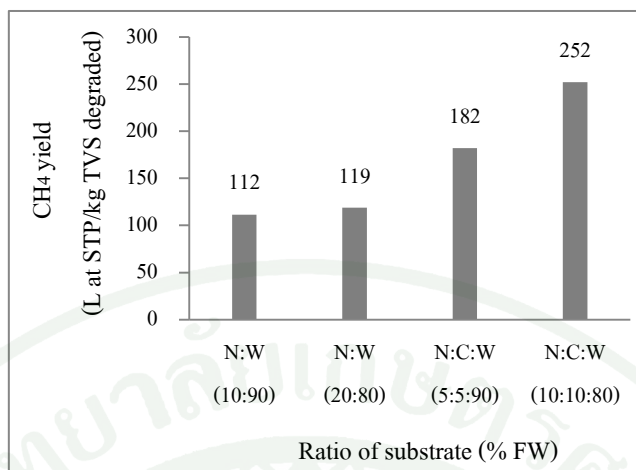
ภาพผนวกที่ 3 ปริมาตรมีเทนรวมทุก 5 วัน (ml/5days) ที่ STP ของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 1 (ศึกษาสัดส่วนหุ้เนเปียร์และหุ้เนเปียร์ผสมมูลโคที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ) ในแต่ละถังหมัก

หมายเหตุ ^a ระยะเวลาที่ระบบอยู่ในสภาวะคงที่ (Steady state) วันที่ 56 - 85, N คือหุ้เนเปียร์, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค และ FW คือน้ำหนักสด



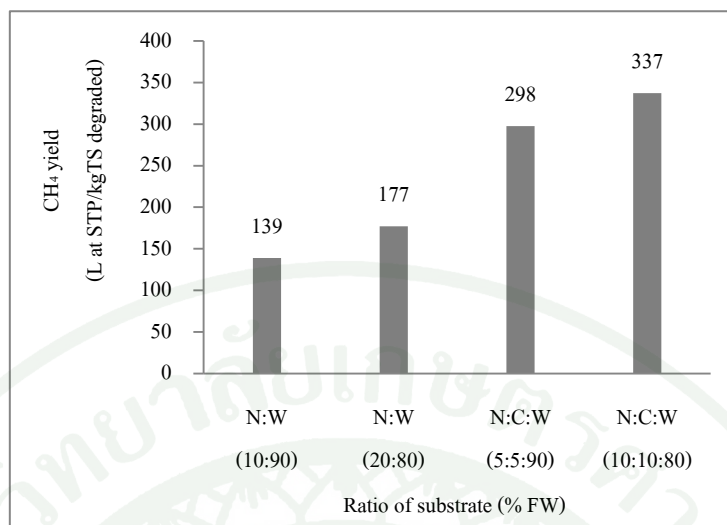
ภาพผนวกที่ ก4 ผลผลิตมีเทน (L at STP/kg COD degraded) ที่ STP ของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 1 (ศึกษาสัดส่วนหัวเนเปียร์และหัวเนเปียร์ผสมมูลโคที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ) ในแต่ละถังหมัก

หมายเหตุ N คือหัวเนเปียร์, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค และ FW คือน้ำหนักสด



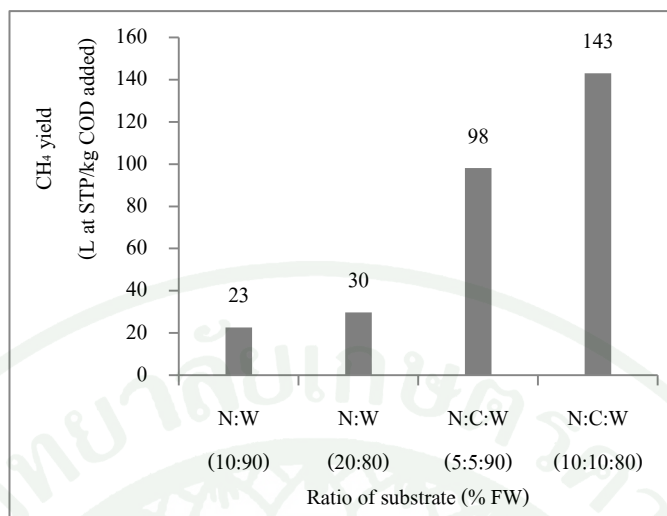
ภาพผนวกที่ ๓5 ผลผลิตมีเทน (L at STP/kg TVS degraded) ที่ STP ของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 1 (ศึกษาสัดส่วนหุ้เนเปียร์และหุ้เนเปียร์ผสมมูลโคที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ) ในแต่ละถังหมัก

หมายเหตุ N คือหุ้เนเปียร์, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค และ FW คือน้ำหนักสด



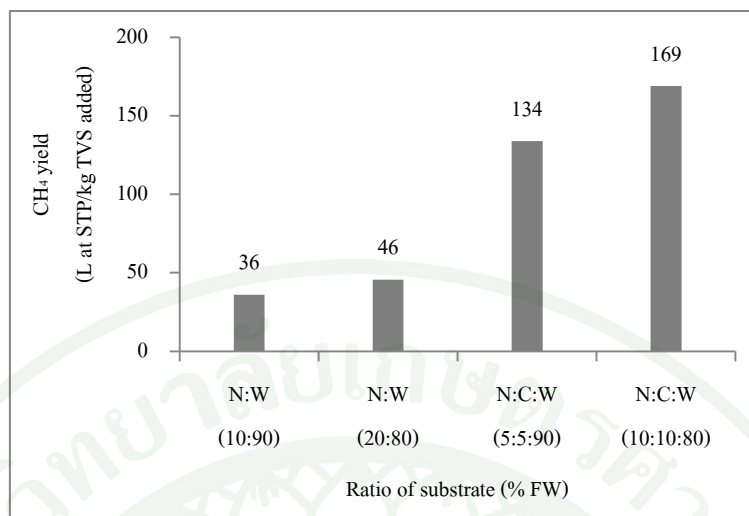
ภาพผนวกที่ 6 ผลผลิตมีเทน (L at STP/kg TS degraded) ที่ STP ของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 1 (ศึกษาสัดส่วนหุ้เนเปียร์และหุ้เนเปียร์ผสมมูลโคที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ) ในแต่ละถังหมัก

หมายเหตุ N คือหุ้เนเปียร์, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค และ FW คือน้ำหนักสด



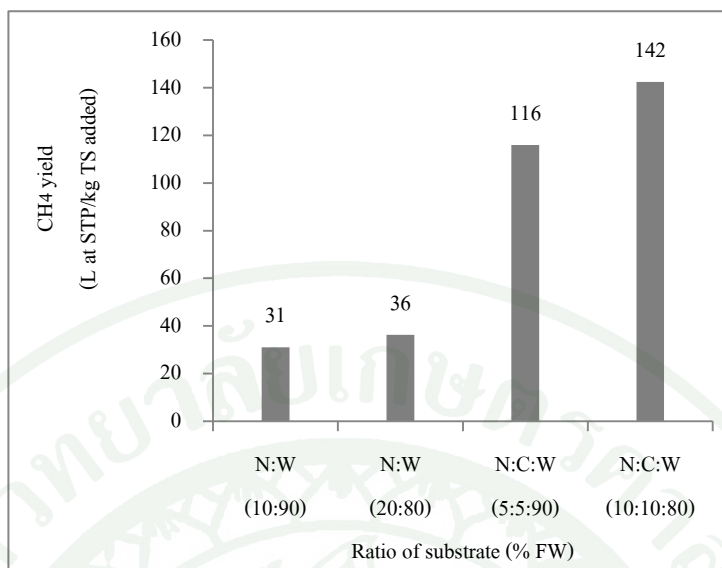
ภาพผนวกที่ ๗ ผลผลิตมีเทน (L at STP/kg COD added) ที่ STP ของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 1 (ศึกษาสัดส่วนหุ้เนเปียร์และหุ้เนเปียร์ผสมมูลโคที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ) ในแต่ละถังหมัก

หมายเหตุ N คือหุ้เนเปียร์, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค และ FW คือน้ำหนักสด



ภาพผนวกที่ 8 ผลผลิตมีเทน (L at STP/kg TVS added) ที่ STP ของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 1 (ศึกษาสัดส่วนหุ้เนเปียร์และหุ้เนเปียร์ผสมมูลโคที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ) ในแต่ละถังหมัก

หมายเหตุ N คือหุ้เนเปียร์, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค และ FW คือน้ำหนักสด



ภาพผนวกที่ ก9 ผลผลิตมีเทน (L at STP/kg TS added) ที่ STP ของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 1 (ศึกษาสัดส่วนหุ้เนเปียร์และหุ้เนเปียร์ผสมมูลโคที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ) ในแต่ละถังหมัก

หมายเหตุ N คือหุ้เนเปียร์, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค และ FW คือน้ำหนักสด

ตารางผนวกที่ ก10 ค่า pH จากการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมัก
หญ้าเนเปียร์ และการหมักหญ้าเนเปียร์ร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้น
จากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก

Time course (days)	RC		RB		pH adjustment (Reactor/g NaHCO ₃)
	Reactor 1	Reactor 2	Reactor 3	Reactor 4	
	N : W	N : W	N : C : W	N : C : W	
	(10 : 90) ^a	(20 : 80) ^a	(5 : 5 : 90) ^a	(10 : 10 : 80) ^a	
1	7.67	7.65	7.58	7.62	-
2	7.57	7.62	7.59	7.64	-
3	7.76	7.75	7.81	7.84	-
4	7.75	7.80	7.82	7.86	-
5	7.73	7.81	7.84	7.90	-
6	7.46	7.59	7.63	7.67	-
7	7.55	7.51	7.50	7.60	-
8	7.53	7.58	7.63	7.67	-
9	7.41	7.40	7.43	7.59	-
10	7.73	7.69	7.72	7.80	-
11	7.16	7.17	7.22	7.34	-
12	7.17	7.17	7.21	7.34	-
13	7.16	7.19	7.21	7.32	-
14	7.13	7.17	7.24	7.30	-
15	7.57	7.57	7.48	7.49	-
16	6.91	7.05	7.17	7.24	1,2,3/30
17	6.93	7.04	7.18	7.31	-
18	7.02	7.09	7.24	7.35	-
19	7.10	7.12	7.51	7.50	-
20	7.40	7.62	7.63	7.65	-
21	7.14	7.11	7.37	7.41	-
22	6.99	7.12	7.21	7.29	-
23	6.95	7.04	7.20	7.33	-
24	6.99	7.13	7.34	7.38	1/30
25	7.34	7.22	7.60	7.85	-
26	7.20	6.94	7.12	7.42	-

ตารางผนวกที่ ก10 (ต่อ)

Time course (days)	RC		RB		pH adjustment (Reactor/g NaHCO ₃)
	Reactor 1	Reactor 2	Reactor 3	Reactor 4	
	N : W	N : W	N : C : W	N : C : W	
	(10 : 90) ^a	(20 : 80) ^a	(5 : 5 : 90) ^a	(10 : 10 : 80) ^a	
27	7.05	6.98	7.05	7.36	-
28	7.04	6.92	7.12	7.36	-
29	7.11	6.73	7.06	7.50	-
30	7.18	6.99	7.32	7.55	-
31	6.81	6.95	6.96	7.25	-
32	6.83	6.87	6.96	7.25	-
33	6.83	6.84	6.95	7.23	-
34	6.96	6.54	7.08	7.35	-
35	7.15	6.87	7.29	7.58	-
36	6.88	6.76	6.95	7.24	1,2,3/30
37	6.96	6.63	7.01	7.25	-
38	6.91	6.73	7.04	7.29	-
39	6.98	6.77	7.12	7.32	-
40	7.13	6.72	7.28	7.56	-
41	6.91	6.56	7.24	7.37	-
42	7.00	6.57	7.23	7.27	-
43	6.76	6.61	7.25	7.17	-
44	6.92	6.58	7.31	7.27	-
45	7.38	6.72	7.24	7.70	-
46	7.17	6.61	7.16	7.45	-
47	7.21	6.59	7.07	7.33	-
48	7.19	6.42	6.88	7.09	-
49	7.31	6.47	7.30	7.31	-
50	7.36	6.87	7.29	7.78	-
51	7.22	6.51	7.37	7.37	-
52	7.20	6.49	7.32	7.31	-
53	7.29	6.52	7.22	7.23	-
54	7.30	6.50	7.34	7.34	-
55	7.59	6.62	7.79	7.59	-

ตารางผนวกที่ ก10 (ต่อ)

Time course (days)	RC		RB		pH adjustment (Reactor/g NaHCO ₃)
	Reactor 1	Reactor 2	Reactor 3	Reactor 4	
	N : W	N : W	N : C : W	N : C : W	
	(10 : 90) ^a	(20 : 80) ^a	(5 : 5 : 90) ^a	(10 : 10 : 80) ^a	
56	6.98	6.42	6.91	6.95	-
57	6.76	7.42	6.77	6.60	-
58	7.08	7.46	7.01	7.30	1,3/30
59	7.10	7.56	7.21	7.32	-
60	7.16	7.68	7.43	7.71	-
61	6.78	7.49	6.96	7.39	-
62	6.75	7.21	6.81	7.15	-
63	6.78	7.17	6.65	7.02	-
64	6.81	7.18	6.73	7.21	-
65	7.09	7.53	7.28	7.56	-
66	6.78	7.14	6.78	7.18	-
67	6.75	6.93	6.76	6.95	-
68	6.71	6.83	6.74	6.90	-
69	6.78	6.98	6.80	6.94	-
70	6.88	7.31	6.58	7.31	-
71	6.57	7.08	6.62	6.93	-
72	6.71	6.83	6.56	6.82	-
73	6.72	7.10	6.67	6.98	-
74	6.80	7.15	6.80	6.99	-
75	6.79	7.47	6.82	7.33	-
76	6.58	6.82	6.57	6.64	-
77	6.93	7.39	6.95	7.13	-
78	6.92	7.22	6.91	7.02	-
79	7.54	7.86	7.02	7.69	-
80	7.73	8.13	7.24	8.11	-
81	7.02	7.42	6.95	7.51	-
82	6.95	7.64	6.83	7.70	-
83	6.82	7.59	6.78	7.59	-
84	7.10	7.79	6.79	7.72	-

ตารางผนวกที่ ก10 (ต่อ)

Time course (days)	RC		RB		pH adjustment (Reactor/g NaHCO ₃)
	Reactor 1	Reactor 2	Reactor 3	Reactor 4	
	N : W	N : W	N : C : W	N : C : W	
	(10 : 90) ^a	(20 : 80) ^a	(5 : 5 : 90) ^a	(10 : 10 : 80) ^a	
85	7.55	8.13	7.17	8.37	-
86	7.05	7.45	6.97	7.50	-
87	7.52	8.12	7.02	8.13	-
88	7.32	7.98	6.93	7.38	-
89	7.33	7.84	6.91	7.64	-
90	7.42	7.98	6.99	8.23	-
91	7.00	7.49	6.91	7.45	-
92	7.02	7.54	6.92	7.46	-
93	6.91	7.41	6.88	7.56	-
94	7.05	7.50	6.90	7.59	-
95	7.43	7.86	7.02	7.92	-
96	6.83	7.36	6.90	7.56	-
97	6.92	7.64	6.91	7.93	-
98	6.84	7.62	6.83	7.72	-
99	6.91	7.68	6.85	7.73	-
100	7.38	7.76	7.01	7.89	-
Initial pH	7.50	7.50	7.50	7.50	-
pH at steady state ^b	7.02	7.49	6.87	7.47	-

หมายเหตุ ^a สัดส่วนเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักสด, ^b ระยะเวลาที่ระบบอยู่ในสภาวะคงที่ (Steady state)
วันที่ 66 – 100, N คือหญ้าเนเปียร์, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค, RC คือเชื้อจุลินทรีย์
จากกระเพาะหมักโค, RB คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักกระบือ และ FW คือน้ำหนักสด

ตารางผนวกที่ ก11 ปริมาตรก๊าซทั้งหมดที่ผลิตได้ ปริมาตรก๊าซทั้งหมดที่ผลิตได้ที่ STP ปริมาณเปอร์เซ็นต์มีเทน และปริมาณมีเทนที่ผลิตได้ที่ STP จาก การทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักหญ้าเนเปียร์ และการหมักหญ้าเนเปียร์ร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อ จุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก

Time course (days)	RC								RB							
	Reactor 1				Reactor 2				Reactor 3				Reactor 4			
	N : W (20 : 80) ^a				N : C : W (10 : 10 : 80) ^a				N : W (20 : 80) ^a				N : C : W (10 : 10 : 80) ^a			
	Total gas (ml/day)	Total gas (ml/day)	CH ₄ (%)	CH ₄ ^c (ml/day)	Total gas (ml/day)	Total gas (ml/day)	CH ₄ (%)	CH ₄ ^c (ml/day)	Total gas (ml/day)	Total gas (ml/day)	CH ₄ (%)	CH ₄ ^c (ml/day)	Total gas (ml/day)	Total gas (ml/day)	CH ₄ (%)	CH ₄ ^c (ml/day)
	at STP ^b		at STP		at STP ^b		at STP		at STP ^b		at STP		at STP ^b		at STP	
1	297	271	12.11	33	296	271	11.02	30	321	293	12.23	36	214	196	10.32	20
2	394	360	11.45	41	307	281	10.81	30	345	315	12.85	41	248	227	10.11	23
3	325	297	11.71	35	178	163	11.34	18	232	212	11.93	25	235	215	10.52	23
4	358	327	12.33	40	164	150	10.92	16	331	303	12.01	36	230	210	11.03	23
5	449	410	10.43	43	195	178	11.65	21	349	319	12.33	39	207	189	10.96	21
6	377	345	12.14	42	164	150	11.83	18	446	408	14.32	58	214	196	12.65	25
7	617	564	13.56	76	381	348	12.19	42	807	738	15.21	112	518	474	13.70	65
8	618	565	13.91	79	397	363	12.05	44	705	644	14.71	95	382	349	12.94	45
9	319	292	13.02	38	322	294	11.98	35	523	478	15.43	74	283	259	13.17	34
10	341	312	12.77	40	349	319	11.86	38	461	421	10.59	45	334	305	11.54	35
11	386	353	15.34	54	598	547	17.34	95	907	829	15.59	129	429	392	25.03	98
12	513	469	14.23	67	633	579	17.87	103	1128	1031	15.13	156	545	498	20.48	102

ตารางผนวกที่ ก11 (ต่อ)

Time course (days)	RC								RB							
	Reactor 1				Reactor 2				Reactor 3				Reactor 4			
	N : W (20 : 80) ^a				N : C : W (10 : 10 : 80) ^a				N : W (20 : 80) ^a				N : C : W (10 : 10 : 80) ^a			
	Total gas (ml/day)	Total gas (ml/day)	CH ₄ (%)	CH ₄ ^c (ml/day)	Total gas (ml/day)	Total gas (ml/day)	CH ₄ (%)	CH ₄ ^c (ml/day)	Total gas (ml/day)	Total gas (ml/day)	CH ₄ (%)	CH ₄ ^c (ml/day)	Total gas (ml/day)	Total gas (ml/day)	CH ₄ (%)	CH ₄ ^c (ml/day)
	at STP ^b			at STP	at STP ^b			at STP	at STP ^b			at STP	at STP ^b			at STP
13	765	699	16.09	113	593	542	18.32	99	870	795	15.79	126	486	444	22.34	99
14	539	493	15.96	79	493	451	18.54	84	545	498	16.98	85	468	428	20.43	87
15	417	381	16.50	63	411	376	18.84	71	368	336	16.56	56	372	340	20.19	69
16	398	364	16.34	59	589	538	38.32	206	358	327	18.99	62	371	339	35.93	122
17	631	577	16.21	93	982	898	39.54	355	324	296	19.17	57	633	579	38.44	222
18	668	611	17.01	104	877	802	40.91	328	289	264	19.01	50	561	513	40.61	208
19	587	537	16.32	88	846	773	40.02	309	323	295	19.21	57	533	487	46.32	226
20	527	482	17.24	83	993	908	39.17	356	359	328	19.26	63	704	644	36.75	236
21	337	308	17.42	54	-	-	48.93	-	352	322	20.64	66	1295	1184	37.14	440
22	839	767	17.30	133	-	-	45.05	-	975	891	20.78	185	1173	1072	37.48	402
23	573	524	16.96	89	-	-	49.51	-	563	515	21.56	111	1357	1240	41.93	520
24	476	435	17.27	75	-	-	51.98	-	486	444	21.43	95	1084	991	47.91	475
25	343	314	16.90	53	-	-	55.53	-	426	389	20.29	79	1338	1223	49.79	609
26	968	885	20.20	179	1236	1130	48.47	548	1096	1002	21.63	217	1068	976	38.94	380

ตารางผนวกที่ ก11 (ต่อ)

Time course (days)	RC								RB							
	Reactor 1				Reactor 2				Reactor 3				Reactor 4			
	N : W (20 : 80) ^a				N : C : W (10 : 10 : 80) ^a				N : W (20 : 80) ^a				N : C : W (10 : 10 : 80) ^a			
	Total gas	Total gas	CH ₄	CH ₄ ^c	Total gas	Total gas	CH ₄	CH ₄ ^c	Total gas	Total gas	CH ₄	CH ₄ ^c	Total gas	Total gas	CH ₄	CH ₄ ^c
	(ml/day)	(ml/day)	(%)	(ml/day)	(ml/day)	(ml/day)	(%)	(ml/day)	(ml/day)	(ml/day)	(%)	(ml/day)	(ml/day)	(ml/day)	(%)	(ml/day)
	at STP ^b			at STP	at STP ^b			at STP	at STP ^b			at STP	at STP ^b			at STP
27	584	534	20.29	108	1406	1285	48.69	626	919	840	20.39	171	1103	1008	43.88	442
28	639	584	17.27	101	1361	1244	49.00	610	572	523	22.19	116	997	911	42.70	389
29	421	385	17.71	68	1290	1179	51.93	612	356	325	21.69	71	758	693	46.28	321
30	429	392	15.43	61	1271	1162	43.46	505	392	358	20.48	73	791	723	41.66	301
31	1035	946	12.38	117	1219	1114	39.47	440	966	883	15.56	137	937	857	32.13	275
32	841	769	15.93	122	1324	1210	37.23	451	845	772	19.03	147	952	870	37.02	322
33	648	592	16.65	99	1233	1127	38.38	433	611	559	18.71	104	1035	946	34.58	327
34	427	390	14.52	57	1185	1083	28.57	309	536	490	15.51	76	912	834	30.27	252
35	432	395	14.48	57	1133	1036	33.94	352	455	416	16.88	70	853	780	32.17	251
36	943	862	17.69	152	1235	1129	22.58	255	1282	1172	19.29	226	1306	1194	30.72	367
37	969	886	16.15	143	1397	1277	30.20	386	1152	1053	18.88	199	1186	1084	31.79	345
38	749	685	15.10	103	1045	955	28.68	274	868	793	21.04	167	1253	1145	31.83	365
39	539	493	16.45	81	982	898	30.21	271	911	833	20.32	169	1302	1190	30.51	363
40	442	404	16.90	68	931	851	30.86	263	741	677	24.43	165	979	895	35.39	317

ตารางผนวกที่ ก11 (ต่อ)

Time course (days)	RC								RB							
	Reactor 1				Reactor 2				Reactor 3				Reactor 4			
	N : W (20 : 80) ^a				N : C : W (10 : 10 : 80) ^a				N : W (20 : 80) ^a				N : C : W (10 : 10 : 80) ^a			
	Total gas	Total gas	CH ₄	CH ₄ ^c	Total gas	Total gas	CH ₄	CH ₄ ^c	Total gas	Total gas	CH ₄	CH ₄ ^c	Total gas	Total gas	CH ₄	CH ₄ ^c
	(ml/day)	(ml/day)	(%)	(ml/day)	(ml/day)	(ml/day)	(%)	(ml/day)	(ml/day)	(ml/day)	(%)	(ml/day)	(ml/day)	(ml/day)	(%)	(ml/day)
	at STP ^b			at STP	at STP ^b			at STP	at STP ^b			at STP	at STP ^b			at STP
41	1192	1090	14.60	159	1358	1241	31.48	391	1396	1276	18.70	239	1453	1328	33.83	449
42	1166	1066	17.34	185	1367	1250	32.22	403	1397	1277	18.82	240	1317	1204	31.38	378
43	683	624	17.92	112	1192	1090	33.08	360	949	867	25.22	219	848	775	34.07	264
44	581	531	21.08	112	927	847	32.68	277	821	750	23.01	173	1079	986	30.54	301
45	553	506	18.38	93	952	870	31.76	276	866	792	22.53	178	924	845	28.44	240
46	1182	1080	15.91	172	1213	1109	30.75	341	1209	1105	18.27	202	1346	1230	39.43	485
47	954	872	17.31	151	1285	1175	31.50	370	1343	1228	18.21	224	1234	1128	43.72	493
48	670	612	17.42	107	1173	1072	32.52	349	1084	991	24.09	239	1236	1130	50.31	568
49	534	488	20.28	99	942	861	32.14	277	992	907	22.93	208	1043	953	48.10	459
50	548	501	19.08	96	1048	958	30.94	296	822	751	23.84	179	917	838	52.14	437
51	1132	1035	36.23	375	1248	1141	32.79	374	1357	1240	41.69	517	1504	1375	47.61	655
52	923	844	36.13	305	1182	1080	32.11	347	1281	1171	41.61	487	1241	1134	50.27	570
53	809	740	42.18	312	1182	1080	33.38	361	997	911	44.78	408	1072	980	52.47	514
54	746	682	43.12	294	983	899	30.14	271	981	897	45.77	410	1242	1135	48.41	550

ตารางผนวกที่ ก11 (ต่อ)

Time course (days)	RC								RB							
	Reactor 1				Reactor 2				Reactor 3				Reactor 4			
	N : W (20 : 80) ^a				N : C : W (10 : 10 : 80) ^a				N : W (20 : 80) ^a				N : C : W (10 : 10 : 80) ^a			
	Total gas	Total gas	CH ₄	CH ₄ ^c	Total gas	Total gas	CH ₄	CH ₄ ^c	Total gas	Total gas	CH ₄	CH ₄ ^c	Total gas	Total gas	CH ₄	CH ₄ ^c
	(ml/day)	(ml/day)	(%)	(ml/day)	(ml/day)	(ml/day)	(%)	(ml/day)	(ml/day)	(ml/day)	(%)	(ml/day)	(ml/day)	(ml/day)	(%)	(ml/day)
	at STP ^b			at STP	at STP ^b			at STP	at STP ^b			at STP	at STP ^b			at STP
55	987	902	43.62	394	911	833	21.82	182	962	879	47.89	421	1211	1107	50.81	562
56	1203	1100	35.96	395	1272	1163	24.94	290	1268	1159	36.66	425	1464	1338	44.92	601
57	917	838	32.19	270	1193	1091	23.36	255	1101	1006	39.40	397	1092	998	39.40	393
58	873	798	35.00	279	1181	1080	30.29	327	908	830	37.36	310	1322	1208	45.41	549
59	723	661	31.24	206	1092	998	35.32	353	843	771	35.64	275	1041	952	47.42	451
60	842	770	31.81	245	1015	928	31.84	295	792	724	35.59	258	908	830	50.48	419
61	1092	998	32.22	322	1432	1309	45.88	601	1098	1004	32.10	322	1172	1071	40.54	434
62	916	837	31.96	268	1265	1156	41.99	486	934	854	34.53	295	937	857	44.94	385
63	787	719	34.10	245	1387	1268	40.21	510	702	642	36.25	233	1159	1059	47.93	508
64	753	688	33.56	231	1149	1050	42.34	445	864	790	35.78	283	1152	1053	46.87	494
65	698	638	32.07	205	1112	1016	41.46	421	652	596	31.55	188	989	904	40.05	362
66	922	843	23.17	195	1627	1487	45.78	681	891	814	22.31	182	1312	1199	40.06	480
67	904	826	22.32	184	1793	1639	46.52	762	838	766	22.45	172	1029	941	45.23	425
68	838	766	27.08	207	1695	1549	47.73	740	732	669	23.54	158	1245	1138	49.72	566

ตารางผนวกที่ ก11 (ต่อ)

Time course (days)	RC								RB							
	Reactor 1				Reactor 2				Reactor 3				Reactor 4			
	N : W (20 : 80) ^a				N : C : W (10 : 10 : 80) ^a				N : W (20 : 80) ^a				N : C : W (10 : 10 : 80) ^a			
	Total gas (ml/day)	Total gas (ml/day)	CH ₄ (%)	CH ₄ ^c (ml/day)	Total gas (ml/day)	Total gas (ml/day)	CH ₄ (%)	CH ₄ ^c (ml/day)	Total gas (ml/day)	Total gas (ml/day)	CH ₄ (%)	CH ₄ ^c (ml/day)	Total gas (ml/day)	Total gas (ml/day)	CH ₄ (%)	CH ₄ ^c (ml/day)
	at STP ^b			at STP	at STP ^b			at STP	at STP ^b			at STP	at STP ^b			at STP
69	722	660	26.53	175	1738	1589	49.17	781	692	633	26.20	166	1384	1265	45.78	579
70	668	611	21.08	129	1562	1428	47.45	678	548	501	19.22	96	1307	1195	46.96	561
71	1065	974	19.40	189	1642	1501	53.46	802	803	734	18.04	132	1245	1138	45.18	514
72	931	851	23.90	203	1591	1454	52.63	765	835	763	22.34	171	1512	1382	48.86	675
73	920	841	31.03	261	1750	1600	56.76	908	782	715	19.84	142	1031	942	48.30	455
74	710	649	25.64	166	1545	1412	54.87	775	684	625	23.59	147	1281	1171	47.43	555
75	702	642	26.87	172	1504	1375	53.44	735	629	575	27.78	160	1175	1074	51.65	555
76	1019	931	26.41	246	1578	1442	56.70	818	723	661	26.35	174	1352	1236	46.65	577
77	1134	1037	32.42	336	1723	1575	51.69	814	828	757	22.75	172	1417	1295	45.85	594
78	859	785	29.19	229	1786	1633	53.47	873	744	680	19.60	133	1422	1300	46.42	603
79	681	623	24.46	152	1641	1500	54.66	820	642	587	20.34	119	1287	1176	41.64	490
80	678	620	24.45	152	1561	1427	50.62	722	628	574	24.27	139	1189	1087	47.57	517
81	985	900	28.32	255	1654	1512	55.32	836	845	772	24.21	187	1349	1233	45.21	558
82	943	862	33.98	293	1708	1561	55.28	863	892	815	25.88	211	1491	1363	48.41	660

ตารางผนวกที่ ก11 (ต่อ)

Time course (days)	RC								RB							
	Reactor 1				Reactor 2				Reactor 3				Reactor 4			
	N : W (20 : 80) ^a				N : C : W (10 : 10 : 80) ^a				N : W (20 : 80) ^a				N : C : W (10 : 10 : 80) ^a			
	Total gas (ml/day)	Total gas (ml/day)	CH ₄ (%)	CH ₄ ^c (ml/day)	Total gas (ml/day)	Total gas (ml/day)	CH ₄ (%)	CH ₄ ^c (ml/day)	Total gas (ml/day)	Total gas (ml/day)	CH ₄ (%)	CH ₄ ^c (ml/day)	Total gas (ml/day)	Total gas (ml/day)	CH ₄ (%)	CH ₄ ^c (ml/day)
	at STP ^b			at STP	at STP ^b			at STP	at STP ^b			at STP	at STP ^b			at STP
83	857	783	25.43	199	1631	1491	53.74	801	599	548	21.32	117	1467	1341	46.25	620
84	795	727	22.45	163	1534	1402	52.15	731	969	886	20.85	185	1231	1125	40.97	461
85	848	775	24.11	187	1417	1295	51.69	670	655	599	23.13	138	1144	1046	49.21	515
86	887	811	26.52	215	1769	1617	52.56	850	643	588	23.58	139	1316	1203	46.42	558
87	734	671	28.42	191	1786	1633	54.35	887	777	710	26.32	187	1478	1351	47.21	638
88	854	781	26.34	206	1657	1515	53.52	811	781	714	23.24	166	1411	1290	45.21	583
89	769	703	24.11	169	1532	1400	52.59	736	715	654	20.06	131	1239	1133	40.86	463
90	722	660	25.44	168	1419	1297	49.48	642	631	577	21.56	124	1343	1228	48.94	601
91	821	750	27.40	206	1682	1538	52.56	808	654	598	22.34	134	1332	1218	45.23	551
92	885	809	28.35	229	1794	1640	51.38	843	771	705	27.23	192	1487	1359	46.53	632
93	765	699	26.32	184	1796	1642	49.21	808	762	697	23.77	166	1480	1353	45.10	610
94	734	671	25.91	174	1543	1410	51.46	726	730	667	21.38	143	1298	1187	40.34	479
95	693	633	24.84	157	1472	1346	48.43	652	683	624	20.56	128	1342	1227	47.94	588
96	823	752	25.52	192	1622	1483	52.41	777	792	724	23.24	168	1303	1191	46.51	554

ตารางผนวกที่ ก11 (ต่อ)

Time course (days)	RC								RB							
	Reactor 1				Reactor 2				Reactor 3				Reactor 4			
	N : W (20 : 80) ^a				N : C : W (10 : 10 : 80) ^a				N : W (20 : 80) ^a				N : C : W (10 : 10 : 80) ^a			
	Total gas (ml/day)	Total gas (ml/day)	CH ₄ (%)	CH ₄ ^c (ml/day)	Total gas (ml/day)	Total gas (ml/day)	CH ₄ (%)	CH ₄ ^c (ml/day)	Total gas (ml/day)	Total gas (ml/day)	CH ₄ (%)	CH ₄ ^c (ml/day)	Total gas (ml/day)	Total gas (ml/day)	CH ₄ (%)	CH ₄ ^c (ml/day)
	at STP ^b			at STP	at STP ^b			at STP	at STP ^b			at STP	at STP ^b			at STP
97	868	793	28.77	228	1788	1634	53.35	872	810	740	26.73	198	1452	1327	48.68	646
98	781	714	26.19	187	1613	1474	53.18	784	712	651	23.32	152	1281	1171	46.37	543
99	753	688	25.39	175	1622	1483	52.21	774	822	751	21.72	163	1215	1111	41.46	460
100	712	651	24.03	156	1517	1387	50.48	700	817	747	20.20	151	1367	1250	48.13	601
Average ^d	828	757	26.05	198	1637	1496	52.01	778	745	681	22.84	155	1320	1207	46.07	556

หมายเหตุ ^a สัดส่วนเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักสด, ^b วิธีคำนวณปริมาตรก๊าซทั้งหมดที่ผลิตได้ต่อวันที่ STP แสดงดังภาคผนวก ข, ^c ปริมาตรก๊าซมีเทนที่ผลิตได้ต่อวันมาจากผลคูณระหว่างปริมาตรก๊าซทั้งหมดกับเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทน, ^d ค่าเฉลี่ยในช่วงระยะเวลาที่ระบบอยู่ในสภาวะคงที่ (Steady state) วันที่ 66 - 100, N คือหุ้มน้ำเนเปียร์, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค, RC คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักโค, RB คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักกระบือ และ FW คือน้ำหนักสด

ตารางผนวกที่ ก12 ปริมาตรมีเทนที่ผลิตได้รวมทุก 5 วัน^a (ที่ STP) จากการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักหญ้าเนเปียร์ และการหมักหญ้าเนเปียร์ร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก

(ml/5days)

Time course (days)	RC		RB	
	Reactor 1	Reactor 2	Reactor 3	Reactor 4
	N : W (20 : 80) ^b	N : C : W (10 : 10 : 80) ^b	N : W (20 : 80) ^b	N : C : W (10 : 10 : 80) ^b
5	192	116	177	110
10	275	177	384	204
15	375	452	551	455
20	427	1554	289	1015
25	403	-	537	2445
30	517	2900	648	1834
35	452	1984	535	1428
40	548	1448	927	1756
45	661	1707	1049	1633
50	624	1633	1051	2442
55	1679	1534	2244	2851
60	1396	1520	1664	2413
65	1270	2462	1320	2183
70	891	3642	773	2612
75	992	3985	752	2755
80	1115	4047	738	2781
85	1097	3902	838	2813
90	949	3926	747	2843
95	950	3836	762	2860
100	938	3907	832	2805
Average ^c	990	3892	777	2781

หมายเหตุ ^a ปริมาตรมีเทนที่ผลิตได้ในแต่ละรอบของการเติมสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์ (มีการเติมทุก ๆ 5 วัน), ^b สัดส่วนเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักสด, ^c ค่าเฉลี่ยในช่วงระยะเวลาที่ระบบอยู่ในสภาวะคงที่ (Steady state) วันที่ 66 – 100, N คือหญ้าเนเปียร์, W คือน้ำ

ตารางผนวกที่ ก12 (ต่อ)

ประปา, C คือมูลโค, RC คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักโค, RB คือเชื้อจุลินทรีย์
จากกระเพาะหมักกระบือ และ FW คือน้ำหนักสด



ตารางผนวกที่ ก13 ค่า COD เฉลี่ยของสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์ที่เติมเข้าระบบของการทดลอง ชุดที่ 1 ระยะที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักหญ้าเนเปียร์ และการหมักหญ้าเนเปียร์ร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโค และกระบือ) ในแต่ละถังหมัก

Reactor	Mixed culture	Substrate	Ratio (% FW)	COD (g/L)
1	RC	N : W	20 : 80	26.08
2	RC	N : C : W	10 : 10 : 80	31.25
3	RB	N : W	20 : 80	26.08
4	RB	N : C : W	10 : 10 : 80	31.25

หมายเหตุ N คือหญ้าเนเปียร์, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค, RC คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักโค, RB คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักกระบือ และ FW คือน้ำหนักสด (Fresh weight)

ตารางผนวกที่ ก14 ค่า COD ของสารละลายผสมหุ้ยนเปียร์ที่ออกจากระบบของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักหุ้ยนเปียร์ และการหมักหุ้ยนเปียร์ร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระป๋อง) ในแต่ละถังหมัก

(g/L)

Time course (days)	RC		RB	
	Reactor 1	Reactor 2	Reactor 3	Reactor 4
	N : W (10 : 90) ^a	N : W (20 : 80) ^a	N : C : W (5 : 5 : 90) ^a	N : C : W (10 : 10 : 80) ^a
70	9.64	10.71	9.86	7.18
75	9.38	10.75	9.17	6.43
80	8.19	10.73	9.74	6.09
85	8.31	10.39	9.19	5.91
90	8.31	10.17	8.53	5.47
95	8.25	10.18	8.68	5.79
100	8.22	10.35	8.64	5.98
Average	8.61	10.47	9.12	6.12

หมายเหตุ ^a สัดส่วนเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักสด, N คือหุ้ยนเปียร์, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค, RC คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักโค, RB คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักกระป๋อง และ FW คือน้ำหนักสด

ตารางผนวกที่ ก15 ค่า TVS เฉลี่ยของสารละลายผสมหญาเนเปียร์ที่เติมเข้าระบบของการทดลอง ชุดที่ 1 ระยะที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักหญาเนเปียร์ และการหมักหญาเนเปียร์ร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโค และกระบือ) ในแต่ละถังหมัก

Reactor	Mixed culture	Substrate	Ratio (% FW)	TVS (g/L)
1	RC	N : W	20 : 80	16.68
2	RC	N : C : W	10 : 10 : 80	27.72
3	RB	N : W	20 : 80	16.68
4	RB	N : C : W	10 : 10 : 80	27.72

หมายเหตุ N คือหญาเนเปียร์, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค, RC คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักโค, RB คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักกระบือ และ FW คือน้ำหนักสด (Fresh weight)

ตารางผนวกที่ ก16 ค่า TVS ของสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์ที่ออกจากระบบของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักหญ้าเนเปียร์ และการหมักหญ้าเนเปียร์ร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระป๋อง) ในแต่ละถังหมัก

(g/L)

Time course (days)	RC		RB	
	Reactor 1	Reactor 2	Reactor 3	Reactor 4
	N : W (10 : 90) ^a	N : W (20 : 80) ^a	N : C : W (5 : 5 : 90) ^a	N : C : W (10 : 10 : 80) ^a
70	9.56	11.84	8.48	11.56
75	9.60	10.94	8.92	11.72
80	9.14	10.42	9.24	11.56
85	9.42	10.22	9.66	11.58
90	9.48	11.44	9.86	11.36
95	9.28	10.72	9.46	11.08
100	9.26	10.94	9.74	11.90
Average	9.39	10.93	9.34	11.54

หมายเหตุ ^a สัดส่วนเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักสด, N คือหญ้าเนเปียร์, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค, RC คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักโค, RB คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักกระป๋อง และ FW คือน้ำหนักสด

ตารางผนวกที่ ก17 ค่า TS เฉลี่ยของสารละลายผสมหญาเนเปียร์ที่เติมเข้าระบบของการทดลอง ชุดที่ 1 ระยะที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักหญาเนเปียร์ และการหมักหญาเนเปียร์ร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโค และกระบือ) ในแต่ละถังหมัก

Reactor	Mixed culture	Substrate	Ratio (% FW)	TS (g/L)
1	RC	N : W	20 : 80	22.76
2	RC	N : C : W	10 : 10 : 80	32.14
3	RB	N : W	20 : 80	22.76
4	RB	N : C : W	10 : 10 : 80	32.14

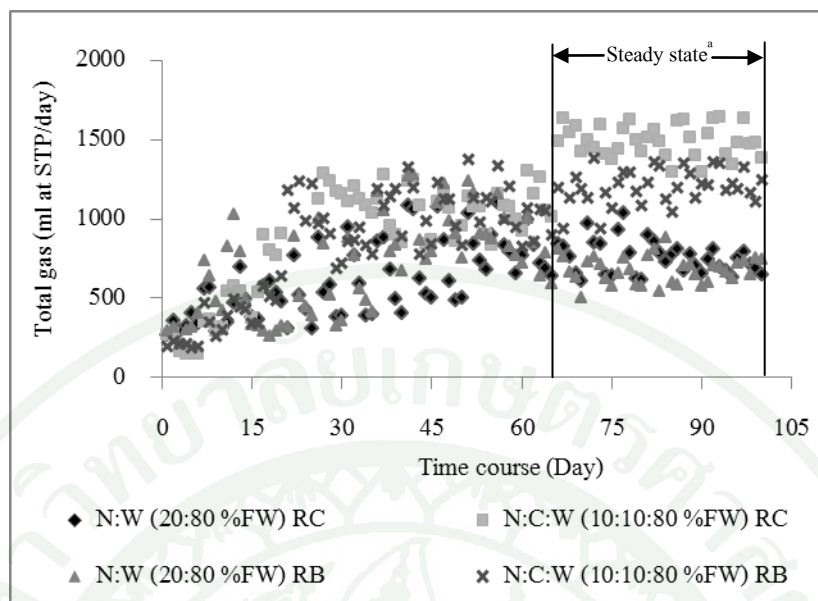
หมายเหตุ N คือหญาเนเปียร์, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค, RC คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักโค, RB คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักกระบือ และ FW คือน้ำหนักสด (Fresh weight)

ตารางผนวกที่ ก18 ค่า TS ของสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์ที่ออกจากระบบของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักหญ้าเนเปียร์ และการหมักหญ้าเนเปียร์ร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระป๋อง) ในแต่ละถังหมัก

(g/L)

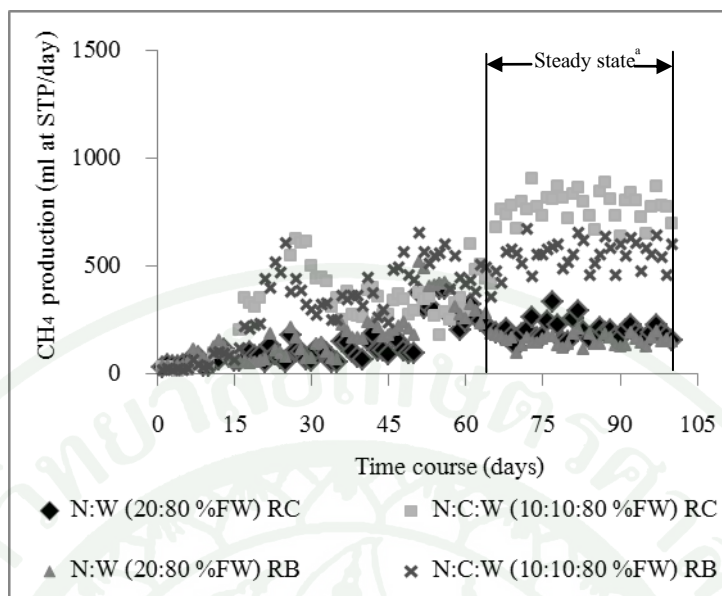
Time course (days)	RC		RB	
	Reactor 1	Reactor 2	Reactor 3	Reactor 4
	N : W (10 : 90) ^a	N : W (20 : 80) ^a	N : C : W (5 : 5 : 90) ^a	N : C : W (10 : 10 : 80) ^a
70	16.32	19.64	16.64	21.44
75	16.12	19.42	16.76	20.06
80	15.66	18.34	15.60	19.88
85	15.98	19.52	14.46	20.16
90	15.92	19.72	14.20	20.12
95	15.60	18.94	14.98	20.66
100	15.22	18.64	15.50	20.96
Average	15.83	19.18	15.45	20.47

หมายเหตุ ^a สัดส่วนเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักสด, N คือหญ้าเนเปียร์, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค, RC คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักโค, RB คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักกระป๋อง และ FW คือน้ำหนักสด



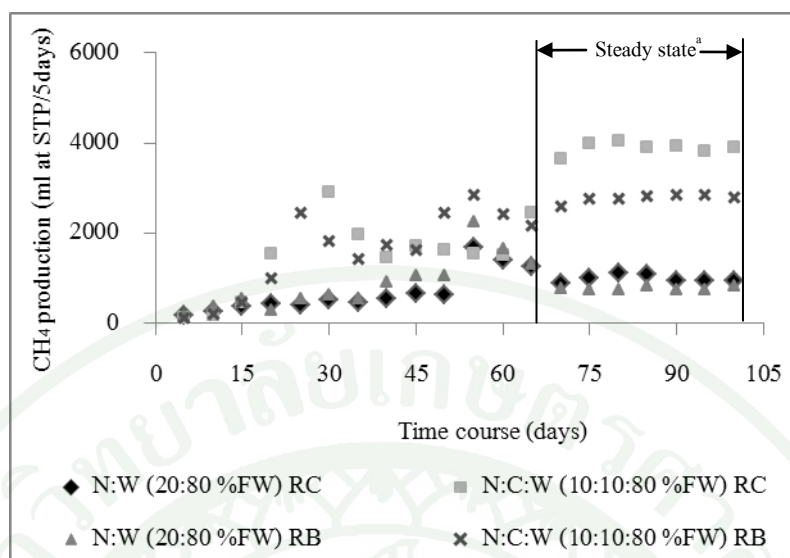
ภาพผนวกที่ 10 ปริมาตรก๊าซทั้งหมดที่ผลิตได้ (ml/day) ที่ STP ของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักหญ้าเนเปียร์ และการหมักหญ้าเนเปียร์ร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถึงหมัก

หมายเหตุ ^a ระยะเวลาที่ระบบอยู่ในสภาวะคงที่ (Steady state) วันที่ 66 – 100, N คือหญ้าเนเปียร์, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค, RC คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักโค, RB คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักกระบือ และ FW คือน้ำหนักสด



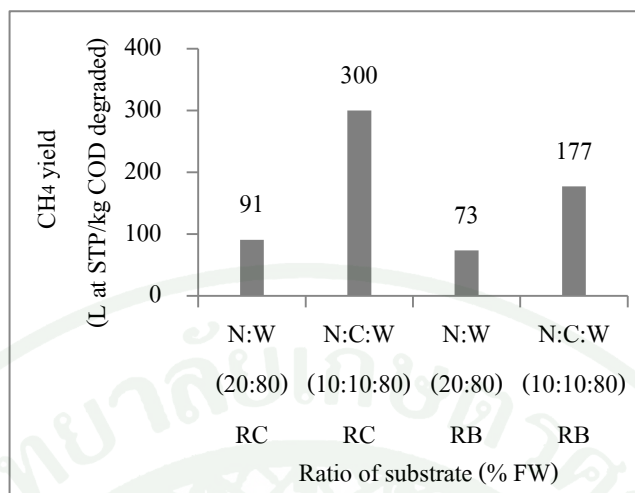
ภาพผนวกที่ ก11 ปริมาตรมีเทน (ml/day) ที่ STP ของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักหญ้าเนเปียร์ และการหมักหญ้าเนเปียร์ร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก

หมายเหตุ ^a ระยะเวลาที่ระบบอยู่ในสภาวะคงที่ (Steady state) วันที่ 66 – 100, N คือหญ้าเนเปียร์, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค, RC คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักโค, RB คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักกระบือ และ FW คือน้ำหนักสด



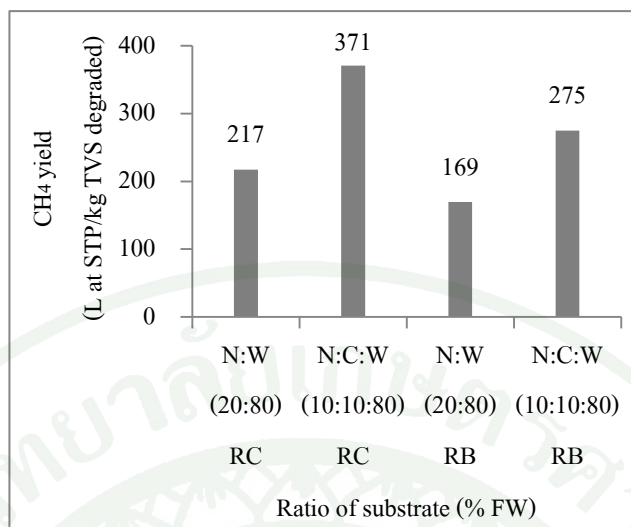
ภาพผนวกที่ 12 ปริมาตรมีเทนรวมทุก 5 วัน (ml/5days) ที่ STP ของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักหญ้าเนเปียร์ และการหมักหญ้าเนเปียร์ ร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก

หมายเหตุ ^a ระยะเวลาที่ระบบอยู่ในสภาวะคงที่ (Steady state) วันที่ 66 – 100, N คือหญ้าเนเปียร์, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค, RC คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักโค, RB คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักกระบือ และ FW คือน้ำหนักสด



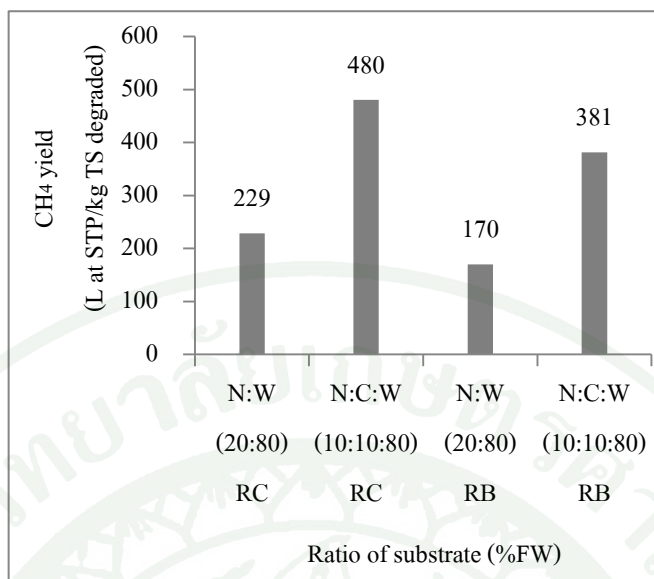
ภาพผนวกที่ ก13 ผลผลิตมีเทน (L at STP/kg COD degraded) ที่ STP ของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักหญ้าเนเปียร์ และการหมักหญ้าเนเปียร์ร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก

หมายเหตุ N คือหญ้าเนเปียร์, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค, RC คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักโค, RB คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักกระบือ และ FW คือน้ำหนักสด (Fresh weight)



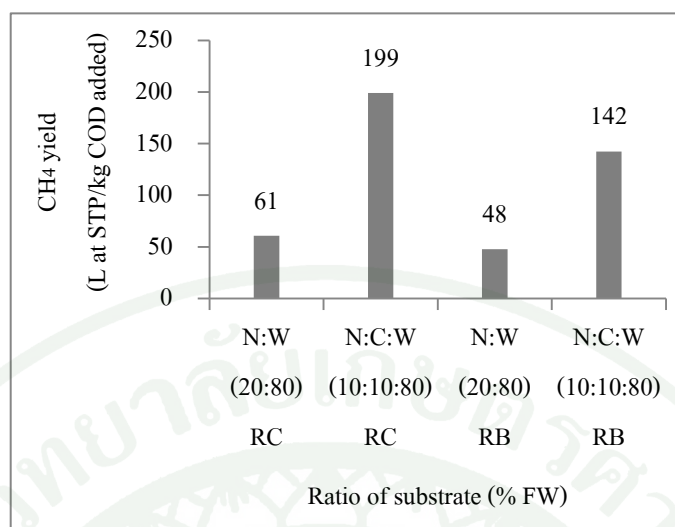
ภาพผนวกที่ ก14 ผลผลิตมีเทน (L at STP/kg TVS degraded) ที่ STP ของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักหญ้าเนเปียร์ และการหมักหญ้าเนเปียร์ร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก

หมายเหตุ N คือหญ้าเนเปียร์, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค, RC คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักโค, RB คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักกระบือ และ FW คือน้ำหนักสด (Fresh weight)



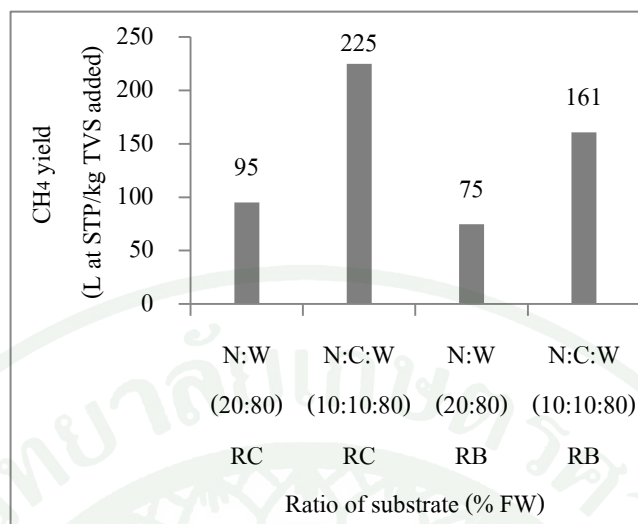
ภาพผนวกที่ ก15 ผลผลิตมีเทน (L at STP/kg TS degraded) ที่ STP ของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักหญ้าเนเปียร์ และการหมักหญ้าเนเปียร์ ร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก

หมายเหตุ N คือหญ้าเนเปียร์, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค, RC คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักโค, RB คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักกระบือ และ FW คือน้ำหนักสด (Fresh weight)



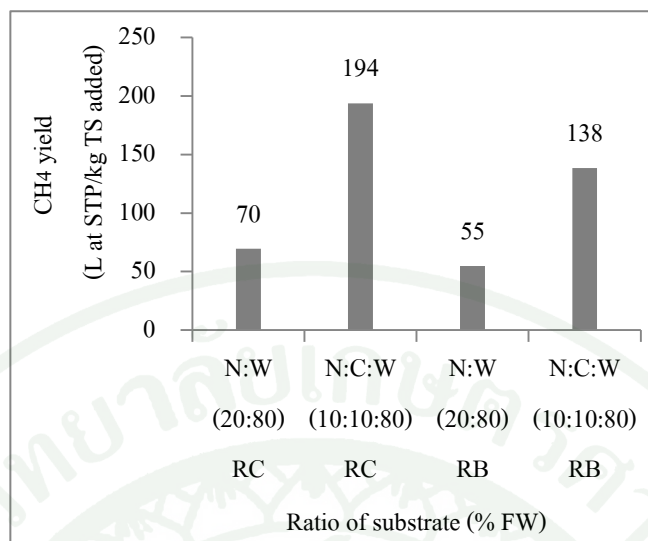
ภาพผนวกที่ ก16 ผลผลิตมีเทน (L at STP/kg COD added) ที่ STP ของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักหญ้าเนเปียร์ และการหมักหญ้าเนเปียร์ร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก

หมายเหตุ N คือหญ้าเนเปียร์, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค, RC คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักโค, RB คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักกระบือ และ FW คือน้ำหนักสด (Fresh weight)



ภาพผนวกที่ ก17 ผลผลิตมีเทน (L at STP/kg TVS added) ที่ STP ของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักหญ้าเนเปียร์ และการหมักหญ้าเนเปียร์ร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก

หมายเหตุ N คือหญ้าเนเปียร์, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค, RC คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักโค, RB คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักกระบือ และ FW คือน้ำหนักสด (Fresh weight)



ภาพผนวกที่ ก18 ผลผลิตมีเทน (L at STP/kg TS added) ที่ STP ของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักหญ้าเนเปียร์ และการหมักหญ้าเนเปียร์ร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก

หมายเหตุ N คือหญ้าเนเปียร์, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค, RC คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักโค, RB คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักกระบือ และ FW คือน้ำหนักสด (Fresh weight)

ตารางผนวกที่ ก19 ค่า pH จากการทดลองชุดที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักฟางข้าว และการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก

Time course (days)	RC		RB		pH adjustment (Reactor / g NaHCO ₃)
	Reactor 1	Reactor 2	Reactor 3	Reactor 4	
	S : W	S : C : W	S : W	S : C : W	
	(3.5 : 96.5) ^a	(1.75 : 10 : 88.25) ^a	(3.5 : 96.5) ^a	(1.75 : 10 : 88.25) ^a	
1	7.69	7.41	7.65	7.38	-
2	7.65	7.22	7.51	7.19	-
3	7.23	6.97	7.24	6.98	-
4	7.22	7.13	7.20	7.08	-
5	7.13	7.11	7.11	7.13	-
6	7.11	7.10	7.10	7.10	-
7	7.08	7.14	7.02	7.11	-
8	7.05	7.12	7.00	7.00	-
9	6.97	7.08	6.98	7.01	-
10	6.83	7.10	6.97	6.95	1,3,4/30
11	7.12	7.11	7.14	7.19	-
12	7.11	7.11	7.10	7.20	-
13	7.10	7.10	7.11	7.19	-
14	7.08	7.12	7.09	7.18	-
15	7.15	7.53	7.30	7.31	-
16	7.00	7.34	7.13	7.21	-
17	7.11	7.45	7.24	7.27	-
18	7.12	7.38	7.31	7.25	-
19	7.04	7.45	7.30	7.31	-
20	6.79	7.51	7.31	7.53	-
21	6.85	7.29	7.11	7.35	1,3/20
22	6.95	7.28	7.14	7.41	-
23	6.87	7.22	7.10	7.36	-
24	6.89	7.24	7.13	7.37	-
25	7.08	7.34	7.22	7.53	-
26	6.88	7.14	7.02	7.33	-

ตารางผนวกที่ ก19 (ต่อ)

Time course (days)	RC		RB		pH adjustment (Reactor / g NaHCO ₃)
	Reactor 1	Reactor 2	Reactor 3	Reactor 4	
	S : W (3.5 : 96.5) ^a	S : C : W (1.75 : 10 : 88.25) ^a	S : W (3.5 : 96.5) ^a	S : C : W (1.75 : 10 : 88.25) ^a	
27	6.95	7.20	7.08	7.34	-
28	6.92	7.24	7.12	7.35	-
29	6.98	7.25	7.16	7.38	-
30	7.02	7.22	7.15	7.43	-
31	7.01	7.19	7.05	7.41	-
32	6.97	7.20	7.03	7.35	-
33	6.98	7.03	7.05	7.18	-
34	7.02	7.21	7.11	7.31	-
35	7.09	7.31	7.33	7.55	-
36	7.02	7.15	7.18	7.39	-
37	7.01	7.22	7.23	7.48	-
38	7.04	7.21	7.24	7.45	-
39	7.03	7.20	7.25	7.50	-
40	7.08	7.29	7.35	7.62	-
41	7.04	7.21	7.22	7.48	-
42	7.01	7.17	7.16	7.41	-
43	6.90	7.13	7.14	7.39	-
44	7.00	7.12	7.16	7.38	-
45	7.09	7.27	7.38	7.56	-
46	7.01	7.33	7.25	7.46	-
47	6.90	7.32	7.08	7.51	-
48	7.00	7.28	7.06	7.50	-
49	7.09	7.26	7.07	7.43	-
50	7.01	7.49	7.30	7.63	-
51	6.90	7.32	7.26	7.50	-
52	7.00	7.23	7.04	7.37	-
53	6.90	7.21	7.18	7.44	-
54	7.01	7.20	7.20	7.48	-
55	7.00	7.13	7.30	7.52	-

ตารางผนวกที่ ก19 (ต่อ)

Time course (days)	RC		RB		pH
	Reactor 1	Reactor 2	Reactor 3	Reactor 4	adjustment
	S : W	S : C : W	S : W	S : C : W	(Reactor /
	(3.5 : 96.5) ^a	(1.75 : 10 : 88.25) ^a	(3.5 : 96.5) ^a	(1.75 : 10 : 88.25) ^a	g NaHCO ₃)
56	7.00	7.03	7.14	7.13	-
57	7.01	7.04	7.11	7.14	-
58	7.00	7.10	7.13	7.15	-
59	7.10	7.21	7.20	7.20	-
60	7.21	7.53	7.13	7.62	-
61	7.00	7.39	7.01	7.28	-
62	7.02	7.40	7.02	7.25	-
63	7.00	7.44	7.02	7.23	-
64	7.01	7.23	7.00	7.25	-
65	7.25	7.69	7.03	7.59	-
66	7.01	7.43	7.12	7.24	-
67	7.00	7.40	7.11	7.23	-
68	7.02	7.41	7.12	7.24	-
69	7.00	7.40	7.10	7.20	-
70	7.12	7.65	7.20	7.45	-
71	7.10	7.51	7.23	7.40	-
72	7.11	7.45	7.21	7.36	-
73	7.10	7.48	7.20	7.34	-
74	7.09	7.47	7.15	7.35	-
75	7.08	7.45	7.18	7.37	-
Initial pH	7.50	7.50	7.50	7.50	-
pH at steady state ^b	7.03	7.33	7.15	7.37	-

หมายเหตุ ^a สัดส่วนเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักสด, ^b ระยะเวลาที่ระบบอยู่ในสภาวะคงที่ (Steady state)
วันที่ 41 – 75, S คือฟางข้าว, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค, RC คือเชื้อจุลินทรีย์จาก
กระเพาะหมักโค, RB คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักกระบือ และ FW คือน้ำหนักสด
(Fresh weight)

ตารางผนวกที่ ก20 ปริมาตรก๊าซทั้งหมดที่ผลิตได้ ปริมาตรก๊าซทั้งหมดที่ผลิตได้ที่ STP ปริมาณเปอร์เซ็นต์มีเทน และปริมาณมีเทนที่ผลิตได้ที่ STP จาก
การทดลองชุดที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักฟางข้าว และการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจาก
กระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก

Time course (days)	RC								RB							
	Reactor 1				Reactor 2				Reactor 3				Reactor 4			
	S : W (3.5 : 96.5) ^a				S : C : W (1.75 : 10 : 88.25) ^a				S : W (3.5 : 96.5) ^a				S : C : W (1.75 : 10 : 88.25) ^a			
	Total gas (ml/day)	Total gas (ml/day)	CH ₄ (%)	CH ₄ ^c (ml/day)	Total gas (ml/day)	Total gas (ml/day)	CH ₄ (%)	CH ₄ ^c (ml/day)	Total gas (ml/day)	Total gas (ml/day)	CH ₄ (%)	CH ₄ ^c (ml/day)	Total gas (ml/day)	Total gas (ml/day)	CH ₄ (%)	CH ₄ ^c (ml/day)
	at STP ^b			at STP ^b	at STP ^b			at STP ^b	at STP ^b			at STP ^b	at STP ^b			at STP ^b
1	707	646	14.76	95	598	547	23.56	129	882	806	17.12	138	714	653	21.55	141
2	542	495	15.53	77	739	676	25.13	170	732	669	18.52	124	764	698	22.43	157
3	679	621	16.35	101	688	629	26.84	169	694	634	19.65	125	738	675	21.71	146
4	432	395	18.29	72	746	682	28.32	193	682	623	18.38	115	735	672	23.29	156
5	442	404	20.71	84	452	413	24.75	102	445	407	18.71	76	682	623	23.79	148
6	632	578	20.34	118	617	564	37.23	210	783	716	17.34	124	684	625	27.04	169
7	425	388	20.54	80	632	578	39.32	227	821	750	18.36	138	723	661	28.31	187
8	624	570	23.15	132	572	523	43.25	226	634	580	18.91	110	715	654	35.32	231
9	398	364	21.67	79	603	551	43.24	238	538	492	20.04	99	798	729	36.81	269
10	442	404	29.31	118	539	493	43.44	214	593	542	23.88	129	604	552	39.14	216
11	932	852	20.33	173	607	555	39.22	218	504	461	12.56	58	905	827	31.56	261
12	776	709	21.62	153	732	669	41.49	278	643	588	15.86	93	937	857	30.22	259

ตารางผนวกที่ ก20 (ต่อ)

Time course (days)	RC								RB							
	Reactor 1				Reactor 2				Reactor 3				Reactor 4			
	S : W (3.5 : 96.5) ^a				S : C : W (1.75 : 10 : 88.25) ^a				S : W (3.5 : 96.5) ^a				S : C : W (1.75 : 10 : 88.25) ^a			
	Total gas (ml/day)	Total gas (ml/day)	CH ₄ (%)	CH ₄ ^c (ml/day)	Total gas (ml/day)	Total gas (ml/day)	CH ₄ (%)	CH ₄ ^c (ml/day)	Total gas (ml/day)	Total gas (ml/day)	CH ₄ (%)	CH ₄ ^c (ml/day)	Total gas (ml/day)	Total gas (ml/day)	CH ₄ (%)	CH ₄ ^c (ml/day)
	at STP ^b			at STP ^b	at STP ^b			at STP ^b	at STP ^b			at STP ^b	at STP ^b			at STP ^b
13	759	694	20.85	145	719	657	42.87	282	609	557	16.71	93	922	843	25.61	216
14	701	641	19.37	124	749	685	40.11	275	603	551	19.38	107	910	832	26.21	218
15	741	677	21.42	145	613	560	43.74	245	702	642	14.82	95	915	836	18.99	159
16	678	620	19.32	120	493	451	38.56	174	599	548	18.11	99	568	519	40.38	210
17	705	644	19.92	128	598	547	41.51	227	601	549	19.05	105	507	463	41.19	191
18	691	632	20.45	129	576	527	42.98	226	622	569	21.50	122	512	468	42.07	197
19	598	547	21.84	119	642	587	44.12	259	617	564	20.53	116	605	553	42.92	237
20	653	597	29.08	174	671	613	45.94	282	614	561	20.22	113	684	625	44.35	277
21	612	559	17.29	97	723	661	20.22	134	578	528	15.74	83	979	895	21.26	190
22	768	702	16.45	115	979	895	35.40	317	714	653	19.92	130	1011	924	34.71	321
23	693	633	30.09	191	962	879	39.78	350	771	705	24.74	174	1131	1034	40.00	414
24	804	735	28.94	213	1132	1035	38.06	394	901	824	24.41	201	1218	1113	40.29	449
25	702	642	34.16	219	975	891	40.88	364	867	793	29.67	235	1137	1039	42.59	443
26	1122	1026	29.65	304	1229	1123	30.32	341	1297	1186	30.08	357	916	837	34.69	290

ตารางผนวกที่ ก20 (ต่อ)

Time course (days)	RC								RB							
	Reactor 1				Reactor 2				Reactor 3				Reactor 4			
	S : W (3.5 : 96.5) ^a				S : C : W (1.75 : 10 : 88.25) ^a				S : W (3.5 : 96.5) ^a				S : C : W (1.75 : 10 : 88.25) ^a			
	Total gas (ml/day)	Total gas (ml/day)	CH ₄ (%)	CH ₄ ^c (ml/day)	Total gas (ml/day)	Total gas (ml/day)	CH ₄ (%)	CH ₄ ^c (ml/day)	Total gas (ml/day)	Total gas (ml/day)	CH ₄ (%)	CH ₄ ^c (ml/day)	Total gas (ml/day)	Total gas (ml/day)	CH ₄ (%)	CH ₄ ^c (ml/day)
	at STP ^b		at STP ^b		at STP ^b		at STP ^b		at STP ^b		at STP ^b		at STP ^b		at STP ^b	
27	952	870	30.45	265	1111	1016	37.67	383	1124	1027	30.21	310	1006	920	42.11	387
28	986	901	35.88	323	1262	1154	39.74	458	1199	1096	32.48	356	1121	1025	43.53	446
29	957	875	37.15	325	1284	1174	38.06	447	1107	1012	33.99	344	1044	954	42.41	405
30	1048	958	37.17	356	1175	1074	39.04	419	1207	1103	35.28	389	1069	977	42.52	415
31	1265	1156	29.73	344	1423	1301	35.00	455	1098	1004	36.06	362	989	904	36.53	330
32	956	874	30.20	264	1462	1336	38.57	515	927	847	42.80	363	901	824	36.47	300
33	1110	1015	25.33	257	1502	1373	39.29	539	1011	924	36.53	338	1062	971	42.25	410
34	953	871	28.34	247	1321	1208	40.21	486	1074	982	38.21	375	1085	992	40.11	398
35	831	760	29.10	221	1285	1175	41.90	492	963	880	40.71	358	1194	1091	45.02	491
36	969	886	22.85	202	1479	1352	27.09	366	944	863	30.22	261	1197	1094	29.47	322
37	1035	946	29.48	279	1498	1369	31.04	425	932	852	34.17	291	1099	1005	39.39	396
38	917	838	20.29	170	1386	1267	32.83	416	1032	943	30.44	287	1018	931	32.82	305
39	992	907	29.21	265	1421	1299	43.92	570	972	889	33.22	295	1053	963	44.25	426
40	954	872	35.23	307	1519	1389	47.80	664	937	857	38.19	327	1077	984	44.30	436

ตารางผนวกที่ ก20 (ต่อ)

Time course (days)	RC								RB							
	Reactor 1				Reactor 2				Reactor 3				Reactor 4			
	S : W (3.5 : 96.5) ^a				S : C : W (1.75 : 10 : 88.25) ^a				S : W (3.5 : 96.5) ^a				S : C : W (1.75 : 10 : 88.25) ^a			
	Total gas (ml/day)	Total gas (ml/day)	CH ₄ (%)	CH ₄ ^c (ml/day)	Total gas (ml/day)	Total gas (ml/day)	CH ₄ (%)	CH ₄ ^c (ml/day)	Total gas (ml/day)	Total gas (ml/day)	CH ₄ (%)	CH ₄ ^c (ml/day)	Total gas (ml/day)	Total gas (ml/day)	CH ₄ (%)	CH ₄ ^c (ml/day)
	at STP ^b			at STP ^b	at STP ^b			at STP ^b	at STP ^b			at STP ^b	at STP ^b			at STP ^b
41	817	747	30.11	225	1312	1199	46.21	554	936	856	28.45	243	1103	1008	40.31	406
42	975	891	35.54	317	1365	1248	48.37	604	906	828	37.30	309	1291	1180	44.84	529
43	962	879	22.74	200	1157	1058	42.21	446	631	577	31.57	182	996	910	36.81	335
44	722	660	28.09	185	1156	1057	43.66	461	921	842	32.09	270	989	904	38.01	344
45	773	707	28.39	201	1042	953	43.25	412	748	684	34.09	233	795	727	38.98	283
46	783	716	33.28	238	1317	1204	33.39	402	908	830	26.46	220	1022	934	24.99	233
47	693	633	24.14	153	1393	1273	36.26	462	715	654	28.38	185	1114	1018	35.54	362
48	875	800	25.24	202	1394	1274	40.13	511	953	871	30.21	263	1086	993	40.01	397
49	793	725	37.16	269	1412	1291	52.15	673	871	796	35.15	280	1183	1081	40.10	434
50	732	669	34.00	228	1391	1272	40.83	519	994	909	32.93	299	1053	963	35.55	342
51	774	708	29.27	207	1249	1142	39.69	453	903	825	27.03	223	1105	1010	28.64	289
52	910	832	33.01	275	1375	1257	49.59	623	950	868	31.28	272	1124	1027	42.37	435
53	918	839	26.31	221	1206	1102	43.31	477	986	901	30.18	272	1013	926	38.85	360
54	899	822	27.11	223	1297	1186	43.26	513	912	834	33.03	275	1182	1080	40.21	434

ตารางผนวกที่ ก20 (ต่อ)

Time course (days)	RC								RB							
	Reactor 1				Reactor 2				Reactor 3				Reactor 4			
	S : W (3.5 : 96.5) ^a				S : C : W (1.75 : 10 : 88.25) ^a				S : W (3.5 : 96.5) ^a				S : C : W (1.75 : 10 : 88.25) ^a			
	Total gas (ml/day)	Total gas (ml/day)	CH ₄ (%)	CH ₄ ^c (ml/day)	Total gas (ml/day)	Total gas (ml/day)	CH ₄ (%)	CH ₄ ^c (ml/day)	Total gas (ml/day)	Total gas (ml/day)	CH ₄ (%)	CH ₄ ^c (ml/day)	Total gas (ml/day)	Total gas (ml/day)	CH ₄ (%)	CH ₄ ^c (ml/day)
	at STP ^b			at STP ^b	at STP ^b			at STP ^b	at STP ^b			at STP ^b	at STP ^b			at STP ^b
55	931	851	35.47	302	1381	1262	50.80	641	982	898	37.62	338	1055	964	46.61	450
56	876	801	36.79	295	1495	1367	39.74	543	981	897	28.50	256	1095	1001	40.80	408
57	725	663	30.48	202	1398	1278	39.40	504	978	894	28.48	255	922	843	37.55	316
58	916	837	35.23	295	1457	1332	41.97	559	1192	1090	33.14	361	1087	994	41.50	412
59	705	644	35.99	232	1310	1197	34.23	410	1076	984	28.51	280	1098	1004	42.28	424
60	912	834	35.86	299	1471	1345	41.74	561	1129	1032	32.46	335	1005	919	43.10	396
61	819	749	35.58	266	1426	1304	41.16	537	1014	927	31.52	292	1056	965	41.18	398
62	989	904	30.73	278	1319	1206	43.21	521	1023	935	30.11	282	962	879	39.12	344
63	907	829	35.53	295	1417	1295	41.88	542	953	871	32.80	286	1053	963	45.93	442
64	947	866	35.91	311	1374	1256	44.26	556	1103	1008	27.49	277	1021	933	45.68	426
65	963	880	30.37	267	1326	1212	46.93	569	1012	925	32.81	304	1016	929	47.35	440
66	1010	923	31.02	286	1303	1191	46.75	557	904	826	34.05	281	1095	1001	45.34	454
67	971	888	26.23	233	1295	1184	40.11	475	942	861	35.28	304	1121	1025	46.37	475
68	895	818	30.21	247	1234	1128	41.01	463	975	891	32.54	290	942	861	43.22	372

ตารางผนวกที่ ก20 (ต่อ)

Time course (days)	RC								RB							
	Reactor 1				Reactor 2				Reactor 3				Reactor 4			
	S : W (3.5 : 96.5) ^a				S : C : W (1.75 : 10 : 88.25) ^a				S : W (3.5 : 96.5) ^a				S : C : W (1.75 : 10 : 88.25) ^a			
	Total gas (ml/day)	Total gas (ml/day)	CH ₄ (%)	CH ₄ ^c (ml/day)	Total gas (ml/day)	Total gas (ml/day)	CH ₄ (%)	CH ₄ ^c (ml/day)	Total gas (ml/day)	Total gas (ml/day)	CH ₄ (%)	CH ₄ ^c (ml/day)	Total gas (ml/day)	Total gas (ml/day)	CH ₄ (%)	CH ₄ ^c (ml/day)
	at STP ^b			at STP ^b	at STP ^b			at STP ^b	at STP ^b			at STP ^b	at STP ^b			at STP ^b
69	754	689	35.65	246	1493	1365	50.34	687	983	899	38.20	343	1095	1001	47.88	479
70	975	891	35.86	320	1455	1330	49.41	657	990	905	38.14	345	910	832	45.06	375
71	994	909	31.78	289	1385	1266	52.96	670	985	900	37.47	337	1012	925	46.48	430
72	973	889	31.90	284	1229	1123	49.61	557	963	880	38.60	340	1085	992	46.56	462
73	913	835	35.37	295	1269	1160	53.94	626	918	839	37.67	316	1055	964	46.28	446
74	908	830	30.11	250	1284	1174	44.11	518	902	825	35.21	290	993	908	45.28	411
75	901	824	31.44	259	1384	1265	43.21	547	896	819	30.12	247	1102	1007	43.19	435
Average ^d	875	799	31.77	254	1336	1222	43.97	537	950	868	32.54	282	1052	962	41.49	399

หมายเหตุ ^a สัดส่วนเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักสด, ^b วิธีคำนวณปริมาตรก๊าซทั้งหมดที่ผลิตได้ต่อวันที่ STP แสดงดังภาคผนวก ข, ^c ปริมาตรก๊าซมีเทนที่ผลิตได้ต่อวันมาจากผลคูณระหว่างปริมาตรก๊าซทั้งหมดกับเปอร์เซ็นต์ก๊าซมีเทน, ^d ค่าเฉลี่ยในช่วงระยะเวลาที่ระบบอยู่ในสภาวะคงที่ (Steady state) วันที่ 41 - 75, S คือฟางข้าว, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค, RC คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักโค, RB คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักกระบือ และ FW คือน้ำหนักสด

ตารางผนวกที่ ก21 ปริมาตรมีเทนที่ผลิตได้รวมทุก 5 วัน^ก (ที่ STP) จากการทดลองชุดที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักฟางข้าว และการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก

(ml/5days)

Time course (days)	RC		RB	
	Reactor 1	Reactor 2	Reactor 3	Reactor 4
	S : W	S : C : W	S : W	S : C : W
	(3.5 : 96.5) ^ข	(1.75 : 10 : 88.25) ^ข	(3.5 : 96.5) ^ข	(1.75 : 10 : 88.25) ^ข
5	430	763	577	749
10	527	1116	599	1072
15	740	1297	446	1113
20	670	1168	555	1112
25	835	1558	824	1816
30	1574	2048	1756	1944
35	1333	2488	1796	1930
40	1223	2441	1461	1886
45	1128	2477	1238	1898
50	1090	2567	1247	1768
55	1227	2708	1380	1968
60	1322	2577	1487	1958
65	1417	2725	1440	2050
70	1332	2838	1564	2155
75	1377	2918	1530	2184
Average ^ค	1270	2687	1412	1997

หมายเหตุ ^ก ปริมาตรมีเทนที่ผลิตได้ ในแต่ละรอบของการเติมสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์ (มีการเติมทุก ๆ 5 วัน), ^ข สัดส่วนเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักสด, ^ค ค่าเฉลี่ยในช่วงระยะเวลาที่ระบบอยู่ในสภาวะคงที่ (Steady state) วันที่ 41 – 75, S คือฟางข้าว, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค, RC คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักโค, RB คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักกระบือ และ FW คือน้ำหนักสด

ตารางผนวกที่ ก22 ค่า COD เฉลี่ยของสารละลายผสมฟางข้าวที่เติมเข้าระบบของการทดลองชุดที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักฟางข้าว และการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก

Reactor	Mixed culture	Substrate	Ratio (% FW)	COD (g/L)
1	RC	S : W	3.5 : 96.5	23.70
2	RC	S : C : W	1.75 : 10 : 88.25	31.68
3	RB	S : W	3.5 : 96.5	23.70
4	RB	S : C : W	1.75 : 10 : 88.25	31.68

หมายเหตุ S คือฟางข้าว, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค, RC คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักโค, RB คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักกระบือ และ FW คือน้ำหนักสด

ตารางผนวกที่ ก23 ค่า COD ของสารละลายผสมฟางข้าวที่ออกจากระบบของการทดลองชุดที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักฟางข้าว และการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถึงหมัก

(g/L)

Time course (days)	RC		RB	
	Reactor 1	Reactor 2	Reactor 3	Reactor 4
	S : W	S : C : W	S : W	S : C : W
	(3.5 : 96.5) ^a	(1.75 : 10 : 88.25) ^a	(3.5 : 96.5) ^a	(1.75 : 10 : 88.25) ^a
45	9.63	15.56	9.63	16.40
50	9.70	14.12	9.38	16.13
55	9.59	14.97	9.59	16.13
60	9.80	15.07	9.70	16.44
65	9.66	15.53	9.66	16.42
70	9.54	15.17	9.43	16.26
75	9.65	15.39	9.32	16.31
Average	9.65	15.12	9.53	16.30

หมายเหตุ ^a สัดส่วนเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักสด, S คือฟางข้าว, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค, RC คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักโค, RB คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักกระบือและ FW คือน้ำหนักสด

ตารางผนวกที่ ก24 ค่า TVS เฉลี่ยของสารละลายผสมฟางข้าวที่เติมเข้าระบบของการทดลองชุดที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักฟางข้าว และการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก

Reactor	Mixed culture	Substrate	Ratio (% FW)	TVS (g/L)
1	RC	S : W	3.5 : 96.5	15.98
2	RC	S : C : W	1.75 : 10 : 88.25	20.55
3	RB	S : W	3.5 : 96.5	15.98
4	RB	S : C : W	1.75 : 10 : 88.25	20.55

หมายเหตุ S คือฟางข้าว, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค, RC คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักโค, RB คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักกระบือ และ FW คือน้ำหนักสด

ตารางผนวกที่ ก25 ค่า TVS ของสารละลายผสมฟางข้าวที่ออกจากระบบของการทดลองชุดที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักฟางข้าว และการหมักฟางข้าวร่วมกับ มูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละ ถึงหมัก

(g/L)

Time course (days)	RC		RB	
	Reactor 1	Reactor 2	Reactor 3	Reactor 4
	S : W	S : C : W	S : W	S : C : W
	(3.5 : 96.5) ^a	(1.75 : 10 : 88.25) ^a	(3.5 : 96.5) ^a	(1.75 : 10 : 88.25) ^a
45	5.38	7.44	5.04	7.10
50	5.28	7.36	5.40	7.38
55	5.34	7.28	5.52	7.32
60	4.98	7.74	4.94	7.14
65	4.50	7.42	5.42	7.16
70	5.00	7.60	4.10	7.24
75	5.18	8.00	4.36	7.08
Average	5.10	7.55	4.97	7.21

หมายเหตุ ^a สัดส่วนเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักสด, S คือฟางข้าว, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค, RC คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักโค, RB คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักกระบือและ FW คือน้ำหนักสด

ตารางผนวกที่ ก26 ค่า TS เฉลี่ยของสารละลายผสมฟางข้าวที่เติมเข้าระบบของการทดลองชุดที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักฟางข้าว และการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก

Reactor	Mixed culture	Substrate	Ratio (% FW)	TS (g/L)
1	RC	S : W	3.5 : 96.5	19.40
2	RC	S : C : W	1.75 : 10 : 88.25	25.52
3	RB	S : W	3.5 : 96.5	19.40
4	RB	S : C : W	1.75 : 10 : 88.25	25.52

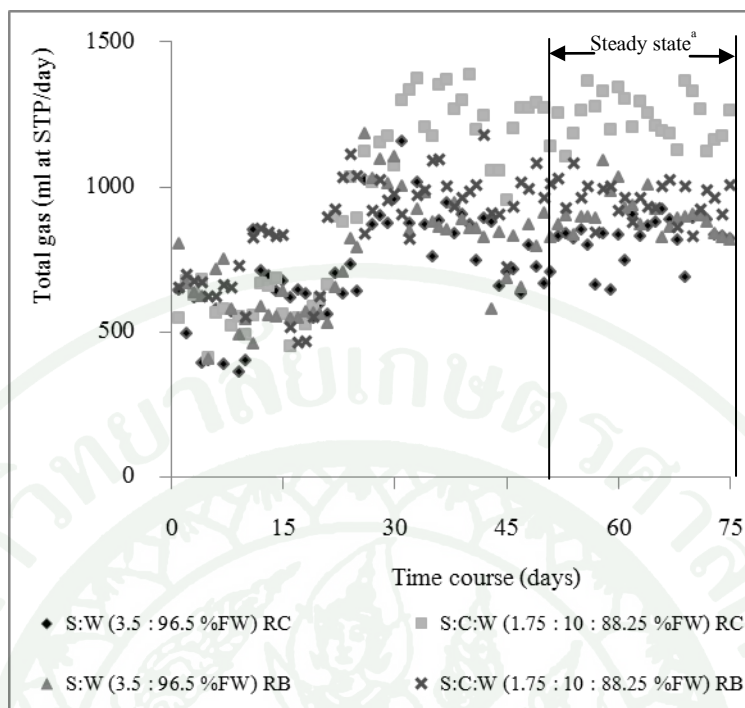
หมายเหตุ S คือฟางข้าว, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค, RC คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักโค, RB คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักกระบือ และ FW คือน้ำหนักสด

ตารางผนวกที่ ก27 ค่า TS ของสารละลายผสมฟางข้าวที่ออกจากระบบของการทดลองชุดที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักฟางข้าว และการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถึงหมัก

(g/L)

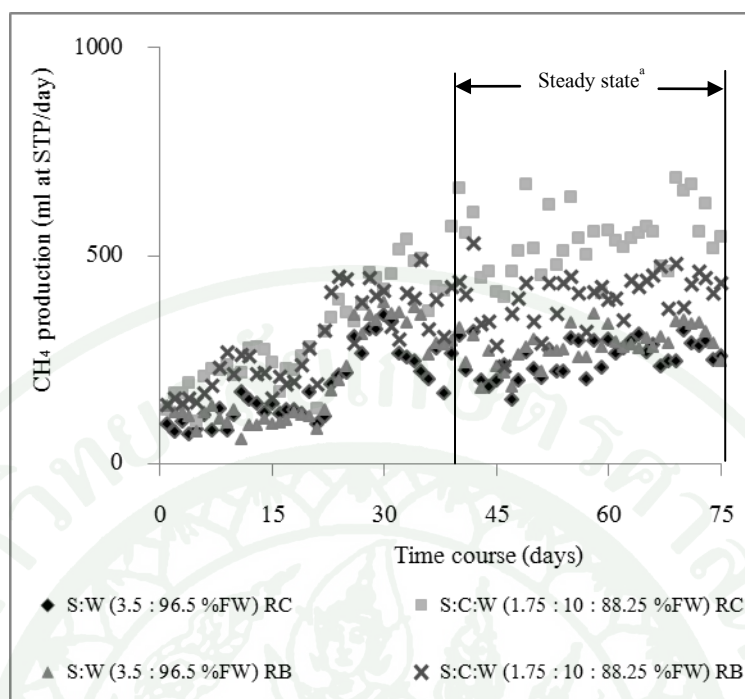
Time course (days)	RC		RB	
	Reactor 1	Reactor 2	Reactor 3	Reactor 4
	S : W	S : C : W	S : W	S : C : W
	(3.5 : 96.5) ^a	(1.75 : 10 : 88.25) ^a	(3.5 : 96.5) ^a	(1.75 : 10 : 88.25) ^a
45	9.96	14.24	10.64	14.24
50	10.44	13.26	11.08	14.16
55	10.06	13.68	10.62	14.14
60	9.24	13.64	9.78	15.06
65	8.72	13.66	9.82	14.12
70	9.18	13.86	9.64	14.14
75	9.76	14.14	10.06	14.38
Average	9.63	13.79	10.24	14.32

หมายเหตุ ^a สัดส่วนเปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักสด, S คือฟางข้าว, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค, RC คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักโค, RB คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักกระบือและ FW คือน้ำหนักสด



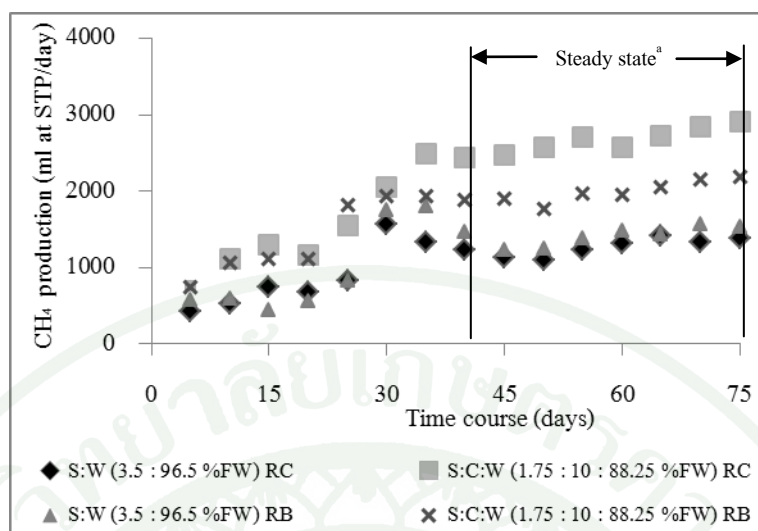
ภาพผนวกที่ ก19 ปริมาตรก๊าซทั้งหมดที่ผลิตได้ (ml/day) ที่ STP ของการทดลองชุดที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักฟางข้าว และการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก

หมายเหตุ ^a ระยะเวลาที่ระบบอยู่ในสภาวะคงที่ (Steady state) วันที่ 41 – 75, S คือฟางข้าว, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค, RC คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักโค, RB คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักกระบือ และ FW คือน้ำหนักสด



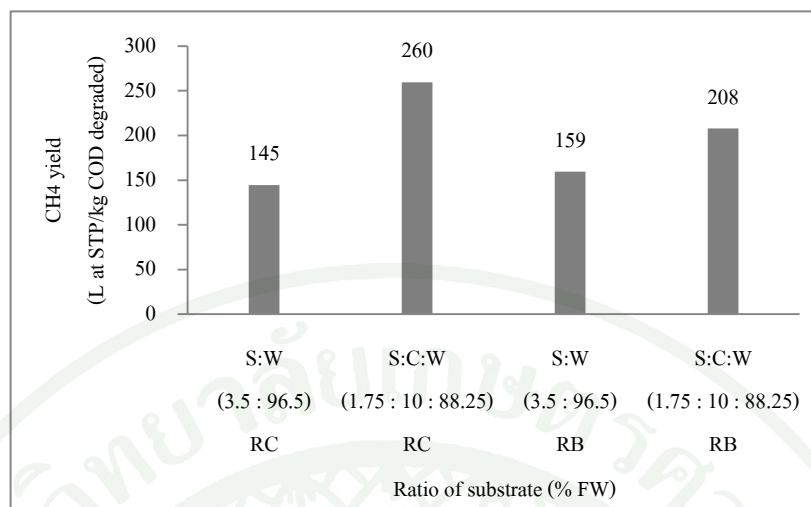
ภาพผนวกที่ ก20 ปริมาตรมีเทน (ml/day) ที่ STP ของการทดลองชุดที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักฟางข้าว และการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก

หมายเหตุ ^a ระยะเวลาที่ระบบอยู่ในสภาวะคงที่ (Steady state) วันที่ 41 – 75, S คือฟางข้าว, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค, RC คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักโค, RB คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักกระบือ และ FW คือน้ำหนักสด



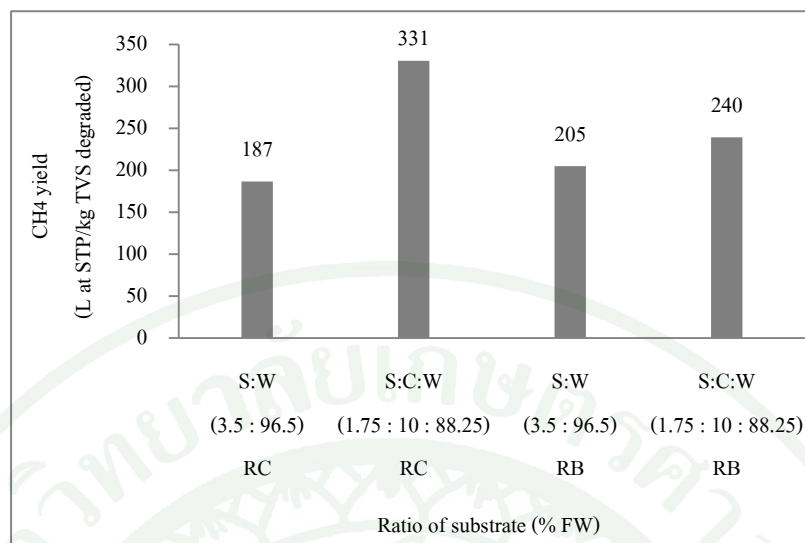
ภาพผนวกที่ ก21 ปริมาตรมีเทนรวมทุก 5 วัน (ml/5days) ที่ STP ของการทดลองชุดที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักฟางข้าว และการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก

หมายเหตุ ^a ระยะเวลาที่ระบบอยู่ในสภาวะคงที่ (Steady state) วันที่ 41 – 75, S คือฟางข้าว, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค, RC คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักโค, RB คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักกระบือ และ FW คือน้ำหนักสด



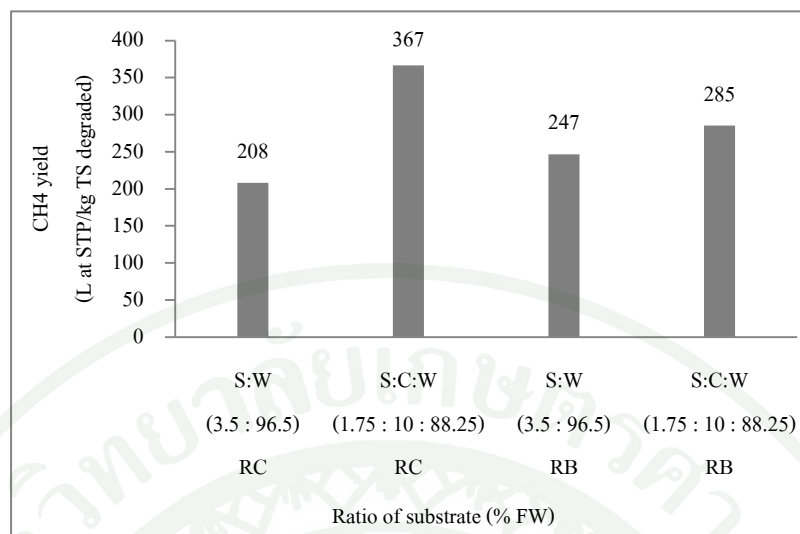
ภาพผนวกที่ ก22 ผลผลิตมีเทน (L at STP/kg COD degraded) ที่ STP ของการทดลองชุดที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักฟางข้าว และการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก

หมายเหตุ S คือฟางข้าว, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค, RC คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักโค, RB คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักกระบือ และ FW คือน้ำหนักสด



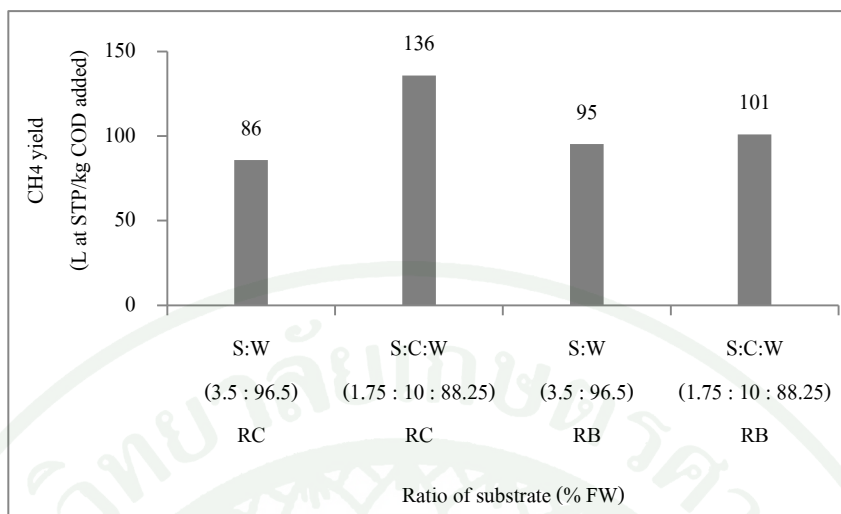
ภาพผนวกที่ ก23 ผลผลิตมีเทน (L at STP/kg TVS degraded) ที่ STP ของการทดลองชุดที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักฟางข้าว และการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก

หมายเหตุ S คือฟางข้าว, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค, RC คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักโค, RB คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักกระบือ และ FW คือน้ำหนักสด



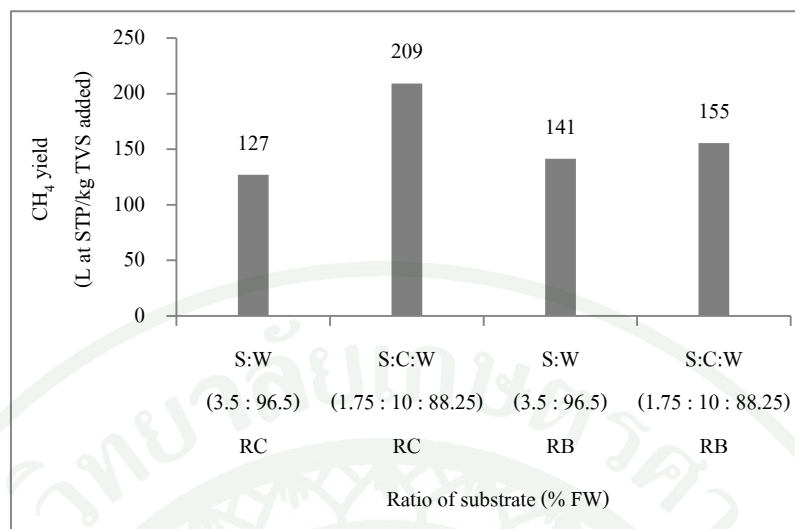
ภาพผนวกที่ ก24 ผลผลิตมีเทน (L at STP/kg TS degraded) ที่ STP ของการทดลองชุดที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักฟางข้าว และการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก

หมายเหตุ S คือฟางข้าว, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค, RC คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักโค, RB คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักกระบือ และ FW คือน้ำหนักสด



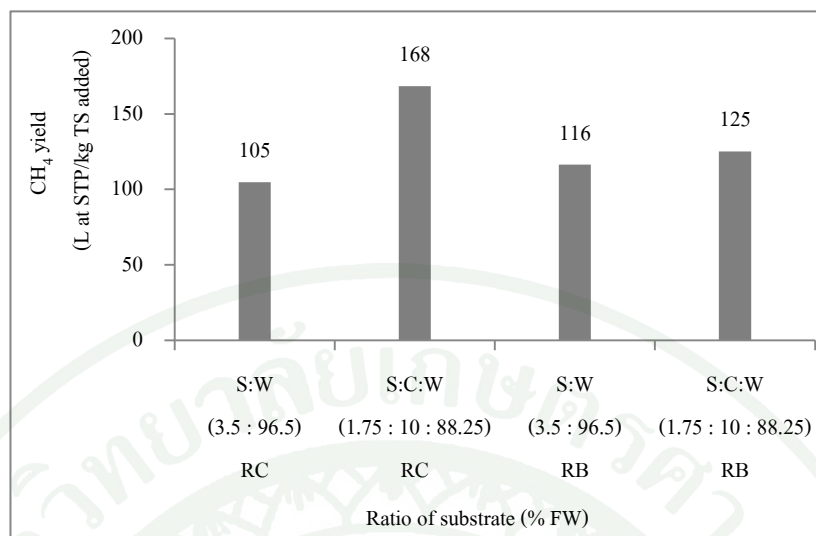
ภาพผนวกที่ ก25 ผลผลิตมีเทน (L at STP/kg COD added) ที่ STP ของการทดลองชุดที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักฟางข้าว และการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก

หมายเหตุ S คือฟางข้าว, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค, RC คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักโค, RB คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักกระบือ และ FW คือน้ำหนักสด



ภาพผนวกที่ ก26 ผลผลิตมีเทน (L at STP/kg TVS added) ที่ STP ของการทดลองชุดที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักฟางข้าว และการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก

หมายเหตุ S คือฟางข้าว, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค, RC คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักโค, RB คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักกระบือ และ FW คือน้ำหนักสด



ภาพผนวกที่ ก27 ผลผลิตมีเทน (L at STP/kg TS added) ที่ STP ของการทดลองชุดที่ 2 (ศึกษาผลผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักฟางข้าว และการหมักฟางข้าวร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักโคและกระบือ) ในแต่ละถังหมัก

หมายเหตุ S คือฟางข้าว, W คือน้ำประปา, C คือมูลโค, RC คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักโค, RB คือเชื้อจุลินทรีย์จากกระเพาะหมักกระบือ และ FW คือน้ำหนักสด



การหาน้ำหนักหุ้ยนเปียร์และมูลโคในการผลิตมีเทน 1 m³

การหาน้ำหนักหุ้ยนเปียร์ในการผลิตมีเทน 1 m³ โดยใช้สัดส่วนหุ้ยนเปียร์เพียงอย่างเดียว 20 %FW และใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักของโค ได้ผลผลิตมีเทน 70 L at STP/kg TS added (ตารางที่ 13) มีวิธีคำนวณดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{ผลิต CH}_4 \text{ 70 L} & \quad \text{ใช้หุ้ยนเปียร์แห้ง} \quad 1 \quad \text{kg DW} \\ \text{ผลิต CH}_4 \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} & \quad \text{ใช้หุ้ยนเปียร์แห้ง} \quad \frac{1 \times 1000}{70} = 14.4 \text{ kg DW} \\ \text{คิดเป็นหุ้ยนเปียร์สด} & \quad 14.4 \times \frac{100}{16.07} = 89.6 \text{ kg FW} \end{aligned}$$

ดังนั้นการผลิต CH₄ 1 m³ จากหุ้ยนเปียร์เพียงอย่างเดียว 20 %FW และใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักของโค จะได้จากหุ้ยนเปียร์แห้งหนัก 14.4 kg DW (89.6 kg FW) สำหรับการหาน้ำหนักหุ้ยนเปียร์โดยใช้หุ้ยนเปียร์เพียงอย่างเดียว 20 %FW และใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักของกระบือ ได้ผลผลิตมีเทน 55 L at STP/kg TS added (ตารางที่ 13) ในการผลิต CH₄ 1 m³ คำนวณได้โดยวิธีเดียวกันและได้ผลคือ จะต้องใช้หุ้ยนเปียร์แห้งหนัก 18.3 kg DW (113.9 kg FW)

การหาน้ำหนักหุ้ยนเปียร์และมูลโคในการผลิตมีเทน 1 m³ โดยใช้สัดส่วนหุ้ยนเปียร์ผสมมูลโค 10 : 10 %FW และใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักของโค หุ้ยนเปียร์มีค่า TS 16.07 % และมูลโคมีค่า TS 23.78 % (ตารางที่ 9) มีวิธีคำนวณดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{หุ้ยนเปียร์ 10 \%FW} & \quad \text{คิดเป็นหุ้ยนเปียร์แห้ง} \quad 10 \times \frac{16.07}{100} = 1.607 \% \\ \text{มูลโค 10 \%FW} & \quad \text{คิดเป็นมูลโคแห้ง} \quad 10 \times \frac{23.78}{100} = 2.378 \% \end{aligned}$$

เมื่อคิดเพียงหุ้ยนเปียร์แห้งและมูลโคแห้งผสมกัน

$$\begin{aligned} \text{จะมีหุ้ยนเปียร์แห้งอยู่} & \quad \frac{1.607}{(1.607+2.378)} \times 100 = 40.33 \% \\ \text{จะมีมูลโคแห้งอยู่} & \quad \frac{2.378}{(1.607+2.378)} \times 100 = 59.67 \% \end{aligned}$$

จากผลการทดลองได้ผลผลิตมีเทน 194 L at STP/kg TS added (ตารางที่ 13) จะได้ว่า

ผลิต CH_4 194 L ใช้หุ้ยเนเปียร์แห้งผสมมูลโคแห้ง 1 kg DW

ผลิต CH_4 $\frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}}$ ใช้หุ้ยเนเปียร์แห้งผสมมูลโคแห้ง $\frac{1 \times 1000}{194} = 5.15 \text{ kg DW}$

หาน้ำหนักหุ้ยเนเปียร์และมูลโค ในหุ้ยเนเปียร์แห้งผสมมูลโคแห้ง 5.15 kg DW

คิดเป็นหุ้ยเนเปียร์แห้ง $\frac{40.33}{100} \times 5.15 = 2.08 \text{ kg DW}$

คิดเป็นมูลโคแห้ง $\frac{59.67}{100} \times 5.15 = 3.07 \text{ kg DW}$

ดังนั้นการผลิต CH_4 1 m^3 จากหุ้ยเนเปียร์ผสมมูลโค 10 : 10 %FW และใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักของโค จะได้จากหุ้ยเนเปียร์แห้งหนัก 2.08 kg DW ผสมกับมูลโคแห้งหนัก 3.07 kg DW

หุ้ยเนเปียร์แห้ง 2.08 kg DW คิดเป็นหุ้ยเนเปียร์สด $2.08 \times \frac{100}{16.07} = 13 \text{ kg FW}$

มูลโคแห้ง 3.07 kg DW คิดเป็นมูลโคสด $3.07 \times \frac{100}{23.78} = 13 \text{ kg FW}$

ดังนั้นการผลิต CH_4 1 m^3 จากหุ้ยเนเปียร์ผสมมูลโค 10 : 10 %FW และใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักของโค จะได้จากหุ้ยเนเปียร์สดหนัก 13 kg FW ผสมกับมูลโคสดหนัก 13 kg FW

สำหรับการหาน้ำหนักหุ้ยเนเปียร์และมูลโคโดยใช้สัดส่วนหุ้ยเนเปียร์ผสมมูลโค 10 : 10 %FW โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักของกระบือ ได้ผลผลิตมีเทน 138 L at STP/kg TS added (ตารางที่ 13) ในการผลิต CH_4 1 m^3 คำนวณได้โดยวิธีเดียวกันและได้ผลคือ จะต้องใช้หุ้ยเนเปียร์แห้งหนัก 2.9 kg DW (18.2 kg FW) ผสมกับมูลโคแห้งหนัก 4.3 kg DW (18.2 kg FW)

การหาน้ำหนักฟางข้าวและมูลโคในการผลิตมีเทน 1 m³

การหาน้ำหนักฟางข้าวในการผลิตมีเทน 1 m³ โดยใช้สัดส่วนฟางข้าวเพียงอย่างเดียว 3.5 %FW และใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักของโค ได้ผลผลิตมีเทน 105 L at STP/kg TS added (ตารางที่ 16) มีวิธีคำนวณดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{ผลิต CH}_4 \text{ 105 L} & \quad \text{ใช้ฟางข้าวแห้ง} \quad 1 \quad \text{kg DW} \\ \text{ผลิต CH}_4 \frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}} & \quad \text{ใช้ฟางข้าวแห้ง} \quad \frac{1 \times 1000}{105} = 9.5 \quad \text{kg DW} \\ \text{คิดเป็นฟางข้าวสด} & \quad 14.4 \times \frac{100}{16.07} = 10.3 \text{ kg FW} \end{aligned}$$

ดังนั้นการผลิต CH₄ 1 m³ จากฟางข้าวเพียงอย่างเดียว 3.5 %FW และใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักของโค จะได้จากฟางข้าวแห้งหนัก 14.4 kg DW (89.6 kg FW) สำหรับการหาน้ำหนักฟางข้าวโดยใช้ฟางข้าวเพียงอย่างเดียว 3.5 %FW และใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักของกระบือ ได้ผลผลิตมีเทน 116 L at STP/kg TS added (ตารางที่ 16) ในการผลิต CH₄ 1 m³ คำนวณได้โดยวิธีเดียวกันและได้ผลคือ จะต้องใช้ฟางข้าวแห้งหนัก 8.6 kg DW (9.4 kg FW)

การหาน้ำหนักฟางข้าวและมูลโคในการผลิตมีเทน 1 m³ โดยใช้สัดส่วนฟางข้าวผสมมูลโค 1.75 : 10 %FW และใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักของโค ฟางข้าวมีค่า TS 91.92 % และมูลโคมีค่า TS 23.78 % (ตารางที่ 14) มีวิธีคำนวณดังต่อไปนี้

$$\begin{aligned} \text{ฟางข้าว 1.75 \%FW} & \quad \text{คิดเป็นฟางข้าวแห้ง} \quad 1.75 \times \frac{91.92}{100} = 1.6086 \% \\ \text{มูลโค 10 \%FW} & \quad \text{คิดเป็นมูลโคแห้ง} \quad 10 \times \frac{23.78}{100} = 2.378 \% \end{aligned}$$

เมื่อคิดเพียงฟางข้าวแห้งและมูลโคแห้งผสมกัน

$$\begin{aligned} \text{จะมีฟางข้าวแห้งอยู่} & \quad \frac{1.6086}{(1.6086+2.378)} \times 100 = 40.35 \% \\ \text{จะมีมูลโคแห้งอยู่} & \quad \frac{2.378}{(1.6086+2.378)} \times 100 = 59.65 \% \end{aligned}$$

จากผลการทดลองได้ผลผลิตมีเทน 168 L at STP/kg TS added (ตารางที่ 16) จะได้ว่า

ผลิต CH_4 168 L ใช้ฟางข้าวแห้งผสมมูลโคแห้ง 1 kg DW

ผลิต CH_4 $\frac{1 \text{ m}^3}{1000 \text{ L}}$ ใช้ฟางข้าวแห้งผสมมูลโคแห้ง $\frac{1 \times 1000}{168} = 5.95$ kg DW

หาน้ำหนักฟางข้าวและมูลโค ในฟางข้าวแห้งผสมมูลโคแห้ง 5.95 kg DW

คิดเป็นฟางข้าวแห้ง $\frac{40.35}{100} \times 5.95 = 2.40$ kg DW

คิดเป็นมูลโคแห้ง $\frac{59.65}{100} \times 5.95 = 3.55$ kg DW

ดังนั้นการผลิต CH_4 1 m^3 จากฟางข้าวผสมมูลโค 1.75 : 10 %FW และใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักของโค จะได้จากฟางข้าวแห้งหนัก 2.4 kg DW ผสมกับมูลโคแห้งหนัก 3.55 kg DW

ฟางข้าวแห้ง 2.40 kg DW คิดเป็นฟางข้าวสด $2.40 \times \frac{100}{91.92} = 2.6$ kg FW

มูลโคแห้ง 3.55 kg DW คิดเป็นมูลโคสด $3.55 \times \frac{100}{23.78} = 14.9$ kg FW

ดังนั้นการผลิต CH_4 1 m^3 จากฟางข้าวผสมมูลโค 1.75 : 10 %FW และใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักของโค จะได้จากฟางข้าวสดหนัก 2.6 kg FW ผสมกับมูลโคสดหนัก 14.9 kg FW

สำหรับการหาน้ำหนักฟางข้าวและมูลโคโดยใช้สัดส่วนฟางข้าวผสมมูลโค 1.75 : 10 %FW โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นจากกระเพาะหมักของกระบือ ได้ผลผลิตมีเทน 125 L at STP/kg TS added (ตารางที่ 16) ในการผลิต CH_4 1 m^3 คำนวณได้โดยวิธีเดียวกันและได้ผลคือ จะต้องใช้ฟางข้าวแห้งหนัก 3.2 kg DW (3.5 kg FW) ผสมกับมูลโคแห้งหนัก 4.8 kg DW (20.1 kg FW)

วิธีคำนวณ Organic loading rate ในรูป COD

ในการคิด Organic loading rate ในหน่วยกิโลกรัม COD ต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน สามารถคิดได้จากอัตราการเติมสารอินทรีย์คูณกับค่า COD ที่เข้าระบบแล้วหารด้วยปริมาตรความจุของถังหมัก ดังสมการ

$$\text{OLR (kg COD /m}^3 \cdot \text{day)} = \frac{QS_0}{V}$$

โดย OLR คือ Organic loading rate หน่วยกิโลกรัม COD ต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน, kg COD /m³·day

Q คือ อัตราการเติมสารอินทรีย์ หน่วยมิลลิลิตรต่อวัน, ml/day

S₀ คือ COD ที่เข้าระบบ หน่วยกรัมต่อลิตร, g/L

V คือ ปริมาตรความจุของถังหมัก หน่วยมิลลิลิตร, ml

ตัวอย่างการคำนวณ OLR ของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 1 (ศึกษาสัดส่วนหมักเนเปียร์และหมักเนเปียร์ผสมมูลโคที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ) สำหรับสารละลายผสมหมักเนเปียร์เพียงอย่างเดียว 10 % FW (ถังหมักที่ 1) มีค่า COD ที่เติมเข้าระบบ 15.75 g/L มีอัตราการเติมสารอินทรีย์ 125 ml/day และมีปริมาตรความจุของถังหมัก 5000 ml จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \text{OLR (kg COD /m}^3 \cdot \text{day)} &= \frac{(125 \text{ ml/day})(15.75 \text{ g COD/L})}{5000 \text{ ml}} \times \frac{\text{kg}}{1000 \text{ g}} \times \frac{1000 \text{ L}}{\text{m}^3} \\ &= 0.39 \text{ kg COD /m}^3 \cdot \text{day} \end{aligned}$$

ดังนั้นสารละลายผสมหมักเนเปียร์เพียงอย่างเดียว 10 % FW (ถังหมัก ที่ 1) จะมีค่า OLR 0.39 kg COD /m³·day สำหรับสารละลายผสมสัดส่วนอื่นก็ใช้วิธีการคำนวณเช่นเดียวกัน

วิธีคำนวณ Organic loading rate ในรูป TVS

สำหรับการคิด Organic loading rate ในหน่วยกิโลกรัม TVS ต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน สามารถคิดได้จากอัตราการเติมสารอินทรีย์คูณกับค่า TVS ที่เข้าระบบแล้วหารด้วยปริมาตรความจุของถังหมัก ดังสมการ

$$\text{OLR (kg TVS /m}^3\cdot\text{day)} = \frac{QS_0}{V}$$

โดย OLR คือ Organic loading rate หน่วยกิโลกรัม TVS ต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน, kg TVS /m³·day

Q คือ อัตราการเติมสารอินทรีย์ หน่วยมิลลิลิตรต่อวัน, ml/day

S₀ คือ TVS ที่เข้าระบบ หน่วยกรัมต่อลิตร, g/L

V คือ ปริมาตรความจุของถังหมัก หน่วยมิลลิลิตร, ml

ตัวอย่างการคำนวณค่า OLR ของการทดลองชุดที่ 1 ระยะที่ 1 (ศึกษาสัดส่วนหุ้เนเปียร์และหุ้เนเปียร์ผสมมูลโคที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ) สำหรับสารละลายผสมหุ้เนเปียร์เพียงอย่างเดียว 10 % FW (ถังหมักที่ 1) มีค่า TVS ที่เติมเข้าระบบ 9.88 g/L มีอัตราการเติมสารอินทรีย์ 125 ml/day และมีปริมาตรความจุของถังหมัก 5000 ml จะได้ว่า

$$\begin{aligned}\text{OLR (kg TVS /m}^3\cdot\text{day)} &= \frac{(125 \text{ ml/day})(9.88 \text{ g TVS /L})}{5000 \text{ ml}} \times \frac{\text{kg}}{1000 \text{ g}} \times \frac{1000 \text{ L}}{\text{m}^3} \\ &= 0.25 \text{ kg TVS /m}^3\cdot\text{day}\end{aligned}$$

ดังนั้นสารละลายผสมหุ้เนเปียร์เพียงอย่างเดียว 10 % FW (ถังหมัก ที่ 1) จะมีค่า OLR 0.25 kg TVS /m³·day สำหรับสารละลายผสมสัดส่วนอื่นก็ใช้วิธีการคำนวณเช่นเดียวกัน

วิธีการคำนวณประสิทธิภาพการกำจัด COD

ประสิทธิภาพการในกำจัด COD ของระบบสามารถคำนวณได้โดยใช้ค่า COD ของสารละลายผสมหมักเนเปียร์ที่เดิมเข้าระบบ และค่า COD ของสารละลายผสมหมักเนเปียร์ที่ออกจากระบบ ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{ประสิทธิภาพการกำจัด COD (\%)} = \frac{[\text{COD in (g/L)} - \text{COD out (g/L)}]}{\text{COD in (g/L)}} \times 100$$

โดย COD in คือค่า COD ของสารละลายผสมหมักเนเปียร์ที่เดิมเข้าระบบ (g/L) และ COD out คือค่า COD ของสารละลายผสมหมักเนเปียร์ที่ออกจากระบบ (g/L)

วิธีการคำนวณประสิทธิภาพการกำจัด TVS

ประสิทธิภาพการในกำจัด TVS ของระบบสามารถคำนวณได้โดยใช้ค่า TVS ของสารละลายผสมหมักเนเปียร์ที่เดิมเข้าระบบ และค่า TVS ของสารละลายผสมหมักเนเปียร์ที่ออกจากระบบ ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{ประสิทธิภาพการกำจัด TVS (\%)} = \frac{[\text{TVS in (g/L)} - \text{TVS out (g/L)}]}{\text{TVS in (g/L)}} \times 100$$

โดย TVS in คือ ค่า TVS ของสารละลายผสมหมักเนเปียร์ที่เดิมเข้าระบบ (g/L) และ TVS out คือค่า TVS ของสารละลายผสมหมักเนเปียร์ที่ออกจากระบบ (g/L)

วิธีการคำนวณปริมาตรก๊าซที่ STP

การคำนวณปริมาตรก๊าซที่ STP เป็นการคำนวณโดยการเปลี่ยนปริมาตรก๊าซที่สภาวะการทดลอง (Room condition) เป็นปริมาตรก๊าซที่สภาวะมาตรฐาน (Standard temperature and pressure; STP)

STP คือสภาวะที่อุณหภูมิ 0°C (273.15 เคลวิน) และที่ความดัน 1 บรรยากาศ (1.013×10^5 นิวตันต่อตารางเมตร)

สภาวะการทดลอง คือสภาวะที่อุณหภูมิห้องโดยเฉลี่ย 30°C และที่ความดันของก๊าซในระบบเก็บก๊าซ ซึ่งใช้สมการในการคำนวณดังต่อไปนี้

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

โดย P_1 คือความดันก๊าซที่ STP หน่วยนิวตันต่อเมตร, N/m

P_2 คือความดันก๊าซที่ที่สภาวะการทดลอง หน่วยนิวตันต่อเมตร, N/m

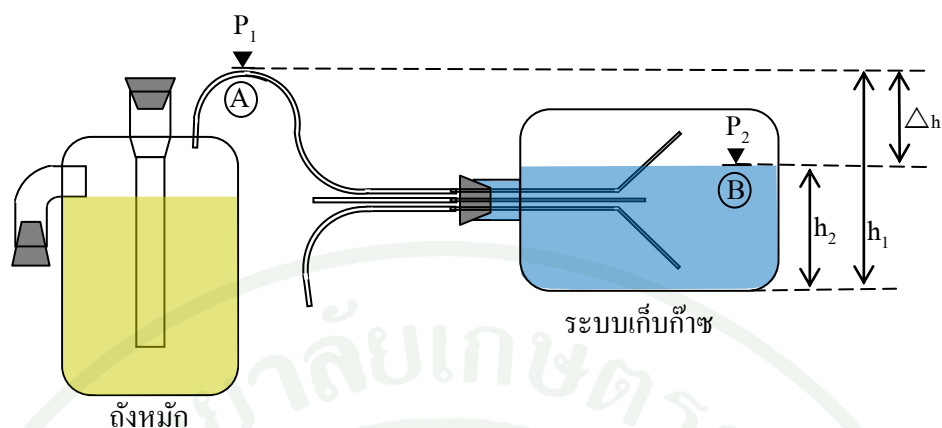
V_1 คือปริมาตรก๊าซที่ STP หน่วยมิลลิลิตร, ml

V_2 คือปริมาตรก๊าซที่สภาวะการทดลอง หน่วยมิลลิลิตร, ml

T_1 คืออุณหภูมิที่ STP หน่วยเคลวิน, K

T_2 คืออุณหภูมิที่สภาวะการทดลอง หน่วยเคลวิน, K

ในการคำนวณเปลี่ยนปริมาตรก๊าซที่สภาวะทดลอง เป็นปริมาตรก๊าซที่ STP สามารถทำได้ดังต่อไปนี้



ภาพผนวกที่ ๑ ระบบเก็บก๊าซของการทดลอง

จากภาพผนวกที่ ๑ สามารถคำนวณหาความดันก๊าซในระบบเก็บก๊าซของการทดลอง (P_2) ได้ดังนี้

$$\text{ความดันที่จุด A} = \text{ความดันที่จุด B}$$

$$P_1 + \rho g h_1 = P_2 + \rho g h_2$$

$$P_2 = P_1 + \rho g (h_1 - h_2)$$

โดย $P_1 = 1.013 \times 10^5$ นิวตันต่อเมตร, N/m

$\rho = 1,000$ กิโลกรัมต่อตารางเมตร, kg/m³

$g = 9.8$ เมตรต่อวินาทีต่อวินาที, m/s²

$\Delta h = (h_1 - h_2)$

Δh = ค่าความสูงของก๊าซที่อยู่ในระบบเก็บก๊าซ (m) ได้จากการทดลอง

ค่าความสูงของก๊าซ ($h_1 - h_2$) ที่อยู่ในระบบเก็บก๊าซวัดได้คือ 15 cm หรือ 15×10^{-2} m และ อุณหภูมิเฉลี่ย 30 °C

$$P_2 = (1.013 \times 10^5 \text{ N/m}^2) + (1,000 \times 9.8 \times 15 \times 10^{-2})$$

$$P_2 = 102,770 \text{ N/m}^2$$

$$P_2 \cong 1 \text{ atm}$$

หาค่าความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรก๊าซที่ STP และปริมาตรก๊าซที่สภาวะการทดลองจากสมการต่อไปนี้

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

โดย P_1 = ความดันที่ STP ($101,300 \text{ N/m}^2$)

P_2 = ความดันที่สภาวะการทดลอง ($102,770 \text{ N/m}^2$)

T_1 = อุณหภูมิ (K) ที่ STP (273.15 K)

T_2 = อุณหภูมิ (K) ที่สภาวะการทดลอง ($273.15+30 \text{ K}$)

V_2 = ปริมาตรก๊าซที่สภาวะการทดลอง (ml)

หาค่า V_1 (ปริมาตรก๊าซที่ STP) ด้วยการแทนค่าลงสมการต่อไปนี้

$$V_1 = \frac{P_2 V_2 T_1}{T_2 P_1}$$

$$V_1 = \frac{102,770 \times V_2 \times (273.15+30)}{273.15 \times 101,300}$$

$$V_1 = 0.91411 V_2 \text{ ml}$$

ดังนั้นในการเปลี่ยนปริมาตรก๊าซทั้งหมดที่สภาวะการทดลอง เป็นปริมาตรก๊าซทั้งหมดที่ STP นั้น ทำได้โดยคูณค่า 0.91411 กับปริมาตรก๊าซทั้งหมดที่สภาวะทดลองในหน่วยมิลลิลิตร

การคำนวณผลผลิตมีเทน

ผลผลิตมีเทน (Methane yield) คือ ปริมาตรมีเทนที่ผลิตได้ต่อ COD ที่ถูกกำจัด (L at STP/kg COD degraded) หรือต่อ TVS ที่ถูกกำจัด (L at STP/kg TVS degraded) หรือต่อ TS ที่ถูกกำจัด (L at STP/kg TS degraded) หรืออาจแสดงในรูปปริมาตรมีเทนที่ผลิตได้ต่อ COD ที่เติมเข้าระบบ (L at STP/kg COD added) หรือต่อ TVS ที่เติมเข้าระบบ (L at STP/kg TVS added) หรือต่อ TS ที่เติมเข้าระบบ (L at STP/kg TS added) โดยวิธีการคำนวณผลผลิตมีเทนในรูปปริมาตรมีเทนที่ผลิตได้ต่อ COD ที่ถูกกำจัด แสดงดังสมการต่อไปนี้

$$\text{ผลผลิตมีเทน (L at STP/kg COD degraded)} = \frac{\text{ปริมาตรมีเทนที่ผลิตได้ (L)} \times 1000}{Q(S_0 - S)}$$

เมื่อ Q คือ อัตราการเติมสารอินทรีย์ทุก 5 วัน หน่วยมิลลิเมตรต่อ 5 วัน, ml/5days

S_0 คือ ค่า COD ที่เข้าระบบ หน่วยกรัมต่อลิตร, g/L

S คือ ค่า COD ที่ออกจากระบบ หน่วยกรัมต่อลิตร, g/L

โดยปริมาตรมีเทนที่ผลิตได้ คัดจากปริมาตรก๊าซมีเทนรวมทุก 5 วันที่ STP หน่วยมิลลิเมตรต่อ 5 วัน, ml/5 days

สำหรับการคำนวณผลผลิตมีเทนในรูปของ TVS ที่ถูกกำจัด (L at STP/kg TVS degraded) ใช้วิธีการคำนวณเช่นเดียวกันโดยเปลี่ยนค่า S_0 และ S เป็นค่า TVS ที่เติมเข้าระบบ และ TVS ที่ออกจากระบบตามลำดับ และในรูปของ TS ที่ถูกกำจัด (L at STP/kg TS degraded) ใช้วิธีการคำนวณเช่นเดียวกันโดยเปลี่ยนค่า S_0 และ S เป็นค่า TS ที่เติมเข้าระบบ และ TS ที่ออกจากระบบตามลำดับ

วิธีการคำนวณผลผลิตมีเทนในรูปปริมาตรมีเทนที่ผลิตได้ต่อ COD ที่เติมเข้าระบบ แสดงดังสมการต่อไปนี้

$$\text{ผลผลิตมีเทน (L at STP/kg COD added)} = \frac{\text{ปริมาตรมีเทนที่ผลิตได้ (L)} \times 1000}{Q(S_0)}$$

โดยปริมาตรมีเทนที่ผลิตได้ คัดจากปริมาตรก๊าซมีเทนรวมทุก 5 วันที่ STP หน่วยมิลลิลิตร ต่อ 5 วัน, ml/5 days

เมื่อ Q คือ อัตราการเติมสารอินทรีย์ทุก 5 วัน หน่วยมิลลิลิตรต่อ 5 วัน, ml/5 days

S_0 คือ ค่า COD ที่เข้าระบบ หน่วยกรัมต่อลิตร, g/L

สำหรับการคำนวณผลผลิตมีเทนในรูปของ TVS ที่เติมเข้าระบบ (L at STP/kg TVS added) ใช้วิธีการคำนวณเช่นเดียวกันโดยเปลี่ยนค่า S_0 เป็นค่า TVS ที่เติมเข้าระบบ และในรูปของ TS ที่เติมเข้าระบบ (L at STP/kg TS added) ใช้วิธีการคำนวณเช่นเดียวกันโดยเปลี่ยนค่า S_0 เป็นค่า TS ที่เติมเข้าระบบ



การวิเคราะห์ฟอสฟอรัสและไนโตรเจนในรูป Total kjeldahl nitrogen (TKN)

1. การเตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ฟอสฟอรัสและไนโตรเจน

1.1 ชั่งตัวอย่างประมาณ 0.2 g ด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง ใส่ลงในหลอดตัวอย่าง (Digestion tube) ขนาด 250 ml

1.2 เติม Catalyst (Se 1 g และ Na_2SO_4 100 g) 0.05 g

1.3 เติมกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) 5 ml

1.4 นำตัวอย่างไปย่อยด้วยเครื่องย่อย (Block digestion unit) Gerhardt รุ่น KB 20 S โดยเริ่มต้นย่อยที่อุณหภูมิ 100 °C ประมาณ 1 ชั่วโมง และปรับอุณหภูมิเพิ่มเป็น 280°C ระหว่างย่อยจะเกิดควันสีขาวขุ่นและสารละลายจะเปลี่ยนจากสีดำกลายเป็นสีเหลืองใส จากนั้นย่อยต่อจนกระทั่งสารละลายกลายเป็นสีใสและทิ้งให้อยู่ในสภาวะอุณหภูมิห้อง

1.5 เติมน้ำกลั่น Deionized water 20 ml ลงในหลอดตัวอย่าง โดยฉีดล้างด้านข้างหลอดให้สารลงไปให้หมด จากนั้นวางหลอดตัวอย่างบนเครื่องเขย่าสาร (Vortex mixer) 30 วินาที

2. วิธีการวิเคราะห์ฟอสฟอรัส

2.1 กรองตัวอย่างด้วยกระดาษกรองเบอร์ 5 โดยใช้ Volumetric flask ขนาด 50 ml

2.2 นำตัวอย่างที่ผ่านการกรองแล้วมาเติมสารให้สี (Vanadomolybdate reagent) 10 ml และปรับปริมาตรเป็น 50 ml ด้วยน้ำกลั่น Deionized water จากนั้นทิ้งไว้ 10 นาที (อย่าให้เกิน 30 นาที)

2.3 เตรียมสารละลายฟอสเฟตความเข้มข้นมาตรฐาน (Standard phosphate solution) ความเข้มข้น 1, 2, 3, 4 และ 5 mg/L โดยใช้ปิเปตดูดสาร Stock phosphate solution (KH_2PO_4) ความเข้มข้น 50 mg/L มา 1, 2, 3, 4 และ 5 ml ตามลำดับ ใส่ใน Volumetric flask ขนาด 50 ml เติมสารให้สี (Vanadomolybdate reagent) 10 ml (สำหรับ Blank จะเติมสารให้สี 10 ml ใน Volumetric flask) จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น Deionized water ให้เป็น 50 ml ทิ้งไว้ 10 นาที (อย่าให้เกิน 30 นาที) นำไปวัดค่าดูดกลืนแสง (Absorbance) ด้วยเครื่องวัดค่าดูดกลืนแสง (Spectrophotometer) ยี่ห้อ LaboMed รุ่น 22 RS ที่ความยาวคลื่น 470 nm เพื่อทำกราฟมาตรฐาน (Standard curve)

2.4 นำตัวอย่างที่ทิ้งไว้ 10 นาทีแล้ว ไปวัดค่าดูดกลืนแสง ที่ความยาวคลื่น 470 nm ด้วยเครื่องวัดค่าดูดกลืนแสง และนำค่าดูดกลืนแสงมาเปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐาน จะได้ค่าฟอสฟรัส ในหน่วย mg/L ของฟอสฟอรัส (mg/L as P)

3. วิธีการวิเคราะห์ Total Kjeldahl Nitrogen (TKN)

3.1 ปรับปริมาตรเป็น 50 ml ด้วยน้ำกลั่น Deionized water ในหลอดตัวอย่าง (Digestion tube) ขนาด 250 ml

3.2 เตรียมขวดรูปชมพู่ (Erlenmeyer flask) สำหรับเก็บไอของแอมโมเนีย โดยใช้ขวดรูปชมพู่ขนาด 25 ml เติมสารละลาย Boric acid 50 ml (เตรียมโดยใช้บอริก (H_3BO_3) 30 g และปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น Deionized water เป็น 1.5 L) เติม Indicator (Methyl red 3 หยด และ Methylene blue 3 หยด) แล้วนำไปวางในเครื่องกลั่นตรงสำหรับเก็บไอของแอมโมเนีย โดยให้สายยางสีขาวจุ่มลงใน สารละลาย Indicating boric acid ให้มิด (หากจุ่มไม่มิดจะสูญเสียไอของแอมโมเนียทำให้การวิเคราะห์ผิดพลาด)

3.3 นำหลอดตัวอย่างที่มีตัวอย่าง เข้าเครื่องกลั่นอัตโนมัติ (Automatic distillator) ยี่ห้อ Gerhardt Vapodest 20S โดยตั้งโปรแกรมการเติม ให้ใช้น้ำกลั่น Deionized water 20 ml และ Sodium hydroxide - thiosulfate reagent 10 ml (เตรียมโดยละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) 500 g และโซเดียมไทโอซัลเฟต ($Na_2S_2O_3 \cdot 5H_2O$) 25 g ด้วยน้ำกลั่น Deionized water และปรับปริมาตรเป็น 1 L ด้วยน้ำกลั่น Deionized water) ไอของแอมโมเนียจะถูกเก็บในขวดรูปชมพู่โดยสารละลาย boric acid จะเปลี่ยนจากสีชมพูเป็นสีเขียวอ่อน ใช้เป็นสารไทเทรนต์ (Titrand)

3.4 เตรียมสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟิวริก โดยนำกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) เข้มข้น 28 ml ใช้เป็นสารไทเทรนต์ (Titrant) หาความเข้มข้นกรดซัลฟิวริก (N of H_2SO_4) โดยใช้โซเดียมคาร์บอเนต (Na_2CO_3) 0.02 N เป็น Standardize ไตเตรทหาความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่แน่นอนโดยใช้สูตร

$$N_1 V_1 = N_2 V_2$$

N_1 = ความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริก, N

(N of H_2SO_4 สำหรับใช้คำนวณ TKN (mg/L as N))

N_2 = ความเข้มข้นของโซเดียมคาร์บอเนต, N

V_1 = ปริมาตรกรดซัลฟิวริกที่ใช้ไตเตรทโซเดียมคาร์บอเนต, ml

V_2 = ปริมาตรโซเดียมคาร์บอเนตในขวดรูปชมพู่, ml

3.5 นำสารละลาย Boric acid ออกจากเครื่องกลั่นและนำไปไตเตรทกับกรดซัลฟิวริกที่จุดยุติสารละลายจะเปลี่ยนจากสีเขียวอ่อนเป็นสีชมพูม่วง

3.6 คำนวณค่า TKN ในหน่วย mg/L ของไนโตรเจน (mg/L as N) โดยใช้สูตร

$$\text{TKN (mg/L as N)} = \frac{(A-B) \times C}{\text{ml Sample}}$$

A = ปริมาตรของกรดซัลฟิวริกที่ใช้ไตเตรทตัวอย่าง, ml

B = ปริมาตรของกรดซัลฟิวริกที่ใช้ไตเตรท Blank (ใช้น้ำกลั่น Deionized water แทนตัวอย่าง), ml

C = $(14 \times 1000 \times N \text{ of } H_2SO_4)$

**การวิเคราะห์ปริมาณธาตุแคลเซียม (Ca) ทองแดง (Cu) เหล็ก (Fe) โพแทสเซียม (K) และ
แมกนีเซียม (Mg)**

1. การเตรียมตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์ปริมาณธาตุแคลเซียม ทองแดง เหล็ก โพแทสเซียม และแมกนีเซียม

1.1 ชั่งตัวอย่างประมาณ 0.3g ใสลงในหลอดตัวอย่าง (Digestion tube) ขนาด 250 ml

1.2 เติมกรดไนตริก (HNO_3) 4 ml และกรดเปอร์คลอริก (HClO_4) 2 ml

1.3 นำตัวอย่างไปย่อยด้วยเครื่องย่อย (Block digestion unit) Gerhardt รุ่น KB 20 S โดยเริ่มต้นที่อุณหภูมิ $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ ประมาณ 1 ชั่วโมง และปรับอุณหภูมิเพิ่มเป็น $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ ระหว่างย่อย สารละลายจะเปลี่ยนจากสีน้ำตาลเป็นสีเหลืองใส และย่อยต่อจนกระทั่งสารละลายกลายเป็นสีใส และทิ้งให้อยู่ในสภาวะอุณหภูมิห้อง

1.4 เติมน้ำกลั่น 20 ml ลงในหลอดตัวอย่าง และกรองตัวอย่างด้วยกระดาษกรองเบอร์ 5 จากนั้นจึงปรับปริมาตรเป็น 50 ml โดยใช้ Volumetric flask ขนาด 50 ml และเก็บในขวดพลาสติก

2. วิธีการวิเคราะห์ปริมาณธาตุแคลเซียม ทองแดง เหล็ก โพแทสเซียม และแมกนีเซียม

นำตัวอย่างที่ปรับปริมาตรเป็น 50 ml แล้วในขวดพลาสติก ไปวิเคราะห์หาปริมาณธาตุแคลเซียม ทองแดง เหล็ก โพแทสเซียม และแมกนีเซียม ด้วยเครื่อง Atomic absorption spectrophotometer (AAS)

การวิเคราะห์หาค่า COD (Chemical oxygen demand)

1. การเตรียมสารเคมี

1.1 Standard potassium dichromate solution 0.25 N

ละลาย $K_2Cr_2O_7$ (Primary standard grade) 12.259 g (ที่อบแห้งด้วยอุณหภูมิ 103 - 105 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง) ในน้ำกลั่น และปรับปริมาตรเป็น 1000 ml

1.2 Sulfuric acid reagent ($Ag_2SO_4 \cdot H_2SO_4$)

เติม Ag_2SO_4 22 g ลงในกรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) 2.71 L ตั้งทิ้งไว้ประมาณ 1 - 2 วัน เพื่อให้ Ag_2SO_4 ละลายจนหมด

1.3 Standard ferrous ammonium sulfate titrant (FAS) 0.1 N

ละลาย $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ 39 g ในน้ำกลั่น เติมซัลฟิวริก (H_2SO_4) เข้มข้นปริมาตร 20 ml ทิ้งไว้ให้เย็นแล้วปรับปริมาตรเป็น 1000 ml เก็บในขวดสีชา และให้ทำ Standardize เพื่อหาความเข้มข้นที่แน่นอนทุกครั้งที่นำไปใช้ ด้วยการไทเทรตกับสารละลาย $K_2Cr_2O_7$ (สารละลายมาตรฐาน $K_2Cr_2O_7$ 10 ml ปรับปริมาตรเป็น 100 ml ด้วยน้ำกลั่น และเติมกรดซัลฟิวริกเข้มข้น 30 ml ทิ้งไว้ให้เย็นและไทเทรตด้วย FAS โดยใช้ Ferroin indicator เป็นอินดิเคเตอร์ (ประมาณ 2 - 3 หยด) โดยคำนวณความเข้มข้นดังต่อไปนี้

$$M \text{ of FAS} = \frac{\text{ml } K_2Cr_2O_7 \times 0.25}{\text{ml ของ FAS ที่ใช้}}$$

2. วิธีการวิเคราะห์ค่า COD

2.1 นำตัวอย่างที่เป็นสารละลาย 20 ml ใส่ลงใน round bottom flask (อาจเจือจางตัวอย่างโดยใส่ตัวอย่างน้อยกว่า 20 ml และใช้น้ำกลั่นในการปรับปริมาตรให้ครบ 20 ml

2.2 เติม $\text{Ag}_2\text{SO}_4 \cdot \text{H}_2\text{SO}_4$ 30 ml ลงใน round bottom flask

2.3 เติมสารละลาย Standard potassium dichromate solution (0.25 N) 10.00 ml ลงใน round bottom flask

2.4 เติม HgSO_4 0.4 g ลงใน round bottom flask

2.5 เติม glass bead ลงใน round bottom flask เขย่า 2 ชั่วโมง เพื่อไล่ H_2S

2.6 นำ round bottom flask ที่เติมสารจนครบแล้วไปวางบนเตาไฟฟ้าแล้วรีฟลักซ์เป็นเวลา 2 ชั่วโมง โดยเปิดน้ำเย็นให้ไหลผ่าน Condenser ตลอดเวลา

2.7 นำตัวอย่างออกจากเตาไฟฟ้าและเจือจางด้วยน้ำกลั่นปริมาตร 60 ml (ให้ปริมาตรเป็น 2 เท่าของปริมาตรเดิม)

2.8 ทิ้งให้เย็นจนมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง จากนั้นหยด Ferroin indicator ประมาณ 2 - 3 หยด แล้วนำไปไทเทรตกับสารละลาย FAS จนถึงจุดยุติ (End point) โดยที่จุดยุติจะเปลี่ยนจากสีฟ้าอมเขียวเป็นสีน้ำตาลแดงอิฐ

2.9 ทำ Blank โดยใช้วิธีทำเช่นเดียวกับตัวอย่าง แต่ใช้น้ำกลั่นแทนตัวอย่างปริมาตร 20 ml

3. วิธีคำนวณค่า COD

สามารถคำนวณค่า COD ที่ได้จากการวิเคราะห์ดังต่อไปนี้

$$\text{COD (mg/L)} = \frac{(a-b)N \times 8,000}{\text{ml Sample}}$$

โดย a คือ ml ของ FAS ที่ไทเทรต blank

b คือ ml ของ FAS ที่ไทเทรต Sample

N คือ Normality ของ FAS

วิธีการวิเคราะห์ TS (Total solids)

1. นำถ้วยระเหยมาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งความละเอียด 4 ตำแหน่ง (A) (ถ้วยระเหยผ่านการอบด้วยอุณหภูมิ 103 - 105 °C จนมีน้ำหนักคงที่ และทิ้งไว้ให้เย็นจนมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง ในตู้ดูดความชื้น)
2. ใส่ตัวอย่างสารละลาย (สำหรับการทดลองนี้ใช้ตัวอย่างปริมาตร 5 ml) ในถ้วยระเหยที่ชั่งน้ำหนักไว้แล้ว และนำไประเหยบนอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath) จนสารละลายที่ใส่ไว้แห้งหมด
3. นำถ้วยระเหยไปอบในตู้อบ ที่อุณหภูมิ 103 - 105 °C เป็นเวลาประมาณ 2 ชั่วโมง (ให้น้ำหนักคงที่) ทิ้งไว้ให้เย็นจนมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง ในตู้ดูดความชื้น
4. ชั่งน้ำหนักถ้วยระเหยที่มีตัวอย่างและผ่านการอบแล้ว ด้วยเครื่องชั่งความละเอียด 4 ตำแหน่ง (B)
5. คำนวณค่า TS ดังสมการต่อไปนี้

$$TS \text{ (mg/L)} = \frac{(B - A) \times 10^6}{\text{ml ของตัวอย่างที่ใช้}}$$

วิธีการวิเคราะห์ TVS (Total volatile solids)

1. นำถ้วยระเหยที่ชั่งน้ำหนักแล้วจากการวิเคราะห์ค่า TS ไปเผาในเตาเผาที่อุณหภูมิ 550 °C เป็นเวลา 20 นาที และทิ้งไว้ให้เย็นจนมีอุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิห้อง ในตู้ดูดความชื้น
2. ชั่งน้ำหนักถ้วยระเหยที่มีตัวอย่างและผ่านการเผาแล้ว ด้วยเครื่องชั่งความละเอียด 4 ตำแหน่ง (C)
3. คำนวณค่า TVS ดังสมการต่อไปนี้

$$\text{TVS (mg/L)} = \frac{(B - C) \times 10^6}{\text{ml ของตัวอย่างที่ใช้}}$$





(ก)

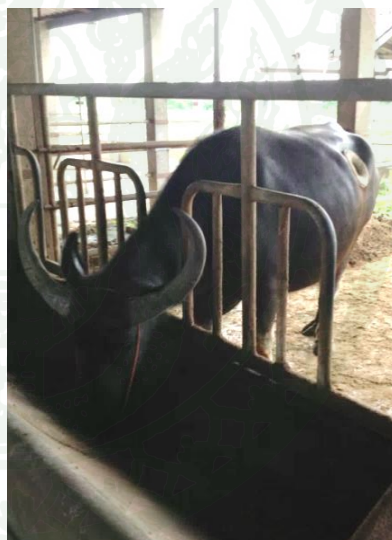


(ข)

ภาพผนวกที่ 1 สถานที่ปลูกหญ้าเนเปียร์และนาข้าว (ก) และหญ้าเนเปียร์สับละเอียด (ข)



(ก)



(ข)

ภาพผนวกที่ 2 แหล่งเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการเริ่มต้นระบบจากโคเนื้อ (ก) และกระบือ (ข)



(ก)



(ข)

ภาพผนวกที่ 33 สารละลายผสมหญ้าเนเปียร์ต่อน้ำในสัดส่วน 10 : 90 % FW (ก) และสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์ต่อน้ำในสัดส่วน 20 : 80 % FW (ข)

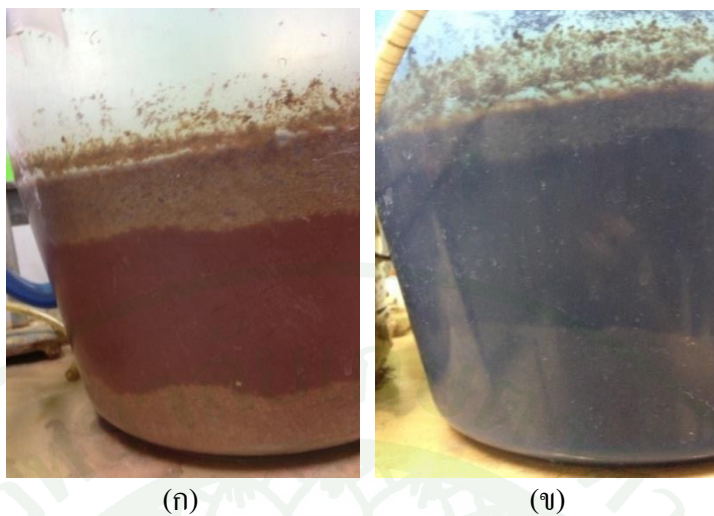


(ก)



(ข)

ภาพผนวกที่ 34 สารละลายผสมหญ้าเนเปียร์ต่อมูลโคต่อน้ำในสัดส่วน 5 : 5 : 90 % FW (ก) และสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์ต่อมูลโคต่อน้ำในสัดส่วน 10 : 10 : 80 % FW (ข)



(ก)

(ข)

ภาพผนวกที่ 5 สารละลายผสมฟางข้าวต่อน้ำในสัดส่วน 3.5 : 96.5 % FW (ก) และสารละลายผสมฟางข้าวต่อมูลโคต่อน้ำในสัดส่วน 1.75 : 10 : 88.25 % FW (ข)



(ก)



(ข)

ภาพผนวกที่ 6 ภาพด้านบนระบบเก็บก๊าซแบบแทนทีน้ำ (ก) และถังหมัก (ข)



(ก)

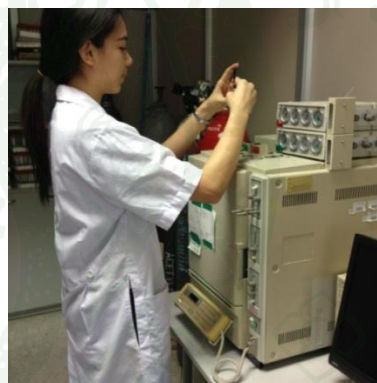


(ข)

ภาพผนวกที่ ๗ จุดเก็บตัวอย่างก๊าซ (ก) และหลอดสุญญากาศที่ใช้เก็บตัวอย่างก๊าซ (ข)



(ก)



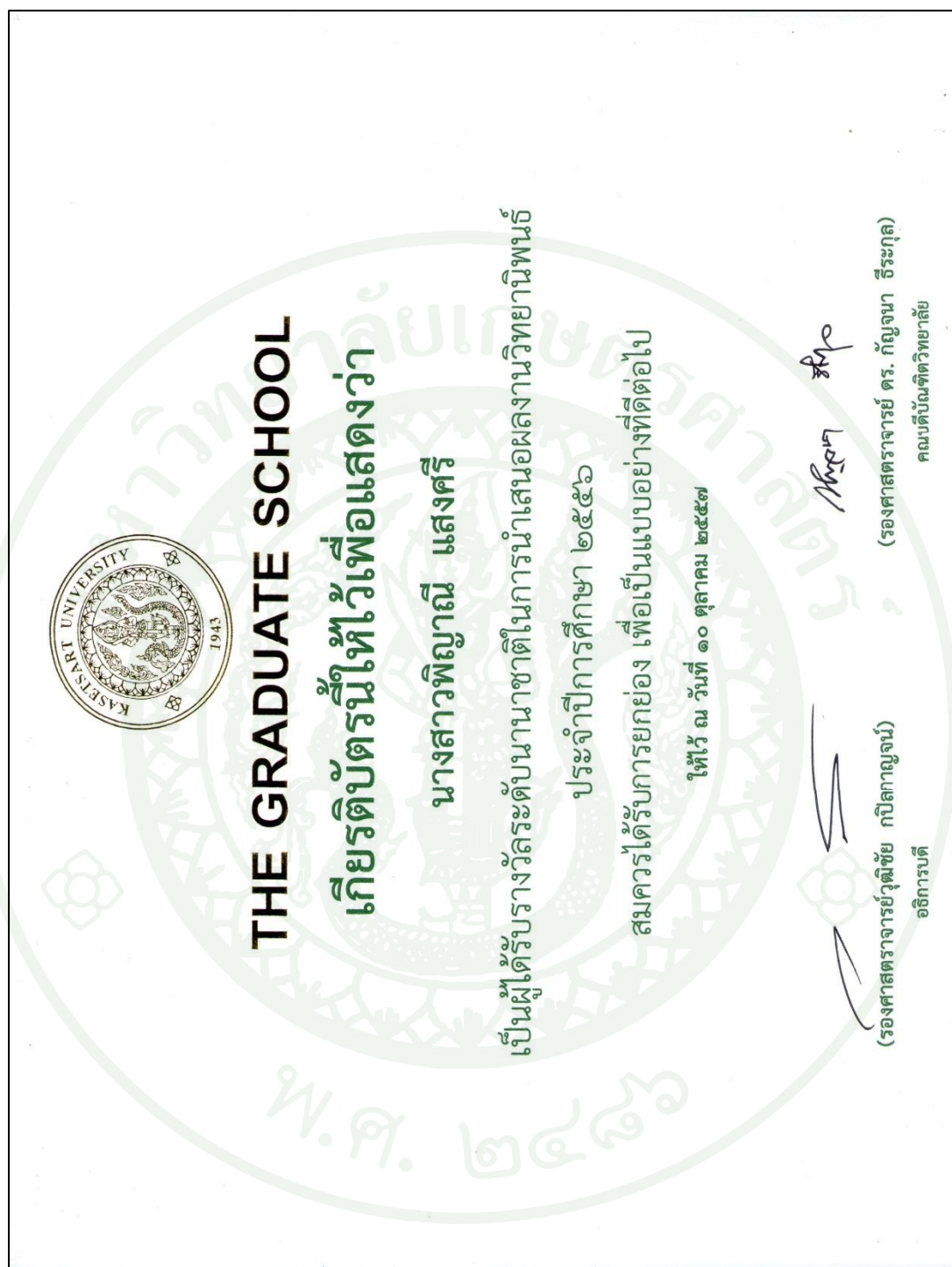
(ข)

ภาพผนวกที่ ๘ การวิเคราะห์ค่า COD (ก) และการวิเคราะห์ปริมาณเปอร์เซ็นต์มีเทนด้วยเครื่อง Gas chromatograph (ข)





ภาพผนวกที่ ๑1 รางวัล Outstanding presentation/Contribution จากการนำเสนอบทความเรื่อง Methane production from napier grass by co-digestion with cow dung ในการประชุมวิชาการ Global Conference on Global Warming 2014 (GCGW-14) ซึ่งจัดขึ้นในวันที่ 25-29 พฤษภาคม 2557 ณ Peking University, Beijing, China



ภาพผนวกที่ จ2 รางวัลเกียรติยศแก่นิสิตที่ได้รับรางวัลระดับนานาชาติ ประจำปีการศึกษา 2556
จากบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ซึ่งจัดขึ้นในวันที่ 10 ตุลาคม 2557
ณ ห้องประชุมยุทธเจียมไชยศรี อาคารสารสนเทศ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัย
เกษตรศาสตร์



ภาพผนวกที่ ๑3 ใบรับรองการนำเสนอบทความเรื่อง การผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์โดยการหมักร่วมกับมูลโค ในการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 13 ซึ่งจัดขึ้นในวันที่ 26 – 28 มีนาคม 2557 ณ โรงแรมเดอะ ทวิน ทาวเวอร์ ร่องเมือง กรุงเทพฯ

ประวัติการศึกษาและการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล

นางสาวพิชญ์ณี แสงศรี

เกิดวันที่

27 กรกฎาคม 2533

สถานที่เกิด

จังหวัดฉะเชิงเทรา

ประวัติการศึกษา

วท.บ. (วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม) มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ผลงานดีเด่นและ/หรือรางวัลทางวิชาการ

- ได้รับรางวัล Outstanding presentation/Contribution จากการนำเสนอบทความเรื่อง Methane production from napier grass by co-digestion with cow dung ในการประชุมวิชาการ Global Conference on Global Warming 2014 (GCGW-14) ซึ่งจัดขึ้นในวันที่ 25-29 พฤษภาคม 2557 ณ Peking University, Beijing, China

- ได้รับรางวัลเกียรติยศแก่นิสิตที่ได้รับรางวัลระดับนานาชาติ ประจำปีการศึกษา 2556 จาก บัณฑิตวิทยาลัย ซึ่งจัดขึ้นในวันที่ 10 ตุลาคม 2557 ณ ห้องประชุมขงยุทธเจียมไชยศรี อาคารสารสนเทศ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ประสบการณ์ในการทำงาน

เป็นผู้ช่วยนักวิจัยของฝ่ายเครื่องมือและวิจัยทางวิทยาศาสตร์ สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ทำงานเป็นระยะเวลา 10 เดือน จากเดือน มกราคม - ตุลาคม 2557

ความสามารถพิเศษ

1. สามารถใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ได้ในระดับเชี่ยวชาญ รวมทั้งสามารถกู้ไฟล์ข้อมูลที่เสียหายได้ และสามารถติดตั้งระบบปฏิบัติการ Windows รวมทั้งโปรแกรมที่เป็นประโยชน์ต่อองค์กรได้

2. สามารถใช้เครื่องมือและอุปกรณ์วิเคราะห์ทางวิทยาศาสตร์ประเภท Chromatograph และ spectrometer ได้ดี