



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

ปริญญา

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การผลิตก๊าซมีเทนจากหญ้าเนเปียร์โดยการหมักแบบสองขั้นตอน

Biomethane Production from Napier Grass by Two-stage Anaerobic Digestion

นามผู้วิจัย นางสาวยุวดี แสงศิลป์

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุชาติ เหลืองประเสริฐ, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(อาจารย์นุชรา สีนบัวทอง, วท.ค.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์สุริยะ สะวานนท์, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุชาติ เหลืองประเสริฐ, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา ธีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การผลิตก๊าซมีเทนจากหญ้าเนเปียร์โดยการหมักแบบสองขั้นตอน

Biomethane Production from Napier Grass by Two-stage Anaerobic Digestion

โดย

นางสาวยุวดี แสงศิลป์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม)

พ.ศ. 2557

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ยูวดี แสงศิลป์ 2557: การผลิตก๊าซมีเทนจากหญ้าเนเปียร์โดยการหมักแบบสองขั้นตอน
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม) สาขาวิศวกรรม
สิ่งแวดล้อม ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุชาติ เหลืองประเสริฐ, Ph.D. 132 หน้า

การศึกษาการหมักหญ้าเนเปียร์ที่ช่วงอายุการตัด 30, 45, 60 และ 90 วัน ทำโดยการหมักแบบสองขั้นตอน (ขั้นตอนการหมักกรดและการสร้างมีเทน) สร้างถังหมัก 5 ชุดจากขวดพลาสติก ถังหมักกรดและถังสร้างมีเทนมีความจุใช้งาน 4 และ 5 ลิตร ตามลำดับ เติมสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์กับน้ำในอัตราส่วน 1:5 เข้าสู่ถังหมักกรดวันละครั้งด้วยอัตราการเติม 100, 150, 200, 250, และ 300 มิลลิลิตรต่อวัน ระยะเวลาเก็บกักในถังหมักกรดคือ 40, 26.7, 20, 16 และ 13.3 วัน ตามลำดับ และถังสร้างมีเทนคือ 50, 33.3, 25, 20 และ 16.7 วัน ตามลำดับ มวลจุลินทรีย์เริ่มต้นในระบบมีค่าประมาณ 10 กรัมต่อลิตร ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้องคือ 30 ± 1 องศาเซลเซียส มีการปรับค่าความเป็นกรด-ด่างในถังสร้างมีเทนตอนเริ่มต้นเดินระบบให้มีค่าเป็น 7.5 จากนั้นระบบทำงาน โดยไม่มีการควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่าง

หญ้าเนเปียร์อายุการตัด 30 วัน ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดที่อัตราการระบายทุกสารอินทรีย์ 0.97 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน (ระยะเวลาเก็บกักในถังหมักกรดและถังสร้างมีเทนคือ 20 และ 25 วัน) ประสิทธิภาพของระบบในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปชีโอดีและของแข็งระเหยทั้งหมดเป็น 69 เปอร์เซ็นต์ และ 71 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ค่าความเป็นกรด-ด่างเฉลี่ยในถังหมักกรดและถังสร้างมีเทนเป็น 5.15 และ 6.70 ตามลำดับ ผลผลิตก๊าซมีเทนที่ได้คือ 160 ลิตรที่สภาวะมาตรฐานต่อกิโลกรัมของหญ้าเนเปียร์แห้งที่เติมเข้าระบบ แสดงให้เห็นว่าการผลิตก๊าซมีเทนบริสุทธิ์ 1 ลูกบาศก์เมตร ต้องใช้หญ้าเนเปียร์ 6.25 กิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง สำหรับหญ้าเนเปียร์ที่อายุการตัด 45, 60 และ 90 วัน ผลผลิตก๊าซมีเทนคือ 127, 104 และ 74 ลิตรที่สภาวะมาตรฐานต่อกิโลกรัมของหญ้าเนเปียร์แห้งที่เติมเข้าระบบตามลำดับ (ระยะเวลาเก็บกักในถังหมักกรดและถังสร้างมีเทนคือ 20 และ 25 วัน) แม้ว่าหญ้าเนเปียร์ที่มีอายุการตัดสูงจะให้ผลผลิตก๊าซมีเทนต่ำกว่าหญ้าที่มีอายุการตัดน้อย แต่เมื่อพิจารณาน้ำหนักของหญ้าเนเปียร์ที่ปลูกได้ต่อปีต่อหน่วยพื้นที่ พบว่าหญ้าเนเปียร์ที่มีอายุการตัด 60 วันให้ผลผลิตก๊าซมีเทนต่อหน่วยพื้นที่สูงสุดคือ 6500 ลูกบาศก์เมตรต่อเฮกแตร์ต่อปี (1040 ลูกบาศก์เมตรต่อไร่ต่อปี)

Yuwadee Sangsil 2014: Biomethane Production from Napier Grass by Two-stage Anaerobic Digestion. Master of Engineering (Environmental Engineering), Major Field: Environmental Engineering, Department of Environmental Engineering. Thesis Advisor: Assistant Professor Suchat Leungprasert, Ph.D. 132 pages.

Digestion of napier grass at the cutting interval of 30, 45, 60 and 90 days was investigated in two-stage (acidogenic and methanogenic) anaerobic reactors. Five sets of reactors were constructed with plastic bottles. The reactor working volume was 4 and 5 litres for acidogenic and methanogenic reactor, respectively. Acidogenic reactors were fed once daily at a feed rate of 100, 150, 200, 250, and 300 ml/day with a slurry of 1:5 napier grass : water. Hydraulic retention times (HRT) were 40, 26.7, 20, 16, and 13.3 days respectively for acidogenic and 50, 33.3, 25, 20 and 16.7 days for methanogenic reactor stage. Mixed ruminal microorganisms of approximately 10 g mixed liquor volatile suspended solid/litre were used as inoculum. The reactors were operated at ambient temperature of 30 ± 1 °C. pH was adjusted to be 7.5 for all methanogenic reactors at the start-up period. The reactors functioned without pH control.

For napier grass at the cutting interval of 30 days, the maximum methane yield (CH_4 yield) was observed at an organic loading rate (OLR) of $0.97 \text{ kg COD/m}^3 \cdot \text{day}$ (HRTs 20 and 25 days for acidic and methanogenic stage). COD and TVS degradation efficiency was 69% and 71%, respectively. The average pH in the acidogenic and methanogenic reactors was 5.15 and 6.70, respectively. The CH_4 yield was 160 L at STP/kg of dry napier grass added to the reactor, which indicated that 6.25 kg of dry napier grass is needed to produce 1 m^3 of pure CH_4 . For napier grass at the cutting interval of 45, 60 and 90 days, the CH_4 yield was observed at 127, 104 and 74 L at STP/kg of dry napier grass added to the reactor, respectively (HRTs 20 and 25 days for acidic and methanogenic stage). Although the napier grass at the higher cutting interval gave lower CH_4 yield than that of the lower age, but when considering mass of napier grass annually obtained per area of cultivation, the napier grass at the cutting interval of 60 days gave the highest CH_4 yield per area and showed at $6500 \text{ m}^3/\text{hectare}/\text{year}$ (1040

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์เรื่อง “การผลิตก๊าซมีเทนจากหญ้าเนเปียร์โดยการหมักแบบสองขั้นตอน” เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยเรื่องการผลิตก๊าซมีเทนจากหญ้าเนเปียร์โดยการหมักแบบสองขั้นตอน ซึ่งได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และบุคคลต่างๆ ที่ได้ให้ช่วยเหลือจนกระทั่งวิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จไปด้วยดี ผู้วิจัยขอขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุชาติ เหลืองประเสริฐ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่คอยให้คำปรึกษาและแนะนำแนวทางที่เหมาะสมสำหรับการวิจัย ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ ดร.นุชรา สิบบัวทอง อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วมและหัวหน้าโครงการวิจัย ที่คอยให้ความรู้ คำแนะนำและแนวทางในการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น การแปรผลข้อมูล การสรุปผลการศึกษา ให้คำปรึกษาในเรื่องการใช้เครื่องมือทางวิทยาศาสตร์และห้องปฏิบัติการ ตลอดจนการตรวจแก้ไขวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. สุริยะ สะวานนท์ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่ช่วยเหลือด้านการปลูกหญ้าเนเปียร์และเตรียมเชื้อจุลินทรีย์สำหรับการศึกษาในครั้งนี้ รวมทั้งรองศาสตราจารย์ ดร. ศัญญา สิริวิทยาปกรณ์ ประธานการสอบปากเปล่าชั้นสุดท้าย และรองศาสตราจารย์ ดร. สุชา ขาวเขียร ผู้ทรงคุณวุฒิจากจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ที่ให้คำแนะนำในการแก้ไขวิทยานิพนธ์ ส่งผลให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

นอกจากนี้ผู้วิจัยต้องขอขอบคุณฝ่ายเครื่องมือและวิจัยทางวิทยาศาสตร์ สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และเครื่องมือสำหรับการใช้ในการวิจัย รวมทั้งคณาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่คอยสั่งสอนและให้ความรู้ในศาสตร์ด้านต่างๆ แก่ผู้วิจัย สุดท้ายขอขอบคุณครอบครัวที่คอยสนับสนุนทุนการศึกษาและให้กำลังใจ ทำให้การดำเนินการศึกษาในครั้งนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ยูวดี แสงศิลป์

พฤศจิกายน 2557

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ	(7)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	5
อุปกรณ์และวิธีการ	19
อุปกรณ์	19
วิธีการ	20
ผลและวิจารณ์	28
สรุปและข้อเสนอแนะ	62
สรุป	62
ข้อเสนอแนะ	63
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	64
ภาคผนวก	73
ภาคผนวก ก ข้อมูลดิบจากการศึกษาการผลิตก๊าซมีเทนจากหญ้าเนเปียร์ อายุการตัด 30 วัน	74
ภาคผนวก ข ข้อมูลดิบจากการศึกษาการผลิตก๊าซมีเทนจากหญ้าเนเปียร์ อายุการตัด 45 วัน	86
ภาคผนวก ค ข้อมูลดิบจากการศึกษาการหาความเหมาะสมของอายุการตัด หญ้าเนเปียร์ในการผลิตก๊าซมีเทน	100
ภาคผนวก ง วิธีการคำนวณพารามิเตอร์ต่างๆ	108
ภาคผนวก จ วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ	119
ภาคผนวก ฉ ภาพประกอบจากการทดลอง	123
ภาคผนวก ช ใบประกาศและรางวัลจากการนำเสนอผลงาน	128
ประวัติการศึกษาและทำงาน	132

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ชนิดและสัดส่วนของก๊าซต่างๆ ที่เกิดจากกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน	5
2	สารอินทรีย์ที่เป็นพิษสำหรับกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน	12
3	ผลของอายุการตัดต่อองค์ประกอบทางเคมีของหญ้าเนเปียร์	16
4	องค์ประกอบทางเคมีในใบ และลำต้นของหญ้าเนเปียร์	17
5	HRT ในถังหมักกรด และถังสร้างมีเทนสำหรับการทดลอง	25
6	ลักษณะสมบัติของหญ้าเนเปียร์ที่อายุการตัดต่างๆ	28
7	ลักษณะสมบัติของสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์ที่อายุการตัดต่างๆ	29
8	สรุปผลการศึกษากาการหมักหญ้าเนเปียร์อายุการตัด 30 วัน ที่ OLR ต่างๆ ในระบบหมักแบบสองขั้นตอน	39
9	สรุปผลการศึกษากาการหมักหญ้าเนเปียร์อายุการตัด 45 วัน ที่ OLR ต่างๆ ในระบบหมักแบบสองขั้นตอน	48
10	สรุปผลการศึกษากาการหมักหญ้าเนเปียร์อายุการตัดต่างๆ โดยระบบหมักแบบสองขั้นตอน	61
ตารางผนวกที่		
ก1	ปริมาตรก๊าซทั้งหมด (Total gas) ปริมาณก๊าซมีเทน (%CH ₄) และปริมาณก๊าซมีเทน (CH ₄ production) ที่สภาวะมาตรฐานจากการหมักหญ้าเนเปียร์อายุการตัด 30 วัน	75
ก2	COD ของสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์อายุการตัด 30 วัน ที่ผ่านออกจากระบบ	80
ก3	TVS ของสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์อายุการตัด 30 วัน ที่ผ่านออกจากระบบ	80
ก4	pH ในถังหมักกรด และถังสร้างมีเทนจากการหมักสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์อายุการตัด 30 วัน	81

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางผนวกที่	หน้า
ข1 ปริมาตรก๊าซทั้งหมด (Total gas) ปริมาณก๊าซมีเทน (%CH ₄) และปริมาณก๊าซมีเทน (CH ₄ production) ที่สภาวะมาตรฐานจากการหมักหุ้มน้ำเนเปียร์อายุการตัด 45 วัน	87
ข2 COD ของสารละลายผสมหุ้มน้ำเนเปียร์อายุการตัด 45 วัน ที่ผ่านออกจากระบบ	93
ข3 TVS ของสารละลายผสมหุ้มน้ำเนเปียร์อายุการตัด 45 วัน ที่ผ่านออกจากระบบ	93
ข4 pH ในถังหมักกรด และถังสร้างมีเทนจากการหมักสารละลายผสมหุ้มน้ำเนเปียร์อายุการตัด 45 วัน	94
ค1 ปริมาตรก๊าซทั้งหมด (Total gas) ปริมาณก๊าซมีเทน (%CH ₄) และปริมาณก๊าซมีเทน (CH ₄ production) ที่สภาวะมาตรฐานจากการหมักหุ้มน้ำเนเปียร์ที่อายุการตัดต่างๆ	101
ค2 COD ของสารละลายผสมหุ้มน้ำเนเปียร์ที่อายุการตัดต่างๆ ที่ผ่านออกจากระบบ	104
ค3 TVS ของสารละลายผสมหุ้มน้ำเนเปียร์ที่อายุการตัดต่างๆ ที่ผ่านออกจากระบบ	104
ค4 pH ในถังหมักกรด และถังสร้างมีเทนจากการหมักสารละลายผสมหุ้มน้ำเนเปียร์ที่อายุการตัดต่างๆ	105
ง1 ตัวอย่างวิธีการคำนวณปริมาณก๊าซมีเทนที่สภาวะมาตรฐาน	111

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า	
1	ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาในการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน	6
2	แผนภูมิการดำเนินงานตลอดระยะเวลาการทดลอง	21
3	ระบบการหมักแบบสองขั้นตอน และระบบการแทนที่น้ำประกอบไปด้วย (1) ถังหมักกรด (Acidogenic reactor) (2) ถังสร้างมีเทน (Methanogenic reactor) และ (3) ถังเก็บก๊าซ (Gas collection system)	22
4	ลักษณะของระบบจริงที่ใช้ในการทดลอง	23
5	ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อวัน OLR ต่างๆ จากการหมักหุ้มน้ำเนเปียร์ อายุการตัด 30 วัน	31
6	ปริมาณก๊าซมีเทนเฉลี่ยที่เกิดขึ้นต่อวันที่ OLR ต่างๆ จากการหมักหุ้มน้ำเนเปียร์ อายุการตัด 30 วัน	32
7	ปริมาณก๊าซมีเทนเฉลี่ยที่เกิดขึ้นที่ OLR ต่างๆ จากการหมักหุ้มน้ำเนเปียร์ อายุการตัด 30 วัน	33
8	ประสิทธิภาพของระบบหมักในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของ COD และ TVS ที่ OLR ต่างๆ จากการหมักหุ้มน้ำเนเปียร์อายุการตัด 30 วัน	34
9	ผลผลิตก๊าซมีเทนในหน่วย L at STP/kgCOD degraded (ก) และ L at STP/kgCOD added (ข) จากการหมักหุ้มน้ำเนเปียร์อายุการตัด 30 วัน	35
10	ผลผลิตก๊าซมีเทนในหน่วย L at STP/kgTS degraded (ก) และ L at STP/kgTS added (ข) จากการหมักหุ้มน้ำเนเปียร์อายุการตัด 30 วัน	36
11	ผลผลิตก๊าซมีเทนในหน่วย L at STP/kgTVS degraded (ก) และ L at STP/kgTVS added (ข) จากการหมักหุ้มน้ำเนเปียร์อายุการตัด 30 วัน	36
12	ค่า pH เฉลี่ยของสารละลายผสมที่ผ่านการหมักในถังหมักกรด และถังสร้าง มีเทนที่ OLR ต่างๆ จากการหมักหุ้มน้ำเนเปียร์อายุการตัด 30 วัน	38
13	ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อวัน OLR ต่างๆ จากการหมักหุ้มน้ำเนเปียร์ อายุการตัด 45 วัน	40
14	ปริมาณก๊าซมีเทนเฉลี่ยที่เกิดขึ้นต่อวันที่ OLR ต่างๆ จากการหมักหุ้มน้ำเนเปียร์ อายุการตัด 45 วัน	42

สารบัญญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
15	ปริมาณก๊าซมีเทนเฉลี่ยที่เกิดขึ้นที่ OLR ต่างๆ จากการหมักหญ้าเนเปียร์อายุการตัด 45 วัน	43
16	ประสิทธิภาพของระบบหมักในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของ COD และ TVS ที่ OLR ต่างๆ จากการหมักหญ้าเนเปียร์อายุการตัด 45 วัน	44
17	ผลผลิตก๊าซมีเทนในหน่วย L at STP/kgCOD degraded (ก) และ L at STP/kgCOD added (ข) จากการหมักหญ้าเนเปียร์อายุการตัด 45 วัน	45
18	ผลผลิตก๊าซมีเทนในหน่วย L at STP/kgTS degraded (ก) และ L at STP/kgTS added (ข) จากการหมักหญ้าเนเปียร์อายุการตัด 45 วัน	45
19	ผลผลิตก๊าซมีเทนในหน่วย L at STP/kgTVS degraded (ก) และ L at STP/kgTVS added (ข) จากการหมักหญ้าเนเปียร์อายุการตัด 45 วัน	46
20	ค่า pH เฉลี่ยของสารละลายผสมที่ผ่านการหมักในถังหมักกรด และถังสร้างมีเทนที่ OLR ต่างๆ จากการหมักหญ้าเนเปียร์อายุการตัด 45 วัน	47
21	ปริมาตรก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อวันจากการหมักหญ้าเนเปียร์อายุการตัดต่างๆ	50
22	ปริมาตรก๊าซมีเทนเฉลี่ยที่เกิดขึ้นต่อวันจากการหมักหญ้าเนเปียร์ที่อายุการตัดต่างๆ หมักหญ้าเนเปียร์อายุการตัดต่างๆ	50
23	ปริมาณก๊าซมีเทนเฉลี่ยที่เกิดขึ้นจากการใช้หญ้าเนเปียร์ที่อายุการตัดต่างๆ	51
24	ประสิทธิภาพของระบบหมักในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของ COD และ TVS จากการหมักหญ้าเนเปียร์อายุการตัดต่างๆ	53
25	ผลผลิตก๊าซมีเทนในหน่วย L at STP/kgCOD degraded (ก) และ L at STP/kgCOD added (ข) จากการหมักหญ้าเนเปียร์อายุการตัดต่างๆ	54
26	ผลผลิตก๊าซมีเทนในหน่วย L at STP/kgTS degraded (ก) และ L at STP/kgTS added (ข) จากการหมักหญ้าเนเปียร์อายุการตัดต่างๆ	55
27	ผลผลิตก๊าซมีเทนในหน่วย L at STP/kgTVS degraded (ก) และ L at STP/kgTVS added (ข) จากการหมักหญ้าเนเปียร์อายุการตัดต่างๆ	55
28	หญ้าเนเปียร์แห้งที่อายุการตัดต่างๆ สำหรับการผลิตก๊าซมีเทนบริสุทธิ์ 1 m ³	57

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพที่		หน้า
29	ผลผลิตก๊าซมีเทนจากหญ้าเนเปียร์อายุการตัดต่างๆ ในหน่วย $m^3/rai/yr$ (ก) และหน่วย $m^3/ha/yr$ (ข)	58
30	ค่า pH เฉลี่ยของสารละลายผสมที่ผ่านการหมักในถังหมักกรด และถังสร้างมีเทนจากการหมักหญ้าเนเปียร์อายุการตัดต่างๆ	60
ภาพผนวกที่		
ง1	ความดันของก๊าซในระบบเก็บก๊าซของการทดลอง	109
ง2	เครื่อง Gas Chromatograph (GC) Shimadzu 14B	112
ฉ1	หญ้าเนเปียร์สด (ก) และหญ้าเนเปียร์สับ (ข)	124
ฉ2	หญ้าเนเปียร์สดบดละเอียด (ก) และสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์ (ข)	124
ฉ3	ขวดพลาสติกความจุ 6 ลิตรสำหรับใช้สร้างถังหมัก (ก) และถังอ (ข)	125
ฉ4	การต่อท่อและสายยางในถังหมักกรด (ก) และถังแทนที่น้ำ (ข)	125
ฉ5	ถังหมักกรดขณะเริ่มต้นเดินระบบ (ก) และจุลินทรีย์เริ่มต้นในถังสร้างมีเทน (ข)	126
ฉ6	จุลินทรีย์ผสมจากกระเพาะรูเมน โค (ก) ระบบหมักแบบสองขั้นตอนขณะเริ่มต้นเดินระบบ (ข)	126
ฉ7	หลอดเก็บตัวอย่างก๊าซ (ก) และการเก็บตัวอย่างก๊าซจากระบบ (ข)	127
ฉ8	การเติมสารละลายผสมเข้าสู่ระบบ (ก) และระบบหมักแบบสองขั้นตอนขณะเดินระบบ (ข)	127
ช1	รางวัล Outstanding presentation/Contribution จากการประชุม Global Conference on Global Warming 2014 (GCGW-14) ซึ่งจัดขึ้นในวันที่ 25-29 พฤษภาคม 2557 ณ Peking University, Beijing, China	129
ช2	รางวัลเกียรติยศแก่นิสิตที่ได้รับรางวัลระดับนานาชาติประจำปีการศึกษา 2556 เนื่องในโอกาสวันคล้ายวันสถาปนาบัณฑิตวิทยาลัยครบรอบปีที่ 48	130
ช3	ใบประกาศจากการนำเสนอผลงานในงานประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ ครั้งที่ 13	131

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

°C	=	degree celsius
CH ₄	=	methane
COD	=	chemical oxygen demand
DW	=	dry weight
g	=	gram
HRT	=	hydraulic retention time
kg	=	kilogram
L	=	litre
m	=	metre
m ³	=	cubic metre
mm	=	millimetre
mg	=	milligram
MLVSS	=	mixed liquor volatile suspended solids
OLR	=	organic loading rate
STP	=	standard temperature and pressure
TVS	=	total volatile solids
TS	=	total solids
TKN	=	total kjeldahl nitrogen

การผลิตก๊าซมีเทนจากหญ้าเนเปียร์โดยการหมักแบบสองขั้นตอน

Biomethane Production from Napier Grass by Two-stage Anaerobic Digestion

คำนำ

ประเทศไทยมีการเพิ่มขึ้นของประชากรอย่างต่อเนื่องทุกปี ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลต่อความต้องการในการใช้พลังงานด้านต่างๆ เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะพลังงานไฟฟ้า ในปี พ.ศ. 2554 ประเทศไทยมีการใช้ไฟฟ้าทั้งหมด 24,070 เมกะวัตต์ (ศูนย์พยากรณ์และสารสนเทศพลังงาน, 2555) ทั้งนี้พลังงานไฟฟ้าเหล่านี้มาจากการผลิตขึ้นเองภายในประเทศร้อยละ 44.3 และนำเข้าจากประเทศเพื่อนบ้านร้อยละ 55.67 (การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย, 2555) ซึ่งประกอบไปด้วย ลาว และมาเลเซีย นอกจากนี้ประเทศไทยยังนำเข้าก๊าซธรรมชาติจากพม่าอีกเป็นจำนวนมากเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า แต่ก็ยังไม่เพียงพอกับความต้องการภายในประเทศ นักวิทยาศาสตร์จึงพยายามค้นคว้าวิจัยเพื่อหาแหล่งพลังงานทางเลือก (Alternative energy) ที่เหมาะสมกับประเทศไทย และพลังงานทางเลือกที่มีความน่าสนใจสำหรับประเทศไทย คือพลังงานจากก๊าซชีวภาพซึ่งเกิดจากกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic digestion) และประเทศไทยจัดเป็นประเทศเกษตรกรรมจึงมีแหล่งวัตถุดิบสำหรับใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพเป็นจำนวนมาก

กระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน เป็นกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์และผลิตพลังงานในรูปของก๊าซชีวภาพ เช่น ก๊าซมีเทนและก๊าซไฮโดรเจน (Angenent *et al.*, 2004) ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้หลายรูปแบบ เช่น ใช้สำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า ใช้แทนก๊าซหุงต้ม หรือพัฒนาเป็นก๊าซชีวภาพบดอัด (Compressed biomethane gas: CBG) สำหรับใช้ในรถยนต์ เป็นต้น กระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนได้ถูกนำมาใช้ และประสบความสำเร็จในการผลิตก๊าซมีเทนในหลายทศวรรษที่ผ่านมา รวมทั้งได้รับการยอมรับว่าเป็นทางเลือกที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (Merlino *et al.*, 2013)

การผลิตก๊าซมีเทนโดยใช้ระบบการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนนั้น หากความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่าย (Volatile fatty acid: VFA) ภายในระบบสูง ผลผลิตก๊าซมีเทนจะต่ำ แต่การหมักแบบสองขั้นตอน (Two-stage anaerobic digestion) จะแยกปฏิกิริยาระหว่างการหมักกรด (Acidogenesis) และการสร้างมีเทน (Methanogenesis) เพื่อสร้างสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมให้

จุลินทรีย์แต่ละชนิด เป็นการช่วยลดการใช้สารเคมีในการปรับความเป็นกรด-ด่าง (pH) ในระบบ (Sinbuathong *et al.*, 2012) ทำให้ระบบมีผลผลิตก๊าซมีเทน (Methane yield) สูงขึ้น ระบบการหมักแบบสองขั้นตอนนี้เหมาะสำหรับสารตั้งต้นที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูง ย่อยสลายได้ยาก และต้องการระยะเวลาเก็บกักในระบบที่ยาวนานกว่าปกติ เช่น กากจากการหมักเอทานอล (Nasr *et al.*, 2011) กากเมล็ดสับดำ (Sinbuathong *et al.*, 2012) และหญ้าหมัก (Orozco *et al.*, 2013) เป็นต้น สำหรับประเทศไทยกำลังให้ความสนใจหญ้าเนเปียร์สายพันธุ์ปากช่อง 1 ในการนำมาใช้เป็นวัสดุหมักสำหรับผลิตก๊าซมีเทน

หญ้าเนเปียร์ (Napier grass) เป็นหญ้าสูงเขตร้อน ให้ผลผลิตมากกว่า 50 ตันน้ำหนักแห้งต่อเฮกตาร์ต่อปี (Kubota *et al.*, 1994) มีมากกว่า 130 สายพันธุ์ นิยมปลูกไว้สำหรับเลี้ยงสัตว์ เช่น โค และกระบือ หญ้าชนิดนี้มีศักยภาพสูงในการนำไปผลิตก๊าซมีเทน (Shiralipour and Smith, 1984) และสามารถใช้เป็นวัสดุหมักร่วมได้ดี (Jingura and Matengaifa, 2007) เช่นน้ำเสียจากฟาร์มสุกร (จักรพันธ์, 2553) ไบโฆ้วโปดสด (Olugbemide *et al.*, 2012) เป็นต้น ด้วยเหตุนี้หญ้าเนเปียร์จึงเป็นพืชชนิดหนึ่งที่เหมาะสมสำหรับนำมาใช้เป็นวัสดุหมักเพื่อผลิตก๊าซมีเทน เพื่อนำไปแปรรูปเป็นพลังงานประเภทต่างๆ ขึ้นอยู่กับความต้องการในการใช้ประโยชน์

การวิจัยครั้งนี้ศึกษาถึงวิธีการผลิตก๊าซมีเทนจากหญ้าเนเปียร์สายพันธุ์ปากช่อง 1 โดยใช้กระบวนการหมักแบบสองขั้นตอน แยกระหว่างถังหมักกรดและถังสร้างมีเทน ใช้จุลินทรีย์ผสม (Mixed culture) จากกระเพาะหมัก (Rumen) ของโค เดินระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous operation) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซมีเทน ซึ่งประกอบไปด้วยระยะเวลาเก็บกัก (Hydraulic retention time: HRT) อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Organic loading rate: OLR) และอายุการตัดหญ้าเนเปียร์ที่เหมาะสม ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนในรูปแบบต่างๆ สูงที่สุด

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาการผลิตก๊าซมีเทนจากหญ้าเนเปียร์ โดยการหมักแบบสองขั้นตอน (Two-stage anaerobic digestion)
2. เพื่อศึกษาวิธีการเดินระบบที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซมีเทนจากหญ้าเนเปียร์ โดยศึกษาถึงความเหมาะสมของอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ (Organic loading rate: OLR) ระยะเวลาเก็บกัก (Hydraulic retention time: HRT) และอายุการตัดหญ้าเนเปียร์ (Cutting interval)
3. เพื่อหาผลผลิตก๊าซมีเทน (Methane yield) ในรูปของ
 - 3.1 ผลผลิตก๊าซมีเทนที่เกิดต่อการเติมและกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของซีโอดี (Methane produced/kg COD added, and degraded)
 - 3.2 ผลผลิตก๊าซมีเทนที่เกิดต่อการเติมและกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของของแข็งทั้งหมด (Methane produced/kg Total solids added, and degraded)
 - 3.3 ผลผลิตก๊าซมีเทนที่เกิดต่อการเติมและกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของของแข็งระเหยทั้งหมด (Methane produced/kg Total volatile solids added, and degraded)
4. เพื่อหาประสิทธิภาพของระบบในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดี (% COD degradation) และของแข็งระเหยทั้งหมด (%TVS degradation)

ขอบเขตการวิจัย

1. ศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้ระบบการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนแบบสองขั้นตอน (Two-stage anaerobic digestion) และเก็บก๊าซโดยการแทนที่น้ำ (Water displacement)
2. เดินระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous operation) คือ เติมน้ำทุกวัน หรือ 2 วัน

3. วัตถุดิบที่นำมาเป็นสารตั้งต้นในการผลิตก๊าซมีเทนคือหญ้าเนเปียร์สายพันธุ์ปากช่อง 1 ที่อายุการตัดต่างๆ นำมาจากภาควิชาสัตวบาล คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

4. จุลินทรีย์เริ่มต้นที่ใช้สำหรับการผลิตก๊าซมีเทนเป็นเชื้อจุลินทรีย์ผสม (Mixed culture) จากกระเพาะรูเมน (Rumen) ของโค นำมาจากภาควิชาสัตวบาล คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน



การตรวจเอกสาร

องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน

กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic digestion) เป็นกระบวนการบำบัดทางชีวภาพในสภาวะที่ไม่ใช้อากาศ โดยจุลินทรีย์จะใช้คาร์บอนไดออกไซด์เป็นตัวรับอิเล็กตรอน และย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ให้มีโมเลกุลเล็กลงสามารถเปลี่ยนเป็นก๊าซชีวภาพ ซึ่งองค์ประกอบหลักของก๊าซชีวภาพคือ ก๊าซมีเทน (CH_4) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ส่วนก๊าซอื่นๆ เช่น ไฮโดรเจน (H_2) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ออกซิเจน (O_2) และไนโตรเจน (N_2) เป็นต้น

สัดส่วนของก๊าซชนิดต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพจากกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนมีค่าดังตารางที่ 1

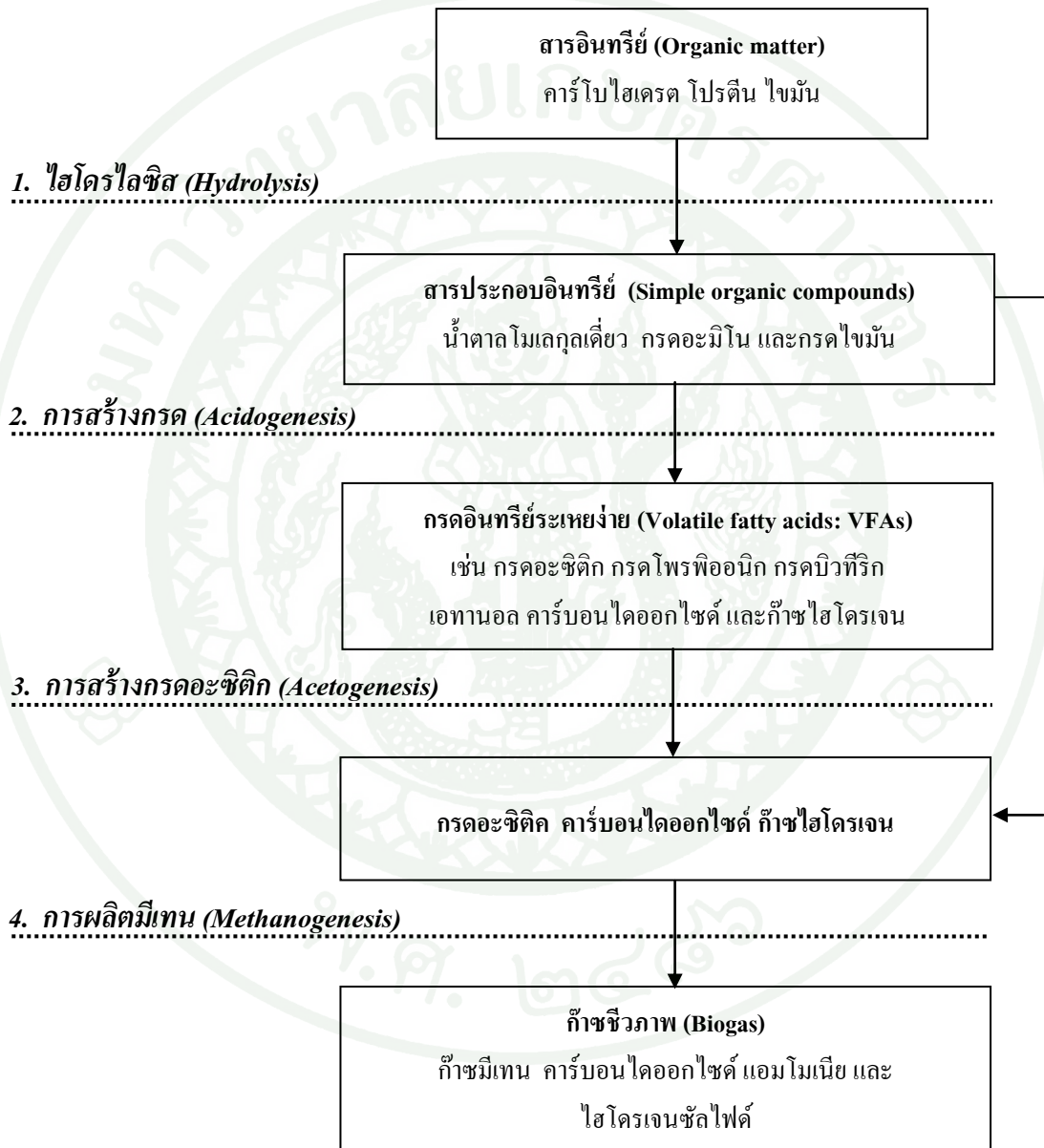
ตารางที่ 1 ชนิดและสัดส่วนของก๊าซต่างๆ ที่เกิดจากกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน

Compound	Content (%)
Methane (CH_4)	50-75
Carbon dioxide (CO_2)	25-45
Water vapour	2 (20 °C)-7 (40 °C)
Oxygen (O_2)	<2
Nitrogen (N_2)	<2
Ammonia (NH_3)	<1
Hydrogen (H_2)	<1
Hydroden sulphide (H_2S)	<1

ที่มา: Seadi *et al.* (2008)

ขั้นตอนในการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน

ในปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนนั้น สารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลซับซ้อนและขนาดใหญ่ จะถูกเปลี่ยนไปเป็นก๊าซชีวภาพตามขั้นตอนต่างๆ ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาในการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน

ที่มา: Breure and Andel (1987)

ขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาในการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (ภาพที่ 1) ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน โดยแต่ละขั้นตอนมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 การเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) เป็นขั้นตอนแรกในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน ขั้นตอนนี้จะเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลเชิงซ้อนและมีขนาดใหญ่ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน โดยเอนไซม์ที่ผลิตและหลั่งออกมาจากเซลล์จุลินทรีย์ ให้เป็นสารประกอบอินทรีย์อย่างง่ายที่ละลายน้ำได้ เช่น กลูโคส กรดอะมิโน และกรดไขมัน โดยอนุภาคต้องมีขนาดเล็กพอที่จะขนส่งข้ามเยื่อหุ้มเซลล์ของจุลินทรีย์ได้ การย่อยสลายในขั้นตอนนี้เกิดขึ้นค่อนข้างช้าและต้องการพลังงานสำหรับการย่อยโมเลกุลเชิงซ้อน โดยจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิซึ่งถือว่าเป็นปัจจัยจำกัดในการกำหนดอัตราการย่อยสลายสำหรับกระบวนการย่อยสลายทั้งกระบวนการ (Anderson *et al.*, 2003)

ขั้นตอนที่ 2 การสร้างกรด (Acidogenesis) เป็นขั้นตอนที่จุลินทรีย์ชนิดสร้างกรด (Acidogenic bacteria) ซึ่งสามารถดำรงชีพอยู่ได้ทั้งสภาพที่มีและไม่มีออกซิเจน (Facultative bacteria) เปลี่ยนสารอินทรีย์จากกระบวนการไฮโดรไลซิสเป็นกรดไขมันระเหยง่าย (Volatile fatty acids: VFAs) เช่น กรดอะซิติก (CH_3COOH) กรดโพรพิอิก ($\text{C}_2\text{H}_5\text{COOH}$) กรดบิวทิริก ($\text{C}_3\text{H}_7\text{COOH}$) เป็นต้น และผลิตภัณฑ์อื่นๆ เช่น เอทานอล ไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ ในขั้นตอนการสร้างกรดปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นค่อนข้างเร็ว (Lier *et al.*, 2008) นอกจากนี้ยังพบว่าจุลินทรีย์ชนิดนี้จะใช้ออกซิเจนที่มีในระบบ เพื่อป้องกันแบคทีเรียชนิดสร้างก๊าซมีเทนที่มีความอ่อนไหวต่อก๊าซออกซิเจน (Anderson *et al.*, 2003)

ขั้นตอนที่ 3 การสร้างกรดอะซิติก (Acetogenesis) เป็นขั้นตอนที่จุลินทรีย์ชนิดผลิตกรดอะซิติก (Acetogenic bacteria) เปลี่ยน VFAs เป็นกรดอะซิติกที่อยู่ในรูปของอะซิเตด ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ (Lier *et al.*, 2008) ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญสำหรับการผลิตก๊าซมีเทน

ตารางข้างล่างจะรวมขั้นตอนการสร้างกรด และการสร้างกรดอะซิติกไว้ด้วยกัน เนื่องจากจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับขั้นตอนทั้งสองมีความเกี่ยวข้องกัน เรียกจุลินทรีย์กลุ่มนี้ว่าจุลินทรีย์กลุ่มที่ไม่ผลิตก๊าซมีเทน (Non-methanogenic bacteria)

ขั้นตอนที่ 4 การผลิตก๊าซมีเทน (Methanogenesis) เป็นขั้นตอนสุดท้ายของการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยจุลินทรีย์ชนิดผลิตก๊าซมีเทน (Methanogenic bacteria) ใช้ไฮโดรเจนเป็นตัวให้อิเล็กตรอน (Electron donor) และเกิดปฏิกิริยากำจัดหมู่ -COOH ออกจากกรดอะซิติก (Decarboxylation) ได้ก๊าซมีเทน และคาร์บอนไดออกไซด์ (Lier *et al.*, 2008) ผลผลิตสุดท้ายของขั้นตอนนี้คือ ก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ใอน้ำ และก๊าซอื่นๆ ในปริมาณเล็กน้อย เช่น ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ ก๊าซแอมโมเนีย เป็นต้น

McCarty (1964) ได้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรก๊าซมีเทนที่ผลิตได้จากการหมักกลูโคสกับปริมาณของ COD (Chemical oxygen demand) ที่ถูกกำจัด คือ 1 กรัมของ COD ที่ถูกกำจัด สามารถผลิตก๊าซมีเทนได้ 0.350 ลิตร ที่สภาวะมาตรฐาน (อุณหภูมิ 0 °C ความดัน 1 atm) และเป็นดัชนีที่ใช้ในการบ่งบอกถึงประสิทธิภาพในการทำงานของระบบ

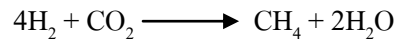
จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน

ประกอบด้วยจุลินทรีย์จำนวน 2 กลุ่ม ได้แก่

1. จุลินทรีย์ชนิดสร้างกรด (Acid forming bacteria) จุลินทรีย์กลุ่มนี้สามารถดำรงชีพอยู่ได้ทั้งสภาพที่มีและไม่มีออกซิเจน โดยจะเปลี่ยนสารอินทรีย์โมเลกุลขนาดเล็กเป็นกรดไขมันระเหยง่าย (Volatile fatty acid: VFA) และก๊าซไฮโดรเจน เพื่อให้จุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทนใช้ในการผลิตก๊าซมีเทนต่อไป จุลินทรีย์ชนิดสร้างกรดมีอัตราการเจริญเติบโตสูงและทนทานต่อสภาพแวดล้อมได้ดี เป็นผลสืบเนื่องมาจากการอยู่ร่วมกันของจุลินทรีย์หลายกลุ่ม (Mixed culture) หากภายในระบบผลิตก๊าซชีวภาพมีกลุ่มของจุลินทรีย์ชนิดสร้างกรดมีมากเกินไป จะก่อให้เกิดปัญหาต่อระบบ เนื่องจากจุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทนถูกยับยั้งการทำงาน เมื่อระบบมี pH ต่ำกว่า 6.5 เนื่องจากกรดถูกผลิตภายในระบบมากเกินไปทำให้ค่า pH ของระบบลดลง และส่งผลต่อการดำรงชีพของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนได้

2. จุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทน (Methane producing bacteria) จุลินทรีย์กลุ่มนี้จะมีการเจริญเติบโตช้า และมีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมสูง โดยเฉพาะความเป็นกรด-ด่าง (pH) Gray (1981) รายงานว่าจุลินทรีย์ชนิดสร้างก๊าซมีเทนมีอัตราการเจริญเติบโตช้ากว่าจุลินทรีย์ชนิดสร้างกรด 4 เท่า จุลินทรีย์ชนิดสร้างก๊าซมีเทนแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

2.1 จุลินทรีย์ชนิดที่สร้างมีเทนจากก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน โดยเรียก จุลินทรีย์ชนิดนี้ว่า Hydrogenotrophic methanogen จุลินทรีย์จะใช้ก๊าซไฮโดรเจน เป็นแหล่ง พลังงาน และใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งคาร์บอน ดังสมการ



2.2 จุลินทรีย์ชนิดที่สร้างมีเทนจากกรดอะซิติก เรียกว่า Acetoclastic methanogen โดย จุลินทรีย์จะใช้กรดอะซิติกเป็นแหล่งพลังงาน ดังสมการ



ปัจจัยที่มีผลต่อระบบการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน

ในระบบการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน จำเป็นต้องรักษาภาวะแวดล้อม ให้เหมาะสมสำหรับจุลินทรีย์ โดยปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการทำงานของจุลินทรีย์มีดังนี้

1. อุณหภูมิ (Temperature) จุลินทรีย์แต่ละกลุ่มสามารถเจริญเติบโตได้ดีภายในช่วงของ อุณหภูมิที่แตกต่างกัน ดังต่อไปนี้

1.1 ช่วงเทอร์โมฟิลิก (Thermophilic) คือช่วงอุณหภูมิ 45-65 °C ช่วงนี้อัตราการผลิต ก๊าซมีเทนค่อนข้างสูง สามารถรองรับ OLR ได้สูง แต่ระบบต้องการพลังงานความร้อนสูงและ จุลินทรีย์ไม่สามารถทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิได้เหมือนจุลินทรีย์ในช่วงอุณหภูมิ ทั่วไป

1.2 ช่วงมีโซฟิลิก (Mesophilic) คือช่วงอุณหภูมิ 25-45 °C เป็นช่วงของอุณหภูมิที่ใช้กัน อย่างแพร่หลายมากที่สุด (Anderson *et al.*, 2003) เนื่องจากมีความเหมาะสมกับกิจกรรมทาง ชีวภาพของจุลินทรีย์ และมีความเสถียรภาพค่อนข้างสูง

1.3 ช่วงไซโครฟิลิก (Psychrophilic) คือช่วงอุณหภูมิ 10-25 °C ในช่วงนี้จะใช้พลังงาน น้อย แต่อัตราการผลิตก๊าซมีเทนค่อนข้างต่ำและต้องใช้ระยะเวลาเก็บกักที่ยาวนาน

2. ความเป็นกรด-ด่าง (pH) เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน เพราะจุลินทรีย์ชนิดผลิตก๊าซมีเทน มีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงของค่า pH เป็นอย่างมาก โดยปกติจุลินทรีย์ชนิดผลิตก๊าซมีเทนสามารถทำงานได้ในช่วงค่า pH ระหว่าง 6.6-7.6 แต่ในช่วง 7.0-7.2 จุลินทรีย์สามารถทำงานได้เต็มประสิทธิภาพที่สุด (McCarty, 1964) Mosey and Fernandes (1989) พบว่าอัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ชนิดผลิตก๊าซมีเทนจะลดลงอย่างมากที่ค่า pH ต่ำกว่า 6.6 และ Sandberg and Ahring (1992) รายงานว่าแกรนูลของจุลินทรีย์จะถูกทำลายที่ pH 8.3 สำหรับขั้นตอนการสร้างกรดค่า pH ที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 5.5-6.5 (Yu and Fang, 2002; Kim *et al.*, 2003a, 2003b) ด้วยเหตุนี้จึงมีการแยกการหมักออกเป็นสองขั้นตอน เพราะกรดที่เกิดขึ้นภายในระบบจะทำให้ค่า pH ในลดลง และปฏิกิริยาจะถูกนำมาใช้ในปรับเพิ่มค่า pH ถึง 6.4 จากนั้นควรใช้โซเดียมไบคาร์บอเนตหรือโพแทสเซียมคาร์บอเนตในการเพิ่มค่า pH ให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม (Gerardi, 2003)

3. อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ (Organic loading rate: OLR) OLR ของระบบหมักมักถูกแสดงในหน่วยของน้ำหนักของของแข็งระเหย (Volatile solids: VS) หรือ COD (Chemical oxygen demand) ต่อหน่วยของปริมาตรบ่อหมักต่อหน่วยของเวลา Gerardi (2003) ได้ออกแบบและแนะนำค่า OLR ไว้ในช่วง 3.2-7.2 kgVS/m³.day สำหรับระบบหมักและวัตถุดิบประเภทต่างๆ ส่วน Metcalf & Eddy *et al.* (2003) ได้แนะนำ OLR ในช่วง 3.2-32 kgCOD/m³.day สำหรับระบบการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน OLR เป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อระบบการย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจน เพราะจะเกี่ยวข้องกับอัตราการผลิตก๊าซมีเทน หากระบบมี OLR ที่สูงเกินไปจะทำให้อัตราการผลิตก๊าซมีเทนลดลง เนื่องมาจากภายในระบบมีการสร้างและสะสมของ VFAs ทำให้ค่า pH ภายในระบบลดลงและส่งผลกระทบต่อการทำงานของจุลินทรีย์ชนิดผลิตก๊าซมีเทน ในระยะเริ่มต้นเดินระบบการเติมสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบมีความสำคัญเป็นอย่างมาก ควรมีการเติมซ้ำๆ เพื่อให้จุลินทรีย์ชนิดผลิตก๊าซมีเทนเจริญเติบโตและคุ้นเคยกับสารอินทรีย์ชนิดนั้นๆ จนสามารถปรับตัวและรองรับ OLR สูงๆ ได้เมื่อเวลาผ่านไป

4. ระยะเวลาเก็บกัก (Hydraulic retention time: HRT) เป็นระยะเวลาที่ใช้ในการกักเก็บสารอินทรีย์ไว้ภายในระบบ ถ้า HRT สั้นเกินไประบบจะล้มเหลว เนื่องจากจุลินทรีย์กลุ่มที่ไม่ใช้ออกซิเจนเจริญเติบโตได้ช้า และต้องการระยะเวลาในการย่อยสลายสารอินทรีย์เพื่อเปลี่ยนเป็นก๊าซชีวภาพ แต่ข้อดีคือช่วยลดขนาดของบ่อหมัก เป็นการประหยัดค่าใช้จ่ายในการลงทุน ในทางกลับกันถ้า HRT ในระบบสูง จะมีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูง ประสิทธิภาพของระบบในการกำจัดสารอินทรีย์สูง แต่มีข้อเสียคือขนาดของบ่อหมักจะใหญ่ขึ้น เป็นการเพิ่มค่าใช้จ่ายในการลงทุน

Hartmann and Ahring (2006) รายงานว่าระยะเวลาในการเก็บกักกากของเสียในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนจะแตกต่างกันอยู่ในช่วง 3-55 วัน ขึ้นอยู่กับประเภทของกากของเสีย อุณหภูมิในการเดินระบบ และโครงสร้างภายนอกของกระบวนการย่อย Salminen and Rintala (2002) รายงานว่าใช้ระยะเวลาเก็บกักนาน 50-100 วัน สำหรับกระบวนการหมักกากของเสียที่มาจากโรงฆ่าสัตว์สัตว์ปีก จะเห็นได้ว่ากากของเสียแต่ละชนิดต้องการ HRT ที่แตกต่างกัน

5. ธาตุอาหาร (Nutrient) สารอาหารเช่นไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) และกำมะถัน (S) มีความจำเป็นต่อการทำงานของจุลินทรีย์ เพราะธาตุอาหารเหล่านี้เป็นองค์ประกอบพื้นฐานในการสร้างเซลล์และช่วยในการสังเคราะห์เอนไซม์ ธาตุอาหารจะถูกแบ่งออกเป็นกลุ่มธาตุอาหารหลักและธาตุอาหารรอง แต่ทั้งสองกลุ่มไม่ควรจะมีปริมาณมากเกินไปเพราะจะทำให้เกิดความเป็นพิษต่อระบบ ระบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนมีความต้องการธาตุอาหารในอัตราส่วน BOD:N:P เท่ากับ 100:1.1:0.2 หากระบบมีปริมาณธาตุอาหารที่เพียงพอจะทำให้จุลินทรีย์สามารถทำงานได้ดี ประสิทธิภาพของระบบสูงขึ้น (ศิริพร, 2539) Anderson *et al.* (2003) ได้แนะนำอัตราส่วนระหว่าง COD:N สำหรับการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ไม่เปลี่ยนเป็นกรดแบบไม่ใช้ออกซิเจน คือ 100:2.5 และอัตราส่วนระหว่าง COD:P ที่แนะนำมีค่าระหว่าง 80:1-200:1 นอกจากนี้องค์ประกอบของกากของเสียยังถูกหาในรูปของอัตราส่วนระหว่างปริมาณคาร์บอนอินทรีย์และปริมาณไนโตรเจน (C:N ratio) โดยกากของเสียที่อัตราส่วนระหว่าง C:N สูง ไม่เหมาะสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ เพราะอาจก่อให้เกิดสภาวะขาดแคลนไนโตรเจนได้ ในทางกลับกันหากอัตราส่วนระหว่าง C:N ต่ำเกินไป จะก่อให้เกิดแอมโมเนียสะสมภายในระบบซึ่งเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ (Hartmann and Ahring, 2006) โดย Kayhanian and Hardy (1994) รายงานว่าอัตราส่วนระหว่าง C:N ที่เหมาะสมสำหรับการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนอยู่ในช่วง 25-30 หากต้องการรักษาระดับของอัตราส่วนระหว่าง C:N ของวัสดุหมักให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม ให้นำวัสดุหมักที่มีอัตราส่วนระหว่าง C:N สูง มาหมักรวม (Co-digestion) กับวัสดุหมักที่มีอัตราส่วนระหว่าง C:N ต่ำ เช่น มูลสัตว์ หรือเศษอาหาร (Zaher *et al.*, 2007)

6. สารพิษ (Toxic) สารประกอบหลายชนิด รวมทั้งธาตุอาหารที่จุลินทรีย์ต้องการสามารถก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน หรือเป็นตัวยับยั้งกระบวนการย่อยสลายได้ ถ้าภายในระบบมีความเข้มข้นของสารประกอบและธาตุอาหารบางชนิดสูงเกินไป โดยระดับความเป็นพิษจะขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสารประกอบ ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สารอนินทรีย์ที่เป็นพิษสำหรับกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน

Compound	Concentration (mg/L)		
	Stimulating	Moderately toxic	Strongly toxic
Sodium (Na ⁺)	100-200	3500-5500	8000
Potassium (K ⁺)	200-400	2500-4500	12000
Calcium (Ca ²⁺)	100-200	2500-4000	8000
Magnesium (Mg ²⁺)	75-150	1000-1500	3000
Ammonia (NH ⁴⁺)		1500-3000	3000
Sulfide (S ²⁻)		200	200
Copper (Cu ²⁺)			0.5 (soluble) 50-70 (total)
Chromium (Cr ⁶⁺)		10	3.0 (soluble) 200-250 (total)
Chromium (Cr ³⁺)		10	2.0 (soluble) 180-420 (total)
Nickel (Ni ²⁺)			30 (total)
Zinc (Zn ²⁺)			1.0 (soluble)
Arsenate and arsenite		>0.7	
Cyanide		1-2	
Lead-containing compounds		5	
Iron-containing compounds		>35	
Copper-containing compounds		1	
Potassium chloride (KCl)		>10000	
Chloride (Cl ⁻)		6000	

ที่มา: Metcalf & Eddy *et al.* (2003); Appels *et al.* (2008)

7. การกวนผสม (Mixing) การกวนผสมมีบทบาทสำคัญต่อการกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน เพราะช่วยให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างวัสดุหมักใหม่ที่เพิ่งเติมเข้าระบบกับกลุ่มจุลินทรีย์ในระบบ ช่วยป้องกันการแยกชั้นของวัสดุหมักและการเกิดตะกอนลอยบริเวณผิวหน้าของถังหมัก รวมทั้งช่วยเพิ่มอัตราการผลิตก๊าซมีเทน Appels *et al.* (2008) รายงานว่าการ

กวนผสมสามารถทำได้หลายรูปแบบ เช่น การใช้เครื่องมือกล การเวียนกลับกากตะกอนที่ผ่านการหมัก หรือการฉีดด้วยฟองก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้

8. สภาพความเป็นด่าง (Alkalinity) เป็นดัชนีที่บ่งชี้ถึงความสามารถในการรักษาระดับ pH ของระบบ กล่าวคือถ้าระบบมีค่าสภาพความเป็นด่างสูงแสดงว่าระบบมีปริมาณบัฟเฟอร์ (Buffer) สูง สามารถรักษาค่า pH ของระบบให้คงตัวอยู่ได้นาน โดยไม่เกิดการแปรปรวนได้ง่าย เมื่อมีปริมาณ VFAs เพิ่มขึ้นในระบบ โดยทั่วไประบบบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนควรมีค่าสภาพความเป็นด่างอยู่ในช่วง 1000-3000 mg/L as CaCO₃ และไม่ควรต่ำกว่า 1000 mg/L as CaCO₃ (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553)

ระบบการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน

ระบบการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ

1. ระบบหมักแบบขั้นตอนเดียว (Single-stage anaerobic digestion) เป็นระบบที่นิยมใช้มานานหลายทศวรรษสำหรับการย่อยสลากากสลัดจ์ (Sludge) จากระบบบำบัดน้ำเสีย โดยระบบหมักจะประกอบด้วยถังปฏิกรณ์แบบปิดถังเดียว ข้อบกพร่องหลักของระบบนี้ คือ กระบวนการย่อยสลากทั้งหมดจะเกิดขึ้นภายในถังปฏิกรณ์เดียวกัน แม้จะมีความแตกต่างในเรื่องของอัตราการเจริญเติบโตและค่า pH ที่เหมาะสมของกลุ่มจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องในแต่ละขั้นตอน จึงเป็นสาเหตุที่ทำให้ระบบประเภทนี้ล้มเหลวได้ง่ายเมื่อเทียบกับระบบหมักแบบหลายขั้นตอน ระบบหมักแบบขั้นตอนเดียวสามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ

ระบบหมักแบบขั้นตอนเดียวอัตราต่ำ (Low rate) ซึ่งโดยส่วนใหญ่หมักจะไม่มีการกวนผสม (Mixing)) ปฏิกรณ์ที่เกิดขึ้นจึงค่อนข้างช้า

ระบบหมักแบบขั้นตอนเดียวอัตราสูง (High rate) ส่วนใหญ่ในถังปฏิกรณ์จะมีการกวนผสมเพื่อให้เกิดการย่อยสลากได้ดีขึ้น เนื่องจากจุลินทรีย์สามารถสัมผัสกับสารอินทรีย์ได้อย่างทั่วถึง

ข้อดีของระบบหมักแบบขั้นตอนเดียว คือไม่มีความซับซ้อนของการเดินระบบและเทคโนโลยี ไม่มีการเวียนกลับตะกอนมาใช้ซ้ำ

2. ระบบหมักแบบหลายขั้นตอน (Multi-stage anaerobic digestion) ระบบหมักแบบหลายขั้นตอนพยายามที่จะแยกขั้นตอนการย่อยสลาย (Hydrolysis) และขั้นตอนการสร้างกรด (Acidogenesis/Acetogenesis) ออกจากขั้นตอนการสร้างมีเทน (Methanogenesis) เนื่องจากจุลินทรีย์แต่ละชนิดมีสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสมแตกต่างกัน (Zoetemeyer *et al.*, 1982; Liu *et al.*, 2006a, 2006b) ส่วนใหญ่ระบบหมักประเภทนี้จะมีสองขั้นตอน (Two-stage anaerobic digestion) ระบบหมักแบบหลายขั้นตอนจะช่วยป้องกันระบบกรณีที่เกิดความผันผวนของ OLR หรือมีตัวแปรบางอย่างที่ส่งผลกระทบต่อจุลินทรีย์ชนิดสร้างก๊าซมีเทน โดยมีขั้นตอนแรกเป็นบัฟเฟอร์ วัสดุหมักที่ผ่านจากขั้นตอนแรกเข้าสู่ขั้นตอนที่สองจะมีลักษณะเป็นเนื้อเดียวกัน ระบบจึงมีเสถียรภาพมากขึ้น (Mata-Alvarez, 2002) อย่างไรก็ตามระบบการหมักแบบหลายขั้นตอนมีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูงทั้งในแง่ของการก่อสร้างและการบำรุงรักษา แต่มีประสิทธิภาพสูงกว่าระบบการหมักแบบขั้นตอนเดียว

Nielsen *et al.*, (2004) รายงานว่าระบบหมักแบบขั้นตอนเดียว และระบบหมักแบบสองขั้นตอนในการบำบัดปุ๋ยคอกที่อุณหภูมิช่วงเทอร์โมฟิลิกนั้น ระบบหมักแบบสองขั้นตอนมีอัตราการผลิตก๊าซมีเทนจำเพาะสูงกว่า 6-8 % และประสิทธิภาพในการกำจัด VS สูงกว่าระบบการหมักแบบขั้นตอนเดียวธรรมดา 9 %

Liu *et al.* (2006a, 2006b) รายงานว่าในการหมักขยะมูลฝอยเทศบาล ระบบหมักแบบสองขั้นตอนให้ผลผลิตก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น 21 % เมื่อเปรียบเทียบกับระบบหมักแบบขั้นตอนเดียว ถึงแม้หมักแบบขั้นตอนเดียวอาจจะเกิดการลัดวงจร (Short-circuiting) ได้ง่ายกว่าระบบหมักแบบหลายขั้นตอน การลัดวงจรคือการที่วัสดุหมักผ่านการเก็บกักภายในระบบด้วย HRT ที่สั้นกว่าที่ต้องการ ทำให้ผลผลิตก๊าซมีเทนลดลง

3. ระบบการหมักแบบเติมสารตั้งต้นครั้งเดียว (Batch anaerobic digestion) ในระบบหมักแบบการเติมสารตั้งต้นครั้งเดียวนั้น ถังหมักจะถูกบรรจุวัสดุหมักเพียงครั้งเดียว จนกระทั่งสิ้นสุดกระบวนการย่อยสลายจึงปล่อยออก ระบบถูกออกแบบให้มีความเรียบง่ายและสามารถเคลื่อนย้ายได้ จึงเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับการบำบัดกากของเสียที่เป็นสารอินทรีย์ ระบบการหมักแบบเติมสารตั้งต้นครั้งเดียวมีลักษณะการใช้งานเช่นเดียวกับหลุมฝังกลบขยะ (Landfill) โดยปริมาณก๊าซมีเทนที่สามารถผลิตได้อยู่ระหว่าง 50-100 % ในทางตรงกันข้ามต้องระมัดระวังเรื่องความปลอดภัยจะต้องดำเนินการเพื่อหลีกเลี่ยงการระเบิด

หญ้าเนเปียร์

หญ้าเนเปียร์ (Napier grass) หรือหญ้าช้าง (Elephant grass) มีถิ่นกำเนิดมาจากภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคกลางของแอฟริกา เมื่อเจริญเติบโตเต็มที่จะสูงถึง 4 m หญ้าเนเปียร์จัดเป็นหญ้าเขตร้อนที่ให้ผลผลิตในหน่วยน้ำหนักแห้งสูงที่สุด (Skerman and Riveros, 1990; Humphreys, 1995) โดย Schreuder *et al.* (1993) พบว่าผลผลิตหญ้าเนเปียร์แห้งอยู่ระหว่าง 10-40 ton DW/ha/yr ขึ้นอยู่กับความอุดมสมบูรณ์ของดิน สภาพภูมิอากาศและการบริหารจัดการ นอกจากนี้เขตร้อนเป็นภูมิภาคที่ให้ผลผลิตหญ้าเนเปียร์สูงสุด (Ferraris and Sinclair, 1980; Woodard and Prine, 1991) ถึง 85 ton DW/ha/yr เมื่อได้รับปุ๋ยในปริมาณที่สูง (Skerman and Riveros, 1990)

หญ้าเนเปียร์สายพันธุ์ปากช่อง 1 เป็นหญ้าลูกผสมเนเปียร์สายพันธุ์หนึ่ง ซึ่งเกิดจากการผสมข้ามพันธุ์ระหว่างหญ้าเนเปียร์ยักษ์และหญ้าไฉ่มุก เป็นพืชอาหารสัตว์ที่มีศักยภาพสูงทั้งในแง่การให้ผลผลิต และมีคุณค่าทางอาหารสัตว์ตามที่สัตว์ต้องการ เหมาะสำหรับใช้เลี้ยงสัตว์ โดยเฉพาะสัตว์เคี้ยวเอื้อง เช่น โคนม โคนเนื้อ กระบือ แพะ และแกะ (ไกรลาศ, ม.ป.ป.)

1. สภาพภูมิอากาศ และลักษณะดินที่เหมาะสม

หญ้าเนเปียร์เป็นหญ้าที่เจริญเติบโตได้เร็ว ให้ผลผลิตสูง สามารถเจริญเติบโตได้ดีในพื้นที่ที่มีปริมาณน้ำฝนสูง (> 1000 mm/yr) สามารถทนแล้งได้ในระดับปานกลาง (3-4 เดือน) เนื่องจากมีระบบรากที่ค่อนข้างลึก หากพื้นที่ปลูกอยู่ในพื้นที่สูง (สูงกว่า 2100 m) การเจริญเติบโตจะชะลอลงเนื่องจากอุณหภูมิที่ต่ำลง อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตอยู่ในช่วง 25-40 °C (Russell and Webb, 1976) นอกจากนี้หญ้าเนเปียร์ต้องการแสงแดดเพื่อใช้ในการเจริญเติบโต พบว่าการปลูกใกล้ร่มเงาหรือที่ร่มในสวนผลไม้จะให้ผลผลิตไม่มาก จึงควรปลูกในบริเวณพื้นที่ที่มีแสงแดดส่องถึงอย่างเพียงพอ หญ้าเนเปียร์เจริญเติบโตได้ดีในดินหลายประเภทไม่ว่าจะเป็นดินร่วนปนทราย ดินเหนียว หรือดินลูกรัง ชอบดินที่มีการระบายน้ำดีและมีความอุดมสมบูรณ์ แต่ไม่เหมาะกับพื้นที่ที่มีน้ำท่วมขัง (Bogdan, 1977)

2. องค์ประกอบของหญ้าเนเปียร์

หญ้าเนเปียร์ที่มีอายุการตัดมากจะให้ผลผลิตในหน่วยน้ำหนักแห้งเพิ่มขึ้น แต่คุณค่าทางโภชนาการของหญ้าลดลง โดย Crowder and Chheda (1995) รายงานว่า การเพิ่มช่วงอายุการตัดของหญ้าเนเปียร์ ทำให้ผลผลิตในหน่วยน้ำหนักแห้ง เช่น เเปอร์เซ็นต์วัตถุแห้ง (Dry matter) เยื่อใยหยาบ (Crude fiber) ลิกนิน (Lignin) และผนังเซลล์ (Cell wall) เพิ่มขึ้น แต่ในทางกลับกัน สัดส่วนของใบต่อลำต้น (Leaf-stem ratio: LSR) เเปอร์เซ็นต์โปรตีน (Crude protein) ปริมาณแร่ธาตุ (P, K, Ca และ Mg) ลดลง

องค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญของหญ้าเนเปียร์ประกอบด้วยวัตถุแห้ง (Dry matter) อินทรีย์วัตถุ (Organic matter) เถ้า (ash) โปรตีนหยาบ (Crude protein: CP) เยื่อใยหยาบ (Crude fiber: CF) เยื่อใยที่ไม่ละลายในสารซักฟอกที่เป็นกลาง (Neutral detergent fiber: NDF) เยื่อใยที่ไม่ละลายในสารซักฟอกที่เป็นกรด (Acid detergent fiber: ADF) ลิกนิน (Acid detergent lignin: ADL) และเซลลูโลสประเภทต่างๆ ซึ่งปริมาณขององค์ประกอบทางเคมีเหล่านี้จะแตกต่างกันไปตามอายุการตัด ตัวอย่างเช่น หญ้าเนเปียร์ที่อายุการตัด 60, 90 และ 120 วัน ที่มีองค์ประกอบดังตารางที่ 3 อีกทั้งในส่วนของใบและลำต้น ก็มีปริมาณขององค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกันดังตารางที่ 4

ตารางที่ 3 ผลของอายุการตัดต่อองค์ประกอบทางเคมีของหญ้าเนเปียร์

Chemical composition	Cutting interval (days)		
	60	90	120
Dry matter (g/kg)	478.5	506.3	511.1
Organic matter (g/kg DW)	944.9	933.2	928.6
Ash (g/kg DW)	71.4	66.8	55.0
Crude protein (g/kg DW)	109.9	86.3	79.9
Neutral detergent fiber (NDF, g/kg DW)	686.0	720.3	765.1
Acid detergent fiber (ADF, g/kg DW)	488.6	505.6	511.8
Hemicellulose (g/kg DW)	208.3	231.7	259.5
Cellulose (g/kg DW)	427.6	372.3	354.6
Acid detergent lignin (g/kg DW)	84.1	116.4	151.0

ที่มา: Ansah *et al.* (2010)

ตารางที่ 4 องค์ประกอบทางเคมีในใบ และลำต้นของหญ้าเนเปียร์

Chemical composition	Cutting interval (days)	
	Leaf	Stem
Dry matter (g/kg)	499.9	500.0
Organic matter (g/kg DW)	922.4	948.8
Ash (g/kg DW)	77.6	51.2
Crude protein (g/kg DW)	122.2	61.8
Neutral detergent fiber (NDF, g/kg DW)	708.6	761.7
Acid detergent fiber (ADF, g/kg DW)	468.5	535.4
Hemicellulose (g/kg DW)	240.0	226.3
Cellulose (g/kg DW)	362.8	406.9
Acid detergent lignin (g/kg DW)	105.8	128.5

ที่มา: Ansah *et al.* (2010)

การผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์

หญ้าเนเปียร์เป็นหญ้าที่เหมาะสมสำหรับนำมาเป็นสารตั้งต้นในการหมัก เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ เนื่องจากให้ผลผลิตต่อพื้นที่การปลูกสูง เจริญเติบโตเร็ว และเหมาะกับสภาพอากาศในประเทศไทย ตัวอย่างงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซมีเทนจากหญ้าเนเปียร์ ได้แก่

Wilawan *et al.* (2013) ศึกษาถึงการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างหญ้าเนเปียร์ สายพันธุ์ปากช่อง 1 และมูลไก่ โดยใช้ระบบหมักแบบถังกวนต่อเนื่อง (Completely stirred tank reactor: CSTR) ผลการศึกษาพบว่าที่ OLR 1.1 kgVS/m³.day ซึ่งมีอัตราส่วนระหว่าง C:N เท่ากับ 20 ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด 0.27±0.01 L/kgVS added และเมื่อ OLR เพิ่มขึ้นผลผลิตก๊าซมีเทนลดลง

จักรพันธ์ (2553) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียฟาร์มสุกรหมักร่วมกับหญ้าเนเปียร์ พบว่า HRT ที่ดีที่สุด คือ 10 วัน ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด 0.629(±0.16) L/gVS

พญาณี และคณะ (2557) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักหญ้าเนเปียร์ และการหมักหญ้าเนเปียร์ร่วมกับมูลโค โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์ผสมจากกระเพาะหมักโคและกระบือ พบว่าการหมักหญ้าเนเปียร์ร่วมกับมูลโคในสัดส่วนหญ้าเนเปียร์ : มูลโค : น้ำ เท่ากับ 10 : 10 : 80 และใช้เชื้อจุลินทรีย์ผสมจากกระเพาะหมักโค ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสูงกว่าการหมักโดยใช้หญ้าเนเปียร์อย่างเดียว ผลผลิตก๊าซมีเทนที่ได้เท่ากับ 300 L/kgCOD degraded หรือ 371 L/kgTVS degraded หรือ 194 L/kgTS added

Chynoweth *et al.* (1993) รายงานว่าการหมักหญ้าเนเปียร์แบบไม่ใช้ออกซิเจนนั้นให้ผลผลิตก๊าซมีเทนระหว่าง 0.19-0.34 L/kgVS added

Tong *et al.* (1989) ศึกษาศึกษาการผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักหญ้าเนเปียร์โดยใช้ระบบหมักแบบเติมสารตั้งต้นครั้งเดียว (Batch methane fermentation) พบว่าใช้ระยะเวลาตลอดการศึกษา รวม 104 วัน ผลผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดมีค่า $0.288 \pm 0.004 \text{ m}^3 \text{ at STP/kgVS}$

Rekha and Pandit (2013) ศึกษาการผลิตก๊าซมีเทนจากหญ้าเนเปียร์ด้วยระบบหมักแบบเติมสารตั้งต้นครั้งเดียว โดยมีการปรับสภาพหญ้าเนเปียร์ด้วยด่าง (NaOH) ก่อนการหมัก พบว่าหญ้าเนเปียร์ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยด่างให้ผลผลิตก๊าซมีเทน $0.158 \text{ m}^3/\text{kgTS}$ สูงกว่าผลผลิตก๊าซมีเทนที่ได้จากการหมักหญ้าเนเปียร์ที่ยังไม่ผ่านการปรับสภาพซึ่งมีค่า $0.047 \text{ m}^3/\text{kgTS}$

Janejadkarn and Chavalparit (2013) ศึกษาการผลิตก๊าซมีเทนจากหญ้าเนเปียร์สายพันธุ์ปากช่อง 1 จากระบบหมักแบบถังกวนต่อเนื่องที่อุณหภูมิห้อง ผลการศึกษาพบว่าค่า VS ที่ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดคือ 2 % คิดเป็นอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ $0.57 \text{ kgVS/m}^3 \cdot \text{day}$ โดยผลผลิตก๊าซชีวภาพมีค่า $0.529 \text{ m}^3/\text{kgVS added}$ และผลผลิตก๊าซมีเทนมีค่า $0.242 \text{ m}^3/\text{kgVS added}$

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

ในการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์พันธุ์ปากช่อง 1 โดยใช้ระบบหมักแบบสองขั้นตอน มีอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองดังนี้

1. เครื่องแก้วพื้นฐานที่ใช้โดยทั่วไปในห้องปฏิบัติการ ประกอบไปด้วย บีกเกอร์ กระจกบด ตวง แท่งแก้วคน ขามระเหย ขวดแก้วรูปชมพู่ ปิเปต บิวเรต และหลอดหยด

2. เครื่องมือและอุปกรณ์ในการวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์ ได้แก่

2.1 COD Reflux Apparatus Model GERHARDT รุ่น EV

2.2 pH meter Model Cyber Scan รุ่น 500

2.3 เครื่องชั่งทศนิยม 4 ตำแหน่ง

2.4 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath)

2.5 เตาเผา

3. Gas Chromatograph (GC) Shimadzu 14B ที่มีตัวตรวจวัดเป็น Thermal conductivity detector (TCD) ใช้ Column molecular sieves 13X และก๊าซอาร์กอน (Ar) เป็นก๊าซตัวพา (Carrier gas) ก๊าซมาตรฐาน (Standard gas) ที่ใช้เป็นก๊าซผสมระหว่าง H_2 30 % และ CH_4 30 % ที่สภาวะดังต่อไปนี้

Column oven 40 °C

Injection port 60 °C

Detector 70 °C

4. สารเคมีและอุปกรณ์ในการวิเคราะห์ COD (Chemical oxygen demand) ของสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์ ตามวิธีมาตรฐาน Standard Methods (AWWA *et al.*, 2005)

5. อุปกรณ์สำหรับสร้างระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic reactor) และระบบการแทนที่น้ำ (Water displacement)

5.1 ขวดพลาสติกความจุ 6 ลิตร

5.2 ท่อพีวีซี และข้องอพีวีซี

5.3 สายยาง และสายยางซิลิโคน

5.4 หลอดแก้วแบบต่างๆ

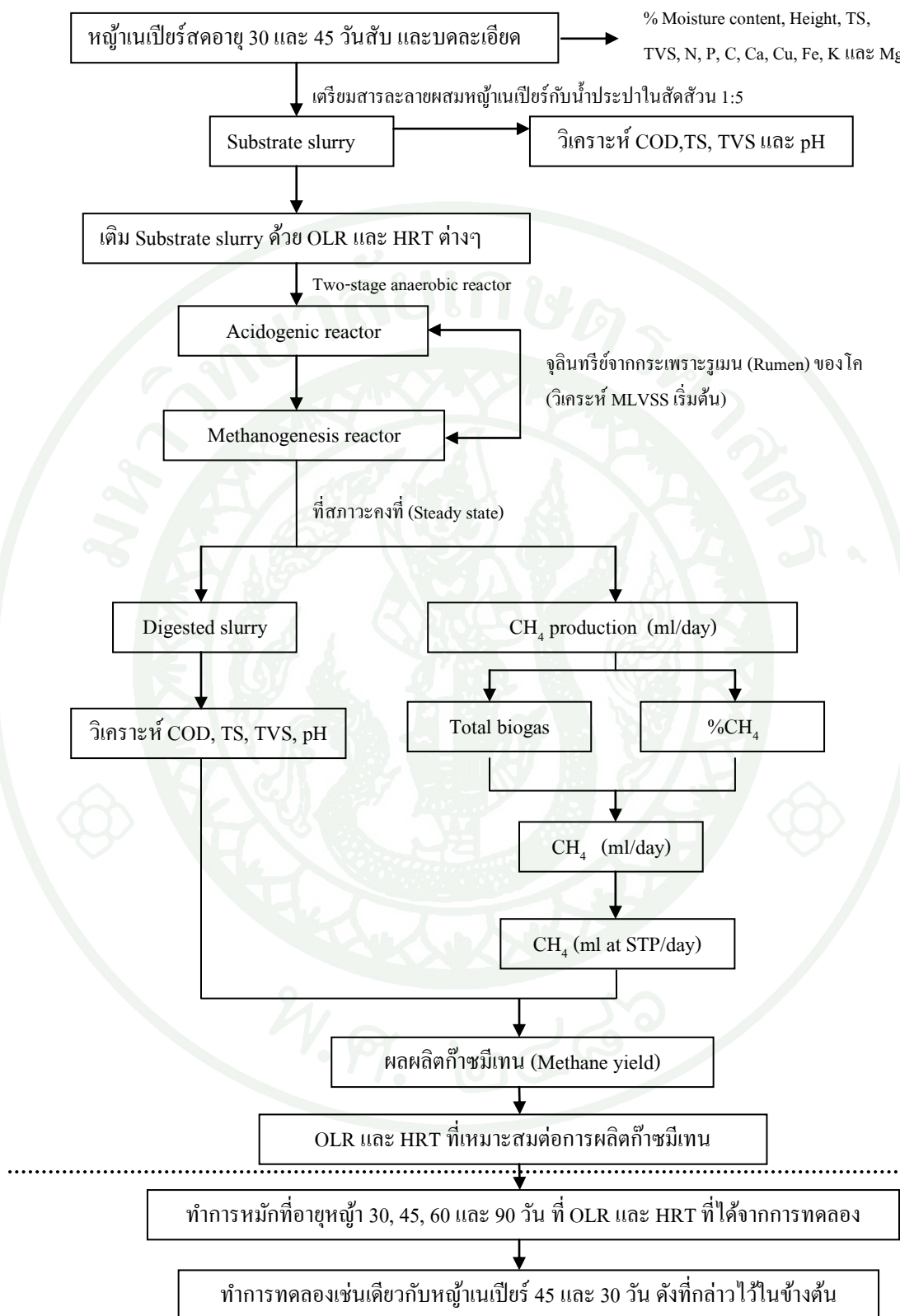
5.5 จุกยางแบบต่างๆ

5.6 ถวดขนาดเล็ก

5.7 กาวซิลิโคน

วิธีการ

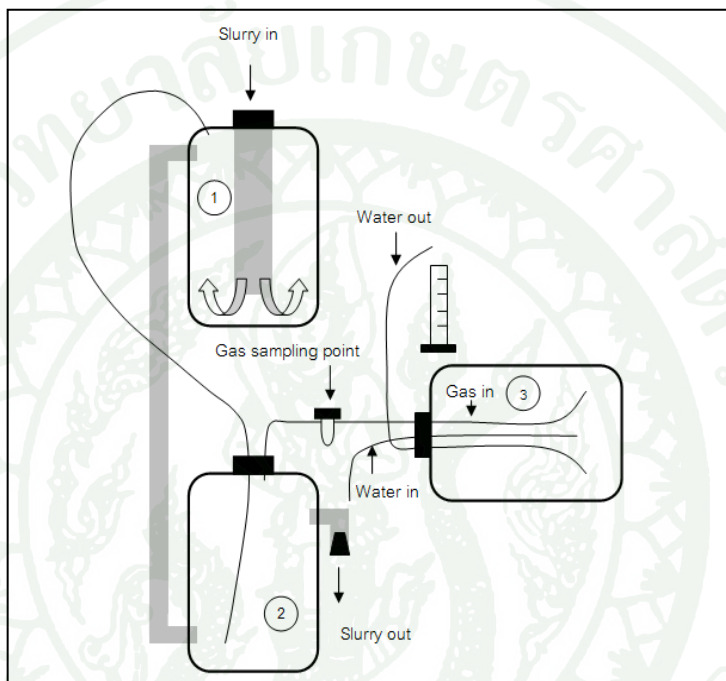
การศึกษาวิจัยในครั้งนี้สามารถสรุปเป็นแผนภูมิวิธีการทดลองได้ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แผนภูมิการดำเนินงานทดลองระยะเวลาการทดลอง

จากภาพที่ 2 สามารถแบ่งขั้นตอนในการศึกษาออกเป็น 5 ขั้นตอน ดังต่อไปนี้

1. การสร้างระบบหมักสองขั้นตอน (Two-stage anaerobic reactor) ดังภาพที่ 3 จำนวน 5 ชุด โดยแต่ละชุดประกอบด้วยถังหมักกรด (Acidogenic reactor) ถังสร้างมีเทน (Methanogenic reactor) และถังเก็บก๊าซ (Gas collection system)

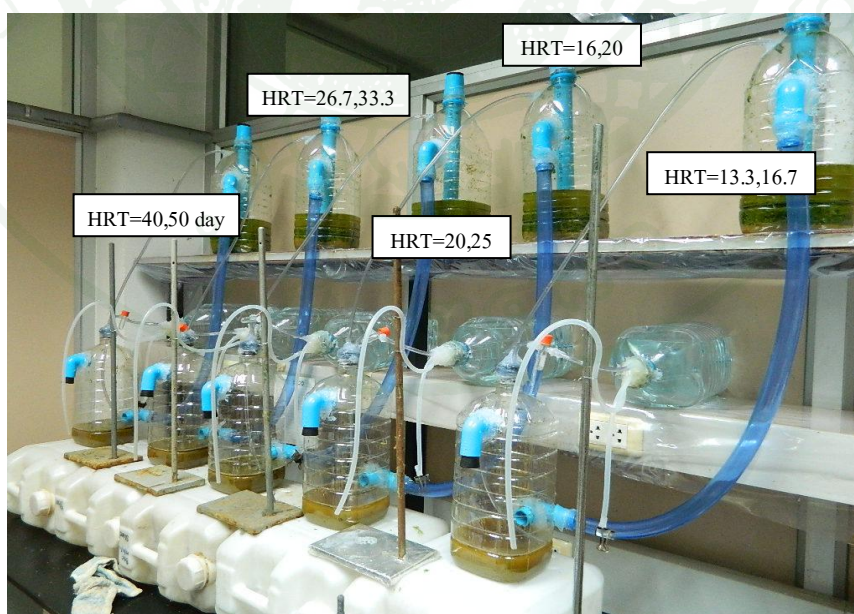


ภาพที่ 3 ระบบการหมักแบบสองขั้นตอน และระบบการแทนที่น้ำประกอบไปด้วย (1) ถังหมักกรด (Acidogenic reactor) (2) ถังสร้างมีเทน (Methanogenic reactor) และ (3) ถังเก็บก๊าซ (Gas collection system)

1.1 ถังหมักกรด (Acidogenic reactor) ใช้ถังพลาสติกความจุ 6 L นำท่อพีวีซีมาใส่บริเวณปากถังพลาสติกเพื่อรองรับสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์ แล้วใช้ลวดขนาดเล็กพันเพื่อความแน่นหนา พร้อมจุกยางปิดฝา อุดรอยต่อระหว่างขวดน้ำพลาสติกกับท่อพีวีซีด้วยกาวซิลิโคน เจาะรูทางก๊าซออก (Acidogenic gas out) แล้วต่อสายสำหรับก๊าซที่เกิดในระบบออกจากถังหมักกรดเข้าสู่ถังสร้างมีเทน เจาะรูทางน้ำส้นให้เหลือปริมาตร 4 L แล้วนำช่องอมมาต่อพร้อมสายยางสำหรับน้ำส้นออก (Slurry out) อุดรอยรั่วด้วยกาวซิลิโคนสีใส

1.2 ถังสร้างมีเทน (Methanogenic reactor) นำถังพลาสติกความจุ 6 L มาเจาะรูทางเข้าสารละลายผสมจากถังหมักกรด (Slurry in) โดยมีข้อต่อเป็นตัวเชื่อมระหว่างถังกับสายยาง จากนั้นเจาะรูทางน้ำล้น (Digested slurry) ให้เหลือปริมาตร 5 L และนำข้อต่อมาต่อพร้อมจุกยางปิดฝาบริเวณปากถังพลาสติกนำจุกยางมาเจาะรู 2 รู สำหรับก๊าซที่มาจากถังหมักกรด และอีกรูสำหรับทางออกของก๊าซที่เกิดในถังสร้างมีเทน (Methanogenic gas out) ไปยังระบบแทนที่น้ำ อุดรอยรั่วด้วยกาวซิลิโคนสีใส

1.3 ถังเก็บก๊าซ (Gas collection system) นำถังพลาสติกความจุ 6 L มาเติมสารละลาย H_2SO_4 0.05 M โดยบริเวณปากถังใช้จุกยางเจาะรู 3 รู ด้านในต่อกับแท่งแก้วและด้านบนต่อกับสายยาง โดยรูแรกเป็นทางน้ำออก (Water out) แท่งแก้วมีลักษณะงอลงด้านล่างถังพลาสติก รูที่สองจะเป็นทางน้ำเข้าซึ่งใช้สำหรับเติมน้ำ (Water in) แท่งแก้วมีลักษณะตรง รูที่สามเป็นทางที่ก๊าซเข้ามาจากถังสร้างมีเทนเข้ามาแทนที่น้ำ (Gas in) แท่งแก้วจะมีลักษณะงอขึ้นด้านบนถังพลาสติก และห้ามให้สารละลาย H_2SO_4 มีปริมาตรสูงกว่าปลายของแท่งแก้วทางด้านบน สายยางที่ใช้ต่อกับแท่งแก้วเป็นทางน้ำออก และทางน้ำเข้านั้นเป็นสายยางประเภทซิลิโคน อุดรอยรั่วด้วยกาวซิลิโคนสีใส ซึ่งเป็นการเก็บตัวอย่างก๊าซโดยการแทนที่น้ำ (Water displacement) นอกจากนี้สายยางที่นำก๊าซจากถังสร้างมีเทนมายังถังเก็บก๊าซจะมีหลอดแก้วรูปตัว T ที่ต่อกับจุกยางสีส้ม ไว้สำหรับเก็บตัวอย่างก๊าซ เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณก๊าซมีเทน ($\%CH_4$) ที่เกิดขึ้นภายในระบบ



ภาพที่ 4 ลักษณะของระบบจริงที่ใช้ในการทดลอง

2. การวิเคราะห์ลักษณะสมบัติของหมักเนเปียร์ ประกอบด้วยพารามิเตอร์ดังต่อไปนี้

- 2.1 ความชื้นของหมักเนเปียร์ (% Moisture content)
- 2.2 ผลผลิตหมักเนเปียร์ (Yield)
- 2.3 ส่วนสูงของหมักเนเปียร์ (Height)
- 2.4 ของแข็งทั้งหมด (Total solids: TS)
- 2.5 ของแข็งระเหยทั้งหมด (Total volatile solids: TVS)
- 2.6 ไนโตรเจน (N)
- 2.7 ฟอสฟอรัส (P)
- 2.8 แร่ธาตุรอง ได้แก่ แคลเซียม (Ca) ทองแดง (Cu) เหล็ก (Fe) โพแทสเซียม (K) และแมกนีเซียม (Mg)

3. การเดินระบบ (Start up and Operation)

3.1 การเดินระบบโดยใช้หมักเนเปียร์อายุการตัด 30 วัน

3.1.1 เติมจุลินทรีย์ผสมจากกระเพาะรูเมนของโคในถังหมักกรดและถังสร้างมีเทนประมาณถังละ 1 L เพื่อเป็นจุลินทรีย์เริ่มต้น และวิเคราะห์มวลจุลินทรีย์เริ่มต้นในรูป Mixed liquor volatile suspended solids (MLVSS) ซึ่งมีค่าประมาณ 10 g/L

3.1.2 เตรียมสารละลายผสมหมักเนเปียร์ (Substrate slurry) นำหมักเนเปียร์สดอายุการตัด 30 วัน สับและบดละเอียดความยาวประมาณ 2-4 mm ผสมกับน้ำประปาในอัตราส่วน 1:5 สาเหตุที่ใช้อัตราส่วนดังกล่าว คือสารละลายผสมที่ได้ไม่เจือจางหรือเข้มข้นเกินไป วิเคราะห์ค่าเริ่มต้นของสารละลายผสม ซึ่งประกอบด้วยปริมาณสารอินทรีย์ในรูปของ COD (Chemical oxygen demand) ของแข็งทั้งหมด (Total solids: TS) ของแข็งระเหยทั้งหมด (Total volatile solids: TVS) และค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) โดยสารละลายผสมจะเตรียมก่อนการเติมเข้าสู่ระบบในแต่ละวัน ส่วนหมักเนเปียร์ที่สับและบดละเอียดไว้แล้วนั้น เก็บใส่ถุงพลาสติกและผูกปากถุง หรือใส่ในภาชนะที่มีฝาปิด แล้วนำไปแช่เย็นที่อุณหภูมิประมาณ 4 °C

3.1.3 การเริ่มต้นเดินระบบ (Start up) ด้วยการเติมสารละลายผสมหมู๋เนเปียร์ลงในถังหมักกรดถึงละ 1 L ทุกๆ 3 วัน และมีลักษณะการเติมแบบไหลย้อนขึ้นข้างบน (Upflow) โดยเติมจนกระทั่งสารละลายเต็มถังหมักกรด (ความจุใช้งาน 4 L) และไหลออกบริเวณทางน้ำล้นเข้าสู่ถังสร้างมีเทน (ความจุใช้งาน 5 L) เพื่อสร้างความคุ้นเคยให้จุลินทรีย์ ระหว่างนี้ทำการบันทึกค่า pH ในถังหมักกรดและถังสร้างมีเทนทุกวัน หลังจากเติมสารละลายในถังหมักกรดและถังสร้างมีเทนเต็มถัง (ถังหมักทั้งสองประกอบด้วยจุลินทรีย์เริ่มต้นถึงละ 1 L จึงเหลือปริมาตรรวมสำหรับสารละลาย 7 L) ปรับค่า pH ในถังสร้างมีเทนแต่ละถังด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) ให้มีค่าประมาณ 7.5

3.1.4 การเดินระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous operation) โดยเติมสารละลายผสมหมู๋เนเปียร์ลงในถังหมักกรดด้วยอัตราการเติม (Q) ที่แตกต่างกันคือ 100, 150, 200, 250 และ 300 ml/day เป็นผลให้ระยะเวลาเก็บกัก (Hydraulic retention time: HRT) ในถังหมักกรดและถังสร้างมีเทนของถังหมักแต่ละชุดแตกต่างกันดังตารางที่ 5 ทำการทดลองที่อุณหภูมิห้อง (ประมาณ 30 ± 1 °C) และบันทึกค่า pH ในถังหมักกรดทุกครั้งก่อนการเติมสารละลายเข้าสู่ระบบ

ตารางที่ 5 HRT ในถังหมักกรด และถังสร้างมีเทนสำหรับการทดลอง

Daily feed (ml/day)	HRT for acidogenic reactor (day)	HRT for methanogenic reactor (day)
100	40	50
150	26.7	33.3
200	20	25
250	16	20
300	13.3	16.7

3.1.5 เมื่อระบบเข้าสู่ระยะคงที่ (Steady state) บันทึกปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้น (Total gas) ทุกวัน โดยการวัดปริมาตรน้ำที่ถูกแทนที่ และเก็บตัวอย่างก๊าซที่เกิดขึ้นภายในระบบโดยใช้หลอดเก็บตัวอย่างก๊าซทุกๆ 3 วัน เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณก๊าซมีเทน ($\% \text{CH}_4$) ด้วยเครื่อง Gas Chromatograph (GC/TCD) รายงานปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นที่สภาวะมาตรฐาน (อุณหภูมิ 0 °C ความดัน 1 atm) เก็บตัวอย่างสารละลายผสมหมู๋เนเปียร์ (Digested slurry) ที่ผ่านการหมัก

จากถังสร้างมีเทนทุกๆ ถังหมัก (วิธีการเก็บตัวอย่างแสดงดังภาคผนวก จ) เพื่อนำมาวิเคราะห์หาปริมาณสารอินทรีย์ที่เหลือในรูปของ COD, TS และ TVS รวมทั้งค่า pH บันทึกข้อมูลในช่วงระยะที่เป็นเวลา 30 วัน

3.1.6 จำนวนผลผลิตก๊าซมีเทน (Methane yield) ที่เกิดขึ้นในรูปของผลผลิตก๊าซมีเทนที่เกิดต่อการเติมและกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของ COD (L at STP/kg COD added, and degraded) ผลผลิตก๊าซมีเทนที่เกิดต่อการเติมและกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของ TS (L at STP/kg TS added, and degraded) และผลผลิตก๊าซมีเทนที่เกิดต่อการเติมและกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของ TVS (L at STP/kg TVS added, and degraded) เปรียบเทียบผลผลิตก๊าซมีเทนที่ได้เพื่อหา HRT และ OLR ที่เหมาะสม

3.1.7 จำนวนหาประสิทธิภาพของระบบหมักในรูปของการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของ COD (% COD degradation) และ TVS (%TVS degradation)

3.2 การเดินระบบโดยใช้หญ้าเนเปียร์อายุการตัด 45 วัน

3.2.1 เตรียมสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์ด้วยวิธีการเดียวกันกับข้อ 3.1.2 แต่เปลี่ยนมาใช้หญ้าเนเปียร์อายุการตัด 45 วัน และวิเคราะห์ค่าเริ่มต้นของสารละลายผสมประกอบด้วย COD, TS, TVS และ pH

3.2.2 เริ่มต้นการเดินระบบด้วยการเติมสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์ลงในถังหมักกรดถึงละ 1 L ทุกๆ 3 วัน และมีลักษณะการเติมแบบไหลย้อนขึ้นข้างบน (Upflow) จนกระทั่งสารละลายเต็มถังหมักกรด และไหลออกบริเวณทางน้ำส้นเข้าสู่ถังสร้างมีเทน เพื่อแทนที่สารละลายผสมหญ้าเนเปียร์อายุการตัด 30 วัน และไม่ต้องเปลี่ยนจุลินทรีย์ที่ใช้ในถังหมักทั้งสองระหว่างนี้ทำการบันทึกค่า pH ในหมักกรดและถังสร้างมีเทนทุกวัน หลังจากสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์อายุการตัด 45 วัน แทนที่ในถังหมักกรดและถังสร้างมีเทนจนเต็มถัง (เติมทั้งหมด 7 L) ปรับค่า pH ในถังสร้างมีเทนแต่ละถังด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) ให้มีค่าประมาณ 7.5 หลังจากนั้นทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 3.1.4-3.1.7

3.3 การเดินระบบเพื่อหาอายุการตัดที่เหมาะสม โดยใช้หญ้าเนเปียร์อายุการตัด 30, 45, 60 และ 90 วัน

3.3.1 เตรียมสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์ด้วยวิธีการเดียวกันกับข้อ 3.1.2 โดยใช้หญ้าเนเปียร์อายุการตัด 30, 45, 60 และ 90 วัน และวิเคราะห์ค่าเริ่มต้นของสารละลายผสม ประกอบด้วย COD, TS, TVS และ pH

3.3.2 เริ่มต้นการเดินระบบด้วยการเติมสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์ลงในถังหมักกรดถึงละ 1 L ทุกๆ 3 วัน และมีลักษณะการเติมแบบไหลย้อนขึ้นข้างบน (Upflow) โดยถังชุดที่ 1 เติมน้ำสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์อายุการตัด 30 วัน ถังชุดที่ 2 เติมน้ำสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์อายุการตัด 45 วัน ถังชุดที่ 3 เติมน้ำสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์อายุการตัด 60 วัน และถังชุดที่ 4 เติมน้ำสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์อายุการตัด 90 วัน จนกระทั่งสารละลายเต็มถึงหมักกรด และไหลออกบริเวณทางน้ำล้นเข้าสู่ถังสร้างมีเทน ระหว่างนี้ทำการบันทึกค่า pH ในถังหมักกรด และถังสร้างมีเทนทุกวัน หลังจากสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์อายุการตัดต่างๆ แทนที่ในถังหมักกรดและถังสร้างมีเทนชุดที่ 1-4 จนเต็มถัง (เต็มทั้งหมด 7 L) ปรับค่า pH ในถังสร้างมีเทนแต่ละถังด้วยโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) ให้มีค่าประมาณ 7.5

3.3.3 เดินระบบแบบกึ่งต่อเนื่องด้วย HRT ที่เหมาะสม ซึ่งได้จากการหมักโดยใช้หญ้าเนเปียร์อายุการตัด 30 และ 45 วัน (ข้อ 3.1 และ 3.2)

3.3.4 เมื่อระบบเข้าสู่ระยะคงที่ ทำการทดลองเช่นเดียวกับข้อ 3.1.5-3.1.7

3.3.5 กำหนดผลผลิตก๊าซมีเทนที่ได้ในหน่วยของปริมาตรก๊าซมีเทนที่ผลิตได้ต่อหน่วยพื้นที่ต่อปี ($\text{m}^3/\text{rai}/\text{yr}$ และ $\text{m}^3/\text{ha}/\text{yr}$)

สถานที่และระยะเวลาทำการวิจัย

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ทำการทดลอง ณ งานเคมีและสิ่งแวดล้อม ฝ่ายเครื่องมือและวิจัยทางวิทยาศาสตร์ อาคารปฏิบัติการวิจัยกลาง สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน ใช้ระยะเวลาทั้งหมด 18 เดือน

ผลและวิจารณ์

ผลการศึกษาการผลิตก๊าซมีเทนจากหญ้าเนเปียร์โดยการหมักแบบสองขั้นตอน ประกอบด้วยรายละเอียด 5 ส่วน ดังต่อไปนี้

1. ลักษณะสมบัติของหญ้าเนเปียร์ที่อายุการตัดต่างๆ

หญ้าเนเปียร์สายพันธุ์ปากช่อง 1 ที่อายุการตัด 30, 45, 60 และ 90 วัน นำมาสับและบดละเอียดให้มีขนาดประมาณ 2-4 mm เมื่อนำมาวิเคราะห์ลักษณะสมบัติประกอบด้วยความชื้น (Moisture content) ของแข็งทั้งหมด (Total solids) ของแข็งระเหยทั้งหมด (Total volatile solids) ไนโตรเจน (N) ฟอสฟอรัส (P) และแร่ธาตุรอง ได้ผลดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ลักษณะสมบัติของหญ้าเนเปียร์ที่อายุการตัดต่างๆ

Parameters	Napier grass at various cutting interval (days)			
	30	45	60	90
Height (cm)	120	180	250	300
Herbage yield (ton DW/rai/yr)	2.7	6	10	13
Moisture content (%)	82.05	86.98	83.93	74.95
Total solids (TS, %)	17.95	13.02	16.07	25.05
Total volatile solids (TVS, % of TS)	84.30	87.67	87.69	88.79
Nitrogen (TKN, mg as N/kg DW)	18422	13162	9348	5004
Phosphorus (PO_4^{3-} , mg as P/kg DW)	56.44	70.82	56.47	62.00
Calcium (Ca, mg/kg DW)	1398	1246	750	716
Copper (Cu, mg/kg DW)	4.15	2.71	2.16	0.47
Iron (Fe, mg/kg DW)	403	89	93	101
Potassium (K, mg/kg DW)	37159	43168	30249	20305
Magnesium (Mg, mg/kg DW)	969	760	1229	708

หมายเหตุ DW คือ Dry weight หรือ น้ำหนักแห้ง

2. ลักษณะสมบัติของสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์ที่อายุการตัดต่างๆ

เมื่อนำหญ้าเนเปียร์สดที่สับและบดละเอียดมาผสมกับน้ำประปาในอัตราส่วน 1:5 ที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตก๊าซมีเทนในครั้งนี มาวิเคราะห์หาลักษณะสมบัติพบว่ามิลักษณะดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ลักษณะสมบัติของสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์ในอัตราส่วน 1:5 ที่อายุการตัดต่างๆ

Parameters	Napier grass at various cutting interval (days)			
	30	45	60	90
Chemical oxygen demand (COD, g/L)	19.32	24.00	27.32	30.87
Total solids (TS, g/L)	17.73	24.00	26.94	32.30
Total volatile solids (TVS, g/L)	14.43	18.42	20.88	29.18
pH	5.86	7.22	6.92	6.17
Nitrogen (TKN, mg/L as N)	661	343	300	251
Phosphorus (PO ₄ ³⁻ , mg/L as P)	2.03	1.84	1.81	3.11
Calcium (Ca, mg/L)	50.19	32.45	24.11	35.87
Copper (Cu, mg/L)	0.15	0.07	0.07	0.02
Iron (Fe, mg/L)	14.47	2.32	2.99	5.06
Potassium (K, mg/L)	1334	1124	972	1017
Magnesium (Mg, mg/L)	34.79	19.79	39.50	35.47
COD:N Ratio	100:3.42	100:1.43	100:1.10	100:0.81

เมื่อหญ้าเนเปียร์มีอายุการตัดเพิ่มขึ้น พบว่าปริมาณสารอินทรีย์ในรูป COD, TS และ TVS เพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์อายุการตัด 90 วันมีปริมาณสารอินทรีย์สูงสุด โดยมีค่าดังตารางที่ 7

ปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และแร่ธาตุรอง ได้แก่ แคลเซียม ทองแดง เหล็ก โพแทสเซียม และแมกนีเซียม มีค่าดังตารางที่ 7 พบว่าเมื่อหญ้ามีอายุการตัดมากขึ้นปริมาณแร่ธาตุต่างๆ มีแนวโน้มลดลง สอดคล้องกับรายงานของ Crowder and Chheda (1995) ซึ่งรายงานว่า การเพิ่มช่วงอายุการตัดของหญ้าเนเปียร์ทำให้ปริมาณแร่ธาตุ (P, K, Ca และ Mg) ลดลง Anderson *et al.*

(2003) ได้แนะนำอัตราส่วนระหว่าง COD:N ในระบบการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนสำหรับการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ไม่เปลี่ยนเป็นกรด คือ 100:2.5 ดังนั้นเมื่อพิจารณาสารละลายผสมหุ้เนเปียร์อายุการตัดต่างๆ จากการทดลองครั้งนี้พบว่าสารละลายผสมหุ้เนเปียร์อายุการตัด 30, 45 และ 60 วัน มีความเหมาะสมสำหรับใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตก๊าซมีเทน โดยไม่ทำให้สถานะภายในระบบหมักเป็นกรด

การนำเสนอผลการศึกษานำลำดับต่อไป จะนำเสนอในส่วนของ การผลิตก๊าซมีเทนจากหุ้เนเปียร์ เพื่อหาระยะเวลาเก็บกัก (Hydraulic retention time: HRT) และอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ (Organic loading rate: OLR) ที่เหมาะสมสำหรับการเดินระบบ ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 30 ± 1 °C โดยใช้สารละลายผสมหุ้เนเปียร์อายุการตัด 30 และ 45 วัน เติมน้ำเข้าระบบหมักจำนวน 5 ชุด ด้วยอัตราการเติม 100, 150, 200, 250 และ 300 ml/day โดยเติมน้ำเข้าสู่ถังหมักกรดความจุใช้งาน 4 L และถังสร้างมีเทนความจุใช้งาน 5 L เป็นผลให้ HRT ในถังหมักกรดคือ 40, 26.7, 20, 16 และ 13.3 วัน และในถังสร้างมีเทนเท่ากับ 50, 33.3, 25, 20 และ 16.7 วัน (ตารางที่ 5) สามารถคำนวณหา OLR จากสมการ

$$\text{Organic loading rate (OLR, kgCOD/m}^3\cdot\text{day)} = \frac{Q \text{ (ml/day)} \times S_0 \text{ (g/L)} \times 10^{-3}}{V \text{ (L)}}$$

เมื่อ Q คือ อัตราการเติมสารละลายผสมเข้าสู่ระบบ

S_0 คือ ค่าเริ่มต้นของ COD

V คือ ความจุใช้งานของถังหมัก

การทดลองในลำดับต่อไป คือการศึกษาความเหมาะสมของอายุการตัดหุ้เนเปียร์ในการผลิตก๊าซมีเทน ซึ่งจะเดินระบบโดยใช้ HRT ที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองโดยใช้หุ้เนเปียร์อายุการตัด 30 และ 45 วัน ภายใต้สถานะการทดลองดังที่กล่าวมาในข้างต้น

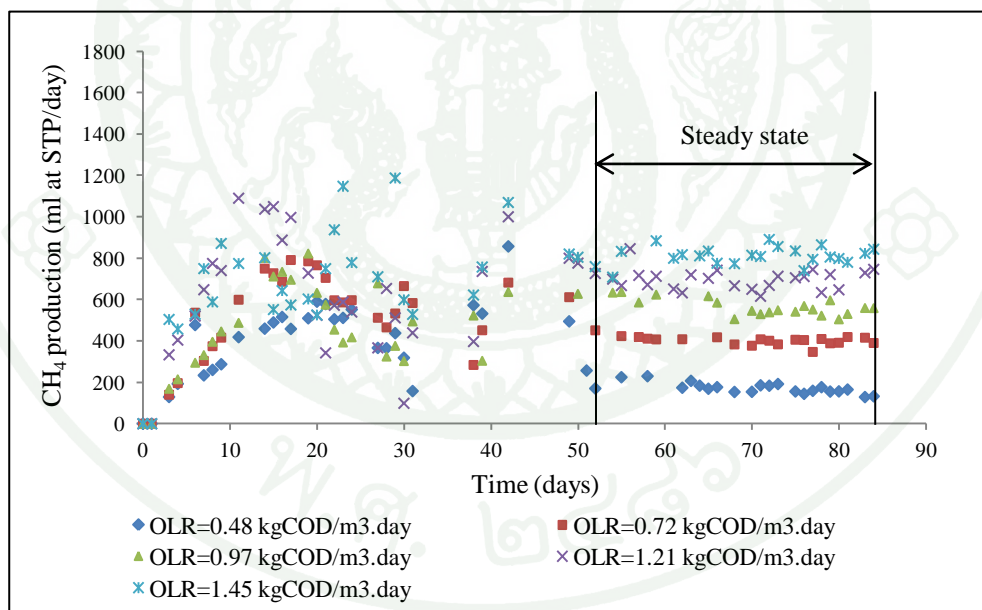
เมื่อระบบเข้าสู่ระยะคงที่ (Steady state) คือเมื่อถึงระยะที่สารละลายผสมหุ้เนเปียร์อยู่ในถังหมักด้วยเวลาเกินกว่าระยะเก็บกัก และก๊าซที่เกิดขึ้นในถังหมักแต่ละชุดมีปริมาตรต่อวันคงที่ ผลการศึกษาแสดงดังต่อไปนี้

3. การผลิตก๊าซมีเทนโดยใช้หมักเยื่ออายุการตัด 30 วัน

สารละลายผสมหมักเยื่ออายุการตัด 30 วัน มีค่าเริ่มต้นของ COD 19.32 g/L, TS 17.73 g/L, TVS 14.43 g/L และ pH 5.86 คิดเป็น OLR ของถังหมักแต่ละชุดเท่ากับ 0.48, 0.72, 0.97, 1.21 และ 1.45 kgCOD/m³.day หรือ 0.36, 0.54, 0.72, 0.90 และ 1.08 kgTVS/m³.day ตามลำดับ เมื่อระบบเข้าสู่ระยะคงที่ ผลการศึกษาแสดงดังต่อไปนี้

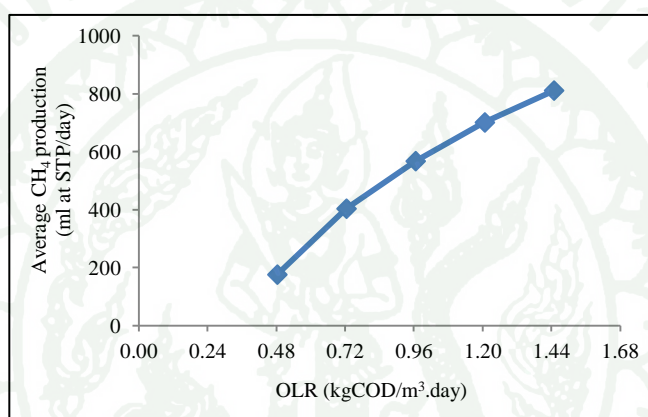
3.1 ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

จากการบันทึกปริมาณก๊าซทั้งหมด (Total gas) ที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน และผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทน (%CH₄) จำนวนปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน (ที่สภาวะมาตรฐาน) และสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิด (ml/day) กับระยะเวลาที่เดินระบบ (วัน) ได้ดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อวันที่ OLR ต่างๆ จากการหมักหมักเยื่ออายุการตัด 30 วัน

การผลิตก๊าซมีเทนจากหมักเยื่ออายุการตัด 30 วัน ใช้ระยะเวลาตลอดการทดลองรวม 85 วัน โดยในระยะเริ่มต้นเดินระบบ ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นค่อนข้างต่ำ และค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป (ภาพที่ 5 และ ตารางผนวกที่ ก1) เมื่อระบบหมักทั้ง 5 ชุดเข้าสู่ระยะคงที่ คือเดินระบบมากกว่า 50 วัน ซึ่งเกินกว่า HRT ของถังหมักชุดที่มี HRT มากที่สุด (ถังหมักชุดที่ 1 มี HRT ในถังหมักกรด 40 วัน และถังสร้างมีเทน 50 วัน) ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในแต่ละวันคงที่ที่ OLR 0.48, 0.72, 0.97, 1.21 และ 1.45 kgCOD/m³.day ปริมาณก๊าซมีเทนเฉลี่ยที่ผลิตได้เท่ากับ 175, 403, 567, 701 และ 811 ml/day ตามลำดับ (รายงานที่สภาวะมาตรฐาน) และสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซมีเทนเฉลี่ยที่ผลิตได้กับ OLR ได้ดังภาพที่ 6

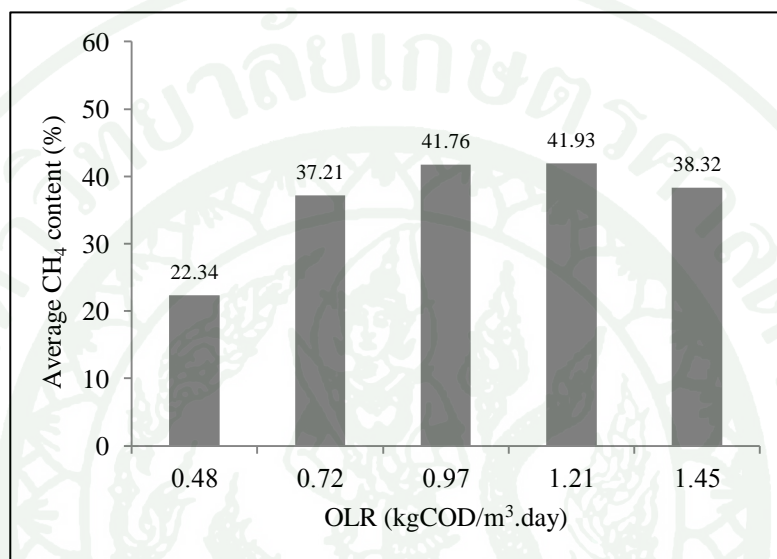


ภาพที่ 6 ปริมาณก๊าซมีเทนเฉลี่ยที่เกิดขึ้นต่อวันที่ OLR ต่างๆ จากการหมักหมักเยื่ออายุการตัด 30 วัน

ปริมาณก๊าซมีเทนเฉลี่ยที่ผลิตได้ในแต่ละวันมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ OLR ภายในระบบเพิ่ม แต่อัตราการเพิ่มขึ้นจะลดลง (โดยสังเกตได้จาก Slope ของกราฟในหน่วย ml/OLR.day ในภาพที่ 6) โดยช่วงแรกอัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณก๊าซมีเทนสูงกว่าช่วงหลัง (ภาพที่ 6)

3.2 ปริมาณก๊าซมีเทน (%CH₄) ที่เกิดขึ้นที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

เมื่อเก็บตัวอย่างก๊าซที่เกิดขึ้นภายในระบบ เพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทน (%CH₄) โดยใช้เครื่อง Gas chromatograph (GC/TCD) พบว่าเมื่อระบบเข้าสู่ระยะคงที่ ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นมีค่าเฉลี่ยดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 ปริมาณก๊าซมีเทนเฉลี่ยที่เกิดขึ้นที่ OLR ต่างๆ จากการหมักหญาเนเปียร์อายุการตัด 30 วัน

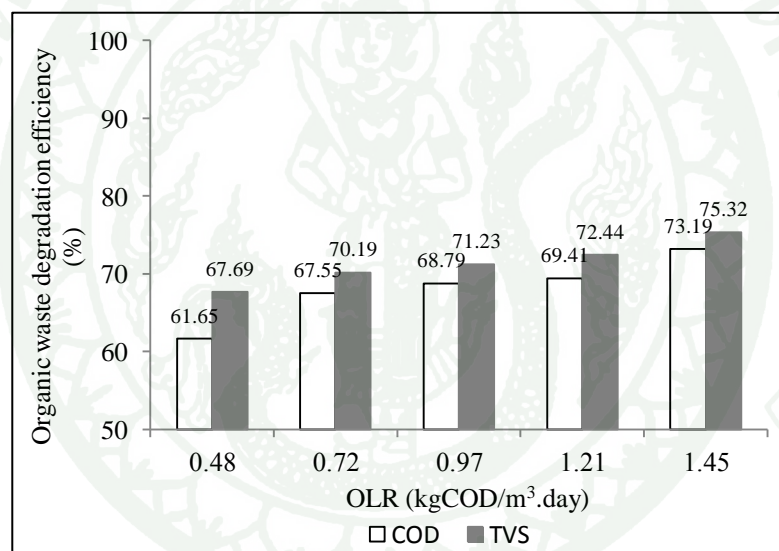
ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นแสดงดังตารางผนวกที่ ก1 โดยที่ OLR 0.48, 0.72, 0.97, 1.21 และ 1.45 kgCOD/m³.day ให้ปริมาณก๊าซมีเทน (%CH₄) เฉลี่ยเท่ากับ 22.34, 37.21, 41.76, 41.93 และ 38.32 % ตามลำดับ (ภาพที่ 7) โดยที่ OLR 1.21 kgCOD/m³.day (HRT ในถังหมักกรด 16 วัน และถังสร้างมีเทน 20 วัน) ให้ปริมาณก๊าซมีเทนเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 41.93 % ใกล้เคียงกับที่ OLR 0.97 kgCOD/m³.day ที่มีค่าเฉลี่ยปริมาณก๊าซมีเทน 41.76 % ซึ่งโดยทั่วไปนั้น ก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นภายในระบบการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic digestion) จะมีสัดส่วนของก๊าซมีเทนอยู่ในช่วง 50-75 % (Seadi *et al.*, 2008)

ที่ OLR 0.48 kgCOD/m³.day ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นค่อนข้างต่ำคือ 22.34 % มีสาเหตุมาจาก OLR ที่เข้าระบบในแต่ละวันต่ำเกินไป ทำให้ปริมาณสารอินทรีย์ภายในระบบไม่เพียงพอที่จะเปลี่ยนไปเป็นก๊าซมีเทน ซึ่ง Göblös *et al.* (2007) ได้อธิบายไว้ว่าตัวแปรที่สำคัญที่สุดของการผลิตก๊าซชีวภาพ คือ องค์ประกอบ และปริมาณ ซึ่งตัวแปรทั้งสองได้รับอิทธิพลจากสาร

ตั้งต้นที่ใช้ และ OLR ที่เข้าสู่ระบบ ในการทดลองครั้งนี้พบว่า เมื่อเพิ่ม OLR ปริมาณก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น (ภาพที่ 7) แต่ถ้า OLR สูงเกินไปปริมาณก๊าซมีเทนจะลดลง ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากความเข้มข้นของสารตั้งต้นมากเกินไป ทำให้ pH ในระบบลดลง (ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อ 3.5 ในลำดับต่อไป)

3.3 ประสิทธิภาพของระบบในการกำจัดสารอินทรีย์

สารละลายผสมหญ้าเนเปียร์อายุการตัด 30 วัน มีค่าเฉลี่ย COD เริ่มต้นเข้าสู่ระบบเท่ากับ 19.32 g/L และ TVS 14.43 g/L เมื่อระบบเข้าสู่ระยะคงที่ ประสิทธิภาพของระบบการหมักแบบสองขั้นตอนในการกำจัดสารอินทรีย์มีค่าดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ประสิทธิภาพของระบบหมักในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปแบบของ COD และ TVS ที่ OLR ต่างๆ จากการหมักหญ้าเนเปียร์อายุการตัด 30 วัน

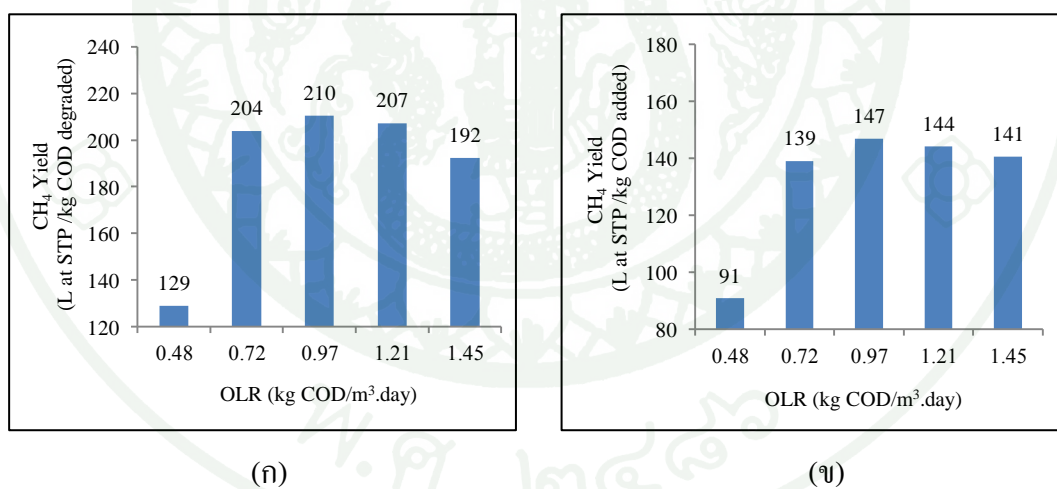
ที่ OLR 0.48, 0.72, 0.97, 1.21 และ 1.45 kgCOD/m³.day ค่า COD ของสารละลายผสมที่ผ่านการหมัก (Digested slurry) ออกจากระบบมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.41, 6.23, 6.03, 5.91 และ 5.18 g/L (ตารางผนวกที่ ก2) ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัด COD 61.65, 67.55, 68.79, 69.41 และ 73.19 % ตามลำดับ (ภาพที่ 8) เมื่อคิดในรูปแบบของ TVS พบว่าค่า TVS ของสารละลายผสมที่ผ่านการหมักออกจากระบบมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.66, 4.30, 4.15, 3.98 และ 3.56 g/L (ตารางผนวกที่ ก3) ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัด TVS 67.69, 70.19, 71.23, 72.44 และ 75.32 % ตามลำดับ (ภาพที่ 8)

ประสิทธิภาพของระบบในการกำจัดสารอินทรีย์สูงขึ้นใกล้เคียงกันที่ OLR 0.72-1.45 kgCOD/m³.day แสดงให้เห็นว่าระบบสามารถเปลี่ยนสารอินทรีย์เป็นก๊าซชีวภาพได้ดี ภายในระบบมีสารอินทรีย์เพียงพอ ไม่เกิดภาวะขาดแคลนสารอินทรีย์ แต่จากการที่ปริมาณก๊าซมีเทน (ภาพที่ 7) สูงขึ้นไม่มากนักเมื่อ OLR ภายในระบบเพิ่ม เป็นผลให้ประสิทธิภาพของระบบสูงขึ้นแต่ไม่แตกต่างกันมากนัก (ภาพที่ 8)

3.4 ผลผลิตก๊าซมีเทน

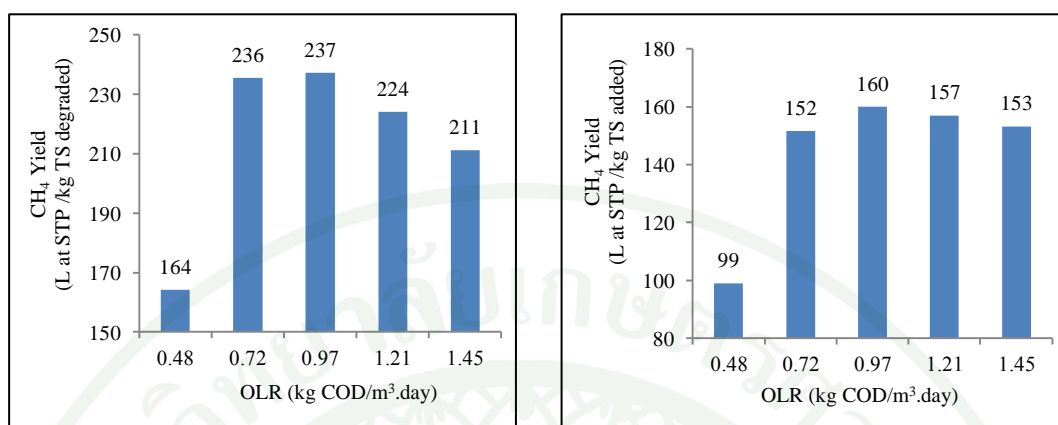
ผลผลิตก๊าซมีเทน (Methane yield, CH₄ yield) คือปริมาณก๊าซมีเทนที่ผลิตได้ต่อปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัดหรือถูกเติมเข้าระบบ โดยปริมาณสารอินทรีย์จะอยู่ในรูปของ COD, TS และ TVS ตัวอย่างวิธีการคำนวณแสดงดังภาคผนวก ง ซึ่งการศึกษาค้างนี้จะแสดงค่าของผลผลิตก๊าซมีเทนใน 6 รูปแบบ ดังนี้

ก. ผลผลิตก๊าซมีเทนในหน่วย L CH₄ at STP/kgCOD degraded and added



ภาพที่ 9 ผลผลิตก๊าซมีเทนในหน่วย L at STP/kgCOD degraded (ก) และ L at STP/kgCOD added (ข) จากการหมักหุ้ย้านเป็ยร์อายุการตัด 30 วัน

ข. ผลผลิตก๊าซมีเทนในหน่วย L CH₄ at STP/kgTS degraded and added

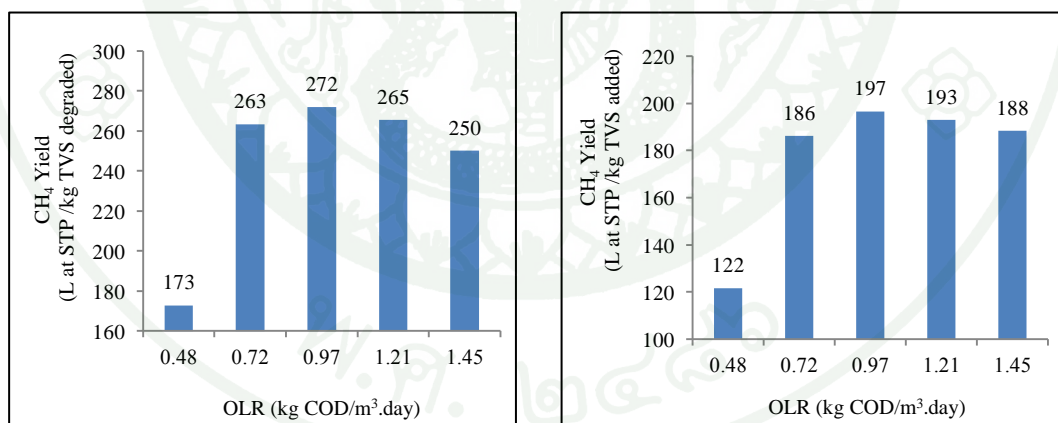


(ก)

(ข)

ภาพที่ 10 ผลผลิตก๊าซมีเทนในหน่วย L at STP/kgTS degraded (ก) และ L at STP/kgTS added (ข) จากการหมักหญ้าเนเปียร์อายุการตัด 30 วัน

ค. ผลผลิตก๊าซมีเทนในหน่วย L CH₄ at STP/kgTVS degraded and added



(ก)

(ข)

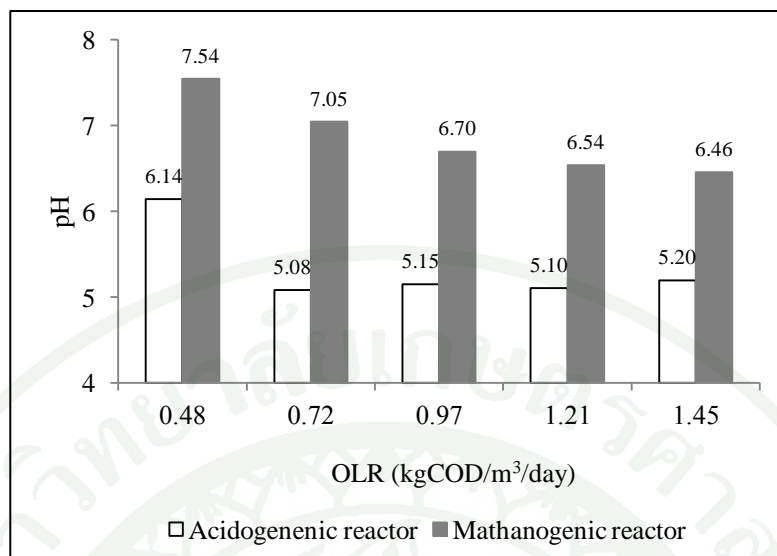
ภาพที่ 11 ผลผลิตก๊าซมีเทนในหน่วย L at STP/kgTVS degraded (ก) และ L at STP/kgTVS added (ข) จากการหมักหญ้าเนเปียร์อายุการตัด 30 วัน

ระบบหมักให้ผลผลิตก๊าซมีเทน (CH_4 yield) สูงสุดที่ OLR 0.97 $\text{kgCOD/m}^3\cdot\text{day}$ (HRT ในถังหมักกรด 20 วัน และถังสร้างมีเทน 25 วัน) มีค่าเท่ากับ 210 L at STP/kgCOD degraded (ภาพที่ 9(ก)) และ 147 L at STP/kgCOD added (ภาพที่ 9(ข)) หรือ 272 L at STP/kgTVS degraded (ภาพที่ 11(ก)) และ 197 L at STP/kgTVS added (ภาพที่ 11(ข)) หรือ 237 L at STP/kgTS degraded (ภาพที่ 10(ก)) และ 160 L at STP/kgTS added (ภาพที่ 10(ข)) ดังนั้นการผลิตก๊าซมีเทนบริสุทธิ์ 1 m^3 จะต้องใช้หัวน้ำเนเปียร์แห้ง 6.25 kg

ผลผลิตก๊าซมีเทนมีค่าสูงใกล้เคียงกันที่ OLR 0.72-1.21 $\text{kgCOD/m}^3\cdot\text{day}$ (ภาพที่ 9, 10 และ 11) ดังนั้นในการผลิตก๊าซมีเทนจากหัวน้ำเนเปียร์อายุการตัด 30 วัน โดยระบบหมักแบบสองขั้นตอน อาจเดินระบบด้วยค่า OLR 0.72 $\text{kgCOD/m}^3\cdot\text{day}$ เพื่อเป็นการลดปริมาณการใช้สารตั้งต้นคือหัวน้ำเนเปียร์ เป็นการประหยัดทรัพยากร การใช้ในปริมาณที่น้อยกว่าจึงเป็นสิ่งที่ดีและยังให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสูงใกล้เคียงกับที่ OLR 0.97 $\text{kgCOD/m}^3\cdot\text{day}$ (ภาพที่ 9, 10 และ 11)

3.5 ค่า pH ของสารละลายผสมหัวน้ำเนเปียร์ที่ผ่านการหมัก

เมื่อเดินระบบด้วย OLR 0.48, 0.72, 0.97, 1.21 และ 1.45 $\text{kgCOD/m}^3\cdot\text{day}$ ระบบหมักสามารถคงอยู่ได้ไม่ล้มเหลวโดยไม่ต้องทำการเติมสารเคมีเพื่อปรับค่า pH ขณะเดินระบบ ซึ่ง Göblös *et al.* (2007) อธิบายว่าในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนนั้น ระบบอาจไม่ต้องการควบคุมค่า pH หากมีการหมักสารตั้งต้นให้เป็นกรด โดยเฉพาะการหมักที่มี OLR เข้าสู่ระบบค่อนข้างสูง สอดคล้องกับการทดลองในครั้งนี้ที่มีการแยกถังหมักออกเป็นสองขั้นตอน คือ ขั้นตอนการหมักกรดและขั้นตอนการสร้างมีเทน เมื่อระบบเข้าสู่ระยะคงที่ค่า pH เฉลี่ยของสารละลายผสมที่ผ่านการหมัก (Digested slurry) ในถังหมักกรดและถังสร้างมีเทนในแต่ละถังหมัก ซึ่งรองรับ OLR ค่าต่างๆ มีค่าดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 ค่า pH เฉลี่ยของสารละลายผสมที่ผ่านการหมักในถังหมักกรด และถังสร้างมีเทนที่ OLR ต่างๆ จากการหมักน้ำเนเปียร์อายุการตัด 30 วัน

ที่ OLR 0.72-0.97 kgCOD/m³.day การแยกการหมักออกเป็นสองขั้นตอน คือขั้นตอนการหมักกรดและขั้นตอนการสร้างมีเทนประสบความสำเร็จ เมื่อพิจารณาจากค่า pH ของสารละลายผสมในถังหมักทั้งสอง (ภาพที่ 12) คือค่า pH ในถังหมักกรดมีค่าเป็นกรด และ pH ในถังสร้างมีเทนมีค่าเป็นกลาง ที่ OLR 0.97 kgCOD/m³.day (ให้ค่าผลผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด) มีค่า pH ของถังหมักกรดเท่ากับ 5.15 และถังสร้างมีเทนเท่ากับ 6.70 ที่ OLR 1.21-1.45 kgCOD/m³.day ค่า pH ของถังสร้างมีเทนเริ่มมีค่าเป็นกรด (ภาพที่ 12) จึงไม่เหมาะกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ชนิดสร้างก๊าซมีเทน เป็นสาเหตุให้ปริมาณก๊าซมีเทน (%CH₄) ที่ได้ลดลง โดยช่วงของ pH ที่เหมาะสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ชนิดผลิตก๊าซมีเทน คือ 6.6 – 7.4 (McCarty, 1964)

ผลการทดลองสรุปไว้ดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 สรุปผลการศึกษากาการหมักหญาเปียรออายุการตัด 30 วัน ที่ OLR ต่างๆ ในระบบหมักแบบสองขั้นตอน

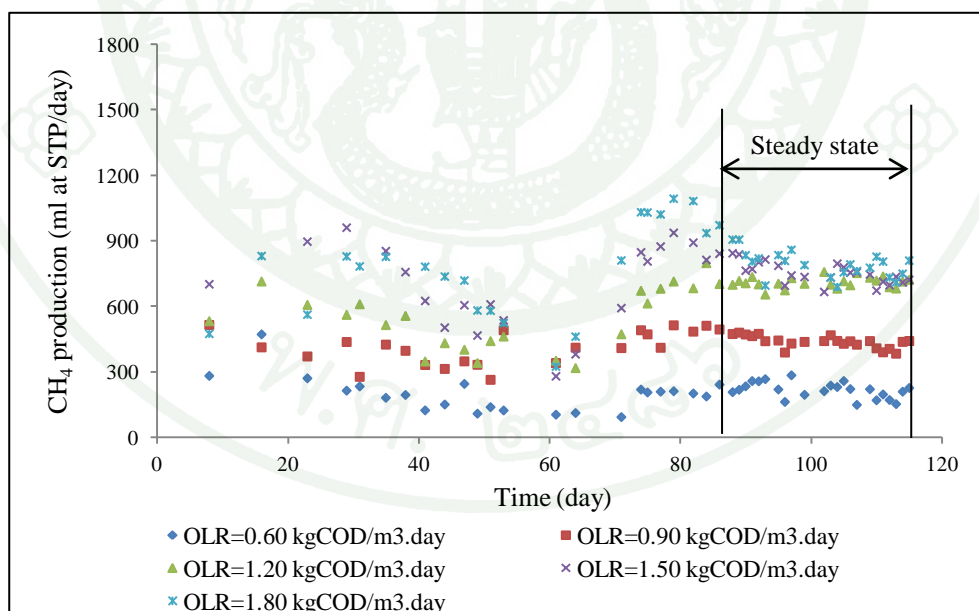
Parameters	Organic loading rate (kgCOD/m ³ .day)				
	0.48	0.72	0.97	1.21	1.45
OLR (kgTVS/m ³ .day)	0.36	0.54	0.72	0.90	1.08
Reactor volume for each acidogenic, methanogenic reactor (L)	4, 5	4, 5	4, 5	4, 5	4, 5
Daily feed (ml/day)	100	150	200	250	300
HRT for each acidogenic, methanogenic reactor (day)	40, 50	26.7, 33.3	20, 25	16, 20	13.3, 16.7
Initial MLVSS (g/L)	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
Initial pH of substrate solution	5.86	5.86	5.86	5.86	5.86
CH ₄ produced at steady state (ml at STP/day)	175	403	567	701	811
Average CH ₄ (%)	22.34	37.21	41.76	41.93	38.32
Initial COD (g/L)	19.32	19.32	19.32	19.32	19.32
COD at steady state (g/L)	7.41	6.27	6.03	5.91	5.18
COD degradation efficiency (%)	61.65	67.55	68.79	69.41	73.19
Initial TVS (g/L)	14.43	14.43	14.43	14.43	14.43
TVS at steady state (g/L)	4.66	4.30	4.15	3.98	3.56
TVS degradation efficiency (%)	67.69	70.19	71.23	72.44	75.32
Initial TS (g/L)	17.73	17.73	17.73	17.73	17.73
CH ₄ yield (L at STP/kgCOD degraded)	129	204	210	207	192
CH ₄ yield (L at STP/kgCOD added)	91	139	147	144	141
CH ₄ yield (L at STP /kgTS degraded)	164	236	237	224	211
CH ₄ yield (L at STP /kgTS added)	99	152	160	157	153
CH ₄ yield (L at STP /kgTVS degraded)	173	263	272	265	250
CH ₄ yield (L at STP /kgTVS added)	122	186	197	193	188
Average pH of acidogenic reactor at steady state	6.14	5.08	5.15	5.10	5.20
Average pH of methanogenic reactor at steady state	7.54	7.05	6.70	6.54	6.46

4. การผลิตก๊าซมีเทนโดยใช้หมักเยื่ออายุการตัด 45 วัน

สารละลายผสมหมักเยื่ออายุการตัด 45 วัน ซึ่งมีค่าเริ่มต้นของ COD (Chemical oxygen demand) 24.00 g/L ของแข็งทั้งหมด (Total solids: TS) 24.00 g/L ของแข็งระเหยทั้งหมด (Total volatile solids: TVS) 18.42 g/L และค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) 7.22 คิดเป็นอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (Organic loading rate: OLR) ของถังหมักแต่ละชุดเท่ากับ 0.60, 0.90, 1.20, 1.50 และ 1.80 kgCOD/m³.day หรือ 0.46, 0.69, 0.92, 1.15 และ 1.38 kgTVS/m³.day ตามลำดับ เมื่อระบบเข้าสู่ระยะคงที่ ผลการศึกษาแสดงดังต่อไปนี้

4.1 ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

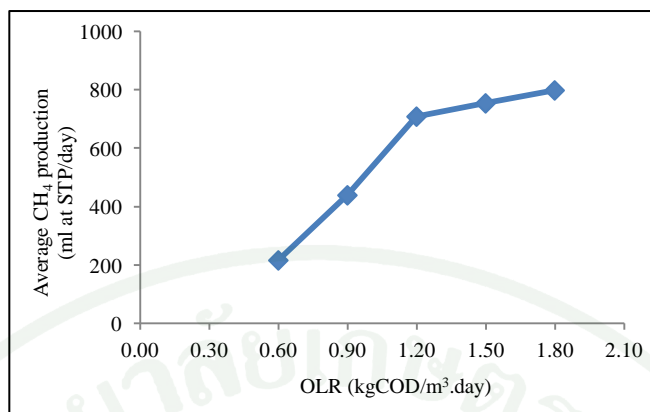
จากผลการบันทึกปริมาณก๊าซทั้งหมด (Total gas) ที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน และผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทน (%CH₄) สามารถคำนวณปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน (รายงานที่สภาวะมาตรฐาน) และสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้น (ml/day) กับระยะเวลาที่เดินระบบ (วัน) ได้ดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อวันที่ OLR ต่างๆ จากการหมักหมักเยื่ออายุการตัด 45 วัน

การผลิตก๊าซมีเทนจากหญ้าเนเปียร์อายุการตัด 45 วัน ใช้ระยะเวลาตลอดการทดลองรวม 115 วัน โดยในระยะเริ่มต้นเดินระบบปริมาตรก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นค่อนข้างต่ำ และเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป เมื่อเดินระบบได้ประมาณ 30 วัน พบว่าที่ OLR 1.20-180 kgCOD/m³.day ปริมาตรก๊าซมีเทนเริ่มลดลง (ภาพที่ 13 และ ตารางผนวกที่ ข1) ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากค่า pH ในถังสร้างมีเทนลดลงและเริ่มมีค่าเป็นกรด ทำให้ประสิทธิภาพในการทำงานของจุลินทรีย์ชนิดผลิตก๊าซมีเทนลดลง ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ McCarty (1964) ที่กล่าวไว้ว่าจุลินทรีย์ชนิดผลิตก๊าซมีเทนสามารถทำงานได้ในช่วงค่า pH ระหว่าง 6.6-7.6 โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วง pH 7.0-7.2 จุลินทรีย์สามารถทำงานได้เต็มประสิทธิภาพที่สุด ดังนั้นเมื่อเดินระบบจนถึงวันที่ 60 จึงทำการปรับค่า pH ภายในถังสร้างมีเทนที่ OLR 1.20-180 kgCOD/m³.day ให้มีค่าประมาณ 7.5 โดยใช้โซเดียมไบคาร์บอเนต หลังจากการปรับค่า pH ภายในถังสร้างมีเทน จุลินทรีย์ชนิดผลิตก๊าซมีเทนจึงสามารถกลับมาทำงานได้เต็มประสิทธิภาพ แต่ต้องอาศัยระยะเวลาในการปรับตัวดังแสดงในภาพที่ 13 หลังจากการปรับค่า pH ในถังสร้างมีเทน ปริมาตรก๊าซมีเทนค่อยๆ เพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป จนเข้าสู่ระยะคงที่ และหลังจากนั้นระบบสามารถคงอยู่ได้ไม่ล้มเหลว โดยไม่ต้องทำการเติมสารเคมีเพื่อปรับค่า pH ขณะเดินระบบอีก เมื่อเปรียบเทียบกับกรหมักโดยใช้หญ้าเนเปียร์อายุการตัด 30 วัน พบว่าระบบหมักสามารถคงอยู่ได้โดยไม่มีกรปรับ pH ตลอดการทดลอง ทั้งนี้เนื่องจากสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์อายุการตัด 45 วัน มีปริมาณสารอินทรีย์สูงกว่า ค่า pH ในระบบหมักจึงมีความเป็นกรดอย่างรุนแรง ส่งผลให้ถังสร้างมีเทนมีความเป็นกรดสูงตามไปด้วย

เมื่อระบบหมักทั้ง 5 ชุด เข้าสู่ระยะคงที่ คือเดินระบบถึงวันที่ 86 ปริมาตรก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในแต่ละวันคงที่ ที่ OLR 0.60, 0.90, 1.20, 1.50 และ 1.80 kgCOD/m³.day ปริมาตรก๊าซมีเทนเฉลี่ยที่ผลิตได้เท่ากับ 217, 440, 709, 755 และ 799 ml/day ตามลำดับ (รายงานที่สภาวะมาตรฐาน) สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรก๊าซมีเทนเฉลี่ยที่ผลิตได้กับ OLR ได้ดังภาพที่ 14

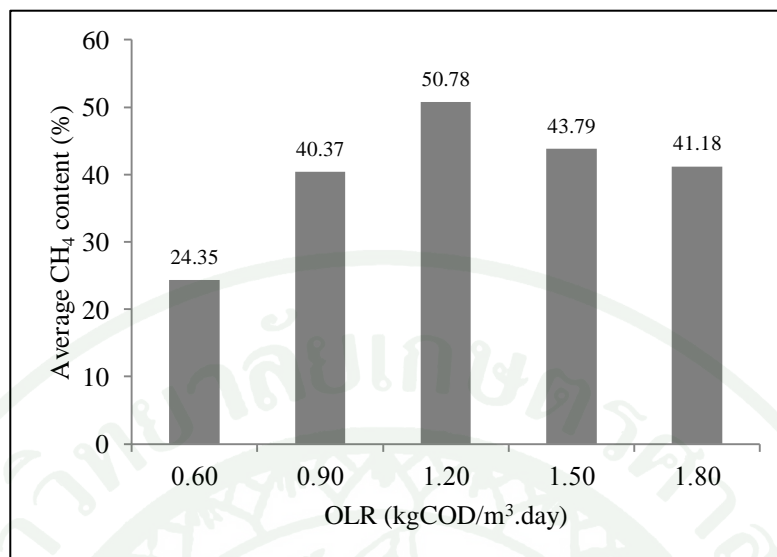


ภาพที่ 14 ปริมาณก๊าซมีเทนเฉลี่ยที่เกิดขึ้นต่อวันที่ OLR ต่างๆ จากการหมักหญ้าเนเปียร์อายุการตัด 45 วัน

ปริมาณก๊าซมีเทนเฉลี่ยที่ผลิตได้ในแต่ละวันมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อ OLR ภายในระบบเพิ่ม แต่อัตราการเพิ่มขึ้นจะลดลง (โดยสังเกตได้จาก Slope ของกราฟในหน่วย ml/OLR.day ในภาพที่ 14) โดยในช่วงแรกมีอัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณก๊าซมีเทนสูงกว่าช่วงหลัง (ภาพที่ 14) ซึ่งอัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณก๊าซมีเทนในการทดลองรอบนี้มีแนวโน้มเช่นเดียวกับการทดลองโดยใช้หญ้าเนเปียร์อายุการตัด 30 วัน (ภาพที่ 6)

4.2 ปริมาณก๊าซมีเทน (%CH₄) ที่เกิดขึ้นที่อัตรากระบวนการบรทุกสารอินทรีย์ต่างๆ

เมื่อเก็บตัวอย่างก๊าซที่เกิดขึ้นภายในระบบ เพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทน (%CH₄) โดยใช้เครื่อง Gas chromatograph (GC/TCD) พบว่าเมื่อระบบเข้าสู่ระยะคงที่ ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นมีค่าเฉลี่ยดังภาพที่ 15

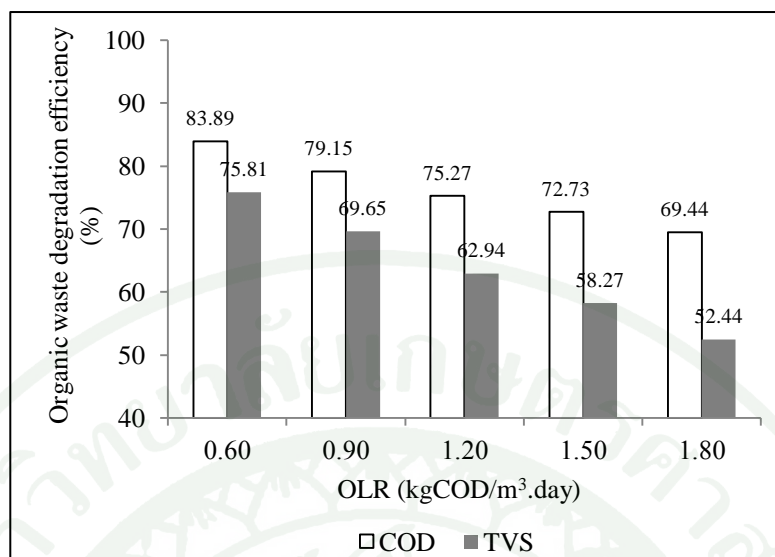


ภาพที่ 15 ปริมาณก๊าซมีเทนเฉลี่ยที่เกิดขึ้นที่ OLR ต่างๆ จากการหมักหญาเนเปียร์อายุการตัด 45 วัน

ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นแสดงดังตารางผนวกที่ ข1 โดยที่ OLR 0.60, 0.90, 1.20, 1.50 และ 1.80 kgCOD/m³.day ให้ปริมาณก๊าซมีเทน (%CH₄) เฉลี่ยเท่ากับ 24.35, 40.37, 50.78, 43.79 และ 41.19 % ตามลำดับ (ภาพที่ 15) โดยปริมาณก๊าซมีเทนเฉลี่ยสูงสุดคือ 50.78 % เกิดขึ้นที่ OLR 1.20 kgCOD/m³.day (HRT ในถังหมักกรด 20 วัน และถังสร้างมีเทน 25 วัน) ส่วนที่ OLR 0.60 kgCOD/m³.day ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นค่อนข้างต่ำคือ 24.35 % และที่ OLR 1.50 kgCOD/m³.day ปริมาณก๊าซมีเทนเริ่มลดลง ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากปัจจัยต่างๆ ดังอธิบายในหัวข้อ 3.2

4.3 ประสิทธิภาพของระบบในการกำจัดสารอินทรีย์

สารละลายผสมหญาเนเปียร์อายุการตัด 45 วัน มีค่าเฉลี่ย COD เริ่มต้นเข้าสู่ระบบเท่ากับ 24.00 g/L และ TVS 18.42 g/L เมื่อระบบเข้าสู่ระยะคงที่ ประสิทธิภาพของระบบการหมักแบบสองขั้นตอนในการกำจัดสารอินทรีย์มีค่าดังภาพที่ 16



ภาพที่ 16 ประสิทธิภาพของระบบหมักในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของ COD และ TVS ที่ OLR ต่างๆ จากการหมักหญ้าเนเปียร์อายุการตัด 45 วัน

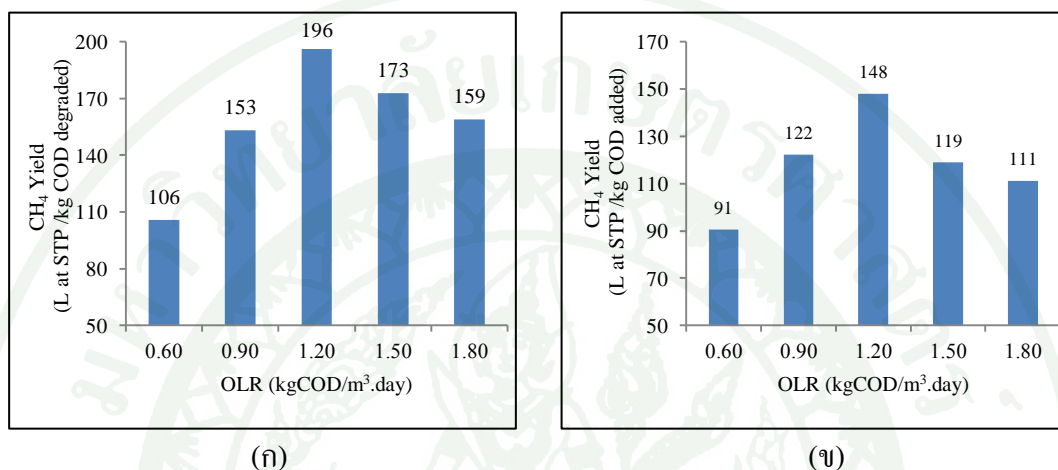
ที่ OLR 0.60, 0.90, 1.20, 1.50 และ 1.80 kgCOD/m³.day ค่า COD ของสารละลายผสมที่ผ่านการหมัก (Digested slurry) ออกจากระบบมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.87, 5.00, 5.93, 6.54 และ 7.33 g/L (ตารางผนวกที่ ข2) ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัด COD 83.89, 79.15, 75.27, 72.73 และ 69.44 % ตามลำดับ (ภาพที่ 16) เมื่อคิดในรูปของ TVS พบว่าค่า TVS ของสารละลายผสมที่ผ่านการหมักออกจากระบบมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.46, 5.59, 6.83, 7.69 และ 8.76 g/L (ตารางผนวกที่ ข3) ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัด TVS 75.81, 69.65, 62.94, 58.27 และ 52.44 % ตามลำดับ (ภาพที่ 16)

เมื่อระบบหมักมี OLR เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพของระบบในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของ COD และ TVS ลดลง (ภาพที่ 16) เนื่องจากสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบมีปริมาณมากขึ้นแต่ HRT ภายในระบบลดลง ทำให้ระบบไม่สามารถเปลี่ยนสารอินทรีย์เป็นก๊าซมีเทนได้เต็มประสิทธิภาพ ค่า COD และ TVS ของสารละลายผสมที่ผ่านการหมักออกจากระบบจึงมีค่าสูง เป็นสาเหตุให้ระบบหมักที่รองรับ OLR สูงมีประสิทธิภาพต่ำกว่า

4.4 ผลผลิตก๊าซมีเทน

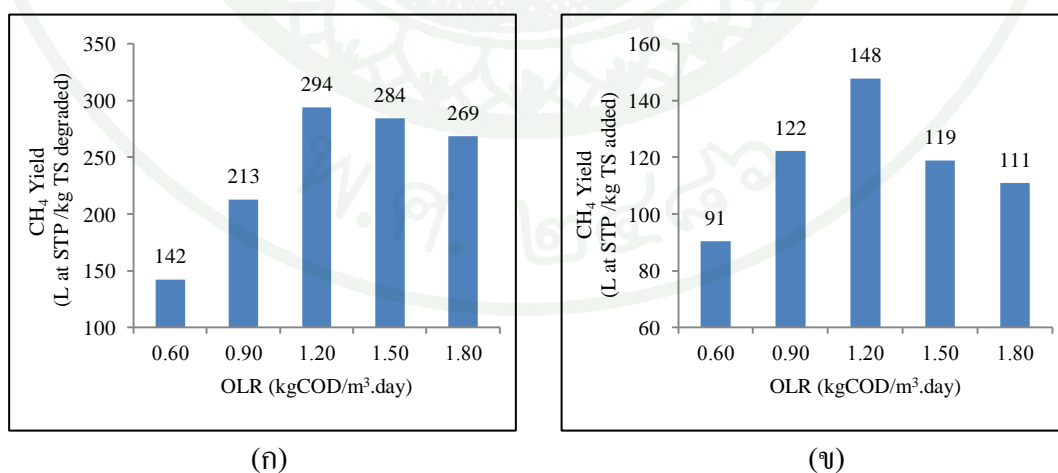
การศึกษาค้างนี้จะแสดงค่าของผลผลิตก๊าซมีเทนใน 6 รูปแบบ ดังนี้

ก. ผลผลิตก๊าซมีเทนในหน่วย L CH₄ at STP/kgCOD degraded and added



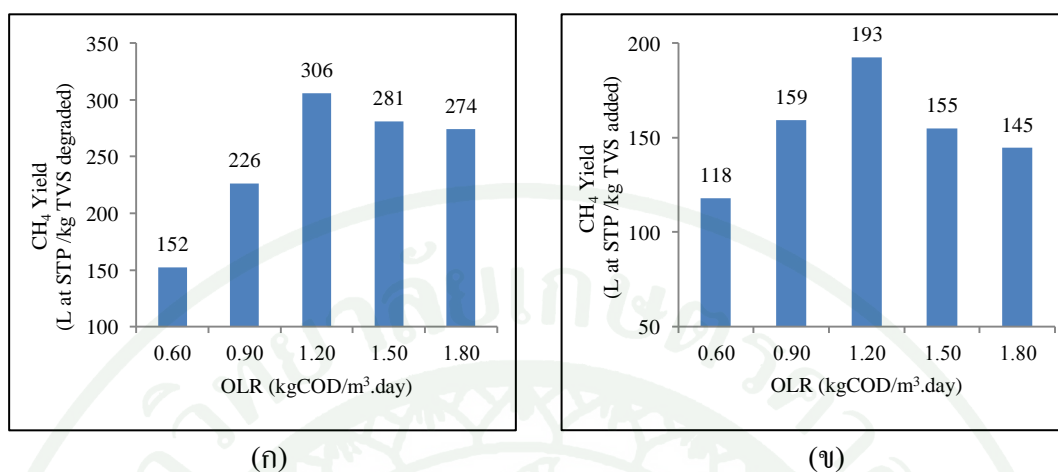
ภาพที่ 17 ผลผลิตก๊าซมีเทนในหน่วย L at STP/kgCOD degraded (ก) และ L at STP/kgCOD added (ข) จากการหมักหีวน้ำเนเปียร์อายุการตัด 45 วัน

ข. ผลผลิตก๊าซมีเทนในหน่วย L CH₄ at STP/kgTS degraded and added



ภาพที่ 18 ผลผลิตก๊าซมีเทนในหน่วย L at STP/kgTS degraded (ก) และ L at STP/kgTS added (ข) จากการหมักหีวน้ำเนเปียร์อายุการตัด 45 วัน

ก. ผลผลิตก๊าซมีเทนในหน่วย L CH₄ at STP/kgTVS degraded and added



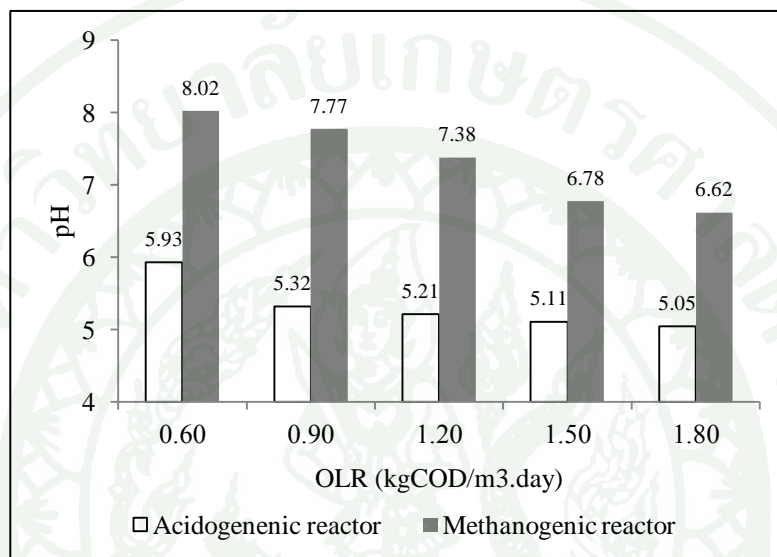
ภาพที่ 19 ผลผลิตก๊าซมีเทนในหน่วย L at STP/kgTVS degraded (ก) และ L at STP/kgTVS added (ข) จากการหมักหญ้าเนเปียร์อายุการตัด 45 วัน

ระบบหมักให้ผลผลิตก๊าซมีเทน (CH₄ yield) สูงสุดที่ OLR 1.20 kgCOD/m³.day (HRT ในถังหมักกรด 20 วัน และถังสร้างมีเทน 25 วัน) มีค่าเท่ากับ 196 L at STP/kgCOD degraded (ภาพที่ 17(ก)) และ 148 L at STP/kgCOD added (ภาพที่ 17(ข)) หรือ 306 L at STP/kgTVS degraded (ภาพที่ 19(ก)) และ 193 L at STP/kgTVS added (ภาพที่ 19(ข)) หรือ 294 L at STP/kgTS degraded (ภาพที่ 18(ก)) และ 148 L at STP/kgTS added (ภาพที่ 18(ข)) ดังนั้นการผลิตก๊าซมีเทนบริสุทธิ์ 1 m³ จะต้องใช้หญ้าเนเปียร์แห้ง 6.76 kg

McCarty (1964) ได้แสดงค่าผลผลิตก๊าซมีเทนตามทฤษฎี (Theoretical methane yield) จากการย่อยสลายกลูโคส โดย 1 kg ของ COD ที่ถูกย่อยสลายสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้ 350 L ที่สภาวะมาตรฐาน ซึ่งผลผลิตก๊าซมีเทนในรูปของปริมาตรก๊าซมีเทนที่ผลิตได้ต่อปริมาณสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัดนั้น เป็นดัชนีที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพของระบบหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน

4.5 ค่า pH สารละลายผสมหุ้ยเนเปียร์ที่ผ่านการหมัก

เมื่อเดินระบบด้วย OLR 0.60, 0.90, 1.20, 1.50 และ 1.80 kgCOD/m³.day พบว่าที่ระยะ
คงที่ ค่าเฉลี่ย pH ของสารละลายผสมที่ผ่านการหมัก (Digested slurry) ในถังหมักกรดและถังสร้าง
มีเทนในแต่ละถังหมัก ซึ่งรองรับ OLR ค่าต่างๆ มีค่าดังภาพที่ 20



ภาพที่ 20 ค่า pH เฉลี่ยของสารละลายผสมที่ผ่านการหมักในถังหมักกรด และถังสร้างมีเทนที่
OLR ต่างๆ จากการหมักหุ้ยเนเปียร์อายุการตัด 45 วัน

ที่ OLR 0.60-1.80 kgCOD/m³.day การแยกการหมักออกเป็นสองขั้นตอน คือขั้นตอน
การหมักกรดและขั้นตอนการสร้างมีเทนประสบความสำเร็จ เมื่อพิจารณาจากค่า pH ของสาร
ละลายผสมในถังหมักทั้งสอง (ภาพที่ 20) คือค่า pH ในถังหมักกรดมีค่าเป็นกรดและ pH ในถัง
สร้างมีเทนมีค่าเป็นกลาง ที่ OLR 1.20 kgCOD/m³.day (ให้ค่าผลผลิตก๊าซมีเทนสูงสุด) มีค่า pH
ของถังหมักกรดเท่ากับ 5.22 และถังสร้างมีเทนเท่ากับ 7.38 ที่ OLR 1.50-1.80 kgCOD/m³.day
ค่า pH ของถังสร้างมีเทนเริ่มมีค่าเป็นกรด (ภาพที่ 20) ไม่เหมาะกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์
ชนิดสร้างก๊าซมีเทน เป็นสาเหตุให้ปริมาณก๊าซมีเทน (%CH₄) ลดลง

ผลการทดลองสรุปไว้ดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 สรุปผลการศึกษากาการหมักหญาเปียรอายุการตัด 45 วัน ที่ OLR ต่างๆ ในระบบหมักแบบสองขั้นตอน

Parameters	Organic loading rate (kgCOD/m ³ .day)				
	0.60	0.90	1.20	1.50	1.50
OLR (kgTVS/m ³ .day)	0.46	0.69	0.92	1.15	1.38
Reactor volume for each acidogenic, methanogenic reactor (L)	4, 5	4, 5	4, 5	4, 5	4, 5
Daily feed (ml/day)	100	150	200	250	300
HRT for each acidogenic, methanogenic reactor (day)	40, 50	26.7, 33.3	20, 25	16, 20	13.3, 16.7
Initial MLVSS (g/L)	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0
Initial pH of substrate solution	7.22	7.22	7.22	7.22	7.22
CH ₄ produced at steady state (ml at STP/day)	217	440	709	755	799
Average CH ₄ (%)	24.35	40.37	50.78	43.79	41.18
Initial COD (g/L)	24.0	24.0	24.0	24.0	24.0
COD at steady state (g/L)	3.86	5.00	5.93	6.54	7.33
COD degradation efficiency (%)	83.89	79.15	75.27	72.73	69.44
Initial TVS (g/L)	18.42	18.42	18.42	18.42	18.42
TVS at steady state (g/L)	4.45	5.59	6.82	7.68	8.76
TVS degradation efficiency (%)	75.81	69.65	62.94	58.27	52.44
Initial TS (g/L)	24.00	24.00	24.00	24.00	24.00
CH ₄ yield (L at STP/kgCOD degraded)	106	153	196	173	159
CH ₄ yield (L at STP/kgCOD added)	91	122	148	119	111
CH ₄ yield (L at STP /kgTS degraded)	142	213	294	284	269
CH ₄ yield (L at STP /kgTS added)	91	122	148	119	111
CH ₄ yield (L at STP /kgTVS degraded)	152	226	306	281	274
CH ₄ yield (L at STP /kgTVS added)	118	159	193	155	145
Average pH of acidogenic reactor at steady state	5.93	5.32	5.21	5.11	5.05
Average pH of methanogenic reactor at steady state	8.02	7.77	7.38	6.78	6.62

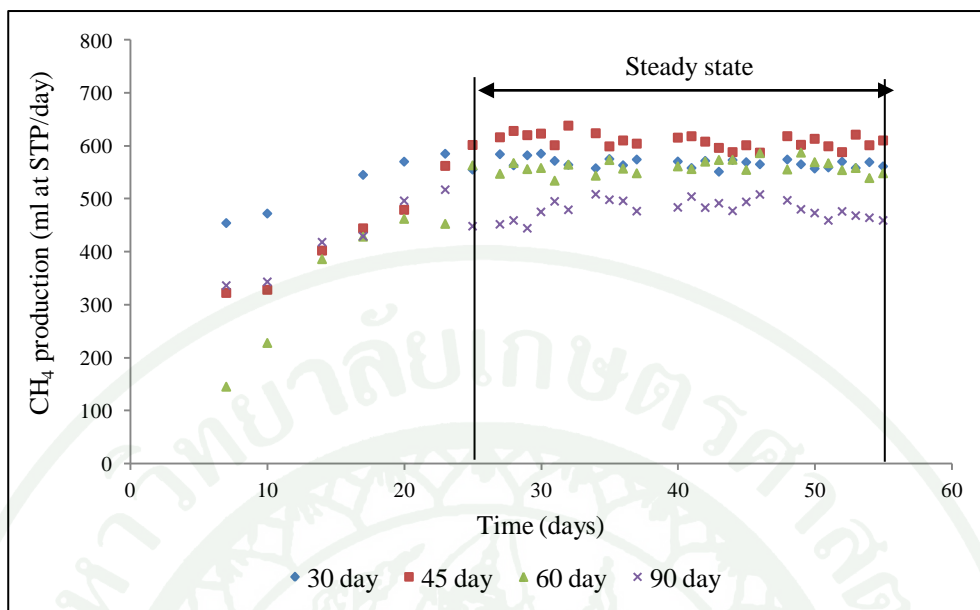
จากผลการทดลองในข้อ 3 และ 4 พบว่าระยะเวลาเก็บกัก (Hydraulic retention time: HRT) ที่เหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซมีเทนจากหญ้าเนเปียร์สายพันธุ์ปากช่อง 1 คือ HRT ในถังหมักกรดเท่ากับ 20 วัน และถังสร้างมีเทนเท่ากับ 25 วัน ดังนั้นในการหมักหญ้าเนเปียร์ที่มีอายุการตัดแตกต่างกัน (30, 45, 60 และ 90 วัน) จึงเดินระบบที่ระยะเวลาเก็บกักดังกล่าวในการทดลองข้อ 5 เพื่อศึกษาความเหมาะสมของอายุการตัดหญ้าเนเปียร์ในการผลิตก๊าซมีเทน

5. การศึกษาความเหมาะสมของอายุการตัดหญ้าเนเปียร์ (Cutting interval) ในการผลิตก๊าซมีเทน

สารละลายผสมหญ้าเนเปียร์อายุการตัด 30, 45, 60 และ 90 วัน เดิมเข้าสู่ระบบหมักจำนวน 4 ชุด ด้วยอัตราการเติม 200 ml/day เข้าสู่ถังหมักกรดความจุใช้งาน 4 L ระยะเวลาเก็บกักในถังหมักกรดเท่ากับ 20 วัน และถังสร้างมีเทนเท่ากับ 25 วัน (มาจากการทดลองในข้อ 3 และ 4) โดยระบบหมักรองรับค่าอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ (Organic loading rate: OLR) ที่แตกต่างกัน เนื่องจากการเตรียมสารละลายผสมอัตราส่วน 1:5 ของหญ้าเนเปียร์อายุการตัดต่างๆ มีค่าเริ่มต้นของ COD และ TVS ไม่เท่ากัน ผลการศึกษาเมื่อระบบเข้าสู่ระยะคงที่ (Steady state) แสดงดังต่อไปนี้

5.1 ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นที่อายุการตัดต่างๆ

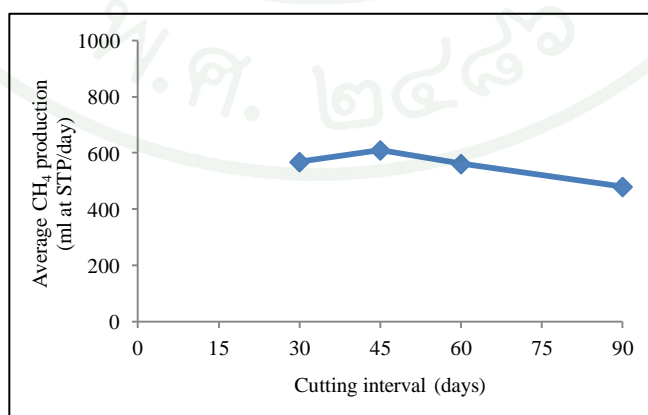
จากผลการบันทึกปริมาณก๊าซทั้งหมด (Total gas) ที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน และผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทน (%CH₄) สามารถคำนวณปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน (รายงานที่สภาวะมาตรฐาน) และสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิด (ml/day) กับระยะเวลาที่เดินระบบ (วัน) ได้ดังภาพที่ 21



ภาพที่ 21 ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นต่อวันจากการหมักหญ้าเนเปียร์ที่อายุการตัดต่างๆ

การศึกษาอายุการตัดหญ้าเนเปียร์ที่เหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซมีเทนใช้ระยะเวลาตลอดการทดลองรวม 55 วัน โดยในระยะเริ่มต้นเดินระบบปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นค่อนข้างต่ำและเพิ่มขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป (ภาพที่ 19 และ ตารางผนวกที่ ค1) เมื่อเดินระบบได้ประมาณ 25 วันระบบหมักทั้ง 4 ชุดเข้าสู่ระยะคงที่ ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในแต่ละวันค่อนข้างคงที่ สร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณก๊าซมีเทนเฉลี่ยที่ผลิตได้กับอายุการตัดหญ้าเนเปียร์ได้ดังภาพที่

22

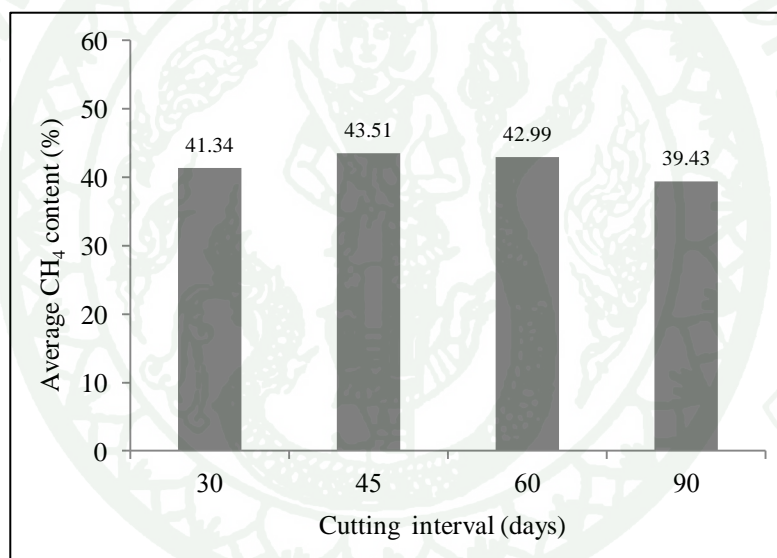


ภาพที่ 22 ปริมาณก๊าซมีเทนเฉลี่ยที่เกิดขึ้นต่อวันจากการหมักหญ้าเนเปียร์ที่อายุการตัดต่างๆ

หญ้าเนเปียร์อายุการตัด 30, 45, 60 และ 90 วัน ให้ปริมาณก๊าซมีเทนเฉลี่ยเท่ากับ 568, 610, 561 และ 480 ml/day ตามลำดับ (รายงานที่สภาวะมาตรฐาน) แต่การพิจารณาความเหมาะสมของอายุการตัดหญ้าเนเปียร์สำหรับการผลิตก๊าซมีเทนนั้นจำเป็นต้องคำนึงถึงค่าผลผลิตก๊าซมีเทน (CH_4 yield) และผลผลิตก๊าซมีเทนต่อหน่วยพื้นที่ด้วย ซึ่งจะนำเสนอผลการทดลองในลำดับต่อไป

5.2 ปริมาณก๊าซมีเทน ($\%\text{CH}_4$) ที่เกิดขึ้นที่อายุการตัดต่างๆ

เมื่อเก็บตัวอย่างก๊าซที่เกิดขึ้นภายในระบบ เพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนโดยใช้เครื่อง Gas chromatograph (GC/TCD) พบว่าเมื่อระบบเข้าสู่ระยะคงที่ ปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นมีค่าเฉลี่ยดังภาพที่ 23



ภาพที่ 23 ปริมาณก๊าซมีเทนเฉลี่ยที่เกิดขึ้นจากการใช้หญ้าเนเปียร์ที่อายุการตัดต่างๆ

ผลการบันทึกปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นแสดงดังตารางผนวกที่ ค1 โดยหญ้าเนเปียร์ที่อายุการตัด 30, 45, 60 และ 90 วัน ให้ปริมาณก๊าซมีเทน ($\%\text{CH}_4$) เฉลี่ยที่ใกล้เคียงกัน คือ 41.34, 43.51, 42.99 และ 39.43 % ตามลำดับ (ภาพที่ 23)

ก๊าซชีวภาพจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนมีสัดส่วนของก๊าซมีเทนอยู่ในช่วง 50-75 % (Seadi *et al.*, 2008) ดังนั้นหากต้องการเพิ่มปริมาณก๊าซมีเทนสามารถทำได้หลายแนวทาง เช่นการติดตั้งเครื่องมือกวนผสม เพราะการกวนผสม (Mixing) จะ

ช่วยให้เกิดการสัมผัสกันระหว่างวัสดุหมักใหม่ที่เพิ่งเติมเข้าระบบกับกลุ่มจุลินทรีย์ในระบบ ช่วยป้องกันการแยกชั้นของวัสดุหมักและการเกิดตะกอนลอยบริเวณผิวหน้าของถังหมัก รวมทั้งเพิ่มอัตราการผลิตก๊าซมีเทนอีกด้วย ส่วนอีกวิธีหนึ่งคือการเติมธาตุอาหารรอง (Micronutrients) ลงไปในระบบ Wilkie *et al.* (1986) ได้รายงานว่าการเติมธาตุอาหารรอง เช่น กำมะถัน (S) นิกเกิล (Ni) โคบอลต์ (Co) โมลิบดีนัม (Mo) และ ซีลีเนียม (Se) ลงไปในระบบ จะเพิ่มการผลิตก๊าซมีเทนประมาณ 40 % และลดความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่าย (Volatile fatty acids: VFAs) ภายในระบบอย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อพิจารณาอัตราส่วนระหว่าง COD:N ของสารละลายผสมหุ้เนเปียร์พบว่ามีความในโตรเจนค่อนข้างต่ำ (ตารางที่ 7) ดังนั้นการหมักร่วม (Co-digestion) จึงเป็นอีกวิธีการหนึ่งสำหรับการเพิ่มผลผลิตก๊าซมีเทน เพราะการนำสารตั้งต้นที่มีค่าในโตรเจนสูงมาหมักร่วม เป็นการเพิ่มค่าในโตรเจนในระบบ ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Zaher *et al.*, (2007) ได้แนะนำว่าหากต้องการรักษาระดับของอัตราส่วนระหว่าง C:N ของวัสดุหมักให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม ให้นำวัสดุหมักที่มีอัตราส่วนระหว่าง C:N สูง มาหมักร่วมกับวัสดุหมักที่มีอัตราส่วนระหว่าง C:N ต่ำ เช่น มูลสัตว์หรือเศษอาหาร เป็นต้น

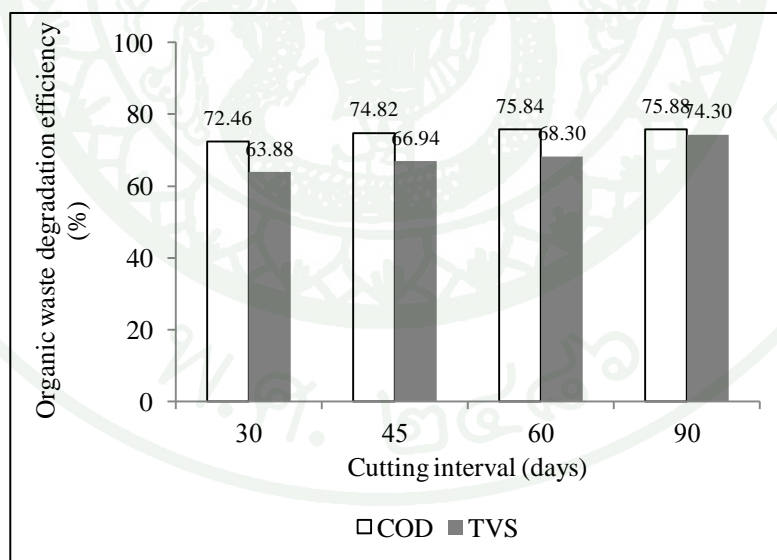
การปรับสภาพหุ้เนเปียร์ก่อนเข้าสู่กระบวนการหมักก็เป็นอีกวิธีหนึ่งที่น่าสนใจสำหรับการเพิ่มผลผลิตก๊าซมีเทน โดย Rekha and Pandit (2013) ได้ศึกษาถึงการผลิตก๊าซมีเทนจากหุ้เนเปียร์ด้วยระบบหมักแบบเติมสารตั้งต้นครั้งเดียว โดยมีการปรับสภาพหุ้เนเปียร์ด้วยด่าง (โซเดียมไฮดรอกไซด์) ก่อนการหมัก พบว่าหุ้เนเปียร์ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยด่างให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสูงกว่าที่ได้จากการหมักหุ้เนเปียร์ที่ยังไม่ผ่านการปรับสภาพ

เมื่อพิจารณาความเข้มข้นของธาตุอาหารในสารละลายผสมหุ้เนเปียร์ที่อายุการตัดต่างๆ พบว่าความเข้มข้นของแคลเซียม ทองแดง เหล็ก และแมกนีเซียม (ตารางที่ 7) อยู่ในระดับที่ไม่เป็นพิษต่อระบบ ส่วนความเข้มข้นของโพแทสเซียม (ตารางที่ 7) อยู่ในระดับที่สูงกว่าระดับกระตุ้น โดย Metcalf & Eddy. *et al.* (2003) และ Appels *et al.* (2008) ได้รายงานถึงระดับความเข้มข้นของโพแทสเซียมที่เป็นพิษต่อกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนในระดับกระตุ้นไว้ระหว่าง 100-200 mg/L และระดับพิษปานกลางอยู่ในช่วง 2500-4500 mg/L ดังนั้นในการทดลองครั้งนี้ความเข้มข้นของโพแทสเซียมในสารละลายผสมหุ้เนเปียร์อาจเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลต่อปริมาณก๊าซมีเทน (%CH₄) ที่เกิดขึ้น

5.3 ประสิทธิภาพของระบบในการกำจัดสารอินทรีย์

สารละลายผสมหญ้าเนเปียร์อายุการตัด 30, 45, 60 และ 90 วัน มี COD เริ่มต้นเข้าสู่ระบบเท่ากับ 19.32, 24.00, 27.32 และ 30.87 g/L และ TVS 14.43, 18.42, 20.88 และ 29.18 g/L ตามลำดับ จะเห็นได้ว่าสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์อายุการตัด 30 วัน มีค่าเริ่มต้นของ COD และ TVS ต่ำสุด และมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออายุการตัดเพิ่ม ซึ่ง Crowder and Chheda (1995) รายงานว่าการเพิ่มช่วงอายุการตัดของหญ้าเนเปียร์ทำให้ส่วนของลำต้นมากกว่าส่วนของใบ และ Ansah *et al.* (2010) อธิบายไว้ว่าส่วนของลำต้นจะมีองค์ประกอบของอินทรีย์วัตถุสูงกว่าในใบ ด้วยเหตุนี้ค่า COD และ TVS ของสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์ที่อายุการตัดต่างๆ สำหรับการศึกษารุ่นนี้จึงมีค่าแตกต่างกัน เป็นผลให้ OLR เข้าสู่ระบบหมักไม่เท่ากัน โดยหญ้าเนเปียร์อายุการตัด 30, 45, 60 และ 90 วันให้ OLR เข้าสู่ระบบเท่ากับ 0.97, 1.20, 1.37 และ 1.54 kgCOD/m³.day หรือ 0.72, 0.92, 1.04 และ 1.46 kgTVS/m³.day ตามลำดับ

เมื่อระบบเข้าสู่ระยะคงที่ ประสิทธิภาพของระบบการหมักแบบสองขั้นตอนในการกำจัดสารอินทรีย์มีค่าดังภาพที่ 24



ภาพที่ 24 ประสิทธิภาพของระบบหมักในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปแบบของ COD และ TVS จากการหมักหญ้าเนเปียร์อายุการตัดต่างๆ

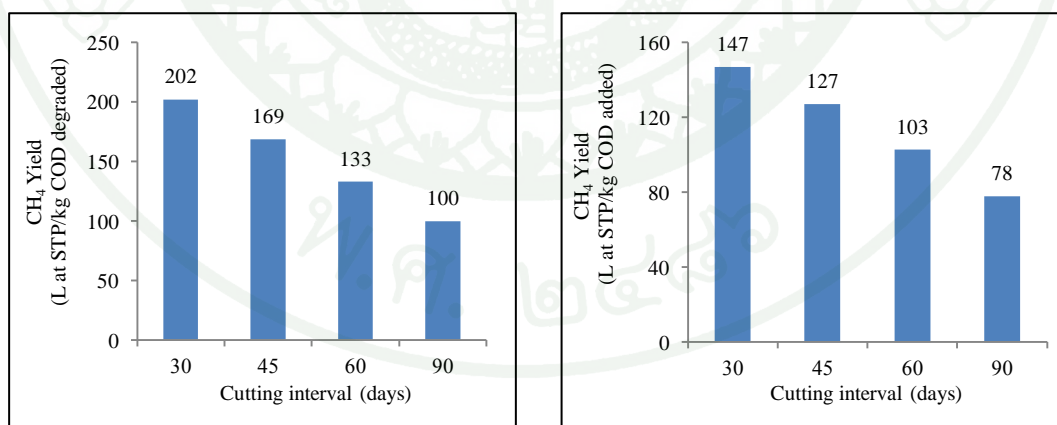
สารละลายผสมหญ้าเนเปียร์อายุการตัด 30, 45, 60 และ 90 วัน ที่ผ่านการหมักออกจากระบบมีค่า COD เฉลี่ยเท่ากับ 5.32, 6.04, 6.60 และ 7.69 g/L (ตารางผนวกที่ ค2) ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัด COD 72.46, 74.82, 75.84 และ 75.99 % ตามลำดับ (ภาพที่ 24) เมื่อคิดในรูปของ TVS พบว่าค่า TVS เฉลี่ยของสารละลายผสมที่ผ่านการหมักออกจากระบบมีเท่ากับ 5.21, 6.09, 6.62 และ 7.50 g/L (ตารางผนวกที่ ค3) ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัด TVS 63.88, 66.94, 68.30 และ 74.30 % ตามลำดับ

จากผลการทดลองพบว่าประสิทธิภาพของระบบในการกำจัดสารอินทรีย์ในสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์อายุการตัดต่างๆ มีค่าใกล้เคียงกัน คือในรูปของ COD อยู่ในช่วง 72-76 % และในรูปของ TVS อยู่ในช่วง 63-74 % (ภาพที่ 24) สอดคล้องกับรายงานของ Abu-Dahrieh *et al.* (2011) ซึ่งศึกษาการผลิตก๊าซมีเทนจากหญ้าหมักโดยการเดินระบบแบบต่อเนื่องที่ OLR ค่าต่างๆ พบว่าระบบหมักมีประสิทธิภาพในการกำจัด COD ใกล้เคียงกัน

5.4 ผลผลิตก๊าซมีเทน

การศึกษาครั้งนี้จะแสดงค่าของผลผลิตก๊าซมีเทนใน 6 รูปแบบ ดังนี้

ก. ผลผลิตก๊าซมีเทนในหน่วย L CH₄ at STP/kgCOD degraded and added

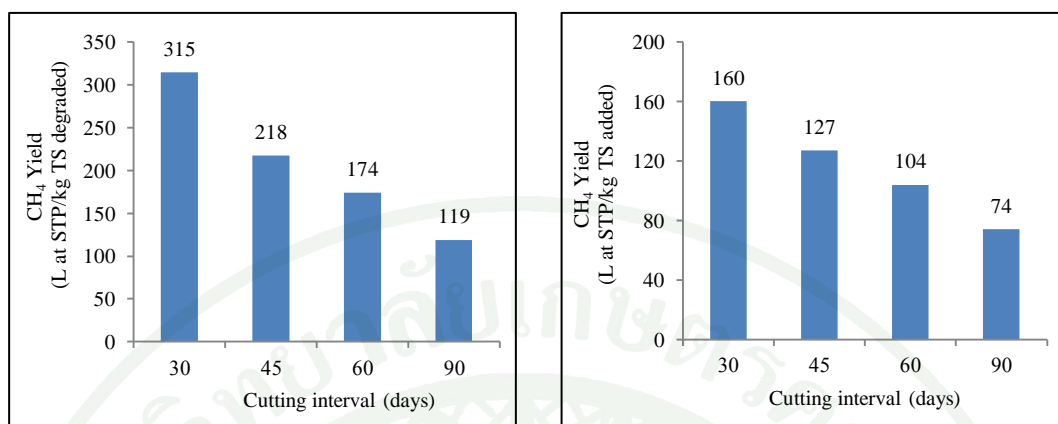


(ก)

(ข)

ภาพที่ 25 ผลผลิตก๊าซมีเทนในหน่วย L at STP/kgCOD degraded (ก) และ L at STP/kgCOD added (ข) จากการหมักหญ้าเนเปียร์อายุการตัดต่างๆ

ข. ผลผลิตก๊าซมีเทนในหน่วย L CH₄ at STP/kgTS degraded and added

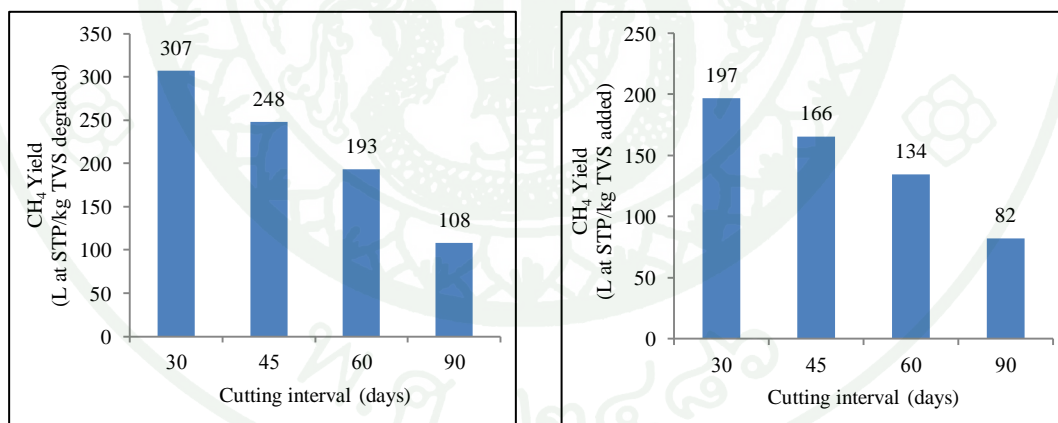


(ก)

(ข)

ภาพที่ 26 ผลผลิตก๊าซมีเทนในหน่วย L at STP/kgTS degraded (ก) และ L at STP/kgTS added (ข) จากการหมักหญ้าเนเปียร์อายุการตัดต่างๆ

ค. ผลผลิตก๊าซมีเทนในหน่วย L CH₄ at STP/kgTVS degraded and added



(ก)

(ข)

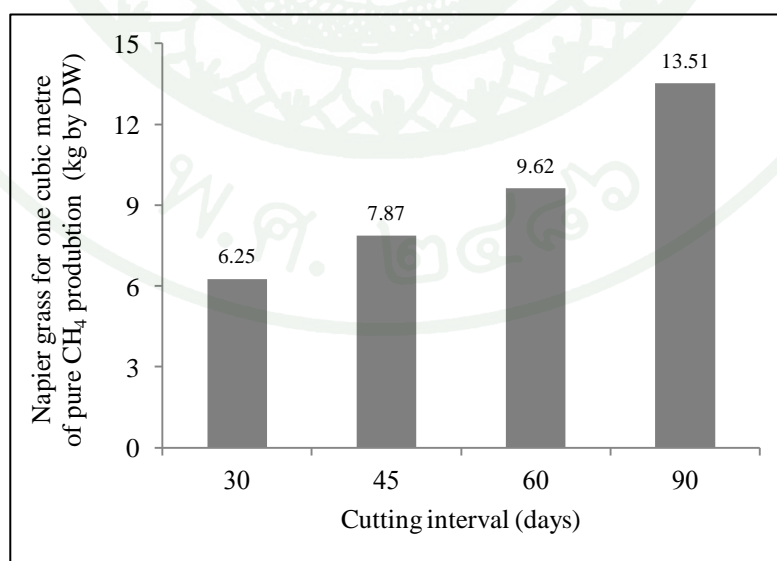
ภาพที่ 27 ผลผลิตก๊าซมีเทนในหน่วย L at STP/kgTVS degraded (ก) และ L at STP/kgTVS added (ข) จากการหมักหญ้าเนเปียร์อายุการตัดต่างๆ

ระบบหมักให้ผลผลิตก๊าซมีเทน (CH_4 yield) สูงสุด เมื่อเดินระบบด้วยหญ้าเนเปียร์อายุการตัด 30 วัน ผลผลิตก๊าซมีเทนมีค่าเท่ากับ 202 L at STP/kgCOD degraded (ภาพที่ 25(ก)) และ 147 L at STP/kgCOD added (ภาพที่ 25(ข)) หรือ 307 L at STP/kgTVS degraded (ภาพที่ 27(ก)) และ 197 L at STP/kgTVS added (ภาพที่ 27(ข)) หรือ 315 L at STP/kgTS degraded (ภาพที่ 26(ก)) และ 160 L at STP/kgTS added (ภาพที่ 26(ข)) หญ้าเนเปียร์อายุการตัด 45, 60 และ 90 วัน ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนลดลงตามลำดับสอดคล้องกับรายงานของ Shiralipour and Smith (1984) ที่รายงานไว้ว่าผลผลิตก๊าซมีเทนมีค่าลดลงเมื่ออายุการตัดหญ้าเนเปียร์เพิ่มขึ้น จากการทดลองพบว่าหญ้าเนเปียร์อายุการตัด 90 วัน ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนน้อยที่สุด แม้มีค่า COD และ TVS เข้าสู่ระบบสูงสุด สาเหตุที่เป็นเช่นนี้เพราะหญ้าที่มีอายุการตัดสูงปริมาณแร่ธาตุจะลดลง (Crowder and Chheda, 1995) ทำให้ธาตุอาหารภายในระบบไม่เพียงพอ และอีกสาเหตุคือความเข้มข้นของลิกโนเซลลูโลสภายในระบบ ซึ่ง Ansah *et al.* (2010) รายงานว่าปริมาณลิกนินและเยื่อใยต่างๆ มีค่าสูงขึ้น (รวมกันเรียกว่าลิกโนเซลลูโลส หรือ Lignocellulose) เมื่อเพิ่มอายุการตัดหญ้าเนเปียร์ ซึ่งลิกนินมีโครงสร้างที่แข็งแรงทำให้พืชมีรูปร่างและโครงสร้างที่มั่นคง (Perez *et al.*, 2002) จึงย่อยสลายได้ยาก (Orr and Kirk, 2003) ไม่สามารถละลายน้ำได้ตามธรรมชาติ และทนทานต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์และปฏิกิริยาออกซิเดชัน (Lewis and Davin, 1998; Hendriks and Zeeman, 2009) ดังนั้นการผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักหญ้าเนเปียร์ที่มีอายุการตัดสูงขึ้นจึงถูกจำกัดด้วยความเข้มข้นของเซลลูโลสและลิกนินในระบบ (Lehtomaki and Bjornsson, 2006) เนื่องจากลิกโนเซลลูโลสย่อยสลายได้ยาก (Owen *et al.*, 1979; Chynoweth *et al.*, 1993; Cho *et al.*, 1995; Angelidaki and Sanders, 2004; Hansen *et al.*, 2004; Buffiere *et al.*, 2006)

ผลผลิตก๊าซมีเทน (CH_4 yield) ที่ได้จากการทดลองหมักหญ้าเนเปียร์ที่อายุการตัดต่างๆ สอดคล้องกับรายงานของ Chynoweth *et al.* (1993) ซึ่งรายงานว่าการหมักหญ้าเนเปียร์แบบไม่ใช้ออกซิเจนนั้นให้ผลผลิตก๊าซมีเทนระหว่าง 190-340 L/kgVS added และเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุหมักทางการเกษตรอื่นๆ เช่น Jagadabhi *et al.* (2011) ศึกษาการผลิตก๊าซมีเทนจากมะเขือเทศแดงกว่า กก และหญ้าหมัก ด้วยระบบหมักแบบสองขั้นตอนประกอบด้วยระบบหมักแห้งแบบลีชเบด (Leach-bed reactors: LBR) และระบบแบบตะกอนลอย (Upflow anaerobic sludge blanket reactor: UASB) พบว่าผลผลิตก๊าซมีเทนมีค่าระหว่าง 30-140 L/kgVS added Sinbuathong *et al.* (2012) ศึกษาการผลิตก๊าซมีเทนจากกากเมล็ดสับดูดำด้วยระบบหมักแบบสองขั้นตอน พบว่าผลผลิตก๊าซมีเทนมีค่าประมาณ 240 L at STP/kg TS added Kalia *et al.* (2000) ศึกษาการผลิตก๊าซมีเทนจากก้านกล้วย (Banana stem) พบว่าผลผลิตก๊าซมีเทนมีค่า 196 L/kgTS added และ Isci and Demirer (2007) ศึกษาการผลิตก๊าซมีเทนจากฟ้าย พบว่าผลผลิตก๊าซมีเทนมีค่า 78 L/kgTS added

เมื่อเปรียบเทียบค่าผลผลิตก๊าซมีเทน (CH_4 yield) ที่ได้จากสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์อายุการตัด 30 และ 45 วันจากการทดลองในรอบนี้ พบว่าผลผลิตก๊าซมีเทนที่ได้มีค่าน้อยกว่าการศึกษาในรอบแรก (ข้อ 3 และ 4) เนื่องจากหญ้าเนเปียร์ที่ใช้ในการทดลองไม่ได้มาจากรอบการตัดเดียวกัน โดยการทดลองในรอบแรก (ข้อ 3 และ 4) ใช้หญ้าเนเปียร์อายุการตัด 30 และ 45 วันจากการตัดในรอบแรก และการศึกษาในครั้งนี้ใช้หญ้าเนเปียร์จากการตัดรอบที่สองจากแปลงเดียวกัน โดยผลผลิตก๊าซมีเทนที่ได้จากการหมักหญ้าในการตัดรอบแรกมีค่าสูงกว่าผลผลิตก๊าซมีเทนที่ได้จากการหมักหญ้าในรอบการตัดที่สอง (ตารางที่ 8, 9 และ 10) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Amon *et al.* (2007) ที่ได้ว่าพืชที่มีการตัดหมุนเวียนกันนั้น การตัดในรอบแรกจะให้ผลผลิตก๊าซมีเทนมากกว่าการตัดในรอบถัดๆ ไป หญ้าเนเปียร์จากการตัดในรอบแรกจึงเป็นตัวเลือกที่ดีที่สุดสำหรับการผลิตก๊าซมีเทน De Boever *et al.* (1993) ศึกษาเกี่ยวกับหญ้าไรซ์ (Ryegrass) และอธิบายว่าหญ้าไรซ์จากการตัดรอบหลังมีเชื้อยีสและลิกนินเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเป็นสาเหตุให้ผลผลิตก๊าซมีเทนลดลง นอกจากนี้การใส่ปุ๋ยรองพื้นก่อนการปลูกหญ้าเนเปียร์ทำให้หญ้าที่ได้จากการตัดครั้งแรกจะมีแร่ธาตุมากกว่าหญ้าที่ได้จากการตัดครั้งถัดๆ ไป จึงให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสูงกว่า

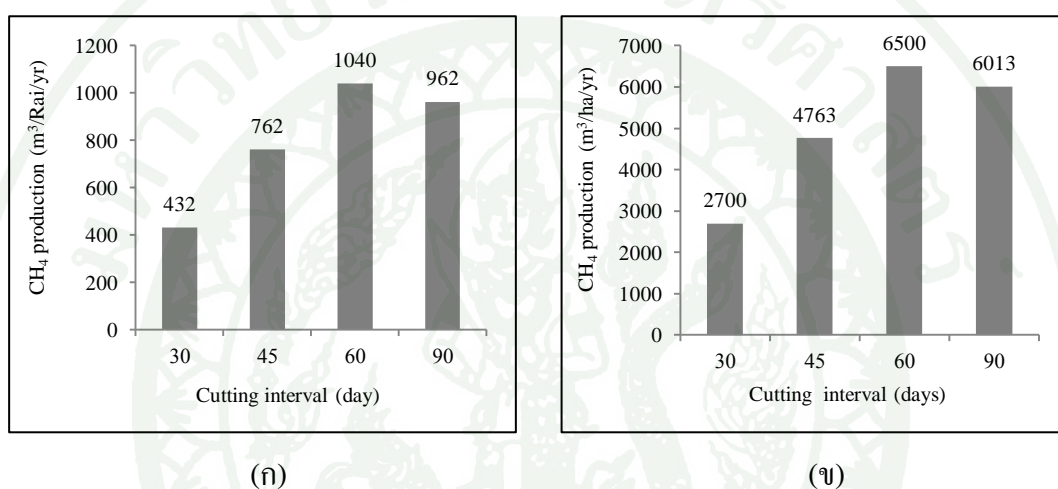
เมื่อพิจารณาค่าของผลผลิตก๊าซมีเทนในรูปของปริมาตรก๊าซมีเทนที่ผลิตได้ต่อปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solids: TS) ที่ถูกเติมเข้าระบบ พบว่าการผลิตก๊าซมีเทนบริสุทธิ์ 1 m^3 โดยใช้สารละลายผสมหญ้าเนเปียร์อายุการตัด 30, 45, 60 และ 90 วัน จะต้องใช้ปริมาณหญ้าเนเปียร์แห้งที่แตกต่างกันดังแสดงในภาพที่ 28



ภาพที่ 28 ปริมาณหญ้าเนเปียร์แห้งที่อายุการตัดต่างๆ สำหรับการผลิตก๊าซมีเทนบริสุทธิ์ 1 m^3

จากการทดลองพบว่าการผลิตก๊าซมีเทนบริสุทธิ์ 1 m^3 ต้องใช้หญ้าเนเปียร์แห้งอายุการตัด 30 วันน้อยที่สุด และต้องใช้ในปริมาณมากขึ้นเมื่อหญ้ามีอายุการสูง (ภาพที่ 28)

แม้หญ้าเนเปียร์อายุการตัด 30 วัน ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสูงที่สุด (ภาพที่ 25, 26 และ 27) แต่เมื่อพิจารณาถึงผลผลิตต่อหน่วยพื้นที่ด้วย และพบว่าหญ้าเนเปียร์อายุการตัด 60 วัน ให้ค่าผลผลิตก๊าซมีเทนต่อหน่วยพื้นที่สูงสุด โดยผลผลิตก๊าซมีเทนต่อหน่วยพื้นที่ของหญ้าเนเปียร์ที่อายุการตัดต่างๆ แสดงดังภาพที่ 29



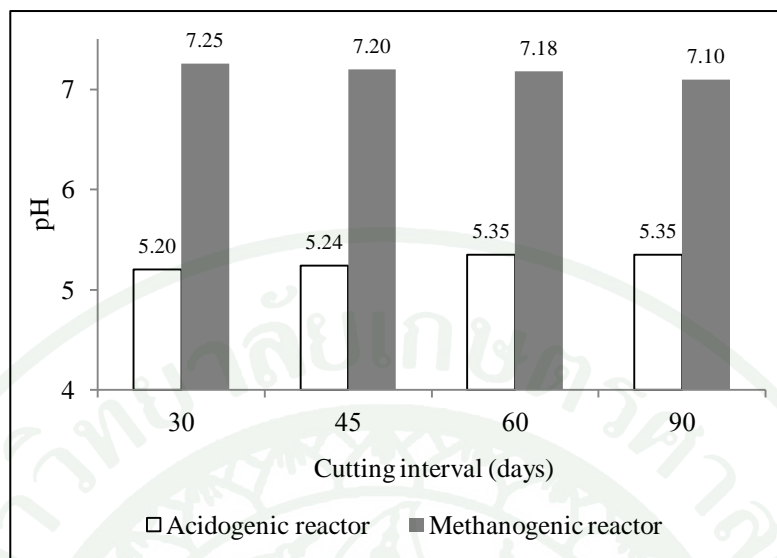
ภาพที่ 29 ผลผลิตก๊าซมีเทนจากหญ้าเนเปียร์อายุการตัดต่างๆ ในหน่วย $\text{m}^3/\text{rai}/\text{yr}$ (ก) และหน่วย $\text{m}^3/\text{ha}/\text{yr}$ (ข)

จากการประเมินผลผลิตหญ้าเนเปียร์ที่ทำการปลูกเพื่อการทดลองในครั้งนี้ พบว่าการปลูกหญ้าเนเปียร์ 1 ไร่ โดยมีการใส่ปุ๋ยและรดน้ำเป็นอย่างดี เมื่อทำการตัดที่อายุ 30, 45, 60 และ 90 วัน จะได้หญ้าผลผลิตหญ้าเนเปียร์แห้ง (Herbage yield) 2.7, 6, 10 และ 13 ton DW/rai/yr ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 6 (ปลูกที่ภาควิชาสัตวบาล คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน) หรือคิดเป็น 16.88, 37.50, 62.50 และ 81.25 ton DW/ha/yr ซึ่ง Schreuder *et al.* (1993) รายงานว่าผลผลิตหญ้าเนเปียร์แห้งอยู่ระหว่าง 10-40 ton DW/ha/yr ขึ้นอยู่กับความอุดมสมบูรณ์ของดิน สภาพภูมิอากาศและการบริหารจัดการ และ Skerman and Riveros (1990) รายงานว่า เขตร้อนเป็นภูมิภาคที่ให้ผลผลิตหญ้าเนเปียร์แห้งสูงสุดถึง 85 ton DW/ha/yr เมื่อได้รับปุ๋ยในปริมาณที่สูง

เมื่อนำผลผลิตก๊าซมีเทน (CH_4 yield) ที่ได้ (ภาพที่ 26) มาคำนวณผลผลิตก๊าซมีเทนต่อหน่วยพื้นที่ (ภาพที่ 29) พบว่าหญ้าเนเปียร์อายุการตัด 60 วัน ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนต่อหน่วยพื้นที่สูงสุด คือ $1040 \text{ m}^3/\text{rai}/\text{yr}$ หรือ $6500 \text{ m}^3/\text{ha}/\text{yr}$ (วิธีการคำนวณแสดงดังภาคผนวก ง) แม้หญ้าเนเปียร์อายุการตัด 30 วันจะให้ผลผลิตก๊าซมีเทน (CH_4 yield) ในหน่วยต่างๆ สูงสุด (ภาพที่ 25, 26 และ 27) แต่เมื่อพิจารณาพร้อมกับผลผลิตหญ้าเนเปียร์รวมต่อหน่วยพื้นที่ (Herbage yield) แล้วพบว่าหญ้าเนเปียร์ที่มีอายุการตัดสูงให้ผลผลิตหญ้าเนเปียร์รวมต่อหน่วยพื้นที่สูงกว่าหญ้าเนเปียร์ที่มีอายุการตัดต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับ Wijitphan and Lowilai (2011) ซึ่งอธิบายไว้ว่าหญ้าเนเปียร์ที่มีอายุการตัดสูงมีอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวันสูง จึงให้ผลผลิตหญ้าเนเปียร์รวมต่อหน่วยพื้นที่มากกว่าที่อายุการตัดต่ำ และแม้ว่าหญ้าเนเปียร์ที่มีอายุการตัดต่ำจะมีจำนวนครั้งของการตัดมากกว่า แต่ผลผลิตต่อหน่วยพื้นที่ที่ได้ในแต่ละครั้งมีปริมาณน้อยมาก เมื่อรวมทุกครั้งที่การตัด หญ้าเนเปียร์ที่มีอายุการตัดสูงจึงให้ผลผลิตหญ้าเนเปียร์รวมต่อหน่วยพื้นที่มากกว่าหญ้าที่มีอายุการตัดต่ำ ดังนั้นหญ้าเนเปียร์อายุการตัด 90 วันจึงให้ผลผลิตต่อหน่วยพื้นที่สูงสุด แต่เมื่อพิจารณาในรูปของผลผลิตก๊าซมีเทนต่อหน่วยพื้นที่ พบว่าหญ้าเนเปียร์อายุการตัด 60 วัน ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนต่อหน่วยพื้นที่สูงสุด จึงมีความเหมาะสมที่สุดสำหรับใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตก๊าซมีเทน

5.5 ค่า pH ของสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์ที่ผ่านการหมัก

เมื่อเดินระบบด้วยตัวช่วยอัตราการเติมสารละลายผสมเข้าสู่ระบบ 200 ml/day (HRT ในถังหมักกรด 20 วัน และถังสร้างมีเทน 25 วัน) พบว่า ระบบสามารถคงอยู่ได้ ไม่ล้มเหลว โดยไม่ต้องมีการปรับค่า pH ตลอดการทดลอง ที่ระยะคงที่ ค่าเฉลี่ย pH ของสารละลายผสมที่ผ่านการหมัก (Digested slurry) ในถังหมักกรด และถังสร้างมีเทนในแต่ละถังหมัก ซึ่งรองรับสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์ที่อายุการตัดต่างๆ มีค่าดังภาพที่ 30



ภาพที่ 30 ค่า pH เฉลี่ยของสารละลายผสมที่ผ่านการหมักในถังหมักกรด และถังสร้างมีเทนจากการหมักหญ้าเนเปียร์อายุการตัดต่างๆ

การหมักสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์อายุการตัด 30, 45, 60 และ 90 วัน ด้วย HRT ในถังหมักกรด 20 วัน และถังสร้างมีเทน 25 วัน ที่สภาวะคงที่ มีค่า pH ของถังหมักกรดเท่ากับ 5.20, 5.24, 5.35 และ 5.35 ตามลำดับ และถังสร้างมีเทนมีค่าเท่ากับ 7.25, 7.20, 7.18 และ 7.10 (ภาพที่ 30) เมื่อพิจารณาค่า pH ของสารละลายผสมในถังหมักทั้งสอง พบว่า การแยกการหมักออกเป็นสองขั้นตอน คือขั้นตอนการหมักกรด และขั้นตอนการสร้างมีเทนประสบความสำเร็จ คือ ค่า pH ในถังหมักกรดมีค่าเป็นกรด และ pH ในถังสร้างมีเทนมีค่าเป็นกลาง เหมาะกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ชนิดสร้างกรด และจุลินทรีย์ชนิดสร้างมีเทน

ผลการทดลองสรุปไว้ดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 สรุปผลการศึกษากาการหมักหญ้าเปียร์อายุการตัดต่างๆ โดยระบบหมักแบบสองขั้นตอน

Parameters	Napier grass at various cutting interval (days)			
	30	45	60	90
Reactor volume for each acidogenic, methanogenic reactor (L)	4, 5	4, 5	4, 5	4, 5
Daily feed (ml/day)	200	200	200	200
HRT for each acidogenic, methanogenic reactor (day)	20, 25	20, 25	20, 25	20, 25
Initial MLVSS (g/L)	10.0	10.0	10.0	10.0
Initial pH of substrate solution	5.86	7.22	6.92	6.17
Initial COD (g/L)	19.32	24.00	27.32	30.87
Initial TS (g/L)	17.73	24.00	26.94	32.30
Initial TVS (g/L)	14.43	18.42	20.88	29.18
OLR (kgCOD/m ³ .day)	0.97	1.20	1.37	1.54
OLR (kgTVS/m ³ .day)				
CH ₄ produced at steady state (ml at STP/day)	568	610	561	480
Average CH ₄ (%)	41.34	43.51	42.99	39.43
COD at steady state (g/L)	5.32	6.04	6.60	7.69
COD degradation efficiency (%)	72.46	74.82	75.84	75.88
TVS at steady state (g/L)	5.21	6.09	6.62	7.50
TVS degradation efficiency (%)	63.88	66.94	68.30	74.30
CH ₄ yield (L at STP/kgCOD degraded)	202	169	133	100
CH ₄ yield (L at STP/kgCOD added)	147	127	103	78
CH ₄ yield (L at STP /kgTS degraded)	315	218	174	119
CH ₄ yield (L at STP /kgTS added)	160	127	104	74
CH ₄ yield (L at STP /kgTVS degraded)	307	248	193	108
CH ₄ yield (L at STP /kgTVS added)	197	166	134	82
Napier grass (DW) for Pure CH ₄ 1 m ³ (kg)	6.25	7.87	9.62	13.51
CH ₄ yield per area (m ³ /rai/yr)	432	762	1040	962
CH ₄ yield per area (m ³ /ha/yr)	2700	4763	6500	6013
Average pH of acidogenic reactor at steady state	5.20	5.24	5.35	5.35
Average pH of methanogenic reactor at steady state	7.25	7.20	7.18	7.10

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

การศึกษาการผลิตก๊าซมีเทนจากหญ้าเนเปียร์โดยการหมักแบบสองขั้นตอน ในถังหมักกรดความจุ 4 ลิตร และถังสร้างมีเทนความจุ 5 ลิตร ใช้เชื้อจุลินทรีย์ผสม (Mixed culture) จากกระเพาะรูเมน (Rumen) ของโค เพื่อหาอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ (Organic loading rate: OLR) ระยะเวลาเก็บกัก (Hydraulic retention time: HRT) และอายุการตัดหญ้าเนเปียร์ (Cutting interval) ที่เหมาะสมสำหรับก๊าซมีเทน โดยศึกษาที่อายุการตัด 30, 45, 60 และ 90 วัน ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 30 ± 1 องศาเซลเซียส ถังหมักแต่ละชุดรองรับอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ที่แตกต่างกัน จากการศึกษาสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

1. หญ้าเนเปียร์สามารถใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตก๊าซมีเทนได้ ให้ปริมาณก๊าซมีเทน ($\%CH_4$) สูงสุด 50.78 เปอร์เซ็นต์
2. การหมักหญ้าเนเปียร์อายุการตัด 30 และ 45 วัน ให้ผลผลิตก๊าซมีเทน (CH_4 yield) สูงสุด ที่ระยะเวลาเก็บกักในถังหมักกรด 20 วัน และถังสร้างมีเทน 25 วัน
3. หญ้าเนเปียร์ที่อายุการตัดต่างๆ ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนแตกต่างกัน โดยหญ้าเนเปียร์อายุการตัด 30 วัน ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดคือ 210 L at STP/kgCOD degraded และ 147 L at STP/kgCOD added (หรือ 237 L at STP/kgTS degraded และ 160 L at STP/kgTS added หรือ 272 L at STP/kgTVS degraded และ 197 L at STP/kgTVS added) ผลผลิตก๊าซมีเทนสูงสุดเกิดขึ้นเมื่อระบบรองรับอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ $0.97 \text{ kgCOD/m}^3 \cdot \text{day}$
4. การหมักหญ้าเนเปียร์อายุการตัด 60 วัน ให้ผลผลิตก๊าซมีเทนต่อหน่วยพื้นที่สูงสุด คือ 1040 ลูกบาศก์เมตรต่อไร่ต่อปี หรือ 6500 ลูกบาศก์เมตรต่อเฮกแตร์ต่อปี
5. การหมักหญ้าเนเปียร์อายุการตัด 30, 45, 60 และ 90 วัน ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของ COD 72.46, 74.82, 75.84 และ 75.88 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในรูปของ TVS 63.88, 66.94, 68.30 และ 74.30 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

6. ค่าเฉลี่ยความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของหมู๋เนเปียร์ที่อายุการตัดต่างๆ ในถังหมักกรดอยู่ในช่วงกรด 5.20-5.35 และในถังสร้างมีเทนอยู่ในช่วง 7.10-7.25

7. การผลิตก๊าซมีเทนบริสุทธิ์ 1 ลูกบาศก์เมตร ต้องใช้หมู๋เนเปียร์แห้งอายุการตัด 30, 45, 60 และ 90 วัน จำนวน 6.25, 7.87, 9.62 และ 13.51 กิโลกรัมโดยน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ

8. หมู๋เนเปียร์ที่ใช้ในการหมักเพื่อผลิตก๊าซมีเทนอาจมาจากการตัดหลายรอบ แต่หมู๋เนเปียร์ที่มาจาก การตัดรอบแรกให้ผลผลิตก๊าซมีเทนสูงกว่าการตัดในรอบถัดๆ ไป

ข้อเสนอแนะ

1. ปริมาณสารอินทรีย์ในสารละลายที่ผ่านการหมัก (Digested slurry) ออกจากระบบยังมีความเข้มข้นสูง ควรนำไปหมักต่อในขั้นตอนที่สามเพื่อให้ได้ก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้น

2. ควรศึกษาความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยง่าย (Volatile Fatty Acids: VFAs) ภายในระบบด้วย เนื่องจากกรดไขมันระเหยง่ายเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน

3. ควรมีการประเมินความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ด้วย เนื่องจากหมู๋เนเปียร์จัดเป็นทรัพยากร

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. 2555. **หล้าเนเปียร์พืชพลังงานสีเขียวพลังงานทดแทนที่น่าจับตามอง**. แหล่งที่มา: www.dede.go.th, 20 ธันวาคม 2555.

กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม. 2553. **คู่มือการปฏิบัติงานเกี่ยวกับการออกแบบการผลิต การควบคุมคุณภาพ และการใช้ก๊าซชีวภาพ (Biogas) สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม**. กรมโรงงานอุตสาหกรรม, กรุงเทพฯ.

การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย. 2555. **รายงานประจำปี 2554 การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย**. แหล่งที่มา: http://www.egat.co.th/index.php?option=com_content&view=category&id=184&layout=blog, 20 ธันวาคม 2556.

ไกรลาส เขียวทอง. ม.ป.ป.. **คู่มือการปลูกหล้าเนเปียร์ปากช่อง 1**. ศูนย์วิจัยและพัฒนาอาหารสัตว์ นครราชสีมา, นครราชสีมา.

จักรพันธ์ หมั่นจี. 2553. **การผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียฟาร์มสุกรโดยการย่อยสลายร่วมกับหล้าเนเปียร์และเศษอาหารโดยถังปฏิกรณ์แอโรบิกอาร์**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

พิญญาณี แสงศรี, นุชรา สิบบัวทอง, สุชาติ เหลืองประเสริฐ และ สุริยะ สะวานนท์. 2557. **การผลิตก๊าซชีวภาพจากหล้าเนเปียร์โดยการหมักร่วมกับมูลโค**. น. 215-216. ใน **บทคัดย่อการประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 13**. สมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ.

ศิริพร คุณาวิชา. 2539. **การศึกษาการกำจัดไนเตรทจากระบบบำบัดน้ำเสียของโรงงานวันเส้นโดยวิธีออกซิก-แอนแอโรบิกที่มีตัวกลาง**. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ศูนย์พยากรณ์และสารสนเทศพลังงาน สำนักนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน. 2555.

สถานการณ์พลังงานไทย. แหล่งที่มา: <http://doc-eppo.eppo.go.th/EnergySituation/News.htm>, 20 ธันวาคม 2556

Abu-Dahrieh, J., A. Orozco, E. Groom and D. Rooney. 2011. Two-stage anaerobic digestion of tomato, cucumber, common reed and grass silage in leach-bed reactors and upflow anaerobic sludge blanket reactors. **Bioresource Technology** 102 (2011): 4726–4733.

Amon, T., B. Amon, V. Kryvoruchko, A. Machmüller, K. Hopfner-Sixt, V. Bodiroza, R. Hrbek, J. Friedel, E. Pötsch, H. Wagenristl, M. Schreiner and W. Zollitsch. 2006. Methane production through anaerobic digestion of various energy crops grown in sustainable crop rotations. **Bioresource Technology**. 98 (2007): 3204–3212.

Anderson, G.K., P.J. Sallis and S. Uyanik. 2003. Anaerobic treatment processes, p. 391-426. *In* D. Mara, N.J Horan Jr., eds. **Handbook of Water and Wastewater Microbiology**. Academic Press, London.

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

Angenent, L.T., K. Karim, M.H. Al-Dahhan, B.A. Wrenn and R.D. Espinosa. 2004. Production of bioenergy and biochemicals from industrial and agricultural wastewater. **Trends in Biotechnology** 22: 477-485.

Ansah, T., Osafo E.L.K. 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 (5): 923-929.

APHA, AWWA, and WEF. 2005. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**, 19 ed. Washington, D.C.

- Appels, L., J. Baeyens, J. Degreve and R. Dewil. 2008. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. **Progress in Energy and Combustion Science** 34: 755-781.
- Breure, A.M. and J.G. Andel. 1987. **Bioenvironmental Systems**. CRC Press, Florida.
- Bogdan, A.V. 1977. **Tropical Pastures and Fodder Plants**. Longman Group (Far East), Limited, London.
- 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.
- 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.
- Chynoweth, D. P., C.E. Turick, J.M. Owens, D.E. Jerger and M.W. Peck. 1993. Biochemical methane potential of biomass and waste feedstocks. **Biomass and Bioenergy** 5: 95-111.
- Crowder, L.V. and H.R. Chheda. 1995. **Tropical Grassland Husbandry**. Wiley, New Jersey.
- De Boever, J. L., A. De Smet, D.L. De Brabander and C.V. Boucque. 1993. Evaluation of physical structure. 1. grass silage. **Journal of Dairy Science** 76 (1): 140-153.
- Ferraris, R. and D.F. Sinclair. 1980. Factors affecting the growth of *Pennisetum purpureum* in the wet tropics. II. Uninterrupted growth. **Australian Journal of Agricultural Research** 31 (5): 915 – 925.
- Gerardi, M. H. 2003. **The Microbiology of Anaerobic Digesters**. Wiley & Sons, Inc., New Jersey.

- Göblös, S., P. Portörö, D. Bordás, M. Kálmán and I. Kiss. 2007. Comparison of the effectivities of two-phase and single-phase anaerobic sequencing batch reactors during dairy wastewater treatment. **Renewable Energy** 33 (2008): 960–965.
- 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. 2006. Strategies for the anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste: an overview. **Water Science and Technology** 53 (8): 7-22
- Hendriks, A. and G. Zeeman. 2009. Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass. **Bioresource Technology** 100: 10-18.
- Humphreys, L.R. 1995. **Tropical Forages: Their Role in Sustainable Agriculture**. Wiley, New Jersey.
- Isci, A. and G.N. Demirer. 2007. Biogas production potential from cotton wastes. **Renewable Energy** 32: 750–757.
- Jagadabhi, P.S., P. Kaparaju and J. Rintala. 2011. Two-stage anaerobic digestion of tomato, cucumber, common reed and grass silage in leach-bed reactors and upflow anaerobic sludge blanket reactors. **Bioresource Technology** 102 (2011): 4726–4733.
- Janejadkarn A. and O. Chavalparit. 2013. Biogas production from napier grass (Pak Chong 1) (*Pennisetum purpureum* × *Pennisetum americanum*). **Advanced Materials Research** 856: 327-332.

- Jingura, R.M. and R. Matengaifa. 2007. Optimization of biogas production by anaerobic digestion for sustainable energy development in Zimbabwe. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 13 (2009): 1116–1120.
- Kalia, V.C., V. Snonakya and N. Raizada. 2000. Anaerobic digestion of banana stem waste. **Bioresource Technology** 73: 191–193.
- Kayhanian, M. and S. Hardy. 1994. The impact of four design parameters on the performance of a high-solids anaerobic digestion of municipal solid waste for fuel gas production. **Environmental Technology** 15: 557-567
- Kim, J., C. Park, T.H. Kim, M. Lee, S. Kim, S.W. Kim and J. Lee. 2003a. Effects of various pretreatments for enhanced anaerobic digestion with waste activated sludge. **Journal of Bioscience and Bioengineering** 95: 271–275.
- Kim, M., C.Y. Gomec, Y. Ahn and R.E. Speece. 2003b. Hydrolysis and acidogenesis of particulate organic material in mesophilic and thermophilic anaerobic digestion. **Environmental Technology** 24: 1183–1190.
- Kubota, F., Y. Matsuda, W. Agata and K. Nada. 1994. The relationship between canopy structure and high productivity in napier grass, *Pennisetum purpureum* Schumach. **Field Crops Research** 38 (1994): 105-110.
- 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.
- 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

- Lier, J.B.V., N. Mahmoud and G. Zeeman. 2008. Anaerobic Wastewater Treatment, p. 401-442. In M. Henze, M.C.M.V. Loosdrecht and G. Ekama Jr., eds. **Biological Wastewater Treatment: Principles, Modeling, and Design**. IWA publishing, London.
- Liu, D.W., D.P. Liu, R.J. Zeng and I. Angelidaki. 2006a. Hydrogen and methane production from household solid waste in the two-stage fermentation process. **Water Research** 40: 2230–2236.
- Liu, G.T., X.Y. Peng and T.R. Long. 2006b. Advance in high-solid anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste. **Journal of Central South University of Technology** 13: 151–157.
- Mata-Alvarez, J. 2002. **Biomethanization of the Organic Fraction of Municipal Solid Wastes**. IWA Publishing, London.
- McCarty, P.L. 1964. Anaerobic waste treatment fundamental part one - Chemistry waste and microbiology. **Public Works** 95 (9): 107-112.
- Merlino, G., A. Rizzi, A. Schievano, A. Tenca, B. Scaglia, R. Oberti, F. Adani and D. Daffonchio. 2013. Microbial community structure and dynamics in two-stage vs single-stage thermophilic anaerobic digestion of mixed swine slurry and market biowaste. **Water Research** 47 (2013): 1983-1995.
- Metcalf & Eddy, G. Tchobanoglous, F.L. Burton and H.D. Stensel. 2003. **Wastewater Engineering: Treatment and Reuse**. McGraw-Hill, Boston. Mosey, F. and X. Fernandes. 1989. Patterns of hydrogen in biogas from the anaerobic digestion of milk-sugars. **Water Science and Technology** 21: 187-196.

- Nasr, N., E. Elbeshbishy, H. Hafez, G. Nakhla and M.H.E. Naggar . 2011. Comparative assessment of single-stage and two-stage anaerobic digestion for the treatment of thin stillage. **Bioresource Technology** 111 (2012): 122–126.
- Nielsen, H.B., Z. Mladenovska, P. Westermann and B.K. Ahring. 2004. Comparison of two-stage thermophilic (68 °C/55 °C) anaerobic digestion with one-stage thermophilic (55 °C) digestion of cattle manure. **Biotechnology and Bioengineering** 86: 291–300.
- Olugbemide, A.D., A.O. Imasuen, P.O. Oleghe and J.O. Efosa. 2012. Anaerobic co-digestion of fresh maize leaves with elephant grass. **Journal of Applied Sciences and Environmental Management** 16 (1): 155- 157.
- Orozco, A.M., A.S. Nizami, J.D. Murphy and E. Groom. 2013. Optimizing the thermophilic hydrolysis of grass silage in a two-phase anaerobic digestion system. **Bioresource Technology** 143: 117– 125.
- 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.
- Rekha B.N and A.B. Pandit. 2013. Performance enhancement of batch anaerobic digestion of napier grass by alkali pre-treatment. **International Journal of ChemTech Research** 5 (2): 558-564.

- Russell, J.S. and H.R. Webb. 1976. Climatic range of grasses and legumes used in pastures. Result of survey conducted at the 11th International Grassland Congress. **Journal of the Australian Institute of Agricultural Science** 42: 156-163.
- Salminen, E.A. and J.A. Rintala. 2002. Semi-continuous anaerobic digestion of solid poultry slaughterhouse waste: effect of hydraulic retention time and loading. **Water Research** 23: 3175-3182.
- Sandberg, M. and B. Ahring. 1992. Anaerobic treatment of fish meal process waste-water in a UASB reactor at high pH. **Applied Microbiology and Biotechnology** 36: 800-804.
- Schreuder, R., P.J.M. Snijders, A.P. Wouters, A. Steg and J.N. Kariuki. 1993. **Variation in OM Digestibility, CP, Yield and Ash Content of Napier Grass (*Pennisetum purpureum*) and Their Prediction from Chemical and Environmental Factor**. Research report. National Animal Husbandry Research Station, Naivasha Kenya.
- Seadi, T.A., D. Rutz, H. Prassl, M. Köttner, T. Finsterwalder, S. Volk and R. Janssen. 2008. **Biogas Handbook**. University of Southern Denmark Esbjerg, Denmark.
- Shiralipour, A. and P.H. Smith. 1984. Conversion of biomass into methane gas. **Biomass** 6: 81-92.
- Sinbuathong, N., P. Sirirote, B. Sillapacharoenkul, J. Munakata-Marr and S. Chulalaksananukul. 2012. Biogas production from two-stage anaerobic digestion of *Jatropha curcas* seed cake. **Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects** 34 (2012): 2048–2056.
- Skerman, P.J. and F. Riveros. 1990. **Tropical Grasses**. FAO, Rome.

Tong, X., L.H. Smith and P.L. McCarty. 1989. Methane fermentation of selected lignocellulosic Materials. **Biomass** 21 (1990): 239-255.

Wilkie, A., M. Goto, F.M. Bordeaux and P.H. Smith. 1986. Enhancement of anaerobic methanogenesis from napier grass by addition of micronutrients. **Biomass** 11 (1986): 135-146.

Wijitphan, S. and P. Lowilai. 2011. Effects of Cutting Interval on Yields and Nutritive Values of King Napier Grass (*Pennisetum purpureum* cv. *King grass*) under Irrigation Supply. **KKU Research Journal** 16 (3): 215-224.

Woodard, K.R. and G.M. Prine. 1991. Forage yield and quality of elephant grass as affected by harvesting frequency and genotype. **Agron. Journal** 83:541-546.

Yu, H.Q. and H.H.P. Fang. 2002. Acidogenesis of dairy wastewater at various pH levels. **Water Science and Technology** 45: 201–206.

Zaher, U., D. Cheong, B. Wu and S. Chen. 2007. **Producing Energy and Fertilizer from Organic Municipal Solid Waste**. Ecology Publication, Department of Biological Systems Engineering, Washington State University.

Zoetemeyer, R.J., J.C. Vandenheuvel and A. Cohen. 1982. pH influence on acidogenic dissimilation of glucose in an anaerobic digester. **Water Research** 16: 303–311.





ตารางผนวกที่ ก1 ปริมาณก๊าซทั้งหมด (Total gas) ปริมาณก๊าซมีเทน (%CH₄) และปริมาณก๊าซมีเทน (CH₄ production) ที่สภาวะมาตรฐานจากการหมัก
 หน้ําเนเปียร์อายุการตัด 30 วัน

Day	Total gas (ml/day)					%CH ₄					CH ₄ production (ml at STP/day)				
	Organic loading rate (kgCOD/m ³ .day)					Organic loading rate (kgCOD/m ³ .day)					Organic loading rate (kgCOD/m ³ .day)				
	0.48	0.72	0.97	1.21	1.45	0.48	0.72	0.97	1.21	1.45	0.48	0.72	0.97	1.21	1.45
1	0	0	0	0	0	12.38	15.73	10.92	10.92	17.98	0	0	0	0	0
2	930	0	0	820	1600	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	939	920	1097	1411	1870	15.14	16.73	16.91	16.91	25.95	129	140	169	333	504
4	1179	935	1175	1561	1444	17.98	23.07	20.08	20.08	28.46	193	196	215	404	458
6	2272	1929	1122	1619	1553	23.09	30.58	28.86	28.86	35.35	477	537	295	521	529
7	1316	1072	1270	1862	1735	19.52	31.12	28.70	28.70	38.25	234	304	332	648	750
8	1105	1215	1284	1887	1571	25.88	33.90	33.90	33.90	45.12	260	375	396	775	589
9	1311	1170	1167	1785	2432	24.10	39.08	42.00	42.00	45.58	287	416	446	740	872
11	1106	1389	1037	2395	1591	41.60	47.42	51.68	51.68	50.02	419	599	488	1090	774
13	1211	1547	474	2100	2312	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	1089	1698	1719	2150	1968	46.38	48.53	51.24	51.24	53.01	459	750	801	1037	802
15	1230	1688	1586	2267	1550	43.75	47.37	49.31	49.31	50.89	490	727	711	1050	552
16	1243	1539	1616	1880	1737	45.62	49.03	49.93	49.93	51.88	516	686	734	887	643
17	1058	1696	1617	2067	1737	47.62	51.28	47.29	47.29	53.03	458	791	696	997	574
19	1063	1812	1832	1859	2108	52.71	47.63	49.35	49.35	43.03	510	785	823	728	603

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Day	Total gas (ml/day)					%CH ₄					CH ₄ production (ml at STP/day)				
	Organic loading rate (kgCOD/m ³ .day)					Organic loading rate (kgCOD/m ³ .day)					Organic loading rate (kgCOD/m ³ .day)				
	0.48	0.72	0.97	1.21	1.45	0.48	0.72	0.97	1.21	1.45	0.48	0.72	0.97	1.21	1.45
20	1355	1712	1425	1413	1880	47.86	49.17	48.81	48.81	40.76	590	766	633	524	525
21	1329	1576	1305	1000	3175	47.83	49.16	48.41	48.41	37.64	578	705	575	342	750
22	1149	1282	1054	1563	3318	48.29	51.16	47.40	47.40	40.25	505	597	455	572	938
23	1112	1200	909	1644	4237	50.56	53.71	47.45	47.45	39.37	511	586	392	589	1148
24	1290	1267	970	1741	4503	47.05	51.80	47.30	47.30	34.09	552	597	417	540	779
26	1437	1737	591	1560	4537	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
27	1223	1108	1911	1698	2684	32.94	50.80	39.02	39.02	23.74	367	512	678	367	711
28	1243	2586	914	1954	4733	32.25	19.79	39.02	39.02	36.77	365	466	324	654	1475
29	1408	1340	1096	1530	3858	34.18	43.71	37.74	37.74	36.76	438	533	376	512	1188
30	1184	2106	816	1518	2272	29.60	34.73	40.76	40.76	7.14	319	665	303	99	599
31	686	2103	1478	1371	2000	25.29	30.49	36.77	36.77	35.21	158	583	494	439	528
33	1803	1016	1226	1600	1106	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
34	3439	1073	556	1425	2418	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
35	-	477	463	1071	1918	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
36	-	-	-	1494	2016	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
37	-	1635	1136	1550	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Day	Total gas (ml/day)					%CH ₄					CH ₄ production (ml at STP/day)				
	Organic loading rate (kgCOD/m ³ .day)					Organic loading rate (kgCOD/m ³ .day)					Organic loading rate (kgCOD/m ³ .day)				
	0.48	0.72	0.97	1.21	1.45	0.48	0.72	0.97	1.21	1.45	0.48	0.72	0.97	1.21	1.45
38	2723	1312	2198	1670	1685	23.12	23.80	26.14	26.14	26.14	573	284	523	397	622
39	2146	1349	1072	1637	1748	27.26	36.81	31.18	31.18	49.42	532	452	304	736	757
41	1787	1092	1318	-	2079	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
42	2283	1452	1490	2142	2271	41.27	51.63	46.96	46.96	51.34	857	682	637	1000	1069
43	1295	1355	1316	1810	2161	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
44	1210	1369	2457	1910	1934	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
45	1824	1327	1378	1763	2815	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
46	1914	1361	1986	1968	2822	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
47	1531	1256	2151	1896	2559	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
48	1867	1240	1706	1934	1817	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
49	2051	1489	2011	1761	2325	26.52	45.15	50.83	50.83	49.93	495	612	930	800	820
50	1817	1445	1652	2035	2308	-	-	-	-	-	369	489	628	776	805
51	1757	1435	2282	2774	4496	-	-	-	-	-	357	486	867	1058	1567
52	1798	1222	2380	2663	4762	16.53	40.61	39.38	29.97	29.97	270	451	853	726	759
54	1719	1408	1668	1832	2032	-	-	-	-	-	349	477	634	699	708
55	1598	1251	1675	1750	2676	-	-	-	-	-	325	423	636	668	933

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Day	Total gas (ml/day)					%CH ₄					CH ₄ production (ml at STP/day)				
	Organic loading rate (kgCOD/m ³ .day)					Organic loading rate (kgCOD/m ³ .day)					Organic loading rate (kgCOD/m ³ .day)				
	0.48	0.72	0.97	1.21	1.45	0.48	0.72	0.97	1.21	1.45	0.48	0.72	0.97	1.21	1.45
56	1878	1315	1642	1870	4620	23.24	48.50	49.05	49.73	49.73	397	580	733	846	1856
57	1814	1238	1542	1879	4581	-	-	-	-	-	369	419	586	717	1597
58	1969	1124	1564	1856	4870	12.83	40.20	48.74	39.79	39.79	230	411	694	672	1336
59	2055	1381	1642	1868	2823	-	-	-	-	-	418	467	624	713	984
61	-	-	-	1707	2294	-	-	-	-	-	-	-	-	651	800
62	856	1206	2275	1658	2344	-	-	-	-	-	174	408	864	633	817
63	916	1335	1652	1754	2198	24.87	39.31	51.30	45.09	45.09	207	477	771	720	957
64	868	1993	4780	4734	2414	23.30	26.62	22.64	31.24	31.24	184	483	985	1345	811
65	832	1445	1622	1842	2394	-	-	-	-	-	169	489	616	703	835
66	721	1265	1591	1846	2377	26.93	36.30	40.43	44.18	44.18	177	418	585	742	776
68	755	1014	1330	1748	2219	-	-	-	-	-	153	343	505	667	774
70	759	1114	1436	1703	2335	-	-	-	-	-	154	377	546	650	814
71	862	1188	1475	1798	2276	23.66	37.75	39.46	37.65	37.65	186	408	530	616	808
72	813	1218	1408	1705	2454	24.82	40.72	42.01	43.10	43.10	184	451	538	669	891
73	781	1135	1427	1742	2244	27.00	37.15	42.25	44.97	44.97	192	384	549	713	856
75	768	1199	1425	1849	2396	-	-	-	-	-	156	406	541	705	835

ตารางผนวกที่ ก1 (ต่อ)

Day	Total gas (ml/day)					%CH ₄					CH ₄ production (ml at STP/day)				
	Organic loading rate (kgCOD/m ³ .day)					Organic loading rate (kgCOD/m ³ .day)					Organic loading rate (kgCOD/m ³ .day)				
	0.48	0.72	0.97	1.21	1.45	0.48	0.72	0.97	1.21	1.45	0.48	0.72	0.97	1.21	1.45
76	711	1313	1498	1865	2122	-	-	-	-	-	144	444	569	711	740
77	769	1089	1435	1735	2329	22.74	35.03	42.28	47.23	47.23	159	347	552	745	795
78	623	1210	1375	1662	2480	-	-	-	-	-	127	410	522	634	865
79	691	1111	1476	1700	2390	24.72	38.45	36.98	46.62	46.62	155	389	497	721	806
80	769	1156	1328	1697	2290	-	-	-	-	-	156	391	505	647	798
81	812	1238	1396	4465	2238	-	-	-	-	-	165	419	530	1703	780
83	634	1228	1472	1912	2362	-	-	-	-	-	129	416	559	729	823
84	838	1658	1318	1880	1998	17.38	25.87	46.59	43.63	43.63	133	390	559	746	943

หมายเหตุ 1. ศูนย์ คือ ปริมาตรก๊าซเป็นศูนย์

2. - คือ ไม่มีการบันทึกข้อมูล

3. วันที่ไม่มีการบันทึกปริมาณก๊าซมีเทน (%CH₄) ให้ใช้ค่าเฉลี่ยปริมาณก๊าซมีเทนช่วงระยะคงที่ (วันที่ 55-84) ในการคำนวณปริมาณก๊าซมีเทน

ตารางผนวกที่ ก2 COD ของสารละลายผสมหุ้เนเปียร์อายุการตัด 30 วันที่ผ่านออกจากระบบ

Day	COD at steady state (mg/L)				
	Organic loading rate (kgCOD/m ³ .day)				
	0.48	0.72	0.97	1.21	1.45
66	7465	6395	6015	5870	5260
72	7380	6235	6070	5990	5060
77	7355	6130	6070	5910	5055
79	7460	6270	5995	5985	5420
84	7380	6315	5990	5785	5105
Average	7408	6269	6028	5908	5180

ตารางผนวกที่ ก3 TVS ของสารละลายผสมหุ้เนเปียร์อายุการตัด 30 วันที่ผ่านออกจากระบบ

Day	TVS at steady state (mg/L)				
	Organic loading rate (kgCOD/m ³ .day)				
	0.48	0.72	0.97	1.21	1.45
66	4740	4260	4160	3940	3560
72	4600	4300	4120	3900	3500
77	4740	4240	4160	4010	3590
79	4640	4360	4140	3960	3560
84	4580	4340	4180	4060	3580
Average	4660	4300	4152	3974	3558

ตารางผนวกที่ 4 pH ในถังหมักกรด และถังสร้างมีเทนจากการหมักสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์อายุการตัด 30 วัน

Day	pH of acidogenic reactor					pH of methanogenic reactor				
	Organic loading rate (kgCOD/m ³ .day)					Organic loading rate (kgCOD/m ³ .day)				
	0.48	0.72	0.97	1.21	1.45	0.48	0.72	0.97	1.21	1.45
1	4.89	4.83	4.80	4.90	5.11	7.18	7.00	7.11	7.27	6.85
4	4.91	4.89	4.92	4.98	5.18	8.19	7.30	7.45	7.31	7.06
6	4.96	4.88	4.97	5.08	5.20	7.55	7.28	7.26	7.20	7.06
7	4.84	4.85	4.88	4.98	5.27	7.68	7.24	7.37	7.19	7.03
8	4.86	4.81	4.91	4.92	5.20	7.50	7.65	7.68	7.31	7.35
9	4.82	4.79	4.98	4.95	5.06	7.30	7.27	7.21	7.21	7.17
11	4.87	4.78	4.89	4.75	4.82	7.61	7.48	7.66	7.23	7.37
13	4.90	4.80	4.84	4.81	4.95	8.48	7.39	7.30	7.36	7.18
14	4.94	4.83	4.85	4.78	4.95	8.34	7.47	7.46	7.60	7.33
15	4.97	4.84	4.84	4.90	5.07	8.12	7.58	7.46	7.49	7.43
16	4.99	4.85	4.84	4.82	5.04	8.07	7.73	7.56	7.07	7.43
17	4.97	4.84	4.84	4.90	5.03	7.75	7.49	7.39	7.40	7.24
19	5.06	4.88	4.89	4.91	5.32	7.71	7.45	7.30	7.22	7.35
20	5.07	4.87	4.86	4.90	5.59	8.10	7.50	7.48	7.28	7.30
21	5.13	4.92	4.90	4.91	5.78	8.52	7.57	7.47	7.24	7.24
22	5.17	4.94	4.90	4.93	5.91	8.04	7.62	7.38	7.18	7.30

ตารางผนวกที่ ก4 (ต่อ)

Day	pH of acidogenic reactor					pH of methanogenic reactor				
	Organic loading rate (kgCOD/m ³ .day)					Organic loading rate (kgCOD/m ³ .day)				
	0.48	0.72	0.97	1.21	1.45	0.48	0.72	0.97	1.21	1.45
23	5.21	4.94	4.98	4.92	6.05	8.11	7.68	7.47	7.08	7.15
24	5.19	4.88	4.92	4.90	6.16	7.56	7.51	7.28	7.16	7.15
26	5.21	4.89	4.83	4.86	6.22	7.75	7.33	7.11	6.91	7.01
27	5.29	4.88	4.83	4.83	6.20	7.72	7.42	7.14	7.04	7.05
28	5.35	4.82	4.80	4.83	5.94	7.93	7.52	7.74	7.04	7.04
29	5.40	4.86	4.81	4.80	5.36	7.72	7.51	7.84	6.97	7.02
30	5.49	4.90	4.80	4.81	5.24	7.86	7.47	7.71	7.03	7.04
31	5.68	4.85	4.80	4.83	5.18	7.54	7.31	7.65	6.96	7.09
33	6.11	4.80	4.77	4.82	5.16	7.45	7.20	7.33	6.87	6.98
34	6.19	4.82	4.80	4.80	5.02	8.08	7.63	8.19	7.82	7.45
35	6.30	4.84	4.80	4.82	5.06	7.82	7.35	7.50	7.12	7.11
36	6.37	4.86	4.80	4.83	5.09	7.73	7.29	7.37	7.02	7.00
37	6.29	4.81	4.76	4.80	5.01	7.76	7.23	7.38	6.88	6.90
38	6.27	4.81	4.78	4.80	5.04	7.59	7.21	7.08	6.85	6.84
39	6.20	4.83	4.77	4.80	5.00	7.49	7.17	6.93	6.80	6.77
41	6.24	4.80	4.76	4.82	5.01	7.41	7.16	6.83	6.72	6.68

ตารางผนวกที่ ก4 (ต่อ)

Day	pH of acidogenic reactor					pH of methanogenic reactor				
	Organic loading rate (kgCOD/m ³ .day)					Organic loading rate (kgCOD/m ³ .day)				
	0.48	0.72	0.97	1.21	1.45	0.48	0.72	0.97	1.21	1.45
42	6.22	4.82	4.77	4.84	5.04	7.50	7.20	6.81	6.73	6.66
43	6.20	4.85	4.79	4.86	5.03	7.47	7.16	6.77	6.73	6.64
44	6.23	4.90	4.77	4.83	5.00	7.43	7.09	6.77	6.63	6.57
45	6.16	4.85	4.80	4.80	5.00	7.61	7.16	6.77	6.70	6.61
46	6.24	4.85	4.83	4.76	5.04	7.47	7.15	6.79	6.68	6.57
47	6.25	4.83	4.84	4.73	5.01	7.43	7.20	6.83	6.71	6.61
48	6.26	4.84	4.83	4.72	5.02	7.62	7.12	6.81	6.71	6.57
49	6.32	4.83	4.83	4.72	5.00	7.69	7.20	6.75	6.72	6.57
50	6.29	4.82	4.83	4.70	4.95	7.68	7.19	6.75	6.71	6.59
51	6.30	4.82	4.82	4.71	4.90	7.80	7.25	6.84	6.72	6.56
52	6.27	4.81	4.79	4.72	4.90	7.42	7.05	6.69	6.65	6.55
56	6.21	4.82	4.80	4.73	4.90	7.54	7.15	6.76	6.61	6.50
57	6.19	4.93	4.84	4.88	5.01	7.45	7.09	6.79	6.61	6.51
58	6.18	4.93	4.81	4.86	4.97	7.41	7.01	6.77	6.58	6.46
59	6.08	4.95	4.85	4.89	5.00	7.24	6.95	6.70	6.52	6.42
61	6.00	4.94	4.87	4.93	5.01	7.65	7.10	6.77	6.51	6.46

ตารางผนวกที่ ก4 (ต่อ)

Day	pH of acidogenic reactor					pH of methanogenic reactor				
	Organic loading rate (kgCOD/m ³ .day)					Organic loading rate (kgCOD/m ³ .day)				
	0.48	0.72	0.97	1.21	1.45	0.48	0.72	0.97	1.21	1.45
62	6.01	4.92	4.88	4.91	5.00	7.42	7.00	6.77	6.51	6.45
63	6.07	4.99	4.92	4.99	5.02	7.61	7.09	6.74	6.55	6.49
64	6.06	4.98	4.91	4.99	5.01	7.50	7.02	6.69	6.51	6.47
65	6.01	5.07	5.06	5.36	5.25	7.50	7.02	6.69	6.54	6.47
66	6.01	5.08	5.16	5.32	5.31	7.49	6.97	6.66	6.52	6.42
68	6.09	5.13	5.22	5.30	5.29	7.36	6.92	6.61	6.47	6.33
70	6.12	5.14	5.24	5.21	5.28	7.54	7.10	6.68	6.48	6.34
71	6.09	5.13	5.27	5.15	5.28	7.62	7.01	6.70	6.54	6.38
72	6.12	5.14	5.33	5.13	5.27	7.50	6.96	6.68	6.50	6.39
73	6.16	5.19	5.41	5.16	5.30	7.40	6.91	6.62	6.47	6.40
75	6.15	5.21	5.47	5.20	5.31	7.47	6.91	6.57	6.40	6.38
76	6.15	5.25	5.56	5.26	5.37	7.66	7.20	6.72	6.52	6.44
77	6.20	5.33	5.64	5.36	5.49	7.66	7.21	6.69	6.54	6.48
78	6.19	5.37	5.68	5.41	5.54	7.64	7.00	6.64	6.46	6.46
79	6.15	5.40	5.65	5.40	5.51	7.58	7.04	6.71	6.54	6.51
80	6.24	5.34	5.45	5.44	5.61	7.69	6.97	6.63	6.56	6.49

ตารางผนวกที่ ก4 (ต่อ)

Day	pH of acidogenic reactor					pH of methanogenic reactor				
	Organic loading rate (kgCOD/m ³ .day)					Organic loading rate (kgCOD/m ³ .day)				
	0.48	0.48	0.72	0.97	1.21	0.48	0.48	0.72	0.97	1.21
81	6.20	5.38	5.51	5.45	5.55	7.50	6.99	6.64	6.56	6.46
83	6.01	5.07	5.06	5.36	5.25	7.55	6.98	6.65	6.52	6.48
84	6.01	5.08	5.16	5.32	5.31	7.79	7.15	6.66	6.52	6.47



ตารางผนวกที่ ข1 ปริมาตรก๊าซทั้งหมด (Total gas) ปริมาณก๊าซมีเทน (%CH₄) และปริมาณก๊าซมีเทน (CH₄ production) ที่สภาวะมาตรฐานจากการหมักหมย้านเป็ยร์อายุการตัด 45 วัน

Day	Total gas (ml/day)					%CH ₄					CH ₄ production (ml at STP/day)				
	Organic loading rate (kgCOD/m ³ .day)					Organic loading rate (kgCOD/m ³ .day)					Organic loading rate (kgCOD/m ³ .day)				
	0.60	0.90	1.20	1.50	1.80	0.60	0.90	1.20	1.50	1.80	0.60	0.90	1.20	1.50	1.80
1	918	1025	1263	1656	1282	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	926	1263	1017	950	1523	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	975	1182	1117	1222	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	1698	1375	1119	2857	2328	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	735	1381	1218	2200	2306	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	1082	1427	1363	2062	2026	28.68	39.70	42.96	37.41	25.76	282	515	533	702	475
9	1181	1422	1619	2164	2164	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	942	1048	1438	1110	1110	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	950	1050	1306	1145	1145	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13	774	911	1291	3284	2106	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	0	0	1380	1113	0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	931	1010	1233	3177	2040	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16	1174	932	1431	3624	1810	44.23	48.71	54.88	52.75	50.48	472	413	714	-	831
17	1171	853	1269	2629	1666	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
18	962	815	1223	1278	1939	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

Day	Total gas (ml/day)					%CH ₄					CH ₄ production (ml at STP/day)				
	Organic loading rate (kgCOD/m ³ .day)					Organic loading rate (kgCOD/m ³ .day)					Organic loading rate (kgCOD/m ³ .day)				
	0.60	0.90	1.20	1.50	1.80	0.60	0.90	1.20	1.50	1.80	0.60	0.90	1.20	1.50	1.80
19	860	781	1086	1263	2068	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
21	792	881	1218	2264	2408	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
22	742	965	1219	1795	1985	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
23	1005	845	1336	1812	2096	29.67	48.28	49.95	54.41	29.50	271	371	607	897	563
24	759	817	1286	1974	2172	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
27	699	805	1262	1457	1612	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
28	918	943	1368	2209	2455	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
29	721	985	1244	2170	2390	32.73	48.81	49.63	48.67	38.13	215	437	562	961	829
30	818	1060	1228	2863	2032	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
31	786	854	1328	3137	2095	32.73	35.79	50.51	50.81	41.12	234	278	610		784
33	782	996	1284	2278	2264	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
34	754	959	1222	2058	2120	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
35	716	982	1180	1958	2015	27.94	47.63	47.97	47.93	45.13	182	426	515	854	827
36	748	973	1202	1623	1944	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
37	746	930	1221	1836	2054	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
38	698	891	1280	1756	2273	30.72	48.99	47.81	47.43	50.08	195	397	557	758	

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

Day	Total gas (ml/day)					%CH ₄					CH ₄ production (ml at STP/day)				
	Organic loading rate (kgCOD/m ³ .day)					Organic loading rate (kgCOD/m ³ .day)					Organic loading rate (kgCOD/m ³ .day)				
	0.60	0.90	1.20	1.50	1.80	0.60	0.90	1.20	1.50	1.80	0.60	0.90	1.20	1.50	1.80
39	713	900	1287	1933	2432	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
40	714	959	1298	1720	2383	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
41	756	970	1242	1800	2359	18.10	37.64	30.82	38.18	36.45	124	332	348	625	782
42	612	872	1211	1870	2122	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
43	708	910	1312	1810	2214	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
44	809	934	1412	1850	2180	20.55	36.99	33.62	29.89	37.17	151	314	432	503	737
45	722	960	1436	1790	2175	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
47	735	1349	1644	2072	2412	36.71	28.42	26.88	32.14	32.76	245	349	402	606	719
48	680	1015	1553	1862	2231	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
49	650	1218	1556	2096	2196	18.48	30.06	24.08	24.49	29.12	109	333	341	467	582
50	652	1074	1315	1628	2095	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
51	698	1135	1412	1712	2480	21.91	25.60	34.36	39.13	25.73	139	264	441	609	581
52	712	1162	1394	1796	2270	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
53	641	1084	1311	1824	2768	21.29	49.81	38.76	32.32	20.82	124	491	462	536	524
55	643	1276	1363	1775	2292	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
58	610	1467	0	0	1513	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

Day	Total gas (ml/day)					%CH ₄					CH ₄ production (ml at STP/day)				
	Organic loading rate (kgCOD/m ³ .day)					Organic loading rate (kgCOD/m ³ .day)					Organic loading rate (kgCOD/m ³ .day)				
	0.60	0.90	1.20	1.50	1.80	0.60	0.90	1.20	1.50	1.80	0.60	0.90	1.20	1.50	1.80
60	522	979	0	1133	1721	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
61	510	1230	1112	1386	1615	22.57	30.50	34.79	22.24	22.12	105	341	352	280	325
62	764	1463	718	1235	1461	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
64	463	1164	1110	1345	1617	26.65	38.86	31.49	31.15	31.39	112	412	318	381	462
65	512	1396	1215	1434	1681	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
67	649	1078	1400	1630	2240	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
71	1016	1363	1520	2078	2800	10.14	33.04	34.18	31.34	31.83	94	410	473	592	811
72	1054	1215	1380	2143	2560	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
73	1126	1310	1428	1941	2661	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
74	976	1278	1612	2092	2729	24.74	42.24	45.82	44.56	41.55	220	491	672	848	1032
75	967	1356	1503	1918	2667	23.48	38.30	44.87	46.20	42.46	207	472	614	806	1030
76	1014	1440	1533	2274	2765	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
77	850	1112	1493	2154	2760	27.16	40.63	50.15	44.62	40.69	210	411	681	874	1022
78	771	1384	1616	2180	2847	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
79	951	1290	1391	2283	2774	24.50	43.78	56.45	45.12	43.32	212	514	714	937	1093
81	975	1244	1448	2125	2472	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

Day	Total gas (ml/day)					%CH ₄					CH ₄ production (ml at STP/day)				
	Organic loading rate (kgCOD/m ³ .day)					Organic loading rate (kgCOD/m ³ .day)					Organic loading rate (kgCOD/m ³ .day)				
	0.60	0.90	1.20	1.50	1.80	0.60	0.90	1.20	1.50	1.80	0.60	0.90	1.20	1.50	1.80
82	932	1255	1467	2154	2618	23.79	42.48	51.2	45.53	45.47	202	485	683	892	1083
83	900	1215	1543	2052	2531	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
84	895	1295	1681	2000	2555	23.11	43.44	52.21	44.68	40.26	188	512	798	813	936
85	956	1324	1500	1981	2750	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
86	1052	1311	1489	2147	2582	25.31	41.48	51.87	43.09	41.39	242	495	703	842	972
88	935	1286	1515	2118	2419	-	-	-	-	-	208	474	699	844	906
89	1114	1312	1496	2056	2322	21.57	40.25	52.69	44.82	42.88	219	480	717	838	906
90	1054	1280	1530	1917	2228	-	-	-	-	-	234	472	706	764	835
91	1130	1216	1600	1820	2256	25.17	41.98	50.5	46.60	39.25	259	464	735	772	806
92	1158	1288	1519	2015	2189	-	-	-	-	-	257	475	701	803	820
93	1025	1187	1492	2040	2045	28.68	40.86	48.22	43.92	37.41	267	441	655	815	696
95	990	1205	1526	1974	2230	-	-	-	-	-	220	444	704	786	835
96	844	1116	1426	1815	2122	21.24	38.34	51.93	42.08	41.89	163	389	674	695	809
97	955	1140	1590	1995	2022	32.80	41.49	50.44	40.88	46.72	285	430	730	742	859
99	880	1188	1525	1845	2108	-	-	-	-	-	196	438	704	735	790
102	955	1198	1642	1673	-	-	-	-	-	-	212	442	758	666	-

ตารางผนวกที่ ข1 (ต่อ)

Day	Total gas (ml/day)					%CH ₄					CH ₄ production (ml at STP/day)				
	Organic loading rate (kgCOD/m ³ .day)					Organic loading rate (kgCOD/m ³ .day)					Organic loading rate (kgCOD/m ³ .day)				
	0.60	0.90	1.20	1.50	1.80	0.60	0.90	1.20	1.50	1.80	0.60	0.90	1.20	1.50	1.80
103	1070	1270	1516	1840	1956	-	-	-	-	-	238	468	700	733	733
104	1040	1200	1476	1998	1840	-	-	-	-	-	231	442	681	796	689
105	951	1220	1576	1915	2025	29.92	38.68	49.91	44.72	41.07	259	429	716	779	757
106	998	1195	1510	1894	2116	-	-	-	-	-	222	441	697	755	793
107	910	1118	1590	1795	1956	18.06	41.80	52.06	46.33	42.85	150	425	753	757	763
109	995	1198	1585	1874	2075	-	-	-	-	-	221	442	732	747	777
110	838	1160	1567	1816	2256	22.38	38.70	50.4	40.72	40.34	171	408	718	673	828
111	887	1059	1598	1791	2150	-	-	-	-	-	197	390	738	714	805
112	908	1117	1532	1815	2014	20.81	39.97	49.37	42.22	40.00	172	406	688	697	733
113	810	1094	1447	1746	1996	20.78	38.59	51.81	46.33	39.14	153	384	682	736	711
114	944	1188	1547	1782	2002	-	-	-	-	-	210	438	714	710	750
115	1021	1199	1564	1812	2162	-	-	-	-	-	227	442	722	722	810

หมายเหตุ 1. ศูนย์ คือ ปริมาตรก๊าซเป็นศูนย์

2. - คือ ไม่มีการบันทึกข้อมูล

3. วันที่ไม่มีการบันทึกปริมาณก๊าซมีเทน (%CH₄) ให้ใช้ค่าเฉลี่ยปริมาณก๊าซมีเทนช่วงระยะคงที่ (วันที่ 86-115) ในการคำนวณปริมาณก๊าซมีเทน

ตารางผนวกที่ ข2 COD ของสารละลายผสมหุ้่นเนเปียร์อายุการตัด 45 วันที่ผ่านออกจากระบบ

Day	COD at steady state (mg/L)				
	Organic loading rate (kgCOD/m ³ .day)				
	0.60	0.90	1.20	1.50	1.80
91	3865	5000	5930	6540	7330
97	3725	5200	6040	6620	7325
105	4050	4980	5975	6570	7630
110	3920	4930	5815	6510	7210
113	3765	4890	5895	6460	7150
Average	3865	5000	5931	6540	7329

ตารางผนวกที่ ข3 TVS ของสารละลายผสมหุ้่นเนเปียร์อายุการตัด 45 วันที่ผ่านออกจากระบบ

Day	TVS at steady state (mg/L)				
	Organic loading rate (kgCOD/m ³ .day)				
	0.60	0.90	1.20	1.50	1.80
91	4460	5590	6830	7690	8760
97	4840	5640	6880	7280	8500
105	4120	5660	6660	7740	8700
110	4060	5080	6760	7840	9060
113	4800	5980	7000	7880	8780
Average	4456	5590	6826	7686	8760

ตารางผนวกที่ ข4 pH ในถังหมักกรด และถังสร้างมีเทนจากการหมักสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์อายุการตัด 45 วัน

Day	pH of acidogenic reactor					pH of methanogenic reactor				
	Organic loading rate (kgCOD/m ³ .day)					Organic loading rate (kgCOD/m ³ .day)				
	0.60	0.90	1.20	1.50	1.80	0.60	0.90	1.20	1.50	1.80
1	5.64	5.59	5.08	4.93	5.04	7.79	7.80	7.55	7.48	7.35
2	5.75	5.66	5.15	4.97	5.08	7.95	7.76	7.53	7.52	7.29
3	5.87	5.72	5.18	4.99	5.10	7.74	7.59	7.40	7.41	7.28
5	5.91	5.75	5.24	5.02	5.14	7.78	7.56	7.37	7.35	7.15
7	5.95	5.71	5.14	4.94	5.10	7.95	7.88	7.39	7.35	7.17
8	5.96	5.83	5.23	5.02	5.20	7.80	7.78	7.50	7.36	7.14
9	6.09	5.97	5.41	5.17	5.34	7.79	7.68	7.40	7.31	7.11
10	6.04	5.91	5.37	5.16	5.32	7.65	7.62	7.27	7.15	6.97
11	6.02	5.93	5.48	5.26	5.42	7.57	7.50	7.27	7.04	6.86
13	5.84	5.70	5.29	5.07	5.25	7.58	7.44	7.21	7.02	6.79
15	6.11	5.97	5.57	5.37	5.54	7.83	7.61	7.36	7.09	6.90
16	6.07	6.02	5.62	5.40	5.59	7.83	7.57	7.35	7.14	6.92
17	6.19	6.14	5.73	5.35	5.51	7.83	7.45	7.25	7.10	6.90
18	5.92	5.83	5.56	5.19	5.37	7.84	7.62	7.43	7.18	5.90
19	6.21	6.02	5.91	5.48	5.65	7.87	7.38	7.23	7.06	6.80
21	6.18	6.10	5.79	5.55	5.51	7.86	7.37	7.20	7.07	6.88

ตารางผนวกที่ ข4 (ต่อ)

Day	pH of acidogenic reactor					pH of methanogenic reactor				
	Organic loading rate (kgCOD/m ³ .day)					Organic loading rate (kgCOD/m ³ .day)				
	0.60	0.90	1.20	1.50	1.80	0.60	0.90	1.20	1.50	1.80
22	6.11	6.13	5.67	5.64	5.50	7.88	7.42	7.18	7.17	6.84
23	5.78	5.85	5.31	5.47	5.35	8.05	7.58	7.21	7.12	6.85
24	6.08	6.12	5.48	5.73	5.41	7.55	7.27	6.97	6.90	6.85
27	5.83	5.75	5.11	5.83	4.95	8.06	7.70	7.03	6.86	6.81
28	5.68	5.79	5.34	5.55	5.00	8.06	7.50	6.94	6.79	6.71
29	5.89	6.04	5.43	5.54	5.10	8.19	7.34	6.86	6.74	6.72
30	5.90	5.94	5.42	5.31	5.02	8.02	7.38	6.86	6.79	6.75
31	5.94	5.94	5.45	5.19	5.01	7.97	7.24	6.87	6.86	6.76
33	5.75	5.66	5.60	4.97	4.92	8.25	7.60	7.08	6.91	6.77
34	5.94	5.78	5.65	4.99	4.95	8.08	7.46	6.84	6.81	6.67
35	5.87	5.65	5.54	4.92	4.80	7.87	7.45	6.80	6.77	6.57
36	5.84	5.62	5.45	4.89	4.75	8.12	7.42	6.77	6.76	6.57
37	5.94	5.62	5.59	4.99	4.81	8.10	7.42	6.87	6.79	6.58
38	5.75	5.43	5.38	4.82	4.59	7.89	7.21	6.80	6.68	6.48
39	5.81	5.41	5.06	4.76	4.57	7.72	7.14	6.74	6.62	6.43
40	5.79	5.27	5.05	4.56	4.49	7.74	7.13	6.72	6.58	6.34

ตารางผนวกที่ ข4 (ต่อ)

Day	pH of acidogenic reactor					pH of methanogenic reactor				
	Organic loading rate (kgCOD/m ³ .day)					Organic loading rate (kgCOD/m ³ .day)				
	0.60	0.90	1.20	1.50	1.80	0.60	0.90	1.20	1.50	1.80
41	5.81	5.26	4.70	4.68	4.63	7.73	7.34	6.65	6.65	6.38
42	5.85	5.27	4.64	4.64	4.65	7.88	7.34	6.80	6.64	6.36
43	5.75	5.20	4.57	4.54	4.56	8.02	7.59	6.78	6.63	6.37
44	5.90	5.26	4.65	4.66	4.69	8.03	7.32	6.76	6.64	6.37
45	5.80	5.16	4.62	4.64	4.69	7.85	7.16	6.70	6.53	6.31
47	5.80	5.11	4.65	4.64	4.71	7.86	7.11	6.72	6.56	6.33
48	5.86	5.13	4.74	4.70	4.81	8.01	7.43	6.84	6.69	6.39
49	5.80	5.14	4.71	4.66	4.72	8.03	7.17	6.74	6.60	6.26
50	5.91	5.17	4.79	4.74	4.79	7.88	7.15	6.71	6.56	6.25
51	6.00	5.19	4.81	4.77	4.81	7.68	7.15	6.74	6.64	6.30
52	5.89	5.18	4.72	4.70	4.76	7.92	7.14	6.68	6.69	6.21
53	5.80	5.02	4.55	4.52	4.60	7.72	6.92	6.60	6.60	6.13
55	5.81	5.63	5.77	5.73	5.76	5.81	7.40	6.64	6.48	5.98
58	5.90	5.82	5.72	5.84	5.75	8.39	8.08	7.86	7.70	7.72
60	5.83	5.66	5.56	5.36	5.47	8.36	8.09	7.84	7.63	7.55
61	5.90	5.78	5.59	5.28	5.52	8.35	8.32	8.03	7.90	7.70

ตารางผนวกที่ ข4 (ต่อ)

Day	pH of acidogenic reactor					pH of methanogenic reactor				
	Organic loading rate (kgCOD/m ³ .day)					Organic loading rate (kgCOD/m ³ .day)				
	0.60	0.90	1.20	1.50	1.80	0.60	0.90	1.20	1.50	1.80
62	5.89	5.85	5.52	5.24	5.51	8.96	8.83	8.31	8.07	7.77
64	5.82	5.82	5.25	5.01	4.92	8.30	8.20	7.88	7.82	7.75
65	5.86	5.86	5.29	5.13	5.01	8.01	8.01	7.86	7.64	7.85
67	5.86	5.53	5.24	5.20	5.04	8.39	8.25	7.81	7.94	7.78
71	5.84	5.57	5.11	5.08	5.02	8.32	8.22	7.57	7.49	7.78
72	5.81	5.56	5.18	5.02	5.00	8.35	8.26	7.73	7.76	7.75
73	5.75	5.54	5.05	5.01	4.99	8.35	8.08	7.53	7.55	7.80
74	5.70	5.53	5.00	5.12	5.10	8.17	8.12	7.48	7.47	7.65
75	5.88	5.59	5.46	5.35	5.26	8.18	8.13	7.54	7.43	7.63
76	5.88	5.53	5.27	5.19	5.16	8.16	8.13	7.64	7.49	7.66
77	5.82	5.63	5.52	5.43	5.30	8.12	8.01	7.61	7.61	7.57
78	5.81	5.67	5.52	5.39	5.29	8.12	8.04	7.62	7.49	7.64
79	5.90	5.63	5.59	5.42	5.30	8.11	7.97	7.54	7.46	7.56
81	5.94	5.67	5.55	5.45	5.32	8.18	7.96	7.56	7.37	7.49
82	5.85	5.64	5.41	5.34	5.29	8.01	7.85	7.43	7.16	7.36
83	5.90	5.55	5.42	5.36	5.28	8.03	7.83	7.46	7.30	7.22

ตารางผนวกที่ ข4 (ต่อ)

Day	pH of acidogenic reactor					pH of methanogenic reactor				
	Organic loading rate (kgCOD/m ³ .day)					Organic loading rate (kgCOD/m ³ .day)				
	0.60	0.90	1.20	1.50	1.80	0.60	0.90	1.20	1.50	1.80
84	5.81	5.56	5.33	5.28	5.20	8.05	7.85	7.50	7.23	7.10
85	5.83	5.49	5.31	5.25	5.18	8.09	7.98	7.65	7.11	7.01
86	5.96	5.48	5.30	5.30	5.25	8.03	7.83	7.50	7.06	6.99
88	5.77	5.58	5.29	5.10	5.17	8.11	7.81	7.51	7.09	6.95
89	5.91	5.51	5.28	5.27	5.18	8.18	7.73	7.56	6.97	6.91
90	5.91	5.47	5.25	5.29	5.21	8.25	7.79	7.61	6.96	6.87
91	5.94	5.46	5.25	5.21	5.20	8.01	7.80	7.53	6.99	6.89
92	5.98	5.46	5.28	5.21	5.19	8.11	7.96	7.62	6.92	6.74
93	5.99	5.39	5.30	5.20	5.15	8.11	7.98	7.66	6.86	6.74
95	6.00	5.36	5.23	5.20	5.09	7.92	7.81	7.25	6.89	6.70
96	6.00	5.34	5.21	5.20	5.11	7.97	7.83	7.35	6.89	6.65
97	6.00	5.29	5.19	5.18	5.15	7.91	7.88	7.30	6.87	6.69
99	5.92	5.23	5.12	5.16	5.16	7.90	7.81	7.31	6.73	6.64
102	5.96	5.26	5.23	5.13	5.06	8.05	7.87	7.36	6.75	6.63
103	5.89	5.24	5.24	4.96	4.97	8.02	7.72	7.23	6.67	6.59
104	5.80	5.29	5.20	5.00	4.95	8.08	7.73	7.31	6.74	6.58

ตารางผนวกที่ ข4 (ต่อ)

Day	pH of acidogenic reactor					pH of methanogenic reactor				
	Organic loading rate (kgCOD/m ³ .day)					Organic loading rate (kgCOD/m ³ .day)				
	0.60	0.90	1.20	1.50	1.80	0.60	0.90	1.20	1.50	1.80
105	5.86	5.30	5.25	5.01	4.90	8.00	7.71	7.28	6.74	6.48
106	5.79	5.31	5.23	5.05	4.92	8.00	7.82	7.39	6.72	6.47
107	5.96	5.25	5.19	5.02	4.90	8.01	7.48	7.31	6.56	6.47
109	5.81	5.21	5.16	5.08	4.95	7.92	7.78	7.37	6.67	6.47
110	5.85	5.21	5.11	5.05	4.90	7.94	7.69	7.33	6.61	6.42
111	6.06	5.21	5.15	4.93	4.96	8.02	7.75	7.39	6.61	6.41
112	5.99	5.25	5.10	5.01	4.99	8.04	7.71	7.27	6.57	6.38
113	6.01	5.18	5.16	4.98	4.94	8.00	7.61	7.23	6.59	6.43
114	5.99	5.20	5.25	5.04	4.96	7.95	7.70	7.20	6.60	6.40
115	5.92	5.22	5.19	5.09	4.89	7.99	7.75	7.25	6.55	6.41



ภาคผนวก ค

ข้อมูลดิบจากการศึกษาความเหมาะสมของอายุการตัดหญ้าเนเปียร์ในการผลิตก๊าซมีเทน

ตารางผนวกที่ ค1 ปริมาณก๊าซทั้งหมด (Total gas) ปริมาณก๊าซมีเทน (%CH₄) และปริมาณก๊าซมีเทน (CH₄ production) ที่สภาวะมาตรฐานจากการหมัก
หญ้าเนเปียร์ที่อายุการตัดต่างๆ

Day	Total gas (ml/day)				%CH ₄				CH ₄ production (ml at STP/day)			
	Napier grass at various cutting interval (days)				Napier grass at various cutting interval (days)				Napier grass at various cutting interval (days)			
	30	45	60	90	30	45	60	90	30	45	60	90
1	1036	854	715	860	-	-	-	-	-	-	-	-
2	1156	768	763	686	-	-	-	-	-	-	-	-
3	1182	968	677	903	-	-	-	-	-	-	-	-
5	1442	1079	1054	1045	-	-	-	-	-	-	-	-
7	1696	1088	987	1335	35.98	32.64	16.25	35.96	455	323	146	337
8	1619	1266	1058	1504	-	-	-	-	-	-	-	-
9	1554	1387	895	1358	-	-	-	-	-	-	-	-
10	1509	1315	1061	1287	41.77	44.18	23.68	37.90	473	329	229	344
11	1469	1348	1250	1797	-	-	-	-	-	-	-	-
13	1496	1463	1478	1894	-	-	-	-	-	-	-	-
14	1547	1721	1572	1383	43.11	38.53	27.05	33.30	-	403	387	419
15	1606	1778	1615	1880	-	-	-	-	-	-	-	-
16	1575	1703	1675	1908	-	-	-	-	-	-	-	-
17	1568	1699	1586	1446	45.32	41.74	29.75	40.26	546	445	429	430
18	1680	1719	1497	1826	-	-	-	-	-	-	-	-

ตารางผนวกที่ ค1 (ต่อ)

Day	Total gas (ml/day)				%CH ₄				CH ₄ production (ml at STP/day)			
	Napier grass at various cutting interval (days)				Napier grass at various cutting interval (days)				Napier grass at various cutting interval (days)			
	30	45	60	90	30	45	60	90	30	45	60	90
20	1576	1549	1429	1531	46.81	48.28	35.61	42.85	571	480	463	497
21	1640	1751	1504	1477	-	-	-	-	-	-	-	-
22	1660	1654	1530	1552	-	-	-	-	-	-	-	-
23	1598	1550	1470	1492	47.18	46.99	33.91	45.52	586	563	453	518
25	1503	1522	1442	1252	-	-	-	-	556	602	564	449
27	1608	1482	1349	1262	-	-	-	-	585	617	548	453
28	1614	1571	1495	1396	43.21	46.12	41.79	44.11	564	629	568	460
29	1550	1492	1424	1241	-	-	-	-	583	621	557	445
30	1632	1510	1522	1358	43.54	45.42	41.83	46.61	586	624	559	476
31	1522	1496	1368	1382	-	-	-	-	572	602	535	496
32	1596	1655	1379	1381	45.30	43.08	45.06	46.16	565	639	565	480
34	1485	1578	1392	1420	-	-	-	-	559	625	544	509
35	1452	1522	1645	1457	39.08	43.32	45.05	45.21	576	600	574	499
36	1500	1494	1426	1385	-	-	-	-	564	611	558	497
37	1505	1467	1448	1419	39.82	44.59	47.76	36.99	575	605	549	478
40	1519	1557	1437	1351	-	-	-	-	571	616	562	485

ตารางผนวกที่ ค1 (ต่อ)

Day	Total gas (ml/day)				%CH ₄				CH ₄ production (ml at STP/day)			
	Napier grass at various cutting interval (days)				Napier grass at various cutting interval (days)				Napier grass at various cutting interval (days)			
	30	45	60	90	30	45	60	90	30	45	60	90
41	1569	1488	1556	1239	42.33	41.26	45.7	35.90	559	619	557	505
42	1522	1538	1460	1378	-	-	-	-	572	609	571	484
43	1546	1442	1438	1368	39.22	43.89	43.89	39.57	552	597	574	492
44	1420	1514	1469	1388	-	-	-	-	574	589	575	478
45	1420	1478	1475	1277	41.83	42.51	41.39	33.14	570	602	555	495
46	1452	1536	1397	1336	-	-	-	-	566	588	587	509
48	1450	1564	1422	1305	-	-	-	-	575	619	556	498
49	1516	1551	1484	1210	40.31	42.72	39.82	34.60	566	603	588	481
50	1467	1600	1520	1182	38.78	42.19	37.58	32.03	558	614	570	474
53	1486	1571	1429	1307	-	-	-	-	559	622	559	469
54	1516	1521	1381	1296	-	-	-	-	570	602	540	465
55	1494	1544	1404	1282	-	-	-	-	562	611	549	460

หมายเหตุ 1. - คือ ไม่มีการบันทึกข้อมูล

2. วันที่ไม่มีการบันทึกปริมาณก๊าซมีเทน (%CH₄) ให้ใช้ค่าเฉลี่ยปริมาณก๊าซมีเทนช่วงระยะคงที่ (วันที่ 25-55) ในการคำนวณปริมาตรก๊าซมีเทน

ตารางผนวกที่ ค2 COD ของสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์ที่อายุการตัดต่างๆ ที่ผ่านออกจากระบบ

Day	COD at steady state (mg/L)			
	Napier grass at various cutting interval (days)			
	30	45	60	90
30	5440	6135	6580	7580
37	5405	5990	6455	7660
45	5410	6145	6650	7690
51	5025	5890	6720	7625
55	5320	6040	6600	7865
เฉลี่ย	5320	6040	6601	7684

ตารางผนวกที่ ค3 TVS ของสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์ที่อายุการตัดต่างๆ ที่ผ่านออกจากระบบ

Day	TVS at steady state (mg/L)			
	Napier grass at various cutting interval (days)			
	30	45	60	90
30	5210	6150	6630	7480
37	4980	6140	6920	7340
45	5300	5960	6520	7640
51	5360	6020	6420	7540
55	5210	6190	6620	7500
เฉลี่ย	5212	6092	6622	7500

ตารางผนวกที่ ๓4 pH ในถังหมักกรด และถังสร้างมีเทนจากการหมักสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์ที่อายุการตัดต่างๆ

Day	pH of acidogenic reactor				pH of methanogenic reactor			
	Napier grass at various cutting interval (days)				Napier grass at various cutting interval (days)			
	30	45	60	90	30	45	60	90
1	5.34	5.02	5.10	5.10	7.75	7.73	7.90	7.79
2	5.21	5.00	5.05	5.04	7.65	7.62	7.64	7.70
3	5.28	5.18	5.17	5.13	7.61	7.66	7.60	7.65
5	5.29	5.25	5.10	5.10	7.54	7.61	7.54	7.69
6	5.25	5.23	5.13	5.13	7.60	7.64	7.55	7.60
7	5.32	5.21	5.10	5.17	7.65	7.56	7.59	7.52
8	5.30	5.31	5.09	5.24	7.50	7.51	7.50	7.52
9	5.31	5.30	5.15	5.29	7.57	7.58	7.50	7.51
10	5.33	5.29	5.19	5.23	7.53	7.52	7.48	7.56
11	5.40	5.35	5.15	5.21	7.47	7.42	7.42	7.47
13	5.45	5.31	5.20	5.28	7.45	7.42	7.36	7.48
14	5.40	5.34	5.27	5.15	7.48	7.41	7.34	7.41
15	5.30	5.39	5.25	5.18	7.45	7.47	7.34	7.42
16	5.24	5.41	5.20	5.16	7.25	7.48	7.30	7.32
17	5.26	5.40	5.22	5.21	7.38	7.39	7.31	7.41
18	5.28	5.37	5.21	5.16	7.38	7.38	7.26	7.22

ตารางผนวกที่ ค4 (ต่อ)

Day	pH of acidogenic reactor				pH of methanogenic reactor			
	Napier grass at various cutting interval (days)				Napier grass at various cutting interval (days)			
	30	45	60	90	30	45	60	90
20	5.27	5.40	5.19	5.20	7.34	7.40	7.20	7.27
21	5.25	5.39	5.16	5.23	7.29	7.40	7.16	7.33
22	5.25	5.40	5.16	5.22	7.29	7.42	7.11	7.15
23	5.35	5.37	5.16	5.24	7.20	7.35	7.06	7.11
25	5.30	5.36	5.20	5.29	7.23	7.33	7.05	7.11
27	5.17	5.34	5.22	5.31	7.20	7.26	7.10	7.21
28	5.20	5.33	5.25	5.30	7.30	7.23	7.05	7.18
29	5.16	5.30	5.27	5.31	7.27	7.23	7.08	7.20
30	5.21	5.26	5.35	5.35	7.25	7.24	7.12	7.11
31	5.21	5.27	5.45	5.33	7.24	7.20	7.16	7.15
32	5.23	5.25	5.40	5.56	7.23	7.14	7.10	7.09
34	5.21	5.20	5.32	5.46	7.17	7.19	7.10	7.01
35	5.20	5.22	5.33	5.40	7.24	7.17	7.11	7.04
36	5.20	5.25	5.39	5.39	7.26	7.20	7.15	7.05
37	5.21	5.23	5.40	5.35	7.20	7.14	7.16	7.06
40	5.25	5.20	5.40	5.35	7.36	7.11	7.17	7.11

ตารางผนวกที่ ค4 (ต่อ)

Day	pH of acidogenic reactor				pH of methanogenic reactor			
	Napier grass at various cutting interval (days)				Napier grass at various cutting interval (days)			
	30	45	60	90	30	45	60	90
41	5.20	5.27	5.35	5.37	7.31	7.20	7.20	7.12
42	5.22	5.25	5.34	5.35	7.35	7.19	7.21	7.09
43	5.18	5.24	5.32	5.31	7.40	7.19	7.17	7.07
44	5.23	5.20	5.37	5.29	7.33	7.19	7.29	7.14
45	5.20	5.26	5.40	5.27	7.31	7.22	7.28	7.13
46	5.19	5.20	5.39	5.25	7.32	7.25	7.30	7.13
48	5.13	5.22	5.33	5.21	7.22	7.22	7.26	7.05
49	5.20	5.24	5.30	5.29	7.20	7.23	7.22	7.07
50	5.18	5.20	5.39	5.30	7.19	7.23	7.17	7.11
53	5.22	5.19	5.35	5.33	7.19	7.14	7.17	7.07
54	5.20	5.21	5.34	5.56	7.21	7.19	7.29	7.05
55	5.17	5.23	5.30	5.46	7.22	7.20	7.25	7.01



1. การคำนวณก๊าซที่สภาวะมาตรฐาน

การคำนวณก๊าซที่สภาวะมาตรฐานโดยแสดงการคำนวณการเปลี่ยนปริมาตรก๊าซที่สภาวะการทดลอง (Room Condition) ให้เป็นปริมาตรก๊าซที่สภาวะมาตรฐาน (Standard temperature and pressure: STP)

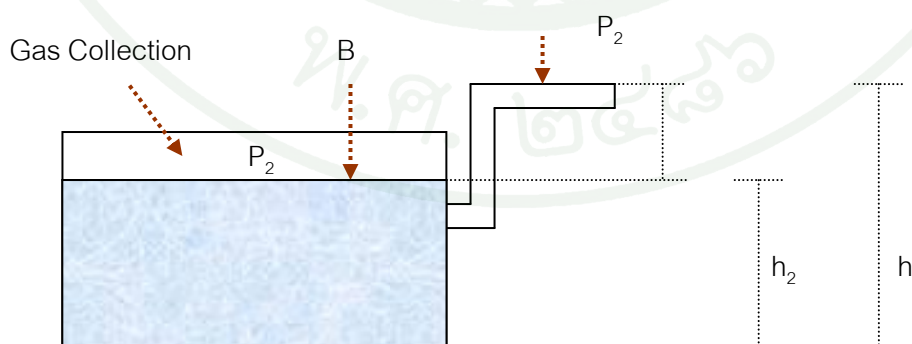
สภาวะมาตรฐาน (STP) คือสภาวะที่อุณหภูมิ 0°C (273.15 K) และที่ความดัน 1 atm ($0.013 \times 10^5\text{ N/m}^2$)

สภาวะการทดลอง คือสภาวะที่อุณหภูมิห้องเฉลี่ย 30°C และที่ความดันของก๊าซในระบบเก็บก๊าซ ซึ่งใช้สมการ (1) ในการคำนวณ

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

เมื่อ P_1, P_2 คือ ความดันก๊าซที่สภาวะมาตรฐานและที่สภาวะการทดลองตามลำดับ
 T_1, T_2 คือ อุณหภูมิ (K) ที่สภาวะมาตรฐานและที่สภาวะการทดลองตามลำดับ
 V_1, V_2 คือ ปริมาตรก๊าซที่สภาวะมาตรฐานและที่สภาวะการทดลองตามลำดับ

โดยสามารถคำนวณเปลี่ยนปริมาตรก๊าซที่สภาวะทดลอง เป็นปริมาตรก๊าซที่สภาวะมาตรฐานดังนี้



ภาพผนวกที่ 1 ความดันของก๊าซในระบบเก็บก๊าซของการทดลอง

ความดันของก๊าซในระบบเก็บก๊าซของการทดลอง (P_2)

จากภาพสามารถหา P_2 ได้ดังนี้

ความดันที่จุด A = ความดันที่จุด B

$$P_1 + \rho gh_1 = P_2 + \rho gh_2$$

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

โดยที่ P_1 คือ $1.013 \times 10^5 \text{ N/m}^2$ หรือ 1 atm

ρ คือ 1000 Kg/m^3

g คือ 9.8 m/s^2

$(h_1 - h_2)$ คือ ความสูงของก๊าซที่อยู่ในระบบเก็บก๊าซ (m) ได้จากการทดลอง
การคำนวณ

ค่าความสูงของก๊าซ ($h_1 - h_2$) ที่อยู่ในระบบเก็บก๊าซวัดได้ 10 cm หรือ $10 \times 10^{-2} \text{ m}$ และอุณหภูมิ
เฉลี่ย 30°C หาคความดันที่จุด B โดยการ แทนค่าใน (2) จะได้

$$\begin{aligned} P_2 &= (1.013 \times 10^5) + (1000 \times 9.8 \times 10 \times 10^{-2}) \\ &= 102280 \text{ N/m}^2 \\ &\cong 1 \text{ atm} \end{aligned}$$

หาค่าความสัมพันธ์ระหว่าง V_1 และ V_2 จากสมการที่

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

โดย P_1 คือ ความดันที่สภาวะมาตรฐาน (101300.0 N/m^2)

P_2 คือ ความดันที่สภาวะการทดลอง (102280 N/m^2)

T_1 คือ อุณหภูมิ (K) ที่สภาวะมาตรฐาน (273.15 K)

T_2 คือ อุณหภูมิ (K) ที่สภาวะการทดลอง (303.15 K)

V_2 คือ ปริมาตรก๊าซที่สภาวะการทดลอง (V_2, ml)

แทนค่าหา V_1 ปริมาตรก๊าซที่สภาวะมาตรฐาน

$$\begin{aligned} V_1 &= \frac{P_2 V_2 T_1}{P_1 T_2} \\ &= \frac{102280 \times V_2 \times 273.15}{101300 \times (273.15 + 30)} \\ V_1 &= 0.90976 V_2 \text{ ml} \end{aligned}$$

ในการเปลี่ยนปริมาตรก๊าซที่สภาวะการทดลอง ให้เป็นปริมาตรก๊าซที่สภาวะมาตรฐานนั้น ทำได้โดยการนำปริมาตรก๊าซทั้งหมด (ml/day) คูณด้วย 0.90976

2. วิธีการคำนวณก๊าซมีเทนที่สภาวะมาตรฐาน

การผลิตก๊าซมีเทน โดยใช้หญ้าเนเปียร์ที่อายุการตัด 30 วัน ด้วยอัตราการเติมของเหลวเข้าสู่ระบบ 200 ml/day เมื่อเดินระบบจนเข้าสู่ระยะคงที่ ตัวอย่างการคำนวณปริมาตรก๊าซมีเทนที่สภาวะมาตรฐานแสดงดังตารางผนวกที่ ๑1

ตารางผนวกที่ ๑1 ตัวอย่างวิธีการคำนวณปริมาตรก๊าซมีเทนที่สภาวะมาตรฐาน

Day	Total gas (ml/day)	Total gas (ml at STP/day)	CH ₄ (%)	CH ₄ production (ml at STP/day)
28	1614	1468	43.21	634
30	1632	1485	43.54	646
37	1505	1369	39.82	545
41	1569	1427	42.33	604
49	1516	1379	40.31	556

เมื่อระบบเข้าสู่ระยะคงที่บันทึกปริมาตรก๊าซทั้งหมด (Total gas) ที่เกิดขึ้นโดยการวัดปริมาตรน้ำที่ถูกแทนที่ จากนั้นนำไปคูณด้วย 0.90976 จะได้ปริมาตรก๊าซทั้งหมดที่สภาวะมาตรฐาน เก็บตัวอย่างก๊าซที่เกิดขึ้นภายในระบบโดยใช้หลอดเก็บตัวอย่างก๊าซ และนำไปวิเคราะห์

ปริมาณก๊าซมีเทนด้วยเครื่อง Gas Chromatograph (GC/TCD) (ภาพผนวกที่ ๓2) เพื่อนำมาคำนวณหาปริมาณก๊าซมีเทนที่สภาวะมาตรฐาน (ตารางผนวกที่ ๓1)

ผลการวิเคราะห์ปริมาณก๊าซมีเทนจากเครื่อง Gas chromatography จะแสดงผลในรูปแบบของพื้นที่ใต้กราฟ และนำไปเปรียบเทียบกับพื้นที่ใต้กราฟที่ได้จากการวิเคราะห์ก๊าซมาตรฐาน เพื่อคำนวณปริมาณก๊าซมีเทนที่ได้ การศึกษานี้ใช้ก๊าซมีเทน 30 % เป็นก๊าซมาตรฐานซึ่งมีพื้นที่ใต้กราฟเป็น 768980



ภาพผนวกที่ ๓2 เครื่อง Gas Chromatograph (GC) Shimadzu 14B

3. วิธีการคำนวณอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์

เมื่อเตรียมเป็นสารละลายผสมระหว่างหลู๋เนเปียร์อายุการตัด 30 วัน กับน้ำประปาในอัตราส่วน 1:5 มีค่าเริ่มต้นของ COD 19.32 g/L และ TVS 14.43 g/L สามารถคำนวณหา OLR ได้จากสมการ

$$\text{Organic loading rate (OLR, kgCOD/m}^3 \cdot \text{day)} = \frac{Q \text{ (ml/day)} \times S_0 \text{ (g/L)} \times 10^{-3}}{V \text{ (L)}}$$

เมื่อ Q คือ อัตราการเติมสารละลายผสมเข้าสู่ระบบ

S_0 คือ ค่าเริ่มต้นของ COD

V คือ ความจุใช้งานของถังหมัก

เมื่อคิดในรูปของ COD ซึ่งมีอัตราการเติมสารละลายผสมเข้าสู่ถังหมักกรด 200 ml/day เข้าสู่ถังหมักกรดความจุ 4 L OLR มีค่า 0.97 kgTVS/m³.day

$$\begin{aligned} \text{Organic loading rate (OLR, kgCOD/m}^3\text{.day)} &= \frac{(200 \text{ ml/day} \times 19.32 \text{ g/L} \times 10^{-3})}{4 \text{ L}} \\ &= 0.97 \end{aligned}$$

เมื่อคิดในรูปของ TVS ซึ่งมีอัตราการเติมสารละลายผสมเข้าสู่ถังหมักกรด 200 ml/day เข้าสู่ถังหมักกรดความจุ 4 L OLR มีค่า 0.72 kgTVS/m³.day

$$\begin{aligned} \text{Organic loading rate (OLR, kgTVS/m}^3\text{.day)} &= \frac{(200 \text{ ml/day} \times 14.43 \text{ g/L} \times 10^{-3})}{4 \text{ L}} \\ &= 0.72 \end{aligned}$$

4. วิธีการคำนวณผลผลิตก๊าซมีเทนในรูปแบบต่างๆ

สารละลายผสมหุ้ยนเป็ยร้ออายุการตัด 30 วัน มีค่าเริ่มต้นของ COD 19.320 g/L, TS 17.73 g/L และ TVS 14.43 g/L เมื่อระบบมีอัตราการเติมสารละลายผสมเข้าสู่ถังหมักกรด 200 ml/day พบว่าที่ระยะคงที่ ผลผลิตก๊าซมีเทนมีค่าดังต่อไปนี้

4.1 ผลผลิตก๊าซมีเทนที่เกิดต่อการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของ COD

$$\begin{aligned} \text{COD ที่ถูกกำจัดในระบบต่อวัน} &= Q(S_0 - S) \\ &= 200 \text{ ml/day} \times (19320 - 5320) \text{ mg/L} \\ &= (200 \times 10^{-3} \text{ L/day}) \times (14000 \times 10^{-3} \text{ g/L}) \\ &= 2.8000 \text{ g/day} \end{aligned}$$

$$\text{ปริมาตรก๊าซมีเทนที่สภาวะมาตรฐาน} = 568 \text{ ml/day}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ผลผลิตก๊าซมีเทนที่สภาวะมาตรฐาน} &= \frac{568 \text{ ml/day}}{2.8000 \text{ g/day}} \\
 &= 203 \text{ ml/gCOD degraded} \\
 &= 203 \text{ L at STP/kgCOD degraded}
 \end{aligned}$$

4.2 ผลผลิตก๊าซมีเทนที่เกิดต่อการเติมสารอินทรีย์ในรูปของ COD

$$\begin{aligned}
 \text{COD ที่ถูกกำจัดในระบบต่อวัน} &= Q(S_0) \\
 &= 200 \text{ ml/day} \times (19320) \text{ mg/L} \\
 &= (200 \times 10^{-3} \text{ L/day}) \times (19320 \times 10^{-3} \text{ g/L}) \\
 &= 3.8640 \text{ g/day} \\
 \text{ปริมาตรก๊าซมีเทนที่สภาวะมาตรฐาน} &= 568 \text{ ml/day} \\
 \text{ผลผลิตก๊าซมีเทนที่สภาวะมาตรฐาน} &= \frac{568 \text{ ml/day}}{3.8640 \text{ g/day}} \\
 &= 147 \text{ ml/gCOD added} \\
 &= 147 \text{ L at STP/kgCOD added}
 \end{aligned}$$

4.3 ผลผลิตก๊าซมีเทนที่เกิดต่อการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของ TS

$$\begin{aligned}
 \text{TS ที่ถูกกำจัดในระบบต่อวัน} &= Q(S_0 - S) \\
 &= 200 \text{ ml/day} \times (17730 - 8745) \text{ mg/L} \\
 &= (200 \times 10^{-3} \text{ L/day}) \times (8985 \times 10^{-3} \text{ g/L}) \\
 &= 1.7970 \text{ g/day} \\
 \text{ปริมาตรก๊าซมีเทนที่สภาวะมาตรฐาน} &= 568 \text{ ml/day} \\
 \text{ผลผลิตก๊าซมีเทนที่สภาวะมาตรฐาน} &= \frac{568 \text{ ml/day}}{1.7970 \text{ g/day}} \\
 &= 316 \text{ ml/gCOD degraded} \\
 &= 316 \text{ L at STP/kgCOD degraded}
 \end{aligned}$$

4.4 ผลผลิตก๊าซมีเทนที่เกิดต่อการเติมสารอินทรีย์ในรูปของ TS

$$\begin{aligned}
 \text{TS ที่ถูกกำจัดในระบบต่อวัน} &= Q(S_0) \\
 &= 200 \text{ ml/day} \times (17730) \text{ mg/L} \\
 &= (200 \times 10^{-3} \text{ L/day}) \times (17730 \times 10^{-3} \text{ g/L}) \\
 &= 3.5460 \text{ g/day}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ปริมาณก๊าซมีเทนที่สภาวะมาตรฐาน} &= 568 \text{ ml/day} \\
 \text{ผลผลิตก๊าซมีเทนที่สภาวะมาตรฐาน} &= \frac{568 \text{ ml/day}}{3.5460 \text{ g/day}} \\
 &= 160 \text{ ml/gCOD added} \\
 &= 160 \text{ L at STP/kgCOD added}
 \end{aligned}$$

4.5 ผลผลิตก๊าซมีเทนที่เกิดต่อการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของ TVS

$$\begin{aligned}
 \text{TVS ที่ถูกกำจัดในระบบต่อวัน} &= Q(S_0 - S) \\
 &= 200 \text{ ml/day} \times (14425 - 5210) \text{ mg/L} \\
 &= (200 \times 10^{-3} \text{ L/day}) \times (9215 \times 10^{-3} \text{ g/L}) \\
 &= 1.8430 \text{ g/day}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ปริมาณก๊าซมีเทนที่สภาวะมาตรฐาน} &= 568 \text{ ml/day} \\
 \text{ผลผลิตก๊าซมีเทนที่สภาวะมาตรฐาน} &= \frac{568 \text{ ml/day}}{1.8430 \text{ g/day}} \\
 &= 308 \text{ ml/gCOD degraded} \\
 &= 308 \text{ L at STP/kgCOD degraded}
 \end{aligned}$$

4.6 ผลผลิตก๊าซมีเทนที่เกิดต่อการเติมสารอินทรีย์ในรูปของ TVS

$$\begin{aligned}
 \text{TVS ที่ถูกกำจัดในระบบต่อวัน} &= Q(S_0) \\
 &= 200 \text{ ml/day} \times (14425) \text{ mg/L} \\
 &= (200 \times 10^{-3} \text{ L/day}) \times (14425 \times 10^{-3} \text{ g/L}) \\
 &= 2.8850 \text{ g/day}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{ปริมาตรก๊าซมีเทนที่สภาวะมาตรฐาน} &= 568 \text{ ml/day} \\
 \text{ผลผลิตก๊าซมีเทนที่สภาวะมาตรฐาน} &= \frac{568 \text{ ml/day}}{2.8850 \text{ g/day}} \\
 &= 197 \text{ ml/gCOD added} \\
 &= 197 \text{ L at STP/kgCOD added}
 \end{aligned}$$

5. วิธีการคำนวณผลผลิตก๊าซมีเทนต่อหน่วยพื้นที่

ในการทดลองในครั้งนี้ พบว่าการผลิตก๊าซมีเทนบริสุทธิ์ 1 ลูกบาศก์เมตร โดยการหมักแบบสองขั้นตอน จะต้องใช้หญ้าเนเปียร์แห้งอายุ 30, 45, 60 และ 90 วัน จำนวน 6.25, 7.87, 9.62 และ 13.51 กิโลกรัมตามลำดับ (ข้อ 5) และจากการประเมินผลผลิตหญ้าเนเปียร์ที่ทำการปลูกเพื่อการทดลองในครั้งนี้ พบว่าการปลูกหญ้าเนเปียร์ 1 ไร่ โดยมีการใส่ปุ๋ยและรดน้ำเป็นอย่างดี เมื่อทำการตัดที่อายุ 30, 45, 60 และ 90 วัน จะได้หญ้าเนเปียร์แห้ง 2.7, 6, 10 และ 13 ton DW/rai/yr ตามลำดับ หรือคิดเป็น 16.88, 37.50, 62.50 และ 81.25 ton DW/ha/yr สามารถคำนวณผลผลิตก๊าซมีเทนต่อหน่วยพื้นที่ได้ดังนี้

5.1 หนุ่เนเปียร์อายุการตัด 30 วัน

$$\begin{aligned} \text{หนุ่เนเปียร์แห้ง } 6.25 \times 10^{-3} \text{ ton ผลิตก๊าซมีเทนบริสุทธิ์ได้} &= 1 \text{ m}^3 \\ \text{หนุ่เนเปียร์แห้ง } 2.7 \text{ ton/rai/yr ผลิตก๊าซมีเทนบริสุทธิ์ได้} &= \frac{1 \text{ m}^3 \times 2.7 \text{ ton/rai/yr}}{6.25 \times 10^{-3} \text{ ton}} \\ &= 432 \text{ m}^3/\text{rai/yr} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{หนุ่เนเปียร์แห้ง } 16.88 \text{ ton/ha/yr ผลิตก๊าซมีเทนบริสุทธิ์ได้} &= \frac{1 \text{ m}^3 \times 16.88 \text{ ton/ha/yr}}{6.25 \times 10^{-3} \text{ ton}} \\ &= 2700 \text{ m}^3/\text{ha/yr} \end{aligned}$$

หนุ่เนเปียร์อายุการตัด 30 วันให้ผลผลิตก๊าซมีเทนต่อหน่วยพื้นที่เท่ากับ 432 m³/rai/yr หรือ 2700 m³/ha/yr

5.2 หนุ่เนเปียร์อายุการตัด 45 วัน

$$\begin{aligned} \text{หนุ่เนเปียร์แห้ง } 7.87 \times 10^{-3} \text{ ton ผลิตก๊าซมีเทนบริสุทธิ์ได้} &= 1 \text{ m}^3 \\ \text{หนุ่เนเปียร์แห้ง } 6 \text{ ton/rai/yr ผลิตก๊าซมีเทนบริสุทธิ์ได้} &= \frac{1 \text{ m}^3 \times 6 \text{ ton/rai/yr}}{7.87 \times 10^{-3} \text{ ton}} \\ &= 762 \text{ m}^3/\text{rai/yr} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{หนุ่เนเปียร์แห้ง } 37.50 \text{ ton/ha/yr ผลิตก๊าซมีเทนบริสุทธิ์ได้} &= \frac{1 \text{ m}^3 \times 37.50 \text{ ton/ha/yr}}{7.87 \times 10^{-3} \text{ ton}} \\ &= 4765 \text{ m}^3/\text{ha/yr} \end{aligned}$$

หนุ่เนเปียร์อายุการตัด 45 วันให้ผลผลิตก๊าซมีเทนต่อหน่วยพื้นที่เท่ากับ 762 m³/rai/yr หรือ 4765 m³/ha/yr

5.3 หญ้าเนเปียร์อายุการตัด 60 วัน

$$\begin{aligned}
 \text{หญ้าเนเปียร์แห้ง } 9.62 \times 10^{-3} \text{ ton ผลิตก๊าซมีเทนบริสุทธิ์ได้} &= 1 \text{ m}^3 \\
 \text{หญ้าเนเปียร์แห้ง } 10 \text{ ton/rai/yr ผลิตก๊าซมีเทนบริสุทธิ์ได้} &= \frac{1 \text{ m}^3 \times 10 \text{ ton/rai/yr}}{9.62 \times 10^{-3} \text{ ton}} \\
 &= 1040 \text{ m}^3/\text{rai/yr} \\
 \text{หญ้าเนเปียร์แห้ง } 62.50 \text{ ton/ha/yr ผลิตก๊าซมีเทนบริสุทธิ์ได้} &= \frac{1 \text{ m}^3 \times 62.50 \text{ ton/ha/yr}}{9.62 \times 10^{-3} \text{ ton}} \\
 &= 6497 \text{ m}^3/\text{ha/yr}
 \end{aligned}$$

หญ้าเนเปียร์อายุการตัด 60 วันให้ผลผลิตก๊าซมีเทนต่อหน่วยพื้นที่เท่ากับ $1040 \text{ m}^3/\text{rai/yr}$ หรือ $6497 \text{ m}^3/\text{ha/yr}$

5.4 หญ้าเนเปียร์อายุการตัด 90 วัน

$$\begin{aligned}
 \text{หญ้าเนเปียร์แห้ง } 13.51 \times 10^{-3} \text{ ton ผลิตก๊าซมีเทนบริสุทธิ์ได้} &= 1 \text{ m}^3 \\
 \text{หญ้าเนเปียร์แห้ง } 13 \text{ ton/rai/yr ผลิตก๊าซมีเทนบริสุทธิ์ได้} &= \frac{1 \text{ m}^3 \times 13 \text{ ton/rai/yr}}{13.51 \times 10^{-3} \text{ ton}} \\
 &= 962 \text{ m}^3/\text{rai/yr} \\
 \text{หญ้าเนเปียร์แห้ง } 81.25 \text{ ton/ha/yr ผลิตก๊าซมีเทนบริสุทธิ์ได้} &= \frac{1 \text{ m}^3 \times 81.25 \text{ ton/ha/yr}}{13.51 \times 10^{-3} \text{ ton}} \\
 &= 6014 \text{ m}^3/\text{ha/yr}
 \end{aligned}$$

หญ้าเนเปียร์อายุการตัด 60 วันให้ผลผลิตก๊าซมีเทนต่อหน่วยพื้นที่เท่ากับ $1040 \text{ m}^3/\text{rai/yr}$ หรือ $6497 \text{ m}^3/\text{ha/yr}$

ค่าผลผลิตก๊าซมีเทนต่อหน่วยพื้นที่จากการคำนวณในภาคผนวก ง นี้ อาจมีค่าแตกต่างกับค่าที่แสดงในภาพที่ 29 เล็กน้อย เนื่องจากตำแหน่งทศนิยมในการคำนวณแตกต่างกัน



ภาคผนวก จ
วิธีการวิเคราะห์พารามิเตอร์ต่างๆ

1. การวิเคราะห์ปริมาณความสกปรกสารอินทรีย์ในรูป COD โดย Dichromate reflux's method

1.1 สารเคมี

1.1.1 Standard potassium dichromate solution 0.25 N: ละลาย $K_2Cr_2O_7$ (Primary standard grade) 12.259 g (ที่ผ่านการอบแห้งที่อุณหภูมิ 103-105 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง) ในน้ำกลั่น และเจือจางจนได้ปริมาตร 1000 ml

1.1.2 Sulfuric acid reagent: เติม Ag_2SO_4 22 g ลงในกรด H_2SO_4 เข้มข้น 4 kg หรือ 2.71 L ตั้งทิ้งไว้ 1 ถึง 2 วัน เพื่อให้ละลายและผสมจนเข้ากัน

1.1.3 Standard ferrous ammonium sulfate titrant (FAS) 0.1 N: ละลาย $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ 39 g ในน้ำกลั่น เติมกรด H_2SO_4 เข้มข้น 20 ml ทิ้งไว้ให้เย็นแล้วเจือจางจนได้ปริมาตร 1000 ml ให้ทำ Standardize สารละลายนี้ทุกครั้งที่ใช้ โดยนำไปไทเทรตกับสารละลาย $K_2Cr_2O_7$ ดังนี้

เจือจาง 10 ml ของสารละลายมาตรฐาน $K_2Cr_2O_7$ จนเป็น 100 ml เติมกรด H_2SO_4 เข้มข้น 30 ml ทิ้งไว้ให้เย็นและไทเทรตด้วย FAS โดยใช้ Ferroin indicator เป็นอินดิเคเตอร์ (2-3 หยด)

$$\text{โมลาร์ของ FAS} = \frac{\text{ml } K_2Cr_2O_7 \times 0.25}{\text{ml FAS ที่ใช้}}$$

1.1.4 Ferroin indicator solution ละลาย 1 – 10 Phenanthroline monohydrate 1.485 g และ $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 98 g ในน้ำกลั่น แล้วเจือจางจนมีปริมาตรเป็น 100 ml

1.1.5 Mercuric sulfate ($HgSO_4$)

1.2 วิธีการเตรียมตัวอย่าง

1.2.1 เติมสารละลายผสมที่ผ่านการหมัก (Digested slurry) ปริมาตร 50 ml ในหลอดทดลองขนาด 75 ml

1.2.2 ตั้งทิ้งไว้ 10 นาที

1.2.3 จุ่มปลายปิเปตจากระดับน้ำสูงสุด 4 cm เพื่อปิเปตเฉพาะสารละลายผสมส่วนใส

1.3 วิธีการวิเคราะห์

1.3.1 นำสารละลายตัวอย่างลงใน Round bottom flask 20 ml หรือ น้อยกว่า 20 ml แล้วปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นจนครบ 20 ml

1.3.2 เติม Sulfuric acid reagent 30 ml ลงใน Round bottom flask

1.3.3 เติมสารละลาย Standard potassium dichromate solution 0.25 N 10.00 ml

1.3.4 เติม HgSO_4 0.4 g ลงใน Round bottom flask

1.3.5 เติม Glass bead ลงใน Round bottom flask

1.3.6 นำ Round bottom flask ไปต่อกับ Condenser เปิดน้ำเย็นให้ไหลผ่าน Condenser แล้วรีฟลักซ์นาน 2 ชั่วโมง

1.3.7 เจือจางด้วยน้ำกลั่นจนปริมาตรเป็น 2 เท่าของปริมาตรเดิม (60 ml) ทิ้งไว้ให้เย็น หยด Ferroin indicator 2-3 หยด แล้วนำไปไทเทรตกับสารละลาย FAS จนเมื่อถึงจุด End point เมื่อมีการเปลี่ยนจากสีฟ้าอมเขียวเป็นสีน้ำตาลแดง

1.3.8 Blank ทำเช่นเดียวกับตัวอย่างแต่เปลี่ยนจากสารละลายตัวอย่างเป็นน้ำกลั่น ปริมาตร 20 ml

1.4 การคำนวณ

$$\text{COD} = \frac{(a - b)N \times 8000}{\text{ml sample}}$$

เมื่อ COD คือค่า Chemical Oxygen Demand ในหน่วย mg/L

a = ml FAS ที่ใช้ในการไทเทรต Blank

b = ml FAS ที่ใช้ในการไทเทรตตัวอย่าง

N = Normality of FAS

2. การวิเคราะห์ของแข็งทั้งหมด (Total solids) และของแข็งระเหยทั้งหมด (Total volatile solids)

2.1 อุปกรณ์และเครื่องมือ

- 2.1.1 ชามระเหย (Evaporating dish)
- 2.1.2 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Water bath)
- 2.1.3 เครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง
- 2.1.4 ตู้อบ (Oven)
- 2.1.5 ตู้ดูดความชื้น (Desiccator)
- 2.1.6 เตาเผา (Muffin furnace)

2.2 วิธีการวิเคราะห์

2.2.1 นำถ้วยชามระเหยที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 103-105 °C จนมีน้ำหนักคงที่ และทิ้งไว้ให้เย็นในตู้ดูดความชื้นจนเย็น มาชั่งด้วยเครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง (A)

2.2.2 เตรียมตัวอย่างสารละลายโดยใช้กระบอกตวง (ปริมาตรของกระบอกตวงและตัวอย่างที่ใช้ขึ้นอยู่กับปริมาณของแข็งในสารละลายตัวอย่าง) ใส่ในชามระเหยจากข้อ 2.2.1 และนำไประเหยบนอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิจนแห้ง ระวังอย่าให้ไหม้

2.2.3 นำชามระเหยไปอบที่อุณหภูมิ 103-105 °C เพื่อไล่ความชื้นนานประมาณ 2 ชั่วโมง หรือจนกว่าน้ำหนักคงที่ แล้วทิ้งให้เย็นในตู้ดูดความชื้น

2.2.4 ชั่งด้วยเครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง (B)

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

2.2.5 นำชามระเหยที่ชั่งน้ำหนักแล้วไปเผาที่อุณหภูมิ 550 °C เป็นเวลา 20 นาที และทิ้งให้เย็นในตู้ดูดความชื้น

2.2.4 ชั่งด้วยเครื่องชั่งละเอียด 4 ตำแหน่ง (C)

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



ภาคผนวก ฉ
ภาพประกอบจากการทดลอง

ภาพประกอบการเตรียมสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์



(ก)



(ข)

ภาพผนวกที่ ๑1 หญ้าเนเปียร์สด (ก) และหญ้าเนเปียร์สับ (ข)



(ก)



(ข)

ภาพผนวกที่ ๑2 หญ้าเนเปียร์สดบดละเอียด (ก) และสารละลายผสมหญ้าเนเปียร์ (ข)

ภาพประกอบการสร้างระบบหมักแบบสองขั้นตอน



(ก)



(ข)

ภาพผนวกที่ ๓3 ขวดพลาสติกความจุ 6 ลิตรสำหรับใช้สร้างถังหมัก (ก) และท่อจ (ข)



(ก)



(ข)

ภาพผนวกที่ ๓4 การต่อท่อและสายยางในถังหมักกรด (ก) และถังแทนที่น้ำ (ข)

ภาพประกอบการเริ่มต้นเดินระบบ



(ก)



(ข)

ภาพผนวกที่ ๑5 ถังหมักกรดขณะเริ่มต้นเดินระบบ (ก) และจุลินทรีย์เริ่มต้นในถังสร้างมีเทน (ข)



(ก)



(ข)

ภาพผนวกที่ ๑๖ จุลินทรีย์ผสมจากกระเพาะรูเมน โค (ก) ระบบหมักแบบสองขั้นตอนขณะเริ่มต้นเดินระบบ (ข)

ภาพประกอบขณะเดินระบบ



(ก)



(ข)

ภาพผนวกที่ ๗ หลอดเก็บตัวอย่างก๊าซ (ก) และการเก็บตัวอย่างก๊าซจากระบบ (ข)



(ก)



(ข)

ภาพผนวกที่ ๘ การเติมสารละลายผสมเข้าสู่ระบบ (ก) และระบบหมักแบบสองชั้นตอนขณะเดินระบบ (ข)





ภาพผนวกที่ ข1 รางวัล Outstanding presentation/Contribution จากการประชุม Global Conference on Global Warming 2014 (GCGW-14) ซึ่งจัดขึ้นในวันที่ 25-29 พฤษภาคม 2557 ณ Peking University, Beijing, China



ภาพผนวกที่ ข2 รางวัลเกียรติยศแก่นิสิตที่ได้รับรางวัลระดับนานาชาติประจำปีการศึกษา 2556
เนื่องในโอกาสวันคล้ายวันสถาปนาบัณฑิตวิทยาลัยครบรอบปีที่ 48



ขอขอบใจรับรองนี้เพื่อแสดงว่า

นางสาวยุวดี แสงศิลาปี

ได้นำเสนอบทความเรื่อง

การผลิตก๊าซมีเทนจากหญ้าเนเปียร์โดยการหมักแบบสองขั้นต้นตอน

การประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 13

13th National Environmental Conference

วันที่ 26 – 28 มีนาคม 2557

ณ โรงแรมเดอะ ทวิน ทาวเวอร์ รอมเมือง กรุงเทพฯ

ให้ไว้ ณ วันที่ 27 มีนาคม 2557

ดร.ประเสริฐ ตปนียางกูร

นายกสมาคมวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมแห่งประเทศไทย



กระทรวงพลังงาน
MINISTRY OF ENERGY



ภาพผนวกที่ ๒2 ใบประกาศจากการนำเสนอผลงานในงานประชุมวิชาการสิ่งแวดล้อมแห่งชาติครั้งที่ 13

