

การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพจากมูลไก่โดยเทคนิค  
การลดแอมโมเนียด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมี



ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน  
มหาวิทยาลัยแม่โจ้  
พ.ศ. 2561

การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพจากมูลไก่โดยเทคนิค  
การลดแอมโมเนียด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมี



สหัสมา ใจสิน

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษาตามหลักสูตร

ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต

สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยแม่โจ้

พ.ศ. 2561

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยแม่โจ้

การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพจากมูลไก่โดยเทคนิค  
การลดแอมโมเนียด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมี

สหัชฌมา ใจสิน

วิทยานิพนธ์นี้ได้รับการพิจารณาอนุมัติให้เป็นส่วนหนึ่งของความสมบูรณ์ของการศึกษา  
ตามหลักสูตรปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน

พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษา

อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก

(อาจารย์ ดร.จุฑาภรณ์ ชนะถาวร)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. ....

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(อาจารย์ ดร.รจพรณ นิรัฐศิลป์)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. ....

อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม

(อาจารย์ ดร.ณัฐธนิชา สุขเกษม)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. ....

ประธานอาจารย์ผู้รับผิดชอบหลักสูตร

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนศ ไชยชนะ)

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. ....

บัณฑิตวิทยาลัยรับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์ ดร.เกรียงศักดิ์ เม่งอำพัน)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่.....เดือน.....พ.ศ. ....

ชื่อเรื่อง	การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพจากมูลไก่โดยเทคนิค การลดแอมโมเนียด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมี
ชื่อผู้เขียน	นายสหัชฌา ใจสิน
ชื่อปริญญา	วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงานทดแทน
อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก	อาจารย์ ดร.จุฑาภรณ์ ชนะถาวร

### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพจากมูลไก่ด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมีในระดับห้องปฏิบัติการและระดับครัวเรือน ในส่วนแรก ทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ดำเนินการในระบบแบบกะ ถังหมักขนาด 19 L ปริมาตรใช้งานจริง 16 L โดยศึกษาชนิดของสารประกอบแมกนีเซียมที่ความเข้มข้น 100 mg/L สำหรับตกตะกอนแอมโมเนียในมูลไก่ โดยสารเคมีที่ใช้ได้แก่ แมกนีเซียมซัลเฟต ( $MgSO_4$ ) แมกนีเซียมคลอไรด์ ( $MgCl_2$ ) และแมกนีเซียมออกไซด์ ( $MgO$ ) ศึกษาผลของ  $MgSO_4$  ที่ช่วงความเข้มข้น 100 – 200 mg/L ศึกษาระยะเวลาการกวนและระยะเวลาการตกตะกอนที่แตกต่างกัน สำหรับตกตะกอนแอมโมเนียในกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพ จากการทดลองพบว่า การใช้  $MgSO_4$  สามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้สูงที่สุด 35.5 L ซึ่งสูงกว่าชุดควบคุมคิดเป็นร้อยละ 46 มีองค์ประกอบของแก๊สมีเทนคิดเป็นร้อยละ 51 สามารถกำจัด TS, VS, COD และ TKN คิดเป็นร้อยละ 54, 49, 65 และ 13 ตามลำดับ โดยการใช้  $MgSO_4$  ที่ความเข้มข้น 100 mg/L เป็นสภาวะที่ดีที่สุดในการผลิตแก๊สชีวภาพและแก๊สมีเทน จากการทดลองระยะเวลาการกวนและระยะเวลาการตกตะกอน พบว่า ที่ระยะเวลาการกวน 5 min และระยะเวลาการตกตะกอน 90 min สามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้สูงที่สุด 44.5 L มีองค์ประกอบของแก๊สมีเทนคิดเป็นร้อยละ 65 สามารถกำจัด TS, VS และ COD คิดเป็นร้อยละ 58, 52 และ 68 ตามลำดับ ในส่วนของการทดลองในระดับครัวเรือนในถังหมักขนาด 200 L ปริมาตรใช้งานจริง 160 L พบว่าสามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้ 1,095 L การผลิตเฉลี่ยต่อวัน  $0.06 \text{ m}^3/\text{วัน}$  มีองค์ประกอบของแก๊สมีเทนคิดเป็นร้อยละ 64 โดยสามารถให้ผลผลิตแก๊สมีเทน  $2.84 \text{ ml CH}_4/\text{g VS}_{\text{removal}}\cdot\text{วัน}$  จากการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ของระบบในระดับครัวเรือน มีค่าใช้จ่ายต้นทุน 6,442 บาท ซึ่งสามารถคืนทุนได้ในระยะเวลา 2.9 ปี

คำสำคัญ : แก๊สชีวภาพ, มูลไก่, การตกตะกอนทางเคมี, แอมโมเนีย



<b>Title</b>	EFFICIENCY ENHANCEMENT OF BIOGAS PRODUCTION FROM CHICKEN MANURE BASED ON AMMONIA REDUCTION CHEMICAL PRECIPITATION TECHNIQUE
<b>Author</b>	Mr. Sahatcha Jaisin
<b>Degree</b>	Master of Engineering in Renewable Energy Engineering
<b>Advisory Committee Chairperson</b>	Dr. Jutaporn Chanathaworn

### ABSTRACT

The objective of this research is to study the enhanced efficiency of biogas production from chicken manure by chemical precipitation method in laboratory and household level. In the first part, the laboratory-scale was conducted in batch reactor 19 L operating volume 16 L. Three types of magnesium component at the concentration of 100 mg/L were studied for precipitation of ammonia in chicken manure including magnesium sulphate ( $MgSO_4$ ), magnesium chloride ( $MgCl_2$ ) and magnesium oxide ( $MgO$ ). The effect of  $MgSO_4$  concentration at 100 – 200 mg/L and stirring time and precipitation time for ammonia precipitation on biogas production was studied. It was found that the magnesium sulphate by produced the highest biogas production at 35.5 L, which was higher than the control at 46%, methane content at 50.8%, TS, VS, COD and TKN removal at 54, 49, 65 and 13% respectively. 100 mg/L  $MgSO_4$  was the optimum condition for biogas and methane production. The experiment at stirring time of 5 min and precipitation time 90 min showed the highest cumulative biogas production at 44.5 L and methane content at 65% with the maximum TS, VS and COD removal at 58, 52 and 68% respectively. The household process study was conducted in batch reactor 200 L operating volume 160 L. The biogas production produced was 1,095 L with biogas yield of  $0.06 \text{ m}^3/\text{day}$ , methane content of 64% with the methane yield of  $2.84 \text{ ml CH}_4/\text{g VS}_{\text{removal}} \cdot \text{day}$ . The economics evaluation for household method stirred tank reactor was 6,442 baht with

a payback period of 2.9 years.

Keyword : Biogas, Chicken manure, Chemical precipitation, Ammonia



## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ในการให้ความช่วยเหลือทางด้านทุนสนับสนุนงานวิจัยภายใต้โครงการผลิตและการพัฒนาศักยภาพการศึกษาด้านพลังงานหมุนเวียนในระดับอาเซียนสำหรับนักศึกษาระดับบัณฑิตศึกษา วิทยาลัยพลังงานทดแทนมหาวิทยาลัยแม่โจ้ ปีการศึกษา 2016 และขอขอบคุณสำนักวิจัยและส่งเสริมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ประจำปี 2017 สำหรับทุนสนับสนุนงานวิจัย

ขอขอบคุณพระคุณ อาจารย์ ดร. จุฑาภรณ์ ชนะถาวร ในการให้ความช่วยเหลือและคำปรึกษาในการวิจัยและการเขียนวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบคุณพระคุณ อาจารย์ ดร. รจพรรณ นิรัฐศิลป์ และอาจารย์ ดร. ณัฐต์นิชา สุขเกษม ในการให้คำปรึกษาในงานวิจัย ขอขอบคุณพระคุณ อาจารย์ ดร. พิชรี อินธนู ที่ช่วยเหลือในการวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สชีวภาพ ขอขอบคุณพระคุณ น.ส. กมลดารา เจริญสุวรรณ ในการให้ช่วยเหลือการดำเนินงานต่าง ๆ และทุนการสำหรับการวิจัย และขอขอบคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. อติศักดิ์ ปัตติยะ ที่กรุณาสละเวลามาเป็นประธานกรรมการสอบ พร้อมทั้งให้ คำแนะนำ ตลอดจนตรวจเล่มวิทยานิพนธ์ ทำให้เกิดความสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี และทั้งนี้ขอขอบคุณ วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ในการให้ช่วยเหลือพื้นที่สำหรับดำเนินงานวิจัย

สัทัชฌา ใจสิน

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ค
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	ง
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญ.....	ช
สารบัญตาราง.....	ญ
สารบัญภาพ.....	ฎ
อักษรย่อ.....	ฒ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ.....	1
1.2 วัตถุประสงค์.....	3
1.3 ขอบเขตของการศึกษา.....	3
1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ.....	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและการตรวจเอกสาร.....	5
2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับแก๊สชีวภาพ.....	5
2.2 การย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกาศ.....	8
2.3 แบคทีเรียในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์.....	10
2.4 ปัจจัยสำคัญในการย่อยสลายสารอินทรีย์.....	12
2.5 ระบบสำหรับการหมักแก๊สชีวภาพ.....	17
2.6 เทคโนโลยีการผลิตแก๊สชีวภาพ.....	18
2.7 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์เป็นแอมโมเนีย.....	23
2.8 วิธีการกำจัดแอมโมเนีย.....	25

2.9 องค์ประกอบของมูลไก่อ.....	28
2.10 ศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทน (BMP) .....	31
2.11 งานวิจัยที่ผ่านมา.....	34
บทที่ 3 วัตถุประสงค์และวิธีการทดลอง.....	46
3.1 วัตถุประสงค์.....	48
3.2 สารเคมี.....	48
3.3 วิธีการทดลองในระดับห้องห้องปฏิบัติการ.....	49
3.4 วิธีการทดลองในระดับครัวเรือน.....	52
บทที่ 4 ผลการทดลองและวิจารณ์.....	55
4.1 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของวัตถุประสงค์ที่ตั้งต้น.....	55
4.2 ผลของการศึกษาชนิดของสารประกอบแมกนีเซียมต่อปริมาณการผลิตแก๊สชีวภาพ .....	56
4.3 ผลของความเข้มข้นของสารเคมีประกอบแมกนีเซียมต่อปริมาณการผลิตแก๊สชีวภาพ.....	63
4.4 ผลของระยะเวลาการกวนต่อระยะเวลาตกตะกอนของแมกนีเซียมซัลเฟตต่อปริมาณการผลิตแก๊สชีวภาพ .....	69
4.5 ผลการศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพในระดับครัวเรือน.....	76
4.6 การวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์.....	78
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	81
5.1 ผลการทดลองของการศึกษาชนิดของสารประกอบแมกนีเซียม .....	81
5.2 ผลการทดลองของการศึกษาความเข้มข้นของสารเคมี.....	81
5.3 ผลการทดลองของการศึกษาระยะเวลาการกวนต่อระยะเวลาตกตะกอน.....	81
5.4 ผลการทดลองในระดับครัวเรือน .....	82
5.5 ข้อเสนอแนะ .....	82
บรรณานุกรม.....	84
ภาคผนวก ก.....	88

ภาคผนวก ข.....	95
ภาคผนวก ค.....	99
ภาคผนวก ง.....	102
ประวัติผู้วิจัย.....	119



## สารบัญตาราง

	หน้า
ตารางที่ 1 องค์ประกอบของแก๊สชีวภาพ.....	6
ตารางที่ 2 สมบัติของแก๊สชีวภาพ.....	7
ตารางที่ 3 ศักยภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพของมูลสัตว์ชนิดต่าง ๆ.....	7
ตารางที่ 4 ศักยภาพการผลิตและการนำแก๊สชีวภาพไปใช้เป็นพลังงานทดแทนจากฟาร์มปศุสัตว์ .....	8
ตารางที่ 5 ความเข้มข้นในการกระตุ้นและยับยั้งของไอออนบวก.....	14
ตารางที่ 6 ผลของแอมโมเนียไนโตรเจนที่มีต่อระบบผลิตแก๊สชีวภาพ.....	15
ตารางที่ 7 องค์ประกอบเบื้องต้นของมูลไก่.....	28
ตารางที่ 8 อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของวัสดุคูลิบ .....	29
ตารางที่ 9 ปริมาณมลพิษที่ยอมรับได้ภายในโรงเรือน .....	30
ตารางที่ 10 ปริมาณสารอาหารในมูลสัตว์.....	31
ตารางที่ 11 ปริมาณแก๊สที่สามารถผลิตได้.....	35
ตารางที่ 12 องค์ประกอบเบื้องต้นของมูลไก่และหญ้าเนเปียร์ .....	37
ตารางที่ 13 องค์ประกอบเบื้องต้นของมูลไก่ ช้างข้าวโพด และหัวเชื้อ .....	38
ตารางที่ 14 ประสิทธิภาพเฉลี่ยในการบำบัดน้ำทิ้งจากบ่อบำบัด.....	41
ตารางที่ 15 วิเคราะห์องค์ประกอบของมูลไก่ .....	48
ตารางที่ 16 วิเคราะห์พารามิเตอร์ในขั้นตอนการหมักแก๊สชีวภาพระดับห้องห้องปฏิบัติการ .....	52
ตารางที่ 17 วิเคราะห์พารามิเตอร์ในขั้นตอนการหมักแก๊สชีวภาพระดับครัวเรือน .....	54
ตารางที่ 18 องค์ประกอบเบื้องต้นของมูลไก่จากฟาร์มในจังหวัดเชียงใหม่ .....	56
ตารางที่ 19 ผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ในกระบวนการหมักหลังผ่านการตกตะกอนโดยใช้ สารประกอบแมกนีเซียม.....	57
ตารางที่ 20 ผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ในกระบวนการหมักหลังผ่านการตกตะกอนด้วย แมกนีเซียมซัลเฟต.....	64



ตารางที่ 21 ผลของการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ในกระบวนการหมักที่ระยะเวลาการกวนต่อ  
 ระยะเวลาตกตะกอน 60 min ..... 69

ตารางที่ 22 ผลของการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ในกระบวนการหมักที่ระยะเวลาการกวนต่อ  
 ระยะเวลาตกตะกอน 90 min ..... 69

ตารางที่ 23 ศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทนที่ระยะเวลาการกวนต่อระยะเวลาตกตะกอน ..... 75

ตารางที่ 24 องค์ประกอบเบื้องต้นของมูลไก่จากฟาร์มในจังหวัดเชียงใหม่ ..... 76

ตารางที่ 25 การวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ ..... 80



## สารบัญภาพ

	หน้า
ภาพที่ 1 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์.....	8
ภาพที่ 2 บ่อหมักข้าวแบบถังลอย .....	19
ภาพที่ 3 บ่อหมักข้าวแบบโดมคงที่ .....	20
ภาพที่ 4 บ่อหมักข้าวแบบราง .....	20
ภาพที่ 5 บ่อแบบพลาสติกคลุมบ่อดิน.....	21
ภาพที่ 6 ลักษณะการทำงานของบ่อหมักไม่ใช้อากาศแบบเร็ว .....	22
ภาพที่ 7 แผนผังระบบแบบกวนสมบูรณ์.....	22
ภาพที่ 8 แมงกานีสซีโอไลต์ขนาด 1.5 – 5.0 mm.....	26
ภาพที่ 9 ชุดทดลองศึกษาการผลิตแก๊สมีเทนจากการใช้มูลสุกรและหญ้าเนเปียร์หมัก .....	32
ภาพที่ 10 ชุดทดลองศึกษาการผลิตแก๊สมีเทนจากการใช้หญ้าเนเปียร์พันธุ์แคระ.....	33
ภาพที่ 11 แบบจำลองการศึกษาศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนของเศษก้านและใบไม้หลายชนิด.....	34
ภาพที่ 12 ระดับของแอมโมเนียที่เหลือหลังจากผ่านการดูดซับ .....	38
ภาพที่ 13 การผลิตแก๊สมีเทนของมูลไก่โดยการไล่แอมโมเนียที่ระเหยออก .....	40
ภาพที่ 14 ประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจน .....	41
ภาพที่ 15 การกำจัดสารอินทรีย์ในแต่ละค่า pH.....	42
ภาพที่ 16 ความเข้มข้นของแอมโมเนียต่อเวลาที่อัตราส่วน $Mg^{2+}:NH_4^+-N:PO_4^{3-}P$ ต่างกัน .....	43
ภาพที่ 17 ผลของค่า pH ต่อการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจน (ก) และการกำจัดสารอินทรีย์ (ข) .....	44
ภาพที่ 18 แผนผังการทดลอง.....	47
ภาพที่ 19 ลักษณะของมูลไก่.....	48
ภาพที่ 20 แบบจำลองการทดลองผลิตแก๊สชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการ.....	50
ภาพที่ 21 การทดลองผลิตแก๊สชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการ.....	51

ภาพที่ 22 แบบจำลองการทดลองผลิตแก๊สชีวภาพในระดับห้องครัวเรือน .....	53
ภาพที่ 23 การทดลองผลิตแก๊สชีวภาพในระดับห้องครัวเรือน .....	53
ภาพที่ 24 ผลของประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในกระบวนการหมักหลังผ่านการตกตะกอนโดยใช้สารประกอบแมกนีเซียม .....	58
ภาพที่ 25 ปริมาณแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละวันของกระบวนการหมักหลังผ่านการตกตะกอนโดยใช้สารประกอบแมกนีเซียม .....	59
ภาพที่ 26 ปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมในกระบวนการหมักหลังผ่านการตกตะกอนโดยใช้ สารประกอบแมกนีเซียม .....	60
ภาพที่ 27 ผลขององค์ประกอบแก๊สมีเทนในกระบวนการหมักหลังผ่านการตกตะกอนโดยใช้ สารประกอบแมกนีเซียม .....	61
ภาพที่ 28 ผลของการกำจัด TKN ในกระบวนการหมักหลังผ่านการตกตะกอนโดยใช้สารประกอบแมกนีเซียม .....	62
ภาพที่ 29 ผลของการกำจัดสารอินทรีย์ในกระบวนการหมักหลังผ่านการตกตะกอน ด้วยแมกนีเซียมซัลเฟต .....	64
ภาพที่ 30 ปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นในแต่ละวันในกระบวนการหมักหลังผ่านการตกตะกอน .....	66
ภาพที่ 31 ปริมาณแก๊สสะสมในกระบวนการหมักหลังผ่านการตกตะกอนด้วยแมกนีเซียมซัลเฟต....	67
ภาพที่ 32 ผลขององค์ประกอบแก๊สมีเทนในกระบวนการหมักหลังผ่านการตกตะกอน ด้วยแมกนีเซียมซัลเฟต .....	67
ภาพที่ 33 ผลของการกำจัด TKN ในกระบวนการหมักหลังผ่านการตกตะกอนด้วยแมกนีเซียมซัลเฟต .....	68
ภาพที่ 34 ผลของการกำจัดสารอินทรีย์ในกระบวนการหมักที่ระยะเวลาการกวน .....	70
ภาพที่ 35 แก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละวันที่ระยะเวลาการกวนต่อระยะเวลาตกตะกอน 60 min ..	71
ภาพที่ 36 แก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละวันที่ระยะเวลาการกวนต่อระยะเวลาตกตะกอน 90 min ..	71
ภาพที่ 37 ปริมาณแก๊สสะสมที่ระยะเวลาการกวนต่อระยะเวลาตกตะกอน 60 min.....	72
ภาพที่ 38 ปริมาณแก๊สสะสมที่ระยะเวลาการกวนต่อระยะเวลาตกตะกอน 90 min.....	73
ภาพที่ 39 ผลของการกำจัด TKN ในระบบที่ระยะเวลาการกวนต่อระยะเวลาตกตะกอน.....	73

ภาพที่ 40 ผลขององค์ประกอบของแก๊สมีเทนที่ระยะเวลาการกวนต่อระยะเวลาตกตะกอน .....	74
ภาพที่ 41 แก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละวันของการทดลองในระดับครัวเรือน 200 L .....	77
ภาพที่ 42 แก๊สชีวภาพสะสมของการทดลองในระดับครัวเรือน 200 L .....	77
ภาพที่ 43 การจำกัดสารอินทรีย์และ TKN ในระบบระดับครัวเรือน 200 L .....	78



## อักษรย่อ

Alk	(Alkalinity)	ความเป็นด่าง
BMP	(Biochemical methane potential)	ศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทน
C	(Carbon)	คาร์บอน
C/N	(Carbon	อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน
COD	(Carbon to Nitrogen ratio)	ปริมาณสารอินทรีย์
MAP	(Magnesium ammonium phosphate)	ตะกอนแมกนีเซียมแอมโมเนียม ฟอสเฟต
MC	(Moisture content)	ความชื้น
N	(Nitrogen)	ไนโตรเจน
TS	(Total solid)	ปริมาณของแข็งทั้งหมด
TKN	(Total kjeldahl nitrogen)	ปริมาณสารอินทรีย์ไนโตรเจนและ แอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมด
VFA	(Volatile fatty acid)	ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย
VFA/Alk	(Volatile fatty acid to Alkalinity)	สัดส่วนของปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย ง่ายต่อความเป็นด่าง
VS	(Volatile solid)	ปริมาณของแข็งระเหยง่าย

# บทที่ 1

## บทนำ

### 1.1 ที่มาและความสำคัญ

พลังงานทดแทน (Alternative energy) เป็นที่รู้จักกันอย่างแพร่หลาย อาทิเช่น พลังงานแสงอาทิตย์ (Solar energy) พลังงานลม (Wind energy) พลังงานความร้อนใต้พิภพ (Geothermal) พลังงานน้ำ (Hydropower) พลังงานชีวมวล (Biomass energy) และพลังงานชีวภาพ (Biogas energy) เป็นต้น พลังงานทดแทนถูกคิดค้นขึ้นมาและนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานใหม่เพื่อทดแทนพลังงานจากแหล่งเดิมที่กำลังลดลงและมีแนวโน้มที่จะหมดไปในอนาคต ในขณะที่การใช้พลังงานต่างๆ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อตอบสนองความต้องการ พลังงานทดแทนจึงมีความสำคัญทั้งในปัจจุบันและในอนาคต ดังนั้นประเทศต่าง ๆ รวมถึงประเทศไทยที่มีการส่งเสริมและพัฒนาทางด้านพลังงานทดแทนมาอย่างต่อเนื่อง

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ทำให้มีวัสดุเหลือทิ้งจากกระบวนการผลิตต่าง ๆ เกิดขึ้นในปริมาณมาก เมื่อเกิดการสะสมตามธรรมชาติ ย่อมส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมตามมา วัสดุเหลือทิ้งดังกล่าว มีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อแปรรูปเป็นพลังงานได้ จึงได้มีการนำมาเพิ่มมูลค่าในรูปของพลังงาน เช่น การนำน้ำเสียจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังแปรรูปมาใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตแก๊สชีวภาพ (เกื้อกุล บุญยี่, 2552) การหมักมูลสุกรร่วมกับเศษอาหารและใบปาล์มเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพ (อัญชลี แทนนิล, 2553) การผลิตแก๊สชีวภาพจากใบยางพาราโดยหมักร่วมกับมูลสุกรสำหรับใช้ในครัวเรือน (จิตชนก คงแดง, 2554) การผลิตแก๊สชีวภาพโดยใช้มูลไก่หมักร่วมกับซังดอกปอปปี้ (Bayrakdar et al., 2017) และการผลิตแก๊สชีวภาพจากการใช้มูลไก่โดยการหมักร่วมกับซังข้าวโพด (Li et al., 2013) เป็นต้น แก๊สชีวภาพที่ได้สามารถนำมาใช้ทดแทนการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล ทำให้ลดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมและยังลดปัญหาการสะสมของวัตถุดิบเหลือทิ้งได้อีกด้วย

เทคโนโลยีการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic digestion technology) เป็นเทคโนโลยีหนึ่งที่สามารถนำของเหลือทิ้งมาแปรรูปเป็นพลังงานได้ โดยการนำวัตถุดิบเหลือทิ้งจากทางการเกษตรหรือจากฟาร์มปศุสัตว์มาแปรรูปเป็นแก๊สชีวภาพ ซึ่งสามารถใช้ทดแทนการใช้แก๊สหุงต้ม (LPG) ทั้งในระดับครัวเรือน และในระดับโรงงานอุตสาหกรรม เช่น นำมาใช้ในการสันดาปเครื่องยนต์เพื่อผลิตไฟฟ้า หรือใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อต้มไอน้ำในการผลิตไฟฟ้า โดยเฉพาะการผลิตแก๊สชีวภาพจากฟาร์มปศุสัตว์นั้นในประเทศไทยมีศักยภาพการผลิตแก๊สชีวภาพสูงถึง  $879.61 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{ปี}$  แต่ส่วนใหญ่แล้วได้จากการใช้วัตถุดิบจากฟาร์มสุกรหรือฟาร์มโคเป็นส่วนใหญ่ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและ



อนุรักษพลังงาน, 2559) ถึงแม้ว่าประเทศไทยมีฟาร์มไก่อยู่เป็นจำนวนมากก็ตาม หากมองในด้านศักยภาพการผลิตแก๊สชีวภาพนั้นพบว่า มูลไก่มีศักยภาพที่สามารถใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตแก๊สชีวภาพมากกว่ามูลสัตว์อื่น ๆ เมื่อเทียบกับปริมาณแก๊สชีวภาพต่อกิโลกรัมของมูลสัตว์ (ศกรินทร์ หมูเทพ, 2555) แต่เนื่องจากในมูลไก่มีองค์ประกอบของแอมโมเนียในปริมาณที่สูง ทำให้ส่งผลต่อระบบการย่อยสลายเป็นแก๊สชีวภาพ

มูลไก่เป็นวัตถุดิบเหลือทิ้งที่มีปริมาณไนโตรเจนสูง ซึ่งทำให้เกิดเป็นแก๊สแอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) และเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการผลิตแก๊สมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) เนื่องจากในกระบวนการหมักแก๊สชีวภาพแบบไม่ใช้อากาศ จะต้องมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N Ratio) ที่เหมาะสม (อัญชลี แทนนิล, 2553), (จิตชนก คงแดง, 2554) ในขณะที่มูลไก่มีค่า C/N Ratio ต่ำ (สิริชัย แยมแบน, 2554) ซึ่งเมื่อนำมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตแก๊สชีวภาพอาจทำให้ระบบผลิตแก๊สชีวภาพมีปริมาณผลได้น้อย เนื่องจากเกิดการสะสมของแอมโมเนียและทำให้เกิดการยับยั้งแบคทีเรียขึ้น ได้มีการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับการลดแอมโมเนียในมูลไก่เช่น การศึกษาการกำจัดแอมโมเนียในมูลไก่โดยใช้กระบวนการไล่แอมโมเนียที่ระเหยออก (Ammonia stripping) (Abouelenien et al., 2010), (Nie et al., 2015) การศึกษาการลดแอมโมเนียในมูลไก่ด้วยวิธีการดูดซับจากการใช้อะลูมิเนียมซิลิเกต (Wlazlo et al., 2016) การศึกษาการกำจัดแอมโมเนียในมูลไก่ที่ผ่านการไฮโดรไลซิสโดยใช้วิธีการตกตะกอนผลึกสูตรไวท์ (อานนท์ ดวงพาลี, 2552) เป็นต้น ซึ่งวิธีการข้างต้นสามารถลดปริมาณของแอมโมเนียได้ แต่มีขั้นตอนที่ซับซ้อน มีค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานสูง นอกจากนี้ยังมีการนำมูลไก่มาหมักร่วมกับวัตถุดิบอื่น ๆ (Anaerobic co-digestion) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพ เช่น การศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์โดยการหมักร่วมกับมูลไก่และมูลโค (บัววันรัตน์ บุญอ่อน, 2014) การศึกษาผลิตแก๊สชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างหญ้าเนเปียร์กับมูลไก่ (Weerayuttil et al., 2016) เป็นต้น แต่วัตถุดิบที่ใช้หมักร่วมกันจะต้องมีองค์ประกอบของคาร์บอนที่สูง เพื่อให้สัดส่วน C/N Ratio อยู่ในช่วงที่เหมาะสม เกิดการย่อยสลายได้ง่าย และต้องไม่ส่งผลกระทบต่อระบบห่วงโซ่อาหาร เป็นต้น

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจการกำจัดแอมโมเนียในมูลไก่ด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี จากการศึกษาค้นคว้างานวิจัยของ (พงศัลดดา เผ่าศิริ, 2556) ได้ใช้เทคนิคการตกตะกอนของแมกนีเซียมเพื่อกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนของน้ำเสียจากฟาร์มไก่ โดยสามารถกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนได้ถึงร้อยละ 79 ซึ่งเป็นวิธีที่ไม่ซับซ้อน มีค่าใช้จ่ายน้อย จึงทำให้เกิดแนวคิดในการนำมาประยุกต์ใช้กับการผลิตแก๊สชีวภาพ งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการและระดับครัวเรือน เพื่อศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพจากมูลไก่โดยใช้เทคนิคการลดแอมโมเนียด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี เปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่มีการลดแอมโมเนีย ศึกษาชนิดของสารเคมีที่มีสารประกอบของแมกนีเซียม ความเข้มข้นของสารเคมี ระยะเวลาการกวน



ต่อระยะเวลาตกตะกอน วิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อระบบผลิตแก๊สชีวภาพ และศึกษาศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทน (Biochemical methane potential, BMP) เพื่อใช้เป็นแนวทางสำหรับการผลิตแก๊สชีวภาพในระดับครัวเรือนต่อไป

## 1.2 วัตถุประสงค์

- 1.2.1 ศึกษาความเป็นไปได้ในการลดแอมโมเนียในมูลไก่ด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมี
- 1.2.2 คัดเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสมในการลดแอมโมเนียในมูลไก่ด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมี
- 1.2.3 ศึกษาประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพจากมูลไก่ที่ผ่านการลดแอมโมเนียด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมี

## 1.3 ขอบเขตของการศึกษา

- 1.3.1 การศึกษาชนิดของสารเคมี 3 ชนิด ได้แก่ แมกนีเซียมซัลเฟต เฮปตะไฮเดรต ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) แมกนีเซียมคลอไรด์ เฮกซะไฮเดรต ( $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ) และแมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ )
- 1.3.2 การศึกษาการลดปริมาณแอมโมเนียในมูลไก่ด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี โดยศึกษาความเข้มข้นของสารเคมีที่แตกต่างกันในช่วง 100 – 200 mg/L และศึกษาระยะเวลาการกวนในช่วงเวลา 1 – 5 min ต่อระยะเวลาตกตะกอนในช่วงเวลา 30 – 90 min
- 1.3.3 ใช้มูลไก่จากฟาร์มในจังหวัดเชียงใหม่เป็นวัตถุดิบในการทดลอง
- 1.3.4 ดำเนินการทดลอง 2 ระดับ ได้แก่ ระดับห้องปฏิบัติการระบบแบบกะ โดยใช้ถังหมักขนาด 19 L ปริมาตรใช้งานจริง 16 L และในระดับครัวเรือน โดยใช้ถังหมักขนาด 200 L ปริมาตรใช้งานจริง 160 L ดำเนินการภายใต้อุณหภูมิในช่วง  $35 \pm 3$  °C เป็นระยะเวลา 20 วัน หรือจนกว่าปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นคงที่
- 1.3.5 ศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพจากมูลไก่ที่ผ่านการตกตะกอนทางเคมี และปัจจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ไนโตรเจนและแอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมด (Total Kjeldahl Nitrogen, TKN) ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในระบบ องค์ประกอบของแก๊สมีเทน ปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้น วิเคราะห์ศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทน (Biochemical methane potential, BMP)
- 1.3.6 วิเคราะห์ความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ของระบบผลิตแก๊สชีวภาพในระดับครัวเรือน

#### 1.4 ประโยชน์ที่ได้รับ

- 1.4.1 ทราบถึงสภาวะที่เหมาะสมในการใช้สารเคมีเพื่อลดแอมโมเนียในมูลไก่สำหรับการผลิตแก๊สชีวภาพ ทำให้เกิดองค์ความรู้ใหม่ในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพและพัฒนาเทคโนโลยีด้านพลังงานทดแทน สามารถนำไปใช้เป็นแนวทางสำหรับผู้สนใจพัฒนาทางด้านเชื้อเพลิงชีวภาพ และองค์ความรู้ที่ได้สามารถนำไปเผยแพร่ให้กับชุมชน เพื่อส่งเสริมให้ทุกคนเห็นความสำคัญทางด้านพลังงานมากขึ้น
- 1.4.2 ลดปัญหาการสะสมของมูลไก่ที่มีผลกระทบต่อทางด้านสิ่งแวดล้อม เช่น การเกิดกลิ่นเหม็นจากฟาร์มไก่ หรือสาเหตุทำให้แหล่งน้ำมีความสกปรก เป็นต้น
- 1.4.3 เพิ่มมูลค่าของวัสดุขี้มูลที่เหลือทิ้งจากฟาร์มปศุสัตว์ และสามารถใช้เป็นแนวทางส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนการใช้แหล่งพลังงานฟอสซิล เพื่อลดต้นทุนทางด้านพลังงานทั้งในระดับครัวเรือนหรือในระดับชุมชน



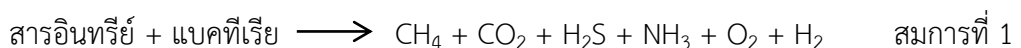
## บทที่ 2

### ทฤษฎีและการตรวจเอกสาร

งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพจากมูลไก่โดยใช้เทคนิคการลดแอมโมเนียด้วยวิธีการตกตะกอน ซึ่งใช้มูลไก่เป็นวัตถุดิบเพียงชนิดเดียว การทดลองมีการศึกษาผลิตแก๊สชีวภาพทั้งในระดับห้องปฏิบัติการและระดับครัวเรือน ศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการผลิตแก๊สชีวภาพและความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ ซึ่งในบทนี้เป็นการศึกษาทฤษฎีและการตรวจเอกสารที่เกี่ยวข้อง ประกอบไปด้วย 11 หัวข้อหลัก ในด้านทฤษฎีจะกล่าวถึง ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับแก๊สชีวภาพ การย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกาศ แบคทีเรียในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ ปัจจัยสำคัญในการย่อยสลายสารอินทรีย์ ระบบสำหรับการหมักแก๊สชีวภาพ เทคโนโลยีการผลิตแก๊สชีวภาพ กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์เป็นแอมโมเนีย วิธีการกำจัดแอมโมเนีย องค์ประกอบของมูลไก่ ศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทน และการตรวจเอกสาร การศึกษาทฤษฎีและการตรวจเอกสารเพื่อนำข้อมูลมาใช้เป็นแนวทางในการศึกษาวิจัย โดยทฤษฎีและงานวิจัยที่ผ่านมาจะมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

#### 2.1 ความรู้ทั่วไปเกี่ยวกับแก๊สชีวภาพ

แก๊สชีวภาพ (Biogas) คือ แก๊สที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะที่ไม่ใช้ออกาศ โดยมีแบคทีเรียเป็นตัวย่อยสลายสารอินทรีย์ ในกระบวนการย่อยสลายจะมีแบคทีเรีย 2 กลุ่ม คือ แบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด (Acidogenic bacteria) และแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทน (Methanogenic bacteria) โดยแบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด จะทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลใหญ่ เช่น คาร์โบไฮเดรต (Carbohydrates) โปรตีน (Protein) ไขมัน (Fatty) ให้กลายเป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเล็ก เช่น กลูโคส (Glucose) กรดอะมิโน (Amino acid) กรดไขมัน (Fatty acid) แต่มีกลุ่มแบคทีเรียที่ผลิตกรดอีกกลุ่ม ที่จะเปลี่ยนกรดอินทรีย์ขนาดเล็กให้เป็นกรดอะซิติก (Acetic acid) และแก๊สไฮโดรเจน ( $H_2$ ) จากนั้นแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทนจะผลิตมีเทนโดยการใช้กรดอะซิติกและไฮโดรเจนเป็นสารอาหารและย่อยสลายทำให้เกิดเป็นแก๊สมีเทน ( $CH_4$ ) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) โดยสมการทางเคมีของแก๊สชีวภาพแสดงสมการที่ 1



องค์ประกอบของแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นแก๊สมีเทน 50 - 70% และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ 30 - 50% โดยมีแก๊สอื่น ๆ เกิดขึ้นเล็กน้อย เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ ) ออกซิเจน ( $O_2$ ) ไนโตรเจน ( $N_2$ ) ไฮโดรเจน ( $H_2$ ) ไออน้ำ เป็นต้น (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและ

อนุรักษ์พลังงาน, 2554) แสดงดังตารางที่ 1 โดยองค์ประกอบของแก๊สชีวภาพจะขึ้นที่กับวัตถุดิบที่ใช้ ในกระบวนการ โดยที่กระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพจะต้องไม่มีอากาศเข้าไปในระบบ เพราะจะทำให้ ประสิทธิภาพการเกิดแก๊สมีเทนลดลงหรือทำให้ระบบเกิดความล้มเหลวได้ เนื่องจากอากาศมีผลกับ แบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทนที่อยู่ในระบบ

**ตารางที่ 1** องค์ประกอบของแก๊สชีวภาพ

องค์ประกอบ	ร้อยละ
มีเทน	50-70 % (v/v)
คาร์บอนไดออกไซด์	20-50 % (v/v)
ไนโตรเจน	0-5 % (v/v)
ออกซิเจน	0-2 % (v/v)
ไฮโดรเจนซัลไฟด์	50-10,000 ppm
แอมโมเนีย	0-1 % (v/v)
ไอน้ำ	0-10 % (v/v)
แก๊สอื่น ๆ	0-1 % (v/v)

ที่มา: (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2554)

ทั้งนี้แก๊สชีวภาพมีคุณสมบัติที่สามารถนำไปทดแทนการใช้เชื้อเพลิงจากแหล่งเดิม เช่น ทดแทนการใช้แก๊สหุงต้ม (LPG) น้ำมันเบนซิน น้ำมันเตา หรือแม้กระทั่งนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับ ผลิตไฟฟ้า เป็นต้น ซึ่งสมบัติของแก๊สชีวภาพแสดงดังตารางที่ 2 โดยแก๊สชีวภาพมีรูปแบบที่จะนำไปใช้ เช่น การนำแก๊สชีวภาพไปใช้เป็นแหล่งเชื้อเพลิงสำหรับผลิตพลังงานความร้อน โดยการเผาไหม้เพื่อให้ ความร้อนโดยตรง ซึ่งจะได้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูง เช่น การนำแก๊สชีวภาพไปใช้ในครัวเรือน ใช้เป็นเชื้อเพลิงในการอบแห้ง หรือใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับหม้อต้มไอน้ำในการผลิตไฟฟ้า เป็นต้น

**ตารางที่ 2** สมบัติของแก๊สชีวภาพ

คุณสมบัติ	มีเทน	คาร์บอนไดออกไซด์
มวลโมลเลกุล (kg/mol)	16.04	44.01
ความหนาแน่น (ที่ 1.013 bar, 15 °C) (kg/m <sup>3</sup> )	0.68	1.87
อุณหภูมิเปลี่ยนสถานะ (°C)	-82.7	31
ความดันเปลี่ยนสถานะ (bar)	45.96	73.82
การนำความร้อน (ที่ 1.013 bar, 0 °C) (mW/m·K)	32.81	14.65
ค่าความร้อนสูงสุด (ที่ 1.013 bar, 15.6 °C) (mW/m·K)	37.63	-
ค่าความร้อนต่ำสุด (ที่ 1.013 bar, 15 °C) (mW/m·K)	33.91	-
อุณหภูมิติดไฟอัตโนมัติ (°C)	595	-

ที่มา: (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2553)

การผลิตแก๊สชีวภาพจากฟาร์มปศุสัตว์ของประเทศไทย มีศักยภาพการผลิตถึง 879.61x10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/ปี โดยศักยภาพของการผลิตแก๊สชีวภาพแต่ละวัตถุดิบมีความแตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 3 ในขณะที่มูลไก่มีศักยภาพที่สามารถผลิตแก๊สชีวภาพมากกว่ามูลสัตว์อื่น ๆ เมื่อเทียบกับปริมาณแก๊สชีวภาพที่ได้ต่อกิโลกรัมของมูลสัตว์ ทั้งนี้ มูลสัตว์แต่ละชนิดมีศักยภาพการผลิตและการนำแก๊สชีวภาพไปใช้เป็นพลังงานทดแทนที่แตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 4

**ตารางที่ 3** ศักยภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพของมูลสัตว์ชนิดต่าง ๆ

ชนิดของมูลสัตว์	ปริมาณแก๊สชีวภาพต่อกิโลกรัมของมูลสัตว์ (m <sup>3</sup> /kg)
วัว ควาย	0.023-0.040
หมู	0.040-0.059
ไก่	0.065-0.116

ที่มา: (ศักรินทร์ ทุมเทพ, 2555)

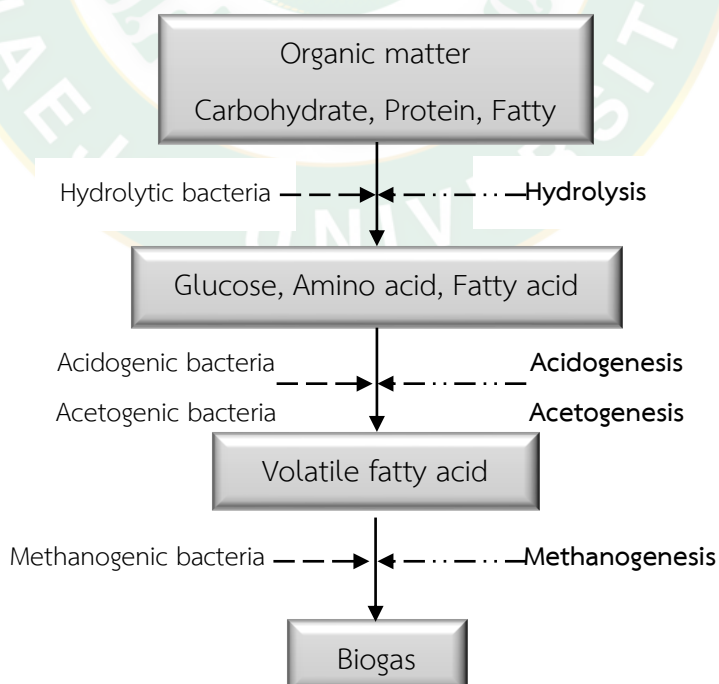
**ตารางที่ 4** ศักยภาพการผลิตและการนำแก๊สชีวภาพไปใช้เป็นพลังงานทดแทนจากฟาร์มปศุสัตว์

ประเภทฟาร์ม	จำนวน โรงงาน	ศักยภาพที่ ผลิตได้ $10^6$ $m^3$ /ปี	เทียบเท่า ไฟฟ้า (MW)	เทียบเท่า ความร้อน (ktoe)	เทียบเท่าแก๊ส ชีวภาพอัด (ton)
ฟาร์มไก่	6,281	336.81	40.40	168.41	153,059.34
ฟาร์มโคกระบือ	5,617	245.50	29.46	122.75	111,592.03
ฟาร์มเป็ด	168	8.40	1.00	4.20	3,822.21
ฟาร์มแพะ แกะ	48	0.10	0.01	0.05	45.94
ฟาร์มหมู	2,541	288.78	34.65	144.39	131,264.40
รวม	14,653	879.61	105.52	439.80	399,783.92

ที่มา: (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2559)

## 2.2 การย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกาศ

กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกาศ เกิดจากการเปลี่ยนแปลงสารอินทรีย์ให้เป็น แก๊สมีเทน และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งแก๊สทั้งสองชนิดเป็นองค์ประกอบหลักของแก๊สชีวภาพจากการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกาศให้กลายเป็นแก๊สชีวภาพ แสดงดังภาพที่ 1

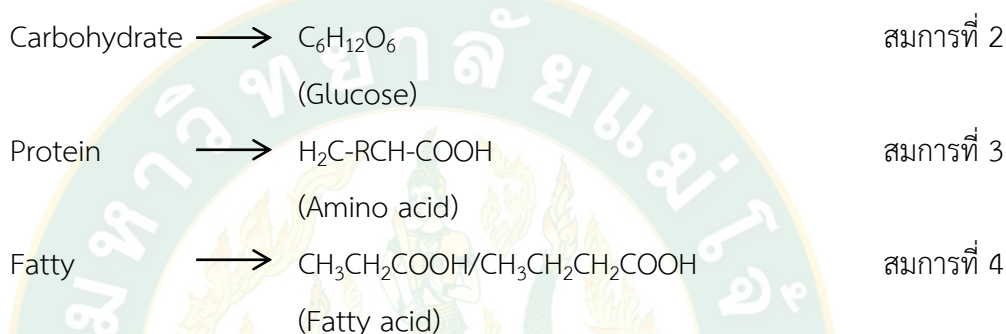


**ภาพที่ 1** กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์



### 2.1.1 กระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis)

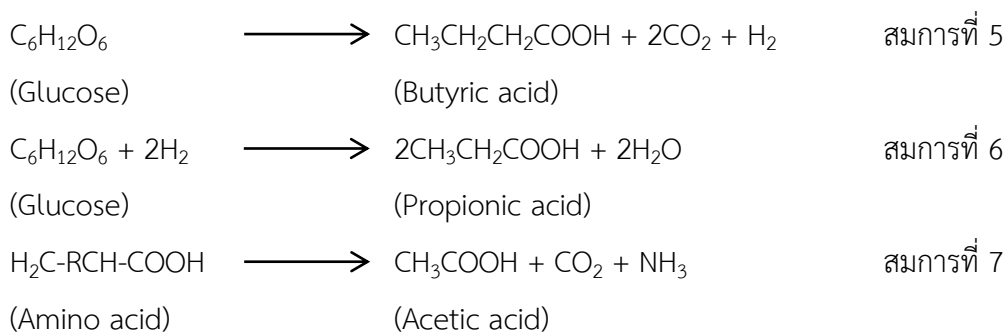
เป็นกระบวนการแรกของการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลใหญ่ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน ให้กลายเป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเล็ก ซึ่งผลจากการย่อยสลายจะได้ สารประกอบอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเดี่ยว เช่น น้ำตาลกลูโคส กรดอะมิโน กรดไขมัน เป็นต้น ปัจจัยที่เกี่ยวข้องของปฏิกิริยาในกระบวนการไฮโดรไลซิสจะขึ้นอยู่กับค่า pH ระยะเวลาที่เก็บ อุณหภูมิ รวมถึงองค์ประกอบของวัตถุดิบที่ป้อนเข้าสู่ระบบ โดยมีแบคทีเรียกลุ่มไฮโดรไลติก และแบคทีเรียกลุ่มเฟอร์เมนเตทีฟ เป็นตัวย่อยสลายสารอินทรีย์ในขั้นตอนไฮโดรไลซิส ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ของกระบวนการไฮโดรไลซิสแสดงดังสมการที่ 2 - 4



แบคทีเรียในกระบวนการไฮโดรไลซิสจะแบ่งตามชนิดของเอนไซม์ที่ใช้ย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยความเร็วในการย่อยสลายจะขึ้นอยู่กับเอนไซม์จากแบคทีเรีย และปัจจัยอื่น ๆ เช่น ความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในระบบ ความเข้มข้นของเอนไซม์ การสัมผัสสารอินทรีย์ในระบบ เป็นต้น

### 2.1.2 กระบวนการอะซิโดเจเนซิส (Acidogenesis)

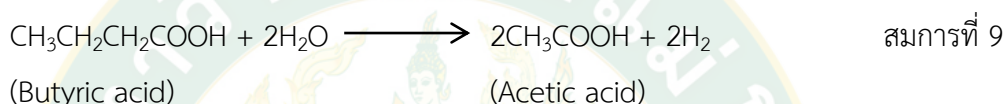
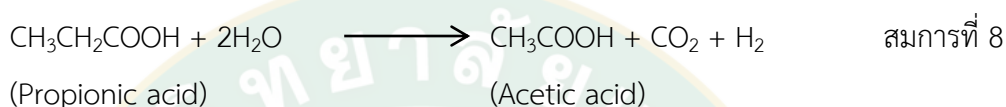
กระบวนการอะซิโดเจเนซิสเป็นการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเล็กหรือโมเลกุลเดี่ยวที่ได้จากกระบวนการไฮโดรไลซิส โดยแบคทีเรียกลุ่มผลิตกรดจะใช้สารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเดี่ยวเป็นแหล่งอาหาร ผลจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลเดี่ยวของแบคทีเรีย จะทำให้ได้กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile fatty acid) ที่มีโครงสร้างโมเลกุลคาร์บอนไม่เกิน 5 อะตอม เช่น กรดไอโซบิวทีริก (Isobutyric acid) กรดโพรพิโอนิก (Propionic acid) กรดอะซิติก (Acetic acid) เป็นต้น แสดงสมการดังสมการที่ 5 - 7





### 2.1.3 กระบวนการอะซิโตเจเนซิส (Acetogenesis)

เป็นกระบวนการผลิตกรดเช่นเดียวกับอะซิโตเจเนซิส แต่อะซิโตเจเนซิสเป็นกระบวนการที่นำกรดอินทรีย์โครงสร้างโมเลกุลเดี่ยวที่มีคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม มาเปลี่ยนเป็นอะซิเตท ฟอร์เมท แก๊สไฮโดรเจน และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสารประกอบสำคัญในการผลิตแก๊สมีเทน โดยมีแบคทีเรียกลุ่มอะซิโตเจนิคเป็นตัวย่อยสลาย กระบวนการอะซิโตเจเนซิสเป็นกระบวนการที่สำคัญในการลดการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายและไฮโดรเจน ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้กระบวนการผลิตแก๊สมีเทนถูกยับยั้งหรืออาจทำให้ระบบล้มเหลวได้ โดยการย่อยสลายของกระบวนการอะซิโตเจเนซิสแสดงดังสมการที่ 8 และ 9



### 2.1.4 กระบวนการมีทาโนเจเนซิส (Methanogenesis)

มีทาโนเจเนซิสเป็นกระบวนการสุดท้ายของการย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยมีแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างมีเทนย่อยสลายกรดอินทรีย์จากกระบวนการอะซิโตเจเนซิส เช่น กรดอะซิเตท กรดฟอร์เมท แก๊สไฮโดรเจน ให้กลายเป็นแก๊สมีเทน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สอื่น ๆ เล็กน้อย ซึ่งการย่อยสลายของกระบวนการมีทาโนเจเนซิสแสดงดังสมการที่ 10 และ 11



แบคทีเรียในกระบวนการมีทาโนเจเนซิส เป็นแบคทีเรียที่มีการเจริญเติบโตช้าและมีสภาวะค่อนข้างจำกัด เช่น แบคทีเรียในกระบวนการมีทาโนเจเนซิสจะเจริญเติบโตได้ดีในช่วง pH 6.8 – 7.2 เป็นต้น

## 2.3 แบคทีเรียในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์

ในการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ให้กลายเป็นสารอินทรีย์โมเลกุลเล็ก ต้องอาศัยแบคทีเรียในการย่อยสลายโครงสร้างโมเลกุล ซึ่งแบคทีเรียจำแนกดังกลุ่มต่อไปนี้

### 2.2.1 แบคทีเรียกลุ่มไฮโดรไลติก (Hydrolytic bacteria)

เป็นแบคทีเรียที่ไม่ใช้อากาศในการย่อยสลาย ซึ่งแบคทีเรียกลุ่มนี้จะย่อยสลายสารอินทรีย์ โครงสร้างโมเลกุลใหญ่ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน เซลลูโลส ลิกนิน และไขมัน ให้กลายเป็น สารอินทรีย์โครงสร้างโมเลกุลเดี่ยวที่ละลายน้ำได้ เช่น กลูโคส กรดอะมิโน กรดไขมัน การย่อยสลาย สารอินทรีย์เหล่านี้จะถูกเร่งปฏิกิริยาโดยเอนไซม์ (Extracellular enzyme) เช่น ไลเปส โปรตีเอส และเซลลูเลส การย่อยสลายขั้นตอนนี้เป็นไปได้ช้าและมีข้อจำกัดในการย่อยสลายของวัตถุดิบบาง ประเภท เช่น วัตถุดิบที่มีเซลลูโลส หรือที่มีลิกนินเป็นองค์ประกอบ แบคทีเรียกลุ่มนี้จะเจริญเติบโตได้ดีที่ค่า pH กลาง ๆ และสามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงของ pH ในระบบ ซึ่งสามารถทนได้ถึง 4.5

### 2.2.2 แบคทีเรียกลุ่มผลิตกรด (Acidogenic, Acetogenic bacteria)

- Acidogenic bacteria แบคทีเรียกลุ่มนี้จะทำการย่อยสลายกลูโคส กรดอะมิโน และกรดไขมัน ที่ได้จากการบวนการไฮโดรไลซิสให้กลายเป็นกรดอินทรีย์ เช่น อะซิเตท และยังเกิดแก๊สบาง ชนิด เช่น แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจน ในการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มที่สร้าง กรดโดยส่วนใหญ่แล้วจะเจริญเติบโตได้ดีในสภาวะความเป็นกรด สามารถทนต่อความเป็นกรดได้ดี

- Acetogenic bacteria แบคทีเรียกลุ่มนี้จะทำการย่อยสลายกรดอินทรีย์ระเหยง่าย ให้เป็นอะซิเตท แบคทีเรียกลุ่มนี้ต้องการสภาวะที่มีความดันย่อยของไฮโดรเจนต่ำ สำหรับการย่อย สลายกรดอินทรีย์ระเหยง่าย แต่ที่ภายใต้สภาวะที่มีความดันย่อยของไฮโดรเจนสูง ทำให้การเกิดอะซิ เตทลดลงและสารตั้งต้นจะถูกเปลี่ยนไปเป็นกรดไพรูวิก บิวทีริก และเอทานอลมากกว่ามีเทน ทำให้ระบบมีการสะสมของกรดอินทรีย์มากขึ้น เมื่อระบบมีการสะสมของกรดอินทรีย์มากจะส่งผลต่อค่า pH ของระบบ ซึ่งทำให้ค่า pH ของระบบลดลง จึงทำให้เกิดสภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อแบคทีเรียกลุ่มที่ สร้างมีเทน แบคทีเรียกลุ่มที่สร้างมีเทนจะดึงไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นในระบบไปใช้ ทำให้ระบบมีความดัน ย่อยของไฮโดรเจนต่ำ ซึ่งทำให้เกิดสภาวะที่เหมาะสมต่อแบคทีเรียที่สร้างกรดกลุ่มนี้

### 2.2.3 แบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทน (Methanogenic bacteria)

เป็นแบคทีเรียที่สำคัญในการผลิตแก๊สชีวภาพ ซึ่งแบคทีเรียกลุ่มนี้จะสร้างแก๊สมีเทนจากผลที่ ได้จากการบวนการอะซิโตเจเนซิสและกระบวนการอะซิโตเจเนซิส โดยการเปลี่ยนอะซิเตทให้ กลายเป็นแก๊สมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ แบคทีเรียกลุ่มนี้อ่อนไหวต่อสภาพแวดล้อมที่ เปลี่ยนแปลงอย่างมากเช่น ค่า pH อุณหภูมิ และที่สำคัญคืออากาศ แบคทีเรียกลุ่มนี้จะเจริญเติบโตได้ดีที่ระดับ pH เป็นกลางหรือช่วง 6.8 – 7.2

## 2.4 ปัจจัยสำคัญในการย่อยสลายสารอินทรีย์

ในระบบการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนต้องไม่มีอากาศผ่านเข้าในระบบ เนื่องจากอากาศเป็นอันตรายต่อแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน นอกเหนือจากอากาศที่เป็นปัจจัยสำคัญในการย่อยสลายแล้วยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่มีผลต่อระบบการย่อยสลายดังนี้

### 2.3.1 สภาพความเป็นกรด (Acidity) และสภาพความเป็นด่าง (Alkalinity)

ในขั้นตอนการผลิตแก๊สชีวภาพจะเกิดขึ้นได้ดีที่ค่า pH 6.5 – 7.2 โดยที่ค่า pH ที่เหมาะสมในการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนเท่ากับ 7.0 เมื่อค่า pH ลดลงต่ำกว่า 6.5 จะส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของระบบ เนื่องจากระบบมีความเป็นกรดมากและทำให้เกิดการสะสมของกรดไขมันระเหยง่าย (Volatile fatty acid) ขึ้นในระบบ ซึ่งมีผลต่อแบคทีเรียบางกลุ่มเช่น แบคทีเรียกลุ่มที่สร้างมีเทนจะมีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงค่า pH มากที่สุด

- สภาพความเป็นด่าง (Alkalinity) เป็นค่าที่บ่งบอกสภาพความเป็นด่างของระบบในการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน ส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นในรูปของไบคาร์บอเนต ซึ่งไบคาร์บอเนตที่เกิดขึ้นมาจากการทำปฏิกิริยาระหว่างแอมโมเนียกับคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ จึงทำให้เกิดด่างและเป็นตัวบ่งชี้ถึงบัฟเฟอร์ (Buffering capacity) ที่อยู่ในระบบ โดยที่บัฟเฟอร์มีหน้าที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาสะเทินกับคาร์บอนไดออกไซด์และกรดอินทรีย์ระเหยง่าย ค่า Alkalinity จะเป็นตัวชี้วัดในการควบคุมค่า pH ในระบบการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย และระบบควรมีสภาพความเป็นด่างอยู่ในช่วงประมาณ 1,000 – 1,500 mg/L ในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนต ปริมาณต่างที่อยู่ในระบบการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนอาจเกิดมาจากเกลือแอมโมเนียที่อยู่ในระบบ เช่น แอมโมเนียมไบคาร์บอเนต ( $\text{NH}_4\text{HCO}_3$ ) และแอมโมเนียมอะซิเตท ( $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ ) เป็นต้น

ทั้งนี้ ถ้ากระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนสามารถย่อยสลายได้อย่างสมบูรณ์และมีปริมาณไนโตรเจนเพียงพอ จะทำให้ได้แอมโมเนียมไบคาร์บอเนตที่เป็นบัฟเฟอร์สำหรับเกิดปฏิกิริยาสะเทินกับกรดอินทรีย์ระเหยง่าย และได้แอมโมเนียมอะซิเตทที่แบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทนสามารถนำไปย่อยสลายให้กลายเป็นแก๊สมีเทน อีกทั้งยังสามารถได้แอมโมเนียมไบคาร์บอเนตกลับคืนมาทำปฏิกิริยาใหม่ได้ แต่ถ้าความเป็นบัฟเฟอร์สำหรับเกิดปฏิกิริยาสะเทินกับกรดอินทรีย์ระเหยง่ายไม่เพียงพอ จะทำให้เกิดกรดอินทรีย์ระเหยง่ายขึ้นในระบบมาก ทำให้ค่า pH ต่ำ แบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทนไม่สามารถย่อยสลายแอมโมเนียมอะซิเตทได้และเป็นอันตรายต่อแบคทีเรียในระบบ (ปวันรัตน์ บุญอ่อน, 2557)

- กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile fatty acid, VFA) กรดอินทรีย์ระเหยง่ายเกิดจากสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างโมเลกุลใหญ่ เช่น โพรตีน คาร์โบไฮเดรต และ ไขมัน ถูกแบคทีเรียในกลุ่มผลิตกรดย่อยสลายกลายเป็นกรดอินทรีย์ เช่น กรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก แล้วจึงถูกนำไปใช้โดยแบคทีเรียกลุ่มที่ผลิตมีเทน ซึ่งจะย่อยสลายกรดอินทรีย์กลายเป็นแก๊สมีเทนและแก๊ส

คาร์บอนไดออกไซด์เป็นส่วนใหญ่ แต่ถ้าแบคทีเรียกลุ่มที่ผลิตมีเทน นำไปใช้ไม่ทันจะทำให้เกิดการสะสมของกรด ซึ่งส่งผลให้ค่า pH ในระบบลดลงทำให้เกิดอันตรายต่อแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างมีเทน โดยทั่วไปปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายในระบบไม่ควรเกิน 4,000 mg/L ซึ่งระบบที่ปกติควรมีปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายไม่เกิน 2,000 mg/L แต่เมื่อในระบบมีปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่าย 8,000 – 10,000 mg/L แสดงว่าเกิดความเป็นกรดขึ้นในระบบ ซึ่งเป็นพิษต่อแบคทีเรียและอาจทำให้ระบบล้มเหลวได้

ดังนั้นการควบคุมความเป็นกรดต่าง อาจต้องประเมินจากสัดส่วนของปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายและปริมาณต่างที่อยู่ในระบบ (VFA/Alk) โดยถ้าสัดส่วนของปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่อปริมาณต่างมีค่าน้อยกว่า 0.4 แสดงว่าระบบมีความเป็นบัฟเฟอร์สูง สามารถต้านทานการเปลี่ยนแปลงของ pH ได้ แต่หากสัดส่วนของปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่อปริมาณต่างมีค่าสูงกว่า 0.8 แสดงว่าระบบมีความเป็นบัฟเฟอร์ต่ำ ซึ่งอาจส่งผลให้ค่า pH สามารถลดลงได้อย่างรวดเร็ว

### 2.3.2 อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิของการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนของแบคทีเรียแบ่งออกเป็น 3 ช่วงดังนี้

- Psychrophilic จะมีอุณหภูมิประมาณ 5 – 15 °C
- Mesophilic จะมีอุณหภูมิประมาณ 20 – 45 °C
- Thermophilic จะมีอุณหภูมิประมาณ 50 – 65 °C

อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพจะอยู่ในช่วง Mesophilic และ Thermophilic โดยในช่วง Thermophilic จะมีการย่อยสลายสารอินทรีย์เร็วช่วง Mesophilic แต่ทั้งนี้ อุณหภูมิปกติในประเทศไทยอยู่ในช่วง Mesophilic อยู่แล้ว จึงไม่จำเป็นต้องเพิ่มอุณหภูมิให้กับระบบ ถึงแม้ว่าประสิทธิภาพของระบบช่วง Mesophilic จะดีกว่า Thermophilic แต่เมื่อวิเคราะห์ในเรื่องของค่าใช้จ่ายสำหรับเพิ่มอุณหภูมิ อาจทำให้ระบบมีความคุ้มทุนน้อยกว่าช่วง Mesophilic ก็เป็นไปได้ ทั้งนี้ แบคทีเรียกลุ่มที่สร้างมีเทน ไม่สามารถทนต่ออุณหภูมิที่ต่ำมากหรือสูงมากเกินไปได้ ถ้าหากอุณหภูมิลดต่ำกว่า 10 °C แบคทีเรียจะหยุดทำงาน แต่ถ้าหากอุณหภูมิสูงเกิน 65 °C อาจทำให้แบคทีเรียตายได้เช่นกัน

### 2.3.3 สารอาหาร (Nutrient)

สารอาหารที่แบคทีเรียต้องการเพื่อการเจริญเติบโต นอกเหนือไปจากคาร์บอนและไฮโดรเจนแล้วยังมีไนโตรเจน ซัลเฟอร์ ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม นอกจากนี้ก็มีธาตุที่จำเป็นในปริมาณน้อยมาก ๆ เช่น เหล็ก แมงกานีส ลิบดินัม สังกะสี โคบอลต์ ซีลีเนียม ทังสเตน และนิกเกิล เป็นต้น แต่



โดยทั่วไปสารอินทรีย์จะมีธาตุอาหารเหล่านี้ในระดับที่สมดุลพอเพียงสำหรับแบคทีเรีย เพราะฉะนั้น ในกระบวนการย่อยสลายจึงไม่จำเป็นต้องเติมสารอาหารลงไป

#### 2.3.4 สารยับยั้งและสารพิษ (Toxic substance)

ในการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนอาจมีการสะสมของสารที่เป็นพิษอยู่ ซึ่งสารพิษที่เกิดขึ้น อาจมาจากสารอินทรีย์หรือสารอนินทรีย์ ผลของสารพิษอาจจะไปยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย หรืออาจเป็นพิษโดยตรงต่อแบคทีเรีย โดยเฉพาะสารพิษที่มีผลต่อแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างมีเทน เนื่องจากแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างมีเทนมีความอ่อนไหวต่อสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลง ความรุนแรงและ ฤทธิ์ในการยับยั้งขึ้นอยู่กับปริมาณและความเข้มข้นของสารนั้น ๆ สารบางชนิดในปริมาณและความ เข้มข้นที่พอเหมาะก็อาจจะไปช่วยกระตุ้นการเจริญเติบโตของแบคทีเรียในระบบ และทำให้ ประสิทธิภาพของระบบดีขึ้น สารยับยั้งและสารพิษสามารถจำแนกได้ดังนี้

- พิษของไอออนบวก ไอออนบวกที่เป็นพิษต่อระบบผลิตแก๊สชีวภาพได้แก่ โซเดียม ( $\text{Na}^+$ ) โพแทสเซียม ( $\text{K}^+$ ) แมกนีเซียม ( $\text{Mg}^{2+}$ ) และแคลเซียม ( $\text{Ca}^{2+}$ ) ซึ่งธาตุเหล่านี้ เมื่ออยู่ในระดับความ เข้มข้นที่พอเหมาะจะมีประโยชน์ต่อแบคทีเรีย ซึ่งความเข้มข้นของไอออนบวกแต่ละชนิดจะมีช่วงที่ เหมาะสมแตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 5 แต่ทั้งนี้ หากในระบบมีความเข้มข้นของไอออนบวกมาก เกินไป จะทำให้เกิดความเป็นพิษต่อแบคทีเรียได้ ความเป็นพิษของไอออนบวกจะมีความรุนแรงไม่ เท่ากัน ซึ่งขึ้นอยู่กับไอออนบวกของโลหะเบาแต่ละชนิด โดยที่ไอออนบวกของโลหะเบาที่มีวาเลนซ์ เท่ากับ 1 มีความเป็นพิษน้อยกว่าไอออนบวกของโลหะเบาที่มีวาเลนซ์เท่ากับ 2

**ตารางที่ 5** ความเข้มข้นในการกระตุ้นและยับยั้งของไอออนบวก

ไอออนบวก	ความเข้มข้น (mg/L)		
	กระตุ้น	เริ่มยับยั้ง	ยับยั้งรุนแรง
โซเดียม ( $\text{Na}^+$ )	100 – 200	3,500 - 5,500	8,000
โพแทสเซียม ( $\text{K}^+$ )	200 – 400	2,500 - 4,500	12,000
แคลเซียม ( $\text{Ca}^{2+}$ )	100 – 200	2,500 - 4,500	8,000
แมกนีเซียม ( $\text{Mg}^{2+}$ )	75 – 150	1,000 - 1,500	3,000

ที่มา: (นฤมล เชาวะกระโทก, 2556)

- พิษของโลหะหนัก ได้แก่ แมงกานีส (Mn), สังกะสี (Zn), แคดเมียม (Cd), นิกเกิล (Ni), โคบอลต์ (Co), ทองแดง (Cu) และโครเมียม (Cr) โลหะหนักที่จะมีผลต่อระบบผลิตแก๊สชีวภาพมากที่สุด

ค่าความเป็นพิษของสารประกอบโลหะหรือไอออนโลหะหนักแต่ละชนิดขึ้นอยู่กับปริมาณและความเข้มข้นที่มีอยู่ โลหะหนักบางประเภทยังมีความจำเป็นต่อแบคทีเรียเช่น นิกเกิล หรือ โคบอลต์ เป็นต้น

- แอมโมเนีย เป็นสารที่เกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์พวกโปรตีนที่ประกอบด้วยไนโตรเจน ซึ่งจะอยู่ในรูปของแอมโมเนีย หรืออาจอยู่ในรูปของแอมโมเนียมไอออน ( $\text{NH}_4^+$ ) หรือแก๊สแอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) แสดงดังสมการที่ 12 ปริมาณของแอมโมเนียมไอออนจะมีความสัมพันธ์กับค่า pH เมื่อ pH มีค่าประมาณ 7.0 ความเข้มข้นของแอมโมเนียจะมีประมาณ 1% ของแอมโมเนียทั้งหมด โดยจะมีความเข้มข้นของแอมโมเนียมากขึ้นเมื่อ pH สูงขึ้น สำหรับค่าความเป็นพิษของแอมโมเนียนั้นพบว่าแอมโมเนียจะเป็นพิษต่อแบคทีเรียมากกว่าแอมโมเนียมไอออน โดยพบว่าแอมโมเนียมไอออนจะเป็นพิษต่อแบคทีเรียเมื่อมีความเข้มข้นมากกว่า 150 mg/L ในขณะที่แบคทีเรียสามารถทนต่อความเข้มข้นของแอมโมเนียมไอออนได้สูงถึง 3,000 mg/L แสดงดังตารางที่ 6 ดังนั้นการรักษา pH ให้มีค่าประมาณ 7.0 หรือต่ำกว่า ทำให้แอมโมเนียทั้งหมดอยู่ในรูปแบบของแอมโมเนียมไอออนซึ่งเป็นพิษต่อระบบน้อยกว่าระดับความเป็นพิษของแอมโมเนียที่ความเข้มข้นต่าง ๆ



**ตารางที่ 6** ผลของแอมโมเนียไนโตรเจนที่มีต่อระบบผลิตแก๊สชีวภาพ

แอมโมเนียไนโตรเจน (mg/L)	ผลกระทบ
50 – 200	อยู่ในช่วงปริมาณที่เหมาะสม
200 – 1,000	ไม่เกิดผลเสียต่อระบบ
1,500 – 3,000	เริ่มเกิดการยับยั้งขึ้นเมื่อค่า pH สูง
> 3,000	เป็นพิษต่อระบบโดยตรง

ที่มา: (นฤมล เชาวกระโทก, 2556)

- ซัลไฟด์ สร้างขึ้นมาจากการเปลี่ยนซัลเฟต ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) โดยการย่อยสลายของโปรตีน การย่อยสลายซัลเฟตมีทั้งที่อยู่ในรูปของสารที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ ขึ้นอยู่กับไอออนประจุบวกที่ซัลเฟตรวมอยู่ โดยส่วนที่มีการรวมกับโลหะหนักจะตกตะกอน ส่วนที่เหลือจะละลายน้ำหรืออยู่ในรูปของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ ) และเมื่อละลายน้ำสามารถเปลี่ยนเป็นกรดซัลฟูริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) ความเข้มข้นของซัลไฟด์ละลายน้ำที่แบคทีเรียสามารถทนได้อยู่ระหว่าง 50 – 160 mg/L ซัลไฟด์จะเป็นพิษเมื่อถูกดูดซึมเข้าสู่เซลล์ของแบคทีเรีย ความเข้มข้นมากกว่า 200 mg/L แบคทีเรียจะหยุดการเจริญเติบโต

- ออกซิเจน ออกซิเจนมีผลต่อระบบการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนอย่างมาก เนื่องจากจะไปยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างมีเทน และอาจทำให้ระบบหมักแก๊สชีวภาพล้มเหลว

### 2.3.5 การกวน (Mixing)

การกวนเป็นสิ่งสำคัญของระบบย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกาศ ผลจากการกวนจะทำให้แบคทีเรียที่อยู่ในระบบสามารถสัมผัสกับสารอินทรีย์ได้ทั่วถึง รวมถึงกระจายอุณหภูมิในระบบให้เท่ากัน และช่วยในการป้องกันการสะสมของสารอินทรีย์ตามจุดต่าง ๆ ของระบบ

### 2.3.6 อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N Ratio)

เป็นค่าปริมาณคาร์บอนและไนโตรเจนของสารอินทรีย์ และมีความสำคัญต่อการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกาศ คาร์บอนและไนโตรเจนจะถูกแบคทีเรียนำไปใช้ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมควรจะอยู่ในช่วง 20 – 30:1 ถ้าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนสูง ไนโตรเจนจะถูกแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างมีเทนนำไปใช้เพื่อเสริมสร้างเซลล์และจะหมดย่างรวดเร็ว และทำให้เกิดการสะสมของกรดขึ้นในระบบ ส่งผลทำให้ได้ปริมาณแก๊สชีวภาพน้อย แต่ถ้าหากอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่ำ จะทำให้ไนโตรเจนมีมากและเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของเป็นแอมโมเนีย ซึ่งแอมโมเนียจะเพิ่มค่า pH ของระบบและมีผลต่อแบคทีเรีย

### 2.3.7 อัตราการป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบ (Organic loading rate, OLR)

เป็นปัจจัยสำคัญในการเติมสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบในแต่ละวัน ซึ่งถ้าหากว่าปริมาณที่เติมมากเกินไป จะส่งผลทำให้ค่า pH ลดลง เนื่องจากการเปลี่ยนสารอินทรีย์ในระบบให้กลายเป็นแก๊สมีเทนนั้น แบคทีเรียต้องมีจำนวนที่เหมาะสมกับปริมาณของสารอินทรีย์ที่เติมเข้าสู่ระบบ เพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ได้หมด ถ้าหากเติมสารอินทรีย์เข้าระบบมากเกินไปจะทำให้การย่อยสลายสารอินทรีย์ลดลง แบคทีเรียบางกลุ่มถูกยับยั้งหรือถูกทำลายไปเพราะสภาพที่ไม่สมดุล และในทางกลับกันถ้าหากป้อนสารอินทรีย์เข้าระบบน้อยเกินไป แก๊สที่ผลิตได้ก็จะน้อยตามทำให้ระบบทำงานไม่เต็มประสิทธิภาพของการผลิตแก๊สชีวภาพ

### 2.3.8 ระยะเวลาการกักเก็บสารอินทรีย์ (Retention time)

ระยะเวลาในการกักเก็บสารอินทรีย์ในระบบขึ้นอยู่กับปริมาณและประเภทของสารอินทรีย์ที่เติมเข้าสู่ระบบ ซึ่งมีลักษณะและคุณสมบัติที่ต่างกันรวมถึงรูปแบบของระบบในการย่อยสลาย หากระยะเวลาในการกักเก็บสั้นเกินไป สารอินทรีย์จะไม่เพียงพอต่อการนำไปใช้ของแบคทีเรียที่ผลิตแก๊สชีวภาพ นอกจากนี้แบคทีเรียจะถูกถ่ายออกจากระบบเร็วเกินไป ส่งผลให้จำนวนแบคทีเรียลดลงไป ทำให้แบคทีเรียที่เหลืออยู่ในระบบทำการย่อยสารอินทรีย์ไม่ทันและอาจทำให้ค่า pH ในระบบลดลง แต่ถ้าระยะเวลาการกักเก็บนานเกินไป จะทำให้เกิดตะกอนของสารอินทรีย์ที่แบคทีเรียย่อยสลายแล้วสะสมอยู่ในระบบ ระยะเวลาในการกักเก็บส่วนใหญ่ประมาณ 14 – 60 วัน ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น



อุณหภูมิ ขนาดและประเภของถังหมัก และปริมาณสารอินทรีย์ที่เติมเข้าสู่ระบบ เป็นต้น ระยะเวลาในการกักเก็บเป็นตัวบ่งชี้ถึงพฤติกรรมของแบคทีเรียที่อยู่ในระบบ เช่น แบคทีเรียจะมีชีวิตได้นานเท่าใดเมื่อไม่มีการเติมสารอินทรีย์ เป็นต้น ระยะเวลาการกักเก็บนั้นยังบ่งบอกถึงระยะเวลาที่แบคทีเรียต้องการเพื่อใช้ในการย่อยสารอินทรีย์ให้หมด ดังนั้นเมื่อแบคทีเรียยังย่อยสารอินทรีย์ไม่หมด แสดงว่าแบคทีเรียจะยังไม่ตายจากการขาดอาหาร

## 2.5 ระบบสำหรับการหมักแก๊สชีวภาพ

การเลือกใช้ระบบสำหรับการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกาศ จะต้องเลือกระบบให้เหมาะสมสำหรับการย่อยสลายและให้เหมาะสมกับวัตถุประสงค์ในการย่อยสลาย ซึ่งจะช่วยให้การเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตแก๊สชีวภาพ โดยระบบสามารถจำแนกได้ 3 ประเภทดังนี้

### 2.4.1 ระบบแบบกะ (Batch operation)

ลักษณะของระบบเป็นการเติมสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบเพียงครั้งเดียว โดยเติมให้เต็มระบบ ในขณะที่เริ่ม หลังจากนั้นจะปล่อยให้ระบบดำเนินการตามกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ สารอินทรีย์ในระบบจะสังเกตได้ถ้าปริมาณแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้น เมื่อไม่มีแก๊สชีวภาพเกิดขึ้นจะทำการถ่ายตะกอนออกจากระบบ แล้วเติมสารอินทรีย์เข้าไปใหม่ ระบบแบบกะเหมาะกับวัตถุดิบปริมาณมาก แต่ประสิทธิภาพและเสถียรภาพของระบบไม่คงที่ เนื่องจากแก๊สชีวภาพที่ได้ไม่สม่ำเสมอ

### 2.4.2 ระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง (Semi-continuous operation)

ลักษณะของระบบเป็นการเติมสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบเป็นช่วง ๆ อย่างสม่ำเสมอ โดยมีการเติมสารอินทรีย์และถ่ายสารอินทรีย์ที่ผ่านการย่อยสลายแล้วออกจากระบบ ระบบแบบกึ่งต่อเนื่องเหมาะกับการที่ใช้สารอินทรีย์เป็นประจำ ระบบจะมีท่อสำหรับเติมสารอินทรีย์เข้าไปในระบบและมีท่อสำหรับถ่ายสารอินทรีย์ที่ผ่านการย่อยสลายแล้วออกจากระบบ ในระบบนี้จะมีการเติมสารอินทรีย์ทุกวัน ๆ ละครั้ง ระบบแบบกึ่งต่อเนื่องมีผลดีต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย เนื่องจากระบบมีสภาวะที่คงตัว ซึ่งแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างมีเทนมีความอ่อนไหวต่อสภาพที่เปลี่ยนแปลง จึงทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพดีขึ้น และปริมาณแก๊สชีวภาพเกิดขึ้นอย่างสม่ำเสมอ

### 2.4.3 ระบบแบบต่อเนื่อง (Continuous operation)

ลักษณะของระบบเป็นการเติมสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา สารอินทรีย์จะถูกย่อยสลายในช่วงเวลาหนึ่งและถูกถ่ายออกจากระบบอย่างต่อเนื่องเช่นกัน ระบบแบบต่อเนื่องจะ

ประสิทธิภาพสูง แต่ในเรื่องของการเติมสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบนั้นควบคุมได้ยาก เนื่องจากอัตราการเติมสารอินทรีย์ต้องคงที่สม่ำเสมอ

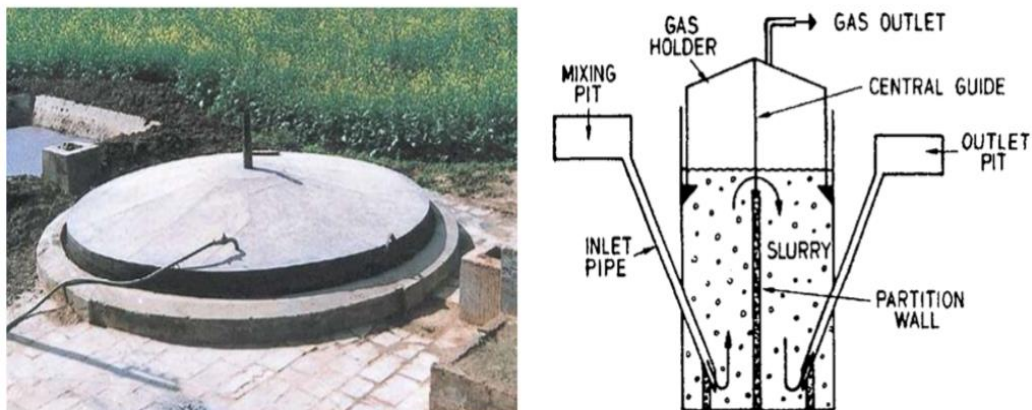
## 2.6 เทคโนโลยีการผลิตแก๊สชีวภาพ

การผลิตแก๊สชีวภาพส่วนใหญ่จะแยกตามแหล่งที่มาของวัตถุดิบ เช่น วัตถุดิบที่ได้จากฟาร์มปศุสัตว์ (Manure waste) ของเสียจากอุตสาหกรรม (Industrial waste) ขยะมูลฝอย (Municipal solid waste, MSW) เป็นต้น ซึ่งเทคโนโลยีการผลิตแก๊สชีวภาพเป็นกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic digestion) โดยสามารถแบ่งตามอัตราการย่อยสลายอินทรีย์ ได้ 2 ระดับ คือ อัตราการย่อยสลายอินทรีย์ต่ำ (Low rate) และสูง (High rate) ซึ่งเทคโนโลยีสำหรับการผลิตแก๊สชีวภาพในประเทศไทยสามารถแบ่งได้ 2 ประเภทดังนี้

### 2.5.1 บ่อหมักไม่ใช้ออกซิเจนแบบช้า (Low rate anaerobic digestion)

ระบบนี้เป็นระบบที่ออกแบบโดยมีกลุ่มแบคทีเรียชนิดที่ไม่ต้องใช้ออกซิเจนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยจะควบคุมให้เกิดสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสม มีระยะเวลาที่กักเก็บ (Hydraulic retention time, HRT) อยู่ในช่วง 30 – 60 วัน สามารถแบกรับอัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ (Organic loading rate, OLR) ได้ในช่วง 0.64 – 1.60 kg COD/m<sup>3</sup>·วัน ระบบสามารถดำเนินการแบบผสม (Mixing) ได้ สามารถเติมวัตถุดิบสารอินทรีย์และสามารถกำจัดสลัดจ์ (Sludge) ออกได้เป็นครั้งคราว ระบบชนิดนี้สามารถใช้ฝาปิดแบบลอยหรือแบบติดกับก็ได้ แต่การใช้ฝาปิดชนิดติดกับที่อาจจะไม่สะดวกในการเดินระบบ ซึ่งบ่อหมักไม่ใช้ออกซิเจนแบบช้ามีรูปแบบอยู่หลายประเภทด้วยกัน

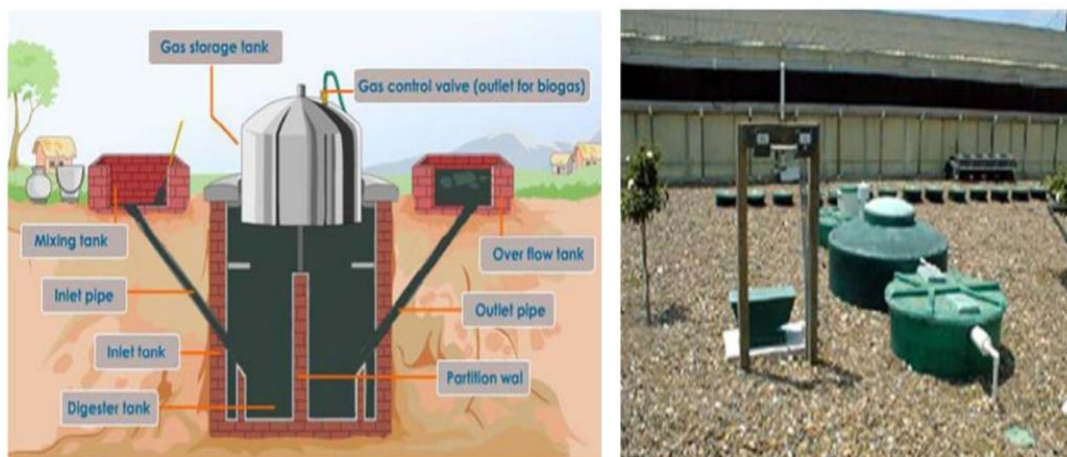
- บ่อหมักช้าแบบถังลอย (Floating drum digester) หรือ Indian digester ลักษณะส่วนใหญ่จะเป็นรูปทรงกระบอก ฝังอยู่ใต้พื้นดิน ใช้มูลสัตว์และของเหลวเป็นวัตถุดิบสารอินทรีย์สำหรับผลิตแก๊สชีวภาพ ส่วนบนของระบบเป็นฝาครอบเก็บแก๊สชีวภาพ ทำด้วยโลหะหรือไฟเบอร์กลาส ซึ่งจะลอยขึ้นลงตามปริมาตรแก๊สที่ผลิตได้ แสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 บ่อหมักข้าวแบบถังลอย

ที่มา: (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2554)

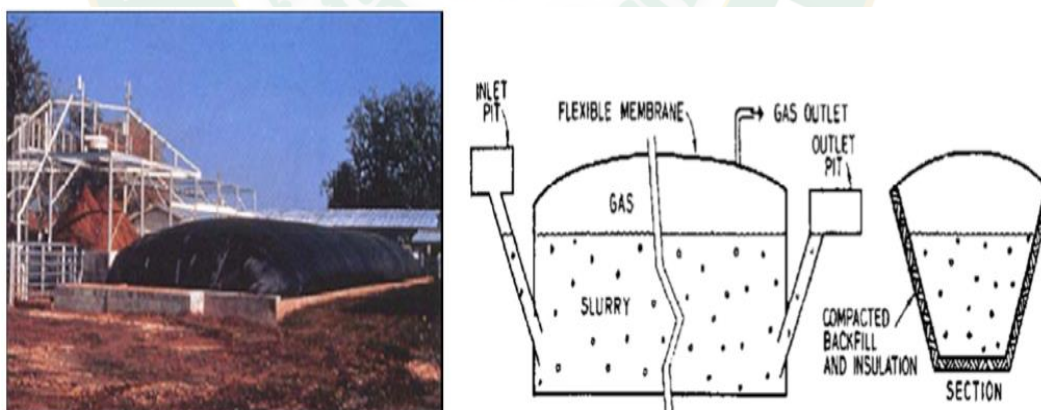
- บ่อหมักข้าวแบบโดมคงที่ (Fixed dome digester) มีลักษณะเป็นทรงกลมฝังอยู่ใต้ดิน ในส่วนที่เก็บแก๊สมีลักษณะเป็นโดม ข้อดีของระบบนี้คือ ประหยัดพื้นที่บริเวณฟาร์ม เนื่องจากถังหมักอยู่ใต้ผิวดิน จึงทำให้สามารถระบายของเสียจากฟาร์มหรือโรงเรือนสู่บ่อหมักโดยอาศัยแรงโน้มถ่วง ในบ่อหมักจะมีอุณหภูมิที่ค่อนข้างคงที่ ซึ่งทำให้การหมักของมูลสัตว์เป็นไปอย่างต่อเนื่อง แต่ข้อเสียของระบบนี้คือในบริเวณที่ระดับน้ำใต้ดินสูง การทำงานและการสร้างบ่อหมักจะค่อนข้างยากลำบาก และในบริเวณส่วนโค้งของถังหมักจะต้องใช้เทคนิคและความชำนาญสูง ระบบบ่อหมักข้าวแบบโดมคงที่มีส่วนประกอบที่สำคัญคือ บ่อเติมมูลสัตว์ ซึ่งมีหน้าที่ในการผสมมูลสัตว์กับน้ำก่อนเติมเข้าสู่ระบบ ภายในบ่อทำหน้าที่ผลิตแก๊สชีวภาพโดยมีแบคทีเรียทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่อยู่ในระบบ บนด้านบนของบ่อหมักมีเป็นลักษณะแบบโดมมีหน้าที่เก็บแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้น มีบ่อล้นที่คอยรับมูลสัตว์ที่ล้นออกจากระบบ และเมื่อปริมาณแก๊สชีวภาพในบ่อลดลง มูลสัตว์ในบ่อล้นจะไหลกลับสู่ระบบอีกครั้ง และระบบนี้มีบ่อรับกากจากบ่อล้น ซึ่งเป็นที่รองรับตะกอนจากบ่อล้น ตะกอนที่ได้สามารถนำไปใช้ในการเกษตรได้ แสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 บ่อหมักข้าวแบบโดมคองที่

ที่มา: (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2554)

- บ่อหมักข้าวแบบราง (Plug flow digester) มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมคางหมูฝังในดิน ส่วนที่ใช้เก็บแก๊สจะเป็นผ้าพลาสติกที่เรียกว่า red-mud-plastic คลุมส่วนบนของบ่อหมักไว้ แสดงดังภาพที่ 4 ระบบนี้สามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้มาก เนื่องจากบ่อมีลักษณะเป็นแนวยาว จึงทำให้มีระยะเวลาในการหมักมากขึ้น



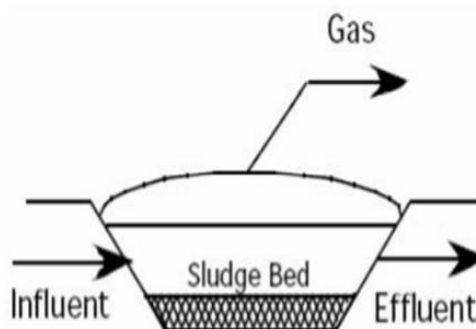
ภาพที่ 4 บ่อหมักข้าวแบบราง

ที่มา: (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2554)

- บ่อแบบพลาสติกคลุมบ่อดิน (Cover lagoon) รูปแบบของระบบนี้ได้นำรูปแบบของถังเก็บแก๊สของบ่อแบบ Plug Flow มาสร้างครอบไปบนบ่อรวบรวมมูลสัตว์ที่มีอยู่แล้ว ซึ่งอาจเป็นบ่อ



คอนกรีตหรือดินชุดก็ได้ในกรณีที่เป็น บ่อดินชุด อาจปูแผ่นยางที่ใช้ปูสระเก็บน้ำมาปูทับเพื่อมิให้เกิด การรั่วซึมของของเสียลงใต้ดิน แสดงดังภาพที่ 5

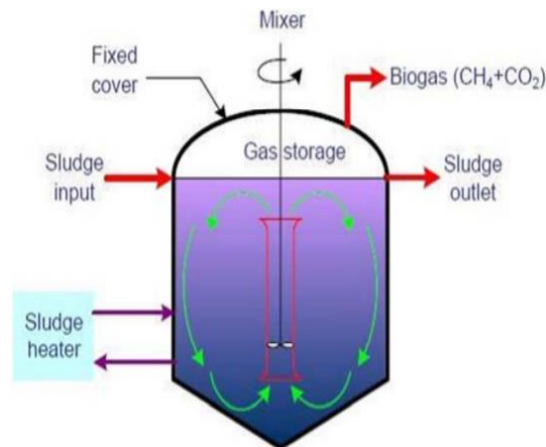


ภาพที่ 5 บ่อแบบพลาสติกคลุมบ่อดิน

ที่มา: (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2554)

#### 2.5.2 บ่อหมักไม่ใช้อากาศแบบเร็ว (High rate anaerobic reactor)

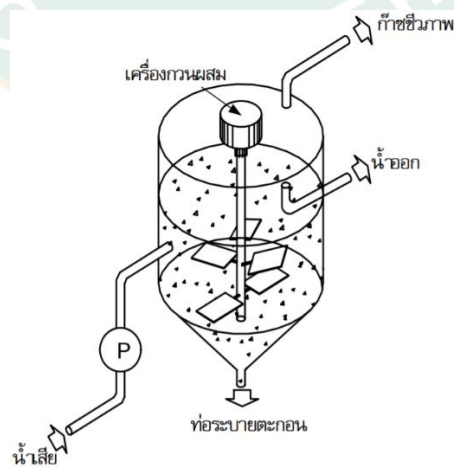
ระบบนี้มีอัตราการย่อยสลายของสารอินทรีย์เกิดขึ้นเร็ว เพราะในระบบมีการกวนผสม แสดงดังภาพที่ 6 การกักเก็บและรักษาตะกอนแบคทีเรียที่มีคุณภาพให้อยู่ในระบบเป็นเวลานาน โดยออกแบบให้ตะกอนถูกยึดตรึงไว้กับตัวกลาง หรือการทำให้ตะกอนรวมตัวกันเป็นก้อน และยังมี การนำตะกอนที่หลุดไปกับน้ำล้นกลับมาในระบบ บ่อหมักที่มีขนาดเล็กสามารถรับปริมาณของเสียได้มาก ระบบนี้เป็นระบบที่สามารถผลิตแก๊สชีวภาพจากสารอินทรีย์ที่มีปริมาณสารแขวนลอยสูง ระบบจะมีประสิทธิภาพในการย่อยสลายค่อนข้างเร็ว ระยะเวลาเก็บกัก (HRT) ประมาณ 0.5 - 3 วัน ประสิทธิภาพการกำจัด COD สูงถึงร้อยละ 80 - 90 อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ (OLR) อยู่ใน ช่วง 2.4 - 20 kg COD/m<sup>3</sup>·วัน การดำเนินงานของระบบสามารถเติมสารอินทรีย์และสามารถทิ้งสลัดจ์ได้ อย่างต่อเนื่อง ส่วนใหญ่จะไม่นิยมนำมาใช้กับมูลสัตว์เนื่องจากตะกอนจากมูลสัตว์จะสร้างปัญหาแก่ ระบบ



ภาพที่ 6 ลักษณะการทำงานของบ่อหมักไม่ใช้อากาศแบบเร็ว

ที่มา: (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2554)

- ระบบผลิตแก๊สชีวภาพแบบกวนสมบูรณ์ (Completely stirred tank reactor) เป็นระบบแบบไม่ใช้อากาศที่มีการเลี้ยงตะกอนแบบเชื้อแขวนลอย โดยมีเครื่องกวนทำให้แบคทีเรียและวัตถุดิบผสมกันได้อย่างทั่วถึง แสดงดังภาพที่ 7 นอกจากนี้การที่ระบบมีการกวนผสมจะสามารถช่วยลดความรุนแรงของสารพิษที่หลุดเข้าสู่ระบบได้ เนื่องจากเกิดการเจือจางโดยน้ำที่อยู่ในถัง แต่อย่างไรก็ตามระบบมีเวลากักเก็บตะกอนเท่ากับเวลากักเก็บน้ำ ทำให้มีความสามารถในการรับสารอินทรีย์ได้ต่ำ เมื่อเทียบกับระบบที่มีอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์สูงในแบบอื่น ๆ ทั้งนี้หากต้องการเพิ่มปริมาณสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบ จำเป็นต้องขยายระบบให้ใหญ่ขึ้นหรือสร้างถังใหม่



ภาพที่ 7 แผนผังระบบแบบกวนสมบูรณ์

ที่มา: (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2554)



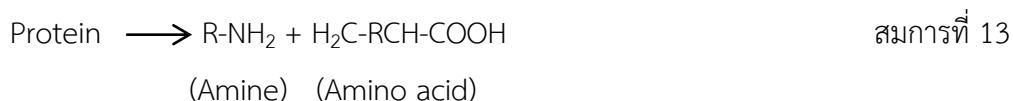
บ่อหมักไม่ใช้อากาศแบบเร็ว เหมาะสมที่จะนำมาประยุกต์ใช้กับน้ำเสียจากอุตสาหกรรมที่มีปริมาณความเข้มข้นสารอินทรีย์สูง แก๊สชีวภาพที่ได้สามารถนำไปใช้ทดแทนสารเชื้อเพลิงจากแหล่งเดิมที่ใช้ในกระบวนการผลิต ซึ่งสามารถลดค่าใช้จ่ายการบำบัดและสามารถช่วยลดการใช้สารเชื้อเพลิงด้วย เนื่องด้วยเทคโนโลยีผลิตแก๊สชีวภาพต้องประยุกต์ใช้กับน้ำเสียที่มีความเข้มข้นสารอินทรีย์สูง จึงจำเป็นต้องมีขั้นตอนบำบัดต่อเนื่อง เพื่อให้ น้ำเสียที่บำบัดแล้วเป็นไปตามมาตรฐาน

## 2.7 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์เป็นแอมโมเนีย

สารอินทรีย์ที่มีองค์ประกอบของโปรตีนจะมีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ ซึ่งจะถูกย่อยสลายด้วยกระบวนการไฮโดรไลซิสโดยที่แบคทีเรียจะนำไนโตรเจนไปใช้ในการสร้างเซลล์ ในระหว่างการย่อยสลายสารอินทรีย์หากมีออกซิเจนเพียงพอ จะทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สแอมโมเนียมีซัลเฟต และน้ำ แต่หากมีออกซิเจนไม่เพียงพอในการย่อยสลายสารอินทรีย์ จะทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สแอมโมเนีย เอมีน แก๊สมีเทน แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ และกรดอินทรีย์ แก๊สแอมโมเนียและแก๊สไนโตรเจนเป็นผลสุดท้ายของกระบวนการย่อยสลายและการเปลี่ยนรูป หลังจากกระบวนการย่อยสลายจนเกิดแก๊สแอมโมเนีย หากไม่มีการสัมผัสกับน้ำ แอมโมเนียก็จะระเหยออกสู่อากาศ แต่โดยมากเมื่อแอมโมเนียสัมผัสกับน้ำก็จะอยู่ในรูปของแอมโมเนียมไอออน และจะเปลี่ยนรูปต่อเป็นไนเตรท โดยทั่วไปหลังจากสารอินทรีย์ถูกย่อยสลายแล้วจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของแอมโมเนียและก่อให้เกิดปัญหาขึ้น หากน้ำมีปริมาณของออกซิเจนที่ละลายต่ำ ส่งผลให้เกิดการสะสมของแอมโมเนีย เนื่องจากแอมโมเนียไม่สามารถสลายกลายเป็นไนไตรต์และไนเตรตได้ ทำให้เกิดในเรื่องของกลิ่นเหม็นและทำให้เกิดความเป็นด่างขึ้น ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมรวมถึงสิ่งมีชีวิตต่าง ๆ ในกรณีที่มีค่า pH ต่ำกว่า 7 แอมโมเนียมักจะละลายอยู่ในรูปของไอออน ซึ่งมีผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตน้อยกว่าแอมโมเนีย กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์เป็นแอมโมเนียแบ่งเป็น 2 กระบวนการดังนี้

### 2.6.1 แอมโมไนเซชัน (Ammonization)

เป็นกระบวนการแรกของการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลใหญ่หรือโปรตีน โดยแบคทีเรียทำการย่อยสลายโปรตีนและนำไนโตรเจนไปใช้ในการสร้างเซลล์ จนผลสุดท้ายของกระบวนการได้เป็นเอมีน (Amine) และกรดอะมิโน (Amino acid) แสดงดังสมการที่ 13



### 2.6.2 แอมโมนิฟิเคชัน (Ammonification)

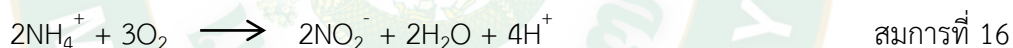
เป็นกระบวนการต่อเนื่องจากแอมโมนิเซชัน โดยแบคทีเรียทำการการย่อยสลายเอมีนและกรดอะมิโน ให้กลายเป็นแอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) และแอลกอฮอล์ แสดงดังสมการที่ 14



กระบวนการทั้งสองจะเกิดขึ้นได้ดีในสภาวะที่เป็นกลางมากกว่าสภาวะที่เป็นกรด เนื่องจากสภาวะที่เป็นกลางแบคทีเรียสามารถเจริญเติบโตได้ดีที่สุด และสำหรับระบบหมักแก๊สชีวภาพแบบไม่ใช้ออกซิเจนจะทำให้เกิดแอมโมเนียตกค้างในระบบ เพราะขาดออกซิเจนสำหรับเข้าไปเปลี่ยนรูปแอมโมเนียเป็นไนเตรท นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอย่างรวดเร็วจะมีผลต่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ของแบคทีเรีย ซึ่งกระบวนการแปรสภาพแอมโมเนียแบ่งเป็น 2 กระบวนการดังนี้

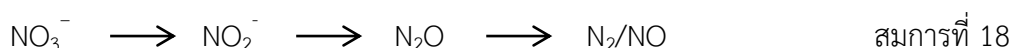
### 2.6.3 ไนตริฟิเคชัน (Nitrification)

เป็นกระบวนการที่ต่อเนื่องจากแอมโมนิฟิเคชัน โดยใช้แอมโมเนียเป็นสารตั้งต้นสำหรับเปลี่ยนรูปให้เป็นแอมโมเนียมไอออน ( $\text{NH}_4^+$ ) ไนไตรท์ ( $\text{NO}_2^-$ ) และไนเตรท ( $\text{NO}_3^-$ ) แสดงดังสมการที่ 15 - 17



### 2.6.4 ดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification)

เป็นกระบวนการที่เกิดต่อเนื่องจากไนตริฟิเคชัน ด้วยการรีดิวซ์ไนเตรทให้เป็นไนไตรท์ ไนตรัสออกไซด์ และแก๊สไนโตรเจนหรือไนตริกออกไซด์ โดยผลของไนไตรท์ที่เกิดขึ้นตอนไนตริฟิเคชันบางส่วนจะแปรรูปเป็นแอมโมเนียก่อนเข้าสู่กระบวนการรีดิวซ์อีกครั้ง และบางส่วนจะเข้าสู่กระบวนการรีดิวซ์และเปลี่ยนเป็นแก๊สไนโตรเจนได้โดยตรง แสดงดังสมการที่ 18



ไนโตรเจนเมื่ออยู่ในน้ำมักพบได้ในรูปของแก๊สไนโตรเจนละลายและสารประกอบไนโตรเจน ซึ่งสารประกอบไนโตรเจนที่อยู่ในน้ำแบ่งออกเป็น 4 ชนิดคือ สารอินทรีย์ไนโตรเจน แอมโมเนีย ไนเตรต และไนไตรต์ ซึ่งสารประกอบไนโตรเจนเหล่านี้ถูกเรียกรวมกันก็คือ ไนโตรเจนทั้งหมด แสดงดังสมการที่ 19

ไนโตรเจนทั้งหมด = สารอินทรีย์ไนโตรเจน + สารอนินทรีย์ไนโตรเจน

ไนโตรเจนทั้งหมด = สารอินทรีย์ไนโตรเจน +  $\text{NH}_3$  +  $\text{NO}_3^-$  +  $\text{NO}_2^-$  สมการที่ 19

ดังนั้นในการวิเคราะห์หาปริมาณสารอินทรีย์ไนโตรเจนจะใช้วิธี เจลดาล์ (Kjeldahl) ซึ่งเป็นวิธีย่อยสลายสารอินทรีย์ไนโตรเจนให้กลายเป็นแอมโมเนีย ซึ่งสามารถวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนได้จากแอมโมเนียที่เกิดขึ้น ทั้งนี้ ปริมาณของสารอินทรีย์ไนโตรเจนและแอมโมเนียไนโตรเจนจึงนิยมเรียกว่า ทีเคเอ็นไนโตรเจน (Total kjeldahl nitrogen, TKN) แสดงดังสมการที่ 20

$\text{TKN} = \text{สารอินทรีย์ไนโตรเจน} + \text{แอมโมเนีย}$  สมการที่ 20

แอมโมเนียไนโตรเจนเมื่ออยู่ในน้ำจะมีอยู่ 2 รูปแบบ คือ แอมโมเนียอิสระหรือแก๊สแอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) และแอมโมเนียมไอออน ( $\text{NH}_4^+$ ) ซึ่งแสดงดังสมการที่ 21 และ 22

$\text{NH}_4^+ + \text{H}_2\text{O} \longrightarrow \text{NH}_3 + \text{H}_3\text{O}^+$  สมการที่ 21

$\text{NH}_4^+ \longrightarrow \text{NH}_3 + \text{H}^+$  สมการที่ 22

โดยปกติแอมโมเนียจะอยู่ในรูปของไอออน ( $\text{NH}_4^+$ ) มากกว่าอยู่ในรูปแบบของแก๊สแอมโมเนีย ( $\text{NH}_3$ ) เมื่อน้ำมีสภาพเป็นกลาง แต่ถ้าหากน้ำมีสภาพเป็นด่างหรือค่า pH สูงขึ้น จะพบว่าปริมาณของแก๊สแอมโมเนียมากขึ้น และแอมโมเนียในรูปของไอออนจะมีน้อยลง (พงศัลดดา เผ่าศิริ, 2556) แต่ทั้งนี้ การเกิดแอมโมเนียในรูปแบบต่าง ๆ หรือปริมาณของแอมโมเนียจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับค่า pH อุณหภูมิ และปริมาณออกซิเจนละลายเป็นหลัก โดยปริมาณของแก๊สแอมโมเนียจะเพิ่มขึ้นตามระดับของค่า pH และอุณหภูมิที่สูงขึ้น ซึ่งพบว่าค่า pH มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของแอมโมเนียในน้ำมากกว่าอุณหภูมิ

## 2.8 วิธีการกำจัดแอมโมเนีย

แอมโมเนียเป็นสาเหตุสำคัญที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ไม่ว่าจะเป็นทางอากาศหรือในน้ำ ล้วนเกิดผลเสียทั้งสิ้น ดังนั้นในการกำจัดแอมโมเนียสามารถทำได้หลายวิธีทั้งทางกายภาพ ทางเคมี และรวมถึงวิธีทางชีวภาพ

### 2.7.1 การกำจัดแอมโมเนียโดยวิธีไล่แอมโมเนียที่ระเหยออก (Ammonia stripping)

เป็นกระบวนการแยกแอมโมเนียออกจากของเหลวด้วยกระบวนการทางกายภาพ กระบวนการนี้เหมาะสำหรับการกำจัดแอมโมเนียที่ระดับน้อยกว่า 10 mg/L ประสิทธิภาพของกระบวนการขึ้นอยู่กับอุณหภูมิโดยประสิทธิภาพของระบบจะลดลงเมื่ออุณหภูมิลดลง สามารถปรับค่า

ความเป็นกรดและความร้อนได้ กระบวนการไล่แอมโมเนียที่ระเหยออก เป็นเทคนิคที่นำไปใช้กับการบำบัดน้ำเสียที่ต้องการลดระดับของแอมโมเนียลง แต่ความเข้มข้นขององค์ประกอบอื่นยังคงอยู่ในน้ำเสียจะมีสารประกอบไนโตรเจนอยู่จำนวนมาก ซึ่งจะอยู่ในรูปของแอมโมเนีย เมื่อกำจัดแอมโมเนียออกจากน้ำเสีย แอมโมเนียจะเปลี่ยนรูปเป็นไนเตรตไนโตรเจน ทั้งนี้ได้มีการศึกษาการใช้กระบวนการไล่แอมโมเนียที่ระเหยออกสำหรับลดแอมโมเนีย เช่น ศึกษาการกำจัดแอมโมเนียโดยใช้กระบวนการไล่แอมโมเนียที่ระเหยออก (Stripping) เพื่อลดแอมโมเนียในมูลไก่ (Abouelenien et al., 2010) ศึกษาผลกระทบของความเข้มข้นแอมโมเนียที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการหมักโดยใช้มูลไก่เพียงชนิดเดียว โดยใช้เทคนิคไล่แอมโมเนียที่ระเหยออกจากของเหลวในถังหมัก (Nie et al., 2015) เป็นต้น

### 2.7.2 การดูดซับ (Adsorption)

เป็นกระบวนการทางกายภาพ ชีวภาพ และเคมี ซึ่งการดูดซับเป็นความสามารถของตัวดูดซับในการดึงโมเลกุลของสารที่อยู่ในสถานะแก๊สหรือของเหลว ให้มาเกาะผิวของตัวดูดซับ คุณสมบัติของตัวดูดซับคือ ต้องมีความพรุนหรือมีรูพรุนเพื่อที่เพิ่มพื้นที่สัมผัสระหว่างตัวดูดซับกับสารละลาย ขนาดโครงสร้าง และการเรียงตัวต้องมีความสม่ำเสมอ ความสามารถในการละลายของสารละลายเป็นปัจจัยสำคัญในการที่สารละลายจะทำปฏิกิริยากับตัวดูดซับ การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเมื่อความสามารถในการละลายของสารละลายลดลง เนื่องจากการดูดซับสารละลายจะต้องแยกออกจากตัวทำละลาย เช่น น้ำ ดังนั้นสารละลายที่มีความสามารถในการละลายน้ำน้อย จะถูกดูดซับได้ดี และสารละลายจะต้องมีการเคลื่อนที่เพื่อไปสัมผัสกับตัวดูดซับ ทั้งนี้มีการศึกษาใช้เทคนิคการดูดซับในการกำจัดแอมโมเนีย เช่น การกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนของน้ำเสียจากฟาร์มไก่และฟาร์มสุกรโดยใช้แมงกานีสซีโอไลต์เป็นตัวดูดซับ แสดงดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 แมงกานีสซีโอไลต์คละขนาด 1.5 – 5.0 mm.

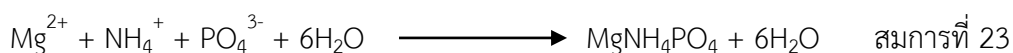
ที่มา: (ศิลป์ชัย มณีชาติย์ และคณะ, 2552)



### 2.7.3 การตกตะกอนโดยใช้สารเคมี (Chemical precipitation)

เป็นอีกกระบวนการหนึ่งที่สามารถลดแอมโมเนียได้ โดยเป็นกระบวนการใช้สารเคมีเติมลงไป ในน้ำ เพื่อไปทำปฏิกิริยากับสารละลายที่อยู่ในน้ำ เปลี่ยนสารละลายให้อยู่ในรูปของตะกอน การตกตะกอนทางเคมีขึ้นอยู่กับสมดุลทางเคมีของสารละลายนั้น ๆ ที่มีผลต่อการละลายในน้ำ การตกตะกอนทางเคมีมีกระบวนการที่หลากหลาย เช่น การใช้สารเคมีที่สามารถทำปฏิกิริยาโดยตรงกับสารที่ละลายน้ำเพื่อเปลี่ยนเป็นสารใหม่ ที่เป็นสารประกอบมีสมบัติละลายน้ำได้น้อยลงและทำให้ตกตะกอน หรือใช้สารเคมีที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสมดุลของสารละลายในการละลายน้ำ ไม่ให้สามารถละลายน้ำได้อีกและทำให้เกิดการตกตะกอน หรือเปลี่ยนอุณหภูมิของสารละลาย ทำให้ความสามารถในการละลายลดลงและกลายเป็นของแข็ง ทั้งนี้การสร้างตะกอนมีปัจจัยอยู่หลายอย่าง เช่น ค่า pH ปริมาณของสารเคมีที่ใช้ สมบัติของสารเคมี อุณหภูมิ การกวน เป็นต้น เนื่องจากสารเคมีที่ใช้สำหรับการตกตะกอนแต่ละชนิดมีสมบัติแตกต่างกัน ทั้งนี้มีการศึกษาการใช้เทคนิคการตกตะกอนโดยใช้สารเคมีในการลดแอมโมเนีย เช่น การศึกษาการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมีของน้ำทิ้งจากบ่อบำบัด โดยใช้อลูมิเนียมซัลเฟตหรือสารส้ม ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$ ) เฟอร์ริคคลอไรด์ ( $\text{FeCl}_3$ ) และแคลเซียมออกไซด์หรือปูนขาว ( $\text{CaO}$ ) (เอกฉัฐ ขวนขวายทรัพย์, 2541) การศึกษาการใช้เกลือแมกนีเซียมในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนออกจากน้ำเสียจากฟาร์มสุกรด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมี (พงศัลดดา เผ่าศิริ, 2556) การศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ไนโตรเจนและแอมโมเนียไนโตรเจน ออกจากน้ำเสียจากกากโปรตีนของโรงงานผลิตวุ้นเส้น โดยใช้กระบวนการตกตะกอนทางเคมีด้วยสารส้ม (ณวัฒน์ ศรีภูม่น, 2546) การศึกษากำจัดแอมโมเนียในมูลไก่ด้วยวิธีการตกตะกอนผลึกสูตรไวท์โดยใช้สารแมกนีเซียมคลอไรด์และโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{MgCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{KH}_2\text{PO}_4$ ) (อานนท์ ดวงพาลี, 2552) การศึกษาการตกตะกอนแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต ( $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , MAP) จากน้ำเสียของฟาร์มไก่ โดยได้ศึกษาการใช้แมกนีเซียมคลอไรด์กับโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{MgCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O} + \text{KH}_2\text{PO}_4$ ), แมกนีเซียมซัลเฟตกับไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O} + \text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) และแมกนีเซียมออกไซด์กับกรดฟอสฟอริก 85% ( $\text{MgO} + 85\% \text{H}_3\text{PO}_4$ ) สำหรับตกตะกอน MAP (Yetilmezsoy และ Sapci-Zengin, 2009) เป็นต้น

ทั้งนี้ ในการตกตะกอนผลึกสูตรไวท์ ( $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ , MAP) จะต้องมีส่วนประกอบของแมกนีเซียมต่อแอมโมเนียมต่อฟอสเฟต ( $\text{Mg}^{2+}:\text{NH}_4^+:\text{PO}_4^{3-}$ ) เป็นอัตราส่วนเชิงโมลเท่ากับ 1:1:1 โดยทั่วไปแอมโมเนียมและฟอสเฟตจะมีอยู่ในน้ำเสียมากพอสมควร แต่แมกนีเซียมจะมีอยู่น้อยจึงต้องมีการเติมแหล่งแมกนีเซียมลงไปเพื่อทำให้เกิดการตกตะกอนผลึกสูตรไวท์แสดงดังสมการที่ 23



## 2.9 องค์ประกอบของมูลไก่

มูลไก่เป็นวัตถุดิบที่สามารถนำมาย่อยสลายเพื่อผลิตแก๊สชีวภาพได้ แต่มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนต่ำ แสดงดังตารางที่ 7 เพราะในมูลไก่มีปริมาณไนโตรเจนมากซึ่งไนโตรเจนที่อยู่ในมูลไก่เมื่อทำการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน ไนโตรเจนจะอยู่ในรูปของแอมโมเนียไนโตรเจน ส่งผลต่อแบคทีเรียกลุ่มที่ผลิตมีเทนและอาจทำให้เกิดการสะสมของแอมโมเนียไนโตรเจนขึ้นในระบบ จึงเป็นสาเหตุทำให้ประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพลดลง ดังนั้นในการย่อยสลายเพื่อผลิตแก๊สชีวภาพโดยใช้มูลไก่เป็นวัตถุดิบตั้งต้น สามารถนำไปหมักร่วมกับวัตถุดิบอื่น ๆ ได้ แต่ในการหมักร่วมต้องทำการวิเคราะห์วัตถุดิบ เพื่อให้ได้องค์ประกอบที่เหมาะสมสำหรับการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน หรือปรับสภาพของมูลไก่โดยการลดปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนก่อนที่จะนำไปใช้ในกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพ ทั้งนี้ มูลไก่มีศักยภาพที่สามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตแก๊สชีวภาพได้เมื่อเทียบกับวัตถุดิบอื่น ๆ ถึงแม้ว่าจะมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่ต่ำกว่าก็ตาม แสดงดังตารางที่ 8

ตารางที่ 7 องค์ประกอบเบื้องต้นของมูลไก่

	องค์ประกอบ					
	TS (%)	VS (%)	MC (%)	C (%)	N (%)	C/N
(Weerayutsil et al., 2016)	49.6	31.8	18.5	25.0	3.0	8.2
(Li et al., 2014)	24.9	19.4	55.6	36.2	3.6	10.1
(ปวันรัตน์ บุญอ่อน, 2557)	14.5	12.3	73.0	34.2	3.6	9.2
(Wang et al., 2014)	29.9	65.3	4.8	58.6	6.11	9.6
(Niu et al., 2013)	11.2	8.3	80.5	35.2	5.4	6.5
(สิริชัย แยมแบน, 2554)	30.5	22.3	47.2	15.2	2.0	7.6
(หทัยรัตน์ เปี้ยดตะคุ, 2555)	43.6	33.8	56.4	37.3	4.9	8.3



**ตารางที่ 8** อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนของวัตถุดิบ

วัตถุดิบ	อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน
มูลเป็ด	8
มูลไก่	10
มูลสุกร	18
มูลแพะ	12
มูลแกะ	19
มูลวัว ควาย	24
มูลคน	8
มูลช้าง	43
ผักตบชวา	25
เปลือกข้าวโพด	60
ฟางข้าว	70
ฟางข้าวสาลี	90
ขี้เลื่อย	> 200

ที่มา: (ชนวนานี จิใจ, 2559)

### 2.8.1 ผลกระทบที่เกิดจากฟาร์มไก่

มูลไก่เป็นวัตถุดิบเหลือทิ้ง (Waste) จากกระบวนการผลิตในฟาร์มไก่ ซึ่งเป็นสิ่งที่ไม่สามารถเปลี่ยนแปลงเป็นผลประโยชน์สำหรับการผลิตในฟาร์มไก่ได้ อีกทั้งยังทำให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมทั้งในฟาร์มและนอกฟาร์มไก่ เช่น กลิ่นเหม็นจากมูลไก่ หรือกลิ่นจากบ่อบำบัด เป็นต้น ทั้งนี้วัตถุดิบเหลือทิ้งจากฟาร์มไก่นอกเหนือจากมูลไก่แล้วยังมี น้ำเสีย ซากสัตว์ แก๊ส และขยะ เป็นต้น โดยวัตถุดิบเหลือทิ้งเหล่านี้ถือว่าเป็นของเสียอย่างหนึ่งจากกระบวนการผลิต ซึ่งมีลักษณะเป็นทั้งของแข็งของเหลว และแก๊ส โดยของเสียเหล่านี้เกิดจากไข่ขี้ถ่ายออกมา และบางส่วนเกิดจากการสะสมของวัตถุดิบเหลือทิ้ง อย่างไรก็ตามของเสียเหล่านี้มีองค์ประกอบของสารอินทรีย์ที่สามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตพลังงานได้ (อาหะมะ มะสาและ, 2560)

ทั้งนี้ มลพิษที่เกิดจากฟาร์มไก่นั้นมีส่วนประกอบของสารพิษที่เกิดจากแบคทีเรียและฝุ่นละอองซึ่งอยู่ในรูปของแก๊ส โดยมลพิษจากฟาร์มมีการกำหนดค่าความเข้มข้นที่ยอมรับได้จากกรมควบคุมมลพิษ แสดงดังตารางที่ 9 โดยแก๊สจากฟาร์มมีผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์รวมถึงสุขภาพของสัตว์ในฟาร์มด้วย

**ตารางที่ 9** ปริมาณมลพิษที่ยอมรับได้ภายในโรงเรือน

ชนิดของแก๊ส	กลิ่น	ปริมาณความเข้มข้นแก๊สสูงสุดที่ยอมรับได้ (ppm)	กรมปศุสัตว์แนะนำ (ppm)
CO <sub>2</sub>	ไม่มีกลิ่น	3,000	ไม่เกิน 5,000
CO	ไม่มีกลิ่น	50	ไม่เกิน 50
CH <sub>4</sub>	มีกลิ่นฉุน	15	ไม่เกิน 50
H <sub>2</sub> S	คล้ายกลิ่นไข่เน่า	3	-

ที่มา: (สำนักจัดการคุณภาพน้ำ, 2554)

### 2.8.2 การกำจัดของเสียจากฟาร์มไก่

ปัจจัยของมลพิษจากวัตถุดิบเหลือทิ้งหรือของเสียเกิดจากสาเหตุ เช่น วัสดุรองพื้นคอก มูล และปัสสาวะ และเศษอาหาร เป็นต้น ซึ่งการจัดการแต่ละปัจจัยมีวิธีที่แตกต่างกันออกไปอย่างเช่น การจัดการวัสดุรองพื้นคอก โดยทั่วไปควรมีความหนาประมาณ 10 -15 cm. จึงจะสามารถดูดซับความชื้นได้เพียงพอ และทำให้กลิ่นที่เกิดจากมูลสัตว์ลดลง ทั้งนี้ วัสดุที่ใช้สามารถแห้งง่าย ไม่อัดแน่น ไม่เป็นฝุ่น ไม่ขึ้นเชื้อรา และควรเป็นวัสดุที่หาได้ง่าย เป็นต้น ในส่วนการจัดการมูลและปัสสาวะสามารถทำได้โดยการเก็บกวาดหลังจากได้ผลผลิตจากไก่ เช่น เก็บกวาดทุก ๆ 3 – 4 เดือน โดยการตักมูลไก่ออกและใช้เป็นปุ๋ยสำหรับการเกษตร เป็นต้น ทั้งนี้ มูลไก่มีปริมาณสารอาหารที่เหมาะสมสำหรับพืช ทั้งแบบสด เปียก และแห้ง แต่การใช้มูลไก่อังมีข้อจำกัดอยู่พอสมควร เช่น ปริมาณของไนโตรเจนที่สูง ซึ่งเมื่ออยู่ในรูปของแอมโมเนียจะสามารถระเหยลอยสู่อากาศได้ และเป็นสาเหตุของมลพิษฟาร์มมูลไก่ มูลไก่มีปริมาณสารอาหารมากกว่าเมื่อเทียบกับมูลสัตว์อื่น ๆ แสดงดังตารางที่ 10 จากตารางแสดงให้เห็นว่า มูลไก่มีปริมาณสารอาหารมากกว่ามูลสัตว์ชนิดอื่น ๆ โดยเฉพาะไนโตรเจน ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดแอมโมเนีย แต่ทั้งนี้ในด้านของพลังงาน มูลไก่อมีศักยภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพเช่นกัน

ตารางที่ 10 ปริมาณสารอาหารในมูลสัตว์

ชนิดของมูลสัตว์	ความชื้น (%)	สารอาหารหลัก (%)		
		ไนโตรเจน	ฟอสฟอรัส	โพแทสเซียม
วัว ม้า	60 – 80	5.4 – 6.4	2.3 – 4.5	4.5 – 5.4
แกะ หมู แพะ	65 – 75	4.5 – 9.5	3.2	5.9 – 8.6
ไก่				
เป็ยก – เหนียว	75	13.6	9.1	4.5
ขึ้น – เป็นก้อน	50	18.1	18.1	9.1
เป็นก้อน	30	27.2	24.9	13.6
แห้ง	15	40.8	31.7	18.1

ที่มา: (สำนักจัดการคุณภาพน้ำ, 2554)

## 2.10 ศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทน (BMP)

เป็นการวิเคราะห์หาศักยภาพในการผลิตมีเทนของสารอินทรีย์ที่อยู่ในระบบหมักแก๊สชีวภาพแบบไม่ใช้อากาศ เพื่อให้ทราบถึงสารอินทรีย์ชนิดนั้น ๆ มีศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทนมากน้อยเพียงใด ซึ่งผลที่ได้จะแสดงในรูปของปริมาณแก๊สมีเทนที่เกิดขึ้นทั้งหมดต่อปริมาณของสารอินทรีย์ ( $\text{CH}_4/\text{g COD}$  หรือ  $\text{CH}_4/\text{g VS}$ ) ทำให้ทราบถึงปริมาณแก๊สมีเทนที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน และจำนวนวันที่มีการผลิตแก๊ส แต่โดยทั่วไปสารอินทรีย์จะไม่เปลี่ยนเป็นแก๊สมีเทนทั้งหมด จึงต้องมีการวิเคราะห์การเปลี่ยน COD เป็นมีเทน เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทน การคำนวณศักยภาพการผลิตแก๊สชีวภาพในทางทฤษฎี สารอินทรีย์ 1 kg COD จะเปลี่ยนเป็นแก๊สมีเทน 350 L ที่สภาวะมาตรฐาน (ความดัน 1 atm อุณหภูมิ 0 °C) การหาค่าศักยภาพในการผลิตมีเทนแสดงดังสมการที่ 24 – 28

1. การคำนวณหาปริมาณของแข็งระเหยง่ายที่ถูกย่อยสลาย

ของแข็งระเหยที่ถูกกำจัด = ของแข็งระเหย<sub>เข้า</sub> – ของแข็งระเหย<sub>ออก</sub>

$$VS_{\text{removed}} (\text{mg/L}) = VS_{\text{in}} - VS_{\text{out}}$$

สมการที่ 24

2. การคำนวณหาปริมาณ COD ที่ถูกย่อยสลาย

สารอินทรีย์ที่ถูกกำจัด = สารอินทรีย์<sub>เข้า</sub> – สารอินทรีย์<sub>ออก</sub>

$$\text{COD}_{\text{removed}} (\text{mg/L}) = \text{COD}_{\text{in}} - \text{COD}_{\text{out}}$$

สมการที่ 25

## 3. การคำนวณหาประสิทธิภาพในการกำจัด COD

$$\text{COD}_{\text{removed}} (\%) = (\text{COD}_{\text{in}} - \text{COD}_{\text{out}} / \text{COD}_{\text{in}}) \times 100 \quad \text{สมการที่ 26}$$

## 4. การคำนวณหาค่าอัตราการผลิตแก๊สมีเทนของแบคทีเรีย (Specific Methane Yield)

อัตราการผลิตแก๊สชีวภาพ = ปริมาณแก๊สมีเทน / สารอินทรีย์ที่ถูกกำจัด

$$\text{Specific Methane Yield} = \text{Methane Yield (L)} / \text{COD}_{\text{removed}} (\text{kg}) \quad \text{สมการที่ 27}$$

## 5. การคำนวณหาค่าศักยภาพในการผลิตมีเทน (% BMP)

$$\% \text{ BMP} = (\text{อัตราการผลิตแก๊สชีวภาพ} / * \text{ปริมาณแก๊สมีเทนที่เกิดขึ้นตามทฤษฎี}) \times 100$$

$$\% \text{ BMP} = (\text{Specific Methane Yield} / * \text{Methane Yield}) \times 100 \quad \text{สมการที่ 28}$$

\*จากทฤษฎี COD 1 kg เปลี่ยนเป็นแก๊สมีเทน 350 L

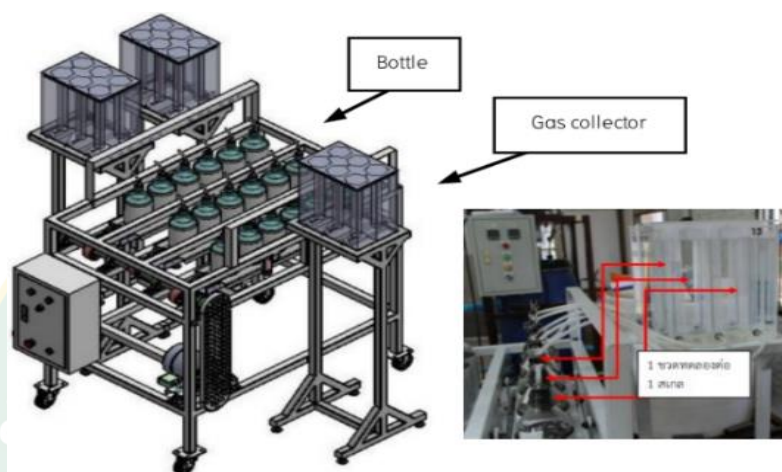
มีการศึกษาการหาค่าศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนจากการผลิตแก๊สชีวภาพของแต่ละวัสดุดิบ เช่น การศึกษาศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนจากการหมักร่วมของมูลสุกรและหญ้าเนเปียร์หมัก โดยศึกษาผลของการหมักร่วมที่อัตราส่วนแตกต่างกัน จากการทดลองพบว่า การหมักร่วมของมูลสุกรและหญ้าเนเปียร์หมัก มีศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนในช่วงร้อยละ 51.76 - 54.38 (รุ่งทิวา สีมานาน และคณะ, 2558)



ภาพที่ 9 ชุดทดลองศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนจากการใช้มูลสุกรและหญ้าเนเปียร์หมัก

ที่มา: (รุ่งทิวา สีมานาน และคณะ, 2558)

การศึกษาศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนของหญ้าเนเปียร์พันธุ์แคระ หญ้าสดและหญ้าที่ผ่านการปรับปรุงสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายต่าง โดยใช้สารละลายโซดาไฟและน้ำปูนขาวความเข้มข้น 1 %w/v จากการทดลองพบว่า หญ้าเนเปียร์พันธุ์แคระที่ไม่ผ่านการปรับปรุงสภาพด้วยสารเคมีมีศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนอยู่ในช่วง  $0.181 - 0.273 \text{ m}^3/\text{kg VS}_{in}$  แต่เมื่อปรับปรุงสภาพด้วยสารละลายต่าง สามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้ถึงร้อยละ 30 (นิลวรรณ ไชยหนู, 2559)

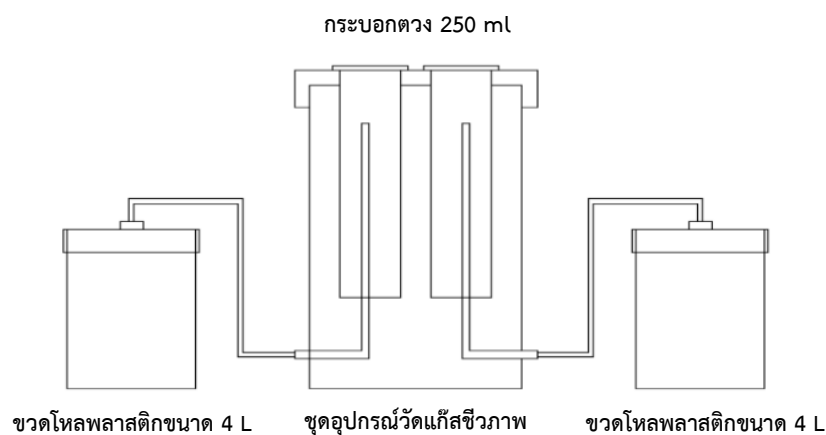


ภาพที่ 10 ชุดทดลองศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนจากการใช้หญ้าเนเปียร์พันธุ์แคระ

ที่มา: (นิลวรรณ ไชยหนู, 2559)

การศึกษาศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนของเศษก้านและใบไม้หลายชนิด โดยใช้อัตราส่วนของวัตถุดิบผสมต่อเชื้อแบคทีเรียตั้งต้นที่ 70:30 แบ่งการทดลองออกเป็น 5 ชุด จากการทดลอง การผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษก้านและใบไม้หลายชนิด มีศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนอยู่ในช่วงร้อยละ 20 – 25 ซึ่งพบว่า จากการใช้เศษก้านและใบไม้หลายชนิด สามารถนำไปใช้ในการผลิตแก๊สชีวภาพได้ (กลิ่น ประทุม ปัญญาปิง และคณะ, 2555)





ภาพที่ 11 แบบจำลองการศึกษาศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนของเศษก้านและใบไม้หลายชนิด

ที่มา: (กลิ่นประทุม ปัญญาปิง และคณะ, 2555)

### 2.11 งานวิจัยที่ผ่านมา

(ภัทรา วงษ์พันธ์กมล และศิริระประภา ชัยเนตร, 2555) ศึกษาปริมาณการเกิดแก๊สชีวภาพจากการใช้มูลไก่ โดยทำการทดลองแบบ Pilot scale ในถังขนาด 10 L แบ่งการทดลองเป็น 6 ชุด โดยทำการศึกษาใช้อัตราส่วนมูลไก่ต่อน้ำ 1:10 จำนวน 3 ชุด (ชุดที่ 1, 3 และ 5) และอัตราส่วนมูลไก่ต่อน้ำกากส่าต่อน้ำเปล่า 1:1:10 อีก 3 ชุด (ชุดที่ 2, 4 และ 6) ใช้เวลาในการหมัก 30, 90 และ 180 วัน จากการทดลองพบว่า ระบบมีประสิทธิภาพกำจัด TS มีค่าเท่ากับร้อยละ 27.02, 9.97, 40.05, 25.22, 43.83 และ 47.89 ตามลำดับ ประสิทธิภาพกำจัด COD พบว่ามีค่าเท่ากับร้อยละ 16.85, 14.22, 29.35, 58.66, 53.80 และ 77.88 ตามลำดับ และประสิทธิภาพในการกำจัด TKN เท่ากับร้อยละ 34.17, 4.44, 50.11, 37.30, 69.50 และ 71.11 ตามลำดับ ในขณะที่ระบบสามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้ 0.7, 0.8, 1.6, 1.6, 2.1 และ 2.1 L ตามลำดับ จากการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อมีระยะเวลาในการหมักนานขึ้น ระบบสามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้มากขึ้นตามไปด้วย แต่ทั้งนี้ปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นในระยะ 30 วัน มีการเกิดแก๊สได้ดีกว่าที่ระยะเวลา 90 และ 180 วัน จึงสามารถสรุปได้ว่าระยะที่เหมาะสมในการทดลองคือช่วง 30 วัน



**ตารางที่ 11** ปริมาณแก๊สที่สามารถผลิตได้

ระยะเวลา (วัน)	วัตถุดิบ	ปริมาณแก๊สเฉลี่ย (L/week)	ปริมาณแก๊สสะสม (L)
30	มูลไก่:น้ำเปล่า	0.175	0.7
	มูลไก่:น้ำกากส่า:น้ำเปล่า	0.2	0.8
90	มูลไก่:น้ำเปล่า	0.133	1.6
	มูลไก่:น้ำกากส่า:น้ำเปล่า	0.133	1.6
180	มูลไก่:น้ำเปล่า	0.084	2.1
	มูลไก่:น้ำกากส่า:น้ำเปล่า	0.088	2.2

ที่มา: (ภัทรา วงษ์พันธ์กุล และศิระประภา ชัยเนตร, 2555)

(ศักรินทร์ หมูเทพ, 2555) ศึกษาศึกษากายภาพการผลิตแก๊สชีวภาพจากมูลไก่เนื้อด้วยระบบถังกวนสมบูรณ์ โดยได้แบ่งการทดลองเป็น 3 ส่วน ในส่วนที่ 1 เป็นการทดลองหาศึกษากายภาพการผลิตแก๊สชีวภาพโดยศึกษาอัตราส่วนของมูลไก่ต่อน้ำที่ 1:3 และ 1:5 (เทียบเท่า TS ประมาณร้อยละ 15 และ 11) ซึ่งพบว่า สามารถผลิตแก๊สมีเทนเฉลี่ยเท่ากับ 0.173 และ 0.176  $\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{kg VS}_{\text{added}}$  เทียบเท่า 101.36 และ 103.48 L/kg ส่วนที่ 2 เป็นการศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ โดยเลือกใช้ปริมาณ TS 11% เติมน้ำโดยถังปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์ (CSTR) ขนาด 24 L เวลาพักเก็บน้ำที่ 10, 20, 30 และ 40 วัน มีการเติมเชื้อตั้งต้นร้อยละ 30 ของปริมาตรถัง จากการทดลองพบว่า ไม่สามารถสรุปได้ว่าช่วงเวลากักเก็บไหนดีที่สุด เนื่องจากระบบไม่สามารถรักษาสภาวะคงที่ได้ สาเหตุมาจากมีปริมาณ VFA สะสมในระบบสูง ประกอบกับการเพิ่มอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์เร็วเกินไป และในส่วนที่ 3 เป็นการศึกษาเพิ่มเติมโดยเดินระบบแบบ ASBR (ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนแล้วถ่ายน้ำส่วนที่ใสทิ้ง) โดยถังที่ 1 ใช้ปริมาณ TS 5.5% เวลากักเก็บ 40 วัน ถังที่ 2 ใช้ปริมาณ TS 11% เวลากักเก็บ 80 วัน และถังที่ 3 ใช้ปริมาณ TS 5.5% เวลากักเก็บ 40 วัน โดยเดินระบบแบบ CSTR เพื่อเปรียบเทียบรูปแบบการเดินระบบ จากการทดลองพบว่า อัตราการผลิตแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นของแต่ละถังเท่ากับ 0.140, 0.058 และ 0.112  $\text{m}^3/\text{kg VS}_{\text{added}}$  ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบแบบ ASBR มีความเหมาะสมกว่าแบบ CSTR

(สิริชัย แยมแบน, 2554) ศึกษาผลิตแก๊สชีวภาพจากมูลไก่ไข่ด้วยระบบบ่อหมักรางของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ในส่วนแรกเป็นการศึกษาหาศึกษากายภาพ

ผลิตแก๊สชีวภาพโดยใช้อัตราส่วนมูลไก่ต่อน้ำ 1:2, 1:4, 1:8 และ 1:10 จากผลการทดลองพบว่าสามารถผลิตแก๊สมีเทนเฉลี่ยเท่ากับ 0.310, 0.318, 0.320 และ 0.334  $\text{m}^3/\text{kg VS}_{\text{added}}$  ตามลำดับ โดยเมื่อเทียบกับจำนวนไก่ 1 ตัว จะสามารถผลิตแก๊สมีเทนได้ 9.34, 9.70, 9.77 และ 10.19 L/วัน ในส่วนที่ 2 ได้ศึกษาใช้อัตราส่วนมูลไก่ต่อน้ำที่ 1:10 สำหรับเดินระบบในถังปฏิกรณ์ CMU-CD ขนาด 1,100 L ซึ่งพบว่าการใช้เชื้อตั้งต้น 30% ของปริมาตรถังปฏิกรณ์ สามารถลดระยะเวลาในการเริ่มต้นระบบได้ดีกว่าแบบไม่มีการเติมเชื้อตั้งต้นได้ถึงร้อยละ 50 เมื่อพิจารณาอัตราการผลิตแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นที่เวลากักเก็บ 10, 20 และ 30 วัน มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.735, 0.558 และ 0.745  $\text{m}^3/\text{kg COD}_{\text{added}}$  และมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.049, 0.792 และ 1.061  $\text{m}^3/\text{kg VS}_{\text{added}}$  ตามลำดับ

(หทัยรัตน์ เปี้ยตตะคุ, 2555) ศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพจากเปลือกลำไยและเปลือกลิ้นจี่โดยการหมักร่วมกับมูลไก่ แบ่งการทดลองออกเป็น 3 ส่วน ในส่วนแรกเป็นการศึกษาหา ค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) ที่เหมาะสมสำหรับการผลิตแก๊สชีวภาพ โดยศึกษาที่ค่า C/N ที่ 15, 20, 25 และ 30 จากการทดลองพบว่าที่อัตราส่วน C/N 25 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสม โดยสามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้ 50  $\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{kg VS}_{\text{added}}$  ในส่วนที่ 2 เป็นการศึกษาอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (OLR) ที่ 0.5, 0.8, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5 และ 4.0  $\text{kg VS}/\text{m}^3 \cdot \text{วัน}$  ในระบบแบบ ASBR จำนวน 2 ชุด จากการทดลองพบว่า การหมักร่วมกับมูลไก่ (ชุดที่ 1) ที่ค่า OLR 0.5  $\text{kg VS}/\text{m}^3 \cdot \text{วัน}$  สามารถผลิตแก๊สมีเทนได้ 0.142  $\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{kg VS}_{\text{added}}$  และการหมักร่วมกับยูเรีย (ชุดที่ 2) ที่ค่า OLR 2.5  $\text{kg VS}/\text{m}^3 \cdot \text{วัน}$  สามารถผลิตแก๊สมีเทนได้ 0.071  $\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{kg VS}_{\text{added}}$  ในส่วนที่ 3 เป็นการทดลองใช้ค่า OLR ที่ 4  $\text{kg VS}/\text{m}^3 \cdot \text{วัน}$  มาศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างเปลือกลิ้นจี่กับมูลไก่ และเปลือกลำไยกับมูลไก่ จากการทดลองพบว่า การหมักร่วมกับมูลไก่โดยแยกชนิดของเปลือกสามารถผลิตแก๊สมีเทนได้ 0.04 และ 0.10  $\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{kg VS}_{\text{added}}$  ตามลำดับ จากนั้น ได้ทำการทดลองหมักร่วมระหว่างเปลือกลิ้นจี่กับยูเรีย และเปลือกลำไยกับยูเรีย ซึ่งพบว่าสามารถผลิตแก๊สมีเทนได้ 0.02 และ 0.02  $\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{kg VS}_{\text{added}}$  ตามลำดับ

(ณัฐติมา จำมัน, 2557) ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพจากการหมักร่วมระหว่างเศษผลไม้กับมูลไก่ โดยใช้เศษผลไม้ 3 ชนิด ได้แก่ สับปะรด มะละกอ และมะม่วง โดยทำการผสมเศษผลไม้ที่อัตรา 1:1:1 โดยการทดลองได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วน ในส่วนแรกเป็นศึกษาหาอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) ที่เหมาะสม โดยทำการทดลองที่อัตราส่วน 15, 20, 25 และ 30 จากการทดลองพบว่า ที่อัตราส่วน C/N 20 เป็นอัตราส่วนที่สามารถให้ผลผลิตแก๊สมีเทนสูงสุดเท่ากับ 0.54  $\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{kg VS}_{\text{added}}$  ในส่วนของการทดลองที่ 2 เป็นการศึกษาอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (OLR) ในระบบ ASBR ระดับห้องปฏิบัติการ โดยทดลองที่ค่า OLR 0.5, 0.8, 1, 1.5, 2,

2.5 และ 3 kg VS/m<sup>3</sup>·วัน ซึ่งได้แบ่งการทดลองเป็น 2 ชุด ได้แก่ ชุดที่ 1 ใช้มูลไก่เป็นวัตถุดิบหมักร่วม และชุดที่ 2 ใช้ยูเรียเป็นวัตถุดิบหมักร่วม จากการทดลองพบว่า ชุดที่ 1 สามารถผลิตแก๊สมีเทนได้ 0.3 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg VS<sub>added</sub> ที่ค่า OLR 0.8 kg VS/m<sup>3</sup>·วัน และชุดที่ 2 สามารถผลิตแก๊สมีเทนได้ 0.14 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg VS<sub>added</sub> ที่ค่า OLR 1.5 kg VS/m<sup>3</sup>·วัน

(Weerayutsil et al., 2016) ศึกษาการหมักร่วมระหว่างมูลไก่กับหญ้าเนเปียร์ในระบบแบบกะ โดยที่อัตราส่วน C/N ของมูลไก่และหญ้าเนเปียร์คือ 8.2 และ 39.35 ลำดับ แสดงดังตารางที่ 12 ซึ่งการทดลองได้ศึกษาหาอัตราส่วนระหว่างมูลไก่ต่อหญ้าเนเปียร์ที่แตกต่างกัน โดยมีระยะเวลาในการหมัก 48 วัน ควบคุม TS 2% จากการทดลองพบว่า ที่อัตราส่วนมูลไก่ต่อหญ้าเนเปียร์ 1:1 สามารถผลิตแก๊สมีเทนได้ 64.4% ซึ่งมากกว่าการทดลองที่อัตราส่วนมูลไก่ต่อหญ้าเนเปียร์อื่น ๆ ทั้งนี้ พบว่าการหมักร่วมสามารถให้ผลผลิตแก๊สชีวภาพได้ดีกว่าการใช้วัตถุดิบเพียงชนิดเดียว ในขณะที่มูลไก่มีอัตราส่วน C/N ที่ต่ำ ซึ่งมีปริมาณไนโตรเจนที่สูงและทำให้เกิดการยับยั้งของแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทนในระบบได้ และในขณะเดียวกัน การใช้หญ้าเนเปียร์เพียงชนิดเดียวทำให้เกิดการสะสมของ VFA ในระบบได้ เนื่องจากเกิดการย่อยสลายของเซลลูโลสในขั้นตอน Hydrolysis

ตารางที่ 12 องค์ประกอบเบื้องต้นของมูลไก่และหญ้าเนเปียร์

องค์ประกอบ	มูลไก่	หญ้าเนเปียร์
TS (mg/kg)	658,000	162,983
VS (mg/kg)	422,000	142,250
MC (%)	18.49	81.10
C (%)	25.02	48.91
N (%)	3.04	1.23
C/N	8.22	39.35

ที่มา: (Weerayutsil et al., 2016)

(Li et al., 2014) ศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพแบบหมักร่วมระหว่างมูลไก่และซังข้าวโพดในระบบแบบกะและระบบแบบต่อเนื่อง โดยได้วิเคราะห์องค์ประกอบเบื้องต้น แสดงดังตารางที่ 9 พบว่าระบบแบบกะใช้ปริมาณสารอาหารที่ความเข้มข้นของ 3 g VS/L อัตราส่วน C/N 20 ระยะเวลาหมัก 30 วัน ซึ่งสามารถผลิตแก๊สมีเทนได้ 281 ± 12 mL/g VS<sub>added</sub> ในขณะที่ระบบแบบต่อเนื่อง มีการเติมสารอาหารคิดเป็น 12% TS อัตราส่วน C/N 20 ที่อัตราการบรรทุกสารอินทรีย์ 1 – 4 g VS/L/วัน

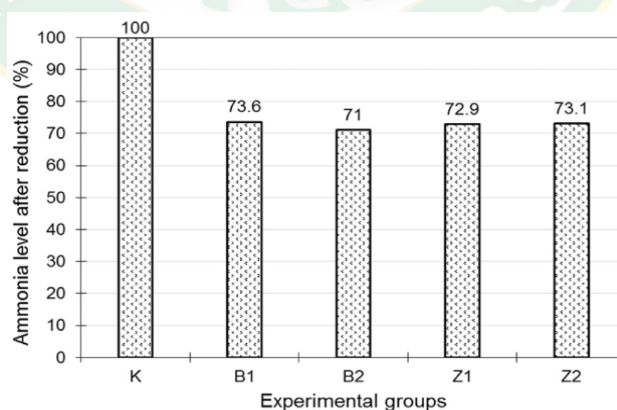
พบว่าที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ 4 g VS/L/วัน สามารถผลิตแก๊สมีเทนได้  $223 \pm 7$  ml/g  $VS_{added}$

**ตารางที่ 13** องค์ประกอบเบื้องต้นของมูลไก่ ชั่งข้าวโพด และหัวเชื้อ

องค์ประกอบ	มูลไก่	ชั่งข้าวโพด	หัวเชื้อ
TS (%)	$24.9 \pm 2.3$	$88.8 \pm 0.8$	$4.6 \pm 0.3$
VS (%)	$19.4 \pm 1.0$	$83.6 \pm 1.1$	$2.7 \pm 0.2$
C (%)	$36.2 \pm 1.3$	$44.2 \pm 1.7$	$34.3 \pm 4.2$
N (%)	$3.6 \pm 1.1$	$0.7 \pm 0.1$	$3.8 \pm 1.1$
C/N	$10.1 \pm 2.9$	$63.2 \pm 8.5$	$9.3 \pm 1.6$

ที่มา: (Li et al., 2014)

(Wlazlo et al., 2016) ศึกษาการลดแอมโมเนียด้วยวิธีการดูดซับโดยใช้อะลูมิเนียมซิลิเกตในการดูดซับแอมโมเนียในมูลไก่ โดยทำการเปรียบเทียบระหว่างชุดควบคุม (K) และอะลูมิเนียมซิลิเกตที่ 1 และ 2% โดยน้ำหนัก ซึ่งแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มคือ โซเดียมเบนโทไนท์ (B1 และ B2) และซีโอไลท์ (Z1 และ Z2) จากการทดลองพบว่า การใช้อะลูมิเนียมซิลิเกตสามารถลดปริมาณของแอมโมเนียในมูลไก่ได้ แสดงดังภาพที่ 12 การใช้อะลูมิเนียมซิลิเกตทั้ง 2 กลุ่มสามารถลดแอมโมเนียได้ใกล้เคียง โดยช่วงที่สามารถลดปริมาณแอมโมเนียได้คิดเป็นร้อยละ 26 - 29



**ภาพที่ 12** ระดับของแอมโมเนียที่เหลือหลังจากผ่านการดูดซับ

ที่มา: (Wlazlo et al., 2016)

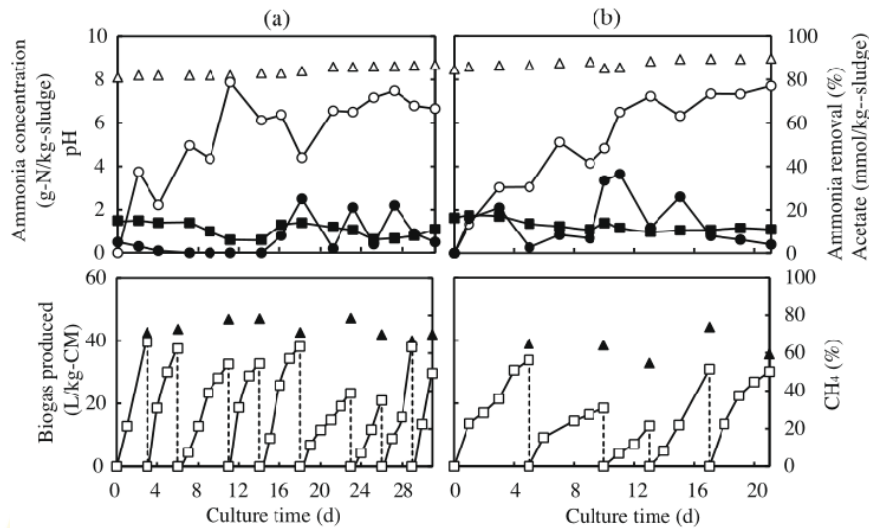
(ศิลป์ชัย มณีชาติย์ และคณะ, 2552) ศึกษาการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนของน้ำเสียจากฟาร์มไก่และฟาร์มสุกร โดยใช้แมงกานีสซีโอไซด์แบบคละขนาด 1.5 – 5.0 mm. และแบบกำหนดขนาด สร้างแบบจำลองคลองวนเวียนขนาด 34,633 cm<sup>3</sup> การทดลองได้ศึกษาความสามารถในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจน และปัจจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง พบว่า การใช้แมงกานีสซีโอไซด์สามารถกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนได้ทั้งแบบคละขนาดและแบบกำหนดขนาด โดยที่แมงกานีสซีโอไซด์ขนาด 1.5 mm. สามารถกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนคิดเป็นร้อยละ 78 ปริมาตรที่ใช้ 25,225 cm<sup>3</sup> ต่อปริมาณน้ำเสีย 12 L อัตราการไหล 20 L/hr. ระยะเวลาสัมผัสระหว่างน้ำเสียกับแมงกานีสซีโอไซด์ 120 min ซึ่งน้ำเสียมีค่า pH เท่ากับ 8.6 ณ อุณหภูมิห้อง ในขณะที่ใช้แมงกานีสซีโอไซด์แบบคละขนาด ในเงื่อนไขเดียวกัน แต่มีค่า pH เท่ากับ 7.9 สามารถกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนคิดเป็นร้อยละ 59 จากการทดลองแสดงให้เห็นว่า ในเงื่อนไขเดียวกัน ขนาดของแมงกานีสซีโอไซด์เป็นปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อความสามารถในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจน และเมื่อค่า pH สูงขึ้นทำให้ความสามารถในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน

(Nie et al., 2015) ศึกษาผลของความเข้มข้นแอมโมเนียที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพและเสถียรภาพของการหมักโดยใช้มูลไก่เพียงชนิดเดียว โดยใช้เทคนิคไล่แอมโมเนียที่ระเหยออกจากสารอินทรีย์ในถังหมัก และนำส่วนที่ถูกไล่แอมโมเนียกลับมาใช้ในกระบวนการหมักอีกครั้ง โดยศึกษาในระดับห้องปฏิบัติการ ระบบแบบ CSTR ที่อุณหภูมิ 40 °C ผลการทดลองพบว่า ที่อัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (OLR) 5.3 g VS/L·วัน มีแอมโมเนียไนโตรเจนอิสระ (FAN) เฉลี่ยอยู่ที่ 0.77 g/L โดยสามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้ 0.39 L/g VS เมื่อ OLR เพิ่มขึ้น พบว่ามีค่า FAN อยู่ที่ 0.86 g/L และสามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้ 0.27 L/g VS ทั้งนี้การใช้มูลไก่เพียงชนิดเดียวเป็นวัตถุดิบในการหมักทำให้เกิดความเข้มข้นของแอมโมเนียที่สูง แต่การนำสารอินทรีย์ในระบบมาผ่านการไล่แอมโมเนียที่ระเหยออกและนำกลับมาใช้อีกครั้ง อาจเป็นวิธีแก้ปัญหาในเรื่องของการยับยั้งของแอมโมเนียได้ ซึ่งการไล่แอมโมเนียที่ระเหยออกสามารถนำไปประยุกต์ใช้ทั้งในระบบที่มีขนาดใหญ่หรือระบบขนาดเล็กได้

(Abouelenien et al., 2010) ศึกษาการกำจัดแอมโมเนียโดยใช้กระบวนการไล่แอมโมเนียที่ระเหยออก (Stripping) เพื่อลดแอมโมเนียในมูลไก่ ไม่ให้เกิดการสะสมของแอมโมเนียเนื่องจากมีผลยับยั้งการผลิตแก๊สมีเทน ซึ่งการทดลองได้ใช้มูลไก่จากฟาร์มของมหาวิทยาลัยโรซามา โดยมีความเข้มข้นของแอมโมเนียอยู่ที่ 3 g N/kg<sub>มูลไก่แห้ง</sub> มีการควบคุมอุณหภูมิ 55 °C ในถังขนาด 5 L ระยะเวลาดำเนินการ 10 วัน หลังจากไล่แอมโมเนียจนเหลือความเข้มข้นต่ำกว่า 2 g N/kg<sub>มูลไก่แห้ง</sub> พบว่า การ



ผลิตแก๊สมีเทนในช่วงความเข้มข้นของแอมโมเนียต่ำกว่า  $2 \text{ g N/kg}$  มูลไก่แห้ง มีปริมาณที่สูงขึ้น แสดงดังภาพที่ 13



- ความเข้มข้นของแอมโมเนีย
- อะซิเตท
- ▲ pH
- แก๊สชีวภาพ
- แอมโมเนียที่ถูกกำจัด
- △ ร้อยละมีเทน

**ภาพที่ 13** การผลิตแก๊สมีเทนของมูลไก่โดยการไล่แอมโมเนียที่ระเหยออก  
(a) มูลไก่ที่ผ่านการไล่แอมโมเนีย, (b) มูลไก่ที่ผ่านการไล่ผสมมูลไก่ธรรมดา

ที่มา: (Abouelenien et al., 2010)

(เอกณัฐ ขวนขวยทรัพย์, 2541) ศึกษาการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมีของน้ำทิ้งจากบ่อบำบัด โดยได้ศึกษาหาอัตราการกวน เวลาการกวน และเวลาที่ให้ตกตะกอนที่เหมาะสม ซึ่งใช้สารส้มเป็นสารสร้างตะกอน พบว่าค่าที่เหมาะสมในการตกตะกอนคือที่ระยะเวลาการกวนเร็ว 100 rpm นาน 3 min และ ที่ระยะเวลาการกวนช้า 40 rpm นาน 20 min เวลาสำหรับทิ้งให้ตกตะกอนคือ 1 hr. ทั้งนี้ ยังได้ศึกษาเปรียบเทียบสารสร้างตะกอน 3 ชนิดคือ อลูมิเนียมซัลเฟต (สารส้ม) เพอร์ริคคลอไรด์ และแคลเซียมออกไซด์ (ปูนขาว) พบว่า สารส้มเป็นสารที่เหมาะสมที่สุดในการบำบัดโดยสามารถกำจัดความขุ่นได้ 99.67% กำจัดไนโตรเจน (TKN) ได้ 24.07% กำจัดอินทรีย์ไนโตรเจนได้ 86.12% กำจัดแอมโมเนียมไนโตรเจนได้ 0% และกำจัดฟอสฟอรัสได้ 96.29% แสดงดังตารางที่ 14 ปริมาณสารส้มที่ใช้ 250 mg/L และค่า pH ก่อนผ่านการตกตะกอน 8.5 จากการทดลองมีค่าใช้จ่ายด้านสารเคมีในระดับปฏิบัติการ  $177.10 \text{ บาท/m}^3$  และในเชิงพาณิชย์  $1.84 \text{ บาท/m}^3$

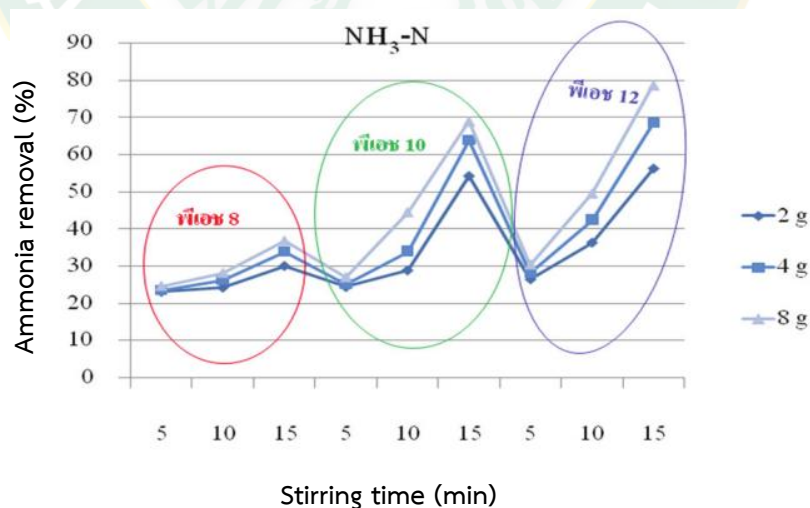


ตารางที่ 14 ประสิทธิภาพเฉลี่ยในการบำบัดน้ำทิ้งจากบ่อบำบัด

สารสร้างตะกอน	ประสิทธิภาพเฉลี่ยในการกำจัด (%)		
	ความขุ่น	ไนโตรเจน (TKN)	อินทรีย์ไนโตรเจน
สารส้ม	99.67	24.07	86.12
เฟอร์ริกคลอไรด์	99.76	23.46	83.22
ปูนขาว	99.53	24.90	88.15

ที่มา: (เอกณัฐ ขวนขวยทรัพย์, 2541)

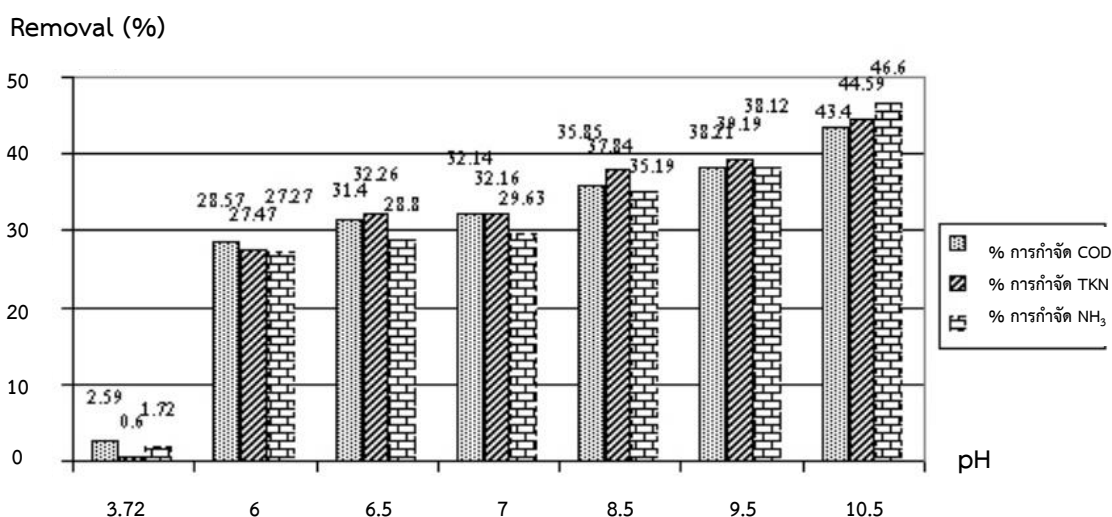
(พงศ์ลัดดา เผ่าศิริ, 2556) ใช้การตกตะกอนของเกลือแมกนีเซียมในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนออกจากน้ำเสียจากฟาร์มสุกร โดยศึกษาระดับ pH 8, 10 และ 12 ปริมาณแมกนีเซียมซัลเฟต 2, 4 และ 8 g และศึกษาเวลาในการกวนที่ 5, 10 และ 15 min จากผลการทดลองพบว่า ที่ระดับ pH 12 ปริมาณแมกนีเซียมซัลเฟตที่ใช้ 8 g ในระยะเวลาการกวน 15 min มีประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนคิดเป็นร้อยละ 78.81 แสดงดังภาพที่ 14 ทั้งนี้ แมกนีเซียมซัลเฟตมีประสิทธิภาพในการนำมากำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนโดยวิธีการตกตะกอนทางเคมี สามารถช่วยบำบัดน้ำเสียและลดปัญหาของกลิ่นได้



ภาพที่ 14 ประสิทธิภาพการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจน

ที่มา: (พงศ์ลัดดา เผ่าศิริ, 2556)

(ณวัฒน์ ศรีภูม้น, 2546) ศึกษาประสิทธิภาพในการกำจัด COD, TKN และ  $\text{NH}_3\text{-N}$  ออกจากน้ำเสียจากกากโปรตีนของโรงงานผลิตวันเส้น โดยใช้กระบวนการตกตะกอนทางเคมีด้วยสารส้ม ซึ่งทำการศึกษาค่า pH และปริมาณสารส้มที่แตกต่างกัน ในการกำจัด COD, TKN และ  $\text{NH}_3\text{-N}$  ออกจากน้ำเสีย จากการทดลองพบว่า ค่า pH ที่ 6.5 โดยใช้สารส้ม 60 mg/L สามารถกำจัด COD, TKN และ  $\text{NH}_3\text{-N}$  คิดเป็นร้อยละ 31.40, 32.26 และ 28.80 ตามลำดับ แต่ทั้งนี้ การทดลองได้ปรับ pH โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งพบว่า เมื่อทำการปรับ pH เพิ่มขึ้น น้ำเสียมีการตกตะกอนได้ดีขึ้นตามค่า pH ที่เพิ่มขึ้น แสดงดังภาพที่ 15 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อค่า pH เพิ่มขึ้น ความสามารถในการกำจัด COD, TKN และ  $\text{NH}_3\text{-N}$  จะเพิ่มขึ้นตาม ทั้งนี้ การทดลองมีค่าใช้จ่ายของสารเคมี 28.5 บาท/ $\text{m}^3$  สำหรับการตกตะกอนทางเคมี อีกทั้งการทดลองนี้ได้ศึกษากระบวนการโฟมแพคชั่นเนชั่นในการนำน้ำเสียที่ผ่านการตกตะกอนมาบำบัด และมีการเติมอากาศในการบำบัด ซึ่งพบว่า เมื่อเติมอากาศเข้าไปสามารถกำจัด COD, TKN และ  $\text{NH}_3\text{-N}$  ได้เพิ่มขึ้น

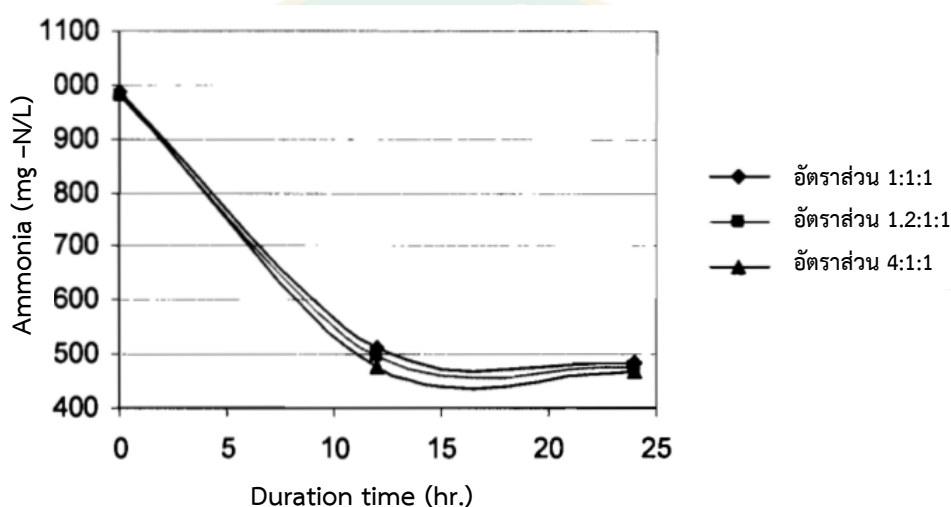


ภาพที่ 15 การกำจัดสารอินทรีย์ในแต่ละค่า pH

ที่มา: (ณวัฒน์ ศรีภูม้น, 2546)

(อานนท์ ดวงพาลี, 2552) ศึกษากำจัดแอมโมเนียด้วยวิธีการตกตะกอนผลึกสูตรไวท์โดยใช้สารแมกนีเซียมคลอไรด์และโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต การทดลองได้ใช้มูลไก่เป็นวัตถุดิบและศึกษาหาผลของอุณหภูมิและเวลาที่แตกต่างกัน สำหรับการไฮโดรไลซิสมูลไก่ และนำไปวิเคราะห์หาแอมโมเนีย TKN พบว่า อัตราการไฮโดรไลซิสสูงขึ้นเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โดยที่อุณหภูมิ 150 °C สำหรับการไฮโดรไลซิส มีอัตราส่วนแอมโมเนียไนโตรเจนต่อ TKN เพิ่มขึ้นจาก 0.254 เป็น 0.404 และมีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงเป็นแอมโมเนียต่อ TKN 0.1365 g  $\text{NH}_4^+\text{-N/g TKN-hr}$  และที่อุณหภูมิปกติที่

30 °C มีอัตราส่วนแอมโมเนียไนโตรเจนต่อ TKN เพิ่มขึ้นจาก 0.254 เป็น 0.257 และมีค่าอัตราการเปลี่ยนแปลงเป็นแอมโมเนียต่อ TKN 0.0011 g NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N/g TKN-hr จากนั้นได้ทำการทดลองกำจัดแอมโมเนียโดยใช้สารแมกนีเซียมคลอไรด์และโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต ที่อัตราส่วนเชิงมวล Mg<sup>2+</sup> : NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N : PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P ที่ต่างกัน พบว่า เมื่ออัตราส่วนเชิงมวลสูงขึ้น ทำให้อัตราการก่อผลึกสูงขึ้นตาม และการฟอร์มตะกอนเกิดขึ้นได้ดีในช่วง 60 min แรก โดยสามารถกำจัดไนโตรเจนได้ 2.11 g N/kg<sub>มูลไก่แห้ง</sub> ซึ่งค่า TKN ลดลงจาก 12.10 g N/kg<sub>มูลไก่แห้ง</sub> เหลือ 9.95 g N/kg<sub>มูลไก่แห้ง</sub> แสดงดังภาพที่ 16

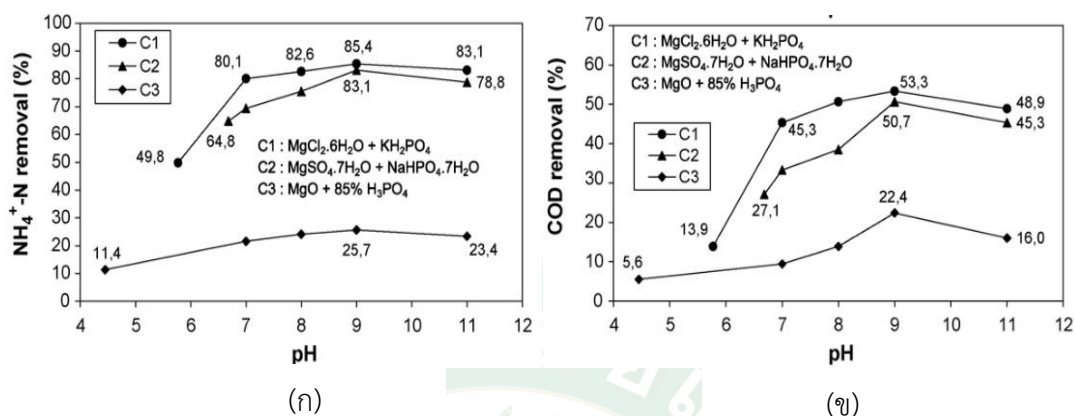


ภาพที่ 16 ความเข้มข้นของแอมโมเนียต่อเวลาที่อัตราส่วน Mg<sup>2+</sup>:NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N:PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P ต่างกัน

ที่มา: (อานนท์ ดวงพาลี, 2552)

(Yetilmezsoy and Sapci-Zengin, 2009) ศึกษาการตกตะกอนแมกนีเซียมแอมโมเนียมฟอสเฟต (MgNH<sub>4</sub>PO<sub>4</sub>·6H<sub>2</sub>O, MAP) จากน้ำเสียของฟาร์มไก่ โดยได้ศึกษาการใช้แมกนีเซียมคลอไรด์กับโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (MgCl<sub>2</sub>·H<sub>2</sub>O + KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>), แมกนีเซียมซัลเฟตกับไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O + NaHPO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O) และ แมกนีเซียมออกไซด์กับกรดฟอสฟอริก 85% (MgO + 85%H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>) สำหรับตกตะกอน MAP ที่ค่า pH แตกต่างกัน โดยใช้อัตราส่วนเชิงมวล Mg<sup>2+</sup>:NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N:PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P คือ 1:1:1 พบว่า การใช้แมกนีเซียมคลอไรด์กับโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟตสำหรับตกตะกอน MAP สามารถกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจน (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N) และ COD ได้มากกว่าการใช้สารเคมีชนิดอื่น โดยที่ค่า pH 9 สามารถกำจัด NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N และ COD ได้มากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 85.4 และ 53.3 ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 17 หลังจากนั้นได้ทำการศึกษาอัตราส่วนเชิงมวล

$Mg_2^+ : NH_4^+ - N : PO_4^{3-} - P$  ที่แตกต่างกันสำหรับการตกตะกอน MAP และทดลองนำตะกอนที่ได้ไปใช้กับพืช ซึ่งพบว่า ตะกอน MAP สามารถนำไปใช้เป็นปุ๋ยสำหรับการเกษตรได้



ภาพที่ 17 ผลของค่า pH ต่อการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจน (ก) และการกำจัดสารอินทรีย์ (ข)

ที่มา: (Yetilmezsoy and Sapci-Zengin, 2009)

จากการตรวจสอบเอกสาร พบว่า มูลไก่สามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตแก๊สชีวภาพได้ เช่น การผลิตแก๊สชีวภาพโดยใช้มูลไก่เป็นวัตถุดิบเพียงชนิดเดียว ทำการทดลองในถังขนาด 10 L สามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้ในช่วง 0.7 – 2.1 L มีประสิทธิภาพการกำจัด COD อยู่ในช่วงร้อยละ 14 - 77 และสามารถกำจัด TKN ได้ร้อยละ 4 – 71 (ภัทรา วงษ์พันธ์กุล และศิริระประภา ชัยเนตร, 2555) การศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพจากมูลไก่เนื้อด้วยระบบถังกวนสมบูรณ์ ในถังขนาด 24 L พบว่าสามารถผลิตแก๊สมีเทนเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.173 – 0.176 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg VS<sub>added</sub> (ศักรินทร์ หมูเทพ, 2555) และการศึกษาผลิตแก๊สชีวภาพจากมูลไก่ไข่ด้วยระบบบ่อหมักราง พบว่า สามารถผลิตแก๊สมีเทนเฉลี่ยอยู่ในช่วง 0.310 – 0.334 m<sup>3</sup>/kg VS<sub>added</sub> โดยเมื่อเทียบกับจำนวนไก่ 1 ตัว จะสามารถผลิตแก๊สมีเทนได้ 9.34 – 10.19 L/วัน (สิริชัย แยมแบน, 2554) เป็นต้น ในขณะที่มูลไก่สามารถนำร่วมกับวัตถุดิบอื่น ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตแก๊สชีวภาพได้ เช่น การทดลองหมักร่วมระหว่างมูลไก่กับเปลือกกล้วยและเปลือกถั่วลิสง ซึ่งพบว่าที่อัตราส่วน C/N 25 เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสม โดยสามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้ 50 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg VS<sub>added</sub> (หทัยรัตน์ เปียดตะคุ, 2555) การหมักร่วมระหว่างเศษผลไม้กับมูลไก่ พบว่า ที่อัตราส่วน C/N 20 เป็นอัตราส่วนที่สามารถให้ผลผลิตแก๊สมีเทนสูงสุดเท่ากับ 0.54 m<sup>3</sup> CH<sub>4</sub>/kg VS<sub>added</sub> (ณัฐติมา จำมัน, 2557) และการหมักร่วมระหว่างมูลไก่กับหญ้าเนเปียร์ในระบบแบบกะ พบว่า ที่อัตราส่วนมูลไก่ต่อหญ้าเนเปียร์ 1:1 สามารถผลิตแก๊สมีเทนได้ 64.4% (Weerayutsil et al., 2016) เป็นต้น เนื่องจากมูลไก่มีองค์ประกอบของสารอินทรีย์สำหรับ

การเจริญเติบโตของแบคทีเรียในกระบวนการหมัก แต่ทั้งนี้พบว่ามีองค์ประกอบของไนโตรเจนที่สูง ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้เกิดความเป็นพิษในระบบจากการสะสมแอมโมเนียขึ้น จึงทำให้สามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้น้อยลง ทั้งนี้จึงมีการศึกษาการลดแอมโมเนียด้วยวิธีต่าง ๆ เช่น การลดแอมโมเนียด้วยวิธีการดูดซับโดยใช้อะลูมิเนียมซิลิเกต ซึ่งสามารถลดแอมโมเนียได้และอยู่ในช่วงร้อยละ 26 - 29 (Wlazlo et al., 2016) การกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนของน้ำเสียจากฟาร์มไก่และฟาร์มสุกร โดยใช้แมงกานีสซีโอไซด์เป็นตัวดูดซับ โดยสามารถกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนคิดเป็นร้อยละ 59 (ศิลาชัยมณีชัยดี และคณะ, 2552) การลดแอมโมเนียโดยใช้กระบวนการไล่แอมโมเนียที่ระเหยออกเพื่อลดแอมโมเนียในมูลไก่ ทดลองในถังขนาด 5 L ระยะเวลาดำเนินการ 10 วัน จากการทดลองพบว่า ความเข้มข้นของแอมโมเนียเริ่มต้นอยู่ที่ 3 g N/kg<sub>มูลไก่แห้ง</sub> หลังจากไล่แอมโมเนียจนเหลือความเข้มข้นต่ำกว่า 2 g N/kg<sub>มูลไก่แห้ง</sub> พบว่า การผลิตแก๊สมีเทนในช่วงความเข้มข้นของแอมโมเนียต่ำกว่า 2 g N/kg<sub>มูลไก่แห้ง</sub> มีปริมาณที่สูงขึ้น (Abouelenien et al., 2010) ทั้งนี้วิธีการดูดซับแอมโมเนียข้างต้นเป็นวิธีที่มีสถานะที่ไม่เหมาะสมสำหรับกระบวนการหมัก เช่น อากาศ และตัวดูดซับ เป็นต้น ในขณะที่วิธีการไล่แอมโมเนียระเหยออกเป็นวิธีการที่ซับซ้อน และมีค่าใช้จ่ายในการเดินระบบสูง ทั้งนี้จึงได้ศึกษาการลดแอมโมเนียด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี เช่น ศึกษาการกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมีของน้ำทิ้งจากบ่อบำบัด โดยใช้อลูมิเนียมซัลเฟต (สารส้ม) เพอร์ริคคลอไรด์ และแคลเซียมออกไซด์ (ปูนขาว) เป็นสารสร้างตะกอน ซึ่งพบว่า สารส้มเป็นสารที่เหมาะสมที่สุด สามารถกำจัดไนโตรเจน (TKN) ได้ 24.07% กำจัดอินทรีย์ไนโตรเจนได้ 86.12% (เอกณัฐ ขวนขวายุทรัพย์, 2541) การศึกษาการตกตะกอนของเกลือแมกนีเซียมในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจน จากผลการทดลองพบว่า ที่ระดับ pH 12 ปริมาณแมกนีเซียมซัลเฟตที่ใช้ 8 g มีประสิทธิภาพในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนคิดเป็นร้อยละ 78.81 (พงศ์ลัดดา เผ่าศิริ, 2556) เป็นต้น ทั้งนี้การใช้วิธีการตกตะกอนทางเคมี เป็นวิธีที่ง่ายและมีค่าใช้จ่ายต่ำ จากการศึกษาทฤษฎีและการตรวจเอกสารข้างต้น ทางผู้วิจัยจึงสนใจนำวิธีการตกตะกอนทางเคมีโดยใช้สารเคมีที่มีองค์ประกอบของแมกนีเซียมมาประยุกต์ใช้ในกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพโดยการลดแอมโมเนียในมูลไก่ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตแก๊สชีวภาพภายใต้สภาวะแบบไม่ใช้อากาศ



### บทที่ 3

#### วัตถุดิบและวิธีการทดลอง

บทนี้กล่าวถึงวัตถุดิบ สารเคมี และวิธีการทดลอง โดยแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ 1. วัตถุดิบที่ใช้ในการศึกษา ซึ่งการทดลองนี้ได้ใช้มูลไก่จากฟาร์มในจังหวัดเชียงใหม่เป็นวัตถุดิบตั้งต้น ทำการวิเคราะห์คุณลักษณะเบื้องต้น ได้แก่ ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solid, TS) ปริมาณของแข็งระเหยง่าย (Volatile solid, VS) ปริมาณสารประกอบสารอินทรีย์ (Chemical oxygen demand, COD) ปริมาณสารอินทรีย์ไนโตรเจนทั้งหมดและแอมโมเนียไนโตรเจน (Total kjeldahl nitrogen, TKN) ความชื้น (Moiture content, MC) และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) 2. สารเคมีที่ใช้สำหรับลดแอมโมเนียในมูลไก่ด้วยเทคนิคการตกตะกอนทางเคมีมี 3 ชนิด ได้แก่ แมกนีเซียมซัลเฟต เฮปตะไฮเดรต ( $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ ) แมกนีเซียมคลอไรด์ เฮกซะไฮเดรต ( $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ ) และ แมกนีเซียมออกไซด์ ( $MgO$ ) 3. วิธีการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการในระบบแบบกะ วิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องทั้งก่อนและหลังการหมัก นอกจากนี้ได้ทำการตรวจวัดปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน องค์ประกอบของแก๊สมีเทน และวิเคราะห์ศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทน (Biochemical methane potential, BMP) 4. การทดลองในระดับครัวเรือน ในส่วนนี้ได้เลือกใช้เงื่อนไขที่เหมาะสมจากการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ เพื่อศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพจากมูลไก่โดยใช้เทคนิคลดแอมโมเนียด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี ทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องทั้งก่อนและหลังการหมัก ตรวจวัดปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน องค์ประกอบของแก๊สมีเทน และวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์ แสดงดังภาพที่ 18



ภาพที่ 18 แผนผังการทดลอง

### 3.1 วัตถุประสงค์

งานวิจัยนี้ใช้มูลไก่เป็นวัตถุประสงค์หลักเพียงชนิดเดียว โดยมูลไก่ได้รับความอนุเคราะห์จากฟาร์มไก่ไข่ในเขตพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ ลักษณะเบื้องต้นของมูลไก่ส่วนใหญ่มีการจับตัวกันเป็นกลุ่มก้อนขนาดใหญ่ มีความอ่อนนุ่ม มีสีน้ำตาลเข้ม ค่อนข้างเปียก มีกลิ่นฉุนมาก แสดงดังภาพที่ 19 อีกทั้งยังพบว่ามูลไก่บางส่วนมีลักษณะเป็นก้อนเล็ก ๆ สีน้ำตาลอ่อน ไม่แข็งมาก ค่อนข้างแห้งปะปนอยู่ และพบมูลไก่ที่มีลักษณะเป็นผงปะปนกับเศษดิน รวมถึงเศษของขนไก่ติดมากับมูลไก่ ทำการแยกขนไก่และเศษอื่น ๆ ที่ปนเปื้อนออก มูลไก่ที่มีขนาดใหญ่จะทำการบีบให้มีขนาดเล็กกลงหรือละเอียดพอประมาณ ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบเบื้องต้นก่อนทำการทดลอง แสดงดังตารางที่ 15



ภาพที่ 19 ลักษณะของมูลไก่

### ตารางที่ 15 วิเคราะห์องค์ประกอบของมูลไก่

พารามิเตอร์	การวิเคราะห์
TS	APHA, AWWA, 22 <sup>nd</sup> , 2012, p.2540 B
VS	APHA, AWWA, 22 <sup>nd</sup> , 2012, p.2540 B
TKN	AOAC and OMAF
MC	AOAC, 2012
C/N ratio	AOAC, 2012

### 3.2 สารเคมี

การศึกษาการลดปริมาณแอมโมเนียในมูลไก่ด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมีสำหรับการผลิตแก๊สชีวภาพ ได้ใช้สารเคมีที่มีสารประกอบของแมกนีเซียม 3 ชนิด ดังนี้

### 3.2.1 แมกนีเซียมซัลเฟต เฮปตะไฮเดรต ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ )

มีลักษณะทางกายภาพเป็นผงผลึกสีขาว ไม่มีกลิ่น ความสามารถในการละลายน้ำ 710 g/L ที่  $20^\circ\text{C}$  มวลโมเลกุล 246.47 g/mol ความหนาแน่น  $1.68\text{ g/cm}^3$  จุดหลอมเหลว  $150^\circ\text{C}$

### 3.2.2 แมกนีเซียมคลอไรด์ เฮกซะไฮเดรต ( $\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ )

มีลักษณะทางกายภาพเป็นเม็ดเล็ก ๆ ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ความสามารถในการละลายน้ำ 546 g/L ที่  $20^\circ\text{C}$  สามารถละลายในแอลกอฮอล์และที่ที่มีความชื้น มวลโมเลกุล 203.30 g/mol ความหนาแน่น  $1.57\text{ g/cm}^3$  จุดหลอมเหลว  $117^\circ\text{C}$

### 3.2.3 แมกนีเซียมออกไซด์ ( $\text{MgO}$ )

มีลักษณะทางกายภาพเป็นผงสีขาว ไม่กลิ่น ความสามารถในการละลายน้ำ 86 mg/L ที่  $30^\circ\text{C}$  มวลโมเลกุล 58.32 g/mol ความหนาแน่น  $2.34\text{ g/cm}^3$  จุดหลอมเหลว  $350^\circ\text{C}$

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการลดปริมาณแอมโมเนียในมูลไก่ด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมีสำหรับการผลิตแก๊สชีวภาพด้วยกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยใช้มูลไก่เป็นวัตถุดิบเพียงชนิดเดียว การทดลองได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ทดลองในระดับห้องปฏิบัติการและในระดับครัวเรือน

## 3.3 วิธีการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ

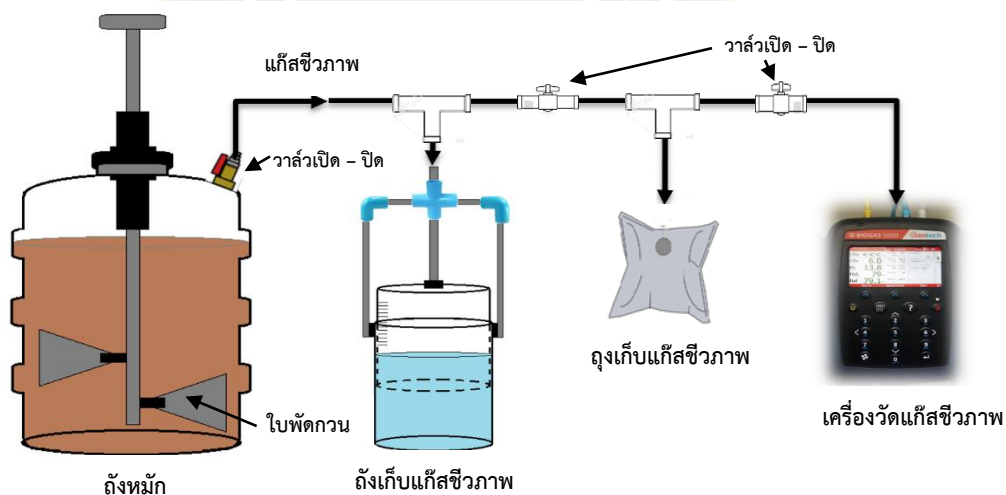
การทดลองในระดับห้องปฏิบัติการดำเนินการระบบแบบกะ (Batch) แสดงดังภาพที่ 20 และ 21 ในถังหมักขนาด 19 L ปริมาตรใช้งานจริง 16 L ดำเนินการหมักภายใต้อุณหภูมิเมโซฟิลิก ( $35 \pm 3^\circ\text{C}$ ) ดำเนินการหมักจนกว่าปริมาณแก๊สเกิดขึ้นคงที่หรือมีแนวโน้มลดลง การทดลองในระดับห้องปฏิบัติการได้แบ่งเป็น 3 ขั้นตอน ได้แก่

ขั้นตอนที่ 1 ทำการศึกษาการตกตะกอนแอมโมเนียในมูลไก่ด้วยสารเคมีที่มีองค์ประกอบของแมกนีเซียม 3 ชนิด คือ แมกนีเซียมซัลเฟต แมกนีเซียมคลอไรด์ และแมกนีเซียมออกไซด์ ที่ความเข้มข้น  $100\text{ mg/L}$  โดยการละลายสารเคมีในมูลไก่ ที่ผสมน้ำในอัตราส่วน 1:3 หลังจากการทดลองการตกตะกอนแอมโมเนีย นำมูลไก่ที่ผ่านการตกตะกอนไปใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตแก๊สชีวภาพเพื่อศึกษาปริมาณของแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้น ปริมาณองค์ประกอบของมีเทน และวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องก่อนและหลังการทดลอง ได้แก่ TS, VS COD, VFA, Alk และ TKN ดำเนินการหมักในระดับ

ห้องปฏิบัติการขนาด 19 L ปริมาตรใช้งานจริง 16 L ภายใต้อุณหภูมิการหมักเมโซฟิลิก (Mesophilic) ( $35\pm 3$  °C) ระยะเวลาการหมัก 20 วัน ทำการกวนด้วยมือเป็นเวลา 1 min/วัน

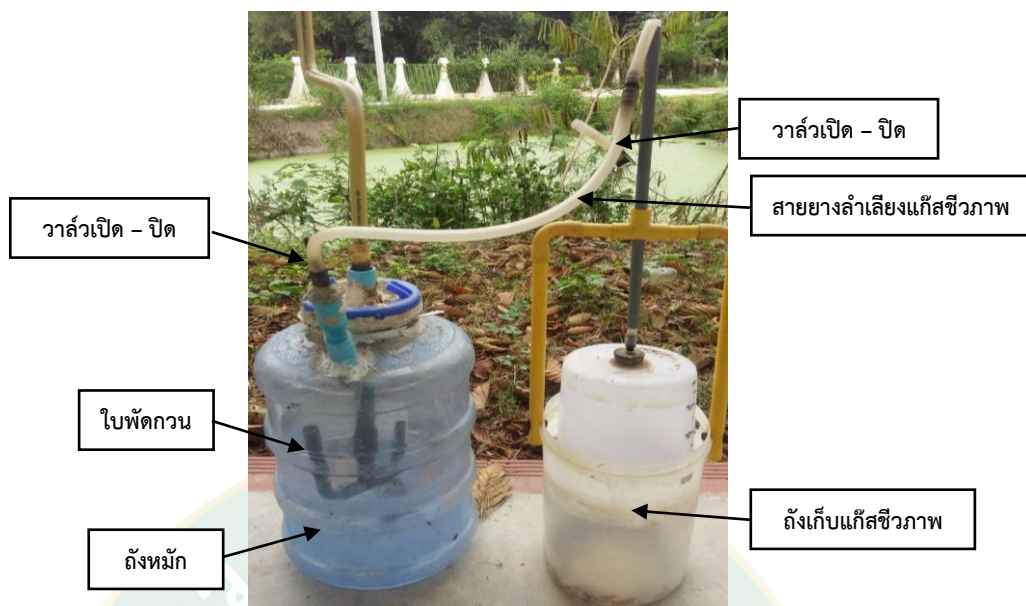
ขั้นตอนที่ 2 เลือกเงื่อนไขที่ดีที่สุดจากขั้นตอนที่ 1 ทำการศึกษาความเข้มข้นของสารเคมีที่ความเข้มข้น 100, 150 และ 200 mg/L โดยการละลายสารเคมีในมูลไก่ ที่ผสมน้ำในอัตราส่วน 1:3 หลังจากการทดลองการตกตะกอนแอมโมเนีย นำมูลไก่ที่ผ่านการตกตะกอนไปใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตแก๊สชีวภาพ เพื่อศึกษาปริมาณของแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้น ปริมาณองค์ประกอบของมีเทน และวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องก่อนและหลังการทดลอง ได้แก่ TS, VS COD, VFA, Alk และ TKN ดำเนินการหมักในระดับห้องปฏิบัติการขนาด 19 L ปริมาตรใช้งานจริง 16 L ภายใต้อุณหภูมิการหมักเมโซฟิลิก ( $35\pm 3$  °C) ระยะเวลาการหมัก 20 วัน ทำการกวนด้วยมือเป็นเวลา 1 min/วัน

ขั้นตอนที่ 3 ศึกษาระยะเวลาการกวนและระยะเวลาตกตะกอน โดยศึกษาที่ระยะเวลาการกวน 1, 3 และ 5 min และระยะเวลาตกตะกอนของสารเคมีที่ช่วงเวลา 60 และ 90 min โดยการละลายสารเคมีในมูลไก่ที่ผสมน้ำในอัตราส่วน 1:3 นำมูลไก่ที่ผ่านการตกตะกอนมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตแก๊สชีวภาพ เพื่อศึกษาปริมาณของแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้น ปริมาณองค์ประกอบของมีเทน และวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องก่อนและหลังการทดลอง ได้แก่ TS, VS COD, VFA, Alk และ TKN แสดงดังตารางที่ 16 ดำเนินการหมักในระดับห้องปฏิบัติการขนาด 19 L ปริมาตรใช้งานจริง 16 L ภายใต้อุณหภูมิการหมักเมโซฟิลิก ( $35\pm 3$  °C) ระยะเวลาการหมัก 20 วัน ทำการกวนด้วยมือเป็นเวลา 1 min/วัน



ภาพที่ 20 แบบจำลองการทดลองผลิตแก๊สชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการ





ภาพที่ 21 การทดลองผลิตแก๊สชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการ

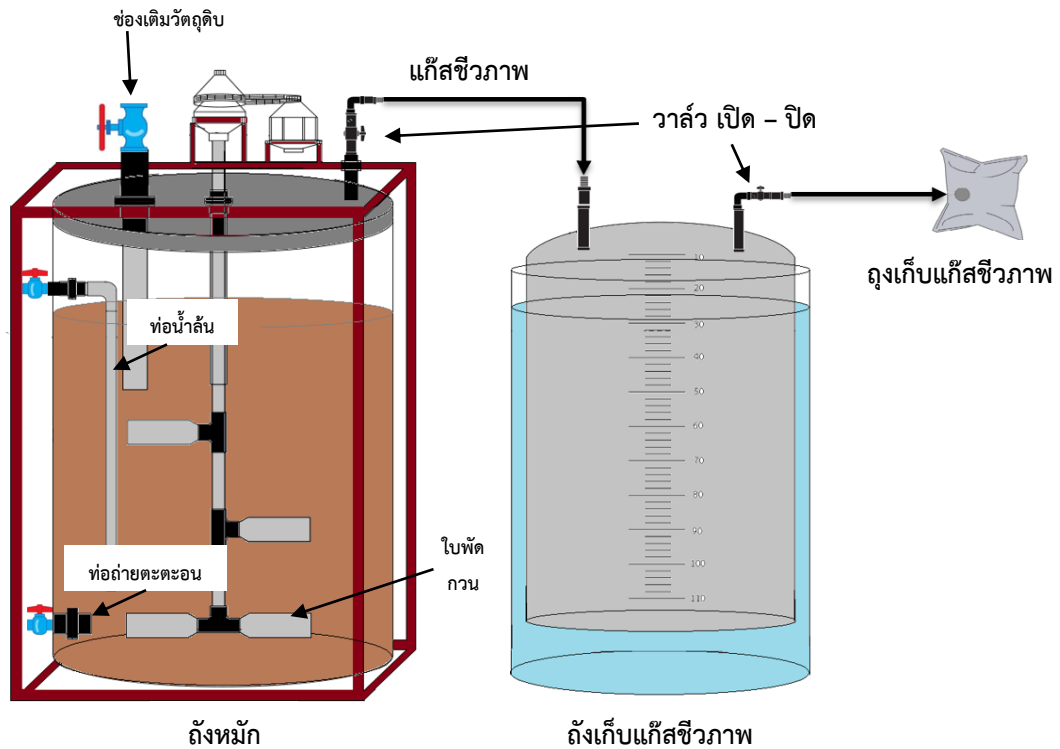
ระบบหมักแก๊สชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการ ประกอบด้วย ถังหมัก (Reactor) ขนาด 19 L ปริมาตรใช้งานจริง 16 L ถังหมักถูกปิดด้วยฝาที่มีใบกวนสำหรับกวนในระบบ ด้านบนของถังติดตั้ง วาล์ว (Valve) ที่สามารถเปิดปิดเชื่อมด้วยสายยางเพื่อลำเลียงแก๊สชีวภาพไปยังถังเก็บแก๊ส (Storage) โดยที่สายยางเชื่อมด้วยข้อต่อสามทางและวาล์วเปิดปิดสำหรับลำเลียงแก๊สชีวภาพไปยังถังเก็บแก๊ส ถังเก็บตัวอย่างแก๊สชีวภาพ (Gas bag) และเครื่องวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของแก๊ส (Gas detector) ชุด ถังเก็บแก๊สอ่านปริมาตรแก๊สที่เกิดขึ้นโดยใช้หลักการแทนที่น้ำ ประกอบด้วยถังขนาด 5 และ 7 L โดยที่ถังขนาด 5 L เชื่อมกับสายยางสำหรับลำเลียงแก๊ส และคว่ำปากถังลงในถังขนาด 7 L ที่บรรจุน้ำไว้ เพื่อวัดปริมาตรของแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นโดยใช้หลักการแทนที่ของน้ำ (Water displacement) เมื่อระบบมีการผลิตแก๊สชีวภาพ แก๊สจะลอยตัวสูงขึ้นและลำเลียงมายังถังเก็บแก๊ส โดยที่น้ำในถังจะถูก แทนที่ด้วยแก๊สที่เกิดขึ้น ซึ่งสามารถอ่านค่าปริมาตรของแก๊สที่เกิดขึ้นในแต่ละวันได้ ในส่วนของการ วิเคราะห์ห้องค์ประกอบของแก๊สชีวภาพ ได้ทำการเก็บตัวอย่างแก๊สจากถังเก็บแก๊ส โดยใช้ถุงเก็บ ตัวอย่างแก๊สชีวภาพ ที่เชื่อมต่อกับสายยางจากถังเก็บแก๊ส ในขณะที่ถุงเก็บตัวอย่างแก๊สชีวภาพ สามารถถอดออกจากสายยางได้ การเก็บตัวอย่างแก๊สทำได้โดยการกดถังเก็บแก๊สที่ลอยตัวขึ้น โดยให้ น้ำที่อยู่ในถัง 7 L ดันแก๊สที่อยู่ด้านบนและลำเลียงตามสายยางไปยังถุงเก็บตัวอย่างแก๊สชีวภาพ หลังจากนั้นเชื่อมเครื่องวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของแก๊สเข้ากับถุงเก็บตัวอย่างแก๊สชีวภาพ เพื่อ วิเคราะห์ห้องค์ประกอบของแก๊สที่ได้ และทำการจดบันทึก

**ตารางที่ 16** วิเคราะห์พารามิเตอร์ในขั้นตอนการหมักแก๊สชีวภาพระดับห้องปฏิบัติการ

พารามิเตอร์	จำนวนครั้งในการวิเคราะห์	การวิเคราะห์
TS	ก่อนและหลังการหมัก	APHA, AWWA, 22 <sup>nd</sup> , 2012, p.2540 B
VS	ก่อนและหลังการหมัก	APHA, AWWA, 22 <sup>nd</sup> , 2012, p.2540 B
TKN	ก่อนและหลังการหมัก	AOAC and OMAF
pH	ก่อนและหลังการหมัก	pH meter
VFA	ก่อนและหลังการหมัก	APHA, AWWA, 22 <sup>nd</sup> , 2012, p.2320
Alk	ก่อนและหลังการหมัก	APHA, AWWA, 22 <sup>nd</sup> , 2012, p.2320
COD	ก่อนและหลังการหมัก	APHA, AWWA, 22 <sup>nd</sup> , 2012, p.5220
ปริมาณแก๊สชีวภาพ	ทุกวัน	แทนที่น้ำ
CH <sub>4</sub>	3 ครั้ง/การทดลอง	Gas check (Geotech biogas 5000)

### 3.4 วิธีการทดลองในระดับครัวเรือน

การศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพในระดับครัวเรือน ดำเนินการในระบบแบบกะ (Batch) โดยการเติมวัตถุดิบเพียงครั้งเดียว แสดงดังภาพที่ 22 และ 23 โดยพิจารณาจากเงื่อนไขที่เหมาะสมจากการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ ทำการทดลองในถังหมักขนาด 200 L ปริมาตรใช้งานจริง 160 L โดยใช้สารเคมีละลายในมูลไก่ที่ผสมน้ำ ในอัตราส่วนมูลไก่ต่อน้ำ 1:3 ดำเนินการหมักภายใต้อุณหภูมิเมโซฟิลิก ( $35 \pm 3$  °C) ทำการกวน 1 ครั้งต่อวัน เป็นเวลา 10 min ระยะเวลาการหมัก 20 วัน หรือจนกว่าปริมาณแก๊สเกิดขึ้นคงที่หรือมีแนวโน้มลดลง วิเคราะห์พารามิเตอร์ทั้งก่อนและหลังการหมัก ได้แก่ TS, VS, COD, VFA, Alk และ TKN วัดปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นทุกวัน วิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สชีวภาพ แสดงดังตารางที่ 17 ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองในระดับครัวเรือนจะนำไปวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์



ภาพที่ 22 แบบจำลองการทดลองผลิตแก๊สชีวภาพในระดับห้องครัวเรือน



ภาพที่ 23 การทดลองผลิตแก๊สชีวภาพในระดับห้องครัวเรือน

ระบบหมักแก๊สชีวภาพในระดับห้องครัวเรือน ประกอบด้วย ถังหมักขนาด 200 L ปริมาตรใช้งานจริง 160 L ด้านข้างของถังติดตั้งท่อน้ำล้นและท่อตั้งกาก ภายในถังหมักประกอบด้วยแกนใบกวนและใบกวนจำนวน 4 ใบ ด้านบนติดตั้งมอเตอร์เข้ากับแกนใบพัดสำหรับกวน โดยมอเตอร์ที่ใช้เป็นมอเตอร์ขนาด 190 W ความเร็วรอบในการหมุน 75 rpm (วัดในขณะที่ถังบรรจุน้ำ) ทำการติดตั้งท่อสำหรับเติมวัตถุดิบเข้าระบบ และติดตั้งบอลวาล์วเปิดปิดสำหรับลำเลียงแก๊สชีวภาพ โดยเชื่อมด้วย

สายยางเพื่อลำเลียงแก๊สชีวภาพไปยังถังเก็บแก๊ส ถังเก็บแก๊สประกอบด้วยถังขนาด 120 L สำหรับเก็บแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้น กว่าถัง 120 L ลงในถังขนาด 200 L ที่บรรจุน้ำวัดปริมาตรของแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นโดยใช้หลักการแทนที่ของน้ำ (Water displacement) ด้านบนของถังเก็บแก๊สติดตั้งวาล์วโดยเชื่อมต่อด้วยสายยางเข้ากับถุงเก็บตัวอย่างแก๊สชีวภาพสำหรับเก็บตัวอย่างของแก๊สที่เกิดขึ้นเพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สชีวภาพ วิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องทั้งก่อนและหลังการหมัก แสดงดังตารางที่ 17 ซึ่งผลที่ได้จากการทดลองในระดับครัวเรือนจะนำไปวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางด้านเศรษฐศาสตร์

**ตารางที่ 17** วิเคราะห์พารามิเตอร์ในขั้นตอนการหมักแก๊สชีวภาพระดับครัวเรือน

พารามิเตอร์	จำนวนครั้งในการวิเคราะห์	การวิเคราะห์
TS	ก่อนและหลังการหมัก	APHA, AWWA, 22 <sup>nd</sup> , 2012, p.2540 B
VS	ก่อนและหลังการหมัก	APHA, AWWA, 22 <sup>nd</sup> , 2012, p.2540 B
TKN	ก่อนและหลังการหมัก	AOAC and OMAF
pH	ก่อนและหลังการหมัก	pH meter
VFA	ก่อนและหลังการหมัก	APHA, AWWA, 22 <sup>nd</sup> , 2012, p.2320
Alkalinity	ก่อนและหลังการหมัก	APHA, AWWA, 22 <sup>nd</sup> , 2012, p.2320
COD	ก่อนและหลังการหมัก	APHA, AWWA, 22 <sup>nd</sup> , 2012, p.5220
ปริมาณแก๊สชีวภาพ	ทุกวัน	แทนที่น้ำ
CH <sub>4</sub>	5 ครั้ง/การทดลอง	Gas check (Geotech biogas 5000)



## บทที่ 4

### ผลการทดลองและวิจารณ์

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาการลดปริมาณแอมโมเนียในมูลไก่ด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมีสำหรับการผลิตแก๊สชีวภาพด้วยกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกาศ โดยใช้มูลไก่เป็นวัตถุดิบเพียงชนิดเดียว ทำการหมักในระบบแบบแบทช์เพื่อศึกษาผลของวิธีการตกตะกอนทางเคมีต่อปริมาณการผลิตแก๊สชีวภาพเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่มีการตกตะกอนทางเคมี การทดลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ทดลองในระดับห้องปฏิบัติการและในระดับครัวเรือน โดยการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการดำเนินการโดยใช้ถังหมักขนาด 19 L ปริมาตรใช้งานจริง 16 L ดำเนินการภายใต้อุณหภูมิเมโซฟิลิก ( $35\pm 3$  °C) ระยะเวลาการหมัก 20 วัน หรือจนกว่าปริมาณแก๊สคงที่หรือมีแนวโน้มลดลง การทดลองการตกตะกอนทำการผสมมูลไก่และน้ำในอัตราส่วนมูลไก่ต่อน้ำที่ 1:3 แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 ทำการศึกษาชนิดของสารประกอบแมกนีเซียมในการตกตะกอนต่อปริมาณการผลิตแก๊สชีวภาพ โดยศึกษาสารเคมี 3 ชนิด ได้แก่ แมกนีเซียมซัลเฟต เฮปตะไฮเดรต ( $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ ) แมกนีเซียมคลอไรด์ เฮกซะไฮเดรต ( $MgCl_2 \cdot 6H_2O$ ) และแมกนีเซียมออกไซด์ ( $MgO$ ) ที่ความเข้มข้น 100 mg/L เพื่อศึกษาและคัดเลือกสารเคมีที่เหมาะสมสำหรับการตกตะกอนทางเคมีเพื่อลดแอมโมเนียในมูลไก่ในกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพ ขั้นตอนที่ 2 เป็นการศึกษาหาความเข้มข้นของสารเคมีที่เหมาะสม โดยพิจารณาเลือกสารเคมีที่เหมาะสมจากขั้นตอนที่ 1 เพื่อศึกษาหาความเข้มข้นในช่วง 150 – 200 mg/L ขั้นตอนที่ 3 พิจารณาเลือกเงื่อนไขที่เหมาะสมจากขั้นตอนที่ 2 เพื่อศึกษาระยะเวลาการกวนก่อนการตกตะกอนของสารเคมีในช่วงเวลา 1 – 5 min และเวลาการตกตะกอนในช่วงเวลา 60 – 90 min ผลจากการทดลองในขั้นตอนนี้นำไปวิเคราะห์ศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทน (BMP) เพื่อใช้เป็นแนวทางสำหรับการศึกษาผลิตแก๊สชีวภาพในระดับครัวเรือนต่อไป

ส่วนที่ 2 ศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพในระดับครัวเรือน ดำเนินการโดยใช้ถังหมักขนาด 200 L ปริมาตรที่ใช้งานจริง 160 L ดำเนินการภายใต้อุณหภูมิเมโซฟิลิก ( $35\pm 3$  °C) ระยะเวลาการหมัก 20 วัน หรือจนกว่าปริมาณแก๊สคงที่หรือมีแนวโน้มลดลง และทำการวิเคราะห์การคั่งทุนทางด้านเศรษฐศาสตร์ ทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องทั้งก่อนและหลังการหมัก ตรวจวัดปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน และองค์ประกอบของแก๊สมีเทน (Methane content)

#### 4.1 ผลการวิเคราะห์คุณลักษณะของวัตถุดิบตั้งต้น

ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบเบื้องต้นของมูลไก่ ก่อนดำเนินการผลิตแก๊สชีวภาพ เช่น ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solids, TS) ปริมาณของแข็งระเหยง่าย (Volatile solids, VS)



ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total kjeldahl nitrogen, TKN) ความชื้น (Moisture content, MC) และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) แสดงดังตารางที่ 18

**ตารางที่ 18** องค์ประกอบเบื้องต้นของมูลไก่จากฟาร์มในจังหวัดเชียงใหม่

พารามิเตอร์	มูลไก่
TS (mg/kg)	493,512
VS (mg/kg)	335,668
TKN (mg/kg)	22,755.50
MC (%)	21.5
C/N ratio	9:1

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบเบื้องต้นของวัตถุดิบพบว่า C/N Ratio ของมูลไก่มีค่า 9:1 ซึ่งมีปริมาณต่ำกว่าค่า C/N Ratio ที่เหมาะสม โดยที่ค่าอัตราส่วนที่เหมาะสมจะอยู่ในช่วง 20 – 30 (อัญชลี แทนนิล, 2553), (สิริชัย แยมแบน, 2554) ซึ่งถ้าหากค่า C/N Ratio ต่ำกว่าค่าที่เหมาะสม ทำให้ไนโตรเจนมีมากและเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของแอมโมเนีย ส่งผลให้ค่า pH ของระบบเพิ่มขึ้น มีผลต่อแบคทีเรียกลุ่มที่ผลิตมีเทน (Methanogenic bacteria) และเป็นสาเหตุทำให้แก๊สชีวภาพที่ผลิตได้มีปริมาณที่ต่ำ ในทางกลับกัน หากค่า C/N Ratio สูง ไนโตรเจนที่อยู่ในระบบจะถูกแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างมีเทนนำไปใช้เพื่อเสริมสร้างเซลล์และไนโตรเจนจะหมดอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ขึ้นในระบบ ส่งผลทำให้ได้ปริมาณแก๊สชีวภาพน้อยเช่นกัน จากการวิเคราะห์องค์ประกอบเบื้องต้นของมูลไก่ พบว่า สามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตแก๊สชีวภาพได้ ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของ (Weerayutsil et al., 2016) ที่มีองค์ประกอบใกล้เคียงกัน

#### 4.2 ผลของการศึกษาชนิดของสารประกอบแมกนีเซียมต่อปริมาณการผลิตแก๊สชีวภาพ

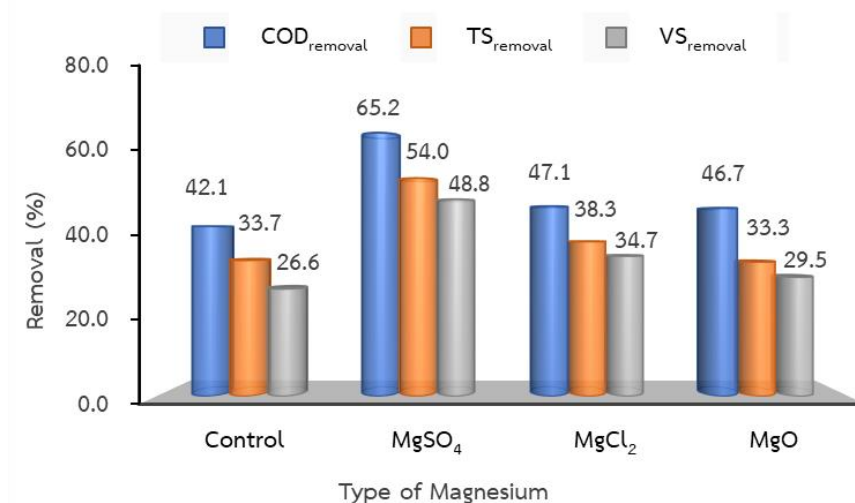
จากการศึกษาผลของชนิดของสารประกอบแมกนีเซียมในการตกตะกอนแอมโมเนียในมูลไก่ต่อปริมาณการผลิตแก๊สชีวภาพ โดยใช้แมกนีเซียมซัลเฟต แมกนีเซียมคลอไรด์ และแมกนีเซียมออกไซด์ ที่ความเข้มข้น 100 mg/L ละลายในมูลไก่ที่ผสมน้ำในอัตราส่วนของมูลไก่ต่อน้ำ 1:3 กวนเป็นเวลา 1 min และทิ้งไว้เพื่อรอให้เกิดการตกตะกอนเป็นเวลา 30 min จากนั้นทำการหมักในระบบแบบไม่ใช้อากาศ ถังหมักขนาด 19 L ปริมาตรใช้จริง 16 L ดำเนินการภายใต้อุณหภูมิเมโซฟิลิก ( $35 \pm 3$  °C) ทำการวิเคราะห์ปริมาณแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้ต่อวัน ระยะเวลาการหมัก 20 วัน และทำการ

วิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง เช่น pH, TS, VS, COD, VFA, ALK และ TKN ผลจากการทดลอง แสดงดังตารางที่ 19

**ตารางที่ 19** ผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ในกระบวนการหมักหลังผ่านการตกตะกอนโดยใช้ สารประกอบแมกนีเซียม

ตัวอย่าง	พารามิเตอร์									
	TS removal (mg/L)		VS removal (mg/L)		COD removal (mg/L)		VFA/Alk		pH	
	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
Control	39,980	26,517	24,100	17,693	26,347	15,253	0.60	0.84	6.9	7.6
MgSO <sub>4</sub>	51,080	23,510	24,653	12,633	31,893	11,093	0.65	0.72	7.1	7.2
MgCl <sub>2</sub>	39,830	24,577	18,147	11,850	23,573	12,480	0.63	0.71	7.0	7.6
MgO	43,440	28,990	17,700	12,480	20,800	11,093	0.63	0.74	7.0	7.4

จากการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องของการทดลองทั้งก่อนและหลังการหมัก พบว่า หลังจากดำเนินการหมักเป็นเวลา 20 วัน ปริมาณ TS, VS และ COD มีค่าลดลง ซึ่งการทดลองใช้ แมกนีเซียมซัลเฟตที่มีความเข้มข้น 100 mg/L สามารถกำจัดปริมาณ TS, VS และ COD ได้สูงสุด คิดเป็นร้อยละ 54.0, 48.8 และ 65.2 ตามลำดับ ในขณะที่เดียวกันความสามารถในการกำจัดปริมาณ TS, VS, COD จากการทดลองใช้สารเคมีแมกนีเซียมคลอไรด์และแมกนีเซียมออกไซด์ คิดเป็นร้อยละ 38.3, 34.7, 47.1 และ 33.3, 29.5, 46.7 ตามลำดับ ในส่วนของชุดควบคุมสามารถกำจัดปริมาณ TS, VS และ COD ได้น้อยที่สุด ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 33.7, 26.6 และ 42.1 ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 24 ทั้งนี้ การลดลงของสารอินทรีย์เกิดจากแบคทีเรียในระบบได้นำสารอินทรีย์ไปใช้ และเปลี่ยนเป็นแก๊สชีวภาพ ซึ่งสอดคล้องกับ (ศักรินทร์ หมูเทพ, 2555) จากการผลิตแก๊สชีวภาพของมูลไก่ มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปของของแข็งระเหยง่าย (VS) ถูกย่อยสลายให้กลายเป็นแก๊สมีเทนได้โดยเฉลี่ยร้อยละ 28 - 31

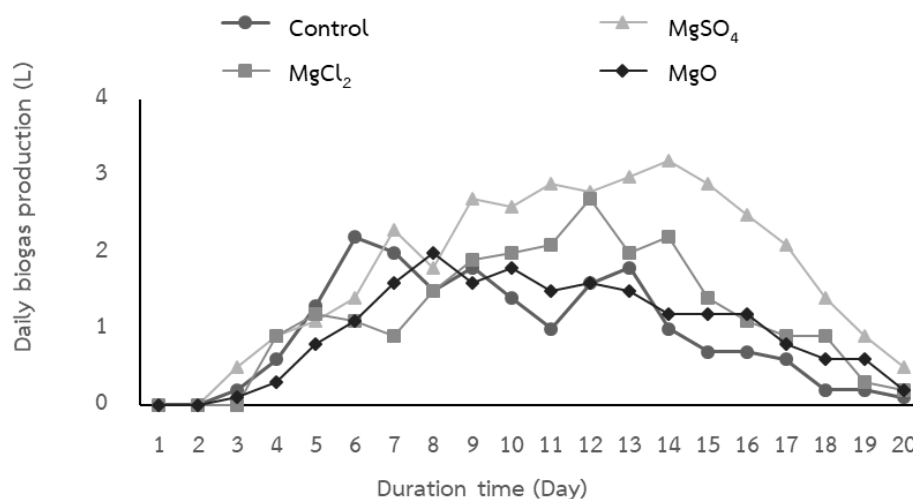


ภาพที่ 24 ผลของประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ในกระบวนการหมักหลังผ่านการตกตะกอนโดยใช้สารประกอบแมกนีเซียม

จากการวิเคราะห์สัดส่วนของ VFA/Alk พบว่า เริ่มต้นของการทดลอง ระบบมีสัดส่วนของ VFA/Alk อยู่ในช่วง 0.6 ซึ่งเป็นช่วงที่สามารถต้านทานการเปลี่ยนแปลง pH ได้ แต่มีความเป็นบัฟเฟอร์ต่ำ และแสดงให้เห็นว่าระบบมีปริมาณของกรดอินทรีย์ที่เหมาะสม แบคทีเรียสามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโตและผลิตเป็นแก๊สชีวภาพได้ (ศักรินทร์ หมูเทพ, 2555), (สิริชัย แยมแบน, 2554) แต่ทั้งนี้ ช่วงแรกของการทดลอง พบว่าองค์ประกอบของแก๊สชีวภาพส่วนใหญ่เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สอื่น ๆ ถึงร้อยละ 95

ผลของการผลิตแก๊สชีวภาพ พบว่า ระบบเริ่มมีการผลิตแก๊สชีวภาพในวันที่ 3 ยกเว้นการทดลองการใช้แมกนีเซียมคลอไรด์ในการตกตะกอนแอมโมเนียที่ความเข้มข้น 100 mg/L ระบบเริ่มมีการผลิตแก๊สชีวภาพในวันที่ 4 โดยการผลิตแก๊สชีวภาพของทุก ๆ การทดลองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ในช่วงแรกระบบอยู่ในช่วงของกระบวนการอะซิโดเจเนซิสและกระบวนการอะซิโดเจเนซิส (ชิตชนก คงแดง, 2554), (ปวันรัตน์ บุญอ่อน, 2557) แนวโน้มของการผลิตแก๊สชีวภาพเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการหมักที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากเกิดการย่อยสลายของสารอินทรีย์ในระบบ (อัญชลี แทนนิล, 2553) ทั้งนี้หลังจากดำเนินการหมักได้ช่วงระยะหนึ่ง การผลิตแก๊สชีวภาพของแต่ละการทดลองเริ่มคงที่ เนื่องจากระบบการหมักแก๊สชีวภาพเป็นระบบแบบพาสช์ซึ่งมีการเติมวัตถุดิบเพียงครั้งเดียว จึงไม่มีสารอินทรีย์เพียงพอต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ (จิราพร เผ่าเอียง, 2560) โดยพบว่า การใช้แมกนีเซียมซัลเฟต สามารถผลิตแก๊สชีวภาพในแต่ละวันได้สูงสุดในวันที่ 14 แต่หลังจากนั้น ปริมาณแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นเริ่มลดลง จนกระทั่งถึงวันที่ 18 แก๊สชีวภาพเกิดขึ้นเริ่มคงที่ ในขณะที่การทดลองใช้แมกนีเซียมคลอไรด์และแมกนีเซียมออกไซด์ พบว่าการผลิตแก๊สชีวภาพในแต่ละวันได้สูงสุดในวันที่

12 และ 8 ตามลำดับ หลังจากนั้นการเกิดแก๊สชีวภาพเริ่มลดลงจนกระทั่งถึงวันที่ 20 พบว่ามีการผลิตแก๊สชีวภาพแต่ละวันเพียง 200 ml เท่านั้น ในส่วนของการทดลองชุดควบคุม แก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นสูงสุดพบในวันที่ 6 หลังจากนั้นการเกิดแก๊สชีวภาพเริ่มลดลง จนกระทั่งในวันที่ 20 พบว่าการผลิตแก๊สชีวภาพแต่ละวันเพียง 100 ml แสดงดังภาพที่ 25

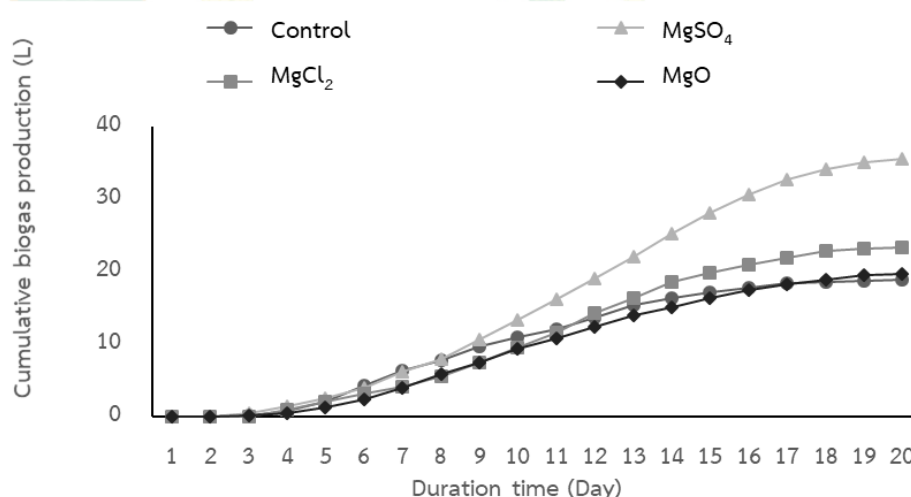


ภาพที่ 25 ปริมาณแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละวันของกระบวนการหมักหลังผ่านการตกตะกอนโดยใช้สารประกอบแมกนีเซียม

จากการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์หลังการหมัก พบว่า หลังจากดำเนินการหมักเป็นเวลา 20 วัน ระบบมีสัดส่วนของ VFA/Alk เพิ่มขึ้น และอยู่ในช่วง 0.7 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ระบบยังมีปริมาณของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายอยู่ และบ่งบอกได้อีกประการหนึ่งว่า แบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทนไม่สามารถนำกรดอินทรีย์ระเหยง่ายไปใช้ได้ทัน จึงเป็นสาเหตุทำให้ระบบเกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Bayrakdar et al., 2017) จากการวิเคราะห์ค่าปริมาณกรดต่างในระบบ พบว่ามีค่า pH อยู่ในช่วง 7.3 – 7.6 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบยังมีความเป็นบัฟเฟอร์อยู่ แต่เป็นสัดส่วนที่มีความเป็นบัฟเฟอร์ต่ำ เนื่องจากมูลไก่มีค่า C/N Ratio ต่ำกว่าค่าที่เหมาะสม ทำให้มีปริมาณของไนโตรเจนสูง แบคทีเรียจึงใช้ไนโตรเจนในการเจริญเติบโตได้ไม่หมด เมื่อมีระยะเวลาในการหมักที่นานขึ้น ไนโตรเจนจะถูกเปลี่ยนรูปเป็นแอมโมเนีย ทำให้เกิดการสะสมของแอมโมเนียขึ้นในระบบ และส่งผลให้เกิดการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทน (Nie et al., 2015) ซึ่งแบคทีเรียกลุ่มนี้มีการเจริญเติบโตในช่วงของค่า pH ที่แคบ จึงเป็นสาเหตุทำให้ระบบสามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้น้อยลง (นฤมล เชาวกระโทก, 2556) โดยสังเกตได้จากการทดลองของชุดควบคุม หลังจากดำเนินการหมักเป็นเวลา 20 วัน พบว่า มีค่า pH เพิ่มขึ้น เนื่องจากการสะสมของแอมโมเนียเกิดขึ้น ทั้งนี้ไนโตรเจน

ถูกเปลี่ยนรูปเป็นแอมโมเนียหรือแอมโมเนียมไอออน จะขึ้นอยู่กับค่า pH ในระบบ เมื่อมีค่า pH ไม่เกิน 7.2 แอมโมเนียไนโตรเจนจะอยู่ในรูปของแอมโมเนียมไอออน ซึ่งมีความเป็นพิษน้อยกว่าแอมโมเนีย แต่ถ้าในระบบมีค่า pH มากกว่า 7.2 แอมโมเนียไนโตรเจนจะอยู่ในรูปของแอมโมเนียแทน จึงเป็นสาเหตุทำให้เกิดการยับยั้งขึ้นในระบบ และทำให้สามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้ในปริมาณที่น้อยลง ในส่วนของการทดลองที่ใช้สารเคมีหลังจากดำเนินการหมักเป็นเวลา 20 วัน มีค่า pH เพิ่มขึ้นเช่นกันและอยู่ในช่วง 7.2 – 7.4 ซึ่งเป็นช่วงที่มีความเสี่ยงต่อการเกิดการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทน

การผลิตแก๊สชีวภาพจากมูลไก่โดยการลดแอมโมเนียด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมีสามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้ปริมาณมากกว่าชุดควบคุม โดยที่ใช้แมกนีเซียมซัลเฟต สามารถผลิตแก๊สชีวภาพสะสมได้สูงสุดเฉลี่ย 35.5 L ซึ่งสามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้สูงสุด เมื่อเทียบกับชุดควบคุมสามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้มากกว่าคิดเป็นร้อยละ 46.8 และการผลิตแก๊สชีวภาพรองลงมาคือ การใช้แมกนีเซียมคลอไรด์และแมกนีเซียมออกไซด์ ซึ่งสามารถผลิตแก๊สชีวภาพสะสมเฉลี่ย 23.3 L และ 19.7 L ตามลำดับ ในขณะที่ชุดควบคุมสามารถผลิตแก๊สชีวภาพสะสมเฉลี่ยได้น้อยที่สุด 18.9 L แสดงดังภาพที่ 26



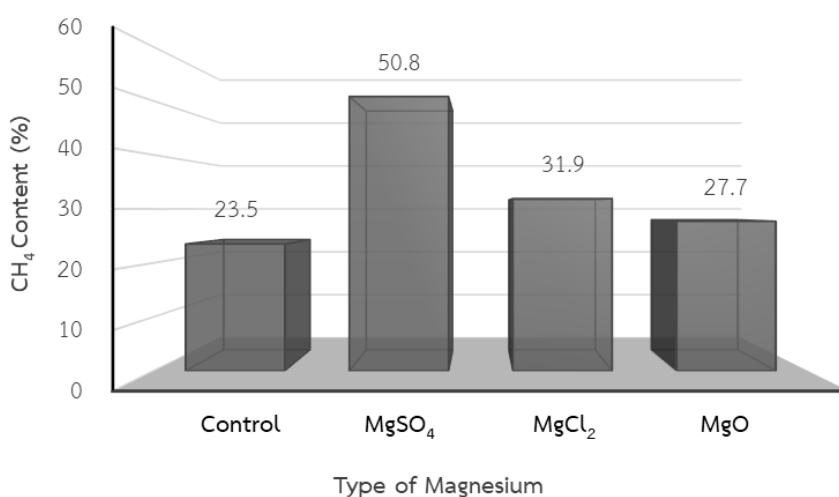
ภาพที่ 26 ปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมในกระบวนการหมักหลังผ่านการตกตะกอนโดยใช้สารประกอบแมกนีเซียม

จากการทดลอง การใช้สารประกอบแมกนีเซียมในการลดแอมโมเนียด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี ผลการทดลองพบว่า ระบบการผลิตแก๊สชีวภาพหลังผ่านการตกตะกอนแอมโมเนียสามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้มากกว่าชุดควบคุม เนื่องจากการใช้สารเคมีโดยวิธีการตกตะกอนสามารถ



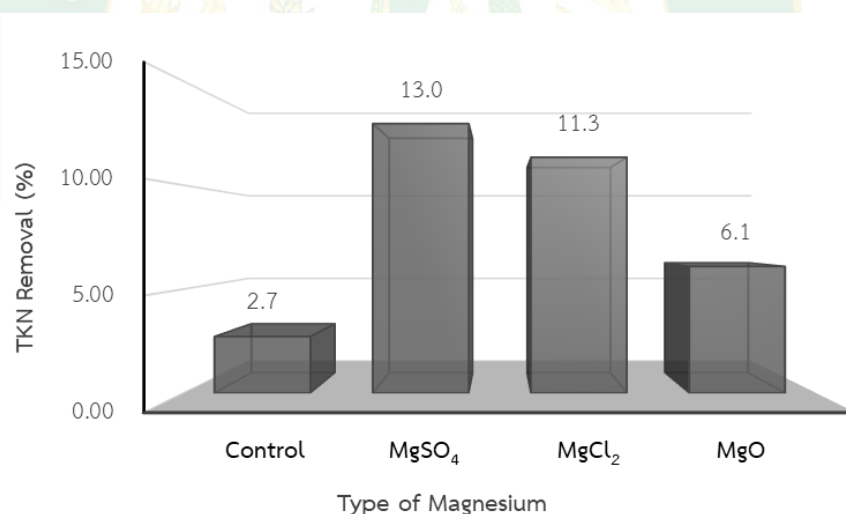
กำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนได้ จึงทำให้ปริมาณของแอมโมเนียไนโตรเจนที่จะเปลี่ยนรูปเป็นแอมโมเนียลดลง โดยสังเกตได้จากค่า pH ของชุดควบคุมที่มีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากแบคทีเรียในระบบถูกยับยั้งจากการสะสมของแอมโมเนียในระบบ และทำให้มีการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบน้อยลง จึงเป็นสาเหตุทำให้ระบบสามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้น้อยลงเช่นกัน (Niu et al., 2013) แต่ในขณะเดียวกันการใช้แมกนีเซียมคลอไรด์และแมกนีเซียมออกไซด์ที่ความเข้มข้น 100 mg/L สามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้มากกว่าชุดควบคุมเพียงเล็กน้อย เนื่องจากหลังจากดำเนินการหมักเป็นเวลา 20 วัน ระบบมีค่า pH เพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้เกิดความเป็นพิษต่อแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทน โดยเฉพาะการใช้แมกนีเซียมออกไซด์สามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้มากกว่าเพียงแค่ร้อยละ 4 เท่านั้น เนื่องจากแมกนีเซียมออกไซด์มีความสามารถในการละลายน้ำต่ำ จึงทำให้กำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนได้น้อย และทำให้เกิดแอมโมเนียขึ้นในระบบ

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สมีเทน จากการทดลองการผลิตแก๊สชีวภาพจากมูลไก่ โดยการลดแอมโมเนียด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี พบว่าหลังจากดำเนินการหมักเป็นเวลา 20 วัน การใช้แมกนีเซียมซัลเฟต มีองค์ประกอบของแก๊สมีเทนสูงสุด คิดเป็นร้อยละ 50.8 รองลงมา คือ การใช้แมกนีเซียมคลอไรด์และแมกนีเซียมออกไซด์ มีองค์ประกอบของแก๊สมีเทนร้อยละ 31.9 และ 27.7 ตามลำดับ ในขณะที่ชุดควบคุมมีองค์ประกอบของแก๊สมีเทนน้อยที่สุด คิดเป็นร้อยละ 23.5 แสดงดังภาพที่ 27



ภาพที่ 27 ผลขององค์ประกอบแก๊สมีเทนในกระบวนการหมักหลังผ่านการตกตะกอนโดยใช้สารประกอบแมกนีเซียม

จากการวิเคราะห์ค่า TKN ทั้งก่อนและหลังการหมัก ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกถึงปริมาณสารอินทรีย์ไนโตรเจนและแอมโมเนียไนโตรเจนทั้งหมดของการทดลอง พบว่าหลังจากดำเนินการหมักเป็นระยะเวลา 20 วัน ทุกการทดลองมีปริมาณ TKN ลดลง แสดงดังภาพที่ 28 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การทดลองใช้สารเคมีสามารถลดปริมาณ TKN ได้มากกว่าชุดควบคุม โดยที่การใช้แมกนีเซียมซัลเฟตสามารถกำจัดไนโตรเจนในรูปของ TKN ได้สูงสุด คิดเป็นร้อยละ 13 รองลงมาคือการใช้แมกนีเซียมคลอไรด์และแมกนีเซียมออกไซด์ คิดเป็นร้อยละ 11.3 และ 6.1 ตามลำดับ ในขณะที่ชุดควบคุมสามารถกำจัด TKN ได้น้อยที่สุดคิดเป็นร้อยละ 2.7 ทั้งนี้ การใช้แมกนีเซียมซัลเฟตสามารถกำจัด TKN ได้มากกว่าการใช้แมกนีเซียมคลอไรด์และแมกนีเซียมออกไซด์ เนื่องจาก แมกนีเซียมซัลเฟตมีความสามารถในการละลายน้ำดีกว่าสารเคมีอีก 2 ชนิด จึงสามารถแตกตัวและฟอร์มผลึกได้ดีกว่า แต่ทั้งนี้การใช้แมกนีเซียมซัลเฟตมีความสามารถในการละลายน้ำใกล้เคียงกับแมกนีเซียมคลอไรด์ จึงสามารถกำจัด TKN ได้มากกว่าเพียงแค่ 2.6% ในส่วนของการใช้แมกนีเซียมออกไซด์สามารถกำจัด TKN ได้น้อยที่สุด เนื่องจากมีความสามารถในการละลายน้ำที่ต่ำ จึงทำให้แตกตัวและฟอร์มผลึกได้ยากกว่าการใช้สารเคมีอื่น ๆ



**ภาพที่ 28** ผลของการกำจัด TKN ในกระบวนการหมักหลังผ่านการตกตะกอนโดยใช้สารประกอบแมกนีเซียม

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อมีการใช้สารเคมีสำหรับการตกตะกอนทางเคมีสามารถลดปริมาณ TKN ในระบบได้มากกว่าชุดควบคุม เนื่องจากสารเคมีที่ใช้สามารถละลายน้ำได้และทำให้เกิดสารประกอบใหม่ขึ้น ในทางทฤษฎีแมกนีเซียมสามารถฟอร์มผลึกร่วมกับแอมโมเนียมไอออนและฟอสเฟตเพื่อตกตะกอนได้ (อานนท์ ดวงพาลี, 2552) ซึ่งโดยทั่วไปฟอสเฟตเกิดจากการ

ละลายน้ำของฟอสฟอรัส ซึ่งเป็นแร่ธาตุที่มีอยู่ในธรรมชาติทั่วไป และแอมโมเนียไนโตรเจนเกิดจากการเปลี่ยนรูปของสารอินทรีย์ไนโตรเจน เมื่อละลายอยู่ในน้ำจะทำให้เปลี่ยนรูปเป็นแอมโมเนียไนโตรเจน จึงทำให้การตกตะกอนด้วยสารเคมีสามารถลดปริมาณ TKN ได้ ในอีกกรณีหนึ่ง การทดลองได้ทำการกวนและทิ้งให้ตกตะกอน ซึ่งทำให้สารเคมีกระจายตัวและมีการสัมผัสกับวัตถุดิบมากขึ้น ทั้งนี้ ถ้าหากมีปริมาณออกซิเจนเพียงพอ แอมโมเนียไนโตรเจนจะเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของไนไตรท์และไนเตรท ซึ่งจะถูกรีดิวซ์เปลี่ยนรูปเป็นแอมโมเนียไนโตรเจน จึงสามารถลดปริมาณของ TKN ได้เช่นกัน

ผลของการทดลองสามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้น้อยลง เกิดจากการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรีย เนื่องจากหลังจากดำเนินการหมักเป็นเวลา 20 วัน พบว่าระบบมีค่า pH เพิ่มขึ้น และอยู่ในช่วงที่แบคทีเรียมีความเสี่ยงจากการถูกยับยั้ง จึงทำให้มีปริมาณของกรดอินทรีย์สะสมอยู่ในระบบ โดยสังเกตได้จากการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง และจากสัดส่วนของ VFA/Alk ทั้งนี้ ระบบยังมีความเป็นบัฟเฟอร์อยู่ ซึ่งสามารถต้านทานการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ได้ในระดับหนึ่ง แต่อยู่ในช่วงที่มีความเป็นบัฟเฟอร์ต่ำ เนื่องจาก มูลไก่มีปริมาณไนโตรเจนที่สูง ซึ่งสังเกตได้จากค่า C/N ratio จึงทำให้เกิดแอมโมเนียไนโตรเจนขึ้นในระบบ แต่ทั้งนี้ในขั้นตอนของการตกตะกอนจากการใช้สารเคมี สามารถกำจัด TKN ได้เพียงร้อยละ 6 – 12 เนื่องจากมีการใช้สารเคมีในปริมาณที่น้อย เมื่อเทียบกับการทดลองของ (พงศ์ลัดดา เผ่าศิริ, 2556) ซึ่งใช้สารเคมีในปริมาณที่มาก จึงทำให้สามารถกำจัด TKN ได้มากตามไปด้วย แต่เนื่องด้วยระบบผลิตแก๊สชีวภาพเป็นระบบแบบไม่ใช้อากาศ จึงไม่สามารถใช้สารเคมีในปริมาณที่มากเกินไป เพราะอาจส่งผลเสียต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียได้

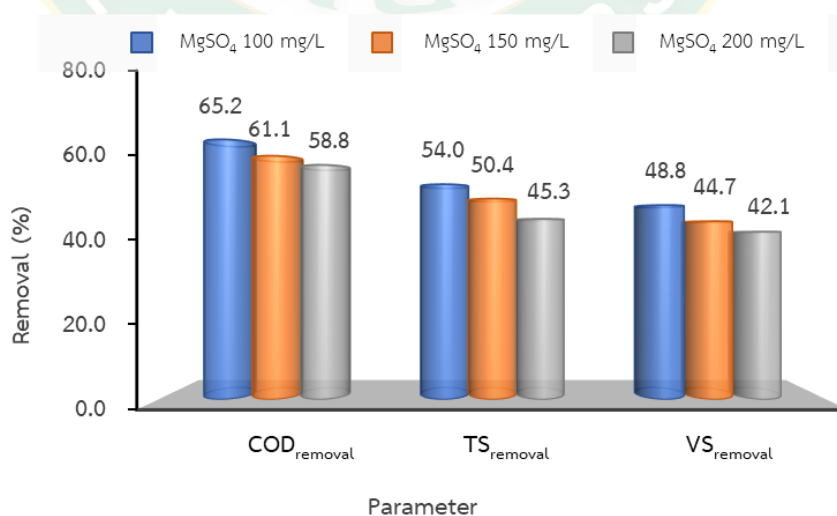
#### 4.3 ผลของความเข้มข้นของสารเคมีประกอบแมกนีเซียมต่อปริมาณการผลิตแก๊สชีวภาพ

จากการทดลองชนิดของสารเคมีที่เหมาะสมในการตกตะกอนแอมโมเนียไนโตรเจนในมูลไก่ พบว่า การใช้แมกนีเซียมซัลเฟต มีศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทนมากที่สุด จึงคัดเลือกมาใช้ในการทดลองในการหาความเข้มข้นของสารเคมีที่เหมาะสม โดยทำการทดลองที่ความเข้มข้น 100, 150 และ 200 mg/L โดยละลายในมูลไก่ที่ผสมน้ำในอัตราส่วนของมูลไก่ต่อน้ำ 1:3 ทำการกวนเป็นเวลา 1 min และตั้งทิ้งไว้เพื่อให้ตกตะกอนเป็นเวลา 30 min ทำการทดลองในระบบการหมักแบบแบทช์ ในถังหมักขนาด 19 L ปริมาตรที่ใช้จริง 16 L ดำเนินการภายใต้อุณหภูมิเมโซฟิลิก ( $35 \pm 3$  °C) ดำเนินการหมักเป็นเวลา 20 วัน และทำการวัดปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นทุกวัน ตรวจวัดองค์ประกอบของแก๊สมีเทน ทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง ซึ่งผลจากการทดลอง แสดงดังตารางที่ 20

**ตารางที่ 20** ผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ในกระบวนการหมักหลังผ่านการตกตะกอนด้วยแมกนีเซียมซัลเฟต

ความเข้มข้น (mg/L)	พารามิเตอร์									
	TS removal (mg/L)		VS removal (mg/L)		COD removal (mg/L)		VFA/Alk		pH	
	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
100	51,080	23,510	24,653	12,633	31,893	11,093	0.65	0.72	7.1	7.3
150	41,930	20,810	24,840	13,733	24,960	9,707	0.65	0.74	7.2	7.5
200	41,387	22,637	23,303	13,497	23,573	9,707	0.66	0.73	7.2	7.5

จากการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องทั้งก่อนและหลังการหมัก พบว่า หลังจากดำเนินการหมักเป็นเวลา 20 วัน การทดลองใช้แมกนีเซียมซัลเฟตที่ความเข้มข้น 150 และ 200 mg/L มีปริมาณของ TS, VS และ COD ลดลง โดยที่การทดลองใช้แมกนีเซียมซัลเฟตที่ความเข้มข้น 150 mg/L สามารถกำจัด TS, VS และ COD คิดเป็นร้อยละ 50.4, 44.7 และ 61.1 ตามลำดับ และการทดลองใช้แมกนีเซียมซัลเฟตที่ความเข้มข้น 200 mg/L สามารถกำจัด TS, VS และ COD คิดเป็นร้อยละ 45.3, 42.1 และ 58.8 ตามลำดับ จากการทดลองเพิ่มความเข้มข้นของสารเคมีพบว่า การใช้แมกนีเซียมซัลเฟตที่ความเข้มข้น 100 mg/L มีการกำจัด TS, VS และ COD ได้สูงสุด แสดงดังภาพที่ 29



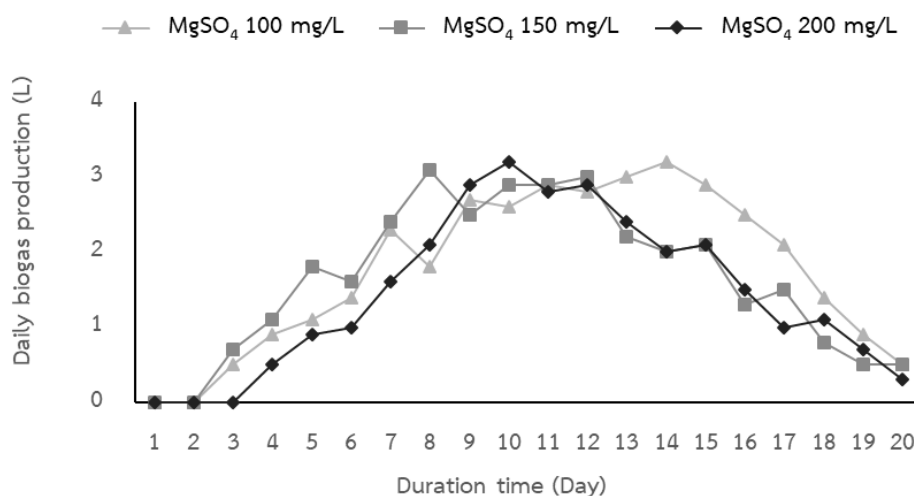
**ภาพที่ 29** ผลของการกำจัดสารอินทรีย์ในกระบวนการหมักหลังผ่านการตกตะกอนด้วยแมกนีเซียมซัลเฟต

จากการวิเคราะห์สัดส่วนของ VFA/Alk พบว่า ก่อนดำเนินการหมักระบบมีสัดส่วนของ VFA/Alk อยู่ในช่วง 0.6 ซึ่งบ่งบอกถึงการมีปริมาณของกรดอินทรีย์มาก และระบบอยู่ในช่วงที่มีความเป็นบัฟเฟอร์ต่ำ แต่ทั้งนี้แบคทีเรียสามารถนำกรดอินทรีย์ไปใช้ในการเจริญเติบโตและผลิตเป็นแก๊สชีวภาพ โดยมีองค์ประกอบของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สอื่น ๆ คิดเป็นร้อยละ 95 ในขณะที่การทดลองใช้แมกนีเซียมซัลเฟตที่ความเข้มข้น 100 mg/L มี มีสัดส่วนของ VFA/Alk อยู่ในช่วง 0.6 เช่นเดียวกัน

จากการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์หลังการหมัก พบว่า หลังจากดำเนินการหมักเป็นเวลา 20 วัน ระบบมีสัดส่วนของ VFA/Alk เพิ่มขึ้น และอยู่ในช่วง 0.7 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ระบบมีการย่อยสลายสารอินทรีย์ แต่แบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทนไม่สามารถนำกรดอินทรีย์ระเหยง่ายไปใช้ได้ทัน จึงทำให้ระบบเกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายขึ้น การทดลองใช้แมกนีเซียมซัลเฟตที่ความเข้มข้น 150 และ 200 mg/L ระบบมีค่า pH เพิ่มขึ้นและอยู่ในช่วง 7.5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบมีความเป็นด่าง และอยู่ในช่วงที่สามารถทำให้เกิดการยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทนได้ ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ปริมาณผลิตแก๊สชีวภาพลดลง ทั้งนี้หากระบบมีแอมโมเนียไนโตรเจนอยู่ในระดับที่เหมาะสม ทำให้สามารถลดปัญหาการเปลี่ยนแปลงค่า pH ในระบบได้ เนื่องจากแอมโมเนียสามารถเปลี่ยนรูปเป็นแอมโมเนียมไอออนและทำปฏิกิริยากับคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ซึ่งทำให้เกิดเป็นแอมโมเนียมไบคาร์บอเนตที่สามารถควบคุมสมดุลของค่า pH และสร้างความเป็นบัฟเฟอร์ให้กับระบบได้ (นฤมล เชาวะระโทก, 2556)

จากการวิเคราะห์การผลิตแก๊สชีวภาพในแต่ละวัน พบว่า การใช้แมกนีเซียมซัลเฟตในการตกตะกอนที่ความเข้มข้น 150 mg/L แก๊สชีวภาพเริ่มเกิดขึ้นในวันที่ 3 ในขณะที่การใช้แมกนีเซียมซัลเฟตที่ความเข้มข้น 200 mg/L แก๊สชีวภาพเริ่มเกิดขึ้นในวันที่ 4 และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าระบบอยู่ในช่วงของกระบวนการอะซิโตเจเนซิสและกระบวนการอะซิโตเจเนซิสโดยที่แก๊สชีวภาพส่วนใหญ่ยังเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (ชิตชนก คงแดง, 2554), (ปวันรัตน์ บุญอ่อน, 2557) และจากการใช้แมกนีเซียมซัลเฟตในการตกตะกอนที่ความเข้มข้น 150 และ 200 mg/L พบว่า มีปริมาณการผลิตแก๊สชีวภาพในแต่ละวันสูงสุดในวันที่ 8 และ 10 ตามลำดับ หลังจากนั้นปริมาณแก๊สชีวภาพเกิดเริ่มคงที่และมีแนวโน้มลดลง จนกระทั่งถึงวันที่ 20 ในขณะที่การทดลองใช้แมกนีเซียมซัลเฟตที่ความเข้มข้น 100 mg/L สามารถผลิตแก๊สชีวภาพในแต่ละวันได้สูงสุดในวันที่ 14 และมีแนวโน้มลดลงหลังจากนั้นจนกระทั่งถึงวันที่ 20 แสดงดังภาพที่ 30

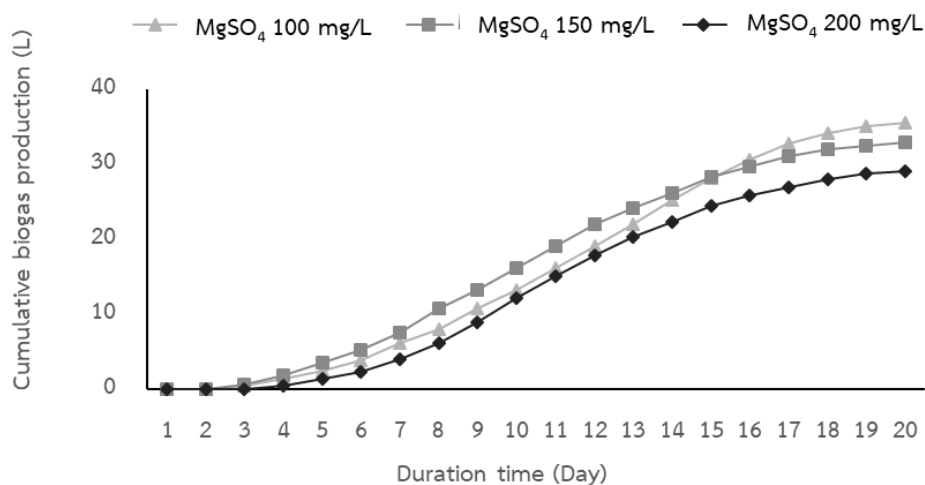




ภาพที่ 30 ปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นในแต่ละวันในกระบวนการหมักหลังผ่านการตกตะกอนด้วยแมกนีเซียมซัลเฟต

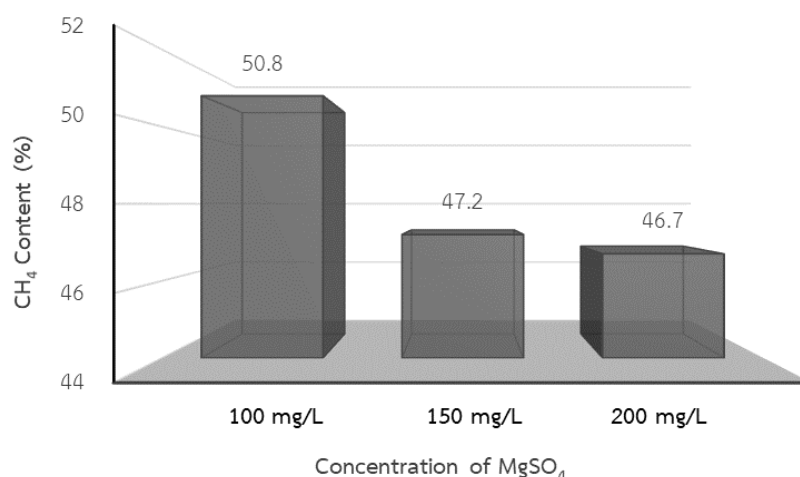
จากการวิเคราะห์องค์ประกอบเบื้องต้นของมูลไก่ พบว่ามูลไก่มีค่า C/N Ratio ต่ำกว่าค่าที่เหมาะสม ซึ่งหมายถึงการมีปริมาณของไนโตรเจนที่สูง และทำให้ระบบมีความเป็นด่าง เนื่องจากแบคทีเรียไม่สามารถนำไนโตรเจนไปใช้ได้ทัน จึงทำให้ไนโตรเจนเปลี่ยนรูปเป็นแอมโมเนียไนโตรเจนและทำให้เกิดการสะสมของแอมโมเนีย ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการยับยั้งของแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทน

จากการทดลองผลิตแก๊สชีวภาพจากมูลไก่โดยการลดแอมโมเนียด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมีโดยใช้แมกนีเซียมซัลเฟตในการตกตะกอน แสดงให้เห็นว่า เมื่อใช้แมกนีเซียมซัลเฟตที่ความเข้มข้น 150 และ 200 mg/L สำหรับการตกตะกอน สามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้ 32.9 L และ 29.0 L ตามลำดับ ในขณะที่แมกนีเซียมซัลเฟตที่ความเข้มข้น 100 mg/L สามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้มากกว่าคิดเป็นร้อยละ 7.3 และ 18.3 ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 31 จากการเปรียบเทียบการใช้แมกนีเซียมซัลเฟต พบว่า การเพิ่มความเข้มข้นของแมกนีเซียมซัลเฟตเป็น 150 และ 200 mg/L ไม่สามารถเพิ่มปริมาณแก๊สชีวภาพเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้แมกนีเซียมซัลเฟตที่ความเข้มข้น 100 mg/L จากการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ทั้งก่อนและหลังการหมักแสดงให้เห็นว่า สารอินทรีย์ถูกย่อยสลายได้ใกล้เคียงกัน สังเกตได้จากปริมาณสารอินทรีย์ที่ลดลง แต่เมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นของสารเคมี ทำให้ค่า pH ในระบบเพิ่มขึ้น ซึ่งทำให้เกิดความเป็นพิษในระบบและส่งผลต่อแบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทนในกระบวนการมีเทนเจเนซิส (ชิตชนก คงแดง, 2554) จึงทำให้มีปริมาณการผลิตแก๊สชีวภาพน้อยลง



ภาพที่ 31 ปริมาณแก๊สสะสมในกระบวนการหมักหลังผ่านการตกตะกอนด้วยแมกนีเซียมซัลเฟต

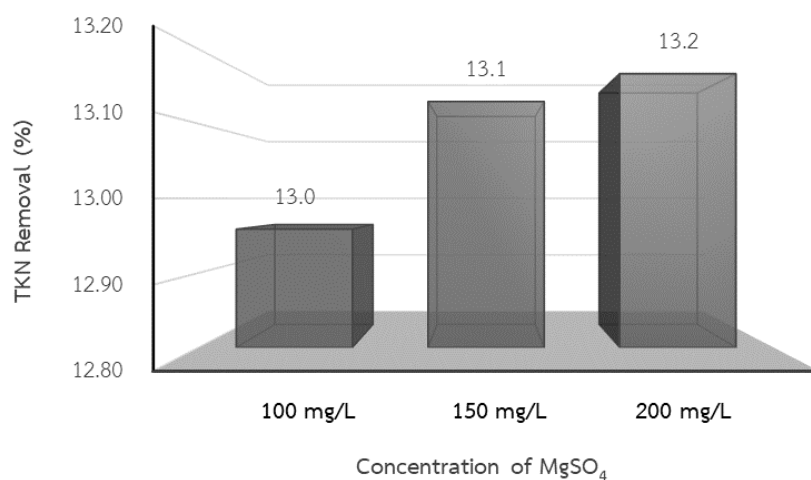
หลังจากดำเนินการหมักเป็นเวลา 20 วัน การใช้แมกนีเซียมซัลเฟตที่ความเข้มข้น 150 และ 200 mg/L มีองค์ประกอบของแก๊สมีเทนคิดเป็นร้อยละ 47.2 และ 46.7 ตามลำดับ ซึ่งน้อยกว่าการใช้แมกนีเซียมซัลเฟตที่ความเข้มข้น 100 mg/L แสดงดังภาพที่ 32 แสดงให้เห็นว่า การเพิ่มความเข้มข้นของสารเคมีไม่สามารถเพิ่มองค์ประกอบของแก๊สมีเทนได้ เนื่องจากระบบมีค่า pH ที่สูงเกินกว่าช่วงที่แบคทีเรียจะสามารถเจริญเติบโตได้ จึงทำให้แก๊สชีวภาพมีองค์ประกอบของมีเทนน้อยลง



ภาพที่ 32 ผลขององค์ประกอบแก๊สมีเทนในกระบวนการหมักหลังผ่านการตกตะกอนด้วยแมกนีเซียมซัลเฟต

จากการทดลองการผลิตแก๊สชีวภาพจากมูลไก่โดยการลดแอมโมเนียด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี โดยใช้แมกนีเซียมซัลเฟตในช่วงความเข้มข้น 150 – 200 mg/L สำหรับทำการ

ตกตะกอนในขั้นตอนก่อนดำเนินการหมัก ได้ทำการวิเคราะห์ค่า TKN ทั้งก่อนและหลังการหมัก พบว่า หลังจากดำเนินการหมักเป็นระยะเวลา 20 วัน การใช้แมกนีเซียมซัลเฟตที่ความเข้มข้น 150 และ 200 mg/L สามารถกำจัด TKN โดยคิดเป็นร้อยละ 13.1 และ 13.2 ตามลำดับ ซึ่งสามารถกำจัด TKN ได้ไม่ต่างจากการใช้แมกนีเซียมซัลเฟตที่ความเข้มข้น 100 mg/L แสดงดังภาพที่ 33



ภาพที่ 33 ผลของการกำจัด TKN ในกระบวนการหมักหลังผ่านการตกตะกอนด้วยแมกนีเซียมซัลเฟต

ในทางทฤษฎี แมกนีเซียมเป็นโลหะเบาที่มีวาเลนซ์เท่ากับ 2 ซึ่งมีความเป็นพิษต่อแบคทีเรียในระบบ แต่เมื่ออยู่ในระดับความเข้มข้นที่เหมาะสมจะมีประโยชน์ต่อแบคทีเรีย ทั้งนี้ ถ้าหากในระบบมีความเข้มข้นของไอออนบวกมากเกินไป จะทำให้เกิดความเป็นพิษต่อแบคทีเรียได้ ซึ่งแมกนีเซียมในช่วงความเข้มข้น 75 – 150 mg/L สามารถกระตุ้นการทำงานของแบคทีเรีย แต่หากระบบมีความเข้มข้นของแมกนีเซียมอยู่ในช่วง 1,000 – 1,500 mg/L จะมีความเป็นพิษและเริ่มเกิดการยับยั้งขึ้น (นฤมล เชาวะกระโทก, 2556) ทั้งนี้ การใช้แมกนีเซียมซัลเฟตยังทำให้เกิดซัลไฟด์ขึ้นในระบบ เนื่องจากสารเคมีที่ใช้มีซัลเฟตรวมอยู่และเกิดแตกตัวเมื่อสารเคมีละลายน้ำ โดยทั่วไป ซัลไฟด์ถูกสร้างขึ้นมาจากการเปลี่ยนซัลเฟต ( $\text{SO}_4^{2-}$ ) โดยการย่อยสลายของโปรตีน ซึ่งซัลเฟตมีทั้งที่อยู่ในรูปของสารที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ ขึ้นอยู่กับไอออนของโลหะที่ซัลเฟตรวมอยู่ โดยซัลเฟตสามารถตกตะกอนเมื่อรวมกับโลหะหนัก และบางส่วนจะอยู่ในรูปของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $\text{H}_2\text{S}$ ) แต่เมื่อละลายน้ำสามารถเปลี่ยนเป็นกรดซัลฟูริก ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) โดยที่ความเข้มข้นของซัลไฟด์เมื่อละลายน้ำแบคทีเรียสามารถทนได้อยู่ในช่วงความเข้มข้น 50 – 160 mg/L และซัลไฟด์จะเป็นพิษเมื่อถูกดูดซึมเข้าสู่เซลล์ของแบคทีเรีย แต่เมื่อความเข้มข้นมากกว่า 200 mg/L (เกื้อกุล บุญยี่, 2552) แบคทีเรียจะหยุดการเจริญเติบโต จึงเป็นสาเหตุทำให้ระบบผลิตแก๊สชีวภาพได้น้อยลง

#### 4.4 ผลของระยะเวลาการกวนต่อระยะเวลาดกตะกอนของแมกนีเซียมซัลเฟตต่อปริมาณการผลิตแก๊สชีวภาพ

จากการทดลองข้างต้นพบว่า การใช้แมกนีเซียมซัลเฟต 100 mg/L มีศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทนมากที่สุด ทั้งนี้เพื่อศึกษาระยะเวลาการกวน และระยะเวลาดกตะกอนที่เหมาะสม การทดลองนี้จึงได้เลือกใช้แมกนีเซียมซัลเฟต 100 mg/L ละลายในน้ำที่อัตราส่วนของมูลไก่ต่อน้ำ 1:3 โดยได้ศึกษาระยะเวลาการกวนสำหรับการตกตะกอนที่ช่วงเวลา 1 - 5 min ต่อระยะเวลาดกตะกอน 60 - 90 min ในถังหมักขนาด 19 L ปริมาตรใช้จริง 16 L ดำเนินการภายใต้อุณหภูมิเมโซฟิลิก ( $35 \pm 3$  °C) เป็นเวลา 20 วัน และทำการวัดปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นทุกวัน ตรวจวัดองค์ประกอบของแก๊สมีเทน ทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง แสดงดังตารางที่ 21 และ 22

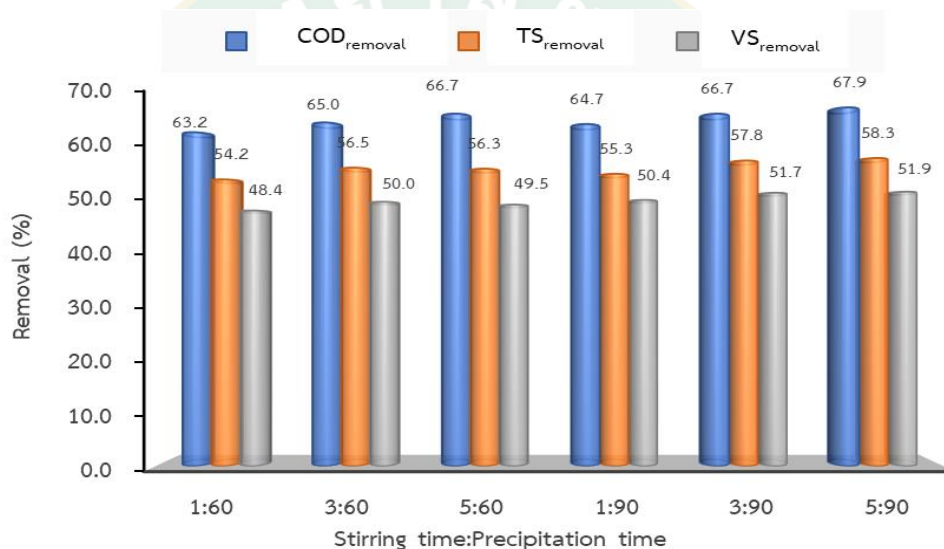
**ตารางที่ 21** ผลของการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ในกระบวนการหมักที่ระยะเวลาการกวนต่อระยะเวลาดกตะกอน 60 min

ระยะเวลาการกวน (min)	พารามิเตอร์									
	TS removal (mg/L)		VS removal (mg/L)		COD removal (mg/L)		VFA/ALK		pH	
	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
1	36,250	16,590	15,083	7,790	19,302	7,111	0.64	0.67	7.1	7.4
3	37,927	16,513	20,133	10,067	20,317	7,111	0.64	0.65	7.0	7.3
5	39,617	17,327	20,457	10,337	24,381	8,127	0.67	0.68	7.1	7.3

**ตารางที่ 22** ผลของการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ในกระบวนการหมักที่ระยะเวลาการกวนต่อระยะเวลาดกตะกอน 90 min

ระยะเวลาการกวน (min)	พารามิเตอร์									
	TS removal (mg/L)		VS removal (mg/L)		COD removal (mg/L)		VFA/ALK		pH	
	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
1	46,333	20,713	18,833	9,350	17,270	6,095	0.66	0.68	7.1	7.2
3	43,093	18,187	17,160	8,287	21,333	7,111	0.64	0.66	7.0	7.2
5	39,407	16,440	22,333	10,740	28,444	9,143	0.67	0.69	6.9	7.2

จากการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องทั้งก่อนและหลังการหมัก พบว่า หลังจากดำเนินการหมักเป็นเวลา 20 วัน ทุกการทดลองมีปริมาณ TS, VS และ COD ลดลง ทั้งนี้พบว่า ทุกการทดลองมีการกำจัดสารอินทรีย์ได้ใกล้เคียงกัน สามารถกำจัด TS, VS และ COD คิดเป็นร้อยละเฉลี่ย 56.4, 51.9 และ 65.7 ตามลำดับ โดยการทดลองที่ระยะเวลาการกวน 5 min ต่อระยะเวลาตกตะกอน 90 min สามารถกำจัด TS, VS และ COD ได้มากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 58.3, 51.9 และ 67.9 ตามลำดับ และการทดลองที่สามารถกำจัดปริมาณ TS, VS และ COD น้อยที่สุด พบที่ การทดลองที่ระยะเวลาการกวน 1 min ต่อระยะเวลาตกตะกอน 60 min ซึ่งสามารถกำจัด TS, VS และ COD คิดเป็นร้อยละ 54.2, 48.4 และ 63.2 ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 34

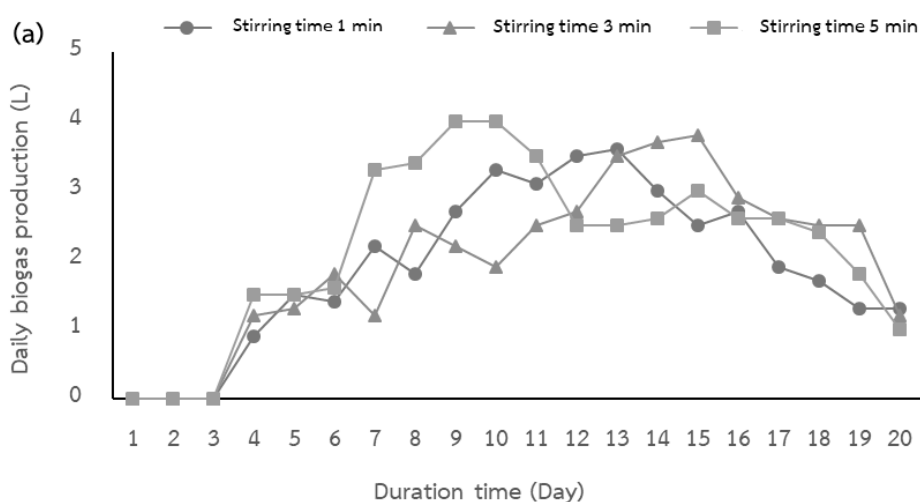


ภาพที่ 34 ผลของการกำจัดสารอินทรีย์ในกระบวนการหมักที่ระยะเวลาการกวน ต่อระยะเวลาตกตะกอน

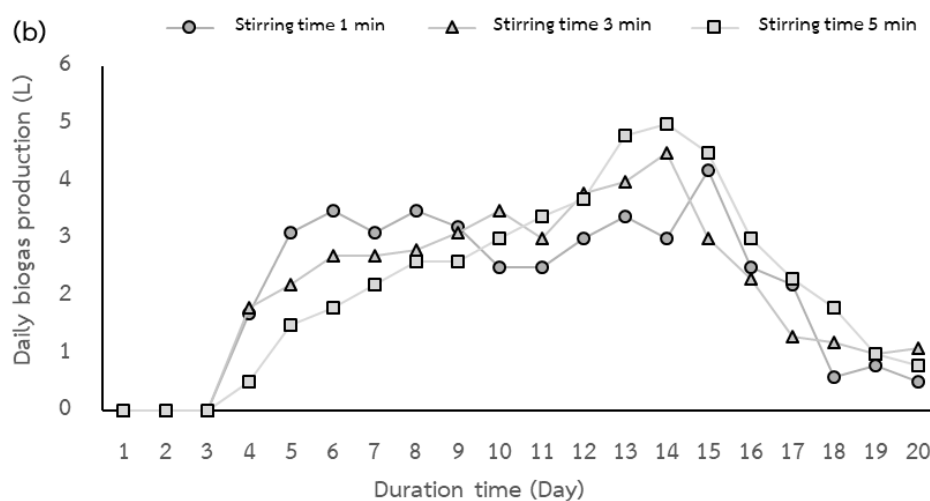
จากการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อใช้ระยะเวลาการกวนต่อระยะเวลาตกตะกอนแมกนีเซียมซัลเฟตมากขึ้น ระบบสามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้มากขึ้นเพียงเล็กน้อย ทั้งนี้จากการวิเคราะห์สัดส่วนของ VFA/Alk ในช่วงเริ่มต้นพบว่าสัดส่วนของ VFA/Alk อยู่ในช่วง 0.6 แสดงให้เห็นว่าระบบมีปริมาณของกรดอินทรีย์อยู่ในปริมาณมากและเป็นช่วงที่มีความเป็นบัฟเฟอร์ต่ำ แต่แบคทีเรียสามารถทนในสภาวะนี้ได้และสามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโต (ศกรินทร์ หมูเทพ, 2555), (สิริชัย แยมแบน , 2554) ซึ่งทำให้ช่วงแรกของการทดลองมีการผลิตปริมาณแก๊สชีวภาพเกิดขึ้น แสดงดังภาพที่ 35 และ 36 โดยที่ทุก ๆ การทดลองแก๊สชีวภาพเริ่มผลิตในวันที่ 3 และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งหลังจากวันที่ 15 การผลิตแก๊สชีวภาพเริ่มลดลง และจากการทดลองพบว่า การทดลองที่ระยะเวลาการกวน 5 min ต่อระยะเวลาตกตะกอน 90 min มีปริมาณแก๊สชีวภาพที่ผลิตขึ้นในแต่ละ



วันสูงสุด ซึ่งสามารถผลิตแก๊สชีวภาพในแต่ละวันได้ 5 L ในวันที่ 14 ซึ่งเป็นปริมาณแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละวันมากที่สุด ในขณะที่การทดลองที่ระยะเวลาการกวน 1, 3 และ 5 min ต่อระยะเวลาตกตะกอนที่ 60 min สามารถผลิตแก๊สชีวภาพในแต่ละวันสูงสุดได้ 3.6, 3.8 และ 4.0 L ในวันที่ 13, 15 และ 10 ตามลำดับ การทดลองที่ระยะเวลาการกวน 1 และ 3 min ต่อระยะเวลาตกตะกอนที่ 90 min สามารถผลิตแก๊สชีวภาพในแต่ละวันสูงสุดได้ 4.2 และ 4.5 L ในวันที่ 15 และ 14 ตามลำดับ



ภาพที่ 35 แก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละวันที่ระยะเวลาการกวนต่อระยะเวลาตกตะกอน 60 min

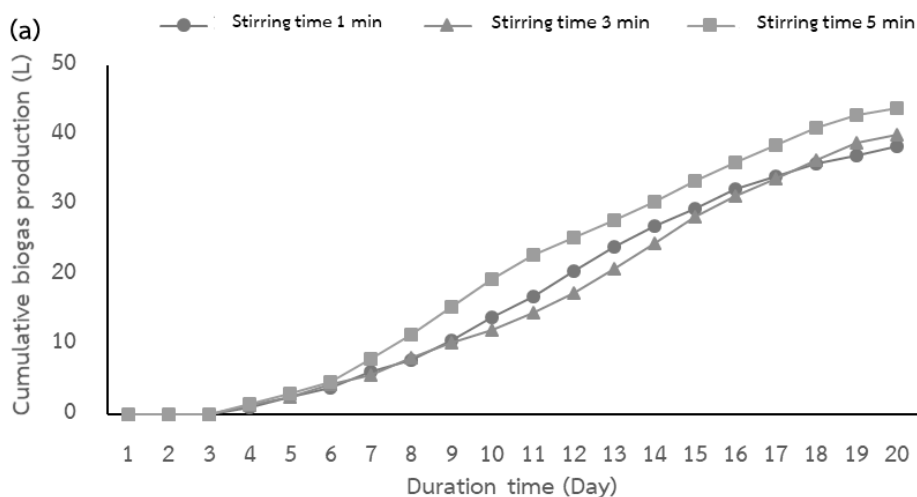


ภาพที่ 36 แก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละวันที่ระยะเวลาการกวนต่อระยะเวลาตกตะกอน 90 min

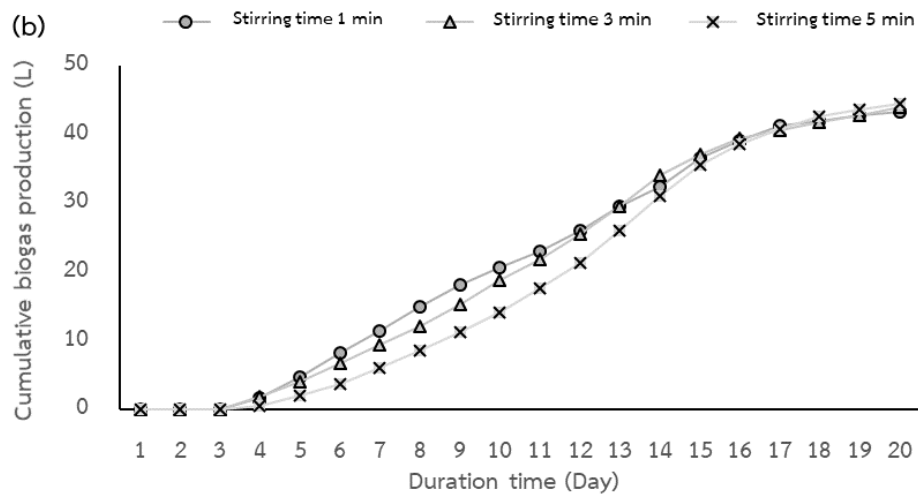
จากการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์หลังการหมัก พบว่า หลังจากดำเนินการหมักเป็นเวลา 20 วัน ระบบยังมีสัดส่วนของ VFA/Alk อยู่ในช่วง 0.6 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ระบบมีปริมาณกรดอินทรีย์มาก

แต่แบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทนยังคงนำกรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้นในระบบไปใช้ได้ทัน จึงทำให้ช่วงสัดส่วนของ VFA/Alk ยังเท่าเดิม และจากการวิเคราะห์ค่า pH หลังการหมัก พบว่า ยังอยู่ในช่วงที่แบคทีเรียกลุ่มผลิตมีเทนสามารถเจริญเติบโตได้ และยังไม่ถูกยับยั้งจากความเป็นพิษของระบบ ยกเว้นการทดลองที่ระยะเวลาการกวน 1 min ต่อระยะเวลาตกตะกอนที่ 60 min พบว่า หลังจากดำเนินการหมักเป็นเวลา 20 วัน มีค่า pH เพิ่มขึ้นเป็น 7.4 ทำให้ระบบเริ่มเกิดการยับยั้งการเจริญเติบโตขึ้น จึงทำให้ผลิตแก๊สชีวภาพได้น้อยกว่าการทดลองอื่น ๆ

จากการทดลองการผลิตแก๊สชีวภาพของมูลไก่ จากการใช้วิธีการตกตะกอนทางเคมีโดยใช้แมกนีเซียมซัลเฟตที่ความเข้มข้น 100 mg/L โดยศึกษาระยะเวลาการกวนต่อระยะเวลาการตกตะกอนที่แตกต่างกัน พบว่า หลังจากดำเนินการหมักเป็นเวลา 20 วัน การทดลองที่ระยะเวลาการกวน 5 min ต่อระยะเวลาตกตะกอน 90 min มีปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมสูงกว่าการทดลองอื่น ๆ โดยสามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้ 44.5 L และปริมาณการผลิตแก๊สชีวภาพสะสมน้อยที่สุด ที่ระยะเวลาการกวน 1 min ต่อระยะเวลาตกตะกอน 60 min ซึ่งสามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้เพียง 38.4 L ในขณะที่การทดลองที่ระยะเวลาการกวน 3 และ 5 min ต่อระยะเวลาตกตะกอนที่ 60 min สามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้ 40.0 และ 43.8 L ตามลำดับ ที่ระยะเวลาการกวน 1 และ 3 min ต่อระยะเวลาตกตะกอน 90 min สามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้ 43.3 และ 44.0 L ตามลำดับ แสดงดังภาพที่ 37 และ 38

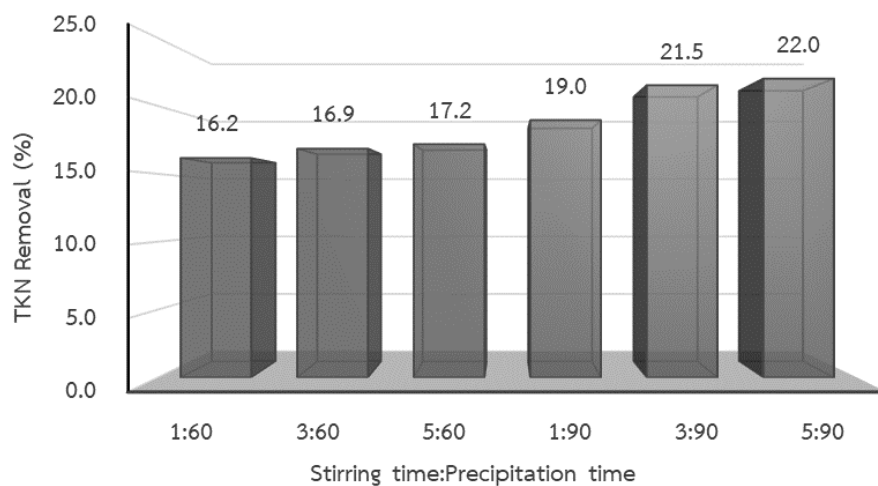


ภาพที่ 37 ปริมาณแก๊สสะสมที่ระยะเวลาการกวนต่อระยะเวลาตกตะกอน 60 min



ภาพที่ 38 ปริมาณแก๊สสะสมที่ระยะเวลาการกวนต่อระยะเวลาตกตะกอน 90 min

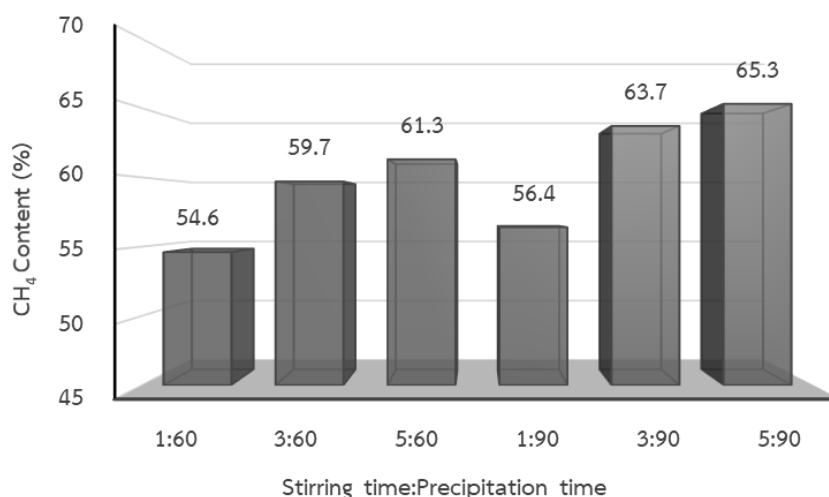
จากการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อระยะเวลาการกวนต่อระยะเวลาการตกตะกอนเพิ่มขึ้นทำให้สามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้มากขึ้นเพียงเล็กน้อย จากการวิเคราะห์ค่า TKN ของการทดลองทั้งก่อนและหลังการหมัก พบว่าเมื่อมีระยะเวลาการกวนต่อระยะเวลาตกตะกอนก่อนดำเนินการหมักนานขึ้น ความสามารถในการกำจัด TKN สูงขึ้นเช่นเดียวกัน โดยการทดลองที่ระยะเวลาการกวน 5 min ต่อระยะเวลาตกตะกอน 90 min สามารถกำจัด TKN คิดเป็นร้อยละ 22.0 และการทดลองที่ระยะเวลาการกวน 1 min ต่อระยะเวลาตกตะกอน 60 min สามารถกำจัด TKN ได้น้อยที่สุดคิดเป็นร้อยละ 16.2 แสดงดังภาพที่ 39



ภาพที่ 39 ผลของการกำจัด TKN ในระบบที่ระยะเวลาการกวนต่อระยะเวลาตกตะกอน

จากการทดลองแสดงให้เห็นว่า เมื่อใช้ระยะเวลาการกวนต่อระยะเวลาตกตะกอนนานขึ้น ส่งผลให้ปริมาณ TKN ในระบบลดลง เนื่องจากเมื่อระยะเวลาการกวนนานขึ้นทำให้สารเคมีละลายน้ำได้ดีและกระจายตัวได้อย่างทั่วถึง จึงทำให้มีการสัมผัสกับสารแขวนลอยในระบบและตกตะกอนได้ในที่สุด (ณวัฒน์ ศรีภูม้น, 2546) ในขณะที่ระยะเวลาตกตะกอนเพิ่มขึ้น ทำให้มีปริมาณออกซิเจนเข้าทำปฏิกิริยาในกระบวนการดีไนตริฟิเคชัน (Denitrification) ซึ่งเป็นกระบวนการที่เกิดต่อเนื่องจากไนตริฟิเคชัน (Nitrification) โดยใช้แอมโมเนียเป็นสารตั้งต้นสำหรับเปลี่ยนรูปให้เป็นแอมโมเนียมไอออน ไนไตรท์ และไนเตรท (พงศัลดดา เผ่าศิริ, 2556) หลังจากนั้นจะทำการรีดิวซ์ไนเตรทให้เป็นไนไตรท์ ไนไตรท์ออกไซด์ และแก๊สไนโตรเจน ตามลำดับ โดยมีออกซิเจนเป็นตัวล่ำเลียงอิเล็กตรอน ผลของไนไตรท์ที่เกิดในขั้นตอนไนตริฟิเคชัน บางส่วนจะแปรรูปเป็นแอมโมเนียก่อนเข้าสู่กระบวนการรีดิวซ์อีกครั้ง และบางส่วนจะเข้าสู่กระบวนการรีดิวซ์และเปลี่ยนเป็นแก๊สไนโตรเจนได้โดยตรง จึงทำให้สามารถลด TKN ลงได้ แต่ทั้งนี้ การผลิตแก๊สชีวภาพดำเนินการในสภาวะไม่ใช้ออกซิเจน จึงทำให้สามารถลดปริมาณของ TKN ได้เพียงเล็กน้อย ซึ่งจากการทดลองสามารถกำจัดค่า TKN ในช่วงร้อยละ 16 – 22 เพียงเท่านั้น

ในส่วนขององค์ประกอบของแก๊สมีเทน พบว่า การทดลองที่ระยะเวลาการกวน 5 min ต่อระยะเวลาตกตะกอน 90 min ผลิตแก๊สมีเทนได้สูงสุดคิดเป็นร้อยละ 65.3 และการทดลองที่ระยะเวลาการกวน 1 min ต่อระยะเวลาตกตะกอน 60 min ผลิตแก๊สมีเทนได้น้อยที่สุดคิดเป็นร้อยละ 54.6 แสดงดังภาพที่ 40



ภาพที่ 40 ผลขององค์ประกอบของแก๊สมีเทนที่ระยะเวลาการกวนต่อระยะเวลาตกตะกอน

จากการทดลองผลิตแก๊สชีวภาพด้วยวิธีการตกตะกอนทางเคมี พบว่าเมื่อระยะเวลาการกวนต่อระยะเวลาตกตะกอนนานขึ้น สามารถเพิ่มปริมาณการผลิตแก๊สชีวภาพและองค์ประกอบของแก๊สมีเทนได้ จึงได้มีการวิเคราะห์ศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทน (BMP) แสดงดังตารางที่ 23

**ตารางที่ 23** ศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทนที่ระยะเวลาการกวนต่อระยะเวลาตกตะกอน

ระยะเวลาตกตะกอน (min)	ระยะเวลาการกวน (min)	ปริมาณแก๊สมีเทนจำเพาะ ( $m^3 CH_4/kg VS_{removal}$ )	BMP (%)
60	1	0.0287	8.2
	3	0.0237	6.8
	5	0.0265	7.6
90	1	0.0258	7.4
	3	0.0316	9.0
	5	0.0251	7.2

จากการวิเคราะห์ศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทน พบว่า การทดลองที่ระยะเวลาการกวน 3 min ต่อระยะเวลาตกตะกอน 90 min มีศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทนสูงสุด คิดเป็นร้อยละ 9.0 และการทดลองที่ระยะเวลาการกวน 3 min ต่อระยะเวลาตกตะกอน 60 min มีศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทนน้อยที่สุดคิดเป็นร้อยละ 6.8 แสดงดังตารางที่ 23 จากการวิเคราะห์ศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทน พบว่า เมื่อระยะเวลาการกวนต่อระยะเวลาตกตะกอนเพิ่มขึ้น ไม่มีผลต่อการเพิ่มศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทน ซึ่งค่าศักยภาพการผลิตแก๊สมีเทนขึ้นอยู่กับปริมาณของแก๊สชีวภาพ องค์ประกอบของมีเทน และการย่อยสลายของสารอินทรีย์ในระบบ สังเกตได้จากการทดลองที่ระยะเวลาการกวน 5 min ต่อระยะเวลาตกตะกอน 90 min มีศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทนน้อยกว่าการทดลองที่ระยะเวลาการกวน 3 min ต่อระยะเวลาตกตะกอน 90 min เนื่องจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบถึงร้อยละ 67.8 แต่สามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้มากกว่าเพียงร้อยละ 1.1 ในขณะที่การทดลองที่ระยะเวลาการกวน 3 min ต่อระยะเวลาตกตะกอน 90 min มีการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบคิดเป็นร้อยละ 66.7 ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ระบบมีการเปลี่ยนแปลงสารอินทรีย์เป็นแก๊สชีวภาพได้ดีกว่าเมื่อระยะเวลาในการหมักนานขึ้น ระบบสามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้มากขึ้น และทำให้มีองค์ประกอบของแก๊สมีเทนเพิ่มขึ้นตามมา ในขณะที่การทดลองที่ระยะเวลาการกวน 5 min ต่อระยะเวลาตกตะกอน 90 min มีการใช้สารอินทรีย์สำหรับแปรรูปเป็นแก๊สชีวภาพในปริมาณที่มาก และเมื่อระยะเวลาหมักนานขึ้น ส่งผลให้สารอินทรีย์ในระบบลดลง



จากการทดลองใช้สารเคมีในการตกตะกอนเพื่อลดแอมโมเนียในมูลไก่ สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพได้สูงกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ไม่ผ่านการตกตะกอนด้วยสารเคมี

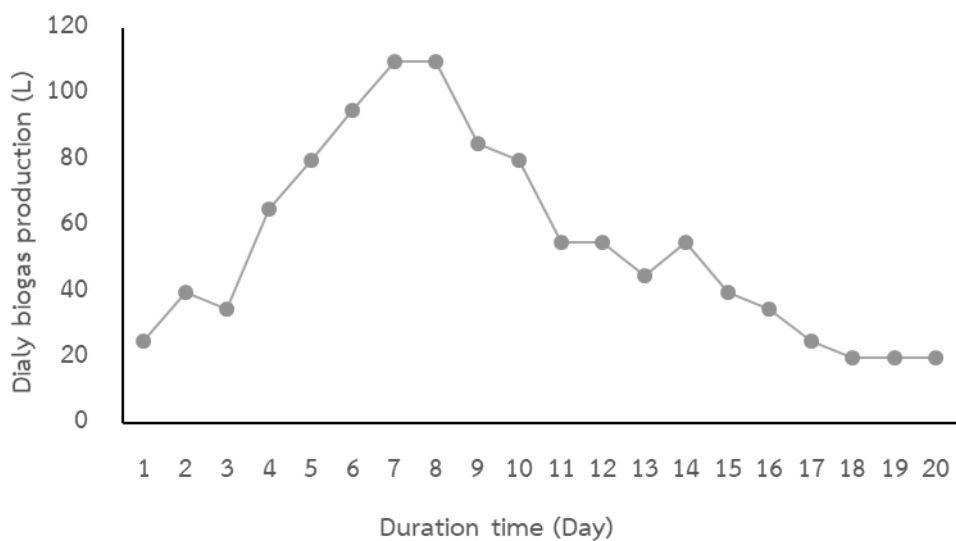
#### 4.5 ผลการศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพในระดับครัวเรือน

การขยายระบบการผลิตแก๊สชีวภาพจากระดับห้องปฏิบัติการเป็นระดับครัวเรือน ขนาด 200 L โดยการคัดเลือกจากเงื่อนไขที่เหมาะสมจากการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ คัดเลือกจากการใช้แมกนีเซียมซัลเฟตในการตกตะกอนที่ความเข้มข้น 100 mg/L ระยะเวลาการกวน 3 min ต่อระยะเวลาตกตะกอน 90 min ทำการหมักในระบบไม่ใช้อากาศแบบแบทช์ โดยการเติมวัตถุดิบตั้งต้นเพียงครั้งเดียว ถึงหมักขนาด 200 L ปริมาตรใช้งานจริง 160 L ดำเนินการหมักภายใต้อุณหภูมิเมโซฟิลิก ( $35 \pm 3$  °C) โดยดำเนินการหมักเป็นเวลา 20 วัน ทำการวัดปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นทุกวัน ตรวจวัดองค์ประกอบของแก๊สมีเทน ทำการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องก่อนและหลังการหมัก ก่อนดำเนินการทดลอง ได้นำมูลไก่ไปวิเคราะห์องค์ประกอบเบื้องต้น แสดงดังตารางที่ 24

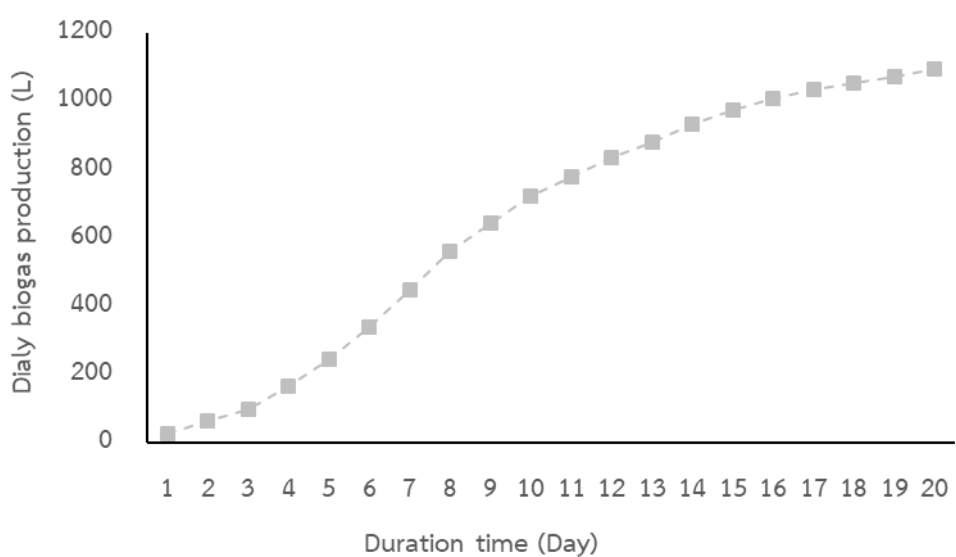
ตารางที่ 24 องค์ประกอบเบื้องต้นของมูลไก่จากฟาร์มในจังหวัดเชียงใหม่

พารามิเตอร์	มูลไก่
TS (mg/kg)	498,132
VS (mg/kg)	326,805
TKN (mg/kg)	25,275.45
MC (%)	9.33
C/N ratio	8:1

จากการทดลองการผลิตแก๊สชีวภาพในระดับครัวเรือน โดยใช้แมกนีเซียมซัลเฟต 16 g พบว่าระบบมีการผลิตแก๊สชีวภาพตั้งแต่วันที่ 1 ของการทดลอง และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น จนกระทั่งในวันที่ 7 และ 8 พบว่า สามารถผลิตแก๊สชีวภาพในแต่ละวันได้สูงถึง 110 L ซึ่งเป็นปริมาณแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละวันสูงที่สุด แสดงดังรูปที่ 41 แต่เมื่อระยะเวลาการหมักผ่านไป แนวโน้มการผลิตแก๊สชีวภาพลดลง เนื่องจากไม่มีการเติมสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบ จนกระทั่งถึงช่วงระยะเวลาการหมักวันที่ 18 – 20 การผลิตแก๊สชีวภาพเริ่มคงที่ หลังจากดำเนินการหมักเป็นเวลา 20 วัน พบว่าระบบสามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้สูงสุดเฉลี่ย 1,095 L แสดงดังภาพที่ 42 คิดเป็น 54.75 L/วัน



ภาพที่ 41 แก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละวันของการทดลองในระดับครัวเรือน 200 L

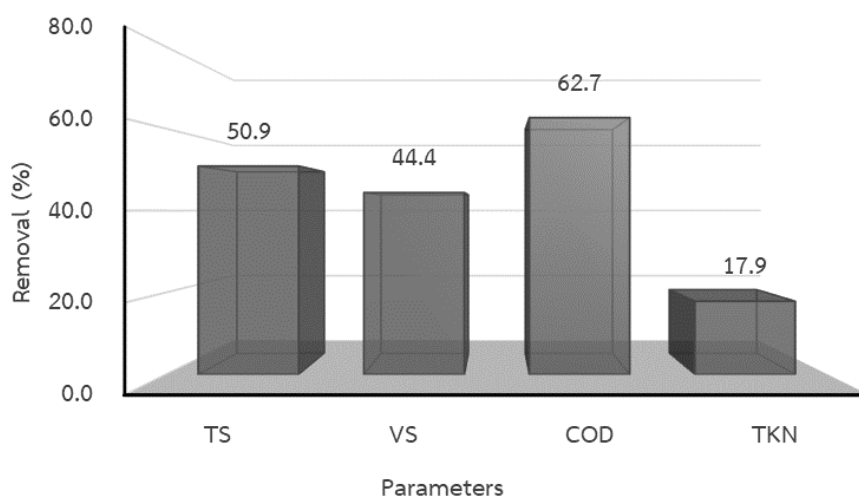


ภาพที่ 42 แก๊สชีวภาพสะสมของการทดลองในระดับครัวเรือน 200 L

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สชีวภาพพบว่า ในช่วง 4 วันแรก มีองค์ประกอบของแก๊สมีเทนอยู่ในช่วงร้อยละ 0 – 6 ส่วนใหญ่เป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ อยู่ในช่วงร้อยละ 70 – 90 และมีองค์ประกอบของแก๊สอื่น ๆ เพียงเล็กน้อย หลังจากดำเนินการหมักผ่านไป 15 วัน พบว่ามีองค์ประกอบของแก๊สมีเทนเพิ่มขึ้นและอยู่ในช่วงร้อยละ 30 – 45 แต่ยังไม่เหมาะสมในการนำไปใช้งานได้ เนื่องจากมีองค์ประกอบของแก๊สมีเทนไม่ถึงร้อยละ 50 (จิราพร เผ่าเอี้ยง, 2560) หลังจาก

ระยะเวลาการหมักผ่านไป 20 วัน พบว่ามีองค์ประกอบของแก๊สมีเทนเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 63.7 ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมในการนำไปใช้งาน

จากการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องของการทดลองในระบบการหมักแบบคริวเรื่อน ทั้งก่อนและหลังการหมัก พบว่าหลังจากดำเนินการหมักเป็นเวลา 20 วัน ระบบมีปริมาณ TS, VS และ COD ลดลง โดยที่ปริมาณ TS เริ่มต้นเท่ากับ 45,378 mg/L ลดลงเหลือ 22,295 mg/L มีประสิทธิภาพการกำจัดคิดเป็นร้อยละ 50.9 ปริมาณ VS เริ่มต้นเท่ากับ 27,640 mg/L ลดลงเหลือ 15,365 mg/L มีประสิทธิภาพการกำจัดคิดเป็นร้อยละ 44.4 และปริมาณ COD เริ่มต้นเท่ากับ 30,660 mg/L มีประสิทธิภาพการกำจัดลดเหลือ 11,440 mg/L คิดเป็นร้อยละ 62.7 แสดงดังภาพที่ 43 จากการลดลงของปริมาณสารอินทรีย์ในระบบเนื่องมาจากการย่อยสลายของจุลินทรีย์ แสดงให้เห็นว่าในระบบมีการย่อยสลายสารอินทรีย์ของแบคทีเรีย จากการวิเคราะห์สัดส่วนของ VFA/Alk พบว่า สัดส่วนของ VFA/Alk ก่อนหมักอยู่ในช่วง 0.5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบมีปริมาณของกรดอินทรีย์แต่ยังมีความเป็นบัฟเฟอร์อยู่ หลังจากดำเนินการหมักเป็นเวลา 20 วัน พบว่า สัดส่วนของ VFA/Alk ยังอยู่ในช่วง 0.5 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าแบคทีเรียสามารถนำกรดอินทรีย์ในระบบไปใช้ได้ทัน จึงไม่เกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ขึ้นในระบบ จากการวิเคราะห์ค่า TKN ในระบบ พบว่า สามารถกำจัด TKN ในระบบได้เพียงร้อยละ 17.9 แสดงดังภาพที่ 43



ภาพที่ 43 การกำจัดสารอินทรีย์และ TKN ในระบบระดับคริวเรื่อน 200 L

#### 4.6 การวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์

การวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์จะทำการคำนวณระบบการหมักในระดับคริวเรื่อน ของการผลิตแก๊สชีวภาพจากมูลไก่โดยการลดแอมโมเนียด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี ระบบการ

หมักขนาด 200 L ทำการติดตั้งใบกวนและกวนด้วยระบบมอเตอร์ขนาด 190 W ทำการกวนก่อนหมักเป็นเวลา 3 min ในระหว่างดำเนินการหมัก และในระหว่างการหมักได้ทำการกวนทุกวันเป็นเวลา 10 min/ครั้ง/วัน โดยมอเตอร์ใช้ไฟฟ้าตามเวลาดังกล่าวคิดเป็น 0.03 kWh/วัน ระยะเวลาใช้งาน 300 วัน/ปี ราคาค่าไฟฟ้าเฉลี่ย 3 บาท/kWh (อัตราค่าไฟฟ้าประเภทที่ 1)

จากการการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ พบว่า มีค่าใช้จ่ายด้านต้นทุนรวม 6,442.2 บาท โดยมีค่าใช้จ่ายด้านต้นทุนของระบบ 5,220 บาท ค่าใช้จ่ายด้านต้นทุนของพลังงานในรูปของไฟฟ้า 27 บาท/ปี และค่าใช้จ่ายด้านต้นทุนวัตถุดิบ 1,195.2 บาท/ปี ทั้งนี้ผลจากการผลิตแก๊สชีวภาพสามารถนำมาทดแทนการใช้แก๊สหุงต้มได้โดยมีระยะเวลาคืนทุนของระบบเป็นเวลา 2.9 ปี แสดงดังตารางที่ 25 ถึงแม้ระยะคืนทุนใช้ระยะเวลาถึง 2.9 ปี แต่การผลิตแก๊สชีวภาพมีการลงทุนในการสร้างระบบแค่เริ่มต้น และการใช้แก๊สชีวภาพที่ได้จากการหมักทดแทนการใช้เชื้อเพลิงจากฟอสซิล ช่วยลดผลกระทบที่เกิดขึ้นต่อสิ่งแวดล้อม ลดการนำเข้าเชื้อเพลิงจากภายนอก เป็นการเพิ่มอำนาจการแข่งขันทางด้านพลังงานให้กับประเทศ สร้างความมั่นคงทางด้านพลังงาน อีกทั้งยังสร้างความยั่งยืนทางด้านพลังงานทั้งในปัจจุบันและในอนาคต



**ตารางที่ 25** การวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์

ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์	รายการ	ราคา	หน่วย
ต้นทุนระบบ	ชุดระบบผลิตแก๊สชีวภาพ (200 L)	3,220	บาท
	ชุดมอเตอร์	1,100	บาท
	ค่าแรง	900	บาท
	ราคารวมของระบบ	5,220	บาท
ต้นทุนไฟฟ้า	การใช้ไฟฟ้าก่อนดำเนินการหมัก	0.0095	kWh
	ราคาค่าไฟฟ้า (3 บาท/kWh)	0.027	บาท
	การใช้ไฟฟ้าระหว่างการหมัก	0.03	kWh/วัน
	ราคาค่าไฟฟ้า	0.09	บาท/วัน
	การใช้ไฟฟ้าทั้งหมด	9.0095	kWh/ปี
	รวมราคาค่าไฟฟ้า	27	บาท/ปี
	รวมต้นทุนไฟฟ้า		
ต้นทุนวัตถุดิบ	วัตถุดิบมูลไก่ 40 kg	90	บาท/เดือน
		1,080	บาท/ปี
	แมกนีเซียมซัลเฟต 500 g	300	บาท
	แมกนีเซียมซัลเฟต 16 g/เดือน	9.6	บาท
		115.2	บาท/ปี
	รวมราคาวัตถุดิบ	1,195.2	บาท/ปี
ต้นทุนรวม		6,442.2	บาท
ผลผลิตแก๊สชีวภาพ	ผลิตแก๊สชีวภาพเฉลี่ย (20 วัน)	54.7	L/วัน
		0.05	m <sup>3</sup> /วัน
	การทำงานของระบบ	300	วัน/ปี
	ผลิตแก๊สชีวภาพ	15	m <sup>3</sup> /ปี
การใช้แก๊สหุงต้ม	1 คราวเรือนใช้แก๊สหุงต้ม 1 ถัง (15 kg) เฉลี่ย	7.5	kg/เดือน
	ราคาแก๊สหุงต้ม (1 ถัง, 15 kg)	360	บาท
		180	บาท/เดือน
		2,160	บาท/ปี
ระยะเวลาคืนทุน		2.9	ปี



## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองการผลิตแก๊สชีวภาพจากมูลไก่โดยการลดแอมโมเนียด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี โดยใช้มูลไก่เป็นวัตถุดิบเพียงชนิดเดียว การทดลองได้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ ทดลองในระดับห้องปฏิบัติการและในระดับครัวเรือน โดยการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการได้แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนด้วยกัน ซึ่งสามารถสรุปได้ดังนี้

#### 5.1 ผลการทดลองของการศึกษาชนิดของสารประกอบแมกนีเซียม

จากการศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพจากมูลไก่โดยการลดแอมโมเนียด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี โดยใช้แมกนีเซียมซัลเฟต แมกนีเซียมคลอไรด์ และแมกนีเซียมออกไซด์ ที่ความเข้มข้น 100 mg/L พบว่า การใช้แมกนีเซียมซัลเฟตที่ความเข้มข้น 100 mg/L สามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้สูงสุด 35.5 L โดยมีองค์ประกอบของแก๊สมีเทนคิดเป็นร้อยละ 50.8 โดยสามารถกำจัด TS, VS และ COD คิดเป็นร้อยละ 54.0, 48.8 และ 65.2 ตามลำดับ และสามารถกำจัด TKN คิดเป็นร้อยละ 13.0 จากการใช้สารแมกนีเซียมซัลเฟตสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพได้มากกว่าชุดควบคุมถึงร้อยละ 46.0

#### 5.2 ผลการทดลองของการศึกษาความเข้มข้นของสารเคมี

จากการศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพจากมูลไก่โดยการลดแอมโมเนียด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี โดยเพิ่มความเข้มข้นของแมกนีเซียมซัลเฟตเป็น 150 และ 200 mg/L เทียบกับแมกนีเซียมซัลเฟตที่ความเข้มข้น 100 mg/L พบว่า การเพิ่มความเข้มข้นของแมกนีเซียมซัลเฟตเป็น 150 และ 200 mg/L สามารถกำจัด TKN ได้ใกล้เคียงกับการใช้แมกนีเซียมซัลเฟตที่ความเข้มข้น 100 mg/L และสามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้ใกล้เคียงกัน

#### 5.3 ผลการทดลองของการศึกษาระยะเวลาการกวนต่อระยะเวลาตกตะกอน

จากการศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพจากมูลไก่โดยการลดแอมโมเนียด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี โดยใช้แมกนีเซียมซัลเฟตที่ความเข้มข้น 100 mg/L ศึกษาระยะเวลาการกวนที่ 1, 3 และ 5 min ต่อระยะเวลาตกตะกอนที่ 60 และ 90 min พบว่า การทดลองที่ระยะเวลาการกวน 5 min ต่อระยะเวลาตกตะกอน 90 min มีปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมสูงสุด โดยสามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้ 44.5 L โดยมีองค์ประกอบของแก๊สมีเทนคิดเป็นร้อยละ 65.3 สามารถกำจัด TS, VS และ COD คิด

เป็นร้อยละ 58.3, 51.9 และ 67.9 ตามลำดับ และสามารถกำจัด TKN คิดเป็นร้อยละ 22.0 แต่พบว่าการทดลองที่ระยะเวลาการกวน 3 min ต่อระยะเวลาตกตะกอน 90 min มีศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทนสูงกว่า ซึ่งมีศักยภาพในการผลิตแก๊สมีเทนคิดเป็นร้อยละ 9.0

#### 5.4 ผลการทดลองในระดับครัวเรือน

ศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพจากมูลไก่โดยการลดแอมโมเนียด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมีในระดับครัวเรือน โดยใช้เงื่อนไขที่เหมาะสมจากการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ พบว่าหลังจากดำเนินการหมักเป็นระยะเวลา 20 วัน ระบบสามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้ 1,095 L โดยคิดเฉลี่ยต่อวันได้ 54.75 L/วัน มีองค์ประกอบของแก๊สมีเทนคิดเป็นร้อยละ 63.7 จากการวิเคราะห์สารอินทรีย์ในระบบ พบว่า สามารถกำจัด TS, VS และ COD คิดเป็นร้อยละ 50.9, 44.4 และ 62.7 ตามลำดับ ซึ่งสามารถให้ผลผลิตแก๊สมีเทน 2.84 ml CH<sub>4</sub>/g VS<sub>removal</sub>·วัน

จากการวิเคราะห์ทางด้านเศรษฐศาสตร์ของระบบผลิตแก๊สชีวภาพจากมูลไก่โดยการลดแอมโมเนียด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมีในระดับครัวเรือน พบว่า แก๊สชีวภาพที่ได้สามารถนำไปทดแทนการใช้แก๊สหุงต้มได้ โดยมีต้นทุนรวมสำหรับการผลิตแก๊สชีวภาพ 6,442.2 บาท และพบว่าสามารถคืนทุนได้ในระยะเวลา 2.9 ปี

#### 5.5 ข้อเสนอแนะ

- 5.5.1 ควรมีการศึกษาอัตราส่วนของมูลไก่ต่อน้ำที่อัตราต่าง ๆ เพื่อหาอัตราส่วนที่เหมาะสมจากการลดปริมาณแอมโมเนียในมูลไก่สำหรับผลิตแก๊สชีวภาพ
- 5.5.2 ในการผลิตแก๊สชีวภาพจากมูลไก่ ควรมีการศึกษาการปรับสภาพของมูลไก่ก่อนดำเนินการหมักด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมีในวิธีการอื่น ๆ และศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องสำหรับการลดปริมาณแอมโมเนียไนโตรเจนในมูลไก่
- 5.5.3 ในการผลิตแก๊สชีวภาพจากมูลไก่โดยการลดแอมโมเนียด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี ควรมีการศึกษาสารเคมีในกลุ่มโลหะเบาชนิดอื่นนอกเหนือจากการทดลองนี้ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการลดปริมาณของแอมโมเนียไนโตรเจนได้มากขึ้น
- 5.5.4 ในการผลิตแก๊สชีวภาพจากมูลไก่โดยการลดแอมโมเนียด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมีในระดับครัวเรือน ควรมีการศึกษาระบบผลิตแก๊สชีวภาพแบบกึ่งต่อเนื่อง

(Semi-continuous operation) และระบบผลิตแก๊สชีวภาพแบบต่อเนื่อง  
(Continuous operation) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพให้สูงขึ้น



## บรรณานุกรม

- เกื้อกุล บุญยี่. 2552. การผลิตก๊าซชีวภาพจากกระบวนการหมักแบบไร้อากาศโดยใช้น้ำเสียของโรงงานแปรงมันสำปะหลังแปรรูป. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- เอกณัฐ ขวนขวยทรัพย์. 2541. การกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำทิ้งที่ผ่านการบำบัดจากบ่อเติมอากาศโดยการตกตะกอนทางเคมี. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. 2553. คู่มือการปฏิบัติงานเกี่ยวกับการออกแบบการผลิตการควบคุมคุณภาพและการใช้ก๊าซชีวภาพ (Biogas) สำหรับโรงงานอุตสาหกรรม. สำนักเทคโนโลยีความปลอดภัย กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2554. คู่มือการพัฒนาและการลงทุนผลิตพลังงานทดแทนชุดที่ 5 พลังงานก๊าซชีวภาพ. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน.
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. 2559. ศักยภาพการผลิตและการนำแก๊สชีวภาพไปใช้เป็นพลังงานทดแทน. [ระบบออนไลน์]. แหล่งที่มา [http://biogas.dede.go.th/biogas/web\\_biogas/](http://biogas.dede.go.th/biogas/web_biogas/) (1 ก.พ. 2560).
- กลิ่นประทุม ปัญญาปิง, วรวิธ กัณอิน, สรานุรักษ์ แสนพรหม และเอกราช คาปัญญา. 2555. ศักยภาพการย่อยสลายให้ก๊าซมีเทนของเศษก้านและใบไม้หลายชนิด. *Journal of Community Development Research* 5(1).
- จิราพร เผ่าเอี้ยง. 2560. การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพโดยการหมักร่วมของ น้ำเสียและขี้ขาวโศบตภายใต้สภาวะการหมักแบบไร้อากาศ. มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- ชิตชนก คงแดง. 2554. การผลิตก๊าซชีวภาพจากใบยางพาราโดยการหมักร่วมกับมูลสุกรสำหรับใช้ในครัวเรือน. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ชันวานี จิใจ. 2559. การผลิตก๊าซชีวภาพโดยกระบวนการหมักร่วมระหว่างมูลไก่กับน้ำเสียจากกระบวนการผลิตขนมจีน. มหาวิทยาลัยราชภัฏยะลา.
- ณวัฒน์ ศรีภูม้น. 2546. การบำบัดน้ำเสียเบื้องต้นของน้ำเสียจากโรงงานวันเส้นด้วย กระบวนการตกตะกอนทางเคมีและกระบวนการโพรแมคชั่นเนชั่น. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ณัฐติมา จำมัน. 2557. การปรับปรุงการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษผลไม้โดยการหมักร่วมกับมูลไก่. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- นฤมล เชาวะกระโทก. 2556. การผลิตก๊าซชีวภาพจากกากตะกอนดีแคเตอร์ของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบร่วมกับน้ำเสียจากโรงงานแปรรูปอาหารทะเลแช่แข็ง.

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

นิลวรรณ ไชยทนต์, ร่มไทร มุกเมืองทอง, วรุฒ ชมเจริญ และ อนุพันธ์ วรรณภีระ. 2559. ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนของหญ้าเนเปียร์พันธุ์แคระภายใต้การปรับสภาพเบื้องต้นด้วยสารละลายต่าง.

**วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา**, 1(32 - 36).

บุญอ่อน, ปวันรัตน์. 2014. ผลของการเติมมูลไก่และมูลโคต่อประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ

**จากหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 โดยถึงปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์**. สาขาวิชาวิศวกรรม

สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ปวันรัตน์ บุญอ่อน. 2557. ผลของการเติมมูลไก่และมูลโคต่อประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ

**จากหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 โดยถึงปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์**. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

พงศัลดดา เผ่าศิริ. 2556. การกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำเสียฟาร์มสุกรโดย

**วิธีการตกตะกอนด้วยเกลือแมกนีเซียม**. มหาวิทยาลัยมหาสารคาม.

ภัทรา วงษ์พันธ์กุล และศิระประภา ชัยเนตร. 2555. การศึกษาปริมาณการเกิดก๊าซของมูลไก่จาก

**ฟาร์มเลี้ยงไก่**. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา วิทยาเขตภาคพายัพ.

รุ่งทิวา สีมาปาน, ศรีกาญจนา คล้ายเรือง, ศิราภรณ์ ชื่นบาล และธูปน ชื่นบาล. 2558. ศักยภาพการ

ผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักร่วมของมูลสุกรและหญ้าเนเปียร์หมัก. **การประชุมทางวิชาการ**

**ครั้งที่ 53 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์189**.

ศักรินทร์ หมูเทพ. 2555. ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลไก่เนื้อด้วยระบบถังกวนสมบูรณ์.

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ศิลป์ชัย มณีชาติย์, สุขุม ไร่ใจ และอิสริยา วุฒิสินธุ์. 2552. การกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนจากน้ำเสีย

ฟาร์มสุกรและไก่ด้วยแมงกานีสซีโอไลต์ในแบบจำลองคลองวนเวียน. **Environment and**

**Natural Resources Journal**,7(1).

สำนักจัดการคุณภาพน้ำ. 2554. **คู่มือการจัดการกลิ่นจากฟาร์มสัตว์ปีก**. กรมควบคุมมลพิษ

กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม.

สิริชัย แยมแบน. 2554. การผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลไก่ไข่ด้วยระบบบ่อหมักรางของ

**มหาวิทยาลัยเชียงใหม่**. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

หทัยรัตน์ เปี้ยดตะคุ. 2555. การผลิตก๊าซชีวภาพจากเปลือกลำไยและเปลือกถั่วลิสงโดยการย่อยสลาย

**ร่วมกับมูลไก่**. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

อัญชลี แทนนิล. 2553. การย่อยร่วมแบบไม่ใช้ออกซิเจนของมูลสุกร ใบปาล์ม และขยะของแข็ง

**ชุมชนในถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ชั้นตอนและถังปฏิกรณ์เมมเบรน**. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

อานนท์ ดวงพาลี. 2552. การกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนในกระบวนการไฮโดรไลซิสทางความร้อนของมูลไก่โดย

**วิธีตกผลึกสูตรไวท์**. มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี.



- อาหะมะ มะสาและ. 2560. การผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสียในฟาร์มไก่เนื้อ. วิชาสัมมนา 515-497 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- Abouelenien, F., Fujiwara, W., Namba, Y., Kosseva, M., Nishio, N. และNakashimada, Y. 2010. Improved methane fermentation of chicken manure via ammonia removal by biogas recycle. **Bioresour Technol**,101(16), 6368-6373.
- Bayrakdar, Alper, Molaey, Rahim, Sürmeli, Recep Önder, Sahinkaya, Erkan และÇalli, Barış. 2017. Biogas production from chicken manure: Co-digestion with spent poppy straw. **International Biodeterioration & Biodegradation**,119(205-210).
- Li, Y., Zhang, R., Chen, C., Liu, G., He, Y. และLiu, X. 2013. Biogas production from co-digestion of corn stover and chicken manure under anaerobic wet, hemi-solid, and solid state conditions. **Bioresour Technol**,149(406-412).
- Li, Y., Zhang, R., He, Y., Zhang, C., Liu, X., Chen, C. และLiu, G. 2014. Anaerobic co-digestion of chicken manure and corn stover in batch and continuously stirred tank reactor (CSTR). **Bioresour Technol**,156(342-347).
- Nie, H., Jacobi, H. F., Strach, K., Xu, C., Zhou, H. และLiebetrau, J. 2015. Mono-fermentation of chicken manure: ammonia inhibition and recirculation of the digestate. **Bioresour Technol**,178(238-246).
- Niu, Q., Qiao, W., Qiang, H., Hojo, T. และLi, Y. Y. 2013. Mesophilic methane fermentation of chicken manure at a wide range of ammonia concentration: stability, inhibition and recovery. **Bioresour Technol**,137(358-367).
- Wang, X., Lu, X., Li, F. และYang, G. 2014. Effects of temperature and carbon-nitrogen (C/N) ratio on the performance of anaerobic co-digestion of dairy manure, chicken manure and rice straw: focusing on ammonia inhibition. **PLoS One**,9(5), e97265.
- Weerayuttil, Panomchai, Khoyun, Umaporn และKhuanmar, Kulyakorn. 2016. Optimum Ratio of Chicken Manure and Napier Grass in Single Stage Anaerobic Co-digestion. **Energy Procedia**,100(22-25).
- Wlazlo, L., Nowakowicz-Debek, B., Kapica, J., Kwiecien, M. และPawlak, H. 2016. Removal of ammonia from poultry manure by aluminosilicates. **J Environ Manage**,183(Pt 3), 722-725.
- Yetilmezsoy, K. และSapci-Zengin, Z. 2009. Recovery of ammonium nitrogen from the

effluent of UASB treating poultry manure wastewater by MAP precipitation as a slow release fertilizer. *J Hazard Mater*,166(1), 260-269.





ภาคผนวก ก  
วิธีการวิเคราะห์

## 1. การวิเคราะห์ของแข็งทั้งหมด (Total solids, TS) และปริมาณของแข็งระเหยง่าย (volatile solid, VS)

ของแข็งทั้งหมด หมายถึง ปริมาณสารที่เหลืออยู่ในภาชนะหลังจากระเหยน้ำออกจากตัวอย่างจนหมด แล้วนำไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 103 – 105 °C จนกระทั่ง น้ำหนักคงที่ แล้วปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น (Desiccator) แล้วชั่งน้ำหนักของของแข็งในภาชนะนั้น ซึ่งจะได้ปริมาณของของแข็งทั้งหมด ในส่วนของปริมาณของแข็งระเหยง่าย สามารถหาได้จากการนำตัวอย่างที่ผ่านการอบหาของแข็งทั้งหมดไปเผาที่อุณหภูมิ 550 °C

### 1.1 วิธีการวิเคราะห์

1. นำภาชนะสำหรับใส่ตัวอย่างไปอบที่อุณหภูมิ 103 – 105 °C เป็นเวลา 1 hr.
2. ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น (Desiccator) แล้วชั่งน้ำหนัก = (A)
3. เลือกใช้ปริมาตรของตัวอย่างให้เหมาะสม โดยมีหน่วยเป็น L
4. นำตัวอย่างไประเหยน้ำออกบน Water bath หรือ Hot plate
5. นำไปอบที่อุณหภูมิ 103 – 105 °C เป็นเวลา 1 hr. หรือจนน้ำหนักของตัวอย่างคงที่
6. ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น แล้วชั่งน้ำหนัก = (B)
7. นำภาชนะที่ได้จากการหาปริมาณของแข็งทั้งหมด ไปเผาในตู้อบที่อุณหภูมิ 550 °C เป็นเวลา 30 - 40 min
8. ปล่อยให้เย็นในโถดูดความชื้น ชั่งน้ำหนักที่เหลือจากการเผา = (C)

### 1.2 การคำนวณ

ของแข็งทั้งหมด (mg/L) =  $((B-A) \times 1000) /$  ปริมาตรของตัวอย่าง

ของแข็งระเหยง่าย (mg/L) =  $((B-C) \times 1000) /$  ปริมาตรของตัวอย่าง

เมื่อ A = น้ำหนักของภาชนะ (mg)

B = น้ำหนักภาชนะและตัวอย่างหลังจากอบแห้ง (mg)

C = น้ำหนักภาชนะและตัวอย่างหลังจากเผา (mg)

## 2. การวิเคราะห์ค่าซีโอดี (Chemical oxygen demand, COD) โดยวิธีรีฟลักซ์แบบปิด (Closed reflux)

การวิเคราะห์หาค่า COD เป็นการออกซิไดซ์สารประกอบอินทรีย์ในตัวอย่างด้วยตัวออกซิไดซ์อย่างแรง ซึ่งผลิตภัณฑ์สุดท้ายจะได้น้ำและคาร์บอนไดออกไซด์ ก่อนทำการวิเคราะห์ควรตรวจดูฝาปิดของหลอดทดลองทุกครั้ง หากมีการชำรุดอาจทำให้รอยแตกการปนเปื้อนและทำให้มีการสูญหายของ

สารอินทรีย์ได้ โดยการหาค่า COD สารอินทรีย์จะถูกย่อยสลายในตูบที่มีอุณหภูมิ 150 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ในขณะที่ความไวในการย่อยสลายจะขึ้นอยู่กับปริมาณของตัวอย่างและหลอดทดลองที่ใช้ แสดงดังตารางผนวกที่ 1

**ตารางผนวกที่ 1** ปริมาณตัวอย่างและรีเอเจนต์ที่ใช้สำหรับขนาดต่าง ๆ ของหลอดทดลอง

ขนาดของหลอดทดลอง	ตัวอย่าง (ml)	สายละลายใน การย่อยสลาย (ml)	กรดซัลฟูริก รีเอเจนต์ (ml)	ปริมาตร ทั้งหมด (ml)
หลอดย่อยสลาย				
16 x 100 mm.	2.5	1.5	3.5	7.5
20 x 150 mm.	5.0	3.0	7.0	15.0
25 x 150 mm.	10.0	6.0	14.0	30.0
แอมพูลมาตรฐาน				
10 ml	2.5	1.5	3.5	7.5

## 2.1 สารเคมี

1. สารละลายมาตรฐาน  $K_2Cr_2O_7$  0.0167 M อบ  $K_2Cr_2O_7$  4.913 g ที่อุณหภูมิ 103 – 105 °C เป็นเวลา 2 hr. ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้นจากนั้นละลายในน้ำกลั่น 500 ml แล้วค่อย ๆ เติม Conc.  $H_2SO_4$  ปริมาณ 167 ml และเติม  $HgSO_4$  ลงไป 33.3 g คนให้ละลาย ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง แล้วปรับปริมาตรเป็น 1 L ด้วยน้ำกลั่น
2.  $H_2SO_4$  Reagent ละลาย  $Ag_2SO_4$  22 g ลงใน Conc.  $H_2SO_4$  1 ขวด ซึ่งมีน้ำหนัก 4.0 kg
3. สารละลาย Ferriin indicator ละลาย  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$  0.695 g และ 1,10 phenanthroline monohydrate 1.485 g ในน้ำกลั่น แล้วปรับปริมาตรเป็น 100 ml
4. สารละลาย  $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot H_2O$  0.1 M ละลาย  $Fe(NH_4)_2(SO_4)_2 \cdot 2H_2O$  39.2 g ในน้ำกลั่น 500 ml เติม Conc.  $H_2SO_4$  ปริมาณ 20 ml คนให้ละลาย ตั้งทิ้งไว้ให้เย็น แล้วเติมน้ำกลั่นจนมีปริมาตรเป็น 1,000 ml สารละลายนี้ต้องเทียบกับสารละลายมาตรฐาน  $K_2Cr_2O_7$  ที่ใช้ในการย่อยสลายทุกครั้ง โดยใช้ น้ำกลั่นแทนตัวอย่าง (Blank)



## 2.2 วิธีการวิเคราะห์

1. ล้างหลอดทดลองและฝาหลอดด้วย  $\text{H}_2\text{SO}_4$  20% ก่อนนำไปใช้เพื่อป้องกันการปนเปื้อนสารอินทรีย์อื่น ๆ
2. เลือกใช้ปริมาตรของตัวอย่างและสารเคมีที่เหมาะสมตามตารางผนวกที่ 1
3. นำตัวอย่างมาใส่หลอดทดลองหรือแอมพูล เติมสารละลายที่ใช้ในการย่อยสลาย ได้แก่ สารละลายมาตรฐาน  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$
4. ค่อย ๆ เท  $\text{H}_2\text{SO}_4$  Reagent ให้ไหลลงกันหลอด เพื่อให้ชั้นของกรดอยู่ที่ชั้นตัวอย่างและสารละลายในการย่อยสลาย
5. ปิดจุกหลอดให้แน่นหรือถ้าใช้แอมพูลก็ให้เชื่อมให้สนิท แล้วคว่ำหลอดไปมาหลาย ๆ ครั้ง เพื่อผสมให้เข้ากันอย่างทั่วถึง
6. นำหลอดทดลองนี้ไปใส่เครื่องย่อยสลาย (Block digester) หรือตุ๋น ซึ่งได้ทำให้ร้อนถึงอุณหภูมิ  $150^\circ\text{C}$  ก่อน ใช้เวลารีฟลักซ์ 2 hr. แล้วทิ้งให้เย็นถึงอุณหภูมิห้องโดยนำหลอดทดลองมาวางในที่วางหลอดทดลอง
7. เปิดฝาจุก แล้วจึงใส่แท่งแม่เหล็กที่หุ้มด้วยทีเอฟอี (TFE covered magnetic bar) ถ้าใช้แอมพูลให้เทของผสมลงในภาชนะที่ใหญ่กว่าเพื่อนำไปไตเตรท เติม Ferroin indicator ประมาณ 1 – 2 หยด คนโดยใช้เครื่องกวนชนิดใช้แม่เหล็ก (magnetic stirrer) อย่างรวดเร็ว ในขณะที่ไตเตรทด้วยสารละลายมาตรฐาน  $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$  0.1 M จุดยุติจะเปลี่ยนอย่างรวดเร็วจากสีฟ้าอมเขียวเป็นสีน้ำตาลแดง ถึงแม้บางครั้ง สีฟ้าอมเขียวอาจจะกลับมาปรากฏอีกในหลายนาทีถัดมา และในลักษณะเดียวกันให้ทำรีฟลักซ์และไตเตรท Blank ที่มีรีเอเจนต์กับน้ำกลั่นในปริมาตรเท่ากับตัวอย่าง

## 2.3 การคำนวณ

$$\text{COD (mg/L)} = ((A-B) \times M \times 8,000) / \text{ตัวอย่าง (ml)}$$

เมื่อ  $A = \text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2$  ที่ใช้ในการไตเตรท Blank (ml)

$B = \text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2$  ที่ใช้ในการไตเตรทตัวอย่าง (ml)

$M = \text{Molarity}$  ของ  $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2$

### 3. การวิเคราะห์กรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile fatty acid, VFA) และความเป็นด่าง (Alkalinity, Alk)

วิธีนี้เป็นวิธีใช้สำหรับควบคุมระบบ สามารถนำไปใช้ในการควบคุมระบบเพื่อที่จะได้ทราบถึงการทำงานของแบคทีเรียในระบบ ใช้เวลาในการทดลองประมาณ 1 hr. โดยมีขั้นตอนดังนี้

1. หาสภาพต่างทั้งหมดที่ pH 4.0 โดยวิธีการไตเตรทแบบโพเทนชิอเมตริก
2. ต้มไล่ Carbonic acid
3. ไตเตรทกลับจาก pH 4.0 ไปเป็น 7.0 เพื่อหาสภาพต่างของกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (Volatile acid alkalinity) และสภาพต่างของเบส (Base alkalinity) แล้วจึงคำนวณหาค่ากรดอินทรีย์ระเหยง่าย

#### 3.1 สารเคมี

1. สารละลายมาตรฐาน  $H_2SO_4$  0.5 N
2. สารละลายมาตรฐาน NaOH 0.5 N

#### 3.2 วิธีการวิเคราะห์

1. นำตัวอย่างใส่หลอดทดลองและนำไปเข้าเครื่องแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง (Centrifuge) ที่ความเร็วรอบประมาณ 7,000 rpm เป็นเวลา 10 min หรือจนกว่าตะกอนจะแยกออกจากน้ำ จากนั้นนำเอาส่วนที่ใสมา 50 – 200 ml ใส่ในบีกเกอร์ขนาด 100 – 300 ml วัดค่า pH ของตัวอย่าง ไตเตรทจน pH ถึง 4.0 ด้วยสารละลายมาตรฐาน  $H_2SO_4$  0.5 M บันทึกปริมาตรกรดมาตรฐานที่ใช้ (A)
2. ไตเตรทตัวอย่างต่อไปจน pH ถึง 3.3 – 3.5 โดยไม่ต้องบันทึกปริมาตรกรดที่ใช้ จากนั้นนำไปต้มจนเดือดประมาณ 2 – 3 min เพื่อไล่ Carbonic acid
3. ปรับ pH ให้เป็น 4.0 ด้วยสารละลายมาตรฐาน NaOH 0.5 M จดบันทึกปริมาณสารตั้งแต่ว่า pH 4.0 จนถึง 7.0 สมมติ = B (ml)

#### 3.3 การคำนวณ

$$\text{Alkalinity (mg/L)} = (A \times N (H_2SO_4) \times 50 \times 1,000) / V$$

$$\text{VFA (mg/L)} = (B \times N (NaOH) \times 50 \times 1,000) / V$$

เมื่อ A = สารละลายมาตรฐาน  $H_2SO_4$  (ml)

B = สารละลายมาตรฐาน NaOH (ml)

ก) กรณีที่ 1 ถ้าสภาพต่าง VFA < 180 mg/L

$$\text{VFA (mg/L คัดในรูป CH}_3\text{COOH)} = \text{สภาพต่าง VFA} \times 1.0$$

ข) กรณีที่ 2 ถ้าสภาพต่าง VFA > 180 (mg/L)

$$\text{VFA (mg/L คัดในรูป CH}_3\text{COOH)} = \text{สภาพต่าง VFA} \times 1.5$$

#### 4. การวิเคราะห์หาปริมาณเจลดาทาร์ลไนโตรเจน (Total Kjeldahl nitrogen, TKN)

การวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด หมายถึงผลรวมระหว่างออร์แกนิกไนโตรเจน (Organic nitrogen) และแอมโมเนียไนโตรเจน (Ammonia nitrogen) สำหรับการวิเคราะห์ออร์แกนิกไนโตรเจนถ้าไม่ได้แยกแอมโมเนียไนโตรเจนออกเสียออก ผลที่ได้จะได้เป็นไนโตรเจนทั้งหมด ไนโตรเจนทั้งหมดที่จะกล่าวถึงนี้หาได้โดยวิธีเจลดาทาร์ล มีเมอร์คิวรี (II) ซัลเฟตเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ซึ่งจะเปลี่ยนพวกออร์แกนิกไนโตรเจนเป็นแอมโมเนียมซัลเฟต หลังจากการย่อยสลายด้วย Conc.  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ที่มีโพแทสเซียมซัลเฟต ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ ) เป็นตัวเพิ่มจุดเดือดให้สูงขึ้นถึง 344 – 371 °C หลังจากการย่อยสลายแล้วให้เจือจางส่วนที่เหลือภายในขวดเจลดาทาร์ล แล้วทำให้เป็นด่างด้วย NaOH นำไปกลั่นโดยมีสารละลาย Boric acid เป็นตัวดูดกลืนสารเคมี

##### 4.1 สารเคมี

1. สารละลายสำหรับย่อยสลาย (Digestion solution) ละลาย  $\text{K}_2\text{SO}_4$  134 g ในน้ำกลั่น 650 ml ผสม Conc.  $\text{H}_2\text{SO}_4$  200 ml แล้วละลาย Red mercury (II) oxide 2 g ใน  $\text{H}_2\text{SO}_4$  3 N ค่อย ๆ เติมลงในสารละลาย  $\text{K}_2\text{SO}_4$  แล้วเจือจางปริมาตรเป็น 1,000 ml เก็บไว้ในที่ที่มีอุณหภูมิสูงกว่า 14 °C เพื่อป้องกันการตกตะกอน
2. phenolphthalein indicator
3. สารละลาย Sodium hydroxide - sodium thiosulphate reagent ละลาย NaOH 500 g และ  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  25 g ในน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรเป็น 1,000 ml
4. สารละลายอินดิเคเตอร์ผสม (Mixed indicator) ละลาย Methyl red indicator 200 mg ใน Ethyl alcohol 95% 100 ml ละลาย Methylene blue 100 mg ใน Ethyl alcohol 95% 50 ml แล้วผสมสารละลายทั้งสองชนิดนี้เข้าด้วยกัน
5. สารละลาย Indicating boric acid solution ละลาย Boric acid 20 g ในน้ำกลั่นเพียงเล็กน้อย เติม Mixed indicator ลงไป 10 ml แล้วเติมน้ำกลั่นจนได้ปริมาตร 1,000 ml
6. สารละลายมาตรฐาน  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0.01 M

#### 4.2 วิธีการวิเคราะห์

1. ตวงตัวอย่างโดยให้มีปริมาตรที่เหมาะสม ดังรายละเอียดที่แสดงไว้ในตารางผนวกที่ 2 ใส่ลงในขวดเจลาตาทึบและใส่ลูกแก้ว 5 – 6 ลูก
2. เติมสารละลายสำหรับย่อยสลายออร์แกนิกไนโตรเจน 50 ml
3. ต้มจนได้สายละลายใส เคี้ยวต่ออีก 20 – 30 min ทิ้งให้เย็นแล้วเติมน้ำกลั่นลงไป 300 ml
4. ทำให้เป็นด่างด้วยสารละลาย Sodium hydroxide - sodium thiosulphate reagent 50 ml โดยใช้ phenolphthalein เป็นอินดิเคเตอร์ แล้วนำไปกลั่นลงในสารละลาย boric acid 50 ml จนได้ปริมาตรทั้งหมดเป็น 200 ml
5. นำส่วนที่กลั่นได้ให้เย็น นำไปไตเตรทกับสารละลายมาตรฐาน  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0.01 M โดยใช้ Mixed indicator 2 – 3 หยด

#### 4.3 การคำนวณ

$$\text{ไนโตรเจนทั้งหมด (mg/L)} = ((A-B) \times M \times 1,000 \times 28) / V$$

เมื่อ A = สารละลาย  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ที่ใช้สำหรับตัวอย่าง

B = สารละลาย  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ที่ใช้สำหรับ Blank

M = Molality ของสารละลาย  $\text{H}_2\text{SO}_4$

#### ตารางผนวกที่ 2 ปริมาตรของตัวอย่างที่เหมาะสม

ออร์แกนิกไนโตรเจนในตัวอย่าง (mg/L)	ปริมาณของตัวอย่าง (ml)
0 – 1	500
1 - 10	250
10 – 20	100
20 – 50	50
50 – 100	25



ภาคผนวก ข  
การทดลองระดับห้องปฏิบัติการ





ภาพที่ ข-1 สร้างถังหมักขนาด 19 L สำหรับการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ



ภาพที่ ข-2 สร้างถังเก็บแก๊สขนาด 5 L สำหรับการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ



ภาพที่ ข-3 ชุดถังเก็บแก๊ส



ภาพที่ ข-4 การเตรียมวัตุดิบ



ภาพที่ ข-5 ตั้งทิ้งไว้สำหรับตกตะกอน



ภาพที่ ข-6 การทดลองผลิตแก๊สชีวภาพในระดับระดับห้องปฏิบัติการ



ภาคผนวก ค  
การทดลองระดับครัวเรือน





ภาพที่ ค-1 ชุดถังเก็บแก๊สชีวภาพระดับครัวเรือน



ภาพที่ ค-2 ชุดถังหมักแก๊สชีวภาพระดับครัวเรือน





ภาพที่ ค-3 ระบบผลิตแก๊สชีวภาพระบบครัวเรือน





ภาคผนวก ง  
บทความวิจัยที่ได้เผยแพร่ในระดับชาติและนานาชาติ



# Proceedings ICEM<sup>13th</sup>

The 13<sup>th</sup> International Conference on Ecomaterials 2017  
November 19-23, 2017

KMUTT Knowledge Exchange for Innovation Center (KX), Bangkok, Thailand





## The effect of magnesium on ammonia reduction in enhancing chicken manure biogas production

Sahatcha Jaisin<sup>1</sup>, Jutaporn Chanathaworn<sup>1\*</sup>, Rotjapun Nirunsin<sup>1</sup>,  
Natthanicha Sukasem<sup>1</sup>, Patcharee Intanoo<sup>2</sup> and Kamoldara Reansuwan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*School of Renewable Energy, Maejo University, Chiang Mai, 50290, Thailand*

<sup>2</sup>*Department of Industrial Chemistry and Textile Technology, Faculty of Science, Maejo University*

\*e-mail: winchana.jc@gmail.com

**Abstract:** The effect of ammonia removal by chemical process was evaluated to improve biogas production. During this study, anaerobic digestion was dispensed in batch system 19 L reactor with operating volume 15 L experiment in mesophilic condition for 15 days. Chicken manure was used as the single material with carbon to nitrogen ratio (C/N ratio) of 9:1 at associate initial pH of 7.1. Three types of magnesium chemical enclosed magnesium sulphate (MgSO<sub>4</sub>), magnesium chloride (MgCl<sub>2</sub>) and magnesium oxide (MgO) for ammonia removal was studied with 100 mg/L, 150 mg/L and 200 mg/L magnesium loading to match with the control experiment (without magnesium). Maximum cumulative biogas production was measured at 15,320 mL when using 100 mg/L MgSO<sub>4</sub>, along with the maximum Chemical Oxygen Demand (COD) removal and Total solids (TS) removal of 30.4% and 37.7%, respectively, whereas the cumulative biogas production, the COD removal and the TS removal were 7,150 mL, 15.8% and 17.0%, respectively, for the control experiment without magnesium treatment.

**Keywords:** chicken manure; chemical process; ammonia removal; magnesium

### 1. Introduction

A large number of chicken farms in Thailand have long been the source of chicken manure waste accumulation, causing some environmental impact due to the odour. The problem was partly resolved by exploiting the chicken manure as plant fertilizer. More recently, the renewable energy from chicken manure waste has become attention-grabbing, as the biogas produced can be used as an alternative energy supply and can also help resolving the environmental issue.

The potentials of producing biogas from farm animal manure have been reviewed here. Chicken manure can produce relatively high biogas yield of 0.40 – 0.60

m<sup>3</sup>/kg, while swine manure and cow manure that biogas potential of farm animal manure from swine and cow yield biogas production of 0.10 – 0.38 m<sup>3</sup>/kg and 0.26 – 0.28 m<sup>3</sup>/kg, respectively<sup>1</sup>. However, the chicken manure also contains high content of nitrogen and low C/N ratio. Nitrogen content in the chicken manure are the rather dynamic ammonia gas molecules that are the source of odour, which is dangerous to health and also prohibit the production of methane gas (CH<sub>4</sub>).

Therefore, several ways were used for the ammonia removal in order to improve biogas production, e.g. ammonia stripping during methane fermentation to avoid ammonia accumulation<sup>2</sup>. Technically,





stripping was used to remove ammonia from the liquid fraction by the mono-fermentation method of chicken manure.<sup>3</sup> An experiment on adding Napier Pakchong 1 grass to increase of the biogas production was carried out<sup>4</sup> and the co-digestion of chicken manure with used poppy straw was also studied<sup>5</sup>. Additionally, it was found that removal of ammonia nitrogen in swine wastewater could be done by precipitating the ammonium with magnesium salt<sup>6</sup>. Another experiment on the removal ammonia of nitrogen in wastewater from swine farms and chicken farms by using manganese zeolite within the reaction ditch was also reported<sup>7</sup>.

In this work, a simple experiment on using magnesium salts – magnesium sulphate ( $MgSO_4$ ), magnesium oxide ( $MgO$ ) – was carried out in order to find the best salt type and concentration used for ammonia reduction.

## 2. Materials and Methods

### 2.1 Chicken manure

Chicken manure was collected from farm in Chiang Mai, Thailand. Physical and chemical characteristics of Chicken manure were analyzed. Characteristics of chicken manure is shows in Table 1.

**Table 1.** Characteristics of chicken manure.

Constituent	chicken manure
Total solids (mg/kg)	493,512
Volatile solid (mg/kg)	335,668
C/N ratio	9:1

### 2.2 Batch anaerobic digestion test

Six single stage reactors of 19 L with digestion operating volume 15 L was used for the experiment and ratio of chicken manure to water was 1:3. The experiment was studied various chemical concentrations with 100 mg/L, 150 mg/L and 200 mg/L  $MgSO_4$  loading and type chemicals with 100 mg/L  $MgCl_2$  and 100 mg/L  $MgO$  loading were used compare to the control experiment (without chemical loading). After chemical loading the

mixtures in altogether reactors were stirred for 1 min and set for 30 min to chemical precipitation. The experiments were operated under mesophilic condition for 15 days and all reactors were connected with water-replacement biogas collector.

### 2.3 Analytical methods

Biogas volume was measured with water-replacement. Samples were taken from reactor before digestion and after digestion for sample analysis. pH was measured with a pH meter (Innovation Beyond 2000, INDEX). Total solids (TS), Volatile solids (VS), Volatile fatty acid (VFA), alkalinity (Alk) and Chemical Oxygen Demand (COD) were analyzed according to standard methods [8]. TS and VS were analyzed by gravimetric method. VFA and Alk were analyzed by titration method, for VFA was analyzed exploitation with 0.02 M  $H_2SO_4$  to endpoints of pH 3.3 – 3.5 and Alk was analyzed using with 0.02 M  $H_2SO_4$  for titration. COD was analyzed by Closed Reflux method by exploitation of 0.13 M ferrous ammonium sulfate concentration (FAS).

## 3. Results & Discussion

### 3.1 Cumulative biogas production

Biogas production accumulations throughout the period of the experiment are shown in Figure 1. Cumulative biogas production of 100 mg/L  $MgSO_4$  loading was higher than other experiments, that cumulative biogas of 100 mg/L  $MgSO_4$  loading was 15,320 mL with the methane content of 68% and 0.69 L  $CH_4$ /d of methane production for 15 days. Whereas the cumulative biogas production of control experiment was lower than other experiments, cumulative biogas of control experiment was 7,150 mL for 15 days, biogas accumulation of control experiment was increased until day 10 of 6,900 mL and then biogas accumulation was become steady at day 11. For the cumulative biogas production of 150 mg/L and 200 mg/L





MgSO<sub>4</sub> loading were 10,900 ml and 14,050 ml at day 15, respectively. The cumulative biogas production of 200 mg/L MgSO<sub>4</sub> loading was increased throughout the period of the experiment. The experiments of 100 mg/L MgCl<sub>2</sub> and MgO loading were 10,280 mL and 10,120 mL for 15 days, severally. Whereas biogas accumulation of 100 mg/L MgCl<sub>2</sub> loading was become steady at day 12 of 9,980 mL and 100 mg/L MgO loading was become steady at day 14 of 9,940 mL. When the cumulative biogas was calculated proportion, the results all chemical loading were higher than the control experiment. The best of chemical loading was found that 100 mg/L MgSO<sub>4</sub> of 53.3%, followed by 200 mg/L and 150 mg/L MgSO<sub>4</sub> loading was 49.1% and 34.4%, respectively. For the 100 mg/L MgCl<sub>2</sub> and MgO loading were 30.4% and 29.3%, respectively. The MgSO<sub>4</sub> loading was found that higher than MgCl<sub>2</sub> and MgO loading, at 100 mg/L MgSO<sub>4</sub> loading was higher than MgCl<sub>2</sub> and MgO were about 32.9% and 31.9%, respectively. 100 mg/L MgSO<sub>4</sub> loading was higher than 150 mg/L and 200 mg/L MgSO<sub>4</sub> loading were regarding 28.9% and 8.3%, respectively.

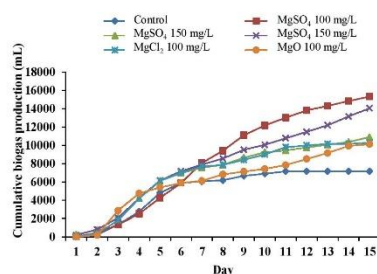


Figure 1. Cumulative biogas production.

### 3.2 Daily biogas production

Figure 2 shows regarding the daily biogas production. Peak of daily biogas production was found that the 100 mg/L MgO loading was 2,700 mL at day 3, then again the biogas production was decreased until

range regarding 240 – 700 mL. Peak of 150 mg/L and 200 mg/L MgSO<sub>4</sub> loading and 100 mg/L MgCl<sub>2</sub> loading were found that at day 4 were 2,100 ml, 2,160 and 2,400 ml, respectively. The 100 mg/L MgSO<sub>4</sub> loading was found that at day 7 was 2,200 ml. The best of biogas production at day 15 was found that 200 mg/L MgSO<sub>4</sub> loading of 900 mL was better than of biogas production at day 15 of 100 mg/L and 150 mg/L MgSO<sub>4</sub> loading and 100 mg/L MgCl<sub>2</sub> loading. The biogas yield was 480 ml, 540 ml and 120 ml, severally. Whereas the biogas production of control experiment was lower than other experiments, that peak was found that 2,040 mL at day 5 and was not occurred the biogas production at day 12. The ambient temperature for 15 days of experiments, the average temperature was 26 °C, with high temperature was 34 °C at day 14, low temperature was 23 °C at day 4.

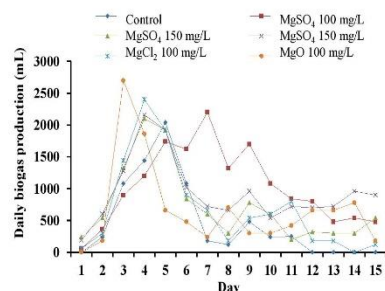


Figure 2. Daily biogas production.

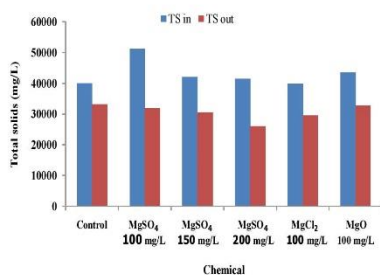
### 3.3 Changes in characteristic sample

Changes in characteristic of TS, VS and COD was shown in Figure 3 – 5. TS of 100 mg/L MgSO<sub>4</sub> loading decreased from 51,080 mg/L to 31,843 mg/L, it is beyond experiments. For the term of VS, the condition of 100 mg/L MgSO<sub>4</sub> loading decreased from 24,653 mg/L to 17,300 mg/L and COD decreased from 31,893 mg/L to 22,187 mg/L.

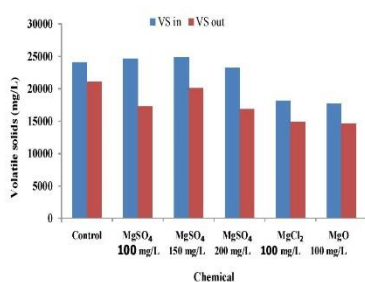
Figure 6 shows TS, VS and COD removal, 100 mg/L MgSO<sub>4</sub> loading was the best



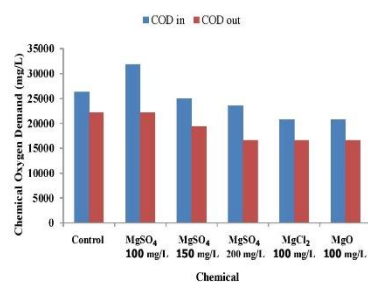
condition for TS, VS and COD removal that was 37.7%, 29.8% and 30.4%, respectively. However, the control experiment of TS, VS and COD removal was 17%, 12.8% and 15.8%, respectively. In term of 150 mg/L and 200 mg/L  $MgSO_4$ , 100 mg/L  $MgCl_2$  and 100 mg/L  $MgO$  loading were 27.3%, 37.3%, 25.7% and 24.5%, respectively. For the VS removal of 150 mg/L and 200 mg/L  $MgSO_4$ , 100 mg/L  $MgCl_2$  and 100 mg/L  $MgO$  loading was 19.2%, 27.8%, 18.2% and 17.4%, respectively and COD removal was 22.2%, 29.4%, 20.0% and 20.0%, respectively.



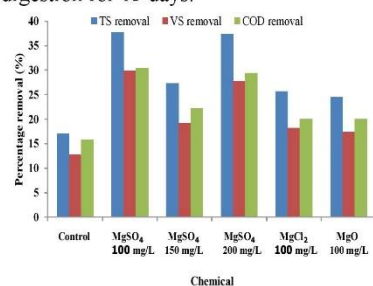
**Figure 3.** Change of TS in anaerobic digestion for 15 days.



**Figure 4.** Change of VS in anaerobic digestion for 15 days.



**Figure 5.** Change of COD in anaerobic digestion for 15 days.



**Figure 6.** TS, VS and COD removal in anaerobic digestion for 15 days.

#### 4. Conclusion

From the experiment, it was found that biogas production from chicken manure treated by magnesium salt was higher than that from the control experiment. 100 mg/L  $MgSO_4$  provided the maximum biogas production of 15,320 mL/15 days. The best condition of TS, VS and COD removal was 37.7%, 29.8% and 30.4%, respectively. In conclusion, it was confirmed that the ammonia removal by chemical process using magnesium salt successfully improved biogas production.

#### 5. Acknowledgements

The author would like to thank School of Renewable Energy, Maejo University, Maejo University, of financial support under project from the production and development potential graduate of



renewable energy in ASEAN countries for graduate students, School of Renewable Energy, Maejo University, academic year 2016. The authors also wish to thank the Office of Agricultural Research and Extension Maejo University, Thailand 2017 for financial support.

#### 6. References

1. Weerayuttil, P. , Khoyun, U. and Khuanmar, K. , 2016, *Energy Procedia*, 100, 22–25.
2. Abouelenien, F., Fujiwara, W., Namba, Y. , Kosseva, M. , Nishio, N. and Nakashimada, Y. , 2010, *Bioresource Technology*, 101, 6368–6373.
3. Nie, H., Jacobi, H.F., Strach, K., Xu, C., Zhou, H. and Liebetrau J. , 2015, *Bioresource Technology*, 178, 238–246.
4. Pawanrat Boonon, 2014, *Effect of Chicken and Dairy manures addition on Biogas production efficiency from Napier PakChong 1 grass by completely mixed reactor*, Environmental Engineering Chiang Mai University.
5. Bayrakdar, A. , Molaey, R. , Sürmel, R. O. , Sahinkaya, E. and Calli, B. , 2017, *International Biodeterioration & Biodegradation*, 119, 205–210.
6. Paosiri, P., Suebsoh, W., and Songkasti, C. , 2012, *Rajabhat Maha Sarakham University Journal*, 6(1), 129–137.
7. Meneekat, S. , Rawchai, S. and isariya, w. , 2009, *Environment and Natural Resources Journal*, 7(1).
8. A. A. P. H, 2005, *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 21<sup>st</sup> ed. New York.



## บทความฉบับเต็ม

### การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 3

ด้านสารสนเทศ การเกษตร การจัดการ บริหารธุรกิจ  
วิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี  
The 3<sup>rd</sup> National Conference on Informatics, Agriculture,  
Management, Business administration, Engineering,  
Sciences and Technology : IAMBEST 2018

**24 - 25 พฤษภาคม 2561**

จัดโดย : สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง  
วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์ จังหวัดชุมพร



การประชุมวิชาการระดับชาติ IAMBEST ครั้งที่ 3  
The 3<sup>rd</sup> National Conference on Informatics, Agriculture, Management,  
Business Administration, Engineering, Science and Technology



การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการลดแอมโมเนียโดยวิธีการตกตะกอนของแมกนีเซียมซัลเฟต  
สำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ

The Study of Factors Affecting on Ammonia Reduction by Magnesium  
Sulfate Precipitation for Biogas Production

ศัทธมา ใจสิน จุฑาภรณ์ ชนะถาวร\* และ กมลดารา เจริญสุวรรณ

Sahatcha Jaisin, Jutaporn Chanathaworn\* and Kamoldara Reansuwan

วิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50290

School of Renewable Energy, Maejo University, Chiang Mai, 50290, Thailand.

\* Corresponding author: winchana.jc@gmail.com

#### บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของเวลาการกวนและการตกตะกอนแมกนีเซียมซัลเฟต ( $MgSO_4$ ) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยใช้  $MgSO_4$  ที่ความเข้มข้น  $100 \text{ mg L}^{-1}$  ที่อัตราส่วนของมูลไก่ต่อน้ำ 1:3 ในเวลาการกวน 1, 3 และ 5 min และเวลาการตกตะกอนที่ 60 และ 90 min ตามลำดับ จากนั้นทำการหมักก๊าซชีวภาพแบบแบทช์ในระบบไร้อากาศปริมาตรการหมัก 15 L ระยะเวลาการหมัก 20 วัน ภายใต้การควบคุมอุณหภูมิที่สภาวะ mesophilic ( $34 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ ) จากการทดลองพบว่า ที่เวลาการกวน 5 min ใช้เวลาตกตะกอน 90 min มีปริมาณก๊าซสะสมสูงสุดคือ 44,500 mL แต่อย่างไรก็ตาม จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพพบว่า ที่เวลาการกวน 3 min เวลาตกตะกอน 90 min ให้องค์ประกอบก๊าซมีเทนสูงสุด 62.3% ซึ่งให้ปริมาณก๊าซมีเทนสูงสุดคิดเป็น 26,976 mL และจากการวิเคราะห์ TS, VS และ COD พบว่าที่เวลาการกวน 5 min ในเวลาตกตะกอน 90 min สามารถกำจัด TS, VS และ COD ได้สูงสุดอยู่เท่ากับ 67.9%, 66.6% และ 62.5% ตามลำดับ  
**คำสำคัญ:** ก๊าซชีวภาพ การตกตะกอน แมกนีเซียมซัลเฟต มูลไก่

#### Abstract

The main aim of this research is to study the factors affecting of the stirring times and precipitation times of magnesium sulphate ( $MgSO_4$ ) on biogas production efficiency by using the  $MgSO_4$  concentration of  $100 \text{ mg L}^{-1}$ . The ratio of chicken manure to water was 1:3. The duration of the stirring times were 1, 3 and 5 min and the precipitation times were ranged 60 and 90 min,



## การประชุมวิชาการระดับชาติ IAMBEST ครั้งที่ 3

The 3<sup>rd</sup> National Conference on Informatics, Agriculture, Management,  
Business Administration, Engineering, Science and Technology



respectively. Then the anaerobic fermentation was investigated in a lab-scale batch reactor with 15 L working volume. The digester was operated for 20 days under mesophilic condition ( $34 \pm 2$  °C). The result showed that the condition for highest cumulative biogas production of 44,500 mL was found that to be the stirring time of 5 min with precipitation times of 90 min. However, the highest methane content of 62.3% with methane yield of 26,976 mL was found to be the stirring time of 3 min with precipitation times of 90 min. The highest of TS, VS and COD removal were 67.9%, 66.6% and 62.5%, respectively with the condition of the stirring time of 5 min and precipitation times of 90 min.

**Keywords:** Biogas, Precipitation, Magnesium sulfate, Chicken manure

### บทนำ

ก๊าซชีวภาพเกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยแบคทีเรียในสภาวะไร้อากาศ โดยที่แบคทีเรียจะนำสารอินทรีย์มาใช้ในการเจริญเติบโตและผลิตก๊าซชีวภาพโดยมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบหลัก ซึ่งมีสมบัติในการจุดติดไฟ จึงสามารถนำมาใช้ทดแทนก๊าซหุงต้มได้ มีงานวิจัยหลายงานวิจัยที่สนใจศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพ อาทิเช่น ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากใบยางพาราโดยการหมักร่วมกับมูลสุกร (ชิตชนก, 2011) การศึกษากระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศ โดยใช้ น้ำเสียจากโรงงานแปงมันสำปะหลังแปรรูป (เกื้อกุล, 2009) การศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 ด้วยการเติมมูลไก่และมูลโค (ปวันรัตน์, 2014) โดยส่วนใหญ่ก๊าซชีวภาพผลิตจากวัตถุดิบประเภทมูลสัตว์ เช่น มูลโค มูลสุกร และมูลไก่ แต่เนื่องจากมูลไก่มีองค์ประกอบของไนโตรเจนสูง ส่งผลให้มีอัตราส่วน C/N ต่ำกว่าค่าที่เหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งอัตราส่วนที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 20 - 30:1 ไนโตรเจนที่อยู่ในมูลไก่จะถูกสะสมอยู่ในรูปของแอมโมเนีย เมื่อระบบมีการสะสมของแอมโมเนียสูง (สิริชัย, 2011) ทำให้ระบบมีความเป็นด่างสูงขึ้น ส่งผลต่อค่า pH ที่อยู่ในระบบ ทำให้มีผลต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มที่ผลิตก๊าซมีเทนในระบบการผลิตก๊าซชีวภาพ เนื่องจากแบคทีเรียกลุ่มนี้มีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงค่า pH ในระบบ ถึงแม้ว่าค่า pH เปลี่ยนแปลงไปไม่มาก แต่ก็อาจทำให้แบคทีเรียที่ผลิตก๊าซมีเทนหยุดการเจริญเติบโต (อัญชลี, 2010) และทำให้ระบบล้มเหลวได้

ดังนั้นแอมโมเนียจึงเป็นปัญหาหลักในการผลิตก๊าซชีวภาพ และเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจึงได้มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการลดแอมโมเนีย อาทิเช่น การกำจัดแอมโมเนียโดยการนำก๊าซชีวภาพจากการหมักมูลไก่ไปรีไซเคิลด้วยกระบวนการ ammonia

## การประชุมวิชาการระดับชาติ IAMBEST ครั้งที่ 3

The 3<sup>rd</sup> National Conference on Informatics, Agriculture, Management,  
Business Administration, Engineering, Science and Technology



striping (Abouelenien et al., 2010) รวมถึงมีวิจัยเกี่ยวกับการลดแอมโมเนีย อาทิเช่น การใช้กระบวนการตกตะกอนทางเคมีโดยใช้เกลือแมกนีเซียมซัลเฟตในการกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนน้ำเสียจากฟาร์มสุกร (พงศัลลิตดา, 2012) ศึกษาการกำจัดแอมโมเนียด้วยการตกผลึกโดยใช้อุณหภูมิไฮโดรไลซิส 150 °C เพื่อให้ตกตะกอนโดยใช้สาร  $MgCl_2 \cdot 6H_2O$  และ  $KH_2PO_4$  (อานนท์, 2009) เป็นต้น

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาการลดแอมโมเนียในมูลไก่ ก่อนการหมักด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมีของ  $MgSO_4$  ทำการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องคือ ผลของการกวนก่อนการตกตะกอนและระยะเวลาการตกตะกอน  $MgSO_4$  เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ

### วิธีการศึกษา

#### 1. วัตถุประสงค์

วัตถุประสงค์มูลไก่ได้รับความอนุเคราะห์จากฟาร์มไก่ในเขตพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ ทำการวิเคราะห์ลักษณะของมูลไก่ก่อนการทดลอง เช่น ค่าปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solid, TS) ปริมาณของแข็งระเหยง่าย (Volatile solid, VS) ความชื้น (Moisture content, MC) และ ค่าอัตราส่วน C/N แสดงดัง Table 1.

**Table 1** Characteristics of chicken manure from chicken farm in Chiang Mai.

Constituent	Chicken manure
TS content (%)	21.4±0.01
VS content (%)	17.5±0.02
MC (%)	78.5
C/N ratio	8:1

#### 2. ศึกษาการลดแอมโมเนียด้วย $MgSO_4$

ผสมวัตถุประสงค์ในอัตราส่วนของมูลไก่และน้ำ 1:3 โดยใช้  $MgSO_4$  ความเข้มข้น 100 mg  $L^{-1}$  ละลายในน้ำสำหรับทำการตกตะกอนเพื่อลดแอมโมเนียในมูลไก่ จากนั้นทำการกวนก่อนการตกตะกอน โดยศึกษาเวลาการกวนในช่วง 1 – 5 min ก่อนจะตั้งทิ้งไว้เพื่อให้ตกตะกอน ศึกษาเวลาสำหรับการตกตะกอนโดยวางทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 60 – 90 min หลังจากนั้นเข้าสู่กระบวนการหมักแบบไร้อากาศด้วยระบบแบบแบทช์

### การประชุมวิชาการระดับชาติ IAMBEST ครั้งที่ 3

The 3<sup>rd</sup> National Conference on Informatics, Agriculture, Management,  
Business Administration, Engineering, Science and Technology



### 3. ระบบหมักก๊าซชีวภาพในระดับห้องปฏิบัติการ

การหมักก๊าซชีวภาพจากการใช้มูลไก่เป็นวัตถุดิบได้ดำเนินการทดลองในระบบแบบแบทช์ในระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้ถังหมักขนาด 19 L ปริมาตรการใช้งานจริง 15 L นำมูลไก่ที่ผ่านการลดแอมโมเนียมาเป็นวัตถุดิบในการหมัก ดำเนินการหมักภายใต้อุณหภูมิ mesophilic ( $34 \pm 2$  °C) ระยะเวลา 20 วัน ทำการเขย่า 1 ครั้งต่อวัน เป็นเวลา 1 min ทำการติดตั้งถังสำหรับเก็บก๊าซเชื่อมต่อกับถังหมักก๊าซชีวภาพ อ่านค่าอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยการแทนที่น้ำ บันทึกข้อมูลปริมาตรก๊าซชีวภาพที่ผลิตทุกวัน และวัดองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ นำตัวอย่างวิเคราะห์ค่า pH, TS, VS, Chemical Oxygen Demand (COD), alkalinity (ALK) และ Volatile fatty acid (VFA) ก่อนและหลังการหมักก๊าซชีวภาพ

### 4. การวิเคราะห์ผล

อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในแต่ละวันอ่านปริมาตรจากสเกลของถังเก็บก๊าซ วิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพด้วยเครื่อง Gas Analyzer (Gas Data GFM Series) ทำการตรวจวัดค่า pH ก่อนและหลังการหมักด้วย pH Meter (multi-parameter tester 35 series, eutech instruments, oakton) และทำการวิเคราะห์พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องก่อนหมักและหลังหมัก เช่น TS, VS, COD, ALK และ VFA ตามมาตรฐาน APHA, AWWA and WEF. 1998

### ผลการศึกษาและวิจารณ์

#### 1. ผลของการกวนและเวลาการตกตะกอน $MgSO_4$ ต่อปริมาณก๊าซสะสมและองค์ประกอบของมีเทน

จากการทดลองลดแอมโมเนียในมูลไก่ด้วย  $MgSO_4$  โดยศึกษาเวลาการกวนและการตกตะกอน ก่อนนำมูลไก่มาผลิตก๊าซชีวภาพ โดยทำการหมักในระดับห้องปฏิบัติการ ในสภาวะการย่อยสลายแบบไร้อากาศ ปริมาตรการหมัก 15 L อุณหภูมิในการหมัก  $34 \pm 2$  °C ระยะเวลาการหมัก 20 วัน จาก Figure 1 แสดงให้เห็นถึงปริมาณก๊าซสะสมของการทดลอง โดยได้ทดลองที่เวลาการกวนและเวลาตกตะกอน  $MgSO_4$  ที่แตกต่างกัน พบว่าปริมาณก๊าซสะสมสูงสุดพบที่เวลาการกวน 5 min เวลาตกตะกอน 90 min มีปริมาณก๊าซสะสมคือ 44,500 mL รองลงมาคือ 43,300 mL และ 27,900 mL ที่เวลาการกวน 3 min และ 1 min ตามลำดับ จากการทดลองที่เวลาตกตะกอน 60 min ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม 40,000, 43,800 และ 44,000 mL ที่เวลาการตกตะกอน 1, 3 และ 5 min ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบปริมาณก๊าซสะสมกับชุดควบคุมที่ไม่มีกรดแอมโมเนียด้วย  $MgSO_4$  พบว่า การผ่านกระบวนการลด

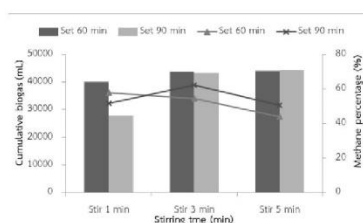
## การประชุมวิชาการระดับชาติ IAMBEST ครั้งที่ 3

The 3<sup>rd</sup> National Conference on Informatics, Agriculture, Management,  
Business Administration, Engineering, Science and Technology



แอมโมเนียสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพได้ ซึ่งชุดควบคุมให้ปริมาณก๊าซสะสม 7,150 mL (Jaisin et al., 2017)

แต่อย่างไรก็ตามจากการวิเคราะห์ห้วงค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ พบว่า ที่เวลาทวน 3 min เวลาตกตะกอน 90 min ให้ห้วงค์ประกอบก๊าซมีเทนสูงสุด 62.3% ซึ่งให้ปริมาณก๊าซมีเทนสูงสุดคิดเป็น 26,976 mL รองลงมาคือที่เวลาทวน 5 min และ 1 min ให้ห้วงค์ประกอบของมีเทน 50.6% และ 51.8% ตามลำดับ ซึ่งให้ปริมาณก๊าซมีเทนคิดเป็น 22,517 mL และ 14,452 mL ตามลำดับ ในขณะที่การทดลองเวลาตกตะกอน 60 min ให้ห้วงค์ประกอบก๊าซมีเทน 57.7%, 54.5% และ 43.9% ที่เวลาทวน 1, 3 และ 5 min ตามลำดับ ซึ่งให้ปริมาณก๊าซมีเทนคิดเป็น 23,080, 23,871 และ 19,316 mL ตามลำดับ



**Figure 1** Comparison of the cumulative biogas and methane production.  
Symbols: column chart, cumulative biogas; line chart, methane percentage

## 2. การเปลี่ยนแปลง TS ในระบบการหมัก

ปริมาณ TS ก่อนและหลังการหมักที่เวลาการตกตะกอน 60 min ดัง Figure 2(a) และเวลาการตกตะกอน 90 min ดัง Figure 2(b) พบว่าการกำจัด TS สูงที่สุด ที่เวลาทวน 5 min เวลาตกตะกอน 90 min โดยปริมาณ TS เริ่มต้นมีค่าเท่ากับ  $159,407 \text{ mg L}^{-1}$  หลังจกดำเนินการหมักเป็นเวลา 20 วัน ลดลงเหลือ  $51,240 \text{ mg L}^{-1}$  คิดเป็น 67.9% ในขณะที่การกำจัด TS ต่ำสุดพบที่เวลาการทวน 1 min เวลาตกตะกอน 90 min ซึ่งมีปริมาณ TS เริ่มต้นในระบบเท่ากับ  $93,000 \text{ mg L}^{-1}$  หลังจกดำเนินการหมักเป็นเวลา 20 วัน ลดลงเหลือ  $40,380 \text{ mg L}^{-1}$  คิดเป็น 56.6% สาเหตุที่ปริมาณ TS ในระบบลดลงเนื่องจากว่าจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบหมักจะย่อยสลายสารอินทรีย์เพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานในการเจริญเติบโต ดังการทดลองการหมักมูลสุกรมีประสิทธิภาพการกำจัด TS ในระบบสูงถึง 84.4% (ชิตชนก, 2011)



## การประชุมวิชาการระดับชาติ IAMBEST ครั้งที่ 3

The 3<sup>rd</sup> National Conference on Informatics, Agriculture, Management,  
Business Administration, Engineering, Science and Technology

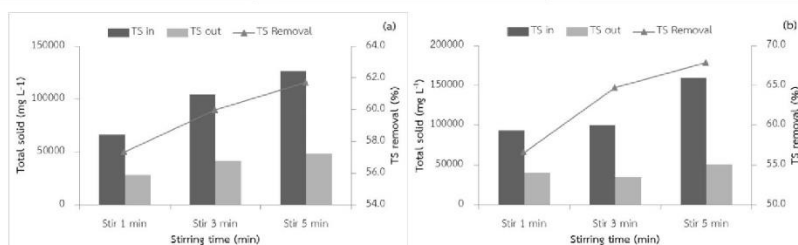


Figure 2 Comparison TS and TS removal of experiments, precipitation time 60 min (a) and precipitation time 90 min (b)

## 3. การเปลี่ยนแปลง VS ในระบบการหมัก

ปริมาณ VS ก่อนและหลังการหมักที่เวลาการตกตะกอน 60 min ดัง Figure 3(a) และเวลาการตกตะกอน 90 min ดัง Figure 3(b) พบว่าการกำจัด VS สูงที่สุด ที่เวลาการกวน 5 min เวลาตกตะกอน 90 min โดยปริมาณ VS เริ่มต้นมีค่าเท่ากับ 105,667 mg L<sup>-1</sup> หลังจากดำเนินการหมักเป็นเวลา 20 วัน ลดลงเหลือ 35,340 mg L<sup>-1</sup> คิดเป็น 66.6% ในขณะที่การกำจัด VS ต่ำสุดพบที่เวลาการกวน 1 min เวลาตกตะกอน 90 min ซึ่งมีปริมาณ VS เริ่มต้นในระบบเท่ากับ 50,833 mg L<sup>-1</sup> หลังจากดำเนินการหมักเป็นเวลา 20 วัน ลดลงเหลือ 25,017 mg L<sup>-1</sup> คิดเป็น 50.8% โดยทั่วไป VS เป็นของแข็งส่วนที่เป็นสารอินทรีย์ ซึ่งในระบบหมักก๊าซชีวภาพจุลินทรีย์จะทำการย่อยสลายให้กลายเป็นก๊าซชีวภาพ ดังการทดลองของ รุ่งทิวา และคณะ (2015) ได้ทำการทดลองการหมักร่วมของมูลสุกรและหญ้าเนเปียร์ ซึ่งพบว่าปริมาณ VS ในระบบถูกใช้ไป 80% (รุ่งทิวา และคณะ, 2015)

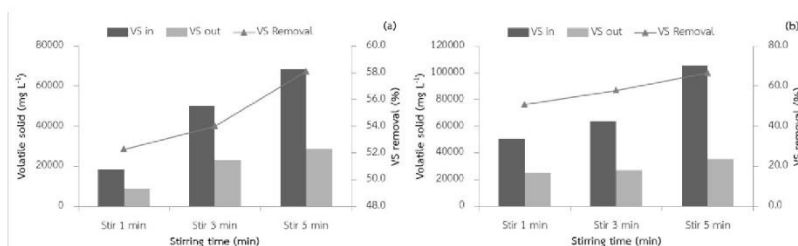


Figure 3 Comparison VS and VS removal of experiments, precipitation time 60 min (a) and precipitation time 90 min (b).



## การประชุมวิชาการระดับชาติ IAMBEST ครั้งที่ 3

The 3<sup>rd</sup> National Conference on Informatics, Agriculture, Management,  
Business Administration, Engineering, Science and Technology



## 4. การเปลี่ยนแปลง COD ในระบบการหมัก

ปริมาณ COD ก่อนและหลังการหมักที่เวลาการตกตะกอน 60 min ดัง Figure 4(a) และเวลาการตกตะกอน 90 min ดัง Figure 4(b) พบว่าการกำจัด COD สูงที่สุด ที่เวลาการกวน 5 min เวลาตกตะกอน 90 min โดยปริมาณ COD เริ่มต้นมีค่าเท่ากับ  $24,381 \text{ mg L}^{-1}$  หลังจากดำเนินการหมักเป็นเวลา 20 วัน ลดลงเหลือ  $9,143 \text{ mg L}^{-1}$  คิดเป็น 62.5% ในขณะที่การกำจัด COD ต่ำสุดพบที่เวลาการกวน 1 min เวลาตกตะกอน 90 min ซึ่งมีปริมาณ COD เริ่มต้นในระบบเท่ากับ  $18,286 \text{ mg L}^{-1}$  หลังจากดำเนินการหมักเป็นเวลา 20 วัน ลดลงเหลือ  $10,159 \text{ mg L}^{-1}$  คิดเป็น 44.4% การลดลงของปริมาณ COD เกิดเนื่องจากสารอินทรีย์ในระบบถูกจุลินทรีย์ย่อยสลายไป แต่ยังคงเหลือสารอินทรีย์ที่จุลินทรีย์ไม่สามารถย่อยสลายได้อยู่ในระบบ ดังการทดลองหมักร่วมระหว่างผักตบชวากับมูลสุกรของ นิลวรรณ และ อัจฉรา (2013) ซึ่งมีปริมาณ COD ลดลงเมื่อทำการหมักก๊าซชีวภาพ โดยสามารถกำจัด COD สูงถึง 90% (นิลวรรณ และ อัจฉรา, 2013)

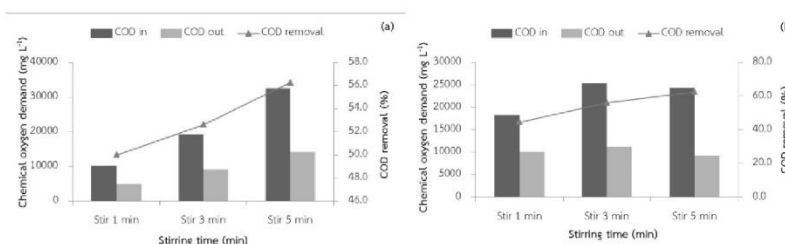


Figure 4 Comparison COD and COD removal of experiments, precipitation time 60 min (a) and precipitation time 90 min (b)

## สรุป

จากการทดลองลดแอมโมเนียในมูลไก่ด้วย  $\text{MgSO}_4$  ความเข้มข้น  $100 \text{ mg L}^{-1}$  โดยศึกษาเวลาการกวนและการตกตะกอน ก่อนนำมูลไก่มาผลิตก๊าซชีวภาพ โดยทำการหมักในระดับห้องปฏิบัติการ ในสภาวะการย่อยสลายแบบไร้อากาศ ปริมาตรการหมัก 15 L อุณหภูมิในการหมัก  $34 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  เวลาการหมัก 20 วัน โดยได้ทดลองที่เวลาการกวนและเวลาตกตะกอนของ  $\text{MgSO}_4$  ที่แตกต่างกัน จากการทดลองพบว่า ที่เวลาการกวน 5 min เวลาตกตะกอน 90 min มีปริมาณก๊าซสะสมสูงสุด ด้วยบันทึกปริมาณก๊าซได้  $44,500 \text{ mL}$  ซึ่งมีปริมาณก๊าซสะสมสูงกว่าการทดลองอื่น ๆ แต่มีองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพน้อยกว่าการทดลองที่เวลาการกวน 3 min เวลาตกตะกอน 90 min ซึ่งมีองค์ประกอบก๊าซมีเทนสูงสุด 62.3% ให้ปริมาณก๊าซมีเทนสูงสุด

### การประชุมวิชาการระดับชาติ IAMBEST ครั้งที่ 3

The 3<sup>rd</sup> National Conference on Informatics, Agriculture, Management,  
Business Administration, Engineering, Science and Technology



คิดเป็น 26,976 mL และจากการวิเคราะห์ TS, VS และ COD ในระบบพบว่า ที่เวลาทวน 5 min ในเวลาดักตะกอน 90 min สามารถกำจัด TS, VS และ COD ได้ดีกว่าการทดลองอื่น ๆ โดยคิดเป็น 67.9%, 66.6% และ 62.5% ตามลำดับ

#### คำขอบคุณ

ทางผู้เขียนขอขอบคุณวิทยาลัยพลังงานทดแทน มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ในการให้ความช่วยเหลือทางด้านทุนสนับสนุนงานวิจัยภายใต้โครงการผลิตและการพัฒนาศักยภาพการศึกษา ด้านพลังงานหมุนเวียนในระดับอาชีวศึกษาสำหรับนักศึกษาในระดับบัณฑิตศึกษา วิทยาลัยพลังงานทดแทนมหาวิทยาลัยแม่โจ้ ปีการศึกษา 2016 และทางผู้เขียนขอขอบคุณสำนักงานวิจัยและส่งเสริมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ประจำปี 2017

#### เอกสารอ้างอิง

- เกื้อกุล บุญยี่. 2009. การผลิตก๊าซชีวภาพจากกระบวนการหมักแบบไร้อากาศโดยใช้น้ำเสียของโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลังแปรรูป. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ชิตชนก คงแดง. 2011. การผลิตก๊าซชีวภาพจากใบยางพาราโดยการหมักร่วมกับมูลสุกรสำหรับใช้ในครัวเรือน. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- นิลวรรณ ไชยหนู และ อัจฉรา จันทร์ผง. 2013. การศึกษาศักยภาพของการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยระบบหมักย่อยร่วมระหว่างผักตบชวากับมูลสุกร. รายงานการวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภาควิชาชีพ เชียงใหม่.
- ปวันรัตน์ บุญอ่อน. 2014. ผลของการเติมมูลไก่และมูลโคต่อประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์ปากช่อง 1 โดยถึงปฏิกรณ์แบบกวนสมบูรณ์. วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- พงศ์รัตดา เผ่าศิริ, วีระศักดิ์ สืบเสาะ และชาญชัยณรงค์ ทรงศาศรี. 2012. การกำจัดแอมโมเนียไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในน้ำเสียฟาร์มสุกรโดยวิธีการตกตะกอนด้วยเกลือแมกนีเซียม. วารสารมหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม; ว.มรม. ปีที่ 6 ฉบับที่ 1 : มกราคม เมษายน 2555: 129 – 137.

## การประชุมวิชาการระดับชาติ IAMBEST ครั้งที่ 3

The 3<sup>rd</sup> National Conference on Informatics, Agriculture, Management,  
Business Administration, Engineering, Science and Technology



- รุ่งทิวา สีม่าปาน, ศรีกาญจนา คล้ายเรือง, ศิราภรณ์ ชื่นบาล และ รุปน ชื่นบาล. 2015. ศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากการหมักร่วมของมูลสุกรและหญ้าเนเปียร์หมัก. การประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 53 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- สิริชัย แยมแบน. 2011. การผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลไก่ไข่ด้วยระบบบ่อหมักรางของ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมพลังงาน, บัณฑิตวิทยาลัย, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- อัญชลี แท่นนิล. 2010. การย่อยร่วมแบบไม่ใช้ออกซิเจนของมูลสุกร ใบปาล์ม และขยะของแข็งชุมชนในถังปฏิกรณ์ร่วม 2 ขั้นตอนและถังปฏิกรณ์เมมเบรน. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต. สาขาวิชาเคมีเทคนิค, คณะวิทยาศาสตร์, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- อานนท์ ดวงพาลี. 2009. การกำจัดแอมโมเนียในกระบวนการไฮโดรไลซิสทางความร้อนของมูลไก่โดยวิธีการตกผลึกsturไวท์. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต. สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- APHA, AWWA and WEF. 1998. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20<sup>st</sup> ed. Maryland: American Public Health Association. Washington D.C. U.S.A.
- Abouelenien, F., Fujiwara, W., Namba, Y., Kosseva, M., Nishio, N. and Nakashimada, Y. 2010. Improved methane fermentation of chicken manure via ammonia removal by biogas recycle. Bioresource Technology 101 6368–6373.
- Jaisin, S., Chanathaworn, J., Nirunsin, R., Sukasem, N., Intanoo, P. and Reansuwan, K. 2017. The effect of magnesium on ammonia reduction in enhancing chicken manure biogas production. International conference on ecomaterials (ICEM13). November 19-23, 2017 KMUTT Knowledge Exchange for Innovation Center (KX), Khlongsan, Bangkok, Thailand.

## ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	นาย สหัชฌา ใจสิน
เกิดเมื่อ	15 สิงหาคม 2535
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2558 วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่
ประวัติการทำงาน	ตำแหน่ง พนักงานควบคุมคุณภาพ บริษัท ซีพีแรม จำกัด สาขาเชียงใหม่

