การศึกษาสภาวะเริ่มต้นที่เหมาะสมของการผลิตแก๊สมีเทนจากสับเตรทร่วมระหว่างมูลแพะกับฟางข้าวโดยกลุ่มจุลินทรีย์ไร้อากาศภายใต้ สภาวะการหมักแบบกะ โดยวิธี Response Surface Methodology

ทวี คำภิลานน

การค้นคว้าอิสระนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม
2557

Study on the initial conditions for the Production of methane gas from co-substrate between goat manure and rice straw by anaerobic microorganisms under batch fermentation with Response Surface Method

Tawee Kampilanon

Case Study Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements
for the Degree of Master of Science Field in
Environmental Technology and Management
Pibulsongkram Rajabhat University
2014

ชื่อเรื่องการค้นคว้าอิสระ	การศึกษาสภาวะเริ่มต้นที่เหมาะสมของการผลิตแก๊สมีเทนจากสับเตรทร่วมระหว่างมูลแพะกับฟางข้าวโดยกลุ่มจุลินทรีย์ไร้อากาศภายใต้สภาวะการหมักแบบกะโดยวิธี Response Surface Methodology
ชื่อนักศึกษา	นายทวี คำภิลานน
สาขาวิชา	เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม
ประธานที่ปรึกษาการค้นคว้าอิสระ	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุขสมาน สังโยคะ
กรรมการ	อาจารย์ ดร.จักรกฤช ศรีละออ

คณะกรรมการบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม อนุมัติให้นับการค้นคว้าอิสระฉบับนี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม

.....ประธานคณะกรรมการบัณฑิตศึกษา
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์วราภรณ์ ชื่อประดิษฐ์กุล)
วันที่.....เดือน.....พ.ศ. 2557

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธันวดี ศรีธาวิรัตน์)

สุขสมาน สังโยคะ .....กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุขสมาน สังโยคะ)

.....กรรมการ
(อาจารย์ ดร.จักรกฤช ศรีละออ)

อรชร ฉิมจารย์ .....กรรมการและเลขานุการ
(อาจารย์ ดร.อรชร ฉิมจารย์)

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม

ชื่อเรื่องการค้นคว้าอิสระ	การศึกษาสภาวะเริ่มต้นที่เหมาะสมของการผลิตแก๊สมีเทนจากสับเตรทร่วมระหว่างมูลแพะและฟางข้าวโดยกลุ่มจุลินทรีย์ไร้อากาศภายใต้สภาวะการหมักแบบกะโดยวิธี Response Surface Methodology
ชื่อนักศึกษา	ทวี คำภิลานน
ประธานที่ปรึกษาการค้นคว้าอิสระ	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุขสมาน สังโยคะ ดร.จักรกฤช ศรีละออ

บทคัดย่อ

งานวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยมีแนวคิดที่จะนำฟางข้าวซึ่งเป็นของวัสดุเหลือทิ้งจากการผลิตข้าวและมูลแพะ มาเป็นวัตถุดิบในการผลิตแก๊สมีเทนภายใต้สภาวะไร้อากาศ ออกแบบการทดลองโดยวิธีการดอบสนองต่อพื้นที่ผิว (response surface methodology; RSM) แบบ Central Composite Design (CCD) เพื่อศึกษาสภาวะเริ่มต้นที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สมีเทนจากฟางข้าวร่วมกับมูลแพะภายใต้กระบวนการหมักแบบกะ ปัจจัยที่ศึกษาประกอบด้วยอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) และค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) จากการศึกษาพบว่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมต่อการผลิดมีเทนเท่ากับ 25.59 และค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7.19 โดยให้ผลได้ของแก๊สมีเทนเท่ากับ 80.68 มิลลิลิตรต่อกรัมซีโอดีที่ลดลง (mL/g-COD-removal)

หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาเทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม
ปีการศึกษา 2556

ลายมือชื่อนักศึกษา.....
ลายมือชื่อประธานที่ปรึกษา.....
ลายมือชื่อกรรมการที่ปรึกษา.....

Title	Study on the proper initial Conditions for the Production of Methane Gas from Co-substrate between Goat Manure and Rice Straw by Anaerobic Microorganisms under Batch Fermentation with Response Surface Method
Author	Mr.Tawee Kanpilanon
Advisors	Asst.Prof.Dr.Suksaman Sangyoka Dr. Chakkit Sreelao

Abstract

The concept of this research is to bring the straw, which is the waste from the production of rice and goat manure used as raw material to produce methane under anaerobic conditions. Experimental design using response surface methodology (RSM) and Central Composite Design (CCD) to assess the optimum conditions for the production of methane from rice straw with goat manure under batch fermentation process. Factors include the ratio of carbon to nitrogen (C/N ratio) and the acidity - alkalinity (pH). The results found that the optimum ratio of carbon to nitrogen in the methane production was 25.59 and pH was 7.19. Yield of methane is equivalent to 80.68 mL/g-COD.

Degree of Master of Science
Field in Technology and Environmental Management
Academic Year 2013

Student's Signature..Tawee Kanpilanon..
Advisor's Signature..Suksaman Sangyoka
Co-Advisor's Signature..Chakkit Sreelao

กิตติกรรมประกาศ

การค้นคว้าอิสระฉบับนี้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยดีเพราะได้รับความกรุณาเป็นอย่างดียิ่งจากผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุขสมาน สังโยคะ และ ดร.จักกฤช ศรีละออ อาจารย์ที่ปรึกษาที่กรุณาให้คำแนะนำตรวจสอบและแก้ไข

ขอขอบพระคุณ คณะเทคโนโลยีการเกษตรและอาหาร มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้สถานที่ทำการทดลองวิจัย ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ภาควิชาเทคโนชีวภาพ คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่นที่ช่วยวิเคราะห์ข้อมูลในการวิจัย และฟาร์มเส้นทางเห็ด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการช่วยเหลือวัสดุ ศึกษาวิจัย

คุณค่าและประโยชน์อันพึงมีจากการค้นคว้าอิสระฉบับนี้ขอมอบเป็นกตเวทิตาคุณแด่นายประครอง – นางสังวาล คำภิลานน ผู้เป็นบิดา-มารดา รวมถึงครู อาจารย์ และท่านผู้มีพระคุณที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจแก่ผู้วิจัยด้วยดีตลอดมา ขอน้อมคารวะแด่ผู้เขียนตำราวิชาการที่ได้ใช้ศึกษาค้นคว้าอ้างอิงทุกท่าน

ทวี คำภิลานน

สารบัญ

หน้า

บทคัดย่อภาษาไทย..... ฆ
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ..... ง
กิตติกรรมประกาศ..... จ
สารบัญ..... ฉ
สารบัญตาราง..... ฌ
สารบัญภาพ..... ญ

บทที่

1 บทนำ..... 1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา..... 1
จุดมุ่งหมายของการวิจัย..... 2
สมมุติฐานของการวิจัย..... 2
ขอบเขตของงานวิจัย..... 2
นิยามศัพท์เฉพาะ..... 2
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ..... 3

2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 4
ฟางข้าว..... 4
องค์ประกอบของฟางข้าว..... 4
การใช้ประโยชน์จากฟางข้าว..... 5
กระบวนการจัดการฟางข้าวหลังการเก็บเกี่ยวของเกษตรกร..... 6
พื้นที่ปลูกข้าวนาปีของประเทศไทย..... 7
พื้นที่ที่มีการผลิตฟางข้าวในประเทศไทย..... 12
แพะ..... 13

สารบัญ (ต่อ)

บทที่		หน้า
	กายวิภาคศาสตร์ของแพะ	13
	ระบบทางเดินอาหารของแพะ	14
	มูลแพะ	14
	การใช้ประโยชน์จากมูลแพะ	15
	แนวทางการใช้มูลสัตว์เพื่อปรับปรุงบำรุงดิน	15
	เกษตรกรผู้เลี้ยงแพะในประเทศไทย	17
	แก๊สมีเทน	17
	กระบวนการหมักแบบไม่ใช้อากาศ (Anaerobic digestion)	17
	ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตแก๊สมีเทน	18
	วิธีตอบสนองต่อพื้นที่ผิว	21
	หลักการวิธีตอบสนองต่อพื้นที่ผิว	21
	ขั้นตอนของวิธีดอบสนองต่อพื้นที่ผิว	22
	แผนการทดลองแบบ Central Composite Design	22
3	**วิธีการดำเนินการวิจัยและเก็บข้อมูล**	24
	วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี	24
	วิธีการทดลอง	25
	การวิเคราะห์ผลการทดลอง	27
	สถานที่ทำการวิจัย	29
4	**ผลการทดลอง**	30
	ผลของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N)	30
	และค่าความเป็นกรด – ด่าง (pH) ต่อการผลิตแก๊สมีเทน	
	การทดลองซ้ำ (Confirmation Experiment)	33
5	**สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ**	35
	สรุปผล	35

สารบัญ (ต่อ)

บทที่ **หน้า**

อภิปรายผล..... 35
ข้อเสนอแนะ..... 36
บรรณานุกรม..... 37

ภาคผนวก..... 40
ภาคผนวก ก..... 41

ประวัติผู้วิจัย..... 47

สารบัญตาราง

ตาราง หน้า

1 ข้อมูลพื้นที่ ผลผลิต ข้าวพื้นที่เพาะปลูกข้าวนาปี พ.ศ 2556 รายจังหวัด..... 8
2 ปริมาณธาตุอาหารเฉลี่ยในมูลสัตว์แห้งชนิดต่างๆ..... 16
3 ตำแหน่งของการออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Design..... 23
4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง..... 24
5 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง..... 24
6 สภาวะที่ใช้ในการออกแบบการทดลองโดยวิธีการสอบสนองต่อพื้นที่ผิวแบบ Central Composite Design..... 26
7 ชุดการทดลองที่ออกแบบการทดลองโดย Central Composite Design..... 26
8 สภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สโดยวิธี gas chromatography... 28
9 ปริมาณผลได้ของไบโอแก๊สและแก๊สมีเทนในแต่ละชุดการทดลอง..... 30
10 แบบจำลองพิสูจน์ค่าความเชื่อมั่นของการออกแบบการทดลอง..... 31
11 แสดงปริมาณผลได้ของแก๊สมีเทนในสภาวะต่างๆ..... 34

สารบัญภาพ

ภาพ หน้า

1 โครงสร้างหลักของฟางข้าว..... 4
2 องค์ประกอบของฟางข้าว..... 5
3 การเผาฟาง..... 7
4 ปริมาณฟางข้าวในประเทศไทย (นาปี)..... 12
5 กายภาพของแพะ..... 14
6 มูลแพะ..... 15
7 ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียในสภาวะไร้อากาศ..... 18
8 โครงสร้างพื้นที่การตอบสนองของปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตแก๊สมีเทน..... 32
9 ปริมาณไบโอแก๊สแต่ละการทดลอง..... 33

บทที่ 1
บทนำ

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีการทำอาชีพเกษตรกรรมส่วนใหญ่ โดยเฉพาะการปลูกข้าว ซึ่งเป็นพืชหลักทางเศรษฐกิจที่ทำรายได้ให้แก่ประเทศไทยโดยการส่งออก ประเภทของการผลิตข้าวในประเทศไทยมีอยู่ 2 ประเภทหลัก ๆ คือ การผลิตข้าวนาปี และการผลิตข้าวนาปรัง ซึ่งจะมีข้อแตกต่างกันคือ การผลิตข้าวนาปีจะทำการผลิตในฤดูฝนเนื่องจากต้องใช้น้ำที่ได้จากฝนเป็นหลัก ส่วนข้าวนาปรังจะใช้น้ำจากระบบชลประทาน หรือบ่อน้ำบาดาล เมื่อถึงฤดูกาลเก็บเกี่ยวผลผลิตที่ได้จากการผลิตข้าว ได้แก่ ข้าวเปลือก และฟางข้าว ข้าวเปลือกจะถูกนำไปสีเป็นข้าวสาร ส่วนฟางข้าวจะถูกนำไปใช้ประโยชน์ในด้านการทำปุ๋ยหมัก อาหารสัตว์ แต่อย่างไรก็ตามยังคงมีฟางข้าวเหลือทิ้งที่ไม่ได้ถูกนำไปใช้ประโยชน์อีกจำนวนมาก ซึ่งเกษตรกรผู้ผลิตข้าวส่วนใหญ่จะทำการกำจัดฟางข้าวเหลือทิ้งโดยการเผา ทำให้เกิดมลภาวะทางอากาศ นอกจากนั้นผลกระทบที่ตามมายังทำให้เกิดการสูญเสียอินทรียวัตถุในดินรวมทั้งจุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ย่อยสลายอินทรียวัตถุอีกด้วยอีกด้วย

จากข้อมูลสารสนเทศและสถิติของกรมปศุสัตว์ พบว่า ในปัจจุบันมีการเพิ่มจำนวนของสัตว์เศรษฐกิจสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากจำนวนประชากรที่เพิ่มขึ้นและความต้องการบริโภคผลิตภัณฑ์จากสัตว์ที่มากขึ้น แพะจัดเป็นสัตว์เศรษฐกิจชนิดหนึ่งที่มีการเลี้ยงเป็นอาชีพหลักเพิ่มมากขึ้น ซึ่งในสมัยก่อนนิยมเลี้ยงในภาคใต้ของประเทศไทยเท่านั้น ในปี 2555 เกษตรกรที่ประกอบอาชีพเลี้ยงแพะมีจำนวนมากถึง 46,464 ราย ซึ่งมีจำนวนแพะทั้งหมด 491,779 ตัว (กลุ่มสารสนเทศและข้อมูลสถิติ ศูนย์สารสนเทศ กรมปศุสัตว์, 2555) ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเลี้ยงแพะ ได้แก่ เนื้อแพะ และนม นอกจากนั้นยังมีมูลแพะซึ่งเป็นของเสียที่เกิดขึ้น ซึ่งสามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการทำปุ๋ยคอกหรือปุ๋ยหมักได้ แต่ในปัจจุบันมีการนำไปใช้ประโยชน์น้อยมาก จึงยังมีมูลแพะที่ไม่ได้นำไปใช้ประโยชน์อีกจำนวนมาก

ปัจจุบันประเทศไทยมีการส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนเพิ่มมากขึ้น เพื่อลดภาระการนำเข้าพลังงานจากต่างประเทศ การผลิตแก๊สมีเทนไว้ใช้ภายในครัวเรือนหรือใช้ในอุตสาหกรรมจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งซึ่งสามารถผลิตได้ เนื่องจากประเทศไทยมีศักยภาพสูงในส่วนของวัตถุดิบการผลิตแก๊สมีเทน โดยแก๊สมีเทนสามารถนำไปใช้เป็นพลังงานได้หลากหลายรูปแบบ เช่น เป็นเชื้อเพลิงเครื่องยนต์ ต้มน้ำผลิตกระแสไฟฟ้า และใช้ในการทำอาหารในครัวเรือน ฯลฯ

จากที่กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะนำฟางข้าวซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการผลิตข้าวและมูลแพะ มาใช้ประโยชน์ในด้านการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตแก๊สมีเทนจากกระบวนการหมักในสภาพไร้อากาศ เนื่องจากฟางข้าวและมูลแพะมีธาตุคาร์บอน และไนโตรเจน

เป็นองค์ประกอบซึ่งเป็นธาตุอาหารที่จำเป็นในกระบวนการย่อยสลายของจุลินทรีย์แบบไร้อากาศ นอกจากนั้นในมูลแพะยังประกอบด้วยจุลินทรีย์ที่จะใช้เป็นเชื้อดั้งต้นในการผลิตแก๊สมีเทน ซึ่งจะทำให้ได้พลังงานจากของเสียเหลือทิ้งและเป็นการลดปริมาณของเสียในสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

1.2 จุดมุ่งหมายของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาสภาวะเริ่มต้นที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สมีเทนจากฟางข้าวร่วมกับมูลแพะ
2. เพื่อเป็นการใช้ประโยชน์ทางด้านพลังงานจากของเหลือทิ้ง และเป็นการลดปริมาณของเสียสู่สิ่งแวดล้อม

1.3 สมมุติฐานการวิจัย

ค่าของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน และค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นที่เหมาะสมในกระบวนการหมักภายใต้สภาวะไร้อากาศจะทำให้ได้ผลได้และปริมาตรของแก๊สมีเทนสูงสุด

1.4 ขอบเขตการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงทดลองและได้กำหนดขอบเขตการวิจัยดังนี้

1. ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลอง

ในการวิจัยนี้ผู้วิจัยได้ใช้มูลแพะจากฟาร์มเส้นทางเห็ด 193 หมู่ 11 ตำบลท่าโพธิ์ อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก และฟางข้าวเหลือทิ้งภายในเขตจังหวัดพิษณุโลก

2. ขอบเขตตัวแปรที่ศึกษา

ตัวแปรอิสระ (Independent Variable) คือ ปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลต่อการผลิตแก๊สมีเทนจากฟางข้าวร่วมกับมูลแพะ ได้แก่ อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน ค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น

ตัวแปรตาม (Dependent Variable) คือ ปริมาตรของแก๊สมีเทน และผลได้ของแก๊สมีเทน

ระยะเวลาที่ทำการวิจัยและวิเคราะห์ข้อมูล อยู่ในช่วงเดือนกุมภาพันธ์ พ.ศ. 2557 ถึงเดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2557

1.5 นิยามศัพท์

แก๊สมีเทน คือ แก๊สที่เกิดจากกระบวนการย่อยสลายอินทรียวัตถุด้วยจุลินทรีย์ในสภาวะที่ไร้อากาศ

ฟางข้าว คือ ต้นข้าวแห้งที่นวดเอาเมล็ดออกแล้ว

การหมักแบบไร้อากาศ คือ การย่อยอินทรียวัตถุด้วยจุลินทรีย์ในสภาวะที่ไม่ใช้ออกซิเจน

มูลแพะ คือ ของเสียและอาหารที่เหลือจากกระบวนการย่อยซึ่งถูกขับถ่ายออก

1.6 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

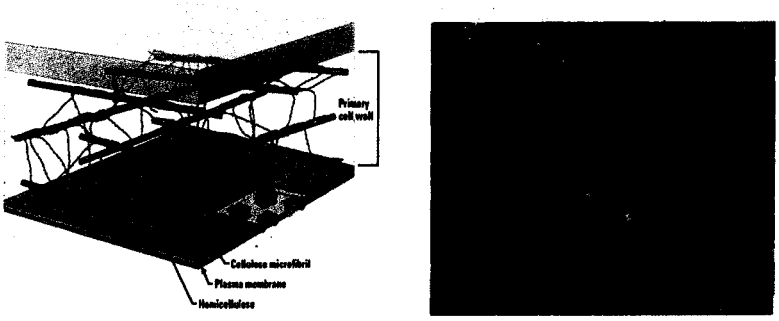
1. ทราบสภาวะเริ่มต้นที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สมีเทนจากการหมักร่วมระหว่างมูลแพะ และฟางข้าว
2. ใช้ประโยชน์ด้านพลังงานจากวัสดุเหลือทิ้งภาคการเกษตร

บทที่ 2
เอกสารที่เกี่ยวข้อง

2.1 ฟางข้าว

ฟางข้าวคือ ลำต้นแห้งของข้าวซึ่งเป็นผลพลอยได้อย่างหนึ่งที่ได้หลังการเก็บเกี่ยวข้าว ทั้งประเทศมีฟางข้าวประมาณ 23.35 ล้านตันในแต่ละปี โดยเฉลี่ยการทำนาในประเทศหนึ่งไร่ ให้ผลผลิตทั้งหมดของส่วนที่อยู่เหนือดินประมาณ 805 กิโลกรัม เป็นข้าวเปลือกประมาณ 320 กิโลกรัม และฟางข้าวประมาณ 485 กิโลกรัม
(บรูต ลินคิส และเพง เชังชื้อ, 2548)

ฟางข้าวมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเฉลี่ย 99 : 1 ในฟางข้าว 485 กิโลกรัมที่ได้ในหนึ่งไร่จะมีธาตุไนโตรเจน 2.3 กิโลกรัม ฟอสฟอรัส 0.3 กิโลกรัม และโพแทสเซียม 5.7 กิโลกรัม ซึ่งธาตุเหล่านี้มีความสำคัญต่อความอุดมสมบูรณ์ของดินในด้านธาตุอาหารของพืช
(บรูต ลินคิส และเพง เชังชื้อ, 2548)

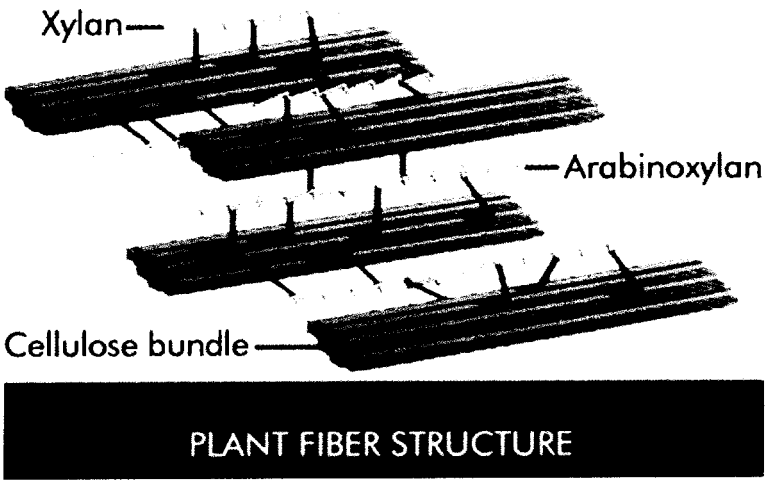


ภาพ 1 โครงสร้างหลักของฟางข้าว

(**ที่มา:** www.ldd.go.th.)

2.2 องค์ประกอบของฟางข้าว

องค์ประกอบของฟางข้าวส่วนใหญ่ประกอบไปด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งมีลักษณะโครงสร้างดังภาพ 2



ภาพ 2 องค์ประกอบของฟางข้าว

(**ที่มา:** www.ldd.go.th.)

2.3 การใช้ประโยชน์จากฟางข้าว

2.3.1 ประโยชน์จากฟางข้าวที่มีต่อการปรับสภาพดิน ฟางข้าวเป็นอินทรียวัตถุอย่างหนึ่งที่ได้มาหลังการเก็บเกี่ยวข้าว ซึ่งอาจจะมีประโยชน์ต่อการปรับปรุงดินหลายประการดังนี้

การปรับปรุงสมบัติทางกายภาพของดิน ฟางข้าวทำให้ดินโปร่งร่วนซุย เพราะอินทรียวัตถุที่ได้จากการย่อยสลายของฟางข้าว จะเข้าไปแทรกอยู่ตามช่องว่างของดินไว้ ทำให้เกิดโครงสร้างของดินที่สามารถดูดซับน้ำได้ ซึ่งง่ายต่อการเตรียมดินในการปักดำ และทำให้รากพืชเจริญเติบโตแพร่กระจายในดินได้มากขึ้นดินมีการระบายอากาศมากขึ้นการซึมผ่านของน้ำและการอุ้มน้ำของดินดีขึ้น (คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2548)

การปรับปรุงสมบัติทางเคมีของดิน เมื่อฟางข้าวย่อยสลายจะปลดปล่อยให้ธาตุอาหารพืชแก่ดินโดยตรง ถึงแม้จะมีปริมาณธาตุอาหารน้อยกว่าปุ๋ยเคมีแต่จะมีทั้งธาตุอาหารหลักและธาตุอาหารรอง ซึ่งจะค่อยๆ ปลดปล่อยให้เป็นประโยชน์ต่อพืชในระยะยาวช่วยดูดยึดธาตุอาหาร จากการใส่ปุ๋ยเคมีไม่ให้สูญเสียไปจากดินโดยง่าย ซึ่งพืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพและลดปริมาณการใช้ปุ๋ยเคมี

การปรับปรุงสมบัติทางชีวภาพของดิน ฟางข้าวช่วยทำให้ดินมีปริมาณอินทรียวัตถุเพิ่มขึ้นอินทรียวัตถุที่เพิ่มขึ้นเป็นแหล่งอาหาร และพลังงานของจุลินทรีย์ในดินทำให้ปริมาณและกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนธาตุอาหารในดิน ให้อยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ต่อพืชเพิ่มขึ้น (ยงยุทธ โอสถสภา, อรรถศิษฐ์ วงศ์มณีโรจน์ และชวลิต ฮงประยูร, 2551)

2.3.2 ประโยชน์จากฟางข้าวเป็นพลังงานทดแทน ฟางข้าวมีศักยภาพเพียงพอที่จะนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทนได้ด้วยการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงของหม้อต้มน้ำในโรงงานอุตสาหกรรม นำไปผลิตเป็นกระแสไฟฟ้าเป็นต้น วิธีการนี้มีการปฏิบัติกันน้อยมากในประเทศไทย เพราะอาศัยพลังงานไฟฟ้าจากแก๊สและฟอสซิลเป็นหลัก การจัดการฟางข้าวแบบนี้เป็นการเพิ่มมูลค่าเศรษฐกิจของฟางข้าวให้สูงขึ้น และนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทนพลังงานฟอสซิลที่นับวันจะหมดไปทุกที แต่ทว่าฟางข้าวเป็นชีวมวลที่ให้ความร้อนต่ำยุ่งยากในการเก็บรวบรวม และมีค่าใช้จ่ายในการขนส่งสูง นอกจากนี้แล้วการผลิตพลังงานทดแทนต้องใช้ฟางข้าวปริมาณมาก เมื่อนำฟางข้าวออกไปจากพื้นที่นาจะทำให้ธาตุอาหารที่มีอยู่ถูกนำออกไปด้วย

2.3.3 ประโยชน์จากฟางข้าวในการทำปุ๋ยหมัก วิธีนี้เป็นการนำฟางข้าวหมักร่วมกับมูลสัตว์ปุ๋ยเคมีหรือจุลินทรีย์ เมื่อหมักแล้วฟางข้าวจะเปลี่ยนสภาพจากเดิมเป็นผงเปื่อยยุ่ยสีน้ำตาลปนดำ สามารถนำไปใช้ได้เลย แต่วิธีการนี้เกษตรกรปฏิบัติกันน้อยมาก เพราะเกษตรกรเห็นว่ายุ่งยากในการปฏิบัติต้องใช้ทั้งค่าใช้จ่าย เวลา และแรงงาน ในการจัดการนอกจากนั้นเกษตรกรยังขาดความรู้ความเข้าใจ การหมักจะทำให้ปริมาณธาตุอาหารพืชเพิ่มสูงขึ้นสามารถนำมาใช้ได้ง่าย เนื่องจากฟางข้าวจะมีขนาดเล็กลงและความเป็นประโยชน์ต่อพืชจะมากกว่าฟางข้าวที่ไม่ได้หมัก

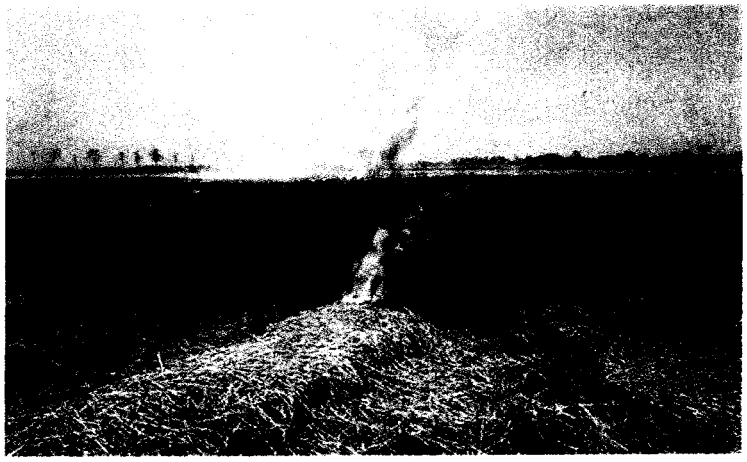
2.4 กระบวนการจัดการฟางข้าวหลังการเก็บเกี่ยวของเกษตรกร

หลังจากเกษตรกรเก็บเกี่ยวข้าวแล้ว สิ่งที่เหลือทิ้งไว้ในทุ่งนา คือฟางข้าวซึ่งเกษตรกรจะเลือกใช้วิธีจัดการที่แตกต่างกันออกไปแล้วแต่ความถนัดและความเหมาะสมวิธีการต่างๆ ที่นิยมใช้กันมีดังต่อไปนี้

2.4.1 การปล่อยทิ้งไว้ในทุ่งนา วิธีนี้เป็นวิธีดั้งเดิมที่เกษตรกรนิยมใช้กันทั่วไปในพื้นที่ปลูกข้าวนาปี โดยปล่อยฟางทิ้งไว้ในทุ่งนาให้เกิดการย่อยสลายตามธรรมชาติ ปัจจุบันเกษตรกรประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์เลือกใช้วิธีการดังกล่าว โดยเฉพาะในพื้นที่ทำนาปีที่มีการปลูกข้าวเพียงครั้งเดียวต่อปี เนื่องจากเป็นวิธีการที่ง่ายเสียค่าใช้จ่ายต่ำใช้แรงงานและเวลาในการจัดการน้อย แต่ว่าปริมาณธาตุอาหารที่จะสะสมในดินอาจมีน้อย เนื่องจากการทิ้งฟางข้าวไว้นานจนกว่าจะถึงฤดูทำนาอาจทำให้ปริมาณของฟางข้าวลดลง และธาตุอาหารสูญเสียไป เช่น ไนโตรเจน

2.4.2 การนำไปเลี้ยงสัตว์ การนำฟางข้าวไปเลี้ยงสัตว์เป็นวิธีการที่เกษตรกรใช้กันมานาน และในปัจจุบันเกษตรกรจำนวนหนึ่งก็จะขายฟางข้าวให้กับเกษตรกรผู้เลี้ยงสัตว์ เพราะเกษตรกรเริ่มมีการนำเครื่องจักรนวดข้าวมาใช้ มีการอัดฟางเป็นก้อนทำให้มีความสะดวกยิ่งขึ้นในการขนย้าย และเก็บรักษาพร้อมทั้งความต้องการใช้ประโยชน์ของฟางข้าว นับวันสูงขึ้นซึ่งมีเกษตรประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์เลือกใช้วิธีการทั้งสองนี้วิธี ทำให้เกษตรกรมีรายรับเพิ่มขึ้นจากการขายฟางข้าว ซึ่งเป็นการเพิ่มมูลค่าของฟางข้าวให้เกษตรกร แต่วิธีนี้อาจทำให้ดินสูญเสียความอุดมสมบูรณ์ไปเรื่อยๆ ถ้ามีการขนย้ายฟางข้าวออกจากทุ่งนาอย่างต่อเนื่องกันในแต่ละปี

2.4.3 การเผาฟางข้าวหลังการเก็บเกี่ยว วิธีนี้นิยมใช้กันเฉพาะในพื้นที่ทำนาเขตชลประทาน ซึ่งมีการปลูกข้าวสองครั้งต่อปี เกษตรกรประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์จะเผาฟางข้าวหลังการเก็บเกี่ยวข้าวนาปี (ภาพ 3) เพื่อเตรียมพื้นที่เพาะปลูกข้าวนาปรังต่อไป เพราะการเผาฟางข้าวทำให้การเตรียมพื้นที่เพาะปลูกสะดวกขึ้นโดยมีค่าใช้จ่ายเพียงเล็กน้อยในการจัดการฟางข้าว นอกจากนั้นยังช่วยทำลายวงจรชีวิตของแมลงศัตรูพืช และเชื้อโรคที่มีการระบาดในพื้นที่ได้แต่ว่าการเผาฟางข้าวก็อาจทำลายสิ่งมีชีวิตที่เป็นประโยชน์ที่อยู่ในดิน โครงสร้างของดินถูกทำลาย ดินสูญเสียธาตุอาหาร เช่น คาร์บอนและไนโตรเจนจะกลายเป็นก๊าซ สูญเสียไปในบรรยากาศ และยังเป็นมลพิษอีกด้วยโดยเฉพาะก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมจะแปรสภาพเป็นรูปขี้เถ้าที่สูญเสียไปกับลมได้ง่าย (วิจิตรา ยงยุทธอำไพ, 2554)



ภาพ 3 การเผาฟางข้าว

2.4.4 การไถกลบฟางข้าวหลังการเก็บเกี่ยว วิธีนี้เป็นการไถกลบฟางข้าวที่มีอยู่ในนาภายหลังการเก็บเกี่ยวผลผลิตลงไปในดิน ในขณะที่ดินยังมีความชื้น และปล่อยทิ้งไว้เพื่อให้เกิดการย่อยสลายในดิน ซึ่งจะกลายเป็นแหล่งอินทรียวัตถุและธาตุอาหารพืชให้กับดิน หลังจากนั้นจึงปลูกพืชผลตามที่ต้องการต่อไป วิธีการนี้เกษตรกรนิยมปฏิบัติกันในพื้นที่ทำนาปีกล่าวคือหลังเก็บเกี่ยวข้าวแล้วจะมีเกษตรกรประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ที่ทิ้งฟางข้าวไว้ในทุ่งนา โดยเฉพาะตอซังข้าว เมื่อเข้าสู่ต้นฤดูฝนประมาณปลายเดือนเมษายนหรือต้นเดือนพฤษภาคม เกษตรกรจะเตรียมดินครั้งที่หนึ่ง เรียกว่าไถดะ แล้วปล่อยน้ำเข้านาให้ท่วมวัสดุหมักทิ้งไว้เพื่อให้ตอซังและฟางข้าวเกิดการย่อยสลาย แล้วจึงไถครั้งที่สอง เรียกว่าไถแปร หลังจากนั้นจึงปลูกพืชหลักต่อไป

2.5 พื้นที่ปลูกข้าวนาปีของประเทศไทย

ประเทศไทยเป็นประเทศที่สามารถปลูกข้าวนาปีได้ทุกภาค โดยแต่ละภาคจะมีพื้นที่ในการปลูกข้าวที่แตกต่างกัน รวมทั้งผลผลิตที่ต่างกันด้วยดังตารางแสดงข้อมูลพื้นที่ ผลผลิตข้าว

พื้นที่เพาะปลูกข้าวนาปี ประจำปี 2556 โดยเรียงลำดับจากพื้นที่ปลูกข้าวมากที่สุดลงไปถึงพื้นที่เพาะปลูกน้อยที่สุด (ตาราง 1)

ตาราง 1 ข้อมูลพื้นที่ ผลผลิต ข้าวพื้นที่เพาะปลูกข้าวนาปี พ.ศ 2556 รายจังหวัด

ลำดับ	จังหวัด	พื้นที่เพาะปลูก(ไร่)	ปริมาณผลผลิต (ตัน)	ผลผลิต/ไร่/ปี (กก.)
1	อุบลราชธานี	4,306,121	1,412,859	328
2	นครราชสีมา	3,899,650	1,437,656	369
3	สุรินทร์	3,251,286	1,151,467	354
4	ร้อยเอ็ด	3,114,156	1,027,582	330
5	ศรีสะเกษ	3,107,594	1,189,218	383
6	บุรีรัมย์	3,070,612	1,110,493	362
7	ขอนแก่น	2,553,748	787,184	308
8	อุทัยธานี	2,524,926	1,226,934	486
9	นครสวรรค์	2,524,926	1,226,934	486
10	มหาสารคาม	2,229,544	771,949	346
11	อุดรธานี	2,110,614	788,040	373
12	สกลนคร	1,849,794	615,109	333
13	พิจิตร	1,774,862	919,310	518
14	พิษณุโลก	1,767,828	939,714	532
15	ชัยภูมิ	1,687,321	488,758	290
16	กาฬสินธุ์	1,471,856	514,536	350
17	นครพนม	1,405,595	436,448	311
18	กำแพงเพชร	1,393,927	732,570	526

ตาราง 1 (ต่อ)

ลำดับ	จังหวัด	พื้นที่เพาะปลูก(ไร่)	ปริมาณผลผลิต (ตัน)	ผลผลิต/ไร่/ปี (กก.)
19	เชียงราย	1,351,955	746,322	552
20	สุพรรณบุรี	1,299,266	914,683	704
21	ยโสธร	1,282,735	452,342	353
22	สุโขทัย	1,168,483	590,197	505
23	เพชรบูรณ์	1,157,699	602,731	521
24	อำนาจเจริญ	1,026,280	335,199	327
25	พระนครศรีอยุธยา	942,967	569,552	604
26	หนองบัวลำภู	928,063	339,976	366
27	สระแก้ว	822,890	296,833	361
28	ชัยนาท	785,932	525,003	668
29	ลพบุรี	759,400	400,204	527
30	ฉะเชิงเทรา	728,736	414,661	569
31	พะเยา	694,418	370,309	533
32	อุตรดิตถ์	665,910	412,613	620
33	หนองคาย	554,627	166,000	299
34	เชียงใหม่	496,788	304,080	612
35	มุกดาหาร	493,117	175,302	355
36	ปราจีนบุรี	467,232	185,847	398
37	ลำปาง	438,481	238,327	544
38	นครนายก	435,264	214,150	492
39	กาญจนบุรี	418,226	252,190	603

ตาราง 1 (ต่อ)

ลำดับ	จังหวัด	พื้นที่เพาะปลูก(ไร่)	ปริมาณผลผลิต (ตัน)	ผลผลิต/ไร่/ปี (กก.)
40	เลย	414,482	157,689	380
41	นครปฐม	405,717	277,510	684
42	สระบุรี	396,663	207,851	524
43	อ่างทอง	342,308	217,366	635
44	ราชบุรี	338,928	227,421	671
45	สิงห์บุรี	325,374	216,374	665
46	ปทุมธานี	315,886	209,432	663
47	นครศรีธรรมราช	315,400	117,339	372
48	เพชรบุรี	312,373	215,537	690
49	แพร่	299,204	184,798	618
50	ตาก	287,496	128,803	448
51	น่าน	261,051	140,929	540
52	สงขลา	226,664	105,155	464
53	พัทลุง	148,892	61,936	416
54	แม่ฮ่องสอน	143,925	69,020	480
55	ลำพูน	120,500	67,866	563
56	นนทบุรี	117,100	83,258	711
57	ปัตตานี	113,379	48,753	430
58	กรุงเทพมหานคร	105,708	57,294	542
59	ชลบุรี	87,639	38,298	437
60	นราธิวาส	69,554	27,682	398

ตาราง 1 (ต่อ)

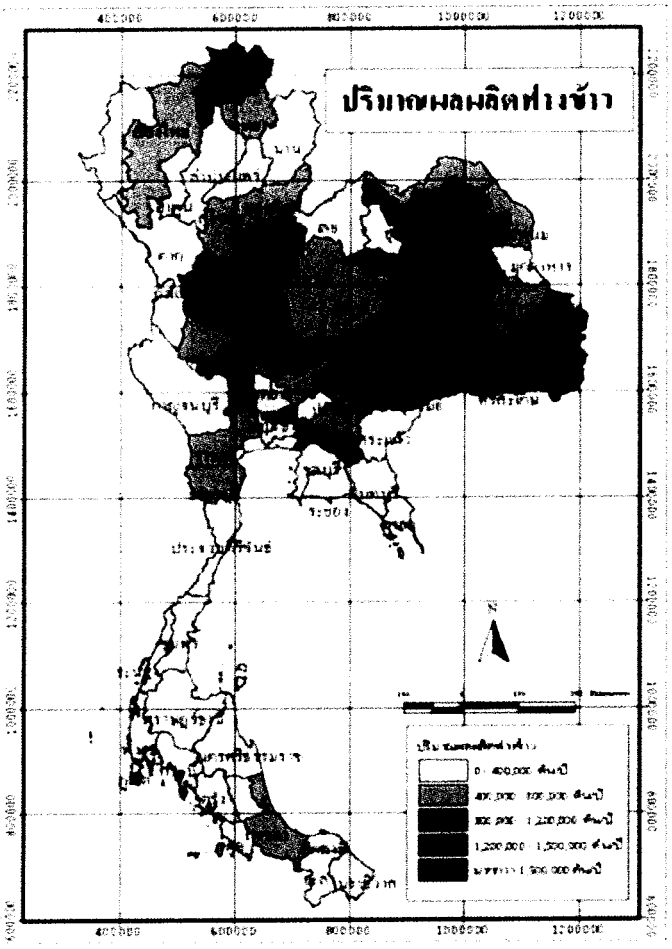
ลำดับ	จังหวัด	พื้นที่เพาะปลูก(ไร่)	ปริมาณผลผลิต (ตัน)	ผลผลิต/ไร่/ปี (กก.)
61	ยะลา	48,236	17,365	360
62	ประจวบคีรีขันธ์	47,317	22,807	482
63	สมุทรปราการ	38,447	28,412	739
64	สตูล	36,618	14,940	408
65	จันทบุรี	26,808	9,168	342
66	ระยอง	23,005	9,524	414
67	ตราด	22,550	9,155	406
68	ตรัง	15,693	6,450	411
69	สมุทรสาคร	13,938	8,990	645
70	สุราษฎร์ธานี	7,222	2,687	372
71	ชุมพร	5,977	2,391	400
72	กระบี่	3,547	1,241	350
73	สมุทรสงคราม	3,216	2,354	732
74	พังงา	1,666	528	317
75	ระนอง	628	199	317
76	ภูเก็ต	64	37	578
	รวม	**66,406,004**	**28,279,841**	

(**ที่มา:** สำนักส่งเสริมการค้าสินค้าเกษตรกรมการค้าภายใน กระทรวงพาณิชย์, 2556)

จากตารางดังกล่าวพบว่าพื้นที่ที่มีการเพาะปลูกมากที่สุด คือจังหวัดอุบลราชธานี จำนวน 4,306,121 ไร่ และน้อยที่สุด คือจังหวัดภูเก็ต จำนวน 64 ไร่ จังหวัดที่มีผลผลิตต่อไร่มากที่สุด คือจังหวัดสมุทรปราการผลผลิตเฉลี่ย 739 กิโลกรัม/ไร่/ปี

2.6 พื้นที่ที่มีการผลิตฟางข้าวในประเทศไทย

ผลของการปลูกข้าวในประเทศไทยซึ่งมีส่วนเหลือทิ้งได้แก่ฟางข้าวโดยมีฟางข้าวเฉลี่ยต่อปีสูงถึง 80 ล้านตันต่อปีซึ่งรวมทั้งการปลูกข้าวนาปีและนาปรัง โดยพื้นที่ที่มีการผลิตฟางข้าวมากอยู่ที่จังหวัดพิษณุโลก พิจิตร นครสวรรค์ สุพรรณบุรี อ่างทอง อุบลราชธานี และสุรินทร์ เฉลี่ยมีปริมาณฟางข้าวสูงกว่า1.5 ล้านตันต่อปีเมื่อเทียบต่อหน่วยพื้นที่พบว่าภาคกลางมีปริมาณฟางข้าวเฉลี่ยสูงสุด



ภาพ 4 ปริมาณฟางข้าวในประเทศไทย (นาปี)

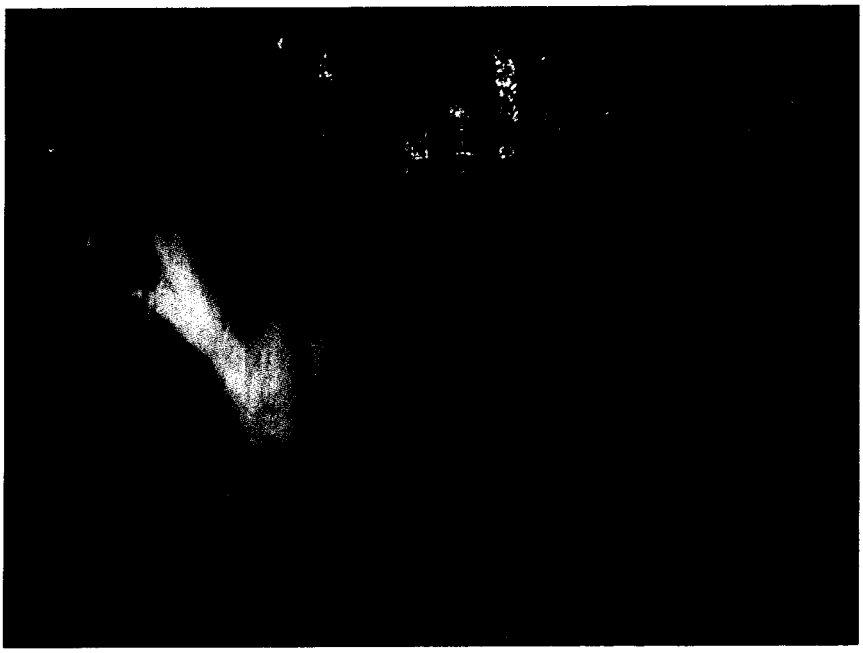
(**ที่มา:** www.dede.go.th/dede/index.php?option=com.)

2.7 แพะ

กายวิภาคศาสตร์ของแพะ

แพะเป็นสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมจัดอยู่ในกลุ่มสัตว์เคี้ยวเอื้อง เช่นเดียวกับโคกระบือ แต่จะมีขนาดเล็กโดยมีขนาดน้ำหนักตัวประมาณ 35-65 กิโลกรัม และมีความสูงเฉลี่ย 55-100 เซนติเมตร ซึ่งขนาดตัวจะแปรผันไปตามแต่ เพศ พันธุ์ สิ่งแวดล้อม ปัจจัยด้านสุขภาพสัตว์ และคุณภาพของอาหารที่แพะได้รับ โดยปกติแพะตัวเมียนั้นจะมีขนาดตัวเล็กกว่าตัวผู้ หรือพันธุ์แท้ส่วนใหญ่จะมีขนาดใหญ่กว่าพันธุ์ลูกผสมหรือพันธุ์พื้นเมือง ซึ่งแพะพันธุ์แท้ในแถบประเทศเขตหนาว และเขตอบอุ่นส่วนใหญ่จะมีขนาดใหญ่มาก โดยแพะตัวผู้ที่โตเต็มที่บางตัวอาจหนักได้ถึง 80-120 กิโลกรัม และด้านความสูงอาจมีมากถึง 100-130 เซนติเมตร ซึ่งถือเป็นลักษณะดีเด่นของแพะพันธุ์ที่ใช้ในการให้ผลผลิตเป็นเนื้อหรือในพ่อพันธุ์แพะนมพันธุ์ที่มีถิ่นกำเนิดอยู่ในเขตหนาว และเขตอบอุ่นก็อาจมีขนาดใหญ่มากได้เช่นกัน ในแพะบางพันธุ์ก็อาจพบพันธุ์ที่มีขนาดเล็กมากหรือเรียกว่าเป็นแพะพันธุ์แคระก็สามารถพบได้ เช่น แพะพันธุ์ปิกมี่ (Pygmy) ซึ่งมีถิ่นกำเนิดในทวีปแอฟริกา นอกเหนือจากขนาดตัวของแพะแต่ละพันธุ์ที่มีขนาดต่างๆ กันไปตามลักษณะประจำพันธุ์แล้ว ในแพะบางพันธุ์ยังมีลักษณะเด่นของการให้ผลผลิตขนแพะโดยเฉพาะแพะที่มีเส้นขนยาวเรียวเล็กนุ่มละเอียดและบางเบา เช่น แพะพันธุ์แองโกล่า (Angola) และพันธุ์แคชเมียร์ (Cashmere) ซึ่งถือว่าเป็นแพะพันธุ์ที่นิยมเลี้ยงไว้ตัดขนเพื่อนำขนแพะเข้าสู่อุตสาหกรรมสิ่งทอสำหรับใช้ทำเครื่องนุ่งห่มคุณภาพสูง ถือได้ว่าเป็นอุตสาหกรรมที่มีมูลค่าสูงมากในตลาดแถบทวีปยุโรปอเมริกาและออสเตรเลียแต่ในประเทศเขตร้อน และประเทศไทยนั้นยังไม่นิยมเลี้ยงแพะเพื่อผลิตขนอันอาจเนื่องมาจากสาเหตุของสภาพภูมิอากาศที่ไม่เอื้ออำนวยต่อการเลี้ยง การดูแลแพะพันธุ์ดังกล่าว เนื่องจากแพะมีขนยาวและหนาจึงทำให้ทนต่อสภาพอากาศร้อนได้ไม่ดีนัก และการขาดอาหารหยาบที่มีคุณภาพดีอาจส่งผลต่อคุณภาพของการสร้างขนเป็นต้น

จากภาพรวมดังที่กล่าวมาแพะเป็นสัตว์ที่มีลักษณะ และความแตกต่างหลากหลายตามลักษณะของพันธุ์เพศอายุ และลักษณะการให้ผลผลิตดังนั้นในรายละเอียดต่างๆ ของลักษณะประจำพันธุ์ขนาดรูปร่าง และประโยชน์ของแพะแต่ละพันธุ์



ภาพ 5 กายภาพของแพะ

ระบบทางเดินอาหารของแพะ

แพะเป็นสัตว์ที่ให้ผลผลิตได้หลากหลายรูปแบบซึ่งส่วนใหญ่เป็นเนื้อ และนม เช่นเดียวกับปศุสัตว์ทั่วไปอีกทั้งเป็นสัตว์เคี้ยวเอื้องทำให้ผลของการให้ผลผลิตเนื้อ และนม จึงขึ้นกับคุณภาพของอาหารหยาบที่สัตว์กิน และศักยภาพการย่อยอาหารของสัตว์โดยการทำหน้าที่ของจุลินทรีย์ในกระเพาะอาหารส่วนหน้า (Fore stomach) กระเพาะหมักที่ทำหน้าที่หมักอาหารพวกเยื่อใย และการสังเคราะห์วิตามินให้แก่ตัวสัตว์ซึ่งโดยปกติอาหารพวกเยื่อใยจะมีคุณค่าทางอาหารต่ำแต่จุลินทรีย์จะเปลี่ยนเป็นสารอาหารที่มีประโยชน์ที่สัตว์นำไปใช้ในการดำรงชีวิตและการสร้างผลผลิตต่อไปโดยระบบทางเดินอาหารของแพะมีรูปแบบเช่นเดียวกับโค กระบือ คือมีกระเพาะอาหารที่แบ่งแยกได้เป็น 4 ส่วนคือกระเพาะหมัก (Rumen) กระเพาะรวงผึ้ง (Reticulum) กระเพาะสามสิบกลีบ (Omasum) กระเพาะแท้ (Abomasum)

มูลแพะ

มูลแพะ คือของเสียเหลือทิ้งจากระบบทางเดินอาหารของแพะโดยการถ่ายออกทางทวารหนัก (ภาพ 6) ส่วนใหญ่จะมีกลิ่นเหม็น เนื่องจากสารที่เป็นผลผลิตของแบคทีเรียในลำไส้ของสัตว์นั้นๆ หลังจากที่สัตว์ตัวหนึ่งได้ย่อยอาหารที่กินเข้าไป มักจะเหลือส่วนหนึ่งที่ระบบทางเดินอาหารไม่สามารถดูดซึมได้ และจะกลายเป็นอุจจาระหรือมูลสัตว์ แต่ถึงกระนั้นอุจจาระอาจจะยังคงมีพลังงานหลงเหลืออยู่กว่า 50 เปอร์เซ็นต์ ของอาหารทั้งหมด นั่นหมายความว่าอาหารทุกอย่างที่สัตว์กินเข้าไป จะมีพลังงานส่วนหนึ่งหลงเหลือมาให้กับผู้ย่อยสลายในระบบนิเวศ สิ่งมีชีวิตหลายชนิดสามารถเจริญเติบโตได้ในอุจจาระ ตั้งแต่แบคทีเรียเห็ดรา หรือแม้แต่

แมลง เช่น ด้วงขี้ควาย (Dung Beetle) ซึ่งสามารถรับรู้กลิ่นได้จากระยะทางไกล อุจจาระนั้นมีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับอาหารที่กินเข้าไปอุจจาระอาจเป็นอาหารหลักหรืออาหารเสริมของสัตว์บางชนิด ตัวอย่างเช่นลูกช้างจะกินมูลจากแม่ของมันเพื่อเพิ่มจุลินทรีย์ในลำไส้ (gut flora) เป็นต้น

ภาพ 6 มูลแพะ

การใช้ประโยชน์จากมูลสัตว์

มูลสัตว์ ส่วนใหญ่เป็นของแข็งประกอบไปด้วยเศษของพืช และสัตว์ซึ่งเป็นอาหารที่สัตว์กินเข้าไปแล้วไม่สามารถย่อยหรือนำไปใช้ประโยชน์ได้หมด จึงเหลือเป็นกากที่สัตว์ขับถ่ายออกมา โดยเศษอาหารเหล่านี้ได้ผ่านกระบวนการย่อยสลายไปบางส่วนแล้วในทางเดินอาหาร ดังนั้นส่วนที่เป็นมูลสัตว์จึงอุดมไปด้วยธาตุอาหารชนิดต่างๆ รวมทั้งสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำได้หลายชนิด ซึ่งเมื่อรวมกันเข้าก็จะมีองค์ประกอบที่สามารถใช้เป็นธาตุอาหารที่สมบูรณ์ของพืชได้ ส่วนมูลสัตว์แต่ละชนิดจะมีธาตุอาหารชนิดใดมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับชนิดของอาหารที่สัตว์ชนิดนั้นกินเข้าไปเป็นปัจจัยสำคัญรวมทั้งปัจจัยอื่นๆ ได้แก่ ระบบการย่อยอาหารของสัตว์ วิธีการให้อาหาร รวมทั้งการจัดการรวบรวมมูล การเก็บรักษา เป็นต้น ในปุ๋ยคอกนอกจากจะมีธาตุอาหารที่จำเป็นต่อพืชแล้วยังให้ฮอร์โมน และสารควบคุมการเจริญเติบโตชนิดต่างๆ ที่จำเป็นสำหรับพืชอีกมากมายด้วย

(**ที่มา**: www.dede.go.th e-book.ram.edu/e-book/a/AT335/AT335-2.pdf.)

แนวทางการใช้มูลสัตว์เพื่อปรับปรุงบำรุงดิน

โดยทั่วไปมูลแพะ และมูลวัวจะมีธาตุอาหารต่ำกว่ามูลสัตว์ชนิดอื่นเพราะเป็นสัตว์กินหญ้า ไม่ควรใส่แปลงปลูกผักโดยตรง เพราะมีปัญหาเมล็ดวัชพืชปะปนมา ควรนำไปหมักเป็นปุ๋ยหมักเสียก่อน หรือนำไปผลิตก๊าซชีวภาพแล้วนำกากที่เหลือไปใช้จะได้ประโยชน์มากกว่า

มูลแห้งเหมาะสำหรับใส่แบบหว่าน ในสวนไม้ผล หรือรองก้นหลุมปลูกพืชเมื่อเปรียบเทียบปริมาณธาตุอาหารในมูลสัตว์ชนิดต่างๆ จะเห็นว่ามูลสุกร และกากตะกอนมูลสุกรจากบ่อหมักก๊าซชีวภาพรวมทั้งมูลของไก่ไข่มีปริมาณธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส แคลเซียม แมกนีเซียม เหล็ก ทองแดง แมงกานีส และสังกะสีมากกว่ามูลวัวขณะที่มูลวัวมีปริมาณธาตุโปแตสเซียม และโซเดียมมากกว่ามูลสุกรดัง ตารางแสดงปริมาณธาตุอาหารเฉลี่ยในมูลสัตว์แห้งชนิดต่าง (**ที่มา**: www.dede.go.th e-book.ram.edu/e-book/a/AT335/AT335-2.pdf.)

ตาราง 2 ปริมาณธาตุอาหารเฉลี่ยในมูลสัตว์แห้งชนิดต่างๆ

ปุ๋ยมูลสัตว์	ปริมาณธาตุอาหารทั้งหมด (เปอร์เซ็นต์)							
	ไนโตรเจน	ฟอสฟอรัส	โพแทสเซียม	แคลเซียม	แมกนีเซียม	ซัลเฟอร์	โซเดียม	เหล็ก
มูลสุกร	2.69	3.24	1.12	3.85	1.18	0.19	0.27	0.44
ตะกอนจากกระบวนการหมัก	2.23	6.84	0.23	11.70	1.09	1.16	0.07	0.63
มูลไก่ไข่	2.59	1.96	2.29	8.09	0.74	0.54	0.32	0.31
มูลโคเนื้อ	1.36	0.51	1.71	1.76	0.50	0.33	0.73	0.45
มูลโคนม	1.27	0.48	1.42	0.98	0.43	0.31	0.23	0.34
มูลแพะ	1.03	0.66	0.64	1.49	0.37	0.37	0.13	0.14
มูลแกะ	0.94	0.54	1.07	1.23	0.34	0.19	0.20	0.11

(**ที่มา**: www.dede.go.th e-book.ram.edu/e-book/a/AT335/AT335-2.pdf.)

เกษตรกรผู้เลี้ยงแพะในประเทศไทย

ประเทศไทยมีเกษตรกรที่หันมายึดอาชีพเลี้ยงแพะมากขึ้นเนื่องจากมีแนวโน้มทางด้านการตลาดดีขึ้น ในอดีตการเลี้ยงเพาะจะเลี้ยงเฉพาะทางภาคใต้เป็นส่วนใหญ่เนื่องจากมีการใช้ประโยชน์จากเนื้อ นม ทางด้านศาสนาจำนวนมาก ประกอบกับปัจจุบันพื้นที่ในการเลี้ยงเพาะมีอย่างจำกัดในปัจจุบันจึงมีการกระจายการเลี้ยงแพะไปทั่วทั้งประทศซึ่งจากการสำรวจของกรมปศุสัตว์ ในปี พ.ศ 2555 พบว่ามีเกษตรกรผู้เลี้ยงแพะ ในประเทศไทยปี พ.ศ. 2555 ยอดรวมทั้งแพะเนื้อและแพะนมมีทั้งหมด 47,467 ราย รวมยอดแพะทั้งหมด 491,779 ตัว และมีแนวโน้มที่สูงขึ้นตามลำดับ (กลุ่มสารสนเทศและข้อมูลสถิติ ศูนย์สารสนเทศ กรมปศุสัตว์, 2555)

2.8 แก๊สมีเทน

กระบวนการหมักแบบไม่ใช้อากาศ (Anaerobic process)

ในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้อากาศ มีปฏิกิริยาหลักๆ เกิดขึ้นอยู่ 2 ขั้นตอน คือ 1) กระบวนการผลิดกรด (Acidogenesis) 2) กระบวนการผลิดมีเทน (Methanogenesis) ซึ่งพบว่ากระบวนนี้สามารถผลิดได้ทั้งมีเทนและก๊าซไฮโดรเจนออกมาพร้อมๆ กันได้

ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ของกระบวนการหมักแบบไม่ใช้อากาศ (Anaerobic process) เกิดขึ้น 4 ขั้นตอน ดังนี้

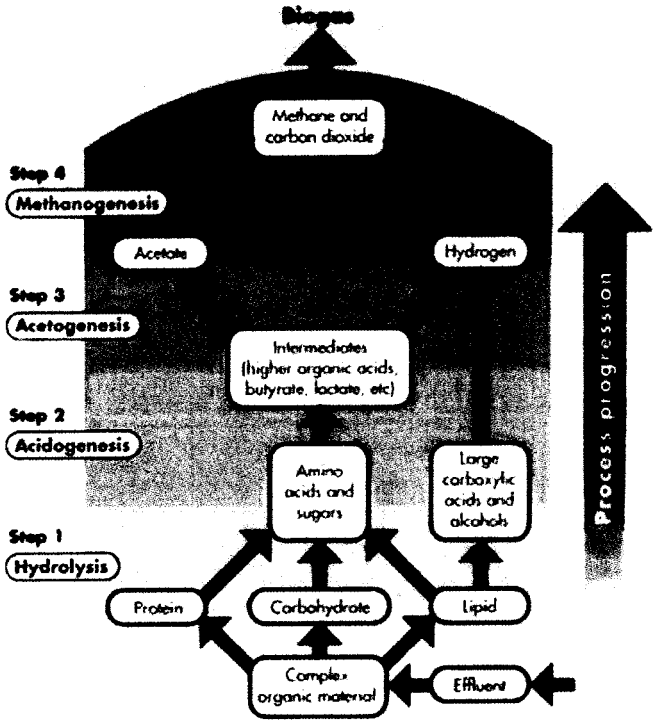
1) กระบวนการไฮโดรไลซีส (Hydrolysis) ไฮโดรไลซีสเป็นกระบวนการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ที่มีโมเลกุลใหญ่ เช่น คาร์โบไฮเดรท โปรดีน ไขมัน ให้กลายเป็นสารประกอบอินทรีย์โมเลกุลเล็ก เช่น น้ำตาลกลูโคส กรดอะมิโน กรดไขมัน ขั้นตอนนี้เกิดขึ้นภายนอกเซลล์โดยเอนไซน์ของแบคทีเรียที่ปล่อยออกมา

2) กระบวนการสร้างกรด (Acidogenesis) ผลผลิดจากปฏิกิริยาของกระบวนการไฮโดรไลซีสในขั้นตอนที่ 1 จะถูกแบคทีเรียที่สร้างกรดนำไปใช้เพื่อผลิตกรดไขมันระเหยง่าย (VFA) เช่น กรดโพรไพโอนิก กรดบิวทาริก เป็นต้น ซึ่งเป็นกรดอินทรีย์ที่มีน้ำหนักโลเลกุลต่ำ และมีคาร์บอนอะตอมไม่เกิน 5 ตัว

3) กระบวนการสร้างกรดอะซิติกจากกรดไขมันระเหยง่าย (Acitogenesis) กรดไขมันระเหยง่ายจากกระบวนการสร้างกรดจะถูกแบคทีเรียอะซิโดจินิก (Acitogenic bacteria) เปลี่ยนให้เป็นกรดอะซิติก กรดฟอร์มิก คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน ปฏิกิริยานี้มีความสำคัญเนื่องจากเป็นการลดการสะสมของกรดไขมันระเหยง่าย ซึ่งการสะสมของกรดไขมันระเหยง่ายปริมาณสูงสามารถลดการสร้างมีเทนได้

4) กระบวนการสร้างมีเทน (Methanogenesis) กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนซึ่งเป็นผลจากปฏิกิริยาของแบคทีเรียสร้างกรดจะถูกแบคทีเรียสร้างมีเทน (Methanogenic bacteria) ใช้สร้างมีเทน
(กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2556)

ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ (ขั้นตอนการเกิดแก๊สมีเทน) คือ การย่อยสลายสารอินทรีย์โดยกลุ่มแบคทีเรียในสภาวะไร้อากาศ (ไร้ออกซิเจน) ผลที่เกิดจากการย่อยสลายส่วนใหญ่ คือ แก๊สมีเทน ซึ่งมีองค์ประกอบหลักเป็นก๊าซมีเทน



ภาพ 7 ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียในสภาวะไร้อากาศ

(**ที่มา:** www.dede.go.th/kmber/Attach /Biogas-present.pdf.)

ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตแก๊สมีเทน

การย่อยสลายสารอินทรีย์และการผลิตแก๊สมีเทนมีปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องดังนี้

อุณหภูมิ อุณหภูมิในการเดินระบบ (operating temperature) แบคทีเรียผลิตมีเทน ไม่สามารถทนต่ออุณหภูมิต่ำมากหรือสูงมากได้ ถ้าหากอุณหภูมิลดลงต่ำกว่า 10 องศาเซลเซียส แบคทีเรียจะหยุดทำงาน อุณหภูมิในการเดินระบบแบ่งออกเป็น 2 ระดับตามสปีชีส์ของแบคทีเรียผลิตมีเทน ได้แก่ เมโซฟิลิก (Mesophilic) และเทอร์โมฟิลิก (Thermophilic) เมโซฟิลิก ทำงานได้ดีที่อุณหภูมิประมาณ 20–45 องศาเซลเซียสแต่ที่เหมาะสมที่สุดคือ ช่วง 37-41 องศาเซลเซียส โดยในช่วงอุณหภูมินี้แบคทีเรียส่วนใหญ่ในถังหมักจะเป็นเมโซฟิลิก เทอร์โมฟิลิก ทำงานได้ดีในช่วงอุณหภูมิที่สูงกว่าเมโซฟิลิก โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมที่สุดประมาณ 50–52 องศาเซลเซียส แต่สามารถทำงานในอุณหภูมิที่สูงขึ้นถึง 70 องศาเซลเซียส

แบคทีเรียเมโซฟิลิก มีจำนวนสปีชีส์มากกว่าเทอร์โมฟิลิก และมีความสามารถในการทนต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมได้ดีกว่าเทอร์โมฟิลิก ทำให้ระบบหมักแก๊สมีเทนที่ใช้อุณหภูมิช่วงของเมโซฟิลิกมีความเสถียรมากกว่า แต่ขณะเดียวกันอุณหภูมิซึ่งสูงกว่าในระบบที่ใช้เทอร์โมฟิลิก ก็เป็นการช่วยเร่งปฏิกิริยาส่งผลให้อัตราการผลิดแก๊สสูงกว่า ข้อเสียของระบบเทอร์โมฟิลิก คือการที่ต้องใช้พลังงานจากภายนอกมาเพิ่มความร้อนให้ระบบ ทำให้อาจได้พลังงานสุทธิที่ต่ำกว่าระบบเมโซฟิลิก (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2556)

ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมที่สุดในการผลิดแก๊สมีเทนอยู่ระหว่าง 7.0-7.2 ค่าความเป็นกรด-ด่างในถังหมักขึ้นอยู่กับช่วงของการหมักด้วย เพราะในช่วงแรกแบคทีเรียที่สร้างกรดจะสร้างกรดเป็นจำนวนมาก และทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างลดลง ซึ่งถ้าหากค่าความเป็นกรด-ด่างลดต่ำลงกว่า 5.0 ก็จะหยุดกระบวนการย่อยและหมักทั้งหมดหรือแบคทีเรียตาย แบคทีเรียสร้างมีเทนอ่อนไหวต่อความเป็นกรดด่างมาก และจะไม่เจริญเติบโดหากค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำกว่า 6.5 ในช่วงท้ายของกระบวนการ ความเข้มข้นของแอมโมเนียจะมากขึ้นตามการย่อยสลายไนโตรเจนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่างเพิ่มโดยอาจเกิน 8.0 จนระบบเริ่มมีความเสถียรค่าความเป็นกรด-ด่างจะอยู่ระหว่าง 6.8–8 (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2556)

อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N Ratio) อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนของขยะอินทรีย์ที่สามารถใช้ในการผลิตแก๊สมีเทนคือตั้งแต่ 8–30 แต่อัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผลิตแก๊สมีเทนคือประมาณ 23 ถ้าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนสูงมาก ไนโตรเจนจะถูกแบคทีเรียสร้างมีเทนนำไปใช้เพื่อสร้างโปรตีนให้ตัวเองและจะหมดอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ได้ก๊าซน้อย แต่ถ้าหากอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนมีค่าต่ำมากๆ ก็จะทำให้ไนโตรเจนมีปริมาณมากและไปเกาะกันเป็นแอมโมเนีย ซึ่งแอมโมเนียจะไปเพิ่มค่าความเป็นกรด-ด่าง ซึ่งหากค่าความเป็นกรด-ด่างสูงถึง 8.5 ก็จะเริ่มเป็นพิษกับแบคทีเรียทำให้จำนวนแบคทีเรียสร้างมีเทนลดลง นอกจากนี้หากค่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนอยู่นอกเหนือจากช่วง 8–30 จะทำให้มีสัดส่วนปริมาณก๊าซที่ได้เป็นก๊าซอื่นๆ เช่น คาร์บอนไดออกไซด์สูงขึ้น (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2556)

มูลสัตว์โดยเฉพาะวัวควายมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเหมาะสมที่สุด รองลงมา ได้แก่ ดอกจอก ผักตบชวา และเศษอาหาร ขณะที่ฟางข้าวมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่ค่อนข้างสูง อย่างไรก็ตามสามารถนำวัตถุดิบที่มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่สูงมาผสมกับวัตถุดิบที่มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่ต่ำ เพื่อให้ได้วัตถุดิบที่มีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่ต้องการ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2556)

ปริมาณสารอินทรีย์ที่เข้าสู่ระบบ (Loading) ปริมาณสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบ คือ ปริมาณสารอินทรีย์ที่เราเติมใส่ถังหมักในแต่ละวัน ซึ่งถ้าหากว่าปริมาณที่เราเติมนั้นมากเกินไปจะส่งผลต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง ลดลงมากเกินไป (เนื่องจากในช่วงแรกของกระบวนการ คือ

acidogenesis กรดจะถูกผลิตขึ้นมา) จนทำให้ระบบล้มเหลวเนื่องจากแบคทีเรียสร้างมีเทนตายหมด ซึ่งหากสิ่งนี้เกิดขึ้นจริงก็จะต้องเริ่มต้นระบบใหม่หมด แต่ถ้าหากปริมาณสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบน้อยก๊าซที่ผลิตได้ก็จะน้อยตามไปด้วย เท่ากับว่าไม่ได้เดินระบบเต็มกำลังการผลิต ทำให้ถังหมักมีขนาดใหญ่เกินไปโดยไม่จำเป็น
(กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2556)

ระยะเวลาในการกักเก็บสารอินทรีย์ในถังหมัก (Retention time) ระยะเวลาในการกักเก็บสารอินทรีย์ในถังหมักขึ้นอยู่กับปริมาณ และประเภทของสารอินทรีย์ที่เติมเข้าไปซึ่งมีลักษณะและคุณสมบัติที่แตกต่างกันไป รวมถึงรูปแบบของระบบและถังหมัก หากระยะเวลาในการกักเก็บสารอินทรีย์สั้นไปก็จะไม่เพียงพอสำหรับแบคทีเรียที่จะผลิตแก๊สมีเทน นอกจากนี้แบคทีเรียยังจะถูกถ่ายออกจากระบบเร็วเกินไปส่งผลให้จำนวนแบคทีเรียลดลงไป ทำให้แบคทีเรียที่เหลืออยู่ทำการย่อยไม่ทันและอาจทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างในถังหมักลดลง ขณะเดียวกันการที่ระยะเวลาการกักเก็บสารอินทรีย์นานเกินไปจะทำให้เกิดกากตะกอนของสารอินทรีย์ที่แบคทีเรียย่อยสลายแล้วสะสมอยู่ทำให้ถังหมักมีขนาดใหญ่โดยไม่จำเป็น ระยะเวลาในการกักเก็บส่วนใหญ่ประมาณ 14–60 วัน ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ คือ ปริมาณของแข็งอุณหภูมิ ชนิดของจุลินทรีย์ และปริมาณของสารอินทรีย์ที่เติม ระยะเวลาในการกักเก็บนั้นเป็นตัวบ่งชี้ว่าแบคทีเรียจะมีชีวิตได้นานเท่าไหร่โดยไม่มีการเติมอาหารเนื่องจากระยะเวลาในการกักเก็บนั้นหมายถึงระยะเวลาที่แบคทีเรียต้องการเพื่อย่อยอาหารให้หมด ดังนั้นเมื่อไหร่ก็ตามที่แบคทีเรียยังย่อยอาหารไม่หมดก็หมายความว่าแบคทีเรียจะยังไม่ตายจากการขาดอาหาร
(กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2556)

ปริมาณของแข็ง (Total Solid Content, TSC)

Solid Content ของสารอินทรีย์ในการผลิตแก๊สมีเทน แบ่งเป็น 2 ระดับ คือ

High-solid (ปริมาณของแข็งสูง) TSC สูงกว่า ~20เปอร์เซ็นต์

Low-solid (ปริมาณของแข็งต่ำ) TSC ต่ำกว่า ~15เปอร์เซ็นต์

ถังหมักที่ออกแบบสำหรับเติมสารอินทรีย์ที่มีปริมาณของแข็งสูงจะต้องใช้พลังงานมากกว่าในการสูบน้ำตะกอน (slurry) แต่เนื่องจากในระบบที่มีปริมาณของแข็งสูงความเข้มข้นของน้ำในถังสูงกว่า พื้นที่ที่ใช้ก็จะน้อยกว่า ในทางกลับกัน ถังหมักที่มีปริมาณของแข็งต่ำสามารถใช้เครื่องสูบน้ำทั่วไปที่ใช้พลังงานน้อยกว่าสูบน้ำตะกอน แต่ก็ต้องใช้พื้นที่มากกว่าเนื่องจากปริมาณต่อสารอินทรีย์ที่เติมเข้าไปสูงขึ้น กระนั้นก็ดี การที่น้ำตะกอนมีความใสกว่าก็จะทำให้การหมุนเวียนและกระจายตัวของแบคทีเรียและสารอินทรีย์ดีขึ้น และการที่แบคทีเรียสามารถสัมผัสสารอินทรีย์อย่างทั่วถึงก็ช่วยให้การย่อยและการผลิตก๊าซเร็วขึ้น
(กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2556)

การคลุกเคล้า (Mixing) การคลุกเคล้าตะกอน น้ำ และสารอินทรีย์เป็นส่วนที่สำคัญอีกส่วนเพราะจะทำให้แบคทีเรียสัมผัสกับสารอินทรีย์ได้อย่างทั่วถึง ทำให้แบคทีเรียทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ส่งผลให้การเกิดก๊าซเร็วขึ้นและมากขึ้น นอกจากนี้ยังป้องกันการตกตะกอน และตะกอนลอย (Scum) ซึ่งตะกอนอาจจะไปอุดช่องทางสำหรับระบายของเหลวจากถัง (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2556)

สารอาหาร (Nutrient) สารอาหารที่แบคทีเรียต้องการเพื่อการเจริญเติบโตนอกเหนือจากคาร์บอนและไฮโดรเจนแล้ว ยังมีไนโตรเจน ซัลเฟอร์ ฟอสฟอรัส โปแตสเซียม แคลเซียม นอกจากนี้ก็มีธาตุที่จำเป็นในปริมาณน้อยมากๆ เช่น เหล็ก แมงกานีส ลิบดินัม สังกะสี โคบอลต์ ซิลิเนียม ทังเสตน และนิเกิลเป็นต้น แต่ขยะอินทรีย์โดยทั่วไปจะมีธาตุอาหารเหล่านี้ในระดับที่สมดุลพอเพียง ดังนั้นในการหมักจึงไม่จำเป็นต้องเติมสารอาหารใดๆ ลงไป (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2556)

สารยับยั้งและสารพิษ (Inhibiting and Toxic Materials) กรดไขมันระเหยได้ ไฮโดรเจน หรือแอมโมเนีย รวมถึงธาตุไอออน สารพิษ โลหะหนัก สารทำความสะอาดต่างๆ เช่น สบู่ น้ำยาล้างต่างๆ และยาปฏิชีวนะ สามารถส่งผลยับยั้งการเจริญเติบโตและการผลิตก๊าซของแบคทีเรียได้ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2556)

2.9 วิธีตอบสนองต่อพื้นที่ผิว (Response Surface Methodology, RSM)

วิธีตอบสนองต่อพื้นที่ผิวเป็นวิธีการทางคณิตศาสตร์ และสถิติที่เป็นประโยชน์ในการสร้างแบบจำลองและวิเคราะห์ปัญหา ซึ่งแสดงผลตอบสนองต่อผลจากตัวแปรต่าง ๆ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาจุดหรือความเหมาะสมต่อผลนั้น (Montogomery, 2001)

RSM เป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพกับกระบวนการที่มีความซับซ้อนทำให้ง่ายในการจัดการและการอธิบายผล เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่น
(Box and Behnken, 1960; Gan and Latiff, 2011)

2.9.1 หลักการวิธีตอบสนองต่อพื้นที่ผิว หลักการวิธีตอบสนองพื้นที่ผิวมีดังนี้

2.9.1.1 การนำเสนอการทดลองวิธีตอบสนองต่อพื้นที่ผิว ต้องมีแผนการทดลองที่เหมาะสม อย่างน้อยต้องมีตัวแปรอิสระ 2 ตัวขึ้นไปและต้องเป็นตัวแปรเชิงปริมาณ มีตัวแปรตามอย่างน้อย 1 ตัวขึ้นไป และต้องเป็นตัวแปรเชิงปริมาณด้วย ดังนั้นแผนการทดลองที่จะสามารถสร้างพื้นที่ผิว คือ Factorial Design, Mixture Design, Central Composite Design (CCD) และ Plackett & Burman Design

2.9.1.2 ระดับของตัวแปรอิสระที่ต้องผันแปรควรครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องการศึกษา

2.9.1.3 นำข้อมูลของตัวแปรอิสระแต่ละตัวที่มีความสัมพันธ์กับข้อมูลของตัวแปรตามเพื่อสร้างเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Model) (กัลยาณี เด็งพงศธร, 2554)

2.9.2 ขั้นตอนของวิธีตอบสนองต่อพื้นที่ผิว ในการทดลองวิจัยโดยวิธีตอบสนองต่อพื้นที่ผิวมีขั้นตอนดังนี้

เลือกแผนการทดลอง (Selection design)

เก็บรวบรวมข้อมูล (Response Variable)

สร้างสมการความสัมพันธ์ (Regression)

ทดสอบพิสูจน์แบบจำลอง

หาสภาวะที่เหมาะสมของการทดลอง (Optimization)

2.9.3 แผนการทดลองแบบ Central Composite Design (CCD) แผนการทดลองนี้เป็นการออกแบบที่ทุกระดับของแต่ละปัจจัยห่างจากศูนย์กลาง เท่ากัน และทำซ้ำที่จุดกึ่งกลาง แต่ละปัจจัยจะมีระดับการทดลอง 5 ระดับ ($-\alpha$, -1, 0, 1, α)

องค์ประกอบของแผนการทดลองแบบ CCD มีดังนี้

1. ตำแหน่งการทดลอง ของ 2^n Fractorial Design (n คือตัวแปรอิสระ) n = 2 ดังนั้น 2^2 จะมีตำแหน่งการทดลองทั้งหมด 4 ตำแหน่ง (-1,-1) (+1,-1) (+1, +1) (-1, +1)

2. ตำแหน่งการทดลองที่เพิ่มขึ้นมาอีก 4 ตำแหน่งคือตำแหน่งที่เป็นแนว + α หรือ - α ในแนวแกน (+ α, 0) (- α, 0) (0, + α) (0, - α)

3. ตำแหน่งตรงกลางของพื้นที่การทดลองอีก 1 ตำแหน่ง คือ Central Point (ตำแหน่ง 0,0)

ดังนั้นการทดลองแบบ CCD ในกรณีที่มีตัวแปรอิสระ 2 ตัว จะมีตำแหน่งเพิ่มขึ้นจาก 2^2 Fractorial Design อีก 5 ตำแหน่งคือ (+ α, 0) (- α, 0) (0, + α) (0, - α) และ (0,0) ทำให้การทดลองสามารถครอบคลุมพื้นที่ที่ต้องการศึกษาได้มากกว่า 2^2 Fractorial Design (กัลยาณี เต็งพงศธร, 2554)

จากข้อความดังกล่าวข้างต้นการทดลองแบบ Central Composite Design (CCD) สามารถกำหนดตำแหน่งของการทดลองได้ดังตาราง 3

ตาราง 3 ตำแหน่งของการออกแบบการทดลองแบบ Central Composite Design (CCD)

จำนวนตัวแปรอิสระ(Xi)= n	2	3	4	5
จำนวนตำแหน่งการทดลองทั้งหมดใน CCD	9	15	25	43
ระดับของ ค่า $\alpha = 2^{n/4}$	1.4142	1.6818	2	2.3784

(ที่มา: กัลยาณี เด็งพงศธร, 2554)

บทที่ 3
วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 วัสดุอุปกรณ์และสารเคมี

3.1.1 อุปกรณ์

ตาราง 4 อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

วัสดุอุปกรณ์/เครื่องมือวิเคราะห์	รูปแบบ/ชนิด	บริษัท/ประเทศ
Gas chromatography (GC)	GC-2014	Shimadzu, Japan
pH meter	BP-20	Satorius, Germany
Syringe for GC-17A	10 uL	SGE, Australia
Gas tight syringe for GC-2014	1 mL และ 10 mL	ITO, Japan
Hot air oven	LDO-100E	Lab tech
Balance	PB602-S	Mettler Toledo, Switzerland

3.1.2 สารเคมี

ตาราง 5 สารเคมีที่ใช้ในการทดลอง

ลำดับที่	ชื่อสาร	สูตรเคมี	บริษัท/ประเทศ
1	Sodium hydroxide	NaOH	ซิกกี่เคมีคอลซัพพลาย, ไทย
2	Hydrochloric acid	HCl	ซิกกี่เคมีคอลซัพพลาย, ไทย
3	Nitrogen gas	N_2	ร้านทรัพย์ประเสริฐ ออกซิเจน, ไทย
4	Hydrogen gas (standard)	H_2	ร้านทรัพย์ประเสริฐ ออกซิเจน, ไทย
5	Methane gas(standard)	CH_4	ร้านทรัพย์ประเสริฐ ออกซิเจน, ไทย
6	Carbon dioxide (standard)	CO_2	ร้านทรัพย์ประเสริฐ ออกซิเจน, ไทย

3.1.3 วัตถุดิบที่ใช้ในการทดลอง

3.1.3.1 มูลแพะจากฟาร์มเส้นทางเห็ด 193 ม.11 ต.ท่าโพธิ์ อ.เมือง จ.พิษณุโลก

3.1.3.2 ฟางข้าวเหลือทิ้งภายในเขตจังหวัดพิษณุโลก

3.1.4 จุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลอง

จุลินทรีย์ที่ใช้ในการผลิตแก๊สมีเทนเป็นกลุ่มจุลินทรีย์ในมูลแพะจากฟาร์มเส้นทางเห็ด 193 ม.11 ต.ท่าโพธิ์ อ.เมือง จ.พิษณุโลก

3.2 วิธีการทดลองการศึกษาสภาวะเริ่มต้นที่เหมาะสมของการผลิตแก๊สมีเทนจากสับเตรทร่วมระหว่างมูลแพะกับฟางข้าวโดยกลุ่มจุลินทรีย์ไร้อากาศโดยการหมักแบบกะ (Batch fermentation) โดยใช้วิธี RSM (Response Surface Methodology)

3.2.1 การเตรียมฟางข้าว

นำฟางข้าวมาทำให้มีขนาดเล็กลงด้วยวิธีการบด ด้วยเครื่องบดให้มีขนาด 0.2-1.0 เซนติเมตร แล้วนำมาผสมกับน้ำประปา ในอัตราส่วนระหว่างฟางข้าวกับน้ำประปาเท่ากับ 1:0.5 วิเคราะห์ปริมาณ COD โดยวิธีมาตรฐาน (APHA, 1997) ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดโดยใช้วิธี Colorimetric (Harwood และคณะ, 1970) และค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นโดยใช้ pH meter

3.2.2 การเตรียมมูลแพะ

มูลแพะที่ใช้เป็นมูลแพะที่ได้จากฟาร์มเส้นทางเห็ดซึ่งเหมาะแก่การเป็นแหล่งคาร์บอนและไนโตรเจนในการผลิตแก๊สมีเทน นอกจากนั้นมูลแพะยังเป็นแหล่งของกลุ่มจุลินทรีย์ไร้อากาศที่ใช้ในการผลิตแก๊สมีเทนนำมูลแพะมาบดให้ละเอียดวิเคราะห์ปริมาณ COD และปริมาณชีวมวลโดยการวัดค่าของแข็งระเหยง่าย (Volatile Suspended Solid; VSS) ด้วยวิธีมาตรฐาน (APHA, 1997) ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดโดยใช้วิธี Colorimetric (Harwood และคณะ, 1970) และค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นโดยใช้ pH meter

3.2.3 ออกแบบการทดลองโดยใช้วิธีการตอบสนองต่อพื้นที่ผิว (RSM) แบบ Central Composite Design (CCD)

ทำการศึกษาปัจจัยหลักที่คาดว่าจะมีผลต่อการผลิตแก๊สมีเทน โดยการคัดเลือกปัจจัยเบื้องต้นที่มีผลต่อการผลิดแก๊สมีเทนจากสับเตรทร่วมระหว่างมูลแพะกับฟางข้าวเป็นแหล่งคาร์บอนและไนโตรเจน จำนวน 2 ปัจจัย ได้แก่ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) (A) ค่าความเป็นกรด-ด่าง (ค่าความเป็นกรด-ด่าง) (B) ซึ่งในแต่ละปัจจัยมีความแปรผันเป็น 5 ระดับ ดังแสดงไว้ในตาราง 5 และประกอบด้วย 13 ทรีตเมนต์ แสดงไว้ในตาราง 6 กำหนดให้ค่าการตอบสนอง (Response) คือ ปริมาตรของแก๊สมีเทนและผลได้ของแก๊สมีเทน

ทำการวางแผนการทดลองแบบ Central Composite Design (CCD) โดยทำการอาศัยแบบจำลองเด็มรูปแบบดังสมการ

$$Y = \beta 0 + \sum \beta_j x_j$$

เมื่อ Y = response

$\beta 0$ = the model intercept

β_j = the linear coefficient

x_j = the level of the independent variable

ตาราง 6 สภาวะที่ใช้ในการออกแบบการทดลองโดยวิธีการสอบสนองต่อพื้นที่ผิวแบบ Central Composite Design

รหัส	ปัจจัย	ระดับของปัจจัย				
		$-\alpha$ level	Low level	Medium level	High level	α level
A	อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน	17.93	20.00	25.00	30.00	32.07
B	ค่าความเป็นกรด-ด่าง	5.59	6.00	7.00	8.00	8.41

ตาราง 7 ชุดการทดลองที่ออกแบบการทดลองโดย Central Composite Design

ชุดการทดลอง	A(Actual)	A(Code)	B(Actual)	B(Code)
1	20.000	-1.000	8.000	1.000
2	32.071	1.414	7.000	0.000
3	30.000	1.000	8.000	1.000
4	17.929	-1.414	7.000	0.000
5	25.000	0.000	7.000	0.000
6	30.000	1.000	6.000	-1.000
7	25.000	0.000	5.590	-1.414
8	25.000	0.000	7.000	0.000
9	25.000	0.000	7.000	0.000
10	25.000	0.000	8.410	1.414
11	20.000	-1.000	6.000	-1.000

ตาราง 7 (ต่อ)

ชุดการทดลอง	A(Actual)	A(Code)	B(Actual)	B(Code)
12	25.000	0.000	7.000	0.000
13	25.000	0.000	7.000	0.000

หมายเหตุ -2 = -α, -1 = low level, 0 = mean level, 1 = high level, 2 = α

3.2.4 การหมักแก๊สมีเทนแบบกะ (batch fermentation)

การหมักแก๊สมีเทนแบบกะโดยกลุ่มจุลินทรีย์แบบไร้อากาศ ทำในขวดซีรั่มขนาด 100 มิลลิลิตรซึ่งจะมีปริมาตรการทำงาน 70 มิลลิลิตร โดยกำหนดการแปรผันระดับของปัจจัยที่ได้จากการออกแบบการทดลอง ดังตารางที่ 5 และ 6 ปิดด้วยฝาจุกยาง และฝาจุกอะลูมิเนียม โดยใช้ คีมบีบรัดฝาจุก (Supelco, USA) ไล่ออกซิเจนในน้ำหมักและวิเคราะห์ช่องว่างเหนือน้ำหมักโดยใช้แก๊สไนโตรเจนเป็นเวลา 5 นาทีเพื่อทำให้เกิดสภาวะไร้อากาศ นำไปเขย่าในเครื่องปั่น (shaker) โดยกำหนดให้มีการหมุนที่ 150 รอบต่อนาทีที่อุณหภูมิห้อง โดยทำการหมักเป็นเวลา 30 วัน

3.2.5 การพิสูจน์แบบจำลอง (Confirm test)

ทำการพิสูจน์แบบจำลองภายหลังจากที่ได้สภาวะที่เหมาะสมต่อค่าตอบสนอง (Response) ที่ศึกษาคือปริมาตรของแก๊สมีเทน และผลได้ของแก๊สมีเทน โดยทำการทดลองซ้ำอีกครั้งจำนวน 4 การทดลอง ได้แก่ 1) ระดับของปัจจัยระดับต่ำ 2) ระดับของปัจจัยระดับสูงตามตาราง 5 การทดลองที่ 3) สภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลอง และ 4) สภาวะควบคุม (ค่าระดับของปัจจัยที่อยู่ในช่วงค่ากลางตามตาราง 6)

3.3 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.3.1 การวิเคราะห์แก๊ส

การวิเคราะห์แก๊สทำได้โดยเก็บตัวอย่างปริมาตร 3 มิลลิลิตร โดยใช้ gas tight syringe ใส่ในขวดซีรั่มขนาด 10 มิลลิลิตร ปิดด้วยจุกซิลิโคนและฝาอะลูมิเนียม นำมาวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊ส โดยใช้ Gas chromatography ภายใต้สภาวะตามที่แสดงในตาราง 8

ตาราง 8 สภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สโดยวิธี gas chromatography

Equipment	GC-2014(Shimadzu)
Column type	Shin carbon (size 3m x 3mm, activated charcoal 60/80 mesh)
Injection temp	130°C
Detector temp	140°C
Detector type	TCD
Current	140 mA
Total flow of carrier gas (He)	25 ml/min
Injection volume	1ml
Stop time	7 min

(Sreela-or และคณะ, 2011)

3.3.2 การวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอนอินทรีย์ด้วยวิธี Chemical Oxygen Demand (COD)

การวิเคราะห์ค่าซีโอดี (Chemical Oxygen Demand) ทำได้โดยการนำหลอดทดลองที่ล้างสะอาดแล้วไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง นำออกจากตู้อบแล้วทิ้งให้เย็นในอุณหภูมิห้องดูดน้ำตัวอย่าง 2.5 มิลลิลิตร ใส่หลอดทดลอง เติมน้ำกลั่นเพื่อเจือจางอัตราส่วน 1:2 คือเติมน้ำกลั่น 5 มิลลิลิตร ทำแบลงค์โดยใส่น้ำกลั่นลงในหลอดทดลอง 7.5 มิลลิลิตร เติมโพแตสเซียมไดโครเมต 1.5 มิลลิลิตร ในน้ำตัวอย่างและแบลงค์ เติมกรดซัลฟิวริก 3.5 มิลลิลิตร ในน้ำตัวอย่างและแบลงค์ นำหลอดทดลองใส่ไว้ในตะแกรง และนำเข้าตู้อบที่มีอุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมงหลังจากอบครบ 2 ชั่วโมงแล้วนำออกมาตั้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องเทน้ำตัวอย่างลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร หยดเฟอโรอินดิเคเดอร์ 2-3 หยด จะเปลี่ยนเป็นสีเขียวอมน้ำเงิน ไตเตรทด้วยเฟอร์รัสแอมโมเนียซัลเฟตความเข้มข้น 0.025 นอร์มอล ทีละหยดจนถึงจุดยุติ คือสีของน้ำตัวอย่างจะเปลี่ยนเป็นสีแดงอิฐ บันทึกผล ซึ่งปริมาณของไดโครเมตที่หายไปคือสารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำตัวอย่าง

3.3.3 การวิเคราะห์ปริมาณเซลล์จุลินทรีย์ด้วยการหาของแข็งระเหย (Volatile Suspended Solid; VSS)

การวิเคราะห์ของแข็งแขวนลอยระเหย หรือตะกอนแขวนลอยระเหย (Volatile Suspended Solids) ทำได้โดยการนำฟางข้าวและมูลแพะมาอบแห้งที่อุณหภูมิประมาณ 103-105 องศาเซลเซียส จนแห้งแล้วจึงนำไปทิ้งให้เย็นที่อุณหภูมิห้องในโถดูดความชื้น (Desiccators) และนำมาชั่ง จากนั้นนำฟางข้าวกับมูลแพะที่อบแห้งแล้วมาเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ประมาณ 3 ชั่วโมง และนำมาชั่งน้ำหนักที่หายไปจากการชั่งครั้งแรกจะเป็นค่าของของแข็งแขวนลอยระเหย และนำน้ำหนักที่ชั่งได้มาลบกับน้ำหนักแห้งของฟางข้าวกับมูลแพะนำไปหาค่าของแข็งระเหย (VSS) ซึ่งค่าที่ได้ถือว่าเป็นค่าที่ใช้แทนปริมาณของเซลล์จุลินทรีย์ในระบบได้

3.4 สถานที่ทำการวิจัย

ทำการวิจัยและวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้พื้นที่บริเวณ สาขาวิชาเกษตรศาสตร์ คณะเทคโนโลยีการเกษตร และอาหาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม จังหวัดพิษณุโลก สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร สาขาวิชาเทคโนชีวภาพ คณะเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทที่ 4
ผลการทดลอง

จากการศึกษาสภาวะเริ่มต้นเริ่มต้นที่เหมาะสมของการผลิตแก๊สมีเทนจากสับเตรทร่วมระหว่างมูลแพะกับฟางข้าว โดยทำการศึกษาเกี่ยวกับอัตราส่วนระหว่างคาร์บอนต่อไนโตรเจนและค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น ได้ผลการทดลองดังนี้

4.1 ผลของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N) และค่าความเป็นกรด – ด่าง (pH) ต่อการผลิตแก๊สมีเทน

ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตแก๊สมีเทนในการทดลองครั้งนี้ ได้แก่ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (A) และค่าความเป็นกรด – ด่าง (B) สามารถเขียนเป็นสมการถดถอยได้ดังนี้

$$Y = 1439.96 + 37.78_A + 280.31_B - 0.08_{AB} - 0.72_A^2 - 18.80_B^2$$

การออกแบบการทดลองครั้งนี้มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ค่าความไม่เหมาะสมของแบบการทดลอง (Lack of fit) ไม่มีความแตกต่างทางด้านสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความเหมาะสมในการเลือกแบบการทดลองในครั้งนี้ (ตาราง 10) นอกจากนั้นค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจของแบบจำลอง R^2 มีค่าเท่ากับ 0.97 และ R^2 (adj) ซึ่งขึ้นกับองศาอิสระของตัวแปร (Degree of freedom) มีค่าเท่ากับ 0.95 แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองมีความสัมพันธ์กับข้อมูลจากการทดลองสำหรับค่าตัวแปรต้นทั้งสองตัวแปรที่ระดับความเชื่อมั่นสูงกว่า 95 เปอร์เซ็นต์

ตาราง 9 ปริมาณผลได้ของไบโอแก๊สและแก๊สมีเทนในแต่ละชุดการทดลอง

ชุดการทดลอง	A(Code)	A(Actual)	B(Code)	B(Actual)	Methane (mL)	Biogas (mL)
1	-1.000	20.000	1.000	8.000	52.360	690.10
2	1.414	32.071	0.000	7.000	50.110	652.43
3	1.000	30.000	1.000	8.000	56.530	810.07
4	-1.414	17.929	0.000	7.000	30.160	271.74

ตาราง 9 (ต่อ)

ชุดการทดลอง	A(Code)	A(Actual)	B(Code)	B(Actual)	Methane (mL)	Biogas (mL)
5	0.000	25.000	0.000	7.000	79.020	1743.97
6	1.000	30.000	-1.000	6.000	34.560	336.96
7	0.000	25.000	-1.414	5.590	12.180	52.74
8	0.000	25.000	0.000	7.000	80.410	1860.69
9	0.000	25.000	0.000	7.000	72.960	1589.80
10	0.000	25.000	1.414	8.410	65.420	1147.47
11	-1.000	20.000	-1.000	6.000	28.770	256.63
12	0.000	25.000	0.000	7.000	80.120	1839.56
13	0.000	25.000	0.000	7.000	78.440	1729.60

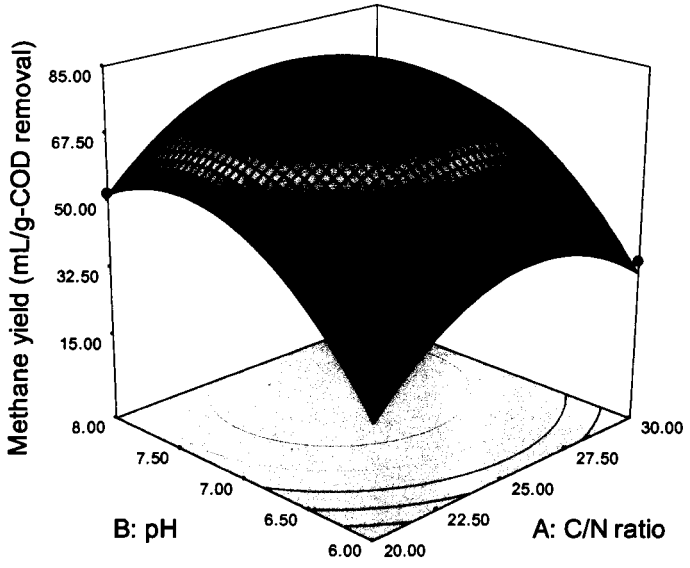
ตาราง 10 แบบจำลองพิสูจน์ค่าความเชื่อมั่นของการออกแบบการทดลอง (significance of regression coefficients)

Factor	Methane production (mL)	
	Coefficients estimate	Probability
Model	-	<0.0001
Intercept	78.190	-
A	4.770	0.0449
B	15.110	0.0001
AB	-0.410	8.8878
A^2	-18.130	< 0.0001
B^2	-18.800	< 0.0001
Lack of fit	-	0.0517

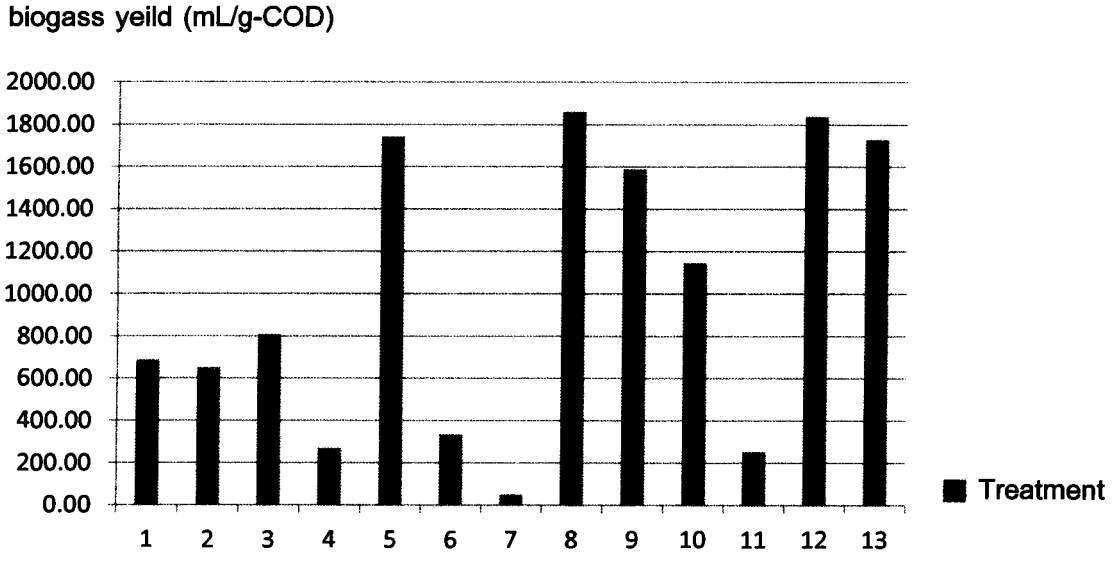
ภาพ 9 แสดงอิทธิพลของปัจจัย A (อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน) และ B (ค่าความเป็นกรด – ด่าง) ที่มีต่อผลได้ของแก๊สมีเทนจากกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ จากผลการทดลองพบว่า เมื่อกำหนดค่าของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 20.00 สามารถให้ผลได้ของแก๊สมีเทนเท่ากับ 20.98 มิลลิลิตรต่อกรัมซีโอดีที่ลดลง และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนคาร์บอนต่อ

ไนโตรเจนจาก 20.00 ถึง 25.59 พบว่าผลได้ของแก๊สมีเทนเพิ่มสูงขึ้นเท่ากับ 80.68 มิลลิลิตรต่อกรัมซีโอดีที่ลดลง เนื่องจากที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมสามารถทำให้อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ และกิจกรรมของจุลินทรีย์เพิ่มสูงขึ้น (Yokoi et al., 2014) และนอกจากนั้นอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่มีค่าต่ำจะทำให้จุลินทรีย์นำสารอาหารไปใช้ในการสร้างเซลล์ (Sreela-or, 2011) แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนสูงกว่า 25 ผลได้ของแก๊สมีเทนลดลง เนื่องจากขาดธาตุไนโตรเจนที่ใช้ในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ (Lin and Lay, 2004)

การผลิตแก๊สมีเทนจากฟางข้าวร่วมกับมูลแพะโดยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นที่ 6.00 สามารถให้ผลได้ของแก๊สมีเทนเท่ากับ 20.98 มิลลิลิตรต่อกรัมซีโอดีที่ลดลง และเมื่อเพิ่มค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นจาก 6.00 ถึง 7.19 พบว่าผลได้ของแก๊สมีเทนสูงขึ้นเท่ากับ 80.68 มิลลิลิตรต่อกรัมซีโอดีที่ลดลง เนื่องจากที่ค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมจะทำให้กิจกรรมของจุลินทรีย์เกิดขึ้นได้ดี ค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำจะส่งผลให้ระยะเวลาการปรับตัว (Lag time) ของจุลินทรีย์มีระยะเวลานาน (Van Ginkel et al., 2001) และนอกจากนั้นค่าค่าความเป็นกรด-ด่างที่ต่ำอาจจะยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ (Reungsang and Sreela-or, 2013) จะเห็นได้จากการทดลองครั้งนี้เมื่อเพิ่มค่าความเป็นกรด-ด่างให้สูงขึ้นจะทำให้ผลได้ของมีเทนเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่ในทางตรงกันข้ามหากเพิ่มปริมาณค่าความเป็นกรด-ด่างสูงกว่า 7.19 ผลได้ของแก๊สมีเทนมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากค่าความเป็นกรด-ด่างที่สูงจะส่งผลทำให้ผนังเซลล์ของจุลินทรีย์เกิดความเสียหาย (Khanal et al., 2004)



ภาพ 8 โครงสร้างพื้นที่การตอบสนองของปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตแก๊สมีเทน



ภาพ 9 ปริมาณไบโอแก๊สแต่ละการทดลอง

ผลรวมของปริมาณไบโอแก๊สแต่ละการทดลองเมื่อครบจำนวน 30 วัน พบว่า การทดลองที่ 8 มีปริมาณสูงสุด 1860.69 mL/g-COD ซึ่งมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 25 และความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 7 โดยผลได้ของไบโอแก๊สน้อยที่สุด คือ การทดลองที่ 7 ซึ่งมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 25 และความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 5.59 มีปริมาณไบโอแก๊สเท่ากับ 52.74 mL/g-COD (ภาพ 9)

4.2 การทดลองซ้ำ (Confirmation Experiment)

จากสมการทำนายผลการทดลองการผลิตแก๊สมีเทนจากฟางข้าวร่วมกับมูลแพะโดยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน พบว่าสภาวะที่เหมาะสมที่สามารถให้ค่าผลได้ของแก๊สมีเทนสูงสุด คือ อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน 25.59 และค่าความเป็นกรด-ด่าง 7.19 สามารถให้ผลได้ของแก๊สมีเทนเท่ากับ 80.72 มิลลิลิตรต่อกรัมซีโอดีที่ลดลง ซึ่งเมื่อนำสภาวะที่ได้มาทำการทดลองซ้ำดังตาราง 11 พบว่าที่สภาวะที่เหมาะสมจากสมการการทำนายพบว่าสามารถให้ผลได้ของแก๊สมีเทนเท่ากับ 80.68 มิลลิลิตรต่อกรัมซีโอดีที่ลดลง ซึ่งมีค่าความแตกต่างระหว่างค่าที่ได้จากการทำนายและค่าที่ได้จาการทดลองจริงเพียง 0.05 เท่านั้น แสดงให้เห็นถึงความน่าเชื่อถือของแบบการทดลองที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้

ตาราง 11 แสดงปริมาณผลได้ของแก๊สมีเทนในสภาวะต่างๆ

ชุดการทดลอง	Condition	C:N ratio	pH	Methane (mL/g-COD)	
				Predicted	Obtained
-	Optimal	25.59	7.19	80.72	80.68
1	High	30.00	8.00	61.74	60.73
0	Medium	25.00	7.00	79.11	78.19
-1	Worst	20.00	6.00	21.05	20.98

บทที่ 5
สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผล

การศึกษาสภาวะเริ่มต้นที่เหมาะสมของการผลิตแก๊สมีเทนจากสับเตรทร่วม ระหว่างมูลแพะกับฟางข้าวโดยกลุ่มจุลินทรีย์ไร้อากาศภายใต้สภาวะการหมักแบบกะ (batch fermentation) ออกแบบการทดลองโดยวิธีดอบสนองพื้นที่ผิว (Response Surface Methodology) ซึ่งได้ทำการศึกษา 2 ปัจจัย คือ อัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N Ratio) และค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) พบว่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สมีเทนสูงสุดเท่ากับ 25.59 และค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7.19 ให้ผลได้ของแก๊สมีเทนเท่ากับ 80.72 มิลลิลิตรต่อกรัมซีโอดี (mL/g-COD) เมื่อนำสภาวะที่ได้มาทำการทดลองซ้ำ พบว่าที่สภาวะที่เหมาะสมจากสมการการทำนายให้ผลได้ของแก๊สมีเทนเท่ากับ 80.68 มิลลิลิตรต่อกรัมซีโอดีที่ลดลง ซึ่งมีค่าความแตกต่างระหว่างค่าที่ได้จากการทำนาย และค่าที่ได้จากการทดลองจริงเพียง 0.04 เท่านั้น แสดงให้เห็นถึงความน่าเชื่อถือของแบบการทดลองที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้

5.2 อภิปรายผล

อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) และค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ทั้ง 2 ปัจจัยมีผลต่อผลได้ของแก๊สมีเทนจากกระบวนการหมักแบบไร้อากาศ จากผลการทดลองพบว่าเมื่อกำหนดค่าของอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 20.00 สามารถให้ผลได้ของแก๊สมีเทนเท่ากับ 20.98 มิลลิลิตรต่อกรัมซีโอดีที่ลดลง และเมื่อเพิ่มอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนจาก 20.00 ถึง 25.59 พบว่าผลได้ของแก๊สมีเทนเพิ่มสูงขึ้นเท่ากับ 80.68 มิลลิลิตรต่อกรัมซีโอดีที่ลดลง เนื่องจากที่อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมสามารถทำให้อัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์ และกิจกรรมของจุลินทรีย์เพิ่มสูงขึ้น (Yokoi et al., 2001) และนอกจากนั้นอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่มีค่าต่ำจะทำให้จุลินทรีย์นำสารอาหารไปใช้ในการสร้างเซลล์ (Sreela-or, 2011) แต่เมื่อเพิ่มอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนสูงกว่า 25 ผลได้ของแก๊สมีเทนลดลง เนื่องจากขาดธาตุไนโตรเจนที่ใช้ในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ (Lin and Lay, 2004) การผลิตแก๊สมีเทนจากฟางข้าวร่วมกับมูลแพะโดยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนพบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นที่ 6.00 สามารถให้ผลได้ของแก๊สมีเทนเท่ากับ 20.98 มิลลิลิตรต่อกรัมซีโอดีที่ลดลง และเมื่อเพิ่มค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นจาก 6.00 ถึง 7.19 พบว่าผลได้ของแก๊สมีเทนสูงขึ้นเท่ากับ 80.68 มิลลิลิตรต่อกรัมซีโอดีที่ลดลง เนื่องจากที่ค่าความเป็นกรด-ด่างทีเหมาะสมจะทำให้กิจกรรมของจุลินทรีย์เกิดขึ้นได้ดี ค่าความเป็นกรด-ด่างต่ำจะส่งผลให้ระยะเวลาการ

ปรับตัว (Lag time) ของจุลินทรีย์มีระยะเวลานาน (Van Ginkel et al., 2001) และนอกจากนั้น ค่าความเป็นกรด-ด่างที่ต่ำอาจจะยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ (Reungsang and Sreela-or, 2013) จะเห็นได้จากการทดลองครั้งนี้เมื่อเพิ่มค่าความเป็นกรด-ด่างให้สูงขึ้นจะทำให้ผลได้ของมีเทนเพิ่มขึ้นตามไปด้วย แต่ในทางตรงกันข้ามหากเพิ่มปริมาณค่าความเป็นกรด-ด่างสูงกว่า 7.19 ผลได้ของแก๊สมีเทนมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากค่าความเป็นกรด-ด่างที่สูงจะส่งผลทำให้ผนังเซลล์ของจุลินทรีย์เกิดความเสียหาย (Khanal et al., 2004)

5.3 ข้อเสนอแนะ

5.3.1 เพื่อให้การทดลองสามารถใช้ได้จริงจึงควรนำการทดลองไปใช้กับระบบหมักแบบต่างๆ เพื่อให้ทราบความแตกต่างของผลได้ของแก๊สมีเทนเมื่อใช้ระบบหมักที่แตกต่างกัน

5.3.2 ในการนำฟางข้าวที่มีความสด แห้ง ที่แตกต่างกัน มีผลต่ออัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน ดังนั้นจึงควรระมัดระวังในการนำฟางข้าวที่มีความแตกต่างกันมาทำการทดลองซึ่งจะมีผลต่อปริมาณแก๊สมีเทนได้

5.3.3 เพื่อลดปริมาณการปลดปล่อยสารพิษสู่สิ่งแวดล้อม ในกระบวนการปรับ ค่าความเป็นกรด-ด่าง เนื่องจากใช้สารเคมีกรด และด่างที่มีความเข้มข้นสูงควรเพิ่มความระมัดระวังในการทดลองเพื่อลดการปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2556). **ปริมาณผลผลิตฟางข้าว.** [online].Available: www.dede.go.th/dede/index.php?option=com. [2556, ธันวาคม 20].

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2556). **การผลิตแก๊สธรรมชาติจากของเสียฟาร์มปศุสัตว์และโรงงานอุตสาหกรรม.** [online].Available: www.dede.go.th/kmber/Attach_ /Biogas-present.pdf. [2556, ธันวาคม 20].

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2556). **โครงสร้างฟางข้าว.** [online].Available: www.ldd.go.th. [2556, ธันวาคม 22].

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. (2556). **การใช้ประโยชน์จากมูลสัตว์.** [online].Available: www.dede.go.th e-book.ram.edu/e-book/a/AT335/AT335-2.pdf. [2556, ธันวาคม 28].

กลุ่มสารสนเทศและข้อมูลสถิติ ศูนย์สารสนเทศ กรมปศุสัตว์. (2555). **ข้อมูลเกษตรกรผู้เลี้ยงแพะแกะ รายอำเภอ ปีงบประมาณ 2555.** [online].Available: www.dede.go.th/dede /index.php?option=com. [2556, ธันวาคม 28].

กัลยาณี เต็งพงศธร. (2554). **เอกสารประกอบการสอนวิชาการวางแผนการทดลองทางอุตสาหกรรมเกษตร.** คณะอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง. 3-4 หน้า.

คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา. (2548). **ปฐพีวิทยาเบื้องต้น.** ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 547 หน้า.

จุรีย์ ช่วยชาติ. (ม.ป.ป). **การผลิตแก๊สมีเทนจากกากตะกอนดีแคนเตอร์โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มร่วมกับมูลสุกร.** ตรัง:โรงเรียนบ้านคลองโดน

ชนะ เปลื้องกลาง. (2554). **ผลของการเสริมกลีเซอรีนต่อการเกิดแก๊สมีเทนจากมูลโค.** สุโขทัย:มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช

ชนกพร วงษ์วัน, อรทัย ชวาลภาฤทธิ์. (2555). **การผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักร่วมของต้นข้าวโพดที่ปรับสภาพเบื้องต้นร่วมกับของเสียกลีเซอรอล.** กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

พิชญ รัชฎาวงศ์, สุรพงศ์ นนทประเสริฐ. (2555). **การผลิตแก๊สมีเทนของใบอ้อยที่ผ่านการบำบัดเบื้องต้นโดยใช้วิธีทางความร้อนและทางชีวภาพ.**กรุงเทพฯ:จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

น้ำเพชร พันธุ์พิพัฒน์, สุภวัฒน์ วิวรรธ์ภัทรกิจ. (2555). **ศึกษาศักยภาพการผลิตไฟฟ้าด้วยไบโอแก๊สที่ผลิตจากเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร.** กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บรูด ลินคิส และเพง เช้งชื้อ. (2548). **การจัดการกับธาตุอาหารสำหรับข้าวนาพื้นที่ราบใน ส.ป.ป. ลาว**. สถาบันวิจัยเกษตรกรรมและป่าไม้ กระทรวงเกษตรและป่าไม้. 100 หน้า. (ภาษาลาว)

ปิยทัศน์ พุ่มทองดรู. (2535). **การผลิตโปรตีนเซลล์เดียวจากฟางข้าว**. กรุงเทพฯ:จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ยงยุทธ โอสถสภา, อรรถศิษฐ์ วงศ์มณีโรจน์, และชวลิต ฮงประยูร. (2551). **ปุ๋ยเพื่อการเกษตรยั่งยืน.** (พิมพ์ครั้งที่ 1). สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ. 519 หน้า.

วิจิตรา ยงยุทธอำไพ. (2554). **ลดการเผาฟางข้าวและตอซัง ลดภาวะโลกร้อน**. มูลนิธิรักษ์ไทย.[online]. Available: www.raksthai.org/thai/news/detail.php?content=1&topic [2556, ธันวาคม 20].

สุริยะ สะวานนท์, สมชัย จันทร์สว่าง. (ม.ป.ป). **การศึกษาการเปรียบเทียบการย่อยสลายมูลสุกรด้วยจุลินทรีย์อีเอ็มกับจุลินทรีย์ผลิตมีเทน**. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

สมจินดนา ลิ้มสุข, ปุณยวี เพียรธรรม,อนุรักษ์ ปีตีรักษ์กุล. (2554). **การผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหารร่วมกับกลีเซอรีนดิบที่ได้จากกระบวนการผลิตไบโอดีเซล**. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

สมพงษ์ เชิดอยู่, พุทธชาต เมฆทอง, สุวิน อภิชาตพัฒนศิริ. (ม.ป.ป). **การจัดการของเสียจากโรงเพาะเลี้ยงสัตว์ทดลองเพื่อลดโลกร้อน.** มหาวิทยาลัยมหิดล

สำนักส่งเสริมการค้าสินค้าเกษตรกรมการค้าภายใน กระทรวงพาณิชย์. (2556). **สถิติปริมาณฟางข้าวในประเทศไทย.** กรุงเทพฯ

อินแปง ดวงวงสา. (2553). **การจัดการฟางข้าวเพื่ออนุรักษ์ธาตุ N, P, และ K ในดินนาของประเทศลาว** วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (สาขาเกษตรศาสตร์). เกษตรศาสตร์มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี.

APHA. (1997). Standard Methods of the Examination of Water and Wastewater. **American Public Health Association**, Washington DC, USA. [online].www. scialert.net/fulltext/?doi=jas.2011.2460.2463&org=11#71614_b. [2556, ธันวาคม 28].

Box, G. E. P. and Behnken, D. W. (1960). Some new three level designs for the study of quantitative variables. **Technometrics**. 2: 455–475.

Gan, C. Y. and Latiff, A. A. (2011). Extraction of antioxidant pectic-polysaccharide from

mangosteen (*Garcinia mangostana*) rind: optimization using response surface methodology. **Carbohydrate Polymers**. 83: 600–607.

Montogomery, D.C. (2001). Desing and analysis of experiments. New York: **John Wiley & Sons Inc**. pp. 427 -510.

Reungsang, A. & Sreelaor, C. (2013, April). Bio-Hydrogen Production from Pineapple Waste Extract by Anaerobic Mixed Cultures. **Energies**. 6: 2175-2190.

Sreela-or, C., Plangklang, P. & Reungsang, A. (2011, Jun). Co-digestion of food waste and sludge for hydrogen production by anaerobic mixed cultures. **ELSEVIER**. 36: 14227-14237.

Sreela-or, C., Imai, T., Plangklang, P. & Reungsang, A. (2011, May). Optimization of key factors affecting hydrogen production from food waste by anaerobic mixed cultures. **ELSEVIER**. 36: 14120-14133.

Harwood, F.E. Rey, E.K. Heiniger. (1997). Optimization of initial substrate and pH level for germination of sporing hydrogen-producing anaerobes in cow dung compost. **Bioresour Techno**. 91: 189-93.

Khanal, S.K., Chen, W.H. & Sung, S. (2004). Biological hydrogen production: effects of pH and intermediate products. **Int J Hydrogen Energy**. 29: 31-1123.

Lin, C.Y. & Lay, C.H. (2004). Carbon/nitrogen-ratio effect on fermentative hydrogen production by mixed microfora. **Int J Hydrogen Energy**. 29: 5-21.

Van Ginkel, S., Sung, S.W. & Lay, J.J. (2001). Biohydrogen production as a function of pH and substrate concentration. **Environ Sci-Technol**. 35: 30-4726.

Yokoi, H., Saitsu. A., Uchida, H., Hirose, J. & Takasaki, Y. (2001). Microbial hydrogen production from sweet potato starch residue. **J Biosci Bioeng**. 91: 58-63.

Yenfeng He, Yunzhi Pang, Yanping Liu, Xiujin Li, Kuisheng Wang. (2008). **physicochemical Characterization of Rice straw Pretreated with Sodium Hydroxide in the Solid state for Enhacing Biogas Production**. Beijing: Beijing University

ภาคผนวก

ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ-สกุล	ทวี คำภิลานน
วัน เดือน ปีเกิด	14 ธันวาคม 2523
สถานที่เกิด ที่อยู่	115 หมู่ 4 ตำบลวังโพรง อำเภอเนินมะปราง จังหวัดพิษณุโลก
ปัจจุบัน ตำแหน่ง	ฟาร์มเส้นทางเห็ด 193 หมู่ 11 ตำบลท่าโพธิ์ อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000 (ประกอบธุรกิจส่วนตัว)
สถานที่ทำงาน	ฟาร์มเส้นทางเห็ด 193 หมู่ 11 ตำบลท่าโพธิ์ อำเภอเมือง จังหวัดพิษณุโลก 65000

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2537	ประถมศึกษาปีที่ 6 โรงเรียนบ้านวังโพรง
พ.ศ. 2539	มัธยมศึกษาปีที่ 3 โรงเรียนวังโพรงวิทยาคม
พ.ศ. 2542	มัธยมศึกษาปีที่ 6 โรงเรียนวังโพรงพิทยาคม
พ.ศ. 2555	วิทยาศาสตร์บัณฑิต (พืชศาสตร์) มหาวิทยาลัย ราชภัฏพิบูลสงคราม
พ.ศ. 2557	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีและการจัดการสิ่งแวดล้อม) มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม