

การผลิตแก๊สชีวภาพจากกากของแข็งที่ได้จากอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม



นายทักษณีย์ วุฒิกุล

สถาบันวิทยบริการ

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปีการศึกษา 2549

ISBN 974-14-2033-1

ลิขสิทธิ์ของจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

**BIOGAS PRODUCTION FROM INDUSTRIAL OIL-PALM SOLID WASTES**



**Mr. Tuksadon Wutikhun**

สถาบันวิทยบริการ

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย  
**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements  
for the Degree of Master of Science Program in Biotechnology**

**Faculty of Science**

**Chulalongkorn University**

**Academic Year 2006**

**ISBN 974-14-2033-1**



ทักษนัย วุฒิกุล : การผลิตแก๊สชีวภาพจากกากของแข็งที่ได้จากอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม.  
(BIOGAS PRODUCTION FROM INDUSTRIAL OIL-PALM SOLID WASTES) อ. ที่ปรึกษา :  
รศ.ดร. นภา ศิวรังสรรค์, อ.ที่ปรึกษาร่วม:รศ.ดร. นิพนธ์ พิสุทธิไพศาล 109 หน้า. ISBN 974-14-  
2033-1.

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพโดยใช้กากของเสียที่ได้จากอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มเป็นวัตถุดิบ โดยใช้เชื้อจุลินทรีย์ที่ได้จากกระบวนการบำบัดน้ำเสียจากระบบยูเอเอสบีเป็นหัวเชื้อ การทดลองทำในขวดหมักขนาด 100 มิลลิลิตร และ 2 ลิตร การทดลองในขวดขนาด 100 มิลลิลิตรได้ทำการแปรผันค่าของความเข้มข้นกากปาล์มเป็น 0%, 5% ,10% และ 15% ค่า pH ที่ 5.8 และ pH 7.0 และอุณหภูมิที่ 37°C และ 55 °C ผลการทดลองพบว่าการหมักในภาวะที่มีการเติมการปาล์มที่ความเข้มข้นกากปาล์ม 5% อุณหภูมิ 37 °C pH 5.8 และ 7.0 เกิดปริมาณแก๊สมีเทน และแก๊สไฮโดรเจนในปริมาณที่สูงที่สุดเมื่อเทียบกับการทดลองกรณีอื่นๆ โดยที่ pH 5.8 มีอัตราการผลิตแก๊สมีเทนเท่ากับ 0.46 ml/gTVS/วัน โดยปริมาณแก๊สมีเทนที่เกิดขึ้นทั้งหมดเท่ากับ  $246.79 \pm 7.27$  ไมโครโมล หรือ  $81.78 \pm 2.41$  มิลลิลิตร และมีอัตราการผลิตแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 0.32 ml/gTVS/วัน โดยเกิดแก๊สไฮโดรเจนจำนวน  $57.79 \pm 4.16$  ไมโครโมล หรือ  $19.15 \pm 1.38$  มิลลิลิตร และที่ pH 7.0 มีอัตราการผลิตแก๊สมีเทนเท่ากับ 0.60 ml/gTVS/วัน โดยเกิดแก๊สมีเทนจำนวน  $320.08 \pm 6.31$  ไมโครโมล หรือ  $106.07 \pm 2.09$  มิลลิลิตร และมีอัตราการผลิตแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 0.26 ml/gTVS/วัน โดยเกิดแก๊สไฮโดรเจนจำนวน  $47.35 \pm 1.32$  ไมโครโมล หรือ  $15.69 \pm 0.44$  มิลลิลิตร ซึ่งปริมาณแก๊สมีเทน และไฮโดรเจนที่ผลิตได้แปรผกผันกันปริมาณความเข้มข้นของกากปาล์มทุกภาวะของการทดลอง สำหรับการผลิตแก๊สชีวภาพในขวดแก้วขนาด 2 ลิตร ได้เลือกใช้ภาวะที่มีการเติมกากปาล์ม pH และ อุณหภูมิที่ให้ผลผลิตก๊าซชีวภาพสูงสุดในการหมักในขวดซีรัมขนาด 100 มิลลิลิตร จากการทดลองพบว่า ที่ pH 5.8 อุณหภูมิ 37°C มีอัตราการผลิตแก๊สมีเทนเท่ากับ  $8.33 \times 10^{-4}$  ml/gTVS/วัน โดยเกิดแก๊สมีเทนจำนวน 3.86 ไมโครโมล หรือ 1.28 มิลลิลิตร และมีอัตราการผลิตแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 0.06 ml/gTVS/วัน โดยเกิดแก๊สไฮโดรเจนจำนวน 255.44 ไมโครโมล หรือ 84.65 มิลลิลิตรและที่ pH 7.0 อุณหภูมิ 37°C มีอัตราการผลิตแก๊สมีเทนเท่ากับ  $3.15 \times 10^{-3}$  ml/gTVS/วัน โดยเกิดแก๊สมีเทนจำนวน 16.30 ไมโครโมล หรือ 5.40 มิลลิลิตร และมีอัตราการผลิตแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 0.06 ml/gTVS/วัน โดยเกิดแก๊สไฮโดรเจนจำนวน 305.59 ไมโครโมล หรือ 101.26 มิลลิลิตร เมื่อทำการเปรียบเทียบผลการทดลองในขวดซีรัมขนาด 100 มิลลิลิตร และขวดแก้วขนาด 2 ลิตร พบว่าการหมักในขวดซีรัมขนาด 100 มิลลิลิตร มีประสิทธิภาพมากกว่าการหมักในขวดแก้วขนาด 2 ลิตร

สาขาวิชา.....เทคโนโลยีชีวภาพ.....

ปีการศึกษา 2549

ลายมือชื่อนิสิต..... ทักษนัย วุฒิกุล .....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษา..... รศ.ดร. นภา ศิวรังสรรค์ .....

ลายมือชื่ออาจารย์ที่ปรึกษาร่วม..... รศ.ดร. นิพนธ์ พิสุทธิไพศาล .....

KEY WORD: BIOGAS / SOLID WASTES / BIOHYDROGEN / PALM / ANAEROBIC MICROORGANISM

TUKSADON WUTIKHUN : BIOGAS PRODUCTION FROM INDUSTRIAL OIL-PALM SOLID WASTES. THESIS ADVISOR : ASSOC. PROF. NAPA SIWARUNGSON, Ph.D., THESIS COADVISOR : ASSIST. PROF. NIPON PISUTPAISAL, Ph.D., 109 pp. ISBN 974-14-2033-1.

This research was the study on biogas production from oil-palm solid waste leftover in the palm-oil extraction industry. The experiment was conducted into two reactor types, 100-mL serum bottle and 2-L glass bottle, using UASB granules as an inoculum. Initial study was focused on the biogas production in 100-mL serum bottle in the different experimental conditions including varied oil-palm solid waste concentrations of 0%, 5%, 10% and 15%; pHs of 5.8 and 7.0; and temperatures of 37°C and 55 °C. The results showed experiments with oil-palm concentration of 5%; pH 5.8 and 7.0; and 37 °C yielded the highest methane and hydrogen volume. At pH 5.8, methane production rate was 0.46 ml/gTVS/day, and the total accumulated mole and volume were  $246.79 \pm 7.27$   $\mu$ moles and  $81.78 \pm 2.41$  ml, respectively, whereas the hydrogen production rate was 0.32 ml/gTVS/day, and the total accumulated mole and volume were  $57.79 \pm 4.16$   $\mu$ moles, and  $19.15 \pm 1.38$  ml. At pH 7.0, the methane production rate was 0.60 ml/gTVS/day, and the total accumulated mole and volume were  $320.08 \pm 6.31$   $\mu$ moles and  $106.07 \pm 2.09$  ml, whereas the hydrogen production rate was 0.26 ml/gTVS/day, and the total accumulated mole and volume were  $47.35 \pm 1.32$   $\mu$ moles or  $15.69 \pm 0.44$  ml. The methane and hydrogen yields inversely proportions to the oil-palm concentrations for all experimental conditions. The experiment conditions with oil-palm concentration of 5%; pH 5.8 and 7.0; and 37 °C were chosen to set up in 2-L bottle. At pH 5.8, the methane production rate was  $8.33 \times 10^{-4}$  ml/gTVS/day, and the total accumulated mole and volume were 3.86  $\mu$ moles, and 1.28 ml, respectively, whereas the hydrogen production rate was 0.06 ml/gTVS/day, and the total accumulated mole and volume were 255.44  $\mu$ moles or 84.65 ml, respectively. At pH 7.0, methane production rate was  $3.15 \times 10^{-3}$  ml/gTVS/day, and the total accumulated mole and volume were 16.30  $\mu$ mol or 5.40 ml, whereas the hydrogen production rate was 0.06 ml/gTVS/day, and the total accumulated mole and volume were 305.59  $\mu$ moles or 101.26 ml. At the same experimental conditions, higher methane and hydrogen production rate in 100-mL reactor compared with 2-L reactor.

Field of study.....Biotechnology..... Student's signature.....*Tuksadon Wutikhun*.....

Academic year .....2006.....

Advisor's signature.....*Napa Siwarungson*.....

Co-advisor's signature.....*Nipon Pisutpaisal*.....

## กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. นภา ศิวรังสรรค์ อาจารย์ที่ปรึกษา และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นิพนธ์ พิสุทธิไพศาล อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ที่ได้ให้ความกรุณาเป็นอาจารย์ที่ปรึกษา คอยให้คำแนะนำ และให้ความช่วยเหลือตลอดระยะเวลาที่ผู้เขียนได้ศึกษา และทำงานวิจัย

ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร. อรัญ อินเจริญศักดิ์ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. กนกทิพย์ ภัคดีบำรุง และรองศาสตราจารย์ ดร. ศิริรัตน์ เร่งพิพัฒน์ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ที่กรุณาให้คำแนะนำแก่ผู้เขียน

ขอขอบคุณ ภาควิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์ หลักสูตรเทคโนโลยีชีวภาพ บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่ได้อนุเคราะห์สถานที่ และทุนในการวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ อาจารย์ เพื่อนๆ พี่ๆ น้องๆ ที่หลักสูตรเทคโนโลยีชีวภาพ ที่ภาควิชาชีวเคมี และน้องๆ ที่ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ที่คอยให้คำแนะนำ ช่วยเหลือในทุกๆ เรื่องเป็นอย่างดีตลอดเวลาที่ได้ทำงานวิจัย

สุดท้ายนี้ ขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา และญาติพี่น้องทุกคน ที่ให้ความช่วยเหลือ และเป็นกำลังใจที่ดีแก่ผู้เขียนจนสำเร็จการศึกษา

ศาสตราจารย์ ดร. อรุณ วัชรวิภากร  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย.....	ง
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....	จ
กิตติกรรมประกาศ.....	ฉ
สารบัญตาราง.....	ช
สารบัญรูป.....	ฌ
บทที่ 1 บทนำ.....	1
บทที่ 2 การตรวจเอกสาร.....	6
2.1 ทรัพยากรพลังงาน.....	6
2.2 แก๊สชีวภาพ.....	7
2.3 แก๊สไฮโดรเจน.....	17
2.4 การผลิตแก๊สไฮโดรเจนโดยวิธีการหมักแบบไร้แสงไร้อากาศ.....	27
2.5 ปัจจัยที่ควบคุมกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน.....	30
2.6 กากของเสียจากอุตสาหกรรมการสกัดน้ำมันปาล์ม.....	33
บทที่ 3 อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง.....	47
3.1 วัสดุ อุปกรณ์ และสารเคมี.....	47
3.2 พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา และการวิเคราะห์ห้ข้อมูลในการทดลอง.....	51
3.3 ระเบียบวิธีวิจัย.....	51
3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล.....	53
บทที่ 4 ผลการทดลอง และวิจารณ์ผลการทดลอง.....	60
4.1 ถังหมักขนาด 100 มิลลิลิตร.....	60
4.2 ถังหมักขนาด 2 ลิตร.....	93
บทที่ 5 สรุปผลการทดลอง.....	101
รายการอ้างอิง.....	103
ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์.....	109

## สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 การผลิตแก๊สมีเทนและแก๊สไฮโดรเจนด้วยวิธีทางชีวภาพ.....	9
2.2 อนุกรมวิธานของแบคทีเรียที่ผลิตแก๊สมีเทน.....	13
2.3 ชนิดของแบคทีเรียและสารตั้งต้นในกระบวนการผลิตแก๊สมีเทน.....	15
2.4 สมบัติของแก๊สไฮโดรเจน.....	18
2.5 จุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการผลิตแก๊สไฮโดรเจน.....	23
2.6 ข้อดีและข้อเสียของการนำจุลินทรีย์ในกลุ่มต่างๆ มาผลิตแก๊สไฮโดรเจน.....	29
2.7 ประเภทของสารพิษต่างๆในระบบการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน.....	32
2.8 ปริมาณของกรดไขมันอิสระชนิดต่างๆในน้ำมันปาล์มดิบ.....	36
2.9 ปริมาณสารต่างๆ ที่มีอยู่ในน้ำมันปาล์ม.....	36
2.10 ส่วนประกอบในเมล็ดของน้ำมันปาล์ม.....	37
2.11 กรดไขมัน ในน้ำมันเมล็ดในปาล์มกับน้ำมันมะพร้าว.....	37
2.12 องค์ประกอบของเสียที่เป็นของแข็งต่อต้านของผลปาล์มสด.....	46
3.1 องค์ประกอบและความเข้มข้นของแก๊สมาตรฐาน .....	56
3.2 การวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์แก๊สที่เกิดขึ้น .....	59
4.1 ปริมาตรแก๊สชีวภาพสะสมจากการทดลอง.....	90
4.2 อัตราการผลิตแก๊สชีวภาพจากการทดลอง.....	91
4.3 เปรียบเทียบปริมาตรแก๊สชีวภาพต่อกรัมของสารอินทรีย์แห้ง ระบายได้.....	92
4.4 ปริมาตรแก๊สสะสมที่เกิดขึ้นจากการหมักในถังหมักขนาด 2 ลิตร .....	100
4.5 ปริมาตรแก๊สที่ได้จากการหมักในขวดซีรัมขนาด 100 มิลลิลิตร และปริมาตร แก๊สที่ได้จากการหมักในขวดแก้วขนาด 2 ลิตร ภายใต้ภาวะเดียวกัน.....	100



## สารบัญรูป

ณ

รูปที่	หน้า
1.1	2
1.2	5
2.1	11
2.2	21
2.3	26
2.4	34
2.5	34
2.6	39
2.7	39
2.8	40
2.9	41
2.10	43
3.1	48
3.2	50
3.3	50
3.4	52
3.5	55
3.6	57
4.1	62
4.2	63
4.3	66
4.4	67
4.5	69

รูปที่	หน้า
4.6 แก๊สชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักที่อุณหภูมิ 37 °C pH 7.0 ความเข้มข้นกากปาล์มต่างๆ.....	70
4.7 ปริมาณของแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักที่อุณหภูมิ 37 °C pH 7.0 ความเข้มข้นกากปาล์มต่างๆ.....	73
4.8 ปริมาณของแก๊สชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักที่อุณหภูมิ 37 °C pH 7.0 ความเข้มข้นกากปาล์มต่างๆ.....	74
4.9 แก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักที่อุณหภูมิ 55 °C pH 5.8 ความเข้มข้นกากปาล์มต่างๆ.....	76
4.10 แก๊สชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักที่อุณหภูมิ 55 °C pH 5.8 ความเข้มข้นกากปาล์มต่างๆ.....	77
4.11 ปริมาณของแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักที่อุณหภูมิ 55 °C pH 5.8 ความเข้มข้นกากปาล์มต่างๆ.....	79
4.12 ปริมาณของแก๊สชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักที่อุณหภูมิ 55 °C pH 5.8 ความเข้มข้นกากปาล์มต่างๆ.....	80
4.13 แก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักที่อุณหภูมิ 55 °C pH 7.0 ความเข้มข้นกากปาล์มต่างๆ.....	82
4.14 แก๊สชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักที่อุณหภูมิ 55 °C pH 7.0 ความเข้มข้นกากปาล์มต่างๆ.....	83
4.15 ปริมาณของแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักที่อุณหภูมิ 55 °C pH 7.0 ความเข้มข้นกากปาล์มต่างๆ.....	85
4.16 ปริมาณของแก๊สชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักที่อุณหภูมิ 55 °C pH 7.0 ความเข้มข้นกากปาล์มต่างๆ.....	86
4.17 แก๊สมีเทนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักที่อุณหภูมิ 37 °C pH 5.8 ความเข้มข้นกากปาล์ม 5%.....	94
4.18 แก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักที่อุณหภูมิ 37 °C pH 5.8 ความเข้มข้นกากปาล์ม 5%.....	95
4.19 แก๊สมีเทนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักที่อุณหภูมิ 37 °C pH 7.0 ความเข้มข้นกากปาล์ม 5%.....	97

รูปที่

หน้า

4.20 แก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักที่อุณหภูมิ 37 °C pH 7.0 ความเข้มข้นกากปาล์ม 5%.....

98



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

# บทที่ 1

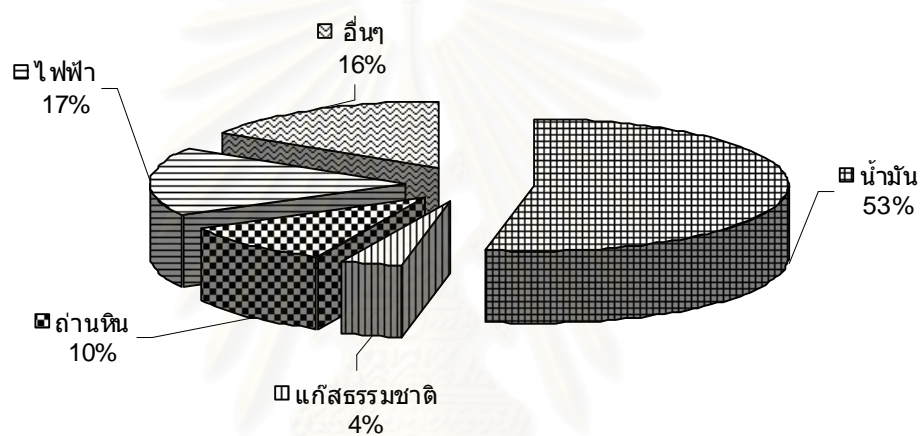
## บทนำ

### 1.1 ความเป็นมา และความสำคัญของปัญหา

พลังงานเป็นสิ่งสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจ และการดำเนินชีวิตของประชาชน ในแต่ละปีประเทศไทยมีการใช้พลังงานเป็นจำนวนมาก ดังจะเห็นได้จากข้อมูลของกระทรวงพลังงานที่รายงานถึงการใช้พลังงานทั้งหมดในปี 2548 พบว่าประเทศไทยมีการใช้พลังงานทั้งหมดเท่ากับ 9.3 หมื่นล้านลิตร เทียบเท่าน้ำมันดิบ โดยพลังงานที่ใช้กันในประเทศไทยจะประกอบไปด้วย น้ำมันสำเร็จรูป 53% แก๊สธรรมชาติ 4% ถ่านหิน 10% พลังงานไฟฟ้า 17% และพลังงานอื่นๆ อีก 16% (กระทรวงพลังงาน, 2549) ดังแสดงในรูปที่ 1.1

จากข้อมูลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าในแต่ละปีประเทศไทยมีการใช้พลังงานจากน้ำมันมากที่สุด เมื่อเทียบกับพลังงานชนิดอื่น ทำให้ประเทศไทยจะต้องนำเข้าน้ำมันจากต่างประเทศในปริมาณสูงในแต่ละปี เนื่องจากน้ำมันเป็นแหล่งพลังงานที่มีอยู่อย่างจำกัด และคาดว่าจะหมดไปจากโลกในไม่ช้า ประกอบกับสถานการณ์ราคาน้ำมันมีราคาแพงส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจทั่วโลกเป็นอย่างมาก สถานการณ์ดังกล่าวก่อให้เกิดความตื่นตัว และความพยายามที่จะหาพลังงานทดแทนมาใช้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งจากพลังงานหมุนเวียน (renewable energy) เช่น พลังงานจากแสงอาทิตย์ พลังงานจากน้ำ และพลังงานจากลม เป็นต้น เพื่อทดแทนการใช้พลังงานน้ำมัน

พลังงานจากชีวมวลในรูปของแก๊สชีวภาพ เป็นพลังงานหมุนเวียนที่น่าสนใจชนิดหนึ่ง เพราะองค์ประกอบหลักในแก๊สชีวภาพ คือ แก๊สมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) ซึ่งมีค่าความร้อนสูง และสามารถนำมาใช้เป็นพลังงานได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้การผลิตแก๊สชีวภาพยังเป็นประโยชน์ต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย เพราะแก๊สชีวภาพสามารถผลิตได้จากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน ซึ่งจุลินทรีย์ที่ทำการผลิตแก๊สชีวภาพ สามารถลดปริมาณสารอินทรีย์ได้ 50 -70% โดยน้ำหนัก ดังนั้นหากวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตแก๊สชีวภาพเป็นขยะเหลือทิ้ง หรือน้ำเสียที่ประกอบด้วยสารอินทรีย์ที่มีปริมาณสูงแล้ว การผลิตแก๊สชีวภาพโดยใช้วัตถุดิบดังกล่าว จะเป็นประโยชน์ทั้งในแง่ของการลดปริมาณขยะ แล้วยังเป็น การเปลี่ยนของเสียให้เป็นพลังงานที่มีค่ามากยิ่งขึ้นอีกด้วย



รูปที่ 1.1 เปรอร์เซ็นต์การใช้พลังงานในรูปแบบต่างๆ ในประเทศไทย (กระทรวงพลังงาน, 2549)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

นอกเหนือจากแก๊สมีเทนที่ผลิตได้จากกระบวนการหมักแบบไร้อากาศแล้ว แก๊สไฮโดรเจน ( $H_2$ ) ยังเป็นพลังงานทางเลือกที่น่าสนใจทางหนึ่ง เนื่องจากไฮโดรเจนมีค่าความร้อนต่อหน่วยสูง ให้พลังงานมากถึง 1-3 เท่า ของพลังงานฟอสซิล และยังเป็นพลังงานที่สะอาด เนื่องจากกระบวนการเผาไหม้จะมีเพียงน้ำที่ถูกปลดปล่อยออกเป็นผลิตภัณฑ์สุดท้าย ซึ่งไม่ก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศดังเช่นกระบวนการเผาไหม้น้ำมันปิโตรเลียม และถ่านหิน แก๊สไฮโดรเจนสามารถผลิตได้หลายวิธี ได้แก่ วิธีทางเคมีกายภาพ เช่น การใช้กระแสไฟฟ้าแยกไฮโดรเจนออกจากน้ำ (electrolysis) การแยกไฮโดรเจนจากแก๊สมีเทน (steam reforming) เป็นต้น และวิธีทางชีวภาพซึ่งได้แก่ กระบวนการใช้จุลินทรีย์แบบไม่ใช้แสงภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน และกระบวนการใช้จุลินทรีย์ประเภทสังเคราะห์แสง เป็นต้น แม้ว่าแก๊สไฮโดรเจนที่ใช้อยู่ในปัจจุบันจะได้จากการผลิตโดยวิธีเคมีกายภาพ แต่วิธีดังกล่าวมีต้นทุนสูง ดังนั้นการค้นคว้าวิจัยเพื่อต้องการให้ต้นทุนการผลิตแก๊สไฮโดรเจนต่ำลง จึงได้รับความสนใจ ซึ่งกระบวนการผลิตแก๊สไฮโดรเจนโดยวิธีชีวภาพนั้น มีความเป็นไปได้สูง ถ้าหากวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเป็นวัสดุที่มีต้นทุนต่ำ และมีองค์ประกอบของสารอินทรีย์ในปริมาณสูง

ในประเทศไทยเริ่มมีการส่งเสริมให้เกษตรกรขยายพื้นที่การปลูกปาล์มน้ำมันพันธุ์ดีมากขึ้น เพื่อให้เพียงพอต่อการบริโภคที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และนำไปใช้ผลิตไบโอดีเซล อีกทั้งปาล์มน้ำมันมีต้นทุนการผลิตต่ำ ให้ผลผลิตต่อพื้นที่สูง น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมของผลิตภัณฑ์ต่างๆ ได้หลากหลาย ทั้งด้านอุปโภค และบริโภค เช่น อุตสาหกรรมเพื่อการบริโภค อุตสาหกรรมนมข้นหวาน และนมจืด อุตสาหกรรมบะหมี่สำเร็จรูป อุตสาหกรรมเนยขาว และเนยเทียม อุตสาหกรรมครีมเทียม อุตสาหกรรมของว่าง และขนมเคี้ยว อุตสาหกรรมสบู่ และอุตสาหกรรมเครื่องอุปโภคอื่นๆ เช่น พลาสติก เครื่องสำอาง น้ำมันหล่อลื่น และยางรถยนต์ เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 1.2 ด้วยเหตุนี้เองจึงทำให้มีการใช้น้ำมันปาล์มเป็นจำนวนมาก ดังนั้นจึงทำให้เกิดของเสียในอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มเป็นจำนวนมาก ของเสียที่เกิดขึ้นนี้จะประกอบไปด้วย ทะลายปาล์มเปล่า กะลา เส้นใยกากของเสียเหล่านี้จะเป็นปัญหาสำคัญที่จะต้องนำไปกำจัดต่อไป โดยทะลายปาล์มเปล่าจะถูกนำไปเผาถมดิน หรือนำไปเพาะเห็ด เส้นใย และกะลานั้นนำไปเป็นเชื้อเพลิงในหม้อไอน้ำ เพื่อนำไปผลิตไอน้ำใช้ในกระบวนการสกัดน้ำมัน หรือผลิตไฟฟ้าใช้ในโรงงาน บางที่อาจนำของเสียเหล่านี้ไปผลิตอาหารสัตว์ก็ได้ จะเห็นได้ว่าวิธีการกำจัดของเสียแบบเดิมจะทำให้เกิดมลภาวะกับสิ่งแวดล้อม โดยทะลายปาล์มเปล่าเมื่อนำไปเผาก็จะทำให้เกิดควันดำสู่อากาศ ส่วนเส้นใย และกะลาเมื่อนำไปเผาเป็นเชื้อเพลิงก็จะทำให้เกิดควันเช่นกัน และนอกจากนี้ยังทำให้เกิดเถ้าถ่านลอยฟุ้งในอากาศด้วย ของเสียที่ต้องกำจัดเหล่านี้จะมีวิธีการกำจัดที่จะทำให้เกิดผลผลิตที่มีมูลค่ามากกว่าที่จะนำไปเผา หรือใช้เป็นปุ๋ย ประกอบกับในปัจจุบันน้ำมันเชื้อเพลิงเริ่มมีราคาเพิ่มสูงขึ้นเรื่อย ๆ และประชากรในประเทศยังคงมี

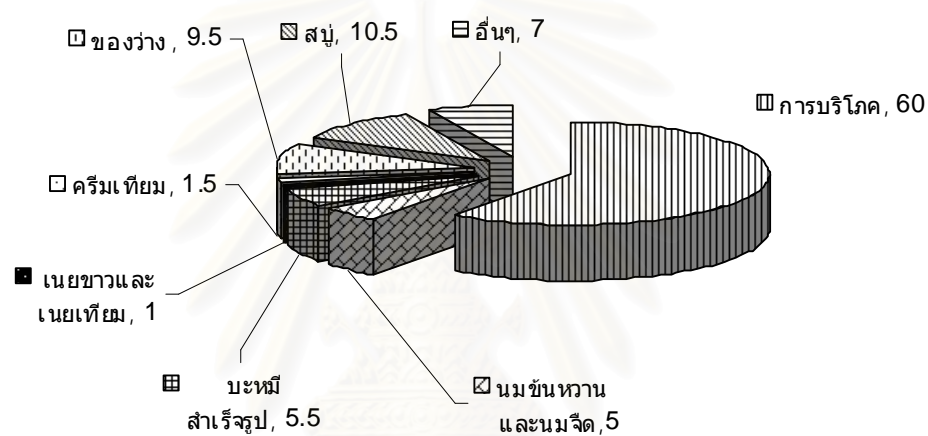
ความต้องการบริโภคพลังงานเพิ่มขึ้นตลอด ดังนั้น กากของเสียเหล่านี้จึงน่าจะนำมาใช้ในการผลิตพลังงานแหล่งใหม่ที่สามารถทดแทนพลังงานเชื้อเพลิงแบบเก่าได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงต้องการที่จะนำวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สมีเทนโดยวิธีทางชีวภาพ

### วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. ศึกษาการผลิตแก๊สไฮโดรเจน และแก๊สมีเทนโดยวิธีชีวภาพ จากกากของเสียที่ได้จากอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบ batch
2. หาภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตแก๊สไฮโดรเจน และแก๊สมีเทน จากกากของเสียที่ได้จากอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม
3. เปรียบเทียบปริมาณแก๊สไฮโดรเจน และแก๊สมีเทนที่ผลิตได้จากกากของเสียจากอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม ที่ความเข้มข้นของกากปาล์ม และที่ภาวะต่างๆ



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 1.2 เปอร์เซ็นต์ของการใช้น้ำมันปาล์มในอุตสาหกรรมต่างๆ (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2547)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



## บทที่ 2

### การตรวจเอกสาร

พลังงานเป็นปัจจัยสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจของโลก และมีความสำคัญต่อกิจกรรมต่างๆ ของมนุษย์ โดยเฉพาะด้านอุตสาหกรรม และด้านขนส่ง ดังนั้นอาจกล่าวได้ว่าพลังงานเป็นทรัพยากรที่ทำให้โลกมีการพัฒนาขับเคลื่อนไปข้างหน้าได้ ประเทศไทยเป็นประเทศที่มีการเติบโตด้านการอุตสาหกรรมอย่างมากในช่วงเวลาสิบปีที่ผ่านมา และมีการขยายตัวด้านขนส่งจึงทำให้มีความจำเป็นต้องใช้พลังงานเป็นจำนวนมาก

#### 2.1 ทรัพยากรพลังงาน

ทรัพยากรพลังงานสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท ดังต่อไปนี้ คือ

##### 2.1.1 พลังงานจากแร่เชื้อเพลิงธรรมชาติ

พลังงานจากแหล่งแร่เชื้อเพลิงธรรมชาติ เป็นแหล่งพลังงานที่เกิดการสะสมของอินทรีย์วัตถุ ภายใต้ความร้อน และความดันเป็นเวลานาน ตั้งแต่สิบล้านปีจนถึงหลายพันล้านปี ทรัพยากรพลังงานชนิดนี้พบได้ทั้งในรูปแบบเป็นของแข็ง ของเหลว และก๊าซ ซึ่งได้แก่ ถ่านหิน (coal) น้ำมันปิโตรเลียม (petroleum) หินน้ำมัน (oil shale) นอกจากนี้ทรัพยากรพลังงานจากแร่เชื้อเพลิงธรรมชาติอีกประเภทหนึ่งที่ไม่ได้เกิดการสะสมของอินทรีย์วัตถุ ได้แก่ เชื้อเพลิงกัมมันตรังสี ซึ่งพลังงานเหล่านี้เมื่อนำมาใช้จะก่อให้เกิดของเสีย และแก๊สพิษที่เป็นปัญหายากต่อการกำจัด

##### 2.1.2 พลังงานจากแหล่งธรรมชาติ

พลังงานจากแหล่งธรรมชาติมีหลายประเภท ได้แก่ พลังงานลม ซึ่งในประเทศไทยได้มีการนำพลังงานลมมาใช้ประโยชน์มาเป็นเวลานานแล้ว แต่ส่วนใหญ่จะใช้ในการเกษตรมากกว่า การนำไปผลิตกระแสไฟฟ้า โดยใช้ในการทำกังหันชักน้ำเข้านา พลังงานน้ำ พลังงานแสงอาทิตย์ โดยพลังงานแสงอาทิตย์จะใช้กันมากในการผลิตกระแสไฟฟ้า แต่มีความนิยมน้อยเนื่องจากต้นทุนสูง และประสิทธิภาพยังต่ำ และพลังงานความร้อนใต้พิภพ จะเป็นการอาศัยพลังงานความร้อนจากหิน หลอมเหลวร้อนใต้ผิวดินที่ถ่ายเทมายังผิวโลก เป็นต้น

##### 2.1.3 พลังงานจากชีวมวล

พลังงานชีวมวล ได้แก่ พลังงานจากฟืน และถ่านไม้ ซึ่งจัดเป็นพลังงานเพื่อการยังชีพที่เก่าแก่ที่สุดของมนุษย์ และวัสดุเหลือใช้จากภาคการเกษตร เช่น แกลบ จี้เลื่อย ฟางข้าว ชานอ้อย และ

ซังข้าวโพด เป็นต้น วัสดุเหลือใช้เหล่านี้สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงได้หลายวิธี เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยตรงในเตาเพื่อผลิตความร้อนในหม้อน้ำ หรือผลิตกระแสไฟฟ้า ทำเป็นเชื้อเพลิงอัดแท่งแทนฟืน หรือนำมาใช้เป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการหมักทางชีวภาพเพื่อผลิตแก๊สชีวภาพ

ในปัจจุบันประเทศไทยมีการใช้เชื้อเพลิงประเภทฟอสซิลเป็นแหล่งพลังงานหลัก และมีแนวโน้มการใช้พลังงานสูงขึ้นเรื่อยๆ แต่แหล่งพลังงานดังกล่าว มีจำนวนจำกัด และปฏิกิริยาการเผาไหม้เชื้อเพลิงเพื่อนำไปใช้เป็นพลังงาน จะก่อให้เกิดการปลดปล่อยแก๊สที่เป็นมลพิษทางอากาศ เช่น  $\text{CO}_x$ ,  $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$ ,  $\text{C}_x\text{H}_x$ , ฝุ่น เหมะควัน และสารประกอบอินทรีย์ชนิดต่างๆ เข้าสู่ชั้นบรรยากาศ ซึ่งมลพิษทางอากาศเหล่านี้ จะเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดภาวะเรือนกระจก ฝนกรด และทำให้สภาพอากาศของโลกเกิดการเปลี่ยนแปลง จนทำให้น้ำแข็งบริเวณขั้วโลกเกิดการละลาย ด้วยเหตุนี้เราจึงเริ่มตระหนักถึงปัญหาผลกระทบที่เกิดขึ้น และจำนวนของแหล่งพลังงานที่กำลังจะหมดไป โดยการเริ่มทำการอนุรักษ์พลังงานอย่างแท้จริง ตลอดจนเร่งดำเนินนโยบายสำรวจค้นคว้าวิจัย และพัฒนาแหล่งทรัพยากรพลังงานอย่างกว้างขวาง เพื่อให้มีพลังงานใช้ทดแทนพลังงานจากแหล่งธรรมชาติที่อาจหมดไปในอนาคต

พลังงานชีวมวลเป็นพลังงานทดแทนทางเลือกหนึ่ง ที่น่าจะเข้ามามีบทบาทสำคัญในการนำมาใช้เพื่อทดแทนพลังงานรูปแบบดั้งเดิมที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน เพราะพลังงานจากชีวมวลจะเป็นการนำของเหลือทิ้งจากภาคเกษตรกรรม และอุตสาหกรรมที่หาได้ง่าย ราคาไม่แพง และมีจำนวนมาก มาใช้ให้เป็นประโยชน์ การใช้พลังงานจากชีวมวลยังสามารถนำมาใช้ได้หลายรูปแบบ เช่น นำมาเผาไหม้โดยตรง หรือนำไปเผาให้พลังงานในเตาไอน้ำ เพื่อใช้พลังงานจากไอน้ำ และการนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นเพื่อผลิตแก๊สชีวภาพ และแก๊สไฮโดรเจน เป็นต้น ดังตารางที่ 2.1 จะเปรียบเทียบการผลิตแก๊สชีวภาพ (แก๊สมีเทน) กับแก๊สไฮโดรเจนที่ผลิตด้วยวิธีทางชีวภาพ

## 2.2 แก๊สชีวภาพ

แก๊สชีวภาพเป็นสารที่อยู่ในรูปของแก๊ส ซึ่งเกิดขึ้นตามธรรมชาติในสภาวะที่เหมาะสม เป็นแก๊สที่ได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยวิธีทางชีวภาพ โดยแบคทีเรียชนิดไม่ใช้ออกซิเจนในสภาวะไร้อากาศ แหล่งที่เกิดแก๊สชีวภาพได้แก่ น้ำเสียของโรงงานแปรรูปสินค้าทางการเกษตร และฟาร์มเลี้ยงสัตว์ เช่น โรงงานแปรงมันสำปะหลัง โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มดิบ โรงงานผลไม้มั้กระป๋อง โรงงานผลิตแอลกอฮอล์ และฟาร์มเลี้ยงหมู เป็นต้น องค์ประกอบหลักของแก๊สชีวภาพได้แก่ แก๊สมีเทน ( $\text{CH}_4$ ) ประมาณ 60-70 % แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $\text{CO}_2$ ) ประมาณ 28-38 % และแก๊สอื่นๆ เช่น

ไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ ) และไนโตรเจน ( $N_2$ ) เป็นต้น ประมาณ 2 % เนื่องจากแก๊สชีวภาพมีแก๊สมีเทนเป็นส่วนประกอบหลัก ดังนั้นจึงทำให้มีสมบัติจุดติดไฟได้ดี และสามารถนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทนในรูปแบบต่างๆ ได้ เช่น เผาเพื่อใช้ประโยชน์จากความร้อนโดยตรง โดยนำพลังงานความร้อนที่ได้ไปใช้กับเครื่องกลูกสุกร และหม้อต้มไอน้ำ (Steam Boiler) เป็นต้น และใช้ในการขับเคลื่อนเครื่องจักรกลต่างๆ เช่น ใช้กับเครื่องยนต์เบนซิน และเครื่องยนต์ดีเซล เป็นต้น หรือเผาเพื่อใช้พลังงานความร้อนร่วมกับการใช้ผลิตพลังงานไฟฟ้า

แก๊สมีเทนที่เกิดด้วยวิธีทางชีวภาพ เป็นผลมาจากกระบวนการหมักแบบออลิซิมของแบคทีเรียในกลุ่ม methanogen ลักษณะจำเพาะของแบคทีเรียในกลุ่มนี้คือ ต้องอาศัยอยู่ในสภาพแวดล้อมที่ไร้ออกซิเจน แหล่งที่เราสามารถพบแบคทีเรียเหล่านี้ตามธรรมชาติได้แก่ กากตะกอนในบ่อบำบัด กระจาเพาะ หรือลำไส้ของสัตว์ และในตะกอน หรือโคลนชื้นแฉะ เป็นต้น

แบคทีเรียในกลุ่ม methanogen จะเป็นกลุ่มแบคทีเรียที่ไม่ค่อยได้รับการสนใจ มีการศึกษาน้อย แต่เมื่อเกิดวิกฤตการณ์ด้านพลังงาน จึงเป็นการกระตุ้นให้นักวิทยาศาสตร์หันมาสนใจศึกษากันมากขึ้น เพื่อที่จะนำพลังงานที่ได้จากแก๊สชีวภาพมาใช้ประโยชน์ต่อไป การผลิตแก๊สชีวภาพจะเกิดจากการที่แบคทีเรียนำแหล่งพลังงานที่จำเพาะ มาใช้เพื่อการเจริญเติบโต โดยจะได้ผลผลิตสุดท้ายเป็นแก๊สชีวภาพ ซึ่งแหล่งพลังงานที่จำเพาะจะได้มาจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ หรือลักษณะทางธรณีวิทยาของแหล่งที่อยู่อาศัย

ตารางที่ 2.1 การผลิตแก๊สมีเทน และแก๊สไฮโดรเจนด้วยวิธีทางชีวภาพ (Heguang, 2002)

	การผลิตแก๊สมีเทน (methane production)	การผลิตแก๊สไฮโดรเจน (hydrogen production)	
		ชนิดจุลินทรีย์	
		anoxygenic phototrophic bacteria	heterotrophic anaerobic bacteria
แหล่งคาร์บอน (carbon sources)	acetic acid, CO <sub>2</sub>	saccharide, lipid, protein, fatty acids, aromatic compound, alcohol เป็นต้น	cellulose, saccharide, lipid, protein, aromatic compound เป็นต้น
แหล่งพลังงาน (energy source)	oxidation of H <sub>2</sub>	oxidation of reductive organic compounds and light energy	oxidation of reductive organic compounds
เอนไซม์ที่เกี่ยวข้อง (key enzyme)	Hydrogenase	Nitrogenase and Hydrogenase	Hydrogenase
ตัวยับยั้ง (inhibitors)	O <sub>2</sub> , S <sub>2</sub> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	O <sub>2</sub> , NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	CO, O <sub>2</sub>
เวลาในการหมัก (retention time)	5-10 วัน (อุณหภูมิสูง) 10-20 วัน (อุณหภูมิต่ำ)	< 4 วัน	< 4 วัน
pH ที่เหมาะสม	6.7-7.4	6.5-9.0	6.5-8.5
อัตราการผลิตแก๊สที่ใช้เป็นพลังงาน	สูง	สูง	ต่ำ
สายพันธุ์	<i>Methanosarcina methanica</i> <i>Methanotherix sp.</i> <i>Methanobacter sp.</i> <i>Methanococcus sp.</i>	<i>Rhodobacter sphaeroides</i> <i>Rhodobacter capsulatus</i>	<i>Clostridium butyricum</i> <i>Methanobacterium sp.</i>

### 2.2.1 ชีวเคมีของการผลิตแก๊สชีวภาพ

การผลิตแก๊สชีวภาพจะอาศัยกระบวนการย่อยสลายของแบคทีเรียแบบไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic digestion) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของสารอินทรีย์ให้กลายเป็นแก๊สมีเทน โดยการเกิดปฏิกิริยาเหล่านี้ส่วนใหญ่แล้วจะเกิดขึ้นได้ จะต้องอาศัยแบคทีเรียหลายชนิดช่วยกันย่อยสลายสารอินทรีย์

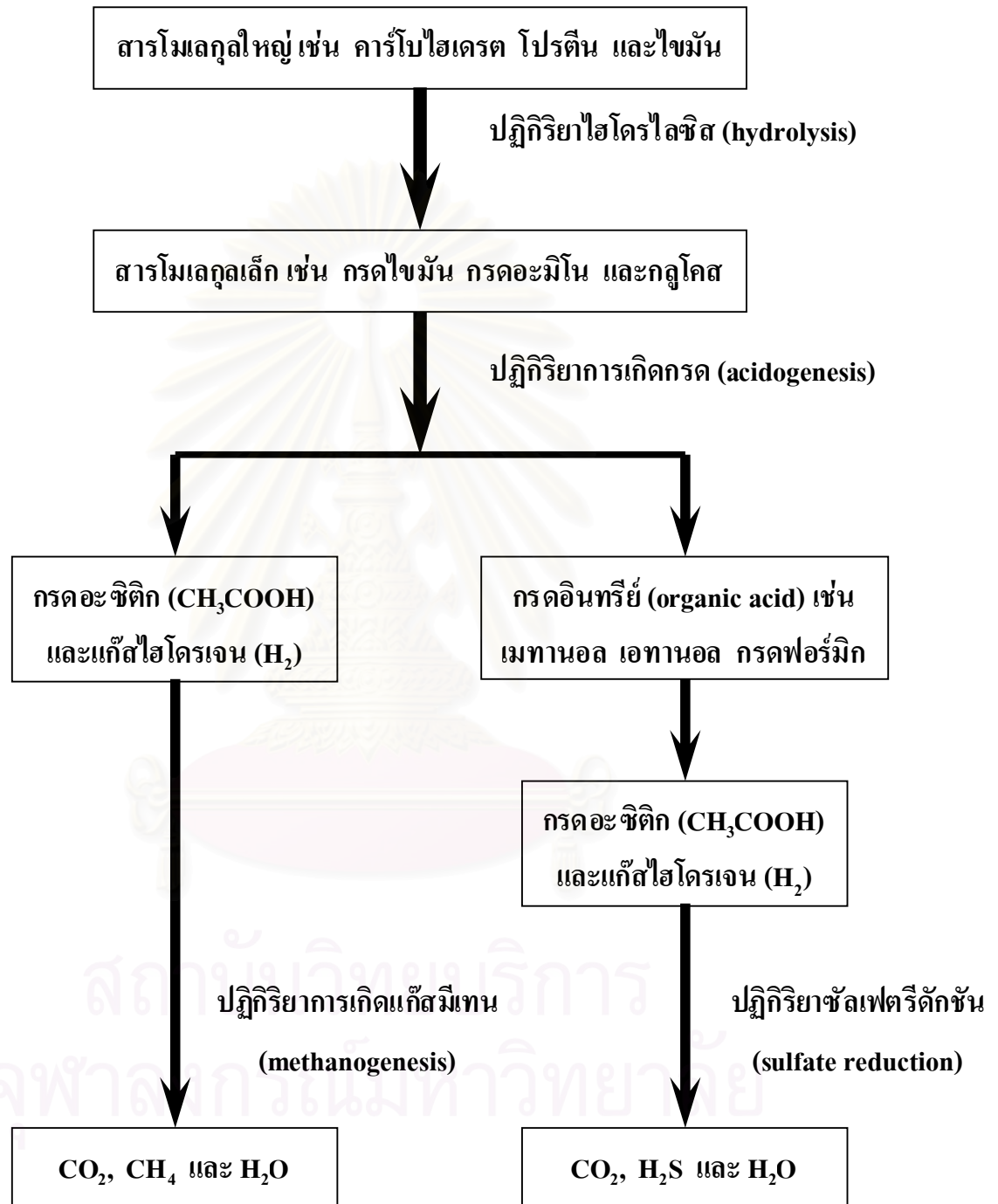
ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนจะต้องอาศัยจุลินทรีย์ 3 กลุ่ม ในการย่อยสลาย จุลินทรีย์กลุ่มแรกจะเป็นตัวย่อยสลาย (hydrolysis) สารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ให้มีโมเลกุลเล็กลง จนจุลินทรีย์ในกลุ่มที่ 2 ซึ่งเป็นกลุ่มที่สร้างกรดสามารถนำไปใช้ได้ และกลุ่มสุดท้ายจะเป็นจุลินทรีย์กลุ่มที่สร้างมีเทน ซึ่งขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆ แสดงดังรูป 2.1 และมีรายละเอียดของแต่ละปฏิกิริยาแบ่งได้ 4 แบบ คือ

#### ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis)

ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเป็นปฏิกิริยาที่ทำการเปลี่ยน สารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ (คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน) ซึ่งมีขนาดใหญ่เกินกว่าที่แบคทีเรียจะดูดซึมเข้าเซลล์ได้ ให้กลายเป็นสารที่มีโมเลกุลขนาดเล็กลง (น้ำตาล กรดอะมิโน และกรดไขมัน) แบคทีเรียในกลุ่มนี้จะเรียกว่า ไฮโดรไลซิงแบคทีเรีย ซึ่งไฮโดรไลซิงแบคทีเรียจะผลิตเอนไซม์ และทำการปล่อยออกมาภายนอกเซลล์ เพื่อทำการเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส ทำให้สารอินทรีย์มีโมเลกุลเล็กลง จนแบคทีเรียสามารถดูดซึมเข้าสู่เซลล์เมมเบรนได้โดยตรง

#### ปฏิกิริยาการเกิดกรด (acidogenesis)

ปฏิกิริยาการเกิดกรดจะเป็นปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก (น้ำตาล โมเลกุลเดี่ยว กรดอะมิโน และกรดไขมัน) ด้วยกระบวนการหมัก (fermentation) ซึ่งจะได้ผลผลิตส่วนใหญ่คือ กรดอินทรีย์ จึงทำให้ปฏิกิริยานี้ถูกเรียกว่าเป็นปฏิกิริยาการสร้างกรดนั่นเอง นอกจากผลผลิตส่วนใหญ่ที่เป็นกรดอินทรีย์แล้ว ยังสามารถพบผลิตภัณฑ์ชนิดอื่นปะปนออกมาได้อีก โดยผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับชนิดของแบคทีเรีย และภาวะแวดล้อมของการเกิดปฏิกิริยา เช่น แก๊สไฮโดรเจน กรดอะซิติก และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์



รูปที่ 2.1 ปฏิกิริยาการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน (สุब्ณชาติ, 2548)

### ปฏิกิริยาการสร้างกรดอะซิติก (acetogenesis)

ปฏิกิริยาการสร้างกรดอะซิติกคือ ปฏิกิริยาที่ย่อยสลายกรดอินทรีย์ที่ระเหยง่ายที่เกิดจากขั้นตอนของปฏิกิริยาการเกิดกรดให้เป็นกรดอะซิติก โดยแบคทีเรียในกลุ่มที่สร้างกรดอะซิติก (acetogenic) ซึ่งขั้นตอนนี้จะเป็นขั้นตอนที่สำคัญของการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน เนื่องจากในขั้นตอนนี้สุดท้าย ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ต่อจากขั้นตอนนี้จะสามารถใช้สารตั้งต้นที่มีจำนวนคาร์บอน 1-2 คาร์บอนเท่านั้น (กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก เมทานอล และเมทิลามีน) และแก๊สไฮโดรเจน โดยภายในระบบจะต้องมีภาวะที่เหมาะสมถึงจะเกิดปฏิกิริยา โดยสมการที่ 2.1 เป็นการเปลี่ยนกรดบิวทริก และสมการที่ 2.2 เป็นการเปลี่ยนกรดครด โพรไพโอนิก ให้เป็นกรดอะซิติก และแก๊สไฮโดรเจน



### ปฏิกิริยาการสร้างแก๊สมีเทน (methanogenesis)

ปฏิกิริยาการสร้างแก๊สมีเทนเป็นปฏิกิริยาการเปลี่ยนกรดอะซิติก และแก๊สไฮโดรเจน ให้เป็นแก๊สมีเทนภายใต้ภาวะที่ไม่มีออกซิเจน โดยแบคทีเรียในกลุ่มที่สร้างมีเทน (methanogen) แบคทีเรียในกลุ่มที่สร้างมีเทนจะเป็นแบคทีเรียที่มีอัตราการเจริญเติบโตช้ามาก และยังเป็นแบคทีเรียที่สามารถใช้สารตั้งต้นได้เพียงไม่กี่ชนิดคือ สารที่มีคาร์บอนเพียง 1 หรือ 2 คาร์บอนเท่านั้น ส่วนกรดอินทรีย์ที่มีจำนวนคาร์บอนมากกว่า 2 อะตอม แบคทีเรียที่สร้างมีเทนจะไม่สามารถนำไปใช้เป็นสารตั้งต้นเพื่อผลิตเป็นแก๊สมีเทนได้ จึงทำให้แบคทีเรียในกลุ่มนี้ต้องอาศัยแบคทีเรียชนิดอื่นๆ ให้ทำการเปลี่ยนกรดอินทรีย์ชนิดต่างๆ ให้เป็นกรดอะซิติก หรือแก๊สไฮโดรเจนก่อน หลังจากนั้นแบคทีเรียในกลุ่มที่สร้างมีเทนจึงสามารถนำสารเหล่านั้นมาย่อยสลายต่อไป

นอกจากนั้นแบคทีเรียในกลุ่มที่สร้างแก๊สมีเทนยังเป็นแบคทีเรียที่มีความไวต่อสภาพแวดล้อมเป็นอย่างมากเช่น ไม่อาจทนต่อแก๊สออกซิเจน แม้มีเพียงปริมาณเล็กน้อย และอาจเจริญเติบโตได้ไม่ดี เมื่ออยู่ในช่วงพีเอชนอกเหนือจากช่วง 6.8 – 9.2 เป็นต้น ตารางที่ 2.2 และ 2.3 จะเป็นตัวอย่างแบคทีเรียในกลุ่มที่สร้างแก๊สมีเทนหลายๆ ชนิด

ตารางที่ 2.2 อนุกรมวิธานของแบคทีเรียที่ผลิตแก๊สมีเทน (Bitton, 1994)

อันดับของแบคทีเรียสร้างแก๊สมีเทน (Order)	ตระกูลของแบคทีเรียสร้างแก๊สมีเทน (Family)	สกุลของแบคทีเรียสร้างแก๊สมีเทน (Genus)	ชนิดของแบคทีเรียสร้างแก๊สมีเทน (Species)
Methanobacteriales	Methanobacteriaceae	<i>Methanobacterium</i>	<i>M. formicicum</i> <i>M. bryanri</i> <i>M. thermoautotrophicum</i> <i>M. ruminantium</i>
		<i>Methanobrevibacter</i>	<i>M. arboriphilus</i> <i>M. smithii</i> <i>M. vannielli</i>
Methanococcales	Methanococcaceae	<i>Methanococcus</i>	<i>M. voltae</i> <i>M. mobile</i>
Methanomicrobiales	Methanomicrobiceae	<i>Methanogenium</i>	<i>M. cariaci</i> <i>M. marisnigri</i>
		<i>Methanosprillum</i>	<i>M. hungatei</i> <i>M. barkeri</i>
	Methanosarcinaceae	<i>Methanosarcina</i>	<i>M. mazei</i>



จะเห็นได้ว่าปฏิริยาของการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนนั้นจะประกอบไปด้วยขั้นตอนต่างๆ หลายขั้นตอน ดังนั้นการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนนี้จึงมีความสลับซับซ้อน อันเนื่องมาจากต้องมีการอาศัยพึ่งพาของแบคทีเรียในกลุ่มต่างๆ ให้เกิดการทำงานร่วมกัน โดยเฉพาะในขั้นตอนสุดท้ายคือ ขั้นตอนการสร้างแก๊สมีเทน จะเป็นขั้นตอนที่สำคัญที่สุดของการย่อยสลายสารอินทรีย์อย่างสมบูรณ์ และทำให้ระบบการย่อยสลายไม่ล้มเหลว เนื่องจากเป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นอย่างช้าๆ และต้องมีการควบคุมปัจจัยต่างๆ ให้เหมาะสมต่อการทำงานของแบคทีเรียในกลุ่มนี้



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.3 ชนิดของแบคทีเรีย และสารตั้งต้นในกระบวนการผลิตแก๊สมีเทน (สุब्ธิต, 2548)

ชนิดของแบคทีเรีย	สารตั้งต้น	ชนิดของแบคทีเรีย	สารตั้งต้น
<i>Methanobacterium bryantii</i>	H <sub>2</sub>	<i>Methanogenium cariaci</i>	H <sub>2</sub> และ HCOOH
<i>M. formicum</i>	H <sub>2</sub> และ HCOOH	<i>M. marisnigi</i>	H <sub>2</sub> และ HCOOH
<i>M. thermoautotropicum</i>	H <sub>2</sub>	<i>M. tatii</i>	H <sub>2</sub> และ HCOOH
<i>M. alcaliphilum</i>	H <sub>2</sub>	<i>M. olentagyi</i>	H <sub>2</sub>
<i>Methanobrevibacter arboriphilus</i>	H <sub>2</sub>	<i>M. thermophilicum</i>	H <sub>2</sub> และ HCOOH
<i>M. ruminantium</i>	H <sub>2</sub> และ HCOOH	<i>M. bourgense</i>	H <sub>2</sub> และ HCOOH
<i>M. smithii</i>	H <sub>2</sub> และ HCOOH	<i>M. aggregans</i>	H <sub>2</sub> และ HCOOH
<i>Methanococcus vannilii</i>	H <sub>2</sub> และ HCOOH	<i>Methanococcoides methylutens</i>	CH <sub>3</sub> NH <sub>2</sub> และ CH <sub>3</sub> OH
<i>M. voltae</i>	H <sub>2</sub> และ HCOOH	<i>Methanotherix soehngnii</i>	CH <sub>3</sub> COOH
<i>M. deltae</i>	H <sub>2</sub> และ HCOOH	<i>M. concilii</i>	CH <sub>3</sub> COOH
<i>M. maripaludis</i>	H <sub>2</sub> และ HCOOH	<i>Methanothermus fevidus</i>	H <sub>2</sub>
<i>M. jannaschii</i>	H <sub>2</sub>	<i>Methanolobus undarius</i>	CH <sub>3</sub> OH, CH <sub>3</sub> NH <sub>2</sub> และ (CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> NH
<i>M. thermolithoautotrophicus</i>	H <sub>2</sub> และ HCOOH	<i>Methanosarcina barkeri</i>	CH <sub>3</sub> OH และ CH <sub>3</sub> COOH
<i>M. frisius</i>	H <sub>2</sub> , CH <sub>3</sub> OH, CH <sub>3</sub> NH <sub>2</sub> และ (CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> N		
<i>Methanomicrobium mobile</i>	H <sub>2</sub> และ HCOOH		

### 2.2.2 แบคทีเรียในกระบวนการผลิตแก๊สมีเทน

แบคทีเรียที่สร้างแก๊สมีเทนตามชนิดของสารตั้งต้น สามารถจำแนกได้ดังต่อไปนี้

#### แบคทีเรียกลุ่มที่สร้างแก๊สมีเทนจากกรดอะซิติก (obligate acetoclastic methanogen)

เป็นแบคทีเรียที่สามารถใช้กรดอะซิติกเป็นแหล่งของคาร์บอน และแหล่งของพลังงานได้เพียงอย่างเดียว ปฏิบัติการสร้างแก๊สมีเทนจากกรดอะซิติกแสดงดังสมการที่ 2.3



#### แบคทีเรียกลุ่มที่สร้างแก๊สมีเทนจากแก๊สไฮโดรเจน (obligate hydrogenotrophic methanogen)

แบคทีเรียในกลุ่มนี้จะใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นแหล่งของพลังงาน ( $\text{H}_2$  utilizer) และใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นแหล่งของคาร์บอนเพื่อผลิตแก๊สมีเทน แบคทีเรียชนิดนี้นอกจากจะสามารถใช้แก๊สไฮโดรเจนแล้วยังสามารถใช้กรดฟอร์มิกเป็นสารตั้งต้นได้อีกด้วย ทั้งนี้เนื่องมาจากว่ากรดฟอร์มิกสามารถเปลี่ยนเป็นแก๊สไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ได้ง่าย ปฏิบัติการสร้างแก๊สมีเทนจากแก๊สไฮโดรเจนแสดงดังสมการที่ 2.4 และปฏิบัติการเปลี่ยนกรดฟอร์มิกให้เป็นแก๊สไฮโดรเจนแสดงดังสมการที่ 2.5



#### แบคทีเรียกลุ่มที่สร้างแก๊สมีเทนจากแก๊สไฮโดรเจน หรือกรดอะซิติก (hydrogenotrophic/acetoclastic methanogen)

แบคทีเรียในกลุ่มนี้จะสามารถใช้ได้ทั้งกรดอะซิติก และแก๊สไฮโดรเจนเป็นสารตั้งต้นผลิตแก๊สมีเทน แต่อย่างไรก็ตามแบคทีเรียในกลุ่มนี้จะมีความชอบที่จะใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นสารตั้งต้นมากกว่ากรดอะซิติก

### 2.3 แก๊สไฮโดรเจน

ไฮโดรเจนเป็นธาตุที่เบาที่สุด มีอยู่ในปริมาณมากที่สุดในจักรวาล และบนโลกนี้ เป็นโมเลกุลที่พบได้ทั่วไปตามธรรมชาติ ธาตุไฮโดรเจนเป็นส่วนประกอบของสสารแทบจะทุกชนิด ตัวอย่างที่เห็นได้ชัดคือ น้ำที่เป็นปัจจัยสำคัญมากที่สุดของสิ่งมีชีวิตบนโลก ในน้ำหนึ่งโมเลกุลจะมีไฮโดรเจนเป็นส่วนประกอบอยู่ถึงสองอะตอม บรรยากาศในโลกรวมแก๊สไฮโดรเจนอยู่ประมาณ 0.1 ppm. มีความแข็งแรงในการยึดโมเลกุลเท่ากับ 436 kJ/mol (104 kcal/mol) แก๊สไฮโดรเจนเป็นแก๊สที่ไม่มีสี และไม่มีกลิ่น เมื่ออยู่ในสถานะแก๊สจะมีความหนาแน่น 0.0899 g/l ในสถานะของเหลวจะไม่มีสี ค่า viscosity ต่ำ เคลื่อนที่ได้เร็ว ในสถานะของแข็งจะเป็นของแข็งไม่มีสี มีลักษณะเป็นโครงสร้างผลึก 6 เหลี่ยม มีจุดหลอมเหลวที่อุณหภูมิ  $-259.2^{\circ}\text{C}$  และมีจุดเดือดที่อุณหภูมิ  $-252.77^{\circ}\text{C}$  ต้องการพลังงานในการติดไฟต่ำ (ตารางที่ 2.4 แสดงคุณสมบัติของแก๊สไฮโดรเจน) กระบวนการนำไฮโดรเจนไปใช้เป็นพลังงานยังไม่ก่อให้เกิดของสะสมที่ทำให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมด้วย เพราะผลผลิตสุดท้ายเมื่อนำไฮโดรเจนไปใช้จะได้เป็นน้ำบริสุทธิ์

พลังงานจากแก๊สไฮโดรเจนเป็นพลังงานที่สะอาด ไม่ทำให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม สามารถสร้างทดแทนได้ตลอด และยังให้พลังงานสูงด้วย แก๊สไฮโดรเจนจึงเป็นแหล่งพลังงานที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทน แก๊สไฮโดรเจนนอกจากจะนำไปใช้เป็นพลังงานแล้วยังสามารถนำไปใช้ในรูปแบบต่างๆ ได้อีก

ตารางที่ 2.4 สมบัติของแก๊สไฮโดรเจน (www.iahe.org)

<b>Hydrogen</b>	
มวลโมเลกุล (Molecular weight)	2.016 g
ความหนาแน่น (Density)	0.0838 kg/m <sup>3</sup>
Higher heating value	141.90 MJ/kg 11.89 MJ/m <sup>3</sup>
Lower heating value	119.90 MJ/kg 10.05 MJ/m <sup>3</sup>
จุดเดือด (Boiling temperature)	20.3 K
ความหนาแน่นที่สถานะของเหลว (Density as liquid)	70.8 kg/m <sup>3</sup>
จุดวิกฤติ (Critical point)	
อุณหภูมิ (Temperature)	32.94 K
ความดัน (Pressure)	12.84 bar
ความหนาแน่น (density)	31.40 kg/m <sup>3</sup>
Self-ignition temperature	858 K
Ignition limits in air	4-75 (vol. %)
Stoichiometric mixture in air	29.53 (vol. %)
Flame temperature in air	2,318 K
Diffusion coefficient	0.61 cm <sup>2</sup> /s
Specific heat (c <sub>p</sub> )	14.89 kJ/(kg·K)

### 2.3.1 ประโยชน์ของแก๊สไฮโดรเจน

#### พลังงาน

แก๊สไฮโดรเจนสามารถนำมาใช้เป็นพลังงานได้ เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิงในจรวด ใช้เป็น fuel cell เพื่อผลิตไฟฟ้า เป็นต้น แก๊สไฮโดรเจนเมื่อเกิดการเผาผลาญจะได้ผลผลิตสุดท้ายเป็นน้ำบริสุทธิ์ อีกทั้งแก๊สไฮโดรเจนยังเป็นแก๊สที่ไม่มีวันหมดไปจากโลก แก๊สไฮโดรเจนสามารถสกัดได้จากน้ำ เมื่อเผาผลาญเราจะได้น้ำกลับมาอีกครั้ง ด้วยเหตุผลเหล่านี้จึงทำให้แก๊สไฮโดรเจนเป็นตัวเลือกที่ดีที่จะใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทน

#### อุตสาหกรรม

เราสามารถนำแก๊สไฮโดรเจนมาใช้ในด้านอุตสาหกรรมหลายอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมการกลั่นน้ำมันดิบ เราจะใช้แก๊สไฮโดรเจนในกระบวนการ hydroheating ซึ่งเป็นกระบวนการกำจัดซัลเฟอร์ และสารตกค้างอื่นๆ ที่ปะปนมาในน้ำมันดิบ อุตสาหกรรมการเกษตรจะใช้แก๊สไฮโดรเจนเพื่อใช้ผลิตปุ๋ยแอมโมเนีย อุตสาหกรรมเคมีจะใช้แก๊สไฮโดรเจนเป็นสารตั้งต้นเพื่อสังเคราะห์แอมโมเนีย แอลกอฮอล์ อัลดีไฮด์ และสารเคมีต่างๆ อุตสาหกรรมอาหารจะใช้แก๊สไฮโดรเจนในการผลิตน้ำมันพืช เพื่อป้องกันปฏิกิริยาการเกิดออกซิไดซ์ และป้องกันการเกิดกลิ่นเหม็นหืน นอกจากนี้ยังมีการใช้แก๊สไฮโดรเจนในการเปลี่ยนน้ำมันเหลวไปเป็นน้ำมันแข็ง เช่น margarine อุตสาหกรรมโลหะหนัก และเหมืองแร่จะใช้แก๊สไฮโดรเจนในการผลิตเหล็ก โดยใช้เป็นแหล่งให้พลังงานความร้อนแก่เหล็ก เพื่อใช้เปลี่ยนแปลง และปรับปรุงคุณภาพของเหล็ก นอกจากนี้ยังมีการใช้แก๊สไฮโดรเจนบริสุทธิ์ในการผลิตทั้งสแตน โมลิบดีนัม แมกนีเซียม และใช้แก๊สไฮโดรเจนในการตัด-หลอมแก้ว และแร่ควอตซ์

### 2.3.2 วิธีการผลิตแก๊สไฮโดรเจน

#### 2.3.2.1 การผลิตแก๊สไฮโดรเจนโดยวิธีกายภาพ และเคมี

##### การผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากเชื้อเพลิงฟอสซิล

การผลิตแก๊สไฮโดรเจนด้วยวิธีนี้ จะอาศัยกระบวนการ steam hydrocarbon reforming โดยจะฉีดพ่นไอน้ำร้อนอุณหภูมิสูงเข้าผสมกับแก๊สธรรมชาติ ทำให้โมเลกุลไฮโดรคาร์บอนเกิดการแตกตัว และปลดปล่อยไฮโดรเจนออกมา โดยสมการที่ 2.6 และสมการที่ 2.7 จะเป็นสมการเคมีของปฏิกิริยาการเกิดกระบวนการ steam hydrocarbon reforming นอกจากนี้ยังมีอีกวิธีหนึ่งเรียกว่า gasification คือการเผาถ่านที่มีกำมะถันต่ำโดยใช้อุณหภูมิสูง



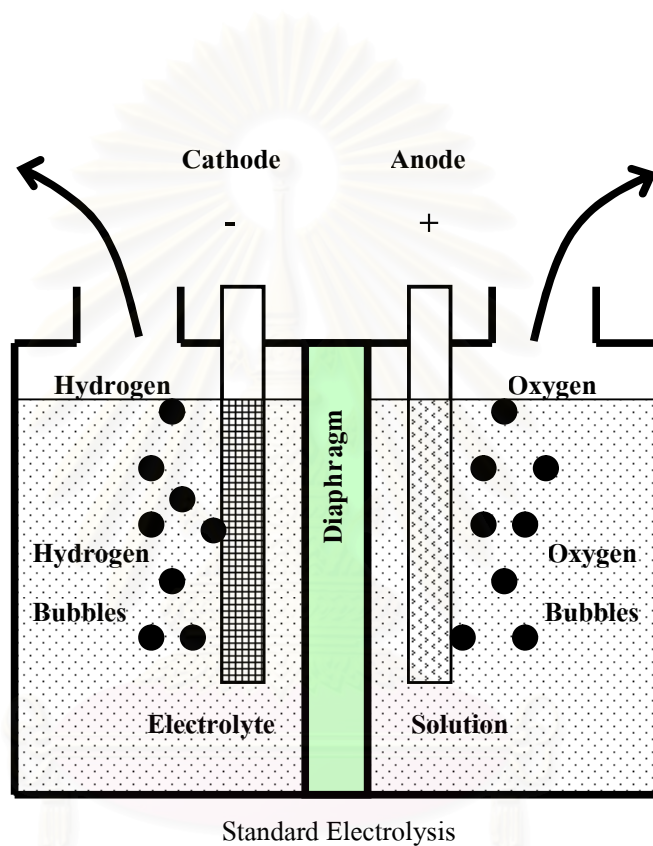
ในกระบวนการนี้จะมีการดักจับแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น โดยใช้ตัวดูดซับ หรือแผ่นเมมเบรนแยกสกัดเอาแก๊สไฮโดรเจนออกจากแก๊สผสม และแยกเอาส่วนประกอบที่ไม่ต้องการออกไป

#### การผลิตแก๊สไฮโดรเจนโดยวิธีอิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis)

วิธีนี้จะได้แก๊สไฮโดรเจนที่มีความบริสุทธิ์สูง เป็นการแยกน้ำด้วยกระแสไฟฟ้า (รูปที่ 2.2) ซึ่งกระแสไฟฟ้าจะเข้าไปสลายโมเลกุลของน้ำได้เป็นไฮโดรเจนอะตอม และออกซิเจนอะตอม โดยอาศัยการจุ่มสายไฟสองสายลงในน้ำที่ทำให้มีความเป็นด่างมากขึ้น แล้วผ่านไฟฟ้ากระแสตรงลงไปตามสายนั้น จึงทำให้เกิดขั้วสองขั้วตรงข้ามกันคือ positive electrode และ negative electrode ไฮโดรเจนอะตอม และออกซิเจนอะตอมจะแยกออกจากกัน โดยไฮโดรเจนอะตอมจะเข้าไปเกาะที่ด้าน negative electrode และออกซิเจนอะตอมจะเข้าไปเกาะที่ด้าน positive electrode ถึงแม้ว่าไฮโดรเจนที่ได้จะมีความบริสุทธิ์สูง แต่วิธีนี้ยังมีต้นทุนที่สูงตามไปด้วย อีกทั้งต้องใช้ไฟฟ้าเป็นจำนวนมาก และในระหว่างการแยกโมเลกุลของน้ำยังต้องทำในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูง

#### การผลิตแก๊สไฮโดรเจนโดยวิธีเทอโมเคมีสทรี (thermochemistry)

การผลิตแก๊สไฮโดรเจนโดยวิธีเทอโมเคมีสทรี เป็นวิธีที่อาศัยตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีเพื่อทำให้อุณหภูมิในการเกิดการสลายตัวของน้ำต่ำลง โดยการใช้สารประกอบของปรอทโบรไมด์ และแคลเซียมในกระบวนการ แต่วิธีนี้จะพบปัญหาที่เกิดจากสารประกอบโลหะหนักที่เหลือจากการเกิดปฏิกิริยา



รูปที่ 2.2 การผลิตแก๊สไฮโดรเจนด้วยวิธี electrolysis (www.greencarcongress.com)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



### 2.3.2.2 การผลิตแก๊สชีวภาพโดยวิธีชีวภาพ (Debabrata, 2001)

วิธีนี้จะอาศัยกระบวนการทางชีวภาพของจุลินทรีย์ เพื่อให้จุลินทรีย์นี้ผลิตแก๊สไฮโดรเจนออกมา วิธีนี้สามารถใช้ของเสียจากอุตสาหกรรม ทั้งที่เป็นของแข็ง และของเหลวเป็นสารตั้งต้นเพื่อใช้เลี้ยงจุลินทรีย์ได้ จึงเป็นการบำบัดของเสีย และอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมไปในตัว การผลิตแก๊สไฮโดรเจนโดยวิธีทางชีวภาพจึงเป็นเทคโนโลยีสีเขียวสำหรับอนาคต

สำหรับของเสียที่เป็นของแข็งนั้น เราพบงานวิจัยหลายงานวิจัยที่นำของแข็งเหลือทิ้งมาผลิตเป็นแก๊สไฮโดรเจน โดย Fascetti และคณะ (1998) และ Roychowdhury และคณะ (1998) ได้ศึกษาโดยใช้กากของแข็งที่ได้มาจากขยะตามบ้านเรือน และกากตะกอนจากโรงบำบัดน้ำเสีย ทางผู้วิจัยพบว่าของเสียดังกล่าวสามารถนำมาผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้ งานวิจัยของ Fascetti และ Todini (1995) ก็รายงานว่าสามารถใช้กากของแข็งมาใช้เลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ *Rhodobacter sphaeroides* RV เพื่อผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้

ส่วนน้ำเสียนั้นก็มีงานวิจัยหลายงานวิจัยที่ได้ศึกษาโดยใช้น้ำเสียจากแหล่งต่างๆ เช่น หางนม โดย Venkataraman และ Vatsala (1990) ทำการทดลองโดยใช้น้ำเสียสำหรับการเลี้ยงเชื้อ *Rhodobacter rubrum* และ *Rhodobacter capsulatus* น้ำเสียจากโรงกลั่นเหล้า โดย Sasikala และคณะ (1991) ทำการทดลองโดยนำน้ำเสียจากโรงกลั่นเหล้า มาเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ *Rhodobacter sphaeroides* O.U. 001 น้ำเสียจากโรงงานเต้าหู้ โดย Huguang และคณะ (1999) ได้ทำการทดลองโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานเต้าหู้ และน้ำเสียจากโรงงานน้ำตาล Thangaraj และ Kulandaivelu (1994) และ Yoshiyuki และคณะ (1996) ทำการทดลองโดยใช้น้ำเสียจากโรงงานน้ำตาลมาเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งงานวิจัยของ Thangaraj และ Kulandaivelu ใช้จุลินทรีย์ในกลุ่มที่ไม่ต้องใช้แสง แต่งานวิจัยของ Yoshiyuki และคณะ ใช้จุลินทรีย์ในกลุ่มที่สังเคราะห์แสง

จุลินทรีย์ที่สามารถผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้มีหลายชนิดดังตารางที่ 2.5 แต่ละชนิดก็จะมีวิธีการเจริญเติบโตได้ในสภาวะที่แตกต่างกันออกไป บางชนิดใช้แหล่งพลังงานจากแสง บางชนิดใช้แหล่งพลังงานจากสารประกอบอนินทรีย์ แต่ไม่ว่าจะใช้พลังงานจากแหล่งใดก็ตาม ในขั้นตอนของการผลิตแก๊สไฮโดรเจนนี้ จะต้องทำภายใต้ภาวะที่ไร้ออกซิเจนเท่านั้น เพื่อป้องกันการเกิดออกซิไดซ์ระหว่างแก๊สไฮโดรเจน และแก๊สออกซิเจน ซึ่งจะทำให้แก๊สไฮโดรเจนที่ได้ลดน้อยลง กระบวนการในการผลิตแก๊สไฮโดรเจน โดยวิธีทางชีวภาพสามารถทำได้หลายวิธี ดังนี้

ตารางที่ 2.5 จุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการผลิตแก๊สไฮโดรเจน (Debabrata, 2001)

ชนิดจุลินทรีย์	ชื่อจุลินทรีย์	เอกสารอ้างอิง
Green algae	<i>Scenedesmus obliquus</i>	Schnackenberg, 1993
	<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	Greenbaum, 1990
	<i>C. moewusii</i>	Greenbaum, 1990
Cyanobacteria Heterocystous	<i>Anabaena azollae</i>	Banerjee, 1989, Shi, 1987
	<i>Anabaena CA</i>	Kumar, 1991
	<i>A. variabilis</i>	Tsygankov, 1997, Vyas, 1995
	<i>A. cylindrica</i>	Smith, 1992 Stewart, 1975
	<i>Nostoc muscorum</i>	Spiller, 1978
	<i>N. spongiaeforme</i>	Vyas, 1995
	<i>Weatiellopsis prolifica</i>	Vyas, 1995
Nonheterocystous	<i>Pletonema borynum</i>	Sarker, 1992
	<i>Oscillatoria Miami BG7</i>	Kumazawa, 1981
	<i>O. limnellca</i>	Belkin, 1978
	<i>Synechococcus sp.</i>	Reddy, 1984
	<i>Aphanothece halophytico</i>	Belkin, 1978
	<i>Mastidocladus laminosus</i>	Bothe, 1990
	<i>Phormidium valderirnum</i>	Bagal, 1998
Photosynthetic bacteria	<i>Rhodobacter sphaeroides</i>	Fescetti, 1998, Sasikala, 1995
	<i>R. capsulatus</i>	Krahn, 1996
	<i>R. sulidophilus</i>	Peng, 1987
	<i>Rhodopseudomona sphaeroidess</i>	Singh, 1991
	<i>R. palustris</i>	Vincezini, 1982
	<i>R. capsulate</i>	Vrati, 1983
	<i>Rhodospirillum rubrum</i>	Zurrer, 1982
	<i>Chromatium sp. Miami PSB1071</i>	Ohta, 1981
	<i>Chlorobium limicola</i>	Gogotov, 1991
	<i>Chloroflexu aurantiacus</i>	Gogotov, 1991

ตารางที่ 2.5 แสดงจุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการผลิตแก๊สไฮโดรเจน (ต่อ)

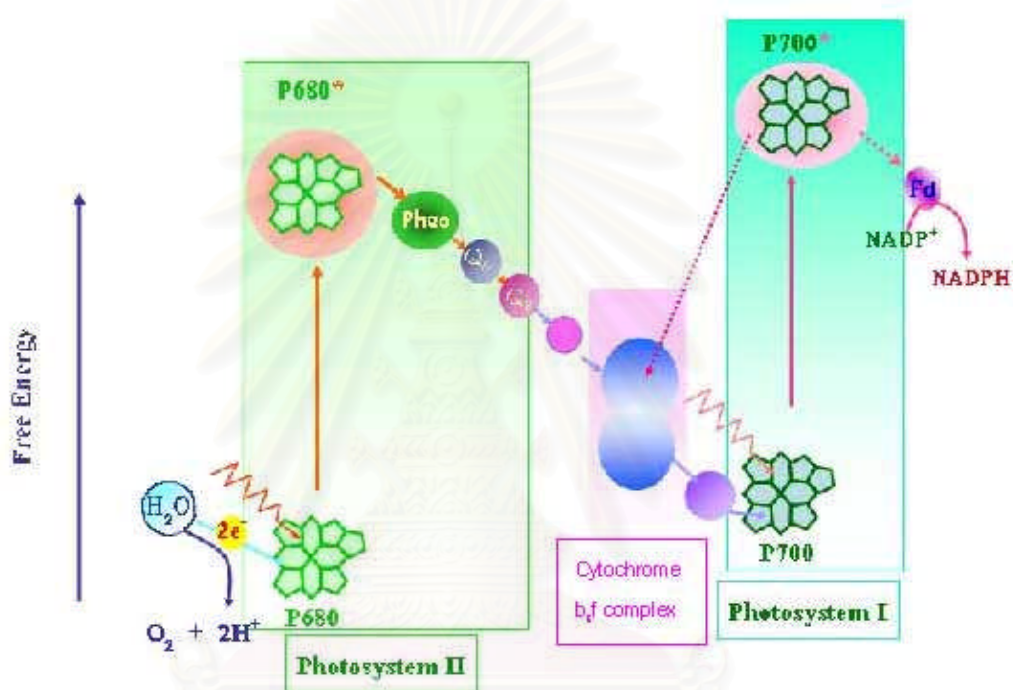
ชนิดจุลินทรีย์	ชื่อจุลินทรีย์	เอกสารอ้างอิง
Photosynthetic bacteria	<i>Thiocapsa roseopersicina</i>	Gogotov, 1991
	<i>Halobacterium halobium</i>	Khan, 1991
Fermentative bacteria	<i>Enterobacter aerogenes</i>	Tanisho, 1983
	<i>E. cloacae</i>	Kumar, 1999
	<i>Clostridium butyricum</i>	Tanisho, 1987
	<i>C. pasteurianum</i>	Brosseau, 1982
	<i>Desulfovibrio vulgaris</i>	Bothe, 1990
	<i>Magashaera elsdenii</i>	Bothe, 1990
	<i>Citrobacter intermedius</i>	Brosseau, 1982
	<i>Escherichia coli</i>	Tanisho, 1987

*Biophotolysis of water using algae and cyanobacteria*

วิธีนี้จะอาศัยกระบวนการ photosynthetic ซึ่งจะเป็นกระบวนการที่จะดึงเอาพลังงานแสงมาใช้เป็นพลังงาน (สมการที่ 2.8) เพื่อสลายโมเลกุลของน้ำให้ได้เป็นออกซิเจน โปรตรอน และอิเล็กตรอน เพื่อนำไปใช้ในกระบวนการอื่น ๆ เช่น ผลิตเป็นสารประกอบคาร์บอนใน biomass เป็นต้น



กระบวนการสังเคราะห์แสงนี้จะพบได้ในพืช และสาหร่ายสังเคราะห์แสง แต่กระบวนการสังเคราะห์แสงที่จะนำมาใช้เพื่อผลิตแก๊สไฮโดรเจนนี้ จะเปลี่ยนจากการผลิตสารประกอบคาร์บอนใน biomass มาผลิตเป็นแก๊สไฮโดรเจนแทน โดยกระบวนการสังเคราะห์แสงนี้ จะเกี่ยวข้องกับระบบของการดูดกลืนแสงที่แตกต่างกัน 2 แบบ คือ photosystem I หรือ PS I ซึ่งจะดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 700 nm และ photosystem II หรือ PS II ซึ่งจะดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 680 nm ซึ่งทั้ง 2 ระบบนี้จะทำหน้าที่ร่วมกันเพื่อให้สามารถถ่ายทอดพลังงานแสงไปใช้ในการสร้าง ATP และ NADPH การถ่ายทอดอิเล็กตรอนใน light reaction เป็นดังรูปที่ 2.3 ซึ่งมีงานวิจัยหลายๆ งานวิจัยได้ทำการทดลองการผลิตแก๊สไฮโดรเจนด้วยวิธีนี้โดยใช้สาหร่าย พบว่าสาหร่ายสามารถผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้ (Gaffon และ Rubin, 1992, Benemann et al., 1980, Lee และ Greenbaum, 1997, Kumazawa และ Mitsui, 1981, Healey, 1970)



รูปที่ 2.3 การถ่ายทอดอิเล็กตรอนใน light reaction (www.emc.maricopa.edu)

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

*Photo – decomposition of organic compounds by photosynthetic bacteria*

เป็นการนำพลังงานจากแสงมาใช้เป็นพลังงาน เพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ และผลิตแก๊สไฮโดรเจน โดยอาศัย photosynthetic bacteria ข้อดีของจุลินทรีย์ในกลุ่มนี้คือ จุลินทรีย์ในกลุ่มนี้จะให้ผลผลิตแก๊สไฮโดรเจนตามทฤษฎีในปริมาณสูง สามารถใช้แสงได้ในช่วงความยาวคลื่นที่กว้าง สามารถใช้สารอินทรีย์จากของเสียได้ จึงเป็นการบำบัดของเสียเหล่านี้ไปด้วย และเนื่องจากจุลินทรีย์ในกลุ่มนี้จะเจริญเติบโตในสภาวะที่ขาดออกซิเจน จึงทำให้เกิดการกำจัดจุลินทรีย์หลายชนิด ในขณะที่เลี้ยงจุลินทรีย์ในกลุ่มนี้

จากการศึกษาพบว่า มีหลายงานวิจัยได้ทำการศึกษาการผลิตแก๊สไฮโดรเจน โดยวิธีทางชีวภาพ จากจุลินทรีย์ในกลุ่ม photosynthetic bacteria โดยผลของงานวิจัยเหล่านี้พบว่า ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่ผลิตได้แปรผันตามความเข้มของแสง (Miyake และ Kawamura, 1987, Sasikala และคณะ, 1991, Maria, 2001 และ Xian, 2005) และจุลินทรีย์ในกลุ่ม photosynthetic purple nonsulfur bacteria ยังสามารถนำมาใช้ผลิตแก๊สไฮโดรเจน จากน้ำที่เหลือทิ้งจาก hydrogen fermentation reactor ที่หมักโดย anaerobic bacteria ได้ด้วย (Chi, 2002)

*Fermentative hydrogen production from organic compounds*

การผลิตแก๊สไฮโดรเจนโดยวิธีทางชีวภาพแบบไม่ใช้แสงอาทิตย์จะขออธิบายในหัวข้อ 2.4

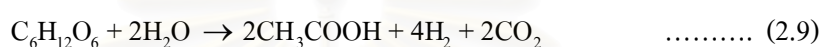
จากที่กล่าวมาแล้วเราสามารถผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากเชื้อเพลิงฟอสซิล มวลชีวภาพ และน้ำ ซึ่งปริมาณส่วนใหญ่ของแก๊สไฮโดรเจนที่ผลิตได้ จะผลิตมาจากเชื้อเพลิงฟอสซิล โดยกระบวนการ stream reforming, electrolysis และ thermochemical แต่วิธีดังกล่าวจะเป็นกระบวนการที่จะทำให้เกิดปฏิกิริยาเคมีที่รุนแรง และมีผลต่อสภาพแวดล้อม ซึ่งจะต่างจากวิธีการผลิตแก๊สไฮโดรเจนด้วยวิธีทางชีวภาพ ที่ในกระบวนการผลิตจะใช้อุณหภูมิ และความดันไม่สูง อีกทั้งยังใช้พลังงานน้อยกว่า และยังเป็นกระบวนการที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย ตารางที่ 2.6 แสดงการเปรียบเทียบข้อดีข้อเสีย ของการใช้จุลินทรีย์ในกลุ่มต่างๆ

**2.4 การผลิตแก๊สไฮโดรเจนโดยวิธีการหมักแบบไร้แสงไร้อากาศ (dark fermentation)**

จุลินทรีย์ในกลุ่มนี้จะเป็นจุลินทรีย์พวก anaerobic microorganism วิธีนี้เป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการผลิตแก๊สไฮโดรเจนโดยวิธีทางชีวภาพในระดับอุตสาหกรรม เพราะเป็นวิธีที่ไม่ต้องใช้แสง จึงทำ

ให้สามารถผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้ตลอดเวลาทั้งเวลากลางวัน และเวลากลางคืน มีอัตราการผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้ในปริมาณสูง และสามารถเจริญเติบโตได้ดีในภาวะที่ผลิตแก๊สไฮโดรเจน

จำนวนแก๊สไฮโดรเจนจะเกิดมาก หรือน้อยนั้นขึ้นอยู่กับแก๊สที่เกิดขึ้น ซึ่งแก๊สที่ได้จะเป็นแก๊สผสมระหว่างแก๊สไฮโดรเจน ( $H_2$ ) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) แต่อาจพบแก๊สมีเทน ( $CH_4$ ) และแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ( $H_2S$ ) ผสมอยู่ด้วย ซึ่งจะทำให้เกิดแก๊สไฮโดรเจนได้น้อยลง โดยถ้า end product ที่เกิดขึ้นเป็นกรดอะซิติก ผลตามทฤษฎีจะทำให้เกิดแก๊สไฮโดรเจน 4 โมล/โมลของกลูโคส (สมการที่ 2.9)



แต่ถ้า end product เป็นกรดบิวทริก ผลตามทฤษฎีจะทำให้เกิดแก๊สไฮโดรเจน 2 โมล/โมล ของกลูโคส (สมการที่ 2.10)



โดยสิ่งที่จะส่งผลกระทบต่อการเกิด end product นั้นขึ้นกับสภาพแวดล้อมในการเจริญเติบโต ความเหมาะสมของระดับ pH hydraulic retention time (HRT) และความดันบรรยากาศ โดยระดับ pH และความดันที่เหมาะสมในการเลี้ยงจุลินทรีย์เพื่อผลิตแก๊สไฮโดรเจน จะอยู่ในช่วง pH ต่างๆ (Fumiaki, 1991, Herbert, 2001, Shinwu, 2003 และ Morimoto, 2004) และความดันจะต้อง < 50 kPa เมื่อเลี้ยงจุลินทรีย์ที่อุณหภูมิ 60 °C (Lee, 1988), < 20 kPa เมื่อเลี้ยงจุลินทรีย์ที่อุณหภูมิ 70 °C (Van, 2002) และ < 2 kPa เมื่อเลี้ยงจุลินทรีย์ที่อุณหภูมิ 98 °C (Adams, 1990)

นอกจากนี้ยังมีอีกหลายงานวิจัยที่ทำการศึกษเกี่ยวกับจุลินทรีย์ที่สามารถผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้ ยกตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ Morimoto และคณะ (2004) ได้ทำการศึกษหาจุลินทรีย์ที่สามารถผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้ โดยนำแหล่งของจุลินทรีย์มาจากแหล่งต่างๆ มาเลี้ยงแบบไร้ออกซิเจน และไม่มีแสง ในน้ำเสียสังเคราะห์ ซึ่งจากงานวิจัยนี้พบว่า จุลินทรีย์ที่ได้มาจากในหลายๆ แหล่งสามารถผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้ และงานวิจัยของ Ueno และคณะ (1996), Shihwu และคณะ (2003) และ Hang-sik และคณะ (2004) ได้ทำการศึกษการผลิตแก๊สไฮโดรเจนโดยการเลี้ยงจุลินทรีย์ในสภาวะไร้อากาศ และไม่มีแสงในของเสีย ซึ่งงานวิจัยเหล่านี้ก็ให้ผลที่มีแนวโน้มแบบเดียวกันคือ จุลินทรีย์สามารถสร้างแก๊สไฮโดรเจนได้

ตารางที่ 2.6 ข้อดีและข้อเสียของการนำจุลินทรีย์ในกลุ่มต่างๆ มาผลิตแก๊สไฮโดรเจน

ชนิดของจุลินทรีย์	ข้อดี	ข้อเสีย
green algae	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้จากน้ำ</li> <li>- ประสิทธิภาพของการนำพลังงานแสงไปใช้มากกว่าพืช 10 เท่า</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ต้องการแสงในการผลิตแก๊สไฮโดรเจน</li> <li>- ออกซิเจนสามารถทำให้ระบบเสียหายได้</li> </ul>
cyanobacteria	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้จากน้ำ</li> <li>- มี nitrogenase เพื่อตรึงไนโตรเจนในอากาศ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ต้องการแสงในการผลิตแก๊สไฮโดรเจน</li> <li>- ออกซิเจนจะเข้าไปยับยั้ง nitrogenase</li> <li>- เกิดคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบ</li> </ul>
photosynthetic bacteria	<ul style="list-style-type: none"> <li>- สามารถใช้ของเสียได้หลายรูปแบบ</li> <li>- ใช้คลื่นความยาวแสงได้ในช่วงกว้าง</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ต้องการแสงในการผลิตแก๊สไฮโดรเจน</li> <li>- เกิดคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบ</li> </ul>
fermentative bacteria	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ไม่ต้องการแสง ดังนั้นจึงผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้ตลอดทั้งวัน</li> <li>- ใช้อาหารเลี้ยงเชื้อได้หลายรูปแบบ</li> <li>- สามารถผลิตสารตัวกลาง ซึ่งเป็นกรดที่มีจำนวนคาร์บอนน้อยๆ ที่มีค่าได้</li> <li>- เป็นระบบที่ไม่ใช้ออกซิเจน ดังนั้นจึงไม่มีออกซิเจนเข้าไปรบกวน</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- อาหารที่นำมาใช้ต้องมีการเตรียมก่อนใช้</li> <li>- เกิดคาร์บอนไดออกไซด์ในระบบ</li> </ul>



## 2.5 ปัจจัยที่ควบคุมกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน

### อุณหภูมิ

อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่สำคัญมากในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน เนื่องจากแบคทีเรียที่สร้างแก๊สมีเทน เป็นแบคทีเรียที่มีบทบาทสำคัญในการย่อยสลาย ซึ่งมีความไวต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิมาก ดังนั้นจึงต้องมีความระมัดระวังในการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ เช่นการย่อยสลายแบบที่ต้องใช้อุณหภูมิสูงจะต้องใช้อุณหภูมิประมาณ  $50 - 60^{\circ}\text{C}$  และการย่อยสลายแบบอุณหภูมิปานกลางต้องใช้อุณหภูมิประมาณ  $30 - 35^{\circ}\text{C}$

### ค่า pH

ความเป็นกรด-ด่าง หรือค่าพีเอช เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อการย่อยสลายของแบคทีเรียแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยเฉพาะอย่างยิ่งแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างมีเทน ถ้าค่าพีเอชมีค่าที่ไม่เป็นกลาง การเจริญเติบโตของแบคทีเรียในกลุ่มที่สร้างมีเทนจะถูกยับยั้ง ทำให้ระบบการย่อยสลายทั้งระบบล้มเหลวได้ ดังนั้นอาจจะต้องมีการเติมสารเคมีบางอย่างเพื่อรักษาค่าพีเอชให้คงที่

### ระยะเวลาในการหมัก

ระยะเวลาที่ใช้ในการหมักต้องมีระยะเวลาที่เหมาะสม และเพียงพอที่จะทำให้เกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้อย่างสมบูรณ์

### สารพิษ

สารพิษที่ปะปนมากับน้ำหมักมีหลายชนิดดังแสดงในตารางที่ 2.7 เช่น ซัลไฟด์มีผลต่อการยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียในกลุ่มที่สร้างแก๊สมีเทน นอกจากนี้ยังมีสารพิษอีกหลายชนิดที่ทำให้ระบบการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนล้มเหลว และการตรวจวัดความล้มเหลวของระบบสามารถดูได้จากปริมาณแก๊สมีเทนที่ลดลง และปริมาณของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายสูงขึ้น เนื่องจากสารพิษจะทำให้จุลินทรีย์ในระบบไม่สามารถเปลี่ยนสาร โมเลกุลใหญ่ชนิดต่างๆ ในน้ำเสียไปเป็นกรดที่ระเหยง่าย (volatile acid) และเปลี่ยนจากกรดที่ระเหยง่ายไปเป็นกรดอะซิติก เพราะแบคทีเรียทั้ง 2 กลุ่ม (แบคทีเรียสร้างแก๊สมีเทน และแบคทีเรียกลุ่มซัลเฟตรีดิวเซอร์) สามารถใช้กรดอะซิติก และแก๊สไฮโดรเจนเป็นตัวให้อิเล็กตรอนได้ แต่ถ้ามีปริมาณกรดอะซิติกจำนวนน้อยจะทำให้แบคทีเรียกลุ่มซัลเฟตรีดิวเซอร์เอาชนะแบคทีเรียที่สร้างแก๊สมีเทนได้ เพราะแบคทีเรียกลุ่มซัลเฟตรีดิวเซอร์มีความสามารถในการจับสารตั้งต้น หรือตัวให้อิเล็กตรอนได้ดีกว่าแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างแก๊สมีเทน ดังนั้นถ้ากรดอะซิติกในระบบเกิดขึ้นในปริมาณน้อยจะทำให้ขั้นตอนสุดท้ายของการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนจะเกิดปฏิกิริยาซัลเฟตรีดักชัน (sulfate reduction) ได้แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ และทำให้ระบบล้มเหลวได้

### ความเข้มข้นของกรดอินทรีย์

ความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน จากรูปที่ 2.1 กรดอินทรีย์จะเกิดขึ้นในขั้นตอนที่ 2 หรือขั้นตอนการทำให้เกิดกรด (acidogenesis) และเป็นสารตั้งต้นของปฏิกิริยาการสร้างแก๊สมีเทน (methanogenesis) ดังนั้นถ้าปริมาณของกรดอินทรีย์มีอยู่ในปริมาณสูงกว่าปกติ จะทำให้บ่งชี้ได้ว่าขั้นตอนของปฏิกิริยาการสร้างแก๊สมีเทน ถูกยับยั้ง หรือเป็นสัญญาณบ่งบอกถึงการไม่สมดุลของกระบวนการย่อยสลายในระบบ ซึ่งจะทำให้ระบบล้มเหลวได้ ความเข้มข้นปกติของกรดอินทรีย์ในรูปของกรดอะซิติกในระบบที่ดีจะอยู่ในช่วง 200 – 400 มิลลิกรัม/ลิตร

### อัตราการสร้างแก๊สมีเทน

อัตราการสร้างแก๊สมีเทนเป็นตัววัดกิจกรรมของแบคทีเรียในกลุ่มที่สร้างแก๊สมีเทน และเป็นสิ่งบ่งบอกถึงประสิทธิภาพของระบบการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนที่มีความสำคัญมาก เพราะถ้ามีอัตราการสร้างแก๊สมีเทนลดลงจะเป็นสัญญาณบ่งบอกว่า มีความผิดปกติเกิดขึ้นกับกิจกรรมของแบคทีเรียในกลุ่มที่สร้างแก๊สมีเทน

### ธาตุอาหาร

ธาตุอาหารเป็นสิ่งจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ ถ้าในอาหารเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์มีธาตุอาหารที่จุลินทรีย์ต้องการอยู่ครบก็จะทำให้จุลินทรีย์เหล่านี้เจริญเติบโตได้ดี ดังงานวิจัยของ Fescetti และคณะ (1995) ได้ทำการศึกษาพบว่าแลคเตตเหมาะสมสำหรับการเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ *Rhodobacter sphaeroides* RV เพื่อผลิตแก๊สไฮโดรเจน และงานวิจัยของ Kumazawa และ Mitsui (1981) ที่ได้ทำการทดสอบความสัมพันธ์ของปริมาณของธาตุไนโตรเจนที่อยู่ในอาหารต่อการเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ *Oscillatoria* sp. Miami BG7 เพื่อผลิตแก๊สไฮโดรเจน ซึ่งจากการทดลองพบว่า ปริมาณของธาตุไนโตรเจนที่อยู่ในอาหารเลี้ยงเชื้อมีผลต่อการผลิตแก๊สไฮโดรเจน

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 2.7 ประเภทของสารพิษต่างๆ ในระบบการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน

ประเภทของสารพิษ		ชนิดของสารพิษ
สารอินทรีย์		<ul style="list-style-type: none"> <li>• ฟีนอล</li> <li>• สารประกอบฟีนอล</li> <li>• คลอโรฟอร์ม</li> </ul>
สารอนินทรีย์	พิษสูง	<ul style="list-style-type: none"> <li>• โลหะหนัก (โคโรเมียม นิกเกิล สังกะสี ทองแดง และสารหนู</li> <li>• ไฮยาไนต์</li> </ul>
	พิษต่ำ	<ul style="list-style-type: none"> <li>• โซเดียม</li> <li>• แคลเซียม</li> <li>• โพแทสเซียม</li> <li>• แมงกานีส</li> <li>• เหล็ก</li> <li>• คลอไรด์</li> </ul>

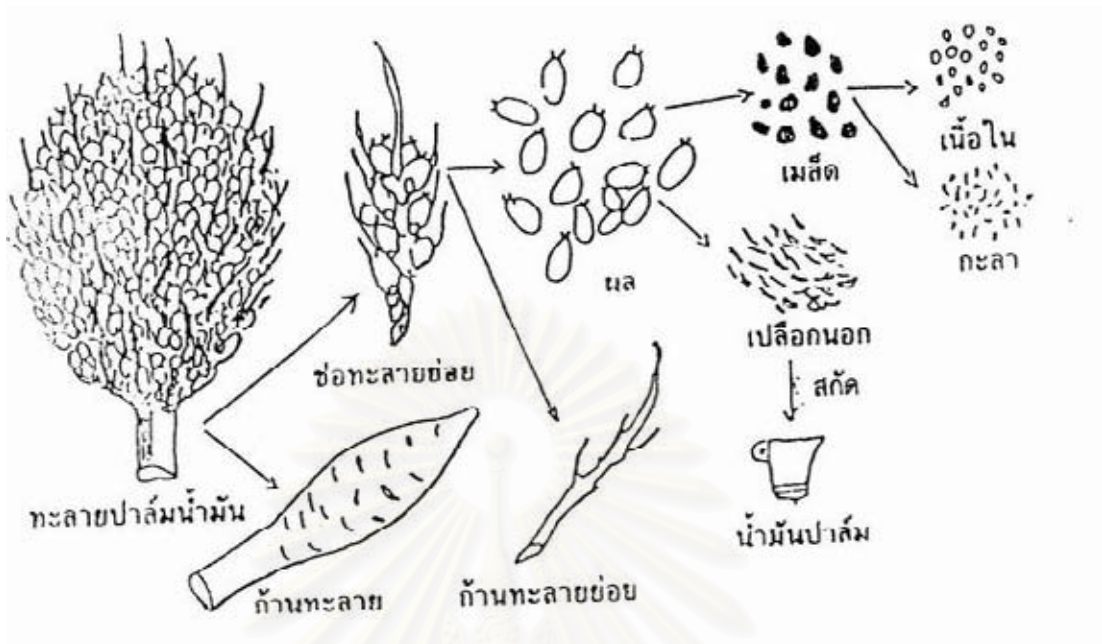
## 2.6 กากของเสี้ยนจากอุตสาหกรรมการสกัดน้ำมันปาล์ม

ในประเทศไทยเริ่มมีการส่งเสริมให้ปลูกปาล์มน้ำมันมากขึ้น เพื่อให้มีผลผลิตเพียงพอต่อการบริโภค และนำไปใช้ผลิตไบโอดีเซล ผลปาล์มที่ได้จะถูกนำไปแปรรูปในอุตสาหกรรมการสกัดน้ำมันปาล์ม จากกระบวนการแปรรูปข้างต้นจะทำให้เกิดของเสี้ยนจำนวนมากทั้งที่เป็นของเหลว และของแข็งของเสี้ยนที่เป็นกากของแข็งนี้จะเป็นปัญหาต่อการกำจัดอย่างมาก เพราะเมื่อนำไปกำจัดโดยวิธีเผา ก็จะทำให้เกิดปัญหาหมอกภาวะ หรือจะนำไปเพาะเห็ด ทำปุ๋ย และทำอาหารสัตว์ มูลค่าที่ได้จากของเสี้ยนเหล่านี้ยังมีมูลค่าต่ำ ดังนั้นการหาวิธีนำของเสี้ยนเหล่านี้มาเพิ่มมูลค่าจึงเป็นสิ่งสำคัญ การนำกากของเสี้ยนที่ได้นี้มีผลผลิตแก๊สชีวภาพ จึงอาจเป็นการเพิ่มมูลค่าของของเสี้ยนได้

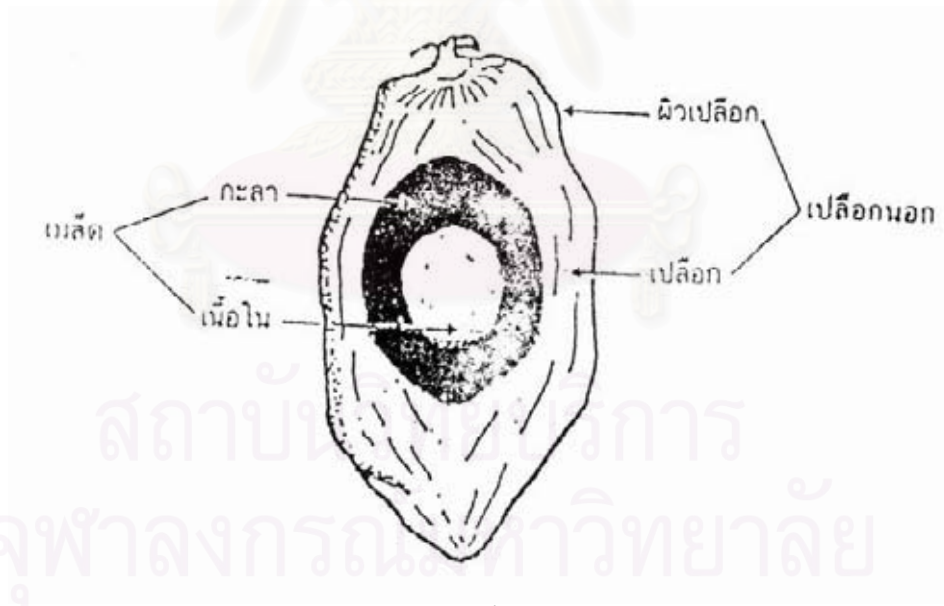
ปาล์มน้ำมันเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทย เริ่มเข้ามาสู่ประเทศไทยทางประเทศอินโดนีเซีย มาเลเซีย สามารถสร้างรายได้ให้แก่เกษตรกร โรงงานอุตสาหกรรม และบุคคลที่เกี่ยวข้องเป็นมูลค่าปีละหลายหมื่นล้านบาท ปาล์มน้ำมันมีถิ่นกำเนิดในแอฟริกา จัดอยู่ในพืชตระกูลปาล์ม (Palmae หรือ Recaceae) ตระกูลย่อย (sub – family) เดียวกับมะพร้าวคือ *Cocoineae* สกุล *Elaeis* ซึ่งมีอยู่ 3 ชนิดคือ *Elaeis guineensis* jacq. (African oil palm) หรือ *Alfonsia guineensis* H.B.K, *Corogo oleifera* (American oil palm) และ *Elaeis odora* (American oil palm) ปาล์มน้ำมันทั้ง 3 ชนิดนี้ *Elaeis guineensis* มีความสำคัญทางเศรษฐกิจมากที่สุด ปาล์มน้ำมันที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมการสกัดน้ำมันปาล์ม จะประกอบไปด้วย 2 ส่วน คือส่วนของทะลายปาล์ม และส่วนของผล ดังแสดงในรูปที่ 2.4 และ 2.5

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชที่ชอบอากาศในเขตร้อนฝนตกชุก การเพาะปลูกจึงจำกัดอยู่ในเขตที่ราบต่ำของภูมิภาคแถบเส้นศูนย์สูตรที่มีความชื้นสูง เป็นที่ราบใกล้ชายฝั่งทะเล เนือดินสมบูรณ์ และลึก น้ำไม่ขัง เช่น ดินเหนียวปนทราย ปาล์มน้ำมันจึงปลูกได้ที่แถบภาคใต้ของประเทศไทย และเมื่อมีการดูแลรักษาที่เหมาะสมก็จะให้ผลผลิตที่คุ้มค่ากับการลงทุน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 2.4 ส่วนประกอบของทะลายปาล์ม (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2547)



รูปที่ 2.5 ส่วนประกอบของผลปาล์มน้ำมัน (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2547)

### 2.6.1 องค์ประกอบของน้ำมันปาล์ม

การแปรรูปน้ำมันปาล์มจะเป็นการสกัดน้ำมันปาล์มได้จากส่วนของเปลือกนอก และจากเมล็ดใน ซึ่งมีองค์ประกอบแตกต่างกัน ดังนี้

#### 2.6.1.1 น้ำมันปาล์มจากเปลือกนอกของผลปาล์ม

น้ำมันปาล์มโดยทั่วไปหีบได้จากส่วนของเปลือกนอกของผลปาล์ม เมื่อหีบจะได้น้ำมันปาล์มดิบมีลักษณะเหลวมีน้ำปนอยู่ หลังจากนั้นจะนำมากรองแยกสิ่งสกปรก และเส้นใยออกแล้วนำไปกำจัดความชื้นให้อยู่ในระดับมาตรฐาน เพื่อลดการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสระหว่างการขนส่งน้ำมันดิบที่ได้ไปบรรจุลงในถัง เพื่อรอการนำไปขายให้กับโรงกลั่นน้ำมันปาล์มต่อไป

น้ำมันปาล์มดิบแยกได้ออกเป็น 2 ส่วน คือส่วนใส และส่วนที่เป็นไข โดยทั่วไปจะมีจุดหลอมเหลวประมาณ  $40\text{ }^{\circ}\text{C}$  และมีจุดแข็งตัวอยู่ระหว่าง  $25 - 50\text{ }^{\circ}\text{C}$  ซึ่งขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณกรดไขมันที่เป็นองค์ประกอบอยู่ น้ำมันปาล์มดิบจะมีลักษณะสีแดงส้ม ซึ่งเป็นส่วนของสารคาร์โรทีนอยด์ ประกอบด้วยเม็ดสีที่เรียกว่า คาโรทีน (carotene) ไลโคปีน (lycopine) และแซนโทฟิล (xanthophyll) น้ำมันปาล์มดิบที่ได้อาจมีกลิ่นซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของพวก P-ionome น้ำมันปาล์มดิบมีองค์ประกอบของกรดไขมัน และสารต่างๆ ดังที่แสดงในตารางที่ 2.8 – 2.9

ปริมาณของกรดไขมันเหล่านี้ไม่ค่อยแน่นอนขึ้นอยู่กับพันธุ์ปาล์ม น้ำมัน ดินฟ้าอากาศ และภูมิอากาศที่ปลูก นอกจากนี้แล้วในน้ำมันปาล์มยังประกอบไปด้วยสารที่ไม่สามารถทำเป็นสบู่ (unsaponifiable matter) ได้ประมาณร้อยละ 0.2 – 1 โดยน้ำหนัก

#### 2.6.1.2 น้ำมันปาล์มจากเมล็ดในผลปาล์ม

เมล็ดในปาล์มจะมีน้ำมันประมาณ 46 – 57 % สำหรับส่วนประกอบต่างๆ ในเมล็ดปาล์มแสดงในตารางที่ 2.10 การหีบน้ำมันเมล็ดในทำได้โดยหีบด้วยแรงอัดสูงๆ หรือสกัดด้วยตัวทำละลาย น้ำมันที่ได้แตกต่างจากน้ำมันจากเปลือกปาล์ม แต่มีสมบัติ และส่วนประกอบใกล้เคียงกับน้ำมันมะพร้าว น้ำมันเมล็ดในจะใสไม่มีสีถึงสีเหลืองอ่อน กรดไขมันที่มีอยู่ส่วนมากจะเป็นกรดไขมันอิ่มตัวคล้ายกับที่พบในน้ำมันมะพร้าว แสดงในตารางที่ 2.11

ตารางที่ 2.8 ปริมาณของกรดไขมันอิสระชนิดต่าง ๆ ในน้ำมันปาล์มดิบ (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2547)

ชนิดของกรดไขมัน	เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของกรดไขมัน
<b>กรดไขมันอิ่มตัว</b>	
Lauric acid (C12)	เล็กน้อย
Myristic acid (C12)	2
Palmitic acid (C16)	43
Stearic acid (C18)	7
Arachidic acid (C20)	เล็กน้อย
รวม	52
<b>กรดไขมันไม่อิ่มตัว</b>	
Oleic acid (C18:1)	39
Linoleic acid (C18:2)	9
Linolenic acid (C18:3)	เล็กน้อย
รวม	48

ตารางที่ 2.9 ปริมาณสารต่างๆ ที่มีอยู่ในน้ำมันปาล์ม (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2547)

ชนิดของสาร	เปอร์เซ็นต์
สารพวกลาร์โรทีนอยด์	0.03 – 0.15
Tocopherols	0.003 – 0.11
Sterols	0.003 – 0.10
Phosphatide	0.05 – 0.10
Total alcohol	0.08

ตารางที่ 2.10 ส่วนประกอบในเมล็ดของน้ำมันปาล์ม (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2547)

ชนิดของสาร	ร้อยละ
ความชื้น	9.2
โปรตีน	8.5
น้ำมัน (สกัดโดยฮีเทอร์)	49.0
เส้นใย	5.8
คาร์โบไฮเดรต	26.9
เถ้า	1.8

ตารางที่ 2.11 กรดไขมันในน้ำมันเมล็ดในปาล์ม กับน้ำมันมะพร้าว (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2547)

ส่วนประกอบ	น้ำมันเมล็ดในปาล์ม (%)	น้ำมันมะพร้าว (%)
<b>กรดไขมันอิ่มตัว</b>		
Caproic acid (C6)	-	0.08
Caprylic acid (C8)	2.4 – 4.3	5.4 – 9.5
Capric acid (C10)	3.0 – 6.3	4.5 – 9.7
Lauric acid (C12)	44.5 – 52.0	44.1 – 51.3
Myristic acid (C14)	14.1 – 18.6	13.1 – 18.5
Palmitic acid (C16)	6.5 – 10.4	7.5 – 10.5
Stearic acid (C18)	1.3 – 3.5	1.0 – 3.7
Arachidic acid (C20)	0 – 1.9	0 – 1.5
<b>กรดไขมันไม่อิ่มตัว</b>		
Palmitoleic Acid (C16:1)	0 – 0.6	0 – 1.3
Oleic acid (C18:1)	10.5 – 18.5	5.0 – 8.2
Linoleic acid (C18:2)	0.7 – 2.5	1.0 – 2.6



จะเห็นได้ว่าน้ำมันจากเปลือกมีสัดส่วนของกรดไขมันอิ่มตัว และไม่อิ่มตัวเกือบเท่ากันคือ 52 :48 ในขณะที่น้ำมันจากเมล็ดในมีกรดไขมันอิ่มตัวสูงมาก ในทางโภชนาการน้ำมันปาล์มให้ปริมาณความร้อนประมาณ 9 กิโลแคลอรีต่อกรัม มีวิตามิน เอ ดี อี และเค สูง น้ำมันปาล์มใช้เป็นน้ำมันบริโภคได้ดี เพราะมีกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูงร้อยละ 48 ทำให้ร่างกายของเราสร้างสารคลอเลสเตอรอลต่ำกว่าน้ำมันจากสัตว์ และน้ำมันจากเมล็ดในปาล์ม ซึ่งมีกรดไขมันอิ่มตัวสูง สำหรับสารคลอเลสเตอรอลนี้ ร่างกายจะสะสมไว้ได้ผิวหนัง และตกตะกอนที่ผิวหนังของเส้นโลหิต ทำให้เส้นโลหิตอุดตันได้ เป็นสาเหตุของโรคความดันโลหิตสูง และหัวใจได้

## 2.6.2 การแปรรูปน้ำมันปาล์ม

การแปรรูปน้ำมันปาล์มในอุตสาหกรรมมีกระบวนการ 3 กระบวนการด้วยกัน คือ การหีบเอาน้ำมันจากส่วนเปลือก และส่วนเมล็ดใน กระบวนการกลั่นน้ำมันปาล์มให้บริสุทธิ์ และการนำน้ำมันที่ได้จากการกลั่นในมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์

### การหีบเอาน้ำมันจากส่วนเปลือก และส่วนเมล็ดใน

ในกระบวนการหีบเอาน้ำมันจากส่วนเปลือก และส่วนเมล็ดใน (รูปที่ 2.6-2.9) จะเริ่มจากการนำเอาปาล์มสดมาหนึ่งในหม้อหนึ่งความดัน เพื่อขยับยั้งเอนไซม์ที่ทำให้ไขมันแตกตัวเป็นกรดไขมันอิสระ นอกจากนี้การนึ่งผลปาล์มสดยังทำให้ขั้วผลปาล์มนิ่ม ซึ่งจะทำให้ผลปาล์มหลุดร่วงจากทะลายปาล์มได้ง่าย และทำให้เนื้อเยื่อของผลปาล์มยุ่ย ง่ายต่อการหีบอัดน้ำมัน ภายในหม้อหนึ่งจะมีไอน้ำร้อน และมีการปรับสภาวะต่างๆ ให้เหมาะสม จากนั้นจะแยกผลปาล์มออกจากทะลายปาล์มแล้วจึงทำการย่อยผลปาล์มก่อนที่จะนำไปสกัดเป็นน้ำมันปาล์มต่อไป

ในขั้นตอนนี้จะมีการแยกสิ่งเจือปนได้แก่ น้ำเสีย ทะลายปาล์ม เศษใย และกากเมล็ดใน โดยปกติของเสียเหล่านี้จะถูกนำไปกำจัด โดยการนำน้ำเสียกลับไปรดต้นปาล์ม ส่วนพวกที่เป็นกากของแข็งจะนำไปเป็นเชื้อเพลิงในหม้อไอน้ำ ถมที่ดิน เพาะเห็ด เผาทิ้ง หรือขายให้โรงงานอาหารสัตว์ ซึ่งมูลค่าที่ได้จะมีมูลค่าต่ำ

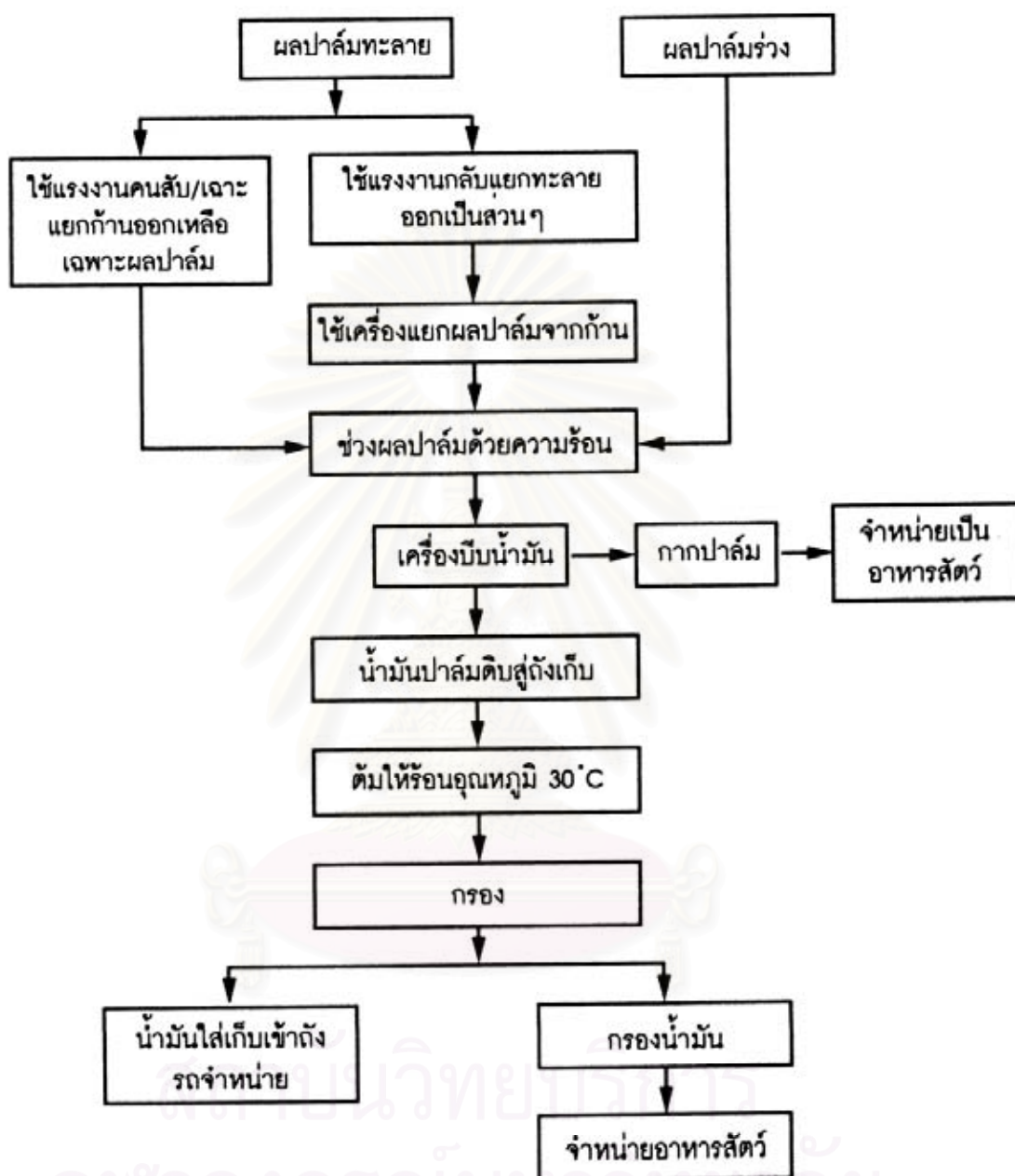
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



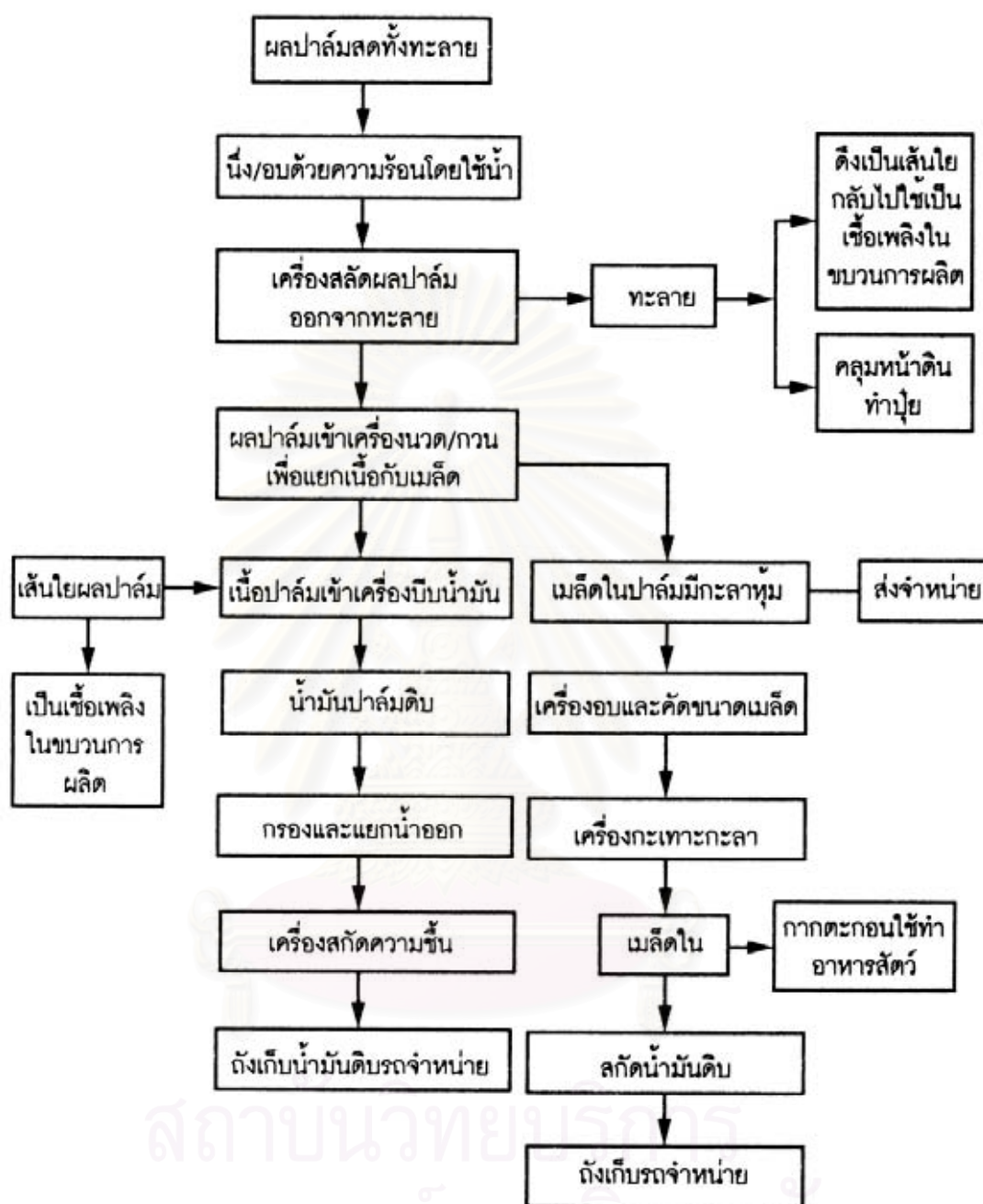
รูปที่ 2.6 ขั้นตอนการหีบน้ำมันแบบแยกเปลือกและเมล็ดในโดยไม่ใช้น้ำ (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2547)



รูปที่ 2.7 ขั้นตอนการหีบน้ำมันแบบแยกเปลือกและเมล็ดใน โดยใช้น้ำ (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2547)



รูปที่ 2.8 ขั้นตอนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบแบบรวมเมล็ดใน (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2547)



รูปที่ 2.9 ขั้นตอนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบแบบแยกเมล็ดออก (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2547)

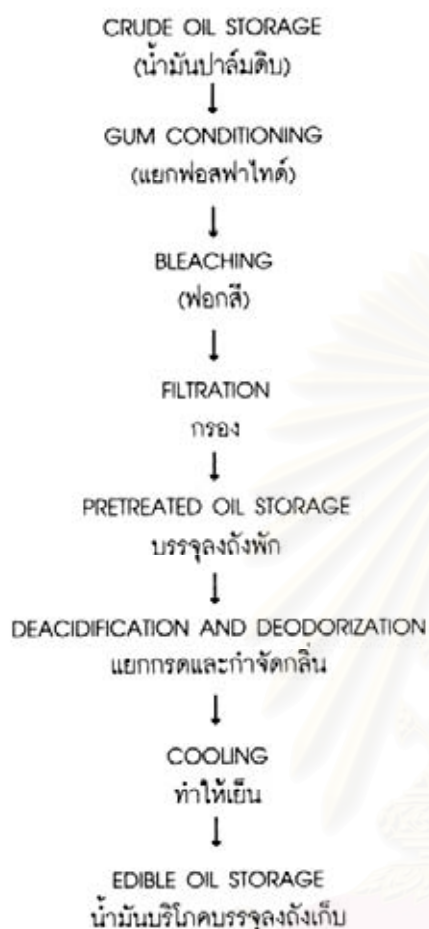
### กระบวนการกลั่นใส่น้ำมันปาล์มให้บริสุทธิ์

ในกระบวนการนี้เป็นการนำเอาน้ำมันปาล์มดิบมาทำให้บริสุทธิ์ โดยขจัดสิ่งเจือปนต่าง ๆ ออกไป จนน้ำมันมีความบริสุทธิ์ตามมาตรฐานที่กำหนด สามารถใช้บริโภคได้ กระบวนการกลั่นน้ำมันปาล์มบริสุทธิ์นี้มี 2 ระบบด้วยกันคือ ระบบการกลั่นโดยวิธีทางกายภาพ และระบบการกลั่นโดยวิธีทางเคมี (รูปที่ 2.10)

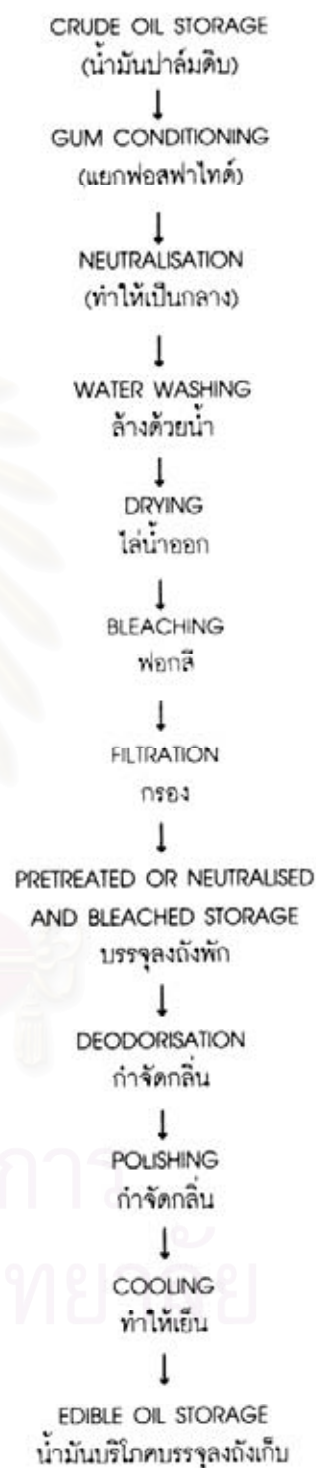
กระบวนการทางกายภาพ เป็นกระบวนการนำน้ำมันปาล์มดิบที่จะกำจัดสิ่งเจือปนพวกฟอสฟาไทด์ออก โดยใช้กรดฟอสฟอริก สารที่เจือปนอยู่จะรวมตัวเป็นก้อน ฟอกสีน้ำมันด้วยดินฟอกสี และผ่านเข้าเครื่องกรอง เพื่อแยกเอาดินฟอกสี และตะกอนของสิ่งเจือปนออก หลังจากนั้นก็ผ่านไปยังกระบวนการกำจัดกรด และกลั่นเพื่อแยกเอากรดไขมันอิสระ แอลดีไฮด์ และคีโตนออก โดยใช้วิธีการพ่นด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 230 – 240 °C ภายใต้สูญญากาศใช้เวลาประมาณ 1 – 2 ชั่วโมง

กระบวนการทางเคมี จะใช้สารเคมีเกือบทุกขั้นตอน ดังนั้นต้นทุนการผลิตต่อหน่วยค่อนข้างสูง เริ่มจากนำน้ำมันปาล์มดิบมาแยกฟอสฟาไทด์ออกก่อนโดยใช้กรดฟอสฟอริก หลังจากนั้นกำจัดกรดไขมันอิสระ โดยใช้สารละลายโซดาไฟ ขั้นตอนนี้จะได้ไขมันที่มีกรดไขมันอิสระไม่เกิน 0.03% จากนั้นนำน้ำมันไปไล่ความชื้น และฟอกสีด้วยดินฟอกสี กรองดินฟอกสีออก แล้วจึงนำไปกำจัดกลิ่น โดยใช้ไอน้ำเพื่อแยกเอากรดที่เหลืออยู่ พร้อมทั้งแอลดีไฮด์ และคีโตน ซึ่งเป็นตัวทำให้น้ำมันเหม็นหืน และฟอกสีน้ำมันได้ด้วย น้ำมันที่ได้จะเป็นน้ำมันที่บริสุทธิ์

## กระบวนการทางกายภาพ



## กระบวนการทางเคมี



รูปที่ 2.10 กระบวนการกลั่นใส่น้ำมันปาล์มบริสุทธิ์ (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2547)

### การนำน้ำมันที่ได้จากการกลั่นในมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์

เป็นการนำเอาน้ำมันปาล์มที่กลั่นบริสุทธิ์แล้วมาแปรรูปในอุตสาหกรรมเครื่องอุปโภค และบริโภคมากมาย เช่น บะหมี่กึ่งสำเร็จรูป เนยเทียม ครีมเทียม นมข้นหวาน ขนมขบเคี้ยว และน้ำมันปาล์ม เป็นต้น

กระบวนการข้างต้นจะเห็นได้ว่ามีของเสียเกิดขึ้นในหลายๆ ขั้นตอน กระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบจะมีการใช้น้ำสำหรับผลิตไอน้ำ และสกัดแยกน้ำมันปาล์มดิบ จึงมีน้ำเสียเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก น้ำเสียเหล่านี้จะมีลักษณะขุ่น และมีค่า BOD สูง จึงทำให้โรงงานไม่สามารถปล่อยน้ำเสียลงสู่แหล่งธรรมชาติได้ บางโรงงานที่มีสวนปาล์มจึงนำน้ำเสียนี้ไปรดสวนปาล์มของโรงงานเพื่อลดปริมาณน้ำเสียภายในโรงงาน นอกจากของเสียที่เป็นของเหลวแล้วยังมีของเสียที่เป็นของแข็งที่เกิดจากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบ ได้แก่ ทะลายปาล์มเปล่า กากเส้นใย กากสตัดจ์ กะลา และขี้เถ้าจากหม้อไอน้ำ ของเสียเหล่านี้สามารถนำไปขาย หรือนำไปทำประโยชน์อย่างอื่นได้ ทะลายปาล์มเปล่าสามารถนำไปเพาะเห็ด หรืออาจนำไปถมที่ดินในสวนปาล์มของโรงงาน กากเส้นใย และกะลาบางส่วนจะถูกนำไปทำเป็นเชื้อเพลิงในหม้อไอน้ำ กะลาสามารถนำไปขายเป็นอาหารสัตว์ ส่วนขี้เถ้าจากหม้อไอน้ำสามารถนำไปผลิตปุ๋ยได้

จากการศึกษาของสำนักเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมโรงงาน กรมโรงงานอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรม พบว่าผลิตภัณฑ์ และวัสดุเศษเหลือทิ้งของกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มดิบมีดังตารางที่ 2.12

ของเสียที่เกิดขึ้นเหล่านี้จะก่อให้เกิดปัญหาเป็นอย่างมากเมื่อนำไปกำจัดได้ไม่ทันตามปริมาณของเสียที่เกิดขึ้น อีกทั้งวิธีการนำของเสียเหล่านี้ไปกำจัดยังไม่สามารถเพิ่มมูลค่าได้ ดังนั้นการหาวิธีการกำจัดของเสียโดยที่สามารถให้ผลผลิตที่มีมูลค่ามากจึงเป็นวิธีที่ดี การผลิตแก๊สมีเทน และแก๊สไฮโดรเจน โดยวิธีทางชีวภาพจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ เพราะว่าแก๊สมีเทน และแก๊สไฮโดรเจนสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ในหลายๆ ด้าน โดยอาจนำไปใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตน้ำมันพืช การผลิตไฟฟ้าเพื่อใช้ภายในโรงงาน หรือนำไปใช้งานได้ในอุตสาหกรรมเคมีต่างๆ และในอนาคตอาจจะนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทนพลังงานจาก fossil fuel ได้ อีกทั้งการผลิตแก๊สชีวภาพโดยวิธีทางชีวภาพยังมีต้นทุนที่ต่ำกว่าวิธีแบบเดิมๆ เพราะใช้ของเสียที่เหลือจากอุตสาหกรรมมาเป็นสารตั้งต้นสำหรับการเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ เพื่อให้จุลินทรีย์ย่อยสลายของเสียเหล่านั้น ดังนั้นจึงเป็นการบำบัดของเสียไปด้วย และยังได้ผลผลิตที่มีมูลค่าสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ จากงานวิจัยของ Atif และคณะ (2004)

ได้ทำการทดลองนำน้ำเสียที่ได้จากกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มไปบำบัด โดยใช้จุลินทรีย์ในแบบที่ไม่ใช้อากาศ พบว่าจุลินทรีย์สามารถใช้น้ำเสียเหล่านี้ผลิตแก๊สชีวภาพ และแก๊สไฮโดรเจนได้



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



ตารางที่ 2.12 องค์ประกอบของเสียที่เป็นของแข็งต่อต้านของผลปาล์มสด (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2547)

ชนิดของของเสีย	จำนวน (กิโลกรัม/ตันผลปาล์มสด)
ทะลายปาล์มเปล่า	200 – 230
กะลา	60
เส้นใย	145



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### บทที่ 3

#### อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

#### 3.1 วัสดุ อุปกรณ์และสารเคมี

##### 3.1.1 กากปาล์มน้ำมัน

กากของแข็งปาล์มน้ำมัน (รูปที่ 3.1) ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ เป็นส่วนเนื้อชั้นในของผลปาล์มที่เหลือทิ้งจากการสกัดน้ำมันปาล์ม โดยกากปาล์มที่ใช้นี้ได้รับการอนุเคราะห์จาก บริษัท สุขสมบูรณ์ น้ำมันปาล์ม จำกัด จังหวัดชลบุรี กากปาล์มมีค่าปริมาณของแข็ง (total solid) และ ของแข็งระเหย (total volatile solid) เท่ากับ 0.91 กรัมของแข็งระเหยได้ต่อกรัมของกากปาล์ม และ 0.87 กรัมของของแข็งระเหยได้ต่อกรัมของกากปาล์ม ตามลำดับ

##### 3.1.2 จุลินทรีย์

จุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองจะมีลักษณะเป็นเม็ด (granule) ซึ่งนำมาจากบ่อบำบัดน้ำเสียแบบยูเอเอสบีของ โรงงานเส้นไหมโซเฮง จำกัด ตำบลยายชา อำเภอสามพราน จังหวัดนครปฐม

##### 3.1.3 สารละลายบัฟเฟอร์

สารละลายบัฟเฟอร์หมายถึง สารละลายที่สามารถต้านทานการเปลี่ยนแปลงค่า pH เมื่อมีการเติมกรด ( $H^+$ ) หรือเบส ( $OH^-$ ) ลงไปเล็กน้อย โดยทั่วไปแล้วสารละลายบัฟเฟอร์จะประกอบไปด้วยกรด หรือเบสอ่อน กับเกลือของมัน เช่น acetic acid กับ sodium acetate carbonic acid กับ sodium bicarbonate ammonium hydroxide กับ ammonium chloride หรือ  $H_2PO_4^-$  กับ  $HPO_4^{2-}$  สารละลายบัฟเฟอร์มีความสำคัญ และใช้ทั่วไปในการศึกษาทางชีวเคมี ซึ่งจำเป็นต้องมีการควบคุมให้สารละลายมีค่า pH ตามต้องการ

สารละลายบัฟเฟอร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นสารละลายฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 5.8 และ pH 7.0 โดยสารละลาย 1 M phosphate buffer pH 5.8 เตรียมได้โดยชั่ง  $KH_2PO_4$  และ  $K_2HPO_4$  จำนวน 0.96 โมล และ 0.04 โมล ตามลำดับ จากนั้นจึงนำไปผสมกับน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 950 มิลลิลิตร และทำการปรับ pH ให้ได้ pH 5.8 โดยใช้ 1 M NaOH และ 1 M HCl ส่วนสารละลาย 1 M phosphate buffer pH 7.0 เตรียมได้โดยชั่ง  $KH_2PO_4$  และ  $K_2HPO_4$  จำนวน 0.61 โมล และ 0.39 โมล ตามลำดับ จากนั้นจึงนำไปผสมกับน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 950 มิลลิลิตร และทำการปรับ pH ให้ได้ pH 7.0 โดยใช้ 1 M NaOH และ 1 M HCl ในการทดลองนี้จะใช้สารละลายบัฟเฟอร์ทั้งสองที่ความเข้มข้นเท่ากับ 50 mM



รูปที่ 3.1 ลักษณะกากชั้นในของผลปาล์มน้ำมัน

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

### 3.1.4 ถังปฏิบัติการ

ถังปฏิบัติการที่ใช้ในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ชนิด ชนิดแรกจะเป็นการหมักในขวดซีรัมขนาด 100 มิลลิลิตร โดยที่ด้านฝาขวดจะปิดด้วยจุกยาง และฝาอะลูมิเนียม (รูปที่ 3.2) ในงานวิจัยในขวดซีรัมจะประกอบไปด้วยส่วนน้ำหมัก ซึ่งจะมีกากปาล์ม เชื้อจุลินทรีย์ และสารละลายบัฟเฟอร์ ปริมาตร 55 มิลลิลิตร และส่วนที่เป็นช่องว่าง (Head space) ปริมาตร 45 มิลลิลิตร ส่วนถังปฏิบัติการชนิดที่สองใช้ขวดแก้วขนาด 2 ลิตร ซึ่งจะทำการปิดด้วยจุกยางซิลิโคน และฝาเกลียวพลาสติก (รูปที่ 3.3) การหมักในขวดแก้วขนาด 2 ลิตรนี้จะประกอบไปด้วยส่วนน้ำหมัก ซึ่งจะมีกากปาล์ม และสารละลายบัฟเฟอร์ ปริมาตร 1,100 มิลลิลิตร และส่วนที่เป็นช่องว่าง (Head space) ปริมาตร 900 มิลลิลิตร



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 3.2 ขวดซีรัมขนาดความจุ 100 มิลลิลิตร



รูปที่ 3.3 ขวดแก้วขนาด 2 ลิตร

### 3.2 พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษาและการวิเคราะห์ลักษณะนำหมักในการทดลอง

#### 3.2.1 pH

ในงานทดลองนี้ใช้ค่า pH ในการควบคุมการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ เพื่อหาค่าที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สชีวภาพ

#### 3.2.2 ปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นจากการสร้างของเชื้อจุลินทรีย์

ปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นนี้จะเป็นตัวชี้วัดให้เห็นถึงความเหมาะสมของภาวะต่างๆ ว่าเหมาะสมต่อการเจริญของจุลินทรีย์มากน้อยแค่ไหน ถ้าจุลินทรีย์มีการผลิตแก๊สออกมาเป็นจำนวนมาก ก็จะสามารถแสดงให้เห็นว่าที่ภาชนะนั้นๆ มีความเหมาะสมในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์

#### 3.2.3 องค์ประกอบของแก๊ส

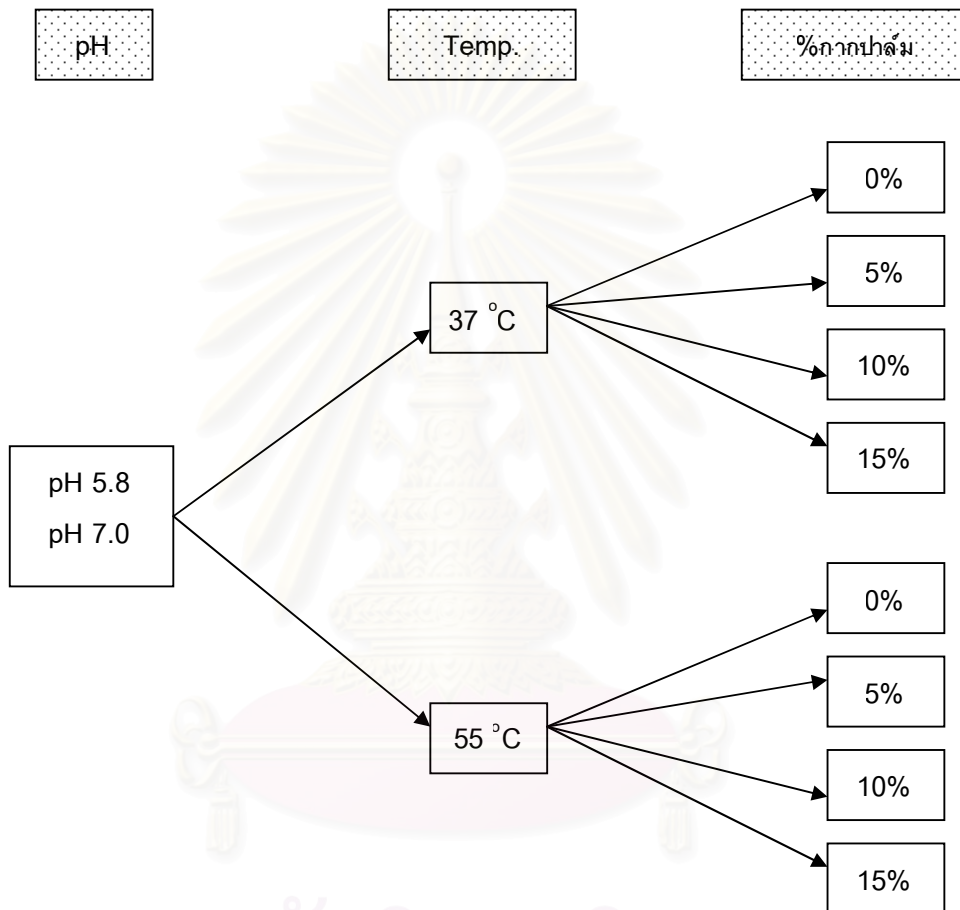
แก๊สที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตของจุลินทรีย์จะประกอบด้วยแก๊สหลายๆ ชนิด ดังนั้นจึงจำเป็นที่เราต้องนำแก๊สที่เกิดขึ้นเหล่านี้มาวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊ส ว่าประกอบด้วยแก๊สชนิดใดบ้าง และที่ภาชนะนั้นๆ จุลินทรีย์สามารถสร้างแก๊สชนิดที่เราสนใจได้มากน้อยเพียงใด

### 3.3 ระเบียบวิธีวิจัย

#### 3.3.1 การหมักในขวดซีรัมขนาด 100 มิลลิลิตร

ในการทดลองนี้จะทำการหมักกากปาล์มในขวดซีรัมขนาด 100 มิลลิลิตร ซึ่งภายในขวดจะประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นของเหลวที่มีกากปาล์ม สารละลายบัฟเฟอร์ และเชื้อจุลินทรีย์รวมกันมีปริมาตรเท่ากับ 55 มิลลิลิตร โดยการทดลองได้ทำการแปรผันค่าความเข้มข้นของ กากปาล์ม 4 ความเข้มข้น (total solid) คือ 0%, 5%, 10% และ 15% แปรผันอุณหภูมิ 2 อุณหภูมิ คือ 37 °C และ 55 °C ตามลำดับ และแปรผันค่า pH เริ่มต้น 2 ค่า คือ pH 5.8 และ 7.0 ตามลำดับ โดยที่การทดลองจะทำ 2 ซ้ำ ดังแสดงในรูปที่ 3.4

การทดลองเริ่มจากการชั่งกากปาล์มใส่ลงในขวดตามความเข้มข้นกากปาล์มที่ต้องการ แล้วเติมสารละลายบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 50 mM และเชื้อจุลินทรีย์ 5 มิลลิลิตร ทำการปิดด้วยฝาจุกยาง และฝาอะลูมิเนียม แล้วนำไปใส่แก๊สออกซิเจนที่อยู่ภายในขวด โดยใช้แก๊สไนโตรเจนที่มีอัตราการไหล 3 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นจึงนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 °C (Incubator; Precision Scientific รุ่น 815) และ 55 °C (Waterbath; Memmert รุ่น WB 14) จากนั้นทำการเก็บตัวอย่างแก๊สจากถังปฏิกริยา และนำมาวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเครื่อง แก๊สโครมาโทกราฟี ทุกๆ 3 วัน และทำการวัดค่า pH (pH meter; EUTECH INSTRUMENTS รุ่น Cyberscan pH 11) เมื่อสิ้นสุดการทดลอง



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รูปที่ 3.4 แผนการทดลอง

### 3.3.2 การหมักในขวดซีรัมขนาด 2 ลิตร

ในการทดลองนี้จะเลือกภาวะที่เหมาะสม ในการหมักในขวดซีรัมขนาด 100 มิลลิลิตร มาทำการขยายขนาด และหมักในขวดที่มีขนาดใหญ่ขึ้น โดยในขวดขนาด 2 ลิตรนี้จะประกอบไปด้วย ส่วนที่เป็นของเหลวที่มีกากปาล์ม สารละลายบัฟเฟอร์ และเชื้อจุลินทรีย์รวมกัน มีปริมาตรเท่ากับ 1,100 มิลลิลิตร โดยความเข้มข้นกากปาล์ม ค่า pH และอุณหภูมิ จะดูความเหมาะสมจากการหมักในขวดซีรัมขนาด 100 มิลลิลิตร

การทดลองจะเริ่มจากชั่งกากปาล์มใส่ลงในขวดตามความเข้มข้นกากปาล์มที่ต้องการ แล้วเติม สารละลายบัฟเฟอร์ความเข้มข้น 50 mM และเชื้อจุลินทรีย์ 100 มิลลิลิตร ทำการปิดด้วยฝาจุกยาง ซิลิโคน และฝาเกลียว แล้วนำไปใส่แก๊สออกซิเจนที่อยู่ในขวด โดยใช้แก๊สในโตรเจนที่มีอัตราการไหล 3 มิลลิลิตรต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที หลังจากนั้นจึงนำไปบ่มที่อุณหภูมิที่เหมาะสม และทำการเก็บตัวอย่างแก๊สจากถังปฏิกิริยา และนำมาวิเคราะห์ห้องค์ประกอบด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟฟีทุก ๆ 2 วัน และทำการวัดค่า pH เมื่อสิ้นสุดการทดลอง

## 3.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

### 3.4.1 การวิเคราะห์หาปริมาณของแข็ง

การหาปริมาณของแข็งนี้ ทำเพื่อทดสอบหาความชื้นที่ปะปนมากับกากของแข็งที่ใช้ในการหมัก โดยในงานวิจัยนี้จะหาปริมาณของแข็งทั้งหมด (total solids) และหาสารระเหยง่าย และสารคงตัวที่อยู่ในกากของเสีย

#### 3.4.1.1 ปริมาณของแข็งทั้งหมด (total solids)

ปริมาณของแข็งทั้งหมด หมายถึง ปริมาณสารที่เหลืออยู่ในภาชนะหลังจากการระเหยน้ำออกจากสารตัวอย่าง โดยขั้นตอนการวิเคราะห์เริ่มจากนำซามระเหย ไปอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 103 - 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง หลังจากนั้นจึงปล่อยให้เย็นลงในโถทำแห้ง หรือ เดสิคเคเตอร์ ชั่งน้ำหนัก และนำไปเก็บในเดสิคเคเตอร์จนกว่าจะใช้ เติมปริมาตรตัวอย่างที่เหมาะสม ใส่ลงในซามระเหย แล้วจึงนำซามระเหยนี้ไปอบในตู้อบที่ อุณหภูมิ 103 - 105 องศาเซลเซียส เป็น เวลาอย่างน้อย 1 ชั่วโมง เมื่อครบตามเวลาแล้วจึงปล่อยให้เย็นในเดสิคเคเตอร์ และทำการชั่งน้ำหนัก จากนั้นนำซามระเหยไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 103 - 105 °C ปล่อยให้เย็นในเดสิคเคเตอร์อีกครั้ง แล้วจึงนำไปชั่งน้ำหนักจนได้น้ำหนักที่คงที่ หรือน้ำหนักที่ลดลงน้อยกว่า 4% หรือไม่เกิน 0.5 มิลลิกรัมของการชั่งครั้งก่อน



### 3.4.1.2 ปริมาณสารระเหยง่าย และสารคงตัว (total volatile and fixed solids)

สารระเหยง่าย (volatile solids) หมายถึงปริมาณของแข็งที่กลายเป็นไอได้เมื่อนำไปเผาที่อุณหภูมิ  $550 \pm 50$  °C ในระยะเวลาที่กำหนด ซึ่งสารที่ระเหยไปส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ ส่วนของแข็งที่เหลือจากการเผาก็คือสารคงตัว (fixed solids) นั่นเอง วิธีการวิเคราะห์ทำได้โดยเผาของแข็งที่ได้จากการหา total solids ในเตาเผาอุณหภูมิ  $550 \pm 50$  °C (ให้อุณหภูมิของเตาเผาลงที่ต้องการก่อนจึงใส่ตัวอย่างเข้าไป) เป็นเวลา 15-20 นาที จากนั้นทิ้งให้ขามระเหยเย็นลงแล้วจึงเก็บในเตลิกเคเตอร์จนเย็นเท่าอุณหภูมิห้องจากนั้นจึงนำไปชั่งน้ำหนัก ซึ่งน้ำหนักที่เหลืออยู่ คือ ปริมาณของแข็งคงตัวทั้งหมด และน้ำหนักที่หายไปในการเผาเป็นของแข็งระเหยทั้งหมด

### 3.4.2 องค์ประกอบของแก๊ส

แก๊สในถังปฏิกริยาจะดูดออกมาโดยใช้เข็มฉีดยาขนาด 500 ไมโครลิตร (Hamilton, USA) ดูดแก๊สจากส่วนที่เป็นช่องว่างในถังปฏิกริยาปริมาตร 250 ไมโครลิตร (รูปที่ 3.5) แล้วทำการฉีดเข้าเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟฟี (Shimadzu GC-8A) ซึ่งจะเชื่อมต่อกับเครื่องอ่านผล (Shimadzu C-R6A) คอลัมน์ที่ใช้ในการวิเคราะห์แก๊สตัวอย่างคือ column Unibeads C 60/80 โดยในการวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สจะใช้แก๊สฮีเลียมเป็นแก๊สตัวพา (carrier gas) และมีตัวตรวจวัดแบบ thermal conductivity detector (TCD) ซึ่งเป็นตัวตรวจวัดที่ประกอบด้วย heated filament ที่มีกระแสไฟฟ้าคงที่ ในการตรวจวัดจะเป็นการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของ filament current ของ reference cell และ sample cell การเปลี่ยนแปลงนี้จะมีความสัมพันธ์กับค่าสัมประสิทธิ์นำความร้อนของสารที่ต้องการวิเคราะห์ กับค่าสัมประสิทธิ์นำความร้อนของแก๊สตัวพาทำให้ตัวตรวจวัดชนิดนี้สามารถตรวจสอบสารได้ทุกชนิด ยกเว้นแก๊สที่ใช้เป็นแก๊สตัวพา ภาวะที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของแก๊สมีดังต่อไปนี้คือ อุณหภูมิของ injector และ detector เท่ากับ  $150$  °C อุณหภูมิของคอลัมน์เท่ากับ  $80$  °C และปรับค่า current ที่ 180 mA ฉีดแก๊สตัวอย่างเทียบกับแก๊สผสมมาตรฐาน

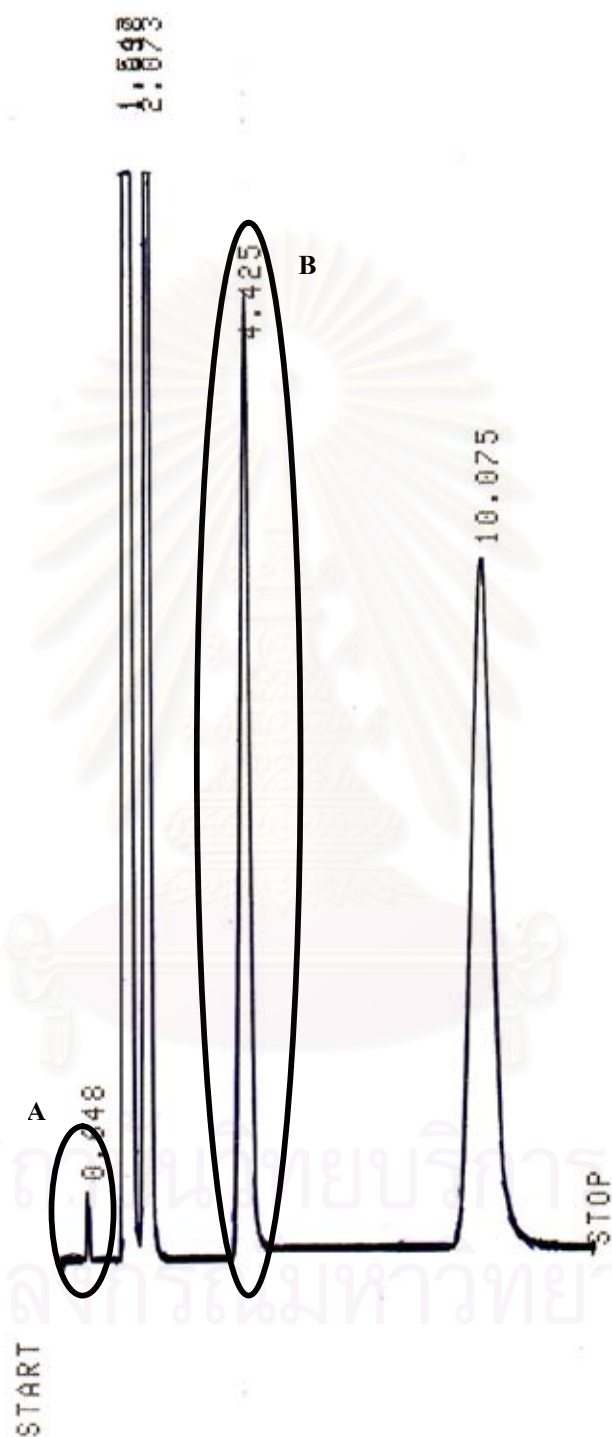
ในการวิเคราะห์หาองค์ประกอบของแก๊สแต่ละชนิด จะสังเกตจากระยะเวลาที่แก๊สใช้เวลาในการผ่านคอลัมน์ โดยแก๊สแต่ละชนิดจะใช้เวลาที่แตกต่างกัน ดังรูปที่ 3.6 จะเป็นผลของการฉีดแก๊สผสมมาตรฐาน (Restek air standard no. 34512) ที่ทราบปริมาณความเข้มข้นที่แน่นอน ซึ่งจะประกอบไปด้วยแก๊สชนิดต่างๆ ตามตารางที่ 3.1 ผสมอยู่กับแก๊สฮีเลียม (helium) โดยจากรูปที่ 3.6 แก๊สมาตรฐานที่จะออกมาเป็นชนิดแรกคือ แก๊สไฮโดรเจน (peak A) แก๊สมีเทนจะออกมาเป็นลำดับที่ 5 (peak B)



รูปที่ 3.5 การดูดแก๊สตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 3.1 องค์ประกอบ และความเข้มข้นของแก๊สมาตรฐานที่ใช้ฉีดเพื่อเปรียบเทียบกับแก๊สที่เกิดขึ้นในการทดลอง

องค์ประกอบของแก๊สมาตรฐาน	ความเข้มข้น (%)
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO <sub>2</sub> )	5
คาร์บอนมอนอกไซด์ (CO)	5
ไฮโดรเจน (H <sub>2</sub> )	4
มีเทน (CH <sub>4</sub> )	4
ไนโตรเจน (N <sub>2</sub> )	5
ออกซิเจน (O <sub>2</sub> )	5
ฮีเลียม (helium)	72
<b>Total</b>	100



รูปที่ 3.6 การแยกแก๊สมาตรฐานโดยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟฟี A คือ แก๊สไฮโดรเจน (retention time ประมาณ 0.65 นาที) และ B คือ แก๊สมีเทน (retention time ประมาณ 4.43 นาที)

### 3.4.3 ปริมาณของแก๊สที่เกิดขึ้น

ปริมาตรแก๊สที่เกิดขึ้นในถังปฏิกิริยาคำนวณจากผลต่างความดันที่เปลี่ยนแปลงในถังปฏิกิริยา โดยในแต่ละครั้งที่ทำการเก็บแก๊สตัวอย่างในถังปฏิกิริยา จะทำการเก็บแก๊สตัวอย่างแล้วนำไปฉีดเข้าเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี จากนั้นจะใช้เข็มเจาะฝาจุกยางให้แก๊สภายในระบบออกจากถังปฏิกิริยา เพื่อปรับความดันภายใน และภายนอกให้เท่ากัน จากนั้นจึงทำการเก็บตัวอย่างแก๊สในขวดอีกครั้ง ผลที่ได้เราจะนำค่าพื้นที่ใต้กราฟ (peak area) มาเปรียบเทียบกับพื้นที่ใต้กราฟที่ได้จากการฉีดแก๊สมาตรฐานที่รู้ความเข้มข้นที่แน่นอน ดังนั้นเราจึงทราบความเข้มข้นของแก๊สที่เกิดขึ้นทั้งก่อน และหลังปรับความดันภายในถังปฏิกิริยา โดยความเข้มข้นของแก๊สที่ได้จะอยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์ เปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของแก๊สที่ได้นี้จะถูกนำไปคำนวณดังตารางที่ 3.2

หลังจากได้เปอร์เซ็นต์แก๊สที่เกิดขึ้นในแต่ละวัน เราจะนำเปอร์เซ็นต์นี้ไปคำนวณหาปริมาตรแก๊สที่เกิดขึ้นได้จากการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ที่ได้กับพื้นที่ว่างภายในขวดซีรัม ก็จะทำให้ทราบจำนวนแก๊สที่เกิดขึ้นจริงในแต่ละครั้ง

ตารางที่ 3.2 การวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์แก๊สที่เกิดขึ้น

ครั้งที่วิเคราะห์องค์ประกอบ แก๊ส		% แก๊สจากการ วัดด้วยเครื่อง GC	% แก๊สที่ เพิ่มขึ้นใน แต่ละวัน	% แก๊สสะสม
1	ก่อน	A		
	หลัง	B		
2	ก่อน	C	D+A-B	D+A-B
	หลัง	D		
3	ก่อน	E	F+C-D	(D+A-B)+( F+C-D)
	หลัง	F		
4	ก่อน	G	H+E-F	(D+A-B)+( F+C-D)+( H+E-F)
	หลัง	H		

## บทที่ 4

### ผลการทดลอง และวิจารณ์ผลการทดลอง

#### 4.1 ถังหมักขนาด 100 มิลลิลิตร

##### 4.1.1 แก๊สชีวภาพ ที่อุณหภูมิ 37 °C pH 5.8

รูปที่ 4.1 แสดงปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักที่อุณหภูมิ 37 °C pH 5.8 โดยใช้กากปาล์มเข้มข้น 0%, 5%, 10% และ 15% ที่ความเข้มข้นของกากปาล์ม 0% (รูปที่ 4.1a) แก๊สมีเทนมีปริมาณเพิ่มขึ้นหลังจากเริ่มการหมัก และเกิดขึ้น สูงที่สุดในวันที่ 74 ของการหมัก คือ  $63.00 \pm 2.01$  ไมโครโมล และมีแก๊สมีเทนสะสมเฉลี่ยตลอดระยะเวลาการหมัก 74 วัน เท่ากับ  $456.43 \pm 22.07$  ไมโครโมล (รูปที่ 4.2 a) ที่ความเข้มข้นกากปาล์ม 5% มีแก๊สมีเทนเกิดขึ้นเล็กน้อยในระยะเวลาหมัก 9 วันแรก หลังจากนั้นจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วจนถึงวันที่ 20 ของการหมัก จนมีแก๊สมีเทนประมาณ 34–36 ไมโครโมล โดยแก๊สมีเทนจะสูงที่สุดในวันที่ 32 วัน ซึ่งมีค่าเท่ากับ  $36.19 \pm 0.27$  ไมโครโมล (รูปที่ 4.1b) หลังจากนั้นแก๊สมีเทนจะเกิดขึ้นค่อนข้างคงที่จนถึงวันที่ 74 และมีแก๊สมีเทนสะสมตลอดระยะเวลาการหมักมีค่าเท่ากับ  $246.79 \pm 7.27$  ไมโครโมล (รูปที่ 4.2b) ที่ความเข้มข้นกากปาล์ม 10% (รูปที่ 4.1c) และ 15% (รูปที่ 4.1d) พบว่ามีแก๊สมีเทนเกิดขึ้นในปริมาณน้อยมากในช่วง 30 วัน แรกของการหมัก หลังจากนั้นความเข้มข้นของแก๊สมีเทนจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ จนถึง  $13.13 \pm 0.38$  ไมโครโมล และ  $9.25 \pm 0.51$  ไมโครโมล ตามลำดับ ในวันที่ 74 ของการหมัก ส่วนแก๊สมีเทนสะสมตลอดระยะเวลาการหมัก 74 วัน มีค่าเท่ากับ  $39.30 \pm 0.49$  ไมโครโมล (รูปที่ 4.2 c) และ  $23.86\% \pm 0.64$  ไมโครโมล (รูปที่ 4.2d) สำหรับปริมาณกากปาล์ม 10% และ 15% ตามลำดับ

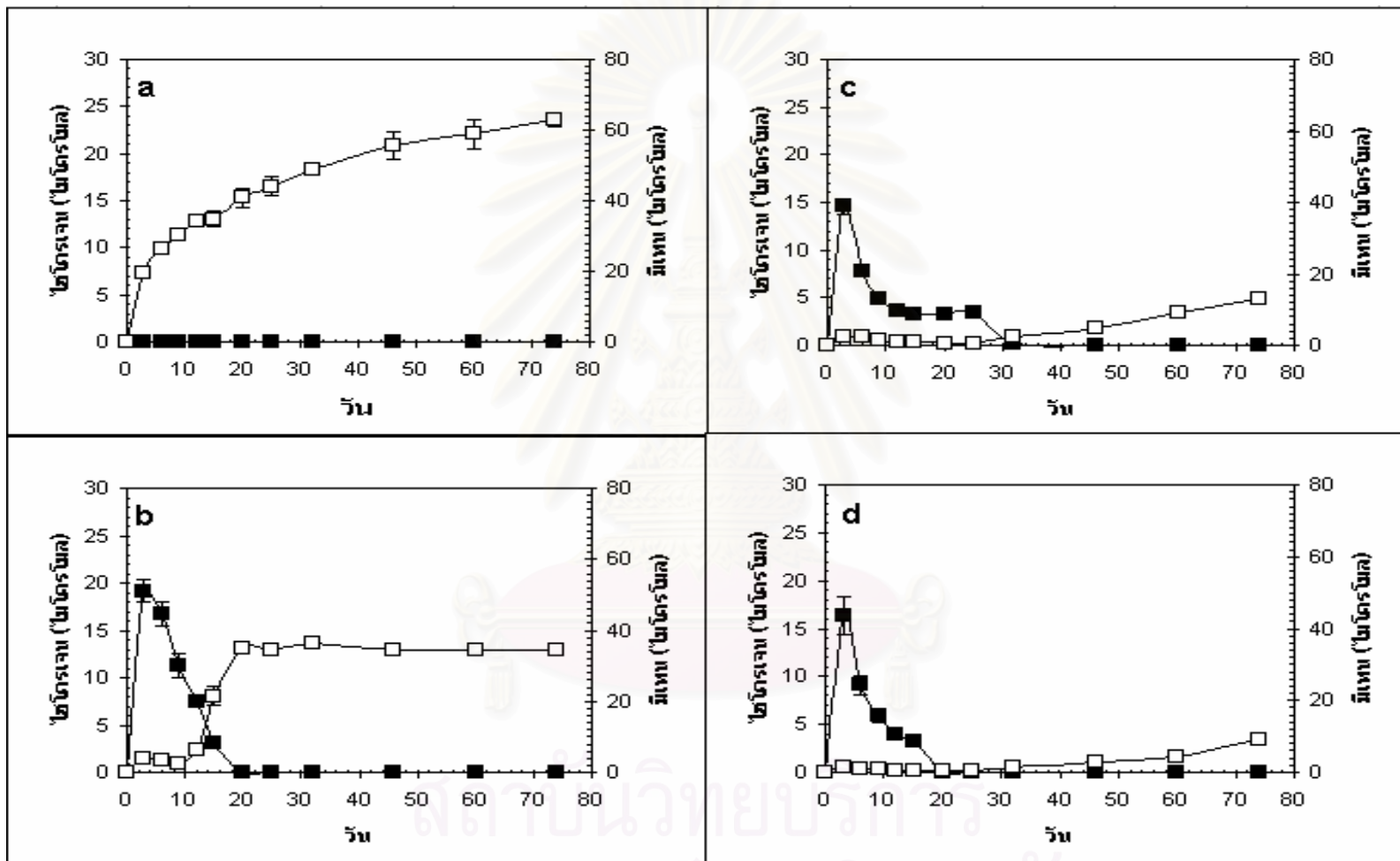
นอกจากนี้ในการหมักที่อุณหภูมิ 37 °C pH 5.8 ยังทำการวัดปริมาณการเกิดแก๊สไฮโดรเจนด้วย โดยที่ความเข้มข้นกากปาล์ม 0% (รูปที่ 4.1a และรูปที่ 4.2a) จะไม่พบการเกิดแก๊สไฮโดรเจนตลอดระยะเวลาการหมัก 74 วัน ที่ความเข้มข้นกากปาล์ม 5%, 10% และ 15% มีแนวโน้มการเกิดแก๊สไฮโดรเจนที่คล้ายๆ กัน คือมีการเกิดแก๊สไฮโดรเจนอย่างรวดเร็วในช่วง 3 วันแรกของการหมัก และมีแก๊สไฮโดรเจนสูงที่สุดในวันที่ 3 ของการหมัก หลังจากนั้นแก๊สไฮโดรเจนจะลดลง โดยที่ความเข้มข้นกากปาล์ม 5% (รูปที่ 4.1b) เกิดแก๊สไฮโดรเจนสูงที่สุดในวันที่ 3 เท่ากับ  $19.16 \pm 1.13$  ไมโครโมล หลังจากวันที่ 3 ความเข้มข้นของแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจะลดลงเรื่อยๆ จนในวันที่ 25 ของการหมักจะไม่มีแก๊สไฮโดรเจนเกิดขึ้นเลย และเมื่อสิ้นสุดการทดลองมีแก๊สไฮโดรเจนสะสมตลอดระยะเวลาการหมัก 74 วัน มีค่าเท่ากับ  $57.79 \pm 4.16$  ไมโครโมล (รูปที่ 4.2b) ที่ความ

เข้มข้นกากปาล์ม 10% จะเกิดแก๊สไฮโดรเจนสูงสุดที่วันที่ 3 เท่ากับ  $14.58 \pm 0.83$  ไมโครโมล (รูปที่ 4.1c) จากนั้นแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจะลดลงเรื่อยๆ จนไม่มีแก๊สไฮโดรเจนเกิดขึ้นเลยในวันที่ 46 เมื่อสิ้นสุดการทดลองมีแก๊สไฮโดรเจนสะสมเท่ากับ  $40.78 \pm 1.05$  ไมโครโมล (รูปที่ 4.2c) และที่ความเข้มข้นกากปาล์ม 15% จะเกิดแก๊สไฮโดรเจนสูงสุดที่วันที่ 3 เท่ากับ  $16.33 \pm 2.04$  ไมโครโมล (รูปที่ 4.1d) แก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจะเกิดน้อยลงจนไม่เกิดเลยในวันที่ 25 เมื่อสิ้นสุดการทดลองจะมีแก๊สไฮโดรเจนสะสมตลอดระยะเวลาการหมักเท่ากับ  $38.48 \pm 1.77$  ไมโครโมล (รูปที่ 4.2d)

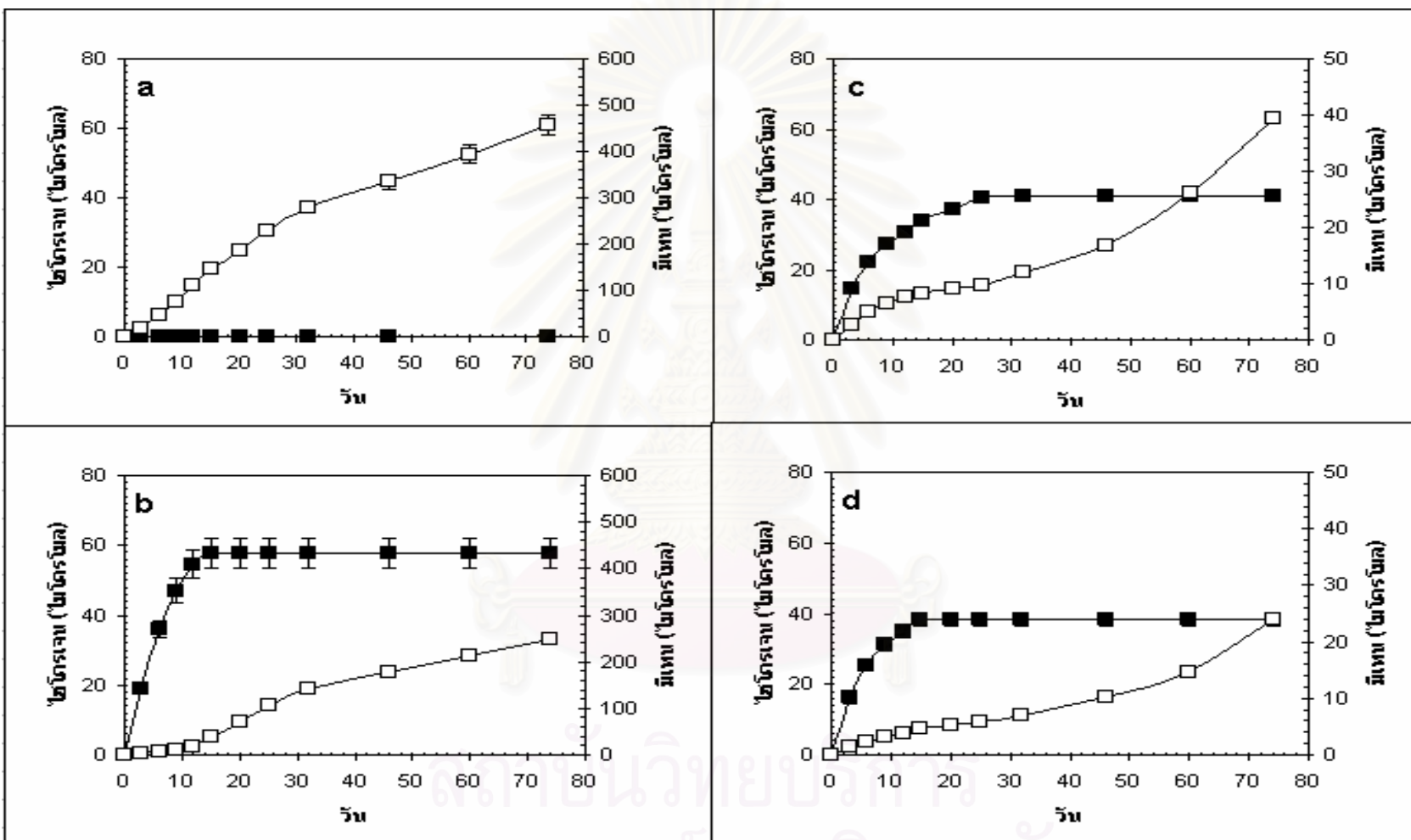


สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย





รูปที่ 4.1 แก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักที่อุณหภูมิ 37 °C pH 5.8 ความเข้มข้นกากปาล์มเท่ากับ (a) 0%, (b) 5%, (c) 10% และ (d) 15% ข้อมูลในแต่ละจุดเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำสองครั้ง สัญลักษณ์ ■ แสดงแก๊สไฮโดรเจนและ □ แสดงแก๊สมีเทน



รูปที่ 4.2 แก๊สชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักที่อุณหภูมิ 37 °C pH 5.8 ความเข้มข้นกากปาล์มเท่ากับ (a) 0%, (b) 5%, (c) 10% และ (d) 15% ข้อมูลในแต่ละจุดเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำสองครั้ง สัญลักษณ์ ■ แสดงแก๊สไฮโดรเจนและ ● แสดงแก๊สมีเทน

ปริมาณแก๊สมีเทนที่ได้จากการทดลองการหมักกากปาล์มที่อุณหภูมิ 37 °C pH 5.8 แสดงดังรูปที่ 4.3 และ 4.4 ซึ่งจะมีแนวโน้มเช่นเดียวกับรูปที่ 4.1 และ 4.2 โดยที่ความเข้มข้นกากปาล์ม 0% จะเกิดแก๊สมีเทนเพิ่มขึ้นอย่างช้าจนมีปริมาณ  $20.88 \pm 0.67$  มิลลิลิตร (รูปที่ 4.3a) ในวันที่ 74 และมีปริมาณแก๊สมีเทนสะสมเป็นจำนวน  $151.25 \pm 7.31$  มิลลิลิตร (รูปที่ 4.4a) ที่ความเข้มข้นกากปาล์ม 5% จะเกิดแก๊สมีเทนในปริมาณเล็กน้อยตั้งแต่เริ่มทำการหมัก และจะเริ่มเพิ่มขึ้นตั้งแต่วันที่ 12 จนมีปริมาตรคงที่ตั้งแต่วันที่ 20 ของการหมักจนจบการทดลอง แก๊สมีเทนเกิดขึ้นสูงสุดในวันที่ 32 คิดเป็นปริมาตร 11.99 มิลลิลิตร (รูปที่ 4.3b) และมีปริมาณแก๊สมีเทนสะสมเฉลี่ยจำนวน  $81.78 \pm 2.41$  มิลลิลิตร (รูปที่ 4.4b) ที่ความเข้มข้น 10% และ 15% จะมีแนวโน้มคล้ายๆ กัน โดยจะเกิดแก๊สมีเทนสูงที่สุดในวันที่ 74 ของการหมัก คิดเป็นจำนวน  $4.35 \pm 0.13$  มิลลิลิตร (รูปที่ 4.3c) และ  $3.07 \pm 0.17$  มิลลิลิตร (รูปที่ 4.3c) ตามลำดับ ส่วนปริมาณแก๊สมีเทนสะสมเฉลี่ยคิดเป็นจำนวน  $13.02 \pm 0.16$  มิลลิลิตร (รูปที่ 4.4c) และ  $7.91 \pm 0.21$  มิลลิลิตร (รูปที่ 4.4d) ตามลำดับ

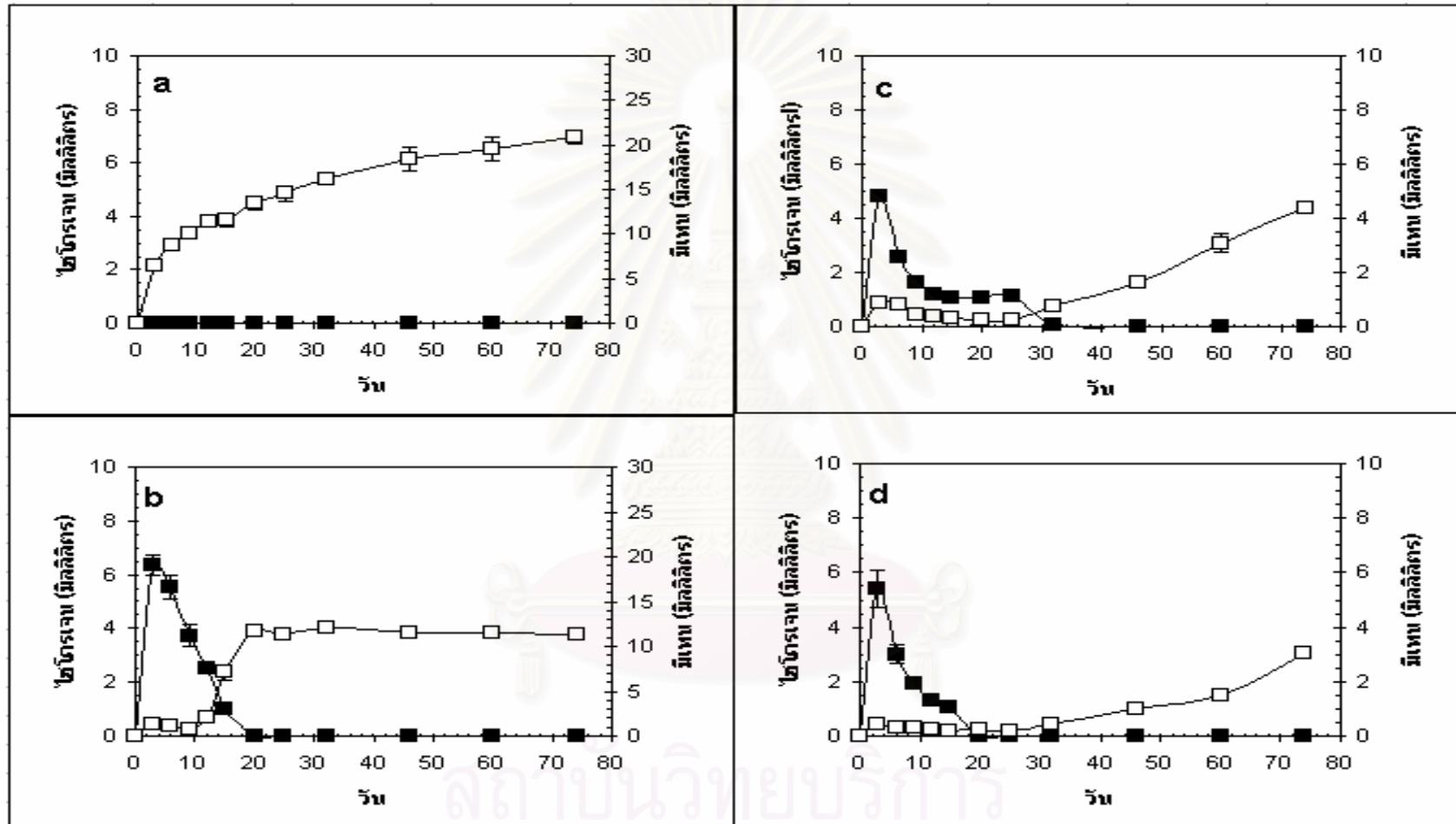
ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่ได้จากการทดลองการหมักกากปาล์มที่อุณหภูมิ 37 °C pH 5.8 เมื่อนำมาคำนวณหาปริมาณแก๊สไฮโดรเจน พบว่ากราฟที่ได้มีแนวโน้มคล้ายกับรูปที่ 4.1 และ 4.2 เช่นกัน โดยที่ 0% (รูปที่ 4.3a และ 4.4a) จะไม่พบแก๊สไฮโดรเจนเลย แต่ที่ความเข้มข้นกากปาล์ม 5%, 10% และ 15% จะมีแนวโน้มที่คล้ายกัน คือจะผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้สูงที่สุดตั้งแต่วันที่ 3 ของการหมัก โดยจะเกิดแก๊สไฮโดรเจนจำนวน  $6.35 \pm 0.37$  มิลลิลิตร,  $4.83 \pm 0.27$  มิลลิลิตร และ  $5.41 \pm 0.67$  มิลลิลิตร ตามลำดับ และคิดเป็นปริมาณแก๊สไฮโดรเจนสะสมเฉลี่ยเท่ากับ  $19.15 \pm 1.38$  มิลลิลิตร,  $13.51 \pm 0.35$  มิลลิลิตร และ  $12.74 \pm 0.59$  มิลลิลิตร ตามลำดับ

จากผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นของแก๊สมีเทนที่เกิดขึ้นจากการหมักจะแปรผกผันกับความเข้มข้นของกากปาล์มที่ใช้ เพราะที่ความเข้มข้นกากปาล์ม 10% และ 15% จะมีแก๊สมีเทนเกิดขึ้นอย่างช้าๆ และมีแก๊สมีเทนสะสมของเพียง  $13.02 \pm 0.16$  มิลลิลิตร ( $39.30 \pm 0.49$  ไมโครโมล) และ  $7.91 \pm 0.21$  มิลลิลิตร ( $23.86 \pm 0.64$  ไมโคร โมล) ตามลำดับ แต่ที่ความเข้มข้นกากปาล์ม 5% จะมีแก๊สมีเทนสะสมสูงถึง  $81.78 \pm 2.41$  มิลลิลิตร ( $246.79 \pm 7.27$  ไมโคร โมล) และมีอัตราการเกิดแก๊สมีเทนอย่างรวดเร็ว โดยที่ความเข้มข้นกากปาล์ม 0% จะเกิดแก๊สมีเทนจำนวนมากที่สุด ผลดังกล่าวแสดงว่ากากปาล์มอาจมีองค์ประกอบที่ไปยังยังการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ในการผลิตแก๊สมีเทน หรือการหมักในการทดลองนี้ไม่ได้ทำการกวน จุลินทรีย์จึงกระจายได้ไม่ทั่วถึง จึงทำให้ประสิทธิภาพการหมักทำได้ไม่ดี และจากการสังเกตผลของแก๊สไฮโดรเจนที่ได้จากการหมักที่อุณหภูมิ 37 °C pH 5.8 ในทุกๆ ความเข้มข้น พบว่าการเกิดแก๊สไฮโดรเจนมีแนวโน้มการเกิดคล้ายๆ กัน ยกเว้นในความเข้มข้นกากปาล์ม 0% จะไม่มีการผลิตแก๊ส

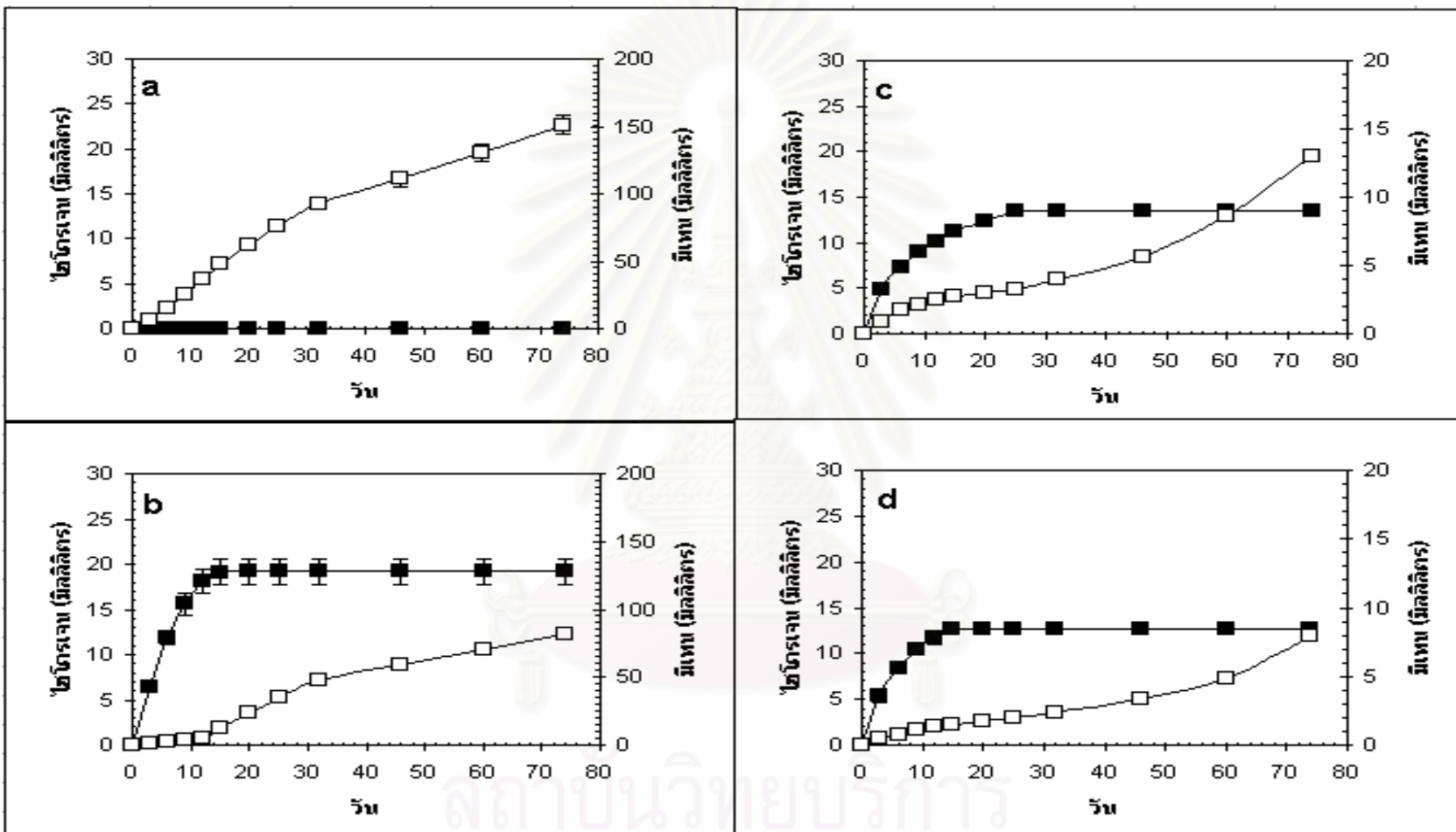
ไฮโดรเจนเกิดขึ้นเลย แสดงว่ากากปาล์มมีส่วนชักจูงให้เกิดแก๊สไฮโดรเจน โดยที่ความเข้มข้นกากปาล์ม 5% จะให้ผลที่ดีที่สุดเมื่อเทียบกับความเข้มข้นอื่นๆ เพราะในวันที่ 3 ของการหมักจะเกิดแก๊สไฮโดรเจนสูงที่สุดถึง  $6.35 \pm 0.37$  มิลลิลิตร ( $19.16 \pm 1.13$  ไมโครโมล) และมีปริมาตรแก๊สไฮโดรเจนสะสมสูงที่สุดคือ  $19.15 \pm 1.38$  มิลลิลิตร ( $57.79 \pm 4.16$  ไมโครโมล) แก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจะลดลงจนไม่มีแก๊สไฮโดรเจนเกิดขึ้นเลยเมื่อผ่านการหมักได้ 25 วัน แต่ที่ความเข้มข้นกากปาล์ม 10% จะผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้ระยะเวลานานกว่า โดยจะผลิตแก๊สไฮโดรเจนจนถึงวันที่ 32 ของการหมัก แต่ปริมาตรแก๊สไฮโดรเจนสะสมยังมีน้อยกว่าการหมักที่ความเข้มข้นกากปาล์ม 5%



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



รูปที่ 4.3 ปริมาณของแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักที่อุณหภูมิ 37 °C pH 5.8 ความเข้มข้นกากปาล์มเท่ากับ (a) 0%, (b) 5%, (c) 10% และ (d) 15% ข้อมูลในแต่ละจุดเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำสองครั้ง สัญลักษณ์ ■ แสดงแก๊สไฮโดรเจนและ □ แสดงแก๊สมีเทน

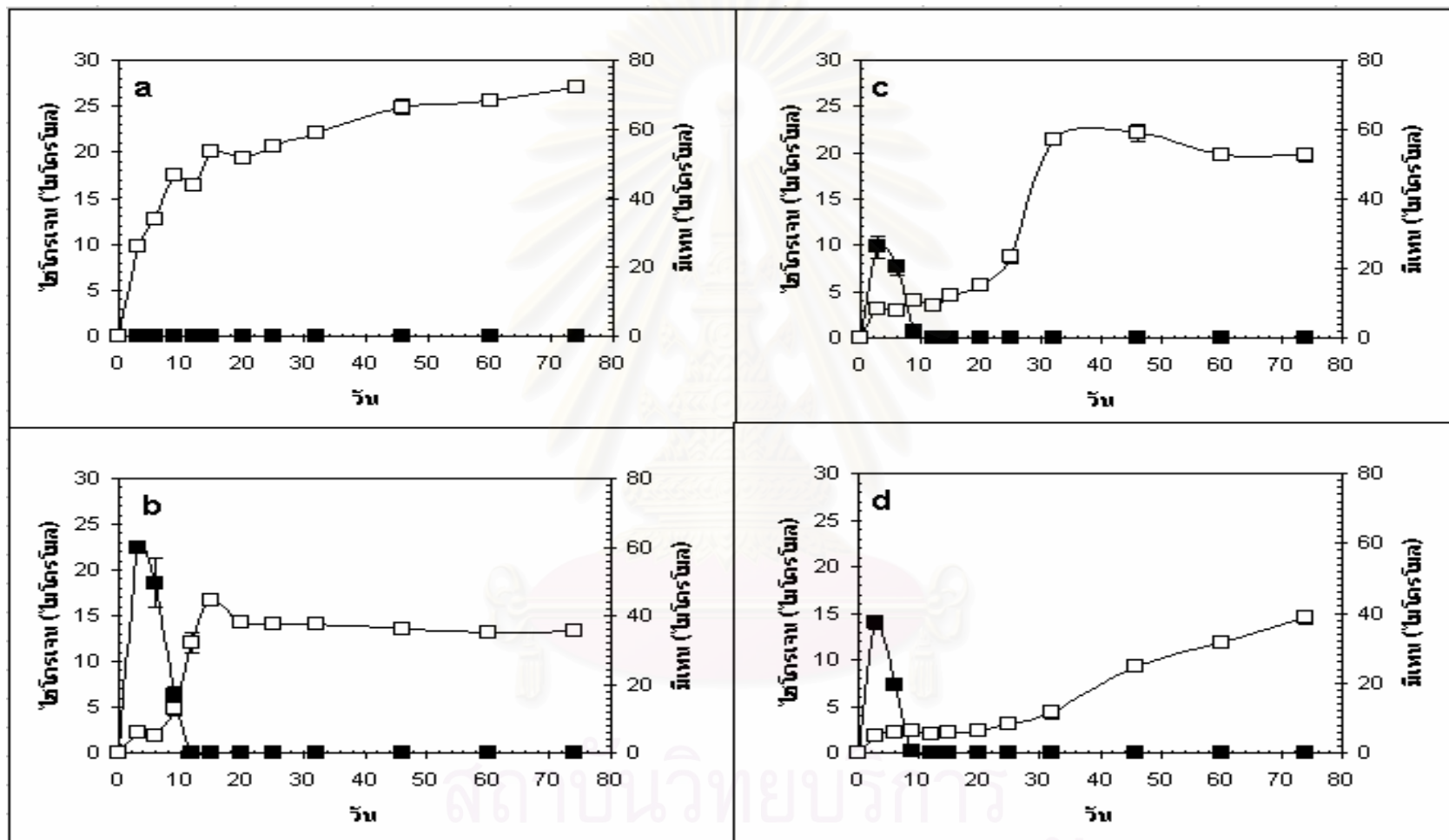


รูปที่ 4.4 ปริมาณของแก๊สชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักที่อุณหภูมิ 37 °C pH 5.8 ความเข้มข้นกากปาล์มเท่ากับ (a) 0%, (b) 5%, (c) 10% และ (d) 15% ข้อมูลในแต่ละจุดเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำสองครั้ง สัญลักษณ์ ■ แสดงแก๊สไฮโดรเจนและ □ แสดงแก๊สมีเทน

#### 4.1.2 แก๊สชีวภาพ ที่อุณหภูมิ 37 °C pH 7.0

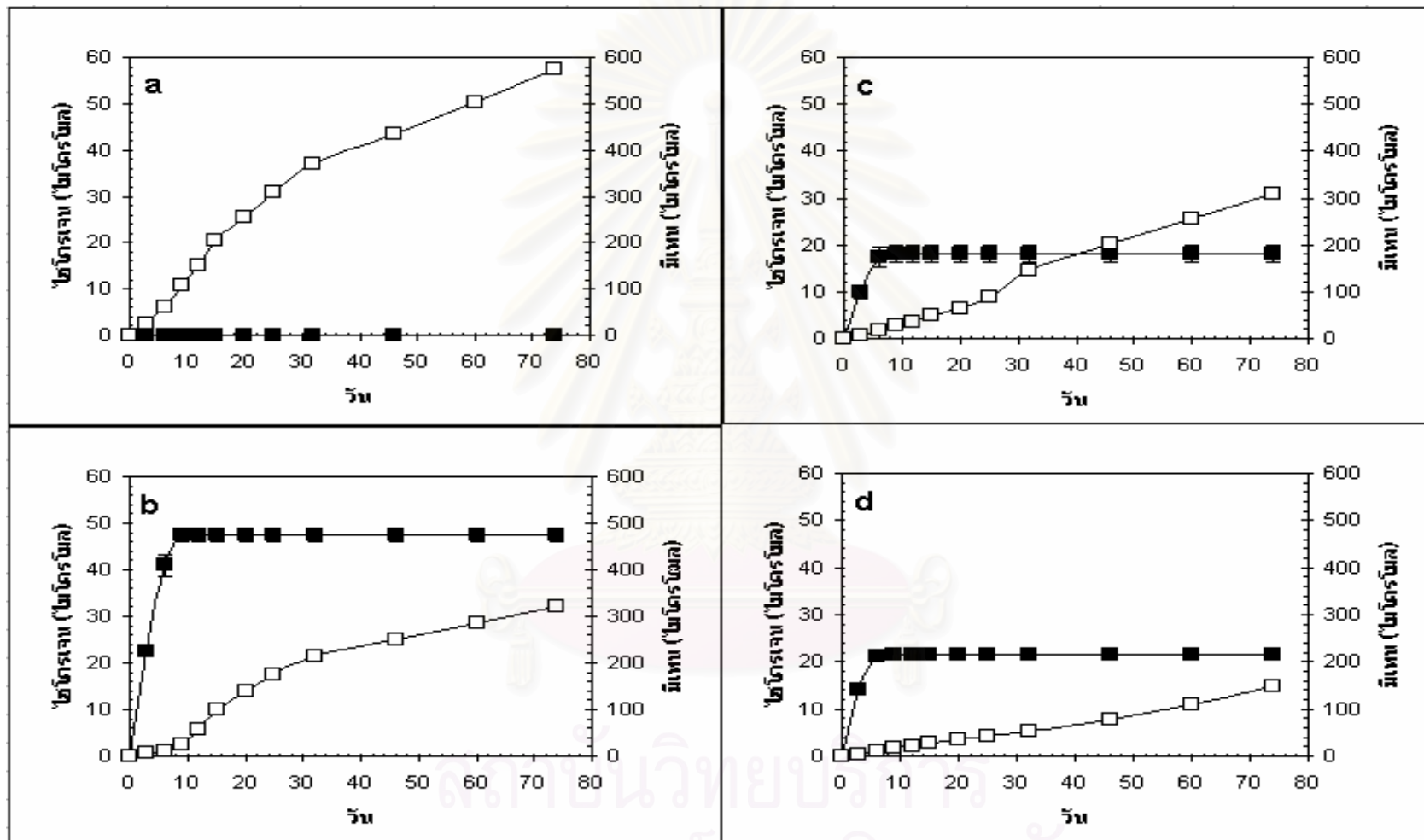
แก๊สมีเทนที่เกิดขึ้นจากการหมักกากปาล์มที่ความเข้มข้น 0%, 5%, 10% และ 15% ที่อุณหภูมิ 37 °C pH 7.0 ในรูปที่ 4.5 แสดงให้เห็นว่าที่ความเข้มข้นกากปาล์ม 0% มีแก๊สมีเทนเพิ่มขึ้นตลอดการทดลอง ซึ่งวัดได้สูงที่สุดหลังจากวันที่ 74 ของการหมัก คือ  $72.37 \pm 1.07$  ไมโครโมล (รูปที่ 4.5a) และมีแก๊สมีเทนสะสมหลังจากจบการทดลองคือ  $575.87\% \pm 5.09$  ไมโครโมล (รูปที่ 4.6a) ที่ความเข้มข้นกากปาล์ม 5% และ 10% มีแนวโน้มการเกิดแก๊สมีเทนที่คล้ายๆ กัน โดยหลังจากเริ่มการหมักในระยะแรกจะเกิดแก๊สมีเทนเล็กน้อย โดยที่ความเข้มข้นกากปาล์ม 5% จะเริ่มมีการผลิตแก๊สเพิ่มขึ้นในวันที่ 9 จนคงที่ในวันที่ 20 และที่ความเข้มข้นกากปาล์ม 10% จะเริ่มมีการผลิตแก๊สเพิ่มขึ้นในวันที่ 20 จนคงที่ในวันที่ 32 โดยที่ความเข้มข้นกากปาล์ม 5% ผลิตแก๊สมีเทนได้สูงที่สุดในวันที่ 15 ของการหมัก คือ  $44.56 \pm 0.48$  ไมโครโมล (รูปที่ 4.5b) และมีแก๊สมีเทนสะสมเท่ากับ  $320.08 \pm 6.31$  ไมโครโมล (รูปที่ 4.6b) ที่ความเข้มข้นกากปาล์ม 10% ผลิตแก๊สมีเทนได้สูงที่สุดในวันที่ 46 ของการหมัก คือ  $59.02 \pm 2.25$  ไมโครโมล (รูปที่ 4.5c) และมีแก๊สมีเทนสะสมเท่ากับ  $308.84\% \pm 1.35$  ไมโครโมล (รูปที่ 4.6b) และที่ความเข้มข้นกากปาล์ม 15% เกิดแก๊สมีเทนอย่างช้าๆ หลังจากการหมักผ่านไป 32 วัน และเริ่มเกิดแก๊สมีเทนมากขึ้น โดยจะเกิดมากที่สุดเมื่อเวลาผ่านไป 74 วัน คือ  $38.59 \pm 1.89$  ไมโครโมล (รูปที่ 4.5d) และมีแก๊สมีเทนสะสมเท่ากับ  $148.82 \pm 2.20$  ไมโครโมล (รูปที่ 4.6d)

นอกจากนี้ในรูป 4.5 ยังแสดงแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจากการหมักกากปาล์มที่ระดับความเข้มข้น 0%, 5%, 10% และ 15% ที่อุณหภูมิ 37 °C pH 7.0 จากการทดลองพบว่า ที่ความเข้มข้นกากปาล์ม 0% (รูปที่ 4.5a) ไม่มีแก๊สไฮโดรเจนเกิดขึ้นเลย แต่ที่ความเข้มข้นกากปาล์ม 5%, 10% และ 15% มีแนวโน้มการเกิดคล้ายๆ กัน คือ จะเกิดแก๊สไฮโดรเจนอย่างรวดเร็วหลังจากเริ่มการหมักได้เพียง 3 วัน โดยจะมีแก๊สไฮโดรเจนสูงที่สุดจำนวน  $22.43 \pm 0.33$  ไมโครโมล (รูปที่ 4.5b),  $9.83 \pm 1.19$  ไมโครโมล (รูปที่ 4.5c) และ  $14.00 \pm 0.73$  ไมโครโมล (รูปที่ 4.5d) ตามลำดับ และหลังจากจบการทดลองแล้วมีแก๊สไฮโดรเจนสะสมเกิดขึ้นจำนวน  $47.35 \pm 1.32$  ไมโครโมล (รูปที่ 4.6b),  $18.13 \pm 1.90$  ไมโครโมล (รูปที่ 4.6c) และ  $21.47 \pm 0.45$  ไมโครโมล (รูปที่ 4.6d) ตามลำดับ



รูปที่ 4.5 แก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักที่อุณหภูมิ 37 °C pH 7.0 ความเข้มข้นกากปลาแห้งเท่ากับ (a) 0%, (b) 5%, (c) 10% และ (d) 15% ข้อมูลในแต่ละจุดเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำสองครั้ง สัญลักษณ์ ■ แสดงแก๊สไฮโดรเจนและ □ แสดงแก๊สมีเทน





รูปที่ 4.6 แก๊สชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักที่อุณหภูมิ 37 °C pH 7.0 ความเข้มข้นกากปาล์มเท่ากับ (a) 0%, (b) 5%, (c) 10% และ (d) 15% ข้อมูลในแต่ละจุดเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำสองครั้ง สัญลักษณ์ ■ แสดงแก๊สไฮโดรเจนและ ■ แสดงแก๊สมีเทน

ปริมาณของแก๊สมีเทน และแก๊สไฮโดรเจนที่ได้จากการหมักกากปาล์มที่อุณหภูมิ 37 °C pH 7.0 แสดงดังรูปที่ 4.7 และ 4.8 ซึ่งแนวโน้มการเกิดแก๊สชีวภาพที่ได้จะมีแนวโน้มไม่แตกต่างกับรูปที่ 4.5 และ 4.6 ที่ความเข้มข้นกากปาล์ม 0% ปริมาณแก๊สมีเทนสูงที่สุดในวันที่ 74 ของการหมัก คือ  $23.98 \pm 0.35$  มิลลิลิตร (รูปที่ 4.7a) และปริมาณแก๊สมีเทนสะสมเท่ากับ  $190.83 \pm 1.69$  มิลลิลิตร (รูปที่ 4.8a) ที่ความเข้มข้นกากปาล์ม 5% ปริมาณแก๊สมีเทนสูงที่สุดในวันที่ 15 ของการหมัก คือ  $14.67 \pm 0.16$  มิลลิลิตร (รูปที่ 4.7b) และปริมาณแก๊สมีเทนสะสมเท่ากับ  $106.07 \pm 2.09$  มิลลิลิตร (รูปที่ 4.8b) ที่ความเข้มข้นกากปาล์ม 10% ปริมาณแก๊สมีเทนสูงที่สุดในวันที่ 46 ของการหมัก คือ  $19.56 \pm 0.74$  มิลลิลิตร (รูปที่ 4.7c) และปริมาณแก๊สมีเทนสะสมเท่ากับ  $102.34 \pm 0.45$  มิลลิลิตร (รูปที่ 4.8c) และที่ความเข้มข้นกากปาล์ม 15% ปริมาณแก๊สมีเทนสูงที่สุดในวันที่ 74 ของการหมัก คือ  $12.79 \pm 0.63$  มิลลิลิตร (รูปที่ 4.7d) และปริมาณแก๊สมีเทนสะสมเท่ากับ  $49.31 \pm 0.73$  มิลลิลิตร (รูปที่ 4.8d)

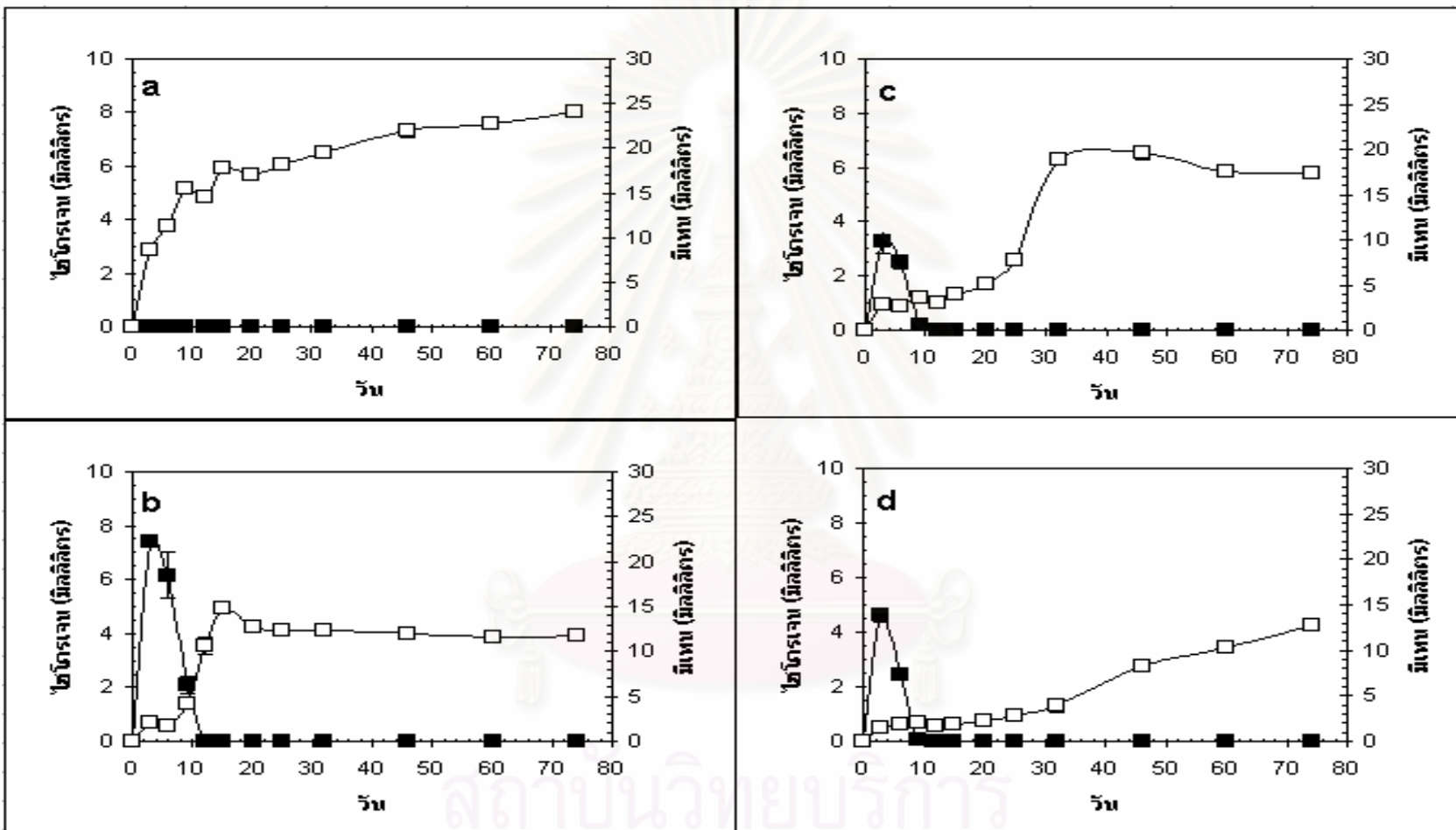
สำหรับปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่คำนวณได้มีดังนี้ คือ ที่ความเข้มข้นกากปาล์ม 0% (รูปที่ 4.7a และ 4.8a) จะไม่มีแก๊สไฮโดรเจนเกิดขึ้นเลย แต่ที่ความเข้มข้นกากปาล์ม 5%, 10% และ 15% จะมีแนวโน้มการเกิดที่คล้ายกัน โดยจะมีการผลิตแก๊สไฮโดรเจนอย่างรวดเร็วตั้งแต่วันที่ 3 ของการหมัก มีปริมาณแก๊สไฮโดรเจนเกิดขึ้นจำนวน  $7.43 \pm 0.11$  มิลลิลิตร (รูปที่ 4.7b),  $3.26 \pm 0.40$  มิลลิลิตร (รูปที่ 4.7c) และ  $4.54 \pm 0.24$  มิลลิลิตร (รูปที่ 4.7d) ตามลำดับ และมีปริมาณแก๊สไฮโดรเจนสะสมเท่ากับ  $15.69 \pm 0.44$  มิลลิลิตร (รูปที่ 4.8b),  $6.01 \pm 0.63$  มิลลิลิตร (รูปที่ 4.8c) และ  $7.11 \pm 0.15$  มิลลิลิตร (รูปที่ 4.8d) ตามลำดับ

จากผลการทดลองที่เกิดขึ้นพบว่า แก๊สมีเทนสะสมที่เกิดขึ้นจากการหมักจะแปรผกผันกับความเข้มข้นของกากปาล์ม โดยที่ความเข้มข้นกากปาล์ม 0% มีปริมาณแก๊สมีเทนมากที่สุดเมื่อเทียบกับระดับความเข้มข้นอื่นๆ คือ มีจำนวนแก๊สมีเทนสะสมเฉลี่ยเท่ากับ  $190.83 \pm 1.69$  มิลลิลิตร ( $575.87 \pm 5.09$  ไมโครโมล) และในความเข้มข้นกากปาล์ม 5%, 10% และ 15% จะมีจำนวนแก๊สมีเทนสะสมลดลง เมื่อมีความเข้มข้นกากปาล์มเพิ่มมากขึ้น จำนวนแก๊สมีเทนสะสมของแต่ละความเข้มข้นเท่ากับ  $106.07 \pm 2.09$  มิลลิลิตร ( $320.08 \pm 6.31$  ไมโครโมล),  $102.34 \pm 0.45$  มิลลิลิตร ( $308.84 \pm 1.35$  ไมโครโมล) และ  $49.31 \pm 0.73$  มิลลิลิตร ( $148.82 \pm 2.20$  ไมโครโมล) ตามลำดับ ในส่วนของแก๊สไฮโดรเจนจะให้ผล คือ ที่ระดับความเข้มข้นกากปาล์ม 0% จะไม่มีแก๊สไฮโดรเจนเลย แต่ที่ระดับความเข้มข้นกากปาล์ม 5% จะมีจำนวนแก๊สไฮโดรเจนสะสมมากที่สุดคือ  $15.69 \pm 0.44$  มิลลิลิตร ( $47.35 \pm 1.32$  ไมโครโมล) และที่ระดับความเข้มข้นกากปาล์ม 10% และ 15% จะมี

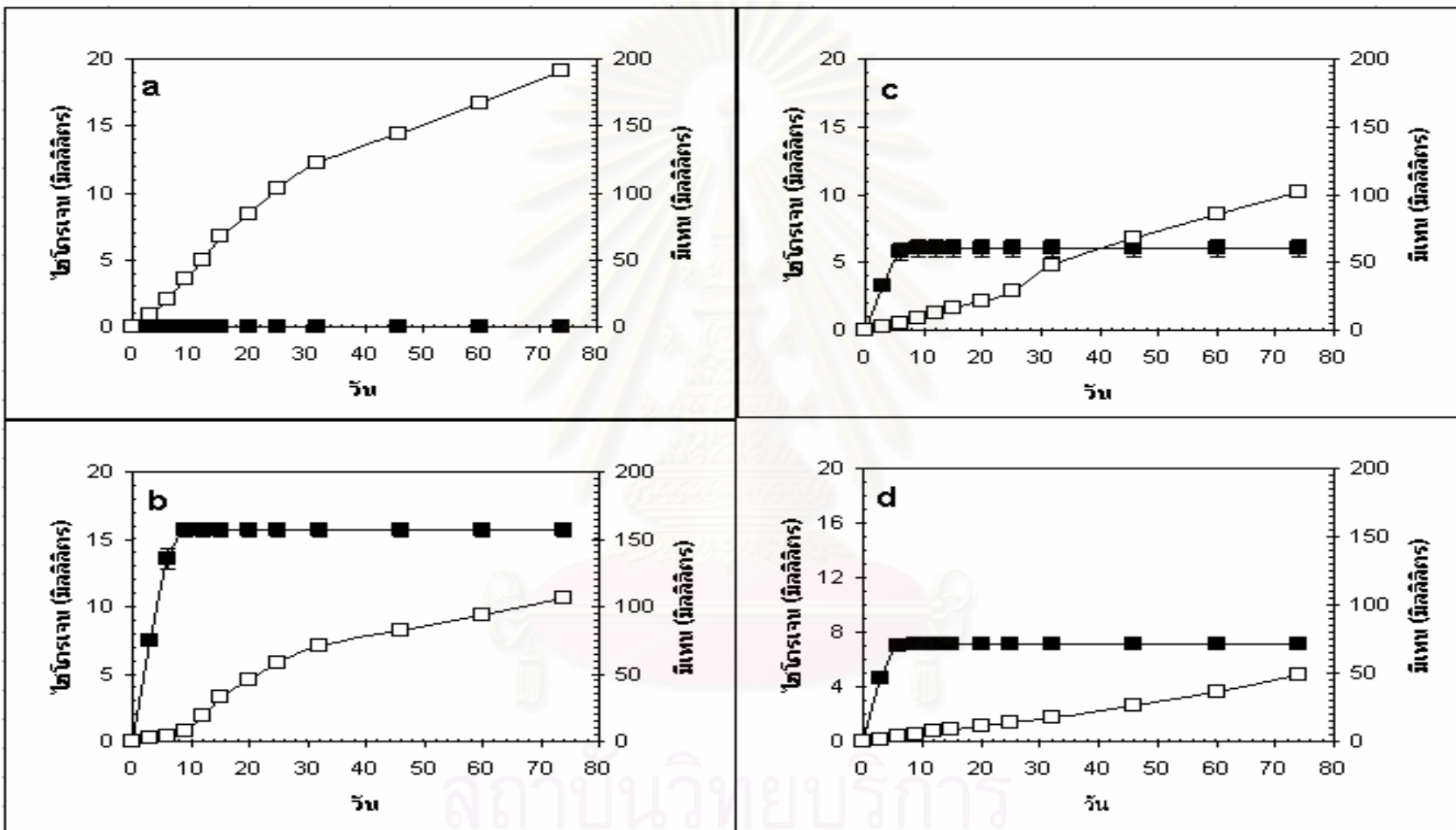
จำนวนแก๊สไฮโดรเจนสะสมใกล้เคียงกัน คือ  $6.01 \pm 0.63$  มิลลิลิตร ( $18.13 \pm 1.90$  ไมโครโมล)  
และ  $7.11 \pm 0.15$  มิลลิลิตร ( $21.47 \pm 0.45$  ไมโครโมล) ตามลำดับ



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



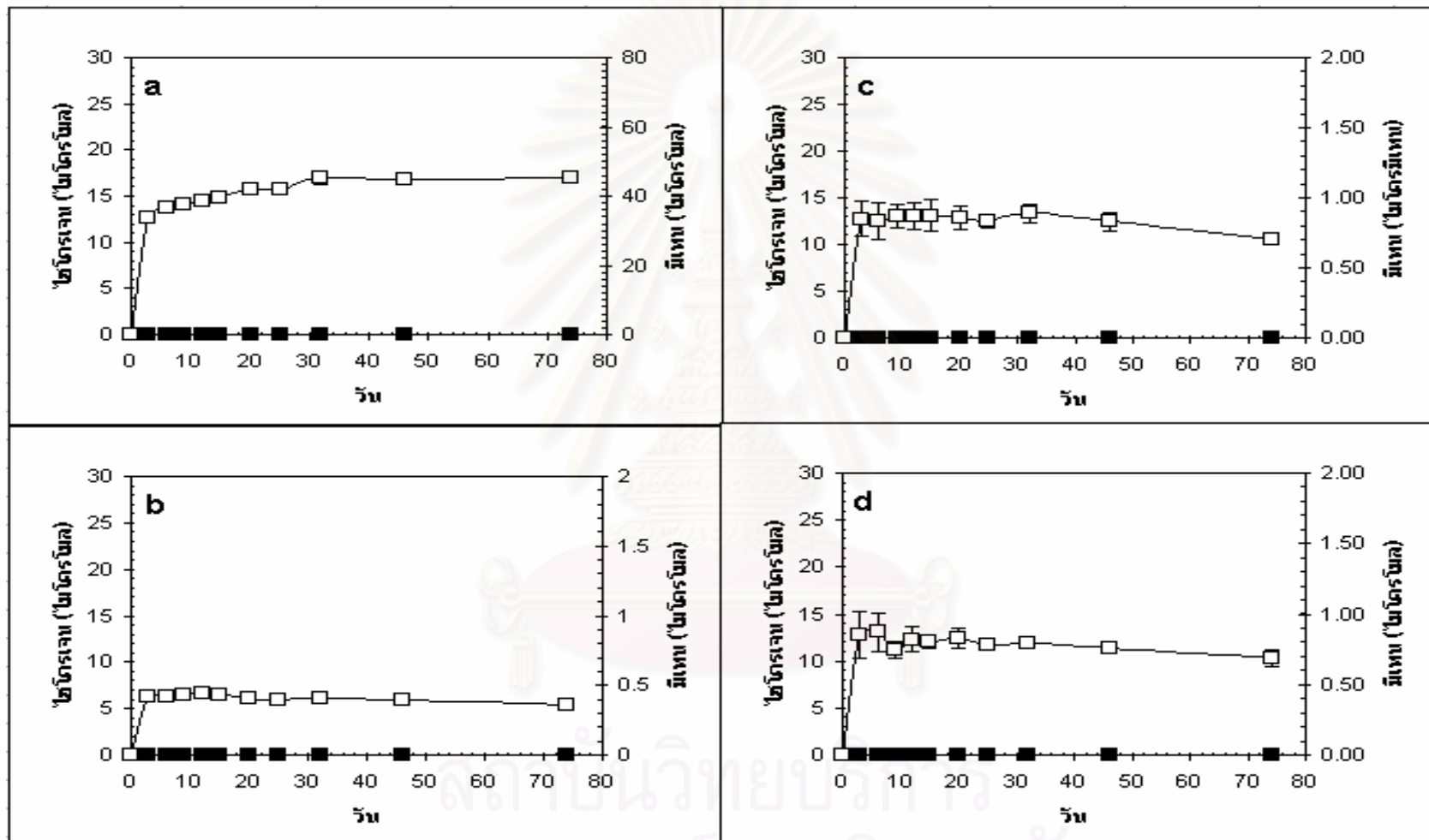
รูปที่ 4.7 ปริมาณของแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักที่อุณหภูมิ 37 °C pH 7.0 ความเข้มข้นกากปาล์มเท่ากับ (a) 0%, (b) 5%, (c) 10% และ (d) 15% ข้อมูลในแต่ละจุดเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำสองครั้ง สัญลักษณ์ ■ แสดงแก๊สไฮโดรเจนและ ● แสดงแก๊สมีเทน



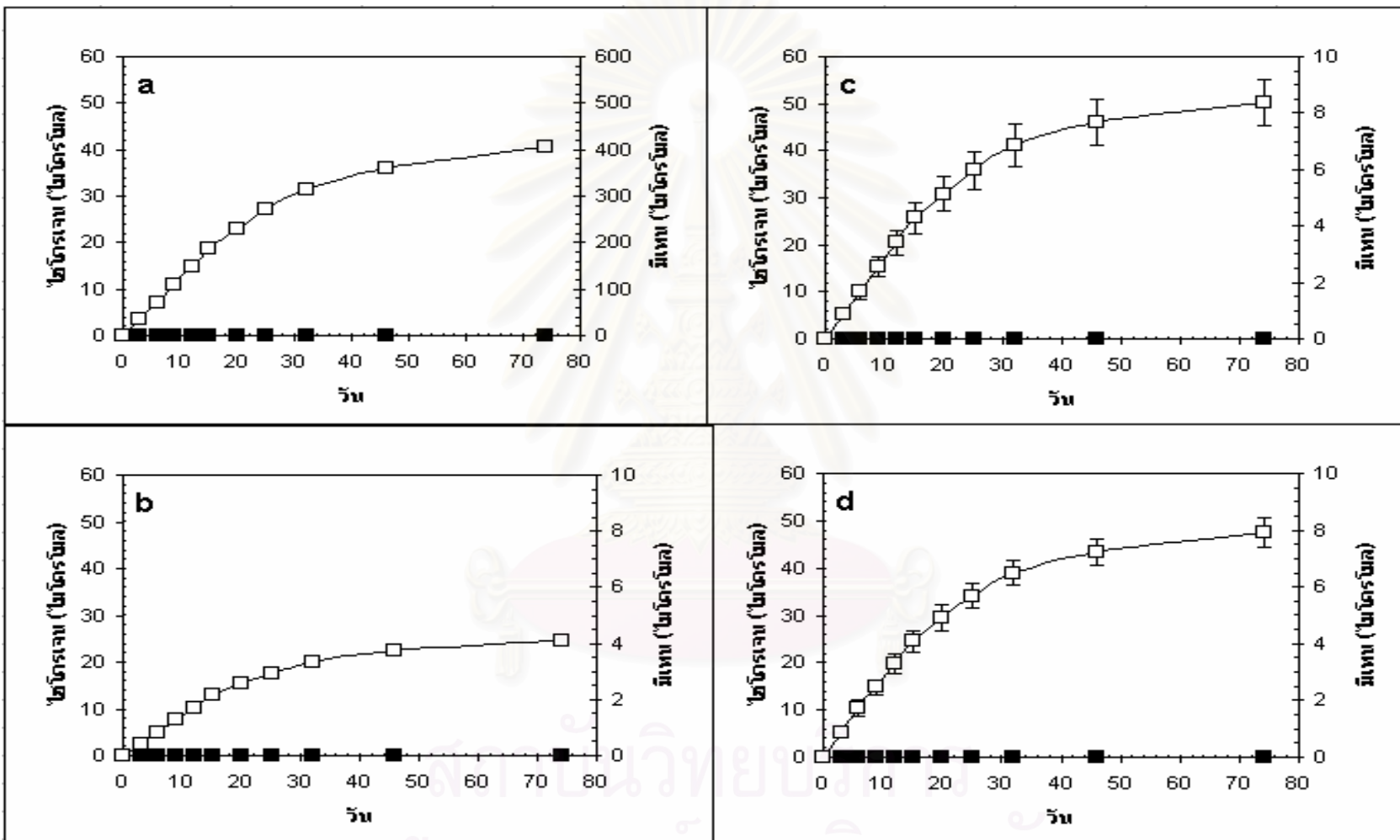
รูปที่ 4.8 ปริมาณของแก๊สชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักที่อุณหภูมิ 37 °C pH 7.0 ความเข้มข้นกากปาล์มเท่ากับ (a) 0%, (b) 5%, (c) 10% และ (d) 15% ข้อมูลในแต่ละจุดเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำสองครั้ง สัญลักษณ์ ■ แสดงแก๊สไฮโดรเจนและ □ แสดงแก๊สมีเทน

#### 4.1.3 แก๊สชีวภาพ ที่อุณหภูมิ 55 °C pH 5.8

การหมักกากปาล์มที่ระดับความเข้มข้นกากปาล์ม 0%, 5%, 10% และ 15% ที่อุณหภูมิ 55 °C pH 5.8 เกิดแก๊สมีเทนแสดงดังรูปที่ 4.9 และ 4.10 โดยที่ความเข้มข้นกากปาล์ม 0% (รูปที่ 4.9a) จะเกิดแก๊สมีเทนอย่างรวดเร็วตั้งแต่เริ่มการหมัก จากนั้นแก๊สมีเทนจะเพิ่มขึ้นอย่างช้าๆ และเกือบคงที่ เมื่อเวลาผ่านไป 32 วัน ของการหมัก แก๊สมีเทนเกิดขึ้นสูงสุดจำนวน  $45.51 \pm 1.16$  ไมโครโมล ในวันที่ 80 ของการหมัก และมีจำนวนแก๊สมีเทนสะสมเกิดขึ้นเท่ากับ  $406.01 \pm 7.79$  ไมโครโมล (รูปที่ 4.10a) ที่ความเข้มข้นกากปาล์ม 5%, 10% และ 15% ทั้ง 3 ความเข้มข้นจะมีแนวโน้มการเกิดแก๊สมีเทนคล้ายๆ กับการหมักที่ความเข้มข้นกากปาล์ม 0% โดยแก๊สมีเทนที่เกิดขึ้นจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วหลังจากการหมักผ่านไป 3 วัน จากนั้นแก๊สมีเทนที่เกิดขึ้นก็จะเริ่มคงที่ ซึ่งจำนวนแก๊สมีเทนที่เกิดขึ้นสูงสุด ที่ความเข้มข้นกากปาล์ม 5% เท่ากับ  $0.44 \pm 0.01$  ไมโครโมล (รูปที่ 4.9b) ในวันที่ 12 ของการหมัก ที่ความเข้มข้นกากปาล์ม 10% เท่ากับ  $0.89 \pm 0.07$  ไมโครโมล (รูปที่ 4.9c) ในวันที่ 32 ของการหมัก และที่ความเข้มข้นกากปาล์ม 15% เท่ากับ  $0.87 \pm 0.14$  ไมโครโมล (รูปที่ 4.9d) ในวันที่ 6 ของการหมัก ซึ่งในแต่ละความเข้มข้นของกากปาล์มจะมีจำนวนแก๊สมีเทนสะสมเท่ากับ  $4.10 \pm 0.03$  ไมโครโมล (รูปที่ 4.10b),  $8.39 \pm 0.82$  ไมโครโมล (รูปที่ 4.10c) และ  $7.93 \pm 0.53$  ไมโครโมล (รูปที่ 4.10d) ตามลำดับ ในส่วนของการวิเคราะห์แก๊สไฮโดรเจนที่หมักที่อุณหภูมิ 55 °C pH 5.8 ในทุกๆ ความเข้มข้นจะไม่พบแก๊สไฮโดรเจนเลยดังแสดงในรูปที่ 4.9 และ 4.10



รูปที่ 4.9 แก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักที่อุณหภูมิ 55 °C pH 5.8 ความเข้มข้นกากปาล์มเท่ากับ (a) 0%, (b) 5%, (c) 10% และ (d) 15% ข้อมูลในแต่ละจุดเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำสองครั้ง สัญลักษณ์ ■ แสดงแก๊สไฮโดรเจนและ ■ แสดงแก๊สมีเทน



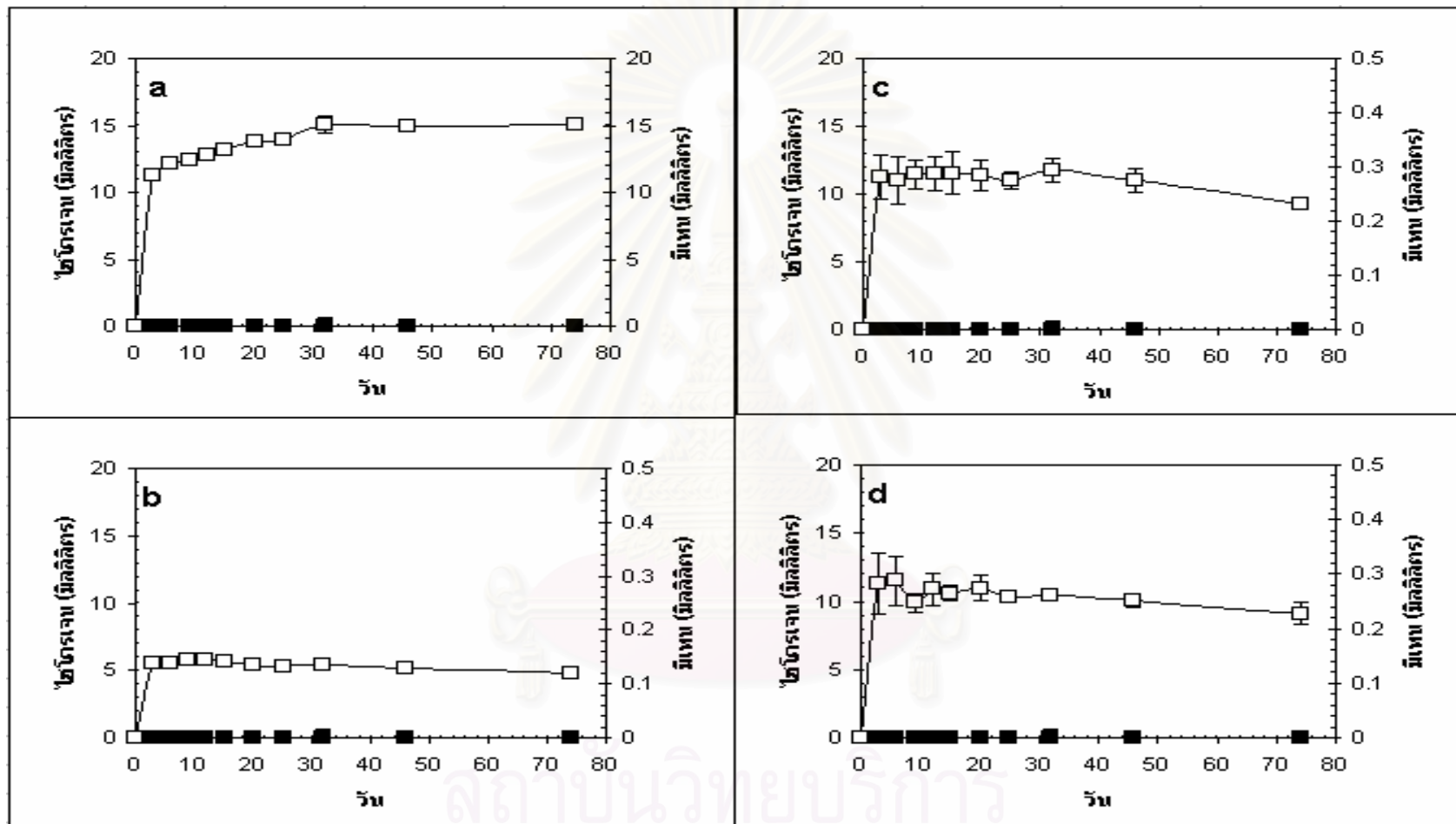
รูปที่ 4.10 แก๊สชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้นจากระบวนการหมักที่อุณหภูมิ 55 °C pH 5.8 ความเข้มข้นกากปาล์มเท่ากับ (a) 0%, (b) 5%, (c) 10% และ (d) 15% ข้อมูลในแต่ละจุดเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำสองครั้ง สัญลักษณ์ ■ แสดงแก๊สไฮโดรเจนและ □ แสดงแก๊สมีเทน



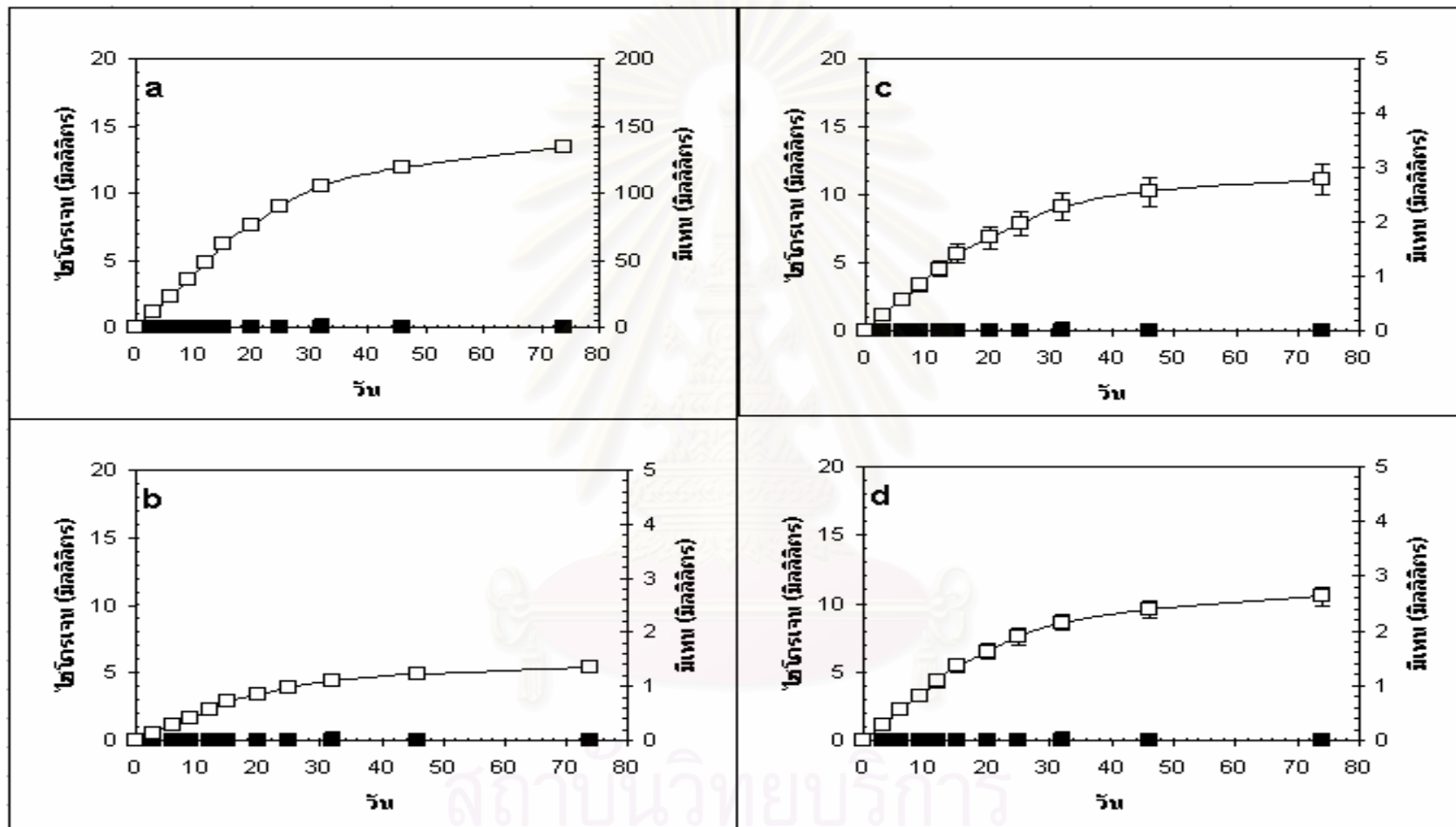
แก๊สมีเทนที่ได้เมื่อนำมาคำนวณเป็นปริมาตรจะได้แนวโน้มน่าเหมือนกับรูปที่ 4.9 และ 4.10 โดยแต่ละความเข้มข้นกากปาล์มก็จะมีแนวโน้มในการเกิดแก๊สมีเทนที่คล้ายกันด้วย ซึ่งแก๊สมีเทนที่เกิดขึ้นจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วหลังจากเริ่มหมักไปได้ 3 วัน ที่ความเข้มข้นกากปาล์ม 0% มีปริมาณแก๊สมีเทนสูงที่สุดเท่ากับ  $15.08 \pm 0.38$  มิลลิลิตร (รูปที่ 4.11a) ในวันที่ 80 ของการหมัก และมีปริมาณแก๊สมีเทนสะสมเท่ากับ  $134.54 \pm 2.58$  มิลลิลิตร (รูปที่ 4.12a) ที่ความเข้มข้นกากปาล์ม 5% มีปริมาณแก๊สมีเทนสูงที่สุดเท่ากับ  $0.15 \pm 0.01$  มิลลิลิตร (รูปที่ 4.11b) ในวันที่ 12 ของการหมัก และมีปริมาณแก๊สมีเทนสะสมเท่ากับ  $1.36 \pm 0.01$  มิลลิลิตร (รูปที่ 4.12b) ที่ความเข้มข้นกากปาล์ม 10% มีปริมาณแก๊สมีเทนสูงที่สุดเท่ากับ  $0.29 \pm 0.02$  มิลลิลิตร (รูปที่ 4.11c) ในวันที่ 32 ของการหมัก และมีปริมาณแก๊สมีเทนสะสมเท่ากับ  $2.78 \pm 0.27$  มิลลิลิตร (รูปที่ 4.12c) ที่ความเข้มข้นกากปาล์ม 15% มีปริมาณแก๊สมีเทนสูงที่สุดเท่ากับ  $0.29 \pm 0.04$  มิลลิลิตร (รูปที่ 4.11d) ในวันที่ 6 ของการหมัก และมีปริมาณแก๊สมีเทนสะสมเท่ากับ  $2.63 \pm 0.18$  มิลลิลิตร (รูปที่ 4.12d) ในส่วนของแก๊สไฮโดรเจน ปริมาณของแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นเท่ากับ 0 ในทุกความเข้มข้นกากปาล์ม

จากผลการทดลองพบว่ามีแก๊สมีเทนเกิดขึ้นมากที่สุดที่ความเข้มข้นกากปาล์ม 0% โดยมีจำนวนแก๊สมีเทนเท่ากับ  $134.54 \pm 2.58$  มิลลิลิตร ( $406.01 \pm 7.79$  ไมโครโมล) และในส่วนของกากปาล์มที่ความเข้มข้นกากปาล์ม 5%, 10% และ 15% จะมีจำนวนของแก๊สมีเทนสะสมไม่มาก โดยมีจำนวนแก๊สมีเทนสะสมเท่ากับ  $1.36 \pm 0.01$  มิลลิลิตร ( $4.10 \pm 0.03$  ไมโครโมล),  $2.78 \pm 0.27$  มิลลิลิตร ( $8.39 \pm 0.82$  ไมโครโมล) และ  $2.63 \pm 0.18$  มิลลิลิตร ( $7.93 \pm 0.53$  ไมโครโมล) ตามลำดับ จากผลที่กล่าวไปแสดงให้เห็นว่ากากปาล์มมีผลยับยั้งการเกิดแก๊สมีเทน เพราะในส่วนของกากปาล์มที่ไม่ใส่กากปาล์มเลยยังพบการสร้างแก๊สมีเทนในจำนวนที่มากกว่าการทดลองที่ใส่กากปาล์มมาก นอกจากนี้สาเหตุที่ไม่พบการสร้างแก๊สไฮโดรเจนในระบบนี้อาจจะมาจากอุณหภูมิที่สูงเกินกว่าจุลินทรีย์ในกลุ่มที่สร้างแก๊สไฮโดรเจนจะดำรงชีวิตอยู่ได้

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



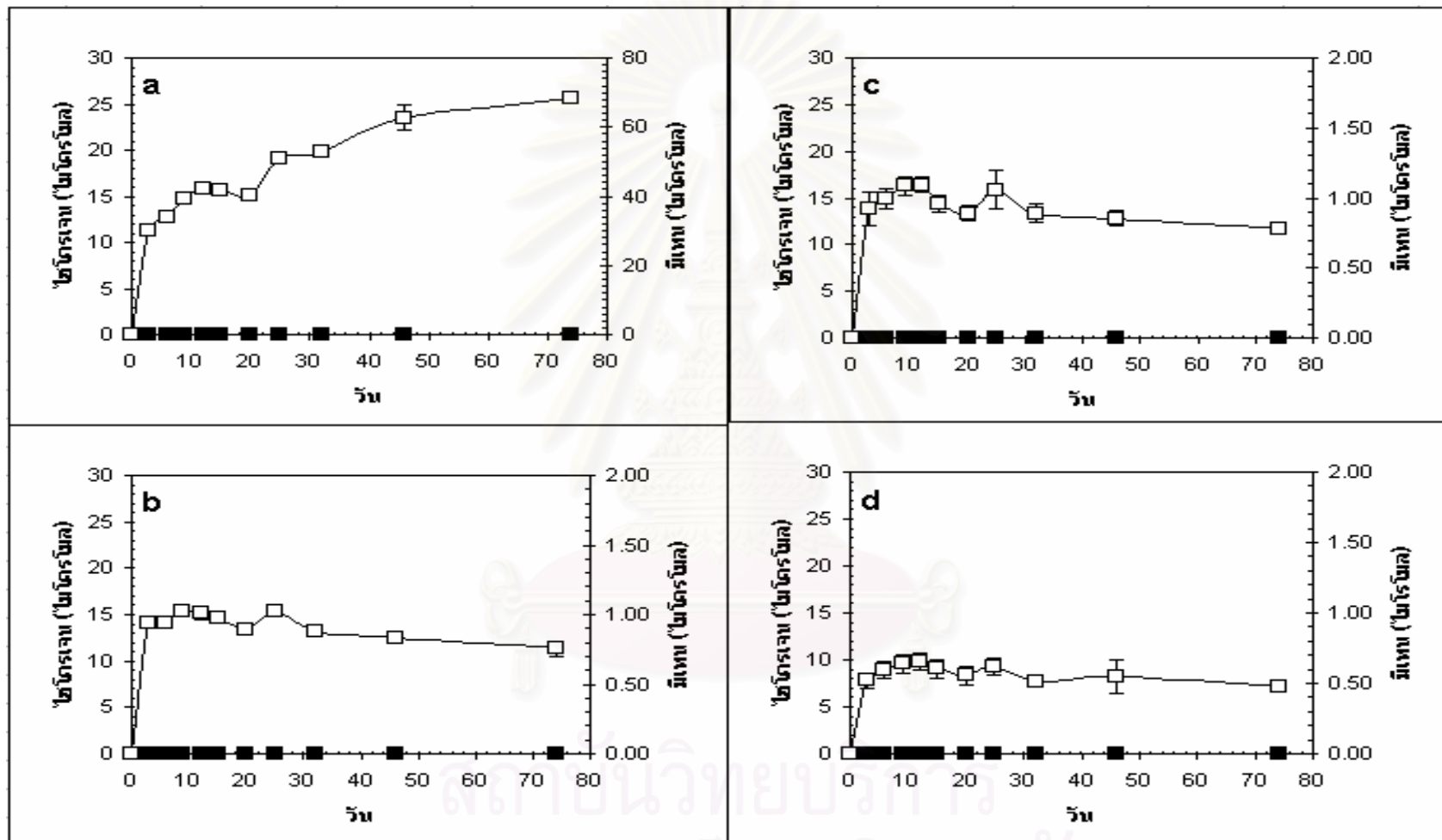
รูปที่ 4.11 ปริมาณของแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักที่อุณหภูมิ 55 °C pH 5.8 ความเข้มข้นกากปาล์มเท่ากับ (a) 0%, (b) 5%, (c) 10% และ (d) 15% ข้อมูลในแต่ละจุดเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำสองครั้ง สัญลักษณ์ ■ แสดงแก๊สไฮโดรเจนและ ■ แสดงแก๊สมีเทน



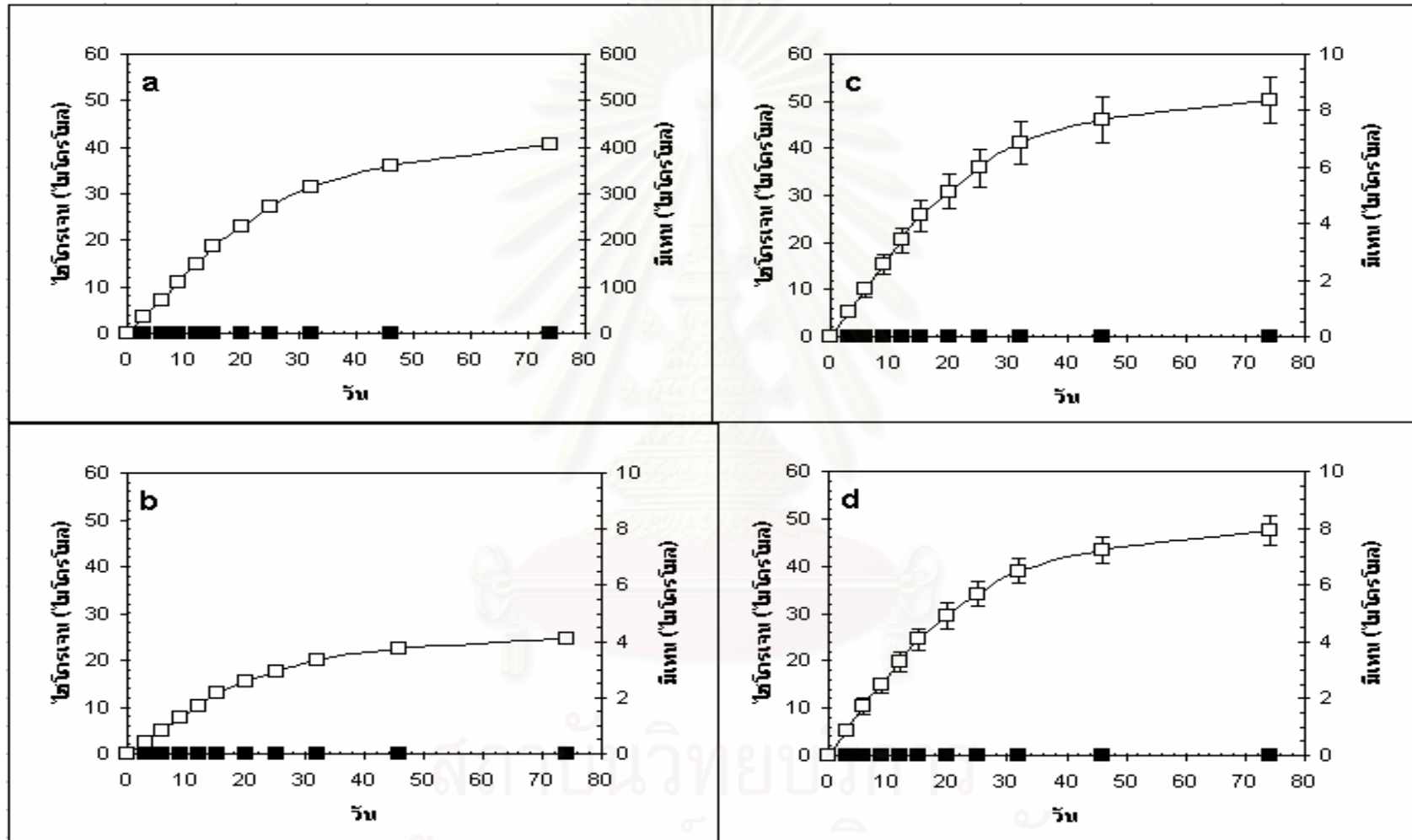
รูปที่ 4.12 ปริมาณของแก๊สชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักที่อุณหภูมิ 55 °C pH 5.8 ความเข้มข้นกาบปาล์มเท่ากับ (a) 0%, (b) 5%, (c) 10% และ (d) 15% ข้อมูลในแต่ละจุดเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำสองครั้ง สัญลักษณ์ ■ แสดงแก๊สไฮโดรเจนและ ■ แสดงแก๊สมีเทน

#### 4.1.4 แก๊สชีวภาพ ที่อุณหภูมิ 55 °C pH 7.0

แก๊สชีวภาพที่เกิดจากการหมักกากปาล์มที่อุณหภูมิ 55 °C pH 7.0 โดยที่ความเข้มข้นกากปาล์ม 0% เกิดแก๊สมีเทนเพิ่มขึ้นตลอดการทดลอง ซึ่งจะมีแก๊สมีเทนเกิดขึ้นสูงที่สุดจำนวน  $68.53 \pm 1.07$  ไมโครโมล (รูปที่ 4.13a) ในวันที่ 80 ของการทดลอง และมีแก๊สมีเทนสะสมเท่ากับ  $462.52 \pm 0.54$  ไมโครโมล (รูปที่ 4.14a) ที่ความเข้มข้นกากปาล์ม 5%, 10% และ 15% มีแนวโน้มที่คล้ายกัน คือ หลังจากทำการหมักไปแล้ว 3 วัน แก๊สมีเทนจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นแนวโน้มจะค่อนข้างคงที่ โดยที่ความเข้มข้นกากปาล์ม 5% มีแก๊สมีเทนเกิดขึ้นสูงสุดเท่ากับ  $1.03 \pm 0.01$  ไมโครโมล หลังจากการหมักผ่านไป 9 วัน และมีแก๊สมีเทนสะสมเท่ากับ  $9.26 \pm 0.01$  ไมโครโมล (รูปที่ 4.14b) ที่ความเข้มข้นกากปาล์ม 10% มีแก๊สมีเทนเกิดขึ้นสูงสุดเท่ากับ  $1.09 \pm 0.05$  ไมโครโมล หลังจากผ่านไป 12 วัน และมีแก๊สมีเทนสะสมเท่ากับ  $9.53 \pm 0.71$  (รูปที่ 4.14c) ที่ความเข้มข้นกากปาล์ม 15% มีแก๊สมีเทนเกิดขึ้นสูงสุดเท่ากับ  $0.66 \pm 0.06$  ไมโครโมล หลังจากผ่านไป 12 วัน และมีแก๊สมีเทนสะสมเท่ากับ  $5.73 \pm 0.62$  ไมโครโมล (รูปที่ 4.14d) ในการทดลองที่อุณหภูมินี้ทุกๆ ความเข้มข้นกากปาล์มจะไม่พบการเกิดแก๊สไฮโดรเจนเลย (รูปที่ 4.13 และ 4.14)



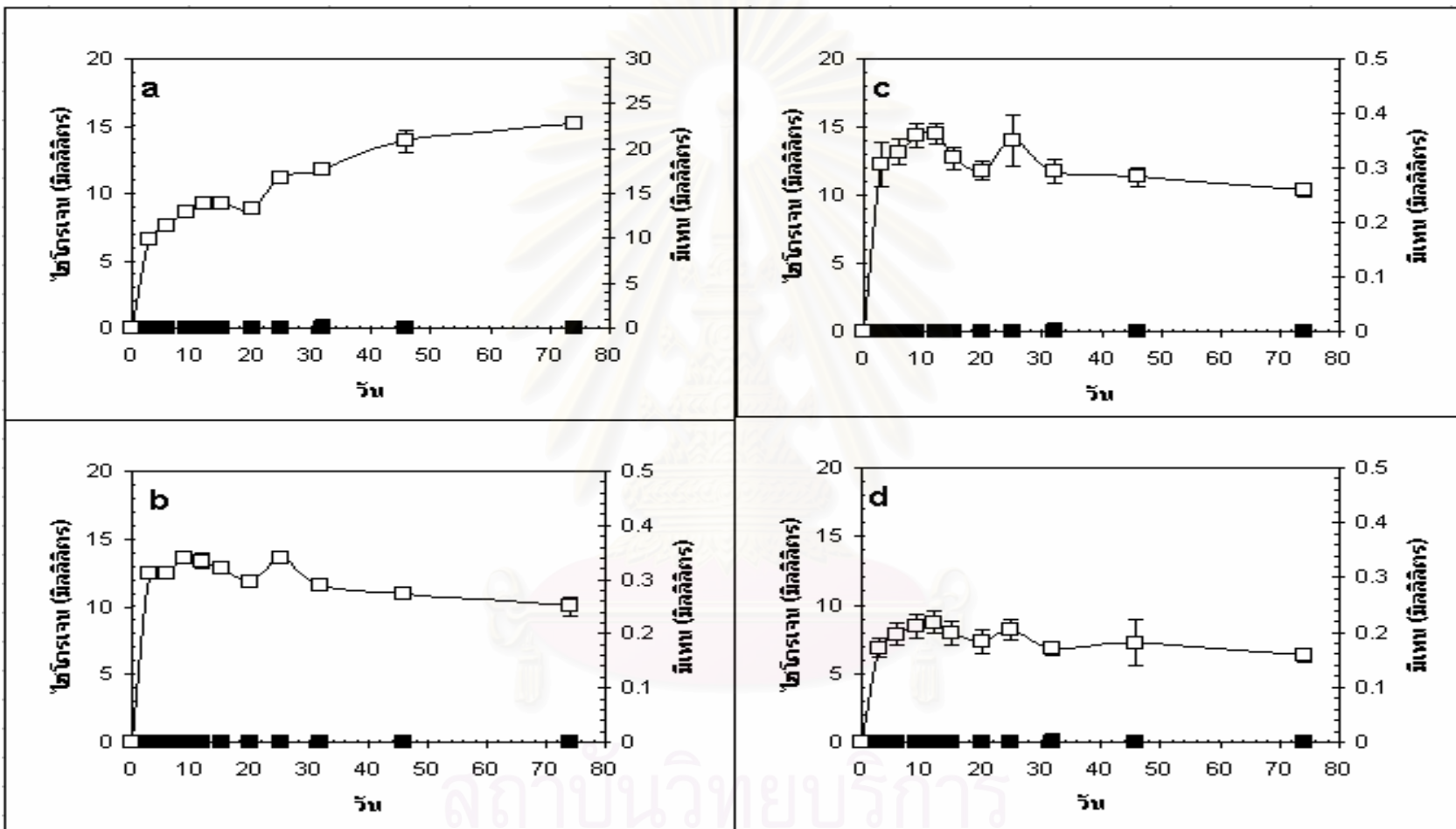
รูปที่ 4.13 แก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักที่อุณหภูมิ 55 °C pH 7.0 ความเข้มข้นกากปาล์มเท่ากับ (a) 0%, (b) 5%, (c) 10% และ (d) 15% ข้อมูลในแต่ละจุดเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำสองครั้ง สัญลักษณ์ ■ แสดงแก๊สไฮโดรเจนและ □ แสดงแก๊สมีเทน



รูปที่ 4.14 แก๊สชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้นจากระบวนการหมักที่อุณหภูมิ 55 °C pH 7.0 ความเข้มข้นกากปาล์มเท่ากับ (a) 0%, (b) 5%, (c) 10% และ (d) 15% ข้อมูลในแต่ละจุดเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำสองครั้ง สัญลักษณ์ ■ แสดงแก๊สไฮโดรเจนและ ■ แสดงแก๊สมีเทน

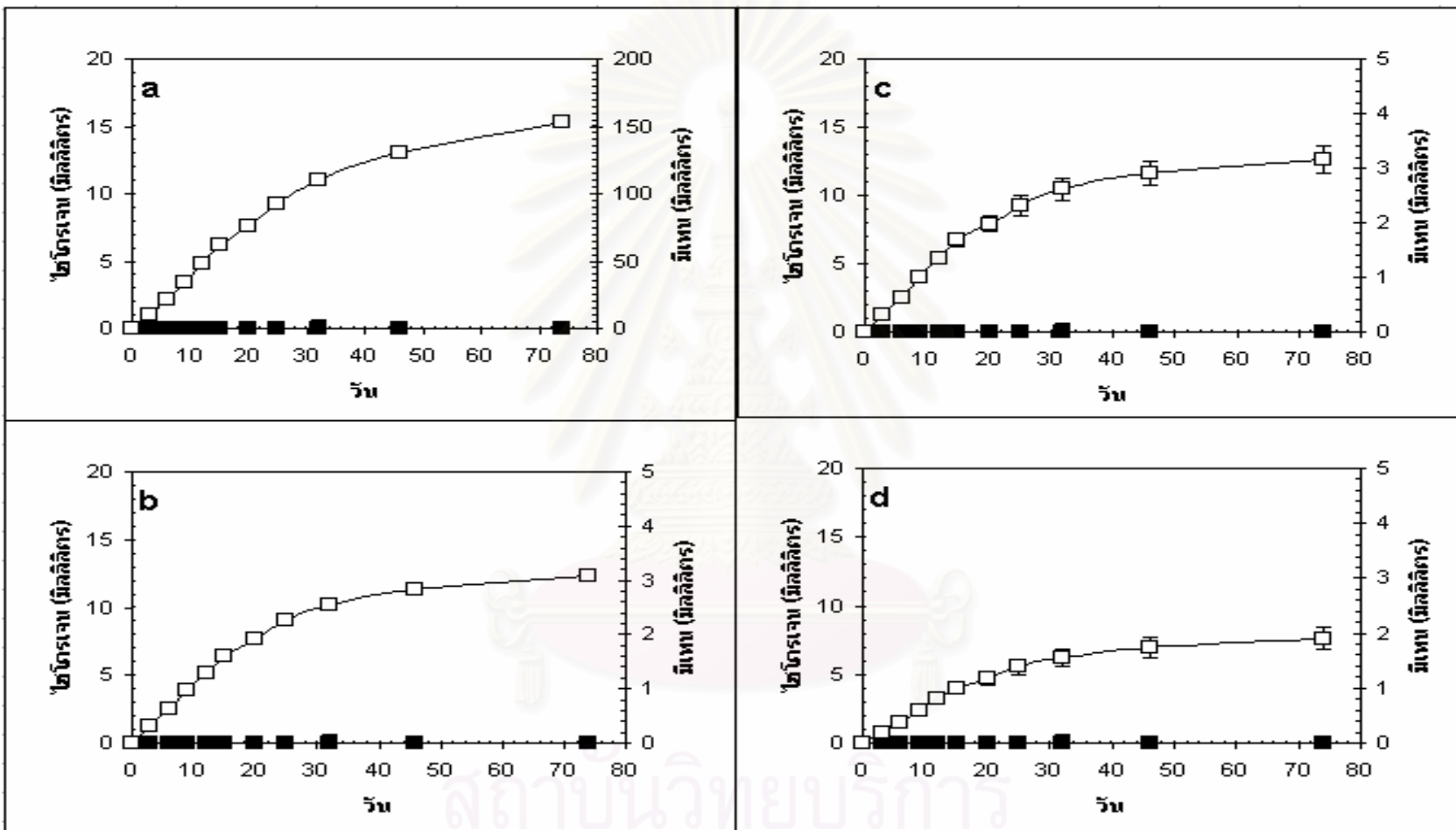
แก๊สชีวภาพที่ได้เมื่อนำมาคำนวณหาปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้น จะให้ผลที่คล้ายกับรูปที่ 4.13 และ 4.14 โดยปริมาณแก๊สมีเทนที่เกิดขึ้นที่ความเข้มข้นกากปาล์ม 0% จะเกิดแก๊สมีเทนเพิ่มขึ้นตลอดการทดลอง จนมีปริมาณแก๊สมีเทนเกิดขึ้นสูงที่สุดเท่ากับ  $22.71 \pm 0.35$  มิลลิลิตร (รูปที่ 4.15a) หลังจากผ่านการหมักได้ 80 วัน และมีปริมาณแก๊สมีเทนสะสมเท่ากับ  $153.27 \pm 0.18$  มิลลิลิตร (รูปที่ 4.16a) ที่ความเข้มข้นกากปาล์ม 5% จะมีปริมาณแก๊สมีเทนเกิดขึ้นสูงที่สุดเมื่อผ่านการหมักไปได้ 9 วัน เท่ากับ  $0.34 \pm 0.01$  มิลลิลิตร (รูปที่ 4.15b) และมีปริมาณแก๊สมีเทนสะสมเท่ากับ  $3.07 \pm 0.01$  มิลลิลิตร (รูปที่ 4.16b) ที่ความเข้มข้นกากปาล์ม 10% จะมีปริมาณแก๊สมีเทนเกิดขึ้นสูงที่สุดเมื่อผ่านการหมักไปได้ 12 วัน เท่ากับ  $0.36 \pm 0.02$  มิลลิลิตร (รูปที่ 4.15c) และมีปริมาณแก๊สมีเทนสะสมเท่ากับ  $3.16 \pm 0.24$  มิลลิลิตร (รูปที่ 4.16c) และที่ความเข้มข้นกากปาล์ม 15% จะมีปริมาณแก๊สมีเทนเกิดขึ้นสูงที่สุดเมื่อผ่านการหมักไปได้ 12 วัน เท่ากับ  $0.22 \pm 0.02$  มิลลิลิตร (รูปที่ 4.15d) และมีปริมาณแก๊สมีเทนสะสมเท่ากับ  $1.90 \pm 0.21$  มิลลิลิตร (รูปที่ 4.16d) และเนื่องจากระบบไม่มีการผลิตแก๊สไฮโดรเจน ดังนั้นปริมาณแก๊สที่คำนวณได้จึงเป็น 0 (รูปที่ 4.15 และ 4.16)

จากผลการทดลองที่ได้จะเห็นได้ว่าการหมักกากปาล์มทุกๆ ความเข้มข้นที่อุณหภูมิ  $55^{\circ}\text{C}$  pH 7.0 จะไม่ผลิตแก๊สไฮโดรเจนเลย สาเหตุอาจจะมาจากอุณหภูมิที่สูงเกินไป ไม่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในกลุ่มที่สร้างแก๊สไฮโดรเจน และในส่วนของปริมาณแก๊สมีเทนที่เกิดขึ้นจะมีจำนวนมากที่สุดในการหมักที่ไม่ใส่กากปาล์มเลย ซึ่งอาจจะมีสาเหตุมาจากกากปาล์มอาจไปยับยั้งการสร้างมีเทนของจุลินทรีย์ หรืออุณหภูมิที่สูงเกินไป



รูปที่ 4.15 ปริมาณของแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักที่อุณหภูมิ 55 °C pH 7.0 ความเข้มข้นกากปาล์มเท่ากับ (a) 0%, (b) 5%, (c) 10% และ (d) 15% ข้อมูลในแต่ละจุดเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำสองครั้ง สัญลักษณ์ ■ แสดงแก๊สไฮโดรเจนและ ■ แสดงแก๊สมีเทน





รูปที่ 4.16 ปริมาณของแก๊สชีวภาพสะสมที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักที่อุณหภูมิ 55 °C pH 7.0 ความเข้มข้นกากปาล์มเท่ากับ (a) 0%, (b) 5%, (c) 10% และ (d) 15% ข้อมูลในแต่ละจุดเป็นค่าเฉลี่ยจากการทดลองซ้ำสองครั้ง สัญลักษณ์ ■ แสดงแก๊สไฮโดรเจนและ ■ แสดงแก๊สมีเทน

จากผลการทดลองที่ได้จากการหมักกากปาล์มเพื่อผลิตแก๊สชีวภาพที่ pH 5.8 และ pH 7.0 อุณหภูมิ 37 °C และ 55 °C และความเข้มข้นกากปาล์ม 0%, 5%, 10% และ 15% ให้ปริมาณแก๊สชีวภาพสะสม ดังตารางที่ 4.1 และมีอัตราการผลิตแก๊สชีวภาพต่อกรัมของของแข็งระเหยได้ (g TVS) ต่อวัน ดังตารางที่ 4.2 โดยแก๊สมีเทนจะคิดตั้งแต่เริ่มการทดลองจนถึงวันที่ 74 ของการทดลอง และแก๊สไฮโดรเจนจะคิดตั้งแต่เริ่มการทดลองจนถึงวันที่ 25 ของการทดลอง ซึ่งเมื่อนำผลที่ได้มาเปรียบเทียบกัน ได้ผลเป็นดังนี้

ที่อุณหภูมิ 37 °C จะเกิดแก๊สชีวภาพมากกว่าการหมักที่อุณหภูมิ 55 °C เนื่องจากที่อุณหภูมิ 37 °C มีความเหมาะสมกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่นำมาเลี้ยงมากกว่า จึงทำให้จุลินทรีย์สามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้ดี และเมื่อนำผลการทดลองที่หมักที่อุณหภูมิ 37 °C และ 55 °C มาเปรียบเทียบกันจะเห็นได้ชัดว่า ที่อุณหภูมิ 37 °C จะได้ปริมาณแก๊สมีเทนปริมาณมากกว่าการหมักที่อุณหภูมิ 55 °C และจะได้แก๊สไฮโดรเจนมากกว่าเช่นเดียวกัน โดยการหมักที่อุณหภูมิ 55 °C จะไม่เกิดแก๊สไฮโดรเจนขึ้นเลย จุลินทรีย์ที่นำมาหมักในการทดลองนี้น่าจะเป็นจุลินทรีย์ในกลุ่มมีโซฟิลล์ (mesophile) ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่เจริญเติบโตได้ดีที่ระหว่างอุณหภูมิ 35 °C – 37 °C เช่นเดียวกับงานทดลองของ Hang-Sik, Jong-Ho และ Sang-Hyoun (2004) ได้ทำการทดลองโดยใช้จุลินทรีย์ในกลุ่มมีโซฟิลล์ (mesophile) และเทอร์โมฟิลล์ (thermophile) ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่เจริญเติบโตได้ดีที่อุณหภูมิปานกลาง และสูงตามลำดับ ในการทดลองนี้จะใช้จุลินทรีย์ในการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากเศษอาหาร จุลินทรีย์ในกลุ่มมีโซฟิลล์จะทำการทดลองที่  $35 \pm 1$  °C และจุลินทรีย์ในกลุ่มเทอร์โมฟิลล์จะทำการทดลองที่  $55 \pm 1$  °C จากการทดลองพบว่าในกลุ่มเทอร์โมฟิลล์จุลินทรีย์จะผลิตแก๊สไฮโดรเจน แต่ไม่ผลิตแก๊สมีเทน จุลินทรีย์ในกลุ่มมีโซฟิลล์จะพบว่ามีการผลิตทั้งแก๊สมีเทน และแก๊สไฮโดรเจน แต่จะพบแก๊สมีเทนในปริมาณมากกว่า

การหมักที่ pH 5.8 จะเกิดแก๊สไฮโดรเจนได้ดีกว่าการหมักที่ pH 7.0 เนื่องจากที่ pH ต่ำๆ จะเกิดแก๊สไฮโดรเจนได้ดี แต่ที่ pH 5.8 จะได้แก๊สมีเทนน้อยกว่าการหมักที่ pH 7.0 เมื่อเปรียบเทียบกันในภาวะที่เหมือนกัน โดยในการทดลองที่อุณหภูมิ 55 °C pH 5.8 และ pH 7.0 ความเข้มข้นกากปาล์ม 5%, 10% และ 15% จะให้ปริมาณแก๊สมีเทนที่ใกล้เคียงกันดังแสดงในตารางที่ 4.1 ซึ่งจะสอดคล้องกับงานวิจัยของ Haruhiko และคณะ (2001), Shihwu, Dennis และ Lutgarde (2003) Krishnan และคณะ (2006) และ Krishnan และ Desa (2006) ซึ่งพบว่าที่ pH ต่ำเป็นภาวะที่จุลินทรีย์สามารถผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้มากที่สุด นอกจากนี้ Krishnan และคณะ (2006) ยังได้รายงานอีกว่าการหมักที่ pH 6.0 จุลินทรีย์เริ่มมีการสร้างแก๊สมีเทนขึ้น และ Hang-Sik และคณะ (2004) ก็พบเช่นเดียวกันคือ ที่ pH ต่ำ

เป็นสภาวะที่ จุลินทรีย์สามารถผลิตแก๊สไฮโดรเจน ได้มากที่สุดทั้งจุลินทรีย์ในกลุ่มมีโซฟิลล์ และเทอร์โมฟิลล์

นอกจากนี้ผลการทดลองที่อุณหภูมิ และ pH คงที่แสดงให้เห็นว่า ปริมาณแก๊สมีเทน และแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจะแปรผกผันกับความเข้มข้นของกากปาล์มที่ใช้ ผลการทดลองดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kalia และ Joshi (1995) ซึ่งได้ทำการทดลองหมักเปลือกถั่วเพื่อผลิตแก๊สชีวภาพที่ระดับความเข้มข้นของเปลือกถั่ว 1%-5% จากการทดลองพบว่าแก๊สชีวภาพที่จุลินทรีย์ผลิตขึ้นจะมีปริมาณน้อยลง เมื่อเพิ่มระดับของความเข้มข้นของเปลือกถั่ว และ Kalia, Sonakya และ Raizada (2000) ยังรายงานผลเช่นเดียวกัน โดยทางผู้วิจัยพบว่า ปริมาณแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้จากลำต้นกล้วยโดยใช้จุลินทรีย์ในกลุ่มมีโซฟิลล์ และเทอร์โมฟิลล์ พบว่าเมื่อมีการเพิ่มเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของลำต้นกล้วยมากขึ้น จุลินทรีย์ในกลุ่มมีโซฟิลล์จะทำให้แก๊สชีวภาพที่ได้มีปริมาณลดลง และจุลินทรีย์ในกลุ่มเทอร์โมฟิลล์จะผลิตแก๊สได้ปริมาณใกล้เคียงกันในความเข้มข้นของลำต้นกล้วยไม่เกิน 8% แต่เมื่อความเข้มข้นของลำต้นกล้วย 16% จุลินทรีย์ในกลุ่มนี้จะผลิตแก๊สชีวภาพได้ลดลง ซึ่งคณะผู้วิจัยได้ให้เหตุผลว่า เส้นใยตามธรรมชาติของต้นกล้วยไม่เหมาะสมที่จะนำมาใช้เลี้ยงจุลินทรีย์เพื่อผลิตแก๊สมีเทน ควรทำการย่อยเส้นใย หรือเตรียมเส้นใยก่อนที่จะนำมาใช้หมัก ดังงานทดลองของ Yao-Ting และคณะ (2006) โดยผู้วิจัยได้นำฟางข้าวมาต้มกับ 2% HCl ก่อนนำมาหมัก เพื่อผลิตแก๊สไฮโดรเจนผลที่ได้จากการทดลองพบว่า จุลินทรีย์สามารถผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากฟางข้าวที่ผ่านการต้มด้วย 2% HCl ได้ดีกว่าฟางข้าวที่ไม่ได้ผ่านการต้มด้วยกรด นอกจากนี้ทางผู้วิจัยยังพบว่า มีความเป็นไปได้น้อยมากที่จะนำฟางข้าวที่ไม่ได้ผ่านการเตรียมหมักด้วยจุลินทรีย์ เพื่อผลิตแก๊สไฮโดรเจน Yao-Ting ยังได้ทำการทดลองโดยใช้กากเบียร์ที่ผ่านการต้มด้วย HCl และ NaOH พบว่าจุลินทรีย์ที่เลี้ยงในกากเบียร์ที่ผ่านการต้มด้วย HCl จะผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้ดีกว่าการใช้ NaOH เหตุผลประการหนึ่งของงานวิจัยนี้ที่เมื่อมีการเติมกากปาล์มแล้ว แก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นจะมีปริมาณน้อยลง อาจมาจากกากของแข็งของเราที่ใช้ในงานทดลองนี้ ซึ่งเป็นส่วนของกะลาของเมล็ดใน โดยในขั้นตอนของการหีบเอาน้ำมันจากเมล็ดจะมีการใช้ตัวทำละลายในการสกัดเอาน้ำมัน ตัวทำละลายนี้อาจจะมีผลยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ได้ ทำให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตไม่ได้ แก๊สชีวภาพที่ได้จึงมีปริมาณน้อยลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกากปาล์ม

อย่างไรก็ตาม ยังมีอีกหลายงานวิจัยที่ให้ผลที่ขัดแย้งกับงานวิจัยนี้ เช่น งานวิจัยของ Ali และ Coskun (2000), Haruhiko และคณะ (2001), Hang-Sik และคณะ (2004) และ Ilyin และคณะ (2005) เป็นต้น โดย Ali และ Coskun (2000) ได้ทำการทดลองผลิตแก๊สชีวภาพจากผลของมะกอกที่ปริมาณถึงหมักขนาด 1 ลิตร อุณหภูมิ 37 °C พบว่าเมื่อมีการเพิ่มเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นของผลมะกอกจะทำให้

แก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นมีปริมาณมากขึ้น โดยงานวิจัยนี้ทำการแปรผันค่าความเข้มข้นตั้งแต่ 5%, 10% และ 15% Haruhiko และคณะ (2001) ได้ทำการทดลองเลี้ยงเชื้อ *C. butyricum* แบบ monoculture และ mixed culture ในอาหารที่มีแป้ง (starch residue) โดยการเลี้ยงเชื้อทั้ง 2 แบบ จะเกิดปริมาณแก๊สไฮโดรเจนเพิ่มมากขึ้น เมื่อมีเปอร์เซ็นต์ของแป้งเพิ่มขึ้น Hang-Sik และคณะ (2004) ทำการเลี้ยงจุลินทรีย์กลุ่มเทอร์โมฟิลล์ ในเศษอาหารที่มีเปอร์เซ็นต์ความเข้มข้นแตกต่างกัน จากการทดลองพบว่าที่ความเข้มข้น 10 g/l ซึ่งเป็นปริมาณของแข็งที่มากที่สุดในการทดลอง มีปริมาณแก๊สมีเทนเกิดมากที่สุด และ Ilyin และคณะ (2005) ทำการทดลองโดยใช้เชื้อจุลินทรีย์ในกลุ่มที่สร้างมีเทน เพื่อผลิตแก๊สชีวภาพจากส่วนน้ำของผลมันฝรั่งสดที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ พบว่าที่ระดับความเข้มข้นของน้ำมันฝรั่งสดมากจะเกิดแก๊สชีวภาพมาก และเมื่อนำแก๊สชีวภาพที่ได้ในแต่ละการทดลองมาวิเคราะห์ความเข้มข้นของแก๊สมีเทนจะพบว่า ที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ จะมีเปอร์เซ็นต์ของแก๊สมีเทนใกล้เคียงกัน เช่นเดียวกับของ Krishnan และ Desa (2006) งานทดลองนี้ก็ให้ผลคล้ายกับของ Ilyin และคณะ (2005) โดยพบว่า เมื่อมีการเพิ่มจำนวนของสารตั้งต้นจะทำให้เกิดแก๊สชีวภาพมากขึ้น แต่เมื่อนำแก๊สชีวภาพที่ได้มาวิเคราะห์หาเปอร์เซ็นต์ของแก๊สไฮโดรเจน จะพบว่าเปอร์เซ็นต์แก๊สไฮโดรเจนที่ได้ไม่แตกต่างกันเลย แม้จะมีปริมาณของแก๊สชีวภาพเกิดเพิ่มขึ้นก็ตาม

การทดลองนี้ได้ปริมาตรแก๊สมีเทน และแก๊สไฮโดรเจน (ภาวะที่มีการเติมกากปาล์ม) ที่เกิดขึ้นต่อกรัมของสารอินทรีย์แข็งระเหยได้ (total volatile solid) ที่สูงที่สุดมีค่าเท่ากับ 44.38 ml/g TVS และ 8.01 ml/g TVS ตามลำดับ เมื่อนำค่าที่ได้ไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ ที่ทำการหมักโดยใช้สารตั้งต้นต่างกันจะได้ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.1 ปริมาณแก๊สชีวภาพสะสมที่ได้จากการทดลองที่ pH 5.8 และ pH 7.0 อุณหภูมิ 37 °C และ 55 °C และความเข้มข้นกากปาล์ม 0%, 5%, 10% และ 15%

อุณหภูมิ (°C)	pH	ความเข้มข้นกากปาล์ม (%)	ปริมาณแก๊สสะสม (ml)	
			มีเทน	ไฮโดรเจน
37 °C	5.8	0%	151.25 ± 7.31	0
		5%	81.78 ± 2.71	19.15 ± 1.38
		10%	13.10 ± 0.16	13.51 ± 0.35
		15%	7.91 ± 0.21	12.74 ± 0.59
	7	0%	190.83 ± 1.69	0
		5%	106.07 ± 2.09	15.69 ± 0.44
		10%	102.34 ± 0.45	6.01 ± 0.63
		15%	49.31 ± 0.73	7.11 ± 0.15
55 °C	5.8	0%	134.54 ± 2.58	0
		5%	1.36 ± 0.01	0
		10%	2.78 ± 0.27	0
		15%	2.63 ± 0.18	0
	7	0%	153.27 ± 0.18	0
		5%	3.07 ± 0.01	0
		10%	3.16 ± 0.24	0
		15%	1.90 ± 0.21	0

ตารางที่ 4.2 อัตราการผลิตแก๊สชีวภาพที่ได้จากการทดลองที่ pH 5.8 และ pH 7.0 อุณหภูมิ 37 °C และ 55 °C และความเข้มข้นกากปาล์ม 5%, 10% และ 15%

อุณหภูมิ (°C)	pH	ความเข้มข้นกากปาล์ม (%)	อัตราการผลิตแก๊สชีวภาพ (ml/g TVS/วัน)	
			มีเทน*	ไฮโดรเจน**
37 °C	5.8	5%	0.46	0.32
		10%	0.04	0.11
		15%	0.01	0.07
	7	5%	0.60	0.26
		10%	0.29	0.05
		15%	0.09	0.04
55 °C	5.8	5%	$7.69 \times 10^{-3}$	0
		10%	$7.88 \times 10^{-3}$	0
		15%	$4.96 \times 10^{-3}$	0
	7	5%	0.02	0
		10%	$8.95 \times 10^{-3}$	0
		15%	$3.59 \times 10^{-3}$	0

\*แก๊สมีเทนใช้ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มการทดลองจนถึงวันที่ 74 ของการทดลอง

\*\*แก๊สไฮโดรเจนใช้ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มการทดลองจนถึงวันที่ 25 ของการทดลอง

ตารางที่ 4.3 เปรียบเทียบปริมาณแก๊สชีวภาพต่อกรัมของสารอินทรีย์แข็งระเหยได้ (total volatile solid)

ระยะเวลาหมัก	pH	อุณหภูมิหมัก (°C)	สารตั้งต้น	แก๊สชีวภาพ (ml/gTVS)	ผู้แต่ง
74 วัน	5.8	37	กากปาล์ม	H <sub>2</sub> 8.01	งานวิจัยนี้
	7.0			CH <sub>4</sub> 44.38	
5 วัน	5.6	55 ± 1	เศษอาหาร	H <sub>2</sub> 91.50	Hang-Sik และคณะ (2004)
50 วัน	-	55	ขยะชุมชน	CH <sub>4</sub> 495	Trine และคณะ (2004)
7 วัน	6-7	39	ขานอ้อย	CH <sub>4</sub> 77	Kivaisi และ Eliapenda (1995)
			ขี้ขี้วัวโพด	CH <sub>4</sub> 64	
115 วัน	7.8	11	อุจจาระวัว	CH <sub>4</sub> 33.60	Rene และคณะ (2006)
			อุจจาระลาหมา	CH <sub>4</sub> 19.30	
	7.8	35	อุจจาระวัว	CH <sub>4</sub> 131.30	
			อุจจาระลาหมา	CH <sub>4</sub> 84.10	
120 ชั่วโมง	5-6	37	ขยะชุมชน	H <sub>2</sub> 180	Jiunn-Jyi และคณะ (1999)
150 ชั่วโมง	4.7-5	36 ± 1	ฟางข้าว (ต้มด้วยกรด)	H <sub>2</sub> 68.10	Yao-Ting และคณะ (2006)
			ฟางข้าว (ไม่ต้ม)	H <sub>2</sub> 0.50	
160 ชั่วโมง	4.8-5.6	36 ± 1	กากเบียร์	H <sub>2</sub> 68.60	Yao-Ting และคณะ (2006)

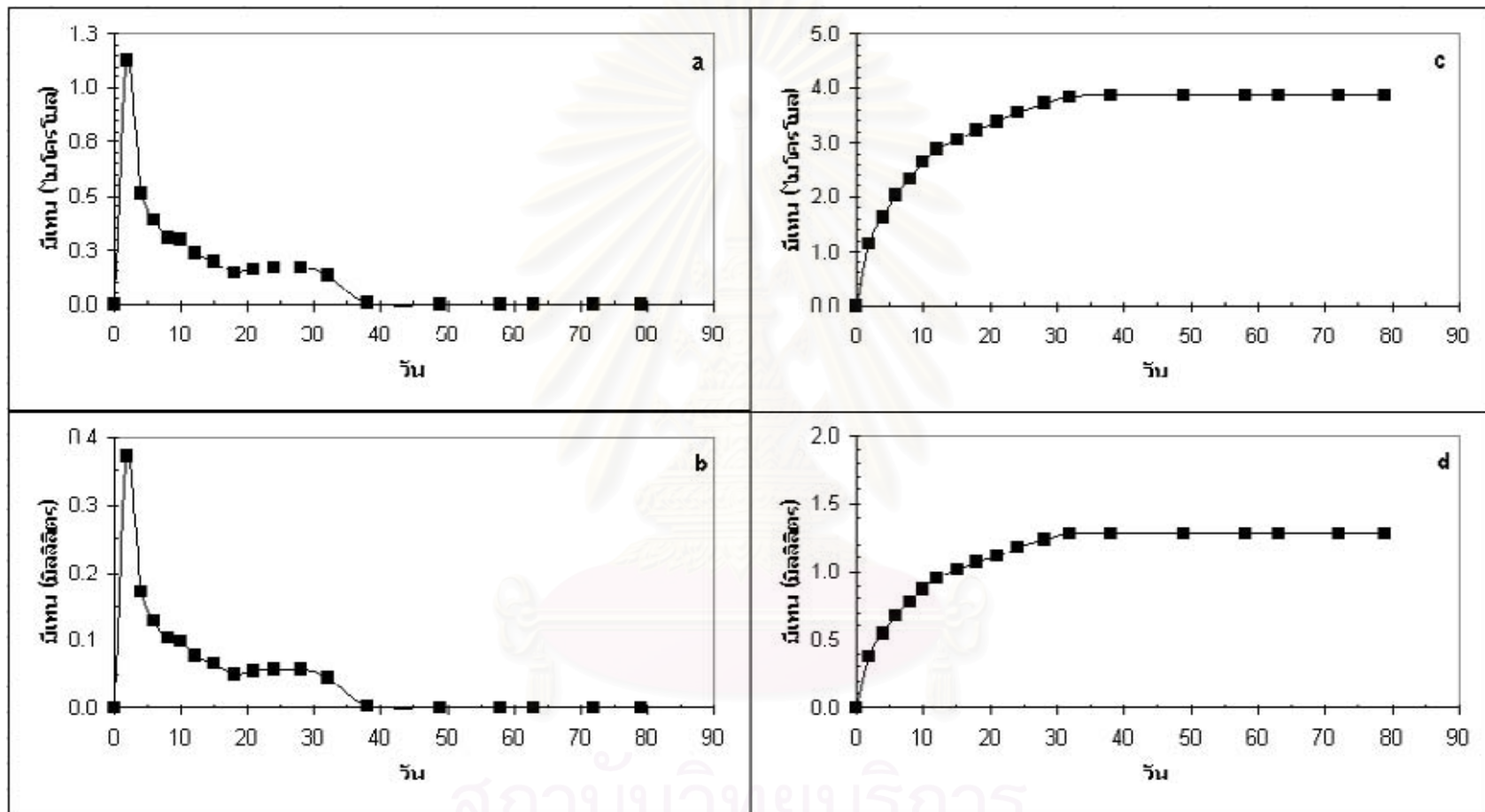
## 4.2 ถังหมักขนาด 2 ลิตร

### 4.2.1 แก๊สชีวภาพ ที่อุณหภูมิ 37 °C pH 5.8 ความเข้มข้นกากปาล์ม 5%

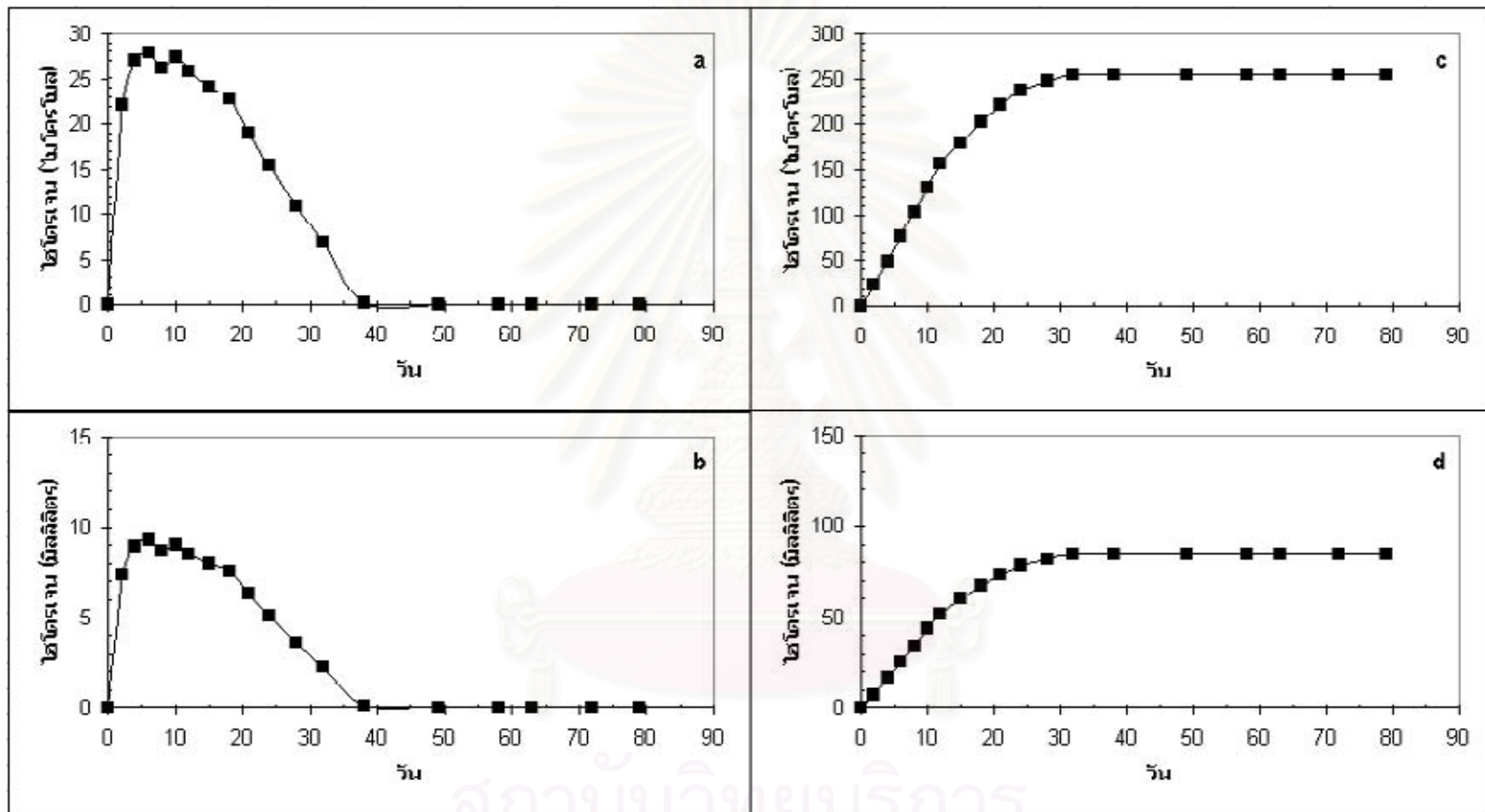
การหมักกากปาล์มความเข้มข้น 5% ที่อุณหภูมิ 37 °C pH 5.8 เกิดแก๊สชีวภาพดังแสดงในรูป 4.17 และ 4.18 แก๊สมีเทนจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว และมีความเข้มข้นแก๊สมีเทนสูงที่สุดหลังจากหมักได้ 2 วัน แก๊สมีเทนมีจำนวนสูงที่สุดเท่ากับ 1.12 ไมโครโมล (รูปที่ 4.17a) หลังจากนั้นแก๊สมีเทนที่เกิดขึ้นจะลดลงเรื่อยๆ จนไม่มีแก๊สมีเทนเกิดขึ้นเลยเมื่อผ่านการหมักไปได้ 49 วัน และเมื่อจบการทดลองจะได้แก๊สมีเทนสะสมตลอดการทดลองเท่ากับ 3.85 ไมโครโมล (รูปที่ 4.17c) โดยแก๊สมีเทนที่เกิดขึ้นคิดเป็นปริมาตรแก๊สมีเทนดังรูปที่ 4.17b และ 4.17d แนวโน้มของการเกิดแก๊สมีเทนจะคล้ายกับรูปที่ 4.17a และ 4.17c ตามลำดับ โดยปริมาตรแก๊สมีเทนสูงสุดในวันที่ 2 ของการทดลองมีปริมาตรเท่ากับ 0.37 มิลลิลิตร (รูปที่ 4.17b) และมีปริมาตรของแก๊สมีเทนสะสมเมื่อจบการทดลองเท่ากับ 1.28 มิลลิลิตร (รูปที่ 4.17d)

ส่วนแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจากการหมักกากปาล์มความเข้มข้น 5% ที่อุณหภูมิ 37 °C pH 5.8 จะแสดงดังรูปที่ 4.18 การเกิดแก๊สไฮโดรเจนจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อผ่านการหมักได้ 2 วัน (รูปที่ 4.18a) เมื่อการหมักผ่านไปได้ 6 วัน แก๊สไฮโดรเจนจะเกิดน้อยลงเรื่อยๆ จนไม่มีการผลิตแก๊สไฮโดรเจนเลยเมื่อผ่านการหมักไปได้ 49 วัน แก๊สไฮโดรเจนจะเกิดสูงที่สุดเท่ากับ 27.95 ไมโครโมล เมื่อผ่านการหมักไปได้ 6 วัน คิดเป็นปริมาตรแก๊สไฮโดรเจนเท่ากับ 9.26 มิลลิลิตร (รูปที่ 4.18b) และเมื่อจบการทดลองได้เปอร์เซ็นต์แก๊สไฮโดรเจนสะสมเท่ากับ 255.44 ไมโครโมล (รูปที่ 4.18c) หรือคิดเป็นปริมาตรเท่ากับ 84.55 มิลลิลิตร (รูปที่ 4.18d)





รูปที่ 4.17 แก๊สมีเทนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักที่อุณหภูมิ 37 °C pH 5.8 ความเข้มข้นกากปาล์ม 5% (a) แก๊สมีเทนที่เกิดขึ้น (b) ปริมาณแก๊สมีเทนที่เกิดขึ้น (c) แก๊สมีเทนสะสม (d) ปริมาณแก๊สมีเทนสะสม

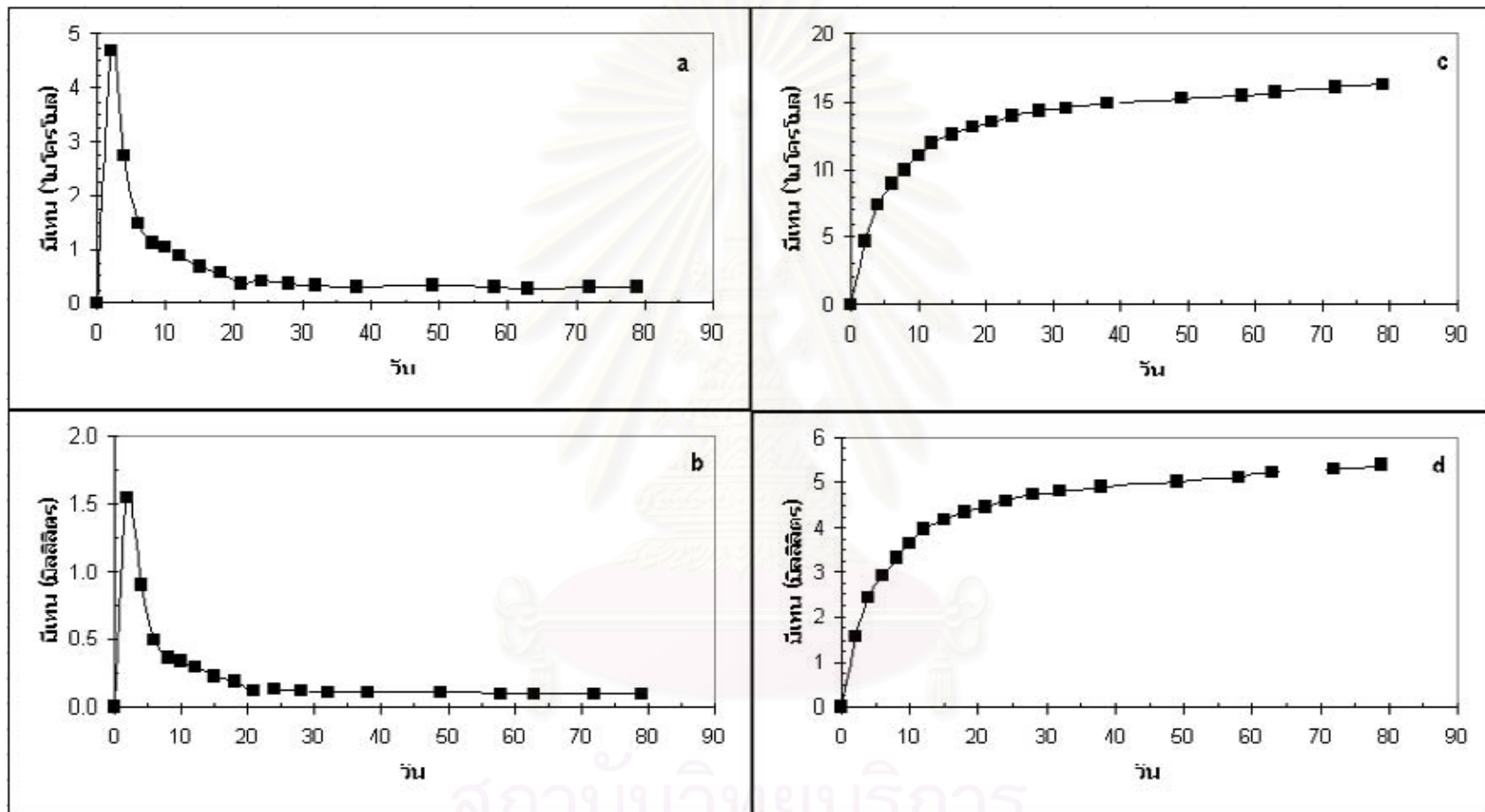


รูปที่ 4.18 แก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักที่อุณหภูมิ 37 °C pH 5.8 ความเข้มข้นกากปาล์ม 5% (a) แก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น (b) ปริมาตรแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น (c) แก๊สไฮโดรเจนสะสม (d) ปริมาตรแก๊สไฮโดรเจนสะสม

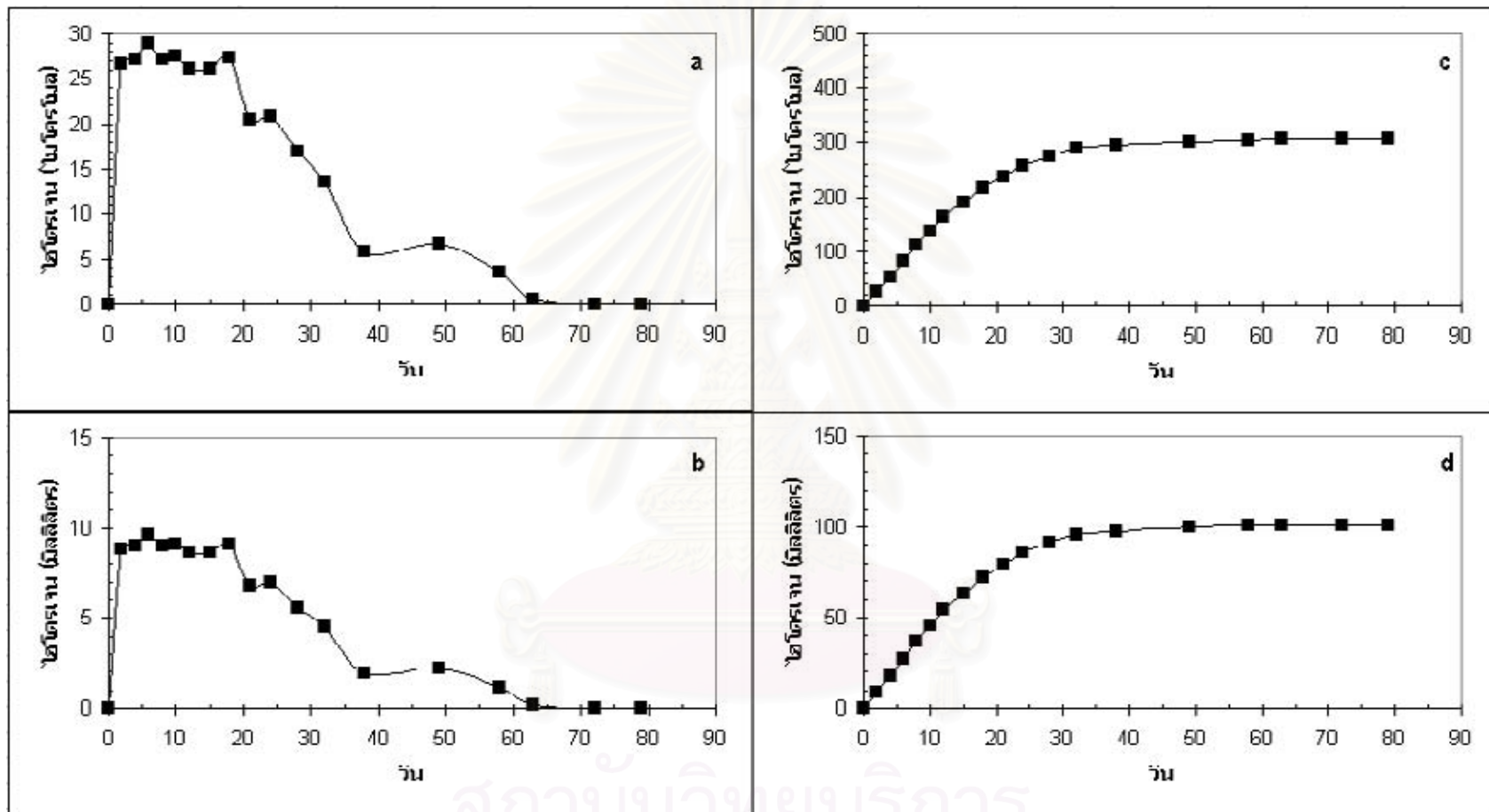
#### 4.2.2 แก๊สชีวภาพ ที่อุณหภูมิ 37 °C pH 7.0 ความเข้มข้นกากปาล์ม 5%

แก๊สชีวภาพที่เกิดจากการหมักกากปาล์ม 5% ที่อุณหภูมิ 37 °C pH 7 แสดงดังรูปที่ 4.19 และ 4.20 แก๊สมีเทนจะเกิดขึ้นสูงที่สุด และเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อผ่านการหมักไปได้ 2 วัน โดยจะมีแก๊สมีเทนเกิดขึ้นสูงสุดเท่ากับ 4.67 ไมโครโมล (รูปที่ 4.19a) หรือคิดเป็นปริมาตรเท่ากับ 1.55 มิลลิลิตร (รูปที่ 4.19b) หลังจากนั้นแก๊สมีเทนจะเกิดน้อยลงเรื่อยๆ จนคงที่เมื่อผ่านการหมักไปได้ 21 วัน หลังจากจบการทดลองจะได้แก๊สมีเทนสะสมเท่ากับ 16.30 ไมโครโมล (รูปที่ 4.19c) หรือคิดเป็นปริมาตรแก๊สเท่ากับ 5.40 มิลลิลิตร (รูปที่ 4.19d)

แก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจะแสดงดังรูปที่ 4.20 โดยแก๊สไฮโดรเจนจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วเมื่อผ่านการหมักไปได้ 2 วัน โดยจะมีแก๊สไฮโดรเจนเกิดขึ้นสูงสุดเท่ากับ 28.97 ไมโครโมล (รูปที่ 4.20a) หรือเท่ากับ 9.60 มิลลิลิตร (รูปที่ 4.20b) ในวันที่ 6 ของการหมัก หลังจากนั้นจะคงที่จนถึงวันที่ 18 แก๊สไฮโดรเจนจะเกิดลดลงจนไม่เกิดเลยเมื่อผ่านการหมักไปได้ 72 วัน เมื่อจบการทดลองจะมีแก๊สไฮโดรเจนสะสมเท่ากับ 305.59 ไมโครโมล (รูปที่ 4.20c) หรือเท่ากับ 101.26 มิลลิลิตร (รูปที่ 4.20d)



รูปที่ 4.19 แก๊สมีเทนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักที่อุณหภูมิ 37 °C pH 7.0 ความเข้มข้นกากปาล์ม 5% (a) แก๊สมีเทนที่เกิดขึ้น (b) ปริมาตรแก๊สมีเทนที่เกิดขึ้น (c) แก๊สมีเทนสะสม (d) ปริมาตรแก๊สมีเทนสะสม



รูปที่ 4.20 แก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักที่อุณหภูมิ 37 °C pH 7.0 ความเข้มข้นกากปาล์ม 5% (a) แก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น (b) ปริมาตรแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น (c) แก๊สไฮโดรเจนสะสม (d) ปริมาตรแก๊สไฮโดรเจนสะสม

เมื่อนำผลของปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นจากการหมักกากปาล์มความเข้มข้น 5% ที่อุณหภูมิ 37 °C pH 5.8 และ pH 7.0 มาเปรียบเทียบกับกันดังแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่าปริมาณแก๊สมีเทนที่ได้มีปริมาณน้อยมาก และแก๊สมีเทน และแก๊สไฮโดรเจนจากการหมักที่ pH 7.0 จะมีปริมาณมากกว่าที่ pH 5.8 นอกจากนี้อัตราการผลิตแก๊สที่ความเข้มข้นกากปาล์ม 5% อุณหภูมิ 37 °C pH 7.0 ยังมีค่ามากกว่าการหมักที่ความเข้มข้นกากปาล์ม 5% อุณหภูมิ 37 °C pH 5.8 โดยอัตราการผลิตแก๊สชีวภาพจะเกิดขึ้นตั้งแต่เริ่มการทดลองจนถึงวันที่ 32 ของการทดลอง

ปริมาณแก๊สชีวภาพที่ได้จากการหมักในขวดแก้วขนาด 2 ลิตร นี้เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นจากการหมักในขวดซีรัมขนาด 100 มิลลิลิตร ในอัตราส่วนของปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นต่อกรัมของกากของเสียจะได้ผลดังที่แสดงในตารางที่ 4.5 โดยการหมักในขวดซีรัมขนาด 100 มิลลิลิตร pH 5.8 จะมีค่าเท่ากับ 34.22 ml CH<sub>4</sub>/g TVS และ 8.01 ml H<sub>2</sub>/g TVS การหมักในขวดซีรัมขนาด 100 มิลลิลิตร pH 7.0 จะมีค่าเท่ากับ 44.38 ml CH<sub>4</sub>/g TVS และ 6.56 ml H<sub>2</sub>/g TVS การหมักในขวดแก้วขนาด 2 ลิตร pH 5.8 จะมีค่าเท่ากับ 0.03 ml CH<sub>4</sub>/g TVS และ 1.77 ml H<sub>2</sub>/g TVS การหมักในขวดแก้วขนาด 2 ลิตร pH 7.0 จะมีค่าเท่ากับ 0.11 ml CH<sub>4</sub>/g TVS และ 2.12 ml H<sub>2</sub>/g TVS

จากตารางที่ 4.5 จะเห็นได้อย่างชัดเจนว่า การหมักในขวดซีรัมขนาด 100 มิลลิลิตร มีประสิทธิภาพมากกว่าการหมักในขวดแก้วขนาด 2 ลิตร เพราะปริมาณแก๊สชีวภาพที่ได้ต่อกรัมของกากของแข็งที่ได้จากการหมักในขวดซีรัมขนาด 100 มิลลิลิตร มีค่าสูงกว่าปริมาณแก๊สชีวภาพที่ได้ต่อกรัมของกากของแข็งที่ได้จากการหมักในขวดแก้วขนาด 2 ลิตร ซึ่งอาจจะมีสาเหตุมาจากระบบของเราที่ไม่ได้มีการปั่นกววน การกระจายตัวของเชื้อจุลินทรีย์ภายในขวดใหญ่จึงกระจายไม่ทั่วถึง มีการกระจุกตัวอยู่ภายในบริเวณใดบริเวณหนึ่ง จึงทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถนำกากปาล์มมาใช้ได้อย่างเต็มที่ จุลินทรีย์จึงเจริญเติบโตได้ไม่ดีพอ แก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นจึงมีปริมาณน้อย เมื่อนำเปรียบเทียบกับการหมักในขวดเล็ก

สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ตารางที่ 4.4 ปริมาตรแก๊สสะสม และอัตราการผลิตแก๊สที่เกิดขึ้นจากการหมักในถังหมักขนาด 2 ลิตร ที่อุณหภูมิ 37 °C ความเข้มข้นกากปาล์ม 5% pH 5.8 และ pH 7.0

ชนิดของแก๊ส	ปริมาตรแก๊สสะสม (ml)		อัตราการผลิตแก๊สชีวภาพ (ml/g TVS/วัน) *	
	pH 5.8	pH 7.0	pH 5.8	pH 7.0
มีเทน	1.28	5.40	$8.33 \times 10^{-4}$	$3.15 \times 10^{-3}$
ไฮโดรเจน	84.65	101.26	0.05	0.06

\*อัตราการผลิตแก๊สใช้ระยะเวลาตั้งแต่เริ่มการทดลองจนถึงวันที่ 32 ของการทดลอง

ตารางที่ 4.5 ปริมาตรแก๊สที่ได้จากการหมักในขวดซีรัมขนาด 100 มิลลิลิตร กับปริมาตรแก๊สที่ได้จากการหมักในขวดแก้วขนาด 2 ลิตร ภายใต้ภาวะความเข้มข้นกากปาล์ม 5% อุณหภูมิ 37 °C pH 5.8 และ pH 7.0

pH	ปริมาตรแก๊สที่ได้ในขวดซีรัมขนาด 100 มิลลิลิตร		ปริมาตรแก๊สที่ได้ในขวดแก้วขนาด 2 ลิตร	
	มีเทน (ml/g TVS)	ไฮโดรเจน (ml/g TVS)	มีเทน (ml/g TVS)	ไฮโดรเจน (ml/g TVS)
5.8	34.22	8.01	0.03	1.77
7.0	44.38	6.56	0.11	2.12

## บทที่ 5

### สรุปผลการทดลอง

ผลของการศึกษาการผลิตแก๊สชีวภาพ (แก๊สมีเทน และแก๊สไฮโดรเจน) จากกากของแข็งที่ได้จากอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม โดยศึกษาปริมาณ และชนิดของแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นจากการหมักเชื้อจุลินทรีย์ในภาวะไร้อากาศภายในขวดซีรัมขนาด 100 มิลลิลิตร และขวดแก้วขนาด 2 ลิตร ซึ่งในการหมักที่ใช้ขวดซีรัมขนาด 100 มิลลิลิตร จะมีการแปรผันค่าความเข้มข้นกากปาล์มที่ 0%, 5%, 10% และ 15% ค่า pH 5.8 และ 7.0 และอุณหภูมิ 37 °C และ 55 °C จากการทดลองพบว่า จะเกิดแก๊สมีเทนทุกๆ ภาวะที่ทำการทดลอง แต่ทุกๆ ภาวะที่อุณหภูมิ 55 °C จะมีปริมาณแก๊สมีเทนเกิดขึ้นน้อยมาก และในส่วนของแก๊สไฮโดรเจนจะพบเฉพาะที่ภาวะความเข้มข้นกากปาล์ม 5%, 10% และ 15% ค่า pH 5.8 และ 7.0 และอุณหภูมิ 37 °C เท่านั้น โดยในทุกๆ ภาวะที่อุณหภูมิ 55 °C จะไม่เกิดแก๊สไฮโดรเจนเลย

เมื่อนำปริมาณแก๊สสะสมที่ได้จากการหมักเชื้อจุลินทรีย์ในขวดซีรัมมาเปรียบเทียบกันจะพบว่าที่อุณหภูมิ 37 °C จะเกิดแก๊สชีวภาพมากกว่าการหมักที่อุณหภูมิ 55 °C ดังนั้นจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองนี้น่าจะเป็นจุลินทรีย์ในกลุ่มมีโซฟิลล์ (mesophile) การหมักที่ pH 5.8 จะเกิดแก๊สไฮโดรเจนได้ดีกว่าการหมักที่ pH 7.0 เนื่องจากที่ pH ต่ำๆ จุลินทรีย์จะผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้ดี แต่ที่ pH 5.8 จะเกิดแก๊สมีเทนน้อยกว่าการหมักที่ pH 7.0 เพราะที่ pH 7.0 เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในกลุ่มที่สร้างแก๊สมีเทน และเมื่อเปรียบเทียบในภาวะที่เหมือนกัน และในระดับความเข้มข้นกากปาล์มที่ต่างกันพบว่า ที่ปริมาณความเข้มข้นกากปาล์มน้อยจะให้ปริมาณแก๊สมีเทนที่มากกว่าการหมักที่มีปริมาณความเข้มข้นกากปาล์มมาก เช่นเดียวกับแก๊สไฮโดรเจนแต่ที่ความเข้มข้นกากปาล์ม 0% จะไม่เกิดแก๊สไฮโดรเจนเกิดขึ้นเลย ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากตัวทำลายที่ปะปนมากับวัตถุดิบที่ใช้

การหมักเชื้อจุลินทรีย์ในขวดแก้วขนาด 2 ลิตร จะเลือกภาวะที่น่าสนใจที่ทำให้เกิดแก๊สชีวภาพมากที่สุดมาทำการขยายขนาดการทดลอง โดยจากการทดลองในขวดซีรัมพบว่า การหมักในภาวะที่มีความเข้มข้นกากปาล์ม 5% อุณหภูมิ 37 °C pH 5.8 และ 7.0 เกิดปริมาณแก๊สมีเทน และแก๊สไฮโดรเจนในปริมาณที่น่าสนใจ ดังนั้นจึงเลือก 2 ภาวะนี้มาทำการขยายขนาด เพื่อทดลองในขวดแก้วขนาด 2 ลิตร และทำการศึกษารายละเอียด และชนิดของแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้น โดยปริมาณแก๊สชีวภาพที่ได้เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นจากการหมักในขวดซีรัมขนาด 100 มิลลิลิตร ในอัตราส่วนของ



ปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นต่อกรัมของกากของแข็งระเหยได้จะพบว่า การหมักในขวดซีรัมขนาด 100 มิลลิลิตร มีประสิทธิภาพมากกว่าการหมักในขวดแก้วขนาด 2 ลิตร

การนำเชื้อจุลินทรีย์มาหมักโดยใช้กากปาล์มเป็นสารตั้งต้นนี้ จุลินทรีย์สามารถนำสารอินทรีย์จากกากของแข็งมาใช้เพื่อผลิตแก๊สชีวภาพได้ แต่ปริมาณของแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นยังมีปริมาณน้อยเกินไป อันเนื่องมาจากกากของแข็ง ซึ่งเป็นส่วนของเมล็ดในที่นำมาใช้จะมีตัวทำลายปะปนมาระหว่างขั้นตอนการหีบเอาน้ำมัน โดยตัวทำลายนี้อาจจะเข้าไปทำการยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ทำให้แก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเพิ่มความเข้มข้นกากปาล์มมีจำนวนน้อยลงเรื่อยๆ และด้วยโครงสร้างของกากของแข็งที่ไม่เหมาะสมที่จุลินทรีย์จะนำไปใช้ ดังนั้นการทดลองต่อไปอาจจะนำกากของแข็งที่ได้ไปย่อย (pre-treatment) เพื่อให้โครงสร้างของกากปาล์มเหมาะสมที่จุลินทรีย์จะนำไปใช้ได้ ทำการศึกษาขั้นตอนการผลิตน้ำมันปาล์มในระดับอุตสาหกรรมให้ละเอียดยิ่งขึ้น เพื่อหาสารที่เป็นต้นเหตุให้เกิดการยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ และทำการกำจัดสารดังกล่าวออกไปก่อนที่จะนำกากปาล์มมาใช้หมัก และอาจพัฒนา หรือหาสายพันธุ์ของเชื้อจุลินทรีย์ที่เหมาะสม เพื่อให้สามารถผลิตแก๊สชีวภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ และมีปริมาณแก๊สชีวภาพที่ต้องการมากขึ้น



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

## รายการอ้างอิง

- กระทรวงพลังงาน. Energy plus. เล่มที่ 9. กรุงเทพมหานคร, 2549.
- กรมส่งเสริมการเกษตร. ปาล์มน้ำมัน. ครั้งที่พิมพ์ 2. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ชุมนุมชนสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย, 2547.
- ศุภันต์ นิมรัตน์. จุลชีววิทยาของน้ำเสีย. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2548.
- Ali, T., Coskun, D. Biogas production from olive pomace. *Resources Conservation and Recycling*. 30:301-313, 2000.
- Atif, A., Fakhru'r-Razi, A., Ngan, M., Morimoto, M., Iyuke, S., Veziroglu, T. Fed batch production of hydrogen from palm oil mill effluent using anaerobic microflora. *Int. J. hydrogen energy*. 2004.
- Bagal, R., Madamwar, D. Prolonged evolution of photo-hydrogen by intermittent supply of nitrogen using a combined system of *Phormidium valderianum*, *Halobacterium halobium* and *Escherichia coli*. *Int. J. Hydrogen Energy*. 23:545-550, 1998.
- Banerjee, M., Kumar, A., Kumar, D. Factors regulating nitrogenase activity and hydrogen evolution in *Azolla Anabaena* symbiosis. *Int. J. hydrogen energy*. 12:871-879, 1989.
- Belkin, S., Padan, E. Hydrogen metabolism in the facultative anoxygenic cyanobacterial blue-green algae, *Oscillatoria limnetica* and *Aphanothece halophytica*. *Arch. Microbiol*. 116:109-111, 1978.
- Benemann, R., Miyamoto, K., Hallenbeck, C. Bioengineering aspects of biophotolysis. *Enzyme Microbial Technol*. 2:103-111, 1980.
- Bitton G. *Wastewater microbiology*. John Wiley & Sons. Chichester, 1994.
- Bothe, H., Kentemicj, T. Potentialities of H<sub>2</sub>-production by cyanobacteria for solar energy conversion program In: Veziroglu TN, Takashashi PK. Hydrogen energy progress VIII. Proceedings of the Eighth WHEC, Hawaii. New York:Pergamon Press, p. 729-734, 1990.
- Brosseau, D., Zajic, E. Continuous microbial production of hydrogen gas. *Int. J. Hydrogen Energy*. 7:623-628, 1982.

- Chi, L., Pei-Chung, C., Chun-Chin, W., Yun-Chang, T. Photohydrogen production using purple nonsulfur bacteria with hydrogen fermentation reactor effluent. Int. J. Hydrogen Energy. 27(11-12):1309-1313, 2002.
- Debabrata, D., Nejat, T. Hydrogen production by biological processes: a survey of literature. Int. J. Hydrogen Energy. 26:13-28, 2001.
- Fascetti, E., Todini, O. *Rhodobacter sphaeroides* RV cultivation and hydrogen production in one and two-stage chemostat. Appl. Microbiol. Biotechnol. 44:300-305, 1995.
- Fascetti, E., D'Addario, E., Todini, O., Robertiello, A. Photosynthetic hydrogen evolution with volatile organic acids derived from the fermentation of source selected municipal solid wastes. Int. J. Hydrogen energy. 23(9):753-760, 1998.
- Gaffron, H., Rubin, J. Fermentative and photochemical production of hydrogen by algae. J. Gen. Physiol. 26:219-240, 1992.
- Gogotov, N., Zorin, A., Serebriakova, T. Hydrogen production by model systems including hydrogenase from phototrophic bacteria. Int. J. Hydrogen Energy. 16:393-396, 1991.
- Greenbaum, E. Hydrogen production by photosynthetic water splitting. In: Veziroglu TN, Takashashi PK, editors. Hydrogen energy progress VIII. Proceedings 8th WHEC, Hawaii. New York: Pergamon Press. p. 743-754, 1990.
- Hang-Sik, S., Jong-Ho, Y., Sang-Hyoun, K. Hydrogen production from food waste in anaerobic mesophilic and thermophilic acidogenesis. Int. J. Hydrogen Energy. 29:1355-1363, 2004.
- Haruhiko, Y., Akio, S., Hiroyuki, U., Jun, H., Sachio, H., Yoshiyuki T. Microbial hydrogen production from sweet potato starch residue. Journal of bioscience and bioengineering. 91(1):58-63, 2001.
- Healey, P. Hydrogen evolution by several algae. Planta. 91:220, 1970.
- Heguang, Z., Tomoo, S., Anatoly, A., Tsygankov, A., Yasuo, A., Miyake, J. Hydrogen production from tofu wastewater by *Rhodobacter sphaeroides* immobilized in agar gels. Int. J. hydrogen energy. 24:305-310, 1999.
- Heguang, Z., Shunsaku, U., Yasuo, A., Jun, M. Hydrogen production as a novel process of wastewater treatment-studies on tofu wastewater with entrapped *R. sphaeroides* and mutagenesis. Int. J. hydrogen energy. 27:1349-1357, 2002.

- Ilyin, V., Kornushenkova, I., Starkova, L., Lauriniavichius, K. Study of methanogenesis during bioutilization of plant residuals. Acta Astronautica. 56:465-470, 2005.
- Jiunn-Jyi, L., Young-Joon, L., Tatsuya, N. Feasibility of biological hydrogen production from organic fraction of municipal; solid waste. Wat. Res. 33(11):2579-2586, 1999.
- Kalia, V., Joshi, A. Conversion of waste biomass (pea-shells) into hydrogen and methane through anaerobic digestion. Bioresource Technology. 53:165-168, 1995.
- Kalia, V., Sonakya, V., Raizada, N. Anaerobic digestion of banana stem waste. Bioresource Technology. 73:191-193, 2000.
- Khan, T., Bhatt, J. Polyethylene glycol mediated fusion of *Halobacterium halobium* MMT22 and *Escherichia coli* for enhancement of hydrogen production. J. Hydrogen Energy. 16:683-685, 1991.
- Kivaisi, A., Eliapenda, S. Application of rumen microorganisms for enhanced anaerobic degradation of bagasse and maize bran. Biomass and Bioenergy. 8(1):45-50, 1995.
- Krahn, E., Schnerder, K., Muller, K. Comparative characterization of H<sub>2</sub> production by the conventional Mo nitrogenase and alternative “iron-only” nitrogenase of *Rhodobacter capsulata* hap mutants. Appl. Microbiol. Biotechnol. 46:285-290, 1996.
- Krishnan, V., Desa, A. Biohydrogen generation from palm oil mill effluent using anaerobic contact filter. Int. J. hydrogen energy. 31:1284-1291, 2006.
- Kumar, D., Kumar, HD. Effect of monochromatic lights on nitrogen fixation and hydrogen evolution in the isolated hetrocysts of *Anabaena* sp. strain CA. Int. J. Hydrogen Energy. 16:397-401, 1991.
- Kumazawa, S., Mitsui, A. Characterization and optimization of hydrogen photoproduction by saltwater blue-green algae, *Oscillatoria* Sp. Miami BG7: I. Enhancement through limiting the supply of nitrogen nutrient. Int. J. Hydrogen Energy. 6:339-348, 1981.
- Lee, W., Greenbaum, E. A new perspective on hydrogen production of photosynthetic water splitting. In: Saha BC, Woodward J. editors. Fuels and chemical for biomass. ACS Symposium Series. Washington: ACS. 666:209-222, 1997.

- Maria, J., Barbosa, M., Rocha, S., Johannes, T., René, H., Wijffels. Acetate as a carbon source for hydrogen production by photosynthetic bacteria. *Journal of Biotechnology*. 85(1):25-33, 2001.
- Miyake, J., Kawamura, S. Efficiency of light energy conversion to hydrogen by photosynthetic bacteria *Rhodobacter sphaeroides*. *Int. J. Hydrogen Energy*. 12:147-149, 1987.
- Ohta, Y., Frank, J., Mitsui, A. Hydrogen production by marine photosynthetic bacteria: effect of environmental factors and substrate specificity of the growth of hydrogen-producing marine photosynthetic bacterium sp. Miami PBS 1071. *Int. J. Hydrogen Energy*. 6:451-460, 1981.
- Peng, Y., Stevens, P., De Vos, P., De Ley, J. Relation between pH, hydrogenase and nitrogenase activity,  $\text{NH}_4^+$  concentration and hydrogen production in cultures of *Rhodobacter sulfidophilus*. *J. Gen. Microbiol.* 133:1243, 1987.
- Reddy, J., Mitsui, A. Simultaneous production of hydrogen and oxygen as affected by light intensity in unicellular aerobic nitrogen fixing blue-green alga *Synchococcus* sp. Miami BG 043511. In: Sybesmaic C, editors. Advances in photosynthetic research vol. II. Hague : Martinus Nijhoff Junk. p. 785-788, 1984.
- Rene, A., Saul, V., Gunnar, L. Biogas production from llama and cow manure at high altitude. *Biomass and Bioenergy*. 30:66-75, 2006.
- Roychowdhury, S., Cox, D., Nag, M., Cipico, E. Continuous generation of hydrogen from sewage sludge. In: Bolcich JC, Veziroglu TN, editors. Hydrogen energy progress XII. Proceedings of 12th WHEC. Argentina. p. 533-541, 1998.
- Sarker, S., Pandey, D., Kashyap, K. Hydrogen photoproduction by filamentous non-heterocystous cyano-bacterium *Plectonema boryana* and simultaneous release of ammonia. *Int. J. Hydrogen Energy*. 17:689-694, 1992.
- Sasikala, K., Ramana, V., Rao, R. Environmental regulation for optimal biomass yield and photoproduction of hydrogen by *Rhodobacter sphaeroides* O.U.001. *Int. J. Hydrogen Energy* . 16:597-601, 1991.
- Sasikala, K., Ramana, V., Subrahmanyam, M. Photo-production of hydrogen from wastewater of a lactic acid fermentation plant by a purple non-sulfur photosynthetic bacterium *Rhodobacter sphaeroides* O.U. 001. *Indian. J. Exp. Biol.* 29:74-75, 1991.

- Sasikala, K., Ramana, V., Rao, R. Regulation of simultaneous hydrogen photoproduction during growth by pH and glutamate in *Rhodobacter sphaeroides* O.U.001. Int. J. Hydrogen Energy. 20:123-126, 1995.
- Schnackenberg, J., Schulz, R., Senger, H. Characterization and purification of a hydrogenase from eukaryotic green alga *Scenedesmus obliquus* FFB Lett. 327:21-24, 1993.
- Shihwu, S., Dennis, B., Lutgarde, R. Biohydrogen production from renewable organic wastes. Hydrogen fuel cells and infrastructure technologies. 2003.
- Singh, P., Srivastava, C., Isolation of non-sulfur photo-synthetic bacteria strains efficient in hydrogen production at elevated temperatures. Int. J. Hydrogen Energy. 16:404-405, 1991.
- Smith, D., Ewart, D., Tucker, W. Hydrogen production by cyanobacteria. Int. J. Hydrogen Energy. 17:695-698, 1992.
- Spiller, H., Ernst, E., Kerkin, W., Boyer, P. Increase and stabilization of photoproduction of hydrogen in *Nostocmicorum* by photosynthetic electron transport inhibitors. Z. Naturforsch. 33:541-547, 1978.
- Stewart, P., Rowell, P., Effects of L-methionine D,L-sulfoximine on the newly fixed NH<sub>3</sub>, acetylene reduction and heterocyst production in *Anabaena cylindrica*. Biochem Biophys Res Commun. 65:846-856, 1975.
- Tanisho, S., Suzuki, Y., Wakoo, N. Fermentative hydrogen evolution by *Enterobacter aerogenes* strain E.82005. Int. J. Hydrogen Energy. 12:623-627, 1987.
- Thangaraj, A., Kulandaivelu, G. Biological hydrogen photoproduction using dairy and sugarcane waste waters. Bioresource technology. 48:9-12, 1994.
- Trine, H., Jens, S., Irini, A., Emilia, M., Jes la Cour, J., Hans, M., Thomas, C. Method for determination of methane potentials of solid organic waste. Waste Management. 24:394-400, 2004.
- Tsygankov, S., Serebryakova, T., Sueshnikov, A., Rao, K., Gogotov, N., Hall, O. Hydrogen photoproduction by three different nitrogenases in whole cells of *Anabaena variabilis* and dependence on pH. Int. J. Hydrogen Energy. 22:859-867, 1997.

- Venkataraman, C., Vatsala, M. Hydrogen production from whey by phototrophic bacteria. In: Veziroglu TN, Takashashi PK, editors. Hydrogen energy progress VIII. Proceedings of 8th WHEC, Hawaii. New York: Pergamon Press. p. 781-788, 1990.
- Vincezini, M., Materassi, R., Tredici, R, Florenzano, G. Hydrogen production by immobilized cell-I. light dependent dissimilation of organic substances by *Rhodospseudomonas palustris*. Int. J. Hydrogen Energy. 7:231-236, 1982.
- Vrati, S., Verma, J. Production of molecular hydrogen and single cell protein by *Pseudomonas capsulata* from cow dung. J. Ferment Technol. 61:157-162, 1983.
- Vyas, D., Kumar, D. Nitrogen fixation and hydrogen uptake in four cyanobacteria. Int J Hydrogen Energy. 22: 163-168, 1995.
- Xian, S., Han-Qing, Y. Response surface analysis on the effect of cell concentration and light intensity on hydrogen production by *Rhodospseudomonas capsulate*. Process Biochemistry. 40(7):2475-2481, 2005.
- Yao-Ting, F., Gao-Sheng, Z., Xin-Yong, G., Yan, X., Mao-Hong, F. Biohydrogen-production from beer lees biomass by cow dung compost. Biomass and Bioenergy. 30:493-496, 2006.
- Yoshiyuki, U., Seiji, O., Masayoshi, M. Hydrogen production from industrial wastewater by anaerobic microflora in chemostat culture. Journal of Fermentation and Bioengineering. 82(2):194-197, 1996.
- Zurrer, H., Bachofen, R. Aspects of growth and hydrogen production of the photosynthetic bacterium *Rhodospirillum rubrum* in continuous cultures. Biomass. 2:165, 1982.
- [www.iahe.org](http://www.iahe.org)[2006, June 20]
- [www.greencarcongress.com](http://www.greencarcongress.com)[2006, September 20]
- [www.emc.maricopa.edu](http://www.emc.maricopa.edu)[2006, September 20]

## ประวัติผู้เขียนวิทยานิพนธ์

นายทักษณนย์ วุฒิกุล เกิดเมื่อวันที่ 9 ธันวาคม พ.ศ. 2524 ที่จังหวัดกรุงเทพฯ จบการศึกษาระดับมัธยมศึกษาตอนต้น และมัธยมศึกษาตอนปลาย สายวิทยาศาสตร์ จากโรงเรียนสาธิตมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปทุมวัน เขตปทุมวัน จังหวัดกรุงเทพฯ และได้รับปริญญาวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ จากคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ในปีการศึกษา 2546 และเข้าศึกษาต่อในระดับปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ในปีการศึกษา 2547 และสำเร็จการศึกษาชั้นปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต ในภาคต้น ปีการศึกษา 2549



สถาบันวิทยบริการ  
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย