

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

การทดลองนี้ แบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก คือ การทดลองการหาปัจจัยและสภาวะที่เหมาะสมของการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วยสารกรดหรือสารด่าง และการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการ โดยใช้กระบวนการหมักกากมันสำปะหลังแบบเท ในสภาวะต่างกัน เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ โดยผลการทดลอง และวิจารณ์ผลการทดลองแสดงได้ดังนี้

4.1 ปัจจัยและสภาวะที่เหมาะสมของการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วยสารกรดหรือสารด่าง

4.1.1 สมรรถนะการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วยสารกรด

ผลการตรวจวัดปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ แสดงได้ดังตารางที่ 4.1 พบว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่เกิดขึ้นภายหลังกระบวนการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วยกรดที่สภาวะต่างๆ อยู่ในช่วง 9.9-855 มิลลิกรัมต่อกรัมกากแห้ง ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดจากระดับเริ่มต้นถึง 214 เท่า

เมื่อนำข้อมูลปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์จากตารางที่ 4.1 มาทำการวิเคราะห์หาผลของปัจจัย (รายละเอียดแสดงในภาคผนวก ข) พบความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.1 และรูปที่ 4.1 ซึ่งกล่าวได้ว่า ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ($P < 0.05$) ค่าพีเอชและอุณหภูมิของสารละลายเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการย่อยสลายกากมันสำปะหลังเป็นน้ำตาลรีดิวซ์มากที่สุด เห็นได้จากค่าสัมประสิทธิ์ของทั้งสองปัจจัยในสมการมีค่ามากกว่าปัจจัยอื่นมากพอสมควร และนอกจากนี้พีเอชกับอุณหภูมิยังเป็นปัจจัยที่มีผลร่วมกันอย่างมากอีกด้วย โดยค่าสัมประสิทธิ์มีค่าพอกันกับปัจจัยหลักทั้งสองปัจจัย ในขณะที่ปัจจัยอื่นๆมีผล หรือผลร่วมต่อประสิทธิภาพการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ค่อนข้างน้อย

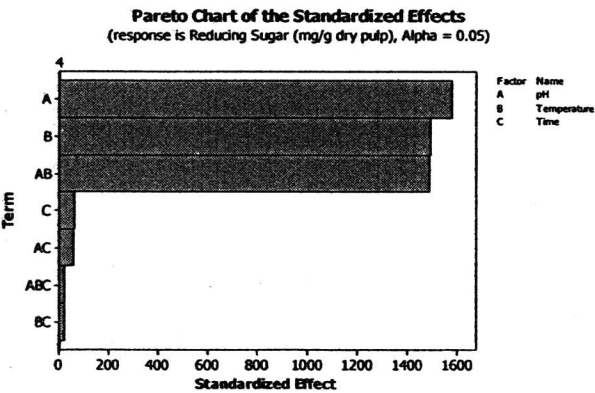
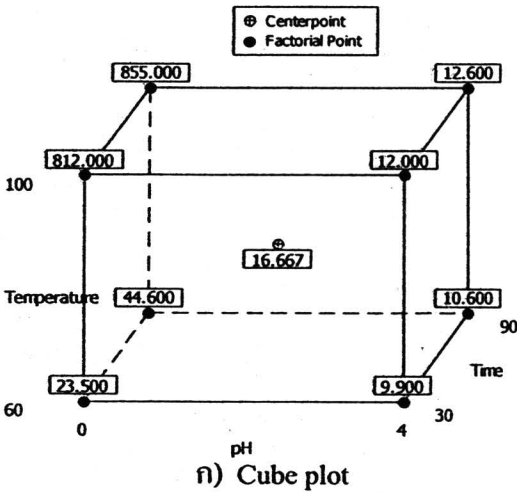
$$Y = -1153 + 289.93A + 19.44B - 0.196C - 4.85AB + 0.05AC + 0.009BC - 0.002ABC \quad (4.1)$$

เมื่อ Y = ผลผลิตน้ำตาลรีดิวซ์, มก. กลูโคส/กรัม กากแห้ง
 A = ค่าของพีเอช (0-4)
 B = ค่าของอุณหภูมิ (60-100 องศาเซลเซียส)
 C = ค่าของเวลา (30-90 นาที)

ตารางที่ 4.1 ผลการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วยสารกรด

พีเอช	อุณหภูมิ °ซ	เวลา นาที	พีเอช		น้ำตาลรีดิวซ์ (มก.กลูโคส/ก.กาก แห้ง)	กรดไขมันระเหย (มก.อะซิติก/ก.กาก แห้ง)
			ก่อน	หลัง		
B*	-	-	4.45	4.45	4.04	2.96
2	80	60	2.19	2.13	16.5	23.6
0	100	90	0.21	0.02	855.0	60.3
4	60	90	4.24	4.22	10.6	13.0
4	100	30	4.26	4.24	12.0	14.2
2	80	60	2.15	2.10	17.1	21.3
2	80	60	2.16	2.10	16.4	22.5
0	60	30	0.32	0.19	23.5	27.2
4	60	30	4.28	4.27	9.9	13.6
0	60	90	0.13	0.06	44.6	28.4
0	100	30	0.20	0.03	812.0	31.9
4	100	90	4.25	4.21	12.6	16.6

* คือ กากมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านกระบวนการใดๆ



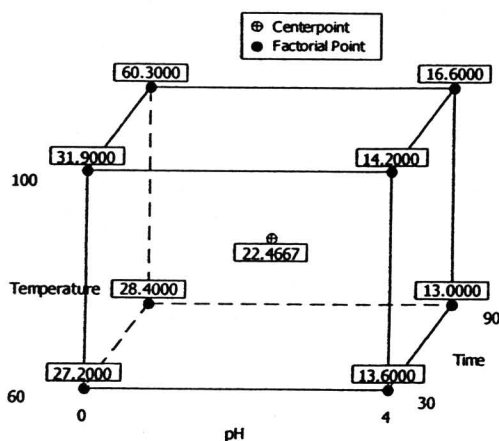
รูปที่ 4.1 กราฟแสดงผลของปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดน้ำตาลรีดิวซ์ ในกรณีของการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วยสารกรด

ดังนั้น หากต้องการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ให้ได้มากที่สุด ก็ควรเลือกใช้สภาวะการเดินระบบที่มีค่าพีเอชต่ำ และมีอุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาสูงสุด หรืออาจกล่าวได้ว่าสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ คือการไฮโดรไลซิสกากมันด้วยสารละลายกรดที่พีเอช 0 อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที ซึ่งให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงถึง 855 มิลลิกรัมต่อกรัมกากแห้ง อนึ่งผลการทดลองที่ได้นี้สอดคล้องกับการทดลองของ Agu, R.C et al., (1997) ซึ่งทำการศึกษาการไฮโดรไลซิสมันสำปะหลังเส้นด้วยกรดซัลฟิวริกที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส และอัตราส่วนกรัมของมันสำปะหลังต่อมิลลิตรของสารละลายกรด เท่ากับ 1:10 โดยทำการแปรผันความเข้มข้นของสารละลายกรดและระยะเวลาทำปฏิกิริยา ที่พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการไฮโดรไลซิส คือ พีเอช โดยเมื่อทำการเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายกรด ซึ่งก็คือ การลดค่าพีเอชลง จะทำให้น้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้มีปริมาณเพิ่มมากขึ้น เช่นเดียวกัน

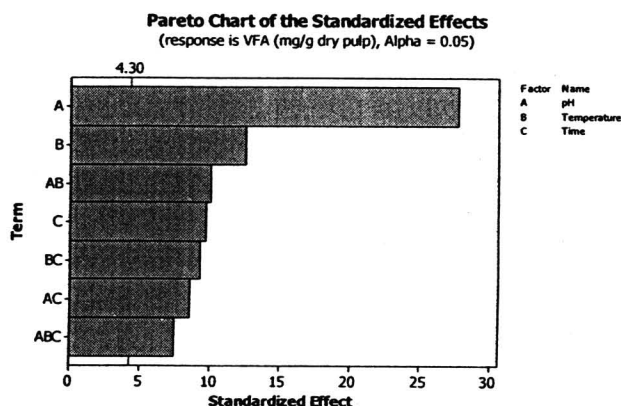
จากข้อมูลที่แสดงในตารางที่ 4.1 เมื่อทำการวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณกรดไขมันระเหย พบว่าทุกปัจจัยมีผลต่อการผลิตกรดไขมันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % และปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดกรดไขมันระเหยมากที่สุด คือ พีเอช ในส่วนของอุณหภูมิและเวลา มีผลเช่นกันแต่น้อยสังเกตได้จากค่าสัมประสิทธิ์ของทั้งสองปัจจัยมีค่าน้อยกว่าสัมประสิทธิ์ของพีเอชมากพอสมควร และปัจจัยที่มีผลร่วมกันอย่างมีนัยสำคัญคือ พีเอชกับอุณหภูมิ ,อุณหภูมิกับเวลา และปัจจัยทั้งสามยังมีผลร่วมกันอีกด้วย แต่ค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัยร่วมระหว่างพีเอชกับอุณหภูมิมีกว่าปัจจัยร่วมอื่นๆ ซึ่งสัมประสิทธิ์เหล่านี้มีค่าใกล้เคียงกันมาก แสดงดังสมการที่ 4.2 และรูปที่ 4.2

$$Y = 39.95 - 6.18A - 0.22B - 0.66C + 0.05AB + 0.14AC + 0.01BC - 0.003ABC \quad (4.2)$$

เมื่อ	Y	=	ผลผลิตกรดไขมันระเหย , มก. อะซิติก/ก. กากแห้ง
	A	=	ค่าของพีเอช (0-4)
	B	=	ค่าของอุณหภูมิ (60-100 องศาเซลเซียส)
	C	=	ค่าของเวลา (30-90 นาที)



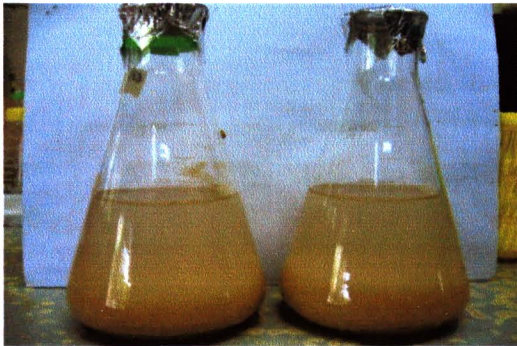
ก) Cube plot



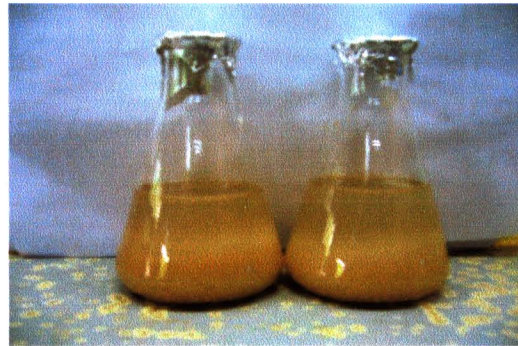
ข) Pareto plot

รูปที่ 4.2 กราฟแสดงผลของปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดกรดไขมันระเหยในกรณีของการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วยสารกรด

หากพิจารณาจากปริมาณกรดไขมันระเหยที่ผลิตได้ จะเห็นว่าสภาวะการเดินระบบที่ดีที่สุดเป็นสภาวะเดียวกันกับกรณีของน้ำตาลรีดิวซ์ คือ การไฮโดรไลซิสด้วยสารกรด ที่ค่าพีเอช 0 อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ด้วยระยะเวลาทำปฏิกิริยา 90 นาที ซึ่งให้ปริมาณกรดไขมันระเหยสูงสุดที่ 60.3 มิลลิกรัมต่อกรัมกากแห้ง ดังนั้น จึงสรุปได้ว่าสภาวะดังกล่าวเป็นสภาวะที่ดีที่สุดสำหรับการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วยสารกรด แต่เนื่องจากสภาพของกากมันสำปะหลังเมื่อทำการไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิสูงและมีสภาพความเป็นกรดสูง จะทำให้กากมันสำปะหลังเริ่มเปลี่ยนเป็นสีแดงจนกลายเป็นสีดำใหม่แสดงได้ดังรูปที่ 4.3 ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Agu, R.C et al., (1997) ที่ศึกษาการไฮโดรไลซิสเปลือกและกากมันสำปะหลังด้วยกรดซัลฟูริกที่ความเข้มข้น 0.2-5 โมลาร์ ปรากฏว่า เมื่อทำการไฮโดรไลซิสด้วยกรดแต่ละความเข้มข้นแล้ว กรดที่มีความเข้มข้นตั้งแต่ 1 โมลาร์ขึ้นไปทำให้สารละลายกากมันสำปะหลังเริ่มเปลี่ยนเป็นสีดำ และสอดคล้องกับการศึกษาของ อุดมเกียรติ พรหมประเทศ (2536) ที่ศึกษาการไฮโดรไลซิสแป้ง 4 ชนิด ได้แก่ แป้งข้าวเจ้า แป้งข้าวเหนียว แป้งข้าวจ้าว และแป้งด้วยกรดไฮโดรคลอริก ที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.7-1.0 สำหรับแป้งข้าวเจ้าและแป้งข้าวเหนียว และความเข้มข้นกรดไฮโดรคลอริกร้อยละ 0.2-0.5 สำหรับแป้งข้าวจ้าวและแป้งมันสำปะหลัง พบว่า ที่ความเข้มข้นกรดร้อยละ 0.2 ลักษณะของแป้งมันสำปะหลังเปลี่ยนเป็นสีแดงจาง และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นกรดขึ้นเรื่อยๆ ความเข้มข้นสีจะเพิ่มขึ้นเช่นกัน อย่างไรก็ตาม ผลผลิตกรดไขมันระเหยที่ได้มีค่าต่ำกว่าน้ำตาลรีดิวซ์มาก แสดงว่า ผลผลิตหลักที่ได้จากการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วยสารกรด คือ น้ำตาลรีดิวซ์



ก) กากมันสำปะหลังเมื่อผสมกับน้ำ



ข) กากมันสำปะหลังเมื่อผสมกับสารกรด



ค) สารละลายกากมันเมื่อทำการไฮโดรไลซิส
ก่อนการปรับพีเอชให้เป็นกลาง



ง) สารละลายกากมันเมื่อทำการไฮโดรไลซิส
หลังการปรับพีเอชให้เป็นกลาง

รูปที่ 4.3 กากมันสำปะหลังไฮโดรไลซิสด้วยสารกรดพีเอช 0, อุณหภูมิ 100 °ซและ เวลา 90 นาที

4.1.2 สมรรถนะการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วยสารด่าง

ผลการหาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ แสดงได้ดังตารางที่ 4.2 พบว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่เกิดขึ้นภายหลังกระบวนการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วยสารด่างที่สภาวะต่างๆ อยู่ในช่วง 10.1-16.5 มิลลิกรัมต่อกรัมกากแห้ง ซึ่งมีค่าเพิ่มขึ้นสูงสุดจากระดับเริ่มต้นประมาณ 4 เท่า

เมื่อนำข้อมูลปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ มาทำการวิเคราะห์หาผลของปัจจัย พบความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.3 และรูปที่ 4.4 ซึ่งกล่าวได้ว่า ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % ($P < 0.05$) ปัจจัยหลักที่มีผลต่อการย่อยสลายกากมันเป็นน้ำตาลรีดิวซ์ได้แก่ พีเอชและอุณหภูมิ โดยพีเอชเป็นปัจจัยหลักที่มีผลมากที่สุด สืบเนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ของพีเอชในสมการมีค่ามากกว่าค่าสัมประสิทธิ์ของอุณหภูมิ นอกจากนี้ยังพบว่าปัจจัยทั้งสองมีผลร่วมกันอีกด้วย

$$Y = 10.46 + 0.044A + 0.11B - 0.008AB$$

(4.3)

- เมื่อ
- Y

A

B

$=$ ผลผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ , มก. กอโคส/ก. กากแห้ง

$=$ ค่าของพีเอช (9-13)

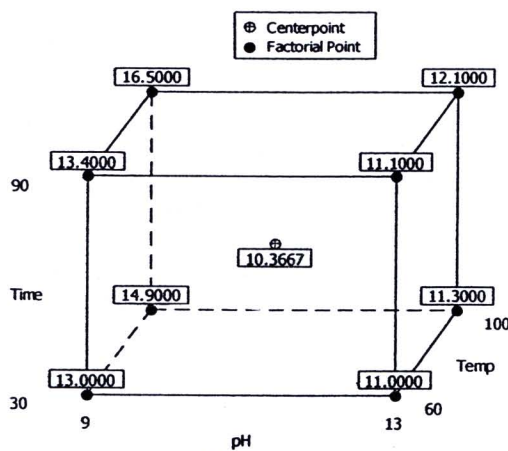
$=$ ค่าของอุณหภูมิ (60-100 องศาเซลเซียส)

ดังนั้น หากต้องการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ให้ได้มากที่สุด ก็ควรเลือกใช้สภาวะการเดินระบบที่ค่าพีเอชต่ำ อุณหภูมิสูง หรืออาจกล่าวได้ว่าสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ คือการไฮโดรไลซิสกากมันด้วยสารละลายค่าพีเอช 9 เป็นเวลา 90 นาที และอุณหภูมิเท่ากับ 100 องศาเซลเซียส ซึ่งให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ 16.5 มิลลิกรัมกอโคสต่อกรัมกากแห้ง

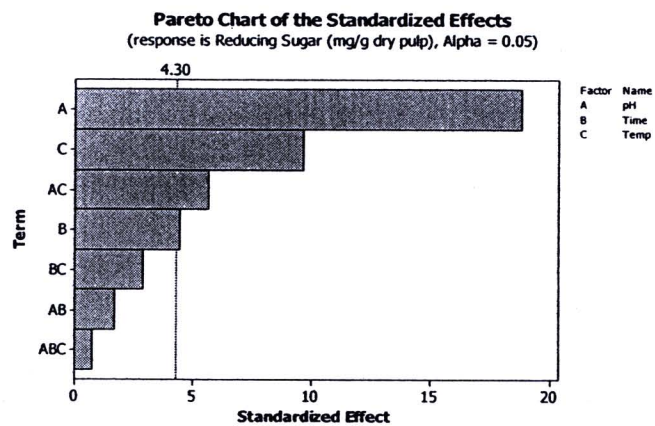
ตารางที่ 4.2 ผลการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วยสารต่าง

พีเอช	อุณหภูมิ °ซ	เวลา นาที	พีเอช		น้ำตาลรีดิวซ์ (มก.กอโคส/ก.กากแห้ง)	กรดไขมันระเหย (มก.อะซิติก/ก.กากแห้ง)
			ก่อน	หลัง		
B*	-	-	4.45	4.45	4.04	2.96
11	80	60	11.23	10.95	10.5	18.4
9	60	90	9.07	6.65	13.4	7.3
13	100	90	12.85	12.42	12.1	57.6
13	60	30	12.89	12.80	11.0	22.0
9	100	30	9.03	7.33	14.9	7.3
11	80	60	11.21	10.93	10.5	19.6
11	80	60	11.24	10.95	10.1	19.6
9	60	30	9.01	6.64	13.0	4.9
9	100	90	9.02	6.57	16.5	9.8
13	60	90	12.85	12.75	11.1	46.5
13	100	30	12.85	12.43	11.3	31.8

* คือ กากมันสำปะหลังที่ไม่ผ่านกระบวนการใดๆ



ก) Cube plot



ข) Pareto plot

รูปที่ 4.4 กราฟแสดงผลของปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดน้ำตาลรีดิวซ์ในกรณีของการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วยสารต่าง

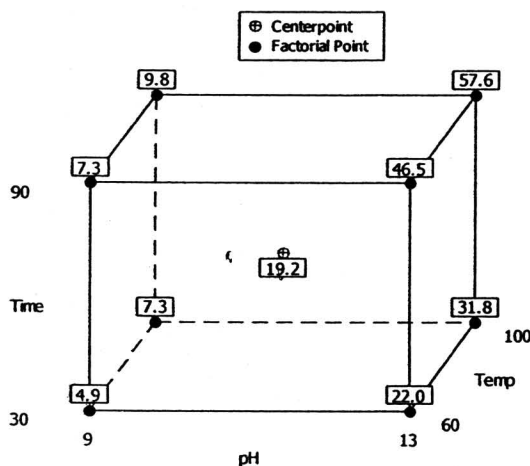
สำหรับกรดไขมันระเหย จากการวิเคราะห์ข้อมูลในตาราง พบว่า ทุกปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตกรดไขมันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % โดยพีเอชเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการผลิตกรดไขมันระเหยมากที่สุด ดังความสัมพันธ์ที่แสดงในสมการที่ 4.3 และรูปที่ 4.5 เห็นได้ว่าค่าสัมประสิทธิ์ของพีเอช มีค่ามากกว่าปัจจัยอื่น และปัจจัยที่มีผลรองลงมาก็คือ ระยะเวลาปฏิกิริยา สำหรับปัจจัยที่มีผลร่วมกันอย่างมีนัยสำคัญคือ พีเอชกับอุณหภูมิ และพีเอชกับเวลา ซึ่งสัมประสิทธิ์ของผลร่วมระหว่างพีเอชกับอุณหภูมิมีค่ามากกว่า แสดงว่ามีผลมากกว่าพีเอชกับอุณหภูมิ

$$Y = 9.51 - 1.04A - 0.32B - 0.72C + 0.043AB + 0.085AC \quad (4.4)$$

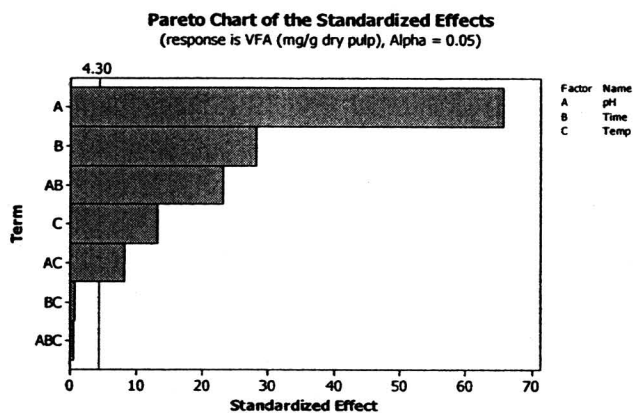
เมื่อ Y = ผลผลิตกรดไขมันระเหย , มก. อะซิติก/ก. กากแห้ง
 A = ค่าของพีเอช (9-13)
 B = ค่าของอุณหภูมิ (60-100 องศาเซลเซียส)
 C = ค่าของเวลา (30-90 นาที)

อนึ่ง การไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังจากแหล่งอื่นๆ อาจจะได้ความสัมพันธ์แตกต่างจากสมการที่ 4.1-4.4 ทั้งนี้เนื่องจาก ปริมาณแป้งในกากอาจจะแตกต่างไปจากตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา

หากพิจารณาจากปริมาณกรดไขมันระเหยที่ผลิตได้ จะเห็นว่าสภาวะการเดินระบบที่ดีที่สุด คือ การไฮโดรไลซิสด้วยสารด่าง ที่พีเอช 13 อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ด้วยระยะเวลาทำปฏิกิริยา 90 นาที ซึ่งให้ปริมาณกรดไขมันระเหย 57.6 มิลลิกรัมอะซิติกต่อกรัมกากแห้ง



ก) Cube plot



ข) Pareto plot

รูปที่ 4.5 กราฟแสดงผลของปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดกรดไขมันระเหยในกรณีของการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วยสารด่าง

ถึงแม้ว่า พีเอช จะเป็นปัจจัยหลักที่มีผลอย่างมากต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วยสารด่างในแง่ของการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์และกรดไขมันระเหย แต่ข้อมูลในสมการที่ 4.3 และ 4.4 แสดงให้เห็นว่า พีเอชมีผลต่อการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์กับกรดไขมันระเหยในทิศทางตรงกันข้าม กล่าวคือที่อุณหภูมิและระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาเดียวกัน การเพิ่มพีเอชของสารละลายกากมันสำปะหลัง ทำให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ได้ลดลง ในขณะที่ปริมาณกรดไขมันระเหยเพิ่มขึ้น

เมื่อทำการเปรียบเทียบข้อมูลการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังทั้งด้วยสารกรดและสารด่างสามารถสรุปได้ว่า สภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมัน น่าจะเป็นการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วยสารกรด ที่พีเอชเท่ากับ 0 อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที เนื่องจากเป็นสภาวะที่ให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และกรดไขมันระเหยสูงสุด อย่างไรก็ตาม ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงสุดของการไฮโดรไลซิสด้วยด่างมีค่าต่ำกว่าค่าสูงสุดของการไฮโดรไลซิสด้วยกรดมาก ในขณะที่ปริมาณกรดไขมันระเหยสูงสุดของทั้ง 2 กรณีมีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งจากตารางที่ 4.2 เห็นได้ว่า ค่าพีเอชภายหลังการไฮโดรไลซิสมีค่าลดลงในทุกการทดลอง จึงอาจเป็นไปได้ว่าการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังด้วยด่างอาจให้ผลิตภัณฑ์ที่

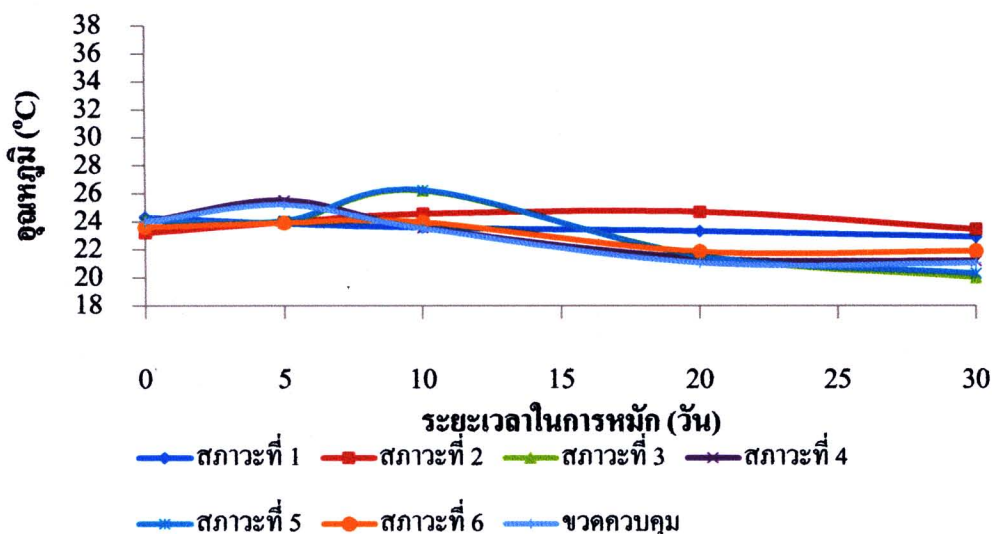
เป็นกรดอินทรีย์ชนิดอื่น ที่ไม่ใช่กรดไขมันระเหย และผลิตภัณฑ์ที่เป็นน้ำตาลก็อาจเป็นน้ำตาลชนิดอื่นที่ไม่ใช่น้ำตาลรีดิคซ์ (Knill, C.J et al.,2003) ซึ่งได้แสดงรายละเอียดไว้ในหัวข้อที่ 2.7.2 ของบทที่ 2

4.2 ผลของปริมาณน้ำตาลรีดิคซ์และกรดไขมันระเหยที่มีต่อประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ

สำหรับผลการตรวจวัดปริมาณน้ำตาลรีดิคซ์และกรดไขมันระเหยที่เกิดขึ้น ภายหลังจากไฮโดรไลซิสกากมันด้วยสารกรดหรือสารด่าง ก่อนนำไปหมักแบบไร้ออกซิเจน ของการทดลองส่วนที่ 2 นี้ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 3.6 เช่นเดียวกัน ซึ่งจะเห็นได้ว่าปริมาณน้ำตาลรีดิคซ์และปริมาณกรดไขมันระเหยจากการทดลองทั้งของส่วนที่ 1 และส่วนที่ 2 มีค่าใกล้เคียงกัน และในการทดลองนี้ได้ทำการทดลองสภาวะละ 2 ซ้ำ โดยเมื่อนำผลการทดลองทั้ง 2 ซ้ำวิเคราะห์ทางสถิติ(One-way Anova) แล้วพบว่าไม่มีค่าไม่แตกต่างกัน ซึ่งรายละเอียดผลการทดลองทั้ง 2 ซ้ำ แสดงไว้ในภาคผนวก ค สำหรับการวิเคราะห์ผลการทดลองการหมักกากมันสำปะหลังเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพจึงใช้เป็นค่าเฉลี่ย ซึ่งอธิบายดังต่อไปนี้

4.2.1 อุณหภูมิ

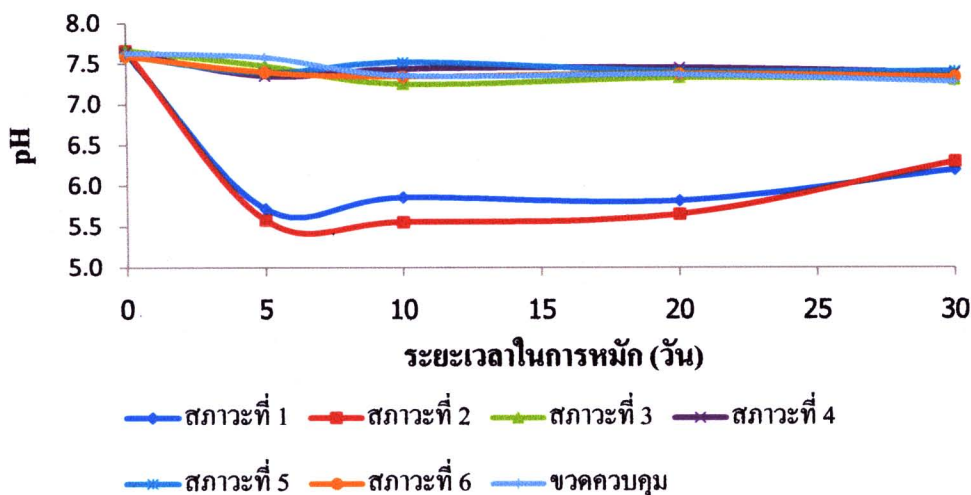
อุณหภูมิของตัวอย่างที่ผ่านการหมักจากระบบ มีค่าอยู่ในช่วง 20-26.25 องศาเซลเซียส ตลอดระยะเวลาทำการทดลอง (รูปที่ 4.6) โดยอุณหภูมิตัวอย่างที่ผ่านการหมักจะมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิห้อง ซึ่งที่อุณหภูมิดังกล่าว การทำงานของระบบจะอยู่ในช่วง Mesophilic (อุณหภูมิประมาณ 20-45 องศาเซลเซียส) โดยจุลินทรีย์ที่ทำงานภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนสามารถทำงานได้ดีในช่วงอุณหภูมิดังกล่าว



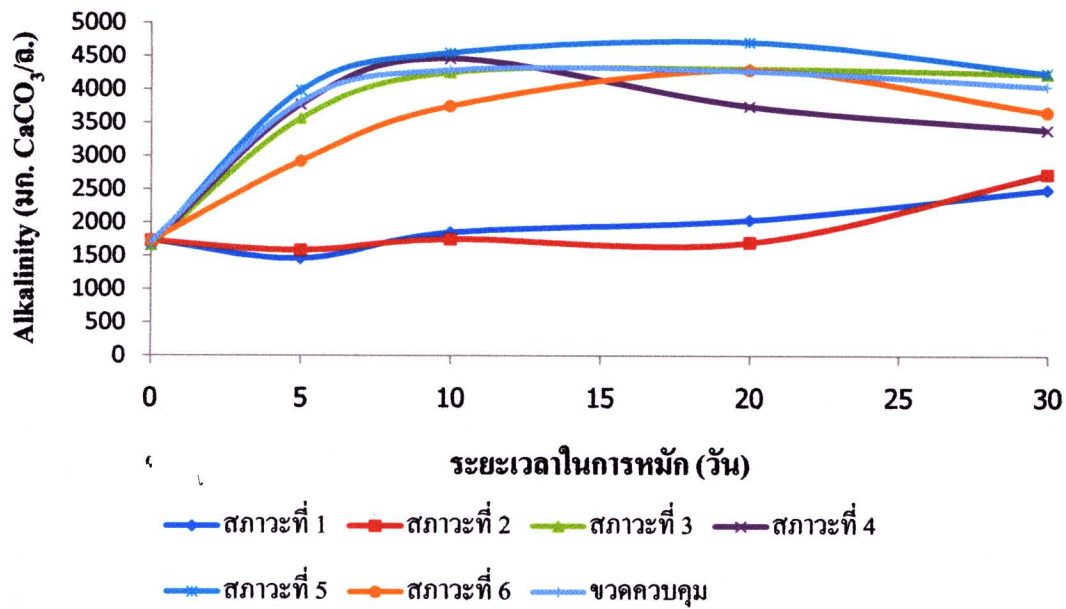
รูปที่ 4.6 อุณหภูมิตัวอย่างที่ผ่านการหมักตลอดช่วงเวลาในการทดลอง

4.2.2 พีเอช, อัลคาไลน์ตี และกรดไขมันระเหย

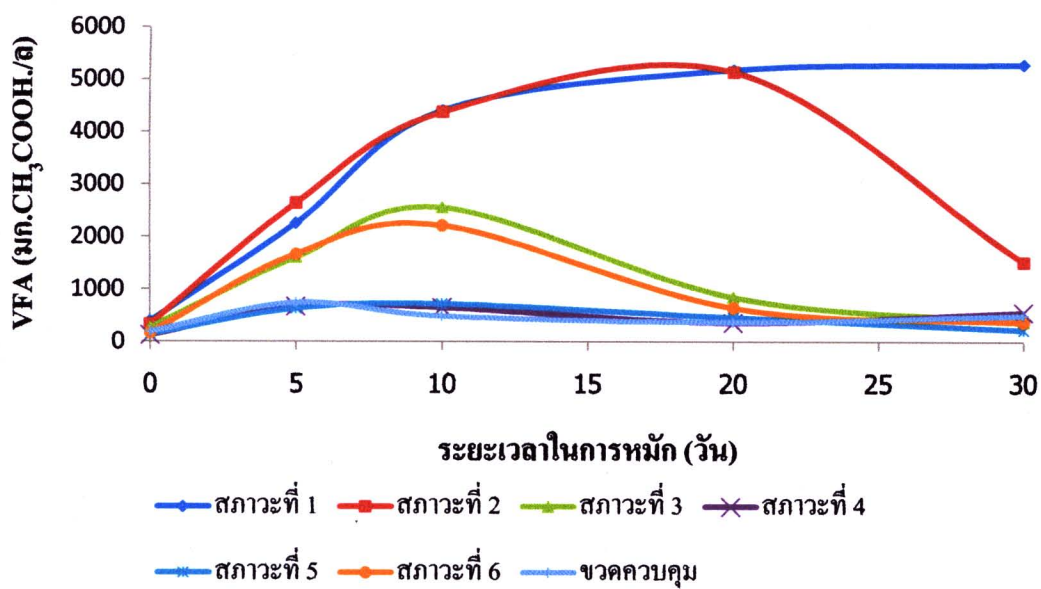
พีเอชของส่วนผสมกากมันสำปะหลังกับเชื้อตะกอนเริ่มต้นของแต่ละสภาวะมีค่าอยู่ในช่วง 7.60-7.67 ส่วนค่าพีเอชของตัวอย่างที่ผ่านการหมักในทุกสภาวะ มีค่าอยู่ในช่วง 7.30-7.67 ยกเว้น สภาวะที่ 1 และ 2 ที่มีค่าประมาณ 5 แสดงได้ดังรูปที่ 4.7 เมื่อพิจารณาค่าอัลคาไลน์ตี พบว่า ค่าอัลคาไลน์ตีทุกสภาวะ ยกเว้น สภาวะที่ 1 และ 2 มีค่ามากกว่าเริ่มต้นค่อนข้างมาก ซึ่งอยู่ในช่วง 1,662-4,750 มก. $\text{CaCO}_3/\text{ล}$. สาเหตุที่อัลคาไลน์ตีมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องมาจากปฏิกิริยาการเปลี่ยนกรดไขมันระเหยเป็นก๊าซมีเทน ดังแสดงในสมการที่ 4.5 และ 4.6 อัลคาไลน์ตีที่สร้างขึ้นจากปฏิกิริยาดังกล่าว จะทำหน้าที่ในการต้านทานการลดลงของค่าพีเอช เมื่อระบบมีการสร้างกรดไขมันระเหยเพิ่มขึ้นในระหว่างการหมัก จึงทำให้ค่าพีเอชของระบบมีสภาพเป็นกลางตลอดระยะเวลาการหมัก จุลินทรีย์สร้างมีเทนก็จะทำงานได้ดี เป็นผลให้อัตราการสร้างก๊าซค่อนข้างสูง ดังรายละเอียดในหัวข้อ 4.2.4 ในส่วนของสภาวะที่ 1 และ 2 ค่าอัลคาไลน์ตีในช่วง 20 วันแรกจะไม่เพิ่มหรือเพิ่มขึ้นเล็กน้อยและจะเพิ่มมากขึ้นในวันที่ 30 ของการหมัก แสดงในรูปที่ 4.8 ในขณะที่พีเอชก็ลดลงต่ำมาก สาเหตุที่เป็นเช่นนี้น่าจะเกิดจากการใช้สารกรดเข้มข้นในการไฮโดรไลซิสจึงทำให้กรดอินทรีย์ที่สร้างขึ้นอยู่ในรูปของกรดมากกว่าเกลือ จากสมการที่ 4.5 การเปลี่ยนกรดไขมันระเหยที่อยู่ในรูปของกรดเป็นก๊าซมีเทน จะทำให้ได้กรดคาร์บอนิกแทนเกลือโซเดียมไบคาร์บอเนต เป็นเหตุให้ไม่มีการสร้างอัลคาไลน์ตีขึ้นมาระหว่างการหมัก ความสามารถการต้านทานการเปลี่ยนแปลงของค่าพีเอชจึงต่ำ ในขณะที่ระบบมีการสร้างกรดไขมันระเหยขึ้นเรื่อยๆตลอดระยะเวลาการหมัก ค่าพีเอชของระบบจึงลดต่ำจนอยู่ในสภาวะที่จุลินทรีย์สร้างมีเทนไม่สามารถทำงานได้ต่อไปจนในที่สุดไม่เกิดก๊าซมีเทน ลักษณะเช่นนี้เรียกว่า Sour หรือ Stuck (มันสิน คณกุลเวศม์ , 2542) ก่อให้เกิดการสะสมของกรดไขมันระเหย ซึ่งแสดงได้ดังรูปที่ 4.9



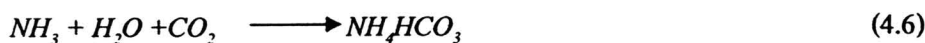
รูปที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงค่าพีเอชของตัวอย่างตลอดระยะเวลาในการหมัก



รูปที่ 4.8 ปริมาณอัลคาไลน์ที่ลดลงระยะเวลาในการหมัก



รูปที่ 4.9 ปริมาณกรดไขมันระเหยตลอดระยะเวลาในการหมัก



หากพิจารณาสัดส่วนระหว่างปริมาณกรดไขมันระเหยและอัลคาโลไนต์ที่มีอยู่ เพื่อตรวจสอบความเหมาะสมของสภาวะการทำงานของจุลินทรีย์ในระบบด้วย พบว่า ในสภาวะที่ 1 และ 2 มีค่าสูงถึง 3 ในขณะที่ในทางปฏิบัติระบบจะทำงานได้ดี เมื่อค่าสัดส่วนกรดไขมันระเหยและอัลคาโลไนต์มีค่าน้อยกว่า 0.4 (สันทนต์ สิริอนันต์ไพบูลย์, 2549) เป็นเหตุให้อัตราการสร้างก๊าซต่ำมาก แสดงในรายละเอียดหัวข้อ 4.2.4 ส่วนสภาวะอื่นๆ มีค่าสัดส่วนของกรดไขมันระเหยและอัลคาโลไนต์ต่ำกว่า 0.4 แสดงว่า ระบบมีบัพเฟอร์สูง

4.2.3 ประสิทธิภาพในการลดสารอินทรีย์

สารอินทรีย์ในระบบที่ทำการตรวจวัด ได้แก่ ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหย และสารอินทรีย์ในรูปซีไอดี ผลการทดลองสารอินทรีย์ที่เหลืออยู่ แสดงไว้ในตารางที่ 4.3 และประสิทธิภาพในการลดสารอินทรีย์ แสดงได้ในตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่า สภาวะการหมักที่ 5 มีประสิทธิภาพในการลดสารอินทรีย์ในรูปของของแข็งได้มากที่สุด สังเกตได้จากรูปที่ 4.10 และ รูปที่ 4.11 และในสภาวะอื่นๆจะมีประสิทธิภาพในการลดปริมาณสารอินทรีย์ในรูปของของแข็งส่วนใหญ่ มีค่าต่ำกว่าร้อยละ 50 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากลักษณะสมบัติของตัวอย่างที่มีค่าการย่อยสลายได้ต่ำ อาจทำให้ต้องใช้เวลาในการย่อยสลายหรือการหมักที่นานขึ้นเพื่อสลายสารอินทรีย์ในของเสีย

ในส่วนของสารอินทรีย์ในรูปซีไอดีนั้น พบว่า โดยส่วนใหญ่ประสิทธิภาพการลดซีไอดีของทุกสภาวะ (ยกเว้นสภาวะที่ 1) มีค่าสูงกว่าสภาวะควบคุม โดยพบว่า สภาวะที่ 6 มีค่าสูงที่สุดในเกือบทุกระยะเวลาการหมัก สังเกตได้จากรูปที่ 4.12

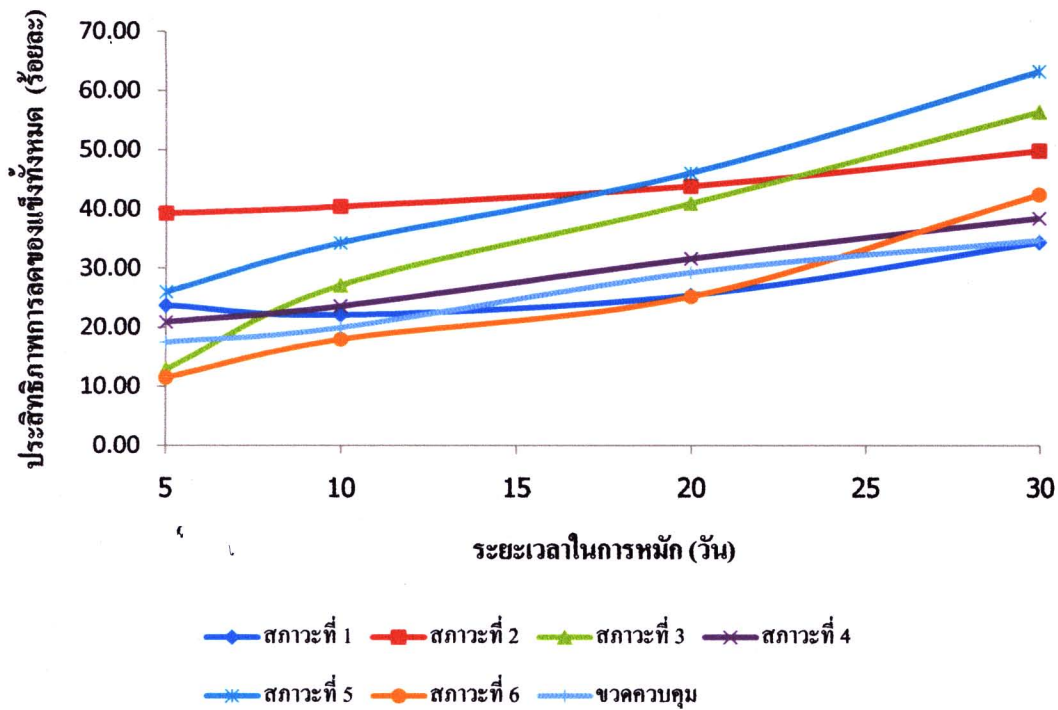
เมื่อพิจารณาในส่วนของประสิทธิภาพในการลดสารอินทรีย์ในช่วงเวลาการหมักที่ 5 วันจะเห็นได้ว่าที่ สภาวะที่ 2 มีค่าประสิทธิภาพการลดของแข็งและซีไอดีค่อนข้างสูงกว่าสภาวะอื่น หากสามารถควบคุมพีเอช ในระหว่างการหมักให้เป็นกลางโดยการเติมสารด่างลงภายในถังหมัก ก็น่าจะทำให้ประสิทธิภาพการลดสารอินทรีย์มีค่าสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง

ตารางที่ 4.3 ปริมาณของแข็งทั้งหมด ของแฉะระเหย และปริมาณซีโอดีที่เหลืออยู่ในสารละลาย ภายหลังการหมักที่เวลาต่าง ๆ กัน

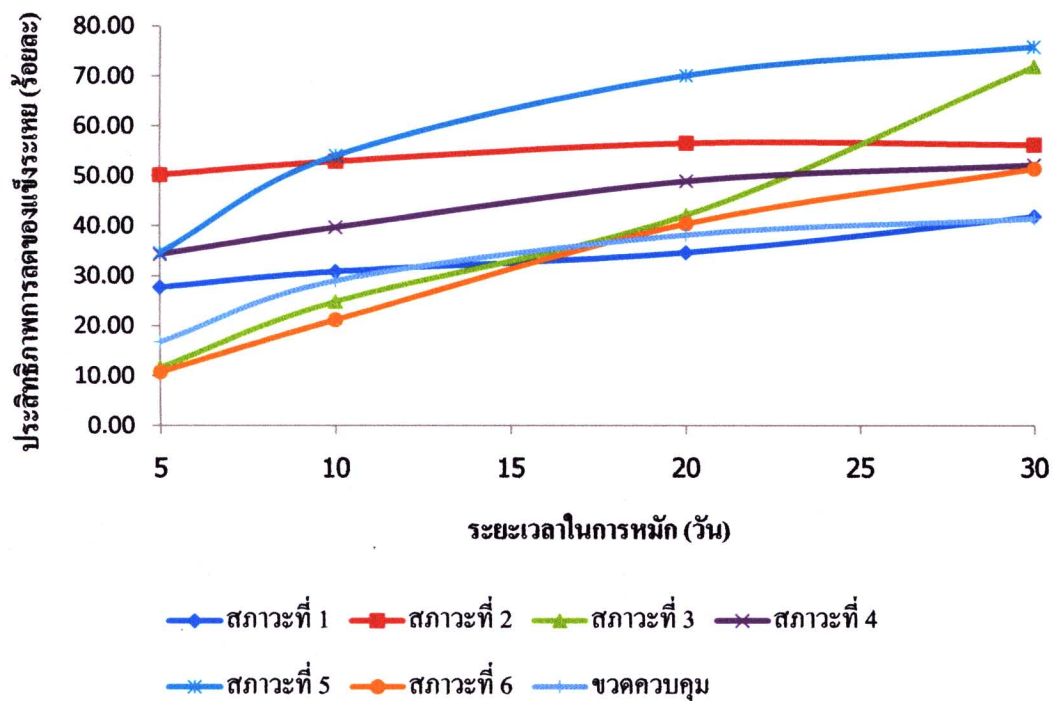
สภาวะที่	ของแข็งทั้งหมด (มก./ล.)						ของแฉะระเหย (มก./ล.)						ซีโอดี (มก./ล.)					
	0	5	10	20	30	0	5	10	20	30	0	5	10	20	30	0	5	10
1	35,090	26,770	27,349	26,180	23,051	26,227	18,954	18,142	17,139	15,241	38,880	29,200	28,080	26,100	25,110			
2	34,309	20,846	20,463	19,262	17,228	25,802	12,848	12,155	11,213	11,304	39,575	27,735	26,400	23,765	21,410			
3	30,099	26,222	21,949	17,781	13,145	21,956	19,393	16,508	12,712	6,168	38,560	28,800	23,125	15,900	13,900			
4	31,106	24,594	23,779	21,287	19,143	24,559	16,127	14,812	12,553	11,750	39,040	26,560	23,500	23,530	19,400			
5	33,727	24,958	22,179	18,186	12,442	24,866	16,250	11,430	7,428	6,002	38,880	30,240	27,040	22,700	16,600			
6	34,883	30,880	28,635	26,094	20,082	25,218	22,509	19,879	15,038	12,248	41,120	26,880	23,250	18,000	12,845			
ควบคุม	29,604	24,437	23,703	20,954	19,325	21,372	17,782	15,175	13,221	12,521	39,520	29,600	24,700	24,865	22,700			

ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพการลดปริมาณของแข็งทั้งหมด ของแฉะระเหย และปริมาณซีโอดี ภายหลังการหมักที่เวลาต่าง ๆ กัน

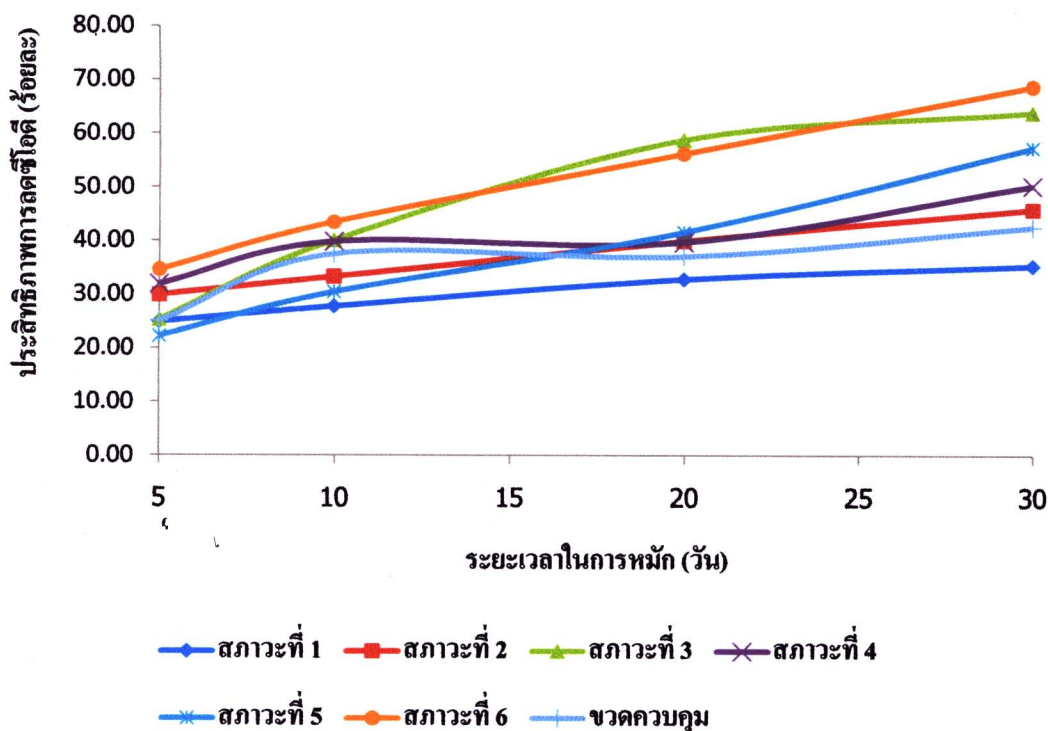
สภาวะที่	ของแข็งทั้งหมด (ร้อยละ)						ของแฉะระเหย (ร้อยละ)						ซีโอดี (ร้อยละ)					
	0	5	10	20	30	0	5	10	20	30	0	5	10	20	30	0	5	10
1	-	23.71	22.06	25.39	34.31	-	27.73	30.83	34.65	41.90	-	24.90	27.78	32.87	35.40			
2	-	39.23	40.36	43.86	49.79	-	50.21	52.89	56.54	56.20	-	29.92	33.29	39.95	45.90			
3	-	12.88	27.08	40.93	56.33	-	11.67	24.81	42.10	71.90	-	25.31	40.03	58.77	64.00			
4	-	20.93	23.55	31.57	38.46	-	34.33	39.69	48.89	52.20	-	31.97	39.81	39.73	50.30			
5	-	26.00	34.24	46.08	63.11	-	34.65	54.03	70.13	75.90	-	22.22	30.45	41.62	57.30			
6	-	11.48	17.91	25.20	42.43	-	10.74	21.17	40.37	51.40	-	34.63	43.46	56.23	68.80			
ควบคุม	-	17.45	19.93	29.22	34.72	-	16.80	29.00	38.14	41.40	-	25.10	37.50	37.08	42.60			



รูปที่ 4.10 ประสิทธิภาพการลดของแข็งทั้งหมดของแต่ละสภาวะการหมัก



รูปที่ 4.11 ประสิทธิภาพการลดของแข็งระเหยของแต่ละสภาวะการหมัก



รูปที่ 4.12 ประสิทธิภาพการลดซีไอดีของแต่ละสภาวะการหมัก

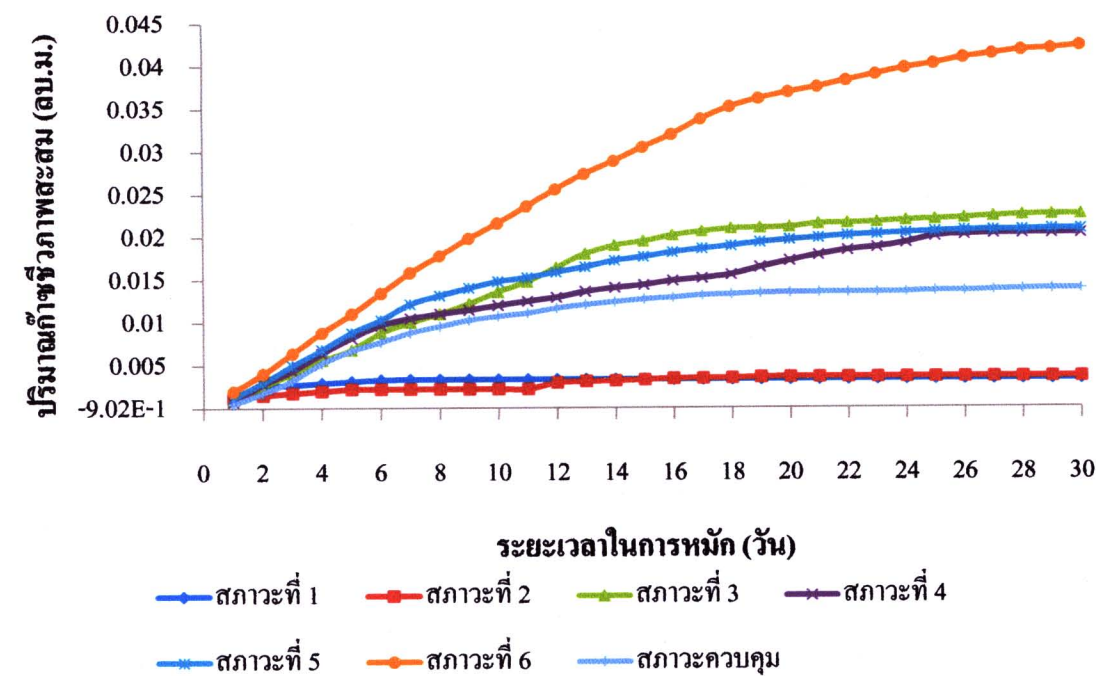
4.2.4 ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและองค์ประกอบก๊าซชีวภาพ

อัตราเร็วและประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ แสดงไว้ในตารางที่ 4.5 และรูปที่ 4.13 ซึ่งพบว่าอัตราเร็วและประสิทธิภาพของการผลิตก๊าซชีวภาพสำหรับสภาวะที่มีการย่อยสลายกากมันด้วยสารกรดหรือสารด่างสูงกว่าของสภาวะควบคุม (ยกเว้นสภาวะที่ 1 และ 2) โดยเฉพาะสภาวะที่ 6 ซึ่งเป็นสภาวะที่ให้ประสิทธิภาพสูงสุดทั้งในแง่ของอัตราเร็วและความสามารถในการสร้างก๊าซอย่างโดดเด่น ในขณะที่สภาวะที่ 3, 4 และ 5 ให้อัตราเร็วและประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซใกล้เคียงกัน และสูงกว่าของสภาวะควบคุมไม่มากนัก

ในส่วนของสภาวะที่ 1 และ 2 นั้น พบว่ามีการสร้างก๊าซเฉพาะในช่วงสัปดาห์แรกของการหมัก แต่หลังจากนั้นอัตราการผลิตก๊าซได้ลดลงอย่างมากและไม่เกิดก๊าซชีวภาพจนทำให้ปริมาณก๊าซสะสมที่ได้ต่ำและต่ำกว่าของสภาวะควบคุมในช่วงท้ายของการหมัก ทั้งนี้อาจเป็นเพราะว่าค่าพีเอชภายในถังหมักมีค่าลดลง ซึ่งจากการตรวจวัด พบว่าพีเอชมีค่าเท่ากับ 5 ตั้งแต่วันที่ 5 ของการหมักเป็นต้นไป ค่าพีเอชดังกล่าวเป็นสภาพที่ไม่เหมาะสมสำหรับการทำงานของจุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่สร้างก๊าซมีเทน จึงส่งผลให้ไม่มีก๊าซชีวภาพเกิดขึ้น

ตารางที่ 4.5 ปริมาณก๊าซสะสมที่เกิดขึ้นระหว่างการหมักกากมันที่ระยะเวลาต่างๆ

สถานะที่	ปริมาณก๊าซสะสม, ลบ.ม./กก.กากแห้ง				
	5 วัน	10 วัน	15 วัน	20 วัน	30 วัน
1	0.088	0.095	0.095	0.095	0.095
2	0.063	0.063	0.094	0.103	0.103
3	0.194	0.386	0.555	0.603	0.644
4	0.234	0.341	0.410	0.489	0.580
5	0.251	0.422	0.504	0.560	0.594
6	0.313	0.615	0.869	1.052	1.205
ควบคุม	0.191	0.305	0.362	0.383	0.395



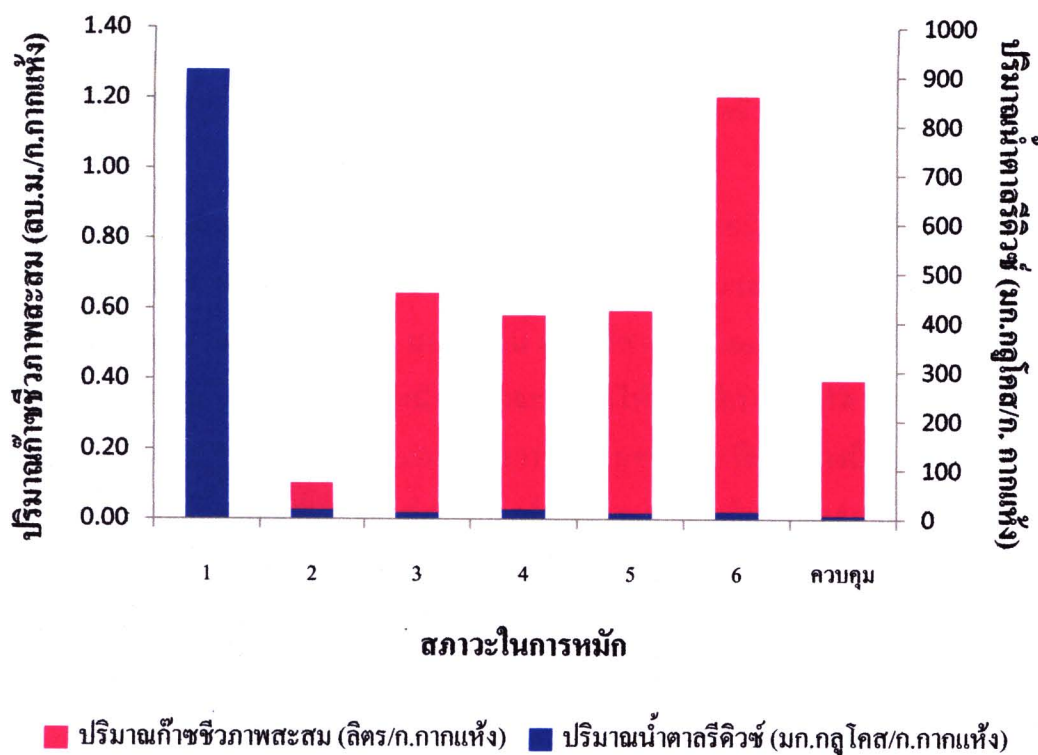
รูปที่ 4.13 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมตลอดระยะเวลาในการหมัก

จากข้อมูลที่กล่าวมาแล้ว จะเห็นว่าการไฮโดรไลซิสกากมันด้วยสารด่างที่พีเอช 13 ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที และ อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นสถานะที่ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเฉลี่ยสูงสุดในทุกช่วงเวลาของการหมัก โดยให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมภายหลังการ

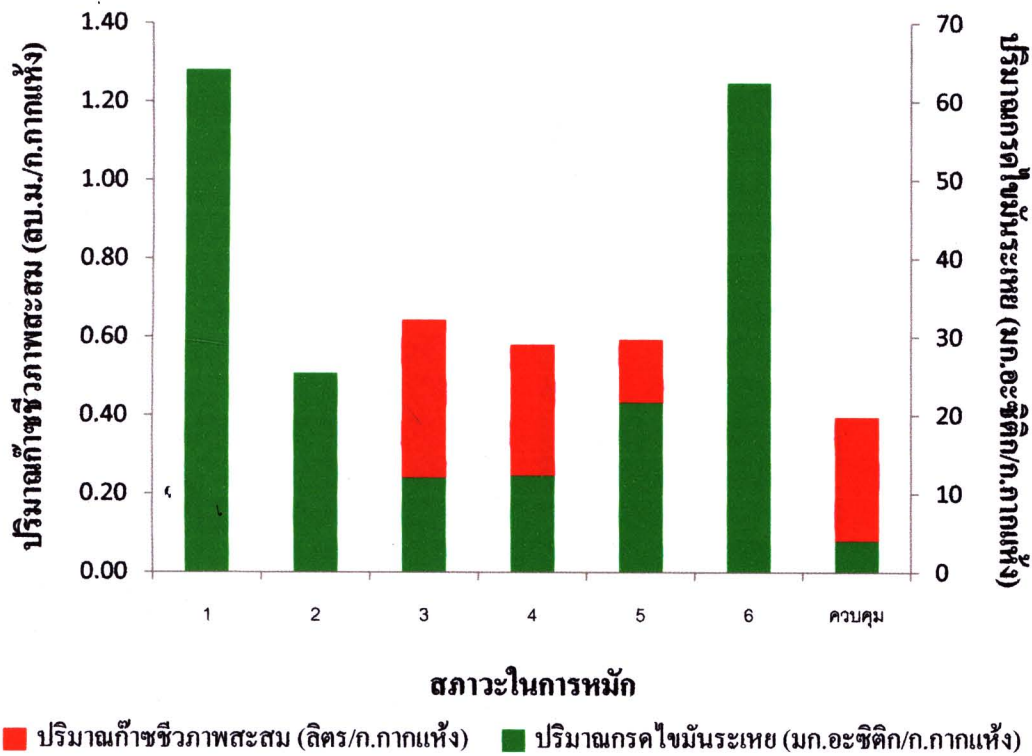
หมัก 30 วันเท่ากับ 1.2 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมกากแห้ง (1.31 นอร์มัลลูกบาศก์เมตร (Nm³) / กิโลกรัมกากแห้ง) หรือ 0.19 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมกากเปียก (0.21 นอร์มัลลูกบาศก์เมตร / กิโลกรัมกากเปียก) ซึ่งสูงกว่าที่สถานะควบคุม 3 เท่า สำหรับการคำนวณแสดงไว้ใน ภาคผนวก

สำหรับกรณีของสถานะควบคุมซึ่งให้ปริมาณก๊าซภายหลังการหมัก 30 วันเท่ากับ 0.395 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมกากแห้ง (0.43 นอร์มัลลูกบาศก์เมตร / กิโลกรัมกากแห้ง) หรือเท่ากับ 0.063 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมกากเปียก (0.07 นอร์มัลลูกบาศก์เมตร / กิโลกรัมกากเปียก) นั้นพบว่าปริมาณก๊าซที่ได้มีค่าสูงกว่าของผลการศึกษาของพิชยา สวยศมและคณะ (2550) ซึ่งได้ทำการศึกษาศรรณะการผลิดก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังและพบว่าปริมาณก๊าซสะสมภายหลังการหมัก 30 วันในช่วง 0.034-0.047 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมกากเปียก

อย่างไรก็ตาม เมื่อทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองในส่วนที่ 1 ที่แสดงให้เห็นว่าสถานะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตน้ำคาลรีคิวิซ์และกรดไขมันระเหย ได้แก่ สถานะที่ 1 ซึ่งเป็นการไฮโดรไลซิติกากมันด้วยสารกรดที่ค่าพีเอช 0 ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 90 นาที และอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส แสดงได้ดังรูปที่ 4.14 และรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบปริมาณน้ำคาลรีคิวิซ์ และก๊าซชีวภาพแต่ละสถานะ

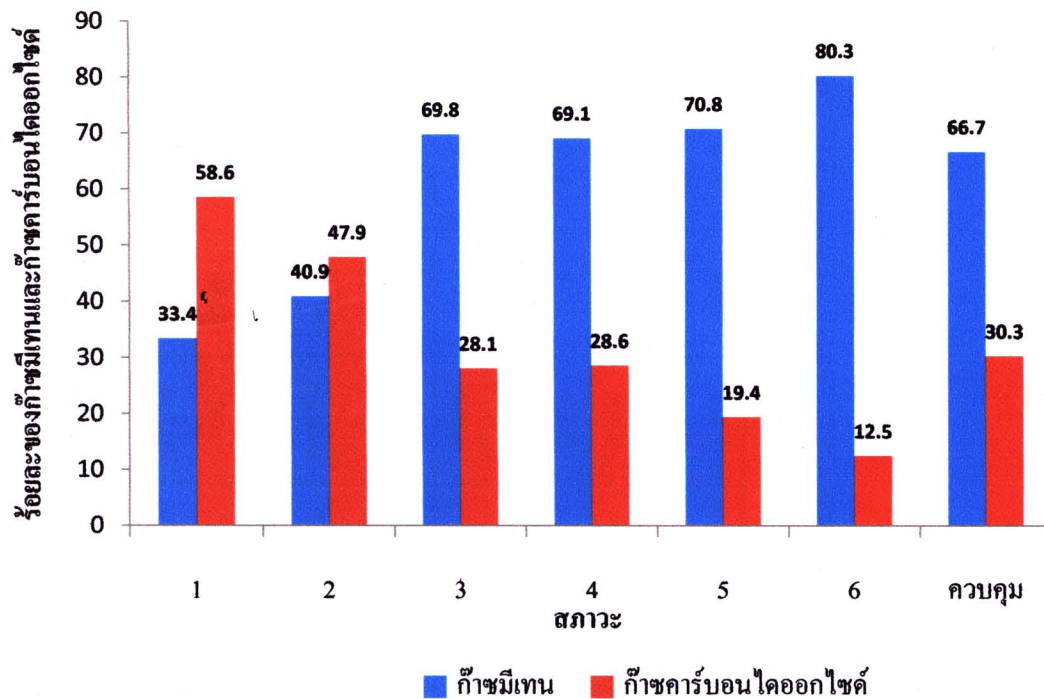


รูปที่ 4.15 การเปรียบเทียบปริมาณกรดไขมันระเหย และก๊าซชีวภาพแต่ละสถานะ

ถึงแม้ว่า ในสถานะที่ 1 จะให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และกรดไขมันระเหยสูงที่สุด แต่กลับเกิดก๊าซต่ำที่สุด ซึ่งมีสาเหตุมาจากการลดลงของค่าพีเอชจนอยู่ในระดับที่ไม่เหมาะสมกับการเจริญเติบโตของแบคทีเรียสร้างมีเทน นอกจากนี้ การใช้สารละลายกรดซัลฟูริกซึ่งมีซัลเฟตเป็นองค์ประกอบในการไฮโดรไลซิสกากมัน ก็น่าจะส่งผลให้แบคทีเรียกลุ่มรีดิวซ์ซัลเฟต (sulfate reducing bacteria) เจริญเติบโตได้ดีกว่าและยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียสร้างมีเทนอีกด้วย ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และกรดไขมันระเหยอาจไม่ใช่ปัจจัยหลักปัจจัยเดียวที่ควบคุมประสิทธิภาพของการผลิตก๊าซชีวภาพ

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นในแต่ละ สถานะการหมักภายหลังจากการหมักเป็นเวลา 30 วัน (รูปที่ 4.16) พบว่าสถานะที่ 6 ให้ก๊าซที่มีมีเทนอยู่ร้อยละ 80.3 และมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 12.5 ในขณะที่สถานะที่ 1 และ 2 ให้ก๊าซที่มีมีเทนอยู่ร้อยละ 33.4 และ 40.9 ตามลำดับ และมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับร้อยละ 58.6 และ 47.9 ซึ่งจะเห็นว่าสัดส่วนของก๊าซมีเทนมีค่าต่ำแต่กลับมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มาก ทั้งนี้คาดว่าน่าจะมีสาเหตุมาจากการเกิดสภาพกรด ทำให้จุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่สร้างก๊าซมีเทนไม่สามารถทำงานได้ดังได้

กล่าวมาแล้วข้างต้น ส่วนก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจนพบว่ามีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 1.6-6.5 และ 0.41-2.53 ตามลำดับ ซึ่งมีค่าค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับระบบไร้ออกออกซิเจนโดยทั่วไป สาเหตุเนื่องมาจากขั้นตอนการเก็บตัวอย่างก๊าซไปตรวจวัดอาจมีการปนเปื้อนของอากาศในถุงเก็บก๊าซ



รูปที่ 4.16 ร้อยละของก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ สภาวะพิเศษต่างๆในการหมัก

4.3 การประเมินค่าใช้จ่ายในการทำไฮโดรไลซิสกากมัน

การประเมินค่าใช้จ่ายในส่วนของการเตรียมที่ใช้สำหรับการไฮโดรไลซิสกากมันสำหรับหลัก และความเหมาะสมในการนำไปใช้ในการเดินระบบจริง แสดงไว้ในตารางที่ 4.6 และ ตารางที่ 4.7

ตารางที่ 4.6 ค่าใช้จ่ายในส่วนของการเตรียมที่ใช้ในการทำไฮโดรไลซิสและความคุ้มค่าในการลงทุนเมื่อใช้ทดแทนก๊าซหุงต้ม (LPG)

สถานะ	ค่าใช้จ่ายการไฮโดรไลซิส (บาท/กก.กากแห้ง)	ระยะเวลาหมัก 5 วัน			ระยะเวลาหมัก 10 วัน			ระยะเวลาหมัก 20 วัน			ระยะเวลาหมัก 30 วัน		
		ปริมาณก๊าซ (ลบ.ม./กก.กากแห้ง)	ทดแทนก๊าซหุงต้ม (กก.LPG/กก.กากแห้ง)	เงินที่เพิ่มจากสถานะควบคุม (บาท./กก.กากแห้ง)	ปริมาณก๊าซ (ลบ.ม./กก.กากแห้ง)	ทดแทนก๊าซหุงต้ม (กก.LPG/กก.กากแห้ง)	เงินที่เพิ่มจากสถานะควบคุม (บาท./กก.กากแห้ง)	ปริมาณก๊าซ (ลบ.ม./กก.กากแห้ง)	ทดแทนก๊าซหุงต้ม (กก.LPG/กก.กากแห้ง)	เงินที่เพิ่มจากสถานะควบคุม (บาท./กก.กากแห้ง)	ปริมาณก๊าซ (ลบ.ม./กก.กากแห้ง)	ทดแทนก๊าซหุงต้ม (กก.LPG/กก.กากแห้ง)	เงินที่เพิ่มจากสถานะควบคุม (บาท./กก.กากแห้ง)
1	210	0.088	0.04	-0.9	0.094	0.04	-1.8	0.094	0.04	-2.5	0.095	0.04	-2.6
2	30	0.063	0.03	-1.2	0.063	0.03	-2.1	0.103	0.05	-2.4	0.103	0.05	-2.5
3	0.3	0.194	0.09	0	0.387	0.18	+0.8	0.604	0.28	+1.9	0.644	0.30	+2.2
4	0.2	0.234	0.11	+0.3	0.342	0.16	+0.4	0.490	0.23	+1.0	0.580	0.27	+1.6
5	1.3	0.251	0.12	+0.5	0.422	0.19	+1.1	0.561	0.26	+1.6	0.594	0.27	+1.8
6	121	0.313	0.14	+1.0	0.615	0.28	+2.7	1.054	0.48	+5.9	1.205	0.55	+7.1
ควบคุม	-	0.191	0.09	1.7	0.305	0.14	2.6	0.385	0.18	3.3	0.395	0.18	3.4

หมายเหตุ ค่าใช้จ่ายที่คิดเป็นค่าสารเคมีที่ใช้ในปรับค่าพีเอชก่อนการไฮโดรไลซิสและปรับพีเอชให้เป็นกลางภายหลังการไฮโดรไลซิส แสดงการคำนวณใน

ภาคผนวก จ

ตารางที่ 4.7 ค่าใช้จ่ายในส่วนของการดำเนินงานที่ใช้ไฮโดรไลซิสและค่าในการลงทุนเมื่อใช้ทดแทนพลังงานไฟฟ้า

สถานะ	ค่าใช้จ่ายการไฮโดรไลซิส (บาท/กก.กากแห้ง)	ระยะเวลาหมัก 5 วัน			ระยะเวลาหมัก 10 วัน			ระยะเวลาหมัก 20 วัน			ระยะเวลาหมัก 30 วัน		
		ปริมาณก๊าซ (ลบ.ม./กก.กากแห้ง)	ทดแทนพลังงานไฟฟ้า (กิโลวัตต์/ชั่วโมง)	เงินที่เพิ่มจากสถานะควบคุม (บาท/กก.กากแห้ง)	ปริมาณก๊าซ (ลบ.ม./กก.กากแห้ง)	ทดแทนพลังงานไฟฟ้า (กิโลวัตต์/ชั่วโมง)	เงินที่เพิ่มจากสถานะควบคุม (บาท/กก.กากแห้ง)	ปริมาณก๊าซ (ลบ.ม./กก.กากแห้ง)	ทดแทนพลังงานไฟฟ้า (กิโลวัตต์/ชั่วโมง)	เงินที่เพิ่มจากสถานะควบคุม (บาท/กก.กากแห้ง)	ปริมาณก๊าซ (ลบ.ม./กก.กากแห้ง)	ทดแทนพลังงานไฟฟ้า (กิโลวัตต์/ชั่วโมง)	เงินที่เพิ่มจากสถานะควบคุม (บาท/กก.กากแห้ง)
1	210	0.088	0.106	-0.33	0.094	0.113	-0.68	0.094	0.113	-0.94	0.095	0.114	-0.97
2	30	0.063	0.075	-0.42	0.063	0.075	-0.78	0.103	0.123	-0.91	0.103	0.123	-0.95
3	0.3	0.194	0.232	+0.01	0.387	0.465	+0.27	0.604	0.725	+0.71	0.644	0.772	+0.80
4	0.2	0.234	0.280	+0.14	0.342	0.410	+0.12	0.490	0.588	+0.34	0.580	0.697	+0.60
5	1.3	0.251	0.301	+0.19	0.422	0.506	+0.38	0.561	0.673	+0.57	0.594	0.713	+0.64
6	121	0.313	0.376	+0.40	0.615	0.738	+1.01	1.054	1.265	+2.17	1.205	1.446	+2.62
ควบคุม	-	0.191	0.229	0.62	0.305	0.366	0.99	0.385	0.461	1.25	0.395	0.474	1.28

หมายเหตุ ค่าใช้จ่ายที่คิดเป็นค่าสารเคมีที่ใช้ในปรับค่าฟีดเอชก่อนการไฮโดรไลซิสและปรับฟีดเอชให้เป็นกลางภายหลังการไฮโดรไลซิสแสดงการคำนวณ ใน

ภาคผนวก จ

สารเคมีที่ใช้ในการไฮโดรไลซิสด้วยกรดคือ กรดซัลฟูริก ซึ่งใช้แบบ Commercial grade ของบริษัท คูสวัสต์ เคมีเคิล จำกัด ราคา 390 บาทต่อกรด 20 ลิตร และสารเคมีที่ใช้ในการไฮโดรไลซิสด้วยด่าง คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งใช้แบบ Commercial grade ของบริษัทยูเนียนชาวด์ จำกัด ราคา 45 บาทต่อกิโลกรัม สำหรับราคาเป็นราคาในช่วงเดือน เมษายน พ.ศ 2554 ซึ่งเป็นราคาขายปลีก ในกรณีของการเดินระบบจริง ต้องมีการใช้สารเคมีในปริมาณมากขึ้น อาจเสียค่าใช้จ่ายในการซื้อสารเคมีได้ราคาสูงกว่ามากกว่าครึ่ง เนื่องจากซื้อได้ในราคาส่ง

ก๊าซชีวภาพเป็นแหล่งพลังงานที่สามารถผลิตขึ้นใช้เองได้อย่างต่อเนื่องสม่ำเสมอ ซึ่งสามารถทดแทนหรือทดแทนการใช้เชื้อเพลิงต่างๆกับอุปกรณ์ที่ต้องการความร้อนจากเชื้อเพลิงได้เป็นอย่างดี เช่น ทดแทนการใช้ก๊าซหุงต้ม(LPG) ในครัวเรือน เครื่องกกลูกสุกร เครื่องอบแห้ง หม้อต้มไอน้ำ ระบบทำความเย็นแบบดูดซึม รวมถึงการใช้ในรูปของแสงสว่างกับตะเกียง และหรือใช้กับเครื่องยนต์สำหรับสูบน้ำหรือผลิตพลังงานไฟฟ้าเพื่อใช้กับอุปกรณ์ไฟฟ้าต่างๆ (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ,2548)

ก๊าซชีวภาพ 1 ลูกบาศก์เมตร สามารถทดแทนก๊าซหุงต้ม (LPG) ได้ 0.46 กิโลกรัม (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน,2548) และราคาก๊าซหุงต้ม (LPG) กิโลกรัมละ 18.9 บาท (ราคาของ Unique Gas เชื้อราคาจาก ปตท. วันที่ 24 มีนาคม พ.ศ 2554) ดังตารางที่ 4.6 จะเห็นได้ว่า สภาวะที่ 1 มีค่าใช้จ่ายในการไฮโดรไลซิสสูงที่สุด เท่ากับ 210 บาทต่อกิโลกรัมกากแห้ง แต่กลับเกิดปริมาณก๊าซชีวภาพต่ำที่สุดและสามารถทดแทนค่าใช้จ่ายสำหรับก๊าซหุงต้มที่เพิ่มขึ้นจากสภาวะควบคุม -0.26 บาทต่อกิโลกรัมกากแห้ง ซึ่งมีค่าน้อยกว่าสภาวะควบคุม ขณะที่สภาวะควบคุมไม่มีค่าใช้จ่ายในการไฮโดรไลซิสและสามารถทดแทนก๊าซหุงต้มได้ถึง 3.4 บาทต่อกิโลกรัมกากแห้ง เช่นเดียวกับกับสภาวะที่ 2 ที่ทดแทนค่าใช้จ่ายก๊าซหุงต้มน้อยกว่าค่าใช้จ่ายในการไฮโดรไลซิส และสภาวะควบคุม ดังนั้นสภาวะที่ 1 และสภาวะที่ 2 นั้นไม่เหมาะสมในการนำไปใช้เดินระบบจริง ในขณะที่สภาวะที่ 6 มีค่าใช้จ่ายสูงรองลงมา เท่ากับ 121 บาทและเกิดปริมาณก๊าซชีวภาพสูงที่สุด เมื่อใช้ก๊าซชีวภาพในการทดแทนก๊าซหุงต้ม สามารถทดแทนค่าใช้จ่ายก๊าซหุงต้มที่เพิ่มขึ้นจากสภาวะควบคุม 7.1 บาทต่อกิโลกรัมกากแห้ง ในทางเทคนิค สภาวะที่ 6 เป็นสภาวะที่ดีที่สุด เนื่องจากให้ปริมาณก๊าซชีวภาพมากที่สุด แต่เมื่อพิจารณาในแง่ของการประเมินค่าใช้จ่ายในการทดลอง พบว่า ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้เมื่อนำมาทดแทนก๊าซหุงต้มและพลังงานไฟฟ้าได้มากกว่าสภาวะควบคุมก็จริง แต่ค่าตอบแทนที่ได้ยังน้อยกว่าค่าใช้จ่ายในการทำไฮโดรไลซิส จึงไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในการเดินระบบจริง ดังนั้น สภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบจริง คือ สภาวะที่ 3 ซึ่งสามารถทดแทนค่าใช้จ่ายสำหรับก๊าซหุงต้มที่เพิ่มขึ้นจากสภาวะควบคุมตั้งแต่ระยะเวลาการหมักที่ 10 วันขึ้นไปได้ถึง 0.8 บาทต่อกิโลกรัมกากแห้ง มีค่ามากกว่าค่าใช้จ่ายในการ

ไฮโดรไลซิส ถึง 0.5 บาท ซึ่งมีความมากกว่าสถานะอื่น จึงมีความเหมาะสมในการนำไปใช้เดินระบบจริง

สำหรับการใช้ก๊าซชีวภาพเพื่อทดแทนพลังงานไฟฟ้า ก๊าซชีวภาพ 1 ลูกบาศก์เมตร สามารถทดแทนพลังงานไฟฟ้า ได้ 1.2 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2545) ราคาไฟฟ้าคิดจากค่าเฉลี่ยหน่วยของพลังงานไฟฟ้า 2.7 บาทต่อหน่วย (หน่วยไฟฟ้าคือ กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง) (การไฟฟ้านครหลวง, 2554) ดังตารางที่ 4.7 เห็นได้ว่า สถานะที่ 1 มีค่าใช้จ่ายในการไฮโดรไลซิสสูงที่สุด สามารถทดแทนค่าใช้จ่ายสำหรับค่าไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจากสถานะควบคุม -0.97 บาทต่อกิโลกรัมกากแห้ง ซึ่งน้อยกว่าค่าใช้จ่ายในการไฮโดรไลซิส และเมื่อเทียบกับสถานะควบคุม ขณะที่สถานะควบคุมไม่มีค่าใช้จ่ายในการทดลองและสามารถทดแทนพลังงานไฟฟ้าได้ถึง 1.28 บาทต่อกิโลกรัมกากแห้ง เช่นเดียวกับสถานะที่ 2 ที่ทดแทนค่าใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้าน้อยกว่าค่าใช้จ่ายในการไฮโดรไลซิส และสถานะควบคุม ดังนั้นสถานะที่ 1 และสถานะที่ 2 นั้นไม่เหมาะสมในการนำไปใช้เดินระบบจริง ในขณะที่สถานะที่ 6 สามารถทดแทนค่าใช้จ่ายสำหรับค่าไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจากสถานะควบคุม 2.62 บาทต่อกิโลกรัมกากแห้ง ซึ่งมีความมากกว่าสถานะควบคุมและทุกสถานะ แต่ทั้งนี้ก็ยังน้อยกว่าค่าใช้จ่ายในการไฮโดรไลซิส จึงไม่เหมาะสมในการเดินระบบจริงเช่นกัน ดังนั้น สถานะที่เหมาะสมในการเดินระบบจริง คือ สถานะที่ 3 ซึ่งสามารถทดแทนค่าใช้จ่ายสำหรับค่าไฟฟ้าที่เพิ่มขึ้นจากสถานะควบคุมตั้งแต่ระยะเวลาการหมักที่ 20 วันขึ้นไป ได้ถึง 0.71 บาทต่อกิโลกรัมกากแห้ง มีค่ามากกว่าค่าใช้จ่ายในการไฮโดรไลซิสถึง 0.41 บาท ซึ่งมีความมากกว่าสถานะอื่น จึงมีความเหมาะสมในการนำไปใช้เดินระบบจริง

อย่างไรก็ตาม ค่าใช้จ่ายในการทดลองไม่ได้รวมกับค่าก่อสร้างและค่าดำเนินการ ดังนั้น ราคาค่าใช้จ่ายอาจมีเพิ่มมากขึ้น หากใช้เดินระบบจริง และเนื่องจากราคาก๊าซหุงต้มเป็นราคาอยู่ในความควบคุมของรัฐบาล หากเป็นราคาจริง ผลผลิตที่ได้ก็สามารถทดแทนก๊าซหุงต้มได้มากขึ้น