

บทที่ 4

ผลการทดลองและวิจารณ์ผล

งานวิจัยนี้ได้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ชุด ชุดที่ 1 เป็นการหาปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของเอนไซม์และสภาวะที่เหมาะสมของการทำงานของเอนไซม์ และ ชุดที่ 2 เป็นการหาผลของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และกรดไขมันระเหยที่มีต่อประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยมีรายละเอียดผลการทดลองดังนี้

4.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของเอนไซม์และสภาวะที่เหมาะสมของการทำงานของเอนไซม์

ผลการตรวจวัดปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และกรดไขมันระเหยที่สภาวะการเดินระบบต่างๆ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.1 โดยพบว่า ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่เกิดขึ้นมีค่าอยู่ในช่วง 88-499 มิลลิกรัมกลูโคสต่อกรัมกากแห้ง โดยปริมาณสูงสุดมีค่ามากกว่าระดับเริ่มต้น 10 เท่า ส่วนปริมาณกรดไขมันระเหยที่เกิดขึ้นอยู่ในช่วง 10-31 มิลลิกรัมกรดอะซิติกต่อกรัมกากแห้ง โดยปริมาณสูงสุดมีค่ามากกว่าระดับเริ่มต้น 15 เท่า

ตารางที่ 4.1 ปริมาณน้ำคาลรีดิฟซ์และกรดไขมันระเหยที่เกิดขึ้นภายใต้สภาวะการเดินระบบต่างๆ

เซดูลเลข NCU/ก. กากแห้ง	เพคตินเอส PGU/ก. กากแห้ง	พีเอช	เวลา ชม.	น้ำคาลรีดิฟซ์ มก.กนูโคส/ก. กากแห้ง	กรดไขมันระเหย มก.กรดอะซิติก/ก. กากแห้ง
B*	-	-	-	48	2.1
30.0	50	3.0	2	366	18.6
5.0	200	3.0	2	368	18.6
5.0	50	6.0	2	88	10.3
30.0	200	6.0	2	184	15.5
5.0	50	3.0	6	327	25.9
30.0	200	3.0	6	499	27.9
30.0	50	6.0	6	239	17.6
5.0	200	6.0	6	218	16.6
17.5**	125	4.5	4	186	20.7
17.5**	125	4.5	4	193	18.6
17.5**	125	4.5	4	199	22.8
5.0	50	3.0	2	240	19.7
30.0	200	3.0	2	417	20.7
30.0	50	6.0	2	171	12.4
5.0	200	6.0	2	114	12.4
30.0	50	3.0	6	383	27.9
5.0	200	3.0	6	434	31.0
5.0	50	6.0	6	162	17.6
30.0	200	6.0	6	278	15.5
17.5**	125	4.5	4	209	17.6
17.5**	125	4.5	4	200	18.6
17.5**	125	4.5	4	192	17.6

* คือ สารละลายกากมันสำปะหลังเริ่มต้น

** คือ จุดกึ่งกลางของการไฮโดรไลซิสกากมันด้วยเอนไซม์

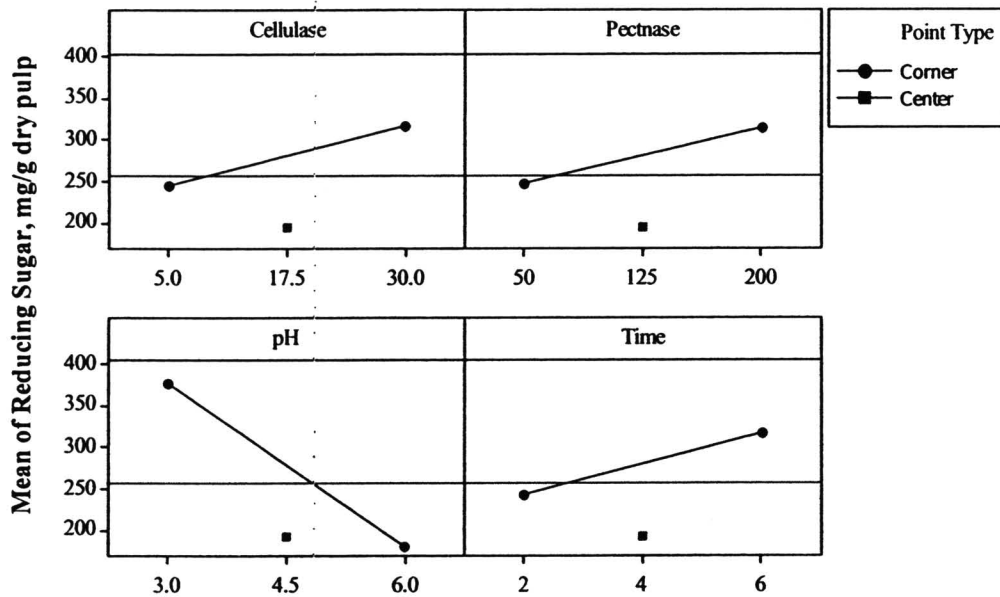


4.1.1 สมรรถนะของการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์

เมื่อนำข้อมูลปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์จากตารางที่ 4.1 มาทำการวิเคราะห์หาผลของปัจจัยด้วยโปรแกรมการวิเคราะห์การทดลองแบบแฟกทอเรียล พบความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.1 ซึ่งกล่าวได้ว่า ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ทุกปัจจัยที่เลือกศึกษามีผลต่อสมรรถนะการทำงานของเอนไซม์อย่างมีนัยสำคัญ โดยค่าสัมประสิทธิ์ของพีเอชในสมการมีค่ามากที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 44.41 และมีผลในทางลบ แสดงให้เห็นว่า ที่พีเอชต่ำสามารถให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ได้ดีกว่าที่พีเอชสูง ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ของความเข้มข้นของเอนไซม์เซลลูเลส ความเข้มข้นของเอนไซม์เพคตินเอส และเวลาในการทำปฏิกริยานั้นมีค่าเท่ากับ 7.99, 1.45 และ 20.96 ตามลำดับ และมีผลในทางบวก ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การใช้ความเข้มข้นของเอนไซม์เซลลูเลสและเพคตินเอสสูงและเวลาในการทำปฏิกริยามากจะสามารถให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ได้ดีกว่าการใช้ความเข้มข้นของเอนไซม์เซลลูเลสและเพคตินเอสต่ำและเวลาในการทำปฏิกริยาน้อย ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า พีเอชของสารละลายเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการย่อยสลายกากมันสำปะหลังเป็นน้ำตาลรีดิวซ์มากที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.1 โดยผลการวิเคราะห์ข้อมูลได้แสดงไว้ในภาคผนวก ง

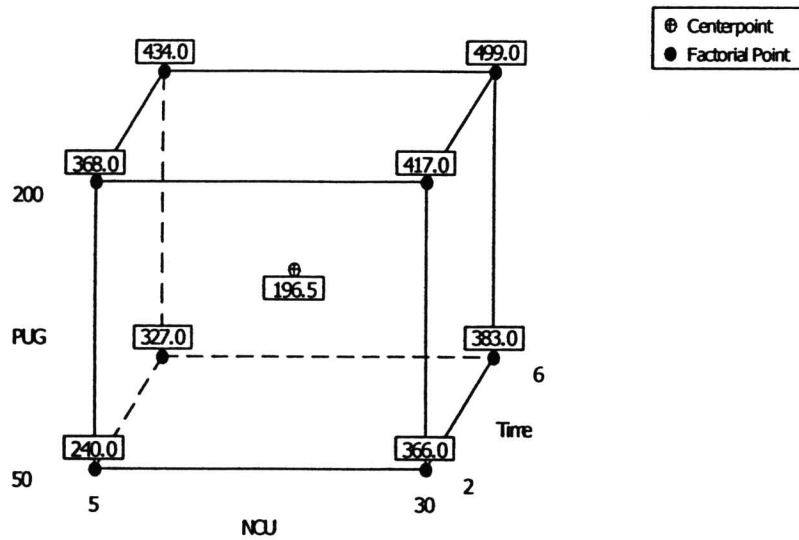
$$Y = 269.62 + 7.99A + 1.45B - 44.41C + 20.95D - 0.19B * C \quad (4.1)$$

เมื่อ	Y	คือ ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ หน่วยมิลลิกรัมกลูโคสต่อกรัมกากแห้ง
	A	คือ ความเข้มข้นของเอนไซม์เซลลูเลสในช่วงที่ศึกษา (5-30)
	B	คือ ความเข้มข้นของเอนไซม์เพคตินเอสในช่วงที่ศึกษา (50-200)
	C	คือ พีเอชในช่วงที่ศึกษา (3-6)
	D	คือ เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกริยากับเอนไซม์ในช่วงที่ศึกษา (2-6)

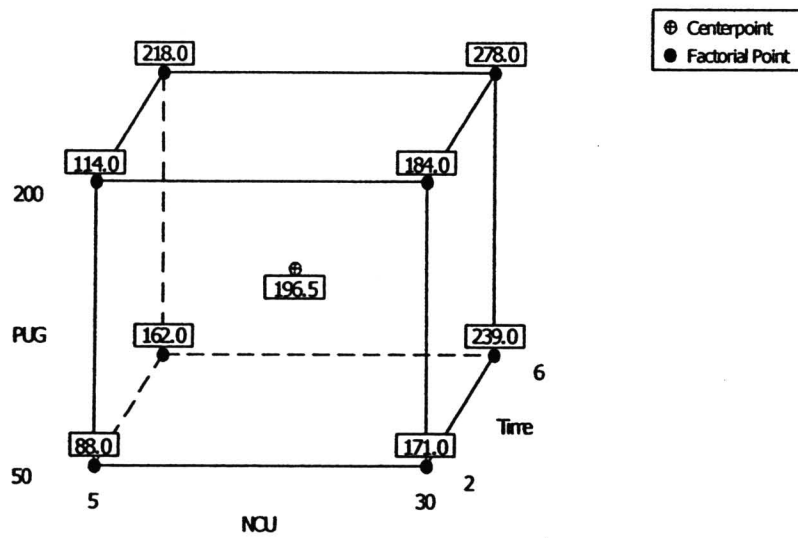


รูปที่ 4.1 กราฟแสดงผลของแต่ละปัจจัยที่มีต่อการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ส่วนปัจจัยที่มีผลร่วมกัน ได้แก่ พีเอชกับความเข้มข้นของเอนไซม์เพคตินเนส จากสมการจะเห็นว่า ค่าสัมประสิทธิ์ของผลรวมระหว่างพีเอชกับความเข้มข้นของเอนไซม์เพคตินเนสมีผลในทางลบ และมีค่าสัมประสิทธิ์เท่ากับ 16.8 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าสัมประสิทธิ์ของปัจจัยอื่นๆ ซึ่งจากการทดลองพบว่า ที่พีเอช 3 ความเข้มข้นของเอนไซม์เพคตินเนสมีผลต่อการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์มากกว่าที่พีเอช 6 และเมื่อใช้ความเข้มข้นของเอนไซม์เซลลูเลสเท่ากัน ความเข้มข้นของเอนไซม์เพคตินเนส 200 PGU จะให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์มากกว่าที่ความเข้มข้น 50 PGU ขณะที่พีเอช 6 ความเข้มข้นของเอนไซม์เพคตินเนสมีผลต่อการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์น้อยมาก ดังแสดงในรูปที่ 4.2



(ก) Cube Plot แสดงผลรวมระหว่างปัจจัยที่พีเอช 3



(ข) Cube Plot แสดงผลรวมระหว่างปัจจัยที่พีเอช 6

รูปที่ 4.2 Cube Plot แสดงผลของปัจจัยที่มีต่อปริมาณน้ำแคลริคิซ์ ที่ค่าพีเอชต่างๆ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ดังนั้น จากความสัมพันธ์ในสมการที่ 4.1 หากต้องการผลิตน้ำตาลรีคิวซ์ให้ได้มากที่สุด ก็ควรเลือกใช้สภาวะการเดินระบบที่มีความเข้มข้นของเซลลูเลส ความเข้มข้นของเพคตินเอส และเวลาในการทำปฏิกิริยาสูงสุด แต่มีค่าพีเอชต่ำสุด หรืออาจกล่าวได้ว่า สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตน้ำตาลรีคิวซ์สำหรับช่วงค่าที่ใช้ในการทดลอง คือ การไฮโดรไลซิสกากมันทีพีเอช 3 ด้วย เอนไซม์เซลลูเลสและเพคตินเอสในปริมาณ 30 NCU และ 200 PGU ต่อกรัมกากแห้ง ตามลำดับ เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ซึ่งให้ปริมาณน้ำตาลรีคิวซ์สูงถึง 499 มิลลิกรัมกลูโคสต่อกรัมกากแห้ง หรือคิดเป็นร้อยละ 50 โดยสามารถเพิ่มปริมาณน้ำตาลรีคิวซ์ถึง 10 เท่าจากระดับเริ่มต้น

อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาของกล้าณรงค์ ศรีรอดและคณะ ซึ่งได้ทำการศึกษการเพิ่มประสิทธิภาพในการสกัดแป้งออกจากกากมันสำปะหลัง โดยใช้เอนไซม์เซลลูเลสและเพคตินเอส พบว่าความเข้มข้นของเอนไซม์เซลลูเลสมีผลต่อประสิทธิภาพการสกัดมากกว่าความเข้มข้นของเอนไซม์เพคตินเอส โดยปริมาณของเซลลูเลสและเพคตินเอสที่ทำให้การสกัดแป้งมีประสิทธิภาพสูงที่สุด คือ 15 NCU และ 122.5 PGU ต่อกรัมของกากแห้ง ตามลำดับ เป็นเวลา 60 นาที ที่พีเอช 4.5 โดยสามารถสกัดแป้งออกจากกากมันคืนกลับมาได้ร้อยละ 40 (Sritoth et al., 2000b)

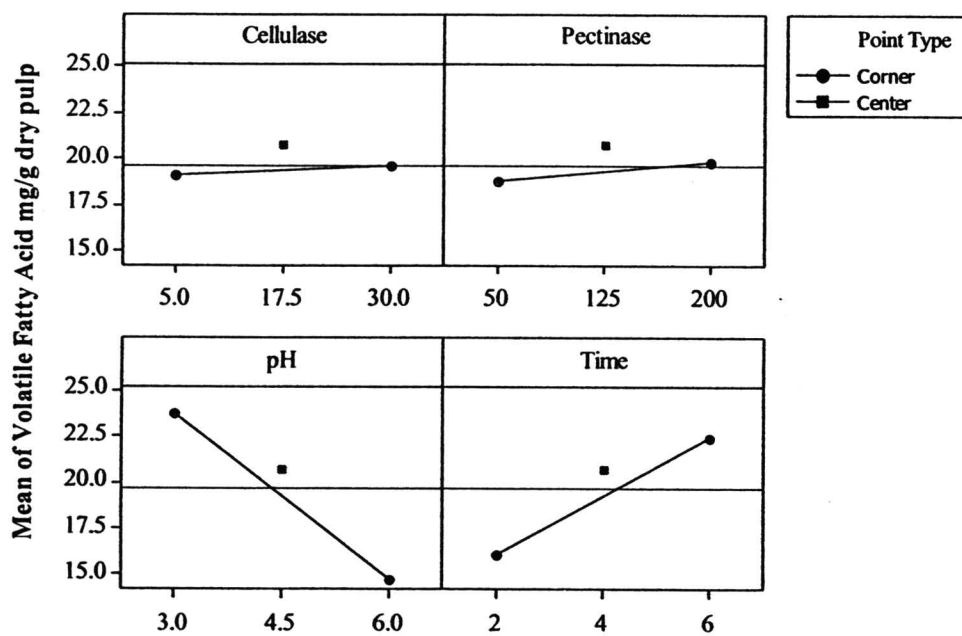
4.1.2 สมรรถนะของการผลิตกรดไขมันระเหย

จากการวิเคราะห์ข้อมูลปริมาณกรดไขมันระเหยด้วยโปรแกรมการวิเคราะห์การทดลองแบบแฟคทอเรียล พบความสัมพันธ์ดังสมการที่ 4.2 ซึ่งกล่าวได้ว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตกรดไขมันระเหยอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% มีเพียง 2 ปัจจัย ได้แก่ พีเอชและเวลาในการทำปฏิกิริยา โดยค่าสัมประสิทธิ์ของพีเอชในสมการมีค่ามากที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.49 และมีผลในทางลบ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า ที่พีเอชต่ำสามารถให้ปริมาณกรดไขมันระเหยได้ดีกว่าที่พีเอชสูง ส่วนค่าสัมประสิทธิ์ของเวลาในการทำปฏิกิริยามีค่าเท่ากับ 0.68 และมีผลในทางบวก แสดงให้เห็นว่า การใช้เวลาในการทำปฏิกิริยามากจะสามารถให้ปริมาณกรดไขมันระเหยได้ดีกว่าการใช้เวลาในการทำปฏิกิริยาน้อย ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า พีเอชของสารละลายเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการย่อยสลายกากมันสำปะหลังเป็นกรดไขมันระเหยมากที่สุด เช่นเดียวกับกับน้ำตาลรีคิวซ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.3 โดยพีเอชมีผลต่อการย่อยสลายกากมันสำปะหลังเป็นกรดไขมันระเหยมากกว่าเวลาในการทำ

ปฏิกิริยาเล็กน้อย และไม่พบผลร่วมของปัจจัยที่เลือกศึกษา โดยผลการวิเคราะห์ข้อมูลได้แสดงไว้ในภาคผนวก ง

$$Y = 27.67 - 3.49A + 0.68B \quad (4.2)$$

- เมื่อ Y คือ ปริมาณกรดไขมันระเหย หน่วยมิลลิกรัมกรดอะซิติกต่อกรัมกากแห้ง
 A คือ พีเอชในช่วงที่ศึกษา (3-6)
 B คือ เวลาที่ใช้ในการทำปฏิกิริยากับเอนไซม์ในช่วงที่ศึกษา (2-6)



รูปที่ 4.3 กราฟแสดงผลของแต่ละปัจจัยที่มีต่อการผลิตกรดไขมันระเหย ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



หากพิจารณาจากปริมาณกรดไขมันระเหยที่ผลิตได้ จะเห็นว่า สภาพการเดินระบบที่ดีที่สุดสำหรับช่วงค่าที่ใช้ในการทดลอง คือ การหมักย่อยด้วยเอนไซม์เซลลูเลสและเพคตินเอสในปริมาณ 5 NCU และ 200 PGU ต่อกรัมกากแห้ง ตามลำดับ ที่พีเอช 3 ด้วยระยะเวลาทำปฏิกิริยา 6 ชั่วโมง ซึ่งให้ปริมาณกรดไขมันระเหยสูงสุดที่ 31 มิลลิกรัมกรดอะซิติกต่อกรัมกากแห้ง แต่เนื่องจากปริมาณกรดไขมันระเหยที่เกิดขึ้นมีค่าค่อนข้างต่ำ เมื่อเทียบกับน้ำตาลรีดิวซ์ จึงกล่าวได้ว่า กรดไขมันระเหยไม่ใช่ผลิตภัณฑ์หลักของการไฮโดรไลซิสกากมันด้วยเอนไซม์ผสมเซลลูเลสและเพคตินเอส

อนึ่ง ในงานวิจัยนี้ น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนจากโรงงานผลิตแป้งมันได้ใช้ในการเตรียมสารละลายกากมันสำปะหลัง 2%TS ซึ่งน้ำเสียดังกล่าวอาจมีสารบางอย่างที่มีผลต่อการทำงานของเอนไซม์ที่ใช้ในการศึกษาค้างอยู่ อย่างเช่น เชื้อจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสีย เอนไซม์หรือตัวยับยั้งจากกระบวนการไฮโดรไลซิสแป้งมัน เป็นต้น ดังนั้นความสัมพันธ์ในสมการที่ 4.1 และ 4.2 จึงอาจใช้ได้เฉพาะกับกรณีของการเจือจางกากมันด้วยน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนจากโรงงานผลิตแป้งมันเท่านั้น

เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างสมรรถนะของการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์กับสมรรถนะของการผลิตกรดไขมันระเหย พบว่า มีแนวโน้มที่สอดคล้องกัน คือ พีเอชของสารละลายและเวลาในการทำปฏิกิริยาเป็นปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพผลิตอย่างมีนัยสำคัญ โดยสภาพที่ทำให้เกิดน้ำตาลรีดิวซ์สูงก็มักจะให้กรดระเหยสูงเช่นเดียวกัน อย่างเช่น ที่พีเอช 3 และระยะเวลาทำปฏิกิริยา 6 ชั่วโมง การหมักย่อยด้วยเอนไซม์เซลลูเลสและเพคตินเอสในปริมาณ 30 NCU และ 200 PGU ต่อกรัมกากแห้ง ตามลำดับ ให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงสุด 499 มิลลิกรัมกลูโคสต่อกรัมกากแห้ง และให้กรดไขมันระเหยสูงถึง 28 มิลลิกรัมกรดอะซิติกต่อกรัมกากแห้ง ในขณะที่ ที่พีเอชและเวลาทำปฏิกิริยาเดียวกันนี้ การหมักย่อยด้วยเอนไซม์เซลลูเลสและเพคตินเอสในปริมาณ 5 NCU และ 200 PGU ต่อกรัมกากแห้ง ตามลำดับ ให้ปริมาณกรดไขมันระเหยสูงสุด 31 มิลลิกรัมกรดอะซิติกต่อกรัมกากแห้งและให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์สูงถึง 434 มิลลิกรัมกลูโคสต่อกรัมกากแห้ง อย่างไรก็ตาม ในทางทฤษฎีปริมาณกรดไขมันระเหยน่าจะมีผลต่ออัตราเร็วของการผลิตก๊าซชีวภาพมากกว่าปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ เนื่องจากจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการสร้างก๊าซ น่าจะสามารถเปลี่ยนกรดไขมันระเหยไปเป็นก๊าซได้เร็วกว่า ในขณะที่การเปลี่ยนน้ำตาลรีดิวซ์เป็นก๊าซชีวภาพต้องผ่าน

ขั้นตอนการหมักให้เป็นกรดอินทรีย์ก่อน หากมีปริมาณกรดไขมันระเหยมาก ก็น่าจะสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้มาก ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลัง ก็น่าจะเป็นการหมักย่อยด้วยเอนไซม์เซลลูเลสและเพคตินเอสในปริมาณ 5 NCU และ 200 PGU ต่อกรัมกากแห้ง ตามลำดับ ที่พีเอช 3 ด้วยระยะเวลาทำปฏิกิริยา 6 ชั่วโมง ซึ่งให้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และกรดไขมันระเหยไม่แตกต่างไปจากที่สภาวะของการใช้เอนไซม์เซลลูเลสและเพคตินเอสในปริมาณ 30 NCU และ 200 PGU ต่อกรัมกากแห้ง ตามลำดับ แต่มีการใช้เอนไซม์เซลลูเลสลดลงถึง 6 เท่า

4.2 ผลของปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และกรดไขมันระเหยที่มีต่อประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ

สำหรับผลการตรวจวัดปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และกรดไขมันระเหยที่เกิดขึ้น ภายหลังจากการไฮโดรไลซิสกากมันด้วยเอนไซม์ที่สภาวะต่างๆ ก่อนนำไปหมักแบบไร้ออกซิเจน ของการทดลองชุดที่ 2 ได้แสดงไว้ในตารางที่ 4.2 จะเห็นได้ว่า ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และปริมาณกรดไขมันระเหยจากการทดลองทั้งของชุดที่ 1 และชุดที่ 2 มีค่าใกล้เคียงกัน สำหรับข้อมูลผลการทดลองการหมักกากมันสำปะหลังเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพได้แสดงไว้ในภาคผนวก จ

ตารางที่ 4.2 สภาวะการทำงานของเอนไซม์ที่เลือกมาศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ

สภาวะที่	เซลลูเลส NCU/ก.*	เพคตินเอส PGU/ก.*	พีเอช	เวลา ชม.	น้ำตาลรีดิวซ์ มก.กลูโคส/ ก.กากแห้ง	กรดไขมันระเหย มก.กรดอะซิติก/ ก.กากแห้ง
1	สภาวะควบคุม				47.1	3.1
2	5	50	6	2	82.9	11.6
3	30	50	6	6	218	15.6
4	30	50	3	6	360	31.6
5	30	200	3	6	481	30.7
6**	30	50	6	6	214	19.1

* นำหนักกากแห้ง

** ไม่ได้ทำการปรับพีเอชให้เป็นกลางก่อนนำไปหมักก๊าซ

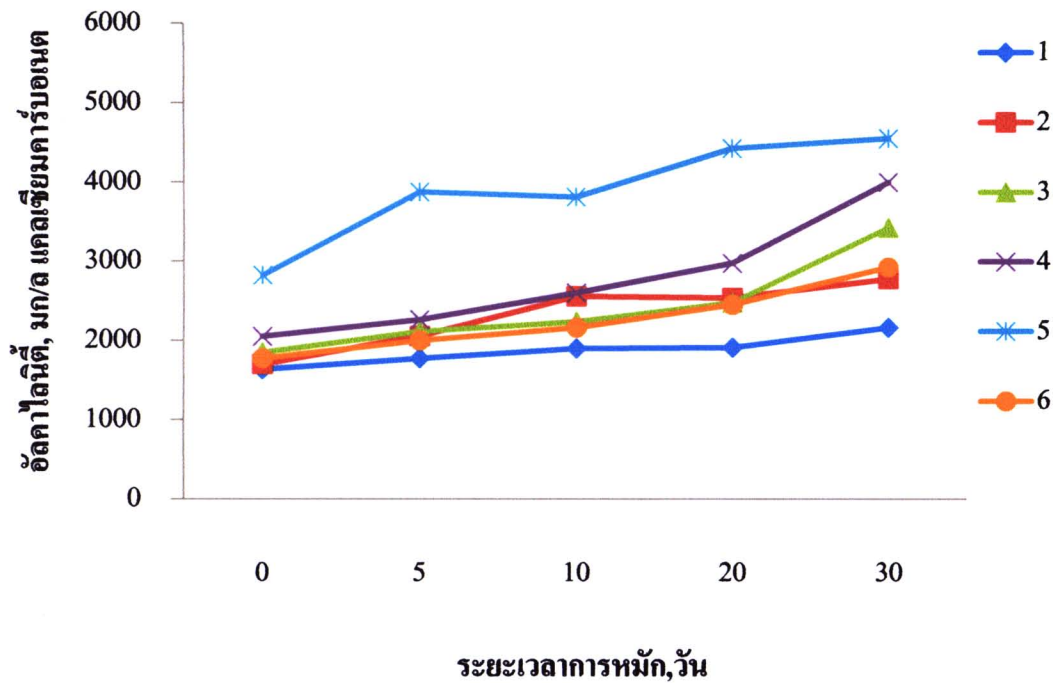
4.2.1 อุณหภูมิ

อุณหภูมิของตัวอย่างที่ผ่านการหมักจากระบบ มีค่าอยู่ในช่วง 20-26.25 องศาเซลเซียส ตลอดระยะเวลาทำการทดลอง โดยอุณหภูมิตัวอย่างที่ผ่านการหมักจะมีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิของสภาพแวดล้อมภายนอก ซึ่งที่อุณหภูมิดังกล่าว การทำงานของระบบจะอยู่ในช่วง Mesophilic (อุณหภูมิประมาณ 20-45 องศาเซลเซียส) โดยจุลินทรีย์ที่ทำงานภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนสามารถทำงานได้ดีในช่วงอุณหภูมิดังกล่าว

4.2.2 พีเอช อัลคาไลน์ตี และกรดไขมันระเหย

สำหรับพีเอชของสารละลายกากมันเริ่มต้นที่วัดได้ มีค่าระหว่าง 7.5-8.0 และพีเอชของสารละลายกากมันหลังจากทำปฏิกิริยากับเอนไซม์แล้ว มีค่าอยู่ระหว่าง 3.1-7.8 โดยพีเอชของสารละลายกากมันภายหลังการหมักที่ระยะเวลาต่างๆ มีค่าอยู่ระหว่าง 5.2-7.9 (แสดงไว้ในภาคผนวก จ) สำหรับสภาวะที่ 6 ซึ่งไม่ได้ทำการปรับพีเอชให้เป็นกลางก่อนนำไปหมักก๊าซ แม้ที่พีเอช 6 จะมีค่าต่ำกว่าค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับระบบไร้ออกซิเจนคือ 6.5-7.5 (McCarty, P.L., 1964) แต่จากการทดลองพบว่า ระบบยังสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เช่น การสร้างกรดไขมันระเหย การลดค่าซีโอดี เป็นต้น

สำหรับผลการตรวจวัดค่าอัลคาไลน์ตีของกากมันสำปะหลังหลังการหมัก พบว่า ทุกสภาวะการหมักมีค่าอัลคาไลน์ตีที่เกิดขึ้นค่อนข้างสูงมีค่าอยู่ในช่วง 1,638-4,550 มิลลิกรัมต่อลิตร แคลเซียมคาร์บอเนต โดยสภาวะที่ให้ค่าอัลคาไลน์ตีเฉลี่ยสูงสุด คือ สภาวะที่ 5 และสภาวะที่ให้ค่าอัลคาไลน์ตีเฉลี่ยต่ำสุด คือ สภาวะควบคุม แสดงได้ดังรูปที่ 4.4 โดยในช่วงเริ่มต้นระบบอัลคาไลน์ตีที่เกิดขึ้นจะมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างน้อย และมีแนวโน้มค่อยๆ เพิ่มขึ้นในระหว่างการหมัก จึงทำให้สามารถทนต่อการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันระเหยที่เพิ่มขึ้นได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อพีเอชของระบบมากนัก

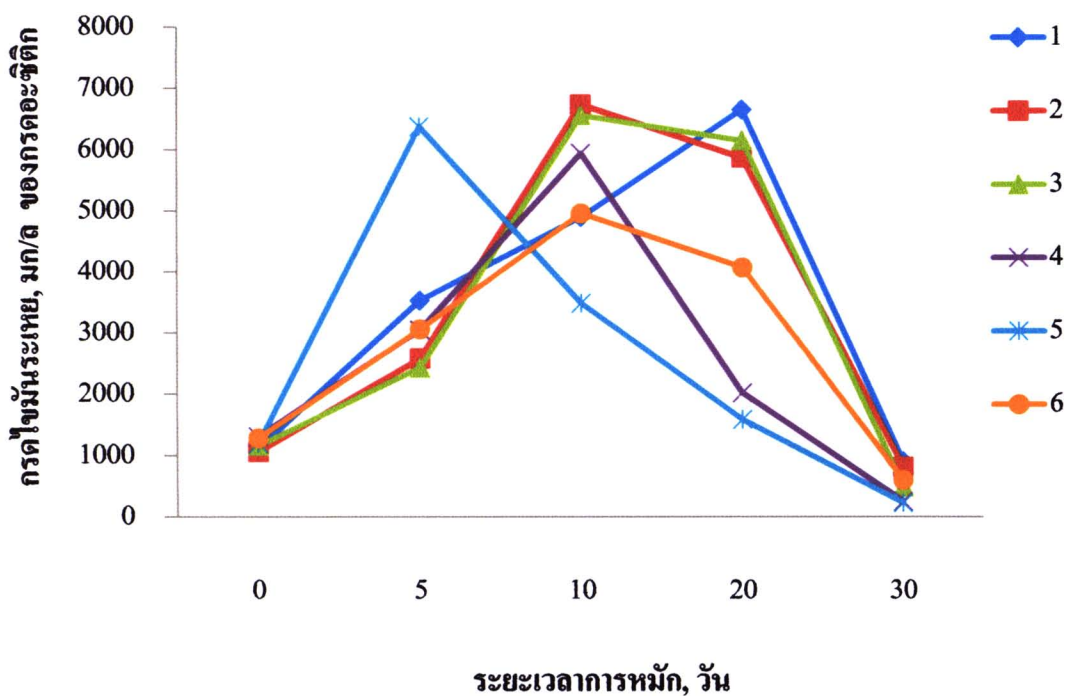


รูปที่ 4.4 การเปลี่ยนแปลงอัลคาไลน์ของสารละลายกากมันภายหลังการหมัก

เมื่อเปรียบเทียบค่าอัลคาไลน์ที่ได้จากการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง พบว่า ค่าอัลคาไลน์ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงไว้ในภาคผนวก จ ซึ่งจากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) โดยสภาวะที่ 2, 3, 4 และ 6 จะให้ค่าอัลคาไลน์ที่เฉลี่ยภายหลังการหมักที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งจากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) สำหรับสภาวะที่ให้ค่าอัลคาไลน์เฉลี่ยสูงสุดเมื่อเทียบกับสภาวะอื่นๆ คือ สภาวะที่ 5 ซึ่งจากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

สำหรับผลการตรวจวัดปริมาณกรดไขมันระเหยของกากมันสำปะหลัง พบว่า ปริมาณกรดไขมันระเหยเฉลี่ยที่เกิดขึ้นมีค่าอยู่ในช่วง 231-1,307 มิลลิกรัมต่อลิตรกรดอะซิติก โดยจะมีปริมาณกรดไขมันระเหยเพิ่มสูงขึ้นในช่วงแรกของการหมัก เนื่องจากค่าอัลคาไลน์ที่วัดได้ในการทดลองนี้มีค่าค่อนข้างสูง ระบบจึงยังคงมีกำลังบัฟเฟอร์สูง จึงสามารถการต้านทานการเปลี่ยนแปลงของพีเอชและปริมาณกรดไขมันระเหยที่เพิ่มขึ้นได้ ซึ่งปริมาณกรดไขมันระเหยที่มีค่ามากในช่วงแรกของการหมักนี้ แสดงให้เห็นว่า มีปริมาณจุลินทรีย์ที่สร้างมีเทนในถังหมักไม่มากพอที่จะ

ย่อยสลายกรดไขมันระเหยให้เปลี่ยนรูปเป็นก๊าซมีเทน อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจึงน้อยกว่าอัตราการสร้างกรด และปริมาณกรดไขมันระเหยจะลดลงในขั้นตอนท้ายของการหมัก เนื่องจากมีจุลินทรีย์ที่สร้างมีเทนเพิ่มมากขึ้น จึงมีการย่อยสลายกรดไขมันระเหยให้เป็นก๊าซชีวภาพเพิ่มมากขึ้น แสดงได้ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 การเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดไขมันระเหยของสารละลายกากมันภายหลังการหมัก

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณกรดไขมันระเหยที่ได้จากการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง พบว่า ปริมาณกรดไขมันระเหยที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) โดยที่ระยะเวลาการหมัก 0 วัน พบว่า แต่ละสภาวะการหมักไม่มีผลต่อปริมาณกรดไขมันระเหย โดยเมื่อเริ่มต้นระบบปริมาณกรดไขมันระเหยเฉลี่ยมีค่าอยู่ในช่วง 1,062-1,307 มิลลิกรัมต่อลิตรกรดอะซิติก ส่วนที่ระยะเวลาการหมัก 5 วัน พบว่า สภาวะที่ให้ปริมาณกรดไขมันระเหยเฉลี่ยสูงสุดเมื่อเทียบกับสภาวะควบคุม คือ สภาวะที่ 5 ซึ่งปริมาณกรดไขมันระเหยที่ได้มีค่าเท่ากับ 6,373 มิลลิกรัมต่อลิตรกรดอะซิติก และที่ระยะเวลาการหมัก 10 วัน พบว่า สภาวะที่ให้

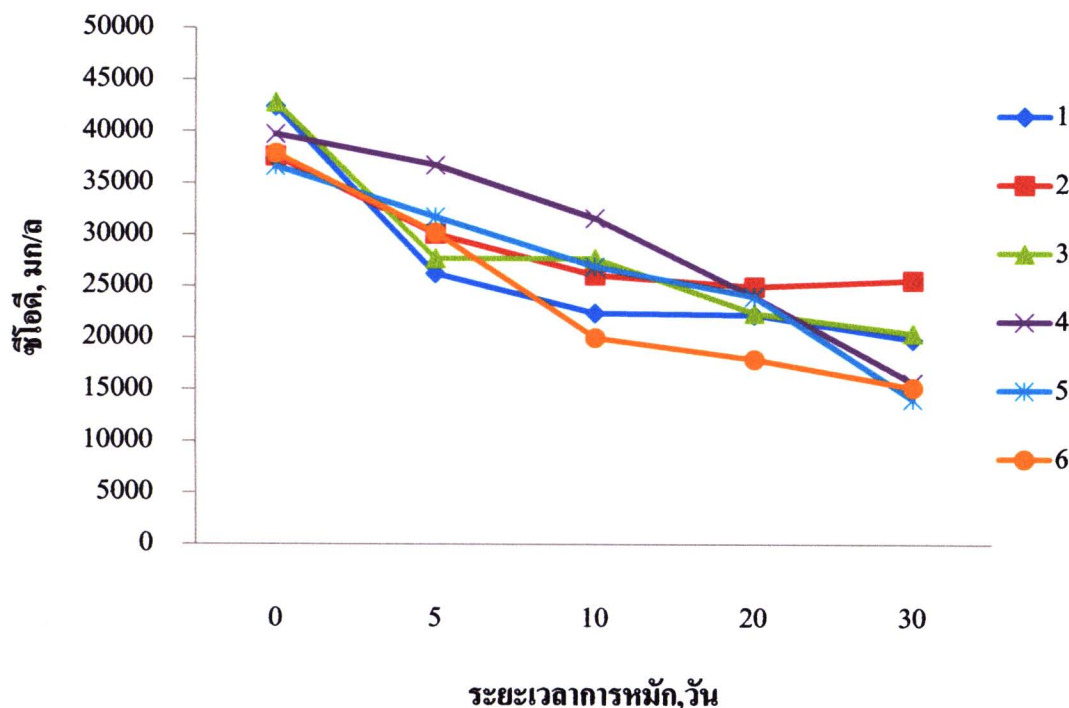
ปริมาณกรดไขมันระเหยเจ็ลสูงที่สุด คือ สภาวะที่ 2 และรองลงมาเป็นสภาวะที่ 3 และ 4 ตามลำดับ ซึ่งปริมาณกรดไขมันระเหยเจ็ลสูงที่สุดที่ได้มีค่าเท่ากับ 6,733 มิลลิกรัมต่อลิตรกรดอะซิติก และสภาวะที่ให้ปริมาณกรดไขมันระเหยเจ็ลต่ำสุด คือ สภาวะที่ 5 ซึ่งปริมาณกรดไขมันระเหยเจ็ลที่ได้มีค่าเท่ากับ 3,484 มิลลิกรัมต่อลิตรกรดอะซิติก และที่ระยะเวลาการหมัก 20 และ 30 วัน พบว่าปริมาณกรดไขมันระเหยของทุกๆ สภาวะการหมักจะมีค่าลดลง ซึ่งสภาวะที่ให้ปริมาณกรดไขมันระเหยเจ็ลต่ำสุดเมื่อทำการหมักเป็นเวลา 30 วัน คือ สภาวะที่ 5 โดยปริมาณกรดไขมันระเหยเจ็ลที่ได้มีค่าเท่ากับ 231 มิลลิกรัมต่อลิตรกรดอะซิติก

4.2.3 ประสิทธิภาพในการลดสารอินทรีย์

สำหรับปริมาณชีโอดี ปริมาณของแข็งรวม และปริมาณของแข็งระเหยที่เหลือน้อยอยู่ในสารละลายภายหลังจากการหมักที่เวลาต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.3 โดยพบว่า ค่าชีโอดีเจ็ลที่เกิดขึ้นมีค่าอยู่ในช่วง 14,080-42,810 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยค่าชีโอดีในช่วงแรกจะมีค่าสูงมาก และมีแนวโน้มค่อยๆ ลดลงในระหว่างการหมัก และจะมีค่าน้อยมากในตอนท้ายของการหมัก ในช่วงแรกของการหมักค่าชีโอดีมีค่าสูง เนื่องจากยังมีสารอินทรีย์ที่จุลินทรีย์ย่อยสลายได้ยากอยู่จำนวนมาก และเมื่อทำการเดินระบบหมักย่อย ปริมาณสารอินทรีย์จะถูกย่อยสลายไปเรื่อยๆ กลายเป็นก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ทำให้ค่าชีโอดีค่อยๆ ลดลงและมีค่าต่ำสุดในตอนท้ายของการหมัก แสดงได้ดังรูปที่ 4.6

ตารางที่ 4.3 ปริมาณซีโอดี ของแจึงรวม ของแจึงระเหยที่เหลืออยู่ในสารละลายภายหลังการหมักที่เวลาต่างๆ

สถานะที่	ของแจึงรวม, มก./ล.					ของแจึงระเหย, มก./ล.					ซีโอดี, มก./ล.				
	0 วัน	5 วัน	10 วัน	20 วัน	30 วัน	0 วัน	5 วัน	10 วัน	20 วัน	30 วัน	0 วัน	5 วัน	10 วัน	20 วัน	30 วัน
1	27,150	25,383	24,500	19,053	17,081	18,037	15,912	14,496	11,017	10,763	42,415	26,240	22,240	22,240	19,800
2	28,258	27,812	24,661	22,885	20,080	23,182	22,286	16,938	14,686	13,313	37,595	30,080	26,080	24,960	25,600
3	27,737	26,205	23,818	22,259	18,714	19,774	17,562	16,821	15,186	10,510	42,810	27,680	27,680	22,400	20,480
4	29,744	27,616	23,340	22,321	16,505	22,174	19,407	14,971	14,244	12,410	39,730	36,740	31,600	24,000	15,680
5	21,771	21,048	20,288	19,576	12,110	16,169	15,314	14,395	13,904	7,613	36,640	31,725	26,920	24,000	14,080
6	30,766	28,565	24,384	24,081	14,804	23,067	20,331	18,943	15,423	9,706	37,870	30,200	20,000	17,920	15,200

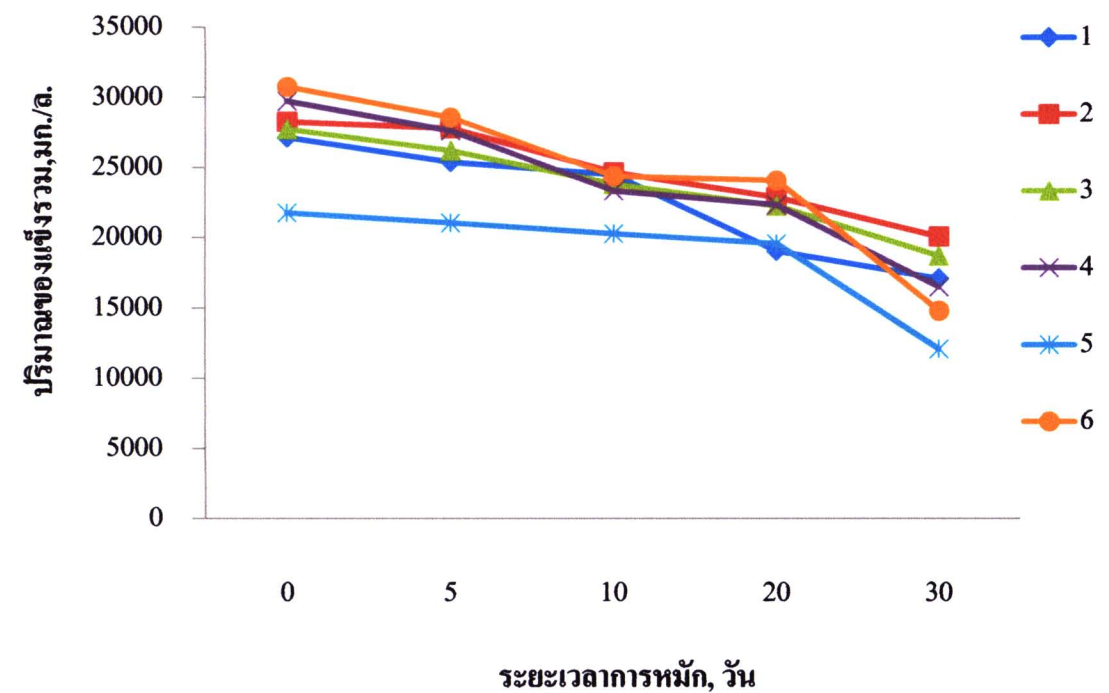


รูปที่ 4.6 การเปลี่ยนแปลงค่าซีโอดีของสารละลายกากมันภายหลังการหมัก

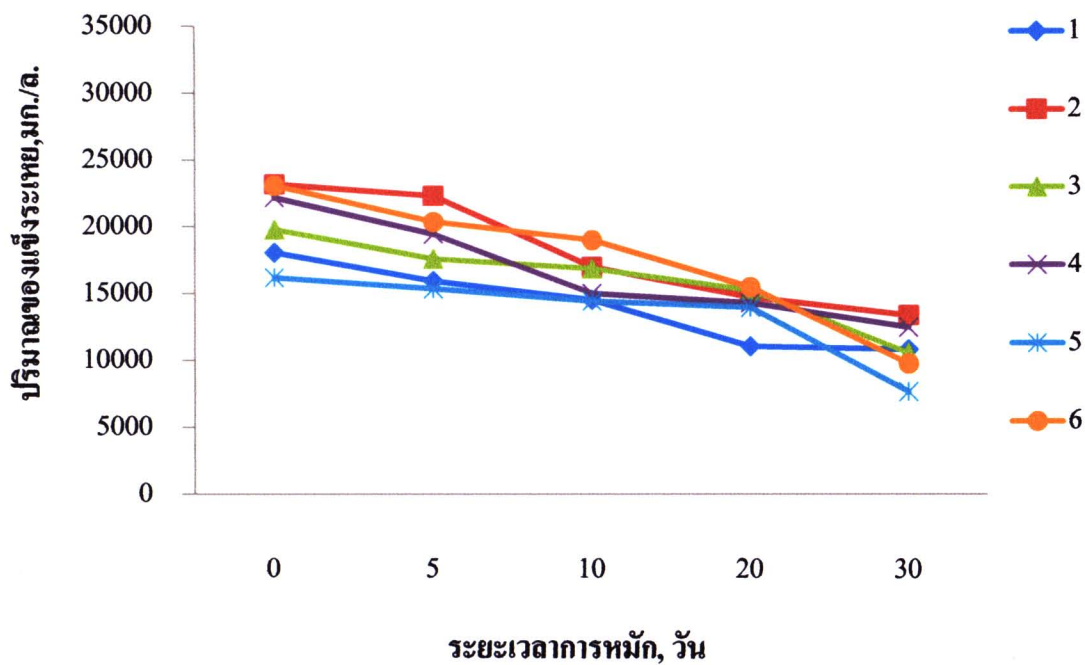
เมื่อเปรียบเทียบค่าซีโอดีที่ได้จากการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง พบว่า ค่าความซีโอดีที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) โดยเมื่อเริ่มต้นระบบจนถึงวันที่ 30 ของการหมัก พบว่า แต่ละสภาวะการหมักสามารถลดค่าซีโอดีได้ร้อยละ 32-62 โดยสภาวะที่มีการลดค่าซีโอดีได้มากที่สุด จากวันแรกของการหมัก คือ สภาวะที่ 5 และสภาวะที่มีการลดค่าซีโอดีได้ต่ำสุด จากวันแรกของการหมัก คือ สภาวะที่ 2

ข้อสังเกตประการหนึ่ง คือ ค่าซีโอดีบางตัวอย่างที่วิเคราะห์ได้มีค่าสูงขึ้นเมื่อเวลาหมักผ่านไป อย่างเช่น ค่าซีโอดีในระหว่างการหมักวันที่ 30 ของสภาวะที่ 2 ทั้งนี้ เนื่องจากสารละลายกากมันมีลักษณะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน ทำให้ในขั้นตอนการคั่งตัวอย่างมาวิเคราะห์หาค่าซีโอดีอาจมีตะกอนปนออกมามากหรือน้อยกว่าที่ควรในบางครั้ง จึงอาจทำให้ค่าซีโอดีที่ได้มีค่าสูงหรือต่ำกว่าที่ควร

สำหรับผลการตรวจวัดปริมาณของแฉะรวม พบว่า ปริมาณของแฉะรวมเฉลี่ยที่ได้มีค่าอยู่ในช่วง 12,110-30,766 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปริมาณของแฉะรวมในช่วงแรกของการหมักมีค่าสูงและจะค่อยๆ ลดลงในระหว่างการหมัก และมีปริมาณน้อยมากในตอนท้ายของการหมัก แสดงได้ดังรูปที่ 4.7 ส่วนปริมาณของแฉะระเหยเฉลี่ยที่ได้มีค่าอยู่ในช่วง 7,613-23,182 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยปริมาณของแฉะระเหยในช่วงแรกของการหมักมีค่าสูงและมีแนวโน้มค่อยๆ ลดลงในระหว่างการหมัก จนมีปริมาณน้อยมากในตอนท้ายของการหมัก เช่นเดียวกับของแฉะรวม แสดงได้ดังรูปที่ 4.8



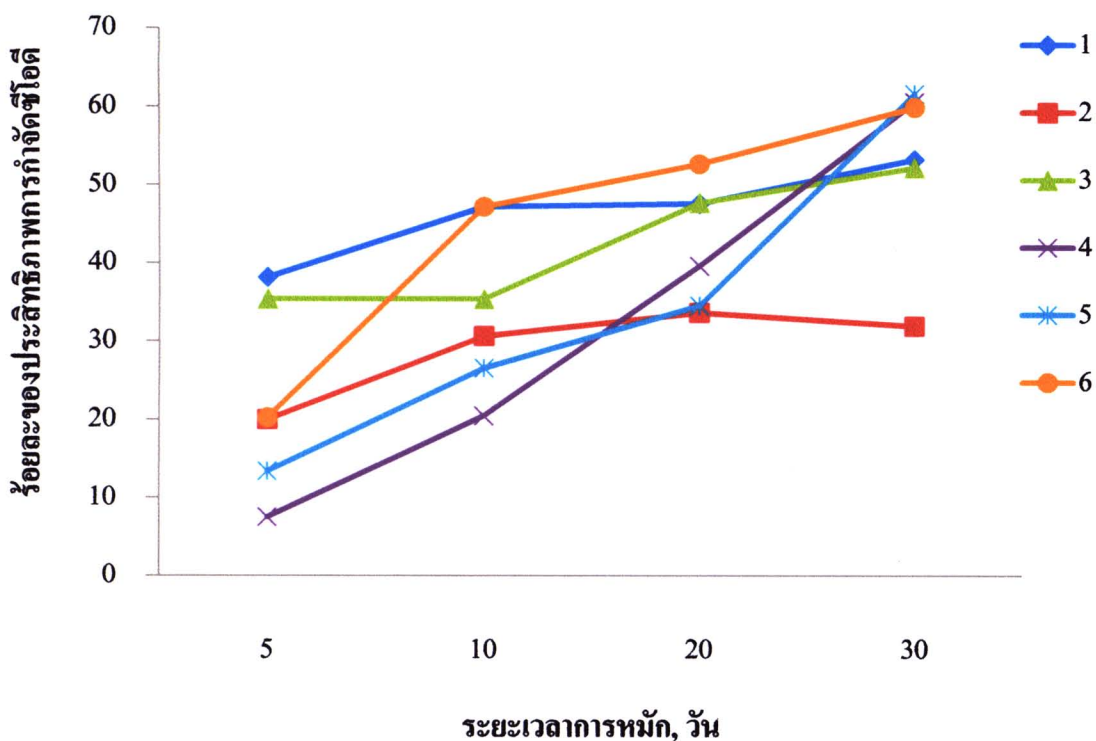
รูปที่ 4.7 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแฉะรวมของสารละลายกากมันนั้ภายหลังการหมัก



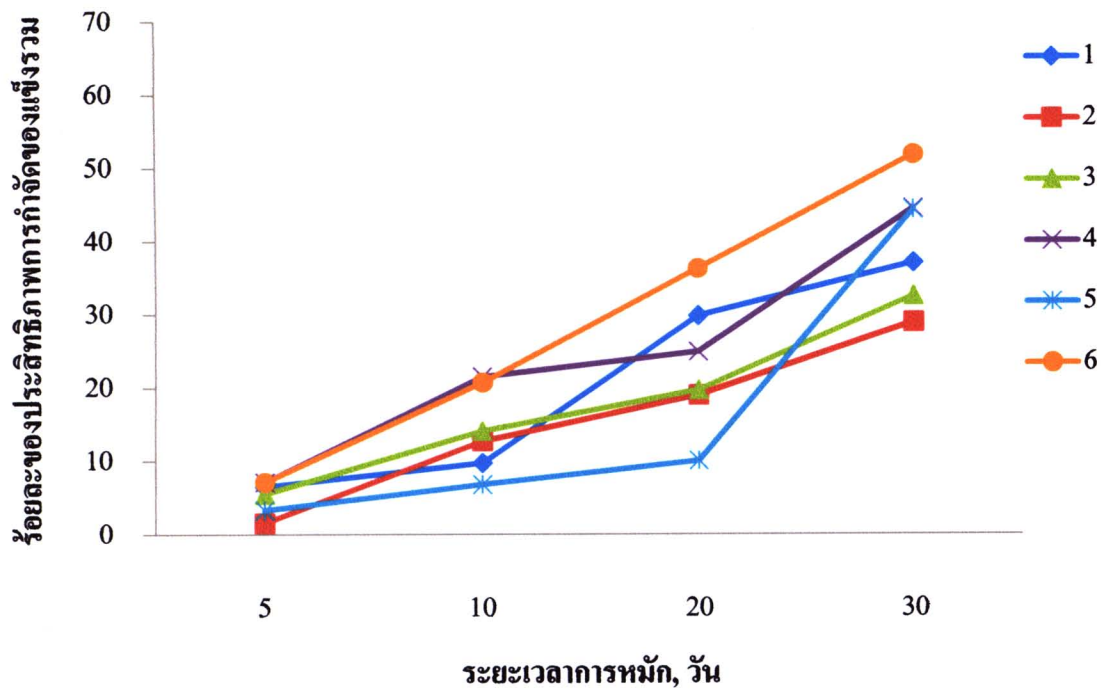
รูปที่ 4.8 การเปลี่ยนแปลงปริมาณของแข็งระเหยของสารละลายกากมันภายหลังการหมัก

เมื่อเปรียบเทียบปริมาณของแข็งรวมและปริมาณของแข็งระเหยที่ได้จากการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง พบว่า ปริมาณของแข็งรวมและปริมาณของแข็งระเหยที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) โดยเมื่อเริ่มต้นการหมักจนถึงวันที่ 30 ของการหมัก พบว่า แต่ละสภาวะการหมักสามารถลดปริมาณของแข็งรวมได้ร้อยละ 29-52 โดยสภาวะที่มีการลดปริมาณของแข็งรวมได้สูงสุดจากวันแรกของการหมัก คือ สภาวะที่ 6 และสภาวะที่มีการลดปริมาณของแข็งรวมได้ต่ำสุดจากวันแรกของการหมักสภาวะ คือ สภาวะที่ 2

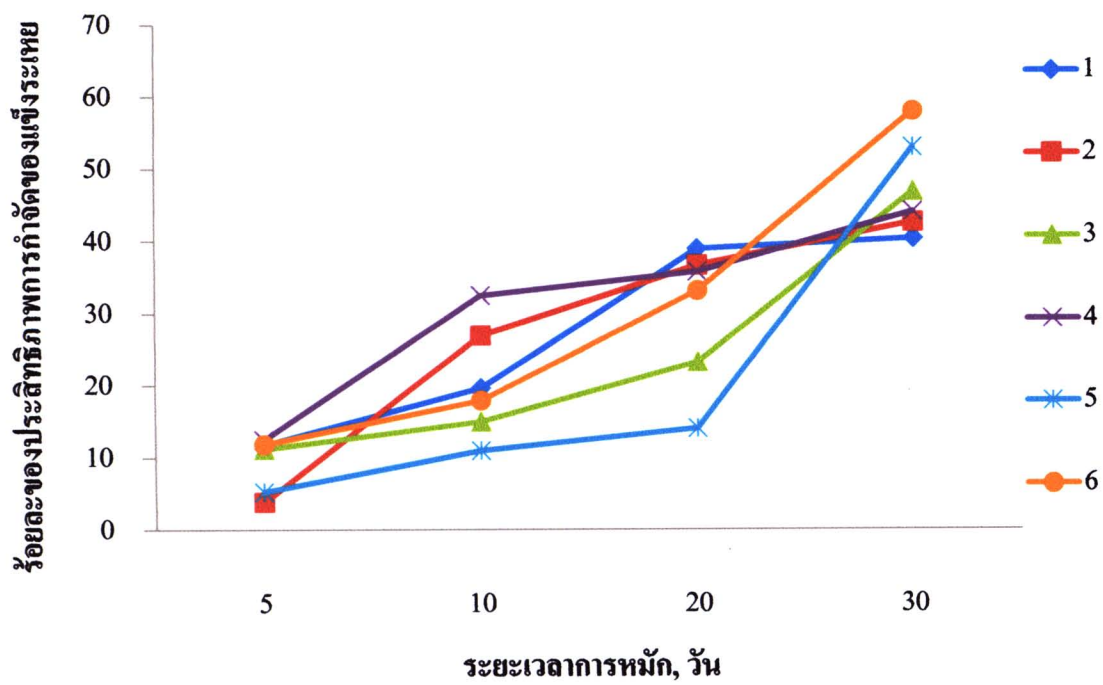
สำหรับประสิทธิภาพในการกำจัดค่าซีไอดี ของแฉังรวม และของแฉังระเหยที่เหลืออยู่ในสารละลายภายหลังการหมักที่เวลาต่างๆ แสดงได้ดังตารางที่ 4.4 โดยภายหลังการหมัก 5 และ 10 วัน พบว่า ประสิทธิภาพของการกำจัดซีไอดีของขวดหมักสภาวะควบคุมมีค่าสูงสุด และภายหลังการหมัก 20 วัน พบว่า ประสิทธิภาพของการกำจัดซีไอดีของขวดหมักสภาวะที่ 6 มีค่าสูงสุด และภายหลังการหมัก 30 วัน พบว่า ประสิทธิภาพของการกำจัดซีไอดีของขวดหมักสภาวะที่ 5 มีค่าสูงสุด ดังแสดงในรูปที่ 4.9 สำหรับประสิทธิภาพของการกำจัดของแฉังรวมและของแฉังระเหย ภายหลังการหมัก 30 วัน พบว่า ขวดหมักสภาวะที่ 6 มีค่าสูงที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 4.10 และ 4.11 ตามลำดับ ทั้งนี้ เนื่องจากขั้นตอนการคั่งตัวอย่างมาวิเคราะห์หาค่าซีไอดี ของแฉังรวม และของแฉังระเหย อาจมีตะกอนปนออกมามากหรือน้อยกว่าที่ควรในบางครั้ง จึงอาจทำให้ค่าที่ได้มีค่าสูงหรือต่ำกว่าที่ควร ดังนั้น การใช้ข้อมูลดังกล่าวในการประเมินผลอาจไม่คั่นัก



รูปที่ 4.9 ประสิทธิภาพของการกำจัดซีไอดีของสารละลายกากมันภายหลังการหมัก



รูปที่ 4.10 ประสิทธิภาพของการกำจัดของแข็งรวมของสารละลายกากมันนั้ภายหลังการหมัก



รูปที่ 4.11 ประสิทธิภาพของการกำจัดของแข็งระเหยของสารละลายกากมันนั้ภายหลังการหมัก

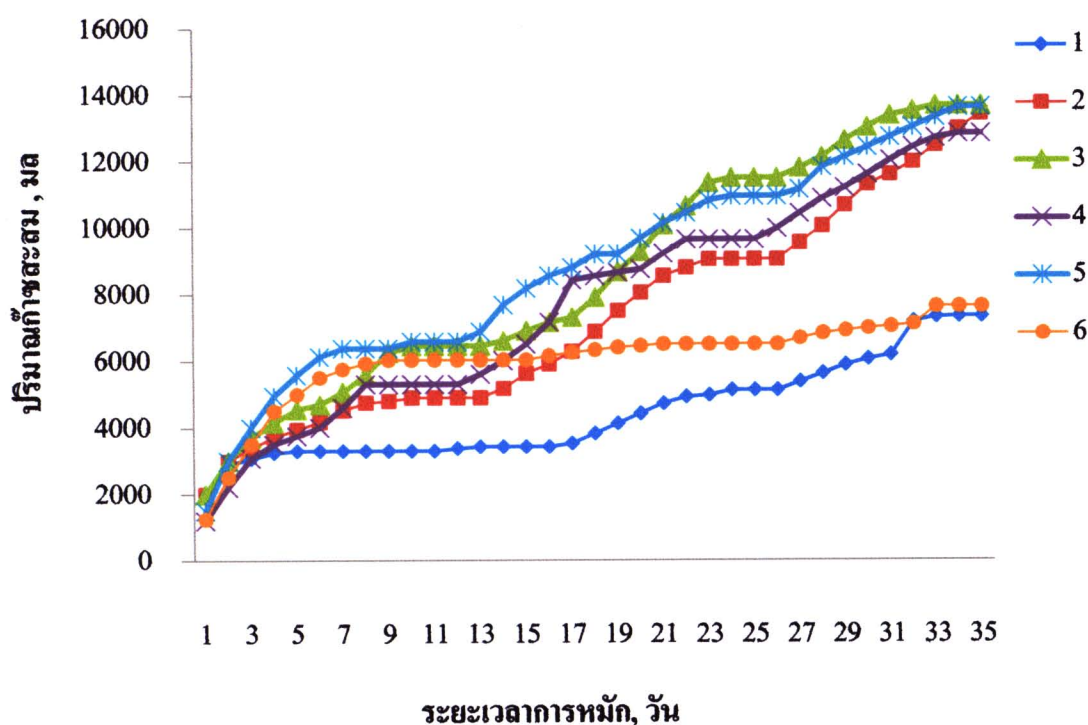
ตารางที่ 4.4 ประสิทธิภาพการลดค่าซีไอดี ของแฉะรวม ของแฉะรวมที่เหลืออยู่ในสารละลายภายหลังการหมักที่เวลาต่างๆ

สถานะที่	ของแฉะรวม,%				ของแฉะระเหย,%				ซีไอดี,%			
	5 วัน	10 วัน	20 วัน	30 วัน	5 วัน	10 วัน	20 วัน	30 วัน	5 วัน	10 วัน	20 วัน	30 วัน
1	6.51	9.76	29.82	37.09	11.78	19.63	38.92	40.33	38.14	47.19	47.57	53.22
2	1.58	12.73	19.01	28.94	3.87	26.93	36.65	42.57	19.99	30.63	33.61	31.91
3	5.52	14.13	19.75	32.53	11.19	14.94	23.20	46.85	35.34	35.34	47.68	52.16
4	7.15	21.53	24.96	44.51	12.48	32.49	35.76	44.03	7.53	20.46	39.59	60.53
5	3.32	6.81	10.08	44.38	5.29	10.97	14.01	52.92	13.41	26.53	34.50	61.57
6	7.15	20.74	36.31	51.88	11.86	17.88	33.14	57.92	20.25	47.19	52.68	59.86



4.2.4 ประสิทธิภาพการผลิตก๊าซชีวภาพและองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

ผลการตรวจวัดปริมาณก๊าซชีวภาพจากการหมักกากมันสำปะหลัง แสดงดังในรูปที่ 4.12 และตารางที่ 4.5 ซึ่งพบว่า อัตราเร็วและประสิทธิภาพของการสร้างก๊าซชีวภาพสำหรับสภาวะที่มีการย่อยสลายกากมันด้วยเอนไซม์สูงกว่าของสภาวะควบคุม (สภาวะที่ 1) อย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ในทุกกรณี โดยสภาวะที่ให้ประสิทธิภาพและอัตราเร็วของการสร้างก๊าซสูงสุด ได้แก่ สภาวะที่ 5 ซึ่งเป็นสภาวะที่มีน้ำตาลรีดิวซ์สูงสุด รองลงมาเป็นสภาวะที่ 3, 2 และ 4 ตามลำดับ



รูปที่ 4.12 ปริมาณก๊าซสะสม ภายหลังจากการหมัก 0, 5, 10, 20 และ 30 วัน

สำหรับสภาวะควบคุม ซึ่งเป็นสารละลายกากมันสำปะหลัง 2%TS ที่ไม่ผ่านการทำปฏิกิริยากับเอนไซม์ใดๆ ปรับพีเอชให้เป็นกลาง เติมสารละลายอาหารแล้วหมักกับเชื้อจุลินทรีย์ในอัตราส่วนที่เท่ากัน จะเห็นว่า อัตราการผลิตก๊าซในช่วง 3 วันแรกสูงใกล้เคียงกับของสภาวะอื่นๆ แต่หลังจากนั้นอัตราการผลิตก๊าซลดลงอย่างมากจนทำให้ปริมาณก๊าซสะสมมีค่าค่อนข้างคงที่จนกระทั่งวันที่ 18 ของการหมัก อัตราการผลิตก๊าซจึงค่อยๆ เพิ่มขึ้น แต่ก็ยังถือว่าน้อยเมื่อเทียบกับสภาวะอื่นๆ นอกจากนี้สภาวะที่ 6 ซึ่งไม่มีการปรับพีเอชให้เป็นกลางก่อนนำไปหมักก๊าซ พบว่า มี

อัตราการสร้างก๊าซในช่วงสัปดาห์แรกสูงใกล้เคียงกับของสถานะที่ 5 แต่หลังจากนั้นอัตราการผลิตก๊าซได้ลดลงอย่างมากจนทำให้ปริมาณก๊าซสะสมมีค่าค่อนข้างคงที่และมีค่าใกล้เคียงกับสถานะควบคุมในวันที่ 30 ของการหมัก ทั้งนี้ยังไม่สามารถระบุสาเหตุที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ดังกล่าว นอกจากข้อสมมติฐานว่าอาจเกิดจากมีรอยรั่วที่สายขนานำก๊าซและบริเวณรอยเชื่อมต่อต่างๆ ของถังแทนที่น้ำ เนื่องจากผลการตรวจวัดพีเอชและอัลคาไลน์ดีกซ์ภายหลังการหมักที่เวลาต่างๆ ไม่พบความผิดปกติใดๆ

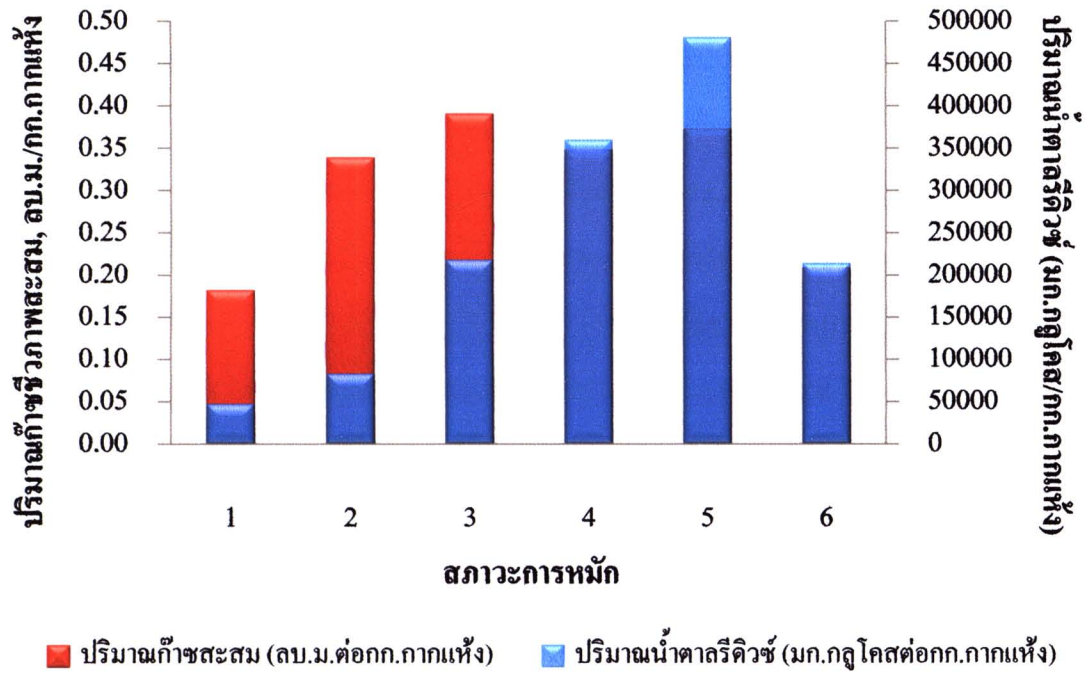
ตารางที่ 4.5 ปริมาณก๊าซสะสมที่เกิดขึ้นระหว่างการหมักกากมันที่ระยะเวลาต่างๆ

สถานะที่	ปริมาณก๊าซสะสม, ลบ.ม./กก.กากแห้ง				
	5 วัน	10 วัน	15 วัน	20 วัน	30 วัน
1	0.099	0.099	0.103	0.133	0.182
2	0.119	0.147	0.169	0.242	0.339
3	0.137	0.194	0.207	0.278	0.391
4	0.113	0.159	0.195	0.263	0.348
5	0.167	0.197	0.245	0.290	0.373
6	0.150	0.181	0.181	0.194	0.209

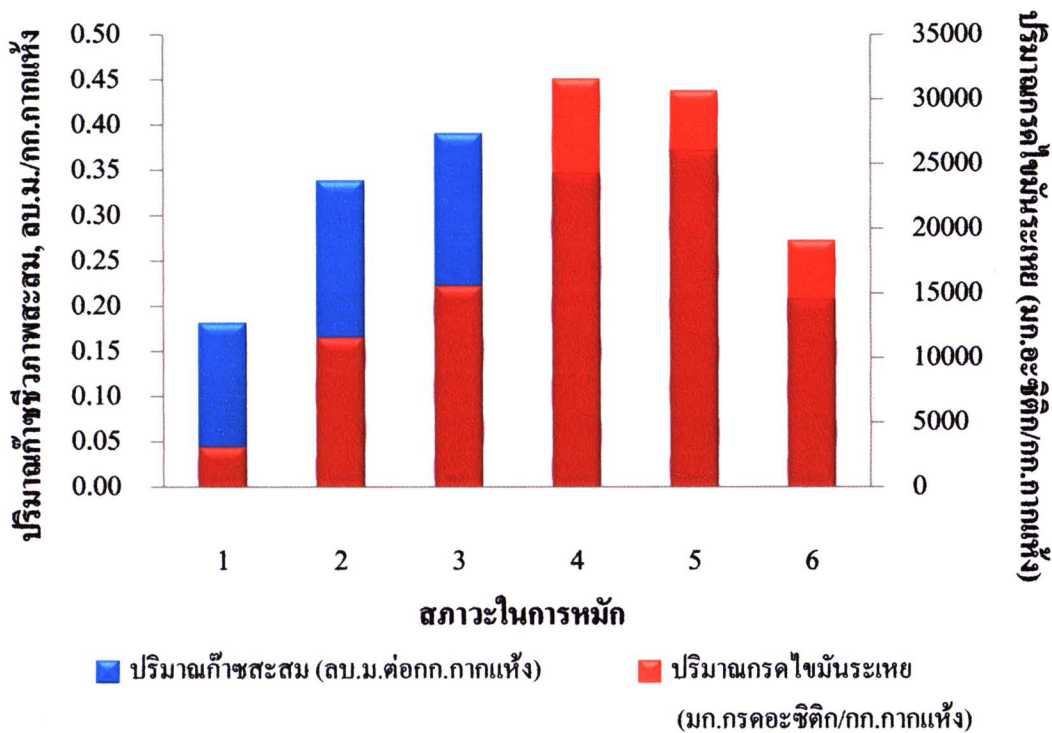
เมื่อพิจารณาจากปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้หลังจากการหมัก 30 วัน พบว่า ที่สถานะควบคุมให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเฉลี่ย 0.182 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมกากแห้ง หรือ 0.029 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมกากเปียก ในขณะที่สถานะที่มีการไฮโดรไลซิสกากมันด้วยเอนไซม์ก่อนการหมัก ทุกสถานะให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมเฉลี่ยใกล้เคียงกัน โดยมีค่าอยู่ในช่วง 0.339-0.391 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมกากแห้ง หรือ 0.033-0.062 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมกากเปียก (0.193-0.360 นอร์มัลลูกบาศก์เมตร (Nm^3) ต่อกิโลกรัมกากแห้ง หรือ 0.030-0.057 นอร์มัลลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมกากเปียก) ซึ่งมากกว่ากรณีของสถานะควบคุมประมาณสองเท่าตัว

จากที่กล่าวมาแล้วจะเห็นว่า หากการเดินระบบจริงออกแบบให้มีระยะเวลาเก็บกักกากมัน (hydraulic retention time) 30 วัน สภาวะที่ 2 ก็น่าจะเป็นสภาวะเหมาะสมสำหรับการทำไฮโดรไลซิส เนื่องจากสภาวะดังกล่าวใช้ปริมาณเอนไซม์และเวลาในการทำปฏิกิริยาน้อยที่สุด และใช้ค่าพีเอชสูงสุด จึงสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายต่ำ ในขณะที่ปริมาณก๊าซที่ได้ไม่แตกต่างจากสภาวะอื่นๆ มาก อย่างไรก็ตาม จากผลการศึกษาของพิชยา สวรสและคณะซึ่งได้ทำการศึกษาสมรรถนะการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังที่ผ่านการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์เซลลูเลส 5-20 NCU ต่อกรัมกากแห้ง และเพคตินเอส 5-125 PGU ต่อกรัมกากแห้ง ที่พีเอช 4.5 เป็นเวลา 30 นาที กลับพบว่า การไฮโดรไลซิสกากมันก่อนการหมักก๊าซนั้นไม่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการสร้างก๊าซชีวภาพได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยให้ปริมาณก๊าซสะสมภายหลังการหมัก 30 วันในช่วง 0.034-0.047 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมกากเปียก (พิชยา สวรส และคณะ, 2551)

เมื่อทำการเปรียบเทียบกับผลการทดลองชุดที่ 1 แสดงให้เห็นว่า สภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ ได้แก่ สภาวะที่ 5 ซึ่งเป็นการไฮโดรไลซิสกากมันด้วยเอนไซม์เซลลูเลสและเพคตินเอส 30 NCU และ 200 PGU ต่อกรัมกากแห้ง ตามลำดับ ที่พีเอช 3 เป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง ซึ่งสามารถผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.373 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมกากแห้ง (0.344 นอร์มัลลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมกาก) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับสภาวะที่ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสูงสุด ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่า สภาวะที่ให้น้ำตาลรีดิวซ์สูงเป็นสภาวะที่ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสูงด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.13 สำหรับสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตกรดไขมันระเหย ได้แก่ สภาวะที่ 4 ซึ่งเป็นการไฮโดรไลซิสกากมันด้วยเอนไซม์เซลลูเลสและเพคตินเอส 30 NCU และ 50 PGU ต่อกรัมกากแห้ง ตามลำดับ ที่พีเอช 3 เป็นระยะเวลา 6 ชั่วโมง ซึ่งสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้เท่ากับ 0.348 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมกากแห้ง (0.321 นอร์มัลลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมกาก) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับสภาวะที่ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสูงสุดเช่นกัน ดังนั้นจึงอาจกล่าวได้ว่า สภาวะที่ให้กรดไขมันระเหยสูงเป็นสภาวะที่ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสูงด้วย ดังแสดงในรูปที่ 4.14

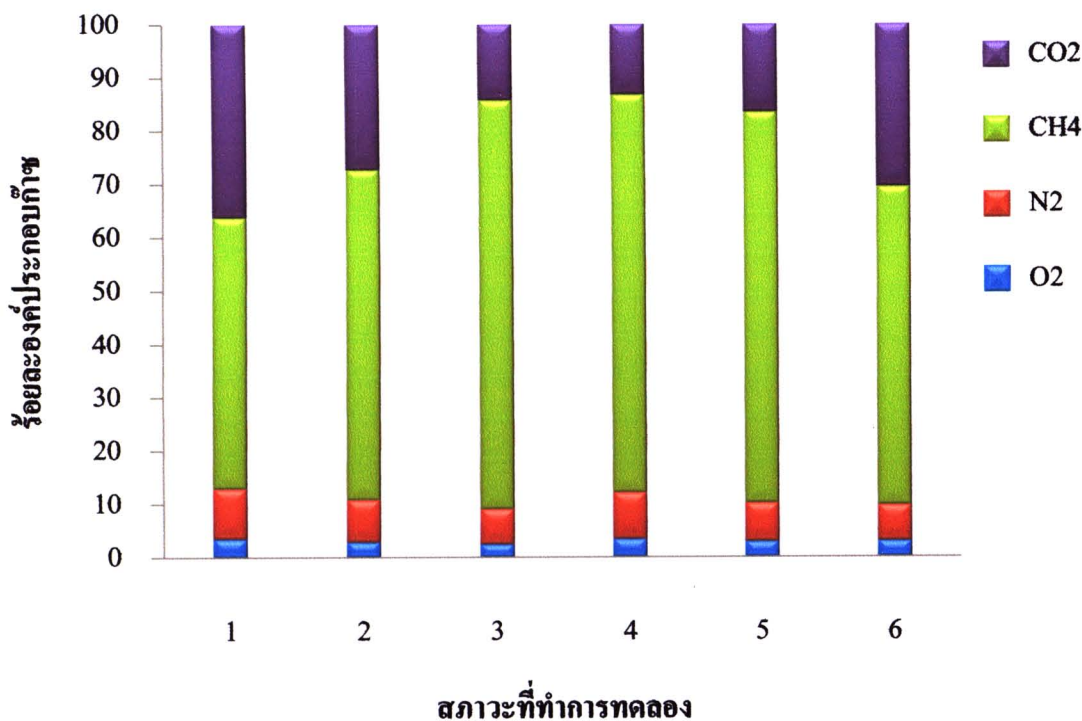


รูปที่ 4.13 การเปรียบเทียบปริมาณน้ำประปาและไฟฟ้าที่ได้จากการหมักแต่ละสภาวะ



รูปที่ 4.14 การเปรียบเทียบปริมาณกรดไขมันและไฟฟ้าที่ได้จากการหมักแต่ละสภาวะ

ในส่วนขององค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่เกิดจากการหมักกากมันสำปะหลังเป็นเวลา 30 วัน พบว่ามีก๊าซมีเทนอยู่ในช่วงร้อยละ 50.9-76.7 ซึ่งเป็นสัดส่วนที่ค่อนข้างมาก เนื่องจากการวิเคราะห์ในช่วงท้ายของการหมักซึ่งเป็นช่วงของการผลิตก๊าซมีเทน ในขณะที่สัดส่วนของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่วิเคราะห์ได้มีค่าอยู่ในช่วงร้อยละ 13.2-36.3 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าก๊าซมีเทน เนื่องจากการหมักได้ผ่านพ้นช่วงของการผลิตกรดไปแล้ว ทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในช่วงของการผลิตกรดอินทรีย์ถูกจุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่สร้างมีเทนเปลี่ยนกรดอินทรีย์ไปเป็นก๊าซมีเทนแทน ส่วนก๊าซไนโตรเจนและก๊าซออกซิเจนมีค่าร้อยละ 6.6-9.4 และ 2.4-3.5 ตามลำดับ ซึ่งค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับระบบไร้ออกออกซิเจนโดยทั่วไป ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากขั้นตอนการเก็บตัวอย่างก๊าซไปวิเคราะห์อาจจะมีอากาศค้างอยู่ในสายยางที่แยกเป็นสามทางที่ใช้สำหรับใช้ต่อกับถุงเก็บก๊าซหรือมีอากาศค้างอยู่ในถุงเก็บก๊าซเพื่อไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบของก๊าซในก๊าซชีวภาพ โดยองค์ประกอบของก๊าซต่างๆ จะแตกต่างกันไปในแต่ละสภาวะการหมัก แสดงได้ดังรูปที่ 4.15



รูปที่ 4.15 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ ภายหลังกการหมักเป็นเวลา 30 วัน



4.2.5 การประเมินค่าใช้จ่ายในการทำไฮโดรไลซิสกากมัน

4.2.5.1 ค่าใช้จ่ายในการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังก่อนการหมักก๊าซชีวภาพ

สำหรับราคาเอนไซม์ที่ใช้ในการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังและราคาสารกรด และสารด่างที่ใช้ในการปรับพีเอชของไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลัง แสดงไว้ในตารางที่ 4.6 และ 4.7 ตามลำดับ โดยราคาเอนไซม์เซลลูเลสความเข้มข้น 700 NCU ต่อกรัมของเอนไซม์ ขนาด 50 มิลลิลิตร ราคา 6,600 บาท และราคาเอนไซม์เพคตินเอสความเข้มข้น 26,000 PGU ต่อกรัมของเอนไซม์ ขนาด 50 มิลลิลิตร ราคา 5,280 บาท (ราคาปลีก ณ เดือนเมษายน พ.ศ. 2554) สำหรับสารเคมีที่ใช้ในการปรับพีเอชของไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลัง คือ กรดซัลฟิวริกเข้มข้น 98% ชนิด Commercial grade ของบริษัท กุสวัสต์ เคมีเคิล จำกัด ราคา 390 บาทต่อกรด 20 ลิตร และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ ชนิด Commercial grade ของบริษัท ยูเนียนชาวด์ จำกัด ราคา กิโลกรัมละ 45 บาท (ราคาปลีก ณ เดือนเมษายน พ.ศ. 2554) อนึ่ง ราคาสารเคมีในข้างต้นนั้นเป็นราคาสารเคมีที่สั่งซื้อเป็นแบบราคาปลีก ในกรณีของการเดินระบบจริงต้องมีการใช้สารเคมีในปริมาณมากขึ้น อาจเสียค่าใช้จ่ายในการซื้อสารเคมีได้ราคาสูงกว่า เนื่องจากซื้อได้ในราคาส่ง

ตารางที่ 4.6 ราคาเอนไซม์ที่ใช้ในการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังก่อนการหมักก๊าซชีวภาพ

ความเข้มข้น เอนไซม์เซลลูเลส (NCU/กก.กากแห้ง)	ความเข้มข้น เอนไซม์เพคตินเอส (PGU/กก.กากแห้ง)	ราคาเอนไซม์ (บาท/กก.กากแห้ง)	
		เอนไซม์เซลลูเลส	เอนไซม์เพคตินเอส
5	50	786	169
15	125	2,357	423
30	200	4,714	677

ตารางที่ 4.7 ราคากรดและด่างที่ใช้ในการปรับพีเอชขยะไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลัง

พีเอช	ราคากรดที่ใช้ ปรับพีเอช (บาท/กก.กากแห้ง)	ราคาด่างที่ใช้ ปรับพีเอชให้เป็นกลางก่อนหมัก (บาท/กก.กากแห้ง)
3.0	0.45	0.69
4.5	0.35	0.45
6.0	0.23	0.21

4.2.5.2 การใช้ก๊าซชีวภาพทดแทนก๊าซหุงต้ม (LPG)

ก๊าซชีวภาพ 1 ลูกบาศก์เมตร สามารถทดแทนก๊าซหุงต้มได้ 0.46 กิโลกรัม (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2548) สำหรับการประเมินค่าใช้จ่ายในส่วนของการเคมีที่ใช้สำหรับการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังและความคุ้มค่าในการลงทุนเมื่อใช้ทดแทนก๊าซหุงต้ม แสดงดังตารางที่ 4.8 โดยราคาก๊าซหุงต้มกิโลกรัมละ 18.90 บาท (ราคาของ Unique Gas เชื้อราคาจาก ปตท. วันที่ 24 มีนาคม พ.ศ. 2554) ดังนั้น จะเห็นว่าก๊าซชีวภาพที่ได้จากการหมักกากมันทุกสภาวะสามารถทดแทนก๊าซหุงต้มได้ โดยสภาวะที่ 3 สามารถทดแทนพลังงานได้มากที่สุด และประหยัดเงินในการซื้อก๊าซหุงต้มเพื่อบริโภคในครัวเรือนได้ 3.40 บาทต่อกิโลกรัมก๊าซหุงต้ม ทั้งนี้ สภาวะที่ 5 มีค่าใช้จ่ายในการทดลองสูงที่สุด เท่ากับ 5,392.14 บาทต่อกิโลกรัมกากแห้ง ซึ่งให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสูงที่สุด สามารถทดแทนค่าใช้จ่ายสำหรับก๊าซหุงต้มได้เพียง 3.24 บาทต่อกิโลกรัมกากแห้ง ซึ่งน้อยกว่าค่าใช้จ่ายในการทดลองมาก เช่นเดียวกับสภาวะที่ 2, 3, 4 และ 6 ซึ่งปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้สามารถทดแทนค่าใช้จ่ายก๊าซหุงต้มน้อยกว่าค่าใช้จ่ายในการทดลอง ดังนั้น สภาวะการหมักที่มีการไฮโดรไลซิสกากมัน ก่อนนำไปหมัก จึงไม่เหมาะสมในการเดินระบบจริง เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการทดลองสูงมากเมื่อเทียบกับค่าใช้จ่ายก๊าซหุงต้มที่ประหยัดได้ ดังนั้น สภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบจริง คือ สภาวะควบคุมที่ไม่มีค่าใช้จ่ายในการทดลอง ซึ่งสามารถทดแทนค่าใช้จ่ายสำหรับก๊าซหุงต้มได้ 1.58 บาทต่อกิโลกรัมกากแห้ง อย่างไรก็ตาม ค่าใช้จ่ายในการทดลองนี้ไม่ได้รวมกับค่าก่อสร้างและค่าดำเนินการ ดังนั้น ค่าใช้จ่ายอาจเพิ่มมากขึ้น หากใช้ในการเดินระบบจริง และเนื่องจากราคาก๊าซหุงต้มเป็นราคาอยู่ในความควบคุมของรัฐบาล หากเป็นราคาจริง ผลผลิตที่ได้ก็อาจทดแทนการใช้ก๊าซหุงต้มได้มากขึ้น

ตารางที่ 4.8 ค่าใช้จ่ายในส่วนของการทำไฮโดรไลซิสและความคุ้มค่าในการลงทุนเมื่อใช้ทดแทนก๊าซหุงต้ม (LPG)

สถานะ	ค่าใช้จ่ายในการไฮโดรไลซิส (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)	ทดแทนค่าใช้จ่าย (บาท/กก.กากแห้ง)	ปริมาณก๊าซ (ลบ.ม./กก.กากแห้ง)	ทดแทนก๊าซหุงต้ม (กก.LPG/กก.กากแห้ง)	ทดแทนค่าใช้จ่าย (บาท/กก.กากแห้ง)	ปริมาณก๊าซ (ลบ.ม./กก.กากแห้ง)	ทดแทนก๊าซหุงต้ม (กก.LPG/กก.กากแห้ง)	ทดแทนค่าใช้จ่าย (บาท/กก.กากแห้ง)	ปริมาณก๊าซ (ลบ.ม./กก.กากแห้ง)	ทดแทนก๊าซหุงต้ม (กก.LPG/กก.กากแห้ง)	ทดแทนค่าใช้จ่าย (บาท/กก.กากแห้ง)
1	-	0.10	0.05	0.86	0.10	0.05	0.86	0.13	0.06	1.16	0.18	0.08	1.58
2	955.44	0.12	0.05	1.03	0.15	0.07	1.28	0.24	0.11	2.10	0.34	0.16	2.95
3	4,883.44	0.14	0.06	1.19	0.19	0.09	1.69	0.28	0.13	2.42	0.39	0.18	3.40
4	4,884.14	0.11	0.05	0.98	0.16	0.07	1.38	0.26	0.12	2.29	0.35	0.16	3.03
5	5,392.14	0.17	0.08	1.45	0.20	0.09	1.71	0.29	0.13	2.52	0.37	0.17	3.24
6	4,883.45	0.15	0.07	1.30	0.18	0.08	1.57	0.19	0.09	1.69	0.21	0.10	1.82

4.2.5.3 การใช้ก๊าซชีวภาพทดแทนพลังงานไฟฟ้า

ก๊าซชีวภาพ 1 ลูกบาศก์เมตร สามารถทดแทนพลังงานไฟฟ้าได้ 1.2 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง (กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน, 2548) สำหรับการประเมินค่าใช้จ่ายในส่วนของการใช้สำหรับการไฮโดรไลซิสกากมันสำปะหลังและความคุ้มค่าในการลงทุนเมื่อใช้ทดแทนพลังงานไฟฟ้า แสดงดังตารางที่ 4.9 โดยราคาค่าไฟฟ้าคิดจากหน่วยของพลังงานไฟฟ้า 2.70 บาทต่อกิโลวัตต์ต่อชั่วโมง (การไฟฟ้านครหลวง, 2554) ดังนั้น จะเห็นว่าก๊าซชีวภาพที่ได้จากการหมักกากมันทุกสภาวะสามารถทดแทนพลังงานไฟฟ้าได้ โดยสภาวะที่ 3 สามารถทดแทนพลังงานไฟฟ้าได้มากที่สุดและประหยัดค่าใช้จ่ายได้ 1.27 บาทต่อกิโลวัตต์ต่อชั่วโมง ทั้งนี้ สภาวะที่ 5 มีค่าใช้จ่ายในการทดลองสูงที่สุด และสามารถทดแทนค่าใช้จ่ายสำหรับพลังงานไฟฟ้าได้เพียง 1.21 บาทต่อกิโลกรัมกากแห้ง ซึ่งน้อยกว่าค่าใช้จ่ายในการทดลอง เช่นเดียวกันกับสภาวะที่ 2, 3, 4 และ 6 ซึ่งปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้สามารถทดแทนค่าใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้าได้น้อยกว่าค่าใช้จ่ายในการทดลอง ดังนั้น สภาวะการหมักที่มีการไฮโดรไลซิสกากมัน ก่อนนำไปหมัก จึงไม่เหมาะสมในการเดินระบบจริง เนื่องจากค่าใช้จ่ายในการทดลองสูงมากเมื่อเทียบกับค่าใช้จ่ายพลังงานไฟฟ้าที่ประหยัดได้ ดังนั้น สภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบจริง คือ สภาวะควบคุมที่ไม่มีค่าใช้จ่ายในการทดลอง ซึ่งสามารถทดแทนค่าใช้จ่ายสำหรับพลังงานไฟฟ้าได้ 0.59 บาทต่อกิโลกรัมกากแห้ง

ตารางที่ 4.9 ค่าใช้จ่ายในส่วนของการดำเนินงานที่ใช้ในโครงการไฮโดรไลซิสและควบคุมค่าในการลงทุนเมื่อใช้ทดแทนพลังงานไฟฟ้า

สถานะ	ค่าใช้จ่ายในการไฮโดรไลซิส (บาท/กก.กากแห้ง)	ระยะเวลาหมัก 5 วัน			ระยะเวลาหมัก 10 วัน			ระยะเวลาหมัก 20 วัน			ระยะเวลาหมัก 30 วัน		
		ปริมาณก๊าซ (ลบ.ม./กก.กากแห้ง)	ทดแทนพลังงานไฟฟ้า (กิโลวัตต์/ชั่วโมง)	ทดแทนค่าใช้จ่าย (บาท/กก.กากแห้ง)	ปริมาณก๊าซ (ลบ.ม./กก.กากแห้ง)	ทดแทนพลังงานไฟฟ้า (กิโลวัตต์/ชั่วโมง)	ทดแทนค่าใช้จ่าย (บาท/กก.กากแห้ง)	ปริมาณก๊าซ (ลบ.ม./กก.กากแห้ง)	ทดแทนพลังงานไฟฟ้า (กิโลวัตต์/ชั่วโมง)	ทดแทนค่าใช้จ่าย (บาท/กก.กากแห้ง)	ปริมาณก๊าซ (ลบ.ม./กก.กากแห้ง)	ทดแทนพลังงานไฟฟ้า (กิโลวัตต์/ชั่วโมง)	ทดแทนค่าใช้จ่าย (บาท/กก.กากแห้ง)
1	-	0.10	0.12	0.32	0.10	0.12	0.32	0.13	0.16	0.43	0.18	0.22	0.59
2	955.44	0.12	0.14	0.39	0.15	0.18	0.48	0.24	0.29	0.78	0.34	0.41	1.10
3	4,883.44	0.14	0.16	0.44	0.19	0.23	0.63	0.28	0.33	0.90	0.39	0.47	1.27
4	4,884.14	0.11	0.14	0.31	0.16	0.19	0.52	0.26	0.32	0.85	0.35	0.42	1.13
5	5,392.14	0.17	0.20	0.54	0.20	0.24	0.64	0.29	0.35	0.94	0.37	0.45	1.21
6	4,883.45	0.15	0.18	0.49	0.18	0.22	0.59	0.19	0.23	0.63	0.21	0.25	0.68

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากในการศึกษานี้ได้สั่งซื้อเอนไซม์มาจากต่างประเทศในปริมาณที่ไม่มากและซื้อมาในราคาปลีก จึงมีราคาที่ค่อนข้างสูง แต่ในอนาคตหากมีการผลิตเอนไซม์ได้เอง อาจทำให้สามารถซื้อเอนไซม์ได้ในราคาที่ต่ำลง หากซื้อในปริมาณมาก การใช้เอนไซม์ในการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมันสำปะหลังก็น่าจะมีความเป็นไปได้มากขึ้น