รายงานผลการวิจัย

เรื่อง ศักยภาพการผลิตเอทานอลและแก๊สชีวภาพจากลำไยตกเกรด

Potential of Ethanol and Biogas Production from Low Grade Longan

โครงการย่อยภายใต้ชุดโครงการ : การสร้างมูลค่าเพิ่มลำไยตกเกรด

Increase Value-Added of Low Grade Longan

ได้รับการจัดสรรงบประมาณวิจัย ประจำปี 2554

จำนวน 300,000 บาท

หัวหน้าโครงการ ผศ.ดร. ณัฐวุฒิ ดุษฎี

ผู้ร่วมโครงการ ผศ.ดร. ศิรินุช จินดารักษ์

ผศ.ดร. ธวัลรัตน์ รัตนเดชานาคินทร์

ดร. ญาณากร สุทัสนมาลี

นายอุกกฤต สมัครสมาน

งานวิจัยเสร็จสิ้นสมบูรณ์

8/พ.ค./2555

สารบัญ

	หน้า
สารบัญตาราง	ค
สารบัญภาพ	ง
บทคัดย่อ	1
Abstract	2
คำนำ	3
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	5
ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	5
การตรวจเอกสาร	6
อุปกรณ์และวิธีการ	19
ผลการวิจัย	30
วิจารณ์ผลการวิจัย	48
สรุปผลการวิจัย	53
เอกสารอ้างอิง	54

สารบัญตาราง

หน้า

ตารางที่ 1	แสดงวัตถุดิบชนิดต่างๆที่ได้มีการศึกษาในการผลิตถ่านกัมมันต์	4
ตารางที่ 2	การแบ่งกลุ่มของขนาดรูพรุน	5
ตารางที่ 3	เปรียบเทียบข้อดีข้อเสียของกระบวนการผลิตถ่านกัมมันต์ โดยการกระตุ้นทางกายภาพและทางเคมี	11
ตารางที่ 4	สภาวะในการทดลองผลิตถ่านกัมมันต์อัดแท่งจากลำไยตกเกรด	12
ตารางที่ 5	ค่าการดูดซับไอโอดีนที่กระตุ้นด้วยซิงค์คลอไรด์	12
ตารางที่ 6	สภาวะในการทดลองผลิตถ่านกัมมันต์อัดแท่งจากลำไยตกเกรด	30
ตารางที่ 7	สภาวะในการทดลองผลิตถ่านกัมมันต์อัดแท่งจากลำไยตกเกรด	31
ตารางที่ 8	การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ในส่วนของต้นทุนคงที่และต้นทุนผันแปร	31
ตารางที่ 9	คุณสมบัติต่างๆของถ่านกัมมันต์ทางการค้าและถ่านกัมมันต์จากลำไยตกเกรด	32
ตารางที่ 10	คุณสมบัติทางเคมีของลำไยสดและลำไยอบแห้งตกเกรต	32
ตารางที่ 11	ผลการหาสภาวะที่เหมาะสมในระดับสเกลขนาดเล็กของลำไยสดตกเกรต	33
ตารางที่ 12	ผลการหาสภาวะที่เหมาะสมในระดับสเกลขนาดเล็กของลำไยอบแห้งตกเกรด	34
ตารางที่ 13	ผลการศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องกลั่นแอลกอฮอล์ต้นแบบ (ลำไยอบแห้ง)	36
ตารางที่ 14	ผลการศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องกลั่นแอลกอฮอล์ต้นแบบ (ลำไยสด)	37
ตารางที่ 15	ผลการทดสอบค่าของน้ำหมักที่ใช้ในการทำไบโอแก๊สก่อน การบรรจุลงในถังระบบ	39
ตารางที่ 16	รายละเอียดสำหรับการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์สำหรับต้นทุนคงที่	46
ตารางที่ 17	รายละเอียดสำหรับการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์สำหรับ ต้นทุนผันแปร	47
ตารางที่ 18	การประเมินต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ของการผลิตเอทานอลจากลำไยตกเกรด	47

สารบัญภาพ

หน้า

ภาพที่ 1 วิกฤติการณ์ด้านราคารับซื้อลำไยปี 2548 3
ภาพที่ 2 แสดงการเตรียมผลิตเอทานอลจากเนื้อลำไยปั่น 6
ภาพที่ 3 แสดงการเปลี่ยนน้ำตาลกลูโคสเป็นเอทานอลโดยการหมักยีสต์ 6
ภาพที่ 4 เครื่องกลั่นแยกเอทานอล 7
ภาพที่ 5 ขั้นตอนของปฏิกิริยาชีวเคมีที่เกิดขึ้นในการบำบัดแบบแอนแอโรบิค 11
ภาพที่ 6 แสดงแผนการดำเนินการทดลองผลิตเอทานอลและแก๊สชีวภาพจากลำไยตกเกรด 20
ภาพที่ 7 การเตรียมหมักน้ำลำไยตกเกรดตามสภาวะต่างๆ 21
ภาพที่ 8 การหมักน้ำลำไยในระดับสเกลขนาดเล็กตามสภาวะต่างๆ 21
ภาพที่ 9 ลำไยตกเกรดจากแหล่งรับซื้อ ณ ตำบลแม่แฝก อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ 22
ภาพที่ 10 การล้างและแช่ลำไยตกเกรดเพื่อฆ่าเชื้อโรค 22
ภาพที่ 11 การบีบอัดเอาน้ำลำไยด้วยเครื่องอัดไฮโดลิค 23
ภาพที่ 12 เครื่องบดละเอียดลำไยก่อนที่จะนำไปต้มเพื่อฆ่าเชื้อโรคและสกัดน้ำตาล 23
ภาพที่ 13 การต้มเพื่อฆ่าเชื้อโรคและสกัดน้ำตาลออกจากลำไยตกเกรด 24
ภาพที่ 14 การต่อยีสต์ Sacharomyces cerevisiae จากน้ำลำไยลงอาหารเลี้ยงเชื้อ YM broth 24
ภาพที่ 15 ถังหมักน้ำลำไยตกเกรดขนาด 150 ลิตร 24
ภาพที่ 16 รายละเอียดโครงสร้างหม้อกลั่นแอลกอฮอล์ต้นแบบ 25
ภาพที่ 17 หม้อกลั่นเอทานอลต้นแบบ 25
ภาพที่ 18 เครื่องมือในการวัดปริมาณแอลกอฮอล์ (Hydro meter) 26
ภาพที่ 19 ขั้นตอนการผลิตแก๊สชีวภาพจากลำไยตกเกรด 27
ภาพที่ 20 กากลำไยที่ได้จากการบีบเอาน้ำคาลเพื่อนำไปหมักแอลกอฮอล์ 28
ภาพที่ 21 มูลวัวสดที่นำมาเป็นสารตั้งต้นในการผลิตแก๊สชีวภาพจากกากลำไยตกเกรด 28
ภาพที่ 22 การเติมกากลำไยผสมมูลวัวสดลงไปในถังหมัก 29
ภาพที่ 23 การเกิดแก๊สขึ้นภายหลังจากการเติมกากลำไยที่หมักผสมกับมูลโคใน
ถังขนาด 200 ลิตร 29
ภาพที่ 24 โครงสร้างเครื่องกลั่นแอลกอฮอล์ต้นแบบ 35
ภาพที่ 25 ตัวถังต้มน้ำส่าที่มีการดัดแปลงโดยการให้ความร้อนจากการเผาท่อสแตนเลส 36
ภาพที่ 26 การกลั่นเอทานอลจากลำไยตกเกรด (แบบกะ) 37

สารบัญภาพ (ต่อ)

หน้า

ภาพที่ 27 ลักษณะถังหมักไบโอแก๊สที่ใช้ในการทดลอง 39
ภาพที่ 28 ปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นในแต่ละวันของการหมักย่อยร่วมระหว่างลำไยกับมูลโค 40
ภาพที่ 29 ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในการทดลอง 41
ภาพที่ 30 ปริมาณแก๊สมีเทนที่เกิดขึ้นในการทดลอง 42
ภาพที่ 31 ปริมาณ COD ในแต่ละวันของการทดลอง 43
ภาพที่ 32 ปริมาณ Alkalinity ของน้ำหมักกากลำไยผสมกับมูลโคในถังหมัก 44
ภาพที่ 33 ค่าพีเอชของน้ำหมักกากลำไยผสมกับมูลโคในถังหมัก 44
ภาพที่ 34 ปริมาณน้ำตาลรีดิวส์ที่ตรวจพบในถังระบบ(ถังผลิตแก๊ส) 45

ศักยภาพการผลิตเอทานอลและแก๊สชีวภาพจากลำไยตกเกรด

Potential of Ethanol and Biogas Production from Low Grade Longan

ณัฐวุฒิ ดุษฎี[1] ศิรินุช จินดารักษ์[2] ธวัลรัตน์ รัตนเดชานาคินทร์[3] และญาณากร สุทัศนมาลี[4]

Nathawut Dussadee,[1] Sirinut Jindaruk,[2] Thawanrat Ratanadachanakin,[3]

Yanakon Suthadsanamalee[4] and Aukrit Samaksaman[1]

[1]ศูนย์วิจัยพลังงานมหาวิทยาลัยแม่โจ้ จ.เชียงใหม่ 50290

[2]คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

[3] คณะวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จ.เชียงใหม่ 50290

[4]คณะวิศวกรรมศาสตร์และอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จ.เชียงใหม่ 50290

บทคัดย่อ

ลำไยเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของภาคเหนือ ซึ่งในแต่ละปีจะมีผลผลิตออกมาอย่างมากมาย (ประมาณ 600,000 ตันต่อปี) ข้อเสียเมื่อมีผลผลิตมากคือราคาขายที่ตกต่ำ ดังนั้นการนำลำไยตกเกรดมาพัฒนาเป็นแหล่งผลิตเอทานอลและหาแนวทางการเพิ่มมูลค่าจะเป็นแนวทางหนึ่งที่จะสามารถเพิ่มรายได้ของชาวสวนลำไยได้ ในการศึกษานี้จะเริ่มต้นที่การประเมินศักยภาพด้านวัตถุดิบ โดยทำการวิเคราะห์องค์ประกอบลำไยตกเกรด โดยการแยกเนื้อ เปลือก และเมล็ด จากนั้นจึงทำการประเมินศักยภาพในการผลิตเอทานอลของลำไยตกเกรด ผลที่ได้จากการหมักน้ำลำไยตกเกรดอบแห้งและลำไยสด พบว่า จะได้ความเข้มข้นแอลกอฮอล์สูงสุด เท่ากับ 8% (V/V) (325 ml) และ 8.5% (V/V) (390 ml) ณ ระยะเวลาการเลี้ยงยีสต์สด (Saccharomyces cereviceae) เท่ากับ 14 ชั่วโมง เท่ากัน และประสิทธิภาพการหมักเท่ากับ 91.44% และ 95.05% ตามลำดับ การศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องกลั่นแอลกอฮอล์ต้นแบบด้วยการกลั่นน้ำส่าจากลำไยอบแห้งตกเกรด 150 ลิตร พบว่า ปริมาตรของแอลกอฮอล์ที่กลั่นได้เท่ากับ 31.6 ลิตร เวลาในการกลั่นเท่ากับ 18 ชั่วโมง 50 นาที โดยใช้แก๊ส LPG ไปเท่ากับ 8.46 กก. ได้แอลกอฮอล์ความเข้มข้น 8.6% (V/V) และประสิทธิภาพการกลั่นเท่ากับ 48.94% ในส่วนของลำไยสดตกเกรด ปริมาณแอลกอฮอล์ที่กลั่นได้เท่ากับ 32.7 ลิตร เวลาในการกลั่นเท่ากับ 19 ชั่วโมง โดยใช้แก๊ส LPG เท่ากับ 8.37 กก. ความเข้มข้นแอลกอฮอล์ที่ได้เท่ากับ 8.6 %(V/V) และประสิทธิภาพการกลั่นเท่ากับ 50.36% จากผลการทดลอง พบว่า การผลิตเอทานอลจากลำไยตกเกรดเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถเพิ่มมูลค่าลำไยตกเกรดได้

คำสำคัญ : เอทานอล ยีสต์สด (Saccharomyces cereviceae)

Abstract

Longans are one of the most important eeonomic erops in Northern part of Thailand and eaeh year about 600,000 kg of fresh longans are harvestcd. During the harvest period where the supply is greater than the demand, the price of the longan product drops considerably. In order to solve this problem, the use of longan as another potential source of ethanol production has come under our consideration. Ir this research, the evaluation of the raw material (low grade longan) was first initiated by analyzing the component of shell, seed and kernel. Then, the potential of ethanol production from the low grade longan was determined. Result from longan juice fermentations show that the maximum amount of alcohol is estimated to be 8% (v/v) (325 ml) and 8.5% (v/v) (390 ml) and thereby giving the fermentation efficiency of 91.44% and 95.05%, when using dry and fresh low grade longan respectively. The study of a prototype alcohol steam distillation system with the capacity of 150 L using low grade dry longan found that the system produees 31.6 L of alcohol (8.6% v/v) with the total time of distillation of 18 hours and 50 minutes. The whole distillation process consumes 8.46 kg of LPG and the distillation efficiency is 48.94%. Similarly, the amount of alcohol produced from the same distillation system using low grade fresh longans is 32.7 L (8.6% v/v). The distillation time is about 19 hours with LPG consumption of 8.37 kg and the distillation efficiency is calculated to be 50.36%. This research has firmly established that the ethanol production from the low grade longans is feasible and is one of the several ways to increase the value-added of the longan product.

Key word : Ethanol Saccharomyces cereviceae

คำนำ

ลำไยเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของภาคเหนือ โดยเฉพาะในกลุ่มจังหวัดล้านนา ได้แก่จังหวัด เชียงใหม่ ลำพูน ลำปาง เชียงราย พะเยา และแม่ฮ่องสอน ซึ่งในปี พ.ศ. 2552 คาดว่าจะมีผลผลิตลำไยสดออกสู่ตลาดไม่ต่ำกว่า 600,000 ตัน ซึ่งเมื่อลำไยมีผลผลิตมากจะทำให้ราคาผลผลิตลำไยตกต่ำ ซึ่งปัญหาดังกล่าวเคยเกิดวิกฤติมาแล้วในปี 2548 ซึ่งจะเห็นว่าลำไยเกรด AA เหลือเพียงกิโลกรัมละ 12 บาท และลำไยตกเกรดตั้งแต่ เกรด B ลงไปเหลือ เพียง 2.50 บาท และเกรด C เพียง 50 สตางค์เท่านั้น ซึ่งลำไยตกเกรด (เกรด C) เกษตรกรไม่นิยมนำไปขายเนื่องจากไม่คุ้มค่าในการรวบรวมและขนส่ง และพ่อค้าคนกลางไม่สามารถนำไปอบแห้งได้ ส่วนมากจึงทิ้งอยู่ภายในสวนของเกษตรกร นอกจากนั้นแล้วลำไยเกรด AA, A , B ที่แตกขณะขนส่ง ผู้รับซื้อ/เกษตรกร ก็จะทิ้งอยู่ที่จุดรับซื้อ หรือโรงอบ เป็นจำนวนมาก

ที่มา: สำนักงานเกษตรอำเภอสามเงา จังหวัดตาก (นิรนาม, 2550) ลำไยที่ไม่ได้คุณภาพ

ภาพที่ 1 วิกฤติการณ์ด้านราคารับซื้อลำไยปี 2548

จากราคาซื้อขาย และต้นทุนการผลิตลำไยแห้งปัจจุบันพบว่า ลำไยเกรด B และ C และลำไยบุบหรือแตกขณะขนส่งมายังจุดรับซื้อหรือโรงอบแห้ง ไม่สามารถที่จะนำมาอบแห้งได้ เนื่องจากไม่คุ้มกับต้นทุนการผลิต ดังนั้นโครงการนี้จึงมีเป้าหมายที่จะพัฒนามูลค่าเพิ่มลำไยตกเกรด โดยการพัฒนาให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่ไม่ใช่สำหรับการบริโภคซึ่งจะเป็นการพัฒนาที่ยั่งยืน ทั้งนี้ในการพัฒนามูลค่าเพิ่มลำไยจำเป็นต้องทำพร้อมกันทั้ง 4 แนวทาง ได้แก่ การผลิตเอทานอลและไบโอแก๊ส การผลิตปุ๋ยอินทรีย์ การผลิตถ่านกัมมันต์ และการผลิตน้ำส้มไม้ จึงจะมีศักยภาพในการเพิ่มมูลค่า โดยมีรายละเอียดดังนี้

การเพิ่มมูลค่าด้วยการนำมาผลิตเป็นเอทานอลและแก๊สชีวภาพ

ลำไยตกเกรดเมื่อราคาลดต่ำลงเหลือเพียง 1-2 บาท จะมีค่าใกล้เคียงกับพืชอื่นที่นำมาผลิตเอทานอลเช่น มันสำปะหลัง หรืออ้อย ดังแสดงในตารางที่ 1 และเมื่อนำมาแยกเอาเปลือกและเม็ดออก ในส่วนเนื้อลำไยมีน้ำตาลเป็นองค์ประกอบ 13.4-20.12 % (นิรนาม, 2552) ดังนั้น จึงมีศักยภาพในการนำมาผลิตเป็นเอทานอลได้ และจากการทดสอบในเบื้องต้นกับลำไยนอกฤดูพบว่าในหนึ่งตันสามารถผลิตเอทานอลได้ประมาณ 50-60 ลิตร ทั้งนี้ถ้าใช้ลำไยในฤดูที่มีความหวานมากขึ้นคาดว่าจะได้ผลผลิตที่มากขึ้น

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบผลผลิตเอทานอลจากพืชต่างๆ 1 ตัน (นิรนาม, 2552)

ชนิดวัสดุ	ผลผลิตเอทานอล (ลิตรต่อตัน)
ธัญพืช	375
กากน้ำตาล	250
มันสำปะหลัง	155
น้ำมะพร้าว	83
ข้าวฟ่าง	70
อ้อย	70
ลำไย	50-60

ดังนั้นการผลิตเอทานอลจากลำไยตกเกรดจึงเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถเพิ่มมูลค่าลำไยตกเกรดได้ โดยมีศักยภาพประมาณ 1,000-1,200 บาท/ตันลำไยตกเกรด โดยประเมินที่ราคาเอทานอล 20 บาท/ลิตร (ชัชวาลและคณะ, 2550)

จากตารางที่ 2 แสดงองค์ประกอบของเนื้อลำไยชนิดต่างๆ โดยลำไยพันธุ์แห้วมีปริมาณ Total sugar สูงที่สุด รองลงมาคือ พันธุ์เบี้ยวเขียวและแดง โดยมีปริมาณ Total sugar เท่ากับ 20.12, 19.90 และ 18.63 % ตามลำดับ และปริมาณน้ำตาล Sucrose มีสูงสุดในลำไยพันธุ์แห้ว โดยมีปริมาณเท่ากับ 16.20 % ในส่วนของค่าพีเอชจะเท่ากับ 7.1 และลำไยพันธุ์ที่มีปริมาณ Total sugar น้อยที่สุด คือ พันธุ์ใบดำ โดยมีเท่ากับ 13.40 %

ตารางที่ 2 องค์ประกอบของเนื้อลำไย (นิรนาม, 2554)

พันธุ์ลำไย	pH	ความชื้น % (wb)	Sucrose (%)	Total sugar (%)
ดอ	6.5	66.90	11.20	17.20
แดง	6.5	68.20	13.00	18.63
ใบคำ	6.8	70.11	11.40	13.40
เบี้ยวเขียว	7.2	67.24	15.96	19.90
แห้ว	7.1	66.91	16.20	20.12

วัตถุประสงค์ของการทำวิจัย

เพื่อยกระดับทางเศรษฐกิจของชาวสวนลำไยด้วยการเพิ่มมูลค่าลำไยตกเกรด (แผนงานวิจัย) และเพื่อพัฒนาพลังงานทดแทนด้านเอทานอลและแก๊สชีวภาพจากลำไยตกเกรด โดยขอบเขตของโครงการวิจัยในกระบวนการผลิตเอทานอลจะใช้เนื้อลำไยตกเกรดที่แยกเปลือกและเมล็ดออก และน้ำส่าที่ได้จากกระบวนการผลิตเอทานอลจะนำมาหมักถังหมักแก๊สชีวภาพเพื่อผลิตแก๊สชีวภาพเพื่อใช้ประโยชน์ในรูปแบบพลังงานความร้อน

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

- เป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับลำไยที่เหลือทิ้ง
- เกษตรกรมีรายได้เพิ่มขึ้นจากองค์ความรู้ในงานวิจัยที่สามารถถ่ายทอดลงไปสู่ชุมชน
- ทราบศักยภาพและต้นทุนการผลิตเอทานอลและแก๊สชีวภาพจากลำไยตกเกรด
- การพัฒนาเอทานอลและแก๊สชีวภาพจากลำไยตกเกรดสามารถนำไปสู่การลดการนำเข้าเชื้อเพลิงจากต่างประเทศและลดการสูญเสียเงินตราออกสู่ต่างประเทศได้

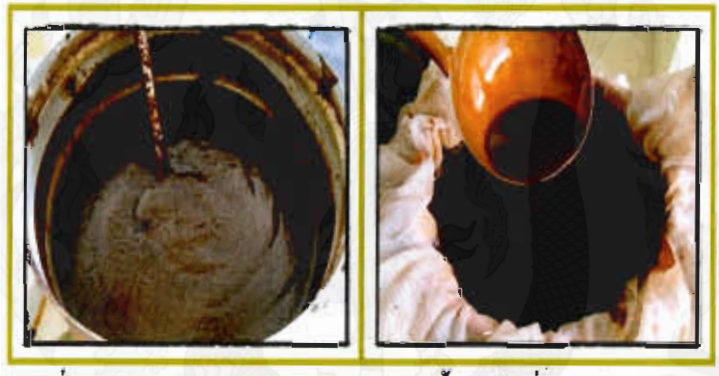
การตรวจเอกสาร

หลักการและทฤษฎี

กระบวนการผลิตเอทานอล

การเตรียมวัตถุดิบก่อนเข้ากระบวนการ

ในขั้นตอนนี้จะทำการปั่นเอาเนื้อลำไยตกเกรดให้ละเอียด เพื่อใช้ในการเตรียมการหมักต่อไป ซึ่งจากการศึกษาของ รติกร (2551) เตรียมสารสกัดลำไยเข้มข้น และใช้จุลินทรีย์ 5 ชนิด ได้แก่ *Candida utilis*, *Escherichia coli*, *Klebsiella* sp., *Saccharomyces cerevisiae* และ *Zymomonas mobilis* ในการหมักโดยใช้อาหารเลี้ยงเชื้อประกอบไปด้วย nutrient broth, yeast และ *Zymomonas* media ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 การเตรียมผลิตเอทานอลจากเนื้อลำไยปั่น (รติกร, 2551)

กระบวนการหมักเอทานอล

กระบวนการหมักเป็นการเปลี่ยนน้ำตาลกลูโคสให้กลายเป็นเอทานอล โดยใช้ยีสต์สายพันธุ์ที่นิยมใช้กันทั่วไปคือ *Saccharomyces cerevisiae* (บุณยพัต และคณะ, 2546) โดยหมักได้ทั้งแบบกะและแบบต่อเนื่อง ซึ่งประกอบไปด้วย 2 ขั้นตอนโดยขั้นตอนแรกยีสต์จะใช้น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (Monosaccharide) เป็นอาหารและเปลี่ยนน้ำตาลเป็นเอทานอลโดยผ่านกระบวนการที่เรียกว่าไกลโคไลซิส (Glycolysis) ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน ดังภาพที่ 3

$$C_6H_{12}O_6 + Yeast \longrightarrow 2CO_2 + 2C_2H_5O_{12} + 28.7\ kcal \quad (1)$$

(กลูโคส) (เอทานอล)

100 % 48.89 % 51.11 %

ภาพที่ 3 การเปลี่ยนน้ำตาลกลูโคสเป็นเอทานอลโดยการหมักยีสต์ (บุณยพัต และคณะ, 2546)

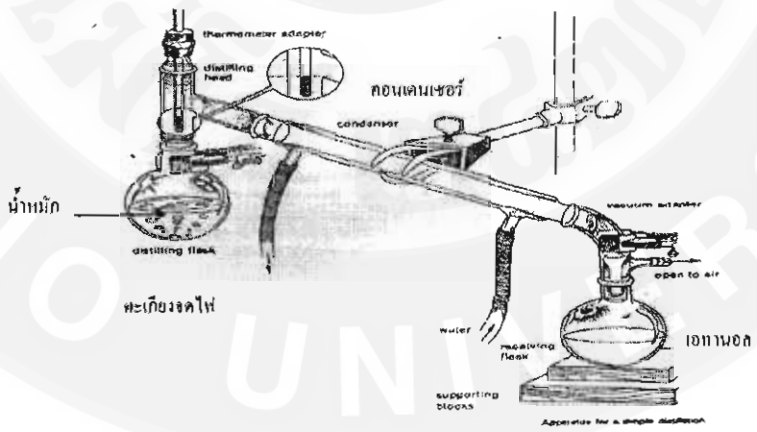
ตามทฤษฎีน้ำตาลกลูโคสร้อยละ 100 จะถูกเปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และเอทานอล เท่ากับร้อยละ 48.89 และ 51.11 โดยน้ำหนัก ตามลำดับ แต่ในทางปฏิบัติจะเกิดการสูญเสียได้เป็นสารประกอบอื่น ๆ หรือใช้ในการสร้างเซลล์ของยีสต์ ขั้นตอนที่ 2 เป็นการกลั่นเอทานอลให้ได้ความบริสุทธิ์เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 95 ปัจจุบันการผลิตเอทานอลในระดับอุตสาหกรรมทั่วโลกประมาณร้อยละ 93 ใช้กระบวนการหมัก (นิรนาม, 2006)

<u>กระบวนการเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลที่ได้จากการหมัก</u>

โดยทั่วไปมักใช้การกลั่นแยกเพื่อเพิ่มความเข้มข้นของเอทานอลขึ้นไปถึงระดับที่ไม่สามารถกลั่นต่อได้กล่าวคือเกิดเป็นสารผสมอะซีโอโทรปิก (95.5% เอทานอลโดยปริมาตร) จากนั้นจึงใช้กระบวนการแยกต่างๆ เช่น กระบวนการกลั่นแยกแบบอะซีโอโทรปิก กระบวนการเพอร์แวปเปอร์เรชั่น กระบวนการดูดซับเพื่อทำให้เอทานอลบริสุทธิ์ (99.9% เอทานอลโดยปริมาตร) (นิรนาม, 2549)

<u>กระบวนการทำเอทานอลให้บริสุทธิ์</u>

วิธีการทำให้เอทานอลบริสุทธิ์ (Anhydrous Ethnol) สามารถทำให้จาก 3 กระบวนการ คือ กระบวนการกลั่นแยกแบบอะซีโอโทรปิก กระบวนการเพอร์แวปพอเรชั่น และกระบวนการดูดซับ (สามารถ, 2552) ซึ่งจากการศึกษาและเปรียบเทียบทางเศรษฐศาสตร์ของทั้ง 3 กระบวนการ พบว่ากระบวนการดูดซับเป็นกระบวนการที่มีค่าใช้จ่ายต่ำสุด



ภาพที่ 4 เครื่องกลั่นแยกเอทานอล (สามารถ, 2009)

ประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลจากลำไยตกเกรด

จากผลของแอลกอฮอล์ที่ได้จากการหมักนำมาคำนวณค่าประสิทธิภาพการหมัก (Fermentaiton Efficiency) และ Conversion ratio (Yield) ดังนี้ (สาวิตรี, 2540)

$$\text{ประสิทธิภาพการหมัก} = \frac{\text{แอลกอฮอล์ที่ผลิตได้ทั้งหมด (ลิตร)} \times 100}{\text{แอลกอฮอล์ที่ควรได้ทางทฤษฎี (ลิตร)}}$$

$$\text{Conversion ratio (คิดจากน้ำหนักกากแห้ง)} = \frac{\text{แอลกอฮอล์ที่ผลิตได้ทั้งหมด (กรัม)}}{\text{ปริมาณกากที่ใช้ (กรัม โดยน้ำหนักแห้ง)}}$$

หลักการและทฤษฎีการผลิตแก๊สชีวภาพ

แก๊สชีวภาพ คือ กลุ่มแก๊สที่เกิดขึ้นจากการย่อยสลายของอินทรียวัตถุ เช่น คน สัตว์ พืชและสิ่งมีชีวิตชนิดต่างๆ ที่ตายลงแล้วถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ กลุ่มหนึ่ง โดยจุลินทรีย์กลุ่มนี้ดำรงชีวิตโดยไม่ต้องการออกซิเจน ซึ่งในขณะทำการย่อยสลายนั้นจะเกิดแก๊สขึ้นกลุ่มหนึ่ง โดยมีแก๊สมีเทนเป็นองค์ประกอบหลัก รองลงมาคือคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สไนโตรเจน แก๊สไฮโดรเจนและแก๊สชนิดอื่นๆ โดยที่แก๊สมีเทนจะมีมากที่สุด มีคุณสมบัติไม่มีสีไม่มีกลิ่นและติดไฟได้

การย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยจุลินทรีย์ที่ไม่ใช้อากาศ หมายถึงการย่อยสลายสารอินทรีย์ทางชีวภาพ ด้วยจุลินทรีย์ที่ไม่ใช่อากาศ โดยสารอินทรีย์จะถูกใช้ในการออกซิเดชั่น ภายในเซลล์จุลินทรีย์ ภายในเซลล์จุลินทรีย์โดยกระบวนการนี้จะมีการเปลี่ยนรูปสารอินทรีย์ส่วนหนึ่งไปเป็นเซลล์ใหม่ และอีกส่วนหนึ่งจะถูกเปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์และมีก๊าซมีเทนเพื่อให้จุลินทรีย์ที่ไม่ใช้อากาศเปลี่ยนแปลงกรดอินทรีย์ระเหยง่ายให้เป็นมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ จึงต้องลดขนาดสารอินทรีย์และเปลี่ยนเป็นกรดอินทรีย์ก่อนที่ จุลินทรีย์จะย่อยสลายให้เป็นก๊าซชีวภาพ (มีเทน+คาร์บอนไดออกไซด์)

จุดเด่นของการบำบัดด้วยจุลินทรีย์แบบไม่ใช้อากาศ

1. ได้ผลผลิตคือ "ก๊าซชีวภาพ"ซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทนได้
2. ไม่สิ้นเปลืองพลังงานในการเดินระบบ
3. รองรับอัตราภาระบรรทุกสารอินทรีย์(Organic loading rate)ได้มากกว่า

4. มีความต้องการสารอาหารเสริม เช่น ไนโตเจน (N) และ ฟอสฟอรัส (P) เพื่อใช้ในกระบวนการสังเคราะห์เซลล์ใหม่น้อยกว่า

5. ทนต่อภาวะ shock load และการผันแปรของอัตราการไหลได้ดีกว่า

6. มีตะกอนส่วนเกินที่จะต้องกำจัดน้อยกว่าแบบใช้อากาศ

<u>จุดด้อยของการบำบัดด้วยจุลินทรีย์แบบไม่ใช้อากาศ</u>

1. จุลินทรีย์มีอัตราการเจริญเติบโตช้า ต้องใช้เวลาอยู่ในระบบนาน ทำให้ถังปฏิกิริยาต้องมีปริมาตรมากกว่า และใช้พื้นที่ในการก่อสร้างมากกว่า

2. การเริ่มเดินระบบ (start – up) ค่อนข่างยุ่งยากและใช้เวลานานกว่าจะเข้าสู่สภาวะคงที่ (steady state) การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ค่อนข้างต่ำ

3. น้ำที่บำบัดแล้ว ยังคงเหลือความสกปรกสูงเกินกว่าที่จะทิ้งลงแม่น้ำ จำเป็นต้องได้รับการบำบัดเพิ่มเติม เพื่อให้คุณภาพน้ำทิ้งตามมาตรฐาน

4. ถังปฏิกิริยา ภาชนะ และท่อต้องใช้วัสดุที่ทนต่อการกัดกร่อน

5. มีปัญหากลิ่นเหม็นจากก๊าซ H_2S (ก๊าซไม่เน่า)

<u>ลำดับขั้นตอนการผลิตแก๊สชีวภาพของจุลินทรีย์</u>

ระบบบำบัดแบบแอนแอโรบิคหรือแบบไร้อากาศ เป็นระบบบำบัดน้ำเสียที่อาศัยการทำงานของแบกทีเรียที่ไม่ใช่อากาศ หรือออกซิเจน (anaerobic bacteria) มาย่อยสลายความสกปรกหรือสารอินทรีย์ในน้ำเสียโดยจะเปลี่ยนสารอินทรีย์ในน้ำเสียไปเป็นก๊าซชีวภาพ (biogas) ที่มีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบหลักซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงได้ กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบดังกล่าวเป็นปฏิกิริยาชีวเคมีหลายขั้นตอน ประกอบด้วย 3 ปฏิกิริยาหลัก (นิรนาม, 2553) คือ

1. Hydrolysis เป็นปฏิกิริยาแรกที่เกิดขึ้นเพื่อสลายอินทรีย์เชิงซ้อนที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ที่มักจะไม่ละลายน้ำให้แตกตัวเป็นสารอินทรีย์เชิงเดี่ยวที่เป็นอนุมูลเริ่มต้น (building blocks) ของชีวโมเลกุลต่าง ๆ ได้แก่ คาร์โบไฮเดรท โปรตีน ไขมัน ปฏิกิริยาเหล่านี้ต้องอาศัยการขับ exocellular enzymes จากจุลินทรีย์หลายชนิดที่อยู่ร่วมกันในระบบ และโดยที่เป็นการเปลี่ยนสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ให้เล็กลงทำให้ละลายน้ำได้ดีขึ้น และสามารถถูกดูดซึมเข้าไปภายในเซลของจุลินทรีย์ประเภท saprophytes ได้ บางครั้งจะเรียกขั้นตอนนี้ว่า Solubilization

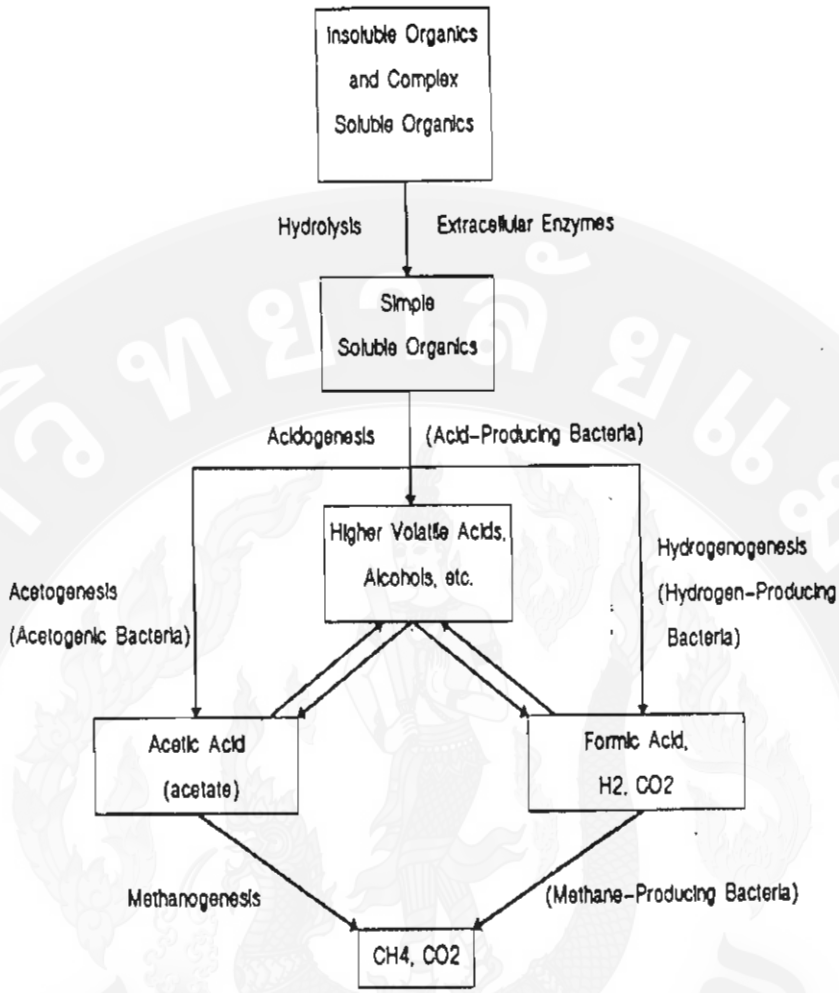
2. Acidogenesis หรือปฏิกิริยาการสร้างกรดอินทรีย์ โดยแบคทีเรียประเภทสร้างกรด (acid forming bacteria) จะย่อยสลายสารละลายอินทรีย์ที่ได้จากปฏิกิริยาไฮโรไลซิส ให้เป็นกรด

อินทรีย์โมเลกุลสั้น ๆ ที่ระเหยได้ง่าย หรือ Volatile fatty acid (VFA) เช่น valeric acid, butyric acid, propoinic acid เป็นต้น จากนั้นก็จะมีจุลินทรีย์อีกกลุ่มมาย่อยสลายกรดอินทรีย์เหล่านี้ได้เป็น acetic acid, formic acid, H_2 และ CO_2

3. Methanogenesis หรือปฏิกิริยาการสร้างมีเทนเกิดจากการทำงานของเมทาโนเจน (methanogen) ซึ่งเป็น strictly anaerobic bacteria คือ แบคทีเรียไร้อากาศอย่างแท้จริง ดังนั้นปฏิกิริยานี้จะเกิดขึ้นได้จะต้องไม่มีออกซิเจนอยู่เลย เมทาโนเจนจะใช้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายจาก Acidogenesis มาเปลี่ยนเป็นมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ ลำดับขั้นตอนการเกิดปฏิกิริยาแสดงในภาพที่ 2.4

ระบบบำบัดแบบแอนแอโรบิค เหมาะสำหรับบำบัดน้ำเสียที่มีความสกปรกมากๆ หรือมีค่าบีโอดี หรือซีโอดีสูง ๆ (มีค่าเป็นพัน มก./ลิตร ขึ้นไป) และเนื่องจากจุลินทรีย์ในระบบส่วนใหญ่เป็น mesophilic microorganisms จึงเหมาะกับการนำมาใช้บำบัดน้ำเสียในเขตร้อน อีกทั้งไม่ต้องสูญเสียพลังงานในการเดินระบบเหมือนระบบแอโรบิคที่ต้องใช้กระแสไฟฟ้าเพื่อเติมอากาศ นอกจากนี้ยังได้มีเทนเป็นเชื้อเพลิงทดแทนอีกด้วย จึงเป็นที่นิยมกันมากในประเทศไทย โดยเฉพาะการบำบัดน้ำเสียจากอุตสาหกรรมเกษตรที่มีค่าบีโอดีสูงและบางชนิดมีโปรตีนอยู่น้อย เช่น น้ำเสียจากโรงงานแป้ง โรงงานกระดาษ เป็นต้น

การจะนำระบบบำบัดแบบไร้อากาศไปใช้กับน้ำเสียจากกิจกรรมใด ๆ ควรจะต้องทำการทดสอบค่า BMP (Biochemical Methane Potential) หรือ SMA (Specific Methanogenic Activity) เพื่อประเมินความเป็นไปได้หรือศักยภาพของระบบรวมทั้งประสิทธิภาพของการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียก่อน



ภาพที่ 5 ขั้นตอนของปฏิกิริยาชีวเคมีที่เกิดขึ้นในการบำบัดแบบแอนแอโรบิค (นิรนาม, 2553)

จากภาพที่ 5 เป็นขั้นตอนของการเกิดปฏิกิริยาชีวเคมีของกระบวนการเกิดแก๊สมีเทน โดย Methanogen bacteria ซึ่งลำดับของการย่อยสลายจะถึงขั้นได้ กรดอะซิติก และกรดฟอร์มิค Methanogen bacteria ถึงจะสามารถเปลี่ยนไปเป็นมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ได้

ตารางที่ 3 แสดงสัดส่วนของก๊าซชนิดต่างๆ ในก๊าซชีวภาพ (นิรนาม, 2553)

แก๊ส	เปอร์เซ็นต์
มีเทน (CH_4)	60 - 70
คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2)	30 - 40
ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S)	1,500 – 2,500 ppm
แก๊สอื่นๆ	1 – 2 %

โดยแก๊สชีวภาพจะมีเปอร์เซ็นต์ของมีเทนสูงสุดเท่ากับ 60 – 70 % รองลงมา คือแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เท่ากับ 30 – 40% ไฮโดรเจนซัลไฟด์และแก๊สอื่นๆ ประมาณ 1-2%

ตารางที่ 4 แสดงคุณสมบัติของแก๊สชีวภาพ (อุเทน, 2554)

คุณสมบัติของแก๊สชีวภาพ	ปริมาณ
ค่าความร้อน	21 MJ/m^3 (CH_4 60%)
ความเร็วเปลวไฟ	25 cm/s
อัตรา A/F ในทางทฤษฎี	6.19 m^3a/m^3g
อุณหภูมิเผาไหม้ในอากาศ	650 C
อุณหภูมิจุดติดไฟของ CH_4	600 C
ค่าความจุความร้อน (Cp)	1.6 kJ/m^3 C
ความหนาแน่น (P)	1.15 kg/m^3

จากตารางที่ 4 ค่าความร้อนของแก๊สชีวภาพเท่ากับ 21 MJ/m^3 ความเร็วของเปลวไฟเท่ากับ 25 cm/s อัตรา A/F ในทางทฤษฎีเท่ากับ 6.19 m^3a/m^3g อุณหภูมิเผาไหม้ในอากาศเท่ากับ 650 C อุณหภูมิจุดติดไฟของ CH_4 เท่ากับ 600 องศาเซลเซียส ค่าความจุความร้อน (Cp) เท่ากับ 1.6 kJ/m^3 C° และความหนาแน่น เท่ากับ 1.15 kg/m^3 (ชัชวาล และคณะ, 2550)

ตารางที่ 5 แสดงการทดแทนพลังงานจากแหล่งอื่นๆของแก๊สชีวภาพ 1 ลบ.ม.

ชนิดพลังงาน	ปริมาณ
แก๊สหุงต้ม	0.46 กิโลกรัม
น้ำมันเบนซิน	0.67 ลิตร
น้ำมันดีเซล	0.60 ลิตร
น้ำมันเตา	0.55 ลิตร
ฟืนไม้	1.50 กก.
ไฟฟ้า	1.2 – 2.0 กิโลวัตต์/ชั่วโมง

จากตารางที่ 5 แก๊สชีวภาพ 1 ลบ.ม. เทียบเท่าแก๊สหุงต้ม 0.46 กิโลกรัม เทียบเท่าน้ำมันเบนซิน 0.67 ลิตร เทียบเท่า น้ำมันดีเซล 0.60 ลิตร เทียบเท่า น้ำมันเตา 0.55 ลิตร เทียบเท่า ฟืนไม้ 1.50 กก. และเทียบเท่า ไฟฟ้า 1.2 – 2.0 กิโลวัตต์/ชั่วโมง

<u>ชนิดของจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องในการผลิตแก๊สชีวภาพ</u> (ธเนศ, 2528)

1. Fermentative bacteria ย่อยสารที่มีโมเลกุลใหญ่ให้เป็นสารโมเลกุลเล็ก แล้วถูกเปลี่ยนไปเป็นอะซิเตท โพพิโอเนท แลคเตท บิวทิเรท และเอทานอล

2. Hydrogen – producing acetogenic bacteria จุลินทรีย์กลุ่มนี้ทำหน้าที่ย่อยสลาย อะซิเตท โพพิโอเนท แลคเตท บิวทิเรท และเอทานอล ได้เป็นกรดอะซิติก แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน

3. Homoacetogenic bacteria ได้แก่ Butyribacterium methylophicum จุลินทรีย์กลุ่มนี้เป็นกลุ่มที่ใช้แก๊สไฮโดรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์ ได้ผลผลิตเป็นกรดอะซิติก ถ้าใช้สารประกอบที่มีคาร์บอนหลายอะตอม เช่น แลคเตท ไพรูเวท และเฮกโซส ผลผลิตที่ได้เป็นกรดอะซิติกและกรดบิวทิริก

4. Methanogenic bacteria แบคทีเรียกลุ่มนี้มีทั้งที่เป็นแกรมบวกและแกรมลบ ขึ้นกับชนิดของ Cell envelop ของแบคทีเรียที่ทำหน้าที่ผลิตมีเทน ส่วนใหญ่จัดอยู่ในพวก Obligately anaerobic bacteria เจริญเติบโตได้ดีในสภาวะที่ขาดออกซิเจน ค่าพีเอชอยู่ในช่วง 7 – 7.8 ทำให้มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงสภาวะได้น้อย และมีอัตราการเจริญเติบโตที่ช้ากว่าแบคทีเรียที่ไม่สร้างมีเทน ซึ่งโดยเฉลี่ยต้องใช้ระยะเวลาประมาณ 3 -5 วัน ที่ 35 องศาเซลเซียส ถึง วันที่ 10 ในการเพิ่มจำนวนเป็น 2 เท่า ได้แก่แบคทีเรียในกลุ่ม Hydrogenotrophic methanogens หรือ Hydrogen utilizing chemolithotrophic methanogens หรือ Acetoclastic bacteria หรือ Acetate splitting bacteria

5. Non – Methanogenic bacteria แบคทีเรียพวกนี้ส่วนใหญ่เป็น Facultative anaerobic bacteria ซึ่งสามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ทั้งในสภาวะแวดล้อมที่มีและไม่มีอากาศ โดยรับพลังงานที่ใช้ในการเจริญเติบโตจากการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ให้เป็นกรดไขมันระเหยง่าย กรดอินทรีย์ แอลกอฮอล์ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน แอมโมเนีย และซัลไฟด์ สามารถเจริญเติบโตที่พีเอช 4 – 6.5 ทนต่อการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อมได้ดี แบ่งตัวได้ 2 เท่าภายใน 24 ชั่วโมง ได้แก่แบคทีเรียกลุ่ม Acidogenic bacteria และ Acetogenic bacteria

<u>ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ</u> (นิรนาม, 2552)

การกวนผสม

จะต้องมีการกวนผสมที่เหมาะสม ซึ่งอาจใช้เครื่องกล ใช้รูปแบบการไหล หรือ การนำก๊าซชีวภาพมาใช้ในการกวนก็ได้ขึ้นอยู่กับระบบ และชนิดของที่ใช้สารเคมีที่เป็นพิษต่อระบบ

สารเคมี

เช่น ยาฆ่าเชื้อ ยาปฏิชีวนะ ยาฆ่าแมลง ปุ๋ยเคมี หรือ สารเคมีอื่นๆ ที่อาจเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ที่ย่อยสลายของเสียในบ่อ ทำให้จุลินทรีย์หยุดทำงานและไม่มีก๊าซเกิดขึ้น จึงไม่ควรปล่อยให้สารเคมีเหล่านั้นลงไปในบ่อก๊าซชีวภาพ

อุณหภูมิ

จุลินทรีย์จะเจริญเติบโตได้ดีที่อุณหภูมิประมาณ 35 – 37 °C (Mesophillic) หรือ 50 – 55 °C (thermophillic) ถ้าอุณหภูมิสูงหรือต่ำกว่านี้ จุลินทรีย์จะเจริญเติมโตไม่ดีหนัก

ความเป็นกรดด่าง

ค่าความเหมาะสมควรอยู่ระหว่าง 6.8 – 7.2 ถ้าสูงหรือต่ำกว่าค่าในช่วงที่เหมาะสม จะทำให้การผลิตก๊าซชีวภาพลดลง

<u>การคำนวณปริมาณแก๊สมีเทน</u> (อุเทน, 2554)

ปริมาณแก๊สมีเทนที่ผลิตได้ (ลบ.ม./วัน) = COD ที่ย่อยสลาย (กก./วัน) x 0.35 ลบ.ม.

ปริมาณแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้ (ลบ.ม./วัน) = ปริมาณแก๊สมีเทนที่ผลิตได้/สัดส่วนแก๊สมีเทนในแก๊สชีวภาพ

โดย 1 กก. COD ที่ย่อยสลายไปจะผลิตแก๊สมีเทนได้ 0.35 ลบ.ม. ที่ STP (0 °C และความดัน 1 บรรยากาศ)

การทบทวนวรรณกรรม / สารสนเทศ (Information) ที่เกี่ยวข้อง

<u>การผลิตเอทานอล</u>

กล้าณรงค์ (2544) ได้ทำการศึกษาสถานภาพของวัตถุดิบที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตแก๊สโซฮอล์ จากสภาวะวิกฤตในเรื่องน้ำมันและภาระของประเทศในการนำเข้าน้ำมันดิบซึ่งมีผลต่อเศรษฐกิจของประเทศเป็นอย่างมาก ทำให้รัฐบาลประกาศนโยบายเกี่ยวกับเอทานอลขึ้นใน

เดือนตุลาคม 2543 และได้เชิญชวนนักลงทุนมาผลิตเอทานอล โดยใช้วัตถุดิบการเกษตรกรรม เช่น อ้อย มันสำปะหลัง เป็นต้น เนื่องจากกำลังการผลิตเพื่อทดแทนความต้องการเบนซินบางส่วนนั้นต้องมีการผลิตเอทานอลถึง 2,000,000 ลิตรต่อวัน และต้องใช้วัตถุดิบจำนวนมาก จำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องมีการศึกษาความเหมาะสมของพืชที่สมควรนำมาใช้เป็นวัตถุของการผลิตเอทานอลจากผลการวิจัยพบว่าพืชที่เหมาะสมสำหรับการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบผลิตเอทานอลมากที่สุดคือมันสำปะหลัง ทั้งนี้เพราะพื้นที่การเพาะปลูกมันสำปะหลังไม่สามารถลดลงน้อยกว่า 6.5 ล้านไร่ได้ เนื่องจากมีหลาย เขตพื้นที่ที่ไม่มีพืชอื่นเหมาะสมกว่ามันสำปะหลัง ผลผลิตของหัวมันต่อพื้นที่มีแนวโน้มสูงขึ้นเพราะมีการเปลี่ยนพันธุ์เพาะปลูกและใส่ปุ๋ย ประมาณการได้ว่าผลผลิตของประเทศในช่วง 5 ปีข้างหน้าจะมีประมาณ 20 ล้านตันต่อปี (เชื้อแป้ง 25-30%) และมีต้นทุนการผลิตอยู่ที่ 0.64 บาทต่อกิโลกรัมหัวมันสดในกรณีการผลิตระดับ 20 ล้านตันต่อปีเช่นนี้จะทำให้เกิดส่วนเกินของตลาด หลังจากความต้องการในการผลิตแป้ง 8 ล้านต่อหัวมันสด (สำหรับ 2 ล้านตันแป้ง) และมันเส้น มันอัดเม็ดสำหรับส่งออก และบริโภคภายในประเทศ (8 ล้านตัวหัวมันสด) อีก 4 ล้านตัน ซึ่งปริมาณนี้เพียงพอที่จะผลิตเอทานอล 2 ล้านลิตรต่อวันตลอดปี การใช้มันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบในการผลิตเอทานอลจึงไม่เพียงแต่แก้ไขปัญหาของประเทศในเรื่องพลังงาน แต่ยังมีส่วนช่วยสร้างเสถียรภาพของราคาหัวมันสด ในส่วนเกิน 4 ล้านตันนี้ที่รัฐบาลต้องใช้งบประมาณแทรกแซงราคาเป็นจำนวนมากเกือบทุกปีในการใช้มันสำปะหลังนั้นต้องใช้ในรูปของมันเส้นเพราะสามารถแปรรูป (ในช่วงที่หัวมันราคาตกต่ำที่สุด) และเก็บสต็อกใช้ได้ตลอดปี ทำให้เกิดงานใหม่ขึ้นในหมู่บ้าน การขนส่งมันเส้นมีประสิทธิภาพดีกว่าทำให้โรงงานสามารถรับมันเส้นจากแหล่งต่างๆ ได้สะดวก สามารถใช้เทคโนโลยีการผลิตเช่นเดียวกันกับการผลิตเอทานอลโดยธัญญาพืช ซึ่งปัจจุบันในการใช้ Simultaneous Saccharification and Fermentation (SSF) สามารถลดต้นทุนการผลิตลงได้อย่างมาก การคำนวณโดยระบบปัจจุบันพบว่าหัวมันเส้นราคา 2,500 บาทต่อตัน จะผลิตเอทานอลได้ในต้นทุนการผลิต 11.55 บาทต่อลิตรสำหรับอ้อยนั้นไม่เหมาะสมที่นำมาใช้เป็นวัตถุดิบเพราะยังมีปริมาณเพียง 53 ล้านตันต่อปี ในขณะที่ความต้องการอ้อยสดของอุตสาหกรรมน้ำตาลมีถึง 75 ล้านตันต่อปี และอ้อยยังมีพระราชบัญญัติควบคุมเรื่องการแบ่งปันผลประโยชน์อยู่ แต่ผลิตภัณฑ์พลอยได้จากอุตสาหกรรมน้ำตาล คือ กากน้ำตาล ซึ่งจะผลิตได้ประมาณร้อยละ 5 ของอ้อย หรือ 2.5 ล้านตันต่อปี สามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเอทานอล ได้ในส่วนที่เหลือจากการบริโภคในประเทศ ซึ่งมีประมาณ 1 ล้านตันหรือผลิตเอทานอลได้ประมาณ 800,000 ลิตรต่อวันตลอดปี การผลิตต่อเนื่องจากโรงงานน้ำตาล จะทำให้ต้นทุนการผลิตเอทานอลจากกากน้ำตาลต่ำมาก แม้ว่าคำนวณจากการผลิตปกติ ต้นทุนการผลิตเอทานอลจากกากน้ำตาลจะมีประมาณ 11.3 บาท (เมื่อคิด

กากน้ำตาลที่ 1,500 บาทต่อตัน)ในภาพรวมกล่าวได้ว่าการผลิตเอทานอลในประเทศสามารถผลิตได้ถึง 3,000,000 ลิตรต่อวันตลอดปี โดยใช้มันสำปะหลัง (2.2 ล้านลิตร) และกากน้ำตาล (0.8 ล้านลิตร)

นพพลและรณชัย (2552) ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้ลำไยอบแห้ง เพื่อผลิตให้เป็นเอทานอล ผลการศึกษาจากการสุ่มตัวอย่างจากโกดังเก็บลำไยในส่วนที่สภาพภายนอกยังไม่เน่าเสีย (คาดว่ามีลำไยส่วนนี้ประมาณร้อยละ 90) สามารถจำแนกลำไยอบแห้งดังกล่าวได้เป็นสองกลุ่มในสัดส่วนเท่าๆ กัน กลุ่มแรกมีเชื้อราปรากฏให้เห็น และกลุ่มที่สองไม่สังเกตพบเชื้อรา เมื่อนำลำไยทั้งสองกลุ่มไปวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลด้วยวิธีวัด ความเข้มข้นน้ำตาลรีดิวซ์ (DNS) และการใช้เครื่องโครมาโตกราฟีของเหลวประสิทธิภาพสูง (HPLC) พบว่าระดับปริมาณน้ำตาลที่วิเคราะห์ได้จากทั้งสองกลุ่มมีค่าใกล้เคียงกับปริมาณน้ำตาลที่ได้จาก ลำไยอบแห้งอายุไม่ถึง 1 ปี โดยกลุ่มที่มีเชื้อรามีปริมาณน้ำตาลที่วิเคราะห์ได้น้อยกว่าลำไยอบแห้งอายุไม่ถึง 1 ปี เพียงเล็กน้อย และมีปริมาณน้ำตาลประมาณครึ่งหนึ่งของเนื้อลำไยอบแห้งที่ใช้ทดสอบ ส่วนผลการทดลองขั้นถัดไปจากการนำลำไยอบแห้งดังกล่าวไปหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์ที่สามารถผลิตเอทานอลได้ พบว่าจุลินทรีย์สามารถผลิตเอทานอลได้ความเข้มข้นระดับสูง นั่นคือเมื่อเนื้อลำไยอบแห้ง 1,000 กิโลกรัม หรือ 1 ตัน จะสามารถผลิตเอทานอลได้ถึง 209 กิโลกรัม

สุกัลยา และคณะ (2552) ได้ทำการศึกษาการผลิตแอลกอฮอล์จากลำไยอบแห้ง การทดลองในขวดรูปชมพู่เพื่อเปรียบเทียบผลกระทบของความเข้มข้นของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ในน้ำลำไยที่ 5, 10, 15 และ 20 องศาบริกซ์ที่มีต่อการผลิตแอลกอฮอล์โดยใช้ยีสต์ Saccharomyces cerevisiae พบว่าที่ 20 องศาบริกซ์สามารถผลิตแอลกอฮอล์ได้ระดับสูงสุดเท่ากับ 7.70% (v/v) และเมื่อเปรียบเทียบการใช้ยีสต์ในรูปแบบต่างๆ กันในรูปผง, ผงที่ผ่านการกระตุ้นด้วยน้ำอุ่นที่ 30-40 องศาเซลเซียส และหัวเชื้อยีสต์เหลว พบว่าการใช้หัวเชื้อยีสต์ผลิตแอลกอฮอล์ได้ระดับสูงสุดเท่ากับ 7.00% (v/v) การทดลองเปรียบเทียบแหล่งไนโตรเจนต่างชนิดได้แก่ น้ำต้มเนื้อ, ไข่ผงและสารสกัดจากยีสต์ พบปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดเท่ากับ 0.035, 7 และ 10% (w/w) ตามลำดับ อย่างไรก็ตามการใช้ไข่ผงเป็นแหล่งไนโตรเจนในน้ำลำไยทำให้ผลิตแอลกอฮอล์ได้ต่ำกว่ากรณีไม่ใส่แหล่งไนโตรเจนเพิ่มเติมไป 0.90% (v/v) การทดลองในถังปฏิกรณ์ชีวภาพแบบกะขนาด 5 ลิตรในช่วงอุณหภูมิ 27-30 องศาเซลเซียส โดยรักษาอัตราการหมุนของใบพัดในถังไว้ที่ 300 rpm เป็นเวลา 12 ชั่วโมงเพื่อเพิ่มมวลชีวภาพ ตามด้วยการกระตุ้นให้เกิดการผลิตแอลกอฮอล์โดยลดอัตราการหมุนลงเหลือ 100 rpm เป็นเวลา 68 ชั่วโมง สามารถผลิตแอลกอฮอล์ได้ 4.20% (v/v) การทดลองขั้นต่อมาในระบบกึ่งกะ โดยเติมน้ำลำไย 15 องศาบริกซ์ปริมาตร 400 ml ในชั่วโมงที่ 80 เพื่อเพิ่มความ

เข้มข้นของน้ำตาลในถังปฏิกรณ์ชีวภาพ ทำให้ระดับแอลกอฮอล์เพิ่มขึ้นถึงระดับ 5.52% (v/v) ในชั่วโมงที่ 112

กำเนิดและสุกณณี (2536) ได้ทำการศึกษาการผลิตเอทานอลเชื้อเพลิงจากอ้อยโดยเชื้อ Zymomonas mibilis สายพันธุ์ต่าง ๆ 5 สายพันธุ์ คือ Z. *mobilis* TISTR 405, TISTR 548 (CM141), TISTR 550, TISTR 1042 และ IFO 13756 ทดสอบการผลิดเอทานอลขั้นต้นในน้ำดาลทราย และน้ำอ้อย ปริมาตร 150 มล. วัดปริมาณเอทานอบโดยเครื่องกาซโครมาโตกราฟ พบว่า Z. *mobilis* สายพันธุ์ TISTR 405, TISTR 548, TISTR 1042, TISTR 550 และ IFO 13756 ผลิตเอทานอลจากน้ำตาลทรายได้ 7.04, 12.27, 14.49, 15.69 และ 15.73% โดยปริมาตร ตามลำดับ ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส พีเอช 7 เวลาในการหมักอยู่ระหว่าง 144-156 ชั่วโมง และมีอะเซทตาลดีไฮด์ปนอยู่ 0.13, 0.28, 0.13, 0.22 และ 0.30 % โดยปริมาตร ตามลำดับ โดย (Z.*mobilis* IFO 13756 ผลิตเอทานอลและอะเซตาลดีไฮด์มากที่สุด 10.58% และ 0.05% โดยปริมาตร

บุณยพัตและคณะ (2546) ได้ศึกษาการบูรณาการกระบวนการผลิตเอทานอลกับโรงงานน้ำตาลและโรงแป้งมันสำปะหลังและประเมินเชิงเทคโนโลยีในการทำเอทานอลให้บริสุทธิ์จากการวิจัยพบว่ากระบวนการผลิตเอทานอลกับโรงงานน้ำตาล พบว่าในการผลิตเอทานอลที่กำลังการผลิต 100,000 ลิตรต่อวัน จะต้องใช้อ้อยเป็นวัตถุดิบจำนวน 1,267.2 ตันต่อวัน และใช้โมลาส 330 ตันต่อวัน และมีการใช้ไอน้ำสำหรับกระบวนการกลั่นรวม 15.61 ตันต่อชั่วโมง ส่วนกระบวนการผลิตเอทานอลกับโรงงานแป้งมันสำปะหลัง พบว่าในการผลิตเอทานอลที่กำลังการผลิต 10,000 ลิตรต่อวัน จะต้องใช้มันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบจำนวน 59.55 ตันต่อวันและมีการใช้ไอน้ำสำหรับกระบวนการกลั่นรวม 1.52 ตันต่อชั่วโมง ซึ่งจากการวิเคราะห์ราคาต้นทุนการผลิตเอทานอลต่อหน่วยพบว่าการบูรณาการกระบวนการผลิตเอทานอลกับโรงงานแป้งมันสำปะหลังโดยวิธีการต่าง ๆ สามารถลดต้นทุนการผลิตต่อหน่วยเอทานอลลงได้ประมาณ 0.3-2.3 บาทต่อลิตร

<u>การผลิตแก๊สชีวภาพ</u>

ธเนศ (2528) ได้ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพที่อุณหภูมิต่าง ๆ จากของเสียโรงงานสับปะรดกระป๋อง โดยใช้ถังหมักขนาด 1 แกลลอน ปริมาณการหมัก 3 ลิตรใช้เชื้อที่ได้จากการหมักสับปะรดที่อุณหภูมิห้องและทำการปรับตัวให้เข้ากับอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองโดยการเพิ่มอุณหภูมิของถังหมักขึ้น 5 องศาเซลเซียสต่อสัปดาห์ ทำการเพิ่มปริมาณการเติมวัตถุดิบจาก12.5 ถึง 17.5 กรัมน้ำหนักเปียก/ลิตรการหมัก-วัน ที่ระยะเวลาการหมัก 50 วัน จะได้ปริมาณก๊าซเพิ่มขึ้นตั้งแต่ 1.27 ถึง 1.79 ลิตร/ลิตรการหมัก-วัน ที่อุณหภูมิการหมัก 55 องศาเซลเซียส และ 1.22 ถึง 1.46 ลิตร/ลิตรการ

หมัก-วัน ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ปริมาณของก๊าซที่ได้ต่อน้ำหนักของวัตถุดิบที่เติมจะลดลง เมื่ออัตราการเติมวัตถุดิบมากขึ้น การเพิ่มปริมาณการเติมวัตถุดิบที่มากกว่า 17.5 กรัมน้ำหนักเปียก/ลิตรการหมัก-วัน ที่ทุก ๆ อุณหภูมิของการหมักจะทำให้เกิดการล้มเหลวของสภาวะการหมัก ทั้งนี้ อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียสเป็นอุณหภูมิที่ให้อัตราการย่อยสลายของสารอินทรีย์สูง และสามารถเติมสารอินทรีย์ลงไปได้มาก พลังงานที่ได้จากระบบก็มากกว่าพลังงานที่ต้องใส่ลงไปเพื่อเพิ่มอุณหภูมิของสารละลายในถังหมักให้เท่ากับอุณหภูมิที่ต้องการ

นิลวรรณ (2552) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพและเศรษฐศาสตร์ระบบหมักไร้อากาศแบบถังกวนต่อเนื่องเพื่อบำบัดของเสียจากฟาร์มสุกร ในช่วงอุณหภูมิสูง Thermophilic ที่ 55 องศาเซลเซียส ขนาดถังหมัก 1 ลูกบาศก์เมตร โดยวิธีการเติมน้ำเสียแบบเท (Batch Feeding) ควบคุมน้ำเสียตั้งต้นให้มีสัดส่วนปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) 2% โดยน้ำหนัก และทำการเปลี่ยนระยะเวลาเก็บกักน้ำเสีย 4 – 6 วัน จากผลการทดลองพบว่า ระบบที่ใช้ระยะเวลาเก็บกักน้ำเสีย 4 วัน จะมีประสิทธิภาพในการบำบัดของเสีย 84% สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 956 ลิตรต่อวัน โดยมีสัดส่วนก๊าซมีเทน 65.6%

นิรนาม (2552) ได้ทำการทดลองหาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนจากของเสียร่วมกับน้ำเสียฟาร์มสุกร พบว่า ของเสียทั้ง 5 ชนิด มีศักยภาพในการเพิ่มการผลิตก๊าซมีเทนสำหรับน้ำเสียฟาร์มสุกร ได้แก่ เศษอาหารที่อัตราส่วน 60:40 %VS กลีเซอรีนที่อัตราส่วน 5:95% VS หญ้าเนเปียร์ที่อัตราส่วน 30:40%VS ฟางข้าวที่อัตราส่วน 60:40%VS และต้นข้าวโพดที่อัตราส่วน 60:50%VS ซึ่งมีค่าอัตราการผลิตก๊าซมีเทนสูงกว่าการหมักย่อยเฉพาะน้ำเสียฟาร์มสุกรเพียงอย่างเดียว คือ 0.605 0.530 0.527 และ 0.477 m^3 CH_4 kg^{-1} VS_{added} ตามลำดับ คิดเป็นร้อยละการเพิ่มขึ้นอยู่ในช่วง 5-25% เทียบกับค่าอัตราการผลิตก๊าซมีเทนของน้ำเสียฟาร์มสุกรที่อัตราส่วน 100%VS เท่ากับ 0.452 m^3 CH_4 kg^{-1} VS_{added}

วิภารัตน์ (2551) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของระบบบำบัดแบบไร้อากาศสองขั้นตอนโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบสร้างกรดไร้อากาศ (Anaerobic Acid Reactor) และถังปฏิกรณ์แบบยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) ซึ่งจะเป็นถังสร้างมีเทน โดยพบว่า การเตรียมหัวเชื้อตะกอนสลัดจ์ มีผลในการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตกรดมากกว่าตะกอนสลัดจ์ที่ไม่มีการเตรียมโดยมีปริมาณไขมันที่ระเหยง่ายสูงสุดเท่ากับ 350 – 650 มิลลิกรัมต่อลิตร ของอะซิเตท ค่าพีเอชเท่ากับ 4.5 – 5.6 และประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพเท่ากับ 3 – 6 ลิตรต่อวัน

อุปกรณ์และวิธีการ

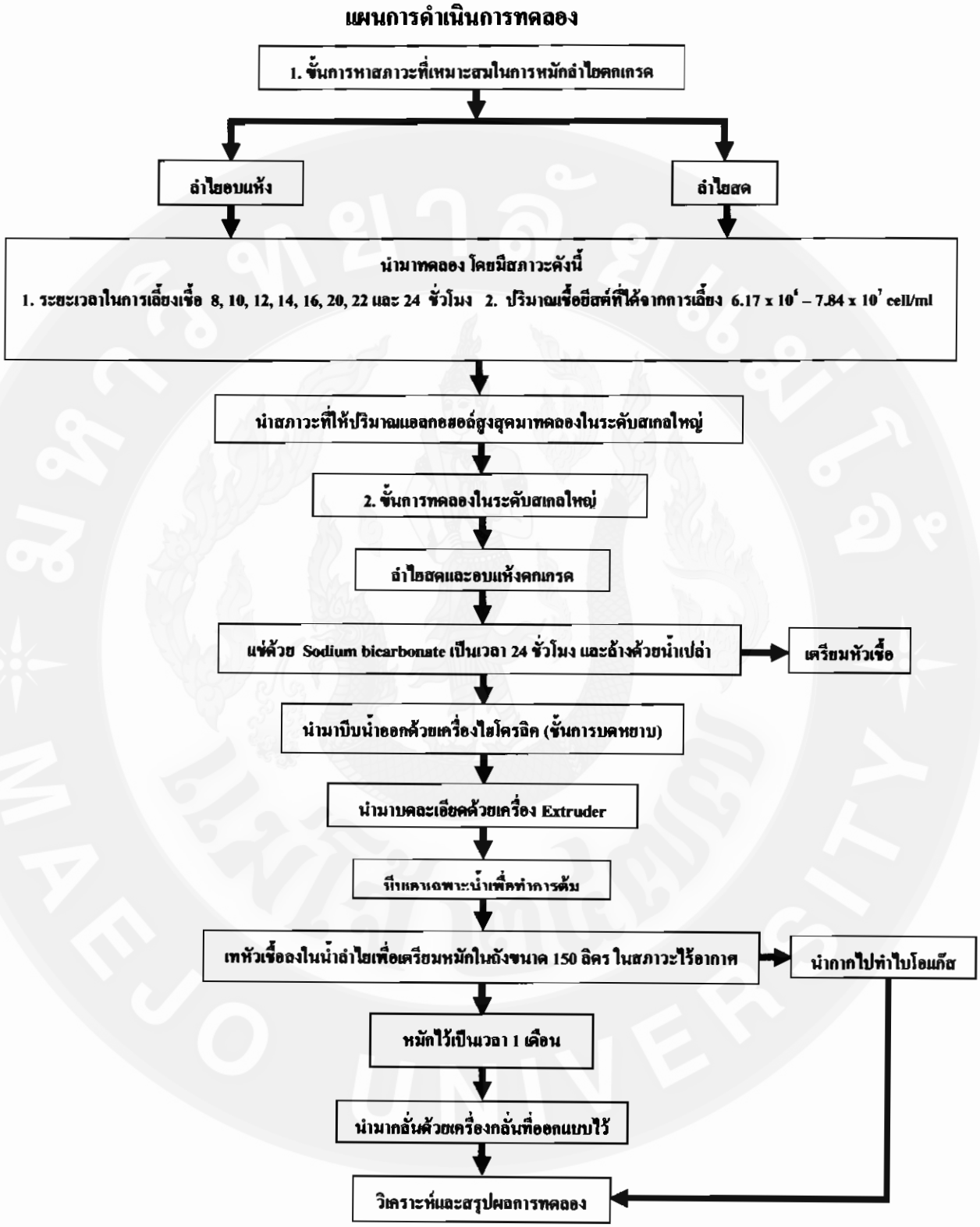
อุปกรณ์ในกระบวนการทดลอง

- หม้อนึ่งความดันไอ
- เครื่องวัดความหวาน (Refractometer)
- ชุดกลั่นเอทานอลขนาดเล็กจำนวน 2 ตัว
- ยีสต์สด
- ตู้เขี่ยเชื้อ
- ลวดเขี่ยเชื้อ
- ตะเกียงแอลกอฮอล์
- บีกเกอร์ขนาด 100 ml.
- ลำไยตกเกรด
- ตู้อบลมร้อน (Hot air Oven)
- ถังขนาด 1000 ลิตร สำหรับผลิตแก๊ส
- ถังขนาด 500 ลิตร สำหรับเก็บแก๊ส จำนวน 3 ถัง
- ถังขนาด 500 ลิตร สำหรับเป็นถังเติม จำนวน 1 ถัง

<u>กระบวนการดำเนินการทดลอง</u>

<u>การผลิตเอทานอลจากลำไยตกเกรด</u>

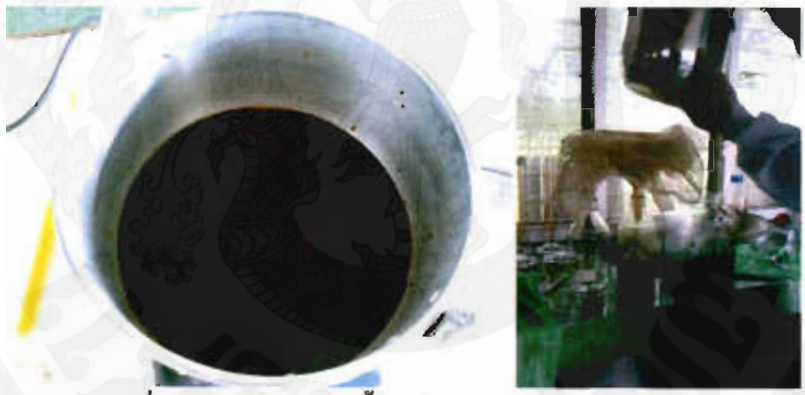
ในกระบวนการทดลองได้มีการทำการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการก่อน หลังจากนั้นจึงมีกระบวนการผลิตเอทานอลในระดับขนาดการทดลองที่ใหญ่ขึ้น ซึ่งจากการทดลองเลี้ยงในระดับห้องปฏิบัติการ เชื้อจุลินทรีย์ทุกชนิดจะตายด้วยกระบวนการใช้หม้อนึ่งความดันที่อุณหภูมิสูง แต่เมื่อขยายขนาดการทดลองที่ใหญ่ขึ้น กระบวนการทดลองจะมีข้อจำกัดอยู่ที่ขนาดของอุปกรณ์ที่ใช้ในการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ ดังนั้นการออกแบบการทดลอง จึงต้องอาศัยการต้มฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ที่ยาวนานเป็นระยะเวลา 4-6 ชั่วโมง และมีการใช้สารเคมี เช่น โซเดียมคาร์บอเนต ที่มีความเข้มข้นสูง และหัวเชื้อยีสต์นั้นจะต้องเป็นยีสต์สด ที่ผ่านกระบวนการเลี้ยงปรับสภาวะในอาหารเลี้ยงเชื้อซึ่งเชื้อจะมีความแข็งแรงสามารถที่จะต่อสู้กับเชื้อจุลินทรีย์ชนิดอื่นๆได้ โดยมีการออกแบบการทดลองดังภาพที่ 6



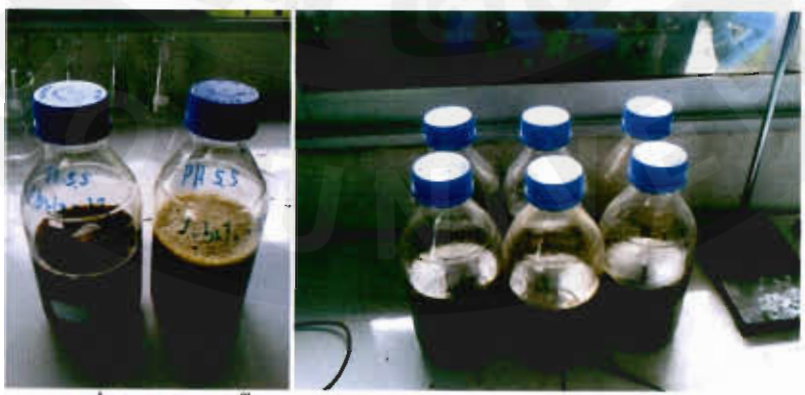
ภาพที่ 6 แผนการดำเนินการทดลองผลิตเอทานอลและแก๊สชีวภาพจากลำไยตกเกรด

ขั้นการหาสภาวะที่เหมาะสมในระดับสเกลขนาดเล็กของการหมักลำไยตกเกรด

กระบวนการทดลองในระดับสเกลขนาดเล็กนั้นทั้งลำไยสดและอบแห้งตกเกรด จะมีการกำหนดสภาวะในการหาปริมาณแอลกอฮอล์ที่ผลิตได้สูงสุดของยีสต์ Saccharomyces cereviceae โดยจะมีปัจจัยที่ใช้ในการแปรผัน คือ ระยะเวลาในการเลี้ยง (ชั่วโมง) และปริมาตรหัวเชื้อที่ 10% ซึ่งจากการประเมินในเบื้องต้น พบว่า ลำไยสด 1 กิโลกรัม ใช้น้ำในการต้มสกัดน้ำตาล เท่ากับ 2.5 ลิตร ซึ่งจะได้น้ำลำไยสำหรับหมักแอลกอฮอล์ประมาณ 2.0 ลิตร (ส่วนหนึ่งระเหยไป) โดยจะมีปริมาณน้ำตาลเท่ากับ 70.07 g/L , % brix เท่ากับ 17 % และมีปริมาณกาก โดยน้ำหนักแห้งเฉลี่ยเท่ากับ 0.579 Kg. ในส่วนของลำไยอบแห้งตกเกรด จากการประเมินในเบื้องต้น พบว่า ลำไยอบแห้งตกเกรด 1 กิโลกรัม ใช้น้ำในการต้มสกัดน้ำตาล เท่ากับ 2.5 ลิตร ซึ่งจะได้น้ำลำไยสำหรับหมักแอลกอฮอล์ประมาณ 1.92 ลิตร โดยมีปริมาณน้ำตาลเท่ากับ 69.56 g/L, % brix เท่ากับ 17 % และปริมาณกาก โดยน้ำหนักแห้งเฉลี่ยเท่ากับ 0.564 Kg. ดังภาพที่ 7 และ 8



ภาพที่ 7 การเตรียมหมักน้ำลำไยตกเกรดตามสภาวะต่างๆ



ภาพที่ 8 การหมักน้ำลำไยในระดับสเกลขนาดเล็กตามสภาวะต่างๆ

ขั้นการทดลองในระดับสเกลขนาดใหญ่ของการหมักลำไยตกเกรด

ขั้นตอนที่ 1 การจัดหาแหล่งรับซื้อลำไยตกเกรดจากแหล่งรับซื้อ ในตำบลแม่แฝก อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่ ซึ่งเป็นแหล่งรับซื้อลำไยเพื่อการจัดจำหน่ายให้กับโรงงานในจังหวัดลำพูนและจังหวัดใกล้เคียง มีอัตราการรับซื้อประมาณวันละ 500 – 600 กิโลกรัมต่อวัน จากการสอบถามข้อมูลในเบื้องต้น พบว่า จะมีลำไยที่ไม่ได้ขนาดอยู่ประมาณ 30% ของแต่ละวัน ซึ่งแหล่งรับซื้อนี้ก็จะทำการทิ้งเสียเป็นส่วนใหญ่ จากการลงพื้นที่สำรวจ พบว่า ลำไยตกเกรดจากแหล่งรับซื้อแห่งนี้จะเป็นลำไยที่มีหลายพันธุ์ปะปนกันมา ดังภาพที่ 9

ภาพที่ 9 ลำไยตกเกรดจากแหล่งรับซื้อ ณ ตำบลแม่แฝก อำเภอสันทราย จังหวัดเชียงใหม่

ขั้นตอนที่ 2 นำลำไยที่ได้มาทำการล้างสิ่งสกปรกออกแล้วทำการแช่ด้วย Sodium bicarbonate เป็นเวลา 24 ชม. เนื่องจากในกระบวนการผลิตเอทานอลนั้น ถ้ามีจำนวนของลำไยหลายกิโลกรัม มักจะมีเศษดิน กิ่งไม้ ต่างๆ ติดมาด้วย จึงต้องทำการล้างและแช่น้ำไว้เป็นเวลานานพอสมควร เพราะมักจะมีเชื้อโรคชนิด E. coli ติดมาด้วย ดังภาพที่ 10

ภาพที่ 10 การล้างและแช่ลำไยตกเกรดเพื่อฆ่าเชื้อโรค

ขั้นตอนที่ 3 นำเอาลำไยตกเกรดมาบีบน้ำออกด้วยเครื่องอัดไฮโดรลิค(ขั้นการบดหยาบ) เนื่องจากมีลำไยในปริมาณที่มาก จึงต้องมีการใช้อุปกรณ์ที่มีความรวดเร็วในการที่จะบีบอัด เอาน้ำลำไยออกมาให้ได้ไวและมากที่สุด เพราะป้องกันในเรื่องของการที่ลำไยจะเน่าเสียก่อนกระบวนการผลิตเอทานอล ดังภาพที่ 11

ภาพที่ 11 การบีบอัดเอาน้ำลำไยด้วยเครื่องอัดไฮโดลิค

ขั้นตอนที่ 4 นำมาบดด้วยเครื่องบดละเอียด ขนาด 1 แรงม้า (ขั้นการบดละเอียด) หลังจากที่ผ่านขั้นตอนการบีบอัดแล้วจะนำมาป่นละเอียดด้วยเครื่องบดละเอียด ซึ่งจะทำให้ได้น้ำลำไยออกมาได้ดียิ่งขึ้น ดังภาพที่ 12

ภาพที่ 12 เครื่องบดละเอียดลำไยก่อนที่จะนำไปต้มเพื่อฆ่าเชื้อโรคและสกัดน้ำตาล

ขั้นตอนที่ 5 นำน้ำที่ได้มาต้มที่อุณหภูมิ 100 องศา เป็นเวลา 4 ชั่วโมงเพื่อฆ่าเชื้อราและจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ ดังภาพที่ 13 และทำการวัดปริมาณน้ำตาลรีดิวส์ โดยวิธี Modified Lane – Eynon Constant Volumetric Method (กนกวรรณ, 2547)

ภาพที่ 13 การต้มเพื่อฆ่าเชื้อโรคและสกัดน้ำตาลออกจากลำไยตกเกรด

ขั้นตอนที่ 6 ทำการเพาะเชื้อยีสต์ Sacharomyces cerevisiae ในอาหารเลี้ยงเชื้อ YM Broth เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ดังภาพที่ 14

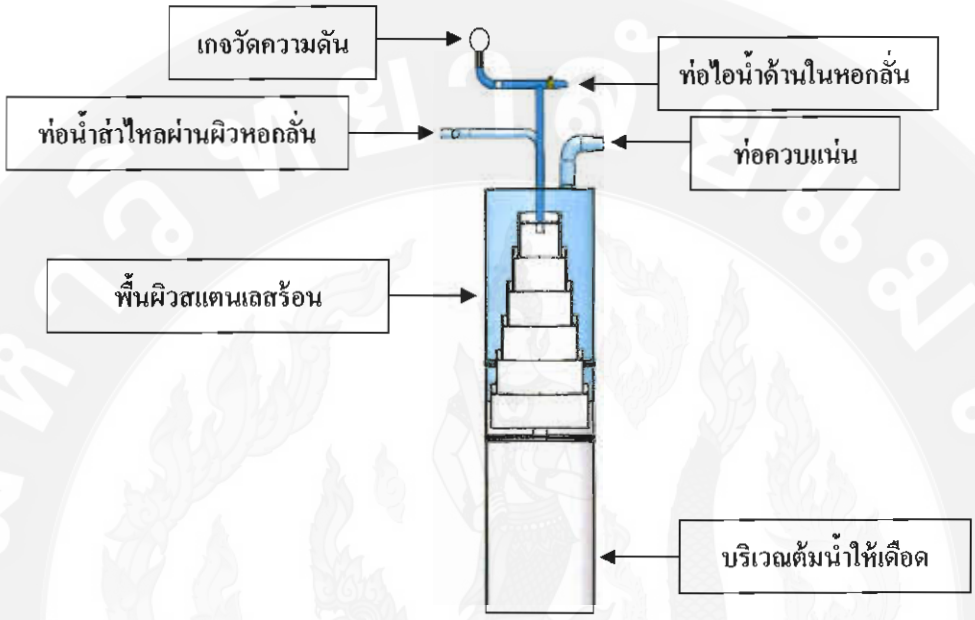
ภาพที่ 14 การต่อยีสต์ Sacharomyces cerevisiae จากน้ำลำไยลงอาหารเลี้ยงเชื้อ YM broth

ขั้นตอนที่ 7 นำเชื้อยีสต์จากสภาวะที่ดีที่สุดในระดับสเกล ปริมาตร 500 ml มาถ่ายลงถังหมักขนาด 150 ลิตร ดังภาพที่ 15

ภาพที่ 15 ถังหมักน้ำลำไยตกเกรดขนาด 150 ลิตร

ขั้นตอนที่ 8 หมักไว้เป็นระยะเวลา 7 - 10 วัน ในสภาวะอุณหภูมิห้อง

ขั้นตอนที่ 9 นำน้ำส่ามากลั่นแอลกอฮอล์ด้วยเครื่องกลั่นที่ออกแบบไว้ ดังภาพที่ 16



ภาพที่ 16 รายละเอียดโครงสร้างหม้อกลั่นแอลกอฮอล์ต้นแบบ

ภาพที่ 17 หม้อกลั่นเอทานอลต้นแบบ

จากภาพที่ 16 และ 17 เป็นหม้อกลั่นเอทานอลต้นแบบขนาด 50 ลิตร มีการดัดแปลงติดตั้งท่อน้ำวนไว้ที่ก้นถังซึ่งทำด้วยสแตนเลสขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 ซม. อุณหภูมิสูงสุดประมาณ

110 องศา และทนแรงดันได้ประมาณ 11 bar โดยใช้ท่อแก้วใส่ความยาว 35 เซนติเมตร จำนวน 2 ท่อในกระบวนการควบแน่น อัตราการไหลของน้ำที่ใช้ในกระบวนการควบแน่นเท่ากับ 6 ลิตรต่อนาที

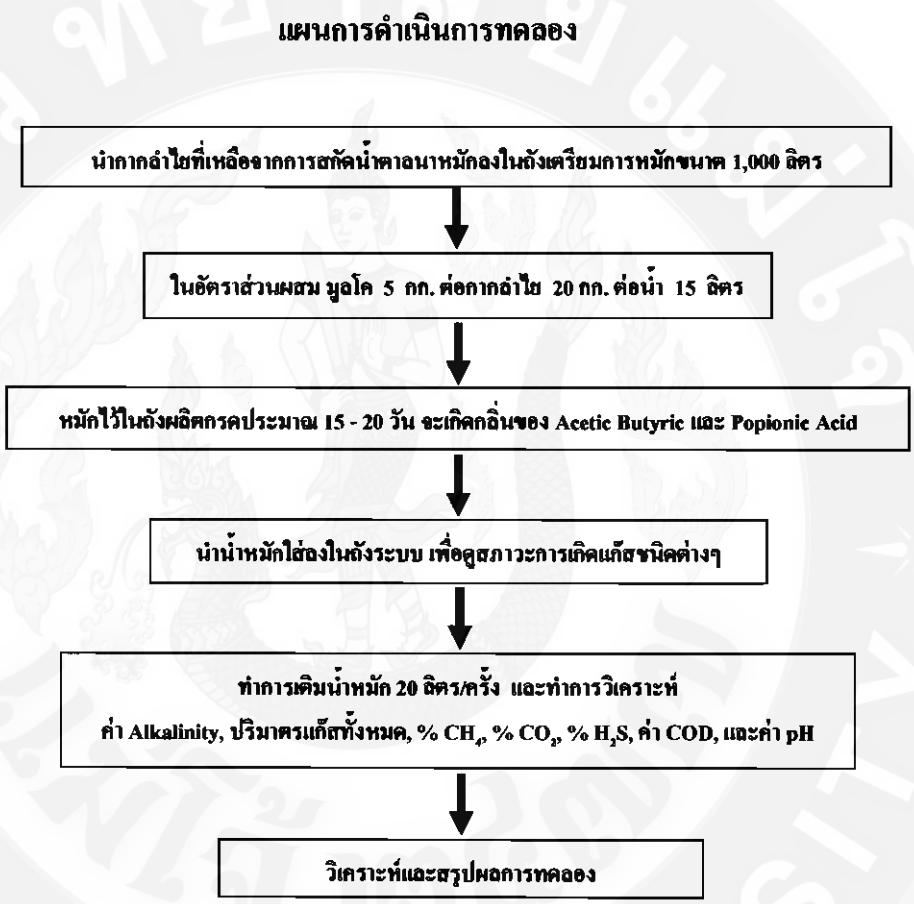
ขั้นตอนที่ 10 วัดความเข้มข้นแอลกอฮอล์ที่ได้ด้วย Hydrometer ดังภาพที่ 17 โดยสามารถวัดความเข้มข้นของแอลกอฮอล์ได้มากกว่า 95 %

ภาพที่ 18 เครื่องมือในการวัดปริมาณแอลกอฮอล์ (Hydro meter)

สำนักหอสมุด มหาวิทยาลัยแม่โจ้

การผลิตแก๊สชีวภาพจากฉำไยตกเกรด

ในกระบวนการทดลองได้ใช้เชื้อจุลินทรีย์เมทาโนเจนจากขี้วัวสดเป็นหัวเชื้อตั้งต้น ซึ่งจะทำการหมักแบบ 2 ขั้นตอน โดยช่วงแรกจะทำการหมักในถังเตรียมก่อน หลังจากนั้นจึงจะทำการถ่ายเทลงในถังหมักขนาด 1,000 ลิตร โดยมีแผนการทดลองดังภาพที่ 19



ภาพที่ 19 ขั้นตอนการผลิตแก๊สชีวภาพจากฉำไยตกเกรด

ขั้นตอนที่ 1 นำกากลำไยหยาบที่เหลือจากการบีบเอาน้ำออกไปใส่ลงในถังหมักขนาด 200 ลิตร

ภาพที่ 20 กากลำไยที่ได้จากการบีบเอาน้ำตาลเพื่อนำไปหมักแอลกอฮอล์

ขั้นตอนที่ 2 เติมหัวเชื้อโดยจะใช้มูลวัวสด 10 กก. เป็นตัวกระตุ้นให้เกิดการผลิตแก๊สชีวภาพ โดยอัตราส่วนที่ใช้ คือ มูลวัวสด 10 กก : กากลำไยหยาบ 20 กก. ดังภาพที่ 20 และ 21 ซึ่งจะทำการหมักแบบ 2 ขั้นตอน โดยช่วงแรกจะทำการหมักผสมในถังขนาด 200 ลิตรก่อน และเมื่อเวลาผ่านไปประมาณ 7 – 10 วันจึงจะนำกากลำไยในถังขนาด 200 ลิตรไปเติมลงในถังผลิตแก๊สชีวภาพ

ภาพที่ 21 มูลวัวสดที่นำมาเป็นสารตั้งต้นในการผลิตแก๊สชีวภาพจากกากลำไยตกเกรด

ภาพที่ 22 การเติมกากลำไยผสมมูลวัวสดลงไปในถังหมัก

ขั้นตอนที่ 3 ในช่วงแรกจะทำการประเมินอัตราการเติมน้ำส่า จากการวัดค่า COD ซึ่งจะทำให้ทราบว่าจะต้องเติมน้ำส่าลงไปเท่าใดเพื่อให้จุลินทรีย์ในถังหมักสามารถที่จะผลิตแก๊สชีวภาพได้สูงสุด

ขั้นตอนที่ 4 ปล่อยทิ้งไว้ 20 - 25 วันถังหมักจะลอยขึ้น นั่นแสดงว่ามีแก๊สชีวภาพเกิดขึ้น ทำการวัดปริมาตรที่ได้ในช่วงระยะเวลาการเก็บข้อมูล 10 วันต่อการเติม 1 ครั้ง

ภาพที่ 23 การเกิดแก๊สหลังจากการเติมกากลำไยที่หมักผสมกับมูลโคในถังขนาด 200 ลิตร

ขั้นตอนที่ 5 การวิเคราะห์ค่าต่างๆ ในกระบวนการทดลอง ได้แก่

ค่า COD, Alkalinity และ Total Kjeldahl Nitrogen ใช้วิธีวิเคราะห์ Base on APHA – AWWA (2005)

Total Suspended Solid, Total Volatile Supended Solid และ Total Volatile Solid ใช้วิธีวิเคราะห์ In house method modified from AOAC (2005), 922.10 and APHA – AWWA (2005)

Total Solid ใช้วิธีวิเคราะห์ AOAC (2005), 920.151 และ C/N ใช้วิธีวิเคราะห์ In house method AOAC (2005)

ผลการวิจัย

การผลิตเอทานอลจากลำไยตกเกรด

ในการดำเนินการทดลองผลิตเอทานอลจากลำไยตกเกรด ได้มีการวิเคราะห์องค์ประกอบต่างๆ ของเนื้อลำไยสดและลำไยอบแห้ง ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของเนื้อลำไยอบแห้งและเนื้อลำไยสด

การทดสอบ	เนื้อลำไยอบแห้ง	เนื้อลำไยสด	วิธีการตรวจสอบ
	ปริมาณ (g /100 g)	ปริมาณ (g /100 g)	
Water Activity	0.98	-	In house method based on AOAC (2005), 978.18 In house method based on Compendium of method for Food analysis (2003) p2-80 to p2-81.
Total Sugar	15	18	
Fructose	2.34	2.87	
Glucose	2.46	2.79	
Sucrose	10.20	11.31	
Maltose	< 0.5	< 0.5	
Lactose	< 0.5	< 0.5	
% Brix	17	18	

จากตารางที่ 6 พบว่าภายในเนื้อลำไยสดจะมีเปอร์เซ็นต์ Brix เท่ากับ 18% และลำไยอบแห้งจะมีเปอร์เซ็นต์ Brix เท่ากับ 17% โดยในส่วนของน้ำตาลกลูโคสจะอยู่ที่ 2.79 กรัม/100 กรัม และ 2.46 กรัม/100 กรัม โดย Total Sugar เท่ากับ 18 และ 15 กรัม/100 กรัม โดยในส่วนของน้ำตาล Maltose และ Lactose นั้น จะมีน้อยกว่า 0.5 กรัม/100 กรัม

ตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของเมล็ดลำไยสด

การทดสอบ	ปริมาณ (g /100 g)	วิธีการตรวจสอบ
Crude Fiber	1.97	In house method based on AOAC (2005), 978.18
Protein	5.34	
Fat	1.30	In house method based on Compendium of method for Food analysis (2003) p2-80 to p2-81.
Carbohydrate	52.50	
Ash	1.16	

จากตารางที่ 7 แสดงองค์ประกอบของเมล็ดลำไย ซึ่งประกอบไปด้วย Carbohydrate ที่มีปริมาณสูงสุดเท่ากับ 52.50 กรัม/100 กรัม รองลงมาคือ Protein เท่ากับ 5.34 กรัม/100 กรัม Crude Fiber เท่ากับ 1.97, Protein เท่ากับ 5.34 และ Ash 1.16 กรัม/100 กรัม ตามลำดับ

ตารางที่ 8 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของเปลือกลำไย

การทดสอบ	ปริมาณ (g /100 g)	วิธีการตรวจสอบ
Crude Fiber	23.64	In house method based on AOAC (2005), 978.18
Protein	4.56	
Fat	0.56	In house method based on Compendium of method for Food analysis (2003) p2-80 to p2-81.
Carbohydrate	45.55	
Ash	3.07	

จากตารางที่ 8 พบว่าภายในเปลือกลำไยมีปริมาณของ Carbohydrate สูงสุด รองลงมา คือ Crude Fiber ซึ่งมีค่าเท่ากับ 45.55 และ 23.64 กรัม/100 กรัม ตามลำดับ โดยในส่วนของ Protein, Ash และ Fat ซึ่งจะมีค่าน้อย โดยมีค่าเท่ากับ 4.56, 3.07 และ 0.56 กรัม/100 กรัม ตามลำดับ

ตารางที่ 9 ปริมาณองค์ประกอบของลำไยตกเกรด 1 กก.

ลำไย 1 (กก.)	เนื้อ (กก.)	เปลือก (กก.)	เม็ด (กก.)	น้ำหนักกากเมื่อไล่ความชื้น (กก.)	ความชื้นที่หายไป (%)
ลำไยสด	0.2763	0.2176	0.5061	0.579	42.1
ลำไยอบแห้ง	0.2518	0.2198	0.5284	0.564	43.6
เฉลี่ย	0.2640	0.2187	0.5172	0.5715	42.85

จากตารางที่ 9 พบว่า ภายในเนื้อลำไยสดตกเกรด 1 กิโลกรัม ประกอบไปด้วย เนื้อ 0.2763 กก. เปลือก 0.2176 กก. และเม็ด 0.5061 กก. ตามลำดับ ในส่วนของเนื้อลำไยอบแห้ง 1 กก. ประกอบไปด้วย เนื้อ 0.2518 กก. เปลือก 0.2198 กก. และเม็ด 0.5284 กก. ตามลำดับ

ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตแอลกอฮอล์จากลำไยตกเกรด

จากการศึกษาหาข้อมูลและประเมินปัจจัยในการผลิตแอลกอฮอล์ พบว่า ปัจจัยที่มีความเหมาะสมที่จะกำหนดในการทดลอง คือ ปริมาณน้ำตาลในลำไย เชื้อยีสต์สดและระยะเวลาในการเลี้ยงเชื้อยีสต์สด

ปริมาณน้ำตาลในน้ำลำไย

จากการทดลอง เมื่อทำการวัด % Brix (Total solid หรือ ค่าความหวาน) ของลำไยตกเกรดชนิดอบแห้งและสด พบว่า % Brix ที่ได้คือ 17 และ 18 Brix ตามลำดับ โดยน้ำลำไยที่ได้มีค่าพีเอชเท่ากับ 4.9 และ 5.1 ตามลำดับ ปริมาณน้ำตาลที่วัดได้คือ 85 และ 90 g/L ตามลำดับ ดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 คุณสมบัติทางเคมีของลำไยสดและลำไยอบแห้งตกเกรด

การทดสอบ	ลำไยอบแห้ง	ลำไยสด	วิธีการตรวจสอบ
ค่าพีเอช	4.9	5.1	เครื่องพีเอชมิเตอร์
ปริมาณน้ำตาลรีดิวส์	85 g/L	90 g/L	Determination of Reducing Sugar by Lane –
% Brix	17	18	Eynon Method และเครื่อง Refracto meter
อุณหภูมิในการหมัก	26-28 C	26-28 C	เทอร์โมมิเตอร์

เชื้อยีสต์สด

ได้รับความอนุเคราะห์ในการต่อเชื้อจาก สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ โดยทำการเลี้ยงในอาหารเหลวชนิด YM Broth ของบริษัท Becton, Dickinson and Company ทำการเลี้ยงเป็นเวลา 14 ชั่วโมง ซึ่งจะได้เชื้อยีสต์ที่อยู่ในช่วงเจริญวัย โดยจะเป็นช่วงที่เชื้อยีสต์มีความแข็งแรงทนทานต่อทุกสภาวะโดยเฉพาะเชื้อยีสต์ที่มีอยู่ในอากาศทั่วไป ซึ่งยีสต์ที่มีในอากาศนี้จะมีความสามารถในการกำจัดน้ำตาลได้รวดเร็วกว่ายีสต์ Saccharomyces cereviceae เมื่อเชื้อยีสต์ Saccharomyces cereviceae มีปริมาณน้อยและไม่แข็งแรง

ระยะเวลาในการเลี้ยง

จากการทดลองในระดับสเกลของลำไยสดตกเกรด พบว่า การเลี้ยงยีสต์ Saccharomyces cereviceae ได้ปริมาณแอลกอฮอล์สูงสุด เท่ากับ 8.5 % (390 ml) ณ ระยะเวลาการเลี้ยงเชื้อยีสต์สต 14 ชั่วโมง ซึ่งปริมาณเชื้อยีสต์เท่ากับ 7.58×10^7 cell/ml และประสิทธิภาพการหมักเท่ากับ 95.05% รองลงมาคือ 7% ณ ระยะเวลาการเลี้ยง 12 และ 24 ชั่วโมง โดยมีประสิทธิภาพการหมักเท่ากัน คือ 78.28 % ดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 ผลการหาสภาวะที่เหมาะสมในระดับสเกลขนาดเล็กของลำไยสดตกเกรด

% แอลกอฮอล์ที่ได้	ระยะเวลาในการเลี้ยง (ชม.)	ปริมาตรหัวเชื้อ (%)	ปริมาณเชื้อยีสต์ Cell/ml	ปริมาณแอลกอฮอล์ที่ได้	ประสิทธิภาพการหมัก (%)
4%	8	10	6.17×10^6	350 ml	47.73
5%	10	10	6.85×10^6	330 ml	55.916
7%	12	10	6.91×10^7	360 ml	78.28
8.5 *	14 *	10	7.58×10^7 *	390 ml	95.05 *
5%	16	10	7.84×10^7	350 ml	55.916
6%	18	10	7.76×10^7	370 ml	67.09
4%	20	10	7.65×10^7	340 ml	47.73
5%	22	10	7.62×10^7	360 ml	55.916
7%	24	10	7.58×10^7	360 ml	78.28

* มีปริมาณแอลกอฮอล์สูงที่สุด

จากการทดลองในระดับสเกลของลำไยอบแห้งตกเกรด พบว่า การเลี้ยงยีสต์ Saccharomyces cereviceae ได้ปริมาณแอลกอฮอล์สูงสุด เท่ากับ 8 % (325 ml) ณ ระยะเวลาการเลี้ยงยีสต์สดเท่ากับ 14 ชั่วโมง ซึ่งปริมาณเชื้อยีสต์เท่ากับ 7.48 x 10^7 cell/ml และประสิทธิภาพการหมักเท่ากับ 91.44 % รองลงมา คือ รองลงมาคือ 7% ณ ระยะเวลาการเลี้ยง 12, 18, 20, 22 และ 24 ชั่วโมง โดยมีประสิทธิภาพการหมักเท่ากัน คือ 80.01 % ดังตารางที่ 12

ตารางที่ 12 ผลการหาสภาวะที่เหมาะสมในระดับสเกลขนาดเล็กของลำไยอบแห้งตกเกรด

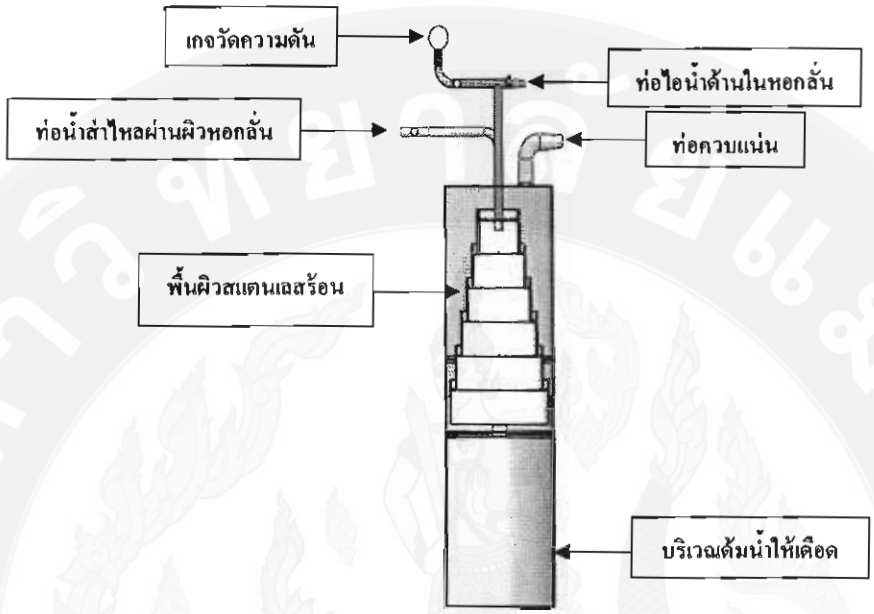
% แอลกอฮอล์ที่ได้	ระยะเวลาในการเลี้ยง (ชม.)	ปริมาตรหัวเชื้อ	ปริมาณเชื้อยีสต์ Cell/ml	ปริมาณแอลกอฮอล์ที่ได้	ประสิทธิภาพการหมัก (%)
4%	8	10	6.54 x 10^6	310	45.72
5%	10	10	6.75 x 10^6	340	57.15
7%	12	10	6.98 x 10^7	315	80.01
8% *	14 *	10	7.48 x 10^7 *	325 *	91.44 *
6%	16	10	7.74 x 10^7	330	68.58
7.3%	18	10	7.89 x 10^7	317	83.44
7.7%	20	10	7.75 x 10^7	340	88.01
7.4%	22	10	7.68 x 10^7	320	84.58
7%	24	10	7.61 x 10^7	335	80.01

* มีปริมาณแอลกอฮอล์สูงที่สุด

<u>การศึกษาประสิทธิภาพของกระบวนการหมักและการกลั่นด้วยเครื่องต้นแบบ</u>

เมื่อทราบสภาวะการหมักที่สามารถให้ปริมาณแอลกอฮอล์สูงสุด จะนำมาทำการทดลองในระดับสเกลที่ใหญ่ขึ้น โดยใช้เครื่องกลั่นแอลกอฮอล์ต้นแบบ, ใช้สภาวะการหมักที่ได้จากการทำการทดลองในระดับสเกลและทำการหมักในถังพลาสติกขนาด 150 ลิตร โดยอุณหภูมิอยู่ในช่วง 27 – 31 องศาเซลเซียส

เครื่องกลั่นแอลกอฮอล์ต้นแบบ



ภาพที่ 24 โครงสร้างเครื่องกลั่นแอลกอฮอล์ต้นแบบ

จากหลักการในการให้ความร้อนผ่านท่อสแตนเลส จะเป็นการเพิ่มพื้นที่การให้ความร้อนที่สูงขึ้นแก่น้ำส่า โดยมวลน้ำส่าที่ร้อนจะไหลไปสู่มวลน้ำที่เย็น ซึ่งลักษณะเช่นนี้จะทำให้ความร้อนกระจายไปทั่วทั้งถังกลั่นได้เป็นอย่างดี โดยในการทดลองนั้นจะใช้น้ำส่าประมาณ 50 ลิตร ซึ่งถังกลั่นชุดนี้จะมีส่วนประกอบ โดยรวม คือ

1. ตัวถังต้มน้ำส่าที่มีการดัดแปลง โดยการติดตั้งท่อสแตนเลส เพื่อใช้ในการให้ความร้อน
2. ตัวพื้นผิวสแตนเลสที่ทำเป็นชั้นๆ เพื่อเป็นการเพิ่มแรงดันและเพิ่มอุณหภูมิให้แอลกอฮอล์สามารถที่จะระเหยออกมาได้อย่างรวดเร็ว
3. เกจวัดความดันและวัดอุณหภูมิของไอน้ำก่อนออกมาควบแน่น ดังภาพที่ 24 และ 25

ภาพที่ 25 ตัวถังต้มน้ำส่าที่มีการดัดแปลงโดยการให้ความร้อนจากการเผาท่อสแตนเลส

ตารางที่ 13 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องกลั่นแอลกอฮอล์ต้นแบบ (ลำไยอบแห้ง)

การทดลองที่	ปริมาตรน้ำส่าเริ่มต้น litre	น้ำหนักน้ำหลังต้ม kg.	น้ำหนักน้ำที่ระเหยไป litre	น้ำหนักแก๊สที่ใช้ไป kg.	% แอลกอฮอล์ของน้ำส่า (v/v)	% แอลกอฮอล์ที่กลั่นได้ (v/v)	ปริมาตรที่กลั่นได้ litre	เวลาที่ใช้ในกระบวนการกลั่น
1	50	36.90	13.1	2.74	4 %	8.5 %	10.5	6 ชม. 5 นาที
2	50	38.64	11.36	2.81	4.3 %	8.7 %	11.1	6 ชม. 30 นาที
3	50	37.85	12.15	2.91	4.2 %	8.5 %	10	6 ชม. 15 นาที
รวม	**150**	-	**36.6**	**8.46**	**4.16 %**	**8.6 %**	**31.6**	**18 ชม. 50 นาที**

จากตารางที่ 13 พบว่า การกลั่นน้ำส่าจากลำไยอบแห้งตกเกรดปริมาตรของแอลกอฮอล์ที่กลั่นได้เท่ากับ 31.6 ลิตร เวลาในการกลั่นเท่ากับ 18 ชั่วโมง 50 นาที โดยใช้แก๊ส LPG ไปเท่ากับ 8.46 กก. เปอร์เซ็นต์แอลกอฮอล์ที่กลั่นได้เท่ากับ 8.6 %

ตารางที่ 14 ผลการศึกษาประสิทธิภาพของเครื่องกลั่นแอลกอฮอล์ต้นแบบ (ลำไยสด)

การทดลองที่	ปริมาตรน้ำส่าเริ่มต้น litre	น้ำหนักน้ำหลังต้ม kg.	น้ำหนักน้ำที่ระเหยไป litre	น้ำหนักแก๊สที่ใช้ไป kg.	% แอลกอฮอล์ของน้ำส่า (v/v)	% แอลกอฮอล์ที่กลั่นได้ (v/v)	ปริมาตรที่กลั่นได้ litre	เวลาที่ใช้ในกระบวนการกลั่น
1	50	36.20	13.8	2.76	4.8 %	8.8 %	11.5	6 ชม. 25 นาที
2	50	37.60	12.4	2.73	4.2 %	8.6 %	10.7	6 ชม. 15 นาที
3	50	38.10	11.9	2.78.	4.9 %	8.5 %	10.5	6 ชม. 20 นาที
รวม	**150**	-	**37.3**	**8.37**	**4.6 %**	**8.6 %**	**32.7**	**19 ชม.**

จากตารางที่ 14 พบว่าการกลั่นน้ำส่าจากลำไยสดตกเกรดปริมาตรของแอลกอฮอล์ที่กลั่นได้เท่ากับ 32.7 ลิตร เวลาในการกลั่นเท่ากับ 19 ชั่วโมง โดยใช้แก๊ส LPG ไปเท่ากับ 8.37 กก. เปอร์เซ็นต์แอลกอฮอล์ที่กลั่นได้เท่ากับ 8.6 %

ภาพที่ 26 การกลั่นเอทานอลจากลำไยตกเกรด (แบบกะ)

จากภาพที่ 26 เป็นกระบวนการกลั่นแอลกอฮอล์แบบกะโดยใช้เครื่องกลั่นต้นแบบที่มีอัตราการกลั่น 50 ลิตรต่อครั้ง โดยจะมีหลอดควบแน่น 2 ขั้นตอน เนื่องจากไอผสมระหว่างเอทานอลและไอน้ำนั้นมีอุณหภูมิสูงประมาณ 105 องศา ซึ่งร้อนมาก จึงต้องมีหลอดควบแน่น 2 ขั้นตอน ถึงจะไม่เกิดการสูญเสียไอของเอทานอล

การผลิตแก๊สชีวภาพจากลำไยตกเกรด

จากการทดลอง นำกากลำไยตกเกรดมาผสมหมักกับมูลวัวสด (Co – digestion) เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพในการหมักย่อยได้ดียิ่งขึ้น ซึ่งมูลโคสดมีค่าของความเป็นด่าง (Alkalinity) อยู่ที่ระดับ 7 – 7.8 (กล้าณรงค์, 2544) ซึ่งจากหลักการดังกล่าวเป็นองค์ประกอบที่ช่วยส่งเสริมให้เกิดการเพิ่มขึ้นของศักยภาพการหมัก และส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยจะทำในรูปแบบของการเติมแบบ Batch ซึ่งจะเติมครั้งละ 20 กก. โดยจะเก็บผลการทดลองเป็นระยะเวลา 10 วัน ซึ่งจะทำการทดลองทั้งหมด 3 การทดลอง ในสภาวะที่อุณหภูมิอยู่ในช่วง 25 – 32 องศา ค่าพีเอชเท่ากับ 6.8 – 7.5 และค่า Alkalinity เท่ากับ 3,000 – 3,500 ml/L ($CaCO_3$)

ในกระบวนการทดลองนั้นจะมีการนำกากลำไยที่เหลือจากการสกัดเอาน้ำตาล เพื่อนำไปผลิตเป็นเอทานอล มาผสมรวมกับมูลโคและน้ำในอัตราส่วน มูลโค 5 กก. : กากลำไย 20 กก. : น้ำ 15 ลิตร ในถังหมักเตรียม (ผลิตกรด) เพื่อการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆ จากกากของลำไยตกเกรด โดยจะทำการหมักไว้เป็นระยะเวลา 15 - 20 วัน โดยมีการคนผสมทุกๆ วัน โดยเมื่อนำตัวอย่างมาทำการทดสอบวัดค่าต่างๆ พบว่ามีรายละเอียดดังตารางที่ 15

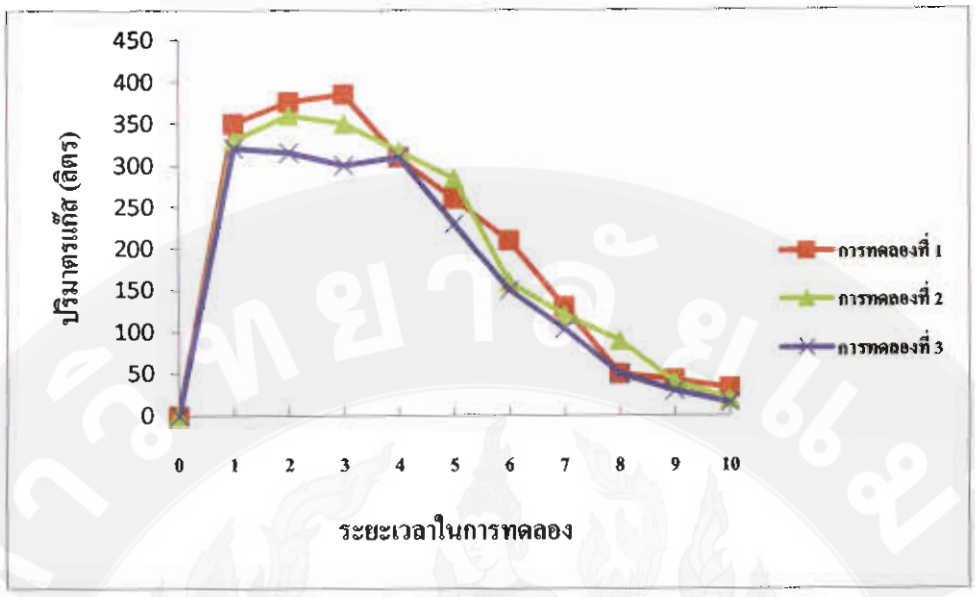
จากตารางที่ 15 พบว่าค่า COD ของน้ำหมักที่เกิดจากการผสมกากลำไยตกเกรดและมูลวัวไปนั้นมีค่าเท่ากับ 254,000 mg/L เมื่อทำการหมักในถังเตรียมเป็นเวลา 7 – 10 วัน ซึ่งค่า COD ที่สูงนี้หมายถึง ปริมาณสารอินทรีย์ที่จุลินทรีย์และแบคทีเรียต้องการในกระบวนการที่จะเปลี่ยนไปเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สมีเทน ซึ่งนอกจากปัจจัยที่กล่าวมาแล้ว ยังมีในส่วนของค่า Alkalinity เท่ากับ 42.1 mg/L ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับค่า pH โดยถ้าค่า Alkalinity น้อยนั้น หมายถึงความสามารถในการรักษาสภาพความเป็นด่างที่ต่ำ โดยค่า pH จะต่ำลง ซึ่งจะหมายถึงสารนั้นจะมีความเป็นกรดสูง ซึ่งจากผลการทดลองในช่วงแรกค่า pH จะเท่ากับ 3.8 ในส่วนของ TKN (Total Kjeldahl Nitrogen) หมายถึง ปริมาณสารไนโตรเจนทั้งหมดในสารละลาย โดยจะมีค่าเริ่มต้นเท่ากับ 2,942 mg/L ซึ่งจะมีความสัมพันธ์กับค่า NH_3 (แอมโมเนีย) โดยแอมโมเนียเกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ประเภทโปรตีนของจุลินทรีย์และแบคทีเรีย โดยโปรตีนจะย่อยสลายเป็นกรดอะมิโน จากนั้นแบคทีเรียจะปล่อยเอนไซม์ออกมาย่อยสลายกรดอะมิโน โดยกระบวนการ Deamination ได้เป็นแอมโมเนียปริมาณมากออกมา (นิรนาม, 2554) โดยจากการทดลองจะอยู่ที่ระดับ 4600.32 mg/L , Total Suspended Solid (TSS) หมายถึง สารแขวนลอย อยู่ที่ระดับ 0.8 mg/L, Total Volatilc Supended Solid (TVSS) หมายถึง ของแข็งแขวนลอยระเหยง่าย อยู่ที่ระดับ 0.7 mg/L ในส่วนของ Total Volatilc Solid หมายถึงสารระเหยง่าย อยู่ที่ระดับ 126.9 mg/L และ Total Solid (TS) หมายถึง ปริมาณของแข็งทั้งหมด อยู่ที่ระดับ 143.9 mg/L

ตารางที่ 15 ผลการทดสอบค่าของน้ำหมักที่ใช้ในการทำไบโอแก๊สก่อนการบรรจุลงในถังระบบ

การทดสอบ	ผลการทดสอบ	วิธีการตรวจสอบ
COD	254 g/L	Base on APHA – AWWA (2005)
Alkalinity	42.1 mg/L	
TKN	2,942.1 mg/L	
TSS	0.8 mg/L	In house method modified from AOAC (2005), 922.10 and APHA – AWWA (2005)
TVSS	0.7 mg/L	
TVS	126.9 mg/L	
TS	143.9 mg/L	AOAC (2005), 920.151
C/N	14:1	In house method AOAC (2005)
NH_3	4600.32 mg/L	
pH	3.8	pH Meter

ในการทดลองการผลิตแก๊สชีวภาพจากลำไยตกเกรดนั้นจะใช้ถังหมักขนาด 1,000 ลิตร เป็นถังระบบสำหรับผลิตแก๊สมีเทน ดังภาพที่ 27 ซึ่งจะต้องมีใบกวนไว้สำหรับกระจายสารจำพวกกรดอินทรีย์ระเหยง่าย เพื่อให้เมทาโนเจนแบคทีเรียใช้ในการสังเคราะห์แก๊สมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ ได้อย่างทั่วถึง โดยในถังระบบนี้จะปิดสนิท อากาศไม่สามารถที่จะเข้าได้ และในกระบวนการวัดอัตราการเกิดไบโอแก๊สนั้น จะใช้วิธีการวัดปริมาตรแก๊สต่อวัน และจะทำการปล่อยออกทุกวัน เพื่อดูความสามารถในการเปลี่ยนสารอินทรีย์ในน้ำหมักผสมมูลโค 20 ลิตร ไปเป็นแก๊สชีวภาพ

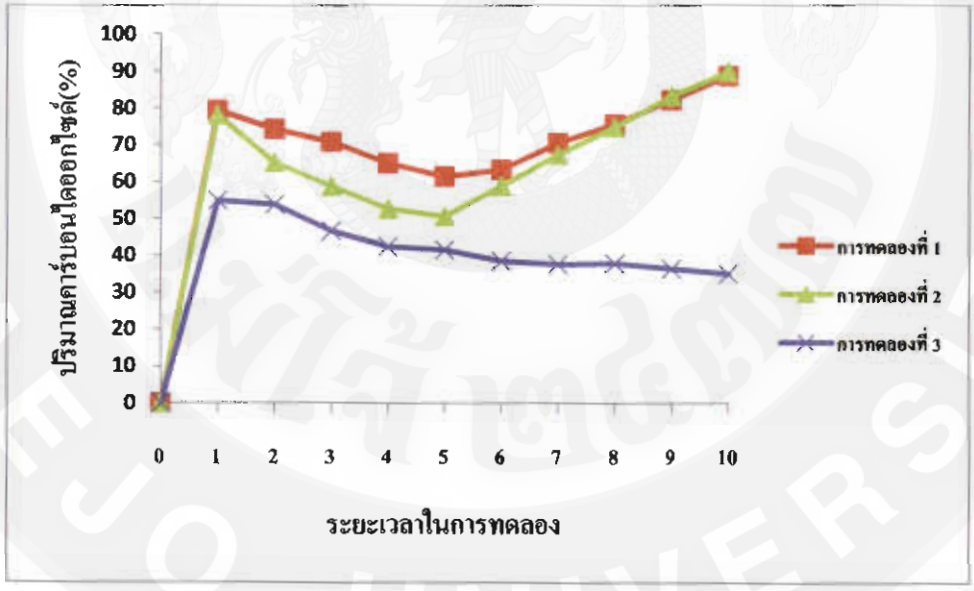
ภาพที่ 27 ลักษณะถังหมักไบโอแก๊สที่ใช้ในการทดลอง



ภาพที่ 28 ปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นในแต่ละวันของการหมักย่อยร่วมระหว่างลำไยกับมูลโค

จากภาพที่ 28 พบว่า การทดลองที่ 1 มีปริมาณแก๊สสูงสุดรองลงมา คือ การทดลองที่ 2 และการทดลองที่ 3 มีปริมาณแก๊สต่ำสุด โดยมีค่าเท่ากับ 385, 360 และ 320.6 ลิตร ตามลำดับ โดยลักษณะของกราฟจะเพิ่มสูงขึ้นในวันที่ 3 ของการทดลอง จากนั้นจะค่อยๆลดลงในวันที่ 4 ของการทดลองเป็นต้นไป เนื่องจากปัจจัยอยู่ 3 อย่าง คือ กรดไขมันระเหยง่าย (VFA) เริ่มน้อยลง, สารอาหารพื้นฐาน เช่น กลูโคสไม่เพียงพอต่อความต้องการในการเป็นแหล่งพลังงานในกระบวนการทำกิจกรรมต่างๆของจุลินทรีย์และแบคทีเรีย ในส่วนสุดท้าย คือ ความสมดุลในการย่อยสลายสารอินทรีย์ชนิดต่างๆและการผลิตแก๊สของแบคทีเรีย (Hydrogen – producing aeetogenic bacteria) ซึ่งสามารถอธิบายได้ดังนี้ การลดลงของกรดไขมันระเหยง่ายเป็นเพราะพวก Acetogenic bacteria และ Hydrogen – producing acetogenic bacteria ทำการเปลี่ยนกรดไขมันระเหยง่ายไปเป็น Acetic acid และกรดฟอร์มิค (Methanoic Acid : CH_2O_2) แล้ว Methanogen bacteria จะทำการเปลี่ยนไปเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจนและมีเทน โดยถ้าเชื้อแบคทีเรียและจุลินทรีย์ที่กล่าวมานั้นมีความแข็งแรงและปริมาณมาก ความสามารถในการผลิตแก๊สชนิดต่างๆจะสูง ทำให้ได้ปริมาณแก๊สชีวภาพที่สูง แต่ถ้ามีในปริมาณที่น้อยความสามารถในการผลิตแก๊สชนิดต่างๆจะต่ำส่งผลต่อปริมาณแก๊สชีวภาพที่ต่ำ ในส่วนของปริมาณกลูโคสนั้น เป็นตัวแปรที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งในกระบวนการผลิตแก๊สให้กับถังระบบ ซึ่งกลูโคสจะเป็นแหล่งพลังงานพื้นฐานที่สำคัญในกระบวนการดำเนินกิจกรรมต่างๆของพวกจุลินทรีย์และแบคทีเรีย โดยพบว่าถ้ากลูโคสเริ่มขาดแคลน ความสามารถในการดำเนินกิจกรรมต่างๆจะลดลงเป็นอย่างมาก ซึ่งก็จะส่งผลต่อการผลิตแก๊สที่ต่ำลงแม้ยังมีกรดไขมันระเหยง่ายอีกมากมายที่รอกระบวนการเปลี่ยนไปเป็นแก๊ส และใน

ส่วนสุดท้าย ความสมดุลในการย่อยสลายสารอินทรีย์ชนิดต่างๆและการผลิตแก๊สของแบคทีเรียในถังระบบ โดยที่ Acetogenic bacteria, Hydrogen – producing acetogenic bacteria และ Methanogen bacteria มีความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ต่ำกว่า พวก Hydrolytic bacteria (พวกใช้ออกซิเจนในถังเตรียม) ซึ่งหมายถึงอัตราการผลิตแก๊สชนิดต่างๆ ไม่สมดุลกับอัตราการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ แบคทีเรียและจุลินทรีย์ในถังระบบ(ผลิตแก๊ส)มีความสามารถในการผลิตแก๊สที่สูง แต่ความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์จะต่ำ ส่วนในถังเตรียม(ผลิตกรด) แบคทีเรียและจุลินทรีย์ชนิดต่างๆมีความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ให้เป็นโมเลกุลเล็กสูง แต่ความสามารถในการผลิตแก๊สจะต่ำ จึงเกิดความไม่สมดุลในการผลิตแก๊ส จากการสังเกตพบว่า ในถังระบบนั้นเมื่อการผลิตแก๊สสิ้นสุดในวันที่ 10 ของการทดลอง จะต้องรออีกประมาณ 5 – 8 วัน แก๊สถึงจะเพิ่มสูงขึ้นอีก แสดงให้เห็นว่าจุลินทรีย์และแบคทีเรียในถังระบบจะดำเนินกิจกรรมในการย่อยสลายสารอินทรีย์ก่อน ถึงจะดำเนินกระบวนการผลิตแก๊ส จึงต้องใช้เวลานานพอสมควรในกระบวนการสร้างแก๊ส จากสารอินทรีย์ต่างๆ

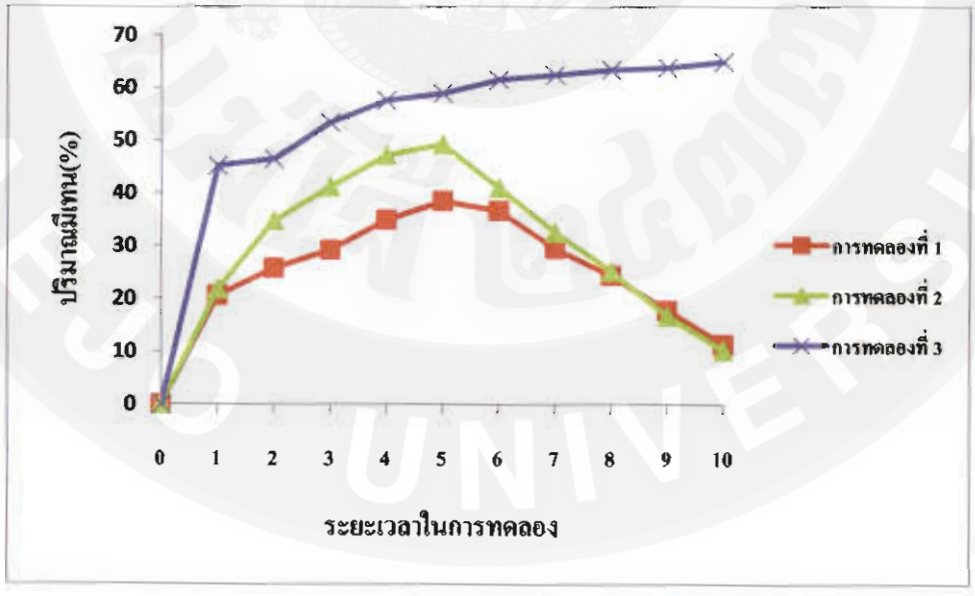


ภาพที่ 29 ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในการทดลอง

จากภาพที่ 29 พบว่า ในส่วนของการทดลองที่ 1 และ 2 นั้น จะมีการเกิดของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในปริมาณที่สูง แต่ในการทดลองที่ 3 นั้นพบว่าปริมาณแก๊สคาร์บอนได - ออกไซด์ มีปริมาณที่ลดลง ตามลำดับจนถึงวันที่ 10 ของการทดลอง โดยลักษณะเช่นนี้ สามารถอธิบายได้ว่า ในกรณีที่ระบบกำลังจะเข้าสู่สภาวะคงที่ ปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จะมีปริมาณน้อยกว่าปริมาณของแก๊สมีเทน ซึ่งแสดงว่าในการทดลองที่ 3 จุลินทรีย์สามารถผลิตแก๊ส

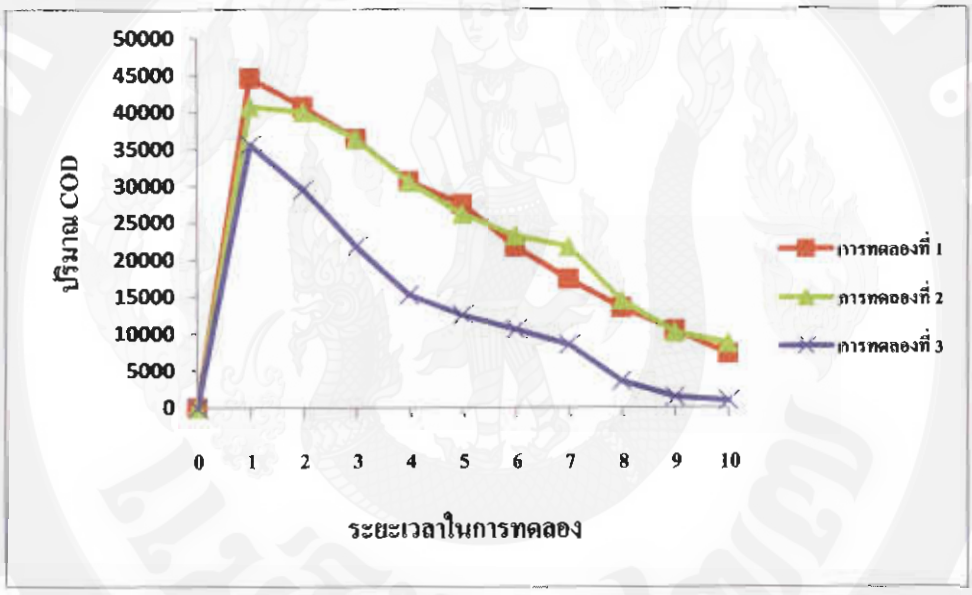
มีเทนจาก กรดอะซิติก และกรดฟอร์มิก ได้ในปริมาณที่สูง ส่วนสาเหตุการเกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงในการทดลองที่ 1 และ 2 นั้น น่าจะมีสาเหตุมาจาก การแข่งขันกันในการดำเนินกิจกรรมของ Methanogen bacteria และ Hydrogen – producing acetogenic bacteria โดยที่การเจริญเติบโตของเมทาโนเจนจะค่อนข้างช้า และจะเจริญได้ดีในสภาวะไร้ออกซิเจน แต่ Hydrogen – producing aeetogenic bacteria เป็นพวก Facultative anaerobic bacteria (ไม่ผลิตแก๊สมีเทน เจริญได้ดีในสภาวะที่มีและไม่มีออกซิเจน) จะมีการเจริญเติบโตที่รวดเร็วกว่า Methanogen bacteria (นิรนาม, 2554) เมื่อ Hydrogen – producing acetogenic bacteria ได้รับพลังงานที่ใช้ในการเจริญเติบโตจากการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่เป็นกรดไขมันระเหยง่าย จะเกิดการผลิตแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน และซัลไฟด์ออกมาในปริมาณที่สูงกว่าพวกเมทาโนเจนแบคทีเรียที่ผลิตแก๊สมีเทน ซึ่งสามารถที่จะแบ่งตัวได้เป็น 2 เท่า ภายในเวลา 24 ชั่วโมง โดยจากการทดลองจุดไฟในการทดลองที่ 3 พบว่า ไฟที่ได้จะติดอยู่นาน เปลวไฟมีสีฟ้าปนม่วง ได้กลิ่นของไฮโดรเจนซัลไฟด์เล็กน้อย แตกต่างกับการทดลองที่ 1 และ 2 ที่เปลวไฟนั้นจะติดๆดับๆ ไม่สม่ำเสมอ

จากภาพที่ 30 พบว่าในการทดลองที่ 3 นั้น มีปริมาณแก๊สมีเทนสูงสุดในวันที่ 10 ของการทดลอง ในส่วนของการทดลองที่ 2 และการทดลองที่ 1 ตามลำดับ มีเปอร์เซ็นต์มีเทนสูงสุดในวันที่ 5 เท่ากัน คือที่ 49.3% และ 38.56% ตามลำดับ



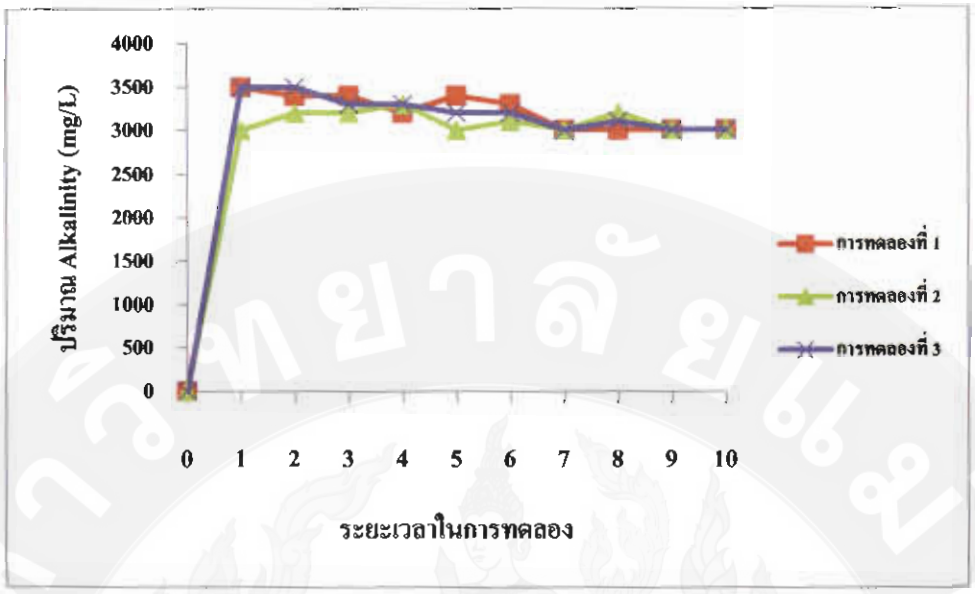
ภาพที่ 30 ปริมาณแก๊สมีเทนที่เกิดขึ้นในการทดลอง

จากภาพที่ 31 พบว่าปริมาณ COD นั้นจะมีการลดลงเรื่อยๆ โดยในการทดลองที่ 1 2 และ 3 นั้นมีปริมาณ COD เริ่มต้นเท่ากับ 44,620 40,768 และ 35,602 mg/L ตามลำดับ โดยในวันที่ 10 ของการทดลองนั้น จะมีค่า COD เหลือเท่ากับ 7,280 8,730 และ 950 mg/L ตามลำดับ ซึ่งค่า COD เป็นการวัดปริมาณสารอินทรีย์ที่เกิดการสลายตัว โดยแบคทีเรียและจุลินทรีย์ที่มีความต้องการในการใช้พลังงานจากสารนั้นๆ ซึ่งจะวัดออกมาในรูปของความต้องการปริมาณออกซิเจนของน้ำเสียที่สามารถออกซิไดซ์สารอินทรีย์ต่างๆ ไปเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ โดยค่า COD นั้นจะมีความสัมพันธ์กับปริมาณแก๊สชีวภาพที่เกิดขึ้น คือ ถ้าระบบการหมักมีค่า COD สูงปริมาณแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้ก็จะสูงขึ้นตาม ถ้าระบบมีค่า COD น้อย ปริมาณแก๊สชีวภาพก็จะต่ำ

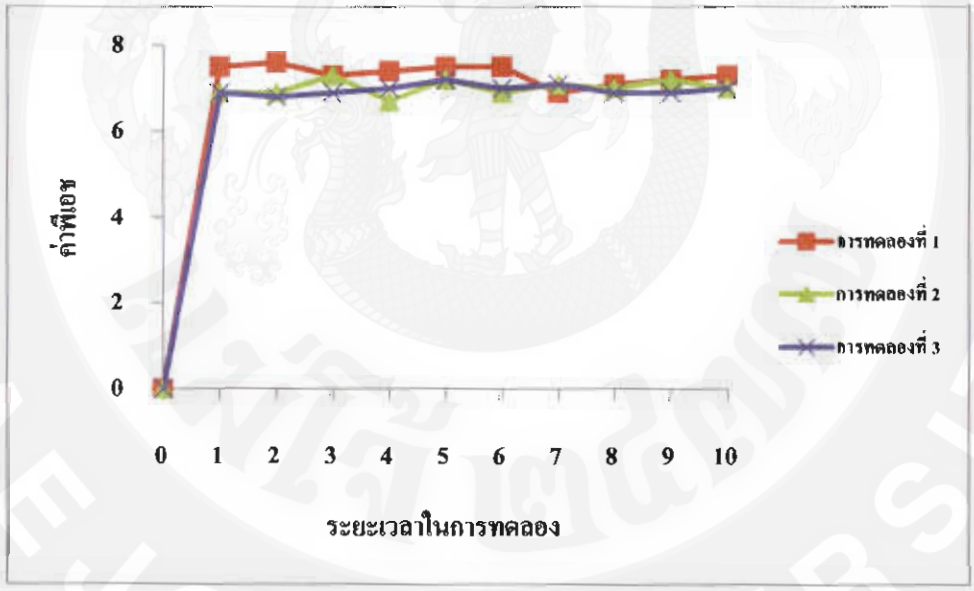


ภาพที่ 31 ปริมาณ COD ในแต่ละวันของการทดลอง

จากภาพที่ 32 สภาพ Alkalinity พบว่ามีสภาพเป็นด่างของไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) ซึ่งค่า Alkalinity จะมีความสัมพันธ์กับค่าพีเอช โดยค่าพีเอชจะอยู่ในช่วง 6.9 – 7.5 ของทั้ง 3 การทดลอง ค่า Alkalinity จะอยู่ในช่วง 3,000 – 3,500 ml/L ($CaCO_3$) ของทั้ง 3 การทดลอง โดยค่า Alkalinity หมายถึง ความสามารถในการรักษาสภาพความเป็นกรดเป็นด่างของน้ำ จากการทดลองถ้าระบบไม่สามารถที่จะรักษาสภาพความเป็นกรดเป็นด่างในช่วงนี้ได้จะทำให้การผลิตแก๊สมีเทนมีปริมาณน้อยลง โดยจุลินทรีย์เมทาโนเจน ไม่สามารถที่จะทนทานต่อสภาวะความเป็นกรดสูงหรือค่าพีเอชต่ำได้ ซึ่งความเป็นกรดสูงนี้จะไปยับยั้งการผลิตแก๊สมีเทนและแก๊สอื่นๆ ได้

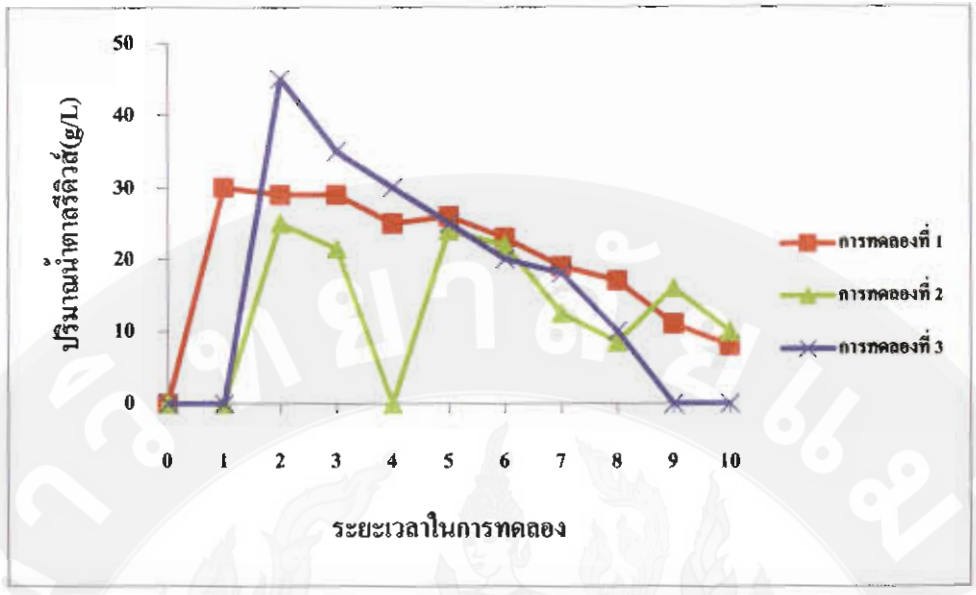


ภาพที่ 32 ปริมาณ Alkalinity ของน้ำหมักกากลำไยผสมกับมูลโคในถังหมัก



ภาพที่ 33 ค่าพีเอชของน้ำหมักกากลำไยผสมกับมูลโคในถังหมัก

จากภาพที่ 33 พบว่า ค่า pH ของทั้ง 3 การทดลองนั้น เมื่อเริ่มต้นทดลองจะอยู่ที่ระดับ 6.8 – 7.5 จนกระทั่งวันที่ 10 ของการทดลอง ค่า pH จะอยู่ที่ระดับ 7 – 7.5 แสดงว่าระบบในการหมักแก๊สชีวภาพค่อนข้างที่จะคงที่



ภาพที่ 34 ปริมาณน้ำตาลรีดิวส์ที่ตรวจพบในถังระบบ(ถังผลิตแก๊ส)

จากภาพที่ 34 พบว่า ปริมาณน้ำตาลรีดิวส์ในถังระบบ(ถังผลิตแก๊ส) ของทั้ง 3 การทดลอง ค่อนข้างที่จะไม่คงที่ โดยในวันแรกของการทดลองที่ 1 มีปริมาณของน้ำตาลรีดิวซ์ที่สูง เพราะจุลินทรีย์และแบคทีเรียในถังผลิตกรดได้ทำการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ให้เป็นกลูโคสไว้ก่อนแล้ว โดยที่ Acid producing bacteria ยังไม่ใช้น้ำตาลกลูโคสเป็นแหล่งพลังงานในกระบวนการเปลี่ยนสารอินทรีย์โมเลกุลเล็กไปเป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่าย ซึ่งเมื่อนำน้ำหมักกากลำไยผสมมูลโคมาเติมลงในถังระบบ(ผลิตแก๊ส) สันนิษฐานว่าแบคทีเรียและจุลินทรีย์พวก Facultative anaerobic bacteria (ไม่ผลิตแก๊สมีเทน เจริญได้ดีในสภาวะที่มีและไม่มีออกซิเจน) จะใช้น้ำตาลรีดิวซ์ก่อนพวกเมทาโนเจนแบคทีเรีย โดยปริมาณน้ำตาลรีดิวส์จะค่อยๆลดลงจนถึงวันที่ 10 ของการทดลอง ส่วนการทดลองที่ 2 และ 3 จะตรวจไม่พบปริมาณน้ำตาลรีดิวส์ ในวันที่ 0 และ 1 ของการหมักในถังระบบ อาจเป็นเพราะน้ำตาลรีดิวซ์หมดลงตั้งแต่อยู่ในถังเตรียม(ผลิตกรด) โดยเมื่อนำมาเติมลงในถังระบบจุลินทรีย์และแบคทีเรียจำพวก Facultative anaerobic bacteria กำลังดำเนินกิจกรรมการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ให้เป็นน้ำตาลกลูโคส เพราะโดยธรรมชาติแล้ว ถ้าในระบบมีน้ำตาลกลูโคสอยู่ก่อนแล้ว จุลินทรีย์และแบคทีเรียชนิดต่างๆจะใช้กลูโคสเป็นแหล่งพลังงานในการดำเนินกิจกรรมต่างๆ ก่อน เมื่อหมดแล้วถึงจะดำเนินการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ให้กลายเป็นน้ำตาลกลูโคสเพื่อเป็นแหล่งพลังงานต่อไป ซึ่งสังเกตได้จากในวันที่ 4 ของการทดลองที่ 2 นั้น ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์จะเท่ากับ 0 และจะเพิ่มขึ้นอีกในวันที่ 5 ของการทดลอง เท่ากับ 25 mg/L จากนั้นถึงจะค่อยๆลดลงตามลำดับ

(โดยน้ำตาลรีดิวส์ หมายถึง น้ำตาลที่มีกลุ่มของ Aldehyde หรือ Ketone ที่เป็นอิสระ ถูกออกซิไดซ์ได้ง่าย ด้วยตัวออกซิไดซ์อย่างอ่อน ได้แก่ น้ำตาลกลูโคส น้ำตาลกาแลคโตส และน้ำตาลฟรุกโตส (นิรนาม, 2554) โดยคาดว่าเกิดจากการทำงานร่วมกันของจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ ที่มีคุณสมบัติในการย่อยสลายสารโมเลกุลใหญ่ให้เป็นสารโมเลกุลเล็ก อาทิ เช่น น้ำตาลกลูโคส ซึ่งก็จัดเป็นประเภทของน้ำตาลรีดิวส์ โดยการย่อยสลายที่ดีนั้นจะต้องมีการถวนสารอาหารกับจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ ให้สามารถเข้าถึงกันได้โดยง่าย โดยเมื่อมีการถวนเกิดขึ้น การตรวจวัดปริมาณน้ำตาลรีดิวส์จะมีค่าสูงขึ้น ทั้งนี้อาจเป็นเพราะจุลินทรีย์มีการเข้าถึงแหล่งอาหารที่สามารถย่อยไปเป็นน้ำตาลรีดิวส์ได้

<u>การวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์</u>

จากการรวบรวมข้อมูลในการดำเนินการทดลอง เพื่อทำการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ โดยมีต้นทุนคงที่เท่ากับ 55,700 บาท ดังตารางที่ 16 ซึ่งมีการใช้อุปกรณ์ที่มีความหลากหลาย โดยในการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์นี้ จะคำนึงถึงความรวดเร็วในกระบวนการผลิตและระยะเวลาการคืนทุนที่สั้น จึงต้องมีการใช้อุปกรณ์มากกว่า 1 อย่าง

ตารางที่ 16 รายละเอียดสำหรับการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์สำหรับต้นทุนคงที่

ลำดับที่	ต้นทุนคงที่
1	ถังหมักขนาด 150 ลิตร จำนวน 40 ถัง ราคา 20,000 บาท
2	หลอดแก้วสำหรับกลั่นเอทานอล ราคา 2,000 บาท
3	เครื่องบดอัดลำไยขนาด 3 แรงม้า จำนวน 3 ตัว ราคา 27,000 บาท
4	ยีสต์สด ราคา 700 บาท
5	หม้อต้มสกัดน้ำลำไยขนาด 300 ลิตร จำนวน 10 ใบ ราคา 8,000 บาท
รวม / เดือน	-
รวม / ปี	55,700 บาท

ในส่วนการวิเคราะห์ต้นทุนผันแปร ดังตารางที่ 17 ซึ่งมีปัจจัยในการวิเคราะห์ต้นทุนผันแปรดังนี้ ค่าไฟฟ้า, ค่าเชื้อเพลิง, ค่าอุปกรณ์สำหรับต้มฆ่าเชื้อ, ค่าจัดซื้อลำไยตกเกรด และค่าแรงงาน

ตารางที่ 17 รายละเอียดสำหรับการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์สำหรับต้นทุนผันแปร

ลำดับที่	ต้นทุนผันแปร
1	ค่าไฟฟ้าสำหรับเครื่องบดอัดลำไย 1,701.673 บาท/เดือน
2	ค่าเชื้อเพลิง LPG จำนวน 10 ถัง ราคา 3,000 บาท/เดือน
3	ถังน้ำมัน 200 ลิตร สำหรับต้มฆ่าเชื้อ จำนวน 10 ใบ ราคา 2,000 บาท
4	ค่าจัดซื้อลำไยตกเกรด 6 ตันรวมค่าขนส่ง / ครั้ง ราคา 15,000 บาท
5	ค่าแรง คนงาน 3 คน 20 วัน วันละ 200 บาท เท่ากับ 12,000 บาท
รวม / เดือน	33,701.673 บาท / เดือน
รวม / ปี	404,420.076 บาท / ปี

ในการประเมินต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ พบว่า ต้องใช้วัตถุดิบตั้งแต่ 6 ตันต่อเดือนขึ้นไป ซึ่งจะทำให้ได้ปริมาณเอทานอล 95% อยู่ที่ 379 ลิตรต่อเดือน สำหรับลำไยอบแห้งตกเกรด และ 410.28 ลิตรต่อเดือน สำหรับลำไยสดตกเกรด โดยเอทานอล 95% 1 ลิตร จะใช้วัตถุดิบเท่ากับ 15.83 กก. สำหรับลำไยอบแห้งตกเกรด และ 14.62 กก. สำหรับลำไยสดตกเกรด โดยมีต้นทุนวัตถุดิบต่อหน่วยเท่ากับ 88.92 บาทต่อกิโลกรัม สำหรับลำไยอบแห้งตกเกรด และ 82.14 บาทต่อกิโลกรัม สำหรับลำไยสดตกเกรด ดังตารางที่ 18

ตารางที่ 18 การประเมินต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ของการผลิตเอทานอลจากลำไยตกเกรด

ลำไย	น้ำหนักวัตถุดิบ (ตัน/เดือน)	ปริมาณเอทานอล 95% (ลิตร / เดือน)	ปริมาณวัตถุดิบต่อเอทานอล 1 ลิตร (95%)	ต้นทุนวัตถุดิบต่อหน่วย (บาท/กก.)
อบแห้ง	6	379	15.83 กก.	88.92
สด	6	410.28	14.62 กก.	82.14
เฉลี่ย	6	394.64	15.225 กก.	85.53

จากการประเมินทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้น พบว่า ในกระบวนการผลิตเอทานอลจากลำไยตกเกรดมีต้นทุนวัตถุดิบต่อหน่วยที่สูง ความคุ้มค่าต่อการลงทุนมีความเสี่ยงในการคืนทุนที่ช้า เนื่องจากผลผลิตเอทานอลที่ได้ต่ำ อีกทั้งปัจจัยอื่นๆในกระบวนการผลิตมีต้นทุนที่สูง กระบวนการผลิตเอทานอลจากลำไยตกเกรดจึงยังไม่เป็นที่น่าลงทุนในทางเศรษฐศาสตร์

สรุปและวิจารณ์ผลการวิจัย

การผลิตเอทานอลจากลำไยตกเกรด

จากผลการทดลองที่ได้กล่าวมาแล้วนั้น กระบวนการที่จะได้ซึ่งความเข้มข้นของแอลกอฮอล์ที่สูงนั้นมีปัจจัยอยู่ 2 อย่างคือ กระบวนการหมัก และกระบวนการกลั่น โดยกระบวนการหมักนั้น จะขึ้นอยู่กับความสามารถของยีสต์ที่ใช้หมัก สายพันธุ์ ความแข็งแรงและช่วงเวลาในการผลิตเอทานอลสูงสุด และในส่วนของความเข้มข้นของน้ำตาล ชนิดของน้ำตาลก่อนที่เอทานอลนั้นจะถูกเปลี่ยนไปเป็นกรดอะซิติก ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพในการหมักสูงขึ้น (ได้แอลกอฮอล์ที่มีความเข้มข้นสูง) และกระบวนการกลั่น จะขึ้นอยู่กับเครื่องกลั่นต้นแบบแบบกะขนาด 50 ลิตร ซึ่งมีการดัดแปลงโดยการดิดตั้งท่อน้ำวนสำหรับเผา เพื่อเพิ่มพื้นที่การรับความร้อนและเพิ่มแรงดันในการระเหยของแอลกอฮอล์

โดยจากการทดลองในระดับสเกลใหญ่นั้น พบปัญหาในกระบวนการหมัก คือ แอลกอฮอล์ในน้ำส่าที่ได้ถูกเปลี่ยนไปเป็นกรดอะซิติก โดยปริมาณน้ำตาลรีดิวส์ยังคงเหลืออยู่ และเปอร์เซ็นต์แอลกอฮอล์ที่วัดได้ของน้ำส่ามีน้อย คือ 4.1 และ 4.3 % ตามลำดับ

การที่แอลกอฮอล์ในน้ำส่าถูกเปลี่ยนไปเป็นกรดอะซิติกนั้น มีสาเหตุมาจากการปนเปื้อนแบคทีเรียที่ผลิตกรดอะซิติก ซึ่งจะส่งผลให้การหมักจะหยุดชะงักได้ โดยจากการทดลองในระดับสเกลใหญ่นั้นได้มีกระบวนการผ่านความร้อนให้กับน้ำลำไยที่อุณหภูมิน้ำเดือด คือ 95 – 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5-8 ชั่วโมง เพื่อฆ่าเชื้อโรคชนิดต่างๆที่ปนเปื้อนมากับลำไยตกเกรด เพราะลำไยตกเกรดที่ไปรับซื้อมาทำการทดลองนั้น จะอยู่ในสภาพที่ถูกปล่อยทิ้งไว้ตามพื้นดินเหมาะแก่การปนเปื้อนของเชื้อโรคทุกชนิด ที่เป็นอันตรายต่อกระบวนการผลิตแอลกอฮอล์ของยีสต์ Saccharomyces cereviceae กรณีที่เชื้อโรคเหล่านั้นไม่ตาย เนื่องจากไม่ผ่านความร้อนที่อุณหภูมิและความดันสูง โดยในระดับสเกลเล็กขนาด 500 ml. จะไม่พบปัญหาในเรื่องของการปนเปื้อนและกระบวนการเปลี่ยนไปเป็นกรดอะซิติกของเอทานอลเลย ทั้งนี้น่าจะมาจากกระบวนการให้ความร้อนในระดับสเกลใหญ่นั้นไม่สามารถฆ่าเชื้อที่มีความสามารถในการผลิตกรดอะซิติกได้ ซึ่งเชื้อชนิดนี้มีความสามารถในการดำรงชีวิตได้ดีทั้งในสภาวะมีออกซิเจนและไร้ออกซิเจน จะเข้าแข่งขันแย่งชิงแหล่งพลังงาน เช่น กลูโคส แล้วผลิตกรดอะซิติกออกมายับยั้งการเจริญเติบโตและกระบวนการผลิตแอลกอฮอล์ของยีสต์ Saccharomyces cereviceae ซึ่งกรดอะซิติกจะมีผลโดยตรงต่อเซลล์ของยีสต์ โดยจะทำให้เซลล์ยีสต์นั้นแตกและถูกยับยั้งการเจริญเติบโตในที่สุด สังเกตได้จากการที่มีปริมาณน้ำตาลเหลืออยู่และการได้กลิ่นเหม็นเปรี้ยวคล้ายน้ำส้มสายชู เมื่อเปิดถังหมักออกมา

ซึ่งการที่จะฆ่าเชื้อโรคชนิดนี้ได้จะต้องใช้ความดันที่ 15 -21 bar อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 - 30 นาที เพราะมีสปอร์ที่ทนความร้อนและความดันที่สูงได้ กระบวนการให้เพียงแค่ความร้อนอย่างเดียวนั้นไม่อาจที่จะยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียชนิดนี้ได้

การที่มีปริมาณน้ำตาลและ % brix เหลืออยู่ นั้นน่าจะมีสาเหตุมาจากน้ำตาลที่เหลือในน้ำส่า เป็นน้ำตาลที่ yeast ไม่สามารถที่จะนำไปใช้ในการผลิตเอทานอลได้ เพราะอาจจะเป็นพวกน้ำตาลโมเลกุลใหญ่ เช่น น้ำตาลฟรุกโตส น้ำตาลซูโคส ซึ่งโดยทั่วไปแล้วยีสต์มีความสามารถใช้น้ำตาลกลูโคสได้ดีที่สุด (บุณยพัต, 2546) จากตารางที่ 1.1 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของเนื้อลำไยอบแห้งและเนื้อลำไยสด พบว่า ในลำไยอบแห้งและลำไยสดตกเกรดมีปริมาณของน้ำตาลซูโครสสูงที่สุด คือเท่ากับ 10.20 และ 11.31 g /100 g ตามลำดับ รองลงมา คือ น้ำตาลกลูโคส ที่ระดับ 2.46 และ 2.79 g / 100 g ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นได้ชัดว่าปริมาณของน้ำตาลกลูโคสที่น้อย ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการผลิตแอลกอฮอล์ของยีสต์ Saccharomyces cereviceae ต่ำเป็นครึ่งหนึ่งของกระบวนการหมักแบบต่อเนื่อง

จากการทดลองวัดเปอร์เซ็นต์แอลกอฮอล์ในน้ำส่าก่อนกระบวนการกลั่น พบว่า มีเปอร์เซ็นต์แอลกอฮอล์เท่ากับ 4.1 และ 4.3 % ตามลำดับ โดยลักษณะของน้ำส่าที่สังเกตได้ คือ มีสีส้ม กลิ่นออกเปรี้ยวๆ คล้ายน้ำส้มสายชู ซึ่งปัจจัยที่กระตุ้นให้เกิดนั้น ดังที่ได้กล่าวมาแล้วในเบื้องต้น แต่ถ้าหากจะกล่าวถึงปัจจัยโดยรวมแล้ว พบว่า ความเข้มข้นของน้ำตาลที่สกัดได้จากลำไยตกเกรด มีส่วนสำคัญต่อการผลิตแอลกอฮอล์ของยีสต์ Saccharomyces cereviceae โดยจาก บุณยพัต (2546) พบว่าความเข้มข้นของน้ำตาลที่สูงกว่าร้อยละ 22 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรสารละลาย จะเกิดการรบกวนการเจริญเติบโตของเชื้อยีสต์ ทำให้เติบโตได้ยาก การหมักจะเป็นไปอย่างช้าและไม่สมบูรณ์ ทำให้เกิดกรดแลคติค กรดน้ำส้ม และสารอินทรีย์ต่างๆ ขึ้นได้ ส่วนมากจะเกิดในบรรยากาศของคาร์บอนไดออกไซด์ โดยปกติแล้วกระบวนการหมักจะใช้ความเข้มข้นไม่เกินร้อยละ 18 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรสารละลาย เพื่อให้การเจริญเติบโตเป็นไปแบบปกติจะใช้ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยปริมาตร ถ้าน้ำตาลเป็นแบบโมเลกุลเล็ก เช่น กลูโคส ฟรุคโตส แล้วการหมักจะเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว กว่าพวกที่มีโมเลกุลใหญ่ เช่น ซูโคส มอลโตส ทั้งนี้เพราะยีสต์สามารถนำน้ำตาลโมเลกุลเล็กไปใช้ได้ทันที ซึ่งจากการทดลองนั้นพบว่า ในน้ำลำไยที่สกัดเอาน้ำตาลนั้นมีปริมาณความเข้มข้นของน้ำตาลรีดิวส์สูงถึง 13.58 และ 14.04 % ตามลำดับ ซึ่งลักษณะเช่นนี้อาจมีผลต่อกระบวนการเจริญเติบโตและผลิตแอลกอฮอล์ของยีสต์ Saccharomyces cereviceae ก็เป็นได้

รูปแบบของการหมักก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อกระบวนการผลิตแอลกอฮอล์ของยีสต์ Saccharomyces cereviceae ถ้าใช้กระบวนการหมักแบบต่อเนื่อง โดยการเติมแหล่งพลังงานให้กับยีสต์ เช่น น้ำตาลกลูโคสและธาตุไนโตรเจน แล้วกระบวนการผลิตแอลกอฮอล์ก็จะสูงขึ้นในระดับหนึ่ง เพราะยีสต์จะได้รับแหล่งพลังงานคือ น้ำตาลกลูโคส ซึ่งส่วนหนึ่งจะถูกใช้ไปในการเจริญเติบโตและอีกส่วนหนึ่งจะถูกใช้เป็นแหล่งพลังงานในการผลิตแอลกอฮอล์ ในส่วนของธาตุไนโตรเจนนั้นยีสต์จะใช้ในการแบ่งเซลล์ที่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งจะเป็นการเพิ่มประชากรในการที่ยีสต์จะผลิตแอลกอฮอล์ที่สูงขึ้น แต่จากการทดลองซึ่งเป็นแบบกะ พบว่าประสิทธิภาพในการหมักจะต่ำกว่าประสิทธิภาพในการหมักแบบต่อเนื่อง เพราะกระบวนการหมักแบบกะนั้น จะใส่แหล่งอาหารและแหล่งพลังงานเพียงครั้งเดียว จนจบกระบวนการผลิตแอลกอฮอล์ ส่วนกระบวนการหมักแบบต่อเนื่องนั้นจะมีการเติมแหล่งอาหารและแหล่งพลังงานดังที่กล่าวมาให้ตลอด ข้อดีของกระบวนการหมักแบบกะ คือ เหมาะกับการผลิตที่มีปริมาตรไม่มากนัก ในการหมักแต่ละครั้งยีสต์ที่ใช้มีความแข็งแรงและว่องไวดี ทั้งนี้เพราะต้องเตรียมยีสต์ขึ้นใหม่อยู่เสมอ ทำให้การผ่าเหล่าเกิดขึ้นยาก การควบคุมให้ระบบอยู่ในสภาวะการหมักแบบปลอดเชื้อทำได้ง่าย และการควบคุมระบบทำได้ง่ายไม่ซับซ้อน (อุเทน, 2554)

ในส่วนของกระบวนการกลั่นนั้น พบว่าทั้งสองการทดลอง คือลำไยอบแห้งตกเกรดและลำไยสดตกเกรด มีประสิทธิภาพการกลั่นที่ใกล้เคียงกัน คือ 48.94 % และ 50.36 % ตามลำดับ ซึ่งเมื่อเทียบกับการกลั่นแบบต่อเนื่องในระบบอุตสาหกรรมแล้วจะเป็นครึ่งหนึ่งของระบบอุตสาหกรรม เพราะในกระบวนการกลั่นแบบกะนั้น จะต้องกลั่นให้แอลกอฮอล์หมดก่อนในขั้นตอนแรก ถึงจะนำแอลกอฮอล์ที่ได้นั้นมากลั่นซ้ำอีกรอบ 2 เพื่อเพิ่มความเข้มข้นยิ่งๆขึ้นไป แต่ในกระบวนการกลั่นแบบต่อเนื่องนั้นจะทำการให้ความร้อนในครั้งเดียว แต่จะมีการควบแน่นหลายๆครั้งเพื่อเพิ่มความเข้มข้นของแอลกอฮอล์ขึ้นไป จนได้ความเข้มข้นที่ต้องการแล้วจึงจะหยุดการดำเนินการ ทั้งนี้ในอนาคตกระบวนการพัฒนาการกลั่นในระดับชุมชนนั้น จะต้องอาศัยองค์ความรู้ในหลายๆด้าน มาประยุกต์ใช้ เพราะมาตรฐานการกลั่นจะได้เท่าเทียมกัน เพื่อความก้าวหน้าของระบบอุตสาหกรรมในชุมชน ซึ่งจะเป็นรากฐานเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศต่อไป

การผลิตไบโอแก๊ส

จากผลการทดลอง พบว่า ปริมาณแก๊สมีเทนที่มีความเข้มข้นค่อนข้างสูง พบได้จากการทดลองที่ 3 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 68.5% รองลงมา คือการทดลองที่ 2 และ 1 ตามลำดับ ซึ่งแก๊สจากการทดลองที่ 3 จุดติดไฟได้ดี ไม่ค่อยมีกลิ่นของแก๊สไฮโดรเจนไดซัลไฟด์ ซึ่งแสดงว่าระบบการผลิตแก๊สมีเทนกำลังจะเสถียร โดยเมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบของคุณสมบัติทางเคมีของลำไยแล้ว จากตารางที่ 1.2 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของเมล็ดลำไยสด พบว่า มีปริมาณของคาร์โบไฮเดรตสูงถึง 52.50 g/100 g รองลงมา คือโปรตีน Crude Fiber, Fat และ Ash ตามลำดับ โดยมีปริมาณเท่ากับ 5.34, 1.30 และ 1.16 g/100 g ตามลำดับ ในส่วนขององค์ประกอบของเปลือกลำไย จากตารางที่ 1.3 พบว่า มีปริมาณของคาร์โบไฮเดรตสูงถึง 45.55 g/100 g รองลงมา คือ Crude Fiber, Protein, Ash และ Fat ตามลำดับ โดยมีปริมาณเท่ากับ 23.64, 4.56, 3.07 และ 0.56 ตามลำดับ ซึ่งโดยกระบวนการทางธรรมชาติแล้ว การย่อยสลายสารอินทรีย์ ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน นั้นจะอาศัยความสามารถทางธรรมชาติของจุลินทรีย์ชนิดต่างๆ ซึ่งแต่ละชนิดก็มีความสามารถในกระบวนการย่อยสลายที่แตกต่างกัน โดยคาร์โบไฮเดรตนั้นจะถูกย่อยสลายเป็นน้ำตาลโมเลกุลคู่ จากนั้นถึงจะถูกย่อยสลายกลายเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว เช่นน้ำตาลกลูโคส จากการทดลองผลิตไบโอแก๊สจากลำไยตกเกรดนั้น ได้มีการออกแบบการทดลองที่สำคัญๆ อยู่ 2 ระบบ คือ ระบบการผลิตกรด และระบบการผลิตแก๊ส จากการศึกษาข้อมูลของ (วิภารัตน์, 2551) ได้ทำการศึกษาประสิทธิภาพของระบบบำบัดแบบไร้อากาศสองขั้นตอน โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบสร้างกรดไร้อากาศ (Anaerobic Acid Reactor) และถังปฏิกรณ์แบบยูเอเอสบี (Upflow Anaerobic Sludge Blanket) ซึ่งจะเป็นถังสร้างมีเทน โดยพบว่า การเตรียมหัวเชื้อตะกอนสลัดจ์ มีผลในการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตกรดมากกว่าตะกอนสลัดจ์ที่ไม่มีการเตรียมและให้ผลของเปอร์เซ็นต์แก๊สมีเทนที่สูงกว่าการผลิตแก๊สมีเทนในขั้นตอนเดียว โดยจากการทดลองพบว่ากระบวนการหมักกากลำไยตกเกรดผสมกับมูลโค เมื่อนำไปหมักในถังเตรียม(ถังผลิตกรด) จะเกิดการย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่(เปลือก, เนื้อ และเมล็ด) โดยจุลินทรีย์และแบคทีเรียชนิดที่ใช้อากาศและไม่ใช้อากาศ เรียกขั้นตอนนี้ว่า Hydrolysis โดยจะย่อยสารพวกเซลลูโลสไปเป็นคาร์โบไฮเดรต จากนั้นถึงจะย่อยไปเป็นน้ำตาลโมเลกุลคู่ และสุดท้ายถึงจะกลายเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว เช่น น้ำตาลกูลโคส กรดอะมิโน และกรดไขมัน จากนั้นสารอินทรีย์โมเลกุลเล็ก จะเข้าสู่กระบวนการสร้างกรดในขั้นตอน Fermentation หรือ Acidogenesis โดย Acidogenic Bacteria จะได้กรดไขมันระเหยง่าย Volatile fatty acid (VFA) สังเกตได้จากมีกลิ่นหอมปนเปรี้ยวคล้ายน้ำส้มสายชู ซึ่งจะเป็นสารจำพวก Propionic Acid Butyric Acid และ Acetic Acid ค่า pH อยู่ในช่วง 3.8 – 4.6 จากการสังเกตจะพบเห็นฟองอากาศผุดขึ้นมาเป็นระยะๆ เมื่อระยะเวลาการหมักประมาณ 15 -20 วัน

ซึ่งเมื่อนำไปเติมในถังระบบที่ปราศจากออกซิเจน ที่มีแบคทีเรียและจุลินทรีย์จำพวก Facultative anaerobic bacteria และ Methanogen bacteria อยู่ การทดลองในขั้นนี้จะพบว่า โดยเฉลี่ยทั้ง 3 การทดลองนั้น จะเกิดแก๊สขึ้นอย่างรวดเร็ว โดยในการทดลองที่ 1 และ 2 นั้น จะมีปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่สูงกว่าปริมาณแก๊สมีเทน แต่เมื่อถึงการทดลองที่ 3 กลับพบว่ามีปริมาณแก๊สมีเทนที่สูงกว่าแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์อย่างเห็นได้ชัด ทั้งนี้เป็นเพราะแบคทีเรียและจุลินทรีย์ชนิดที่มีความสามารถในการใช้อากาศและไม่ใช้อากาศนั้น มีความสามารถในการเจริญเติบโตได้ดีทั้ง 2 สภาวะ ต่างกับเมทาโนเจนแบคทีเรียที่มีความสามารถในการเจริญเติบโตได้ดีเพียงสภาวะเดียว คือ ไร้ออกซิเจน ทำให้ในช่วงแรกของการทดลองนั้น(การทดลองที่ 1 และ 2)กระบวนการผลิตแก๊สมีเทนนั้นมีค่อนข้างต่ำ แต่เมื่อเข้าสู่การทดลองที่ 3 การเพิ่มประชากรของเมทาโนเจนแบคทีเรียมีในปริมาณที่สูงและความสามารถในการผลิตแก๊สมีเทนก็เพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ยับยั้งการเจริญเติบโตและยับยั้งการผลิตแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ของพวก Facultative anaerobic bacteria ซึ่งจากการทดลองจะสามารถประมาณเวลาได้ว่า การที่ระบบจะคงที่นั้น จะต้องอาศัยเวลาประมาณ 25 – 30 วัน ในการเจริญเติบโตและการสร้างแก๊สมีเทนของเมทาโนเจนแบคทีเรีย ซึ่งปัจจัยที่สำคัญประการหนึ่งในกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพนั้น คือการการกวนผสมเพื่อให้จุลินทรีย์เข้าถึงเป้าหมายที่จะทำการย่อยสลายอินทรีย์สารต่างๆ เพราะจุลินทรีย์และแบคทีเรียไม่สามารถที่จะเคลื่อนที่เองได้ จะต้องอาศัยการนำพาของแรงกลต่างๆ ถึงจะเกิดการดำเนินกิจกรรมนั้นๆ ถ้าในถังเตรียมและถังระบบไม่มีกระบวนการกวนเกิดขึ้นแล้ว ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สของพวกจุลินทรีย์และแบคทีเรียก็จะลดต่ำลง

ในการประเมินต้นทุนทางเศรษฐศาสตร์ พบว่า ต้องใช้วัตถุดิบตั้งแต่ 6 ตันต่อเดือนขึ้นไป ซึ่งจะทำให้ได้ปริมาณเอทานอล 95% อยู่ที่ 379 ลิตรต่อเดือน สำหรับลำไยอบแห้งตกเกรด และ 410.28 ลิตรต่อเดือน สำหรับลำไยสดตกเกรด โดยเอทานอล 95% 1 ลิตร จะใช้วัตถุดิบเท่ากับ 15.83 กก. สำหรับลำไยอบแห้งตกเกรด และ 14.62 กก. สำหรับลำไยสดตกเกรด โดยมีต้นทุนวัตถุดิบต่อหน่วยเท่ากับ 88.92 บาทต่อกิโลกรัม สำหรับลำไยอบแห้งตกเกรด และ 82.14 บาทต่อกิโลกรัม สำหรับลำไยสดตกเกรด จากการประเมินทางเศรษฐศาสตร์เบื้องต้น พบว่า ในกระบวนการผลิตเอทานอลจากลำไยตกเกรดมีต้นทุนวัตถุดิบต่อหน่วยที่สูง ความคุ้มค่าต่อการลงทุนมีความเสี่ยงในการคืนทุนที่ช้า เนื่องจากผลผลิตเอทานอลที่ได้ต่ำ อีกทั้งปัจจัยอื่นๆในกระบวนการผลิตมีต้นทุนที่สูง กระบวนการผลิตเอทานอลจากลำไยตกเกรดจึงยังไม่เป็นที่น่าลงทุนในทางเศรษฐศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

กนกวรรณ แก้มเสือ. 2547. การศึกษาแนวทางในการเพิ่มประสิทธิภาพการหมักกากน้ำตาลในโรงงานบริษัทแสงโสม จำกัด จังหวัดกาญจนบุรี. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยศิลปากร.

กล้าณรงค์ ศรีรอต. 2544. การศึกษาสถานภาพของวัตถุดิบที่นำมาใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตแก๊สโซฮอล์. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ.

กำเนิด สุภัณวงษ์ และ สุกณณี บวรสมบัติ. 2536. รายงานการวิจัย เรื่องการผลิตเอทานอลเชื้อเพลิงจากอ้อยโดย *Zymomonas mobilis*. ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

ชัชวาล คำวงศ์, ณัฐวิทย์ พงศ์พันธุ์, นุกูลกิจ ทูนกาศ, วิลาวัลย์ ปันอิ่น และวิไลวรรณ ลีนะกุล. 2550. โครงการจัดทำระบบฐานข้อมูลพลังงานเพื่อการวิเคราะห์และวางยุทธศาสตร์พลังงานของประเทศ. เอกสารเผยแพร่. สถาบันพัฒนาวิจัยและพลังงานจังหวัดเชียงใหม่.

ธเนศ อุทิศธรรม. 2528. การผลิตก๊าซชีวภาพที่อุณหภูมิต่าง ๆ จากของเสียในโรงงานสับปะรดกระป๋อง. ปริญญานิพนธ์คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

นิรนาม. 2549. การนำของเสียจากการผลิตเอทานอลมาใช้ประโยชน์เพื่อเพิ่มมูลค่า. เอกสารทางวิชาการ. สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตผลทางการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร. 2006. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

นิรนาม. 2550. สำนักงานเกษตรอำเภอสามเงา จังหวัดตาก. เอกสารผลผลิตและราคาลำไย. กระทรวงเกษตร และสหกรณ์

นิรนาม. 2552. การศึกษาความเป็นไปได้ของการผลิตเอทานอลจากมันสำปะหลัง. boc.dip.go.th/download/report5.pdf?ml=5&mlt=system&tmpl. (5 ตุลาคม 2554)

นิรนาม. 2552. คุณค่าทางอาหารและยาของลำไย. เอกสารเผยแพร่. http://www.arda.or.th/kasetinfo/longan. (2 ธันวาคม.2554)

นิรนาม. 2552. โครงการการศึกษาการเพิ่มศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของน้ำเสียจากฟาร์มสุกรในรูปแบบการหมักย่อยร่วมโดยถังปฏิกรณ์ UASB และ CSTR เพื่อการใช้พลังงานอย่างมีประสิทธิภาพ.สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน (สวพ.) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ (2552)

นิรนาม. 2553. บทปฏิบัติการเรื่อง Biochemical Methane Potential (BMP). www. cpfshe.cpportal.net/Portals/0/file/2010/jd1010.pdf. (15 พฤศจิกายน 2553)

นิรนาม. 2554. เคมีของคาร์โบไฮเดรต.
http://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/Chap1/chapter1_3.html.
(12 ธันวาคม 2554).

นิรนาม. 2554. Ammonia. http://www.medtechzone.com/data/chem/ammonia.php.
(18 ธันวาคม 2554).

นิรนาม. 2554. ลำไย. th.wikipedia.org/wiki/ลำไย. (30 พฤศจิกายน 2550).

นิรนาม. 2555. http://surathai.wordpress.com/2010/06/12/factors.

นิลวรรณ ไชยทนุ. 2552. การวิเคราะห์ประสิทธิภาพและเศรษฐศาสตร์ในการใช้ระบบหมักไร้อากาศแบบถังกวนต่อเนื่องเพื่อบำบัดของเสียจากฟาร์มสุกร. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตร์มหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ : จังหวัดเชียงใหม่.

นพพล เล็กสวัสดิ์ และ รณชัย ปรารถนาผล (2552) บทความการใช้ลำไยอบแห้งค้างสต็อคเพื่อผลิตเอทานอล. http://www.agro.cmu.ac.th/.../Record%5CInterview-EthanolLongan.doc
(15 กันยายน. 2552)

บุณยพัต สุภานิช, รัตนา จิระรัตนานนท์, สุวิทย์ เตีย, วิทยา เทพไพฑูรย์, อนวิช สังข์เพ็ชร, จิระเดช ฮายุกต์ และปนัดดา ภูอากาศ. 2546. การบูรณาการกระบวนการผลิตเอทานอลกับโรงงานน้ำตาล และโรงแป้งมันสำปะหลังเชิงเทคโนโลยีในการทำเอทานอลให้บริสุทธิ์. รายงานการวิจัย. สำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ. มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าธนบุรี : กรุงเทพมหานคร

รติกร บัวดำ. 2551. The Product of Organic Compound from Expired Longan Using 15 Microbial Strains in static Condition. เอกสารเผยแพร่. วิศวกรรมอาหาร. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ : จังหวัดเชียงใหม่

วิภารัตน์ ชัยเพชร. 2551. การบำบัดน้ำเสียจากอตสาหกรรมอาหารทะลกระป๋องโดยใช้กระบวนการหมักแบบไร้อากาศสองขั้นตอนในถังสร้างกรดแบบไร้อากาศและถังปฏิกรณ์แบบยูเอเอสบี. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ : จังหวัดสงขลา.

สามารถ บุญอาจ. 2552. การพัฒนาเครื่องกลั่นเอทานอลสำหรับเครื่องยนต์ทางการเกษตร แบบติดตั้งประจำที่. เอกสารทางวิชาการ. สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.

สาวิตรี ลิ่มทอง. 2540. ยีสต์และยีสต์เทคโนโลยี. ภาควิชาจุลชีววิทยา. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ : กรุงเทพมหานคร.

สุกัลยา ปาละกูล สุภาพร ฟองดวง และ นพพล เล็กสวัสดิ์. 2552. การผลิตแอลกอฮอล์จากลำไยอบแห้ง. http://agro.cmu.ac.th/Research/WebAjarn/ppp%5Cnl_c01701.doc (15 กันยายน 2554)

อุเทน กันทา. 2554. การผลิต CBG จากก๊าซชีวภาพ เพื่อนำไปใช้ในรถยนต์. เอกสารการฝึกอบรม. สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานนครพิงค์. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ : จังหวัดเชียงใหม่.

ภาคผนวก

ภาคผนวก

1. การเผยแพร่องค์ความรู้

ในการลงพื้นที่สำรวจความต้องการเทคโนโลยีที่จะเข้ามาช่วยในการพัฒนาเกี่ยวกับเรื่องลำไยตกเกรด พบว่า ที่หมู่บ้านหนองไซ ต.ป่าสัก อ.เมือง จ.ลำพูน ชาวบ้านมีความต้องการเทคโนโลยีขั้นพื้นฐานที่สามารถเรียนรู้และต่อยอดได้ด้วยตนเอง ดังนั้นทางศูนย์วิจัยพลังงานมหาวิทยาลัยแม่โจ้ จึงได้นำเอาองค์ความรู้ที่มีอยู่ลงสู่ชุมชน โดยได้ทำการจัดแสดงองค์ความรู้ต่างๆ พร้อมเครื่องมือและตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่ได้ เพื่อให้ชาวบ้านได้สัมผัส และแลกเปลี่ยนเรียนรู้

ภาพผนวกที่ 1 บรรยากาศการลงทะเบียนและการบรรยาย ณ ศูนย์ชุมชนการเรียนรู้ หมู่บ้านหนองไซ ตำบลป่าสัก อำเภอเมือง จังหวัดลำพูน

จากภาพที่ 6.8.1 เป็นบรรยากาศของการลงทะเบียนของผู้เข้าร่วมรับฟังการบรรยาย โดยมีผู้เข้าร่วมรับฟังการบรรยายประมาณ 35 คน โดยส่วนใหญ่จะเป็นผู้ใหญ่และผู้สูงอายุ ซึ่งมีอาชีพเกษตรกรในตำบลป่าสัก ให้ความสนใจที่จะพัฒนาศักยภาพในการผลิตเอทานอลและแก๊สชีวภาพจากลำไยตกเกรด โดยผู้เข้าร่วมรับฟังการบรรยายส่วนหนึ่ง มีความมุ่งหวังที่จะนำไปใช้ประโยชน์ในชีวิตประจำวัน และต่อยอดองค์ความรู้

ภาพผนวกที่ 2 การถ่ายรูปร่วมกันของผู้เข้าร่วมการอบรม

ในอนาคตผู้นำชุมชนได้มีโครงการการยกระดับเพื่อสร้างผลิตภัณฑ์ภายในชุมชนที่มีส่วนผสมเป็นเอทานอลจากลำไยตกเกรด เพื่อการพัฒนาเศรษฐกิจที่ยั่งยืนของชาวชุมชนหนองไซ ตำบลป่าสัก อำเภอเมือง จังหวัดลำพูน ต่อไป

2. การคำนวณประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลจากลำไยตกเกรด (กนกวรรณ, 2547)

ประสิทธิภาพการหมัก = ความเข้มข้นของแอลกอฮอล์(%) x ปริมาตรน้ำส่า (ลิตร) x 100 [1]
ลำไยที่ใช้ (กก.) x ความเข้มข้นของน้ำลำไย x 0.644 ลิตร

ตารางผนวกที่ 1 ประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตเอทานอลจากลำไยสดตกเกรด

% แอลกอฮอล์ที่ได้	ระยะเวลาในการเลี้ยง (ชม.)	ปริมาณเชื้อยีสต์ Cell/ml	ปริมาณแอลกอฮอล์ที่ได้	ประสิทธิภาพการหมัก (%)
4%	8	6.17×10^6	350 ml.	47.73

ความเข้มข้นของน้ำตาลจากลำไยสดตกเกรด (%w/v) = [F x 250 x 100]/ [10 x A] [2]

เมื่อ A = ปริมาตรสารละลายตัวอย่างที่ใช้ในการไตรเตรท (ml) = 4.5 ml

F = Factor ของ Fehling solution = 0.05

ความเข้มข้นของน้ำตาลจากลำไยอบแห้งเท่ากับ = 27.77 %

โดย ความเข้มข้นของแอลกอฮอล์ที่กลั่นได้ = 4 %

ปริมาตรน้ำส่า = 2 ลิตร

ปริมาณลำไย = 1 กก.

ความเข้มข้นของน้ำลำไย = 27.77 %

Conversion ratio = [แอลกอฮอล์ที่ผลิตได้(กรัม)]/[ปริมาณกากที่ใช้(กรัมโดยน้ำหนักแห้ง)] [3]

แอลกอฮอล์ที่ผลิตได้ทั้งหมด คิดจาก เปอร์เซ็นต์แอลกอฮอล์ที่ได้จากการกลั่นเท่ากับ 8.6 %

โดย น้ำ 100 ml. มีแอลกอฮอล์เท่ากับ 8.9 ml.

ถ้า น้ำ 36,500 ml. จะมีแอลกอฮอล์เท่ากับ [8.9 x 36,500] /[100] = 3,248.5 ml.

จากความหนาแน่นของแอลกอฮอล์เท่ากับ 0.789 g/cm^3 เพื่อหามวลของแอลกอฮอล์เป็นกรัม จะได้ว่า

$m = 0.789\ g/cm^3 \times 3,248.5\ ml$

$m = 2,563.06\ g.$

แทนค่าลงใน (3) Conversion ratio = [2,563.06 g.] / [89.58 g.]

Conversion ratio = 0.0286 Ans.

3. ลำไยอบแห้งตกเกรด (กนกวรรณ, 2547)

ประสิทธิภาพการหมัก = ความเข้มข้นของแอลกอฮอล์(%) x ปริมาตรน้ำส่า (ลิตร) x 100
ลำไยที่ใช้ (กก.) x ความเข้มข้นของน้ำลำไย x 0.644 ลิตร

ตารางผนวกที่ 2 ประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตเอทานอลจากลำไยอบแห้งตกเกรด

% แอลกอฮอล์ที่ได้	ระยะเวลาในการเลี้ยง (ชม.)	ปริมาณเชื้อยีสต์ Cell/ml	ปริมาณแอลกอฮอล์ที่ได้	ประสิทธิภาพการหมัก (%)
4%	8	6.54×10^6	310 ml.	45.72

ความเข้มข้นของน้ำตาลจากลำไยอบแห้งตกเกรด (%w/v) = [F x 250 x 100]/ [10 x A] [2]

เมื่อ A = ปริมาตรสารละลายตัวอย่างที่ใช้ในการไตรเตรท (ml) = 4.3 ml

F = Factor ของ Fehling solution = 0.05

ความเข้มข้นของน้ำตาลจากลำไยอบแห้งเท่ากับ = 27.17 %

โดย ความเข้มข้นของแอลกอฮอล์ที่กลั่นได้ = 4 %

ปริมาตรน้ำส่า = 2 ลิตร

ปริมาณลำไย = 1 กก.

ความเข้มข้นของน้ำลำไย = 27.17 %

Conversion ratio = [แอลกอฮอล์ที่ผลิตได้(กรัม)] / [ปริมาณกากที่ใช้(กรัมโดยน้ำหนักแห้ง)] [1]

แอลกอฮอล์ที่ผลิตได้ทั้งหมด คิดจาก เปอร์เซ็นต์แอลกอฮอล์ที่ได้จากการกลั่นเท่ากับ 8.6 %

โดย น้ำ 100 ml. มีแอลกอฮอล์เท่ากับ 8.6 ml.

ถ้า น้ำ 35,000 ml. จะมีแอลกอฮอล์เท่ากับ [8.6 x 35,000] /[100] = 3,010 ml.

จากความหนาแน่นของแอลกอฮอล์เท่ากับ 0.789 g/cm^3 เพื่อหามวลของแอลกอฮอล์เป็นกรัม

จะได้ว่า m = 0.789 g/cm^3 x 3,010 ml

m = 2,374.89 g.

แทนค่าลงใน (3) Conversion ratio = [2,374.89 g.] / [80.25 g.]

Conversion ratio = 0.0295 Ans.

จาก Emden – Meyerhof Pathway (กนกวรรณ, 2547) สามารถเขียนเป็นสมการเคมีแสดงการเปลี่ยนน้ำตาลกลูโคสไปเป็นแอลกอฮอล์ ได้ดังนี้

$C_6H_{12}O_6$	⟶	$2C_2H_5OH$	+	$2CO_2$
(Glucose)		Ethy Alcohol		Carbondioxide
Mw. 180		92		88

น้ำตาลกลูโคส 1 กิโลกรัม เปลี่ยนเป็นแอลกอฮอล์ได้ = 92/180 กิโลกรัม
= 0.511 กิโลกรัม
= 0.511/0.7934 ลิตร
= 0.644 ลิตร Ans.

4. การคำนวณประสิทธิภาพเครื่องกลั่น

สูตรการหาประสิทธิภาพของเครื่องกลั่นแอลกอฮอล์ (นิรนาม, 2555)

$$N_1 \times V_1 = N_2 \times V_2$$

โดย N_1 = ดีกรีของน้ำส่าหรือน้ำหมักก่อนกลั่น
V_1 = ปริมาตรของน้ำส่าหรือน้ำหมัก
N_2 = ดีกรีรวมของแอลกอฮอล์ที่กลั่นได้
V_2 = ปริมาตรของแอลกอฮอล์ที่กลั่นได้

<u>ลำไยอบแห้งตกเกรด</u>

ดีกรีของน้ำส่า (N_1) = 4.1 %
ปริมาตรของน้ำส่า (V_1) = 150 Litre
ดีกรีรวมของน้ำสุราที่กลั่นได้ (N_2) = 8.6 %
ปริมาตรของเอทานอลที่กลั่นได้ (V_2) = ? Litre

จากสูตร จะได้ว่า ปริมาตรของเอทานอลที่กลั่นได้ (V_2) = [4.1 x 150] / [8.6]
= 71.51 Litre

เทียบบัญญัติไตรยางศ์ กลั่นได้ 71.51 Litre คิดเป็น 100 %
ถ้ากลั่นได้จริง 35 Litre คิดเป็น [100 % x 35] / [71.51]
คิดเป็น 48.94 % <u>Ans.</u>

<u>ลำไยสดตกเกรด</u>

ดีกรีของน้ำส่า (N_1) = 4.3 %

ปริมาตรของน้ำส่า (V_1) = 150 Litre

ดีกรีรวมของน้ำสุราที่กลั่นได้ (N_2) = 8.9 %

ปริมาตรของเอทานอลที่กลั่นได้ (V_2) = ? Litre

จากสูตร จะได้ว่า ปริมาตรของเอทานอลที่กลั่นได้ (V_2) = [4.3 x 150] / [8.9]

= 72.47 Litre

เทียบบัญญัติไตรยางศ์ กลั่นได้ 72.47 Litre คิดเป็น 100 %

ถ้ากลั่นได้จริง 36.5 Litre คิดเป็น [100 % x 36.5] / [72.47]

คิดเป็น 50.36 % <u>Ans</u>.

ปริมาณลำไยที่ใช้ต่อถังหมัก = 250 kg.

ปริมาตรน้ำส่าหมักต่อถัง = 150 Litre

กลั่นแอลกอฮอล์ต่อถังได้ = 35 Litre

5. การหาอัตราส่วนของกาก DDG ในถังหมักไบโอแก๊ส

จากอัตราส่วน มูลโค 5 กก. : กากลำไย 20 กก. : น้ำ 15 ลิตร

= มูลโค 1 : กากลำไย 4 : น้ำ 3

ถ้าหมักในถัง 500 ลิตร จะได้ว่า ต้องใช้ มูลโค 62.5 กก. : กากลำไย 250 กก. : น้ำ 187.5 ลิตร

6. การวิเคราะห์หาความเข้มข้นน้ำตาลทั้งหมดในตัวอย่าง โดยวิธี Modified Lane – Eynon Constant Volumetric Method (AOAC, 1975)

วิธีวิเคราะห์ (กรณีเป็นของแข็ง)

1. ชั่งตัวอย่างกากน้ำตาล (ที่คนให้เข้ากันดีแล้ว) 10 กรัม ในถ้วยพลาสติกขนาด 100 ml. ละลายด้วยน้ำกลั่น คนสารละลายให้เข้ากัน ถ่ายสารละลายลงใน Volumetric Flask ขนาด 200 ml. ปรับให้ถึงขีดปริมาตรด้วยน้ำกลั่น

2. Pipette สารละลายจากข้อ 1 ปริมาตร 25 ml. ลงใน Erlenmeyer Flask ขนาด 250 ml. เติมน้ำกลั่น 75 ml. และ 0.1 N HCL ปริมาตร 30 ml. เขย่าให้เข้ากัน นำไปตั้งใน water bath ที่ควบคุมอุณหภูมิที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

3. ยกลงตั้งทิ้งไว้ในอ่างน้ำจนถึงอุณหภูมิห้อง ถ่ายตัวอย่างลงใน Volumetric Flask ขนาด 250 ml. ปรับให้ถึงขีดปริมาตรด้วยน้ำกลั่น ปิดจุกเขย่าให้เข้ากัน

4. ดูด Fehling ' s solution A และ Fehling ' s solution B อย่างละ 5 ml. ลงใน Erlenmeyer Flask ขนาด 250 ml. เขย่าให้เข้ากัน

5. เติมสารละลายตัวอย่างลงใน Burette ขนาด 25 ml. ปรับให้ถึงขีดปริมาตรแล้วปล่อยสารละลายตัวอย่างลงใน Erlenmeyer Flask ขนาด 250 ml. ในข้อ 4 ประมาณ 18 – 20 ml.

6. นำ Erlenmeyer Flask ขนาด 250 ml. ตั้งบนเตาสำหรับไตเตรทน้ำตาล จับเวลาตั้งแต่สารละลายเริ่มเดือดจนครบ 2 นาที แล้วรีบหยดสารละลาย 1% Methylene blue ลงไป 3 หยด ไตเตรทต่อจนสีของ Methylene blue หายไปภายใน 1 นาที (จุดสิ้นสุดของปฏิกิริยาจะเห็นตะกอนสีน้ำตาลแดงเกิดขึ้น) บันทึกปริมาตรตัวอย่างที่ใช้ไตเตรททั้งหมด)

การคำนวณ ความเข้มข้นน้ำตาลทั้งหมด = [F x 200 x 250 x 100] / [w x 25 x A] (1)

เมื่อ A = ปริมาตรสารละลายตัวอย่างที่ใช้ในการไตเตรท (ml.)

F = Factor ของ Fehling ' s solution = 0.05

W = น้ำหนักตัวอย่างน้ำตาล (กรัม)

วิธีวิเคราะห์หาความเข้มข้นของน้ำตาลทั้งหมด(%w/v) = [F x 250 x 100] / [10 x A] (2)
(กรณีเป็นสารละลาย) เช่น โมลาส

เมื่อ A = ปริมาตรสารละลายตัวอย่างที่ใช้ในการไตเตรท

B = Factor ของ Fehling ' s solution = 0.05

ขั้นตอนที่ 1 = ดูดตัวอย่าง 10 ml. ลงใน Erlenmeyer Flask ขนาด 250 ml. เติมน้ำกลั่น 75 ml. และ 0.1 N HCl 30 ml. เขย่าให้เข้ากัน นำไปตั้งใน Water bath ที่ควบคุมอุณหภูมิที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที

ขั้นตอนที่ 2 = ทำการทดลองต่อไปในทำนองเดียวกับกากน้ำตาล

- การวิเคราะห์หาค่าความหนาแน่นของตัวอย่างกากน้ำตาล โดยวิธี Dilution Method

ขั้นตอนที่ 1 เทน้ำกลั่น 50 ml. ลงในกระบอกขนาด 100 ml. แล้วใช้แท่งแก้วคนเพื่อไล่ฟองอากาศในน้ำกลั่น ปรับให้ถึงขีดปริมาตร 50 ml. ชั่งน้ำหนัก (A กรัม)

ขั้นตอนที่ 2 เติมตัวอย่างกากน้ำตาลลงในกระบอกตวงในข้อ 1 ให้ถึงขีดปริมาตร 100 ml. ใช้แท่งแก้วคนให้ตัวอย่างกากน้ำตาลละลายเข้ากัน ชั่งน้ำหนัก (B กรัม)

การคำนวณ ความหนาแน่นของกากน้ำตาล (กรัม/มิลลิลิตร) = [B – A] / [50]

เมื่อ A = น้ำหนักของน้ำกลั่น (กรัม)

B = น้ำหนักของน้ำกลั่นรวมกับตัวอย่างกากน้ำตาล (กรัม)

7. การวิเคราะห์หาปริมาณเชื้อยีสต์ (Yeast Count) โดยใช้ Haemacytometer

วิธีวิเคราะห์

1. ดูดตัวอย่าง 5 ml. ใส่ลงใน Volumetric Flask ขนาด 100 ml. ปรับปริมาตรให้ถึงขีดปริมาตรด้วยน้ำกลั่น ปิดจุก เขย่าให้เข้ากัน

2. วาง Cover Glass ลงบน Haemacytometer Slide อย่าให้มีฟองอากาศ

3. ใช้ Pipette ดูดสารละลายตัวอย่างเล็กน้อยแตะที่ขอบ Cover Glass บน Haemacytometer Slide

4. นำไปส่องดูด้วย กล้องจุลทรรศน์ กำลังขยาย 40 เท่า จะเห็นตารางปรากฏบน Haemacytometer Slide ซึ่งมีทั้งหมด 25 ช่องใหญ่ ใน 1 ช่อง จะมีตารางเล็กๆ ภายในอีก 16 ช่องเล็ก

5. การนับเซลล์โดยใช้ Counter นับจำนวนเซลล์ที่อยู่ในช่องใหญ่ 5 ช่อง (แนวตั้งแนวนอน หรือแนวทแยงมุม) ถ้ามีเซลล์อยู่ตรงขอบตารางสี่เหลี่ยมจัตุรัสพอดี ให้นับเซลล์ที่อยู่ตรงเส้นขอบบนและเส้นขอบด้านซ้ายรวมกับเซลล์ในช่อง ขณะที่จะไม่นับเซลล์ที่อยู่ตรงเส้นขอบล่างและเส้นขอบด้านขวา โดยใช้เส้นขอบกลางเส้นกลางจาก 31 เส้น เป็นแนวในการนับ คือ เซลล์ใดก็ตามที่แตะเส้นกลางของขอบเส้นบนและซ้ายจะถูกนับ ส่วนเซลล์ที่อยู่นอกเส้นกลางของขอบก็ไม่ต้องนับ

6. เซลล์ลูกที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ครึ่งหนึ่งของเซลล์แม่ให้นับเป็นเซลล์

การคำนวณ ปริมาตรของ Haemacytometer ใน 1 ช่อง ตาราง = $1 \times 1 \times 0.1 = 0.1$ mm.^{3}

แต่ 10^3 mm.^{3} = 1 cm.^{3} = 1 ml.

ปริมาตร = 0.1 mm.^{3} = 10^{-4} ml.

จำนวนเซลล์ที่นับ (เซลล์/มิลลิตร) = จำนวนเซลล์ทั้งหมด x 5 x 10^4 x Dilution

8. การวิเคราะห์หาความเข้มข้นของแอลกอฮอล์ (% Alcohol) โดยวิธี Hydrometer Method (AOAC, 1995)

วิธีวิเคราะห์

1. ตวงตัวอย่างที่ต้องการทราบค่าความเข้มข้นของแอลกอฮอล์ลงใน Cylender
2. แขวน Thermometer ลงใน Cylender แล้วค่อยๆหย่อน Alcoholmeter ลงไป
3. อ่านค่าอุณหภูมิจาก Thermometer และค่าความเข้มข้นของแอลกอฮอล์จาก Alcoholmeter
4. นำค่าทั้งสองที่อ่านได้ไปเปิดตารางคู่มือแอลกอฮอล์มิเตอร์ ค่าที่อ่านได้จากตารางจะเป็นค่าความเข้มข้นของแอลกอฮอล์ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส