

รายงานการวิจัย

เรื่อง

ผลของสภาวะต่างๆในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ที่มีต่อการเกิดก๊าซมีเทน

The Effect of Various Conditions in the Acidogenesis
on the Methane Production

การวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากงบประมาณแผ่นดิน
ประจำปี 2538

คณะผู้ดำเนินการวิจัย

ยุวดี นาคะผดุงรัตน์ พรพรรณ เลิศทวีสินธุ์ สุพัฒน์ เถาเพงษ์ไทย

547.037
ย442ร
ร.2

ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร



๕๔๗.๐๓๗

๕๔๔๘

๕, ๒

รายงานการวิจัย

เรื่อง

ผลของสภาวะต่างๆในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ที่มีต่อการเกิดก๊าซมีเทน

**The Effect of Various Conditions in the Acidogenesis
on the Methane Production**

การวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากงบประมาณแผ่นดิน
ประจำปี ๒๕๓๘

คณะผู้ดำเนินการวิจัย

ยุวดี นาคะผดุงรัตน์ พรพรรณ เลิศทวีสินธุ์ สุพัฒน์ เผ่าพงษ์ไทย

ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร

๑๐๒๗๖๗

๒๘ ก.ค. ๒๕๔๑

งานวิจัยนี้ศึกษาถึงผลของความเข้มข้นกากมะเขือเทศ ระยะเวลาเก็บกักกากและอุณหภูมิ ต่อชนิดและปริมาณสารตัวกลางที่เกิดขึ้น ในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์จากการหมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอน ในถังปฏิกรณ์ผลิตกรดอินทรีย์ขนาด 1.5 ลิตร หมักกากมะเขือเทศเพื่อให้ได้กรดอินทรีย์โดยใช้กากมะเขือเทศผสมหัวเชื้อจุลินทรีย์สำหรับผลิตกรดอินทรีย์ให้มีความเข้มข้น 10 กรัม และ 20 กรัมต่อลิตร ทำการหมักให้มีระยะเวลาเก็บกักกากนาน 3 วัน และ 5 วัน และนำน้ำหมักจากขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ที่อุณหภูมิต่างๆ มาปรับสภาพ pH ให้เป็น 7.0 เพื่อใช้ป้อนเป็นวัตถุดิบสำหรับขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทน ในถังปฏิกรณ์ขนาด 4 ลิตร ให้มีอัตราการป้อนอินทรีย์สารลงสู่ถังปฏิกรณ์ 0.5 กรัมชีโอดีต่อวันและมีระยะเวลาเก็บกัก 3 วัน และ 5 วัน ศึกษาผลของระยะเวลาเก็บกักต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ จากน้ำหมักกากมะเขือเทศผลการทดลองพบว่าเมื่อใช้กากมะเขือเทศที่มีความเข้มข้นสูงขึ้นจาก 10 กรัมต่อลิตรเป็น 20 กรัมต่อลิตร และระยะเวลาเก็บกักกากนานขึ้นจาก 3 วัน เป็น 5 วัน จะให้ปริมาณอินทรีย์สาร และกรดอินทรีย์ระเหยมากขึ้นโดยปริมาณอินทรีย์สารในน้ำหมักสูงสุดเท่ากับ 1,324 มิลลิกรัมชีโอดีต่อลิตร เมื่อใช้กากมะเขือเทศที่มีความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร หมักที่อุณหภูมิห้อง มีระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน ประสิทธิภาพการขจัดอินทรีย์สารสูงสุดเท่ากับร้อยละ 47.59 ของของแข็งทั้งหมด เมื่อใช้กากมะเขือเทศที่มีความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร หมักที่อุณหภูมิห้องระยะเวลาเก็บกักกากนาน 3 วัน

ปริมาณของกรดอะซิติกในน้ำหมักจะสูงสุดเท่ากับ 2.9 มิลลิโมลาร์ เมื่อใช้กากมะเขือเทศที่มีความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร หมักที่อุณหภูมิห้อง มีระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน ปริมาณของกรดโพรพิโอนิก กรดบิวทีริก และ กรดแวนิลิกสูงสุดเท่ากับ 2.74 2.83 และ 3.39 มิลลิโมลาร์ เมื่อใช้กากมะเขือเทศที่มีความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตรหมักที่ 37 องศาเซลเซียส มีระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน ปริมาณกรดไอโซบิวทีริกสูงสุดเท่ากับ 3.15 มิลลิโมลาร์ เมื่อใช้กากมะเขือเทศที่มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร หมักที่ 37 องศาเซลเซียส ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน pH ของน้ำหมักในถังปฏิกรณ์ผลิตกรดอินทรีย์อยู่ในช่วง 5.42-5.83

ผลของระยะเวลาเก็บกักในขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทนต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ พบว่าปริมาณก๊าซชีวภาพ ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพต่อกรัมชีโอดีที่เติม การขจัดอินทรีย์สารในรูปชีโอดี และการขจัดกรดอินทรีย์ระเหยจะสูงขึ้น เมื่อระยะเวลาเก็บกักนานขึ้น ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพมีค่าสูงสุดเท่ากับ 0.6 ลิตรต่อกรัมชีโอดีที่เติมปริมาณก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.3 ลิตรต่อวัน มีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนในก๊าซผสมระหว่าง CH_4 และ CO_2 เท่ากับร้อยละ 61.28 ที่อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 0.5 กรัมชีโอดีต่อวัน ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน ใช้น้ำหมักจาก

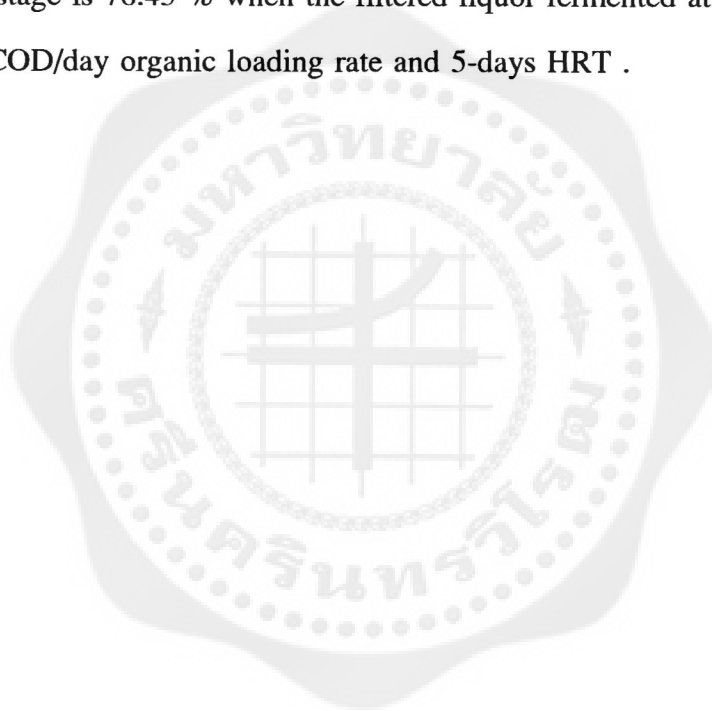
ถึงปฏิกรณ์ผลิตกรดอินทรีย์ที่หมักที่อุณหภูมิห้อง และความสามารถในการขจัดอินทรีย์สารในรูป
ซีไอดี สูงสุดร้อยละ 76.45 ที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 1.0 กรัมซีไอดี
ต่อวันใช้น้ำหมักจากถึงปฏิกรณ์ผลิตกรดอินทรีย์ที่หมักที่ 37 องศาเซลเซียส



The research was carried out to study on two stage anaerobic digestion of tomato solid wastes. The effects of various conditions, i.e. the concentration of tomato solid waste, the solid retention time (SRT) and temperature on the acidogenic stage were investigated. The experiments were performed by using 1.5 litre reactor and the tomato solid waste mixed with the acidogenic inoculum into the concentration of 10 g/litre and 20 g/litre were used as raw material. The experiments were carried out at various solid retention time of 3 and 5 days. The filtered liquor was feeded semicontinuously into 4 litre biogas reactor at organic loading rate of 0.5 COD/day and fermented at various hydraulic retention time of 3 and 5 days. The results showed that the organic content, in term of mgCOD/litre, and volatile fatty acid content in the filtered liquor when using 20 g/litre tomato solid waste are higher than those of using 10 g/litre tomato solid waste, compared with the same temperature. At the longer solid retention time, the higher contents of organic compound and volatile fatty acid were found. The highest organic content is 1,324 mg COD/litre when using 20 g/litre tomato solid waste, 5-day SRT at room temperature. The highest organic destruction is 47.59 % of total solid when using 20 g/litre tomato solid waste, 3-days SRT at room temperature. The highest acetic acid content is 2.9 mM when using 20 g/litre tomato solid waste, 3-day SRT at room temperature. The highest contents of propionic acid, butyric acid and valeric acid are 2.74 ,2.83 and 3.39 mM when using 20g/litre tomato solid waste, 5 day SRT at 37 °C .The highest content of isobutyric acid is 3.15 mM when using 10g/litre tomato solid waste, 3-day SRT at 37 °C, pH of the filtered liquor is in the range of 5.42-5.83

The effect of the hydraulic retention time (HRT) on the methanogenic stage was studied. The results demonstrated that the amount of biogas, the efficiency of gas production, COD reduction and TVA reduction will increase when the HRT increases. The maximum efficiency of gas production is 0.6 litre/g COD added, the

amount of biogas is 0.3 litre/day with the methane content in the combined gas between carbondioxide and methane of 61.28 when using 0.5 gCOD/day organic loading rate, 5-days HRT and the filterd liquor fermented at room temperature was used. The highest organic destruction in term of COD destruction in the methanogenic stage is 76.45 % when the filtered liquor fermented at 37 °C was used at 0.5 g COD/day organic loading rate and 5-days HRT .



สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
คำนำ.....	1
ก๊าซชีวภาพ.....	2
การเกิดก๊าซชีวภาพ.....	3
ปฏิกิริยาชีวเคมีของกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรีย.....	3
ปัจจัยที่เกี่ยวข้องในกระบวนการหมักแบบอับอากาศ.....	7
คำจำกัดความของคำศัพท์ต่าง ๆ ที่ใช้ในงานวิจัย.....	8
งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	8
วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....	13
ประโยชน์ของงานวิจัย.....	13
2 วิธีการวิจัย.....	14
แผนการวิจัย.....	14
แหล่งของจุลินทรีย์ ถึงปฏิกรณ์และวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตกรดอินทรีย์ และก๊าซชีวภาพ.....	14
วิธีดำเนินการทดลอง.....	17
การเตรียมเชื้อจุลินทรีย์สำหรับผลิตกรดอินทรีย์.....	17
การเตรียมถังปฏิกรณ์สำหรับผลิตกรดอินทรีย์.....	17
การเตรียมถังปฏิกรณ์สำหรับผลิตก๊าซมีเทน.....	18

บทที่	หน้า
3 ผลการวิจัย.....	24
ผลของความเข้มข้นสารแขวนลอยกากมะเขือเทศต่อขั้นตอนการผลิต กรดอินทรีย์.....	24
ผลของระยะเวลาเก็บกักกากต่อขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์.....	30
ผลของอุณหภูมิต่อขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ที่มีระยะเวลาเก็บกักกากต่างๆ.....	37
ผลของระยะเวลาเก็บกักและอัตราการป้อนอินทรีย์สารในขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทน ต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ.....	44
4 สรุปอภิปรายผลและข้อเสนอแนะ.....	46
สรุปอภิปรายผล.....	46
ข้อเสนอแนะ.....	49
บรรณานุกรม.....	50

บทที่ 1

บทนำ

คำนำ

เมื่อประชากรเพิ่มจำนวนมากขึ้นในขณะที่แหล่งพลังงานกลับน้อยลงไปหรือไม่สมบูรณ์เพียงพอ ก่อให้เกิดปัญหาต่อประเทศที่กำลังพัฒนา ดังนั้นจึงจำเป็นที่จะต้องหาแหล่งพลังงานทดแทนขึ้นมาใช้ ทั้งนี้เพื่อความอยู่รอดของประชากรเป็นสำคัญ พลังงานรูปแบบหนึ่งซึ่งสามารถนำมาใช้ทดแทนคือพลังงานจากก๊าซชีวภาพซึ่งเกิดจากการหมักของเสียต่าง ๆ ทางการเกษตร ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีผลผลิตทางการเกษตรหลายชนิดแต่มักประสบปัญหาาราคาของผลผลิตต่ำ อันเนื่องมาจากความไม่แน่นอนของราคาผลผลิตทางการเกษตร รัฐบาลจึงได้ส่งเสริมให้มีการพัฒนาอุตสาหกรรมทางการเกษตรมากขึ้น ได้แก่ อุตสาหกรรมการแปรรูปอาหาร จากการขยายตัวของอุตสาหกรรมการเกษตรทำให้มีวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ซึ่งเกิดในระหว่างกระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร เช่น จากการคัดแต่งกากหรือส่วนเปลือกที่ต้องกำจัดทิ้งเป็นจำนวนมาก การคัดผลผลิตที่มีตำหนิเสียหายทิ้งไป และยังมีน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม สิ่งเหล่านี้หากก่อให้เกิดปัญหาล้างแฉะล้น วัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้บางอย่างได้ถูกนำกลับมาใช้ให้เป็นประโยชน์เช่นใช้เป็นเชื้อเพลิง ปุ๋ย อาหารสัตว์ หรือเป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมประเภทอื่น (Lane, 1984) แต่ก็ยังมีวัสดุเหลือทิ้งบางส่วนที่ยังถูกปล่อยทิ้งให้สูญเปล่า ดังนั้นในปัจจุบันนี้จึงได้มีการศึกษาเพื่อกำจัดของเสียเหล่านี้ให้เหมาะสมและนำเอาวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้มาใช้ให้เป็นประโยชน์มากขึ้น โดยอาศัยเทคโนโลยีที่เหมาะสม การแปรรูปมะเขือเทศเป็นผลิตภัณฑ์อาหารสำเร็จรูปเป็นตัวอย่างหนึ่งที่ทำให้มีของเสียเหลือทิ้งได้แก่ ผลเน่าเสีย ผลมีรอยตำหนิที่คัดทิ้งและส่วนกากคือเปลือกและเมล็ดที่ถูกแยกออกจากน้ำ และเนื้อหลังจากผ่านการบดด้วยเครื่องมือแล้ว (เกษม พิสิฐ, 2531) ของเสียเหล่านี้จะมีปริมาณร้อยละ 9 ของปริมาณมะเขือเทศที่ใช้เป็นวัตถุดิบ (Hill and Dykstra, 1980) จึงน่าจะนำกากมะเขือเทศเหล่านี้มาใช้เป็นวัตถุดิบในการเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์เพื่อให้ได้ผลผลิตที่สามารถนำมาใช้เป็นประโยชน์ต่อไปได้ เช่น นำมาใช้ในการผลิตกรดอินทรีย์ หรือใช้ในการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยทั่วไปก๊าซชีวภาพจะประกอบด้วยก๊าซมีเทนร้อยละ 40-80 ค่าความร้อนประมาณ 13,700 -27,500 กิโลจูลต่อลูกบาศก์เมตร (มรกต ตันติเจริญ และคนอื่นๆ, 2534) โดยอาศัยกระบวนการหมักแบบอับอากาศ ซึ่งทำได้ทั้งแบบขั้นตอนเดียว (single stage fermentation) และแบบสองขั้นตอน (two-stage fermentation) เป็นการย่อย

สลายอินทรีย์สารโดยอาศัยจุลินทรีย์สองกลุ่มคือ กลุ่มจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องในการผลิตกรดอินทรีย์ (acidogenic bacteria) และจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องในการผลิตก๊าซมีเทน (methanogenic bacteria) จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องในการผลิตกรดอินทรีย์ จะทำงานได้ดีในสภาวะที่เป็นกลางถึงเป็นกรด คือ pH ประมาณ 5.5 หรือต่ำกว่า (TATA, Energy Research Institute. 1985) จุลินทรีย์กลุ่มนี้จะย่อยสลายอินทรีย์สารพวกเซลลูโลส ไขมัน โปรตีนให้เป็นโมเลกุลเล็กละลายน้ำได้ เช่น กรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก กรดแลคติก กรดบิวทีริก และเอทานอล เป็นต้น ซึ่งจะเป็นขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทน (Donald. 1987) และจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องในการผลิตก๊าซมีเทน จะทำงานได้ดีในสภาวะแวดล้อมที่เป็นกลางถึงเป็นด่างเล็กน้อย คือ pH อยู่ระหว่าง 6.5 -7.5 และถ้า pH สูงกว่า 8.0 จุลินทรีย์จะหยุดทำงาน (Sprott, Brid and McDonald. 1985) กระบวนการหมักแบบอับอากาศขั้นตอนเดียวเป็นวิธีการที่ง่ายและสะดวก แต่ระบบมักล้มเหลวได้ง่าย เพราะมีการสะสมของกรดโพรพิโอนิก (Verrier, Fay and Albagmac. 1987) กระบวนการหมักแบบอับอากาศสองขั้นตอนนี้ ได้แยกขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ออกจากขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทน จะทำให้สามารถศึกษาและควบคุมสภาวะที่เหมาะสมของแต่ละขั้นตอนได้

จากการศึกษาการผลิตก๊าซมีเทนจากกรดอินทรีย์ พบว่าก๊าซมีเทนได้มาจากการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกร้อยละ 72 และได้มาจากกรดโพรพิโอนิก และกรดอินทรีย์ระเหยอื่น ๆ ร้อยละ 28 (McCarty and Jesis. 1984) ชนิดและปริมาณสารตัวกลางที่เกิดขึ้น จะเปลี่ยนแปลงไปเป็นก๊าซมีเทนที่แตกต่างกัน (เกษแก้ว ปะนะมณฑา. 2534)

ก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพหมายถึง ก๊าซที่ได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ได้มาจากสิ่งมีชีวิตทั้งที่เป็นพืชและสัตว์ ในสภาวะไร้ออกซิเจน โดยมีจุลินทรีย์หลายชนิดเป็นตัวย่อยสลาย ก๊าซชีวภาพเป็นก๊าซผสมระหว่างก๊าซมีเทน (CH_4) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นส่วนใหญ่ นอกจากนี้อาจมีก๊าซไนโตรเจน ก๊าซออกซิเจน ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ปนอยู่บ้างเล็กน้อย ก๊าซที่เกิดจากกระบวนการหมักจะมีปริมาณที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับวัตถุดิบที่ใช้และสภาวะของกระบวนการหมัก โดยทั่วไปองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพมีดังต่อไปนี้

ก๊าซมีเทนร้อยละ	55-56
ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ	35-45
ก๊าซไนโตรเจนร้อยละ	0-8

ก๊าซออกซิเจนร้อยละ 0-1

ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ร้อยละ 0-1

ก๊าซชีวภาพที่สามารถใช้เป็นพลังงานเชื้อเพลิงได้จะต้องมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 (Updated guidebook on biogas development. 1984)

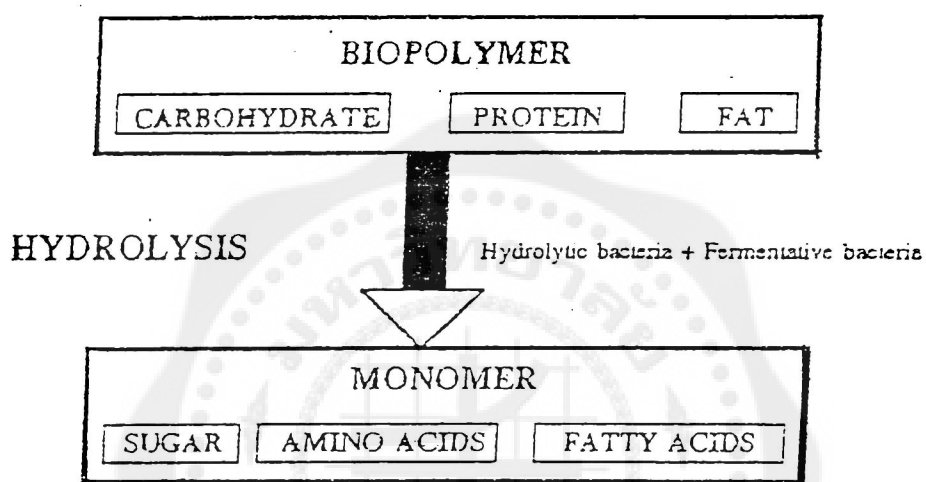
การเกิดก๊าซชีวภาพ

กระบวนการหมักเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพเป็นปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในสภาวะไร้ออกซิเจน สารอินทรีย์ส่วนใหญ่ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต ไขมัน และโปรตีน จะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์จนได้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายเป็นมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งเป็นองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ กระบวนการหมักก๊าซชีวภาพจัดเป็นกระบวนการที่มีการหมุนเวียนคาร์บอน และธาตุอื่น ๆ เนื่องจากการย่อยสลายแบบไร้อากาศของสารอินทรีย์ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่สะอาดปลอดภัย ง่ายในการทำปฏิกิริยาคือ CO_2 และ CH_4 โดยมีการเจริญเติบโตของเซลล์น้อย (McCarty. 1964)

ปฏิกิริยาชีวเคมีของกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรีย สามารถแบ่งได้ 3 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนการไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ (acid production) และขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทน (methane production)

ขั้นที่ 1 ขั้นตอนไฮโดรไลซิส

ในขั้นตอนนี้สารอินทรีย์เชิงซ้อน (complex organic compound) ที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ไม่สามารถละลายน้ำได้เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน จะถูกย่อยสลายโดยเอนไซม์ที่ปล่อยออกมาจากเซลล์ (extracellular enzyme) จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องในขั้นตอนนี้เป็นพวก hydrolytic bacteria และ fermentative bacteria ทำให้สารอินทรีย์แตกตัวมีขนาดเล็กลงและสามารถละลายน้ำได้ และเคลื่อนย้ายเข้าไปในเซลล์ของจุลินทรีย์ ผลิตภัณฑ์ที่ได้ในขั้นตอนนี้เป็นอะไรขึ้นอยู่กับชนิดสารตั้งต้นเช่นถ้าสารตั้งต้นเป็นคาร์โบไฮเดรต จะได้น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (simple sugar) โปรตีนเปลี่ยนไปเป็นเปปไทด์หรือกรดอะมิโน ไขมันจะเปลี่ยนเป็นกรดไขมันและกลีเซอรอล ดังภาพประกอบ 1 นอกเหนือจากการย่อยที่เกิดจาก hydrolytic bacteria แล้วยังอาจมีปฏิกิริยาที่เกิดจากพวก fermentative bacteria ซึ่งให้ผลิตภัณฑ์ พวกสารประกอบแอลกอฮอล์ กรดอินทรีย์ ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์รวมอยู่ด้วย ชนิดและปริมาณของแบคทีเรียในถังหมักจะเปลี่ยนแปลงไปขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสารอินทรีย์



ภาพประกอบ 1 การย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศในขั้นตอนไฮโดรไลซิส
(Westerman. 1989)

ขั้นที่ 2 การผลิตกรดอินทรีย์

ขั้นตอนนี้เป็นการย่อยสลายผลิตภัณฑ์ที่ได้จากขั้นตอนไฮโดรไลซิส เพื่อนำไปใช้ในการสร้างเซลล์ใหม่และใช้เป็นพลังงาน พลังงานที่ได้จากจุลินทรีย์นำไปใช้ในวัตถุประสงค์ 3 อย่างคือ

2.1 Biosynthesis คือการสร้างสารประกอบของเซลล์จากแอมโมเนียมฟอสเฟต และแหล่งของคาร์บอน ซึ่งมีขั้นตอนมากมายและต้องการพลังงานในการสร้างสารประกอบต่าง ๆ

2.2 Active transport จุลินทรีย์มีการเลือกสารประกอบจากสารอาหารที่ต้องการนำเข้าสู่เซลล์ โดยต้องต้านกับระดับความเข้มข้นของสารภายในและภายนอกเซลล์ ซึ่งถ้าเซลล์มีพลังงานสะสมที่เพียงพอจะทำให้ปฏิกิริยานี้เกิดเร็วขึ้น

2.3 Motility เนื่องจากจุลินทรีย์บางชนิดมีแฟลกเจลลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่จึงต้องการพลังงานเพื่อนำไปใช้ในการควบคุมการทำงานของแฟลกเจลลา

อินทรีย์สารโมเลกุลเล็กจากขั้นตอนไฮโดรไลซิสจะถูกแบคทีเรียพวก facultative และ obligate anaerobe ซึ่งเป็นพวกที่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ดีทั้งในสภาวะที่มีและไม่มีออกซิเจน เจริญเติบโตในช่วง pH 6.5-7.5 ทนต่อการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อมได้ดี มีอัตราการเจริญเติบโตสูงแบ่งตัวเพิ่มจำนวนเป็น 2 เท่า ภายในเวลา 24 ชั่วโมง จะใช้อินทรีย์สารเหล่านี้เป็นแหล่งพลังงานเกิดกระบวนการหมัก (fermentation) ซึ่งผลของปฏิกิริยาทำให้ได้สารที่อยู่ในรูปออกซิไดส์และรีดิวส์ พวกที่อยู่ในรูปออกซิไดส์ ส่วนใหญ่เป็นพวกกรดอินทรีย์ระเหย (volatile fatty acid) ที่มีคาร์บอนอะตอมไม่เกิน 5 อะตอม เช่น กรดอะซิติก (acetic acid) กรดโพรพิโอนิก (propionic acid) กรดบิวทีริก (butyric acid) กรดแวลีริก (valeric acid) เป็นต้น แบคทีเรียที่ทำหน้าที่ในช่วงนี้คือแบคทีเรียที่สร้างกรด หรือ non-methanogenic bacteria พวกที่อยู่ในรูปรีดิวส์มีอยู่หลายอย่างขึ้นอยู่กับชนิดของแบคทีเรีย และตัวรับอิเล็กตรอน ตัวอย่างเช่นแบคทีเรียที่สร้างกรดบางชนิดใช้ไฮโดรเจน-ไอออนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนทำให้เกิดไฮโดรเจนโมเลกุลขึ้นมา แต่ผลของปฏิกิริยาที่อยู่ในรูปรีดิวส์ตัวอื่น ๆ เช่น แอลกอฮอล์ ที่มีคาร์บอนไม่เกิน 5 อะตอม ไม่เกิดขึ้นหรือเกิดขึ้นน้อยมาก ถ้าหากไม่มีการสร้างไฮโดรเจนโมเลกุลขึ้นมาแบคทีเรียที่สร้างกรดเหล่านี้จะใช้สารประกอบอินทรีย์เป็นตัวรับอิเล็กตรอนทำให้เกิดผลของปฏิกิริยาที่อยู่ในรูปรีดิวส์ชนิดอื่น เช่น เมทานอล เอทานอล โพรพานอล บิวทานอล หรือกรดแลกติก นอกจากนี้แบคทีเรียบางชนิดยังสามารถสร้างกรดอะซิติก กรดฟอร์มิก หรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจนโมเลกุล และ acetyl-CoA จากกรดอินทรีย์ระเหยที่มีขนาด

โมเลกุลใหญ่โดย pathway ของ ปฏิกิริยา pyruvate lyase และ หรือ pyruvate-formate lyase ซึ่งเกิดในช่วง pH ที่เป็นกรดโดยเอ็นไซม์ formate hydrogen lyase หรือผลของปฏิกิริยาที่อยู่ในรูปรีดิวส์อื่น ๆ ที่เกิดในปฏิกิริยาช่วงแรก ตัวอย่างของปฏิกิริยาประเภทนี้คือการเปลี่ยนกลูโคสเป็นไพรูเวทและแลกเตท

จากตัวอย่างที่กล่าวมา เป็นขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ซึ่งให้ผลผลิตเป็นสารพวกกรดอินทรีย์ระเหยง่ายเช่นกรดอะซิติก ก๊าซไฮโดรเจน และพวกแอลกอฮอล์ เช่นเมทานอล ซึ่งจะถูกใช้โดยจุลินทรีย์กลุ่ม methanogenic bacteria เพื่อเกิดเป็นก๊าซมีเทนต่อไป

ขั้นที่ 3 การผลิตก๊าซมีเทน

กรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนที่สองเป็นสารประกอบอย่างง่ายส่วนใหญ่ได้แก่กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก ไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จะถูกเปลี่ยนไปเป็นก๊าซมีเทนโดยแบคทีเรียที่สร้างก๊าซมีเทน แบคทีเรียกลุ่มนี้เรียกว่า methanogenic bacteria จัดอยู่ในพวก obligate anaerobic bacteria จะดำรงชีวิตอยู่ได้แต่ในสภาวะไร้ออกซิเจนเท่านั้น เจริญได้ดีทั้งในช่วงอุณหภูมิปานกลาง 35-40 องศาเซลเซียส และช่วงอุณหภูมิสูง 55-60 องศาเซลเซียส pH ที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตและผลิตก๊าซมีเทนอยู่ในช่วง 6.5-7.5 ต้องการแอมโมเนีย และซัลไฟด์ หรือ ซีสเทอีน (cysteine) เป็นแหล่งไนโตรเจนและซัลเฟอร์

ปฏิกิริยาการเกิดก๊าซมีเทนเกิดขึ้นได้ จากปฏิกิริยาการดีคาร์บอกซิเลชันของกรดอะซิติก (acetate decarboxylation) โดยจุลินทรีย์พวก acetoclastic methanogenic ดังสมการ (1) และการรีดักชันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เกิดโดยจุลินทรีย์พวก O_2 -reducing methanogenic bacteria ดังสมการ (2) และปฏิกิริยาของไพโรฟออนิก ดังสมการ (3) โดยจุลินทรีย์พวก

Methanobacterium propionicum

1. การเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกเป็นก๊าซมีเทน



2. การเปลี่ยนแปลงก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นก๊าซมีเทน



ปัจจัยที่เกี่ยวข้องในกระบวนการหมักแบบอับอากาศ

เนื่องจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ต้องอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์หลายชนิดที่เจริญเติบโตร่วมกัน ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเข้าใจถึงปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของจุลินทรีย์เพื่อให้กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ดำเนินไปได้อย่างดียิ่ง กระบวนการหมักแบบอับอากาศมีปัจจัยต่างๆ เข้ามาเกี่ยวข้องหลายอย่างที่จะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพมากหรือน้อยได้แก่อัตราการป้อนอินทรีย์สาร (organic loading rate) องค์ประกอบของวัตถุดิบ ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย ค่าความเป็นด่าง (alkalinity) อุณหภูมิ ระยะเวลาเก็บกัก (hydraulic retention time, HRT) และปริมาณคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C:N) เป็นต้น (ปริดา แยมเจริญวงศ์. 2534) ปัจจัยต่างๆ สามารถจำแนกออกเป็นปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อม และปัจจัยในการปฏิบัติงาน

ตาราง 1 ปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อมและปัจจัยในการปฏิบัติงาน

ปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อม (environmental factor)	ปัจจัยในการปฏิบัติงาน (operational factor)
pH	ระยะเวลาเก็บกัก
ความเป็นด่าง (alkalinity)	อัตราการป้อนอินทรีย์สาร
อุณหภูมิ (temperature)	องค์ประกอบของวัตถุดิบ
ความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ระเหยง่าย (volatile acid concentration)	การกวนผสม
สารพิษ (toxic materials)	ปริมาณความร้อน (heating)
อาหารเสริม (nutrients)	

คำจำกัดความของคำศัพท์ต่าง ๆ ที่ใช้ในงานวิจัย (Khan, Miller and Murray. 1983)

1) ระยะเวลาเก็บกัก คือระยะเวลาในการหมักซึ่งเป็นตัวแปรหลักในการออกแบบการกำจัดของเสียตามทฤษฎีระยะเวลาเก็บกัก จะแทนเวลาที่ของเสียอยู่ในถังหมัก และหาได้โดยการหารปริมาตรของถังหมักด้วยปริมาตรของของเสียที่ไหลผ่านถังหมักต่อหน่วยเวลา ถ้าของเสียที่เติมในถังหมักเป็นของแข็ง จะเรียกว่าระยะเวลาเก็บกักกาก (solid retention time, SRT)

2) ของแข็งทั้งหมด แสดงถึงปริมาณสิ่งเจือปนทั้งหมดในน้ำว่ามีมากน้อยเพียงใด เมื่อระเหยน้ำออกจนหมด ไม่รวมถึงสารบางอย่างที่ระเหยไปกับน้ำ เช่น พวกกรดอินทรีย์ และกรดต่าง ๆ ที่ละลายน้ำโดยสิ่งเจือปนที่เหลือนี้เป็นของแข็งมีทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ทั้งที่ละลายและไม่ละลายในน้ำ

3) ของแข็งระเหย (volatile solids) คือปริมาณสารอินทรีย์ที่ระเหยง่าย จากคุณสมบัติของสารอินทรีย์ที่ประกอบด้วยคาร์บอนเป็นส่วนใหญ่ เมื่อเผาในอากาศที่มีอุณหภูมิ 550-600 องศาเซลเซียส จะกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และระเหยไปแต่สารอนินทรีย์จะคงอยู่ ดังนั้นจะบอกให้ทราบถึงปริมาณสารอินทรีย์ในวัตถุดิบอย่างคร่าว ๆ

4) กรดอินทรีย์ระเหย (volatile acids) เป็นผลิตภัณฑ์ตัวกลางในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาพอับอากาศได้แก่กรดอินทรีย์ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ 1 ถึง 5 อะตอมเป็นส่วนใหญ่

5) สภาพความเป็นด่างรวม (total alkalinity) เป็นพารามิเตอร์ที่บอกถึงความเป็นบัฟเฟอร์ของระบบ เพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของค่า pH ซึ่งเป็นอันตรายต่อการดำรงชีวิตของจุลินทรีย์ในระบบ

6) ซีโอดี (Chemical Oxygen Demand, COD) คือค่าความต้องการออกซิเจนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่หาได้โดยวิธีการทางเคมี โดยค่าซีโอดีจะแสดงถึงปริมาณสารอินทรีย์ทั้งหมดในน้ำเสียหรือน้ำทิ้ง ทั้งที่จุลินทรีย์ย่อยสลายได้และย่อยสลายไม่ได้

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

นักวิทยาศาสตร์พยายามศึกษาหาวิธีการในการกำจัดของเสียทิ้งทางการเกษตรให้เหมาะสมวิธีการหนึ่งคือการนำกากเหลือทิ้งทางการเกษตรมาหมักแบบอับอากาศ และสามารถผลิตพลังงานคือก๊าซชีวภาพ ซึ่งสามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้ การหมักแบบอับอากาศนี้ได้มีการพัฒนาวิธีการและระบบเรื่อยมา โดยทั้งระบบขั้นตอนเดียว ซึ่งเป็นการทำงานร่วมกันของจุลินทรีย์สองกลุ่ม คือกลุ่มที่ผลิตกรดอินทรีย์และกลุ่มที่ผลิตก๊าซมีเทน และอีกระบบหนึ่งคือแบบสองขั้นตอนโดยแยก

ขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์และขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทนออกจากกัน และมีการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมของแต่ละขั้นตอนในการผลิตกรดอินทรีย์และก๊าซชีวภาพ เช่น การเริ่มเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ อัตราการป้อนอินทรีย์สาร ระยะเวลาเก็บกัก และลักษณะของวัตถุดิบเป็นต้น (Ghosh. 1983)

สภาวะต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลอย่างมากต่อการย่อยสลายอินทรีย์สารในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ของกระบวนการหมักแบบอับอากาศสองขั้นตอน จากการทดลองหมักแบบอับอากาศสองขั้นตอนในการผลิตกรดอินทรีย์จากน้ำตาลกลูโคสใน Continuous Flow Stirred Tank Reactor แบบอับอากาศ พบว่าเมื่อมีอัตราการป้อนน้ำตาลกลูโคสจาก 2.5 กรัมต่อลิตรต่อวันจนถึง 75 กรัมต่อลิตรต่อวัน ที่ pH 6.0 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส จะให้ผลผลิตพวกกรดบิวทีริก กรดอะซิติกและกรดแลกติกเพิ่มขึ้น ขณะที่ปริมาณเอทานอลและโพรพานอลไม่เปลี่ยนแปลง (Zoetemeyer and others. 1982 a) นอกจากนี้การหมักแบบอับอากาศของน้ำตาลกลูโคสใน Fluidized-Bed Bioreactor พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนอินทรีย์สารจาก 2.5 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรถึงปฏิกิริยาต่อวัน จนถึง 7.5 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรถึงปฏิกิริยาต่อวัน พบว่าปริมาณ กรดอะซิติกจะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราการป้อนอินทรีย์สาร ส่วนกรดบิวทีริกและกรดโพรพิโอนิกจะคงที่ และเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนอินทรีย์สารไปจนถึง 21.12 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรถึงปฏิกิริยาต่อวัน พบว่าปริมาณของกรดบิวทีริกจะเพิ่มขึ้นมาก กรดอะซิติกเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนกรดโพรพิโอนิก ค่อนข้างคงที่ (Sreekrishnan, Ramachandran and Ghosh. 1991) และในการศึกษาการหมักแบบอับอากาศของน้ำตาลกลูโคสใน Upflow Reactor ที่ pH 5.9 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส พบว่าที่อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 10 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรถึงปฏิกิริยาต่อวัน จะได้กรดแลกติกเป็นผลิตภัณฑ์หลัก รองลงมาคือ บิวทีริก อะซิติกและแวลีลิกตามลำดับ และที่อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 50 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรถึงปฏิกิริยาต่อวัน จะได้กรดบิวทีริกเป็นผลิตภัณฑ์หลัก รองลงมาคืออะซิติก และโพรพิโอนิก ส่วนแลกติกจะได้ปริมาณน้อยที่สุด (Zoetemeyer and others. 1982)

จากการศึกษาการบำบัดน้ำทิ้งจากโรงงานผลิตชีส โดยใช้ถังปฏิกรณ์ชนิด UASB ขนาด 4 ลิตร ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ทำการทดลองเป็นระยะเวลานานกว่า 1 ปี พบว่าที่ภาระการรับอินทรีย์สาร 31 กรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรถึงปฏิกิริยาต่อวัน มีประสิทธิภาพในการกำจัดอินทรีย์สารร้อยละ 90 โดยทำการทดลองที่ภาระการรับอินทรีย์สารสูงสุดที่ 45 กรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรถึงปฏิกิริยาต่อวัน ประสิทธิภาพในการกำจัดอินทรีย์สารร้อยละ 70 ถึง 80 (Rico Gutierrez and others. 1991)

จากการศึกษาการผลิตกรดอินทรีย์จากน้ำทิ้งโรงงานเป็่งมันสำปะหลัง โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบ Anaerobic Contact ขนาด 25 ลิตร และควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ตลอดการทดลอง การเติมน้ำทิ้งเป็นแบบต่อเนื่อง จุลินทรีย์ที่ออกจากถังปฏิกรณ์จะถูกตกตะกอน แล้วสูบกลับเข้าถังปฏิกรณ์ใหม่ โดยการทดลองนี้ใช้น้ำทิ้งที่มีค่า COD สูง 22,000 มิลลิกรัมต่อลิตรและเติมอาหารเสริมคือ ฟอสฟอรัส ซึ่งมีความเหมาะสมกว่าในน้ำทิ้งที่มีค่า COD ต่ำเพียง 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และไม่เติมอาหารเสริม สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตกรดอินทรีย์นี้คือควบคุมที่ HRT 1 วัน อัตราการป้อนอินทรีย์สาร ประมาณ 22 กิโลกรัม COD ต่อลูกบาศก์เมตรถึงถังปฏิกรณ์ต่อวัน ซึ่งให้ประสิทธิภาพและอัตราการผลิตกรดอินทรีย์สูง แต่ประสิทธิภาพและอัตราการผลิตก๊าซมีเทนต่ำสุด นอกจากนี้ยังพบว่า ที่อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 21.39 กิโลกรัม COD ต่อลูกบาศก์เมตรถึงถังปฏิกรณ์ต่อวัน HRT 1 วัน ไม่จำเป็นต้องควบคุม pH ในถังปฏิกรณ์ให้เป็นกลาง เมื่อไม่มีการควบคุม pH ระบบหมักผลิตกรดอินทรีย์มีความเข้มข้นสูงถึง 5,800 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการผลิตกรดอินทรีย์สูงถึง 4.67 กิโลกรัม ในรูปกรดน้ำส้มต่อลูกบาศก์เมตรถึงถังปฏิกรณ์ต่อวัน และประสิทธิภาพการเปลี่ยนสารอินทรีย์เป็นกรดอินทรีย์สูงถึง 0.4 กิโลกรัม ต่อกิโลกรัมสารอินทรีย์ที่ถูกทำลาย กรดอินทรีย์ที่ผลิตได้มีความเหมาะสมที่จะนำไปหมักต่อเป็นก๊าซมีเทนหรือเลี้ยงแบคทีเรียสังเคราะห์แสง โดยไม่ต้องเติมสารอาหารเสริมและปรับ pH เลย (สุเมธ ขวเดช และคนอื่นๆ. 2530)

การผลิตกรดอินทรีย์จากมะเขือเทศเมื่อมีการหมักแบบครั้งคราว (batch) โดยทำการหมักในถังปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส และ 32 องศาเซลเซียส ผลการทดลอง พบว่าหลังจากทำการหมักไปได้ 41 ชั่วโมง pH ของทั้งสองถังลดลงเหลือ 4.2 และเมื่อการหมักสิ้นสุดลงในถังปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส มี pH เป็น 3.6 และถึงถังปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียส มี pH เป็น 3.4 ขณะที่ทำการหมักไปได้ 41 ชั่วโมงแล้วนั้นความเข้มข้นของกรดบิวทีริกในถังปฏิกรณ์ไม่เพิ่มขึ้นอีกเลย แสดงว่าจุลินทรีย์พวกที่สร้างกรดบิวทีริกไม่สามารถเจริญได้ในสภาวะแวดล้อมที่มีค่า pH ต่ำกว่า 4.2 ในขณะที่ความเข้มข้นของกรดแลกติกเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนสิ้นสุดระยะเวลาการหมักซึ่งใช้เวลา 250 ชั่วโมง ดังนั้นจุลินทรีย์พวกที่สร้างกรดแลกติกจึงสามารถเจริญได้ในสภาวะที่มีความเป็นกรดสูงได้ดีกว่าจุลินทรีย์พวกที่สร้างกรดบิวทีริก (Koster. 1984)

จากการวิจัยเกี่ยวกับผลของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่อจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซชีวภาพที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส พบว่าโดยทั่วไปอัตราการย่อยสลายในช่วงเริ่มต้นเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นยกเว้นในกรณีของกรดอะซิติกมีอัตราการย่อยสลายสูงสุดที่ความ

เข้มข้นตั้งต้นของกรด 30 มิลลิโมลาร์ และลดลงที่ความเข้มข้นสูงกว่า 40 มิลลิโมลาร์ ที่ความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ที่เท่ากัน พบว่ากรดบิวทริกถูกใช้ได้รวดเร็วที่สุดตามด้วยกรดอะซิติก และกรดโพรพิโอนิก และในการย่อยสลายกรดบิวทริกและกรดโพรพิโอนิกให้กรดอะซิติกเป็นสารตัวกลาง ความเข้มข้นของกรดอะซิติก ในช่วง 30 มิลลิโมลาร์ไม่มีผลต่อการย่อยสลายกรดบิวทริก แต่ที่ความเข้มข้นสูงกว่า 3.3 มิลลิโมลาร์ ยับยั้งการย่อยสลายกรดโพรพิโอนิก นอกจากนี้กรดโพรพิโอนิก มีผลยับยั้งการใช้กรดบิวทริก ดังนั้นเมื่อกรดอะซิติกยับยั้งการใช้กรดโพรพิโอนิกส่งผลยับยั้งการใช้กรดบิวทริกด้วย (จงกล พูนทวี. 2537)

จากการศึกษาถึงผลของระยะเวลาเก็บกักและอัตราการป้อนอินทรีย์สารที่มีต่อปริมาณและคุณภาพของก๊าซชีวภาพโดยกระบวนการหมักแบบอับอากาศในถังหมักที่บรรจุตัวกรองทำด้วยโลหะรูปอานม้าโดยใช้น้ำเสียที่สังเคราะห์ขึ้นเป็นวัตถุดิบ มีกลูโคส และน้ำแช่ข้าวโพด (corn steep liquor) เป็นองค์ประกอบและศึกษาภายใต้สภาวะต่าง ๆ กันคือ ให้มีอัตราการป้อนอินทรีย์สารอยู่ในช่วง 1 ถึง 13 กิโลกรัม ซีโอดี ต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน และระยะเวลาเก็บกักระหว่าง 12 ถึง 24 ชั่วโมง พบว่าระยะเวลาเก็บกักต่ำสุดที่ทำให้ระบบอยู่ตัวที่สุดคือ 12 ชั่วโมง สามารถจัดอินทรีย์สารในรูปของซีโอดีได้ประมาณร้อยละ 90 ที่อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 11 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน (Minyang and others. 1992)

จากการศึกษาการกำจัดของเหลือทิ้งที่เกิดจากกระบวนการแปรรูปของผัก และผลไม้ซึ่งเกิดจากผักและผลไม้หลายชนิด เช่น มะม่วง สับปะรด มะเขือเทศ ถั่วฝักยาว และส้ม เมื่อทำการทดลองที่ระยะเวลาเก็บกักและปริมาณการป้อนอินทรีย์สารต่าง ๆ กัน พบว่าที่ปริมาณการป้อนอินทรีย์สาร 40 กิโลกรัมของของแข็งทั้งหมดต่อลูกบาศก์เมตรถึงปฏิกรณ์ต่อวัน ที่ระยะเวลาเก็บกัก 20 วัน ปริมาณก๊าซสูงสุดคือ 0.6 ลูกบาศก์เมตรต่อกิโลกรัมของของแข็งทั้งหมด โดยมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบร้อยละ 51 ถึง 53 (Viswanath and others. 1992)

การวิจัยเกี่ยวกับน้ำทิ้งโรงงานอุตสาหกรรมแป้งมันสำปะหลัง อำเภอบ้านโป่ง จังหวัดราชบุรี ซึ่งมีค่าซีโอดีอยู่ในช่วง 1,950-45,200 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยทดลองใส่ในถังปฏิกรณ์แบบมีตัวกรอง และแบบตรึงฟิล์มขนาดความจุ 50 ลิตร พบว่าสามารถลดปริมาณอินทรีย์สารได้ถึงร้อยละ 80 ปริมาตรก๊าซที่เกิดขึ้นประมาณ 2.9 ลูกบาศก์เมตรต่อลูกบาศก์เมตรของถังหมักต่อวัน มีก๊าซมีเทนประมาณร้อยละ 60 - 70 (มรกต ดันติเจริญ. 2534)

จากการศึกษาผลของระยะเวลาเก็บกัก โดยทดลองหมักมูลวัวในถังปฏิกรณ์ขนาด 10 ลิตร ที่ระยะเวลาเก็บกักต่าง ๆ คือ 0.9 วัน 1.5 วัน 2.1 วัน 6 วันและ 8 วัน พบว่าการเพิ่มระยะเวลาเก็บกักจะทำให้การขจัดอินทรีย์สารสูงขึ้น การลดระยะเวลาเก็บกักไม่มีผลในการยับยั้งกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ และระยะเวลาเก็บกัก จะไม่มีผลต่อปริมาณก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพด้วย (Sanchez. 1992)

การย่อยสลายกากมะเขือเทศแบบอับอากาศชั้นตอนเดียวในถังปฏิกรณ์ขนาด 4 ลิตร โดยเตรียมกากมะเขือเทศให้มีขนาดต่าง ๆ กัน คือ 1.3 2.4 3.2 12.7 และ 20 มิลลิเมตร มีอัตราการป้อนอินทรีย์สาร 3 กรัมของของแข็งระเหยต่อลิตรถึงปฏิกรณ์ต่อวัน ใช้ระยะเวลาเก็บกัก 18 วัน พบว่ากากมะเขือเทศที่มีขนาด 1.3 มิลลิเมตรสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้สูงสุด คือผลิตก๊าซมีเทนได้ 0.81 ลิตรต่อลิตรถึงปฏิกรณ์ต่อวัน มีการขจัดของแข็งระเหยได้มากที่สุดคือร้อยละ 60.3 ของของแข็งทั้งหมด ในขณะที่กากมะเขือเทศที่มีขนาด 20 มิลลิเมตร ผลิตก๊าซได้เพียง 0.25 ลิตร ต่อถึงปฏิกรณ์ต่อวัน (Hill and Nakano. 1984)

จากการศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพโดยเปรียบเทียบระหว่างการหมักแบบอับอากาศชั้นตอนเดียวและ สองชั้นตอนโดยใช้กากเหลือทิ้งและน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมเครื่องคั้นน้ำอ้อยซึ่งมีค่าซีโอดีสูง ผลการทดลองพบว่าการหมักแบบอับอากาศชั้นตอนเดียวโดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบที่มีการควบคุมการรับภาระการเติมปริมาณอินทรีย์สาร ได้น้อยและใช้ระยะเวลาเก็บกักนาน แต่กระบวนการหมักแบบอับอากาศสองชั้นตอนสามารถรับภาระการเติมอินทรีย์สารได้สูงถึง 12 กิโลกรัม ซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรถึงปฏิกรณ์ต่อวัน ลดระยะเวลาเก็บกักได้ต่ำถึง 13 ชั่วโมง ทำให้ถังปฏิกรณ์มีขนาดเล็กซึ่งจะลดต้นทุนในการสร้างถังปฏิกรณ์และต้นทุนในการดำเนินงาน (Ombregt and Pipyn. 1985)

จากการวิจัยเกี่ยวกับการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำที่บีบจากกากเหลือทิ้งการทำกาแฟ พบว่าการผลิตก๊าซชีวภาพโดยใช้กระบวนการหมักแบบชั้นตอนเดียวถึงปฏิกรณ์สามารถรับปริมาณการเติมของแข็งระเหยได้ 0.5 - 3 กรัมต่อลิตรถึงปฏิกรณ์ต่อวันที่ระยะเวลาเก็บกัก 10 วัน อัตราการเติมของแข็งระเหย 0.97 กรัมต่อลิตรถึงปฏิกรณ์ต่อวัน สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 1.55 ลิตรต่อลิตรถึงปฏิกรณ์ต่อวัน โดยมีองค์ประกอบเป็นก๊าซมีเทนร้อยละ 79 แต่เมื่อใช้กระบวนการหมักแบบสองชั้นตอน พบว่าสถานะที่เหมาะสมทำให้ระบบอยู่ตัวคือ ขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ใช้ระยะเวลาเก็บกัก 0.5 วัน ที่ภาระการเติมของแข็งระเหยได้ 5.6 กรัมต่อลิตรถึงปฏิกรณ์ต่อวันและในขั้นตอนการเกิดก๊าซมีเทนมีระยะเวลาเก็บกัก 8 วัน ที่ภาระการเติมของแข็งที่ระเหยได้ 1.8 กรัมต่อลิตรถึงปฏิกรณ์ต่อวัน สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 1.9 ลิตร ต่อลิตรถึงปฏิกรณ์ต่อวัน (Calzada. 1984)

จากการศึกษาเมื่อนำหมักที่มีความเข้มข้นของอินทรีย์สารประมาณ 1.5 กรัม ซีโอดีต่อลิตร ป้อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพโดยมีระยะเวลาเก็บกักลดลงจาก 10 วันเป็น 5 วันและ 2 วัน จะทำให้อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นเป็น 0.06 ลิตรต่อลิตร 0.16 ลิตรต่อลิตรและ 0.27 ลิตรต่อลิตรตามลำดับ (วิบูลย์ นุชประมูล. 2535)

นอกจากนี้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการเกิดก๊าซชีวภาพวิธีหนึ่งที่เป็นไปได้คือการเพิ่มจำนวนของจุลินทรีย์ที่ใช้กรดอะซิติกให้มากขึ้นซึ่งอาจทำได้โดยในช่วง start up ค่อย ๆ เพิ่มปริมาณการป้อนสารอาหาร อีกวิธีคือการแยกขั้นตอนการหมักออกเป็น 2 ขั้นตอน โดยในขั้นตอนการเกิดกรดอาจควบคุมไม่ให้เกิดกรดไพรูวอนิกที่ย่อยสลายได้ยากโดยอาศัย HRT ที่นานกว่า 2.5 วัน pH ประมาณ 6.0 ซึ่งอาจจะทำให้ปริมาณกรดอะซิติกและกรดบิวทิริกมากแต่ให้กรดไพรูวอนิกน้อย (จงกล พูนทวี. 2537)

จากรายงานการวิจัยต่างๆสรุปได้ว่าปัจจัยต่างๆ เช่น อัตราการป้อนอินทรีย์สาร ระยะเวลาเก็บกัก อุณหภูมิ จะมีผลต่อปริมาณและชนิดของกรดอินทรีย์และการผลิตก๊าซชีวภาพและการขจัดอินทรีย์สารในกากเหลือทิ้งและการหมักแบบอับอากาศสองขั้นตอนเป็นวิธีการหมักที่ให้ผลในการขจัดอินทรีย์สารและการเกิดก๊าซชีวภาพได้ดีกว่าการหมักแบบขั้นตอนเดียว ดังนั้นจึงสนใจที่จะศึกษาผลของการป้อนอินทรีย์สารและระยะเวลาเก็บกักกากต่อปริมาณของสารตัวกลางที่เกิดขึ้น ในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์สารที่อุณหภูมิต่าง ๆ และผลของระยะเวลาเก็บกัก ในขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทนที่มีต่อคุณภาพก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อศึกษาผลของอัตราการป้อนวัตถุดิบ ระยะเวลาที่ยอมให้เชื้ออยู่ในถังหมัก และอุณหภูมิที่ทำการหมักในขั้นตอนการผลิตกรด ต่อการเกิดก๊าซมีเทน

ประโยชน์ของงานวิจัย

ทราบถึงพื้นฐานทางวิทยาศาสตร์ที่เกี่ยวกับการผลิตก๊าซชีวภาพ และ ผลกระทบของสภาวะต่าง ๆ ที่ใช้ในขั้นตอนการผลิตกรดต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ การขจัดกากอินทรีย์สารในขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทน เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาพัฒนาต่อไป ให้ได้ระบบที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ก่อนที่จะนำไปประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

บทที่ 2

วิธีการวิจัย

ทำการวิจัยที่ห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร และที่คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี โดยมีแผนการวิจัยดังนี้

แผนการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้จะหมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอน

ขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ โดยนำกากมะเขือเทศผสมกับหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการผลิตกรดอินทรีย์โดยศึกษาและเปรียบเทียบระหว่างถึงปฏิกรณ์ผลิตกรดอินทรีย์ที่มีอัตราการป้อนอินทรีย์สาร ระยะเวลาเก็บกักกาก อุณหภูมิต่างกัน การทดลองในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์มี 2 ชุดการทดลองดังนี้คือ

การทดลองที่ 1 เป็นการศึกษาผลของการป้อนอินทรีย์สารที่มีความเข้มข้นสารแขวนลอยกากมะเขือเทศเป็น 10 กรัมต่อลิตรและ 20 กรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาเก็บกักกากต่าง ๆ คือ 3 วัน และ 5 วัน

การทดลองที่ 2 ศึกษาเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิต่อขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วันและ 5 วัน และความเข้มข้นสารแขวนลอยกากมะเขือเทศ 10 กรัมต่อลิตร และ 20 กรัมต่อลิตร โดยใช้อุณหภูมิต่างกันคือที่อุณหภูมิห้อง และ 37 องศาเซลเซียส

ในขั้นตอนการผลิตก๊าซชีวภาพ นำน้ำหมักที่ได้จากขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์มากรองแล้วป้อนเข้าสู่ถึงปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพโดยศึกษาและเปรียบเทียบระหว่างถึงปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพที่มีระยะเวลาเก็บกักต่าง ๆ กันเมื่อป้อนอินทรีย์สารคงที่โดยนำน้ำหมักจากถึงปฏิกรณ์ผลิตกรดอินทรีย์ที่มีระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน ความเข้มข้นสารแขวนลอยกากมะเขือเทศ 20 กรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้อง และ 37 องศาเซลเซียส มาเป็นวัตถุดิบสำหรับป้อนเข้าสู่ถึงปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพมีระยะเวลาเก็บกักในขั้นตอนการผลิตก๊าซชีวภาพนาน 3 วันและ 5 วันปรับให้มีอัตราการป้อนอินทรีย์สารเป็น 0.5 กรัมชีโอดีต่อวัน

แหล่งของจุลินทรีย์ ถึงปฏิกรณ์ และวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตกรดอินทรีย์และก๊าซชีวภาพ

1. แหล่งของจุลินทรีย์

จุลินทรีย์ที่ใช้ในการผลิตกรดอินทรีย์นำมาจากหัวเชื้อซีไก่อหมักกับน้ำความเข้มข้น

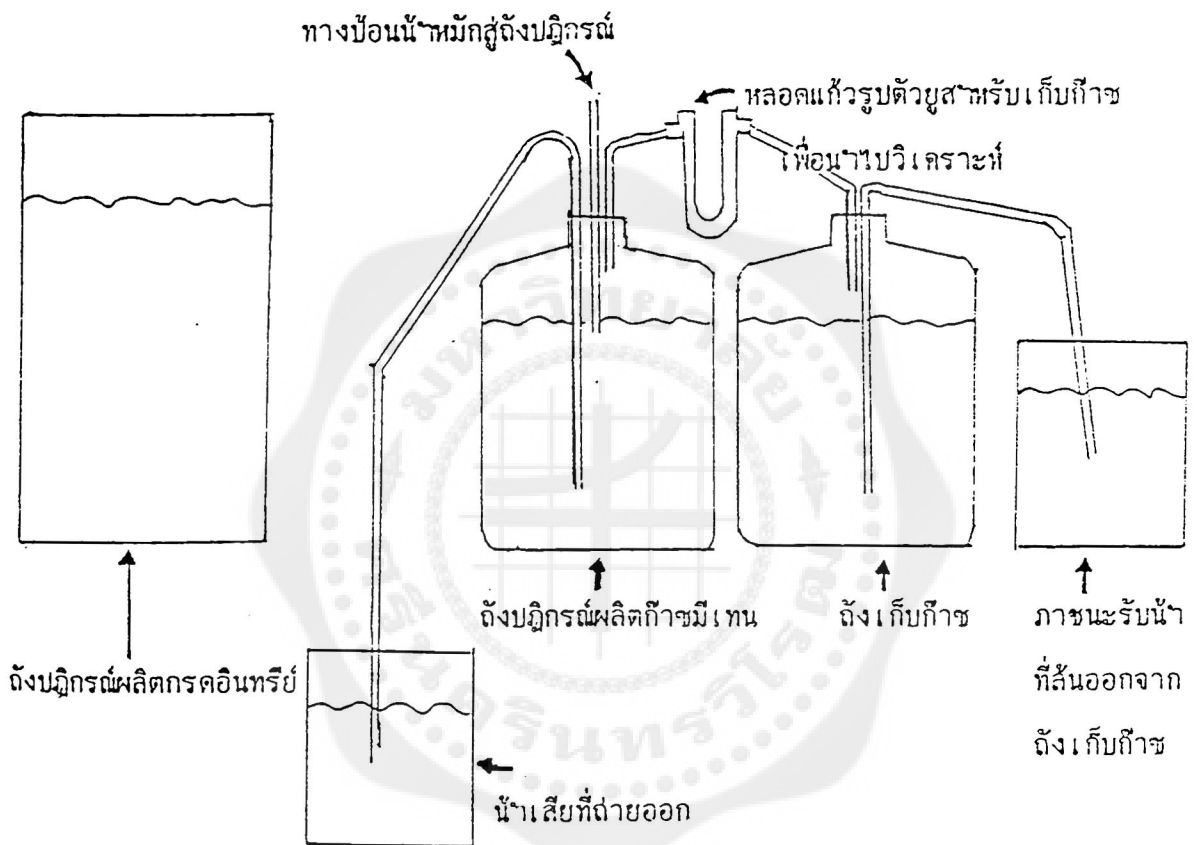
ร้อยละ 5 หมักเป็นเวลา 10 วัน นำมากรองเพื่อใช้เป็นหัวเชื้อจุลินทรีย์ผลิตกรดอินทรีย์
 จุลินทรีย์ที่ใช้ในการผลิตก๊าซมีเทนได้มาจากน้ำเสียจากการผลิตก๊าซมีเทนโดยใช้สาร
 แวนอลอยคากซอสถัวเหลืองที่มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร จากห้องปฏิบัติการวิจัย
 เทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร

2. ดังปฏิกรณ์

2.1 ดังปฏิกรณ์ผลิตกรดอินทรีย์ ใช้ขวดแก้วรูปหม้อขนาด 2.5 ลิตร โดยมีปริมาตรการใช้
 งาน 1.5 ลิตร

2.2 ดังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทนเป็นขวดแก้วเกลลอนขนาดความจุ 4 ลิตร ปริมาตรของ
 เหลวที่ใช้ในการหมักเท่ากับ 3.5 ลิตร ฝาขวดเป็นยางที่สอดหลอดแก้ว 3 แท่ง ซึ่งมีเส้นผ่านศูนย์กลาง
 5 มิลลิเมตรขนาดยาว 8 เซนติเมตร สำหรับเป็นท่อนำก๊าซ ยาว 15 เซนติเมตร สำหรับเป็นที่
 นำน้ำเสียออกและยาว 25 เซนติเมตรสำหรับเป็นทางป้อนน้ำหมักเข้าสู่ดังปฏิกรณ์

ดังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทนนี้จะต่อกับถังก๊าซและอุปกรณ์เก็บก๊าซตัวอย่างดังภาพประกอบ
 2 โดยที่ถังเก็บก๊าซเป็นขวดแก้วขนาดความจุ 4 ลิตร เก็บก๊าซโดยการแทนที่น้ำและอุปกรณ์เก็บ
 ก๊าซตัวอย่าง เป็นหลอดแก้วรูปตัวยูสำหรับเก็บก๊าซนำไปตรวจวิเคราะห์



ภาพประกอบ 2 แสดงชุดการทดลองแบบอับอากาศสองขั้นตอน

3. วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตกรดอินทรีย์และก๊าซชีวภาพ

กากมะเขือเทศแห้งเป็นกากเหลือทิ้งและได้รับความอนุเคราะห์จากโครงการหลวงอาหารสำเร็จรูปบรรจุใส่ถุงพลาสติกปิดผนึกเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง

4. วิธีดำเนินการทดลอง

1. การเตรียมเชื้อจุลินทรีย์สำหรับผลิตกรดอินทรีย์

นำกากมะเขือเทศแห้งมาผสมกับหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการผลิตกรดอินทรีย์ให้มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตรหมักในถังปฏิกรณ์ผลิตกรดอินทรีย์ การหมักในช่วงแรกเป็นแบบเก็บกัก (batch process) นานประมาณ 10 วัน น้ำหมักที่ได้นี้ใช้เป็นหัวเชื้อจุลินทรีย์สำหรับการหมักเพื่อให้ได้กรดอินทรีย์ต่อไป

2. การเตรียมถังปฏิกรณ์สำหรับการผลิตกรดอินทรีย์

นำกากมะเขือเทศแห้งผสมกับหัวเชื้อจุลินทรีย์สำหรับผลิตกรดอินทรีย์ที่เตรียมไว้ตามข้อ 1 ให้มีความเข้มข้นของสารแขวนลอยกากมะเขือเทศเป็น 10 กรัมต่อลิตรและ 20 กรัม ต่อลิตร แล้วหมักในถังปฏิกรณ์ผลิตกรดอินทรีย์นานประมาณ 7 วัน น้ำหมักที่ได้นี้ใช้เพื่อผลิตกรดอินทรีย์ต่อไป

3. ศึกษาผลของสภาวะต่าง ๆ ต่อการผลิตกรดอินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ผลิตกรดอินทรีย์ ดังนี้

3.1 อัตราการป้อนอินทรีย์สารและระยะเวลาเก็บกักกาก

นำกากมะเขือเทศแห้งผสมกับน้ำให้มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร และ 20 กรัมต่อลิตร แล้วป้อนเข้าถังหมักโดยจะป้อนแบบกึ่งต่อเนื่อง (semicontinuous) วันละครั้ง โดยก่อนเติมกากมะเขือเทศผสมน้ำจะทำการกวนถังปฏิกรณ์ประมาณ 1 นาที แล้วเติมน้ำหมักผสมกากมะเขือเทศออกเท่ากับจำนวนที่จะเติมเข้าไป และเมื่อเติมกากมะเขือเทศแห้งผสมน้ำแล้ว กวนให้เข้ากันประมาณ 2 นาที ที่แต่ละอัตราการป้อนอินทรีย์สารจะหมักโดยให้มีระยะเวลาเก็บกักกากเป็น 3 วันและ 5 วัน

3.2 อุณหภูมิ

ศึกษาการผลิตกรดอินทรีย์จากกากมะเขือเทศที่อุณหภูมิต่าง ๆ คือ อุณหภูมิห้อง และ 37 องศาเซลเซียส เริ่มปรับอุณหภูมิจากอุณหภูมิห้องเป็น 37 องศาเซลเซียส โดยค่อย ๆ ปรับเพิ่มครั้งละประมาณ 5 องศาเซลเซียส ใช้เวลาแต่ละช่วงอุณหภูมิประมาณ 10 วันในการป้อนกากมะเขือเทศจะใช้กากมะเขือเทศแห้งผสมกับน้ำที่ปรับอุณหภูมิให้เท่ากับที่จะใช้ในการทดลองป้อนเข้าสู่ถังหมักแบบกึ่งต่อเนื่องวันละครั้ง และศึกษาโดยให้มีระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน และ 5 วัน

ในการศึกษาผลของสภาวะต่าง ๆ ต่อการผลิตกรดอินทรีย์นั้นจะหมักนานประมาณ 1 เดือน จึงเริ่มเก็บตัวอย่างน้ำหมักที่ออกจากถังปฏิกรณ์ผลิตกรดอินทรีย์แต่ละถังปฏิกรณ์มา

กรอง แล้วนำน้ำหมักที่กรองได้ไปวิเคราะห์หา pH ซีโอดี Alkalinity ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย ปริมาณของแข็งทั้งหมด ปริมาณของแข็งระเหย และปริมาณของแข็งคงตัว วัดปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นโดยการแทนที่น้ำ และวัดปริมาณก๊าซแต่ละชนิดในก๊าซผสมสัปดาห์ละ 1 ถึง 2 ครั้ง และทำการเก็บข้อมูลต่ออีกประมาณ 1 เดือน

4. การเตรียมถังปฏิกรณ์สำหรับผลิตก๊าซมีเทน

นำ stock หัวเชื้อจุลินทรีย์ผลิตก๊าซชีวภาพจากการหมักกากซีสต์เหลือทิ้งในห้องปฏิบัติการวิจัยเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ ซึ่งมีตะกอนเชื้อจุลินทรีย์อยู่ ใส่ในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทนประมาณ 2 ลิตร เติมน้ำลงไปประมาณ 1.5 ลิตร เพิ่มปริมาณเชื้อจุลินทรีย์โดยการเติมโซเดียมอะซิเตททุกวันเพื่อใช้เป็นแหล่งอาหารเป็นเวลา 20 วัน โดยให้ความเข้มข้นของโซเดียมอะซิเตทร้อยละ 0.1 หลังจากเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทนด้วยโซเดียมอะซิเตทเป็นเวลา 20 วัน จึงเติมโซเดียมอะซิเตทผสมกับน้ำหมักกากมะเขือเทศที่ถ่ายออกจากถังปฏิกรณ์ผลิตกรดอินทรีย์ ทุก ๆ สัปดาห์ โดยค่อย ๆ ลด ปริมาณของโซเดียมอะซิเตทแต่ละครั้ง ๆ เพิ่มปริมาณของน้ำหมักกากมะเขือเทศ ตามอัตราส่วนของโซเดียมอะซิเตทต่อปริมาณน้ำหมักกากมะเขือเทศดังนี้คือ 90:10 80:20 70:30 60:40 50:50 40:60 30:70 20:80 10:90 และในที่สุดจะเลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์ด้วยน้ำหมักกากมะเขือเทศเท่านั้น ระยะเวลาในการเตรียมเชื้อจุลินทรีย์สำหรับผลิตก๊าซมีเทนนี้ประมาณ 8 สัปดาห์ ระหว่างที่เลี้ยงเชื้อจุลินทรีย์นั้นจะทำการตรวจสอบปริมาณ และคุณภาพของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้น จนกระทั่งก๊าซชีวภาพ ที่เกิดขึ้นมีปริมาณและคุณภาพค่อนข้างคงที่แล้วก็เริ่มทำการทดลอง

5. การหมักเพื่อให้ได้ก๊าซมีเทน

นำน้ำหมักที่ถ่ายออกจากถังปฏิกรณ์ผลิตกรดอินทรีย์ปรับ pH ให้เป็น 7.0 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ซึ่งมีความเข้มข้น 1 นอร์มัล (N) ป้อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทน ที่เตรียมไว้ตามข้อ 4 หมักแบบกึ่งต่อเนื่องให้ระยะเวลาเก็บกักนาน 3 และ 5 วัน เพื่อศึกษาประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพเมื่อมีระยะเวลาเก็บกักต่างกันแต่ปริมาณการป้อนอินทรีย์สารในอัตราที่คงที่ โดยป้อนอินทรีย์สารวันละครั้ง และจะเก็บน้ำหมักที่ถ่ายออกจากถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทนเพื่อนำไปวิเคราะห์หาค่าซีโอดี กรดอินทรีย์ระเหย pH และ alkalinity

การบันทึกข้อมูล

วัดปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นโดยการแทนที่น้ำ pH ในถังที่ผลิตกรดอินทรีย์และถังที่ ผลิตก๊าซมีเทนทุกวัน

วิเคราะห์หาค่าซีโอดี ความเป็นด่างและกรดอินทรีย์ระเหยทุก ๆ 2 วัน

วิเคราะห์คุณภาพของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นสัปดาห์ละ 1-2 ครั้ง

การวิเคราะห์หาค่าซีโอดี เป็นการหาปริมาณอินทรีย์สารในน้ำหมักโดยวิธี open reflux (APHA. AWWA. WPCF. 1985) โดยคิดเปรียบเทียบในรูปของปริมาณออกซิเจนที่ต้องการใช้ในการออกซิไดส์อินทรีย์สารด้วยสารเคมีซึ่งมีอำนาจในการออกซิไดส์สูง (strong chemical oxidant) ในสารละลายที่เป็นกรด (ธงชัย พรรณสวัสดิ์. 2525)

เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องมือที่ใช้ในการรีฟลักซ์ (refluxing apparatus) ประกอบด้วย

1. ขวดกลมก้นแบน (flat bottom flask) ชนิดที่มีปากแบบกราวจอยท์ (ground joint)

ขนาดความจุ 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร

2. เครื่องควบแน่น (condensor)

3. เตาแผ่นร้อน (hot plate)

วิธีวิเคราะห์

1. ใส่เมอคิวรี (II) ซัลเฟต (HgSO_4) ปริมาณ 0.4 กรัมลงในขวดรีฟลักซ์ เติมน้ำหมักหรือน้ำหมักที่ทำให้เจือจางแล้วลงไป 20 ลูกบาศก์เซนติเมตร เขย่าให้เข้ากัน เติมสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตที่มีความเข้มข้น 0.0417 โมลาร์ จำนวน 10 ลูกบาศก์เซนติเมตร แล้วค่อย ๆ เติมกรดซัลฟูริกเข้มข้นซึ่งมีซิลเวอร์ซัลเฟตเจือปนอยู่ (ละลายซิลเวอร์ซัลเฟต 22 กรัมในกรดซัลฟูริกเข้มข้น 1ขวด ซึ่งมีน้ำหนัก 4.1 กิโลกรัม) จำนวน 30 ลูกบาศก์เซนติเมตร ใส่ลูกแก้ว 5-6 เม็ดเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการเดือดอย่างรุนแรง

2. นำขวดรีฟลักซ์ต่อกับเครื่องควบแน่น แล้วรีฟลักซ์หรือต้มให้เดือดเป็นเวลานาน

2 ชั่วโมง ทิ้งไว้ให้เย็นล้างเครื่องควบแน่นด้วยน้ำกลั่นก่อนที่จะถอดเครื่องควบแน่นออกจากขวดรีฟลักซ์

3. เจือจางส่วนผสมที่ได้ด้วยน้ำกลั่น จนมีปริมาตรประมาณ 150 ลูกบาศก์เซนติเมตร ทำให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง แล้ววิเคราะห์หาปริมาณของไดโครเมตที่มากเกินไปด้วยสารละลายมาตรฐานไอโอรอน (II) แอมโมเนียมซัลเฟตที่มีความเข้มข้น 0.10 โมลาร์โดยใช้เฟอร์โรอินเป็นอินดิเคเตอร์ เมื่อถึงจุดสมมูลสารละลายจะเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเขียวเป็นสีน้ำตาลแดง

4. ทำแบลนด์(blank) โดยใช้ น้ำกลั่น 20 ลูกบาศก์เซนติเมตรแทนน้ำหมัก และทำการวิเคราะห์พร้อมไปกับตัวอย่าง

การคำนวณ

ซีไอดี (มิลลิกรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) = $\frac{(a-b)M \times 8,000}{\text{ปริมาตรของน้ำหมัก(ลูกบาศก์เซนติเมตร)}}$

a = ปริมาตรของไอร้ออน (II) แอมโมเนียมซัลเฟตซึ่งใช้ติเตรตกับแบลงค์ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

b = ปริมาตรของไอร้ออน (II) แอมโมเนียมซัลเฟตซึ่งใช้ติเตรตกับน้ำหมัก (ลูกบาศก์เซนติเมตร)

M = ความเข้มข้นของไอร้ออน (II) แอมโมเนียมซัลเฟต (โมลาร์)

การวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย alkalinity โดยวิธีการติเตรต (direct titration) (ธงชัย พรรณสวัสดิ์. 2525; Powell and Archer. 1989)

เครื่องมือและอุปกรณ์

1. เครื่องมือวัดความเป็นกรด - ด่าง (pH-meter)
2. บิวเรตขนาด 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร 2 อันพร้อมขาตั้ง
3. เตาแผ่นร้อน
4. เครื่องหมุนเหวี่ยง (centrifuge)
5. เครื่องกวนโดยใช้แท่งแม่เหล็ก (magnetic stirrer)
6. บีกเกอร์ขนาด 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร

วิธีวิเคราะห์

1. เตรียมน้ำหมักที่จะหาปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย โดยวางทิ้งให้ตกตะกอนและรินเอาแต่ส่วนที่ใสหรือนำไปปั่นตกตะกอนที่ความเร็ว 1,000 g ประมาณ 5 นาที
2. นำน้ำหมักใส่ในบีกเกอร์ 2 ใบ ใบละ 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร วัด pH ของน้ำหมักแล้วติเตรตน้ำหมักด้วยสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟูริกเข้มข้น 0.05 โมลาร์ เขย่าตลอดเวลาจนกระทั่ง pH เป็น 4 จดปริมาตรกรดที่ใช้เพื่อนำไปคำนวณหาค่าความเป็นด่างของน้ำหมักทั้งหมด (total alkalinity) แล้วติเตรตต่อจน pH อยู่ระหว่าง 3.3-3.5
3. ดับสารตัวอย่างให้เดือดเบา ๆ ประมาณ 3 นาที แล้วทิ้งให้เย็นเท่าอุณหภูมิห้องระหว่างนี้ให้ปรับเครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง ด้วยสารละลายมาตรฐานบัฟเฟอร์ pH 4
4. ติเตรตน้ำหมักจากข้อ 3 ด้วยสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 โมลาร์ จน pH ขึ้นเป็น 4 ติเตรตต่อจน pH ขึ้นเป็น 7 จดปริมาตรของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการติเตรตจาก pH 4 ถึง pH 7

การคำนวณ

1. คำนวณค่าความเป็นด่างของสารละลายตัวอย่างน้ำหมัก

ความเป็นด่างทั้งหมด (มิลลิกรัม CaCO_3 ต่อลิตร)

$$= \frac{\text{ปริมาณของกรดซัลฟูริกที่ใช้จน pH เป็น 4 (ลบ.ชม.)} \times 0.1 \times 50 \times 1,000}{\text{ปริมาตรของน้ำหมัก (50 ลูกบาศก์เซนติเมตร)}}$$

$$= \text{ปริมาณของกรดซัลฟูริกที่ใช้จน pH เป็น 4 ลบ.ชม.} \times 100$$

ความเป็นด่างของกรดอินทรีย์ระเหย (มิลลิกรัม CaCO_3 ต่อลิตร)

$$= \frac{\text{ปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้เปลี่ยน pH 4 เป็น 7} \times 0.1 \times 50 \times 1,000}{\text{ปริมาตรของน้ำหมัก (50 ลูกบาศก์เซนติเมตร)}}$$

$$= \text{ปริมาณของโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้เปลี่ยน pH 4 เป็น 7} \times 100$$

การคำนวณหาปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย

1. ถ้าความเป็นด่างของกรดอินทรีย์ระเหยมากกว่า 180 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$(\text{ปริมาณของกรดอินทรีย์ระเหย}) = \text{ความเป็นด่างของกรดอินทรีย์ระเหย} \times 1.5$$

2. ถ้าความเป็นด่างของกรดอินทรีย์ระเข้น้อยกว่า 180 มิลลิกรัมต่อลิตร

$$(\text{ปริมาณของกรดอินทรีย์ระเหย}) = \text{ความเป็นด่างของกรดอินทรีย์ระเหย} \times 1.0$$

การวิเคราะห์องค์ประกอบของกรดอินทรีย์ระเหย

อุปกรณ์ที่ใช้วิเคราะห์องค์ประกอบของกรดอินทรีย์ระเหย

Shimadzu Gas Chromatography Model GC-14A

Flame Ionization Detector (FID)

อุณหภูมิคอลัมน์ 170 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิของ injector port 200 องศาเซลเซียส

ใช้ในโตรเจนเป็น carrier gas ที่อัตราการไหล 50 มิลลิลิตรต่อนาที

วิธีวิเคราะห์

เป็นการหาปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี โดยนำตัวอย่างที่ได้มา 1 มิลลิลิตรผสมกับกรดออกซาลิกเข้มข้น 0.2 นอร์มัล(N) 200 ไมโครลิตรเข้าให้เข้ากันแล้วนำไปปั่นที่ความเร็วรอบ 10,000 g ประมาณ 5 นาที ดูดเอาแต่เฉพาะของเหลวใส่ลงในขวดแก้วที่ใช้กับเครื่อง autoinjector เป็นตัวดูดของเหลวใส่ 1 ไมโครลิตร ฉีดเข้าเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี โดยมีไนโตรเจนเป็น carrier gas และก๊าซที่แยกได้จะเคลื่อนออกจากคอลัมน์ ผ่านเข้าไปใน detector และส่งสัญญาณไปยัง recorder บันทึกเป็น peak area

โดย peak แรกเป็น เอทธานอลต่อไปคือกรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก กรดบิวทีริก กรดแวนิลิก ตามลำดับ

การวิเคราะห์หาปริมาณของของแข็ง

ปริมาณของของแข็งทั้งหมด เป็นปริมาณสารที่เหลืออยู่ในภาชนะหลังจากการระเหยน้ำออกจากน้ำหมักจนหมด โดยนำน้ำหมักปริมาตร 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร ใส่ในถ้วยระเหย และนำไปอบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียสจนน้ำหนักคงที่ ปล่อยให้เย็นในเดสิเคเตอร์ แล้วชั่งหาน้ำหนักของของแข็งในภาชนะนั้น เทียบหาปริมาณของของแข็งทั้งหมด ซึ่งมีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร

วิธีวิเคราะห์

1. การเตรียมจานระเหย จานที่ใช้ต้องอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส ประมาณ 1 ชั่วโมง ปล่อยให้เย็นในเดสิเคเตอร์ แล้วชั่งหาน้ำหนัก
2. เลือกใช้ปริมาตรของน้ำตัวอย่างให้เหมาะสม โดยปกติใช้ 50 หรือ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร
3. ค่อย ๆ รินน้ำตัวอย่างที่ต้องการหาปริมาณของของแข็งทั้งหมดลงในถ้วยระเหยที่ตั้งบนเครื่องอังไอน้ำ เมื่อไอน้ำระเหยออกหมด นำจานระเหยอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 103 ถึง 105 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ ปล่อยให้เย็นในเดสิเคเตอร์
4. ชั่งจานระเหยทันทีที่เย็นลงเท่าอุณหภูมิห้อง น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นคือน้ำหนักของสารทั้งหมดซึ่งคำนวณเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร

การคำนวณ

ปริมาณของของแข็งทั้งหมด(มิลลิกรัมต่อลิตร) = $\frac{\text{น้ำหนักของสารทั้งหมด(มก.)} \times 1,000}{\text{ปริมาตรของน้ำหมักตัวอย่าง(ลบ.ซม.)}}$

ปริมาตรของน้ำหมักตัวอย่าง(ลบ.ซม.)

ปริมาณของของแข็งระเหย เป็นปริมาณของสารที่สลายได้ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ ส่วนตะกอนที่เหลืออยู่ไม่สลายไปเรียกว่าปริมาณสารคงตัว ส่วนใหญ่เป็นสารอนินทรีย์

วิธีวิเคราะห์

1. นำจานระเหยที่วิเคราะห์หาปริมาณของของแข็งทั้งหมดแล้วเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียสจนกระทั่งน้ำหนักคงที่ (ประมาณ 15-20 นาที) ปล่อยให้เย็นในเดสิเคเตอร์
2. ชั่งจานระเหยทันทีที่เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง จะได้น้ำหนักสารคงตัวที่เหลืออยู่ ซึ่งนำไปคำนวณหาปริมาณของของแข็งระเหย

การคำนวณ

$$\text{ปริมาณสารคงตัว(มิลลิกรัมต่อลิตร)} = \frac{\text{น้ำหนักสารคงตัว(มก.)} \times 1,000}{\text{ปริมาตรของน้ำหมักตัวอย่าง(ลบ.ซม.)}}$$

$$\text{ปริมาณสารระเหยทั้งหมด(มิลลิกรัมต่อลิตร)} = \text{ปริมาณสารทั้งหมด} - \text{ปริมาณสารคงตัว}$$

(มก./ล.) (มก./ล.)

การวัดปริมาตรก๊าซชีวภาพ

โดยการวัดปริมาตรของน้ำที่ล้นออกมาเมื่อถูกแทนที่ด้วยก๊าซชีวภาพ

การวิเคราะห์คุณภาพของก๊าซชีวภาพ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพในถังปฏิกรณ์

Shimadzu Gas Chromatography Model GC-9A

Thermal Conductivity Detector (TCD)

80/100 mesh Porapak N.Column

อุณหภูมิคอลัมน์ 70 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิของ injector port 100 องศาเซลเซียส

วิธีวิเคราะห์

เป็นการหาปริมาณก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพ โดยจะเก็บก๊าซจากถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทน โดยใช้หลอดแก้วรูปตัวยูต่อเข้าระหว่างถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทนกับขวดเก็บก๊าซแล้วนำก๊าซที่เก็บได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณก๊าซมีเทนโดยวิธีทางเคมีด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี ใช้syringe ดูดเอาก๊าซตัวอย่างจากหลอดแก้วรูปตัวยูฉีดเข้าไปยัง injector port ก๊าซตัวอย่างจะถูกส่งผ่านเข้าไปในคอลัมน์ซึ่งสามารถแยกก๊าซออกจากกันโดยมีฮีเลียม (He) เป็น carrier gas และก๊าซที่แยกได้จะเคลื่อนออกจากคอลัมน์ผ่านเข้าไปใน detector และส่งสัญญาณไปยัง recorder บันทึกเป็น peak ของโครมาโตแกรมและบอกค่าก๊าซที่แยกได้เป็นร้อยละของก๊าซทั้งหมด โดย peak แรกเป็นอากาศ ต่อไปคือก๊าซมีเทนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ตามลำดับ

บทที่ 3

ผลการวิจัย

1. ผลของความเข้มข้นสารแขวนลอยกากมะเขือเทศต่อขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์สาร

หมักกากมะเขือเทศเพื่อให้ได้กรดอินทรีย์ ตามวิธีการวิจัยบทที่ 2 โดยใช้กากมะเขือเทศแห้งผสมกับหัวเชื้อจุลินทรีย์สำหรับผลิตกรดอินทรีย์ให้มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตรและ 20 กรัมต่อลิตร ให้มีระยะเวลาเก็บกักกากนาน 3 วัน 5 วัน ผลการทดลองพบว่า ที่ระยะเวลาเก็บกักกากนาน 3 วัน อุณหภูมิห้อง เมื่อป้อนสารแขวนลอยกากมะเขือเทศมีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร และ 20 กรัมต่อลิตร น้ำหมักที่กรองได้จะมีปริมาณอินทรีย์สารเท่ากับ 736 และ 1,183 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร และปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยเท่ากับ 936 และ 1,050 มิลลิกรัมต่อลิตร pH เท่ากับ 5.83 และ 5.65 ความเป็นด่างเท่ากับ 974 และ 1181 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถจัดอินทรีย์สารในขั้นตอนนี้ ได้ร้อยละ 41.54 และ 47.59 ของของแข็งทั้งหมด หรือร้อยละ 58.44 และ 52.41 ของของแข็งระเหย ตามลำดับ นอกจากนี้สารตัวกลางที่พบในน้ำหมักที่กรองได้คือกรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก กรดไอโซบิวทีริก กรดบิวทีริก กรดแวลริก และเอทานอล ซึ่งเมื่อใช้สารแขวนลอยกากมะเขือเทศที่มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร และ 20 กรัมต่อลิตร จะให้กรดอะซิติกเท่ากับ 2.16 และ 2.90 มิลลิโมลาร์ กรดโพรพิโอนิกเท่ากับ 2.05 และ 2.37 มิลลิโมลาร์ กรดไอโซบิวทีริก เท่ากับ 2.54 และ 2.61 มิลลิโมลาร์ กรดบิวทีริกเท่ากับ 1.94 และ 2.17 มิลลิโมลาร์ กรดแวลริกเท่ากับ 2.5 และ 2.73 มิลลิโมลาร์ และเอทานอลเท่ากับ 0.69 และ 0.86 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับดังผลแสดงในตาราง 1

เมื่อป้อนสารแขวนลอยกากมะเขือเทศที่มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร และ 20 กรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน อุณหภูมิห้องพบว่า จะให้ปริมาณอินทรีย์สารเท่ากับ 1,000 และ 1,324 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร และปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยเท่ากับ 697 และ 1,052 มิลลิกรัมต่อลิตร pH เท่ากับ 5.63 และ 5.46 ความเป็นด่างเท่ากับ 1,271 และ 1,605 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถจัดอินทรีย์สารในขั้นตอนนี้ ได้ร้อยละ 40.90 และ 43.63 ของของแข็งทั้งหมด หรือร้อยละ 58.93 และ 57.05 ของของแข็งระเหย ตามลำดับ และสารตัวกลางที่พบในน้ำหมักที่กรองได้คือกรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก กรดไอโซบิวทีริก กรดบิวทีริก กรดแวลริก และเอทานอล ซึ่งเมื่อใช้สารแขวนลอยกากมะเขือเทศ 10 กรัมต่อลิตรและ 20 กรัมต่อลิตร จะให้กรดอะซิติกเท่ากับ 2.60 และ 2.78 มิลลิโมลาร์ กรดโพรพิโอนิกเท่ากับ 2.47 และ 2.77 มิลลิโมลาร์ กรดไอโซบิวทีริก 2.35 และ 2.63 มิลลิโมลาร์ กรดบิวทีริก 1.71 และ 2.59 มิลลิโมลาร์ กรดแวลริกเท่ากับ 0

และ 2.15 มิลลิโมลาร์ และเอทานอล 2.19 และ 0.63 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ ดังแสดงในตาราง 2

เมื่อป้อนสารแขวนลอยกากมะเขือเทศที่มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตรและ 20 กรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส พบว่าจะให้ปริมาณอินทรีย์สารเท่ากับ 975 และ 1,151 มิลลิกรัมชีโอดีต่อลิตร และปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยเท่ากับ 892 และ 779 มิลลิกรัมต่อลิตร pH เท่ากับ 5.62 และ 5.42 ความเป็นด่างเท่ากับ 1,257 และ 1,503 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถจัดอินทรีย์สารในขั้นตอนนี้ได้ร้อยละ 37.40 และ 42.48 ของของแข็งทั้งหมด หรือร้อยละ 62.60 และ 56.82 ของของแข็งระเหย ตามลำดับ และสารตัวกลางที่พบในน้ำหมักที่กรองได้คือกรดอะซิติก กรดโพรอิก กรดไอโซบิวทีริก กรดบิวทีริก กรดแวลริก และเอทานอล ซึ่งเมื่อใช้สารแขวนลอยกากมะเขือเทศ 10 กรัมต่อลิตรและ 20 กรัมต่อลิตร จะให้กรดอะซิติกเท่ากับ 2.15 และ 2.68 มิลลิโมลาร์ กรดโพรอิกเท่ากับ 2.32 และ 2.47 มิลลิโมลาร์ กรดไอโซบิวทีริก 3.15 และ 2.81 มิลลิโมลาร์ กรดบิวทีริก 1.86 และ 2.12 มิลลิโมลาร์ กรดแวลริกเท่ากับ 1.46 และ 0 มิลลิโมลาร์ และเอทานอล 0.80 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ ดังแสดงในตาราง 3

เมื่อป้อนสารแขวนลอยกากมะเขือเทศที่มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตรและ 20 กรัมต่อลิตรเดิม ที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส พบว่าจะให้ปริมาณอินทรีย์สารเท่ากับ 978 และ 1,298 มิลลิกรัมชีโอดีต่อลิตร และปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยเท่ากับ 1,080 และ 1,146 มิลลิกรัมต่อลิตร pH เท่ากับ 5.78 และ 5.44 ความเป็นด่างเท่ากับ 1,413 และ 1,830 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถจัดอินทรีย์สารในขั้นตอนนี้ได้ร้อยละ 36.13 และ 37.75 ของของแข็งทั้งหมด หรือร้อยละ 63.87 และ 61.54 ของของแข็งระเหย ตามลำดับ และสารตัวกลางที่พบในน้ำหมักที่กรองได้คือกรดอะซิติก กรดโพรอิก กรดไอโซบิวทีริก กรดบิวทีริก กรดแวลริก และเอทานอล ซึ่งเมื่อใช้สารแขวนลอยกากมะเขือเทศ 10 กรัมต่อลิตรและ 20 กรัมต่อลิตร จะให้กรดอะซิติกเท่ากับ 2.45 และ 2.71 มิลลิโมลาร์ กรดโพรอิกเท่ากับ 2.59 และ 2.74 มิลลิโมลาร์ กรดไอโซบิวทีริก 2.52 และ 2.69 มิลลิโมลาร์ กรดบิวทีริก 1.97 และ 2.83 มิลลิโมลาร์ กรดแวลริกเท่ากับ 3.38 และ 3.39 มิลลิโมลาร์ และเอทานอล 1.08 และ 0.54 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ ดังแสดงในตาราง 4

ตาราง 1 ผลของความเข้มข้นสารแขวนลอยกากมะเขือเทศ ต่อปริมาณอินทรีย์สาร
กรดอินทรีย์ระเหย pH ความเป็นด่าง การขจัดอินทรีย์สาร ชนิดและปริมาณกรดอินทรีย์
ระเหยในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ของการหมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอน
ที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน อุณหภูมิห้อง

พารามิเตอร์	ความเข้มข้นสารแขวนลอยกากมะเขือเทศ (กรัมต่อลิตร)	
	10	20
COD (ม.ก. ซีโอดีต่อลิตร)	736	1183
TVA (ม.ก. ต่อลิตร)	1169	1919
VFA (ม.ก. ต่อลิตร)	936	1050
pH	5.83	5.65
ค่าความเป็นด่าง (ม.ก. ต่อลิตร)	974	1181
สารตัวกลางที่เกิดขึ้น (มิลลิโมลาร์)		
กรดอะซิติก	2.16	2.90
กรดโพรพิโอนิก	2.05	2.37
กรดไอโซบิวทีริก	2.56	2.61
กรดบิวทีริก	1.94	2.17
กรดแวลริก	2.50	2.73
เอทานอล	0.69	0.86
การขจัดอินทรีย์สาร		
ร้อยละของของแข็งทั้งหมด	41.54	47.59
ร้อยละของของแข็งระเหย	58.44	52.41

ตาราง 2 ผลของความเข้มข้นสารแขวนลอยกากมะเขือเทศ ต่อปริมาณอินทรีย์สาร

กรดอินทรีย์ระเหย pH ความเป็นด่าง การขจัดอินทรีย์สาร ชนิดและปริมาณกรดอินทรีย์
ระเหยในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ของการหมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอน
ที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน อุณหภูมิห้อง

พารามิเตอร์	ความเข้มข้นสารแขวนลอยกากมะเขือเทศ (กรัมต่อลิตร)	
	10	20
COD (ม.ก. ซีไอดีต่อลิตร)	1000	1324
TVA (ม.ก. ต่อลิตร)	1589	2286
VFA (ม.ก. ต่อลิตร)	697	1052
pH	5.63	5.46
ค่าความเป็นด่าง (ม.ก. ต่อลิตร)	1271	1605
สารตัวกลางที่เกิดขึ้น (มิลลิโมลาร์)		
กรดอะซิติก	2.60	2.78
กรดโพรพิโอนิก	2.47	2.77
กรดไอโซบิวทีริก	2.35	2.63
กรดบิวทีริก	1.71	2.59
กรดแวลีลิก	-	2.15
เอทานอล	2.19	0.63
การขจัดอินทรีย์สาร		
ร้อยละของของแข็งทั้งหมด	40.90	43.63
ร้อยละของของแข็งระเหย	58.93	57.05

ตาราง 3 ผลของความเข้มข้นสารแขวนลอยกากมะเชื้อเทศ ต่อปริมาณอินทรีย์สาร
กรดอินทรีย์ระเหย pH ความเป็นด่าง การขจัดอินทรีย์สาร ชนิดและปริมาณกรดอินทรีย์
ระเหยในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ของการหมักกากมะเชื้อเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอน
ที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส

พารามิเตอร์	ความเข้มข้นสารแขวนลอยกากมะเชื้อเทศ (กรัมต่อลิตร)	
	10	20
COD (ม.ก. ซีไอดีต่อลิตร)	975	1151
TVA (ม.ก. ต่อลิตร)	1653	1977
VFA (ม.ก. ต่อลิตร)	892	779
pH	5.62	5.42
ค่าความเป็นด่าง (ม.ก. ต่อลิตร)	1257	1503
สารตัวกลางที่เกิดขึ้น (มิลลิโมลาร์)		
กรดอะซิติก	2.15	2.68
กรดโพรพิโอนิก	2.32	2.47
กรดไอโซบิวทีริก	3.15	2.81
กรดบิวทีริก	1.86	2.12
กรดแวลีลิก	1.46	-
เอทานอล	0.80	-
การขจัดอินทรีย์สาร		
ร้อยละของของแข็งทั้งหมด	37.40	42.48
ร้อยละของของแข็งระเหย	62.60	56.82

ตาราง 4 ผลของความเข้มข้นสารแขวนลอยกากมะเขือเทศ ต่อปริมาณอินทรีย์สาร
กรดอินทรีย์ระเหย pH ความเป็นด่าง การขจัดอินทรีย์สาร ชนิดและปริมาณกรดอินทรีย์
ระเหยในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ของการหมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอน
ที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส

พารามิเตอร์	ความเข้มข้นสารแขวนลอยกากมะเขือเทศ (กรัมต่อลิตร)	
	10	20
COD (ม.ก. ซีโอดีต่อลิตร)	978	1298
TVA (ม.ก. ต่อลิตร)	1683	2679
VFA (ม.ก. ต่อลิตร)	1080	1146
pH	5.78	5.44
ค่าความเป็นด่าง (ม.ก. ต่อลิตร)	1413	1830
สารตัวกลางที่เกิดขึ้น (มิลลิโมลาร์)		
กรดอะซิติก	2.45	2.71
กรดโพรพิโอนิก	2.59	2.74
กรดไอโซบิวทีริก	2.52	2.69
กรดบิวทีริก	1.97	2.83
กรดแวกีติก	3.38	3.39
เอทานอล	1.08	0.54
การขจัดอินทรีย์สาร		
ร้อยละของของแข็งทั้งหมด	36.13	37.75
ร้อยละของของแข็งระเหย	63.87	61.54

2.ผลของระยะเวลาเก็บกักกากต่อขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์

เมื่อใช้กากมะเขือเทศแห้งผสมหัวเชื้อจุลินทรีย์(ซึ่งเตรียมตามวิธีการวิจัยในบทที่ 2)ให้ความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร แล้วทำการทดลองที่อุณหภูมิห้องโดยให้มีระยะเวลาเก็บกักกากนาน 3 วัน และ 5 วัน นำน้ำหมักที่กรองได้มาวิเคราะห์หาปริมาณอินทรีย์สารปริมาณของแข็งทั้งหมด ปริมาณของแข็งระเหย ปริมาณสารตัวกลางที่เกิดขึ้น กรดอินทรีย์ระเหย pH และค่าความเป็นด่าง ผลการทดลองพบว่า น้ำหมักที่ได้จากการหมักที่ระยะเวลาเก็บกักกากนาน 3 วัน และ 5 วัน มีปริมาณอินทรีย์สารเท่ากับ 736 และ 1,000 มิลลิกรัมชีโอดีต่อลิตร ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยเท่ากับ 936 และ 697 มิลลิกรัมต่อลิตร pH เท่ากับ 5.83 และ 5.63 ความเป็นด่างเท่ากับ 974 และ 1271 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถจัดอินทรีย์สารในขั้นตอนนี้ได้ร้อยละ 41.54 และ 40.90 ของของแข็งทั้งหมดหรือร้อยละ 58.44 และ 58.93 ของของแข็งระเหยตามลำดับ และสารตัวกลางที่พบในน้ำหมักคือกรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก กรดไอโซบิวทีริก กรดบิวทีริก กรดแวลริก และเอทานอล โดยน้ำหมักที่ได้จากการหมักกากมะเขือเทศที่มีระยะเวลาเก็บกักกากนาน 3 วัน และ 5 วัน จะให้กรดอะซิติกเท่ากับ 2.16 และ 2.60 มิลลิโมลาร์ กรดโพรพิโอนิก 2.05 และ 2.47 มิลลิโมลาร์ กรดไอโซบิวทีริก 2.54 และ 2.35 มิลลิโมลาร์ กรดบิวทีริก 1.94 และ 1.71 มิลลิโมลาร์ กรดแวลริก 2.50 และ 0 มิลลิโมลาร์ เอทานอล 0.69 และ 2.19 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ ดังแสดงในตาราง 5

เมื่อป้อนสารแขวนลอยกากมะเขือเทศที่มีความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร แล้วทำการทดลองที่อุณหภูมิห้องโดยมีระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน และ 5 วัน นำน้ำหมักที่กรองได้มาวิเคราะห์หาปริมาณอินทรีย์สาร ปริมาณของแข็งทั้งหมด ปริมาณของแข็งระเหย ปริมาณสารตัวกลางที่เกิดขึ้น กรดอินทรีย์ระเหย pH และค่าความเป็นด่าง ผลการทดลองพบว่า น้ำหมักที่กรองได้จากการหมักที่ระยะเวลาเก็บกักกาก นาน 3 วัน และ 5 วัน มีปริมาณอินทรีย์สารเท่ากับ 1,183 และ 1,324 มิลลิกรัมชีโอดีต่อลิตร ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยเท่ากับ 1,050 และ 1,052 มิลลิกรัมต่อลิตร pH เท่ากับ 5.65 และ 5.46 ความเป็นด่างเท่ากับ 1,181 และ 1,605 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถจัดอินทรีย์สารในขั้นตอนนี้ได้ร้อยละ 45.59 และ 43.63 ของของแข็งทั้งหมด หรือร้อยละ 52.41 และ 57.05 ของของแข็งระเหย และสารตัวกลางที่พบในน้ำหมักคือกรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก กรดไอโซบิวทีริก กรดบิวทีริก กรดแวลริก และเอทานอล โดยน้ำหมักที่ได้จากการหมักกากมะเขือเทศที่มีระยะเวลาเก็บกักกากนาน 3 วัน และ 5 วัน จะให้กรดอะซิติกเท่ากับ 2.90 และ 3.78 มิลลิโมลาร์ กรดโพรพิโอนิกเท่ากับ 2.37 และ 2.77 มิลลิโมลาร์ กรดไอโซบิวทีริก 2.61 และ 2.63 มิลลิโมลาร์

กรดบิวทีริก 2.17 และ 2.59 มิลลิโมลาร์ กรดแวลริก 2.73 และ 2.15 มิลลิโมลาร์ และ เอทานอล 0.86 และ 0.63 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ ดังแสดงในตาราง 6

เมื่อป้อนสารแขวนลอยกากมะเขือเทศที่มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร ศึกษาขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส โดยมีระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน และ 5 วัน ผลการทดลองพบว่าน้ำหมักที่กรองได้จากการหมักที่ระยะเวลาเก็บกักกากนาน 3 วัน และ 5 วัน มีปริมาณอินทรีย์สารเท่ากับ 975 และ 978 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยเท่ากับ 892 และ 1,080 มิลลิกรัมต่อลิตร pH เท่ากับ 5.62 และ 5.78 ความเป็นด่างเท่ากับ 1,257 และ 1,413 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถจัดอินทรีย์สารในขั้นตอนนี้ได้ร้อยละ 37.40 และ 36.13 ของของแข็งทั้งหมด หรือร้อยละ 62.60 และ 63.87 ของของแข็งระเหย และสารตัวกลางที่พบในน้ำหมักคือกรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก กรดไอโซบิวทีริก กรดบิวทีริก กรดแวลริก และเอทานอล โดยน้ำหมักที่ได้จากการหมักกากมะเขือเทศที่มีระยะเวลาเก็บกักกากนาน 3 วัน และ 5 วัน จะให้กรดอะซิติกเท่ากับ 2.15 และ 2.45 มิลลิโมลาร์ กรดโพรพิโอนิกเท่ากับ 2.32 และ 2.59 มิลลิโมลาร์ กรดไอโซบิวทีริก 3.15 และ 2.52 มิลลิโมลาร์ กรดบิวทีริก 1.86 และ 1.97 มิลลิโมลาร์ กรดแวลริก 1.46 และ 3.38 มิลลิโมลาร์ เอทานอล 0.80 และ 1.08 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ ดังแสดงในตาราง 7

เมื่อป้อนสารแขวนลอยกากมะเขือเทศที่มีความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ศึกษาขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส โดยมีระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน และ 5 วัน พบว่าน้ำหมักที่กรองได้มีปริมาณอินทรีย์สารเท่ากับ 1,151 และ 1,298 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยเท่ากับ 1,977 และ 2,679 มิลลิกรัมต่อลิตร pH เท่ากับ 5.42 และ 5.44 ความเป็นด่างเท่ากับ 1,503 และ 1,830 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถจัดอินทรีย์สารในขั้นตอนนี้ได้ร้อยละ 42.48 และ 37.75 ของของแข็งทั้งหมด หรือร้อยละ 56.82 และ 61.54 ของของแข็งระเหย และสารตัวกลางที่พบในน้ำหมักที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน คือกรดอะซิติก 2.68 มิลลิโมลาร์ กรดโพรพิโอนิก 2.47 มิลลิโมลาร์ กรดไอโซบิวทีริก 2.81 มิลลิโมลาร์ กรดบิวทีริก 2.12 มิลลิโมลาร์ น้ำหมักที่ได้จากการหมักกากมะเขือเทศที่มีระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน จะให้กรดอะซิติก เท่ากับ 2.71 มิลลิโมลาร์ กรดโพรพิโอนิกเท่ากับ 2.74 มิลลิโมลาร์ กรดไอโซบิวทีริก 2.69 มิลลิโมลาร์ กรดบิวทีริก 2.23 มิลลิโมลาร์ กรดแวลริก 3.39 มิลลิโมลาร์ และ เอทานอล 0.54 มิลลิโมลาร์ ดังแสดงในตาราง 8

จากผลการทดลองในตาราง 5 และ 6 ที่อุณหภูมิห้อง เมื่อใช้สารแขวนลอยกากมะเขือเทศความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน จะให้ปริมาณกรดอะซิติก

กรดโพรฟิออนิก กรดไอโซบิวทีริก กรดบิวทีริก สูงกว่าที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน และเมื่อใช้สารแขวนลอยกากมะเขือเทศ ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน จะให้ปริมาณกรดอะซิดิก กรดโพรฟิออนิก กรดไอโซบิวทีริก กรดบิวทีริก กรดแวลีลิกสูงกว่าที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน

จากผลการทดลองในตาราง 7 และ 8 ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เมื่อใช้สารแขวนลอยกากมะเขือเทศ ความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตรที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วันจะให้ปริมาณกรดอะซิดิก กรดโพรฟิออนิก กรดบิวทีริก กรดแวลีลิก สูงกว่าที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน แต่จะให้กรดไอโซบิวทีริกน้อยกว่าที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน แต่เมื่อใช้สารแขวนลอยกากมะเขือเทศ ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน จะให้ปริมาณกรดอะซิดิก กรดโพรฟิออนิก กรดบิวทีริก สูงกว่าที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน แต่ให้กรดไอโซบิวทีริกน้อยกว่าที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน และจะพบกรดแวลีลิกที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน เท่านั้น



ตาราง 5 ผลของระยะเวลาเก็บกักกากต่อปริมาณอินทรีย์สาร กรดอินทรีย์ระเหย pH
ความเป็นด่าง การขจัดอินทรีย์สาร ชนิดและปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย ในขั้นตอน
การผลิตกรดอินทรีย์ของการหมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอนที่มีความ
เข้มข้นสารแขวนลอยกากมะเขือเทศ 10 กรัมต่อลิตร อุณหภูมิห้อง

พารามิเตอร์	ระยะเวลาเก็บกักกาก (วัน)	
	3	5
COD(ม.ก. ซีโอดี ต่อลิตร)	736	1000
TVA (ม.ก. ต่อลิตร)	1169	1589
VFA (ม.ก. ต่อลิตร)	936	697
pH	5.83	5.63
ค่าความเป็นด่าง(ม.ก. ต่อลิตร)	974	1271
สารตัวกลางที่เกิดขึ้น (มิลลิโมลาร์)		
กรดอะซิติก	2.16	2.60
กรดโพรพิโอนิก	2.05	2.47
กรดไอโซบิวทีริก	2.54	2.35
กรดบิวทีริก	1.94	1.71
กรดแวลริก	2.50	0
เอทานอล	0.69	2.19
การขจัดอินทรีย์สาร		
ร้อยละของของแข็งทั้งหมด	41.54	40.90
ร้อยละของของแข็งระเหย	58.44	58.93

ตาราง 6 ผลของระยะเวลาเก็บกักกากต่อปริมาณอินทรีย์สาร กรดอินทรีย์ระเหย pH
 ความเป็นด่าง การขจัดอินทรีย์สาร ชนิดและปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย ในขั้นตอน
 การผลิตกรดอินทรีย์ของการหมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอนที่มีความ
 เข้มข้นสารแขวนลอยกากมะเขือเทศ 20 กรัมต่อลิตร อุณหภูมิห้อง

พารามิเตอร์	ระยะเวลาเก็บกักกาก (วัน)	
	3	5
COD(ม.ก. ซีโอดี ต่อลิตร)	1183	1324
TVA (ม.ก. ต่อลิตร)	1919	2286
VFA (ม.ก. ต่อลิตร)	1050	1052
pH	5.65	5.46
ค่าความเป็นด่าง(ม.ก. ต่อลิตร)	1181	1605
สารตัวกลางที่เกิดขึ้น (มิลลิโมลาร์)		
กรดอะซิติก	2.90	3.78
กรดโพรพิโอนิก	2.37	2.77
กรดไอโซบิวทีริก	2.61	2.63
กรดบิวทีริก	2.17	2.59
กรดแวลริก	2.73	2.15
เอทานอล	0.86	0.63
การขจัดอินทรีย์สาร		
ร้อยละของของแข็งทั้งหมด	45.59	43.63
ร้อยละของของแข็งระเหย	52.41	57.05

ตาราง 7 ผลของระยะเวลาเก็บกักกากต่อปริมาณอินทรีย์สาร กรดอินทรีย์ระเหย pH
ความเป็นด่าง การขจัดอินทรีย์สาร ชนิดและปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย ในขั้นตอน
การผลิตกรดอินทรีย์ของการหมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอนที่มีความ
เข้มข้นสารแขวนลอยกากมะเขือเทศ 10 กรัมต่อลิตร อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส

พารามิเตอร์	ระยะเวลาเก็บกักกาก (วัน)	
	3	5
COD(ม.ก. ซีไอดี ต่อลิตร)	975	978
TVA (ม.ก. ต่อลิตร)	1653	1683
VFA (ม.ก. ต่อลิตร)	892	1080
pH	5.62	5.78
ค่าความเป็นด่าง(ม.ก. ต่อลิตร)	1257	1413
สารตัวกลางที่เกิดขึ้น (มิลลิโมลาร์)		
กรดอะซิติก	2.15	2.45
กรดโพรพิโอนิก	2.32	2.59
กรดไอโซบิวทีริก	3.15	2.52
กรดบิวทีริก	1.86	1.97
กรดแวลริก	1.46	3.38
เอทานอล	0.80	1.08
การขจัดอินทรีย์สาร		
ร้อยละของของแข็งทั้งหมด	37.40	36.13
ร้อยละของของแข็งระเหย	62.60	63.87

ตาราง 8 ผลของระยะเวลาเก็บกักกากต่อปริมาณอินทรีย์สาร กรดอินทรีย์ระเหย pH
ความเป็นด่าง การขจัดอินทรีย์สาร ชนิดและปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย ในขั้นตอน
การผลิตกรดอินทรีย์ของการหมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอนที่มีความ
เข้มข้นสารแขวนลอยกากมะเขือเทศ 20 กรัมต่อลิตร อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส

พารามิเตอร์	ระยะเวลาเก็บกักกาก (วัน)	
	3	5
COD(ม.ก. ซีไอดี ต่อลิตร)	1151	1298
TVA (ม.ก. ต่อลิตร)	1977	2679
VFA (ม.ก. ต่อลิตร)	779	1146
pH	5.42	5.44
ค่าความเป็นด่าง(ม.ก. ต่อลิตร)	1503	1830
สารตัวกลางที่เกิดขึ้น (มิลลิโมลาร์)		
กรดอะซิติก	2.68	2.71
กรดโพรพิโอนิก	2.47	2.74
กรดไอโซบิวทีริก	2.81	2.69
กรดบิวทีริก	2.12	2.23
กรดแวลีริก	0	3.39
เอทานอล	0	0.54
การขจัดอินทรีย์สาร		
ร้อยละของของแข็งทั้งหมด	42.48	37.75
ร้อยละของของแข็งระเหย	56.82	61.54

3. ผลของอุณหภูมิต่อขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ที่มีระยะเวลาเก็บกักกากต่าง ๆ

หมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอนโดยป้อนสารแขวนลอยกากมะเขือเทศที่มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ให้มีระยะเวลาเก็บกักกาก นาน 3 วัน และ 5 วัน ทดลองที่อุณหภูมิต่าง ๆ กันคือที่ อุณหภูมิห้อง และ 37 องศาเซลเซียส โดยเริ่มทำการหมักที่อุณหภูมิห้องประมาณ 2 เดือน จากนั้นจึงเพิ่มอุณหภูมิของถังปฏิกรณ์เป็น 37 องศาเซลเซียส ดังวิธีการวิจัยในบทที่ 2 หลังจากเพิ่มอุณหภูมิถังปฏิกรณ์ได้ตามต้องการแล้ว จะใช้เวลาปรับสภาพถังปฏิกรณ์ต่อไปอีกประมาณ 30 วัน จากนั้นจึงเริ่มเก็บข้อมูลการทดลองผลการทดลองพบว่า ที่ความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน น้ำหมักที่กรองได้มีปริมาณอินทรีย์สารเท่ากับ 736 และ 975 มิลลิกรัมชีโอดีต่อลิตรและปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยเท่ากับ 936 และ 892 มิลลิกรัมต่อลิตร pH เท่ากับ 5.83 และ 5.62 และค่าความเป็นด่างเท่ากับ 974 และ 1257 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถจัดอินทรีย์สารในขั้นตอนนี้ได้ร้อยละ 41.54 และ 37.40 ของของแข็งทั้งหมดหรือร้อยละ 58.44 และ 62.60 ของของแข็งระเหย ตามลำดับ ดังแสดงในตาราง 9 ที่ความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน ทดลองที่อุณหภูมิห้องและ 37 องศาเซลเซียส น้ำหมักที่กรองได้มีปริมาณอินทรีย์สารเท่ากับ 1,000 และ 978 มิลลิกรัมชีโอดีต่อลิตรและปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยเท่ากับ 697 และ 1,083 มิลลิกรัมต่อลิตร pH เท่ากับ 5.63 และ 5.78 และค่าความเป็นด่างเท่ากับ 1,271 และ 1,413 มิลลิกรัมต่อลิตรสามารถจัดอินทรีย์สารในขั้นตอนนี้ได้ร้อยละ 40.90 และ 36.13 ของของแข็งทั้งหมดหรือร้อยละ 58.93 และ 63.87 ของของแข็งระเหยตามลำดับ ดังแสดงในตาราง 10

ที่ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร มีระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน ทดลองที่อุณหภูมิห้อง และ 37 องศาเซลเซียส น้ำหมักที่กรองได้มีปริมาณอินทรีย์สารเท่ากับ 1,183 และ 1,151 มิลลิกรัมชีโอดีต่อลิตรและปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยเท่ากับ 1,050 และ 779 มิลลิกรัมต่อลิตร pH เท่ากับ 5.65 และ 5.42 และค่าความเป็นด่างเท่ากับ 1,181 และ 1,503 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถจัดอินทรีย์สารในขั้นตอนนี้ได้ร้อยละ 44.59 และ 42.48 ของของแข็งทั้งหมดหรือร้อยละ 52.41 และ 56.82 ของของแข็งระเหย ตามลำดับ ดังแสดงในตาราง 11 ที่ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วันทดลองที่อุณหภูมิห้อง และ 37 องศาเซลเซียส น้ำหมักที่กรองได้มีปริมาณอินทรีย์สารเท่ากับ 1,324 และ 1,298 มิลลิกรัมชีโอดีต่อลิตรและปริมาณ กรดอินทรีย์ระเหยเท่ากับ 1,052 และ 1,146 มิลลิกรัมต่อลิตร pH เท่ากับ 5.46 และ 5.44 และค่าความเป็นด่างเท่ากับ 1,605 และ 1,830 มิลลิกรัมต่อลิตรสามารถจัดอินทรีย์สารในขั้นตอนนี้ได้ร้อยละ 43.63 และ 37.75 ของของแข็งทั้งหมดหรือร้อยละ 57.05 และ 61.54 ของของแข็งระเหย ตามลำดับ ดังแสดงในตาราง 12

ตาราง 9 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณอินทรีย์สาร กรดอินทรีย์ระเหย pH ความเป็นด่าง และการจัดอินทรีย์สารในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ของการหมักกากมะเขือเทศ แบบ อับอากาศสองขั้นตอนที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน และใช้สารแขวนลอยกากมะเขือเทศ ที่มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร

อุณหภูมิที่ทำการหมัก (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิห้อง	37
COD (ม.ก. ซีไอดีต่อลิตร)	736	975
TVA (ม.ก./ลิตร)	1169	1653
VFA (ม.ก./ลิตร)	936	892
pH	5.83	5.62
T-alk (ม.ก./ลิตร)	974	1257
การจัดอินทรีย์สาร		
ร้อยละของของแข็งทั้งหมด	41.54	37.40
ร้อยละของของแข็งระเหย	58.44	62.60

ตาราง 10 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณอินทรีย์สาร กรดอินทรีย์ระเหย pH ความเป็นด่าง และการจัดอินทรีย์สารในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ของการหมักกากมะเขือเทศ แบบอับอากาศสองขั้นตอนที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน และใช้สารแขวนลอยกากมะเขือเทศที่มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร

อุณหภูมิที่ทำการหมัก (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิห้อง	37
COD (ม.ก. ซีไอดีต่อลิตร)	1,000	978
TVA (ม.ก./ลิตร)	1,589	1,683
VFA (ม.ก./ลิตร)	697	1,083
pH	5.63	5.78
T-alk (ม.ก./ลิตร)	1,271	1,413
การจัดอินทรีย์สาร		
ร้อยละของของแข็งทั้งหมด	40.90	36.13
ร้อยละของของแข็งระเหย	58.93	63.87

ตาราง 11 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณอินทรีย์สาร กรดอินทรีย์ระเหย pH ความเป็นด่าง และการจัดอินทรีย์สารในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ของการหมักกากมะเขือเทศ แบบ อับอากาศสองขั้นตอนที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน และใช้สารแขวนลอยกากมะเขือเทศ ที่มีความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร

อุณหภูมิที่ทำการหมัก (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิห้อง	37
COD (ม.ก. ซีไอดีต่อลิตร)	1,183	1,151
TVA (ม.ก./ลิตร)	1,919	1,977
VFA (ม.ก./ลิตร)	1,050	779
pH	5.65	5.42
T-alk (ม.ก./ลิตร)	1,181	1,503
การจัดอินทรีย์สาร		
ร้อยละของของแข็งทั้งหมด	44.59	42.48
ร้อยละของของแข็งระเหย	52.41	56.82

ตาราง 12 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณอินทรีย์สาร กรดอินทรีย์ระเหย pH ความเป็นด่าง และการจัดอินทรีย์สาร ในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ของการหมักกากมะเขือเทศ แบบ อับอากาศสองขั้นตอนที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน และใช้สารแขวนลอยกากมะเขือเทศ ที่มีความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร

อุณหภูมิที่ทำการหมัก (องศาเซลเซียส)	อุณหภูมิห้อง	37
COD (ม.ก. ซีไอดีต่อลิตร)	1,324	1,298
TVA (ม.ก./ลิตร)	2,286	2,679
VFA (ม.ก./ลิตร)	1,052	1,146
pH	5.46	5.44
T-alk (ม.ก./ลิตร)	1,605	1,830
การจัดอินทรีย์สาร		
ร้อยละของของแข็งทั้งหมด	43.63	37.75
ร้อยละของของแข็งระเหย	57.05	61.54

ตาราง 13 ผลของความเข้มข้นสารแขวนลอยกากมะเขือเทศต่อปริมาณอินทรีย์สาร กรดอินทรีย์
ระเหย pHความเป็นด่าง การขจัดอินทรีย์สาร ชนิด และปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย ในขั้นตอน
การผลิตกรดอินทรีย์ ของการหมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอน

	ความเข้มข้นสารแขวนลอยกากมะเขือเทศ(กรัมต่อลิตร)ระยะเวลาเก็บกัก และอุณหภูมิที่ทดลอง							
พารามิเตอร์	3 วัน				5 วัน			
	10		20		10		20	
	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2
COD(มก.ซีไอดี ต่อลิตร)	736	975	1183	1151	1,000	978	1324	1298
TVA(มก.ต่อลิตร)	1169	1653	1919	1977	1589	1683	2286	2679
VFA(มก.ต่อลิตร)	936	892	1050	779	697	1080	1052	1146
pH	5.83	5.62	5.65	5.42	5.63	5.78	5.46	5.44
ค่าความเป็นด่าง (มก.ต่อลิตร)	974	1257	1181	1503	1271	1413	1605	1830
การขจัดอินทรีย์สาร								
ร้อยละของของแข็งทั้งหมด	41.54	37.40	47.59	42.48	40.90	36.13	43.63	37.75
ร้อยละของของแข็งระเหย	58.44	62.60	52.41	56.82	58.93	63.87	57.05	61.54

ตาราง 13 (ต่อ)

	ความเข้มข้นสารแขวนลอยกากมะเขือเทศ(กรัมต่อลิตร)ระยะ เวลาเก็บกักและอุณหภูมิที่ทดลอง							
พารามิเตอร์	3 วัน				5 วัน			
	10		20		10		20	
	T1	T2	T1	T2	T1	T2	T1	T2
สารตัวกลางที่เกิดขึ้น(มิลลิโมลาร์)								
กรดอะซิติค	2.16	2.15	2.9	2.68	2.60	2.45	2.78	2.71
กรดโพรพิโอนิก	2.05	2.32	2.37	2.47	2.47	2.59	2.77	2.74
กรดไอโซบิวทีริก	2.54	3.15	2.61	2.81	2.35	2.52	2.63	2.69
กรดบิวทีริก	1.94	1.86	2.17	2.12	1.71	1.97	2.59	2.83
กรดแวลีลิก	2.5	1.46	2.73	0	0	3.38	2.15	3.39
เอทานอล	0.69	0.80	0.86	0	2.19	1.08	0.63	0.54

หมายเหตุ T1หมายถึง ถึงปฏิกรณ์ผลิตกรดอินทรีย์ที่อุณหภูมิห้อง T2 หมายถึง ถึงปฏิกรณ์ผลิตกรดอินทรีย์
ที่อุณหภูมิ37 องศาเซลเซียส

4.ผลของระยะเวลาเก็บกักและอัตราการป้อนอินทรีย์สารในขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทนต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ

นำน้ำหมักจากถังปฏิกรณ์ผลิตกรดอินทรีย์ที่มีระยะเวลาเก็บกักจาก 5 วัน อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 20 กรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิห้อง และ 37 องศาเซลเซียส มาปรับความเข้มข้นของอินทรีย์สาร แล้วป้อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทนแบบกึ่งต่อเนื่อง โดยให้มีอัตราการป้อนอินทรีย์สารเป็น 0.5 กรัมชีโอดีต่อวัน และระยะเวลาเก็บกักในขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทนนี้เป็น 3 วัน และ 5 วัน ทำการทดลองประมาณ 1 เดือน จึงนำน้ำหมักที่ได้มาวิเคราะห์ผลการทดลองในตาราง 14 แสดงให้เห็นว่าเมื่อใช้น้ำหมักจากถังปฏิกรณ์ผลิตกรดอินทรีย์ที่อุณหภูมิห้องอัตราการป้อนอินทรีย์สาร 0.5 กรัมชีโอดีต่อวัน มีระยะเวลาเก็บกัก 3 วัน และ 5 วัน ปริมาตรของก๊าซชีวภาพจะสูงขึ้นจาก 0.26 เป็น 0.30 ลิตรต่อวัน ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.52 และ 0.60 ลิตรต่อกรัมชีโอดีที่เติม หรือ เท่ากับ 1.18 และ 0.78 ลิตรต่อกรัมชีโอดีที่ถูกทำลาย การขจัดอินทรีย์สารในรูปชีโอดีเพิ่มขึ้นเท่ากับร้อยละ 44.76 และ 76.45 การขจัดกรดอินทรีย์ระเหยเท่ากับร้อยละ 87.39 และ 93.65 ค่า pH ของน้ำหมักที่ออกจากถังปฏิกรณ์เท่ากับ 7.33 และ 7.32 องค์ประกอบของก๊าซมีเทนในก๊าซผสมระหว่าง CH_4 และ CO_2 เท่ากับร้อยละ 51.42 และ 61.28 ค่าความเป็นด่างเท่ากับ 1,261 และ 1,103 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ

เมื่อใช้น้ำหมักจากถังปฏิกรณ์ผลิตกรดอินทรีย์ ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 0.5 กรัมชีโอดีต่อวัน มีระยะเวลาเก็บกัก 3 วัน และ 5 วัน ปริมาตรของก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.11 และ 0.28 ลิตรต่อวัน ประสิทธิภาพในการผลิต ก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.22 และ 0.56 ลิตรต่อกรัมชีโอดีที่เติม หรือ เท่ากับ 0.41 และ 0.77 ลิตร ต่อกรัมชีโอดีที่ถูกทำลาย การขจัดอินทรีย์สารในรูปชีโอดีเท่ากับร้อยละ 36.99 และ 73.12 การขจัดกรดอินทรีย์ระเหยเท่ากับร้อยละ 80.6 และ 93.21 ค่า pH ของน้ำหมักที่ออกจากถังปฏิกรณ์เท่ากับ 7.32 และ 7.33 องค์ประกอบของก๊าซมีเทนในก๊าซผสมระหว่าง CH_4 และ CO_2 เท่ากับร้อยละ 56.36 และ 73.40 ค่าความเป็นด่างเท่ากับ 1,379 และ 1,238 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับจะเห็นว่าปริมาณก๊าซชีวภาพ ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพต่อกรัมชีโอดีที่เติม การขจัดอินทรีย์สารในรูปชีโอดี และการขจัดกรดอินทรีย์ระเหย จะสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาเก็บกักนานขึ้น แต่เมื่อเทียบที่อุณหภูมิต่างกัน ระยะเวลาเก็บกักเดียวกันพบว่า น้ำหมักที่อุณหภูมิห้องจะให้ปริมาณก๊าซชีวภาพ และประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ (ลิตรต่อกรัมชีโอดีที่เติม) สูงกว่าถังปฏิกรณ์ที่ใช้น้ำหมักที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส

ตาราง 14 ผลของระยะเวลาเก็บกักในขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทนต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ

พารามิเตอร์	HRT 3วัน		HRT 5วัน	
	OLR 0.5 กรัมชีโอดี/วัน		OLR 0.5 กรัมชีโอดี/วัน	
	T1	T2	T1	T2
ปริมาตรก๊าซชีวภาพ(ลิตร/วัน)	0.26	0.11	0.30	0.28
ปริมาตรก๊าซชีวภาพ(ลิตร/ลิตร/วัน)	0.07	0.03	0.09	0.08
ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพ (ลิตร/กรัมชีโอดีที่เติม)	0.52	0.22	0.60	0.56
(ลิตร/กรัมชีโอดีที่ถูกทำลาย)	1.18	0.41	0.78	0.77
COD reduction (ร้อยละ)	44.76	36.99	76.45	73.12
TVA reduction(ร้อยละ)	87.39	80.6	93.65	93.21
ค่าความเป็นด่าง(ม.ก./ลิตร)	1261	1379	1103	1238
pH	7.33	7.32	7.32	7.33
ร้อยละของก๊าซมีเทนในก๊าซผสม	51.42	56.36	61.28	73.40

หมายเหตุ T1หมายถึง ถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทนที่ใช้น้ำหมักกรดอินทรีย์จากขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ที่อุณหภูมิห้อง

T2หมายถึง ถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทนที่ใช้น้ำหมักกรดอินทรีย์จากขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ที่อุณหภูมิ37 องศาเซลเซียส

บทที่ 4

สรุปอภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

ในกระบวนการหมักแบบอับอากาศสองขั้นตอนเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพมีจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซชีวภาพอยู่ 2 พวก คือ non- methanogenic bacteria ซึ่งเจริญได้ดีในช่วง pH กว้างคือระหว่าง 3.5 - 6.5 อีกกลุ่มหนึ่งคือ methanogenic bacteria ซึ่งเจริญได้ดีในช่วง pH ที่เป็นกลางคือประมาณ 7.0-7.8 และมีอัตราการเจริญช้ากว่าพวกแรก ดังนั้นในการศึกษาจึงแยกเป็น 2 ขั้นตอน คือขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ pH ประมาณ 4.0-6.5 และ ขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทน pH ประมาณ 7.0-7.5 งานวิจัยนี้ศึกษาผลของความเข้มข้นสารแขวนลอยกากมะเขือเทศ ระยะเวลาเก็บกักกากและอุณหภูมิต่อชนิดและปริมาณสารตัวกลางในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ ผลของระยะเวลาเก็บกักต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ จากการหมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอนในถังปฏิกรณ์การผลิตกรดอินทรีย์ที่มีปริมาตรใช้งาน 1.5 ลิตร ใช้หัวเชื้อจุลินทรีย์กลุ่มที่ผลิตกรดอินทรีย์จากน้ำหมักมูลไก่ผสมกับน้ำให้มีความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร กรอง และ เอน้ำหมักมูลไก่ที่กรองได้มาผสมกับกากมะเขือเทศให้มีความเข้มข้นของกากมะเขือเทศเป็น 10 กรัมต่อลิตรและ 20 กรัมต่อลิตร เติมน้ำในถังปฏิกรณ์เพื่อเป็นวัตถุดิบในการหมักโดยป้อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์แบบกึ่งต่อเนื่อง แล้วศึกษาผลต่างๆ ในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ ต่อจากนั้นนำน้ำหมักกรดอินทรีย์ที่ได้จากขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ไปเป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตก๊าซมีเทน โดยนำมาปรับ pH จนเป็น 7.0 ก่อนเติมน้ำในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทนในการเตรียมถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทนเพื่อเพิ่มปริมาณเชื้อจุลินทรีย์กลุ่ม methanogen นั้นจะใช้สารละลายโซเดียมอะซิเตต เข้มข้นร้อยละ 0.1 ป้อนเป็นแหล่งคาร์บอนแก่กลุ่มจุลินทรีย์โดยตรงเพื่อให้เชื้อจุลินทรีย์เพิ่มปริมาณได้อย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นจึงนำน้ำหมักกากมะเขือเทศที่ได้จากขั้นตอนแรกผสมกับโซเดียมอะซิเตตและค่อยๆ ลดปริมาณของโซเดียมอะซิเตตในที่สุดจะป้อนแต่น้ำหมักกากมะเขือเทศเพียงอย่างเดียว แล้วจึงศึกษาผลของระยะเวลาเก็บกัก ต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ

การทดลองหมักกากมะเขือเทศเพื่อให้ได้กรดอินทรีย์โดยใช้กากมะเขือเทศผสมกับหัวเชื้อจุลินทรีย์สำหรับผลิตกรดอินทรีย์ให้มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตรและ 20 กรัมต่อลิตร ทำการหมักให้มีระยะเวลาเก็บกักกากนาน 3 วัน และ 5 วัน ที่อุณหภูมิห้อง ตรวจวัดปริมาณอินทรีย์สารในรูปมิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย pH ค่าความเป็นด่าง การขจัดอินทรีย์สารชนิดและปริมาณกรดอินทรีย์ พบว่าถ้าใช้กากมะเขือเทศเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ในน้ำหมักที่ได้เมื่อเทียบกับระยะเวลาเก็บกักกากเดียวกัน จะมีปริมาณอินทรีย์สาร ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย การขจัดอินทรีย์สารในรูปของแข็งทั้งหมด สูงกว่าเมื่อใช้กากมะเขือเทศเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร เนื่องจาก

ปริมาณอินทรีย์สารที่ป้อนเพิ่มขึ้น และที่ใช้ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน อัตราการป้อนอินทรีย์สารเดียวกันจะให้ปริมาณอินทรีย์สาร ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยสูงกว่าที่ใช้ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน เนื่องจากจุลินทรีย์มีจำนวนจำกัดในขณะที่ปริมาณอินทรีย์สารเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มระยะเวลาเก็บกักกาก และใช้กากมะเขือเทศเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการขจัดอินทรีย์สารจะสูงขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มระยะเวลาที่จุลินทรีย์สัมผัสอาหาร

ชนิดกรดอินทรีย์ระเหยและสารตัวกลางที่พบคือกรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก กรดไอโซบิวทีริก กรดบิวทีริก กรดแวนิลิก และเอทานอล ซึ่งปริมาณกรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก และกรดบิวทีริก จะเพิ่มเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณกากมะเขือเทศที่ป้อนเข้าไป และพบว่าโดยทั่วไปกรดอะซิติกจะมีปริมาณสูงกว่ากรดอินทรีย์ระเหยชนิดอื่น และระยะเวลาเก็บกักกากไม่มีผลหรืออาจจะมีผลน้อยต่อปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย เนื่องจากที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน จุลินทรีย์สามารถเปลี่ยนอินทรีย์สารในน้ำหมักให้เป็นกรดอินทรีย์ได้หมด ดังนั้นการเพิ่มระยะเวลาเก็บกักกากมากขึ้นก็ไม่มีผลต่อการย่อยสลายอินทรีย์สารไปเป็นกรดอินทรีย์ซึ่งจากผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการทดลองของ Sreekrishanan, Ramachandran and Ghosh. 1991 โดยศึกษาผลของการป้อนอินทรีย์สารในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์โดยป้อนน้ำตาลกลูโคสจาก 2.5 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จนถึง 21.12 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร พบว่าปริมาณกรดอะซิติกเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการป้อนอินทรีย์สาร และจากการหมักกากมะเขือเทศให้มีความเข้มข้น 10 กรัมและ 20 กรัมต่อลิตร พบว่าปริมาณกรดอะซิติก จะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณกากมะเขือเทศที่ป้อนเข้าไป (เครือวัลย์. 2537)

จะเห็นว่าในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์นี้เชื้อจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องสามารถย่อยสลายอินทรีย์สารกากมะเขือเทศเป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่ายที่มีคาร์บอน 2- 5 อะตอม ซึ่งกรดอินทรีย์ที่สำคัญคือกรดอะซิติก แต่กรดอะซิติกที่ได้มีปริมาณค่อนข้างต่ำแต่การขจัดอินทรีย์สารสูงกว่า เมื่อเทียบกับผลการทดลองของเครือวัลย์ (เครือวัลย์. 2537) อาจเป็นไปได้ว่าในถังปฏิกรณ์ผลิตกรดอินทรีย์มีเชื้อจุลินทรีย์ที่สามารถนำกรดอะซิติกที่เกิดขึ้นไปใช้ได้

การศึกษาผลของอุณหภูมิต่อขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ที่มีระยะเวลาเก็บกักกากต่างๆ โดยใช้กากมะเขือเทศผสมหัวเชื้อจุลินทรีย์ให้มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร ทำการหมักให้มีระยะเวลาเก็บกักกากนาน 3 วัน และ 5 วัน ที่อุณหภูมิห้อง และ 37 องศาเซลเซียส พบว่าที่อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 10 กรัมต่อลิตร อุณหภูมิห้อง ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน จะให้ปริมาณอินทรีย์สารสูงกว่า ที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน เนื่องมาจากที่อุณหภูมิห้องเชื้อจุลินทรีย์มีปริมาณจำกัด แต่ปริมาณสารอาหารมีมากกว่า ทำให้การย่อยสลายอินทรีย์สารเกิดได้น้อย ปริมาณอินทรีย์สารที่ออกมาจึงน้อย แต่เมื่อเพิ่มระยะเวลาเก็บกักให้นานขึ้น จุลินทรีย์มีเวลาในการสัมผัสและย่อยสลาย

อินทรีย์สารได้นานขึ้น ทำให้ปริมาณอินทรีย์สารมีมากขึ้นด้วย แต่เมื่ออุณหภูมิเพิ่มเป็น 37 องศาเซลเซียส ระยะเวลาเก็บกักนานขึ้น ปริมาณอินทรีย์สารที่มีในน้ำหมักไม่เพิ่มตามอาจเป็นเพราะ จุลินทรีย์กลุ่มnon-methanogenไม่สามารถเพิ่มจำนวนได้ดีที่ 37 องศาเซลเซียส และอาจเนื่องจาก ปริมาณอินทรีย์สารที่ใช้เป็นแหล่งอาหารของจุลินทรีย์มีปริมาณน้อย.

ในการฉีดราการป้อนอินทรีย์สาร 20 กรัมต่อลิตร พบว่าที่ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน ที่อุณหภูมิห้อง และ 37 องศาเซลเซียส ให้ปริมาณอินทรีย์สารสูงกว่าที่ระยะเวลาเก็บกัก 3 วัน ที่อุณหภูมิเดียวกัน เนื่องจากในถังหมักมีปริมาณอินทรีย์สารที่ใช้เป็นแหล่งอาหารของจุลินทรีย์ มากพอและเมื่อระยะเวลาเก็บกักมากขึ้น จุลินทรีย์มีเวลาสัมผัสกับอาหาร ได้นานขึ้น การย่อยสลายเกิดได้ดีขึ้น ปริมาณอินทรีย์สารจึงเพิ่มขึ้นด้วย

จากผลการทดลองที่ได้ปรากฏว่าเมื่อใช้กากมะเขือเทศความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน จะให้ปริมาณอินทรีย์สาร กรดอินทรีย์ระเหย และปริมาณกรดอินทรีย์แต่ละชนิดในปริมาณสูง จึงนำน้ำหมักจากถังปฏิกรณ์ผลิตกรดอินทรีย์เหล่านี้มาใช้เป็นวัตถุดิบป้อนเข้าสู่ถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทน เพื่อศึกษาผลของระยะเวลาเก็บกัก ในขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทนต่อการเกิดก๊าซชีวภาพ

การทดลองนี้พบว่าปริมาณก๊าซชีวภาพ ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพต่อกรัมชีโอดี ที่เติม การขจัดอินทรีย์สารในรูปชีโอดี และ การขจัดกรดอินทรีย์ระเหยสูงขึ้น เมื่อระยะเวลาเก็บกักนานขึ้นอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพในเทอมลิตรต่อลิตรต่อวันที่เกิดขึ้นจะสูงสุดเท่ากับ 0.09 ลิตรต่อลิตรต่อวัน ที่ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน ใช้น้ำหมักกรดอินทรีย์จากอุณหภูมิห้องและมืองค์ประกอบของก๊าซมีเทนในก๊าซผสมระหว่าง CH_4 และ CO_2 เท่ากับร้อยละ 65.79 เมื่อเพิ่มระยะเวลาเก็บกักให้นานขึ้น ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นอาจเนื่องมาจากเมื่อเพิ่มระยะเวลาเก็บกัก เชื้อจุลินทรีย์มีเวลาสัมผัสกับอินทรีย์สารมากขึ้นการย่อยสลายอินทรีย์สารก็เพิ่มขึ้น ซึ่งจะทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในการขจัดอินทรีย์สารในรูปชีโอดี ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการศึกษาระยะเวลาเก็บกักและอัตราการป้อนอินทรีย์สารในขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทนจาก Cheese ซึ่ง Yan (Yan. 1988) พบว่าอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพจะเพิ่มมากขึ้น เมื่อระยะเวลาเก็บกักนานขึ้น ประสิทธิภาพในการขจัดอินทรีย์สารจะดีขึ้น เมื่อระยะเวลาเก็บกักนานขึ้น โดยสามารถขจัดอินทรีย์สารในรูปของชีโอดีได้สูงสุดร้อยละ 76.45 เมื่อใช้น้ำหมักกรดอินทรีย์จากอุณหภูมิห้องหมักที่ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะปริมาณอาหารที่เติมลงไปอาจพอเหมาะกับปริมาณจุลินทรีย์ที่มีอยู่จำนวนน้อยในถังปฏิกรณ์ ทำให้เชื้อจุลินทรีย์สามารถใช้อาหารได้หมดด้วยระยะเวลาที่จุลินทรีย์ได้สัมผัสกับอาหารนานขึ้น

ผลการทดลองตารางที่ 14 ปริมาณก๊าซที่วัดได้มีปริมาณน้อย อาจเป็นเพราะ เชื้อจุลินทรีย์ ที่มีอยู่ในน้ำหมักมีเชื้อ non-methanogen ปนกับ methanogen ดังนั้นก็จะใช้สารอาหารนั้น ๆ อย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดกรดอินทรีย์จำนวนมาก และเกิดภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อการที่พวก methanogen จะเปลี่ยนกรดอินทรีย์ให้เป็นก๊าซมีเทน แต่พวก methanogen ก็ยังคงทำงานได้จึงทำให้ได้ผลิตภัณฑ์อื่น ๆ มากกว่ามีเทนเช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

ข้อเสนอแนะ

1.แหล่งจุลินทรีย์เริ่มต้นที่นำมาใช้ในการศึกษานี้ อาจยังปรับตัวในการย่อยสลายซับซ้อนที่เป็นกากมะเขือเทศได้ไม่ดึ้นัก จึงทำให้ปริมาณอินทรีย์สารที่มีอยู่ในน้ำหมักค่อนข้างน้อย ดังนั้นควรจะใช้เวลานานขึ้นกว่านี้ในการเริ่มเลี้ยงจุลินทรีย์จากน้ำหมักมูลไก่ที่ใช้ขับสเตรปเป็นกากมะเขือเทศ

2.เมื่อพิจารณาผลการทดลองพบว่าปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นปริมาณน้อยมาก ดังนั้นควรหาวิธีการเพิ่มปริมาณก๊าซชีวภาพ โดยการเพิ่มจำนวนเชื้อจุลินทรีย์ หรือให้จุลินทรีย์หลุดออกจากระบบน้อยที่สุด ซึ่งอาจทำได้โดยใช้ตะกอนจุลินทรีย์หมุนเวียนเพื่อแก้ปัญหานี้

บรรณานุกรม

- เกษม พิลึก. การผลิตมะเชื้อเทศส่งโรงงาน. สมาคมการค้าปุ๋ยและธุรกิจเกษตรไทย 2531 .
- เกษแก้ว ปะนะมณฑา. การศึกษาการย่อยสลายชั้นสเตรทต่างๆโดยจุลินทรีย์จากถังปฏิกรณ์
ผลิตก๊าซชีวภาพ . วิทยานิพนธ์ วท.ม. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
2534. อัดสำเนา..
- เครือวัลย์ เคลื่อนสูงเนิน. ผลของสภาวะต่างๆต่อขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ของการหมักกาก
มะเชื้อเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอน . วิทยานิพนธ์ วท.ม. กรุงเทพฯ:
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒประสานมิตร 2537. อัดสำเนา.
- จกกล พูนทวี ผลของกรดอินทรีย์ระเหยง่ายต่อจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตก๊าซชีวภาพ.
วิทยานิพนธ์ วท.ม. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี, 2537. อัดสำเนา.
- ปรีดา แยมเจริญวงศ์ เทคโนโลยีน้ำและน้ำเสีย, ภาควิชาสุขาภิบาล คณะสาธารณสุขศาสตร์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2534.
- ธงชัย พรรณสวัสดิ์. คู่มือวิเคราะห์น้ำทิ้ง. สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย. 2525.
- วิบูลย์ นุชประมูล. การหมักกากมะเชื้อเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอน. ปรินูญยานิพนธ์ วท.ม.
กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร. 2535. อัดสำเนา.
- มรกต ดันติเจริญ และคณะ สรุปโครงการนิทรรศการเทคโนโลยีครั้งที่ 6, สถาบันเทคโนโลยี
พระจอมเกล้าธนบุรี . ตุลาคม . 2534.
- สุเมธ ชวเดช. และคณะ การผลิตกรดอินทรีย์จากน้ำทิ้งโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง
สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย. 2530 .
- APHA,AWWA,WPCF. “Standard Method for The Examination of Water and Waste
Water” 16th. edition. : 533-535, 1985 .
- Calzada, J.F. “ Biogas production from coffee pulp juice:one and two-phase syst ”
Agricul Wastes, 9:217-230; 1984.
- Donald, L. Wise . Bioenvironmental Systems Boca Raton , Florida, Economic and Social
Commision for Asia and the Pacific, 96-103, 1987.
- Ghosh, S., A . Sajjad and M.P. Herry, “Two - Stage Upflow anaerobic digestion
of concentration sludge,” Biotech.Bioeng.Symp , 13:351-370; 1983 .

- Hill, D.J., and K. Nakano. "Effect of Particle Size on Anaerobic Digestion of Tomato Solid Wastes," Agricultural Wastes. 10:285-295;1984.
- Khan, A.W., S. Miller and D. Murray. "Development of a Two -Phase Combination Fermenter for the Conversion of Cellulose to Methane," Biotechnology and Bioengineering. 25:1571-1579;1983.
- Koster, I.W., " Liquefaction and Acidogenesis of Tomatoes in an Anaerobic Two-Phase Solid Waste Treatment System," Agricult. Wastes, 11: 241-252, 1984..
- Lane, A.G. " Laboratory Scale Anaerobic digestion of Fruit and Vegetable Solid Waste," Biomass , 5:245-259; 1984.
- McCarty, P.L. "Anaerobic Waste Treatment Fundamental part 1, 2, 3 and ," Public Works, 1964.
- McCarty, P.L. and J.S. Jeris. "The Biochemistry of Methane Fermentation Using ¹⁴C tracers" J. Water. Pollut. Control Fed., 37:178-192, 1984.
- Powell, G.E., and D.B. Archer "On-Line Titration Method for Monitoring Buffer Capacity and Total Volatile Fatty Acid Level in Anaerobic Digesters," Biotechnology and Bioengineering. 33:570-577;1989.
- Prema Viswanath , S.Sumithra,Devi and Krishna Nand , " Anaerobic digestion of Fruit and Vegetable Processing Wastes for Biogas Production," Bioresource Technology , 40:43-48; 1992 .
- Rico Gutierrez, J.L., Garejia Encina , P.L., and F. Fdz-polanco, " Anaerobic Treatment of Cheese Production Wastewater using a UASB Reactor " Bioresource Technology,37:271-276, 1991.
- Sanchez, E.P. and others. "Effect of the hydraulic retention time on the anaerobic biofilm reactor efficiency applied to screened cattle waste treatment" Biotech. Letters ,14(7):635-638;1992.
- Sprott, G.D. ,S.E. Bird and I.J. Mc.Donald. " Proton Motive Force as a Function of the pH at which Methanobacterium bryantii is Grown , " Can. J. Microbiol. 31:1031-1034 ;1985.
- Sreekrishnan , T.R. , K.B. Ramachandran , P. Ghosh. " Effect of Operation Variables on Biofilm Fermentation and Performance of Anaerobic Fluidized Bed Bioreactor," Biotech and Bioengineer ., 37: 557-566; 1991 .
- TATA Energy Research Institute. "Biogas Technology" TATA Energy Documentation and Information Centre , India :5-13; 1985 .
- Updated Guide Book on Biogas Development Energy Resources Development Series No. 27, United Nations New York, 1984.
- Verrier, D., F. Fay and G., Albagmac. " Two -phase methanization of solid vegetable wastes," Biological Wastes, 22:163-177; 1987.
- Westerman, P., Ahring. B.K and Mah, R.A., " Kinetic of two Subgroups of propionate Using Organisms in Anaerobic Digestion " Applied and Environment Microbiology , 55 (3): 710-715 ;1989.
- Yan, J.Q. "Methane Production from Cheese," Biomass. 17:185-202;1988.

- Yang, M. and others , “Stability and Performance of Thermophilic Anaerobic , Fixed-Bed Reactor Packed with a Saddle- Shaped Slag Biocarrier ” Environmental Technology , 13:671-678; 1992 .
- Zoetemeyer, R.J., Heuvel, J.C. Van Den and Cohen, A ., “pH Influence, and Acidogenic Dissimilation of Glucose in an Anaerobic Digestion,” Water Res., 16:303-311; 1982 .
- Zoetemeyer, R.J., A.J.C.M. Matthijsen , A. Cohen and C. Boelhouwer “ Product Inhibition in the acid forming Stage of the Anaerobic Digestion Process ” Water Res. 16:663- 639, 1982a.

