

547.29
๓ 759๘
Y.3

ผลของสภาวะต่าง ๆ ต่อขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์
ในการหมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอน

ปริณฎานิพนธ์

ของ

เครือวัลย์ เคลื่อนสูงเนิน

21 ก.พ. 2538

เสนอต่อมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต วิชาเอกเคมีชีวภาพ

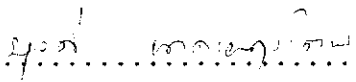
ตุลาคม 2537

ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

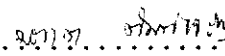
192730

คณะกรรมการควบคุมและคณะกรรมการสอบได้พิจารณาปริญญาโทเรียบร้อยแล้ว เห็นสมควร
รับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต วิชาเอกเคมีชีวภาพ ของ
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒได้

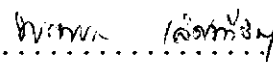
คณะกรรมการควบคุม

.....  ประธาน

(ดร.ยูวดี นาคะผดุงรัตน์)

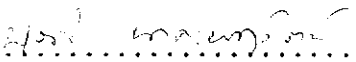
.....  กรรมการ

(รศ.ดร.มรกต ตันติเจริญ)

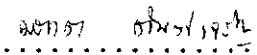
.....  กรรมการ

(ผศ.พรพรรณ เลิศทวีสินธุ์)

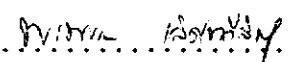
คณะกรรมการสอบ

.....  ประธาน

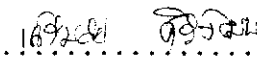
(ดร.ยูวดี นาคะผดุงรัตน์)

.....  กรรมการ

(รศ.ดร.มรกต ตันติเจริญ)

.....  กรรมการ

(ผศ.พรพรรณ เลิศทวีสินธุ์)

.....  กรรมการที่แต่งตั้งเพิ่มเติม

(ดร.เสริมสิน ศิริวัฒนา)

บัณฑิตวิทยาลัยอนุมัติให้รับปริญญาโทเรียบร้อยแล้ว เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต วิชาเอกเคมีชีวภาพ ของมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

.....  คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(ดร.ศิริยุภา พูลสุวรรณ)

วันที่ ..14.. เดือน ..กุมภาพันธ์.. พ.ศ. ..2537..

ประกาศขอบคุณการ

ปริญญานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยความช่วยเหลือเป็นอย่างดีจาก ดร. ยวดี นาคะผดุงรัตน์ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พรพรรณ เลิศทวีสินธุ์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร รองศาสตราจารย์ ดร. มรกต ตันติเจริญ คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี ที่ได้กรุณาให้คำแนะนำสนับสนุน ตลอดจนได้สละเวลาตรวจแก้ไขข้อบกพร่องของปริญญานิพนธ์ฉบับนี้จนสำเร็จลุล่วงลงด้วยดี ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ ภาวิณี ชัยประเสริฐ คุณวิบูลย์ นุชประมูล ที่ช่วยแนะนำและให้คำปรึกษา ตลอดจนเพื่อน ๆ และทุกคนที่มีส่วนเกี่ยวข้องช่วยเหลือในงานวิจัยครั้งนี้

ขอขอบคุณ โครงการอาหารหลวงสำเร็จรูป ที่ได้อนุเคราะห์วัตถุดิบที่ใช้ในการวิจัย

ผู้วิจัยขอกราบขอบพระคุณ บิดา มารดา ผู้เป็นปฐมาจารย์ ญาติพี่น้อง ผู้ซึ่งช่วยเหลือให้กำลังใจ ทุนทรัพยากร และอยู่เบื้องหลังของความสำเร็จของผู้วิจัยตลอดมา

เครือวัลย์ เคลื่อนสูงเนิน

สารบัญ

บทที่		หน้า
1	บทนำ	1
	คำนำ	1
	การย่อยสลายอินทรีย์สารในสภาวะไร้ออกซิเจน	2
	จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายอินทรีย์สารในสภาวะไร้ออกซิเจน	10
	ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการหมักแบบอับอากาศ	12
	ปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อม	13
	ปัจจัยในการปฏิบัติงาน	15
	คำจำกัดความของศัพท์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการวิจัย	16
	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	17
	วัตถุประสงค์ของการวิจัย	23
	ประโยชน์ของงานวิจัย	23
2	วิธีการวิจัย	24
	แผนการวิจัย	24
	แหล่งของจุลินทรีย์ ถึงอุปกรณ์และวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตกรดอินทรีย์	25
	วิธีดำเนินการทดลอง	25
	การเตรียมเชื้อจุลินทรีย์สำหรับผลิตกรดอินทรีย์	25
	การเตรียมถังปฏิกรณ์ผลิตกรดอินทรีย์	25
	การหมักเพื่อให้ได้กรดอินทรีย์	26
3	ผลการวิจัย	35
	ผลของความเข้มข้นกากมะ เชื้อต่อขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์	35
	ผลของระยะเวลาเก็บกักกากต่อขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์	41
	ผลของอุณหภูมิต่อขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ที่มีระยะเวลาเก็บกักกากต่าง ๆ	45
	ผลของการกวนต่อขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์	56

4	สรุปอภิปรายและข้อเสนอแนะ	58
	สรุปอภิปราย	58
	ข้อเสนอแนะ	64
	บรรณานุกรม	65
	ภาคผนวก	70
	ประวัติของผู้วิจัย	113

บัญชีตาราง

ตาราง

หน้า

1	การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของการผลิตก๊าซมีเทน จากการย่อยสลายกรดอินทรีย์ระเหยของ methanogenic bacteria	9
2	ผลของความเข้มข้นกาบมะเขือเทศต่อปริมาณอินทรีย์สาร กรดอินทรีย์ระเหย pH ความแตกต่าง การจัดอินทรีย์สาร ชนิดและปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ของการหมักกาบมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอน ที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน	36
3	ผลของความเข้มข้นกาบมะเขือเทศต่อปริมาณอินทรีย์สาร กรดอินทรีย์ระเหย pH ความแตกต่าง การจัดอินทรีย์สาร ชนิดและปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ของการหมักกาบมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอน ที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน	38
4	ผลของความเข้มข้นกาบมะเขือเทศต่อปริมาณอินทรีย์สาร กรดอินทรีย์ระเหย pH ความแตกต่าง การจัดอินทรีย์สาร ชนิดและปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ของการหมักกาบมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอน ที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 10 วัน	40
5	ผลของระยะเวลาเก็บกักกากต่อปริมาณอินทรีย์สาร กรดอินทรีย์ระเหย pH ความแตกต่าง การจัดอินทรีย์สาร ชนิดและปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย ในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ของการหมักกาบมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอน เมื่อใช้กาบมะเขือเทศผสมน้ำให้มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร	42
6	ผลของระยะเวลาเก็บกักกากต่อปริมาณอินทรีย์สาร กรดอินทรีย์ระเหย pH ความแตกต่าง การจัดอินทรีย์สาร ชนิดและปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย ในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ของการหมักกาบมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอน เมื่อใช้กาบมะเขือเทศผสมน้ำให้มีความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร	44

- 7 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณอินทรีย์สาร กรดอินทรีย์ระเหย pH ความเป็นต่าง และการจัด
อินทรีย์สาร ในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ ของการหมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศ
สองขั้นตอนที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน และ เมื่อใช้กากมะเขือเทศผสมน้ำให้มีความ
เข้มข้น 10 กรัมตอลิตร 47
- 8 ผลของอุณหภูมิต่อชนิดและปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย ในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ของการ
หมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอน ที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วันและเมื่อใช้
กากมะเขือเทศผสมน้ำให้มีความเข้มข้น 10 กรัมตอลิตร 48
- 9 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณอินทรีย์สาร กรดอินทรีย์ระเหย pH ความเป็นต่าง และการจัด
อินทรีย์สาร ในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ ของการหมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศ
สองขั้นตอนที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน และเมื่อใช้กากมะเขือเทศผสมน้ำให้มีความ
เข้มข้น 10 กรัมตอลิตร 50
- 10 ผลของอุณหภูมิต่อชนิดและปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย ในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ของการ
หมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอน ที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วันและเมื่อใช้
กากมะเขือเทศผสมน้ำให้มีความเข้มข้น 10 กรัมตอลิตร 51
- 11 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณอินทรีย์สาร กรดอินทรีย์ระเหย pH ความเป็นต่าง และการจัด
อินทรีย์สารในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ ของการหมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศสอง
ขั้นตอนที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 10 วันและเมื่อใช้กากมะเขือเทศผสมน้ำให้มีความเข้มข้น
10 กรัมตอลิตร 54
- 12 ผลของอุณหภูมิต่อชนิดและปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย ในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ของการ
หมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอนที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 10 วันและเมื่อใช้
กากมะเขือเทศผสมน้ำให้มีความเข้มข้น 10 กรัมตอลิตร 55
- 13 ผลของการกวนต่อปริมาณอินทรีย์สาร กรดอินทรีย์ระเหย pH ความเป็นต่าง การจัดการ
อินทรีย์สาร ชนิดและปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ของการหมัก
กากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอนระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน อุณหภูมิ 40 องศา
เซลเซียส และเมื่อใช้กากมะเขือเทศผสมน้ำให้มีความเข้มข้น 10 กรัมตอลิตร 57

[illegible]

[illegible]

บัญชีภาพประกอบ

ภาพประกอบ

หน้า

1	ปฏิบัติการ Stickland	6
---	----------------------------	---

บทที่ 1

บทนำ

คำนำ

ปัจจุบันรัฐบาลมีการส่งเสริมอุตสาหกรรมเพื่อการส่งออก ทำให้มีการขยายตัวทางอุตสาหกรรมมากขึ้น ประเทศไทยมีโรงงานอุตสาหกรรมซึ่งใช้ผลผลิตทางการเกษตรเป็นวัตถุดิบจำนวนมาก ทำให้มีวัสดุเหลือทิ้ง หรือกากของเสียจากการผลิตที่ต้องกำจัดทิ้งเป็นจำนวนมากด้วย วัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้บางอย่างได้นำกลับมาใช้ประโยชน์บ้างเช่น ใช้เป็นอาหารสัตว์ ปุ๋ย เชื้อเพลิง (Lane. 1984) แต่วัสดุเหลือทิ้งส่วนใหญ่มักยังถูกปล่อยทิ้งไว้ให้สลายเปื่อย ซึ่งอาจก่อให้เกิดปัญหาสภาวะแวดล้อมเป็นพิษ เป็นแหล่งเพาะพันธุ์เชื้อโรคและพาหะ ดังนั้นนักวิทยาศาสตร์พยายามศึกษาหาวิธีในการกำจัดของเสียเหล่านี้ให้เหมาะสมและนำมาใช้เพื่อให้เป็นประโยชน์ การแปรรูปมะเขือเทศเป็นผลิตภัณฑ์อาหารสำเร็จ ทำให้มีของเสียเหลือทิ้ง ได้แก่ ผลเน่าเสีย ผลมีรอยตำหนิที่คัดทิ้งและส่วนกากคือเปลือกและเมล็ดที่ถูกแยกออกจากรสและเนื้อหลังจากผ่านการบดด้วยเครื่องแล้ว (เกษม พิสิฐ. 2531) ของเสียเหล่านี้จะมีปริมาณร้อยละ 9 ของปริมาณมะเขือเทศที่ใช้เป็นวัตถุดิบ (Hill and Dykstra. 1980) การกำจัดของเสียและได้ผลผลิตที่สามารถนำกลับมาใช้ประโยชน์ได้วิธีหนึ่ง คือ กระบวนการหมักแบบอับอากาศซึ่งทำได้ทั้งแบบขั้นตอนเดียว (single stage fermentation) และแบบสองขั้นตอน (two-stage fermentation) เป็นการย่อยสลายอินทรีย์สารโดยจุลินทรีย์สองกลุ่ม คือ กลุ่มจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องงานการผลิตกรดอินทรีย์ คือ acidogenic bacteria ซึ่งจะทำงานได้ดีในสภาวะที่เป็นกลางถึงเป็นกรด คือ pH 5.5 หรือ ต่ำกว่า (TATA. Energy Research Institute. 1985) จุลินทรีย์กลุ่มนี้จะย่อยสลายอินทรีย์สารพวกเซลลูโลส ไขมัน โปรตีนให้เป็นโมเลกุลเล็กละลายน้ำได้เช่น กรดอะซิติก กรดไพรูวอิก กรดแลคติก กรดบิวทีริก และเอทานอล เป็นต้น ซึ่งเป็นสารตัวกลางและเป็นขั้นสเตรทสำหรับขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทน (Donald. 1987) และกลุ่มจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องงานการผลิตก๊าซมีเทนคือ methanogenic bacteria จะทำงานได้ดี

ในสภาวะแวดล้อมที่ pH อยู่ระหว่าง 6.5-7.5 และถ้า pH สูงกว่า 8.0 จุลินทรีย์จะหยุดทำงาน (Sprott, Brid and McDonald. 1985) กระบวนการหมักแบบอับอากาศขั้นตอนเดียวเป็นวิธีที่ง่ายและสะดวก แต่ระบบมักจะล้มเหลวได้ง่ายเพราะมีการสะสมของกรดไพรูวอิก (Verrier, Fay and Albagmac. 1987) ในการศึกษาผลของกรดไพรูวอิกที่ความเข้มข้น 0-200 มิลลิโมลาร์ (mM) ต่อจุลินทรีย์ผลิตก๊าซมีเทน พบว่าความเข้มข้นของกรดไพรูวอิกที่สูงกว่า 20 มิลลิโมลาร์สามารถยับยั้งการเจริญของกลุ่มจุลินทรีย์ที่ผลิตก๊าซมีเทนและยับยั้งการผลิตก๊าซมีเทน (Barredo and Evison. 1991) กระบวนการหมักแบบสองขั้นตอนนั้นได้แยกขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ออกจากขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทน ซึ่งทำให้สามารถศึกษา และควบคุมสภาวะที่เหมาะสมของแต่ละขั้นตอนได้จากการศึกษาการผลิตก๊าซมีเทนจากกรดอินทรีย์ พบว่าก๊าซมีเทนได้มาจากการเปลี่ยนแปลงของกรดอะซิติกร้อยละ 72 และได้มาจากการไพรูวอิกและกรดอินทรีย์ระเหยอื่นๆ ร้อยละ 28 (McCarty and Jesis. 1984) ชนิดและปริมาณของสารตัวกลางที่เกิดขึ้นจะเปลี่ยนแปลงไปเป็นก๊าซมีเทนที่แตกต่างกัน (เกษแก้ว ปะนะมณฑา. 2534) ดังนั้นจึงสนใจศึกษาถึงผลของสภาวะต่าง ๆ ในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ของการหมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอนเช่น อัตราการป้อนอินทรีย์สาร (organic loading rate) ระยะเวลาเก็บกักกาก (solid retention time. SRT) อุณหภูมิ และการกวนต่อชนิดและปริมาณของสารตัวกลางที่เกิดขึ้น เพื่อให้ทราบถึงสภาวะที่เหมาะสมที่สุดที่จะให้ได้กรดอะซิติกปริมาณสูงที่สุด ซึ่งจุลินทรีย์ผลิตก๊าซมีเทนสามารถนำกรดอะซิติกไปใช้ในการผลิตก๊าซมีเทนได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพวิธีหนึ่งซึ่งก๊าซชีวภาพจะมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบที่สำคัญ

การย่อยสลายอินทรีย์สารในสภาวะไร้ออกซิเจน

กระบวนการย่อยสลายอินทรีย์สารในสภาวะไร้ออกซิเจนเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพสารอินทรีย์ส่วนใหญ่นั้นได้แก่ คาร์โบไฮเดรต ไขมันและโปรตีน จะถูกย่อยสลายจนได้ก๊าซชีวภาพ ปฏิกิริยาชีวเคมีของกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรีย สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ขั้นตอน คือ ขั้นตอน

ไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ (acid production) และขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทน (methane production) ดังนี้

ขั้นที่ 1 ขั้นตอนไฮโดรไลซิส

ในขั้นตอนนี้สารอินทรีย์เชิงซ้อน (complex organic compound) ที่มีขนาดโมเลกุลใหญ่ไม่สามารถละลายน้ำได้ เช่น คาร์โบไฮเดรต ไขมัน และ โปรตีน จะถูกย่อยสลายโดยเอนไซม์ที่ปล่อยออกมาจากเซลล์ (exoenzymes) จาก fermentative bacteria ทำให้สารอินทรีย์แตกตัวมีขนาดเล็กลง และสามารถละลายน้ำได้

complex polysaccharide -----> simple sugar

protein -----> peptide + amino acid

fat -----> glycerol + fatty acid

สารประกอบคาร์โบไฮเดรต เช่น starch, sucrose, glycogen, และ amylose ถูกย่อยสลายได้ง่ายโดยเอนไซม์ amylase

โปรตีน ถูกย่อยสลายโดยเอนไซม์ protease และ peptidase

สารประกอบไขมัน โดยเอนไซม์ lipase

ขั้นที่ 2 การผลิตกรดอินทรีย์

อินทรีย์สารโมเลกุลเล็กจากขั้นตอนไฮโดรไลซิสจะถูกแบคทีเรียพวก facultative และ obligate anaerobe ซึ่งเป็นพวกที่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ทั้งในสภาวะที่มีและไม่มีออกซิเจนเจริญเติบโตได้ดีในช่วง pH 6.5-7.5 ทนต่อการเปลี่ยนแปลงสภาวะแวดล้อมได้ดี มีอัตราการเจริญเติบโตสูงแบ่งตัวเพิ่มจำนวนเป็น 2 เท่าภายในเวลา 24 ชั่วโมงจะใช้อินทรีย์สารโมเลกุลเล็กเหล่านี้เป็นแหล่งคาร์บอนและพลังงานเกิดกระบวนการหมัก (fermentation) ซึ่งผลของปฏิกิริยามีทั้งพวกที่อยู่ในรูปก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ อีกพวกหนึ่งคือพวกกรดอินทรีย์ระเหย (volatile fatty acid) ที่มีคาร์บอนอะตอมไม่เกิน 5 อะตอมเช่น กรดอะซิติก (acetic acid) กรด

โปรพิโอนิก (propionic acid) กรดบิวทีริก (butyric acid) กรดแวลีริก (valeric acid) เป็นต้น ซึ่งชนิดของผลผลิตที่ได้ในขั้นตอนนี้ขึ้นอยู่กับสารตั้งต้นและสภาวะแวดล้อมที่จุลินทรีย์เจริญเติบโต

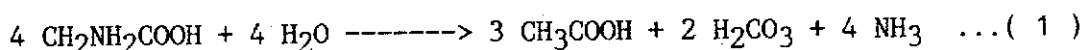
จากรายงานการวิจัยพบองค์ประกอบของกากมะ เชื้อเทศโดยคิดเป็นร้อยละของของแข็งทั้งหมด (total solid) ดังนี้คือประกอบด้วยเฮมิเซลลูโลสร้อยละ 39.3 ไบรตินร้อยละ 23.3 เซลลูโลส ร้อยละ 8.0 ลิกนินร้อยละ 6.0 ether extract ร้อยละ 17.0 ฟอสฟอรัสร้อยละ 0.22 โซเดียมร้อยละ 0.151 โพแทสเซียมร้อยละ 0.954 แคลเซียมร้อยละ 0.08 ไนโตรเจน ร้อยละ 3.73 และอัตราส่วนของธาตุคาร์บอนต่อไนโตรเจนเท่ากับ 13.4 (Sarada and Nand. 1989) ดังนั้นการย่อยสลายกากมะ เชื้อเทศส่วนใหญ่จะเป็นการย่อยสลายอินทรีย์สารพวกคาร์โบไฮเดรต การย่อยสลายเซลลูโลสมีข้อจำกัด และย่อยสลายได้ยากกว่าสารคาร์โบไฮเดรตชนิดอื่น ๆ เซลลูโลส เป็นโพลีเมอร์ของกลูโคส เช่นเดียวกับแป้ง แต่พันธะไกลโคซิดิกที่ต่อระหว่างกลูโคสจะเป็นชนิด $\beta,1-4$ -glucosidic กล่าวคือ พันธะ $\beta,1-4$ -glucosidic ทำให้กลูโคสที่ต่อกันอยู่ในสายลูกโซ่ของเซลลูโลสยึดตัวออกันแนวเส้นตรงได้ทำให้สายเซลลูโลสหลายสายมีโอกาสดำเนินการกลัดกัน โดยที่โมเลกุลของน้ำไม่สามารถเข้าไปแทรกตัวอยู่ได้เลย ซึ่งเป็นเส้นใยที่มีความเหนียว แข็งแรง ซึ่งการย่อยสลายพันธะไกลโคซิดิกในเซลลูโลสจะเป็น rate limiting steps ของการย่อยสลาย (Springer. 1973)

การย่อยสลายคาร์โบไฮเดรต

การย่อยสลายอินทรีย์สารพวกคาร์โบไฮเดรต เช่น แป้ง น้ำตาล รวมทั้งพวกเซลลูโลสและ เฮมิเซลลูโลสจะถูกย่อยสลายโดยกระบวนการไฮโดรไลซิส เป็นสารพวกโมโนแซคคาไรด์ เช่น กลูโคส จากนั้นกลูโคสจะถูกย่อยสลายต่อโดยผ่าน Embden Meyerhof Pathway ได้ไพรูเวต (pyruvate) ซึ่งไพรูเวตจะถูกเปลี่ยนเป็นสารต่างๆ เช่นกรดแลคติก กรดบิวทีริก กรดโปรพิโอนิก กรดอะซิติก เอทานอล ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจน ทั้งนี้จะได้สารชนิดใดขึ้นอยู่กับสภาวะแวดล้อม เช่น pH อุณหภูมิและชนิดของเชื้อจุลินทรีย์

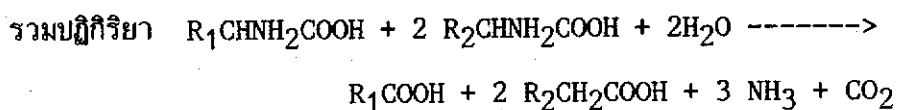
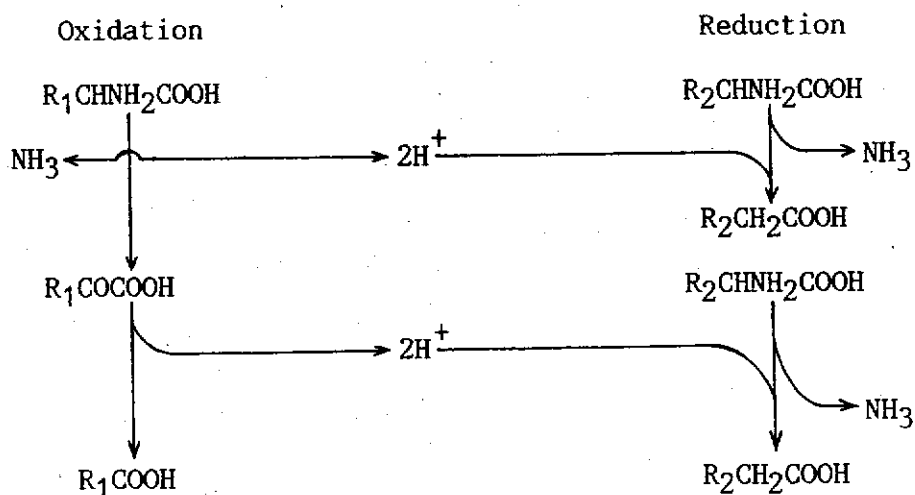
การย่อยสลายสารประกอบไนโตรเจน

สารประกอบไนโตรเจน เช่น ไพรดีน ยูเรีย เพียวรีน (purine) และ พิริมิดีน (pyrimidine) มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ โดยสารประกอบไนโตรเจนที่เป็นไพรีนจะถูกย่อยสลายโดยกระบวนการไฮโดรไลซิสได้กรดอะมิโน ซึ่งกรดอะมิโนบางชนิดจะถูกย่อยสลายให้ผลผลิตเป็นไพรูเวต ต่อจากนั้นจะเปลี่ยนเป็นสารตัวกลางชนิดใดขึ้นอยู่กับชนิดของกรดอะมิโน และจุลินทรีย์ จุลินทรีย์กลุ่มที่ย่อยสลายไพรีนในกระบวนการหมักแบบไร้ออกซิเจนได้แก่พวก Clostridia นอกจากนี้ยังมีกรดอะมิโนบางชนิดที่เปลี่ยนเป็นกรดอินทรีย์ระเหยได้ โดยไม่ต้องผ่านการเป็นกรดไพรูวิก เช่น ถ้ากรดอะมิโนเป็นไกลซีนเมื่อย่อยสลายโดย Clostridium histolyticum จะเป็นอะซิเตท ดังสมการ (1)



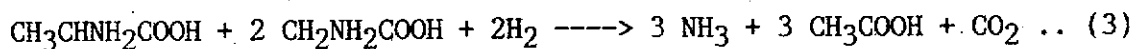
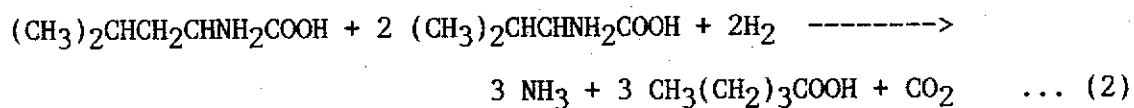
ถ้ากรดอะมิโนเป็น ธรีโอนีน เมื่อถูกย่อยสลายโดย Clostridium histolyticum จะได้อะซิเตท แต่เมื่อถูกย่อยสลายโดย Clostridium sporosphaeroides จะได้เป็นไพรูฟอเนต และถ้าถูกย่อยสลายโดย Clostridium propionicum จะได้ไพรูฟอเนตกับบิวทีเรต

นอกจากนี้ มีกระบวนการย่อยสลายกรดอะมิโนโดยปฏิกิริยาควตู่ระหว่าง Oxidation และ Reduction deamination ของกรดอะมิโน 2 โมเลกุลนั้น เกิดขึ้นโดยโมเลกุลหนึ่งเป็นฝ่ายให้อิเล็กตรอนและอีกโมเลกุลหนึ่งเป็นฝ่ายรับอิเล็กตรอน เรียกปฏิกิริยานี้ว่า Stickland (Nagase and Matsuo. 1982) ดังภาพประกอบ 1



ภาพประกอบ 1 ปฏิกริยา Stickland

ตัวอย่างเช่น ปฏิกิริยา Oxidation-Reduction ของ ลูซีน กับ เวสสัน ได้กรดโอโซ-
แวรีลิก ถ้าเป็นปฏิกิริยา Oxidation-Reduction ของ อะลานีน และ ไกลซีน ได้กรดอะซิติก
ตั้งสมการ (2) และ (3)



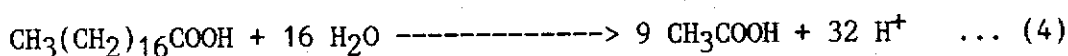
นอกจากนี้ สารประกอบไนโตรเจนพวกเพียวรีน พิริมิดีน สามารถย่อยสลายโดยจุลินทรีย์กลุ่ม Non-methanogenic bacteria ผลผลิตที่ได้จะขึ้นอยู่กับแบคทีเรียที่ใช้ในการย่อยสลาย เช่น Uracil ถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรีย Clostridium uracilicium จะได้ผลผลิตเป็นอะลูมาย ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และ แอมโมเนีย แต่ถ้าแบคทีเรียเป็น Clostridium acidurici จะได้ผลผลิตเป็น กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และแอมโมเนีย (Hobson, Bousfield and Sommer, 1974)

การย่อยสลายสารประกอบไขมัน

ไขมันจะถูกย่อยสลายโดยกระบวนการไฮโดรไลซิสให้เป็นกลีเซอรอล และกรดไขมัน เช่น กรดสเตียริก กรดโอเลริก และ กรดพาลมิติก ฯลฯ โดยเอนไซม์ Lipase กลีเซอรอล จะถูกย่อยสลายต่อตามกระบวนการ Glycolysis ให้ผลผลิตเป็นกรดไพรูวิก ซึ่งต่อไปจะถูกย่อยสลายไปในลักษณะ เช่นเดียวกับการย่อยสลายอินทรีย์สารพวกคาร์โบไฮเดรต

ส่วนกรดไขมันเช่นกรดสเตียริกจะถูกออกซิไดส์ด้วยปฏิกิริยาเบต้าออกซิเดชัน (β -oxidation) ให้กรดอะซิติกและไฮโดรเจนดั่งสมการ (4)

β -oxidation

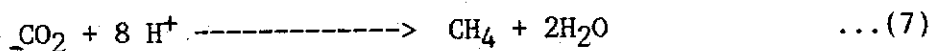
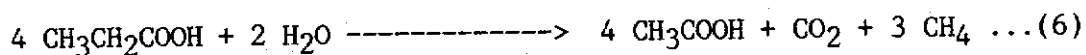
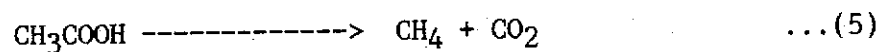


ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น เป็นขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ซึ่งให้ผลผลิตเป็นสารพวก volatile fatty acid เช่นกรดอะซิติก กรดไพรูวอิก กรดบิวทีริก ฯลฯ นอกจากนี้อาจเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจนและพวกแอลกอฮอล์ เช่น เมทานอล ซึ่งจะถูกใช้โดยจุลินทรีย์กลุ่ม methanogenic bacteria เพื่อเกิดเป็นก๊าซมีเทนต่อไป

ขั้นที่ 3 การผลิตก๊าซมีเทน

การผลิตก๊าซมีเทนเกิดจากการทำงานของจุลินทรีย์ที่สามารถใช้กรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ในสภาวะไร้ออกซิเจน มีชื่อเรียกว่า มีเทนแบคทีเรีย (methanogenic bacteria) เป็นพวก obligate anaerobe bacteria คือสามารถเจริญเติบโตได้ในสภาวะไม่มีออกซิเจน เจริญได้ทั้งในช่วงอุณหภูมิปานกลาง 35-40 องศาเซลเซียส และช่วงอุณหภูมิสูง 53-60 องศาเซลเซียส pH ที่เหมาะสมในการเจริญเติบโต และผลิตก๊าซมีเทนอยู่ในช่วง 6.5 - 7.5 ต้องการแอมโมเนีย (ammonia) และซัลไฟด์ (sulfide) หรือ ซีสเทอีน (cysteine) เป็นแหล่งไนโตรเจนและซัลเฟอร์ตามลำดับ ส่วนอินทรีย์สารที่ใช้ขึ้นอยู่กับชนิดของจุลินทรีย์

ปฏิกิริยาการเกิดก๊าซมีเทนเกิดขึ้นได้ จากปฏิกิริยาการดีคาร์บอกซิเลทของกรดอะซิติก (acetate decarboxylation) โดยจุลินทรีย์พวก acetoclastic methanogenic ดังสมการ (5) และปฏิกิริยาของไพรูวอเนตดังสมการ (6) โดยจุลินทรีย์พวก Methanobacterium propionicum และ การรีดักชันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (carbondioxide reduction) เกิดขึ้นโดยจุลินทรีย์พวก O₂-reducing methanogenic bacterium เช่น ดังสมการ (7)

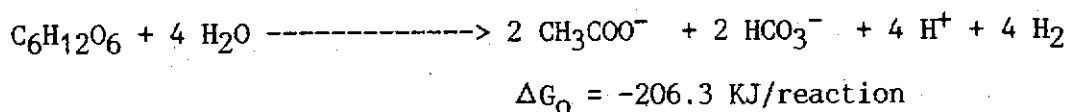


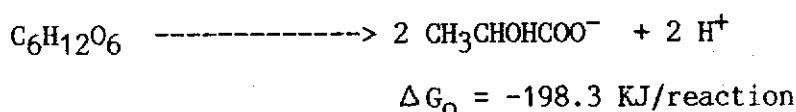
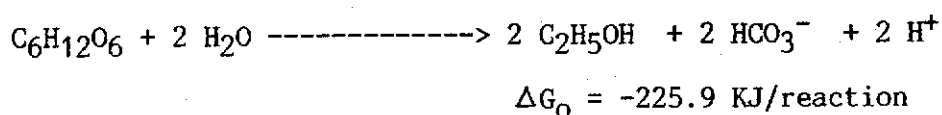
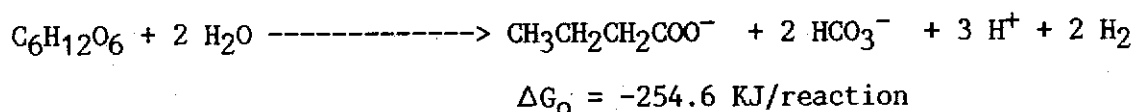
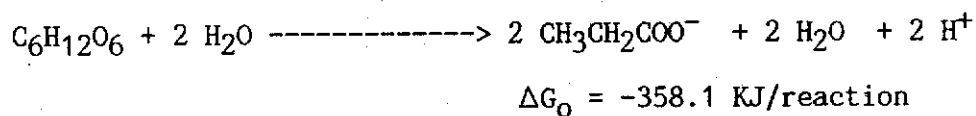
นอกจากนี้ กรดอินทรีย์ระเหยต่างๆ ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์จะย่อยสลายโดยจุลินทรีย์กลุ่ม methanogenic bacterium ได้ก๊าซมีเทน ซึ่งในการเปลี่ยนกรดอินทรีย์ระเหยไปเป็นก๊าซมีเทนนั้น กรดอินทรีย์ระเหยแต่ละชนิดจะให้พลังงานอิสระ (ΔG_0) ต่างกันดังตาราง 1 (Pipyn and Verstarate. 1981)

ตาราง 1 การเปลี่ยนแปลงพลังงานอิสระของการผลิตก๊าซมีเทน จากการย่อยสลายกรดอินทรีย์ระเหยของ methanogenic bacteria

ซิสเตรท	พลังงานอิสระที่เปลี่ยนแปลงต่อหนึ่งโมลของการผลิตก๊าซมีเทน (กิโลจูล)
กรดอะซิติก	-31.0
กรดไพรูวิก	-32.3
กรดบิวทีริก	-32.7
เอทานอล	-59.5
กรดแลคติก	-68.8

การย่อยสลายน้ำตาลกลูโคสเพื่อให้ได้กรดอินทรีย์ต่าง ๆ ในสภาวะไร้ออกซิเจนสามารถพิจารณาได้จากสมการ ดังนี้





ในทุกปฏิกิริยาจะมีพลังงานอิสระ ต่างกันและมีค่าเป็นลบ แสดงว่าปฏิกิริยาสามารถดำเนินมาทางขวาได้โดยลำพัง ดังนั้นการย่อยสลายคาร์โบไฮเดรตจึงอาจพบสารเหล่านี้เป็นสารตัวกลางได้ การที่จะได้สารใดมากหรือน้อยก็ขึ้นกับชนิด และ ปริมาณของจุลินทรีย์ และสภาวะแวดล้อมที่ใช้ในปฏิกิริยาต่าง ๆ (Pipyn และ Vestaraete, 1981)

จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องในการย่อยสลายอินทรีย์สารในสภาวะไร้ออกซิเจน

จุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการย่อยสลายอินทรีย์สารต่าง ๆ เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพนั้นแบ่งเป็น 2 กลุ่มใหญ่ ๆ ตามลักษณะการทำงานของจุลินทรีย์คือ

(1) Non-Methanogenic Bacteria

เป็นจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับขั้นตอนไฮโดรไลซิส และขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ จุลินทรีย์พวกนี้เป็นพวก facultative anaerobic bacteria แบบที่เรียนในกลุ่มนี้ได้แก่ fermentative

bacteria, hydrogen producing acetogenic bacteria และ homoacetogenic bacteria

1.1 Fermentative หรือ Hydrolytic bacteria

จุลินทรีย์ในกลุ่มนี้จะทำหน้าที่ในขั้นตอนไฮโดรไลซิส และขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ในสภาวะที่ไร้ออกซิเจน โดยผลิตเอนไซม์ออกมานอกเซลล์เพื่อย่อยสลายสารโมเลกุลใหญ่ให้มีขนาดเล็กลงแล้วส่งผ่านเข้าไปในเซลล์เปลี่ยนเป็นสารอื่น ๆ เช่น อะซิเตท โพรพิโอเนท แลคเตท บิวทีเรท และเอทานอล ทั้งนี้จะได้สารคั้นขึ้นอยู่กับอินทรีย์สารที่ถูกย่อยสลายและชนิดของจุลินทรีย์เช่น ถ้าเป็น Bacteroides fibrisolvens จะย่อยอินทรีย์สารพวกเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสได้เป็นฟอร์เมท แลคเตท และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แต่ถ้าย่อยอินทรีย์สารพวกเพคตินจะได้อะซิเตท บิวทีเรท และฟอร์เมท (Bryant and Small. 1965) และถ้าเป็นแบคทีเรียพวก Bacteroides ruminicola ย่อยสลายอินทรีย์สารพวกเฮมิเซลลูโลสได้เป็นฟอร์เมท อะซิเตทและโพรพิโอเนท ถ้าย่อยสลายอินทรีย์สารพวกเพคตินจะได้ฟอร์เมท บิวทีเรท และ แลคเตท (Dehority. 1969) ส่วนแบคทีเรียพวก Bacteroides succinogenes ย่อยสลายเซลลูโลสได้เป็นฟอร์เมท อะซิเตท และ ซัคซิเนท ถ้าเป็นแบคทีเรียพวก Acetivibrio cellulolyticus หรือ Clostridium thermocellum ย่อยสลายเซลลูโลสได้เป็นอะซิเตท เอทานอล ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และ ก๊าซไฮโดรเจน (Patel and others. 1980)

1.2 Hydrogen-producing acetogenic bacteria

จุลินทรีย์ในกลุ่มนี้จะทำหน้าที่ย่อยสลายแอลกอฮอล์และกรดอินทรีย์ที่มีคาร์บอนหลายตัวไปเป็นกรดอะซิติก และก๊าซไฮโดรเจน ตัวอย่างเช่น Syntrophomonas wolfei จะย่อยสลายกรดแวลริก กรดบิวทีริก และกรดคาโอบริก ได้เป็นกรดอะซิติก ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจน ถ้าเป็นพวก Syntrophobacter wolinii จะย่อยสลายกรดโพรพิโอนิกให้ได้เป็นกรดอะซิติก ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจน (Boone and Bryant. 1980)

1.3 Homoacetogenic Bacteria

จุลินทรีย์ในกลุ่มนี้เป็นพวกที่ใช้ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และสารประกอบคาร์บอน ที่มีคาร์บอน 1 อะตอมในการเจริญเติบโต ได้ผลผลิตสุดท้ายเป็นอะซิเตทออกมาเพียงอย่างเดียว และถ้าใช้สารประกอบที่มีคาร์บอนหลายอะตอม เช่น กรดแลคติก ไพรูเวท เฮกซิซ จะผลิตทั้งบิวทาเรท และอะซิเตท แบคทีเรียในกลุ่มนี้ได้แก่ Clostridium aceticum, Clostridium formicoaceticum, Acetobacterium woodii และ Acetogenium kivui เป็นต้น

(2) Methanogenic Bacteria

จุลินทรีย์ในกลุ่มนี้จะเกี่ยวข้องกับขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทน ซึ่งเป็นพวกที่สามารถดำรงชีวิตอยู่ได้ในสภาวะไร้ออกซิเจนเท่านั้น (obligate anaerobic bacteria) จุลินทรีย์เหล่านี้เจริญเติบโตได้ดีในช่วง pH 6.5-7.5 ถ้า pH สูงกว่า 8 จุลินทรีย์จะหยุดทำงาน (Sprott, Bird and McDonald. 1985) แบคทีเรียในกลุ่มนี้สามารถแบ่งได้เป็น 5 กลุ่ม คือ

2.1 Methanococcus

2.2 Methanobacterium

2.3 Methanosarcina

2.4 Methanospirillum

2.5 Methanobacillus

ปัจจัยที่เกี่ยวข้องในกระบวนการหมักแบบอับอากาศ

การทำงานของกระบวนการหมักแบบอับอากาศมีปัจจัยต่าง ๆ เข้ามาเกี่ยวข้องหลายอย่างที่จะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพมากหรือน้อย ทั้งในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ และขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทน ได้แก่ อัตราการป้อนอินทรีย์สาร องค์ประกอบของวัตถุดิบ ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย ค่าความเป็นด่าง (alkalinity) อุณหภูมิ ระยะเวลาเก็บกักกากและปริมาณคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C:N)

เป็นด่าง (alkalinity) อุณหภูมิ ระยะเวลาเก็บกักกากและปริมาณคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C:N) เป็นต้น (ปรีดา แย้มเจริญวงศ์. 2534)

ปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อม

pH แบคทีเรียที่สร้างกรดสามารถทน pH ได้ต่ำถึง 4.5 โดยไม่เป็นอันตรายทั้งนี้เนื่องจากแบคทีเรียกลุ่มนี้ย่อยสลายอินทรีย์สารและก่อให้เกิดกรดอินทรีย์ ดังนั้นจึงคงทนต่อสภาพที่ pH เป็นกรดได้ดีสำหรับการเปลี่ยนแปลง pH ภายในถังปฏิกรณ์นั้นเกิดขึ้นเนื่องจากปริมาณของอินทรีย์สารที่ป้อนเข้าสู่ระบบ ถ้ามีการป้อนอินทรีย์สารเข้าสู่ระบบมาก แบคทีเรียที่สร้างกรดจะทำการย่อยสลายอินทรีย์สารเหล่านี้ให้เป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่ายจึงเกิดการสะสมของกรด ทำให้ pH ของระบบลดลง ส่วนแบคทีเรียที่ผลิตก๊าซมีเทน pH ที่เหมาะสมกับประสิทธิภาพการผลิตมีเทน คือ 6.5-7.5 แต่ถ้า pH สูงกว่า 8.0 ประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทนลดลงอย่างรวดเร็วจนหยุดทำงาน แต่ถ้า pH ลดลงต่ำจนถึง 5.0 เป็นอันตรายอย่างรุนแรงต่อแบคทีเรียที่ผลิตก๊าซมีเทน

ความเป็นด่าง เป็นตัวบ่งชี้ถึงเสถียรภาพของระบบเป็นความสามารถของน้ำในการรับอนุภาคโปรตรอน มีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตรของแคลเซียมคาร์บอเนต ถ้าระบบมีค่าความเป็นด่างสูงแสดงว่าระบบมี Buffering Capacity สูงสามารถรักษาค่า pH ให้คงตัวอยู่แม้จะมีการเพิ่มปริมาณของกรดในทางตรงกันข้าม ถ้าระบบมีค่าความเป็นด่างต่ำแสดงว่าเกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ภายในระบบค่อนข้างสูงค่า pH จะลดลงอย่างมาก ดังนั้นต้องระมัดระวังควบคุมการทำงานของระบบให้มากขึ้น ค่าความเป็นด่างที่เหมาะสมมีค่าประมาณ 1000-3000 มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนี้ควรคำนึงถึงอัตราส่วนของความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยต่อระดับความเป็นด่างไบคาร์บอเนต ($\text{VFA}/\text{HCO}_3^{-1}$) ถ้าอัตราส่วนนี้น้อยกว่า 0.4 ระบบมี Buffering Capacity สูง การทำงานของระบบเกิดขึ้นดี ถ้าอัตราส่วนนี้มีค่าสูงกว่า 0.8 แสดงว่า pH ในระบบกำลังลดลงอย่างรวดเร็วการทำงานของระบบจะล้มเหลว

กรดอินทรีย์ระเหย การย่อยสลายอินทรีย์สารในสภาวะไร้ออกซิเจนจะได้กรดอินทรีย์ระเหยเป็นสารตัวกลาง ซึ่งจะถูกใช้เป็นแหล่งอาหารที่สำคัญของแบคทีเรียพวกที่สร้างก๊าซมีเทน ถ้ามีการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยมากกว่าการใช้กรดอินทรีย์ระเหยในระบบ จะทำให้ค่าความเป็นด่างลดลงก่อน

จนกระทั่ง ค่าความเป็นด่างต่ำมาก ถ้ายังมีการสะสมของอินทรีย์ระเหยในระบบอีก pH ของระบบจะลดต่ำลง ถ้า pH ต่ำลงจนถึง 4.5-5.0 จะทำให้ระบบหมักเสียสมดุลระหว่างขั้นตอนการผลิตกรดกับขั้นตอนการผลิตก๊าซ กรดอินทรีย์ระเหยที่ตรวจพบในระบบหมักส่วนใหญ่ได้แก่ กรดอะซิติก กรดบิวทีริก และกรดไพรฟอยนิกในสภาวะที่ pH เป็นกลาง กรดเหล่านี้จะอยู่ในรูป อะซิเตท บิวทีเรท และไพรฟอยเนท

อุณหภูมิ อุณหภูมิของการหมักโดยทั่วไปมีอยู่ 3 ช่วง ดังนี้

1.1 Psychrophilic range อุณหภูมิระหว่าง 5-21 องศาเซลเซียส

1.2 Mesophilic range อุณหภูมิระหว่าง 21-40 องศาเซลเซียส

1.3 Thermophilic range อุณหภูมิระหว่าง 40-60 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการทำงานของกระบวนการหมักแบบไร้ออกซิเจนสามารถแบ่งได้เป็น 2 ช่วง คือ ช่วงแรกระหว่าง 35-40 องศาเซลเซียส ซึ่งอยู่ในช่วง Mesophilic ส่วนอีกช่วงหนึ่งคือ 53-60 องศาเซลเซียสซึ่งอยู่ในช่วงของ Thermophilic

อาหารเสริม นอกจากอินทรีย์สารในระบบหมักที่ใช้เป็นแหล่งอาหารโดยตรงของแบคทีเรียแล้ว แบคทีเรียยังต้องการแร่ธาตุบางชนิดในการเสริมสร้างเซลล์ใหม่ด้วย เช่น ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ในอัตราส่วน COD:N:P เท่ากับ 100:2.2:0.4 แม้ว่าแบคทีเรียจะต้องการแร่ธาตุเหล่านี้ในปริมาณที่ค่อนข้างต่ำมากแต่ถ้าขาดสารเหล่านี้แบคทีเรียจะย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ไม่เต็มที่ จึงจำเป็นต้องเติมสารเหล่านี้โดยปรับอัตราส่วน COD:N:P ให้เหมาะสม (พิทยา ทิพย์ะวัฒน์. 2531)

สารพิษ สารบางอย่างถ้ามีในถังหมักมากเกินไป จะเป็นพิษต่อแบคทีเรีย ซึ่งระดับความเป็นพิษจะขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของสาร สารพิษส่วนใหญ่ได้แก่ พวกเกลืออินทรีย์ รวมทั้งสารประกอบอินทรีย์ที่มีพิษ (toxic organic compound) ส่วนพวกโลหะอัลคาไลน์และโลหะอัลคาไลน์เอิร์ธนั้น จะไม่มีความเข้มข้นที่แน่นอนในการยับยั้งและเป็นพิษ จะแปรเปลี่ยนไปขึ้นอยู่กับว่าโลหะนั้นจะมีปฏิกิริยาโดยตัวมันเองหรือปฏิกิริยาร่วม เช่น แอมโมเนีย เมื่ออยู่ในรูปของ NH_3 จะยับยั้งเมื่อมีความเข้มข้นสูงเพียงพอ ซึ่งอยู่ระหว่าง 1,500-3,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ pH สูงกว่า 7.4

แต่ที่ความเข้มข้นสูงกว่า 3,000 มิลลิกรัมต่อลิตรแล้ว แอมโมเนียมไอออน (NH_4^+) เพียงอย่างเดียวจะเป็นพิษรุนแรง ไม่ว่า pH จะเท่าใดก็ตาม (McCarty. 1964)

ปัจจัยในการปฏิบัติงาน

ระยะเวลาเก็บกัก เป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างหนึ่งในการควบคุมประสิทธิภาพของกระบวนการหมักก๊าซชีวภาพ อัตราการย่อยสลายในกระบวนการหมักแบบอับอากาศจะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาเก็บกักอินทรีย์สาร จนถึงค่าสูงสุดค่าหนึ่ง ต่อจากนั้นก็จะลดลง แต่ถ้าระยะเวลาเก็บกักน้อยเกินไปจะมีผลทำให้ตะกอนแบคทีเรียหลุดออกจากระบบได้มาก จนกระทั่งถึงขั้นหนึ่งที่แบคทีเรียถูกล้างออกจากระบบในอัตราที่เร็วกว่าที่แบคทีเรียจะเพิ่มจำนวนขึ้น ซึ่งเป็นสาเหตุที่ทำให้ระบบล้มเหลว นอกจากนี้ ระยะเวลาเก็บกักจะเป็นปัจจัยหลักในการออกแบบระบบการหมัก กล่าวคือระยะเวลาเก็บกักเป็นระยะเวลาที่ของเสียอยู่ในถังหมัก สามารถหาได้โดยการหารปริมาณถังหมักด้วยปริมาณของของเสียที่เติมลงในถังหมักต่อหน่วยเวลา

อัตราการป้อนอินทรีย์สาร เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญที่สุด ที่กำหนดความสามารถในการบำบัดของเสีย การปรับอัตราการป้อนอินทรีย์สารให้มีค่าแตกต่างกัน ทำได้โดยการเปลี่ยนอัตราการไหลของของเสียที่ไหลผ่านถังหมัก หรือเปลี่ยนค่าความเข้มข้นของของแข็งหรือความเข้มข้นของสารอินทรีย์ที่ใส่เข้าไป ซึ่งการเปลี่ยนอัตราการป้อนอินทรีย์สารจะมีผลต่อระยะเก็บกัก

การกวน การกวนเป็นปัจจัยสำคัญในระบบการย่อยสลายแบบอับอากาศ เนื่องจากทำให้สารอาหารสัมผัสกับจุลินทรีย์ได้ดีขึ้น เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบด้วย และป้องกันการสะสมของอินทรีย์สารตามจุดต่าง ๆ ของถังปฏิกรณ์ และ ทำให้ของเหลวภายในมีสภาพเป็นเนื้อเดียวกัน การมีวิธีการกวนของเหลวในถังปฏิกรณ์ มีหลายวิธีซึ่งแต่ละวิธีจะมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป (ชาญชัย คุณวานากิจ. 2529)

ค่าจำกัดความของค่าศัพท์ต่าง ๆ ที่ใช้งานวิจัย (Khan, Miller and Murray. 1983)

1) ระยะเวลาเก็บกัก คือระยะเวลาในการหมักซึ่งเป็นตัวแปรหลักในการออกแบบการกำจัดของเสีย ระยะเวลาเก็บกัก เป็นระยะเวลาที่ของเสียอยู่ในถังหมัก และ หาได้โดยการหาปริมาณของถังหมักด้วยปริมาณของของเสียที่ไหลผ่านถังหมักต่อหน่วยเวลา ถ้าของเสียที่เติมในถังหมักเป็นของแข็ง จะเรียกว่าระยะเวลาเก็บกักทาง (solid retention time, SRT)

2) ของแข็งทั้งหมด แสดงถึงปริมาณสิ่งเจือปนทั้งหมดคือน้ำว่ามีมากน้อยเพียงใด เมื่อระเหยน้ำออกจนหมด ไม่รวมถึงสารบางอย่างที่ระเหยไปกับน้ำ เช่น พวกกรดอินทรีย์และกรดต่าง ๆ ที่ละลายน้ำโดยสิ่งเจือปนที่เหลือนี้เป็นของแข็ง มีทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ทั้งที่ละลายและไม่ละลายในน้ำ

3) ของแข็งระเหย (volatile solids) คือปริมาณสารอินทรีย์ที่ระเหยง่าย จากสมบัติของสารอินทรีย์ที่ประกอบด้วยคาร์บอนเป็นส่วนใหญ่ เมื่อเผาในอากาศที่มีอุณหภูมิ 550-600 องศาเซลเซียส จะกลายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และระเหยไป แต่สารอนินทรีย์จะคงอยู่ ดังนั้นจะบอกให้ทราบถึงปริมาณสารอินทรีย์ในวัตถุดิบอย่างคร่าว ๆ

4) กรดอินทรีย์ระเหย (volatile acids) เป็นผลิตภัณฑ์ตัวกลางในกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในสภาพแอ็บอากาศ ได้แก่ กรดอินทรีย์ที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบ 1 ถึง 5 อะตอมเป็นส่วนใหญ่

5) สภาพความเป็นด่างรวม (total alkalinity) เป็นพารามิเตอร์ที่บอกถึงความเป็นบัฟเฟอร์ของระบบ เพื่อป้องกันการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วของค่า pH ซึ่งเป็นอันตรายต่อการดำรงชีวิตของจุลินทรีย์ในระบบ

6) ซีโอดี (chemical oxygen demand; COD) คือ ค่าความต้องการออกซิเจนในการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่หาได้โดยวิธีการทางเคมี โดยค่าซีโอดีจะแสดงถึงปริมาณสารอินทรีย์ทั้งหมดในน้ำเสียหรือน้ำทิ้ง ทั้งที่จุลินทรีย์ย่อยสลายได้และย่อยสลายไม่ได้

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

สภาวะต่าง ๆ มีอิทธิพลอย่างมากต่อการย่อยสลายอินทรีย์สารในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ของกระบวนการหมักแบบอับอากาศสองขั้นตอน จากการทดลองการหมักแบบอับอากาศสองขั้นตอนในการผลิตกรดอินทรีย์จากน้ำตาลกลูโคสใน continuous flow stirred tank reactor แบบอับอากาศที่ pH 6.0 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนน้ำตาลกลูโคสจาก 2.5 กรัมต่อลิตรต่อวันจนถึง 75 กรัมต่อลิตรต่อวันจะให้ผลผลิตพวกกรดบิวทีริก อะซิเตทและแลคเตทเพิ่มขึ้น ขณะที่ปริมาณเอทานอลและโพรพิโอนะไม่เปลี่ยนแปลง (Zoetemeyer and others. 1982a) นอกจากนี้ การหมักแบบอับอากาศของน้ำตาลกลูโคสใน fluidized-bed bioreactor พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนอินทรีย์สารจาก 2.5 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรถึงปฏิกรณ์ต่อวันจนถึง 7.5 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรถึงปฏิกรณ์ต่อวัน พบว่าปริมาณกรดอะซิติกจะเพิ่มขึ้นเป็นสัดส่วนโดยตรงกับอัตราการป้อนอินทรีย์สาร ส่วนปริมาณของกรดบิวทีริก และ กรดโพรพิโอนิกจะคงที่และเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนอินทรีย์สารไปจนถึง 21.12 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรถึงปฏิกรณ์ต่อวัน พบว่าปริมาณของกรดบิวทีริกจะเพิ่มขึ้นมา กรดอะซิติกเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ส่วนกรดโพรพิโอนิกค่อนข้างคงที่ (Sreekrishnan, Ramachandran and Ghosh. 1991) และในการศึกษาการหมักแบบอับอากาศของน้ำตาลกลูโคสใน upflow reactor ที่ pH 5.9 อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส พบว่าที่อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 10 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรถึงปฏิกรณ์ต่อวันจะได้แลคเตทเป็นผลผลิตหลัก รองลงมา คือ บิวทีเรท อะซิเตท และ วาสิเรท ตามลำดับ และที่อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 50 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรถึงปฏิกรณ์ต่อวัน จะได้บิวทีเรทเป็นผลผลิตหลัก รองลงมาคืออะซิเตท และโพรพิโอนะ ส่วนแลคเตท จะได้ปริมาณน้อยที่สุด (Zoetemeyer and others. 1982b)

จากการทดลองผลิตกรดอินทรีย์จากน้ำทิ้งจากโรงงานแป้งมันสำปะหลัง โดยใช้ถังปฏิกรณ์แบบ Anaerobic Contact ขนาด 25 ลิตร และ ความจุอุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ตลอดจนการทดลอง การเติมน้ำทิ้งเป็นแบบต่อเนื่อง จุลินทรีย์ที่ออกจากถังปฏิกรณ์จะถูกตกตะกอนแล้วสูบกลับเข้าถังปฏิกรณ์ใหม่ จุดประสงค์ในการศึกษาเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตกรดอินทรีย์จากน้ำทิ้งโรงงาน

แป้งมันสำปะหลัง พบว่าในการผลิตกรดอินทรีย์จากน้ำทิ้งนี้ ควรใช้น้ำทิ้งที่มีค่าซีโอดีสูง 22,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และ เติมน้ำอาหารเสริม (ฟอสฟอรัส) ซึ่งมีความเหมาะสมกว่าน้ำทิ้งที่มีค่าซีโอดีต่ำ เพียง 10,000 มิลลิกรัมต่อลิตร และไม่เติมน้ำอาหารเสริม สภาวะที่เหมาะสมในการผลิตกรดอินทรีย์นี้ ควรควบคุมระบบที่ HRT 1 วัน อัตราการป้อนอินทรีย์สารประมาณ 22 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตร ถึงปฏิบัติการต่อวัน ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพและอัตราการผลิตกรดอินทรีย์สูง แต่ประสิทธิภาพและอัตราการผลิตก๊าซมีเทนต่ำสุด นอกจากนี้ยังพบว่า ที่อัตราการป้อนอินทรีย์สาร 21.39 กิโลกรัมซีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรถึงปฏิบัติการต่อวัน HRT 1 วัน ไม่จำเป็นต้องควบคุม pH ในถึงปฏิบัติการให้เป็นกลาง เมื่อไม่มีการควบคุม pH ระบบการหมักผลิตกรดอินทรีย์มีความเข้มข้นสูงถึง 5,800 มิลลิกรัมต่อลิตร อัตราการผลิตกรดอินทรีย์ (VFA production rate) สูงถึง 4.67 กิโลกรัมในรูปกรดน้ำส้มต่อลูกบาศก์เมตรถึงปฏิบัติการต่อวัน และ ประสิทธิภาพการเปลี่ยนเป็นอินทรีย์สารเป็นกรดอินทรีย์สูงถึง 0.4 กิโลกรัม ต่อ กิโลกรัมอินทรีย์สารที่ถูกขจัด กรดอินทรีย์ที่ผลิตได้มีความเหมาะสมที่จะนำไปหมักต่อเป็นก๊าซมีเทนหรือเลี้ยงแบคทีเรียสังเคราะห์แสง โดยไม่ต้องเติมน้ำอาหารเสริม และปรับ pH แต่อย่างใด (สุเมธ ชวเดช และคณะ. 2530)

นอกจากนี้ยังมีการศึกษาถึงผลของการยับยั้งโดยอุณหภูมิที่ไม่เหมาะสม ศึกษาผลของอุณหภูมิ และอัตราการเติมน้ำอาหารโดยใช้จุลินทรีย์จาก activated sludge ซึ่งมี glucose monohydrate ระดับความเข้มข้นร้อยละ 1.0 เป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับการหมักที่ pH 5.8 + 0.2 และแปรค่าอุณหภูมิ ตั้งแต่ 20 องศาเซลเซียสถึงอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส พบว่าช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมมีสองช่วงคือ ช่วง mesophilic อยู่ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ซึ่งสารตัวกลางที่เกิดขึ้นขึ้นกับอัตราการเติมน้ำอาหาร ถ้าเติมน้ำอัตราสูงมีกรดบิวที่ริกเกิดขึ้นมาก แต่ถ้าเติมน้ำอัตราต่ำมีกรดอะซิติก และโพรพิอิก เป็นผลผลิตที่สำคัญ ส่วนอุณหภูมิที่เหมาะสมอีกช่วงคือ ช่วง thermophilic อยู่ที่ 52 องศาเซลเซียส และมีกรดแลคติกเป็นผลผลิตที่สำคัญ และถ้าเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจาก 46 องศาเซลเซียส เป็นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส พบว่ามีกรดบิวที่ริก, เอทานอล และ กรดแลคติก เกิดขึ้นมาก ทั้งนี้เกิดในขณะที่ เติมน้ำอาหารในอัตราสูง (Zoetemeyer. 1982)

จากศึกษาการผลิตกรดอินทรีย์จากมะเขือเทศเมื่อทำการหมักแบบครั้งคราว (batch) โดยทำการหมักที่ 22 องศาเซลเซียสและ 32 องศาเซลเซียสพบว่าหลังจากทำการหมักไปได้ 41 ชั่วโมง pH ของสารทั้งสองถึงลดลงเหลือ 4.2 และเมื่อการหมักสิ้นสุดลง ถึงปฏิบัติการที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส มี pH เป็น 3.6 และถึงปฏิบัติการที่อุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียส มี pH เป็น 3.4 ขณะที่ทำการหมักไปได้ 41 ชั่วโมง ความเข้มข้นของกรดบิวทีริกในถังปฏิกรณ์ไม่เพิ่มขึ้นอีกเลย แสดงว่าจุลินทรีย์พวกที่สร้างกรดบิวทีริกไม่สามารถเจริญเติบโตได้ในสภาวะแวดล้อมที่มีค่า pH ต่ำกว่า 4.2 ในขณะที่ความเข้มข้นของกรดแลกติกเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงสู่ระยะเวลาการหมักซึ่งใช้เวลา 250 ชั่วโมง ดังนั้นจุลินทรีย์พวกที่สร้างกรดแลกติกจึงสามารถเจริญได้ในสภาวะที่เป็นกรดสูง ได้ศึกษาจุลินทรีย์พวกที่สร้างกรดบิวทีริก ผลการทดลองเปรียบเทียบการหมักที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส และ 32 องศาเซลเซียส พบว่าที่อุณหภูมิ 32 องศาเซลเซียส มีอัตราการผลิตกรดแลกติกสูงกว่าที่อุณหภูมิ 22 องศาเซลเซียส (Koster. 1984)

จากการศึกษาการผลิตกรดอินทรีย์จาก vegetable solid waste แบบอับอากาศสองขั้นตอนโดยขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ ใช้ถึงปฏิบัติการแบบมีการกวนปริมาตรถึงปฏิบัติการ 7 เมตร ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส และ 55 องศาเซลเซียส บ้อนอินทรีย์สารวันละ 1 ครั้ง ในขั้นตอนนี้มีการควบคุม pH โดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ พบว่าผลของอุณหภูมิที่มีต่อขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส กรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้นส่วนใหญ่เป็นการคอะซิติกที่ถูกนำไปใช้ในการผลิตก๊าซมีเทนได้อย่างรวดเร็วในขั้นตอนการผลิตมีเทน ในขณะที่การผลิตกรดอินทรีย์ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส จะได้กรดส่วนใหญ่เป็นการคโปรพิออนิก ซึ่งนำไปใช้ในการผลิตก๊าซมีเทนได้ช้า pH ที่เหมาะสมสำหรับการย่อยสลายอินทรีย์สารไปเป็นกรดอินทรีย์ คือ pH 6.5 อินทรีย์สารจะถูกย่อยสลายได้ถึงร้อยละ 90 (Verrier, Fay and Albagmac. 1987)

การหมักแบบอับอากาศของโปรตีนในถังหมักเดี่ยว (single batch) โดยย่อยสลายที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส 30 องศาเซลเซียส และ 50 องศาเซลเซียสพบว่าที่อุณหภูมิสูงขึ้นอัตราการย่อยสลายอินทรีย์สารสูงขึ้นเป็นร้อยละ 46.0 49.3 และ 50.3 ตามลำดับ (Maly and Fadrus.1971) การหมัก slop waste ซึ่งเตรียมโดยการหมักแอลกอฮอล์จากกากน้ำตาล (molasses) กับยีสต์

ของเสียที่ได้หลังจากกลั่นระเหยเอทานอลออกแล้วเรียกว่า slop waste slop waste จะประกอบด้วยปริมาณของแข็งทั้งหมดร้อยละ 11.50 ของแข็งระเหยร้อยละ 9.76 ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดร้อยละ 3.45 ไนโตรเจนร้อยละ 0.16 ซัลเฟอร์ร้อยละ 2.01 ซัลเฟตร้อยละ 0.20 และหมัก slop waste แบบอับอากาศโดยการบ่มแบบกึ่งต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส และ อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียสพบว่าที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส จะให้กรดอะซิติก และ กรดไพรฟอยอนิกสูงกว่าการหมักที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส แต่จะให้กรดบิวทีริกต่ำกว่า (Permpong, Gaysorn and Susumu. 1985) และในการศึกษาสารตัวกลางในกระบวนการย่อยสลายเปลือกกล้วยแปรรูปแบบอับอากาศสองขั้นตอนที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส โดยมีการบ่มแบบกึ่งต่อเนื่องพบว่าการหมักที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียสให้ปริมาณกรดอะซิติกและกรดบิวทีริกสูงกว่าที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส แต่พบกรดไพรฟอยอนิกเฉพาะที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียสเท่านั้น (ทิพยา ทิพย์วัฒน์. 2531) นอกจากนี้การศึกษากการหมักแบบต่อเนื่องโดยใช้ meat extract กลีเซอรอล โซเดียมคลอไรด์ แคลเซียมคลอไรด์ และ แมกนีเซียมซัลเฟตเป็นอาหารของจุลินทรีย์โดยหมักที่ pH 5.5 อัตราการกวน 300 รอบต่อนาที ระยะเวลาเก็บกัก 8 วัน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส 30 องศาเซลเซียส 35 องศาเซลเซียส และ 40 องศาเซลเซียส พบว่าเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นจะให้กรดอะซิติกและกรดแวลีริกเพิ่มขึ้น แต่กรดไพรฟอยอนิกลดลง ส่วนกรดบิวทีริกคงที่ (Dinopoulou, Rudd and Lester. 1988)

การศึกษาลผลของอัตราการกวน ในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์โดยหมักอินทรีย์สารพวกกลูโคส ซูโครส และเจลาติน ที่ pH 6.8 อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ระยะเวลาเก็บกัก 8-10 วันใช้อัตราการกวนต่างๆในช่วง 350 รอบต่อนาที ถึง 650 รอบต่อนาที พบว่าที่อัตราการกวน 545 รอบต่อนาที จะให้ปริมาณกรดอินทรีย์สูงถึง 954 มิลลิกรัมต่อลิตรโดยให้กรดอะซิติก (ประมาณ 666 มิลลิกรัมต่อลิตร) สูงกว่ากรดไพรฟอยอนิก (ประมาณ 251 มิลลิกรัมต่อลิตร) (Perot and others. 1988) และในการศึกษาผลของการกวนในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์โดยใช้ต้นมะกอกบดเป็นอาหารของจุลินทรีย์ พบว่าการหมักที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส pH 5 และมีระยะเวลาเก็บกักยาวนาน 5 วันโดยเปรียบเทียบการกวนที่ 0 50 และ 200 รอบต่อนาที พบว่าที่อัตราการกวน 200 รอบต่อนาที จะให้กรดอินทรีย์ระเหยพวกอะซิเตท ไพรฟอยอนิก และเอทานอล ที่อัตราการกวน 50 รอบต่อนาที จะพบกรดอินทรีย์

ระเหยคือ อะซิเตท บิวทีเรท โพรพิโอเนท และเอทานอล และที่อัตราการกวน 0 รอบต่อนาทีจะให้การคือนทรีย์ระเหยคือ อะซิเตท บิวทีเรทและเอทานอล นอกจากนี้จะพบอะซิเตทสูงสุดที่อัตราการกวน 50 รอบต่อนาทีและในขั้นตอนการผลิตก๊าซมีเทนพบว่าการกวนจะไม่มีผลต่อการผลิตก๊าซ (Hamdi. 1991)

จากการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำปิบเปลือกสับปะรดโดยใช้กระบวนการหมักแบบสองขั้นตอน โดยศึกษาในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์เปรียบเทียบกับระหว่างการใช้ น้ำหมักที่ไม่มีการวนตะกอนจุลินทรีย์กลับมาใช้ (sludge recycle) น้ำหมักที่มีตะกอนจุลินทรีย์ที่มีการกวนและน้ำหมักที่มีตะกอนจุลินทรีย์แต่ไม่มีการกวนที่มีการเติมอินทรีย์สาร และที่เวลาเก็บกักต่าง ๆ พบว่าที่อัตราการเติมอินทรีย์สาร และ ระยะเวลาเก็บกักเดียวกันการใช้ น้ำหมักที่มีตะกอนจุลินทรีย์มีประสิทธิภาพในการผลิตกรดอินทรีย์ และปริมาณกรดอินทรีย์สูงกว่าการใช้ น้ำหมักที่ไม่มีการวนตะกอนจุลินทรีย์กลับมาใช้ ส่วนที่ใช้น้ำหมักที่มีตะกอนจุลินทรีย์ที่มีการกวน และไม่มีการกวนมีประสิทธิภาพการผลิตกรดอินทรีย์ และปริมาณกรดอินทรีย์ใกล้เคียงกัน (นันทนิตย์ ทศน์เยี่ยม. 2531)

นอกจากนี้การหมักแบบต่อเนื่องใน continuously stirred tank reactor โดยใช้ของเสียจากการชำแหละเนื้อ (meat waste) และเมธานอลเป็นอาหารของจุลินทรีย์ มีระยะเวลาเก็บกัก 3.4 วัน 6.8 วันและ 13.5 วัน พบว่ามีปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมดเป็น 1751 1996 และ 2070 มิลลิกรัมต่อลิตร โดยมีกรดอะซิติกเป็น 960 1085 และ 1135 มิลลิกรัมต่อลิตร และกรดโพรพิโอนิกเป็น 301 319 และ 335 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ คือเมื่อระยะเวลาเก็บกักนานจะมีการอะซิติก กรดโพรพิโอนิก กรดแวลีลิกสูงขึ้น แต่กรดไอโซบิวทีริกลดต่ำลง (Dinopoulau and Lester. 1989)

จากการศึกษาผลกระทบของ pH ต่อการผลิตกรดอินทรีย์ในช่วงที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส โดยใช้ถังหมักแบบกวนใช้กลูโคสร้อยละ 1 และ simple salt เป็นซับสเตรทพบว่าปริมาณกรดอินทรีย์เสถียรภาพของระบบผลิตกรดอินทรีย์มีค่าคงที่ ที่สภาวะเหมาะสมของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ดังนี้ คืออัตราการเจริญเติบโตสูงสุด เท่ากับ 0.33 ต่อชั่วโมง pH เท่ากับ 6.0 อัตราการบ่มสารอินทรีย์เท่ากับ 8.4 กิโลกรัมชีโอดีต่อลูกบาศก์เมตรต่อวันที่อัตราการเจริญเติบโตสูงสุด ผลผลิตที่ได้ประมาณร้อยละ 90 คงที่ที่ pH 6.0 และหลังจากนั้นผลผลิตส่วนใหญ่จะเปลี่ยนจากการคืบคาน เป็นกรดแลคติก กรดอะซิติก,

กรดฟอร์มิค และ เอทานอล (Zoetemeyer and others. 1982)

จากการศึกษาผลกระทบของ pH ต่อการผลิตกรดอินทรีย์จากน้ำตาลแลคโตสซึ่งเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ของของเสียจากอุตสาหกรรมทำเนย (cheese whey) ซึ่งศึกษาช่วงของ pH ระหว่าง 4.0 ถึง 6.5 พบว่าช่วง pH ที่เหมาะสมอยู่ในระหว่าง 6.0-6.5 ช่วง pH ดังกล่าวผลผลิตกรดที่พบมากที่สุด ได้แก่ กรดอะซิติก และกรดบิวทีริก ส่วนผลผลิตรองลงมา ได้แก่ เอทานอล กรดโพรพิโอนิก และกรดคาโพรอิก (caproic acid) แต่กรดไฮโซบิวทีริกและกรดแลคติกพบน้อยมาก ส่วนกรดฟอร์มิคไม่พบเลย (Kisaalita, Pinder and Lo. 1986)

จากการศึกษาการย่อยสลายซัสเตรทต่าง ๆ โดยจุลินทรีย์จากถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซชีวภาพ ในขวดซีรัมที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เมื่อใช้กรดอินทรีย์แต่ละชนิด (กรดอะซิติก กรดบิวทีริก กรดแลคติก และ กรดโพรพิโอนิก) ที่ความเข้มข้น 20 50 และ 100 มิลลิโมลาร์เป็นซัสเตรท พบว่าความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการใช้ของจุลินทรีย์ที่ผลิตก๊าซมีเทนเพิ่มขึ้นซ้ำลง ปริมาณของซัสเตรทที่ถูกใช้ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นสูงขึ้นกับชนิดของกรดอินทรีย์ ในกรณีของกรดอะซิติก กรดบิวทีริก และกรดโพรพิโอนิกที่ความเข้มข้น 20 มิลลิโมลาร์ กรดแต่ละชนิดที่ถูกใช้ได้มากกว่าร้อยละ 90 แต่เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นเป็น 50 มิลลิโมลาร์ จุลินทรีย์ที่ผลิตก๊าซมีเทนใช้ได้เพียงร้อยละ 55 50 และ 20 ตามลำดับ แม้ว่าจะเพิ่มระยะเวลาการย่อยสลายให้นานขึ้น และความเข้มข้นของซัสเตรทลดลงแล้วก็ตาม แสดงให้เห็นว่านอกจากผลของการยับยั้งของซัสเตรทแล้ว กรดเหล่านี้ยังมีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์อีกด้วย ความเป็นพิษของกรดขึ้นกับชนิดของกรด จากการศึกษาพบว่า กรดโพรพิโอนิกมีความเป็นพิษมากกว่ากรดอะซิติก (เกษแก้ว ปะนะมณฑา. 2534)

จากรายงานวิจัยต่าง ๆ พบว่าอัตราการบ่มอินทรีย์สาร ระยะเวลาเก็บกัก อุณหภูมิ และการกวน จะมีผลต่อชนิดและปริมาณของกรดอินทรีย์สารที่สร้างขึ้นในการหมักแบบอับอากาศ และการหมักแบบอับอากาศสองขั้นตอน เป็นวิธีการหมักที่ให้ผลในการกำจัดอินทรีย์สาร และการเกิดก๊าซชีวภาพได้ดีกว่าการหมักแบบขั้นตอนเดียว ดังนั้นจึงสนใจที่จะศึกษาผลของอัตราการบ่มอินทรีย์สาร ระยะเวลาเก็บกัก อุณหภูมิ และการกวนต่อชนิด และปริมาณของสารตัวกลางที่เกิดขึ้น ในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ เพื่อหาให้ทราบสภาวะที่เหมาะสมที่สุดของขั้นตอนแรกของการหมักจากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอน

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. ศึกษาผลของอัตราการป้อนอินทรีย์สาร ระยะเวลาเก็บกักกาก อุณหภูมิและการกวนต่อปริมาณ และชนิดของสารตัวกลางที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์
2. เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสม ในการย่อยสลายกากมะเขือเทศเพื่อให้ได้กรดอินทรีย์ โดยเฉพาะกรดอะซิติกปริมาณสูงสุด

ประโยชน์ของงานวิจัย

1. ได้ข้อมูลและทราบถึงวิธีการต่าง ๆ ที่ใช้ในการศึกษาในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ของการหมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอน
2. ทราบถึงผลของสภาวะต่าง ๆ ในการหมักเช่น อัตราการป้อนอินทรีย์สาร ระยะเวลาเก็บกักกาก อุณหภูมิและการกวนต่อสารตัวกลางที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ในเชิงปริมาณและ คุณภาพ
3. เข้าใจถึงสภาวะที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากกากมะเขือเทศมากขึ้นซึ่งสามารถนำมาใช้ในการควบคุมการทำงานของถังปฏิกรณ์ผลิตกรดอินทรีย์ เพื่อการศึกษาในรายละเอียดต่อไป

บทที่ 2

วิธีการวิจัย

ทำการวิจัยที่ห้องปฏิบัติการของภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร และที่คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี โดยมีแผนการวิจัยและวิธีการวิจัยดังนี้

แผนการวิจัย

การหมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอนในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์โดยนากากมะเขือเทศผสมหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการผลิตกรดอินทรีย์ โดยศึกษาและเปรียบเทียบระหว่างถึงปฏิกิริยาการผลิตกรดอินทรีย์ที่อัตราการบ่มอินทรีย์สาร ระยะเวลาเก็บกักกาก อุณหภูมิและการกวนต่างกัน

การทดลองทั้งหมดมี 3 ชุดการทดลองดังนี้คือ

การทดลองที่ 1 เป็นการศึกษาผลของอัตราการบ่มอินทรีย์สารที่มีความเข้มข้นกากมะเขือเทศเป็น 10 กรัมต่อลิตร และ 20 กรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาเก็บกักกากต่าง ๆ คือ 3 วัน 5 วัน และ 10 วัน ต่อขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์

การทดลองที่ 2 ศึกษาผลเปรียบเทียบผลของอุณหภูมิที่อุณหภูมิต่าง ๆ กันคือที่อุณหภูมิห้อง 40 องศาเซลเซียส 45 องศาเซลเซียส 50 องศาเซลเซียส และ 55 องศาเซลเซียส ต่อขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน 5 วันและ 10 วัน และเมื่อใช้กากมะเขือเทศผสมน้ำเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร

การทดลองที่ 3 ศึกษาเปรียบเทียบผลของการกวนต่อขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ ที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และเมื่อใช้กากมะเขือเทศผสมน้ำเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร

แหล่งของจุลินทรีย์ ถังปฏิกรณ์และวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตกรดอินทรีย์

1. แหล่งของจุลินทรีย์

จุลินทรีย์ที่ใช้ในการผลิตกรดอินทรีย์ นำมาจากน้ำหมักที่ถ่ายออกจากถังปฏิกรณ์ผลิตกรดอินทรีย์จากน้ำปี้จากเปลือกสับปะรด ของคณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี

2. ถังปฏิกรณ์

ถังปฏิกรณ์ผลิตกรดอินทรีย์ใช้ขวดแก้วรูปชมพู่ขนาด 2.5 ลิตร โดยมีปริมาตรใช้งาน 1.5 ลิตร

3. วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตกรดอินทรีย์

วัตถุดิบที่ใช้เป็นกากมะเขือเทศแห้งผสมน้ำให้มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตรและหรือ 20 กรัมต่อลิตร โดยกากมะเขือเทศแห้งเป็นกากเหลือทิ้ง และได้รับความอนุเคราะห์จากโครงการอาหารหลวงสำเร็จรูปบรรจุใส่ถุงพลาสติกปิดผนึก เก็บไว้ในตู้เย็นหมักหมอง

วิธีดำเนินการทดลอง

1. การเตรียมเชื้อจุลินทรีย์สำหรับผลิตกรดอินทรีย์

นํากากมะเขือเทศแห้งมาผสมกับหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการผลิตกรดอินทรีย์ ให้มีปริมาณกากมะเขือเทศ 10 กรัมต่อลิตร หมักในถังปฏิกรณ์ผลิตกรดอินทรีย์การหมักในช่วงแรกเป็นแบบเก็บกัก (batch process) นานประมาณ 1 สัปดาห์ น้ำหมักที่ได้นี้ใช้เป็นหัวเชื้อจุลินทรีย์สำหรับการหมักเพื่อให้ได้กรดอินทรีย์ต่อไป

2. การเตรียมถังปฏิกรณ์ผลิตกรดอินทรีย์

นํากากมะเขือเทศแห้งผสมกับหัวเชื้อจุลินทรีย์สำหรับผลิตกรดอินทรีย์ที่เตรียมตามข้อ 1 ให้มีปริมาณกากมะเขือเทศเป็น 10 กรัมต่อลิตร และ 20 กรัมต่อลิตร แล้วหมักในถังปฏิกรณ์ผลิตกรดอินทรีย์นานประมาณ 1 สัปดาห์ ถังปฏิกรณ์ผลิตกรดอินทรีย์จะใช้ในการทดลองต่อไป

3. การหมักเพื่อให้ได้กรดอินทรีย์

นำถังปฏิกรณ์ที่ผลิตกรดอินทรีย์จากข้อ 2 ทำการทดลอง โดยศึกษาผลของสภาวะต่าง ๆ ต่อการผลิตกรดอินทรีย์ ดังนี้คือ

3.1 อัตราการบ้อนอินทรีย์สาร และระยะเวลาเก็บกักกาก

นำกากมะเขือเทศแห้งผสมกับน้ำให้มีปริมาณกากมะเขือเทศ 10 กรัมต่อลิตรและ 20 กรัมต่อลิตรแล้วบ้อนเข้าถังปฏิกรณ์ผลิตกรดอินทรีย์ (ที่เตรียมได้ตามข้อ 2) โดยจะบ้อนแบบกึ่งต่อเนื่อง (semicontinuous process) วันละครั้ง ก่อนเติมกากมะเขือเทศจะกวาดถังปฏิกรณ์ประมาณ 1 นาที แล้วตักน้ำหมักผสมกากมะเขือเทศออกในปริมาตรเท่ากับที่จะเติมเข้าไป และเมื่อเติมกากมะเขือเทศแล้วกวาดให้เข้ากันประมาณ 1 นาที ที่แต่ละการบ้อนอินทรีย์สารจะหมักโดยให้มีระยะเวลาเก็บกักกากเป็น 3 วัน 5 วันและ 10 วัน การทดลองแต่ละถังปฏิกรณ์จะต้องใช้เวลาในการปรับสภาพประมาณ 30-40 วัน จึงเริ่มนำตัวอย่างน้ำหมักมาทำการวิเคราะห์ และเก็บข้อมูลต่ออีกประมาณ 30 วัน

3.2 อุณหภูมิ

ศึกษาผลของอุณหภูมิต่อขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์จากกากมะเขือเทศ โดยทำการหมักกากมะเขือเทศที่อุณหภูมิห้อง 40 องศาเซลเซียส 45 องศาเซลเซียส 50 องศาเซลเซียสและ 55 องศาเซลเซียส นำกากมะเขือเทศแห้งผสมกับน้ำที่ปรับอุณหภูมิให้เท่ากับที่จะใช้ในการทดลอง บ้อนเข้าสู่ถังหมักแบบกึ่งต่อเนื่องวันละครั้งโดยแต่ละอุณหภูมิจะต้องใช้เวลาในการปรับสภาพประมาณ 40 วัน และศึกษาโดยให้มีระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน 5 วัน และ 10 วัน

3.3 การกวน

ศึกษาผลของการกวนต่อขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ ที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ปริมาณกากมะเขือเทศ 10 กรัมต่อลิตร โดยเปรียบเทียบระหว่างมีการกวนกับการไม่กวน (กวนโดยใช้เครื่องกวนแม่เหล็ก กวนในอัตราประมาณ 545 รอบต่อนาที)

การบันทึกข้อมูล

- วัดปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้นโดยการแทนที่น้ำและวัด pH ในถังที่ผลิตกรดอินทรีย์ทุกวัน
- วิเคราะห์ค่าซีไอดี ความเป็นด่างและกรดอินทรีย์ระเหยทุก ๆ 2 วัน
- วิเคราะห์คุณภาพของก๊าซที่เกิดขึ้นสัปดาห์ละ 1 ครั้ง

การวิเคราะห์ค่าซีไอดี เป็นการหาปริมาณอินทรีย์สารในน้ำหมักโดยวิธี open reflux (APHA. AWWA. WPCF.1985) โดยคิดเปรียบเทียบปริมาณของปริมาณออกซิเจนที่ต้องการใช้ในการออกซิไดซ์อินทรีย์สารด้วยสารเคมีซึ่งมีอำนาจการออกซิไดซ์สูง (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 เติมน้ำหมักหรือน้ำหมักที่ทาให้เจือจางแล้วลงไป 20 ลูกบาศก์เซนติเมตร เขย่าให้เข้ากัน เติมสารละลายมาตรฐานโพแทสเซียมไดโครเมตที่มีความเข้มข้น 0.0417 นมลาร์ 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 ทิ้งไว้ให้เย็น ล้างเครื่องควบแน่นด้วยน้ำกลั่นก่อนที่จะถอดเครื่องควบแน่นออกจากขวดรีฟลักซ์
3. เจือจางส่วนผสมที่ได้ด้วยน้ำกลั่น จนมีปริมาตรประมาณ 150 ลูกบาศก์เซนติเมตร ทาให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง แล้วตีเตรตหาปริมาณของไดโครเมตที่มากเกินไปด้วยสารละลายมาตรฐานไอโอรอน (II) แอมโมเนียมซัลเฟตที่มีความเข้มข้น 0.10 โมลาร์ โดยใช้เฟอโรอินเป็นอินดิเคเตอร์ เมื่อถึงจุดสมมูลย์สารละลายจะเปลี่ยนจากสีน้ำเงินเขียวเป็นสีน้ำตาลแดง
4. ทาแบลนด์ (blank) โดยใช้ น้ำกลั่น 20 ลูกบาศก์เซนติเมตรแทนน้ำหมัก และทำการวิเคราะห์พร้อมไปกับตัวอย่าง

การคำนวณ

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

- a = ปริมาตรของไอโอรอน (II) แอมโมเนียมซัลเฟตซึ่งใช้ตีเตรตกับแบลนด์ (ลูกบาศก์เซนติเมตร)
- b = ปริมาตรของไอโอรอน (II) แอมโมเนียมซัลเฟตซึ่งใช้ตีเตรตกับน้ำหมัก (ลูกบาศก์เซนติเมตร)
- M = ความเข้มข้นของไอโอรอน (II) แอมโมเนียมซัลเฟต (โมลาร์)

การวิเคราะห์ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย alkalinity (VFA) โดยวิธีการตีเตรต (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. ปีกเกอร์ขนาด 250 ลูกบาศก์เซนติเมตร

วิธีวิเคราะห์

1. เตรียมน้ำหมักที่จะหาปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย โดยวางทิ้งไว้ตกตะกอนและรินเอาแต่ส่วนที่ใสหรือนำไปปั่นตกตะกอนที่ความเร็ว 1,000 g ประมาณ 5 นาที
2. นำน้ำหมักใส่ในปีกเกอร์ 2 ใบ ใบละ 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร วัด pH ของน้ำหมัก แล้วเติมกรดน้ำหมักด้วยสารละลายมาตรฐานกรดซัลฟูริกเข้มข้น 0.05 โมลาร์ เขย่าตลอดเวลาจนกระทั่ง pH เป็น 4 จดปริมาณกรดที่ใช้เพื่อนำไปคำนวณหาค่าความเป็นด่างของน้ำหมักทั้งหมด (total alkalinity) แล้วเติมกรดต่อจน pH อยู่ระหว่าง 3.3-3.5
3. คัมสารตัวอย่างให้เดือดเบา ๆ ประมาณ 3 นาที แล้วทิ้งให้เย็นเท่าอุณหภูมิห้อง ระหว่างนี้ให้ปรับเครื่องวัดความเป็นกรด-ด่าง ด้วยสารละลายมาตรฐานบัฟเฟอร์ pH 4
4. เติกรดน้ำหมักจากข้อ 3 ด้วยสารละลายมาตรฐานโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 โมลาร์ จน pH เป็น 4 เติกรดต่อจน pH เป็น 7 จดปริมาณของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการเติมกรดจาก pH 4 ถึง pH 7

การคำนวณ

1. คำนวณค่าความเป็นต่างของสารละลายตัวอย่างน้ำหมัก

ความเป็นต่างทั้งหมด (มิลลิกรัม CaCO_3 ต่อลิตร)

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

ปริมาณของน้ำหมัก (50 ลูกบาศก์เซนติเมตร)

$$= [\text{ปริมาณของกรดซัลฟูริกที่ใช้จน pH เป็น 4 (ลบ.ชม.)}] \times 100$$

ความเป็นต่างของกรดอินทรีย์ระเหย (มิลลิกรัม CaCO_3 ต่อลิตร)

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

ปริมาณของน้ำหมัก (50 ลูกบาศก์เซนติเมตร)

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

การคำนวณหาปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย

1. ถ้าความเป็นต่างของกรดอินทรีย์ระเหยมากกว่า 180 มิลลิกรัมต่อลิตร
(ปริมาณของกรดอินทรีย์ระเหย) = ความเป็นต่างของกรดอินทรีย์ระเหย $\times 1.5$
2. ถ้าความเป็นต่างของกรดอินทรีย์ระเขยน้อยกว่า 180 มิลลิกรัมต่อลิตร
(ปริมาณของกรดอินทรีย์ระเหย) = ความเป็นต่างของกรดอินทรีย์ระเหย $\times 1.0$

การวิเคราะห์หาปริมาณของของแข็ง

ปริมาณของของแข็งทั้งหมด เป็นปริมาณสารที่เหลืออยู่ ณ ภาชนะหลังจากการระเหยน้ำออกจากน้ำหนักทั้งหมด โดยน้ำหนักปริมาตร 50 ลูกบาศก์เซนติเมตร ใส่ในถ้วยระเหย และนำไปอบที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียสจนน้ำหนักคงที่ บล่อยาให้เย็นในเดสิคเคเตอร์ แล้วชั่งหาน้ำหนักของของแข็งในภาชนะนั้น เพื่อบหาปริมาณของของแข็งทั้งหมดซึ่งมีหน่วยเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร

วิธีวิเคราะห์

1. การเตรียมจานระเหย จานที่ใช้ต้องอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียสประมาณ 1 ชั่วโมง บล่อยาให้เย็นในเดสิคเคเตอร์ (desiccator) แล้วชั่งหาน้ำหนัก
2. เลือกใช้ปริมาตรของน้ำตัวอย่างให้เหมาะสม โดยปกติใช้ 50 หรือ 100 ลูกบาศก์เซนติเมตร
3. ค่อย ๆ รินน้ำตัวอย่างที่ต้องการหาปริมาณของของแข็งทั้งหมดลงในถ้วยระเหยที่ตั้งบนเครื่องอังไอน้ำ เมื่อไอน้ำระเหยออกหมด นำจานระเหยอบในตู้อบที่อุณหภูมิ 103 ถึง 105 องศาเซลเซียส จนน้ำหนักคงที่ บล่อยาให้เย็นในเดสิคเคเตอร์
4. ชั่งจานระเหยทันทีที่เป็นลงเท่าอุณหภูมิห้อง น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นคือน้ำหนักของสารทั้งหมด ซึ่งคำนวณเป็นมิลลิกรัมต่อลิตร

การคำนวณ

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

ปริมาณของของแข็งระเหย เป็นปริมาณของสารที่ละลายได้ที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ส่วนใหญ่จะเป็นสารอินทรีย์ ส่วนตะกอนที่เหลืออยู่ไม่ละลายไปเรียกว่าปริมาณสารคงตัว ส่วนใหญ่เป็นสารอนินทรีย์

วิธีวิเคราะห์

1. นำจานระเหยที่วิเคราะห์หาปริมาณของของแข็งทั้งหมดแล้วเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียสจนกระทั่งน้ำหนักคงที่ (ประมาณ 15-20 นาที) บดอย่าให้เย็นในเคลสิกเคเตอร์
2. ชั่งจานระเหยทันทีที่เย็นลงที่อุณหภูมิห้อง จะได้น้ำหนักสารคงตัวที่เหลืออยู่ ซึ่งจะนำไปคำนวณหาปริมาณของของแข็งระเหย

การคำนวณ

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

$$\text{ปริมาณสารระเหยทั้งหมด (มิลลิกรัมต่อลิตร)} = \frac{\text{ปริมาณสารทั้งหมด (มก.)}}{\text{(มก./ล.)}} - \frac{\text{ปริมาณสารคงตัว (มก.)}}{\text{(มก./ล.)}}$$

การวัดปริมาตรก๊าซที่เกิดขึ้นในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์

โดยการวัดปริมาตรของน้ำที่ล้นออกมาเมื่อถูกแทนที่ด้วยก๊าซ

การวิเคราะห์คุณภาพของก๊าซ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซในถังปฏิกรณ์ผลิตกรดอินทรีย์

Shimadzu Gas Chromatography Model GC-9A

- Thermal Conductivity Detector (TCD)
- 80/100 mesh Porapak N.Column
- อุณหภูมิคอลัมน์ 70 องศาเซลเซียส
- อุณหภูมิของ injector port 100 องศาเซลเซียส
- อุณหภูมิของ detector 120 องศาเซลเซียส

วิธีวิเคราะห์

เป็นการหาปริมาณก๊าซในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ โดยจะเก็บก๊าซจากถังปฏิกรณ์ผลิตกรดอินทรีย์ โดยใช้หลอดแก้วรูปตัวยูต่อเข้าระหว่างถังปฏิกรณ์ผลิตกรดอินทรีย์ ดังภาพประกอบ แล้วนำก๊าซที่เก็บได้ไปวิเคราะห์หาปริมาณก๊าซด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟ ใช้ syringe ดูดเอาก๊าซตัวอย่างจากหลอดแก้วรูปตัวยูฉีดเข้าไปยัง injector port ก๊าซตัวอย่างจะถูกส่งผ่านเข้าไปในคอลัมน์ซึ่งสามารถแยกก๊าซออกจากกันโดยมีฮีเลียม (He) เป็น carrier gas และก๊าซที่แยกได้จะเคลื่อนออกจากคอลัมน์ผ่านเข้าไปใน detector และส่งสัญญาณไปยัง recorder บันทึกเป็น peak ของโครมาโตแกรมและบอกค่าก๊าซที่แยกได้เป็นร้อยละของก๊าซทั้งหมด โดย peak แรกเป็นอากาศ ส่วน peak ต่อไปคือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์

การวิเคราะห์หากรดอินทรีย์

อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิเคราะห์หาชนิดและปริมาณของกรดอินทรีย์

Shimadzu Gas Chromatography Model GC-14A

- Flame Ionization Detection (FID)
- 80/100 mesh Porapak N.Column
- อุณหภูมิคอลัมน์ 170 องศาเซลเซียส
- อุณหภูมิของ injector port 200 องศาเซลเซียส
- อุณหภูมิของ detector 120 องศาเซลเซียส

วิธีวิเคราะห์

เป็นการหากรดอินทรีย์ด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟ โดยนำตัวอย่างที่ได้มา 5 มิลลิลิตรผสมกับกรดออกซาลิก 3 โมลาร์ (M) 1 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันแล้วนำไปปั่นที่ความเร็วรอบ 10,000 g ประมาณ 5 นาที ดูดเฉพาะของเหลวใส 1 มิลลิลิตร ใส่ในขวดแก้วใช้เครื่อง auto injector เป็น

ตัวดูดของเหลวสี 1 ไมโครลิตร ฉีดเข้าเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟโดยมีไนโตรเจน (N_2) เป็น carrier gas และก๊าซที่แยกได้จะเคลื่อนออกจากคอลัมน์ผ่านเข้าไปใน detector และส่งสัญญาณไปยัง recorder บันทึกเป็น peak area โดย peak แรกเป็นเอทานอล ต่อไปคือกรดอะซิติก กรดไพรูวอิก กรดบิวทีริก และกรดแวลริกตามลำดับ

บทที่ 3

ผลการวิจัย

1. ผลของความเข้มข้นกากมะเขือเทศต่อขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์

หมักกากมะเขือเทศเพื่อให้ได้กรดอินทรีย์ตามวิธีการวิจัยในบทที่ 2 โดยใช้กากมะเขือเทศแห้ง ผสมกับหัวเชื้อจุลินทรีย์สำหรับผลิตกรดอินทรีย์ ให้มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร และ 20 กรัมต่อลิตร ให้มีระยะเวลาเก็บกักกากนาน 3 วัน 5 วัน และ 10 วัน ทำการทดลองนานประมาณ 2 เดือน นำน้ำหมักที่ได้มากรองและวิเคราะห์หาปริมาณอินทรีย์สาร กรดอินทรีย์ระเหย pH และค่าความเป็นด่าง ผลการทดลองพบว่า ที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน เมื่อใช้น้ำหมักมะเขือเทศเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร และ 20 กรัมต่อลิตร น้ำหมักที่กรองได้จะมีปริมาณอินทรีย์สารเท่ากับ 1470 และ 3009 มิลลิกรัมซีไอต่อลิตรและปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยเท่ากับ 921 และ 1340 มิลลิกรัมต่อลิตร pH เท่ากับ 4.26 และ 4.36 ความเป็นด่างเท่ากับ 92 และ 111 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถจัดอินทรีย์สารในขั้นตอนนี้ได้ร้อยละ 17.35 และ 14.71 ของของแข็งทั้งหมดหรือร้อยละ 24.62 และ 17.49 ของของแข็งระเหยตามลำดับ นอกจากนี้สารตัวกลางที่พบในน้ำหมักที่กรองได้คือกรดอะซิติก กรดไพรูวอิก กรดบิวทีริก กรดแวนิลิก และเอทานอล ซึ่งเมื่อใช้กากมะเขือเทศที่มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร และ 20 กรัมต่อลิตร จะให้กรดอะซิติกเท่ากับ 5.25 และ 8.51 มิลลิโมลาร์ หรือร้อยละ 34.20 และ 38.13 ของกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมด กรดไพรูวอิกเท่ากับ 0.96 และ 1.97 มิลลิโมลาร์ หรือร้อยละ 9.22 และ 12.98 ของกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมด กรดบิวทีริกเท่ากับ 4.15 และ 5.37 มิลลิโมลาร์ หรือร้อยละ 46.03 และ 40.89 ของกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมด กรดแวนิลิกเท่ากับ 0.83 และ 0.92 มิลลิโมลาร์หรือร้อยละ 10.53 และ 7.98 ของกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมด และเอทานอลเท่ากับ 1.80 และ 0.28 มิลลิโมลาร์ตามลำดับดังผลแสดงในตาราง 2

ตาราง 2 ผลของความเข้มข้นกากมะเขือเทศต่อปริมาณอินทรีย์สาร กรดอินทรีย์ระเหย pH ความ
เป็นด่าง การขจัดอินทรีย์สาร ชนิดและปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์
ของการหมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอนที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน

พารามิเตอร์	ความเข้มข้นกากมะเขือเทศ (กรัมต่อลิตร)			
	10		20	
COD (มก. ซีไอดีต่อลิตร)	1470		3009	
TVA (มก. ต่อลิตร)	921		1340	
VFA (มก. ต่อลิตร)	769		1033	
pH	4.26		4.36	
ค่าความเป็นด่าง (มก. ต่อลิตร)	92		111	
สารตัวกลางที่เกิดขึ้น	มิลลิโมลาร์	ร้อยละของ กรดอินทรีย์ ระเหยทั้งหมด	มิลลิโมลาร์	ร้อยละของ กรดอินทรีย์ ระเหยทั้งหมด
กรดอะซิติก	5.25	34.20	8.51	38.13
กรดไพรูวอิก	0.96	9.22	1.97	12.98
กรดบิวทีริก	4.15	46.03	5.37	40.89
กรดแวลริก	0.83	10.53	0.92	7.98
เอทานอล	1.80	-	0.28	-
การขจัดอินทรีย์สาร				
ร้อยละของของแข็งทั้งหมด	17.35		14.71	
ร้อยละของของแข็งระเหย	24.62		17.49	

หมายเหตุ ร้อยละของกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมดคิดจากปริมาณกรดในหน่วยของมิลลิกรัมต่อลิตร
เทียบกับค่า TVA

เมื่อป้อนกากมะเขือเทศผสมน้ำที่มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร และ 20 กรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน พบว่า จะให้ปริมาณอินทรีย์สารเท่ากับ 2058 และ 3750 มิลลิกรัม ซีโอดีต่อลิตร และปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยเท่ากับ 1302 และ 1969 มิลลิกรัมต่อลิตร pH เท่ากับ 4.24 และ 4.37 ความเป็นด่างเท่ากับ 125 และ 133 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถจัดอินทรีย์สารในขั้นตอนน้ำได้ร้อยละ 22.42 และ 15.94 ของของแข็งทั้งหมดหรือร้อยละ 27.56 และ 19.23 ของของแข็งระเหยตามลำดับและสารตัวกลางที่พบในน้ำหมักที่กรองได้คือกรดอะซิติก กรดไพรูวอิก กรดบิวทีริก กรดแวลีริก และเอทานอล ซึ่งเมื่อใช้กากมะเขือเทศที่มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร และ 20 กรัมต่อลิตร จะให้กรดอะซิติกเท่ากับ 8.03 และ 15.78 มิลลิโมลาร์ หรือร้อยละ 37.01 และ 48.09 ของกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมด กรดไพรูวอิกเท่ากับ 1.07 และ 2.84 มิลลิโมลาร์ หรือร้อยละ 7.29 และ 12.69 ของกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมด กรดบิวทีริกเท่ากับ 6.10 และ 6.44 มิลลิโมลาร์ หรือร้อยละ 47.84 และ 33.36 ของกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมด กรดแวลีริกเท่ากับ 0.87 และ 0.99 มิลลิโมลาร์หรือร้อยละ 7.83 และ 5.84 ของกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมด 7.83 และ 5.84 และเอทานอลเท่ากับ 1.76 และ 0.04 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ ดังผลแสดงในตาราง 3

ตาราง 3 ผลของความเข้มข้นกากมะเขือเทศต่อปริมาณอินทรีย์สาร กรดอินทรีย์ระเหย pH ความ
เป็นด่าง การจัดอินทรีย์สาร ชนิดและปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์
ของการหมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอนที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน

พารามิเตอร์	ความเข้มข้นกากมะเขือเทศ (กรัมต่อลิตร)			
	10		20	
COD (มก. ซีไอดีต่อลิตร)	2058		3750	
TVA (มก. ต่อลิตร)	1302		1969	
VFA (มก. ต่อลิตร)	1043		1307	
pH	4.24		4.37	
ค่าความเป็นด่าง (มก. ต่อลิตร)	125		133	
สารตัวกลางที่เกิดขึ้น	มิลลิโมลาร์	ร้อยละของ กรดอินทรีย์ ระเหยทั้งหมด	มิลลิโมลาร์	ร้อยละของ กรดอินทรีย์ ระเหยทั้งหมด
กรดอะซิติก	8.03	37.01	15.78	48.09
กรดไพรูวอิก	1.07	7.29	2.84	12.69
กรดบิวทีริก	6.10	47.84	6.44	33.36
กรดแวนิลิก	0.87	7.83	0.99	5.84
เอทานอล	1.76	-	0.04	-
การจัดอินทรีย์สาร				
ร้อยละของของแข็งทั้งหมด	22.42		15.94	
ร้อยละของของแข็งระเหย	27.56		19.23	

หมายเหตุ ร้อยละของกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมดคิดจากปริมาณกรดในหน่วยของมิลลิกรัมต่อลิตร

เทียบกับค่า TVA

เมื่อป้อนกากมะเขือเทศสับน้ำที่มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตรและ 20 กรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 10 วัน พบว่าจะให้ปริมาณอินทรีย์สารเท่ากับ 2303 และ 4583 มิลลิกรัม ซีไอต่อลิตร และปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยเท่ากับ 1490 และ 2439 มิลลิกรัมต่อลิตร pH เท่ากับ 4.34 และ 4.45 ความเป็นด่างเท่ากับ 185 และ 233 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถขจัดอินทรีย์สารในขั้นตอนนี้ได้ร้อยละ 50.87 และ 41.43 ของของแข็งทั้งหมด หรือร้อยละ 53.56 และ 41.44 ของของแข็งระเหยตามลำดับ และสารตัวกลางที่พบในน้ำหมักที่กรองได้คือ กรดอะซิติก กรดไพรูวอิก กรดบิวทีริก กรดแวลีริกและเอทานอล ซึ่งเมื่อใช้กากมะเขือเทศที่มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตรและ 20 กรัมต่อลิตร จะให้กรดอะซิติกเท่ากับ 10.40 และ 20.15 มิลลิโมลาร์ หรือร้อยละ 41.87 และ 49.56 ของกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมด กรดไพรูวอิกเท่ากับ 1.43 และ 3.31 มิลลิโมลาร์ หรือร้อยละ 8.45 และ 11.97 ของกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมด กรดบิวทีริกเท่ากับ 6.24 และ 7.83 มิลลิโมลาร์ หรือร้อยละ 42.75 และ 32.75 ของกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมด กรดแวลีริกเท่ากับ 0.88 และ 1.19 มิลลิโมลาร์ หรือร้อยละ 6.91 และ 5.69 ของกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมด และเอทานอลเท่ากับ 1.43 และ 0.04 มิลลิโมลาร์ตามลำดับ ดังผลแสดงในตาราง 4

ตาราง 4 ผลของความเข้มข้นกากมะเขือเทศต่อปริมาณอินทรีย์สาร กรดอินทรีย์ระเหย pH ความ
เป็นด่าง การขจัดอินทรีย์สาร ชนิดและปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์
ของการหมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอน ที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 10 วัน

พารามิเตอร์	ความเข้มข้นกากมะเขือเทศ (กรัมต่อลิตร)			
	10		20	
COD (มก.ซีไอดีต่อลิตร)	2303		4583	
TVA (มก.ต่อลิตร)	1490		2439	
VFA (มก.ต่อลิตร)	1149		1873	
pH	4.34		4.45	
ค่าความเป็นด่าง (มก.ต่อลิตร)	185		233	
สารตัวกลางที่เกิดขึ้น	มิลลิโมลาร์	ร้อยละของ กรดอินทรีย์ ระเหยทั้งหมด	มิลลิโมลาร์	ร้อยละของ กรดอินทรีย์ ระเหยทั้งหมด
กรดอะซิติก	10.40	41.87	20.15	49.56
กรดไพรูวอิก	1.43	8.45	3.31	11.97
กรดบิวทีริก	6.24	42.75	7.83	32.75
กรดแวนิสิก	0.88	6.91	1.19	5.69
เอทานอล	1.43	-	0.04	-
การขจัดอินทรีย์สาร				
ร้อยละของของแข็งทั้งหมด	50.87		41.43	
ร้อยละของของแข็งระเหย	53.56		41.44	

หมายเหตุ ร้อยละของกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมดคิดจากปริมาณกรดในหน่วยของมิลลิกรัมต่อลิตร
เทียบกับค่า TVA

2. ผลของระยะเวลาเก็บกักกากต่อขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์

เมื่อใช้กากมะเขือเทศแห้งผสมหัวเชื้อจุลินทรีย์ (ซึ่งเตรียมตามวิธีการวิจัยในข้อที่ 2) ให้มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร แล้วทำการทดลองโดยให้ระยะเวลาเก็บกักกากนาน 3 วัน 5 วัน และ 10 วันซึ่งทำการทดลองนานประมาณ 2 เดือน น้ำหมักที่กรองได้มาวิเคราะห์หาปริมาณอินทรีย์สารกรดอินทรีย์ระเหย pH และค่าความเป็นด่าง ผลการทดลองพบว่าน้ำหมักที่ได้จากการหมัก ที่ระยะเวลาเก็บกักกากนาน 3 วัน 5 วันและ 10 วัน มีปริมาณอินทรีย์สารเท่ากับ 1470 2058 และ 2303 มิลลิกรัมซีไอต่อลิตร ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยเท่ากับ 921 1302 และ 1490 มิลลิกรัมต่อลิตร pH เท่ากับ 4.26 4.24 และ 4.34 ความเป็นด่างเท่ากับ 92 125 และ 185 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถขจัดอินทรีย์สารในขั้นตอนนี้ได้ร้อยละ 17.35 22.42 และ 50.87 ของของแข็งทั้งหมดหรือร้อยละ 24.62 27.56 และ 53.56 ของของแข็งระเหยตามลำดับ และสารตัวกลางที่พบในน้ำหมักคือ กรดอะซิติก กรดไพรูวอิก กรดบิวทีริก กรดแวลีริก และเอทานอล โดยน้ำหมักที่ได้จากการหมักกากมะเขือเทศที่มีระยะเวลาเก็บกักกากนาน 3 วัน 5 วัน และ 10 วัน จะให้กรดอะซิติกเท่ากับ 5.25 8.03 และ 10.40 มิลลิโมลาร์ หรือร้อยละ 34.20 37.01 และ 41.87 ของกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมด กรดไพรูวอิกเท่ากับ 0.96 1.07 และ 1.43 มิลลิโมลาร์ หรือร้อยละ 9.22 7.29 และ 8.45 ของกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมด กรดบิวทีริกเท่ากับ 4.15 6.10 และ 6.24 มิลลิโมลาร์ หรือร้อยละ 46.03 47.84 และ 42.75 ของกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมด กรดแวลีริกเท่ากับ 0.83 0.87 และ 0.88 มิลลิโมลาร์ หรือร้อยละ 10.53 7.83 และ 6.91 ของกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมด และเอทานอลเท่ากับ 1.80 1.76 และ 1.43 มิลลิโมลาร์ตามลำดับ

ดังผลแสดงในตาราง 5

ตาราง 5 ผลของระยะเวลาเก็บกักกากต่อปริมาณอินทรีย์สาร กรดอินทรีย์ระเหย pH ความเป็นต่าง การจัดอินทรีย์สาร ชนิดและปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ของการหมักกาก มะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอนเมื่อใช้กากมะเขือเทศผสมน้ำให้ความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร

พารามิเตอร์	ระยะเวลาเก็บกักกาก (วัน)					
	3		5		10	
COD (มก. ซีโอดีต่อลิตร)	1470		2058		2303	
TVA (มก. ต่อลิตร)	921		1302		1490	
VFA (มก. ต่อลิตร)	769		1043		1149	
pH	4.26		4.24		4.34	
ค่าความเป็นต่าง (มก. ต่อลิตร)	92		125		185	
สารตัวกลางที่เกิดขึ้น	มิลลิโมลาร์	ร้อยละของกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมด	มิลลิโมลาร์	ร้อยละของกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมด	มิลลิโมลาร์	ร้อยละของกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมด
กรดอะซิติก	5.25	34.20	8.03	37.01	10.40	41.87
กรดไพรูวอิก	0.96	9.22	1.07	7.29	1.43	8.45
กรดบิวทีริก	4.15	46.03	6.10	47.84	6.24	42.75
กรดแวลีริก	0.83	10.53	0.87	7.83	0.88	6.91
เอทานอล	1.80	-	1.76	-	1.43	-
การจัดอินทรีย์สาร						
ร้อยละของของแข็งทั้งหมด	17.35		22.42		50.87	
ร้อยละของของแข็งระเหย	24.62		27.56		53.56	

หมายเหตุ ร้อยละของกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมดคิดจากปริมาณกรดในหน่วยของมิลลิกรัมต่อลิตร
เทียบกับค่า TVA

เมื่อป้อนกากมะเขือเทศที่มีความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร น้ำหนักที่กรองได้มาวิเคราะห์หาปริมาณอินทรีย์สาร กรดอินทรีย์ระเหย pH และค่าความเป็นด่าง ผลการทดลองพบว่าน้ำหนักที่ได้จากการหมักที่ระยะเวลาเก็บกักกากนาน 3 วัน 5 วัน และ 10 วัน มีปริมาณอินทรีย์สารเท่ากับ 3009 3750 และ 4583 มิลลิกรัมซีไอต่อลิตร ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยเท่ากับ 1340 1969 และ 2439 มิลลิกรัมต่อลิตร pH เท่ากับ 4.36 4.37 และ 4.45 ความเป็นด่างเท่ากับ 111 133 และ 233 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถหาค่าอินทรีย์สารในขั้นตอนนี้ได้ร้อยละ 14.71 15.94 และ 41.43 ของของแข็งทั้งหมด หรือร้อยละ 17.49 19.23 และ 41.44 ของของแข็งระเหยตามลำดับ และสารตัวกลางที่พบในน้ำหนักคือกรดอะซิติก กรดไพรูวอิก กรดบิวทีริก กรดแวลีริกและเอทานอล โดยน้ำหนักที่ได้จากการหมักกากมะเขือเทศที่มีระยะเวลาเก็บกักกากนาน 3 วัน 5 วัน และ 10 วัน จะให้กรดอะซิติกเท่ากับ 8.51 15.78 และ 20.15 มิลลิโมลาร์ หรือร้อยละ 38.13 48.09 และ 49.56 ของกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมด กรดไพรูวอิกเท่ากับ 1.97 2.84 และ 3.31 มิลลิโมลาร์หรือร้อยละ 12.98 12.69 และ 11.97 ของกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมด กรดบิวทีริกเท่ากับ 5.37 6.44 และ 7.83 มิลลิโมลาร์หรือร้อยละ 40.89 33.36 และ 32.75 ของกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมด กรดแวลีริกเท่ากับ 0.92 0.99 และ 1.19 มิลลิโมลาร์ หรือร้อยละ 7.98 5.84 และ 5.69 ของกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมด และเอทานอลเท่ากับ 0.28 0.04 และ 0.04 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ ดังผลแสดงในตาราง 6

จากผลการทดลอง ในตาราง 5 และ 6 เมื่อใช้กากมะเขือเทศเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน จะให้ปริมาณกรดอะซิติก กรดไพรูวอิก กรดบิวทีริก และกรดแวลีริกสูงกว่าที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วันร้อยละ 34 10 32 และ 4 ตามลำดับ และที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 10 วัน จะให้ปริมาณกรดอะซิติก กรดไพรูวอิก กรดบิวทีริก และกรดแวลีริกสูงกว่าที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วันร้อยละ 22 25 2 และ 0 ตามลำดับ อีกทั้งเมื่อใช้สารแขวนลอยกากมะเขือเทศเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน จะให้ปริมาณกรดอะซิติก กรดไพรูวอิก กรดบิวทีริก และกรดแวลีริกสูงกว่าที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน ร้อยละ 46 30 16 และ 7 ตามลำดับ และที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 10 วัน จะให้ปริมาณกรดอะซิติก กรดไพรูวอิก กรดบิวทีริก และ กรดแวลีริกสูงกว่าที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วันร้อยละ 21 14 17 และ 16 ตามลำดับ จากผลจะเห็นว่าแนวโน้มการเพิ่มของกรดอินทรีย์ที่ระยะเวลาเก็บกักกากจาก 3 วัน เป็นระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน จะสูงกว่าการเพิ่มของกรดอินทรีย์ที่ระยะเวลาเก็บกักกากจาก 5 วัน เป็นระยะเวลาเก็บกักกาก 10 วัน

ตาราง 6 ผลของระยะเวลาเก็บกากกากต่อปริมาณอินทรีย์สาร กรดอินทรีย์ระเหย pH ความเป็นต่าง การขจัดอินทรีย์สาร ชนิดและปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ของการหมักกาก มะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอน เมื่อใช้กากมะเขือเทศผสมน้ำให้ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร

พารามิเตอร์	ระยะเวลาเก็บกากกาก (วัน)					
	3		5		10	
COD (มก. ซีไอดีต่อลิตร)	3009		3750		4583	
TVA (มก. ต่อลิตร)	1340		1969		2439	
VFA (มก. ต่อลิตร)	1033		1307		1873	
pH	4.36		4.37		4.45	
ค่าความเป็นต่าง (มก. ต่อลิตร)	111		133		233	
สารตัวกลางที่เกิดขึ้น	มิลลิโมลาร์	ร้อยละของ กรดอินทรีย์ ระเหยทั้งหมด	มิลลิโมลาร์	ร้อยละของ กรดอินทรีย์ ระเหยทั้งหมด	มิลลิโมลาร์	ร้อยละของ กรดอินทรีย์ ระเหยทั้งหมด
กรดอะซิติก	8.51	38.13	15.78	48.09	20.15	49.56
กรดไพโรอิก	1.97	12.98	2.84	12.69	3.31	11.97
กรดบิวทีริก	5.37	40.89	6.44	33.36	7.83	32.75
กรดแวลีริก	0.92	7.98	0.99	5.84	1.19	5.69
เอทานอล	0.28	-	0.04	-	0.04	-
การขจัดอินทรีย์สาร						
ร้อยละของของแข็งทั้งหมด	14.71		15.94		41.43	
ร้อยละของของแข็งระเหย	17.49		19.23		41.44	

หมายเหตุ ร้อยละของกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมดคิดจากปริมาณกรดในหน่วยของมิลลิกรัมต่อลิตร

เทียบกับค่า TVA

3. ผลของอุณหภูมิต่อขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ที่มีระยะเวลาเก็บกักกากต่าง ๆ

จากผลการทดลองในตาราง 2 3 และ 4 จะเห็นว่าเมื่อใช้กากมะเขือเทศที่มีความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร จะให้ปริมาณอินทรีย์สารและปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยในน้ำหมักมากกว่าเมื่อใช้กากมะเขือเทศที่มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร เนื่องจากเป็นการเพิ่มปริมาณอินทรีย์สาร แต่เมื่อใช้กากมะเขือเทศที่มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร สามารถจัดอินทรีย์สารในรูปของร้อยละของของแข็งทั้งหมด และร้อยละของของแข็งระเหยมากกว่าเมื่อใช้สารแขวนลอยกากมะเขือเทศที่มีความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ดังนั้นจึงเลือกใช้กากมะเขือเทศที่มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตรในการทดลองต่อไป

หมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอนโดยบ้อนกากมะเขือเทศที่มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร ให้มีระยะเวลาเก็บกักกากนาน 3 วัน 5 วันและ 10 วัน ทดลองที่อุณหภูมิต่าง ๆ กันคือ ที่อุณหภูมิห้อง 40 องศาเซลเซียส 45 องศาเซลเซียส 50 องศาเซลเซียส และ 55 องศาเซลเซียส โดยเริ่มทำการหมักที่อุณหภูมิห้องนานประมาณ 2 เดือน จากนั้นจึงเพิ่มอุณหภูมิของถังปฏิกรณ์เป็นที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส 45 องศาเซลเซียส 50 องศาเซลเซียส และ 55 องศาเซลเซียส โดยที่แต่ละอุณหภูมิจะต้องใช้เวลาในการปรับสภาพประมาณ 40 วัน จากนั้นจึงทำการทดลองต่ออีกประมาณ 40 วัน เพื่อเก็บข้อมูล โดยนำน้ำหมักที่กรองได้มาวิเคราะห์หาปริมาณอินทรีย์สาร กรดอินทรีย์ระเหย pH และค่าความเป็นด่าง ผลการทดลองดังนี้

3.1 ผลของอุณหภูมิต่อขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน

เมื่อใช้กากมะเขือเทศที่มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร เป็นวัตถุดิบในการหมักโดยมีระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน และ น้ำหมักที่กรองได้จากถังปฏิกรณ์ ซึ่งทดลองที่อุณหภูมิห้อง 40 องศาเซลเซียส 45 องศาเซลเซียส 50 องศาเซลเซียส และ 55 องศาเซลเซียส จะให้ปริมาณอินทรีย์สารเท่ากับ 1470 1715 1568 1486 และ 1741 มิลลิกรัมชีโอดีต่อลิตร และปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยเท่ากับ 921 1007 762 493 และ 395 มิลลิกรัมต่อลิตร pH เท่ากับ 4.26 4.58 4.28 4.01 และ 4.10 ค่าความเป็นด่างเท่ากับ 92 230 88 16 และ 15 มิลลิกรัมต่อลิตร และสามารถจัดอินทรีย์สารในขั้นตอนนี้ได้ร้อยละ 17.35 33.95 26.18 15.20 และ 26.95 ของของแข็งทั้งหมดหรือร้อยละ 24.62 42.86 32.51 22.98 และ 29.12 ของของแข็งระเหยตามลำดับ ดังผลแสดงในตาราง 7

ที่อุณหภูมิห้อง 40 องศาเซลเซียส 45 องศาเซลเซียส จะพบสารตัวกลางในน้ำหมักเป็น กรดอะซิติก กรดไพรูวอิก กรดบิวทีริก กรดแวลีลิก และเอทานอลส่วนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และ 55 องศาเซลเซียส จะพบแต่กรดอะซิติก และ กรดบิวทีริก โดยปริมาณของกรดไพรูวอิก ที่ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเท่ากับร้อยละ 0.60 ของกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมดและที่อุณหภูมิ 55 องศา เซลเซียสเท่ากับร้อยละ 0.04 ของกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมดซึ่งน้อยมากจนไม่มีความสำคัญ ที่อุณหภูมิ ห้องจะพบ กรดอะซิติก กรดไพรูวอิก กรดบิวทีริกและกรดแวลีลิก เท่ากับ 5.25 0.96 4.15 และ 0.83 มิลลิโมลาร์ หรือร้อยละ 34.20 9.22 46.03 และ 10.53 ของกรดอินทรีย์ระเหย ทั้งหมด (ตามลำดับ) และพบเอทานอลเท่ากับ 1.80 มิลลิโมลาร์ ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เท่ากับ 8.86 0.65 4.87 และ 0.34 มิลลิโมลาร์ หรือร้อยละ 40.91 5.75 49.35 และ 3.97 ของกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมด (ตามลำดับ) และพบเอทานอลเท่ากับ 2.56 มิลลิโมลาร์ ที่ อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียสเท่ากับ 5.35 0.36 3.91 และ 0.08 มิลลิโมลาร์ หรือร้อยละ 44.21 4.19 52.36 และ 1.31 ของกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมด (ตามลำดับ) และพบเอทานอล เท่ากับ 2.90 มิลลิโมลาร์ และที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จะพบกรดอะซิติก และกรดบิวทีริกเท่ากับ 2.68 และ 3.22 มิลลิโมลาร์ หรือร้อยละ 32.65 และ 66.73 ของกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมด ที่ อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส จะพบกรดอะซิติก และกรดบิวทีริกเท่ากับ 3.43 และ 1.83 มิลลิโมลาร์ หรือร้อยละ 52.15 และ 43.34 ของกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมดตามลำดับ ถ้าพิจารณาปริมาณกรดอินทรีย์ ะเหยที่เกิดขึ้นในรูปร้อยละของกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมดที่ทุกอุณหภูมิ พบว่าจะได้ปริมาณของกรดบิวทีริก สูงกว่ากรดชนิดอื่น ยกเว้นที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส จะพบปริมาณของกรดอะซิติกมากที่สุด หาก พิจารณาปริมาณของกรดอินทรีย์ในน้ำหมักในหน่วยของมิลลิโมลาร์ พบว่าที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสจะ มีปริมาณของกรดอะซิติกสูงสุดเท่ากับ 8.86 มิลลิโมลาร์และกรดบิวทีริกสูงสุดเท่ากับ 4.87 มิลลิโมลาร์ ที่อุณหภูมิห้องจะให้ปริมาณของกรดไพรูวอิก และกรดแวลีลิกในน้ำหมักสูงสุด ดังผลแสดงในตาราง 8

ตาราง 7 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณอินทรีย์สาร กรดอินทรีย์ระเหย pH ความเป็นด่าง และการ
 จัดอินทรีย์สาร ในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ ของการหมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศ
 สองขั้นตอนที่ระยะเวลาเก็บกากกาก 3 วัน และเมื่อใช้กากมะเขือเทศผสมน้ำให้มีความเข้มข้น
 10 กรัมต่อลิตร

อุณหภูมิ ที่ทำการหมัก (องศา เซลเซียส)	COD (มก. ซีโอดีต่อ ลิตร)	TVA (มก. ต่อลิตร)	VFA (มก. ต่อลิตร)	pH	T-alk (มก. ต่อลิตร)	การจัดอินทรีย์สาร	
						ร้อยละของ ของแข็ง ทั้งหมด	ร้อยละของ ของแข็ง ระเหย
อุณหภูมิห้อง	1470	921	769	4.26	92	17.35	24.62
40	1715	1007	740	4.58	230	33.95	42.86
45	1568	762	707	4.28	88	26.18	32.51
50	1486	493	443	4.01	16	15.20	22.98
55	1741	395	315	4.10	15	26.95	29.12

ตาราง 8 ผลของอุณหภูมิต่อชนิดและปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย ในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ของการหมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอน ที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน และเมื่อใช้กากมะเขือเทศผสมน้ำให้ความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร

อุณหภูมิ ที่ทำการหมัก (องศาเซลเซียส)	กรดอินทรีย์ระเหยที่เกิดขึ้น									
	กรด อะซิติก		กรด ไพรูวอิก		กรด บิวทีริก		กรด แวลีริก		เอทานอล	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
อุณหภูมิห้อง	5.25	34.20	0.96	9.22	4.15	46.03	0.83	10.53	1.80	-
40	8.86	40.91	0.65	5.75	4.87	49.35	0.34	3.97	2.56	-
45	5.35	44.21	0.36	4.19	3.91	52.36	0.08	1.31	2.90	-
50	2.68	32.65	0.43	0.60	3.22	66.73	0	0	0	-
55	3.43	52.15	0.23	0.04	1.83	47.34	0	0	0	-

หมายเหตุ 1 เท่ากับ มิลลิโมลาร์

2 เท่ากับ ร้อยละของกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมด โดยร้อยละของกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมดคิดจากปริมาณกรดในหน่วยของมิลลิกรัมต่อลิตรเทียบกับค่า TVA

3.2 ผลของอุณหภูมิต่อขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน

เมื่อใช้กากมะเขือเทศที่มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตรเป็นวัตถุดิบในการหมักที่มีระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน ที่อุณหภูมิห้อง 40 องศาเซลเซียส 45 องศาเซลเซียส 50 องศาเซลเซียส และ 55 องศาเซลเซียส จะให้ปริมาณอินทรีย์สารเท่ากับ 2085 1911 1666 1586 และ 2489 มิลลิกรัมซีไอต่อลิตร และปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยเท่ากับ 1302 1438 1017 353 และ 518 มิลลิกรัมต่อลิตร pH เท่ากับ 4.24 4.42 4.46 4.03 และ 4.09 ค่าความเป็นด่างเท่ากับ 125 222 166 15 และ 26 มิลลิกรัมต่อลิตร และสามารถขจัดอินทรีย์สารในขั้นตอนนี้ได้ร้อยละ 22.42 40.84 30.06 21.55 และ 15.51 ของของแข็งทั้งหมด หรือร้อยละ 27.56 49.51 34.11 26.00 และ 20.74 ของของแข็งระเหยตามลำดับ ดังผลแสดงในตาราง 9

ที่อุณหภูมิห้อง 40 องศาเซลเซียส 45 องศาเซลเซียส จะพบว่าสารตัวกลางในน้ำหมักเป็นการดอะซิติก กรดไพรฟอนิก กรดบิวทีริก กรดแวนิลิก และ เอทานอล ส่วนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และ 55 องศาเซลเซียส จะพบแค่กรดอะซิติก และกรดบิวทีริก โดยปริมาณของกรดไพรฟอนิกที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียสเท่ากับร้อยละ 0.77 ของกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมด ซึ่งน้อยมากจนไม่มีความสำคัญ ที่อุณหภูมิห้องพบกรดอะซิติก กรดไพรฟอนิก กรดบิวทีริก และกรดแวนิลิก เท่ากับ 8.03 1.07 6.10 และ 0.87 มิลลิโมลาร์ หรือร้อยละ 37.01 7.29 47.84 และ 7.83 ของกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมด (ตามลำดับ) และพบเอทานอลเท่ากับ 1.76 มิลลิโมลาร์ 40 องศาเซลเซียสเท่ากับ 12.31 1.02 5.51 และ 0.39 มิลลิโมลาร์ หรือร้อยละ 51.39 6.25 39.15 และ 3.19 ของกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมด (ตามลำดับ) และพบเอทานอลเท่ากับ 3.45 มิลลิโมลาร์ ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียสเท่ากับ 6.76 0.57 5.12 และ 0.31 มิลลิโมลาร์ หรือร้อยละ 39.92 5.01 51.42 และ 3.63 ของกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมด (ตามลำดับ) และพบเอทานอลเท่ากับ 3.28 มิลลิโมลาร์ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสจะพบกรดอะซิติก และ กรดบิวทีริกเท่ากับ 2.20 และ 2.16 มิลลิโมลาร์ หรือร้อยละ 37.39 และ 62.60 ของกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมด ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียสเท่ากับ 4.55 และ 2.36 มิลลิโมลาร์ หรือร้อยละ 52.70 และ 46.52 ของกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมดตามลำดับ ถ้าพิจารณาปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยที่เกิดขึ้นในรูปร้อยละของกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมด ที่อุณหภูมิห้อง 45 องศาเซลเซียส

และ 50 องศาเซลเซียส พบว่าจะได้ปริมาณของกรดบิวทีริกสูงกว่ากรดชนิดอื่น ยกเว้นที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และ 55 องศาเซลเซียส จะพบปริมาณของกรดอะซิติกมากที่สุด หากพิจารณาปริมาณของกรดอินทรีย์ในน้ำหมักในหน่วยของมิลลิโมลาร์ พบว่าที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จะมีปริมาณของกรดอะซิติกสูงสุดเท่ากับ 12.31 มิลลิโมลาร์ และเอทานอลสูงสุดเท่ากับ 3.45 มิลลิโมลาร์ ที่อุณหภูมิห้องและ 40 องศาเซลเซียสจะให้ปริมาณของกรดไพรูวอิกในน้ำหมักใกล้เคียงกันและปริมาณของกรดไพรูวอิก กรดบิวทีริก และ กรดแวลีริกในน้ำหมักจะพบสูงสุดที่อุณหภูมิห้อง ดังแสดงผลในตาราง 10

ตาราง 9 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณอินทรีย์สาร กรดอินทรีย์ระเหย pH ความเป็นด่าง และการจัดอินทรีย์สาร ในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ของการหมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอนที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน และเมื่อใช้กากมะเขือเทศผสมน้ำที่มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร

อุณหภูมิ ที่ทำการทดลอง (องศา เซลเซียส)	COD (มก. ซีไอดีต่อ ลิตร)	TVA (มก. ต่อลิตร)	VFA (มก. ต่อลิตร)	pH	T-alk (มก. ต่อลิตร)	การจัดอินทรีย์สาร	
						ร้อยละของ ของแข็ง ทั้งหมด	ร้อยละของ ของแข็ง ระเหย
อุณหภูมิห้อง	2058	1302	1049	4.24	125	22.42	27.56
40	1911	1438	1059	4.42	222	40.84	49.51
45	1666	1017	746	4.46	166	30.06	34.11
50	1586	353	469	4.03	15	21.55	26.00
55	2489	518	505	4.09	26	15.91	20.74

ตาราง 10 ผลของอุณหภูมิต่อชนิดและปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย ในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ของการหมัก
กากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอนที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน และเมื่อใช้กากมะเขือเทศผสม
น้ำให้มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร

อุณหภูมิ ที่ทำการหมัก (องศาเซลเซียส)	กรดอินทรีย์ระเหยที่เกิดขึ้น									
	กรด อะซิติก		กรด โพรพิโอนิก		กรด บิวทีริก		กรด แวลีริก		เอทานอล	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
อุณหภูมิห้อง	8.03	37.01	1.07	7.29	6.40	47.84	0.87	7.83	1.76	-
40	12.31	51.39	1.02	6.25	5.51	39.15	0.39	3.19	3.45	-
45	6.76	39.92	0.57	5.01	5.12	51.42	0.31	3.63	3.28	-
50	2.20	37.39	0	0	2.16	62.60	0	0	0	-
55	4.55	52.70	0.04	0.77	2.36	46.52	0	0	0	-

หมายเหตุ 1 เท่ากับ มิลลิโมลาร์

2 เท่ากับ ร้อยละของกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมด โดยร้อยละของกรดอินทรีย์ระเหย
ทั้งหมดคิดจากปริมาณกรดในหน่วยของมิลลิกรัมต่อลิตรเทียบกับค่า TVA

3.3 ผลของอุณหภูมิต่อการผลิตกรดอินทรีย์ที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 10 วัน

เมื่อใช้กากมะเขือเทศที่มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตรเป็นวัตถุดิบในการหมัก โดยมีระยะเวลาเก็บกักกาก 10 วัน และน้ำหมักที่กรองได้จากถังปฏิกรณ์ ที่อุณหภูมิห้อง 40 องศาเซลเซียส 45 องศาเซลเซียส 50 องศาเซลเซียส และ 55 องศาเซลเซียส จะให้ปริมาณอินทรีย์สารเท่ากับ 2303 1960 2205 1809 และ 2020 มิลลิกรัมซีไอต่อลิตร ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยเท่ากับ 1490 944 1151 529 และ 552 มิลลิกรัมต่อลิตร pH เท่ากับ 4.34 4.98 4.15 4.79 และ 4.84 ค่าความเป็นด่างเท่ากับ 185 331 61 22 และ 121 มิลลิกรัมต่อลิตร และสามารถขจัดอินทรีย์สารในขั้นตอนนี้ได้ร้อยละ 50.87 52.86 53.08 47.82 และ 49.33 ของของแข็งทั้งหมดหรือร้อยละ 53.56 57.50 57.36 43.08 และ 51.46 ของของแข็งระเหยตามลำดับ ดังผลแสดงในตาราง 11

ที่อุณหภูมิห้อง 40 องศาเซลเซียส และ 45 องศาเซลเซียส จะพบสารตัวกลางในน้ำหมักเป็นกรดอะซิติก กรดไพรูวอิก กรดบิวทีริก กรดแวนิลิก และเอทานอล ส่วนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส จะพบกรดอะซิติก และกรดบิวทีริก โดยปริมาณของกรดไพรูวอิกที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเท่ากับร้อยละ 0.94 ของกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมด และที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียสเท่ากับร้อยละ 0.90 ของกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมด ซึ่งน้อยมากจนไม่มีความสำคัญ ที่อุณหภูมิห้องจะพบกรดอะซิติก กรดไพรูวอิก กรดบิวทีริก และ กรดแวนิลิก เท่ากับ 10.40 1.43 6.24 และ 0.88 มิลลิโมลาร์ หรือร้อยละ 41.87 8.45 42.75 และ 6.91 ของกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมด (ตามลำดับ) และพบเอทานอลเท่ากับ 1.43 มิลลิโมลาร์ ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสเท่ากับ 7.78 0.68 2.94 และ 0.18 มิลลิโมลาร์ หรือร้อยละ 50.26 4.93 36.14 และ 2.65 ของกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมด (ตามลำดับ) และพบเอทานอลเท่ากับ 2.47 มิลลิโมลาร์ ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียสเท่ากับ 10.48 0.25 4.74 และ 0.13 มิลลิโมลาร์ หรือร้อยละ 54.64 1.91 42.05 และ 1.39 ของกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมด (ตามลำดับ) และพบเอทานอลเท่ากับ 2.86 มิลลิโมลาร์ และ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จะพบกรดอะซิติก และ กรดบิวทีริกเท่ากับ 3.05 และ 3.34 มิลลิโมลาร์ หรือร้อยละ 34.59 และ 64.46 ของกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมด ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียสเท่ากับ 3.90 และ 3.06

มิลลิโมลาร์หรือร้อยละ 42.39 และ 56.70 ของกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมด ตามลำดับ ถ้าพิจารณาปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยที่เกิดขึ้นในรูปร้อยละของกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมด ที่อุณหภูมิห้อง 50 องศาเซลเซียส และ 55 องศาเซลเซียสพบว่าจะได้ปริมาณของกรดบิวทีริกสูงกว่ากรดอื่น ยกเว้นที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และ 45 องศาเซลเซียสจะพบปริมาณของกรดอะซิติกมากที่สุด หากพิจารณาปริมาณของกรดอินทรีย์ในน้ำหมักในหน่วยของมิลลิโมลาร์ พบว่าที่อุณหภูมิห้องและ 45 องศาเซลเซียส จะมีปริมาณของกรดอะซิติกสูงสุดประมาณ 10.4 มิลลิโมลาร์ และปริมาณของกรดไพรูวอิก กรดบิวทีริก และกรดแวลริกในน้ำหมักจะมีปริมาณสูงสุดที่อุณหภูมิห้อง ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียสจะพบเอทานอลในน้ำหมักสูงสุด ดังผลแสดงในตาราง 12

จากผลการทดลองในตาราง 7 9 และ 11 จะเห็นว่าเมื่อหมักโดยาใช้มะเขือเทศที่มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน 5 วันและ 10 วัน และทดลองที่อุณหภูมิต่างต่างนั้นที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วันและ 5 วัน ที่ทุกอุณหภูมิจะให้ปริมาณอินทรีย์สาร กรดอินทรีย์ระเหย และการขจัดอินทรีย์สารไม่ค่อยแตกต่างกันมากนัก แต่ที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 10 วัน จะให้ปริมาณอินทรีย์สาร และกรดอินทรีย์ระเหยสูงกว่าที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วันและ 5 วันเล็กน้อย ในขณะที่การขจัดอินทรีย์สารที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 10 วันจะสูงกว่าที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วันและ 5 วัน โดยเฉลี่ยประมาณร้อยละ 44

จากผลการทดลองในตาราง 8 10 และ 12 จะเห็นว่า ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และ 55 องศาเซลเซียส ที่ระยะเวลาเก็บกักกากต่างๆ จะให้ร้อยละของการผลิตกรดอะซิติกสูงสุด และไม่พบกรดไพรูวอิก แต่ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมดค่อนข้างต่ำ และที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน จะให้กรดอะซิติกสูงสุด และปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมดค่อนข้างสูง อีกทั้งค่าใช้จ่ายในการใช้พลังงานเพื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 40 องศาเซลเซียสค่อนข้างต่ำการทดลองต่อไปจึงเลือกศึกษาที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสและระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน และการหมักที่ระยะเวลาเก็บกักกากนาน ๆ จะต้องใช้ถึงอุปกรณ์ที่มีขนาดเหมาะสมระดับอุตสาหกรรม เป็นการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับต้นทุนการก่อสร้าง

ตาราง 11 ผลของอุณหภูมิต่อปริมาณอินทรีย์สาร กรดอินทรีย์ระเหย pH ความเป็นด่าง และการจัดอินทรีย์สาร ในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ ของการหมักกากมะเขือเทศแบบอ็อกซิเจนสองขั้นตอน ที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 10 วันและเมื่อใช้กากมะเขือเทศผสมน้ำให้มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร

อุณหภูมิ ที่ทำการทดลอง (องศา เซลเซียส)	COD (มก. ซีไอดีต่อ ลิตร)	TVA (มก. ต่อลิตร)	VFA (มก. ต่อลิตร)	pH	T-alk (มก. ต่อลิตร)	การจัดอินทรีย์สาร	
						ร้อยละของ ของแข็ง ทั้งหมด	ร้อยละของ ของแข็ง ระเหย
อุณหภูมิห้อง	2303	1490	1149	4.34	185	50.87	53.56
40	1960	944	726	4.98	331	52.86	57.50
45	2205	1151	1039	4.15	61	53.08	57.36
50	1809	529	545	4.79	22	47.82	43.08
55	2020	552	603	4.84	121	49.33	51.46

ตาราง 12 ผลของอุณหภูมิต่อชนิดและปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย ในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ของ
การหมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอน ที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 10 วัน และใช้กาก
มะเขือเทศที่มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร

อุณหภูมิ ที่ทำการหมัก (องศาเซลเซียส)	กรดอินทรีย์ระเหยที่เกิดขึ้น									
	กรด อะซิติก		กรด ไพรูวอิก		กรด บิวทีริก		กรด แวลีริก		เอทานอล	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
อุณหภูมิห้อง	10.40	41.87	1.43	8.45	6.24	42.75	0.88	6.91	1.43	-
40	7.78	56.26	0.46	4.93	2.94	36.14	0.18	2.65	2.47	-
45	10.48	54.64	0.25	1.91	4.74	42.05	0.13	1.39	2.86	-
50	3.05	34.59	0.05	0.94	3.34	64.46	0	0	0	-
55	3.90	42.39	0.04	0.90	3.06	56.70	0	0	0	-

หมายเหตุ 1 เท่ากับ มิลลิโมลาร์

2 เท่ากับ ร้อยละของกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมด โดยร้อยละของกรดอินทรีย์ระเหย
ทั้งหมดคิดจากปริมาณกรดในหน่วยของมิลลิกรัมต่อลิตรเทียบกับค่า TVA

4. ผลของการกวนต่อขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์

การทดลองผลของการกวนต่อขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ โดยใช้กากมะเขือเทศที่มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน ทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ตามวิธีวิจัยในข้อ 3.3 ผลการทดลองพบว่า ในน้ำหมักที่กรองได้จากถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนจะให้ปริมาณอินทรีย์สารเท่ากับ 1863 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร และปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยเท่ากับ 1303 มิลลิกรัมต่อลิตร pH เท่ากับ 4.41 ค่าความเป็นด่างเท่ากับ 204 มิลลิกรัมต่อลิตร และน้ำหมักที่ได้จากถังปฏิกรณ์ที่ไม่มีการกวนจะให้ปริมาณอินทรีย์สารเท่ากับ 1882 มิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยเท่ากับ 1391 มิลลิกรัมต่อลิตร pH เท่ากับ 4.43 ค่าความเป็นด่างเท่ากับ 154 มิลลิกรัมต่อลิตร นอกจากนี้สารตัวกลางที่เกิดขึ้นในน้ำหมักจากถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนคือกรดอะซิติก กรดไพรูวอิก กรดบิวทีริก กรดแวลีริก และเอทานอล มีปริมาณเท่ากับ 11.08 1.48 4.08 0.77 และ 2.32 มิลลิโมลาร์ หรือร้อยละ 51.03 10.05 32.00 และ 6.90 ของกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมด ตามลำดับ และน้ำหมักจากถังปฏิกรณ์ที่ไม่มีการกวนจะให้กรดอะซิติก กรดไพรูวอิก กรดบิวทีริก กรดแวลีริก และเอทานอล ในปริมาณเท่ากับ 11.01 1.07 5.59 0.55 และ 2.23 มิลลิโมลาร์ หรือร้อยละ 47.51 6.82 41.04 และ 4.60 ของกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมด ตามลำดับ ดังผลแสดงในตาราง 13 ซึ่งจะเห็นว่า การกวนไม่มีผลต่อขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ เมื่อเทียบกับในถังปฏิกรณ์ที่ไม่มีการกวน

ตาราง 13 ผลของการกวนต่อปริมาณอินทรีย์สาร กรดอินทรีย์ระเหย pH ความเป็นด่าง การขจัดอินทรีย์สาร ชนิดและปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย ในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ ของการหมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอน ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และเมื่อใช้กากมะเขือเทศผสมน้ำให้มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร

พารามิเตอร์	สภาวะที่ทำการทดลอง			
	กวน		ไม่กวน	
COD (มก.ซีไอดีต่อลิตร)	1863		1882	
TVA (มก.ต่อลิตร)	1303		1391	
VFA (มก.ต่อลิตร)	1010		1022	
pH	4.41		4.43	
ค่าความเป็นด่าง (มก.ต่อลิตร)	204		154	
สารตัวกลางที่เกิดขึ้น	มิลลิโมลาร์	ร้อยละของกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมด	มิลลิโมลาร์	ร้อยละของกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมด
กรดอะซิติก	11.08	51.03	11.01	47.51
กรดโพรพิโอนิก	1.48	10.05	1.07	6.82
กรดบิวทีริก	4.08	32.00	5.59	41.04
กรดแวลีริก	0.77	6.90	0.55	4.60
เอทานอล	2.32	-	2.23	-
การขจัดอินทรีย์สาร				
ร้อยละของของแข็งทั้งหมด	38.74		39.01	
ร้อยละของของแข็งระเหย	39.93		40.94	

หมายเหตุ ร้อยละของกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมดคิดจากปริมาณกรดในหน่วยของมิลลิกรัมต่อลิตร เทียบกับค่า TVA

บทที่ 4

สรุปอภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของความเข้มข้นกากมะเขือเทศ ระยะเวลาเก็บกักกากอุณหภูมิจากการหมักกากมะเขือเทศแบบการกวนต่อชนิด และปริมาณสารตัวกลางในขั้นตอนผลิตกรดอินทรีย์ จากการหมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอนจนถึงปฏิกิริยาผลิตกรดอินทรีย์ที่มีปริมาตรใช้งาน 1.5 ลิตร ใช้หัวเชื้อจุลินทรีย์กลุ่มที่ผลิตกรดอินทรีย์ จากนั้นหมักที่ถ่ายออกจากถังปฏิกิริยาผลิตกรดอินทรีย์จากน้ำบีบเปลือกกลับปะรดของสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ใช้กากมะเขือเทศผสมน้ำเป็นวัตถุดิบป้อนเข้าถังปฏิกิริยาแบบกึ่งต่อเนื่อง สรุปผลการทดลองดังนี้

4.1 ผลของความเข้มข้นกากมะเขือเทศต่อขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์

หมักกากมะเขือเทศเพื่อให้ได้กรดอินทรีย์โดยใช้กากมะเขือเทศผสมกับหัวเชื้อจุลินทรีย์สำหรับผลิตกรดอินทรีย์ ให้มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตรและ 20 กรัมต่อลิตร ทำการหมักให้มีระยะเวลาเก็บกักกากนาน 3 วัน 5 วัน และ 10 วัน ตรวจวัดปริมาณอินทรีย์สารในรูปมิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย pH ค่าความเป็นด่าง การขจัดอินทรีย์สาร ชนิดและปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกากมะเขือเทศจะทำให้ปริมาณอินทรีย์สาร ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยและค่าความเป็นด่าง ในน้ำหมักสูงขึ้นด้วย โดยพบว่าถ้าใช้กากมะเขือเทศเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ในน้ำหมักที่ได้จะมีปริมาณอินทรีย์สาร ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยสูงกว่าเมื่อใช้กากมะเขือเทศเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร เนื่องจากปริมาณอินทรีย์สารที่ป้อนเพิ่มขึ้น แม้ว่าปริมาณอินทรีย์สารและกรดอินทรีย์ระเหยที่ความเข้มข้นของกากมะเขือเทศ 20 กรัมต่อลิตร จะสูงกว่าที่ใช้กากมะเขือเทศ 10 กรัมต่อลิตร แต่ pH ในน้ำหมักที่ความเข้มข้นกากมะเขือเทศ 20 กรัมต่อลิตร จะอยู่ในช่วง pH 4.36-4.45 และ pH ในน้ำหมักที่ความเข้มข้นกากมะเขือเทศ 10 กรัมต่อลิตร จะอยู่ในช่วง pH 4.24-4.34 ทั้งนี้แสดงว่าจุลินทรีย์ที่ผลิตกรดอินทรีย์ในการทดลองนี้ สามารถทน pH ได้ต่ำถึง 4.24 โดยไม่เป็น

อันตราย ซึ่งการศึกษานี้สอดคล้องกับผลของ pH ต่อขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ซึ่ง Zoetemeier and others (1982) พบว่าจุลินทรีย์ที่ผลิตกรดอินทรีย์สามารถทน pH ได้ต่ำถึง 4.5 โดยไม่เป็นอันตราย แต่ pH ที่เหมาะสมกับจุลินทรีย์ในการผลิตกรดอินทรีย์เป็น pH ที่ใกล้เคียงหรือค่อนข้างเป็นกลาง นอกจากนี้จากการศึกษาผลของ pH ต่อขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์จากน้ำปัสเปือกสับปะรดของวิเชียร พันธุ์ยี่ (2534) พบว่าเมื่อ pH สูงขึ้นการผลิตกรดอินทรีย์จะสูงขึ้น ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทดลองผลิตกรดอินทรีย์ได้สูงสุด 9,306 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 4 วัน pH 6.0 จากผลการทดลองที่ได้เมื่อใช้กากมะเขือเทศผสมน้ำเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตรประสิทธิภาพในการขจัดอินทรีย์สารต่ำกว่าเมื่อใช้กากมะเขือเทศผสมน้ำเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร ทั้งในรูปร้อยละของของแข็งทั้งหมด และร้อยละของของแข็งระเหย เนื่องจากปริมาณจุลินทรีย์มีจำกัดในขณะที่ปริมาณอินทรีย์สารเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มระยะเวลาเก็บกักกาก และใช้กากมะเขือเทศผสมน้ำเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการขจัดอินทรีย์สารจะสูงขึ้น ซึ่งเป็นการเพิ่มระยะเวลาที่จุลินทรีย์สัมผัสอาหาร ดังนั้นการทดลองต่อไปจึงมีแนวโน้มศึกษาโดยใช้กากมะเขือเทศผสมน้ำเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร

ชนิดกรดอินทรีย์ระเหย และสารตัวกลางที่พบคือกรดอะซิติก กรดไพรูวอิก กรดบิวทีริก กรดแวลีลิก และเอทานอล ซึ่งปริมาณกรดอะซิติก และกรดไพรูวอิกจะเพิ่มเป็นสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณกากมะเขือเทศที่ป้อนเข้าไป ส่วนกรดบิวทีริกและกรดแวลีลิกจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย และปริมาณเอทานอลกลับลดลงเมื่อปริมาณกากมะเขือเทศเพิ่มมากขึ้น ผลในการศึกษาครั้งนี้สอดคล้องกับผลการทดลองของ Sreekrishnan, Ramachandran and Ghosh (1991) โดยศึกษาผลของการป้อนอินทรีย์สารในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์โดยป้อนน้ำตาลกลูโคสจาก 2.5 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรจนถึง 21.12 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร พบว่าปริมาณกรดอะซิติกจะเพิ่มเป็นสัดส่วนโดยตรงกับการป้อนอินทรีย์สาร ตั้งแต่การป้อนน้ำตาลกลูโคสจาก 2.5 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร จนถึง 7.5 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ซึ่งถ้าป้อนอินทรีย์สารเพิ่มจนถึง 21.12 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร พบว่าปริมาณกรดบิวทีริกจะเพิ่มขึ้น ส่วนกรดอะซิติกและกรดไพรูวอิกจะเพิ่มเพียงเล็กน้อย

4.2 ผลของระยะเวลาเก็บกักกากต่อขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์

จากการใช้กากมะเขือเทศผสมหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร และ 20 กรัมต่อลิตร ทาการหมักให้มีระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน 5 วัน และ 10 วัน ตรวจวัดปริมาณอินทรีย์สารในรูปมิลลิกรัมซีโอดีต่อลิตร ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย pH ค่าความเป็นด่าง การขจัดอินทรีย์สาร ชนิดและปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย ดังผลการทดลองในตาราง 5 และ 6 พบว่าระยะเวลาเก็บกักกากเพิ่มขึ้น ปริมาณอินทรีย์สาร ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย pH ค่าความเป็นด่าง การขจัดอินทรีย์สารจะสูงขึ้น เนื่องจากระยะเวลาเก็บกักกากมีอิทธิพลต่อการทำงานของจุลินทรีย์ในถังปฏิกรณ์ ถ้าเพิ่มระยะเวลาเก็บกักกากจะทำให้จุลินทรีย์มีเวลาสัมผัสกับอินทรีย์สารนานขึ้น ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มประสิทธิภาพในการขจัดอินทรีย์สาร ถ้าลดระยะเวลาเก็บกักกากตามาก ๆ จุลินทรีย์จะหลุดออกจากระบบได้ ดังนั้นระยะเวลาที่จุลินทรีย์อยู่ในระบบสั้นทำให้ประสิทธิภาพในการขจัดอินทรีย์สารลดลงด้วย เมื่อใช้กากมะเขือเทศผสมน้ำที่มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร ปริมาณกรดอะซิติกที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วันจะสูงกว่าที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วันร้อยละ 34 และที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 10 วันจะสูงกว่าที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วันร้อยละ 22 และเมื่อใช้กากมะเขือเทศผสมน้ำที่มีความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ปริมาณกรดอะซิติก ที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วันจะสูงกว่าที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วันร้อยละ 46 และที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 10 วันจะสูงกว่าที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วันร้อยละ 21 ดังนั้นเมื่อพิจารณาผลของปริมาณอินทรีย์สาร ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยแต่ละชนิด และ การขจัดอินทรีย์สาร จากผลในตาราง 5 และ 6 ในการทดลองต่อไปจึงมีแนวโน้มที่จะสนใจที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน และเมื่อใช้กากมะเขือเทศผสมน้ำที่มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร เนื่องจากการหมักที่ระยะเวลาเก็บกักนาน ๆ จะต้องใช้ถังปฏิกรณ์ที่มีขนาดใหญ่ในระดับอุตสาหกรรมเป็นการสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายเกี่ยวกับต้นทุนการก่อสร้าง

4.3 ผลของอุณหภูมิต่อขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ที่มีระยะเวลาเก็บกักกากต่าง ๆ

จากการใช้กากมะเขือเทศผสมหัวเชื้อจุลินทรีย์ที่มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตรทาการหมักให้มีระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน 5 วันและ 10 วัน ที่อุณหภูมิห้อง 40 องศาเซลเซียส 45 องศา

เซลเซียส 50 องศาเซลเซียส และ 55 องศาเซลเซียส ตรวจวัดปริมาณอินทรีย์สารในรูปมิลลิกรัม ซีไอดีต่อลิตร ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย pH ค่าความเป็นด่าง การขจัดอินทรีย์สารและชนิด และ ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย พบว่าที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ปริมาณ อินทรีย์สารปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย pH ค่าความเป็นด่างและการขจัดอินทรีย์สารสูงสุด และ อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียสจะให้ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยต่ำสุด ที่อุณหภูมิห้อง 40 องศาเซลเซียส 45 องศาเซลเซียส จะพบสารตัวกลางในน้ำหมักเป็นกรดอะซิติก กรดไพรูวอนิก กรดบิวทีริก กรด แวโรลิกและเอทานอล ส่วนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และ 55 องศาเซลเซียส จะพบแต่กรด อะซิติก และกรดบิวทีริก ถ้าพิจารณาปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยที่เกิดขึ้นในรูปร้อยละของกรดอินทรีย์ ระเหยทั้งหมดที่ทุกอุณหภูมิ พบว่าจะได้ปริมาณของกรดบิวทีริกสูงกว่ากรดชนิดอื่น ยกเว้นที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส จะพบปริมาณของกรดอะซิติกมากที่สุด หากพิจารณาปริมาณของกรดอินทรีย์ในน้ำหมัก ในหน่วยของมิลลิโมลาร์พบว่าที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสจะให้ปริมาณของกรดอะซิติกและกรดบิวทีริก ในน้ำหมักสูงสุด ที่อุณหภูมิห้องจะให้ปริมาณของกรดไพรูวอนิกและกรดแวลโรลิกในน้ำหมักสูงสุด จาก การทดลองในถังปฏิกรณ์ที่อุณหภูมิปานกลางอาจมีเฉพาะจุลินทรีย์กลุ่ม mesophilic ในถังปฏิกรณ์ ที่ อุณหภูมิสูงอาจมีเฉพาะจุลินทรีย์กลุ่ม thermophilic หรือแต่ละถังปฏิกรณ์อาจมีทั้งสองกลุ่มปนกันแต่ เมื่ออุณหภูมิของการหมักเปลี่ยนไปใกล้เคียงกับอุณหภูมิของจุลินทรีย์กลุ่มใด จะทำให้จุลินทรีย์กลุ่มนั้น สามารถเจริญเติบโตเพิ่มจำนวนได้มากขึ้นและทำงานดีขึ้น จากผลการทดลองในตาราง 7 แสดงว่า จุลินทรีย์ mesophilic สามารถเจริญเติบโตและทำงานได้ดี แต่จุลินทรีย์กลุ่ม thermophilic ปรับตัวได้ไม่ดี

จากผลในตาราง 9 ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ปริมาณ กรดอินทรีย์ระเหย ค่าความเป็นด่างและการขจัดอินทรีย์สารสูงสุด ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสจะ ให้ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย pH ความเป็นด่างและการขจัดอินทรีย์สารต่ำสุด ที่อุณหภูมิห้อง 40 องศาเซลเซียส 45 องศาเซลเซียส จะพบสารตัวกลางในน้ำหมักเป็นกรดอะซิติก กรดไพรูวอนิก กรดบิวทีริก กรดแวลโรลิกและเอทานอล ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิ 55 องศา เซลเซียสจะพบแต่กรดอะซิติกและกรดบิวทีริก ถ้าพิจารณาปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยที่เกิดขึ้นในรูปของ กรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมด ที่อุณหภูมิห้อง 45 องศาเซลเซียส และ 50 องศาเซลเซียส พบว่าจะ

ได้ปริมาณของกรดบิวทีริกสูงกว่ากรดชนิดอื่น ยกเว้นที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และ 55 องศาเซลเซียส จะพบปริมาณของกรดอะซิติกมากที่สุด หากพิจารณาปริมาณของกรดอินทรีย์ในน้ำหมักในหน่วยของมิลลิโมลาร์พบว่าที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสจะให้ปริมาณของกรดอะซิติกและเอทานอลในน้ำหมักสูงสุด ที่อุณหภูมิห้อง และ 40 องศาเซลเซียส จะให้ปริมาณของกรดไพรูวอิกในน้ำหมักใกล้เคียงกันและปริมาณของกรดไพรูวอิก กรดบิวทีริก และ กรดแวลีริกในน้ำหมักจะพบสูงสุดที่อุณหภูมิห้อง แสดงว่าจุลินทรีย์ mesophilic สามารถเจริญเติบโตและทำงานได้ดี แต่จุลินทรีย์กลุ่ม thermophilic ปรับตัวได้ไม่ดี

จากผลในตาราง 11 ระยะเวลาเก็บกักกาก 10 วัน อุณหภูมิห้อง ปริมาณอินทรีย์สาร ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยสูงสุด ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสจะให้ปริมาณอินทรีย์สาร ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย ค่าความเป็นด่างต่ำสุด ที่อุณหภูมิห้อง 40 องศาเซลเซียส 45 องศาเซลเซียส จะพบสารตัวกลางในน้ำหมักเป็นกรดอะซิติก กรดไพรูวอิก กรดบิวทีริก กรดแวลีริกและเอทานอล ส่วนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียสจะพบแต่กรดอะซิติก กรดไพรูวอิก และ กรดบิวทีริก ถ้าพิจารณาปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยที่เกิดขึ้นในรูปร้อยละของกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมด ที่อุณหภูมิห้อง 50 องศาเซลเซียส และ 55 องศาเซลเซียสพบว่าจะได้ปริมาณของกรดบิวทีริกสูงกว่ากรดอื่น ยกเว้นที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และ 45 องศาเซลเซียส จะพบปริมาณของกรดอะซิติกมากที่สุด หากพิจารณาปริมาณของกรดอินทรีย์ในน้ำหมักในหน่วยของมิลลิโมลาร์ พบว่าที่อุณหภูมิห้องและ 45 องศาเซลเซียสจะให้ปริมาณของกรดอะซิติกในน้ำหมักสูงสุด ใกล้เคียงกันและปริมาณของกรดไพรูวอิก กรดบิวทีริก และกรดแวลีริกในน้ำหมักจะมีปริมาณสูงสุดที่อุณหภูมิห้อง ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียสจะพบเอทานอลในน้ำหมักสูงสุด จะเห็นได้ที่ระยะเวลาเก็บกักกากนานขึ้น จุลินทรีย์กลุ่ม thermophilic ทำงานได้ดีที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ในขณะที่จุลินทรีย์ mesophilic จะทำงานได้ดีที่อุณหภูมิห้อง จากผลการทดลองพบว่าความเข้มข้นกากมะเขือเทศ ระยะเวลาเก็บกักกากและอุณหภูมิจะมีผลต่อปริมาณอินทรีย์สาร ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย pH ค่าความเป็นด่าง ปริมาณและชนิดของสารตัวกลางในน้ำหมัก การหมักต้องควบคุมอุณหภูมิของถังปฏิกิริยาให้คงที่ ถ้าอุณหภูมิของการหมักเปลี่ยนแปลงจะมีผลต่อการทำงานของจุลินทรีย์ การขึ้นลงของอุณหภูมิที่ thermophilic จะมีผลมากกว่า mesophilic ช่วงของการเปลี่ยนแปลง

ของอุณหภูมิที่จะไม่กระทบต่อกิจกรรมใน mesophilic จะมีได้ ± 2.8 แต่ของ thermophilic จะไม่เกิน ± 0.3 องศาเซลเซียส (Permpong, Gaysorn and Susumu. 1985)

จากผลการทดลองในตาราง 7 8 9 10 11 และ 12 เมื่อพิจารณาผลการทดลอง ที่อุณหภูมิห้อง 40 องศาเซลเซียส และ 45 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมของ จุลินทรีย์ mesophilic bacteria จะพบสารตัวกลางในน้ำหมักคือกรดอะซิติก กรดไพรูวิก กรดบิวทีริก กรดแวนิลิก และ เอทานอล ที่อุณหภูมิห้อง 40 องศาเซลเซียส และ 45 องศาเซลเซียส จะให้ปริมาณอินทรีย์สารต่ำกว่าที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และ 55 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมของจุลินทรีย์ thermophilic bacteria ในการหมักที่อุณหภูมิช่วง mesophilic จะให้ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยสูงกว่าในการหมักที่อุณหภูมิช่วง thermophilic ที่ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และ 55 องศาเซลเซียส จะพบสารตัวกลางในน้ำหมักคือ กรดอะซิติก และกรดบิวทีริก จะไม่พบกรดไพรูวิก เนื่องจากจะเป็นพิษต่อระบบ (Verrier, Fay and Albagmac. 1987) อุณหภูมิช่วง thermophilic จะให้ปริมาณอินทรีย์สารสูงกว่าอุณหภูมิช่วง mesophilic แต่ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยต่ำกว่ามาก ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นช่วย ในการย่อยสลายโพลีเมอร์ให้เป็นโมโนเมอร์เท่านั้น แต่ไม่มีผลการเปลี่ยนจากโมโนเมอร์เป็นกรด อินทรีย์ระเหย

4.4 ผลของการกวนต่อขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์

จากการเลือกศึกษาโดยใช้กากมะเขือเทศผสมน้ำที่มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร ระยะ เวลาเก็บกักกาก 5 วัน ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสเพื่อใช้ในการทดลองต่อไป ดังนั้นจึงทำการ ทดลองหมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอนในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ใช้กากมะเขือเทศ ที่มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร ระยะเวลากักกาก 5 วัน ทดลองที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส พบว่าในน้ำหมักที่กรองได้จากถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนจะให้ปริมาณอินทรีย์สารปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย pH ค่าความเป็นด่าง ชนิดและปริมาณสารตัวกลางไม่แตกต่างกันผลการศึกษานี้สอดคล้อง กับการศึกษาผลของการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำปัสเบสเลือกสับปะรด โดยใช้กระบวนการหมักแบบสอง ขั้นตอน โดยศึกษานขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์พบว่า น้ำหมักที่มีตะกอนจุลินทรีย์ที่มีการกวนเมื่อ เปรียบเทียบกับน้ำหมักที่มีตะกอนจุลินทรีย์ที่ไม่มีการกวน ซึ่งนันทนิตย์ ทศน์เอี่ยม (2531) พบว่า มีประสิทธิภาพการผลิตกรดอินทรีย์และปริมาณกรดอินทรีย์ใกล้เคียงกัน

จากผลการทดลองเมื่อใช้กากมะเขือเทศผสมน้ำให้มีความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร จะให้ปริมาณอินทรีย์สารและปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยในน้ำหมักมากกว่าเมื่อใช้กากมะเขือเทศผสมน้ำที่มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร เนื่องจากเป็นการเพิ่มปริมาณอินทรีย์สาร แต่เมื่อใช้กากมะเขือเทศที่เข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการขจัดอินทรีย์สารสูงกว่าเมื่อใช้กากมะเขือเทศเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ดังนั้นจึงเลือกใช้กากมะเขือเทศผสมน้ำที่มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร ในการทดลองขั้นต่อไปและจากผลการทดลองที่ระยะเวลาเก็บกักกากต่างๆ ถ้าเพิ่มระยะเวลาเก็บกักกาก จะทำให้จุลินทรีย์มีเวลาสัมผัสกับอินทรีย์สารนานขึ้น ซึ่งจะทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในการขจัดอินทรีย์สาร แต่ต้องใช้งบประมาณที่มีขนาดใหญ่ในระดับอุตสาหกรรม และจากการทดลองผลของอุณหภูมิที่ระยะเวลาเก็บกักกากต่าง ๆ พบว่าที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน จะให้ปริมาณของกรดอะซิติก และปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยทั้งหมดในน้ำหมักค่อนข้างสูง อีกทั้งค่าใช้จ่ายในการใช้พลังงานเพื่อเพิ่มอุณหภูมิเป็น 40 องศาเซลเซียส ค่อนข้างต่ำ และจากผลการทดลองพบว่า การกวนไม่ส่งผลต่อการผลิตกรดอินทรีย์ในการทดลองนี้ ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากผลการทดลองนี้คือ ใช้กากมะเขือเทศผสมน้ำให้มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และไม่มีการกวน

ข้อเสนอแนะ

จากการทดลองศึกษาผลของสภาวะต่างๆ ในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ของการหมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอน เช่น อัตราการป้อนอินทรีย์สาร ระยะเวลาเก็บกักกาก อุณหภูมิ และการกวน พบว่า pH อยู่ในช่วง 4.24-4.45 ซึ่งเป็น pH ค่อนข้างต่ำ ดังนั้นควรมีการศึกษาผลของ pH ต่อการผลิตกรดอินทรีย์ โดยการเติมสารเคมีลงไปเป็นการปรับ pH เพื่อให้มี pH ที่เหมาะสมต่อจุลินทรีย์ที่ผลิตกรดอินทรีย์

บรรณานุกรม

บรรณานุกรม

- เกษม พิสิฏ. การผลิตมะเขือเทศส่งโรงงาน. สมาคมการค้าปุ๋ยและธุรกิจเกษตรไทย, 2531.
- เกษแก้ว ปะนะมณฑา. การศึกษาการย่อยสลายชีสเตรทต่างๆ โดยจุลินทรีย์จากถังปฏิกรณ์ผลิต
ก๊าซชีวภาพ. วิทยานิพนธ์ วท.ม. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี,
2534. อัดสำเนา.
- ชาญชัย คุณวานากิจ. การผลิตก๊าซชีวภาพจากผักตบชวาภายใต้การย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจน.
วิทยานิพนธ์ วศ.ม. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2539. อัดสำเนา.
- นันทินิตย์ ทัดเน่เอี่ยม. การเปรียบเทียบการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำปัสเบสือกกลับปะรดในถังปฏิกรณ์
แบบชั้นกรองระหว่างกระบวนการหมักแบบชั้นตอนเดียวและสองชั้นตอน , วิทยานิพนธ์
วท.ม. กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี, 2531. อัดสำเนา.
- ปรีดา แยมเจริญวงศ์. เทคโนโลยีน้ำและน้ำเสีย. ภาควิชาสุขาภิบาล คณะสาธารณสุขศาสตร์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น, 2534.
- ธงชัย พรรณสวัสดิ์. คู่มือวิเคราะห์น้ำทิ้ง. สถาบันวิจัยสภาวะแวดล้อม จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย,
2525.
- หัตทยา ทิพย์ะวัฒน์. การศึกษากลุ่มจุลินทรีย์และสารตัวกลางในกระบวนการย่อยสลายเปลือก
สับปะรดในสภาวะไร้อากาศที่อุณหภูมิสูงและอุณหภูมิต่ำ. วิทยานิพนธ์ วท.ม.
กรุงเทพฯ: สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า ธนบุรี, 2531. อัดสำเนา.
- สุเมธ ชวเดช, และคนอื่นๆ การผลิตกรดอินทรีย์จากน้ำทิ้งโรงงานเบ็งมันสำปะหลัง. สถาบัน
วิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย, 2530.
- APHA,AWWA,WPCF. "Standard Methods for the Examination of Water and
Wastewater," New york : 16th. edition. 533-535; 1985.
- Barredo,M.S. and L.M.Evison. "Effect of Propionate Toxicity on Methanogen
Enriched Sludge Methanobrevibacter smithii and Methanospirillum
hungatii at Different pH Values," Applied and Environmental
Microbiology., 57:1764-1769;1991.

- Boone, D.R. and M.P. Bryant. "Propionate Degrading Bacterium Syntrophobacter wolinii nov. gen. nov, from Methanogenic Ecosystem," Applied and Environmental Microbiology. 40: 626-632; 1980.
- Bryant, M.P. and N.Small. "The Anaerobic Monotrichous Butyric Acid-producing Curved Rod-Shaped Bacteria of the Rumen," Journal Bacteriol. 72: 16-21; 1965.
- Dethority, B.A. "Pectin Fermenting Bacteria Isolated from the Bovine Rumen," Journal Bacteriol. 72 : 16-21; 1965.
- Dinopoulou, G. and J.N.Lester, "Optimization of a Two-Phase Anaerobic Digestion System Treating a Complex Wastewater," Environmental Technology Letters. 10 : 799-814; 1989.
- Donald, L.W. Bioenvironmental Systems Boca Raton. Florida : 96-103; 1987.
- Dinopoulou, G., T.Rudd and J.N.Lester. "Anaerobic Acidogenesis of a Complex Wastewater : I. The Influence of Operation Parameters on Reactor Performance," Biotechnology and Bioengineering. 31 : 1958-1968; 1988.
- Hill, D.J. and S.Dykstra. "Anaerobic Digestion of Cannery Tomato Solid Wastes," Journal of the Environmental Engineering Division. 106 : 266-380; 1980.
- Hobson, P.N., S.Bousfield and R.Summers, Anaerobic Digestion of Organic Matter CRC. Critical Review in Environmental Control, Chemical Rubber Co., Cleveland, June, 1974.
- 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," Agricul. Wastes. 11 : 241-252; 1984.
- Kotze, J.P., Thiel, P.G. and W.H.J. Hattinh. "Anaerobic Digestion II The Characterization and Control of Anaerobic Digestion," Water Research Pergamon Press. 3 : 459-494; 1969.

- Maly, J. and H. Fadrus "Influence of Temperature on Anaerobic Digestion, " Journal Water Pollution Control Federation. 43 : 641-650; 1971.
- McCarty, P.L. "Anaerobic Waste Treatment Fundamentals Part 1,2,3 and 4," Public Works. 1964.
- McCarty, P.L. and J.S. Jeris. "The Biochemistry of Methane Fermentation Using ^{14}C Tracers," Journal Water Pollution Control Federation. 37:178-192; 1984.
- Lane, A.G. "Laboratory Scale Anaerobic Digestion of Fruit and Vegetable Solid Waste," Biomass. 5 : 245-259; 1984.
- Patel, G.B. and others. "Isolation and Characterization of an Anaerobic Cellulolytic Microorganism, Activibrio cellulolyticus gen. nov. sp. nov.," Int. Journal System Bacteriol. 30 : 85-179; 1980.
- Permpong, S., D. Gaysorn and O. Susumu. "Mesophilic and Thermophilic Methane Fermentation of Slop Waste," Fermentation Technology. 63:567-573; 1985.
- Perot, C. and others. "The Effect of pH, Temperature and Agitation Speed on Sludge Anaerobic Hydrolysis Acidification," Environment Technology Letters. 20 : 741-742; 1988.
- Powell, G.E. and D.B. Archer, "On-Line Titration Method for Monitoring Buffer Capacity and Total Volatile Fatty Acid Levels in Anaerobic Digestion," Biotechnology and Bioengineering. 33 : 570-577; 1989.
- Sarada, R. and K. Nand. "Start-up of Anaerobic Digestion of Tomato Processing Waste for Methane Generation," Biological Wastes. 30 : 231-237; 1989.
- Springer, A.M. "The Environmental Factors which Effect the Anaerobic Decomposition of Fibrous Sludge Beds on Stream Bottoms," Dissertation Abs. 32 : 4307-4338; 1973.
- Sprott, G.D., S.E. Bird and I.J. McDonald. "Proton Motive Force as a Function of the pH at which Methanobacterium bryantii is Grown," Canadian Journal of Microbiology. 31 : 1031-1034; 1985.

Sreekrishnan, T.R., K.B. Ramachandran and P. Ghosh. "Effect of Operation Variables on Biofilm Formation and Performance of Anaerobic Fluidized Bed Bioreactor," Biotechnology and Bioengineering. 37 : 557-566; 1991.

TATA Energy Research Institute Biogas Technology TATA Energy Documentation and Information Centre, India : 5-13; 1985.

Verrier, D., F. Fay and G. Albagmac. "Two-Phase Methanization of Solid Vegetable Wastes," Biological Wastes. 22 : 163-177; 1987.

Zoetemeyer, R.J. and others. "Product Inhibition in the Acid Forming Stage of the Anaerobic Digestion Process," Water Research. 16 : 639-663; 1982a.

Zoetemeyer, R.J. and others. "Anaerobic Acidification of Glucose in an Upflow Reactor," Biomass. 2 : 187-199; 1982b.

ภาคผนวก

ตาราง 14 ปริมาณอินทรีย์สาร กรดอินทรีย์ระเหย pH และ ค่าความเป็นด่างในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ของการหมักจาก
 มะเขือเทศแบบอวกาศสองขั้นตอน ที่ระยะเวลาเก็บกัก 3 วัน 5 วันและ 10 วัน เมื่อใช้กากมะเขือเทศผสมน้ำให้มีความ
 เข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร

วันที่ทดลอง	ระยะเวลาเก็บกัก 3 วัน				ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน				ระยะเวลาเก็บกัก 10 วัน			
	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	pH	T-alk (mg/l)	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	pH	T-alk (mg/l)	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	pH	T-alk (mg/l)
1	1617	885	4.28	110	1911	1125	4.33	140	2083	1110	4.37	200
2			4.25				4.30				4.38	
3	1519	780	4.23	100	1960	1095	4.28	150	2303	-	4.36	-
4			4.24				4.28				4.33	
5	1519	735	4.26	110	2107	1125	4.28	150	2058	1350	4.30	190
6			4.28				4.22				4.36	
7	1617	735	4.23	80	1740	1125	4.30	130	2083	1125	4.30	190
8			4.23				4.27				4.41	

วันที่ทดลอง	ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน					ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน					ระยะเวลาเก็บกักกาก 10 วัน				
	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	pH	T-alk (mg/l)		COD (mg/l)	VFA (mg/l)	pH	T-alk (mg/l)		COD (mg/l)	VFA (mg/l)	pH	T-alk (mg/l)	
9	1470	765	4.24	80		2009	1005	4.33	140		2107	1140	4.29	200	
10			4.26					4.27					4.34		
11	1421	825	4.17	100		2131	1080	4.15	130		2303	1215	4.35	200	
12			4.26					4.13					4.37		
13	1372	795	4.44	70		2205	900	4.24	100		2303	1140	4.34	170	
14			4.28					4.23					4.34		
15	1470	780	4.27	80		2205	1095	4.28	90		2303	1125	4.35	150	
16			4.26					4.27					4.35		
17	1470	750	4.27	110		2205	975	4.23	130		2450	1125	4.30	180	
18			4.26					4.20					4.35		
19	1372	735	4.22	100		2205	1080	4.22	120		2548	1095	4.41	200	

ตาราง 14 (ต่อ)

วันที่ทดลอง	ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน				ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน				ระยะเวลาเก็บกักกาก 10 วัน			
	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	pH	T-alk (mg/l)	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	pH	T-alk (mg/l)	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	pH	T-alk (mg/l)
20			4.24				4.24				4.33	
21	1470	720	4.25	90	2058	960	4.22	110	2940	1140	4.33	190
22			4.28				4.19				4.34	
23	1372	750	4.25	80	2058	1035	4.24	110	2254	1110	4.35	170
24			4.26				4.22				4.35	
25	1421	735	4.27	90	1960	960	4.25	120	2401	1125	4.36	180
Mean	1470	769	4.26	92	2058	1043	4.24	125	2303	1149	4.34	185

ตาราง 15 ปริมาณอินทรีย์สาร กรดอินทรีย์ระเหย pH และ ค่าความเป็นด่างขึ้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ของการหมักกาก
มะเขือเทศแบบอวกาศสองชั้นตอน ที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน 5 วัน และ 10 วัน เมื่อใช้กากมะเขือเทศผสมน้ำให้มี
ความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร

วันที่ทดลอง	ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน				ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน				ระยะเวลาเก็บกักกาก 10 วัน			
	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	pH	T-alk (mg/l)	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	pH	T-alk (mg/l)	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	pH	T-alk (mg/l)
1	4214	1140	4.02	120	4900	1155	4.02	110	5194	1950	4.04	220
2			4.06				4.04				4.06	
3	2352	975	4.40	130	2744	1155	4.42	160	2156	1800	4.51	220
4			4.41				4.42				4.51	
5	3234	900	4.41	120	3255	1215	4.43	160	2254	1950	4.50	240
6			4.40				4.42				4.48	
7	2254	975	4.40	120	4704	1665	4.43	150	4508	1875	4.48	250
8			4.42				4.46				4.49	

ตาราง 15 (ต่อ)

วันที่ทดลอง	ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน				ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน				ระยะเวลาเก็บกักกาก 10 วัน			
	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	pH	T-alk (mg/l)	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	pH	T-alk (mg/l)	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	pH	T-alk (mg/l)
9	2450	1005	4.43	130	4410	1350	4.45	130	4410	1830	4.49	240
10			4.44				4.40				4.53	
11	3255	1095	4.44	80	3234	1350	4.39	100	6468	1830	4.53	190
12			4.41				4.37				4.51	
13	3136	975	4.43	90	3332	1455	4.34	120	5880	1875	4.52	210
14			4.40				4.34				4.49	
15	3038	975	4.42	100	3528	1350	4.37	130	5782	1800	4.48	260
16			4.42				4.39				4.47	
17	2940	1095	4.44	110	-	1125	4.38	130	4410	1875	4.47	250
18			4.48				4.40				4.44	
19	3136	1005	4.30	130	3528	1140	4.33	140	4606	1800	4.47	250

ตาราง 15 (ต่อ)

วันที่ทดลอง	ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน				ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน				ระยะเวลาเก็บกักกาก 10 วัน			
	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	pH	T-alk (mg/l)	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	pH	T-alk (mg/l)	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	pH	T-alk (mg/l)
20			4.32				4.40				4.51	
21	3038	1080	4.32	90	3822	1215	4.41	140	4606	1875	4.50	240
22			4.30				4.42				4.48	
23	2940	1095	4.34	110	3724	1245	4.42	140	4802	1950	4.49	240
24			4.34				4.44				4.46	
25	3136	1125	4.34	120	3822	1575	4.43	130	4508	1950	4.47	230
Mean	3009	1033	4.36	111	3750	1307	4.37	133	4583	1873	4.45	233

ตาราง 16 ปริมาณอินทรีย์สาร กรดอินทรีย์ระเหย pH และ ค่าความเป็นด่างในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ของการหมักกากมะเขือเทศแบบอัดอากาศสองขั้นตอน ที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน 5 วัน และ 10 วัน อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสเมื่อใช้กากมะเขือเทศผสมน้ำให้มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร

วันที่ทดลอง	ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน				ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน				ระยะเวลาเก็บกักกาก 10 วัน			
	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	pH	T-alk (mg/l)	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	pH	T-alk (mg/l)	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	pH	T-alk (mg/l)
1	1911	960	4.68	250	1568	1095	4.48	210	2058	615	4.86	310
2			4.46				4.42				4.86	
3	1862	885	4.58	250	1960	1125	4.42	230	2303	840	4.85	320
4			4.48				4.41				4.83	
5	1323	900	4.58	220	1862	1080	4.40	230	1666	885	4.84	330
6			4.50				4.36				4.85	
7	1765	690	4.52	220	2303	1245	4.34	230	1813	885	4.88	320
8			4.59				4.40				4.85	

ตาราง 16 (ต่อ)

วันที่ทดลอง	ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน				ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน				ระยะเวลาเก็บกักกาก 10 วัน			
	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	pH	T-alk (mg/l)	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	pH	T-alk (mg/l)	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	pH	T-alk (mg/l)
9	1715	975	4.72	220	1911	1140	4.38	220	2107	750	4.85	380
10			4.57				4.36				4.90	
11	1813	675	4.56	240	1960	990	4.40	250	2058	675	4.97	330
12			4.65				4.36				4.97	
13	1519	645	4.61	210	2009	1065	4.53	200	1764	690	4.89	330
14			4.57				4.50				5.07	
15	2009	750	4.56	200	2107	1080	4.50	210	1911	705	5.06	340
16			4.54				4.52				5.10	
17	1617	690	4.54	220	1715	855	4.53	230	1960	585	5.19	320
18			4.56				4.40				5.26	
19	1617	675	4.59	240	2229	1035	4.40	210	2058	690	5.18	330

ตาราง 16 (ต่อ)

วันที่ทดลอง	ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน				ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน				ระยะเวลาเก็บกักกาก 10 วัน			
	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	pH	T-alk (mg/l)	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	pH	T-alk (mg/l)	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	pH	T-alk (mg/l)
20			4.58				4.41				5.18	
21	1862	690	4.50	230	1127	1020	4.45	210	1960	690	5.07	330
22			4.48				4.42				5.07	
23	1519	705	4.58	240	1911	1080	4.41	230	2009	705	5.10	320
24			4.56				4.45				5.09	
25	1764	690	4.57	230	2181	975	4.40	220	1813	735	5.07	350
Mean	1715	740	4.58	230	1911	1059	4.42	222	1960	726	4.98	331

ตาราง 17 ปริมาณอินทรีย์สาร กรดอินทรีย์ระเหย pH และ ค่าความเป็นด่างในช่วงขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ของการหมักกากมะเขือเทศแบบใช้อากาศสองขั้นตอน ที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน 5 วัน และ 10 วัน อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เมื่อใช้กากมะเขือเทศผสมน้ำให้ความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร

วันที่ทดลอง	ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน				ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน				ระยะเวลาเก็บกักกาก 10 วัน			
	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	pH	T-alk (mg/l)	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	pH	T-alk (mg/l)	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	pH	T-alk (mg/l)
1	1470	705	4.23	60	1225	810	4.44	150	2401	1110	4.25	70
2			4.23				4.40				4.17	
3	1421	780	4.23	80	1666	885	4.38	170	2205	1140	4.20	100
4			4.25				4.36				4.18	
5	1568	720	4.25	70	1715	840	4.36	140	2695	1140	4.20	80
6			4.26				4.38				4.06	
7	1470	630	4.26	50	1764	720	4.39	160	2401	1155	4.12	40
8			4.12				4.44				4.20	

ตาราง 17 (ต่อ)

วันที่ทดลอง	ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน				ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน				ระยะเวลาเก็บกักกาก 10 วัน			
	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	pH	T-alk (mg/l)	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	pH	T-alk (mg/l)	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	pH	T-alk (mg/l)
9	1764	705	4.23	70	-	780	4.40	170	-	1050	4.06	50
10			4.35				4.41				4.20	
11	1617	720	4.29	90	1960	705	4.46	210	2205	1050	4.04	70
12			4.29				4.41				4.17	
13	1323	705	4.28	140	1617	720	4.46	170	1862	1035	4.16	50
14			4.27				4.45				4.18	
15	1568	720	4.24	140	1323	720	4.44	180	1960	960	4.17	40
16			4.50				4.46				4.17	
17	1519	690	4.44	90	1666	720	4.55	170	2180	810	4.18	70
18			4.35				4.58				4.12	
19	1960	720	4.35	90	2058	705	4.48	160	2254	1020	4.20	70

ตาราง 17 (ต่อ)

วันที่ทดลอง	ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน					ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน					ระยะเวลาเก็บกักกาก 10 วัน				
	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	pH	T-alk (mg/l)		COD (mg/l)	VFA (mg/l)	pH	T-alk (mg/l)		COD (mg/l)	VFA (mg/l)	pH	T-alk (mg/l)	
20			4.30					4.49					4.18		
21	1517	705	4.28	80		1715	675	4.50	170		2229	1005	4.17	50	
22			4.29					4.57					4.15		
23	1568	705	4.30	70		1666	705	4.38	160		2205	1035	4.06	40	
24			4.31					4.44					4.11		
25	1519	690	4.30	120		1641	720	4.46	160		1862	1005	4.12	60	
Mean	1568	707	4.28	88		1666	746	4.46	166		2205	1039	4.15	61	

ตาราง 18 ปริมาณอินทรีย์สาร กรดอินทรีย์ระเหย PH และ ค่าความเป็นด่างในการผลิตกรดอินทรีย์ของการหมักกากมะเขือเทศแบบอ็อกซิเจนสองขั้นตอน ที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน 5 วัน และ 10 วัน อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เมื่อใช้กากมะเขือเทศผสมน้ำให้ความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร

วันที่ทดสอบ	ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน				ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน				ระยะเวลาเก็บกักกาก 10 วัน			
	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	PH	T-alk (mg/l)	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	PH	T-alk (mg/l)	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	PH	T-alk (mg/l)
1	1666	450	4.01	20	1568	510	4.09	10	1911	495	4.88	20
2			4.01				4.01				4.87	
3	1568	450	4.02	20	1127	510	4.04	10	1666	765	4.80	20
4			4.02				4.04				4.72	
5	1225	480	4.01	20	1666	465	4.03	20	1666	555	4.67	20
6			4.01				4.02				4.60	
7	1568	390	4.01	10	1715	450	4.01	20	1862	570	4.72	30
8			4.02				4.02				4.88	

ตาราง 18 (ต่อ)

วันที่ทดลอง	ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน				ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน				ระยะเวลาเก็บกักกาก 10 วัน			
	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	pH	T-alk (mg/l)	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	pH	T-alk (mg/l)	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	pH	T-alk (mg/l)
9	1372	430	4.02	10	1715	450	4.03	20	1666	645	4.81	20
10			4.01				4.04				4.76	
11	1568	330	4.00	10	1666	465	4.02	20	1666	540	4.75	20
12			4.01				4.01				4.78	
13	1372	390	4.02	20	1813	420	4.02	10	2107	465	4.68	20
14			4.01				4.02				4.79	
15	1470	420	4.02	30	1421	-	4.03	-	2058	465	4.81	30
16			4.01				4.04				4.80	
17	1372	450	4.01	10	1519	-	4.02	-	1862	495	4.82	30
18			4.00				4.03				4.82	
19	1666	465	4.00	20	1568	495	4.02	20	1617	540	4.87	20

ตาราง 18 (ต่อ)

วันที่ทดลอง	ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน				ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน				ระยะเวลาเก็บกักกาก 10 วัน			
	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	pH	T-alk (mg/l)	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	pH	T-alk (mg/l)	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	pH	T-alk (mg/l)
20			4.01				4.02				4.85	
21	1519	495	4.01	20	1666	480	4.03	10	1911	540	4.84	20
22			4.01				4.04				4.79	
23	-	480	4.01	10	1617	450	4.03	20	1666	510	4.82	20
24			4.02				4.03				4.83	
25	1470	540	4.02	10	1568	465	4.04	10	1862	504	4.85	20
Mean	1486	443	4.01	16	1586	469	4.03	15	1809	545	4.79	22

ตาราง 19 ปริมาณอินทรีย์สาร กรดอินทรีย์ระเหย pH และ ค่าความเป็นด่างในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ของการหมักกากมะเขือเทศแบบอวกาศสองชั้นตอน ที่ระยะเวลาเก็บกาก 3 วัน 5 วัน และ 10 วัน อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เมื่อใช้กากมะเขือเทศผสมน้ำให้ความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร

วันที่ทดลอง	ระยะเวลาเก็บกาก 3 วัน				ระยะเวลาเก็บกาก 5 วัน				ระยะเวลาเก็บกาก 10 วัน			
	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	pH	T-alk (mg/l)	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	pH	T-alk (mg/l)	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	pH	T-alk (mg/l)
1	1342	495	4.12	20	2695	555	4.09	30	539	645	4.90	120
2			4.10				4.09				4.98	
3	1372	465	4.11	20	2695	450	4.09	30	882	540	4.97	130
4			4.10				4.09				4.96	
5	-	330	4.10	20	2597	510	4.08	40	-	555	4.92	160
6			4.10				4.09				4.68	
7	1862	555	4.11	10	2597	480	4.08	30	1862	420	4.85	140
8			4.10				4.08				4.82	

ตาราง 19 (ต่อ)

วันที่ทดลอง	ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน				ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน				ระยะเวลาเก็บกักกาก 10 วัน			
	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	pH	T-alk (mg/l)	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	pH	T-alk (mg/l)	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	pH	T-alk (mg/l)
9	1815	765	4.11	10	2548	525	4.09	20	2254	870	4.82	115
10			4.11				4.08				4.81	
11	1911	525	4.10	20	2499	504	4.09	20	2303	645	4.80	120
12			4.10				4.10				4.80	
13	2009	495	4.07	10	2205	504	4.10	20	2597	570	4.79	120
14			4.08				4.08				4.79	
15	1960	510	4.08	10	2205	480	4.09	10	2548	570	4.80	120
16			4.10				4.17				4.85	
17	1815	555	4.10	20	2426	532	4.08	20	2303	630	4.80	130
18			4.10				4.09				4.88	
19	1815	495	4.11	20	2548	532	4.09	30	2254	630	4.84	120

ตาราง 19 (ต่อ)

วันที่ทดลอง	ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน				ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน				ระยะเวลาเก็บกักกาก 10 วัน			
	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	pH	T-alk (mg/l)	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	pH	T-alk (mg/l)	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	pH	T-alk (mg/l)
20			4.11				4.09				4.85	
21	1764	480	4.12	10	2695	504	4.10	30	1960	615	4.80	110
22			4.10				4.10				4.85	
23	1666	480	4.11	10	2499	495	4.10	30	2548	615	4.85	100
24			4.11				4.09				4.85	
25	1568	495	4.12	20	2156	495	4.09	30	2254	570	4.83	100
Mean	1741	315	4.10	15	2489	505	4.09	26	2020	605	4.84	121

ตาราง 20 ปริมาณอินทรีย์สาร การคืนชีพระยะเหย pH และ ค่าความเป็นด่างขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ของการหมัก
กากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอน ที่ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสเมื่อใช้กากมะเขือเทศ
ผสมน้ำที่มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร โดยการวางกับไม้วถ่านขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์

วันที่ทดลอง	ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน (กวน)				ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน (ไม่กวน)			
	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	pH	T-alk (mg/l)	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	pH	T-alk (mg/l)
1	1764	990	4.40	220	1421	915	4.30	150
2			4.42				4.32	
3	1617	975	4.41	220	1641	975	4.23	130
4			4.40				4.33	
5	1568	915	4.50	230	1911	1035	4.44	170
6			4.50				4.46	
7	1960	1080	4.36	200	2156	900	4.45	140
8			4.40				4.46	

วันที่ทดลอง	ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน (กวน)				ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน (ไม่กวน)			
	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	pH	T-alk (mg/l)	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	pH	T-alk (mg/l)
9	2229	1035	4.36	210	2254	1095	4.50	160
10			4.40				4.55	
11	2107	1245	4.34	210	2107	1125	4.54	160
12			4.36				4.56	
13	1911	975	4.41	200	1641	1065	4.55	150
14			4.40				4.44	
15	2058	1020	4.44	210	1911	1140	4.43	140
16			4.36				4.42	
17	1911	920	4.39	180	2254	1245	4.44	210
18			4.39				4.45	
19	1715	915	4.41	200	2156	1140	4.40	160

ตาราง 20 (ต่อ)

วันที่ทดลอง	ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน (กวน)				ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน (ไม่กวน)			
	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	pH	T-alk (mg/l)	COD (mg/l)	VFA (mg/l)	pH	T-alk (mg/l)
20			4.48				4.39	
21	1617	1140	4.35	190	1715	780	4.40	130
22			4.44				4.42	
23	1862	855	4.42	190	1666	1100	4.44	180
24			4.44				4.42	
25	1911	1065	4.43	200	1641	780	4.42	130
Mean	1863	1010	4.41	204	1882	1022	4.43	154

ตาราง 21 ชนิดและปริมาณของกรดอินทรีย์ในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ของการหมักกากมะเขือเทศแบบอวกาศสองขั้นตอน ที่ระยะเวลาเก็บกัก 3 วัน 5 วัน และ 10 วัน เมื่อใช้กากมะเขือเทศผสมน้ำให้มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร

วันที่ทดลอง	ระยะเวลาเก็บกัก 3 วัน						ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน						ระยะเวลาเก็บกัก 10 วัน					
	AA	PA	BA	VA	ET		AA	PA	BA	VA	ET		AA	PA	BA	VA	ET	
1	390	119	483	128	14		514	99	616	106	113		649	120	617	103	-	
2																		
3	348	112	446	120	29		475	132	587	102	18		586	117	580	97	91	
4																		
5	373	105	451	96	113		544	103	665	95	131		543	102	480	75	-	
6																		
7	361	104	480	92	20		539	93	638	87	125		703	129	626	93	-	
8																		
9	349	94	470	101	131		509	99	596	92	86		633	122	596	95	3	
10																		

ตาราง 21 (ต่อ)

วันที่ทดลอง	ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน					ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน					ระยะเวลาเก็บกักกาก 10 วัน				
	AA	PA	BA	VA	ET	AA	PA	BA	VA	ET	AA	PA	BA	VA	ET
	,														
11	345	94	444	104	100	588	114	645	97	10	672	124	566	98	76
12															
13	296	78	365	79	97	603	121	696	110	98	649	124	581	97	86
14															
15	293	78	408	91	107	632	121	741	123	77	671	180	613	110	85
16															
17	331	75	429	101	90	502	90	646	116	105	660	122	638	117	75
18															
19	250	66	429	98	111	423	78	617	108	94	709	137	815	121	98
20															
21	300	62	368	97	105	326	68	601	90	36	539	121	654	115	64
22															

วันที่ทดลอง	ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน					ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน					ระยะเวลาเก็บกักกาก 10 วัน				
	AA	PA	BA	VA	ET	AA	PA	BA	VA	ET	AA	PA	BA	VA	ET
23	212	59	371	95	91	301	62	538	103	75	593	121	773	86	-
24															
25	243	64	371	65	73	307	61	506	99	85	506	112	740	132	16
Mean	315	85	424	97	83	482	95	623	102	81	624	126	637	103	66

ตาราง 22 ชนิดและปริมาณของกรดอินทรีย์ในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ของการหมักกามะเขือเทศแบบอ็อกซิไดซ์สองขั้นตอน ที่ระยะเวลาเก็บกัก 3 วัน 5 วัน และ 10 วัน เมื่อใช้กามะเขือเทศผสมน้ำให้มีความเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร

วันที่ทดลอง	ระยะเวลาเก็บกัก 3 วัน						ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน						ระยะเวลาเก็บกัก 10 วัน					
	AA	PA	BA	VA	ET		AA	PA	BA	VA	ET		AA	PA	BA	VA	ET	
1	375	121	532	4	-		890	217	728	9	-		1254	290	800	18	-	
2																		
3	447	151	661	8	-		752	182	731	7	-		1347	299	941	17	-	
4																		
5	378	136	592	5	110		1146	183	720	7	33		1261	280	894	17	35	
6																		
7	408	147	604	5	-		822	211	625	7	-		1213	270	850	17	-	
8																		
9	632	185	570	7	61		816	218	637	173	-		1221	280	795	208	-	
10																		

วันเลือกตั้ง	ระยะเวลาเก็บกากาก 3 วัน					ระยะเวลาเก็บกากาก 5 วัน					ระยะเวลาเก็บกากาก 10 วัน				
	AA	PA	BA	VA	ET	AA	PA	BA	VA	ET	AA	PA	BA	VA	ET
11	511	182	580	206	-	763	199	568	157	-	1100	240	701	189	-
12															
13	447	153	492	177	-	841	255	613	178	-	1121	267	748	200	-
14															
15	482	178	522	183	-	1100	305	669	197	-	1328	317	822	224	-
16															
17	691	203	509	78	-	1096	290	650	70	19	1318	300	812	97	23
18															
19	717	218	519	173	5	890	242	609	170	-	1160	295	784	213	-
20															
21	451	196	480	180	-	920	261	623	17	-	1068	288	726	196	-
22															

ตาราง 22 (ต่อ)

วันที่ทดลอง	ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน						ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน						ระยะเวลาเก็บกักกาก 10 วัน					
	AA	PA	BA	VA	ET		AA	PA	BA	VA	ET		AA	PA	BA	VA	ET	
23	473	189	526	190	-		1154	299	654	17	-		1123	329	717	196	-	
24																		
25	637	209	538	181	-		1096	394	719	17	-		1202	345	792	213	-	
Mean	511	174	548	107	13		947	250	657	115	26		1209	292	799	139	29	

ตาราง 23 ชนิดและปริมาณของกรดอินทรีย์ในส่วนของการผลิตกรดอินทรีย์ของการหมักกากมะเขือเทศแบบแอโรบิกสองขั้นตอน ที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน 5 วัน และ 10 วัน อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เมื่อใช้กากมะเขือเทศผสมน้ำให้ความชื้น 10 กรัมต่อลิตร

วันที่ทดลอง	ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน						ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน						ระยะเวลาเก็บกักกาก 10 วัน					
	ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน						ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน						ระยะเวลาเก็บกักกาก 10 วัน					
	AA	PA	BA	VA	ET		AA	PA	BA	VA	ET		AA	PA	BA	VA	ET	
1	349	51	515	54	121		797	102	514	34	191		422	46	391	-	168	
2																		
3	373	56	483	42	118		691	100	516	39	187		222	52	381	35	259	
4																		
5	494	66	487	56	94		829	99	549	47	157		563	47	346	35	196	
6																		
7	542	59	500	36	209		862	103	576	46	270		526	49	321	-	123	
8																		
9	485	50	520	44	214		724	95	565	54	57		476	38	285	-	129	
10																		

วันที่ทดลอง	ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน					ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน					ระยะเวลาเก็บกักกาก 10 วัน				
	AA	PA	BA	VA	ET	AA	PA	BA	VA	ET	AA	PA	BA	VA	ET
	471	166	392	37	40	778	86	684	59	172	484	51	279	27	81
23	484	54	501	26	102	679	86	604	33	173	424	50	281	-	36
24															
25															
Mean	412	58	497	40	118	739	90	563	46	159	467	41	300	22	114

ตาราง 24 ชนิดและปริมาณของกรดอินทรีย์ในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ของการหมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอน ที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน 5 วันและ 10 วัน อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เมื่อใช้กากมะเขือเทศผสมน้ำที่มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร

วันที่ทดลอง	ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน						ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน						ระยะเวลาเก็บกักกาก 10 วัน					
	AA	PA	BA	VA	ET		AA	PA	BA	VA	ET		AA	PA	BA	VA	ET	
1	348	10	402	-	154		466	49	400	-	127		695	33	737	26	29	
2																		
3	334	14	368	-	98		549	47	432	-	130		615	27	603	19	128	
4																		
5	316	9	353	-	20		525	50	531	18	184		53	26	530	18	154	
6																		
7	334	3	359	-	26		413	52	526	26	204		534	102	582	103	65	
8																		
9	338	4	316	-	264		392	53	527	33	148		567	22	451	11	22	
10																		

วันที่ทดลอง	ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน						ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน						ระยะเวลาเก็บกักกาก 10 วัน					
	AA	PA	BA	VA	ET		AA	PA	BA	VA	ET		AA	PA	BA	VA	ET	
11	356	40	296	-	114		360	52	519	38	56		611	17	500	11	260	
12																		
13	380	19	308	-	168		354	52	506	33	182		604	14	406	-	116	
14																		
15	343	18	473	7	123		367	52	502	52	111		583	9	346	-	152	
16																		
17	304	24	591	14	193		384	58	653	58	156		561	8	361	-	156	
18																		
19	356	28	463	15	172		345	47	533	57	190		614	8	401	5	128	
20																		
21	258	47	416	35	164		443	57	631	63	251		805	9	471	7	124	
22																		

ตาราง 24 (ต่อ)

วันที่ทดลอง	ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน					ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน					ระยะเวลาเก็บกักกาก 10 วัน				
	AA	PA	DA	VA	ET	AA	PA	DA	VA	ET	AA	PA	BA	VA	ET
23	267	43	428	24	117	348	49	517	58	72	623	5	419	3	184
24															
25	234	36	414	40	143	333	49	517	46	161	839	6	488	10	193
Mean	321	32	399	10	135	406	51	523	37	151	629	22	484	16	132

ตาราง 25 สนิมและปริมาณผลงการได้รับที่หน่วยงานการผลิการกลั่นที่วิยวองการณีกากาเนเชื้อเทศเมอณีกากาเนผลงกลอย มีระยะเวลา
เก็บกักกาก 3 วัน 5 วันและ 10 วัน อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เก็บลัษการกะเชื้อเทศสนมได้ใช้ความเย็นกับ 10 กรัมต่อลิตร

วันที่ทดลอง	ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน					ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน					ระยะเวลาเก็บกักกาก 10 วัน				
	AA	PA	BA	VA	ET	AA	PA	BA	VA	ET	AA	PA	BA	VA	ET
1	156	3	318	-	-	120	-	208	-	-	198	5	336	-	-
2															
3	168	4	311	-	-	122	-	183	-	-	178	6	370	-	-
4															
5	160	3	357	-	-	148	-	229	-	-	176	5	340	-	-
6															
7	162	4	323	-	-	145	-	266	-	-	185	5	342	-	-
8															
9	161	3	334	-	-	124	-	207	-	-	173	5	316	-	-
10															

วันที่ทดลอง	ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน						ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน						ระยะเวลาเก็บกักกาก 10 วัน					
	AA	PA	BA	VA	ET		AA	PA	BA	VA	ET		AA	PA	BA	VA	ET	
11	160	3	316	-	-		134	-	220	-	-		185	5	343	-	-	
12																		
13	164	3	330	-	-		138	-	224	-	-		190	3	339	-	-	
14																		
15	163	3	322	-	-		125	-	213	-	-		176	5	339	-	-	
16																		
17	165	3	322	-	-		132	-	200	-	-		190	5	342	-	-	
18																		
19	159	3	328	-	-		132	-	227	-	-		186	5	343	-	-	
20																		
21	161	3	341	-	-		125	-	222	-	-		181	5	342	-	-	
22																		

ตาราง 25 (ต่อ)

วันที่ทดลอง	ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน						ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน						ระยะเวลาเก็บกักกาก 10 วัน					
	AA	PA	BA	VA	ET	AA	PA	BA	VA	ET	AA	PA	BA	VA	ET			
23	161	3	336	-	-	140	-	228	-	-	183	5	340	-	-	-		
24																		
25	156	3	335	-	-	137	-	246	-	-	184	6	338	-	-	-		
Mean	161	3	329	-	-	132	-	221	-	-	183	5	341	-	-	-		

ตาราง 26 ชนิดและปริมาณของกรดอินทรีย์ในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ของการหมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอน ที่ระยะเวลาเก็บกัก 3 วัน 5 วัน และ 10 วัน อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส เมื่อใช้กากมะเขือเทศผสมน้ำให้มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร

วันที่ทดสอบ	ระยะเวลาเก็บกัก 3 วัน						ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน						ระยะเวลาเก็บกัก 10 วัน					
	AA	PA	BA	VA	FT		AA	PA	BA	VA	ET		AA	PA	BA	VA	ET	
1	161	3	218	-	-		127	1	127	-	-		223	8	306	-	-	
2																		
3	166	4	208	-	-		102	-	102	-	-		232	8	296	-	-	
4																		
5	157	1	188	-	-		132	1	167	-	-		250	7	294	-	-	
6																		
7	143	3	157	-	-		248	6	343	-	-		233	6	256	-	-	
8																		
9	183	4	179	-	-		269	-	317	-	-		254	1	280	-	-	
10																		

วันที่ทดลอง	ระยะเวลาเก็บกากาก 3 วัน					ระยะเวลาเก็บกากาก 5 วัน					ระยะเวลาเก็บกากาก 10 วัน				
	AA	PA	BA	VA	ET	AA	PA	BA	VA	ET	AA	PA	BA	VA	ET
11	177	5	200	-	-	243	2	287	-	-	256	9	295	-	-
12															
13	191	7	190	-	-	241	11	314	-	-	200	5	311	-	-
14															
15	199	8	209	-	-	460	18	304	-	-	225	4	330	-	-
16															
17	293	1	203	-	-	456	5	215	-	-	187	3	366	-	-
18															
19	283	8	201	-	-	549	7	247	-	-	218	4	351	-	-
20															
21	319	7	136	-	-	259	2	256	-	-	286	4	332	-	-
22															

วันที่ทดลอง	ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน					ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน					ระยะเวลาเก็บกักกาก 10 วัน				
	AA	PA	BA	VA	ET	AA	PA	BA	VA	ET	AA	PA	BA	VA	ET
23	225	3	170	-	-	237	2	236	-	-	259	4	325	-	-
24															
25	182	2	172	-	-	220	5	222	-	-	217	5	325	-	-
Mean	206	2	187	-	-	273	4	241	-	-	234	5	313	-	-

ตาราง 27 ชนิดและปริมาณของสารอินทรีย์ฟอสฟอรัสในขั้นตอนการเกิดกรดอินทรีย์ฟอสฟอรัสในการหมักกากมะเขือเทศแก่กับกากผลไม้ขึ้นตอน ที่ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เมื่อใช้กากมะเขือเทศผสมน้ำใช้ความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตรโดยการกวนกับไมกาน

วันที่ทดลอง	ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน (กวน)					ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน (ไม่กวน)				
	AA	PA	BA	VA	ET	AA	PA	BA	VA	ET
1	735	128	445	93	91	703	98	526	21	96
2										
3	747	155	519	98	87	678	88	576	16	96
4										
5	1135	187	401	91	94	649	94	584	17	117
6										
7	647	105	381	102	109	676	110	586	51	95
8										

วันที่ทดลอง	ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน (กวน)					ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน (ไม่กวน)				
	AA	PA	BA	VA	ET	AA	PA	BA	VA	ET
9	461	106	447	71	92	700	107	504	100	100
10										
11	410	92	406	110	118	629	92	632	90	105
12										
13	451	93	330	114	121	643	93	687	55	119
14										
15	1026	122	316	125	30	616	97	605	48	116
16										
17	644	105	388	87	107	633	102	520	77	101
18										
19	667	155	417	75	129	659	84	666	87	94

ตาราง 27 (ต่อ)

วันที่ทดลอง	ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน (กวน)					ระยะเวลาเก็บกัก 5 วัน (ไม่กวน)				
	AA	PA	BA	VA	ET	AA	PA	BA	VA	ET
20	614	148	520	93	112	642	99	492	105	116
21	688	214	463	51	147	670	97	545	107	92
22										
23										
24										
25	723	99	387	49	154	691	80	515	53	99
Mean	665	131	417	90	107	661	95	571	64	103

หมายเหตุ AA = กรดอะซิติก VA = กรดแวนิลิก

PA = กรดเพรพอยอนิก ET = เอทานอล

BA = กรดบิวทีริก

ประวัติย่อของผู้วิจัย

ชื่อ นางสาวเครือวัลย์ ชื่อสกุล เคลื่อนสูงเนิน

เกิดวันที่ 17 เดือนกันยายน พุทธศักราช 2506

สถานที่เกิด อำเภอคูสิด จังหวัดกรุงเทพฯ

สถานที่อยู่ปัจจุบัน บ้านเลขที่ 57/16 หมู่ 8 ถนนติวานนท์ ตำบลบางกระสอ

อำเภอเมือง จังหวัดนนทบุรี 11000.

ประวัติการศึกษา

พ.ศ. 2529

คบ.วิชาเอกเคมี จากวิทยาลัยครูจันทร์เกษม

พ.ศ. 2532

ศศ.ม วิชาเอกวิทยาศาสตร์ศึกษา(เคมี) จากมหาวิทยาลัย

เชียงใหม่

พ.ศ. 2537

วท.ม วิชาเอกเคมีชีวภาพ จากมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ประสานมิตร

ผลของสภาวะต่าง ๆ ต่อขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์
ในการหมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอน

บทคัดย่อ

ของ

เครือวัลย์ เคลื่อนสูงเนิน

เสนอต่อมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ประสานมิตร เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา

ตามหลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต วิชาเอกเคมีชีวภาพ

ตุลาคม 2537

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของความเข้มข้นกากมะเขือเทศ ระยะเวลาเก็บกักกากอุณหภูมิจากการกวนต่อชนิดและปริมาณสารตัวกลางที่เกิดขึ้นในขั้นตอนผลิตกรดอินทรีย์จากการหมักกากมะเขือเทศแบบอับอากาศสองขั้นตอนจนถึงปฏิกิริยาผลิตกรดอินทรีย์ขนาด 1.5 ลิตร หมักกากมะเขือเทศเพื่อให้ได้กรดอินทรีย์โดยใช้กากมะเขือเทศผสมกับหัวเชื้อจุลินทรีย์สำหรับผลิตกรดอินทรีย์ ำที่มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตรและ 20 กรัมต่อลิตรทำการหมักให้มีระยะเวลาเก็บกักกากนาน 3 วัน 5 วันและ 10 วัน โดยพบว่าถ้าใช้กากมะเขือเทศเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ในน้ำหมักที่ได้จะมีปริมาณอินทรีย์สาร ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยสูงกว่าเมื่อใช้กากมะเขือเทศเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร และเมื่อใช้กากมะเขือเทศเข้มข้น 20 กรัมต่อลิตร ประสิทธิภาพในการจัดอินทรีย์สารต่ำกว่าเมื่อใช้กากมะเขือเทศเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร ทั้งในรูปร้อยละของของแข็งทั้งหมดและร้อยละของของแข็งระเหย นอกจากนี้ระยะเวลาเก็บกักกากเพิ่มขึ้น ปริมาณอินทรีย์สาร ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย pH ค่าความเป็นด่าง การจัดอินทรีย์สารจะสูงขึ้นชนิดกรดอินทรีย์ระเหยและสารตัวกลางที่พบคือกรดอะซิติก กรดไพรฟอนิก กรดบิวทีริก กรดแวลีริกและเอทานอล

นอกจากนี้ผลของอุณหภูมิต่อขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ที่มีระยะเวลาเก็บกักกากต่างๆ จากการใช้กากมะเขือเทศผสมหัวเชื้อจุลินทรีย์ำที่มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร หมักำให้มีระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน 5 วันและ 10 วัน ที่อุณหภูมิห้อง 40 องศาเซลเซียส 45 องศาเซลเซียส 50 องศาเซลเซียสและ 55 องศาเซลเซียส ตรวจวัดปริมาณอินทรีย์สารในรูปมิลลิกรัมซีไอต่อลิตร ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย pH ค่าความเป็นด่าง การจัดอินทรีย์สาร และชนิดและปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย พบว่าที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 3 วัน อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ปริมาณอินทรีย์สารปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย pH ค่าความเป็นด่างและการจัดอินทรีย์สารสูงสุด และอุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียสจะให้ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยต่ำสุด ที่อุณหภูมิห้อง 40 องศาเซลเซียส และ 45 องศาเซลเซียส จะพบสารตัวกลางในน้ำหมักเป็นกรดอะซิติก กรดไพรฟอนิก กรดบิวทีริก กรดแวลีริกและเอทานอล ส่วนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และ 55 องศาเซลเซียส จะพบแต่กรดอะซิติกและกรดบิวทีริก โดยที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสจะให้กรดอะซิติกและกรดบิวทีริกสูงสุด ที่อุณหภูมิห้องจะให้กรดไพรฟอนิก กรดแวลีริก และเอทานอลสูงสุด ที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย ค่าความเป็นด่างและการจัดอินทรีย์สารสูงสุด ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสจะให้ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย pH ค่าความเป็นด่างและการ

ขจัดอินทรีย์สารต่ำสุด ที่อุณหภูมิห้อง 40 องศาเซลเซียส 45 องศาเซลเซียส จะพบสารตัวกลางในน้ำหมักเป็นกรดอะซิติก กรดไพรูวอนิก กรดบิวทีริก กรดแวลีลิก และเอทานอล ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส และที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส จะพบแต่กรดอะซิติก และกรดบิวทีริก นอกจากนี้ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสจะให้กรดอะซิติกสูงสุด ที่อุณหภูมิห้องจะให้กรดไพรูวอนิก กรดบิวทีริก กรดแวลีลิก และเอทานอลสูงสุดและที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 10 วัน อุณหภูมิห้อง ปริมาณอินทรีย์สาร ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยสูงสุด ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสจะให้ปริมาณอินทรีย์สาร ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย ค่าความเป็นด่างต่ำสุด ที่อุณหภูมิห้อง 40 องศาเซลเซียส 45 องศาเซลเซียส จะพบสารตัวกลางในน้ำหมักเป็นกรดอะซิติก กรดไพรูวอนิก กรดบิวทีริก กรดแวลีลิก และเอทานอล ส่วนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสและที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียสจะพบแต่กรดอะซิติก และ กรดบิวทีริก นอกจากนี้ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียสจะให้กรดอะซิติกสูงสุด ที่อุณหภูมิห้องจะให้กรดไพรูวอนิก กรดบิวทีริก กรดแวลีลิก และ เอทานอลสูงสุด

และจากการเลือกศึกษาโดยใช้กากมะเขือเทศที่มีความเข้มข้น 10 กรัมต่อลิตร ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เปรียบเทียบระหว่างถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนกับถังปฏิกรณ์ที่ไม่มีการกวน (ในสภาวะเดียวกัน) พบว่าในน้ำหมักที่กรองได้จากถังปฏิกรณ์ที่มีการกวนจะให้ปริมาณอินทรีย์สาร ปริมาณกรดอินทรีย์ระเหย pH ค่าความเป็นด่าง ชนิดและปริมาณสารตัวกลางไม่แตกต่างจากถังปฏิกรณ์ที่ไม่มีการกวน แสดงว่าการกวนไม่น่าจะมีผลต่อขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษา

จากการศึกษาครั้งนี้พบว่าอัตราการบ่อนอินทรีย์สาร ระยะเวลาเก็บกักกากและอุณหภูมิมีผลต่อชนิดและปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยในขั้นตอนการผลิตกรดอินทรีย์ โดยที่เมื่ออัตราบ่อนอินทรีย์สารเพิ่มขึ้น ปริมาณอินทรีย์สารและกรดอินทรีย์ระเหยเพิ่มขึ้น แต่ร้อยละของการขจัดอินทรีย์สารลดลงและการเพิ่มระยะเวลาเก็บกักกากสูงขึ้น ปริมาณอินทรีย์สาร กรดอินทรีย์ระเหยและการขจัดอินทรีย์สารจะเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การหมักที่อุณหภูมิต่าง ๆ พบว่าการหมักที่ระยะเวลาเก็บกักกาก 5 วัน ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสจะให้ปริมาณกรดอะซิติกสูง

THE EFFECTS OF VARIOUS CONDITIONS ON ACIDOGENIC STAGE OF
TWO-STAGE ANAEROBIC DIGESTION OF TOMATO SOLID WASTES

AN ABSTRACT

BY

KRUAWAN KLUANSUNGNOEN

Presented in partial fulfillment of the requirements for the

Master of Science degree in Biological Chemistry

at Srinakharinwirot University

October 1994

This research was carried out to study the effects of various conditions, i.e. the concentration of tomato solid waste, the solid retention time, temperature and agitation, on acidogenic stage of two-stage anaerobic digestion of tomato solid wastes. The experiments were performed by using 1.5-litre reactors and semicontinuous feeding. The tomato solid waste mixed with the acidogenic inoculum into the concentrations of 10 g/litre and 20 g/litre were used as raw material. The experiments were carried out at various solid retention times of 3, 5 and 10 days. It was found that the organic content, in term of mgCOD/litre, and the 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. The organic destruction, both in terms of percentages of total solid and total volatile solid, in the filtered liquor when using 20 g/litre tomato solid waste is lower than that of using 10 g/litre one. Moreover, it was also demonstrated that as the solid retention time increases, the organic content, the volatile fatty acid content, pH, alkalinity and the organic destruction increase. The intermediates found in the filtered liquor were acetic acid, propionic acid, butyric acid, valeric acid and ethanol.

The effects of temperature on acidogenic when experiments were carried out by using semicontinuous feeding of 10 g/litre tomato solid waste with various solid retention times of 3, 5 and 10 days. and at various temperatures, i.e. room temperature, 40°C 45°C 50°C and 55°C. It was found that at the solid retention time of 3 days, the organic content, the volatile fatty acid content, pH, alkalinity and the organic

destruction increase to the maximum at 40°C and the volatile fatty acid content is lowest at 55°C. The results demonstrated that acetic acid, propionic acid, butyric acid, valeric acid and ethanol were found as intermediates but propionic acid, ethanol and valeric acid were not produced at 50°C and 55°C. However, the maximum yield of acetic acid were found together with butyric acid at 40°C. The maximum yield of propionic acid, valeric acid and ethanol were found at room temperature.

At the solid retention time of 5 days, the volatile fatty acid content, alkalinity and the organic destruction increase to the maximum at 40°C and the volatile fatty acid content, pH, alkalinity and the organic destruction are lowest at 50°C. The acetic acid, propionic acid, butyric acid, valeric acid and ethanol were found as intermediates at 40°C and 45°C. At 50°C and 55°C, the acetic and butyric acid were produced as intermediates. Moreover, the maximum yield of acetic acid was obtained at 40°C. The maximum yields of propionic acid, butyric acid, valeric acid and ethanol were obtained at room temperature. At the solid retention time of 10 days, the organic content and the volatile fatty acid content increase to the maximum at room temperature and the organic content, the volatile fatty acid content, alkalinity are lowest at 50°C. The results demonstrated that the acetic acid, propionic acid, butyric acid, valeric acid and ethanol were found as intermediates but propionic acid, ethanol and valeric acid were not produced at 50°C and 55°C. The maximum yield of acetic acid was obtained at 45°C. The maximum yields of propionic acid, butyric acid, valeric acid and ethanol were found at room temperature.

The experiments were also performed by using semicontinuous feeding of 10 g/litre tomato solid waste at the 5 day solid retention time 40°C and with and without agitation. The results showed that the organic content, volatile fatty acid content, pH, alkalinity and the amounts and types of intermediates found in the filtered liquor with agitation are more or less the same as those without agitation. This study showed that the agitation has no effect on the acidogenic stage.

In conclusion, the organic loading rate, solid retention time and temperature have the effect on the amounts and types of volatile fatty acid found in the acidogenic stage, i.e. as the organic loading rate increases, the organic content and volatile fatty acid in the filtered liquor increase but the percentage of organic destruction decreases. In addition, as the solid retention time increases, the organic content, volatile fatty acid content and organic destruction increase. The acetic acid content in the filtered liquor is highest when the experiment performed at 5-day solid retention time and 40°C.