

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับยางพารา

ยางพารา หมายถึง วัสดุพอลิเมอร์ที่มีต้นกำเนิดจากของเหลวของพืชบางชนิด ซึ่งมีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวขุ่นข้น มีสมบัติเป็นคอลลอยด์อนุภาคเล็กมีตัวกลางเป็นน้ำ น้ำยางพารา หมายถึงของเหลวที่มีสีขาวขุ่นข้น ได้จากการกรีดเปลือกต้นยางพารา

น้ำยางสด คือ น้ำยางธรรมชาติที่กรีดได้จากต้นยางพารา มีลักษณะเป็นของเหลวสีขาวขุ่นข้น มีกลิ่นหอมเล็กน้อย ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ เนื้อยางประมาณ 35% และส่วนที่เป็นน้ำและสารอื่นๆ ประมาณ 65%

เนื้อยาง หมายถึง เนื้อยางที่มีอยู่ในน้ำยางหรือยางแต่ละชนิด โดยคำนวณเป็นน้ำหนักตามกรรมวิธีที่กรมวิชาการเกษตรกำหนด

2.1.1 ส่วนประกอบในน้ำยางพารา

น้ำยางพาราเป็นสารแขวนลอย มีความหนาแน่น 0.975-0.980 กรัม/ลิตร มีพีเอชประมาณ 6.5-7.0 ความหนืดไม่แน่นอน มีสารประกอบของสารต่างๆ ซึ่งขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น พันธุ์ยาง อายุต้นยาง การกรีด และฤดูกาล น้ำยางมีส่วนประกอบหลักๆ อยู่ 2 ส่วน คือ ส่วนที่เป็นเนื้อยางและส่วนที่ไม่ใช่เนื้อยาง ส่วนประกอบของน้ำยางพารา แสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ส่วนประกอบของน้ำยางพารา

ส่วนประกอบ	เปอร์เซ็นต์
ของแข็งทั้งหมด	22-48
เนื้อยางแห้ง	20-45
โปรตีน	1.5
เรซิน	2.0
คาร์โบไฮเดรต	1.0
สารอินทรีย์	0.5

ส่วนที่เป็นเนื้อยาง

มีอนุภาคของยางที่แขวนลอย (Suspend) ในน้ำเรียกว่า เซรุ่ม เป็นอนุภาคกลมมีขนาดตั้งแต่ 0.1-1.0 ไมครอน (1 ไมครอน = 1/1000 มม.) โมเลกุลมีขนาดใหญ่ไม่ละลายในน้ำ เมื่ออยู่ในสภาพของน้ำยางสดผิวรอบอนุภาคจะถูกห่อหุ้มด้วยชั้นของสารพวกไขมันและ โปรตีน ซึ่งในทางธรรมชาติจะประกอบธาตุไฮโดรคาร์บอน (Hydrocarbon) ในสัดส่วนของคาร์บอน: ไฮโดรเจน เป็น 5:8

ส่วนประกอบที่ไม่ใช่เนื้อยาง (Non Rubber Content)

1) คาร์โบไฮเดรต ส่วนใหญ่เป็นพวกแอริทิล ไลโนซิทอล (L-Methylinositol) ส่วนคาร์โบไฮเดรตอื่นๆ ซึ่งมีอยู่จำนวนน้อย ได้แก่ กลูโคส ซูโครส ฟรุกโตส และกาแลคโตส น้ำตาลเหล่านี้ เมื่อถูกออกซิไดซ์โดยจุลินทรีย์จะเปลี่ยนสภาพเป็นกรดอินทรีย์ (Volatile Fatty Acid) เช่น กรดอะซิติก และกรดโพรพิโอนิก

2) โปรตีนและกรดอะมิโน มีหลายชนิดที่สำคัญ คือ

- แอลฟาโกลบูลิน (α - Globulin) เป็นโปรตีนที่มีสมบัติ surface active จะอยู่บนรอยต่อระหว่างน้ำกับอากาศ และน้ำมันกับน้ำได้ทันที ไม่ละลายน้ำ แต่ละลายในกรด-ด่าง และเกลือ มี Is electric Point ที่มีพีเอชเท่ากับ 4.8 ซึ่งเป็นจุดที่ใกล้เคียงกับน้ำยางมาก

- เฮวาลิน (Hevalin) จะอยู่ที่อนุภาคของเม็ดยาง และละลายอยู่ในชั้นน้ำ มีค่า Is electric Point ที่ pH เท่ากับ 4.5 ประกอบด้วยกำมะถัน 5 % ดังนั้น เมื่อน้ำยางสูญเสียสภาพ โปรตีนนี้จะสลายตัวให้สารประกอบไฮโดรเจนซัลไฟด์ และสารเมอร์แคปแทน ทำให้มีกลิ่นเหม็นมีคาวที่ว่องไวเล็กน้อย ละลายในน้ำได้ทุก pH และไม่ตกตะกอนจากน้ำเดือดไม่มีผลต่อสภาพคอลลอยด์ของน้ำยางพอลิเปปไทด์และกรดอะมิโนพบในส่วนของน้ำในน้ำยางสด ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าพอลิเปปไทด์และกรดอะมิโนเป็นตัวเริ่มต้นในการเกิดอนุภาคยาง

- องค์ประกอบอื่นๆ มีสารพวกที่มีส่วนประกอบของไนโตรเจนอิสระ เช่น โคลีน (choline) เมทิลลามีน (Methylamine) กรดอินทรีย์ (Organic Acid) กรดอนินทรีย์ (Inorganic Acid) อนุมูลของสารอนินทรีย์ โดยเฉพาะฟอสเฟตและคาร์บอนเนต และอนุมูลของโลหะซึ่งส่วนใหญ่เป็นพวกเหล็ก แมกนีเซียม โซเดียม ทองแดง นอกจากนี้ยังมีไซยาไนด์ 0.25 เปอร์เซ็นต์ (ขนิษฐา หทัยสมัทธ์, 2547)

2.1.2 รูปแบบของยางพารา

ยางพารา สามารถแบ่งออกเป็นหลายประเภท ได้แก่

1. น้ำยาง

1.1 น้ำยางสด

1.2 น้ำยางข้น

2. ยางแผ่นผึ่งแห้ง ยางที่ได้จากการนำน้ำยางมาจับตัวเป็นแผ่นโดยสารเคมีที่ใช้จะต้องตามเกณฑ์ที่กำหนด ส่วนการทำให้แห้งอาจใช้วิธีการผึ่งลมในที่ร่ม หรือ อบในโรงอบก็ได้แต่ต้องปราศจากควัน

3. ยางแผ่นรมควัน หมายถึง การนำยางแผ่นที่ผ่านการรีดดอกเรียบร้อยแล้วไปรมควันในโรงรม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้ยางแผ่นที่รมควันนั้นแห้งสนิท ยางแผ่นที่ผ่านการรมควันแล้ว เรียกว่า ยางแผ่นรมควัน (Ribbed Smoked Sheet)

4. ยางเครพ (Crepe Rubber) เป็นยางที่ได้จากการนำเศษยางไปรีดด้วยเครื่องรีดยางสองลูกกลิ้ง โดยทั่วไปเรียกว่าเครื่องเครพ จะมีการใช้น้ำในการทำความสะดวกในระหว่างการรีด เพื่อนำสิ่งสกปรกออกจากยางในขณะที่รีดยาง เนื่องจากยางที่ใช้โดยมากเป็นยางที่มีมูลค่าต่ำมีสิ่งสกปรกเจือปนค่อนข้างมาก เช่น น้ำยางสกิม เศษยางกันถ้วย เศษยางที่ติดบนเปลือกไม้หรือติดบนดินและเศษยางที่ได้จากการผลิตยางแผ่นรมควัน เป็นต้น หลังจากรีดในเครื่องเครพแล้วจะนำยางไปผึ่งแห้ง หรืออบแห้งด้วยลมร้อน ยางเครพที่ได้จะมีสีค่อนข้างเข้ม และมีหลายรูปแบบ เช่น ยาง Brown crepe, Flat bark crepe, Skim crepe และ Blanket crepe เป็นต้น ทั้งนี้จะขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์และชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิต ส่วนยางเครพขาวเป็นยางเครพที่ได้มาจากน้ำยางที่มีการกำจัดสารเกิดสีในน้ำยางคือ สารเบต้าแคโรทีน ซึ่งมีสีเหลืองอ่อน โดยการฟอกสียางให้มีสีขาวด้วยสารเคมีก่อนการทำให้ยางจับตัวกันเป็นก้อนด้วยกรด ยางเครพขาวเป็นยางที่มีคุณภาพและราคาค่อนข้างสูง (พงษ์ธร แซ่ฮุย, 2547)

5. ยางแท่ง ก่อนปี 2508 ยางพาราที่ผลิตขึ้นมา ส่วนใหญ่จะผลิตในรูปของยางแผ่นรมควัน ยางเครพหรือน้ำยางข้น ซึ่งยางธรรมชาติเหล่านี้จะไม่มีการระบุมาตรฐานการจัดชั้นยางที่ชัดเจนตามปกติ จะใช้สายตาในการพิจารณาตัดสินชั้นยาง ต่อมาในปี 2508 สถาบันวิจัยยางมาเลเซีย (Rubber Research Institute of Malaysia) ได้มีการผลิตยางแท่งขึ้นเป็นแห่งแรก เพื่อเป็นการปรับปรุงและพัฒนาคุณภาพของยางพาราให้ได้มาตรฐานเหมาะสมกับการใช้งาน จนทำให้ยางแท่งเป็นยางพาราชนิดแรกที่ผลิตมาโดยมีการควบคุมคุณภาพให้ได้มาตรฐาน ตลอดจนมีการระบุคุณภาพของยางดิบที่ผลิตได้แน่นอน ยางแท่งความหนืดคงที่เป็นยางที่ผลิตขึ้นเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมทำผลิตภัณฑ์ที่ต้องการควบคุมความหนืดของยางที่ใช้ในการแปรรูป เช่น อุตสาหกรรมยางท่อ และอุตสาหกรรมทำกาว

6. ยางสกิม เป็นยางพาราที่ได้จากการจับตัวน้ำยางสกิม (skim latex) ด้วยกรดแล้วนำยางที่ได้ไปทำการรีดแผ่นและทำให้แห้ง โดยน้ำยางสกิมเป็นน้ำส่วนที่เหลือจากการทำน้ำยางข้นด้วยการนำน้ำยางสดมาทำการเซนตริฟิวส์แยกอนุภาคเม็ดยางออกจากน้ำ ซึ่งอนุภาคเม็ดยางเบาว่าน้ำส่วนใหญ่จึงแยกตัวออกไปเป็นน้ำยางข้น น้ำยางข้นที่ได้มีปริมาณเนื้อยางอยู่ร้อยละ 60-63 ซึ่งน้ำยางสกิม คือ ส่วนที่เหลือจากการเซนตริฟิวส์แยกเนื้อยางส่วนใหญ่ออกไปแล้วก็ยังมีส่วนของเนื้อยางออกมาด้วยซึ่งเป็นเนื้อยางที่มีขนาดอนุภาคเล็กๆ มีปริมาณเนื้อยางอยู่ร้อยละ 3-6 (เสาวนีย์ ก่อวุฒิกุลรังสี, 2547)

2.2 การผลิตยางแผ่นผึ่งแห้ง

ยางแผ่นผึ่งแห้ง ผลิตโดยผสมน้ำยางกับน้ำ และเติมกรดฟอร์มิคหรือซัลฟูริกลงในน้ำยางเพื่อให้ยางจับตัวกัน และแยกตัวออกจากน้ำ เมื่อยางแข็งตัวควรเติมน้ำลงในตะกวดเพื่อล้างฝุ่นผง แล้วจึงเทยางออกจากตะกวด ใช้ลูกกลิ้งบีบนวดยางให้เป็นแผ่นหนาพอเข้าจักรรีดได้ นำยางไปรีดเป็นแผ่นด้วยเครื่องรีดแบบ 2 ลูกกลิ้ง นำไปล้างน้ำ แล้วนำไปตากแดดหรือผึ่งในอากาศร้อนเพื่อไล่ความชื้น เพื่อให้ได้ยางแผ่นดิบที่มีคุณภาพดีตรงตามมาตรฐาน มีวิธีการปฏิบัติตามขั้นตอนดังนี้

1. เก็บรวบรวมน้ำยาง ใส่ในถังเก็บน้ำยางที่มีฝาปิด
2. กรองน้ำยางด้วยตะแกรงลวดกรองเบอร์ 40 และ 60 โดยวางตะแกรงกรองซ้อนกัน 2 ชั้นเบอร์ 40 ไว้ข้างบนและเบอร์ 60 ไว้ด้านล่าง
3. ตวงน้ำยางที่กรองแล้ว 3 ลิตรกับน้ำสะอาด 2 ลิตร ใส่ลงตะกวดกวนให้เข้ากันอัตราส่วนผสมนี้อาจเปลี่ยนแปลงได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับเบอร์เซ็นต์เน็อยางแห้งหรือน้ำหนักยางแผ่นที่ได้ ตัวอย่างเช่น ใช้อัตราส่วนผสมนี้แล้วได้ยางแผ่นดิบแห้งน้ำหนักมากกว่า 1.2 กก. ก็ให้ลดปริมาณน้ำยางต่อตะกวดลง แต่ถ้าได้ยางแผ่นดิบแห้งน้ำหนักน้อยกว่า 0.8 กก. ให้เพิ่มปริมาณน้ำยางต่อตะกวดขึ้น โดยปกติยางแผ่นดิบแห้งแล้วควรมีน้ำหนักประมาณ 1 กก.
4. เตรียมน้ำกรด โดยใช้ น้ำกรดฟอร์มิคชนิดความเข้มข้น 90% อัตราส่วน 2 ซ้อนแกมผสมกับน้ำสะอาด 3 กระป๋องนม จะได้กรดที่มีความเข้มข้นพอเหมาะ ซึ่งน้ำกรดฟอร์มิค 90% จำนวน 1 ลิตรสามารถใช้ทำยางแผ่นได้ประมาณ 90-100 แผ่น
5. ตวงน้ำกรดที่ผสมแล้ว 1 กระป๋องนม ใช้พวยกวนน้ำยางก่อน 2-3 รอบ แล้วเทกรดลงในน้ำยาง กวนด้วยพวยให้เข้ากันดีราว 4-5 รอบ (อย่ากวนนานเกินไปจนยางตั้งตัว เพราะจะปิดฟองอากาศออกไม่ทัน) ใช้ใบพายกวาดฟองอากาศออกจากตะกวดให้หมด
6. ปิดตะกวดเพื่อป้องกันมิให้ฝุ่นละอองหรือสิ่งสกปรกตกลงในน้ำยางที่กำลังจับตัวทิ้งไว้ประมาณ 30-45 นาที ยางก็จะจับตัวเป็นก้อน
7. เมื่อยางจับตัวราว 30 นาที ใช้นิ้วมือกดดูยางขยุบตัวลงได้นุ่มๆ ยางไม่ติดมือสามารถนำไปนวดได้ ก่อนนำไปนวดรีดน้ำสะอาดหล่อไว้ทุกตะกวด เพื่อสะดวกในการเทแทนยางออกจากตะกวด อย่าปล่อยให้ยางจับตัวนานเกินไปจนไม่สามารถนวดรีดได้ ควรตรวจสอบการจับตัวบ่อยๆ และสังเกตลักษณะก้อนยางที่จับตัวได้พอดี สำหรับทำการนวดจนเกิดความชำนาญ
8. เทก้อนยางออกจากตะกวดบนโต๊ะนวดยางที่ปูด้วยลูมิเนียมหรือแผ่นสังกะสี ใช้ท่อเหล็กขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 3 นิ้ว ยาวประมาณ 80 เซนติเมตร นวดยางให้หนาประมาณ 1 เซนติเมตร ตกแต่งแผ่นยางขณะทำการนวดให้มีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีความยาวเป็น 2 เท่าของความกว้างมุมทั้งสี่โค้งมนได้รูป
9. นำยางที่นวดแล้วเข้าเครื่องรีดสั้น (จักรเรียบ) 3 - 4 ครั้ง ให้หนาประมาณ 3 - 4 มิลลิเมตร

10. นำแผ่นที่ผ่านการรีดคลื่นแล้วเข้าเครื่องรีดดอก 1 ครั้ง ให้เหลือความหนาไม่เกิน 2 มิลลิเมตร

11. นำแผ่นยางที่รีดดอกแล้วมาล้างด้วยน้ำสะอาด เพื่อล้างน้ำกรดและสิ่งสกปรกที่ติดอยู่ตามผิวของแผ่นยางออกให้หมด

12. นำแผ่นยางมาผึ่งให้แห้งไว้ในที่ร่มประมาณ 6 ชั่วโมง ห้ามนำไปผึ่งแดดเพราะจะทำให้ยางเสื่อมคุณภาพ

13. เก็บรวบรวมยางโดยพาดไว้บนราวในโรงเรือนผึ่งให้แห้งใช้เวลาประมาณ 15 วัน เพื่อรอจำหน่าย

การผลิตยางแผ่นผึ่งแห้ง ก่อให้เกิดน้ำเสียจากขั้นตอนการผลิต ได้แก่

- น้ำเสียจากการทำยางให้แข็งตัว
- น้ำเสียจากการรีดยาง
- น้ำเสียจากการล้างถังบรรจุน้ำยางสด เครื่องมือและอุปกรณ์
- น้ำเสียจากการล้างพื้น

การผลิตยางแผ่นผึ่งแห้ง ส่วนใหญ่เป็นการผลิตในระดับครัวเรือนของเกษตรกรชาวสวนยาง ซึ่งยังไม่มีหน่วยงานใดเข้าไปจัดการแก้ไขปัญหาที่น้ำเสียที่เกิดขึ้น ชาวบ้านต้องจัดการกับน้ำเสียที่เกิดขึ้นเอง และจากลักษณะน้ำเสียจากการผลิตยางแผ่น ซึ่งมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูง และมีส่วนผสมของกรดฟอร์มิก เมื่อกักพักน้ำเสียไว้ในบ่อ หรือปล่อยลงสู่พื้นดิน จะเกิดการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน และเกิดก๊าซชีวภาพ ซึ่งมีองค์ประกอบเป็นก๊าซ มีเทน คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจนซัลไฟด์ เป็นต้น ก๊าซเหล่านี้เมื่อปล่อยออกสู่บรรยากาศ จะเป็นกลุ่มก๊าซที่เป็นสาเหตุหนึ่งของภาวะโลกร้อน

2.3 ขยะอินทรีย์จากครัวเรือน

ขยะอินทรีย์จากครัวเรือน คือ ขยะของเหลือที่เกิดจากการปรุงอาหาร และการรับประทาน ได้แก่ เศษอาหาร เศษผัก และเศษผลไม้ เป็นต้น ซึ่งเป็นขยะอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายได้ง่าย มีการนำไปผลิตก๊าซชีวภาพอย่างแพร่หลาย จากการสำรวจพื้นที่เบื้องต้น พบว่า ขยะอินทรีย์ประเภทเศษอาหารจากครัวเรือนเกษตรกรผู้ผลิตยางแผ่นมีประมาณ 0.3-0.5 กิโลกรัมต่อคนต่อวัน และเนื่องจากครัวเรือนส่วนใหญ่มีการประกอบอาชีพทำสวนผลไม้ ดังนั้นจะมีผลไม้เน่าเสียจำนวนมาก เช่น กกล้วย มะละกอ ทุเรียน ขนุน ลองกอง เป็นต้น

หากไม่มีการจัดการที่ถูกต้อง ขยะอินทรีย์จากครัวเรือนจะก่อให้เกิดปัญหามลภาวะ ได้แก่ เกิดการเน่าเปื่อยส่งกลิ่นเหม็น ก่อให้เกิดน้ำเสีย และเป็นแหล่งเพาะพันธุ์เชื้อโรค รวมทั้งเกิดการปลดปล่อยก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นสู่ชั้นบรรยากาศ

2.4 ระบบผลิตก๊าซชีวภาพ

บ่อหมักก๊าซชีวภาพ มีหน้าที่ในการบำบัดสารอินทรีย์ที่มีความเข้มข้นสูง โดยอาศัยแบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Bacteria) และเกิดก๊าซชีวภาพ ซึ่งมีก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบและสามารถจุดติดไฟได้ ในขั้นตอนการอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน จะถูกย่อยสลายเป็นสารอินทรีย์โมเลกุลเล็ก ความเร็วในการย่อยสลายขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ปล่อยออกมาจากแบคทีเรีย รวมถึงความเข้มข้นของสารอินทรีย์ อุณหภูมิ เป็นต้น ต่อมาจะถูกเปลี่ยนให้เป็นกรดอินทรีย์ชนิดโมเลกุลเล็ก เช่น กรดอะซิติก กรดโพรไพโอนิก เป็นต้น โดยแบคทีเรียกลุ่มสร้างกรด (Acetogenic bacteria) และจะมีก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจนเกิดขึ้นด้วย เรียกขั้นตอนนี้ว่า กระบวนการสร้างกรด (Acidogenesis)

ในกระบวนการสร้างก๊าซมีเทน (Methanogenesis) ผลผลิตที่ได้จากกระบวนการข้างต้นจะถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทน โดยแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน (Methanogenic bacteria) การสร้างก๊าซมีเทนมี 2 แบบ แบบแรกเกิดจากการเปลี่ยนกรดอะซิติกเป็นก๊าซมีเทน โดยคิดเป็นร้อยละ 70 ของก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในระบบ แบบที่สองเกิดจากการรวมตัวกันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนเป็นก๊าซมีเทน

2.4.1 การย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน

กระบวนการบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic wastewater treatment) เป็นกระบวนการบำบัดน้ำเสียในสภาวะไร้ออกซิเจน โดยจุลินทรีย์จะอาศัยสารประกอบอื่นเป็นตัวรับอิเล็กตรอนแทนออกซิเจนละลายน้ำ (dissolved oxygen) หรือออกซิเจนอิสระ

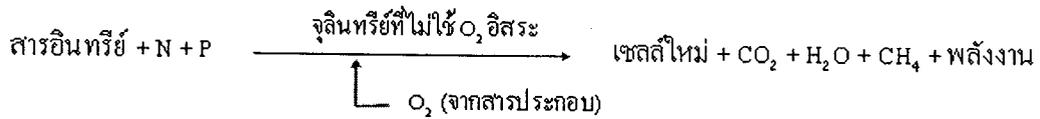
กลไกการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน สามารถแบ่งได้เป็น 4 ขั้นตอน ตามลำดับดังนี้
ขั้นตอนที่ 1 : เป็นกระบวนการไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) โดยอาศัยเอนไซม์ (enzyme) ที่ถูกส่งออกมาจากเซลล์ เพื่อเปลี่ยนสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ให้เป็นสารโมเลกุลเล็ก

ขั้นตอนที่ 2 : เป็นกระบวนการสร้างกรด (Acidogenesis) โดยแบคทีเรียสร้างกรด ซึ่งจะเปลี่ยนผลผลิตที่ได้จากปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในขั้นตอนที่ 1 ไปเป็นกรดไขมันระเหย (Volatile fatty acid; VFA)

ขั้นตอนที่ 3 : เป็นกระบวนการสร้างกรดอะซิติกจากกรดไขมันระเหย (Acetogenesis) โดยแบคทีเรียกลุ่มอะซิโตเจนิค (Acetogenic bacteria) จะเปลี่ยนกรดไขมันระเหยไปเป็นผลผลิตสำคัญในการสร้างก๊าซมีเทน ได้แก่ กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจน

ขั้นตอนที่ 4 : เป็นกระบวนการสร้างมีเทน (Methanogenesis) โดยผลผลิตที่ได้จากแบคทีเรียสร้างกรดในขั้นตอนที่ 3 จะถูกเปลี่ยนไปเป็นก๊าซมีเทน โดยแบคทีเรียกลุ่มสร้างมีเทน (Methanogenesis bacteria) แบคทีเรียกลุ่มที่สร้างมีเทนนี้ แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด ชนิดแรก คือ แบคทีเรียที่สร้างมีเทนจากคาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน (Hydrogenotrophic bacteria) โดยได้คาร์บอนมาจาก

คาร์บอน ไดออกไซด์และได้พลังงานจากไฮโดรเจน ชนิดที่สอง คือ แบคทีเรียที่สร้างมีเทนจากกรดอะซิติก (Acetotrophic bacteria) ซึ่งใช้อะซิติกเป็นตัวรับอิเล็กตรอน และใช้ไฮโดรเจนเป็นแหล่งพลังงาน ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการ โดยรวมได้ ดังนี้



จากกลไกการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนทั้ง 4 ขั้นตอน สรุปได้ว่า ในกระบวนการบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจนอาศัยการทำงานของแบคทีเรีย 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่สร้างกรด และกลุ่มที่สร้างมีเทน ดังนั้น จึงจำเป็นต้องรักษาภาวะแวดล้อมให้เหมาะสมต่อการทำงานร่วมกันอย่างต่อเนื่อง ของแบคทีเรียทั้ง 2 กลุ่ม หากการทำงานของแบคทีเรียกลุ่มหนึ่งเปลี่ยนไป ก็จะมีผลต่อการทำงานของแบคทีเรียอีกกลุ่มหนึ่ง และประสิทธิภาพโดยรวมของระบบได้ ตัวอย่างเช่น กรณีที่ระบบได้รับสารอาหารหรือปริมาณสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นมากกว่าปกติ แบคทีเรียกลุ่มที่สร้างกรดก็จะมีอัตราการเจริญเติบโตสูงขึ้น มีการสร้างกรดอินทรีย์และผลผลิตต่าง ๆ เพิ่มขึ้น ก็จะส่งผลให้แบคทีเรียกลุ่มที่สร้างมีเทนซึ่งมีความสามารถในการเจริญเติบโตต่ำกว่า ไม่สามารถย่อยสลายกรดอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นได้ทัน ก็จะมีปริมาณกรดอินทรีย์สะสมเพิ่มขึ้น ซึ่งถ้าระบบไม่มีกำลังบัฟเฟอร์เพียงพอ ค่า pH ของระบบที่ลดลงก็จะไปมีผลยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างมีเทนจนอาจทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง หรือการทำงานของระบบล้มเหลวได้ในที่สุด (ตรี วาทกิจ, 2554)

2.4.2 การเกิดก๊าซชีวภาพ

1. ความหมายของก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพ หรือ ไบโอก๊าซ คือ ก๊าซที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ โดยจุลินทรีย์ภายใต้สภาวะที่ปราศจากออกซิเจน จากข้อมูลของสถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงานมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ พบว่า ก๊าซชีวภาพมีองค์ประกอบหลัก ดังนี้ ก๊าซมีเทน (CH₄) ประมาณ 60-70 % ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ประมาณ 28-38 % ก๊าซอื่นๆ เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S) และไนโตรเจน (N₂) เป็นต้น ประมาณ 2 %

ก๊าซมีเทนเป็นองค์ประกอบในก๊าซชีวภาพที่ทำให้ก๊าซชีวภาพมีคุณสมบัติติดไฟได้ เมื่อพิจารณาค่ามีเทนในก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานประเภทต่างๆ พบว่า

โรงงานผลิตอาหารทะเล	ค่ามีเทน 81-85 %
โรงงานผลิตน้ำมันปาล์ม	ค่ามีเทน 60-70%
โรงงานผลิตน้ำตาล	ค่ามีเทน 65-80%

โรงงานผลิตสุรา	ค่ามีเทน 80-90%
โรงงานผลิตอาหารจากพืช	ค่ามีเทน 65-70%
โรงเรือนเลี้ยงหมู	ค่ามีเทน 50-70%

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) กระทรวงพลังงาน กล่าวว่า ก๊าซชีวภาพ เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้ออกซิเจน (Anaerobic Process) โดยที่ก๊าซชีวภาพจะมีก๊าซมีเทน (CH_4) เป็นองค์ประกอบหลักอยู่ประมาณ 50 – 80% นอกนั้นเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และมีก๊าซ H_2S , N_2 , H_2 อีกเล็กน้อย ดังนั้นจึงสามารถนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนได้ ปัจจุบันสารอินทรีย์ที่นิยมนำมาผ่านกระบวนการนี้แล้วให้ก๊าซชีวภาพ คือ น้ำเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น โรงงานแป้งมันสำปะหลัง โรงงานเบียร์ โรงงานผลไม้กระป๋อง เป็นต้น รวมทั้งน้ำเสียจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์ จากกระบวนการดังกล่าวมีค่า COD ลดลงมากกว่า 80% และได้ก๊าซชีวภาพ 0.3 – 0.5 ลบ.ม./กิโลกรัม COD ที่ถูกกำจัด ทั้งนี้ขึ้นกับคุณลักษณะของน้ำเสียแต่ละประเภท ก๊าซมีเทนมีค่าความร้อน 39.4 เมกะจูล/ลบ.ม. สามารถใช้ทดแทนน้ำมันเตาได้ 0.67 ลิตร ซึ่งเทียบเท่าพลังงานไฟฟ้า 9.7 kWh โดยวิธีการนำก๊าซชีวภาพไปใช้มีอยู่หลายวิธีด้วยกัน ได้แก่ การใช้เป็นเชื้อเพลิงหม้อไอน้ำ การเผาให้ความร้อนในกระบวนการผลิต การผลิตกระแสไฟฟ้าการใช้ประโยชน์ด้านอื่นๆ เช่น ใช้หุงต้มในโรงอาหารของโรงงาน หรือในครัวเรือน เป็นต้น ซึ่งสามารถทำได้ถ้าอยู่ไม่ห่างไกลจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพมากนัก (ที่มา: กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) กระทรวงพลังงาน <http://www.dede.go.th>)

2. ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ

การย่อยสลายสารอินทรีย์และการผลิตก๊าซมีปัจจัยต่าง ๆ เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

- อุณหภูมิ (Temperature) การย่อยสลายอินทรีย์และการผลิตก๊าซในสภาพปราศจากออกซิเจนสามารถเกิดขึ้นในช่วงอุณหภูมิที่กว้างมากตั้งแต่ 4-60 องศาเซลเซียสขึ้นอยู่กับชนิดของกลุ่มจุลินทรีย์
- ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ความเป็นกรด-ด่าง มีความสำคัญต่อการหมักมาก ช่วง pH ที่เหมาะสมอยู่ในระดับ 6.6-7.5 ถ้า pH ต่ำเกินไปจะเป็นอันตรายต่อแบคทีเรียที่สร้างก๊าซมีเทน
- อัลคาลินิตี (Alkalinity) ค่าอัลคาลินิตี หมายถึง ความสามารถในการรักษาระดับความเป็นกรด-ด่าง ค่าอัลคาลินิตีที่เหมาะสมต่อการหมักมีค่าประมาณ 1,000 - 5,000 มิลลิกรัม/ลิตร ในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3)
- สารอาหาร (Nutrients) สารอินทรีย์ซึ่งมีความเหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ มีรายงานการศึกษาพบว่า มีสารอาหารในสัดส่วน C: N และ C:P ในอัตรา 25:1 และ 20:1 ตามลำดับ
- สารยับยั้งและสารพิษ (Inhibiting and Toxic Materials) เช่น กรดไขมันระเหยได้ ไฮโดรเจน หรือแอมโมเนีย สามารถทำให้ขบวนการย่อยสลายในสภาพไร้ออกซิเจนหยุดชะงักได้

- สารอินทรีย์และลักษณะของสารอินทรีย์สำหรับขบวนการย่อยสลาย ซึ่งมีความแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ที่เข้ามาเกี่ยวข้อง

3. ประโยชน์ของก๊าซชีวภาพ

ด้านพลังงาน

เมื่อพิจารณาถึงด้านเศรษฐกิจแล้ว การลงทุนผลิตก๊าซชีวภาพจะลงทุนต่ำกว่าการผลิตเชื้อเพลิงชนิดอื่น ๆ สามารถนำมาใช้ทดแทนพลังงานเชื้อเพลิงจากแหล่งอื่น ๆ เช่น ฟืน ถ่าน น้ำมัน ก๊าซหุงต้ม และไฟฟ้า ก๊าซชีวภาพจำนวน 1 ลูกบาศก์เมตร สามารถนำไปใช้ได้ดังนี้

1. ให้ค่าความร้อน 3,000-5,000 กิโลแคลอรี ความร้อนนี้จะทำให้น้ำ 130 กิโลกรัม ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เดือดได้
2. ใช้กับตะเกียงก๊าซขนาด 60-100 วัตต์ ลูกใหม่ได้ 5-6 ชั่วโมง
3. ผลิตกระแสไฟฟ้า 1.25 กิโลวัตต์
4. ใช้กับเครื่องยนต์ 2 แรงม้า ได้นาน 1 ชั่วโมง
5. ถ้าใช้กับครอบครัวขนาด 4 คน สามารถหุงต้มได้ 3 มื้อ

ด้านปรับปรุงสภาพแวดล้อม

การผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียและขยะอินทรีย์ เป็นการกำจัดของเสียรูปแบบหนึ่ง ซึ่งช่วยลดความสกปรกและปริมาณของของเสียลง โดยเปลี่ยนสารอินทรีย์จากของเสียเป็นก๊าซชีวภาพ ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการกิจกรรมของจุลินทรีย์ในระบบที่ทำหน้าที่ย่อยสลายของเสียยังช่วยกำจัดเชื้อโรคในของเสียได้อีกด้วย และเนื่องจากระบบผลิตก๊าซชีวภาพเป็นระบบปิด จึงช่วยลดปัญหากลิ่นเหม็น และการปลดปล่อยก๊าซมลพิษออกสู่สิ่งแวดล้อม

ด้านการเกษตร

การทำเป็นปุ๋ย ภาคที่ได้จากการหมักก๊าซชีวภาพเราสามารถนำไปใช้เป็นปุ๋ยได้ดีกว่ามูลสัตว์สด และปุ๋ยคอก ทั้งนี้เนื่องจากในขณะที่มีการหมัก จะมีการเปลี่ยนแปลงสารประกอบไนโตรเจนในของเสีย ทำให้พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้

การทำเป็นอาหารสัตว์ โดยนำส่วนที่เหลือจากการหมัก นำไปตากแห้ง แล้วนำไปผสมเป็นอาหารสัตว์ให้โคและสุกรกินได้ แต่ทั้งนี้ก็มีข้อจำกัด คือ ควรใส่อยู่ระหว่าง 5-10 กิโลกรัม ต่อส่วนผสมทั้งหมด 100 กิโลกรัม จะทำให้สัตว์เจริญเติบโตตามปกติและเป็นการลดต้นทุนการผลิตอีกด้วย

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เทคโนโลยีผลิตก๊าซชีวภาพมีหลายรูปแบบ เช่น ระบบยูเอเอสบี ระบบบ่อหมักแบบมีตัวกลาง ระบบบ่อหมักแบบราง ระบบบ่อหมักแบบกวนผสม เป็นต้น การเลือกใช้เทคโนโลยีผลิตก๊าซชีวภาพชนิด

โต ขึ้นอยู่กับลักษณะน้ำเสีย ต้นทุนในการก่อสร้าง ความยากง่ายในการเดินระบบและดูแลรักษาระบบ เป็นต้น ปัจจุบันมีการศึกษาวิจัยเพื่อใช้ระบบผลิตก๊าซชีวภาพในการจัดการของเสียจากแหล่งกำเนิดต่างๆ หลายประเภท ซึ่งส่วนใหญ่เป็นน้ำเสียที่มีองค์ประกอบของสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายง่าย เช่น น้ำเสียการทำกะทิ มูลสัตว์ น้ำเสียครัวเรือน โรงงานอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน โรงสุรากลั่น และน้ำเสียจากอุตสาหกรรมอาหาร เป็นต้น

นิรมารดและคณะ ได้ศึกษาอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพจากการบำบัดน้ำเสียกะทิ โดยการใช้ระบบบำบัดน้ำเสียไร้ออกซิเจนในห้องปฏิบัติการขนาดความจุ 16.8 ลิตร ซึ่งเป็นระบบยูเอเอสบี น้ำเสียที่ใช้ในการศึกษาเป็นน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีค่าเฉลี่ยน้ำเข้าระบบ ในรูปของ COD 963 mg/l ทำการศึกษาในช่วง 6 เดือน ที่ระยะเวลาเก็บกัก 4 ค่าระหว่าง 16-28 ชั่วโมง พบว่าอัตราการเกิดก๊าซโดยเฉลี่ย 195 ml/l kg COD ที่กำจัด ในส่วนขององค์ประกอบก๊าซพบว่า มีมีเทน ในโครเจน คาร์บอนไดออกไซด์ และอื่นๆ เฉลี่ย ร้อยละ 75.52, 14.08, 8.27 และ 2.13 ตามลำดับ

ภาวิณี ชัยประเสริฐ และคณะ ได้ร่วมกันพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียไร้อากาศประสิทธิภาพสูงแบบครึ่งเซลล์สำหรับโรงงานอุตสาหกรรมเกษตร (High Rate Anaerobic Fixed Bed Reactor for Agro-Industrial Wastewater Treatment) ระบบบำบัดแบบครึ่งฟิล์มจุลินทรีย์ชนิดไม่ใช้อากาศ มีข้อดี คือ มีความสามารถในการรักษาเซลล์จุลินทรีย์ไว้บนวัสดุตัวกลางที่เป็นตัวหลักในการย่อยสลายสารอินทรีย์ และผลิตก๊าซชีวภาพได้ภายในถังปฏิกรณ์ ซึ่งจุลินทรีย์ถูกชะออกจากระบบได้ยาก ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพในการทำงานสูง ลดพื้นที่ที่ใช้ในการบำบัด ไม่มีกลิ่น และได้ก๊าซชีวภาพเก็บไว้ใช้เป็นพลังงานทดแทนในโรงงาน

Goksel N. Dermirer and Shulin Chen. ศึกษาการใช้ระบบบ่อหมักไร้อากาศ (anaerobic hybrid reactor: AHR) แบบใช้ตัวกลาง ในการย่อยสลายมูลสัตว์แบบไม่ใช้อากาศ เติมน้ำระบบชุดทดลองด้วยมูลสัตว์มีลักษณะเป็นของแข็งผสมกับของเหลว และไม่ได้ผ่านการบำบัดขั้นต้นแต่อย่างใด โดยทำการเดินระบบที่ภาระบรรทุกสารอินทรีย์ (OLR) 7.30 g VS/l day และระยะเวลาเก็บกัก (HRT) 15 วัน พบว่าระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัด COD, BOD, TS และ VS อยู่ในช่วง 48-63, 64-78, 55-65 และ 59-68% ตามลำดับ อัตราการผลิตก๊าซมีเทน โดยเฉลี่ยเท่ากับ 0.191 l/g VS

Stephanie Lansing, Raúl Botero Botero and Jay F. Martin ได้ทำการศึกษาศักยภาพของระบบบ่อหมักไร้อากาศแบบต้นทุนต่ำใน Costa Rica ในการบำบัดน้ำเสียจากการเลี้ยงสัตว์ และผลิตพลังงานทดแทน พบว่า น้ำเสียที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบดังกล่าวมีค่า COD ลดลงจาก 2968 mg/l เหลือเพียง 472 mg/l และก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้มีองค์ประกอบเป็นก๊าซมีเทนประมาณ 66% สอดคล้องกับก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากบ่อหมักไร้อากาศของโรงงานอุตสาหกรรม

อรรณพ นรินทร์ และคณะ ได้พัฒนาระบบบำบัดแบบครึ่งฟิล์มจุลินทรีย์ชนิดไร้อากาศ (Anaerobic Fixed Film Reactor: AFFR) เพื่อบำบัดน้ำเสียจากโรงงานผลิตแป้งมันสำปะหลัง โดยใช้หลักการครึ่งเซลล์จุลินทรีย์ไว้บนผิววัสดุตัวกลางที่เป็นตาข่าย ทำให้กักเก็บจุลินทรีย์ให้อยู่ในระบบได้

เป็นระยะเวลาานาน มีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดของเสียได้ร้อยละ 80 ใช้กับน้ำเสียที่มีสารแขวนลอยสูงได้ โดยไม่ต้องปรับสภาพน้ำเสียก่อนเข้าระบบ ทุ่นค่าสารเคมีและการดูแลไม่ซับซ้อน ที่สำคัญเป็นเทคโนโลยีที่คิดค้นและพัฒนาขึ้นเองในประเทศ ระบบดังกล่าว เป็นประเภทที่มีวัสดุตัวกลางอยู่ในถังปฏิกรณ์ เพื่อให้จุลินทรีย์เกาะบนตัวกลางในลักษณะของฟิล์มชีวะ โดยชนิดของวัสดุตัวกลางที่ใช้จะเป็นตาข่ายไนลอนที่ซึ่งติดตั้งอย่างเป็นระเบียบภายในถังปฏิกรณ์ ซึ่งการที่จุลินทรีย์ยึดเกาะอยู่บนตัวกลางนั้นจะสามารถลดการสูญเสียจุลินทรีย์ไม่ให้หลุดออกไปจากระบบบำบัดพร้อมกับน้ำที่บำบัดแล้ว สำหรับข้อดีที่สามารถรักษาจุลินทรีย์ให้อยู่ในระบบได้จำนวนมากนั้น จะทำให้ระบบมีประสิทธิภาพดี มีเสถียรภาพสูง สามารถกำจัดสารอินทรีย์ได้อย่างต่อเนื่อง และสามารถฟื้นตัวกลับเข้าสู่ภาวะทำงานปกติได้อย่างรวดเร็ว หากเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพของน้ำเสียที่ไหลเข้าระบบหรือเกิดการสะสมสารอินทรีย์สูงเกินไป ระบบครึ่งฟิล์มจุลินทรีย์นี้สามารถรับสารอินทรีย์ได้ 6-8 กิโลกรัมซีโอดี ต่อลบ.ม.ของถังต่อวัน ที่ระยะเวลากักเก็บ(HRT) 3-4 วัน จะทำให้ได้ปริมาณก๊าซที่เกิดขึ้น 0.4-0.5 ลบ.ม.ต่อกิโลกรัมซีโอดีที่กำจัด และยังได้ก๊าซชีวภาพที่มีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนประมาณ 60-70% ที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ได้ถึง 80%

สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน (สวพ.) มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ภายใต้การสนับสนุนจากสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน ได้ดำเนินงานวิจัยและประยุกต์ใช้ก๊าซชีวภาพในอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมัน บริษัท ตรังน้ำมันปาล์ม จำกัด จากผลการศึกษาคูณสมบัติของน้ำเสียจากอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันพบว่า น้ำเสียที่เกิดจากการผลิตปริมาณ 1 ลูกบาศก์เมตร สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ถึง 25 ลูกบาศก์เมตร สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน ได้ปรับปรุงและออกแบบระบบก๊าซชีวภาพสำหรับน้ำเสียจากโรงงานน้ำมันปาล์ม ทางสถาบันยังได้ทำการวิจัยและประยุกต์ใช้ก๊าซชีวภาพในโรงงานสุรากลิ่นชุมชนต้นแบบ ซึ่งมีกากสำخن ประมาณ 1000 ลิตร/วัน มีค่าปริมาณสารอินทรีย์ในรูป COD ประมาณ 190,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อปรับสภาพของเสียให้มีความเหมาะสมต่อการหมักพบว่า มีความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์ทางชีวภาพโดยไร้อากาศ 60% เกิดก๊าซชีวภาพประมาณ 50 ลูกบาศก์เมตร/วัน สำหรับอุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลืองขนาดเล็ก สถาบันวิจัยและพัฒนาพลังงาน มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ได้ดำเนินการวิจัยและออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียด้วยระบบก๊าซชีวภาพให้โรงงานผลิตเต้าหู้ถั่วเหลืองและเต้าหู้หลอด ซึ่งมีปริมาณน้ำเสียที่เกิดขึ้นในแต่ละวันประมาณ 20 ลูกบาศก์เมตร มีความเข้มข้นสารอินทรีย์ในรูป COD โดยเฉลี่ย 3,200 มิลลิกรัม/ลิตร ระบบก๊าซชีวภาพที่ใช้เป็นแบบ Anaerobic Baffled Reactor (ABR) คือ บ่อหมักไร้อากาศแบบผนังกัน โดยสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 20 ลูกบาศก์เมตร/วัน สามารถทดแทนการใช้เชื้อเพลิงเดิมได้ 38 กิโลกรัม ประสิทธิภาพของระบบในการบำบัดน้ำเสียในรูป COD ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 80

การศึกษาวิจัยการผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสียร่วม คือ ใช้ของเสียหลายชนิดร่วมกันในการผลิตก๊าซชีวภาพ การศึกษาของ Tarek Elmitwalli และคณะจาก Wageningen University ทำการทดลองนำระบบถังหมักไร้อากาศแบบ UASB-Septic Tank และแบบถังหมัก ไปใช้ในการบำบัดน้ำเสีย ของเสียจาก

บ้านเรือน รวมทั้งมูลวัวของครัวเรือนในชนบท และเป็นการนำของเสียไปใช้ให้เกิดประโยชน์ในการผลิตก๊าซชีวภาพ ในการบำบัดของเสียจากครัวเรือน ซึ่งมีค่า COD ประมาณ 600 mg/l ทำการเดินระบบที่ระยะเวลาเก็บกัก (HRT) 2 วัน พบว่าระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัด COD ประมาณ 65% ผลิตก๊าซชีวภาพได้ 14 ลิตร(มีเทน)/ครัวเรือน/วัน สำหรับการบำบัดมูลสัตว์ พบว่า สามารถเปลี่ยนสารอินทรีย์ในรูป COD ร้อยละ 41 ไปเป็นก๊าซมีเทน อัตราการผลิตก๊าซมีเทนอยู่ในช่วง 0.2-1.2 ลูกบาศก์เมตรของมีเทน/วัว 1 ตัว/วัน และสามารถนำน้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบไปใช้ในการเพาะปลูก นำกากตะกอนไปใช้เป็นปุ๋ย และก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ไปใช้ในการหุงต้ม

Piyapha และคณะ (2553) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากมันสำปะหลังร่วมกับมูลวัว มันสำปะหลังมีองค์ประกอบเป็นคาร์บอนสูง มีค่า C/N ratio สูง (C/N ratio เท่ากับ 84:1) จึงไม่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพ งานวิจัยนี้จึงศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากมันสำปะหลัง โดยใช้มูลวัว (BOD: N: P เท่ากับ 100: 3.47: 0.27) และปุ๋ยยูเรียเป็นแหล่งธาตุอาหารไนโตรเจน โดยใช้ระบบถังหมักชั้นตอนเดียว ขนาด 1 ลิตร เดินระบบที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ระยะเวลาเก็บกัก 30 วัน พบว่า การเติมปุ๋ยยูเรีย 0.08% เป็นปริมาณที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซชีวภาพจากมันสำปะหลัง ความเข้มข้นของมูลวัวและปุ๋ยยูเรียที่เหมาะสม คือ 10% w/v และ 0.08% w/v ตามลำดับ มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 760 ลิตรต่อวัน และค่า pH อยู่ในช่วง 7.4-8.25

วิมลฐษา (2551) ได้ศึกษาการเปรียบเทียบสมรรถนะในการสร้างกรดของน้ำเสียฟาร์มสุกรที่เวลาเก็บกักต่างๆ กัน การวิจัยใช้แบบจำลองถังปฏิกรณ์กวนผสมร่วมกับถังปฏิกรณ์ไหลตามกัน ปริมาตรใช้งาน 15 ลิตร แบ่งการทดลอง 2 ช่วง คือ ช่วงแรกเปรียบเทียบน้ำเข้าที่ไม่มีการปรับพีเอชกับการปรับพีเอชที่เวลาเก็บกักน้ำ 36 ชม. และช่วงที่สอง มีการปรับพีเอชน้ำเข้าระบบให้พีเอชภายในถังมีสภาวะเหมาะสมแก่การสร้างกรดโดยมีพีเอชประมาณ 5 ทดลองที่เวลาเก็บกักน้ำ 4, 6, 12 และ 36 ชม. ผลการทดลองช่วงแรก พบว่า น้ำออกถังปฏิกรณ์ไหลตามกันมีค่าพีเอชสูงกว่าถังปฏิกรณ์กวนผสม จนถึงถังปฏิกรณ์ไหลตามกันมีการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้สูงกว่าถังปฏิกรณ์กวนผสม โดยมีร้อยละการกำจัดซีโอดีของถังปฏิกรณ์ไหลตามกันช่วง ไม่มีการปรับพีเอชและมีการปรับพีเอช 33.3 และ 47.1 ตามลำดับ ร้อยละการกำจัดซีโอดีของถังปฏิกรณ์กวนผสม มีค่า 28.5 และ 10.8 ตามลำดับ น้ำออกจากถังปฏิกรณ์ทั้งสองแบบมีกรดไขมันระเหยง่ายลดลง ถังปฏิกรณ์ไหลตามกันมีการกำจัดกรดไขมันระเหยง่ายสูงกว่าถังปฏิกรณ์กวนผสม การกำจัดกรดไขมันระเหยง่ายช่วง ไม่มีการปรับพีเอชมีค่าสูงกว่าช่วงที่มีการปรับพีเอช การทดลองช่วงที่สอง พบว่า ถังปฏิกรณ์ไหลตามกันมีการกำจัดซีโอดีสูงกว่าถังปฏิกรณ์กวนผสม โดยมีร้อยละการกำจัดของถังปฏิกรณ์ไหลตามกันที่เวลาเก็บกักน้ำที่ 4, 6, 12 และ 36 ชม. มีค่า 12.8, 13.8, 30.5 และ 51.0 ตามลำดับ การกำจัดซีโอดีของถังปฏิกรณ์กวนผสม มีค่า 6, 4.8, 14.1 และ 10.8 ตามลำดับ ที่เวลาเก็บกัก 6 ชม. ขึ้นไป น้ำเข้ามีกรดไขมันระเหยง่ายลดลง ถังปฏิกรณ์ไหลตามกันย่อยสลายกรดไขมันระเหยง่ายสูงกว่าถังปฏิกรณ์กวนผสม โดยมีร้อยละการย่อยสลายกรดไขมันของถังปฏิกรณ์ไหลตามกันที่เวลาเก็บกักน้ำที่ 6, 12 และ 36 ชม. มีค่า 15.6, 41.0 และ 45.2 ตามลำดับ สำหรับถัง

ปฏิกรณ์กวนผสมมีค่า 6.9, 18.4 และ 11.5 ตามลำดับ ที่เวลาเก็บกักน้ำ 4 ชม. น้ำออกมีกรดไขมันระเหยง่ายสูงกว่าน้ำเข้ามีร้อยละการสร้างกรดของถังปฏิกรณ์ไหลตามกันและถังปฏิกรณ์กวนผสม 2.4 และ 3.0 ตามลำดับ อัตราการสร้างกรดในถังปฏิกรณ์ไหลและถังปฏิกรณ์กวนผสม โดยมีค่าเท่ากับ 130.2 และ 249.1 มก./ก.ซีโอดีกำจัด ตามลำดับ องค์ประกอบกรดจากค่ามากไปน้อย ได้แก่ กรดอะซิติก กรดโพรไพโอนิก และกรดบิวทริก ผลการศึกษา พบว่าถังปฏิกรณ์กวนผสมมีการสร้างกรดสูงกว่าถังปฏิกรณ์ไหลตามกันและที่เวลาเก็บกักน้ำ 4 ชม.เหมาะสมกับการสร้างกรดของน้ำเสียฟาร์มสุก

จะเห็นได้ว่าการศึกษาวิจัยส่วนใหญ่มุ่งศึกษาทดลองการผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสียที่ย่อยสลายง่าย และไม่มีสารปนเปื้อนสารเคมี สำหรับน้ำเสียจากการแปรรูปยางพารา ซึ่งมีการใช้กรดซัลฟูริกหรือกรดฟอร์มิกในกระบวนการผลิต ทำให้น้ำเสียมีสภาพเป็นกรดและมีองค์ประกอบเป็นของเสียอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ยาก ยังมีการศึกษาวิจัยน้อย และระบบบำบัดที่ใช้กันอยู่ก็เป็นระบบที่มีประสิทธิภาพมากนัก สายัณห์ และ คณะ (2546) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการสำรวจระบบบำบัดน้ำเสียจากสหกรณ์โรงอบ/รมยาง จำนวน 20 โรงในภาคใต้ของประเทศไทย ซึ่งประกอบด้วย 9 โรง ในรุ่นออกแบบปี พ.ศ. 2537 10 โรง ในรุ่นปี พ.ศ. 2538 1 โรงซึ่งเป็นโรงคู่ที่ประกอบด้วยโรงรุ่นปี 2537 และ 2538 พบว่า ระบบบำบัดน้ำเสียของสหกรณ์ทั้งหมดเป็นระบบเติมอากาศ ซึ่งได้หยุดใช้เครื่องเติมอากาศเพราะที่เครื่องเสียบ่อยครั้ง ยุ่งยากต่อการซ่อมบำรุงและเสียค่าใช้จ่าย จากผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำของสหกรณ์ที่สำรวจ พบว่า น้ำทิ้งที่ออกจากระบบบำบัดเกือบทุกโรงยังไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานของโรงงานอุตสาหกรรม หลังจากนั้นได้คัดเลือกสหกรณ์บ้านทางเกวียน จังหวัดพัทลุงเป็นตัวแทนในการศึกษา เพื่อตรวจวิเคราะห์ติดตามประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียของระบบบำบัดต่อเนื่อง พบว่า การบำบัดโดยการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียนั้นยังไม่สมบูรณ์และยังมีสภาพเป็นแบบการย่อยสลายแบบไร้อากาศโดยแบคทีเรียชนิดไม่ใช้อากาศ (Anaerobic bacteria) ในทุกบ่อ จากผลการติดตามค่าพารามิเตอร์ของน้ำทิ้งที่ออกจากระบบบำบัดของสหกรณ์บ้านทางเกวียน พบว่า น้ำทิ้งมีความเข้มข้นของสารต่างๆ เกินกว่าค่าที่กำหนดไว้สำหรับน้ำใช้เพื่อเกษตรกรรมอย่างปลอดภัย

การศึกษาวิจัยการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการแปรรูปยางพาราส่วนใหญ่มุ่งเน้นการศึกษาวิจัยและพัฒนาระบบสำหรับน้ำเสียการแปรรูปยางพาราในระดับอุตสาหกรรม กัญญารัตน์ และสุเมธ (2551) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียและผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมน้ำยางข้น ซึ่งมีค่า pH ประมาณ 3.6-4.7 ไม่เหมาะสมต่อการเจริญของจุลินทรีย์ในถังหมัก ดังนั้นจึงต้องทำการปรับ pH ให้มีค่าประมาณ 6.5-7.6 โดยกัญญารัตน์ และสุเมธ ได้ทำการศึกษาโดยใช้ระบบหมักไร้อากาศแบบมีแผ่นกั้น (ABR) และเปรียบเทียบผลของการปรับ pH โดยใช้ถ่านไม้ยางพารา กับ การใช้ NaOH และผลของ Recycle ratio ต่อประสิทธิภาพของระบบหมักแบบไร้อากาศของน้ำเสียยางพาราซึ่งมีซัลเฟตสูง พบว่าทั้งสองระบบมีประสิทธิภาพการกำจัด COD และซัลเฟตสูงสุด ที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำเสีย 10 วัน โดยมีประสิทธิภาพการบำบัด 82.71% และ 96.16% สำหรับระบบที่ใช้ NaOH ในการปรับ pH

และมีประสิทธิภาพ 80.77% และ 96.60% สำหรับระบบหมักที่ใช้ถ่านไม้ยางพาราในการปรับ pH โดยไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

สำหรับน้ำเสียจากการผลิตยางแผ่นของเกษตรกรชาวสวนยาง ซึ่งทำการผลิตในระดับครัวเรือน ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของคนในชุมชนอย่างมาก แต่ยังคงขาดการศึกษาวิธีการบำบัดน้ำเสียที่เหมาะสมกับลักษณะน้ำเสียและลักษณะชุมชน ระบบที่ศึกษาเพื่อใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม มีความยุ่งยากในการก่อสร้างและเดินระบบ จึงไม่เหมาะสมที่จะนำไปใช้ในชุมชน ซึ่งจากผลการศึกษาวิจัยของ วิชาญดา และคณะ (2553) น้ำเสียจากการผลิตยางแผ่นฝั่งแห่งมีองค์ประกอบของสารอินทรีย์สูง และมีสภาพเป็นกรด (pH เฉลี่ย 4.6) จึงต้องทำการปรับ pH ของน้ำเสียให้มีสภาพเป็นกลาง ก่อนป้อนเข้าสู่ระบบบำบัดแบบไร้อากาศ เพื่อให้ระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากการเดินระบบด้วยน้ำเสียที่ผ่านการปรับพีเอชในระยะเริ่มต้นระบบ และใช้มูลสุกรเป็นหัวเชื้อจุลินทรีย์เริ่มต้นระบบ ประมาณ ¼ ของปริมาตรถังหมัก พบว่า ระบบบำบัดไร้อากาศแบบ 2 ถัง (ประกอบด้วยถังหมักไร้อากาศ 2 ถัง แต่ละถังมีระยะเวลาเก็บน้ำเสีย 7.5 วัน) มีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียและผลิตก๊าซชีวภาพดีกว่าระบบบำบัดไร้อากาศแบบ 1 ถัง (ประกอบด้วยถังหมักไร้อากาศ 1 ถัง ระยะเวลาเก็บน้ำเสีย 15 วัน) ระบบบำบัดไร้อากาศแบบ 1 ถัง มีประสิทธิภาพการบำบัด COD, BOD, TSS, TKN และ TP เฉลี่ย 58.86%, 56.47%, 45.88%, 31.74% และ 29.44% ตามลำดับ ระบบบำบัดไร้อากาศแบบ 2 ถัง มีประสิทธิภาพการบำบัด COD, BOD, TSS, TKN และ TP เฉลี่ย 61.71%, 57.65%, 51.76%, 33.03% และ 31.78%, ตามลำดับ อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพของระบบ 1 ถัง มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ $0.411 \text{ m}^3\text{-gas/m}^3\text{-reactor.day}$ ($0.60 \text{ m}^3\text{-gas/kg COD}_{\text{removed}}$) ส่วนระบบ 2 ถัง มีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเฉลี่ย $0.467 \text{ m}^3\text{-gas/m}^3\text{-reactor.day}$ ($0.65 \text{ m}^3\text{-gas/kg COD}_{\text{removed}}$) ระบบบำบัดน้ำเสียและผลิตก๊าซชีวภาพจากการศึกษาครั้งนี้มีความเหมาะสมในการนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดน้ำเสียจากการผลิตยางแผ่น แต่ยังไม่สามารถเดินระบบร่วมกับขยะเศษอาหารและขยะอินทรีย์อื่นๆ จากครัวเรือนเกษตรกรได้ จำเป็นมีการศึกษาวิจัยระบบบำบัดร่วมเพิ่มเติม เพื่อให้เกษตรกรสามารถนำของเสียจากครัวเรือนมาใช้ผลิตก๊าซชีวภาพร่วมกับน้ำเสียยางแผ่นได้ โดยเศษอาหารจากครัวเรือนมีลักษณะเป็นของแข็ง ประกอบด้วยสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ที่จุลินทรีย์สร้างมีเทนยังไม่สามารถนำไปใช้ในการผลิตก๊าซมีเทนได้โดยตรง ต้องผ่านการย่อยสลายด้วยจุลินทรีย์สร้างกรด เพื่อเปลี่ยนสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่เป็นกรดอินทรีย์ระเหยง่าย ซึ่งเป็นสารอาหารของจุลินทรีย์สร้างมีเทน งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยระบบ 2 ถังหมัก ซึ่งแยกถังหมักกรดอินทรีย์ และถังหมักก๊าซชีวภาพออกจากกัน มีรายละเอียดดังนี้

วิญฐุชยา (2551) ได้ศึกษาการเปรียบเทียบสมรรถนะในการสร้างกรดของน้ำเสียฟาร์มสุกรที่เวลาเก็บกักต่างๆ กัน การวิจัยใช้แบบจำลองถึงปฏิกรณ์กวนผสมบูรณกับถึงปฏิกรณ์ไหลตามกัน ปริมาตรใช้งาน 15 ลิตร แบ่งการทดลอง 2 ช่วง คือ ช่วงแรกเปรียบเทียบน้ำเข้าที่ไม่มีการปรับพีเอชกับมีการปรับพีเอชที่เวลาเก็บกักน้ำ 36 ชม. และช่วงที่สอง มีการปรับพีเอชน้ำเข้าระบบให้พีเอชภายในถังมีสภาวะเหมาะสมแก่การสร้างกรดโดยมีพีเอชประมาณ 5 ทดลองที่เวลาเก็บกักน้ำ 4, 6, 12 และ 36 ชม. ผลการ

ทดลองช่วงแรก พบว่า น้ำออกถึงปฏิกรณ์ไหลตามกันมีค่าพีเอชสูงกว่าถึงปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ ถึงปฏิกรณ์ไหลตามกันมีการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้สูงกว่าถึงปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ โดยมีร้อยละการกำจัดชีโอดีของถึงปฏิกรณ์ไหลตามกันช่วงไม่มีการปรับพีเอชและมีการปรับพีเอช 33.3 และ 47.1 ตามลำดับ ร้อยละการกำจัดชีโอดีของถึงปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ มีค่า 28.5 และ 10.8 ตามลำดับ น้ำออกจากถึงปฏิกรณ์ทั้งสองแบบมีกรดไขมันระเหยง่ายลดลง ถึงปฏิกรณ์ไหลตามกันมีการกำจัดกรดไขมันระเหยง่ายสูงกว่าถึงปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ การกำจัดกรดไขมันระเหยง่ายช่วงไม่มีการปรับพีเอชมีค่าสูงกว่าช่วงที่มีการปรับพีเอช การทดลองช่วงที่สอง พบว่า ถึงปฏิกรณ์ไหลตามกันมีการกำจัดชีโอดีสูงกว่าถึงปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ โดยมีร้อยละการกำจัดของถึงปฏิกรณ์ไหลตามกันที่เวลาเก็บกักน้ำที่ 4, 6, 12 และ 36 ชม. มีค่า 12.8, 13.8, 30.5 และ 51.0 ตามลำดับ การกำจัดชีโอดีของถึงปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ มีค่า 6, 4.8, 14.1 และ 10.8 ตามลำดับ ที่เวลาเก็บกัก 6 ชม. ขึ้นไป น้ำเข้ามีกรดไขมันระเหยง่ายลดลง ถึงปฏิกรณ์ไหลตามกันย่อยสลายกรดไขมันระเหยง่ายสูงกว่าถึงปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ โดยมีร้อยละการย่อยสลายกรดไขมันของถึงปฏิกรณ์ไหลตามกันที่เวลาเก็บกักน้ำที่ 6, 12 และ 36 ชม. มีค่า 15.6, 41.0 และ 45.2 ตามลำดับ สำหรับถึงปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ มีค่า 6.9, 18.4 และ 11.5 ตามลำดับ ที่เวลาเก็บกักน้ำ 4 ชม. น้ำออกมีกรดไขมันระเหยง่ายสูงกว่าน้ำเข้ามีร้อยละการสร้างกรดของถึงปฏิกรณ์ไหลตามกันและถึงปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ 2.4 และ 3.0 ตามลำดับ อัตราการสร้างกรดในถึงปฏิกรณ์ไหลและถึงปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์ โดยมีค่าเท่ากับ 130.2 และ 249.1 มก./ก.ชีโอดีกำจัด ตามลำดับ องค์ประกอบกรดจากค่ามากไปน้อย ได้แก่ กรดแอสซิติค กรดโพรไพโอนิก และกรดบิวไทรก ผลการศึกษา พบว่าถึงปฏิกรณ์กวนสมบูรณ์มีการสร้างกรดสูงกว่าถึงปฏิกรณ์ไหลตามกันและที่เวลาเก็บกักน้ำ 4 ชม.เหมาะสมกับการสร้างกรดของน้ำเสียฟาร์มสุกร

ชยันต์ (2545) ได้ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากมูลสุกร โดยใช้กระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศสองขั้นตอนที่มีการไหลวนกลับของน้ำเสีย โดยในกระบวนการนี้มีถึงปฏิกรณ์ 2 ถึง ถึงปฏิกรณ์แรกเป็นถึงปฏิกรณ์ผลิตรอคอินทรีย์เป็นถึงที่เติมมูลสุกรเพียงครั้งเดียวตลอดการทดลอง (Batch reactor) ทำหน้าที่ผลิตรอคอินทรีย์จากมูลสุกรในส่วนที่เป็นของแข็ง และส่งผ่านไปยังถึงปฏิกรณ์ที่สอง ถึงปฏิกรณ์ที่สองเป็นถึงปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทน เป็นถึงแบบมีตัวกลาง (Packed bed) ซึ่งมีคุณสมบัติเก็บกักตะกอนจุลินทรีย์ได้ดี ระบบสองขั้นตอนนี้ทำงานโดยการใช้ น้ำไหลวนผ่านระหว่างถึงปฏิกรณ์ทั้ง 2 ถึง ซึ่งน้ำมีหน้าที่ในการชะสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำจากมูลสุกรในถึงปฏิกรณ์ผลิตรอค และนำไปยังถึงปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทน งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาผลของอัตราการไหลวนน้ำระหว่างถึงปฏิกรณ์ทั้ง 2 ถึง และความหนาของชั้นมูลสุกรในถึงปฏิกรณ์ผลิตรอคอินทรีย์ ศึกษาผลของปริมาณน้ำโดยทดลองที่อัตราการไหลวนน้ำ 2, 4 และ 6 ลิตรต่อวัน ที่ความหนาชั้นมูลสุกร 10 เซนติเมตร หรือปริมาณมูลสุกรบรรจุ 8.4 กิโลกรัม พบว่าการเพิ่มปริมาณน้ำในการไหลวนจะช่วยเพิ่มให้มีการพาสารอินทรีย์จากถึงปฏิกรณ์ผลิตรอคอินทรีย์ไปกำจัดในถึงปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทนได้มากขึ้น ทำให้เกิดก๊าซมีเทนในถึงปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทนได้มากขึ้น การย่อยสลายสารอินทรีย์จะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 40 วันแรก และความสามารถในการกำจัดชีโอดีทั้งหมดที่อัตราการไหลวนน้ำ 2, 4 และ 6 ลิตรต่อวัน เป็น 3.1, 3.0 และ

3.3 กิโลกรัม ตามลำดับ และผลิตก๊าซชีวภาพได้ 38, 52 และ 135 ลิตร ตามลำดับ ส่วนการศึกษาโดยการเพิ่มความหนาของชั้นมูลสุกรจาก 10 เซนติเมตร เป็น 20 เซนติเมตร ที่อัตราการไหลวนน้ำ 6 ลิตรต่อวัน พบว่าทำให้มีสารอินทรีย์จากมูลสุกรมากขึ้น แต่ไม่มีผลต่อการผลิตก๊าซมีเทนในถังปฏิกรณ์ผลิตก๊าซมีเทน แต่การเกิดก๊าซมีเทนในถังปฏิกรณ์ผลิตกรดลดลง เนื่องจากผลความเข้มข้นของกรดอินทรีย์ที่เพิ่มมากขึ้นสถานะที่เหมาะสมในงานวิจัยนี้คือ ที่อัตราการไหลวนน้ำ 6 ลิตร ความหนาชั้นมูลสุกร 10 เซนติเมตร (มูลสุกรบรรจุ 8.4 กิโลกรัม) โดยมีประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี สารอินทรีย์ระเหยและของแข็งในถังปฏิกรณ์ผลิตกรดอินทรีย์ เป็นร้อยละ 54, 38 และ 33 ตามลำดับ ปริมาณก๊าซชีวภาพทั้งหมด 376 ลิตร และระยะเวลาในการหมักที่ดีที่สุดในการผลิตก๊าซชีวภาพคือ 40 วัน ในการศึกษาการบำบัดมูลสุกรในส่วนที่เป็นของแข็ง การดำเนินระบบไม่มีปัญหาเรื่องการอุดตัน เนื่องจากมีการแยกแยะระหว่างส่วนที่เป็นของแข็งและของเหลวออกจากกัน และพบว่าระบบบำบัดสองชั้นตอนมีเสถียรภาพการทำงานดีกว่าแบบชั้นตอนเดียว และจากการวิเคราะห์ทางการเงินโดยเปรียบเทียบระหว่างระบบบ่อแบบราง ระบบบ่อแบบ H-UASB และระบบที่ทำการศึกษาคือระบบสองชั้นตอน คำนวณราคาก๊าซชีวภาพได้ 1.9, 1.7 และ 3.0 บาทต่อลูกบาศก์เมตรก๊าซชีวภาพตามลำดับ ระบบสองชั้นตอนถ้าได้มีการปรับปรุงประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นเต็มความสามารถ จะช่วยลดต้นทุนการผลิตก๊าซชีวภาพลงได้มาก เนื่องจากต้นทุนของราคาก่อสร้างระบบนี้มีราคาถูกกว่า