

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญ และที่มาของปัญหาที่ทำการวิจัย

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย ในปัจจุบันมีโรงงานที่ขออนุญาตประกอบกิจการสกัดน้ำมันปาล์มกับกรมโรงงานอุตสาหกรรมอยู่ 99 โรง (กรมโรงงานอุตสาหกรรม, 2555) ซึ่งในกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มจำเป็นต้องมีการใช้น้ำและพลังงานในการขับเคลื่อนเครื่องจักรค่อนข้างมากทำให้เกิดน้ำเสีย โดยเฉพาะน้ำเสียที่เกิดจากขั้นตอนการนึ่งผลปาล์มและการแยกน้ำออกจากน้ำมัน ซึ่งเป็นน้ำเสียที่มีสิ่งสกปรกในรูปของไขมัน น้ำมัน และสารอินทรีย์ปนเปื้อนอยู่มาก ปริมาณน้ำเสียจำนวนมากและวัสดุเศษเหลือที่เกิดจากกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มได้สร้างปัญหาในด้านมลพิษที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและชุมชนใกล้เคียง อีกทั้งยังกลายเป็นรายจ่ายส่วนเกินที่ทำให้ต้นทุนในการผลิตสูงขึ้น ปัจจุบันอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์มได้ให้ความสนใจในการใช้ระบบไร้อากาศในการบำบัดน้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิต เนื่องจากต้นทุนในการเดินระบบต่ำกว่าแบบระบบที่ใช้อากาศ และได้ก๊าซชีวภาพเป็นผลพลอยได้ ก๊าซชีวภาพซึ่งมีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนอยู่ร้อยละ 50-70 ซึ่งเป็นก๊าซที่ให้พลังงานสูงสามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนในการผลิตกระแสไฟฟ้าเพื่อใช้ภายในโรงงานเอง และยังมีส่วนที่เหลือใช้ที่สามารถจำหน่ายให้กับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค ทำให้เกิดรายได้จากการขายไฟฟ้าได้อีกด้วย (วาริ ช้วนรักษธรรม, 2548) อย่างไรก็ตามวัสดุเศษเหลือที่เกิดจากกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม เช่น เส้นใยปาล์ม ทะลายปาล์ม กากตะกอนจากเครื่องแยกน้ำมัน หรือกากตะกอนดีแคนเตอร์ เป็นต้น ยังไม่มีการนำไปใช้ประโยชน์ที่คุ้มค่า ดังนั้นการผลิตก๊าซมีเทนโดยใช้น้ำเสยร่วมกับวัสดุเศษเหลือของโรงงานอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม นอกจากจะเป็นการลดวัสดุเศษเหลือดังกล่าว ยังสามารถเป็นการเพิ่มผลผลิตก๊าซมีเทนซึ่งสามารถนำไปจำหน่ายให้กับการไฟฟ้าส่วนภูมิภาคและเกิดรายได้ให้กับบริษัทได้ดีอีกด้วย อย่างไรก็ตามการใช้วัสดุเศษเหลือซึ่งเป็นของแฉ่งร่วมกับน้ำเสียซึ่งเป็นของเหลวในการผลิตก๊าซมีเทนให้ได้ในปริมาณสูงจะต้องมีส่วนและอัตราการป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบไร้อากาศที่เหมาะสมรวมทั้งระยะเวลาเก็บกักที่เหมาะสม นอกจากนี้ก๊าซชีวภาพที่ได้จากการย่อยสลายแบบไร้อากาศจะมีก๊าซมีเทนซึ่งเป็นก๊าซที่ให้พลังงานสูงเพียงร้อยละ 50-70 การทำให้ก๊าซชีวภาพบริสุทธิ์ขึ้น และมีสัดส่วนของก๊าซมีเทนสูงขึ้น ทำให้มีแนวทางการนำก๊าซชีวภาพไปใช้ประโยชน์เพื่อเป็นพลังงานทดแทนได้หลากหลายขึ้น เช่น การนำไปอัดถังเช่นเดียวกับก๊าซ NGV เป็นต้น

1.2 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาการผลิตก๊าซมีเทนจากการย่อยสลายแบบไร้อากาศโดยใช้น้ำเสียร่วมกับวัสดุเศษเหลือของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม
- 2) เพื่อศึกษาการทำปฏิกิริยาก๊าซมีเทนที่ได้จากการย่อยสลายแบบไร้อากาศโดยใช้น้ำเสียร่วมกับวัสดุเศษเหลือของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

บทตรวจเอกสาร

2.1 ปาล์มน้ำมัน

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชที่สามารถนำไปแปรรูป เป็นผลิตภัณฑ์จำนวนมากหลายผลิตภัณฑ์ นำไปใช้ประโยชน์ทั้งในด้านการบริโภคและอุปโภค น้ำมันปาล์มถูกใช้เพื่อการบริโภคเป็นอันดับ 2 ของโลกรองจากถั่วเหลือง สำหรับปาล์มน้ำมันนั้นเป็นพืชเศรษฐกิจสำคัญที่ประเทศไทย มีโอกาสในการพัฒนาและขยายการผลิตเพื่อรองรับความต้องการในตลาดโลกทั้งบริโภค และเป็นพลังงานทดแทน ซึ่งในปีพ.ศ. 2553 ประเทศผู้ผลิตและส่งออกปาล์มน้ำมันมากที่สุดเป็นอันดับ 1 ของโลก คืออินโดนีเซียซึ่งผลิตได้ 23 ล้านตัน/ปี และส่งออก 16.6 ล้านตัน/ปี รองลงมาคือมาเลเซียผลิตได้ 18 ล้านตัน/ปีและส่งออก 15.5 ล้านตัน/ปี ส่วนประเทศไทยผลิตได้เป็นอันดับ 3 ของโลกแต่กลับผลิตได้เพียง 1.5 ล้านตัน/ปีโดยในอดีตส่งออกประมาณปีละ 1 – 2 แสนตัน/ปี จึงมองว่าประเทศไทยมีศักยภาพที่จะขยายการผลิตปาล์มน้ำมัน เพราะในปัจจุบันประเทศไทยมีสายพันธุ์ปาล์มน้ำมันที่ดีและให้ผลผลิตต่อไร่สูงและสามารถปลูกได้ในทุกภาคของประเทศไทย (แผนงานสนับสนุนความมั่นคงทางอาหาร, 2553)

ส่วนประกอบของทะลายปาล์มน้ำมัน (100%) เมื่อนำมาแปรรูปแล้วคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ดังนี้ (เอกชัย พุกภัยอำไพ, 2548)

- 1) ผลปาล์มน้ำมัน 71% แบ่งเป็น
 - 1.1) น้ำมันปาล์มดิบ 22% ประกอบด้วย
 - น้ำมันปาล์มโอเลอิน 15%
 - น้ำมันปาล์มสเตียริน 5%
 - กรดไขมันปาล์ม 2%
 - 1.2) ความชื้น 26%
 - 1.3) กากเส้นใยปาล์ม 11%
 - 1.4) เมล็ดปาล์มน้ำมัน 12% ประกอบด้วย
 - เนื้อในกะลาปาล์ม 5.5%
 - น้ำมันจากเนื้อในกะลาปาล์ม 2.5%
 - กากเนื้อในกะลาปาล์ม 3.0%
 - กะลาปาล์มน้ำมัน 6.5%
- 2) ทะลายเปล่าของปาล์ม 28%
- 3) สิ่งเจือปนอื่นๆ 1%

ขั้นตอนการสกัดน้ำมันปาล์มจากโรงงาน มีดังนี้ (พรชัย เหลืองอาภาวงศ์, 2549)

1) การรับซื้อทะลายสดปาล์มน้ำมัน (FFB : fresh fruit bunch) การรับซื้อของโรงงานจะรับซื้อทั้งทะลาย และต้องรีบส่งเร็วที่สุดภายหลังการเก็บเกี่ยวลงจากต้น เพราะจะเกิดกระบวนการที่เอนไซม์ชนิดหนึ่งที่ทำให้ไขมันปาล์มมีกรดไขมันอิสระ (free fatty acid) ซึ่งถือเป็นกรดในน้ำมันปาล์มที่ไม่มีคุณภาพ การส่งทะลายปาล์มน้ำมันเข้าโรงงานจะส่งทั้งผลผลิตปาล์มน้ำมันทั้งทะลาย ผสมกับส่วนของผลร่วงที่เก็บมารวมกันในรถบรรทุกส่งโรงงานจะสกัดในขั้นตอนต่อไป

2) การอบไอน้ำความดัน เป็นกระบวนการที่นำทะลายสดปาล์มน้ำมันเข้าไปอบด้วยความร้อนและความดัน ซึ่งจะใช้อุณหภูมิประมาณ 100 องศาเซลเซียส ความดันไอน้ำ (steam pressure) 2.4-3.4 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ในเวลา 60-70 นาที การอบความดันและความร้อนทะลายสดปาล์มน้ำมันเป็นกระบวนการที่ทำเพื่อวัตถุประสงค์ต่างๆ ดังนี้

- เป็นการยับยั้งกระบวนการที่จะทำให้เกิดกรดไขมันอิสระ (free fatty acid) ในผลปาล์มน้ำมัน
- เป็นการทำให้ผลปาล์มน้ำมันหลุดร่วงออกมาจากทะลายง่ายในขั้นตอนต่อไป
- ทำให้ชั้นเปลือกนุ่มเพื่อความสะดวกในการหีบน้ำมันในขั้นตอนต่อไป
- ช่วยทำให้การกะเทาะเมล็ดออกจากเนื้อในสะดวกง่ายขึ้นในขั้นตอนต่อไป
- ช่วยให้การสกัดแยกน้ำออกจากผลปาล์มน้ำมันได้ง่ายในขั้นตอนต่อไป
- เป็นการลดปริมาณน้ำออกจากผลปาล์มน้ำมัน

การอบไอน้ำและความดันทะลายสดปาล์มน้ำมันนี้ หากใช้เวลานานเกินไป จะทำให้เกิดการสูญเสียไขมันปาล์มได้ โดยทั่วไปแล้วการอบความดันและความร้อนตามเวลาที่กำหนดมาตรฐานก็จะมีโอกาสสูญเสียไขมันประมาณ 3% ในขณะที่เดียวกันการอบความดันและความร้อนในระยะที่สั้นไปก็จะทำให้ผลปาล์มน้ำมันจำนวนหนึ่งๆ ไม่สามารถหลุดจากทะลายชั้นตอนแยกผลปาล์มน้ำมัน

3) การแยกผลปาล์มออกจากทะลาย กระบวนการนี้จะถูกเข้าเครื่องนวด (stripping) ซึ่งเครื่องจะทำหน้าที่แยกผลปาล์มน้ำมันออกจากทะลาย หมดขั้นตอนนี้ก็จะได้ผลปาล์มน้ำมันและทะลายเปล่าแยกจากกัน ส่วนของผลปาล์มน้ำมันจะถูกส่งต่อไปยังขั้นตอนย่อยผล และส่วนของทะลายปาล์มน้ำมันจะถูกนำไปเผา หรือไปใช้ในสวนปาล์มน้ำมันอีกครั้งหนึ่งโดยใช้คลุมโคนต้น จากการผลวิเคราะห์ทะลายเปล่าจะมีแร่ธาตุหลายอย่างโดยเฉพาะธาตุโพแทสเซียมอาจมีสูงถึง 30-35% โดยน้ำหนัก และมีแมกนีเซียม 3-5% โดยน้ำหนัก

4) การย่อยผลปาล์มน้ำมัน (digestion) เพื่อย่อยเปลือกออกจากเมล็ด เมื่อเสร็จสิ้นขั้นตอนนี้จะมีส่วนของเปลือก (mesocarp) และส่วนของเมล็ด (seed) กระบวนการย่อยผลปาล์มน้ำมันจะต้องใช้ความร้อนประมาณ 95 องศาเซลเซียส โดยต้องควบคุมอุณหภูมิอยู่ในระดับนี้ตลอดไม่ให้สูง เพราะจะทำให้น้ำเดือด การย่อยนี้จะต้องมีความสม่ำเสมอทั่วถึง

5) การหีบน้ำมันปาล์ม เป็นกระบวนการต่อจากกระบวนการย่อยผลปาล์มน้ำมัน โดยที่จะเป็นเส้นทางของการทำน้ำมันปาล์ม ซึ่งเป็นน้ำมันที่สกัดจากชั้นเปลือกเท่านั้น เครื่องหีบน้ำมันปาล์มเป็นแบบเกลียวอัด แบบเครื่องปั่น หรือแบบอัด hydraulic การใช้เครื่องหีบแบบเกลียวอัด (screw press) ใช้

ความเร็วรอบ 10 รอบต่อนาที ขนาดของเครื่องอาจมีขนาดเล็กที่สามารถหีบน้ำมันปาล์ม 3 ตันต่อชั่วโมง ถ้าขนาดใหญ่ 13 ตันต่อชั่วโมง ส่วนเครื่องปั่น (centrifuge) ใช้ความเร็วรอบ 950-1250 รอบต่อนาที กำลังการผลิต 1-2 ตันต่อชั่วโมง ใช้เวลาการปั่นประมาณ 10 นาที การหีบน้ำมันโดยเครื่องปั่นนี้มีข้อดีคือ จะได้น้ำมันที่ไม่มีเศษกาก ส่วนเครื่องอัดนั้นจะสามารถบีบได้ประมาณ 5 ตันผลสดปาล์มน้ำมันต่อชั่วโมง น้ำมันที่ได้จากการหีบด้วยเครื่องปั่นจะมีน้ำ 40-50% และมีสิ่งเจือปนเล็กน้อย ส่วนน้ำมันดิบที่ได้จากการอัด จะมีน้ำ 55% โดยที่น้ำมันดิบจากเครื่องอัดเกลียวจะมีน้ำ 60% และสิ่งเจือปนมาก การหีบน้ำมันปาล์ม จะได้ผลผลิตออกมาเป็นน้ำมันปาล์มที่ยังคงมีสิ่งเจือปนและความชื้นอยู่จึงต้องผ่านขั้นตอนต่อไป

6) การกรองน้ำมัน กระบวนการกรองน้ำมันต่อน้ำมันดิบที่ได้จากการหีบ เพื่อแยกกากน้ำมัน ออก เครื่องกรองน้ำมัน จะเป็นแบบมีแผ่นกรองหลายชั้น เมื่อเสร็จสิ้นการกรองจะได้น้ำมันที่สะอาด ปราศจากกากน้ำมัน โดยเครื่องจะแยกกากออกไป

7) การแยกน้ำและสิ่งเจือปนออกจากน้ำมันดิบโดยใช้เครื่องเหวี่ยงความเร็วสูง ปกติน้ำมันที่ได้จากการกรองจะยังมีน้ำและสิ่งเจือปนอยู่ (มีน้ำปนอยู่ประมาณ 40-60%) การเหวี่ยงนี้อาศัยความเร็วสูงและความร้อนเข้าช่วย ก็จะสามารถแยกเอาน้ำและสิ่งเจือปนออกจากน้ำมันดิบได้ อุณหภูมิที่ใช้ประมาณ 85-95 องศาเซลเซียส น้ำมันจะอยู่ส่วนบน (ความถ่วงจำเพาะน้อยกว่าน้ำ) ส่วนน้ำก็ถูกแยกออกมาตามท่อ

8) การสกัดความชื้น น้ำมันดิบที่เข้าเครื่องเหวี่ยงเรียบร้อยแล้วจะยังคงมีความชื้นอยู่ จึงต้องสกัดความชื้นออกก่อนนำไปบรรจุในถังเพื่อส่งต่อไปยังโรงงานแปรรูปต่อไป น้ำมันดิบที่ได้จะต้องมีมาตรฐานความชื้นตามที่กำหนดสิ้นสุดกระบวนการสกัดความชื้นจะได้น้ำมันดิบ ซึ่งน้ำมันปาล์มที่ดีมีคุณภาพตามกำหนด โดยทั่วไปจะดูจากส่วนประกอบต่างๆ คือ

- กรดไขมันอิสระ (free fatty acid) ไม่เกิน 5%
- ความชื้นไม่เกิน 0.5%
- สิ่งเจือปนไม่เกิน 0.05%

จากกระบวนการสกัดน้ำมันปาล์มของโรงงาน โดยมีขั้นตอนตามลำดับตั้งแต่การนำผลผลิตเป็น ทะลายสดปาล์มน้ำมันมาอบด้วยไอน้ำความดันแล้วแยกผลปาล์มออกจากทะลาย ต่อจากนั้นย่อยผลปาล์ม น้ำมันซึ่งพองถึงขั้นตอนนี้จะได้ส่วนของน้ำมันปาล์ม (palm oil) ส่วนของกากใยและเมล็ดออกมาส่วนของ กากใยและเมล็ดที่ถูกแยกออกมานี้ก็คือส่วนของกากใยจากชั้น mesocarp และเมล็ดทั้งเมล็ด ซึ่ง ประกอบด้วยชั้นของกะลา (shell) และเนื้อใน (kernel) ในชั้นของเนื้อในนี้มีน้ำมันที่เรียกว่า palm kernel oil สำหรับขั้นตอนการคัดแยกกะลาและเนื้อในของโรงงานมีดังนี้ (พรชัย เหลืองอากาศ, 2549)

1) การแยกเมล็ด ส่วนของกากใยและเมล็ดจะถูกเข้าเครื่องแยกซึ่งจะแยกชั้นของกากใยออกไป ทางหนึ่งและเมล็ดไปทางหนึ่ง ส่วนของกากใยจะถูกส่งไปทำปุ๋ยในสวนปาล์มน้ำมันและใช้ประโยชน์ ต่างๆ หรือการนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงงานต่อไป โดยที่ส่วนของเมล็ด (seed) จะถูกส่งไปยัง กระบวนการการขั้นตอนต่อไปอีกทีเรียกว่า palm kernel oil

2) การอบเมล็ด เป็นกระบวนการอบเมล็ดเพื่อไล่น้ำออกจากส่วนของเมล็ด เมื่อสิ้นสุดขั้นตอนนี้ จะมีส่วนของเมล็ด ซึ่งประกอบด้วยชั้นของกะลา (shell) และเนื้อใน (kernel) ส่วนของน้ำจะถูกแยกออกไป

3) การกะเทาะเมล็ด เมล็ดปาล์มน้ำมันทั้งเมล็ด (seed) ที่ถูกเข้าสู่ขั้นตอนนี้จะถูกกะเทาะให้แตก เพื่อให้ได้เนื้อใน (kernel) แยกออกมา เสร็จสิ้นขั้นตอนนี้จะมีส่วนของกะลา (shell) และเนื้อใน (kernel)

4) การแยกเศษกะลา เป็นขั้นตอนการแยกเอาส่วนของกะลา (shell) ออกจากส่วนของเนื้อใน (kernel) ในขั้นตอนนี้จะแยกเอาส่วนของกะลาเปล่าออกไป ซึ่งก็จะถูกส่งไปใช้ประโยชน์ต่างๆ หรืออาจใช้เป็นเชื้อเพลิงโรงงาน อย่างไรก็ตามกะลาเหล่านี้สามารถนำไปแยกเพื่อทำ activated charcoal หรือถ่านกัมมันต์ได้ ส่วนของเนื้อในจะถูกส่งไปยังขั้นตอนต่อไป ซึ่งชั้นของ kernel จะเป็นส่วนที่มีน้ำมันที่เรียกว่า palm kernel oil อยู่

5) การอบเนื้อใน ส่วนของเนื้อในที่ได้จากขั้นตอนการกะเทาะ หรือแยกส่วนมาแล้ว จะมีปริมาณความชื้นอยู่ระดับหนึ่ง ในทางปฏิบัติจะต้องเอาความชื้นออก กระบวนการเอาความชื้นออกก็คือการอบเพื่อให้ไน้ระเหยออก การอบเนื้อในจะใช้อุณหภูมิ 50-55 องศาเซลเซียส ในเวลา 14-16 ชั่วโมง ซึ่งจะมี ความชื้นต่ำกว่า 7% เนื้อในที่ได้ออกมาจะถูกบรรจุกระสอบ แล้วนำส่งโรงงานสกัดน้ำมันจากส่วนของเนื้อใน เพื่อทำ palm kernel oil ต่อไป

2.2 ก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพ หมายถึง ก๊าซที่ได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ต่างๆ ในสภาพไร้อากาศ (anaerobic digestion) สารอินทรีย์จะประกอบด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจนเป็นส่วนใหญ่ เมื่อผ่านการย่อยสลายในสภาพไร้อากาศสารอินทรีย์ที่มี โครงสร้าง โมเลกุลใหญ่ และ สลับ ซับซ้อน อัน ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมันสารอินทรีย์จะถูกย่อยสลายเป็นโมเลกุลที่เล็กลง และเกิดการสร้างเป็น ก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์รวมทั้งก๊าซอื่นๆบางชนิด (Alonso-Vicario *et al.*, 2010)

องค์ประกอบหลักของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นโดยขบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ คือ

1. ก๊าซมีเทน (CH_4) ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลัก และมีสมบัติเป็นก๊าซเชื้อเพลิง มีสัดส่วนร้อยละ 65-70
2. ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) เป็นส่วนประกอบรอง และมีสมบัติเป็นก๊าซเฉื่อยไม่ติดไฟ มีสัดส่วนประมาณร้อยละ 28-33
3. ก๊าซอื่นๆ เช่น ก๊าซไฮโดรเจน (H_2) ก๊าซไนโตรเจน (N_2) ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) เป็นต้น มีสัดส่วนประมาณร้อยละ 1-2

ก๊าซชีวภาพที่มีก๊าซมีเทนมากกว่าร้อยละ 50 เมื่อผสมอากาศมากกว่า 5-7 เท่า สามารถจุดไฟติดได้ที่อุณหภูมิประมาณ 600-700 องศาเซลเซียส และให้พลังงานความร้อน ดังนั้นก๊าซชีวภาพจึงสามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทน เพื่อทดแทนพลังงานอื่นๆ ได้ (ศูนย์ประสานงานโครงการส่งเสริมเทคโนโลยี ก๊าซชีวภาพ, 2551)

กระบวนการผลิตก๊าซมีเทนจะอาศัยแบคทีเรียที่สำคัญ 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ไม่สร้างมีเทน (non-methanogenic bacteria) และกลุ่มที่สร้างมีเทน (Methanogenic bacteria) ซึ่งแบ่งได้เป็น 3 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) การย่อยสลาย (Hydrolysis)

อินทรีย์สารที่อยู่ในรูปโมเลกุลใหญ่ ซึ่งแบคทีเรียไม่สามารถย่อยสลายได้ทันที ซึ่งจำเป็นต้องทำให้เกิดการแตกตัวเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กเสียก่อน โดยอาศัยเอนไซม์ที่ปล่อยมาจากแบคทีเรียช่วงเร่งให้เกิดการแตกตัว โมเลกุลของอินทรีย์สารถูกดูดซึมเข้าสู่เซลล์ของแบคทีเรียได้โดยตรง สำหรับการย่อยสลายของสารอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ ได้แก่ ไขมัน โพลีแซคคาไรด์ โปรตีน และกรดนิวคลีอิก ให้อยู่ในรูปของสารประกอบอินทรีย์ที่มีขนาดเล็กลง เช่น กรดไขมัน โมโนแซคคาไรด์ ไดแซคคาไรด์ กรดอะมิโนพิวรีน และไพริมิดีน โดยอาศัยกลุ่มแบคทีเรียพวกไม่สร้างมีเทนที่ปนเปื้อนอยู่ในน้ำเสียโดยทั่วไป เช่น *Clostridium* sp. ซึ่งเป็นแบคทีเรียแกรมลบที่มีคุณสมบัติในการสร้างสปอร์ และผลิตเอนไซม์ โปรติเอส พบประมาณ 6.5×10^7 สปอร์/มิลลิเมตร ลักษณะเซลล์รูปแท่ง และรูปกลม มีคุณสมบัติในการผลิตเอนไซม์ไลเปส นอกจากนี้ยังมีแบคทีเรียแกรมลบรูปกลม เช่น *Bacteroides suminicola* พบประมาณ 10^4 - 10^8 เซลล์/มิลลิเมตร ซึ่งมีคุณสมบัติในการผลิตเอนไซม์เซลลูเลส นอกจากนี้ยังพบแบคทีเรียแกรมบวก และแกรมลบอีกหลายชนิดที่แยกได้จากกากตะกอน ซึ่งมีคุณสมบัติในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียได้ สำหรับประเภท และชนิดของแบคทีเรียที่พบในแต่ละขั้นตอนนี้จะขึ้นอยู่กับชนิดน้ำเสีย โดยขั้นตอนนี้เป็นเพียงการเปลี่ยนรูปของสารอินทรีย์เท่านั้น

2) การสร้างกรด (Acid Formation, Acidogenesis)

ขั้นตอนนี้แบคทีเรียจะย่อยสลายสารโมเลกุลที่เล็กลง ซึ่งเกิดจากการแตกตัวของสารโมเลกุลใหญ่จากขั้นตอนแรกเปลี่ยนเป็นกรดอินทรีย์ (Organic acid) ได้แก่ กรดอะซิติก น้ำ และคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น โดยอาศัยกลุ่มของแบคทีเรียที่อยู่ได้ทั้งในสภาพที่มีออกซิเจน หรือไม่มีออกซิเจน (Facultative bacteria) หรือ อาจเรียกว่าเป็นพวก Acid former bacteria ขั้นตอนนี้จะอาศัยแบคทีเรียกลุ่มที่สร้างกรด เช่น *Bacillus* sp., *Clostridium* spp., *Pseudomonas* sp., *Peptococcus anaerobes*, *Bifidobacterium* spp., *Desulphoribrio* spp., *Corynebacterium* spp., *Lactobacillus*, *Actinomyces*, และ *Escherichia coli*. โดยส่วนใหญ่เป็นแบคทีเรียชนิดที่ไม่ต้องการอากาศร้อยละ 99 และพบแบคทีเรียพวกที่ต้องการอากาศเพียงร้อยละ 1 เท่านั้น แบคทีเรียเหล่านี้จัดอยู่ในกลุ่มพวกที่ไม่สร้างก๊าซมีเทน ซึ่งจะใช้สารประกอบเคมีโมเลกุลเล็ก ได้แก่ โมโนแซคคาไรด์ ไดแซคคาไรด์ กรดไขมันกรีเซอร์ไรด์ กรดอะมิโน และ เปปไทด์ ที่ได้จากการย่อยสลายสารอินทรีย์ในขั้นตอนแรกเป็นแหล่งคาร์บอนในการเจริญเติบโต โดยผลผลิตหลักที่สำคัญจากกระบวนการนี้ คือ กรดไขมันระเหยง่าย คาร์บอนไดออกไซด์ และแอมโมเนีย สำหรับแอมโมเนีย อัลดีไฮด์ และคีโตน ที่ถูกสร้างขึ้นนี้จัดเป็นผลิตภัณฑ์รองโดยผลผลิตเหล่านี้เป็นสารตัวกลางที่ถูกเปลี่ยนรูปต่อไปเป็นก๊าซมีเทน โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรดไขมันระเหยง่าย ได้แก่ กรดอะซิติก กรดโพรวินอนิก กรดบิวทิริก และกรดแลคติก จะเป็นผลิตภัณฑ์หลักที่ถูกเปลี่ยนรูปไปเป็นมีเทน มีรายงานว่า

Methane

2.3 การย่อยสลายร่วมแบบไร้อากาศ (co-digestion) จากน้ำเสียและวัสดุเศษเหลือโรงงานอุตสาหกรรม เกษตร

ตัวย่อยร่วมนั้นมีความสำคัญในการช่วยเพิ่มการผลิตก๊าซชีวภาพ ส่วนใหญ่ตัวย่อยร่วมจะเป็นวัสดุเศษเหลือทางการเกษตร มูลสัตว์ เพราะเป็นแหล่งช่วยเพิ่มสารอาหารในโตรเจนเพื่อใช้ในการสร้างเซลล์หรือเพิ่มตัวเชื้อในการย่อยให้มากขึ้น (Angelidaki and Ellegaard, 2003 ; Bolzonella *et al.*, 2006)

สมฤดี ฤทธิยากุล (2551) รายงานว่าการเติมน้ำหรือของเหลวเข้าไปในระบบ ไร้อากาศเพื่อรักษาปริมาณของแข็งรวมที่เหมาะสมจะสามารถทำให้การผสมดีขึ้นและสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ดีขึ้น จากการทดลองการหมัก ไร้อากาศของมูลสุกรร่วมกับสาหร่ายหนามที่อัตราส่วนผสม 50:50 และมีความเข้มข้นของของแข็งเท่ากับร้อยละ 5, 10 และ 20 พบว่า หลังจากการหมัก 12 วัน ความเข้มข้นของของแข็งร้อยละ 20 สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงสุด เท่ากับ 1,805 มล. ขณะที่ความเข้มข้นของของแข็งร้อยละ 5 และ 10 สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 1,427 และ 899 มล.ตามลำดับ อย่างไรก็ตามเมื่อศึกษาองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ พบว่า เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของของแข็งจะมีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนลดลง โดยผลผลิตก๊าซมีเทนมีค่าเท่ากับ 0.145, 0.042 และ 0.023 มล.มีเทน/มก.VS ที่ถูกกำจัด นอกจากนี้ อัตราการป้อนสารอินทรีย์และระยะเวลาเก็บกักสารอินทรีย์เป็นอีกปัจจัยที่สำคัญในการผลิตก๊าซชีวภาพ จากการศึกษาผลของอัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่ระดับ 2, 4 และ 6 กก.VS/ม³-วัน ซึ่งมีผลให้ระยะเวลาเก็บกักเท่ากับ 15, 7.5 และ 5 วัน โดยใช้ระบบกึ่งต่อเนื่องและความเข้มข้นของของแข็งในสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าระบบเท่ากับร้อยละ 5 พบว่าการเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์ส่งผลให้การผลิตก๊าซชีวภาพ และผลผลิตมีเทนลดลงจาก 0.155 มล.มีเทน/มก.VS ที่ถูกกำจัด เป็น 0.095 และ 0.053 มล.มีเทน/มก.VS ที่ถูกกำจัดตามลำดับ

จิรสมัย คลชม (2551) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากกรดอินทรีย์ระเหยที่ผ่านถังหมักกรดเข้าสู่ถังหมักก๊าซในระบบการหมักแบบสองขั้นตอน ระบบประกอบด้วยถังหมักก๊าซที่มีปริมาตร 2,000 ลิตร มีปริมาตรการหมัก 1,250 ลิตร และมีการผสมอย่างสมบูรณ์ และดำเนินระบบด้วยการเติมของเหลวกรดอินทรีย์เข้าสู่ถังหมักก๊าซโดยมีปริมาตรของเหลวที่เติม 16 ลิตรต่อวัน มีความเข้มข้นร้อยละ 30, 40, 50 และ 60 (น้ำหนักต่อปริมาตร) ตามลำดับ ระยะเวลาเก็บกักสารอินทรีย์ 78 วัน คิดเป็นอัตราการบรรทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 1.94, 2.11, 2.43 และ 2.72 กรัมซีโอดีต่อลิตร.วัน ตามลำดับ ผลการศึกษา พบว่าเมื่อปริมาณกรดอินทรีย์ระเหยในระบบเพิ่มขึ้น ปริมาณก๊าซชีวภาพมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นด้วยจนถึงระดับหนึ่งคือที่ 50 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักต่อปริมาตร) มีปริมาตรของเหลวกรดอินทรีย์ระเหยเข้าระบบ 12,109 มิลลิกรัมต่อลิตร สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงที่สุด 1,118.96 ลิตรต่อวัน มีเปอร์เซ็นต์มีเทนร้อยละ 58.84 และมีประสิทธิภาพการกำจัด COD, BOD, TS, TVS และ VFA สูงสุด คือ 91.71, 91.18, 91.95, 94.40 และ 80.13 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และเมื่อเพิ่มความเข้มข้นเป็น 60 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาตรของเหลวกรดอินทรีย์ระเหยเข้าระบบ 15,713 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่าอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพ และประสิทธิภาพ

การกำจัดของระบบมีแนวโน้มลดลง คือ ระบบสามารถผลิตก๊าซได้เพียง 230.50 ลิตรต่อวัน มีเปอร์เซ็นต์มีเทนร้อยละ 20.61 และมีประสิทธิภาพการกำจัดต่ำสุด เป็น 84.90, 84.06, 83.86, 92.20 และ 70.03 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากที่ 60 เปอร์เซ็นต์ ระบบมีการสะสมของกรดอินทรีย์ระเหยค่อนข้างสูงเป็นสาเหตุที่ทำให้แบคทีเรียที่ผลิตก๊าซมีเทนไม่สามารถทนต่อสภาวะที่ไม่เหมาะสมได้ และไม่ผลิตก๊าซในที่สุด

Boubaker และ Ridha (2007) ศึกษาการย่อยร่วมกันแบบไม่ใช้อากาศระหว่างน้ำเสียจากโรงงานผลิตน้ำมันมะกอกกับของเสียที่เป็นของแข็งจากโรงงานผลิตน้ำมันมะกอกแบบกึ่งต่อเนื่องที่อุณหภูมิปานกลาง อัตราการย่อยทุกสารอินทรีย์ที่ 0.67 และ 6.67 กรัมซีโอดี/ลิตร-วัน มีระยะเวลาเก็บกักสารอินทรีย์ที่ 12 24 และ 36 วัน ความเข้มข้นของน้ำเสียที่ใช้เท่ากับ 24 56 และ 80 กรัมซีโอดี/ลิตร และ ปริมาณของเสียที่ใช้ เท่ากับ 56 กรัม/ลิตรของน้ำเสีย ผลการทดลองพบว่าการผลิตก๊าซมีเทนที่ดีที่สุดเท่ากับ 0.95 ลิตร/ลิตร-วัน เมื่อเดินระบบที่อัตราการย่อยทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 4.67 กรัมซีโอดี/ลิตร-วัน (ความเข้มข้นของน้ำเสียที่ใช้เท่ากับ 56 กรัมซีโอดี/ลิตร) และ ระยะเวลาเก็บกักสารอินทรีย์เท่ากับ 12 วัน แต่ประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์ที่มากที่สุดเท่ากับ 89% ที่อัตราการย่อยทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 0.67 กรัมซีโอดี/ลิตร-วัน (ความเข้มข้นของน้ำเสียที่ใช้เท่ากับ 24 กรัมซีโอดี/ลิตร) และ ระยะเวลาเก็บกักสารอินทรีย์เท่ากับ 36 วัน โดยที่การผลิตก๊าซชีวภาพจะถูกยับยั้งเมื่อเดินระบบที่อัตราการย่อยทุกสารอินทรีย์ที่สูงกว่า 4.67 กรัมซีโอดี/ลิตร-วัน

Azbar และคณะ (2008) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียกระบวนการผลิตน้ำมันมะกอก (olive mill effluent, OME) เพียงอย่างเดียวเปรียบเทียบกับการใช้น้ำเสียจากกระบวนการผลิตน้ำมันมะกอกร่วมกับเวย์จากการทำชีส (cheese whey, CW) และ เศษที่ใช้วางรองในการวางไข่ของไก่ (laying hen litter, LHL) พบว่า การใช้ OME ร่วมกับ LHL สามารถเพิ่มการผลิตก๊าซชีวภาพได้ถึง 90% ขณะที่การใช้ OME ร่วมกับ CW สามารถเพิ่มการผลิตก๊าซชีวภาพได้ถึง 20% เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ OME เพียงอย่างเดียว

Boubaker และ Ridha (2008) ศึกษาการย่อยสลายร่วมกันระหว่างน้ำเสียจากโรงงานผลิตน้ำมันมะกอกกับของเสียจากกระบวนการสกัดน้ำมันมะกอก การทดลองนี้เป็นการย่อยแบบบะ ที่ระดับอุณหภูมิปานกลางคือ 37°C แต่ละการย่อยมีการป้อนน้ำเสียจากโรงงานผลิตน้ำมันมะกอก เป็นสารตั้งต้นหลักและของเสียที่เป็นของแข็งจากโรงงาน เป็นสารตั้งต้นร่วมที่ปริมาณแตกต่างกันคือ 28 56 112 และ 150 กรัมTS/ลิตร ของน้ำเสีย ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่า อัตราที่เหมาะสมของของเสียที่เป็นของแข็งที่ถูกใช้ป้อนร่วม คือ 56 กรัมTS/ลิตร ของน้ำเสีย สามารถเพิ่มผลผลิตก๊าซชีวภาพจาก 11.17 ± 2.5 ลิตร/ลิตร เป็น 30.5 ± 2.5 ลิตร/ลิตร และเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดีจาก $44.5 \pm 3\%$ เป็น $83.4 \pm 2\%$ เมื่อเปรียบเทียบกับใช้น้ำเสียเพียงอย่างเดียว นอกจากนี้ยังมีการลดเวลาเริ่มต้นในการผลิตก๊าซชีวภาพในสภาวะคงที่จาก 65 ± 25 วัน เป็น 28 ± 15 วัน

Dareioti และคณะ (2009) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมโดยใช้การย่อยสลายร่วมในสภาวะไร้อากาศแบบสองขั้นตอนที่อุณหภูมิปานกลางโดยใช้กระบวนการสองขั้นตอนในการทดลองใช้น้ำเสียโรงงานอุตสาหกรรมเป็นสารตั้งต้น เช่น น้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันมะกอก (Olive Mill Wastewater : OMW) เป็นวัสดุหลักในการหมักและใช้น้ำเสียมูลวัว (Liquid Cow Manure : LCM) และหางนม (Cheese Whey : CW) เป็นวัสดุร่วมในการหมัก ใช้ถังปฏิกรณ์ (Continuous Stirred Tank Reactor, CSTR) สองถังในการผลิตกรดอินทรีย์และการผลิตก๊าซมีเทนที่อุณหภูมิ 35°C โดยมีระยะเวลาเก็บกักสารอินทรีย์ 19 วัน ช่วงสภาวะเริ่มต้นระบบในถังหมักกรดใช้ถังปฏิกรณ์ CSTR ในช่วงเริ่มต้นใช้ถังปฏิกรณ์หมักกรดมีปริมาตรการหมัก 750 มิลลิลิตร ประกอบด้วยน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันมะกอกร้อยละ 55 หางนมร้อยละ 40 และน้ำเสียมูลวัวร้อยละ 5 โดยใช้การหมักแบบกะเป็นเวลา 72 ชั่วโมงเพื่อปรับสภาพกลุ่มเชื้อจุลินทรีย์ ควบคุมระยะเวลาเก็บกักสารอินทรีย์เท่ากับ 3 วันของถังผลิตกรดอินทรีย์ และในถังผลิตมีเทนควบคุมระยะเวลาเก็บกักสารอินทรีย์เท่ากับ 16 วัน (สัดส่วนระยะเวลาเก็บกักสารอินทรีย์เท่ากับ 1:5) ควบคุมสภาวะนี้ในถังปฏิกรณ์เป็นเวลา 87 วัน ควรมีอัตราส่วนค่าซีโอดีต่อไนโตรเจนเท่ากับ 400 : 7 เพื่อให้เกิดความสมดุลของการรับอนและไนโตรเจน ในวันที่ 88 ของการหมักมีการเติมสารตั้งต้นโดยใช้หางนมร้อยละ 90 และน้ำเสียมูลวัวร้อยละ 10 เพื่อเพิ่มแหล่งไนโตรเจน ได้ผลการบำบัดค่าซีโอดีในช่วงแรก (อัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 5.5 กรัมซีโอดีต่อลิตร-วัน) และช่วงที่สอง (อัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์เท่ากับ 4.5 กรัมซีโอดีต่อลิตร-วัน) เท่ากับร้อยละ 75.5 และ 85.2 ในถังผลิตกรดสามารถผลิตกรดอะซิติกได้สูงสุดในช่วงแรกและช่วงที่สองเท่ากับ 3302 และ 4913 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนถังผลิตมีเทนใช้น้ำเสียที่ออกจากถังผลิตกรดป้อนเข้าสู่ระบบได้อัตราผลผลิตมีเทนในช่วงแรกและช่วงที่สองเท่ากับ 1.35 และ 1.33 ลิตรของมีเทนต่อลิตรของถังปฏิกรณ์ต่อวัน

Boubaker และ Ridha (2010) ศึกษาการย่อยสลายร่วมกันแบบไม่ใช้อากาศสองขั้นตอนของเสียจากโรงงานผลิตน้ำมันมะกอกแบบกึ่งต่อเนื่อง ที่อุณหภูมิปานกลาง (37°C) แต่ละการย่อยมีการป้อนน้ำเสียจากโรงงานผลิตน้ำมันมะกอก เป็นสารตั้งต้นหลักและของเสียที่เป็นของแข็งจากโรงงานเป็นสารตั้งต้นร่วม ทำการทดลองในระยะแรกขั้นตอนการสร้างกรดมีระยะเวลาเก็บกักสารอินทรีย์ที่ 14 และ 24 วัน ซึ่งสอดคล้องกับอัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์ตั้งแต่ 5.54 - 14 กรัมซีโอดี/ลิตร/วัน และในขั้นตอนที่สองการผลิตก๊าซมีเทน ระยะเวลาเก็บกักสารอินทรีย์ที่ 18, 24 และ 36 วัน ตรงกับอัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์ตั้งแต่ 2.28 - 9.17 กรัมซีโอดี/ลิตร/วัน ผลการวิจัยพบว่ากรดไขมันระเหยเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาเก็บกักสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นและความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่มีอิทธิพลมากที่สุดคือ (196 ± 5 กรัมซีโอดี/ลิตร) การย่อยสลายที่ระยะเวลาเก็บกักสารอินทรีย์ที่ยาวที่สุด (24 วัน) ซึ่งสอดคล้องกับอัตราการบำบัดทุกสารอินทรีย์ 8.17 กรัมซีโอดี/ลิตร/วัน นอกจากนี้ขั้นตอนการย่อยสลายในระบบแบบไร้อากาศแบบสองขั้นตอน ซึ่งมีระยะเวลาเก็บกักสารอินทรีย์ในขั้นผลิตกรดที่ 24 วัน และระยะเวลาเก็บกักสารอินทรีย์ในขั้นผลิตมีเทนที่ 36 วัน (สัดส่วนระยะเวลากักเก็บสารอินทรีย์เท่ากับ 2:3) ในการย่อยสลายแบบสองขั้นตอนนี้มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดในเรื่องของผลผลิตมีเทน ประสิทธิภาพในการกำจัดค่าซีโอดี

ทั้งหมดและค่าซีไอดีที่ละลายน้ำได้น้ำเสียเมื่อเทียบกับการย่อยสลายในระบบแบบไร้อากาศแบบขั้นตอนเดียว

2.4 การทำบริสุทธิ์ก๊าซมีเทน

จากองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพนอกจากมีก๊าซมีเทน ยังมีองค์ประกอบของก๊าซอื่นๆ ได้แก่ ความชื้น CO_2 และ H_2S และไอน้ำ Osorio และ Torres (2009) รายงานว่าการทำให้ก๊าซมีเทนบริสุทธิ์เพื่อนำไปใช้ประโยชน์มากขึ้นและมีค่าพลังงานที่สูงขึ้น โดยทำการแยกไอน้ำและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซชีวภาพ

1) ความชื้น (Water vapor) : ความชื้นที่มีอยู่ในก๊าซชีวภาพจะมีผลในเรื่องการกัดกร่อนเมื่ออุณหภูมิของก๊าซลดลง ไอน้ำจะกลั่นตัวและรวมตัวกับก๊าซ CO_2 , NH_3 และ H_2S กลายเป็นกรด ซึ่งสามารถกัดกร่อนอุปกรณ์ที่ใช้ มีผลทำให้อายุการใช้งานของอุปกรณ์ลดลง นอกจากนี้ความชื้นยังมีผลต่อค่าความร้อนของก๊าซชีวภาพ โดยทำให้ก๊าซชีวภาพมีค่าความร้อนลดลง ถึงแม้ปริมาณ CH_4 เท่ากัน

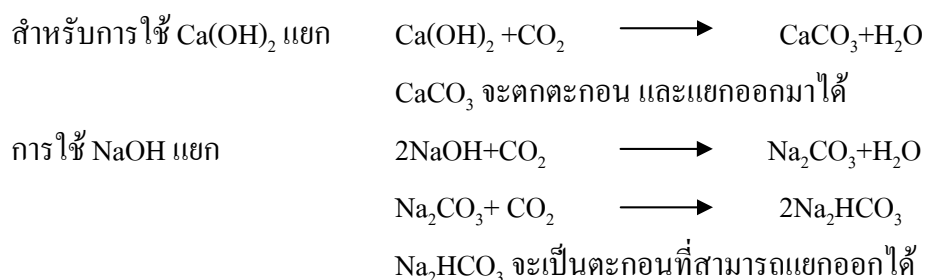
2) ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) : ก๊าซ H_2S เป็นก๊าซไม่มีสี สามารถได้กลิ่นถึงแม้มีความเข้มข้นต่ำและเป็นสารกัดกร่อนเมื่อรวมตัวกับน้ำ นอกจากนี้เมื่อเผาไหม้ก๊าซชีวภาพ ก๊าซ H_2S จะเปลี่ยนรูปได้ก๊าซ SO_2 ซึ่งเป็นสารกัดกร่อนเมื่อรวมตัวกับน้ำเช่นกัน

3) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) : ก๊าซ CO_2 มีผลในเรื่องค่าความร้อนของก๊าซ โดยก๊าซชีวภาพที่มีองค์ประกอบของ CO_2 ในเปอร์เซ็นต์สูง ทำให้มีเปอร์เซ็นต์ CH_4 ต่ำด้วย ซึ่งมีผลให้ก๊าซชีวภาพที่ได้มีค่าความร้อนต่ำเช่นกัน

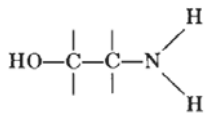
การทำบริสุทธิ์ก๊าซชีวภาพมีหลายวิธีดังแสดงในตารางที่ 1 แต่สำหรับวิธีทำบริสุทธิ์ก๊าซโดยการแยก CO_2 และ H_2S ออกจากก๊าซชีวภาพ มีรายละเอียดดังนี้

1) การใช้สารละลายต่าง (Alkaline salt)

เนื่องจาก CO_2 ละลายน้ำ วิธี Water scrubbing เป็นวิธีที่ง่ายที่ใช้ในการกำจัด CO_2 จากก๊าซชีวภาพ แต่ต้องใช้น้ำปริมาณมาก CO_2 เป็นก๊าซที่มีความเป็นกรดสามารถดูดซึมในสารละลายที่เป็นด่าง มีด่าง 2 ชนิดที่ใช้ในการกำจัด CO_2 คือ NaOH และ Ca(OH)_2 ซึ่งปฏิกิริยามีดังนี้ (ศุวศา กานตวนิชกูร, 2535)

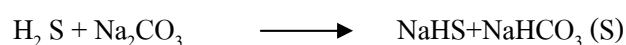


ตารางที่ 1 การทำบริสุทธิ์ก๊าซชีวภาพ

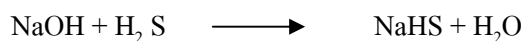
Target compound	Process Type	Process alternatives available
1. Water ⁽¹⁾	Adsorption	1) Silica gel 2) Molecular sieves
	Absorption	1) Ethylene glycol (at low temperature: -20 °C) 2) Selexol
2. CO ₂ และ H ₂ S ⁽²⁾	Absorption	1) Alkaline salt - Ca(OH) ₂ - NaOH
		2) Organic solvents - Dimethyl ether of polyethylene glycol (DMPEG) Selexol [®]
		3) Alkanolamines - mono-ethanol-amine (MEA)
		
	Membrane separation	1) Molecular sieves 2) Activated carbon

ที่มา : ⁽¹⁾ Walsh และคณะ (1989) ; ⁽²⁾ ดัดแปลงจาก Lise และคณะ (2008); Arthur และ Richard (1997)

Na₂CO₃ ที่เกิดขึ้นจากการแยก CO₂ สามารถใช้กำจัด H₂S ในก๊าซชีวภาพได้ โดยให้มีเวลาสัมผัสที่เพียงพอ



การใช้สารละลาย NaOH เพื่อแยกก๊าซ H₂S ออกจากก๊าซชีวภาพมีสมการดังนี้ (Arthur and Richard, 1997)

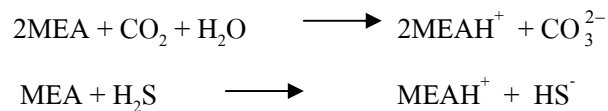


Ruihong และ คณะ (2007) ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากเศษอาหาร ทำการหมักสภาวะไร้อากาศ โดยใช้ถังหมักแบบกะ ที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส วิเคราะห์ค่าความชื้น และสัดส่วนของแข็งระเหยง่ายต่อของแข็งทั้งหมดทุกสัปดาห์ มีค่าเท่ากับร้อยละ 70 และ 83 มีผลผลิตก๊าซชีวภาพที่ได้เท่ากับ 0.6 ลิตร/กรัมของแข็งระเหยง่าย ผลผลิตมีเทนที่ได้เท่ากับ 0.44 ลิตร/กรัมของแข็งระเหยง่าย หลังจากทำ

บริสุทธิ์ก๊าซชีวภาพโดยผ่านสารละลาย 5% NaOH พบว่ามีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนร้อยละ 73 ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ร้อยละ 27 ทำให้พลังงานความร้อนเพิ่มขึ้นจาก 27.2 MJ/m^3 เป็น 37.3 MJ/m^3 ตามปริมาณก๊าซมีเทนที่เพิ่มขึ้น

2) การใช้สารกลุ่ม Alkanolamines

สารละลาย Monoethanolamine (MEA) ใช้เป็นสารที่กำจัด คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) โดยมีปฏิกิริยาดังนี้ (Hamid and Dariush, 2008)



ปกรณ ฤนอมพงษ์ชาติ (2552) ศึกษาการแยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซชีวภาพ โดยการดูดซับด้วยของเหลวในคอลัมน์อัดตัว โดยเลือกชนิดของ สารละลายโมโนเอทานอลเอมีน สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ และสารละลายปูนขาว มีความเข้มข้นของสารละลายเท่ากับ 0.1 0.2 และ 0.3 โมลาร์ อัตราการไหลของสารละลาย 1 2 และ 3 ลิตร/นาที่ อัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ 1 2 และ 3 ลิตร/นาที่ และศึกษาวัสดุตัวกลางเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวบรรจุในคอลัมน์ ได้แก่ ไบโอบอล ฝาชวดน้ำเจาะรู และพรมเช็ดเท้าพลาสติกตัด โดยขนาดของคอลัมน์ที่ใช้ทดสอบมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 7 เซนติเมตร สูง 1 เมตร ใส่วัสดุเพิ่มพื้นที่ผิวสูง 70 เซนติเมตร จากการทดสอบ พบว่าสภาวะที่เหมาะสมมากที่สุดต่อการแยกคาร์บอนไดออกไซด์ ทั้งในด้านประสิทธิภาพและความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของแต่ละสารละลายคือ สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ อัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ 3 ลิตรต่อนาที่ และอัตราการไหลของสารละลาย 3 ลิตรต่อนาที่ มีประสิทธิภาพ 94.4 % สารละลายโมโนเอทานอลเอมีนความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ อัตราการไหลก๊าซชีวภาพ 3 ลิตรต่อนาที่ และอัตราการไหลสารละลาย 2 ลิตรต่อนาที่ มีประสิทธิภาพ 91.9 % สารละลายปูนขาวความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ อัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ 2 ลิตรต่อนาที่ และอัตราการไหลของสารละลาย 2 ลิตรต่อนาที่ มีประสิทธิภาพ 83.05 % ส่วนการใช้วัสดุตัวกลางเป็น ไบโอบอล ฝาชวดน้ำเจาะรู สามารถกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกัน

Appels และคณะ (2008) รายงานว่าในกระบวนการ absorption ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (polar) จะถูกดูดซับด้วย binding force ที่แตกต่างจากก๊าซมีเทน (non-polar) เนื่องจากความมีขั้วที่ต่างกัน สำหรับการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซมีเทนโดยใช้ organic solvents สารที่ใช้ได้แก่ polyethyleneglycol (Selexol®), Genosorb®) และ alkanol amines (mono-ethanol-amine, di-ethanol-amine) เพื่อละลายก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ กระบวนการนี้สามารถทำได้ด้วยความดันต่ำ และสารดังกล่าวสามารถนำกลับมาใช้ใหม่เมื่อผ่านไอน้ำ ขณะที่กระบวนการ PSA จะต้องใช้อุณหภูมิและ

ความดันที่สูง ถึงแม้จะเป็นกระบวนการที่ง่ายแต่เสียค่าใช้จ่ายสูง สำหรับกระบวนการ cryogenic separation เป็นอีกกระบวนการที่เสียค่าใช้จ่ายสูงโดยอาศัยหลักการความแตกต่างของจุดเดือด มีเทนมีจุดเดือดอยู่ที่ 160 องศาเซลเซียส ขณะที่ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์มีจุดเดือดที่ -78 องศาเซลเซียส ดังนั้นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์สามารถถูกกำจัดในรูปของเหลวโดยลดอุณหภูมิของก๊าซชีวภาพลง และเพิ่มความดัน ในปัจจุบันวิธีที่ได้รับความสนใจคือการใช้เมมเบรน เช่น acetate-cellulose polymer ซึ่งมีความสามารถในการยอมให้ผ่านของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์มากกว่าก๊าซมีเทนถึง 20-60 เท่า ภายใต้ความดัน 25 bar

3) การใช้วิธีการดูดซับ

Arouaa และคณะ (2008) รายงานว่าการใช้เทคนิคของ carbon molecular sieves (CMS) เป็นการแยกก๊าซโดยหลักการการดูดซับทางกายภาพตามขนาดของรูพรุนของวัสดุดูดซับ ขณะที่ การใช้เทคนิค molecular sieves ที่ใช้หลักการของการเกิดปฏิกิริยาเคมีระหว่างผิวของตัวดูดซับกับตัวดูดซับ เรียกว่า molecular basket (MB) ซึ่งส่วนใหญ่ใช้วัสดุประเภทซิลิกา (silica-based material) ที่ถูกปรับโครงสร้างด้วยพอลิเมอร์ polyethyleneimine (PEI) จากงานวิจัยของ Arouaa และคณะ (2008) ได้ศึกษาโดยใช้ กะลาปาล์ม (palm shell-based activated carbon) เพื่อใช้เป็น carbon molecular basket (CMB) และปรับโครงสร้างโดยใช้ PEI ทำการศึกษาผลของปริมาณ PEI (0.06, 0.11, 0.13, 0.26, 0.27, 0.28 และ 0.29% โดยน้ำหนัก) ที่ใช้ต่อการดูดซับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน ออกซิเจนและ ไนโตรเจน ผลการทดลองพบว่าการเพิ่มปริมาณ PEI จนถึง 0.26% ทำให้เพิ่มความสามารถในการดูดซับก๊าซมากขึ้น โดยการใช้ PEI และการดูดซับก๊าซลดลงเมื่อเพิ่ม PEI เป็น 0.28 และ 0.29% โดยน้ำหนัก ความสามารถในการดูดซับของก๊าซแต่ละชนิดพบว่า $CO_2 \gg CH_4 > O_2 > N_2$

Xu และคณะ (2009) รายงานว่า การใช้วิธีการดูดซับ (adsorption) ในการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นวิธีการที่ง่าย ใช้พลังงานต่ำ วัสดุที่ใช้ในการดูดซับได้แก่ zeolite, activated carbons และ carbon molecular sieves อย่างไรก็ตามการดูดซับเพียงอย่างเดียวมีค่า selectivity ต่ำ Xu และคณะ (2009) จึงได้ศึกษาการพัฒนาตัวดูดซับให้มี selectivity สูง โดยใช้ monoethanol amine (MEA) เพื่อปรับปรุงสมบัติเชิงหน้าที่ของตัวดูดซับ ทำการทดลองโดยใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ มีเทน และ ไนโตรเจน ผลการทดลองพบว่า การใช้ zeolite ที่ถูกปรับปรุงสมบัติเชิงหน้าที่โดย MEA สามารถเพิ่ม selectivity ของก๊าซผสมทั้ง CO_2/CH_4 และ CO_2/N_2 โดย selectivity ของ CO_2/CH_4 และ CO_2/N_2 เท่ากับ 7.7 และ 25.67 ตามลำดับ เมื่อใช้ MEA 40% โดยน้ำหนัก ที่ 1 atm และ 303K

บทที่ 3

วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 ลักษณะของน้ำเสียและวัสดุเศษเหลือของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

เก็บตัวอย่างน้ำเสียจากบ่อรวบรวมน้ำเสียของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มแบบจ้วง (grab sample) วิเคราะห์ต่างๆ ได้แก่ พีเอช บีโอดี ซีโอดี ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยได้ทั้งหมด ของแข็งแขวนลอย และปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (AOAC, 1990; APHA, AWWA and WEF, 1998)

เก็บตัวอย่างวัสดุเศษเหลือของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ได้แก่ เส้นใยปาล์ม ทะลายปาล์ม และกากตะกอนดีแคนเตอร์ ตากให้แห้งแล้วนำไปอบที่ 60 องศาเซลเซียส นำไปบดด้วยเครื่อง Hammer mill โดยใช้ตะแกรงขนาด 1.0 มิลลิเมตร จากนั้นร่อนผ่านตะแกรงและเอาสารที่รูดผ่านที่มีขนาด 16 เมช วิเคราะห์ต่างๆ ได้แก่ ของแข็งระเหยได้ทั้งหมด และปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (AOAC, 1990; APHA, AWWA and WEF, 1998)

3.2 ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพมีเทนโดยใช้น้ำเสียร่วมกับวัสดุเศษเหลือของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มโดยการวางแผนการทดลองแบบที่ละปัจจัย

3.2.1 ผลของชนิดวัสดุเศษเหลือโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มต่อการผลิตก๊าซชีวภาพในระบบแบบกะ

ทำการทดลองในขวดหมักขนาด 1 ลิตร แบบไม่มีการกวนผสม เติมน้ำเสียและวัสดุเศษเหลือของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ได้แก่ เส้นใยปาล์ม ทะลายปาล์ม และกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ผ่านการบดแล้ว ในปริมาณ 0.5% ของปริมาตรน้ำเสีย (น้ำหนักแห้งต่อปริมาตร) ยกเว้นชุดควบคุมที่มีแต่น้ำเสียไม่มีการเติมวัสดุเศษเหลือ ปรับพีเอชเริ่มต้นให้มีค่าประมาณ 7.0 ทุกชุดการทดลอง โดยใช้ 5 N NaOH (ไม่มีการควบคุมพีเอชระหว่างหมัก) ใช้หัวเชื้อจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มร้อยละ 20 ปริมาตรใช้งานรวมทั้งหมักเท่ากับ 0.8 ลิตร ทำการหมักแบบสภาวะไร้อากาศ โดยการเติมก๊าซไนโตรเจนลงในถังหมักเป็นเวลา 2-3 นาที ทำการหมักแบบกะที่อุณหภูมิห้องจนกระทั่งการสร้างก๊าซชีวภาพลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เก็บตัวอย่างของเหลวทุกวัน เพื่อวิเคราะห์พีเอช เก็บตัวอย่างของเหลวก่อนและหลังการหมักเพื่อวิเคราะห์ค่าได้แก่ ซีโอดี ของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหยได้ทั้งหมด (AOAC, 1990; APHA, AWWA and WEF, 1998) เก็บตัวอย่างก๊าซทุกวันเพื่อวิเคราะห์ปริมาณก๊าซทั้งหมดโดยวิธีการแทนที่น้ำและเมื่อสิ้นสุดการทดลองเก็บตัวอย่างก๊าซเพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี (GC-TCD; SHIMADZA GC-8A) ทำการทดลองทั้งหมด 2 ชั่วโมง คำนวณผลผลิตก๊าซมีเทน และประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์ เลือกชนิดของวัสดุเศษเหลือที่ทำให้เกิดก๊าซชีวภาพมากที่สุดไปใช้ในการทดลองถัดไป

3.2.2 ศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพของวัสดุเศษเหลือโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

ทำการทดลองเพื่อศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนหรือ Biochemical Methane Potential (BMP) ของวัสดุเศษเหลือของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่คัดเลือกได้จากข้อ 3.2.1 โดยทำการทดลองในขวดหมักปริมาตรทั้งหมด 120 มิลลิลิตร โดยใช้ปริมาตรหมัก 60 มิลลิลิตร ใช้หัวเชื้อจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มและวัสดุเศษเหลือของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่คัดเลือกได้จากข้อ 3.2.1 ในอัตราส่วนระหว่างหัวเชื้อต่อซับสเตรต (inoculum to substrate ratios ;ISRs) เท่ากับ 3, 2 และ 1 (คิดในหน่วยของกรัมของแข็งระเหยง่าย) โดยใช้ความเข้มข้นของหัวเชื้อเริ่มต้นเท่ากับ 15 กรัมของแข็งระเหยง่าย/ลิตร และความเข้มข้นซับสเตรตเท่ากับ 5, 7.5 และ 15 กรัมของแข็งระเหยง่าย/ลิตร ซึ่งมีชุดขวดหมักที่ไม่มีการเติมกากตะกอนดีแคนเตอร์เป็นชุดควบคุม เติมน้ำอาหาร 20% (ภาพผนวก) (Raposo *et al.*, 2006) ทำการหมักในสภาวะไร้อากาศโดยใส่อากาศในขวดหมักด้วยก๊าซไนโตรเจนเป็นเวลา 2-3 นาที ทำการหมักแบบกะที่อุณหภูมิห้อง จนกระทั่งการสร้างก๊าซชีวภาพลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์เช่นเดียวกับข้อ 3.2.1 นำปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมและเวลาที่ได้นำมาใช้โปรแกรม Solver บน Microsoft Excel version 2003 ในการคำนวณหาค่าอัตราการผลิตมีเทนจำเพาะ (R_m) จากสมการ Gompertz ดังนี้ (Ho and Sung, 2010)

$$H(t) = H \times \exp \left\{ - \exp \left[\frac{R_m \times e}{H} (\lambda - t) + 1 \right] \right\}$$

เมื่อ $H(t)$ คืออัตราการผลิตก๊าซชีวภาพสะสม (มิลลิลิตร)

R_m คือ อัตราการผลิตมีเทนจำเพาะ (มิลลิลิตร/วัน)

H คือ ศักยภาพในการผลิตมีเทน (มิลลิลิตร)

λ คือ lag phase (วัน)

3.2.3 ผลของสัดส่วนของน้ำเสียและวัสดุเศษเหลือโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มต่อการผลิตก๊าซชีวภาพในระบบแบบกะ

ทำการทดลองในขวดหมักขนาด 1 ลิตรแบบไม่มีการกวนผสม เติมน้ำเสียและวัสดุเศษเหลือของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่คัดเลือกได้จากข้อ 3.2.1 ในปริมาณ 0.25, 0.5, 0.75 และ 1.0% (น้ำหนักแห้งต่อปริมาตรการหมัก) ใช้หัวเชื้อจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มร้อยละ 20 ปริมาตรใช้งานรวมทั้งหมักเท่ากับ 0.8 ลิตร ปรับพีเอชเริ่มต้นให้มีค่าประมาณ 7.0 ทุกชุดการทดลอง โดยใช้ 5 N NaOH หมักแบบสภาวะไร้อากาศ โดยการเติมก๊าซไนโตรเจนลงในถังหมักเป็นเวลา 2-3 นาที ทำการหมักแบบกะที่อุณหภูมิห้อง จนกระทั่งการสร้างก๊าซชีวภาพลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เก็บตัวอย่างเพื่อวิเคราะห์เช่นเดียวกับข้อ 3.2.1 ทำการทดลองทั้งหมด 2 ซ้ำ คำนวณผลผลิตก๊าซมีเทน และประสิทธิภาพ

การบำบัดสารอินทรีย์ เลือกสัดส่วนของวัสดุเศษเหลือที่ทำให้เกิดก๊าซชีวภาพมากที่สุดไปใช้ในการทดลองถัดไป

3.2.4 ผลของอัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่อการผลิตก๊าซชีวภาพในระบบกึ่งต่อเนื่อง

ทำการทดลองในขวดหมักขนาด 1 ลิตรแบบไม่มีการกวนผสม ปริมาตรใช้งานรวมทั้งหมดเท่ากับ 0.8 ลิตร เติมน้ำเสียและวัสดุเศษเหลือของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่คัดเลือกได้จากข้อ 3.2.1 ในปริมาณที่เหมาะสมจากข้อ 3.2.2 ใช้หัวเชื้อจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มในอัตราส่วนระหว่างหัวเชื้อต่อซบสเตรตที่เหมาะสมจากข้อ 3.2.3 ทำการหมักแบบกึ่งต่อเนื่องที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 2, 4 และ 6 กก./VS/ม³-วัน จนกระทั่งระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ (steady state) เก็บตัวอย่างของเหลวที่ป้อนเข้าถังหมักและหลังจากออกจากถังหมักทุก 5 วัน เพื่อวิเคราะห์พีเอช ซีไอดีของแข็งทั้งหมด และของแข็งระเหยได้ทั้งหมด เก็บตัวอย่างของเหลวที่ออกจากถังหมักที่สภาวะคงที่เพื่อวิเคราะห์ค่าได้แก่ พีเอช ซีไอดี ของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยได้ทั้งหมด (AOAC, 1990; APHA, AWWA and WEF, 1998) เก็บตัวอย่างก๊าซทุกวันเพื่อวิเคราะห์ปริมาณก๊าซทั้งหมดโดยวิธีการแทนที่น้ำ และเก็บตัวอย่างก๊าซทุก 7 วันเพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟีทำการทดลองทั้งหมด 2 ซ้ำ คำนวณผลผลิตก๊าซมีเทน และประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์

3.3 ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบโดยใช้การวางแผนการทดลองแบบใช้ปัจจัยร่วมด้วยการออกแบบพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology, RSM)

การวางแผนการทดลองแบบที่ละปัจจัยจะต้องใช้ชุดการทดลองที่มากหากต้องการครอบคลุมช่วงของการศึกษาหลายระดับ นอกจากนี้จะไม่สามารถบอกผลกระทบที่มีระหว่างแต่ละปัจจัยได้ ในการออกแบบพื้นผิวตอบสนองใช้การออกแบบส่วนประสมกลางแบบหมุนได้ (central composite rotatable design, CCDR) โดยเพิ่มการทดลองในแนวกลางและที่จุดศูนย์กลาง ทำการทดลองโดยใช้ระบบกึ่งต่อเนื่อง ศึกษาปัจจัย 3 ปัจจัย ได้แก่ อุณหภูมิ (30-55 °C) อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์ ;OLR (5-9 มิลลิกรัมของแข็งระเหยได้/ลิตร-วัน) และอัตราการกวนผสม;Mixing Rate (0-100%) ทำการทดลองโดยแปรค่าแต่ละปัจจัย 5 ระดับ (ตารางที่ 2) จะได้ชุดการทดลองทั้งหมด 17 ชุดการทดลอง ทำการทดลองโดยใช้ถังปฏิกรณ์ไร้อากาศแบบกวนผสม ปริมาตร 1 ลิตร (ภาพที่ 1) ปริมาตรหมักจริง 0.8 ลิตร โดยใช้ขวดแก้วมีอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ ด้านบนมีช่องสำหรับใส่วัดอุณหภูมิด้วยเทอร์โมมิเตอร์ และช่องที่มีหลอดแก้วสำหรับวัดปริมาณก๊าซชีวภาพ ด้านข้างขวดหมักด้านหนึ่งมีทางสำหรับป้อนสารอินทรีย์และอีกด้านหนึ่งสำหรับเก็บตัวอย่างวิเคราะห์ ควบคุมการกวนด้วย Stirrer ควบคุมอุณหภูมิการหมักด้วยอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ แสดงดัง (ภาพที่ 1) ใช้หัวเชื้อจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม 20% หมักจนระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ (steady state) วัดพีเอช ปริมาณก๊าซชีวภาพโดยวิธีการแทนที่น้ำ เก็บตัวอย่างของเหลวทุก 4 วัน วิเคราะห์ค่าซีไอดี สภาพความเป็นด่างทั้งหมด เก็บตัวอย่างวัน

แรกและวันสุดท้ายวิเคราะห์ค่าของแข็งทั้งหมด ของแข็งระเหยได้ทั้งหมด โดยใช้วิธีมาตรฐานในการวิเคราะห์น้ำและน้ำเสีย (AOAC, 1990; APHA, AWWA and WEF, 1998) และปริมาณของกรดไขมันระเหยง่ายด้วย Gas Chromatography (GC-FID) และองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ คือ ก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ด้วย Gas Chromatography (GC-TCD)

ตารางที่ 2 ตัวแปรและระดับของแต่ละปัจจัยในการออกแบบพื้นผิวตอบสนองใช้การออกแบบส่วนประสมกลางแบบหมุนได้

Independent variable	Symbol	Code factor levels				
		-1.0	-0.5	0	0.5	1.0
Temperature (°C)	X_1	30	35	43	50	55
OLR (กรัมVS/ลิตร-วัน)	X_2	5	6	7	8	9
Mixing rate (%)	X_3	0	20	50	80	100

หมายเหตุ: OLR = 5 กรัมVS/ลิตร-วัน (ไม่มีการเติมกากตะกอนดีแคนเตอร์); mixing rate = 0% (ไม่มีการกวน); mixing rate = 100% (มีการกวนตลอดเวลา)

เมื่อทำการทดลองตามทีออกแบบแล้ว นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม Design Expert Version 5.0 version (State Ease, Minneapolis, MN) โดยหาค่าผลตอบสนอง คือ เปอร์เซ็นต์มีเทน (% Methane) (Y_1) ผลผลิตมีเทน (methane yield) (Y_2) และ ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (% COD Removal) (Y_3) ความสัมพันธ์ดังกล่าวสามารถแสดงในแบบจำลองพหุนามกำลังสองที่ใช้ในการอธิบายความสัมพันธ์ ดังสมการ

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^3 \beta_i X_i + \sum_{i=1}^3 \beta_{ii} X_i^2 + \sum_{i,j=1}^3 \beta_{ij} X_i X_j$$

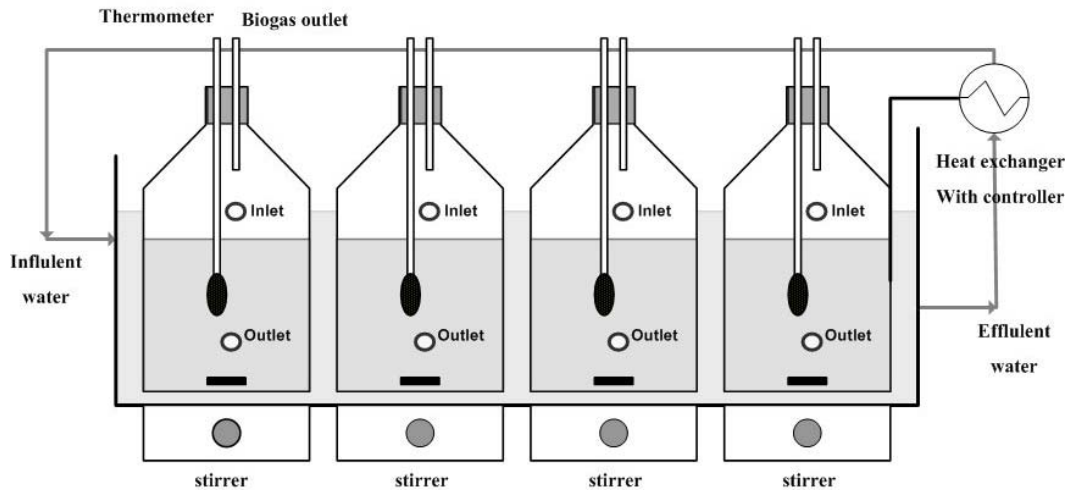
$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_3 X_3 + \beta_4 X_1^2 + \beta_5 X_2^2 + \beta_6 X_3^2 + \beta_7 X_1 X_2 + \beta_8 X_1 X_3 + \beta_9 X_2 X_3$$

โดย β_{ij} คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยโดย i และ j คือ ลำดับของตัวแปร

X_1 = Temperature (°C) ; X_2 = OLR (กรัมVS/ลิตร-วัน) ; X_3 = Mixing rate (%)

นำค่าผลที่ได้จากโปรแกรมเขียนเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ และสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรตาม หรือตัวแปรตอบสนอง (response variable) ภาพของผลตอบสนองจะมีลักษณะเป็นพื้นผิว เรียกรูปที่แสดงค่าของผลตอบสนองที่เปลี่ยนไปตามค่าของตัวแปรอิสระว่า พื้นผิว

ผลตอบสนอง (response surface) หลังจากได้สมการจำลองสามารถหาค่าที่เหมาะสมในการเดินระบบเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ ทำการทดลองในสถานะที่เหมาะสมดังกล่าวแล้วเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองและจากสมการ คำนวณหาร้อยละของความผิดพลาด

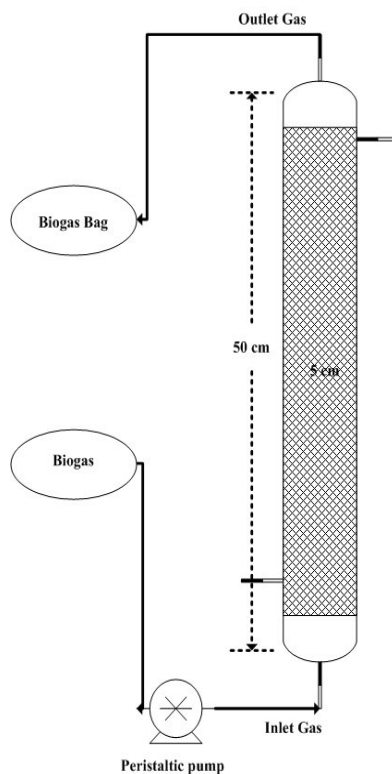


ภาพที่ 1 ถังหมักไร้อากาศแบบกวนผสม

3.4 ศึกษาการทำบริสุทธิ์ก๊าซมีเทนที่ได้จากการย่อยสลายแบบไร้อากาศโดยใช้น้ำเสียร่วมกับวัสดุเศษเหลือของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

3.4.1 ศึกษาชนิดสารในการทำบริสุทธิ์ก๊าซชีวภาพ

ตัวอย่างก๊าซชีวภาพถูกเก็บใส่ถุงเก็บก๊าซ นำตัวอย่างก๊าซวิเคราะห์ห้องปฏิบัติการของก๊าซชีวภาพเริ่มต้น ได้แก่ ก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้ Gas Chromatography (GC-TCD) ชุดคอลัมน์สำหรับทำบริสุทธิ์ก๊าซมีเทนที่ใช้ในการทดลองเป็นแก้วขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร สูง 50 เซนติเมตร ปริมาตร 1.0 ลิตร มีช่องสำหรับก๊าซเข้าและออก และช่องสำหรับสารละลายเข้าและออก ด้านบนและล่าง และภายในบรรจุวัสดุตัวกลาง Bioball แสดงดังภาพที่ 2 จากนั้นนำตัวอย่างก๊าซผ่านคอลัมน์ที่มีวัสดุตัวกลางพลาสติก ด้วย Peristaltic pump ที่ความเร็วรอบ 0.84 ลิตร/ชั่วโมง ที่มีสารละลายแต่ละชนิด ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH), โมโนเอทานอลเอมีน (mono-ethanol-amine ;MEA) และ ปูนขาว (CaO) ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ (ปรกรณ์ ถนนพวงษ์ชาติ, 2552) โดยใช้น้ำกลั่นเป็นชุดควบคุม เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของสารละลายแต่ละชนิด วิเคราะห์ห้องปฏิบัติการของก๊าซชีวภาพ ได้แก่ ก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หลังผ่านสารละลายด้วย Gas Chromatography (GC-TCD) เลือกชนิดของสารละลายที่ให้ปริมาณก๊าซมีเทนสูงที่สุดไปใช้ในการทดลองถัดไป



ภาพที่ 2 คอลัมน์สำหรับการทำบริสุทธิ์ก๊าซชีวภาพ

3.4.2 ศึกษาความเข้มข้นของสารในการทำบริสุทธิ์ก๊าซชีวภาพ

นำตัวอย่างก๊าซชีวภาพวิเคราะห์ห้องประกอบของก๊าซเริ่มต้น ได้แก่ ก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้ Gas Chromatography (GC-TCD) จากนั้นนำตัวอย่างก๊าซผ่านคอลัมน์ที่มีวัสดุตัวกลางพลาสติก ด้วย Peristaltic pump ที่ความเร็วรอบ 0.84 ลิตร/ชั่วโมง ใช้สารละลายที่ให้ปริมาณก๊าซมีเทนสูงที่สุดจากการทดลอง 3.4.1 ศึกษาความเข้มข้น 0, 0.05 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 และ 1 โมลาร์ โดยใช้น้ำกลั่นเป็นชุดควบคุม เพื่อหาความเข้มข้นของสารละลายที่เหมาะสมที่สุด วิเคราะห์ห้องประกอบของก๊าซชีวภาพหลังผ่านสารละลายด้วย Gas Chromatography (GC-TCD) เลือกความเข้มข้นของสารละลายที่ให้ปริมาณก๊าซมีเทนสูงที่สุดไปใช้ในการทดลองถัดไป

3.4.3 ศึกษาอัตราการไหลของก๊าซในการทำบริสุทธิ์ก๊าซชีวภาพ

นำตัวอย่างก๊าซชีวภาพวิเคราะห์ห้องประกอบของก๊าซชีวภาพเริ่มต้น ได้แก่ ก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยใช้ Gas Chromatography (GC-TCD) จากนั้นนำตัวอย่างก๊าซผ่านคอลัมน์ที่มีวัสดุตัวกลางพลาสติก ด้วย Peristaltic pump ที่อัตราการไหลของก๊าซชีวภาพ เท่ากับ 0.84 2.93 และ 4.98 ลิตร/ชั่วโมง โดยใช้ความเข้มข้นของสารละลายที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 5.2.2 เพื่อเปรียบเทียบอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพที่ระดับต่างๆ ในการทำบริสุทธิ์ก๊าซชีวภาพ วิเคราะห์ห้องประกอบของก๊าซชีวภาพ ได้แก่ ก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หลังผ่านสารละลายด้วย Gas Chromatography (GC-TCD)

บทที่ 4

ผลการวิจัย

4.1 ลักษณะของน้ำเสียและวัสดุเศษเหลือของโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

การทดลองนี้ใช้วัสดุเศษเหลือ ได้แก่ เส้นใยปาล์ม ทะลายปาล์ม และกากตะกอนดีแคนเตอร์ ซึ่งสมบัติของวัสดุเศษเหลือแสดงดังตารางที่ 3 และสมบัติของน้ำเสียแสดงดังตารางที่ 4 พบว่า ทะลายปาล์ม เส้นใยปาล์ม และกากตะกอนดีแคนเตอร์ มีปริมาณของแข็งระเหยได้ทั้งหมดใกล้เคียงกันซึ่งเป็นสารอาหารที่จุลินทรีย์นำไปใช้ได้ง่าย เท่ากับ 0.9509 0.9467 และ 0.9618 กรัม/กรัมวัสดุเศษเหลือ ตามลำดับ และมีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด 2.24 2.8 และ 1.12 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ โดยเส้นใยปาล์ม มีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดมากที่สุด และกากตะกอนดีแคนเตอร์มีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดน้อยที่สุด ขณะที่น้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มมี พีเอช 4.1-4.8 บีโอดี 34.2-55.3 กรัม/ลิตร ซีโอดี 53.6-89.5 กรัม/ลิตร ปริมาณของแข็งทั้งหมด 30.7-37.1 กรัม/ลิตร ปริมาณของแข็งแขวนลอย 25.1-31.0 กรัม/ลิตร ปริมาณของแข็งระเหยได้ทั้งหมด 21.4-29.0 กรัม/ลิตร ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด 0.291-1.47 กรัม/ลิตร

ตารางที่ 3 ลักษณะของวัสดุเศษเหลือโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

ปัจจัย	ทะลายปาล์ม	เส้นใยปาล์ม	กากตะกอนดีแคนเตอร์
ปริมาณของแข็งระเหยได้ทั้งหมด (กรัม/กรัมวัสดุเศษเหลือ)	0.9509± 0.0034	0.9467± 0.004	0.9618± 0.0007
ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (มิลลิกรัมไนโตรเจน/ลิตร)	2.24	2.8	1.12

ตารางที่ 4 ลักษณะของน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม

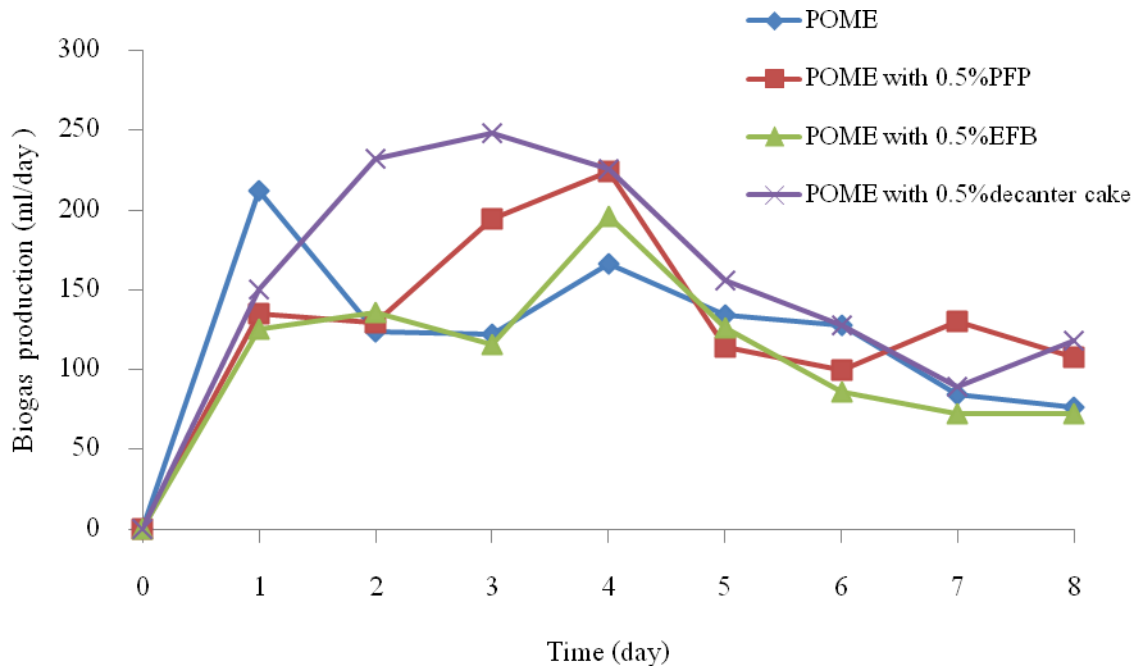
ปัจจัย	น้ำเสียจากบ่อรวบรวมน้ำเสีย
พีเอช	4.10-4.80
บีโอดี	34.2-55.3 กรัม/ลิตร
ซีโอดี	53.6-89.5 กรัม/ลิตร
ปริมาณของแข็งทั้งหมด	30.7-37.1 กรัม/ลิตร
ปริมาณของแข็งระเหยได้ทั้งหมด	21.4-29.0 กรัม/ลิตร
ปริมาณของแข็งแขวนลอย	25.1-31.0 กรัม/ลิตร
ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด	0.291-1.47 กรัม /ลิตร

4.2 ชนิดของวัสดุเศษเหลือที่เหมาะสมในการหมักร่วมกับน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ ด้วยการหมักแบบกะ

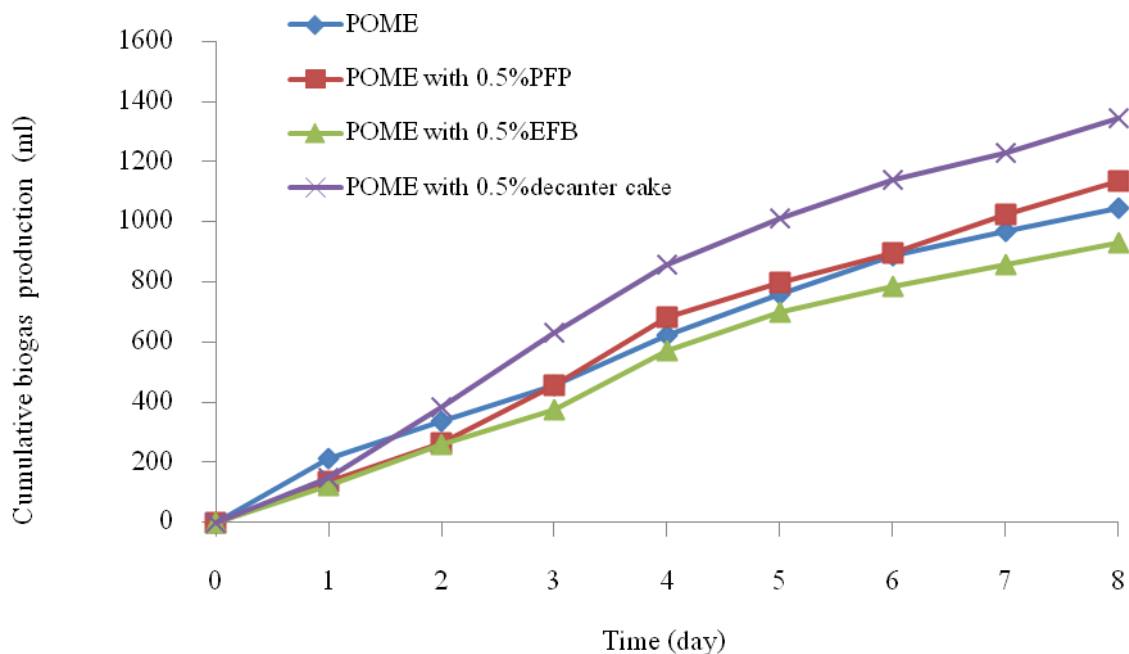
ในการทดลองนี้เป็นการศึกษาชนิดสารตั้งต้นจากวัสดุเศษเหลือร่วมกับน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยการหมักน้ำเสียจากบ่อรวบรวมน้ำเสียร่วมกับวัสดุเศษเหลือ ได้แก่ ทะลายปาล์ม เส้นใยปาล์ม และกากตะกอนดีแคนเตอร์ ซึ่งใช้วัสดุเศษเหลือร้อยละ 0.5 ของปริมาตรการหมัก โดยทำการหมักแบบกะหรือการเติมวัสดุหมักครั้งเดียว (batch)

จากการทดลองได้ทำการวัดปริมาณก๊าซชีวภาพโดยการแทนที่น้ำ โดยปริมาณก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นเป็นตัวบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพของระบบ ซึ่งในทุกชุดการทดลองมีปริมาณก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นในสี่วันแรกของการหมัก (ภาพที่ 3) เนื่องจากในช่วงแรกของการหมักจุลินทรีย์จะทำการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายได้ง่ายก่อน หลังจากนั้นมีการลดลงของปริมาณก๊าซชีวภาพทุกชุดการทดลอง เนื่องจากปริมาณสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายง่ายเหลือน้อยลง โดยชุดการทดลองที่ใช้น้ำเสียร่วมกับกากตะกอนดีแคนเตอร์ผลิตก๊าซชีวภาพสะสมได้สูงที่สุด (1347 มล.) ขณะที่การใช้น้ำเสียเพียงอย่างเดียว, น้ำเสียร่วมกับเส้นใยปาล์ม และทะลายปาล์ม สามารถผลิตก๊าซชีวภาพสะสมได้เท่ากับ 1046, 1134 และ 929 มล. ตามลำดับ (ภาพที่ 4) แสดงให้เห็นว่าชุดการทดลองที่ใช้น้ำเสียร่วมกับวัสดุเศษเหลือทำให้เพิ่มปริมาณสารอาหารให้กับจุลินทรีย์ โดยที่กากตะกอนดีแคนเตอร์ มีสารอาหารที่จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายได้ง่าย มีขนาดเล็ก สามารถละลายน้ำได้ สามารถสัมผัสกับจุลินทรีย์ได้ง่ายกว่าวัสดุเศษเหลือชนิดอื่น ดังนั้นจุลินทรีย์จึงสามารถนำกากตะกอนดีแคนเตอร์ไปใช้ได้ง่าย ส่วนเส้นใยปาล์ม และทะลายปาล์ม มีปริมาณสารอินทรีย์สูง แต่เป็นสารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยาก ทำให้ปริมาณก๊าซชีวภาพน้อยกว่าน้ำเสียร่วมกับกากตะกอนดีแคนเตอร์

เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ พบว่า สัดส่วนก๊าซมีเทนของน้ำเสียอย่างเดียว น้ำเสียร่วมกับเส้นใยปาล์ม น้ำเสียร่วมกับทะลายปาล์ม น้ำเสียร่วมกับกากตะกอนดีแคนเตอร์ เท่ากับ 30.0, 30.4, 33.0 และ 37.4% ตามลำดับ และเมื่อคำนวณ methane yield พบว่า ชุดน้ำเสียร่วมกับกากตะกอนดีแคนเตอร์ ให้ methane yield สูงที่สุด (0.136 มล. $\text{CH}_4/\text{มก. VS}_{\text{removal}}$) ในขณะที่ชุดการทดลองที่ใช้น้ำเสียอย่างเดียว น้ำเสียร่วมกับเส้นใยปาล์ม น้ำเสียร่วมกับทะลายปาล์มมี methane yield เท่ากับ 0.115, 0.096 และ 0.085 มล. $\text{CH}_4/\text{มก. VS}_{\text{removal}}$

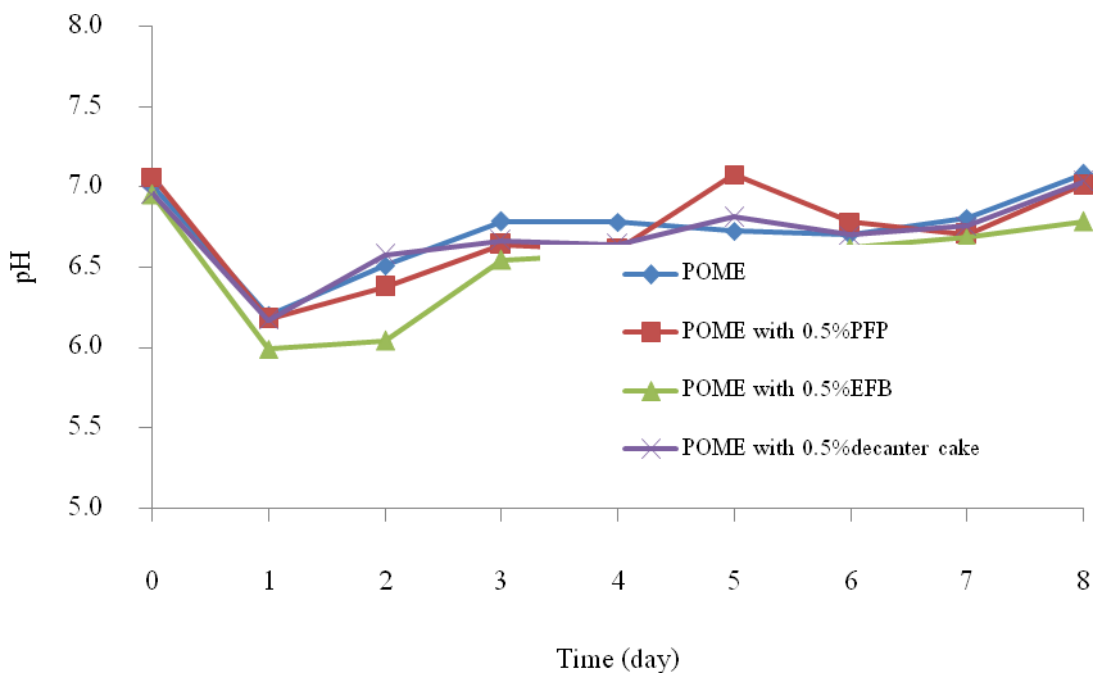


ภาพที่ 3 ปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยของการหมักน้ำเสีย (POME) ร่วมกับวัสดุเศษเหลือโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ได้แก่ เส้นใยปาล์ม (PFP) ทะลายปาล์ม (EFB) และกากตะกอนดีแคนเตอร์ (decanter cake) (0.5% นน.แห้ง/ปริมาตรการหมัก)



ภาพที่ 4 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมของการหมักน้ำเสีย(POME) ร่วมกับวัสดุเศษเหลือโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ได้แก่ เส้นใยปาล์ม (PFP) ทะลายปาล์ม (EFB) และกากตะกอนดีแคนเตอร์ (decanter cake) (0.5% นน.แห้ง/ปริมาตรการหมัก)

การทดลองนี้มีการปรับค่าพีเอชเริ่มต้นให้อยู่ประมาณ 7.0 ผลการทดลองพบว่า ทุกชุดการทดลองมีค่าพีเอชลดลงเร็วในวันแรกของการหมัก หลังจากนั้นค่าพีเอชของระบบจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นเล็กน้อย (ภาพที่ 5) เนื่องจากในช่วงแรกจุลินทรีย์สร้างกรดเจริญเติบโตโดยย่อยสลายสารอินทรีย์ ทำให้เกิดเป็นกรดไขมันระเหยง่าย พีเอชของน้ำเสียจึงลดลง ต่อมาจุลินทรีย์สร้างมีเทนเจริญเติบโตขึ้น และใช้กรดไขมันระเหยง่ายผลิตเป็นก๊าซชีวภาพทำให้ค่าพีเอชของระบบค่อยๆ เพิ่มขึ้น ซึ่งพีเอชสุดท้ายของระบบเท่ากับ 7.1, 7.0, 6.8 และ 7.0 ของชุดการทดลองที่ใช้น้ำเสียเพียงอย่างเดียว (ชุดควบคุม) การใช้น้ำเสียร่วมกับเส้นใยปาล์ม น้ำเสียร่วมกับทะลายปาล์ม และน้ำเสียร่วมกับกากตะกอนดีแคนเตอร์ ตามลำดับ



ภาพที่ 5 พีเอชในการหมักแบบไร้อากาศของน้ำเสีย (POME) ร่วมกับวัสดุเศษเหลือโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม ได้แก่ เส้นใยปาล์ม (PFP) ทะลายปาล์ม (EFB) และกากตะกอนดีแคนเตอร์ (decanter cake) (0.5% น้ำหนักแห้งต่อปริมาตรการหมัก)

เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่าการกำจัดซีโอดีของชุดการทดลองที่ใช้น้ำเสียอย่างเดียว น้ำเสียร่วมกับเส้นใยปาล์ม ทะลายปาล์ม และกากตะกอนดีแคนเตอร์ร้อยละ 0.5 ของปริมาตร มีประสิทธิภาพเท่ากับ 34.3, 38.3, 30.8 และ 35.4% ตามลำดับ สำหรับการกำจัดปริมาณของแข็งทั้งหมดมีประสิทธิภาพเท่ากับ 19.0, 24.8, 25.2 และ 24.1% ตามลำดับ และการกำจัดของแข็งระเหยง่ายทั้งหมดมีประสิทธิภาพเท่ากับ 28.0, 28.4, 27.5 และ 32.5% ตามลำดับ จะเห็นว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในแต่ละชุดการทดลองไม่แตกต่างกันมากนัก อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาจากปริมาณก๊าซชีวภาพ สัดส่วนก๊าซมีเทน และ methane yield จะเห็นว่ามีความสูงที่สุดเมื่อใช้น้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มร่วมกับกากตะกอน

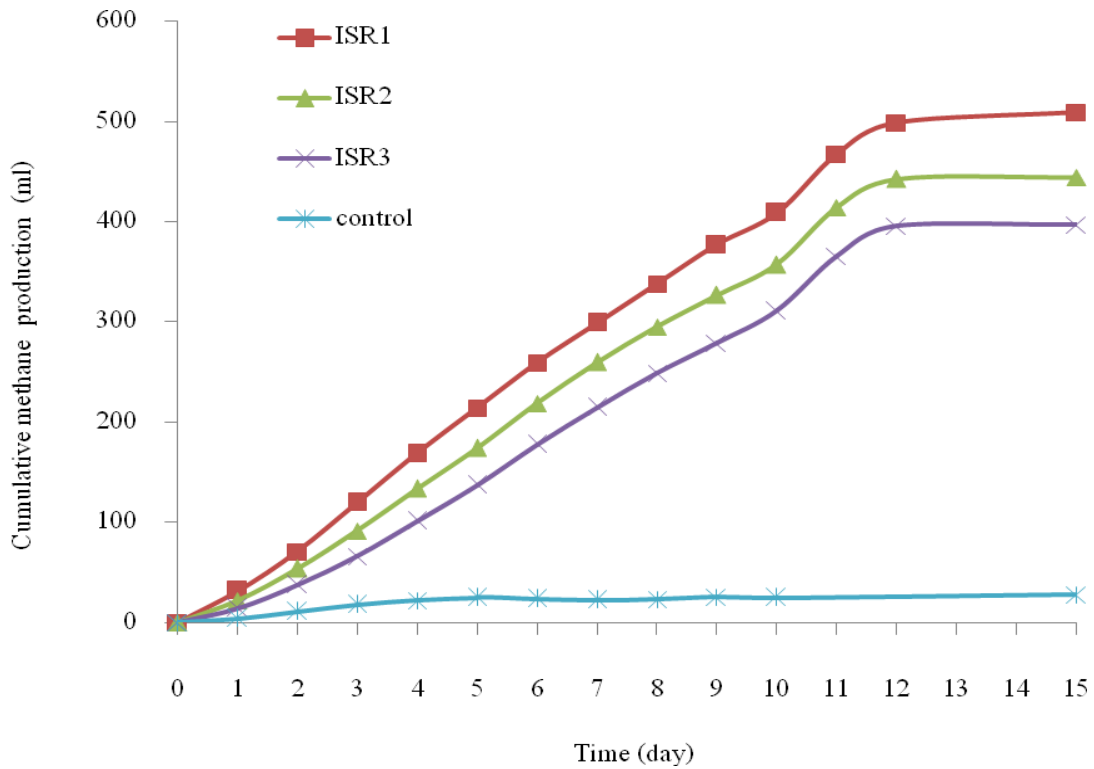
ดีแคนเตอร์ (ตารางที่ 5) ดังนั้นกากตะกอนดีแคนเตอร์จึงเป็นวัสดุเศษเหลือจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่มีศักยภาพในการนำไปใช้หมักร่วมกับน้ำเสียเพื่อเพิ่มผลผลิตก๊าซมีเทนได้

ตารางที่ 5 ผลผลิตมีเทนและประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และของแข็งเมื่อสิ้นสุดการหมักของน้ำเสยร่วมกับวัสดุเศษเหลือโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม (0.5% นน.แห้ง/ปริมาตรการหมัก)

ชุดการทดลอง	ผลผลิตมีเทน (มล. CH ₄ /มก. VS _{removed})	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)		
		ซีโอดี	ของแข็ง ทั้งหมด	ของแข็ง ระเหยง่าย
น้ำเสียอย่างเดียว	0.115	34.3	19.0	23.0
น้ำเสียร่วมกับเส้นใยปาล์ม	0.096	38.3	24.8	28.4
น้ำเสียร่วมกับทะเลสาปาล์ม	0.085	30.8	25.2	27.5
น้ำเสียร่วมกับกากตะกอนดีแคนเตอร์	0.136	35.4	24.1	32.5

4.3 ศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนหรือ Biochemical Methane Potential (BMP) ของกากตะกอนดีแคนเตอร์

จากการทดลองเพื่อศึกษา BMP ของกากตะกอนดีแคนเตอร์ โดยใช้อัตราส่วนระหว่างหัวเชื้อต่อซับสเตรต (inoculum to substrate ratios ;ISRs) เท่ากับ 3, 2 และ 1 (คิดในหน่วยของกรัมของแข็งระเหยง่าย) ความเข้มข้นของหัวเชื้อเริ่มต้นเท่ากับ 15 กรัมของแข็งระเหยง่าย/ลิตร และความเข้มข้นซับสเตรตเท่ากับ 5, 7.5 และ 15 กรัมของแข็งระเหยง่าย/ลิตร ผลการทดลองพบว่า ISR เท่ากับ 1 มีการผลิตก๊าซมีเทนสะสมสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) มีค่าเท่ากับ 509 มิลลิลิตร ขณะที่ ISR เท่ากับ 2 และ 3 มีการผลิตก๊าซมีเทนสะสมเท่ากับ 444 และ 397 มิลลิลิตรตามลำดับ (ภาพที่ 6) และเมื่อคำนวณปริมาณการผลิตก๊าซมีเทนสะสมตามสมการ Gompertz (Ho *et al.*, 2010) พบว่า อัตราการผลิตมีเทนจำเพาะสูงสุด (maximum specific methane production rates; R_m) ของ ISR 1, 2 และ 3 เท่ากับ 49.8, 45.8 และ 41.5 มิลลิลิตร/วัน (ตารางที่ 6) ซึ่งมีความแตกต่างกันทางค่าสถิติ ($p < 0.05$) และพบว่า กากตะกอนดีแคนเตอร์จากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่ใช้ในการทดลองนี้มีอัตราการผลิตมีเทนจำเพาะ (R_m) มากกว่าค่าที่ได้จากงานวิจัยของ Paepatung และคณะ (2009) ซึ่งพบว่ากากตะกอนดีแคนเตอร์ และทะเลสาปาล์มเปล่า จากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม มีอัตราการผลิตมีเทนจำเพาะ (R_m) เท่ากับ 32.9 และ 13.5 มิลลิลิตร/วัน ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่ากากตะกอนมี methane yield ที่ $ISR=1$ เท่ากับ 0.304 มล. CH₄/มก. VS_{removed} ซึ่งใกล้เคียงกับทางทฤษฎี (0.35 มล. CH₄/มก. VS_{removed}) (Metcalf and Eddy, 2004) จะเห็นว่ากากตะกอนดีแคนเตอร์มีศักยภาพมากพอที่จะใช้เป็นวัสดุในการหมักก๊าซชีวภาพ



ภาพที่ 6 ผลของอัตราส่วนระหว่างหัวเชื้อต่อกากตะกอนดีแคนเตอร์ (inoculums to substrate ratios; ISRs) ต่อปริมาณมีเทนสะสม

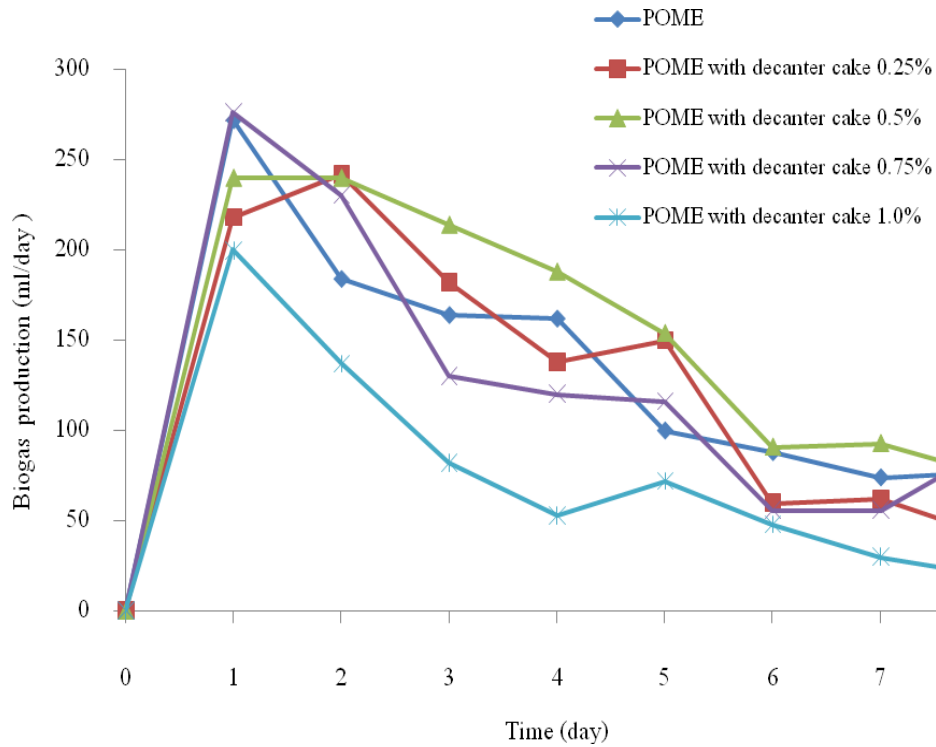
ตารางที่ 6 สัณยภาพการผลิตมีเทนของกากตะกอนดีแคนเตอร์

ISRs	อัตราการผลิตมีเทน จำเพาะ (R_m) (มล./วัน)	สัณยภาพในการผลิต มีเทน (H) (มล.)	lag phase (λ) (วัน)	Methane yield (มล. CH_4 /มก. $\text{VS}_{\text{removed}}$)
Control	7.83	24.9	0.565	0.090
1	49.8	578	0.814	0.304
2	45.8	505	1.23	0.281
3	41.5	461	1.74	0.246

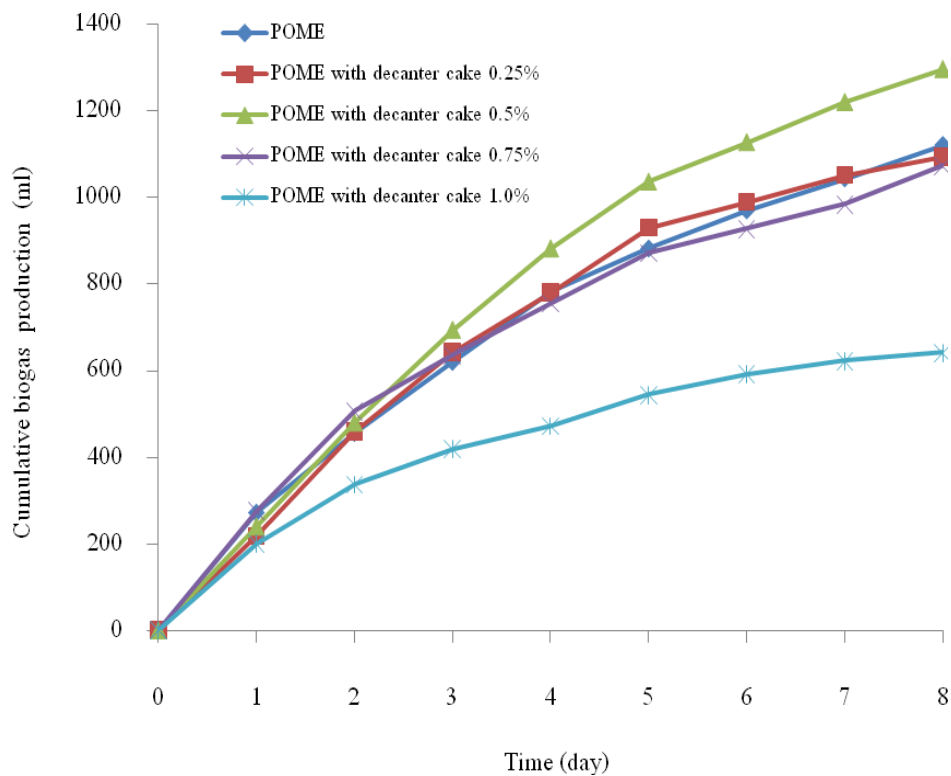
หมายเหตุ: control คือชุดควบคุมที่ไม่มีการเติมกากตะกอนดีแคนเตอร์

4.4 ผลของปริมาณกากตะกอนดีแคนเตอร์ในการหมักร่วมกับน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ ด้วยการหมักแบบกะ

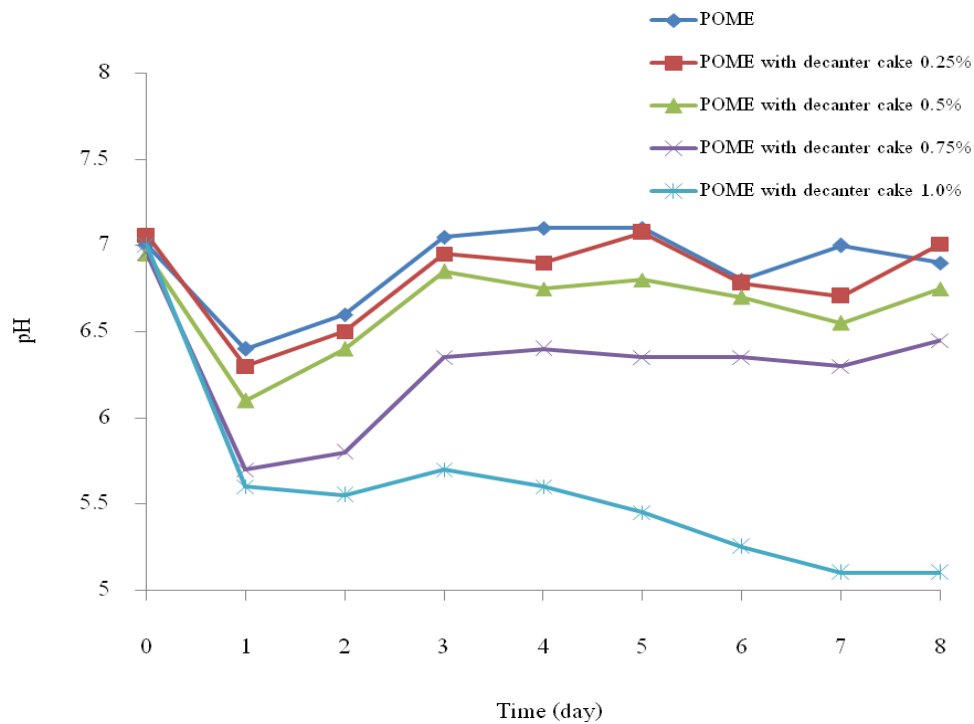
ในการทดลองนี้เป็นการศึกษาผลของปริมาณของกากตะกอนดีแคนเตอร์ในการเป็นวัสดุหมักร่วมกับน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยใช้กากตะกอนดีแคนเตอร์เท่ากับ 0, 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.0% (นน.แห้ง/ปริมาตรการหมัก) ร่วมกับน้ำเสียจากบ่อบรรณน้ำเสีย ทำการหมักแบบกะหรือการเติมวัสดุหมักครั้งเดียว (batch) ผลการทดลองพบว่า ก๊าซชีวภาพที่ได้จากการใช้น้ำเสียร่วมกับกากตะกอนดีแคนเตอร์ 0.5% จะผลิตก๊าซชีวภาพสะสมมากที่สุดเท่ากับ 1,296 มิลลิลิตร โดยมีปริมาณก๊าซมีเทน 43.3% และเมื่อใช้ปริมาณกากตะกอนที่มากขึ้นการผลิตก๊าซชีวภาพจะลดลง โดยการใช้น้ำเสียร่วมกับกากตะกอนดีแคนเตอร์ 0.75 และ 1.0% ให้ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสม เท่ากับ 1074 และ 642 มิลลิลิตร ตามลำดับ (ภาพที่ 7 และ 8) โดยเฉพาะที่ปริมาณกากตะกอน 1% จะเห็นว่ามีปริมาณก๊าซชีวภาพลดลงอย่างมาก เมื่อวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ พบว่า ชุดการทดลองที่มีการเติมกากตะกอน 0, 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.0% มีค่าเท่ากับ 30.5, 32.6, 43.3, 37.5 และ 5.4% ตามลำดับ และเมื่อคำนวณ methane yield มีค่าเท่ากับ 0.108, 0.098, 0.117, 0.082 และ 0.009 มล. CH₄/มก. VS_{removal} ตามลำดับ จะเห็นว่าการเพิ่มปริมาณกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่มากเกินไปจะทำให้การผลิตก๊าซชีวภาพลดลง และมีการผลิตก๊าซมีเทนลดลง เนื่องจากการหมักที่มีปริมาณสารอินทรีย์ที่มากเกินไปจะทำให้จุลินทรีย์กลุ่มสร้างกรดสามารถเจริญได้อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้มีปริมาณกรดระเหยง่ายเกิดสะสมในระบบในปริมาณมาก พีเอชในระบบจึงลดลงอย่างรวดเร็วทำให้ยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทน ภาพที่ 9 แสดงค่าพีเอชในระบบของแต่ละชุดการทดลอง จะเห็นว่าการเติมกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่ 1.0% พีเอชในระบบจะลดลงอย่างรวดเร็วจนกระทั่งมีค่าประมาณ 5.0 เมื่อสิ้นสุดการทดลอง



ภาพที่ 7 ปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยในการหมักแบบไร้อากาศของน้ำเสีย (POME) ร่วมกับกากตะกอนดีเคนเตอร์ (decanter cake) ในระบบหมักแบบกะ



ภาพที่ 8 ปริมาณก๊าซชีวภาพสะสมในการหมักแบบไร้อากาศของน้ำเสีย (POME) ร่วมกับกากตะกอนดีเคนเตอร์ (decanter cake) ในระบบหมักแบบกะ



ภาพที่ 9 พิเศษในการหมักแบบไร้อากาศของน้ำเสีย (POME) ร่วมกับกากตะกอนดีแคนเตอร์ (decanter cake) ในระบบหมักแบบกะ

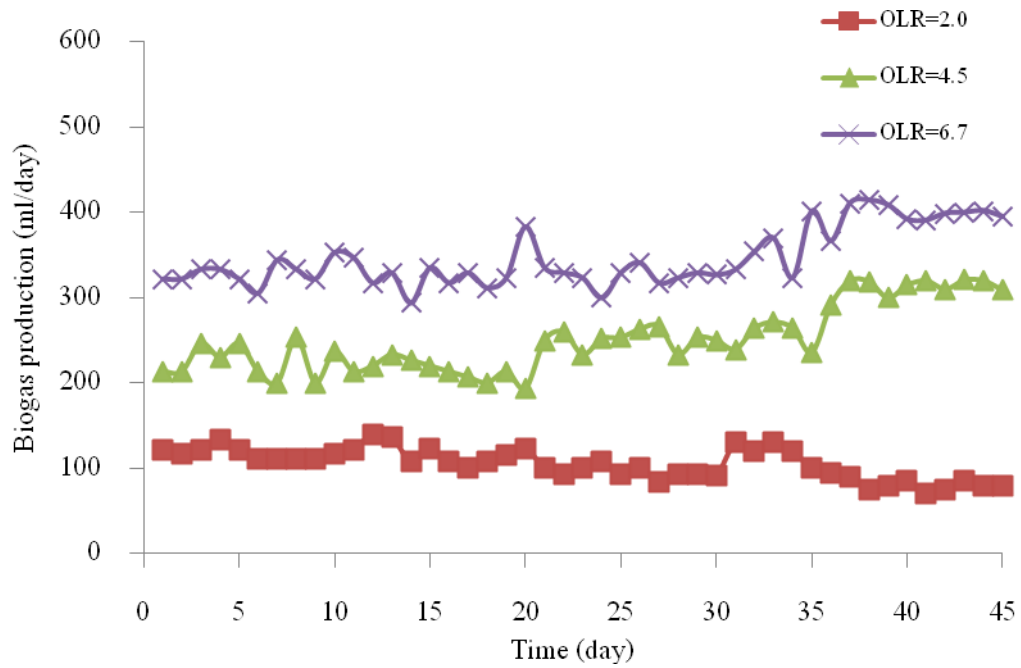
สำหรับประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีเมื่อทำการหมักร่วมของน้ำเสียกับกากตะกอนดีแคนเตอร์ พบว่า การใช้น้ำเสียร่วมกับกากตะกอนดีแคนเตอร์ร้อยละ 0, 0.25, 0.5, 0.75 และ 1.0 สามารถกำจัดซีโอดีได้เท่ากับ 27.0, 27.5, 29.8, 29.2 และ 22.3% ตามลำดับ ปริมาณกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่เพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีลดลง สำหรับการกำจัดปริมาณของแข็งทั้งหมดมีประสิทธิภาพเท่ากับ 15.7, 19.6, 24.8, 25.9 และ 19.7% ตามลำดับ และการกำจัดของแข็งระเหยง่ายทั้งหมดมีประสิทธิภาพเท่ากับ 18.9, 20.8, 26.1, 26.1 และ 20.1% ตามลำดับ (ตารางที่ 7) จะเห็นว่าประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์และผลิตภัณฑ์ชีวภาพในการทดลองนี้มีความแตกต่างจากการทดลองในข้อ 4.2 ทั้งนี้เนื่องจากน้ำเสียที่ใช้ในการทดลองเป็นน้ำเสียที่เก็บมาจากช่วงเวลาที่แตกต่างกัน ทำให้ลักษณะของน้ำเสียเริ่มต้นที่ใช้ในการทดลองจึงมีความแตกต่างกัน จากผลของปริมาณก๊าซชีวภาพและก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจะเห็นว่าปริมาณกากตะกอนดีแคนเตอร์ที่เหมาะสมในการใช้หมักร่วมกับน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มเท่ากับร้อยละ 0.5 ดังนั้นจึงใช้สัดส่วนนี้ในการทดลองระบบกึ่งต่อเนื่องต่อไป

ตารางที่ 7 ผลผลิตมีเทนและประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และของแข็งเมื่อสิ้นสุดการหมักของน้ำเสียร่วมกับกากตะกอนดีแคนเตอร์ในระบบหมักแบบกะ

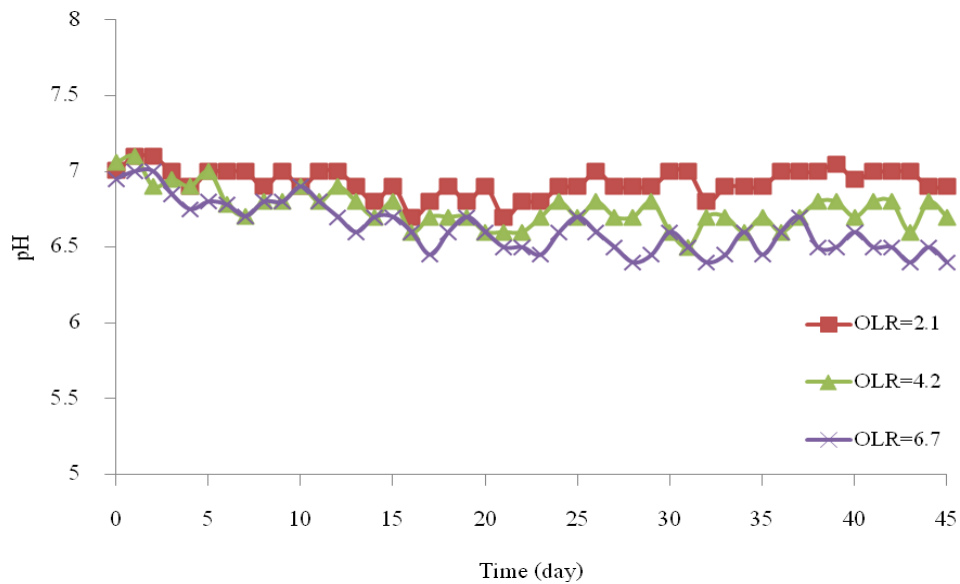
ชุดการทดลอง	ผลผลิตมีเทน (มล. CH ₄ /มก. VS _{removal})	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)		
		ซีไอดี	ของแข็ง ทั้งหมด	ของแข็ง ระเหยง่าย
น้ำเสียอย่างเดียว	0.108	27.0	15.7	18.9
น้ำเสีย+กากตะกอนดีแคนเตอร์ 0.25%	0.098	27.5	19.6	20.8
น้ำเสีย+กากตะกอนดีแคนเตอร์ 0.50%	0.117	29.8	24.8	26.1
น้ำเสีย+กากตะกอนดีแคนเตอร์ 0.75%	0.082	29.2	25.9	26.1
น้ำเสีย+กากตะกอนดีแคนเตอร์ 1.0%	0.009	22.3	19.7	20.1

4.5 ผลของอัตราการป้อนสารอินทรีย์ต่อการผลิตก๊าซชีวภาพในระบบกึ่งต่อเนื่อง

ทำการทดลองแบบกึ่งต่อเนื่องที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 2.0, 4.5 และ 6.7 กรัมVS/ลิตร-วัน จนกระทั่งระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ (steady state) พบว่า การเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์ทำให้เพิ่มการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 6.7 กรัมVS/ลิตร-วัน มีปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยวันละ 398 มิลลิลิตร ตลอดการทดลอง 45 วัน (ภาพที่ 10) และมีองค์ประกอบก๊าซมีเทนเท่ากับ 51.4% รองลงมาคือ ชุดการทดลองที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 4.5 และ 2.0 กรัมVS/ลิตร-วัน ผลิตก๊าซชีวภาพเฉลี่ยวันละ 313 และ 81.5 มิลลิลิตร ตามลำดับ จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์จะสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้สูงขึ้นตามลำดับ โดยเมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์จาก 2.0 เป็น 4.5 กรัมVS/ลิตร-วัน จะเป็นการเพิ่มปริมาณก๊าซชีวภาพในแต่ละวัน ขณะที่เมื่อเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์จาก 4.5 เป็น 6.7 กรัมVS/ลิตร-วัน ปริมาณก๊าซชีวภาพในแต่ละวันจะเพิ่มขึ้น ไม่มากนัก ทั้งนี้อาจเกิดจากการเพิ่มสารอินทรีย์ในระบบส่งผลให้มีการเจริญของจุลินทรีย์สร้างกรดอย่างรวดเร็วและผลิตกรดขึ้นมาสะสมมากขึ้น สังเกตได้จากค่าพีเอชของระบบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 6.7 กรัมVS/ลิตร-วัน จะมีค่าต่ำลงเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 4.5 กรัมVS/ลิตร-วัน (ภาพที่ 11) ทำให้การเจริญของจุลินทรีย์กลุ่มสร้างมีเทนมีการชะลอตัวขึ้น อย่างไรก็ตามระบบยังคงมีความเสถียรและยังไม่มีกรดล้นไหล อย่างไรก็ตามค่าพีเอชของระบบในช่วง steady state ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 6.7 กรัมVS/ลิตร-วัน มีค่าเท่ากับ 6.4-6.6 ซึ่งต่ำกว่าค่าที่เหมาะสมเล็กน้อย (ค่าที่เหมาะสมคือ 6.5-7.5) (Bitton, 1999) ดังนั้นหากมีการเพิ่มอัตราการป้อนสารอินทรีย์ไปมากกว่านี้ อาจทำให้เกิดยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์กลุ่มมีเทนส่งผลให้ระบบล้นไหลได้

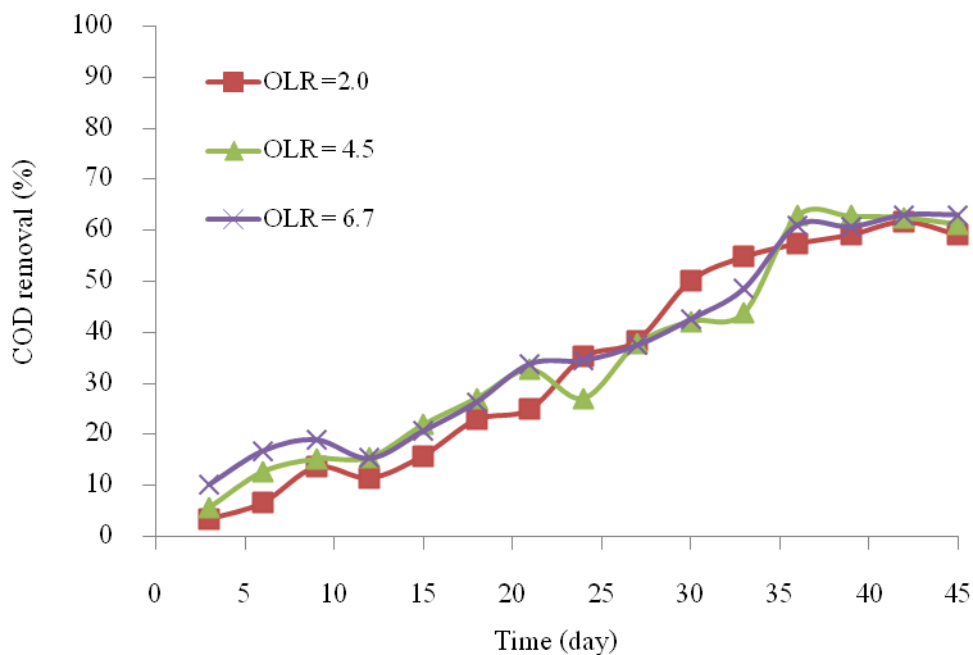


ภาพที่ 10 ปริมาณก๊าซชีวภาพเฉลี่ยในการหมักแบบไร้อากาศของน้ำเสียร่วมกับกากตะกอนดีเคนเตอร์ในระบบหมักแบบกึ่งต่อเนื่องที่ OLR = 2.0, 4.5 และ 6.7 กรัมVS/ลิตร-วัน และ HRT = 15 วัน



ภาพที่ 11 พีเอชในการหมักแบบไร้อากาศของน้ำเสียร่วมกับกากตะกอนดีเคนเตอร์ในระบบหมักแบบกึ่งต่อเนื่องที่ OLR = 2.0, 4.5 และ 6.7 กรัมVS/ลิตร-วัน และ HRT = 15 วัน

นอกจากนี้เมื่อทำการวิเคราะห์ค่าซีโอดี พบว่าที่สภาวะ steady state ทั้งสามชุดการทดลองสามารถกำจัดค่าซีโอดีได้ไม่แตกต่างกัน (ภาพที่ 12) โดยมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดี เท่ากับ 59.4, 62.4 และ 61.9% เมื่อเดินระบบที่ OLR เท่ากับ 2.0, 4.5 และ 6.7 กรัมVS/ลิตร-วัน ตามลำดับ ขณะที่ประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งทั้งหมด (TS) เท่ากับ 20.9, 26.4 และ 24.8% และการกำจัดของแข็งระเหยได้ (VS) เท่ากับ 29.1, 39.5 และ 36.6% เมื่อเดินระบบที่ OLR เท่ากับ 2.0, 4.5 และ 6.7 กรัมVS/ลิตร-วัน ตามลำดับ ในช่วงสภาวะคงที่ (ตารางที่ 8) โดยผลผลิตมีเทนที่ OLR เท่ากับ 4.5 และ 6.7 กรัมVS/ลิตร-วันแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย



ภาพที่ 12 การกำจัดซีโอดีในการหมักแบบไร้อากาศของน้ำเสียร่วมกับกากตะกอนดีเคนเตอร์ในระบบหมักแบบกึ่งต่อเนื่องที่ OLR = 2.0, 4.5 และ 6.7 กรัมVS/ลิตร-วัน และ HRT = 15 วัน

ตารางที่ 8 ผลผลิตมีเทนและประสิทธิภาพการกำจัดสารอินทรีย์และของแข็งเมื่อสิ้นสุดการหมักของน้ำเสียร่วมกับกากตะกอนดีเคนเตอร์ในระบบหมักแบบกึ่งต่อเนื่องที่ HRT = 15 วัน

OLR (กรัมVS/ลิตร-วัน)	ผลผลิตมีเทน (มล. CH ₄ /มก. VS _{removal})	ประสิทธิภาพการกำจัด (%)		
		ซีโอดี	ของแข็ง ทั้งหมด	ของแข็ง ระเหยง่าย
2.0	0.070	59.4	20.9	29.1
4.5	0.128	62.4	26.4	39.5
6.7	0.129	61.9	24.8	36.6

4.6 สภาพที่เหมาะสมในการเดินระบบโดยใช้การวางแผนการทดลองแบบใช้ปัจจัยร่วมด้วยการออกแบบพื้นผิวตอบสนอง (Response surface methodology, RSM)

จากการวางแผนการทดลองโดยใช้การออกแบบพื้นผิวตอบสนองศึกษาตัวแปรต้น 3 ตัวแปร คือ อุณหภูมิ (30-55 องศาเซลเซียส) อัตราการระบรทุกสารอินทรีย์; OLR (5-9 กรัมVS/ลิตร-วัน) และ อัตราการกวน (0-100% โดย 0% หมายถึงไม่มีการกวน และ 100% หมายถึงการกวนตลอดเวลา ปรับพีเอช เริ่มต้นของน้ำเข้าระบบเท่ากับ 7.0 ± 0.2 โดยมีค่าผลตอบสนอง 3 ค่า คือ เปอร์เซ็นต์มีเทน (% Methane) (Y_1) ผลผลิตมีเทน (methane yield) (Y_2) และ ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (% COD Removal) (Y_3) ผลการทดลองดังแสดงในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ชุดการทดลองและค่าตอบสนองสำหรับการย่อยสลายแบบไร้อากาศน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมัน ปาล์มร่วมกับกากตะกอนดีแคนเตอร์ ที่ระยะเวลาเก็บกัก 15 วันภายใต้สภาวะคงที่

Trials	X_1	X_2	X_3	Yield					
				Methane (%)		Yield ($\text{mlCH}_4/\text{mgVS}_{\text{removed}}$)		COD removed (%)	
				Predict	Experiment	Predict	Experiment	Predict	Experiment
1	35	6	20	64.4	66.5	0.363	0.375	67.1	68.5
2	50	6	20	56.4	57.0	0.261	0.268	69.3	70.5
3	35	8	20	60.5	61.7	0.337	0.341	59.2	61.7
4	50	8	20	54.2	55.5	0.236	0.239	65.7	65.2
5	35	6	80	65.3	65.7	0.362	0.370	70.7	71.4
6	50	6	80	58.9	59.4	0.278	0.285	74.7	72.1
7	35	8	80	62.6	63.7	0.357	0.362	66.8	65.8
8	50	8	80	57.9	57.4	0.273	0.272	75.1	73.6
9	30	7	50	59.4	57.2	0.270	0.257	45.6	43.5
10	55	7	50	48.9	48.6	0.116	0.112	54.3	56.4
11	43	5	50	63.6	62.6	0.371	0.359	83.4	83.1
12	43	9	50	58.8	58.1	0.341	0.341	76.1	76.4
13	43	7	0	61.9	59.5	0.361	0.350	72.8	70.1
14	43	7	100	65.8	65.7	0.393	0.387	83.7	86.4
15	43	7	50	69.4	70.1	0.401	0.411	85.0	85.1
16	43	7	50	69.4	68.7	0.401	0.392	85.0	82.5
17	43	7	50	69.4	69.2	0.401	0.398	85.0	87.3

X_1 : อุณหภูมิ ($^{\circ}\text{C}$); X_2 : OLR (กรัมVS/ลิตร-วัน); X_3 : อัตราการกวน (%)

เมื่อทำการทดลองตามที่ออกแบบแล้วนำผลที่ได้จากตารางไปวิเคราะห์ทางสถิติด้วยโปรแกรม Design Expert Version 5.0.8 ซึ่งจะได้ค่าประมาณของสัมประสิทธิ์ (Coefficient estimate) ของปัจจัยและอิทธิพลปฏิสัมพันธ์ (Interaction) ทั้งหมด โดยใช้สมการโพลีโนเมียลอันดับสอง สามารถเขียนเป็นสมการแบบจำลองได้ ดังนี้

Model 1:

$$Y_1 = -167.188 + 7.532X_1 + 24.623X_2 + 0.115X_3 - 0.099X_1^2 - 2.049X_2^2 - 0.0022X_3^2 + 0.0556X_1X_2 + 0.0019X_1X_3 + 0.0096X_2X_3$$

Model 2:

$$Y_2 = -0.40 - 0.046X_1 - 0.075X_2 + 0.093X_3 - 0.076X_1^2 - 0.011X_2^2 - 0.083X_3^2 + 0.0019X_1X_2 + 0.0042X_1X_3 + 0.0051X_2X_3$$

Model 3:

$$Y_3 = -336.85 + 18.210X_1 + 8.509X_2 + 0.058X_3 - 0.223X_1^2 - 1.300X_2^2 - 0.0027X_3^2 + 0.145X_1X_2 + 0.0020X_1X_3 + 0.0333X_2X_3$$

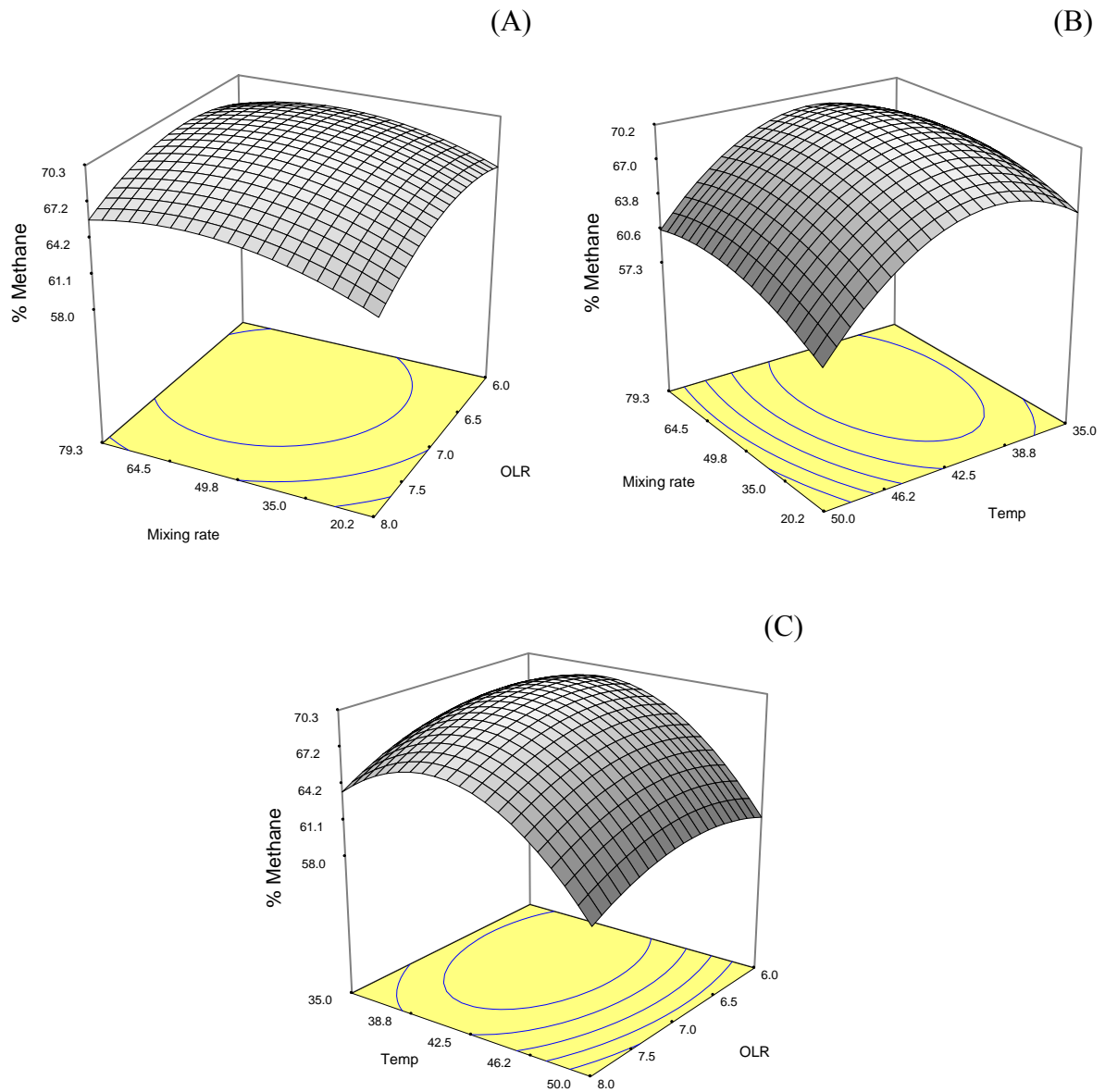
โดย

Y_1 = Methane content (%); Y_2 = Methane yield (ลิตร CH_4 /กรัม $\text{VS}_{\text{removed}}$); Y_3 = COD Removal (%);

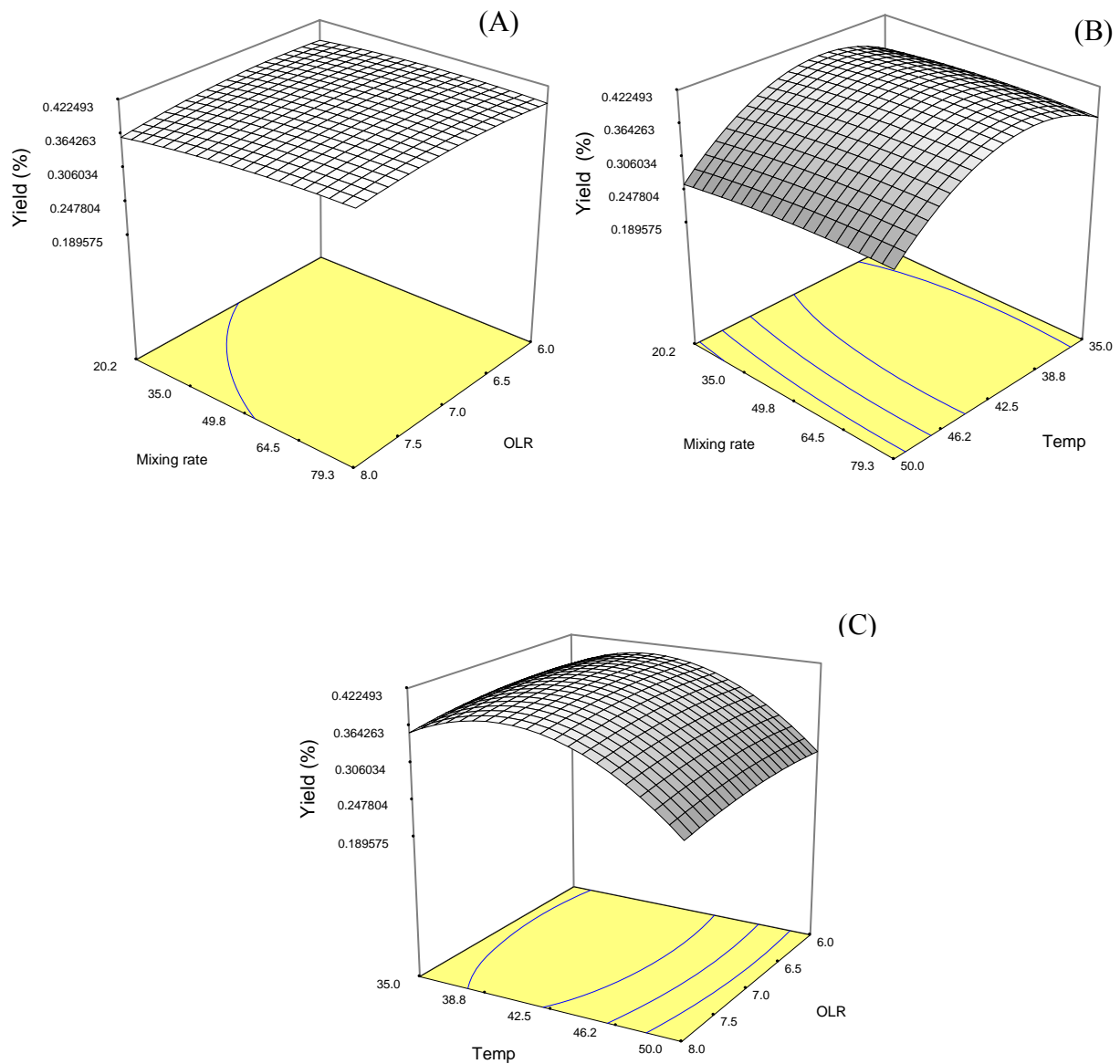
X_1 = Temperature ($^{\circ}\text{C}$); X_2 = OLR (กรัม VS /ลิตร-วัน); X_3 = Mixing rate (%)

จากสมการจำลองเมื่อนำมาพลอตกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ ต่อการผลิตก๊าซมีเทน ผลผลิตมีเทนและการกำจัดชีโอดีดังแสดงในภาพที่ 13-15 พบว่า ถ้า OLR เพิ่มขึ้น และลดระยะเวลาการกวนผสมน้อยลง จะส่งผลทำให้เปอร์เซ็นต์มีเทนน้อยลง และถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้น มีระยะเวลาการกวนที่น้อยลง จะส่งผลทำให้เปอร์เซ็นต์มีเทนน้อยลงเช่นกัน นอกจากนี้ยังสามารถทำนายสถานะเหมาะสมในการเดินระบบในแต่ละ model ได้ โดยสถานะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตก๊าซมีเทนให้ได้มากที่สุด (Model 1) คือ OLR เท่ากับ 6.9 กรัม VS /ลิตร-วัน อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และอัตราการกวน 62% (14 ชั่วโมง/วัน) จะให้ค่าเปอร์เซ็นต์มีเทนจากการทำนาย เท่ากับ 70.3% ขณะที่สามารถทำนายสถานะที่เหมาะสมสำหรับผลผลิตมีเทนที่มากที่สุด (Model 2) คืออุณหภูมิ 40.8 องศาเซลเซียส OLR เท่ากับ 6.8 กรัม VS /ลิตร-วัน และระยะเวลาการกวน 58% (13 ชั่วโมง/วัน) มีผลผลิตมีเทนที่ได้จากสมการทำนาย 0.413 ลิตร CH_4 /กรัม $\text{VS}_{\text{removed}}$ สำหรับการทำนายสถานะที่เหมาะสมในการกำจัดชีโอดี (Model 3) พบว่าการเดินระบบที่ OLR เท่ากับ 6.5 กรัม VS /ลิตร-วัน อุณหภูมิ 43 องศาเซลเซียส และอัตราการกวน 67% (16 ชั่วโมง/วัน) จะให้ประสิทธิภาพการกำจัดชีโอดีจากแบบจำลอง เท่ากับ 86.4% จะเห็นว่าสถานะที่เหมาะสมในการผลิตก๊าซมีเทนและการกำจัดชีโอดีมีค่าที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจาก

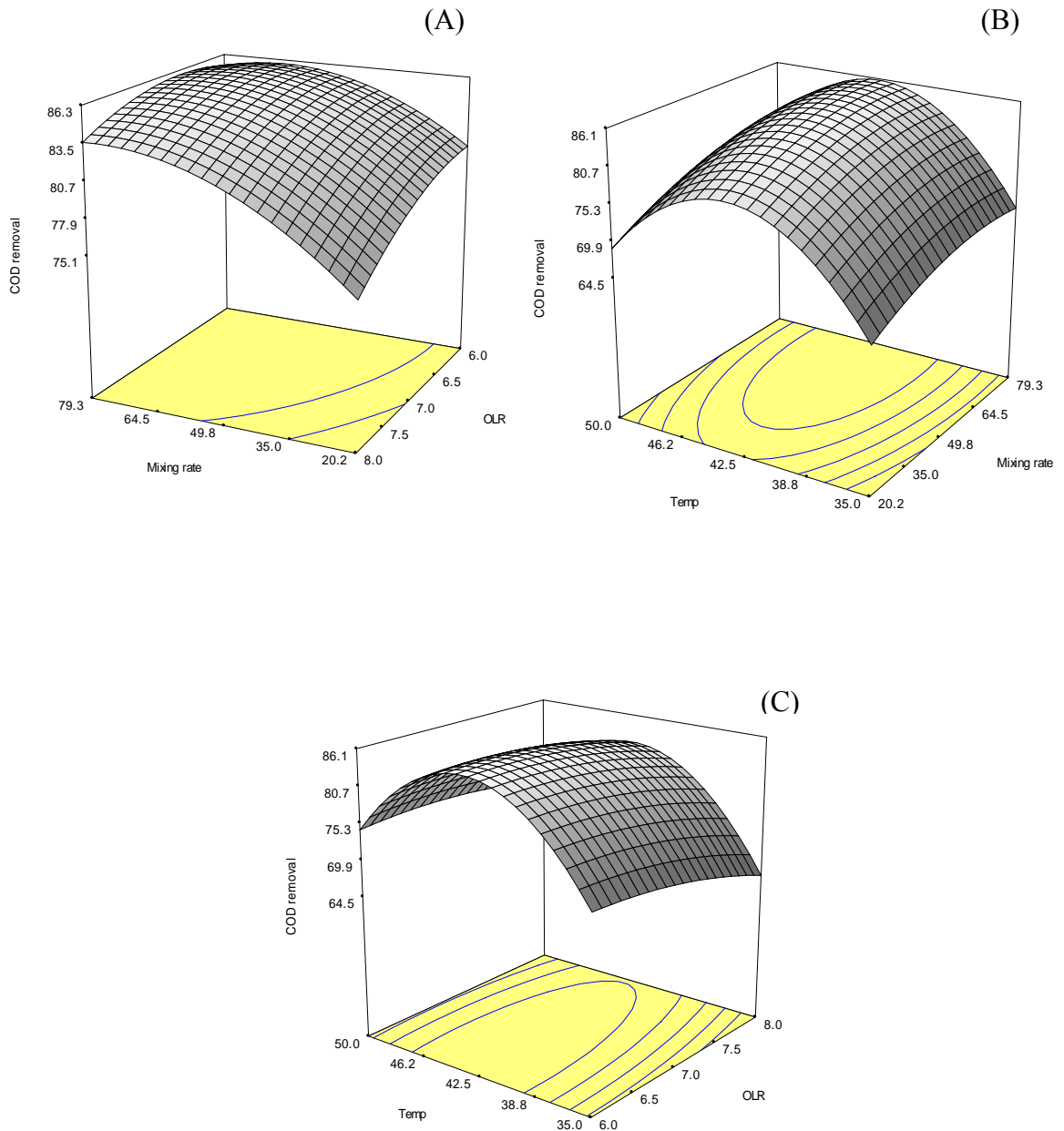
จุดินทรีย์ใช้สารอินทรีย์ในการผลิตก๊าซมีเทน ค่าที่เหมาะสมดังกล่าวสามารถเป็นข้อมูลในการเดินระบบ เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพและการกำจัดสารอินทรีย์ในน้ำเสียต่อไป



ภาพที่ 13 พื้นผิวตอบสนองสำหรับปริมาณมีเทนจาก Model 1 (A) ผลของ OLR และ อัตราการกวนผสม ที่ 43 °ซ; (B) ผลของอุณหภูมิและอัตราการกวนผสม ที่ OLR=7.0 กรัม VS/ลิตร-วัน; (C) ผลของ OLR และอุณหภูมิ ที่อัตราการกวนผสม 50% จากการย่อยสลายแบบไร้อากาศน้ำเสีย โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มร่วมกับกากตะกอนดีแคนเตอร์ ที่ระยะเวลาเก็บกัก 15 วัน



ภาพที่ 14 พื้นผิวตอบสนองสำหรับผลผลิตมีเทนจาก Model 2 (A) ผลของ OLR และ อัตราการกวนผสม ที่ 43 °ซ; (B) ผลของอุณหภูมิและอัตราการกวนผสม ที่ OLR=7.0 กรัมVS/ลิตร-วัน; (C) ผลของ OLR และอุณหภูมิ ที่อัตราการกวนผสม 50% จากการย่อยสลายแบบไร้อากาศน้ำเสีย โรงงานสกัดน้ำมันปาล์มร่วมกับกากตะกอนดีแคนเตอร์ ที่ระยะเวลาเก็บกัก 15 วัน



ภาพที่ 15 พื้นผิวตอบสนองสำหรับการกำจัดซีโอดีจาก Model 3 (A) ผลของ OLR และ อัตราการกวนผสมที่ 43 °ซ; (B) ผลของอุณหภูมิและอัตราการกวนผสม ที่ OLR=7.0 กรัม/ลิตร-วัน; (C) ผลของ OLR และอุณหภูมิ ที่อัตราการกวนผสม 50% จากการย่อยสลายแบบไร้อากาศน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มร่วมกับกากตะกอนดีเคนเตอร์ ที่ระยะเวลาเก็บกัก 15 วัน

เมื่อพิจารณาถึงปัจจัยที่มีผลร่วมกันพบว่า ปัจจัยที่มีผลร่วมกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ของค่าผลตอบสนองเปอร์เซ็นต์มีเทน (Model 1) คือ $X_1, X_2, X_3, X_1^2, X_2^2, X_3^2$ ผลผลิตมีเทนที่ได้ (Model 2) คือ $X_1, X_2, X_3, X_1^2, X_2^2$ และประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดี (Model 3) คือ $X_1, X_2, X_3, X_1^2, X_3^2$ ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ โดยแต่ละปัจจัยนั้นไม่มีอิทธิพลระหว่างปัจจัยร่วมกัน (ตารางที่ 10) สำหรับความน่าเชื่อถือของสมการจำลองตรวจสอบได้จากค่า R^2 โดยใช้ ANOVA ซึ่งหมายถึงสัดส่วนความแปรปรวน

ในตัวแปร ถ้า R^2 เข้าใกล้ 1 แสดงว่า เปอร์เซ็นต์ที่ X สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของ Y นั้นมีค่ามาก แต่ถ้า R^2 มีค่าเข้าใกล้ 0 แสดงว่า เปอร์เซ็นต์ที่ X สามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของ Y นั้นมีค่าน้อย และค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวน (coefficient of variation, C.V.) ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบการกระจายข้อมูล ตั้งแต่สองกลุ่มขึ้นไป ถ้าค่ามากแสดงว่า ข้อมูลมีการกระจายมาก และถ้าค่าน้อย แสดงว่า ข้อมูลมีการกระจายน้อย และค่า lack of fit ที่ได้นั้นต้องไม่มีนัยสำคัญ $\text{Prob}>F>0.05$ จากตารางที่ 11 จะเห็นว่าแบบจำลองที่ได้จากการทดลองนี้มีค่า R^2 มีค่าสูง (>0.95) และ C.V. มีการกระจายข้อมูลดี และ lack of fit >0.05 แสดงว่าแบบจำลองมีความน่าเชื่อถือสามารถใช้อธิบายผลของปัจจัยต่างๆต่อการผลิตก๊าซมีเทน ผลผลิตมีเทนและการกำจัดซีโอดีได้

ตารางที่ 10 การประมาณค่า Coefficient และ p -values

Factor	Model 1		Model 2		Model 3	
	Coefficient estimate	Probability $(P)>F$	Coefficient estimate	Probability $(P)>F$	Coefficient estimate	Probability $(P)>F$
intercept						
X_1	-3.17	0.0004 ^a	-0.04	< 0.000 ^a	2.61	0.0110 ^a
X_2	-1.22	0.0315 ^a	-0.075	0.0428 ^a	-1.89	0.0307 ^a
X_3	1.17	0.0473 ^a	0.09	0.0249 ^a	3.24	0.0035 ^a
X_1^2	-5.58	< 0.0001 ^a	-0.075	< 0.0001 ^a	-12.56	< 0.0001 ^a
X_2^2	-2.05	0.0014 ^a	-0.016	0.0043 ^a	-1.30	0.0750
X_3^2	-1.94	0.0091 ^a	-0.07	0.0554	-2.34	0.0270 ^a
X_1X_2	0.42	0.5376	0.019	0.9644	1.08	0.3100
X_1X_3	0.41	0.5360	0.042	0.3499	0.44	0.6637
X_2X_3	0.28	0.6688	0.051	0.2634	0.98	0.3469

X_1 : Temperature ($^{\circ}\text{C}$) ; X_2 ; OLR (gVS/(L.day)) ; X_3 ; Mixing rate (%)

^a Statistically significant ($P<0.05$)

ตารางที่ 11 การวิเคราะห์ทางสถิติของข้อมูลที่ได้จากแบบจำลอง โดยใช้ ANOVA

	Model 1	Model 2	Model 3
<i>P</i> -value			
● model	0.0006 ^a	< 0.0001 ^a	< 0.0001 ^a
● Lack of Fit	0.1048	0.392	0.4446
<i>R</i> ²	0.9560	0.988	0.9742
Coefficient of variance, C.V.	2.96	3.76	3.91

^aStatistically significant ($P < 0.05$)

หลังจากนั้นทำการทดลองเพื่อยืนยันผลจากการใช้สมการทำนายจาก Model 1-3 (Confirmation experimental) และเปรียบเทียบผลที่ได้จากการทดลองและจากสมการทำนายโดยทำการทดลองเดินระบบ ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมจากแบบจำลองในแต่ละ Model ดังนี้

- Model 1 สภาวะที่เหมาะสมจากแบบจำลองในการเดินระบบ คือ OLR เท่ากับ 6.9 กรัม VS/ลิตร-วัน อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส และอัตราการกวน 62% (14 ชั่วโมง/วัน) พบว่า ให้ค่าเปอร์เซ็นต์ มีเทนจากการทดลองเมื่อระบบเข้าสู่สภาวะคงที่ 68.5% ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าทำนาย (ปริมาณมีเทน เท่ากับ 70.3%) มีร้อยละของความผิดพลาด เท่ากับ 1.5

- Model 2 สภาวะที่เหมาะสมจากแบบจำลองในการเดินระบบ คือ OLR เท่ากับ 6.8 กรัม VS/ลิตร-วัน อุณหภูมิ 40.8 องศาเซลเซียส และอัตราการกวน 58% (13 ชั่วโมง/วัน) พบว่า มีประสิทธิภาพการบำบัดชีโอดีจากการทดลอง 85.1% ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าทำนาย (ประสิทธิภาพการกำจัดชีโอดี 86.4%) มีร้อยละของความผิดพลาด เท่ากับ 1.34

- Model 3 สภาวะที่เหมาะสมจากแบบจำลองในการเดินระบบ คือ OLR เท่ากับ 6.5 กรัม VS/ลิตร-วัน อุณหภูมิ 43 องศาเซลเซียส และอัตราการกวน 67% (16 ชั่วโมง/วัน) พบว่า มีประสิทธิภาพการบำบัดชีโอดีจากการทดลอง 85.1% ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับค่าทำนาย (ประสิทธิภาพการกำจัดชีโอดี 86.4%) มีร้อยละของความผิดพลาด เท่ากับ 1.34

จากการทดลองและผลที่ได้จากการออกแบบการทดลองโดยใช้ RSM พบว่า ค่าผลตอบสนองที่ได้ไม่มีความแตกต่างระหว่างค่าจริงและค่าที่ได้จากสมการทำนายอย่างมีนัยสำคัญ สมการตอบสนองที่ได้จากโปรแกรมจึงมีความน่าเชื่อถือ สามารถนำไปใช้ในการทำนายค่าการศึกษาทดลองได้จริง นอกจากนี้ ได้มีการสอบถามข้อมูลจากโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มนั้น พบว่า อุณหภูมิในบ่อผลิตก๊าซชีวภาพอยู่ในช่วง 40-44 องศาเซลเซียส และมีปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในบ่อก๊าซชีวภาพ โรงงานอยู่ช่วงระหว่างร้อยละ

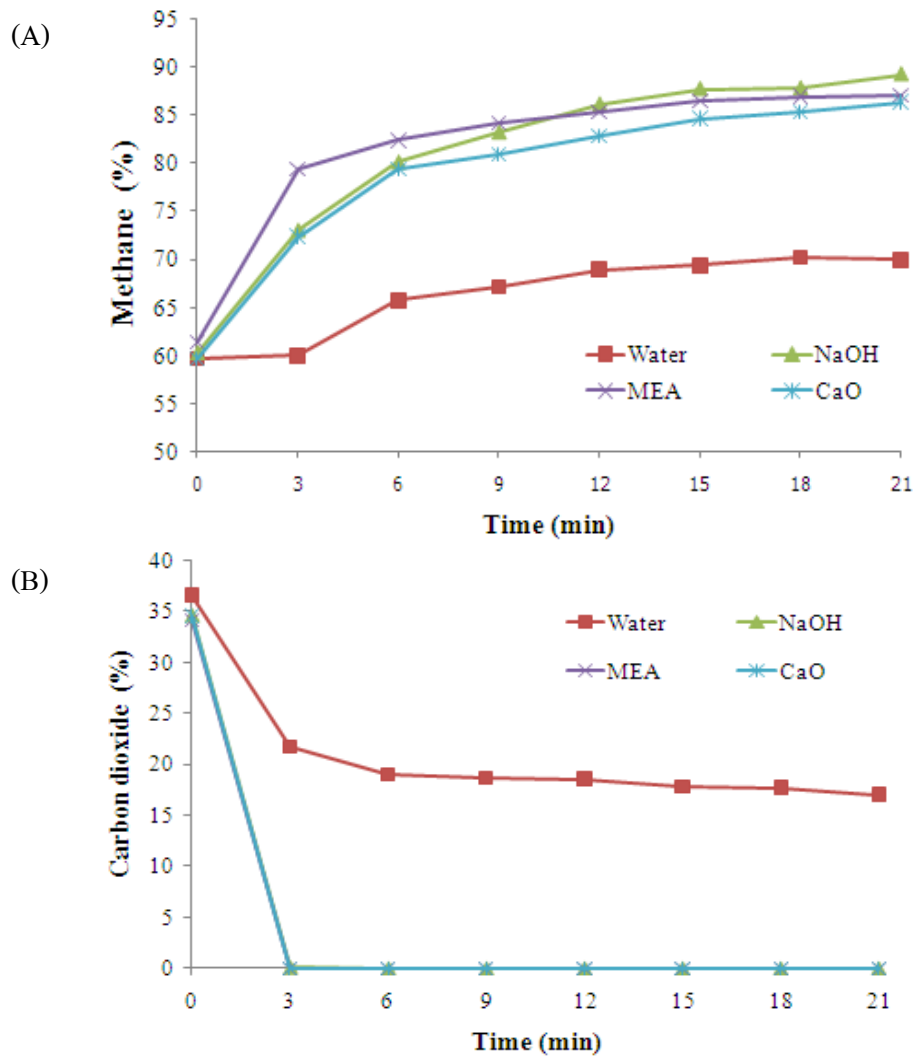
50-60 ซึ่งช่วงอุณหภูมินี้มีค่าใกล้เคียงกับที่สมการได้ทำนายค่าไว้ คือ 40 และ 43 องศาเซลเซียส ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ในการนำข้อมูลจากงานวิจัยนี้ไปเป็นค่าแนะนำในการเดินระบบของโรงงาน

4.7 การทำบริสุทธิ์ก๊าซชีวภาพที่ได้จากการย่อยสลายแบบไร้อากาศโดยใช้น้ำเสียร่วมกับกากตะกอนดีแคนเตอร์

4.7.1 ชนิดของสารในการทำบริสุทธิ์ก๊าซชีวภาพ

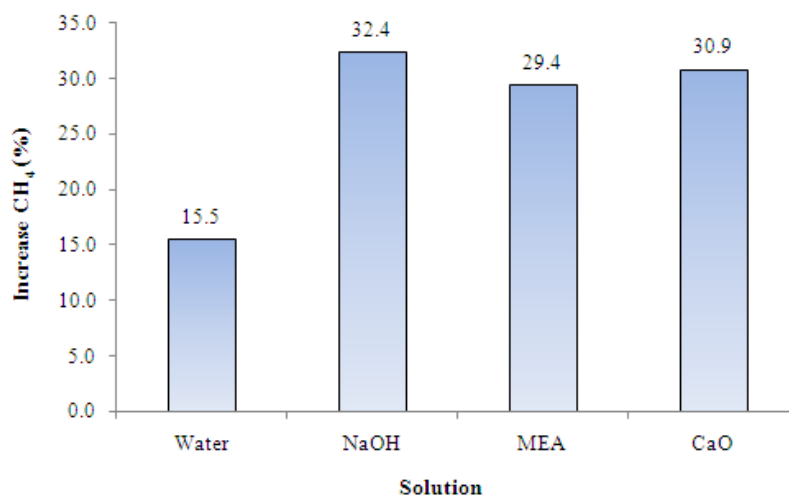
จากการวิเคราะห์ห้องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพเริ่มต้น พบว่ามีก๊าซมีเทนในช่วง 59.7-61.4% ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในช่วง 34.1-36.6% หลังจากนั้นนำตัวอย่างก๊าซผ่านคอลัมน์ที่มีวัสดุตัวกลางพลาสติก ปริมาตร 1 ลิตร โดยใช้ Peristaltic pump ที่ความเร็วรอบ 4.92 ลิตร/ชั่วโมง คิดเป็น EBRT เท่ากับ 9.5 นาที มีสารละลายแต่ละชนิด ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือ โซดาไฟ, โมโนเอทานอลเอมีน (MEA) และปูนขาว (CaO) ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ (ปรกรณ์ ถนอมพงษ์ชาติ, 2552) โดยใช้น้ำกลั่นเป็นชุดควบคุม พบว่า สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ มีประสิทธิภาพสูงสุดในการเพิ่มสัดส่วนก๊าซมีเทน หลังจากผ่านตัวอย่างก๊าซ 21 นาที ให้ปริมาณก๊าซมีเทน $89.22 \pm 0.38\%$ ซึ่งมีความแตกต่างทางสถิติ ($p < 0.05$) มากกว่าชุดการทดลองที่ใช้น้ำกลั่น (ชุดควบคุม) สารละลายโมโนเอทานอลเอมีน และปูนขาว ซึ่งให้ปริมาณก๊าซมีเทนร้อยละ 70.07 ± 0.52 , 87.05 ± 0.63 และ $85.87 \pm 1.90\%$ ตามลำดับ (ภาพที่ 16A) และพบว่า สามารถกำจัดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างสมบูรณ์ในสารละลายเคมีทุกชนิด หลังจากผ่านก๊าซชีวภาพนาที่ที่ 3 ซึ่งมากกว่าชุดควบคุมที่ไม่มีการใช้สารละลายเคมี (ภาพที่ 16B) และมีปริมาณการเพิ่มขึ้นสูงสุดของก๊าซมีเทนคิดเป็นปริมาณที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ 32.4, 15.5, 29.4 และ 30.8% เมื่อใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์, น้ำกลั่น, โมโนเอทานอลเอมีน และปูนขาว ตามลำดับ (ภาพที่ 17) การที่สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์มีประสิทธิภาพดีในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เพราะสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารโมเลกุลที่มีขั้ว ทำให้มีประสิทธิภาพดีในการจับกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นก๊าซโมเลกุลที่มีขั้ว ส่วนก๊าซมีเทนนั้นเป็นก๊าซโมเลกุลที่ไม่มีขั้ว จึงไม่โดนจับด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ได้ (Appels *et al.*, 2008) ซึ่งตรงกับงานวิจัยของ ปรกรณ์ ถนอมพงษ์ชาติ (2552) ที่ศึกษาชนิดของสาร โซเดียมไฮดรอกไซด์ โมโนเอทานอลเอมีน และปูนขาว ต่อการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ พบว่าการใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์หรือสารโซดาไฟ ที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ใช้อัตราการไหลของก๊าซชีวภาพและสารละลาย 3 ลิตรต่อนาที เป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ร้อยละ 94.4 และเมื่อศึกษาความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของการนำมาประยุกต์ใช้งานด้านอุตสาหกรรม โดยการเปรียบเทียบราคา (บาท)/ปริมาณลูกบาศก์เมตรก๊าซชีวภาพ ที่ผ่านการทำปฏิกิริยา พบว่า สารละลายปูนขาวมีราคาถูกที่สุด รองลงมาคือ สารละลายโซดาไฟ และแพงที่สุดคือ โมโนเอทานอลเอมีน แต่สารละลายปูนขาว เมื่อทำปฏิกิริยากับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์แล้ว จะเกิดการรวมตัวกลายเป็นแคลเซียมคาร์บอเนต ติดตามผิวของคอลัมน์และวัสดุตัวกลาง ทำให้ในระบบท่อและหัวฉีดอุดตันได้ ต้องทำความสะอาดบ่อยครั้ง หากแก่การบำรุงรักษา ส่วนสารโมโนเอทานอลเอมีน

ถึงแม้ว่าจะมีประสิทธิภาพสูงในการลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แต่มีราคาที่สูง จึงไม่เหมาะสมต่อการนำมาใช้งานทั้งในระดับอุตสาหกรรม (Tippayawong and Thanompongchart, 2010) ซึ่งจากการทดลองทำให้สามารถเลือกสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งให้ประสิทธิภาพที่ดีและราคาถูก มาใช้ในการทดลองถัดไป



ภาพที่ 16 ประสิทธิภาพของสารละลายเคมีในการทำบริสุทธิ์ก๊าซชีวภาพโดยใช้ถังปฏิกรณ์ 1 ลิตร

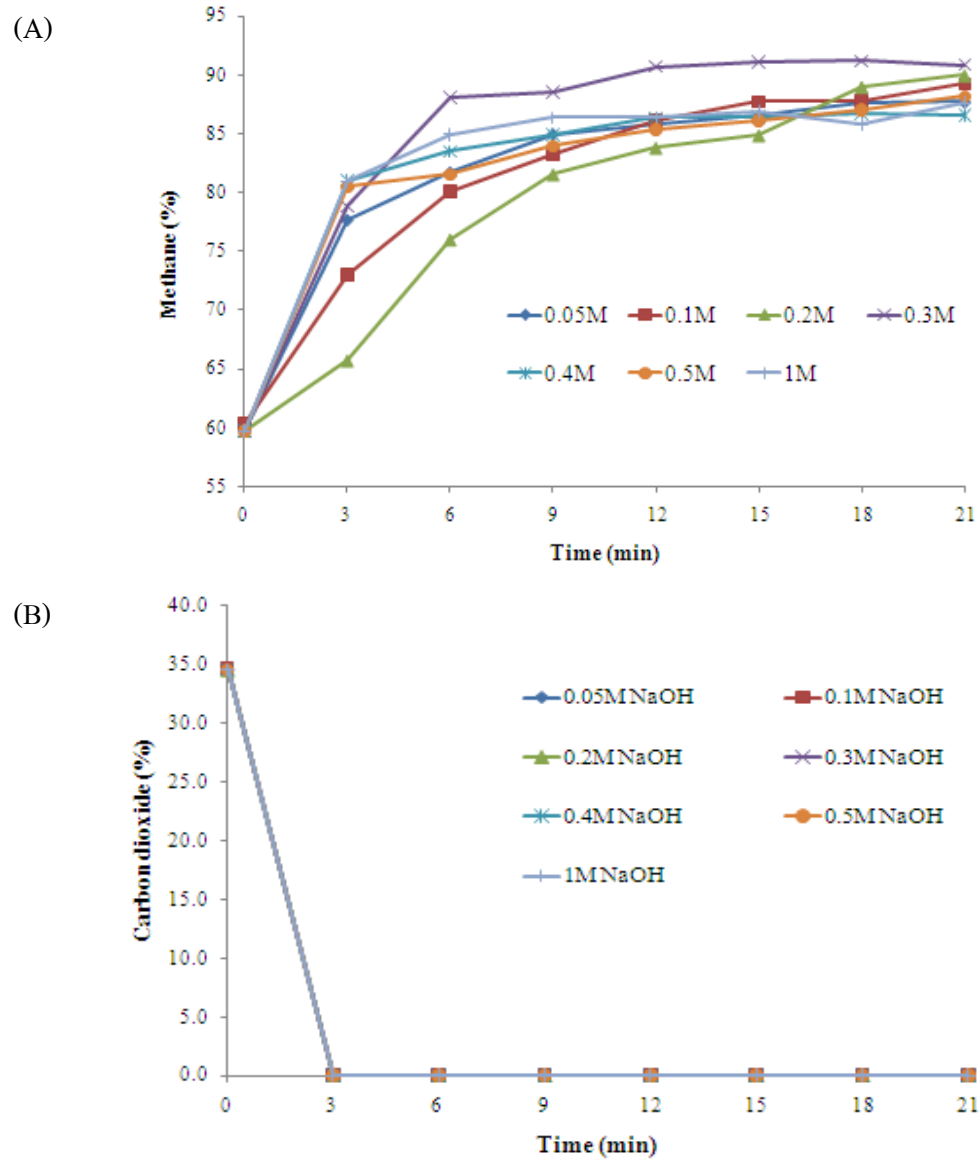
A; methane B; carbon dioxide



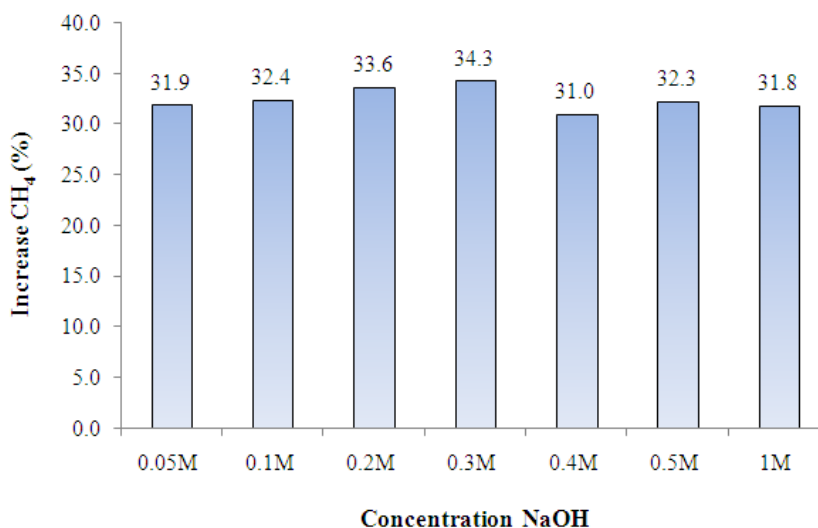
ภาพที่ 17 ร้อยละของการเพิ่มขึ้นสูงสุดของก๊าซมีเทนหลังจากการทำปฏิกิริยาก๊าซชีวภาพด้วยสารละลายเคมีโดยใช้ถังปฏิกรณ์ 1 ลิตร

4.7.2 ความเข้มข้นของสารในการทำปฏิกิริยาก๊าซชีวภาพ

ทำการทดลองโดยนำตัวอย่างก๊าซผ่านคอลัมน์ที่มีวัสดุตัวกลางพลาสติก ที่อัตรา 4.92 ลิตร/ชั่วโมง คิดเป็น EBRT เท่ากับ 9.5 นาที ภายในคอลัมน์มีสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ระดับความเข้มข้นแตกต่างกันที่ 0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5 และ 1 โมลาร์ พบว่า ที่ความเข้มข้น 0.3 โมลาร์ มีประสิทธิภาพสูงสุดในการเพิ่มสัดส่วนก๊าซมีเทนตั้งแต่นาทีที่ 6 ซึ่งมีความแตกต่างทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยมีปริมาณก๊าซมีเทนเท่ากับ $88.0 \pm 0.13\%$ และสัดส่วนมีเทนจะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนนาทีที่ 21 ให้สัดส่วนก๊าซมีเทน $90.9 \pm 0.99\%$ (ภาพที่ 18A) จึงเลือกใช้ความเข้มข้นที่ 0.3 โมลาร์ มาใช้ในการทดลองถัดไป เพราะลดระยะเวลาในการทำปฏิกิริยาก๊าซมีเทน เมื่อเปรียบเทียบกับความเข้มข้นที่ระดับต่างกัน และทุกความเข้มข้นสามารถลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างสมบูรณ์หลังจากนาทีที่ 3 (ภาพที่ 18B) และมีปริมาณการเพิ่มขึ้นของก๊าซมีเทนสูงสุดคิดเป็น 34.3% ที่ความเข้มข้นโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.3 โมลาร์ (ภาพที่ 19) และที่ความเข้มข้นของสารละลายที่สูงจะทำให้ประสิทธิภาพการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ลดลง เพราะว่า ผลของพีเอชและการแตกตัวของคาร์บอนไดออกไซด์ ยิ่งพีเอชมีค่าสูงขึ้นความสามารถในการละลายของคาร์บอนไดออกไซด์ยิ่งลดลง เพราะพีเอชที่มากกว่า 10 คาร์บอนจะอยู่ในรูปของเกลือคาร์บอเนต (CO_3^{2-}) ละลายยากกว่าเมื่อพีเอชอยู่ในช่วง 7-9 คาร์บอนจะอยู่ในรูปเกลือไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) และพีเอชประมาณ 5-6 คาร์บอนไดออกไซด์จะอยู่ในรูปของก๊าซที่ละลายน้ำได้ (Becker, 1993) โดยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เมื่อทำปฏิกิริยากับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จะรวมตัวกลายเป็นโซเดียมไบคาร์บอเนต จึงมีประสิทธิภาพในการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ได้ดีอีกด้วย (Arthur และคณะ, 1997)



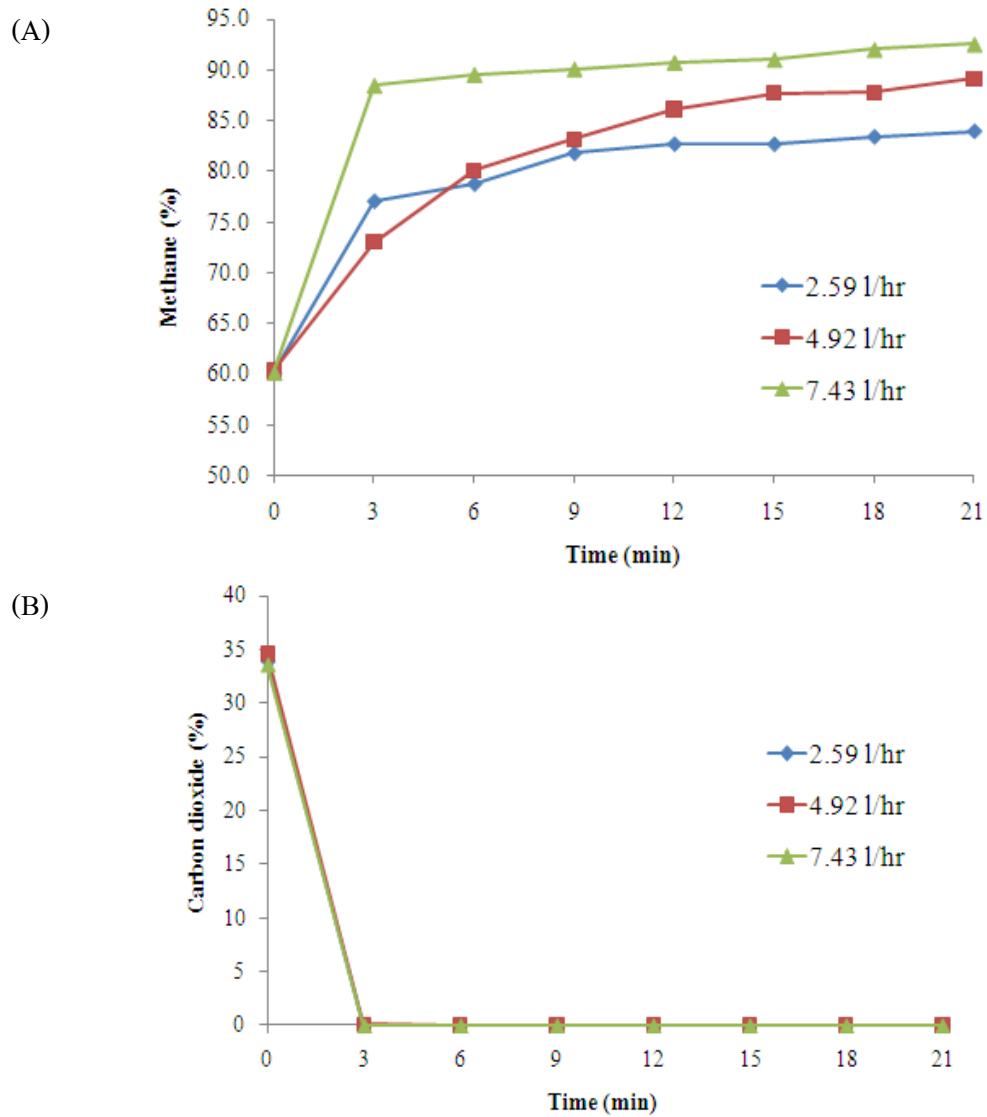
ภาพที่ 18 ประสิทธิภาพของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ ในการทำปฏิกิริยาค้ำชีวภาพโดยใช้ถังปฏิกรณ์ 1 ลิตร A; methane B; carbon dioxide



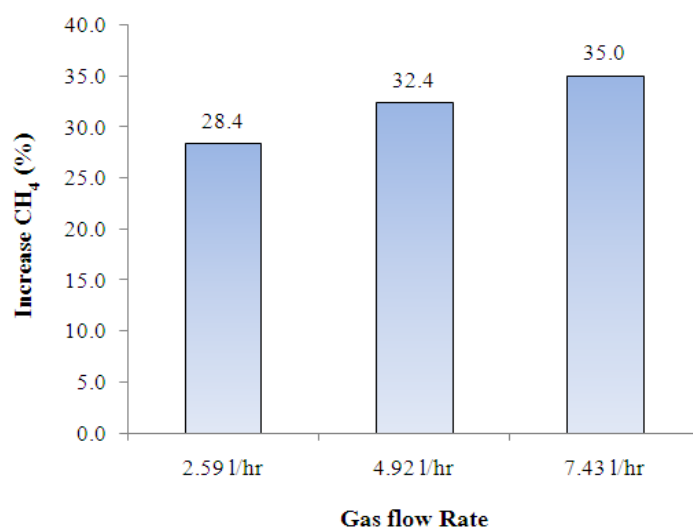
ภาพที่ 19 ร้อยละของการเพิ่มขึ้นสูงสุดของก๊าซมีเทนหลังจากการทำปฏิกิริยาก๊าซชีวภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้นต่างๆ โดยใช้ถังปฏิกรณ์ 1 ลิตร

4.7.3 อัตราการไหลของก๊าซในการทำปฏิกิริยาก๊าซชีวภาพ

ทำการทดลองโดยนำตัวอย่างก๊าซผ่านคอลัมน์ที่มีวัสดุตัวกลางพลาสติก ซึ่งมีสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 0.3 โมลาร์ โดยใช้ Peristaltic pump อัตราการไหลของก๊าซชีวภาพที่ 2.59, 4.92 และ 7.43 ลิตร/ชั่วโมง คิดเป็น EBRT เท่ากับ 18, 9.5 และ 6.2 นาที เพื่อเปรียบเทียบอัตราการไหลของก๊าซต่อการทำปฏิกิริยา พบว่า ที่อัตราการไหลของก๊าซ 7.43 ลิตร/ชั่วโมง EBRT เท่ากับ 6.2 นาที มีประสิทธิภาพดีที่สุดในการเพิ่มสัดส่วนก๊าซมีเทน หลังจาก 21 นาที โดยมีก๊าซมีเทน $92.6 \pm 0.1\%$ ซึ่งมีความแตกต่างทางสถิติ ($p < 0.05$) มากกว่าชุดการทดลองที่ใช้อัตราการไหลของก๊าซ 2.59 และ 4.92 ลิตร/ชั่วโมง (EBRT เท่ากับ 18 และ 9.5 นาที) โดยมีก๊าซมีเทน 84.0 ± 0.35 และ $90.9 \pm 0.99\%$ ตามลำดับ (ภาพที่ 20A) และทุกความเข้มข้นสามารถลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้อย่างสมบูรณ์หลังจากนาที่ที่ 3 (ภาพที่ 20B) มีปริมาณการเพิ่มขึ้นของก๊าซมีเทนสูงสุดคิดเป็น 28.4, 32.4, 35.0% ที่อัตราการไหลของก๊าซ 2.59, 4.92 และ 7.43 ลิตร/ชั่วโมง ตามลำดับ (ภาพที่ 21) โดยพบว่า อัตราการไหลของก๊าซที่สูงขึ้น จะมีประสิทธิภาพมากกว่า เพราะเมื่อก๊าซผ่าน peristaltic pump ที่ความเร็วสูงกว่า ขนาดของฟองก๊าซจะเล็ก ทำให้ ก๊าซลอยขึ้นช้ากว่า จึงสัมผัสกับสารละลายในคอลัมน์ได้นานกว่าด้วย



ภาพที่ 20 ประสิทธิภาพของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.3 โมลาร์ ที่อัตราการไหล
 ต่างๆ ของการทำบริสุทธิ์ก๊าซชีวภาพโดยใช้ถังปฏิกรณ์ 1 ลิตร A; methane B; carbon
 dioxide



ภาพที่ 21 ร้อยละของการเพิ่มขึ้นสูงสุดของก๊าซมีเทนหลังจากการทำปฏิกิริยาก๊าซชีวภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.3 โมลาร์ ที่อัตราการไหลต่างๆ โดยใช้ถังปฏิกรณ์ 1 ลิตร

บทที่ 5

บทสรุป

1. จากการศึกษาชนิดสารตั้งต้นจากวัสดุเศษเหลือร่วมกับน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์มที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพ โดยการหมักน้ำเสียจากบ่อรวบรวมน้ำเสียร่วมกับวัสดุเศษเหลือ ได้แก่ ทะลายปาล์ม เส้นใยปาล์ม และกากตะกอนดีแคนเตอร์ ร้อยละ 0.5 ของปริมาตรการหมัก โดยทำการหมักแบบกะ พบว่า การใช้น้ำเสียร่วมกับกากตะกอนดีแคนเตอร์ ให้ผลผลิตมีเทนสูงที่สุด
2. จากการศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพของกากตะกอนดีแคนเตอร์เตอร์ (Biochemical Methane Potential, BMP) พบว่าที่อัตราส่วน (inoculums to substrate volatile solids ratios; ISRS) เท่ากับ 1 มีผลผลิตมีเทนที่ได้ (methane yield) เท่ากับ 0.304 มิลลิลิตรมีเทน/มิลลิกรัมของแข็งระเหยที่ ถูกกำจัด
3. จากการศึกษาผลของปริมาณกากตะกอนดีแคนเตอร์ (0, 0.25, 0.50, 0.75 และ 1.0% น้ำหนักแห้ง/ปริมาตรการหมัก) ในการหมักร่วมกับน้ำเสียโรงงานสกัดน้ำมันปาล์ม โดยทำการหมักแบบกะ พบว่า การใช้กากตะกอนดีแคนเตอร์หมักร่วมกับน้ำเสียในปริมาณ 0.5 % จะให้ปริมาณก๊าซชีวภาพมากที่สุดและมีปริมาณมากกว่าการใช้น้ำเสียอย่างเดียวในการผลิตก๊าซชีวภาพ
4. จากการศึกษาผลของอัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่ 2.0, 4.5 และ 6.7 กรัมVS/ลิตร-วันต่อการผลิตก๊าซชีวภาพในระบบหมักแบบกึ่งต่อเนื่อง พบว่า อัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่ 6.7 กรัมVS/ลิตร-วัน ระยะเวลาเก็บกักน้ำเสีย 15 วัน สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้มากที่สุด
5. จากการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียและวัสดุหมักร่วมกากตะกอนดีแคนเตอร์ในระบบแบบกึ่งต่อเนื่อง โดยใช้ Response surface methodology (RSM) โดยมีปัจจัยที่ศึกษาคือ อุณหภูมิ อัตราการป้อนสารอินทรีย์ และ ระยะเวลาการกวน และมีผลตอบสนองคือ ปริมาณมีเทน (% Methane) ผลผลิตมีเทน (methane yield) และ ประสิทธิภาพการกำจัดซีโอดี (% COD Removal) จากการทดลองสามารถสร้างสมการแบบจำลองได้ 3 สมการ และสามารถทำนายสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตมีเทนและกำจัดซีโอดีได้ใกล้เคียงกัน คือ การเดินระบบที่อุณหภูมิ 40-43 องศาเซลเซียส อัตราการป้อนสารอินทรีย์ เท่ากับ 6.5-6.9 กรัมVS/ลิตร-วัน และระยะเวลาการกวน 58-67% (กวน 13-16 ชั่วโมง/วัน) จากการเดินระบบในสภาวะที่เหมาะสม พบว่า สามารถผลิตปริมาณมีเทนได้ 68.5% มีผลผลิตมีเทนที่ได้ 0.392 มิลลิลิตรมีเทน/มิลลิกรัมของแข็งระเหยที่ถูกกำจัด ประสิทธิภาพการบำบัดซีโอดี 85.1% และเมื่อเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทดลองและจากการทำนายพบว่า มีความผิดพลาดน้อยมาก (< 2%)
6. จากการศึกษาการทำปฏิกิริยาก๊าซชีวภาพด้วยวิธีการทางเคมีด้วยคอลัมน์ 1 ลิตร ในห้องปฏิบัติการ พบว่า การใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้น 0.3 โมลาร์ อัตราการไหลของก๊าซ

ชีวภาพ 7.43 ลิตร/ชั่วโมง มีความเหมาะสมที่สุดต่อการทำปฏิกิริยาก๊าซมีเทน โดยมีปริมาณก๊าซมีเทนสูงสุด 92.6% และสามารถลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ได้ร้อยละ 100 ตั้งแต่รอบที่ที่ 3 เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้กากถั่ว สารละลายโมโนเอทานอลเอมีน และน้ำปูนขาว ตามลำดับ

เอกสารอ้างอิง

- กรมโรงงานอุตสาหกรรม. กระทรวงอุตสาหกรรม. 2555. ข้อมูลโรงงาน [ออนไลน์]. สืบค้นจาก (<http://sql.diw.go.th/results1.asp>)(18 มิถุนายน 2555)
- จิรสมัย คลชม. 2551. ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากกรดอินทรีย์ระเหยในระบบถังหมักแบบสองขั้นตอน. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยราชภัฏพระนคร.
- ปกรณ ignonพงษ์ชาติ. 2552. การแยกคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากก๊าซชีวภาพ โดยการดูดซับด้วยของเหลวในคอลัมน์อัดตัว. วิทยานิพนธ์วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- แผนงานสนับสนุนความมั่นคงทางอาหาร. 2553. ข่าวฐานทรัพยากรอาหาร (ออนไลน์). สืบค้นจาก: <http://www.food-resources.org> (16 มีนาคม 2554).
- พรชัย เหลืองอากาศ. 2549. คัมภีร์ปาล์มน้ำมัน พืชเศรษฐกิจเพื่อบริโภคและอุปโภค. พิมพ์ครั้งที่ 1. หน้า 294-302. มติชน. กรุงเทพฯ.
- รณชัย ไชยศรี. 2550. กระบวนการหมักแบบไร้อากาศสองขั้นตอนของน้ำเสียโรงงานผลิตน้ำมันปาล์มในถังปฏิกรณ์ UASB และ UFAF. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- วาริ ช้วนรักธรรม. 2548. นวัตกรรมน้ำมันปาล์มจากอุตสาหกรรมอาหารสู่แหล่งพลังงานทดแทนของไทย (ออนไลน์). สืบค้นจาก <http://www.technologymedia.co.th/articleDetail.asp?arid=3143&pid=308> (22 กุมภาพันธ์ 2554)
- สมฤดี ฤทธิ์ยากุล. 2551. ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพ และผลพลอยได้จากกรหมักมูลสุกรร่วมกับสาหร่ายหนามจากทะเลสาบสงขลา. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาการจัดการสิ่งแวดล้อม. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ศุวศา กานตวนิชกูร. 2535. เทคโนโลยีการหมุนเวียนทรัพยากรมาใช้ใหม่. ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- ศูนย์ประสานงานโครงการส่งเสริมเทคโนโลยีก๊าซชีวภาพ. 2553. เทคโนโลยีก๊าซชีวภาพ (ออนไลน์). สืบค้นจาก : <http://www.thaibiogas.net/th/biogas> (25 มกราคม 2553)
- เอกชัย พฤษย์อำไพ. 2548. คู่มือปาล์มน้ำมัน. พิมพ์ครั้งที่ 1. หน้า 241-284. เพ็ท-แพชั่น พับลิชชิง. กรุงเทพฯ.
- Alonso-Vicario, A., Ochoa-Gomez, J.R., Gil-Rio, S., Gomez-Jimenez-Aberasturi, O., Ramirez-Lopez, C.A., Torrecilla-Soria, J. and Dominguez, A. 2010. Purification and upgrading of biogas by pressure swing adsorption on synthetic and natural zeolites. *Micropo. Mesopor. Mat.* 134: 100-107.

- Angelidaki, I. and Ellegaard, L. 2003. Codigestion of manure and organic wastes in centralized biogas plants status and future trends. *Appl Biochem Biotech* 109: 95-105.
- AOAC. 1990. Official Method of Analysis of the Association of Official Analysis Chemists. 15th ed. AOAC., USA.
- APHA, AWWA and WPCF. 1998. Standard Method of the Examination of the Water and Wastewater. 16th ed. American Public Health Association, Wastington, DC.
- Appel, L., Baeyens, J., Degreve, J. and Dewil, R. 2008. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Prog Energ Combust.* 34:755-781.
- Arouaa, M.K., Dauda, W.M.A.W., Yinb, C.Y. and Adinata, D. 2008. Adsorption capacities of carbon dioxide, oxygen, nitrogen and methane on carbon molecular basket derived from polyethyleneimine impregnation on microporous palm shell activated carbon. *Sep. Purif. Technol.* 62:609-613.
- Arthur, L. K. and Richard, B. N. 1997. Gas Purification. Vol. 15. Texas. Gulf Publishing.
- Azbar, N., Keskin, T. and Yuruyen, A. 2008. Enhancement of biogas production from olive mill effluent (OME) by co-digestion. *Biomass Bioenerg.* 32: 1195-1201.
- Becker, E.W. 1993. *Microalgae Biotechnology and Microbiology*. Cambridge University Press. 293 p.
- Bitton, G. 1999. *Wastewater Microbiology*, Wiley-Liss, New York.
- Bolzonella, D., Battistoni, P., Susini, C. and Cecchi, F. 2006. Anaerobic co-digestion of waste activated sludge and OFMSW: the experiences of Viareggio and Treviso plants (Italy). *Water Sci Technol.* 53: 203-211.
- Boubaker, F. and Ridha, B.C. 2007. Anaerobic co-digestion of olive mill wastewater with olive mill solid waste in a tubular digester at mesophilic temperature. *Bioresource Technology.* 98: 769-774.
- Boubaker, F. and Ridha, B.C. 2008. Optimisation of the mesophilic anaerobic co-digestion of olive mill wastewater with olive mill solid waste in a batch digester. *Desalination.* 228: 159-167.
- Boubaker, F. and Ridha, B.C. 2010. Two-phase anaerobic co-digestion of olive mill wastes in semi-continuous digesters at mesophilic temperature. *Bioresource Technol.* 101:1628-1634.
- Dareioti, M.A., Dokianakis, S.N., Stamatelatos, K., Zafiri, C. and Kornaros, M. 2009. Biogas production from anaerobic co-digestion of agroindustrial wastewaters under mesophilic conditions in a two-stage process. *Desalination.* 248: 891-906.
- Hamid, R. G. and Dariush, M. 2008. Selectivity study of H₂S and CO₂ absorption from gaseous mixtures by MEA in packed beds. *Chem Eng Res Des.* 86: 401-409.

- Ho, J. and Sung, S. 2010. Methanogenic activities in anaerobic membrane bioreactors (AnMBR) treating synthetic municipal wastewater. *Bioresource Technol.* 101:2191-2196.
- Lise, A., Jan, B. and Raf, D. 2008. Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Prog Energ Combust.* 34: 755-781.
- Ruihong, Z., Hamed, M., Karl, H., Fengyu, W., Guangqing, L., Chris, C. and Paul, G. 2007. Characterization of food waste as feedstock for anaerobic digestion. *Bioresource Technol.* 98: 929-935.
- Osorio, F. and Torres, J.C. 2009. Biogas purification from anaerobic digestion in a wastewater treatment plant for biofuel production. *Renewable energy.* 34:2164-2171.
- Raposo, F., Banks, C.J., Siegert, I., Heaven, S. and Borja, R. 2006. Influence of inoculum to substrate ratio on the biochemical methane potential of maize in batch tests. *Process Biochem* 41: 1444–1450.
- Tippayawong, N. and Thanompongchart, P. 2010. Biogas quality upgrade by simultaneous removal of CO₂ and H₂S in a packed column reactor. *Energy* 35:4531-4535.
- Walsh, J.L., Ross, C.C., Smith, M.S. and Harper, S.R. 1989. Utilization of Biogas , *Biomass.* 20: 277-290.
- Xu, X., Zhao, X., Sun L. and Liu, X. 2009. Adsorption separation of carbon dioxide, methane and nitrogen on monoethanol amine modified β -zeolite. *Journal of Natural Gas Chemistry.* 18:167-172.