

The 2020 – 2021 TIChE National Chemical Engineering
Student Design Competition

การผลิตพลังงานที่ยั่งยืนจากกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศขั้นสูง
(Sustainable energy from advanced AD process)

The 2020 – 2021 TIChE National Chemical Engineering
Student Design Competition

การผลิตพลังงานที่ยั่งยืนจากกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศขั้นสูง
(Sustainable energy from advanced AD process)

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ.....	2
สารบัญตาราง.....	3
สารบัญภาพ.....	6
บทนำ.....	8
วัตถุประสงค์.....	9
การตรวจเอกสาร.....	10
อุปกรณ์และวิธีการ.....	29
อุปกรณ์.....	29
วิธีการ.....	29
ผลและวิจารณ์.....	33
สรุปและข้อเสนอแนะ.....	67
สรุป.....	67
ข้อเสนอแนะ.....	68
เอกสารและสิ่งอ้างอิง.....	69
ภาคผนวก.....	74
ภาคผนวก ก สมดุลมวล.....	74
ภาคผนวก ข คำนวณต้นทุนผลิตภัณฑ์รวม.....	102
ภาคผนวก ค คำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์.....	106

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	องค์ประกอบจากขยะชุมชน.....	10
2	องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ.....	12
3	ขั้นตอนในการออกแบบกระบวนการผลิต.....	24
4	ปริมาณของสารที่เข้าและออกทั้งหมดในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศชั้นสูง	34
5	เปรียบเทียบกับก๊าซชีวภาพที่ได้ผลจากการสร้างแบบจำลองการผลิตกับทฤษฎี.....	35
6	เปรียบเทียบอัตราส่วนปริมาตรต่อปริมาตรของก๊าซชีวภาพที่ก่อนและหลังการทำ บริสุทธิ์.....	35
7	พลังงานที่เกิดขึ้นในแต่ละอุปกรณ์ในกระบวนการผลิต.....	36
8	สัดส่วนของก๊าซชีวภาพที่นำมาเปลี่ยนเป็นพลังงาน และปริมาณของพลังงานแต่ละ ชนิด.....	38
9	สาหร่ายบิวโกลที่ใช้ในกระบวนการผลิต.....	38
10	รายละเอียดของอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศชั้นสูง...	39
11	ขนาดและข้อมูลต่าง ๆ ของถังผสม (MX-1).....	40
12	ขนาดและข้อมูลต่าง ๆ ของถังจัดเก็บ (V-1).....	41
13	ขนาดและข้อมูลต่าง ๆ ของถังย่อยสลาย (R-1).....	41
14	ขนาดและข้อมูลต่าง ๆ ของถังเก็บน้ำขยะ (ST-2).....	41
15	ขนาดและข้อมูลต่าง ๆ ของถังเก็บปุ๋ย (ST-3).....	42
16	ขนาดและข้อมูลต่าง ๆ ของปั๊ม (P-1).....	42
17	ขนาดและข้อมูลต่าง ๆ ของเครื่องเป่าลม (B-1).....	42
18	ขนาดและข้อมูลต่าง ๆ ของเครื่องผสม (MX-2).....	43
19	ขนาดและข้อมูลต่าง ๆ ของเครื่องดูดซับ (AB-1).....	43
20	ขนาดและข้อมูลต่าง ๆ ของปั๊ม (P-2).....	43
21	ขนาดและข้อมูลต่าง ๆ ของถังจัดเก็บ (V-2).....	44
22	ขนาดและข้อมูลต่าง ๆ ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (HX-1).....	44

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
23	ขนาดและข้อมูลต่าง ๆ ของเครื่องแยก (T-1).....	45
24	ขนาดและข้อมูลต่าง ๆ ของเครื่องทำความเย็น (H-1).....	46
25	ขนาดและข้อมูลต่าง ๆ ของเครื่องทำความเย็น (H-2).....	46
26	ขนาดและข้อมูลต่าง ๆ ของคอมเพลสเซอร์ (CP-1).....	47
27	ขนาดและข้อมูลต่าง ๆ ของคอมเพลสเซอร์ (CP-2).....	47
28	ขนาดและข้อมูลต่าง ๆ ของคอมเพลสเซอร์ (CP-3).....	48
29	ขนาดและข้อมูลต่าง ๆ ของคอมเพลสเซอร์ (CP-4).....	48
30	ขนาดและข้อมูลต่าง ๆ ของเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า (TB-1).....	48
31	ขนาดและข้อมูลต่าง ๆ ของเครื่องทำความเย็น (H-3).....	49
32	ขนาดและข้อมูลต่าง ๆ ของเครื่องทำความเย็น (H-4).....	49
33	ขนาดและข้อมูลต่าง ๆ ของเตาเผา (R-2).....	50
34	อันตรายที่สามารถเกิดขึ้นได้ภายในโรงงานผลิตก๊าซชีวภาพ.....	52
35	ผลกระทบต่อสุขภาพ, สิ่งแวดล้อมและสังคมในทางบวกและทางลบจากการสร้าง โรงงานผลิตก๊าซชีวภาพ.....	57
36	รายละเอียดจำนวนเงินลงทุนในประเภทต่าง ๆ.....	58
37	ผลกระทบทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศขั้นสูงโดยการ พิจารณาวัฏจักรชีวิต.....	62
38	ราคาสารทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิต.....	65
39	ผลการคำนวณการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์.....	65
ตารางภาคผนวกที่		
ก1	สมมูลมวลของสายการผลิตที่ 5 (PL-5) และสายที่ 6 (PL-6).....	75
ก2	สมมูลมวลของสายการผลิตที่ 7 (PL-7) และสายที่ 8 (PL-8).....	76
ก3	สมมูลมวลของสายการผลิตที่ 9 (PL-9) และสายที่ 18 (PL-18).....	77

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางภาคผนวกที่	หน้า
ก4 สมดุลมวลของสายการผลิตที่ 19 (PL-19) และสายที่ 20 (PL-20).....	78
ก5 สมดุลมวลของสายการผลิตที่ 21 (PL-21) และสายที่ 22 (PL-22).....	79
ก6 สมดุลมวลของสายการผลิตที่ 23 (PL-23) และสายที่ 24 (PL-24).....	80
ก7 สมดุลมวลของสายการผลิตที่ 10 (PL-10) และสายที่ 11 (PL-11).....	81
ก8 สมดุลมวลของสายการผลิตที่ 12 (PL-12) และสายที่ 13 (PL-22).....	82
ก9 สมดุลมวลของสายการผลิตที่ 14 (PL-14) และสายที่ 15 (PL-15).....	84
ก10 สมดุลมวลของสายการผลิตที่ 16 (PL-16) และสายที่ 17 (PL-17).....	85
ก11 สมดุลมวลของสายการผลิตที่ 40 (PL-40) และสายที่ 41 (PL-41).....	87
ก12 สมดุลมวลของสายการผลิตที่ 42 (PL-42) และสายที่ 43 (PL-43).....	88
ก13 สมดุลมวลของสายการผลิตที่ 44 (PL-44) และสายที่ 45 (PL-45).....	90
ก14 สมดุลมวลของสายการผลิตที่ 25 (PL-25) และสายที่ 26 (PL-26).....	91
ก15 สมดุลมวลของสายการผลิตที่ 27 (PL-27) และสายที่ 28 (PL-28).....	93
ก16 สมดุลมวลของสายการผลิตที่ 29 (PL-29) และสายที่ 30 (PL-30).....	94
ก17 สมดุลมวลของสายการผลิตที่ 31 (PL-31) และสายที่ 33 (PL-33).....	96
ก18 สมดุลมวลของสายการผลิตที่ 34 (PL-34) และสายที่ 35 (PL-35).....	97
ก19 สมดุลมวลของสายการผลิตที่ 36 (PL-36) และสายที่ 37 (PL-37).....	99
ก20 สมดุลมวลของสายการผลิตที่ 38 (PL-38).....	100
ข1 การคำนวณต้นทุนผลิตภัณฑ์รวม.....	103
ค1 ข้อมูลที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์ความคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์.....	107
ค2 การคำนวณความคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์.....	107
ค3 ผลการคำนวณการวิเคราะห์ความคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์.....	108

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	กระบวนการของวิธีการย่อยสลายแบบไร้อากาศ.....	15
2	ตัวอย่างของถังกวนโดยใช้ใบพัดในการกวน.....	17
3	ตัวอย่างของถังกวนที่มีการใช้การสูบน้ำเสียหมุนเวียนภายในถังปฏิกิริยา.....	18
4	ตัวอย่างถังกวนที่ใช้แก๊สที่เกิดขึ้นภายในถังเป็นตัวกวน.....	19
5	แผนภาพกล่องของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศขั้นสูง.....	26
6	แผนผังการไหลของสารในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศขั้นสูง.....	30
7	แผนภาพการสร้างแบบจำลองกระบวนการผลิตในโปรแกรม Aspen Plus.....	33
8	แผนผังโรงงานกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศขั้นสูง.....	51
9	ขอบเขตการพิจารณาวัฏจักรชีวิตของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศขั้นสูง.....	61
10	ผลกระทบด้านต่าง ๆ จากกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศขั้นสูงหลังการทำเป็นมาตรฐานเดียวกัน.....	63

กิตติกรรมประกาศ

โครงการฉบับนี้สำเร็จได้ด้วยการสนับสนุนจาก คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยของคณะผู้จัดทำ ซึ่งรวมถึงความช่วยเหลือ คำปรึกษา และข้อเสนอแนะหรือแนะนำจากคณาจารย์ บุคลากรและนิสิตปริญญาโท ของภาควิชาวิศวกรรมเคมีทั้งหลาย คณะผู้จัดทำจึงขอขอบพระคุณทุกคนเป็นอย่างยิ่ง

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และเพื่อนของคณะผู้จัดทำที่คอยสนับสนุน ให้กำลังใจในการทำโครงการฉบับนี้ และขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการที่ให้คำปรึกษา และความช่วยเหลือเป็นอย่างดีตลอดมา

คณะผู้จัดทำ

20 มีนาคม 2564

บทนำ

ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันปริมาณของเสียและขยะที่มีปริมาณเพิ่มขึ้น ทั้งจากชุมชน การทำเกษตรกรรมและโรงงานอุตสาหกรรม ต่างส่งผลให้เกิดปัญหาต่าง ๆ มากมาย ไม่ว่าจะเป็นปัญหาขยะล้นพื้นที่ ปัญหาเรื่องความสะอาด หรือเชื้อโรค หรือปัญหาเรื่องกลิ่น เป็นต้น ส่งผลให้หลายภาคส่วนมีแนวคิดที่จะแก้ปัญหา โดยการรณรงค์ในเรื่องการจัดการขยะอย่างถูกวิธี และยังมีแนวคิดที่จะนำขยะแต่ละประเภทมาใช้ประโยชน์เพื่อไม่ให้ขยะถูกทิ้งหรือถูกกำจัดโดยเปล่าประโยชน์

การทำปุ๋ยเป็นหนึ่งในวิธีการแก้ปัญหาขยะประเภทขยะมูลฝอยที่ย่อยสลายได้ง่ายและประหยัด แต่การแก้ปัญหาด้วยวิธีนี้ยังไม่ถือว่าเกิดประโยชน์อย่างจริงจัง เนื่องจากความต้องการในการใช้ปุ๋ยมีเพียงภาคเกษตรกรรมเท่านั้นที่ได้ใช้ประโยชน์ แต่ในสังคมเมืองที่เป็นแหล่งผลิตขยะปริมาณมากนั้น ไม่สามารถนำมาใช้ได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ จึงมีการเสนอแนวคิดในการผลิตก๊าซชีวภาพจากขยะมูลฝอยจากชุมชนและเศษเหลือทิ้งจากมันสำปะหลัง ซึ่งเป็นพืชหลักที่ใช้ในการทำเกษตรกรรม โดยกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศชั้นสูง ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้จุลินทรีย์ภายใต้สภาวะที่ไร้ออกซิเจนในการย่อยสลายขยะให้เกิดเป็นก๊าซชีวภาพ (ออร์แกนิกส์, 2562) ซึ่งนำขยะมูลฝอยเข้าเครื่องผสมเพื่อผสมขยะจากชุมชน และเศษเหลือทิ้งจากมันสำปะหลัง จากนั้นจะเข้าถังหมักเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ โดยจะได้ส่วนที่เป็นของผสมระหว่างของแข็งกับของเหลว และส่วนที่เป็นแก๊ส ส่วนที่เป็นของผสมระหว่างของแข็งและของเหลวจะเข้าเครื่องแยกเพื่อนำของเหลวที่เป็นน้ำชะขยะที่เป็นกรดไปผสมกับขยะใหม่ในเครื่องผสมอีกครั้ง และของแข็งจะนำไปใช้เป็นปุ๋ยสำหรับการเกษตร สำหรับส่วนที่เป็นแก๊สจะมีองค์ประกอบแก๊สหลายชนิด ได้แก่ แก๊สมีเทน, แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์, ไอน้ำและแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ เป็นต้น (กระทรวงพลังงาน, 2554) จะนำไปเข้าเครื่องดูดซับ เพื่อแยกแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากสารที่มีองค์ประกอบของมีเทน และนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

ในโครงการนี้จะศึกษาเกี่ยวกับการนำขยะจากชุมชนร่วมกับเศษเหลือทิ้งจากมันสำปะหลังมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพโดยใช้เทคโนโลยีชั้นสูงซึ่งประกอบด้วย 1) การย่อยวัตถุดิบก่อนเข้าถังก๊าซชีวภาพ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซมีเทน 2) การใช้ระบบดูดซับเพื่อทำให้ก๊าซมีเทนบริสุทธิ์มากขึ้นด้วยสารโมโนเอทานอลามีน (MEA) ซึ่งสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม 3) การใช้ระบบร่วมในการผลิตไฟฟ้าและความร้อน (Combined Heat and Power, CHP) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการใช้เชื้อเพลิง โดยในการศึกษานี้จะใช้โปรแกรม Aspen Plus และมีการคำนึงถึงความปลอดภัย และความอันตรายจากก๊าซเรือนกระจก รวมถึงมีการประเมินความคุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์ เพื่อเป็นข้อมูลในการตัดสินใจสำหรับการนำโครงการนี้ไปพัฒนาและลงทุนต่อไป

วัตถุประสงค์ของโครงการ

- 1) เพื่อสร้างแบบจำลองกระบวนการผลิตไฟฟ้าและเชื้อเพลิงจากขยะจากชุมชนและเศษเหลือทิ้งจากมันสำปะหลังโดยใช้วิธีการย่อยสลายแบบไร้อากาศขั้นสูง
- 2) ศึกษาความเป็นไปได้เชิงเศรษฐศาสตร์และทางเทคนิคของกระบวนการที่ออกแบบ

การตรวจเอกสาร

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1 วัตถุดิบ (Raw Material)

1.1 ขยะจากชุมชน

ขยะจากชุมชนเป็นสิ่งของเหลือทิ้งจากกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ ทั้งการอุปโภคและการบริโภค โดยปริมาณขยะที่มากมายเกิดจากการขาดการจัดการอย่างมีระบบ ซึ่งก่อให้เกิดปัญหาตามมามากมาย (กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, 2560) โดยขยะจากชุมชนประกอบไปด้วย เศษอาหาร 53.49 เปอร์เซ็นต์, พลาสติก 20.12 เปอร์เซ็นต์, กระดาษ 8.95 เปอร์เซ็นต์, แก้วหรือกระจก 5.02 เปอร์เซ็นต์, โลหะ 1.8 เปอร์เซ็นต์และขยะอื่น ๆ เช่น ขยะอันตราย 10.62 เปอร์เซ็นต์ และกำหนดให้ปริมาณขยะจากชุมชนเกิดขึ้น 0.57 กิโลกรัมต่อคนต่อวัน (กระทรวงพลังงาน, 2554) และค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้น ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยปริมาณขยะที่เป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซชีวภาพมีปริมาณ 357.48 ตันต่อวัน ซึ่งองค์ประกอบของขยะจากเศษอาหารได้ถูกศึกษาโดย Wang *et al.* (2016) โดยทำการศึกษาเศษอาหารที่ Xiyuan Canteen of Tongji University โดยข้อมูลขององค์ประกอบขยะจากเศษอาหารประกอบด้วย ไขมัน 22.30 เปอร์เซ็นต์, โปรตีน 29.30 เปอร์เซ็นต์, แป้ง 34.70 เปอร์เซ็นต์และอื่น ๆ 13.70 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 1 องค์ประกอบของขยะจากชุมชน

Percentage of fresh Municipal Waste		
List of items	Wet basis	% humidity
Food & vegetable wastes	53.49	88.3
Plastic	20.12	
Paper	8.95	12.0
Glass	5.02	
Metal	1.80	
Other such as bone / seashell / hazard waste / battery, etc.	10.62	
Total	100	

ที่มา: กระทรวงพลังงาน (2554)

1.2 เศษเหลือทิ้งจากมันสำปะหลัง

ประเทศไทยมีการประกอบอาชีพเกษตรกรรมเป็นส่วนใหญ่ โดยพืชที่ใช้ในการทำเกษตรกรรมจะเป็นมันสำปะหลังเป็นส่วนมาก โดยในต่างจังหวัดหรือเขตปริมณฑลกำหนดให้มีพื้นที่ในการทำเกษตรกรรม 5,000 ไร่ มันสำปะหลังจะนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเป็นแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งมีกำลังการผลิต 500 ตันต่อวันและผลิต 300 วันต่อปี โดยกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังทำให้เกิดเศษเหลือทิ้งจากมันสำปะหลังเป็นปริมาณ 800 ตันต่อวัน (สมาคมวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย, 2563) และกำหนดให้เศษเหลือทิ้งจากมันสำปะหลังทั้งหมดเป็นกากจากมันสำปะหลัง (Virunanon, 2013)

2 ก๊าซชีวภาพ (Biogas)

2.1 ข้อมูลทั่วไปของก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพเกิดจากกระบวนการย่อยสลายของวัสดุอินทรีย์ ทั้งจากพืช สัตว์หรือของเสียจากสัตว์ รวมถึงขยะมูลฝอยที่เป็นขยะอินทรีย์ โดยกระบวนการย่อยสลายทั้งหมดเกิดขึ้นจากการทำงานของจุลินทรีย์ชนิดต่าง ๆ ในสภาวะที่ไร้อากาศ ก๊าซชีวภาพสามารถเกิดขึ้นได้เองตามธรรมชาติถ้ามีสภาพที่เหมาะสม หรือเกิดขึ้นในระบบผลิตก๊าซ เมื่อองค์ประกอบต่าง ๆ ครบถ้วน เช่น มีแบคทีเรีย สารอินทรีย์ อาหารเสริม และสิ่งแวดล้อมอื่น ๆ ที่เหมาะสมแต่ไม่มีออกซิเจน กระบวนการสร้างก๊าซชีวภาพ ก็สามารถเกิดขึ้นได้ตามธรรมชาติโดยทันที ในธรรมชาตินั้น ก๊าซชีวภาพจะเกิดในบ่อที่มีการหมัก ก้นแม่น้ำ ทะเลสาบ ลำไส้คน และวัช ไร่ข้าวที่มีน้ำท่วมขัง ในเปลือกไม้ที่อัปชื้น ใต้ท้องทะเลลึก เป็นต้น อย่างไรก็ตามการเกิดในสภาวะที่กล่าวมาแล้วขั้นต้นนั้นเป็นกระบวนการที่เกิด ในธรรมชาติ ซึ่งอัตราการสร้างก๊าซชีวภาพจะเร็วหรือช้าขึ้นอยู่กับที่กำหนดโดยธรรมชาติ แต่ในเชิงวิศวกรรมแล้ว วิศวกรจะสร้างระบบขึ้นมาเพื่อควบคุมสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ ให้เหมาะสม ให้แบคทีเรียสามารถทำงานได้รวดเร็ว ตามที่ต้องการ หรืออีกนัยหนึ่งคือ วิศวกรที่ออกแบบระบบผลิตก๊าซชีวภาพคือ ผู้ที่เข้าใจธรรมชาติของสารอินทรีย์ และสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของแบคทีเรียกลุ่มไม่ชอบออกซิเจน และทำการสร้างสภาวะดังกล่าว เพื่อให้แบคทีเรียสามารถทำงานได้ตามที่วิศวกรนั้น ๆ ต้องการ

ในการผลิตก๊าซชีวภาพเชิงอุตสาหกรรม วัตถุดิบที่ใช้ก็คือ สารอินทรีย์ (Organic Matter) ที่อยู่ในน้ำเสียหรือของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรมทางการเกษตร ชุมชน และฟาร์มเลี้ยงสัตว์ เช่น น้ำเสียที่ออกจากโรงงานแป้งมันสำปะหลัง โดยน้ำเสียหรือของเสียดังกล่าวจะถูกป้อนเข้าระบบบำบัดน้ำเสียหรือของเสีย ซึ่งจะทำหน้าที่ย่อยสลายสารอินทรีย์และได้ก๊าซชีวภาพเป็นผลผลิตจากการบำบัด นอกจากนี้สารอินทรีย์ที่ย่อยสลายยากก็จะเหลือกลายเป็นกากตะกอนอินทรีย์ ซึ่งจะมีคุณสมบัติใกล้เคียงปุ๋ยอินทรีย์และสามารถนำมาใช้เป็นสารปรับปรุงดินได้ (Biotechnologymintmai)

2.2 การใช้ประโยชน์ของก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพมีประโยชน์ในหลายด้าน ส่วนใหญ่จะเป็นจะเป็นในด้านพลังงาน ได้แก่ ก๊าซชีวภาพมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นแก๊สมีเทน ซึ่งสามารถนำไปใช้เชื้อเพลิงในการให้ความร้อนได้, สามารถนำไปผลิตพลังงานไฟฟ้าหรือพลังงานกล ทำให้นำไปใช้งานได้สะดวกมากขึ้น (พลังงานก๊าซชีวภาพ, 2562)

2.3 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

สมาคมวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย (2563) ได้ศึกษาองค์ประกอบของก๊าซชีวภาพที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิต ซึ่งแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ

Component	Percentage Composition (%v/v)
แก๊สมีเทน (CH ₄)	50 – 70
แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO ₂)	20 – 50
ไอน้ำ	0 – 10
แก๊สไนโตรเจน (N ₂)	0 – 5
แก๊สออกซิเจน (O ₂)	0 – 2
แอมโมเนีย (NH ₃)	0 – 1
แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H ₂ S)	0.005 – 0.5

ที่มา: สมาคมวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย (2563)

3 กระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ

3.1 กระบวนการเตรียมการย่อยสลาย

ในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพได้มีการปรับสภาพของวัตถุดิบ เพื่อสลายพันธะระหว่างโครงสร้างของวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลสขนาดใหญ่ซึ่งประกอบไปด้วยเซลลูโลส, เฮมิเซลลูโลส และลิกนินให้กลายเป็นโครงสร้างย่อย เพื่อช่วยเร่งการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสในถังหมักแบบไม่ใช้อากาศให้เกิดได้ง่ายขึ้นและเร็วขึ้น ส่งผลให้ปริมาณก๊าซชีวภาพที่ได้มีมากขึ้น กระบวนการเตรียมการย่อยสลายในการผลิตก๊าซชีวภาพใช้น้ำขยะที่มีสมบัติกรด เป็นเทคนิคการเตรียมการย่อยสลายโดยใช้สารเคมี โดยกระบวนการปรับสภาพสามารถแบ่งได้เป็น

4 ประเภท คือ การปรับสภาพโดยใช้สารเคมี, การปรับสภาพเชิงกล, การปรับสภาพโดยใช้ความร้อนและการปรับสภาพทางชีวภาพ (Shukra. 2017)

1) การปรับสภาพโดยใช้เคมี (Chemical pretreatment) เป็นกระบวนการปรับสภาพโดยใช้สารเคมี ซึ่งสามารถแบ่งออกเป็นประเภทย่อย ๆ ได้ 3 ประเภท ได้แก่

ก) การทำปฏิกิริยากับโอโซน (Ozonolysis) โอโซนเป็นตัวออกซิไดซ์ที่มีประสิทธิภาพ และสามารถทำให้เกิดการแตกตัวของลิกนินและเฮมิเซลลูโลสในวัสดุพวกฟางข้าวได้ วิธีนี้มีจุดเด่นคือ เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการเอาลิกนินออกได้ดี ไม่มีสารพิษที่จะไปยับยั้งการทำปฏิกิริยา กระบวนการนี้สามารถทำได้ที่อุณหภูมิห้อง แต่ผลเสียของวิธีนี้ คือค่าใช้จ่ายที่สูงมาก

ข) การทำปฏิกิริยาด้วยการใช้ด่าง (Alkali pretreatment) การใช้ด่างในกระบวนการปรับสภาพวัตถุดิบมีผลต่อวัสดุจำพวกลิกนินและเฮมิเซลลูโลส และผลของด่างที่ใช้ในกระบวนการแปลงสภาพจะขึ้นอยู่กับปริมาณของลิกนินที่มีอยู่ในวัสดุนั้นด้วย กลไกการทำงานของด่างนั้นเชื่อว่าจะไปเพิ่มการพองตัวของโมเลกุลภายในต่อสายพันธะภายในของเฮมิเซลลูโลส ความพรุนของวัสดุจะเพิ่มขึ้นได้เมื่อทำการกำจัดสายโซ่ที่เชื่อมต่อกันภายใน การใช้ด่างเจือจางในวัสดุลิกนินและเฮมิเซลลูโลสมีผลทำให้เกิดการบวมภายในเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสในการทำปฏิกิริยาทำให้วัสดุมีความพรุนเพิ่มขึ้นได้ สามารถแยกสายโครงสร้างระหว่างลิกนินและคาร์โบไฮเดรต และเป็นการแยกองค์ประกอบหรือทำลายโครงสร้างของลิกนิน

ค) การทำปฏิกิริยาด้วยการใช้กรด (Acid pretreatment) กระบวนการปรับสภาพโดยใช้กรดนั้นมีจุดประสงค์คือเพื่อให้ได้น้ำตาลในปริมาณที่สูง จากวัสดุชีวมวล ชนิดของกรดที่นำมาปรับสภาพมีมากมายหลายประเภทได้แก่ กรดซัลฟิวริก ไฮโดรคลอริก ไนตริก หรือ ฟอสฟอริก ในกระบวนการแปลงสภาพสามารถใช้ได้ทั้งกรดเข้มข้นและเจือจางเพื่อเพิ่มการทำงานของกระบวนการไฮโดรไลซิส ในกระบวนการปรับสภาพวัตถุดิบ การใช้กรดเจือจางเป็นวิธีหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจศึกษากันมากและแพร่หลายที่สุด เพื่อปรับสภาพวัสดุที่อุณหภูมิที่เหมาะสมโดยใช้กรดซัลฟิวริกหรือกรดฟอสฟอริกมักจะถูกใช้สำหรับการเปลี่ยนวัสดุพวกลิกนินและเฮมิเซลลูโลส ซึ่งประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นเฮมิเซลลูโลสไปเป็นน้ำตาลที่ละลายได้ตามด้วยการใช้เอนไซม์เป็นตัวเร่งในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเพื่อให้เกิดเป็นกลูโคส โดยทั่วไปแล้วพบว่าเมื่อทำการปรับสภาพที่อุณหภูมิสูงและเวลาที่ใช้น้อยกว่าจะมีผลทำให้พบปริมาณไซโลสสูง และการทำงานของเอนไซม์สามารถทำงานได้ดีกว่า ที่อุณหภูมิสูงการใช้กรดเจือจางพบว่ามีผลต่อการเพิ่มการย่อยเซลลูโลส ซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดของสารตั้งต้นและความเข้มข้นที่ใช้

2) การปรับสภาพด้วยวิธีทางเชิงกล (Mechanical Pretreatment) วิธีการทำให้วัตถุดิบมีขนาดเล็กสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การทุบ การบด การม่ การเขย่าวัตถุดิบ เป็นต้น ซึ่งจะมีผลทำให้เกิดการลด

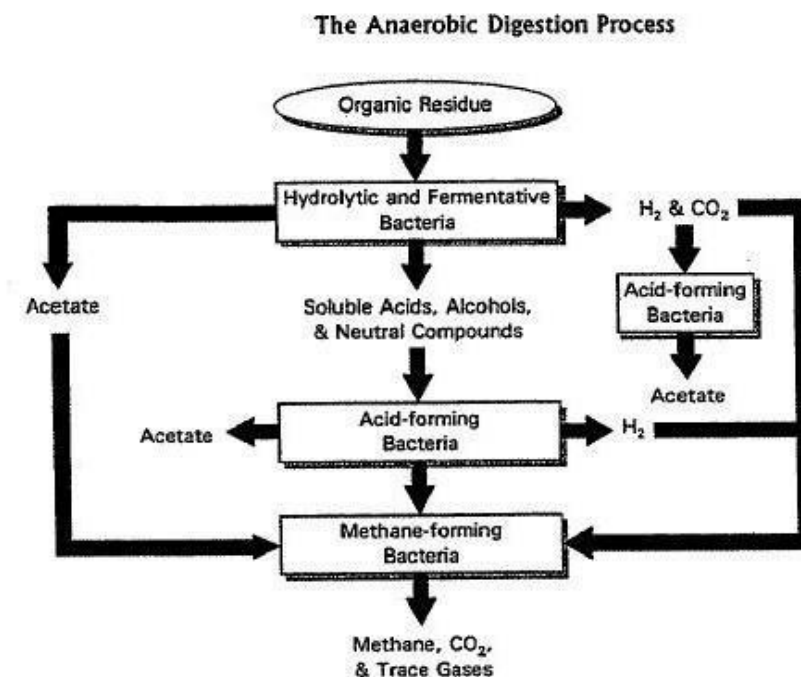
ผลึก (Cellulose Crystallinity) และเพิ่มพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาให้มากขึ้น ความสามารถในการลดขนาดจะขึ้นอยู่กับขนาดสุดท้ายของวัสดุและคุณสมบัติของวัสดุนั้น ซึ่งปกติขนาดของเศษวัสดุจะทำให้มีขนาดประมาณ 0.2 - 2 มิลลิเมตร

3) การปรับสภาพโดยใช้ความร้อน (Thermal Heat Pretreatment) เป็นการปรับสภาพของวัสดุเพื่อทำลายเนื้อเยื่อของเซลลูโลส ซึ่งโดยส่วนใหญ่มักจะใช้อุณหภูมิมากกว่า 150 - 180 องศาเซลเซียส แต่ต้องทำให้วัสดุมีขนาดที่เล็กลงก่อนเข้าสู่กระบวนการย่อยวัสดุทางความร้อน

4) การปรับสภาพทางชีวภาพ (Biological Pretreatment) จุลินทรีย์สามารถใช้ในการปรับสภาพวัสดุประเภทลิกโนเซลลูโลสและยังเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในย่อยวัสดุด้วยเอนไซม์ ในการใช้จุลินทรีย์ในการปรับสภาพ ส่วนมากจะย่อยลิกนินและเฮมิเซลลูโลส ส่วนเซลลูโลสถูกย่อยน้อยมากซึ่งเซลลูโลสมีความต้านทานในการถูกจุลินทรีย์ย่อยของจุลินทรีย์ได้มากกว่าส่วนอื่น ๆ ของลิกโนเซลลูโลส (อาจารย์หลักสูตรวิทยาศาสตร์ชีวภาพ, 2558)

3.2 กระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ

ในปัจจุบันมีขยะที่เกิดขึ้นจำนวนมากในแต่ละวันโดยขยะจากชุมชนจะมีทั้งอินทรีย์สาร และอนินทรีย์สาร ขยะประเภทอินทรีย์สารนั้นมักเป็นประเภทเศษอาหาร เศษผัก ผลไม้โดยจะส่งผลให้หมักเหม็นและเป็นแหล่งสะสมเชื้อโรค จึงได้มีการเปลี่ยนจากขยะประเภทอินทรีย์ให้เกิดประโยชน์ โดยวิธีการย่อยสลายแบบไร้อากาศนั้นจะเกิดก๊าซชีวภาพขึ้น เช่น แก๊สมีเทน ซึ่งสามารถนำกลับมาเป็นพลังงานในการเผาหรือหุงต้มได้ และมีกากที่เป็นของแข็งสามารถนำไปใช้เป็นปุ๋ยได้ ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 กระบวนการของวิธีการย่อยสลายแบบไร้อากาศ

ที่มา: Leccovers's Blog (2010)

3.3 ประโยชน์ของวิธีการย่อยสลายแบบไร้อากาศ

วิธีการย่อยสลายแบบไร้อากาศนั้นมีประโยชน์หลายด้าน เนื่องจากการหมักแบบไร้อากาศจะเป็นการกำจัดขยะมูลฝอยประเภทอินทรีย์สาร ประโยชน์ทางด้านพลังงานคือ จะได้ผลิตภัณฑ์เป็นก๊าซชีวภาพออกมา ซึ่งส่วนใหญ่เป็นแก๊สมีเทน สามารถนำไปใช้เป็นพลังงานได้ ประโยชน์ทางด้านเกษตรกรรมคือ กากที่ได้จากการหมักสามารถนำมาใช้เป็นปุ๋ยเพื่อใช้สำหรับการปลูกต้นไม้ได้ดีกว่าปุ๋ยคอกหรือมูลสัตว์ เนื่องจากการหมักจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสารประกอบไนโตรเจน ทำให้ใช้ประโยชน์ได้ดีขึ้น

3.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยวิธีการย่อยสลายแบบไร้อากาศ

1) ปัจจัยทางสิ่งแวดล้อมจะมีหลายประการที่มีผลต่อการผลิตชีวภาพ ได้แก่

ก) อุณหภูมิ จะขึ้นกับชนิดของจุลินทรีย์ที่ใช้ โดยช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมของจุลินทรีย์ที่ใช้แบ่งเป็น 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงเทอร์โมฟิลิก (50 - 65 องศาเซลเซียส), ช่วงเมโซฟิลิก (20 - 45 องศาเซลเซียส) และช่วงไซโคฟิลิก (5 - 15 องศาเซลเซียส)

ข) ค่าความเป็นกรดต่าง โดยจากผลการทดลองของ McCarty พบว่าระบบจะทำงานได้ดีเมื่อค่าความเป็นกรดต่างอยู่ระหว่าง 6.6 - 7.6 โดยจะมีค่าที่เหมาะสมคือ 7.0 - 7.2 ถ้าค่าความเป็นกรดต่างสูงหรือต่ำกว่านี้จะทำให้ประสิทธิภาพของระบบลดลง

ค) สภาพความเป็นกรดและสภาพความเป็นด่างของระบบ การหมักแบบไร้อากาศจะมีกรดอินทรีย์ระเหยง่ายภายในระบบ โดยมักจะอยู่ในรูปของกรดอะซิติก ซึ่งส่งผลต่อค่าความเป็นกรดต่างเนื่องจากหากเกิดกรดอินทรีย์มากจะมีค่าความเป็นกรดต่างต่ำลงซึ่งทำให้จุลินทรีย์หยุดการเจริญเติบโตจึงต้องมีการรักษาสมดุลของความเป็นกรดและเป็นด่าง โดยสามารถทำได้โดยการควบคุมปริมาณการสร้างกรดอินทรีย์จากการหมักภายในระบบให้เท่ากับอัตราการใช้ไปในการสร้างก๊าซชีวภาพ ซึ่งทำให้ระบบอยู่ในสมดุล

ง) สารอาหาร จุลินทรีย์ที่ย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไร้อากาศนั้นต้องการสารอาหาร 2 ประเภทหลัก ๆ ได้แก่ สารอาหารหลัก จำพวกคาร์บอน, ไนโตรเจน, ฟอสฟอรัสและกำมะถัน และสารอาหารรอง จำพวกแคลเซียม, สังกะสี, แมงกานีส, ทองแดง เป็นต้น โดยของเสียจากแต่ละแหล่งจะมีสารอาหารที่ต่างกันไป เพื่อให้เกิดสภาวะที่เหมาะสมจึงต้องมีการเติมสารอาหารเพื่อให้จุลินทรีย์ได้รับสารอาหารที่ครบถ้วน

จ) สารพิษ ความอันตรายของจะขึ้นกับชนิดและความเข้มข้นของสารโดยจะมีผลต่อจุลินทรีย์ในทางด้านของสารพิษโดยตรงหรือยับยั้งการทำงานของจุลินทรีย์ด้วย โดยถ้าสารพิษสามารถอยู่ในรูปของสารอาหารก็ได้ถ้ามีปริมาณที่มากเกินไป แบ่งสารพิษออกเป็นกลุ่มได้ดังนี้

๑) พิษของไอออนบวก มักจะเป็นไอออนบวกของโลหะเบา เช่น โซเดียม (Na^+), แมกนีเซียม (Mg^{2+}), โพแทสเซียม (K^+) และแคลเซียม (Ca^{2+}) มักจะเกิดจากการย่อยสลายจุลินทรีย์หรือการเติมสารเพื่อปรับค่าความเป็นกรดต่างโดยถ้ามีไอออนบวกมากกว่า 2 ชนิดทำให้พิษมีฤทธิ์เสริมกันหรือหักล้างกันก็ได้

๒) พิษของโลหะหนัก ได้แก่ แมงกานีส (Mn), สังกะสี (Zn), โครเมียม (Cr), แคดเมียม (Cd), นิกเกิล (Ni), ทองแดง (Cu) และโคบอลต์ (Co) ซึ่งจะอยู่ในรูปของไอออนภายในน้ำทิ้ง โดยความเป็นพิษของโลหะสามารถ ลดลงได้หากมีซัลไฟด์ไอออน (S^{2-}) ในปริมาณที่เหมาะสมในน้ำเสีย เนื่องจากไอออนของซัลไฟด์จะจับกับไอออนบวกของโลหะ และกลายเป็นเกลือของโลหะ ซึ่งสามารถลดความเป็นพิษได้

๓) พิษของกรดอินทรีย์ระเหย หากจุลินทรีย์สร้างก๊าซชีวภาพได้มากขึ้น จะทำให้ค่าความเป็นกรดต่างลดลงซึ่งเป็นอันตรายต่อจุลินทรีย์ หากสารบัพเฟอร์ภายในระบบไม่เพียงพอจะทำให้ระบบเสียสมดุลและเกิดอันตรายต่อจุลินทรีย์

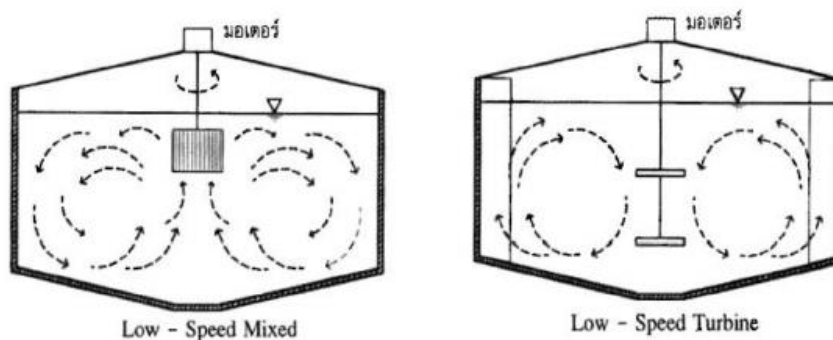
2) ปัจจัยทางด้านการทำงาน มีหลายปัจจัยที่มีผลต่อการเดินระบบ ได้แก่

ก) ระยะเวลาในการเก็บกัก (Hydraulic Retention Time, HRT) และระยะเวลาพักตะกอน (Solid Retention Time, SRT) ระยะเวลาการเก็บกักนั้นเป็นปัจจัยที่สำคัญเนื่องจาก อัตราการย่อยสลายของจุลินทรีย์จะเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาเก็บกัก จนถึงค่าหนึ่งแล้วลดลงเรื่อย ๆ แต่ถ้าระยะเวลาเก็บกักน้อยเกินไปจะทำให้ตะกอนจุลินทรีย์หลุดออกจากระบบมากกว่าจุลินทรีย์ที่เพิ่มขึ้น ทำให้ระบบเกิดความผิดปกติและล้มเหลว

ข) อัตราการป้อนสารอินทรีย์ (Organic Loading Rate, OLR) เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญที่สุดในการย่อยสลายจุลินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ โดยการปรับอัตราการป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบสามารถทำได้โดยเปลี่ยนอัตราการไหลของของเสียที่ไหลผ่านถังหมักหรือเปลี่ยนความเข้มข้นของสารอินทรีย์ ความเข้มข้นของสารอินทรีย์จะต้องเหมาะสมกับปริมาณของสารอินทรีย์ เนื่องจากหากป้อนสารอินทรีย์เข้าสู่ระบบมากเกินไป จะส่งผลให้การย่อยสลายสารอินทรีย์ลดลง เพราะสภาวะของระบบไม่สมดุล จุลินทรีย์บางส่วนจึงถูกทำลาย

ค) การกวน (Mixing) เป็นการทำให้ของเสียและจุลินทรีย์ผสมกันได้ดี เป็นสิ่งที่สำคัญมาก เพราะจะส่งผลให้ปฏิกิริยาเกิดได้อย่างสมบูรณ์ หากกวนได้อย่างทั่วถึงจนจุลินทรีย์สามารถสัมผัสกับของเสียได้มากขึ้น จะทำให้ประสิทธิภาพสูงขึ้น นอกจากนี้การกวนยังป้องกันการแยกชั้นของของเสีย โดยการกวนนั้นต้องระวังไม่ให้ออกซิเจนเข้าสู่ระบบ สามารถทำได้ 3 วิธีหลัก ๆ คือ

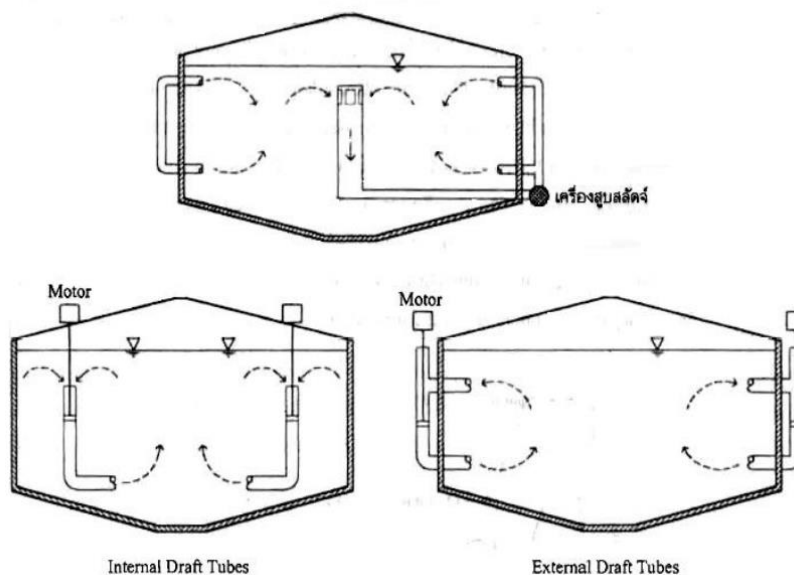
๑) การกวนโดยใช้เครื่องมือกล (Mechanical Mixing) มักใช้เครื่องมือพวกใบพัด โดยใบพัดนั้นมีหลายลักษณะ จะขึ้นกับวัตถุประสงค์ในการใช้ เช่น ใบพัดแบบ Puddle หรือ Turbine ในการกวนให้ของเสียผสมกันเป็นเนื้อเดียวกันต้องใช้พลังงานสูง แต่มีประสิทธิภาพมาก



ภาพที่ 2 ตัวอย่างของถังกวนโดยใช้ใบพัดในการกวน

ที่มา: ทวีนนท์ (2554)

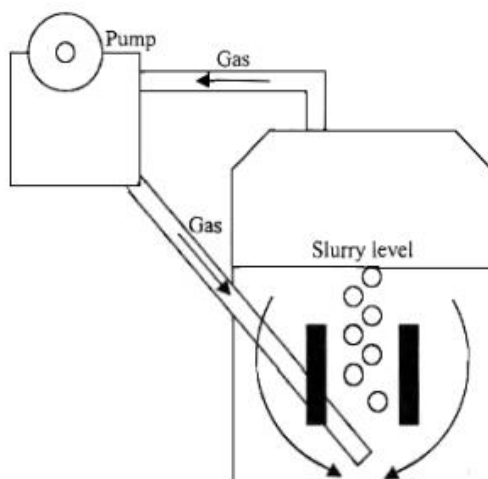
๒) การกวนโดยใช้วิธีการสูบน้ำเสียภายในถังปฏิกิริยาให้เกิดการหมุนเวียน (Mixing by recirculation of wastewater) วิธีนี้จะไม่ใช่พลังงานที่สูงมาก แต่ประสิทธิภาพในการกวนก็ไม่สูงมาก โดยติดตั้งเครื่องสูบน้ำเสียภายในถังไว้ที่ด้านล่างของถัง และป้อนกลับทางด้านบน ทำให้เกิดการหมุนเวียนและกวนของน้ำเสียภายในถัง วิธีนี้จะเพิ่มปริมาณจุลินทรีย์ที่ใช้ในการย่อยสลาย และลดปริมาณการสูญเสียของจุลินทรีย์ที่จะออกจากระบบ



ภาพที่ 3 ตัวอย่างของถังกวนที่มีการใช้การสูบน้ำเสียหมุนเวียนภายในถังปฏิกิริยา

ที่มา: ทวีพันธ์ (2554)

๓) การกวนโดยนำแก๊สที่ได้จากการบำบัดน้ำเสียในถังมาใช้ในการกวนผสม (Mixing by producing gas) วิธีนี้จะอาศัยแก๊สที่เกิดขึ้นจากการบำบัด ซึ่งได้แก่ แก๊สไฮโดรเจน, แก๊สมีเทน, แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์, แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์และแก๊สอื่น ๆ ในการช่วยผสม โดยจะดึงแก๊สที่เกิดขึ้นบางส่วนกลับเข้าถังกวน ทำให้เกิดการกวนผสมของน้ำเสียและตะกอนจุลินทรีย์ภายในถัง ซึ่งวิธีนี้เป็นวิธีการรักษาสภาพไร้อากาศในถังหมักได้ดี



ภาพที่ 4 ตัวอย่างของถังกวนที่ใช้แก๊สที่เกิดขึ้นภายในถังเป็นตัวกวน

ที่มา: ทวีนนท์ (2554)

3.5 การทำบริสุทธิ์ก๊าซชีวภาพ

ก๊าซชีวภาพที่ได้จากการย่อยสลายนั้นก่อให้เกิดแก๊สต่าง ๆ ขึ้นหลายอย่างด้วยกัน แต่ความต้องการหลักที่เราสามารถนำมาใช้งานได้นั่นคือแก๊สมีเทน ดังนั้นก่อนที่เราจะนำก๊าซชีวภาพมาใช้ประโยชน์จึงต้องมีการปรับปรุงคุณภาพของก๊าซชีวภาพ (Biogas Purification) ให้อยู่ในสภาพที่สามารถนำไปใช้งานได้เสียก่อน โดยมีกระบวนการดังนี้คือ (ThailandIndustry, 2552)

1) การดักน้ำในท่อส่งก๊าซชีวภาพ

ปกติแล้วก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้มักจะมี ความชื้นสูงเกือบถึงจุดอิ่มตัว เมื่อก๊าซชีวภาพไหลผ่านท่อส่งแก๊สที่ฝังอยู่ในดินที่มีอุณหภูมิต่ำมักจะทำให้ความชื้น (ไอน้ำ) ในก๊าซชีวภาพกลั่นตัวเป็นหยดน้ำ และสะสมจนเกิดเป็นอุปสรรคในการส่งแก๊สไปตามท่อได้ ดังนั้นจะต้องมีการติดตั้งชุดดักน้ำก่อนการนำก๊าซชีวภาพไปใช้งาน

2) ปรบลดปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂)

การปรับลดปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ จากก๊าซชีวภาพนี้จะปฏิบัติก็ต่อเมื่อมีความจำเป็น เช่น ในกรณีที่ก๊าซชีวภาพที่ได้มีสัดส่วนของแก๊สมีเทนต่ำมากจนอยู่ในระดับที่จุดติดไฟยาก คือประมาณเปอร์เซ็นต์แก๊สมีเทนน้อยกว่า 45 เปอร์เซ็นต์ แต่ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพสำหรับในฟาร์มสุกรนั้นไม่มีปัญหาในเรื่องนี้ ดังนั้นการลดปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จึงไม่จำเป็น

3) การปรับลดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S)

การปรับลดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ที่ปนเปื้อนในก๊าซชีวภาพนั้นมีคุณสมบัติเป็นแก๊สพิษและเมื่อสัมผัสกับน้ำหรือไอน้ำจะเปลี่ยนสภาพเป็นกรดซัลฟูริก (H₂SO₄) ซึ่งเป็นสาเหตุของฝนกรดหรือไอกรดที่สามารถกัดกร่อนโลหะและวัสดุอุปกรณ์ได้ ดังนั้นการลดปริมาณแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพก่อนการนำไปใช้ประโยชน์นั้นจะเป็นผลดีต่อสิ่งแวดล้อมโดยทั่วไปและจะช่วยยืดอายุการใช้งานของอุปกรณ์ใช้แก๊สด้วย

4 สมการที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ

Karthik *et al.* (2014) และ Suhan (2019) ศึกษาการสร้างแบบจำลองการผลิตก๊าซชีวภาพโดยใช้โปรแกรม Aspen Plus ซึ่งข้อมูลที่ได้จากงานวิจัยนี้คือ สมการการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และปฏิกิริยาเคมีทั้งหมดที่เกี่ยวข้องเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ โดยข้อกำหนดของการเกิดปฏิกิริยาเกิดที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส

4.1 สมการไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้น จะมีค่าการดำเนินไปของปฏิกิริยา (Extent of reaction, ξ) ของแต่ละสมการเพื่อบ่งบอกถึงร้อยละการเปลี่ยนแปลงวัตถุดิบไปเป็นผลิตภัณฑ์ ได้แก่

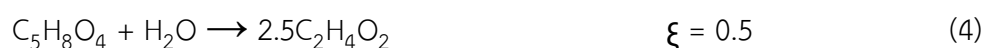
สมการไฮโดรไลซิสที่มีแป้ง ((C₆H₁₂O₆)_n) เป็นวัตถุดิบ



สมการไฮโดรไลซิสที่มีเซลลูโลส ((C₆H₁₂O₆)_n) เป็นวัตถุดิบ



สมการไฮโดรไลซิสที่มีเฮมิเซลลูโลส (C₅H₈O₄) เป็นวัตถุดิบ



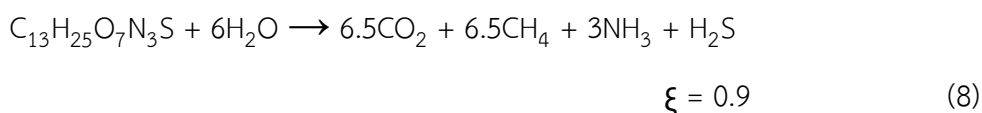
สมการไฮโดรไลซิสที่มีไซโลส ($C_5H_{10}O_5$) เป็นวัตถุดิบ



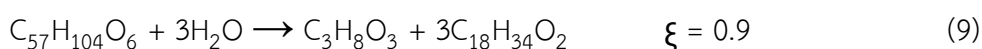
สมการไฮโดรไลซิสที่มีเอทานอล (C_2H_6O) เป็นวัตถุดิบ



สมการไฮโดรไลซิสที่มีโปรตีนที่ละลายได้ ($C_{13}H_{25}O_7N_3S$) เป็นวัตถุดิบ



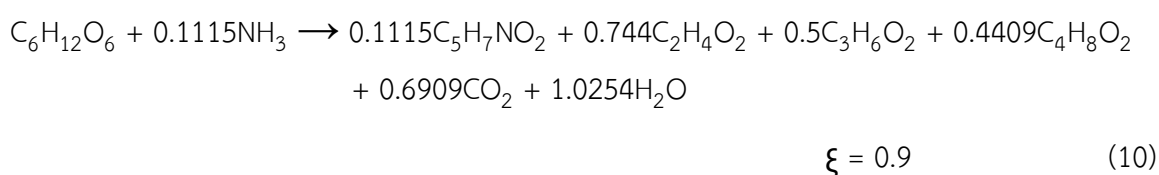
สมการไฮโดรไลซิสที่มีไตรโอเลอิน ($C_{57}H_{104}O_6$) เป็นวัตถุดิบ



4.2 ปฏิริยาเคมีทั้งหมด ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ นั้นมี 3 ประเภทได้แก่ ปฏิริยาสร้างกรด (Acidogenic reactions), ปฏิริยาสร้างกรดอะซิติก (Acetogenic reactions) และปฏิริยาสร้างมีเทน (Methanogenic reactions) โดยแต่ละสมการจะมีค่าการดำเนินไปของปฏิริยา (ξ) และ ค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิริยา (k) แสดงค่าคงที่ของอัตราการเกิดปฏิริยา

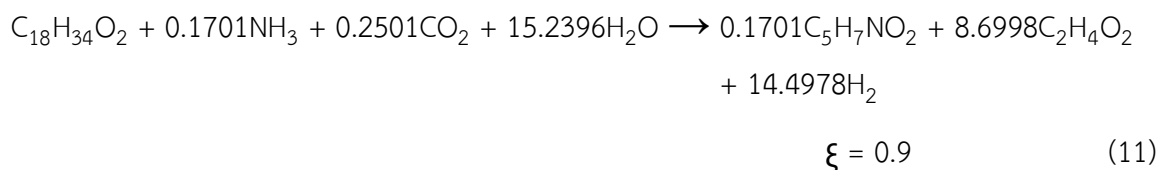
1) สมการเคมีประเภทปฏิริยาสร้างกรดอะซิติก โดยแสดงในสมการที่ 10

วัตถุดิบของสมการที่ 10 นี้ ได้แก่ น้ำตาลเด็คซิโทรส ($C_6H_{12}O_6$) และแอมโมเนีย (NH_3) ส่วนของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ได้แก่ เอทิลไซยาโนอะซิเตต ($C_5H_7NO_2$), ไกลคอลอัลดีไฮด์ ($C_2H_4O_2$), แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2), กรดโพพิโอนิก ($C_3H_6O_2$), กรดบิวทีริก ($C_4H_8O_2$) และน้ำ (H_2O)

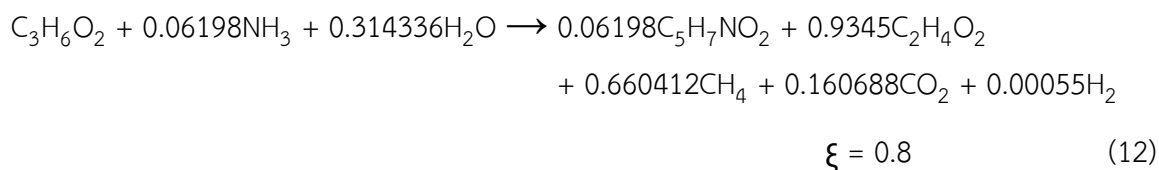


2) สมการเคมีประเภทปฏิกิริยาสร้างกรดอะซิติก โดยแสดงในสมการที่ 11, สมการที่ 12 และสมการที่ 13

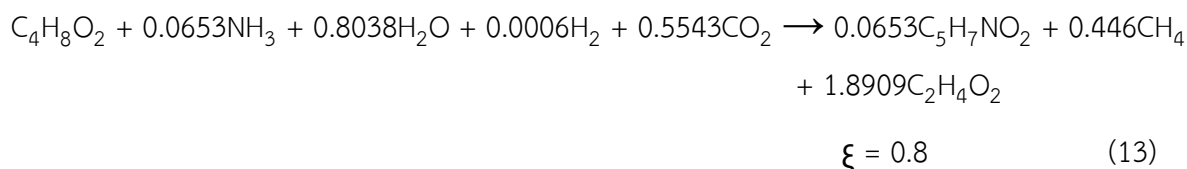
วัตถุดิบของปฏิกิริยานี้ ได้แก่ กรดโอเลอิก ($C_{18}H_{34}O_2$), แอมโมเนีย (NH_3), แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และน้ำ (H_2O) ส่วนของผลิตภัณฑ์ได้แก่ เอทิลไซยาโนอะซิเตด ($C_5H_7NO_2$), ไกลคอลอัลดีไฮด์ ($C_2H_4O_2$) และแก๊สไฮโดรเจน (H_2)



วัตถุดิบของปฏิกิริยานี้ ได้แก่ กรดโพรพิโอนิก ($C_3H_6O_2$), แอมโมเนีย (NH_3) และน้ำ (H_2O) ส่วนของผลิตภัณฑ์ได้แก่ เอทิลไซยาโนอะซิเตด ($C_5H_7NO_2$), ไกลคอลอัลดีไฮด์ ($C_2H_4O_2$), แก๊สมีเทน (CH_4), แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และแก๊สไฮโดรเจน (H_2)

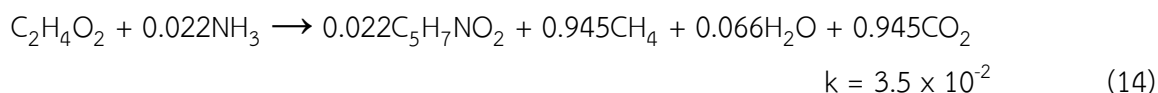


วัตถุดิบของปฏิกิริยานี้ ได้แก่ กรดบิวทีริก ($C_4H_8O_2$), แอมโมเนีย (NH_3), น้ำ (H_2O), แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และแก๊สไฮโดรเจน (H_2) ส่วนของผลิตภัณฑ์ได้แก่ เอทิลไซยาโนอะซิเตด ($C_5H_7NO_2$), ไกลคอลอัลดีไฮด์ ($C_2H_4O_2$), และแก๊สมีเทน (CH_4)

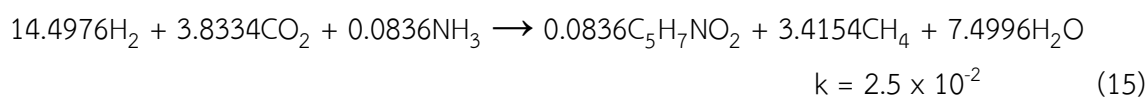


3) สมการเคมีประเภทปฏิกิริยาสังเคราะห์มีเทนโดยแสดงในสมการที่ 14 และสมการที่ 15

วัตถุดิบของปฏิกิริยานี้ ได้แก่ กรดอะซิติก ($C_2H_4O_2$) และแอมโมเนีย (NH_3) ส่วนของผลิตภัณฑ์ได้แก่ เอทิลไซยาโนอะซิเตด ($C_5H_7NO_2$), แก๊สมีเทน (CH_4), แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และน้ำ (H_2O)



วัตถุดิบของปฏิกิริยานี้ ได้แก่ แก๊สไฮโดรเจน (H_2), แอมโมเนีย (NH_3) และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ส่วนของผลิตภัณฑ์ได้แก่ เอทิลไซยาโนอะซิเตด ($C_5H_7NO_2$), แก๊สมีเทน (CH_4), และน้ำ (H_2O)



5 แนวคิดในการออกแบบโรงงาน (Conceptual design)

การออกแบบทางวิศวกรรมเคมีของกระบวนการทางเคมี และการขยายหรือปรับปรุงกระบวนการผลิตที่มีอยู่แล้ว จะใช้หลักการทางวิศวกรรมและทฤษฎี โดยคำนึงถึงข้อกำหนดทางสิ่งแวดล้อม ความปลอดภัยและสุขภาพ นอกจากนี้วิศวกรเคมีมีการออกแบบอุปกรณ์สำหรับโรงงานอุตสาหกรรมในกระบวนการผลิต รวมถึงการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์สำหรับกระบวนการผลิตที่มีความประสงค์จะสร้าง (Peters *et al.*, 2004)

5.1 การพัฒนาการออกแบบกระบวนการผลิต

การพัฒนาการออกแบบกระบวนการผลิตมี 3 ขั้นตอนหลัก ๆ ได้แก่ ขั้นแรกต้องเริ่มจากการพิจารณาความต้องการของลูกค้า และการแข่งขันในตลาดซึ่งดำเนินโดยฝ่ายการตลาด ขั้นตอนที่สองเป็นการค้นคว้า และพัฒนากระบวนการผลิต เพื่อให้ได้มาซึ่งผลิตภัณฑ์ และขั้นตอนสุดท้ายเป็นการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ โดยขั้นตอนในการออกแบบกระบวนการผลิตทางเคมี แสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ขั้นตอนในการออกแบบกระบวนการผลิตทางเคมี

1.	รับรู้ถึงความต้องการของสังคมหรือวิศวกร
	ก. วิเคราะห์ตลาดถึงผลกระทบหากมีผลิตภัณฑ์ใหม่ออกมา
2.	สร้างแนวทางการแก้ปัญหาที่มีประสิทธิภาพอย่างน้อย 1 รายการเพื่อตอบสนองความต้องการ
	ก. ทำการสำรวจวรรณกรรมและค้นหาสิทธิบัตร
	ข. ระบุข้อมูลเบื้องต้นที่จำเป็น
3.	ทำการสังเคราะห์กระบวนการเบื้องต้นของแนวทางการแก้ปัญหาเหล่านี้
	ก. กำหนดเงื่อนไขการทำปฏิกิริยา การแยกและการปฏิบัติการที่เป็นไปได้
	ข. ตระหนักถึงผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม ความปลอดภัยและสุขภาพ
4.	ประเมินความสามารถในการทำกำไรของกระบวนการผลิตเบื้องต้น
5.	ปรับปรุงข้อมูลการออกแบบที่จำเป็น
	ก. สร้างข้อมูลด้วยซอฟต์แวร์ที่เหมาะสม
	ข. ตรวจสอบข้อมูลเพิ่มเติมในกระบวนการผลิตถ้าจำเป็น
6.	จัดเตรียมรายละเอียดสำหรับการออกแบบเชิงวิศวกรรม
	ก. พัฒนาการกระบวนการผลิตจากพื้นฐาน (จำเป็นต้องมีการเปรียบเทียบเชิงเศรษฐกิจ)
	ข. เตรียมแผนภาพการไหลของกระบวนการผลิต
	ค. เพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิต
	ง. ตรวจสอบการควบคุมของกระบวนการผลิต
	จ. ขนาดของอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิต
	ฉ. ประเมินค่าใช้จ่ายในการสร้างโรงงาน
7.	ประเมินความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการผลิตอีกครั้ง
8.	ตรวจสอบผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อม ความปลอดภัยและสุขภาพของกระบวนการผลิตอีกครั้ง
9.	จัดทำรายงานการออกแบบกระบวนการผลิต
10.	ออกแบบเชิงวิศวกรรมให้เสร็จสมบูรณ์
	ก. กำหนดโครงสร้างและข้อกำหนดของอุปกรณ์
	ข. พัฒนาระบบท่อและเครื่องมือวัด
	ค. เตรียมการเสนอราคาสำหรับอุปกรณ์หรือกระบวนการผลิต
11.	จัดหาอุปกรณ์
12.	ให้ความช่วยเหลือ (หากได้รับคำขอ) ในขั้นตอนการก่อสร้าง
13.	ช่วยเหลือในการเริ่มต้นการดำเนินงาน และการดำเนินงานชั่วคราว
14.	เริ่มต้นการผลิต

5.2 การพัฒนากระบวนการผลิต

เมื่อระบุความต้องการได้ วิศวกรเคมีจะสร้างแนวทางการแก้ปัญหาเพื่อตอบสนองความต้องการ ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะมีวัตถุดิบและสารมัธยันตร์ (Intermediate) ที่แตกต่างกันถึงแม้จะมีผลิตภัณฑ์เดียวกัน โดยแนวทางการแก้ปัญหาจะมีขั้นตอนที่แตกต่างกัน แต่กระบวนการสังเคราะห์เบื้องต้นสำหรับแต่ละแนวทางการแก้ปัญหาจะเริ่มจากการออกแบบและสร้างแผนผังกระบวนการผลิต ซึ่งเกี่ยวข้องกับการทำปฏิบัติการแยกและการเปลี่ยนแปลงสถานะของการดำเนินงาน ไม่ว่าจะป็นอุณหภูมิหรือความดัน รวมถึงการเลือกใช้อุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการผลิต โดยจะมีเพียงแผนผังกระบวนการผลิตแบบง่ายที่มีการประเมินเชิงเศรษฐศาสตร์และให้ผลกำไรขั้นต้นที่ดีเท่านั้นที่จะถูกนำไปพิจารณาต่อ ดังนั้นในการพิจารณาความเป็นไปได้ของกระบวนการผลิตที่มีผลกำไรไม่น่าพอใจ หรือมีราคาต้นทุนของวัตถุดิบที่มากกว่าผลิตภัณฑ์และผลิตผลพลอยได้จะไม่ถูกนำมาพิจารณาในต่อ (Peters *et al.*, 2004)

5.3 การออกแบบโดยใช้คอมพิวเตอร์ช่วย

คอมพิวเตอร์ฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์เป็นเครื่องมือที่ขาดไม่ได้ในการออกแบบกระบวนการผลิตและออกแบบโรงงาน ซึ่งคอมพิวเตอร์มีความสามารถในการคำนวณอย่างรวดเร็ว พื้นที่จัดเก็บข้อมูลขนาดใหญ่ และการตัดสินใจเชิงตรรกะ รวมถึงซอฟต์แวร์ทางเทคนิคและทางคณิตศาสตร์ที่ช่วยให้วิศวกรสามารถตรวจสอบผลกระทบของตัวแปรในการออกแบบต่าง ๆ ในกระบวนการผลิตหรือการออกแบบโรงงาน ซึ่งการจำลองกระบวนการผลิตมักจะมีประโยชน์ในการสร้างฐานข้อมูล เพราะมีฐานข้อมูลที่กว้างขวางของคุณสมบัติของสาร และความสัมพันธ์ของคุณสมบัติทางกายภาพสำหรับสารในอุดมคติและไม่อุดมคติ ซึ่งสามารถใช้โปรแกรมการจำลองกระบวนการผลิตเป็นเครื่องมือในการคำนวณสมดุลมวลและสมดุลพลังงานของกระบวนการผลิตได้อีกด้วย (Peters *et al.*, 2004)

5.4 การประมาณต้นทุน

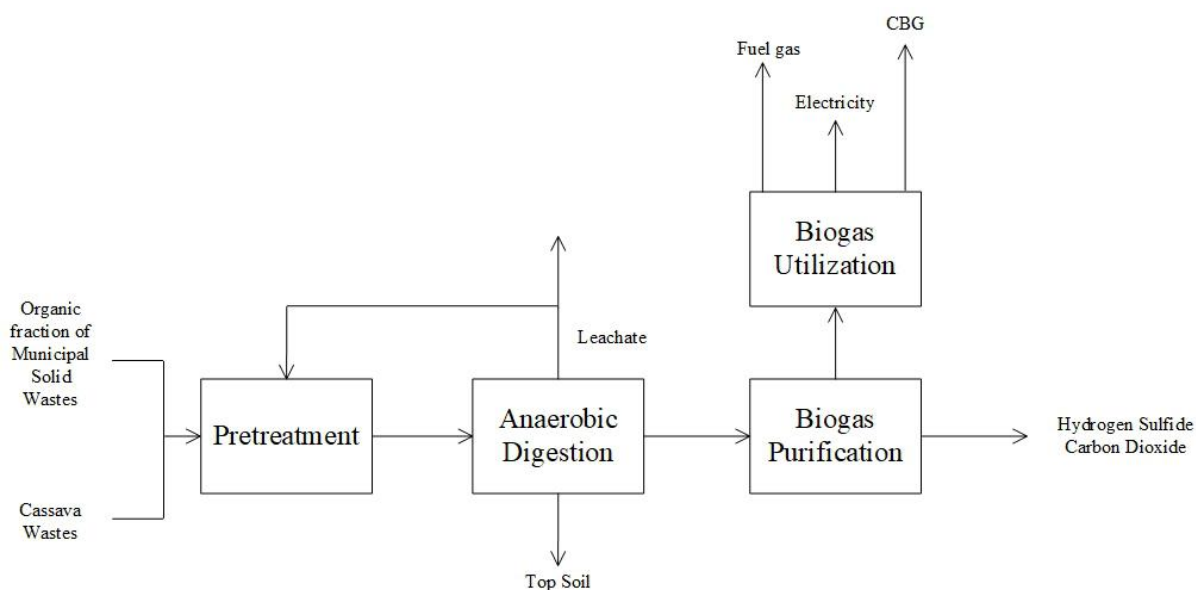
การประเมินต้นทุนที่จำเป็นต้องใช้ในการสร้างโรงงานต้องพิจารณาปัจจัยต่าง ๆ ที่เป็นไปได้ทั้งหมด ค่าใช้จ่ายที่จำเป็นในการสร้างโรงงาน ได้แก่ ต้นทุนคงที่ (Fixed costs) ต้นทุนการผลิต (Variable costs) ค่าแรงงาน ค่าซ่อมแซมและบำรุงโรงงาน ค่าสาธารณูปโภคต่าง ๆ โดยทั้งหมดรวมอยู่ในค่าใช้จ่ายของโรงงาน นอกจากนี้ยังมีค่าใช้จ่ายที่ไม่ขึ้นกับการผลิต ได้แก่ ค่าใช้จ่ายในการบริหารโรงงาน การกระจายและจำหน่ายสินค้ารวมถึงค่าใช้จ่ายอื่น ๆ ซึ่งในการประมาณต้นทุนส่วนใหญ่นั้นจะอิงจากราคาของอุปกรณ์ทั้งหมดเป็นฐานในการคำนวณ โดยค่าใช้จ่ายต่าง ๆ จะถูกประมาณเป็นสัดส่วนของราคาอุปกรณ์ (Peters *et al.*, 2004)

5.5 การวิเคราะห์ความสามารถในการทำกำไรของการลงทุน

การวิเคราะห์ความสามารถในการทำกำไรของการลงทุน ในโรงงานขนาดใหญ่มักจะใช้วิธีที่พิจารณามูลค่าเวลาของเงินเป็นหลัก ประกอบด้วย อัตราผลตอบแทนเงินสดของผลตอบแทน (Internal Rate of Return; IRR) และมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value; NPV) ส่วนโรงงานขนาดเล็กมักจะวิเคราะห์ด้วยระยะเวลาในการคืนทุน (Payback Period) ในการหาความสามารถในการทำกำไร (Peters *et al.*, 2004)

6 แผนภาพกล่อง (Block Diagram)

แผนภาพกล่องซึ่งแสดงภาพรวมของกระบวนการผลิต ดังแสดงในภาพที่ 5 ซึ่งเป็นกระบวนการผลิตแบบง่าย โดยแบ่งขั้นตอนของกระบวนการผลิตเป็นกระบวนการย่อย 4 กระบวนการ ประกอบด้วย กระบวนการเตรียมย่อยสลาย (Pretreatment Process), กระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ (Anaerobic Digestion) และการทำบริสุทธิ์ก๊าซชีวภาพ (Biogas Purification) ซึ่งก๊าซชีวภาพที่ได้จะนำไปผลิตเป็นพลังงานชนิดอื่น ๆ ได้แก่ พลังงานเชื้อเพลิงสำหรับเผาไหม้, ผลิตกระแสไฟฟ้าและพลังงานก๊าซชีวภาพอัดสำหรับเครื่องยนต์ โดยเป็นขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการผลิต เรียกว่า การใช้ประโยชน์จากก๊าซชีวภาพ (Biogas Utilization)



ภาพที่ 5 แผนภาพกล่องของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศขั้นสูง

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Karthik *et al.* (2014) ศึกษากระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากสารประกอบอินทรีย์เชิงซ้อน เช่น โพรตีน ไขมันและคาร์โบไฮเดรต โดยใช้โปรแกรม Aspen Plus โดยมีกระบวนการผลิต 4 ขั้นตอน ประกอบด้วย กระบวนการไฮโดรไลซิส, ปฏิกริยาสังเคราะห์, ปฏิกริยาสังเคราะห์อะซิติก และปฏิกริยาสังเคราะห์ โดยได้แสดงสมการเคมีของการเกิดปฏิกริยาและค่าการเปลี่ยนแปลงวัตถุเป็นผลิตภัณฑ์ โดยกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพทำการกำหนดเงื่อนไขคือให้กระบวนการผลิตเกิดขึ้นที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส โดยในการจำลองจะทำการป้อนขยะจากชุมชน ขยะจากเกษตรกรรม และน้ำเสียเข้าไปในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ หลังจากนั้นนำก๊าซชีวภาพที่ได้ไปเข้าเครื่องเผาไหม้เพื่อนำไปผลิตเป็นพลังงาน ผลการจำลองพบว่า เมื่อใช้ปริมาณอากาศที่มากเกินพอ 15.2 เปอร์เซ็นต์ในการเผาไหม้เพื่อผลิตเป็นพลังงาน จะทำให้ได้ปริมาณพลังงานที่มีมากที่สุด

Virunanon *et al.* (2013) ศึกษาการนำกากมันสำปะหลังมาผลิตเป็นไบโอแอลกอฮอล์ ซึ่งจากงานวิจัยนี้ทำให้ได้ข้อมูลเกี่ยวกับมันสำปะหลังในสัดส่วนต่าง ๆ โดยสามารถนำข้อมูลนี้มาเทียบเป็นปริมาณขององค์ประกอบในมันสำปะหลังได้แก่ เซลลูโลส 4.11 เปอร์เซ็นต์, เฮมิเซลลูโลส 4.20 เปอร์เซ็นต์, ลิกนิน 1.15 เปอร์เซ็นต์, แป้ง 75.1 เปอร์เซ็นต์และอื่น ๆ 15.44 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยองค์ประกอบในมันสำปะหลังสามารถนำไปผลิตเป็นก๊าซชีวภาพได้ ในการทดลองได้นำองค์ประกอบเหล่านี้ไปเข้ากระบวนการไฮโดรไลซิสที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส ใช้ระยะเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อให้สารประกอบเชิงซ้อนโมเลกุลใหญ่กลายเป็นโมเลกุลเล็ก และเข้าสู่กระบวนการหมักโดยใช้เอนไซม์ จากนั้นเพิ่มความบริสุทธิ์ของแอลกอฮอล์ให้ได้ตามที่ต้องการ ผลการทดลองของงานวิจัยนี้พบว่าคือ ปริมาณน้ำตาลถูกเปลี่ยนไปเป็นไบโอแอลกอฮอล์ในปริมาณ 93.3 เปอร์เซ็นต์ โดยองค์ประกอบในมันสำปะหลังสามารถนำไปผลิตเป็นก๊าซชีวภาพได้

Wang *et al.* (2016) ศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของของเสียจากอาหาร ประกอบด้วย ไขมัน, โพรตีนและแป้งที่อุณหภูมิ โดยของเสียจากอาหารสามารถแบ่งได้ออกเป็นไขมัน 22.3 เปอร์เซ็นต์ โพรตีน 29.3 เปอร์เซ็นต์, แป้ง 34.7 เปอร์เซ็นต์และอื่น ๆ 13.7 เปอร์เซ็นต์โดยคิดเทียบกับของเสียที่แห้ง ซึ่งข้อมูลทำให้ทราบปริมาณเศษอาหารแต่ละชนิดที่จะนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพได้ ซึ่งมีวิธีการทดลองคือนำของเสียจากอาหารปริมาณ 10 กรัม ทำการฉายรังสีไมโครเวฟเพื่อศึกษาปริมาณของของเสียจากอาหารที่เปลี่ยนไป จากนั้นนำสารที่ได้หลังปฏิกริยาเข้าเครื่องเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 8,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที ผลการทดลองนี้พบว่า ไขมันจะมีปริมาณเพิ่มขึ้นในช่วงแรกและลดลงเมื่อเวลาผ่านไปเรื่อย ๆ สำหรับโปรตีนจะต่างจากไขมันโดยจะมีปริมาณลดลงในช่วงแรกและเพิ่มขึ้นเล็กน้อย

R. Kigozi, A. Aboyade and E. Muzenda (2014) ศึกษากระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพจากขยะมูลฝอย ประกอบด้วย ขยะจากเศษอาหารและขยะชุมชนส่วนที่เป็นสารอินทรีย์ เช่น ขยะทางการเกษตรกรรม โดยได้นำวัตถุดิบเข้ากระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพ คือ กระบวนการไฮโดรไลซิสเพื่อให้โมเลกุลของเศษอาหารจำพวกโปรตีน ไขมันและคาร์โบไฮเดรตมาขนาดลดลงเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหรือกรดอะมิโน จากนั้นจะนำไปเข้ากระบวนการผลิตก๊าซชีวภาพด้วยปฏิกิริยาเคมี ทำให้ได้ก๊าซชีวภาพเป็นผลิตภัณฑ์ ซึ่งผลการทดลองพบว่า ขยะจากเศษอาหารสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้เท่ากับ 472 ลูกบาศก์เมตร ซึ่งมีปริมาณมากกว่าปริมาณก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จากขยะชุมชนส่วนที่เป็นสารอินทรีย์ซึ่งมีค่าเท่ากับ 390 ลูกบาศก์เมตร

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์ที่ใช้

1 คอมพิวเตอร์ที่ใช้

Processor : Intel(R) Core(TM) i7-7500U CPU @ 2.70Hz 2.90GHz

Installed Memory (RAM) : 8.00 GB

Window edition : Microsoft window 10

2 โปรแกรมที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง

Aspen Plus V8.8

Aspen Properties V8.8

3 โปรแกรมอื่น ๆ ที่ใช้

Microsoft Office 2016

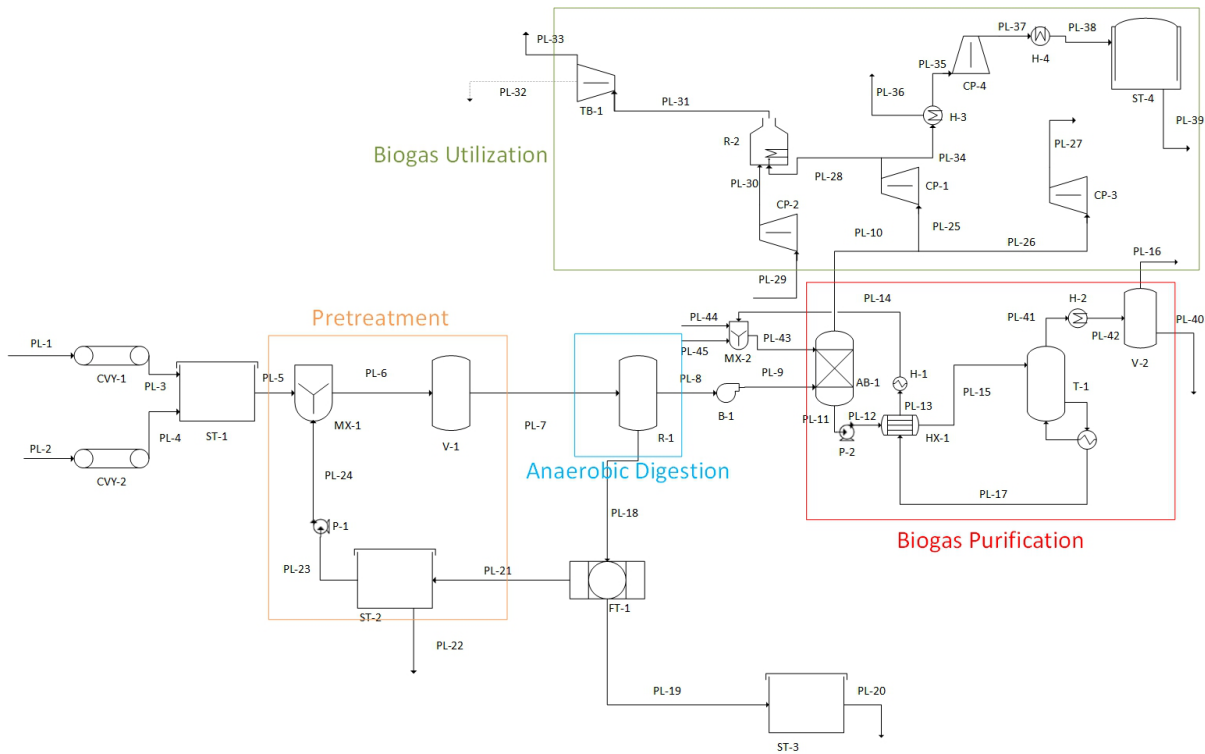
SimaPro

วิธีการดำเนินโครงการ

1 กระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศขั้นสูง

1.1 แผนภาพกระบวนการผลิต

ภาพที่ 6 แสดงแผนภาพการไหลของสารในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศขั้นสูง เพื่อนำก๊าซชีวภาพไปผลิตเป็นไฟฟ้าและเชื้อเพลิง โดยได้จากการสร้างแบบจำลองในโปรแกรม Microsoft Visio ซึ่งแสดงถึงขั้นตอนต่าง ๆ ในกระบวนการผลิต ได้แก่ กระบวนการเตรียมการย่อยสลาย (Pretreatment Process), กระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ (Anaerobic Digestion), การทำบริสุทธิ์ก๊าซชีวภาพ (Biogas Purification) และการใช้ประโยชน์จากก๊าซชีวภาพ (Biogas Utilization)



ภาพที่ 6 แผนภาพการไหลของสารในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศขั้นสูง

1.2 คำอธิบายกระบวนการผลิต

กระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศขั้นสูงจากขยะจากชุมชนและเศษเหลือทิ้งจากมันสำปะหลังสามารถแบ่งขั้นตอนได้เป็น 4 ขั้นตอนได้ดังนี้ กระบวนการเตรียมการย่อยสลาย (Pretreatment Process), กระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ (Anaerobic Digestion), การทำบริสุทธิ์ก๊าซชีวภาพ (Biogas Purification) และการใช้ประโยชน์จากก๊าซชีวภาพ (Biogas Utilization)

1) กระบวนการเตรียมการย่อยสลาย (Pretreatment Process)

วัตถุดิบที่ต้องใช้สำหรับเตรียมการย่อยสลาย ได้แก่ ขยะจากชุมชน (OFMSW) และเศษเหลือทิ้งจากมันสำปะหลัง (Cassava Wastes) โดยขยะจากชุมชนจะเข้าสู่กระบวนการผลิตด้วยสายพานลำเลียง (CVY-1) และเศษเหลือทิ้งจากมันสำปะหลังจะเข้าสู่กระบวนการผลิตด้วยสายพานลำเลียง (CVY-2) ซึ่งขยะทั้งสองประเภทจะถูกลำเลียงไปที่ถังเก็บ (ST-1) และถูกลำเลียงไปที่ถังผสม (MX-1) เพื่อผสมกับน้ำขยะที่วนกลับมาใช้ใหม่ จากนั้นขยะทั้งสองประเภทจะถูกลำเลียงเข้าสู่ถังจัดเก็บ (V-1) เพื่อเตรียมสำหรับกระบวนการย่อยสลาย ซึ่งเป็นกระบวนการเตรียมการย่อยสลายด้วยน้ำขยะ ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นกรดอ่อน

2) กระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ (Anaerobic Digestion)

วัตถุดิบหรือขยะทั้งสองประเภทหลังจากเตรียมสำหรับกระบวนการย่อยสลายใน V-1 แล้ว จะถูกลำเลียงไปยังถังย่อยสลาย (R-1) ซึ่งเป็นถังที่เกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ เพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ โดยกำหนดให้ระยะเวลาการหมักอยู่ที่ 15 วัน เมื่อครบกำหนด 15 วันจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ออกเป็นสองส่วน ได้แก่ ส่วนที่เป็นของเหลวและของแข็ง (PL-18) และส่วนที่เป็นก๊าซ (PL-8)

ส่วนที่เป็นของเหลวและของแข็ง (Digestate) จะถูกนำมาแยกที่เครื่องกรอง (FT-1) เพื่อแยกของแข็ง (PL-19) และของเหลว (PL-21) ออกจากกัน ซึ่งของแข็งจะถูกนำไปขายเป็นปุ๋ย (Top soil) สำหรับของเหลว (Leachate) ที่เป็นน้ำขุ่นที่มีคุณสมบัติเป็นกรดอ่อน จะถูกลำเลียงไปที่ถังเก็บน้ำขุ่น (ST-1) ซึ่งน้ำขุ่นส่วนหนึ่งวนกลับเข้าถังผสม (MX-1) เพื่อไปใช้ในกระบวนการเตรียมการย่อยสลาย (PL-23) และอีกส่วนหนึ่งจะปล่อยทิ้ง (PL-22) เพื่อไม่ให้เกิดการสะสมของน้ำขุ่นในระบบการผลิต ก๊าซชีวภาพ (PL-8) ที่ได้จะเข้าสู่เครื่องเป่าลม (B-1) เพื่อทำการลำเลียงและเพิ่มความดันของก๊าซชีวภาพก่อนเข้าสู่เครื่องดูดซับ (AB-1) ซึ่งก๊าซชีวภาพจะมีองค์ประกอบได้แก่ ก๊าซมีเทน (CH_4), ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2), ก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) และน้ำ (H_2O)

3) การทำบริสุทธิ์ก๊าซชีวภาพ (Biogas Purification)

ก๊าซชีวภาพที่ถูกเพิ่มความดันด้วย B-1 จะถูกลำเลียง (PL-9) เข้าสู่เครื่องดูดซับ (AB-1) โดยเครื่องดูดซับจะทำการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) เพื่อเพิ่มสัดส่วนของก๊าซมีเทนให้มากขึ้น ซึ่งจะทำการด้วยการใช้สารโมโนเอทานอลามีน (Mono Ethanolamine, MEA) ในการจับก๊าซสองชนิด ผลจากการแยกจะถูกแบ่งเป็น 2 สายได้แก่ สายของก๊าซชีวภาพที่ถูกแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกแล้ว (PL-10) ซึ่งก๊าซชีวภาพที่มีสัดส่วนของก๊าซมีเทนที่เพิ่มขึ้นจะถูกนำไปใช้ประโยชน์ในรูปของพลังงานชนิดอื่น และส่วนของสารโมโนเอทานอลามีนที่จับกับก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ (PL-11) จะนำไปแลกเปลี่ยนความร้อนที่เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (HX-1) ซึ่งทำให้มีความร้อนเพิ่มขึ้น เพื่อเตรียมสำหรับเข้าเครื่องแยก (T-1) โดยเครื่องแยกจะทำการแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกจากสารโมโนเอทานอลามีน ซึ่งก๊าซทั้งสองชนิดจะถูกปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม (PL-16) และสายของของเหลวที่ถูกปล่อยทิ้ง (PL-40) ส่วนของสารโมโนเอทานอลามีน (PL-17) จะวนกลับมาแลกเปลี่ยนความร้อนที่ HX-1 และนำกลับไปใช้ใหม่ (PL-14) โดยเข้าเครื่องผสม (MX-2) เพื่อนำมาจับก๊าซทั้งสองชนิดอีกที่เครื่องดูดซับ (AB-1)

4) การใช้ประโยชน์จากก๊าซชีวภาพ (Biogas Utilization)

ก๊าซชีวภาพที่ถูกแยกก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ออกแล้ว (PL-10) จะลำเลียงและถูกแบ่งเป็นสองสายย่อย ๆ เพื่อนำไปใช้ประโยชน์ที่ต่างกัน โดยสายแรก (PL-26) จะนำไปใช้ผลิตก๊าซเชื้อเพลิงที่ใช้ในโรงงาน (Industrial Combustion) ซึ่งจะนำไปเข้าเครื่องคอมเพลสเซอร์ (CP-3) เพื่อเพิ่มความดันเป็น 1.25 บาร์ตามข้อกำหนดของการนำไปใช้ สำหรับสายที่สองของก๊าซชีวภาพที่ถูกแบ่งมาใช้ประโยชน์ (PL-25) จะถูกนำไปเข้าเครื่องคอมเพลสเซอร์ (CP-1) เพื่อเพิ่มความดันเป็น 20 บาร์ และถูกแบ่งเป็นสองสาย ได้แก่ สายที่จะนำไปผลิตเป็นกระแสไฟฟ้า (PL-28) โดยก๊าซชีวภาพจะถูกใช้ในการเผาไหม้กับอากาศที่ถูกเพิ่มเข้ามาในกระบวนการผลิต (PL-29) ที่เตาเผา (R-2) เพื่อนำความร้อนที่ได้ไปหมุนกังหัน (Turbine, TB-1) จึงจะได้กระแสไฟฟ้าออกมาเพื่อนำไปใช้ต่อ (PL-32) และได้ก๊าซที่เหลือจากการหมุนกังหัน (PL-33) และอีกสายหนึ่ง (PL-34) คือสายที่จะนำไปผลิตเป็นก๊าซชีวภาพอัด (Compressed Biogas, CBG) โดยก๊าซชีวภาพในส่วนนี้จะถูกนำไปเข้าเครื่องทำความเย็น (Cooler, H-3) เพื่อทำการกำจัดความชื้นในก๊าซออก (PL-36) และก๊าซชีวภาพหลังจากกำจัดน้ำจะเข้าสู่เครื่องคอมเพลสเซอร์ (CP-4) โดยจะได้ก๊าซชีวภาพความดันเป็น 251 บาร์ ซึ่งทำให้มีอุณหภูมิที่สูง จึงนำไปเข้าเครื่องทำความเย็น (Cooler, H-4) ก่อนนำไปเก็บไว้ที่ถังเก็บ (ST-4) แล้วจึงนำไปขาย (PL-39)

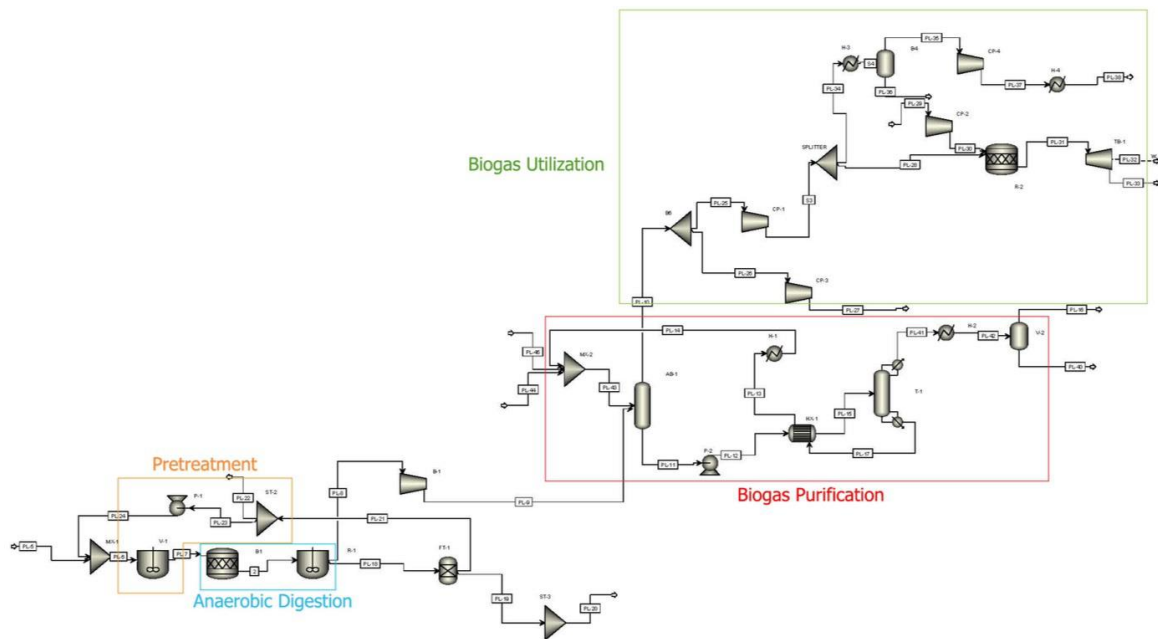
2 สมมติฐานในกระบวนการผลิต

- 1) กำหนดให้กระบวนการผลิตเป็นสภาวะคงที่ ไม่เปลี่ยนแปลงตามเวลา (Steady state)
- 2) กำหนดให้มีการดำเนินงาน 300 วันต่อปี และ 240 ชั่วโมงต่อวัน (7,200 ชั่วโมงต่อปี)
- 3) กำหนดให้วัตถุดิบที่ใช้ในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศชั้นสูง ได้แก่ ขยะจากชุมชนเป็นปริมาณ 357.48 ตันต่อวัน และเศษเหลือทิ้งจากมันสำปะหลังเป็นปริมาณ 800 ตันต่อวัน
- 4) กำหนดให้ผลิตภัณฑ์หลักที่ได้จากการเปลี่ยนก๊าซชีวภาพเป็นพลังงานชนิดอื่น ได้แก่ เชื้อเพลิงสำหรับการเผาไหม้ (CNG) โดยเป็นเชื้อเพลิงที่ 250 มิลลิบาร์เกจ, กระแสไฟฟ้าปริมาณ 930 เมกะวัตต์ชั่วโมงต่อเดือน (11,160,000 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี) และก๊าซชีวภาพอัด (Compressed Biogas; CBG) ที่มีสัดส่วนของมีเทนมากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์และที่ความดัน 250 บาร์เกจ
- 5) กำหนดให้คุณสมบัติของปุ๋ย (Top soil) ที่ได้เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ มีคุณสมบัติคล้ายดินสีดา

ผลและวิจารณ์

1 แผนภาพที่ได้จากกระบวนการผลิต

กระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศขั้นสูงนั้นสามารถสร้างแบบจำลองได้ดังภาพที่ 7 ซึ่งเป็นแผนภาพที่ได้จากโปรแกรม Aspen Plus



ภาพที่ 7 แผนภาพการสร้างแบบจำลองกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศขั้นสูงในโปรแกรม Aspen Plus

2 สมดุลมวลโดยรวม

สมดุลมวลโดยรวมที่เข้าและออกกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศขั้นสูงจากขยะจากชุมชนและเศษเหลือทิ้งจากมันสำปะหลัง จะแสดงในตารางที่ 4 และในส่วนของสมดุลมวลระหว่างอุปกรณ์แต่ละชนิดจะแสดงในภาคผนวก ก

ตารางที่ 4 ปริมาณของสารทั้งหมดที่เข้าและออกในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศชั้นสูง

Component	Mass flow (tons/day)	
	Inlet	Outlet
เอทานอล	0.00	0.18
น้ำ	1,179.12	1,183.54
กลูโคส	0.00	4.67
ลิกนิน	1.35	1.35
เซลลูโลส	4.83	1.74
ไซแลน	4.94	1.23
ไซโลส	0.00	0.38
คาร์บอนไดออกไซด์	0.00	57.87
แป้ง	101.58	30.47
ไตรโอเลอิน	9.33	0.54
เฟอฟูรัล	0.00	0.64
อะซิติก	0.00	29.79
กลีเซอรอล	0.00	0.91
มีเทน	0.00	10.25
แอมโมเนีย	0.00	0.00
ไฮโดรเจนซัลไฟด์	0.00	1.02
เอทิลไซยาโนอะซิเตต (C ₅ H ₇ NO ₂)	0.00	10.18
กรดโพธิโอนิค (C ₃ H ₆ O ₂)	0.00	1.89
กรดบิวทีริก (C ₄ H ₈ O ₂)	0.00	1.99
ไฮโดรเจน	0.00	0.00
โปรตีน	12.26	1.23
กรดโอเลอิก (C ₁₈ H ₃₄ O ₂)	0.00	0.48
โมโนเอทานอลามีน (MEA)	0.01	0.01
ไนโตรเจน	101.25	101.25
ออกซิเจน	30.75	3.57
ไนโตรเจนไดออกไซด์	0.00	0.00
อื่น ๆ	23.89	23.89
Total	1,469.31	1,469.09

ตารางที่ 4 ปริมาณของสารทั้งหมดที่เข้าและออกในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศขั้นสูง (ต่อ)

Component	Mass flow rate (tons/day)	
อื่น ๆ	23.89	23.89
Total	1,469.31	1,469.09
Error Value	0.01%	

จากผลการสร้างแบบจำลองกระบวนการผลิต ทำให้ได้ปริมาณก๊าซชีวภาพ และอัตราส่วนปริมาตรต่อปริมาตร เทียบกับข้อมูลทางทฤษฎี โดยข้อมูลจะแสดงในตารางที่ 5 และอัตราส่วนปริมาตรต่อปริมาตรของก๊าซชีวภาพก่อนและหลังการทำบริสุทธิ์แสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบก๊าซชีวภาพที่ได้ผลจากการสร้างแบบจำลองการผลิตกับทฤษฎี

Component	Mass flow rate of Biogas (tons/day)	Percentage composition (%v/v)	
		Theory	Simulation
มีเทน	17.05	50 – 70	57.96
คาร์บอนไดออกไซด์	29.94	20 – 50	36.93
น้ำ	4.39	0 – 10	4.47
ไนโตรเจน	0	0 – 5	0
ออกซิเจน	0	0 – 2	0
แอมโมเนีย	0	0 – 1	0
ไฮโดรเจนซัลไฟด์	0.50	0.005 – 0.5	0.64
Total	51.87	1	1

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบอัตราส่วนปริมาตรต่อปริมาตรของก๊าซชีวภาพที่ก่อนและหลังการทำบริสุทธิ์

Component	Percentage Composition (%v/v)	
	Before Purification	After Purification
มีเทน	57.96	97.96
คาร์บอนไดออกไซด์	36.93	0
น้ำ	4.47	2.04
ไนโตรเจน	0	0

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบอัตราส่วนปริมาตรต่อปริมาตรของก๊าซชีวภาพที่ก่อนและหลังการทำบริสุทธิ์ (ต่อ)

Component	Percentage Composition (%v/v)	
	Before Purification	After Purification
ออกซิเจน	0	0
แอมโมเนีย	0	0
ไฮโดรเจนซัลไฟด์	0.64	0
Total	1	1

3 สมดุลพลังงานโดยรวม

พลังงานที่เกิดขึ้นในแต่ละอุปกรณ์ในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศสามารถดูได้จากตารางที่ 7 ซึ่งแสดงอุณหภูมิขาเข้าและขาออกของแต่ละอุปกรณ์ รวมถึงพลังงานที่เกิดขึ้นด้วย

ตารางที่ 7 พลังงานที่เกิดขึ้นในแต่ละอุปกรณ์ในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศขั้นสูง

Unit Operation	Code of Unit	Enthalpy (kW)		Q (kW)	Net work required (kW)
		Inlet	Outlet		
Absorber	AB-1 (Top)	-88,370.46	-88,370.46	0	0
	AB-1 (Bottom)				
Blower	B-1	-4,698.03	-4,651.33	0	46.70
Compressor	CP-1	-437.07	-380.82	0	56.25
	CP-2	15.14	627.67	0	612.53
	CP-3	-655.61	-649.12	0	6.49
	CP-4	-0.18	-0.14	0	0.04
Cooler	H-1	-49,669.44	-50,402.03	-733.23	0
	H-2	-31,411.02	-36,821.57	-5,410.55	0
	H-3	-0.19	-0.22	-0.33	0
	H-4	-0.14	-0.19	-0.05	0

ตารางที่ 7 พลังงานที่เกิดขึ้นในแต่ละอุปกรณ์ในกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศชั้นสูง (ต่อ)

Unit Operation	Code of Unit	Enthalpy (kW)		Q (kW)	Net work required (kW)
		Inlet	Outlet		
Digester	R-1	-374,625.00	-375,014.65	-389.65	0
Filter	FT-1	-370,316.62	-370,293.91	22.71	0
Furnace	R-2	247.03	-2,440.59	-2,687.63	0
Heat Exchanger	HX-1	-135,794.91	-135,794.91	0	0
Mixer	MX-1	-375,171.41	-375,171.41	0	0
Filter	MX-2	-83,608.23	-83,608.23	0	0
Pump	P-1	-183,552.37	-183,551.97	0	0.40
Heat Exchanger	P-2	-87,277.75	-87,275.46	0	2.29
Storage Tank	ST-2	-367,104.74	-367,104.74	0	0
	ST-3	-3,189.17	-3,189.17	0	0
Stripper	T-1 (Top)	-86,127.47	-79,930.47	-17,718.24	0
	T-1 (Bottom)	-87,277.75	-87,275.46	23,922.19	0
Vessel Tank	V-1	-375,171.44	-363,434.24	11,738.20	0
	V-2	-36,821.57	-36,805.98	15.59	0

จากการนำก๊าซชีวภาพไปผลิตเป็นพลังงานชนิดต่าง ๆ ได้แก่ ก๊าซเชื้อเพลิงสำหรับอุตสาหกรรมที่ 1.25 บาร์, กระแสไฟฟ้า และก๊าซชีวภาพอัด (Compressed Biogas; CBG) ที่มีสัดส่วนของมีเทนมากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ และที่ 251 บาร์ โดยปริมาณพลังงานชนิดต่าง ๆ ที่ได้จากก๊าซชีวภาพ และสัดส่วนของก๊าซชีวภาพที่นำมาเปลี่ยนเป็นพลังงานแต่ละชนิดจะแสดงอยู่ในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 สัดส่วนของก๊าซชีวภาพที่นำมาเปลี่ยนเป็นพลังงาน และปริมาณของพลังงานแต่ละชนิด

ประเภทพลังงาน	ก๊าซชีวภาพที่ใช้		ปริมาณที่ได้ (ต่อปี)
	ปริมาณก๊าซชีวภาพ (ตันต่อปี)	สัดส่วนก๊าซชีวภาพ (%)	
Industrial Combustion	3,280.92 ตัน	60.00	3,280.92 ตัน
Electricity	2,186.21 ตัน	39.98	10,080 เมกะวัตต์ชั่วโมง
CBG	1.07 ตัน	0.02	1 ตัน
Total	5,468.20	100	

4 สาธารณูปโภคที่ใช้ในกระบวนการผลิต

ปริมาณสาธารณูปโภคทั้งหมดที่ใช้ในกระบวนการผลิตนั้นสามารถสรุปได้ในตารางที่ 9 พร้อมกับแสดงราคาของสาธารณูปโภคแต่ละชนิด

ตารางที่ 9 สาธารณูปโภคที่ใช้ในกระบวนการผลิต

สาธารณูปโภค	จำนวนต่อปี	ราคาต่อหน่วย	ราคาทั้งหมด
ไอน้ำ	90,000 ตัน	135.56 บาทต่อตัน	12.20 ล้านบาท
ไฟฟ้า	5,217,830.07 กิโลวัตต์ ชั่วโมง	5.50 บาทต่อกิโลวัตต์ ชั่วโมง	28.70 ล้านบาท
น้ำหล่อเย็น	470,313.04 ตัน	15.81 บาทต่อตัน	7.44 ล้านบาท

5 รายการอุปกรณ์ในกระบวนการผลิต

ชนิดของอุปกรณ์ทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศขั้นสูงจะแสดงในตารางที่ 10 โดยรายละเอียดในตารางจะแสดงชนิด, จำนวนและราคาของอุปกรณ์แต่ละชนิด

ตารางที่ 10 รายละเอียดของอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ

No.	Unit Operation	Code of Unit	Amount	Price (Baht/Unit)	Total Price (Baht)
1	Absorber	AB-1	1	1,844,322.00	1,844,322.00
2	Blower	B-1	1	30,747.00	30,747.00
3	Compressor	CP-1	1	614,940.00	614,940.00
4		CP-2	1	614,940.00	614,940.00
5		CP-3	1	76,867.50	76,867.50
6		CP-4	1	6,118.66	6,118.66
7	Conveyor	CVY-1	1	30,402.90	30,402.90
8		CVY-2	1	30,402.90	30,402.90
9	Cooler	H-1	1	184,644.00	184,644.00
10		H-2	1	184,644.00	184,644.00
11		H-3	1	184,644.00	184,644.00
12		H-4	1	184,644.00	184,644.00
13	Digester	R-1	6	1,543,500.00	9,261,000.00
14	Filter	FT-1	1	113,248.32	113,248.32
15	Gas Engine	R-2 + TB-1	1	9,224,100.00	9,224,100.00
16	Heat Exchanger	HX-1	1	15,356.23	15,356.23
17	Mixer	MX-1	1	37,645.08	37,645.08
18		MX-2	1	89,166.30	89,166.30
19	Pump	P-1	1	9,839.04	9,839.04
20		P-2	1	9,839.04	9,839.04
21	Storage Tank	ST-1	1	104,631.60	104,631.60
22		ST-2	1	61,620.00	61,620.00

ตารางที่ 10 รายละเอียดของอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศขั้นสูง (ต่อ)

No.	Unit Operation	Code of Unit	Amount	Price (Baht/Unit)	Total Price (Baht)
23	Storage Tank	ST-3	1	15,387.00	15,387.00
24		ST-4	1	318,561.10	318,561.10
25	Stripper	T-1	1	6,149,400.00	6,149,400.00
26	Vessel Tank	V-1	1	430,805.23	430,805.23
27		V-2	1	36,896.40	36,896.40
Total Equipment Cost					29,827,915.90

6 ข้อมูลของอุปกรณ์ในกระบวนการผลิต

อุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิต จะแสดงรายละเอียดของแต่ละอุปกรณ์ ได้แก่ ขนาดและข้อมูลต่าง ๆ ของอุปกรณ์แต่ละชนิดในตารางที่ 11 ถึง 33 โดยตารางที่ 11 ถึงตารางที่ 17 เป็นตารางที่แสดงถึงข้อมูลของอุปกรณ์ในกระบวนการเตรียมการย่อยสลายและกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ (Pretreatment Process & Anaerobic Digestion Process) สำหรับตารางที่ 18 ถึงตารางที่ 25 เป็นข้อมูลของอุปกรณ์ในกระบวนการทำบริสุทธิ์ก๊าซชีวภาพ (Biogas Purification) และสำหรับตารางที่ 26 ถึงตารางที่ 33 เป็นข้อมูลของอุปกรณ์ในกระบวนการใช้ประโยชน์จากก๊าซชีวภาพ (Biogas Utilization)

ตารางที่ 11 ขนาดและข้อมูลต่าง ๆ ของถังผสม (MX-1)

Mixer	
Code of Unit	MX-1
Liquid Volume [L]	14,811.92
Vessel diameter [meter]	1.83
Vessel tangent to tangent height [meter]	5.64
Design gauge pressure [barg]	1.03
Design temperature [C]	121.11
Operating temperature [C]	50.00

ตารางที่ 12 ขนาดและข้อมูลต่าง ๆ ของถังจัดเก็บ (V-1)

Vessel Tank	
Code of Unit	V-1
Liquid Volume [m ³]	238.48.00
Vessel diameter [meter]	4.42
Vessel tangent to tangent height [meter]	4.42
Design gauge pressure [barg]	1.03
Design temperature [C]	177.78
Operating temperature [C]	150.00

ตารางที่ 13 ขนาดและข้อมูลต่าง ๆ ของถังย่อยสลาย (R-1)

Digester Tank	
Code of Unit	R-1
Liquid Volume [m ³]	54,667.00
Design gauge pressure [barg]	1.03
Design temperature [C]	121.11
Operating temperature [C]	50

ตารางที่ 14 ขนาดและข้อมูลต่าง ๆ ของถังเก็บน้ำขยะ (ST-2)

Storage Tank	
Code of Unit	ST-2
Liquid Volume [m ³]	5,854.71
Vessel diameter [meter]	1.37
Vessel tangent to tangent height [meter]	3.96
Design gauge pressure [barg]	1.03
Design temperature [C]	121.11
Operating temperature [C]	50.00

ตารางที่ 15 ขนาดและข้อมูลต่าง ๆ ของถังเก็บปุ๋ย (ST-3)

Storage Tank	
Code of Unit	ST-3
Liquid Volume [m ³]	2,401.93
Vessel tangent to tangent height [meter]	3.66
Design gauge pressure [barg]	1.03
Operating temperature [C]	50.00

ตารางที่ 16 ขนาดและข้อมูลต่าง ๆ ของปั๊ม (P-1)

Pump	
Code of Unit	P-1
Design gauge pressure [barg]	1.03
Design temperature [C]	121.11
Liquid flow rate [l/min]	818.73
Fluid head [meter]	2.11
Fluid specific gravity	0.97
Fluid viscosity [cP]	0.50
Pump efficiency [fraction]	0.62

ตารางที่ 17 ขนาดและข้อมูลต่าง ๆ ของเครื่องเป่าลม (B-1)

Blower	
Code of Unit	B-1
Actual gas flow rate [l/min]	29,836.99
Driver power [kW]	33.86

ตารางที่ 18 ขนาดและข้อมูลต่าง ๆ ของเครื่องผสม (MX-2)

Mixer	
Code of Unit	MX-2
Liquid volume [m ³]	6.31
Vessel diameter [meter]	1.37
Vessel tangent to tangent height [meter]	4.27
Design gauge pressure [N/m ² -gauge]	243,421.08
Design temperature [C]	121.11
Operating temperature [C]	40.82

ตารางที่ 19 ขนาดและข้อมูลต่าง ๆ ของเครื่องดูดซับ (AB-1)

Absorber	
Code of Unit	AB-1
Design gauge pressure [N/m ² -gauge]	243,421.08
Design temperature [C]	121.11
Operating temperature [C]	71.56
Diameter Bottom section [meter]	0.76
Bottom tangent to tangent height [meter]	24.38
Packing height Bottom Section1 [meter]	20.12

ตารางที่ 20 ขนาดและข้อมูลต่าง ๆ ของปั๊ม (P-2)

Pump	
Code of Unit	P-2
Design gauge pressure [N/m ² -gauge]	243,421.08
Design temperature [C]	121.11
Liquid flow rate [m ³ /hr]	31.70
Fluid head [meter]	15.97
Fluid specific gravity	1.04
Fluid viscosity [cP]	0.50

ตารางที่ 20 ขนาดและข้อมูลต่าง ๆ ของปั๊ม (P-2) (ต่อ)

Pump	
Code of Unit	P-2
Pump efficiency [fraction]	0.57

ตารางที่ 21 ขนาดและข้อมูลต่าง ๆ ของถังจัดเก็บ (V-2)

Vessel Tank	
Code of Unit	V-2
Liquid volume [m ³]	3.27
Vessel diameter [meter]	1.07
Vessel tangent to tangent height [meter]	3.66
Design gauge pressure [N/m ² -gauge]	243,421.08
Design temperature [C]	121.11
Operating temperature [C]	40.00

ตารางที่ 22 ขนาดและข้อมูลต่าง ๆ ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (HX-1)

Heat Exchanger	
Code of Unit	HX-1
Heat transfer area [m ²]	80.99
Front end TEMA symbol	B
Shell TEMA symbol	E
Rear end TEMA symbol	M
Tube design gauge pressure [N/m ² -gauge]	243,421.08
Tube design temperature [C]	161.64
Tube operating temperature [C]	107.98
Tube outside diameter [meter]	0.03
Shell design gauge pressure [N/m ² -gauge]	243,421.08
Shell design temperature [C]	161.64
Shell operating temperature [C]	133.86

ตารางที่ 22 ขนาดและข้อมูลต่าง ๆ ของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน (HX-1) (ต่อ)

Heat Exchanger	
Code of Unit	HX-1
Tube length extended [meter]	6.10
Tube pitch [meter]	0.03

ตารางที่ 23 ขนาดและข้อมูลต่าง ๆ ของเครื่องแยก (T-1)

Stripper		
Code of Unit	T-1 (Top)	T-1 (Bottom)
Design gauge pressure [N/sqm-gauge]	243,421.08	-
Design temperature [C]	161.64	-
Operating temperature [C]	133.97	-
Heat transfer area [m ²]	-	1,125.07
Tube design gauge pressure [N/m ² -gauge]	-	760,546.08
Tube design temperature [C]	-	192.11
Tube operating temperature [C]	-	164.33
Tube outside diameter [meter]	-	0.03
Shell design gauge pressure [N/m ² -gauge]	-	473,254.41
Shell design temperature [C]	-	161.64
Shell operating temperature [C]	-	133.86
Tube length extended [meter]	-	6.10
Tube pitch [meter]	-	0.03
Diameter Bottom section [meter]	2.44	-
Bottom tangent to tangent height [meter]	29.41	-
Packing height Bottom Section1 [meter]	25.15	-

ตารางที่ 24 ขนาดและข้อมูลต่าง ๆ ของเครื่องทำความเย็น (H-1)

Cooler	
Code of Unit	H-1
Heat transfer area [m ²]	699.37
Front end TEMA symbol	B
Shell TEMA symbol	E
Rear end TEMA symbol	M
Tube design gauge pressure [N/m ² -gauge]	577,671.08
Tube design temperature [C]	121.11
Tube operating temperature [C]	70.00
Tube outside diameter [meter]	0.03
Shell design gauge pressure [N/m ² -gauge]	351,337.75
Shell design temperature [C]	121.11
Shell operating temperature [C]	77.57
Tube length extended [meter]	6.10
Tube pitch [meter]	0.03

ตารางที่ 25 ขนาดและข้อมูลต่าง ๆ ของเครื่องทำความเย็น (H-2)

Cooler	
Code of Unit	H-2
Heat transfer area [m ²]	6,892.23
Front end TEMA symbol	B
Shell TEMA symbol	E
Rear end TEMA symbol	M
Tube design gauge pressure [N/m ² -gauge]	1,084,296.08
Tube design temperature [C]	146.11
Tube operating temperature [C]	110.00
Tube outside diameter [meter]	0.03
Shell design gauge pressure [N/m ² -gauge]	689,087.75
Shell design temperature [C]	146.11

ตารางที่ 25 ขนาดและข้อมูลต่าง ๆ ของเครื่องทำความเย็น (H-2) (ต่อ)

Cooler	
Code of Unit	H-2
Shell operating temperature [C]	118.33
Tube length extended [meter]	6.10
Tube pitch [meter]	0.03

ตารางที่ 26 ขนาดและข้อมูลต่าง ๆ ของคอมเพรสเซอร์ (CP-1)

Compressor	
Code of Unit	CP-1
Actual gas flow rate Inlet [m ³ /sec]	0.15
Design gauge pressure Inlet [N/m ² -gauge]	-1,328.92
Design temperature Inlet [C]	40.78
Design gauge pressure Outlet [N/m ² -gauge]	898,671.08
Design temperature Outlet [C]	294.05
Driver power [kW]	56.25
Driver type	MOTOR

ตารางที่ 27 ขนาดและข้อมูลต่าง ๆ ของคอมเพรสเซอร์ (CP-2)

Compressor	
Code of Unit	CP-2
Actual gas flow rate Inlet [m ³ /sec]	1.49
Design gauge pressure Inlet [N/m ² -gauge]	-1,328.92
Design temperature Inlet [C]	35.00
Design gauge pressure Outlet [N/m ² -gauge]	898,671.08
Design temperature Outlet [C]	419.82
Driver power [kW]	612.53
Driver type	MOTOR

ตารางที่ 28 ขนาดและข้อมูลต่าง ๆ ของคอมเพรสเซอร์ (CP-3)

Compressor	
Code of Unit	CP-3
Actual gas flow rate Inlet [m ³ /sec]	0.22
Design gauge pressure Inlet [N/m ² -gauge]	-1,328.92
Design temperature Inlet [C]	40.78
Design gauge pressure Outlet [N/m ² -gauge]	23,671.08
Design temperature Outlet [C]	63.46
Driver power [kW]	6.49
Driver type	MOTOR

ตารางที่ 29 ขนาดและข้อมูลต่าง ๆ ของคอมเพรสเซอร์ (CP-4)

Compressor	
Code of Unit	CP-4
Actual gas flow rate Inlet [m ³ /sec]	6.60E-06
Design gauge pressure Inlet [N/m ² -gauge]	898,671.08
Design temperature Inlet [C]	30.00
Design gauge pressure Outlet [N/m ² -gauge]	24,998,671.08
Design temperature Outlet [C]	391.48
Driver power [kW]	0.04
Driver type	MOTOR

ตารางที่ 30 ขนาดและข้อมูลต่าง ๆ ของเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า (TB-1)

Turbine	
Code of Unit	TB-1
Actual gas flow rate Inlet [m ³ /sec]	0.68
Design gauge pressure Inlet [N/m ² -gauge]	898,671.08
Design temperature Inlet [C]	1,000.00
Design gauge pressure Outlet [N/m ² -gauge]	-98,379.94

ตารางที่ 30 ขนาดและข้อมูลต่าง ๆ ของเครื่องผลิตกระแสไฟฟ้า (TB-1) (ต่อ)

Turbine	
Code of Unit	TB-1
Power output [kW]	1,400.00

ตารางที่ 31 ขนาดและข้อมูลต่าง ๆ ของเครื่องทำความเย็น (H-3)

Cooler	
Code of Unit	H-3
Heat transfer area [m ²]	9.56E-04
Tube design gauge pressure [N/m ² -gauge]	6.80E+05
Tube design temperature [C]	321.83
Tube outside diameter [meter]	0.03
Tube operating temperature [C]	40.00
Shell design temperature [C]	321.83
Shell operating temperature [C]	294.05
Tube length extended [meter]	6.10
Shell design gauge pressure [N/m ² -gauge]	1.07E+06
Tube pitch [meter]	0.03

ตารางที่ 32 ขนาดและข้อมูลต่าง ๆ ของเครื่องทำความเย็น (H-4)

Cooler	
Code of Unit	H-4
Heat transfer area [m ²]	1.25E-03
Tube design gauge pressure [N/m ² -gauge]	1.75E+07
Tube design temperature [C]	419.26
Tube outside diameter [meter]	0.03
Tube operating temperature [C]	40.00
Shell design temperature [C]	419.26
Shell operating temperature [C]	391.48

ตารางที่ 32 ขนาดและข้อมูลต่าง ๆ ของเครื่องทำความเย็น (H-4) (ต่อ)

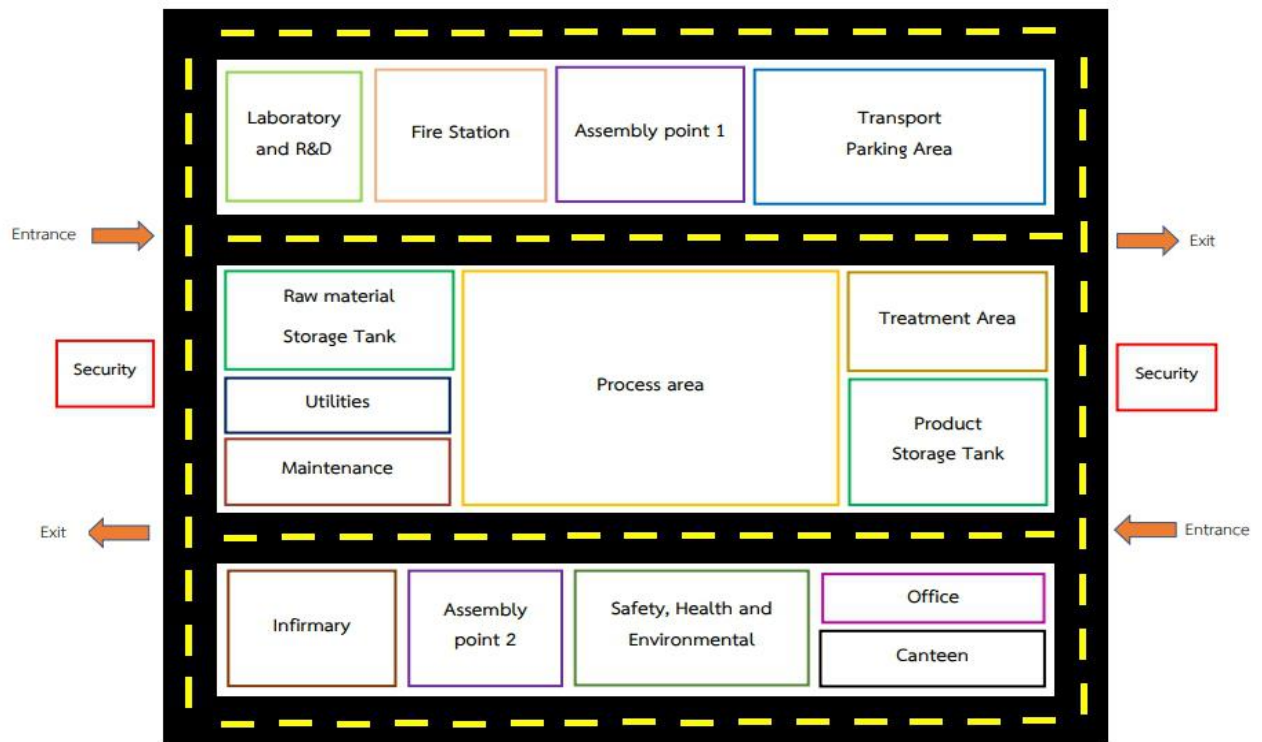
Cooler	
Code of Unit	H-4
Tube length extended [meter]	6.10
Shell design gauge pressure [N/m ² -gauge]	2.63E+07
Tube pitch [meter]	0.03

ตารางที่ 33 ขนาดและข้อมูลต่าง ๆ ของเตาเผา (R-2)

Burner	
Code of Unit	R-2
Actual gas flow rate Inlet [m ³ /sec]	0.31
Design gauge pressure Inlet [N/m ² -gauge]	1.07E+06
Design gauge pressure Outlet [N/m ² -gauge]	1.07E+06
Design temperature Outlet [C]	1,027.78

7 แผนผังโรงงานแบบง่าย

จากโจทย์ที่ได้จาก TIChE นั้นกำหนดไว้ว่า พื้นที่ที่เหมาะสมในการสร้างโรงงานผลิตก๊าซชีวภาพคือ 50 ไร่ หรือเท่ากับ 80,000 ตารางเมตร ซึ่งได้ทำการแบ่งเป็นพื้นที่ประมาณ 200 เมตร x 400 เมตร โดยแผนผังโรงงานกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศชั้นสูงแสดงในภาพที่ 7



ภาพที่ 8 แผนผังโรงงานกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศชั้นสูง

8 การพิจารณาผลกระทบด้านความปลอดภัย ด้านสุขภาพและด้านสิ่งแวดล้อม

8.1 Hazard and Operability Review

อันตรายที่สามารถเกิดขึ้นได้ในโรงงานผลิตก๊าซชีวภาพจากขยะชุมชนและเศษเหลือทิ้งจากมันสำปะหลัง แสดงในตารางที่ 34

ตารางที่ 34 อันตรายที่สามารถเกิดขึ้นได้ภายในโรงงานผลิตก๊าซชีวภาพ

ชื่อโครงการ : การผลิตก๊าซชีวภาพ				วันที่ : 21 กุมภาพันธ์ 2564		
กระบวนการผลิต : การย่อยสลายแบบไร้อากาศ						
ลำดับ	หน่วยที่ต้องการศึกษา	พารามิเตอร์	ความคลาดเคลื่อน	สาเหตุที่เป็นไปได้	ผลกระทบที่เกิดขึ้น	การดำเนินการ
1ก	V-1	อัตราการไหล	มากกว่า	1. ปริมาณวัตถุดิบที่เข้าสู่กระบวนการมีปริมาณมากกว่าปกติ	1. ถังเก็บ (V-1) มีความจุไม่พอ ทำให้ถึงเกิดความเสียหาย	1. ควบคุมปริมาณขยะที่เข้าสู่กระบวนการ
				2. น้ำขยะเข้าสู่กระบวนการผลิตมากเกินไป	2. น้ำขยะเกิดการสะสมในกระบวนการ และอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเกิดความเสียหาย	2. ติดตั้งวาล์ว และมีการตรวจสอบอุปกรณ์อย่างสม่ำเสมอ

ตารางที่ 34 อันตรายที่สามารถเกิดขึ้นได้ภายในโรงงานผลิตก๊าซชีวภาพ (ต่อ)

ชื่อโครงการ : การผลิตก๊าซชีวภาพ				วันที่ : 21 กุมภาพันธ์ 2564		
กระบวนการผลิต : การย่อยสลายแบบไร้อากาศ						
ลำดับ	หน่วยที่ต้องการศึกษา	พารามิเตอร์	ความคลาดเคลื่อน	สาเหตุที่เป็นไปได้	ผลกระทบที่เกิดขึ้น	การดำเนินการ
1ข	V-1	อัตราการไหล	น้อยกว่า	1. ปริมาณวัตถุดิบที่เข้าสู่กระบวนการมีปริมาณน้อยกว่าปกติ	1. กระบวนการผลิตไม่สามารถดำเนินงานได้ตามปกติ	1. ปฏิบัติตาม 1ก.1
				2. น้ำขยะเข้าสู่กระบวนการผลิตไม่เพียงพอ	2. กระบวนการเตรียมการย่อยสลายเกิดขึ้นอย่างไม่เต็มประสิทธิภาพ	2. ปฏิบัติตาม 1ก.2
1ค		ความเข้มข้นของน้ำขยะ	น้อยกว่า	1. ไม่มีวัตถุดิบเข้าสู่กระบวนการผลิต	1. กระบวนการผลิตไม่สามารถดำเนินงานได้	1. ปฏิบัติตาม 1ก.1
1ง	1. น้ำขยะเกิดการรั่วไหลออกจากกระบวนการ			1. กระบวนการเตรียมการย่อยสลายเกิดขึ้นอย่างไม่เต็มประสิทธิภาพ	1. ปฏิบัติตาม 1ก.2	
					2. เพิ่มมลพิษให้สิ่งแวดล้อม	2. มีการตรวจสอบอุปกรณ์อย่างสม่ำเสมอ

ตารางที่ 34 อันตรายที่สามารถเกิดขึ้นได้ภายในโรงงานผลิตก๊าซชีวภาพ (ต่อ)

ชื่อโครงการ : การผลิตก๊าซชีวภาพ				วันที่ : 21 กุมภาพันธ์ 2564		
กระบวนการผลิต : การย่อยสลายแบบไร้อากาศ						
ลำดับ	หน่วยที่ต้องการศึกษา	พารามิเตอร์	ความคลาดเคลื่อน	สาเหตุที่เป็นไปได้	ผลกระทบที่เกิดขึ้น	การดำเนินการ
1จ	V-1	อุณหภูมิ	มากกว่า	1. ความร้อนของก๊าซที่นำมาแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำขยะมีมากเกินไป	1. เกิดความร้อนมากเกินไปในถัง อาจทำให้ถังเกิดความเสียหายได้	1. ควบคุมอัตราการไหลของก๊าซที่นำมาแลกเปลี่ยนความร้อน
1ฉ			น้อยกว่า	1. ความร้อนของก๊าซที่นำมาแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำขยะมีน้อยเกินไป	1. ประสิทธิภาพของกระบวนการเตรียมการย่อยสลายต่ำลง	1. ปฏิบัติตาม 1จ.1
2ก	R-1	ความดัน	มากกว่า	1. อัตราการไหลของสารขาเข้ามีปริมาณมากเกินไป	1. ถังไม่สามารถรับแรงดันที่มากเกินไปได้ อาจทำให้ถังเกิดระเบิดหรือเกิดความเสียหาย	1. ติดตั้ง Safety relief valve
				2. อัตราการไหลของก๊าซชีวภาพขาออกมีปริมาณน้อยเกินไป		2. ปรับอัตราการไหลของก๊าซชีวภาพขาออกให้เหมาะสม ไม่ให้น้อยเกินไป

ตารางที่ 34 อันตรายที่สามารถเกิดขึ้นได้ภายในโรงงานผลิตก๊าซชีวภาพ (ต่อ)

ชื่อโครงการ : การผลิตก๊าซชีวภาพ				วันที่ : 21 กุมภาพันธ์ 2564		
กระบวนการผลิต : การย่อยสลายแบบไร้อากาศ						
ลำดับ	หน่วยที่ต้องการศึกษา	พารามิเตอร์	ความคลาดเคลื่อน	สาเหตุที่เป็นไปได้	ผลกระทบที่เกิดขึ้น	การดำเนินการ
2ข	R-1	ความดัน	น้อยกว่า	1. อัตราการไหลของก๊าซชีวภาพขาออกมากเกินไป	1. เครื่องเป่า (Blower, B-1) ดูดก๊าซออกจนเกิดสถานะสูญญากาศ ทำให้ถึงเกิดความเสียหาย	1. ปฏิบัติตาม 2ก.1
						2. ปฏิบัติตาม 2ก.2
3ก	AB-1	อัตราการไหล	มากกว่า	1. อัตราการไหลของของเหลวที่เข้าเครื่องดูดซับมากเกินไป	1. อาจเกิดน้ำท่วมเครื่องดูดซับทำให้อุปกรณ์เกิดความเสียหายได้	1. ติดตั้งวาล์วควบคุม เพื่อปรับอัตราการไหลของเหลวให้เหมาะสม
				2. อัตราการไหลของก๊าซที่เข้าเครื่องดูดซับมากเกินไป	2. ก๊าซไหลผ่านในเครื่องเร็วเกินไป ทำให้การจับตัวของก๊าซและสาร MEA ไม่เต็มประสิทธิภาพ	2. ติดตั้งวาล์วควบคุม เพื่อปรับอัตราการไหลของก๊าซให้เหมาะสม
3ข			น้อยกว่า	1. อัตราการไหลของของเหลวที่เข้าเครื่องดูดซับน้อยเกินไป	1. ของเหลวไม่สามารถจับตัวกับก๊าซได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ	1. ปฏิบัติตาม 3ก.1

ตารางที่ 34 อันตรายที่สามารถเกิดขึ้นได้ภายในโรงงานผลิตก๊าซชีวภาพ (ต่อ)

ชื่อโครงการ : การผลิตก๊าซชีวภาพ				วันที่ : 21 กุมภาพันธ์ 2564		
กระบวนการผลิต : การย่อยสลายแบบไร้อากาศ						
ลำดับ	หน่วยที่ต้องการศึกษา	พารามิเตอร์	ความคลาดเคลื่อน	สาเหตุที่เป็นไปได้	ผลกระทบที่เกิดขึ้น	การดำเนินการ
3ข	AB-1	อัตราการไหล	น้อยกว่า	2. อัตราการไหลก๊าซที่เข้าเครื่องดูดซับน้อยเกินไป	2. ก๊าซมีน้อยเกินไป ทำให้ของเหลวจับกับก๊าซได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ	2. ปฏิบัติตาม 3ก.2
3ค	T-1	อุณหภูมิ	มากกว่า	1. อัตราการไหลของไอน้ำที่นำมาให้ความร้อนกับอุปกรณ์มากเกินไป	1. อุปกรณ์มีความร้อนสูงเกินไป อาจทำให้อุปกรณ์เกิดความเสียหายและระเบิดได้	1. ติดตั้งวาล์วควบคุม เพื่อปรับอัตราการไหลของไอน้ำให้เหมาะสม
			น้อยกว่า	1. อัตราการไหลของไอน้ำที่นำมาให้ความร้อนกับอุปกรณ์น้อยเกินไป	1. สารในกระบวนการมีอุณหภูมิต่ำเกินไป ส่งผลให้ไม่สามารถทำการแยกก๊าซออกจากของเหลวได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ	1. ปฏิบัติตาม 3ค.1

8.2 Health and Environmental Consideration

ผลกระทบต่อสุขภาพ, สิ่งแวดล้อมและสังคมในทางบวกและทางลบที่คาดว่าจะเกิดขึ้นเนื่องจากการสร้างโรงงานผลิตก๊าซชีวภาพ แสดงในตารางที่ 35

ตารางที่ 35 ผลกระทบต่อสุขภาพ, สิ่งแวดล้อมและสังคมในทางบวกและทางลบจากการสร้างโรงงานผลิตก๊าซชีวภาพ

เหตุการณ์ที่ทำให้เกิดผลกระทบ	ผลกระทบที่คาดว่าจะเกิดขึ้น		ข้อเสนอแนะในการเฝ้าระวัง / ป้องกันผลกระทบ
	ทางบวก	ทางลบ	
1. การตั้งโรงงานอุตสาหกรรมในพื้นที่ชุมชน	1. ลดปริมาณขยะที่เกิดขึ้นในชุมชน 2. พลังงานที่ผลิตได้สามารถนำไปใช้ในชุมชนได้	1. โรงงานมีการสร้างมลพิษต่อชุมชน	1. มีการควบคุมมลพิษก่อนปล่อยออกจากโรงงาน 2. หลีกเลี่ยงการตั้งโรงงานใกล้เคียงกับพื้นที่ชุมชน
2. ขยะต่าง ๆ ที่ถูกปล่อยจากโรงงาน		1. เพิ่มปริมาณมลพิษให้แก่ชุมชน 2. ปริมาณของเสียที่เพิ่มขึ้น ไม่ว่าจะเป็นก๊าซพิษ ฝุ่นละออง หรือขยะ 3. สุขภาพของผู้คนในระแวกใกล้เคียงของโรงงานแยลง เนื่องจากมลพิษ	1. ควบคุมปริมาณของเสียในรูปแบบต่าง ๆ ก่อนปล่อยออกจากโรงงาน
3. ความปลอดภัยของโรงงานไม่ดีตามมาตรฐาน		1. อุบัติเหตุที่เกิดขึ้นภายในและภายนอกโรงงาน	1. มีการตรวจสอบระบบควบคุมและความปลอดภัยของโรงงานอย่างสม่ำเสมอ

9 ค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการลงทุนสำหรับกระบวนการผลิต

9.1 สมมติฐานที่ใช้ในการออกแบบและดำเนินงาน

- 1) การประมาณเงินลงทุนทั้งหมด ใช้การประมาณด้วยวิธีเทียบเปอร์เซ็นต์ของราคาต่าง ๆ กับราคาของอุปกรณ์ทั้งหมดในกระบวนการผลิต (Percentage of Delivered-Equipment Cost Method)
- 2) กำหนดให้สินทรัพย์หมุนเวียน (Working Capital) เป็น 15% ของเงินลงทุนทั้งหมด (TCI)
- 3) กำหนดให้ที่ดินมีการซื้อขาย ไม่ใช่การเช่าที่ดินในการสร้างโรงงาน
- 4) กำหนดให้มีการใช้สารโมโนเอทาโนลามีน (MEA) ในการเริ่มกระบวนการก่อนที่จะเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady state)

9.2 การประมาณต้นทุนทั้งหมด

การประมาณจำนวนเงินลงทุนทั้งหมดนั้นสามารถดูได้จากตารางที่ 34 ซึ่งแสดงถึงค่าเงินลงทุนในประเภทต่าง ๆ โดยอิงมาจากการประมาณด้วยวิธีเทียบเปอร์เซ็นต์ของราคาต่าง ๆ กับราคาของอุปกรณ์ทั้งหมดในกระบวนการผลิต (Percentage of Delivered-Equipment Cost Method)

ตารางที่ 36 รายละเอียดจำนวนเงินลงทุนในประเภทต่าง ๆ

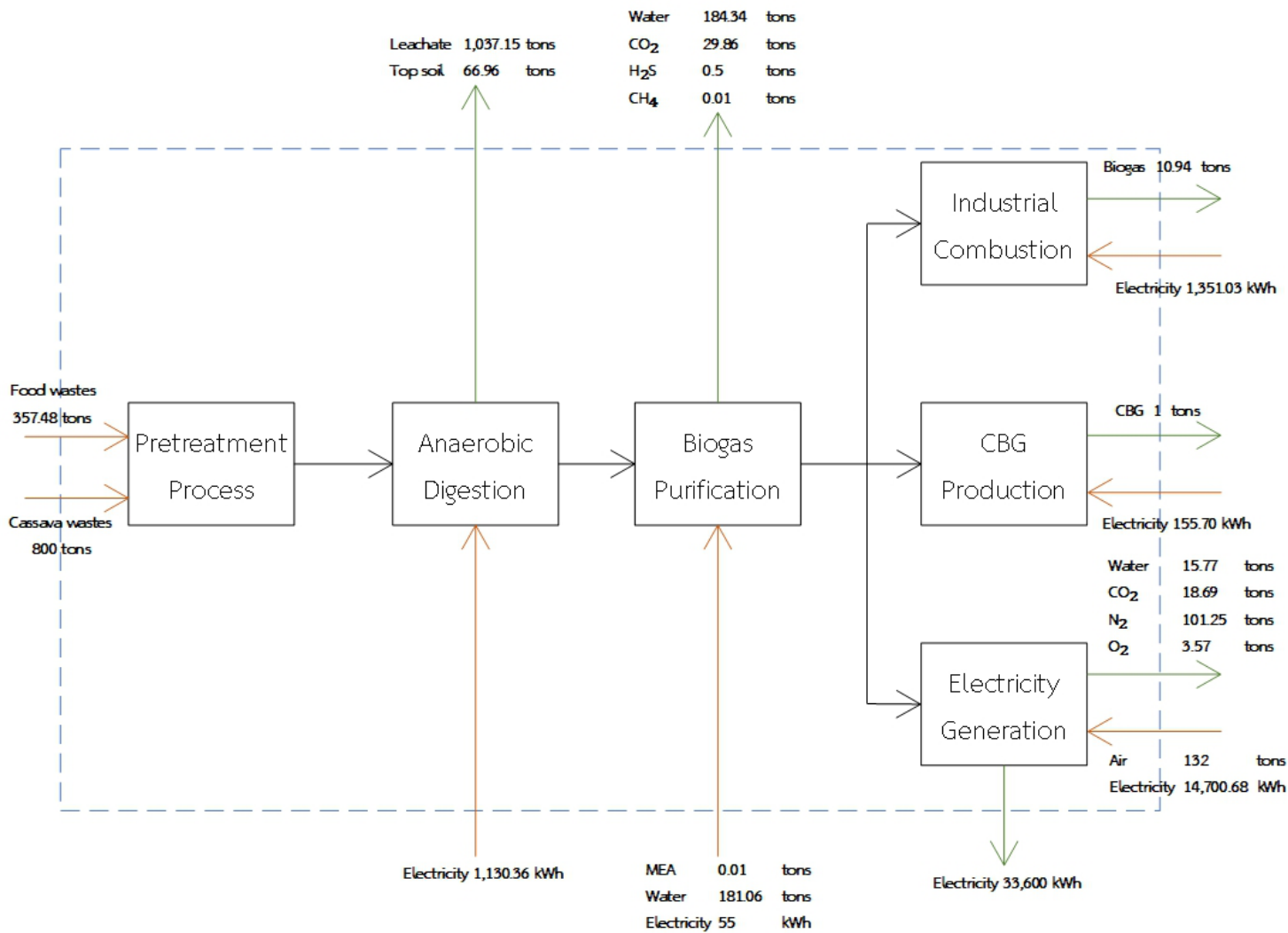
Title	Biogas production by Anaerobic Digestion process	
Solid - fluid processing plant		
Estimating Capital Investment based on Percentage of Delivered-Equipment Cost Method		
	Percent of delivered-equipment cost	Cost in THB
Direct Costs		
Purchased equipment delivered	100	29,827,915.90
Purchased equipment installation	39	11,632,887.20
Instrumentation and controls	26	7,755,258.13
Piping	31	9,246,653.93
Electrical system	10	2,982,791.59
Building	29	8,650,095.61

ตารางที่ 36 รายละเอียดจำนวนเงินลงทุนในประเภทต่าง ๆ (ต่อ)

Title	Biogas production by Anaerobic Digestion process	
Solid - fluid processing plant		
Estimating Capital Investment based on Percentage of Delivered-Equipment Cost Method		
	Percent of delivered- equipment cost	Cost in THB
Direct Costs		
Yard improvement	12	3,579,349.91
Service facilities	55	16,405,353.75
Total direct plant costs	302	90,080,306.02
Indirect costs		
Engineering and supervision	32	9,544,933.09
Construction expenses	34	10,141,491.41
Legal expenses	4	1,193,116.64
Contractor's fee	19	5,667,304.02
Contingency	37	11,036,328.88
Total indirect plant costs	126	37,583,174.03
Fixed-Capital Investment (FCI)	428	127,663,480.05
Working Capital (WC; about 15% of TCI)	75	22,370,936.93
MEA	-	2,063,394.90
Land	-	10,000,000.00
Total Capital Investment (TCI)	503	162,097,811.88

10 การคำนวณก๊าซเรือนกระจก

ในการคำนวณก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศชั้นสูงนั้นพิจารณาด้วยการประเมิน วัฏจักรชีวิต (Life Cycle Assistent, LCA) แบบประตูสู่ประตู (Gate to Gate) ซึ่งเป็นการสนใจแค่กระบวนการผลิต โดยสามารถดูได้จากภาพที่ 8 ที่แสดงถึงวัตถุดิบ สารต่าง ๆ และพลังงานที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตที่ทำให้เกิดก๊าซเรือนกระจกได้ การประเมินวัฏจักรชีวิตของกระบวนการนั้นจะใช้โปรแกรม SimaPro ในการประเมิน โดยอิงจากสิ่งต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิต ได้แก่ วัตถุดิบ, สารต่าง ๆ และกระแสไฟฟ้าที่ต้องใช้ในกระบวนการผลิต ซึ่งผลที่ได้จากโปรแกรม SimaPro นั้นจะแสดงในตารางที่ 37 โดยในตารางจะแสดงผลกระทบทั้งหมดและปริมาณที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศชั้นสูง

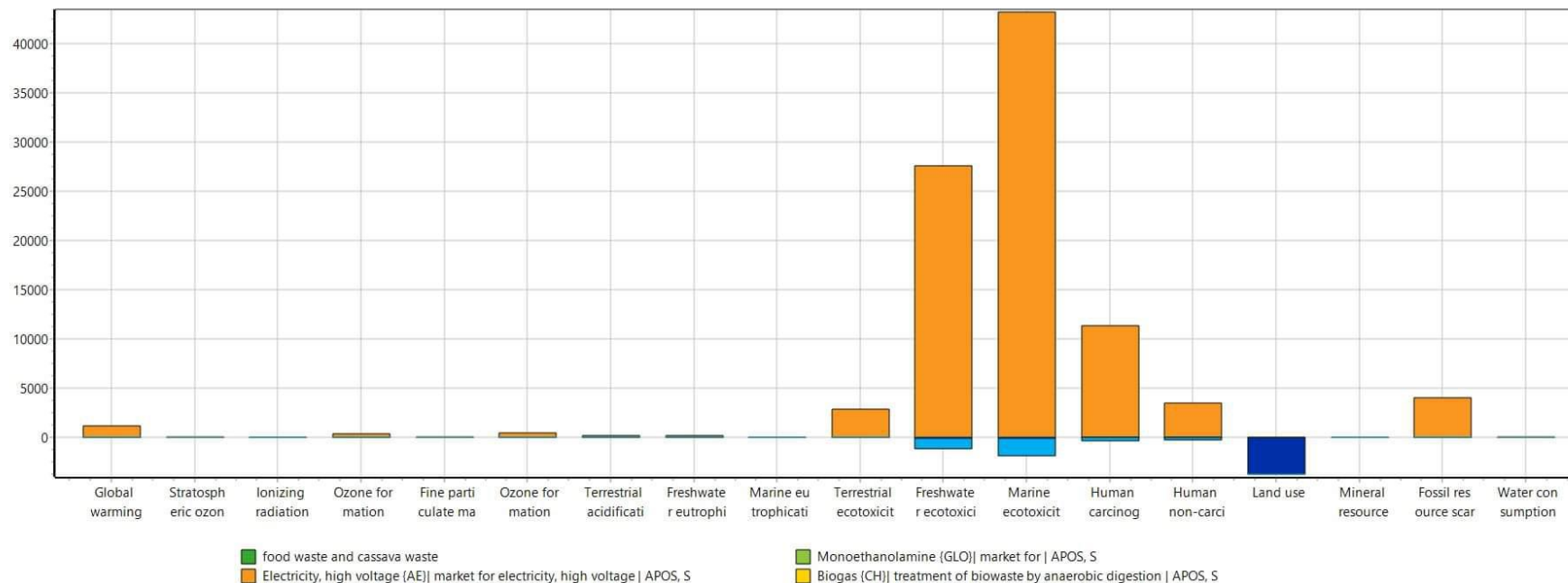


ภาพที่ 9 ขอบเขตการพิจารณาวัฏจักรชีวิตของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศขั้นสูง

ตารางที่ 37 ผลกระทบทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศชั้นสูงโดยการพิจารณาวัฏจักรชีวิต

Impact category	Unit	Total
Global warming	kg CO ₂ eq	9,292,879.27
Stratospheric ozone depletion	kg CFC-11 eq	3.40
Ionizing radiation	kBq Co-60 eq	15,461.31
Ozone formation, Human health	kg NO _x eq	7,759.49
Fine particulate matter formation	kg PM _{2.5} eq	1,873.63
Ozone formation, Terrestrial ecosystems	kg NO _x eq	7,904.22
Terrestrial acidification	kg SO ₂ eq	5,078.79
Freshwater eutrophication	kg P eq	97.54
Marine eutrophication	kg N eq	8.76
Terrestrial ecotoxicity	kg 1,4-DCB	2,918,004.10
Freshwater ecotoxicity	kg 1,4-DCB	32,379.82
Marine ecotoxicity	kg 1,4-DCB	42,627.39
Human carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	30,302.10
Human non-carcinogenic toxicity	kg 1,4-DCB	485,100.09
Land use	m ² a crop eq	-23,139,943.32
Mineral resource scarcity	kg Cu eq	3,412.67
Fossil resource scarcity	kg oil eq	3,882,771.74
Water consumption	m ³	15,413.61

แต่เนื่องจากข้อมูลในตารางที่ 37 มีหน่วยที่ต่างกันทำให้ไม่สามารถนำข้อมูลของผลกระทบในแต่ละด้านมาเปรียบเทียบกันได้ จึงได้มีการทำข้อมูลให้เป็นบรรทัดฐานเดียวกันของผลกระทบและแสดงออกมาเป็นกราฟในภาพที่ 9 โดยถ้าค่าเป็นบวกหมายถึงมีผลกระทบ และถ้าเป็นลบแสดงว่าไม่สร้างผลกระทบ



Method: ReCiPe 2016 Midpoint (H) V1.04 / World (2010) H / Normalization
 Analyzing 1.16E3 ton 'food waste and cassava waste';

ภาพที่ 10 ผลกระทบด้านต่าง ๆ จากกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศชั้นสูงหลังการทำให้เป็นมาตรฐานเดียวกัน

จากภาพที่ 9 พบว่าผลกระทบที่เกิดขึ้นมากที่สุดคือ Marine Ecotoxicity โดยสาเหตุหลักมาจากการใช้ไฟฟ้าที่มากเกินไปสำหรับกระบวนการผลิต แต่ด้านที่ไม่เกิดผลกระทบและเป็นประโยชน์จากกระบวนการผลิตคือ Land use เนื่องจากการนำขยะต่าง ๆ ในชุมชนมาใช้เป็นวัตถุดิบ ซึ่งเป็นการลดปริมาณขยะในชุมชน ทำให้ลดการเกิดผลกระทบได้

11 การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

การวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ที่นำมาวิเคราะห์โรงงานผลิตก๊าซชีวภาพมี 3 วิธี ได้แก่ อัตราผลตอบแทนของผลตอบแทน (Internal Rate of Return; IRR), มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value; NPV) และระยะเวลาในการคืนทุน (Payback Period) โดยสมมติฐานที่กำหนดเพื่อใช้ในการออกแบบและดำเนินงานนั้นมีดังนี้

11.1 สมมติฐานที่ใช้ในการออกแบบและดำเนินงาน

- 1) กำหนดให้อัตรากาสิโนติบุคคลอยู่ที่ 15% ต่อปี
- 2) กำหนดให้ค่าแรงงานเท่ากับ 40.50 บาทต่อคนต่อชั่วโมง (อ้างอิงจากค่าเฉลี่ยของค่าแรงงานไทยในปี 2020) และกำหนดให้มีแรงงานในโรงงานเป็นจำนวนคน 25 คนต่อวัน
- 3) กำหนดให้มีการกู้ยืมเงินลงทุนในวงเงิน 30% ของเงินลงทุนทั้งหมด (TCI) ที่อัตราดอกเบี้ย 5% ต่อปี และมีการผ่อนส่งทุกปีเป็นจำนวนเท่า ๆ กัน
- 4) กำหนดให้ระยะเวลาโครงการดำเนินงานคือ 20 ปี
- 5) กำหนดให้ต้นทุนค่าซื้อที่ดิน เป็นการซื้อจากเจ้าของเดิม ไม่ใช่การเช่าที่ดิน
- 6) กำหนดให้กระบวนการผลิตมีผลิตภัณฑ์หลักเป็นพลังงานชนิดต่าง ๆ ที่ได้จากก๊าซชีวภาพ ได้แก่ ก๊าซเชื้อเพลิงที่ใช้ในโรงงาน, พลังงานไฟฟ้าและก๊าซชีวภาพอัด และมีผลิตภัณฑ์พลอยได้ คือ ปุ๋ยที่ได้จากกระบวนการย่อยสลาย ซึ่งผลิตภัณฑ์ทุกชนิดสามารถขายได้ทั้งหมด
- 7) กำหนดให้ค่าเสื่อมราคาเป็นค่าเสื่อมราคาแบบเส้นตรง (Straight Line Depreciation)
- 8) กำหนดให้การคำนวณต้นทุนผลิตภัณฑ์รวม (TPC) อ้างอิงจากสัดส่วนค่าใช้จ่ายในส่วนต่าง ๆ ของกระบวนการผลิตของอเมริกา ซึ่งกำหนดให้เป็นต้นทุนต่อปีในปีแรกที่มีกำลังการผลิต 100%
- 9) กำหนดให้ Original Value (มูลค่าเริ่มต้นของโรงงาน) เท่ากับเงินลงทุนเริ่มต้น (FCI)
- 10) กำหนดให้ Salvage Value (มูลค่าซากของโรงงาน) เท่ากับ 0
- 11) กำหนดให้อัตราผลตอบแทนต่อปีที่ต้องการอยู่ที่ 10 เปอร์เซ็นต์
- 12) กำหนดให้ราคาสารทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตเป็นไปตามข้อมูลในตารางที่ 38 และเป็นราคาล่าสุดในวันที่ 13 มีนาคม 2564

ตารางที่ 38 ราคาสารทั้งหมดที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิต

ประเภท	ชื่อสาร	ราคา	หน่วย
สารตั้งต้น / วัตถุดิบ	ขยะจากชุมชน	100	บาทต่อตัน
	เศษเหลือทิ้งจากมันสำปะหลัง	100	บาทต่อตัน
	MEA	46.13	บาทต่อกิโลกรัม
	กระแสไฟฟ้า	5.50	บาทต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง
ผลิตภัณฑ์	CNG / ก๊าซเชื้อเพลิง	16	บาทต่อกิโลกรัม
	กระแสไฟฟ้า	5.50	บาทต่อกิโลวัตต์ชั่วโมง
	ปุ๋ย	2.5	บาทต่อกิโลกรัม

ที่มา: ขยะจากชุมชน, เศษเหลือทิ้งจากมันสำปะหลัง, CNG และกระแสไฟฟ้าจาก สมาคมวิศวกรรมเคมีและเคมีประยุกต์แห่งประเทศไทย (2563), MEA จากเคมีภัณฑ์ (2564), ปุ๋ยจากไทยวัสดุ (2564)

11.2 ผลการคำนวณ

ซึ่งผลการคำนวณสำหรับการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ทั้ง 3 วิธี จะแสดงผลในตารางที่ 39 และการคำนวณอย่างละเอียดจะแสดงในภาคผนวก ค

ตารางที่ 39 ผลการคำนวณการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

	Calculation
IRR	10.43%
NPV	4.93
Payback Period	8.26 years

จากผลการคำนวณในตารางที่ 39 จะสามารถวิเคราะห์ได้ดังนี้ การวิเคราะห์ความคุ้มค่าด้วยวิธี Internal Rate of Return (IRR) จะเป็นการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์อัตราผลตอบแทนที่จะได้จากการลงทุนกับเปอร์เซ็นต์อัตราผลตอบแทนที่ต้องการได้ โดยหากเปอร์เซ็นต์อัตราผลตอบแทนที่จะได้จากการลงทุนมีค่ามากกว่าเปอร์เซ็นต์อัตราผลตอบแทนที่ต้องการได้ แสดงว่าโครงการที่ศึกษาและวิเคราะห์อยู่นั้นควรลงทุน ซึ่งจากการคำนวณพบว่า ค่า IRR มีค่าเท่ากับ 10.43 เปอร์เซ็นต์ และอัตราผลตอบแทนที่ต้องการได้อยู่ที่ 10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งค่า IRR มีค่ามากกว่าที่ต้องการได้ หมายความว่า โครงการนี้ควรลงทุน

สำหรับวิธี Net Present Value (NPV) เป็นการคำนวณค่าเงินในปัจจุบัน โดยหากค่า NPV ที่คำนวณได้มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0 แสดงว่า โครงการที่ศึกษาและวิเคราะห์อยู่นั้นควรลงทุน ซึ่งจากการคำนวณพบว่า ค่า NPV มีค่า 4.93 หมายความว่า โครงการนี้ควรลงทุน

สำหรับวิธีสุดท้าย Payback Period เป็นการคำนวณหาระยะเวลาคืนทุน ซึ่งไม่มีเกณฑ์ที่ตายตัว การพิจารณาจะขึ้นกับความต้องการของผู้พิจารณาว่าต้องการคืนทุนในระยะเวลากี่ปี โดยหากมีระยะเวลาคืนทุนน้อยกว่าระยะคืนทุนที่ต้องการ แสดงว่า โครงการที่ศึกษาอยู่นั้นควรลงทุน โดยจากการคำนวณพบว่า โครงการมีระยะเวลาคืนทุนอยู่ที่ 8.26 ปี (ประมาณ 8 ปี 3 เดือน) ซึ่งคณะผู้จัดทำนั้นพอใจกับระยะเวลาคืนทุนดังกล่าว จึงลงความเห็นว่างว่า โครงการนี้ควรลงทุน

บทสรุปและข้อเสนอแนะ

บทสรุปที่นำมาพิจารณาและวิเคราะห์นั้นมีสองด้าน ได้แก่ ด้านเทคนิคในการออกแบบกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศชั้นสูง และด้านความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ พร้อมทั้งมีข้อเสนอแนะต่าง ๆ ในการปรับปรุงแก้ไขกระบวนการให้มีประสิทธิภาพหรือคุ้มค่ามากขึ้น

บทสรุปด้านเทคนิคในการออกแบบกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศชั้นสูง

จากในการออกแบบกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศชั้นสูงของคณะผู้จัดทำนั้นได้กำหนดให้มี 4 ขั้นตอนหลัก ๆ ได้แก่ กระบวนการเตรียมการย่อยสลาย โดยเป็นกระบวนการที่นำวัตถุดิบมาปรับสภาพให้เหมาะสมก่อนนำไปเข้ากระบวนการย่อยสลาย ซึ่งมีการดำเนินงานที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียสและความดัน 1 บาร์ และกระบวนการเตรียมนั้นยังสามารถลดปริมาณน้ำเสียที่ได้จากกระบวนการย่อยสลายได้ด้วยเนื่องจากมีการนำน้ำเสียนกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์กับกระบวนการอีกด้วย ซึ่งกระบวนการต่อไปคือกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ เป็นกระบวนการหลักเนื่องจากการผลิตก๊าซชีวภาพในขั้นตอนนี้ โดยมีข้อกำหนดได้แก่ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส, ความดัน 1 บาร์และมีระยะเวลาในการหมักที่ 15 วันซึ่งเป็นระยะเวลาที่ให้ปริมาณและอัตราส่วนก๊าซชีวภาพที่เหมาะสม จากนั้นเป็นกระบวนการทำบริสุทธิ์ก๊าซชีวภาพและการใช้ประโยชน์จากก๊าซชีวภาพโดยเปลี่ยนเป็นพลังงาน 3 ชนิดได้แก่ เชื้อเพลิงสำหรับอุตสาหกรรม, กระแสไฟฟ้า และก๊าซชีวภาพอัดแล้วสามารถพลังงานทั้งสามชนิดนี้ไปสร้างรายได้ โดยกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศชั้นสูงนั้นจะมุ่งเน้นถึงปริมาณของก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ และอัตราส่วนของก๊าซต่าง ๆ ในก๊าซชีวภาพที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ต่อ ซึ่งมีการคำนึงถึงสาธารณสุขโลก พลังงานที่ใช้ รวมถึงการปล่อยของเสียต่าง ๆ ออกสู่สิ่งแวดล้อม เพื่อให้เป็นกระบวนการที่สามารถสร้างประโยชน์ได้มากที่สุด และสร้างมลพิษให้กับชุมชนน้อยที่สุด ซึ่งของเสียที่ได้จากกระบวนการผลิตนั้นก็จะมีน้ำเสียที่ได้จากกระบวนการย่อยสลาย โดยส่วนหนึ่งจะนำกลับไปใช้ในกระบวนการผลิต เพื่อไม่ให้มีปริมาณน้ำเสียที่ถูกปล่อยมากเกินไป สำหรับน้ำเสียที่ถูกปล่อยทั้งหมดจะมีกระบวนการบำบัดก่อนที่จะปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมเพื่อไม่ให้สร้างปัญหากับระบบนิเวศรวมถึงสร้างความเดือดร้อนให้กับชุมชน

บทสรุปด้านความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

จากผลการประเมินและวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ของกระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศชั้นสูง ด้วยวิธีการย่อยสลายแบบไร้อากาศ พบว่า กระบวนการผลิตนั้นสามารถผลิตก๊าซชีวภาพที่นำไปใช้ประโยชน์ต่อได้ 18.23 ตันต่อวัน (ประมาณ 5,469 ตันต่อปี) โดยแบ่งไปใช้ประโยชน์กับการผลิตพลังงานชนิดอื่นมาอีก 3 ชนิด ได้แก่ เชื้อเพลิงสำหรับอุตสาหกรรมจำนวน 3,280.92 ตันต่อปี โดยเมื่อคิดจากราคาขายที่กิโลกรัมละ 16 บาทจะได้รายได้ทั้งหมด 52,494,674.19 บาทต่อปี, ในการผลิตกระแสไฟฟ้า

สามารถผลิตได้ 10,080,000 กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อปี และขายได้กิโลวัตต์ชั่วโมงละ 5.50 บาททำให้มีรายได้จากส่วนนี้ 55,440,000.00 บาทต่อปี และสำหรับก๊าซชีวภาพอัดที่ต้องการปีละ 1,003.30 ตันมีราคาขายอยู่ที่ 16 บาทต่อกิโลกรัม จะได้รายได้ 16,052.86 บาทต่อปี โดยเมื่อรวมรายได้จากการขายพลังงานทั้งสามชนิดแล้วจะอยู่ที่ 107,950,727.05 บาทต่อปี ซึ่งถือว่าขาดทุน เนื่องจากค่าใช้จ่ายที่ใช้จากกระบวนการผลิตในรายปีคือประมาณ 136.22 ล้านบาท จึงต้องมีการขายปุ๋ย (Top soil) เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ เนื่องจากปุ๋ยที่ได้จากกระบวนการย่อยสลายนั้นมีคุณสมบัติคล้ายดินสีดำที่ใช้สำหรับการเพาะปลูก โดยปริมาณปุ๋ยที่ได้จากกระบวนการต่อปีคือ 20,087,756.76 ตัน และมีราคาขายอยู่ที่กิโลกรัมละ 2.50 บาท ทำให้ราคารวมจากการขายพลังงานทั้ง 3 ชนิดและปุ๋ยอยู่ที่ประมาณ 158.15 ล้านบาทส่งผลให้มีกำไร และจากการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์พบว่า มีอัตราผลตอบแทน (Internal Rate of Return, IRR) อยู่ที่ 10.43 เปอร์เซ็นต์ต่อปี, มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value, NPV) เท่ากับ 4.81 และระยะเวลาคืนทุนอยู่ที่ประมาณ 8 ปี 3 เดือน

ข้อเสนอแนะ

จากผลการประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์แล้ว คณะผู้จัดทำจึงมีความเห็นว่า โครงการนี้ควรลงทุน แต่มีปัจจัยหลายประการที่ทำให้การประเมินความคุ้มค่าที่นั้นคลาดเคลื่อนได้ เช่น ระยะเวลาการคืนทุนของโครงการนี้อาจจะไม่คงที่ได้ ถ้ามีค่าเงินเฟ้อตามระยะเวลา และมีอัตราดอกเบี้ยที่เปลี่ยนแปลงไป รวมถึงปริมาณการขายผลิตภัณฑ์และราคาซื้อขายของวัตถุดิบหรือสารต่าง ๆ

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- ทวินันท์ สเลอาด. (2554). *ผลของเวลาการกวนและการเวียนตะกอนต่อการผลิตแก๊สชีวภาพจาก เศษอาหาร โดยระบบหมักไร้อากาศแบบแห้งในขนาดใช้งานจริง* (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทมหาบัณฑิต). กรุงเทพมหานคร. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. สืบค้นจาก <http://cuir.chula.ac.th/dspace/bitstream/123456789/23557/1/tawinun%20sa.pdf>, วันที่เข้าถึง 28 มิถุนายน 2563
- กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. (2554). *คู่มือการพัฒนาและการลงทุนผลิตพลังงานทดแทน ชุดที่ 6 พลังงานขยะ*. กรุงเทพมหานคร. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน. สืบค้นจาก https://www.dede.go.th/article_attach/h_waste.pdf, วันที่เข้าถึง 17 กันยายน 2563
- มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. สืบค้นจาก http://archive.lib.cmu.ac.th/full/T/2558/enenv60555rkn_ch2.pdf วันที่เข้าถึง 28 มิถุนายน 2563
- Biotechnologymintmai. *Biogas (ก๊าซชีวภาพ)*. สืบค้น 26 ตุลาคม 2563, สืบค้นจาก <https://sites.google.com/site/biotechnologymintmai/biogas-kas-chiwphaph>
- บริษัท เอ็นเนอร์ยี่ วิชั่น จำกัด. (2562). *พลังงานก๊าซชีวภาพ*. สืบค้น 27 ตุลาคม 2563, สืบค้นจาก <http://www.energyvision.co.th/14432517/พลังงานก๊าซชีวภาพ>
- ออร์แกนิกส์. (2562). *กระบวนการย่อยสลายแบบไร้อากาศ*. สืบค้น 2 พฤศจิกายน 2563, สืบค้นจาก <https://organics.co.uk/th/products/41/anaerobic-digestion>
- กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. (2560). *ขยะชุมชน*. สืบค้น 2 พฤศจิกายน 2563, สืบค้นจาก <https://www.mhesi.go.th/main/th/165-knowledge/practical-rad/7440-junk-community>
- อาจารย์หลักสูตรวิทยาศาสตร์ชีวผลิตภัณฑ์. (2558). *กระบวนการปรับสภาพเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตเอทานอลจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรประเภทลิกโนเซลลูโลส*. สืบค้น 2 พฤศจิกายน 2563, สืบค้นจาก <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/VESTSU/article/download/35649/29930/>
- ไทยแลนด์อินดัสทรี. (2552). *ก๊าซชีวภาพ พลังงานทดแทนจากสิ่งปฏิกูล*. สืบค้น 2 พฤศจิกายน 2563, สืบค้นจาก http://www.thailandindustry.com/indust_newweb/articles_preview.php?cid=12547
- องค์การบริหารจัดการก๊าซเรือนกระจก. (2563). *ค่าการปล่อยก๊าซเรือนกระจก*. สืบค้น 22 กุมภาพันธ์ 2564, สืบค้นจาก http://thaicarbonlabel.tgo.or.th/admin/uploadfiles/emission/ts_578cd2cb78.pdf
- เคมีภัณฑ์. (2564). *ราคาขายโมโนเอทานอลามีน*. สืบค้น 3 มีนาคม 2564, สืบค้นจาก <https://thai.alibaba.com/product-detail/monoethanolamine-mea-99-5-in-chemicals-2-aminoethyl-alcohol-60268063581.html>

- ไทยวัสดุ. (2564). *ดินสีกาขนาด 11 กก.* สืบค้น 13 มีนาคม 2564, สืบค้นจาก <https://www.thaiwatsadu.com/th/product/ดิน-สีกา-ขนาด-11-กก-60030671?cate=670202>
- อะลิบบา. (2564). *ราคาเครื่องลำเลียงสายพาน PVC, เครื่องผลิตสายพานลำเลียง.* สืบค้น 14 มีนาคม 2564, สืบค้นจาก https://thai.alibaba.com/product-detail/factory-cheap-price-custom-high-quality-pvc-belt-conveyor-system-machine-1600205644395.html?spm=a2700.7724857.normal_offer.d_title.6fe945ffvdDU4A&s=p
- อะลิบบา. (2564). *United UCTC60 Oil Free Centrifugal Compressor Turbo Centrifugal Compressor Centrifugal Gas Air Compressor.* สืบค้น 17 มีนาคม 2564, สืบค้นจาก https://www.alibaba.com/product-detail/United-UCTC60-Oil-Free-Centrifugal-Compressor_1600130051582.html?spm=a2700.7724857.normal_offer.d_title.68017e0bv9ykka
- อะลิบบา. (2564). *Gas LPG Compressor.* สืบค้น 17 มีนาคม 2564, สืบค้นจาก https://www.alibaba.com/product-detail/Gas-LPG-Compressor_60697057362.html?spm=a2700.7735675.normal_offer.d_title.691463952n0MMu&s=p&fullFirstScreen=true
- อะลิบบา. (2564). *4500 psi electric high pressure air compressor 110V/60Hz.* สืบค้น 17 มีนาคม 2564 สืบค้นจาก https://www.alibaba.com/product-detail/4500-psi-electric-high-pressure-air_60620409361.html?spm=a2700.7735675.normal_offer.d_image.5577c4841eOVuj&s=p&fullFirstScreen=true
- อะลิบบา. (2564). *High quality 1500 Kw Natural Gas Generator Genset.* สืบค้น 17 มีนาคม 2564. สืบค้นจาก https://www.alibaba.com/product-detail/High-quality-1500-Kw-Natural-Gas_1600183683300.html?spm=a2700.7724857.normal_offer.d_title.5d1f58a6O2LN
- อะลิบบา. (2564). *High Pressure Industrial Air Blowers.* สืบค้น 17 มีนาคม 2564, สืบค้นจาก https://www.alibaba.com/product-detail/Industrial-Blowers-Blower-Industrial-High-Pressure_60530380118.html?spm=a2700.7735675.normal_offer.d_title.3b26331fst8C13&s=p
- อะลิบบา. (2564). *Horizontal single stage centrifugal inline chemical pump.* สืบค้น 17 มีนาคม 2564, สืบค้นจาก https://www.alibaba.com/product-detail/horizontal-single-stage-centrifugal-inline-chemical_1600099807086.html?spm=a2700.7735675.normal_offer.d_image.469ae4e4yGvnrz&s=p&fullFirstScreen=true
- อะลิบบา. (2564). *สายการผลิตเอทานอลกลั่นแอลกอฮอล์,สายการผลิตเอทานอลกลั่นเครื่องดื่มแอลกอฮอล์โครงการไบโอเอทานอลกลั่นอุปกรณ์กลั่นเอทานอล.* สืบค้น 17 มีนาคม 2564, สืบค้นจาก <https://thai.alibaba.com/product-detail/bioethanol-project-alcohol-distiller-ethanol-distillation-equipment-food-grade-alcohol-distilled-ethanol-production-line-60836405547.html?spm=a2700.details.0.0.4cdb216cjYq6E3>

- อะลิบบา. (2564). *Stainless Steel Food Vessel with mixer*. สืบค้น 17 มีนาคม 2564, สืบค้นจาก https://www.alibaba.com/product-detail/Stainless-Steel-Food-Vessel-with-mixer_1446428771.html?spm=a2700.7735675.normal_offer.d_image.172f4d448fp20M&s=p&fullFirstScreen=true
- อะลิบบา. (2564). *มัลติฟังก์ชันการผลิตถังผสม,สูงหนืดถังผสม,แข็งผสมของเหลว*. สืบค้น 17 มีนาคม 2564, สืบค้นจาก https://thai.alibaba.com/product-detail/multifunctional-paint-production-mixing-tank-high-viscous-mixing-tank-solid-liquid-mixer-60538377952.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_image.36b8d259Q1UAhs
- อะลิบบา. (2564). *Hot Selling Cheap Custom Electronic Industry Vessel Aquaculture Carbon Filter Media*. สืบค้น 17 มีนาคม 2564, สืบค้นจาก https://www.alibaba.com/product-detail/Vessel-Hot-Selling-Cheap-Custom-Electronic_1600205264954.html?spm=a2700.7724857.normal_offer.d_image.6cf16c7c1Jkg9X&s=p
- อะลิบบา. (2564). *Stainless steel ss304 316L ASME standard shell and tube heat exchanger*. สืบค้น 17 มีนาคม 2564, สืบค้นจาก https://www.alibaba.com/product-detail/Shell-Tube-Heat-Exchanger-Stainless-Steel_1600153793556.html?spm=a2700.7724857.normal_offer.d_title.814f6c7aad1ceR&s=p
- อะลิบบา. (2564). *waste water filtration equipment raking trash collector welded coarse filter wwtp bar screen machine system*. สืบค้น 17 มีนาคม 2564, สืบค้นจาก https://www.alibaba.com/product-detail/waste-water-filtration-equipment-raking-trash_1600109969112.html?spm=a2700.7724857.normal_offer.d_title.36a72ba7kuEA9e
- อะลิบบา. (2564). *Tube in Tube Air Cooled Cooler Heat Exchanger Industrial*. สืบค้น 17 มีนาคม 2564 สืบค้นจาก https://www.alibaba.com/product-detail/Heat-Exchanger-Industrial-Tube-In-Tube_1600068543711.html?spm=a2700.7724857.normal_offer.d_title.3cde20d8vGr4WX&s=p
- อะลิบบา. (2564). *30L-32000L Pressure Vessel Stainless Steel Jacketed Reactor CSTR Reactor*. สืบค้น 17 มีนาคม 2564, สืบค้นจาก https://www.alibaba.com/product-detail/30L-32000L-Pressure-Vessel-Stainless-Steel_1600059230684.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.1d8176e7TFKTMo
- อะลิบบา. (2564). *10000 liter stainless steel mixer tanks water tank price*. สืบค้น 17 มีนาคม 2564, สืบค้นจาก https://www.alibaba.com/product-detail/10000-liter-stainless-steel-mixer-tanks_60751079852.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.550e4b203QiPpA

อะลิบาบา. (2564). *GMP food grade hot sale small large volume 316 304 stainless steel hot water perfume liquid storage tank milk tank*. สืบค้น 17 มีนาคม 2564, สืบค้นจาก https://www.alibaba.com/product-detail/Storage-Tank-2021-GMP-Food-Grade_1600124956075.html?spm=a2700.galleryofferlist.normal_offer.d_title.5f9bb1fcW6lR4J&s=p

อะลิบาบา. (2564). *Biogas fermenter/biogas installations/methane tanks*. สืบค้น 17 มีนาคม 2564, สืบค้นจาก https://www.alibaba.com/product-detail/Biogas-fermenter-biogas-installations-methane-tanks_60315523355.html?spm=a2700.details.0.0.72c641caC28VYw

Rajendran, Karthik *et al.* “ A Novel Process Simulation Model (PSM) for Anaerobic Digestion Using Aspen Plus. ” *Bioresource Technology* 168 (2014) . DOI: 10.1016/j.biortech.2014.01.051

Wang, Fan *et al.* “ The Content Variation of Fat, Protein and Starch in Kitchen Waste Under Microwave Radiation. ” *Procedia Environmental Sciences* 31 (2016) . DOI: 10.1016/j.proenv.2016.02.075

Virunanon, Chompunuch *et al.* “ Cassava Pulp Enzymatic Hydrolysis Process as a Preliminary Step in Bio- Alcohols Production from Waste Starchy Resources. ” *Journal of Cleaner Production* 39 (2013). DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.07.055

Leccover’ s Blog. (2010) . *Biogas and Anaerobic Digestion*. Retrieved 27 October 2020 from <https://floatingcovers.wordpress.com/2010/10/21/part-1-of-biogas-and-anaerobic-digestion/>

Md. Burhan Kabir Suhan *et al.* (2019) *Innovative Multi-stage Anaerobic Modelling of a 10 MW Biogas Plant Using Aspen HYSYS*. Retrieved 27 October 2020 from https://www.researchgate.net/publication/340771255_Innovative_Multi-Stage_Anaerobic_Modelling_of_a_10_MW_Biogas_Plant_Using_Aspen_HYSYS

Achinas Spyridon, Vasileios Achinas, and Gerrit Jan Willem Euverink. “A Technological Overview of Biogas Production from Biowaste. ” *Engineering* 3. 3 (2017) . DOI: 10.1016/J.ENG.2017.03.002

R. Kigozi, A. Aboyade and E. Muzenda (2014) *Biogas Production Using the Organic Fraction of Municipal Solid Waste as Feedstock*. Retrieved 27 October 2020 from <https://www.semanticscholar.org/paper/Biogas-production-using-the-organic-fraction-of-as-Kigozi-Aboyade/e56a35925b8934be3e98afff46c8d46f1eb2c952>

- Paudel, Shukra Raj et al. "Pretreatment of Agricultural Biomass for Anaerobic Digestion: Current State and Challenges. " *Bioresource Technology* 245 (2017) . DOI: 10.1016/j.biortech.2017.08.182
- K. Limo, L., M. Talai, D. S., & K. Arusei, D. (2020). *Optimization of acetic acid pretreatment of corn stover for bioethanol production. International Journal of Scientific and Research Publications (IJSRP), 10(7), 801–808.* DOI: 10.29322/ijsrp.10.07.2020.p10389
- Alibaba. (2021) . *Price of absorption column.* Retrieved 15 March 2021 from <https://thai.alibaba.com/product-detail/gas-purification-machines-flue-gas-desulfurization-flue-gas-purification-1600074614767.html?spm=a2700.details.0.0.45275d3ahiNAKS>

ภาคผนวก ก

สมุดมวล

สมดุลมวลในแต่ละสายการผลิตของกระบวนการจะแสดงในภาคผนวก ก โดยจะอยู่ในรูปแบบของตารางสมดุลมวล ตั้งแต่ตารางภาคผนวกที่ ก1 ถึงตารางภาคผนวกที่ ก20

ตารางภาคผนวกที่ ก1 สมดุลมวลของสายการผลิตที่ 5 (PL-5) และสายที่ 6 (PL-6)

Component	PL-5		PL-6	
	Mass flow (tons/day)	Mass fraction	Mass flow (tons/day)	Mass fraction
เอทานอล	0	0	0.14	0.01
น้ำ	998.06	86.32	1,979.80	90.26
กลูโคส	0	0	3.82	0.17
ลิกนิน	1.35	0.12	1.35	0.06
เซลลูโลส	4.83	0.42	4.83	0.22
ไซแลน	4.94	0.43	4.94	0.23
ไซโลส	0	2.07	0.31	1.09
คาร์บอนไดออกไซด์	0	0	7.63	0.01
แป้ง	101.58	0	101.58	0.35
ไตรโอเลอิน	9.33	8.79	9.77	4.63
เฟอฟูรัล	0	0.81	0.52	0.45
อะซิติก	0	0	29.46	0.02
กลีเซอรอล	0	0	0.75	1.34
มีเทน	0	0	0.01	0.03
แอมโมเนีย	0	0	0	0
ไฮโดรเจนซัลไฟด์	0	0	0.43	0
เอทิลไซยาโนอะซิเตต (C ₅ H ₇ NO ₂)	0	0	8.33	0.02
กรดโพธิโอนิค (C ₃ H ₆ O ₂)	0	0	1.55	0.38
กรดบิวทีริก (C ₄ H ₈ O ₂)	0	0	1.63	0.07
ไฮโดรเจน	0	0	0	0.07
โปรตีน	12.26	0	12.26	0
กรดโอเลอิก (C ₁₈ H ₃₄ O ₂)	0	1.06	0.40	0.56
อื่น ๆ	23.89	0	23.89	0.02
Total	1,156.23	1	2,193.38	1

ตารางภาคผนวกที่ ก2 สมดุลมวลของสายการผลิตที่ 7 (PL-7) และสายที่ 8 (PL-8)

Component	PL-7		PL-8	
	Mass flow (tons/day)	Mass fraction	Mass flow (tons/day)	Mass fraction
เอทานอล	0.14	0.01	0.01	0.01
น้ำ	1,979.80	90.26	4.39	8.41
กลูโคส	3.82	0.17	0	0
ลิกนิน	1.35	0.06	0	0
เซลลูโลส	4.83	0.22	0	0
ไซแลน	4.94	0.23	0	0
ไซโลส	0.31	1.09	0	0
คาร์บอนไดออกไซด์	7.63	0.01	29.94	0
แป้ง	101.58	0.35	0	57.45
ไตรโอเลอิน	9.77	4.63	0	0
เฟอฟูรัล	0.52	0.45	0.02	0
อะซิติค	29.46	0.02	0.21	0.04
กลีเซอรอล	0.75	1.34	0	0.40
มีเทน	0.01	0.03	17.05	0
แอมโมเนีย	0	0	0	32.71
ไฮโดรเจนซัลไฟด์	0.43	0	0.50	0
เอทิลไซยาโนอะซิเตต (C ₅ H ₇ NO ₂)	8.33	0.02	0	0.95
กรดโพธิโอนิค (C ₃ H ₆ O ₂)	1.55	0.38	0.01	0
กรดบิวทีริก (C ₄ H ₈ O ₂)	1.63	0.07	0	0.02
ไฮโดรเจน	0	0.07	0	0
โพรตีน	12.26	0	0	0
กรดโอเลอิก (C ₁₈ H ₃₄ O ₂)	0.40	0.56	0	0
อื่น ๆ	23.89	0.02	0	0
Total	2,193.38	1	52.12	1

ตารางภาคผนวกที่ ก3 สมดุลมวลของสายการผลิตที่ 9 (PL-9) และสายที่ 18 (PL-18)

Component	PL-9		PL-18	
	Mass flow (tons/day)	Mass fraction	Mass flow (tons/day)	Mass fraction
เอทานอล	0.01	0.01	0.31	0.01
น้ำ	4.39	8.41	1,964.46	91.74
กลูโคส	0	0	8.50	0.40
ลิกนิน	0	0	1.35	0.06
เซลลูโลส	0	0	1.74	0.08
ไซแลน	0	0	1.23	0.06
ไซโลส	0	0	0.68	1.12
คาร์บอนไดออกไซด์	29.94	0	16.95	0.03
แป้ง	0	57.45	30.47	0.79
ไตรโอเลอิน	0	0	0.98	1.42
เฟอฟูรัล	0.02	0	1.16	0.05
อะซีติก	0.21	0.04	59.21	0.05
กลีเซอรอล	0	0.40	1.66	2.77
มีเทน	17.05	0	0.02	0.08
แอมโมเนีย	0	32.71	0	0
ไฮโดรเจนซัลไฟด์	0.50	0	0.96	0
เอทิลไซยาโนอะซิเตต (C ₅ H ₇ NO ₂)	0	0.95	18.52	0.04
กรดโพธิโอนิค (C ₃ H ₆ O ₂)	0.01	0	3.45	0.86
กรดบิวทีริก (C ₄ H ₈ O ₂)	0	0.02	3.62	0.16
ไฮโดรเจน	0	0	0	0.17
โพรตีน	0	0	1.23	0
กรดโอเลอิก (C ₁₈ H ₃₄ O ₂)	0	0	0.88	0.06
อื่น ๆ	0	0	23.89	0.04
Total	52.12	1	2,141.26	1

ตารางภาคผนวกที่ ก4 สมดุลมวลของสายการผลิตที่ 19 (PL-19) และสายที่ 20 (PL-20)

Component	PL-19		PL-20	
	Mass flow (tons/day)	Mass fraction	Mass flow (tons/day)	Mass fraction
เอทานอล	0.03	0.05	0.03	0.05
น้ำ	0.98	1.47	0.98	1.47
กลูโคส	0.85	1.27	0.85	1.27
ลิกนิน	1.35	2.02	1.35	2.02
เซลลูโลส	1.74	2.60	1.74	2.60
ไซแลน	1.23	1.84	1.23	1.84
ไซโลส	0.07	35.67	0.07	35.67
คาร์บอนไดออกไซด์	1.69	0.10	1.69	0.10
แป้ง	30.47	2.53	30.47	2.53
ไตรโอเลอิน	0.10	45.51	0.10	45.51
เฟอฟูรัล	0.12	0.15	0.12	0.15
อะซิติค	0.30	0.17	0.30	0.17
กลีเซอรอล	0.17	0.44	0.17	0.44
มีเทน	0	0.25	0	0.25
แอมโมเนีย	0	0	0	0
ไฮโดรเจนซัลไฟด์	0.10	0	0.10	0
เอทิลไซยาโนอะซิเตต (C ₅ H ₇ NO ₂)	1.85	0.14	1.85	0.14
กรดโพธิโอนิค (C ₃ H ₆ O ₂)	0.34	2.77	0.34	2.77
กรดบิวทีริก (C ₄ H ₈ O ₂)	0.36	0.51	0.36	0.51
ไฮโดรเจน	0	0.54	0	0.54
โพรตีน	1.23	0	1.23	0
กรดโอเลอิก (C ₁₈ H ₃₄ O ₂)	0.09	1.83	0.09	1.83
อื่น ๆ	23.89	0.13	23.89	0.13
Total	66.96	1	66.96	1

ตารางภาคผนวกที่ ก5 สมดุลมวลของสายการผลิตที่ 21 (PL-21) และสายที่ 22 (PL-22)

Component	PL-21		PL-22	
	Mass flow (tons/day)	Mass fraction	Mass flow (tons/day)	Mass fraction
เอทานอล	0.28	0.01	0.14	0.01
น้ำ	1,963.48	94.66	981.74	94.66
กลูโคส	7.65	0.37	3.82	0.37
ลิกนิน	0	0	0	0
เซลลูโลส	0	0	0	0
ไซแลน	0	0	0	0
ไซโลส	0.62	0	0.31	0
คาร์บอนไดออกไซด์	15.25	0.03	7.63	0.03
แป้ง	0	0.74	0	0.74
ไตรโอเลอิน	0.88	0	0.44	0
เฟอฟูรัล	1.05	0.04	0.52	0.04
อะซิติค	58.92	0.05	29.46	0.05
กลีเซอรอล	1.50	2.84	0.75	2.84
มีเทน	0.02	0.07	0.01	0.07
แอมโมเนีย	0	0	0	0
ไฮโดรเจนซัลไฟด์	0.86	0	0.43	0
เอทิลไซยาโนอะซิเตต (C ₅ H ₇ NO ₂)	16.67	0.04	8.33	0.04
กรดโพธิโอนิค (C ₃ H ₆ O ₂)	3.10	0.80	1.55	0.80
กรดบิวทีริก (C ₄ H ₈ O ₂)	3.26	0.15	1.63	0.15
ไฮโดรเจน	0	0.16	0	0.16
โพรตีน	0	0	0	0
กรดโอเลอิก (C ₁₈ H ₃₄ O ₂)	0.79	0	0.40	0
อื่น ๆ	0	0.04	0	0.04
Total	2,074.30	1	1,037.15	1

ตารางภาคผนวกที่ 6 สมดุลมวลของสายการผลิตที่ 23 (PL-23) และสายที่ 24 (PL-24)

Component	PL-23		PL-24	
	Mass flow (tons/day)	Mass fraction	Mass flow (tons/day)	Mass fraction
เอทานอล	0.14	0.01	0.14	0.01
น้ำ	981.74	94.66	981.74	94.66
กลูโคส	3.82	0.37	3.82	0.37
ลิกนิน	0	0	0	0
เซลลูโลส	0	0	0	0
ไซแลน	0	0	0	0
ไซโลส	0.31	0	0.31	0
คาร์บอนไดออกไซด์	7.63	0.03	7.63	0.03
แป้ง	0	0.74	0	0.74
ไตรโอเลอิน	0.44	0	0.44	0
เฟอฟูรัล	0.52	0.04	0.52	0.04
อะซิติก	29.46	0.05	29.46	0.05
กลีเซอรอล	0.75	2.84	0.75	2.84
มีเทน	0.01	0.07	0.01	0.07
แอมโมเนีย	0	0	0	0
ไฮโดรเจนซัลไฟด์	0.43	0	0.43	0
เอทิลไซยาโนอะซิเตต (C ₅ H ₇ NO ₂)	8.33	0.04	8.33	0.04
กรดโพธิโอนิค (C ₃ H ₆ O ₂)	1.55	0.80	1.55	0.80
กรดบิวทีริก (C ₄ H ₈ O ₂)	1.63	0.15	1.63	0.15
ไฮโดรเจน	0	0.16	0	0.16
โปรตีน	0	0	0	0
กรดโอเลอิก (C ₁₈ H ₃₄ O ₂)	0.40	0	0.40	0
อื่น ๆ	0	0.04	0	0.04
Total	1,037.15	1	1,037.15	1

ตารางภาคผนวกที่ ก7 สมดุลมวลของสายการผลิตที่ 10 (PL-10) และสายที่ 11 (PL-11)

Component	PL-10		PL-11	
	Mass flow (tons/day)	Mass fraction	Mass flow (tons/day)	Mass fraction
โมโนเอทานอลามีน (MEA)	0.01	0.06	216.30	30.18
น้ำ	1.18	6.48	367.74	51.32
คาร์บอนไดออกไซด์	0	0	0	0
ไฮโดรเจนซัลไฟด์	0	0	0	0
H ₃ O ⁺	0	0	0	0
OH ⁻	0	0	0	0
HCO ³⁻	0	0	0.06	0.01
CO ₃ ²⁻	0	0	0.04	0.01
HS ⁻	0	0	0.60	0.08
S ²⁻	0	0	0	0
MEAH ⁺	0	0	49.78	6.95
MEACOO ⁻	0	0	81.30	11.34
ไนโตรเจน	0	0	0	0
ออกซิเจน	0	0	0	0
คาร์บอนมอนอกไซด์	0	0	0	0
ไฮโดรเจน	0	0	0	0
มีเทน	17.03	93.45	0.01	0
เอทานอล	0	0	0.01	0
กลูโคส	0	0	0	0
ลิกนิน	0	0	0	0
เซลลูโลส	0	0	0	0
ไซแลน	0	0	0	0
ไซโลส	0	0	0	0
แป้ง	0	0	0	0
ไตรโอเลอิน	0	0	0	0
เฟอฟูรัล	0	0	0	0
อะซิติก	0	0.01	0.78	0.11

ตารางภาคผนวกที่ ก7 สมดุลมวลของสายการผลิตที่ 10 (PL-10) และสายที่ 11 (PL-11) (ต่อ)

Component	PL-10		PL-11	
	Mass flow (tons/day)	Mass fraction	Mass flow (tons/day)	Mass fraction
กลีเซอรอล	0	0	0	0
แอมโมเนีย	0	0	0	0
เอทิลไซยาโนอะซิเตต (C ₅ H ₇ NO ₂)	0	0	0	0
กรดโพธิโอนิค (C ₃ H ₆ O ₂)	0	0	0	0
กรดบิวทีริก (C ₄ H ₈ O ₂)	0	0	0	0
โพรตีน	0	0	0	0
กรดโอเลอิก (C ₁₈ H ₃₄ O ₂)	0	0	0	0
อื่น ๆ	0	0	0	0
Total	18.23	1	716.61	1

ตารางภาคผนวกที่ ก8 สมดุลมวลของสายการผลิตที่ 12 (PL-12) และสายที่ 13 (PL-13)

Component	PL-12		PL-13	
	Mass flow (tons/day)	Mass fraction	Mass flow (tons/day)	Mass fraction
โมโนเอทานอลามีน (MEA)	216.65	30.23	300.25	59.85
น้ำ	367.57	51.29	183.49	36.58
คาร์บอนไดออกไซด์	0	0	0	0
ไฮโดรเจนซัลไฟด์	0	0	0	0
H ₃ O ⁺	0	0	0	0
OH ⁻	0	0	0.01	0
HCO ³⁻	0.41	0.06	0.01	0
CO ₃ ²⁻	0.26	0.04	0.01	0
HS ⁻	0.60	0.08	0.12	0.02
S ²⁻	0	0	0	0
MEAH ⁺	50	6.98	6.61	1.32
MEACOO ⁻	80.31	11.21	10.61	2.12

ตารางภาคผนวกที่ 8 สมดุลมวลของสายการผลิตที่ 12 (PL-12) และสายที่ 13 (PL-13) (ต่อ)

Component	PL-12		PL-13	
	Mass flow (tons/day)	Mass fraction	Mass flow (tons/day)	Mass fraction
ไนโตรเจน	0	0	0	0
ออกซิเจน	0	0	0	0
คาร์บอนมอนอกไซด์	0	0	0	0
ไฮโดรเจน	0	0	0	0
มีเทน	0.01	0	0	0
เอทานอล	0.01	0	0	0
กลูโคส	0	0	0	0
ลิกนิน	0	0	0	0
เซลลูโลส	0	0	0	0
ไซแลน	0	0	0	0
ไซโลส	0	0	0	0
แป้ง	0	0	0	0
ไตรโอเลอิน	0	0	0	0
เฟอฟูรัล	0	0	0	0
อะซิติก	0.78	0.11	0.57	0.11
กลีเซอรอล	0	0	0	0
แอมโมเนีย	0	0	0	0
เอทิลไซยาโนอะซิเตต (C ₅ H ₇ NO ₂)	0	0	0	0
กรดโพธิโอนิค (C ₃ H ₆ O ₂)	0	0	0	0
กรดบิวทีริก (C ₄ H ₈ O ₂)	0	0	0	0
โปรตีน	0	0	0	0
กรดโอเลอิก (C ₁₈ H ₃₄ O ₂)	0	0	0	0
อื่น ๆ	0	0	0	0
Total	716.61	1	501.67	1

ตารางภาคผนวกที่ ก9 สมดุลมวลของสายการผลิตที่ 14 (PL-14) และสายที่ 15 (PL-15)

Component	PL-14		PL-15	
	Mass flow (tons/day)	Mass fraction	Mass flow (tons/day)	Mass fraction
โมโนเอทานอลามีน (MEA)	300.25	59.85	217.57	30.36
น้ำ	183.49	36.58	367.34	51.26
คาร์บอนไดออกไซด์	0	0	0	0
ไฮโดรเจนซัลไฟด์	0	0	0	0
H ₃ O ⁺	0	0	0	0
OH ⁻	0	0	0	0
HCO ³⁻	0	0	1.32	0.18
CO ₃ ²⁻	0.01	0	0.13	0.02
HS ⁻	0.12	0.02	0.60	0.08
S ²⁻	0	0	0	0
MEA ^{H+}	6.60	1.32	49.87	6.96
MEACOO ⁻	10.63	2.12	78.98	11.02
ไนโตรเจน	0	0	0	0
ออกซิเจน	0	0	0	0
คาร์บอนมอนอกไซด์	0	0	0	0
ไฮโดรเจน	0	0	0	0
มีเทน	0	0	0.01	0
เอทานอล	0	0	0.01	0
กลูโคส	0	0	0	0
ลิกนิน	0	0	0	0
เซลลูโลส	0	0	0	0
ไซแลน	0	0	0	0
ไซโลส	0	0	0	0
แป้ง	0	0	0	0
ไตรโอเลอิน	0	0	0	0
เฟอฟูรัล	0	0	0	0
อะซิติก	0.57	0.11	0.78	0.11

ตารางภาคผนวกที่ ก9 สมดุลมวลของสายการผลิตที่ 14 (PL-14) และสายที่ 15 (PL-15) (ต่อ)

Component	PL-14		PL-15	
	Mass flow (tons/day)	Mass fraction	Mass flow (tons/day)	Mass fraction
กลีเซอรอล	0	0	0	0
แอมโมเนีย	0	0	0	0
เอทิลไซยาโนอะซิเตต (C ₅ H ₇ NO ₂)	0	0	0	0
กรดโพธิโอนิค (C ₃ H ₆ O ₂)	0	0	0	0
กรดบิวทีริก (C ₄ H ₈ O ₂)	0	0	0	0
โปรตีน	0	0	0	0
กรดโอเลอิก (C ₁₈ H ₃₄ O ₂)	0	0	0	0
อื่น ๆ	0	0	0	0
Total	501.67	1	716.61	1

ตารางภาคผนวกที่ ก10 สมดุลมวลของสายการผลิตที่ 16 (PL-16) และสายที่ 17 (PL-17)

Component	PL-16		PL-17	
	Mass flow (tons/day)	Mass fraction	Mass flow (tons/day)	Mass fraction
โมโนเอทานอลามีน (MEA)	0	0%	300.31	59.86
น้ำ	1.00	3.21%	183.47	36.57
คาร์บอนไดออกไซด์	29.69	95.19%	0	0
ไฮโดรเจนซัลไฟด์	0.49	1.56%	0	0
H ₃ O ⁺	0	0%	0	0
OH ⁻	0	0%	0.01	0
HCO ³⁻	0	0%	0.07	0.01
CO ₃ ²⁻	0	0%	0.01	0
HS ⁻	0	0%	0.12	0.02
S ²⁻	0	0%	0	0
MEAH ⁺	0	0%	6.60	1.32
MEACOO ⁻	0	0%	10.52	2.10

ตารางภาคผนวกที่ ก10 สมดุลมวลของสายการผลิตที่ 16 (PL-16) และสายที่ 17 (PL-17) (ต่อ)

Component	PL-16		PL-17	
	Mass flow (tons/day)	Mass fraction	Mass flow (tons/day)	Mass fraction
ไนโตรเจน	0	0	0	0
ออกซิเจน	0	0	0	0
คาร์บอนมอนอกไซด์	0	0	0	0
ไฮโดรเจน	0	0	0	0
มีเทน	0.01	0.04	0	0
เอทานอล	0	0	0	0
กลูโคส	0	0	0	0
ลิกนิน	0	0	0	0
เซลลูโลส	0	0	0	0
ไซแลน	0	0	0	0
ไซโลส	0	0	0	0
แป้ง	0	0	0	0
ไตรโอเลอิน	0	0	0	0
เฟอฟูรัล	0	0	0	0
อะซิติก	0	0	0.57	0.11
กลีเซอรอล	0	0	0	0
แอมโมเนีย	0	0	0	0
เอทิลไซยาโนอะซิเตต (C ₅ H ₇ NO ₂)	0	0	0	0
กรดโพธิโอนิค (C ₃ H ₆ O ₂)	0	0	0	0
กรดบิวทีริก (C ₄ H ₈ O ₂)	0	0	0	0
โพรตีน	0	0	0	0
กรดโอเลอิก (C ₁₈ H ₃₄ O ₂)	0	0	0	0
อื่น ๆ	0	0	0	0
Total	31.19	1	501.67	1

ตารางภาคผนวกที่ ก11 สมดุลมวลของสายการผลิตที่ 40 (PL-40) และสายที่ 41 (PL-41)

Component	PL-40		PL-41	
	Mass flow (tons/day)	Mass fraction	Mass flow (tons/day)	Mass fraction
โมโนเอทานอลามีน (MEA)	0	0	0.12	0.05
น้ำ	183.34	99.75	184.37	85.76
คาร์บอนไดออกไซด์	0.17	0.10	29.95	13.93
ไฮโดรเจนซัลไฟด์	0.01	0	0.50	0.23
H ₃ O ⁺	0	0	0	0
OH ⁻	0	0	0	0
HCO ³⁻	0.11	0.06	0	0
CO ₃ ²⁻	0	0	0	0
HS ⁻	0	0	0	0
S ²⁻	0	0	0	0
MEAH ⁺	0.12	0.06	0	0
MEACOO ⁻	0	0	0	0
ไนโตรเจน	0	0	0	0
ออกซิเจน	0	0	0	0
คาร์บอนมอนอกไซด์	0	0	0	0
ไฮโดรเจน	0	0	0	0
มีเทน	0	0	0.01	0.01
เอทานอล	0.01	0	0.01	0
กลูโคส	0	0	0	0
ลิกนิน	0	0	0	0
เซลลูโลส	0	0	0	0
ไซแลน	0	0	0	0
ไซโลส	0	0	0	0
แป้ง	0	0	0	0
ไตรโอเลอิน	0	0	0	0
เฟอฟูรัล	0	0	0	0
อะซิติก	0.03	0.02	0.03	0.01

ตารางภาคผนวกที่ ก11 สมดุลมวลของสายการผลิตที่ 40 (PL-40) และสายที่ 41 (PL-41) (ต่อ)

Component	PL-40		PL-41	
	Mass flow (tons/day)	Mass fraction	Mass flow (tons/day)	Mass fraction
กลีเซอรอล	0	0	0	0
แอมโมเนีย	0	0	0	0
เอทิลไซยาโนอะซิเตต (C ₅ H ₇ NO ₂)	0	0	0	0
กรดโพทิโอนิค (C ₃ H ₆ O ₂)	0	0	0	0
กรดบิวทีริก (C ₄ H ₈ O ₂)	0	0	0	0
โปรตีน	0	0	0	0
กรดโอเลอิก (C ₁₈ H ₃₄ O ₂)	0	0	0	0
อื่น ๆ	0	0	0	0
Total	183.79	1	214.98	1

ตารางภาคผนวกที่ ก12 สมดุลมวลของสายการผลิตที่ 42 (PL-42) และสายที่ 43 (PL-43)

Component	PL-42		PL-43	
	Mass flow (tons/day)	Mass fraction	Mass flow (tons/day)	Mass fraction
โมโนเอทานอลามีน (MEA)	0	0	300.25	43.98
น้ำ	184.34	85.75	364.54	53.39
คาร์บอนไดออกไซด์	29.86	13.89	0	0
ไฮโดรเจนซัลไฟด์	0.50	0.23	0	0
H ₃ O ⁺	0	0	0	0
OH ⁻	0	0	0.01	0
HCO ³⁻	0.11	0.05	0.01	0
CO ₃ ²⁻	0	0	0.04	0.01
HS ⁻	0	0	0.12	0.02
S ²⁻	0	0	0	0
MEAH ⁺	0.12	0.05	6.64	0.97
MEACOO ⁻	0	0	10.57	1.55

ตารางภาคผนวกที่ ก12 สมดุลมวลของสายการผลิตที่ 42 (PL-42) และสายที่ 43 (PL-43) (ต่อ)

Component	PL-42		PL-43	
	Mass flow (tons/day)	Mass fraction	Mass flow (tons/day)	Mass fraction
ไนโตรเจน	0	0	0	0
ออกซิเจน	0	0	0	0
คาร์บอนมอนอกไซด์	0	0	0	0
ไฮโดรเจน	0	0	0	0
มีเทน	0.01	0.01	0	0
เอทานอล	0.01	0	0	0
กลูโคส	0	0	0	0
ลิกนิน	0	0	0	0
เซลลูโลส	0	0	0	0
ไซแลน	0	0	0	0
ไซโลส	0	0	0	0
แป้ง	0	0	0	0
ไตรโอเลอิน	0	0	0	0
เฟอฟูรัล	0	0	0	0
อะซิติก	0.03	0.01	0.57	0.08
กลีเซอรอล	0	0	0	0
แอมโมเนีย	0	0	0	0
เอทิลไซยาโนอะซิเตต (C ₅ H ₇ NO ₂)	0	0	0	0
กรดโพธิโอนิค (C ₃ H ₆ O ₂)	0	0	0	0
กรดบิวทีริก (C ₄ H ₈ O ₂)	0	0	0	0
โพรตีน	0	0	0	0
กรดโอเลอิก (C ₁₈ H ₃₄ O ₂)	0	0	0	0
อื่น ๆ	0	0	0	0
Total	214.98	1	682.74	1

ตารางภาคผนวกที่ ก13 สมดุลมวลของสายการผลิตที่ 44 (PL-44) และสายที่ 45 (PL-45)

Component	PL-44		PL-45	
	Mass flow (tons/day)	Mass fraction	Mass flow (tons/day)	Mass fraction
โมโนเอทานอลามีน (MEA)	0.01	100	0	0
น้ำ	0	0	181.06	100
คาร์บอนไดออกไซด์	0	0	0	0
ไฮโดรเจนซัลไฟด์	0	0	0	0
H ₃ O ⁺	0	0	0	0
OH ⁻	0	0	0	0
HCO ³⁻	0	0	0	0
CO ₃ ²⁻	0	0	0	0
HS ⁻	0	0	0	0
S ²⁻	0	0	0	0
MEAH ⁺	0	0	0	0
MEACOO ⁻	0	0	0	0
ไนโตรเจน	0	0	0	0
ออกซิเจน	0	0	0	0
คาร์บอนมอนอกไซด์	0	0	0	0
ไฮโดรเจน	0	0	0	0
มีเทน	0	0	0	0
เอทานอล	0	0	0	0
กลูโคส	0	0	0	0
ลิกนิน	0	0	0	0
เซลลูโลส	0	0	0	0
ไซแลน	0	0	0	0
ไซโลส	0	0	0	0
แป้ง	0	0	0	0
ไตรโอเลอิน	0	0	0	0
เฟอฟูรัล	0	0	0	0
อะซิติก	0	0	0	0

ตารางภาคผนวกที่ ก13 สมดุลมวลของสายการผลิตที่ 44 (PL-44) และสายที่ 45 (PL-45) (ต่อ)

Component	PL-44		PL-45	
	Mass flow (tons/day)	Mass fraction	Mass flow (tons/day)	Mass fraction
กลีเซอรอล	0	0	0	0
แอมโมเนีย	0	0	0	0
เอทิลไซยาโนอะซิเตต (C ₅ H ₇ NO ₂)	0	0	0	0
กรดโพทิโอนิค (C ₃ H ₆ O ₂)	0	0	0	0
กรดบิวทีริก (C ₄ H ₈ O ₂)	0	0	0	0
โปรตีน	0	0	0	0
กรดโอเลอิก (C ₁₈ H ₃₄ O ₂)	0	0	0	0
อื่น ๆ	0	0	0	0
Total	0.01	1	181.06	1

ตารางภาคผนวกที่ ก14 สมดุลมวลของสายการผลิตที่ 25 (PL-25) และสายที่ 26 (PL-26)

Component	PL-25		PL-26	
	Mass flow (tons/day)	Mass fraction	Mass flow (tons/day)	Mass fraction
โมโนเอทานอลามีน (MEA)	0	0.06	0.01	0.06
น้ำ	0.47	6.48	0.71	6.48
คาร์บอนไดออกไซด์	0	0	0	0
ไฮโดรเจนซัลไฟด์	0	0	0	0
H ₃ O ⁺	0	0	0	0
OH ⁻	0	0	0	0
HCO ³⁻	0	0	0	0
CO ₃ ²⁻	0	0	0	0
HS ⁻	0	0	0	0
S ²⁻	0	0	0	0
MEAH ⁺	0	0	0	0
MEACOO ⁻	0	0	0	0

ตารางภาคผนวกที่ ก14 สมดุลมวลของสายการผลิตที่ 25 (PL-25) และสายที่ 26 (PL-26) (ต่อ)

Component	PL-25		PL-26	
	Mass flow (tons/day)	Mass fraction	Mass flow (tons/day)	Mass fraction
ไนโตรเจน	0	0	0	0
ออกซิเจน	0	0	0	0
คาร์บอนมอนอกไซด์	0	0	0	0
ไฮโดรเจน	0	0	0	0
มีเทน	6.81	93.45	10.22	93.45
เอทานอล	0	0	0	0
กลูโคส	0	0	0	0
ลิกนิน	0	0	0	0
เซลลูโลส	0	0	0	0
ไซแลน	0	0	0	0
ไซโลส	0	0	0	0
แป้ง	0	0	0	0
ไตรโอเลอิน	0	0	0	0
เฟอฟูรัล	0	0	0	0
อะซิติก	0	0.01	0	0.01
กลีเซอรอล	0	0	0	0
แอมโมเนีย	0	0	0	0
เอทิลไซยาโนอะซิเตต (C ₅ H ₇ NO ₂)	0	0	0	0
กรดโพธิโอนิค (C ₃ H ₆ O ₂)	0	0	0	0
กรดบิวทีริก (C ₄ H ₈ O ₂)	0	0	0	0
โพรตีน	0	0	0	0
กรดโอเลอิก (C ₁₈ H ₃₄ O ₂)	0	0	0	0
ไนโตรเจนไดออกไซด์	0	0	0	0
อื่น ๆ	0	0	0	0
Total	7.29	1	10.94	1

ตารางภาคผนวกที่ ก15 สมดุลมวลของสายการผลิตที่ 27 (PL-27) และสายที่ 28 (PL-28)

Component	PL-27		PL-28	
	Mass flow (tons/day)	Mass fraction	Mass flow (tons/day)	Mass fraction
โมโนเอทานอลามีน (MEA)	0.01	0.06	0.01	0.06
น้ำ	0.71	6.48	0.47	6.48
คาร์บอนไดออกไซด์	0	0	0	0
ไฮโดรเจนซัลไฟด์	0	0	0	0
H ₃ O ⁺	0	0	0	0
OH ⁻	0	0	0	0
HCO ³⁻	0	0	0	0
CO ₃ ²⁻	0	0	0	0
HS ⁻	0	0	0	0
S ²⁻	0	0	0	0
MEAH ⁺	0	0	0	0
MEACOO ⁻	0	0	0	0
ไนโตรเจน	0	0	0	0
ออกซิเจน	0	0	0	0
คาร์บอนมอนอกไซด์	0	0	0	0
ไฮโดรเจน	0	0	0	0
มีเทน	10.22	93.45	6.81	93.45
เอทานอล	0	0	0	0
กลูโคส	0	0	0	0
ลิกนิน	0	0	0	0
เซลลูโลส	0	0	0	0
ไซแลน	0	0	0	0
ไซโลส	0	0	0	0
แป้ง	0	0	0	0
ไตรโอเลอิน	0	0	0	0
เฟอฟูรัล	0	0	0	0
อะซิติก	0	0.01	0	0.01

ตารางภาคผนวกที่ ก15 สมดุลมวลของสายการผลิตที่ 27 (PL-27) และสายที่ 28 (PL-28) (ต่อ)

Component	PL-27		PL-28	
	Mass flow (tons/day)	Mass fraction	Mass flow (tons/day)	Mass fraction
กลีเซอรอล	0	0	0	0
แอมโมเนีย	0	0	0	0
เอทิลไซยาโนอะซิเตต (C ₅ H ₇ NO ₂)	0	0	0	0
กรดโพธิโอนิค (C ₃ H ₆ O ₂)	0	0	0	0
กรดบิวทีริก (C ₄ H ₈ O ₂)	0	0	0	0
โพรตีน	0	0	0	0
กรดโอเลอิก (C ₁₈ H ₃₄ O ₂)	0	0	0	0
ไนโตรเจนไดออกไซด์	0	0	0	0
อื่น ๆ	0	0	0	0
Total	10.94	1	7.29	1

ตารางภาคผนวกที่ ก16 สมดุลมวลของสายการผลิตที่ 29 (PL-29) และสายที่ 30 (PL-30)

Component	PL-29		PL-30	
	Mass flow (tons/day)	Mass fraction	Mass flow (tons/day)	Mass fraction
โมโนเอทานอลามีน (MEA)	0	0	0	0
น้ำ	0	0	0	0
คาร์บอนไดออกไซด์	0	0	0	0
ไฮโดรเจนซัลไฟด์	0	0	0	0
H ₃ O ⁺	0	0	0	0
OH ⁻	0	0	0	0
HCO ³⁻	0	0	0	0
CO ₃ ²⁻	0	0	0	0
HS ⁻	0	0	0	0
S ²⁻	0	0	0	0
MEAH ⁺	0	0	0	0

ตารางภาคผนวกที่ ก16 สมดุลมวลของสายการผลิตที่ 29 (PL-29) และสายที่ 30 (PL-30) (ต่อ)

Component	PL-29		PL-30	
	Mass flow (tons/day)	Mass fraction	Mass flow (tons/day)	Mass fraction
MEACOO ⁻	0	0	0	0
ไนโตรเจน	101.25	76.71	101.25	76.71
ออกซิเจน	30.75	23.29	30.75	23.29
คาร์บอนมอนอกไซด์	0	0	0	0
ไฮโดรเจน	0	0	0	0
มีเทน	0	0	0	0
เอทานอล	0	0	0	0
กลูโคส	0	0	0	0
ลิซีน	0	0	0	0
เซลลูโลส	0	0	0	0
ไซแลน	0	0	0	0
ไซโลส	0	0	0	0
แป้ง	0	0	0	0
ไตรโอเลอิน	0	0	0	0
เฟอฟูรัล	0	0	0	0
อะซิติก	0	0	0	0
กลีเซอรอล	0	0	0	0
แอมโมเนีย	0	0	0	0
เอทิลไซยาโนอะซิเตต (C ₅ H ₇ NO ₂)	0	0	0	0
กรดโพรพิโอนิก (C ₃ H ₆ O ₂)	0	0	0	0
กรดบิวทีริก (C ₄ H ₈ O ₂)	0	0	0	0
โพรตีน	0	0	0	0
กรดโอเลอิก (C ₁₈ H ₃₄ O ₂)	0	0	0	0
ไนโตรเจนไดออกไซด์	0	0	0	0
อื่น ๆ	0	0	0	0
Total	132.00	1	132.00	1

ตารางภาคผนวกที่ ก17 สมดุลมวลของสายการผลิตที่ 31 (PL-31) และสายที่ 33 (PL-33)

Component	PL-31		PL-33	
	Mass flow (tons/day)	Mass fraction	Mass flow (tons/day)	Mass fraction
โมโนเอทานอลามีน (MEA)	0	0	0	0
น้ำ	15.77	11.32	15.77	11.32
คาร์บอนไดออกไซด์	18.69	13.42	18.69	13.42
ไฮโดรเจนซัลไฟด์	0	0	0	0
H ₃ O ⁺	0	0	0	0
OH ⁻	0	0	0	0
HCO ³⁻	0	0	0	0
CO ₃ ²⁻	0	0	0	0
HS ⁻	0	0	0	0
S ²⁻	0	0	0	0
MEAH ⁺	0	0	0	0
MEACOO ⁻	0	0	0	0
ไนโตรเจน	101.25	72.70	101.25	72.70
ออกซิเจน	3.57	2.56	3.57	2.56
คาร์บอนมอนอกไซด์	0	0	0	0
ไฮโดรเจน	0	0	0	0
มีเทน	0	0	0	0
เอทานอล	0	0	0	0
กลูโคส	0	0	0	0
ลิกนิน	0	0	0	0
เซลลูโลส	0	0	0	0
ไซแลน	0	0	0	0
ไซโลส	0	0	0	0
แป้ง	0	0	0	0
ไตรโอเลอิน	0	0	0	0
เฟอฟูรัล	0	0	0	0
อะซิติก	0	0	0	0

ตารางภาคผนวกที่ ก17 สมดุลมวลของสายการผลิตที่ 31 (PL-31) และสายที่ 33 (PL-33) (ต่อ)

Component	PL-31		PL-33	
	Mass flow (tons/day)	Mass fraction	Mass flow (tons/day)	Mass fraction
กลีเซอรอล	0	0	0	0
แอมโมเนีย	0	0	0	0
เอทิลไซยาโนอะซิเตต (C ₅ H ₇ NO ₂)	0	0	0	0
กรดโพธิโอนิค (C ₃ H ₆ O ₂)	0	0	0	0
กรดบิวทีริก (C ₄ H ₈ O ₂)	0	0	0	0
โพรตีน	0	0	0	0
กรดโอเลอิก (C ₁₈ H ₃₄ O ₂)	0	0	0	0
ไนโตรเจนไดออกไซด์	0	0	0	0
อื่น ๆ	0	0	0	0
Total	139.29	1	139.29	1

ตารางภาคผนวกที่ ก18 สมดุลมวลของสายการผลิตที่ 34 (PL-34) และสายที่ 35 (PL-35)

Component	PL-34		PL-35	
	Mass flow (tons/day)	Mass fraction	Mass flow (tons/day)	Mass fraction
โมโนเอทานอลามีน (MEA)	0	0.06	0	0.02
น้ำ	0.0002	6.48	0	0.40
คาร์บอนไดออกไซด์	0	0	0	0
ไฮโดรเจนซัลไฟด์	0	0	0	0
H ₃ O ⁺	0	0	0	0
OH ⁻	0	0	0	0
HCO ³⁻	0	0	0	0
CO ₃ ²⁻	0	0	0	0
HS ⁻	0	0	0	0
S ²⁻	0	0	0	0
MEAH ⁺	0	0	0	0

ตารางภาคผนวกที่ ก18 สมดุลมวลของสายการผลิตที่ 34 (PL-34) และสายที่ 35 (PL-35) (ต่อ)

Component	PL-34		PL-35	
	Mass flow (tons/day)	Mass fraction	Mass flow (tons/day)	Mass fraction
MEACOO ⁻	0	0	0	0
ไนโตรเจน	0	0	0	0
ออกซิเจน	0	0	0	0
คาร์บอนมอนอกไซด์	0	0	0	0
ไฮโดรเจน	0	0	0	0
มีเทน	0.0033	93.45	0.0033	99.57
เอทานอล	0	0	0	0
กลูโคส	0	0	0	0
ลิซีน	0	0	0	0
เซลลูโลส	0	0	0	0
ไซแลน	0	0	0	0
ไซโลส	0	0	0	0
แป้ง	0	0	0	0
ไตรโอเลอิน	0	0	0	0
เฟอฟูรัล	0	0	0	0
อะซิติก	0	0.01	0	0.01
กลีเซอรอล	0	0	0	0
แอมโมเนีย	0	0	0	0
เอทิลไซยาโนอะซิเตต (C ₅ H ₇ NO ₂)	0	0	0	0
กรดโพรพิโอนิก (C ₃ H ₆ O ₂)	0	0	0	0
กรดบิวทีริก (C ₄ H ₈ O ₂)	0	0	0	0
โพรตีน	0	0	0	0
กรดโอเลอิก (C ₁₈ H ₃₄ O ₂)	0	0	0	0
ไนโตรเจนไดออกไซด์	0	0	0	0
อื่น ๆ	0	0	0	0
Total	0.0036	1	0.0033	1

ตารางภาคผนวกที่ ก19 สมดุลมวลของสายการผลิตที่ 36 (PL-36) และสายที่ 37 (PL-37)

Component	PL-36		PL-37	
	Mass flow (tons/day)	Mass fraction	Mass flow (tons/day)	Mass fraction
โมโนเอทานอลามีน (MEA)	0	0.66	0	0.02
น้ำ	0.0002	99.34	0	0.40
คาร์บอนไดออกไซด์	0	0	0	0
ไฮโดรเจนซัลไฟด์	0	0	0	0
H ₃ O ⁺	0	0	0	0
OH ⁻	0	0	0	0
HCO ³⁻	0	0	0	0
CO ₃ ²⁻	0	0	0	0
HS ⁻	0	0	0	0
S ²⁻	0	0	0	0
MEAH ⁺	0	0	0	0
MEACOO ⁻	0	0	0	0
ไนโตรเจน	0	0	0	0
ออกซิเจน	0	0	0	0
คาร์บอนมอนอกไซด์	0	0	0	0
ไฮโดรเจน	0	0	0	0
มีเทน	0	0	0.0033	99.57
เอทานอล	0	0	0	0
กลูโคส	0	0	0	0
ลิกนิน	0	0	0	0
เซลลูโลส	0	0	0	0
ไซแลน	0	0	0	0
ไซโลส	0	0	0	0
แป้ง	0	0	0	0
ไตรโอเลอิน	0	0	0	0
เฟอฟูรัล	0	0	0	0
อะซิติก	0	0	0	0.01

ตารางภาคผนวกที่ ก19 สมดุลมวลของสายการผลิตที่ 36 (PL-36) และสายที่ 37 (PL-37) (ต่อ)

Component	PL-36		PL-37	
	Mass flow (tons/day)	Mass fraction	Mass flow (tons/day)	Mass fraction
กลีเซอรอล	0	0	0	0
แอมโมเนีย	0	0	0	0
เอทิลไซยาโนอะซิเตต (C ₅ H ₇ NO ₂)	0	0	0	0
กรดโพธิโอนิค (C ₃ H ₆ O ₂)	0	0	0	0
กรดบิวทีริก (C ₄ H ₈ O ₂)	0	0	0	0
โพรตีน	0	0	0	0
กรดโอเลอิก (C ₁₈ H ₃₄ O ₂)	0	0	0	0
ไนโตรเจนไดออกไซด์	0	0	0	0
อื่น ๆ	0	0	0	0
Total	0.0002	1	0.0033	1

ตารางภาคผนวกที่ ก20 สมดุลมวลของสายการผลิตที่ 38

Component	PL-38	
	Mass flow (tons/day)	Mass fraction
โมโนเอทานอลามีน (MEA)	0	0.02
น้ำ	0	0.40
คาร์บอนไดออกไซด์	0	0
ไฮโดรเจนซัลไฟด์	0	0
H ₃ O ⁺	0	0
OH ⁻	0	0
HCO ³⁻	0	0
CO ₃ ²⁻	0	0
HS ⁻	0	0
S ²⁻	0	0
MEAH ⁺	0	0

ตารางภาคผนวกที่ ก20 สมดุลมวลของสายการผลิตที่ 38 (ต่อ)

Component	PL-38	
	Mass flow (tons/day)	Mass fraction
MEACOO ⁻	0	0
ไนโตรเจน	0	0
ออกซิเจน	0	0
คาร์บอนมอนอกไซด์	0	0
ไฮโดรเจน	0	0
มีเทน	0.0033	99.57
เอทานอล	0	0
กลูโคส	0	0
ลิกนิน	0	0
เซลลูโลส	0	0
ไซแลน	0	0
ไซโลส	0	0
แป้ง	0	0
ไตรโอเลอิน	0	0
เฟอฟูรัล	0	0
อะซีติก	0	0.01
กลีเซอรอล	0	0
แอมโมเนีย	0	0
เอทิลไฮยาโนอะซิเตด (C ₅ H ₇ NO ₂)	0	0
กรดโพธิโอนิค (C ₃ H ₆ O ₂)	0	0
กรดบิวทีริก (C ₄ H ₈ O ₂)	0	0
โปรตีน	0	0
กรดโอเลอิก (C ₁₈ H ₃₄ O ₂)	0	0
ไนโตรเจนไดออกไซด์	0	0
อื่น ๆ	0	0
Total	0.0033	1

ภาคผนวก ข
คำนวณต้นทุนผลิตภัณฑ์รวม

การคำนวณดอกเบี้ยเงินกู้

จากสมมติฐานที่กำหนดให้มีการกู้เงินลงทุนเป็นจำนวน 30% ของเงินลงทุนทั้งหมด (TCI) ที่อัตราดอกเบี้ย 5% ต่อปี และมีการผ่อนส่งทุกปีเป็นจำนวนเท่า ๆ กัน ซึ่งจากสมมติฐานดังกล่าวจะมีผลต่อต้นทุนผลิตภัณฑ์รวมต่อปีที่เพิ่มขึ้น จึงต้องมีการคำนวณดอกเบี้ยเงินกู้ ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ 16

$$F = P(1+i)^N = A \left[\frac{(1+i)^N - 1}{i} \right] \quad \dots(16)$$

$$(0.3)(116,443,741.20)(1+0.05)^{20} = A \left[\frac{(1+0.05)^{20} - 1}{0.05} \right]$$

ดังนั้นดอกเบี้ยเงินกู้ที่ต้องจ่ายต่อปี เท่ากับ 2,803,124.12 บาทต่อปี

การคำนวณต้นทุนผลิตภัณฑ์รวม

ต้นทุนผลิตภัณฑ์รวมนั้นอิงจากสัดส่วนค่าใช้จ่ายในส่วนต่าง ๆ ของกระบวนการผลิตโดยมีการปรับสัดส่วนให้เหมาะสมและเป็นจริงมากที่สุด ซึ่งกำหนดให้เป็นต้นทุนต่อปีในปีแรกที่มีกำลังการผลิต 100 เปอร์เซ็นต์ โดยรายละเอียดของการคำนวณที่แสดงในข้อมูลและค่าต่าง ๆ จะแสดงในตารางภาคผนวกที่ ข1

ตารางภาคผนวกที่ ข1 การคำนวณต้นทุนผลิตภัณฑ์รวม

Product:	Biogas	
Operating time, h/yr.	7,200.00	
Biogas production rate	5468.20	ton per year
Compost production rate	20,087.76	ton per year
Fixed Capital Investment, FCI	127.66	Million Baht

ตารางภาคผนวกที่ ข1 การคำนวณต้นทุนผลิตภัณฑ์รวม (ต่อ)

Item	Suggested Factor	ปริมาณที่ใช้ต่อปี	ราคาต่อหน่วย	ราคาทั้งหมด (ล้านบาท)
Raw Materials				
MSW		107,244.30	100.00	10.72
Cassava waste		240,000.00	100.00	24.00
Total Raw Materials				34.72
Operating labor		180,000.00	40.50	7.29
Operating supervision	0.15 of operating labor		7.29	1.09
Utilities				
Water				
Cooling		470,313.04	15.81	7.44
Process				
Electricity		5,217,830.07	5.50	28.70
Fuel				
Refrigeration				
Steam		90,000.00	135.56	12.20
Waste treatment and disposal				
Maintenance and repairs	0.07 of FCI		127.66	8.94
Operating supplies	0.15 of maintenance & repair		8.94	1.34
Laboratory charges	0.12 of operating labor		7.29	0.87
Royalties (if not on lump-sum basis)	0.02 of TPC		142.60	2.85
Variable Cost =				105.45

ตารางภาคผนวกที่ ข1 การคำนวณต้นทุนผลิตภัณฑ์รวม (ต่อ)

Item	Suggested Factor	ปริมาณที่ใช้ต่อปี	ราคาต่อหน่วย	ราคาทั้งหมด (ล้านบาท)
Taxes (property)	0.01 of FCI		127.66	1.28
Insurance	0.01 of FCI		127.66	1.28
MEA make up		3,400.96	46.13	0.16
Water make up		54,318.00	15.81	0.86
Depreciation	0.05 of FCI		127.66	6.38
Loan Interest	Calculate Separately			2.80
Fixed Charges =				12.76
Plant overhead, general	0.55 of labor, supervision and maintenance		17.32	9.53
Plant Overhead =				9.53
Manufacturing Cost =				127.73
Administration	0.20 of labor, supervision and maintenance		17.32	3.46
Distribution & selling	0.04 of TPC		142.60	5.70
Research & Development	0.04 of TPC		142.60	5.70
General Expenses =				14.87
TOTAL PRODUCT COST =				142.60
TOTAL PRODUCT COST WITHOUT DEPRECIATION = c_{oj} =				136.22

ภาคผนวก ค
คำนวณความคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์

รายละเอียดความคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์นั้นอิงจากราคาขายของผลิตภัณฑ์ทั้งหมด (Total Selling Price, S_j), ค่าเสื่อมราคา (Depreciation, d_j), ต้นทุนผลิตภัณฑ์รวม (Total Product Cost, c_{oj}), อัตราภาษี (Tax rate), เงินลงทุนเริ่มต้นทั้งหมด (Total Investment Cost, TCI) และกำหนด โดยข้อมูลที่ต้องการทั้งหมดในการวิเคราะห์นั้นแสดงในตารางภาคผนวกที่ ค1

ตารางภาคผนวกที่ ค1 ข้อมูลที่เกี่ยวข้องในการวิเคราะห์ความคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์

ข้อมูล	สัญลักษณ์	จำนวนเงิน
Total Selling Price	S_j	158.15 ล้านบาท
Depreciation	d_j	6.38 ล้านบาท
Total Product Cost	c_{oj}	136.22 ล้านบาท
Total Investment Cost	TCI	162.10 ล้านบาท
Tax rate	φ	15 เปอร์เซ็นต์
Service lifetime	N	20 ปี

ซึ่งรายละเอียดการประเมินความคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์นั้นแสดงในตารางภาคผนวกที่ ค2 โดยจะแสดงกระแสเงินสดตลอดอายุโครงการ

ตารางภาคผนวกที่ ค2 การคำนวณความคุ้มทุนทางเศรษฐศาสตร์

year	TCI	S_j	c_{oj}	d_j	Profit before tax	Profit after tax (N_{pi})	A_j	Cum. A_j
0	162.10						-162.10	-162.10
1		158.15	136.22	6.38	15.56	13.22	19.61	-142.49
2		158.15	136.22	6.38	15.56	13.22	19.61	-122.89
3		158.15	136.22	6.38	15.56	13.22	19.61	-103.28
4		158.15	136.22	6.38	15.56	13.22	19.61	-83.68
5		158.15	136.22	6.38	15.56	13.22	19.61	-64.07
6		158.15	136.22	6.38	15.56	13.22	19.61	-44.47
7		158.15	136.22	6.38	15.56	13.22	19.61	-24.86
8		158.15	136.22	6.38	15.56	13.22	19.61	-5.26
9		158.15	136.22	6.38	15.56	13.22	19.61	14.35

ตารางภาคผนวกที่ ค2 การคำนวณความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ (ต่อ)

year	TCI	S_j	C_{oj}	d_j	Profit before tax	Profit after tax (N_{pi})	A_j	Cum. A_j
10		158.15	136.22	6.38	15.56	13.22	19.61	33.95
11		158.15	136.22	6.38	15.56	13.22	19.61	53.56
12		158.15	136.22	6.38	15.56	13.22	19.61	73.16
13		158.15	136.22	6.38	15.56	13.22	19.61	92.77
14		158.15	136.22	6.38	15.56	13.22	19.61	112.37
15		158.15	136.22	6.38	15.56	13.22	19.61	131.98
16		158.15	136.22	6.38	15.56	13.22	19.61	151.58
17		158.15	136.22	6.38	15.56	13.22	19.61	171.19
18		158.15	136.22	6.38	15.56	13.22	19.61	190.79
19		158.15	136.22	6.38	15.56	13.22	19.61	210.40
20		158.15	136.22	6.38	15.56	13.22	19.61	230.00

การประเมินความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์จะคิด 3 วิธีได้แก่ อัตราผลตอบแทนเงินสดของผลตอบแทน (Internal Rate of Return; IRR), มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net Present Value; NPV) และระยะเวลาในการคืนทุน (Payback Period) ซึ่งจะนำข้อมูลในตารางที่ 61 มาคำนวณ โดยผลการประเมินความคุ้มค่าที่ได้จะแสดงในตารางภาคผนวกที่ ค3

ตารางภาคผนวกที่ ค3 ผลการคำนวณการวิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์

	Calculation
IRR	10.43%
NPV	4.93
Payback Period	8.26 years (ประมาณ 8 ปี 3 เดือน)