

การประยุกต์ใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้างในการปรับปรุงกระบวนการผลิตไฮโดรเจน
ด้วยการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน

**APPLICATION OF BIOCHAR FROM ELEPHANT DUNG TO IMPROVE
HYDROGEN PRODUCTION PROCESS
BY ANEROBIC FERMENTATION**



วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาพลังงานและสิ่งแวดล้อมชุมชน
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่

พ.ศ. 2567

หัวข้อวิทยานิพนธ์

การประยุกต์ใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้างในการปรับปรุง
กระบวนการผลิตไฮโดรเจนด้วยการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน

ผู้วิจัย

อัญชลี มาสะอาด

สาขาวิชา

พลังงานและสิ่งแวดล้อมชุมชน

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

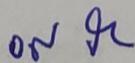
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.หทัยทิพย์ สิ้นธูยา

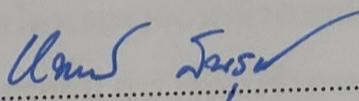
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรจิตต์ เศรษฐพรพงศ์

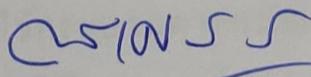
คณะกรรมการสอบ



..... ประธานกรรมการ
(รองศาสตราจารย์ ดร.อดิศักดิ์ ปัตติยะ)

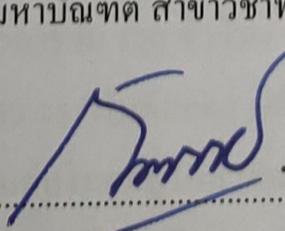


..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.หทัยทิพย์ สิ้นธูยา)



..... กรรมการ
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรจิตต์ เศรษฐพรพงศ์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยนี้เป็นส่วนหนึ่ง
ของการศึกษาตามหลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาพลังงานและสิ่งแวดล้อมชุมชน



..... คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติศักดิ์ โชติกเฉชาณรงค์)

วันที่ 29 เดือน พฤษภาคม พ.ศ. 2567

ลิขสิทธิ์ของบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่

ผลิตไฮโดรเจนโดยการใช้ก๊าซมูลช้างเอเชียและแอฟริกาที่อัตราส่วน 1:2 และ 1:3 เป็นสารตั้งต้นพบว่า มีศักยภาพในการผลิตไฮโดรเจนสะสมที่ 0.231, 0.034, 0.020 และ 0.047 มิลลิลิตรไฮโดรเจนต่อกรัมซีโอดี ตามลำดับ โดยก๊าซมูลช้างเอเชีย 1:2 สามารถผลิตไฮโดรเจนได้สูงสุดและมีประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีร้อยละ 21.96 ดังนั้น การใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้างในการผลิตไฮโดรเจนจึงเป็นทางเลือกที่มีศักยภาพในการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตพลังงานที่มีความมีประสิทธิภาพและมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมลดลงในอนาคต

คำสำคัญ : ถ่านชีวภาพจากมูลช้าง, ไฮโดรเจน, กระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน



The Title : Application of Biochar from Elephant Dung to Improve Hydrogen Production Process by Anerobic Fermentation

The Author : Anchalee Masa-ad

Program : Community Energy and Environment

Thesis Advisors

: Assistant Professor Dr.Hathaihip Sintuya

Chairperson

: Assistant Professor Dr. Worajit Setthapun

Co – advisor

ABSTRACT

An interesting way to develop cleaner and more efficient energy is to improve the efficiency of hydrogen production from biochar. Utilizing biochar from biological sources such as elephant dung in hydrogen production can help reduce use of harmful chemicals and promote eco-friendliness. The use of biochar from biological sources such as elephant dung for hydrogen production can reduce the use of polluting chemicals and promote environmental friendliness. Therefore, the focus of this research is to investigate the efficient utilization of elephant dung biochar in hydrogen production via anaerobic digestion on dark fermentation. The objective of this research is to investigate the optimal concentration of biochar to produce hydrogen and to enhance the efficiency of hydrogen production from anaerobic fermentation. The experiment used glucose as the source material with bacteria from a petroleum refinery wastewater sludge. Elephant dung biochar was added at varying rates of 5 to 25 g/L under anaerobic conditions using a temperature-controlled shaker at 37 °C and 120 rpm for 120 hours. The study found that the hydrogen production potential was accumulated at 0.26, 0.29, 0.37, and 0.26 mol H₂/mol glucose when utilizing elephant dung biochar at concentrations of 0, 5, 15, and 25 g/L, respectively. Furthermore, the elephant dung biochar at 15 g/L showed an efficiency of 26.88% in COD removal, 24.80% in TS removal, and 51.14% in VS removal. Furthermore, experiments were conducted to produce hydrogen using an Asian elephant dung leachate and African elephant dung

leachate at ratios of 1:2 and 1:3 as initial substrates. It was found that there was potential for hydrogen accumulation at 0.231, 0.034, 0.020, and 0.047 mLH₂/g COD, respectively. The 1:2 Asian elephant dung leachate demonstrated the highest hydrogen production potential and efficiency in removing COD by 21.96 % . Therefore, utilization of elephant dung biochar for hydrogen production represents a promising approach to developing efficient energy production technologies with reduced environmental impact for the future.

Keyword: Biochar from Elephant Dung, Hydrogen, Anaerobic Digestion



กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จได้ เนื่องจากการสนับสนุนได้รับความร่วมมือและช่วยเหลือจากหลาย ๆ บุคคล ดังนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.หทัยทิพย์ สิ้นธูยา อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ พร้อมทั้งผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรจิตต์ เศรษฐพรค์ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วมที่ให้คำปรึกษา แนะนำแนวทางการแก้ไขปัญหาให้วิทยานิพนธ์มีความสมบูรณ์มากขึ้น

ขอขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ ดร.อดิศักดิ์ ปัตติยะ ที่ได้รับเกียรติให้เป็นประธานสอบปกป้องวิทยานิพนธ์ของผู้วิจัย ขอขอบคุณต่อความกรุณาและการสนับสนุนที่ได้รับจากท่านเป็นอย่างสูง

ขอขอบพระคุณวิทยาลัยพัฒนาเศรษฐกิจและเทคโนโลยีชุมชนแห่งเอเชีย เป็นอย่างสูง ที่ได้สนับสนุนการศึกษาของผู้วิจัย และขอขอบพระคุณมหาวิทยาลัยเฟิงเจีย ประเทศไต้หวัน ที่ได้อนุเคราะห์พื้นที่ในการเก็บข้อมูลการทดลองงานวิจัยของผู้วิจัย ขอขอบคุณ คณะผู้สอน และบุคลากรทุกระดับที่ได้มีบทบาทสำคัญในการส่งเสริมและพัฒนาทักษะของผู้วิจัยทั้งทางวิชาการและทักษะอื่น ๆ

ท้ายที่สุดนี้ ผู้วิจัยขอขอบคุณตัวของผู้วิจัยเองที่พยายาม และมุ่งมั่นตั้งใจในการทำงานวิจัยนี้จนสำเร็จ และขอกราบขอบพระคุณครอบครัวที่ได้ให้กำลังใจและการสนับสนุนในการศึกษาต่อปริญญาโทในครั้งนี้ ขอขอบคุณเพื่อน ๆ และพี่ ๆ จากวิทยาลัยพัฒนาเศรษฐกิจและเทคโนโลยีชุมชนแห่งเอเชียที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และให้คำแนะนำปรึกษา ร่วมถึงเป็นแรงบันดาลใจที่ทำให้ผู้วิจัยสามารถพัฒนาตัวเองได้จนสำเร็จการศึกษา

อัญชลี มาสะอาด

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อ	๗
ABSTRACT	๘
กิตติกรรมประกาศ	๙
สารบัญ	๑๐
สารบัญตาราง	๑๑
สารบัญภาพ	๑๒
บทที่	
1 บทนำ	1
ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา	1
วัตถุประสงค์ของการวิจัย	2
ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย	2
สมมติฐานการวิจัย	3
ขอบเขตของการวิจัย	3
นิยามศัพท์เฉพาะ	4
กรอบแนวคิดการวิจัย	4
2 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	5
พลังงานทดแทนและความสำคัญของไฮโดรเจน.....	5
กระบวนการผลิตไฮโดรเจน.....	7
กระบวนการผลิตไฮโดรเจนด้วยการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน.....	12
การผลิตไฮโดรเจนโดยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงโดยกลุ่ม จุลินทรีย์.....	17
การคำนวณที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตไฮโดรเจน.....	23
ถ่านชีวภาพ.....	26
กระบวนการไพโรไลซิส.....	27
คุณสมบัติของถ่านชีวภาพ.....	28

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
	การวิเคราะห์สมบัติของถ่านชีวภาพ..... 29
	งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง..... 30
3	วิธีดำเนินการวิจัย..... 34
	วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการวิจัย..... 34
	การเตรียมเชื้อจุลินทรีย์..... 35
	การเตรียมสารอาหาร..... 36
	การผลิตถ่านชีวภาพจากมูลช้างด้วยกระบวนการไพโรไลซิส..... 37
	การปรับปรุงกระบวนการผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการหมักแบบ ไม่ใช้ออกซิเจน โดยใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้าง..... 39
4	ผลการวิจัย..... 43
	ผลของการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของการผลิตถ่าน ชีวภาพจากมูลช้างด้วยกระบวนการไพโรไลซิส..... 44
	ผลของการใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้างในการปรับปรุงกระบวนการผลิต ไฮโดรเจนด้วยการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน..... 47
5	สรุป อภิปรายผล และข้อเสนอแนะ 58
	สรุปผลการทดลอง..... 58
	ข้อเสนอแนะ..... 60
บรรณานุกรม 61
ประวัติผู้วิจัย 66

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	คุณสมบัติของไฮโดรเจน	6
2.2	ข้อดี-ข้อเสียของกระบวนการผลิตไฮโดรเจนด้วยวิธีต่าง ๆ.....	11
2.3	การใช้กลุ่มจุลินทรีย์จากแหล่งต่าง ๆ เพื่อการผลิตไฮโดรเจน.....	18
2.4	ปริมาณไนโตรเจนที่เหมาะสมต่อการผลิตไฮโดรเจน.....	20
2.5	การศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตไฮโดรเจน.....	21
2.6	ผลของค่าความเป็นกรด-ด่างต่อการผลิตไฮโดรเจน.....	22
2.7	ผลของการเพิ่มถ่านชีวภาพต่อการผลิตไฮโดรเจน.....	33
3.1	คุณสมบัติของมูลช้างเอเชีย และมูลช้างแอฟริกา.....	35
3.2	สารละลายเข้มข้นสำหรับการเตรียมสารอาหาร.....	36
4.1	การวิเคราะห์หึ่งค์ประกอบ โดยประมาณ (Proximate analysis).....	44
4.2	การวิเคราะห์โดยแยกธาตุ (Ultimate analysis).....	45
4.3	การวิเคราะห์ลักษณะพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดของรูพรุน.....	47
4.4	ผลของการวิเคราะห์คุณสมบัติของการผลิตไฮโดรเจนด้วยถ่านชีวภาพจากมูล ช้างและถ่านชีวภาพเกรดการค้า ก่อนการหมักและหลังการหมัก.....	48
4.5	งานวิจัยที่ศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่าง ในการผลิตไฮโดรเจน.....	49
4.6	ผลของการวิเคราะห์คุณสมบัติของการผลิตไฮโดรเจนด้วยถ่านชีวภาพจากมูล ช้าง.....	51
4.7	ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของน้ำชะมูลช้าง.....	54
4.8	การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่าซีไอดีของน้ำชะมูลช้างที่อัตราส่วน มูลช้างสดต่อน้ำ.....	55

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1.1	4
2.1	7
2.2	8
2.3	9
2.4	10
2.5	11
2.6	15
2.7	16
2.8	27
2.9	29
4.1	46
4.2	50
4.3	52
4.4	56

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

พลังงานไฮโดรเจนจัดเป็นรูปแบบพลังงานหมุนเวียนที่ได้รับความนิยมและมีบทบาทสำคัญในระบบพลังงานของโลกในอนาคต เนื่องจากการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (Green House Gas: GHG) และเป็นการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม สโกเวลล์ (Scovell, 2022) นอกจากนี้พลังงานไฮโดรเจนยังสามารถพัฒนาและนำไปใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าได้อย่างกว้างขวางซึ่งจะเป็นการลดการนำเข้าเชื้อเพลิงฟอสซิลและเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตไฟฟ้าเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้ใช้พลังงาน โรเซน และคูฮี-เฟย์ (Rosen & Koochi-Fayegh, 2016) โดยกระบวนการผลิตไฮโดรเจนสามารถใช้วัตถุดิบจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ขยะอินทรีย์ และขยะชุมชน ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่มีปริมาณมากในชุมชน

จังหวัดเชียงใหม่เป็นแหล่งพื้นที่การท่องเที่ยวโดยเฉพาะการท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมชาติและการอนุรักษ์สิ่งแวดล้อมและธรรมชาติมีสภาพแวดล้อมบรรยากาศของหุบเขาและสายน้ำ โดยเฉพาะธุรกิจปางช้างได้เปิดให้บริการนักท่องเที่ยวชาวไทยและชาวต่างชาติได้มาเที่ยวชมโดยในแต่ละวันช้าง 1 เชือก สามารถขับถ่ายออกมาเป็นมูลได้ประมาณ 100-150 กิโลกรัม สเตเปียน และคนอื่นๆ (Stepien et al., 2019) แต่เนื่องจากช้างสามารถดูดซึมสารอาหารได้ร้อยละ 30-45 ของอาหารที่กิน และขับถ่ายออกมาเป็นมูลช้างที่มีลักษณะเป็นเส้นใย วิดยอรินิ และคนอื่นๆ (Widyorini et al., 2018) ทำให้เกิดส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมชุมชนด้านน้ำเสีย ส่งกลิ่นเหม็น และหมอกควันจากการเผามูลช้าง ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้เห็นถึงความสำคัญของการแก้ปัญหาของเสียมูลช้างเหล่านี้ โดยมีแนวคิดที่จะผลิตถ่านชีวภาพจากมูลช้างด้วยกระบวนการไพโรไลซิส กระบวนการนี้เป็นการเผาถ่านจากชีวมวลแบบไม่ใช้ออกซิเจนหรือควบคุมให้มีออกซิเจนน้อยที่สุด ทำให้ได้ถ่านชีวภาพที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบหลักมากกว่าร้อยละ 50 ด้วยเหตุนี้ ถ่านชีวภาพจึงมีศักยภาพเป็นแหล่งกักเก็บคาร์บอนได้ดี ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกในบรรยากาศได้ และยังมีรูพรุนจำนวนมากบนพื้นที่ผิวของถ่านชีวภาพ ทำให้สามารถดูดซับแร่ธาตุได้ดีอีกด้วย เล็ง และฮวง (Leng & Huang, 2018) จากที่ได้กล่าวถึงพลังงานไฮโดรเจน และการผลิตถ่านชีวภาพ ไจน และคนอื่นๆ (Jain et al., 2022)

ได้กล่าวไว้ว่า กระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงเป็นเทคนิคที่ได้รับความนิยมเป็นส่วนใหญ่สำหรับการผลิตไฮโดรเจน เนื่องจากสามารถผลิตไฮโดรเจนได้ตลอดทั้งวัน โดยไม่ใช้แสง และยังมีผลพลอยได้เป็นกรดไขมันระเหยได้ เช่น กรดบิวทิริก และกรดอะซิติก ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมได้ งานวิจัยของสุเกียรติ์ และคนอื่น ๆ (Sugiarto et al., 2021) ได้ศึกษาการใช้ถ่านชีวภาพเป็นตัวกลาง (Media) ในการเพิ่มปริมาณการผลิตไฮโดรเจน พบว่า เมื่อเติมถ่านชีวภาพจากไม้สนลงในกระบวนการหมักไม่ใช้ออกซิเจนร่วมกับเศษอาหาร ทำให้ผลผลิตไฮโดรเจนสะสม และอัตราการผลิตไฮโดรเจน เพิ่มขึ้นสูงสุดร้อยละ 107 และร้อยละ 54 ตามลำดับ ซึ่งถ่านชีวภาพสามารถลดค่าความเป็นกรด-ด่างในกระบวนการย่อยสลายส่งผลให้การผลิตไฮโดรเจนได้ดีขึ้นอย่างมีประสิทธิภาพ

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงได้มุ่งเน้นที่จะเพิ่มความสามารถในการผลิตไฮโดรเจน และศึกษาวิธีการผลิตถ่านชีวภาพจากมูลช้าง เพื่อกำจัดเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน และลดความเป็นผลึกของเซลลูโลส และเพิ่มพื้นที่ผิวให้มีปริมาณรูพรุนเพิ่มขึ้น ในการเร่งอัตราการผลิตไฮโดรเจน และเพิ่มปริมาณการผลิตไฮโดรเจน โดยจะศึกษาวิธีการผลิตถ่านชีวภาพจากมูลช้างด้วยกระบวนการไพโรไลซิส เพื่อนำไปทดลองเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงโดยใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้าง โดยหวังว่างานวิจัยนี้จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฮโดรเจนได้อย่างมีประสิทธิภาพและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมในชุมชน

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อผลิตถ่านชีวภาพจากมูลช้างด้วยกระบวนการไพโรไลซิส
2. เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน

โดยใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้าง

ประโยชน์ที่ได้รับจากการวิจัย

1. สามารถลดปัญหาของเสียจากมูลช้างที่มีปริมาณมากในสถานประกอบการปangช้างได้
2. สามารถลดปัญหาการเกิดมลพิษด้านสิ่งแวดล้อมภายในสถานประกอบการปangช้างได้
3. สามารถแก้ปัญหาของเสียจากมูลช้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสอดคล้องกับการพัฒนาด้านพลังงาน
4. สถานประกอบการปangช้างสามารถใช้เทคโนโลยีพลังงานทดแทนที่สามารถกำจัดของเสียมูลช้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ

สมมติฐานการวิจัย

ถ่านชีวภาพจากมูลช้าง คือ มูลช้างที่ถูกเผาด้วยอุณหภูมิสูง เพื่อกำจัดเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน และลดความเป็นผลึกของเซลลูโลส และเพิ่มพื้นที่ผิวให้มีปริมาณรูพรุนเพิ่มขึ้น ในการเร่งอัตราการผลิตไฮโดรเจน และเพิ่มปริมาณการผลิตไฮโดรเจน ดังนั้นถ่านนำถ่านชีวภาพจากมูลช้างเข้าไปเป็นตัวกลางเพื่อช่วยในการก่อตัวของไบโอฟิล์มและการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์บนพื้นผิวในช่วงแรกของกระบวนการผลิตไฮโดรเจน ทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างคงที่ ช่วยเพิ่มการผลิตกรดไขมันระเหยง่ายและลดการยับยั้งแอมโมเนีย ทั้งนี้ ธาตุในองค์ประกอบของถ่านชีวภาพจากมูลช้างยังสามารถเพิ่มการผลิตไฮโดรเจนด้วยการให้สารอาหารที่จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ได้ด้วยเช่นกัน

ขอบเขตของการวิจัย

ขอบเขตด้านเนื้อหา

1. วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการศึกษา

งานวิจัยนี้ใช้วัตถุประสงค์ในการศึกษาการผลิตไฮโดรเจน ได้แก่ มูลช้างสด (Elephant Dung) ถ่านชีวภาพจากมูลช้าง (Biochar from Elephant Dung) และตะกอนน้ำเสียจากโรงงานปิโตรเลียม (Petroleum Waste Sludge)

2. ศึกษาการผลิตถ่านชีวภาพจากมูลช้างด้วยกระบวนการไพโรไลซิส

3. ศึกษาการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้อัตราส่วนของมูลช้างต่อปริมาณถ่านชีวภาพที่แตกต่างกัน

ขอบเขตด้านเวลา

ระยะเวลาในการทำการวิจัยตั้งแต่ มิถุนายน 2565 - ตุลาคม 2566

ขอบเขตด้านสถานที่

1. สถานประกอบการป่างช้าง

2. วิทยาลัยพัฒนาเศรษฐกิจและเทคโนโลยีชุมชนแห่งเอเชีย มหาวิทยาลัยราชภัฏ

เชียงใหม่ วิทยาเขตแมริม

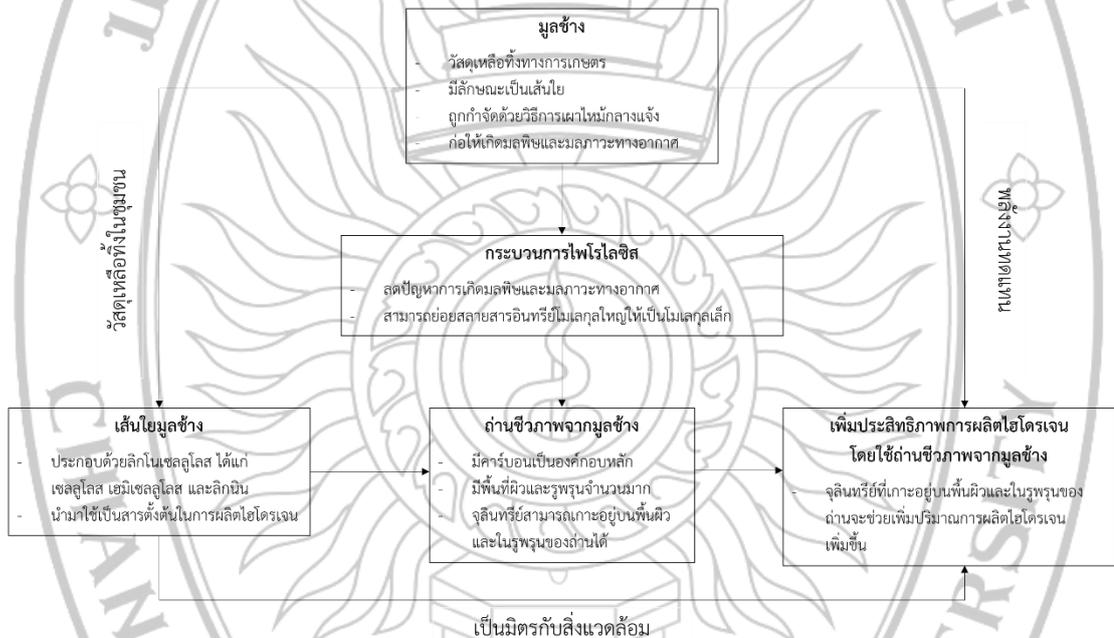
3. Feng Chia University, Taichung, Taiwan

นิยามศัพท์เฉพาะ

ถ่านชีวภาพจากมูลช้าง หมายถึง การนำวัตถุดิบมูลช้างมาใช้ในการผลิตถ่านชีวภาพ โดยใช้ความร้อนที่อุณหภูมิสูงเพื่อทำให้เกิดการย่อยสลายของวัตถุดิบ โดยเรียกกระบวนการนี้ว่า ไพโรไลซิส ซึ่งจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนสภาพจากมูลช้างเป็นถ่านชีวภาพที่มีองค์ประกอบหลักคือ คาร์บอน

อัตราส่วนของมูลช้างต่อปริมาณถ่านชีวภาพจากมูลช้าง หมายถึง สัดส่วนการใช้มูลช้างกับถ่านชีวภาพที่จะทำให้ผลการผลิตไฮโดรเจนมีปริมาณที่เหมาะสมและเป็นไปได้

กรอบแนวคิดการวิจัย



ภาพที่ 1.1 กรอบแนวคิดการวิจัย

บทที่ 2

การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

กระบวนการผลิตไฮโดรเจนเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้น โดยการย่อยสลายของสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน เมื่อมีจุลินทรีย์ และสารอินทรีย์ อยู่ในสภาวะแวดล้อมที่เหมาะสม ทำให้เกิดผลผลิตไฮโดรเจนสูง งานวิจัยนี้จึงได้ศึกษาความสำคัญของไฮโดรเจน กระบวนการผลิตไฮโดรเจน ศึกษาข้อมูลของถ่านชีวภาพ การผลิตถ่านชีวภาพด้วยกระบวนการไพโรไลซิส ศึกษาคุณสมบัติของถ่านชีวภาพ และการเทคนิคการวิเคราะห์ถ่านชีวภาพ โดยมีรายละเอียดดังนี้

พลังงานทดแทนและความสำคัญของไฮโดรเจน

การขาดแคลนของเชื้อเพลิงฟอสซิลที่เป็นแหล่งพลังงานหลักในปัจจุบัน รวมถึงผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่มาจากผลิตภัณฑ์การเผาไหม้ ได้นำไปสู่ความสนใจที่เพิ่มขึ้นในพลังงานไฮโดรเจน ซึ่งถือเป็นแหล่งพลังงานที่มีศักยภาพสูงในอนาคต ไฮโดรเจน หรือเรียกว่า "เชื้อเพลิงของอนาคต" ที่สามารถนำไปแปลงเป็นพลังงานไม่เพียงแต่ในเครื่องยนต์สันดาปภายในหรือเครื่องยนต์ไอพ่น แต่ยังสามารถนำไปใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงได้ด้วย ซึ่งข้อดีของไฮโดรเจน คือ มีค่าความร้อนสูงเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงอื่น ๆ ภูเขาไฟ และคนอื่น ๆ (Lukajtis et al., 2018) และในยุคที่สิ่งแวดล้อมมีการเสื่อมคุณภาพ ทำให้พลังงานไฮโดรเจนมีความสำคัญอย่างมากในฐานะแหล่งพลังงานที่สะอาดทางนิเวศวิทยา เนื่องจากการเผาไหม้ไฮโดรเจนไม่ก่อให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจกที่มีผลกระทบต่อสภาพภูมิอากาศ อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดในการนำไฮโดรเจนไปใช้เป็นแหล่งพลังงาน คือ ความเสี่ยงในการระเบิดเมื่อไฮโดรเจนผสมกับออกซิเจนในช่วงความเข้มข้นร้อยละ 4-75 ปริมาตรต่อปริมาตรในบรรยากาศ ดาวูด (Dawood, 2019) ซึ่งการเก็บรักษาเชื้อเพลิงไฮโดรเจนยังคงยากเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงอื่น ๆ เนื่องจากไฮโดรเจนมีจุดเดือดต่ำจำเป็นต้องเก็บในถังความดันที่มีฉนวนกันความร้อนเพื่อป้องกันการเปลี่ยนสภาพจากเหลวเป็นแก๊สและควบคุมความดันภายในถังให้อยู่ในระดับที่ปลอดภัย อะโบฮัมเซห์ และคนอื่น ๆ (Abohamzeh et al., 2021) ดังนั้น ไฮโดรเจนมีศักยภาพในการเป็นแหล่งพลังงานที่สะอาดและมีความน่าสนใจอย่างมากในอนาคต ซึ่งสามารถช่วยลดปัญหาสิ่งแวดล้อมและสนับสนุนการพัฒนาที่ยั่งยืนได้

ไฮโดรเจน (Hydrogen) เป็นธาตุที่มีสัญลักษณ์เคมี เอช (H) และเป็นองค์ประกอบหลักของน้ำ มีจำนวนโมเลกุลเท่ากับ 2 เท่าของออกซิเจน (O_2) และมีมวลเหมือนกับ 1 อะตอมของคาร์บอน (C) ไฮโดรเจนเป็นพลังงานสะอาดที่สุดและมีประสิทธิภาพสูงในการผลิตพลังงาน โดยเมื่อไฮโดรเจนเผาไหม้กับออกซิเจนจะปล่อยพลังงานและเกิดน้ำเป็นผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้ไฮโดรเจนยังเป็นพาหะพลังงานที่สะอาดและมีประสิทธิภาพสูงในการใช้เป็นเชื้อเพลิงในยานยนต์และการขนส่งต่าง ๆ ด้วยคุณสมบัติที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยกว่าเชื้อเพลิงอื่น ๆ

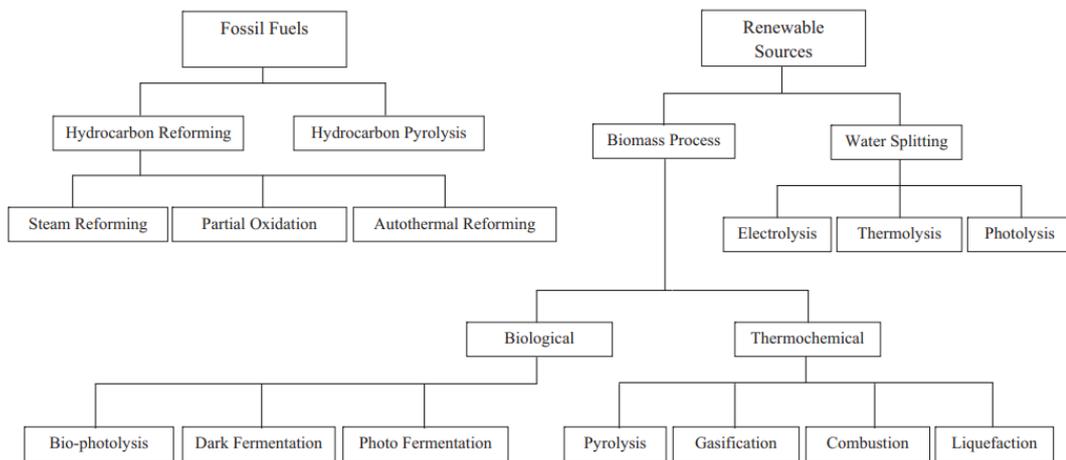
ตารางที่ 2.1 คุณสมบัติของไฮโดรเจน

คุณสมบัติ	ค่า
เลขอะตอม	1
มวลอะตอม	1.008
มวลโมเลกุล	2.016 กรัมต่อโมล
ความหนาแน่น	0.084 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร
อุณหภูมิจุดหลอมเหลว	-259.14 องศาเซลเซียส
จุดเดือด	-252.87 องศาเซลเซียส
จำนวนโปรตรอน	1
ค่าพลังงานความร้อนสูง	142 เมกะจูลต่อกิโลกรัม
ค่าพลังงานความร้อนต่ำ	120 เมกะจูลต่อกิโลกรัม
ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่	0.61 ตารางเซนติเมตรต่อวินาที

ไฮโดรเจนถือได้ว่าเป็นพลังงานที่น่าสนใจในอนาคต เนื่องจากเป็นพลังงานสะอาด เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยเมื่อเกิดการเผาไหม้จะได้ออกมาเพียงก๊าซออกซิเจนและน้ำ ซึ่งแตกต่างจากเชื้อเพลิงอื่น ๆ ซึ่งให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์ ซึ่งก่อให้เกิดก๊าซเรือนกระจกทำให้โลกร้อน นอกจากนี้ยังสามารถนำไฮโดรเจนไปผลิตเป็นกระแสไฟฟ้า โดยป้อนเข้าเซลล์เชื้อเพลิง เพราะประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าสูงกว่าอุปกรณ์ไฟฟ้าอื่น ๆ ดังนั้นพลังงานไฮโดรเจนจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ทดแทนพลังงานจากเชื้อเพลิงฟอสซิลได้

กระบวนการผลิตไฮโดรเจน

กระบวนการผลิตไฮโดรเจนสามารถนำทรัพยากรทดแทนมาใช้ในการผลิตได้ โดยอาจใช้ชีวมวลหรือน้ำเป็นวัสดุเริ่มต้น ในกรณีของชีวมวล วิธีการผลิตสามารถแบ่งเป็น 2 วิธี ได้แก่ วิธีการทางความร้อน และวิธีการทางชีวภาพ โดยกระบวนการทางความร้อนจะมุ่งเน้นไปที่การไพโรไลซิส ในขณะที่กระบวนการทางชีวภาพเป็นกระบวนการหมักโดยใช้แสงและไม่ใช้แสง ในกรณีของการนำน้ำมาผลิตไฮโดรเจน วิธีการผลิตไฮโดรเจนจากน้ำสามารถทำได้โดยใช้กระบวนการแยกน้ำ เช่น อิเล็กโทรไลซิส เทอร์โมไลซิส หรือโฟโตไลซิส ที่ใช้น้ำเป็นวัสดุหลัก ดังนั้น จึงได้เสนอแผนผังทางเลือกต่าง ๆ ในการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้วิธีต่าง ๆ ตามความเหมาะสมของทรัพยากรที่มีอยู่ แสดงดังภาพที่ 2.2



ภาพที่ 2.1 วิธีการผลิตไฮโดรเจน

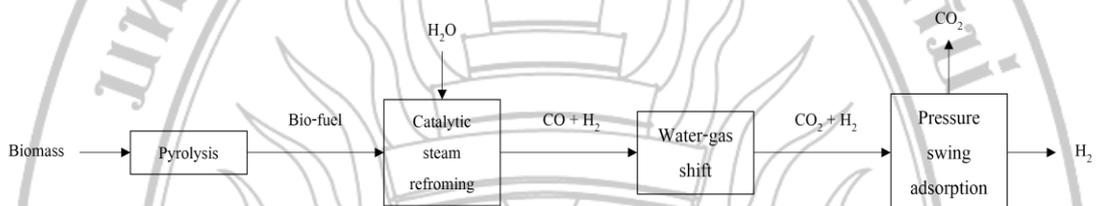
ที่มา : นีโคไลดิส และพุลลิคัส (Nikolaidis & Poullikkas, 2017)

การผลิตไฮโดรเจนมีหลากหลายวิธี โดยทั่วไปการผลิตไฮโดรเจนสามารถแบ่งออกได้ 4 วิธี ได้แก่ วิธีทางความร้อน วิธีแยกสลายด้วยไฟฟ้า วิธีให้แสงทางไฟฟ้าเคมี วิธีการผลิตไฮโดรเจนโดยชีวภาพ ดังนี้

1. วิธีทางความร้อน (Thermo-chemical technologies)

การเผาไหม้ชีวมวลด้วยกระบวนการไพโรไลซิส (Pyrolysis) ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์ออกมาเป็นของเหลวที่เรียกว่าน้ำมันชีวภาพ ได้ของแข็งที่เรียกว่าถ่านชีวภาพและได้ก๊าซสังเคราะห์ เช่น ก๊าซมีเทน ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ สำหรับการผลิตไฮโดรเจนเกิดจากปฏิกิริยา

การเปลี่ยนน้ำเป็นก๊าซ (Water-gas shift; WGS) ซึ่งจะถูกนำไปใช้หลังจากเปลี่ยนคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และไฮโดรเจน (H₂) จากนั้นจะได้ไฮโดรเจนบริสุทธิ์โดยจะแยกก๊าซออกจากไฮโดรเจนด้วยการดูดซับแรงดันสวิง (Pressure swing adsorption: PSA) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้ในการแยกก๊าซบางชนิดออกจากของผสมของก๊าซ ขั้นตอนของกระบวนการไพโรไลซิสชีวมวลแสดงในภาพที่ 2.3 โดยวิธีนี้มีประสิทธิภาพสูงและสามารถผลิตไฮโดรเจนได้เป็นจำนวนมาก อย่างไรก็ตาม วิธีการผลิตนี้มีข้อเสีย คือ ต้นทุนสูงและเกิดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) และมลพิษต่าง ๆ ซึ่งมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในระยะยาว นิโคไลดิส และพุลลิกกัส (Nikolaidis & Poullikkas, 2017)

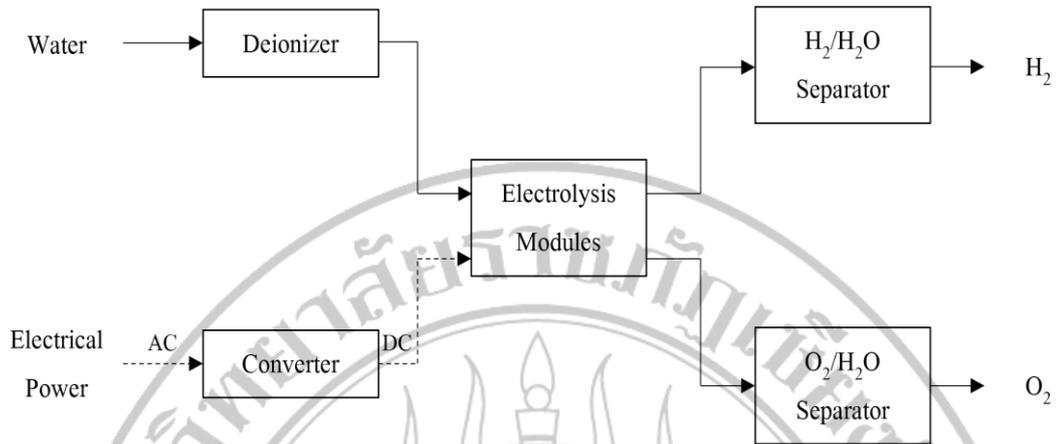


ภาพที่ 2.2 แผนภาพกระบวนการไพโรไลซิสชีวมวล

ที่มา : นิโคไลดิส และพุลลิกกัส (Nikolaidis & Poullikkas, 2017)

2. วิธีแยกน้ำด้วยไฟฟ้า (Electrolysis)

การแยกน้ำด้วยกระบวนการเคมีไฟฟ้าเป็นวิธีที่เปิดเผยและเป็นที่ยอมรับกันดี ซึ่งเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพที่สุดในการแยกน้ำ อย่างไรก็ตาม ปฏิกริยาที่แยกชั้นนี้เป็นพวกเอนโดเทอร์มิกมาก ดังนั้นความต้องการในพลังงานที่จำเป็นจะถูกให้เสนอโดยไฟฟ้า หน่วยเคมีไฟฟ้าประเภทปกติ หรือเครื่องแยกไฟฟ้า ซึ่งแสดงในภาพที่ 2.4 ประกอบด้วย แคโทดและแอโนดที่แช่อยู่ในอิเล็กโทรไลต์ โดยทั่วไปเมื่อกระแสไฟฟ้าถูกนำไปใช้ น้ำจะแตกตัวและผลิตไฮโดรเจนที่แคโทด ในขณะที่ออกซิเจนจะถูกสร้างขึ้นที่แอโนด ซึ่งสามารถเก็บไฮโดรเจนได้เพื่อนำไปใช้งานต่อได้ ดังแสดงในภาพที่ 2.4 วิธีการผลิตนี้เป็นวิธีการที่สะอาดและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม แต่ต้องใช้พลังงานไฟฟ้ามากถึงจะสามารถผลิตไฮโดรเจนได้ในปริมาณมากขึ้น ดังนั้น ต้นทุนการผลิตโดยวิธีนี้จะสูงกว่าวิธีการผลิตโดยวิธีอื่น ๆ นิโคไลดิสและพุลลิกกัส (Nikolaidis & Poullikkas, 2017)

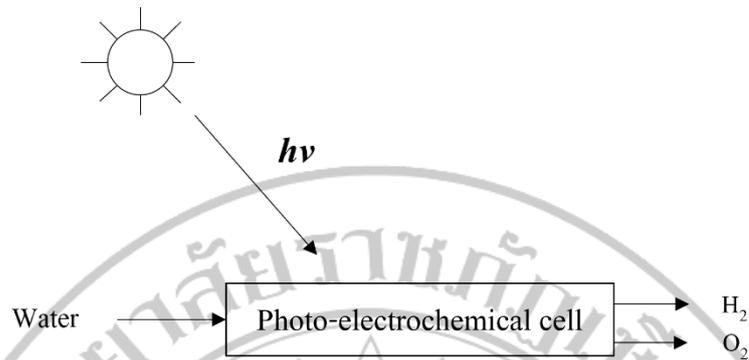


ภาพที่ 2.3 แผนภาพกระบวนการอิเล็กโทรลิซิสของน้ำ

ที่มา : นิโคไลดิส และพุลลิกคัส (Nikolaidis & Poullikkas, 2017)

3. วิธีให้แสงทางไฟฟ้าเคมี (Photo-Electrolytic Technologies)

วิธีการผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยวิธีให้แสงทางเคมีเป็นกระบวนการทั่วไปที่เกิดขึ้นเมื่อพลังงานของแสงที่มองเห็นได้ (Visible Light) ถูกดูดซับด้วยตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยแสง (Photocatalysts) จากนั้นนำไปใช้สลายน้ำเป็นไฮโดรเจนและออกซิเจน ซึ่งในกระบวนการนี้ แสงอาทิตย์จะถูกดูดซับผ่านวัสดุกึ่งตัวนำ (Semiconductor) บางประเภท และกระบวนการแยกน้ำจะคล้ายกันกับกระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้า โดยเฉพาะถ้าโฟตอน (Photon) ที่มีพลังงานมากกว่าหรือเท่ากับพลังงานช่องว่าง (Band Gap) ของวัสดุกึ่งตัวนำสัมพันธ์กับพื้นผิวแอนโนด คู่ของอิเล็กตรอน-หลุม (Electron Hole) จะถูกสร้างขึ้นและแยกออกจากกันโดยสนามไฟฟ้าระหว่างวัสดุกึ่งตัวนำและอิเล็กโทรไลต์ หลุมยังคงอยู่ที่แอนโนดที่มีความสามารถในการแยกน้ำเป็นไฮโดรเจนไอออน (H^+) ซึ่งจะเคลื่อนที่ผ่านอิเล็กโทรไลต์ไปยังแคโทด และออกซิเจนที่ยังคงอยู่กับน้ำ ในขณะที่อิเล็กตรอนไหลผ่านวงจรภายนอกไปยังแคโทด ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนไอออน เพื่อสร้างไฮโดรเจน ดังแสดงในภาพที่ 2.5 การแตกตัวของน้ำด้วยวิธีนี้มีประสิทธิภาพอยู่ที่ร้อยละ 8-14 โดยความสามารถของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นตัวกำหนดประสิทธิภาพของกระบวนการ แต่ข้อเสียของวิธีการนี้คือ ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ต้องทนต่อการกัดกร่อนในน้ำและมีประสิทธิภาพในการผลิตไฮโดรเจนน้อยกว่าวิธีอื่น ๆ นิโคไลดิส และพุลลิกคัส (Nikolaidis & Poullikkas, 2017)



ภาพที่ 2.4 แผนภาพกระบวนการให้แสงทางไฟฟ้าเคมี
ที่มา นิโคไลดิส และพุลลิกคัส (Nikolaidis & Poullikkas, (2017)

4. วิธีการผลิตไฮโดรเจนทางชีวภาพ (Biohydrogen Production)

การผลิตไฮโดรเจนที่มีความบริสุทธิ์สูงด้วยกระบวนการทางชีวภาพผ่านสิ่งมีชีวิต เช่น จุลินทรีย์ และสารตั้งต้นหลักของกระบวนการ คือ น้ำของเสียอินทรีย์ (Organic Waste) หรือชีวมวล การผลิตไฮโดรเจนชีวภาพจะใช้เอนไซม์ (Enzyme) หรือสารประกอบจากโปรตีนช่วยเร่งปฏิกิริยาจากจุลินทรีย์ที่มีการใช้งานในกระบวนการ เช่น สาหร่าย (Algae) แบคทีเรีย (Bacteria) หรืออาร์เคีย (Archaea) โดยการผลิตไฮโดรเจนชีวภาพมีการจำแนกเป็น 2 แบบ ได้แก่ การผลิตไฮโดรเจนโดยกระบวนการหมักแบบใช้แสง และการผลิตไฮโดรเจนโดยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสง

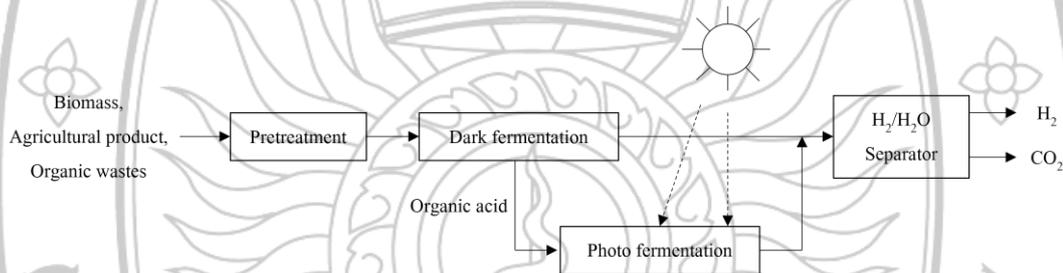
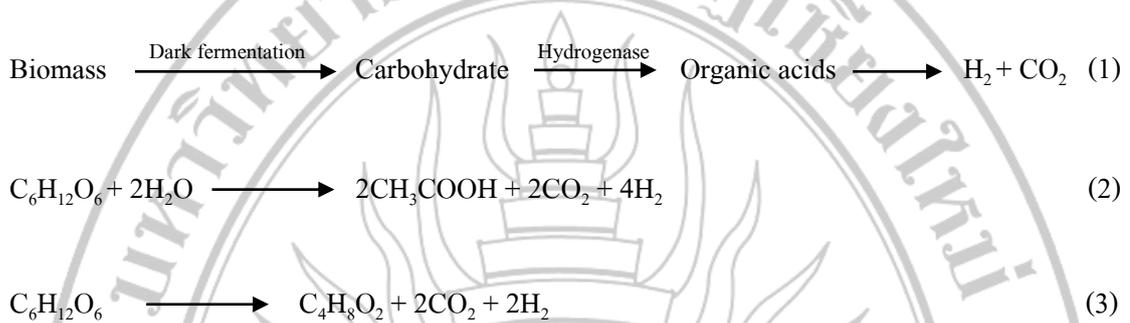
4.1 การผลิตไฮโดรเจนโดยกระบวนการหมักแบบใช้แสง (Photo fermentation)

กระบวนการทางชีวเคมีที่ใช้สิ่งมีชีวิตเป็นตัวกลางเพื่อเปลี่ยนแปลงพลังงานแสงเป็นพลังงานเคมีเพื่อผลิตไฮโดรเจน มีวิธีการผลิตไฮโดรเจนโดยการแยกสลายด้วยแสงทางตรงและทางอ้อม การแยกสลายด้วยแสงทางตรงพบมากในสาหร่ายสีเขียวและการแยกสลายด้วยแสงทางอ้อมพบมากในสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน การใช้งานเชิงอุตสาหกรรมของวิธีการผลิตไฮโดรเจนผ่านการสังเคราะห์ด้วยแสงอยู่ในข้อจำกัดหลัก เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายในการผลิตที่สูง ดังนั้น การใช้สิ่งมีชีวิตเป็นตัวกลางในการผลิตไฮโดรเจนอาจจะมีความเป็นไปได้ต่อไปในอนาคตเมื่อมีการพัฒนาเทคโนโลยีและลดต้นทุนการผลิตลงได้

4.2 การผลิตไฮโดรเจนโดยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสง (Dark fermentation)

การผลิตไบโอไฮโดรเจนด้วยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงจะเกิดในแบคทีเรียแบบไม่ใช้ออกซิเจน ดังสมการที่ (1) ซึ่งมีเอนไซม์ไฮโดรจีเนส (Hydrogenase) และสามารถใช้อาหารตั้งต้นประเภทคาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate) เช่น น้ำตาลกลูโคส ($C_6H_{12}O_6$) ชีวมวล (Biomass)

วัสดุทางการเกษตร ของเสียจากการเกษตรและโรงงานอุตสาหกรรม ในสถานะไม่ใช่แสง เพื่อการผลิตไฮโดรเจน และมีผลพลอยได้เป็นสารอินทรีย์ต่าง ๆ เช่น กรดอะซิติก (CH₃COOH) กรดบิวทีริก (C₄H₈O₂) และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ในกรณีที่ได้อะซิติกเป็นผลพลอยได้ กลูโคส 1 โมล จะสามารถผลิตไฮโดรเจนได้สูงสุด 4 โมล ดังสมการที่ (2) แต่ถ้าหากได้กรดบิวทีริก เป็นผลพลอยได้ จะได้ไฮโดรเจนสูงสุด 2 โมล ดังสมการที่ (3)



ภาพที่ 2.5 แผนภาพของกระบวนการหมักโดยแสงและไม่ใช่แสง
ที่มา : นิโคไลดิส และพุลลิคัส (Nikolaidis & Poullikkas, (2017)

ตารางที่ 2.2 ข้อดี-ข้อเสียของกระบวนการผลิตไฮโดรเจนด้วยวิธีต่าง ๆ

วิธีการผลิตไฮโดรเจน	ข้อดี	ข้อเสีย
วิธีทางความร้อน	- เป็นวิธีที่ใช้กันอย่างแพร่หลาย - ผลิตในอุตสาหกรรมขนาดใหญ่	- ไฮโดรเจนที่ได้ อาจจะมีสารปนเปื้อน - เกิดคาร์บอนไดออกไซด์สูง
วิธีแยกน้ำด้วยไฟฟ้า	- สามารถใช้พลังงานหมุนเวียนเป็นไฟฟ้าได้ - ไม่ปล่อยก๊าซเรือนกระจก	- ประสิทธิภาพต่ำ - ใช้พลังงานสูง - ต้นทุนการผลิตสูง

ตารางที่ 2.2 (ต่อ)

วิธีการผลิตไฮโดรเจน	ข้อดี	ข้อเสีย
วิธีให้แสงด้วยไฟฟ้าเคมี	<ul style="list-style-type: none"> - ได้ไฮโดรเจนที่มีความบริสุทธิ์ - ไม่ปล่อยก๊าซเรือนกระจก 	<ul style="list-style-type: none"> - ประสิทธิภาพต่ำ - ผลิตไฮโดรเจนได้น้อย - ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ต้องทนต่อการกัดกร่อนในน้ำ
วิธีทางชีวภาพ	<ul style="list-style-type: none"> - ผลิตไฮโดรเจนได้ในปริมาณมาก - สามารถใช้สารตั้งต้นได้หลากหลาย - ไม่ปล่อยก๊าซเรือนกระจก 	<ul style="list-style-type: none"> - อัตราการผลิตช้า

จากกระบวนการผลิตไฮโดรเจนทั้ง 4 วิธี ที่ได้กล่าวมาข้างต้น และการสรุปข้อดีข้อเสียของกระบวนการผลิตไฮโดรเจนดังตารางที่ 2.2 วิธีการผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการชีวภาพโดยการหมักแบบไม่ใช้แสงได้ถูกยกขึ้นเป็นวิธีที่น่าสนใจของงานวิจัยนี้ เนื่องจากมีความเป็นไปได้ในการพัฒนาและปรับปรุงการผลิตไฮโดรเจนที่สามารถช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและเสริมสร้างการใช้พลังงานที่ยั่งยืน นอกจากนี้ วิธีการนี้ยังสามารถนำไปสู่การนำเสนอแนวคิดใหม่ในการใช้วัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตไฮโดรเจนที่หลากหลาย ซึ่งจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตพลังงานที่ยั่งยืน ดังนั้นในงานวิจัยนี้มุ่งเน้นที่จะเพิ่มความสามารถในการผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสง เพื่อเป็นแนวทางในการใช้พลังงานที่ยั่งยืนและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมในชุมชน

กระบวนการผลิตไฮโดรเจนด้วยการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน

สารอินทรีย์ที่มีอยู่ในน้ำเสียจะเป็นสารประกอบจำพวกโปรตีน คาร์โบไฮเดรตและไขมัน ทั้งในรูปของของแข็งและสารละลาย กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียแบบไม่ใช้อากาศแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1: Hydrolysis

ขั้นตอนที่ 2: Acidogenesis

ขั้นตอนที่ 3: Acetogenesis

ขั้นตอนที่ 4: Methanogenesis

โดยอาจแบ่งขั้นตอนในการย่อยสลายได้เป็นสองระดับตามผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการย่อยสลาย คือ การย่อยสลายแบบไม่มีการสร้างก๊าซมีเทน และการย่อยสลายแบบที่มีการสร้างก๊าซมีเทน

1. การย่อยสลายแบบไม่มีการสร้างก๊าซมีเทน

ในกระบวนการสร้างก๊าซมีเทนจะต้องทำการเปลี่ยน โมเลกุลขนาดใหญ่ของสารอินทรีย์ จำพวก โปรตีน คาร์โบไฮเดรตและไขมัน ให้มีขนาดเล็กลงจนถึงขั้นของกรดไขมันระเหยง่ายขนาดเล็ก เช่น กรดอะซิติก (Acetic Acid, CH_3COOH) ซึ่งขั้นตอนนี้เรียกรวมกันว่า เป็นขั้นตอนการสร้างกรด โดยการสร้างกรดแบ่งได้เป็น 2 ส่วน คือ

1.1 กระบวนการที่เกิดขึ้นภายนอกเซลล์ ได้แก่ ขั้นตอนที่ 1: ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) สารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีนและไขมัน จะถูกแบคทีเรียย่อยสลาย โดยใช้เอนไซม์ที่ถูกปล่อยออกมาภายนอกเซลล์ให้กลายเป็นสารประกอบเชิงเดี่ยว

1.2 กระบวนการที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ ได้แก่ ขั้นตอนที่ 2: อะซิโดจีเนซิส (Acidogenesis) และขั้นตอนที่ 3: อะซิโตจีเนซิส (Acetogenesis)

ขั้นตอนที่ 2 การย่อยสลายในขั้นตอนนี้จะใช้สารที่ได้จากการย่อยสลายในขั้นตอนแรกเป็นสารตั้งต้น สำหรับแบคทีเรียประเภทสร้างกรด โดยแบคทีเรียกลุ่มนี้จะเปลี่ยนสารอาหารดังกล่าวให้เป็นกรดอินทรีย์ชนิดโมเลกุลเล็ก เช่น กรดอะซิติก กรดไพรูโวนิก กรดวาเลอริก และกรดแลคติก โดยกรดที่เกิดขึ้นทั้งหมดมีสัดส่วนของกรดอะซิติกสูงสุด และมีการเกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นในขั้นตอนนี้ด้วย

การกำหนดชนิดของผลผลิตในขั้นตอนนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัย 2 ประการ คือ ชนิดของสารตั้งต้นซึ่งได้จากขั้นตอนที่ 1 และความดันย่อยของก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen Partial Pressure) เช่น ในสถานะที่ความดันย่อยของก๊าซไฮโดรเจนมีค่าต่ำ (Low Hydrogen Partial Pressure) ผลผลิตที่ได้ คือ กรดอะซิติก ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ แต่ถ้าในสถานะที่ความดันย่อยของก๊าซไฮโดรเจนมีค่าสูง (High Hydrogen Partial Pressure) ผลผลิตที่ได้จะอยู่ในรูปของกรดอะซิติก กรดไพรูโวนิก คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน ดังสมการที่ (4) และ (5)

สถานะ Low Hydrogen Partial Pressure

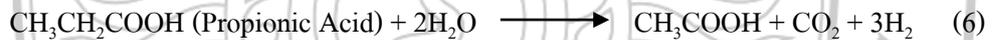


สภาวะ High Hydrogen Partial Pressure



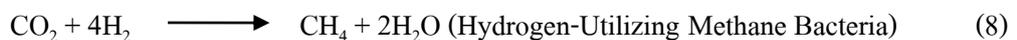
ขั้นตอนที่ 3 เนื่องจากแบคทีเรียสร้างมีเทนต้องการสารอาหารที่มีความเฉพาะเจาะจงสูง โดยสารอาหารที่แบคทีเรียสร้างมีเทนสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ประกอบด้วย กรดอะซิติก กรดฟอร์มิก ไฮโดรเจน เมทานอล และเมธิลามีน แต่ไม่สามารถใช้กรดไขมันระเหยง่ายที่มีคาร์บอนอะตอมเกินกว่าสองอะตอม เช่น กรดโพรไพโอนิก

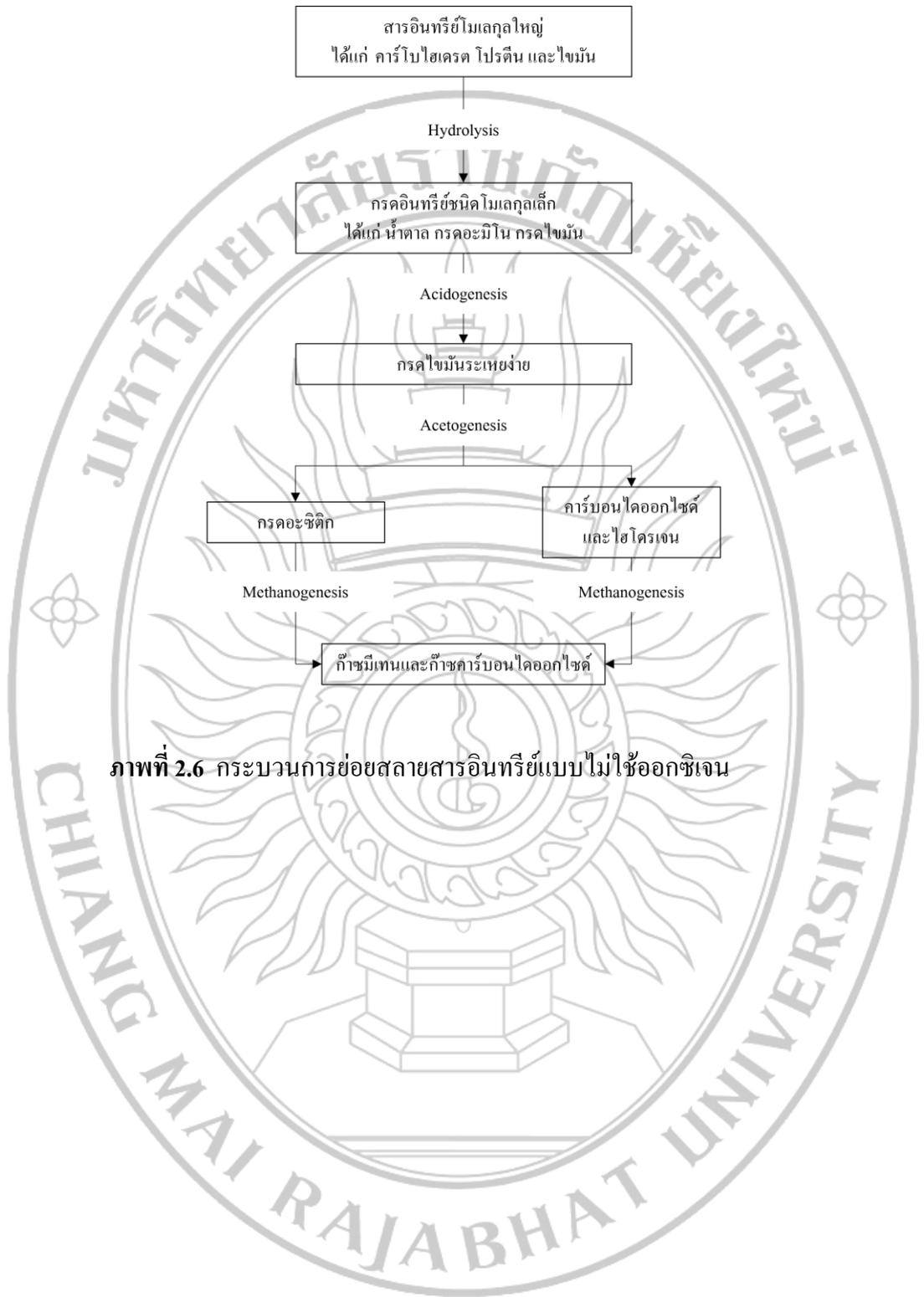
กรดบิวทิริก เป็นสารอาหารในการผลิตก๊าซมีเทนโดยตรงได้ ทำให้เกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ในระบบ เพื่อให้ระบบอยู่ในสภาวะที่เหมาะสมต่อการดำรงชีพของแบคทีเรียจึงต้องทำการย่อยสลายกรดอินทรีย์เหล่านั้นให้มีอะตอมคาร์บอนลดลงเพื่อให้ปฏิกิริยาดำเนินต่อไป แบคทีเรียกลุ่มหนึ่งที่สามารถย่อยสลายกรดไขมันระเหยง่ายที่มีคาร์บอนอะตอมมากกว่า 2 อะตอมให้เป็นกรดอะซิติก ได้แก่ แบคทีเรียที่สร้างไฮโดรเจน (Hydrogen Producing Acetogenic Bacteria) ผลผลิตที่ได้ประกอบด้วยกรดอะซิติก คาร์บอนไดออกไซด์ และไฮโดรเจน โดยปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้ดีภายใต้สภาวะไฮโดรเจนมีค่าต่ำ (Low Hydrogen Partial Pressure) ดังสมการที่ (6)



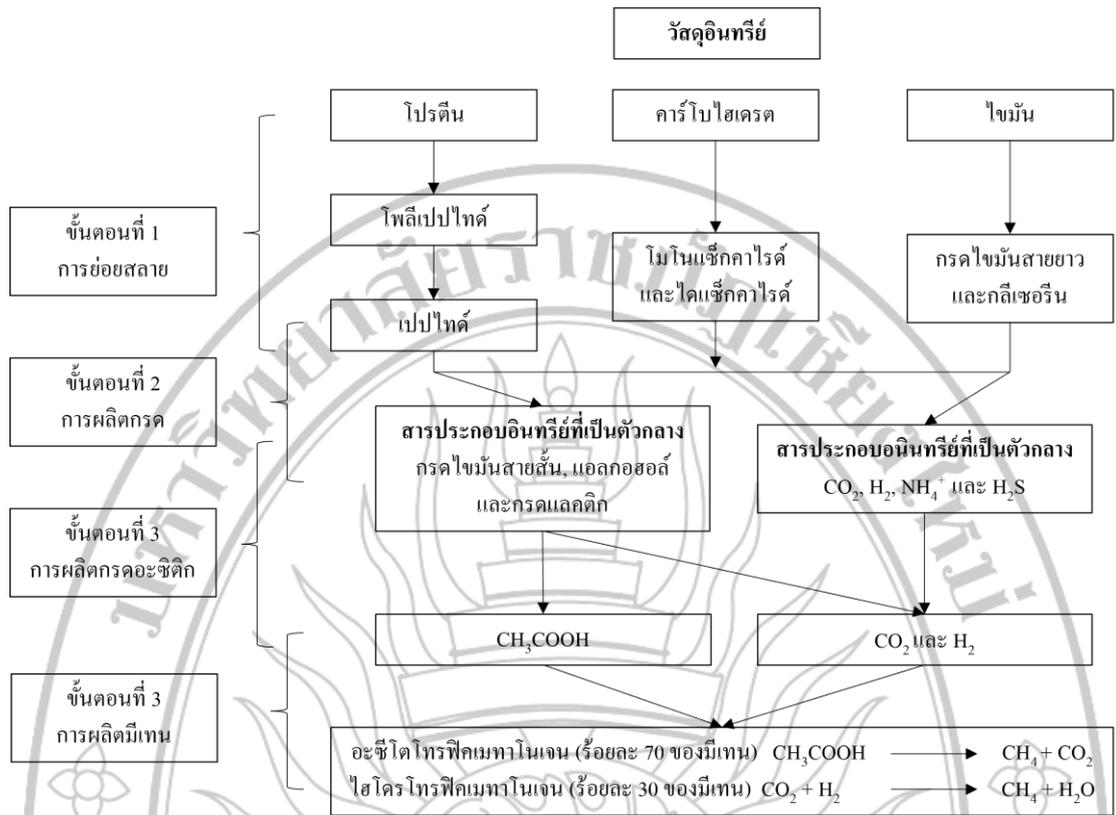
2. การย่อยสลายแบบที่มีการสร้างก๊าซมีเทน

กระบวนการนี้เกิดขึ้นเฉพาะขั้นตอนที่ 4: เมทาโนจีเนซิส (Methanogenesis) โดยที่กรดอินทรีย์ โมเลกุลเล็ก ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจน ที่เกิดจากขั้นตอนการสร้างกรดจะถูกเปลี่ยนเป็นก๊าซมีเทน และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยแบคทีเรียชนิดสร้างก๊าซมีเทน โดยก๊าซมีเทนเกิดได้ 2 แบบ คือ เกิดจากการเปลี่ยนกรดอินทรีย์ไปเป็นก๊าซมีเทน โดยแบคทีเรียชนิดสร้างก๊าซมีเทน (Methane Forming Bacteria) ซึ่งก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นจากขั้นตอนนี้มีปริมาณร้อยละ 70 ของก๊าซมีเทนที่สามารถเกิดขึ้นได้ในระบบ และเกิดจากการรีดิวซ์ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจนให้กลายเป็นก๊าซมีเทน โดยแบคทีเรียประเภท Hydrogen-Utilizing Methane Bacteria ดังสมการที่ (7) และ (8)





ภาพที่ 2.6 กระบวนการย่อยสลายสารอินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน



ภาพที่ 2.7 ขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์โดยแบคทีเรียในสภาวะไร้อากาศ

จากขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์ดังภาพที่ 2.7 แบคทีเรียกลุ่ม *Clostridium spp.* จะทำงานในขั้นตอนการสร้างกรด หรือเรียกกระบวนการนี้ว่า กระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสง ในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงนี้ทำให้ได้ผลไฮโดรเจนถึง 4 โมล ต่อ 1 โมลของกลูโคส โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายกลูโคส 1 โมล คือ อะซิเตท 2 โมล และไฮโดรเจน 4 โมล กิเมียร์ และคนอื่น ๆ (Ghimire et al., 2015)

จุลินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนสามารถใช้คาร์โบไฮเดรตเป็นสารตั้งต้นในการผลิตไฮโดรเจนในกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงได้ และมีผลพลอยได้เป็นสารอินทรีย์ต่าง ๆ เช่น กรดอะซิติก กรดบิวทิริกและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยกลูโคส 1 โมล 3 ารผลิตไฮโดรเจนได้สูงสุด 4 โมล เมื่อได้กรดอะซิติกเป็นผลพลอยได้ แต่ถ้าได้กรดบิวทิริกเป็นผลพลอยได้ จะได้ไฮโดรเจนสูงสุด 2 โมล นอกจากนี้ ยังมีสารตั้งต้นอีกหลายประเภทที่ใช้ได้ เช่น ชีวมวล ผลิตภัณฑ์ทางการเกษตร และของเสียอินทรีย์ต่าง ๆ เป็นต้น

จุลินทรีย์หลายชนิดสามารถผลิตไฮโดรเจนได้จากของเสียอินทรีย์ต่าง ๆ ด้วยการผลิตที่ผ่านกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสง เช่น *C. butyricum*, *C. thermolacticum*, *C. pasteurianum*, *C. paraputrificum* M-21, *C. bifermentans* วันนี้เป็นจุลินทรีย์ที่อาศัยในสภาพไร้ออกซิเจนและมีการสร้างสปอร์สำหรับการหมักแบบกะ จุลินทรีย์ในกลุ่ม *Clostridium* จะผลิตไฮโดรเจนในช่วงที่เซลล์มีการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว หลังจากนั้นในช่วงที่จำนวนเซลล์ไม่มีการเปลี่ยนแปลง จุลินทรีย์ในกลุ่มนี้จะเปลี่ยนการผลิตไฮโดรเจนเป็นการผลิตตัวทำลายอินทรีย์แทน

การผลิตไฮโดรเจนโดยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงโดยกลุ่มจุลินทรีย์

กลุ่มจุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการผลิตไฮโดรเจนสามารถพบได้ทั่วไปในสิ่งแวดล้อม เช่น ในดิน ปุ๋ยคอก ปุ๋ยหมัก ตะกอนจากระบบน้ำเสีย เป็นต้น ซึ่งกลุ่มจุลินทรีย์เหล่านี้ถูกนำไปใช้ในการผลิตไฮโดรเจนโดยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสงกันอย่างแพร่หลาย ดังแสดงในตารางที่ 2.3 การผลิตไฮโดรเจนโดยกลุ่มจุลินทรีย์มีข้อดี คือ การควบคุมกระบวนการหมักทำได้ง่ายกว่าการใช้จุลินทรีย์สายพันธุ์เดี่ยว ใช้ต้นทุนต่ำ ใช้พลังงานน้อย และยังสามารถใช้วัตถุดิบได้หลากหลาย แต่อย่างไรก็ตาม การใช้กลุ่มจุลินทรีย์ในการผลิตไฮโดรเจนมีข้อเสียตรงที่อาจจะมีกลุ่มจุลินทรีย์ที่ผลิตมีเทนปะปนอยู่ ดังนั้นจึงต้องกำจัดจุลินทรีย์ที่ใช้ไฮโดรเจนออกไป โดยในปัจจุบันมีการใช้วิธีการต่าง ๆ ในการกำจัดจุลินทรีย์ดังกล่าวออกไป ได้แก่ การใช้ความร้อน การใช้สภาวะที่เป็นกรด การใช้สภาวะที่เป็นด่างและการใช้สารเคมี

ตารางที่ 2.3 การใช้กลุ่มจุลินทรีย์จากแหล่งต่าง ๆ เพื่อการผลิตไฮโดรเจน

แหล่งจุลินทรีย์	ชนิดจุลินทรีย์	สารตั้งต้น	ปริมาณไฮโดรเจนต่อโมลกลูโคส	อ้างอิง
น้ำเสียจากโรงงานผลิตเอทานอล	Enterobacter cloacae	กลูโคส	3.1	เฉิน, จาง และหวาง (Chen, Zhang & Wang, 2018)
น้ำเสียจากโรงงานผลิตกระดาษ	Klebsiella pneumoniae	กลูโคส	2.5	ลู, จาง และหวาง (Liu, Zhang & Wang 2019)
กากตะกอนจากน้ำเสีย	Mixed culture	กลูโคส	2.2	ซัน, จาง และหวาง (Sun, Zhang & Wang, 2020)
มูลสัตว์	Clostridium butyricum	กลูโคส	2.8	หวาง, จาง และหวาง (Wang, Zhang & Wang, 2017)
เศษซากพืช	Thermoanaerobacter saccharolyticum	เซลลูโลส	3.5	หยาง, จาง และหวาง (Yang, Zhang & Wang, 2021)

ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตไฮโดรเจน

1. สารตั้งต้นหรือสับสเตรต (Substrate)

สารตั้งต้นที่นิยมนำไปผลิตไฮโดรเจน กลูโคส ให้ผลผลิตไฮโดรเจนอยู่ระหว่าง 1.6-2.4 โมลต่อกลูโคส ซูโครส ให้ผลผลิตไฮโดรเจนอยู่ระหว่าง 2.07-6.00 โมลต่อกลูโคสและไซโลส ให้ผลผลิตไฮโดรเจนอยู่ระหว่าง 0.73-2.25 โมลต่อกลูโคส นอกจากนี้ยังมีการนำสารตั้งต้นจากน้ำเสีย เช่น น้ำเสียจากระบบการผลิตอาหาร ของเสียที่เป็นของแข็ง เช่น เศษอาหาร และของเสียจากข้าวโพด ซึ่งได้ถูกนำมาใช้สำหรับผลิตไฮโดรเจนเช่นกัน คาร์โบไฮเดรตส่วนใหญ่เป็นน้ำตาลซึ่งถูกใช้เป็นแหล่งคาร์บอนในกระบวนการหมัก มีผลทำให้เกิดกรดอินทรีย์ร่วมกับไฮโดรเจน

สารตั้งต้นบางชนิด ได้แก่ ชีวมวลที่มีองค์ประกอบของวัสดุลิกโนเซลลูโลสขนาดใหญ่หรือมีส่วนประกอบของลิกนินในปริมาณมากไม่สามารถนำมาใช้ในการผลิตไฮโดรเจนได้เนื่องจากมีโครงสร้างที่ซับซ้อนทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถนำมาใช้ผลิตไฮโดรเจนได้โดยตรงแต่อย่างไรก็ตาม หากมีการปรับสภาพสารตั้งต้นด้วยวิธีการต่าง ๆ เช่น การปรับสภาพด้วยกรด การปรับสภาพด้วยด่าง การระเบิดด้วยไอน้ำ การย่อยด้วยเอนไซม์ก็จะทำให้สารตั้งต้นมีสมบัติที่สามารถทำให้จุลินทรีย์เข้าไปผลิตไฮโดรเจนได้

2. ไอออนโลหะ (Metal ion)

ไอออนโลหะเป็นองค์ประกอบสำคัญของเอนไซม์ไฮโดรจีเนสและเอนไซม์อื่น ๆ เนื่องจาก เหล็กมีความสำคัญสำหรับการสลายอาหารของแบคทีเรีย ซึ่งความเข้มข้นของไอออนโลหะอาจจะไม่เพียงพอที่จะรักษาการทำงานของจุลินทรีย์ได้ในระดับเซลล์ สารประกอบไอออนโลหะจะมีผลกระทบบางอย่างเกี่ยวกับการทำงานและจำนวนของแบคทีเรียที่ผลิตไฮโดรเจน ตัวอย่างเช่น ปัญหาการขาดไอออนโลหะอาจมีผลต่อการเจริญเติบโตและความสามารถในการผลิตไฮโดรเจน การเพิ่มไอออนโลหะสามารถเพิ่มการทำงานที่เฉพาะเจาะจงของเอนไซม์ และทำให้ความสามารถในการผลิตไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น

3. ไนโตรเจนและฟอสเฟต (Nitrogen and Phosphate)

ไนโตรเจนก็เป็นปัจจัยที่สำคัญสำหรับการสังเคราะห์โปรตีน กรดนิวคลีอิก และเอนไซม์ ซึ่งไนโตรเจนเป็นสารอาหารที่สำคัญที่สุดสำหรับแบคทีเรียที่ผลิตไฮโดรเจน หวังและหวาน (Wang & Wan, 2008) การได้รับไนโตรเจนในระดับที่เหมาะสมมีผลต่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่ผลิตไฮโดรเจน ค่าสารอาหารรวมทั้งความจุบัพเฟอร์ของฟอสเฟตในช่วงที่เหมาะสม ถ้าระดับความเข้มข้นของฟอสเฟตที่สูงมากอาจลดประสิทธิภาพในการผลิตไฮโดรเจนได้

4. อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (Carbon to Nitrogen Ratio)

คาร์บอนและไนโตรเจนมีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของจุลินทรีย์ ดังนั้นอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมสามารถส่งเสริมการเจริญของจุลินทรีย์และเกิดผลผลิตได้สูง การผลิตไฮโดรเจน การผลิตไฮโดรเจนจากกลุ่มจุลินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจนผสมกับน้ำตาลซูโครสเข้มข้น 20 กรัมซีโอดีต่อลิตร เป็นสารตั้งต้นและแปรผันอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนระหว่าง 40-130 พบว่าอัตราส่วนคาร์บอนไนโตรเจนที่เหมาะสมต่อการผลิตให้ไฮโดรเจนคือ 47 สามารถให้ผลผลิตไฮโดรเจนเท่ากับ 4.80 โมลไฮโดรเจนต่อโมลซูโครส แต่ถ้าเพิ่มอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเป็น 98 ทำให้การผลิตให้ผลผลิตไฮโดรเจนลดลงเท่ากับ 4.80 โมลไฮโดรเจนต่อโมลซูโครส แสดงให้เห็นว่าอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่สูงส่งผลให้อัตราเมทาบอลิซึมของจุลินทรีย์ช้า และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่ต่ำจะทำให้ปริมาณของแอมโมเนียไนโตรเจนที่สูง ซึ่งทำให้เกิดการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ที่มีความจำเพาะต่อการผลิตไฮโดรเจน

ตารางที่ 2.4 ปริมาณไนโตรเจนที่เหมาะสมต่อการผลิตไฮโดรเจน

จุลินทรีย์	สารตั้งต้น	ความเข้มข้นของไนโตรเจน		ผลผลิตไฮโดรเจน	ที่มา
		ค่าที่ศึกษา	ค่าที่เหมาะสม		
<i>C. butyricum</i> CWBI1009	กลูโคส	0.025-2.3 กรัม ไนโตรเจน ต่อลิตร	0.062 กรัม ไนโตรเจน ต่อลิตร	1.43 โมล ต่อโมลกลู โคส	แฮมิลตัน และคนอื่น ๆ (Hamilton et al., 2018)
<i>C. butyricum</i> RAK25832	กลูโคส	3.33-53.33 กรัมต่อลิตร	26.67 กรัม ต่อลิตร	1.81 โมล ต่อโมลกลู โคส	อารี และคนอื่น ๆ (Aly et al., 2018)
<i>E. Coli</i>	กลูโคส	0.02 กรัม ไนโตรเจน ต่อลิตร	0.01 กรัม ไนโตรเจน ต่อลิตร	1.7 โมลต่อ โมลกลู โคส	บิซาลลอน และคนอื่น ๆ (Bisallon et al., 2006)

5. อุณหภูมิ (Temperature)

อุณหภูมิมีผลต่อการผลิตไฮโดรเจน คือ เมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการหมัก ผลผลิตไฮโดรเจนจะเพิ่มขึ้น แต่ถ้าเพิ่มอุณหภูมิที่สูงเกินไปผลผลิตไฮโดรเจนจะลดลง แต่ทั้งนี้ก็ขึ้นอยู่กับชนิดของจุลินทรีย์ด้วย ดังแสดงในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.5 การศึกษาอุณหภูมิที่เหมาะสมในการผลิตไฮโดรเจน

จุลินทรีย์	สารตั้งต้น	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)		ผลผลิตไฮโดรเจน	ที่มา
		ค่าที่ศึกษา	ค่าที่เหมาะสม		
<i>Bacillus anthracis</i> PUNAJAN 1	แมนโนส	20-50	35	2.42 โมลต่อโมลแมนโนส	ก้อง และคนอื่น ๆ (Kong et al., 2017)
<i>T. thermosaccharolyticum</i> KKU19	ไซโลส	35-70	60	2.09 โมลต่อโมลไซโลส	คำทิพย์ และเรืองแสง (Khamtib & Reungsang, 2012)
มูลวัว	มูลวัว	37-75	60	743 มิลลิตรต่อกิโลกรัมวัว	โยโกะยามะ และคนอื่น ๆ (Yokoyama et al., 2007)

6. ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

ค่าความเป็นกรด-ด่าง ถือเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่สำคัญต่อการผลิตไฮโดรเจน เนื่องจากค่าความเป็นกรด-ด่างที่สูงหรือต่ำเกินไป ส่งผลโดยตรงต่อการทำงานของเอนไซม์ไฮโดรจีเนสจากการศึกษาเบื้องต้น พบว่า อะซิเตทและบิวทิเรทที่เป็นผลิตภัณฑ์หลักของขั้นตอนการสร้างกรดเป็นสาเหตุให้ค่าความเป็นกรด-ด่างลดลงระหว่างการผลิตไฮโดรเจน ทำให้กระบวนการผลิตไฮโดรเจนถูกยับยั้ง อีกทั้งยังพบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไฮโดรเจนมีค่าเริ่มต้น 4 และ 5 โดยสามารถผลิตไฮโดรเจนสะสมได้เท่ากับ 70.9 และ 117.5 มิลลิโมล ตามลำดับ ทั้งนี้ ในระหว่างการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน สารที่มีโมเลกุลจะถูกย่อยสลายให้มีโมเลกุลขนาด

เล็กในขั้นตอนไฮโดรไลซิส จากนั้นจะเข้าสู่ขั้นตอนการผลิตกรด ซึ่งโมเลกุลเล็ก ๆ นั้นจะถูกเปลี่ยนให้เป็นกรดไขมันระเหยง่าย เช่น กรดบิวทิริก กรดโพรพิโอนิก เป็นต้น จากนั้นจุลินทรีย์อีกกลุ่มหนึ่งจะมาย่อยสลายกรดอินทรีย์เหล่านี้ให้เป็นกรดอะซิติก กรดฟอร์มิก ไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งถ้าหากมีกรดไขมันระเหยง่ายมากเกินไปจะส่งผลต่อการผลิตไฮโดรเจน เพราะกรดไขมันระเหยง่ายมีความสัมพันธ์กับค่าความเป็นกรด-ด่าง คือ เซลล์จุลินทรีย์ไม่สามารถปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างได้ ก็จะทำให้เซลล์แตกและทำให้การผลิตไฮโดรเจนลดลง ดังแสดงในตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.6 ผลของค่าความเป็นกรด-ด่างต่อการผลิตไฮโดรเจน

จุลินทรีย์	สารตั้งต้น	ค่าความเป็นกรด-ด่าง		ผลผลิตไฮโดรเจน	ที่มา
		ค่าที่ศึกษา	ค่าที่เหมาะสม		
ตะกอนเร่ง	ฟางข้าว	4.0-5.5	5.01	14.54 นอร์มอล มิลลิลิตรต่อกรัมของแข็งระเหยได้	อาเลมาห์ดี และคนอื่น ๆ (Alemahdi et al., 2015)
วัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรม การเกษตร	ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไม่ใช้ออกซิเจน	4.5-7.5	6.0	0.64 โมลต่อโมลกลูโคส	ดาร์เรอติ และคนอื่น ๆ (Dareioti et al., 2014)
มูลวัว	เซลลูโลส	4.0-7.0	4.5	2.80 มิลลิโมลต่อกรัมเซลลูโลส	หลิน และสูง (Lin & Hung, 2008)

7. สารละลายบัฟเฟอร์ (Buffer Solution)

สารละลายบัฟเฟอร์ มีความสำคัญต่อการผลิตไฮโดรเจน คือ ในระหว่างกระบวนการหมักผลิตภัณฑ์ที่ได้ส่วนใหญ่จะเป็นกรด ในการย่อยโปรตีนจะได้กรดอะมิโน และการย่อยไขมันจะได้กรดไขมัน ซึ่งกรดอะมิโนมีสมบัติทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างลดลง จึงจะส่งผลต่อการผลิตไฮโดรเจนดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น ดังนั้นสารละลายบัฟเฟอร์จึงทำหน้าที่ด้านการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่าง

8. ปริมาณหัวเชื้อจุลินทรีย์ (Inoculum)

ปริมาณหัวเชื้อจุลินทรีย์มีผลต่อการผลิตไฮโดรเจน เนื่องจาก ปริมาณหัวเชื้อที่เติมเข้าไปในระบบหมักส่งผลต่อการย่อยของสารตั้งต้น และผลผลิตไฮโดรเจน ดังนั้นการเติมหัวเชื้อในปริมาณที่เหมาะสมจะทำให้เกิดผลิตไฮโดรเจนสูง จากงานวิจัยของหมิงและคนอื่น ๆ (Ming et al., 2008) ได้ผลิตไฮโดรเจนจากเศษอาหารร่วมกับตะกอนเร่งโดยกลุ่มจุลินทรีย์แบบไม่ใช้ออกซิเจน ทำการแปรผันปริมาตรหัวเชื้อระหว่างร้อยละ 5-50 พบว่าปริมาณหัวเชื้อที่เหมาะสมต่อการผลิตไฮโดรเจน คือร้อยละ 50 สามารถให้ผลไฮโดรเจนเท่ากับ 193.85 มิลลิลิตรไฮโดรเจนต่อกรัมของแข็งระเหยได้

การคำนวณที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตไฮโดรเจน

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงวิธีการคำนวณต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิตไฮโดรเจน เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบการดำเนินงานให้มีประสิทธิภาพ โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. การเตรียมแก๊สไฮโดรเจนมาตรฐานเพื่อวิเคราะห์ด้วยวิธีแก๊สโครมาโตกราฟี การเตรียมแก๊สไฮโดรเจนมาตรฐานสามารถเตรียมได้โดยใช้แก๊สไฮโดรเจนมาตรฐานที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ เช่น ความเข้มข้นร้อยละ 0.3 5 10 และ 15 ปริมาตรต่อปริมาตร จากนั้นดูดแก๊สมาตรฐานแต่ละความเข้มข้น โดยใช้ Gas tight syringe ปริมาตร 3 มิลลิลิตร ใส่ในขวดเก็บแก๊ส ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ที่ผ่านการไล่อากาศด้วยแก๊สไนโตรเจนเป็นเวลา 3 นาที แล้วดูดตัวอย่างแก๊สมาตรฐานในขวดเก็บแก๊สปริมาตร 1 มิลลิลิตร นำไปฉีดวิเคราะห์โดยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี จากนั้นจะทราบค่าพื้นที่ใต้กราฟที่ระดับความเข้มข้นต่างๆ จากนั้นนำค่าของพื้นที่ใต้กราฟและความเข้มข้นของแก๊สมาตรฐานไปพล็อตกราฟ และจะได้ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่ใต้กราฟและความเข้มข้นของแก๊สจะได้สมการเส้นตรงดังสมการที่ (9)

$$Y = aX + b \quad (9)$$

โดยที่ a คือ ค่าความชัน
b คือ ค่าคงที่

2. การคำนวณแก๊สไฮโดรเจนสะสมที่ผลิตได้ ณ ความดันและอุณหภูมิที่ใช้ในแต่ละการทดลอง

ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนเป็นค่าพื้นฐานที่สำคัญในการรายงานผลการทดลองที่บ่งบอกถึงประสิทธิภาพการผลิตแก๊สไฮโดรเจนในกระบวนการหมักย่อย โดยขั้นตอนในการคำนวณปริมาตรแก๊สไฮโดรเจนมีดังนี้

2.1 การคำนวณสัดส่วนของแก๊สไฮโดรเจน

$$\text{สัดส่วนของแก๊สไฮโดรเจน (ร้อยละปริมาตรต่อปริมาตร)} = \frac{\text{Peak area} - \text{ค่าคงที่}}{\text{ค่าความชัน}} \quad (10)$$

เมื่อได้สัดส่วนของแก๊สจากสมการที่ 7 จะนำค่าสัดส่วนของแก๊สที่ได้มาคำนวณปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นและปริมาณแก๊สไฮโดรเจนเฉลี่ยในส่วนของ Headspace ณ เวลานั้น ๆ โดยใช้สมการที่ 11 และ 12

2.2 การคำนวณแก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น

$$VGC_{Ht=i} = \frac{\text{ปริมาณแก๊ส ณ เวลา } t \times \text{สัดส่วนของแก๊สไฮโดรเจนสูงสุด ณ เวลา } t}{100} \quad (11)$$

เมื่อ $VGC_{Ht=i}$ คือ ปริมาตรไฮโดรเจนที่วิเคราะห์ ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟี ณ เวลา t เท่ากับ i ชั่วโมง (มิลลิลิตร)

t คือ เวลาที่เก็บตัวอย่าง

2.3 การคำนวณปริมาณแก๊สไฮโดรเจนเฉลี่ยใน Headspace

$$VHE_{Hav} = \frac{(\text{ปริมาณ Haedspace} \times \text{สัดส่วนของแก๊สไฮโดรเจนสูงสุด}) / 100}{\text{จำนวนครั้งในการเก็บตัวอย่างแก๊ส}} \quad (12)$$

เมื่อ $V_{HE_{Hav}}$ คือ ปริมาตรแก๊สไฮโดรเจนเฉลี่ยใน Headspace (มิลลิลิตร)
 จากนั้นนำค่าปริมาณไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นและปริมาณไฮโดรเจนเฉลี่ยในช่องว่าง
 (Headspace) มาคำนวณหาปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้ ณ เวลานั้น ๆ โดยใช้สมการที่ 13

2.4 การคำนวณปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่ผลิตได้ ณ เวลานั้น ๆ

$$V_{Ht=i} = VGC_{Ht=i} + VHE_{Hav} \quad (13)$$

เมื่อ $V_{Ht=i}$ คือ ปริมาตรไฮโดรเจนที่ผลิตได้ ณ เวลา t เท่ากับ i ชั่วโมง (มิลลิลิตร)
 $VGC_{Ht=i}$ คือ ปริมาตรไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น ณ เวลา t เท่ากับ i ชั่วโมง (มิลลิลิตร)
 VHE_{Hav} คือ ปริมาตรแก๊สไฮโดรเจนเฉลี่ยในช่องว่าง (Headspace)

แต่เนื่องจากกระบวนการผลิตแก๊สนั้นเป็นการผลิตแบบสะสมตั้งแต่ชั่วโมงที่ 0 จนถึงสุดกระบวนการหมัก โดยแก๊สที่เกิดขึ้นที่เวลา 12 ชั่วโมง จะเกิดจากการสะสมของแก๊สตั้งแต่ ชั่วโมงที่ 0 ถึง 12 และปริมาตรที่วิเคราะห์ ณ เวลาที่ 24 ชั่วโมง ก็เป็นแก๊สที่เกิดจากการสะสมของ แก๊สตั้งแต่เวลาที่ 0 ถึง 24 ชั่วโมง ดังนั้น การคำนวณปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นจะต้องคำนวณเป็น ปริมาตรสะสม ซึ่งคำนวณโดยสมการ Mass balance equation สมการที่ (14)

2.5 การคำนวณปริมาณแก๊สไฮโดรเจน

$$\text{ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนสะสม (มิลลิลิตร)} = V_{H,i} + V_{H,i-1} \quad (14)$$

เมื่อ $V_{H,i}$ และ $V_{H,i-1}$ คือ ปริมาณไฮโดรเจนสะสมที่เวลาปัจจุบัน (i) และเวลาที่ผ่าน ($i-1$) ตามลำดับ (มิลลิลิตร)

แต่อย่างไรก็ตามในการรายงานผลการทดลองปริมาณแก๊สไฮโดรเจนสะสมจะคิดเทียบ ต่อหน่วย 1 ลิตร ของปริมาตรการหมัก ดังนั้น หากกระบวนการผลิตที่ใช้ปริมาตรหมักน้อยกว่า 1 ลิตร จะต้องมีการคิดกลับเป็นหน่วยต่อลิตรการหมัก โดยใช้สมการที่ (15)

$$\text{ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนสะสม (มิลลิลิตรต่อลิตรขั้วสเตรค)} = V_{H,i} = \frac{V_{H,i} \times 1000 \text{ มิลลิลิตร}}{\text{ปริมาตรการหมัก (มิลลิลิตร)}} \quad (15)$$

ผลการคำนวณแก๊สสะสมในสมการที่ 7 เป็นการรายงานผลปริมาตรปริมาตรแก๊สไฮโดรเจนที่ผลิตได้ ณ ความดันและอุณหภูมิที่ใช้ในการทดลองนั้น ๆ ซึ่งผลดังกล่าวยังสามารถนำไปใช้เปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่น ๆ ได้ เนื่องจากในแต่ละการทดลองจะใช้เวลาและความดันและอุณหภูมิที่แตกต่างกัน ดังนั้น เพื่อใช้เป็นสภาวะการผลิตที่มาตรฐานเดียวกัน จึงจะต้องมีการคำนวณเพื่อเปลี่ยนปริมาตรแก๊สไฮโดรเจนในการทดลองนั้น ๆ ให้เป็นการผลิต ณ สภาวะมาตรฐาน (Standard temperature and pressure: STP)

1. อัตราการผลิตแก๊สสูงสุด

สมการทางคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการคำนวณอัตราการผลิตแก๊สสูงสุดคือ สมการ Modified Gompertz โดยสมการดังกล่าวจะใช้เพื่อหาเส้นโค้งที่เหมาะสมของผลการทดลอง และวิธีการใช้สมการดังกล่าวสามารถทำได้โดยใช้ฟังก์ชัน Solver ใน Microsoft excel หรือ Sigmaplot

$$M(t) = P \cdot \exp \left[- \exp \left[\frac{R_m E}{P} (\lambda - t) + 1 \right] \right] \quad (16)$$

เมื่อ $M(t)$	คือ ปริมาตรไฮโดรเจน ($\text{mL-H}_2/\text{L}_{\text{substrate}}$) สะสม ณ เวลาต่าง ๆ
P	คือ ปริมาตรไฮโดรเจน ($\text{mL-H}_2/\text{L}_{\text{substrate}}$) สะสมสูงสุด
R_m	คือ อัตราการผลิตไฮโดรเจน ($\text{mL-H}_2/\text{L}_{\text{substrate}}$) สูงสุด
λ	คือ ค่า Lah time (h)
T	คือ ระยะเวลาการหมัก (h)
E	คือ ค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 2.71828

ถ่านชีวภาพ

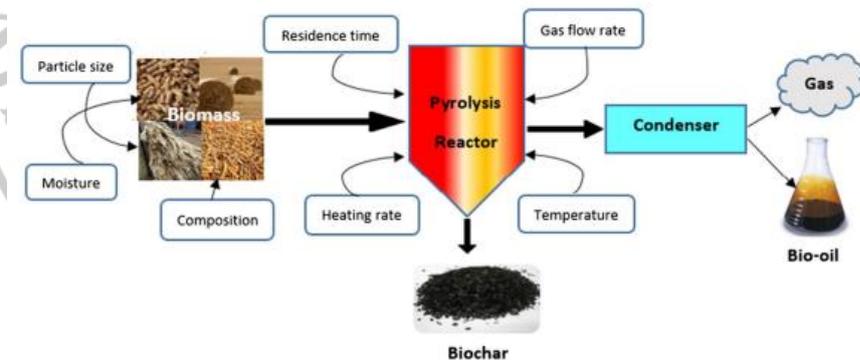
ถ่านชีวภาพ (Biochar) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการเผาไหม้ชีวมวล (Biomass) ในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน โดยใช้กระบวนการควบคุมเวลาและอุณหภูมิในกระบวนการไพโรไลซิส เรียกว่ากระบวนการเผาไหม้ด้วยอุณหภูมิสูง ถ่านชีวภาพจะมีปริมาณคาร์บอนในองค์ประกอบสูงถึงร้อยละ 50 ขององค์ประกอบทั้งหมด จึงเหมาะสำหรับการกักเก็บคาร์บอนได้อย่างมีประสิทธิภาพ และถ่านชีวภาพยังมีสมบัติอื่น ๆ เช่น รูพรุน ซึ่งเหมาะแก่การนำไปใช้ในเกษตรกรรมเพื่อช่วยเพิ่มปริมาณคาร์บอนในดินและช่วยลดการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศอีกด้วย เล็ง และฮวง (Leng & Huang, 2018)

กระบวนการไพโรไลซิส

กระบวนการไพโรไลซิส เป็นกระบวนการทางเคมีที่ทำให้เกิดการแตกตัวของชีวมวลในระบบที่ไม่ใช้ออกซิเจน และส่งผลให้สารอินทรีย์ขนาดใหญ่ที่เรียกว่า สายโซ่ ถูกแยกออกเป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็ก หรือเป็นสายโซ่ที่สั้นลง ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการนี้สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท คือ ของแข็ง ของเหลว และแก๊ส โดยกระบวนการไพโรไลซิสจะเกิดขึ้นที่อุณหภูมิประมาณ 300-700 องศาเซลเซียส

กลไกการเกิดกระบวนการไพโรไลซิสสามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า และกระบวนการไพโรไลซิสแบบรวดเร็ว โดยแต่ละกระบวนการจะมีอัตราการให้ความร้อนแก่ชีวมวลต่างกัน ซึ่งจะมีผลต่อการแตกตัวของโครงสร้างที่ซับซ้อนของชีวมวล และปริมาณของผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการนี้ดังนี้

1. กระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า (Slow Pyrolysis) คือ การถ่ายเทความร้อนให้กับชีวมวลอย่างช้า ๆ ในอุณหภูมิช่วง 300-600 องศาเซลเซียส และไม่เกิน 10 องศาเซลเซียสต่อนาที เมื่อถ่ายเทความร้อนให้กับชีวมวล จะเกิดปฏิกิริยาไพโรไลซิสแบบช้า ๆ ซึ่งเกิดขึ้นในระบบโดยแบ่งออกเป็น 4 ช่วงอุณหภูมิ ได้แก่ ช่วงอุณหภูมิ 20-100 องศาเซลเซียสทำให้ชีวมวลแห้งสนิท ช่วงอุณหภูมิ 100-250 องศาเซลเซียสทำให้เกิดผลิตภัณฑ์แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และกรดอะซิติก ช่วงอุณหภูมิ 250-500 องศาเซลเซียสทำให้เกิดผลิตภัณฑ์แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจนและมีเทน รวมถึงของเหลวทาร์ (Liquid Tar) และช่วงอุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียสขึ้นไปทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ คือ ถ่านชีวภาพ แสดงดังภาพที่ 2.4



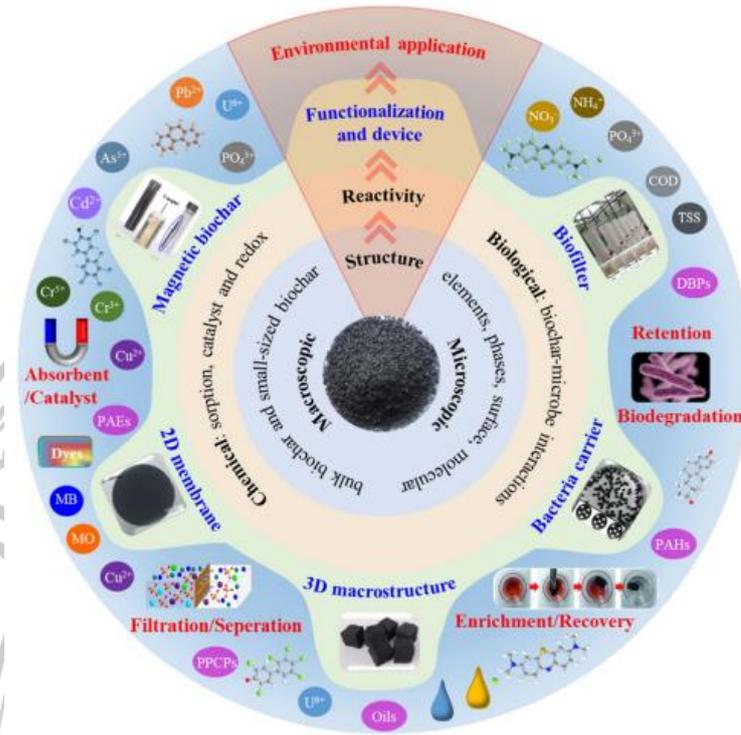
ภาพที่ 2.8 กระบวนการผลิตถ่านชีวภาพด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้า
ที่มา : กุมาร์ ซาคิยา (Kumar Sakhiya, 2020)

2. กระบวนการไพโรไลซิสแบบรวดเร็ว (Fast Pyrolysis) เป็นกระบวนการที่ให้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิ 600-1,000 องศาเซลเซียส โดยอัตราการให้ความร้อนในช่วง 10-100 องศาเซลเซียสต่อวินาที และเป็นกระบวนการที่มีการผลิตผลิตภัณฑ์เหลวในปริมาณสูงในช่วงระยะสั้น ๆ โดยกระบวนการนี้จะได้ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นของเหลว

คุณสมบัติของถ่านชีวภาพ

ถ่านชีวภาพมีโครงสร้างทางเคมีเป็นอะโรมาติกสูง โดยสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันสูง เกิดหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ โดยเฉพาะหมู่คาร์บอกซิล (COO-) ส่งผลให้ถ่านชีวภาพมีพื้นที่ผิวเป็นประจุลบสูง จึงมีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุได้ สมบัติทางเคมีของถ่านชีวภาพ คือ มีปริมาณคาร์บอนคงตัวประมาณ ร้อยละ 50-95 มีปริมาณสารระเหย ประมาณร้อยละ 0-40 มีปริมาณเถ้าประมาณ ร้อยละ 0.5-10 มีปริมาณความชื้นขึ้นอยู่กับความสมบูรณ์ของการเผาไหม้ และมีค่าความร้อนของถ่านชีวภาพเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่ใช้ในการเผา นอกจากนี้สมบัติทางกายภาพของถ่านชีวภาพยังมีการเปลี่ยนแปลงสีของชีวมวลด้วยกระบวนการแยกสลายด้วยความร้อน มีความเป็นพรุนของถ่านชีวภาพและมีพื้นที่ผิวที่สามารถในการเกิดปฏิกิริยาทางกายภาพและเคมีได้

ในปัจจุบันมีการศึกษาถ่านชีวภาพและประโยชน์ทางการเกษตรและสิ่งแวดล้อมเป็นจำนวนมาก รวมถึงการช่วยบรรเทาผลกระทบจากการเปลี่ยนแปลงภูมิอากาศ หวาง และคนอื่น ๆ, วูล์ฟ และคนอื่น ๆ (Wang et al. 2019b; Woolf et al. 2010) และการพัฒนาโครงสร้างขณะที่ทำการเผา เคย์ลูไวท์ และคนอื่น ๆ, เหลียน และซิง, เซียว และคนอื่น ๆ (Keiluweit et al. 2010; Lian and Xing 2017; Xiao et al. 2018) การกำจัดสารตกค้างในน้ำหรือในดิน โมฮัน และคนอื่น ๆ, ตัน และคนอื่น ๆ, ซี และคนอื่น ๆ (Mohan et al. 2014; Tan et al. 2016; Xie et al. 2015) ดังนั้นจึงได้สรุปคุณสมบัติและโครงสร้างของถ่านชีวภาพดังแสดงในภาพที่ 2.9



ภาพที่ 2.9 คุณสมบัติและโครงสร้างของถ่านชีวภาพ

ที่มา : หลู และคนอื่น ๆ (Lu et al., 2020)

การวิเคราะห์สมบัติของถ่านชีวภาพ

1. วิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate analysis) ซึ่งประกอบด้วย การวิเคราะห์หาปริมาณความชื้น (Moisture content; MC) ปริมาณเถ้า (Ash content; AC) ปริมาณของสารระเหย (Volatile matter; VC) และปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon; FC)
2. วิเคราะห์โดยแยกธาตุ (Ultimate analysis) เป็นการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุ ได้แก่ คาร์บอน (Carbon; C) ไฮโดรเจน (Hydrogen; H) ออกซิเจน (Oxygen; O) ไนโตรเจน (Nitrogen; N) และซัลเฟอร์ (Sulphur; S)
3. วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวภายนอก โดยใช้เทคนิคทางกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope ; SEM)
4. วิเคราะห์ลักษณะพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดของรูพรุน โดยใช้เทคนิค Brunauer emmett-teller (BET)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

หวาง และคนอื่น ๆ (Wang et al. 2022) ได้กล่าวไว้ว่า กระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนสามารถช่วยลดปัญหามลพิษจากขยะอินทรีย์ทางการเกษตร และด้านชีวภาพสามารถเพิ่มอัตราการการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ได้ ด้านชีวภาพ คือ สารตัวกลางมีประสิทธิภาพในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งได้ทำการปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยการเติมถ่านชีวภาพจากฟางข้าว เพื่อเพิ่มการผลิตก๊าซในระหว่างการหมักแบบไม่มีออกซิเจน แสดงให้เห็นว่าจุลินทรีย์ต่าง ๆ รวมถึงและเกาะอยู่บนพื้นผิวและรูพรุนของถ่านชีวภาพ ซึ่งจากการวิเคราะห์หารูพรุน (BET) พบว่า รูพรุนที่เกิดขึ้นเป็นแหล่งที่อยู่สำหรับจุลินทรีย์ หลังจาการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจนแล้ว พบว่า พื้นที่ผิวและปริมาณรูพรุนของถ่านชีวภาพลดลง

สุมา และคนอื่น ๆ (Suma et al., 2021) ได้ศึกษาการผลิตถ่านชีวภาพจากมูลช้างด้วยกระบวนการไพโรไลซิส โดยนำมูลช้างที่อบแห้งด้วยอุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมงนำไปเผาด้วยเตาเผาอุณหภูมิสูงที่ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำไปบดละเอียดให้มีขนาด 60 เมช จากผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดของรูพรุน พบว่า ถ่านชีวภาพจากมูลช้างมีปริมาณรูพรุนเท่ากับ 5.69 ตารางเมตรต่อกรัม

หยู และคนอื่น ๆ (Yue et al., 2017) ได้ศึกษาการผลิตถ่านชีวภาพจากมูลวัวด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าที่อุณหภูมิ 300-700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ผลที่ได้พบว่า กลุ่มฟังก์ชันพื้นฐาน และโครงสร้างอะโรมาติกเพิ่มขึ้น แต่กลุ่มฟังก์ชันคาร์บอกซิลและอะลิฟาติกลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 300 องศาเซลเซียส ถึง 500 องศาเซลเซียส ซึ่งผลการวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่ากระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าเป็นวิธีที่รวดเร็วในการจัดการมูลวัวและผลิตถ่านชีวภาพเมื่อพิจารณาจากสภาพแวดล้อมแล้ว การไพโรไลซิสที่เหมาะสม คือ ใช้อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

อปีซิงเหย และคนอื่น ๆ (Abeyasinghe et al., 2022) ได้ศึกษาการผลิตถ่านชีวภาพจากมูลช้าง (BC500) ที่ผ่านการปรับสภาพด้วยแมกนีเซียม (MgBC500) และเหล็ก (FeBC500) เพื่อประเมินประสิทธิภาพในการดูดซับฟอสเฟต โดยผลิตถ่านชีวภาพจากมูลช้างด้วยกระบวนการไพโรไลซิสแบบช้าในเตาเผาอุณหภูมิสูง ที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากผลการวิเคราะห์ BET ของ BC500 MgBC500 และ FeBC500 พบว่า มีพื้นที่ผิวเฉพาะเท่ากับ 62.5 48.7 และ 259.4 ตารางเมตรต่อกรัม ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่า FeBC500 มีพื้นที่ผิวและปริมาณรูพรุนจำนวนมากจึงทำให้มีความสามารถในการดูดซับฟอสเฟตได้ดี

จากงานวิจัยของ หวางและคนอื่น ๆ (Wang et al., 2022) ที่ได้กล่าวถึงการเกาะตัวบนพื้นผิวและรูพรุนของถ่านชีวภาพเพิ่มการผลิตก๊าซได้ และงานวิจัยของ อปีซิงเหย และคนอื่น ๆ (Abeyasinghe et al., 2022) ทำให้ผู้วิจัยได้สนใจกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพ เนื่องจากงานวิจัย

ดังกล่าวได้นำมูลขี้าง ซึ่งเป็นวัตถุดิบเดียวกันกับผู้วิจัยมาผลิตเป็นถ่านชีวภาพ ดังนั้นการควบคุมอุณหภูมิและเวลาไพโรไลซิสที่เหมาะสมสำหรับการผลิตถ่านชีวภาพเพื่อให้คุณสมบัติในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฮโดรเจน

ซัน โยโต และคนอื่น ๆ (Sunyoto et al., 2016) ได้กล่าวถึงสมบัติของถ่านชีวภาพไว้ว่าการเติมถ่านชีวภาพในระบบการหมักก๊าซชีวภาพช่วยเพิ่มการผลิตก๊าซชีวภาพในกระบวนการย่อยแบบแบทช์โดยไม่ใช้ออกซิเจน เนื่องจากความสามารถในการสร้างไบโอฟิล์มและลดการยับยั้งของแอมโมเนียและกรด จากการศึกษาผลของการเพิ่มถ่านชีวภาพที่ปริมาณแตกต่างกัน คือ 8.3-33.3 กรัมต่อลิตร ต่อการผลิตไฮโดรเจนและมีเทนในกระบวนการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน ศึกษาโดยใช้ถังปฏิกรณ์ขนาด 100 มิลลิลิตร อุณหภูมิที่ใช้ คือ 35 องศาเซลเซียส และค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 5 เพื่อทำการผลิตไฮโดรเจน จากนั้นนำวัสดุหมักผสมที่เหลือจากการผลิตไฮโดรเจนไปใช้สำหรับผลิตมีเทน โดยอุณหภูมิที่ใช้ คือ 35 องศาเซลเซียส และค่าความเป็นกรด-ด่างเท่ากับ 7 ผลการทดลอง พบว่าการเพิ่มถ่านชีวภาพทำให้อัตราการผลิตสูงสุดของไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นร้อยละ 32.5 และมีเทนเพิ่มขึ้นร้อยละ 41.6 และช่วยลดระยะเวลาในการหมักทั้งสองขั้นตอนได้ถึงร้อยละ 36.0 และ 41.0 ตามลำดับ นอกจากนี้การเพิ่มถ่านชีวภาพยังช่วยสร้างกรดไขมันระเหยง่ายระหว่างการผลิตไฮโดรเจน และช่วยย่อยกรดไขมันระเหยง่ายในขั้นตอนการผลิตมีเทนด้วย

หลี่ และคนอื่น ๆ (Li et al., 2020) ได้ศึกษาผลกระทบของถ่านชีวภาพจากฟางข้าวต่อการผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้แสง เริ่มต้นจากกระบวนการผลิตถ่านชีวภาพจากฟางข้าว เตรียมได้โดยนำฟางข้าวที่อบแห้งแล้วมาบดให้มีขนาด 40 เมช จากนั้นนำไปเผาด้วยเตาเผาแบบสูญญากาศที่อุณหภูมิ 700 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นนำถ่านชีวภาพที่ได้มาบดให้ละเอียดให้มีขนาด 200 เมช จากนั้นนำถ่านชีวภาพไปเติมในระบบหมักโดยใช้ปริมาณที่แตกต่างกันที่ 3-12 กรัมต่อลิตร ผลการทดลองพบว่า การเติมถ่านชีวภาพ 3 กรัมต่อลิตร เป็นปริมาณที่เหมาะสมต่อการผลิตไฮโดรเจน เนื่องจากอุณหภูมิของถ่านชีวภาพช่วยเพิ่มการตรึงจุลินทรีย์ทำให้ผลผลิตไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น

สาริพันธ์ และเรืองแสง (Saripan & Reungsang., 2014) ได้ศึกษาการหาเงื่อนไขที่เหมาะสมของกระบวนการย่อยเป็นน้ำตาลและหมักพร้อมกันสำหรับการผลิตไฮโดรเจนโดยการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนระหว่างมูลขี้างและคาร์บอกซิลเมทิลเซลลูโลส (CMC) ที่ถูกใช้เป็นสารตั้งต้น พารามิเตอร์ที่วิเคราะห์ ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้น อุณหภูมิ และความเข้มข้นของสารตั้งต้น ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การผลิตไฮโดรเจนสูงสุดและอัตราการผลิตไฮโดรเจนได้ 7.22 ± 0.62 มิลลิโมลไฮโดรเจนต่อกรัมซีเอ็มซี ($\text{mMH}_2/\text{g CMC}$) ที่เติมเข้าไป และ 73.4 ± 3.8 มิลลิโมลไฮโดรเจนต่อกรัมซีเอ็มซี ($\text{mMH}_2/\text{g CMC}$) ตามลำดับ ค่าความเป็นกรด-ด่างเริ่มต้นเท่ากับ 7.0

อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส และความเข้มข้นของซีเอ็มซี (CMC) เท่ากับ 0.25 กรัมต่อลิตร เมื่อได้เงื่อนไขที่ดีที่สุดแล้ว จากนั้นเงื่อนไขนี้จะถูกนำไปใช้ในการผลิตไฮโดรเจนจากส่วนเซลลูโลสของกากอ้อยที่ความเข้มข้น 0.40 กรัมต่อลิตร พบว่าสามารถผลิตไฮโดรเจนได้ 7.10 ± 3.22 มิลลิโมลไฮโดรเจนต่อกรัมเซลลูโลส (mMH₂/g Cellulose) ที่เติมเข้าไป

หลู และคนอื่น ๆ (Lu et al., 2020) ศึกษาผลของการเพิ่มเรซินที่อิ่มตัวด้วยแคลเซียมและแมกนีเซียม (Ca- and Mg-saturated resin) และถ่านชีวภาพที่มีฟอสเฟตเข้าไปในกระบวนการหมักไฮโดรเจนแบบผสมผสานระหว่างการหมักแบบไม่ใช้แสงและการหมักแบบใช้แสง (Single-Stage Hybrid Dark-Photo Fermentation) จากเศษอาหาร ในขั้นตอนแรก ทดลองหมักด้วยปริมาณเรซินที่อิ่มตัวด้วยแคลเซียมและแมกนีเซียมตั้งแต่ 2.5 ถึง 20 กรัมต่อลิตร เพื่อวิเคราะห์ผลของแคลเซียมและแมกนีเซียมที่มีผลต่ออัตราการผลิตไฮโดรเจนและค่าความเป็นกรด-ด่างของระบบ ผลการทดลองพบว่า การเพิ่มเรซินที่อิ่มตัวปริมาณ 5 กรัมต่อลิตร ทำให้ผลผลิตไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นจาก 101.60 ± 2.4 เป็น 164.4 ± 2.6 มิลลิตรไฮโดรเจนต่อกรัมวีเอส (mLH₂/gVS) ในขั้นตอนที่ 2 เพิ่มเรซินที่อิ่มตัวปริมาณ 5 กรัมต่อลิตร ร่วมกับปริมาณถ่านชีวภาพเข้าไปในเครื่องปฏิกรณ์ พบว่าสามารถผลิตไฮโดรเจนสูงสุดสะสม 3130 ± 16.8 มิลลิตร และผลผลิตไฮโดรเจน 197.15 ± 2.9 มิลลิตรไฮโดรเจนต่อกรัมวีเอส (mLH₂/gVS) และจากการวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหมัก พบว่าเกิดกรดบิวทริกและกรดอะซิติกเป็นผลิตภัณฑ์ในระหว่างการผลิตไฮโดรเจน นอกจากนี้ ความเข้มข้นที่เหมาะสมของเรซินและถ่านชีวภาพช่วยส่งเสริมการสลายสารตั้งต้นและลดระยะเวลาการหมักจาก 8.19 ± 0.4 ชั่วโมงเป็น 4.79 ± 0.5 ชั่วโมง ดังนั้นการทดลองแสดงให้เห็นว่าสามารถผลิตไฮโดรเจนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ซาง และคนอื่น ๆ (Zhang et al., 2017) ได้ศึกษาผลของการเพิ่มถ่านชีวภาพ และเหล็ก (Fe²⁺) ต่อการผลิตไฮโดรเจนจากกลูโคสโดยใช้การทดลองแบบแบทช์ กลูโคสที่มีการเพิ่มถ่านชีวภาพและเหล็ก ถูกหมักที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เพื่อผลิตไฮโดรเจน โดยการทดลองจะเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม คือ กลุ่มที่ไม่มีการเพิ่มถ่านชีวภาพและเหล็ก ผลการทดลองพบว่า ถ่านชีวภาพและเหล็กทำให้ระยะเวลาการหมักลดลงจาก 4.25 ชั่วโมงเหลือเพียง 2.12 ชั่วโมง และผลผลิตไฮโดรเจน เพิ่มขึ้นจาก 158.0 มิลลิตรต่อกรัมกลูโคส เป็น 234.4 มิลลิตรต่อกรัมกลูโคส ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า ถ่านชีวภาพ ทำหน้าที่เป็นตัวดูดซับและทำหน้าที่ปรับสมดุลค่าความเป็นกรด-ด่างของระบบได้ อีกทั้งยังสร้างฟิล์มชีวภาพที่เป็นตัวกลางให้จุลินทรีย์เข้ามาเกาะบริเวณพื้นผิว เพื่อเพิ่มการผลิตไฮโดรเจน พื้นที่ผิวของถ่านชีวภาพเป็นสมบัติทางกายภาพที่สำคัญซึ่งช่วยให้จุลินทรีย์สามารถแนบตัวขณะถูกใช้เป็นสารเติมในกระบวนการทางจุลินทรีย์ कुमार และคนอื่น ๆ (Kumar et al., 2021)

ตารางที่ 2.7 ผลของการเพิ่มถ่านชีวภาพต่อการผลิตไฮโดรเจน

สารตั้งต้น	หัวเชื้อจุลินทรีย์	ความเข้มข้นของถ่านชีวภาพ	ผลผลิตที่ได้	อ้างอิง
Brewery Waste Anaerobic Sludge	เศษอาหาร	ถ่านชีวภาพจากขี้เถ้า 10 กรัมต่อลิตร (g/L)	81 มิลลิลิตรต่อกรัมวีเอส (mL/g VS) 72 มิลลิลิตรต่อกรัมวีเอส (mL/g VS)	หวาง และคนอื่นๆ (Wang et al., 2018)
<i>R. sphaeroides</i> and <i>C. acetobutylicum</i>	เศษอาหาร	ไม่เติมถ่านชีวภาพ ถ่านชีวภาพจากตะกอนน้ำเสีย 5 กรัมต่อลิตร (g/L)	197.15 มิลลิลิตรต่อกรัมวีเอส (mL/g VS)	เรซาเอตาวาเบ และคนอื่นๆ (Rezaeitavabe et al., 2020)
Heat treated Sewage sludge	กลูโคส	ไม่เติมถ่านชีวภาพ ถ่านชีวภาพจากข้าวโพด 0.6 กรัมต่อลิตร (g/L)	102.00 มิลลิลิตรต่อกรัมวีเอส (mL/g VS)	ซาง และคนอื่นๆ (Zhang et al., 2017)
<i>T. thermosaccharolyticum</i> M18	ข้าวโพดก่อนการปรับสภาพ	ถ่านชีวภาพจากตะกอนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน 15 กรัมต่อลิตร (g/L)	204.0 มิลลิลิตรต่อกรัมวีเอส (mL/g VS) 5.7 มิลลิลิตรต่อกรัมสารตั้งต้น (mL/g substrate)	จาว และคนอื่นๆ (Zhao et al., 2021)

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้แบ่งการดำเนินงานวิจัยออกเป็น 3 ส่วน คือ การผลิตถ่านชีวภาพจากมูลช้าง ด้วยกระบวนการไพโรไลซิส และการปรับปรุงกระบวนการผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้าง โดยมีรายละเอียด ดังนี้

1. วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการวิจัย
2. การเตรียมเชื้อจุลินทรีย์
3. การเตรียมสารอาหาร
4. การผลิตถ่านชีวภาพจากมูลช้างด้วยกระบวนการไพโรไลซิส
5. การปรับปรุงกระบวนการผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน

โดยใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้าง

วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้วัตถุประสงค์ในการดำเนินงานวิจัย ได้แก่ มูลช้างสด (Elephant Dung) เพื่อใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตไฮโดรเจน ถ่านชีวภาพจากมูลช้าง (Biochar from Elephant Dung) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตไฮโดรเจน และตะกอนน้ำเสียจากโรงงานปิโตรเลียม (Petroleum Waste Sludge) เพื่อนำมาใช้เป็นเชื้อจุลินทรีย์สำหรับการผลิตไฮโดรเจน

ตารางที่ 3.1 คุณสมบัติของมูลช้างเอเชีย และมูลช้างแอฟริกา

องค์ประกอบ	มูลช้างเอเชีย	มูลช้างแอฟริกา	อ้างอิง
เซลลูโลส	ร้อยละ 40-50	ร้อยละ 30-40	ข้าว และคนอื่น ๆ, มุนยาราดซี และคนอื่น ๆ (Chayoa et al., 2020; Munyaradzi et al., 2018)
เฮมิเซลลูโลส	ร้อยละ 20-30	ร้อยละ 15-25	ข้าว และคนอื่น ๆ, มุนยาราดซี และคนอื่น ๆ (Chayoa et al., 2020; Munyaradzi et al., 2018)
ลิกนิน	ร้อยละ 10-15	ร้อยละ 15-20	ข้าว และคนอื่น ๆ, มุนยาราดซี และคนอื่น ๆ (Chayoa et al., 2020; Munyaradzi et al., 2018)
เส้นใยอาหาร	ร้อยละ 35-40	ร้อยละ 25-30	ข้าว และคนอื่น ๆ (Chayoa et al., 2020)
คาร์โบไฮเดรต	ร้อยละ 70-75	ร้อยละ 55-60	ข้าว และคนอื่น ๆ (Chayoa et al., 2020)

การเตรียมเชื้อจุลินทรีย์

เชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการทดลองนี้ คือ ตะกอนน้ำเสียจากโรงงานปิโตรเลียม ซึ่งได้มาจากการนำน้ำเสียจากโรงงานปิโตรเลียมผ่านกระบวนการล้างด้วยน้ำกลั่น เพื่อให้ได้ตะกอนที่มีลักษณะเป็นเกล็ดขนาดเล็ก จากนั้นปรับสภาพตะกอนด้วยความร้อน (Heat-Treat) โดยนำไปเข้าตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เพื่อยับยั้งจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการผลิตมีเทนสารีพันธ์ และเรืองแสง (Saripan & Reungsang, 2014)

การเตรียมสารอาหาร

การผลิตไฮโดรเจนต้องการสารอาหารที่เป็นโลหะไอออนซึ่งมีบทบาทสำคัญในเมแทบอลิซึมของจุลินทรีย์ในกระบวนการผลิตไฮโดรเจน โดยการเตรียมสารอาหารสามารถเตรียมได้จากการใช้สารเคมี ดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.2 สารละลายเข้มข้นสำหรับการเตรียมสารอาหาร

สารอาหาร	สารเคมี	ปริมาณ (กรัมต่อลิตร)
A	ได-โพสเฟสซีเอ็ม ไฮโดรเจน ฟอสเฟต ไตรไฮเดรต ($K_2HPO_4 \cdot 3H_2O$)	200
B	โซเดียมไบคาร์บอเนต ($NaHCO_3$)	52
C	แอมโมเนียมคลอไรด์ (NH_4Cl)	100
	โซเดียมคลอไรด์ ($NaCl$)	10
	แมกนีเซียมคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($MgCl_2 \cdot 6H_2O$)	10
	แคลเซียมคลอไรด์ไดไฮเดรต ($CaCl_2 \cdot 2H_2O$)	5
D	แมงกานีสคลอไรด์เตตระไฮเดรต ($MnCl_2 \cdot 4H_2O$)	0.05
	อะลูมิเนียมคลอไรด์ ($AlCl_3$)	0.05
	นิกเกิลคลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($NiCl_2 \cdot 6H_2O$)	0.092
	เหล็กคลอไรด์เตตระไฮเดรต ($FeCl_2 \cdot 4H_2O$)	2
	คอปเปอร์คลอไรด์ไดไฮเดรต ($CuCl_2 \cdot 2H_2O$)	0.038
	กรดบอริก (H_3BO_3)	0.05
	แอมโมเนียมมอลิบเดนออกไซด์ ($(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$)	0.05
	ซิงค์คลอไรด์ ($ZnCl_2$)	0.05
	โคบอลต์คลอไรด์เฮกซะไฮเดรต ($CoCl_2 \cdot 6H_2O$)	0.05
	โซเดียมเซเลเนตเพนตะไฮเดรต ($Na_2SeO_3 \cdot 5H_2O$)	0.1
กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น (Concentrate HCl)	1 mL	
กรดเอทิลีนไดเอมีนเตตระแอสซิติค (Ethylenediaminetetraacetic acid)	0.5	
E	สารสกัดจากยีสต์ (Yeast extract)	100

เตรียมสารอาหารสำหรับการผลิตไฮโดรเจน โดยชั่งปริมาณสารละลายโดยแบ่งเป็นกลุ่มสารอาหาร A B C D และ E ดังแสดงในตารางที่ 3.1 ละลายในน้ำกลั่น 936 มิลลิลิตร โดยผสมสาร A ปริมาณ 2 มิลลิลิตร สาร B ปริมาณ 50 มิลลิลิตร สาร C ปริมาณ 10 มิลลิลิตร สาร D ปริมาณ 1 มิลลิลิตร และสาร E ปริมาณ 1 มิลลิลิตร จากนั้นผสมสารละลายให้เข้ากันและเก็บไว้ที่ห้องควบคุมอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

การผลิตถ่านชีวภาพจากมูลช้างด้วยกระบวนการไพโรไลซิส

1. เก็บตัวอย่างมูลช้างสดจากปางช้าง จากนั้นนำมาล้างด้วยน้ำสะอาด 3 ครั้ง แล้วนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน สุมา และคนอื่น ๆ (Suma et al., 2021) จากนั้นนำไปเผาด้วยกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 นาที สุมา และคนอื่น ๆ, หยู และคนอื่น ๆ (Suma et al., 2021 & Yue et al., 2017)

2. วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของมูลช้าง และถ่านชีวภาพจากมูลช้าง โดยใช้เทคนิคต่างๆ ดังนี้

2.1 วิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate Analysis) ซึ่งประกอบด้วยการวิเคราะห์หาปริมาณความชื้น (Moisture Content: MC) ปริมาณเถ้า (Ash Content: AC) ปริมาณของสารระเหย (Volatile Matter: VC) และปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed Carbon: FC) โดยมีขั้นตอนดังนี้

การวิเคราะห์หาปริมาณความชื้น

ชั่งน้ำหนักมูลช้าง และถ่านชีวภาพจากมูลช้างตัวอย่างละ 1 กรัม ใสลงในถ้วยกระเบื้อง จากนั้นนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาให้นำถ้วยกระเบื้องไปวางไว้ในโถดูดความชื้น บันทึกค่าน้ำหนักก่อนและหลังอบแห้งตัวอย่าง แล้วคำนวณค่าน้ำหนักที่หายไป ดังสมการที่ (17)

การคำนวณ

$$\text{ค่าความชื้น (ร้อยละ)} = [(A - B) / A] \times 100 \quad (17)$$

เมื่อ $A =$ น้ำหนักก่อนการอบแห้ง

$B =$ น้ำหนักหลังการอบแห้ง

การวิเคราะห์หาปริมาณเถา

ชั่งน้ำหนักมูลช้าง และถ่านชีวภาพจากมูลช้างที่อบไล่ความชื้นแล้ว ตัวอย่างละ 1 กรัม ไล่ลงไปในตัวกระเบื้อง จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาให้นำด้วยกระเบื้องไปวางไว้ในโถ่ดูดความชื้น บันทึกค่าน้ำหนักก่อนและหลังเผา ตัวอย่าง แล้วคำนวณค่าน้ำหนักที่หายไป ดังสมการที่ (18)

การคำนวณ

$$\text{ถ้ำ (ร้อยละ)} = [(A-B) / C] \times 100 \quad (18)$$

- เมื่อ
- A = น้ำหนักรวมของด้วยกระเบื้องและเถาที่เหลือ
 - B = น้ำหนักด้วยกระเบื้องเปล่า
 - C = น้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้

การวิเคราะห์หาปริมาณสารระเหย

ชั่งน้ำหนักมูลช้าง และถ่านชีวภาพจากมูลช้างที่อบไล่ความชื้นแล้ว ตัวอย่างละ 1 กรัม ไล่ลงไปในตัวกระเบื้อง จากนั้นนำไปเผาที่อุณหภูมิ 950 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที เมื่อครบเวลาให้นำด้วยกระเบื้องไปวางไว้ในโถ่ดูดความชื้น บันทึกค่าน้ำหนักและคำนวณค่าน้ำหนักที่หายไป ดังสมการที่ (19) และ (20)

การคำนวณ

$$\text{น้ำหนักที่หายไป (\%)} = [(A-B) / A] \times 100 \quad (19)$$

- เมื่อ
- A = น้ำหนักตัวอย่างที่ใช้
 - B = น้ำหนักตัวอย่างหลังจากเผา

$$\text{ปริมาณสารระเหย (\%)} = C - D \quad (20)$$

- เมื่อ
- C = น้ำหนักที่หายไป (%)
 - D = ความชื้น (%)

การวิเคราะห์หาปริมาณคาร์บอนคงตัว

เป็นค่าที่แสดงถึงส่วนที่เผาไหม้ได้ของมูลช้าง และถ่านชีวภาพจากมูลช้างหลังจากกำจัดความชื้น สารระเหย และเถ้าออกไปแล้ว โดยสามารถคำนวณได้ ดังสมการที่ (21)

การคำนวณ

$$\text{ปริมาณคาร์บอนคงตัว (\%)} = [\text{ความชื้น (\%)} + \text{เถ้า (\%)} + \text{ปริมาณสารระเหย (\%)}] - 100 \quad (21)$$

2.2 วิเคราะห์โดยแยกธาตุ (Ultimate analysis) เป็นการวิเคราะห์หาปริมาณธาตุ ได้แก่ คาร์บอน (Carbon; C) ไฮโดรเจน (Hydrogen; H) ออกซิเจน (Oxygen; O) ไนโตรเจน (Nitrogen; N) และซัลเฟอร์ (Sulphar; S)

2.3 วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสาร โดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (Termogravimetric analysis; TGA)

2.4 วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวภายนอก โดยใช้เทคนิคทางกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope ; SEM)

2.5 วิเคราะห์ลักษณะพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดของรูพรุน โดยใช้เทคนิค (Brunauer Emmett-Teller: BET)

การปรับปรุงกระบวนการผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้าง

1. ทดสอบการเพิ่มประสิทธิภาพและศึกษาการใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้างและถ่านชีวภาพเกรดการค้า ซึ่งเป็นถ่านชีวภาพที่ผลิตจากเหง้ามันสำปะหลัง

2. ทดสอบการเพิ่มประสิทธิภาพและศึกษาหาปริมาณการใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้าง 5, 15 และ 25 กรัมต่อลิตร (g/L) ในการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้กลูโคส 20 กรัมซี โอดีต่อลิตร (gCOD/L) เป็นสารตั้งต้น

3. หาสภาวะที่เหมาะสมของน้ำชะมูลช้างในการผลิตไฮโดรเจน โดยการวิเคราะห์ค่าซีโอดีของน้ำชะมูลช้างที่อัตราส่วนมูลช้างสดต่อน้ำ คือ 1:1 1:2 1:3 และ 1:4

4. ศึกษาการเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตไฮโดรเจนจากถ่านชีวภาพจากมูลช้าง โดยทำการวิเคราะห์จากผลผลิตไฮโดรเจน และประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งและซีโอดีของระบบ โดยทำการทดลองแบบเบทซ์ในขวดแก้วขนาด 60 มิลลิลิตร (mL) ที่ปริมาตรการหมัก

30 มิลลิลิตร (mL) จากนั้นใส่ถ่านชีวภาพจากมูลช้างปริมาณ 15 กรัมต่อลิตร (g/L) ใส่เชื้อจุลินทรีย์ตะกอนน้ำเสียจากโรงงานปิโตรเลียมปริมาณ 5 กรัมของแข็งระเหยได้ต่อลิตร (g/VS_{add}) และเติมสารอาหาร 64 มิลลิลิตรต่อลิตร (mL/L) จากนั้นปรับพีเอชเริ่มต้นให้มีค่าเท่ากับ 6.0 ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริก ความเข้มข้น 1 นอร์มอล (1N HCl) หรือสารละลายโซเดียมคลอไรด์ ความเข้มข้น 1 นอร์มอล (1N NaOH) ทำการไล่อากาศในขวดหมักด้วยอาร์กอน (Argon gas) เป็นเวลา 2 นาที เพื่อให้ขวดอยู่ในสถานะไม่มีออกซิเจน จากนั้นปิดขวดด้วยฝาจุลชีวินแล้วปิดด้วยอะลูมิเนียมแคปให้สนิท จากนั้นนำไปตั้งไว้ในเครื่องเขย่าแบบควบคุมอุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส (Orbital shaker incubator) ความเร็วในการเขย่าเท่ากับ 120 รอบต่อนาที เป็นเวลา 120 ชั่วโมง ติดตามผลการทดลองโดยการวัดปริมาตรของก๊าซที่เกิดขึ้นโดยใช้หลอดจลิตยาแบบแก้วแล้ววิเคราะห์หาค่าความเข้มข้นของก๊าซไฮโดรเจนด้วยเครื่องแก๊สโครมาโตกราฟีที่ใช้ตัววัดสัญญาณชนิดสภาพนำความร้อน

5. วิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของมูลช้างและถ่านชีวภาพจากมูลช้าง โดยใช้เทคนิคต่างๆ ดังนี้

5.1 ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total Solids: TS) และปริมาณของแข็งระเหย (Volatile Solids: VS) โดยทดสอบจากมาตรฐาน Gravimetric Method มีขั้นตอนการวิเคราะห์ ดังนี้

ขั้นตอนการเตรียมถ้วยกระเบื้อง

เผาถ้วยกระเบื้องที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที ก่อนนำไปใช้งานให้นำไปอบที่ 103-105 องศาเซลเซียส ประมาณ 1 ชั่วโมง ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้นอีก 1 ชั่วโมง นำไปชั่งที่เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง บันทึกน้ำหนักในหน่วยกรัม (g)

ขั้นตอนการวิเคราะห์ของแข็งทั้งหมดและของแข็งระเหย

กวนตัวอย่างให้เป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นบีบหรือดวงตัวอย่างใส่ลงในถ้วยกระเบื้อง 10 มิลลิลิตร (mL) จากนั้นนำไปอบข้ามคืนที่อุณหภูมิ 103-105 องศาเซลเซียส ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น 1 ชั่วโมง แล้วนำไปชั่งที่เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง บันทึกน้ำหนักในหน่วยกรัม (g) สำหรับการวิเคราะห์ค่าของแข็งระเหย จะนำถ้วยกระเบื้องและตัวอย่างที่อบแล้ว จากการวิเคราะห์ค่าของแข็งทั้งหมดไปเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส 20 นาที แล้วทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปชั่งที่เครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง บันทึกน้ำหนักในหน่วย (g) ดังสมการที่ (22) และ (23)

การคำนวณ

$$TS \text{ (mg/L)} = (B-A) \times 10^6 / V \quad (22)$$

$$VS \text{ (mg/L)} = (B-C) \times 10^6 / V \quad (23)$$

เมื่อ A = น้ำหนักถ้วยเปล่า (g)

B = น้ำหนักถ้วย + ตัวอย่างหลังอบ (g)

C = น้ำหนักถ้วย + ตัวอย่างหลังเผา (g)

V = ปริมาตรน้ำตัวอย่าง (mL)

5.2 ความต้องการออกซิเจนทางเคมี (Chemical Oxygen Demand: COD) ทดสอบจากมาตรฐาน APHA, AWWA and WPCF, 1992 มีขั้นตอนการวิเคราะห์ ดังนี้

กวนตัวอย่างให้เป็นเนื้อเดียวกันแล้วเปิดตัวอย่าง 2.5 mL หรือน้อยกว่า ใสในหลอดทดลอง เติมน้ำกลั่น 2.5 มิลลิลิตร (mL) เติมโปแตสเซียมไดโครเมต ($K_2Cr_2O_7$) 0.1 นอร์มอล 1.5 มิลลิลิตร (mL) เติมกรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid reagent) 3.5 มิลลิลิตร (mL) จากนั้นปิดฝา แล้วเขย่าเบา ๆ นำไปอบที่ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง แล้วหยดเฟอโรอิน อินดิเคเตอร์ลงไป 2-3 หยด เขย่าให้เข้ากัน จากนั้นไตเตรทกับสารละลายมาตรฐานเฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต (FAS) จนเปลี่ยนสีจากสีเหลืองเป็นสีน้ำตาลแดง คำนวณดังสมการที่ (24)

การคำนวณ

$$COD \text{ as mg } O_2/L = (B-A) \times N \times 8,000 / V \quad (24)$$

เมื่อ B = ปริมาตรเฉลี่ย FAS ที่ใช้ไตเตรท blank (mL)

A = ปริมาตร FAS ที่ใช้ไตเตรทตัวอย่าง (mL)

N = ความเข้มข้นของ FAS

V = ปริมาตรตัวอย่าง (mL)

หมายเหตุ: ความเข้มข้นของ FAS คำนวณดังนี้

$$N_2 = N_1 \times V_1 / V_2$$

N_1 = ความเข้มข้นของ $K_2Cr_2O_7$ (N)

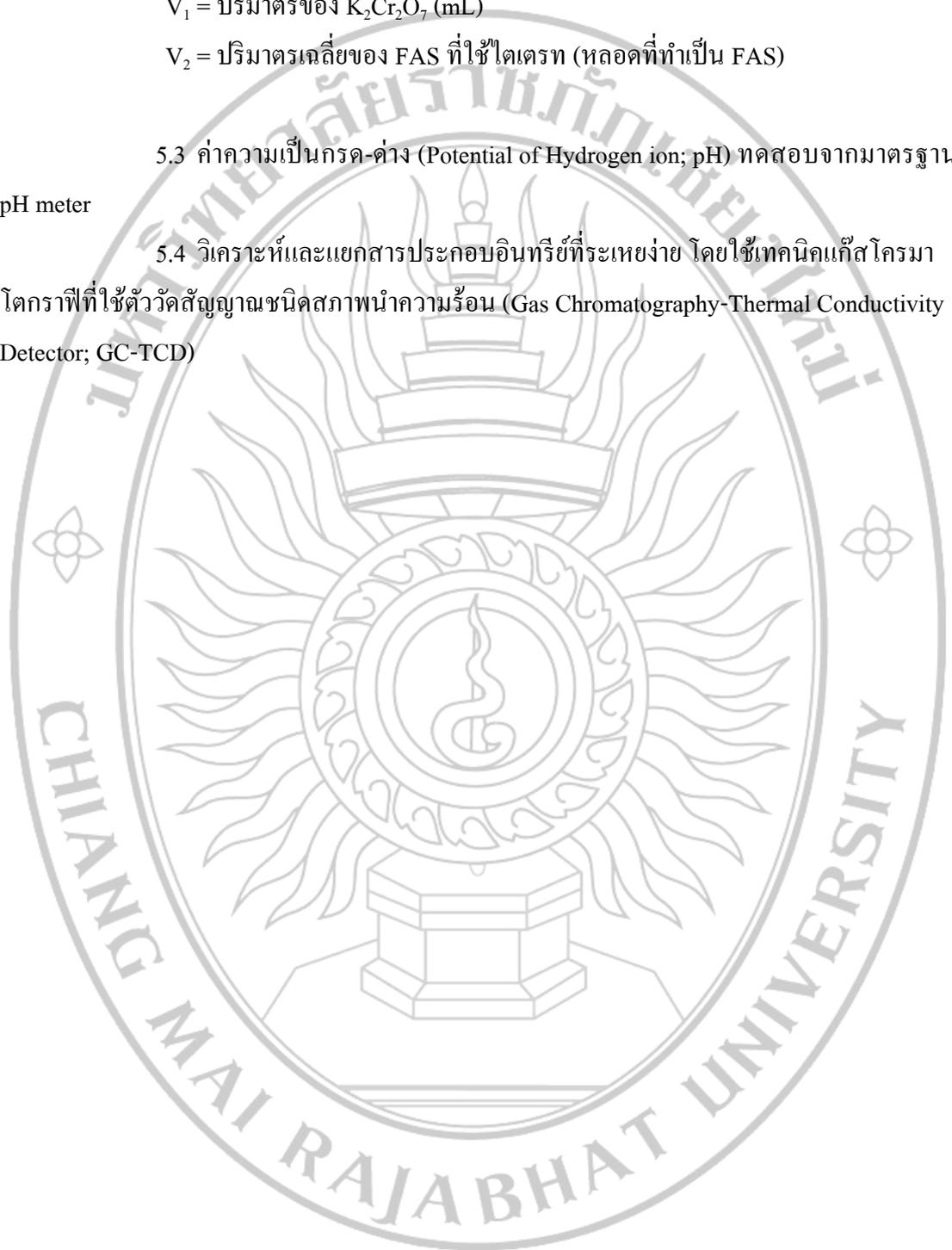
N_2 = ความเข้มข้น FAS (N)

V_1 = ปริมาตรของ $K_2Cr_2O_7$ (mL)

V_2 = ปริมาตรเฉลี่ยของ FAS ที่ใช้ไตเตรท (หลอดที่ทำเป็น FAS)

5.3 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (Potential of Hydrogen ion; pH) ทดสอบจากมาตรฐาน
pH meter

5.4 วิเคราะห์และแยกสารประกอบอินทรีย์ที่ระเหยง่าย โดยใช้เทคนิคแก๊สโครมา
โตกราฟีที่ใช้ตัววัดสัญญาณชนิดสภาพนำความร้อน (Gas Chromatography-Thermal Conductivity
Detector; GC-TCD)



บทที่ 4

ผลการวิจัย

จากการศึกษางานวิจัยการประยุกต์ใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้างในการปรับปรุงกระบวนการผลิตไฮโดรเจนด้วยการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งมีผลการวิเคราะห์ 2 ส่วน ดังนี้

1. ผลของการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของการผลิตถ่านชีวภาพจากมูลช้างด้วยกระบวนการไพโรไลซิส

1.1 ผลของการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ

1.2 ผลของการวิเคราะห์โดยแยกธาตุ

1.3 ผลของการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวภายนอก โดยใช้เทคนิคทางกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

1.4 ผลของการวิเคราะห์ลักษณะพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดของรูพรุน

2. ผลของการใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้างในการปรับปรุงกระบวนการผลิตไฮโดรเจนด้วยการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน

2.1 ผลของการทดสอบการเพิ่มประสิทธิภาพและศึกษาการใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้างและถ่านชีวภาพเกรดการค้า โดยใช้กลูโคสเป็นสารตั้งต้น

2.2 ผลของการทดสอบการเพิ่มประสิทธิภาพและศึกษาหาปริมาณการใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้าง โดยใช้กลูโคสเป็นสารตั้งต้น

2.3 ผลของการหาสภาวะที่เหมาะสมของน้ำชะมูลช้างในการผลิตไฮโดรเจน

2.4 ผลของการใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้างในการผลิตไฮโดรเจนด้วยการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยใช้ น้ำชะมูลช้างเป็นสารตั้งต้น

ผลของการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของการผลิตถ่านชีวภาพจากมูลช้างด้วยกระบวนการไพโรไลซิส

1. ผลของการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate analysis)

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณของถ่านชีวภาพจากมูลช้าง และถ่านชีวภาพเกรดการค้า แสดงดังในตารางที่ 4.3 พบว่า ถ่านชีวภาพจากมูลช้าง และถ่านชีวภาพเกรดการค้ามีค่าความชื้นร้อยละ 1.93 และ 5.69 ปริมาณสารระเหยร้อยละ 36.67 และ 56.30 เถ้าร้อยละ 30.24 และ 16.85 และปริมาณคาร์บอนคงตัวร้อยละ 31.15 และ 27.17 ตามลำดับ

ตารางที่ 4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ (Proximate Analysis)

องค์ประกอบโดยประมาณ (%)	ถ่านชีวภาพจากมูลช้าง	ถ่านชีวภาพเกรดการค้า
ค่าความชื้น	1.93±0.1	5.69±0.1
ปริมาณสารระเหย	36.67±1.0	56.30±0.9
เถ้า	30.24±1.5	16.85±1.0
ปริมาณคาร์บอนคงตัว	31.15±1.0	27.17±1.0

จากการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณของถ่านชีวภาพจากมูลช้างด้วยกระบวนการไพโรไลซิสที่อุณหภูมิ 350 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 นาที และถ่านชีวภาพเกรดการค้า จากตารางที่ 4.1 จะเห็นได้ว่าถ่านชีวภาพทั้ง 2 ชนิดมีค่าความชื้นน้อยกว่าร้อยละ 10 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าถ่านชีวภาพนี้มีคุณสมบัติการเผาไหม้ที่ดี อาเหม็ด และคนอื่น ๆ (Ahmad et al., 2023) ทั้งนี้ปริมาณคาร์บอนคงตัว คือ สิ่งที่เหลือหลังจากแยกค่าความชื้น ค่าสารระเหย และค่าเถ้า ถูกลบและคนอื่น ๆ (Kwak et al., 2019) โดยเมื่อนำมูลช้างมาผ่านกระบวนการคาร์บอนไนเซชัน ทำให้เกิดการสลายตัวของโครงสร้างและระเหยออกไปในรูปของสารระเหย ซึ่งสารอินทรีย์ที่ระเหยง่ายได้ระเหยในกระบวนการคาร์บอนไนเซชันไปมากแล้ว ทำให้ถ่านชีวภาพจากมูลช้างมีปริมาณคาร์บอนคงตัวสูงขึ้นเป็นร้อยละ 31.15 ในขณะที่ถ่านชีวภาพเกรดการค้ามีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 27.17 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของคอลลาซโซ และคนอื่น ๆ (Collazzo et al., 2017) ที่ได้กล่าวถึงปริมาณของสารระเหยในถ่านชีวภาพจากหญ้าเนเปียร์ คือ ร้อยละ 77.24 ซึ่งอยู่ในช่วงที่ระหว่างร้อยละ 70-80 ค่าสารระเหยที่มีปริมาณสูงบ่งบอกได้ว่าเกิดปฏิกิริยาสูงในระหว่างการเปลี่ยนแปลงทางความร้อน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงไปเป็นน้ำมันชีวภาพได้ง่ายในกระบวนการไพโรไลซิส แต่งานวิจัย

นี้ถ่านชีวภาพจากมูลช้างมีปริมาณสารระเหยต่ำกว่าร้อยละ 70 ส่งผลให้มีความชื้นต่ำ เกิดการเผาไหม้ได้อย่างมีประสิทธิภาพทำให้มีส่วนประกอบของคาร์บอนสูงขึ้น จึงเป็นถ่านชีวภาพที่มีคุณสมบัติที่ดี อิวานอฟสกี และคนอื่น ๆ (Ivanovski et al., 2021) ในส่วนของปริมาณเถ้า คือ ส่วนที่เป็นสารอนินทรีย์ที่เหลือหลังจากการเผาไหม้ของถ่านชีวภาพจากมูลช้าง พบว่า มีปริมาณมากเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของคอลลาซโซ และคนอื่น ๆ (Collazzo et al., 2017) รายงานว่าหญ้าเนเปียร์มีปริมาณเถ้าร้อยละ 8.22 และงานวิจัยของพร้อมดี และวิทิตศานต์ (Promdee & Vitidsant, 2013) รายงานว่าหญ้าคามีปริมาณเถ้าร้อยละ 16.1

2. ผลของการวิเคราะห์โดยแยกธาตุ (Ultimate analysis)

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยแยกธาตุของถ่านชีวภาพจากมูลช้าง และถ่านชีวภาพเกรดการค้า แสดงดังในตารางที่ 4.3 พบว่า ถ่านชีวภาพจากมูลช้าง และถ่านชีวภาพเกรดการค้า มีค่าคาร์บอนร้อยละ 58.00 และ 62.93 ไฮโดรเจนร้อยละ 1.87 และ 2.57 ออกซิเจนร้อยละ 8.14 และ 16.01 ไนโตรเจนร้อยละ 1.07 และ 1.98 และซัลเฟอร์ร้อยละ 0.07 และ 0.09 ตามลำดับ

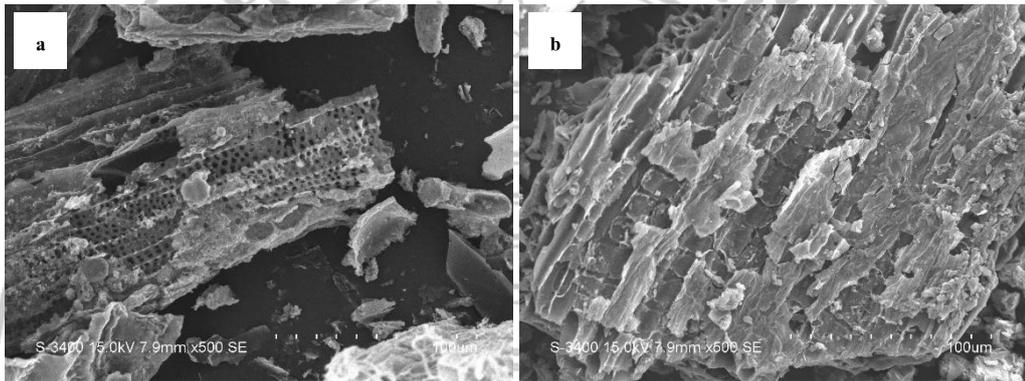
ตารางที่ 4.2 การวิเคราะห์โดยแยกธาตุ (Ultimate Analysis)

องค์ประกอบของธาตุ	ถ่านชีวภาพจากมูลช้าง (ร้อยละ)	ถ่านชีวภาพเกรดการค้า (ร้อยละ)
คาร์บอน	58.00±0.50	62.93±1.00
ไฮโดรเจน	1.87±0.02	2.57±0.03
ออกซิเจน	8.14±0.02	16.01±0.02
ไนโตรเจน	1.07±0.02	1.98±0.01
ซัลเฟอร์	0.07±0.01	0.09±0.01

จากการวิเคราะห์โดยแยกธาตุ พบว่าถ่านชีวภาพจากมูลช้างและถ่านชีวภาพเกรดการค้า มีธาตุคาร์บอนเป็นองค์ประกอบมากที่สุด และพบธาตุออกซิเจนและธาตุไฮโดรเจนเป็นองค์ประกอบรองลงตามลำดับ เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ลิกนิน เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสเกิดการสลายตัวในกระบวนการไพโรไลซิส ส่งผลให้สารประกอบอินทรีย์หลุดออกจากโครงสร้าง และนอกจากนี้สารระเหยบางส่วนหลุดออกจากโครงสร้างเช่นเดียวกัน จึงส่งผลให้สัดส่วนขององค์ประกอบคาร์บอนเพิ่มขึ้น แต่สัดส่วนขององค์ประกอบออกซิเจนและไฮโดรเจนลดลง ทั้งนี้ อัตราส่วนของคาร์บอนต่อออกซิเจนยังแสดงให้เห็นว่าถ่านชีวภาพจากมูลช้างอาจจะ

ประกอบด้วยสารประกอบที่มีสัดส่วนพันธะคาร์บอน-คาร์บอน (C-C) และคาร์บอน-ไฮโดรเจน (C-H) แข็งแรงกว่าเมื่อเทียบกับพันธะคาร์บอน-ออกซิเจน (C-O) ที่มีความแข็งแรงน้อยกว่า ดังนั้น ถ่านชีวภาพจากมูลช้างจึงจัดเป็นวัสดุถ่านชีวภาพที่ดี อีกเปเซนี และคนอื่น ๆ (Ikpeseni et al., nd)

3. ผลของการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวภายนอก โดยใช้เทคนิคทางกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope: SEM)



ภาพที่ 4.1 ลักษณะพื้นผิวภายนอกของถ่านชีวภาพจากมูลช้าง (a) และถ่านชีวภาพเกรดการค้า (b) ที่กำลังขยาย 500 เท่า

ผลจากการถ่ายภาพด้วยเทคนิคทางกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ที่กำลังขยาย 500 เท่า ในภาพที่ 4.1 พบว่า ลักษณะพื้นผิวของถ่านชีวภาพจากมูลช้าง มีขนาดมากกว่าถ่านชีวภาพเกรดการค้า และขนาดรูพรุนของถ่านชีวภาพจากมูลช้างมีขนาดใหญ่กว่าถ่านชีวภาพเกรดการค้าด้วยเช่นกัน เนื่องจากถ่านชีวภาพเกรดการค้ามีปริมาณสารระเหยมากกว่าถ่านชีวภาพจากมูลช้าง ดังแสดงในตารางที่ 4.1 จึงทำให้โครงสร้างของถ่านชีวภาพจัดเรียงตัวเป็นโครงสร้างผลึกที่ไม่เป็นระเบียบ พร้อมทั้งสลายโครงสร้างในส่วนที่เป็นสารระเหยออกมาปกคลุมที่พื้นผิวหรือรูพรุนที่เกิดขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์พื้นผิวจำเพาะ ปริมาณของรูพรุน และจำนวนของรูพรุนในตารางที่ 4.3 พบว่า การผลิตถ่านชีวภาพจากมูลช้างด้วยกระบวนการไพโรลซิส ทำให้พื้นผิวของถ่านชีวภาพมีปริมาณรูพรุนเกิดขึ้นได้มากกว่าถ่านชีวภาพเกรดการค้า

4. ผลของการวิเคราะห์ห้ลักษณะพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดของรูพรุน โดยใช้เทคนิค (Brunauer Emmett-Teller: BET)

ผลการวิเคราะห์ห้ลักษณะพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดของรูพรุนดังแสดงในตารางที่ 4.3 พบว่า ลักษณะพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดของรูพรุนของถ่านชีวภาพจากมูลช้าง และถ่านชีวภาพเกรดการค้า มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 227.5090 และ 1.7790 ตารางเมตรต่อกรัม (m^2/g) ปริมาณของรูพรุน 0.123 และ 0.0040 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม (cm^3/g) และจำนวนของรูพรุน 22.838 และ 112.3449 อังสตรอม (Å) ตามลำดับ

ตารางที่ 4.3 การวิเคราะห์ห้ลักษณะพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดของรูพรุน

ลักษณะ	ถ่านชีวภาพจากมูลช้าง	ถ่านชีวภาพเกรดการค้า
พื้นที่ผิวจำเพาะ ตารางเมตรต่อกรัม (m^2/g)	227.5090	1.7790
ปริมาณของรูพรุน เซนติเมตรต่อกรัม (cm^3/g)	0.123	0.0040
จำนวนของรูพรุน อังสตรอม (Å)	22.8383	112.3449

จากตารางที่ 4.3 แสดงให้เห็นว่าพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาณของรูพรุนและจำนวนของรูพรุนของถ่านชีวภาพเกรดการค้ามีค่าพื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนต่ำกว่าถ่านชีวภาพจากมูลช้าง เนื่องจากการคาร์บอนไนซ์เป็นขั้นแรกของการสร้างรูพรุนและในระหว่างการคาร์บอนไนซ์จะเกิดการสลายตัวเชิงความร้อนของธาตุที่เป็นองค์ประกอบรวมถึงสารระเหยได้ไปเป็นก๊าซที่ไม่ควบแน่นและไฮโดรคาร์บอนเบา ทำให้ถ่านชีวภาพมีการจัดตัวของโครงสร้างผลึกที่ไม่เป็นระเบียบและมีช่องว่างรูพรุนระหว่างผลึกเกิดขึ้น และสารระเหยหรือไฮโดรคาร์บอนเบาที่สลายตัวเชิงความร้อนไปอุดบริเวณช่องว่างรูพรุนระหว่างผลึก ทำให้มีค่าพื้นที่ผิวและปริมาณรูพรุนต่ำ

ผลของการใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้างในการปรับปรุงกระบวนการผลิตไฮโดรเจนด้วยการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของการใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้าง (Biochar from Elephant Dung: ED) และถ่านชีวภาพจากเหง้ามันสำปะหลัง (Biochar From Casava Rhizome: BC) เกรดการค้าที่ได้มาจากวิสาหกิจชุมชนพออินคำแคน จังหวัดขอนแก่น เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ

การผลิตไฮโดรเจนโดยการใช้อ่านชีวภาพในการปรับปรุงกระบวนการผลิตไฮโดรเจนระหว่างอ่านชีวภาพจากมูลช้างกับอ่านชีวภาพเกรดการค้า

1. ผลของการทดสอบการเพิ่มประสิทธิภาพและศึกษาการใช้อ่านชีวภาพจากมูลช้างและอ่านชีวภาพเกรดการค้า โดยใช้กลูโคสเป็นสารตั้งต้น

การวิเคราะห์ผลของคุณสมบัติก่อนหมักและหลังหมักประกอบไปด้วยการหาปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) ของแข็งระเหยง่าย (VS) การทดสอบความเป็นกรด-ด่าง (pH) และการทดสอบหาปริมาณซีโอดี (COD)

ตารางที่ 4.4 ผลของการวิเคราะห์คุณสมบัติของการผลิตไฮโดรเจนด้วยอ่านชีวภาพจากมูลช้างและอ่านชีวภาพเกรดการค้า ก่อนการหมักและหลังการหมัก

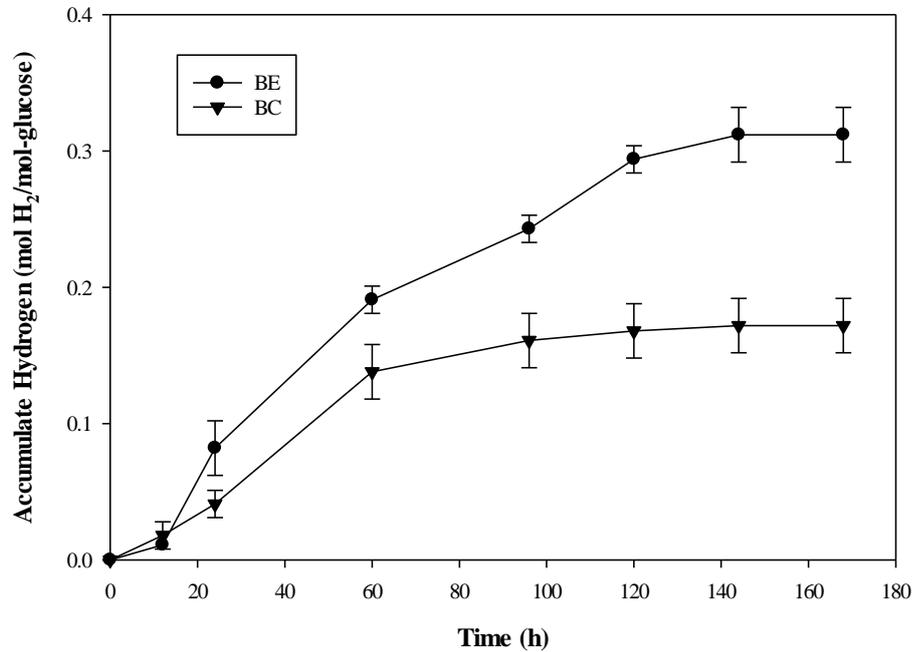
พารามิเตอร์	ผลการทดลอง			
	อ่านชีวภาพจากมูลช้าง		อ่านชีวภาพเกรดการค้า	
	ก่อน	หลัง	ก่อน	หลัง
TS มิลลิกรัมต่อลิตร(mg/L)	39.61±1.0	19.73±0.3	37.41±1.0	20.37±0.2
VS มิลลิกรัมต่อลิตร(mg/L)	33.16±0.5	13.53±0.2	33.10±0.3	20.18±0.5
pH	6.0	4.46	6.0	4.47
COD กรัมต่อลิตร (g/L)	41.99±1.2	33.59±1.2	45.62±1.0	40.72±0.6
ร้อยละการกำจัดซีโอดี	20.00		10.74	

จากผลการทดลองในตารางที่ 4.4 จะเห็นได้ว่าค่าความเป็นกรด-ด่าง จะถูกปรับให้มีค่าเริ่มต้นที่ 6.0 เพื่อให้ในระบบหมักมีค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมและต่อการผลิตไฮโดรเจน ซึ่งจะอยู่ในช่วงระหว่าง 6.0-7.0 หลี และคนอื่นๆ (Li et al., 2014) และเมื่อเสร็จกระบวนการหมักย่อย พบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่างลดลง ซึ่งสอดคล้องกับทางทฤษฎีที่ได้กล่าวถึงกระบวนการผลิตไฮโดรเจน ในขั้นตอนการย่อยสลายสาร โมเลกุลใหญ่ จะถูกย่อยเป็นสาร โมเลกุลเล็กลงในขั้นตอนไฮโดรไลซิส จากนั้นจะเข้าสู่ขั้นตอนการสร้างกรดซึ่ง โมเลกุลเล็กๆ จะถูกเปลี่ยนให้เป็นกรดไขมันระเหยง่าย เช่น กรดบิวทิริก และกรดโพรพิโอนิก เป็นต้น จากนั้นจะมีกลุ่มจุลินทรีย์มาย่อยสลายกรดอินทรีย์เหล่านี้ให้เป็นกรดอะซิติก กรดฟอร์มิก ไฮโดรเจนและก๊าซ

คาร์บอนไดออกไซด์ เมื่อในระบบหมักทำให้เกิดสภาวะกรด-ด่างลดลง ทำให้จุลินทรีย์ต้องใช้พลังงานในการปรับสภาวะกรด-ด่างให้สมดุล และย่อยเกิดอะซิเตทและบิวทิเรทเป็นผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนการสร้างกรด ซึ่งสาเหตุนี้ส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่างลดลง อีกทั้งกระบวนการหมักย่อยยังถูกยับยั้งเมื่อค่าความเป็นกรด-ด่างลดลงต่ำกว่า 6.0 ทำให้การผลิตไฮโดรเจนลดลงตามอีกด้วย สาริพันธ์ และเรืองแสง (Saripan & Reungsang, 2014)

ตารางที่ 4.5 งานวิจัยที่ศึกษาค่าความเป็นกรด-ด่าง ในการผลิตไฮโดรเจน

สารตั้งต้น	ค่าความเป็นกรด-ด่าง		ผลผลิตไฮโดรเจน (mol H ₂ /mol glucose)	ที่มา
	ค่าที่ศึกษา	ค่าที่เหมาะสม		
กลูโคส	5.5-7.0	6.0	0.55	ฮัน และคน อื่น ๆ (Han et al., 2019)
กลูโคส	6.0-7.5	6.5	0.52	จาว และคน อื่น ๆ (Zhao et al., 2021)
กลูโคส	6.5-8.0	7.0	0.48	หวาง และคน อื่น ๆ (Wang et al., 2023)
กลูโคส	6.0	6.0	0.37	งานวิจัยนี้



ภาพที่ 4.2 การผลิตไฮโดรเจนด้วยถ่านชีวภาพจากมูลช้างเปรียบเทียบกับถ่านชีวภาพเกรดการค้า โดยใช้กลูโคสเป็นสารตั้งต้น

จากภาพที่ 4.2 จะเห็นได้ว่าถ่านชีวภาพจากมูลช้างสามารถผลิตไฮโดรเจนสะสมได้ถึง 0.32 โมลไฮโดรเจนต่อโมลกลูโคส (mol H₂/mol glucose) และถ่านชีวภาพเกรดการค้าสามารถผลิตไฮโดรเจนได้เพียง 0.17 โมลไฮโดรเจนต่อโมลกลูโคส (mol H₂/mol glucose) เนื่องจากถ่านชีวภาพจากมูลช้างมีคุณสมบัติพื้นที่ผิวจำเพาะ ปริมาตรรูพรุน และจำนวนของรูพรุนที่มากกว่าถ่านชีวภาพเกรดการค้า จึงทำให้การผลิตไฮโดรเจนด้วยถ่านชีวภาพจากมูลช้างมีพื้นที่บนผิวให้จุลินทรีย์ได้เข้ามาอาศัยเพื่อเป็นที่อยู่สำหรับการเจริญเติบโตเพื่อผลิตไฮโดรเจนได้สูงขึ้น จาง และคนอื่น ๆ (Zhang et al., 2017b)

2. ผลของการทดสอบการเพิ่มประสิทธิภาพและศึกษาหาปริมาณการใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้าง โดยใช้กลูโคสเป็นสารตั้งต้น

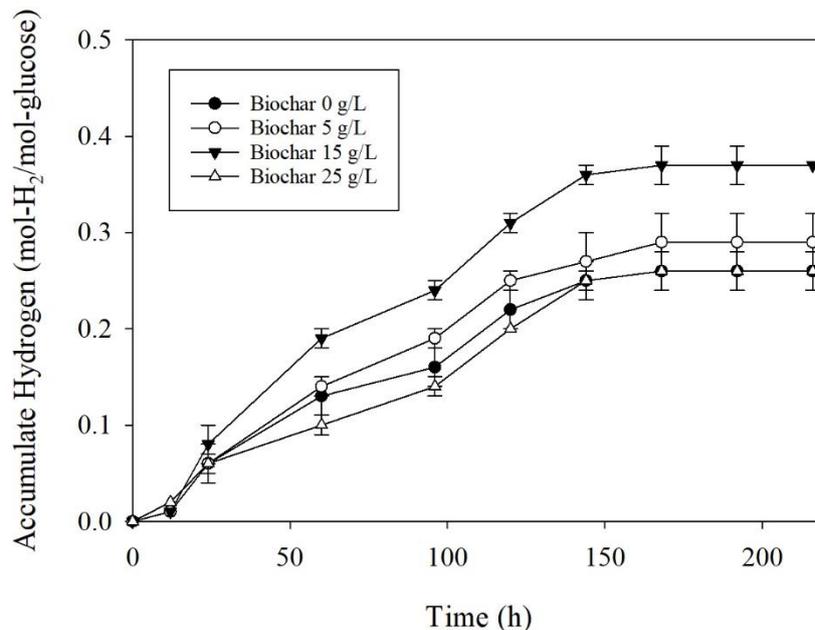
การผลิตไฮโดรเจนด้วยถ่านชีวภาพจากมูลช้างและถ่านชีวภาพเกรดการค้า โดยมีเงื่อนไขการทดลอง คือ ใช้กลูโคส 20 กรัมซีโอดีต่อลิตร (g COD/L) เป็นสารตั้งต้น ใช้ตะกอนน้ำเสียจากโรงงานปิโตรเลียม 5 กรัมของแข็งระเหยง่าย (gVS_{add}) เป็นเชื้อจุลินทรีย์ และใช้ปริมาณถ่านชีวภาพ 0, 5, 10 และ 15 กรัมต่อลิตร (g/L) โดยปริมาณถ่านชีวภาพที่ 0 กรัมต่อลิตร (g/L)

หมายถึง การไม่เติมถ่านชีวภาพในระบบหมักย่อย การวิเคราะห์ผลของคุณสมบัติก่อนหมักและหลังหมักประกอบไปด้วยการหาปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) ของแข็งระเหยง่าย (VS) การทดสอบความเป็นกรด-ด่าง (pH) และการทดสอบหาปริมาณซีโอดี (COD) โดยผลการวิเคราะห์แสดงในตารางที่ 4.6 ดังนี้

ตารางที่ 4.6 ผลของการวิเคราะห์คุณสมบัติของการผลิตไฮโดรเจนด้วยถ่านชีวภาพจากมูลช้าง

พารามิเตอร์	ปริมาณถ่าน (กรัม)	ถ่านชีวภาพจากมูลช้าง	
		ก่อน	หลัง
TS มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L)	0	18.15±0.2	11.22±0.1 38.1
	5	23.44±0.1	17.50±0.2 25.3
	15	33.18±0.3	24.95±0.1 24.80
	25	42.88±0.3	37.8±0.2 11.84
VS มิลลิกรัมต่อลิตร (mg/L)	0	15.99±0.2	8.04±0.2 49.96
	5	19.94±0.1	13.10±0.2 34.30
	15	27.07±0.3	18.34±0.2 51.14
	25	34.12±0.2	27.71±0.3 18.7
pH	0	6.0	4.50
	5	6.0	4.38
	15	6.0	4.43
	25	6.0	4.46
COD กรัมต่อลิตร (g/L)	0	40.06±0.9	34.69±1.0
	5	40.74±0.9	31.67±0.9
	15	41.44±0.9	30.06±1.0
	25	41.78±0.2	38.16±1.0
ร้อยละการกำจัดซีโอดี (%) COD _{removed})	0		13.40
	5		22.26
	15		26.88
	25		8.66

การวิเคราะห์ผลกระทบจากค่าความเป็นกรด-ด่าง ต่อการผลิตไฮโดรเจน ซึ่งผลกระทบของการใช้ถ่านชีวภาพในปริมาณต่าง ๆ ต่อการผลิตไฮโดรเจนจากการเติมสารอินทรีย์เพียงครั้งเดียวพบว่า ปริมาณถ่านชีวภาพมีผลต่อค่าความเป็นกรด-ด่าง ในสารอินทรีย์ การเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่ใช้ในการผลิตไฮโดรเจน และระยะเวลาในการผลิตไฮโดรเจน จากและคนอื่น ๆ (Zhang et al., 2017b) การเติมปริมาณถ่านชีวภาพส่งผลโดยตรงต่อการผลิตไฮโดรเจนอย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงในภาพที่ 4.3 เนื่องจากปริมาณถ่านชีวภาพที่เหมาะสมจะสามารถรักษาค่าความเป็นกรด-ด่างที่เสถียรและเหมาะสมในช่วง 6.0-7.0 และยังสามารถสร้างการเจริญเติบโตของแบคทีเรียที่ผลิตไฮโดรเจน ซึ่งทำให้มีการรักษาความเข้มข้นสูงของแบคทีเรียที่ผลิตไฮโดรเจนและเพิ่มประสิทธิภาพของเอนไซม์ได้ หลี่ และคนอื่น ๆ (Li et al., 2014) จากตารางที่ 4.6 จะเห็นได้ว่าเมื่อเติมถ่านชีวภาพจากมูลช้างลงในระบบหมักจะถูกปรับความเป็นกรด-ด่างให้มีค่าเริ่มต้นที่ 6.0 เพื่อให้เหมาะสมกับการผลิตไฮโดรเจนซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของดาร์ ไอติ และคนอื่น ๆ (Dareioti et al., 2014) ได้ศึกษาการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้วัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมเกษตรเป็นเชื้อจุลินทรีย์ และใช้ตะกอนจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศเป็นสารตั้งต้น โดยค่าความเป็นกรด-ด่างที่ศึกษา คือ 4.5-7.5 พบว่าค่าที่เหมาะสม คือ 6.0 สามารถผลิตไฮโดรเจนได้ 0.64 โมลไฮโดรเจนต่อโมลกลูโคส ($\text{mol H}_2/\text{mol glucose}$) ดาร์ ไอติ และคนอื่น ๆ (Dareioti et al., 2014)



ภาพที่ 4.3 การผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ปริมาณของถ่านชีวภาพจากมูลช้างที่แตกต่างกัน โดยใช้กลูโคสเป็นสารตั้งต้น

จากภาพที่ 4.3 พบว่า การผลิตไฮโดรเจนด้วยถ่านชีวภาพมีผลต่อปริมาณไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น เนื่องจากถ่านชีวภาพที่ใช้เป็นแหล่งคาร์บอนถูกนำเข้าสู่แบคทีเรียที่ใช้ในการหมัก หลีและคนอื่น ๆ (Li et al., 2014) อีกทั้งการเพิ่มถ่านชีวภาพสามารถลดระยะเวลาของการผลิตไฮโดรเจนได้ การเติมถ่านชีวภาพเข้าไปในระบบหมักจะสามารถผลิตไฮโดรเจนสะสมได้มากกว่าระบบหมักที่ไม่ได้เติมถ่านชีวภาพ ผลการทดลองพบว่าเมื่อไม่ได้เติมถ่านชีวภาพ สามารถผลิตไฮโดรเจนได้ 0.26 โมลไฮโดรเจนต่อโมลกลูโคส ($\text{mol H}_2/\text{mol glucose}$) อย่างไรก็ตาม เมื่อความเข้มข้นของถ่านชีวภาพที่ 25 กรัมต่อลิตร (g/L) พบว่าปริมาณการผลิตไฮโดรเจนสะสมเริ่มลดลง อาจเป็นเพราะเมื่อความเข้มข้นของถ่านชีวภาพเพิ่มขึ้น การผลิตไฮโดรเจนจะลดลง 0.26 โมลไฮโดรเจนต่อโมลกลูโคส ($\text{mol H}_2/\text{mol glucose}$) แสดงให้เห็นว่าเมื่อปริมาณถ่านชีวภาพที่มากเกินไป จะสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ได้ เนื่องเกิดสภาพความเป็นด่างอ่อน หรือการรวมตัวกันทำให้ไม่มีพื้นที่ว่างบนผิวของถ่านชีวภาพ ในขณะที่ความเข้มข้นของถ่านชีวภาพ 15 กรัมต่อลิตร (g/L) พบว่าสามารถผลิตไฮโดรเจนสะสมสูงสุด โดยมีปริมาณไฮโดรเจนเพิ่มขึ้น คือ 0.37 โมลไฮโดรเจนต่อโมลกลูโคส ($\text{mol H}_2/\text{mol glucose}$) ซึ่งอาจเป็นเพราะการช่วยเรื่องการเจริญเติบโตของแบคทีเรียกลุ่มอะนาโรบิกบนผิวของถ่านชีวภาพ เนื่องจากโครงสร้างรูพรุนของถ่านชีวภาพจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตไฮโดรเจน โดยรูพรุนของถ่านชีวภาพจะช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในไบโอฟิล์ม และที่สำคัญถ่านชีวภาพมีค่าความเป็นด่างพอที่จะทำหน้าที่เป็นตัวปรับปรุงในการปรับสมดุลของระบบหมักได้

3. ผลของการหาสภาวะที่เหมาะสมของน้ำชะมูลช้างในการผลิตไฮโดรเจน

3.1 ผลการวิเคราะห์ค่าซีโอดีของน้ำชะมูลช้าง งานวิจัยนี้ได้ศึกษาการผลิตไฮโดรเจนจากน้ำชะมูลช้าง 2 สายพันธุ์ คือ มูลช้างเอเชีย และมูลช้างแอฟริกา โดยเก็บตัวอย่างมูลช้างมาจากสวนสัตว์ประเทศไต้หวัน กระบวนการเตรียมน้ำชะมูลช้าง คือ การเจือจางมูลช้างด้วยน้ำกลั่นในอัตราส่วนของน้ำ 1 ส่วน ต่อมูลช้าง 1 ส่วน หรือ 1:1, อัตราส่วนของน้ำ 1 ส่วน ต่อมูลช้าง 2 ส่วน หรือ 1:2, อัตราส่วนของน้ำ 1 ส่วน ต่อมูลช้าง 3 ส่วน หรือ 1:3 และ อัตราส่วนของน้ำ 1 ส่วน ต่อมูลช้าง 4 ส่วน หรือ 1:4 จากนั้นบีบคั้นเอาเฉพาะส่วนที่เป็นน้ำมาวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี ผลการทดสอบหาปริมาณซีโอดี (COD) ดังแสดงในตารางที่ 4.7 น้ำชะมูลช้างเอเชียมีศักยภาพในการผลิตไฮโดรเจนมากกว่าน้ำชะมูลช้างแอฟริกา สังเกตได้จากค่าซีโอดีของน้ำชะมูลช้างเอเชียที่มีค่าต่ำกว่าในทุกอัตราส่วนที่ทดสอบ เป็นเพราะว่ามูลช้างเอเชียมีองค์ประกอบของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสรวมไปถึงปริมาณเส้นใยอาหาร และคาร์โบไฮเดรตสูงกว่ามูลช้างแอฟริกา ส่งผลให้จุลินทรีย์ย่อยสลายมูลช้างเอเชียได้ง่ายกว่า ชั่ว และคนอื่น ๆ, มุนยาราดซี และคนอื่น ๆ (Chayoa et al., 2020; Munyaradzi et al., 2018)

ตารางที่ 4.7 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของน้ำชะมูลช้าง

น้ำชะมูลช้างเอเชีย	ค่าซีโอดี		น้ำชะมูลช้างแอฟริกา	ค่าซีโอดี	
	กรัมซีโอดีต่อลิตร (g COD/L)			กรัมซีโอดีต่อลิตร (g COD/L)	
1:1	34.75±5.2		1:1	47.70±89	
1:2	16.80±3.1		1:2	30.52±3.4	
1:3	13.98±2.7		1:3	17.44±3.6	
1:4	5.51±0.9		1:4	13.46±1.8	

จากการศึกษางานวิจัยก่อนหน้านี้ พบว่า ค่าซีโอดีที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไฮโดรเจนคือ ซีโอดี เท่ากับ 20 กรัมซีโอดีต่อลิตร (g COD/L) สอดคล้องกับงานวิจัยของหลี่ และคนอื่น ๆ (Li et al., 2011) ได้ศึกษารายงานว่า ความเข้มข้นของน้ำเสียจากการย่อยสลายเห็ดที่เหมาะสมในการผลิตไฮโดรเจน คือ 20 กรัมซีโอดีต่อลิตร หลี่ และคนอื่น ๆ (Li et al., 2011) เนื่องจากค่าซีโอดีที่มากเกินไปอาจทำให้สารอินทรีย์ในระบบสะสมมาก ส่งผลให้เกิดการลดค่าความเป็นกรด-ด่าง และอาจยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ผลิตไฮโดรเจนได้ หลี่ และคนอื่น ๆ (Li et al., 2011)

ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้สนใจศึกษามูลช้างทั้ง 2 สายพันธุ์ ได้เลือกใช้อัตราส่วนน้ำต่อมูลช้างเอเชียและมูลช้างแอฟริกา ที่อัตราส่วน 1:2 และ 1:3 เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตไฮโดรเจนจากมูลช้างทั้ง 2 สายพันธุ์ เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนโดยใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้างร่วมกับผลของอัตราส่วนน้ำต่อมูลช้างที่มีต่อปริมาณไฮโดรเจนที่ได้

3.2 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของเชื้อจุลินทรีย์ งานวิจัยนี้ได้ใช้ตะกอนจากน้ำเสียปีโตรเลียมเป็นเชื้อจุลินทรีย์ ในการผลิตไฮโดรเจน โดยตะกอนที่ได้มีลักษณะเป็นเกล็ดขนาดเล็กที่ผ่านการปรับสภาพด้วยความร้อน เพื่อยับยั้งจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดการผลิตมีเทน เมื่อผ่านกระบวนการปรับสภาพแล้วจึงนำมาวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี ได้แก่ ปริมาณของแข็งทั้งหมด (TS) เท่ากับ 994.56 กรัมต่อลิตร (g/L) และของแข็งระเหยง่าย (VS) ได้เท่ากับ 849.59 กรัมต่อลิตร (g/L) โดยค่าปริมาณของแข็งทั้งหมด บ่งบอกถึงปริมาณของแข็งทั้งหมดในตะกอนน้ำเสียปีโตรเลียม ซึ่งรวมถึงสารอินทรีย์และอนินทรีย์ ค่าของแข็งระเหยง่าย บ่งบอกถึงปริมาณของแข็งอินทรีย์ในตะกอนน้ำเสียปีโตรเลียม ซึ่งสามารถย่อยสลายโดยจุลินทรีย์เพื่อผลิตไฮโดรเจน

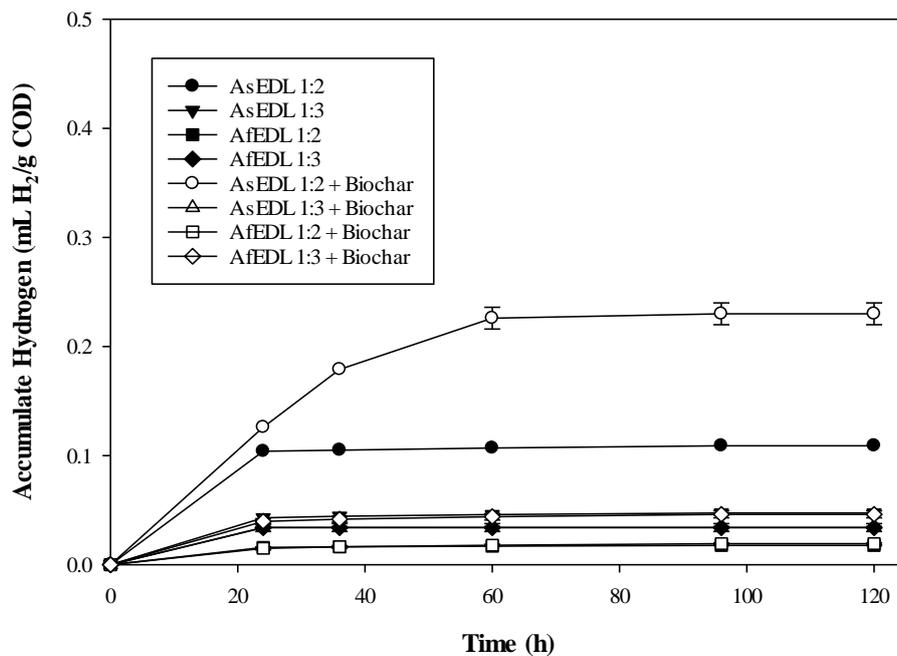
ตารางที่ 4.8 การวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่าซีโอดีของน้ำชะมูลช้างที่อัตราส่วนมูลช้าง
สดต่อน้ำ

พารามิเตอร์		ตัวอย่าง			
		น้ำชะมูลช้าง	น้ำชะมูลช้าง	น้ำชะมูลช้าง	น้ำชะมูลช้าง
		เอเชีย	เอเชีย	แอฟริกา	แอฟริกา
		1:2	1:3	1:2	1:3
pH	ก่อน	6.5	6.5	6.5	6.5
	หลัง	5.85	6.0	6.2	6.2
COD กรัมต่อลิตร (g/L)	ก่อน	77.64	73.54	71.69	72.51
	หลัง	60.59	64.29	65.94	66.96
ร้อยละการกำจัดซี โอดี (%COD _{removed})	-	21.96	12.57	8.02	7.65

4. ผลของการใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้างในการผลิตไฮโดรเจนด้วยการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยใช้น้ำชะมูลช้างเป็นสารตั้งต้น

จากผลการศึกษการใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้างและถ่านชีวภาพเกรดการค้า โดยใช้กลูโคสที่มีค่าซีโอดี (ค่าความเข้มข้นของสารตั้งต้น) 20 กรัมซีโอดีต่อลิตร (g COD/L) เป็นสารตั้งต้น สรุปได้ว่า ถ่านชีวภาพจากมูลช้างมีศักยภาพในการผลิตไฮโดรเจนได้ดีกว่าถ่านชีวภาพเกรดการค้า จากนั้นจึงได้ศึกษาหาปริมาณการใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้าง โดยใช้กลูโคสเป็นสารตั้งต้นเช่นกัน และสรุปได้ว่า การเติมถ่านชีวภาพจากมูลช้างปริมาณ 15 กรัมต่อลิตร (g/L) สามารถผลิตไฮโดรเจนได้ ดังนั้นในการศึกษาผลของการใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้างในการผลิตไฮโดรเจนด้วยการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยใช้น้ำชะมูลช้างเป็นสารตั้งต้น จึงมีความเป็นไปได้ที่จะใช้น้ำชะมูลช้างที่มีค่าซีโอดีใกล้เคียง 20 กรัมซีโอดีต่อลิตร (g COD/L) เนื่องจากค่าซีโอดีเป็นตัววัดปริมาณสารอินทรีย์ในน้ำ ซึ่งสารอินทรีย์เหล่านี้จะสามารถนำมาเปลี่ยนเป็นไฮโดรเจนได้ ดังนั้น น้ำชะมูลช้างที่มีค่าซีโอดี 20 กรัมซีโอดีต่อลิตร (g COD/L) จึงมีค่าความเข้มข้นของสารตั้งต้นที่เหมาะสม ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองก่อนหน้านี้ที่พบว่า การผลิตไฮโดรเจนด้วยถ่านชีวภาพจากมูลช้าง โดยใช้กลูโคสที่ค่าซีโอดีเท่ากับ 20 กรัมต่อลิตร (g COD/L) มีประสิทธิภาพในการผลิตไฮโดรเจนได้ จากการศึกษาของงานวิจัยของเฉิน, หลิว และเฉิน (Chen, Liu & Chen., 2021) พบว่า

ศึกษาการผลิตไฮโดรเจนจากน้ำเสียจากโรงงานผลิตเอทานอล โดยใช้ถ่านชีวภาพจากกากกาแฟ พบว่าถ่านชีวภาพจากกากกาแฟสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฮโดรเจนจากน้ำเสียที่มีค่าซีโอดี 22 กรัมต่อลิตร (g/L) ได้ผลผลิตไฮโดรเจน 1.2 ลิตรต่อกรัมซีโอดี (L/g COD) (เฉิน, หลิว และเฉิน (Chen, Liu & Chen., 2021) นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยการผลิตไฮโดรเจนจากน้ำเสียจากโรงงานผลิตกระดาษ โดยใช้ถ่านชีวภาพจากฟางข้าว พบว่าถ่านชีวภาพจากฟางข้าวสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฮโดรเจนจากน้ำเสียที่มีค่าซีโอดี 18 กรัมซีโอดีต่อลิตร (g COD/L) ได้ผลผลิตไฮโดรเจน 1.8 กรัมซีโอดีต่อลิตร (g COD/L) จากงานวิจัยที่ได้ศึกษาข้างต้น แสดงให้เห็นว่า ถ่านชีวภาพสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฮโดรเจนจากสารตั้งต้นที่มีค่าซีโอดี ใกล้เคียงกับ 20 กรัมซีโอดีต่อลิตร (g COD/L)



ภาพที่ 4.4 การผลิตไฮโดรเจนด้วยน้ำชะมูลช้างโดยใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้างเป็นตัวกลาง

จากภาพที่ 4.4 พบว่าการผลิตไฮโดรเจนด้วยถ่านชีวภาพและไม่ใช้ถ่านชีวภาพ โดยใช้ น้ำชะมูลช้างเอเชีย และแอฟริกาที่อัตราส่วนน้ำต่อมูลช้าง 1:2 และ 1:3 เป็นสารตั้งต้น ผลการทดลอง พบว่า การผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนที่ไม่ได้เติมถ่านชีวภาพลงไป หมักร่วมกับน้ำชะมูลช้างเอเชีย และแอฟริกาที่อัตราส่วนน้ำต่อมูลช้าง 1:2 และ 1:3 มีศักยภาพ

ในการผลิตไฮโดรเจนได้เพียง 0.109, 0.047, 0.017 และ 0.036 มิลลิลิตรไฮโดรเจนต่อกรัมชีโอดีตามลำดับ แต่เมื่อเติมถ่านชีวภาพลงในระบบหมัก พบว่า มีศักยภาพในการผลิตไฮโดรเจนที่เพิ่มขึ้นคือ 0.231, 0.034, 0.020 และ 0.047 มิลลิลิตรไฮโดรเจนต่อกรัมชีโอดี (mol H₂/mol glucose) ตามลำดับ และจะเห็นได้ว่า อัตราส่วนน้ำต่อมูลช้างเอเชีย 1:2 สามารถผลิตไฮโดรเจนได้สูงกว่าที่อัตราส่วนอื่นๆ และมีประสิทธิภาพในการกำจัดของแข็งระเหยง่ายของระบบถึงร้อยละ 21.96 แสดงผลในตารางที่ 4.10 ซึ่งสามารถกำจัดของแข็งระเหยง่ายได้มากกว่าที่อัตราส่วนอื่น ๆ ทั้งนี้เป็นเพราะที่น้ำชะมูลช้างเอเชียที่อัตราส่วน 1:2 มีองค์ประกอบของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส รวมไปถึงปริมาณเส้นใยอาหาร และคาร์โบไฮเดรตสูงกว่ามูลช้างแอฟริกา ส่งผลให้จุลินทรีย์ย่อยสลายมูลช้างเอเชียได้ง่ายกว่า ชั่ว และคนอื่น ๆ, มุนยาราดซี และคนอื่น ๆ (Chayoa et al., 2020; Munyaradzi et al., 2018) จึงไปสร้างกรดเพื่อผลิตไฮโดรเจน อีกทั้งยังมีการเติมถ่านชีวภาพจากมูลช้างเข้าไปในระบบหมัก ทำให้มีผลต่อการการผลิตไฮโดรเจน โดยทั่วไประบบหมักที่มีการเติมถ่านชีวภาพจะสามารถเพิ่มการผลิตไฮโดรเจนได้สูงกว่าระบบหมักที่ไม่เติมถ่านชีวภาพ เป็นเพราะว่า ถ่านชีวภาพมีบทบาทสำคัญ คือ มีความสามารถในการเสริมกิจกรรมของจุลินทรีย์สำหรับการผลิตไฮโดรเจน โดยงานวิจัยของจาง และคนอื่น ๆ (Zhang et al., 2017) ได้กล่าวไว้ว่า ถ่านชีวภาพจะช่วยกระตุ้นการสร้างพอลิเมอร์ภายนอก ซึ่งถือว่าเป็นตัวกลางสำคัญสำหรับการเกาะติดของจุลินทรีย์กับพื้นผิวของถ่านชีวภาพเมื่อเกิดไบโอฟิล์ม ดังนั้น การเติมถ่านชีวภาพจึงช่วยให้จุลินทรีย์ที่เกาะติดเติบโตได้เร็วขึ้น ทำให้การผลิตไฮโดรเจนเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็ว และลดเวลาในการผลิตได้อีกด้วย

การศึกษางานวิจัยของหวาง, จาง, จาว และฮี (Wang, Zhang, Zhao & He., 2024) ได้ศึกษาการใช้ถ่านชีวภาพฟางข้าวที่เตรียมโดยวิธีไพโรไลซิส ที่อุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส พบว่า ถ่านชีวภาพนี้มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 120 ตารางเมตรต่อกรัม สามารถผลิตไฮโดรเจนได้ 0.5 มิลลิลิตรไฮโดรเจนต่อกรัมชีโอดี และงานวิจัยของเฉิน และคนอื่น ๆ (Chen et al., 2016) ศึกษาการผลิตไฮโดรเจนด้วยมูลวัวที่เจือจางด้วยอัตราส่วนของน้ำ 1 ส่วน ต่อมูลวัว 2 ส่วน และเติมถ่านชีวภาพร้อยละ 5 พบว่า สามารถผลิตไฮโดรเจนได้ 0.38 มิลลิลิตรไฮโดรเจนต่อกรัมชีโอดี เมื่อเปรียบคุณสมบัติของถ่านชีวภาพจากมูลช้างกับงานวิจัยก่อนหน้านั้น จะเห็นได้ว่างานวิจัยนี้ ถ่านชีวภาพจากมูลช้างมีพื้นที่ผิว เท่ากับ 227.5 ตารางเมตรต่อกรัม (m²/g) สามารถผลิตไฮโดรเจนได้ 0.231 มิลลิลิตรไฮโดรเจนต่อกรัมชีโอดี (mL H₂/g COD) ซึ่งผลิตไฮโดรเจนได้ใกล้เคียงกับงานวิจัยที่ได้ศึกษา

จากผลการศึกษางานวิจัยการประยุกต์ใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้างในการปรับปรุงกระบวนการผลิตไฮโดรเจนด้วยการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน ชี้ให้เห็นว่า การใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้างในการผลิตไฮโดรเจนจึงเป็นทางเลือกที่มีศักยภาพในการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตพลังงานที่มีความมีประสิทธิภาพและมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมลดลงในอนาคต

บทที่ 5

สรุปอภิปรายผล ข้อจำกัด และข้อเสนอแนะ

สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้เป็นงานวิจัยเพื่อผลิตถ่านชีวภาพจากมูลช้างด้วยกระบวนการไพโรไลซิส และเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนโดยใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้าง พร้อมทั้งทดสอบการเพิ่มประสิทธิภาพและศึกษาหาปริมาณการใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้าง โดยก่อนจะเริ่มการผลิตไฮโดรเจนด้วยถ่านชีวภาพ ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของถ่านชีวภาพจากมูลช้างและถ่านชีวภาพเกรดการค้า โดยสามารถสรุปในข้อ 1 ได้ดังนี้

1. ผลของการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของการผลิตถ่านชีวภาพจากมูลช้างด้วยกระบวนการไพโรไลซิส

1.1 ผลของการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ พบว่า ถ่านชีวภาพจากมูลช้าง และถ่านชีวภาพเกรดการค้า มีค่าความชื้นร้อยละ 1.93 และ 5.69 ปริมาณสารระเหยร้อยละ 36.67 และ 56.30 เถ้าร้อยละ 30.24 และ 16.85 และปริมาณคาร์บอนคงตัวร้อยละ 31.15 และ 27.17 ตามลำดับ

1.2 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบโดยแยกธาตุ ของถ่านชีวภาพจากมูลช้าง และถ่านชีวภาพเกรดการค้า พบว่า ถ่านชีวภาพจากมูลช้าง และถ่านชีวภาพเกรดการค้า มีค่าคาร์บอนร้อยละ 58.00 และ 62.93 ไฮโดรเจนร้อยละ 1.87 และ 2.57 ออกซิเจนร้อยละ 8.14 และ 16.01 ไนโตรเจนร้อยละ 1.07 และ 1.98 และซัลเฟอร์ร้อยละ 0.07 และ 0.09 ตามลำดับ

1.3 ผลจากการถ่ายภาพด้วยเทคนิคทางกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ที่กำลังขยาย 500 เท่า พบว่า ลักษณะพื้นที่ผิวของถ่านชีวภาพจากมูลช้าง มีขนาดมากกว่าถ่านชีวภาพเกรดการค้า และขนาดรูพรุนของถ่านชีวภาพจากมูลช้างมีขนาดใหญ่กว่าถ่านชีวภาพเกรดการค้าด้วยเช่นกัน เนื่องจากถ่านชีวภาพเกรดการค้ามีปริมาณสารระเหยมากกว่าถ่านชีวภาพจากมูลช้าง จึงทำให้โครงสร้างของถ่านชีวภาพจัดเรียงตัวเป็น โครงสร้างผลึกที่ไม่เป็นระเบียบ พร้อมทั้งสลาย

โครงสร้างในส่วนที่เป็นสารระเหยออกมาปกคลุมที่พื้นผิวหรือรูพรุนที่เกิดขึ้น ทำให้การผลิตไฮโดรเจนด้วยถ่านชีวภาพจากมูลช้างมีประสิทธิภาพมากกว่า

1.4 ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดของรูพรุน พบว่า ลักษณะพื้นที่ผิวจำเพาะและขนาดของรูพรุนของถ่านชีวภาพจากมูลช้าง และถ่านชีวภาพเกรดการค้า มีพื้นที่ผิวจำเพาะ 227.5090 และ 1.7790 ตารางเมตรต่อกรัม ปริมาณของรูพรุน 0.123 และ 0.0040 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม และจำนวนของรูพรุน 22.838 และ 112.3449 อังสตรอม ตามลำดับ

จากการวิเคราะห์ผลของการศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของการผลิตถ่านชีวภาพจากมูลช้างด้วยกระบวนการไพโรไลซิส จึงสรุปได้ว่าถ่านชีวภาพจากมูลช้างมีคุณสมบัติที่ดีและเหมาะสมสำหรับนำไปเป็นตัวกลางในการผลิตไฮโดรเจนได้มากกว่าถ่านชีวภาพเกรดการค้า แต่ถึงอย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ยังได้นำถ่านชีวภาพทั้ง 2 ชนิดที่ได้กล่าวถึงไปทดลองผลิตไฮโดรเจนปริมาณ 5 กรัมต่อลิตร เพื่อยืนยันว่าการผลิตไฮโดรเจนด้วยถ่านชีวภาพจากมูลช้างมีประสิทธิภาพมากกว่าถ่านชีวภาพเกรดการค้าได้จริง จึงได้ข้อสรุปข้อที่ 2 ดังนี้

2. ผลของการทดสอบการเพิ่มประสิทธิภาพและศึกษาการใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้างและถ่านชีวภาพเกรดการค้า

จากการวิเคราะห์ผลของการผลิตไฮโดรเจนด้วยถ่านชีวภาพจากมูลช้าง และถ่านชีวภาพเกรดการค้าปริมาณ 5 กรัมต่อลิตร โดยใช้กลูโคสเป็นสารตั้งต้น และใช้ตะกอนน้ำเสียจากโรงงานปิโตรเลียมเป็นจุลินทรีย์ พบว่า การผลิตไฮโดรเจนด้วยถ่านชีวภาพจากมูลช้างสามารถผลิตไฮโดรเจนสะสมได้สูงสุด 0.32 โมลไฮโดรเจนต่อโมลกลูโคส ในขณะที่ถ่านชีวภาพเกรดการค้าสามารถผลิตไฮโดรเจนสะสมได้เพียง 0.17 โมลไฮโดรเจนต่อโมลกลูโคส ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้เลือกถ่านชีวภาพจากมูลช้างเพื่อนำไปทดสอบการเพิ่มประสิทธิภาพและศึกษาหาปริมาณการใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้าง 0, 5, 15 และ 25 กรัมต่อลิตร ในการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้กลูโคส 20 กรัมซีไอดีต่อลิตร เป็นสารตั้งต้นเช่นเดียวกัน จึงได้ข้อสรุปข้อที่ 3 ดังนี้

3. ผลของการทดสอบการเพิ่มประสิทธิภาพและศึกษาหาปริมาณการใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้าง

จากการวิเคราะห์ผลของการปริมาณการใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้าง 0, 5, 15 และ 25 กรัมต่อลิตร พบว่า การผลิตไฮโดรเจนด้วยถ่านชีวภาพจากมูลช้างสามารถผลิตไฮโดรเจนสะสมได้ 0.26, 0.29, 0.37 และ 0.26 โมลไฮโดรเจนต่อโมลกลูโคส ตามลำดับ ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยจึงเลือกปริมาณถ่านชีวภาพจากมูลช้าง 15 กรัมต่อลิตร สำหรับนำไปใช้ในการผลิตไฮโดรเจนด้วยถ่านชีวภาพจากมูลช้าง โดยใช้น้ำชะมูลช้างที่อัตราส่วนต่าง ๆ เป็นสารตั้งต้น และยังคงใช้ตะกอนน้ำเสียจากโรงงานปิโตรเลียมเป็นจุลินทรีย์ จึงได้ข้อสรุปข้อที่ 4 ดังนี้

4. ผลของการหาสภาวะที่เหมาะสมของน้ำชะมูลช้างในการผลิตไฮโดรเจน

จากผลการหาความเข้มข้นของสารตั้งต้น ได้แก่ มูลช้างเอเชียและมูลช้างแอฟริกา ที่อัตราส่วนน้ำต่อมูลช้าง 1:1, 1:2, 1:3 และ 1:4 พบว่า ความเข้มข้นที่เหมาะสมของสารตั้งต้นที่นำมาผลิตไฮโดรเจน ได้แก่ อัตราส่วนน้ำต่อมูลช้างเอเชีย 1:2 และ 1:3 มีค่าเท่ากับ 16.80 และ 13.98 ตามลำดับ และน้ำชะมูลช้างอัตราส่วนน้ำต่อมูลช้างแอฟริกา 1:2 และ 1:3 มีค่าเท่ากับ 30.52 และ 17.44 ตามลำดับ โดยได้วิเคราะห์แล้วว่ามีความเข้มข้นที่เหมาะสมจะนำไปเป็นสารตั้งต้นสำหรับผลิตไฮโดรเจนด้วยถ่านชีวภาพจากมูลช้าง และได้ข้อสรุปดังข้อที่ 5 ดังนี้

5. ผลของการปรับปรุงกระบวนการผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้าง

จากผลการทดลองผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยใช้ถ่านชีวภาพจากมูลช้าง ซึ่งสามารถนำไปผลิตไฮโดรเจนได้ 0.231, 0.034, 0.020 และ 0.047 มิลลิลิตรไฮโดรเจนต่อกรัมชีโอดี ตามลำดับ จากผลการผลิตไฮโดรเจนเห็นได้ว่า อัตราส่วนน้ำต่อมูลช้างเอเชีย 1:2 สามารถผลิตไฮโดรเจนได้สูงสุด และสามารถผลิตไฮโดรเจนได้เพิ่มขึ้นจากการหมักแบบไม่เติมถ่านชีวภาพ จึงยืนยันได้ว่าการนำถ่านชีวภาพที่ผ่านกระบวนการไพโรไลซิสม่าเป็นตัวกลางในการผลิตไฮโดรเจน สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจนได้

ข้อเสนอแนะ

1. ศึกษาและปรับปรุงเทคโนโลยี โดยค้นคว้าเพิ่มเติมในด้านเทคโนโลยีที่ใช้ในการผลิตไฮโดรเจน เพื่อให้การใช้ทรัพยากรและพลังงานมีประสิทธิภาพมากที่สุด
2. ศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับเทคโนโลยีการเติมถ่านชีวภาพในรูปแบบการอัดแท่ง การอัดเม็ด หรือรูปแบบอื่น ๆ เพื่อศึกษาลักษณะของถ่านชีวภาพสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตไฮโดรเจน

บรรณานุกรม

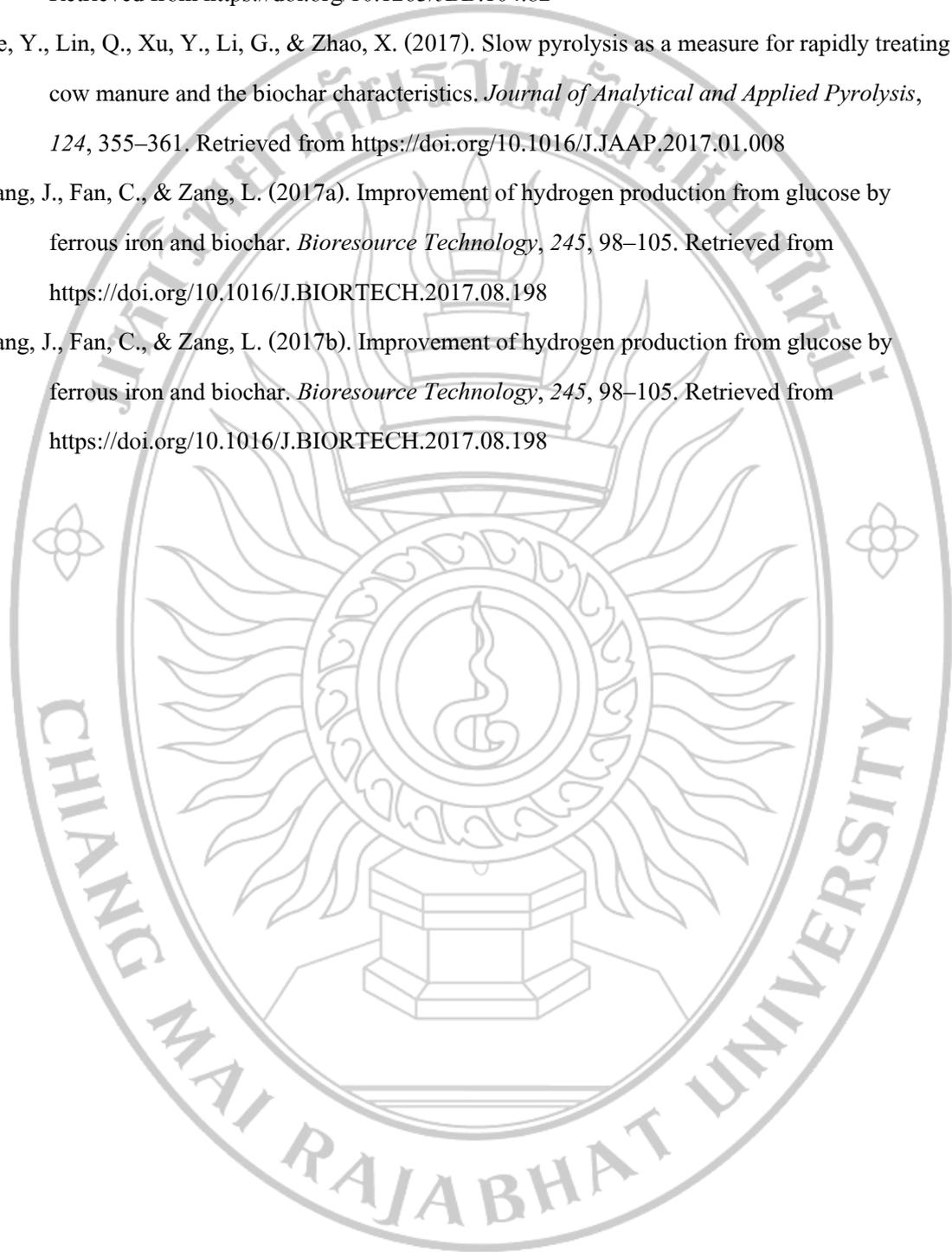
- Abeyasinghe, N., Karunarathna, T., Suwanree, S., Kasemsiri, P., Jetsrisuparb, K., Karunarathna, K. H. T., Chandana, E. P. S., Suwanree, S., Chindaprasirt, P., & Knijnenburg, J. T. N. (2022). Synthesis and phosphate adsorption performance of elephant dung biochar modified with magnesium and iron. *Journal of Metals, Materials and Minerals*, 32(1), 124–133. Retrieved from <https://doi.org/10.55713/jmmm.v32i1.1243>
- Abohamzeh, E., Salehi, F., Sheikholeslami, M., Abbassi, R., & Khan, F. (2021). Review of hydrogen safety during storage, transmission, and applications processes. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 72, 104569. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/J.JLP.2021.104569>
- Ahmad, R., Ilyas, H. N., Yin, W., Liu, X., Li, B., Sultan, M., Imran, M. A., Abbas, A., Javed, Z., & Raman, P. (2023). Agricultural Residue Management Using Forced Draft Gasifier Cookstove. *Handbook of Energy Management in Agriculture*, 163–179. Retrieved from https://doi.org/10.1007/978-981-19-7736-7_9-1
- Collazzo, G. C., Broetto, C. C., Perondi, D., Junges, J., Dettmer, A., Dornelles Filho, A. A., Foletto, E. L., & Godinho, M. (2017). A detailed non-isothermal kinetic study of elephant grass pyrolysis from different models. *Applied Thermal Engineering*, 110, 1200–1211. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2016.09.012>
- Dareioti, M. A., Vavouraki, A. I., & Kornaros, M. (2014). Effect of pH on the anaerobic acidogenesis of agroindustrial wastewaters for maximization of bio-hydrogen production: A lab-scale evaluation using batch tests. *Bioresource Technology*, 162, 218–227. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2014.03.149>
- Dawood, F. (2019). *Hydrogen production for energy: An overview*. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.059>
- Ikpeseni, S. C., Henry, , Orugba, O., Ufuoma, , Efetobor, J., Sada, S. O., Ekpu, M., Monday, , Amagre, E., Owamah, H. I., Orugba, H. O., & Ikpeseni, S. C. (n.d.). *Pyrolysis characteristics and kinetics of the thermal degradation of elephant grass (Pennisetum purpureum): a comparative analysis using the Flynn-Wall-Ozawa and the Kissinger-Akahira-Sunose methods*. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-04322-6>

- Ivanovski, M., Petrovic, A., Ban, I., Goricanec, D., & Urbancl, D. (2021). Determination of the Kinetics and Thermodynamic Parameters of Lignocellulosic Biomass Subjected to the Torrefaction Process. *Materials 2021, Vol. 14, Page 7877, 14(24)*, 7877. Retrieved from <https://doi.org/10.3390/MA14247877>
- Jain, R., Panwar, N. L., Jain, S. K., Gupta, T., Agarwal, C., & Meena, S. S. (2022). Bio-hydrogen production through dark fermentation: an overview. *Biomass Conversion and Biorefinery 2022, 1*, 1–26. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/S13399-022-03282-7>
- Khamtib, S., & Reungsang, A. (2012). Biohydrogen production from xylose by Thermoanaerobacterium thermosaccharolyticum KCU19 isolated from hot spring sediment. *International Journal of Hydrogen Energy, 37(17)*, 12219–12228. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2012.06.038>
- Kong, H., Singh, L., & Krishnan, S. (2017). Fermentative hydrogen production from indigenous mesophilic strain Bacillus anthracis PUNAJAN 1 newly isolated from palm oil mill effluent Energy generation and Wastewater treatment using Microalgae View project Purification of jacalin from jackfruit seed View project Puranjan Mishra. *Article in International Journal of Hydrogen Energy*. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.05.120>
- Kumar, A. N., Dissanayake, P. D., Masek, O., Priya, A., Ki Lin, C. S., Ok, Y. S., & Kim, S. H. (2021). Recent trends in biochar integration with anaerobic fermentation: Win-win strategies in a closed-loop. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, 149*. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111371>
- Kumar Sakhiya, A. (2020). *Production, Activation and Application of Biochar in Recent Times Heat Transfer Analysis of Fixed bed Downdraft gasifier View project Experimental analysis of biochar production and its application View project*. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s42773-020-00047-1>
- Kwak, J. H., Islam, M. S., Wang, S., Messele, S. A., Naeth, M. A., El-Din, M. G., & Chang, S. X. (2019). Biochar properties and lead(II) adsorption capacity depend on feedstock type, pyrolysis temperature, and steam activation. *Chemosphere, 231*, 393–404. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2019.05.128>

- Leng, L., & Huang, H. (2018). An overview of the effect of pyrolysis process parameters on biochar stability. *Bioresource Technology*, 270, 627–642. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2018.09.030>
- Li, F., Cao, X., Zhao, L., Wang, J., & Ding, Z. (2014). *Effects of Mineral Additives on Biochar Formation: Carbon Retention, Stability, and Properties*. <https://doi.org/10.1021/es501885n>
- Li, W., He, L., Cheng, C., Cao, G., & Ren, N. (2020). Effects of biochar on ethanol-type and butyrate-type fermentative hydrogen productions. *Bioresource Technology*, 306. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2020.123088>
- Li, Y. C., Wu, S. Y., Chu, C. Y., & Huang, H. C. (2011). Hydrogen production from mushroom farm waste with a two-step acid hydrolysis process. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(21), 14245–14251. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.06.102>
- Lu, L., Wang, Y., Zhang, K., Zhu, X., Yu, W., Zhu, · Xiaomin, Zhang, Y., Wu, Y., Habib Ullah, ·, Xiao, X., & Chen, · Baoliang. (2020). *Environmental risk of Biochars View project Application of biochar-based materials in environmental remediation: from multi-level structures to specific devices*. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s42773-020-00041-7>
- Łukajtis, R., Hołowacz, I., Kucharska, K., Glinka, M., Rybarczyk, P., Przyjazny, A., & Kamiński, M. (2018). Hydrogen production from biomass using dark fermentation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 665–694. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2018.04.043>
- Nikolaidis, P., & Poullikkas, A. (n.d.). *A comparative overview of hydrogen production processes*. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.09.044>
- Promdee, K., & Vitidsant, T. (2013). Preparation of Biofuel by Pyrolysis of Plant Matter in a Continuous Reactor. *Theoretical and Experimental Chemistry*, 49(2), 126–129. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/S11237-013-9305-Y/FIGURES/2>
- Rosen, M. A., & Koochi-Fayegh, S. (2016). The prospects for hydrogen as an energy carrier: an overview of hydrogen energy and hydrogen energy systems. *Energy, Ecology and Environment*, 1(1), 10–29. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/S40974-016-0005-Z/TABLES/1>

- Saripan, A. F., & Reungsang, A. (2014a). Simultaneous saccharification and fermentation of cellulose for bio-hydrogen production by anaerobic mixed cultures in elephant dung. *International Journal of Hydrogen Energy*, *39*(17), 9028–9035. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2014.04.066>
- Saripan, A. F., & Reungsang, A. (2014b). *Simultaneous saccharification and fermentation of cellulose for bio-hydrogen production by anaerobic mixed cultures in elephant dung*. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.04.066>
- Scovell, M. D. (2022). Explaining hydrogen energy technology acceptance: A critical review. *International Journal of Hydrogen Energy*, *47*(19), 10441–10459. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2022.01.099>
- Stepien, P., Swiechowski, K., Hnat, M., Kugler, S., Stegenta-Dąbrowska, S., Koziel, J. A., Manczarski, P., & Białowiec, A. (2019). Waste to carbon: Biocoal from elephant dung as new cooking fuel. *Energies*, *12*(22). Retrieved from <https://doi.org/10.3390/en12224344>
- Sugiarto, Y., Sunyoto, N. M. S., Zhu, M., Jones, I., & Zhang, D. (2021). Effect of biochar in enhancing hydrogen production by mesophilic anaerobic digestion of food wastes: The role of minerals. *International Journal of Hydrogen Energy*, *46*(5), 3695–3703. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2020.10.256>
- Suma, Y., Pasukphun, N., & Eaktasang, N. (2021). Adsorption of Methylene Blue by Low-Cost Biochar Derived from Elephant Dung. *Applied Environmental Research*, *43*(3), 34–44. Retrieved from <https://doi.org/10.35762/AER.2021.43.3.3>
- Sunyoto, N. M. S., Zhu, M., Zhang, Z., & Zhang, D. (2016). Effect of biochar addition on hydrogen and methane production in two-phase anaerobic digestion of aqueous carbohydrates food waste. *Bioresource Technology*, *219*, 29–36. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2016.07.089>
- Wang, S., Shi, F., Li, P., Yang, F., Pei, Z., Yu, Q., Zuo, X., & Liu, J. (2022). Effects of rice straw biochar on methanogenic bacteria and metabolic function in anaerobic digestion. *Scientific Reports 2022 12:1*, *12*(1), 1–14. Retrieved from <https://doi.org/10.1038/s41598-022-10682-2>
- Widyorini, R., Dewi, G. K., Nugroho, W. D., Prayitno, T. A., Jati, A. S., & Tejolaksono, M. N. (2018). Properties of citric acid-bonded composite board from elephant dung fibers. *Journal of the Korean Wood Science and Technology*, *46*(2), 132–142. Retrieved from <https://doi.org/10.5658/WOOD.2018.46.2.132>

- Yokoyama, H., Waki, M., Ogino, A., Ohmori, H., & Tanaka, Y. (2007). Hydrogen fermentation properties of undiluted cow dung. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, *104*(1), 82–85. Retrieved from <https://doi.org/10.1263/JBB.104.82>
- Yue, Y., Lin, Q., Xu, Y., Li, G., & Zhao, X. (2017). Slow pyrolysis as a measure for rapidly treating cow manure and the biochar characteristics. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, *124*, 355–361. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/J.JAAP.2017.01.008>
- Zhang, J., Fan, C., & Zang, L. (2017a). Improvement of hydrogen production from glucose by ferrous iron and biochar. *Bioresource Technology*, *245*, 98–105. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2017.08.198>
- Zhang, J., Fan, C., & Zang, L. (2017b). Improvement of hydrogen production from glucose by ferrous iron and biochar. *Bioresource Technology*, *245*, 98–105. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2017.08.198>



ประวัติผู้วิจัย

ชื่อ – นามสกุล	อัญชลี มาสะอาด
วัน เดือน ปีเกิด	30 ตุลาคม พ.ศ. 2539
ที่อยู่ปัจจุบัน	54/44 ม.4 ตำบลทับมา อำเภอเมืองระยอง จังหวัดระยอง รหัสไปรษณีย์ 21000
อีเมล	62859101@cmru.ac.th, anchalee5804@gmail.com
ประวัติการศึกษา	พ.ศ. 2562 – ปัจจุบัน กำลังศึกษาระดับปริญญาโท สาขาพลังงาน และสิ่งแวดล้อมชุมชน วิทยาลัยพัฒนาเศรษฐกิจ และเทคโนโลยีชุมชนแห่งเอเชีย (adiCET) มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ พ.ศ. 2558 – 2561 ศึกษาระดับปริญญาตรี สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์
ประสบการณ์การทำงาน	พ.ศ. 2566 – ปัจจุบัน R&D บริษัทเซ้าท์ ซิตี ปีโตรเคมี จำกัด พ.ศ. 2562 – 2566 ผู้ช่วยนักวิจัย วิทยาลัยพัฒนาเศรษฐกิจและเทคโนโลยีชุมชน แห่งเอเชีย (adiCET) มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ พ.ศ. 2562 ฝึกงานสหกิจที่สถาบันบริการตรวจสอบคุณภาพ และมาตรฐานผลิตภัณฑ์, มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ทำหน้าที่เป็นผู้ช่วยนักวิจัยในห้องปฏิบัติการ การทดลองให้ความช่วยเหลือในการใช้เครื่องมือ

วิเคราะห์ทางวิทยาศาสตร์ เช่น HPLC, GC
สำหรับนักวิชาการและนักศึกษา

พ.ศ. 2559 – 2561

ผู้ช่วยนักวิจัย มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์

ทำการทดลองและจัดทำรายงานวิจัย เช่น
โลชั่นจากสารสกัดกลางสาตทดสอบปริมาณ
ซัลฟิดจากเห็ดแครงและเห็ดและสังเคราะห์
ตัวเร่งปฏิกิริยา In_2S_3 , ZnO และ $\text{In}_2\text{S}_3/\text{ZnO}$

