



การพัฒนากระบวนการกลั่นทางชีวภาพเพื่อการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ สารเคมี และวัสดุชีวภาพจากชีวมวลลิกโนเซลลูโลส

วนรัตน์ ภาคินุยะ

ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ณิชากัทธ กิติบวรกุล*

ศูนย์วิจัยอุตสาหกรรมเคมีชีวภาพและวิศวกรรมกระบวนการแบบอัตโนมัติ ภาควิชาวิศวกรรมเคมีและกระบวนการ บัณฑิตวิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร
นานาชาติสิรินธรไทย-เยอรมัน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0 2555 2000 ต่อ 2927 อีเมล: nichaphatkitii@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2023.03.002

รับเมื่อ 2 พฤศจิกายน 2565 แก้ไขเมื่อ 23 พฤศจิกายน 2565 ตอรับเมื่อ 1 ธันวาคม 2565 เผยแพร่ออนไลน์ 3 มีนาคม 2566

© 2023 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

บทคัดย่อ

กระบวนการกลั่นทางชีวภาพเป็นกระบวนการที่นำวัสดุชีวมวลลิกโนเซลลูโลสมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่ม ได้แก่ พลังงานชีวภาพ (เช่น เอทานอล มีเทน บิวทานอล) พลาสติกชีวภาพ สารเคมีแพลตฟอร์ม สารชีวเคมี เป็นต้น โดยวัสดุชีวมวลลิกโนเซลลูโลสได้มาจากกิจกรรมทางการเกษตร หรือโรงงานแปรรูปสินค้าเกษตร เช่น ฟางข้าว ชานอ้อย กากกาแฟ หนุ่ย ชังข้าวโพด เป็นต้น ซึ่งมักจะถูกนำไปเผาทำลายหลังฤดูกาลเก็บเกี่ยวก่อให้เกิดเป็นมลภาวะทางสิ่งแวดล้อม เนื่องจากลักษณะที่สำคัญของชีวมวลลิกโนเซลลูโลสประกอบไปด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งชีวมวลสามารถเปลี่ยนไปเป็นน้ำตาลที่ใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการหมักด้วยจุลินทรีย์ จึงทำให้ชีวมวลชนิดนี้มีศักยภาพสูงในการนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในกระบวนการกลั่นทางชีวภาพ นอกจากนี้ยังถือว่าวัสดุชีวมวลลิกโนเซลลูโลสเป็นวัตถุดิบที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและยังช่วยลดปัญหาปริมาณขยะที่เกิดจากของเหลือทิ้งทางการเกษตร บทความนี้จึงรวบรวมแนวทางการพัฒนากระบวนการกลั่นทางชีวภาพของชีวมวลลิกโนเซลลูโลสเพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์หลักสามประเภท ได้แก่ พลังงานชีวภาพ พลาสติกชีวภาพ และสารเคมีแพลตฟอร์ม ซึ่งเป็นผลจากการพัฒนางานวิจัยและรวมไปถึงการนำเสนอข้อจำกัดของกระบวนการและแนวทางในการพัฒนาในเพื่อการผลิตในระดับอุตสาหกรรมในอนาคต

คำสำคัญ: ลิกโนเซลลูโลส การปรับสภาพเบื้องต้นทางเคมี กระบวนการกลั่นทางชีวภาพ พลังงานชีวภาพ วัสดุชีวภาพ สารชีวเคมี



Recent Progress in Biorefining Process for Production of Biofuels, Biochemicals and Biomaterials from Lignocellulosic Biomass

Vanarat Phakeenuya

Department of Biotechnology, Faculty of Applied Science, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

Nichaphat Kitiborwornkul*

Biorefinery and Process Automation Engineering Center, Department of Chemical and Process Engineering, The Sirindhorn Thai-German International Graduate School of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

* Corresponding Author, Tel. 0 2555 2000 Ext. 2927, E-mail: nichaphatkitii@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2023.03.002

Received 2 November 2022; Revised 23 November 2022; Accepted 1 December 2022; Published online: 3 March 2023

© 2023 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

Abstract

Biorefinery is the process by which lignocellulosic biomass is converted to value-added products such as bioenergy (ethanol, methane, butanol), bioplastics, platform chemicals and biochemicals. The lignocellulosic biomass, such as rice straw, bagasse, coffee grounds, grass, corn cobs, is obtained from agricultural activities and agricultural processing plants. It is often burned after the harvesting season, causing environmental pollution. Compositions of lignocellulose biomass include cellulose, hemicellulose and lignin, which are converted to sugars that are used as raw materials in microbial fermentation processes. Therefore, this biomass has high potential to be used as raw material in the biorefinery process. In addition, lignocellulosic biomass is considered to be an environmentally friendly raw material that helps to reduce the amount of agricultural waste. This review describes the guidelines for the development of the biorefinery process of lignocellulosic biomass to produce three main types of products, including bioenergy, bioplastics and platform chemicals. The process limitations and proposed solutions are described for further applications in industrial productions.

Keywords: Lignocellulose, Chemical pretreatment, Biorefinery, Biofuel, Biomaterial, Biochemical

Please cite this article in press as: V. Phakeenuya and N. Kitiborwornkul, "Recent progress in biorefining process for production of biofuels, biochemicals and biomaterials from lignocellulosic biomass," *The Journal of KMUTNB*, 2023 (in Thai), doi: 10.14416/j.kmutnb.2023.03.002.

1. บทนำ

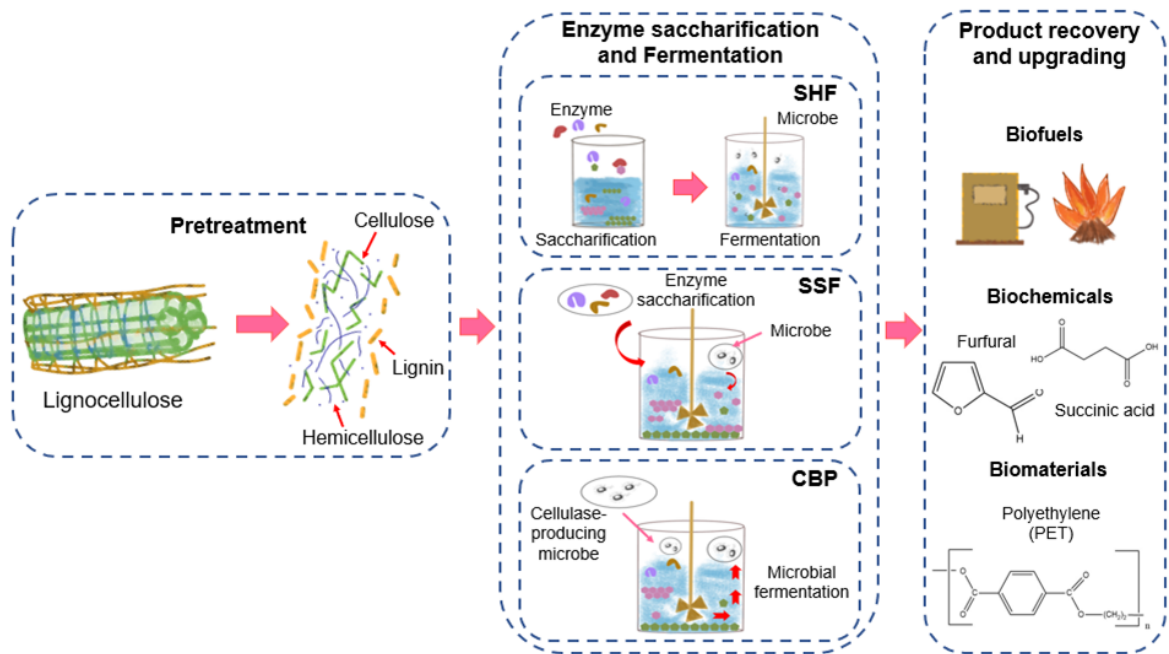
ชีวมวลลิกโนเซลลูโลสโดยเฉพาะของเหลือทิ้งทางการเกษตรที่เกิดขึ้นหลังจากฤดูเก็บเกี่ยวนั้นมีปริมาณมาก โดยปริมาณของเหลือทิ้งของวัสดุชีวมวลลิกโนเซลลูโลสมีมากถึงประมาณ 650 ล้านเมตริกตันต่อปีจากกิจกรรมทางการเกษตร ซึ่งในการช่วยลดปริมาณของเหลือทิ้งเหล่านี้ สามารถนำมาเข้าสู่กระบวนการกลั่นทางชีวภาพ (Biorefinery) ซึ่งเป็นกระบวนการทางเลือกที่สามารถใช้ทดแทนการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพที่มีประสิทธิภาพในระบบอุตสาหกรรมตามหลักการพัฒนาอย่างยั่งยืน (Sustainable Development) อีกทั้งยังสามารถนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตสินค้าเพิ่มมูลค่าที่หลากหลาย เช่น สารเคมีชีวภาพ (Biochemical) และสารเคมีแพลตฟอร์ม (Platform Chemical) ซึ่งเป็นสารทดแทนการใช้งานของสารเคมีจากปิโตรเลียม [1] ปัจจุบันมีการใช้งานผลิตภัณฑ์เหล่านี้ในอุตสาหกรรมที่หลากหลาย เช่น ตัวทำละลาย ยารักษาโรค และ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ วัสดุทางชีวภาพ (Biomaterial) เชื้อเพลิงชีวภาพ (Biofuel) จากผลิตภัณฑ์ที่กล่าวมานี้ล้วนมาจากการนำวัสดุชีวมวลลิกโนเซลลูโลสเข้าสู่กระบวนการกลั่นทางชีวภาพ เมื่อมีการนำวัสดุเหลือทิ้งมาใช้เพิ่มมูลค่า ทำให้ลดปริมาณขยะ และลดการผลิตก๊าซเรือนกระจก [2], [3]

ชีวมวลลิกโนเซลลูโลสเป็นวัตถุดิบหมุนเวียนที่มีความอุดมสมบูรณ์ที่สุดและมีราคาถูกเป็นผลให้ได้รับความสนใจเพิ่มขึ้นในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ โดยโครงสร้างของชีวมวลลิกโนเซลลูโลส ประกอบด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และ ลิกนิน ซึ่งเป็นองค์ประกอบและรูปแบบที่ซับซ้อนของผนังเซลล์พืชทำให้เกิดการย่อยสลายหรือไฮโดรไลซิสได้ยาก [4] จึงจำเป็นที่จะต้องมีการปรับสภาพชีวมวลลิกโนเซลลูโลสด้วยวิธีต่างๆ และเนื่องจากไฮโดรไลซิสของชีวมวลลิกโนเซลลูโลสประกอบไปด้วยน้ำตาลชนิดต่างๆ รวมทั้งกลูโคส ซึ่งสามารถนำไปใช้สำหรับกระบวนการหมักของจุลินทรีย์ (Fermentation) วัตถุดิบดังกล่าวจึงมีศักยภาพที่จะทำหน้าที่เป็นแหล่งทางเลือกสำหรับการผลิตสารเคมีชีวภาพ โดยในขั้นตอนการปรับสภาพมีการปรับปรุงและพัฒนาอย่างต่อเนื่องเพื่อให้ได้มาซึ่งผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูงและมีคุณภาพที่ดีถือเป็น

ปัจจัยหลักที่จะสร้างมูลค่าให้กับอุตสาหกรรมในอนาคตได้

การแปลงชีวมวลลิกโนเซลลูโลสเป็นพลังงานชีวภาพ เช่น เอทานอล ต้องใช้กระบวนการที่มีหลายขั้นตอน เช่น การปรับสภาพ การไฮโดรไลซิส และการหมัก (รูปที่ 1) [5] โดยรูปแบบดั้งเดิมของการแปรรูปทางชีวภาพเพื่อการผลิตเชื้อเพลิงและสารเคมีจากชีวมวลที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว จะเริ่มจากการไฮโดรไลซิสและต่อเนื่องด้วยการหมัก ซึ่งจะทำในถังปฏิกรณ์แบบแยกถังกัน หรือเรียกว่า กระบวนการไฮโดรไลซิสและการหมักแบบแยกส่วน (Separate Hydrolysis and Fermentation; SHF) ซึ่งเป็นการย่อยชีวมวลด้วย เอนไซม์ให้ได้น้ำตาลและนำน้ำตาลไปหมักเป็นผลิตภัณฑ์ เอทานอล เพื่อเป็นการลดต้นทุนโดยการลดปริมาณของถังปฏิกรณ์ พลังงานที่ใช้ และลดความเสี่ยงในการปนเปื้อนระหว่างการดำเนินงาน จึงเกิดเป็นกระบวนการไฮโดรไลซิสและการหมักในเวลาเดียวกัน หรือเรียกว่า กระบวนการไฮโดรไลซิสและการหมักแบบร่วมกัน (Simultaneous Saccharification and Fermentation; SSF) ซึ่งในกระบวนการนี้ ถึงแม้ว่าจะมีความน่าสนใจ แต่ก็ยังมีข้อจำกัดเนื่องจากอุณหภูมิและสภาวะที่เหมาะสมของขั้นตอนการไฮโดรไลซิส และการหมักนั้นแตกต่างกัน ดังนั้นจึงต้องทำการเลือกอุณหภูมิและสภาวะที่เหมาะสมให้ปฏิกิริยาทั้งสองนี้เกิดขึ้นได้ดี นอกจากนี้ยังมีการพัฒนารูปแบบของกระบวนการที่มีหลายขั้นตอนเหล่านี้ให้เป็นกระบวนการที่มีขั้นตอนเดียว ที่เรียกว่ากระบวนการทางชีวภาพแบบควมรวม (Consolidated Bioprocessing; CBP) ซึ่งในกระบวนการนี้จะมีการใช้จุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่ในการหมักและมีความสามารถในการผลิตเอนไซม์ในกระบวนการไฮโดรไลซิสทำให้ช่วยลดต้นทุนของเอนไซม์ในกระบวนการได้

โดยเป้าหมายของบทความนี้มุ่งที่จะแสดงให้เห็นถึงกระบวนการผลิตสารชีวเคมี สารเคมีแพลตฟอร์ม พลังงานเชื้อเพลิง และพอลิเมอร์ชีวภาพจากชีวมวลลิกโนเซลลูโลส โดยบทความนี้เป็นการรวบรวมความก้าวหน้างานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพัฒนากระบวนการปรับสภาพชีวมวล การไฮโดรไลซิส และการหมัก เพื่อผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ รวมไปถึงกลยุทธ์ในการพัฒนากระบวนการชีวภาพแบบ



รูปที่ 1 วิธีการปรับสภาพชีวมวลลิกโนเซลลูโลสด้วยวิธีทางเคมี และความต่อเนื่องกับขั้นตอนไฮโดรไลซิส การหมัก และการเก็บเกี่ยวผลผลิตในกระบวนการกลั่นทางชีวภาพ

ควรรวมในกระบวนการผลิตสารชีวเคมีต่างๆจากชีวมวลลิกโนเซลลูโลส เพื่อประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมตามหลักของ Bio-Circular-Green (BCG) Economic Model [6], [7]

2. ประเภทของวิธีการปรับสภาพ

การปรับสภาพของชีวมวลลิกโนเซลลูโลสมีจุดประสงค์เพื่อช่วยเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในชีวมวลและเพิ่มประสิทธิภาพในขั้นตอนการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์ ซึ่งวิธีที่นำมาใช้ควรเป็นวิธีที่ช่วยลดการก่อกวนของสารยับยั้ง (Inhibitor) โดยวิธีการปรับสภาพชีวมวลลิกโนเซลลูโลสมีด้วยกันหลายแบบ [7] ในการเลือกใช้วิธีต่างๆ จึงอาจขึ้นอยู่กับประเภทของชีวมวลที่นำมาปรับสภาพ เพื่อให้ได้ผลผลิตสูงสุดในกระบวนการ ซึ่งชีวมวลแต่ละชนิดก็มีความแตกต่างทางคุณสมบัติเชิงกายภาพและเชิงเคมีทำให้การเลือกใช้วิธีการปรับสภาพต้องขึ้นอยู่กับชนิดของชีวมวลและยังต้องการการพัฒนากระบวนการให้เหมาะสมต่อจุดประสงค์ซึ่งก็สามารถนำการออกแบบการ ทดลองเพื่อพัฒนากระบวนการ เช่น วิธี

การออกแบบพื้นผิวตอบสนอง เป็นต้น [8]–[12]

2.1 การปรับสภาพทางกายภาพ

การปรับสภาพทางกายภาพ (Physical Pretreatment) สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การปรับสภาพทางกล (การลดขนาดด้วยเครื่องตัดบด) การปรับสภาพด้วยความร้อน (การปรับสภาพด้วยน้ำร้อน) และการปรับสภาพด้วยคลื่นเสียงความถี่สูง (Sonication) [13] การปรับสภาพทางกายภาพทำให้พื้นที่ผิวของชีวมวลเพิ่มขึ้น ซึ่งช่วยให้จุลินทรีย์หรือเอนไซม์ย่อยสลายชีวมวลได้ดีขึ้น โดยการปรับสภาพทางกายภาพมักจะมีข้อเสียคือการใช้พลังงานและค่าบำรุงรักษาอุปกรณ์ที่สูง

2.2 การปรับสภาพทางเคมี

การปรับสภาพทางเคมี (Chemical Pretreatment) ทำได้โดยใช้วิธีการต่างๆ เช่น การใช้สารเคมีกรด เบส ออร์กาโนโซลฟ ออกซิเดชัน เป็นต้น [14] การปรับสภาพ

ทางเคมีช่วยปรับเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมีและกายภาพของชีวมวลลิกโนเซลลูโลสให้มีความเหมาะสมต่อการถูกย่อยสลายด้วยเอนไซม์เซลลูเลสได้ดีขึ้น แต่ยังมีประเด็นที่ควรพัฒนาต่อเพื่อการผลิตในอุตสาหกรรมชีวภาพ เนื่องด้วยสารเคมีบางชนิดมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม หรือการใช้สารเคมีที่มีราคาแพงส่งผลกระทบต่อต้นทุนของกระบวนการ

2.3 การปรับสภาพทางชีววิทยา

การปรับสภาพทางชีววิทยา (Biological Pretreatment) จะมีการใช้จุลินทรีย์หรือเอนไซม์โดยจุลินทรีย์จะอาศัยชีวมวลลิกโนเซลลูโลสเป็นแหล่งสารอาหารช่วยในการผลิตเอนไซม์ในการปรับสภาพชีวมวล เช่น เอนโดกลูคาเนส (Endoglucanase) เซลโลไบโอไฮโดรเลส (Cellobiohydrolases) และเบต้ากลูโคซิเดส (β -glucosidase) ในส่วนของลิกนินสามารถย่อยสลายได้ด้วยเอนไซม์เปอร์ออกซิเดส (Peroxidase) เช่น ลิกนินเปอร์ออกซิเดส (Lignin Peroxidase) และแมงกานีสเปอร์ออกซิเดส (Manganese Peroxidase) และสำหรับการย่อยสลายของเฮมิเซลลูโลสจะใช้ไซลานเนส (Xylanase) ในการย่อย แม้ว่าวิธีการปรับสภาพทางชีววิทยาจะมีข้อดีหลายประการ เช่น การใช้พลังงานต่ำ และไม่ใช้สารเคมีที่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม แต่ก็มีข้อเสียหลายประการ เช่น การควบคุมการทำงานเพื่อให้แน่ใจว่าจุลินทรีย์จะไม่อยู่ในสภาวะที่ไม่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต การใช้เอนไซม์ที่อาจจะมีราคาแพง และกระบวนการนี้มีการใช้เวลานานกว่าการปรับสภาพด้วยวิธีอื่นๆ

3. กระบวนการไฮโดรไลซิสแยกกันกับกระบวนการหมัก

กระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์พร้อมกับการหมัก จุลินทรีย์ และกระบวนการแบบควบรวมในถังปฏิกรณ์เดียวกัน (Separate Hydrolysis and Fermentation; SHF, Simultaneous Saccharification and Fermentation; SSF and Consolidated Bioprocessing; CBP)

หลังจากที่ชีวมวลลิกโนเซลลูโลสถูกนำเข้าสู่กระบวนการปรับสภาพด้วยวิธีต่างๆ แล้ว ก็จะถูกนำไปเข้าสู่กระบวนการไฮโดรไลซิส และการหมัก ซึ่งในหัวข้อนี้

จะเป็นการยกตัวอย่างกลยุทธ์ของกระบวนการที่ใช้เพื่อใช้สำหรับคาร์โบไฮเดรตและคาร์บอน ทั้งสิ้น 3 รูปแบบ ได้แก่

3.1 กระบวนการไฮโดรไลซิสแยกกันกับกระบวนการหมัก (Separate Hydrolysis and Fermentation; SHF)

SHF มีข้อดี คือ สามารถปรับสภาวะการทำงานในขั้นตอนไฮโดรไลซิสแยกกับขั้นตอนการหมักให้เหมาะสม เช่น อุณหภูมิและค่าพีเอช อีกทั้งยังเกี่ยวกับการออกแบบอุปกรณ์รวมถึงระบบการควบคุม เช่น การทำไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์เซลลูเลสมักควบคุมอุณหภูมิประมาณ 50 องศาเซลเซียส หรือสูงกว่า ในขณะที่จุลินทรีย์ที่ทำปฏิกิริยาในขั้นตอนการหมัก เช่น *S. cerevisiae* ไม่ทนต่ออุณหภูมิที่สูงกว่า 37 องศาเซลเซียส ดังนั้นการหมักเอทานอลโดยทั่วไปมักจะใช้อุณหภูมิต่ำกว่า 35 องศาเซลเซียส ซึ่งข้อได้เปรียบของ SHF คือกระบวนการหมักจะมีการใช้ไฮโดรไลซิสที่เป็นของเหลว แทนที่จะเป็นไฮโดรไลซิสในรูปแบบที่มีของแข็งผสมในกระบวนการ SSF ซึ่งกระบวนการที่ใช้ไฮโดรไลซิสที่เป็นของเหลวจะมีประสิทธิภาพในการถ่ายโอนมวล (Mass Transfer) และทำให้สามารถรีไซเคิล (Recycle) ยีสต์หลังจากการหมักโดยการกรองหรือการปั่นเหวี่ยงได้ดีกว่ากระบวนการ SSF [15]

ข้อเสียของ SHF คือ เซลลูเลสถูกยับยั้งให้การทำงานมีประสิทธิภาพลดลง เมื่อความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ของน้ำตาลมีสูงมากเกินไป และจะกลับมายับยั้งการทำงานของเอนไซม์เซลลูเลส (Feedback Inhibition) [16] เอนไซม์อาจถูกยับยั้งการทำงานโดยสารยับยั้งที่มีอยู่ในไฮโดรไลซิส เช่น ผลิตภัณฑ์ที่ได้มาจากการย่อยสลายน้ำตาลและลิกนิน ได้แก่ Furfural, 5-HMF, Acetic Acid, Vanillin โดยทั่วไปการใช้กระบวนการ SHF นั้นจะมีระยะเวลาของการไฮโดรไลซิสที่นานกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการ SSF ดังนั้นปริมาตรของเครื่องปฏิกรณ์จึงต้องใหญ่ขึ้น สิ่งนี้จะเพิ่มต้นทุนของกระบวนการ และยังมีข้อเสียอีกประการหนึ่งคือการสูญเสียน้ำตาลในการแยกของแข็งและของเหลวหลังจากการไฮโดรไลซิส และจะมีการล้างชีวมวลระหว่างสองขั้นตอนซึ่งนำไปสู่การเจือจางของน้ำตาล

3.2 กระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์พร้อมกับกระบวนการหมักจุลินทรีย์ (Simultaneous Saccharification and Fermentation; SSF)

กระบวนการนี้คือการทำทั้งขั้นตอนการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์และการหมักด้วยจุลินทรีย์ไปพร้อมๆกัน ข้อได้เปรียบหลักของ SSF คือ น้ำตาลที่เกิดจากกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์จะถูกเปลี่ยนแปลงโดยยีสต์ทันทีที่ปล่อยออกมา ซึ่งช่วยรักษาระดับน้ำตาลให้อยู่ในระดับต่ำที่ช่วยลดการยับยั้งการทำงานของเซลล์ในขั้นตอนไฮโดรไลซิส และยังช่วยลดความเสี่ยงในการปนเปื้อนอีกด้วย โดยกระบวนการ SHF มักจะมีการใช้สภาวะที่มีอุณหภูมิสูงกว่า SSF ซึ่งส่งผลให้ความสามารถในการทำงานของเอนไซม์ในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเพิ่มขึ้น สิ่งนี้นำไปสู่ผลผลิตเอทานอลโดยรวมที่สูงขึ้น และยังรวมไปถึงจำนวนถึงปฏิกรณ์ที่ลดลงซึ่งทำให้อัตราต้นทุนของกระบวนการลดลง จากการศึกษาในงานวิจัยก่อนหน้ามีการแสดงถึงผลผลิตเอทานอลที่ได้จากไม้เนื้ออ่อนและวัสดุเหลือทิ้งจากการเกษตรด้วยกระบวนการ SSF นั้นสูงกว่าผลผลิตที่ได้จากกระบวนการ SHF โดยได้ผลผลิตเอทานอลระหว่าง 80–85 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามข้อเสียจากการใช้กระบวนการ SSF คือ ยีสต์ที่ใช้หลังจาก SSF นั้นฟื้นฟูสภาพได้ยาก เนื่องจากเซลล์ยีสต์นั้นผสมอยู่กับของแข็งไฮโดรไลเซสที่เหลือซึ่งประกอบไปด้วยลิกนินเป็นส่วนใหญ่ อย่างไรก็ตาม SSF เป็นตัวเลือกที่ดีกว่า SHF สำหรับชีวมวลส่วนมาก [17]

3.3 กระบวนการแบบควบรวมในถึงปฏิกรณ์เดียวกัน (Consolidated Bioprocessing; CBP)

กระบวนการทางชีวภาพแบบควบรวมจะดำเนินการอยู่ในถึงปฏิกรณ์เดียว โดยมีปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของชีวมวลลิกโนเซลลูโลสและการหมักน้ำตาลเกิดขึ้นด้วยการทำงานของจุลินทรีย์ที่มีความสามารถผลิตเอนไซม์เซลลูโลสไลติก และสามารถหมักน้ำตาลที่ได้ (C_5 และ C_6) เป็นเอทานอลหรือผลิตภัณฑ์ที่มีคุณค่าอื่นๆ ได้ ซึ่งเป็นการช่วยลดความซับซ้อนของกระบวนการ ดังนั้น CBP จึงเป็นแนวทางที่ประหยัดสำหรับการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ [18] โดยกระบวนการแบบขั้นตอนเดียวนี้มีความคุ้มค่าสำหรับ

เป้าหมายในการผลิตเอทานอลในระดับอุตสาหกรรม โดยใช้ลิกโนเซลลูโลสเป็นวัตถุดิบ ซึ่ง CBP ให้ผลผลิตประมาณ 1 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง หรือระดับของ > 40 กรัมต่อลิตร ซึ่งสอดคล้องกับผลผลิตที่มากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ของผลผลิตตามทฤษฎี (Theoretical Yield) [19]

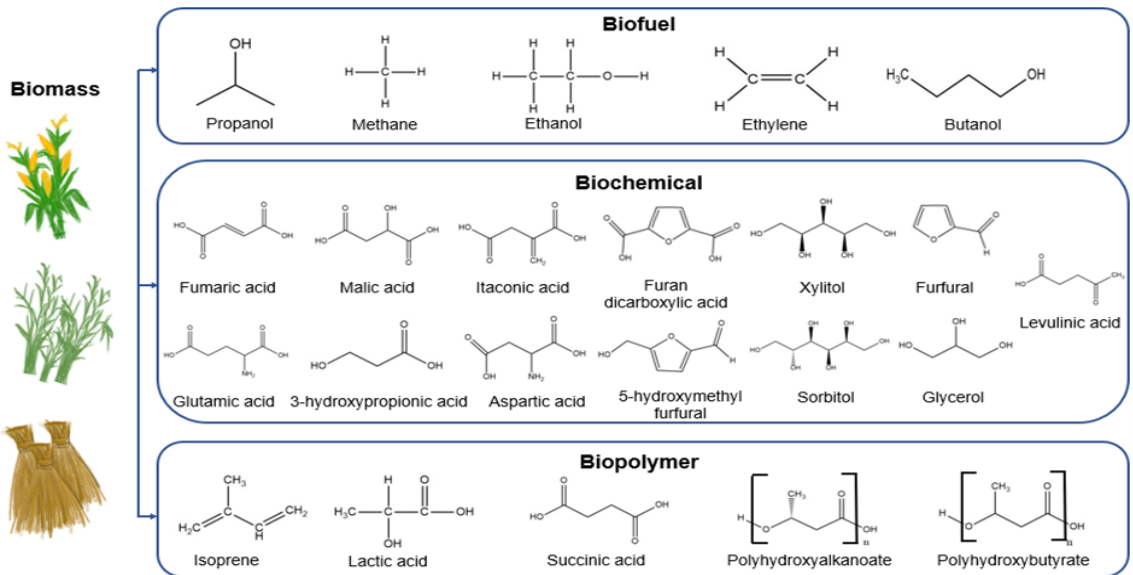
4. ผลิตภัณฑ์เพิ่มมูลค่าที่ได้จากกระบวนการกลั่นทางชีวภาพจากชีวมวลลิกโนเซลลูโลส

หลังจากที่ได้มีการดำเนินการในกระบวนการปรับสภาพชีวมวล กระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยการทำงานของเอนไซม์หรือจุลินทรีย์ และกระบวนการหมักโดยการทำงานของจุลินทรีย์ ก็จะทำให้สามารถเปลี่ยนชีวมวลลิกโนเซลลูโลสเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆที่หลากหลายได้ (รูปที่ 2) โดยผลิตภัณฑ์เหล่านี้สามารถแบ่งออกเป็นหมวดหมู่ และมีงานวิจัยที่ได้ทำการพัฒนากระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 1

4.1 พลังงานชีวภาพ

พลังงานชีวภาพ (Bioenergy) หรือพลังงานจากทรัพยากรชีวภาพเป็นพลังงานหมุนเวียน เช่น ไบโเอทานอล (Bioethanol) หรือ 2nd Generation Ethanol เนื่องจากชีวมวลลิกโนเซลลูโลสมีความซับซ้อนของโครงสร้าง เพื่อประสิทธิภาพที่ดีในการนำชีวมวลไปใช้จึงต้องมีปรับสภาพเบื้องต้น จากนั้นเข้าสู่ขั้นตอนการใช้เอนไซม์ย่อยให้ได้ไฮโดรไลเซสที่มีน้ำตาล C_5 และ C_6 สามารถนำไปหมักเพื่อสร้างไบโเอทานอล โดยจุลินทรีย์ที่สามารถหมักเพนโทสนั้นพบได้ไม่มากในธรรมชาติและมักจะได้ผลผลิตไบโเอทานอลน้อยกว่าจุลินทรีย์ที่ใช้น้ำตาล C_6 อย่างมีนัยสำคัญ

ไบโอมีเทน (Biomethane) หรือก๊าซชีวภาพสามารถผลิตได้จากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น ข้าวสาลี ฟางข้าว ข้าวโพด และธัญพืชอื่นๆ โดยกระบวนการหมักแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Fermentation) [28], [29] จากการรายงานปริมาณของเสียจากธัญพืชและข้าวโพดในแต่ละปีนั้นสามารถสร้างก๊าซมีเทนได้สูง ในการหมักก๊าซมีเทนของชีวมวลเซลลูโลสแต่ละรอบจำเป็นต้องมีกลุ่มจุลินทรีย์ผสมกันซึ่งทำหน้าที่ย่อยสลายสารประกอบหรือชีวมวลเชิงซ้อนที่ไม่ละลายน้ำ เพื่อเปลี่ยนเป็นกรดอินทรีย์ เช่น กรดอะซิติก และ



รูปที่ 2 ตัวอย่างผลผลิตของกระบวนการกลั่นทางชีวภาพจากชีวมวลลิกโนเซลลูโลส ได้แก่ พลังงานชีวภาพ พลาสติกชีวภาพ และสารเคมีแพลตฟอร์ม

แอลกอฮอล์ จากนั้นจะเปลี่ยนกรดอินทรีย์และแอลกอฮอล์เป็นอะซิโตน และเปลี่ยนแปลงแหล่งคาร์บอนโมเลกุลเล็กเหล่านี้เป็นมีเทน ตามลำดับ [30], [31] ผลิตภัณฑ์ที่สร้างขึ้นสามารถนำมาใช้เพื่อชดเชยค่าใช้จ่ายพลังงานในกระบวนการ นอกจากนี้ชีวมวลที่เหลือจากกระบวนการผลิตมีเทนนี้ยังสามารถนำไปใช้เป็นปุ๋ยชีวภาพเพื่อการเกษตรได้

ไบโอไฮโดรเจน (Biohydrogen) ได้มาจากของเสียทางการเกษตร ของเสียในครัวเรือน ของเสียจากอุตสาหกรรม กากตะกอน และวัตถุดิบจากชีวมวลเซลลูโลสอื่นๆ ซึ่งล้วนเหมาะสมสำหรับการผลิตไบโอไฮโดรเจน โดยการผลิตทั่วไปนั้น เซลลูโลสจะถูกปรับสภาพเบื้องต้นและไฮโดรไลซิสก่อน จากนั้นจึงทำการหมักเพื่อผลิตให้ได้ไฮโดรเจน การปรับสภาพอาจมีข้อเสียโดยก่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการ ซึ่งอาจจะไปรบกวนกระบวนการหมักไบโอไฮโดรเจนเป็นพลังงานที่สะอาด และยั่งยืน โดยการผลิตไบโอไฮโดรเจนในปัจจุบันมีหลากหลายวิธี ได้แก่ วิธี Natural Gas Reforming, Steam Methane Reforming (SMR), Electrolysis, Liquid Reforming [32], [33] ซึ่งในปัจจุบันวิธี SMR สามารถผลิต

ไบโอไฮโดรเจนได้สูงถึง 95 เปอร์เซ็นต์เมื่อเทียบกับการใช้พลังงานฟอสซิล การผลิตไบโอไฮโดรเจนนั้นสามารถผลิตด้วยกระบวนการหมักแบบในที่มืด (Dark Fermentation) โดยใช้วัตถุดิบชีวมวล ซึ่งกระบวนการนี้สามารถใช้ชีวมวลที่มีความชื้นได้ในกระบวนการหมัก ซึ่งช่วยลดต้นทุนและค่าใช้จ่ายด้านพลังงานของกระบวนการ ทำให้สามารถใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร หรือน้ำเสียที่ได้จากโรงงานอุตสาหกรรมของเสียชีวภาพได้ ซึ่งวัสดุชีวมวลรวมถึงน้ำเสียเหล่านี้ เป็นตัวกำหนดความสามารถในการผลิตและกระบวนการทางเศรษฐศาสตร์ ความท้าทายของกระบวนการ Dark Fermentation มีหลากหลายปัจจัย ได้แก่ คุณสมบัติของ Biocatalyst หรือจุลินทรีย์ที่ใช้ในกระบวนการ กระบวนการเมทาบอลิซึมของกลุ่มจุลินทรีย์ การอาศัยอยู่ร่วมกัน และปฏิสัมพันธ์ของจุลินทรีย์ คุณสมบัติของวัตถุดิบ ปฏิกริยา Feedback Inhibitions สภาพของกระบวนการ เช่น อุณหภูมิ redox รูปแบบของถังปฏิกรณ์ โดยกลุ่มจุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่เป็น Biocatalyst ได้แก่ *Clostridium sp.*, *Ethanoligenens sp.*, *Megaspaera sp.*, *Acidaminococcus sp.* และ *Klebsiella sp.*

ตารางที่ 1 กระบวนการผลิตผลผลิตในรูปแบบพลังงานชีวภาพ พลาสติกชีวภาพและสารเคมีแพลตฟอร์มจากกระบวนการกลั่นทางชีวภาพของชีวมวลลิกโนเซลลูโลส

ชนิดผลิตภัณฑ์	ตัวอย่างผลิตภัณฑ์	วัตถุดิบ	สภาวะการทำงาน	ปริมาณผลผลิต	เอกสารอ้างอิง
เชื้อเพลิงชีวภาพ	ไบโอเอทานอล	Municipal solid wastes	ทำการปรับสภาพด้วยการใช้ Hydrothermal และกรดเจือจาง	ไบโอเอทานอล 0.42 กรัม/กรัม	[20]
	ไฮโดรเจน	ของเสียจากอาหาร	ทำการปรับสภาพด้วย Hydrothermal	ไฮโดรเจน 43 มิลลิลิตร/กรัม	
	มีเทน	ของเสียจากอาหาร	ทำการปรับสภาพด้วย Hydrothermal	มีเทน 511.6 มิลลิลิตร/กรัมของ Volatile Solids	
วัสดุทางชีวภาพ	Polyhydroxybutyrate; PHB	<i>Agave durangensis leaves</i> และ <i>Bacillus cereus</i> 4N	ทำการปรับสภาพชีวมวลทางกายภาพด้วยอัลตราซาวนด์และความร้อนเป็นเวลา 30 นาที และความร้อน	การสังเคราะห์ PHB เพิ่มขึ้น (0.32 กรัม/ลิตร) และการปรับปรุงอัตราการผลิต PHB (16.79–19.51 เปอร์เซ็นต์)	[21]
	Polyhydroxybutyrate; PHB	ไซโลสที่ผลิตจากชีวมวลลิกโนเซลลูโลส และ <i>Saccharomyces cerevisiae</i> ที่บรรจุยีนจาก <i>Cupriavidus necator</i> และ <i>Scheffersomyces stipitis</i>	การผลิต PHB ในระดับห้องปฏิบัติการ ในสภาวะที่ใช้อากาศ	ได้ผลผลิต PHB เท่ากับ 1.17 ± 0.18 มิลลิกรัม PHB ต่อกรัมไซโลส	[22]
	Polyhydroxyalkanoates; PHA	<i>Bacillus mycoides</i> ICRI89 และ กลองกระดาษ	ทำการลดขนาดกลองกระดาษด้วยกระบวนการ Mechanical Treatment และนำไปไฮโดรไลซิสด้วยเอนไซม์เซลลูเลส	ได้ผลผลิตน้ำตาลรีดิฟิที่ 21.3 ± 0.1 กรัม/ลิตร เมื่อใช้ความเข้มข้นของเอนไซม์ 1.5 เปอร์เซ็นต์ (ปริมาตร/ปริมาตร) ที่ 55 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ เชื้อ <i>B. mycoides</i> ICRI89 สามารถผลิต PHAs 2.1 ± 0.2 กรัม/ลิตร	[23]
	Polyhydroxyalkanoates; PHA	<i>Lysinibacillus</i> sp. RGS และ <i>Ralstonia eutropha</i> ATCC 17699 และชานอ้อย	นำชานอ้อยไปปรับสภาพด้วยกรดไฮโดรคลอริก และไซเตียมคลอไรด์	เมื่อทำการเพาะเลี้ยงร่วมทำให้เกิดการเติบโตของเซลล์สูงสุด (DCW: 11.68 กรัม/ลิตร) และได้ Conversion Yield ของ PHA ที่ 76 เปอร์เซ็นต์ หรือคิดเป็น 8.87 กรัม/ลิตร	[24]
เคมีชีวภาพ	Furfural	ชานอ้อย	นำชานอ้อยไปปรับสภาพด้วยกรด เมื่อทำปฏิกิริยาที่สภาวะ 170 องศาเซลเซียส และความเข้มข้นของกรดซัลฟูริกที่ 0.5 wt.%	ได้ผลผลิตของ furfural สูงสุดที่ 69 เปอร์เซ็นต์ Conversion Yield	[25]
	Levulinic Acid	ยูคาลิปตัส	นำไม้ยูคาลิปตัสไปปรับสภาพด้วยกรดซัลฟูริก ทำปฏิกิริยาที่สภาวะ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 300 นาที	ได้ผลผลิตของกรดเลวูลินิก 105 กรัม/ลิตร กลูโคส	[26]
	Succinic Acid	ตัวอย่างไฮโดรไลซิสจากชีวมวลลิกโนเซลลูโลส	SSF operation โดยการใช้ <i>Actinobacillus succinogenes</i>	ได้ผลผลิตกรดซัคซินิก 62.12, 54.41 และ 65.31 กรัม/ลิตร จากกระบวนการ SHF, SSF และ SSSF ตามลำดับ	[27]

ในส่วนของไบโอแอมโมเนียที่สามารถนำมาใช้ทดแทนไฮโดรเจนในอุตสาหกรรมเชื้อเพลิงชีวภาพได้ แอมโมเนียเป็นก๊าซที่อุดมหมู่มีห้อง เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และผลิตได้ด้วยกระบวนการทางชีวภาพ แม้ว่าไบโอแอมโมเนียจะช่วยทำให้ประหยัดน้ำมันครึ่งหนึ่งของน้ำมันเบนซิน และไม่ปลดปล่อย CO₂ สามารถใช้ทดแทนน้ำมันเบนซินธรรมดาได้ เนื่องจากมีความเสี่ยงจากไฟไหม้น้อยกว่า มีการกระจายตัวอย่างรวดเร็วในอากาศเมื่อเกิดการรั่วและมีกลิ่นที่เป็นเอกลักษณ์ ทำให้สามารถติดตามการรั่วไหลได้ง่ายแม้มีความเข้มข้นเพียงเล็กน้อย การเผาไหม้ของแอมโมเนียอย่างสมบูรณ์จะทำให้เกิดก๊าซไนโตรเจน และไอน้ำเท่านั้น การผลิตแอมโมเนียจากชีวมวลลิกโนเซลลูโลสมีความสำคัญในการช่วยลดการผลิตก๊าซเรือนกระจก ปัจจุบันมีการใช้แบคทีเรียหลายสายพันธุ์ในการผลิตแอมโมเนีย ซึ่งส่วนใหญ่เป็นแบคทีเรียที่แยกได้จากมูลสุกรและมูลสัตว์เคี้ยวเอื้อง [34] ได้แก่ *Eubacterium*, *Clostridium*, *Peptostreptococcus*, *Pseudomonas* และ *Fusobacterium* โดยแบคทีเรียเหล่านี้เป็นแบคทีเรียที่พบได้บ่อยตามแหล่งธรรมชาติ และสามารถผลิตแอมโมเนียได้สูงถึง 680 มิลลิกรัมต่อลิตรต่อวัน

4.2 วัสดุทางชีวภาพ

ไบโอโพลีเมอร์ที่ผลิตจากชีวมวลลิกโนเซลลูโลสสามารถใช้เป็นทางเลือกแทนพลาสติกที่ได้จากปิโตรเลียมทั่วไปซึ่งไบโอโพลีเมอร์สามารถผลิตได้จากชีวมวลที่หลากหลาย เช่น แป้ง เซลลูโลส โปรตีน คอลลาเจน หรืออาจได้มาจากกระบวนการหมักโดยเชื้อจุลินทรีย์ เช่น PHAs คือ เซลลูโลสจากแบคทีเรีย หรือผลิตผ่านกระบวนการโพลีเมอไรเซชันของโมโนเมอร์ที่ผลิตได้จากการหมัก เช่น กรดโพลีแลคติก โพลีบิวทีลีน กรดซัคซินेट [35]–[37] ไบโอโพลีเมอร์มีลักษณะโครงสร้างทางเคมีที่หลากหลายซึ่งทำให้มีประโยชน์สำหรับการใช้งานที่แตกต่างกัน ในหลายกรณี เช่น การใช้งานทางการแพทย์ ซึ่งจำเป็นต้องมีความเข้ากันได้ทางชีวภาพ (Biocompatibility) ของโพลีเมอร์กับร่างกายผู้ใช้งาน โดยปัจจุบันมีความหลากหลายและสามารถจำแนกได้หลายวิธี เช่น กระบวนการหรือแหล่งวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการผลิต

ตัวอย่างของพลาสติกที่ไม่สามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ เช่น Polyethylene (PE), Polypropylene (PP) หรือ Polyethylene Terephthalate (PET) ในทางตรงกันข้ามพลาสติกชีวภาพที่สามารถย่อยสลายได้ เช่น โพลีแลคติก (Polylactic Acid; PLA) ซึ่งสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และมีสมบัติเข้ากันได้ดีทางชีวภาพมากที่สุดตัวหนึ่ง PLA ได้มาจากกรดอินทรีย์แลคติก (Lactic Acid; LA) ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติด้วยการหมักของจุลินทรีย์จากวัตถุดิบชีวมวล เช่น น้ำตาลที่ได้จากข้าวโพด น้ำตาลทราย และหัวบีต PLA เป็นโพลีเมอร์ที่สามารถนำไปใช้งานได้อย่างหลากหลาย มีความแข็งแรงสูง มีความสามารถในการนำมาใช้แปรรูปได้ดีและสามารถใช้เป็นส่วนประกอบในการผลิตชิ้นส่วนขึ้นรูป ฟิლล์ และเส้นใย จากการศึกษาของ Castro-Aguirre และคณะ 2016 พบว่า PLA มีคุณสมบัติทางกลและทางกายภาพที่เทียบเคียงได้กับพอลิเมอร์จากปิโตรเลียมทั่วไป เช่น พอลิเอทิลีนเทเรฟทาเลต (Polyethylene Terephthalate; PET) และพอลิสไตรีน (Polystyrene; PS) ไบโอโพลีเมอร์เหล่านี้ถูกผลิตและจำหน่ายในท้องตลาด และมีอัตราการเติบโตอย่างต่อเนื่อง เพื่อใช้ทดแทนโพลีเมอร์สังเคราะห์ ปัจจุบันมีการใช้ในบรรจุภัณฑ์ ฟิลล์ และเส้นใยที่หลากหลาย แม้จะมีคุณสมบัติหลายอย่างที่คล้ายคลึงกับพอลิเมอร์ที่ใช้ปิโตรเลียมทั่วไปแต่ปริมาณการผลิตก็ยังไม่เพียงพอกับความต้องการของตลาด และยังมีราคาที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปิโตรเลียม

Polyhydroxyalkanoates; PHA, Poly (Butylene Succinate; PBS) เป็นไบโอพอลิเมอร์ที่มีการผลิตระดับอุตสาหกรรม แต่การผลิตนั้นถูกจำกัดเนื่องจากต้นทุนการผลิตที่สูง ซึ่งส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับต้นทุนวัตถุดิบในการหมักโดยจุลินทรีย์และการกระบวนการคัดแยกผลผลิตปลายน้ำ (Downstream Separation) PHA และ PBS มีการใช้งานมากมายในกิจกรรมต่างๆ เช่น เกษตรกรรม และอุตสาหกรรม แต่ส่วนใหญ่อยู่ในด้านการแพทย์ โดยโพลีเมอร์ได้รับการผลิตและปรับปรุงคุณสมบัติเพื่อการใช้งานด้านชีวการแพทย์ที่หลากหลาย เช่น เย็บแผลด้วยเส้นใยที่ละลายและดูดซับได้ โครงข่ายกระดูก แผ่นแปะซ่อมแซมผิวหนัง แผ่นแปะหัวใจและ

หลอดเลือด ล้วนหัวใจ อุปกรณ์ซ่อมแซมเส้นประสาท อุปกรณ์ซ่อมแซมเส้นเอ็น หมุดเกี่ยวกับศัลยกรรมกระดูก และวัสดุปิดแผล (Masood และคณะ 2015, Elmowafy และคณะ [40])

นอกจากนั้น PHAs และ PLA ยังถูกผลิตเป็นอนุภาคขนาดนาโนสเกลสำหรับการนำส่งยาเข้าสู่ร่างกาย การปลูกถ่ายอวัยวะที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนและเพื่อใช้ในการเคลือบรากฟันเทียมที่มีคุณสมบัติสำหรับการเข้ากันได้ทางชีวภาพและการใช้งานด้านวิศวกรรมเนื้อเยื่อที่มีคุณสมบัติเป็นสารต้านแบคทีเรีย [38] PHAs ยังมีศักยภาพที่จะใช้ในการผลิตของใช้ในชีวิตประจำวัน เช่น วัสดุบรรจุภัณฑ์ สินค้าอุปโภคบริโภคและของใช้ในครัวเรือน เพอร์นิเจอร์ กีฬา สุขภาพ ยานยนต์และการขนส่ง และภาคการก่อสร้าง [39], [40]

นอกจากนี้ยังมีไบโอพอลิเมอร์ที่ได้จากการกลั่นน้ำมัน (Fossil Resources) และสามารถย่อยสลายทางชีวภาพได้ด้วยตัวอย่างเช่น Polybutylate Adipate Terephthalate; PBAT โดยมีข้อเสียบางประการโดยเฉพาะคุณสมบัติทางเชิงกลต่างๆ เพื่อปรับปรุงปัญหาเหล่านี้ จึงมักจะผสมกับพอลิเมอร์ชีวภาพและพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพอื่นๆ เช่น Polybutylene Adipate Terephthalate; PBAT และ Poly (Butylene Succinate-co-butylene Adipate; PBSA) เป็นโคพอลิเมอร์ โดยเมื่อทำการผสม PLA/PBAT และ PLA/PBSA จะสามารถปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น ความทนทานต่อเครียดทางวิศวกรรม (Stress and Strain) ได้โดยใช้สารเติมแต่งที่เหมาะสม [41]

นอกจากนี้ยังมีกลุ่มของไบโอพอลิเมอร์ที่เกิดจากการผสมระหว่างพลาสติกกับเซลลูโลส [39] โดยโพลียูรีเทนที่ผสมกับเซลลูโลสถูกผลิตขึ้นโดยการใช้ประโยชน์จากหมู่ฟังก์ชันไฮดรอกซิลของเซลลูโลส และการดัดแปลงโครงสร้างของวัสดุผสมระหว่างโพลียูรีเทน กับสารมัธยันตร์ (Intermediate) ในรูปแบบที่หลากหลาย เช่น Isosorbide และ 2,3-butanediol ที่ผลิตมาจากกลูโคส สำหรับการขึ้นรูปวัสดุผสมในรูปแบบฟิล์มที่เป็นวัสดุที่นำกลับมาใช้ใหม่ได้และผลิตจากวัสดุธรรมชาติ นอกจากนี้ยังมีการผลิตวัสดุผสมระหว่างกรดอะดิก (Adipic Acid) ที่ได้จากเซลลูโลส และผสมกับไนลอน 66 หรือ Polyurethane ได้ [42]

4.3 สารชีวเคมี

ผลิตภัณฑ์เคมีชีวภาพคือผลิตภัณฑ์สารเคมีที่ได้จากชีวมวล เช่น เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน โปรตีน แป้ง น้ำมัน เป็นต้น ซึ่งสามารถผลิตในรูปของแพลตฟอร์มเคมีคอล เช่น C_2 (เอทานอล กรดอะซิติก) C_3 (กรดแลคติก กลีเซอรอล) C_4 (กรดซัคซินิก กรดฟูมาริก) C_5 (เฟอร์ฟูรัล กรดเลวูลินิก) C_6 (5-HMF กรดซัคติก) เป็นต้น ซึ่งสารเหล่านี้เป็นส่วนประกอบที่นำไปใช้ในการสร้างเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าสูงขึ้น [43], [44]

4.3.1 เฟอร์ฟูรัล

เฟอร์ฟูรัล (Furfural) เป็นสารเคมีที่สามารถทำหน้าที่เป็นสารตั้งต้นที่สำคัญสำหรับการสังเคราะห์อนุพันธ์ต่างๆ สำหรับการผลิตเฟอร์ฟูรัลหรืออนุพันธ์ของเฟอร์ฟูรัลจากชีวมวลลิกโนเซลลูโลสโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่นำกลับมาใช้ใหม่ได้ ทำให้สามารถสังเคราะห์สารเคมีที่มีมูลค่าเพิ่ม เช่น Levulinic Acid, Tetrahydrofuran, Pentanediol เป็นต้น โดยการผ่านกระบวนการที่ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่ต่างกัน เฟอร์ฟูรัลสามารถพัฒนาเป็นสารเคมีได้หลายชนิด เช่น Tetrahydrofuran; THF, 2-methyltetrahydrofuran; MTHF, Maleic Anhydride, 1,5-pentanediol; 1,5-PeOL และ Furfuryl Alcohol; FAL การเปลี่ยนรูปของเฟอร์ฟูรัลเป็น FAL โดยยีสต์ (เช่น *S. cerevisiae* NL22, *S. cerevisiae* 354) มีรายงานผลการทดลองว่าสามารถสร้าง FAL ได้สูงถึงประมาณ 80% จาก Furfural (30 มิลลิโมลาร์)

กระบวนการกลั่นทางชีวภาพที่ผลิตเฟอร์ฟูรัลสามารถส่งเสริมเศรษฐกิจชีวภาพ (Bioeconomy) โดยเปลี่ยนวัตถุดิบที่เหลือใช้ให้เป็นปุ๋ยอินทรีย์ อาหารสัตว์ ก๊าซชีวภาพ หรือการผลิตพลังงานเพื่อลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก เมื่อนำตัวอย่างขานอ้อยมาผลิตเป็นเอทานอลและฟูเฟอร์รัล โดยสกัดได้สาร Furfural ในระหว่างการปรับสภาพขานอ้อยด้วยกรดซัลฟิวริก และผลิตเอทานอลในกระบวนการเดียวกันซึ่งสามารถผลิต Furfural ได้ Conversion Yield สูงสุดที่ 69 เปอร์เซ็นต์ เมื่อทำปฏิกิริยาที่สภาวะ 170 องศาเซลเซียส และความเข้มข้นของกรดซัลฟิวริกที่ 0.5 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก โดยได้ผลผลิตเอทานอลที่ 77–95 เปอร์เซ็นต์ [25]

4.3.2 5-ไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรัล

ปัจจุบันมีการผลิต 5-ไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรัล ($C_6H_6O_3$) หรือ 5-HMF ทั่วโลกอยู่ที่ประมาณ 652 กิโลตัน โดยการผลิต 5-HMF นั้นได้มาจากวัตถุดิบโมโนแซ็กคาไรด์ เช่น กลูโคสและฟรุกโตส สาร 5-HMF เป็นโมเลกุลแพลตฟอร์ม C_6 ที่ใช้งานได้หลากหลายและผลิตได้ด้วยกระบวนการกลั่นทางชีวภาพ แต่ต้นทุนการผลิตที่สูงขัดขวางการพัฒนาการผลิตในระดับอุตสาหกรรม [45] 5-HMF เป็นหนึ่งในโมเลกุลแพลตฟอร์มที่สำคัญสำหรับการผลิตสารเคมีทางอุตสาหกรรมจำนวนมาก ได้แก่ Levulinic Acid, Furfuryl Alcohol และ Furandicarboxylic Acid การผลิต 5-HMF ในกระบวนการอุตสาหกรรมจากการไฮโดรไลซิสของเฮกโซสหรือกระบวนการตีไฮดรอกซีของเซลลูโลสด้วยการใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา จากงานวิจัย Portillo Perez และคณะ [46] ที่มีการพัฒนาการสังเคราะห์ 5-HMF และอนุพันธ์โดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นเนื้อเดียวกันและต่างกัน (Homogeneous and Heterogeneous Catalysts) [46] นอกจากนี้ยังมีการพัฒนากระบวนการโดยใช้ฟรุกโตสเป็นวัตถุดิบและใช้กรดเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาซึ่งพบว่าได้กระบวนการผลิต 5-HMF ที่มีอัตราส่วนของผลผลิตสูง (High Selectivity) หรือไม่นั้นจะถูกควบคุมโดยชนิดของกรด การกระจายตัวของฟรุกโตสในตัวทำละลาย และชนิดของตัวทำละลาย โดยผลผลิต HMF จะได้อัตราการเปลี่ยนจากสับสเตรตกลูโคสได้สูงเข้าใกล้ 60 เปอร์เซ็นต์ เมื่อควบคุมอัตราส่วนของกรด Lewis-to-Brønsted เท่ากับ 0.3 [47] นอกจากนี้ อัตราส่วนของผลผลิต HMF จากฟรุกโตสที่สูงถึง 90 เปอร์เซ็นต์ ก็สามารถทำได้เมื่อใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เป็นกรดซัลโฟนิกในตัวทำละลายไดเมทิลซัลโฟไซด์ที่อุณหภูมิที่ 120 องศาเซลเซียส [48] อย่างไรก็ตามกระบวนการแยก HMF ออกจากตัวทำละลาย เช่น DMSO เป็นข้อเสียหลัก เนื่องจากสาร DMSO มีจุดเดือดสูง และด้วยเหตุนี้ตัวทำละลายทางเลือกอื่นๆ (เช่น Tetramethylene Sulfone) หรือระบบตัวทำละลายแบบไบเฟส (Biphasic Solvent System) [48] ได้ถูกนำมาประยุกต์เพื่อการสกัดแยกสาร HMF โดยระบบแบบไบเฟสนี้ประกอบด้วยสารโซเดียมคลอไรด์ในระบบตัวทำละลายน้ำ

ซึ่งมีประโยชน์อย่างมากสำหรับการก่ตัวของ HMF แบบคัดเลือก ซึ่งในระบบนี้จะทำให้ได้ผลผลิต HMF สูงถึง 53 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อทำการเปรียบเทียบกับระบบที่ใช้ $AlCl_3/HCl$ เป็นวัฏภาคที่มีน้ำและเมทิล ไอโซบิวทิล คีโตนเป็นเฟสอินทรีย์ จะทำให้ได้ผลผลิต HMF ถึง 66.2 เปอร์เซ็นต์ โดยมีการเติม NaCl 20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก [49]

4.3.3 กรดซัคซินิก

กรดซัคซินิก (Succinic Acid) เป็นกรดไดคาร์บอกซิลิกที่ใช้ในอุตสาหกรรมที่หลากหลาย โดยเฉพาะอุตสาหกรรมอาหาร โดยสามารถนำเอาชีวมวลลิกโนเซลลูโลสเป็นวัตถุดิบ ซึ่งจะให้มีต้นทุนการผลิตกรดซัคซินิกที่ต่ำลง ซึ่งต้นทุนของวัตถุดิบนั้นมีบทบาทที่สำคัญในกระบวนการโดยรวม จากงานวิจัยของ Yan และคณะ [50] ได้นำเอาไฮโดรไลซิสของก้านข้าวโพดมาเข้าสู่กระบวนการหมักด้วย *C. glutamicum* CG 55 ซึ่งสามารถผลิตกรดซัคซินิกได้ถึง 98.6 กรัมต่อลิตร โดยให้อัตราการผลิต 4.29 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง ภายใต้สภาวะที่ไม่ใช้ออกซิเจน นอกจากนี้ [51] ได้ทำการเพาะเลี้ยง *E. coli* BA305 ด้วยการใส่กลูโคสและไซโลสเป็นวัตถุดิบพร้อมกันแบบไม่ใช้ออกซิเจน โดยทำการหมักแบบกึ่งกะโดยใช้ไฮโดรไลสจากอ้อยทำให้เกิดการผลิตกรดซัคซินิกได้ 39.3 กรัมต่อลิตร นอกจากนี้ Hodge และคณะ [52] ได้ทำการรายงานการผลิตกรดซัคซินิกโดย *E. coli* โดยใช้ไฮโดรไลซิสที่ได้จากก้านข้าวโพดเป็นวัตถุดิบซึ่งสามารถผลิตกรดซัคซินิกได้ 57.8 กรัมต่อลิตร โดยพบว่า การผลิตกรดซัคซินิกลดลงเหลือ 42.4 กรัมต่อลิตร เมื่อใช้ไฮโดรไลซิสของไม้เนื้ออ่อนในการผลิตกรดซัคซินิก

4.3.4 กรดแลคติก

กรดแลคติก (Lactic Acid) (2-ไฮดรอกซีโพรพานอิก) เป็นสารเคมีที่มีคุณค่า มีการนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในรูปแบบสารตัวกลาง (Intermediate Compound) สารกันบูด หรือสารเติมแต่งในอาหารและเครื่องดื่ม เครื่องสำอาง ยา และอุตสาหกรรมอื่น ๆ อีกทั้งยังถูกใช้เป็นส่วนประกอบสำคัญสำหรับการผลิตโพลีเมอร์ที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ หรือสารตั้งต้นสำหรับการผลิตตัวทำละลายที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ในส่วนของการผลิตกรดแลคติกทางเคมียังมีวิธีการอื่นๆ



เช่น ปฏิกริยาออกซิเดชันของโพพิลีนหรือโพพิลีนไกลคอล ปฏิกริยาไฮโดรไลซิสของกรดคลอโรโพพิโอนิก อย่างไรก็ตาม ปฏิกริยาทางสังเคราะห์ทางเคมีเหล่านี้ไม่สามารถทำได้ในเชิงเศรษฐศาสตร์และยังมีข้อจำกัดทางเทคนิคสำหรับกระบวนการผลิตในระดับอุตสาหกรรม ในทางกลับกัน การผลิตกรดแลคติกโดยการหมักหรือทางชีวภาพจะมีประสิทธิภาพขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำตาลที่ใช้เป็นวัตถุดิบที่แตกต่างกัน (เช่น กลูโคส แลคโตส) แป้ง หรือลิกโนเซลลูโลส ไฮโดรไลสและยังกำหนดโดยชนิดของจุลินทรีย์ต่างๆ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นกลุ่มแลคโตบาซิลลัส และยังมีปัจจัยที่มีผลต่อการหมักกรดแลคติก pH อุณหภูมิ สารอาหาร สารตั้งต้น ความเข้มข้นของผลิตภัณฑ์ [53]

Zhang และคณะ ได้ทำการศึกษาการผลิตแลคติกจากกลูโคส ไฮโลสที่ได้จากซังข้าวโพดที่ผ่านการปรับสภาพด้วยอัลคาไลน์โดยใช้ *Lactobacillus Plantarum* ในการทดสอบการหมักแบบกะ ซึ่งสามารถผลิตดี-แลคติก (D-lactic) ได้อยู่ที่ 19.7 กรัมต่อลิตร จากไฮโลส 40 กรัมต่อลิตร โดยการทดสอบการหมักแบบกึ่งกะนี้ สามารถผลิตดี-แลคติกได้ 30.1 กรัม/ลิตร เมื่อใช้สารตั้งต้นเป็นส่วนผสมของกลูโคสและไฮโลส (อัตราส่วน 2 : 1) และสามารถผลิตดี-แลคติกได้ 47.2 กรัม/ลิตร ซึ่งคิดเป็นผลผลิตกรดแลคติก 0.84 กรัมต่อกรัม กลูโคสและไฮโลส นอกจากนี้ยังมีการทดลองในกระบวนการทดลองในระบบ SHF และ SSF พบว่ามีการผลิตกรดดี-แลคติก 19.4 กรัม/ลิตร จากกระบวนการ SHF ในขณะที่กระบวนการ SSF ให้ปริมาณกรดดี-แลคติก 26.8 กรัม/ลิตร เมื่อเติมไฮโดรไลสและใช้สารสกัดจากยีสต์เป็นแหล่งไนโตรเจน ทำให้ได้ปริมาณกรดดี-แลคติก 29.4 กรัม/ลิตร เมื่อเติมสารสกัดจากกากถั่วเหลือง และเมื่อทำการทดลองในรูปแบบกึ่งกะสามารถผลิตกรดดี-แลคติกในกระบวนการ SSF ได้ถึง 61.3 กรัมต่อลิตร โดยเมื่อทำการผลิตในกระบวนการ Simultaneous Saccharification and Co-Fermentation; SSCF ทำให้ได้ผลผลิตเพิ่มขึ้นประมาณ 38 เปอร์เซ็นต์ หรือคิดเป็นประมาณสามเท่าเมื่อเทียบกับกระบวนการ SHF [54]

4.3.5 กรดอิทาโคนิก

กรดอิทาโคนิก (Itaconic Acid; IA) เป็นกรดอินทรีย์

ที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งที่เกิดได้จากชีวมวลลิกโนเซลลูโลส IA เป็นกรดไดคาร์บอกซิลิก ที่มีคาร์บอน 5 อะตอม และเป็นสารเคมีแพลตฟอร์มที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวาง และถูกจัดรวมอยู่ใน 12 อันดับแรกของสารเคมีแพลตฟอร์มโดยองค์กรเพื่อการผลิตพลังงานชีวภาพของกระทรวงพลังงานประเทศสหรัฐอเมริกา การผลิต IA ด้วยกระบวนการทางเทคโนโลยีชีวภาพ สามารถเกิดขึ้นได้โดยการหมักด้วยเชื้อรา เช่น *Aspergillus terreus* และ *Ustilago maydis* หรือแบคทีเรียที่มีการตัดต่อทางพันธุกรรมเพื่อปรับปรุงกระบวนการเมตาบอลิซึม เช่น *E. coli* และ *Corynebacterium glutamicum* IA เป็นสารเคมีทางชีวภาพทดแทนสำหรับโพลีเมอร์ที่ย่อยสลายได้และใช้ทดแทนสารประกอบอินทรีย์อื่นๆ ที่ผลิตขึ้นจากปิโตรเคมีได้อีกด้วย โดยการพัฒนาระบบการผลิต IA ที่สำคัญ นั้นทำได้โดยใช้กระบวนการวิศวกรรมเมตาบอลิซึม และการสังเคราะห์และประยุกต์เพื่อใช้ IA ในการผลิตวัสดุโพลีเมอร์ชนิดใหม่ [55]

ในกระบวนการผลิต IA จากจุลินทรีย์ด้วยการหมัก จะมีการใช้สายพันธุ์เชื้อรา คือ *Aspergillus* โดยเฉพาะ *A. terreus* นอกจากนี้จุลินทรีย์อื่นๆ ก็สามารถผลิต IA ได้เช่นกัน เช่น เชื้อราที่มีเส้นใย *U. maydis* [56] จากการศึกษาของ Teleky และคณะ [55] แสดงให้เห็นว่าการผลิต IA จากไม้แผ่นที่ผ่านการปรับสภาพและกระบวนการไฮโดรไลซิสทำให้ได้ผลผลิตที่เหมาะสม โดยผลผลิตสุดท้ายของ IA ที่ได้รับเมื่อใช้ *A. terreus* ในการหมักอยู่ที่ 0.35 กรัมต่อกรัมกลูโคส และจากการใช้ *U. maydis* ได้ผลผลิตอยู่ที่ 0.48 กรัม ต่อกรัมกลูโคส ในการศึกษา *U. maydis* ที่ผ่านการปรับปรุงทางพันธุกรรมเป็นจุลินทรีย์ที่เหมาะสมสำหรับการผลิต IA จากชีวมวลลิกโนเซลลูโลสที่ผ่านการปรับสภาพแล้วเนื่องจากความทนทานต่อการปนเปื้อน โดยสปีสเตรดที่ถูกไฮโดรไลซ์ด้วยเอนไซม์ทำให้เกิดกลูโคสที่มีความเข้มข้น 180 กรัมต่อลิตร และพบว่า *A. terreus* มีการผลิต IA สูงสุดคือ 30.8 กรัมต่อลิตร [55] โดยพบว่า แป้งข้าวโพดเป็นแหล่งคาร์บอนที่เหมาะสม ประหยัด เพื่อการผลิตจำนวนมากในระดับอุตสาหกรรม จึงถูกใช้สำหรับการหมักด้วย *A. terreus* TN-484 ที่มีการตัดแต่งพันธุกรรม ให้มีการแสดงออกของ

ยีนกลูโคสอะไมเลส (Glucosylase) โดยให้ผลผลิต IA > 60 กรัม/ลิตร และเมื่อเพิ่มการแสดงออกของยีนนี้ก็สามารถเพิ่มอัตราการผลิตเป็น 77.6 กรัมต่อลิตร [55]

4.3.6 กรดเลวูลินิก

กรดเลวูลินิก (Levulinic Acid) เป็นสารที่ได้จากการแปรรูปปิโตรเลียม เช่น γ -valerolactone; GVL, Ethyl Levulinate; EL และเมทิลเตตระไฮโดรฟูแรน (MTHF) นอกจากนี้ยังใช้เป็นสารเติมแต่งในน้ำมันเบนซินและไบโอดีเซล โดยมีการเปลี่ยนแปลงเป็น Valerate Esters โดยสารเคมีที่ผลิตจาก Levulinic Acid ในปัจจุบันมีการใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น ตัวทำละลายเรซิน สารเคมีตัวกลาง โพลีเมอร์ อิเล็กทรอนิกส์ แบตเตอรี่ ตัวดูดซับ การถ่ายภาพ พลาสติก ไชเซอร์ ยาง เครื่องสำอาง ระบบนำส่งยา สิ่งทอ และผลิตภัณฑ์ยา เป็นต้น

จากงานวิจัยของ Kang และคณะ [26] ได้มีการสังเคราะห์กรดเลวูลินิกจากไม้ยูคาลิปตัส โดยใช้เมทานอล 90 เปอร์เซ็นต์ปริมาตร เป็นตัวทำละลายและมีกรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา เนื่องจากตัวทำละลายมีประสิทธิภาพในการยับยั้งฮิวมินที่ผลิตจากกลูโคส และกลูโคสที่ได้จะถูกเปลี่ยนแปลงเป็น LA และ Methyl Levulinate; MLA ดังนั้น 66 เปอร์เซ็นต์ของ LA และ MLA จึงถูกผลิตขึ้นในสภาวะปฏิกิริยาที่ดีที่สุดที่ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 90 นาที และเมื่อใช้ไม้ยูคาลิปตัสเป็นวัตถุดิบ และมีตัวเร่งปฏิกิริยาเป็น H_2SO_4 เพื่อผลิต LA พบว่า การสกัดผลผลิตไซโลสจากเฮมิเซลลูโลสที่เหมาะสมนั้นเกิดขึ้นในสภาวะที่ 170 องศาเซลเซียส และ 300 นาที โดยได้ผลผลิต LA 105 กรัมต่อลิตรกลูโคส [26]

4.3.7 ไซลิทอล

ไซลิทอล (Xylitol) เป็นสารให้ความหวานทำให้ลดการผลิตอินซูลินในระหว่างการย่อยอาหารโดยผู้ป่วยโรคเบาหวาน ในธรรมชาติไซลิทอลพบได้ในผักและผลไม้บางชนิดในปริมาณเล็กน้อย [56] ทำให้การสกัดให้ได้ปริมาณสูงในระดับอุตสาหกรรมทำได้ยากและมีต้นทุนที่สูง ปัจจุบันไซลิทอลถูกผลิตขึ้นโดยปฏิกิริยาทางเคมีในสภาวะที่เป็นต่างโดยการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อเปลี่ยนไซโลสที่ได้จากไฮโดรไลซิส

ของเฮมิเซลลูโลส หรืออาจทำการผลิตไซลิทอลจาก D-xylose โดยการทำงานในกระบวนการหมักของจุลินทรีย์ เช่น ยีสต์ โดยเฉพาะ *Candida* เช่น *C. pelliculosa* *C. boidinii*, *C. guilliermondi*, *Petromyces albertensis* หรือแบคทีเรีย เช่น *Enterobacter liquefaciens*, *Corynebacterium* sp. และ *Mycobacterium smegmatis* โดยทั่วไปยีสต์มีเอนไซม์สองชนิดที่จำเป็นสำหรับการเผาผลาญของไซโลส ได้แก่ ไซโลสรีดักเตส (Xylose Reductase; XR) และไซลิทอลดีไฮโดรจีเนส (Xylitol Dehydrogenase; XDH) จากการศึกษาเพื่อเพิ่มผลผลิตไซลิทอลให้ได้อยู่ที่อัตราการผลิต 0.32–2.67 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง [57] จึงได้ทำการดัดแปลงพันธุกรรมซึ่งจะช่วยเพิ่มผลผลิตของการเปลี่ยนไซโลสเป็นไซลิทอลทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป้าหมายที่สูงขึ้น

5. สรุปประเด็นปริทรรศน์

ชีวมวลลิกโนเซลลูโลสเป็นวัตถุดิบที่สามารถใช้เพื่อการผลิตพลังงานชีวภาพ สารชีวเคมีเพิ่มมูลค่า และไบโอพอลิเมอร์ที่เป็นไปตามหลักการของ Bio-circular Green Economy ซึ่งเป็นตัวเลือกของผลผลิตที่ได้จากกระบวนการผลิตจากวัตถุดิบปิโตรเลียมเพื่อช่วยลดผลกระทบของสภาวะโลกร้อน จากแนวโน้มความต้องการของทั้งทางภาควิจัย ด้านสังคม และอุตสาหกรรมจึงได้ส่งเสริมให้มีการพัฒนาเทคโนโลยีในการพัฒนากระบวนการผลิต โดยการปรับปรุงองค์ประกอบต่างๆ ของกระบวนการ รวมไปถึงกระบวนการสกัดแยกสารเพื่อให้ได้คุณสมบัติและปริมาณที่ตรงกับความต้องการที่ใช้ อย่างไรก็ตามข้อจำกัดของกระบวนการก็ได้แจกแจงจากผลงานวิจัยต่างๆ ที่ผ่านมา เช่น การแข่งขันทางด้านราคาของผลผลิตที่ได้จากลิกโนเซลลูโลสและปิโตรเลียม และปริมาณการผลิตที่เกิดขึ้นจริงในตลาด ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความต้องการในการส่งเสริมการผลิตผลผลิตเหล่านี้ต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] T. Ruensodsai and M. Sriariyanun, "Sustainable development and progress of lignocellulose



- conversion to platform chemicals,” *The Journal of KMUTNB*, vol. 32, no. 4, pp. 815–818, 2022 (in Thai).
- [2] M. Sririyanun and K. Kitsubthawee, “Trends in Lignocellulosic Biorefinery for production of value-added biochemicals,” *Applied Science and Engineering Progress*, vol. 13, no. 4, pp. 283–284, 2020 (in Thai).
- [3] S. Soponronnarit, “Thailand’s energy situation and strategic guidance for reducing greenhouse gas emission,” *The Journal of KMUTNB*, vol. 29, no. 3, pp. 353–354, 2019 (in Thai).
- [4] A. Thanapimmetha, S. Tiyanusorn, P. Srinophakun, M. Saisriyoot, “Reducing sugar production from empty fruit bunches with enzyme Cellic Ctec2[®],” *The Journal of KMUTNB*, vol. 28, no. 2, pp. 285–290, 2018 (in Thai).
- [5] Y-S. Cheng, P. Mutrakulcharoen, S. Chuetor, K. Cheenkachorn, P. Tantayotai, E. J. Panakkal, and M. Sririyanun, “Recent situation and progress in biorefining process of lignocellulosic biomass: toward green economy,” *Applied Science and Engineering Progress*, vol. 13, no. 4, pp. 299–311, 2020 (in Thai).
- [6] D. Yuaikwarmdee, S. Wantanakomol, and T. Silpcharu, “Adaption strategy for automotive part manufacturing industry to support Thailand 4.0,” *The Journal of KMUTNB*, vol. 33, no. 2, 2023 (in Thai).
- [7] T. Phusantisampan and N. Kitiborwornkul, “Progress in chemical pretreatment of lignocellulose biomass for applications in biorefinery,” *The Journal of KMUTNB*, vol. 32, no. 4, pp. 1087–1101, 2022 (in Thai).
- [8] M. Lomjabok, N. Krasaechol, and S. Sai-Ut, “Effect of pepsin and hydrolysis time on antioxidative activity of collagen hydrolysate from chicken feet through response surface methodology,” *The Journal of KMUTNB*, vol. 31, no. 2, pp. 367–377, 2021 (in Thai).
- [9] P. Khwanchai and S. Fong-In, “Optimization of concentrated Jambulan (*Syzygium cumini*) juice production process by vacuum evaporation using response surface methodology,” *The Journal of KMUTNB*, vol. 33, no. 1, pp. 245–256 2023 (in Thai).
- [10] A. Chanpirak, P. Dumnin, and A. Hongpuay, “Optimization of oil extraction from spent coffee grounds (*coffea canephora* var. *robusta* / *coffea arabica*) by hexane using response surface methodology,” *The Journal of KMUTNB*, vol. 28, no. 4, pp. 799–811, 2018 (in Thai).
- [11] N. Ratasukharom, B. Chomtee, C. Wongoutong, and S. Nidsunkid, “A comparison of missing value estimation methods for response surface design,” *The Journal of KMUTNB*, vol. 32, no. 3, pp. 758–769, 2022 (in Thai).
- [12] C. Homkhiew, W. Boonchouytan, and S. Rawangwong, “Optimal manufacturing parameters of rubberwood flour/high density polyethylene composites using Box–Behnken Design,” *The Journal of KMUTNB*, vol. 27, no. 2, pp. 315–328, 2017 (in Thai).
- [13] M. Galbe and O. Wallberg, “Pretreatment for biorefineries: a review of common methods for efficient utilisation of lignocellulosic materials,” *Biotechnology for Biofuels*, vol. 12, pp. 294, 2019.
- [14] D. Jose, N. Kitiborwornkul, and M. Sririyanun,

- “A review on chemical pretreatment methods of lignocellulosic biomass: recent advances and progress,” *Applied Science and Engineering Progress*, vol.15, no. 4, Article no. 6210, 2022.
- [15] D. A. Esquivel-Hernández, J. S. García-Pérez, I. Y. López-Pacheco, H. M. N. Iqbal, and R. Parra-Saldívar, “Resource recovery of lignocellulosic biomass waste into lactic acid - trends to sustain cleaner production,” *Journal of Environmental Management*, vol. 301, Article no. 113925, 2022.
- [16] Y. A. Osman and L. O. Ingram, “Mechanism of ethanol inhibition of fermentation in *Zymomonas mobilis* CP4,” *Journal of Bacteriology*, vol. 164, no. 1, pp. 173–180, 1985.
- [17] C. Li, X. Lin, X. Ling, S. Li, and H. Fang, “Consolidated bioprocessing of lignocellulose for production of glucaric acid by an artificial microbial consortium,” *Biotechnol Biofuels*, vol. 14, no. 1, pp. 110, 2021.
- [18] I. Loaces, S. Schein, and F. Noya, “Ethanol production by *Escherichia coli* from *Arundo donax* biomass under SSF, SHF or CBP process configurations and in situ production of a multifunctional glucanase and xylanase,” *Bioresource Technology*, vol. 224, pp. 307–313, 2017.
- [19] B. S. Dien, M. A. Cotta, and T. W. Jeffries, “Bacteria engineered for fuel ethanol production: Current status,” *Applied Microbiology and Biotechnology*, vol. 63, no. 3, pp. 258–266, 2003.
- [20] F. Battista, G. Mancini, B. Ruggeri, and D. Fino, “Selection of the best pretreatment for hydrogen and bioethanol production from olive oil waste products,” *Renewable Energy*, vol. 88, pp. 401–407, 2016.
- [21] R. E. Martínez-Herrera, M. E. Alemán-Huerta, P. Flores-Rodríguez, V. Almaguer-Cantú, R. Valencia-Vázquez, W. Rosas-Flores, H. Medrano-Roldán, L. A. Ochoa-Martínez, and O.M. Rutiaga-Quiñones, “Utilization of *Agave durangensis* leaves by *Bacillus cereus* 4N for polyhydroxybutyrate (PHB) biosynthesis,” *International Journal of Biological Macromolecules*, vol.1, no. 175, pp. 199–208, 2021.
- [22] A. G. Sandström, A. Muñoz de Las Heras, D. Portugal-Nunes, and M. F. Gorwa-Grauslund, “Engineering of *Saccharomyces cerevisiae* for the production of poly-3-d-hydroxybutyrate from xylose,” *AMB Express*, vol. 25, no. 1, 2015.
- [23] F. Abdelmalek, A. Steinbüchel, and M. Rofeal, “The hyperproduction of polyhydroxybutyrate using *Bacillus mycoides* ICRI89 through enzymatic hydrolysis of affordable cardboard,” *Polymers (Basel)*, vol.14, no. 14, pp. 2810, 2022.
- [24] R. G. aratale, S. K. Cho, A. A. Kadam, G. S. Ghodake, M. Kumar, R. N. Bharagava, S. Varjani, S. Nair, D. S. Kim, H. S. Shin, and G. D. Saratale, “Developing microbial co-culture system for enhanced Polyhydroxyalkanoates (PHA) production using acid pretreated lignocellulosic biomass,” *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 4, pp. 726, 2022.
- [25] A. Devi, S. Bajar, H. Kour, R. Kothari, D. Pant, and A. Singh, “Lignocellulosic biomass valorization for bioethanol production: A circular bioeconomy approach,” *Bioenergy*, vol. 7, pp. 1–22, 2022.
- [26] S. Kang and J. Yu, “Effect of methanol on



- formation of levulinates from cellulosic biomass,” *Industrial & Engineering Chemistry Research*, vol. 54, no. 46, pp. 11552–9, 2015.
- [27] A. M. Borrero-López, C. Valencia, and J. M. Franco, “Lignocellulosic materials for the production of biofuels, biochemicals and biomaterials and applications of lignocellulose-based polyurethanes a review,” *Polymers*, vol. 14, pp. 881, 2022.
- [28] C. Piasai, N. Boontian, T. Phorndon, and M. Padri, “Acetic acid as a carbon source from fermentation of biogas excess sludge for the removal of nutrients in enhanced biological phosphorus removal processes,” *The Journal of KMUTNB*, vol. 32, no. 1, pp. 118–133, 2022 (in Thai).
- [29] T. Phorndon, N. Boontian, C. Piasai, and M. Padri, “Enhanced methane production from cassava pulp by using alkaline hydrolysis and heat with scraps iron,” *The Journal of KMUTNB*, vol.31, no. 2, pp. 216–230, 2021 (in Thai).
- [30] P. Intanoo and P. Ketrom, “The development of biomass fuel from peanut shell,” *The Journal of KMUTNB*, vol. 28, no. 4, pp. 837–847, 2018 (in Thai).
- [31] C. Nualsri, S. Dangwongjaroenporn, and C. Sreela-or, “Effect of biochar from banana peel on the stability of methane production from food waste at different organic loading rates,” *The Journal of KMUTNB*, vol. 31, no. 4, pp. 770–780, 2021 (in Thai).
- [32] N. Sanannam, A. Pimamthisakom, A. Sukvalakunchai, and P. Ngaotrakanwivat, “Cu/CuO doped TiO₂ photoanode for photoelectrochemical water splitting,” *The Journal of KMUTNB*, vol. 32, no. 3, pp. 636–646, 2022 (in Thai).
- [33] P. Keeratiwintakorn, P. Narataruksa, and C. Chuayprasadpattana, “A control system for a pilot-scale modified packed bed reactor for a reforming process,” *The Journal of KMUTNB*, vol. 24, no. 2, 2014 (in Thai).
- [34] K. H. Miga, S. Koren, A. Rhie, M. R. Vollger, A. Gershman, A. Bzikadze, S. Brooks, E. Howe, D. Porubsky, G. A. Logsdon, and V. A. Schneider, “Telomere-to-telomere assembly of a complete human X chromosome,” *Nature*, vol. 858, no. 7823, pp. 79–84, 2020.
- [35] C. Chuensangjun, N. Kongklom, and M. Sririyanun, “Bioplastic: from research to innovation and implementation against global warming,” *The Journal of KMUTNB*, vol. 30, no.2, pp. 183–185, 2020 (in Thai).
- [36] P. Eiamsa-ard, “Polyhydroxyalkanoate: Bioplastic from bacteria,” *The Journal of KMUTNB*, vol. 27, no. 1, pp. 147–158, 2017 (in Thai).
- [37] P. Eiamsa-ard, “Isolation and Identification of polyhydroxyalkanoate (PHA) producing bacteria from food industrial wastewater by using fluorometric screening,” *The Journal of KMUTNB*, vol. 27, no. 4, pp. 771–781, 2017 (in Thai).
- [38] S. M. Saleh, A. M. Soliman, M. A. Sharaf, V. Kale, and B. Gadgil, “Influence of solvent in the synthesis of nano-structured ZnO by hydrothermal method and their application in solar-still,” *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 5, no. 1, pp. 1219–26, 2017.
- [39] K. Shyamala, H. C. Girish, and S. Murgod, “Risk of tumor cell seeding through biopsy and aspiration cytology,” *Journal of International*

- Society of Preventive & Community Dentistry*, vol. 4, no. 1, pp. 5–11, 2014.
- [40] E. M. Elmowafy, M. Tiboni, and M. E. Soliman, “Biocompatibility, biodegradation and biomedical applications of poly (lactic acid)/ poly (lactic-co-glycolic acid) micro and nanoparticles,” *Journal of Pharmaceutical Investigation*, vol. 49, no. 4, pp. 347–80, 2019.
- [41] A. R. de Matos Costa, A. Crocitti, L. H. de Carvalho, S. C. Carroccio, P. Cerruti, and G. Santagata, “Properties of biodegradable films based on poly(butylene succinate) (PBS) and poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) blends,” *Polymers*, vol. 12, no. 10, pp. 2317, 2020.
- [42] N. Srirachya, “Shape stability enhancement of palm fiber hydrogels with natural rubber,” *The Journal of KMUTNB*, vol. 32, no. 1, pp. 143–152, 2022 (in Thai).
- [43] P. Rachamontree, T. Douzou, K. Cheenkachorn, M. Sriariyanun, and K. Rattanaporn, “Furfural: A sustainable platform chemical and fuel,” *Applied Science and Engineering Progress*, vol. 13, no. 1, pp. 3–10, 2019.
- [44] M. Sriariyanun, J. Hendrik Heitz, P. Yasurin, S. Asavasanti, and P. Tantayotai, “Itaconic acid: A promising and sustainable platform chemical?,” *Applied Science and Engineering Progress*, vol. 12, no. 2, 2019.
- [45] J. Yoneda, K. Takeda, T. Otsuka, T. Nakajima, MR. Delbecq, G. Allison, T. Honda, T. Kodera, S. Oda, Y. Hoshi, and N. Usami, “A quantum-dot spin qubit with coherence limited by charge noise and fidelity higher than 99.9%,” *Nature Nanotechnology*, vol. 13, no. 2, pp. 102–6, 2018.
- [46] G. P. Perez, A. Mukherjee, and M. J. Dumont, “Insights into HMF catalysis,” *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, vol. 25, no. 70, pp. 1–35, 2019.
- [47] B. Ghosal, A. Tolamatti, K. K. Singh, K. K. Yadav, R. C. Rannot, A. K. Tickoo, P. Chandra, A. Goyal, N. Kumar, P. Marandi, and N. K. Agarwal, “Multiwavelength study of the radio galaxy NGC 1275 with TACTIC, fermi and swift during December,” *New Astronomy*, vol. 1, no. 80, pp. 101402, 2020.
- [48] L. C. Chen, G. Papandreou, I. Kokkinos, K. Murphy, and A. L. Yuille, “Semantic image segmentation with deep convolutional nets and fully connected crfs,” *arXiv preprint arXiv*, 2014.
- [49] M. Luo, L. Guo, M. Yu, W. Jiang, and H. Wang, “The psychological and mental impact of coronavirus disease 2019 (COVID-19) on medical staff and general public—A systematic review and meta-analysis,” *Psychiatry Research*, vol. 1, no. 291, pp. 113190, 2020.
- [50] Y. Yan, Y. Mao, and B. Li, “Second: sparsely embedded convolutional detection,” *Sensors*, vol. 18, no. 10, pp. 3337, 2018.
- [51] A. Wu, C. Su, D. Wang, Y. Peng, M. Liu, S. Hua, T. Li, GF. Gao, H. Tang, J. Chen, and X. Liu, “Sequential reassortments underlie diverse influenza H7N9 genotypes in China,” *Cell Host & Microbe*, vol. 14, no. 4, pp. 446–52, 2013.
- [52] R. Hodge, J. Brasington, and K. Richards, “Analysing laser-scanned digital terrain models of gravel bed surfaces: linking morphology to sediment transport processes and hydraulics,” *Sedimentology*, vol. 56, no. 7, pp. 2024–43, 2009.



- [53] A. Thakur, P. S. Panesar, and M. S. Saini, "Parametric optimization of lactic acid production by immobilized *Lactobacillus casei* using Box-Behnken Design," *Period Polytech Chem Eng*, vol. 62, no. 3, pp. 274–285, 2018.
- [54] J. Zhang, M. Terrones, C. R. Park, R. Mukherjee, M. Monthieux, N. Koratkar, Y. S. Kim, R. Hurt, E. Frackowiak, T. Enoki, and Y. Chen, "Carbon science in 2016: Status, challenges and perspectives," *Carbon*, vol. 98, no. 70, pp. 708–32, 2016.
- [55] B. E. Teleky and D. C. Vodnar, "Biomass-derived production of itaconic acid as a building block in specialty polymers," *Polymers*, vol. 11, no. 6, pp. 1035, 2019.
- [56] S. Jirasatid, "Effect of riceberry bran on product development of functional drinkable goat milk yogurt," *The Journal of KMUTNB*, vol. 31, no. 2, pp. 356–366, 2021 (in Thai).
- [57] T. O. Suzuki, N. Miyata, H. Horitsu, K. Kawai, K. Takamizawa, Y. Tai, and M. Okazaki, "NAD (P) H-dependent chromium (VI) reductase of *Pseudomonas ambigua* G-1: A Cr(V) intermediate is formed during the reduction of Cr (VI) to Cr (III)," *Journal of Bacteriology*, vol. 174, no. 16, pp. 5340–5, 1992.