



## ความก้าวหน้าของกระบวนการปรับสภาพชีวมวลลิกโนเซลลูโลสด้วยกระบวนการทางเคมี เพื่อกระบวนการกลั่นทางชีวภาพ

ธีราวุติ ภูสันติสัมพันธ์

ศูนย์วิจัยอุตสาหกรรมเคมีชีวภาพและวิศวกรรมกระบวนการแบบอัตโนมัติ ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

ณิชภาพัทธ กิติบวรกุล\*

ศูนย์วิจัยอุตสาหกรรมเคมีชีวภาพและวิศวกรรมกระบวนการแบบอัตโนมัติ ภาควิชาวิศวกรรมเคมีและกระบวนการ บัณฑิตวิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์นานาชาติสิรินธรไทย-เยอรมัน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

\* ผู้นิพนธ์ประสานงาน โทรศัพท์ 0 2555 2000 ต่อ 2927 อีเมล: nichaphatkitii@gmail.com DOI: 10.14416/j.kmutnb.2022.09.018

รับเมื่อ 20 กรกฎาคม 2565 แก้ไขเมื่อ 17 สิงหาคม 2565 ตอรับเมื่อ 25 สิงหาคม 2565 เผยแพร่ออนไลน์ 29 กันยายน 2565

© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### บทคัดย่อ

ชีวมวลลิกโนเซลลูโลสเป็นแหล่งวัตถุดิบเพื่อการผลิตพลังงานหมุนเวียน และกระบวนการกลั่นทางชีวภาพที่สำคัญ ซึ่งกระบวนการกลั่นทางชีวภาพที่เปลี่ยนวัตถุดิบลิกโนเซลลูโลสเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่มีมูลค่าสูง เช่น เชื้อเพลิงชีวภาพ ชีวเคมี และไบโอพอลิเมอร์ กระบวนการผลิตนั้นประกอบด้วยขั้นตอนหลักคือการปรับสภาพชีวมวล ไฮโดรไลซิส การหมัก และการสกัดแยกส่วนผลิตภัณฑ์ ซึ่งในขั้นตอนการปรับสภาพชีวมวลนั้น มีความสำคัญต่อกระบวนการโดยรวม เนื่องจากชีวมวลลิกโนเซลลูโลสมีลักษณะทางเคมี และกายภาพที่แข็งแรงทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของเอนไซม์ในกระบวนการไฮโดรไลซิสลดลง ในปัจจุบันการปรับสภาพชีวมวลมีหลายวิธี เช่น การปรับสภาพทางเคมี ทางกายภาพ ทางกายภาพ-เคมี และการปรับสภาพด้วยวิธีผสม ซึ่งการเลือกใช้วิธีการปรับสภาพก็จะขึ้นอยู่กับชนิดลิกโนเซลลูโลสว่าเหมาะสมกับวิธีใด และเนื่องจากปริมาณของลิกโนเซลลูโลสที่เป็นของเสียเหลือทิ้งมีปริมาณมากจึงเกิดแนวคิดที่จะลดของเสียเหล่านี้ โดยนำมาเพิ่มมูลค่าเป็นผลผลิตในอุตสาหกรรมปลายน้ำที่หลากหลาย นำมาสู่รูปแบบที่เรียกว่าเศรษฐกิจชีวภาพ เศรษฐกิจหมุนเวียน และเศรษฐกิจสีเขียว (BCG Economy) สอดคล้องกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (SDG) ของสหประชาชาติ (UN) จึงมีการเลือกใช้สารเคมีที่นำมาปรับสภาพเป็นสารเคมีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Green Solvent) เช่น สารไอออนิกลิควิด (Ionic Liquid) และสารละลายดีพิวเทคติก (DES) โดยในบทความนี้มุ่งเน้นให้เห็นถึงตัวเลือกของวิธีการปรับสภาพชีวมวลด้วยวิธีทางเคมีที่มีในปัจจุบัน และได้รับการพัฒนาวิจัยมาอย่างต่อเนื่อง รวมไปถึงการวิเคราะห์ข้อดีข้อเสีย และแนะนำจุดที่ควรพัฒนาของกระบวนการ เพื่อพัฒนาเป็นองค์ความรู้ในการวิจัยต่อยอดและเป็นข้อมูลในการประยุกต์ใช้การปรับสภาพในกระบวนการกลั่นทางชีวภาพต่อไปในอนาคต

**คำสำคัญ:** ลิกโนเซลลูโลส การปรับสภาพทางเคมี เศรษฐกิจชีวภาพ เศรษฐกิจหมุนเวียน และเศรษฐกิจสีเขียว กระบวนการกลั่นทางชีวภาพ ผลิตภัณฑ์เพิ่มมูลค่า ชีวมวล

การอ้างอิงบทความ: ธีราวุติ ภูสันติสัมพันธ์ และ ณิชภาพัทธ กิติบวรกุล, “ความก้าวหน้าของกระบวนการปรับสภาพชีวมวลลิกโนเซลลูโลสด้วยกระบวนการทางเคมีเพื่อกระบวนการกลั่นทางชีวภาพ,” *วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, ปีที่ 32, ฉบับที่ 4, หน้า 1087–1101, ต.ค.-ธ.ค. 2565.



## Progress in Chemical Pretreatment of Lignocellulose Biomass for Applications in Biorefinery

Theerawut Phusantisampan

Biorefinery and Process Automation Engineering Center, 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.2022.09.018

Received 20 July 2022; Revised 17 August 2022; Accepted 25 August 2022; Published online: 29 September 2022

© 2022 King Mongkut's University of Technology North Bangkok. All Rights Reserved.

### Abstract

Lignocellulose biomass is raw material for production of renewable energy and biorefining process. Biorefining process converts lignocellulose biomass to various value-added products, such as biofuels, biochemical, and biopolymers. This process is composed of multi-step reactions including pretreatment, hydrolysis, fermentation and product recovery. Among these 4 steps, pretreatment is important to the feasibility of the overall process, because lignocellulose has strong chemical and physical characteristics, which cellulase inefficiently accesses and hydrolyzes biomass. Currently, there are many pretreatment methods, such as chemical pretreatment, physical pretreatment, physical-chemical pretreatment, and combined pretreatment method. The selection of the appropriate method depends on the type of lignocellulose. Due to the abundant amount of lignocellulose in nature, it is necessary to develop the biorefining process to convert the waste to value-added products. This concept agrees well with the Bio economy, Circular economy, and Green economy (BCG Economy) to achieve the sustainable development goals (SDG) of United Nations (UN). Therefore, green chemicals for pretreatment are selected with environmentally friendly property, such as ionic liquid and Deep Eutectic Solutions (DES). This review describes the options of chemical pretreatment methods that are developed by researchers. The pros and cons of each pretreatment method are discussed and the room for improvement is suggested. The knowledge obtained from this review will benefit to provide information for further development and research in biorefining process in the future.

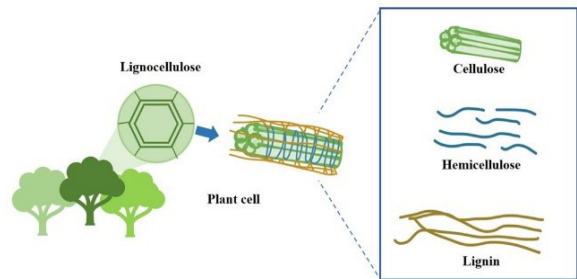
**Keywords:** Lignocellulose, Chemical Pretreatment, BCG economy, Biorefinery, Value-added Products, Biomass,

Please cite this article as: 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, Oct.–Dec. 2022 (in Thai).

## 1. บทนำ

เป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable Development Goals; SDGs) ได้รับการสนับสนุนและรับรองจากประเทศที่เป็นสมาชิกขององค์การสหประชาชาติภายใต้วาระการพัฒนา 2030 [1] นำมาสู่การสร้างแผนพัฒนาที่ยั่งยืนซึ่งประกอบไปด้วยการพัฒนาทั้ง 17 เป้าหมาย [2] โดย SDGs ข้อที่ 7 ที่กล่าวว่า ทุกคนสามารถเข้าถึงพลังงานสมัยใหม่ที่มีความยั่งยืนได้ โดยปัจจุบันความต้องการในการใช้พลังงานชีวภาพทั่วทั้งโลกเพิ่มขึ้น เช่น เอทานอล มิเทน ไฮโดรเจน หรือไบโอดีเซล [3]–[5] ซึ่งได้มาจากการนำวัสดุชีวมวลที่มีอยู่ในธรรมชาติหรือจากแหล่งต่างๆ เช่น วัสดุเหลือทิ้งการเกษตร หรือวัสดุเหลือใช้จากการบริโภค อุโภคมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตพลังงานชีวภาพ ซึ่งชีวมวลลิกโนเซลลูโลสเป็นหนึ่งในทรัพยากรที่มีอยู่มากที่สุด อีกทั้งยังเป็นแหล่งวัตถุดิบหมุนเวียน [6] เนื่องจากการทำการเกษตรเป็นกิจกรรมที่ก่อให้เกิดขยะเหลือทิ้งเป็นจำนวนมากส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ทำให้เกิดปรากฏการณ์ภาวะโลกร้อน [7], [8] นำไปสู่แนวความคิดและแนวปฏิบัติในการนำชีวมวลมาใช้ประโยชน์และสร้างผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่ม ตรงกับแนวคิดที่เรียกว่า เศรษฐกิจชีวภาพ (Bio Economy) เศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) และเศรษฐกิจสีเขียว (Green Economy) (BCG Economy Model) โดยเศรษฐกิจชีวภาพ [9] คือระบบที่มุ่งเน้นการใช้ทรัพยากรชีวภาพอย่างคุ้มค่าที่สามารถเชื่อมโยงกับเศรษฐกิจหมุนเวียนที่เป็นการนำวัสดุต่างๆ กลับมาใช้ประโยชน์ให้มากที่สุด และยังรวมถึงเศรษฐกิจสีเขียว ซึ่งมุ่งแก้ไขปัญหามลพิษเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน BCG Economy นำไปสู่การผลิตเป็นสินค้าในรูปแบบต่างๆ เช่น พลังงานชีวภาพ สารชีวเคมี (Biochemical) และพอลิเมอร์ชีวภาพ (Biopolymer) เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมที่หลากหลาย เช่น อุตสาหกรรมพลังงาน อาหาร พลาสติก การแพทย์ และเกษตรกรรม [10]–[12]

การกลั่นทางชีวภาพ (Biorefinery) คือกระบวนการการเปลี่ยนแปลงชีวมวลให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่า ซึ่งมวลลิกโนเซลลูโลสนั้นเป็นวัตถุดิบชีวมวลที่สำคัญและมีศักยภาพสูงและนำมาผลิตเป็นพลังงานในรูปแบบต่างๆ [13], [14]

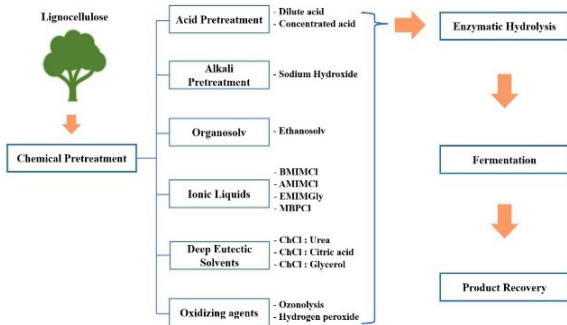


รูปที่ 1 องค์ประกอบของชีวมวลลิกโนเซลลูโลสในพืชที่ประกอบไปด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน

เนื่องจากลิกโนเซลลูโลสนั้น สามารถพบได้ในเซลล์พืชทุกเซลล์ โดยมีปริมาณตามธรรมชาติประมาณ 181.5 พันล้านตันต่อปีทั่วโลก [10], [15] โดยการเก็บเกี่ยวเออลิกโนเซลลูโลสมานั้น อาจได้มาจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร พืชพลังงาน วัสดุเหลือทิ้งจากบ้านเรือนและอุตสาหกรรม ดังนั้น การใช้ลิกโนเซลลูโลสในกระบวนการกลั่นทางชีวภาพนี้ นอกจากจะเพื่อผลิตผลผลิตที่มีมูลค่าสูงแล้ว ยังช่วยลดการปลดปล่อยของเสียออกสู่สิ่งแวดล้อมตามหลักของเศรษฐกิจหมุนเวียนอีกด้วย [16]

เนื่องจากลิกโนเซลลูโลสประกอบด้วยส่วนประกอบหลัก ได้แก่ เซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) (รูปที่ 1) โดยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharides) [17] ของน้ำตาลที่หลากหลาย เช่น กลูโคส (Glucose) ไซโลส (Xylose) แมนโนส (Mannose) และกาแล็กโทส (Galactose) ส่วนลิกนินนั้นเป็นพอลิเมอร์ของสารประกอบจำพวกอะโรมาติก (Aromatic Compounds) ซึ่งการย่อยสลายลิกโนเซลลูโลสนั้น จะช่วยให้ได้เป็นผลิตภัณฑ์น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวจำนวนมากที่ใช้เป็นวัตถุดิบในการหมักเพื่อผลิตเป็นผลผลิตสุดท้าย เช่น เอทานอลได้ในที่สุด

ซึ่งกระบวนการการกลั่นทางชีวภาพเป็นกระบวนการที่มีหลายขั้นตอน ประกอบด้วย การปรับสภาพมวล (Pretreatment) ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) การหมัก (Fermentation) และการสกัดแยกส่วนผลิตภัณฑ์ (Product Recovery) [2] ซึ่งในขั้นตอนการปรับสภาพชีวมวลนั้นมีความสำคัญต่อ



**รูปที่ 2** วิธีการปรับสภาพชีวมวลลิกโนเซลลูโลสทางเคมี และความต่อเนื่องกับขั้นตอนไฮโดรไลซิส การหมัก และการเก็บเกี่ยวผลผลิตในกระบวนการกลั่นทางชีวภาพ

กระบวนการโดยรวม เนื่องจากชีวมวลลิกโนเซลลูโลสมีลักษณะทางเคมีและกายภาพที่แข็งแกร่ง ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของเอนไซม์ (Enzyme Activity) ในกระบวนการไฮโดรไลซิสลดลง อย่างไรก็ตาม ขั้นตอนการปรับสภาพมีการใช้ต้นทุนในการดำเนินงานสูงถึง 40–70% ของค่าใช้จ่ายทั้งหมด ดังนั้น หากมีกระบวนการปรับสภาพที่มีประสิทธิภาพจะช่วยให้ค่าใช้จ่ายของกระบวนการทั้งหมดลดลง และมีความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์ในการผลิตระดับอุตสาหกรรมมากขึ้น

โดยเป้าหมายของบทความนี้มุ่งที่จะแสดงให้เห็นถึงการใช้สารเคมีในการปรับสภาพชีวมวลที่แตกต่างกัน โดยการอภิปรายวิธีการปรับสภาพชีวมวลต่างๆ ด้วยวิธีทางเคมี (รูปที่ 2) และทำการเปรียบเทียบกลไกการทำงาน ข้อจำกัดของกระบวนการ ความท้าทายทางเทคโนโลยีที่ต้องการพัฒนาเพื่อให้ได้มาซึ่งกระบวนการที่มีประสิทธิภาพและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมต่อไป

## 2. การปรับสภาพทางเคมี

การปรับสภาพชีวมวลลิกโนเซลลูโลส มีวิธีในการปรับสภาพที่หลากหลาย [18] โดยการปรับสภาพทางเคมีเป็นวิธีที่ถูกใช้อย่างยาวนานทั้งในระดับห้องปฏิบัติการและระดับอุตสาหกรรมเนื่องจากข้อดีที่มี ได้แก่ มีประสิทธิภาพสูงในการทำงาน การจัดหาสารเคมีนั้นทำได้ง่าย กระบวนการใน

การทำงานค่อนข้างรวดเร็ว และกระบวนการในการควบคุมไม่ยุ่งยาก โดยการปรับสภาพชีวมวลช่วยให้ลิกโนเซลลูโลสมีการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพเพื่อให้เกิดความเหมาะสมต่อการทำงานของเอนไซม์เซลลูเลสที่เข้าไปทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสเปลี่ยนเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเป็นหน่วยย่อยได้ดีขึ้น ได้แก่ น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว และโอลิโกเมอร์ [19] และเมื่อนำไปเข้าสู่กระบวนการหมักก็จะช่วยให้ได้รับผลผลิตจากการหมัก เช่น เอทานอล ในปริมาณที่สูงขึ้นเหมาะต่อการขยายการผลิตไปสู่อุตสาหกรรมขนาดใหญ่

การเลือกใช้วิธีการปรับสภาพจะขึ้นอยู่กับชนิดของลิกโนเซลลูโลสแต่ละประเภทเพื่อให้ได้ผลดีในการปรับสภาพ จึงต้องมีการคำนึงถึงปัจจัยต่างๆ ได้แก่ 1) สามารถจัดลิกนินออกจากลิกเซลลูโลสได้ดีเนื่องจากลิกนินเป็นสารเคมีที่ยับยั้ง (Inhibitor) การทำงานของเอนไซม์เซลลูเลส และจุลินทรีย์ที่ใช้ในกระบวนการหมัก 2) ใช้พลังงานในการปรับสภาพที่ค่อนข้างต่ำ 3) เป็นกระบวนการที่ประหยัดค่าใช้จ่าย 4) ลดโครงสร้างผลึกของเซลลูโลสที่เป็นตัวขัดขวางการทำงานของเอนไซม์เซลลูเลส 5) ช่วยลดขนาดอนุภาคและเพิ่มพื้นที่ผิวของลิกโนเซลลูโลสให้ทำปฏิกิริยากับเอนไซม์ได้ดีขึ้น 6) ลดการผลิตสารยับยั้งการทำงานของเอนไซม์และจุลินทรีย์ และ 7) ใช้สารเคมีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

## 3. การปรับสภาพด้วยกรดและแอลคาไลน์

การปรับสภาพลิกโนเซลลูโลสด้วยกรดและแอลคาไลน์ เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากเนื่องด้วยเหตุผลหลายประการ เช่น สารเคมีที่ใช้สามารถหาได้ค่อนข้างง่ายและราคาไม่สูง รวมถึงสารเคมีที่นำมาใช้บางตัวมีความเป็นพิษต่ำไม่กระทบต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งในการใช้สารเคมีเพื่อการทดลองหรือปรับสภาพควรคำนึงถึงการไม่ก่อให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมเพิ่มขึ้น [20]

การปรับสภาพด้วยกรดเป็นการปรับสภาพที่มีประสิทธิภาพสูง เนื่องจากกรดมีความสามารถในการละลายเฮมิเซลลูโลสและกำจัดลิกนิน แต่เนื่องจากกรดมีความรุนแรงและความสามารถในการกัดกร่อนสูงมากกว่าสารเคมีประเภทอื่น อีกทั้งยังอาจก่อให้เกิดปฏิกิริยาของการสร้างสารยับยั้ง

เช่น ไฮดรอกซีเมทิลเฟอฟูรัล (Hydroxymethylfurfural; HMF) เฟอฟูรัล (Furfural) และกรดแอซีติก (Acetic Acid) [21] โดยสารยับยั้งเหล่านี้จะไปรบกวนขั้นตอนการทำงานของเอนไซม์เซลลูเลสในปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส และในกระบวนการหมักโดยจุลินทรีย์ซึ่งอาจทำให้ได้ผลผลิตลดลง การเลือกใช้กรดในการปรับสภาพมีหลายรูปแบบ เช่น การปรับสภาพด้วยกรดเข้มข้นและกรดเจือจาง ปัจจุบันกรดที่นิยมใช้ในการปรับสภาพมักเป็นกรดแก่ ได้แก่ กรดซัลฟิวริก (Sulfuric Acid) กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric Acid) เนื่องจากมีราคาถูก อีกทั้งยังมีประสิทธิภาพในการไฮโดรไลซ์ ลิกโนเซลลูโลสได้อีกด้วย

จากงานวิจัยของ Silva และคณะ [22] ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบการปรับสภาพ ข้าวสาลี ชานอ้อย และแกลบ ด้วยกรดซัลฟิวริกเจือจางที่ความเข้มข้น 0.5%–1.5% (v/v) โดยผลการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่าการปรับสภาพเพิ่มการผลิตน้ำตาลจากชีวมวลได้อย่างมีนัยสำคัญ หลังจากกระบวนการเอนไซม์แซกคาไรฟิเคชัน โดยได้ผลการผลิตน้ำตาลเพิ่มขึ้นในข้าวสาลี 153.67% ชานอ้อย 91.88% และแกลบ 253.21% ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการปรับสภาพชีวมวลก่อนกระบวนการไฮโดรไลซิสนั้นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตน้ำตาลที่ได้จากกระบวนการไฮโดรไลซิสได้ดี

การใช้แอลคาไลน์ในการปรับสภาพชีวมวลถือเป็นวิธีการปรับสภาพที่ถือว่ามีความเป็นพิษต่อผู้ใช้งานน้อย และมีต้นทุนการปรับสภาพที่ค่อนข้างต่ำ [23] ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเข้าถึงของเอนไซม์ที่ผิวของเฮมิเซลลูโลสได้ดีมากยิ่งขึ้น และช่วยกำจัดลิกนินได้ดี เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) แคลเซียมไฮดรอกไซด์ ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) ยูเรีย ( $\text{CH}_4\text{N}_2\text{O}$ ) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) โดยกลไกการทำงานของ การปรับสภาพด้วยแอลคาไลน์นี้จะช่วยเข้าไปสลายพันธะเอสเทอร์ (Ester Bond) ระหว่างเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน ทำให้ลิกนินแยกตัวออกจากคาร์โบไฮเดรต [24] นอกจากนี้การปรับสภาพด้วยแอลคาไลน์ช่วยปรับเปลี่ยนการจัดเรียงโครงสร้างโมเลกุลของเซลลูโลสในส่วนที่เป็นผลึก (Crystalline Cellulose) ให้เปลี่ยนเป็นเซลลูโลสอสัณฐาน (Amorphous Cellulose) ได้อีกด้วย [25]–[27] แต่ข้อเสียของการใช้แอลคาไลน์

คือกระบวนการนั้นมักจะทำให้สภาวะที่มีการใช้อุณหภูมิที่ต่ำ (เช่นที่ 80–100 องศาเซลเซียส) จึงจำเป็นต้องใช้เวลาในการทำปฏิกิริยานาน (เช่น 24 ชั่วโมง) กว่าที่ใช้กรด [28]

จากงานวิจัยของ Zahoor และคณะ [29] ได้มีการใช้ ยูเรียและ KOH ในการปรับสภาพลิกโนเซลลูโลส โดยการปรับสภาพด้วยแอลคาไลน์มักจะมีการใช้น้ำในการล้างตัวอย่าง หลังจากการปรับสภาพเกิดเป็นน้ำเสียที่ผลิตจากกระบวนการเป็นปริมาณมาก จึงได้นำเอาน้ำเสียที่มีสารยูเรียและ KOH ตกค้างอยู่ไปเป็นปุ๋ยให้กับพืช เนื่องจากมีโพแทสเซียม และ ไนโตรเจน โดยการทดลองได้ใช้การออกแบบตามหลักสถิติคือการทำวิธีพื้นผิวตอบสนอง (Response Surface Methodology) เช่นเดียวกับงานวิจัยอื่นๆ ที่มีมาก่อนหน้าในการหาสภาวะที่เหมาะสมในการปรับสภาพชีวมวล [30]–[33] โดยพบว่า การผสมสารเคมีในอัตราส่วน 1 : 1 (2% w/v) Urea : KOH (UK) และสภาวะการปรับสภาพชีวมวลที่ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทำให้ประสิทธิภาพในการย่อยของเอนไซม์เซลลูเลสอยู่ที่ 75.49% ซึ่งสูงขึ้น 12.55% เมื่อเทียบกับการใช้ KOH เพียงอย่างเดียว และยังช่วยเพิ่มผลผลิตกลูโคสสูงถึง 83.1% และเมื่อทำการเติมสารลดแรงตึงผิว [34] ได้แก่ 1% Tween-80 ก็ยังทำให้ประสิทธิภาพการไฮโดรไลซิสเกิดได้ดียิ่งขึ้น ในส่วนของน้ำที่ใช้ในการล้างตัวอย่างที่นำไปเติมเป็นปุ๋ยแก่พืชก็พบว่า มีประสิทธิภาพในการช่วยเพิ่มความสูงของพืชและผลผลิตของชีวมวลพืชได้ ซึ่งสอดคล้องกับหลักการของเศรษฐกิจหมุนเวียน เพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ของน้ำที่ล้างตัวอย่าง และเป็นการเพิ่มมูลค่าในรูปแบบของปุ๋ยเคมี

#### 4. การปรับสภาพด้วยสารออร์แกนโซล (Organosolv)

การปรับสภาพด้วยสารออร์แกนโซล ช่วยในการแยกส่วนลิกโนเซลลูโลส (Fractionation) [35] การใช้เททานอล เป็นวิธีการปรับสภาพที่ดี เนื่องจากต้นทุนต่ำ ความเป็นพิษต่ำ สามารถสกัดแยกเซลลูโลสได้ดี มีการผลิตลิกนินที่มีความบริสุทธิ์สูงสามารถนำไปเปลี่ยนรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่มได้อีกหลากหลายรูปแบบ เช่น วานิลลิน (Vanillin) และสามารถนำตัวทำละลายกลับมาใช้ใหม่ (Recycle) ได้ เช่น กระบวนการการกลั่น การระเหยด้วยเครื่องกลั่นระเหยแห้ง



แบบหมุน (Rotary Evaporator) การแยกตะกอน และการเติมสารต้านตัวทำละลาย (Anti-solvent) [36], [37] การปรับสภาพด้วยวิธีออร์แกโนโซลเป็นวิธีที่ใช้กำจัดลิกนินด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ โดยมี เมทานอล เอทานอล แอซีโตน ฯลฯ [38] จากการศึกษาของ Vinayak Laxman และคณะ [39] ได้มีการปรับสภาพของไม้ทั้งไม้เนื้ออ่อน และไม้เนื้อแข็ง โดยใช้สภาวะการปรับสภาพที่แตกต่างกัน ได้แก่ อุณหภูมิ ต่ำกว่า 120–200 องศาเซลเซียส โดยทำการทดลองแบบสองขั้นตอน (Two Step Pretreatment) คือ การระเบิดด้วยไอน้ำ และการทำไฮโดรไลซิส และการปรับสภาพด้วยออร์แกโนโซล และการไฮโดรไลซิส โดยมีอัตราการ Recovery ของเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน และสูงกว่า 95% [39]

จากศึกษานี้ได้มีการใช้สารผสมออร์แกโนโซลที่เรียกว่า Cosolvent Enhanced Lignocellulosic Fractionation; CELF โดยการนำ THF ผสมกับ 0.5 wt% สารละลายกรดซัลฟิวริกในอัตราส่วน 2 : 1 (Tetrahydrofuran : THF : Acidic Water, v/v) จากผลการทดลองทำให้ได้ลิกนินจากการปรับสภาพลิกนินเซลลูโลสด้วยสาร CELF ที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่ต่ำ มีปริมาณของกรดคาร์บอกซิลิกสูง และทำลายพันธะ  $\beta$ -O-4 และ  $\beta$ -5 ที่เชื่อมลิกนินเซลลูโลสออกไปได้ดี เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีที่ใช้สารออร์แกโนโซลที่เป็นเอทานอล (Ethanol Organosolv Lignin; EOL) และวิธีคราฟท์ลิกนิน (Kraft Lignin; KL) และเมื่อนำเอาไฮโดรไลเซตที่ได้จากกระบวนการย่อยด้วยเอนไซม์ไปทำการเพาะเลี้ยงยีสต์ *Rhodococcus opacus* PD630 พบว่า จำนวนเซลล์ที่ได้จากการหมักไฮโดรไลเซตของกระบวนการ CELF มีค่าสูงสุดที่  $3.9 \times 10^7$  CFU/มิลลิลิตร ซึ่งสูงกว่าไฮโดรไลเซตที่ได้จากการใช้ EOL และ KL 62.5% และ 77.3% ตามลำดับ ในทำนองเดียวกันผลผลิตของไขมันที่ได้จาก CELF สูงถึง 143 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งสูงกว่า EOL และ KL ถึง 36.2% และ 26.5% ตามลำดับ [40]

ไฮโดรเจนเป็นพลังงานชีวภาพที่อีกรูปแบบหนึ่งซึ่งสามารถผลิตได้ด้วยกระบวนการหมักแบบไร้ออกซิเจนโดยใช้วัสดุเป็นชีวมวลลิกนินเซลลูโลส [41] ในงานวิจัยของ Sarkar และคณะ [42] ได้นำขี้เลื่อย (Birch Sawdust) มาผ่านการ

ปรับสภาพด้วย 60% เอทานอล และ 1% กรดซัลฟิวริก (w/w biomass) ที่สภาวะ 200 องศาเซลเซียส 15 นาที เพื่อการผลิตไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) ควบคู่ไปกับการผลิตสารเคมีแพลตฟอร์ม (Platform Chemicals) เช่น กรดอินทรีย์ (Organic Acids) ที่รวมไปถึงกรดอินทรีย์ขนาดสายสั้น (ได้แก่ กรดแอซีติก กรดโพรพิโอนิก กรดบิวทริก กรดวาเลริก) และกรดอินทรีย์ขนาดสายกลาง เช่น กรดคาโปรอิก โดยควบคุมการหมักในสภาวะที่เป็นกรด (Acidogenic Fermentation) ของตัวอย่างขี้เลื่อยที่ทำการปรับสภาพแล้วทำให้เกิดการผลิตกรดคาร์บอกซิลิก และ H<sub>2</sub> (121.4 มิลลิลิตร/gVS) โดยกรดคาร์บอกซิลิกที่ผลิตได้แบ่งเป็นกรดคาร์บอกซิลิกขนาดสายสั้น (17.8 กรัม/ลิตร) และปานกลาง (2.64 กรัม/ลิตร) โดยกระบวนการการกลั่นทางชีวภาพมีการผลิตไบโอมีเทน (246 มิลลิลิตร/gVS) จากขี้เลื่อยที่เหลือจากการหมัก พบว่ามีประสิทธิภาพได้ดีเมื่อทำปฏิกิริยากับชีวมวลลิกนินเซลลูโลสที่ประกอบด้วยสัดส่วนของเซลลูโลสสูง และเมื่อผสมส่วนที่เหมาะสมของ H<sub>2</sub> และ CH<sub>4</sub> เข้าด้วยกันจะทำให้เกิดไบโอไฮเทน (Biohythane) ที่มีค่าศักยภาพพลังงาน 9.40 kJ/gVS [42]

## 5. การปรับสภาพด้วยสารออกซิเดชัน

วิธีการออกซิเดชันเป็นวิธีการปรับสภาพสารเคมีที่มีคุณสมบัติเป็นตัวออกซิไดซ์ (Oxidizing Agent) [43], [44] เช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ หรือการปรับสภาพด้วยโอโซน ซึ่งสารออกซิไดซ์จะทำปฏิกิริยากับวงแหวนอะโรมาติกของลิกนินทำให้เกิดกรดคาร์บอกซิลิก ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวช่วยยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ อย่างไรก็ตาม สามารถกำจัดสารยับยั้งออกได้โดยขั้นตอนการล้าง [45] ซึ่งจากงานวิจัยของ Travaini และคณะ [46] ที่ระบุว่าข้อดีของการใช้โอโซนนั้นไม่ก่อให้เกิดการผลิตสารประกอบยับยั้ง เช่น Furfural และ HMF ในไฮโดรไลเซตที่มีการปรับสภาพด้วยโอโซน

จากงานวิจัย Travaini และคณะ [23] มีการปรับสภาพขานอ้อยด้วยโอโซน (Ozonolysis) โดยทำการศึกษาค้นคว้าพารามิเตอร์สองตัว คือ ความเข้มข้นของโอโซนและความชื้นของชีวมวล พบว่า อัตราการสกัดแยก (Recovery) ของเซลลูโลสและไซแลน (Xylan) อยู่ที่มากกว่า 92% และเพิ่ม

อัตราการไฮโดรไลซิสคาร์โบไฮเดรตได้อย่างมากในระหว่าง การย่อยด้วยเอนไซม์และทำให้ผลผลิตกลูโคสและไซโลสจาก ชานอ้อยเพิ่มขึ้นจาก 6.64% และ 2.05% เป็น 41.79% และ 52.44% โดยที่ไม่มีการตรวจพบ Furfural หรือ HMF [47] โดยทำการทดสอบความเข้มข้นของไอโซนเป็นพารามิเตอร์ ทดสอบที่มีอิทธิพลสูงสุดต่อเวลาของปฏิกิริยาและการ ปลดปล่อยน้ำตาลจากชีวมวลหลังจากการไฮโดรไลซิสด้วย เอนไซม์ โดยได้ผลผลิตกลูโคสและไซโลสเท่ากับ 77.55% และ 56.95% ตามลำดับ และเมื่อนำไฮโดรไลเซทไปทำการ หมักด้วยยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ให้ผลผลิต เอทานอลประมาณ 80% [48]

## 6. ไอออนิกลิควิด (Ionic Liquid)

ไอออนิกลิควิดคือสารประกอบประเภทเกลือที่ประกอบ ไปด้วยแคทไอออน (Cation) และแอนไอออน (Anion) โดยมัก มีคุณสมบัติเป็นของเหลวที่อุณหภูมิห้องหรืออุณหภูมิที่ต่ำกว่า 100 องศาเซลเซียส ซึ่งไอออนิกลิควิดเป็นสารเคมีที่เป็นมิตร ต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องจาก มีจุดเผาไหม้สูง มีจุดระเหยสูง มีความหนืดต่ำ มีฤทธิ์กัดกร่อนต่ำ มีความสามารถในการนำ ไฟฟ้า ไมติดไฟ และยังสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้หลายครั้ง [49] โดยไอออนิกลิควิดสามารถแบ่งออกเป็นอนุพันธ์ประเภท โคลีน (Choline) แอมโมเนียม (Ammonium) และกรด โปรติก (Protic Acid) [50] เช่น 1-เอทิล-3-เมทิลอิมิดาโซเลียม แอซีเตต (1-ethyl-3-methylimidazolium Acetate; EMIM-Ac) โคลีนียมแอซีเตต (Cholinium Acetate; Cho-Ac) ไอออนิกลิควิด ถูกใช้เป็นตัวทำละลายแบบใหม่ ในกระบวนการการปรับปรุงสภาพ โดยสามารถแยกโครงสร้าง ลิกโนเซลลูโลสออกจากกันอย่างมีประสิทธิภาพเพื่อให้เอนไซม์ เซลลูเลสทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้ดีให้ได้ผลผลิตน้ำตาลสูง และแยกสกัดลิกนินออกไปใช้งานผลิตเป็นผลผลิตอื่นๆ ได้ แต่ก็มีข้อจำกัด เช่น ค่าใช้จ่ายของการใช้ไอออนิกลิควิด การ ยับยั้งการผลิตสารยับยั้งปฏิกิริยาที่ตกค้างต่อกิจกรรมของ เซลลูเลส และความเป็นพิษต่อกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่ใช้ใน ขั้นตอนหมัก [51], [52] เพื่อลดต้นทุนจึงมีการใช้กระบวนการ รีไซเคิลและการนำกลับมาใช้ซ้ำ โดยงานวิจัยแสดงให้เห็นว่า

ไอออนิกลิควิดนี้สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้ถึง 5 ครั้ง โดย ยังสามารถคงประสิทธิภาพได้สูงมากกว่า 80% [53], [54]

ตัวอย่างงานวิจัยที่ทำการปรับปรุงสภาพต้นอินทผลัมด้วย ไอออนิกลิควิดเพื่อการเพิ่มประสิทธิภาพผลผลิตมีเทน ( $CH_4$ ) โดยการเปรียบเทียบกระบวนการการปรับปรุงสภาพ โดยใช้ แอลคาไลน์และไอออนิกลิควิด พบว่า อินทผลัมที่ผ่านการปรับ สภาพด้วยไอออนิกลิควิดให้ค่าศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน ทางชีวเคมี (Biochemical Methane Potential; BMP) สูง ถึง 321.67 มิลลิลิตร- $CH_4/g-TS$  และมีประสิทธิภาพในการ เปลี่ยนแปลงสารตั้งต้นสูงถึง 68.01% และเมื่อเทียบกับการ ปรับปรุงสภาพด้วยแอลคาไลน์ พบว่า มีค่า BMP เท่ากับ 309.76 มิลลิลิตร- $CH_4/g-TS$  และมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแปลง สารตั้งต้น 62.09% [55] ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการปรับปรุงสภาพ ด้วยไอออนิกลิควิดมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าการใช้แอลคาไลน์

นอกจากนี้ไอออนิกลิควิดยังสามารถนำไปประยุกต์ เพื่อการปรับปรุงสภาพชีวมวลที่หลากหลายชนิดได้อีกด้วย โดย ได้ทดสอบกับชีวมวล 4 ชนิด ได้แก่ ผักตบชวา ฟางข้าว ใบ มะม่วง และต้นสน ซึ่งถูกนำมาปรับปรุงสภาพด้วยของเหลว ไอออนิกลิควิด โดยกำหนดสภาวะอุณหภูมิและเวลา พบว่า ที่สภาวะอุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส 2 ชั่วโมง และ 140 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง เป็นสภาวะการทำงาน ที่เหมาะสมในการปรับปรุงสภาพเพื่อส่งเสริมการผลิตก๊าซมีเทน โดยพบว่า ก๊าซมีเทนที่ผลิตได้ของฟางข้าวและใบมะม่วงสูงถึง 233 และ 125 มิลลิลิตรต่อกรัม คาร์โบไฮเดรต [56]

## 7. สารละลายดีพยูเทคติก

สารละลายดีพยูเทคติก (Deep Eutectic Solvent; DES) เป็นสารประกอบของสารเคมีอย่างน้อยสองชนิดขึ้นไป โดยสารผสมนี้จะมีจุดหลอมเหลว (Melting Point) ที่ต่ำลง ไปกว่าจุดหลอมเหลวดั้งเดิมของสารตั้งต้นทั้งสองชนิดนั้น เช่น สารประกอบ Choline Chloride/Urea ที่พบว่า Choline Chloride สาร Urea และ Choline Chloride/Urea มี จุดหลอมเหลวที่ 302, 133, 12 องศาเซลเซียส ตามลำดับ

โดยสาร DES ถูกนำมาเปรียบเทียบกับไอออนิกลิควิด ในการปรับปรุงสภาพชีวมวล และถูกนำมาทดแทนไอออนิกลิควิด



เนื่องจากข้อดีของสาร DES คือมีราคาต่ำกว่าไอออนิกลิควิด มีความเป็นพิษน้อย และสามารถย่อยสลายได้ [57] ตัวอย่างของสาร DES คือการผสมโคลีนคลอไรด์ (Choline Chloride; ChCl) กับกรดอินทรีย์ (เช่น กรดแลคติก กรดออกซาลิก กรดมาเลอิก และกรดพี-โทลูอินซัลโฟนิก) เพื่อใช้สำหรับการสกัดลิแกนด์จากลิแกนด์ไอออนิกให้ได้อิออนิกที่มีความบริสุทธิ์สูง

จากการศึกษาของ Li และคณะ [58] ได้นำฟางข้าว ซึ่งประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตและลิแกนด์ในอัตราส่วนที่สูงมาทำการปรับสภาพด้วยสารผสม สารละลายกรดแลคติก : โคลีนคลอไรด์ (ChCl/Lactic Acid) ที่ผสมในอัตราส่วน 1 : 10 พบว่า สามารถแยกส่วนของลิแกนด์ออกจากชีวมวลได้ประมาณ 30–35% และสกัดไซแลนในส่วนของไฮโดรไลเซตได้มากกว่า 70% หลังจากการปรับสภาพด้วยสารผสม ChCl/Lactic acid และน้ำที่อัตราส่วน 3 : 1 และ 5 : 1 โดยในส่วนไฮโดรไลเซตที่ได้หลังการปรับสภาพประกอบด้วยไซโลส เพอร์ฟูรัล และฮิวมิน นอกจากนี้ DES ที่นำมาใช้ในการปรับสภาพ

ยังให้ผลผลิตที่สูงถึง 90% และสูงถึง 69% สำหรับสาร DES ที่อัตราส่วน 3 : 1 และสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ 5 รอบ โดยพบว่า การนำกลับมาใช้ซ้ำนี้ให้ผลผลิตกลูโคสสูงถึง 60–70% จากการศึกษาค้นคว้าของ Chen และคณะ [59] ชี้ให้เห็นถึงศักยภาพของการปรับสภาพลิแกนด์ไอออนิกด้วย DES ที่ประกอบด้วย ChCl/Lactic acid ทำการปรับสภาพชีวมวลหญ้าเป็นเวลา 45 วินาที โดยใช้ไมโครเวฟที่กำลังไฟฟ้า 800 วัตต์ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการปรับสภาพดังกล่าวมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดลิแกนด์และไซแลน ในขณะที่ยังคงรักษาเซลลูโลสส่วนใหญ่ไว้ในของแข็งที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว โดยกระบวนการปรับสภาพนี้มีความรวดเร็วในการทำปฏิกิริยาและทำให้เกิดการย่อยของเซลลูโลสได้ดีเพิ่มขึ้น 2–5 เท่า และสามารถ Recovery ลิแกนด์ที่มีความบริสุทธิ์ค่อนข้างสูงได้ง่ายอีกด้วย โดยตารางที่ 1 ประกอบไปด้วยการเปรียบเทียบงานวิจัยที่ได้ทำการศึกษาค้นคว้าปรับสภาพชีวมวลลิแกนด์ไอออนิกด้วยวิธีทางเคมีในตัวอย่างชีวมวลที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 1 ตารางเปรียบเทียบการปรับสภาพชีวมวลลิแกนด์ไอออนิกด้วยวิธีทางเคมีในรูปแบบต่างๆ

ชนิดของชีวมวล	ชนิดของสารเคมี	สภาวะการทำงาน	องค์ประกอบของชีวมวล (%)			เอกสารอ้างอิง
			เซลลูโลส	เฮมิเซลลูโลส	ลิแกนด์	
สวิตซ์กราส	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	0.50% (v/v) 125 องศาเซลเซียส 30 นาที	52.30	6.67	24.84	[60]
ลำต้นกล้วย	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	25% m/m 121 องศาเซลเซียส 30 นาที	66.28	3.97	31.15	[61]
สวิตซ์กราส	NaOH	1.00% (w/v) 75 องศาเซลเซียส 60 นาที	53.85	18.96	10.03	[60]
ข้าวป่า	NaOH	0.25–1.5% (w/v) 121 องศาเซลเซียส 60 นาที	39.00	15.00	13.00	[62]
ฟางข้าว	ethanosolv	เอทานอล : น้ำ (1 : 1) 100–140 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง	42.90	23.90	16.70	[63]
ซีเลื้อย	ethanosolv	50% (v/v) EtOH 180–200 องศาเซลเซียส 15–30 นาที	69.20	12.96	13.24	[64]
ลำต้นกล้วย	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	25 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง	74.37	8.68	7.17	[61]
ชานอ้อย	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	7.5% (v/v) 25 องศาเซลเซียส 1 ชั่วโมง	70.70	21.00	4.61	[65]
ไม้สักอินโด	[TMG][HSO <sub>4</sub> ]	1 : 10 (w/w) 100–140 องศาเซลเซียส 0.5–4 ชั่วโมง	37.09	20.07	23.46	[66]
ไม้สักอินโด	[BMIM]MeSO <sub>4</sub> + H <sub>2</sub> O	140 องศาเซลเซียส 4 ชั่วโมง	90.50	3.90	5.30	[67]
ไม้สักอินโด	ChCl/Imidazolium	120 องศาเซลเซียส 24 ชั่วโมง	65.00	15.70	11.9	[67]
ฟางข้าว	ChCl/organic acid	1:1:1 สารละลาย 130 องศาเซลเซียส 120 นาที	50.80	3.10	27.2	[68]

ธีราวุฒิ ภู่งสันติสัมพันธ์ และ นิชาภัทร กิตติบรรกุล, “ความก้าวหน้าของกระบวนการปรับสภาพชีวมวลลิแกนด์ไอออนิกด้วยกระบวนการทางเคมีเพื่อกระบวนการกลั่นทางชีวภาพ.”



## 8. ข้อจำกัดของกระบวนการปรับสภาพลิกโนเซลลูโลสทางเคมี

ในการปรับสภาพลิกโนเซลลูโลสมีข้อจำกัดหลายอย่าง เช่น เมื่อมีการปรับสภาพของลิกโนเซลลูโลสจะมีการใช้น้ำสะอาดมาล้างตัวอย่างที่ผ่านการปรับสภาพซึ่งจำเป็นต้องใช้ปริมาณน้ำจำนวนมากเพื่อกำจัดสารเคมีที่ใช้ในการปรับสภาพออกไป ดังนั้นจึงเกิดเป็นน้ำเสียในปริมาณมาก ซึ่งน้ำเสียที่เกิดขึ้นอาจจะต้องหาวิธีในการบำบัดก่อนการปล่อยทิ้งสู่ธรรมชาติ [69]–[71] ทำให้เกิดเป็นความยุ่งยากของกระบวนการการจัดการน้ำเสีย ซึ่งหากนำน้ำเสียที่เกิดไปใช้เป็นปุ๋ยเคมีก็จะช่วยลดปัญหาน้ำเสียที่เกิดขึ้นได้

ในเรื่องของการนำสารที่ใช้ในการปรับสภาพกลับมาใช้งานใหม่ หากสามารถเลือกใช้สารที่เป็นกลุ่มสารละลายไอออนิกลิควิดหรือ DES ก็ทำให้สามารถนำสารมาใช้ซ้ำได้ และยังมีวิธีที่นำสารกลับมาใช้งานใหม่ได้ง่ายอีกด้วย อย่างไรก็ตาม แม้ว่าสารละลายไอออนิกลิควิดมีข้อดีหลายอย่าง แต่ก็มีข้อจำกัดคือเรื่องของราคาสารเคมีที่ค่อนข้างสูง เช่น สารกลุ่ม EMIM-Ac มีราคาประมาณ 26,500 USD/kg กลุ่ม Cho-Ac มีราคาประมาณ 8,542 USD/kg ซึ่งแนวทางในการแก้ไข จึงเกิดการนำสารไอออนิกลิควิดชนิดอื่นๆ มาใช้ทดแทน เช่น Tributyl Methylammonium Chloride ซึ่งมีราคาประมาณ 973 USD/kg ถือว่าราคาถูกกว่าสารเคมีในประเภทไอออนิกลิควิดมาก หรือการใช้สาร DES เช่น ChCl ที่มีราคาเพียง 193 USD/kg เท่านั้น ดังนั้นสารละลาย DES จึงเป็นทางเลือกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและราคาถูกที่สามารถใช้ทดแทนตัวทำละลายอินทรีย์แบบดั้งเดิมได้ดี

## 9. สรุป

บทความนี้นำเสนอกระบวนการปรับสภาพชีวมวลลิกโนเซลลูโลสด้วยกระบวนการทางเคมี เพื่อส่งเสริมการย่อยสลายและเปลี่ยนรูปชีวมวลเป็นผลผลิตต่างๆ ซึ่งการปรับสภาพด้วยสารเคมีมีหลายวิธี และการเลือกใช้แต่ละวิธีขึ้นอยู่กับประเภทของชนิดลิกโนเซลลูโลสที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ ยังควรประเมินผลการศึกษาด้านกายภาพและความก้าวหน้าใหม่ของวิธีการทางเคมีต่างๆ เนื่องจากการใช้สารเคมี

แต่ละประเภทจะมีข้อดีและข้อจำกัดที่ต่างกัน และการเลือกใช้สารกลุ่มที่เป็น Green Solvent เช่น ไอออนิกลิควิด และ DES ก็จะทำให้ได้กระบวนการที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ต้องคำนึงถึงประเด็นอื่นๆ เช่น การลดการผลิตสารยับยั้งของเอนไซม์หรือจุลินทรีย์ หรือการนำสารเคมีกลับมาใช้ซ้ำ เพื่อให้ได้กระบวนการที่มีความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้จริงในระดับการค้าหรืออุตสาหกรรม

## เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Suttipan. (2022) Networks. Office of the National Economic and Social Development Council [Online] (in Thai). Available: <https://sdgs.nesdc.go.th>
- [2] T. Ruensodsai and M. Sriariyanun, “Sustainable development and progress of lignocellulose conversion to platform chemicals,” *The Journal of KMUTNB*, vol. 32, no. 4, 2022 (in Thai).
- [3] A. Krutthaphan, W. Chaowasin, K. Theinnoi, and C. Wongkhorsub, “Influence of injection timing on performance, combustion and emission characteristics from diesel engine fueled with diesel-plastic pyrolysis oil,” *The Journal of KMUTNB*, vol. 32, no. 2, 2022 (in Thai).
- [4] A. Jantarawattana and P. Kullamethee, “The feasibility study of ethanol fermentation from biomass: Feather pennisetum grass (*Pennisetum pedicellatum* Trin) and residual bamboo shoot,” *The Journal of KMUTNB*, vol. 26, no. 1, 2016 (in Thai).
- [5] T.Khampha, T.Dontree, N.Sooksawat, and S.Singhtho, “The Utilization of agricultural residues for solid fuel alcohol and lapid fuel briquette production,” *The Journal of KMUTNB*, vol. 30, no. 2, 2020 (in Thai).



- [6] A. L. Woiciechowski, C. J. D. Neto, L. P. de S. Vandenberghe, D. P. de C. Neto, A. C. N. Sydney, L. A. J. Letti, S. G. Karp, L. A. Z. Torres, and C. R. Soccol, "Lignocellulosic biomass: Acid and alkaline pretreatments and their effects on biomass recalcitrance - Conventional processing and recent advances," *Bioresource Technology*, vol. 304, pp. 122848, 2020.
- [7] S. Soponronnarit, "Thailand's energy situation and strategic guidance for reducing greenhouse gas emission," *The Journal of KMUTNB*, vol. 29, no. 9, 2019 (in Thai).
- [8] K. Srithiang, "Development of biomass briquettes from mixed pineapple peel and corn cob," *The Journal of KMUTNB*, vol. 33, no. 3, 2021 (in Thai).
- [9] W. Noo-ngam and T. Silpcharu, "Management strategies for achieving sustainable excellence in the industrial business sector," *The Journal of KMUTNB*, vol. 31, no. 1, 2021 (in Thai).
- [10] Y-S. Cheng, P. Mutrakulcharoen, S. Chuetor, K. Cheenkachorn, P. Tantayotai, E. J. Panakkal, and M. Sriariyanun, "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).
- [11] M. P. Gundupalli and M. Sriariyanun, "Recent trends and updates for chemical pretreatment of lignocellulosic biomass," *Applied Science and Engineering Progress*, vol. 16, no. 1, pp. 5842, 2022 (in Thai).
- [12] S. Wisansakkul and O. Oupathumpanont, "Effect of bagasse quantity on quality of thermoplastic starch from compression molding process for woven product," *The Journal of KMUTNB*, vol. 32, no. 2, 2021 (in Thai).
- [13] S. Kaewsen, S. Wisuttipaet, P. Attavinijtrakarn, and T. Roopsing, "The development model of managerial competency in the biomass power plant VSPP industry," *The Journal of KMUTNB*, vol. 32, no. 4, 2022 (in Thai).
- [14] S. Lakonpon, S. Thepchit, P. Attavinijtrakarn, and S. Chokmavirote, "The biomass power plant management model in Thailand," *The Journal of KMUTNB*, vol. 32, no. 1, 2022 (in Thai).
- [15] N. Dahmen, I. Lewandowski, S. Zibek, and A. Weidtmann, "Integrated lignocellulosic value chains in a growing bioeconomy: Status quo and perspectives," *GCB Bioenergy*, vol. 11, no. 1, pp. 107-117, 2019.
- [16] T. Sukontachart, S. Pinthapataya, and W. Simachokedee, "Development of industrial waste management model towards social enterprises for community," *The Journal of KMUTNB*, vol. 31, no. 1, pp. 158-168, 2021 (in Thai).
- [17] A. Thanapimmetha, S. Tiyanusorn, P. Srinophakun, and M. Saisriyoot, "Reducing sugar production from empty fruit bunches with enzyme Cellic Ctec2<sup>®</sup>," *The Journal of KMUTNB*, vol. 28, no. 2, pp. 285-290, 2018 (in Thai).
- [18] S. Polprasert, "Pretreatment of lignocellulosic materials for ethanol production," *Scholarly Article*, vol. 22, no. 5, 2014.
- [19] S. Vieira, M. V. Barros, A. C. N. Sydney, C. M. Piekarski, A. C. de Francisco, L. P. de S. Vandenberghe, and E. B. Sydney, "Sustainability of sugarcane lignocellulosic biomass pretreatment for



- the production of bioethanol,” *Bioresource Technology*, vol. 299, 2020, Art. no. 122635.
- [20] C. Allen, G. Metternicht, and T. Wiedmann, “Initial progress in implementing the sustainable development goals (SDGs): A review of evidence from countries,” *Sustainability Science*, vol. 13, pp. 1453–1467, 2018.
- [21] M. Jędrzejczyk, E. Soszka, M. Czapnik, A. M. Ruppert, and J. Grams, “Chapter 6 - Physical and chemical pretreatment of lignocellulosic biomass,” in *Second and Third Generation of Feedstocks*, A. Basile, F. Dalena, Elsevier, 2019, ch. 6, pp. 143–196.
- [22] T. P. Silva, F. S. de Albuquerque, A. N. Ferreira, D. M. R. C. D. Santos, T. V. D. Santos, S. M. P. Meneghetti, M. Franco, J. M. R. D. Luz, and H. J. V. Pereira, “Dilute acid pretreatment for enhancing the enzymatic saccharification of agroresidues using a *Botrytis ricini* endoglucanase,” *Biotechnology and Applied Biochemistry*, 2022.
- [23] P. Moodley, Y. Sewsynker-Sukai, and E. B. G. Kana, “Progress in the development of alkali and metal salt catalysed lignocellulosic pretreatment regimes: Potential for bioethanol production,” *Bioresource Technology*, vol. 310, 2020, Art. no. 123372.
- [24] X. Chen, R. Zhai, K. Shi, Y. Yuan, B. E. Dale, Z. Gao, and M. Jin, “Mixing alkali pretreated and acid pretreated biomass for cellulosic ethanol production featuring reduced chemical use and decreased inhibitory effect,” *Industrial Crops and Products*, vol. 124, pp. 719–725, 2018.
- [25] Z. Song, G. Yang, Y. Guo, and T. Zhang, “Comparison of two chemical pretreatments of rice straw for biogas production by anaerobic digestion,” *BioResources*, vol. 7, no. 3, pp. 3223–3236, 2012 (in Thai).
- [26] Z. Yuan, Y. Wen, and N. S. Kapu, “Ethanol production from bamboo using mild alkaline pre-extraction followed by alkaline hydrogen peroxide pretreatment,” *Bioresource Technology*, vol. 247, pp. 242–249, 2018.
- [27] F. L. Shimizu, P. Q. Monteiro, P. H. C. Ghiraldi, R. B. Melati, F. C. Pagnocca, W. de Souza, C. Sant’Anna, and M. Brienza, “Acid, alkali and peroxide pretreatments increase the cellulose accessibility and glucose yield of banana pseudostem,” *Industrial Crops & Products*, vol. 115, pp. 62–68, 2018.
- [28] A. W. Bhutto, K. Qureshi, K. Harijan, R. Abro, T. Abbas, A. A. Bazmi, S. Karim, and G. Yu, “Insight into progress in pre-treatment of lignocellulosic biomass,” *Energy*, vol. 122, pp. 724–45, 2017.
- [29] W. Wang, X. Tan, M. Imtiaz, Q. Wang, C. Miao, Z. Yuan, and X. Zhuang, “Rice straw pretreatment with KOH/urea for enhancing sugar yield and ethanol production at low temperature,” *Industrial Crops and Products*, vol. 170, 2021, Art. no. 113776.
- [30] M. Lomjabok, N. Krasaechol, and S. Sai-Ut, “Effect of pepsin and hydrolysis time on antioxidative activity of collagenhydrolysate from chicken feet through response surface methodology,” *The Journal of KMUTNB*, vol. 31, no. 2, pp. 108–117, 2021 (in Thai).
- [31] 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).
- [32] 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, 2020 (in Thai).
- [33] C. Homkhiew, W. Boonchouytan, S. Rawangwong, and T. Ratanawilai, “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).
- [34] K. Kongsom and C. Chaiyaraksa, “Remediation of sand washing water contaminated with petroleum hydrocarbon by persulfate and Sono-persulfate oxidation process,” *The Journal of KMUTNB*, vol. 33, no. 1, 2023 (in Thai).
- [35] D. Sidiras, D. Politi, G. Giakoumakis, and I. Salapa, “Simulation and optimization of organosolv based lignocellulosic biomass refinery: A review,” *Bioresource Technology*, vol. 343, 2022, Art. no. 126158.
- [36] P. P. Thoresen, L. Matsakas, U. Rova, and P. Christakopoulos, “Recent advances in organosolv fractionation: Towards biomass fractionation technology of the future,” *Bioresource Technology*, vol. 306, 2020, Art. no. 123189.
- [37] Z. Zhou, F. Lei, P. Li, and J. Jiang “Lignocellulosic biomass to biofuels and biochemicals: A comprehensive review with a focus on ethanol organosolv pretreatment technology,” *Biotechnology and Bioengineering*, vol. 115, no. 11, pp. 2683–2702, 2018.
- [38] K. R. Cui, L. Ballinas-Casarrubias, E. R. de S. Miguel, J. de Gyves, J. C. Robles-Venzor, and G. Gonzalez-Sanchez, “Cellulose recovery from *Quercus* sp. sawdust using ethanosolv pretreatment,” *Biomass Bioenergy*, vol. 111, pp. 114–124, 2018.
- [39] V.L. Pachapur, S. Kaur Brar, and Y. Le Bihan, “Integrated wood biorefinery: Improvements and tailor-made two-step strategies on hydrolysis techniques,” *Bioresource Technology*, vol. 299, 2020, Art. no. 122632.
- [40] Z. M. Zhao, X. Meng, B. Scheidemantle, Y. Pu, Z. H. Liu, B. Z. Li, C. E. Wyman, C. M. Cai, and A. J. Ragauskas, “Cosolvent enhanced lignocellulosic fractionation tailoring lignin chemistry and enhancing lignin bioconversion,” *Bioresource Technology*, vol. 347, 2022, Art. no. 126367.
- [41] T. Phorndonand, 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, 2021.
- [42] O. Sarkar, U. Rova, P. Christakopoulos, and L. Matsakas, “Organosolv pretreated birch sawdust for the production of green hydrogen and renewable chemicals in an integrated biorefinery approach,” *Bioresource Technology*, vol. 344, 2022, Art. no. 126164.
- [43] S. Anothairungrat and K. Piyamongkala, “Risk assessment of thermal hazard and reactivity of hydrogen peroxide by differential scanning calorimetry,” *The Journal of KMUTNB*, vol. 29, no. 2, pp. 292–301, 2019 (in Thai).
- [44] S. Tangkawanit, “Color fastness and UV

- protection improvement of indigo dyed cotton fabrics coated with nano chitosan and zinc oxide,” *The Journal of KMUTNB*, vol. 30, no. 3, pp. 495–507, 2020 (in Thai).
- [45] M. N. F. Norrahim, R. A. Ilyas, N. M. Nurazzi, M. S. A. Rani, M. S. N. Atikah, and S. S. Shazleen, “Chemical pretreatment of lignocellulosic biomass for the production of bioproducts: An overview,” *Applied Science and Engineering Progress*, vol. 14, no. 4, pp. 588–605, 2021.
- [46] R. Travaini, J. Martín-Juárez, A. Lorenzo-Hernando, and S. Bolado-Rodríguez, “Ozonolysis: An advantageous pretreatment for lignocellulosic biomass revisited,” *Bioresource Technology*, vol. 199, pp. 2–12, 2016.
- [47] R. Travaini, M. D. Otero, M. Coca, R. Da-Silva, and S. Bolado, “Sugarcane bagasse ozonolysis pretreatment: Effect on enzymatic digestibility and inhibitory compound formation,” *Bioresource Technology*, vol. 133, pp. 332–339, 2013.
- [48] R. Travaini, E. Barrado, and S. Bolado-Rodríguez, “Effect of ozonolysis pretreatment parameters on the sugar release, ozone consumption and ethanol production from sugarcane bagasse,” *Bioresource Technology*, vol. 214, pp. 150–158, 2016.
- [49] T. N. Ang, G. C. Ngoh, A. S. M. Chua, and M. G. Lee, “Elucidation of the effect of ionic liquid pretreatment on rice husk via structural analyses,” *Biotechnology for Biofuels*, vol. 5, no. 67, 2012.
- [50] J. Zhang, X. Zhang, M. Yang, S. Singh, and G. Cheng, “Transforming lignocellulosic biomass into biofuels enabled by ionic liquid pretreatment,” *Bioresource Technology*, vol. 322, 2021, Art. no. 124522.
- [51] M. P. Gundupalli, A. S. S. Thomas, Y.-S. Cheng, P. Tantayotai, and M. Sriariyanun, “Differential effects of inorganic salts on cellulase kinetics in enzymatic saccharification of cellulose and lignocellulosic biomass,” *Bioprocess and Biosystems Engineering*, vol. 44, pp. 2331–2344, 2021.
- [52] M. Sriariyanun, N. Kitiborwornkul, P. Tantayotai, K. Rattanaporn, and P.-L. Show, “One-pot ionic Liquid-mediated bioprocess for pretreatment and enzymatic hydrolysis of rice straw with ionic Liquid-tolerance bacterial cellulase,” *Bioengineering*, vol. 9, no. 17, 2022.
- [53] S. Chuetor, E. J. Panakkal, T. Ruensodsai, K. Cheenkachorn, S. Kirdponpattara, Y. -S. Cheng, and M. Sriariyanun, “Improvement of enzymatic saccharification and ethanol production from rice straw using recycled ionic liquid: The effect of anti-solvent mixture,” *Bioengineering*, vol. 9, no. 115, 2022.
- [54] K. Cheenkachorn, T. Douzou, S. Roddecha, P. Tantayotai, and M. Sriariyanun, “Enzymatic saccharification of rice straw under influence of recycled ionic liquid pretreatments,” *Energy Procedia*, vol. 100, pp. 160–165, 2016.
- [55] I. Mehrez, K. Chandrasekhar, W. Kim, S. H. Kim, and G. Kumar, “Comparison of alkali and ionic liquid pretreatment methods on the biochemical methane potential of date palm waste biomass,” *Bioresource Technology*, vol. 360, 2022, Art. no. 127505.
- [56] J. Gao, L. Chen, K. Yuan, H. Huang, and Z. Yan, “Ionic liquid pretreatment to enhance the anaerobic digestion of lignocellulosic biomass,”



- Bioresource Technology*, vol. 150, pp. 352–358, 2013.
- [57] X. Zhang, P. Zhu, Q. Li, and H. Xia, “Recent advances in the catalytic conversion of biomass to furfural in deep eutectic solvents,” *Frontiers in Chemistry*, vol. 10, 2022.
- [58] A. L. Li, X.D. Hou, K. P. Lin, X. Zhang, and M. H. Fu, “Rice straw pretreatment using deep eutectic solvents with different constituents molar ratios: Biomass fractionation, polysaccharides enzymatic digestion and solvent reuse,” *Journal of Bioscience and Bioengineering*, vol. 126, no. 3, pp. 346–354, 2018.
- [59] Z. Chen and C. Wan, “Ultrafast fractionation of lignocellulosic biomass by microwave-assisted deep eutectic solvent pretreatment,” *Bioresource Technology*, vol. 250, pp. 532–537, 2018.
- [60] F. Wang, D. Shi, J. Han, G. Zhang, X. Jiang, M. Yang, Z. Wu, C. Fu, Z. Li, M. Xian, and H. Zhang, “Comparative study on pretreatment processes for different utilization purposes of switchgrass,” *ACS Omega*, vol. 5, no. 35, pp. 21999–2007, 2020.
- [61] F. L. Shimizu, P. Q. Monteiro, P. H. C. Ghiraldi, R. B. Melati, F. C. Pagnocca, W. de-Souza, C. S. Anna, and M. Brienzo, “Acid, alkali and peroxide pretreatments increase the cellulose accessibility and glucose yield of banana pseudostem,” *Industrial Crops and Products*, vol. 115, pp. 62–68, 2018.
- [62] D. Sahoo, S. B. Ummalyma, A. K. Okram, A. Pandey, M. Sankar, and R.K. Sukumaran, “Effect of dilute acid pretreatment of wild rice grass (*Zizania latifolia*) from Loktak Lake for enzymatic hydrolysis,” *Bioresource Technology*, vol. 253, pp. 252–255, 2018.
- [63] N. Aggarwal, P. Pal, N. Sharma, and S. Saravanamurugan, “Consecutive organosolv and alkaline pretreatment: An efficient approach toward the production of cellulose from rice straw,” *ACS Omega*, vol. 6, no. 41, pp. 27247–27258, 2021.
- [64] M. Monção, K. Hružová, U. Rova, L. Matsakas, and P. Christakopoulos, “Organosolv fractionation of birch sawdust: Establishing a lignin-first biorefinery,” *Molecules*, vol. 26, no. 21, pp. 6754, 2021.
- [65] F. L. Vaz, J. da R. Lins, B. R. Alencar, Í. B. de Abreu, E. E. Vidal, E. Ribeiro, E. V. Sampaio, R. S. Menezes, and E.D. Dutra, “Chemical pretreatment of sugarcane bagasse with liquid fraction recycling,” *Renewable Energy*, vol. 174, pp. 666–673, 2021.
- [66] R. Muazzam, A. M. Asim, M. Uroos, N. Muhammad, and J. P. Hallett, “Evaluating the potential of a novel hardwood biomass using a superbase ionic liquid,” *RSC Advances*, vol. 11, no. 31, pp. 19095–19105, 2021.
- [67] R. O. Almeida, A. Moreira, D. Moreira, M. E. Pina, M. G. V. S. Carvalho, M. G. Rasteiro, and J.A.F. Gamelas, “High-performance delignification of invasive tree species wood with ionic liquid and deep eutectic solvent for the production of cellulose-based polyelectrolytes,” *RSC Advances*, vol. 12, no. 7, pp. 3979–3989, 2022.
- [68] M. P. Gundupalli, P. Tantayotai, E. J. Panakkal, S. Chuetor, S. Kirdponpattara, A. S. S. Thomas, B. K. Sharma, and M. Sriariyanun, “Hydrothermal pretreatment optimization and deep eutectic solvent pretreatment of lignocellulosic biomass: An integrated approach,” *Bioresource*



- Technology Reports*, vol. 17, 2022.
- [69] S. Ungwiwatkul and S. Bootdee, "Assessment of water quality in Khlong Yai River in Rayong Province by Chemical Index (CI)," *The Journal of KMUTNB*, vol. 32, no. 2, pp. 398-414, 2022 (in Thai).
- [70] S. Waiyasuri, "Phosphate removal in wastewater by adsorption on calcium carbonate and calcium oxide from eggshell," *The Journal of KMUTNB*, vol. 26, no. 3, pp. 475-486, 2016 (in Thai).
- [71] C. Nualsri, S. Dangwongjaroenporn, C. Sreela-or, T. Kassanuk, and K. Phasinam, "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).