

การปรับสภาพวัตถุดิบพอลิโนเซลลูโลสสำหรับการผลิตเอทานอล

Pretreatment of Lignocellulosic Materials for Ethanol Production

สุภาวดี ผลประเสริฐ*

ภาควิชาวิทยาศาสตร์อนามัยสิ่งแวดล้อม คณะสาธารณสุขศาสตร์
มหาวิทยาลัยมหิดล ถนนราชวิถี เขตราชเทวี กรุงเทพมหานคร 10400

Supawadee Polprasert*

Department of Environmental Health Sciences, Faculty of Public Health,
Mahidol University, Rajvithi Road, Rajthwee, Bangkok 10400

บทคัดย่อ

การนำพืชอาหารมาใช้ผลิตเอทานอลอาจส่งผลให้ราคาสินค้าอาหารปรับสูงขึ้น ปัจจุบันการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตเอทานอลจึงมุ่งเน้นไปใช้วัตถุดิบประเภทอื่นมาทดแทน การนำเอาของเสียหรือวัสดุเหลือใช้ที่อยู่ในรูปลิกโนเซลลูโลสมาผลิตเอทานอลเริ่มได้รับความสนใจมากยิ่งขึ้น เนื่องจากเป็นวัตถุดิบที่มีอยู่เป็นจำนวนมากและมีราคาถูก แต่วัตถุดิบพอลิโนเซลลูโลสประกอบด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน มีองค์ประกอบที่ย่อยสลายได้ยากทางชีวภาพ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการปรับสภาพวัตถุดิบเหล่านี้ก่อนนำไปผลิตเอทานอล กระบวนการปรับสภาพวัตถุดิบสามารถแบ่งออกเป็น 4 รูปแบบ ได้แก่ การปรับสภาพทางกายภาพ การปรับสภาพทางกายภาพร่วมกับเคมี การปรับสภาพทางเคมี และการปรับสภาพทางชีวภาพ ทั้งนี้กระบวนการที่เหมาะสมในการปรับสภาพขึ้นอยู่กับชนิดและลักษณะสมบัติของวัตถุดิบที่นำมาใช้ ดังนั้นบทความนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอวิธีการต่าง ๆ ในการปรับสภาพวัตถุดิบพอลิโนเซลลูโลสก่อนนำไปผลิตเอทานอลเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ และลดต้นทุนในการผลิตเอทานอล

คำสำคัญ : การปรับสภาพ; ลิกโนเซลลูโลส; การผลิตเอทานอล

Abstract

Ethanol production from food plants may cause a rising price of food. At present, the use of lignocellulosic material as a substrate for ethanol production has been promoted because these materials are abundant and cheap. However, lignocellulose consists of cellulose, hemicellulose, and especially, lignin which are difficult to degrade. It is, therefore, necessary to pretreat these materials, prior to processing such that pretreatment can be categorized into 4 processes including physical, physicochemical, chemical, and biological processes. The suitable

*ผู้รับผิดชอบบทความ : supawadee.pol@mahidol.ac.th

pretreatment depends on types and characteristics of raw materials. Therefore, the objective of this article is to present the lignocellulose pretreatment processes, before ethanol production, to enhance cost reduction and efficient of ethanol production.

Keywords: pretreatment; lignocellulose; ethanol production

1. บทนำ

ปัจจุบันความต้องการเอทานอลทั้งในประเทศและต่างประเทศเพิ่มสูงขึ้นมาก เนื่องจากพลังงานในรูปเชื้อเพลิงฟอสซิล (fossil fuel) มีปริมาณลดลงอย่างรวดเร็วแปรผกผันตามการเพิ่มขึ้นของประชากรของโลกและการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรมทั่วโลกจึงให้ความสนใจในการนำเอทานอลมาผสมกับน้ำมันปิโตรเลียม (เบนซิน) เพื่อลดปริมาณการใช้น้ำมันเบนซินลง โดยการเพิ่มสัดส่วนในการเติมเอทานอลให้มากขึ้น เช่น E20, E85 และยังมีส่วนช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกอันเนื่องมาจากการเผาไหม้น้ำมันเชื้อเพลิง [1] วัตถุดิบที่นิยมใช้ในการผลิตเอทานอล ได้แก่ มันสำปะหลัง และกากน้ำตาล ซึ่งมีราคาค่อนข้างสูง เนื่องจากมันสำปะหลังเป็นพืชเศรษฐกิจของไทยสำหรับใช้บริโภคเป็นอาหารของมนุษย์และสัตว์ ส่วนกากน้ำตาลปัจจุบันเป็นที่ต้องการอย่างมากในการนำไปเป็นวัตถุดิบสำหรับผลิตเอทานอลจึงทำให้มีราคาเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้การนำพืชอาหารมาใช้ผลิตเอทานอลส่งผลให้ราคาสินค้าอาหารภายในประเทศปรับสูงขึ้น ดังนั้นปัจจุบันการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตเอทานอลจึงมุ่งเน้นไปใช้วัตถุดิบประเภทอื่นมาทดแทน การนำเอาของเสียหรือวัสดุเหลือใช้ที่อยู่ในรูปลิกโนเซลลูโลส (lignocellulose material) มาผลิตเอทานอลเริ่มได้รับความสนใจมากยิ่งขึ้น เนื่องจากเป็นวัตถุดิบที่มีอยู่เป็นจำนวนมากและมีราคาถูก ประกอบกับประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมและมีอุตสาหกรรมแปรรูปผลผลิตทางการเกษตรหลากหลายรูปแบบ ได้แก่ อุตสาหกรรมผลิต

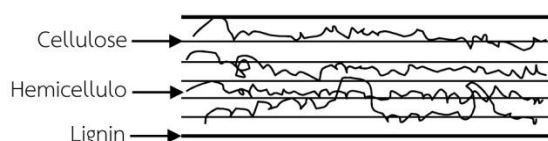
แป้งมันสำปะหลัง อุตสาหกรรมผลิตน้ำมันปาล์มดิบ อุตสาหกรรมผลิตน้ำตาล เป็นต้น การผลิตทั้งภาคการเกษตรและภาคอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับผลผลิตทางการเกษตรมีของเสียเกิดขึ้นปริมาณมาก เช่น กากมันสำปะหลัง ทลายปาล์ม ขานอ้อย โดยกากของเสียเหล่านี้จัดเป็นของเสียที่มีองค์ประกอบของพวกลิกโนเซลลูโลสจำนวนมากสามารถนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตเป็นเอทานอลได้ และการผลิตเอทานอลจากชีวมวลต่าง ๆ ยังถือเป็นหนึ่งในรูปแบบของการผลิตพลังงานทดแทนเพื่อการใช้และผลิตพลังงานอย่างยั่งยืนอีกด้วย ในที่นี้ขอยกตัวอย่างของเสียพวกลิกโนเซลลูโลสที่เกิดขึ้นจากกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มดิบของประเทศไทย ในปี ค.ศ. 2003 จากกระบวนการผลิตน้ำมันปาล์มดิบ 700,000 ตัน/ปี ก่อให้เกิดของเสียคือ ไฟเบอร์ (fiber) 600,000 ตัน/ปี กะลาปาล์ม (shell) 200,000 ตัน/ปี และทลายปาล์มเปล่า 900,000 ตันต่อปี [2] เมื่อพิจารณาจากของเสียที่เกิดขึ้นทลายปาล์มเปล่าและไฟเบอร์จึงน่าจะเป็นวัตถุดิบสำคัญในการผลิตเอทานอลได้ในอนาคตเนื่องจากมีปริมาณมากและเกิดขึ้นต่อเนื่องตลอดทั้งปี นอกจากนี้ Azis และคณะ (2002) ศึกษาองค์ประกอบของทลายปาล์มเปล่า พบว่าประกอบด้วยเซลลูโลส 44.2 % เฮมิเซลลูโลส 33.5 % และลิกนิน 20.4 % [3] ซึ่งเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในทลายปาล์มเปล่าสามารถย่อยสลายได้ทั้งทางเคมีและชีวภาพ เมื่อกระบวนการย่อยเซลลูโลสเสร็จสมบูรณ์แล้วจะได้ผลผลิตเป็นน้ำตาลกลูโคสในขณะที่การย่อยเฮมิเซลลูโลสจะได้ผลผลิตเป็นน้ำตาลเพนโทสและเฮ็กโซส

[4] เมื่อทำการหมักผลผลิตที่ได้เหล่านี้นี้ด้วยเชื้อยีสต์จะได้เอทานอลออกมาในที่สุด อย่างไรก็ตาม การนำวัตถุดิบพวกกลีโคเซลลูโลสมาผลิตเอทานอลนั้น จำเป็นต้องมีการปรับสภาพวัตถุดิบก่อนด้วยกระบวนการต่าง ๆ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะสมบัติของวัตถุดิบที่นำมาใช้ เพื่อกำจัดสารพวกกลีโคลินที่มีสมบัติไปห่อหุ้มหรือเคลือบโครงสร้างของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส และเป็นการแตกพันธะที่เซลลูโลสจับกับสารประกอบอื่นๆออกเพื่อให้เอนไซม์เซลลูเลสสามารถเข้าถึงและย่อยเซลลูโลสได้ง่ายขึ้น

2. องค์ประกอบของกลีโคเซลลูโลส

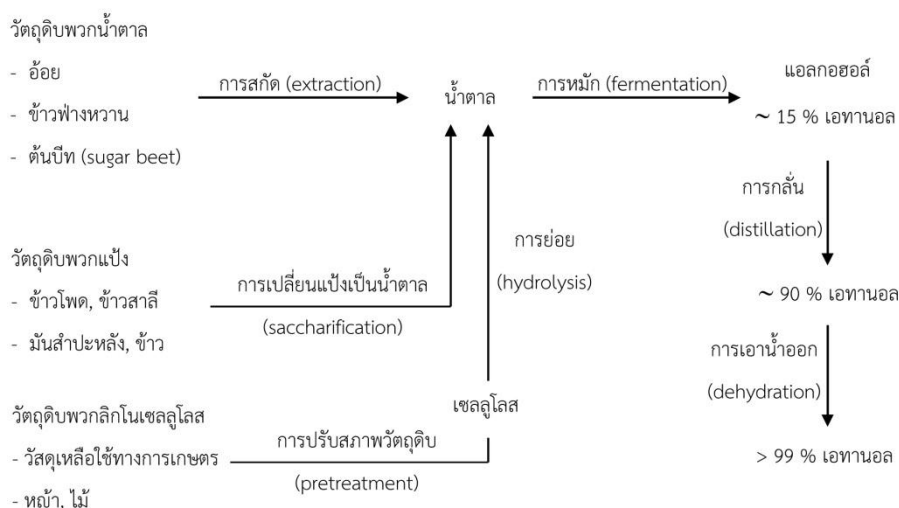
วัตถุดิบพวกกลีโคเซลลูโลสประกอบด้วยเซลลูโลส (cellulose) เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) และลิกนิน (lignin) ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยเซลลูโลสเป็นสายโพลีแซคคาไรด์ของน้ำตาล D-glucose เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ β -1,4 glycosidic ซึ่งประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคสมากกว่า 10,000 หน่วย ส่วนเฮมิเซลลูโลสเป็นโพลีแซคคาไรด์ประกอบด้วยน้ำตาลหลายชนิดเชื่อมต่อกันเป็นโซ่สาขา ได้แก่ น้ำตาลเฮกโซส (กลูโคส กาแลคโตส และแมนโนส)

และ น้ำตาลเพนโตส (ไซโลส และอะราบิโนส) สำหรับลิกนินเป็นสารอินทรีย์โพลีเมอร์ของฟีนิลโพรเพน (phenylpropane) มากกว่า 10,000 หน่วย และเป็นองค์ประกอบหลักในผนังเซลล์ของพืช ทำหน้าที่ห่อหุ้มเส้นใยของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเข้าด้วยกันซึ่งทนต่อการย่อยสลายมาก ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการปรับสภาพวัตถุดิบเหล่านี้นี้ก่อนนำไปผลิตเอทานอล



รูปที่ 1 โครงสร้างทั่วไปของกลีโคเซลลูโลส [5]

การเปลี่ยนวัตถุดิบพวกกลีโคเซลลูโลสไปเป็นเอทานอลนั้นมีขั้นตอนที่ค่อนข้างยุ่งยากซับซ้อนมากกว่าการใช้วัตถุดิบจำพวกน้ำตาลและแป้ง โดยประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ การปรับสภาพวัตถุดิบ (pretreatment) การย่อยวัตถุดิบ (hydrolysis) และการหมักวัตถุดิบ (fermentation) ดังแสดงรายละเอียดขั้นตอนการผลิตเอทานอลจากวัตถุดิบประเภทต่าง ๆ ในรูปที่ 2



รูปที่ 2 กระบวนการชีวภาพในการผลิตเอทานอลจากวัตถุดิบประเภทต่าง ๆ [5]

3. การปรับสภาพวัตถุดิบ (pretreatment)

การปรับสภาพวัตถุดิบมีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดลิกนินซึ่งมีสมบัติไปห่อหุ้มหรือเคลือบโครงสร้างของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ลิกนินจึงเป็นเหมือนผนังป้องกันไม่ให้จุลินทรีย์เข้าไปย่อยสลายเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส นอกจากนี้ยังมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มขนาดรูพรุนของตัววัตถุดิบและลดการเกิดผลึกของเซลลูโลส (cellulose crystallinity) ทำให้เอนไซม์สามารถเข้าถึงวัตถุดิบได้ง่ายขึ้น [6] อีกทั้งยังช่วยลดค่าใช้จ่ายสำหรับใช้เอนไซม์ในการย่อยเซลลูโลสเนื่องจากหากใช้เอนไซม์ในการย่อยเพียงอย่างเดียวโดยไม่มีการปรับสภาพวัตถุดิบก่อนจะมีค่าใช้จ่ายสำหรับเอนไซม์ถึง 25 % ของต้นทุนการผลิตเอทานอลทั้งหมด [7] กระบวนการปรับสภาพวัตถุดิบสามารถแบ่งออกเป็น 4 รูปแบบ ได้แก่ การปรับสภาพทางกายภาพ การปรับสภาพทางกายภาพร่วมกับเคมี การปรับสภาพทางเคมี และการปรับสภาพทางชีวภาพ

3.1 การปรับสภาพทางกายภาพ (physical pretreatment)

การใช้เครื่องมือหรือเครื่องจักรในการหั่นสับ และบด (mechanical comminution) เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวและลดขนาดอนุภาคของลิกโนเซลลูโลส นอกจากนี้ยังเป็นการลดผลึกของเซลลูโลสด้วย [8] โดยทั่วไปควรลดขนาดวัตถุดิบหลังจากหั่นแล้วให้มีขนาดประมาณ 1-3 เซนติเมตร และให้มีขนาด 0.2-2 มิลลิเมตร หลังจากการบดละเอียดแล้ว พลังงานที่ต้องใช้ในการบดวัตถุดิบขึ้นอยู่กับขนาดสุดท้ายของชีวมวลที่ต้องการ โดยส่วนใหญ่วิธีการปรับสภาพทางกายภาพจะใช้ร่วมกับกระบวนการปรับสภาพอื่นๆ ด้วย

3.2 การปรับสภาพทางกายภาพร่วมกับเคมี (physicochemical pretreatment)

3.2.1 การระเบิดด้วยไอน้ำ (steam explosion) ชีวมวลที่ผ่านการหั่นและบดแล้วจะถูก

ปรับสภาพด้วยไอน้ำอันทันทีที่ความดันสูง หลังจากนั้นจึงลดความดันลง โดยส่วนใหญ่จะควบคุมอุณหภูมิที่ 160-260 องศาเซลเซียส ที่ความดัน 0.69-4.83 เมกะพาสคาล (MPa) วัฏระยะหนึ่ง หลังจากนั้นจึงลดความดันลงให้เหลือเท่ากับความดันบรรยากาศ ซึ่งเป็นสาเหตุให้เกิดการย่อยสลายเฮมิเซลลูโลสและการเปลี่ยนรูปลิกนิน เนื่องจากอุณหภูมิสูงและเป็นการเพิ่มศักยภาพในการย่อยเซลลูโลสด้วย ปัจจัยที่มีผลต่อการระเบิดด้วยไอน้ำ ได้แก่ ระยะเวลา อุณหภูมิ และขนาดของชิ้นชีวมวล [9] ข้อดีของการปรับสภาพด้วยวิธีนี้คือ ใช้พลังงานต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับ การบดด้วยเครื่องจักรเพียงอย่างเดียวอย่างเดียว มีความคุ้มค่าเมื่อใช้ในการปรับสภาพไม้เนื้อแข็งและวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร แต่มีประสิทธิผลน้อยเมื่อใช้กับไม้เนื้ออ่อน ข้อจำกัดของวิธีนี้ คือ การทำลายส่วนประกอบของไซแลน (xylan) ซึ่งเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่พบอยู่ในผนังเซลล์ของพืชและก่อให้เกิดสารองค์ประกอบที่อาจไปขัดขวางการทำงานของจุลินทรีย์ที่ใช้ในกระบวนการต่อจากนี้ [5]

3.2.2 การระเบิดด้วยแอมโมเนีย (ammonia fiber explosion, AFEX) การทำให้ชีวมวลสัมผัสกับแอมโมเนียเหลวที่อุณหภูมิและความดันสูงในระยะเวลาหนึ่ง หลังจากนั้นจึงลดความดันลง โดยมีตัวแปร 4 ตัวสำคัญ ในการปรับสภาพของกระบวนการนี้ให้มีประสิทธิภาพ ได้แก่ ภาวะบรรจุทุกแอมโมเนีย ภาวะบรรจุทุกน้ำ อุณหภูมิ และระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา โดยทั่วไปกระบวนการ AFEX จะใช้แอมโมเนียเหลวปริมาณ 1-2 กิโลกรัมแอมโมเนียต่อกิโลกรัมชีวมวลแห้ง ที่อุณหภูมิ 60-120 องศาเซลเซียส และความดัน 1.72-2.06 เมกะพาสคาล เป็นเวลา 30 นาที [10] กระบวนการนี้สามารถช่วยเพิ่มอัตราการเปลี่ยนแปลงเป็นน้ำตาล อย่างไรก็ตาม กระบวนการนี้มีประสิทธิภาพน้อยเมื่อใช้ปรับสภาพชีวมวลที่มีองค์ประกอบของ

ลิกนินสูง เช่น หนังสือพิมพ์ (มีลิกนิน 18-30 %) เศษไม้ (มีลิกนิน 25-35 %) นอกจากนี้พบว่ากระบวนการ AFEX มีค่าใช้จ่ายสูงกว่าการระเบิดด้วยไอน้ำ [5]

3.3 การปรับสภาพทางเคมี

3.3.1 การปรับสภาพด้วยโอโซน (ozonolysis) โอโซนสามารถย่อยสลายลิกนินและเฮมิเซลลูโลสในวัตถุดิบพวกลิกโนเซลลูโลสได้ เช่น ฟางข้าวสาลี ชานอ้อย หญ้า พืชถั่ว ไม้สน ก๊าซโอโซนเป็นสารออกซิแดนท์ที่ดีสามารถละลายน้ำได้ สามารถเข้าไปแตกโครงสร้างของลิกนินและปลดปล่อยสารประกอบที่ละลายน้ำได้และมีน้ำหนักรวมเล็กน้อย เช่น กรดอะซิติก กรดฟลอมิก [11] ประสิทธิภาพการย่อยสลายชีวมวลด้วยเอนไซม์จะเพิ่มขึ้นเมื่อผ่านกระบวนการปรับสภาพด้วยโอโซน ข้อดีของการปรับสภาพด้วยวิธีนี้คือ (1) มีประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน (2) ไม่ผลิตสารตกค้างที่เป็นพิษต่อกระบวนการต่อไป และ (3) ปฏิบัติการสามารถดำเนินได้ภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความดันห้อง อย่างไรก็ตาม ต้องใช้โอโซนปริมาณมากในกระบวนการปรับสภาพทำให้มีค่าใช้จ่ายสูง [5]

3.3.2 การปรับสภาพด้วยกรด (acid hydrolysis) กรดที่นิยมใช้ ได้แก่ กรดซัลฟูริก และกรดไฮโดรคลอริก ซึ่งเดิมเคยใช้กรดเข้มข้นในการย่อยลิกโนเซลลูโลส แต่เนื่องจากกรดเข้มข้นเหล่านี้มีฤทธิ์กัดกร่อน มีความเป็นพิษและเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม จึงจำเป็นต้องใช้ถึงปฏิกิริยาที่ทนทานต่อการกัดกร่อนและมีค่าใช้จ่ายในการคืนสภาพของกรดนั้นสูงมาก ดังนั้นจึงใช้การเจือจางกรดในการปรับสภาพและพบว่า มีอัตราการเกิดปฏิกิริยาสูงสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยเซลลูโลสได้ การปรับสภาพด้วยการเจือจางกรดแบ่งเป็น 2 ชนิด คือ การเจือจางกรดที่อุณหภูมิสูง (> 160 องศาเซลเซียส) และการเจือจางกรดที่อุณหภูมิต่ำ (< 160 องศาเซลเซียส) Jung และคณะ (2013) ได้ศึกษาการปรับสภาพทลายปาล์มเปล่าด้วยวิธีการเจือ

จางกรด พบว่าวิธีการนี้มีประสิทธิผลมากโดยใช้กรดซัลฟูริก 1 % (w/v) ทำปฏิกิริยาภายในเวลา 3 นาที ที่อุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส และทำการย่อยในไมโครเวฟ [12] ถึงแม้ว่าการปรับสภาพด้วยกรดจะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยเซลลูโลสได้ แต่ถ้าพิจารณาในเรื่องค่าใช้จ่ายพบว่าค่าใช้จ่ายที่สูงกว่าการปรับสภาพทางกายภาพร่วมกับเคมี นอกจากนี้จำเป็นต้องปรับ pH ให้เป็นกลางก่อนหลังจากทำการปรับสภาพ เพื่อไม่ให้ขัดขวางการทำงานของกระบวนการในขั้นต่อไป

3.3.3 การปรับสภาพด้วยด่าง (alkaline hydrolysis) โซเดียมไฮดรอกไซด์และปูนขาวเป็นสารเคมีที่นิยมใช้ในกระบวนการปรับสภาพด้วยด่าง ซึ่งด่างเหล่านี้สามารถแตกโครงสร้างของลิกนินและลดการเกิดผลึกของเซลลูโลส [6] การปรับสภาพด้วยด่างเป็นกระบวนการที่ง่ายและไม่ต้องใช้พลังงานมากเมื่อเปรียบเทียบกับกระบวนการปรับสภาพด้วยกรด นันทิกา และคณะ (2554) รายงานว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของโซเดียมไฮดรอกไซด์จะทำให้ปริมาณของเซลลูโลสเพิ่มขึ้นในขณะที่ปริมาณเฮมิเซลลูโลสและลิกนินลดลง [13] นอกจากนี้ Chen และคณะ (2012) พบว่า 70 % ของเฮมิเซลลูโลสถูกกำจัดภายใน 4 สัปดาห์ ภายใต้การปรับสภาพด้วยด่างที่สภาวะอุณหภูมิห้อง และการใช้เอนไซม์ชนิดผสมหลังจากการปรับสภาพวัตถุดิบด้วยด่างแล้วสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายชีวมวลได้อย่างมีนัยสำคัญ [14]

3.3.4 การกำจัดลิกนินโดยการออกซิเดชัน (oxidative delignification) การปรับสภาพด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ในขั้นต่อไปได้ Oliva (2005) พบว่าปฏิกิริยาเฟนตัน [ปฏิกิริยาระหว่างเหล็ก (Fe) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) เกิดเป็นไฮดรอกซิลเรดิคัล ($OH^\bullet$)] สามารถ

ตารางที่ 1 ข้อดีและข้อจำกัดของการปรับสภาพวัตถุดิบลิกโนเซลลูโลสโดยวิธีการต่าง ๆ

วิธีการปรับสภาพ	ข้อดี	ข้อจำกัด
1. ทางกายภาพ	เป็นการปรับสภาพเบื้องต้นโดยการลดขนาดวัตถุดิบเพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวของวัตถุดิบ	ต้องใช้ร่วมกับกระบวนการปรับสภาพอื่น ๆ
2. ทางกายภาพร่วมกับเคมี		
2.1 การระเบิดด้วยไอน้ำ	ใช้พลังงานต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับ การบดด้วยเครื่องจักรอย่างเดียว มีความคุ้มค่าเมื่อใช้ในการปรับสภาพไม้เนื้อแข็งและวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร	มีประสิทธิผลน้อยเมื่อใช้กับไม้เนื้ออ่อน ทำลายส่วนประกอบของไซแลน (xylan) และก่อให้เกิดสารองค์ประกอบที่อาจไปขัดขวางการทำงานของจุลินทรีย์ที่ใช้ในกระบวนการต่อไป
2.2 การระเบิดด้วยแอมโมเนีย	ช่วยเพิ่มอัตราการเปลี่ยนแปลงเป็นน้ำตาล	มีประสิทธิผลน้อยเมื่อใช้ในการปรับสภาพชีวมวลที่มีองค์ประกอบของลิกนินสูง เช่น หนัสน้ำมันพืช เศษไม้ และมีค่าใช้จ่ายสูงกว่าการระเบิดด้วยไอน้ำ
3. ทางเคมี		
3.1 การปรับสภาพด้วยโอโซน	มีประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนิน ไม่ผลิตสารตกค้างที่เป็นพิษต่อกระบวนการต่อไป และปฏิกิริยาสามารถดำเนินได้ภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความดันห้อง	ต้องใช้โอโซนปริมาณมากในกระบวนการปรับสภาพทำให้มีค่าใช้จ่ายสูง
3.2 การปรับสภาพด้วยกรด	สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยเซลลูโลสได้	มีค่าใช้จ่ายที่สูงกว่าการปรับสภาพทางกายภาพร่วมกับเคมี และจำเป็นต้องปรับ pH ให้เป็นกลางก่อนหลังจากปรับสภาพเพื่อไม่ให้ขัดขวางการทำงานของกระบวนการในขั้นต่อไป
3.3 การปรับสภาพด้วยต่าง	เป็นกระบวนการที่ง่ายและไม่ต้องใช้พลังงานมากเมื่อเทียบกับการปรับสภาพด้วยกรด และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการย่อยสลายชีวมวล	จำเป็นต้องทำการปรับ pH ให้เป็นกลางก่อนหลังจากทำการปรับสภาพเพื่อไม่ให้ขัดขวางการทำงานของกระบวนการในขั้นต่อไป
3.4 การออกซิเดชัน	สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ในขั้นต่อไปได้ และปฏิกิริยาสามารถดำเนินได้ภายใต้สภาวะอุณหภูมิและความดันห้อง	สารเคมีที่ใช้มีราคาสูง เช่น H_2O_2
4. ทางชีวภาพ	ใช้พลังงานน้อย ไม่ใช้สารเคมีในกระบวนการทำให้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม	อัตราการย่อยสลายที่เกิดขึ้นค่อนข้างต่ำ ทำให้ต้องใช้เวลานานในการย่อยสลายและใช้พื้นที่ในการผลิตมาก

เพิ่มประสิทธิภาพการหมักวัตถุดิบที่ผ่านการปรับสภาพด้วยการระเบิดด้วยไอน้ำ เนื่องจากปฏิกิริยาเพนตันสามารถย่อยสลายสารประกอบที่เป็นพิษที่เกิดขึ้นได้ เช่น ฟูแรน (furan) ฟีนอลิก (phenolic) [15] Jain และ Vigneshwaran (2012) ได้ศึกษาผลของการปรับสภาพเซลลูโลสด้วยสารละลายเพนตัน พบว่าปฏิกิริยาเพนตันที่เกิดขึ้นมีประสิทธิภาพในการปรับสภาพวัตถุดิบให้เอนไซม์สามารถเข้าถึงและย่อยสลายได้ดี [16] นอกจากนี้ Sinnaraprasat และ Fongsatitkul (2011) พบว่าปฏิกิริยาเพนตันภายใต้สภาวะอุณหภูมิห้อง (28-30 องศาเซลเซียส) ที่อัตราส่วนระหว่าง H_2O_2 : Fe^{2+} เท่ากับ 20 และ COD : H_2O_2 เท่ากับ 130 สามารถย่อยสลายน้ำเสียจากโรงงานผลิตน้ำมันปาล์มดิบซึ่งมีองค์ประกอบของพวกคาร์โบไฮเดรตและให้ปริมาณน้ำตาลที่สามารถนำไปหมักเพื่อผลิตแอลกอฮอล์ได้สูงสุด [17]

3.4 การปรับสภาพทางชีวภาพ

เป็นการใช้จุลินทรีย์ในการย่อยสลายลิกนินและเฮมิเซลลูโลส เช่น brown- fungi, white- fungi, และ soft-rot fungi โดย Dashtban และคณะ (2009) พบว่ารา เช่น *Trichoderma reesei* และ *Aspergillus niger* สามารถผลิตเอนไซม์ extra-cellular cellulolytic เป็นจำนวนมาก ในขณะที่แบคทีเรียและราแบบไร้อากาศ 2-3 ชนิด สามารถผลิตเอนไซม์ cellulolytic ซึ่งเอนไซม์เหล่านี้สามารถย่อยสลายวัตถุดิบพวกลิกโนเซลลูโลสได้เป็นอย่างดี [18] ข้อดีของกระบวนการนี้คือใช้พลังงานน้อย ไม่ใช้สารเคมีในกระบวนการทำให้เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตาม อัตราการย่อยสลายที่เกิดขึ้นค่อนข้างต่ำ ทำให้ต้องใช้เวลานานในการย่อยสลายและใช้พื้นที่ในการผลิตมาก

4. สรุป

การเปลี่ยนวัตถุดิบพวกลิกโนเซลลูโลสไปเป็นเอทานอลจำเป็นต้องทำการปรับสภาพวัตถุดิบก่อนเนื่องจากขั้นตอนการปรับสภาพวัตถุดิบเป็นการแตกพันธะที่เซลลูโลสจับกับสารประกอบอื่น ๆ ออกเพื่อให้เอนไซม์เซลลูเลสสามารถเข้าถึงและย่อยเซลลูโลสได้ง่ายขึ้น [19] และยังช่วยลดค่าใช้จ่ายสำหรับใช้เอนไซม์ในการย่อยเซลลูโลสเนื่องจากหากใช้เอนไซม์ในการย่อยเพียงอย่างเดียว โดยไม่มีการปรับสภาพวัตถุดิบก่อนจะมีค่าใช้จ่ายสำหรับเอนไซม์ถึง 25 % ของต้นทุนการผลิตเอทานอลทั้งหมด [7] กระบวนการปรับสภาพวัตถุดิบสามารถแบ่งออกเป็น 4 รูปแบบ ได้แก่ การปรับสภาพทางกายภาพ การปรับสภาพทางกายภาพร่วมกับเคมี การปรับสภาพทางเคมี และการปรับสภาพทางชีวภาพ [20] ทั้งนี้การเลือกกระบวนการในการปรับสภาพขึ้นอยู่กับชนิดและลักษณะสมบัติของวัตถุดิบที่นำมาใช้

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Wang, M., 1999, Fuel-cycle greenhouse gas emissions impacts of alternative transportation fuels and advanced vehicle technologies, J. Transport. Res. Board 1664: 9-17.
- [2] Chavalparit, O., 2006, Clean Technology for the Crude Palm Oil Industry in Thailand, Ph.D. Thesis, Wageningen University, Wageningen.
- [3] Azis, A.A., Rusin, M. and Mokhtar, A., 2002, Preparation of cellulose from oil palm empty fruit bnnches via ethanol digestion: Effect of acid and alkali catalysts. J. Oil Plam Res. 14: 9-14.

- [4] Millati, R., Wikandari, R., Trihandayani, E. T., Cahyanto, M.N., Taherzadeh, M.J. and Niklasson, C., 2011, Ethanol from oil palm empty fruit bunch via dilute-acid hydrolysis and fermentation by *Mucor indicus* and *Saccharomyces cerevisiae*, *Agri. J.* 6: 54-59.
- [5] Cheng, J., 2009, *Biomass to Renewable Energy Processes*, Taylor and Francis Group, New York.
- [6] Sun, Y. and Cheng, J., 2002, Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: A review, *Biores. Technol.* 83: 1-11.
- [7] Brodeur, G., Yau, E., Badal, K., Collier, J., Ramachandran, K.B. and Ramakrishnan, S., 2011, Chemical and physicochemical pretreatment of lignocellulosic biomass: A review, *Enzyme Res.* p1: 1-17.
- [8] Harun, M.Y., Radiah, A.B.D., Abidin, Z.Z., Yunus, R., 2011, Effect of physical pretreatment on dilute acid hydrolysis of water hyacinth (*Eichhornia crassipes*), *Biores. Technol.* 102: 5193-5199.
- [9] Pejo, E.T., Olive, J.M. and Ballesteros, M., 2008, Realistic approach for full-scale bioethanol production from lignocellulose: A review, *J. Sci. Ind. Res.* 67: 874-884.
- [10] Kumar, P., Barrett, D.M., Delwiche, M.J. and Stroeve, P., 2009, Methods for pretreatment of lignocellulosic biomass for efficient hydrolysis and biofuel production, *Ind. Eng. Chem. Res.* 48: 3713-3729.
- [11] Balat, M., 2011, Production of bioethanol from lignocellulosic materials via the biochemical pathway: A review, *Energy Convers. Manage.* 52: 858-875.
- [12] Jung, Y.H., Kim, I.J., Kim, H.K. and Kim, K.H., 2013, Dilute acid pretreatment of lignocellulose for whole slurry ethanol fermentation, *Biores. Technol.* 132: 109-114.
- [13] นันทิกา คล้ายชม, เพ็ญจิตร ศรีนพคุณ และอนุสิทธิ์ ธนะพิมพ์เมธา, 2554, การผลิตน้ำตาลรีดิวส์จากขางช้างฟางหวานโดยกระบวนการไฮโดรไลซิสด้วยกรด, *วิศวกรรมสาร มก.* 24: 91-102.
- [14] Chen, B.Y., Chen, S.W. and Wang, H.T., 2012, Use of different alkaline pretreatments and enzyme models to improve low-cost cellulosic biomass conversion, *Biom. Bioen.* 39: 182-191.
- [15] Oliver, J.H., Hyunook, K. and Pen-Chi, C., 2000, Decolorization of wastewater, *Crit. Rev. Environ. Sci. Tech.* 30: 499-505.
- [16] Jain, P. and Vigneshwaran, N., 2012, Effect of Fenton's pretreatment on cotton cellulosic substrates to enhance its enzymatic hydrolysis response, *Biores. Technol.* 103: 219-226.
- [17] Sinnaraprasat, S. and Fongsatitkul, P., 2011, Optimal condition of Fenton's reagent to enhance the alcohol production from palm oil mill effluent (POME), *EnvironmentalAsia* 4(2): 9-16.

- [18] Dashtban, M., Schraft, H. and Qin, W., 2009, Fungal bioconversion of lingo-cellulosic residues; opportunities & perspectives. *Int. J. Biol. Sci.* 5: 578-595.
- [19] Zheng, Y., Zhao, J., Xu, F. and Li, Y., 2014, Pretreatment of lignocellulosic biomass for enhanced biogas production. *Prog. Energ. Comb. Sci.* 24: 35-53.
- [20] Singh, R., Shukla, A., Tiwari, S. and Srivastava, M., 2014, A review on delignification of lignocellulosic biomass for enhancement of ethanol production potential, *Renew. Sust. Energ. Rev.* 33: 713-728.