



การผลิตเซลลูโลสเอทานอลในประเทศไทย

Production of Cellulosic Ethanol in Thailand

ชัชพันธ์ นีวาสงษ์^{1,2} และ เฉลิม เรืองวิริยะชัย^{1,2*}

บทคัดย่อ

การผลิตไบโอเอทานอลได้รับความสนใจทั่วโลก เนื่องจากเป็นอีกวิธีการหนึ่งในการลดภาวะโลกร้อนและยังเป็นการรักษาความมั่นคงของพลังงานทั่วโลกอีกด้วย ในช่วงแรกนั้นการผลิตไบโอเอทานอลผลิตจากน้ำตาลและแป้งที่ได้จากพืชผลและธัญพืชจากการเกษตร แต่ในปัจจุบันไบโอเอทานอลสามารถผลิตได้จากวัสดุทดแทนประเภทอื่นๆ นอกเหนือจากแป้งและน้ำตาล เช่น วัสดุลิกโนเซลลูโลส ที่เรียกว่า ลิกโนเซลลูโลสเอทานอล ตัวอย่างเช่น เศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เศษไม้ เศษวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรมและเศษขยะ และพืชพลังงานต่างๆ มีการศึกษาอย่างต่อเนื่องและมากมายในการนำวัสดุลิกโนเซลลูโลสเป็นสารตั้งต้นของน้ำตาลเพื่อการผลิตลิกโนเซลลูโลสเอทานอล โดยส่วนใหญ่วัสดุลิกโนเซลลูโลสประกอบไปด้วยเซลลูโลสจำนวนมากที่รวมกันกับเฮมิเซลลูโลสและลิกนิน ดังนั้นจึงต้องมีการกำจัดเฮมิเซลลูโลสและลิกนินด้วยกระบวนการปรับสภาพต่าง ๆ เพื่อให้ได้เซลลูโลสบริสุทธิ์ สารประกอบเซลลูโลสเป็นวัสดุที่เปลี่ยนไปเป็นลิกโนเซลลูโลสเอทานอลได้ โดยในขั้นตอนแรกจะนำเซลลูโลสมาเปลี่ยนเป็นน้ำตาลกลูโคสด้วยกระบวนการย่อยด้วยกรดหรือกระบวนการย่อยด้วยเอนไซม์ จากนั้นนำน้ำตาลที่ได้มาผ่านกระบวนการหมักด้วยจุลินทรีย์ เช่น *Saccharomyces cerevisiae*, *Escherichia coli*, *Zymomonas mobilis* เพื่อให้ได้ลิกโนเซลลูโลสเอทานอล ในประเทศไทยมีศักยภาพในการผลิตเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจำนวนมากมาย จึงมีความเหมาะสมที่จะสามารถผลิตลิกโนเซลลูโลสเอทานอลได้เป็นอย่างดี อีกทั้งยังสอดคล้องกับนโยบายของรัฐบาลในการเพิ่มกำลังการผลิตเอทานอลให้มากขึ้น ดังนั้นการผลิตลิกโนเซลลูโลสเอทานอลในประเทศไทยจึงเป็นที่น่าสนใจและควรได้รับการสนับสนุนจากอุตสาหกรรมขนาดใหญ่เพื่อความมั่นคงทางด้านพลังงานและเป็นการก้าวขึ้นไปสู่ผู้ผลิตพลังงานทดแทนชั้นนำของโลก

¹ ศูนย์ความเป็นเลิศด้านนวัตกรรมทางเคมี ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น 40002

² กลุ่มวิจัยพลังงานเชื้อเพลิงชีวภาพ โครงการมหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จังหวัดขอนแก่น 40002

*Corresponding Author, E-mail: chal_ru@kku.ac.th

ABSTRACT

The bioethanol production has attracted worldwide attention as a strategy for reducing global warming and improving global energy security. Firstly, bioethanol has been produced from sugars or starches obtained from fruits and grains. Currently, bioethanol can be produced from a number of renewable resources other than starches or sugars such as lignocellulosic materials, so called lignocellulosic ethanol. The source of lignocellulosic ethanol was produced from such as agricultural wastes, forest residues, industrial and municipal wastes, and dedicated energy crops. Lignocellulosic materials continue to be investigated as a source of fermentable sugars for ethanol production and mostly contain cellulose in combination with hemicellulose and lignin. The removal of hemicellulose and lignin can be used several pretreatment processes for pure cellulose. The cellulose component in these materials can be converted to ethanol by first step converting to sugars by acid hydrolysis or enzymatic hydrolysis processes and then the resulting sugars were converted to ethanol by microorganism such as *Saccharomyces cerevisiae*, *Escherichia coli*, *Zymomonas mobilis*, etc. In Thailand, it has potential to produce a plenty of agricultural waste materials. It was also appropriated to produce lignocellulosic ethanol, according with Thai government's policy to increase the production of ethanol. Thus, the production of lignocellulosic ethanol in Thailand it was an interesting and encouraged to become a large industry for stability of energy and enhanced to produce renewable energy on the top of the world.

คำสำคัญ: ลิกโนเซลลูโลสเอทานอล วัสดุลิกโนเซลลูโลส เซลลูโลส กระบวนการปรับสภาพ กระบวนการย่อย

Keyword: Lignocellulosic ethanol, Lignocellulosic materials, Cellulose, Pretreatment process, Hydrolysis process

1. บทนำ

จากข้อมูลทางสถิติของสำนักข่าวแห่งชาติ เมื่อปีพ.ศ. 2553 ประเทศไทยถูกจัดอันดับให้เป็นประเทศผู้ผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพอันดับที่ 8 ของประเทศที่สามารถผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพสูงที่สุดของโลก ร่วมกับประเทศสเปน จากทั้งหมด 63 ประเทศ อีกทั้งไทยเรายังติดอันดับที่ 2 ของประเทศในทวีปเอเชีย หรือเป็นรองแค่ประเทศจีนเท่านั้น ซึ่งผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพมากกว่าประเทศไทย ประมาณ 2.2 ล้านลิตรต่อวัน

เนื่องจากจีนนั้นมีการนำเข้ามันเส้นจากไทยเรา แล้วนำมาผลิตเป็นเอทานอลในการใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวภาพ โดยเฉพาะในมณฑลกวางสี และมณฑลกวางตุ้ง จนทำให้จีนมีการผลิตเอทานอลสูงมากถึง 6 ล้านลิตรต่อวัน

จากการส่งเสริมและพัฒนาการใช้เชื้อเพลิงชีวภาพอย่างจริงจังในประเทศไทย ส่งผลให้ยอดการใช้และปริมาณการผลิตเอทานอลสูงขึ้นเรื่อยๆ โดยที่ปริมาณการผลิตเอทานอลได้เพิ่มขึ้นมาอยู่ที่ 1.2 ล้านลิตรต่อวัน และคาดว่าภายในปี พ.ศ. 2565 ประเทศ

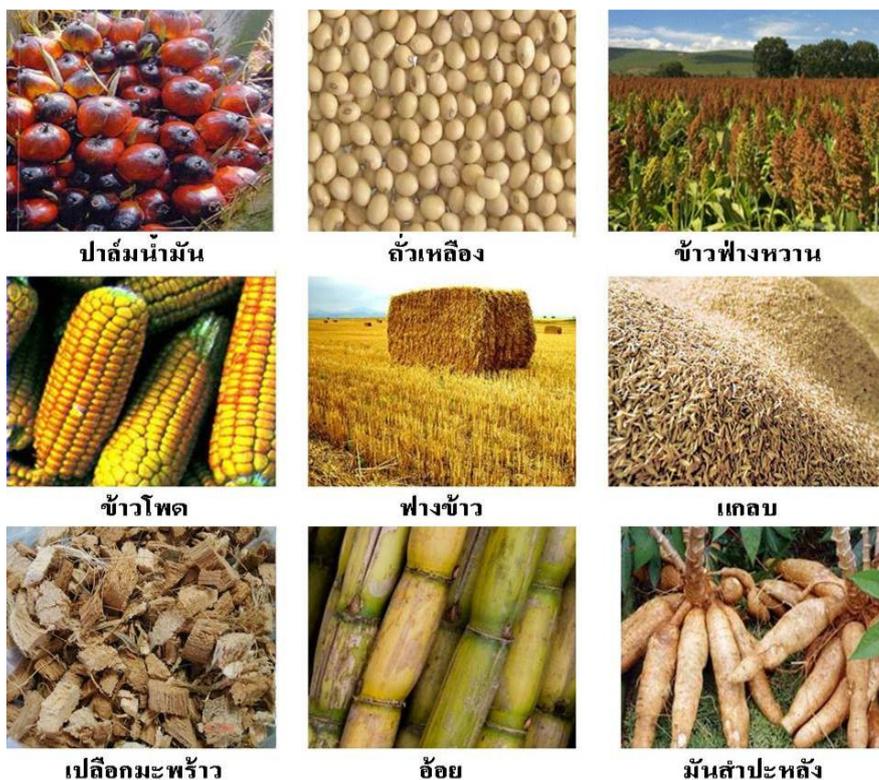
ไทยจึงมีการวางแผนที่จะผลิตเอทานอลให้ได้ 9 ล้านลิตรต่อวัน ซึ่งหากสามารถผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพดังกล่าวได้ตามแผนจริง จะทำให้ไทยขยับการจัดอันดับประเทศผู้ผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพขึ้นไปอยู่ที่อันดับที่ 5 ของโลก และนั่นหมายถึงประเทศไทยจะกลายเป็นผู้นำในการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพของภาคพื้นเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ โดยจะนำหน้าผู้ผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพหน้าใหม่ อย่างมาเลเซีย ได้ในอนาคต

ปัจจุบันเป็นที่ทราบกันดีว่า การผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพของโลก อาทิ ไบโอดีเซล ไบโอดีเซล และไบโอแก๊ส เป็นต้น มีศูนย์กลางการผลิตที่สำคัญอยู่ในทวีปยุโรป แต่ในอนาคตคาดว่าจะมีการย้ายฐานการผลิตจากทวีปยุโรปมาสู่ทวีปเอเชีย เนื่องจากการใช้เชื้อเพลิงชีวภาพนั้นสูงขึ้นเรื่อย ๆ ประกอบกับในทวีปเอเชียเองมีพื้นที่ในการเกษตรกรรมมากกว่าทวีปยุโรป จึงมีวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพจำนวนมาก ทั้ง อ้อย มันสำปะหลัง ปาล์ม น้ำมัน ถั่วเหลือง เป็นต้น ขณะเดียวกันประเทศไทยเองก็ได้ดำเนินการพัฒนาและเร่งวิจัยหาพืชพลังงานที่ไม่เกี่ยวข้องกับพืชที่มนุษย์บริโภคมาผลิตเป็นพลังงาน ได้แก่ ข้าวฟ่างหวาน สาคูดำ นอกจากนี้ ยังมีการขยายพื้นที่ในการเพาะปลูก โดยปลูกปาล์ม น้ำมัน ให้มากขึ้นและเพิ่มผลผลิตปาล์ม น้ำมัน ต่อไร่ให้ได้ผลผลิตสูงขึ้นโดยเฉพาะในพื้นที่ภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือที่มีศักยภาพเพียงพอในการปลูก

การที่ประเทศไทยจะก้าวขึ้นไปเป็นประเทศชั้นนำในการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพนั้น มีความเป็นไปได้สูงมาก เนื่องมาจากประเทศไทยเป็นประเทศ

เกษตรกรรม มีผลผลิตทางการเกษตรจำนวนมาก จึงมีวัตถุดิบในการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพที่สูงกว่าในหลายประเทศ ดังนั้นประเทศไทยเราน่าจะนำข้อได้เปรียบนี้มาผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพให้ได้ประสิทธิภาพมากที่สุด เช่น ในส่วนของการผลิตไบโอดีเซล ปัจจุบันประเทศไทยมีการใช้วัตถุดิบหลัก ได้แก่ อ้อยและมันสำปะหลัง ซึ่งมีผลผลิตจากพืชทั้งสองประมาณ 100 ล้านตันต่อปี และหากสามารถเพิ่มผลผลิตจากพืชทั้งสองชนิดนี้ได้ก็อาจจะเพิ่มปริมาณกำลังการผลิตไบโอดีเซลได้อีกจำนวนมาก ดังนั้นการหาวิธีการหรือกระบวนการในการผลิตไบโอดีเซลอีกวิธีหนึ่งที่น่าจะนำมาใช้ในการเพิ่มการผลิต กล่าวคือ การนำเซลลูโลสจากพืชมาผลิตไบโอดีเซล ที่เรียกกันว่าเซลลูโลซิกเอทานอล (cellulosic ethanol) ซึ่งหลายประเทศในยุโรปมีการใช้กระบวนการดังกล่าวนี้กันอย่างแพร่หลาย

จากข้อมูลทางสถิติจากสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรปี พ.ศ. 2552 ผลผลิตทางเกษตรของประเทศไทย อย่างเช่น อ้อยและมันสำปะหลัง พบว่า มีส่วนประกอบหลักเป็นเซลลูโลสที่สามารถนำมาผลิตเซลลูโลซิกเอทานอลได้ ถ้าคิดรวมกับเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจากพืชเกษตรกรรมชนิดอื่น ๆ เช่น ข้าว ข้าวโพด ถั่วเหลือง มะพร้าว ปาล์ม น้ำมัน ฯลฯ (รูปที่ 1) จึงมีเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นจำนวนมากในแต่ละปี ดังนั้นการที่ประเทศไทยจะเพิ่มการผลิตไบโอดีเซลจึงจำเป็นต้องมีการสนับสนุนการผลิตเอทานอลจากเซลลูโลสของพืช เพื่อเพิ่มการผลิตไบโอดีเซลในประเทศไทยอย่างจริงจังในอนาคต

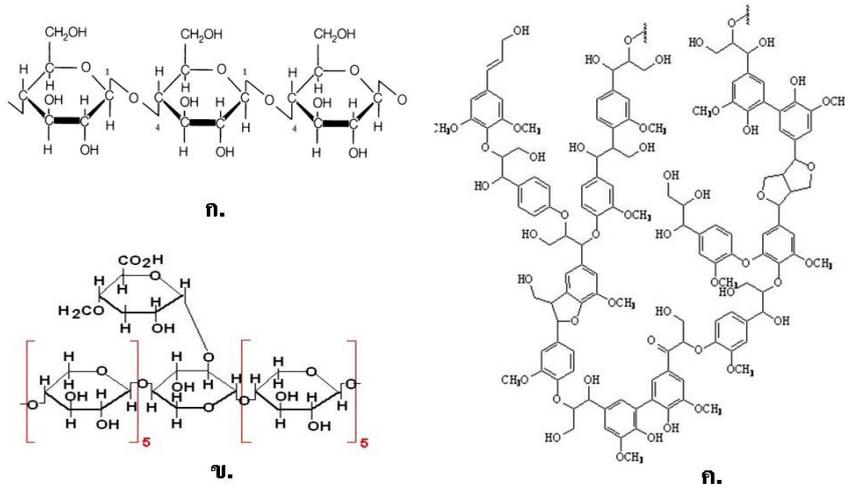


รูปที่ 1 แสดงวัสดุกลไกโนเซลลูโลสในประเทศไทยที่ใช้ในการผลิตเอทานอล (ที่มา: www.thailandindustry.com)

2. กระบวนการเซลลูโลซิเคชันเอทานอล (cellulosic ethanol process)

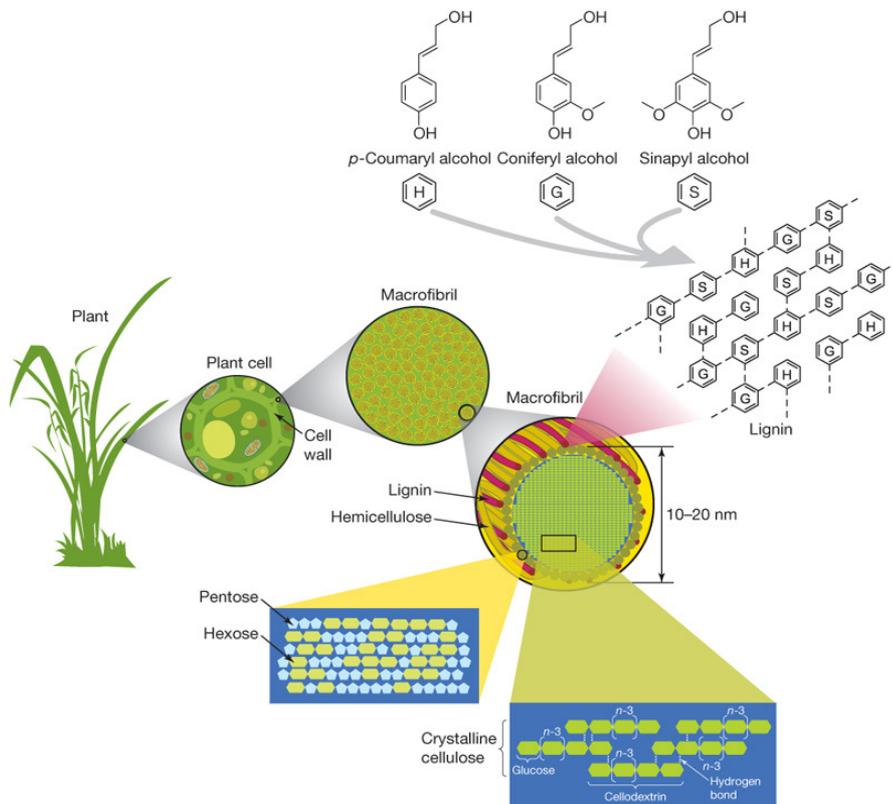
กระบวนการเซลลูโลซิเคชันเอทานอลหรือเอทานอลที่ผลิตจากเซลลูโลส เป็นเอทานอลที่ผลิตได้จากวัตถุดิบหลักประเภทฟางข้าว กากอ้อย ชังข้าวโพด เปลือกไม้ และเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร (อรพิมพ์, 2553) วัตถุดิบดังกล่าวประกอบไปด้วยลิกนิน เฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลส (รูปที่ 2) และเรียกวัตถุดิบประเภทนี้ว่า “วัสดุกลไกโนเซลลูโลส” ซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ประเภทคาร์โบไฮเดรตที่เป็น

ส่วนประกอบสำคัญของเซลล์พืช (รูปที่ 3) ซึ่งเกิดขึ้นจากหน่วยย่อยของน้ำตาลกลูโคสเชื่อมต่อกันเป็นสายยาวหรือพอลิเมอร์ของน้ำตาลกลูโคส เอทานอลที่ผลิตจากเซลลูโลสจึงมีคุณสมบัติและลักษณะทางเคมีเช่นเดียวกับเอทานอลที่ผลิตจากวัตถุดิบประเภทน้ำตาลและแป้งที่ได้จากอ้อยหรือมันสำปะหลัง ซึ่งกระบวนการผลิตเซลลูโลซิเคชันเอทานอล สามารถสรุปขั้นตอนของการผลิตจากพืชชีวมวล ดังมีรายละเอียดในรูปที่ 4



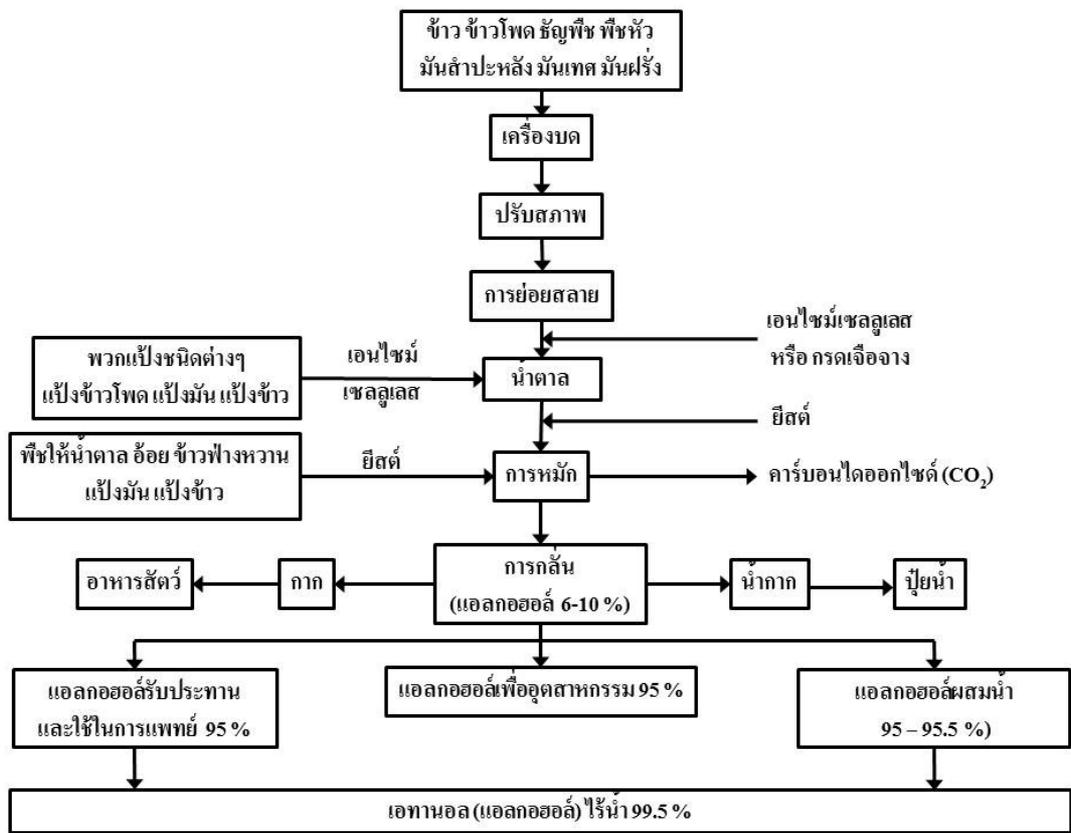
รูปที่ 2 แสดงโครงสร้างทางเคมี ก. เซลลูโลส ข. ตัวอย่างเฮมิเซลลูโลส ค. ลิกนิน
(ที่มา: <http://www.foodnetworksolution.com/vocab/wordcap/cellulose>,

<http://en.wikipedia.org/wiki/File:Hemicellulose.png>, <http://2008.igem.org/Team:Wisconsin/Project>)



รูปที่ 3 แสดงโครงสร้างภายในผนังเซลล์ของพืช

(ที่มา: http://www.nature.com/nature/journal/v454/n7206/fig_tab/nature07190_F2.html)



รูปที่ 4 แสดงกระบวนการผลิตเซลลูโลสิกเอทานอลจากพืชชีวมวลแบบครบวงจร

(ที่มา: <http://gotoknow.org/file/sangpet/view/379101>)

2.1 การปรับสภาพเบื้องต้น (pretreatment)

กระบวนการปรับสภาพเบื้องต้น (pretreatment) เป็นกระบวนการกำจัดสารประกอบจำพวกลิกนินที่ห่อหุ้มเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลสออกไป (Ververis et al., 2007) เนื่องจากสารประกอบเหล่านี้จะทำให้มีผลต่อขั้นตอนกระบวนการย่อยสลาย ซึ่งถ้าไม่ทำการกำจัดลิกนินออกก็จะทำให้การย่อยสลายนั้นทำได้ยาก หรืออาจทำให้เกิดสารอนุพันธ์ที่อาจมีผลต่อกระบวนการผลิตได้ (Mussatto et al., 2008) โดยวิธีการปรับสภาพเบื้องต้นนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 4 วิธี (ประเวทย์ และคณะ, 2551) ดังนี้

2.1.1 การปรับสภาพด้วยวิธีทางกายภาพ (physical pretreatment)

เป็นการลดขนาดของวัตถุดิบ และทำให้เส้นใยเซลลูโลสแตกออก เพื่อเพิ่มพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาให้มากขึ้น เช่น การบด และการใช้ความร้อน เป็นต้น

2.1.2 การปรับสภาพด้วยวิธีทางเคมี (Chemical pretreatment)

จะใช้สารละลายกรดเพื่อเพิ่มความสามารถในการย่อยสลายเฮมิเซลลูโลส เพราะเฮมิเซลลูโลสสามารถย่อยสลายในสารละลายกรดได้ดีกว่าเซลลูโลส

หรือใช้สารละลายเบสเพื่อเพิ่มปริมาณการละลายของ
เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน

2.1.3 การปรับสภาพด้วยวิธีทางเคมี-ฟิสิกส์ (physico-chemical pretreatment)

เป็นการใช้วิธีทางกายภาพร่วมกับการใช้
สารเคมี เช่น การใช้สารละลายเบสเจือจางและความ
ร้อนภายใต้ความดันสูงในการปรับสภาพ ซึ่ง
ประสิทธิภาพการย่อยสลายนั้น ขึ้นอยู่กับความเข้มข้น
ของสารละลายเบสและความร้อนที่เพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ แต่
เมื่อใช้ความร้อนภายใต้สภาวะความดันสูงเพียงอย่าง
เดียว พบว่า อัตราการย่อยสลายลดลง เมื่อความ
ร้อนเพิ่มขึ้น เนื่องจากการแตกตัวของน้ำตาลที่เกิดขึ้น
เปลี่ยนเป็นสารประเภทเฟอร์ฟูรัล ฟอรัลดีไฮด์ หรือ
กรดฟอร์มิก เป็นต้น ซึ่งเป็นตัวขัดขวางขั้นตอนการย่อย
สลาย

ชนิดของสารละลายเบสเจือจางที่นิยมใช้กัน
เช่น

- โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เป็นสารเคมีที่
นิยมใช้มากที่สุด สามารถกำจัดลิกนินได้ดี เนื่องจาก
NaOH เป็นเบสแก่ ซึ่งในบางครั้ง NaOH ไม่ได้กำจัด
ลิกนินออกไปเพียงอย่างเดียว แต่อาจทำลายเฮมิ-
เซลลูโลสและเซลลูโลสบางส่วนออกไปด้วย ดังนั้นการ
ใช้ NaOH จึงจำเป็นต้องใช้อุณหภูมิและเวลาที่
เหมาะสมกับพืชชนิดนั้น ๆ ผลผลิตที่ได้จึงจะมี
ประสิทธิภาพมากที่สุด (Wang et al., 2010)

- แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (NH₄OH) เป็น
สารเคมีที่นิยมใช้ไม่น้อยไปกว่า NaOH แต่เนื่องจาก
NH₄OH เป็นเบสอ่อน จึงต้องใช้เวลาในการกำจัดลิกนิน
นานกว่าเล็กน้อย แต่ปัญหาที่พบจากการใช้ NH₄OH
คือ การกำจัดลิกนินออกไม่หมด และอาจมีกลิ่นของ
แก๊สแอมโมเนียที่เกิดจากกระบวนการย่อยสลายลิกนิน
(Gupta and Lee, 2010)

- โซเดียมซัลไฟด์ (Na₂S) เป็นสารเคมีที่นิยม
ใช้น้อยที่สุด แต่เป็นสารที่กำจัดลิกนินได้ดีที่สุด โดยที่
Na₂S จะมีความจำเพาะเจาะจงกับลิกนินเท่านั้น โดย
จะไม่มีผลต่อเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลส เหตุผลที่นิยม
ใช้ Na₂S ค่อนข้างน้อย ก็อาจเนื่องจากกลิ่นของแก๊ส
ไซเนาที่เกิดจากกระบวนการย่อยสลายลิกนิน แต่
อย่างไรก็ตาม Na₂S ยังคงใช้ในระดับอุตสาหกรรมที่
จำเป็นต้องกำจัดลิกนินออกเท่านั้น เช่น อุตสาหกรรม
ผลิตเยื่อ/กระดาษในหลายบริษัท เป็นต้น

อย่างไรก็ตาม ในการเลือกใช้สารเคมีดังกล่าว
ข้างต้น ขึ้นอยู่กับความเหมาะสมของพืชแต่ละชนิดที่
นำมาใช้ โดยปัจจัยในการเลือกใช้สารเคมีอาจจะเลือก
จากความแข็งแรงของเนื้อไม้และคุณภาพในการแยกลิกนิน
ดังนั้นกระบวนการปรับสภาพตัวอย่าง จึงเป็นอีกปัจจัย
หนึ่งที่สำคัญในการผลิตเซลลูโลสเอทานอล ทั้งในด้าน
คุณภาพวิเคราะห์และปริมาณวิเคราะห์

2.1.4 การปรับสภาพด้วยวิธีทางชีวภาพ (Biological pretreatment)

เป็นการใช้เอนไซม์เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างที่
ซับซ้อนของเซลลูโลสให้อยู่ในรูปโซ่ตรงและช่วยลด
ความเป็นผลึกของเซลลูโลส ซึ่งวิธีการนี้เหมาะสำหรับ
ขั้นตอนการย่อยสลายด้วยเอนไซม์

2.2 การย่อยสลาย (hydrolysis)

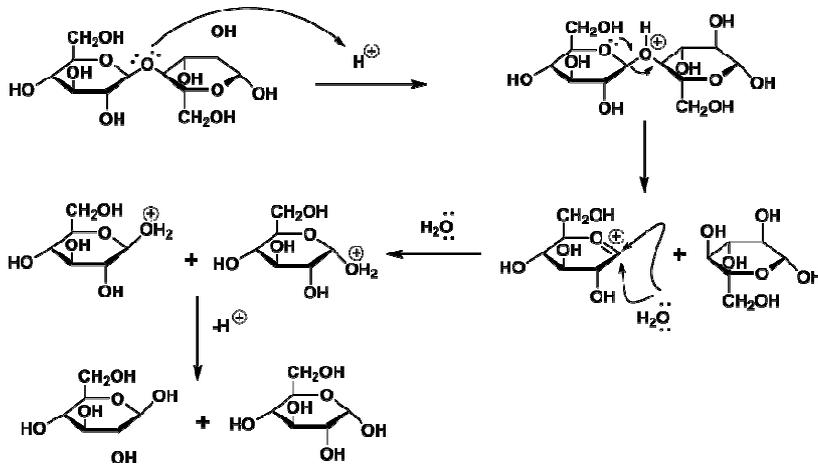
การย่อยสลาย คือการย่อยสลายเซลลูโลสให้
กลายเป็นน้ำตาลกลูโคส และการย่อยสลาย
เฮมิเซลลูโลสซึ่งเป็นโคพอลิเมอร์ของน้ำตาลคาร์บอน 5
และ 6 อะตอม จะได้น้ำตาลไซโลส แมนโนส อะราบิ-
โนส และกลูโคส ขึ้นอยู่กับชนิดของพืช (Bosch et al.,
2010) ซึ่งการย่อยสลายจะทำให้สายพอลิเมอร์ทั้ง
เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสถูกทำให้สั้นลงกลายเป็น
น้ำตาลอิสระก่อนที่จะนำไปหมักเป็นเอทานอล ซึ่งใน

การย่อยสลาย มี 2 กระบวนการหลักๆ ได้แก่ การเกิดปฏิกิริยาทางเคมีและการเกิดปฏิกิริยาด้วยเอนไซม์

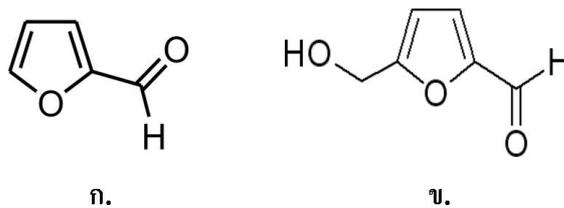
2.2.1 การย่อยสลายด้วยกรด (Acid hydrolysis)

เป็นการใช้กรดเจือจางภายใต้อุณหภูมิและความดันสูง หรืออาจเพิ่มความเข้มข้นของกรดขึ้นเพื่อลดอุณหภูมิและความดันให้ต่ำลง ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายด้วยกรดเจือจาง จะต้องนำไปทำปฏิกิริยาสะเทินก่อนกระบวนการหมัก การย่อยสลาย

ด้วยกรดเจือจางมักนิยมใช้กรดซัลฟิวริก (รูปที่ 5) ซึ่งเป็นกรดที่นิยมใช้กันมาก และมีราคาถูก แต่ในขณะเดียวกัน ก็ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ข้างเคียงหลายชนิด เช่น เฟอร์ฟูรัล ไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรัล (รูปที่ 6) ที่เกิดจากการกำจัดน้ำของน้ำตาล โดยเฉพาะน้ำตาลไซโลสและน้ำตาลคาร์บอน 5 อะตอม ซึ่งในระยะยาวสารเหล่านี้จะมีความเป็นพิษสูง (ประเวทย์ และคณะ, 2552)



รูปที่ 5 แสดงปฏิกิริยาการเกิดการไฮโดรไลซิสด้วยกรด (Iranmahboob et al., 2002)



รูปที่ 6 แสดงโครงสร้างทางเคมี ก. เฟอร์ฟูรัล ข. ไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรัล (ที่มา: <http://en.wikipedia.org/wiki/File:Hydroxymethylfurfural.png>)

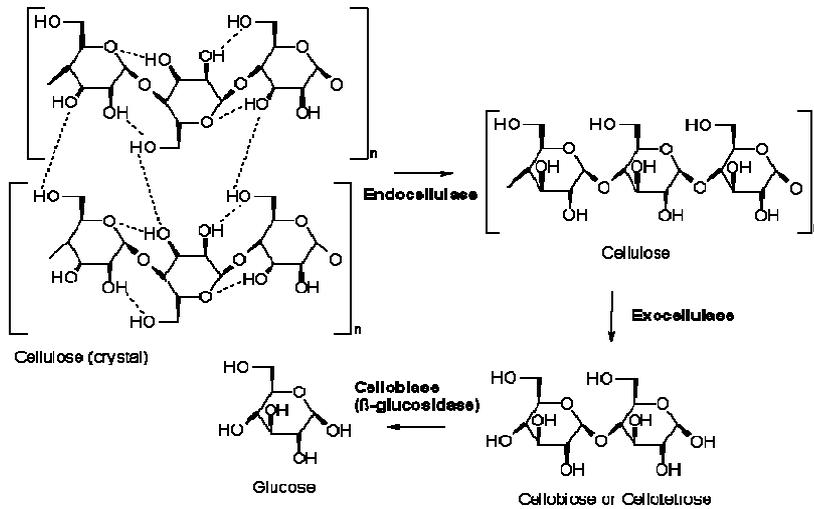
2.2.2 การย่อยสลายด้วยเอนไซม์ (enzyme hydrolysis)

เป็นการใช้เอนไซม์ในการย่อยสลายสายของเซลลูโลสให้กลายเป็นน้ำตาลโดยเอนไซม์เซลลูเลส ปกติแล้วปฏิกิริยานี้จะเกิดภายในอุณหภูมิในร่างกาย ในการ

ย่อยสลายจึงต้องใช้เอนไซม์หลายชนิด สาเหตุที่ต้องใช้หลายชนิด เนื่องจากเอนไซม์นั้นมีความจำเพาะเจาะจง ในการทำปฏิกิริยาสูง เช่น เอนไซม์ endocellulase จะย่อยเซลลูโลสโครงสร้างผลึกให้เป็นเซลลูโลสสายโซ่ ส่วนเอนไซม์ exocellulase จะย่อยเซลลูโลสสายโซ่ให้

เป็นเซลลูโลส และ β -glucosidase จะย่อยเซลลูโลสให้เป็นกลูโคส และขั้นตอนการทำปฏิกิริยาต้องอยู่ภายใต้สภาวะที่ไม่รุนแรง ใช้อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ที่ pH 5 โดยไม่เกิดผลิตภัณฑ์ข้างเคียง และไม่เป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งในอนาคต การย่อย

สลายแบบนี้ น่าจะเป็นวิธีที่นิยมกันมาก เนื่องจากให้ปริมาณน้ำตาลที่สูงจึงเหมาะแก่การหมักเอทานอล ตัวอย่างเช่น Arantes and Saddles (2010) ได้อธิบายกลไกการทำปฏิกิริยาด้วยเอนไซม์ในการย่อยให้เป็นน้ำตาลของเซลลูโลสที่เป็นโครงสร้างผลึก (รูปที่ 7)



รูปที่ 7 แสดงกลไกการทำปฏิกิริยาด้วยเอนไซม์ในการย่อยเซลลูโลสให้เป็นน้ำตาลกลูโคส (ที่มา: <http://en.wikipedia.org/wiki/Cellulase>)

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายด้วยกรดและการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ จะได้น้ำตาลที่มีคาร์บอน 6 อะตอม หรือ น้ำตาลเฮกโซส เช่น กลูโคส และน้ำตาลที่มีอะตอมของคาร์บอน 5 อะตอม หรือน้ำตาลเพนโตส เช่น ไซโลส แมนโนส อะราบิโนส เป็นต้น (Dwivedi et al., 2009)

2.3 การหมัก (fermentation)

การหมักเป็นการย่อยสลายน้ำตาลโดยใช้จุลินทรีย์ (เช่น ยีสต์) ทำให้ได้เป็นเอทานอลขึ้น ปกติแล้ว การหมักทำได้โดยการเตรียมน้ำหมักที่มีความเข้มข้นของน้ำตาลที่ยีสต์สามารถย่อยได้ร้อยละ 14-18 และปรับ pH ให้เหมาะสมกับการเจริญของยีสต์ ประมาณ 4.5-5.0 เพื่อป้องกันการเจริญของจุลินทรีย์ชนิดอื่นๆ จากนั้นเติมเชื้อยีสต์ร้อยละ 5-8 โดยปริมาตร

ลงไป แล้วหมักในสภาพจำกัดอากาศที่อุณหภูมิ 25-35 องศาเซลเซียส ประมาณ 30-72 ชั่วโมง สุดท้ายจะได้รับความเข้มข้นของเอทานอล ร้อยละ 6-10 ต่อน้ำหนักของสารตั้งต้น

จุลินทรีย์ที่นิยมใช้ในกระบวนการหมักในปัจจุบันได้แก่ เชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ซึ่งจุดเด่นของ *S. cerevisiae* ก็คือสามารถเจริญได้ดีในช่วงอุณหภูมิกว้าง 30-40 องศาเซลเซียส และทนอุณหภูมิสูงได้ (ธราพงษ์ และคณะ, 2553) นอกจากนี้ยังได้มีการพัฒนาสายพันธุ์ต่าง ๆ เพื่อให้เหมาะสมกับกระบวนการผลิตเอทานอล ให้มีความทนทานต่อเอทานอลที่มีปริมาณสูงได้ และยังสามารถเจริญได้ดีที่ pH ต่ำ ๆ เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของเชื้อแบคทีเรียอื่น ๆ เช่น Jeffries et al. (2007) ได้ศึกษายีสต์

Pichiasti pitis ในการหมักน้ำตาลไซโลส ซึ่งเป็นน้ำตาลที่ได้จากการย่อยสลายเฮมิเซลลูโลส พบว่าสามารถผลิตเอทานอลได้ถึง 41 กรัม ต่อน้ำตาล 1 ลิตร

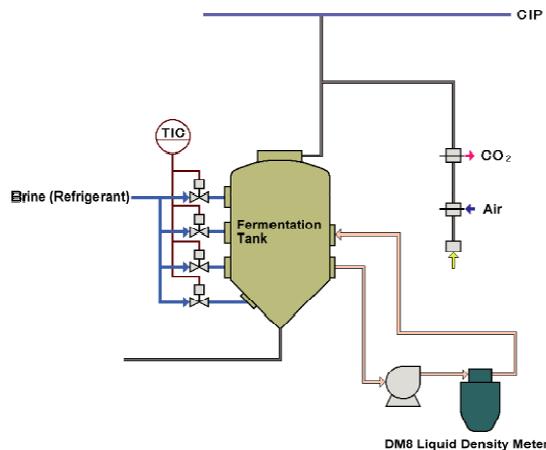
ต่อมา Geddes et al. (2011) ได้ศึกษาแบคทีเรีย *Escherichia coli* ในการผลิตไบโอเอทานอลจากขานอ้อย ผลปรากฏว่าได้ปริมาณเอทานอล 0.21 กรัมต่อปริมาณน้ำหนักขานอ้อย 1 กรัม ส่วนน้ำตาลเพนโตสยังอยู่ในขั้นตอนวิจัย และจากข้อมูลทางงานวิจัย ในปัจจุบัน Sanchez et al. จากประเทศสวีเดนได้มีการพัฒนาเชื้อยีสต์ *S. Cerevisiae* สายพันธุ์ผสมระหว่าง สายพันธุ์ TMB3130 กับ สายพันธุ์ TMB3061 ในการหมักน้ำตาลไซโลส และ

อะราบินอส ในการผลิตเอทานอลได้ ซึ่งน่าจะเป็นจุดเริ่มต้นในการศึกษาวิธีการเพิ่มการผลิตไบโอเอทานอลในอนาคตได้

ปัจจุบันมีเทคโนโลยีการหมัก 2 แบบ ได้แก่

2.3.1 การหมักแบบไม่ต่อเนื่อง (batch fermentation)

ตัวอย่างการหมักแบบไม่ต่อเนื่องที่แสดงในรูปที่ 8 นี้ จะเป็นการผสมหัวเชื้อลงในน้ำหมัก โดยเกิดขึ้นในถังหมักเพียงใบเดียว จนเสร็จสิ้นการหมักภายในเวลา 72 ชั่วโมง โดยการหมักที่นิยมใช้ในปัจจุบันมีดังนี้ (ธราพงษ์ และคณะ, 2553)



รูปที่ 8 แสดงการหมักแบบไม่ต่อเนื่อง (Batch fermentation)

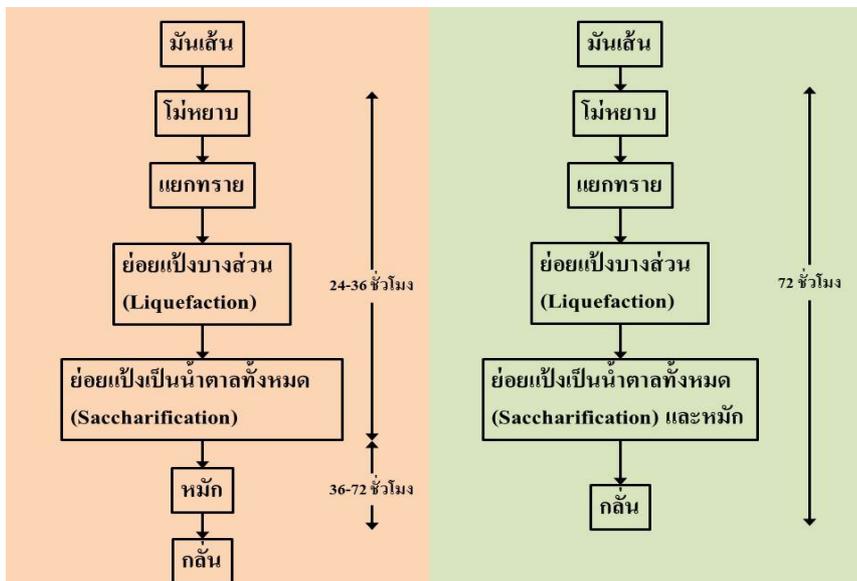
(ที่มา: <http://www.yokogawa.com/iab/appnotes/pop/iab-app-fermentation-pop-en.html>)

- การหมักแบบ CF (conventional fermentation) เริ่มจากการเตรียมวัตถุดิบ โดยการโม่เพื่อลดขนาดของวัตถุดิบ ช่วยในการผสมและการเกิดปฏิกิริยาของเอนไซม์ก่อนการผสมน้ำแป้งที่จะต้องมีความเข้มข้นที่เหมาะสม โดยมีขั้นตอนที่สำคัญกล่าวคือ การให้ความร้อนแก่น้ำแป้ง เพื่อทำให้แป้งสุกหลังจากผ่านการย่อยสลายแป้งครั้งแรกด้วยเอนไซม์

แอลฟา-อะมิเลสแล้ว จึงทำการเติมเอนไซม์กลูโคส-อะมิเลส เพื่อย่อยสลายเป็นน้ำตาลกลูโคส จากนั้นจึงเติมยีสต์ *S. cerevisiae* เพื่อหมักน้ำตาลกลูโคสเป็นเอทานอล ส่วนวิธีการย่อยสลายด้วยกรดเจือจางจะนำน้ำตาลที่ได้จากการย่อยสลายมาเติมเชื้อยีสต์ *S. cerevisiae* ที่ใช้ในการหมักโดยตรง

- การหมักแบบ SSF (simultaneous saccharification and fermentation) โดยรวมขั้นตอนการย่อยสลายครั้งสุดท้าย เพื่อเปลี่ยนเป็นน้ำตาลด้วยเอนไซม์กลูโคส-อะมิเลส พร้อมกับการหมักด้วยเชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* ในขั้นตอนเดียวกัน หลังจากย่อยแป้งครั้งแรกด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะมิเลสแล้ว จะเติมเอนไซม์กลูโคส-อะมิเลสพร้อมเชื้อยีสต์ ทำให้การย่อยสลายแป้งครั้งสุดท้ายด้วยเอนไซม์เกิดขึ้นพร้อมกับการหมักด้วยเชื้อยีสต์ในขั้นตอนเดียวกัน ซึ่งจะช่วยลดระยะเวลาและประหยัดพลังงาน

ของกระบวนการผลิต เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตเอทานอลจากวัตถุดิบที่เป็นแป้ง (ภิญญาภรณ์, 2550) ในรูปที่ 9 เป็นการเปรียบเทียบกระบวนการผลิตเอทานอลจากมันเส้นด้วยการหมักแบบ CF และแบบSSF ซึ่งพบว่า การหมักแบบ CF นั้นใช้เวลาในการผลิตทั้งหมด ตั้งแต่เริ่มจนถึงสิ้นสุดการผลิต สูงถึง 108 ชั่วโมง ในขณะที่การหมักแบบ SSF นั้นจะใช้เวลาในการผลิตทั้งหมดเพียง 72 ชั่วโมง จึงประหยัดเวลา และใช้พลังงานน้อยกว่า ทำให้การหมักแบบ SSF ได้รับความนิยมสูงในปัจจุบัน



รูปที่ 9 แสดงตัวอย่างกระบวนการผลิตเอทานอลจากมันเส้นด้วยกระบวนการหมักแบบไม่ต่อเนื่อง (ก) แบบ conventional fermentation (CF) และ (ข) แบบ simultaneous saccharification and fermentation (SSF) (ที่มา: http://www.rdi.ku.ac.th/kasetfair49/Plant/p_05/p_05.htm)

ข้อดีของเทคโนโลยีการหมักแบบไม่ต่อเนื่อง นั้น คือ ค่าติดตั้งอุปกรณ์ถูกกว่า ไม่จำเป็นต้องฆ่าเชื้อในถังหมักอย่างสมบูรณ์ ไม่ต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญในการควบคุมเครื่องมือระหว่างทำงาน การลงทุนต่ำ ง่ายต่อการเก็บรักษาวัตถุดิบ และสามารถใช้กับการหมักที่ต้องการผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกันได้ ตลอดจนโอกาสที่การหมักจะติดเชื้อมากขึ้นด้วย ส่วนข้อเสียก็คือ ความถี่

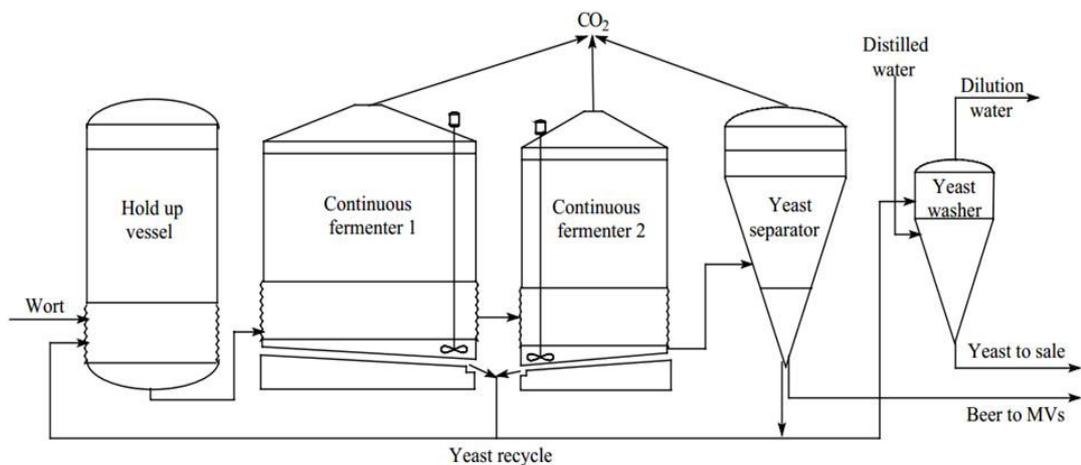
ในการฆ่าเชื้อในถังจะมีผลเสียต่อเครื่องมือที่ใช้วัดค่าใช้จ่ายในการเตรียมหัวเชื้อสูง และมีโอกาสเสี่ยงสูงในการกลายพันธุ์ของเชื้อที่ใช้หมักได้

2.3.2 การหมักแบบต่อเนื่อง (Continuous Fermentation)

การหมักประเภทนี้นิยมใช้ในกระบวนการผลิตเบียร์ ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 10 ซึ่งเป็นการผสม

หัวเชื้อน้ำหมักในถังใบแรกและปล่อยให้มันน้ำไหลของน้ำหมักไปสู่ถังที่ 2 ตามลำดับ จนกระทั่งได้ความเข้มข้นของเอทานอลที่ต้องการน้ำหมักจะต้องผ่านเครื่องแยกเซลล์ สามารถนำเซลล์ยีสต์นั้นมาล้างด้วยกรดได้ และบางส่วนนำกลับเข้าสู่ถังหมักถังแรกกับน้ำหมักใหม่ และเกิดกระบวนการหมักต่อไปเรื่อยๆ โดยไม่มีการพักระบบ (ธราพงษ์ และคณะ, 2553) การหมักแบบนี้มีข้อดีคือ ใช้ผู้ดูแลน้อยในการควบคุมผลิตภัณฑ์ โอกาส

ติดเชื้อในระหว่างการหมักต่ำ และป้องกันความเสียหายของอุปกรณ์เครื่องมือวัดภายในถังในระหว่างการฆ่าเชื้อน้อยกว่า ส่วนข้อเสียคือ วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการหมักต้องเป็นแบบเดียวกันตลอดการหมัก และมีปัญหาในการรักษาอัตราการหมักสูงๆ ส่วนการใช้เครื่องควบคุมแทนคนนั้น มีค่าใช้จ่ายในการทำงานสูงกว่า ตลอดจนอุปกรณ์ในการแยกของแข็งในระหว่างการหมัก มักมีราคาสูงอีกด้วย



รูปที่ 10 แสดงตัวอย่างการผลิตเบียร์ด้วยกระบวนการหมักแบบต่อเนื่อง (continuous fermentation)

(ที่มา: <http://nzic.org.nz/ChemProcesses/food/6A.pdf>)

ในปัจจุบัน การหมักเพื่อผลิตเอทานอลมักใช้น้ำตาลกลูโคสแทบทั้งสิ้น แต่สำหรับน้ำตาลเพนโตสยังอยู่ในระหว่างขั้นตอนการวิจัยและพัฒนา เนื่องจากเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้ในการหมักน้ำตาลเพนโตส ยังผลิตเอทานอลได้ในปริมาณน้อยและยังไม่คุ้มต่อการลงทุนในระดับอุตสาหกรรม หากสามารถพัฒนาเชื้อจุลินทรีย์ในการผลิตเอทานอลจากน้ำตาลเพนโตส หรือการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการย่อยสลายเซลลูโลสให้ได้ปริมาณน้ำตาลเพนโตสที่สูงขึ้นได้นั้น จะเป็นการเพิ่มปริมาณการผลิตอีกทางหนึ่งนั้น หมายถึงจะสามารถเพิ่มปริมาณการผลิตเอทานอลให้สูงขึ้นได้

2.4 การกลั่น (distillation) และการกำจัดน้ำ (dehydration)

เป็นขั้นตอนการแยกเอทานอลออกจากน้ำหมักและน้ำสา โดยการกลั่นซึ่งให้ผลผลิตเอทานอลได้ร้อยละ 8-12 โดยปริมาตร และสามารถทำให้ได้เอทานอลบริสุทธิ์มากขึ้นด้วยการกลั่นแบบลำดับส่วน ซึ่งมีความบริสุทธิ์ถึงร้อยละ 95.6 โดยปริมาตร แต่การนำไปใช้เพื่อเป็นเชื้อเพลิงนั้นจะต้องทำให้เอทานอลมีความบริสุทธิ์ไม่ต่ำกว่าร้อยละ 99.5 โดยปริมาตร ซึ่งจำเป็นต้องใช้เทคนิคและเทคโนโลยีในการกลั่นเพื่อแยกน้ำให้ได้เอทานอลบริสุทธิ์ โดยวิธีที่นิยมใช้มีทั้งหมด 3 วิธี (ประเวทย์ และคณะ, 2552) ได้แก่

2.4.1 การดูดซับด้วย molecular sieve

molecular sieve นั้นเป็นสารประเภทซีโอไลต์ที่สังเคราะห์ขึ้น มีคุณสมบัติพิเศษที่สามารถดูดน้ำได้ในสภาวะที่เย็นและคายน้ำออกเมื่อได้รับความร้อน หลักการนำไปใช้โดยการนำเอทานอลที่บริสุทธิ์ในช่วงร้อยละ 92-96 ผ่าน molecular sieve โดยที่ molecular sieve จะยอมให้โมเลกุลของน้ำผ่านเข้าไปในโมเลกุล ขณะที่โมเลกุลของเอทานอลที่มีขนาดใหญ่กว่าจะไม่สามารถเข้าไปได้ เอทานอลจึงผ่าน molecular sieve ออกมา ซึ่งทำให้เอทานอลมีความบริสุทธิ์ถึงร้อยละ 99.8-99.9 ข้อดีของเทคโนโลยีที่มีการใช้ molecular sieve นี้จะเป็นเทคโนโลยีที่ง่าย ใช้พลังงานต่ำ และไม่จำเป็นต้องใช้สารเคมีชนิดอื่น ๆ แต่ก็มีข้อเสียได้แก่ อัตราการสึกกร่อนหรือเกิดการอุดตันของ molecular sieve นั้นค่อนข้างบ่อยครั้ง จึงจำเป็นต้องเปลี่ยนใหม่ และเสียค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างสูง

2.4.2 การกลั่นแบบอะซีโอโทรป (azeotropic distillation)

ตามหลักการการกลั่นเอทานอลเพื่อให้มีความบริสุทธิ์สูงจะพบปัญหาของการแยกน้ำและเอทานอลออกจากกันไม่ได้ จุดนี้เรียกว่า จุดอะซีโอโทรป ดังนั้นการกลั่นจึงจำเป็นต้องเติมสารเคมีตัวที่ 3 ลงไป เพื่อให้ให้น้ำแยกออกจากเอทานอลได้ดียิ่งขึ้น สารประกอบนี้เรียกว่า เอนเทรนเนอร์ (entrainer) ได้แก่ ไซโคล-เฮกเซน เบนซีน โทลูอีน อีเทอร์ หรือคีโตน วิธีนี้นิยมใช้กันมาก ถึงแม้จะมีข้อเสีย เช่น ต้องใช้พลังงานในการกลั่นจำนวนมาก เพื่อให้ได้เอทานอลที่บริสุทธิ์ ส่วนสารที่ใช้เป็นเอนเทรนเนอร์นั้นมีความเป็นพิษสูงและบางชนิดยังเป็นสารก่อมะเร็งอีกด้วย

2.4.3 เทคโนโลยีแผ่นเยื่อบาง (membrane technology)

เทคโนโลยีนี้ นอกจากจะเป็นเทคโนโลยีใหม่ล่าสุดแล้ว ยังง่ายและใช้พลังงานได้อย่างมีประสิทธิภาพในการแยกสารละลายผสมผ่านแผ่นเยื่อบาง โดยใช้เทคนิคการซึมของน้ำผ่านแผ่นเยื่อบางในรูปของไอน้ำ ด้วยแรงดึงดูดจากภายนอกที่มีความดันไอต่ำกว่าสารที่ผ่านแผ่นเยื่อบาง เมื่อทำการลดอุณหภูมิลงเพื่อให้ไอน้ำกลั่นตัวเป็นของเหลวออกมาที่เรียกว่า เพอร์มิเอชัน (permeation) การแยกเกิดขึ้นได้เนื่องจากองค์ประกอบของสารในสารผสมมีความเป็นขั้วต่างกัน เช่นในกรณีของน้ำกับเอทานอล โดยน้ำมีความเป็นขั้วที่สูงกว่าเอทานอล ความสามารถในการแพร่ผ่านแผ่นเยื่อบางของน้ำจึงมีค่าสูงกว่า ขณะที่มีการซึมผ่านของน้ำ ความดันไอที่ต่ำจากภายนอกจะช่วยดึงน้ำออกมาในรูปของไอน้ำ

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพและพลังงานที่ต้องใช้ระหว่างการกลั่นแบบอะซีโอโทรปและเทคโนโลยีแผ่นเยื่อบางแล้ว พบว่า เทคโนโลยีแผ่นเยื่อบางใช้พลังงานต่ำกว่า เนื่องจากความสามารถในการแยกโดยใช้แผ่นเยื่อบาง ขึ้นอยู่กับอันตรกิริยาระหว่างสารกับแผ่นเยื่อบาง ไม่ถูกจำกัดด้วยความสมดุลทางเทอร์โมไดนามิกส์

3. สรุป

เป็นที่ทราบกันดีแล้วว่า เชื้อเพลิงชีวภาพเป็นพลังงานทางเลือกที่มีความสำคัญอย่างมากในปัจจุบันและอนาคต โดยเฉพาะเอทานอล ซึ่งสามารถผลิตได้จากวัตถุดิบหลายประเภท ไม่ว่าจะเป็นแป้ง น้ำตาล และเซลลูโลสที่ได้จากพืช ในส่วนของประเทศไทยได้มีการนำชีวมวล อย่างเช่น ฟางข้าว ชังข้าวโพด มันสำปะหลัง น้ำอ้อย และกากน้ำตาลใช้ในการผลิตเอทานอลกันแล้ว เพียงแต่ปริมาณการผลิตยังไม่มากเพียงพอต่อปริมาณการใช้เอทานอลในปัจจุบัน ดังนั้น

การใช้กระบวนการเซลล์ลูโลซิกเอทานอลตามที่กล่าวไป น่าจะสามารถเพิ่มปริมาณกำลังการผลิตไบโอเอทานอลให้มากขึ้น มีความเป็นไปได้สูง เนื่องจากทรัพยากรทางการเกษตรของไทยที่มีจำนวนมากในอนาคต หากกระบวนการเซลล์ลูโลซิกเอทานอลนั้นได้รับการส่งเสริมและสนับสนุนจากทางรัฐบาล โดยมีการเสนอเป็นวาระแห่งชาติ และได้รับความร่วมมือจากหลายหน่วยงานทั้งภาครัฐและเอกชน ในการวิจัยและพัฒนาการผลิตเอทานอลจากเซลล์ลูโลสอย่างครบวงจรและยั่งยืนแล้ว ก็จะทำให้ประเทศไทยที่มีชีวมวลจำนวนมากมหาศาลนั้น มีพลังงานด้านไบโอเอทานอลใช้ได้อย่างเพียงพอต่อความต้องการที่นับวันสูงขึ้น และเป็นส่วนหนึ่งที่ทำให้ประเทศไทยก้าวขึ้นไปเป็นผู้ผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพชั้นนำของโลกได้อย่างแน่นอน และจากการเปรียบเทียบเทคนิคต่าง ๆ ที่ใช้ในการผลิตไบโอเอทานอลตามที่ได้นำเสนอมา จะเห็นได้ว่า แต่ละเทคนิคมีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกัน บางเทคโนโลยีอาจจะมีความลงทุนที่สูงเกินไป อาจจะไม่คุ้มค่ากับการลงทุน แต่อีกปัจจัยหนึ่งที่ต้องพิจารณาในปัจจุบันคือ ความเป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งในบางเทคนิคให้ผลผลิตที่สูงและคุ้มค่า แต่กลับส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมที่รุนแรงเช่นกัน ดังนั้นประเทศไทยที่เป็นประเทศเกษตรกรรม จึงควรพิจารณาเทคโนโลยีที่เหมาะสมและคุ้มค่ากับการลงทุนมากที่สุด ก่อนนำเทคโนโลยีเหล่านี้มาใช้ในการผลิตเซลล์ลูโลซิกเอทานอลภายในประเทศ

กิตติกรรมประกาศ

ปัจจุบันคณะผู้วิจัยกำลังดำเนินการวิจัยการผลิตไบโอเอทานอลจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร จึงใคร่ขอขอบคุณ การสนับสนุนจากโครงการส่งเสริมการวิจัยในระดับอุดมศึกษาและการพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ ของสำนักงานคณะกรรมการการ

อุดมศึกษา ภายใต้คำสั่งเดอริวิจัยน้ำมันเชื้อเพลิงชีวภาพ โครงการ มหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติ มหาวิทยาลัยขอนแก่น รวมทั้งขอขอบคุณศูนย์ความเป็นเลิศด้านนวัตกรรมทางเคมี (center of excellence for innovation in chemistry, PERCH-CIC) สำนักงานคณะกรรมการอุดมศึกษา กระทรวงศึกษาธิการ ที่ให้การสนับสนุนทุนการศึกษาและสารเคมี ในระดับบัณฑิตศึกษา และภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ให้ความอนุเคราะห์ในด้านองค์ความรู้และแหล่งข้อมูล ตลอดจนการเรียบเรียงข้อมูลของบทความ ตลอดจนการดำเนินงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- ธราพงษ์ วิจิตตานต์, นวตล เหล่าศิริพจน์ และประเสริฐ เรียบร้อยเจริญ. (2553). รายงานสถานภาพของงานวิจัยและผลิตเอทานอลไบโอดีเซล ไบโอแก๊ส และน้ำมันชีวภาพในประเทศไทย. สำนักพัฒนาบัณฑิตศึกษาและวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (สบว).
- ประเวศ ดุษฎีมวงศ์, จิรศักดิ์ คงเกียรติขจร, ปิยรัตน์ บุญแสวง และ ธีรภัทร ศรีนรคุตร. (2552). การผลิตเอทานอลจากเซลล์ลูโลส. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ. ภูมิภาคภาคใต้. (2550). เทคโนโลยีต้นแบบกลั่นเอทานอล ด้วย เทคนิค บีเอ็ม ฟอง. จาก : <http://www.thaienv.com>.
- อรพิมพ์ มงคลเคหา. (2553). พลังงานทดแทน ตอนที่ 1. บทความวิชาการโปรแกรมวิชาวิทยาศาสตร์และสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา.
- Arantes, V. and Saddler, J.N. (2010). Access to cellulose limits the efficiency of enzymatic hydrolysis: the role of Amorphogenesis. *Biotechnology for Biofuels* 3: 4-14.

- Astudillo, I.C.P. and Alzate, C.A.C. (2011). Importance of stability study of continuous systems for ethanol production. *Journal of Biotechnology* 151: 43–55.
- Balat, M. and Balat, H. (2009). Recent trends in global production and utilization of bio-ethanol fuel. *Applied Energy* 86: 2273–2282.
- Biatas, W., Szymanowska, D. and Grajek, W. (2010). Fuel ethanol production from granular corn starch using *Saccharomyces cerevisiae* in a long term repeated SSF process with full stillage recycling. *Bioresource Technology* 101: 3126–3131.
- Bosch, P., Wallberg, O., Joelsson, E., Galbe, M. and G. Zacchi. (2010). Impact of dual temperature profile in dilute acid hydrolysis of spruce for ethanol production. *Biotechnology for Biofuels* 3: 15.
- Dwivedi, P., Alavalapati, J.R.R. and Lal, P. (2009). Cellulosic ethanol production in the United States: Conversion technologies, current production status, economics, and emerging developments. *Energy for Sustainable Development* 13: 174–182.
- Erdei, B., Barta, Z., Sipos, B., Reczey, K., Galbe, M. and Zacchi G. (2010). Ethanol production from mixtures of wheat straw and wheat meal. *Biotechnology for Biofuels* 3: 16.
- Ferreira-Leitao, V., Perrone, C.C., Rodrigues, J., Franke, A.P.M., Macrelli, S. and Zacchi, G. (2010). An approach to the utilisation of CO₂ as impregnating agent in steam pretreatment of sugar cane bagasse and leaves for ethanol production. *Biotechnology for Biofuels* 3: 7.
- Geddes, C.C., Mullinnix, M.T., Nieves, I.U., Peterson, J.J., Hoffman, R.W., York, S.W., Yomano, L.P., Miller, E.N., Shanmugam, K.T. and Ingram, L.O. (2011). Simplified process for ethanol production from sugarcane bagasse using hydrolysate-resistant *Escherichia coli* strain MM160. *Bioresource Technology* 102: 2702–2711.
- Govindaswamy, S. and Vane, L.M. (2010). Multi-stage continuous culture fermentation of glucose–xylose mixtures to fuel ethanol using genetically engineered *Saccharomyces cerevisiae* 424A. *Bioresource Technology* 101: 1277–1284.
- Gupta, R. and Lee, Y.Y. (2010). Investigation of biomass degradation mechanism in pretreatment of switchgrass by aqueous ammonia and sodium hydroxide. *Bioresource Technology* 101: 8185–8191.
- Hettinga, W.G., Junginger, H.M., Dekker, S.C., Hoogwijk, M., McAloon, A.J. and Hicks, K.B. (2009). Understanding the reductions in US corn ethanol production costs: An experience curve approach. *Energy Policy* 37: 190–203.
- Iranmahboob, J., Nadim, F. and Monemi, S. (2002). Optimizing acid-hydrolysis: a critical step for production of ethanol from mixed wood chips. *Biomass Bioenergy* 22: 401–404.
- Jeffries, T.W., Grigoriev, I.V., Grimwood, J., Laplaza, J.M., Aerts, A., Salamov, A., Schmutz, J., Lindquist, E., Dehal, P., Shapiro, H., Jin, Y.S., Passoth, V. and Richardson, P.M. (2007). Genome sequence of the lignocellulose-bioconverting and xylose-fermenting yeast *Pichia stipitis*. *Nature Biotechnology* 25(3): 319–326.
- Ma, K., Wakisaka, M., Sakai, K. and Shirai, Y. (2009). Flocculation characteristics of an isolated mutant flocculent *Saccharomyces cerevisiae* strain and its application for fuel ethanol production from kitchen refuse. *Bioresource Technology* 100: 2289–2292.

- Mussatto, S.I., Fernandes, M., Milagres, A.M.F. and Roberto, I.C. (2008). Effect of hemicellulose and lignin on enzymatic hydrolysis of cellulose from brewer's spent grain. *Enzyme and Microbial Technology* 43: 124–129.
- Sanchez, R.G., Hahn-Hägerdal, B. and Gorwa-Grauslund, M.F. (2010). Cross-reactions between engineered xylose and galactose pathways in recombinant *Saccharomyces cerevisiae*. *Biotechnology for Biofuels* 3:19.
- Sanchez, R.G., Karhumaa, K., Fonseca, C., Nogue, V.S., Almeida, J.R.M., Larsson, C.U., Bengtsson, O., Bettiga, M., Hahn-Hägerdal, B. and Gorwa-Grauslund, M.F. (2010). Improved xylose and arabinose utilization by an industrial recombinant *Saccharomyces cerevisiae* strain using evolutionary. *Biotechnology for Biofuels* 3: 13.
- Shen, D.K., Gu, S. and Bridgwater, A.V. (2010). The thermal performance of the polysaccharides extracted from hardwood: Cellulose and hemicelluloses. *Carbohydrate Polymers* 82: 39–45.
- Unrean, P. and Srienc F. (2010). Continuous production of ethanol from hexoses and pentoses using immobilized mixed cultures of *Escherichia coli* strains. *Journal of Biotechnology* 150: 215–223.
- Ververis, C., Georghiou, K., Danielidis, D., Hatzinikolaou, D.G., Santas, P., Santas, R. and Corleti, V. (2007). Cellulose, hemicelluloses, lignin and ash content of some organic materials and their suitability for use as paper pulp supplements. *Bioresource Technology* 98: 296–301.
- Wang, Z., Keshwani, D.R., Redding, A.P. and Cheng J.J. (2010). Sodium hydroxide pretreatment and enzymatic hydrolysis of coastal Bermuda grass. *Bioresource Technology* 101: 3583–3585.
- Wan, J., Wang, Y. and Xiao, Q. (2010). Effects of hemicellulose removal on cellulose fiber structure and recycling characteristics of eucalyptus pulp. *Bioresource Technology* 101: 4577–4583.
- Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D.H. and Zheng, C. (2007). Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel* 86: 1781–1788.

