

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของโครงการ^(1,2)

พลังงานที่เราใช้อยู่ในโลกมาจากแหล่งกำเนิดหลายหลาก อาทิเช่น น้ำมันดิบ ก๊าซธรรมชาติ และถ่านหิน แหล่งพลังงานเหล่านี้ เป็นแหล่งพลังงานที่มีอยู่อย่างจำกัด ตัวอย่างน้ำมันดิบมีการคาดการณ์กันว่าอีก 50 ปี น้ำมันดิบ จะถูกสูบมาใช้จนหมดโลก ก๊าซธรรมชาติใช้ไปได้อีกประมาณ 60 ปี ส่วนถ่านหินประมาณ 220 ปี จึงมีการคิดค้นแหล่งพลังงานทดแทนขึ้นมาใช้ อาทิเช่น พลังน้ำ พลังลม พลังจากแสงอาทิตย์ และพลังงานนิวเคลียร์ แต่แหล่งพลังงานเหล่านี้จะมีขอบในการใช้งาน จำกัด และมีค่าใช้จ่ายสูงมากเมื่อเทียบกับแหล่งพลังงานเดิมที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน ดังนั้นจึงได้มีการพิจารณาทดลองใช้พลังงานจากพืชซึ่งมีราคาถูกกว่าแต่ปริมาณการผลิตจากกรรมวิธีที่ใช้อยู่ยังไม่สามารถทดแทนปริมาณที่ต้องการใช้ได้ อาทิเช่น ก๊าซชีวภาพ ไบโอดีเซล ถ่านที่ได้จากฟางข้าวหรือเศษหญ้านำมาเข้าเครื่องอัด และเอทานอล ในที่นี้จะกล่าวถึงเอทานอล แหล่งพลังงานที่มีการวิจัยในประเทศไทยมาเป็นระยะเวลาไม่ต่ำกว่า 10 ปี รวมทั้งมีหลายประเทศใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนน้ำมันเบนซินเกือบร้อยละ 100 เช่น บราซิล เชื้อเพลิงเอทานอล เป็นเชื้อเพลิงที่สะอาด ขณะผลิตก็แทบไม่มีของเสีย ไม่เป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมและเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตผลทางการเกษตร ซึ่งประเทศไทยเหมาะสมอย่างยิ่ง ในขณะนี้สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรมได้ทบทวนมาตรฐานอุตสาหกรรมเอทานอล มอก.640-2545 เพื่อรองรับกับเชื้อเพลิงเอทานอลที่จะมีในอนาคต โดยแบ่งเอทานอลเป็น 2 ชนิด คือชนิดร้อยละ 95 และชนิดร้อยละ 99.5 โดยน้ำหนัก ซึ่งข้อกำหนดดังกล่าวจะช่วยในการผลิตเอทานอลได้ตรงตามวัตถุประสงค์ในการใช้งาน

กากชีวมวลที่เป็นเซลลูโลสเป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตเอทานอลที่น่าสนใจมาก เนื่องจากกากชีวมวลมีปริมาณมาก หาได้ง่าย มีราคาถูก นอกจากนั้น ยังเป็นกากหรือวัสดุเหลือใช้ในการเกษตร การใช้กากชีวมวลประเภทนี้ทำให้สามารถนำส่วนที่เหลือทิ้งมาใช้เป็นพลังงาน โครงสร้างของกากชีวมวลที่เป็น Lignocelluloses ที่นำมาใช้ส่วนใหญ่จะประกอบด้วยสารหลัก 3 ชนิด คือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ในวัสดุชีวมวลแต่ละประเภทจะมีสัดส่วนของสารเหล่านี้ที่แตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับชนิดของพืช และสภาวะที่พืชเติบโต เช่น ภูมิอากาศ ความอุดมสมบูรณ์ เป็นต้น

ฟางข้าวเป็นวัตถุดิบประเภท Lignocellulosic ซึ่งมีองค์ประกอบหลักคือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน โดยเซลลูโลสเป็นสารพอลิเมอร์ของน้ำตาลกลูโคสคล้ายแป้ง แต่พันธะของ

โมโนเมอร์จะเป็นเบต้าแทนที่จะเป็นอัลฟาเหมือนแป้ง พันธะเบต้านี้จะทำให้เซลลูโลสมีลักษณะเชิงเส้น นอกจากนั้นพันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้น และโครงสร้างที่เป็นผลึกยังทำให้เซลลูโลสมีความเสถียรสูง เซลลูโลสจะมีสัดส่วนระหว่างร้อยละ 40-60 ของชีวมวล เฮมิเซลลูโลสซึ่งมีประมาณร้อยละ 20-40 เป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลเช่นเดียวกับเซลลูโลส แต่ในเฮมิเซลลูโลส จะประกอบด้วยน้ำตาลหลายชนิดทั้งน้ำตาลคาร์บอนห้าอะตอม (ไซโลสและอร่าบิโนส) ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลัก และน้ำตาลคาร์บอนหกอะตอม (กลูโคส แมนโนส และกาแลคโตส) ลิกนินเป็นส่วนประกอบที่มีประมาณร้อยละ 10-25 ดังนั้นจึงพบลิกนินเป็นสารตกค้างในทุกกระบวนการที่ผลิตจากเอทานอลจากชีวมวล ลิกนินเป็นสารพอลิฟีนอลที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต ทำหน้าที่คอยยึดเหนี่ยวผนังเซลล์ของพืชเข้าด้วยกัน มีเพียงจุลินทรีย์เพียงไม่กี่ชนิดที่สามารถย่อยสลายสารนี้ไปเป็นกรดอินทรีย์ที่มีมูลค่าสูงได้

1.2 บทบาทด้านพลังงาน

น้ำมันเชื้อเพลิงเป็นปัญหาสำคัญของประเทศไทยมาช้านาน เนื่องจากแหล่งผลิตในประเทศมีไม่เพียงพอกับความต้องการที่สูงขึ้นตามความเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจ จึงต้องพึ่งพาการนำเข้าเป็นหลัก ประเทศไทยสูญเสียเงินตราต่างประเทศเพื่อนำเข้าน้ำมันเชื้อเพลิงกว่าแสนล้านบาท นอกจากนี้ราคาน้ำมันมีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อยๆ มีการประมาณการเมื่อรวมปริมาณน้ำมันจากแหล่งผลิตใหม่ๆ ของโลกจะมีน้ำมันสำรองใช้ได้อีก 40 ปี หากใช้ในอัตราปัจจุบัน การคิดค้นแหล่งพลังงานทดแทนใหม่ๆ จึงเป็นสิ่งสำคัญ และที่มีความตื่นตัวกันมากในขณะนี้ คือ “เอทานอล”

เอทานอลเป็นแอลกอฮอล์ชนิดหนึ่งซึ่งเกิดจากการหมักพืช เศษซากพืช ได้แก่ อ้อย น้ำตาล กากน้ำตาล กากอ้อย บีทรูท (หัวผักกาดหวาน) แป้ง มันสำปะหลัง มันเทศ ธัญพืชต่างๆ เช่น ข้าวโพด ข้าว ข้าวสาลี ข้าวบาร์เลย์ ข้าวฟ่าง เพื่อเปลี่ยนแป้งจากพืชให้เป็นน้ำตาลแล้วเปลี่ยนจากน้ำตาลเป็นแอลกอฮอล์อีก จากรายงานของผู้ผลิตรายใหญ่พบว่าผลผลิตเอทานอลที่ได้จากวัตถุดิบคือ พืชชนิดต่างๆ จำนวน 1 ตัน เมื่อผ่านขบวนการผลิตจะได้ผลผลิตเอทานอลที่แตกต่างกัน หากใช้วัตถุดิบประเภทธัญพืช ข้าว ข้าวโพด จะได้เอทานอลสูงถึงจำนวน 375 ลิตร รองลงมาถ้าใช้กากน้ำตาลจะได้เอทานอลจำนวน 260 ลิตร ในขณะที่ใช้หัวมันสดจะได้เอทานอล 180 ลิตร

ในประเทศไทยมีการแสวงหาเชื้อเพลิงจากทรัพยากรภายในประเทศเพื่อทดแทนการนำเข้ามาเป็นเวลานาน ดังนั้นการนำผลผลิตทางการเกษตรมาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิง เช่น เอทานอลจากมันสำปะหลัง อ้อย ธัญพืชอื่นๆ เพื่อนำไปผสมน้ำมันเบนซินหรือดีเซล จะช่วยลดผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมโดยตรงต่อสถานะเรือนกระจกในชั้นบรรยากาศ และสามารถลดการขาดดุลเงินตราต่างประเทศได้เป็นจำนวนมาก อย่างไรก็ตาม การนำเอทานอลมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงนั้น ประเทศไทย

มีวัตถุดิบเป็นจำนวนมาก ส่วนต้นทุนการผลิตก็ต่ำกว่าการผลิตน้ำมันเบนซินและดีเซลจากปิโตรเลียม หากแต่มีปัญหาในเรื่องการผลิตสิ่งที่จะมารองรับการใช้ประโยชน์เอทานอล คือในส่วนของเครื่องยนต์ที่ใช้ในการเผาไหม้เอทานอล กระทรวงอุตสาหกรรมคาดความต้องการใช้เอทานอลในประเทศไทยว่ามีประมาณ 1 ล้านลิตรต่อวัน หรือ 330 ล้านลิตรต่อปี โดยเอทานอลที่ผลิตได้จะนำไปผสมกับน้ำมันเบนซินในสัดส่วนร้อยละ 10 เพื่อทดแทนการใช้สารเพิ่มค่าออกเทน Methyl Tertiary Butyl Ether (MTBE) ในน้ำมันเบนซินออกเทน 95 ซึ่งต้องนำเข้ามูลค่าปีละกว่า 3,000 ล้านบาท สำหรับการผลิตแก๊สโซฮอล์ ในประเทศไทยนั้นเกิดจากแนวพระราชดำริในพระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวเมื่อปี 2528 โดยโครงการส่วนพระองค์ ได้ศึกษาการผลิตแก๊สโซฮอล์ เพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทน โดยผลิตเอทานอลจากอ้อย หลังจากนั้นก็เกิดความตื่นตัวทั้งจากภาครัฐและเอกชน เข้ามาร่วมพัฒนาและนำไปทดสอบกับเครื่องยนต์ ในปี 2543 มีการดำเนินการทดสอบการใช้แก๊สโซฮอล์ในรถยนต์ พบว่า ช่วยลดมลพิษ ประหยัดน้ำมัน และไม่มีผลต่อสมรรถนะ⁽³⁾

ปัจจัยหลักที่ขับเคลื่อนให้อุตสาหกรรมเอทานอลได้รับความนิยมและมีการเจริญเติบโตต่อเนื่องอย่างยาวนานมีหลายประการดังนี้⁽⁴⁾

- 1.เอทานอลส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อมของท้องถิ่นและของโลกในฐานะที่เป็นเชื้อเพลิงจากธรรมชาติ
 - 2.ผลิตจากพืชจึงทำให้เกิดการกระจายรายได้สู่ประชากรในพื้นที่ห่างไกล
 - 3.ลดการพึ่งพาการนำเข้าวัสดุเชื้อเพลิงจากปิโตรเลียม
 - 4.มีส่วนเสริมให้เกิดการศึกษาและพัฒนาขยายฐานความรู้ในวงกว้าง
- อนาคตของอุตสาหกรรมเอทานอลมีแนวโน้มที่ดีขึ้นจากปัจจัยบวก 3 ประการ
- 1.มีความต้องการใช้เอทานอลเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง
 - 2.โอกาสการวิจัยคิดค้นและพัฒนาเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตและการใช้งานยังเปิดกว้าง
 - 3.เป็นเทคโนโลยีที่ศึกษาทดลองได้ด้วยตัวเองทั้งระดับเล็กจนถึงระดับอุตสาหกรรมขนาดใหญ่

1.3 เอทานอล^(5,6)

เอทานอล (Ethanol หรือ Ethyl Alcohol) เป็นแอลกอฮอล์ชนิดหนึ่ง มีคุณสมบัติติดไฟง่าย ไม่มีสี เป็นสารประกอบเคมีที่เป็นพิษอ่อนๆ ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจนมีสูตรโมเลกุล คือ $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ หรือ $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ประโยชน์ของเอทานอลมากมายที่เห็นในชีวิตประจำวันมีด้วยกันหลายอย่าง อาทิเช่น ใช้ในการผลิตเครื่องดื่ม ใช้ในการผลิตยา เป็นตัวทำละลาย ใช้เป็น

ตัวกลางในการถ่ายเทความร้อน ใช้ในการผลิตเครื่องสำอาง และในปัจจุบันได้นำเอทานอลไปใช้เป็นพลังงานทดแทนในเครื่องยนต์

1. เอทานอลร้อยละ 95 ใช้เป็นเชื้อเพลิงโดยตรงทดแทนน้ำมันเบนซินและน้ำมันดีเซล ใช้ได้กับเครื่องยนต์ที่มีอัตราส่วนการอัดสูง บราซิลเป็นประเทศแรกที่มีการศึกษาวิจัยและเริ่มใช้เอทานอลเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงตั้งแต่ปี 2516 โดยผลิตเอทานอลจากอ้อยและกากน้ำตาล ขานพาหนะที่ใช้เอทานอลเป็นเชื้อเพลิงมีมากถึงประมาณร้อยละ 41 สำหรับในเครื่องยนต์ดีเซลสามารถใช้เอทานอลบริสุทธิ์ร้อยละ 95 ผสมในน้ำมันดีเซลเรียกว่า ดีโซฮอล (Diesohol) ในอัตราส่วนร้อยละ 15 และเพิ่มสารปรับปรุงคุณสมบัติบางตัวในปริมาณร้อยละ 1 ถึง 2

2. เอทานอลบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5 โดยปริมาตร ผสมในน้ำมันเบนซิน ซึ่งจะเรียกว่า แก๊สโซฮอล (Gasohol) โดยทั่วไปใช้ผสมกับน้ำมันเบนซินอัตราส่วนร้อยละ 10 ลักษณะของสารเติมแต่งเพื่อปรับปรุงค่าออกเทนของน้ำมันเบนซิน ซึ่งสามารถนำมาใช้งานกับเครื่องยนต์โดยทั่วไป ไม่ต้องดัดแปลงเครื่องยนต์แต่อย่างใด ซึ่งบราซิลก็ใช้เอทานอลผสมน้ำมันเบนซินที่อัตราส่วนร้อยละ 22

3. เป็นสารเคมีเพิ่มออกเทน (Octane) แก่เครื่องยนต์ โดยการเปลี่ยนรูปเอทานอลมาเป็นสาร ETBE (Ethanol Tertiary Butyl Ether) สามารถใช้ทดแทนสาร MTBE (Methyl Tertiary Butyl Ether) ซึ่ง MTBE เป็นสารเติมแต่งในน้ำมันเบนซินที่หลายประเทศประกาศห้ามใช้เนื่องจากก่อให้เกิดมลพิษในอากาศสูงกว่าสารเติมแต่งอื่นๆ

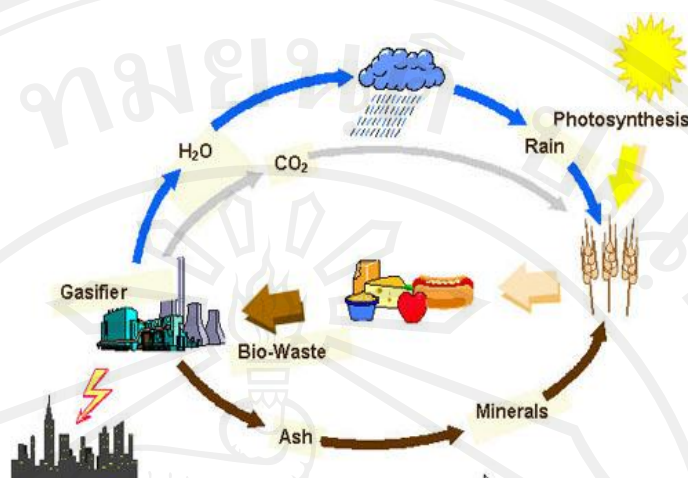
ตาราง 1.1 สมบัติทางกายภาพและเคมีของเอทานอล

สถานะ	ของเหลว
สี	ใส ไม่มีสี
กลิ่น	เฉพาะตัว
น้ำหนักโมเลกุล	46.07
จุดเดือด (องศาเซลเซียส)	78
จุดหลอมเหลว/จุดเยือกแข็ง (องศาเซลเซียส)	-114
ความถ่วงจำเพาะ	0.789
ความหนาแน่นไอ	1.6
ความหนืด (เซ็นติพอยส์)	1.41
ความดันไอ (มิลลิเมตรปรอท)	43 (ที่ 20 องศาเซลเซียส)
ความสามารถในการละลายน้ำ (กรัม/100 มิลลิลิตร)	100

1.4 การใช้พลังงานจากชีวมวล

ชีวมวล⁽⁷⁾ (Biomass) คือสารอินทรีย์ที่เป็นแหล่งกักเก็บพลังงานจากธรรมชาติ และสามารถนำมาใช้ผลิตพลังงานได้ โดยที่ชีวมวลนั้นประกอบด้วยธาตุหลักๆ คือ คาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจน รวมทั้งมีปริมาณของไนโตรเจนและธาตุอื่นๆ อีกเล็กน้อย ชีวมวลนั้นมีอยู่มากมายทั้งที่ได้จากสิ่งมีชีวิต (ยกเว้นที่ได้กลายเป็นเชื้อเพลิงประเภทฟอสซิล เช่น ถ่านหิน น้ำมัน และแก๊สธรรมชาติไปแล้ว) และยังรวมไปถึงสิ่งต่างๆ ที่มีธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน ออกซิเจนเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น เศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร หรือกากจากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมการเกษตร เช่น แกลบได้จากการสีข้าวเปลือก ชานอ้อยได้จากการผลิตน้ำตาลทราย เศษไม้ได้จากการแปรรูปไม้ยางพาราหรือไม้ยูคาลิปตัส และบางส่วนได้จากสวนป่าที่ปลูกไว้ กากปาล์มได้จากการสกัดน้ำมันปาล์มดิบออกจากผลปาล์มสด กากมันสำปะหลังได้จากการผลิตแป้งมันสำปะหลัง ชังข้าวโพดได้จากการสีข้าวโพดเพื่อนำเมล็ดออก กาบและกะลามะพร้าวได้จากการนำมะพร้าวมาปอกเปลือกออกเพื่อนำเนื้อมะพร้าวไปผลิตกะทิ และน้ำมันมะพร้าว ส่วนที่เหลือได้จากการผลิตแอลกอฮอล์เป็นต้น ชีวมวลสามารถเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานได้ เพราะในขั้นตอนของการเจริญเติบโตนั้น พืชใช้คาร์บอนไดออกไซด์และน้ำและเปลี่ยนพลังงานจากแสงอาทิตย์โดยผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสงได้ออกมา เป็นแป้งและน้ำตาล แล้วกักเก็บไว้ตามส่วนต่างๆ ของพืช ดังนั้นเมื่อนำพืชมาผลิตเป็นเชื้อเพลิงโดยผ่านกระบวนการต่างๆ ซึ่งจะได้พลังงานเป็นผลิตภัณฑ์ การใช้ประโยชน์จากพลังงานชีวมวล สามารถใช้ได้ทั้งในรูปของพลังงานความร้อน ไอน้ำ หรือผลิตเป็นกระแสไฟฟ้า โดยจะใช้เชื้อเพลิงชีวมวลชนิดใดชนิดหนึ่งที่กล่าวมาข้างต้น หรือหลายชนิดรวมกันก็ได้ชีวมวลจึงเป็นแหล่งเชื้อเพลิงราคาถูก หากมีการใช้ประโยชน์ในบริเวณที่ไม่ไกลจากแหล่งเชื้อเพลิงมากนัก เพื่อลดต้นทุนในการขนส่ง ชีวมวล มีอยู่ทั่วไปในประเทศไทย การนำชีวมวลมาใช้จึงช่วยลดการสูญเสียเงินตราต่างประเทศในการนำเข้าเชื้อเพลิงและสร้างรายได้ให้กับคนท้องถิ่น นอกจากนี้การผลิตพลังงานจากเชื้อเพลิงชีวมวลด้วยเทคโนโลยีที่เหมาะสม จะไม่ก่อให้เกิดมลภาวะและไม่สร้างสภาวะเรือนกระจก เนื่องจากการปลูกทดแทนทำให้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดการหมุนเวียนและไม่มีการปลดปล่อยเพิ่มเติม นอกจากนี้ยังคงมุ่งหวังว่าการพัฒนาโครงการเกี่ยวกับชีวมวลจะสามารถเสริมสร้างความเข้มแข็ง และการมีส่วนร่วมของชุมชนได้อีกด้วย

การที่ชีวมวลสามารถเปลี่ยนรูปพลังงานได้ เนื่องจากในขั้นตอนของการเจริญเติบโตนั้นพืชได้ใช้กระบวนการสังเคราะห์แสงเปลี่ยนจากคาร์บอนไดออกไซด์ น้ำ และพลังงานจากแสงอาทิตย์ได้ออกมาเป็นแป้งและน้ำตาล แล้วเก็บไว้ตามส่วนต่าง ๆ ของพืช แสดงดังรูปที่ 1.1



รูป 1.1 วัฏจักรของการเกิดชีวมวล⁽⁸⁾

เทคโนโลยีที่ใช้ในการแปรรูปชีวมวลที่ได้รับความนิยมในปัจจุบันเพื่อปรับปรุงคุณภาพให้มีคุณค่ามากขึ้นกว่าเดิมนั้นสามารถจำแนกได้ 2 เทคโนโลยีหลักๆ คือ กระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยวิธีชีวเคมี (Biochemical Conversion Process) และ กระบวนการเปลี่ยนองค์ประกอบทางเคมีโดยใช้พลังงานความร้อน (Thermochemical Conversion Process) ซึ่งกระบวนการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบโดยใช้วิธีชีวเคมี ประกอบด้วย การหมักและการย่อย (Digest) ซึ่งป็นวิธีที่เกิดปฏิกิริยาที่ไม่รุนแรง และสามารถผลิตพลังงานทางเลือกได้ เช่น เอทานอล เมทานอล เป็นต้น⁽⁹⁾

ข้อดีของการใช้ชีวมวลเป็นพลังงาน

1. การนำชีวมวลมาใช้เป็นการนำวัสดุเหลือใช้กลับมาใช้ประโยชน์สูงสุดนอกจากจะก่อให้เกิดรายได้แก่ผู้ผลิตชีวมวลและยังลดสถานะในการกำจัด เช่น นำไปฝังกลบหรือเผาทิ้ง เป็นต้น
2. การไม่นำชีวมวลมาใช้โดยปล่อยให้ย่อยสลายเองตามธรรมชาติจะเกิดแก๊สมีเทนซึ่งถือว่าเป็นแก๊สเรือนกระจกชนิดหนึ่ง และมีอันตรายกว่าแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ถึง 21 เท่า
3. ชีวมวลจะมีกำมะถันหรือซัลเฟอร์ไม่เกินร้อยละ 0.2 ดังนั้นการนำชีวมวลมาเผาไหม้จะไม่สร้างปัญหาเรื่องฝนกรด (น้ำมันเตามีปริมาณกำมะถันร้อยละ 2 ส่วนถ่านหินมีปริมาณกำมะถันร้อยละ 0.3 ถึง 3.8 ซึ่งขึ้นกับประเภทของถ่านหิน)
4. ขี้เถ้าของชีวมวลมีสภาพเป็นด่าง ดังนั้นเหมาะสมที่จะนำไปเพาะปลูกหรือปรับสภาพดินที่เป็นกรด นอกจากนี้ยังนำไปใช้ในอุตสาหกรรมผลิตเหล็ก ผสมในซีเมนต์
5. ก่อให้เกิดรายได้และการสร้างงานในชุมชน

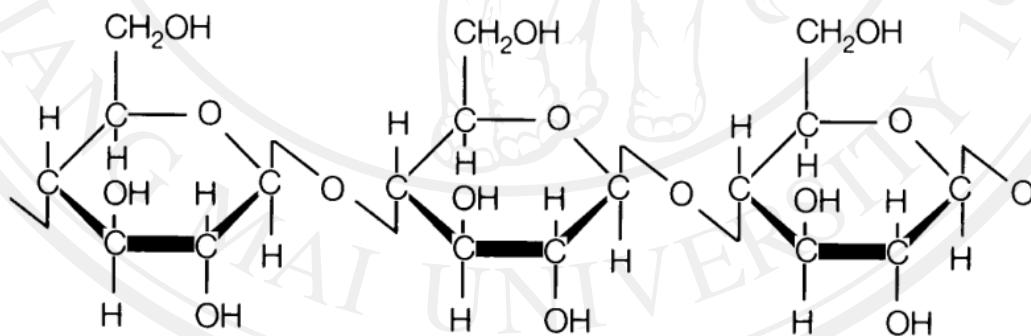
6. ประหยัดเงินตราต่างประเทศเพราะไม่ต้องนำเข้าเชื้อเพลิงจากต่างประเทศ เช่น น้ำมันเตา และถ่านหินเป็นต้น

7. ถ้าโรงงานไฟฟ้าชีวมวลตั้งกระจายอยู่ที่ต่างๆ จะช่วยเสริมการจ่ายไฟฟ้าของการไฟฟ้าภูมิภาคได้เป็นอย่างดี เช่น แรงดันไฟฟ้าไม่ตก จะสมำเสมอ ลดการสูญเสียในสายไฟและหม้อแปลงลง

1.5 องค์ประกอบทางเคมีของชีวมวล ⁽¹⁰⁾

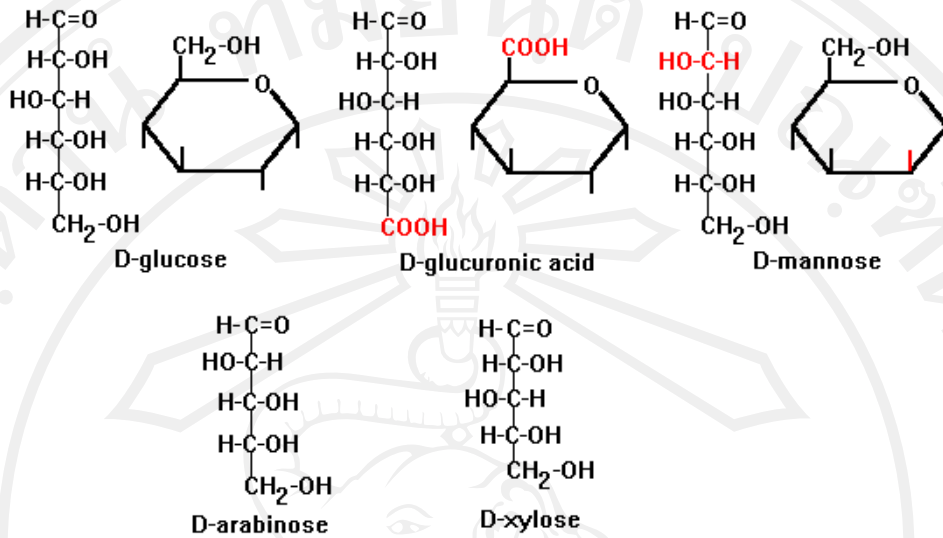
องค์ประกอบที่สำคัญของชีวมวลคือเซลลูโลส (Cellulose) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และลิกนิน (Lignin) ซึ่งโครงสร้างส่วนใหญ่จะประกอบด้วยน้ำตาลและพอลิเมอร์ของน้ำตาลซึ่งเรียกว่า พอลิแซคคาไรด์ (Polysaccharides)

เซลลูโลส คือเส้นใยของพอลิเมอร์แซคคาไรด์ที่เป็นส่วนประกอบหลักในผนังเซลล์ของพืช และเป็นสารอินทรีย์ที่เกิดขึ้นเองตามธรรมชาติมากที่สุด เซลลูโลสเป็นส่วนประกอบหลักในใบไม้ ปอ และฟาง คุณสมบัติทางเคมีที่สำคัญของเซลลูโลสคือเป็นตัวที่ไม่ทำปฏิกิริยาโดยเฉพาะ ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) โครงสร้างของเซลลูโลสแสดงดังรูป 1.2



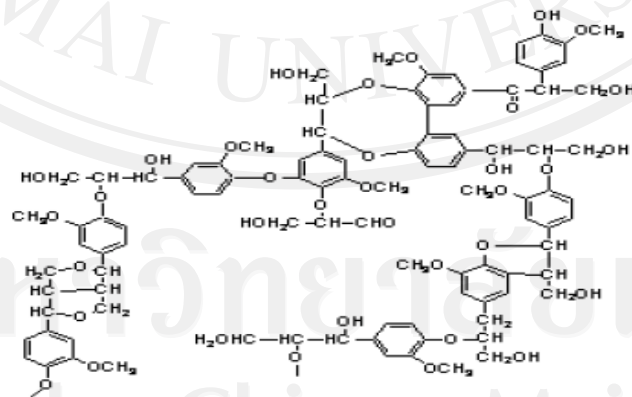
รูป 1.2 โครงสร้างของเซลลูโลส ⁽¹¹⁾

เฮมิเซลลูโลสเป็นพอลิแซคคาไรด์ที่เกิดขึ้นร่วมกับพวกเซลลูโลส แต่จะอยู่ในรูปอสัณฐานที่มีลักษณะการจัดเรียงตัวของอะตอมทางเคมีต่างกับพวกเซลลูโลส และมีมวลต่ำกว่ามาก เซลลูโลสส่วนใหญ่จะเกิดจากน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว พวกดีกลูโคส ส่วนเฮมิเซลลูโลสมักจะประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวต่างชนิดหลาย ๆ ตัวมาต่อกันเป็นกลุ่ม พอลิเมอร์ของเฮมิเซลลูโลสที่ประกอบด้วยหน่วยย่อย 50-200 หน่วย และต่อกันแบบกิ่งก้านสาขามากกว่าแบบเส้นตรง แสดงดังรูปที่ 1.3



รูป 1.3 โครงสร้างของเฮมิเซลลูโลส

ลิกนินเป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญอีกชนิดหนึ่งในพืช ประกอบด้วยโครงสร้างอะโรมาติกของหน่วยฟีนิลโพรเพนที่เชื่อมต่อกันด้วยคาร์บอนสายตรง (Aliphatic Chain) ดังแสดงในรูปที่ 1.4 ซึ่งจะเห็นว่าลิกนินมีคุณลักษณะที่เหมาะสมในการเป็นปลั่งเซลล์ของพืชที่เป็นกาวยึดและเพิ่มความแข็งแรงของเซลล์พืช นอกจากนี้ลิกนินยังอยู่ในรูปอสัณฐานเช่นเดียวกับพวกเฮมิเซลลูโลส



รูป 1.4 โครงสร้างของลิกนิน

1.6 ฟางข้าว⁽¹²⁾

ฟางข้าว เป็นวัสดุเหลือใช้จากการทำนาและมีเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะการทำนาอย่าง ต่อเนื่องที่มากกว่า 1 ครั้งต่อปี ชาวนาบางส่วนเผาฟางข้าวหลังจากนวดข้าวแล้ว แต่ก็มีชาว นาบางส่วนไม่ได้เผาฟางทิ้ง โดยนำฟางข้าวที่เหลือจากการเก็บเกี่ยวไปใช้ประโยชน์หลาย ๆ ประการ โดยทั่วไปในนา 1 ไร่ จะมีฟาง 0.32 ถึง 1.6 ตันต่อ 1 ฤดูปลูก สำหรับองค์ประกอบหรือธาตุอาหาร ในฟางข้าว โดยเฉลี่ยฟางข้าวมีไนโตรเจนร้อยละ 0.7 ซีลีการ้อยละ 11.0 ฟอสฟอรัสร้อยละ 0.15 โปรแตสเซียมร้อยละ 1.83 แมกนีเซียมร้อยละ 0.25 และซัลเฟอร์ร้อยละ 0.80 นอกจากนี้ฟางข้าวยัง เป็นแหล่งสำคัญของไนโตรเจนและคาร์บอนสำหรับจุลินทรีย์ รวมทั้งน้ำตาล แป้ง เซลลูโลส เฮมิ เซลลูโลส ไขมัน โปรตีน และเปคติน สารประกอบเหล่านี้มีถึงร้อยละ 40 ถ้าหากเผาฟางแล้วจะได้สาร ระบายร้อยละ 74.4 คาร์บอนคงตัวร้อยละ 18.3 และเถ้าร้อยละ 10 ถึง 20 ค่าความร้อน 4,300 กิโล แคลอรี/กิโลกรัม หรือในฟางข้าว 1,500 กิโลกรัม มีไนโตรเจน 9 กิโลกรัม ฟอสฟอรัสและกำมะถัน 2 กิโลกรัม โปรแตสเซียม 25 กิโลกรัม และซีลีกา 70 กิโลกรัม

1.7 กระบวนการผลิตเอทานอล⁽⁶⁾

กระบวนการผลิตเอทานอลสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทใหญ่ๆด้วยกัน คือ กระบวนการ ตั้งเคราะห์เคมี (Chemical Synthesis) และกระบวนการหมัก (Fermentation)

1.7.1 เอทานอลที่ผลิตจากกระบวนการสังเคราะห์เคมี

เป็นการผลิตจากอนุพันธ์สารปิโตรเลียม เช่น เอทีลิน ด้วยปฏิกิริยา Ethylene Hydration หรือการเกิดเอทานอลจากปฏิกิริยาที่ย้อนกลับได้ของเอสเทอร์ฟิเคชัน (Esterification) เป็นต้น



ในการเกิดปฏิกิริยา Ethylene Hydration นี้ ใช้กรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ได้ ผลิตภัณฑ์เป็นเอทิลซัลเฟต ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{SO}_4\text{H}$) ขั้นตอนต่อมาเอทิลซัลเฟตไปทำปฏิกิริยากับน้ำจะได้ เอทานอลกับกรดซัลฟิวริกจากนั้นทำการสกัดได้เอทานอลบริสุทธิ์ออกมา



อีกตัวอย่างหนึ่ง คือ ปฏิกิริยาย้อนกลับของเอสเทอร์ฟิเคชันทำให้เกิดเอทานอลได้ ซึ่งการที่จะได้ผลิตภัณฑ์ย้อนกลับเป็นเอทานอลต้องใช้ความร้อนสูงและมีตัวเร่งปฏิกิริยา ในการทำปฏิกิริยากับน้ำ เอสเทอร์สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสซึ่งเป็นปฏิกิริยาสลายตัวแยกออกเป็นกรดคาร์บอกซิลิกและแอลกอฮอล์ ซึ่งเป็นปฏิกิริยาย้อนกลับของปฏิกิริยาเอสเทอร์ฟิเคชัน โดยมีกรดซัลฟิวริกเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง เช่น ปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสของเอทิลอะซิเตต

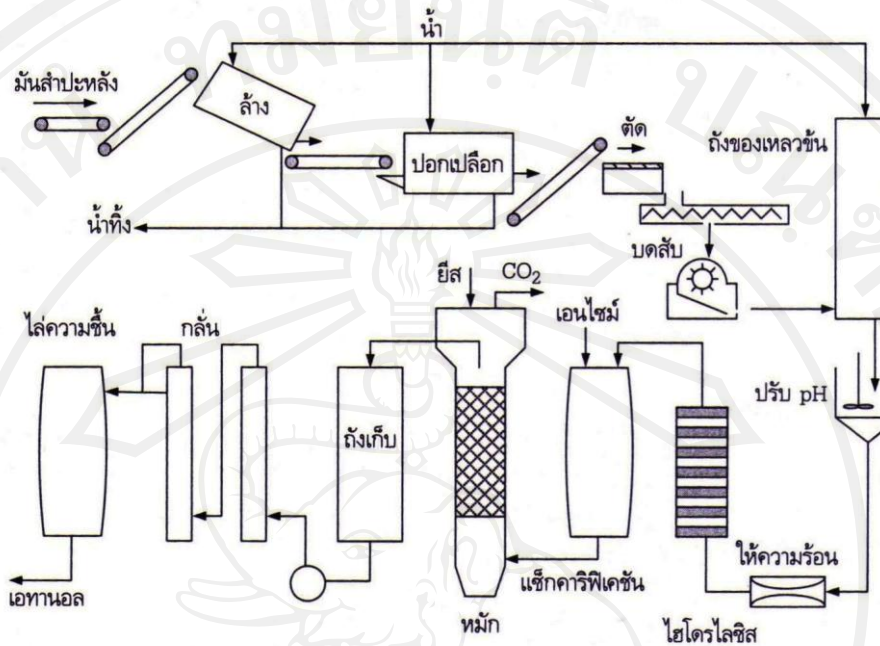
1.7.2 เอทานอลที่ผลิตจากกระบวนการหมัก

เป็นการผลิตเอทานอลจากน้ำตาลด้วยเชื้อยีสต์ ประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนแรก ยีสต์จะใช้น้ำตาลเชิงเดี่ยว (Monosaccharide) เป็นอาหาร และเปลี่ยนน้ำตาลเป็นเอทานอลโดยกระบวนการไกลโคไลซิส (Glycolysis) ในสภาวะที่ไม่ใช้ออกซิเจนดังสมการ



โดยตามทฤษฎี น้ำตาลกลูโคสร้อยละ 100 จะถูกเปลี่ยนเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ และเอทานอลร้อยละ 48.9 และ 51.1 โดยน้ำหนักตามลำดับ แต่ในทางปฏิบัติจะเกิดการสูญเสียได้เป็นสารประกอบอื่นๆ หรือใช้ในการสร้างเซลล์ของยีสต์ ทำให้เกิดเอทานอลได้เพียงประมาณร้อยละ 50 – 90 ของน้ำหนักทางทฤษฎี เมื่อได้เอทานอลแล้ว ขั้นตอนที่ 2 จึงเป็นการทำให้เอทานอลมีความเข้มข้นและบริสุทธิ์สูงขึ้นโดยกระบวนการกลั่นในงานอุตสาหกรรม

ในปัจจุบันการผลิตเอทานอลในระดับอุตสาหกรรมทั่วโลกมากกว่าร้อยละ 90 จะใช้กระบวนการหมักมากกว่ากระบวนการสังเคราะห์ด้วยสารเคมี ซึ่งวัตถุดิบที่สามารถนำมาใช้ในการผลิตเอทานอลจะเป็นสารประกอบคาร์โบไฮเดรตที่มีน้ำตาลเชิงเดี่ยวอยู่ในโครงสร้างโมเลกุล เช่น พวกกากน้ำตาล แป้ง หรือพวกลิกโนเซลลูโลส ซึ่งกระบวนการแปลงสภาพวัตถุดิบไปเป็นเอทานอลของวัตถุดิบแต่ละชนิดจะมีวิธีการเตรียมวัตถุดิบและการเปลี่ยนแปลงไปเป็นน้ำตาลเชิงเดี่ยวไม่เหมือนกัน ตัวอย่างโรงงานแสดงดังรูปที่ 1.5



รูปที่ 1.5 แผนภูมิโรงงานผลิตเอทานอลจากมันสำปะหลัง

1.8 ชนิดของวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตเอทานอล⁽⁶⁾

วัตถุดิบที่ใช้เป็นวัสดุตั้งต้นสำหรับกระบวนการผลิตเอทานอลแบบหมักมี 3 ประเภท คือ พวคน้ำตาล พวกแป้ง และพวกเซลลูโลส โดยแต่ละประเภทจะต้องนำไปผ่านกระบวนการปรับปรุงต่างๆ ก่อนที่จะนำไปหมักเพื่อให้เป็นเอทานอล พวคน้ำตาลสามารถนำไปหมักได้เลยโดยตรง แต่วัตถุดิบประเภทอื่นไม่สามารถหมักได้โดยตรง เพราะวัตถุดิบบางอย่างยังเป็นน้ำตาลโมเลกุลใหญ่ หรือมีส่วนผสมของสารชนิดอื่นอยู่มากมาย เช่น วัตถุดิบพวกลิกโนเซลลูโลส มีองค์ประกอบเป็น เซมิเซลลูโลสและลิกนิน ซึ่งต้องผ่านกระบวนการปรับสภาพ (Pretreatment) และผ่านปฏิกิริยา ไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ก่อนนำไปหมัก ส่วนแป้งต้องผ่านกระบวนการทำให้เป็นของเหลว (Liquefaction) และการละลายเป็นน้ำตาล (Saccharification) ก่อนจะนำไปหมัก กระบวนการที่ทำก่อนหมักนี้เรียกว่า การเตรียมวัตถุดิบก่อนเข้ากระบวนการ ตารางที่ 1.2 แสดงถึงผลผลิตเอทานอลต่อน้ำหนักของวัตถุดิบชีวมวลตั้งต้นโดยเฉลี่ย

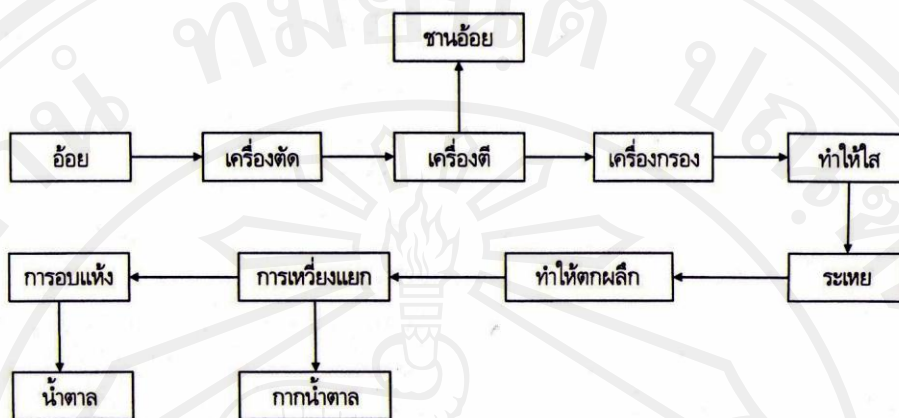
ตาราง 1.2 ผลผลิตเอทานอลจากชีวมวล

วัตถุดิบชีวมวล	ผลการผลิตเอทานอล (ลิตรต่อตัน)
อ้อย	70
กากน้ำตาล	280
ข้าวฟ่างหวาน	85
มันสำปะหลัง	180
มันเทศ	125
ข้าวโพด	370
ไม้	160

1.8.1 วัตถุดิบประเภทน้ำตาล

1. อ้อย (Sugarcane) เป็นชีวมวลที่น่าสนใจ เพราะสามารถผลิตเป็นน้ำอ้อยที่เป็นน้ำตาลได้โดยตรงด้วยกระบวนการที่ง่ายไม่ซับซ้อนและยังมีผลพลอยได้เป็นขานอ้อย (Bagasse) ที่ใช้เป็นแหล่งเชื้อเพลิงมากเกินพอในการผลิตไอน้ำ และไฟฟ้าสำหรับกระบวนการหีบอ้อย การหมัก และการกลั่นในโรงงานได้ อ้อยจะมีปริมาณน้ำตาลโดยเฉลี่ยร้อยละ 12.5 ใน 1 ตัน จึงสามารถผลิตเอทานอลได้ประมาณ 70 ลิตร อ้อยเป็นพืชที่สามารถให้ผลผลิตเอทานอลสูงต่อหนึ่งหน่วยพื้นที่ในการเพาะปลูก และเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีการเพาะปลูกอย่างแพร่หลาย มีการพัฒนาและวิจัยทางการเกษตรอย่างต่อเนื่องในแต่ละประเทศ แต่ส่วนใหญ่อ้อยจะใช้ผลิตน้ำตาลเพื่อการบริโภคในประเทศ และใช้ส่งออกซึ่งใช้อยู่ในวงจรรอาหาร หากต้องการผลิตเอทานอลจากอ้อยในเชิงพลังงานจะต้องมีนโยบายที่ชัดเจนในการกำหนดสัดส่วนอ้อยที่ผลิตได้สำหรับใช้ผลิตน้ำตาล และผลิตเอทานอล รวมถึงการส่งเสริมการเพาะปลูกอ้อยและการใช้พื้นที่เพื่อให้ได้ผลผลิตตามปริมาณที่ต้องการ ซึ่งในบางกรณีอาจจะส่งผลถึงพื้นที่ในการเพาะปลูกพืชเศรษฐกิจอื่นๆ ยกเว้นในกรณีที่มีพื้นที่ในการเพาะปลูกมากมาย เช่น ในประเทศบราซิล กระบวนการผลิตน้ำตาลจากอ้อยมีวัตถุดิบชีวมวลเกิดขึ้น ดังรูปที่ 1.6

2. กากน้ำตาล (Molass) เป็นชีวมวลที่มักถูกใช้ในการผลิตเอทานอล หรืออาหารสัตว์ ได้จากกระบวนการผลิตน้ำตาลจากอ้อย ในทุกๆ 1 ตันของน้ำตาลที่ผลิตได้ จะมีผลพลอยได้เป็นกากน้ำตาลประมาณ 190 ลิตร โดยกากน้ำตาลนี้มีส่วนประกอบเป็นน้ำตาลที่ใช้หมักได้ ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นพวกซูโครส กลูโคส และฟรุกโตส ประมาณร้อยละ 50 -55 และให้ผลผลิตเอทานอล 280 ลิตรต่อตันกากน้ำตาล



รูปที่ 1.6 กระบวนการผลิตน้ำตาลจากอ้อย

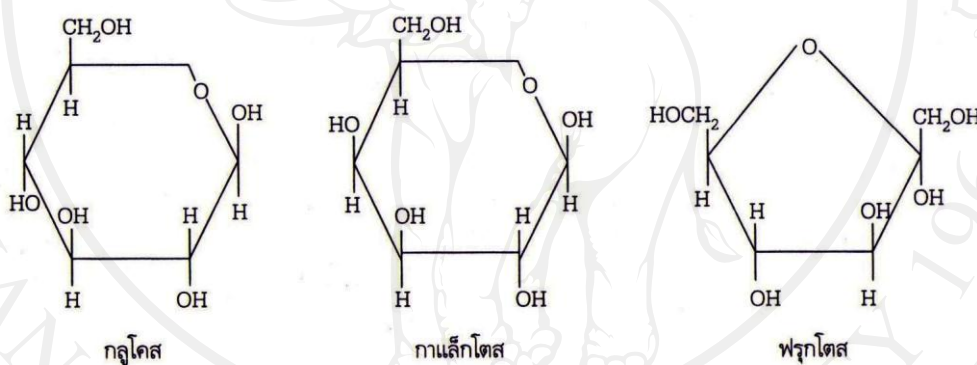
3. ข้าวฟ่างหวาน (Sweet Sorghum) มีส่วนประกอบหลักเป็นซูโครสและกลูโคส เป็นพืชที่มีศักยภาพสูงในการผลิตเอทานอล ลำต้นของข้าวฟ่างหวานเต็มไปด้วยน้ำตาล และใช้เป็นกากเชื้อเพลิงสำหรับสร้างพลังงานในกระบวนการได้ด้วย พืชชนิดนี้เป็นพืชหมุนเวียนที่ดี มีรอบการเพาะปลูกจนถึงการเก็บเกี่ยวค่อนข้างสั้น ประมาณ 3-4 เดือน จึงสามารถปลูกบนแปลงอ้อยได้ หลังจากหมดฤดูไปแล้ว ทำให้สามารถขยายช่วงเวลาการผลิตเอทานอลได้ยาวนาน และได้ใช้ประโยชน์จากเครื่องจักร และกระบวนการคั่วค้ำมากขึ้น อย่างไรก็ตามข้าวฟ่างหวานเป็นพืชที่ค่อนข้างใหม่สำหรับเกษตรกร จึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำงานวิจัย และพัฒนาอย่างกว้างขวางต่อไปเพื่อผลักดันให้เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญในอนาคต

พืชน้ำตาลอื่นๆ เช่น บีทน้ำตาล (Sugar Beet) สามารถใช้ผลิตเอทานอลได้ แต่ปริมาณการผลิตมีค่อนข้างน้อย สำหรับวัตถุดิบชีวมวลตั้งต้นเหล่านี้ ยีสต์สามารถนำไปใช้ได้โดยตรง และไม่ต้องผ่านกระบวนการใดๆ เพียงเตรียมโดยปรับปรุงความเข้มข้น แล้วนำน้ำตาลไปหมัก ซึ่งน้ำตาลที่นำไปหมักได้ต้องเป็นมอโนแซ็กคาไรด์ซึ่งเป็นน้ำตาลเชิงเดี่ยว เป็นคาร์โบไฮเดรตขนาดเล็กสุด ประกอบด้วยคาร์บอน 3-7 อะตอม ไม่สามารถย่อยได้เล็กกว่านี้อีกแล้ว ตัวอย่างมอโนแซ็กคาไรด์แสดงดังตาราง 1.3

มอโนแซ็กคาไรด์ที่เรารู้จักกันดี คือ พวกลูโคส ได้แก่ กลูโคส ฟรุคโตส กาแลกโตส ซึ่งมีสูตรโมเลกุลเหมือนกัน แต่โครงสร้างในการเรียงตัวของอะตอมในโมเลกุลแตกต่างกัน เรียกว่าเป็น ไอโซเมอร์ (Isomer) กัน ดังรูปที่ 1.7 น้ำตาลทั้งสามชนิดนี้เป็นผลสุดท้ายของการย่อยคาร์โบไฮเดรตโมเลกุลใหญ่อื่นๆ ที่สามารถดูดซึมเข้าร่างกายไปใช้เป็นแหล่งพลังงานและเปลี่ยนแปลงเป็นสารจำเป็นอื่นๆ ได้

ตาราง 1.3 ตัวอย่างมอนแซคคาไรด์

ชนิด	สูตรเคมี	ตัวอย่าง
ไตรออส	$C_3H_6O_3$	ฟอสโฟ-กลีเซอรัลดีไฮด์ (PGAL) น้ำตาลตัวแรกจากการสังเคราะห์ด้วยแสง
เตตระโทรส	$C_4H_8O_4$	เซโรโทรส
เพนโทส	$C_5H_{10}O_5$	ไรโบสซึ่งเป็นองค์ประกอบของ RNA
	$C_5H_{10}O_4$	ดีออกซีไรโบส ซึ่งเป็นองค์ประกอบของ DNA
เฮกโซส	$C_6H_{12}O_6$	กลูโคส ฟรุคโตส กาแลคโตส



รูป 1.7 สูตร โมเลกุลเหมือนกันแต่สูตร โครงสร้างแตกต่างกัน

1.8.2 วัตถุดิบประเภทแป้ง

1. **มันสำปะหลัง (Cassava)** เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญที่มีการเพาะปลูกจำนวนมากในประเทศที่กำลังพัฒนาทั้งหลาย ใช้ในการบริโภค มันสำปะหลังเป็นพืชชนิดหนึ่งซึ่งสามารถแปลงพลังงานแสงอาทิตย์เป็นชีวมวลได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ทำให้ได้ผลผลิตต่อพื้นที่เพาะปลูกสูง มันสำปะหลังสามารถเติบโตได้ในสภาพดินที่ไม่ค่อยดี เป็นพืชที่ทนทานต่อสภาพดินฟ้าอากาศได้หลากหลาย และเพาะปลูกง่าย ไม่จำเป็นต้องใช้เทคโนโลยีสูง เป็นพืชที่เกษตรกรส่วนใหญ่เพาะปลูก และปลูกได้ตลอดปี มันสำปะหลัง 1 ตัน สามารถผลิตเอทานอลได้ประมาณ 180 ลิตร ข้อเสียของวัตถุดิบชนิดนี้ คือ ไม่มีกากของเสียที่เป็นแหล่งพลังงานได้เพียงพอสำหรับใช้ในกระบวนการกลั่น

2. ข้าวโพด (Corn) เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญอีกชนิดหนึ่ง ส่วนมากใช้ในการบริโภค ต้องการการดูแลที่ดี ต้องการสภาพดินที่สมบูรณ์ และมีน้ำเพียงพอ มีการเพาะปลูกมากในประเทศสหรัฐอเมริกา ถูกนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเอทานอลเพื่อช่วยพยุงราคาข้าวโพดในตลาด โรงงานที่ผลิตเอทานอลจากข้าวโพดจำเป็นต้องมีแหล่งเชื้อเพลิงอื่นใช้ เพราะข้าวโพดไม่มีกากของเสียเพียงพอสำหรับเป็นแหล่งพลังงาน การนำข้าวโพดมาผลิตเป็นเอทานอลต้องพิจารณาถึงผลกระทบต่อปริมาณการบริโภคก่อน

กลุ่มวัตถุดิบพวกแป้งยังได้มาจากกลุ่มอื่นๆ อีก เช่น ธัญพืช ข้าวต่างๆ และมันฝรั่ง เป็นต้น ในการผลิตเอทานอลนั้น แป้งในวัตถุดิบจะต้องถูกย่อยให้ได้น้ำตาลกลูโคสซึ่งเป็นน้ำตาลเชิงเดี่ยวก่อน ยีสต์จึงจะสามารถเปลี่ยนกาน้ำตาลเป็นเอทานอลได้ ซึ่งการย่อยแป้งประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่ 1 การย่อยครั้งแรกหรือการทำให้เหลว ขั้นตอนนี้จะใช้กรดหรือเอนไซม์กลุ่มแอลฟาอะไมเลส (α -Amylase) ที่มีกิจกรรมการย่อยแป้งที่อุณหภูมิสูงประมาณ 80-95 องศาเซลเซียส เพื่อให้ได้โมเลกุลขนาดเล็กลง และมีความหนืดลดลง ของเหลวที่ได้จะมีค่าสมมูลเดกซ์โทรส (Dextrose Equivalent) อยู่ในช่วง 10-15 เรียกว่า เดกซ์ทริน ต่อมาขั้นที่ 2 เป็นการย่อยครั้งสุดท้าย หรือทำให้หวาน หรือเรียกว่า กระบวนการเปลี่ยนแปลงเป็นน้ำตาล (Saccharidification) ขั้นตอนนี้จะใช้เอนไซม์กลูโคอะไมเลส (Glucoamylase) ย่อยเดกซ์ทรินให้ได้น้ำตาลที่มีโมเลกุลเดี่ยว หรือเล็กพอที่ยีสต์จะสามารถนำไปใช้ได้ ซึ่งโดยทั่วไปเอนไซม์กลุ่มนี้จะมีกิจกรรมที่อุณหภูมิสูงปานกลาง คือประมาณ 55-65 องศาเซลเซียส

แป้งเป็นน้ำตาลโมเลกุลใหญ่ หรือที่เรียกว่า พอลิแซ็กคาไรด์ (Polysaccharide) ซึ่งเป็นคาร์โบไฮเดรตโมเลกุลใหญ่ ประกอบด้วยน้ำตาลเชิงเดี่ยวมากกว่า 10 โมเลกุลขึ้นไป (100-1,000 โมเลกุล) เรียงต่อกันเป็นสายยาวด้วยพันธะ ไกลโคซิดิก (Glycosidic Bond) อาจมีแขนง หรือไม่ก็มีก็ได้ เรียกกระบวนการนี้ว่า พอลิเมอร์ไรเซชัน (Polymerization) สารที่ได้มีสมบัติเป็นของแข็งสีขาว แทบไม่มีการละลายน้ำ ไม่มีรสหวาน ไม่ว่องไวต่อการทำปฏิกิริยาเคมี ตัวอย่างพอลิแซ็กคาไรด์ที่สำคัญ ได้แก่ แป้ง เดกซ์ทริน ไกลโคเจน และเซลลูโลส ทั้งหมดมีกลูโคสเป็นองค์ประกอบแต่มีโครงสร้างแตกต่างกัน เป็นสายยาวหรือแตกแขนงต่างๆกัน ตัวอย่างพอลิแซ็กคาไรด์ที่สำคัญในชีวิตประจำวันแสดงในตาราง 1.4

ตาราง 1.4 ตัวอย่างพอลิแซ็กคาไรด์ที่สำคัญ

พอลิแซ็กคาไรด์	ลักษณะ
เซลลูโลส	โครงสร้างเป็นสายยาว ไม่แตกแขนง เป็นสารโครงสร้างของพืช ร่างกายคนไม่มีเอนไซม์ย่อยเซลลูโลส ไม่มีประโยชน์ในแง่ของอาหาร แต่เป็นกากอาหารกระตุ้นการขับถ่าย
แป้ง	โครงสร้างเป็นสายยาว หรือแตกแขนงเป็นสายยาวไม่ก่แขนง เป็นแหล่งอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรต มีคุณสมบัติไม่ละลายในน้ำเย็น แต่ละลายในน้ำร้อน แป้งเมื่อถูกย่อยจะเป็นสารที่มีโมเลกุลเล็กลง ดังนี้ แป้ง → เดกซ์ทริน → มอลโทส → กลูโคส
ไกลโคเจน	โครงสร้างเป็นสายยาว มีการแตกแขนงเป็นสายสั้นจำนวนมาก ร่างกายสัตว์รองรับไกลโคเจนไว้ที่ตับและกล้ามเนื้อสำหรับใช้ยามขาดแคลนอาหาร

1.8.3 วัตถุประสงค์ประเภทลิโนเซลลูโลส

ส่วนมากวัตถุประสงค์กลุ่มนี้จะเป็นผลผลิตจากป่าไม้ การเกษตร และอุตสาหกรรม เช่น ไม้ต่างๆ หญ้าต่างๆ ฟางข้าว ชานอ้อย ช้างข้าวโพด และของเสียจากอุตสาหกรรมเยื่อกระดาษ ซึ่งวัตถุประสงค์ประเภทนี้มีส่วนประกอบสำคัญ 4 ชนิด คือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และสารประกอบอื่นๆ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นเซลลูโลสเป็นส่วนประกอบหลักประมาณร้อยละ 40-60

โดยขั้นตอนการผลิตเอทานอลจากวัตถุประสงค์ประเภทลิโนเซลลูโลส จะประกอบด้วย 3 ขั้นตอนหลักๆ ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การปรับสภาพชีวมวล เป็นการทำลายโครงสร้างที่แข็งแรงของเซลลูโลส เพื่อให้เอนไซม์เซลลูเลสสามารถเข้าถึงและย่อยเซลลูโลสได้ง่ายขึ้น สามารถทำได้ทั้งวิธีทางเคมี ได้แก่ การย่อยด้วยกรดเจือจาง การย่อยด้วยกรดเข้มข้น การย่อยด้วยด่าง และวิธีทางกายภาพ ได้แก่ การระเบิดด้วยไอน้ำ เป็นต้น

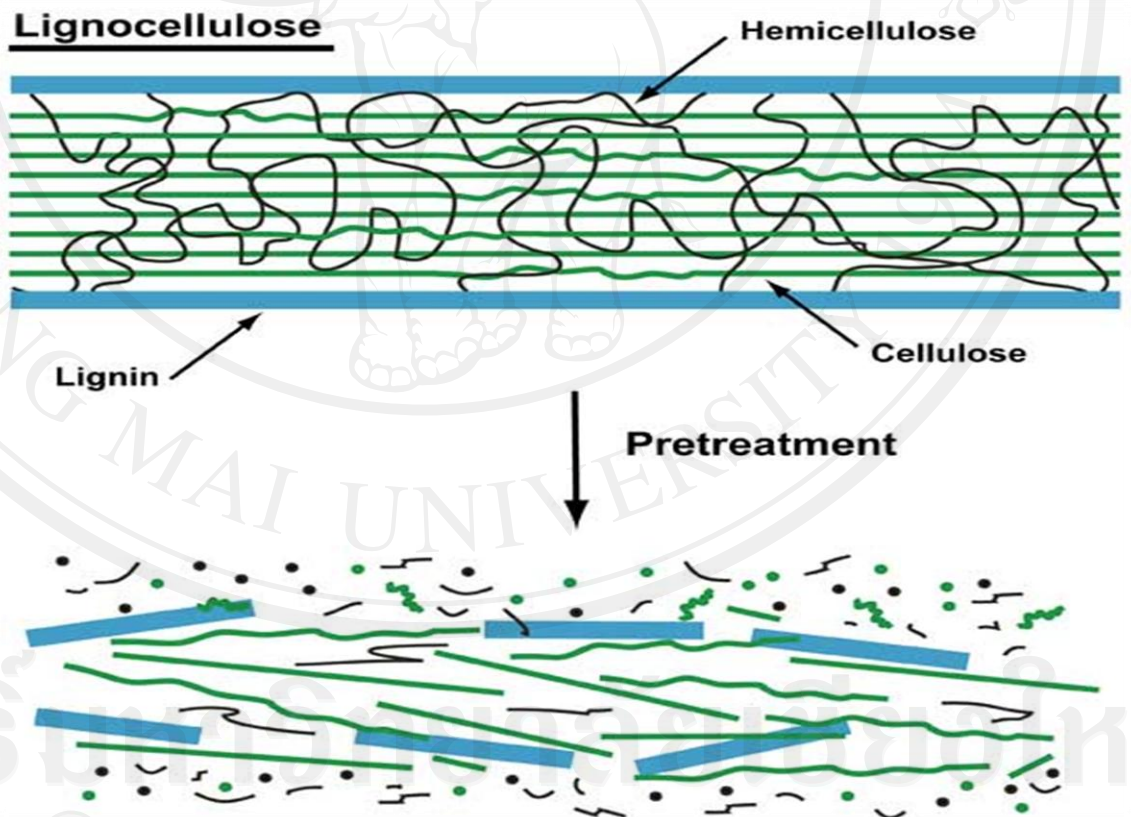
ขั้นตอนที่ 2 การทำปฏิกิริยาย่อย (Hydrolysis) มี 2 วิธีคือ การใช้กรดหรือการใช้เอนไซม์ ปัจจุบันได้มีการนำเทคโนโลยีมาใช่มากมายทั้งทางกายภาพและทางเคมี เพื่อเพิ่มความเร็วของเนื้อวัสดุ ลดปริมาณเฮมิเซลลูโลส และลิกนินในเนื้อวัสดุ การย่อยด้วยกรดจะมี 2 ช่วง ช่วงแรกจะเป็นการย่อยเฮมิเซลลูโลสให้ได้น้ำตาลเพนโทส จากนั้นช่วงที่สองจะเป็นการย่อย

เซลลูโลสให้ได้น้ำตาลกลูโคส ส่วนการย่อยด้วยเอนไซม์ จะใช้เอนไซม์เซลลูเลสเพื่อเปลี่ยนเซลลูโลสเป็นน้ำตาลกลูโคส ซึ่งเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่เล็กที่สุด

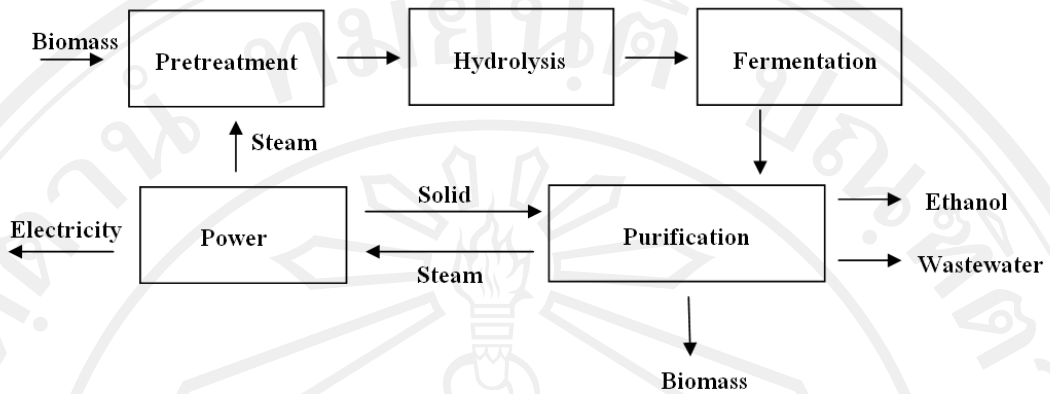
ขั้นตอนที่ 3 การหมักเป็นเอทานอล เมื่อวัตถุดิบกลายเป็นน้ำตาลกลูโคสแล้วสามารถหมักให้เป็นเอทานอลได้ด้วยการใช้เชื้อจุลินทรีย์ ได้แก่ ยีสต์และแบคทีเรียต่อไป

1.9 การปรับสภาพชีวมวล ⁽²⁾

เนื่องจากลิกนินและเฮมิเซลลูโลสประกอบกันเป็นเปลือกหุ้มรอบๆองค์ประกอบเซลลูโลสอยู่ ดังรูป 1.8 ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทำการแยกสารเหล่านี้ออกไป ก่อนเข้าสู่กระบวนการย่อยเซลลูโลส ดังนั้นจึงจำเป็นต้องเพิ่มกระบวนการปรับสภาพเข้าไปก่อน ซึ่งแผนผังของกระบวนการโดยทั่วไปแสดงดังรูป 1.9



รูป 1.8 การจัดเรียงตัวขององค์ประกอบทางเคมีฟางข้าว ⁽¹³⁾



รูป 1.9 แผนผังกระบวนการปรับสภาพชีวมวล

กระบวนการปรับสภาพวัตถุดิบก่อนที่จะได้เซลลูโลสแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภทใหญ่ๆคือ การปรับสภาพด้วยวิธีเชิงกล วิธีทางเคมี และทางชีวภาพ

กระบวนการปรับสภาพเชิงกล เป็นการใช้แรงกลหรือกระบวนการทางกายภาพเพื่อทำความสะอาดปรับขนาดและทำลายโครงสร้างเซลล์ของวัตถุดิบเพื่อให้ปฏิกิริยาทางเคมีหรือชีวเคมีในขั้นต่อไปเกิดขึ้นได้อย่างมีประสิทธิภาพสูง การตัดหรือบดให้ขนาดชิ้นวัตถุดิบมีขนาดเล็กลง จะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิว ทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยา เอนไซม์ หรืออินน้ำจับกับวัตถุดิบได้ง่ายขึ้น ขนาดของวัตถุดิบหลังจากกระบวนการนี้มีตั้งแต่ไม่กี่เซนติเมตรจนกระทั่งถึง 1-3 มิลลิเมตร สำหรับขนาดเล็กมากๆ แล้ว พลังงานที่ใช้ในขั้นตอนนี้อาจสูงถึงหนึ่งในสามของพลังงานทั้งหมดก็ได้ การลดขนาดให้เล็กลงครั้งหนึ่ง ต้องการพลังงานมากขึ้นกว่าสองเท่า และความแข็งของวัสดุจะมีผลอย่างมากต่อความต้องการพลังงาน นอกจากนี้กระบวนการตัดด้วยเครื่องมือตัดด้วยมีด (Knife Mill) ก็ใช้พลังงานน้อยกว่าแฮมเมอร์มิล (Hammer Mill) เกือบทุกสภาวะ

การปรับสภาพทางเคมี กระบวนการทางเคมีที่นิยมใช้แบ่งออกเป็น 3 ชนิดคือการใช้กรดอ่อน กรดแก่ และเบส กระบวนการใช้กรดอ่อนจะใช้กรดเกลือหรือกรดไนตริกเจือจางกระบวนการที่ได้รับความนิยมมากที่สุดคือการใช้กรดกำมะถันเจือจาง (ร้อยละ 0.5-1.5, 160 องศาเซลเซียส) เนื่องจากในสภาวะนี้จะได้ผลได้ (Yield) ของเฮมิเซลลูโลสสูงถึงร้อยละ 75-90 ข้อเสียของกระบวนการนี้คือการใช้อุณหภูมิที่สูงจะทำให้เกิดสารข้างเคียงที่ไม่พึงประสงค์และเป็นพิษต่อกระบวนการหมักในขั้นตอนต่อไป ถึงแม้ว่าการใช้กรดอ่อนจะมีต้นทุนต่ำ แต่การกำจัดสารพิษที่เกิดขึ้นมีราคาสูง ดังนั้น จึงมีการคิดกระบวนการใหม่โดยเพิ่มความเข้มข้นของกรดที่ใช้และทำในอุณหภูมิที่ต่ำกว่า ทำให้สามารถลดการเกิดสารพิษลงได้ การปรับสภาพสามารถทำได้ด้วยต่าง

เช่นกัน เชื่อกันว่าค่าจะทำให้เกิดปฏิกิริยาสบู่ (Saponification) ของพันธะเอสเทอร์ระหว่างโมเลกุลของเฮมิเซลลูโลสกับสารอื่น เช่น ลิกนิน มีรายงานว่ารุกรานของวัสดุลิกโนเซลลูโลสเพิ่มขึ้น การปรับสภาพด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์เจือจางทำให้วัสดุเกิดการพองตัวส่งผลให้พื้นที่ผิวภายในเพิ่มขึ้น ระดับขั้นของพอลิเมอร์ไรเซชัน (Degree of Polymerization) และความเป็นผลึกลดลง เกิดการแยกตัวของโครงสร้างลิกนินและเฮมิเซลลูโลส การใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) เจือจางนี้สามารถลดเปอร์เซ็นต์ของลิกนินลงได้ในไม้เนื้อแข็ง และส่งผลดีต่อสารจำพวกฟางที่มีปริมาณลิกนินต่ำ แต่ไม่เหมาะกับวัสดุที่มีลิกนินสูง แอมโมเนียก็สามารถใช้ในการกำจัดลิกนินได้ ประสิทธิภาพในการกำจัดลิกนินด้วยแอมโมเนียอยู่ที่ร้อยละ 60-80 สำหรับชังข้าวโพด (Corn Cobs) และร้อยละ 65-85 สำหรับหญ้าสวิตช์กราส (Switch Grass)

การปรับสภาพด้วยวิธีทางชีวภาพ เห็ดราหลายชนิดสามารถย่อยลิกนินและเฮมิเซลลูโลสได้ โดยทั่วไปราสีน้ำตาลจะย่อยเซลลูโลส ส่วนราสีขาวและราผุอ่อน (Soft Rot) จะย่อยลิกนินและเฮมิเซลลูโลส ราขาวจะเป็นตัวเลือกที่ดีที่สุดโดยสามารถให้น้ำตาลรีดิวซ์ (Reducing Sugar) ได้ถึงร้อยละ 35 ในเวลาห้าสัปดาห์ เพื่อป้องกันไม่ให้ราใช้เซลลูโลส จึงมีการพัฒนาราสายพันธุ์ที่ไม่มีเอนไซม์เซลลูเลสขึ้น แม้ว่าวิธีทางชีวภาพนี้จะสามารถทำได้ในสภาวะปกติและมีค่าใช้จ่ายต่ำ แต่การย่อยลิกนินทางชีวภาพต้องอาศัยเวลาที่ยาวนานมาก จึงไม่ค่อยเหมาะสมในการนำมาใช้จริง

1.10 การย่อยเซลลูโลส ⁽²⁾

กระบวนการนี้เป็นการแยกสลายด้วยน้ำ (Hydrolysis) เซลลูโลสให้เป็นกลูโคส โดยใช้กรดต่าง หรือเอนไซม์เซลลูเลสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ถ้าวัตถุดิบผ่านการปรับสภาพแล้วจะได้น้ำตาลมากกว่าร้อยละ 90 เมื่อเทียบกับการไม่ปรับสภาพจะให้น้ำตาลเพียงร้อยละ 20

การย่อยด้วยกรด

ในกรณีนี้จะเป็นกระบวนการที่เรียกว่ากระบวนการย่อยด้วยกรดแบบสองขั้นตอน (Two-Stage Acid Process) โดยทำต่อจากการย่อยด้วยกรดในกระบวนการปรับสภาพ ซึ่งในขั้นตอนนี้สามารถใช้ได้ทั้งกรดอ่อนและกรดแก่ กระบวนการที่ใช้กรดอ่อนเป็นกระบวนการที่เก่าแก่ที่สุดกว่าร้อยละ 90 ในขั้นตอนการปรับสภาพจะใช้กรดกำมะถันเจือจาง (ร้อยละ 0.7) ทำที่อุณหภูมิต่ำ (190 องศาเซลเซียส) เพื่อป้องกันการเกิดสารไม่พึงประสงค์ หลังจากแยกน้ำตาลเพนโทส (Pentose) ออกไปแล้ว ในขั้นสองจะเพิ่มอุณหภูมิขึ้นเป็น 215 องศาเซลเซียส แต่ลดความเข้มข้นกรดลงเพื่อผลิตน้ำตาลเฮกโซส (Hexose) ทั้งสองขั้นตอนใช้เวลาในแต่ละขั้นเพียง 3 นาที น้ำตาลที่ได้จากทั้งสองขั้นจะนำไปเข้ากระบวนการหมักถ้าใช้กรดแก่จะได้ประสิทธิภาพที่สูงกว่าคือได้น้ำตาลมากกว่าร้อยละ 90 และสามารถใช้กับวัตถุดิบที่หลากหลายกว่า ปัญหาสำหรับการใช้กรดแก่นอกจากราคา

ของอุปกรณ์ที่ใช้จะแพงกว่าแล้ว การนำกรรคกลับมาใช้ใหม่ เพื่อลดปริมาณกรรคที่ต้องใช้เป็นเรื่องที่สำคัญมาก การใช้เชื้อแผ่นสามารถนำร้อยละ 80 ของกรรคกลับมาใช้ได้ ในขณะที่ไอออนแลกเปลี่ยนประจุสามารถนำกลับมาได้กว่าร้อยละ 97

การย่อยด้วยเอนไซม์

การใช้เอนไซม์เซลลูเลสในการย่อยเซลลูโลสมีข้อได้เปรียบการใช้กรดตรงสภาวะการทำงานที่ไม่รุนแรง ทำให้มีต้นทุนการบำรุงรักษาที่ต่ำ มีประสิทธิภาพสูงสามารถใช้กับกระบวนการปรับสภาพเกือบทุกชนิด ยกเว้นการปรับสภาพทางกายภาพเพียงอย่างเดียว การใช้เอนไซม์นี้น่าจะมีศักยภาพสูงที่สุดในระยะยาว เนื่องจากมีต้นทุนที่ต่ำกว่า ประสิทธิภาพของวิธีนี้จะขึ้นอยู่กับสัดส่วนวัตถุดิบต่อเอนไซม์ ถ้าสัดส่วนสูงไปจะเกิดการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ ในขณะที่สัดส่วนที่ต่ำไปจะทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาและประสิทธิภาพลดลงตามไปด้วย อัตราการเกิดปฏิกิริยาสามารถทำให้เพิ่มขึ้นได้โดยการเติมสารลดแรงตึงผิวเพื่อช่วยในการลดความชื้น (Desorption) ของเอนไซม์หลังเกิดปฏิกิริยา การใช้น้ำย่อยรวม (Enzyme Cocktails) หรือใช้เอนไซม์หลายๆชนิดผสมกัน ไม่ว่าจะเป็นเซลลูเลสจากหลายๆแหล่งหรือผสมเอนไซม์ชนิดอื่น เช่น เพคติเนสลงไป ก็สามารถช่วยให้เปลี่ยนเศษไม้ที่ผ่านการระเบิดด้วยไอน้ำไปเป็นน้ำตาลได้เกือบทั้งหมด มีรายงานว่าการเติม *T.reesei cellobiohydrolase I* ลงไปในเอนไซม์เซลลูโลสที่สกัดได้จาก *Thermomonospora fusca* จะทำให้อัตราการแยกสลายด้วยน้ำเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่า เอนไซม์ที่ใช้ในกระบวนการนี้มีด้วยกัน 3 กลุ่มคือลิกเนส เอนไซม์เซลลูเลส และเซลลูเลส เอนไซม์กลุ่มลิกเนสเป็นเอนไซม์ของราผลิตออกมาย่อยลิกนินในสภาวะที่มีออกซิเจน ในกลุ่มนี้มีเอนไซม์ 2 ประเภทคือ ฟีนอลออกซิเดส หรือแลคเคสและเปอร์ออกซิเดส เอนไซม์กลุ่มลิกเนสนี้มีขนาดใหญ่เกินกว่าที่จะผ่านเนื้อไม้ที่ไม่มีการปรับสภาพเข้าไปย่อยลิกนินภายในได้ สันนิษฐานกันว่าในช่วงแรกลิกเนสน่าจะย่อยสารโมเลกุลขนาดเล็กที่ซึมผ่านออกมาเพื่อทำให้ลิกเนสเปลี่ยนแปลงก่อนเอนไซม์เซลลูเลสเป็นสาร โพลีเมอร์ของน้ำตาลที่ละลายได้ในอคาไลประกอบด้วยบางส่วนของผนังเซลล์ที่เป็นเซลลูโลส และเบต้า-D-กลูแคน สารตระกูลเพคติน (Polygalacturonans) และ เฮเทอโรพอลิแซ็กคาไรด์ (Heteropolysaccharide) ที่มีแกแลคโตสแมนโนส และไซโลส เอนไซม์เซลลูเลสจะมีจำนวนหน่วยของโมโนเมอร์ในช่วงประมาณ 100-200 หน่วยซึ่งเล็กกว่าเซลลูโลส (10000-14000 หน่วย) มาก เอนไซม์กลุ่มของเอนไซม์เซลลูเลสจะประกอบด้วยหน่วยที่ยึดจับกับคาร์โบไฮเดรตกับหน่วยที่ช่วยกระตุ้นปฏิกิริยา โดยที่หน่วยหลังจะเป็นกลุ่มไฮโดรเลสที่ช่วยสลายพันธะเคมีที่มีพันธะไกลโคไซด์ (Glycoside Hydrolase) ที่จะทำลายพันธะไกลโคไซด์ (Glycoside) ระหว่างโมเลกุลของน้ำตาล และ คาร์โบไฮเดรตเอสเทอเรส (Carbohydrate Esterase) ที่จะย่อยพันธะเอสเทอร์ที่เป็นกลุ่มข้างเคียง (Side Group) ของพอลิเมอร์ เอนไซม์ของกลุ่มนี้คือไซลานเนสที่ย่อยพันธะ β 1-4 ระหว่าง

น้ำตาลหลักหรือไซลัน เปลี่ยนเฮมิเซลลูโลสให้กลายเป็นไซโลโอลิโกเมอร์ (Xylooligomer) แล้วย่อยต่อจนได้ไซลัน โมเลกุลเดี่ยว เซลลูโลสเป็นน้ำตาลกลูโคสต่อกันเป็นสายยาวด้วยพันธะ β 1-4 โดยปริมาณเฉลี่ยของจำนวนกลูโคสต่อสายเซลลูโลสอยู่ประมาณ 10000 หน่วย ในเซลลูโลสมีทั้งส่วนที่เป็นผลึกและส่วนที่มีรูปร่างไม่แน่นอน (Amorphous) ประกอบเป็นโครงสร้างที่แข็งแรงและทนทานต่อการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ โดยเฉพาะส่วนที่เป็นผลึก เอนไซม์กลุ่มเซลลูเลสเป็นกลุ่มผสมของเอนไซม์ชนิดต่างๆ ในการย่อยพันธะไกลโคไซด์ โดยมี Endoglucanase, Cellobiohydase, β -Glucosidase การทำงานของกลุ่มนี้เริ่มจาก Endoglucanase หรือ Carboxymethylcellulose (CM)-Cellulase จะย่อยตำแหน่งต่างๆ ภายในส่วนที่มีรูปร่างไม่แน่นอน แบบสุ่มเพื่อเป็นการเปิดช่องทางให้ Cellobiohydase เข้าไปทำงานต่อ Cellobiohydase หรือ Exoglucanase ซึ่งเป็นส่วนประกอบหลัก (ประมาณร้อยละ 40-70 ของโปรตีนทั้งหมดในกลุ่ม) จะค่อยๆ ตัดน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหรือคู่ออกจากปลายสายเซลลูโลส เอนไซม์นี้จะสามารถย่อยโครงสร้างที่เป็นผลึกได้ในขั้นตอนสุดท้ายกลูโคสโมเลกุลคู่ หรือ Cellooligosaccharides จะถูกตัดออกเป็นกลูโคสด้วยเอนไซม์ β -Glucosidase ต้นทุนของเอนไซม์ที่ใช้อาจสูงถึงครึ่งหนึ่งของต้นทุนในกระบวนการแยกสลายด้วยน้ำทั้งหมด แม้ว่าในช่วงสองทศวรรษที่ผ่านมา ราคาของเอนไซม์จะลดลงอย่างมาก การค้นหาเชื้อที่สามารถผลิตเซลลูเลสในปริมาณมากจึงเป็นหัวข้อหนึ่งที่ได้รับการค้นคว้ากันอย่างแพร่หลาย รวมทั้งการค้นหาเอนไซม์ที่สามารถทนทาน pH อุณหภูมิ และสารยับยั้งชนิดต่างๆ เพื่อการใช้งานในสภาวะต่างๆ ได้ดียิ่งขึ้น การปรับปรุงสายพันธุ์ที่มีอยู่ด้วยวิธีการทางพันธุกรรมโดยใช้เทคนิคทางชีวสารสนเทศเข้ามาช่วยก็เป็นทางเลือกอีกทางหนึ่งที่น่าสนใจ มีการผลิต Designer Enzymes หรือที่เรียกว่า Glycosynthase โดยการปรับเปลี่ยนกรดอะมิโนบางตัวในสายโปรตีน เช่นการแทนที่ Typtophan สองตัวด้วย Phenylalanine สามารถเพิ่ม Activity ของ Peroxidase ได้ [Howard 2003] การนำเอนไซม์เซลลูเลสกลับมาใช้ใหม่เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการลดต้นทุน เซลลูเลสสามารถนำกลับออกมาจากส่วนใสด้านบน (Supernatant) หรือตะกอนด้านล่างก็ได้ แต่จากส่วนใสด้านบนจะทำได้ง่ายกว่า มีงานวิจัยที่ทำการนำเอนไซม์ผสมระหว่าง Celluclast และ Novozym กลับมาใช้ใหม่ได้ถึง 5 ครั้งโดยมีรอบของการ (Elapsed Time) 48 ชั่วโมงระหว่างรอบของการนำกลับ อย่างไรก็ตามประสิทธิภาพของเอนไซม์ก็ลดลงทุกๆ รอบของการนำกลับมาใช้

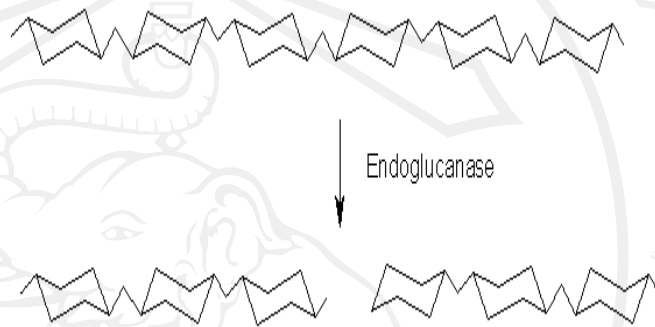
1.10.1 เอนไซม์ที่ใช้ในปฏิกิริยาการย่อยสลายเซลลูโลส ⁽¹⁴⁾

เอนไซม์ที่ใช้ในปฏิกิริยาการย่อยสลายเซลลูโลส คือ เอนไซม์เซลลูเลส (Cellulase) ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่พบในจุลินทรีย์หลายชนิด แบคทีเรียที่นิยมนำมาใช้ผลิตเอนไซม์เซลลูโลส คือ *Trichoderma viride* หรือภายหลังจัดอยู่ใน *T.reessi*

ชนิดและตำแหน่งทำงานของเอนไซม์

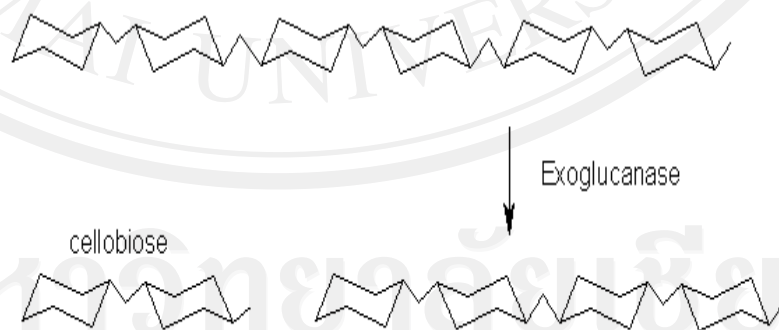
เอนไซม์เซลลูโลสเป็นกลุ่มของเอนไซม์ 3 ชนิด ที่ทำงานร่วมกันแบบแอ็คชั่นเสริมสร้างกัน (Synergistic Action) ได้แก่

เอ็นโดกลูคาเนส (Endoglucanase, CX) ทำหน้าที่ย่อยสลายโอลิโกแซคคาไรด์ และยังย่อยสลายเซลลูโลสให้เปลี่ยนเป็นเซลโลไบโอส ตำแหน่งที่ทำงานเป็นแบบสุ่ม (Random)



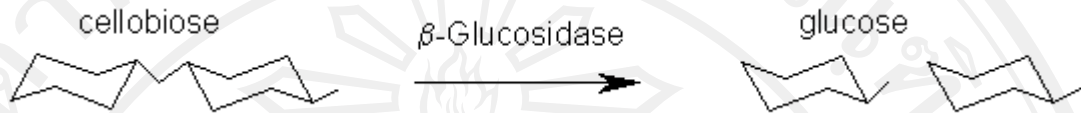
รูป 1.10 ตำแหน่งที่เอนไซม์เอ็นโดกลูคาเนสเข้าทำปฏิกิริยาแบบสุ่ม

เอ็กโซกลูคาเนส (Exoglucanase, C1) ทำหน้าที่ย่อยสลายโอลิโกแซคคาไรด์ และเซลลูโลสให้เปลี่ยนเป็นเซลโลไบโอส โดยจะย่อยสลายจากทางด้านปลายรีดิวซ์ (Reducing End) ของสายโซ่เซลลูโลส



รูป 1.11 ตำแหน่งที่เอนไซม์เอ็กโซกลูคาเนสเข้าทำปฏิกิริยา

เบต้า-กลูโคซิเดส (Beta-Glucosidase, Cb) ทำหน้าที่ย่อยสลายเซลโลไบโอสให้เปลี่ยนเป็นกลูโคส

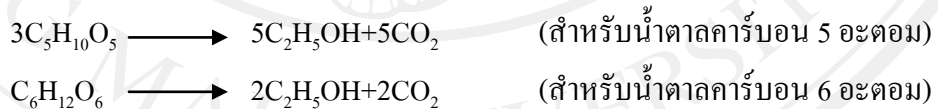


รูป 1.12 ตำแหน่งที่เอนไซม์เบต้า-กลูโคซิเดสเข้าทำปฏิกิริยา

การทำงานของเอนไซม์เซลลูเลส จะถูกยับยั้งด้วยปริมาณของสารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นดังนี้ β -Glucosidase จะถูกยับยั้งด้วยปริมาณกลูโคสที่เพิ่มขึ้น ซึ่งจะมีผลยับยั้งต่อเนื่อง คือ ทำให้มีการสะสมของเซลโลไบโอสเพิ่มขึ้น ซึ่งจะเป็นตัวยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ Endoglucanase และ Exoglucannase ทำให้ปฏิกิริยาช้าลงและยุติในที่สุด

1.11 กระบวนการหมักเอทานอล⁽²⁾

สิ่งมีชีวิตหลายชนิด ตั้งแต่แบคทีเรีย รา หรือยีสต์สามารถเปลี่ยนสารคาร์โบไฮเดรตให้กลายเป็นเอทานอลได้ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน ปริมาณเอทานอลที่ได้ตามทฤษฎีต่อน้ำตาลหนึ่งกิโลกรัมคือ 0.51 กิโลกรัม โดยในส่วนของที่เหลือจะเป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้



แม้ว่าการหมักเฮกโซสไปเป็นเอทานอลจะเป็นที่รู้จักกันตั้งแต่ประมาณ 6000 ปีที่แล้ว แต่การหมักเพนโทสนั้นเพิ่งจะเริ่มมีการค้นคว้ากันเมื่อมีการย่อยสลายลิกโนเซลลูโลสและเพิ่งจะได้ผลในช่วงทศวรรษที่ 1980 อย่างไรก็ตามสิ่งมีชีวิตทุกชนิดก็ยังมีข้อจำกัดไม่ว่าจะเป็นเรื่องที่ไม่สามารถหมักได้ทั้งเพนโทสและเฮกโซส หรือการผลิตชีวมวลหรือเซลล์ใหม่ขึ้นทำให้ปริมาณเอทานอลลดลง นอกจากนั้นเซลล์ยังอาจตายได้ภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจนอีกด้วย ดังนั้น ในสมัยก่อนจึงใช้ถึงปฏิกิริยาต่อแบบอนุกรมเพื่อหมักน้ำตาลชนิดต่างๆ ในปัจจุบันจึงมีการลดจำนวนถึงปฏิกิริยาโดยการรวมปฏิกิริยาให้เกิดร่วมกันในถังเดียวกัน เช่นการรวมปฏิกิริยาการแยกสลายด้วยน้ำเข้ากับการหมัก ทำให้ผลได้สูงขึ้นและลดการเกิดสารยับยั้งให้น้อยลงได้ การปรับแต่งพันธุกรรมอาจทำให้ยีสต์หรือแบคทีเรียสามารถหมักได้ทั้งกลูโคสและไซโลสได้พร้อมกัน แต่ก็ยังมีปัญหาในการหมัก

ไซโลสและอาราบิโนส ในอนาคตอันใกล้ ก็อาจจะสามารถพัฒนาวัสดุที่สามารถหมักน้ำตาลได้หมดทั้ง 5 ชนิดขึ้นมาได้

1.12 ปัจจัยที่มีผลต่อการทำงานของเอนไซม์ ⁽¹⁴⁾

1.12.1 อุณหภูมิ (Temperature)

อัตราการเกิดปฏิกิริยาของเอนไซม์จะมีค่าเพิ่มขึ้นเป็นสองเท่าในทุกๆ อุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น 10 องศาเซลเซียส อัตราการเกิดปฏิกิริยามีค่าสูงสุดที่อุณหภูมิหนึ่ง เรียกว่า “ค่าอุณหภูมิที่เหมาะสมในการทำงาน (Optimum Temperature)” เมื่ออุณหภูมิสูงหรือต่ำกว่าจุดนี้ อัตราการเกิดปฏิกิริยาของเอนไซม์จะช้าลง เพราะเอนไซม์เกิดการเสียสภาพ (Denaturation) หรืออยู่ในสถานะที่ไม่เหมาะสมในการเกิดปฏิกิริยา โดยเอนไซม์เซลลูโลสจะเกิดการเสียสภาพที่อุณหภูมิประมาณ 80 องศาเซลเซียส

1.12.2 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

เอนไซม์ทำงานได้ดีที่สุดที่ pH ค่าหนึ่งเรียกว่า ค่า pH ที่เหมาะสมในการทำงาน ณ จุดที่ pH มีค่าสูงหรือต่ำกว่าค่านี้ กิจกรรม (Activity) ของเอนไซม์จะลดลง เอนไซม์เซลลูเลสจะทำงานได้ดีที่สุดที่ค่า pH ระหว่าง 5.0 ถึง 9.0

1.12.3. ความเข้มข้นของซับสเตรท (Substrate)

เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของซับสเตรท อัตราการเกิดปฏิกิริยาของเอนไซม์จะมีค่าสูงขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงแรก และลดช้าลงเมื่อความเข้มข้นของซับสเตรทสูงขึ้นจนในที่สุดอัตราเร็วของปฏิกิริยาจะไม่เพิ่มขึ้นอีก

1.12.4. ปริมาณเอนไซม์

เมื่ออัตราเร็วของปฏิกิริยาดำเนินไปจนถึงจุดสูงสุด พบว่า อัตราเร็วของปฏิกิริยาจะมีค่าเป็นสัดส่วนโดยตรงกับความเข้มข้นของเอนไซม์

1.12.5. ผลของสารยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ (Enzyme Inhibitor)

เป็นตัวแปรหนึ่งที่ใช้ในการอธิบายกระบวนการทำงานของเอนไซม์ ความจำเพาะของเอนไซม์ต่อซับสเตรท และลักษณะของ Function Group ที่บริเวณ Active Site ทำให้เข้าใจ และสามารถควบคุมกระบวนการที่เกิดขึ้นได้

1.12.6. การติดเชือบนเปื้อน

การติดเชื้อหรือการปนเปื้อนเชื้ออื่นๆ ที่ไม่ต้องการเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ได้ผลผลิตเอทานอลต่ำ เชื้อที่เข้ามาปนเปื้อนเหล่านี้จะแย่งใช้น้ำตาลเป็นอาหาร และปล่อยเอนไซม์ที่มีผล

ให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสถานะในถังหมักให้เป็นผลิตภัณฑ์อื่น การควบคุมสามารถทำได้โดยการฆ่าเชื้อโดยเฉพาะซึ่งมีจำหน่ายทั่วไป

1.13 ปัจจัยที่มีผลต่อการเสถียรภาพของเอนไซม์⁽¹⁴⁾

เนื่องจากเอนไซม์เป็นโปรตีนชนิดหนึ่ง ปัจจัยที่มีผลต่อการเสถียรภาพของโปรตีน จึงมีผลต่อการเสถียรภาพของเอนไซม์ด้วย เช่น สภาพความเป็นกรด-ด่าง ตัวทำละลายอินทรีย์ ยูเรีย ความร้อนหรือรังสีอัลตราไวโอเล็ต เป็นต้น

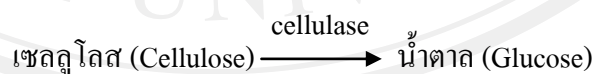
สมบัติของซับสเตรตที่มีผลต่อการทำงานของเอนไซม์

1. ความเป็นผลึก วัตถุประสงค์ที่มีความเป็นผลึกอยู่มาก ทำให้เกิดการย่อยได้ยากขึ้น
2. พื้นที่ผิวสัมผัส ถ้าพื้นที่ผิวสัมผัสระหว่างเอนไซม์กับซับสเตรตมีมาก โอกาสที่เกิดปฏิกิริยาจะมากขึ้นตามด้วยเช่นกัน (ปริมาณลิกนิน และเฮมิเซลลูโลสในวัตถุประสงค์ส่งผลให้เกิดการย่อยได้ยากขึ้น)

3. องศาการเกิดโพลิเมอร์ไรเซชัน (Degree of Polymerization) โมเลกุลของเซลลูโลสมีลักษณะเป็นเส้นใยที่แข็งแรง เนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจน ยึดอยู่จึงถูกย่อยได้ยาก การเพิ่มองศาการเกิดโพลิเมอร์ไรเซชันจะทำให้เส้นใย มีความแข็งแรงมากขึ้นกว่าเดิม จึงถูกย่อยได้ยากขึ้น

1.14 ปฏิกิริยาที่เกี่ยวข้อง⁽¹⁵⁾

1. ปฏิกิริยาแซคคาริฟิเคชัน (Saccharification) แซคคาริฟิเคชันเป็นกระบวนการเปลี่ยนแปลงเป็นน้ำตาล ดังสมการ



2. ปฏิกิริยาการหมัก (Fermentation) Fermentation รากศัพท์มาจากภาษาลาติน Fervere ซึ่งแปลว่า To be Boiling การเรียกเช่นนี้เป็นเพราะการหมักส่วนใหญ่ในระยะแรกจะมีแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้น ทำให้เป็นฟองขึ้นมาลักษณะคล้ายกับการต้มน้ำให้เดือด

Fermentation หมายถึง กระบวนการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีของสารอินทรีย์ โดยปฏิกิริยาของเอนไซม์ เพื่อทำให้สารอินทรีย์นั้นเป็นสารที่มีองค์ประกอบง่ายขึ้น ในปัจจุบัน Fermentation หมายรวมทั้งกระบวนการเปลี่ยนแปลงสารประกอบที่มีองค์ประกอบต่างๆ ให้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนด้วย

ประเภทของการหมัก

1. Aerobic Fermentation คือกระบวนการหมักที่ต้องการออกซิเจน เช่น การเติมกรดน้ำส้ม (Acetic Acid) กรดมะนาว (Citric Acid)
2. Anaerobic Fermentation คือการบวนการหมักที่ไม่ต้องการออกซิเจน เช่น การผลิตแอลกอฮอล์

1.15 เทคโนโลยีในการย่อยเซลลูโลสและการหมักพร้อมกัน⁽²⁾

Separated (Sequential) Hydrolysis and Fermentation (SHF) ในระบบนี้ จะทำการหมักกลูโคสให้เป็นเอทานอลก่อน หลังจากทำการกลั่นแยกเอทานอลออกไป ก็จะนำส่วนที่เหลือไปทำการหมักไซโลสต่อ ก่อนที่จะนำไปกลั่นแยกอีกครั้ง โดยส่วนของการหมักเอทานอลอาจต่อแบบขนานกับถังหมักไซโลสก็ได้

Simultaneous Saccharification and Fermentation (SSF) เป็นการรวมการ การแยกสลายด้วยน้ำกับการหมักเข้าด้วยกัน เพื่อลดจำนวนถังปฏิกรณ์และปริมาณสารยับยั้งที่เกิด และลดความเข้มข้นกลูโคสลงเพื่อไม่ให้เกิดการยับยั้งการหมักโดยกลูโคส การลดเวลาในการแยกสลายด้วยน้ำทำให้ต้องใช้เอนไซม์ในปริมาณที่สูงขึ้นและได้น้ำตาลน้อยลง วิธีนี้จึงต้องหาจุดสมดุลระหว่างต้นทุนที่ลดลงจากการยุบรวมถังปฏิกรณ์และต้นทุนที่เพิ่มขึ้นจากเอนไซม์ เนื่องจากอุณหภูมิที่เหมาะสมระหว่างการย่อยเซลลูโลส (45 องศาเซลเซียส) สูงกว่าอุณหภูมิของการหมักเอทานอล (30 องศาเซลเซียส) อุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการ SSF จึงอยู่ที่ 38 องศาเซลเซียส หรือประมาณกึ่งกลางของทั้งสองจุด แต่ยีสต์หรือแบคทีเรียทั่วไปไม่สามารถทำงานได้ที่อุณหภูมินี้ จึงจำเป็นต้องมีการปรับปรุงสายพันธุ์ของยีสต์หรือแบคทีเรียให้สามารถทนอุณหภูมิที่สูงขึ้นได้ เช่นมีการค้นพบยีสต์ *Kluyveromyces marxianus* และ *K.fragilis* ที่มีอุณหภูมิเหมาะสมในการผลิตเอทานอลที่ 42 องศาเซลเซียส หรือ *Candidaacidothermophilum* ที่สามารถผลิตเอทานอลได้ถึงร้อยละ 80 ของค่าทางทฤษฎีที่ 40 องศาเซลเซียสโดยทั่วไป *Kluyveromyces* จะสามารถทนอุณหภูมิสูงได้ดีกว่าสายพันธุ์ *Candida* หรือ *Saccharomyces* ข้อดีของวิธีการนี้คือสามารถลดการยับยั้งการย่อยเซลลูโลสโดยน้ำตาล (Endproduct Inhibition) และสามารถลดระยะเวลาตลอดจนถึงปฏิกรณ์ที่ใช้ แต่ก็มีรายงานว่าเอทานอลที่เกิดขึ้นทำให้เกิดกิจกรรม (Activity) ของเซลล์ลดลง (ร้อยละ 64 ที่ความเข้มข้นเอทานอล 60 กรัมต่อลิตร) นอกเหนือไปจากนั้น ความสามารถทนเอทานอลของยีสต์ก็จะลดลงเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นด้วย

ระบบใหม่ที่พัฒนาขึ้นมาล่าสุดเป็นการรวมกลุ่มของสิ่งมีชีวิตที่ผลิตเอนไซม์ที่จำเป็นทั้งหมดให้เข้ามาอยู่ในถังปฏิกรณ์ใบเดียวหรือที่เรียกว่า Consolidated BioProcessing (CBP) ระบบ

นี่น่าจะเป็นปลายทางขั้นสุดท้ายในการวิวัฒนาการของเทคโนโลยีการเปลี่ยนแปลงสารชีวมวล ระบบ CBP นี้จะไม่มีค่าลงทุนหรือดำเนินการในการผลิต (หรือซื้อ) เอนไซม์ชนิดใดๆเลย ทั้งยังลดความหลากหลายของวัตถุดิบในการผลิตเอนไซม์ชนิดต่างๆและการหมัก ลงได้ อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันยังไม่มีสิ่งมีชีวิตที่สามารถย่อยสลายเซลลูโลสและผลิตเอทานอลได้ในปริมาณมากๆ ระบบนี้จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาและวิจัยอีกมากก่อนที่จะสามารถนำมาใช้จริงได้

1.16 ผลกระทบเชิงเศรษฐศาสตร์และสังคมของการผลิตเอทานอลจากฟางข้าว

ผลจากสถานการณ์ราคาน้ำมันที่ผันผวนและมีแนวโน้มขยับตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้รัฐบาล หันมาหาทางออกด้วยการจัดหาพลังงานทางเลือกอื่นทดแทน โดยเฉพาะเพิ่มการผลิต "แก๊สโซฮอล์" โดยใช้ เอทานอล เป็นส่วนผสมในน้ำมันเบนซิน 95 แทนสาร MTBE (Methyl Tert-Butyl Ether) โดยล่าสุดรัฐบาลเตรียมให้โรงกลั่นน้ำมันยกเลิกการใช้สาร MTBE ในน้ำมันเบนซินภายในปี 2549 เพื่อส่งเสริมการใช้เอทานอล เป็นสารเพิ่มค่าออกเทนแทน ปัจจุบันประเทศไทยมีการนำเข้าสาร MTBE จากต่างประเทศปีละกว่า 4,000 ล้านบาท หรือ คิดเป็น 10 เปอร์เซ็นต์ ของการนำเข้าน้ำมันเบนซิน เนื่องจาก MTBE เป็นสารที่ช่วยลดปริมาณก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ออกมาจากไอเสียรถยนต์ และช่วยเพิ่มค่าออกเทนของน้ำมันแทนสารตะกั่ว แต่ เนื่องจากสารดังกล่าวส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมหากมีการปนเปื้อนในน้ำใต้ดิน ดังนั้นถ้าประเทศไทยสามารถผลิตเอทานอลจากผลผลิตทางเกษตรมาใช้แทน MTBE ได้มากขึ้น จะทำให้ไทยลดการสูญเสียเงินตราต่างประเทศลงได้จำนวนมาก

วัตถุดิบประเภทชีวมวลที่สามารถนำมาใช้ในการผลิตเอทานอล มี 2 ประเภท คือ

1. วัตถุดิบประเภทแป้งน้ำตาล เช่น อ้อย มันสำปะหลัง มันฝรั่ง มันเส้น หัวบีต ข้าว ข้าวโพด กากน้ำตาล

2. วัตถุดิบประเภทเซลลูโลส เช่น ฟางข้าว แกลบ ชังข้าวโพด

เนื่องจากวัตถุดิบประเภทแป้งและน้ำตาลมีที่สูงกว่าวัตถุดิบประเภทเซลลูโลส และยังเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตสินค้าบริโภค เช่น น้ำตาล อาหารสัตว์ เป็นต้น ซึ่งเมื่อนำวัตถุดิบประเภทนี้มาผลิตเอทานอล จึงอาจส่งผลกระทบต่อการผลิตสินค้าด้านอื่นๆ ดังนั้น จึงควรเลือกวัตถุดิบประเภทเซลลูโลสมาใช้ในการผลิตเอทานอล

ภายหลังจากเกษตรกรเก็บเกี่ยวข้าวแล้ว สิ่งที่เหลือทิ้งและไม่มีใครต้องการคือ ฟางข้าว แม้ว่าการจัดการกับฟางข้าวเหลือทิ้งจะมีหลายวิธี เช่น นำไปเลี้ยงสัตว์ ฝังกลบหน้าดินเพื่อป้องกันการสูญเสียความชื้น หรือ ใช้ในการเพาะเห็ด หากแต่เกษตรกรในพื้นที่นาปรังส่วนใหญ่มักใช้วิธีการเผาฟางข้าวเนื่องจากเป็นวิธีเตรียมพื้นที่สำหรับการทำนาครั้งต่อไปที่เร็วที่สุด แม้เกษตรกร

จะทราบว่า การเผาฟางข้าวก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ และภาวะโลกร้อน แต่เกษตรกรเองก็ไม่มีศักยภาพที่จะลงทุนเพิ่มเพื่อกำจัดฟางข้าว ดังนั้นหากสามารถเพิ่มมูลค่าจากการใช้ประโยชน์ของฟางข้าวได้ จึงน่าจะเป็นแรงจูงใจให้เกษตรกรหยุดเผาฟางข้าว และเป็นการสร้างรายได้ให้กับเกษตรกรได้อีกทางหนึ่ง

เนื่องจากประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ทำให้มีฟางข้าวอยู่เป็นจำนวนมากและน่าจะเพียงพอต่อการนำไปใช้ประโยชน์ด้านการผลิตพลังงาน การนำฟางข้าวมาใช้ผลิตพลังงาน โดยเฉพาะพลังงานทดแทนพลังงานฟอสซิล เช่น ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ และน้ำมัน แม้ว่าฟางข้าวจะเป็นชีวมวลที่มีพลังงานไม่มากนัก และมีความยุ่งยากในการเก็บรวบรวมเมื่อเปรียบเทียบกับชีวมวลชนิดอื่น ๆ แต่ในอนาคตอันใกล้ที่ชีวมวลอื่น ๆ ได้ถูกจับจองไปหมดแล้ว ฟางข้าวจึงน่าจะเป็นทางเลือกหนึ่งที่ยังเหลืออยู่ จากงานวิจัยนี้ น่าจะเป็นการช่วยเพิ่มทางเลือกและนโยบายการพัฒนาพลังงานจากฟางข้าว หากมีการนำนโยบายการจัดการฟางข้าวไปใช้จริงในอนาคต คาดว่าจะช่วยลดมลพิษ เพิ่มรายได้ให้กับเกษตรกร และช่วยเพิ่มแหล่งพลังงานให้กับประเทศ ซึ่งนับเป็นการแก้ปัญหาฟางข้าวเหลือทิ้งได้อย่างยั่งยืนที่สุดในที่สุด

1.17 ผลงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Mohammed⁽¹⁶⁾ ได้ศึกษาการปรับสภาพฟางข้าวโดยใช้การระเบิดด้วยไอน้ำ ก่อนนำฟางข้าวเข้าสู่กระบวนการ Saccharification โดยใช้ *Trichoderma resei* เพื่อผลิตเอนไซม์เซลลูเลส การปรับสภาพฟางข้าวคือ อิทธิพลที่สำคัญ เนื่องจากทำให้เอนไซม์ทำงานได้ง่ายขึ้น จุดประสงค์ในการศึกษาคือ หาสภาวะที่เหมาะสมของความดันไอน้ำ และเวลาในการใช้ไอน้ำในการปรับสภาพฟางข้าว ความดันไอน้ำที่ใช้คือ 2.55 3.04 3.53 และ 4.02 เมกะปาสคาล ระยะเวลาในการใช้ไอน้ำที่ใช้อยู่ในช่วง 0.5 ถึง 10 นาที ผลการทดลองพบว่า เมื่อใช้ความดันไอน้ำ 3.53 เมกะปาสคาล และเวลาในการใช้ไอน้ำ 2 นาที สามารถเพิ่มประสิทธิภาพให้กระบวนการ Saccharification โดยใช้เอนไซม์ได้สูงที่สุด คือได้ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ 15 กรัมต่อลิตร จากนั้นนำฟางข้าวที่ผ่านการระเบิดด้วยไอน้ำที่ความดัน 3.53 เมกะปาสคาล เป็นเวลา 2 นาที ไปผ่านการสกัดด้วยน้ำ หรือสกัดด้วยด่างอีกครั้ง พบว่า ผลที่ได้จากกระบวนการ Saccharification ไม่แตกต่างกันคือ ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ 13 และ 17.5 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ

Zhang และคณะ⁽¹⁷⁾ ได้ศึกษาถึงการลดต้นทุนในการผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ พบว่าต้องเข้าใจ 2 กระบวนการคือ การปรับสภาพฟางข้าวและการผลิตเอนไซม์เซลลูเลส ในการปรับสภาพฟางข้าวได้มีการใช้สารละลายด่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 2 พบว่าสามารถเพิ่มปริมาณเซลลูโลสได้ร้อยละ 54.83 และลดปริมาณเฮมิเซลลูโลสและลิกนินได้ร้อยละ 61.07 และ 36.24 ตามลำดับ จากนั้นนำ

ฟางข้าวไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy) โดยจะสังเกตจากส่วนของเนื้อเยื่อ ทำให้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของฟางข้าวหลังจากการปรับสภาพ พบว่า พื้นที่ผิวภายนอกและรูพรุนของฟางข้าวเพิ่มมากขึ้น จากนั้นนำฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพแล้ว เข้าสู่กระบวนการ Saccharification โดยใช้ *Trichoderma reesei* ZM4-F3 ซึ่งสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยสลายฟางข้าวคือ อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ความเป็นกรดต่างเท่ากับ 4.5 และรอบในการเขย่า 180 รอบต่อนาที หลังจากทำการย่อยสลายเป็นเวลา 96 ชั่วโมง สามารถผลิตน้ำตาลรีดิวซ์ได้ 2.231 กรัมต่อลิตร

Zhu และคณะ⁽¹⁸⁾ ได้ศึกษาการปรับสภาพฟางข้าวโดยใช้ไมโครเวฟร่วมกับสารเคมี ซึ่งเทคนิคนี้เป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพมากกว่าการใช้ความร้อนร่วมกับสารเคมีในการปรับสภาพฟางข้าว ในงานวิจัยนี้ได้มีการศึกษา 3 กระบวนการของการใช้ไมโครเวฟร่วมกับสารเคมีในการปรับสภาพฟางข้าว ได้แก่ การทำงานร่วมกันของไมโครเวฟกับด่าง การทำงานร่วมกันของไมโครเวฟ กรดและด่าง การทำงานร่วมกันของไมโครเวฟ กรด ด่าง และเปอร์ออกไซด์ และยังศึกษาในส่วนของ การนำไซโลสกลับมาจากของเหลวในกระบวนการปรับสภาพ และศึกษาการย่อยสลายฟางข้าวโดยใช้เอนไซม์ ผลการปรับสภาพฟางข้าวพบว่า ฟางข้าวที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพด้วยไมโครเวฟทำงานร่วมกับกรด ด่าง และเปอร์ออกไซด์ เป็นกระบวนการที่ทำให้ฟางข้าวสูญเสียน้ำหนักไปมากที่สุด และทำให้มีปริมาณเซลลูโลสเหลืออยู่ในฟางข้าวสูงที่สุด ผลจากการนำไซโลสกลับมาจากของเหลวในกระบวนการปรับสภาพฟางข้าว พบว่า ไซโลสไม่สามารถนำกลับมาได้จากกระบวนการปรับสภาพด้วยไมโครเวฟทำงานร่วมกับด่าง แต่สามารถนำไซโลสกลับมาได้จากกระบวนการปรับสภาพด้วย ไมโครเวฟทำงานร่วมกับ กรดและด่าง และไมโครเวฟทำงานร่วมกับกรด ด่างและเปอร์ออกไซด์ ผลการทดลองสุดท้ายคือ การย่อยสลายโดยใช้เอนไซม์ของฟางข้าวที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพแล้ว สภาวะที่ใช้คือ อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 4.8 และรอบในการเขย่า 160 รอบต่อนาที ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่ผลิตสูงสุดคือ 35.6 ± 0.4 กรัมต่อลิตรจากฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพด้วยไมโครเวฟทำงานร่วมกับกรด ด่าง และเปอร์ออกไซด์

Badal และคณะ⁽¹⁹⁾ ได้ศึกษาการผลิตเอทานอลจากแกลบข้าว ซึ่งแกลบข้าวประกอบด้วย เซลลูโลสร้อยละ 35.62 ± 0.12 เฮมิเซลลูโลสร้อยละ 11.96 ± 0.73 และลิกนินร้อยละ 15.38 ± 0.20 กระบวนการที่เกี่ยวข้องมี 3 กระบวนการคือ กระบวนการปรับสภาพวัตถุดิบ (Pretreatment) กระบวนการเปลี่ยนแป้งเป็นน้ำตาลโดยใช้เอนไซม์ (Enzymatic Saccharification) และกระบวนการหมัก (Fermentation) ซึ่งกระบวนการปรับสภาพวัตถุดิบและกระบวนการเปลี่ยนแป้งเป็นน้ำตาลจะเป็นตัวกำหนดการเปลี่ยนเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเป็นน้ำตาล ในกระบวนการปรับสภาพ

วัตถุดิบไฮเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ร้อยละ 7.50 ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 11.5 และอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส แช่เกลบข้าวเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และในกระบวนการเปลี่ยนแปลงเป็นน้ำตาลโดยใช้เอนไซม์ มีการเตรียมเอนไซม์ 3 ชนิดคือ Cellulase, β -glucosidase และ Xylanase กระบวนการนี้ทำการทดลองที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 5 เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ผลการทดลองที่ได้จาก 2 กระบวนการนี้คือ ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ 428 ± 12 มิลลิกรัมต่อกรัมเกลบข้าว ระหว่างทำการปรับสภาพวัตถุดิบ ไม่สามารถวัด Furfural และ Hydroxymethyl Furfural ได้ กระบวนการสุดท้ายคือกระบวนการหมัก ซึ่งใช้แบคทีเรีย *Escherichia coli* พันธุ์ FBR5 สำหรับกระบวนการหมักแบบไม่ต่อเนื่อง (Separate Hydrolysis and Fermentation, SHF) ใช้อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 6.5 และระยะเวลา 24 ชั่วโมง ปริมาณเอทานอลที่ได้คือ 8.2 ± 0.2 กรัมต่อลิตร ส่วนกระบวนการหมักแบบต่อเนื่อง (Simultaneous Saccharification and Fermentation, SSF) ใช้อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ค่าความเป็นกรดต่างเท่ากับ 6.0 และระยะเวลา 48 ชั่วโมง ปริมาณเอทานอลที่ได้คือ 8.0 ± 0.2 กรัมต่อลิตร

Dawson และคณะ⁽²⁰⁾ ได้มีการศึกษาการผลิตเอทานอลจากกากต้นอ้อย ซึ่งการทดลองเริ่มจากกระบวนการปรับสภาพ โดยใช้สารเคมี คือ เปอร์ออกไซด์ หรือ กรดซัลฟูริก เพื่อใช้ในการกำจัดลิกนิน เนื่องจากลิกนินเป็นอุปสรรคต่อเอนไซม์ที่มีความสามารถในการย่อยสลายเซลลูโลส ยีสต์ที่ใช้ในการทดลองนี้คือ *Saccharomyces cerevisiae* ATCC พันธุ์ 765 ซึ่งยีสต์พันธุ์นี้สามารถผลิตเอทานอลจากเซลลูโลสได้ สภาพที่เหมาะสมในการปรับสภาพเมื่อใช้เปอร์ออกไซด์คือ เปอร์ออกไซด์ร้อยละ 2 ความเป็นกรดต่างเท่ากับ 13 และเวลา 8 ชั่วโมง สามารถผลิตเอทานอลได้ 118 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาการหมัก 10 วัน เมื่อใช้กรดซัลฟูริกในการปรับสภาพสภาพที่เหมาะสมคือ กรดซัลฟูริก 0.8 โมลาร์ และเวลา 24 ชั่วโมง สามารถผลิตเอทานอลได้ 335.67 มิลลิกรัมต่อลิตร ที่ระยะเวลาการหมัก 12 วัน

Encarnacion⁽²¹⁾ และคณะ ศึกษาการปรับสภาพลำต้นทานตะวันก่อนนำเข้าสู่กระบวนการย่อยสลายโดยใช้เอนไซม์ (Enzymatic Hydrolysis) ลำต้นทานตะวันเป็นของเหลือทางการเกษตรที่มีราคาถูก แต่ยังสามารถใช้ประโยชน์ได้มาก ในงานวิจัยนี้นำลำต้นทานตะวันมาปรับสภาพด้วยไอน้ำ จุดประสงค์ของงานวิจัยคือ เพื่อหาอุณหภูมิในการปรับสภาพที่เหมาะสมในช่วง 180 องศาเซลเซียส ถึง 230 องศาเซลเซียส เมื่อผ่านกระบวนการปรับสภาพด้วยไอน้ำแล้ว อุณหภูมิที่เลือกขึ้นอยู่กับปริมาณของเซลลูโลสในส่วนของแข็ง และน้ำตาลที่ได้จากเฮมิเซลลูโลสในส่วนที่เป็นของเหลว ซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมอยู่ที่ 220 องศาเซลเซียส เมื่อนำของแข็งที่ได้เข้าสู่กระบวนการย่อยสลายโดยใช้เอนไซม์ ซึ่งใช้เอนไซม์เซลลูเลส สามารถผลิตน้ำตาลกลูโคสได้ 16.7 กรัมต่อ 100 กรัมลำต้นทานตะวัน

Ibrahim⁽²²⁾ และคณะ ได้ศึกษาการผลิตน้ำตาลกลูโคสจากฟางข้าว ซึ่งน้ำตาลกลูโคสนี้สามารถนำไปผลิตเป็นเอทานอลได้ในกระบวนการหมักต่อไป ก่อนทำการปรับสภาพฟางข้าว ฟางข้าวที่ใช้มีปริมาณลิกนินร้อยละ 14.55 งานวิจัยนี้ทำการปรับสภาพฟางข้าว 3 วิธีด้วยกันคือ 1. ปรับสภาพด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิ 220 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 นาที 2. ปรับสภาพด้วยไอน้ำเช่นเดียวกับวิธีที่ 1 และสกัดด้วยน้ำที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วสกัดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 20 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 1 ชั่วโมง 3. ปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 2 ชั่วโมง หลังจากการปรับสภาพ พบว่า การปรับสภาพที่ดีที่สุดคือวิธีที่ 2 เนื่องจากสามารถผลิตน้ำตาลกลูโคสได้สูงที่สุดคือ 58.41 กรัมต่อลิตร และในการปรับสภาพด้วยวิธีนี้สามารถลดปริมาณลิกนินได้สูงถึงร้อยละ 71.13

Teater⁽²³⁾ และคณะ ได้ศึกษาการผลิตเอทานอลโดยใช้การย่อยของแข็งพวกเส้นใย เช่น หญ้า สวิตช์แกรส (Switchgrass) ก่อนนำไปผลิตเป็นเอทานอลได้มีการศึกษาสภาวะการปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ความเข้มข้น อุณหภูมิ และเวลาต่างๆ ซึ่งผลการปรับสภาพ Switchgrass ที่เหมาะสมที่สุดคือ การปรับสภาพด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ซึ่งสามารถผลิตน้ำตาลกลูโคสและเอทานอลได้สูงที่สุดคือน้ำตาลกลูโคส 25.1 กรัมต่อลิตร และ เอทานอลร้อยละ 83 ตามลำดับ

1.18 วัตถุประสงค์ของโครงการ

1. ศึกษากระบวนการปรับสภาพฟางข้าวด้วยไอน้ำและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เบื้องต้น เพื่อใช้ในการผลิตเอทานอล

2. ผลิตเอทานอลจากฟางข้าวที่ผ่านการปรับสภาพแล้วโดยกระบวนการหมักแบบต่อเนื่อง (Simultaneous Saccharification and Fermentation)

1.19 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับจากการศึกษา เจริญทฤษฎีและ/หรือเชิงประยุกต์

1. ทราบถึงสถานะที่เหมาะสมในกระบวนการปรับสภาพฟางข้าวด้วยไอน้ำและสารละลายต่าง ๆ
2. ทราบถึงความเหมาะสมของจุลินทรีย์ที่ใช้ในการผลิตเอทานอลจากฟางข้าว
3. เป็นการนำฟางข้าวมาใช้ให้เกิดประโยชน์มากขึ้น

1.20 ขอบเขตงานวิจัย

1. ศึกษาค้นคว้าและรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้อง
2. วิเคราะห์สมบัติของฟางข้าว เช่น การวิเคราะห์ปริมาณกลุ่มสาร (Proximate Analysis) วิเคราะห์ปริมาณธาตุ (Ultimate Analysis) และปริมาณเซลล์ ไลสและลิกนิน เป็นต้น
3. ศึกษาตัวแปรในการปรับสภาพฟางข้าวด้วยไอน้ำและสารละลายต่าง ๆ เช่น เวลาในการปรับสภาพฟางข้าวด้วยไอน้ำ และความเข้มข้นของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์
4. วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของฟางข้าวหลังการปรับสภาพ เช่น ปริมาณลิกนิน และ เซลลูโลส เป็นต้น
5. ทำการหมักน้ำตาลกลูโคสเพื่อคัดเลือกจุลินทรีย์ที่เหมาะสมในการเปลี่ยนน้ำตาลกลูโคสเป็นเอทานอล
6. ทำการหมักฟางข้าวที่ผ่านกระบวนการปรับสภาพแล้วด้วยกระบวนการหมักแบบต่อเนื่องโดยใช้จุลินทรีย์ที่เหมาะสมจากข้อ 7.5
7. รวบรวมและวิเคราะห์ข้อมูล
8. เขียนรายงานวิทยานิพนธ์