

## การศึกษากระบวนการผลิตไฮโดรไลเสทจากการระเบิดต้นปาล์มน้ำมันด้วยไอน้ำ สำหรับการหมักไซลิตอล

### Study on Production Process of Hydrolysate from Steam Explosion of Oil Palm Trunk for Xylitol Fermentation

#### คำนำ

ปัจจุบันประเทศไทยเป็นประเทศหนึ่งในโลกที่มีศักยภาพในการผลิตปาล์มน้ำมัน โดยในบรรดาน้ำมันทั้งหมดของไทย น้ำมันปาล์มมีส่วนแบ่งในตลาดน้ำมันพืชสูงสุดเป็นอันดับสอง ปาล์มน้ำมันจึงเป็นพืชอุตสาหกรรมที่มีการขยายตัวอย่างต่อเนื่องตลอดมา

โดยปกติต้นปาล์มจะให้ทะลายปาล์มและผลปาล์มน้ำมันที่สามารถนำไปสกัดน้ำมันได้เมื่อต้นปาล์มน้ำมันมีอายุ ประมาณ 3 ปี และจะถูกตัดฟันทิ้งเมื่อมีอายุ 25 ปี แต่เนื่องจากต้นปาล์มน้ำมันมีเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน สะสมอยู่ในปริมาณมาก จึงนับได้ว่าต้นปาล์มน้ำมันเป็นแหล่งชีวมวลแหล่งใหญ่อีกแหล่งหนึ่งของประเทศไทย ดังนั้นจึงควรที่จะหาแนวทางในการสร้างมูลค่าเพิ่มจากต้นปาล์มน้ำมันเหล่านี้ ด้วยการแปรรูปเป็นสารเคมี

เทคนิคการระเบิดด้วยไอน้ำเป็นกระบวนการระเบิดชีวมวล เช่น ไม้หรือวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร ด้วยไอน้ำที่อุณหภูมิสูง (180-210 °C) และความดันสูง เป็นเวลาไม่เกิน 10 นาที โดยไอน้ำจะไปละลายส่วนของเฮมิเซลลูโลสออกมา ทำให้เหลือแต่ เซลลูโลสและลิกนิน ซึ่งต่อมาจะถูกนำไปแยกออกจากกันในภายหลัง ด้วยวิธีการเช่นการใช้เบสเพื่อละลายลิกนินออกจากเซลลูโลส หลังจากแยกองค์ประกอบทางเคมีที่มีอยู่ในไม้หรือวัสดุเศษเหลือทิ้งทางการเกษตรออกจากกันได้แล้ว จะนำองค์ประกอบที่แยกได้ในแต่ละส่วนไปใช้ประโยชน์ในงานต่างๆ

เนื่องจากเฮมิเซลลูโลสที่ประกอบอยู่ในต้นปาล์มน้ำมันเป็นประเภทไซแลน (Xylan) ที่มีองค์ประกอบหลัก คือ น้ำตาลไซโลส (Xylose) ดังนั้นเฮมิเซลลูโลสที่ได้จากเทคนิคการระเบิดด้วยไอน้ำ จึงอยู่ในรูปสารละลายน้ำตาลไซโลสและโอลิโกเมอร์ของน้ำตาลไซโลสเป็นส่วนใหญ่

นอกจากนี้ยังมีผลพลอยได้ของสารบางชนิดละลายปะปนอยู่ด้วย เช่น กรดอะซิติก เฟอร์ฟูรอล 5-ไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรอล และสารประกอบฟีนอลิก (Phenolic compounds) ซึ่งล้วนเป็นสารที่อาจมีฤทธิ์ยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่ใช้ในการผลิตไซลิทอล ดังนั้นเพื่อที่จะให้เหลือแต่น้ำตาลไซโลสที่บริสุทธิ์ จึงจำเป็นต้องกำจัดสารที่ปนเปื้อนต่างๆ เหล่านี้ออกไป ด้วยวิธีการต่างๆ เช่น การระเหย การปรับความเป็นกรดด่าง การดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) การแลกเปลี่ยนไอออน (ion exchange) เป็นต้น หลังจากนั้นจึงสามารถนำน้ำตาลไซโลสที่ได้ไปใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับผลิตผลิตภัณฑ์ไซลิทอล

น้ำตาลไซลิทอลคือน้ำตาลแอลกอฮอล์ชนิดหนึ่ง และเป็นอนุพันธ์ของน้ำตาลไซโลสที่มีคุณสมบัติหลายประการที่แตกต่างจากน้ำตาลแอลกอฮอล์ชนิดอื่น เช่น เป็นสารช่วยป้องกันฟันผุ (Pepper และ Olinger, 1988) ที่มีความหวานเทียบเท่ากับซูโครส และให้ความรู้สึกเย็น ในปัจจุบันจึงมีการนำไซลิทอลไปใช้เป็นสารให้ความหวานในผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิด อาทิเช่น หมากฝรั่ง ช็อกโกแลต ทอฟฟี่ ลูกกวาด ไอศกรีม เครื่องดื่ม และผลิตภัณฑ์ทางเภสัชกรรม เป็นต้น (สารโรจน์, 2537; Emodi, 1978) ถึงแม้ว่าสามารถพบไซลิทอลได้ในผักและผลไม้ ตามธรรมชาติ แต่เมื่อนำมาสกัดเพื่อแยกไซลิทอลจะได้ปริมาณน้อยมาก จึงให้ผลไม่คุ้มค่าทางเศรษฐกิจ ดังนั้นจึงใช้วิธีทางเคมี เช่น กระบวนการไฮโดรจีเนชันน้ำตาลไซโลส (Hyvonen และ Koivistoin, 1983) ในการผลิตไซลิทอลเชิงทางอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตาม กระบวนการดังกล่าวเป็นกระบวนการที่นอกจากจะมีค่าใช้จ่ายสูงและมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนน้ำตาลไซโลสเป็นไซลิทอลที่ค่อนข้างต่ำแล้ว ยังเกิดผลพลอยได้อื่นที่ไม่ต้องการที่กระบวนการทำความบริสุทธิ์ของไซลิทอล อันทำให้ต้องเพิ่มขั้นตอนที่ยุ่งยากมากขึ้น ดังนั้นจึงมีการนำเทคโนโลยีชีวภาพมาใช้ในการศึกษาและวิจัยการผลิตไซลิทอล ด้วยกระบวนการหมักด้วยเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งเป็นเทคนิคที่นอกจากจะมีค่าใช้จ่ายต่ำกว่าแล้วยังมีขั้นตอนในการทำบริสุทธิ์ไซลิทอลที่ง่ายกว่าด้วย

ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตสารละลายของน้ำตาลไซโลสจากต้นปาล์มน้ำมันด้วยเทคนิคการระเบิดด้วยไอน้ำ ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีที่ได้จากการระเบิด ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเปลี่ยนสารละลายน้ำตาลโอลิโกเมอร์ของไซโลสให้เป็นน้ำตาลไซโลสโมเลกุลเดี่ยวด้วยการย่อยด้วยกรดซัลฟูริก ศึกษาสภาวะการทำน้ำตาลไซโลสให้บริสุทธิ์ด้วยถ่านกัมมันต์ รวมทั้งศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้น้ำตาลที่ได้เพื่อผลิตไซลิทอลโดยกระบวนการหมักด้วยยีสต์

### วัตถุประสงค์

1. ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของต้นปาล์มน้ำมันและสภาวะที่เหมาะสมในการแยกองค์ประกอบทางเคมีของต้นปาล์มน้ำมันโดยเทคนิคการระเบิดด้วยไอน้ำ
2. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการย่อยน้ำล้างที่ได้จากการระเบิดด้วยไอน้ำด้วยกรดซัลฟูริก
3. ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมไฮโดรไลเซตด้วยถ่านกัมมันต์
4. ศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้น้ำตาลที่ได้เพื่อผลิตไซลิทอลโดยกระบวนการหมักด้วยยีสต์

## การตรวจเอกสาร

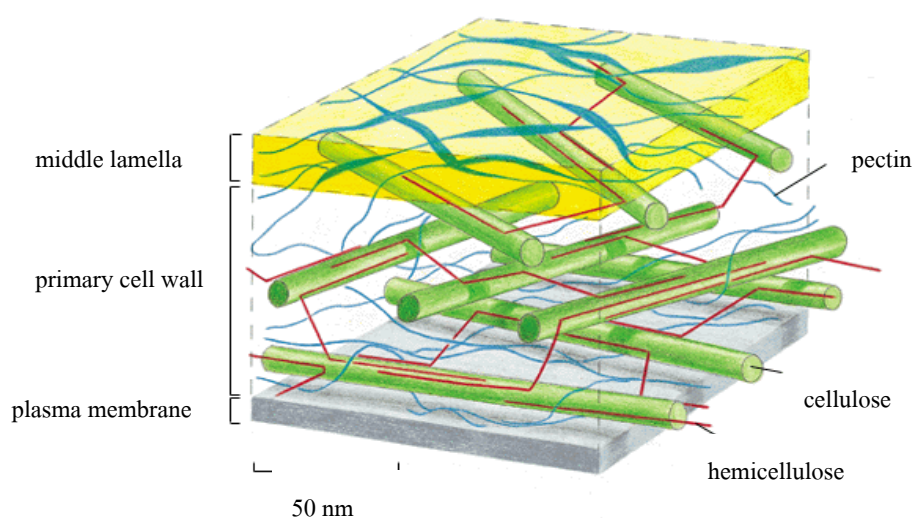
### วัสดุเหลือทิ้งที่เป็นต้นปาล์มน้ำมัน

ปาล์มน้ำมัน (Oil palm) เป็นพืชที่มีแหล่งกำเนิดอยู่ในป่าเขตร้อนของแอฟริกาตะวันตก โดย เป็นพืชในโซนร้อน ตระกูล Palmae ที่มีชื่อทางพฤกษศาสตร์ว่า *Elaeis guineensis* มีใบเลี้ยงเดี่ยว รากตื้น มีลักษณะลำต้นคล้ายต้นมะพร้าว จาก และระกำ มีผลเป็นทะลาย หนักประมาณทะลายละ 20-30 กิโลกรัม

เนื่องจากน้ำมันปาล์มเป็นวัตถุดิบที่ใช้ในอุตสาหกรรมเป็นส่วนใหญ่ ได้แก่ สบู่ เครื่องสำอาง ผงซักฟอก นมข้น ขนมหั้วกรอบ เป็นต้น ปาล์มน้ำมันจึงเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญ ชนิดหนึ่งของโลก ในทวีปยุโรปและอเมริกามีการนำเข้าน้ำมันปาล์มเป็นจำนวนมากจากประเทศ แถบแอฟริกาและเอเชีย ปัจจุบันปาล์มน้ำมันกลายเป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศ มาเลเซีย อินโดนีเซีย และไทย ฯลฯ จากข้อมูลพื้นที่การปลูกปาล์มน้ำมันในปี พ.ศ. 2546 ของกรมส่งเสริม การเกษตร พบว่า ประเทศไทยมีพื้นที่การเพาะต้นปลูกปาล์มน้ำมันประมาณ 2.1 ล้านไร่ ส่วนมาก ปลูกในภาคใต้และภาคตะวันออกเฉียงใต้ของประเทศไทย โดยเกษตรกรนิยมปลูกระยะห่าง 9×9×9 เมตร ซึ่งคิดเป็นจำนวนต้นได้ประมาณ 22 ต้นต่อไร่ ปกติต้นปาล์มน้ำมันใช้ระยะเวลาการ เติบโตประมาณ 3 ปี จึงให้ทะลายปาล์มที่สามารถนำผลไปสกัดเอาน้ำมันปาล์มออกจากผลและเมื่อ ต้นปาล์มน้ำมันมีอายุ 25 ปี จะต้องทำการตัดฟันทิ้ง เนื่องจากต้นปาล์มที่มีอายุมากกว่า 20 ปี จะให้ ผลผลิตน้อยและยังมีความสูงประมาณ 15-18 เมตร มีเส้นผ่านศูนย์กลางลำต้นประมาณ 46-60 เซนติเมตร ซึ่งยากแก่การเก็บเกี่ยว ทำให้ต้องตัดฟันต้นปาล์มน้ำมันทิ้งเพื่อปลูกทดแทน จึงมีต้น ปาล์มน้ำมันเป็นวัสดุเหลือทิ้งเป็นจำนวนมากเป็นปัญหาในการกำจัด แต่เนื่องจากต้นปาล์มน้ำมันมี ปริมาณเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนินสะสมอยู่ในปริมาณที่สูง จึงนับได้ว่าเป็นแหล่งชีวมวล แหล่งใหญ่อีกแหล่งหนึ่งของประเทศไทย โดยต้นปาล์มน้ำมันประกอบด้วยองค์ประกอบหลัก 3 ชนิด คือ เซลลูโลส 41.2 เปอร์เซ็นต์ เฮมิเซลลูโลส 34.4 เปอร์เซ็นต์ ลิกนิน 17.1 เปอร์เซ็นต์ และ อื่นๆ อีก 7.3 เปอร์เซ็นต์ (Sun and Tomkison, 2001) โดยเฮมิเซลลูโลส ส่วนใหญ่เป็นพวกไซแกลน ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ของน้ำตาลไซโลส ปริมาณของไซแกลนในต้นปาล์มน้ำมันจะสูงเทียบเท่ากับ ปริมาณไซแกลนในซังข้าวโพด (corn cob) (Sun *et al.*, 1999) ดังนั้นจึงควรหาแนวทางในการนำเศษ เหลือทิ้งจากต้นปาล์มน้ำมันเหล่านี้มาสร้างมูลค่าเพิ่ม

### องค์ประกอบทางเคมีของไม้

ในไม้มีองค์ประกอบหลัก 4 ชนิด คือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน และสารแทรก โดยที่มีไฮโดรเซลลูโลส คือ ส่วนที่ประกอบด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสซึ่งเป็นสารประกอบพอลิแซ็กคาไรด์ ส่วนที่ไม่ใช่สารประกอบพอลิแซ็กคาไรด์ ได้แก่ ลิกนิน และสารแทรก ดังรายละเอียดดังนี้



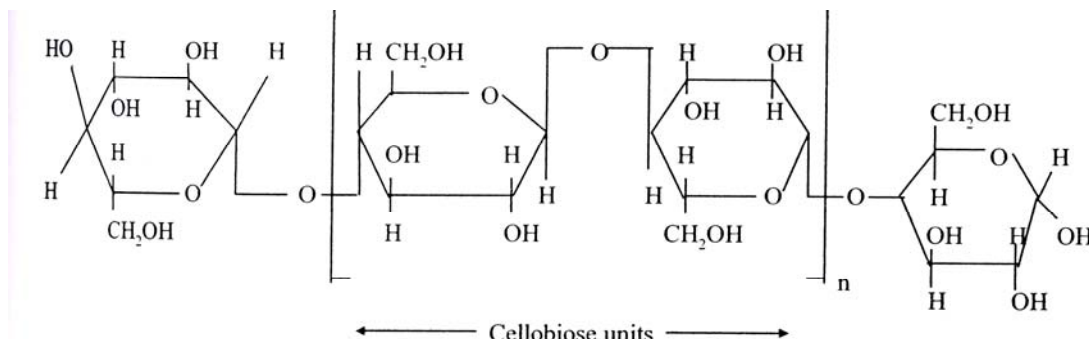
ภาพที่ 1 แสดงองค์ประกอบทางเคมีของไม้

#### 1. เซลลูโลส (Cellulose)

เซลลูโลสคือสารประกอบพอลิแซ็กคาไรด์ ที่เป็นองค์ประกอบหลักของไม้ พบอยู่ประมาณ 40-50 % ของเนื้อไม้ เซลลูโลสเป็นสายโพลิเมอร์ของกลูโคสที่จับกันด้วยพันธะ  $\beta$ -(1,4) glycosidic linkage (ภาพที่ 2) มีน้ำหนักตั้งแต่ 20,000 ถึง 750,000 ดาลตัน (ซึ่งเท่ากับ 100-4,000 หน่วยกลูโคส) มีโครงสร้างเป็นสัณฐาน (crystalline) เนื่องจากไม่มีกิ่งแขนง จึงไม่ละลายน้ำ

คุณสมบัติของเซลลูโลส

1. เป็น linear polysaccharide ประกอบด้วย พันธะ  $\beta$ -(1,4) glycosidic linkage
2. Repeating unit ของเซลลูโลส คือ กลูโคส
3. มีมวลโมเลกุลสูง และมี degree of polymerization (DP) สูง



ภาพที่ 2 แสดงโครงสร้างของเซลลูโลส

ที่มา: Biermann อ้างโดยวิทยา (2543)

4. เซลลูโลสจะมีลักษณะเป็นเส้นด้ายยาวเรียกว่า microfibril
5. มีคุณสมบัติที่เหมือนกันทั้งในไม้เนื้อแข็งและไม้เนื้ออ่อน
6. ไม่มีกิ่งแขนง (side chain) จึงไม่ละลายน้ำ

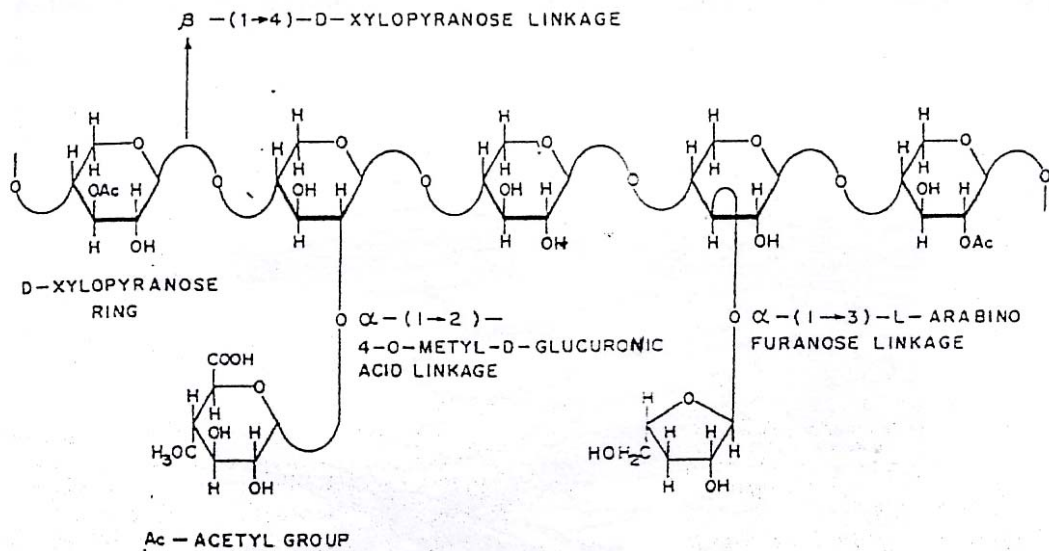
เซลลูโลสสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น การผลิต คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC, อนุพันธ์ของเซลลูโลส ที่ได้จากเซลลูโลสบริสุทธิ์) เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมสิ่งทอ , การผลิตแอลกอฮอล์, และการผลิต Single cell protein (SCP) เป็นต้น

## 2. เฮมิเซลลูโลส (Hemicelluloses)

เฮมิเซลลูโลส คือ สารประกอบพอลิแซ็กคาไรด์ที่พบมากเป็นอันดับสองรองจากเซลลูโลส พบประมาณ 20-30 % ของเนื้อไม้ เฮมิเซลลูโลสจะจับตัวอยู่กับเซลลูโลสและลิกนิน เนื่องจากเฮมิเซลลูโลสเป็นสารประกอบพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงจะถูกย่อยด้วยกรดได้ดีกว่าเซลลูโลสและยังสามารถถูกย่อยได้ด้วยด่าง

เฮมิเซลลูโลสสามารถแบ่งออกได้เป็นประเภทต่างๆ เช่น ไซแลนและแมนแนน โดยไซแลน (ภาพที่3) ประกอบด้วยน้ำตาลไซโลสเป็นหลัก มี D-xylopyranose ประมาณ 200 หน่วยต่อกันด้วยพันธะ 1,4 glycosidic ไซแลนจากแหล่งต่างๆ มีโครงสร้างหลักเหมือนกัน แต่ต่างกันตรง side

chain เท่านั้น โดย side chain ที่พบโดยทั่วไปได้แก่ L-arabinofuranose, D-glucuronic acid, 4-O-methyl-D-glucuronic acid และ อะซิติก (Goodwin and Mercer, 1972; Wong et al., 1988)



ภาพที่ 3 แสดงโครงสร้างของไซเลน

ที่มา: Bastawde (1992)

เฮมิเซลลูโลสจึงเป็นสารประกอบเฮเทอโรโพลีแซ็กคาไรด์ (Heteropolysaccharide) ที่มีโครงสร้างหลักต่อดัวยพันธะ  $\beta$ -(1,4) linkage ของน้ำตาลไซโลสและมีกิ่งแขนงเป็นอนุพันธ์ของน้ำตาลต่างๆ เช่น กลูโคส แมนโนส อะรามิโนส และหมู่อะซิติก

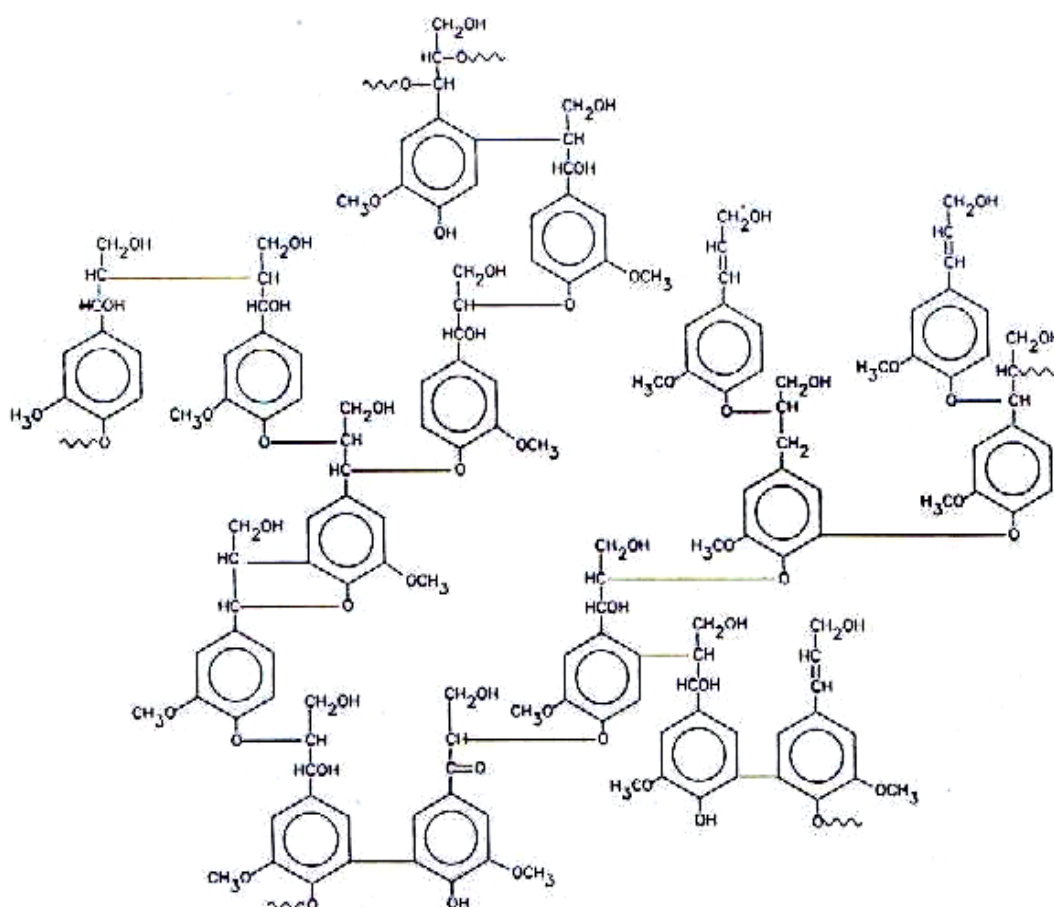
คุณสมบัติโดยทั่วไป ของเฮมิเซลลูโลส มีดังนี้

1. มีน้ำตาลโมเลกุลมากกว่า 1 ชนิดประกอบอยู่
2. ในไม้เนื้อแข็งและไม้เนื้ออ่อนจะมีเฮมิเซลลูโลสในประเภทที่แตกต่างกัน
3. มีมวลโมเลกุลต่ำกว่าเซลลูโลส
4. มีลักษณะโครงสร้างน้ำตาลเป็นแบบกิ่งแขนงแบบอสัณฐาน (Amorphous form)
5. ไม่อยู่ในรูปของผลึก (noncrystalline form)
6. มีความว่องไวทางปฏิกิริยาสูงกว่าเซลลูโลส

เซลลูโลสสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการสร้างผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น น้ำตาลไซโลส น้ำตาลไซลิทอล และ เฟอร์ฟูรอล เป็นต้น

### 3. ลิกนิน (Lignin)

ลิกนินเป็นสารประกอบเชิงซ้อนชนิดหนึ่งที่มีมวลโมเลกุลสูง ไม่มีโครงสร้างที่แน่นอนในธรรมชาติ พบอยู่ประมาณ 20-35 % ของเนื้อไม้ ลิกนินมีโครงสร้าง 3 มิติ เป็น phenylpropane polymer ที่เกิดจากการเชื่อมต่อของ phenylpropane unit ด้วยพันธะ C-O-C และ คาร์บอน-คาร์บอน (C-C) ลิกนินส่วนใหญ่ประกอบด้วยหมู่ phenyl propane ประมาณ 2,500 หน่วย สูตรโครงสร้างของลิกนินแสดงดังในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 สูตรตัวอย่างโครงสร้างลิกนิน



ลิกนินสามารถนำไปใช้ในการผลิตเป็นกาวยไม้, เป็นส่วนผสมในคอนกรีต, เป็นส่วนผสมในอาหารสัตว์ หรือ เป็นตัวเชื่อมต่อน้ำมันในอาหารสัตว์, เป็นสารควบคุมฝุ่นในท้องถนน, และใช้ในอุตสาหกรรมฟอกหนัง เป็นต้น

#### 4. สารแทรก (Extraneous substances)

Extraneous substances เป็นองค์ประกอบรองที่ไม่ใช่ทั้งพอลิแซ็กคาไรด์และลิกนิน ประกอบด้วยสารประเภทต่างๆ 2 ประเภท คือ

- ประเภท extractives ประกอบด้วยสารกลุ่มต่างๆ ได้แก่ สารจำพวก non volatile compound เช่น ไขมัน, resin acid, และกรดไขมันที่จำเป็น
- ประเภท non extractives ได้แก่ mineral, เพคติน และโปรตีนต่างๆ

#### เทคนิคการระเบิดด้วยไอน้ำ (Steam Explosion Technique)

เมื่อประมาณ 60 ปีมาแล้ว มีการนำเทคนิคการระเบิดด้วยไอน้ำมาใช้เพื่อแยกองค์ประกอบของวัสดุจำพวกไม้และวัสดุเศษเหลือทิ้งทางการเกษตร ต่อมาการศึกษาและปรับปรุงเทคโนโลยีนี้จนสามารถออกแบบเครื่องระเบิดไอน้ำให้ทำงานได้ทั้งในรูปของกระบวนการทำงานเป็นครั้ง (batch) และการทำงานอย่างต่อเนื่อง (continuous)

ด้วยระยะเวลาในการระเบิดด้วยไอน้ำไม่เกิน 10 นาที ไอน้ำที่อุณหภูมิและความดันสูง จะสามารถสกัดแยกเฮมิเซลลูโลสออกจากส่วนผสมของเซลลูโลสและลิกนิน ต่อมาจึงทำการแยกเซลลูโลสออกจากลิกนินในภายหลัง ด้วยสารละลายเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์ ดังนั้นเทคนิคการระเบิดด้วยไอน้ำจึงช่วยในการแยกองค์ประกอบต่างๆ ของไม้ให้อยู่ในรูป เฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน ก่อนนำไปทำเป็นวัตถุดิบเริ่มต้นสำหรับผลิตสารที่มีมูลค่าสูงต่อไป

ตัวแปรสำคัญของเทคนิคการระเบิดด้วยไอน้ำ คือ อุณหภูมิของไอน้ำและระยะเวลาที่ใช้ในการระเบิด โดยจะทำการรวมตัวแปรทั้งสองให้เป็นตัวแปรเดียวกัน เรียกว่า “ค่าแฟกเตอร์ของความรุนแรง (severity factor, Ro)” ดังความสัมพันธ์นี้

$$Ro = \int_0^t \exp[(T-100)/14.75] dt$$

หรือ  $\log Ro = \log \{t \exp [(T-100)/14.75] \}$

|       |    |     |                                 |
|-------|----|-----|---------------------------------|
| เมื่อ | Ro | คือ | ค่า severity factor             |
|       | t  | คือ | ระยะเวลาที่ใช้ในการระเบิด (นาท) |
|       | T  | คือ | อุณหภูมิของไอน้ำ (°C)           |

ส่วนประกอบที่สำคัญและหลักการทำงานของเครื่องระเบิดด้วยไอน้ำ แสดงดังภาพที่ 5 ซึ่งประกอบด้วย

หมายเลข 1 คือ ถังเก็บน้ำกลั่น (Water tank) ทำหน้าที่เก็บน้ำกลั่นเพื่อส่งไปยังหมายเลข 2 หมายเลข 2 คือ ถังให้ความร้อน (Heater tank) ทำหน้าที่ให้ความร้อนแก่น้ำในถังที่มาจากถังเก็บน้ำกลั่น

หมายเลข 3 คือ วาล์ว (valve) ทำหน้าที่ควบคุมปรับเปลี่ยนความดันของไอน้ำที่ปล่อยเข้าสู่ถังหมายเลข 4

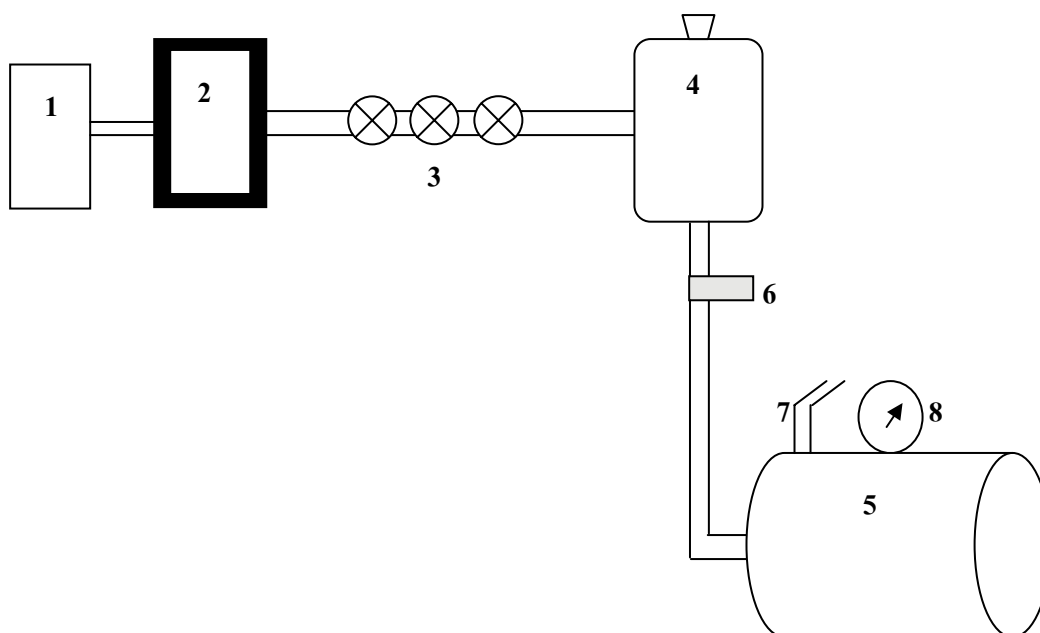
หมายเลข 4 คือ ถังทำปฏิกิริยา (Reactor) ทำหน้าที่ให้ไอน้ำเข้าไปทำปฏิกิริยาอย่างช้าๆกับตัวอย่างชิ้นไม้สับ

หมายเลข 5 คือ ถังรองรับตัวอย่างน้ำและเชื้อเพลิงระเบิด (Receiver) ทำหน้าที่เป็นถังรองรับตัวอย่างน้ำและเชื้อเพลิงระเบิดชิ้นไม้สับด้วยไอน้ำ

หมายเลข 6 คือ วาล์วปิดเปิดทำหน้าที่เปิดให้ชิ้นไม้สับที่ระเบิดแล้วตกลงไปยังถังรองรับเชื้อหมายเลข 5

หมายเลข 7 คือ ท่อปล่อยระบายความดันไ

หมายเลข 8 คือ เครื่องวัดความดัน (ball valve) ภายในถังหมายเลข 5



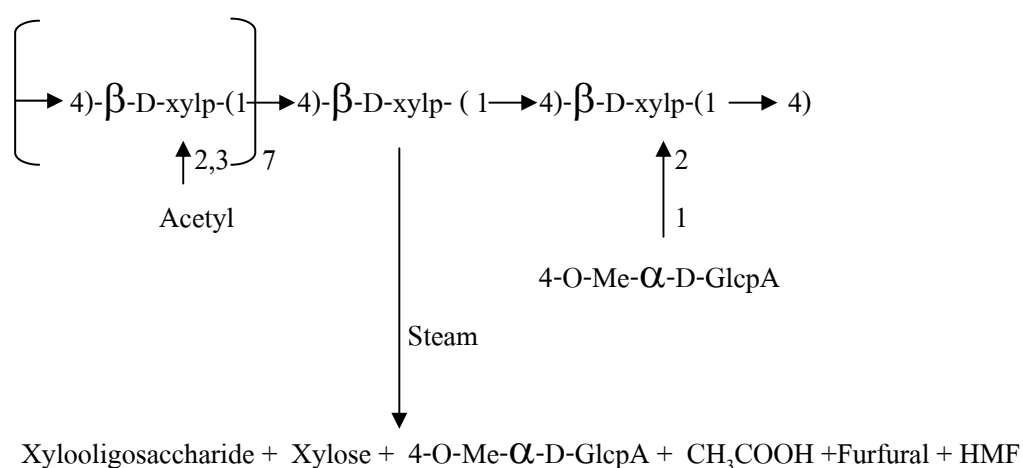
ภาพที่ 5 แสดงส่วนประกอบที่สำคัญของเครื่องระเบิดด้วยไอน้ำ

หลักการทำงานของเทคนิคการระเบิดด้วยไอน้ำ คือ น้ำจากถังหมายเลข 1 (Water tank) ถูกส่งไปยังถังหมายเลข 2 (Heater tank) ซึ่งถังหมายเลข 2 จะมีการให้ความร้อนเกิดขึ้นเพื่อให้น้ำกลายเป็นไอน้ำตามอุณหภูมิหรือความดันที่ต้องการ ไอน้ำถูกส่งต่อไปยังวาล์วหมายเลข 3 (valve) ซึ่งเป็นจุดควบคุมความดันที่ปล่อยเข้าสู่ถังทำปฏิกิริยา คือ หมายเลข 4 (Reactor) ที่บรรจุตัวอย่างขึ้นไม่สับอยู่ เมื่อเปิดวาล์วหมายเลข 3 ไอน้ำเข้าสู่ถังหมายเลข 4 จากนั้นจับเวลา ณ ความดันนั้นและควบคุมความดันไอน้ำให้คงที่ตลอดเวลาโดยการปรับปล่อยวาล์วหมายเลข 3 เมื่อครบเวลาที่กำหนดเปิดท่อวาล์วหมายเลข 6 ที่เชื่อมระหว่างถังหมายเลข 4 และ 5 (Receiver) ความดันจะดันตัวอย่างขึ้นไม่สับที่อยู่ในถังหมายเลข 4 ลงไปยังถังหมายเลข 5 หลังจากนั้นระบายความดันออกจากถังหมายเลข 5 โดยค่าที่ ball valve จะเป็นตัววัดความดันในเครื่องระเบิดด้วยไอน้ำ รอจนกระทั่งค่าความดันใน ball valve เป็นศูนย์ ซึ่งแสดงว่าความดันภายในถังไม่มี จากนั้นจึงทำการเปิดฝาถังหมายเลข 5 ออกเพื่อเอาน้ำและเชื้อเพลิงระเบิดออกมา

จากภาพที่ 6 แสดงกลไกของปฏิกิริยาเคมีที่น่าจะเกิดขึ้นกับไซแลนขณะถูกระเบิดด้วยไอน้ำ โดยในตอนแรกไอน้ำที่อุณหภูมิและความดันสูงจะไปทำให้หมู่อะซิล (acetyl group) ในโมเลกุลไซแลนหลุดออกมากลายเป็นกรดอะซิติก ซึ่งต่อมาจะเกิดการไฮโดรไลซิสโมเลกุลของไซแลนเกิดเป็นไซโลสและโอลิโกเมอร์ของไซโลส และถ้าอุณหภูมิสูงและเวลานาน จะเกิดปฏิกิริยาดีไฮเดรชันโมเลกุลของไซโลส ให้เป็นเฟอร์ฟูรอล รวมทั้งเกิดการไฮโดรไลซิสโมเลกุลเซลลูโลส ให้เป็นกลูโคส ซึ่งจะสลายต่อไปเป็น 5-ไฮดรอกซีลิวเมทิลเฟอร์ฟูรอล (HMF) และมีการสลายพันธะ

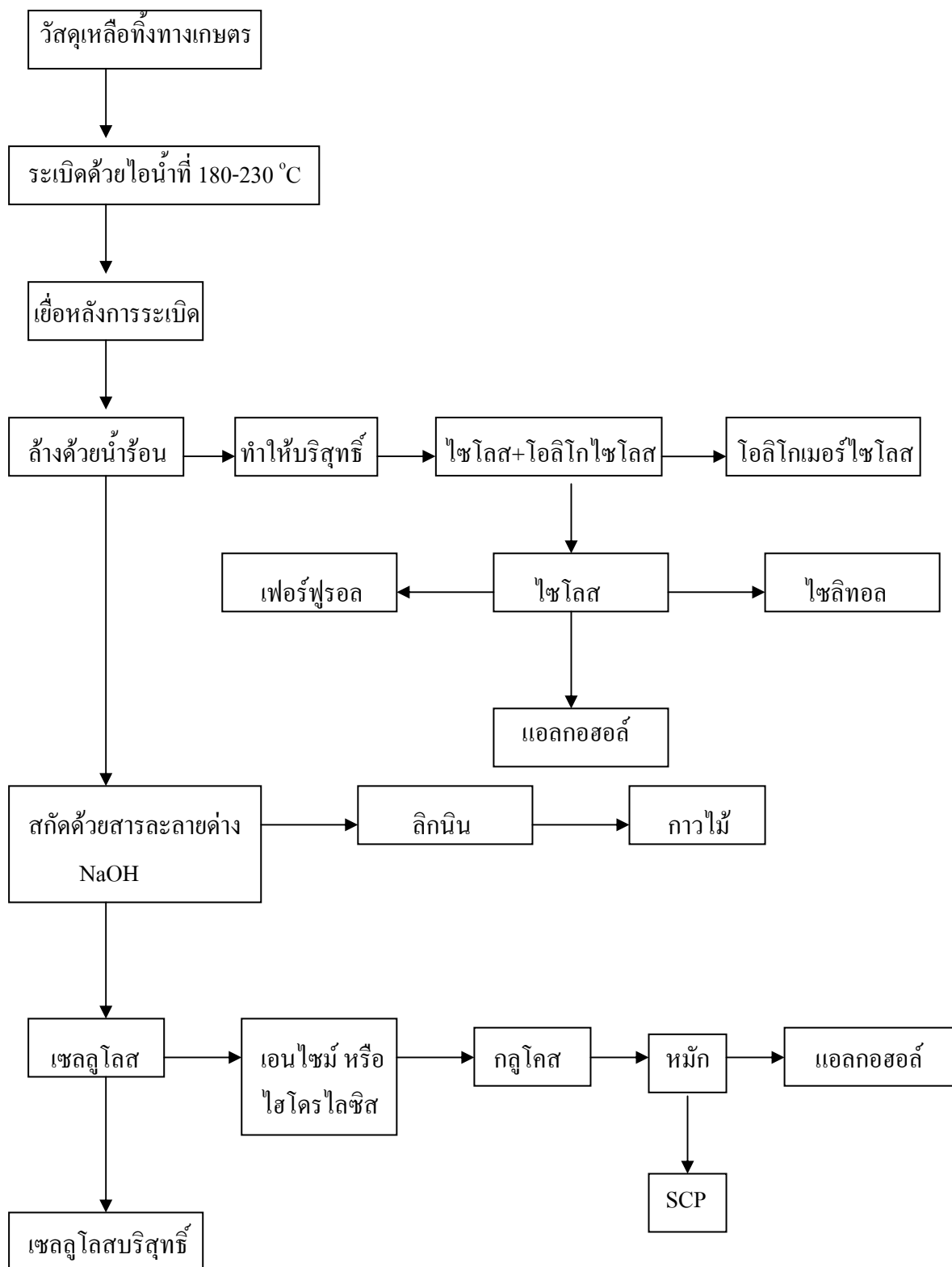
โมเลกุลของลิกนินให้กลายเป็นลิกนินที่มีโมเลกุลขนาดเล็ก เช่น สารประกอบฟีนอลิกเกิดขึ้นด้วย

ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า ในการระเบิดด้วยไอน้ำผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นในสารละลายเฮมิเซลลูโลส คือ ไซโลส กลูโคส โอลิโกเมอร์ของไซโลส เพอร์ฟูรอล 5-ไฮดรอกซีเมทิลเพอร์ฟูรอล กรดอะซิติก และสารประกอบฟีนอลิก (Miyafuji et al., 2003)



ภาพที่ 6 กลไกของปฏิกิริยาเคมีที่น่าจะเกิดขึ้นกับไซแลนขณะถูกระเบิดด้วยไอน้ำ  
ที่มา: วิทยา (2547)

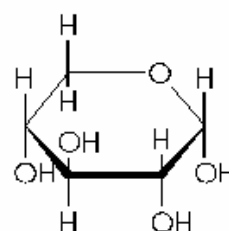
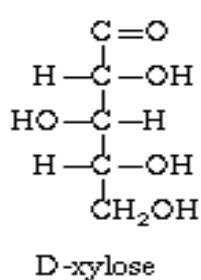
ประโยชน์ของเครื่องระเบิดด้วยไอน้ำ (Steam explosion) สามารถนำมาใช้ในการ pretreatment ไม้หรือวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เพื่อให้ได้วัตถุดิบหลักสามชนิด คือ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนินซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นสารมูลค่าเพิ่มต่างๆ ได้แสดงดังภาพ 7



ภาพที่ 7 แสดงแนวทางการใช้ประโยชน์องค์ประกอบเคมีต่างๆในวัสดุเศษเหลือทิ้งทางเกษตรโดยการ pretreatment ด้วยการระเบิดด้วยไอน้ำ

### น้ำตาลไซโลส (D-Xylose)

น้ำตาลไซโลส จัดเป็นน้ำตาลประเภท Aldopentose ปรกติจะไม่พบน้ำตาลไซโลสในรูปโมเลกุลอิสระแต่จะพบอยู่ในรูปของไซแลนที่อยู่ร่วมกับเซลลูโลส สามารถผลิตน้ำตาลไซโลสจากวัสดุเศษเหลือทางการเกษตร น้ำตาลไซโลสมีสูตรโครงสร้างทางเคมี คือ  $C_5H_{10}O_5$  (ภาพที่ 8) มีน้ำหนักโมเลกุล 150.13 มีรสหวาน และมีจุดหลอมเหลว  $144 - 145 ^\circ C$



ภาพที่ 8 ลักษณะโครงสร้างของน้ำตาลไซโลส

วัสดุเศษเหลือทางการเกษตรเป็นวัสดุชนิดที่ทดแทนได้ จึงสามารถนำมาใช้ได้โดยไม่มีวันหมดสิ้น (Renewable material) นอกจากนั้นยังมีอยู่ในปริมาณมากและมีราคาถูก โดยส่วนประกอบหลักของวัสดุเศษเหลือทางการเกษตร คือ ไซแลน จึงสามารถผลิตไซโลสได้จากวัสดุเศษเหลือทางการเกษตร เพราะ ไซโลสเป็นหน่วยย่อยของไซแลน ภายใต้สภาวะที่เหมาะสม สามารถย่อยไซแลนให้อยู่ในรูปของน้ำตาลไซโลสได้ด้วยกรด หรือเอนไซม์  $\beta$ -xylanase และ  $\beta$ -xylosinase (Cowling และ Kirk, 1976; Dekker, 1982; Kirk, 1983; Budavari, 1989) สามารถนำน้ำตาลไซโลสที่ได้จากการย่อยไซแลน ไปใช้เป็นวัตถุดิบในการสร้างผลิตภัณฑ์ต่างๆ เพื่อสร้างมูลค่าเพิ่ม เช่น น้ำตาลไซลิทอล เป็นต้น

### ไซลิทอล (Xylitol)

ไซลิทอลเป็นแอลกอฮอล์ของน้ำตาลไซโลสที่พบได้ในธรรมชาติ เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวประกอบด้วยคาร์บอน 5 อะตอม และมีคุณสมบัติหลายประการที่แตกต่างจากน้ำตาลแอลกอฮอล์ชนิดอื่น ในจำนวนน้ำตาล polyols ทั้งหมดนั้น ไซลิทอลจัดว่ามีความหวานมากที่สุด โดยมีความหวานเป็น 2.5 เท่าของน้ำตาลแมนนิทอล และมีความหวานเป็น 2 เท่าของซอร์บิทอล เมื่อเปรียบ

ความหวานของไซลิทอลกับน้ำตาลซูโครสแล้ว พบว่า ความหวานจะอยู่ในช่วง 0.85-1.2 เท่าของน้ำตาลซูโครส (Emodi, 1978) ไซลิทอลจะให้ความรู้สึกที่เย็นและเป็นสารช่วยป้องกันฟันผุ (Pepper and Olinger, 1988) ปัจจุบันมีการนำไซลิทอลไปใช้เป็นสารให้ความหวานในผลิตภัณฑ์หลายชนิด อาทิเช่น หมากฝรั่ง ช็อกโกแลต ทอฟฟี่ ลูกกวาด ไอศกรีม เครื่องดื่ม และผลิตภัณฑ์ทางเภสัชกรรม เป็นต้น (สารโรจน์, 2537; Emodi, 1978)

### 1. คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพที่สำคัญของไซลิทอล

ตารางที่ 1 แสดงการสรุปคุณสมบัติทางกายภาพโดยทั่วไปของไซลิทอล โดยคุณสมบัติอื่นๆ ที่มีความสำคัญทางอาหาร มีดังนี้

#### 1. มีการละลายน้ำที่ดีและมีความคงตัวสูง

ไซลิทอลละลายน้ำได้ง่าย ได้สารละลายที่มีความคงตัวสูงแม้ว่าจะผ่านความร้อน หรือ เก็บรักษาไว้นาน โดยไม่เกิดปฏิกิริยา Maillard Browning และ Caramelization ดังเช่นน้ำตาล ฟรุกโทสและเดกซ์โทส เนื่องจากไซลิทอลไม่มีหมู่คีโตนหรือ อัลดีไฮด์ ทำให้จุลินทรีย์ส่วนใหญ่ไม่สามารถใช้ไซลิทอลเป็นอาหารได้ ดังนั้นจึงสามารถเก็บผลิตภัณฑ์ที่มีไซลิทอลเป็นส่วนประกอบ เอาไว้ได้นานโดยไม่ถูกทำลายจากจุลินทรีย์

#### 2. ให้ความรู้สึกเย็น

ไซลิทอลมีรสชาติดีและให้ความรู้สึกเย็นเนื่องจากมีค่าความร้อนจำเพาะเท่ากับ-34.8 แคลอรีต่อกรัม แต่ในสภาพที่เป็นสารละลายหรือ เมื่ออยู่ในรูปอสัณฐาน (amorphous form) จะไม่มีคุณสมบัติเย็น (cooling effect) ดังนั้นถ้าต้องการให้คุณสมบัติเย็นจะต้องใช้ในรูปของผลึกเท่านั้น

#### 3. เป็นสารที่ให้ความหวานมาก

ไซลิทอลมีความหวานเหมือนน้ำตาลทั่วไป แต่หวานมากกว่าเมนทอลและ ซอร์บิทอล 2.5 และ 2 เท่า ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำตาลซูโครสจะมีความหวานตั้งแต่ 0.85-1.25 เท่าขึ้นไป แต่จะมากน้อยแค่ไหนขึ้นอยู่กับค่าพีเอช ความเข้มข้น อุณหภูมิ และความเข้มข้นของเกลือ ถ้ากำหนดให้น้ำตาลซูโครสเป็นสารอ้างอิงที่มีความหวานเป็น 100 สารให้ความหวานชนิดอื่นจะมีความหวานสัมพันธ์ดังนี้ ฟรุกโตส 150 ไซลิทอล 85-120 กลูโคส 70 โซโลส 67 ซอร์บิทอล 50 และ แมนนิทอล 40

#### 4. ให้พลังงานสูง

ไซลิทอลเป็นแหล่งพลังงานที่ดีเหมือนกับคาร์โบไฮเดรตชนิดอื่น โดยเมื่อถูกดูดซึมเข้าร่างกายจะให้พลังงาน 4.06 กิโลแคลอรีต่อกรัม (16.7 กิโลจูลต่อกรัม)

#### 5. เป็นสารป้องกันฟันผุ

เนื่องจากจุลินทรีย์ในช่องปาก เช่น Streptococci ไม่สามารถใช้ไซลิทอลเป็นแหล่งอาหารได้จึงไม่มีการผลิตกรด (Makinen, 1979) ที่ทำลายฟัน ดังนั้นการบริโภคอาหารที่มีไซลิทอลเป็นสารให้ความหวาน เช่น หมากฝรั่งจะช่วยป้องกันฟันผุได้ (Pepper and Olinger, 1988)

ตารางที่ 1 แสดงคุณสมบัติของไซลิทอล

| คุณสมบัติ             | รายละเอียด                                                                                                                                                                                                                                                             |
|-----------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| โครงสร้าง             | $  \begin{array}{ccccccc}  & & \text{H} & \text{OH} & \text{H} & & \\  & &   &   &   & & \\  \text{HOCH}_2 & - & \text{C} & - & \text{C} & - & \text{C} & - & \text{CH}_2\text{OH} \\  & &   &   &   & & \\  & & \text{OH} & \text{H} & \text{OH} & &   \end{array}  $ |
| สูตรโมเลกุล           | $\text{C}_5\text{H}_{12}\text{O}_5$                                                                                                                                                                                                                                    |
| น้ำหนักโมเลกุล        | 152.1                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| รูปร่าง               | ผงผลึก                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| สี                    | ขาว                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| กลิ่น                 | ไม่มีกลิ่น                                                                                                                                                                                                                                                             |
| รสชาติ                | ความหวานใกล้เคียงซูโครส                                                                                                                                                                                                                                                |
| จุดเดือด              | 216 °C                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| จุดหลอมเหลว           | 93.4-94.7 °C                                                                                                                                                                                                                                                           |
| ค่าเบี่ยงเบนแสงจำเพาะ | ไม่มีคุณสมบัติในการเบี่ยงเบนแสง                                                                                                                                                                                                                                        |
| การดูดความชื้น        | ในที่ที่มีความชื้นสูงดูดความชื้นได้มากกว่าซูโครสแต่น้อยกว่าซอร์บิทอล                                                                                                                                                                                                   |
| การละลายน้ำ           | 64.2 g/100 ml                                                                                                                                                                                                                                                          |
| การละลายในเอทานอล     | 6.0 g/100 ml                                                                                                                                                                                                                                                           |
| สารปนเปื้อน           | แมนนิทอล, ซอร์บิทอล, กาแลคทิทอล, อะราบิทอล                                                                                                                                                                                                                             |

ที่มา: Emodi (1978)



## 2. การผลิตไซลิทอล

ผลพลอยได้จากเมทาบอลิซึมของสารคาร์โบไฮเดรต ทำให้ร่างกายมนุษย์สามารถผลิตไซลิทอลประมาณ 5–15 กรัมต่อวัน ในธรรมชาติ สามารถพบไซลิทอลได้ในผักและผลไม้เป็นส่วนใหญ่ เช่น ในส่วนของต้นหรือผลของราสเบอร์รี่, สตรอเบอร์รี่, ลูกพลับ, ผักกาดหอม และดอกกะหล่ำ เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ความเข้มข้นของไซลิทอลในพืชมีน้อยมาก ทำให้การสกัดไซลิทอลจากผักหรือผลไม้ให้ผลที่ไม่คุ้มค่า ดังนั้นการผลิตผลิตภัณฑ์ด้วยเทคโนโลยีชีวภาพจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจอย่างกว้างขวาง ทั้งในขั้นตอนการผลิต การเก็บเกี่ยว การแยก และการทำให้บริสุทธิ์

การผลิตไซลิทอลสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การสกัดจากผักและผลไม้ การสังเคราะห์ด้วยกระบวนการทางเคมี และวิธีทางเทคโนโลยีชีวภาพ ดังนี้ (ภาพที่ 8)

### 2.1 การสกัดจากผักและผลไม้

เนื่องจากผักและผลไม้หลายชนิดมีไซลิทอลเป็นองค์ประกอบอยู่ ดังนั้นจึงสามารถที่จะแยกไซลิทอลออกได้โดยการสกัดด้วยตัวทำละลายผสมระหว่างอะซิโตนและเมทานอล แต่ปริมาณสารที่สกัดได้ค่อนข้างต่ำมาก (น้อยกว่า 90 มิลลิกรัมไซลิทอลต่อ 100 กรัมตัวอย่าง) ดังนั้นจึงไม่คุ้มค่าที่จะผลิตในเชิงอุตสาหกรรม

### 2.2 การสังเคราะห์โดยกระบวนการเคมี

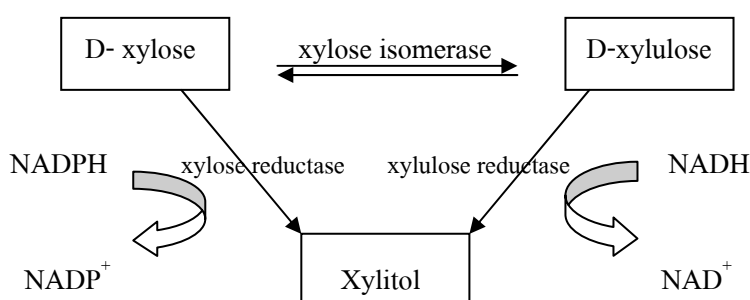
กระบวนการนี้เริ่มต้นโดยการเตรียมไซโลสจากพวกพืชที่มีไซโลสเป็นองค์ประกอบหลัก เช่น ไม้เนื้อแข็ง และพวกวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เช่น ชังข้าวโพด ชานอ้อย ฟางข้าว เมล็ดฝ้าย เปลือกเมล็ดทานตะวัน เป็นต้น ทำการย่อยวัตถุดิบด้วยกรดเจือจาง โดยผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยนอกจากจะมีไซโลสเป็นองค์ประกอบหลักแล้วยังมีน้ำตาลชนิดอื่นปนมาด้วย เช่น กลูโคส อะราบินโนส แมนโนส และกาแลคโตส แต่สารเหล่านี้จะมีปริมาณเล็กน้อยแค่เพิ่มขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบที่นำมาย่อยด้วย หากต้องการทำบริสุทธิ์ไซโลส จะต้องใช้ต้นทุนสูง หลังจากผ่านกระบวนการทำให้บริสุทธิ์และผ่านการกำจัดสีแล้ว จะนำสารละลายไซโลสที่ได้มาทำการเติมไฮโดรเจนโดยปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันที่อุณหภูมิ 80-140 องศาเซลเซียส ภายใต้ความดันของก๊าซไฮโดรเจน 50 atm โดยมีนิกเกิลเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ในขั้นนี้ไซโลสจะถูกเปลี่ยนเป็นไซลิทอล

ประมาณ 50-60 เปอร์เซ็นต์ สารละลายที่ได้จากกระบวนการนี้จะมีน้ำตาลแอลกอฮอล์ชนิดอื่นปะปนอยู่ด้วย โดยน้ำตาลส่วนที่ไม่ทำปฏิกิริยาจะถูกนำไปผ่านกระบวนการทางโครมาโตกราฟีเพื่อกำจัดสารปนเปื้อนออก หลังจากผ่านไฮโดรจีเนชันแล้ว จะทำการกรองโลหะที่ใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาออกจากสารละลาย ก่อนนำไปทำการแลกเปลี่ยนไอออนเพื่อให้เข้มข้น ทำการตกผลึก ทำการกำจัดสี และแยกไซลิทอลออกมา (Wisniak et al., 1974; Hyvonen and Koivistoinen, 1982)

### 2.3 การผลิตไซลิทอลโดยจุลินทรีย์

มีการศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับการผลิตไซลิทอลกันอย่างกว้างขวางด้วยจุลินทรีย์ มีการคัดเลือกจุลินทรีย์ที่สามารถผลิตไซลิทอลได้สูงสุด จากการทดลองพบว่า มีจุลินทรีย์หลายชนิดที่สามารถผลิตไซลิทอลได้ โดยเฉพาะยีสต์ ในสกุล *Candida* (วิเชียรและคณะ, 2538; Babosa et al., 1988; Gong et al., 1981; Sirisansaneeyakul et al., 1995) Hofer et al. (1971) รายงานว่าการผลิตไซลิทอลจากไซโลสด้วยจุลินทรีย์เกิดได้ 2 วิธี คือ

- 1) ไซโลสถูกเปลี่ยนเป็นไซลิทอลโดยตรงโดยเอนไซม์ไซโลสรีดักเทสที่มี NADPH เป็นโคเอนไซม์
- 2) ไซโลสถูกเปลี่ยนไอโซเมอร์ไปเป็นไซลูโลสก่อนด้วยเอนไซม์ไซโลสไอโซเมอเรส จากนั้นจึงถูกรีดิวซ์ไปเป็นไซลิทอลด้วยเอนไซม์ไซลูโลสรีดักเทส โดยมี NADH เป็นโคเอนไซม์ ดังภาพที่ 9

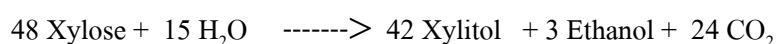


ภาพที่ 9 วิธีการเกิดไซลิทอลจากเมทาบอลิซึมของไซโลส

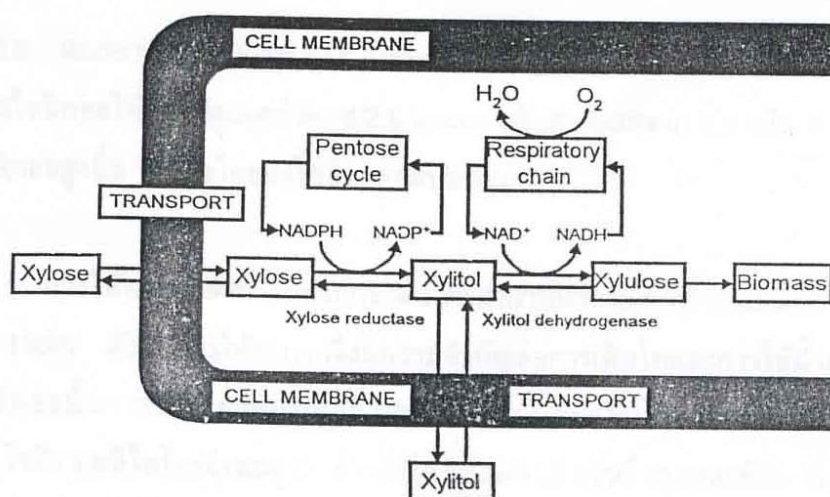
ที่มา: อ้างโดย วรสิทธิ์ (2541)

Barbosa *et al.* (1988) พบว่า เมื่อเพาะเลี้ยงยีสต์ในอาหารที่อุดมด้วยไซโลสเป็นแหล่งให้คาร์บอนและพลังงาน ยีสต์สามารถผลิตไซลิตอลจากไซโลสให้ผลได้ทางทฤษฎีเท่ากับ 0.9 โมลไซลิตอลต่อโมลไซโลส

$126 \text{ Xylose} + 3 \text{ O}_2 + 6 \text{ ADP} + 6 \text{ Pi} + 48 \text{ H}_2\text{O} \longrightarrow 114 \text{ Xylitol} + 6 \text{ ATP} + 60 \text{ CO}_2$   
 ภายใต้สภาวะไม่มีอากาศให้ผลได้ทางทฤษฎีเท่ากับ 0.875 โมลไซลิตอลต่อโมลไซโลส โดยมีเอทานอลเกิดขึ้นด้วยดังนี้



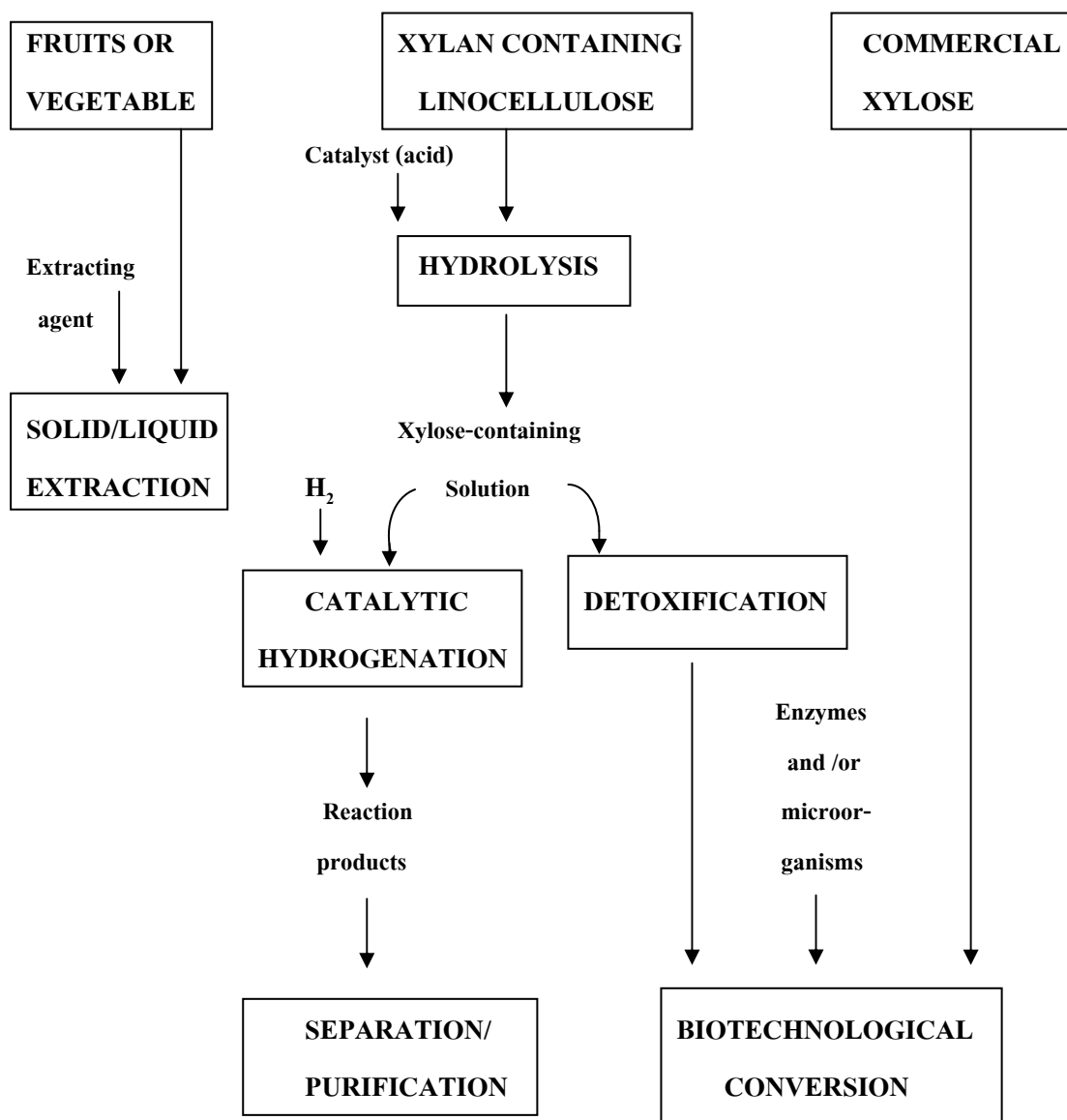
Sirisansaneeyakul *et al.* (1992) ได้อธิบายเมแทบอลิซึมของไซโลสในยีสต์ *C. mogii* จากสมดุลของไซโลสและไซลิตอลที่อยู่ภายในเซลล์และนอกเซลล์ (ภาพที่ 10) โดยพบว่าไซโลสที่อยู่นอกเซลล์จะถูกส่งผ่านเข้าไปในเซลล์ และถูกเอนไซม์ไซโลสรีดักเตส เปลี่ยนให้เป็นไซลิตอล จากนั้นจึงมีการปล่อยไซลิตอลส่วนใหญ่ออกมานอกเซลล์ โดยส่วนที่เหลือจะถูกเอนไซม์ไซลิตอลดีไฮโดรจีเนส เปลี่ยนให้เป็นไซลูโลสเพื่อใช้ในการสังเคราะห์ให้เป็นมวลชีวภาพ



ภาพที่ 10 เมแทบอลิซึมของไซโลสในยีสต์

ที่มา: Sirisansaneeyakul *et al.* (1992) อ้างโดย วรสิทธิ์ (2541)

สรุปกรรมวิธีต่างๆ ในการผลิตไซลิทอลได้ ดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 กรรมวิธีต่างๆ ในการผลิตไซลิทอล

ที่มา: Parajo *et al.* (1997)

### 3. การประยุกต์ใช้ไซลิทอล

เนื่องจากไซลิทอลเป็นน้ำตาลแอลกอฮอล์ ที่ให้ความหวานและมีปริมาณแคลอรีต่ำ จึงเป็นที่นิยมในการนำไปเป็นส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์อาหาร และในผลิตภัณฑ์ทางเภสัชกรรม เพราะมีคุณสมบัติเป็นสารป้องกันฟันผุ เหมาะสำหรับผู้ป่วยโรคเบาหวาน เป็นต้น

### 3.1 ผลิตภัณฑ์ที่เป็นอาหาร

ไซลิทอลถูกนำมาใช้เป็นสารให้ความหวานในผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิด เช่น เบเกอรี่ แยม ลูกกวาด หมากฝรั่ง เป็นต้น หากต้องการให้เป็นผลิตภัณฑ์ที่ป้องกันฟันผุ มักจะใช้ไซลิทอลเป็นสารที่ให้ความหวานเสมอ แต่จะไม่ใช้สารไซลิทอลในเครื่องดื่ม เพราะจะทำให้ผู้บริโภคอาจได้รับไซลิทอลในปริมาณที่มากเกินไป จนเกิดอาการท้องเสียได้

หมากฝรั่ง (Chewing gum) โดยทั่วไปจะประกอบด้วย น้ำตาลซูโครส 50-75% และน้ำ 3-5% และมีการผสมกับกลูโคสไซรัป ในส่วนของซูโครสสามารถนำไซลิทอล แมนนิทอล หรือ ซอร์บิทอล มาใช้ทดแทนได้แต่ไซลิทอลเท่านั้นที่สามารถทดแทนซูโครสได้ในปริมาณ 1:1 เพราะมีความหวานเท่ากับซูโครส ส่วนแมนนิทอล ซอร์บิทอลซึ่งมีความหวานน้อยกว่าจะถูกใช้เพื่อป้องกันฟันผุเท่านั้น

ลูกอม (Hard candy) ลูกอมที่ใช้ไซลิทอลจะให้คุณสมบัติดีกว่าลูกอมที่ใช้สารให้ความหวานอื่น โดยเฉพาะอย่างยิ่งลูกอมที่ปราศจากน้ำตาล (Sugarless candy)

ทอฟฟี่และคาราเมล (Toffees and caramels) ในผลิตภัณฑ์ชนิดนี้ต้องป้องกันไม่ให้ไซลิทอลแข็งและตกผลึก แต่เนื่องจากไซลิทอลไม่เกิด maillard reaction และ caramelization ดังนั้นจึงไม่มีสีและกลิ่นที่ต้องการเหมือนการใช้ฟรุ็กโตส ดังนั้นจึงต้องมีการเติมสีและกลิ่นของผลิตภัณฑ์

ช็อกโกแลต (Chocolate) ในการผลิตช็อกโกแลตสามารถใช้ไซลิทอลทดแทนได้ในอัตราส่วน 1:1 การใช้ไซลิทอลแทนซูโครสทำให้ผลิตภัณฑ์มีความหนืดลดลง แต่สามารถแก้ไขได้โดยการเติมสารพวกกัม (gum) ลงไป รสชาติและเนื้อสัมผัสยังเหมือนกับการใช้ซูโครสเป็นสารให้ความหวาน

เจลาติน (gelatin desserts) แม้ว่าเจลาตินเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีน้ำอยู่ในปริมาณสูง แต่ไซลิทอลสามารถนำไปใช้เป็นสารให้ความหวานทดแทนซูโครสได้อย่างดี โดยที่คุณสมบัติต่างๆ ของผลิตภัณฑ์ไม่เปลี่ยนแปลง

แยม (jams) เราสามารถใช้ไซลิทอลทดแทนซูโครสได้ในอัตราส่วน 1:1 แต่ไม่ควรใช้

ในปรา ยีสต์ จุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญได้ แต่อาจต้องเติมสารพวกเจลาตินเพื่อเพิ่มความหนืดปริมาณที่สูงกว่า 40% เพราะทำให้เกิดการตกผลึกระหว่างการเก็บรักษา ผลิตภัณฑ์ชนิดนี้มีผลไม่เพียงพอประกอบจำนวนมาก เมื่อใช้สารโซลิตอลเป็นสารให้ความหวานก็ไม่จำเป็นต้องใช้สารกันเสียเพราะเชื้อ

ไอศกรีม (ice cream) หากมีการใช้โซลิตอลแทนซูโครส กลูโคสโซลิตอลในผลิตภัณฑ์ที่ต้องแช่แข็ง จะทำให้การหลอมเหลวของผลิตภัณฑ์นั้นลดลง การเติมสารพวก thickener จะช่วยให้เนื้อสัมผัสดีขึ้นได้

### 3.2 ผลิตภัณฑ์ทางเภสัชกรรม

โซลิตอลสามารถใช้เป็น excipient และสารให้ความหวานในกรรมวิธีทางเภสัชกรรมเหมือนในอุตสาหกรรมอาหาร

การทำเม็ดยา (Tablet) ในการทำเม็ดยาต้องมีการใช้อนุภาคสูง ดังนั้นสามารถใช้โซลิตอลเป็นส่วนผสมของการทำเม็ดยาได้ เพราะโซลิตอลมีความคงตัวสูงที่อุณหภูมิสูง โดยโซลิตอลจะทำหน้าที่เป็นทั้งตัวพา (carrier) และสารให้ความหวานไปพร้อมๆ กันซึ่งเม็ดยาที่ใช้โซลิตอลจะมีการกระจายตัวและปล่อยตัวยาวออกมาได้ดี

ยาสีฟัน (Toothpaste) โซลิตอลอาจนำมาใช้แทนซอร์บิทอลบางส่วนหรือทั้งหมดในการผลิตยาสีฟัน เนื่องจากโซลิตอลเป็นสารให้ความหวานกว่าซอร์บิทอลและให้ความรู้สึกเย็น ดังนั้นจึงช่วยปรับปรุงคุณภาพ คุณลักษณะของยาสีฟัน จากคุณสมบัติเหล่านี้จึงมีการนำโซลิตอลไปใช้ในผลิตภัณฑ์เกี่ยวกับช่องปากอื่นๆ เช่น น้ำยาบ้วนปาก

### ผลพลอยได้จากการผลิตน้ำตาลไซโลสจากวัสดุเหลือทิ้งและการกำจัดสารที่ไม่ต้องการ

การย่อยพืชหรือวัสดุเศษเหลือทิ้งทางการเกษตรเพื่อให้ได้น้ำตาลไซโลสซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในส่วนเฮมิเซลลูโลสจะสามารถนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการเปลี่ยนให้เป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ ที่ต้องการได้ การนำน้ำตาลไซโลสที่ได้มาทำการหมักโดยจุลินทรีย์เพื่อให้เกิดผลิตภัณฑ์ต่างๆ พบว่า ผลผลิตที่ได้มีปริมาณต่ำกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับสารละลายไซโลสบริสุทธิ์

เนื่องจากในขั้นตอนการทำให้เกิดน้ำตาลจะเกิดผลพลอยได้ของสารบางชนิด ที่มีผลต่อการยับยั้งการเจริญเติบโตและสร้างผลิตภัณฑ์ของจุลินทรีย์ (Parajo *et al.*, 1997)

Palmqvist *et al.* (1996) สารละลายไซโลสที่ได้จากการย่อยวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรสามารถผลิตต่อเป็นผลิตภัณฑ์ไซลิทอลได้ ซึ่งใช้เป็นอาหารเพาะเลี้ยงเชื้อด้วยจุลินทรีย์ สำหรับการหมักนี้จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไซโลสเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อผลิตภัณฑ์ไซลิทอล เมื่อความเข้มข้นของสับสเตรตสูงผลของอัตราการเกิดผลิตภัณฑ์และผลได้จากสับสเตรตก็จะสูงขึ้นด้วยตามลำดับ อย่างไรก็ตาม อาหารที่ใช้สำหรับการเพาะเลี้ยงเชื้อที่เตรียมจากการย่อยวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร เมื่อทำให้ความเข้มข้นของไซโลสสูงขึ้นโดยการระเหยน้ำออกเป็นการเพิ่มความเข้มข้นของสาร non-volatile ด้วยจึงทำให้เป็นสาเหตุของการยับยั้งเมตาบอลิซึมของจุลินทรีย์ทำให้การเติบโตและผลได้จากผลิตภัณฑ์ลดลง

Olsson and Hahn Hagerdal (1996) ได้พบว่า สารยับยั้งที่มีผลต่อการเจริญเติบโตและสร้างผลิตภัณฑ์ของจุลินทรีย์ กลุ่มสารยับยั้งที่พบจากสารละลายเฮมิเซลลูโลสจากการย่อยไม้และวัสดุเศษเหลือทิ้งทางการเกษตร ได้แก่

1. ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการสลายตัวของน้ำตาล เช่น เฟอร์ฟูรอล และ 5- ไฮดรอกซิลเฟอร์ฟูรอล
2. ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการสลายตัวของส่วนเฮมิเซลลูโลส เช่น อะซิดิก
3. ผลิตภัณฑ์ที่เกิดจากการสลายตัวของลิกนินและอนุพันธ์ของสารประกอบจากไม้ ซึ่งเป็นสารประกอบฟีนอลิก เป็นหลัก
4. สารยับยั้งจากพวกโลหะ หรือแร่ธาตุที่พบในไม้, ดิน หรืออุปกรณ์ที่ใช้ในการย่อย

### **1. ผลของผลิตภัณฑ์ผลพลอยได้จากการย่อยลิกโนเซลลูโลสที่มีผลต่อกระบวนการหมัก**

ผลพลอยได้ที่เกิดขึ้นในสารละลายเฮมิเซลลูโลสที่ได้จากการย่อยวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเป็นสารยับยั้งต่อกระบวนการหมักและมีความสำคัญต่อการใช้แหล่งอาหารของจุลินทรีย์ ทำให้กลไกการเติบโตของจุลินทรีย์ลดลง ซึ่งไปขัดขวางกระบวนการหมักโดยตรง ทำให้ประสิทธิภาพในการหมักลดลง

Vanzyl *et al.* (1991) พบว่า กรดอะซิติกเป็นสารยับยั้งชนิดหนึ่ง ความสามารถในการยับยั้งขึ้นอยู่กับระดับความเข้มข้นที่อยู่ในรูปที่ไม่มีการแตกตัว ในสถานะที่ฟิเอชเป็นกรดกรดอะซิติกสามารถแพร่เข้าสู่เซลล์ไซโตพลาสและเกิดการแตกตัวทำให้ภายในเซลล์มีฟิเอชที่ต่ำกว่าภายนอกเซลล์เป็นผลให้ไม่สามารถเกิดการควบคู่ของพลังงาน เกิดความต้องการ ATP มากขึ้นในการขนส่งสารอาหาร

Weigert *et al.* (1988) พบว่า เฟอร์ฟูรอลและ 5-ไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรอลเป็นสารที่มีผลต่อการเติบโตของจุลินทรีย์ให้มีการปรับตัวอย่างช้าๆ หรือเป็นสาเหตุทำให้เซลล์ตาย สารฟิเอชเฟอร์ฟูรอลมีผลต่อกระบวนการหายใจและกระบวนการ oxidation phosphorylation และเปลี่ยนไปอยู่ในรูปของ furfural alcohol ทำให้มีผลต่อการเติบโตของเซลล์

Clark and Mackie (1984) พบว่า อนุพันธ์ของสารประกอบจากการย่อยกลีโคเซลลูโลส หรือวัสดุเศษเหลือทิ้งทางการเกษตร ที่เป็นสารยับยั้งที่เกิดจากการสลายตัวของกลีโคลินมีความเป็นพิษมากกว่าเฟอร์ฟูรอลและ 5-ไฮดรอกซีเมทิลเฟอร์ฟูรอล ซึ่งระดับความสามารถในการยับยั้งขึ้นกับหมู่ฟังก์ชันที่เกี่ยวข้องกับวงเบนซีน

Tran and Chambers (1985) พบว่า aromatic acid มีความเป็นพิษน้อยกว่าแอลดีไฮด์และกรดไขมันที่มีคาร์บอน 6-9 ตัว มีความเป็นพิษน้อยกว่า คาร์บอน 16 ตัว

Maiorella *et al.* (1987) พบว่า อะซิทาลดีไฮด์ ยับยั้งการขนส่งสารอาหาร (ลักษณะคล้ายกับกรดอะซิติก) และก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบโครงสร้างของเซลล์

Watson *et al.* (1988) ศึกษาผลกระทบจากไอออนของ Fe, Cu, Cr และ Ni (ที่ความเข้มข้นใกล้เคียงกับที่พบในสารละลายที่ได้จากการย่อย) พบว่า ที่ความเข้มข้นของไอออน Cu และ Cr ในช่วง 0-0.004 และ 0-0.19 g/l ไม่มีผลต่อค่า  $\mu_{max}$  อย่างมีนัยสำคัญ แต่จะลดลงเป็น 60% เมื่อความเข้มข้นของ  $Ni^{2+}$  เท่ากับ 0.1 g/l และ Girio *et al.* (1996) พบว่า  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  และ  $Mn^{2+}$  ไม่มีผลต่อกิจกรรมเอนไซม์ xylitol dehydrogenation แต่  $Zn^{2+}$  และ  $Co^{2+}$  มีผลอย่างมากต่อเอนไซม์ชนิดนี้



## 2. การทำน้ำตาลไซโลสให้บริสุทธิ์

ในกระบวนการ pretreatment ของไม้หรือวัสดุเศษเหลือทิ้งทางการเกษตรเพื่อให้ได้สารละลายที่มีน้ำตาลไซโลสเป็นผลิตภัณฑ์หลักจะเกิดผลพลอยได้บางชนิด ได้แก่ กรดอะซิติก (ซึ่งเกิดจากการสลายตัวของหมู่อะซิติกในโมเลกุลของไซเลน) เฟอร์ฟูรอล และ 5-ไฮดรอกซีเฟอร์ฟูรอล (ที่เกิดจากปฏิกิริยาดีไฮเดรชันของโมเลกุลไซโลสและกลูโคส ตามลำดับ) และสารประกอบฟีนอลิก (ที่เกิดจากการสลายตัวของลิกนิน) ซึ่งสารประกอบเหล่านี้มีผลยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ ดังนั้นจึงต้องกำจัดเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพในการหมักที่สูงขึ้น (Palmqvist and Hahn-Hagerdal, 2000) โดยอาศัยวิธีต่างๆ ได้แก่

- การสกัดด้วยตัวทำละลายอินทรีย์ (Parajo *et al.*, 1997; Witson *et al.*, 2000)
- การปรับพีเอช แบบ Overliming หรือ แบบ Neutralization (Roberto *et al.*, 1991; Parajo *et al.*, 1997)
- การระเหย (evaporation) (Larsson *et al.*, 1999)
- การใช้เทคนิคการแลกเปลี่ยนไอออน (Rao *et al.*, 1998; Nilvebrant *et al.*, 2001; Mancilha and Karim, 2003 )

Solange *et al.* (2001) ศึกษาการกำจัดสารพิษในสารละลายที่ได้จากการย่อยจากฟางข้าวด้วยถ่านกัมมันต์ สำหรับการผลิตไซลิทอลโดยเชื้อยีสต์ *Candida guilliermondii* จากการศึกษาไฮโดรไลสจากฟางข้าวที่ผ่านการย่อยด้วยกรดและปรับพีเอชเท่ากับ 8.0 ปริมาตร 50 มิลลิลิตรทำการเติม ถ่านกัมมันต์ 0.5, 1.5, และ 2.5 กรัม หรือในอัตราส่วนสารละลายที่ได้จากการย่อยจากฟางข้าวต่อถ่านกัมมันต์ 120 :1, 40:1 และ 24:1 กรัมต่อกรัม ตามลำดับ แล้วนำไปเขย่าที่ความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชม. ในการกำจัดสารพิษที่ยับยั้งการเจริญและการสร้างไซลิทอล พบว่า วิธีการกำจัดสารพิษก่อนการหมักโดยการดูดซับด้วยถ่านกัมมันต์ เป็นการปรับปรุงประสิทธิภาพการเปลี่ยนน้ำตาลไซโลสเป็นน้ำตาลไซลิทอล โดยการเพาะเลี้ยงแบบ Batch ทำให้ผลได้ไซลิทอลสูงสุด เท่ากับ 0.72 กรัมต่อกรัม และอัตราการผลิตไซลิทอล เท่ากับ 0.61 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมงเมื่อใช้อัตราส่วน ไฮโดรไลสต่อถ่านกัมมันต์เท่ากับ 40:1

Rivas *et al.* (2002) ทำการทดลองผลิตไซลิทอลจากสารละลายที่ได้จากการย่อยซังข้าวโพดโดยวิธีทางชีวภาพ พบว่า กระบวนการหมักสารละลายที่ได้จากการย่อยซังข้าวโพดให้เป็น

ไซโลสแบบ autohydrolysis และ posthydrolysis เมื่อนำสารละลายที่ได้มาทำการหมักต่อด้วยเชื้อยีสต์ *Debaryomyces hansenii* 2 สายพันธุ์ โดยทำการคัดเลือกสายพันธุ์ที่มีการปรับตัวได้ดีมีการเจริญและการผลิตไซลิทอลได้สูง พบว่า สายพันธุ์ *D. Hansenii* NRRL Y-7426 มีความสามารถในการปรับตัวได้ดีกว่า สายพันธุ์ *D. Hansenii* CCMI 942 โดยมีการปรับตัวเป็นไปอย่างต่อเนื่องในสารละลายที่ได้จากการย่อย นอกจากนี้ยังพบว่า การสเตอร์ไรซ์ด้วยการกรองผ่านเมมเบรนเป็นการสเตอร์ไรซ์ที่ดีกว่าวิธีการใช้หม้อนึ่งความดันไอน้ำ (autoclave) และเมื่อใช้สารละลายไซโลสที่ได้จากการย่อยแบบ autohydrolysis-posthydrolysis ผ่านกระบวนการทำให้น้ำตาลไซโลสเข้มข้นโดยวิธีการกลั่นภายใต้สุญญากาศและกำจัดสารพิษโดยการดูดซับด้วยถ่านชาร์ทำการเพาะเลี้ยงแบบเปิดเสรีภายใต้สภาวะความเข้มข้นของไซโลสและเซลล์ที่เหมาะสม พบว่า ทำให้อัตราการผลิตไซลิทอลเพิ่มสูงขึ้นเป็น 1.49 กรัมต่อลิตรต่อชั่วโมง และผลได้ของการผลิตไซลิทอลสูงขึ้นเป็น 0.73 กรัมต่อกรัมไซโลส

Buhner and Agblevor (2004) นำสารละลายที่ได้จากการย่อยเส้นใยข้าวโพดมากำจัดสารพิษก่อนการหมักด้วย เชื้อยีสต์ *Candida tropicalis* ให้เป็นไซลิทอล พบว่า ในการหมักสารละลายที่ได้จากการย่อยเส้นใยข้าวโพดที่เข้มข้นโดยการปรับพีเอชให้เป็นกลางอย่างเดียวไม่เพียงพอ ต้องใช้วิธีการทำให้เป็นด่าง, การทำให้เป็นกลางด้วย  $\text{Ca(OH)}_2$ , การทำให้เป็นกลางร่วมกับการใช้ถ่านกัมมันต์และการทำให้เป็นด่างร่วมกับการใช้ถ่านกัมมันต์เป็นวิธีที่เหมาะสมโดยเฉพาะการทำให้เป็นกลางร่วมกับการใช้ ถ่านกัมมันต์จะให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุดในการผลิตไซลิทอล