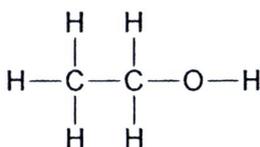


บทที่ 2

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง



2.1 เอทานอล



รูปที่ 2.1 โครงสร้างเคมีของเอทานอล

ที่มา : Wikipedia® (2008)

เอทานอลเป็นวัสดุใสไม่มีสี ติดไฟได้ เป็นสารเคมีอินทรีย์ที่หมักได้จากพืชในกลุ่มแป้งหรือน้ำตาล เอทานอลเป็นที่รู้จักกันในชื่อทั่วไปว่า “เอทิลแอลกอฮอล์” มีผสมอยู่ในสุราหรือเครื่องดื่มที่ผสมแอลกอฮอล์ทุกชนิดที่ใช้บริโภค เอทานอลมีลักษณะและโครงสร้างเคมีคล้ายกับสารเคมีอินทรีย์อีกชนิดหนึ่งคือ เมทานอล หรือเมทิลแอลกอฮอล์ แต่เมทานอลสกัดจากขบวนการกลั่นวัสดุ ปิโตรเคมีและเป็นวัสดุที่มีพิษเมื่อนำมาบริโภค ส่วนใหญ่ใช้ในอุตสาหกรรมที่ผลิตภัณฑ์ไม่นำมาบริโภคหรือมาใช้โดยตรงกับมนุษย์หรือสัตว์ เอทานอลในทางเคมีเป็นกลุ่มสารประกอบอินทรีย์มีสูตรทางเคมีคือ $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ซึ่งมีสูตรโครงสร้างตามรูปที่ 2.1 ประกอบด้วย คาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน เป็นไฮดรอกซิลดิวเทียฟของไฮโดรคาร์บอน เกิดจากการแทนที่ ไฮโดรเจนอะตอมด้วย hydroxyl group (OH) เอทานอลบริสุทธิ์ (anhydrous) มีจุดเดือดที่ 78.5 องศาเซลเซียส คุณสมบัติของเอทานอลใช้เป็นสารเพิ่มออกเทนในน้ำมันแก๊สโซลีนได้ทำให้มีการใช้ผสมแก๊สโซลีนอย่างแพร่หลายแทนสารผสมที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันคือสาร MTBE (Methyl Tertiary Butyl Ether) ซึ่งมีการค้นพบว่าเป็นสารที่มีอันตรายต่อสิ่งแวดล้อมเมื่อมีการรั่วไหลออกสู่แหล่งน้ำสาธารณะและเคยมีการปนเปื้อนในน้ำดื่มในสหรัฐอเมริกา และหากมีการห้ามใช้ สาร MTBE ผสมในเชื้อเพลิงทำให้มีความต้องการใช้เอทานอลเพิ่มขึ้น (วิโรจน์, 2553)

เอทานอล ถูกนำไปใช้ประโยชน์ได้หลายอย่าง เช่น ใช้เป็นเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ เช่น เหล้าไวน์ และเบียร์ ใช้ในอุตสาหกรรมยา ใช้เป็นตัวทำละลายในผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เช่น สีแล็กเกอร์

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ	
ห้องสมุดงานวิจัย	
วันที่	21 พ.ค. 2555
เลขทะเบียน	191043
เลขเรียกหนังสือ	

ยาเคลือบน้ำมัน และขี้ผึ้ง (ครีมขี้ผึ้ง) เป็นเรซิน ใช้เป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์สารเคมีและชีวเคมี ใช้เป็นสารเพิ่มค่าออกเทนในน้ำมันเบนซินที่เรียกว่าแก๊ซโซฮอล์ ใช้เป็นอาหาร เช่นน้ำส้มสายชู เกลาติน ใช้ทางการแพทย์ เช่น ใช้เช็ดแผล ใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องสำอาง ใช้เป็นตัวรีเอเจนต์ในห้องปฏิบัติการและอื่นๆ เป็นต้น (หนังสือพลังงานทดแทนเอทานอล และไบโอดีเซล)

2.2 การผลิตเอทานอล

แหล่งพลังงานที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันได้มาจากเชื้อเพลิงปิโตรเลียม คือ น้ำมันเบนซินและน้ำมันดีเซล และยังมีแนวโน้มลดลงตามลำดับ ในทางกลับกันค่าราคาน้ำมันในขณะนี้ยังเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นหลายประเทศจึงพยายามหาพลังงานอื่นมาทดแทนในรูปแบบต่างๆ เช่น พลังงานลม น้ำ แสงอาทิตย์และพลังงานชีวมวล

เอทานอลเป็นแหล่งพลังงานใหม่ที่กำลังได้รับความสนใจในขณะนี้ พบว่าร้อยละ 90 ได้มาจากกระบวนการหมัก ที่เหลือได้จากการสังเคราะห์ขึ้นมา ในกระบวนการผลิตเอทานอลกระบวนการหมักเป็นขั้นตอนที่สำคัญ เนื่องจากเป็นขั้นตอนที่จุลินทรีย์จะเป็นตัวไปเปลี่ยนวัตถุดิบให้กลายเป็นเอทานอล (www.nrel.gov)



กระบวนการหมักเอทานอล สามารถทำได้ทั้งในระบบต่อเนื่อง (Continuous) และแบบกะ (Batch) แต่กระบวนการหมักส่วนใหญ่ยังคงนิยมใช้แบบกะ เนื่องจากต้นทุนไม่สูงมากและง่ายต่อการควบคุมดูแลรักษา อุณหภูมิที่ใช้ในการหมักประมาณ 30 - 35 องศาเซลเซียส การที่ใช้อุณหภูมิสูงเนื่องจากต้องการเฉพาะเอทานอล จึงไม่จำเป็นต้องคำนึงถึงสารที่หักกลั่นรส ซึ่งจะเกิดได้น้อย และระเหยได้ง่ายที่อุณหภูมิสูง ใช้ระยะเวลาในการหมักสั้นลง อีกทั้งยังช่วยลดต้นทุนในการผลิตได้อีกด้วย (Hacking และคณะ, 1984)

2.2.1 ขั้นตอนเบื้องต้นในการผลิตเอทานอล แบ่งออกได้เป็น 4 ขั้นตอน ดังนี้

1. การเตรียมวัตถุดิบก่อนการหมัก
2. การเตรียมหัวเชื้อ และการหมัก
3. การคัดแยกผลิตภัณฑ์เอทานอลและการทำให้บริสุทธิ์
4. การใช้ประโยชน์จากผลิตภัณฑ์รองและของเสีย

(ที่มา :<http://www.science.cmu.ac.th/department/ic/document/pic/dc8.pdf>)

ในขั้นเตรียมวัตถุดิบก่อนกระบวนการหมัก ถ้าใช้กากน้ำตาลเป็นวัตถุดิบก็จะนำมาทำการเจือจางด้วยน้ำ เพื่อปรับความเข้มข้นของน้ำตาลให้เหมาะสม จึงสามารถนำเข้าสู่กระบวนการหมักได้ แต่ถ้าใช้วัตถุดิบประเภทแป้ง ก็จะต้องย่อยให้กลายเป็นน้ำตาลก่อน โดยการใช้กรดหรือเอนไซม์ โดยทั่วไปแล้วนิยมใช้เอนไซม์ เนื่องจากสะดวก ปฏิกริยาที่เกิดต่อวัตถุดิบไม่รุนแรง และผลิตภัณฑ์เอทานอลที่ได้มีความบริสุทธิ์สูงกว่า

ขั้นตอนต่อไปเป็นการเตรียมหัวเชื้อยีสต์ และเริ่มทำการหมัก โดยสภาวะที่ใช้ในการหมัก จะเกิดได้ภายใต้สภาวะที่ไร้ออกซิเจน หรือมีออกซิเจนเล็กน้อย และใช้เวลาในการหมักประมาณ 2-3 วัน จนได้น้ำหมักที่มีเอทานอลผสมอยู่ในทางปฏิบัติแล้ว ยีสต์สามารถใช้น้ำตาลเพื่อเปลี่ยนเป็นเอทานอลได้ประมาณร้อยละ 95 ส่วนน้ำตาลที่เหลือ ยีสต์ใช้สำหรับการเจริญของเซลล์ หรือเปลี่ยนไปเป็นผลพลอยได้ชนิดอื่นๆ เช่น ฟิวเซลอยล์ (Fusel oil) กรดแลกติก กลีเซอรินและอะซิทัลดีไฮด์ เป็นต้น

น้ำหมักที่ได้จะนำมาผ่านการกลั่นลำดับส่วน ซึ่งจะได้เอทานอลบริสุทธิ์ร้อยละ 95.6 แต่โดยปกติจะเรียกเอทานอลร้อยละ 95 ซึ่งยังไม่สามารถใช้ผสมลงในน้ำมันเบนซินได้เพราะจะเกิดการแยกชั้นของน้ำกับน้ำมัน จึงต้องมีการใช้เทคโนโลยีเพื่อแยกน้ำออกจากเอทานอล เรียกว่า เอทานอลไร้ น้ำ (Anhydrous ethanol หรือ Absolute ethanol) ซึ่งมีความบริสุทธิ์ถึงร้อยละ 99.5 เมื่อเอทานอลที่ได้ มีความบริสุทธิ์ถึงร้อยละ 99.5 แล้ว สามารถนำมาผสมกับน้ำมันเบนซิน เป็นน้ำมันแก๊สโซฮอล์ได้ โดยมีขั้นตอนคือ นำเอทานอลที่มีความบริสุทธิ์ร้อยละ 99.5 โดยปริมาตร อัตราส่วนร้อยละ 10 ใสลงในถังผสมแล้วเติมสารป้องกันการกัดกร่อน (Corrosion inhibitor) ลงไป จากนั้นเติมน้ำมันเบนซิน 91 หรือน้ำมันเบนซิน 95 ลงไปอัตราส่วนร้อยละ 90 เดินเครื่องสูบลมวนเวียน เพื่อให้ น้ำมันและส่วนผสมเข้ากัน ใช้เวลาประมาณ 30-60 นาที จะได้แก๊สโซฮอล์ (ทงศักดิ์, 2548)

2.3 วัตถุดิบที่ใช้ในการหมักเอทานอล

วัตถุดิบหลักที่ใช้ในการหมักเอทานอล สามารถแบ่งออกได้เป็น

- 2.3.1 น้ำตาล จากวัตถุดิบพวกอ้อย หัวบีท กากน้ำตาลและของเสียจากโรงอาหารบางประเภท
- 2.3.2 แป้ง วัตถุดิบจากพวกข้าวโพด ข้าวฟ่าง มันสำปะหลังและอื่นๆ
- 2.3.3 เซลลูโลส จากวัตถุดิบพวกเศษไม้และของเหลือทิ้งจากการเกษตร เช่น ชานอ้อย ฟางข้าว ชังข้าวโพด เป็นต้น

2.3.4 ของเสียจากโรงงานอุตสาหกรรม เช่น น้ำหางนม น้ำแช่เยือกกระดาษ น้ำแช่ข้าวโพดและน้ำทิ้งจากโรงงานผลไม้ เป็นต้น

ในบรรดาวัตถุดิบทั้งหลาย น้ำตาลเป็นวัตถุดิบที่เหมาะสมที่สุดโดยเฉพาะกากน้ำตาล เป็นวัตถุดิบที่ใช้ผลิตเอทานอลในระดับอุตสาหกรรม ส่วนวัตถุดิบประเภทแป้ง เนื่องจากโครงสร้างทางเคมีของแป้งประกอบด้วย อะไมโลส และ อะไมโลเพกติน โดยมีส่วนประกอบหลักเป็นกลูโคส ดังนั้นจึงต้องใช้เอนไซม์แอลฟาอะไมเลส และ กลูโคอะไมเลส ย่อยแป้งให้ได้เป็นน้ำตาล แล้วจึงนำไปใช้หมักแอลกอฮอล์ นอกจากนี้ยังใช้กรดในการย่อยแป้งให้เป็นน้ำตาลก็ได้แต่เป็นขั้นตอนที่ไม่เหมาะสมหลายประการ เช่น การกักกร่อนภาชนะด้วยกรด เป็นต้น

วัตถุดิบประเภทเซลลูโลสจะต้องผ่านขั้นตอนแปรสภาพ โดยอาจใช้การย่อยด้วยเอนไซม์ เช่น เซลลูเลส หรือด้วยกรด อย่างไรก็ตาม ขั้นตอนทั้งสองก็มีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกัน

ตารางที่ 2.1 แหล่งคาร์โบไฮเดรตที่เหมาะสมต่อการหมักเอทานอล

ชนิดของคาร์โบไฮเดรต	วัตถุดิบที่ใช้	ส่วนประกอบที่ได้จากการย่อยสลาย
ซูโครส	อ้อย บีท กากน้ำตาล	กลูโคสและฟรุคโตส
แป้ง	ข้าวโพด ข้าวฟ่าง มันสำปะหลัง มันฝรั่ง เผือก	กลูโคส มอลโตส มอลโตไตรโอส และเดกซ์ทริน
เซลลูโลส	ไม้ เศษไม้ ของเหลือจากการเกษตร (ชานอ้อย, ฟางข้าว)	กลูโคส แมนโนส กาแลคโตส อราบิโนส และไซโลส
แลคโตส	น้ำหางนม	กลูโคสและกาแลคโตส

ที่มา : กมล และ สุปรรมปรีดิ์ (2540)

2.4 เชื้อยีสต์ในการผลิตเอทานอล

2.4.1 ลักษณะทั่วไปของจุลินทรีย์ที่ใช้ในการผลิตเอทานอล

2.4.1.1 ให้ความเข้มข้นของเอทานอลและมีอัตราการหมักได้เอทานอลสูง

2.4.1.2 ทนต่อเอทานอลที่เกิดขึ้น เนื่องจากถ้าเชื้อจุลินทรีย์มีความไวต่อเอทานอล จะทำให้ได้ความเข้มข้นสุดท้ายปริมาณต่ำ

2.4.1.3 ทนทานต่อสภาวะกรดหรือพีเอชต่ำ

2.4.1.4 มีความสามารถในการตกตะกอน เพื่อแยกเซลล์ออกจากน้ำหมักได้ง่าย

2.4.1.5 มีความคงตัวทางพันธุกรรม ไม่เปลี่ยนแปลงง่าย

2.4.1.6 สามารถทนต่อแรงดันออสโมซิสที่เปลี่ยนแปลงไปได้

(ที่มา : www.agro.cmu.ac.th/e_books/.../%BA%B7%B7%D5%E84.ppt)

ยีสต์เป็นจุลินทรีย์ที่มีความสำคัญ ในปัจจุบันอุตสาหกรรมการหมักที่ใช้ยีสต์ในการผลิต จัดเป็นอุตสาหกรรมหมักที่ใหญ่ที่สุด มีดังนี้

1. เครื่องดื่มที่มีแอลกอฮอล์ (Alcoholic beverages) ได้แก่เบียร์ และสุราชนิดต่างๆ
2. ยีสต์ในการทำขนมปัง (Bakers' yeast)
3. ยีสต์อาหารคนและอาหารสัตว์ (Food and fodder yeast)
4. แอลกอฮอล์เชื้อเพลิง (Fuel alcohol)

2.4.2 วงจรชีวิตของยีสต์

ยีสต์จี้นัส *Saccharomyces* มีรูปร่างเป็นเซลล์เดี่ยว (unicellular) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6-8 ไมครอน เจริญได้ดีในสภาวะที่มี และไม่มีออกซิเจน การสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศโดยการสร้างแอสโกสปอร์ (ascospore) และการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศโดยการแตกหน่อ (budding)

2.4.3 ยีสต์ที่ผลิตเอทานอล

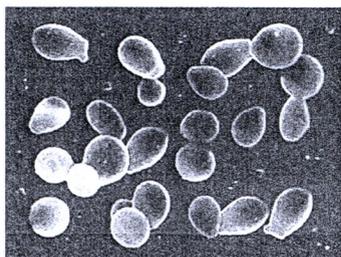
2.4.3.1 จี้นัส *Saccharomyces*

ได้แก่ *Saccharomyces cerevisiae*, *Saccharomyces uvarum*, *Saccharomyces bataviae*, *Saccharomyces carlsbergensis*, *Saccharomyces globosus* โดยเชื้อยีสต์เหล่านี้สามารถใช้แหล่งคาร์บอนได้แตกต่างกัน (<http://www.vcharkarn.com/vcafe/125301>)

ตารางที่ 2.2 แสดงแหล่งคาร์บอนที่ใช้ผลิตเอทานอลของยีสต์จีนิส *Saccharomyces*

แหล่งคาร์บอน	สายพันธุ์ของยีสต์
กลูโคส	ผลิตได้ทุกสายพันธุ์
กาแลกโตส	ผลิตได้บางสายพันธุ์
ซูโครส	ผลิตได้บางสายพันธุ์
มอลโตส	ผลิตได้บางสายพันธุ์
แลคโตส	ไม่มีสายพันธุ์ที่ผลิตได้

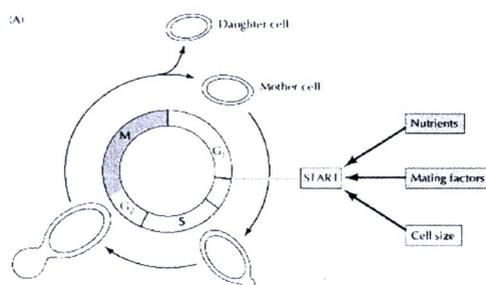
ที่มา : กมล และ สุเปรมปรีดี (2540)



รูปที่ 2.2 เซลล์ *Saccharomyces cerevisiae*

ที่มา : <http://www.diwinetaste.com/html/dwt20071/>

Images/SaccharomycesCerevisiae.jpg



รูปที่ 2.3 วงจรในการแตกหน่อของยีสต์

ที่มา : www.ncbi.nlm.nih.gov/bookshelf/picrender.fcgi

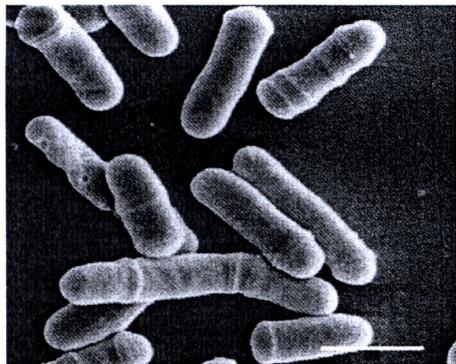
2.4.3.2 จีโนม *Schizosaccharomyces*

ได้แก่ *Schizosaccharomyces pombe*, *Schizosaccharomyces mellacei*, *Schizosaccharomyces formosensis*, *Schizosaccharomyces vordermani* ซึ่งยีสต์เหล่านี้ใช้แหล่งคาร์บอนได้แตกต่างกัน

ตารางที่ 2.3 แสดงแหล่งคาร์บอนที่ใช้ผลิตเอทานอลของยีสต์จีโนม *Schizosaccharomyces*

แหล่งคาร์บอน	สายพันธุ์ของยีสต์
กลูโคส	ผลิตได้ทุกสายพันธุ์
กาแลคโตส	ไม่มีสายพันธุ์ที่ผลิตได้
ซูโครส	ผลิตได้ทุกสายพันธุ์
มอลโตส	ผลิตได้ทุกสายพันธุ์
แลคโตส	ไม่มีสายพันธุ์ที่ผลิตได้

ที่มา : กมล และ สุปรอมปริดี (2540)



รูปที่ 2.4 เซลล์ *Schizosaccharomyces pombe*

ที่มา : <http://www.bscb.org/newsletter/summer2006/pombe1.jpg>

2.4.4 ยีสต์ที่พบในลูกแป้ง

ยีสต์ *Ascomycetous yeast*

Class *Ascomycetes*

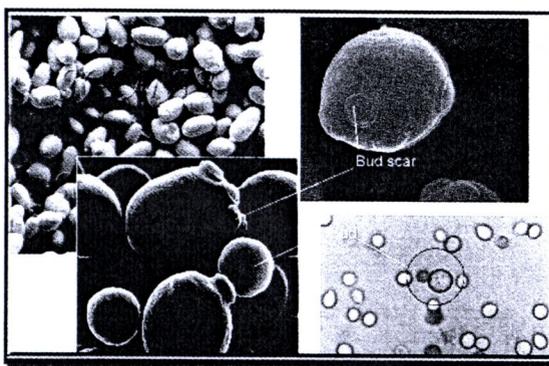
Subclass *Hemiascomycetidae*

Order *Endomycetales*

Family *Saccharomycetaceae*

Genus *Saccharomyces* sp.

Family *Saccharomycetaceae* ยีสต์จะทำให้เกิดกระบวนการหมักโดยเปลี่ยนน้ำตาลให้เป็นเอทิลแอลกอฮอล์และคาร์บอนไดออกไซด์ ยีสต์มีความเกี่ยวข้องในกระบวนการหมักจะมีการสร้าง Ascospores แบบอาศัยเพศอยู่ใน Asci ได้แก่ ยีสต์สกุล *Saccharomyces* sp. และ *Candida* sp. เนื่องจากยีสต์มีคุณสมบัติในการหมักน้ำตาลได้ดี ดังนั้นในกระบวนการหมักผักและผลไม้หรือปลาสดร่วมกับกากน้ำตาล (อาจใช้น้ำตาลทรายแดง น้ำตาลอ้อย) ยีสต์จะทำหน้าที่เปลี่ยนน้ำตาลให้เป็นแอลกอฮอล์และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ หลังจากการหมักวัสดุอินทรีย์ด้วยน้ำตาล (1-2 วัน จะได้กลิ่นแอลกอฮอล์) ยีสต์ในธรรมชาติจะเจริญเติบโตเพิ่มจำนวนเซลล์ เนื่องจากได้แหล่งอาหารจากน้ำตาล โดยจะปรากฏอยู่ที่บริเวณผิวหน้าของวัสดุหมักเป็นฟองที่ลอยเป็นฝ้าอยู่ที่ผิวของน้ำหมักอาจจะเรียกว่า TopYeasts เมื่อการหมักลดลงจะตกตะกอนลง



รูปที่ 2.5 ลักษณะของเชื้อ *Saccharomyces cerevisiae*

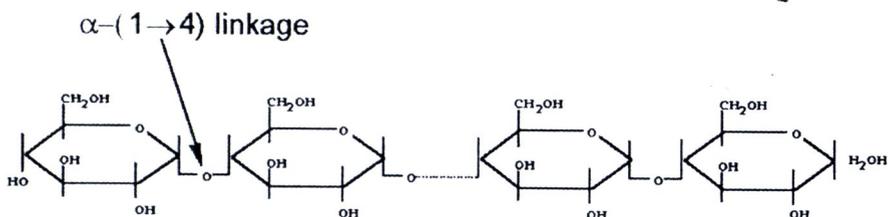
ที่มา: <http://158.108.88.131/courseware/charoen/unit4/>

Montesinos และ Navarro (1999) ได้ทำการผลิตเอทานอลโดยกระบวนการ SSF จากแป้งข้าวสาลีโดยใช้ยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* และเอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดส พบว่า จากการย่อยแป้งเบื้องต้น 6 ชั่วโมง ด้วยเอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดส 270 AGU ต่อกรัมของแป้ง ระยะเวลาที่ใช้ในการหมักประมาณ 60 ชั่วโมง แต่เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของเอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดสเป็น 540 AGU ต่อกรัมของแป้ง ระยะเวลาการหมักลดลงเหลือ 21 ชั่วโมง และให้ความเข้มข้นของเอทานอลเท่ากับ 67 กรัมต่อลิตร องค์ประกอบของน้ำตาลในน้ำหมักหลังจากผ่านการย่อยแล้วอาจจะมีปริมาณแตกต่างกันระหว่างการหมักในสองกระบวนการนี้ มอลโทสซึ่งเป็นน้ำตาลที่หมักได้ถูกผลิตในความเข้มข้นที่สูงขึ้นระหว่างการย่อย ทำให้กระบวนการหมักใช้เวลาสั้นลง

2.5 แป้ง (พิกตร์ประไพ, 2546)

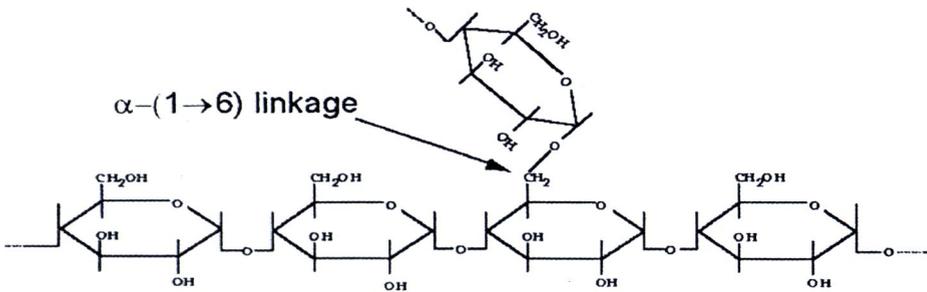
2.5.1 องค์ประกอบภายในแป้ง

แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่สะสมอยู่ในพืชซึ่งพบทั้งในใบ ลำต้น ราก ผล และเมล็ด แป้งมีมวลโมเลกุลตั้งแต่ 10,000 ถึง 1,000,000 มีสูตรทั่วไปเป็น $(C_6H_{10}O_5)_n$ นอกจากนั้น ยังพบว่าแป้งประกอบด้วยพอลิแซ็กคาไรด์ 2 ชนิด และทั้งสองชนิดเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคส (แป้งเป็นพอลิเมอร์ของกลูโคสเป็นมอนอเมอร์) แต่มีมวลโมเลกุลและโครงสร้างต่างกัน พอลิแซ็กคาไรด์ทั้งสองชนิดในแป้งได้แก่ อะไมโลส (Amylose) และอะไมโลเพกทิน (Amylopectin) โดยปกติในแป้งมีอะไมโลส ประมาณร้อยละ 20-28 นอกนั้นเป็นอะไมโลเพกทิน อะไมโลส ประกอบด้วยกลูโคส 250-300 โมเลกุล ซึ่งต่อกันเป็นโซ่ยาวแบบไม่มีกิ่งแต่โซ่ของอะไมโลสขดเป็นเกลียวแบบเฮลิคซ์ (Helix) ส่วนอะไมโลเพกทิน บางครั้ง พบว่ามีกลูโคสถึง 1000 โมเลกุล มีโครงสร้างต่างจากอะไมโลส คือ นอกจากกลูโคสต่อเป็นโซ่ยาวแล้วยังต่อแบบเป็นกิ่งด้วย



รูปที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของอะไมโลส

ที่มา : www.cheng.cam.ac.uk



รูปที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของอะไมโลเพคติน

ที่มา : www.cheng.cam.ac.uk

2.5.2 กลไกการย่อยแป้ง

การย่อยแป้งโดยทั่วไปประกอบด้วย 3 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

1. การเจลาติไนเซชัน (gelatinization)

ซึ่งเป็นขั้นตอนการทำให้เม็ดแป้งพองตัว โดยเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำขณะที่ได้รับความร้อน ทำให้เม็ดแป้งพองตัว เรียกอุณหภูมิช่วงนี้ว่า อุณหภูมิการเกิดเจล (gelatinization temperature)

2. การเกิดลิกูเอแฟคชัน (Liquefaction)

เป็นขั้นตอนการลดความหนืดของแป้งที่เกิดเจล โดยการย่อยโมเลกุลของแป้งแบบสุ่มของลูกโซ่กลูโคส ทำให้แยกเป็นสายสั้นๆ มีขนาดโมเลกุลเล็กลง และมีความหนืดลดลงกว่า 30 ปีที่ผ่านมา มีการใช้เอนไซม์แอลฟาอะไมเลสแทนการใช้กรดย่อยที่อุณหภูมิ 140 องศาเซลเซียส หรือสูงกว่า

3. การเกิดแซคคาริฟิเคชัน (Saccharification)

เป็นขั้นตอนการย่อยแป้งให้เป็นโมเลกุลของน้ำตาลภายหลังการย่อยจะได้ น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว น้ำตาลโมเลกุลคู่ หรือน้ำตาลที่มีโมเลกุลสูงกว่า ผลผลิตที่ได้คือ กลูโคส มอลโทส หรือมอลโทไตรออส

2.6 มันเทศ (สารานุกรมไทยสำหรับเยาวชนฯ เล่มที่ 5)



รูปที่ 2.8 แสดงลักษณะของมันเทศ

มันเทศเป็นพืชที่เป็นเถาเลื้อยราบไปบนพื้นดิน มีรากสะสมอาหารขยายใหญ่เรียกว่า หัว หัวมันเทศมีคุณประโยชน์มาก เพราะใช้เป็นอาหารของมนุษย์ได้เป็นอย่างดี ใช้มันเทศปรุงอาหารได้ทั้งคาวหวาน อาหารคาว ได้แก่ แกงเลียง แกงคั่วแกงกะหรี่ และแกงมัสมั่น เป็นต้น อาหารหวาน ได้แก่ มันเทศต้มน้ำตาล มันเทศแกงบวด มันเทศทอด มันเทศเชื่อม มันเทศกวน มันเทศฉาบ มันเทศรังนก และมันเทศเผา เป็นต้น หัวมันเทศมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตสูง จึงใช้รับประทานแทนข้าวได้ นอกจากนี้เป็นอาหารของมนุษย์แล้ว มันเทศยังใช้เป็นอาหารสำหรับสัตว์ได้อีกด้วย เช่น เป็นอาหารหมู อาหารวัว และอาหารแพะ เป็นต้น มันเทศใช้เป็นอาหารสัตว์ได้ทั้งหัว เถา และใบ ทั้งยังเป็นวัตถุดิบของอุตสาหกรรมได้หลายอย่าง เช่น ใช้ผลิตแป้ง ทำแอลกอฮอล์และน้ำส้มสายชู มันเทศเป็นพืชอาหารที่มีความสำคัญอันดับที่ 5 ของโลกรองจากข้าวสาลี ข้าวเจ้า ข้าวโพดและมันฝรั่ง ในประเทศไทยจะปลูกมันเทศกันทั่วไป แต่ไม่ได้ปลูกในปริมาณมากเพราะมีข้าวเจ้าเป็นอาหารหลักอยู่แล้ว

มันเทศนับว่าเป็นพืชที่เหมาะสมกับดินฟ้าอากาศของประเทศไทยอย่างยิ่ง เพราะสามารถเจริญเติบโตได้ดี และให้ผลผลิตของหัวก่อนข้างสูง มันเทศปลูกได้ปีละ 2 ครั้ง คือ ในฤดูฝนตั้งแต่กลางเดือนพฤษภาคมถึงกลางเดือนมิถุนายน และอีกครั้งหนึ่งหลังฤดูฝน คือ ในราวเดือนกันยายนถึงพฤศจิกายน การปลูกมันเทศเริ่มจากการเตรียมดินไถและพรวน 2-3 ครั้ง เสร็จแล้วยกร่องห่างกันประมาณ 1 เมตร ความสูงของร่องประมาณ 50 เซนติเมตร แล้วตัดเถามันเทศยาวประมาณ 50 เซนติเมตร ฝังลงไปบนสันร่องห่างกันประมาณ 50 เซนติเมตร จากนั้นก็พรวนดินและกำจัดวัชพืช ถ้าไม่ได้ปลูกใน

ฤดูฝนก็ต้องคอยรดน้ำ มันเทศจะทอดยอดงอกงาม เมื่อกอยต่อไป 90-150 วัน หัวมันเทศก็จะแก่และขูดได้

ในปี พ.ศ. 2516 ประเทศต่างๆ ทั่วโลกผลิตมันเทศได้รวมกัน 133 ล้านตัน ประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีนผลิตได้มากที่สุด คือ ผลิตได้ 111 ล้านตัน บราซิล 2.3 ล้านตัน อินโดนีเซีย 2.1 ล้านตัน ญี่ปุ่น 2 ล้านตัน สาธารณรัฐเกาหลี 1.6 ล้านตัน สำหรับประเทศไทยในปีเดียวกันผลิตมันเทศเพียงสองแสนแปดหมื่นตันเท่านั้น

ประเทศไทย มันเทศสามารถขึ้นงอกงามได้ทั่วทุกภาค ภาคกลางผลิตมันเทศได้มากที่สุด ภาคเหนือได้น้อยที่สุด ผลผลิตเฉลี่ยต่อไร่ประมาณ 1 ตันเศษ จังหวัดนครศรีธรรมราชเป็นจังหวัดที่มีเนื้อที่ปลูกและผลผลิตสูงสุดในประเทศ

2.6.1 ประวัติความเป็นมาของมันเทศ

มันเทศมีถิ่นกำเนิดเดิมอยู่บริเวณเขตร้อนของทวีปอเมริกา แต่มันเทศที่ปลูกกันอยู่ในปัจจุบันนักวิทยาศาสตร์ไม่มีหลักฐานแน่นอนว่ามีวิวัฒนาการมาจากพืชป่าชนิดใด อย่างไรก็ตามมนุษย์ก็รู้จักปลูกมันเทศมานานนับพันปีแล้ว ในสมัยโบราณนั้นมันเทศเป็นอาหารหลักของมนุษย์สองเขต คือ พวกอินเดียนในอเมริกากลาง และบริเวณเทือกเขาแอนดีส ประเทศเปรู พวกอินเดียนทั้งสองแหล่งนี้ปลูกข้าวโพดเพื่อใช้เป็นอาหารหลัก และในขณะเดียวกันก็ปลูกมันเทศด้วย อีกเขตหนึ่งคือ ชนเผ่าโพลินีเซียนที่อาศัยอยู่บนหมู่เกาะต่างๆ ในมหาสมุทรแปซิฟิก และตอนเหนือของเกาะนิวซีแลนด์ เชื่อกันว่ามันเทศที่ชาวโพลินีเซียนปลูกกันในสมัยก่อนนั้น นำมาจากทวีปอเมริกาในคริสต์ศตวรรษที่ 16 หลังจากชาวยุโรปค้นพบทวีปอเมริกา นักสำรวจชาวสเปนได้นำมันเทศไปสู่ประเทศสเปน จากประเทศสเปนก็แพร่ต่อไปยังประเทศอื่นๆ ในยุโรป

ทางด้านเอเชีย ต้นมันเทศก็ถูกนำมายังอินเดีย ฟิลิปปินส์ จีน และญี่ปุ่น โดยนักสำรวจสเปนและโปรตุเกส สำหรับประเทศไทยไม่มีหลักฐานบันทึกว่าได้มีการนำมันเทศเข้ามาปลูกในสมัยใดแต่เข้าใจกันว่ามีผู้นำมันเทศมาแพร่หลายในราวสมัยกรุงศรีอยุธยาเป็นราชธานีเพราะมีเรือสำเภาไปมาค้าขายระหว่างประเทศจีน พวกจีนคงจะได้นำติดมือมา ตามนิสสัยที่ไปอยู่ที่ไหนก็หาพันธุ์พืชไปปลูกบริโภค ในปัจจุบันมันเทศปลูกกันทั่วไปในประเทศไทย แต่ส่วนใหญ่แหล่งปลูกเป็นจังหวัดในทางภาคกลาง

2.6.2 การจำแนกมันเทศทางพฤกษศาสตร์

มันเทศถูกลำดับทางพฤกษศาสตร์ ดังนี้

วงศ์ (Family) *Convolvulaceae*

สกุล (Genus) *Ipomoea*ชนิด (Species) *Batatas*

2.6.3 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

มันเทศมีชื่อภาษาจีนว่า "ฮวงกั่ว" ชาวพื้นเมืองในอเมริกาใต้ เรียกมันเทศว่า บาดาดาส ชาวยุโรปได้เอาสำเนียงชาวพื้นเมืองไปใช้ และเพี้ยนไปเป็น โปเตโต (potato) เนื่องจากมันมี 2 ชนิดด้วยกัน คือ ชนิดหวานและไม่หวาน ชนิดหวาน เรียกว่า สวีทโปเตโต (sweet potato) คือ มันเทศนั่นเอง ส่วนชนิดไม่หวานเรียกว่า ไอริชโปเตโต (Irish potato) เราเรียกว่ามันฝรั่ง มันเทศมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า อีโพเมีย บาดาดาส (*Ipomoea batatas*) และอยู่ในวงศ์คอนโวลวูลาเซีย (Convolvulaceae) พืชที่อยู่วงสนี้ จะพบมากในแถบเส้นศูนย์สูตร และภายใต้แถบศูนย์สูตร มีลำต้นเป็นเถาหรือเป็นพุ่มตั้งตรง และมีจำนวนน้อยที่เป็นประเภทไม้ยืนต้น พืชพวกนี้อาจเจริญในที่แห้งแล้ง ในน้ำ และอาจเป็นพวกตัวเบียน (parasite) โดยทั่วไปแล้วเมื่อใบหรือลำต้นเป็นแผลพืชในวงสนี้จะให้น้ำยางสีขาว

สกุลที่สำคัญที่สุดของวงศ์คอนโวลวูลาเซียคืออีโพเมีย ซึ่งมีอยู่ประมาณ 400 ชนิด แต่มีมันเทศเป็นพืชปลูกเพียงชนิดเดียวที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ โดยทั่วไปแล้ว สกุลอีโพเมีย เป็นพืชที่มีเถาพันคลไต่ยาวไปมา หรือเลื้อยราบไปบนพื้นดิน และมีจำนวนน้อยที่เป็นพุ่มตั้งตรง

2.6.3.1 ราก

มันเทศมีระบบรากแบบรากฝอย ซึ่งเกิดจากข้อของลำต้นที่ใช้ปลูก หรือเกิดจากลำต้นที่ทอดไปตามพื้นดิน รากมันเทศจะเป็นที่สะสมอาหารและใช้รับประทานได้

2.6.3.2 ใบ

เป็นแบบใบเดี่ยว เกิดสลับกันบนข้อของลำต้น มีขนาดและรูปร่างต่างกัน ความแตกต่างของใบนั้นมิใช่เกิดจากพันธุ์เท่านั้น แม้แต่ในต้นเดียวกันก็อาจมีรูปร่างแตกต่างกันได้ บางใบมีขอบใบเรียบ บางใบมีใบเป็นแฉก และบางใบมีรูปร่างคล้ายหัวใจ เป็นต้น ใบมีขนเล็กน้อย และมักจะมีสีม่วงอยู่ตามเส้นใบ ก้านใบอาจจะยาวหรือสั้น ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพันธุ์นั้นๆ

2.6.3.3 ดอก

มันเทศที่ปลูกในเขตอบอุ่นมักไม่ออกดอก ส่วนการปลูกในเขตร้อนจะออกดอก แต่มักไม่ติดเมล็ด ดอกเกิดตามมุมของใบ มีก้านช่อดอก (peduncle) แข็งแรง ซึ่งมักจะยาวกว่าก้านใบ ดอกมีกลีบเลี้ยง (sepal) 5 กลีบ ซึ่งโดยปกติจะแยกเป็นอิสระซึ่งกันและกัน หรืออาจเชื่อมติดกันที่โคนกลีบดอก (petal) มี 5 กลีบ กลีบดอกเหล่านั้นจะเชื่อมติดกันเป็นรูปกรวย (corolla tube) มีลักษณะคล้ายดอกผักบุ้ง กลีบดอกมีสีชมพูปนม่วง มีเกสรตัวผู้ (stamen) 5 อัน และแยกเป็นอิสระซึ่งกันและ

กัน ก้านชูอับเกสรตัวผู้เรียกว่า ก้านอับเกสรมีความยาวไม่เท่ากัน และเชื่อมติดอยู่กับฐานของกลีบดอก รังไข่ มี 2 ส่วน บางดอกอาจจะมี 4 ส่วน แต่ละส่วนจะมีไข่ 1 หรือ 2 ที่รับละอองเกสรตัวผู้ (stigma) มี 2 แฉกอยู่ที่ก้าน (style) เชื่อมติดกับรังไข่

2.6.3.4 ผล

มีเปลือกแข็งหุ้ม มีลักษณะเป็นแคปซูล(capsule) ภายในเปลือกแข็งมีเมล็ด เล็กสีดำค่อนข้างแบน ด้านหนึ่งของเมล็ดเรียบ ส่วนอีกด้านหนึ่งเป็นเหลี่ยม ทางด้านเรียบจะเห็นรอยที่เมล็ดติดกับผนังรังไข่เรียกว่า ไฮลัม (hilum) และมีรูเล็กๆ เรียกว่า ไมโครไพล์ (micropyle) เปลือกของเมล็ดค่อนข้างหนา และน้ำซึมผ่านได้ยาก

2.6.3.5 หัว

มันเทศลงหัวในระดับความลึกไม่เกิน 9 นิ้ว หัวมันเทศเกิดจากการขยายตัวของราก ซึ่งเนื้อเยื่อภายในรากที่เรียกว่าพาราไคมา (parenchyma) เป็นส่วนที่สะสมแป้ง รากที่ขยายตัวเป็นหัวขึ้นมาอาจเกิดจากรากของลำต้นที่ใช้ปลูก หรือจากรากที่เกิดจากข้อของลำต้นที่เลื้อยไปตามดินก็ได้ ดังนั้นมันเทศต้นหนึ่งๆ อาจมีหัวมากกว่า 50 หัว ลักษณะหัวส่วนมากมีรูปร่างทรงกระบอก ด้านหัวท้ายเรียวยาวตรงกลางป่องออก สีผิวของหัวและสีของเนื้ออาจจะเป็นสีแดง เหลือง ขาว หรือสีนวลแตกต่างกันไปตามพันธุ์ ผิวอาจจะเรียบหรือขรุขระและมักจะมีรากแขนงเกิดในร่องของหัว หัวมันเทศนอกจากจะให้อาหารจำพวกแป้งแล้ว ยังอุดมสมบูรณ์ไปด้วยวิตามิน เอ (โดยเฉพาะหัวที่มีสีเหลือง) วิตามิน บี และ ซี อีกด้วย

2.6.4 ประโยชน์

หัวมันเทศมีแป้ง โปรตีน ไขมัน และ วิตามินต่างๆ ค่อนข้างมาก ดังนั้นจึงใช้เป็นอาหารมนุษย์และสัตว์ได้เป็นอย่างดี คุณค่าอาหารของหัวมันเทศ เมื่อมีน้ำหนัก 100 กรัม จะมีคุณค่าดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 แสดงส่วนประกอบในหัวมันเทศน้ำหนัก 100 กรัม

ส่วนประกอบ	หัว
น้ำ	70 กรัม
แคลอรี	100 กิโลแคลอรี
แป้ง	25 กรัม
โปรตีน	1.70 กรัม
ไขมัน	0.30 กรัม
เถ้า	1.00 กรัม
แคโรทีน	2000 – 5000 หน่วย
	ในเนื้อหัวสีเหลือง
วิตามินบี ๑	0.10 มิลลิกรัม
ไรโบฟลาวิน	0.05 มิลลิกรัม
ไนอาซีน	0.70 มิลลิกรัม
วิตามินซี	25 มิลลิกรัม

ที่มา : http://guru.sanook.com/search/knowledge_search.php?qID=&wi=&hnl=&ob=&asc=&q= การจำแนกมันเทศทางพฤกษศาสตร์&select=1&id=1487#ประวัติความเป็นมาของมันเทศ

ประโยชน์ที่ได้จากหัวมันเทศ อาจจำแนกได้ดังนี้

1. ใช้ทำเป็นของคาว เช่น แกงเลียง แกงคั่ว แกงกะหรี่ และแกงมัสมั่น เป็นต้น
2. ใช้ทำเป็นของหวาน เช่น แกงบวด มันทอด รังนก ฉาบ เชื่อม กวน ต้มน้ำตาลและมันปิ้ง
3. ใช้ในอุตสาหกรรมการกลั่นสุรา
4. ใช้เลี้ยงสัตว์โดยเฉพาะสุกร ให้มันเทศอย่างเดียวหรือผสมกับอาหารอื่นก็ได้

2.7 เอนไซม์อะไมเลสและกลูโคอะไมเลส (พัคตร์ประไพ, 2546)

เอนไซม์อะไมเลสที่ผลิตจากจุลินทรีย์เป็นเอนไซม์ที่จับออกมานอกเซลล์ (extracellular enzyme) คือ เอนไซม์ที่จุลินทรีย์สร้างขึ้นและปล่อยออกมาภายนอกเซลล์ สามารถย่อยแป้งได้

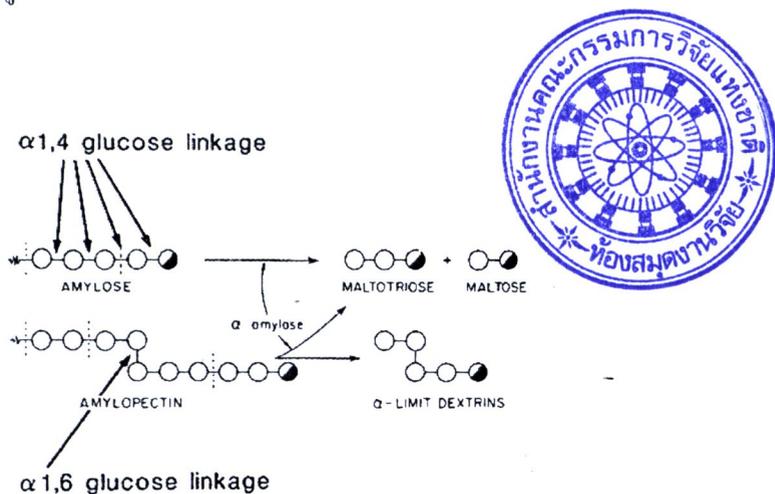
2.7.1 ชนิดของเอนไซม์อะไมเลสโดยแบ่งตามตำแหน่งการย่อยแป้ง (วารสารศูนย์บริการวิชาการ, 2546)

2.7.1.1 เอ็นโดอะไมเลส (endoamylase)

เป็นอะไมเลสประเภทที่ย่อยแป้งแบบสุ่มที่ตำแหน่งพันธะแอลฟา-1,4 กลูโคซิดิก ของอะไมโลส หรืออะไมโลเพคตินแต่ไม่ย่อยพันธะ 1,6-กลูโคซิดิกของอะไมโลเพคติน ถ้าการย่อยเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์จะได้มอลโตสและกลูโคส เอนไซม์ประเภทนี้ได้แก่แอลฟา-อะไมเลส (α -amylase) หรืออะไมโล (1-4) เด็กซ์ทรีเนส (amyl(1-4) dextrinase)

2.7.1.2 เอ็กโซอะไมเลส (exoamylase)

ย่อยแป้งจากปลายสายด้านที่ไม่เกิดการรีดิวิชั่น เข้าไป เอนไซม์ประเภทนี้ได้แก่ เบต้า-อะไมเลส และ กลูโคอะไมเลส สำหรับเบต้า-อะไมเลส หรือ อะไมโล (1-4) มอลโตซิเดส จะย่อยแป้งที่ตำแหน่งพันธะแอลฟา 1,4 กลูโคซิดิกเข้าไปที่ละ 2 หน่วยกลูโคสแต่ไม่สามารถย่อยสลายพันธะที่ต่อแบบพันธะแอลฟา-ดี (1-6) ได้ ผลที่ได้จากการย่อยจึงเป็นน้ำตาลมอลโตส และ ลิมิตเด็กซ์ทรีน ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงปนอยู่ด้วย



รูปที่ 2.9 การย่อยอะไมโลสด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส

ที่มา : <http://gastroresource.com/GITextbook/en/images/imgchp7/fig9.gif>

2.7.2 จุลินทรีย์ที่ผลิตเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส

2.7.2.1 จากแบคทีเรีย ได้แก่ *Bacillus subtilis*, *Bacillus amyloliquefaciens* และ *Bacillus licheniformis*

2.7.2.2 จากเชื้อรา ได้แก่ *Aspergillus niger*, *A. oryzae*

เอนไซม์แอลฟาอะไมเลสที่ผลิตจากจุลินทรีย์ต่างสายพันธุ์ คุณสมบัติของเอนไซม์จะแตกต่างกัน เช่น เอนไซม์แอลฟาอะไมเลสที่ผลิตจากแบคทีเรียจะทนอุณหภูมิได้สูงกว่าเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสจากเชื้อรา

2.7.3 การนำเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส มาใช้ประโยชน์ในทางอุตสาหกรรม (คุยฉี, 2537)

2.7.3.1 อุตสาหกรรมทอผ้า

ใช้เอนไซม์ในการย่อยแป้งที่ตกค้างในผ้า ที่ผ่านการทอแล้ว

2.7.3.2 อุตสาหกรรมขนมปัง

ในการเตรียมแป้งที่ใช้ทำขนมปังจะเติมเอนไซม์อะไมเลสลงไปเพื่อช่วยย่อยแป้งให้เป็นน้ำตาล ซึ่งยีสต์จะใช้น้ำตาลที่ทำให้เกิดคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นในแป้งหมักทำให้ ขนมปังฟู

2.7.3.3 อุตสาหกรรมเครื่องดื่มน้ำผลไม้

น้ำผลไม้ที่ได้จะมีความขุ่นจากแป้งจึงเติมเอนไซม์เพื่อทำให้ใสขึ้น

2.7.3.4 อุตสาหกรรมการผลิตแอลกอฮอล์และเครื่องดื่มประเภทแอลกอฮอล์

2.7.3.5 อุตสาหกรรมการผลิตกลูโคสไซรับเพื่อใช้เป็นสารให้ความหวานในอุตสาหกรรม

2.7.4 เอนไซม์กลูโคอะไมเลส (Uhlig, 1998)

เป็นเอนไซม์ที่ตัดพันธะที่จับกันของน้ำตาลกลูโคส ทั้งพันธะแอลฟา-1,4 และพันธะกิ่ง แอลฟา-1,6 โดยที่การตัดพันธะกิ่งช้ากว่าการตัดพันธะแอลฟา-1,4 ในการย่อยแป้งให้ได้กลูโคสจะต้องใช้กลูโคอะไมเลสร่วมกับแอลฟาอะไมเลส เอนไซม์กลูโคอะไมเลสมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 50-110 กิโลดาลตัน มีความเสถียรที่พีเอช 3.5-5 และที่อุณหภูมิ ± 55 องศาเซลเซียส เอนไซม์กลูโคอะไมเลสพบในจุลินทรีย์ เช่น *Aspergillus niger*, *Aspergillus oryzae* และ *Rhizopus spp.*

เอนไซม์กลูโคอะไมเลสแบ่งเป็น 2 ชนิดใหญ่ ๆ คือ

2.7.4.1 ชนิดที่สามารถย่อยแป้งดิบได้ หรือ GA-1 (raw starch digestive)

2.7.4.2 ชนิดที่ไม่สามารถย่อยแป้งดิบได้ หรือ GA-11 (raw starch indigestive)

GA-1 เป็นเอนไซม์ที่สำคัญในการย่อยแป้งให้เป็นน้ำตาล เอนไซม์นี้จะถูกเปลี่ยนไปเป็น GA-1' และ GA-11' ได้เมื่อถูกย่อยด้วยเอนไซม์โปรติเอส และแอลฟาแมนโนซิเดสซึ่งทำให้ไม่สามารถย่อยแป้งได้

2.8 กระบวนการผลิตเอทานอล (<http://www.vcharkarn.com/varticle/38199>)

2.8.1 กระบวนการย่อยเป็นน้ำตาลแยกจากกระบวนการหมัก (Separate hydrolysis and fermentation ; SHF)

เป็นกระบวนการผลิตเอทานอลแบบธรรมดาที่มีทั้งหมด 3 ขั้นตอนดังนี้

2.8.1.1 ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ (Preparation of Feedstock)

ซึ่งถ้าเป็นประเภทแป้งหรือเซลลูโลสนั้น จะต้องนำไปผ่านกระบวนการย่อยแป้งหรือ เซลลูโลสให้เป็นน้ำตาลก่อน ด้วยการใช้กรดหรือเอนไซม์เมื่อปรับความเข้มข้นให้เหมาะสมแล้วสามารถนำไปหมักได้

2.8.1.2 ขั้นตอนการหมัก (Fermentation)

เป็นกระบวนการเปลี่ยนน้ำตาลกลูโคส (Glucose) ไปเป็นเอทานอลโดยอาศัยเอนไซม์ที่มีอยู่ในเชื้อจุลินทรีย์ตามธรรมชาติ ปฏิกิริยาการเปลี่ยนน้ำตาลกลูโคสไปเป็นเอทานอลจะใช้เชื้อจุลินทรีย์ ส่วนใหญ่ใช้ยีสต์สำหรับผลิตเอทานอลซึ่งจัดอยู่ในกลุ่ม *Saccharomyces* มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนน้ำตาลกลูโคสไปเป็นเอทานอลในสภาวะที่ pH มีค่าระหว่าง 3.0 ถึง 5.0 อุณหภูมิระหว่าง 26-32 องศาเซลเซียส และมีความเข้มข้นของน้ำตาลระหว่าง 16 – 22 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร ทั้งนี้ระยะเวลาในการผลิตเอทานอล จะขึ้นอยู่กับปริมาณของยีสต์ที่ใช้

2.8.1.3 ขั้นตอนการกลั่น (Distillation)

เป็นกระบวนการให้ความร้อนในการแยกเอทานอลออกจากของผสมโดยใช้กระบวนการกลั่นตามลำดับ ซึ่งสามารถแยกเอทานอลให้ได้ความบริสุทธิ์ประมาณร้อยละ 95 โดยปริมาตร

2.8.2 กระบวนการย่อยเป็นน้ำตาลและหมักพร้อมกัน (Simultaneous saccharification and fermentation; SSF)

กระบวนการหมักเอทานอลโดยระบบ SSF โดยรวมขั้นตอนการย่อยครั้งสุดท้ายเพื่อเปลี่ยนเป็นน้ำตาลด้วยเอนไซม์กลูโคอะไมเลส พร้อมกับการหมักด้วยเชื้อยีสต์ในขั้นตอนเดียวกัน หลังจากย่อยแป้งครั้งแรกด้วยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลสแล้ว จะทำการเติมเอนไซม์กลูโค

ไมเลสพร้อมเชื้อยีสต์ ทำให้การย่อยแป้งครั้งสุดท้ายด้วยเอนไซม์เกิดขึ้นพร้อมกับการหมักด้วยเชื้อยีสต์ในขั้นตอนเดียวกัน ซึ่งจะช่วยลดระยะเวลาและประหยัดพลังงานของกระบวนการผลิต เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพของการผลิตเอทานอลจากวัตถุดิบที่เป็นแป้ง กระบวนการผลิตแบบ SSF น้ำแป้งที่ได้จากการย่อยครั้งแรกจะนำมาใช้ในกระบวนการหมักเลย โดยเติมเอนไซม์กลูโคสไมเลสและเชื้อยีสต์เพิ่มลงไปพร้อมกัน ดังนั้น ตัวอย่างน้ำหมักก่อนเข้าสู่กระบวนการหมักเอทานอลจึงมีปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์และค่าสมมูลย์เด็กโทรสต่ำกว่าตัวอย่างที่ได้ เมื่อสิ้นสุดการย่อยครั้งสุดท้ายของกระบวนการผลิต การหมักแบบ SSF จะไม่ค่อยมีการเปลี่ยนแปลงของน้ำตาลกลูโคสที่เกิดขึ้นในระหว่างการหมัก โดยที่ปริมาณน้ำตาลกลูโคสเริ่มต้นก่อนหมักจะมีค่าต่ำ และจะมีค่าต่ำตลอดการหมัก ทั้งนี้ เนื่องจากการหมักแบบ SSF จะทำการย่อยให้น้ำตาลกลูโคสออกมาตลอดเวลา น้ำตาลกลูโคสที่เกิดขึ้นจะถูกยีสต์ใช้ไปในทันทีเพื่อหมักเป็นแอลกอฮอล์ทันที ดังนั้น การหมักแบบ SSF จึงไม่มีการสะสมของน้ำตาลกลูโคส ช่วยให้ประสิทธิภาพการหมักของเชื้อยีสต์ดีขึ้นด้วย

2.9 ปัจจัยที่สำคัญต่อการหมักเอทานอล

(www1.mod.go.th/.../etanol%20home%20page%20&%20proposal.doc)

2.9.1 ความเข้มข้นของน้ำตาล

กรณีที่อาหารเลี้ยงเชื้อมีความเข้มข้นของน้ำตาลสูงเกินขีดจำกัด คือ ประมาณร้อยละ 22 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร จะเกิดการรบกวนของสารตั้งต้นต่อการเจริญเติบโตของยีสต์ ทำให้การเจริญเติบโตของยีสต์เป็นได้ยาก การหมักจะเป็นไปอย่างช้าและไม่สมบูรณ์ทำให้เกิดกรดแลคติก กรดน้ำส้ม และสารอินทรีย์ต่างๆ ขึ้นได้ ซึ่งส่วนมากจะเกิดในบรรยากาศของออกซิเจน แต่บางที่สามารถเกิดในบรรยากาศของคาร์บอนไดออกไซด์ได้ โดยปกติแล้วในกระบวนการหมักจะใช้ความเข้มข้นของน้ำตาลร้อยละ 18 โดยปริมาตร เพื่อให้การเจริญเติบโตของยีสต์เป็นไปได้อย่างปกติ และให้เอทานอลในปริมาณสูงเหมาะแก่การนำไปกลั่น คือประมาณร้อยละ 10 โดยปริมาตรต่อปริมาตร

จากการทดลองการหมักแบบต่อเนื่องของน้ำตาลกลูโคส ฟรุคโตส และซูโครส โดยเชื้อ *Zymomonas mobilis* CP4 โดย Buzato และคณะ ในปี ค.ศ. 1994 สามารถผลิตเอทานอลได้มากกว่า 2.6 กรัมต่อลิตร ที่อัตราการเจือจาง ที่ 0.3 ต่อชั่วโมง 1.8 กรัมต่อลิตร ที่อัตราการเจือจาง ที่ 0.21 ต่อชั่วโมง และ 2.53 กรัมต่อลิตร ที่อัตราการเจือจาง ที่ 0.32 ต่อชั่วโมง เมื่อใช้แหล่งคาร์บอนเป็นกลูโคส ฟรุคโตส และซูโครส ตามลำดับ

2.9.2 ความเข้มข้นของเอทานอล

ในขณะที่มีเอทานอลในปริมาณมากจะมีผลทำให้การหมักช้าลง และเมื่อความเข้มข้นของเอทานอลสูงขึ้นเกินขีดจำกัด หรือมีความเข้มข้นของเอทานอลสูงกว่าร้อยละ 15 โดยปริมาตรต่อปริมาตร ซึ่งขีดจำกัดอาจจะสูงหรือต่ำกว่านี้ ขึ้นกับชนิดของยีสต์ แต่เท่าที่พบจะสูงไม่เกินร้อยละ 18 โดยปริมาตรต่อปริมาตร ถ้าเกินกว่านี้สามารถขัดขวางและหยุดการทำงานของยีสต์ได้

2.9.3 คาร์บอนไดออกไซด์และความดัน

คาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากปฏิกิริยาในการใช้น้ำตาลของยีสต์ จะมีผลต่อการเจริญเติบโตของยีสต์ด้วย ถ้าไม่มีการระบายคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากระบบหมัก ซึ่งมีผลต่อการเพิ่มความดันของคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งถ้าความดันสูงถึง 7.5 บรรยากาศ จะทำให้อัตราเร็วของการหมักลดลงจนกระทั่งความดันสูงถึง 8.0 บรรยากาศ อัตราความเร็วของการหมักจะช้ามากหรือเกือบจะไม่เกิด

2.9.4 ออกซิเจน

ออกซิเจนจะถูกใช้ในการเจริญเติบโตและการแตกหน่อในกระบวนการหายใจ เพื่อทำให้เกิดพลังงานในการดำเนินชีวิต ซึ่งการเจริญเติบโตและการแบ่งตัวของยีสต์ในที่มีออกซิเจน จะไม่ให้เอทานอลออกมา แต่จะมีเพียงคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำเกิดขึ้นเท่านั้น

2.9.5 กรดน้ำส้มหรือกรดอะซิติก

กรดน้ำส้มหรือกรดอะซิติกจะมีผลต่อการยับยั้งการเจริญเติบโตของยีสต์ โดยความเข้มข้นของกรดที่มากกว่าร้อยละ 0.1 จะมีผลต่อการเจริญเติบโต ถ้ามีกรดโพรพิโอนิกและกรดบิวทริกเกิดขึ้นด้วย ก็จะมีผลเช่นเดียวกับกรดน้ำส้ม

2.9.6 ความเข้มข้นของไฮโดรเจนไอออน

ยีสต์จะสามารถเจริญเติบโตได้ดีระหว่าง พีเอช 3-5 จึงมีผลทำให้อัตราการเจริญของยีสต์และอัตราการหมักเพิ่มมากขึ้น ความเป็นกรดจะกีดขวางการเจริญของแบคทีเรียและราบางชนิด ซึ่งความเป็นกรดในช่วงดังกล่าว จะสามารถป้องกันการเจริญของแบคทีเรีย และราบางชนิดได้

2.9.7 สารเร่งการเจริญเติบโต

นอกจากน้ำตาลแล้ว ยีสต์ยังต้องการสารประกอบอื่นๆ เพื่อการเจริญเติบโต สารเหล่านี้ ได้แก่ วิตามินบีรวม เช่น ไบโอติน ไทอามีน ไรโบฟลาวิน กรดนิโคตินิก และกรดแพนโททินิก นอกจากนี้ไทอามีนฟอสเฟต ยังเป็นโคแฟกเตอร์ที่ใช้ในการเปลี่ยนกรดไพรูวิก ให้กลายเป็นเอทานอลอีกด้วย

2.9.8 โลหะ

ในพวกรัษฎพืชต่างๆ เช่น ข้าวจะมีพวกรธาตุต่างๆ เช่น แคลเซียม ทองแดง เหล็ก แมกนีเซียม และแมงกานีส ซึ่งเป็นธาตุที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของยีสต์ และในกระบวนการหมักเอ

ทานอลจากกลูโคส ถ้าปริมาณของโลหะมากเกินไป จะกลายเป็นสารยับยั้งการเจริญเติบโตของยีสต์ สารประกอบพวกซัลเฟอร์จะทำให้ยีสต์แก่เร็ว ส่วนพวกเหล็ก อลูมิเนียม สังกะสี ไม่ค่อยมีผลมากนักต่อปฏิกิริยาการหมัก แต่ถ้าเป็นพวกแคดเมียม ทองแดง พรอท ออสเมียม และเงิน จะเป็นสารที่ทำให้การเจริญเติบโตของยีสต์เป็นไปอย่างช้าๆ

2.9.9 อุณหภูมิ

อุณหภูมิมีผลโดยตรงต่อการทำงานของยีสต์ และมีผลทางอ้อมต่อปริมาณเอทานอลและสารประกอบอะโรมาติกต่างๆ อุณหภูมิส่วนใหญ่ที่ใช้ในการหมักจะอยู่ประมาณ 10-30 องศาเซลเซียส ถ้าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นในช่วงนี้ จะทำให้อัตราการเจริญเติบโตของยีสต์เพิ่มมากขึ้นเป็นสองเท่า ถ้าอุณหภูมิสูงมากๆ จะทำให้เอนไซม์ในยีสต์เกิดสภาพว่องไวต่อปฏิกิริยาลดลง ในช่วงระหว่างอุณหภูมิ 55-56 องศาเซลเซียส ซึ่งจะทำให้ยีสต์ตายได้ ทั้งนี้ขึ้นกับชนิดของยีสต์ที่นำมาใช้ในการหมัก ถ้าอุณหภูมิในการหมักต่างกัน จะทำให้ผลิตภัณฑ์ข้างเคียงที่เกิดขึ้นแตกต่างกันได้ เช่น ที่อุณหภูมิการหมักต่ำๆ จะเกิดสารพวกเอสเทอร์ อะซีตอล (ที่มา : <http://as.doa.go.th/fieldcrops/cas/eth/e002.pdf>)

Diez และ Yokoya (1996) ศึกษาผลของอุณหภูมิ และค่า pH ต่อการผลิตเอทานอลในระหว่างการหมักซูโครส โดยเชื้อ *Zymomonas mobilis* พบว่าอุณหภูมิในช่วงที่ศึกษาที่อุณหภูมิระหว่าง 30-40 องศาเซลเซียส และ pH 5.7 พบว่าที่อุณหภูมิ 34 องศาเซลเซียส เป็นอุณหภูมิที่ทำให้ได้ปริมาณเอทานอลสูงที่สุด 0.483 กรัม ต่อน้ำตาล 1 กรัม

นอกจากนั้น Abate และคณะ (1995) ศึกษาการผลิตเอทานอล โดยการเลี้ยงเชื้อร่วมกันของเชื้อ *Zymomonas mobilis* และ *Saccharomyces* sp. ผลิตเอทานอล โดยใช้น้ำตาลซูโครสเป็นแหล่งคาร์บอน ได้ปริมาณเอทานอล 0.5 กรัมต่อน้ำตาล 1 กรัม และปริมาณเอทานอลที่วัดได้เท่ากับ 1.5 กรัมต่อชั่วโมง

2.10 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Srishuwong และคณะ (2009) ศึกษากระบวนการผลิตเอทานอลจากมันฝรั่งโดยกระบวนการ SSF พบว่าการนำมันฝรั่งมาเตรียมวัตถุดิบ (pretreatment) ด้วยเอนไซม์ โดยใช้เอนไซม์เพกตินเนส (pectinase) เอนไซม์เซลลูเลส (cellulase) และเอนไซม์เฮมิเซลลูเลส (hemicellulase) ซึ่งสามารถลดความหนืดของมันฝรั่งได้ จากนั้นนำแป้งที่ผ่านการเตรียมวัตถุดิบมาย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (α -amylase) ที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส จากนั้นนำมันฝรั่งที่ผ่านการย่อยมาเติมเอนไซม์กลูโคอะไมเลส (glucoamylase) 1.65 AGUต่อกรัม เชื้อยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* และ

แอมโมเนียมซัลเฟตความเข้มข้น 30.2 มิลลิโมลาร์ โดยทำการหมักที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 61.5 ชั่วโมง ซึ่งเป็นกระบวนการ Simultaneous saccharification and fermentation (SSF) ในการผลิตเอทานอล ทำให้ได้ปริมาณเอทานอลร้อยละ 16.61 (ปริมาตรต่อปริมาตร)

Ebrahimi และคณะ (2008) ศึกษาการผลิตเอทานอลจากเศษขนมปัง พบว่าการนำเศษขนมปังมาใช้เป็นอาหารหมักเพื่อใช้ในการผลิตเอทานอล โดยผ่านการย่อยแป้งให้เป็นน้ำตาลใน 2 ขั้นตอน โดยใช้ amylolytic enzyme (การศึกษาครั้งนี้ใช้เอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส และเอนไซม์กลูโคอะไมเลส) การย่อยแป้งข้าวสาลีนำมาใช้ในการเปรียบเทียบผลในการทดลองนี้ ในขั้นตอนแรกคือ กระบวนการลิกูแฟกชัน(liquefaction) โดยศึกษาผลของอุณหภูมิที่ 50-85 องศาเซลเซียส และความเข้มข้นของสารตั้งต้นร้อยละ 20 และร้อยละ 35 จากการทดลองพบว่า การนำสารละลายขนมปังร้อยละ 20 มาเข้ากระบวนการลิกูแฟกชัน เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ทำให้ได้ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ร้อยละ 70 โดยไม่คำนึงถึงอุณหภูมิ การนำสารละลายขนมปังร้อยละ 35 มาเข้ากระบวนการลิกูแฟกชันโดยใช้วิธี fed-batch ได้สารละลายที่มีลักษณะคล้ายแป้งเปียก พบว่าร้อยละ 65 ไม่ละลายที่อุณหภูมิ 85 องศาเซลเซียส จากนั้นเข้าสู่กระบวนการเปลี่ยนแป้งให้เป็นน้ำตาลที่เรียกว่าแซคคาริฟิเคชัน (saccharification) ทำให้ได้ค่าสมมูลเดกซ์โทรส(dextrose equivalent ,DE) มากกว่าร้อยละ 95 และเกือบร้อยละ 80 เป็นปริมาณของแข็งที่ไม่ละลาย การหมักเอทานอลจากเชื้อ *Saccharomyces cerevisiae* ทำให้ได้ปริมาณเอทานอล 350 กรัมต่อขนมปังแห้ง 1 กิโลกรัม การใช้ขนมปังที่เก็บไว้เป็นเวลา 1 สัปดาห์ ไม่มีผลต่อกระบวนการลิกูแฟกชัน แซคคาริฟิเคชัน และผลผลิตของเอทานอลที่ได้

Ohgren และคณะ (2007) ศึกษาการเปรียบเทียบระหว่างกระบวนการ Simultaneous Saccharification and Fermentation และกระบวนการ Separate Hydrolysis and Fermentation โดยใช้ขังข้าวโพดที่ผ่านการ separate ด้วยไอน้ำ พบว่ากระบวนการ SSF และ SHF จะแตกต่างกัน การใช้ปริมาณของแข็งที่ไม่ละลายน้ำร้อยละ 8 จะทำให้การผลิตเอทานอลลดลง ในการทดลองนี้มีการใช้เอนไซม์ 10 FPUต่อกรัมของปริมาณของแข็ง และใช้ความเข้มข้นของยีสต์ในระบบการหมักแบบ SSF 1 กรัมต่อลิตร (น้ำหนักแห้ง) ของ เชื้อ *Saccharomyces cerevisiae* เมื่อนำสารละลายทั้งหมดจากการ pretreatment มาใช้ในการทดลองและทำการเจือจางให้ได้ร้อยละ 8 ของปริมาณของแข็ง โดยใช้น้ำและปรับพีเอช พบว่ากระบวนการหมัก SSF จะให้ผลของการผลิตเอทานอลสูงกว่ากระบวนการ SHF ร้อยละ 13 โดยกระบวนการ SSF มีผลผลิตเอทานอลร้อยละ 72.4 ขณะที่กระบวนการ SHF มีผลผลิตเอทานอลร้อยละ 59.1 ของทฤษฎี มีสารประกอบบางชนิดที่เกิดขึ้นจากกระบวนการ pretreatment วัตถุประสงค์มีผลไปยังการผลิตเอทานอลในกระบวนการ SSF และ SHF ที่แตกต่างกัน