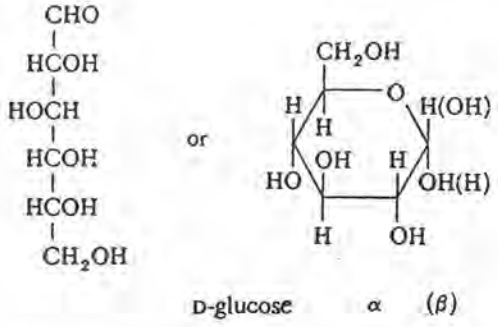
บทที่ 1

บทนำ

1.1 กลูโคสและผลิตภัณฑ์กลูโคส

กลูโคส เป็นหน่วยที่เล็กที่สุดของสารประกอบพวกคาร์โบไฮเดรต มีสูตรโมเลกุล คือ $C_6H_{12}O_6$ และมีน้ำหนักโมเลกุล 180.2 กรัม ผลึกกลูโคสที่ปราศจากน้ำจะเป็นรูปขนมเปียกปูน (rhombic)



รูปที่ 1-1 สูตรโครงสร้างของกลูโคส

ผลิตภัณฑ์กลูโคส มีหลายชนิดตามความเหมาะสมแก่การนำไปใช้ คือ

น้ำเชื่อมกลูโคส (glucose syrup) หมายถึง สารละลายแซคคาไรด์ (saccharide) ที่ได้จากการย่อยแป้งซึ่งได้ผ่านกรรมวิธีการทำให้บริสุทธิ์และเข้มข้นแล้ว มีสมมูลเดกซ์โทรสตั้งแต่ 20 ขึ้นไป นอกจากนี้ยังใช้นิยามกับสารให้ความหวานที่มีแซคคาไรด์ 1 โมเลกุล, 2 โมเลกุล หรือจำนวนโมเลกุลที่สูงกว่านี้ได้ ขึ้นกับชนิดของแป้ง

มอลโทเดกซ์ทริน (maltodextrin) เป็นสารละลายแซคคาไรด์ที่ได้จากการย่อยแป้งซึ่งได้ผ่านกรรมวิธีการทำให้บริสุทธิ์และเข้มข้นแล้ว มีสมมูลเดกซ์โทรสน้อยกว่า 20 เปอร์เซ็นต์

เดกซ์โทรส โมโนไฮเดรต (dextrose monohydrate) เป็นดี-กลูโคส (D-glucose) ที่ผ่านกรรมวิธีการทำให้บริสุทธิ์และตกผลึก โดยใน 1 โมเลกุลผลึกเดกซ์โทรส จะมีน้ำ 1 โมเลกุล

เดกซ์โทรส แอนไฮดรัส (dextrose anhydrous) เป็นดี-กลูโคส (D-glucose) ที่ผ่านกรรมวิธีการทำให้บริสุทธิ์และตกผลึก โดยไม่มีน้ำในผลึกเดกซ์โทรส

ในทางอุตสาหกรรมได้ใช้สมมูลเดกซ์โทรสในการอธิบายถึงผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น

สมมูลเดกซ์โทรส (Dextrose Equivalent หรือ DE) เป็นการวัดปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ที่มีอยู่ (เทียบเท่ากับปริมาณกลูโคส) และคำนวณเป็นร้อยละของน้ำหนักแห้งทั้งหมด (Inglett, 1974)

$$\text{สมมูลเดกซ์โทรส} = \frac{100 \times \text{น้ำตาลรีดิวซ์}}{\text{น้ำหนักแห้ง}}$$

โดยค่าสมมูลเดกซ์โทรสเป็นค่าที่แสดงถึงปริมาณของการเกิดการย่อยคิดเป็นร้อยละของน้ำหนักแห้ง ซึ่งกลูโคสบริสุทธิ์มีค่าสมมูลเดกซ์โทรสเท่ากับ 100 และแป้งจะมีค่าสมมูลเดกซ์โทรสเท่ากับ 0 ในระหว่างการย่อยแป้งค่าสมมูลเดกซ์โทรสจึงเป็นตัวที่ชี้ถึงระดับของการทำลายพันธะกลูโคซิดิก (glucosidic) ในแป้ง

1.2 แหล่งวัตถุดิบในการผลิตกลูโคส

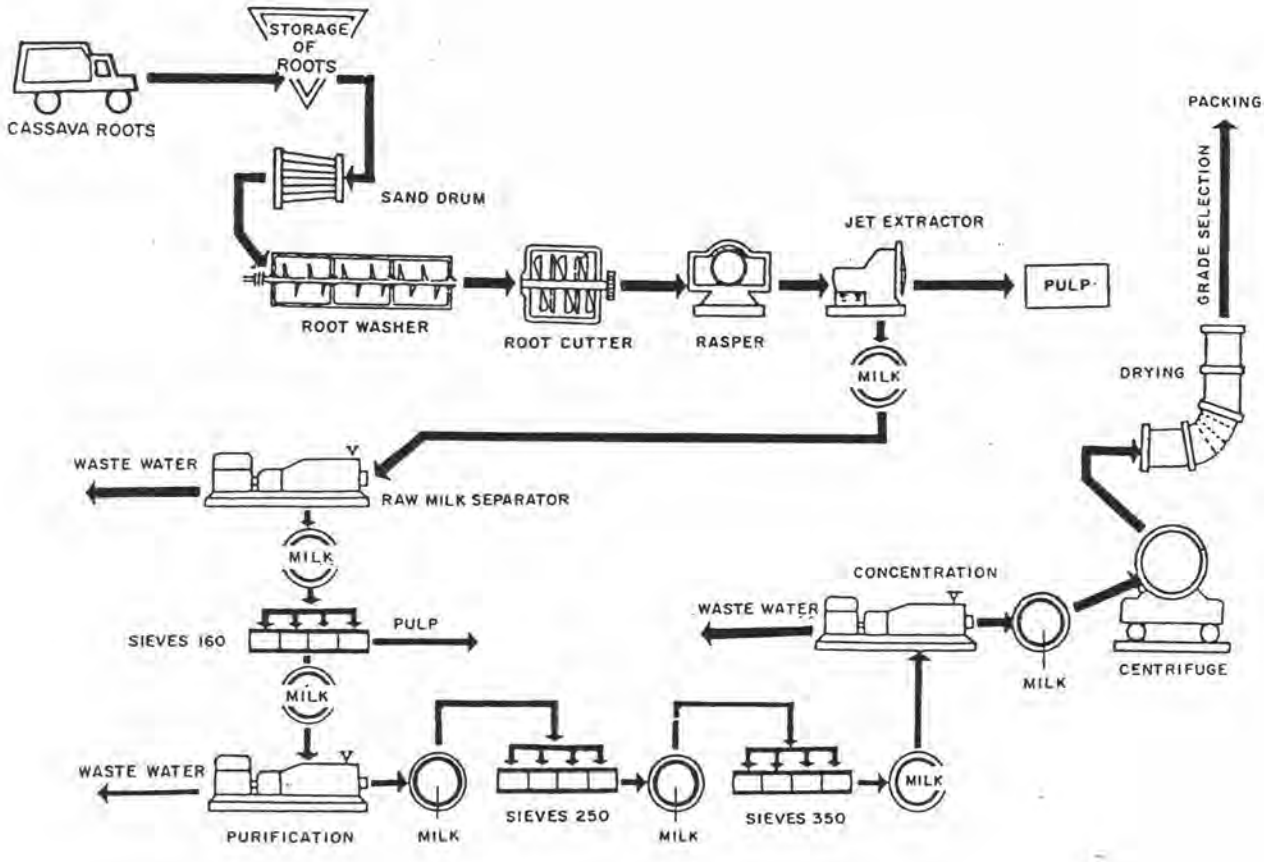
ปัจจุบันแป้งเป็นแหล่งวัตถุดิบที่สำคัญของการผลิตกลูโคส ในประเทศสหรัฐอเมริกานิยมใช้แป้งข้าวโพด เนื่องจากมีข้าวโพดเป็นวัตถุดิบอยู่มาก น้ำตาลที่ผลิตได้จึงนิยมเรียกในอีกชื่อหนึ่งว่า คอร์น ไซรัป หรือ น้ำเชื่อมข้าวโพด (corn syrup) (Inglett, 1974) ในขณะที่ประเทศที่อยู่แถบยุโรปนิยมผลิตน้ำตาลจากแป้งมันฝรั่ง ส่วนประเทศในแถบทวีปอเมริกาใต้และเอเชียนิยมใช้แป้งมันสำปะหลัง นอกจากนี้ยังมีผู้ที่พยายามศึกษาหาแหล่งวัตถุดิบอื่นๆ ขึ้นมาใช้แทนแป้งสำหรับการผลิตน้ำตาลเพื่อเป็นการลดต้นทุนการผลิตลง เนื่องจาก 64 เปอร์เซ็นต์ของต้นทุนการผลิต (กลูโคสเหลว 1 กิโลกรัม) เกิดจากแป้งมันที่นำมาใช้ เป็นค่าเชื้อเพลิงเพียง 22 เปอร์เซ็นต์ และค่าใช้จ่ายอื่น ๆ ได้แก่ ค่าแรง, สารเคมี และภาชนะบรรจุ รวมกันเท่ากับ 14 เปอร์เซ็นต์ (มุคตารี, 2529) ดังนั้นในการหาแนวทางเพื่อลดต้นทุนการผลิตกลูโคส จึงมักจะให้ความสนใจกับการนำเศษวัสดุทางการเกษตรซึ่งปริมาณมาก หาได้ง่าย และราคาถูกมาใช้แทนแป้งมันที่มีราคาสูงกว่า ดังงานวิจัยของปราณี อ่านเปรื่อง และคณะ (2531) ทำการศึกษาการผลิตน้ำตาลสำหรับหมัก (fermentable sugar) โดยการย่อยกากสับปะรดแข็งด้วยเอนไซม์เซลลูเลส (cellulase) ได้ผลผลิตร้อยละ 78.43 ของน้ำหนักกากสับปะรด ในปี 1981 Tsao และ Chou ทดลองย่อยเซลลูโลสในซังข้าวโพดด้วยกรดซัลฟิวริกเพื่อผลิตกลูโคส พบว่ายังไม่ประสบผลสำเร็จเพราะผลผลิตกลูโคสที่ได้ยังมีปริมาณต่ำ เนื่องจากมีลิกนิน (lignin) และโครงสร้างผลึก (crystalline structure) ของโมเลกุล

เซลลูโลสอยู่ภายในทำให้การย่อยเกิดได้ไม่ดี และในปี 1988 Tewari และคณะทำการย่อยซังข้าวโพด, เปลือกถั่ว, ชานอ้อยและฟางข้าวด้วยกรดซัลฟิวริกและไฮโดรคลอริก พบว่าแม้จะทำให้เกิดแซคคาริฟิเคชั่น (saccharification) ได้ดีถึงร้อยละประมาณ 97 แต่ผลิตภัณฑ์ที่ได้นี้กลับเป็นสารตั้งต้นที่ไม่ดีสำหรับการหมักแอลกอฮอล์ เนื่องจากมีเพนโทสอยู่มาก

สำหรับประเทศไทยซึ่งเป็นผู้ผลิตและส่งออกมันสำปะหลังและผลิตภัณฑ์มันสำปะหลังรายใหญ่ของโลก ในแต่ละปีมีการใช้หัวมันสดไปในการผลิตแป้งมันประมาณ 4.4 ล้านตัน (CIAT, 1992) โดยร้อยละ 10 ของน้ำหนักหัวมันสดที่นำมาใช้ในการผลิตแป้งมัน จะเหลือเป็นส่วนของกากมันสำปะหลัง (Grace, 1977) ในขณะที่ประเทศไทยมีปริมาณการใช้แป้งมันเพื่อผลิตกลูโคสเฉลี่ยเพียง 10,000-15,000 ตันต่อปี (The Thai Tapioca Trade Association, 1987) และกลูโคสที่ผลิตได้ยังมีปริมาณไม่เพียงพอต้องมีการนำเข้าจากต่างประเทศอีกปีละประมาณ 35 - 40 ล้านบาท รวมทั้งปัญหาทางด้านเทคนิคในกระบวนการผลิตซึ่งยังมีต้นทุนการผลิตที่สูง ดังนั้นจึงมีแนวโน้มที่จะนำกากมันสำปะหลังมาใช้ในการผลิตกลูโคสได้ เนื่องจากมีปริมาณมาก หาได้ง่าย ราคาถูก และยังมีแป้งเป็นองค์ประกอบอยู่มาก ซึ่งหากกากมันสำปะหลังได้รับการพัฒนาให้สามารถนำมาใช้ได้จริงจะสามารถลดต้นทุนการผลิตลงได้ และยังเป็นการเอื้อประโยชน์แก่อุตสาหกรรมการผลิตแป้งมันสำปะหลังให้สามารถดำเนินการได้จนครบวงจร

1.3 กากมันสำปะหลังจากกระบวนการผลิตแป้งมัน

แป้งมันสำปะหลังที่ผลิตจากประเทศไทยส่วนใหญ่จะเป็นการผลิตในระดับอุตสาหกรรมเพื่อการส่งออกและใช้ในประเทศ ด้วยวิธีการอันทันสมัย (รูปที่ 1-2) แต่จะมีบางส่วนที่จะถูกนำไปผลิตเป็นแป้งมันเกรดสองหรือแบบอังไฟในโรงงานขนาดเล็กที่มีกระบวนการผลิตแบบง่าย ๆ แป้งที่ได้จึงมีคุณภาพต่ำกว่า ใช้เป็นวัตถุดิบในผลิตภัณฑ์เส้นก๋วยเตี๋ยว, ของหวาน และสาคูเป็นต้น



รูปที่ 1-2 แผนผังแสดงขั้นตอนการผลิตแป้งมันสำปะหลังในโรงงานขนาดกลางถึงขนาดใหญ่ (Grace, 1977)

1.3.1 กรรมวิธีการผลิตแป้งมันสำปะหลังในโรงงานอุตสาหกรรม

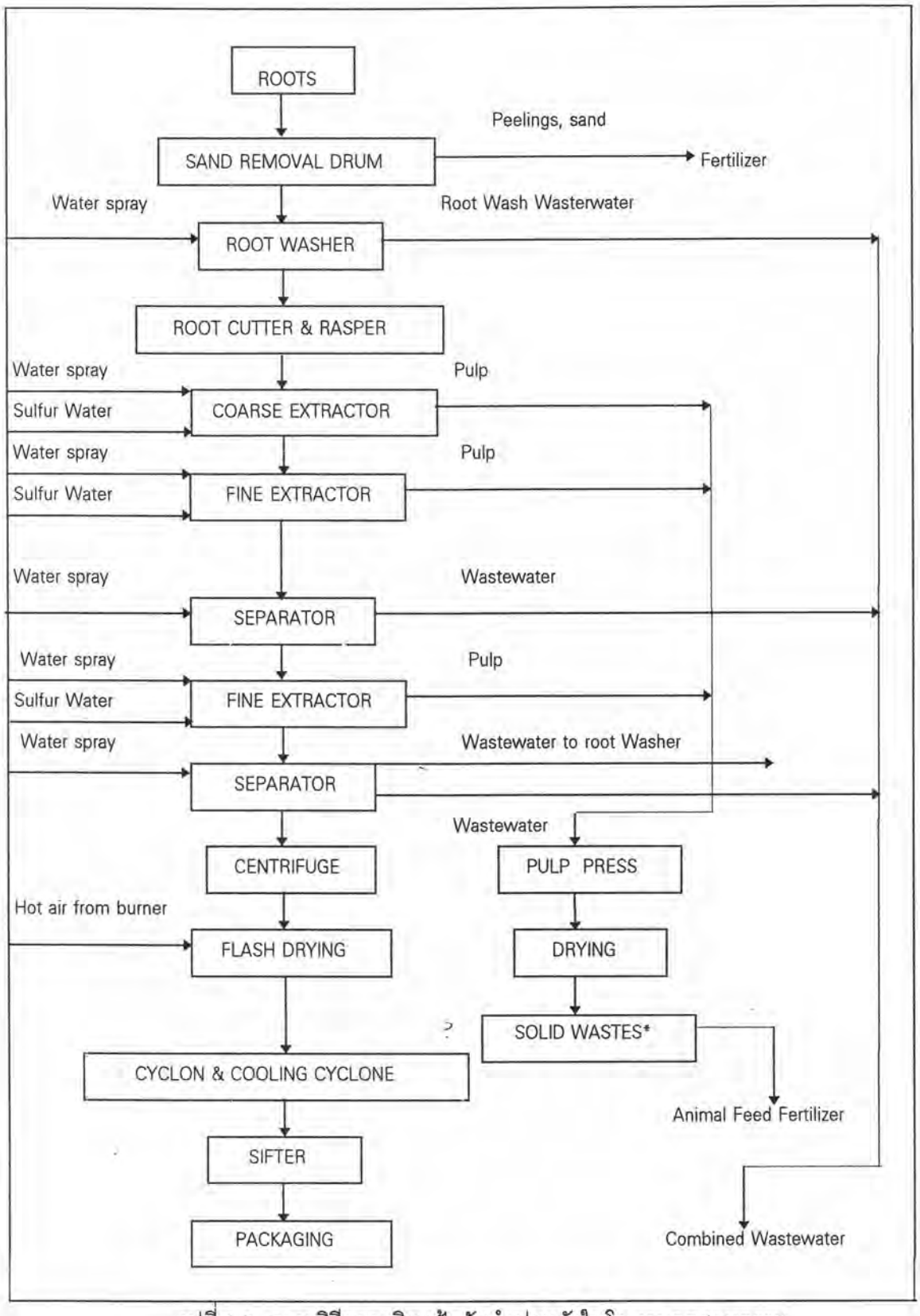
ในรูปที่ 1-3 แสดงกรรมวิธีและขั้นตอนของการผลิตแป้งมันสำปะหลังโดยหัวมันจะถูกส่งเข้าสู่ตะแกรงร่อนดินทราย (sand removal drum) เพื่อกำจัดดินทรายที่ติดมากับหัวมัน และทำให้ผิวนอกของหัวมันหลุดออก ซึ่งดินทรายและผิวมันจะถูกนำไปใช้เป็นปุ๋ยอินทรีย์ต่อไป

จากตะแกรงรอนดินทรายหัวมันจะถูกส่งไปยังรางล้างหัวมัน (root washer) เพื่อทำความสะอาดโดยใช้น้ำฉีด หัวมันที่สะอาดจะถูกส่งไปยังเครื่องสับหัวมัน ซึ่งจะสับหัวมันเป็นชิ้นเล็ก ๆ ขนาดประมาณ 1-2 นิ้ว และชิ้นมันเล็ก ๆ นี้จะตกเข้าสู่เครื่องขูดหัวมัน (root rasper) ทำให้ได้มันสำปะหลังชิ้นละเอียด

มันสำปะหลังชิ้นละเอียดจะเข้าสู่เครื่องแยกหยาบ (coarse extractor) เพื่อแยกเอากากมันสำปะหลังออกจากน้ำแป้ง การทำงานของเครื่องแยกใช้หลักแรงหนีศูนย์กลาง ในขณะที่เครื่องหมุนอยู่จะมีมันสำปะหลังละเอียดส่งเข้ามาตลอดเวลา ในขณะเดียวกันก็จะมีการฉีดน้ำและน้ำกำมะถันเข้ามาอย่างสม่ำเสมอ กากมันสำปะหลังจากเครื่องอัดกากจะถูกนำไปตาก และขายเพื่อทำเป็นอาหารสัตว์ต่อไป

น้ำแป้งที่ถูกแยกออกจากกากมันจะถูกส่งไปยังเครื่องแยกละเอียด (fine extractor) และเครื่องแยก (separators) ซึ่งมีอยู่เป็นชุดเพื่อแยกกากมันออกให้หมดและทำให้น้ำแป้งข้นขึ้น

น้ำแป้งข้นที่ได้จากเครื่องแยกหน่วยสุดท้ายจะถูกส่งเข้าสู่เครื่องเหวี่ยงเพื่อเหวี่ยงให้น้ำแยกออกจากแป้ง น้ำที่ถูกแยกนี้ยังมีแป้งหลงเหลืออยู่จะถูกส่งกลับเข้าสู่เครื่องแยกละเอียดหน่วยแรกใหม่ แป้งที่ถูกแยกเอาน้ำออกแล้วจะถูกพ่นเข้าสู่ท่ออบแห้ง ซึ่งมีลมร้อน (ประมาณ 200 องศาเซลเซียส) จากเตาเผา (burner) เป่าเข้ามาด้วยอัตรามวลลมและความเร็วสูง ความแรงของลมจะพัดเอาแป้งขึ้นไปตามท่ออบแห้งที่สร้างเป็นปล่องสูง แล้วตกลงมาสู่ไซโคลน (cyclone) จะได้แป้งมันที่แห้งและละเอียดแต่ยังร้อนอยู่ จึงต้องทำให้เย็นโดยใช้ไซโคลนเย็น (cooling cyclone) อีกครั้ง แล้วแป้งมันจะถูกปล่อยลงสู่เครื่องร่อนแป้ง (sifter) ก่อนที่จะทำการบรรจุต่อไป



รูปที่ 1-3 กรรมวิธีการผลิตแป้งมันสำปะหลังในโรงงานอุตสาหกรรม

(สุรินทร์ , 2525 อ้างถึงใน สาวิตร, 2530)

1.3.2 กากมันสำปะหลังและการนำไปใช้ประโยชน์

กากมันสำปะหลังเป็นผลพลอยได้ที่เกิดจากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลังซึ่งมีความชื้นสูงถึง 75-80 เปอร์เซ็นต์ของกากมันสด (Grace , 1977) จึงเป็นอุปสรรคอย่างยิ่งต่อการลำเลียงต้องเสียค่าใช้จ่ายในการอบกากมันดังกล่าวให้แห้ง จึงนิยมนำไปตากแห้งและขายไปในราคาถูกเพื่อนำไปผสมอาหารสัตว์

พิจารณาองค์ประกอบที่มีในกากมันสำปะหลัง พบว่าส่วนใหญ่เป็นแป้งที่ไม่สามารถแยกออกได้ในกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง ที่มีอยู่ถึง 56 เปอร์เซ็นต์โดยมวลน้ำหนักแห้ง (Grace, 1977) ที่เหลือเป็นเส้นใยอาหารจากเปลือกของหัวมันสดและเส้นใยจากเนื้อมันสำปะหลัง มีโปรตีนและไขมันอยู่เพียงเล็กน้อย (ตารางที่ 1-1) เนื่องจากองค์ประกอบส่วนใหญ่ในกากมันสำปะหลังก็คือแป้ง ซึ่งเป็นวัตถุดิบสำคัญใช้เป็นสารตั้งต้นเพื่อการผลิตผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ได้มากมาย จึงทำให้กากมันสำปะหลังได้รับความสนใจอย่างมากในเชิงวิชาการ เพื่อใช้ในการศึกษาหาวิธีการใช้ประโยชน์จากกากมันที่มีปริมาณมาก หาได้ง่ายและมีราคาถูก งานวิจัยต่าง ๆ อันเกี่ยวข้องกับการใช้ประโยชน์จากกากมันสำปะหลังได้แก่

จิราภรณ์ โล่ห์วงศ์วัฒน์ (2525) ศึกษาการผลิตกรดมะนาวโดยเชื้อ *Aspergillus niger An12* จากวัสดุที่ประกอบด้วยกากมันสำปะหลังผสมรำข้าวจ้าว

สาวิตร ตระกลูน่าเลื่อมใส (2530) การเลี้ยงเชื้อ *Rhodopscudomonas gelatinosa* จากกากมันสำปะหลังเพื่อผลิตเป็นอาหารปลาและการเพิ่มประสิทธิภาพการเลี้ยงและคุณค่าทางโภชนาการโดยเลี้ยงผสมกับเชื้อ *Rhodopscudomonas sphaeroides P47*

สินีนาถ เจียมอนุกูลกิจ (2539) การผลิตกรดมะนาวโดย *Candida oleophila NN-39* จากสารละลายน้ำตาลที่ได้จากการย่อยกากมันสำปะหลัง

กล้าณรงค์ ศรีรอต และคณะ (2540) ศึกษาการสกัดแป้งออกจากกากมันสำปะหลังโดยใช้เอนไซม์ผสมระหว่างเซลลูเลสกับเพกติเนสในอัตราส่วนต่างๆ สามารถสกัดแป้งได้ประมาณ 56 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณแป้งที่มีอยู่ในกากมัน

Balagopal and Maini (1977) ศึกษาการผลิตโปรตีนเซลล์เดียวจากกากมันสำปะหลัง

Shamala and Sreekantiak (1986) การทำให้กากมันสำปะหลังเกิดแซคคาริฟิเคชั่นโดยเอนไซม์ผสมซึ่งเตรียมขึ้นจาก *Aspergillus ustus.*

Budiatmand and Lonesane (1987) ศึกษาการใช้กากมันสำปะหลังทดแทนการใช้รำข้าวสาลีในการหมักด้วยอาหารแข็ง

Srikanta et al. (1987) พัฒนาเทคนิคในการทำให้กากมันสำปะหลังเกิด แซคคาริฟิเคชั่น เพื่อใช้ในการผลิตแอลกอฮอลล์

Jaleel et al. (1988) การทำให้กากมันสำปะหลังเกิดแซคคาริฟิเคชั่นและนำมาใช้ในการหมักสำหรับการผลิตเอธานอล

Abraham and Kurup (1997) ศึกษาจลนพลศาสตร์การเกิดแซคคาริฟิเคชั่นของกากมันสำปะหลังและผักตบชวาโดยใช้เอนไซม์

จากการสอบเอกสารพบแนวทางการใช้ประโยชน์จากกากมันสำปะหลังที่มีอยู่หลากหลายแต่ไม่พบรายงานของการนำมาใช้เพื่อการผลิตน้ำเชื่อมกลูโคส ดังนั้นโครงการนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการย่อย (hydrolyse) กากมันสำปะหลังเพื่อผลิตน้ำเชื่อมกลูโคสโดยเน้นไปที่การย่อยแป้งที่มีตกค้างอยู่ในการกากมันเหล่านั้น

ตารางที่ 1-1 องค์ประกอบของกากมันสำปะหลัง

องค์ประกอบ	เปอร์เซ็นต์
แป้ง	56.0
เส้นใย	35.9
โปรตีน	5.3
เถ้า	2.7
ไขมัน	0.1
รวม	100

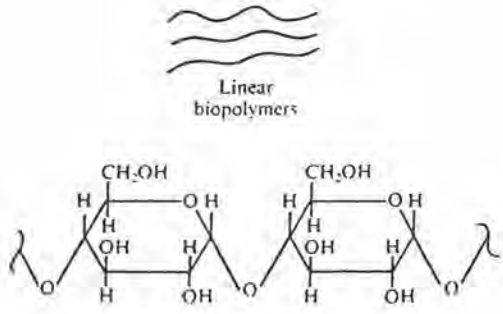
ที่มา : Grace , 1977.

1.4 แป้งมันสำปะหลังและกลไกของการย่อยแป้ง

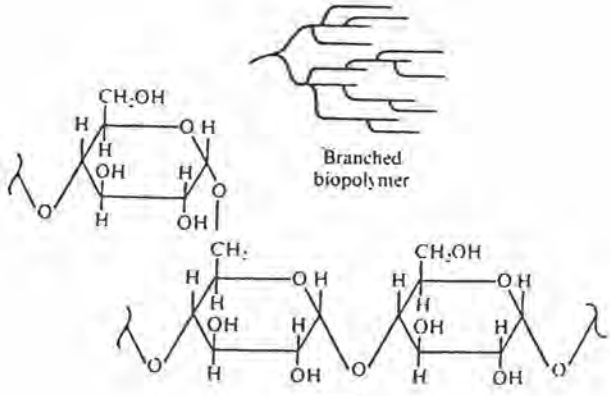
1.4.1 องค์ประกอบของแป้งมันสำปะหลัง

แป้งประกอบด้วยโพลิเมอร์พื้นฐาน 2 ชนิด ซึ่งมีโครงสร้างโมเลกุลและสมบัติที่แตกต่างกัน คือ อะไมโลส (amylose) และอะไมโลเพคติน (amylopectin) โดยอะไมโลสเกิดจากการเรียงต่อกันเป็นแนวเส้นตรงของหน่วยกลูโคสประมาณ 200-2,000 หน่วย ด้วยพันธะ $\alpha(1,4)$ กลูโคซิดิก สามารถละลายน้ำได้ดีขณะต้มมีลักษณะข้น ความหนืดต่ำ แต่เมื่ออุณหภูมิลดลงเกิดการคืนตัวได้มาก ส่วนโมเลกุลอะไมโลเพคตินมีลักษณะเป็นกิ่งก้านโดยเกิดจากอะไมโลสลายสั้นๆ หลายส่วนมาต่อกัน ซึ่งกลูโคสแต่ละหน่วยจะจับกันด้วยพันธะ $\alpha(1,4)$ กลูโคซิดิก 20-25 หน่วย เป็นโครงสร้างหลัก ส่วนที่แตกกันเป็นกิ่งจับกันด้วยพันธะ $\alpha(1,6)$ กลูโคซิดิก ขณะต้มในน้ำจะใสและเหนียวเหนอะหนะทำให้ความหนืดสูง เมื่ออุณหภูมิลดลงจะเกิดการคืนตัวน้อย เพราะโมเลกุลระเกะระกะจึงรวมตัวกันยาก

ความผันแปรของสมบัติทางกายภาพและทางเคมีระหว่างแป้งแต่ละชนิดเกิดจากความแตกต่างกันขององค์ประกอบ คือ อัตราส่วนระหว่างอะไมโลสและอะไมโลเพคติน ขนาดหรือน้ำหนักโมเลกุล และการจัดเรียงตัวของโมเลกุลอะไมโลสและอะไมโลเพคติน สำหรับแป้งมันสำปะหลังมีอะไมโลสอยู่ประมาณ 16-18 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่เหลือเป็นอะไมโลเพคติน น้ำหนักโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินประมาณ 2.1×10^5 และ 3×10^8 ตามลำดับ (Atkinson and Mavituna ,1991) ดังรูปที่ 1-4



(ก)



(ข)

รูปที่ 1-4 โครงสร้างของ (ก) อะไมโลส และ (ข) อะไมโลเพคติน
(Atkinson and Mavituna ,1991)

1.4.2 กลไกของการย่อยแป้ง

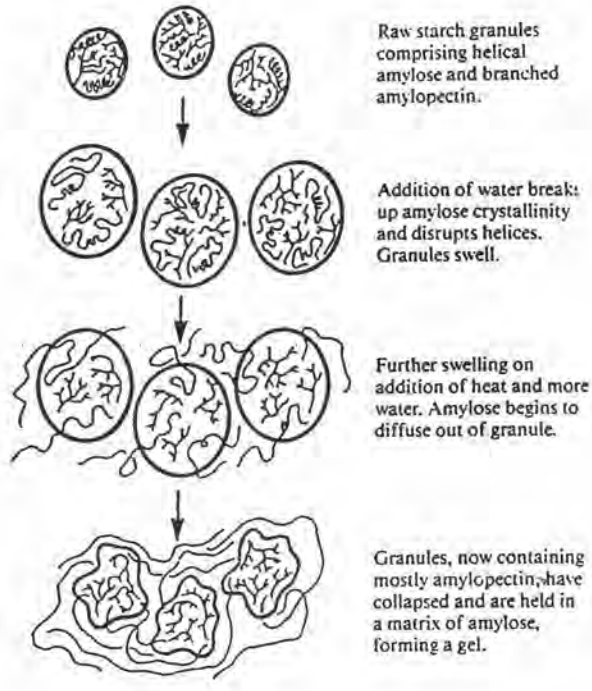
ลำดับขั้นตอนของการเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้ง ตั้งแต่เป็นโพลิเมอร์ของกลูโคส จนกระทั่งถูกย่อยไปจนเกิดเป็นโมเลกุลของน้ำตาลที่มีขนาดสั้นลง ประกอบด้วย 3 ขั้นตอน คือ

1.4.2.1 การเกิดเจลลาติไนเซชั่น (Gelatinization)

เจลลาติไนเซชั่นเป็นกระบวนการเกิดการพองตัว เนื่องจากการดูดซึมน้ำ (hydration) ของเม็ดแป้งในขณะที่ได้รับความร้อน เพราะโมเลกุลภายในเม็ดแป้งมีหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl) จำนวนมากและมีไฮโดรฟิลิก (hydrophilic) สูง โดยเฉพาะอะไมโลเพคตินสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนภายในหรือระหว่างโมเลกุลเป็นจำนวนมาก ทำให้แรงยึดในเม็ดแป้งมีค่าสูงมาก แป้งจึงไม่ละลายในน้ำเย็น เพียงจะดูดซึมน้ำและพองตัวได้เล็กน้อย เมื่อเอาน้ำออกไปทำให้เม็ด

แป้งแห้งกลับคืนสู่สภาพเดิมได้แต่เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นมีพลังงานเพียงพอที่จะทำให้พันธะไฮโดรเจนแตกออกจากกัน เกิดการทำลายการเรียงตัวของผลึก (crystalline) ของอะไมโลส แป้งจะละลายน้ำได้ดีขึ้น ทำให้เกิดการพองตัวของเม็ดแป้ง เม็ดแป้งจึงมีปริมาตรเพิ่มขึ้น 25-30 เท่า ช่วงอุณหภูมิที่แป้งมีการดูดซึมน้ำอย่างรวดเร็วและพองตัวขึ้น เรียกว่า อุณหภูมิการเกิดเจล (gelatinization temperature) ซึ่งแตกต่างกันไปตามชนิดของแป้ง หากมีการให้ความร้อนสูงกว่าอุณหภูมิการเกิดเจลและมีน้ำอยู่มากพอจะทำให้อะไมโลสแพร่ออกจากเม็ดแป้ง เป็นผลให้เม็ดแป้งยุบตัวลง โมเลกุลของน้ำจะเข้าสัมผัสกับหมู่ไฮดรอกซิลของหน่วยกลูโคสได้ ส่วนน้ำที่อยู่ในเม็ดแป้งที่ยุบตัวลงซึ่งมีอะไมโลเพคตินอยู่นั้น จะทำให้เกิดเป็นเจล การเกิดเจลเป็นกระบวนการผันกลับไม่ได้และทำให้มีความหนืดเพิ่มขึ้น

แป้งมันสำปะหลังมีช่วงอุณหภูมิการเกิดเจลประมาณ 52-64 องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำกว่าธัญพืชอื่น ๆ จึงทำให้อัตราการเพิ่มความหนืดสูง เกิดการสลายตัวได้มากกว่าและแป้งมันสำปะหลังยังเกิดการคืนตัวค่อนข้างน้อยและช้า เนื่องจากมีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็นอะไมโลเพคติน ดังรูปที่ 1-5



รูปที่ 1-5 กลไกการเกิดเจลของแป้ง (Remson and Clark ,1988 อ้างถึงใน Atkinson and Mavituna ,1991)

1.4.2.2 การเกิดลิเคอแฟคชั่น (Liquefaction)

เป็นขั้นตอนลดความหนืดของแป้งที่เกิดเจล โดยการย่อยโมเลกุลของแป้งแบบสุ่ม (random hydrolysis) ของลูกโซ่กลูโคส ทำให้แยกเป็นสายสั้น ๆ มีขนาดของโมเลกุลเล็กลงและความหนืดลดลง

1.4.2.3 การเกิดแซคคาริฟิเคชั่น (Saccharification)

เป็นการย่อยแป้งให้เป็นโมเลกุลของน้ำตาล ซึ่งภายหลังการย่อยจะทำให้ได้น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (monosaccharide) น้ำตาลโมเลกุลคู่ (disaccharide) หรือน้ำตาลที่มีโมเลกุลสูงกว่าเล็กน้อย ได้แก่ กลูโคส มอลโตส หรือ มอลโทไทรโอส

1.5 กระบวนการของการผลิตกลูโคส

ประวัติโดยย่อของการค้นพบและพัฒนาการผลิตสารให้ความหวานจากแป้ง มีมาโดยลำดับดังนี้ คือ

ค.ศ. 1811 - Kirchoff ค้นพบการผลิตสารให้ความหวานจากแป้ง โดยการใช้กรดเจือจางในการย่อยแป้งให้เปลี่ยนสภาพไปเป็นสารให้ความหวานได้

1850s - มีการนำกรดชนิดต่าง ๆ มาเปรียบเทียบกันในการย่อยแป้ง

1920s - ทำให้เกิดผลิตภัณฑ์ของกลูโคสอยู่ในรูปผลึกเดกซ์โทรส

Late 1930s - Dale และ Langlois พัฒนาประสิทธิภาพการผลิตกลูโคส โดยการใช้กรดร่วมกับเอนไซม์ในการย่อยแป้ง

Late 1960s - การใช้เอนไซม์หลายชนิดร่วมกันเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยแป้ง

ค.ศ. 1970 - Suzuki รายงานถึงการใช้เอนไซม์ในการเปลี่ยนโครงสร้างกลูโคสไปเป็นฟรุคโทส เพื่อเพิ่มความหวาน

1980s - การหาแหล่งวัตถุดิบอื่น ๆ มาใช้ในการผลิตน้ำตาล

(Inglett, 1974 ; Birch and Parker, 1982)

1.5.1 การย่อยแป้งด้วยกรด (Acid Hydrolysis)

การย่อยแป้งด้วยกรดมีผู้รายงานไว้ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1811 (Grace , 1977) โดยผู้ที่ค้นพบคุณสมบัตินี้คือ นักวิทยาศาสตร์ชาวรัสเซียชื่อ Kirchoff. ต่อมาจึงได้มีผู้พยายามใช้กรดต่าง ๆ มาเปรียบเทียบกันในการย่อยแป้ง ได้แก่ กรดไฮโดรคลอริก (HCl) , กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) , กรดไนตริก (HNO_3) , กรดฟอสฟอริก (H_3PO_4) , กรดไฮโดรฟลูออริก (HF) และกรดออกซาลิก ($C_2H_2O_4$) โดยประเทศในแถบยุโรปนิยมใช้กรดซัลฟิวริก ส่วนประเทศอเมริกานิยมใช้กรดไฮโดรคลอริก ส่วนกรดอื่น ๆ ไม่นิยมใช้เนื่องจากมีราคาค่อนข้างแพง (Redley , 1954 อ้างถึงใน บุณฑริก ยางจิต และปิยวรรณ ธีรวุฒิวรเวทย์ , 2538) ส่วนในประเทศไทยยังคงมีการย่อยแป้งด้วยกรดออกซาลิกในอุตสาหกรรมแบะแซ[1] โดยย่อยแป้งมันสาปะหลังด้วยกรดออกซาลิกที่มีค่าความเป็นกรดด่างเท่ากับ 1 ที่อุณหภูมิ 121°C เป็นเวลา 30 นาที (กล้าณรงค์ ศรีรอต , 2521)

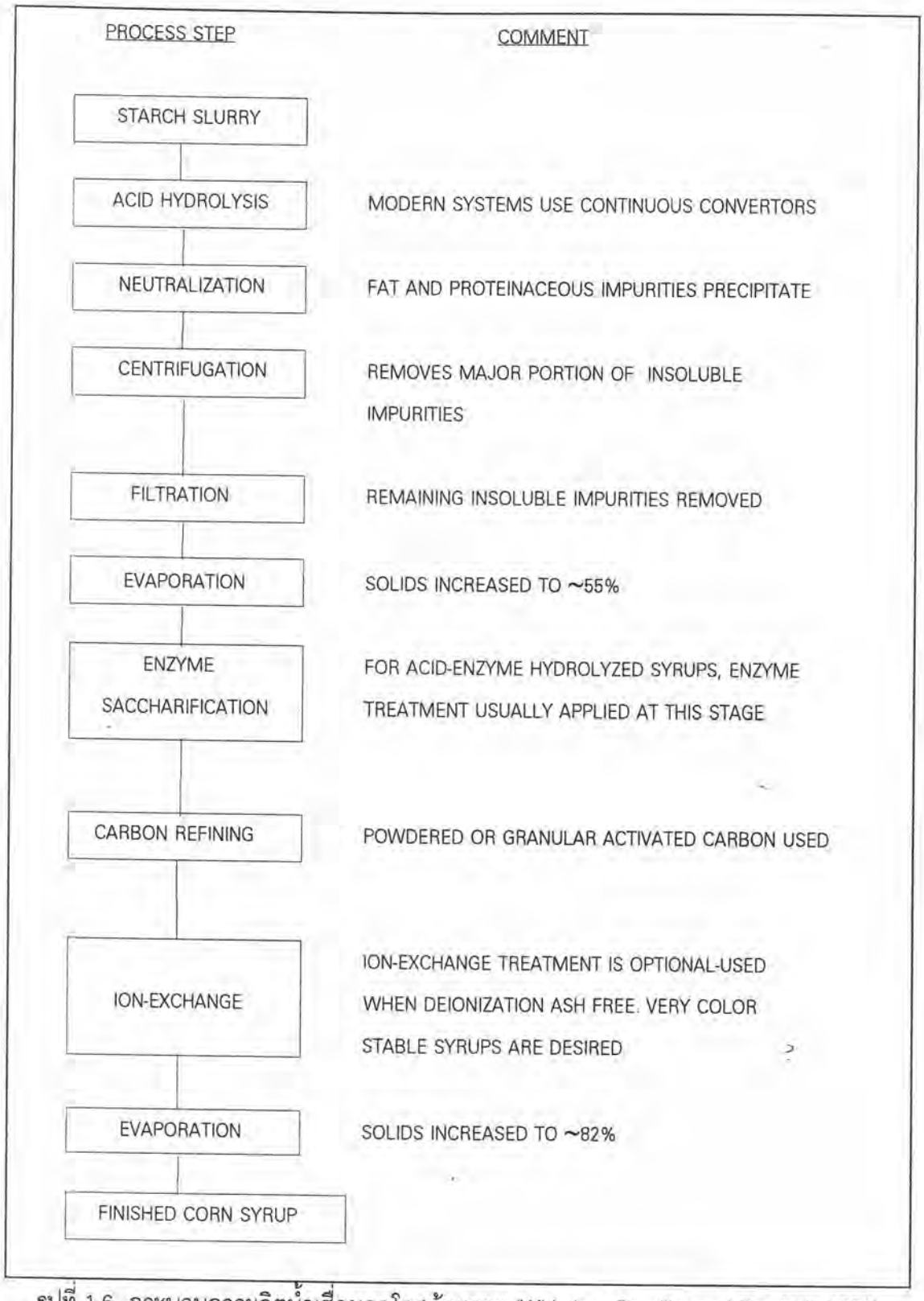
ปัจจุบันการย่อยแป้งด้วยกรดในอุตสาหกรรมมีจำนวนลดลงเนื่องจากการย่อยสลายพันธะระหว่างกลูโคสจะเกิดขึ้นแบบสุ่ม ทำให้ได้สารที่มีโมเลกุลกลูโคสตั้งแต่ 1-4 โมเลกุล หรือมากกว่านั้น เช่น กลูโคส , มอลโตส , มอลโตไตรโอส และเตตระแซคคาไรด์ ซึ่งจะทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการมากขึ้น เช่น การเกิดสารเจนติโอไบออส (gentiobiose) , กรดลิวูลินิก (leuvulinic) , และสารเฟอร์ฟูรอล (furfural substance) อันทำให้เกิดปัญหาทางด้านสีและมีรสขม (Kerr,1950) อีกทั้งภายหลังการย่อยต้องมีการปรับค่าความเป็นกรดด่างให้เป็นกลาง(neutralization) ด้วยด่างเป็นผลให้มีเกลือเกิดขึ้นในน้ำเชื่อม แต่ข้อดีของการย่อยด้วยกรดก็คือ กรดมีราคาถูกและไม่ต้องการการปรับสภาพวัตถุดิบเพื่อให้ง่ายต่อการย่อย อันมีความสำคัญอย่างยิ่งในเชิงพาณิชย์ที่ช่วยประหยัดเวลาและพลังงาน (Tewari et al., 1988)

น้ำเชื่อมกลูโคสทางการค้าชนิดแรกถูกผลิตขึ้นโดยการใช้กรดในการย่อยแป้ง และในปัจจุบันก็ยังมีการใช้วิธีดังกล่าวนี้อยู่แม้จะมีจำนวนวิธีการผลิตลดลง แต่ได้มีการปรับปรุงนำวิธีการทันสมัยมาใช้ให้มีการผลิตได้อย่างต่อเนื่องที่มีประสิทธิภาพสูงกว่า สามารถควบคุมค่าสมมูลเดกซ์โทรสได้ดีกว่าเดิมและผลิตภัณฑ์ยังเกิดสีได้น้อยกว่า

1.แบะแซ คือ น้ำเชื่อมกลูโคสที่ได้จากการย่อยแป้งจนได้น้ำตาลกลูโคสประมาณ 92 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

การย่อยแบบต่อเนื่องจะมีวิธีการโดยลำดับดังนี้ คือ แป้งที่มีความเข้มข้นประมาณ 4 ปอนด์ต่อแกลลอน นำมาปรับค่าความเป็นกรด-ด่างให้มีค่าประมาณ 2 แล้วปั๊มเข้าสู่ถังย่อย (converter) ปรับความดันไอน้ำให้ได้อุณหภูมิที่กำหนด แป้งจะถูกเจลลาติไนซ์ (gelatinized) และตัดสายโพลีเมอร์ให้สั้นลง (depolymerized) หยุดปฏิกิริยาโดยการปรับสภาพความเป็นกรด-ด่างให้เป็นกลาง (neutralization) ด้วยโซดาแอช ของเหลวสีขาวที่ได้จะถูกทำให้ใสโดยการกรอง และ/หรือปั่นแยกเพื่อกำจัดเศษของแข็งและไขมันที่ปะปนออกไป จากนั้นจะถูกทำให้เข้มข้นโดยการระเหยจนได้ปริมาณของแข็งในสารละลายประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์

น้ำเชื่อมที่ได้จะนำมาผ่านผงคาร์บอนเพื่อกำจัดสีและสิ่งเจือปน และบางครั้งน้ำเชื่อมจะถูกนำเข้าสู่เครื่องแลกเปลี่ยนประจุภาค(ion-exchanger) เพื่อกำจัดเถ้าที่ละลายได้ให้ลดน้อยลง น้ำเชื่อมที่ผ่านกระบวนการไปจนเสร็จสิ้นแล้วจะถูกทำให้เย็นและบรรจุลงในถังเพื่อส่งจำหน่าย กรรมวิธีและขั้นตอนของการย่อยแป้งด้วยกรดซึ่งยังคงใช้อยู่ในปัจจุบันได้แสดงไว้ในรูปที่ 1-6



รูปที่ 1-6 กระบวนการผลิตน้ำเชื่อมกลูโคสด้วยกรด (Whistler , Bemiller and Paschall, 1984)

1.5.2 การย่อยแป้งด้วยเอนไซม์ (Enzyme Hydrolysis)

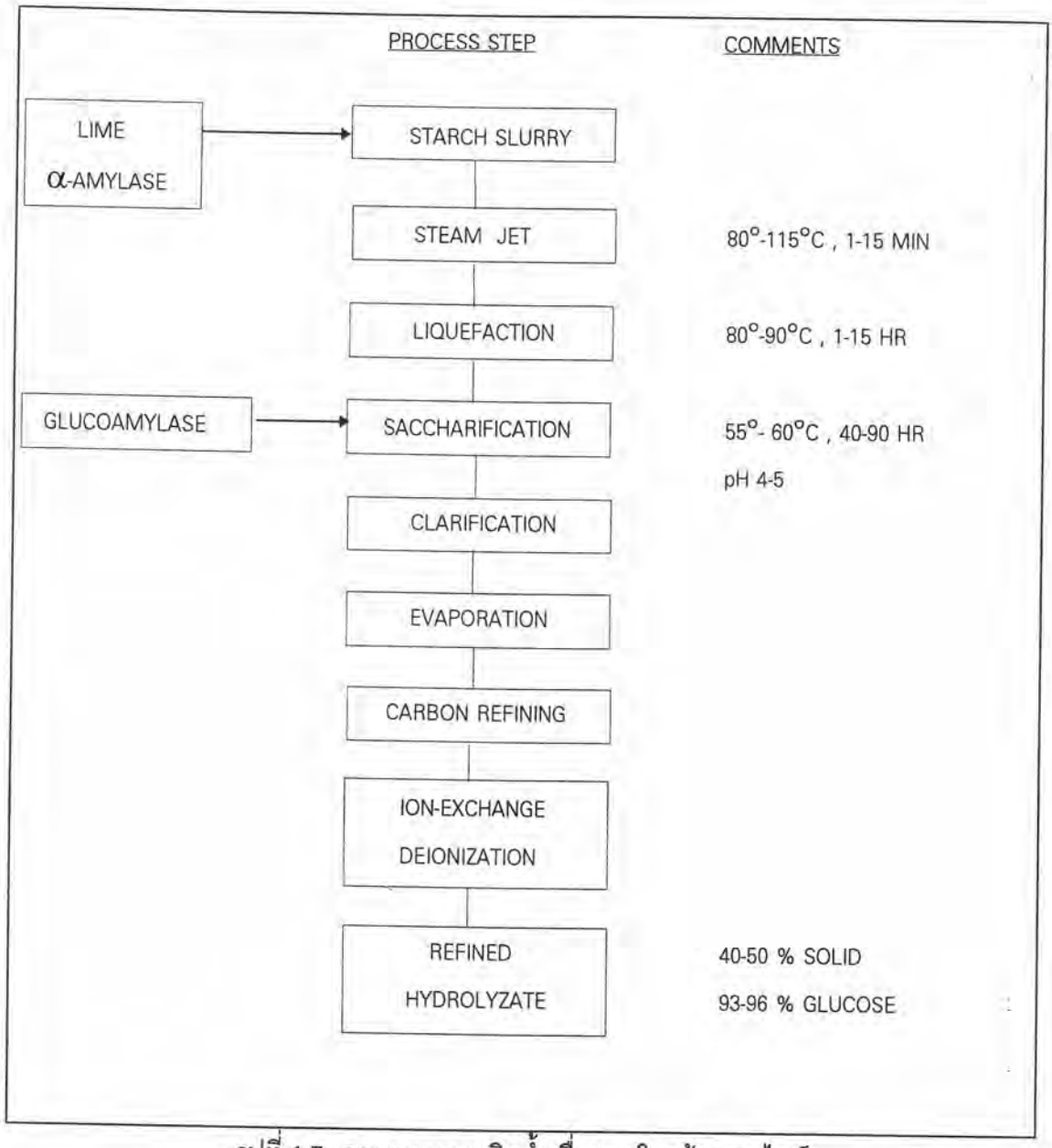
การย่อยแป้งด้วยกรดได้มีการนำมาใช้อย่างกว้างขวางในอดีต แต่ปัจจุบันกลับถูกแทนที่ด้วยกระบวนที่ใช้เอนไซม์ ซึ่งไม่มีปัญหาอันเนื่องมาจากการกัดกร่อนวัสดุอุปกรณ์ การให้ผลิตภัณฑ์ที่มีสีเข้ม มีเกลือเกิดขึ้นภายหลังการปรับสภาพให้เป็นกลาง อีกทั้งไม่ต้องการพลังงานสูงเพื่อให้ความร้อนมาก และควบคุมปฏิกิริยาได้ง่ายกว่าการใช้กรด

จากองค์ประกอบพื้นฐานของแป้งอันได้แก่ อะไมโลสและอะไมโลเพคติน เอนไซม์ที่นิยมนามาใช้ในการย่อยจึงได้แก่ เอนไซม์อะไมเลส (amylase) ซึ่งทำให้เกิดการย่อยแป้งอย่างสุ่มที่ $\alpha(1,4)$ กลูโคซิดิก ทำให้แป้งเกิดลิเคอแฟคชั่น จากนั้นจึงใช้เอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดสในขั้นตอนการเกิดแซคคาลิฟิเคชั่น ทำให้เกิดการย่อยแป้งต่อไปที่ตำแหน่ง $\alpha(1,4)$ และ $\alpha(1,6)$ กลูโคซิดิกกระทั่งย่อยได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งส่วนที่ท้าทายในระบบการย่อยด้วยเอนไซม์ก็คืออะไมโลเพคตินเนื่องจากมักจะเป็นส่วนที่เหลือเพราะมีพันธะ $\alpha(1,6)$ กลูโคซิดิก เป็นองค์ประกอบอยู่ประมาณ 4-6 เปอร์เซ็นต์ของกลูโคสที่มีอยู่ และเอนไซม์ที่ใช้ย่อยแป้งเกือบทั้งหมดมักจะจำเพาะกับพันธะ $\alpha(1,4)$ กลูโคซิดิก ดังนั้นจึงต้องหาวิธีการทำลายพันธะ $\alpha(1,6)$ กลูโคซิดิก เพื่อให้เกิดการย่อยอย่างสมบูรณ์ (Chaplin and Bucke , 1990)

การนำเอนไซม์มาใช้ในการย่อยแป้งนั้นได้มีมานาน และยังใช้กันทั่วไปทางแถบเอเชีย ที่รู้จักกันดีก็คือ ลูกแป้งที่ใช้ในการทำข้าวหมาก แต่เริ่มมีผู้ศึกษาและแยกเชื้อบริสุทธิ์ได้เมื่อปี ค.ศ. 1894 ต่อจากนั้นจึงมีการศึกษากันอย่างกว้างขวาง และเอนไซม์อะไมเลสก็เข้ามาแทนที่กรดในการย่อยแป้ง จากการศึกษาอย่างจริงจังทำให้พบเอนไซม์อีกหลายชนิดที่สามารถย่อยแป้งได้ รวมทั้ง อะไมโลกลูโคซิเดส ในแถบยุโรปและอเมริกาใช้เอนไซม์ อะไมเลส และ อะไมโลกลูโคซิเดส ร่วมกันในการย่อยแป้งได้กลูโคสมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์

กระบวนการของการย่อยแป้งด้วยเอนไซม์ มีกรรมวิธีและขั้นตอนคล้ายคลึงกับการย่อยด้วยกรดแต่จะใช้เอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส เป็นตัวทำให้เกิดการตัดสายโพลีเมอร์ให้สั้นลงแทนการใช้กรด โดยกระบวนการนี้จะมีข้อดีในการเตรียมน้ำเชื่อมที่มีความจำเพาะที่ไม่สามารถทำได้ด้วยการใช้กรดในการย่อย ซึ่งให้ผลิตภัณฑ์ส่วนใหญ่เป็นโพลีเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูง

กรรมวิธีและขั้นตอนของการย่อยแป้งด้วยเอนไซม์แสดงไว้ในรูปที่ 1-7



รูปที่ 1-7 กระบวนการผลิตน้ำเชื่อมกลูโคสด้วยเอนไซม์

(Whistler , Bemiller and Paschall, 1984)

1.5.3 เปรียบเทียบผลดีและผลเสียระหว่างการย่อยวัสดุการเกษตรด้วยกรดกับการใช้เอนไซม์

แม้ว่างานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการหาแนวทางในการย่อยแป้งที่ตกค้างปะปนอยู่ในกากมันให้กลายเป็นน้ำตาลกลูโคส โดยศึกษาจากสภาวะของการย่อยแป้งเป็นสภาวะต้นแบบ แต่สภาวะที่เกิดขึ้นจริงของการย่อยกากมันก็จะมีความแตกต่างไปจากการย่อยแป้งมันสำปะหลัง เนื่องจากในกากมันยังมีส่วนของเส้นใยเป็นองค์ประกอบอยู่มากถึง 35.9 เปอร์เซ็นต์ อันจะเป็นส่วนที่ขัดขวางกระบวนการย่อยได้ แม้จะใช้สภาวะแบบเช่นเดียวกับการย่อยแป้งก็ตาม จึงทำให้มีข้อดีและข้อเสียที่แตกต่างกันระหว่างการย่อยด้วยกรดและเอนไซม์ดังแสดงไว้ใน ตารางที่ 1-2 และ 1-3

ตารางที่ 1-2 เปรียบเทียบผลดีและผลเสียของการย่อยวัสดุการเกษตรด้วยกรด

ผลดี	ผลเสีย
1. คะตะลิสต์ที่ใช้ในปฏิกิริยามีราคาถูกและหาได้ง่าย	1. ต้องใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ทนต่อการกัดกร่อนซึ่งมีราคาแพง
2. ปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้เร็ว	2. ปฏิกิริยาเกิดขึ้นแบบสุ่มทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ไม่ต้องการรวมอยู่ด้วย
3. วัตถุดิบไม่ต้องผ่านการปรับสภาพให้ง่ายต่อการย่อย	3. น้ำตาลที่ได้ถูกเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์อื่น เช่น เฟอร์ฟูรอล และสารเคมีอื่น ๆ เกิดกลิ่นรสที่ไม่ดี
4. คะตะลิสต์มีเสถียรภาพมาก สามารถเก็บไว้ได้นาน โดยไม่เสื่อมสภาพ	4. ปฏิกิริยาเกิดในสภาวะที่รุนแรง โดยต้องใช้อุณหภูมิและความดันสูง
	5. ภายหลังการเกิดปฏิกิริยาน้ำเชื่อมที่ได้ต้องนำมาปรับค่าความเป็นกรดด่างให้เป็นกลาง จึงทำให้มีเกลือเกิดขึ้นปะปนในน้ำเชื่อมได้

ที่มา : Stephenson (1971) ; Chaplin and Bucke (1990)

ตารางที่ 1-3 เปรียบเทียบผลดีและผลเสียของการย่อยวัสดุการเกษตรด้วยเอนไซม์

ผลดี	ผลเสีย
1. สภาวะที่ใช้ในการย่อยทั้ง อุณหภูมิและความเป็นกรดด่างไม่รุนแรง	1. มีราคาแพง
2. ไม่ต้องใช้เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ทนต่อการกัดกร่อนซึ่งมีราคาแพง	2. ปฏิกิริยาเกิดขึ้นช้าต้องใช้เวลานาน
3. ผลิตภัณฑ์น้ำตาลที่เกิดขึ้นไม่ถูกเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์อื่น เช่น เฟอร์ฟูรอล และสารเคมีอื่น ๆ	3. สิ้นเปลืองมากเนื่องจากต้องสูญเสียเอนไซม์เนื่องจากถูกดูดซับบนวัสดุที่ไม่ถูกย่อย
4. ทำให้เกิดการตกผลึกของกลูโคสได้ดีกว่าเพราะมีสารแปลกปลอมที่มีผลต่อการตกผลึกน้อย	4. เอนไซม์มีอายุการใช้งาน เสื่อมสภาพ หรือให้ประสิทธิภาพในการทำปฏิกิริยาลดลงเมื่อเก็บไว้เป็นเวลานาน
5. ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความบริสุทธิ์กว่าการย่อยด้วยกรดเนื่องจากการย่อยอย่างจำเพาะของเอนไซม์	5. เอนไซม์อาจถูกรบกวนจากสารเคมีที่มีอยู่ได้และการจะนำมาใช้ต้องแน่ใจว่าไม่มีสารเคมีเหล่านั้นปะปน

ที่มา : Stephenson (1971)

1.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตกลูโคสจากแป้งมันสำปะหลัง

ในการย่อยกากมันสำปะหลังเพื่อการผลิตน้ำเชื่อมกลูโคส มีปัจจัยหลายอย่างที่มีผลต่อการผลิต การที่จะทำให้ได้ผลผลิตที่ดีมีปริมาณสูงจึงจำเป็นจะต้องศึกษาถึงปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่อการผลิต และควบคุมปัจจัยเหล่านั้นให้อยู่ในสภาวะที่เหมาะสมต่อการผลิต

1.6.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยด้วยกรด

1.6.1.1 ชนิดของสารเคมี

สารเคมีในที่นี้ก็คือ กรดที่ใช้ย่อยและด่างที่ใช้เป็นตัวปรับสภาพสารละลายน้ำตาลที่ได้จากการย่อยนั้นให้มีสภาพความเป็นกลาง ทำให้มีเกลือเกิดขึ้นปะปนในสารละลาย

และปริมาณเกลือที่เกิดขึ้นนั้นจะมีผลต่อความบริสุทธิ์ของน้ำตาล อันจะทำให้ต้องสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการขจัดสิ่งเจือปนเพื่อทำให้น้ำตาลมีความบริสุทธิ์เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ชนิดของเกลือดังกล่าวซึ่งขึ้นกับชนิดของกรด และด่างที่นำมาใช้ในกระบวนการย่อย จากงานวิจัยของสินีนาถ เจียมอนุกูลกิจ (2539) ที่ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของเกลือชนิดต่าง ๆ ที่เกิดจากการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรดและปรับสภาพสารละลายน้ำตาลที่ได้ด้วยด่างต่อการผลิตกรดมะนาว พบว่าจากเกลือทั้งหมดที่ได้ทำการทดลอง ได้แก่ เกลือโซเดียมคลอไรด์, โซเดียมซัลเฟต, แคลเซียมคลอไรด์ และแคลเซียมซัลเฟต มีเพียงเกลือแคลเซียมซัลเฟต เพียงชนิดเดียวที่ไม่มีผลต่อการผลิตกรดมะนาว ทำให้ปริมาณกรดมะนาวที่ได้ลดลง

การที่กรดมีผลต่อคุณภาพสารละลายน้ำตาลที่ได้จากการย่อย เนื่องจากกรดแต่ละชนิดมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันเป็นคุณลักษณะเฉพาะตัว การพิจารณาเลือกชนิดของกรดที่จะนำมาใช้จึงต้องคำนึงถึงต้นทุนการผลิต และประสิทธิภาพการย่อยที่เกิดขึ้นด้วย

1.6.1.2 ความเข้มข้น

นอกจากจะต้องพิจารณาเลือกชนิดของกรดให้เหมาะสมต่อการนำไปใช้แล้ว ยังมีอีกปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญไม่ยิ่งหย่อนไปกว่ากันก็คือ ความเข้มข้นของกรดที่จะนำไปใช้ในการย่อย เพราะหากมีความเข้มข้นที่ต่ำจนเกินไป ปฏิกิริยาของการย่อยที่เกิดขึ้นจะดำเนินไปได้ช้า ต้องใช้เวลานานกว่าปฏิกิริยาจะเกิดได้สมบูรณ์ และในทางกลับกันหากใช้กรดที่มีความเข้มข้นสูงมาก แม้ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นได้เร็ว แต่ก็จะทำให้สิ้นเปลืองปริมาณกรดและด่างที่ใช้ เกิดเกลือเจือปนในสารละลายน้ำตาลมาก อันจะมีผลต่อเนื่องไปจนถึงการเสียค่าใช้จ่ายในการขจัดสารเจือปนออกไปเพื่อให้น้ำตาลที่ได้บริสุทธิ์ขึ้น เป็นผลให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้นตามไปด้วย

1.6.1.3 อุณหภูมิ

อุณหภูมิเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อประสิทธิภาพการผลิตกลูโคส เนื่องจากถ้าแป้งเกิดการเจลลาติไนเซชั่นได้มาก จะทำให้แป้งถูกย่อยไปเป็นกลูโคสได้มากขึ้นด้วยเช่นกัน โดยการเกิดเจลลาติไนเซชั่นของแป้งจะเกิดขึ้นได้ดีเมื่อใช้อุณหภูมิสูง เพราะไขมันและโปรตีนในแป้งที่คอยขัดขวางไม่ให้แป้งดูดน้ำได้นั้นจะตกตะกอนลงมาได้ง่าย (Whistler , Bemiller and Paschall, 1984) และในทางตรงกันข้ามการใช้อุณหภูมิที่สูงมาก มีแนวโน้มทำให้สีของสารละลายน้ำตาลมีสีคล้ำเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย เนื่องจากผลของการเกิดปฏิกิริยาบร้าวนิ่ง (Browning Reaction) ซึ่งเกิดจากน้ำตาลรีดิวซ์ที่เกิดขึ้นเข้าทำปฏิริยากับกรดอะมิโนที่มีอยู่ในแป้ง (Mayer, 1978) ดังนั้นการพิจารณาเลือกใช้อุณหภูมิที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง

1.6.1.4 เวลา

ระยะเวลาที่ใช้ในการย่อยมีความสัมพันธ์กับอุณหภูมิที่ใช้ คือ การย่อยโดยใช้อุณหภูมิสูงทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปได้เร็วจึงอาจจะใช้เวลาเพียงช่วงสั้น ๆ ได้ ซึ่งหากใช้เวลานานเกินไปนั้น จะทำให้เกิดปฏิกิริยาข้างเคียงได้สารที่ไม่พึงประสงค์ขึ้นแทน แต่ถ้าระยะเวลาในการย่อยที่สั้นเกินไป ปฏิกิริยาการย่อยจึงเกิดขึ้นได้ไม่สมบูรณ์ ทำให้ผลผลิตกลูโคสเกิดในปริมาณต่ำ ถ้าทำการย่อยที่อุณหภูมิต่ำปฏิกิริยาดำเนินไปได้ช้ากว่าจะทำให้เกิดได้สมบูรณ์ทำให้สิ้นเปลืองแรงงาน เชื้อเพลิง รวมถึงพลังงานที่ใช้ ซึ่งก็ไม่เหมาะแก่การจะพัฒนาขึ้นไปในระดับอุตสาหกรรมที่มีการแข่งขันสูงได้

1.6.2 ปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยด้วยเอนไซม์

1.6.2.1 ชนิดของเอนไซม์

เอนไซม์ที่นำมาใช้สำหรับการย่อยแป้งมีอยู่หลายชนิด ดังตารางที่ 1-4 ซึ่งแต่ละชนิดก็มีคุณสมบัติที่แตกต่างกันไปตามแหล่งผลิต โดยชนิดที่นิยมนำมาใช้ในการย่อยแป้งในระดับอุตสาหกรรมได้แก่

เอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (α-amylase) ผลิตได้จากจุลินทรีย์ในกลุ่ม *Bacillus sp.* ได้แก่

Bacillus amyloliquefaciens ใช้ในอุตสาหกรรมทั่วไป อุณหภูมิสูงสุดที่ยังสามารถทำงานได้คือ 95 องศาเซลเซียส

Bacillus Licheniformis ผลิตโดยบริษัท Novo Industri A/S ใช้ชื่อทางการค้าว่า Termamyl และอุณหภูมิสูงสุดที่ทำงานได้คือ 110 องศาเซลเซียส

Bacillus subtilis ผลิตโดย บริษัท Novo-Nordisk A/S ใช้ชื่อทางการค้าว่า BAN มีระดับอุณหภูมิที่เหมาะสำหรับการทำงานที่ 70 องศาเซลเซียส

เอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดส (amyloglucosidase) หรือรู้จักในอีกชื่อหนึ่งว่า กลูโคอะไมเลส (glucoamylase) ผลิตได้จากจุลินทรีย์พวก *Aspergillus niger* มีระดับอุณหภูมิที่เหมาะสมกับการทำงานที่ 60 องศาเซลเซียส

ประสิทธิภาพของการผลิตกลูโคสโดยการใช้เอนไซม์ในการย่อยแป้งขึ้นกับประสิทธิภาพการทำงานของเอนไซม์ที่นำมาใช้ โดยต้องจัดเตรียมให้มีสภาวะให้เหมาะสมแก่การทำงานของเอนไซม์นั้น ซึ่งในปัจจุบันได้มีการพัฒนาการใช้เอนไซม์ 2 ชนิดให้ทำงานร่วมกัน คือ การใช้เอนไซม์อะไมเลส ทำงานร่วมกับ อะไมโลกลูโคซิเดส ทำให้ได้ผลผลิตกลูโคสมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์

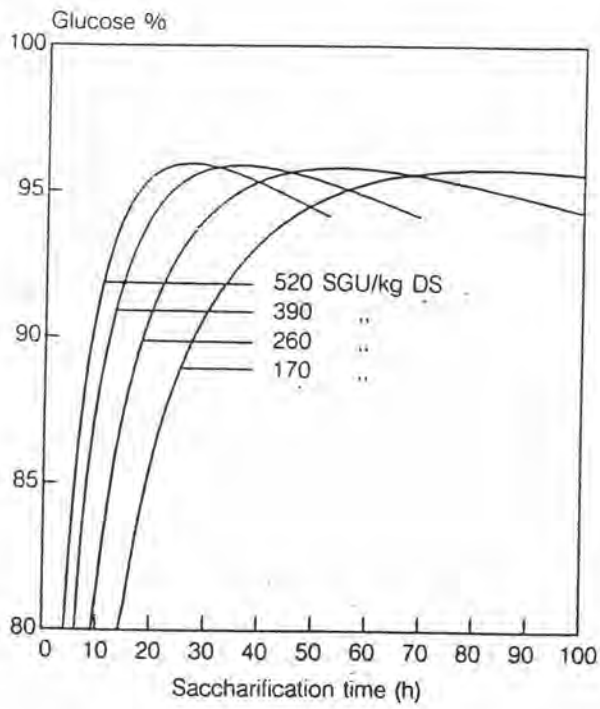
ตารางที่ 1-4 เอนไซม์ที่นิยมนำมาใช้ในการย่อยแป้ง

Enzyme	EC number	Source	Action
α-Amylase	3.2.1.1	*Bacillus amyloliquefaciens*	Only α-1,4-oligosaccharide links are cleaved to give α-dextrins and predominantly maltose (G_2), G_3, G_6 and G_7 oligosaccharides
		B. licheniformis	Only α-1,4-oligosaccharide links are cleaved to give α-dextrins and give predominantly maltose G_3, G_4 and G_5 oligosaccharides
		Aspergillus oryzae, A. niger	Only α-1,4-oligosaccharide links are cleaved to give α-dextrins and predominantly maltose and G_3 oligosaccharides
Saccharifying α-Amylase	3.2.1.1	*B. subtilis* amylosacchariticus)	Only α-1,4-oligosaccharide links are cleaved to give α-dextrins with maltose G_3, G_4 and up to 50% (w/w) glucose
β-Amylase	3.2.1.2	Malted barley	Only α-1,4-links are cleaved, from non-reducing ends, to give limit dextrins and β-maltose
Glucoamylase	3.2.1.3	*A. niger*	α-1,4 and α-1, 6-links are cleaved, from the non-reducing ends, to give β-glucose
Pullulanase	3.2.1.41	*B. acidopullulyticus*	Only α-1,6-links are cleaved to give straight-chain maltodextrins

ที่มา : Chaplin and Bucke (1990)

1.6.2.2 ปริมาณของเอนไซม์ที่ใช้

ปริมาณของเอนไซม์มีความสัมพันธ์โดยตรงกับระยะเวลาที่ใช้ในการย่อย โดยสามารถเร่งปฏิกิริยาของการย่อยแป้งให้เกิดได้สมบูรณ์เร็วขึ้น เมื่อใช้ปริมาณเอนไซม์เพิ่มขึ้น (Chaplin and Bucke, 1990) คือในขั้นตอนของการเกิดแซคคาริฟิเคชั่นเพื่อให้ปฏิกิริยาของการย่อยแป้งเกิดได้สมบูรณ์ จะต้องใช้เวลาประมาณ 72 ชั่วโมง เมื่อใช้เอนไซม์ 170 หน่วยต่อกิโลกรัมแป้ง แต่สามารถทำให้เร็วขึ้นได้ เมื่อเพิ่มปริมาณเอนไซม์ที่ใช้เป็น 520 หน่วย จะใช้เวลาประมาณ 24 ชั่วโมง (รูปที่ 1-8)



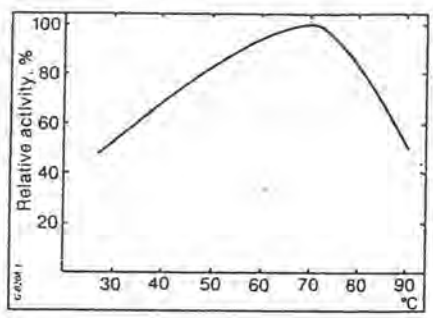
รูปที่ 1-8 ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเอนไซม์ SPEZYME ที่ใช้ในการทำให้เกิดแซคคาริฟิเคชั่นกับระยะเวลาที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาได้โดยสมบูรณ์ (Genencor International, เอกสารกำกับผลิตภัณฑ์เอนไซม์ SPEZYME)

1.6.2.3 เวลา

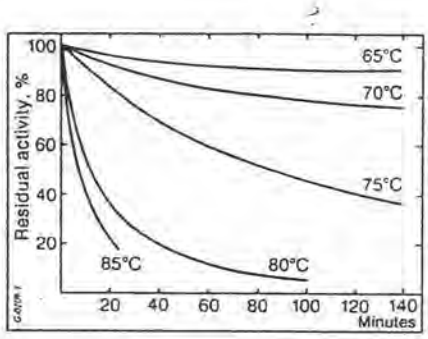
ประสิทธิภาพของการผลิตกลูโคสนอกจากจะขึ้นกับปริมาณเอนไซม์แล้ว ระยะเวลาที่ใช้ในการย่อยก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลด้วยเช่นกัน เพราะการใช้ระยะเวลาเพื่อให้เกิดแซคคาริฟิเคชั่นนานเกินไปจะทำให้ประสิทธิภาพของการผลิตกลูโคสลดลงเนื่องจากไอโซมอลโทสที่เกิดจากการสะสมของกลูโคสเกิดการรวมตัวกันขึ้นใหม่ (re-polymerise) ดังรูปที่ 1-8 (Chaplin and Bucke, 1990)

1.6.2.4 อุณหภูมิ

โดยทั่วไปอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการย่อยแป้งด้วยเอนไซม์ขึ้นกับชนิดของเอนไซม์ที่นำมาใช้ เนื่องจากเอนไซม์จะมีความคงตัวและทำงานได้ดีเฉพาะช่วงอุณหภูมิที่เหมาะแก่เอนไซม์ชนิดนั้น ๆ ดังรูปที่ 1-9 และ รูปที่ 1-10 ซึ่งเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส ส่วนใหญ่มีช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมแก่การทำงานอยู่ที่ 70-100 องศาเซลเซียส ส่วนเอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดส ที่ผลิตจาก *Aspergillus niger* จะมีอุณหภูมิที่เหมาะสมแก่การทำงานอยู่ที่ 60 องศาเซลเซียส



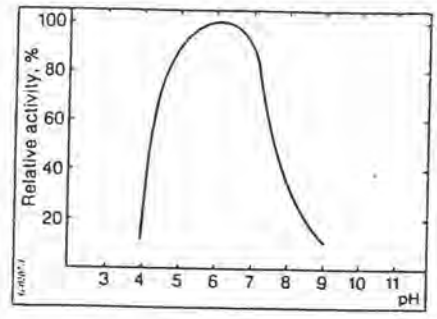
รูปที่ 1-9 ผลของอุณหภูมิต่อการทำงานของเอนไซม์ BAN (Novo Nordisk, เอกสารกำกับผลิตภัณฑ์เอนไซม์ BAN)



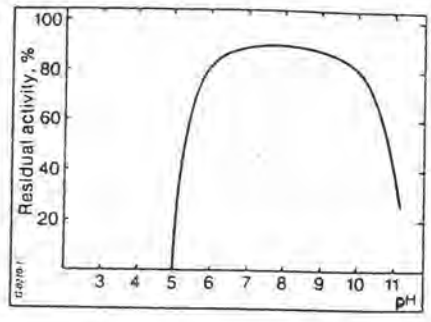
รูปที่ 1-10 ผลของอุณหภูมิต่อความคงตัวของเอนไซม์ BAN (Novo Nordisk, เอกสารกำกับผลิตภัณฑ์เอนไซม์ BAN)

1.6.2.5 ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH)

เอนไซม์เป็นสารจำพวกโปรตีน หากอยู่ในสภาวะที่ไม่เหมาะสมจะทำให้เอนไซม์เสียสภาพ (denature) ไปได้ โดยช่วงของค่าความเป็นกรด-ด่างมีผลต่อการทำงานและการทางานของเอนไซม์ดังรูปที่ 1-11 และรูปที่ 1-12 เอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส ที่มีชื่อทางการค้าคือ BAN จะมีช่วงของค่าความเป็นกรด-ด่างที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 6.5-7.0



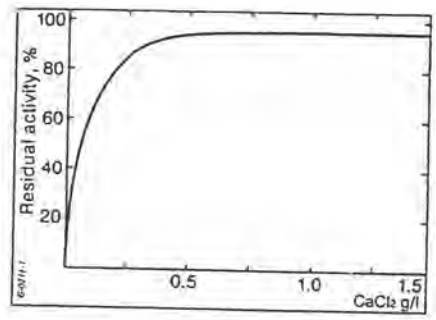
รูปที่ 1-11 ผลของสภาพความเป็นกรดด่างต่อการทำงานของเอนไซม์ BAN
(Novo Nordisk, เอกสารกำกับผลิตภัณฑ์เอนไซม์ BAN)



รูปที่ 1-12 ผลของสภาพความเป็นกรดด่างต่อความคงตัวของเอนไซม์ BAN
(Novo Nordisk, เอกสารกำกับผลิตภัณฑ์เอนไซม์ BAN)

1.6.2.6 สารเสริมอื่น ๆ

การเติมสารบางชนิดให้แก่เอนไซม์จะช่วยทำให้เอนไซม์มีความคงตัวที่ดีขึ้นโดย Ca^{2+} ปริมาณ 20-80 ppm เป็นตัวช่วยกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์และทำให้เอนไซม์เกิดความคงตัวอยู่ได้ (Chaplin and Bucke, 1990) ดังรูปที่ 1-13



รูปที่ 1-13 ผลของความเข้มข้นแคลเซียมคลอไรด์ต่อความคงตัวของเอนไซม์ BAN
(Novo Nordisk, เอกสารกำกับผลิตภัณฑ์เอนไซม์ BAN)

1.7 จลนพลศาสตร์ของการผลิตกลูโคสด้วยกรด

จลนพลศาสตร์เคมี (Chemical Kinetics)

เป็นวิชาที่เกี่ยวข้องกับการศึกษาอัตราเร็วของปฏิกิริยาเคมีในเชิงปริมาณวิเคราะห์และปัจจัยต่าง ๆ ที่มีผลต่ออัตราเร็วของปฏิกิริยา การนำความรู้ทางด้านจลนพลศาสตร์มาประยุกต์ใช้จะช่วยในการทำนายและควบคุมปฏิกิริยาเคมีได้ อันจะทำให้เพิ่มปริมาณสารผลิตผล (product) ได้ตามต้องการซึ่งในระดับห้องปฏิบัติการพยายามทำให้ปฏิกิริยาเกิดได้สมบูรณ์ที่สุด แต่ในโรงงานอุตสาหกรรมนั้นต้องการสารผลิตผลออกจากปฏิกิริยาตลอดเวลาโดยไม่รอให้เกิดอย่างสมบูรณ์ แต่จะพยายามทำให้ปฏิกิริยาดำเนินไปอย่างต่อเนื่องด้วยอัตราเร็วสม่ำเสมอ

อัตราเร็วของปฏิกิริยา (Rate of reaction)

การศึกษาอัตราเร็วของปฏิกิริยามักจะแสดงข้อมูลการเปลี่ยนแปลงลดลงของปริมาณสารที่เข้าทำปฏิกิริยา (reagent) หรือการเพิ่มขึ้นของสารผลิตภัณฑ์ ถ้าระบบอยู่ในสภาวะที่ปริมาตรคงที่หรือเกือบจะคงที่การเปลี่ยนแปลงปริมาณสารที่เข้าทำปฏิกิริยา จะมีสัดส่วนอัตราเดียวกับการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารนั้น สำหรับระบบที่เป็นของเหลว อัตราเร็วของปฏิกิริยามักจะแสดงในเทอมของอัตราการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของสารที่เข้าทำปฏิกิริยา

พิจารณาปฏิกิริยา

$$aA + bB \longrightarrow cC + dD$$

$$\text{อัตราเร็วของปฏิกิริยา} = -\frac{1}{a}\frac{d[A]}{dt} = -\frac{1}{b}\frac{d[B]}{dt} = \frac{1}{c}\frac{d[C]}{dt} = \frac{1}{d}\frac{d[D]}{dt} \qquad (1)$$

โดยเทอมในวงเล็บ [ ] หมายถึงความเข้มข้นของสาร

เครื่องหมายลบ - แสดงว่าระหว่างการเกิดปฏิกิริยาความเข้มข้นของสารที่เข้าทำปฏิกิริยาจะลดลง

ในทางปฏิบัติอัตราเร็วมักจะอยู่ในรูปของความเข้มข้นของสารที่เข้าทำปฏิกิริยาตัวหนึ่งหรือหลายตัวดังข้างต้น แต่ในบางกรณีการที่มีผลิตภัณฑ์เกิดขึ้น ปริมาณผลิตภัณฑ์มักจะเป็นตัวบ่งชี้ที่ดีที่สุดของการดำเนินไปของปฏิกิริยา (Barrow, 1988)

อัตราเร็วของปฏิกิริยาดังสมการ (1) ที่แสดงข้างต้นโดยทั่วไปจะขึ้นกับความเข้มข้นของสารที่เข้าทำปฏิกิริยา 1 ตัว หรือมากกว่า 1 ตัว ดังนั้นอัตราเร็วจึงเปลี่ยนเป็นการดำเนินไปของปฏิกิริยา การหลีกเลี่ยงความยุ่งยากดังกล่าวจึงกระทำได้โดยการศึกษาความเร็วเริ่มต้น (initial rate)ซึ่งเป็นอัตราเร็วของปฏิกิริยาในช่วงเริ่มต้นเมื่อความเข้มข้นของสารที่เข้าทำปฏิกิริยายังไม่เปลี่ยนแปลงไปมากนัก

มีปฏิกิริยาจำนวนมากที่มีอัตราเร็ว ณ อุณหภูมิที่กำหนดเป็นสัดส่วนกับความเข้มข้นของสารที่เข้าทำปฏิกิริยา 1 หรือ 2 ชนิด ซึ่งสารที่เข้าทำปฏิกิริยาแต่ละตัวมีผลต่อกันเพียงเล็กน้อย (integral power) ถ้าพิจารณาปฏิกิริยาที่มี A และ B เป็นสารที่เข้าทำปฏิกิริยาแล้ว สมการอัตราเร็วสำหรับปฏิกิริยาที่ความเข้มข้นมีผลต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาเป็นไปตามความสัมพันธ์

อัตราเร็วของปฏิกิริยา = $k [A]$ สำหรับปฏิกิริยาอันดับที่ 1

อัตราเร็วของปฏิกิริยา = $k [A]^2$ หรือ $k [A] [B]$ สำหรับปฏิกิริยาอันดับที่ 2

k คือ ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยา (reaction rate constant) เป็นพารามิเตอร์จลนพลศาสตร์มูลฐาน (fundamental kinetic parameter) ถ้าค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยามีค่าสูงแสดงว่า ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นเร็วและถ้าค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยามีค่าต่ำ แสดงว่า ปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นช้า และค่าคงที่นี้จะแปรผันตามอุณหภูมิของการเกิดปฏิกิริยา เพื่อเป็นการเน้นอาจเขียนเป็น k [T]

ปฏิกิริยาที่อธิบายได้ด้วยสมการอัตราเร็วทั่วไป (simple rate equation) อาจกล่าวได้เป็นปฏิกิริยาอันดับที่ 1 หรืออันดับที่ 2 แต่ทุกปฏิกิริยาไม่ได้เป็นไปตามกฎของอัตราเร็วทั่วไป (simple rate laws) บางปฏิกิริยามีอันดับเป็นค่าอื่น ๆ ที่ไม่ใช่จำนวนเต็ม อาจจะมีหลายปฏิกิริยาเกิดขึ้นได้พร้อมกันเป็นปฏิกิริยาซับซ้อน หรือการเกิดปฏิกิริยาผันกลับ ดังนั้นการทราบลำดับของปฏิกิริยาและสมการอัตราเร็ว จึงเป็นสิ่งที่สำคัญสามารถช่วยในการคาดเดาผลของการทดลอง เพื่อจะได้พยายามหาสมการอัตราเร็วให้ถูกต้องตรงกับกลไกที่เกิดขึ้น จึงจำเป็นที่จะต้องทำความเข้าใจกับกลไกที่เกิดขึ้นทางทฤษฎีโดยมีสมการอัตราเร็วเป็นส่วนที่แสดงความสัมพันธ์ข้อมูลจากการทดลอง

สมการอัตราเร็วอันดับที่ 1 (First - Order Rare Equations)

ในงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอัตราเร็วของปฏิกิริยาการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรด โดยมุ่งเน้นไปในการย่อยส่วนของแป้งที่ตกค้างอยู่กับกากมันสำปะหลังให้กลายเป็นกลูโคสได้สมบูรณ์ จากการติดตามการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นกลูโคสที่เวลาต่าง ๆ ณ อุณหภูมิที่กำหนด ปฏิกิริยาดำเนินไปได้ช้ามากในน้ำบริสุทธิ์แต่ถูกเร่งได้ด้วยกรด (H^+) และการเปลี่ยนแปลงปริมาณกลูโคสที่เกิดขึ้นกับการดำเนินไปของปฏิกิริยา เป็นไปตามสมการของปฏิกิริยาอันดับที่ 1

$$\left[C_6H_{10}O_5 \right]_n + n\ H_2O \xrightarrow{H^+} n\ C_6H_{12}O_6$$

พิจารณาอัตราเร็วของปฏิกิริยาจากอัตราการเกิดกลูโคส ซึ่งสัมพันธ์กับความเข้มข้นกลูโคสที่พึงเกิดได้จากการย่อยในลักษณะ

$$\left[\begin{array}{c}\text{อัตราการเกิด} \\ \text{กลูโคส}\end{array}\right] \quad \alpha \quad \left[\begin{array}{c}\text{ความเข้มข้นของกลูโคส} \\ \text{ที่พึงเกิดได้จากการย่อย}\end{array}\right]$$

$$\text{อัตราเร็วของปฏิกิริยา} = \frac{1}{n}\frac{dC}{dt} = k\,(C_m - C) \qquad (2)$$

$n = 1$

C_m : ความเข้มข้นของกลูโคสที่พึงเกิดได้สูงสุด

C : ความเข้มข้นกลูโคสที่เกิดขึ้นจริง ณ เวลา t

จากสมการที่ (2) ถูกอินทิเกรตที่สภาวะเริ่มต้น เมื่อความเข้มข้นของกลูโคสที่เวลา $t = 0$ เท่ากับ C_0 และถัดมาที่เวลา t ความเข้มข้นของกลูโคสเพิ่มขึ้นเป็น C

$$\int_{C_0}^{C} \left(\frac{1}{C_m - C}\right) dC = \int_0^t k\,dt$$

$$\ln\left(\frac{1}{C_m - C_0}\right) - \ln\left(\frac{1}{C_m - C_0}\right) = kt$$

$$\ln \left(\frac{C_m - C_0}{C_m - C} \right) = kt$$

$$C_m - C = (C_m - C_0)\, e^{-kt} \qquad (3)$$

Guggenheim ได้เสนอวิธีการคำนวณค่าคงที่อัตราเร็ว (k) ของปฏิกิริยาอันดับที่ 1 สำหรับปฏิกิริยาที่ต้องใช้เวลานานกว่าจะดำเนินไปจนสมบูรณ์ หรือ ปฏิกิริยาที่ไม่สามารถวัดผลที่เกิด ณ เวลาเริ่มต้นได้ เนื่องจากปฏิกิริยาเกิดขึ้นเร็วมากจึงไม่ทราบความเข้มข้นเริ่มต้นที่แน่นอนของการเกิดปฏิกิริยา ซึ่งมีข้อดีที่ค่าจากการคำนวณแต่ละตัวไม่ขึ้นกับค่าจากการสังเกตที่เวลาใด ๆ เพียงค่าใดค่าหนึ่ง (Daniels et al., 1970) โดยข้อมูลจะถูกจัดเป็น 2 ชุด ชุดแรก (C) จะเก็บผลจากการสังเกตที่เวลา t ส่วนชุดที่สอง (C') จะเป็นผลจากการสังเกตที่เวลา $t + \Delta t$ เมื่อ Δt เป็นช่วงเวลาที่กำหนด เมื่อนำมาคำนวณและเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง $\ln (C' - C)$ กับเวลา t จะได้เส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ k

จากสมการอินทิเกรตอัตราเร็วของปฏิกิริยา (3) ความเข้มข้นกลูโคสจากการสังเกต C และ C' ที่ช่วงเวลาที่แตกต่างกัน Δt

$$C_m - C = (C_m - C_0)\, e^{-kt}$$

$$C_m - C' = (C_m - C_0)\, e^{-k(t + \Delta t)}$$

$$C' - C = e^{-kt} \left[(C_m - C_0)(1 - e^{-k\Delta t}) \right]$$

$$\ln (C' - C) = -kt + \ln \left[(C_m - C_0)(1 - e^{-k\Delta t}) \right] \qquad (4)$$

จากสมการที่ (4) จะสามารถหาค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยา (k) ได้จากค่าความชันของเส้นตรงของกราฟระหว่าง $\ln (C' - C)$ กับเวลา t

<u>อิทธิพลของอุณหภูมิที่มีต่อค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยา</u>

อุณหภูมิเป็นปัจจัยที่มีผลอย่างยิ่งต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยา โดยค่าคงที่ของอัตราเร็วของปฏิกิริยาจะเปลี่ยนแปลงอย่างมากเมื่ออุณหภูมิเปลี่ยนไป ซึ่งที่อุณหภูมิหนึ่ง ๆ โมเลกุลของสารที่เข้าทำปฏิกิริยาจะมีพลังงานต่าง ๆ กัน และมีเพียงส่วนหนึ่งเท่านั้นที่มีพลังงานพอที่จะเกิด

ปฏิกิริยาได้เมื่อเกิดการชน เมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น โมเลกุลจะอยู่ในสภาพที่ถูกกระตุ้น (activated molecules) ให้มีพลังงานมากพอที่จะเกิดปฏิกิริยาได้เพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการเกิดปฏิกิริยาและค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาและค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

ในปี 1889 Arrhenius พบว่าลักษณะที่ขึ้นกับอุณหภูมิเช่นนี้ แสดงถึงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราเร็วหรือค่าคงที่อัตราเร็วกับอุณหภูมิเป็นไปแบบเอ็กซ์โปแนนเชียล(exponential) ความสัมพันธ์ที่สังเกตได้นี้สามารถเขียนในรูปทั่วไปได้เป็น

$$k = Ae^{-Ea/RT} \qquad (5)$$

เมื่อ A : พรีเอ็กซ์โปแนนเชียล แฟคเตอร์ (pre-exponential factor) เป็นค่าคงที่

Ea : ค่าพลังงานกระตุ้น (activation energy)

R : ค่าคงที่ของก๊าซ (gas constant) = 8.314 J/mol-K

T : อุณหภูมิในหน่วยเคลวิน

สมการ (5) นี้เป็นที่รู้จักกันโดยทั่วไปว่า คือ สมการอาร์เรเนียล (Arrhenius Equation) สามารถเขียนในรูปที่เป็นสมการลอกการิทึมได้คือ

$$\ln k = \frac{-E_a}{RT} + \ln A \qquad (6)$$

เมื่อเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า ln k กับ 1/T จะได้กราฟเส้นตรงที่มีความชันเท่ากับ $-E_a/R$ ซึ่งจากค่าความชันดังกล่าวสามารถนำมาคำนวณค่าพลังงานกระตุ้น (E_a) ของการเกิดปฏิกิริยาได้

1.8 มูลเหตุจูงใจในการทำวิจัย

น้ำตาลกลูโคสเป็นสารตั้งต้นที่สำคัญที่ใช้ในอุตสาหกรรมต่างๆ ได้มากมาย โดยส่วนใหญ่น้ำตาลกลูโคสที่ผลิตได้ในปัจจุบันได้มาจากการย่อยแป้ง จึงทำให้มีต้นทุนการผลิตสูงและราคาของต้นทุนการผลิตน้ำเชื่อมกลูโคสร้อยละ 64 เกิดจากต้นทุนของราคาแป้งมันสำปะหลัง ดังนั้นเพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายส่วนดังกล่าว จึงได้มุ่งความสนใจไปยังการหาแหล่งวัตถุดิบอื่นมาใช้ทด

แทน โดยแหล่งวัตถุดิบที่น่าจะนำมาพิจารณาเป็นอันแรกจึงได้แก่กากมันสำปะหลัง ซึ่งมีราคาถูก และยังมีแป้งอยู่เป็นองค์ประกอบในปริมาณสูงถึงร้อยละ 56 โดยน้ำหนักแห้ง จึงมีความเป็นไปได้สูงในการที่จะนำไปย่อยเพื่อผลิตน้ำเชื่อมกลูโคสได้ นอกจากนี้ยังหาได้ง่าย มีปริมาณมากและเป็นการเอื้อประโยชน์แก่อุตสาหกรรมการผลิตแป้งมันสำปะหลังให้สามารถดำเนินการไปได้จนครบวงจร

ปัจจุบันแม้กากมันสำปะหลังจะได้รับความสนใจอย่างสูงในเชิงวิชาการ แต่โดยมากจะเป็นการศึกษาการนำกากมันสำปะหลังไปใช้เป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับกระบวนการหมัก ยังไม่มีรายงานถึงการนำมาใช้เพื่อผลิตน้ำเชื่อมกลูโคส ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการผลิตน้ำเชื่อมกลูโคสจากการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยวิธีการต่าง ๆ ทั้งโดยการใช้กรดและใช้เอนไซม์ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของการผลิตและหาสภาวะที่ดีที่สุด โดยจะเน้นไปที่การทำให้เกิดการย่อยแป้งที่ตกค้างอยู่ในกากมันเหล่านั้นให้เกิดการย่อยไปเป็นน้ำตาลกลูโคสได้โดยสมบูรณ์

1.9 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

1. ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตน้ำเชื่อมกลูโคสจากการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรดชนิดต่าง ๆ เพื่อคัดเลือกกรดที่เหมาะสมที่สุดที่จะนำไปใช้

2. ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรด เพื่อหาสภาวะที่ดีที่สุดของการย่อยด้วยกรด

3. ศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มีอิทธิพลต่อการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์ เพื่อหาสภาวะที่ดีที่สุดของการย่อยด้วยเอนไซม์

4. คำนวณค่าคงที่ปฏิกิริยา (rate constant) ของการย่อยกากมันสำปะหลังด้วยกรด ที่สภาวะต่าง ๆ

5. เปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตน้ำชื่อมกลูโคสระหว่างการย่อยด้วยกรดและจากการใช้เอนไซม์