

บทที่ 2

คาร์โบไฮเดรต

คาร์โบไฮเดรตเป็นโมเลกุลชีวภาพ (biomolecule) เช่น น้ำตาล แป้ง และเซลลูโลส (Cellulose) เป็นต้น พบได้ในสิ่งมีชีวิต โดยพืช สัตว์ และแบคทีเรียบางชนิดเกิดการสังเคราะห์ด้วยแสงได้ จะเปลี่ยนแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ โดยมีพลังงานแสงอาทิตย์ร่วมด้วย ได้กลูโคส มีสูตรโมเลกุล เท่ากับ $C_6H_{12}O_6$ โดยจะถูกเก็บสะสมไว้ที่ส่วนต่าง ๆ เพื่อใช้เป็นอาหารของทั้งมนุษย์และสัตว์ และใช้เป็นยารักษาโรค

คาร์โบไฮเดรตเป็นสารอินทรีย์ประเภทพอลิไฮดรอกซี (polyhydroxy) แอลดีไฮด์และคีโตน จำแนกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ มอโนแซ็กคาไรด์ (monosaccharide) ไดแซ็กคาไรด์ (disaccharide) และพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) โครงสร้างประกอบด้วยอะตอมคาร์บอน อะตอมออกซิเจน และอะตอมไฮโดรเจน

มอโนแซ็กคาไรด์

มอโนแซ็กคาไรด์เป็นสารประกอบพอลิไฮดรอกซีแอลดีไฮด์และคีโตน พบสูตรโครงสร้างที่มีจำนวนอะตอมคาร์บอนระหว่าง 3-9 อะตอม ทั้งรูปอิสระและรูปไกลโคไซด์ รวมทั้งน้ำตาลอนุพันธ์ด้วย

1. การเรียกชื่อมอโนแซ็กคาไรด์

ตามปกติชื่อน้ำตาล ได้แก่ มอโนแซ็กคาไรด์ และไดแซ็กคาไรด์ จะลงท้ายเสียงด้วย _โอส (_ose) กรณีชื่อนมอโนแซ็กคาไรด์สามารถบอกถึงจำนวนอะตอมคาร์บอนและชนิดของหมู่ทำหน้าทีได้แก่ หมู่คาร์บอนิลของแอลดีไฮด์และคีโตน ดังตารางที่ 2.1 ดังนี้

1. เรียกชื่อตามหมู่ทำหน้าที ได้แก่ หมู่คาร์บอนิลของแอลดีไฮด์ เรียกว่า แอลโดส (aldose) และหมู่คาร์บอนิลของคีโตน เรียกว่า คีโทส (ketose)

2. เรียกชื่อตามจำนวนอะตอมคาร์บอนในภาษากรีก เช่น อะตอมคาร์บอน 3 อะตอม เรียกว่า ไตร_ (tri_) จึงเรียกชื่อน้ำตาลว่า ไตรโอส (triose) อะตอมคาร์บอน 4 อะตอม เรียกน้ำตาว่า เทโทรส (tetrose) เป็นต้น

3. เรียกชื่อตามทั้งหมู่ทำหน้าทีและจำนวนอะตอมคาร์บอน กล่าวคือ เรียกชื่อหมู่ทำหน้าทีก่อน ได้แก่ หมู่คาร์บอนิลของแอลดีไฮด์ เรียกว่า แอลโด_ (aldo_) หรือคีโตน เรียกว่า คีโท_ (keto_) แล้วตามด้วยชื่อจำนวนอะตอมคาร์บอนในภาษากรีก แล้วลงท้ายเสียงด้วย _โอส กรณีคีโทสให้แทรก

คำว่า “_ul_” ยกเว้นอะตอมคาร์บอน 3 อะตอม เช่น มอโนแซ็กคาไรด์ที่มีอะตอมคาร์บอน 6 อะตอม เป็นแอลดีไฮด์อนุพันธ์ เรียกว่า แอลโดเฮกโซส (aldohexose) หรือคีโตนอนุพันธ์ เรียกว่า คีโตะเฮกซูลอส (ketohexulose) เป็นต้น

4. เรียกชื่อตามชื่อสามัญ เช่น กลูโคส มอลโทส (Maltose) และซูโครส (Sucrose) เป็นต้น ซึ่งการเรียกชื่อแบบนี้จะไม่ทราบจำนวนอะตอมคาร์บอนและหมู่ทำหน้าที

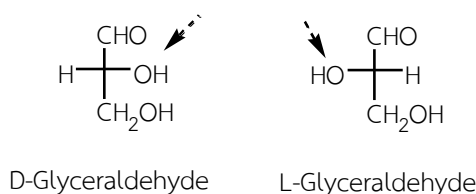
ตารางที่ 2.1 การเรียกชื่อมอโนแซ็กคาไรด์ตามจำนวนอะตอมคาร์บอนและชนิดหมู่ทำหน้าที

จำนวนอะตอม คาร์บอน	เรียกชื่อ อะตอม คาร์บอน	เรียกชื่อน้ำตาลตาม จำนวนอะตอม คาร์บอน	เรียกชื่อน้ำตาลตามอนุพันธ์	
			แอลดีไฮด์	คีโตน
3	ไตร_ (tri_)	ไตรโอส (triose)	แอลโดไตรโอส (aldotriose)	คีโตะไตรโอส (ketotriose)
4	เททร_ (tetr_)	เทโทรส (tetrose)	แอลโดเทโทรส (aldotetrose)	คีโตะเททรูลอส (ketotetrolulose)
5	เพนท_ (pent_)	เพนโทส (pentose)	แอลโดเพนโทส (aldopentose)	คีโตะเพนทูลอส (ketopentulose)
6	เฮกซ_ (hex_)	เฮกโซส (hexose)	แอลโดเฮกโซส (aldohexose)	คีโตะเฮกซูลอส (ketohexulose)
6	เฮปท_ (hept_)	เฮปโทส (heptose)	แอลโดเฮปโทส (aldoheptose)	คีโตะเฮปทูลอส (ketoheptulose)
8	ออกท_ (oct_)	ออกโทส (octose)	แอลโดออกโทส (aldooctose)	คีโตะออกทูลอส (ketooctulose)
9	โนน_ (non_)	โนนูลอส (nonulose)	-	คีโตะโนนูลอส (ketononulose)

2. สเตอริโอไอโซเมอร์ซิมของมอโนแซ็กคาไรด์

สเตอริโอไอโซเมอร์ (stereoisomer) ของมอโนแซ็กคาไรด์ จะกำหนดโครงสร้างแบบชนิดดี-หรือชนิดแอล- ซึ่งเทียบกับมอโนแซ็กคาไรด์ที่เล็กที่สุด ได้แก่ กลีเซอแรลดีไฮด์ (Glyceraldehyde) โดยพิจารณาดำแหน่งหมู่ไฮดรอกซิลบนไครัลคาร์บอน (chiral carbon) ที่อยู่ถัดจากอะตอมคาร์บอนตำแหน่งสุดท้าย กรณีอยู่ด้านขวาจะเป็นโครงสร้างชนิดดี- หรือด้านซ้ายจะเป็นโครงสร้างชนิดแอล- ดัง

โครงสร้างเส้นตรง เรียกว่า ภาพฉายแบบฟิชเชอร์ (Fischer projection) ซึ่งกำหนดโดยอิมิล ฟิชเชอร์ (Emil Fischer) ดังภาพที่ 2.1 โครงสร้างชนิดดี- และแอล-กลีเซอแรลดีไฮด์จะเป็นสเตอริโอไอโซเมอร์กัน และเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า สเตอริโอไอโซเมอริซึม (stereoisomerism) โดยโครงสร้างที่เป็นภาพในกระจกเงาซึ่งกันและกัน เรียกว่า เอแนนทิโอเมอร์ (enantiomer) ซึ่งส่วนใหญ่พบน้ำตาลโครงสร้างแบบชนิดดี- มากกว่าชนิดแอล-



ภาพที่ 2.1 โครงแบบชนิดดี- หรือชนิดแอล- ของกลีเซอแรลดีไฮด์

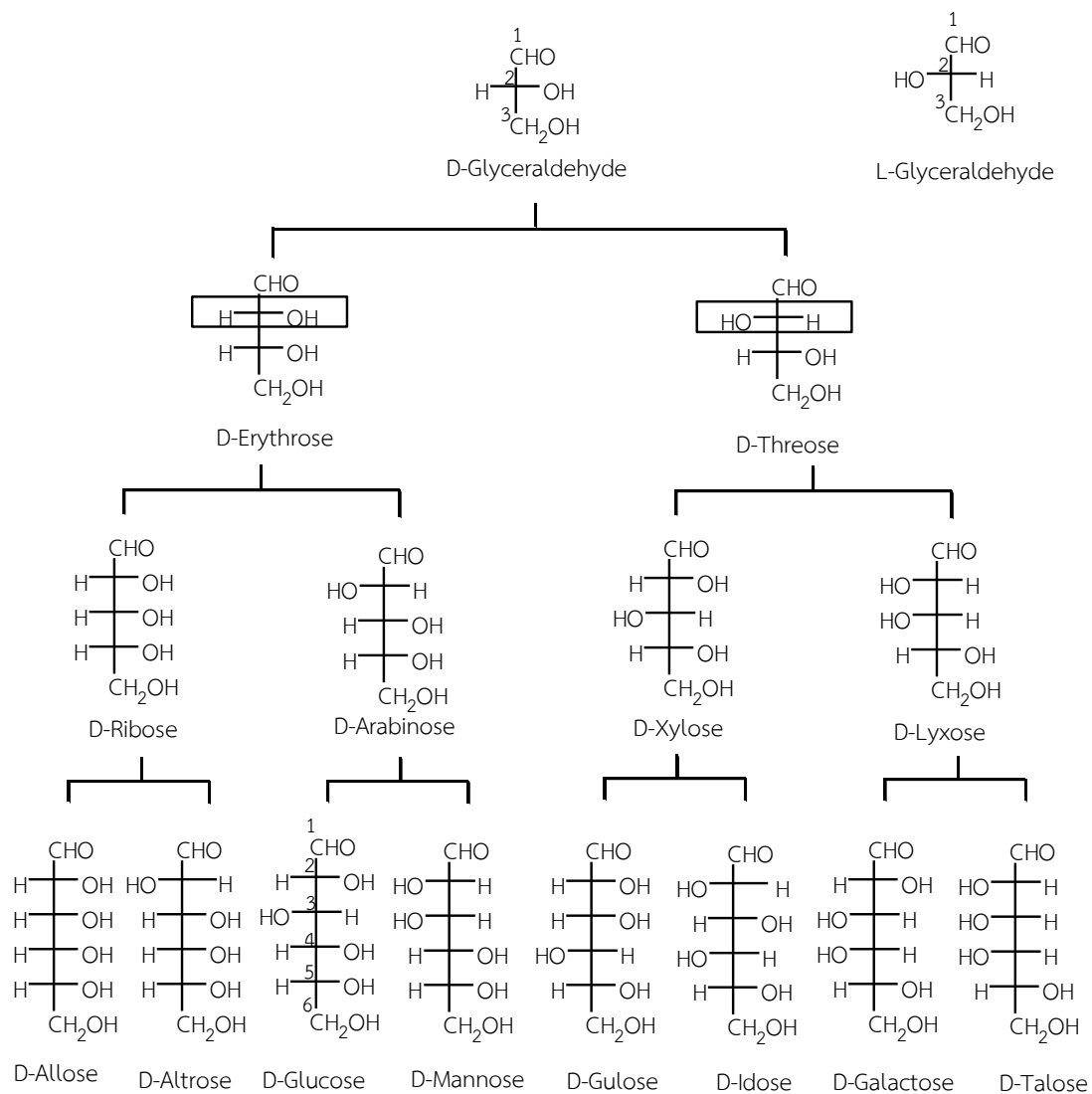
สเตอริโอไอโซเมอร์ของมอนแซ็กคาไรด์ทุกชนิด ซึ่งมีไครัลคาร์บอน กล่าวคือ อะตอมคาร์บอนที่แขนทั้งสองมีอะตอมหรือกลุ่มอะตอมไม่เหมือนกัน โดยมีจำนวนสเตอริโอไอโซเมอร์ เท่ากับ 2^n โดย n คือ จำนวนไครัลคาร์บอน (Bhat, Nagasampagi & Meenakshi, 2009, p. 7.2) ดังนี้

1. น้ำตาลชนิดแอลโดส เช่น พิจารณาภาพฉายแบบฟิชเชอร์ของแอลโดเฮกโซส โดยกำหนดหมู่คาร์บอนิลเป็นตำแหน่งที่ C1 (ภาพที่ 2.2) และมีจำนวนไครัลคาร์บอน เท่ากับ 4 ได้แก่ ตำแหน่งที่ C2 ถึง C5 จึงมีสเตอริโอไอโซเมอร์ เท่ากับ 2^4 (คือ 16 แบบ) และเนื่องจากตำแหน่งที่ C5 จะใช้ระบุน้ำตาลที่มีโครงสร้างชนิดดี- หรือแอล- ดังนั้น แอลโดเฮกโซสมีจำนวนสเตอริโอไอโซเมอร์ทั้งหมด 16 ชนิด ได้แก่ น้ำตาลโครงสร้างแบบชนิดดี- 8 ชนิด และชนิดแอล- 8 ชนิด โดยโครงสร้างชนิดดี- หรือชนิดแอล- เป็นได้ทั้งเอแนนทิโอเมอร์ หรือไดอะสเตอริโอเมอร์ (diastereomer) กัน

ความสัมพันธ์ของโครงสร้างน้ำตาลชนิดแอลโดสทั้งหมดจะเริ่มจากกลีเซอแรลดีไฮด์ ซึ่งมีอะตอมคาร์บอน 3 อะตอม แล้วเพิ่มจำนวนอะตอมคาร์บอนตำแหน่งที่ C2 ถัดจากหมู่คาร์บอนิล โดยให้หมู่ไฮดรอกซิลอยู่ทั้งด้านขวาและซ้าย เช่น เมื่อเพิ่มจำนวนอะตอมคาร์บอนถัดจากแอลดีไฮด์ของดี-กลีเซอแรลดีไฮด์ จะได้ดี-อีริโทรส (D-Erythrose) และดี-เทรโอส (D-Threose) เป็นต้น ดังภาพที่ 2.2

ตัวอย่างแหล่งที่พบน้ำตาลชนิดแอลโดสในธรรมชาติ ดังนี้

- แอล-อะราบินโนส (L-Arabinose) พบในรูปมोनอเมอร์ของกัมtragacanth)
 - ดี-ไรโบส (D-Ribose) เป็นน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบในกรดนิวคลีอิก
 - ดี-กาแล็กโทส (D-Galactose) พบในน้ำนม เป็นมोनอเมอร์ของแล็กโทส (Lactose)
- นอกจากนั้น ยังพบที่สมองและเนื้อเยื่อเซลล์ประสาท

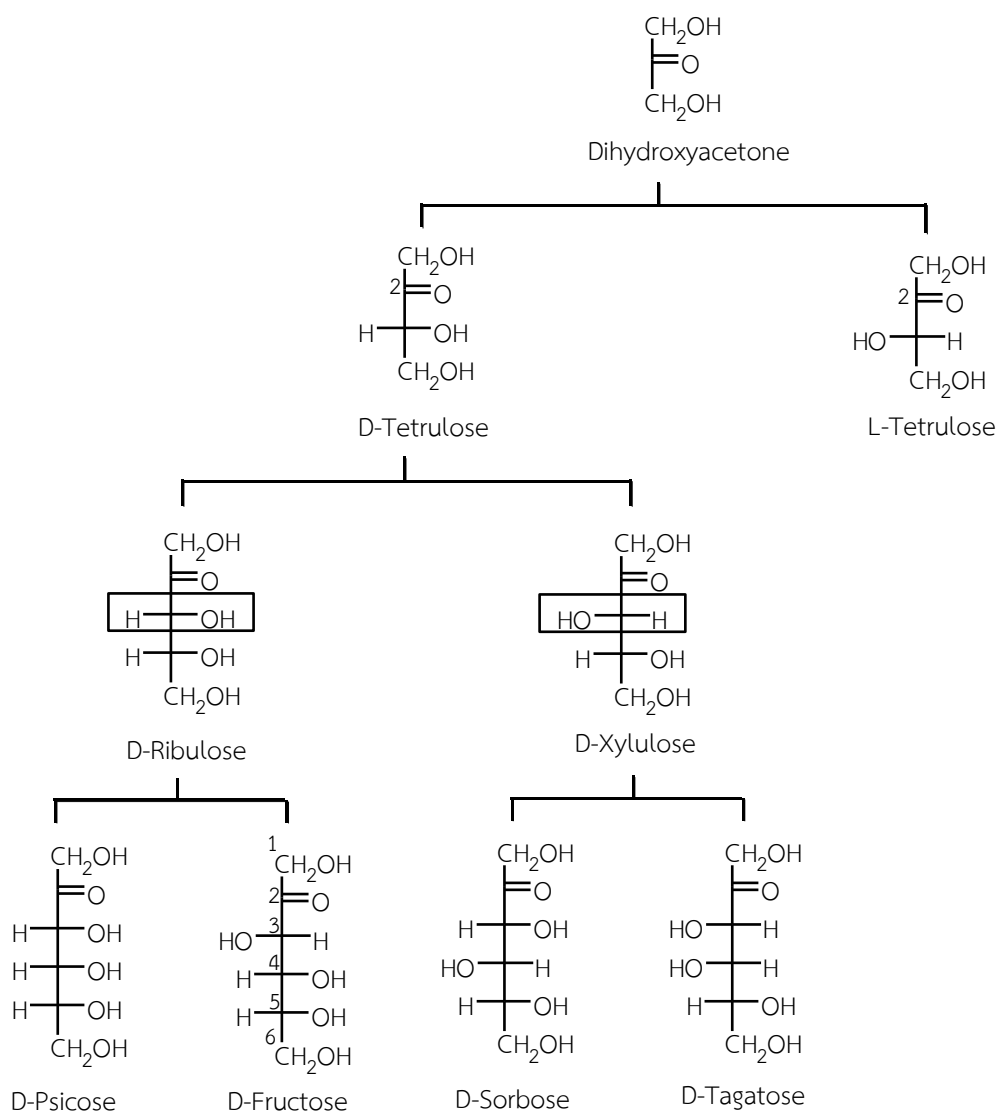


ภาพที่ 2.2 ความสัมพันธ์ของโครงสร้างน้ำตาลชนิดแอลโดสที่มีอะตอมคาร์บอนจำนวน 3-6 อะตอม ที่มา (ดาร์ลีย์ ฉิมภู, 2553, หน้า 81)

2. น้ำตาลชนิดคีโทส ยกเว้นไดไฮดรอกซีแอซีโทน (Dihydroxy acetone) จะมีจำนวนสเตอริโอไอโซเมอร์ เท่ากับ 2^{n-1} โดย n คือ จำนวนไครัลคาร์บอน ตัวอย่างเช่น ฟรุคโทส (Fructose) ที่มีอะตอมคาร์บอน 6 อะตอม และหมู่คาร์บอนิลอยู่ตำแหน่งที่ C2 จะมีจำนวนไครัลคาร์บอน เท่ากับ 3 ได้แก่ ตำแหน่งที่ C3 ถึง C5 จึงมีจำนวนสเตอริโอไอโซเมอร์ เท่ากับ 2^3 (คือ 8 แบบ) ดังนั้น จำนวนสเตอริโอไอโซเมอร์ ทั้งหมดของคีโทเฮกโซสมี 8 ชนิด ได้แก่ โครงแบบชนิดดี- 4 ชนิด และโครงแบบชนิดแอล- 4 ชนิด

ความสัมพันธ์ของโครงสร้างน้ำตาลชนิดคีโทส (ภาพที่ 2.3) โดยเพิ่มจำนวนอะตอมคาร์บอนตรงตำแหน่งที่ C3 ถัดจากหมู่คาร์บอนิล โดยใส่หมู่ไฮดรอกซิลทั้งด้านขวาและด้านซ้าย

เช่นเดียวกับน้ำตาลชนิดแอลโดส เช่น เมื่อเพิ่มจำนวนอะตอมคาร์บอนอยู่ถัดจากหมู่คาร์บอนิลของ ดี-เททรูโลส (D-Tetralose) จะได้ดี-ไซลูโลส (D-Xylulose) และดี-ไรบูลูโลส (D-Ribulose) เป็นต้น



ภาพที่ 2.3 ความสัมพันธ์ของโครงสร้างน้ำตาลชนิดคีโทสที่มีอะตอมคาร์บอนจำนวน 3-6 อะตอม ที่มา (ดัดแปลงจาก ดาววัลย์ ฉิมภู, 2553, หน้า 82)

ตัวอย่างแหล่งน้ำตาลชนิดคีโทสในธรรมชาติ ดังนี้

- ดี-ไรบูลูโลส พบในใบของผลบัต
- ดี-ฟรุกโทสพบอิสระ แหล่งพบในผลไม้หลายชนิดและน้ำผึ้ง รวมทั้งเป็นมอนอเมอร์

(monomer) ของซูโครส

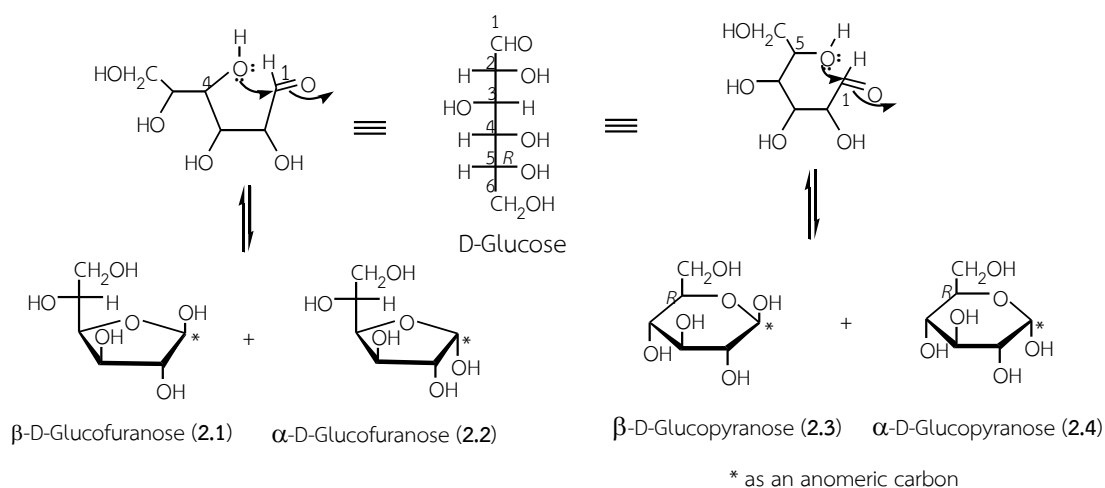
สำหรับมโนแซ็กคาไรด์บางชนิดจะมีโครงสร้างที่ต่างกันเฉพาะจุดไครัลคาร์บอนเพียงตำแหน่งเดียว เรียกว่า เอพิเมอร์ (epimer) เช่น ดี-กลูโคส และดี-กาแล็กโทส โครงสร้างทั้งสองต่างกันที่ไครัลคาร์บอนตำแหน่งที่ C4 เรียกว่า 4-เอพิเมอร์ หรือดี-กลูโคสและดี-แมนโนส (D-Mannose) ต่างกันที่เฉพาะตำแหน่งที่ C2 เรียกว่า 2-เอพิเมอร์ ดังภาพที่ 2.2 เป็นต้น

3. การปิดวงมโนแซ็กคาไรด์

โครงสร้างโซ่เปิดหรือภาพฉายแบบฟิชเชอร์ของมโนแซ็กคาไรด์ที่มีอะตอมคาร์บอนมากกว่า 4 อะตอมขึ้นไป จะสามารถเกิดการเติมภายในโมเลกุลเดียวกัน (intramolecular addition) ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลและหมู่คาร์บอนิลของแอลดีไฮด์และคีโตน เกิดวงเฮมิแอซีทัล (cyclic hemiacetal) หรือวงเฮมิกีทัล (cyclic hemiketal) ตามลำดับ ที่มีวงขนาด 5 เหลี่ยม ของวงฟูแรน (furan ring) เรียกน้ำตาลว่า ฟูแรโนส (furanose) หรือวงขนาด 6 เหลี่ยม ของวงไพแรน (pyran ring) เรียกน้ำตาลว่า ไพแรโนส (pyranose) สูตรโครงสร้างของน้ำตาลโซ่ปิดเรียกว่า ภาพฉายแบบฮาเวอร์ธ (Haworth projection) และตำแหน่งที่ปิดวง เรียกว่า คาร์บอนแอนอเมอร์ (anomeric carbon) ซึ่งสามารถปิดวงได้ 2 แบบ ได้แก่ การปิดวงแบบแอลฟา- (α -form) และแบบบีตา- (β -form) จึงได้สเตอริโอไอโซเมอร์ 2 แบบ ได้แก่ แอนอเมอร์ชนิดแอลฟา- และชนิดบีตา- ตามลำดับ ซึ่งแอนอเมอร์ทั้งสองชนิดนี้ขึ้นอยู่กับโครงแบบชนิดดี- หรือชนิดแอล- ของมโนแซ็กคาไรด์

3.1 การปิดวงน้ำตาลชนิดแอลโดส ที่มีจำนวนอะตอมคาร์บอนเท่ากับ 5 อะตอมขึ้นไป ซึ่งการปิดวงจะขึ้นอยู่กับโครงแบบชนิดดี- หรือชนิดแอล- ดังนี้

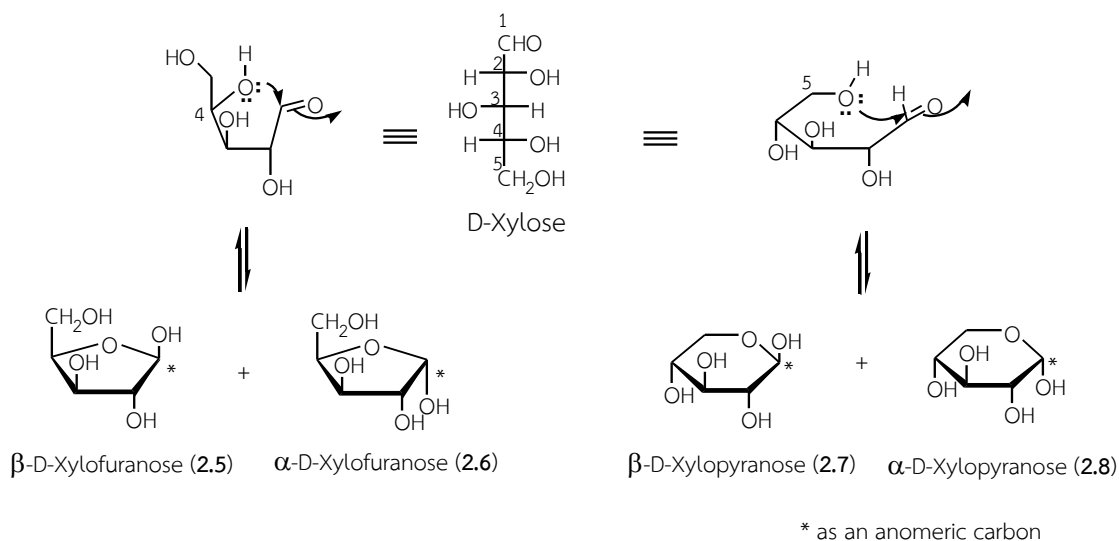
3.1.1 น้ำตาลชนิดดี-แอลโดส กรณีดี-เฮกโซส เช่น การปิดวงดี-กลูโคส (ภาพที่ 2.4) อิเล็กตรอนคูโดดเดี่ยวของหมู่ไฮดรอกซิลตำแหน่งที่ C4 ทำหน้าที่เป็นนิวคลีโอไฟล์ สามารถเติมเข้าที่หมู่คาร์บอนิลหรือตำแหน่งที่ C1 ของแอลดีไฮด์ ซึ่งเป็นคาร์บอนแอนอเมอร์ เกิดเป็นวงเฮมิแอซีทัลขนาด 5 เหลี่ยม ของบีตา-ดี-กลูโคฟูแรโนส (β -D-Glucofuranose, **2.1**) และแอลฟา-ดี-กลูโคฟูแรโนส (α -D-Glucofuranose, **2.2**) กรณีหมู่ไฮดรอกซิลตำแหน่งที่ C5 เข้าทำปฏิกิริยาที่หมู่คาร์บอนิล เกิดเป็นวงขนาด 6 เหลี่ยม ของบีตา-ดี-กลูโคไพแรโนส (β -D-Glucopyranose, **2.3**) และแอลฟา-ดี-กลูโคไพแรโนส (α -D-Glucopyranose, **2.3**) อย่างไรก็ตาม ในธรรมชาติการปิดวงดี-กลูโคส ซึ่งเป็นน้ำตาลชนิดแอลโดเฮกโซส ส่วนมากจะปิดวงได้น้ำตาลชนิดไพแรโนส เนื่องจากวงขนาด 6 เหลี่ยม จะเสถียรภาพกว่าวงขนาด 5 เหลี่ยม



ภาพที่ 2.4 กลไกการปิดวงดี-กลูโคส

ที่มา (ดัดแปลงจาก Bhat, Nagasampagi & Meenakshi, 2009, p. 7.12)

สำหรับการปิดวงน้ำตาลชนิดดี-แอลโดสที่มีอะตอมคาร์บอน 5 อะตอม เช่น ดี-ไซโลส (D-Xylose) พบว่าหมู่ไฮดรอกซิลตำแหน่งที่ C4 จะเติมเข้ากับแอลดีไฮด์ ได้ฟูแรโนสทั้งชนิด บีตา- (2.5) และแอลฟา- (2.6) แต่ถ้าหมู่ไฮดรอกซิลตำแหน่งที่ C5 เกิดปฏิกิริยาการเติม จะได้ไพแรโนส (2.7) และ (2.8) ดังภาพที่ 2.5

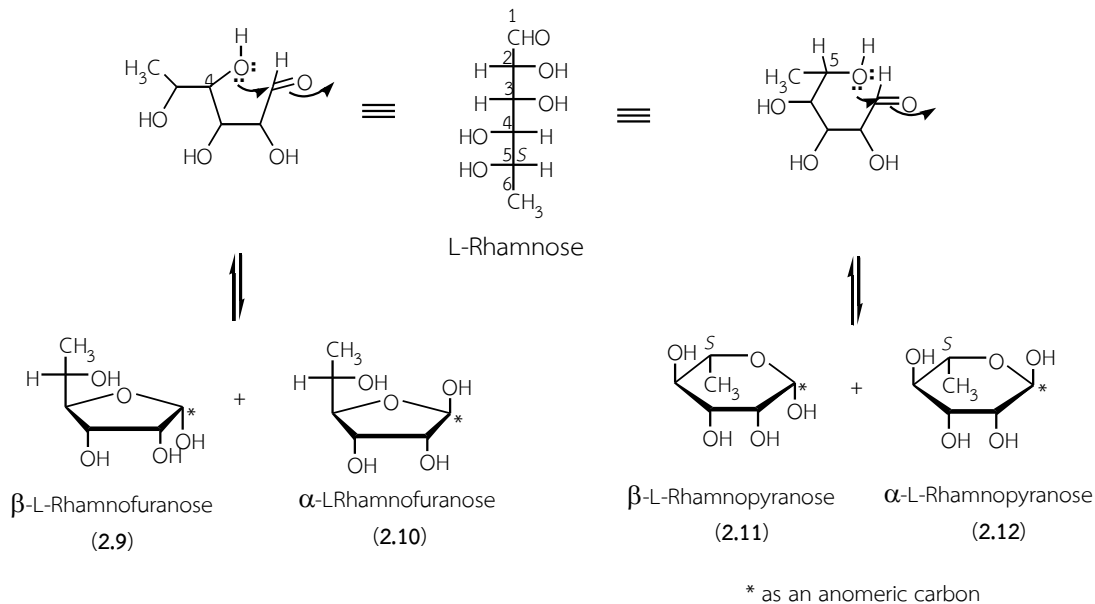


ภาพที่ 2.5 กลไกการปิดวงดี-ไซโลส

ที่มา (ดัดแปลงจาก ดาววัลย์ ฉิมภู, 2553, หน้า 85)

3.1.2 น้ำตาลชนิดแอล-แอลโดส กรณีแอล-เฮกโซส ตัวอย่างเช่น แอล-แรมนโนส (L-Rhamnose) สามารถเกิดการปิดวงได้ฟูแรโนส (2.9) และ (2.10) และไพแรโนส (2.11) และ (2.12)

เช่นเดียวกับน้ำตาลโครงแบบชนิดดี- แต่หมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนแอนอเมอร์ของแอนอเมอร์ชนิดแอลฟา- และชนิดบีตา- จะตรงข้ามกัน ดังภาพที่ 2.6



ภาพที่ 2.6 กลไกการปิดวงของแอล-แรมนโนส

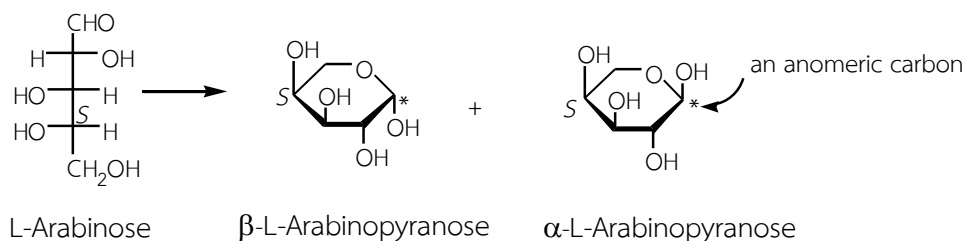
ที่มา (ดัดแปลงจาก ตริเพธร กาญจนภูมิ, 2552, หน้า 44)

ดังนั้น การระบุชนิดแอนอเมอร์ทั้งไพแรโนสและฟูแรโนสจากการปิดวงมอโนแซ็กคาไรด์ที่มีภาพฉายแบบฟิชเชอร์ คือ การปิดวงน้ำตาลโครงแบบชนิดดี- ถ้าหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ด้านบนของวง เรียกว่า แอนอเมอร์ชนิดบีตา- และกรณีอยู่ด้านล่างของวง เรียกว่า แอนอเมอร์ชนิดแอลฟา- ส่วนน้ำตาลโครงแบบชนิดแอล- จะเรียกชนิดแอนอเมอร์ตรงข้ามกับน้ำตาลโครงแบบชนิดดี-

ข้อสังเกต ถ้าระบุชนิดแอนอเมอร์ของมอโนแซ็กคาไรด์จากภาพฉายแบบฮาเวอร์ธสามารถพิจารณาจากทิศทางการหมุนของคาร์บอนแอนอเมอร์ ดังนี้

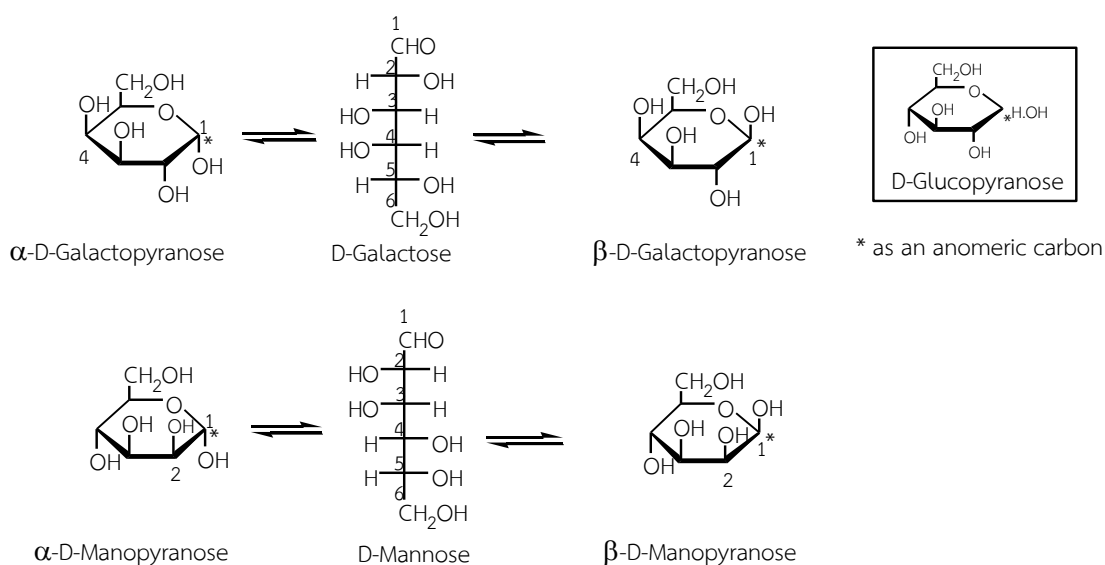
อะตอมคาร์บอนก่อนตำแหน่งสุดท้ายของมอโนแซ็กคาไรด์เป็นโครงแบบชนิดดี- จะมีทิศทางการหมุนทวนเข็มนาฬิกา (*R*-configuration) เช่น การปิดวงได้เป็นดี-กลูโคไพแรโนส จะเกิดแอนอเมอร์ชนิดบีตา- (2.3) โดยหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ด้านบนของวง และแอนอเมอร์ชนิดแอลฟา- (2.4) หมู่ไฮดรอกซิลอยู่ด้านล่างของวง (ภาพที่ 2.4) ส่วนน้ำตาลโครงแบบชนิดแอล- อะตอมคาร์บอนก่อนตำแหน่งสุดท้ายจะมีทิศทางการหมุนตามเข็มนาฬิกา (*S*-configuration) เมื่อปิดวง จะเกิดแอนอเมอร์ชนิดบีตา- หมู่ไฮดรอกซิลอยู่ด้านล่างของวง และแอนอเมอร์ชนิดแอลฟา- หมู่ไฮดรอกซิล อยู่ด้านบนของวง เช่น แอล-แรมนโนไพแรโนส ดังภาพที่ 2.6 แต่ถ้าหมู่ไฮดรอกซิลที่เกิดการปิดวงอยู่บนอะไครล

คาร์บอน (achiral carbon) ให้พิจารณาทิศทางการหมุนของอะตอมคาร์บอนถัดมา ตัวอย่างเช่น แอล-อะราบินโนไฟแรโนส (L-Arabinopyranose) ดังภาพที่ 2.7 เป็นต้น



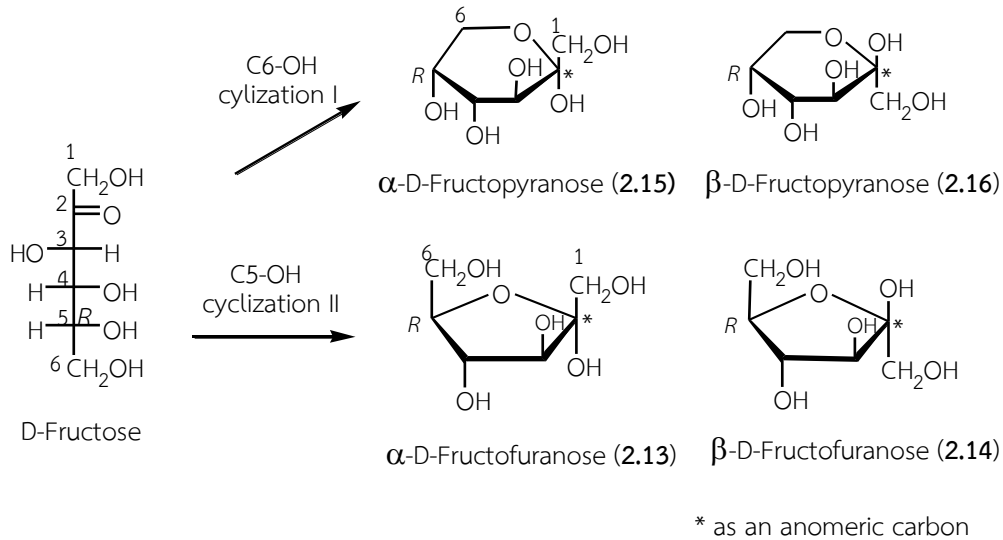
ภาพที่ 2.7 ชนิดแอนอเมอร์ของแอล-อะราบินโนไฟแรโนสกับทิศทางการหมุนของอะตอมคาร์บอนที่มา (ดัดแปลงจาก ตรีเพชร กาญจนภูมิ, 2552, หน้า 47)

ในทำนองเดียวกัน สามารถเขียนภาพฉายแบบฮาเวอร์ธของน้ำตาลชนิดแอลโดสอื่นได้ง่าย โดยพิจารณาจากสเตอริโอเคมี เช่น ดี-กาแล็กโทส เป็น 4-เอพิเมอร์ของดี-กลูโคส ดังนั้น ภาพฉายแบบฮาเวอร์ธของดี-กาแล็กโทส หรือดี-กาแล็กโทไฟแรโนส (D-Galactopyranose) จะเหมือนกับ ดี-กลูโคไฟแรโนส ยกเว้นตำแหน่งที่ C4 ส่วนดี-แมนโนส สูตรโครงสร้างเป็น 2-เอพิเมอร์ของดี-กลูโคส มีภาพฉายแบบฮาเวอร์ธแตกต่างกับดี-กลูโคสเฉพาะตำแหน่งที่ C2 เท่านั้น ดังภาพที่ 2.8



ภาพที่ 2.8 ภาพฉายแบบฮาเวอร์ธของดี-กาแล็กโทไฟแรโนส และดี-แมนโนไฟแรโนส

3.2 การปิดวงน้ำตาลชนิดคีโทส เช่น ดี-ฟรุคโทส ปิดวงได้ทั้งฟูแรโนส (2.13) และ (2.14) และไพแรโนส (2.15) และ (2.16) โดยหมู่ไฮดรอกซิลตำแหน่งที่ C5 และ C6 เกิดปฏิกิริยาการเติมเข้าที่หมู่คาร์บอนิลตำแหน่งที่ C2 ตามลำดับ ดังภาพที่ 2.9

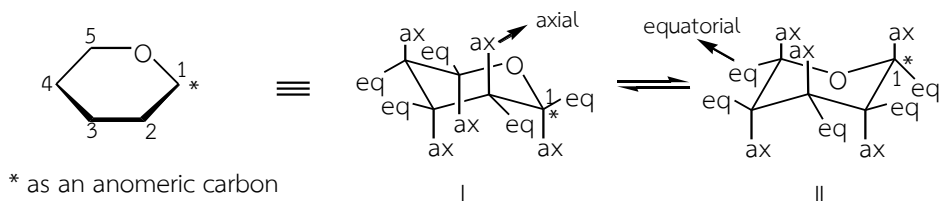


ภาพที่ 2.9 กลไกการปิดวงดี-ฟรุคโทส

ที่มา (ดัดแปลงจาก ดาวัลย์ นิมภู, 2553, หน้า 85; McMurry & Simanek, 2007, p. 450)

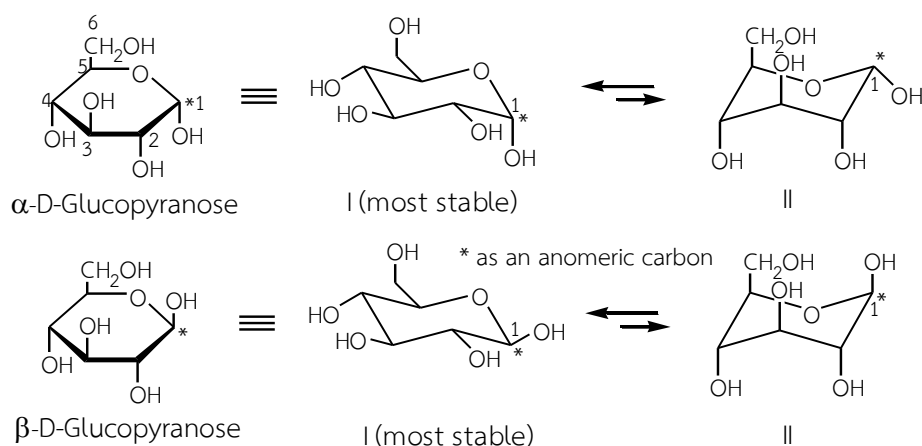
4. โครงรูปเก้าอี้ของมโนแซ็กคาไรด์

การปิดวงมโนแซ็กคาไรด์ได้ไพแรโนส ซึ่งเป็นวงขนาด 6 เหลี่ยม เมื่อเขียนโครงสร้างเป็นโครงรูปเก้าอี้ (chair conformation) สามารถจัดเรียงตัวได้ 2 ลักษณะ คือ แบบ I และแบบ II ดังภาพที่ 2.10 ซึ่งเป็นสมดุกัน กำหนดตำแหน่งแต่ละอะตอมคาร์บอนเป็นแอกซ์เซียล (axial position, ax) และตำแหน่งอีควอทอเรียล (equatorial position, eq) (ดาวัลย์ นิมภู, 2553, หน้า 85) โดยตำแหน่งแอกซ์เซียลของโครงรูปเก้าอี้แบบ I จะเปลี่ยนเป็นตำแหน่งอีควอทอเรียลของโครงรูปเก้าอี้แบบ II โดยคาร์บอนแอนอเมอร์ตำแหน่งที่ C1 จะเป็นตัวกำหนดแอนอเมอร์ชนิดบีตา- หรือชนิดแอลฟา-



ภาพที่ 2.10 โครงรูปเก้าอี้ของไพแรโนส

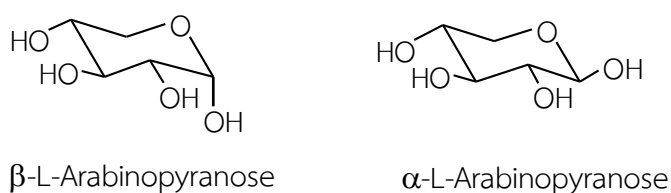
โครงสร้างเก้าอี้ของแอลฟา- และบีตา-ดี-กลูโคไพแรนอส ดังภาพที่ 2.11 หมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนแอนอเมอร์อยู่ตำแหน่งแอกซ์เซียล จะเป็นแอนอเมอร์ชนิดแอลฟา- ส่วนหมู่ไฮดรอกซิลอยู่ตำแหน่งอีควอทอเรียล จะเป็นแอนอเมอร์ชนิดบีตา- โดยโครงสร้างเก้าอี้แบบ I จะมีความเสถียรมากกว่าแบบ II เนื่องจากหมู่ไฮดรอกซิลตำแหน่งที่ C2 ถึง C5 ในตำแหน่งอีควอทอเรียลเกะกะน้อยกว่าตำแหน่งแอกซ์เซียล



ภาพที่ 2.11 โครงสร้างเก้าอี้ของแอลฟา- และบีตา-ดี-กลูโคไพแรนอส

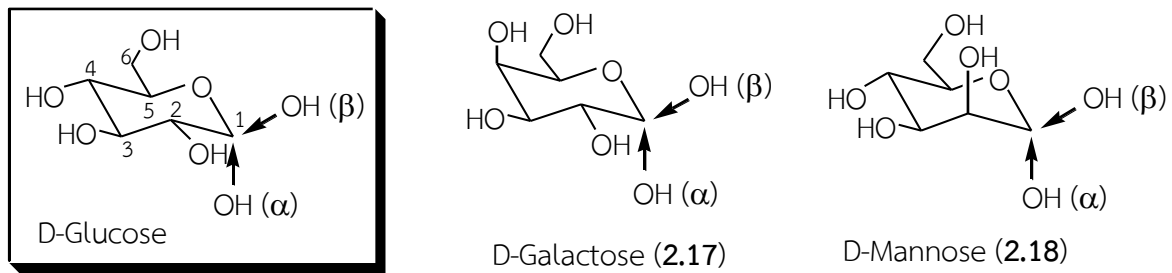
ทีมา (ตรีเพชร กาญจนภูมิ, 2552, หน้า 48)

สำหรับโครงสร้างเก้าอี้ของน้ำตาลโครงสร้างชนิดแอล- ได้แก่ แอล-อะราบินโนไพแรนอส ดังภาพที่ 2.12



ภาพที่ 2.12 โครงสร้างแบบรูปเก้าอี้ของแอลฟา- และบีตา-อะราบินโนไพแรนอส

สูตรโครงสร้างของดี-กาแล็กโทส (2.17) และดี-แมนโนส (2.18) เป็น 4- และ 2- เอพิเมอร์ของดี-กลูโคส ตามลำดับ จึงสามารถเขียนโครงสร้างเก้าอี้ของน้ำตาลทั้งสอง โดยพิจารณาจากโครงสร้างเก้าอี้ของดี-กลูโคส ดังภาพที่ 2.13



ภาพที่ 2.13 โครงรูปเก้าอี้ของดี-กาแล็กโทสและดี-แมนโนส

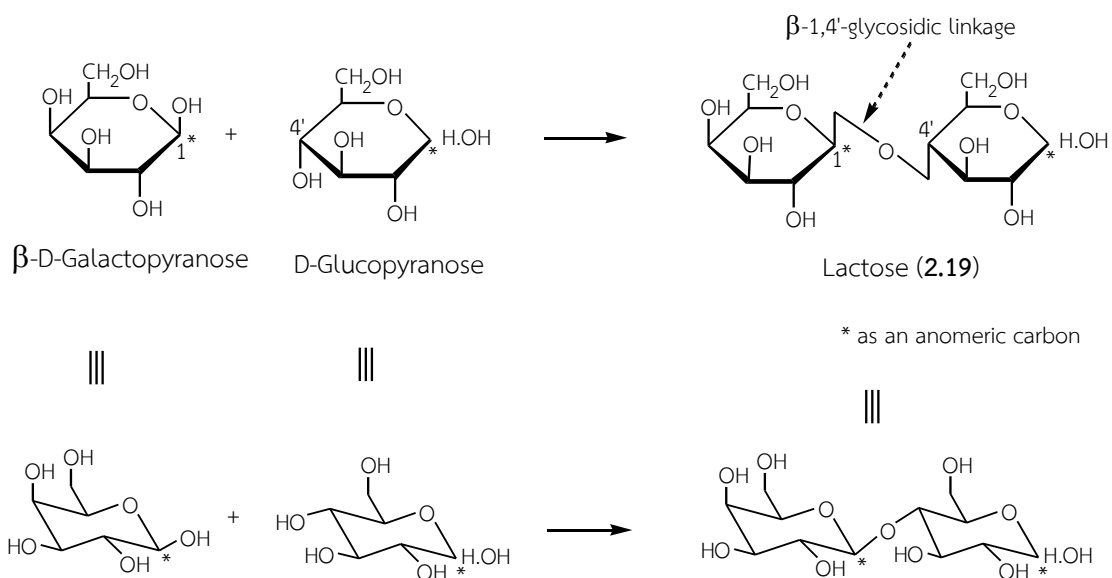
ที่มา (ดัดแปลงจาก ตริเพชร กาญจนภูมิ, 2552, หน้า 49)

ไดแซ็กคาไรด์

ไดแซ็กคาไรด์เกิดจากมโนแซ็กคาไรด์ 2 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะอีเธอร์ (ether bond) เรียกว่า พันธะไกลโคซิดิก ไดแซ็กคาไรด์ที่พบบ่อย ดังนี้

1. แล็กโทส

แล็กโทส (2.19) พบเฉพาะในน้ำนมประมาณร้อยละ 5 เกิดจากหมู่ไฮดรอกซิลตำแหน่งที่ C1 ของบีตา-ดี-กาแล็กโทส เชื่อมพันธะกันตรงตำแหน่งที่ C4' ของดี-กลูโคสที่มีแอนอเมอร์ชนิดใดก็ได้ ด้วยพันธะไกลโคซิดิกชนิดบีตา-1,4'- (β -1,4'-glycosidic linkage) จะได้แล็กโทส ดังภาพที่ 2.14

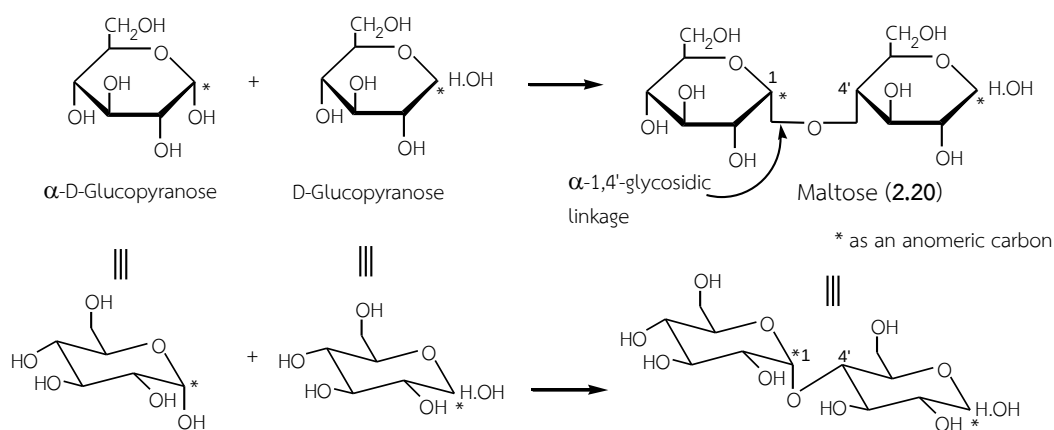


ภาพที่ 2.14 แล็กโทสเกิดการเชื่อมต่อดด้วยพันธะไกลโคซิดิกชนิดบีตา-1,4'-

ที่มา (ดัดแปลงจาก ดาวัลย์ ฉิมภู, 2553, หน้า 93)

2. มอลโทส

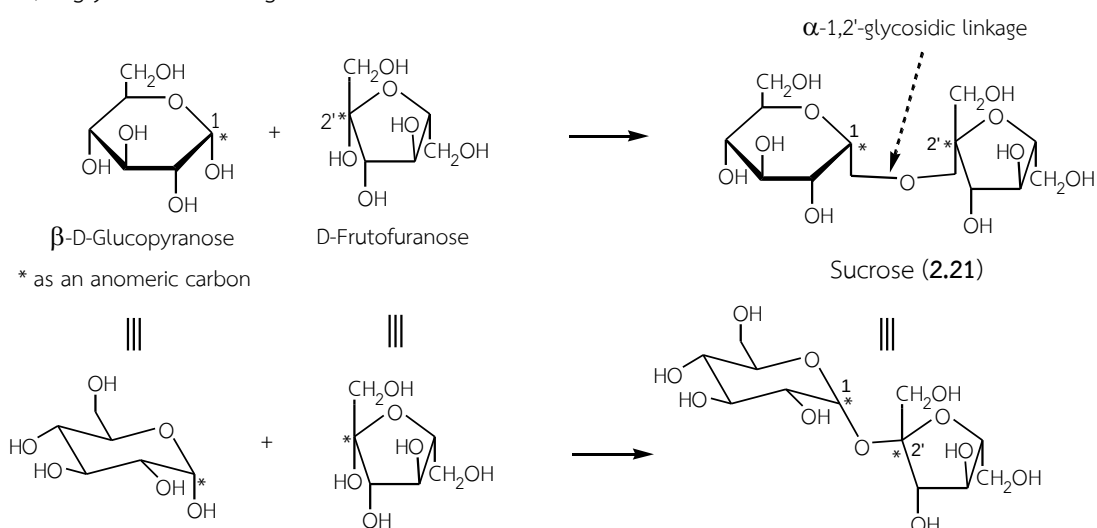
มอลโทส (2.20) เกิดจากดี-กลูโคส 2 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกชนิดแอลฟา-1,4'- (α -1,4'-glycosidic linkage) โดยกลูโคสหน่วยที่สองส่วนใหญ่พบแอนอเมอร์ชนิดแอลฟา-มากกว่าชนิดบีตา- ดังภาพที่ 2.15 มอลโทสได้จากการย่อยแป้งและเซลลูโลส โดยอะไมเลส (Amylase)



ภาพที่ 2.15 มอลโทสเกิดการเชื่อมต่อดัวยพันธะไกลโคซิดิกชนิดแอลฟา-1,4'-
 ที่มา (ดัดแปลงจาก ดาววัลย์ ฉิมภู, 2553, หน้า 92)

3. ซูโครส

ซูโครส (2.21) หรือชื่อเรียกทั่วไป คือ น้ำตาลทราย (sugar cane) เป็นไดแซ็กคาไรด์ที่ได้จากอ้อย เกิดจากแอลฟา-ดี-กลูโคสเชื่อมกับบีตา-ดี-ฟรุกโทสด้วยพันธะไกลโคซิดิกชนิดแอลฟา-1,2'- (α -1,2'-glycosidic linkage) ดังภาพที่ 2.16

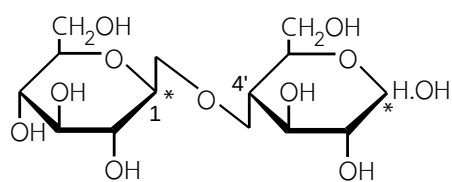


ภาพที่ 2.16 ซูโครสเกิดการเชื่อมต่อดัวยพันธะไกลโคซิดิกชนิดแอลฟา-1,2'-
 ที่มา (ดัดแปลงจาก Bhat, Nagasampagi & Meenakshi, 2009, p. 7.34)

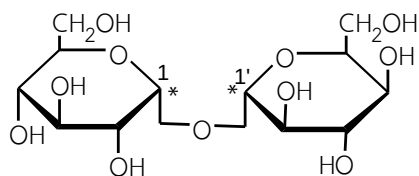
ตัวอย่างไดแซ็กคาไรด์ชนิดอื่น ดังตารางที่ 2.2 และภาพที่ 2.17

ตารางที่ 2.2 มอนอเมอร์และชนิดพันธะไกลโคซิดิกของไดแซ็กคาไรด์ที่สำคัญในธรรมชาติ

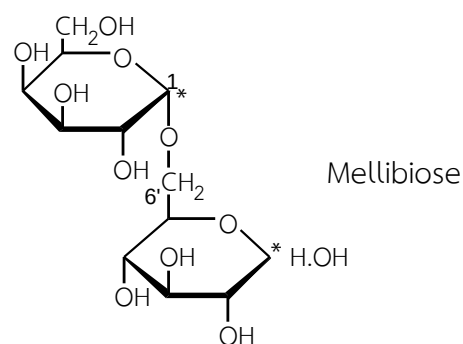
ไดแซ็กคาไรด์	มอนอเมอร์	ชนิดพันธะไกลโคซิดิก
แล็กโทส	กาแล็กโทสและกลูโคส	บีตา-1,4'-
มอลโทส	กลูโคส 2 หน่วย	แอลฟา-1,4'-
ซูโครส	กลูโคสและฟรุ็กโทส	แอลฟา-1,2'-
เซลโลบิโอส (Cellobiose)	กลูโคส 2 หน่วย	บีตา-1,4'-
เมลลิบิโอส (Mellibiose)	กาแล็กโทสและกลูโคส	แอลฟา-1,6'-
เทรฮาโลส (Trehalose)	กลูโคส 2 หน่วย	แอลฟา-1,1'-



Cellobiose



Trehalose



Mellibiose

* as an anomeric carbon

ภาพที่ 2.17 โครงสร้างเซลโลบิโอส เมลลิบิโอส และเทรฮาโลส

ที่มา (ดัดแปลงจาก สมพงษ์ จันทรโพธิ์ศรี, 2552, หน้า 222; Bhat, Nagasampagi & Meenakshi, 2009, p. 7.35)

พอลิแซ็กคาไรด์

มอนแซ็กคาไรด์ตั้งแต่ 2 หน่วยขึ้นไป ต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิก เรียกว่า พอลิแซ็กคาไรด์ หรือมอนแซ็กคาไรด์ 2-9 หน่วย ต่อกัน เรียกว่า ออลิโกแซ็กคาไรด์ (oligosaccharide) และมากกว่า 10 หน่วย เรียกว่า พอลิแซ็กคาไรด์ กรณีมอนอเมอร์เป็นมอนแซ็กคาไรด์ชนิดเดียวกัน เรียกว่า โฮโมพอลิแซ็กคาไรด์ (homopolysaccharide) และถ้ามีมอนอเมอร์เป็นมอนแซ็กคาไรด์มากกว่าหนึ่งชนิด เรียกว่า เฮเทอโรพอลิแซ็กคาไรด์ (heteropolysaccharide) ตัวอย่างที่สำคัญ ดังนี้

1. แป้ง

แป้ง (starch) เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่สังเคราะห์ได้จากพืชหลายชนิด พบได้ในส่วนต่าง ๆ ได้แก่ ราก ใบ และผล โดยเฉพาะเมล็ด เช่น ข้าว ข้าวโพด ข้าวสาลี ข้าวโอ๊ต และมันฝรั่ง เป็นต้น นอกจากนี้ ยังพบในสัตว์และมนุษย์อีกด้วย แป้งทำหน้าที่เป็นแหล่งสะสมอาหารและให้พลังงาน โครงสร้างประกอบด้วยพอลิแซ็กคาไรด์ 2 หน่วย เชื่อมต่อพันธะกัน ได้แก่ อะไมโลส (Amylose, 2.22) พบปริมาณร้อยละ 15-20 และอะไมโลเพกทิน (Amylopectin, 2.23) ร้อยละ 80-85 (Bhat, Nagasampagi & Meenakshi, 2009, p. 7.41)

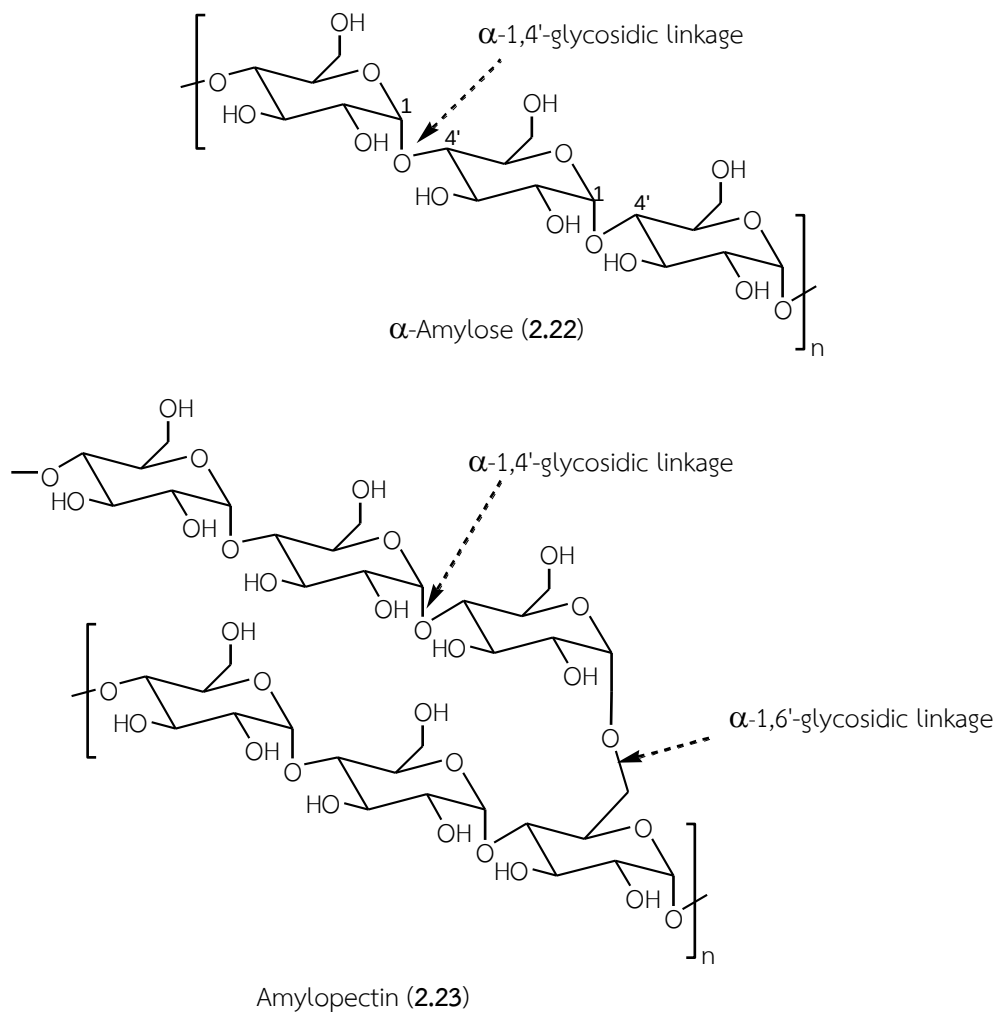
โครงสร้างอะไมโลสหรือบางครั้งเรียกว่า แอลฟา-อะไมโลส เกิดจากแอลฟา-ดี-กลูโคส จำนวน 60-300 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกชนิดแอลฟา-1,4'- ดังภาพที่ 2.18 เกิดเป็นโซ่ตรง (สมพงษ์ จันทรโพธิ์ศรี, 2552, หน้า 225) ส่วนโครงสร้างอะไมโลเพกทินเกิดจากแอลฟา-ดี-กลูโคสจำนวน 300-6,000 หน่วย (ดาวัลย์ ฉิมภู, 2553, หน้า 95) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกชนิดแอลฟา-1,4'- เช่นเดียวกัน แต่ทุก 23-40 หน่วยของกลูโคส จะเกิดการเชื่อมด้วยพันธะไกลโคซิดิกชนิดแอลฟา-1,6'- (α -1,6'-glycosidic linkage) ได้โครงสร้างโซ่กิ่ง ดังภาพที่ 2.20

คุณสมบัติของแป้ง (ดาวัลย์ ฉิมภู, 2553, หน้า 95-96) ดังนี้

1) การละลายน้ำ เมื่อนำแป้งไปต้มในน้ำร้อน แป้งจะแยกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ละลายน้ำ ร้อยละ 10-20 ของอะไมโลส และส่วนที่ไม่ละลายน้ำร้อยละ 80-90 ของอะไมโลเพกทิน กระจายอยู่ในลักษณะของไมเซลล์ (micelle)

2) การทดสอบด้วยไอโอดีน (iodine test) เฉพาะอะไมโลสในแป้งเท่านั้น จะทำปฏิกิริยากับไอโอดีน โดยอะไมโลสจะบิดเป็นเกลียว แล้วเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกับไอโอดีน ได้สารละลายสีน้ำเงินหรือสีน้ำเงินเข้ม ซึ่งความเข้มของสีจะขึ้นอยู่กับการปริมาณอะไมโลส กล่าวคือ แป้งที่มีองค์ประกอบของอะไมโลสน้อยหรือไม่มีเลย จะเกิดสีแดงกับไอโอดีน

3) การแยกสลายด้วยอะไมเลส ซึ่งจะตัดพันธะไกลโคซิดิกเฉพาะอะไมโลสในแป้งเท่านั้น ได้เป็นโมเลกุลขนาดเล็กลง ดังนี้ 1) แอลฟา-อะไมเลส (α -Amylase) จะตัดพันธะไกลโคซิดิกชนิดแอลฟา-1,4'- แบบสุ่ม เกิดเป็นกลูโคส มอลโทส และเดกซ์ทริน (Dextrin) เป็นต้น แหล่งของแอลฟา-อะไมเลสพบในระบบการย่อยอาหารของมนุษย์และสัตว์ ได้แก่ ตับอ่อน และน้ำลาย 2) บีตา-อะไมเลส (β -Amylase) ทำหน้าที่ตัดพันธะไกลโคซิดิกชนิดแอลฟา-1,4'- โดยเฉพาะส่วนปลายที่ไม่รีดิวซ์ (non reducing end) เข้ามาที่ละ 2 หน่วยของกลูโคส ได้มอลโทส สำหรับบีตา-อะไมเลสไม่พบในน้ำย่อยของมนุษย์ แต่พบในราและแบคทีเรีย ได้แก่ บาซิลลัสเซเรียส (*Bacillus cereus*) และในเมล็ดธัญพืช เช่น ข้าวสาลี ข้าวบาร์เลย์ และข้าวมอลต์ เป็นต้น



ภาพที่ 2.18 โครงสร้างแอลฟา-อะไมโลสและอะไมโลเพกทิน

ที่มา (ดัดแปลงจาก Bhat, Nagasampagi & Meenakshi, 2009, p. 7.42)

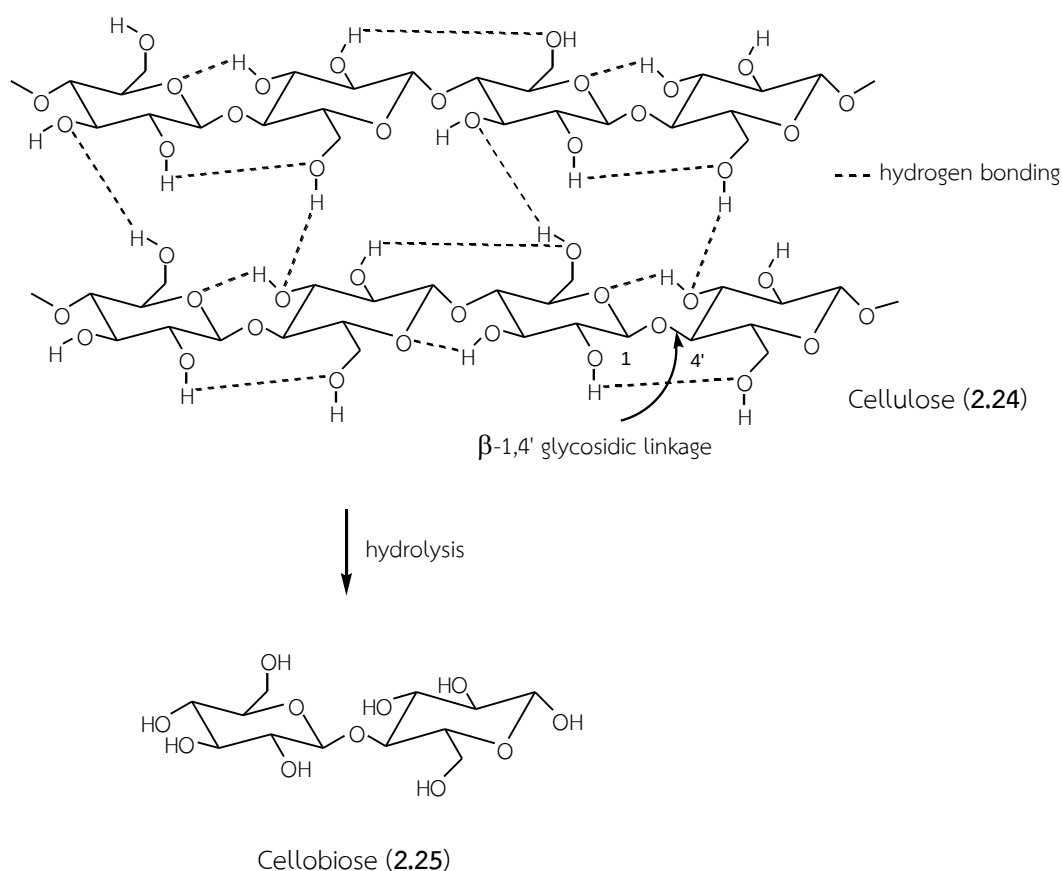
2. ไกลโคเจน

โครงสร้างไกลโคเจน (Glycogen) คล้ายกับอะไมโลเพกทิน กล่าวคือ แอลฟา-ดี-กลูโคส เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกชนิดแอลฟา-1,4'- แต่ทุก 12-18 หน่วยของกลูโคส จะเชื่อมด้วย พันธะไกลโคซิดิกชนิดแอลฟา-1,6'- (สมพงศ์ จันทรีโพธิ์ศรี, 2552, หน้า 226) ทำให้โครงสร้างมีโซ่กิ่งเป็น ระยะมากกว่าอะไมโลเพกทิน แหล่งที่พบ ได้แก่ เนื้อเยื่อของสัตว์ โดยเฉพาะในตับและกล้ามเนื้อ เมื่อ ไกลโคเจนถูกแยกสลายด้วยอะไมเลส ได้กลูโคส มอลโทส และเดกซ์ทริน ทำหน้าที่ช่วยปรับระดับ น้ำตาลในเลือด ทำงานร่วมกับฮอร์โมนกลูคากอน (Glucagon) อินซูลิน (Insulin) และกลูโคคอร์ติคอยด์ (Glucocorticoid) แต่ถ้าร่างกายมีปริมาณกลูโคสเกินความต้องการ กลูโคสจะเปลี่ยนเป็นไกลโคเจน และเมื่อร่างกายต้องการพลังงาน ก็จะสลายให้กลูโคสในเลือด ส่วนคุณสมบัติเมื่อทดสอบด้วยไอโอดีน จะได้สีม่วงแดง (ดาวัลย์ ฉิมภู, 2553, หน้า 96)

3. เซลลูโลส

เซลลูโลส (2.24) เป็นพอลิแซ็กคาไรด์พบเฉพาะที่ผนังเซลล์พืชและแบคทีเรียเท่านั้น โดยทำหน้าที่เป็นโครงสร้าง (structure) โครงสร้างเซลลูโลสต่างจากแป้งตรงไม่มีโซ่กิ่ง เกิดจากปีตา-ดี-กลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกชนิดปีตา-1,4'-(Bhat, Nagasampagi & Meenakshi, 2009, p. 7.40) ในแต่ละโมเลกุลของเซลลูโลสสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจน (hydrogen bonding) ระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลได้ ดังภาพที่ 2.19 ทำให้เกิดการรวมกันเป็นมัด เรียกว่า ไมโครไฟบริล (microfibril) ซึ่งทนต่อแรงดึงได้สูง

การวิเคราะห์หาปริมาณเซลลูโลสอาศัยวิธีของอัปเดแกรฟฟ์ (Updegraff) โดยนำเส้นใยมาละลายในกรดผสมระหว่างกรดแอซติก (Acetic acid) และกรดไนตริก (Nitric acid) วัตถุประสงค์เพื่อกำจัดลิกนิน (lignin) เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) และไซโลแซน (Xylosan) จากนั้นจึงทำปฏิกิริยาต่อกับแอนทราเซน (anthrone) ในกรดซัลฟิวริก (Sulfuric acid) เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีสี แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 635 นาโนเมตร ด้วยเครื่องยูวี-วิซิเบิลสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Updegraff, 1969, pp. 420-424)



ภาพที่ 2.19 พันธะไฮโดรเจนภายในและระหว่างโมเลกุลและการแยกสลายด้วยน้ำของเซลลูโลส

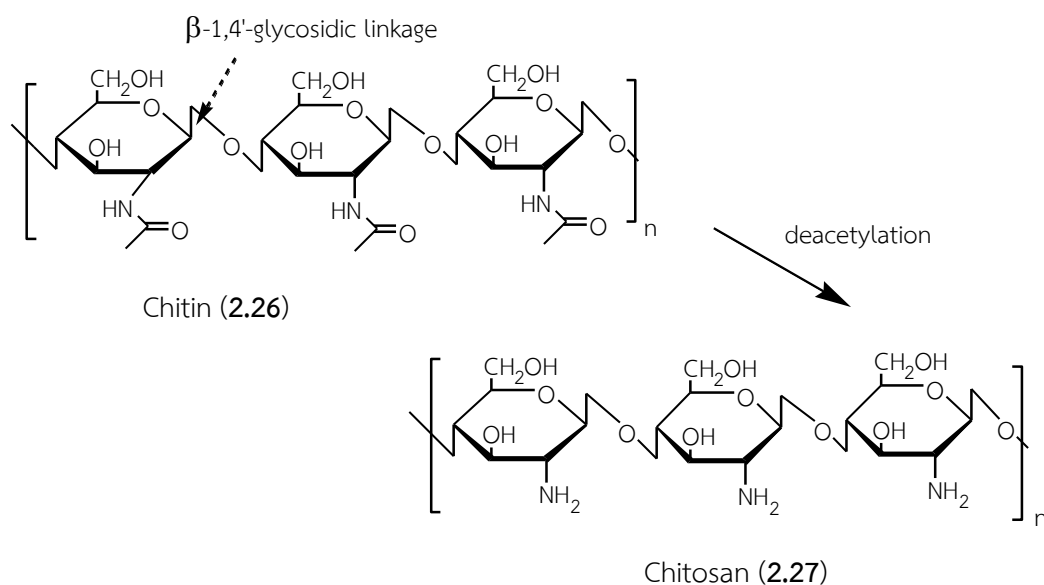
คุณสมบัติของเซลลูโลส ดังนี้

1) การละลายน้ำ เซลลูโลสสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนภายในและระหว่างโมเลกุล เกิดเป็นหน่วยย่อยผลึก (crystalline subunits) จึงเกิดการละลายน้ำได้

2) การแยกสลายด้วยน้ำ เมื่อเซลลูโลสถูกแยกสลายด้วยน้ำ จะได้เซลโลบิโอส (5.25) ซึ่งเป็นไดแซ็กคาไรด์เกิดจากกลูโคส 2 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกชนิดบีตา-1,4'- (Bhat, Nagasampagi & Meenakshi, 2009, p. 7.40) ดังภาพที่ 2.19 และเมื่อการแยกสลายด้วยน้ำเกิดจนสมบูรณ์ จะได้กลูโคสในที่สุด

4. ไคติน

ไคติน (Chitin, 2.26) หรือมิวโคพอลิแซ็กคาไรด์ (mucopolysaccharide) เป็นพอลิเมอร์ของเอ็น-แอซีทิล-ดี-กลูโคซามีน (*N*-acetyl-D-glycosamine) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกชนิดบีตา-1,4'- (Merzendorfer, 2011, pp. 759-769) ส่วนใหญ่พบในส่วนแข็งที่หุ้มเปลือกแมลง ปู และกุ้ง หรืออาจพบในจุลินทรีย์ ได้แก่ รา และยีสต์ เมื่อกำจัดหมู่แอซีทิล (Acetyl group, $-(C=O)-CH_3$) ของไคตินออก โดยการต้มในสารละลายเบส จะได้ไคโทซาน (Chitosan, 2.27) ดังภาพที่ 2.20 ประโยชน์ใช้เป็นแผ่นฟิล์มวัสดุชีวภาพ มีคุณสมบัติย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติและไม่เป็นพิษ เช่น วัสดุตกแต่งแผลและควบคุมการปล่อยสารสำคัญของยา (drug release) สารเติมแต่งในเครื่องสำอาง และผลิตภัณฑ์บำรุงผิว แผ่นเยื่อ (membrane) ฟิล์มห่ออาหาร สารกระตุ้นการเจริญเติบโตในพืช สารเพิ่มความแข็งแรงของกระดูก ตัวต้านออกซิเดชัน และเป็นตัวดูดซับ เป็นต้น



ภาพที่ 2.20 โครงสร้างไคตินและไคโทซาน

ตัวอย่างของพอลิแซ็กคาไรด์อื่น (ภาพที่ 2.21) ดังนี้

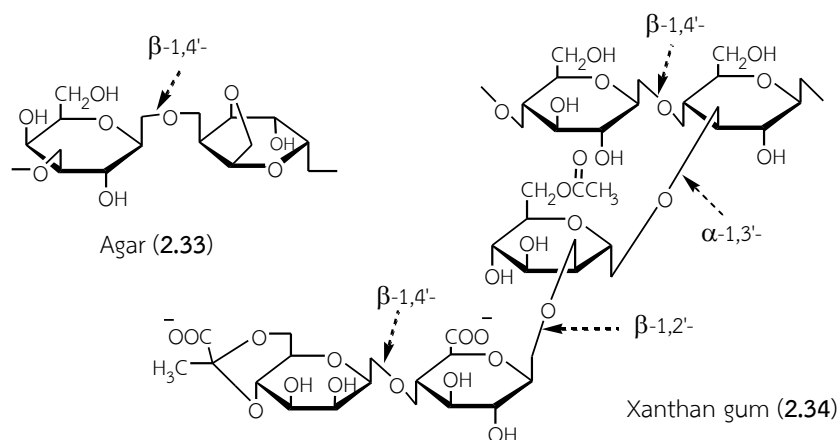
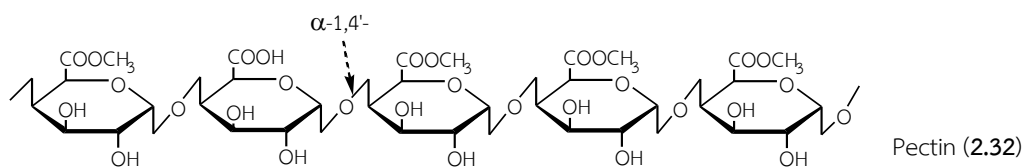
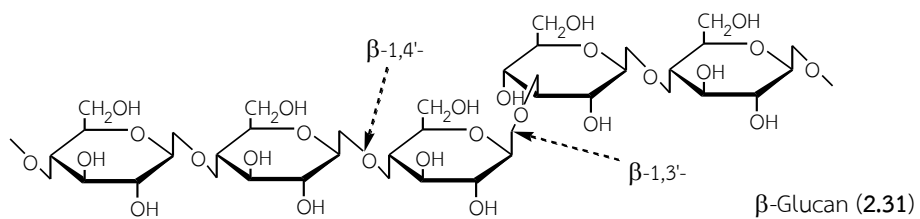
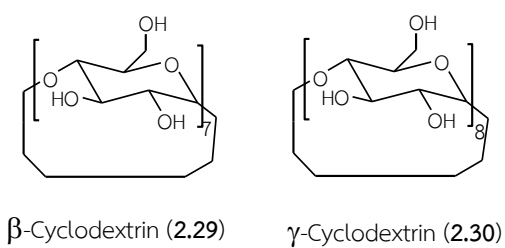
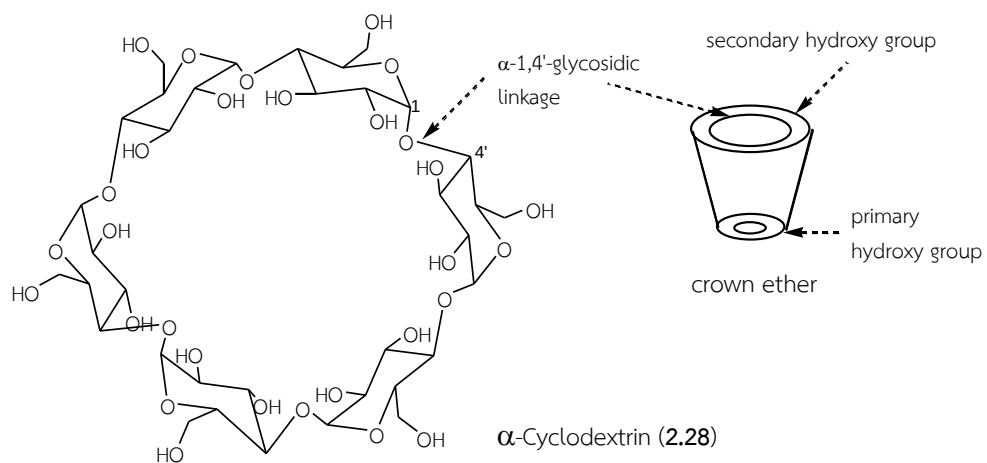
- ไซโคลเดกซ์ทริน (Cyclodextrin) เป็นพอลิแซ็กคาไรด์ได้จากการแยกสลายด้วยน้ำแป้งหรือมันสำปะหลังด้วยเอนไซม์ โครงสร้างเป็นวงแหวนลักษณะคล้ายอีเธอร์มงกุฏ (crown ether) เกิดจากกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกชนิดปีตา-1,4'- (สมพงศ์ จันทร์โพธิ์ศรี, 2552, หน้า 227) ในธรรมชาติพบไซโคลเดกซ์ทริน 3 ชนิด คือ แอลฟา- (2.28) ปีตา- (2.29) และแกมมา- (2.30) เกิดจากมอนอเมอร์ของกลูโคส 6, 7 และ 8 หน่วย ตามลำดับ (Mathew & Adlercreutz, 2012, pp. 574-580) การใช้ประโยชน์ เช่น ชนิดแอลฟา- เป็นตัวกระทำอิมัลชัน (emulsifier) ในอาหารและเครื่องสำอาง ชนิดปีตา- เป็นพอลิเมอร์ควบคุมการปล่อยสารของยา และชนิดแกมมา- เป็นสารดักจับโลหะหนักและสารพิษ เป็นต้น

- ปีตา-กลูแคน (β -Glucan, 2.31) พบในรำข้าวเมสึดข้าวโอ๊ต และข้าวสาลี โครงสร้างเกิดจากกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกชนิดปีตา-1,4'- โดยทุก 3-4 หน่วยของกลูโคส เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกชนิดปีตา-1,3'- (β -1,3'-glycosidic linkage) (Li, Cui, Wang & Yada, 2012, pp. 377-382) ประโยชน์ใช้เป็นเส้นใยผสมในอาหาร และเป็นส่วนผสมในดินเพื่อเสริมความแข็งแรง เป็นต้น

- เพกทิน (Pectin, 2.32) พบมากในผนังเซลล์ของเนื้อเยื่อพืช บริเวณผิวเปลือกด้านในที่มีสีขาวของส้มและมะนาว สูตรโครงสร้างของเพกทินเป็นเส้นตรง ประกอบด้วยกรดกาแล็กทูโรนิก (Galacturonic acid) และเมทิลเอสเทอร์ (methyl ester) ของกรดกาแล็กทูโรนิกเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกชนิดแอลฟา-1,4'- (Caffall & Mohnen, 2009, pp. 1879-1900) ประโยชน์ส่วนมากใช้เป็นส่วนประกอบในเยลผลไม้ เยลลี่ ผสมกับแอลจีเนต (Alginate) ใช้เป็นแผ่นฟิล์มห่ออาหาร เป็นต้น

- อะการ์ (Agar, 2.33) สกัดจากสาหร่าย เป็นพอลิเมอร์ของอะกาโรบิโอส (Agarobiose) เกิดจากดี-กาแล็กโทสเชื่อมพันธะกับ 3,6-แอนไฮโดร-แอล-กาแล็กโทส (3,6-Anhydro-L-galactose) ประโยชน์ของอะการ์ คือ ใช้เป็นวุ้นอาหารเพาะเลี้ยงเชื้อและใช้ทำอาหาร ผสมกับโลหะเงินทำเป็นแผ่นฟิล์มป้องกันการติดเชื้อแบคทีเรีย

- แขนแซนแกม (Xanthan gum, 2.34) พบว่าได้จากกระบวนการหมักน้ำอ้อยด้วยแบคทีเรีย *Xanthomonas campestris* ได้โครงสร้างเหมือนเซลลูโลส แต่ทุก ๆ 2 หน่วย ของกลูโคส จะเชื่อมพันธะกับอนุพันธ์ของแมนโนสและกรดกลูคูโรนิก (Glucuronic acid) ประโยชน์ของแซนแซนแกม ได้แก่ สารลดแรงตึงผิว (surfactant) ในเครื่องสำอางอิมัลชัน (emulsion) น้ำสลัด น้ำเชื่อม และน้ำปลา เป็นต้น สารแขวนลอย (suspension) ตัวกระทำเจล (gelling agent) สารให้ความเสถียร (stabilizer) และสารเพิ่มความข้น (thickener)



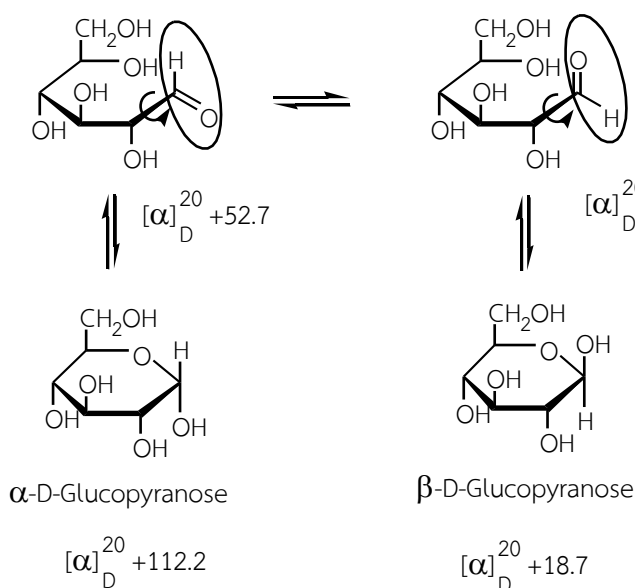
ภาพที่ 2.21 แอลฟา- บีตา- และแกมมา-ไซโคลเดกซ์ทริน บีตา-กลูแคน อะการ์ แซนแทนกัม และ เพกทิน

คุณสมบัติของคาร์โบไฮเดรต

คาร์โบไฮเดรตมีคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่แตกต่างกัน ดังนี้

1. คุณสมบัติการหมุนเชิงแสง (optical rotation)

ทั้งมอนแซ็กคาไรด์และไดแซ็กคาไรด์แต่ละชนิดมีคุณสมบัติแตกต่างกัน โดยเฉพาะการหมุนเชิงแสง ($[\alpha]$) กรณีน้ำตาลมีคุณสมบัติการหมุนเชิงแสงไปทางขวาหรือทิศทางตามเข็มนาฬิกา เรียกว่า เดกซ์โทรโรทาทอรี (dextrorotatory, d) หรือแสดงด้วยเครื่องหมายบวก (+) ส่วนการหมุนเชิงแสงไปทางซ้ายหรือทิศทางทวนเข็มนาฬิกา เรียกว่า เลโวโรทาทอรี (levorotatory, l) หรือแสดงด้วยเครื่องหมาย (-) ซึ่งค่าการหมุนเชิงแสงเป็นค่าเฉพาะจะไม่ขึ้นกับโครงสร้างชนิดดี- หรือชนิดแอล- ของน้ำตาล สามารถตรวจวัดด้วยเครื่องโพลาริมิเตอร์ (polarimeter) เท่านั้น เช่น ดี-กลูโคส เท่ากับ $[\alpha]_D^{20} +52.7$ องศา และดี-ฟรุคโทส เท่ากับ $[\alpha]_D^{20} -92.4$ องศา เป็นต้น ดังภาพที่ 2.22 (ดาร์ลีย์ ฉิมภู, 2553, หน้า 86)



ภาพที่ 2.22 ปรากฏการณ์มิวทาโรเทชันของดี-กลูโคส

การเกิดโครงสร้างแอนอเมอร์ชนิดแอลฟา- และชนิดบีตา- เป็นสมดุลงันระหว่างโครงสร้างโซ่ปิดและโซ่เปิด เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า มิวทาโรเทชัน (mutarotation) ตัวอย่างเช่น สารละลายแอลฟา-ดี-กลูโคส วัดค่าการหมุนเชิงแสงได้ $[\alpha]_D^{20} +112.2$ องศา แต่เมื่อระยะเวลาผ่านไป ค่าการหมุนเชิงแสงจะลดลงเรื่อย ๆ จนกระทั่งคงตัวที่ $[\alpha]_D^{20} +52.7$ องศา ในขณะที่วัดค่าการหมุนเชิงแสงเริ่มต้นของสารละลายบีตา-ดี-กลูโคสได้ $[\alpha]_D^{20} +18.7$ องศา และเมื่อเวลาผ่านไป ค่าการหมุนเชิงแสงจะเพิ่มขึ้น

จนกระทั่งคงตัวที่ $[\alpha]_D^{20} +52.7$ องศา เช่นเดียวกัน แสดงว่ากลูโคส จะอยู่ในสมดุลระหว่างโครงสร้างโซ่เปิดและโซ่ปิดตลอดเวลา ดังภาพที่ 2.22 ในขณะที่สูตรโครงสร้างเปลี่ยนเป็นโซ่ปิดจะเกิดแอนอเมอร์ชนิดแอลฟา- และชนิดบีตา- เนื่องจากหมู่คาร์บอนิลมีรูปร่างเป็นระนาบสามเหลี่ยมและสามารถหมุนได้อิสระ จึงเกิดการเรียงตัวได้ 2 แบบ

ตัวอย่างปรากฏการณ์มิวทาโรเทนของมอนแซ็กคาไรด์และไดแซ็กคาไรด์อื่น ๆ ดังตารางที่ 2.3

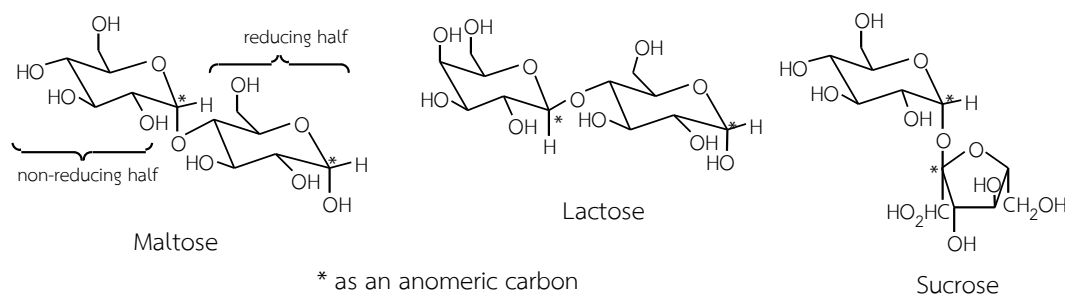
ตารางที่ 2.3 ปรากฏการณ์มิวทาโรเทนของมอนแซ็กคาไรด์บางชนิด

ชนิดน้ำตาล	$[\alpha]_D^{20}$ เริ่มต้น	$[\alpha]_D^{20}$ สุดท้าย
แอลฟา-ดี-กลูโคส	+112.2 องศา	+52.7 องศา
บีตา-ดี-กลูโคส	+18.7 องศา	+52.7 องศา
แอลฟา-ดี-กาแล็กโทส	+150.7 องศา	+80.2 องศา
บีตา-ดี-กาแล็กโทส	+52.8 องศา	+80.2 องศา
แอลฟา-ดี-อะราบินอส	-77.3 องศา	-104.5 องศา
บีตา-ดี-อะราบินอส	-190.6 องศา	-104.5 องศา
แอลฟา-ดี-แลกโทส	+85.0 องศา	+52.6 องศา
บีตา-ดี-มอลโทส	+117.7 องศา	+130.4 องศา
ซูโครส	-	+66.5 องศา

ที่มา (Bhat, Nagasampagi & Meenakshi, 2009, p.7.14)

2. คุณสมบัติน้ำตาลรีดิวซ์ (reducing sugar)

น้ำตาลที่มีคุณสมบัติน้ำตาลรีดิวซ์ เช่น กาแล็กโทส กลูโคส แมนโนส ฟรุ็กโทส แล็กโทส และมอลโทส เป็นต้น จะเกิดเป็นตะกอนสีแดงอิฐ กับสารละลายเบเนดิกต์ (Benedict's solution) หรือสารละลายเฟห์ลิง (Fehling's solution) ซึ่งคุณสมบัติน้ำตาลรีดิวซ์พิจารณาได้จากหมู่ไฮดรอกซิลที่คาร์บอนแอนอเมอร์ของภาพฉายแบบฮาเวอร์ธ หรือหมู่ฟอร์มิลของภาพฉายแบบฟิสเชอร์ ดังนั้นซูโครสจึงมีคุณสมบัติน้ำตาลไม่รีดิวซ์ (nonreducing sugar) ดังภาพที่ 2.23 ศึกษาเพิ่มเติมของการตรวจสอบคุณสมบัติน้ำตาลรีดิวซ์ในบทที่ 10



ภาพที่ 2.23 ตัวอย่างโครงสร้างน้ำตาลรีดิวซ์และน้ำตาลไม่รีดิวซ์

3. การแยกสลายด้วยน้ำ (hydrolysis)

พันธะไกลโคซิดิกในไดแซ็กคาไรด์สามารถถูกแยกสลายด้วยน้ำในสภาวะกรดและเบส ได้ มอนแซ็กคาไรด์ 2 หน่วย เช่น ซูโครสถูกแยกสลายด้วยน้ำ ได้กลูโคสและฟรุกโทส และสามารถทดสอบ ยืนยันโดยการทำปฏิกิริยากับสารละลายเบนิดิกต์ ได้ตะกอนสีแดงอิฐ เป็นต้น

น้ำตาลอนุพันธ์

เมื่อมอนแซ็กคาไรด์อยู่ในรูปสารละลายจะเกิดปรากฏการณ์มิวทาโรเทชัน เปลี่ยนเป็นโซปิดได้ แอนอเมอร์ชนิดแอลฟา- และชนิดบีตา- เนื่องจากหมู่คาร์บอนิลอิสระของแอลดีไฮด์และคีโตนจะทำ ปฏิกิริยากับหมู่ไฮดรอกซิล ดังนั้น หมู่คาร์บอนิลอิสระและหมู่ไฮดรอกซิลของมอนแซ็กคาไรด์จึง สามารถเกิดปฏิกิริยาเคมีได้เหมือนกับสารอินทรีย์ ทำให้พบน้ำตาลอนุพันธ์ในธรรมชาติ ดังนี้

1. น้ำตาลฟอสเฟต

ในการสังเคราะห์ด้วยแสงจะใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำเป็นสารตั้งต้นร่วมกับพลังงาน แสง เพื่อสร้างคาร์โบไฮเดรต แก๊สออกซิเจน และหมู่ฟอสเฟตเป็นผลพลอยได้ ทำให้น้ำตาลสามารถ รวมตัวกับหมู่ฟอสเฟต ได้น้ำตาลฟอสเฟต (phosphate sugar) ได้แก่ ฟรุกโทส-6-ฟอสเฟต (Fructose-6-phosphate, **2.39**) และกลูโคส-6-ฟอสเฟต (Glucose-6-phosphate, **2.40**) ซึ่งเป็นสารมัธยันตร์ สำคัญในกระบวนการสร้างกลูโคส ดังภาพที่ 2.24 โดยเริ่มจากไรบูโลส-1,5-ไดฟอสเฟต (Ribulose-1,5-diphosphate, **2.35**) เปลี่ยนเป็นรูปอินอล (enol form) แล้วรวมตัวกับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และ การแยกสลายด้วยน้ำ เปลี่ยนเป็น 3-ฟอสโฟกลีเซอเรต (3-Phosphoglycerate, **2.36**) 2 โมล แล้ว หมู่คาร์บอกซิเลต (-COO^-) จะถูกรีดิวซ์ด้วยเอ็นเอดีพีเอช เปลี่ยนเป็น 3-ฟอสโฟกลีเซอแรลดีไฮด์ (3-Phosphoglyceraldehyde, **2.37**) ซึ่งสามารถจัดตัวใหม่ เปลี่ยนเป็นไดไฮดรอกซีลแอซีโตน ฟอสเฟต (Dihydroxyacetone phosphate, **2.38**) หลังจากนั้น 3-ฟอสโฟกลีเซอแรลดีไฮด์ (**2.37**)

2. น้ำตาลแอลกอฮอล์

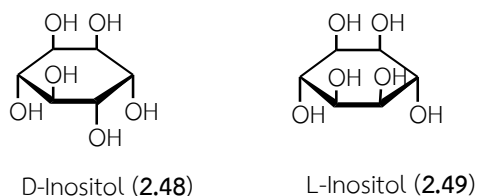
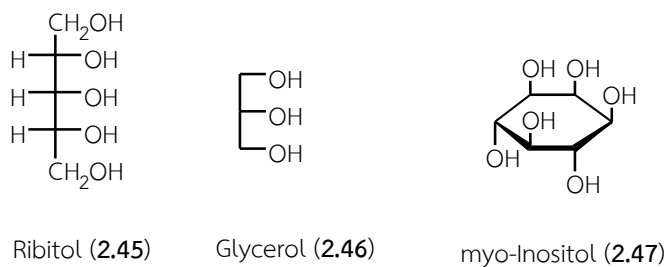
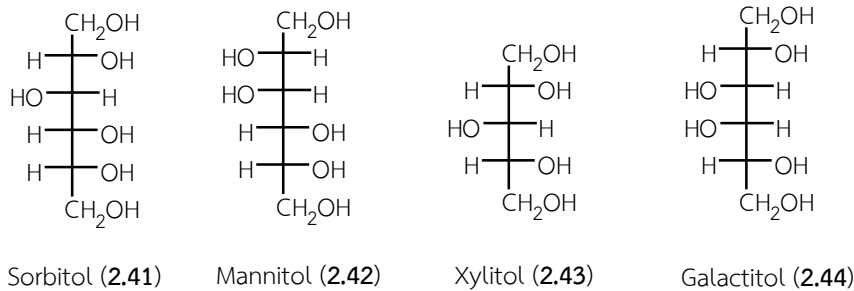
น้ำตาลแอลกอฮอล์ (sugar alcohol) หรือไซคลิทอล (cyclitol) เกิดจากหมู่คาร์บอนิลของแอลดีไฮด์หรือคีโตนถูกรีดิวซ์หรือการเติมไฮโดรเจน (hydrogenation) โดยมีโลหะเป็นตัวเร่ง ได้เป็นหมู่ไฮดรอกซิล ส่วนมากน้ำตาลแอลกอฮอล์จะเป็นสารให้ความหวาน ข้อดี คือ ให้แคลอรีน้อยกว่าซูโครสหรือน้ำตาลทั่วไป จึงใช้เป็นส่วนผสมสำหรับอาหารลดน้ำหนักหรืออาหารที่ต้องการความหวานแต่ให้พลังงานต่ำ ตัวอย่างดังภาพที่ 2.25 ดังนี้

2.1 กลูซิทอล (Glucitol, 2.41) หรือซอร์บิทอล (Sorbitol) เกิดจากกลูโคสถูกรีดิวซ์ หรือจากเซลลูโลสซึ่งมีมอนอเมอร์เป็นกลูโคส กลูซิทอลมีความหวานน้อยกว่าซูโครสและกลูโคสประมาณครึ่งหนึ่ง พบในผลไม้แอปเปิล มะเขือเทศ และลูกพรุน เป็นต้น สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในทางการแพทย์ อุตสาหกรรมอาหาร เครื่องสำอาง และยาสีฟัน เป็นต้น

2.2 แมนนิทอล (Mannitol, 2.42) เกิดจากแมนโนสถูกรีดิวซ์ พบได้ในเห็ดสกุลโบลีทัส (*Boletus* sp.) (Heleno, et al., 2011, pp. 1343-1348) ผักและผลไม้หลายชนิด เช่น หอมหัวใหญ่ ฟักทอง และมะกอก เป็นต้น หรือจากกระบวนการหมักสาหร่ายด้วยจุลินทรีย์ แมนนิทอลจะให้พลังงานครึ่งหนึ่งของซูโครส ด้านการแพทย์ใช้เป็นอาหารสำหรับผู้ป่วยโรคเบาหวาน หรือระหว่างการผ่าตัด ในอุตสาหกรรมอาหารใช้เป็นส่วนประกอบของอาหารไขมันต่ำหรืออาหารไม่มีน้ำตาล ใช้ผสมกับไซลิทอลในลูกอมและหมากฝรั่ง ทำให้ฟันไม่ผุ ผสมกับอะการ์ เรียกว่า แมนนิทอลซอลต์อะการ์ (Mannitol salt agar) ใช้เป็นอาหารเลี้ยงเชื้อเฉพาะกลุ่ม ผสมกับไฮโดรเจนเพอร์ออกไซด์เพื่อช่วยลดปริมาณเชื้อแบคทีเรียที่ก่อให้เกิดการระคายเคืองต่อผิว และใช้เป็นสารตั้งต้นการสังเคราะห์ยา ได้แก่ เคลิสทีโนไลด์ (Cleistenolide) ซึ่งออกฤทธิ์ต้านแบคทีเรียและรา (Ramesh & Meshram, 2011, pp. 2443-2445) เป็นต้น

2.3 ไซลิทอล (Xylitol, 2.43) แหล่งที่พบ ได้แก่ ชิงพีช กากชานอ้อย เปลือกไม้เนื้อแข็ง ถั่ว ผักและผลไม้บางชนิด เช่น กะหล่ำปลี และมะเขือยาว เป็นต้น ได้จากไซโลสถูกรีดิวซ์หรือกระบวนการหมักด้วยยีสต์และแบคทีเรียโดยตรง หรือการแยกสลายด้วยน้ำของไซแลน (Xylan) ซึ่งมีไซโลสเป็นองค์ประกอบ ไซลิทอลมีความหวานใกล้เคียงกับซูโครสแต่มากกว่ากลูโคส จึงเหมาะสำหรับเป็นอาหารลดความอ้วนและอาหารสำหรับผู้ป่วยโรคเบาหวาน เนื่องจากเมื่อดูดซึมเข้าสู่ร่างกายแล้ว จะไม่เพิ่มระดับน้ำตาลหรืออินซูลินในเลือด ใช้เป็นส่วนประกอบในยาแก้ไอ ยาอมแก้เจ็บคอหรือยาสีฟัน ลูกอม และหมากฝรั่ง เนื่องจากช่วยป้องกันฟันผุและให้ความเย็นเมื่ออยู่ในปาก

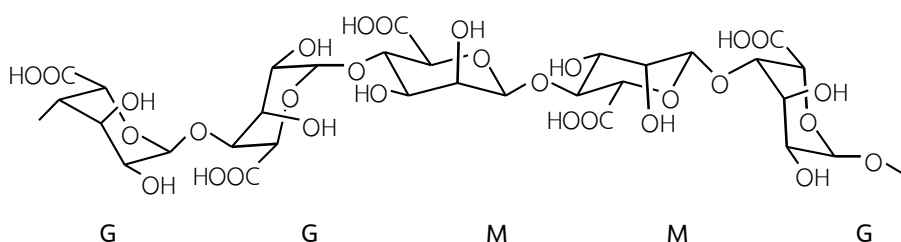
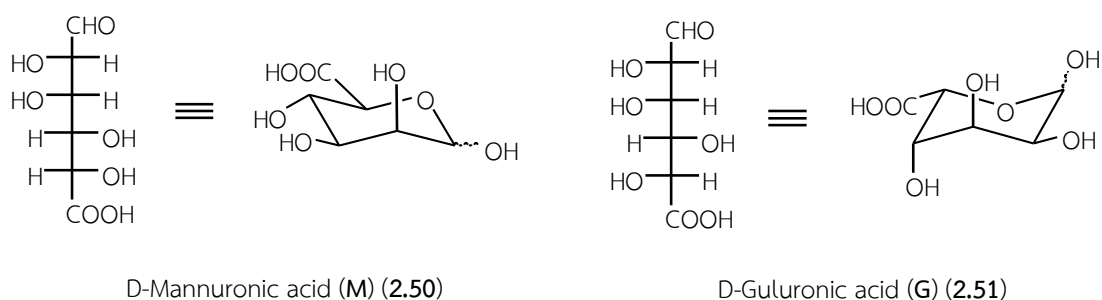
ตัวอย่างน้ำตาลแอลกอฮอล์อื่น เช่น กาแล็กทิทอล (Galactitol, 2.44) หรือดูอิทอล (Dulcitol) ไบริทอล (Ribitol, 2.45) กลีเซอรอล (2.46) ไมโอ-ไโนซิทอล (myo-Inositol, 2.47) ดี-ไโนซิทอล (D-Inositol, 2.48) และแอล-ไโนซิทอล (L-Inositol, 2.49) เป็นต้น ดังภาพที่ 2.25



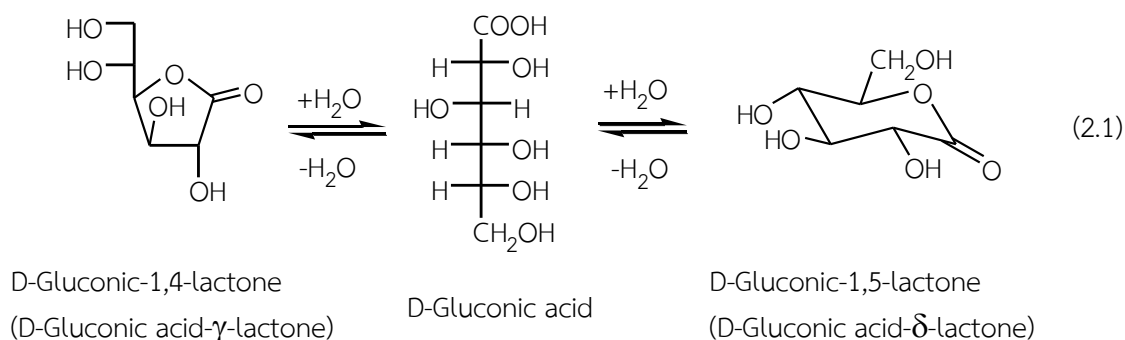
ภาพที่ 2.25 น้ำตาลแอลกอฮอล์ที่พบในธรรมชาติ

3. กรดน้ำตาล

เมื่อออกซิเดชันของหมู่ไฮดรอกซีเมธิล (Hydroxy methyl group, $-\text{CH}_2\text{OH}$) ที่อะตอมคาร์บอนตำแหน่งสุดท้ายของน้ำตาลชนิดแอลโดส ได้กรดคาร์บอกซิลิก เรียกว่ากรดน้ำตาล (sugar acid) หรือกรดยูโรนิก (uronic acid) เช่น กรดแมนนูโรนิก (Mannuronic acid, 2.50) และกรดกลูโรนิก (Guluronic acid, 2.51) ซึ่งกรดทั้งสองเป็นมอนอเมอร์ในแอลจินเต ดังภาพที่ 2.26 พบในสาหร่ายทะเลสีน้ำตาล (สุวภัทร ศรีจันทร์ทองศิริ, 2550) และกรดกาแล็กทูโรนิก พบในรากของพืชตระกูลแบรียสกุลมอรินดา (*Morinda officinalis*) (Zhang, et al., 2009, pp. 257-261) เป็นต้น กรณีแอลดีไฮด์ถูกออกซิไดส์ เรียกว่า กรดแอลโดนิก (aldonic acid) เช่น กรดกลูโคนิก (Gluconic acid) ซึ่งสามารถเปลี่ยนโครงสร้างเป็นวงแล็กโตน (lactone ring) ได้ ดังสมการ (2.1) หรือออกซิเดชันทั้งหมู่ไฮดรอกซีเมธิลและแอลดีไฮด์ เรียกว่า กรดแอลดาร์ริก (aldaric acid) ตัวอย่างเช่น กรดทาร์ทาริก ((±)-Tartaric acid) พบในมะขาม ถั่วฝักยาว และองุ่น กรดกาแล็กตาร์ริก (Galactaric acid) หรือกรดมุซิก (Mucic acid) กรดกลูคาร์ริก (Glucaric acid) หรือกรดแซ็กคาร์ริก (Saccharic acid) เป็นต้น

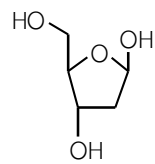


ภาพที่ 2.26 โครงสร้างแอลจีเนตประกอบด้วยกรดกลูโคนิกและกรดแมนนูโรนิก
ที่มา (ดัดแปลงจาก สุวภัทร ศรีจันทร์ทองศิริ, 2550, หน้า 18)



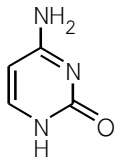
4. น้ำตาลดีออกซี

น้ำตาลดีออกซี (deoxy sugar) เป็นน้ำตาลอนุพันธ์ที่หมู่ไฮดรอกซิลถูกแทนที่ด้วยอะตอมไฮโดรเจน เช่น 2-ดีออกซี-ดี-ไรโบส (2-Deoxy-D-ribose, 2.52) เป็นองค์ประกอบในสูตรโครงสร้างของกรดดีออกซีไรโบนิวคลีอิกหรือดีเอ็นเอ (deoxyribonucleic acid, DNA) โดยเกิดพันธะกับไธมีน (Thymine, T) ซึ่งโครงสร้างดีเอ็นเอจะเป็นสายพอลินิวคลีโอไทด์ (polynucleotide) 2 สาย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างคู่เบส ได้แก่ กัวนีน (Guanine, G) กับไซโทซีน (Cytosine, C) และอะดีนีน (Adenine, A) กับไธมีน (T) และพันเป็นเกลียววนขวา เรียกว่า ดับเบิลฮีลิกซ์ (double helix) ดังภาพที่ 2.27

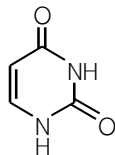


2-Deoxy-D-ribose

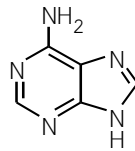
(2.52)



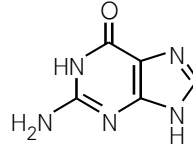
Thymine, T



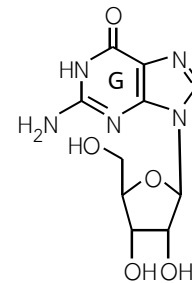
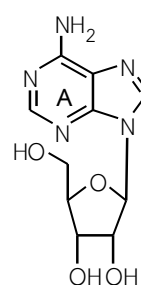
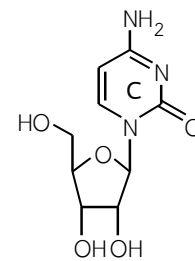
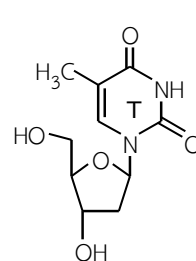
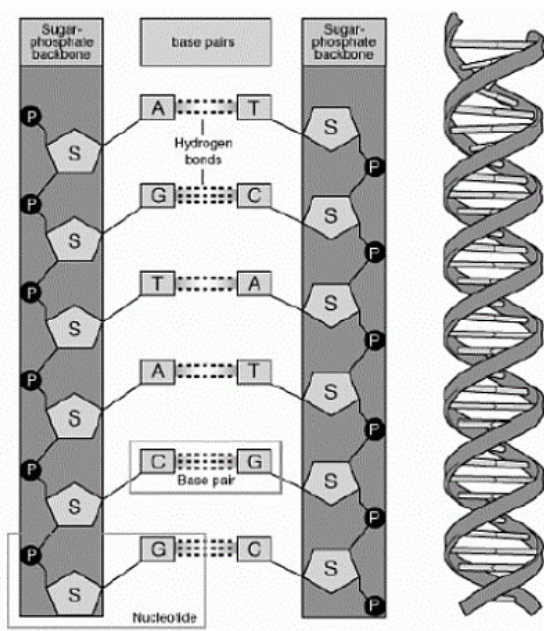
Cytosine, C



Adenine, A



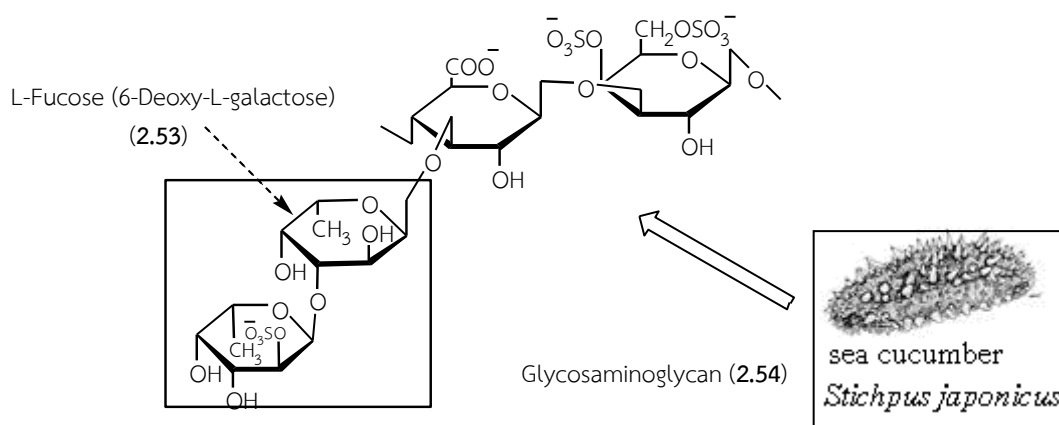
Guanine, G



ภาพที่ 2.27 โครงสร้างดับเบิลฮีลิกซ์ของดีเอ็นเอ

ที่มา (ดัดแปลงจาก Peszek, 2014)

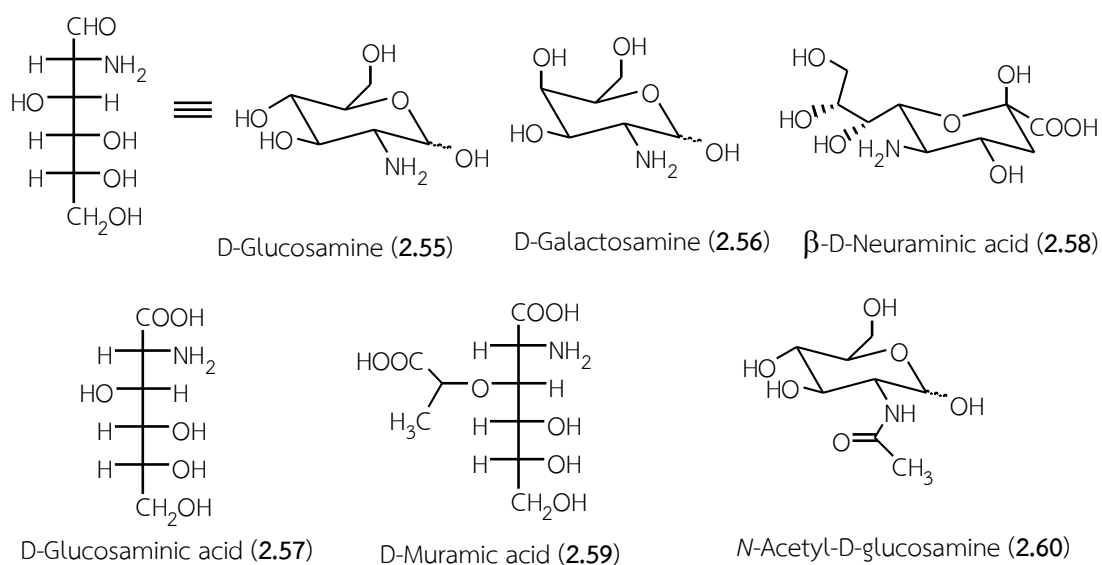
ตัวอย่างน้ำตาลไดออกซีอื่น ๆ ได้แก่ แอล-ฟูโคส (L-Fucose, **2.53**) พบทั้งรูปอิสระ และ สารประกอบเชิงซ้อน เช่น ไกลโคซามิโนไกลแคน (Glycosaminoglycan, **2.54**) พบในผนังเซลล์ของ หนอนทะเลสกุลสทิซปัส (*Stichopus japonicus*) ดังภาพที่ 2.28 (Kariya, et al., 1997, pp. 273-279)



ภาพที่ 2.28 ไกลโคซามิโนไกลแคนในผนังเซลล์ของหนอนทะเลสกุลสทิซพัส
ทีมา (ดัดแปลงจาก Kariya, et al., 1997, p. 274)

5. น้ำตาลแอมิโน

หมู่ไฮดรอกซิลของน้ำตาลถูกแทนที่ด้วยหมู่แอมิโน เรียกว่า น้ำตาลแอมิโน (amino sugar) หรือเรียกชื่อว่า น้ำตาลแอมิโนดีออกซี (amino deoxy sugar) เช่น กลูโคซามีน (Glucosamine, 2.55) และกาแล็กโทซามีน (Galactosamine, 2.56) เป็นต้น นอกจากนี้ อาจพบหมู่แอมิโนในกรดน้ำตาล เช่น กรดกลูโคซามินิก (Glucosaminic acid, 2.57) กรดนิวรามินิก (Neuraminic acid, 2.58) และกรดมูรามิก (Muramic acid, 2.59) เป็นต้น หรือหมู่แอมิโนอยู่ในรูปของเอ็น-แอซิติล (N-acetyl) เช่น เอ็น-แอซิติล-ดี-กลูโคซามีน (2.60) ในโครงสร้างไคติน ดังภาพที่ 2.29

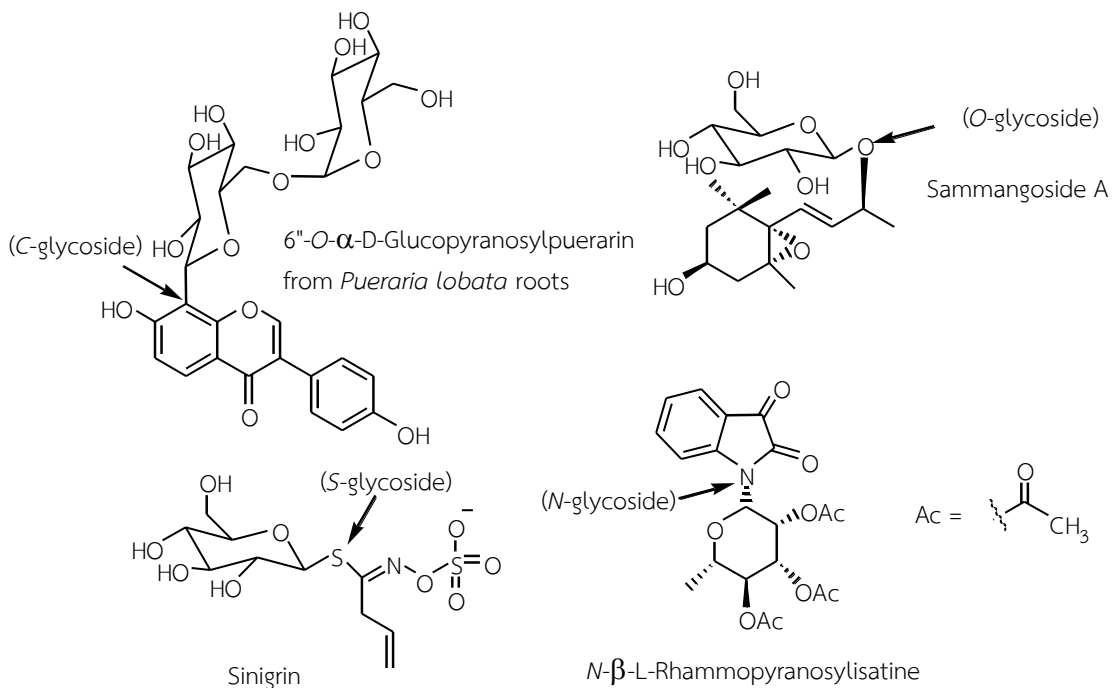


ภาพที่ 2.29 น้ำตาลแอมิโนบางชนิด

6. ไกลโคไซด์

โครงสร้างสารอินทรีย์ที่มีน้ำตาลเกาะอยู่ เรียกว่า ไกลโคไซด์ ประกอบด้วย 2 ส่วน คือ ส่วนน้ำตาล เรียกว่า ไกลโคน (glycone) และส่วนที่ไม่ใช่น้ำตาล เรียกว่า อะไกลโคน (aglycone) หรือจีนิน (genin) ซึ่งทั้งสองส่วนเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิก สามารถจำแนกไกลโคไซด์ ดังนี้

6.1 ตามชนิดของพันธะไกลโคซิดิก กรณีน้ำตาลเชื่อมต่อกันผ่านอะตอมออกซิเจน เรียกว่า โอ-ไกลโคไซด์ (O-glycoside) ซึ่งส่วนใหญ่จะพบในธรรมชาติ การเชื่อมต่อกันผ่านอะตอมคาร์บอน เรียกว่า ซี-ไกลโคไซด์ (C-glycoside) พันธะผ่านอะตอมไนโตรเจน เรียกว่า เอ็น-ไกลโคไซด์ (N-glycoside) และพันธะผ่านอะตอมซัลเฟอร์ เรียกว่า เอส-ไกลโคไซด์ (S-glycoside) ซึ่งแต่ละชนิดของพันธะดังกล่าวสามารถเกิดได้ทั้งแอลฟา- หรือบีตา-ไกลโคไซด์ ดังภาพที่ 2.30

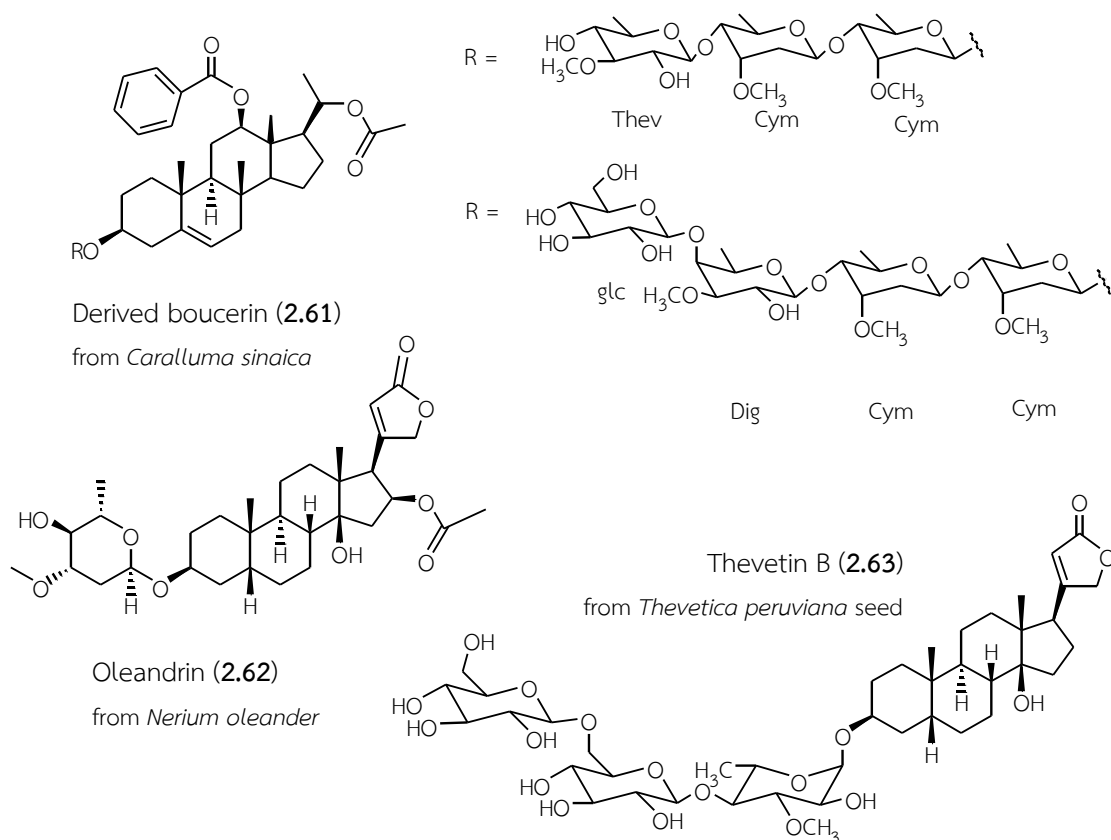


ภาพที่ 2.30 ตัวอย่างไกลโคไซด์ตามชนิดของพันธะไกลโคซิดิก

6.2 ตามชนิดของไกลโคนหรือน้ำตาล ที่พบบ่อย ได้แก่ กลูโคส แรมโนส อะราบินอสไซโลส และอะพีโอส (Apiose) รวมทั้งน้ำตาลดื่อกซี เช่น ไชมาโรส (Cymarose, Cym) เทวีโทส (Thevetose, Thev) และดิจิทาโลส (Digitalose, Dig) เป็นต้น ได้แก่ บูซีรินอนุพันธ์ (Derived boucerin, **2.61**) ดังภาพที่ 2.31 การเรียกชื่อทั่วไปของไกลโคไซด์จะเรียกตามชื่อน้ำตาล เช่น กลูโคส เรียกว่า กลูโคไซด์ (Glucoside) หรือแรมโนส เรียกว่า แรมโนไซด์ (Rhamnoside) เป็นต้น

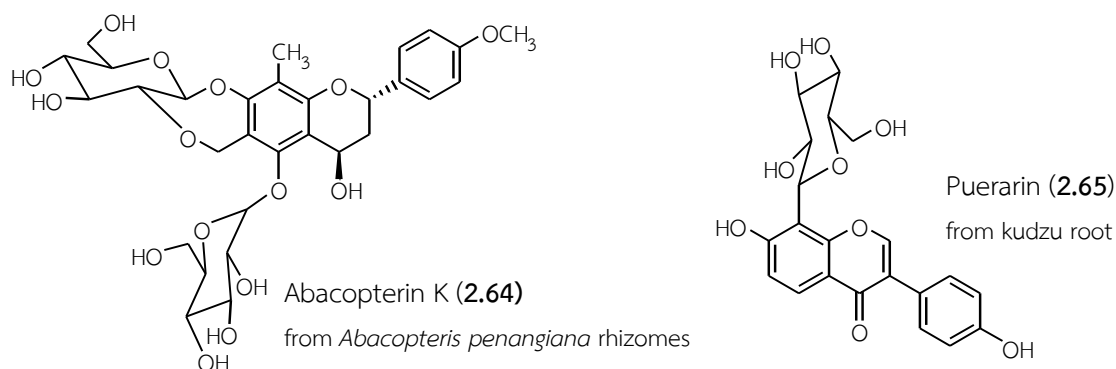
6.3 ตามชนิดของอะไกลโคน ดังนี้

6.3.1 กลุ่มสเตอรอยด์ไกลโคไซด์ (steroidal glycoside) โครงสร้างจะมีนิวเคลียสของสเตอรอยด์ (steroid) ถ้าเป็นสารที่ออกฤทธิ์ต่อหัวใจ เรียกว่า คาร์ดิแอกไกลโคไซด์ (cardiac glycoside) เช่น โอลีเอนดริน (Oleandrin, **2.62**) และเธวีทินบี (Thevetin B, **2.63**) เป็นต้น ดังภาพที่ 2.31



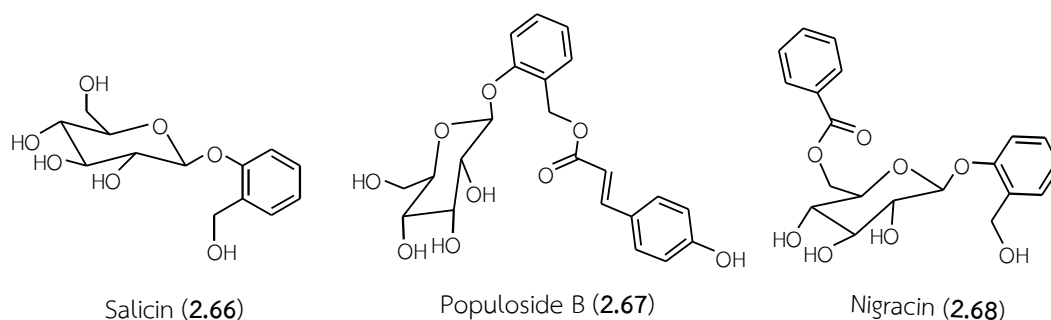
ภาพที่ 2.31 ตัวอย่างสเตอรอยด์ไกลโคไซด์

6.3.2 กลุ่มฟลาโวนอยด์ไกลโคไซด์ (flavonoid glycoside) มีส่วนอะไกลโคนเป็นฟลาโวนอยด์ ซึ่งเป็นสารประกอบพอลิฟีนอล (polyphenol compound) โครงสร้างประกอบด้วยวงแอโรแมติก 2 วง ต่อเชื่อมกันด้วยอะตอมคาร์บอน ในกลุ่มนี้พบหลายประเภท เช่น ฟลาโวนอน (flavonone) ฟลาโวน (flavone) และฟลาโวนอล (flavonol) เป็นต้น ตัวอย่างเช่น อะบาโคปทีรินเค (Abacopterin K, **2.64**) และพูราริน (Puerarin, **2.65**) เป็นต้น ดังภาพที่ 2.32



ภาพที่ 2.32 ตัวอย่างฟลาโวนอยด์ไกลโคไซด์

6.3.3 กลุ่มแอลกอฮอล์ไกลโคไซด์ (alcoholic glycoside) ส่วนอะไกลโคนเป็นสารประกอบฟีนอลิก (phenolic compound) ซึ่งสูตรโครงสร้างมีหมู่ไฮดรอกซิลเกาะกับวงเบนซีน เรียกว่าฟีนอลิกไกลโคไซด์ (phenolic glycoside) ตัวอย่างเช่น ซาลิซิน (Salicin, 2.66) พอปูโลไซด์บี (Populoside B, 2.67) และนิกราซิน (Nigracin, 2.68) เป็นต้น ดังภาพที่ 2.33

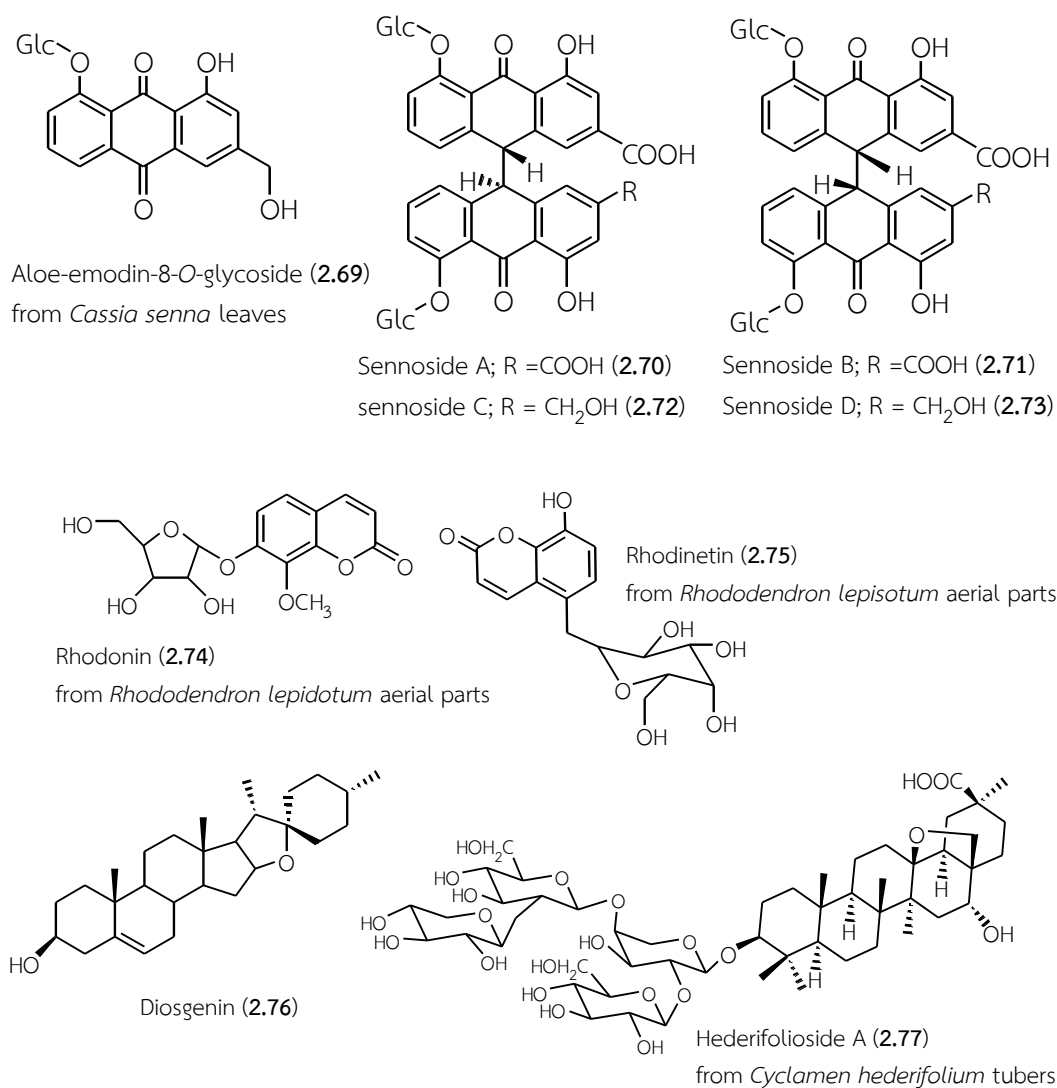


ภาพที่ 2.33 ตัวอย่างฟีนอลิกไกลโคไซด์

6.3.4 กลุ่มแอนทราควิโนนไกลโคไซด์ (anthraquinone glycoside) โครงสร้างจะมีน้ำตาลเกาะกับแอนทราควิโนน (anthraquinone) ได้แก่ อะโล-อีโมดินไกลโคไซด์ (Aloe-emodin glycoside, 2.69) พบในพืชหลายชนิด และเซนโนไซด์เอ บี ซี และอี (Sennodise A, -B, C และ D, 2.70-2.73) ดังภาพที่ 2.34 ส่วนมากพบในพืชสกุลแคสเซีย (*Cassia* spp.) (Kuhnert & Molod, 2005, pp. 7571-7573)

6.3.5 กลุ่มคูมารินไกลโคไซด์ (coumarin glycoside) มีคูมารินเป็นอะไกลโคน ได้แก่ โรโดนิน (Rhodonin, 2.74) และโรโดเน็ติน (Rhodonetin, 2.75) ดังภาพที่ 2.34 ซึ่งแยกได้จากพืชในวงศ์อีริคาซีอี (Ericaceae) ซึ่งเป็นพืชท้องถิ่นในประเทศอินเดีย (Khan, Sawl, Tantray & Alam, 2008, pp. 232-233)

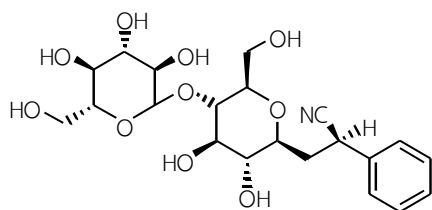
6.3.6 กลุ่มซาโปนินไกลโคไซด์ (saponin glycoside) ในส่วนอะไกลโคน เรียกว่า ซาโปจีนิน (sapogenin) ตัวอย่างเช่น ไดออสจีนิน (Diosgenin, **2.76**) และเฮเดรีโฟลิโอไซด์เอ (Hedelifolioside A, **2.77**) เป็นต้น ดังภาพที่ 2.34



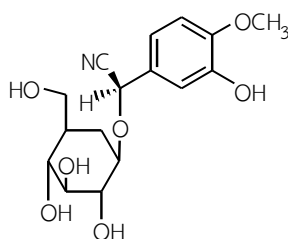
ภาพที่ 2.34 ตัวอย่างแอนทราควิโนนไกลโคไซด์ คูมารินไกลโคไซด์ และซาโปนินไกลโคไซด์

6.3.7 กลุ่มไซยาโนจีนิกไกลโคไซด์ (cyanogenic glycoside) โครงสร้างมีหมู่ไซยาไนด์ (cyanide) ในส่วนอะไกลโคน หลังจากไกลโคไซด์ถูกแยกสลายด้วยน้ำแล้ว ได้น้ำตาล และแก๊ส ไฮโดรเจนไซยาไนด์ (HCN) เช่น ยูคาลิปโทซินบี (Eucalyptosin B, **2.78**) และไฮดราไซยาโนไซด์เอ (Hydracyanoside A, **2.79**) เป็นต้น ดังภาพที่ 2.35

6.3.8 กลุ่มไฮโอไกลโคไซด์ (thioglycoside) ส่วนอะไกลโคนจะมีอะตอมซัลเฟอร์ เรียกว่า ไอโซไธโอไซยาเนต (isothiocyanate) ได้แก่ ซินิกริน (Sinigrin) ดังภาพที่ 2.30



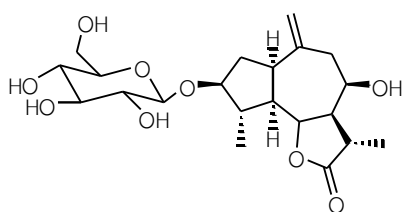
Eucalyptosin B (2.78)
from *Eucalyptus camphora*



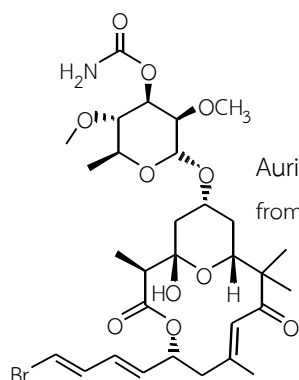
Hydracyanoside A (2.79)
from *Hydrangea macrophylla* leaves and stems

ภาพที่ 2.35 ตัวอย่างไฮยาโนจีนิกไกลโคไซด์

6.3.9 กลุ่มแลกโตนไกลโคไซด์ (lactone glycoside) โครงสร้างส่วนน้ำตาลเกาะกับอะไกลโคนที่เป็นสารประกอบแลกโตน ได้แก่ กัวเอียนไฮโดรเจนไกลโคไซด์ (Guaianoside glycoside, 2.80) กรณีอะไกลโคนเป็นวงแลกโตนขนาดใหญ่ จะเรียกว่า แมโครไลด์ไกลโคไซด์ (macrolide glycoside) ได้แก่ ออริไซด์บี (Aurisode B, 2.81) ดังภาพที่ 2.36



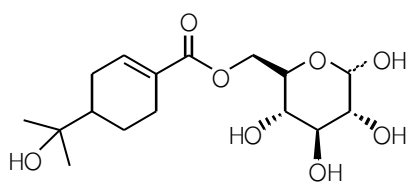
Guaianoside glycoside (2.80)
from *Crepis conyzifolia* roots



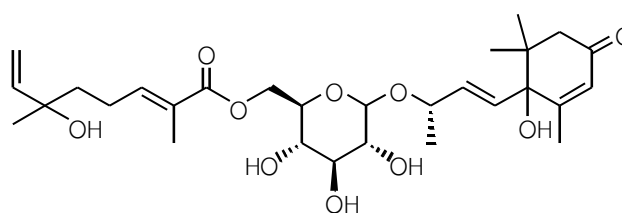
Aurisode B (2.81)
from the sea hare *Dolabella auricularia*

ภาพที่ 2.36 ตัวอย่างแลกโตนไกลโคไซด์และแมโครไลด์ไกลโคไซด์

6.3.10 กลุ่มเอสเทอร์ไกลโคไซด์ (ester glycoside) หมู่ไฮดรอกซิลของน้ำตาลจะต่อพันธะเอสเทอร์กับหมู่คาร์บอกซิลของส่วนอะไกลโคน ได้เป็นโอ-ไกลโคไซด์ เช่น ยูแคลไมดินเอ (Eucalmaidin A, 2.82) และโรทังดิโด้ลีนเอ (Rotundifoline A, 2.83) เป็นต้น ดังภาพที่ 2.37



Eucalmaidin A (2.82)

from *Eucalyptus maidenii* leaves

Rotundifoline A (2.83)

from *Rotala rotundifolia* leaves

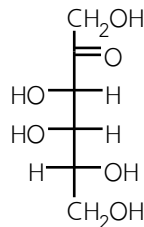
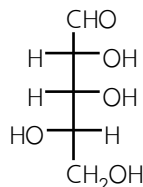
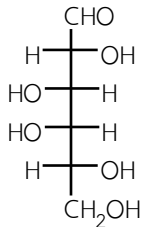
ภาพที่ 2.37 ตัวอย่างเอสเทอร์ไกลโคไซด์

บทสรุป

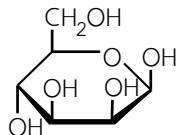
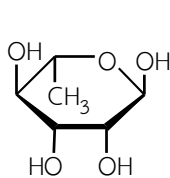
มอนแซ็กคาไรด์เป็นสารประกอบพอลิไฮดรอกซีแอลดีไฮด์และคีโตน มีสเตอริโอไอโซเมอร์เท่ากับ 2^n โดยที่ n คือ จำนวนไครลอะตอม โดยกำหนดโครงสร้างชนิดดี- และชนิดแอล- ซึ่งเทียบกับกลีเซอรอลดีไฮด์ ซึ่งโครงสร้างที่เป็นภาพในกระจกเงาซึ่งกันและกัน เรียกว่า เอแนนทิโอเมอร์ โครงสร้างที่ต่างกันเฉพาะจุดไครลคาร์บอนเพียงตำแหน่งเดียว เรียกว่าเอพิเมอร์ สูตรโครงสร้างเส้นตรงของมอนแซ็กคาไรด์ เรียกว่า ภาพฉายแบบฟิชเชอร์ ซึ่งจะเป็นสมมูลกับโครงสร้างไซปิด เรียกว่า ภาพฉายแบบฮาเวอร์ธของน้ำตาลชนิดไพแรโนสและฟูแรโนส เรียกปรากฏการณ์นี้ว่า มิวทาโรเทชัน ซึ่งตำแหน่งที่ปิดวง เรียกว่า คาร์บอนแอนอเมอร์ เกิดได้ 2 แบบ คือ แอนอเมอร์ชนิดแอลฟา- และชนิดบีตา- เมื่อมอนแซ็กคาไรด์เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิก ได้ได้แซ็กคาไรด์ ไทรแซ็กคาไรด์และพอลิแซ็กคาไรด์ ในที่สุด นอกจากนี้ ยังพบน้ำตาลอนุพันธ์ ได้แก่ น้ำตาลฟอสเฟต น้ำตาลแอลกอฮอล์ กรดน้ำตาล น้ำตาลดีออกซี น้ำตาลเอมีโน และไกลโคไซด์ ซึ่งคุณสมบัติของน้ำตาลแต่ละชนิด ได้แก่ การหมุนเชิงแสง การแยกสลายด้วยน้ำ และน้ำตาลรีดิวซ์ โดยเกิดตะกอนสีแดงอิฐกับสารละลายเบเนดิกต์

คำถามท้ายบท

1. จงบอกความหมายของแอลโดเฮปโทส และจงเขียนโครงสร้างสเตอริโอไอโซเมอร์ทั้งหมด
2. จากโครงสร้างน้ำตาลที่กำหนดให้ จงระบุว่าเป็นโครงสร้างชนิดดี- หรือชนิดแอล-

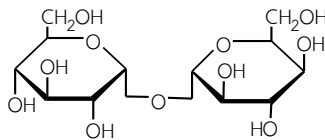
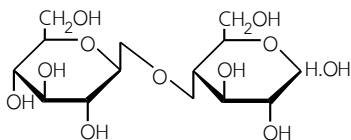


3. จงแสดงการปิดวงดี-ไลโอส (D-Lyose) ได้วงขนาด 5 เหลี่ยม และการปิดวงดี-กาแล็กโทสได้วงขนาด 6 เหลี่ยม
4. กำหนดโครงสร้างน้ำตาลไซปิโด จงระบุว่าเป็นแอนอเมอร์ชนิดแอลฟา- หรือชนิดบีตา-



5. จงเขียนภาพฉายแบบฟิชเชอร์และภาพฉายแบบฮาเวอร์ธ ของน้ำตาลต่อไปนี้
 - 5.1 4-เอพิเมอร์ของปีต้า-ดี-กาแล็กโทไพแรโนส (β -D-Galactopyranose)
 - 5.2 2-เอพิเมอร์ของแอล-อะราบินโนส
 - 5.3 เอแนนทิโอเมอร์ของดี-ไซโลส

6. กำหนดโครงสร้าง จงบอกมอนอเมอร์และชนิดพันธะไกลโคซิดิก



7. จากข้อ 6 น้ำตาลใดบ้างที่ทำปฏิกิริยากับสารละลายเบเนดิกต์ เพราะเหตุใด
8. จงอธิบายปรากฏการณ์มิวทาโรเทชัน
9. จงอธิบายว่า เพราะเหตุใดส่วนใหญ่สารเมแทบอลิต์ทุติยภูมิจะอยู่ในรูปไกลโคไซด์มากกว่ารูปอิสระ