

แผนบริหารการสอนประจำบทที่ 5

หัวข้อเนื้อหาประจำบท

1. สมบัติทางเคมีของคาร์โบไฮเดรต
2. โครงสร้างของคาร์โบไฮเดรต
3. การแบ่งประเภทของคาร์โบไฮเดรต
4. หน้าที่ของคาร์โบไฮเดรต

บทสรุป

คำถามท้ายบท

เอกสารอ้างอิง

วัตถุประสงค์เชิงพฤติกรรม

เพื่อให้นักศึกษาสามารถ

1. บอกสมบัติทางเคมีของคาร์โบไฮเดรตได้
2. อธิบายโครงสร้างของคาร์โบไฮเดรตได้
3. อธิบายการแบ่งประเภทของคาร์โบไฮเดรต
4. อธิบายหน้าที่ของคาร์โบไฮเดรต

วิธีการสอนและการจัดกิจกรรมการเรียนรู้การสอนประจำบท

1. ศึกษาเอกสารประกอบการสอน เรื่อง คาร์โบไฮเดรต และเมทาบอลิซึม
2. ศึกษาค้นคว้าเพิ่มเติมเรื่องคาร์โบไฮเดรต และเมทาบอลิซึม
3. การตอบคำถามท้ายบท

สื่อการเรียนการสอน

1. เอกสารประกอบการสอน
2. สไลด์ Microsoft Power Point เรื่อง
3. เว็บไซต์ที่เกี่ยวข้องกับคาร์โบไฮเดรต และเมทาบอลิซึม

การวัดผลและการประเมินผล

1. สังเกตจากความสนใจ ความตั้งใจเรียน

2#

#

2. ตรวจสอบคำตอบจากการค้นคว้าเพิ่มเติมเรื่องคาร์โบไฮเดรต และเมทาบอลิซึม
3. ตรวจสอบคำตอบจากการตอบคำถามท้ายบท

#

บทที่ 5

คาร์โบไฮเดรต และเมทาบอลิซึม

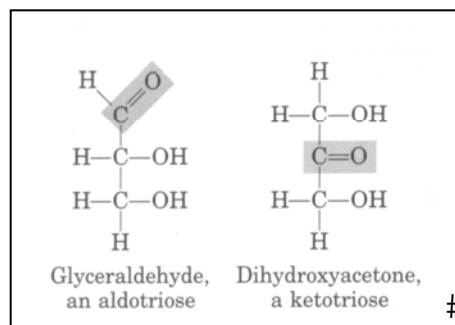
คาร์โบไฮเดรตจัดเป็นโภชนะที่มีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งในทางอาหารสัตว์ เนื่องจากอาหารที่สัตว์กินเข้าไปในแต่ละวันนั้นมีคาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบส่วนใหญ่ ซึ่งในอาหารสัตว์ทุกชนิดโดยทั่วไปเฉลี่ยแล้วมีคาร์โบไฮเดรตประกอบอยู่ประมาณ 70% ของอาหารที่สัตว์กินในแต่ละวัน ซึ่งสัตว์ใช้คาร์โบไฮเดรตเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญ ดังนั้นถ้าหากสัตว์ขาดคาร์โบไฮเดรตก็ทำให้สัตว์ขาดพลังงาน ซึ่งมีผลทำให้กลไกการทำงานของอวัยวะต่างผิดปกติ ทำให้สัตว์ถึงตายได้ อย่างไรก็ตามแม้ว่าในอาหารสัตว์จะประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตเป็นส่วนใหญ่ แต่เนื่องจากสัตว์ใช้คาร์โบไฮเดรตเพื่อเป็นแหล่งพลังงาน และถ้าหากเหลือใช้แล้ว ร่างกายก็จะเปลี่ยนคาร์โบไฮเดรตไปเป็นสารเคมีอย่างอื่นได้ เนื่องจากโครงคาร์บอน(carbon skeleton) ที่ได้จากการ metabolism ของคาร์โบไฮเดรต สามารถนำไปใช้ในการเปลี่ยนไปมา (interconversion) ของสารในวิถี (pathway) ต่างๆได้มาก ดังนั้นร่างกายจึงเก็บคาร์โบไฮเดรตที่เหลือใช้เพื่อสะสมในรูปของคาร์โบไฮเดรตโดยตรงในปริมาณที่น้อยมาก ได้แก่ในรูปน้ำตาลกลูโคสในเลือด (blood glucose) และ ไกลโคเจน ในตับและกล้ามเนื้อ (muscle and liver glycogen) ซึ่งมีอยู่ไม่เกิน 1% ของน้ำหนักตัว

ความหมายและความสำคัญของคาร์โบไฮเดรต

carbohydrate เป็นคำที่มาจากภาษาฝรั่งเศสคำว่า “hydrate de carbone” ซึ่งเป็นคำที่ใช้เรียกสารประกอบตามธรรมชาติที่มีธาตุ carbon (C) ไฮโดรเจน(H) และ ออกซิเจน (O) ประกอบกันโดยมีสัดส่วนของธาตุไฮโดรเจนและออกซิเจนเป็น 2 ต่อ 1 เช่นเดียวกับสัดส่วนของทั้ง 2 ธาตุนี้ที่ประกอบกันเป็นน้ำ (McDonald *et al.*, 1998) ดังนั้นในระยะแรกๆ จึงเขียนสูตรทั่วไปของคาร์โบไฮเดรตได้ดังนี้คือ $(CH_2O)_n$ โดยที่ $n \geq 3$ (Voet and Voet, 1990) อย่างไรก็ตามในระยะต่อมาพบว่า สัดส่วนของธาตุไฮโดรเจนและออกซิเจนที่ประกอบกันเป็นคาร์โบไฮเดรตนั้นไม่ได้เป็น 2:1 เสมอไป ดังนั้นจึงเขียนสูตรทั่วไปของคาร์โบไฮเดรตเสียใหม่ที่เป็น empirical formula ได้ว่า $C_x(H_2O)_y$ (ปทุมทริกา, 2528) ดังนั้นในปัจจุบันคำจำกัดความของคาร์โบไฮเดรตจึงมุ่งพิจารณาไปที่ว่าคาร์โบไฮเดรตเป็น polyhydroxy aldehyde, polyhydroxy ketone, polyhydroxy acids และ polyhydroxy alcohols รวมทั้งอนุพันธ์ (derivatives) ของสารเหล่านี้ (McDonald *et al.*, 1998)

#

ในการให้คำจำกัดความของคาร์โบไฮเดรตในปัจจุบันจัดคาร์โบไฮเดรตเป็น polyhydroxy aldehyde, ketone, acid และ alcohol รวมทั้งอนุพันธ์ (derivatives) ของสารเหล่านี้ หรืออาจจะ เป็น oligomer หรือ polymer ของ polyhydroxy aldehyde และ polyhydroxy ketone โดยที่ คาร์โบไฮเดรตที่พบส่วนใหญ่ เป็นสารประกอบของ carbon: C, hydrogen: H และ oxygen: O โดยมีอัตราส่วนของ H: O เป็น 2: 1 ดังนั้นในอดีตจึงเขียนสูตรของคาร์โบไฮเดรตเป็น $(C H_2O)_n$ แต่เนื่องจากในปัจจุบันพบว่านอกจาก C, H และ O แล้ว ยังมีคาร์โบไฮเดรตบางชนิดที่มีธาตุอื่นที่ นอกเหนือไปจาก 3 ธาตุนี้ประกอบอยู่ด้วยเช่น ฟอสฟอรัส (P) กำมะถัน(S) และไนโตรเจน (N) ขณะเดียวกันสารบางอย่างที่มีสูตรว่า $(CH_2O)_n$ ที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรตก็มีด้วย เช่น Acetic acid ($C_2H_4O_2$), lactic acid ($C_3H_6O_3$) ขณะที่สารประกอบคาร์โบไฮเดรตบางชนิดก็ไม่ได้มีสูตร โครงสร้างเป็น $(C H_2O)_n$ ก็มีเช่นกันได้แก่ rhamnose sugar ซึ่งมีสูตรว่า $C_6H_{12}O_5$ ดังนั้นปัจจุบันจึง เขียนเป็นสูตรเอมิไพริกัล (empirical formula) ได้ดังนี้คือ $C_x(H_2O)_y$, (ปุกนทริกา, 2528) ซึ่งเป็นผลให้ สามารถครอบคลุมได้กว้างกว่าเพราะ คาร์บอน(C) จะเป็นเท่าไรก็ได้โดยมีค่าเท่ากับ X ซึ่งเป็นตัว แปรที่มีอิสระ(variable value) ขณะที่สัดส่วนของ H: O จะเป็นเท่าไรก็ขึ้นอยู่กับ Y และเนื่องจาก คาร์โบไฮเดรตที่ย่อยได้ง่ายส่วนใหญ่คือแป้งและน้ำตาล โดยที่คาร์โบไฮเดรตที่เป็นน้ำตาลนั้นมีส่วนของ โครงสร้างโมเลกุลที่ทำหน้าที่เป็น functional group ที่ต่างกันได้ 2 แบบ คือ aldehyde และ ketone (ภาพที่ 5.1) ดังนั้นจึงมักจะเรียกน้ำตาลที่เป็นอนุพันธ์ของ aldehyde ว่า aldose และเรียก น้ำตาลที่ เป็นอนุพันธ์ของ ketone ว่า ketose

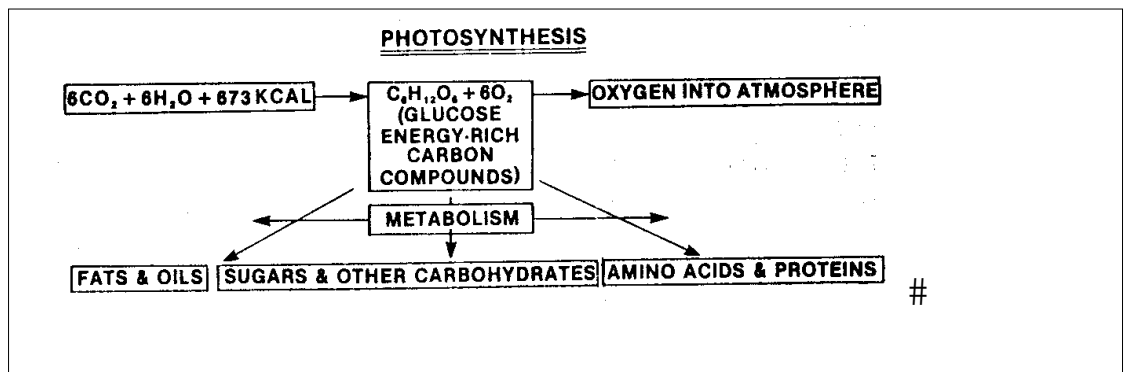


ภาพที่ 5.1: ตัวอย่างน้ำตาลที่มี 3 คาร์บอน (triose) ซึ่งเป็นอนุพันธ์ของ aldehyde (Glyceraldehyde) และ ketone (Dihydroxy acetone)

ที่มา: Nelson and Cox (2000)

ความสำคัญของคาร์โบไฮเดรต

คาร์โบไฮเดรต เป็นโมเลกุลขั้นต้นที่ได้จากการสังเคราะห์ของพืชในกระบวนการสังเคราะห์แสง (photosynthesis) โดยพืชใช้คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และน้ำ (H_2O) เป็นวัตถุดิบโดยมีแสงและคลอโรฟิลล์ (chlorophyll) ร่วมในปฏิกิริยา (light reactions) ได้เป็นน้ำตาลเชิงเดี่ยวที่เป็น glucose และ oxygen รวมทั้งได้พลังงาน (gibb free energy: ΔG เท่ากับ 2,872 kj หรือ เท่ากับ 686 kcal) (Linder, 1959) ดังปฏิกิริยา (ภาพที่ 5.2)



ภาพที่ 5.2 กระบวนการสังเคราะห์แสงในพืชแสดงผลรวมของปฏิกิริยาทั้งใน light และ dark reactions

ที่มา: Ensminger *et al.*, 1990

การแบ่งประเภทของคาร์โบไฮเดรตตามโครงสร้างและองค์ประกอบทางเคมี

คาร์โบไฮเดรตในอาหารที่สัตว์กิน สามารถแบ่งตามธรรมชาติของสารเคมีที่ประกอบออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ คือ

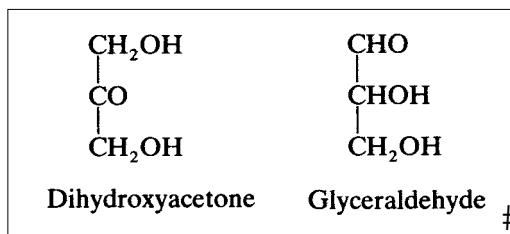
1. กลุ่มที่เป็นน้ำตาล (sugar group) ได้แก่ ได้แก่ น้ำตาลที่พบในแหล่งตามธรรมชาติ ทั่วๆไปอาจมีรสหวาน หรือขมก็ได้ แล้วแต่นชนิดน้ำตาลนั้น แบ่งเป็น 2 กลุ่มย่อยตามความซับซ้อนของโครงสร้างได้ 2 กลุ่มคือ

1.1.) น้ำตาลเชิงเดี่ยว (monosaccharides) หรือน้ำตาลอย่างง่าย (simple sugar) เป็นน้ำตาลที่เป็นหน่วยที่เล็กที่สุดของคาร์โบไฮเดรต สามารถแบ่งเป็นกลุ่มย่อยตามจำนวนอะตอมของคาร์บอนที่ประกอบในโมเลกุลที่มีตั้งแต่ 3-7 อะตอมคือ triose, tetroses, pentoses, hexoses และ heptoses ตามลำดับ น้ำตาลเชิงเดี่ยวที่ประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอน 3 4 และ 7 อะตอมมักพบในสภาพที่เป็นสารตัวกลาง (intermediate หรือ metabolized) ของปฏิกิริยา metabolism ของ

#

คาร์โบไฮเดรตชนิดต่างๆในสิ่งมีชีวิตมากกว่าที่พบในรูปอิสระในอาหาร ในขณะที่น้ำตาลเชิงเดี่ยวที่มี 5 และ 6 คาร์บอน พบได้ในรูปอิสระในอาหารซึ่งน้ำตาลเชิงเดี่ยว เหล่านี้มักจะเชื่อมต่อกันเป็นน้ำตาลเชิงซ้อน (polysaccharides) ชนิดต่างๆได้จัดเป็น น้ำตาลที่เป็นโมเลกุลพื้นฐานของน้ำตาลอื่นๆ และเป็นน้ำตาลที่เป็นผลผลิตขั้นสุดท้ายของการย่อยคาร์โบไฮเดรตชนิดต่างๆโดยปกติมีสูตรทั่วไปว่า $(CH_2O)_n$ โดยที่ n จะมีค่าตั้งแต่ 3 ขึ้นไปซึ่ง Monosaccharides ที่มีโดยทั่วไปได้แก่

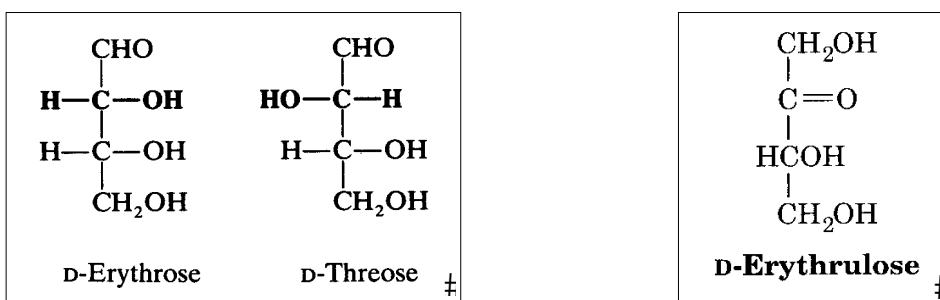
1.) น้ำตาลเชิงเดี่ยวที่โมเลกุลมีจำนวน 3 คาร์บอน (triose: $C_3H_6O_3$) เป็นน้ำตาลที่ไม่พบในธรรมชาติ แต่พบว่าเป็นตัวกลาง (intermediate หรือ metabolite) ในวิถีการเปลี่ยนแปลง (metabolism) ของคาร์โบไฮเดรตอื่น เช่น ในวิถี glycolysis ได้แก่ glyceraldehyde และ dihydroxy acetone (ภาพที่ 5.3)



ภาพที่ 5.3 โครงสร้างของ dihydroxy acetone และ glyceraldehyde

ที่มา: Kuchel and Ralston (1988)

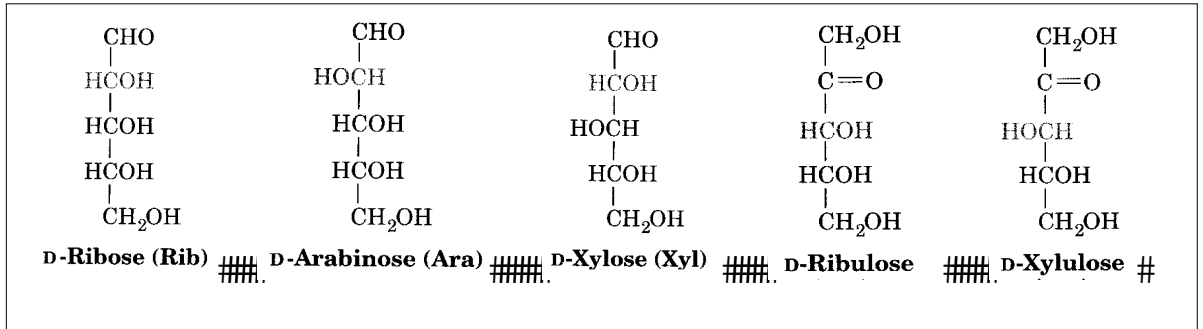
2.) น้ำตาลเชิงเดี่ยวที่โมเลกุลมีจำนวน 4 คาร์บอน (Tetrose ($C_4H_8O_4$) เป็นน้ำตาลที่ไม่พบใน ธรรมชาติเช่นกันแต่พบในสถานะที่เป็นสารตัวกลางของ metabolism ของน้ำตาลชนิดอื่นๆ ได้แก่ น้ำตาล threose และ erythrose ซึ่งจัดเป็น aldotetrose และ erythrulose ที่จัดเป็น ketotetrose (ภาพที่ 5.4)



ภาพที่ 5.4 โครงสร้างของน้ำตาล erythrose และ threose ซึ่งเป็นน้ำตาลชนิด aldotetrose และ น้ำตาล erythrulose ที่เป็น ketotetrose

ที่มา: Kuchel and Ralston (1988) และ Voet and Voet (1990)

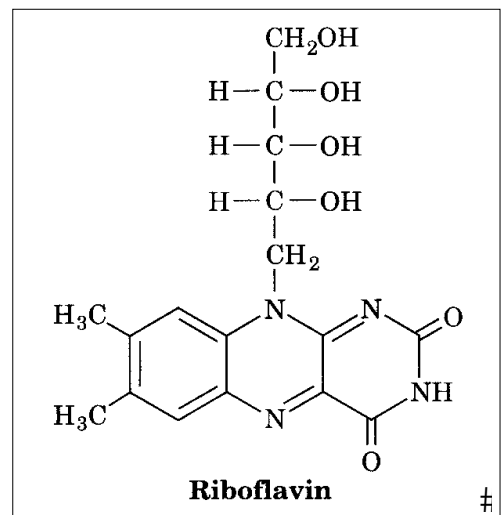
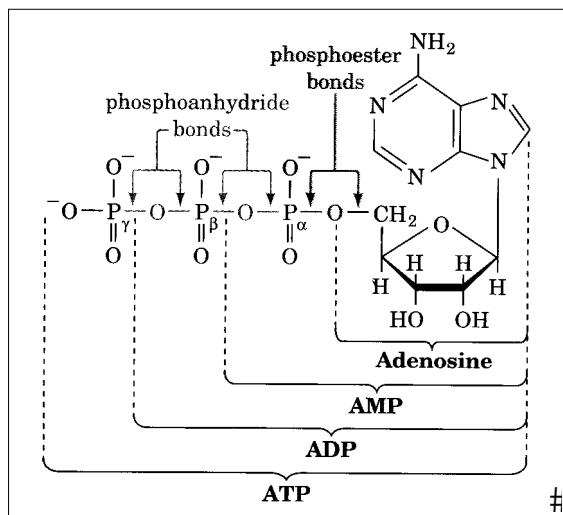
3.) น้ำตาลเชิงเดี่ยวที่โมเลกุลมีจำนวน 5 คาร์บอน (pentose: C₅H₁₀O₅) เป็นน้ำตาลที่ไม่ได้พบในรูปอิสระ (free form) ในธรรมชาติ แต่พบในรูปที่อยู่รวมกับน้ำตาลชนิดอื่น ได้แก่ น้ำตาล ribose, arabinose, xylose และ xylulose (ภาพที่ 5.5)



ภาพที่ 5.5: โครงสร้างของน้ำตาลเชิงเดี่ยวที่โมเลกุลมีคาร์บอน 5 อะตอมทั้งที่เป็น aldopentose ซึ่งได้แก่ ribose, arabinose และ xylose และที่เป็น ketopentose ซึ่งได้แก่ ribulose และ xylulose

ที่มา: ดัดแปลงจาก Voet and Voet (1990)

3.1) Ribose เป็นน้ำตาลเชิงเดี่ยวที่พบได้ในทุกเซลล์ของสิ่งมีชีวิตเพราะน้ำตาลชนิดนี้เป็นองค์ประกอบของ ribonucleic acids: RNA รวมทั้งเป็นส่วนประกอบของ AMP (adenosine monophosphate) ADP (adenosine diphosphate) และ ATP (adenosine triphosphate) และใน vitamin B₂ (riboflavin) (ภาพที่ 5.6)



#

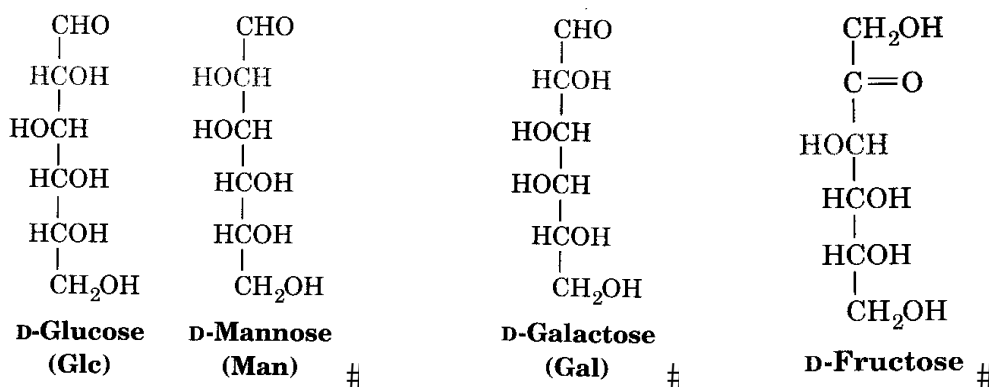
ภาพที่ 5.6 โครงสร้างของ AMP (adenosine monophosphate), ADP (adenosine diphosphate) ATP (adenosine triphosphate) และวิตามิน B₂ (riboflavin) ซึ่งมีน้ำตาล Ribose เป็นองค์ประกอบที่สำคัญ

ที่มา: Voet and Voet (1990)

3.2) Arabinose เป็นน้ำตาลเชิงเดี่ยวที่เป็นส่วนประกอบของคาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อนอื่นที่เป็น pentosans ของ arabinans (arabans) และเป็นส่วนประกอบของ hemicellulose พบอิสระใน silage เนื่องจากถูก hydrolyzed ออกมาจาก hemicellulose ในโครงสร้างของผนังเซลล์ของพืชหมัก และยังสามารถพบได้ในยางไม้บางชนิดเช่น gum arabic และ ยางไม้อื่นๆถ้าย่อย (hydrolysis) ยางไม้เหล่านั้นก็จะได้อrabinose

3.3) Xylose เป็นน้ำตาลเชิงเดี่ยวที่เป็นส่วนประกอบของคาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อนพวก pentosans ของ xylans ซึ่ง xylans จัดเป็นส่วนประกอบสำคัญของ hemicellulose ของหญ้า ดังนั้นจึงพบน้ำตาลชนิดนี้ได้ในหญ้าแห้ง (hay) และแกนฝักข้าวโพด (corn cop)

4.) น้ำตาลเชิงเดี่ยวที่โมเลกุลมีจำนวน 6 คาร์บอน (Hexoses: C₆H₁₂O₆) จัดเป็นน้ำตาลที่มีความสำคัญที่สุดในทางอาหารสัตว์ได้แก่ glucose, mannose, galactose และ fructose (ภาพที่ 5.7)



ภาพที่ 5.7 โครงสร้างของน้ำตาล glucose, mannose galactose ซึ่งจัดเป็น aldohexose และน้ำตาล fructose

ซึ่งจัดเป็น ketohexose ในโครงสร้างที่เป็น D-form ทั้งหมด

ที่มา: Voet and Voet (1990)

4.1) glucose (dextrose) เป็นน้ำตาลที่พบได้ทั้งในรูปอิสระตามธรรมชาติและประกอบรวมอยู่กับ น้ำตาลชนิดอื่น เช่น น้ำตาลใน น้ำหวานของผลองุ่น (grape sugar) ในน้ำผลไม้, ในน้ำผึ้ง, ในน้ำเลี้ยงต้นไม้ (xylem) น้ำตาลในเลือด (blood glucose) เป็นน้ำตาลที่มีความหวานเป็น 3 ใน 4 ของน้ำตาลอ้อย ในการย่อยอาหาร carbohydrate ขั้นสุดท้ายในร่างกายของสัตว์จะได้เป็น glucose น้ำตาลชนิดนี้ในรูปบริสุทธิ์มีลักษณะเป็นผลึกขาว แข็งคล้ายน้ำตาล และสามารถละลายได้ในน้ำ

4.2) galactose ในธรรมชาติจะรวมอยู่กับ glucose ในน้ำตาลนม (lactose) หรือ galactose ที่เป็นส่วนประกอบของ galactolipid ซึ่งเป็นส่วนประกอบของสมองและเนื้อเยื่อประสาท หรือในสารสีบางอย่างเช่น anthocyanin หรือในยางไม้ (gums) หรือในเมือกไม้ (mucilage) บางชนิด จะไม่พบgalactoseในรูปอิสระในธรรมชาติ แต่ในการตรวจสอบผลผลิตจากอาการระบวมการหมักบางครั้งอาจจะพบ galactose ได้ ซึ่ง galactose ที่พบนั้นเป็นผลมาจากการหมักโดยจุลินทรีย์ ไม่ใช่รูปอิสระในธรรมชาติที่มีบทบาททางชีวเคมีใดๆ

4.3) mannose เป็นน้ำตาลเชิงเดี่ยวที่ไม่พบในรูปอิสระในธรรมชาติเช่นเดียวกันแต่พบได้ในพืชอยู่ในรูปของ polymer ของ mannose ในรูป mannan ที่พบได้มากใน เซลล์ของจุลินทรีย์พวก ยีสต์ รา และ แบคทีเรีย รวมทั้ง mannose ที่เป็นส่วนประกอบของ glycoprotein บางชนิด ถ้าสกัด mannose เป็นสารบริสุทธิ์อาจจะมึรสหวานหรือขมก็ได้ขึ้นอยู่กับโครงสร้าง (form) α -mannose มีรสหวานนิดๆ ขณะที่ β -mannose มีรสขมนิดๆ ในพืชบางชนิดมี mannan อยู่มากแต่เนื่องจากร่างกายของคนไม่มี enzyme ที่จะย่อย คาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อนชนิดนี้จึงมีการนำมาทำเป็นอาหารลดความอ้วนในคนไข้บางประเภทได้

4.4) fructose เป็นน้ำตาลที่พบได้ในรูปอิสระเช่นเดียวกับ glucose มีมากในผลไม้ จึงได้ชื่อว่าเป็นน้ำตาลผลไม้ (fruit sugar หรือ levulose) ในน้ำผึ้ง หรืออาจจะอยู่รวมกับ glucose ในน้ำตาลทราย (sucrose) fructose จัดเป็นน้ำตาลเชิงเดี่ยวที่มีความหวานมากที่สุด ซึ่งหวานกว่าน้ำตาลทราย (sucrose) (ดูตารางที่ 4.1)

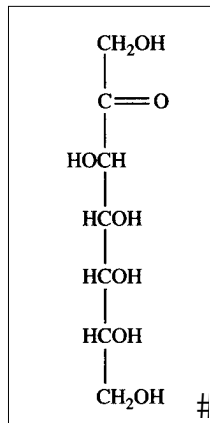
#

ตารางที่ 5.1 ระดับความหวาน (relative sweetness) ของสารเคมีบางชนิด

Sucrose	1.0	Maltose	0.45
D-Fructose	1.35	Galactose	0.32
D-Glucose	0.74	Lactose	0.16
Xylose	0.67	Saccharin	200-700
Sorbitol	0.54		

ที่มา: Bernard *et al* (1981)

5.) น้ำตาลเชิงเดี่ยวที่โมเลกุลมีจำนวน 7 คาร์บอน (heptoses: $C_7H_{14}O_7$) ได้แก่ D-sedoheptulose เป็นน้ำตาลที่ไม่พบในธรรมชาติแต่พบเป็นสารตัวกลางใน pentose phosphate pathway

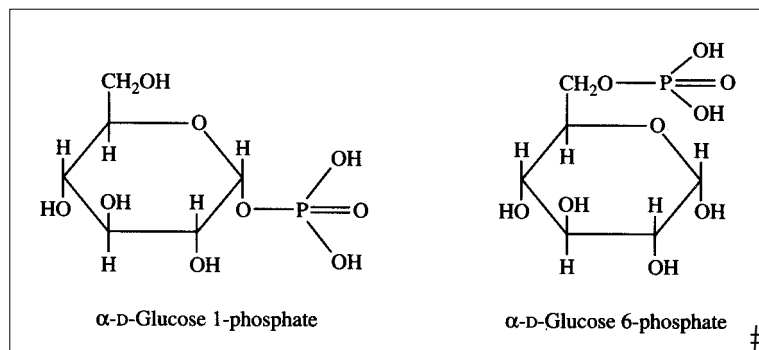


ภาพที่ 5.8 โครงสร้างของน้ำตาล D- sedoheptulose ซึ่งจัดเป็น ketoheptose

ที่มา: McDonald *et al.*, 1998

4.2.1.2 อนุพันธ์ของน้ำตาลเชิงเดี่ยว (monosaccharides derivatives) ได้แก่ monosaccharides ถูกทำปฏิกิริยาให้แปรสภาพไปจากเดิม เช่น

1.) phosphoric acid ester เป็นอนุพันธ์ของน้ำตาลเชิงเดี่ยวที่มีบทบาทสำคัญ

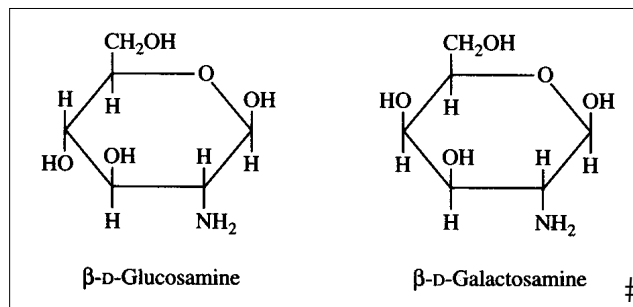


มากในปฏิกิริยาเคมีหลายๆ อย่างในร่างกายได้แก่ glucose 1-phosphate และ glucose 6-phosphate เป็น glucose ที่ถูกทำปฏิกิริยาการเติมฟอสเฟส (phosphatase) ตรงคาร์บอนตำแหน่งที่ 1 และ 6 (C1 และ C6) ได้เป็น glucose 1-phosphate และ glucose 6-phosphate ตามลำดับ ซึ่งมีความสำคัญในการทำหน้าที่เป็นตัวกลาง (intermediate) ใน metabolism ของ glucose ในวัฏจักรต่างๆ เช่นใน glycolysis เป็นต้น

ภาพที่ 5.9 อนุพันธ์ของน้ำตาล glucose ที่เป็น glucose 1-phosphate และ glucose 6-phosphate ซึ่งเป็นทำหน้าที่เป็นตัวกลางใน metabolism ของ glucose ในวัฏจักรต่างๆ

ที่มา: McDonald *et al.*, 1998

2.) amino sugar เกิดจากน้ำตาล 6 คาร์บอนที่ กลุ่ม hydroxyl (OH group) ตำแหน่งที่ 2 ถูกเติมด้วย amino group ได้เป็น amino sugar ซึ่งเป็นสารสำคัญที่ประกอบในส่วนต่างๆ ของร่างกายของคนและสัตว์ได้แก่ glucosamine ซึ่งเป็นส่วนประกอบของ chitin ในเปลือกของสัตว์จำพวก crustacea เช่น กุ้ง ปู ซึ่งเมื่อถูกกับความร้อนจะเปลี่ยนเป็นสีส้ม และอีกชนิดหนึ่งคือ galactosamine ที่พบได้ในส่วนของคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบอยู่ในกระดูกอ่อน (cartilage) ซึ่งมี



ความสำคัญในการเจริญเติบโตของกระดูก

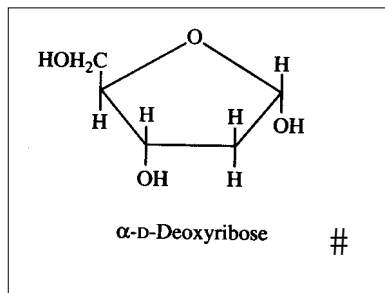
ภาพที่ 5.10 อนุพันธ์ของน้ำตาล glucose ที่เป็น β -D-glucosamine และ β -D-galactosamine ซึ่งเป็นส่วนประกอบของ chitin ในสัตว์มีเปลือกแข็งหุ้ม (crustacean) และในกระดูกอ่อน ตามลำดับ

ที่มา: McDonald *et al.*, 1998

#

3.) **deoxy sugar** ได้แก่น้ำตาลที่กลุ่ม ไฮดรอกซิล (OH-group) ในบางตำแหน่งถูกแทนที่ด้วย hydrogen atom เกิดเป็นน้ำตาลที่ขาด ออกซิเจน (deoxysugar) เช่น ถ้าเป็นน้ำตาล ribose ที่ถูกแทนที่ด้วย hydrogen atom ในตำแหน่ง คาร์บอนที่ 2 เกิดเป็นน้ำตาลที่ขาดออกซิเจนที่ชื่อ deoxyribose ซึ่งมีความสำคัญต่อสัตว์เป็นอย่างมากเนื่องจากเป็นน้ำตาลที่เป็นส่วนประกอบของ DNA

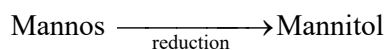
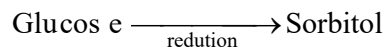
4.) **sugar acid** ได้แก่น้ำตาลที่เป็นอนุพันธ์ของ aldehyde (aldose) ที่ถูก oxydized แล้วได้เป็น sugar acid หลายๆ ชนิด เช่น uronic acid ซึ่งได้แก่ glucouronic acid และ galactouronicacid ซึ่งจะทำหน้าที่ในการทำลายพิษต่างๆ ที่เข้าสู่ร่างกาย



ภาพที่ 5.11 อนุพันธ์ของน้ำตาล Glucose α -D-deoxyribose ซึ่งเป็นส่วนประกอบของ DNA (deoxy ribonucleic acids) ที่ทำหน้าที่ในการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรม

ที่มา: McDonald *et al.*, 1998

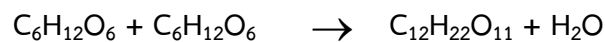
5.) **Sugar alcohol** เป็น alcohol ที่เกิดจากกลุ่มไฮดรอกซิล (OH-group) ของน้ำตาล ถูกทำปฏิกิริยา reduction ได้เป็น sugar alcohol หลายๆ ชนิด เช่น



ซึ่ง mannitol นับว่าเป็น sugar alcohol ที่มีความสำคัญที่พบได้ในเห็ดหมักซึ่งเกิดจากจุลินทรีย์ใช้ประโยชน์จากน้ำตาล fructose จากเห็ดในสภาพไร้ออกซิเจน (anaerobic fermentation)

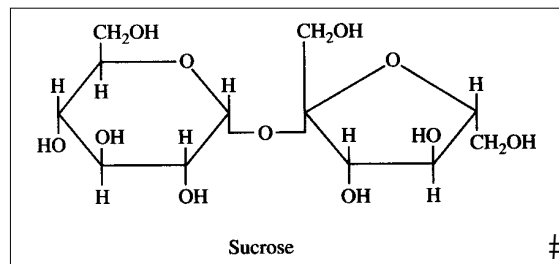
4.2.1.3 น้ำตาลเชิงซ้อน (oligosaccharides) เป็นน้ำตาลที่ประกอบด้วย น้ำตาลเชิงเดี่ยว (monosaccharides) ตั้งแต่ 2-10 โมเลกุลมาต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิก (glycosidic bond หรือ glycosidic linkage) เช่น น้ำตาล lactose ที่เกิดจากน้ำตาล galactose และ น้ำตาล glucose มาต่อกัน สามารถพบน้ำตาลชนิดนี้ได้ ในอาหารบางชนิดเช่นกัน สามารถจำแนกได้ดังนี้

1.) Disaccharides ($C_{12}H_{22}O_{11}$) เป็น น้ำตาลที่เกิดจากการรวมตัวกันของ monosaccharides 2 โมเลกุล ดังปฏิกิริยาต่อไปนี้



ตัวอย่างของ disaccharides ที่สำคัญ เช่น

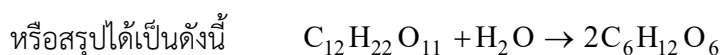
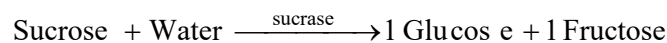
1.1 Sucrose เป็นน้ำตาลที่พบได้ในอ้อย (sugar cane) และหัวบีท (sugar beet) เป็น น้ำตาลที่ประกอบด้วย glucose กับ fructose อย่างละ 1 โมเลกุลทำปฏิกิริยากัน พบมากในอ้อย ในผลไม้บางอย่าง



ภาพที่ 5.12 โครงสร้างของน้ำตาล sucrose ที่เกิดจาก glucose และ fructose อย่างละโมเลกุลมาต่อกัน

ที่มา: McDonald *et al.*, 1998

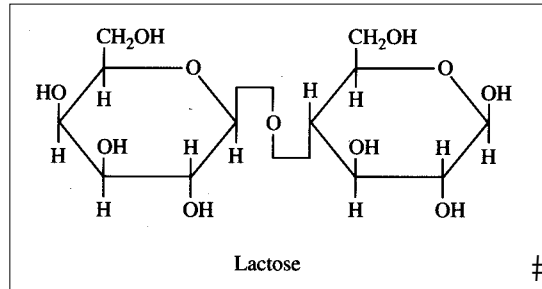
เมื่อถูกย่อยด้วย sucrase ได้เป็น glucose และ fructose อย่างละ 1 โมเลกุลดังนี้



ในพืช sucrose ทำหน้าที่เป็นน้ำตาลขนส่ง (transport sugar) เพื่อการขนส่งสารอย่างอื่นในระบบลำเลียงอาหารเพื่อไปหล่อเลี้ยงส่วนต่างๆ ของพืช

#

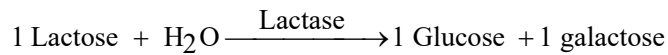
1.2 Lactose เป็นน้ำตาลที่พบได้ในน้ำนม จึงเรียกว่าน้ำตาลนม (milk sugar) ประกอบด้วย 1 โมเลกุล ของน้ำตาล glucose กับ 1 โมเลกุล ของน้ำตาล galactose พบได้มากในน้ำนมของสัตว์ เช่น ในนมโคมี lactose ประมาณ 4.3-4.8 % เป็นน้ำตาลที่ละลายน้ำได้ยากและรสก็ไม่ค่อยหวาน (ดูตารางที่ 4.1)



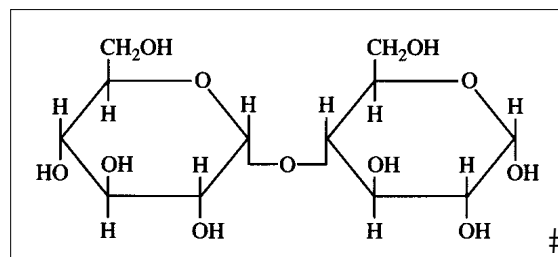
ภาพที่ 5.13 โครงสร้างของน้ำตาล lactose ที่เกิดจาก galactose และ glucose อย่างละโมเลกุลมาต่อกัน

ที่มา: McDonald *et al.*, 1998

แบคทีเรียจำพวก *Lactobacillus acidophilus* และ *Streptococcus lactis* ในลำไส้สามารถหมัก น้ำตาล lactose เพื่อให้เกิดเป็น lactic acid ได้ ทำให้ในลำไส้มีสภาพเป็นกรดได้ เมื่อ lactose ถูกย่อยด้วย lactase ได้เป็น 1 glucose + 1 galactose ดังนี้



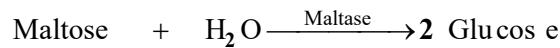
1.3 maltose (malt sugar) เป็นน้ำตาลที่ได้จากการย่อยแป้ง (starch) หรือ glycogen โดย amylase ในร่างกายสัตว์ ในธรรมชาติ น้ำตาลชนิดนี้เกิดจากการย่อยแป้งในระหว่างการงอกของเมล็ดเพื่อให้ได้น้ำตาลที่จะนำไปใช้ในกิจกรรมการเจริญของต้นอ่อนของพืช น้ำตาลชนิดนี้สามารถละลายน้ำได้แต่รสชาติไม่หวานนัก ในเด็กเล็กที่ชอบปฏิเสธการกินข้าวและอมข้าวไว้ในปากนานๆ จนรู้สึกหวานก็เป็นความหวานที่มาจาก maltose ซึ่งเกิดจาก salivary amylase ย่อยแป้งในข้าวจนได้เป็น glucose + glucose จึงมีรสหวานนิดๆ



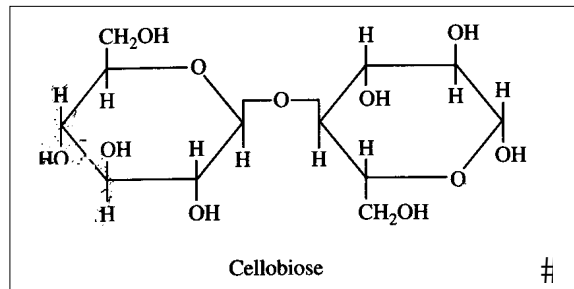
ภาพที่ 5.14 โครงสร้างของน้ำตาล maltose ที่เกิดจาก glucose 2 โมเลกุล

ที่มา: McDonald *et al.*, 1998

ดังนั้น maltose จึงเป็นน้ำตาลที่ประกอบด้วย glucose 2 โมเลกุลต่อกันด้วยพันธะ glycosidic bond ที่เป็นพันธะชนิด α -1, 4 glycosidic linkage พบได้มากในเมล็ดพืชที่กำลังจะงอกมีความหวานน้อยกว่า sucrose เมื่อถูกย่อยด้วย maltase ได้เป็น glucose โมเลกุลดังนี้



1.4 Cellobiose เป็นน้ำตาลที่ประกอบด้วย glucose 2 โมเลกุลต่อกัน ด้วยพันธะ β -1, 4 glycosidic linkage มีคุณสมบัติคล้าย maltose คือมี reducing group เพียง 1 กลุ่ม แต่มีความหวานน้อยกว่าและไม่พบอิสระในธรรมชาติ แต่พบเป็นหน่วยย่อย (repeating unit) ของ Cellulose



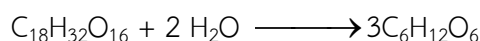
ภาพที่ 5.15 โครงสร้างของน้ำตาล cellobiose ที่เกิดจาก glucose 2 โมเลกุล

ที่มา: McDonald *et al.*, 1998

ร่างกายของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยทุกชนิดไม่มี enzyme สำหรับย่อย cellobiose แต่จุลินทรีย์ มี enzyme สำหรับย่อย cellobios ได้ ดังนั้นสัตว์เลี้ยงทั่วไปจึงไม่สามารถใช้ประโยชน์จากน้ำตาลชนิดนี้ได้ ยกเว้นสัตว์เคี้ยวเอื้องที่มีจุลินทรีย์ในกระเพาะรูเมนทำให้สามารถหมัก (ferment) น้ำตาลชนิดนี้ได้

2.) trisaccharides ($\text{C}_{18}\text{H}_{32}\text{O}_{16}$) เป็น น้ำ ตาล ที่ เกิด จาก monosaccharides 3 molecules เชื่อมต่อกันด้วย glycosidic linkage ได้แก่ น้ำตาลดังต่อไปนี้

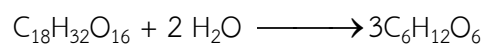
2.1 raffinose เป็นน้ำตาลที่เกิดจาก glucose fructose และ galactose อย่างละ 1 molecule มาต่อกัน เมื่อถูก hydrolyzed หรือถูกย่อยจะได้เป็น monosaccharides 3 molecules เหมือนเดิมคือ



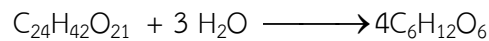
#

พบน้ำตาลชนิดนี้ได้มากพืชในรูปของ sucrose (glucose+fructose) พบปริมาณเล็กน้อยในหัวบีทและในกากน้ำตาล ในเมล็ดฝ้าย มี raffinose ประกอบอยู่ประมาณ 80 กรัม/กิโลกรัม

2.2 kestose และ isokestose เป็นน้ำตาลที่เกิดจาก น้ำตาล fructose เกาะอยู่กับน้ำตาล sucrose (glucose+fructose) พบได้มากในส่วนของเมล็ด ต้นและใบของหญ้าหลายชนิด เมื่อถูก hydrolyzed หรือถูกย่อยจะได้เป็น monosaccharides 3 molecules เช่นเดิมคือ 1 molecule ของ glucose และ 2 molecules ของ fructose ดังนี้



2.3 tetrasaccharides (C₂₄H₄₂O₂₁) เป็นน้ำตาลที่เกิดจาก monosaccharides 4 molecules มาต่อกันตัวอย่างเช่นน้ำตาล stachyose ที่เกิดจาก galactose 2 molecules, glucose 1 molecules และ fructose 1 molecules มาต่อกัน ถูกย่อยจะได้เป็น monosaccharides 4 molecules เช่นเดิมดังนี้



น้ำตาล stachyose พบได้ในพืชชั้นสูงต่างๆ ไปเช่นเดียวกับ raffinose และพบได้มากในเมล็ดพืชตระกูลถั่วและในรากพืช สัตว์สามารถย่อย stachyose ได้ดีแต่คนย่อยได้น้อย ดังนั้นหากคนกินพืชบางชนิด เช่น ถั่วดิบเข้าไปมากๆ ก็จะหลื่อน้ำตาลชนิดนี้ตกไปยังลำไส้ใหญ่ได้มาก จุลินทรีย์ที่อยู่ในลำไส้ใหญ่ก็ ทำการหมักน้ำตาลที่เหลือเกิดเป็นแก๊สได้

4.2.2 กลุ่มที่ไม่ใช่น้ำตาล (Polysaccharides)

polysaccharides เป็นคาร์โบไฮเดรตที่ไม่ใช่น้ำตาล และแตกต่างไปจากกลุ่มที่เป็นน้ำตาล เนื่องจากโดยส่วนใหญ่แล้วเกิดจากการรวมตัวกันของน้ำตาล 5 และ 6 คาร์บอนจำนวนมาก มีน้ำหนักโมเลกุลสูง พบได้มากในพืชทั้งในรูปที่พืชเก็บไว้เป็นอาหารสำรองและที่เป็นโครงสร้างของพืชทางด้านอาหารสัตว์ถือได้ว่าคาร์โบไฮเดรตชนิดนี้เป็นคาร์โบไฮเดรตที่มีมากที่สุด และมีความสำคัญทางด้านอาหารสัตว์มากที่สุดด้วย เพราะอาหารคาร์โบไฮเดรตที่สัตว์กินเข้าไปส่วนใหญ่เป็นคาร์โบไฮเดรตที่อยู่ใน รูปนี้ เช่นแป้งจากข้าวโพด ปลายข้าว มันสำปะหลัง และข้าวฟ่าง และ cellulose ในใบและต้นพืช และจัดเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญที่สุดในอาหารสัตว์ทั้งในสัตว์กระเพาะเดี่ยวและสัตว์เคี้ยวเอื้อง

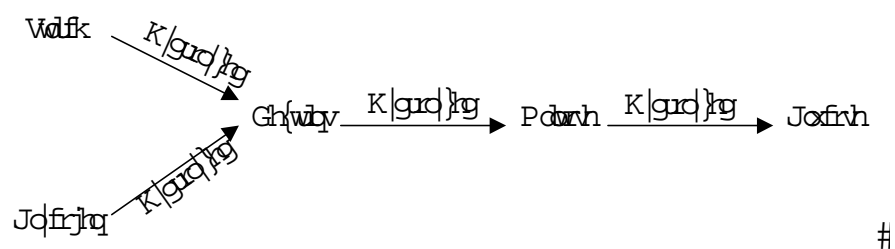
4.2.2.1. homoglycans (homopolysaccharides) เป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วย น้ำตาลเชิงเดี่ยว (monosaccharides) ที่เป็นชนิดเดียวกันมากกว่า 10 molecules ขึ้นไปมาต่อกัน ซึ่งมีคุณสมบัติที่สำคัญคือ ไม่ละลายในน้ำเย็น รสชาติไม่หวาน มีน้ำหนักโมเลกุลสูง และสูงกว่าน้ำตาล เพราะเป็นสารประกอบเชิงซ้อนกว่า พบคาร์โบไฮเดรตชนิดนี้ได้มากในพืช ทั้งในรูปที่พืชจะเก็บไว้เป็น อาหารสำรอง (reserve food materials) เช่น แป้ง และที่เป็นส่วนประกอบของโครงสร้างของเซลล์ พืช (structural materials) เช่น cellulose ซึ่ง homoglycans ที่สำคัญในอาหารสัตว์มีดังนี้

1.) **pentosans ($C_5H_8O_4$)_n** เป็น polysaccharide ที่ประกอบด้วยหน่วยย่อยของน้ำตาล pentose พบมากในหญ้าแห้ง ฟางข้าว, ช้างข้าวโพด เปลือกถั่ว, เปลือกเมล็ดพืชตระกูลถั่วชนิดต่าง pentosans ที่สำคัญๆ คือ arabinans (arabans) ที่เกิดจากการรวมตัวกันของน้ำตาล arabinose และ xylans ที่เกิดจากการรวมตัวกันของ xylose ซึ่งทั้ง arabinans และ xylans พบเป็นส่วนประกอบของ hemicellulose ในผนังเซลล์ของพืชที่มักจะรวมตัวกับสารเคมีอย่างอื่น

2.) **hexans หรือ hexosans ($C_6H_{10}O_5$)_n** เป็น polysaccharide ที่ประกอบด้วยหน่วยย่อยของน้ำตาล hexose ทั้งหมด ซึ่งมีทั้งที่เป็น glucosans ที่ประกอบด้วยหน่วยย่อยของ glucose ทั้งหมด หรือ fructosans ที่ประกอบด้วยหน่วยย่อยของ fructose ทั้งหมด และ galactans ที่ประกอบด้วย หน่วยย่อยของ galactose ทั้งหมด รวมทั้ง mannans ที่ประกอบด้วย หน่วยย่อยของ น้ำตาล mannose ทั้งหมด ซึ่งแต่ละชนิดมีรายละเอียดดังนี้

2.1 glucosans หรือ glucans เป็น hexans ที่ประกอบด้วยหน่วยย่อยของ glucose ทั้งหมดได้แก่

2.1.1 dextrins เป็นสารตัวกลาง (intermediate) ที่เกิดจากการย่อยแป้ง (starch) หรือ การย่อย glycogen ซึ่งการย่อย starch และ glycogen ให้ผลผลิตตามลำดับดังแสดงในภาพ ที่ 4.16



ภาพที่ 5.16 แสดงลำดับการสลาย starch และ glycogen จนได้เป็น glucose ในขั้นสุดท้าย
ที่มา: McDonald *et al.*, 1998

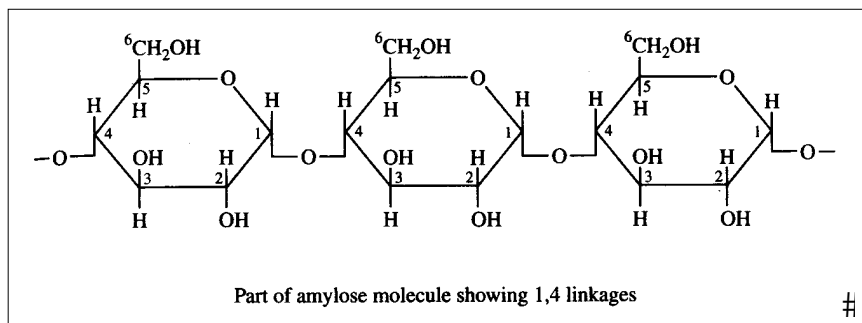
#

ในธรรมชาติสามารถพบ dextrin ได้ในเมล็ดพืชที่กำลังงอก หรือเมื่อนำแป้งไปต้มให้เป็นกาวยิ่งก็เกิดเป็น dextrin ซึ่งเมื่อละลายน้ำมีลักษณะเหนียว ถ้ามีความเข้มข้นของ dextrin มากเมื่อทำปฏิกิริยากับ Iodine เกิดเป็นสีแดง แต่ถ้ามีน้อยจะไม่เกิดสี ในการอบขนมปังที่มี dextrin เกิดขึ้นทำให้ขนมปังมีกลิ่นหอม

2.1.2 dextrans เป็นสารที่ได้จากการสังเคราะห์จาก D-glucose ของแบคทีเรียมีประโยชน์ทางการแพทย์โดยใช้ผสมยา และใช้ผสมในธาตุเหล็กที่ใช้ฉีดให้กับลูกสุกรเพื่งคลอดเพื่อป้องกันการขาดธาตุเหล็ก ซึ่งอยู่ในรูป Iron dextrans

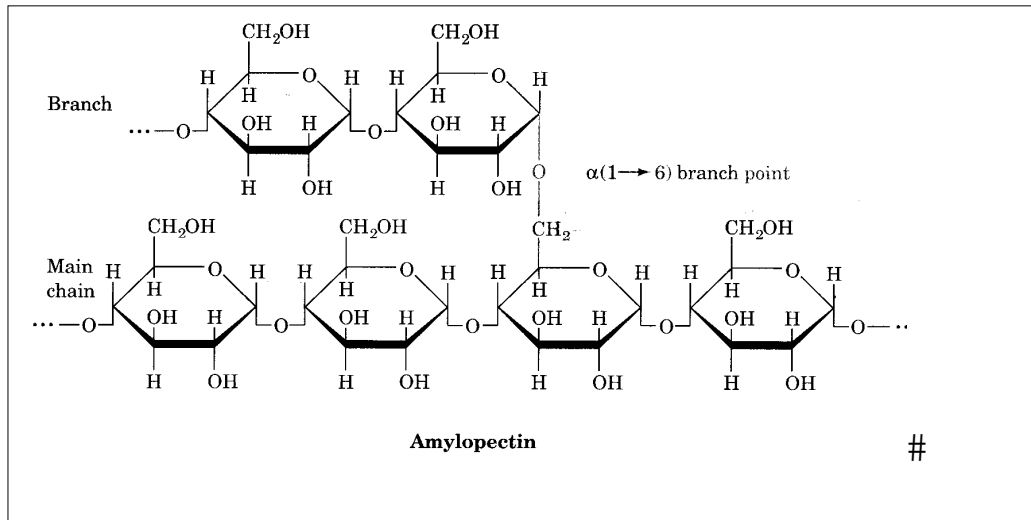
2.1.3 แป้ง (starch) เป็น glucans ที่สำคัญที่สุดเพราะเป็นแหล่งอาหารสำรองของพืช โดยที่พืชเก็บแป้งไว้ในส่วนต่างๆ เช่น เมล็ด ผล หัว และราก ซึ่งแป้งเหล่านี้มีลักษณะเป็นเม็ดๆ (granules) ที่มีขนาดและรูปร่างแตกต่างกันในพืชแต่ละชนิด แม้ว่าองค์ประกอบหลักของแป้งคือคาร์โบไฮเดรตที่เป็น glucans แต่ในเม็ดแป้งก็ยังมีโมฆะอย่างอื่นเช่น โปรตีน ไขมัน และแร่ธาตุพวกฟอสฟอรัสอยู่ด้วย

แป้งในพืชต่างๆไปสามารถแบ่งตามความแตกต่างกันทางเคมีออกได้เป็น 2 ชนิดหลักๆ คือ amylose (ภาพที่ 5.17) และ amylopectin (ภาพที่ 5.18) โดยมีสัดส่วนของแป้งทั้ง 2 ชนิดแตกต่างกันในพืชแต่ละชนิด



ภาพที่ 5.17 แสดงส่วนหนึ่งของโครงสร้างของ แป้ง (amylose) ที่เกิดจาก glucose หลายๆ หน่วยต่อกันด้วยพันธะ α -1, 4 -glycosidic linkage ที่เป็นสายตรง (straight chain)

ที่มา: McDonald *et al.*, 1998



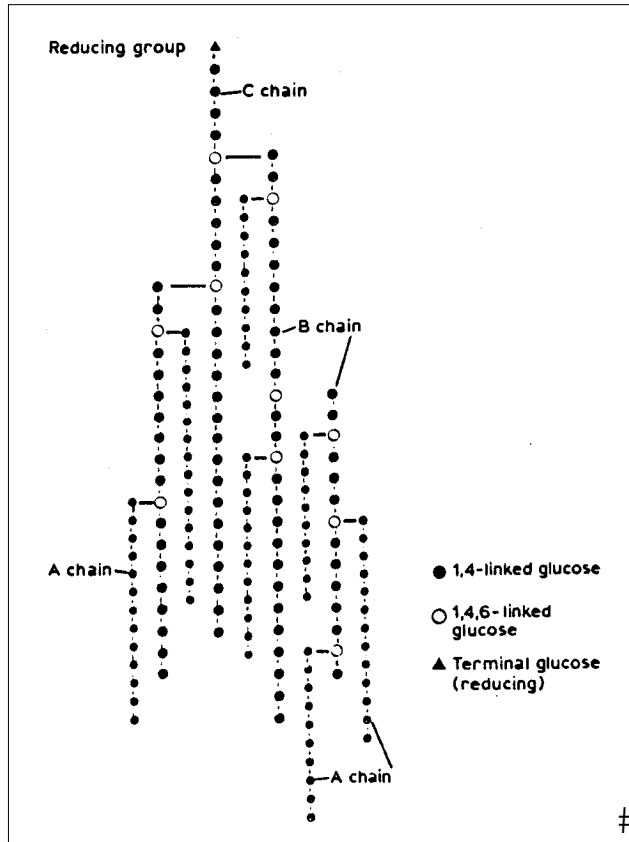
ภาพที่ 5.18 แสดงส่วนหนึ่งของโครงสร้างของ แป้ง (amylopectin) ที่เกิดจาก glucose ต่อกันด้วย พันธะ α -1, 4 -glycosidic linkage ในสายตรง และ α -1, 6 -glycosidic linkage ตรงตำแหน่งที่ แดกกิ่งก้านสาขา (branch point)

ที่มา: Voet and Voet, 1990

โดยเฉลี่ยแล้วพืชส่วนใหญ่มีปริมาณของ amylopectin ในสัดส่วนที่สูงกว่าคือมีอยู่ประมาณ 70-80 % ของแป้งทั้งหมด ซึ่งสามารถทดสอบคุณสมบัติได้ง่ายๆได้โดยการใช้สารละลาย iodine ซึ่งถ้าเป็นแป้งที่มี amylose อยู่มากจะให้สีน้ำเงินเข้ม (deep blue) ขณะที่ amylopectin ให้สีม่วง (purple) หรือม่วงอมน้ำเงิน (blue-violet)

ความแตกต่างทางเคมีที่สำคัญของแป้งทั้ง 2 ชนิดอยู่ที่โครงสร้างของพันธะทางเคมีระหว่างหน่วยย่อยของแป้ง โดยที่ amylose ประกอบด้วยหน่วยย่อยที่เป็น glucose ที่ต่อกันด้วยพันธะ α -1, 4-glycosidic linkage ที่เป็นสายตรง (straight chain) เกือบทั้งหมด แต่อาจจะมี พันธะชนิด α -1, 6-glycosidic linkage ตรงตำแหน่งที่แดกกิ่งก้านสาขา (branch point) อยู่บ้างเพียงเล็กน้อย ขณะที่ amylopectin เป็นแป้งที่ประกอบด้วยหน่วยย่อยที่เป็น glucose ที่ต่อกันด้วยพันธะ α -1, 4-glycosidic linkage ในสายตรง (straight chain) เช่นกัน และมีพันธะชนิด α -1, 6 -glycosidic linkage ตรงตำแหน่งที่แดกกิ่งก้านสาขา (branch point) ทุกๆ 24-30 หน่วยของกลูโคส (ภาพที่ 5.19) จำนวนหน่วยของกลูโคส ในโมเลกุลของ amylopectin อาจสูงถึง 10^6 (1,000,000 หน่วย) ขณะที่โมเลกุลของ amylose ประกอบด้วยหน่วยย่อยของกลูโคสที่มีหน่วยนับเป็นจำนวนพันๆ หน่วยเท่านั้น

#

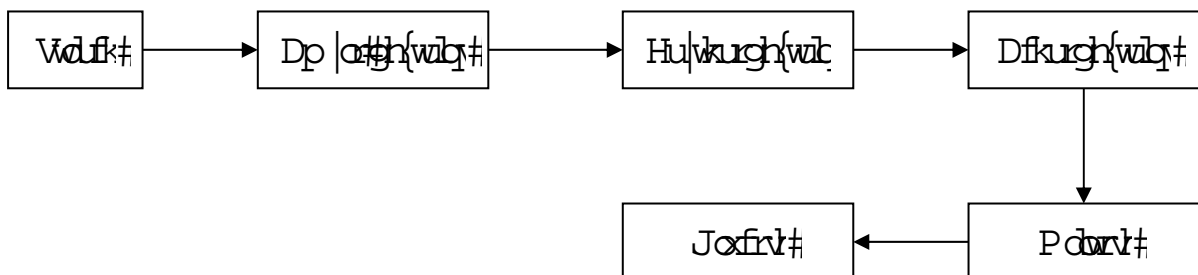


ภาพที่ 5.19 แสดงโครงสร้างของ amylopectin ที่มีพันธะ α -1, 4 -glycosidic linkage ในสายตรง

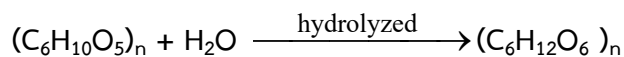
(●) และ α -1, 6 -glycosidic linkage ตรงตำแหน่งที่แตกแขนง(O)

ที่มา: Chesson and Forsberg (1988)

แป้งทั้ง 2 ชนิดที่มีในพืชสามารถนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานในอาหารสัตว์ได้เป็นอย่างดี และในอาหารที่สัตว์กินในแต่ละวันก็มีแป้งที่มาจากธัญพืช เช่น รำ ปลายข้าว ข้าวโพด หรือมันสำปะหลัง ในสัดส่วนที่มากกว่าวัตถุดิบอื่นๆ โดยที่แป้งเหล่านี้มีคุณสมบัติที่สำคัญคือ ไม่ละลายน้ำเย็น แต่เมื่อเม็ดแป้งที่แขวนลอยอยู่ในน้ำถูกทำให้ร้อนจะพองตัวออกและเกิดเป็นกาว (gelatinize) แป้งมีคุณค่าทางอาหารใกล้เคียงกับน้ำตาล ย่อยได้ง่ายผลผลิตขั้นสุดท้ายจะได้เป็นน้ำตาล glucose ดังนี้



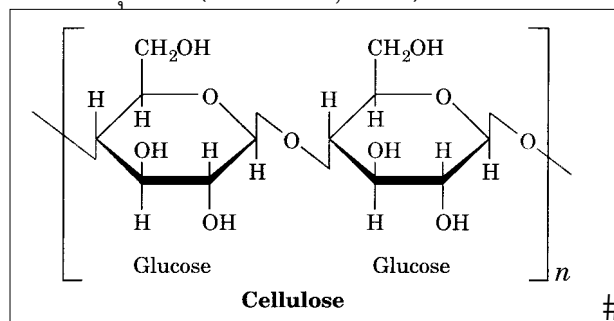
2.1.4 glycogen เป็นคาร์โบไฮเดรตที่ร่างกายเก็บสะสมไว้ในตับและกล้ามเนื้อ และเป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตที่สำคัญที่ร่างกายเก็บสำรองเอาไว้ จึงเรียกได้ว่า animal starch ในสัตว์แต่ละชนิดมี glycogen ที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่ต่างกัน นอกจากนั้น glycogen ของสัตว์ชนิดเดียวกันแต่มาจากอวัยวะที่ต่างกันก็แตกต่างกันด้วย เช่นน้ำหนักโมเลกุลของ glycogen จากตับของหนูมีค่าเท่ากับ $1-5 \times 10^8$ ขณะที่ น้ำหนักโมเลกุลของ glycogen จากกล้ามเนื้อมีค่าเพียง 5×10^6 เท่านั้น อย่างไรก็ตาม glycogen มีบทบาทสำคัญในการ metabolism ของพลังงานในร่างกาย นอกจากในตับและกล้ามเนื้อแล้วแหล่งอื่นที่พบว่า glycogen มากได้แก่ในตัวของผึ้ง หอยนางรม ข้าวโพดหวาน และในลำไส้เล็ก glycogen มีโครงสร้างคล้ายๆ กับ amylopectin (ภาพที่ 4.19) แต่มี branch point ทุกๆ 8-12 หน่วยของ glucose (Voet and Voet, 1990) เมื่อถูก hydrolyzed ก็จะได้เป็น glucose ดังนี้



2.1.5 cellulose เป็นสารเคมีที่พบได้มากที่สุดในพืชเนื่องจาก cellulose ประกอบกันเป็นโครงสร้างพื้นฐานของผนังเซลล์ของพืช ทำให้ต้นพืชมีความแข็งแรง สามารถต้านทานสภาพแวดล้อมภายนอกทั้งลม ฝน และแมลงและศัตรูอื่นๆ ได้ การที่พืชที่มีอายุมากยิ่งมีความแข็งแรงมากขึ้นก็เพราะมี cellulose และสารเคมีอื่นเช่น lignin และ hemicellulose สะสมมากขึ้น ในพืชบางอย่างเช่นปุยฝ้าย มี cellulose บริสุทธิ์เกือบ 100% ในทางโภชนศาสตร์ cellulose จัดเป็นเยื่อใย (fiber) ซึ่งสัตว์ทุกชนิดไม่สามารถย่อยได้ นอกจากจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ในกระเพาะ rumen ของสัตว์เคี้ยวเอื้องและในไส้ติ่งและลำไส้ใหญ่ของสัตว์กินพืช (herbivorous) หลายชนิด ในทาง เคมี cellulose เป็น glucans (glucosans) ที่ประกอบด้วยกลูโคส ตั้งแต่ 15,000 หน่วยขึ้นไป มาต่อกัน ด้วย β -1,4-glycosidic linkage (ภาพที่ 5.20) และมักจะไม่มีการระบุ ขนาดโมเลกุลใหญ่ที่สุดของ cellulose ทั้งนี้เพราะไม่มีพันธุกรรมที่กำหนดแม่พิมพ์ (no genetically determined template) ที่เป็นตัวกำหนดขนาดโมเลกุล (Voet and Voet, 1990) ดังนั้นโมเลกุลจึงมีขนาดใหญ่ที่ไม่มีขีดจำกัด แต่โมเลกุลของ cellulose ในอาหารโดยทั่วไปมีขนาดอยู่ในช่วง 500-10,000 หน่วยของกลูโคส (Kirchgesner, 1987) สัตว์เลี้ยงทุกชนิดไม่มี enzyme สำหรับย่อย cellulose โดยตรง แต่จุลินทรีย์ในทางเดินอาหารมี cellulase ที่สามารถย่อย cellulose ได้ ถึงกระนั้นก็ตาม การย่อย cellulose ก็เกิดขึ้นได้ยากเพราะว่า cellulose มักจะห่อหุ้มไปด้วยสารอย่างอื่น และการเข้าถึง glycosidic bond ของ cellulase ก็เป็นไปได้ยาก (Voet and Voet, 1990) ดังนั้นการย่อย cellulose โดย

#

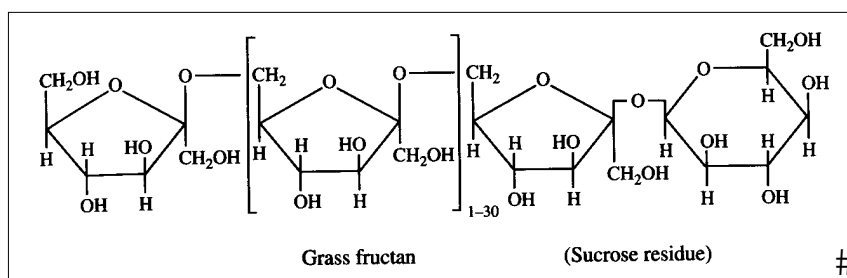
จุลินทรีย์จึงต้องอาศัยการย่อยโดยระบบ enzyme ถึง 2 ระบบ คือ C1 และ CX จนได้เป็น cellobiose และ glucose ในขั้นสุดท้าย (Van Soest, 1982)



ภาพที่ 5.20 โครงสร้างของ cellulose ที่เกิดจากหน่วยย่อยของกลูโคส ประมาณ 15,000 หน่วย ต่อกันด้วย β -1,4 Glycosidic bond

ที่มา: Voet and Voet, 1990

2.2) Fructans (Fructosans) เป็น hexans ที่ประกอบด้วยหน่วยย่อยที่เป็นน้ำตาล fructose และมี glucose บ้างเล็กน้อย (ภาพที่ 5.21) พบได้ในส่วนต้น และราก ใบ และเมล็ดของพืชเขตหนาวหลายๆชนิด โดยเฉพาะพืชในตระกูล compositae และตระกูลหญ้า แต่พบ fructans ได้เฉพาะในพืชเขตหนาวเท่านั้นโดยที่พืชเก็บ fructans ไว้เพื่อใช้เป็นแหล่งอาหารสำรอง



ภาพที่ 5.21 หน่วยย่อยของ fructans ของหญ้า ซึ่งประกอบด้วยน้ำตาล fructose เป็นหลัก และบางครั้งพบว่า มี glucose ที่ได้จากการย่อยส่วนปลายของ sucrose ด้วย

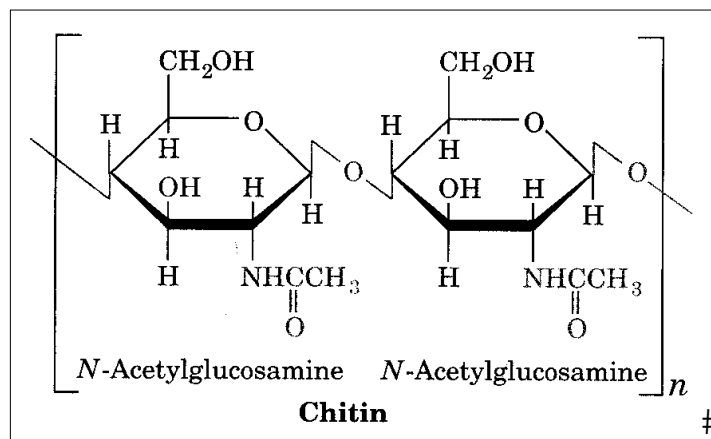
ที่มา: McDonald *et al.*, 1998

คาร์โบไฮเดรตชนิดนี้มีคุณสมบัติที่สำคัญๆคือ ละลายในน้ำเย็นได้ เนื่องจากมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ แบ่งตามความแตกต่างของโครงสร้างออกเป็น 3 กลุ่มคือ levan ที่มีหน่วยย่อยของ fructose ต่อกันด้วย 2, 6 linkage และ inulin ที่มีหน่วยย่อย ต่อกันด้วย 2, 1 linkage และ พวกที่มีหน่วยย่อย ต่อกันทั้งด้วย 2, 1 linkage และ 2, 6 linkage ซึ่งเป็นโครงสร้างที่มีการแตกแขนงจำนวนมาก เช่น fructans

ในจุดเจริญของข้าวสาลี เมื่อถูกย่อยก็จะให้ fructose และมีบ้างเล็กน้อยที่เป็น glucose ซึ่งได้จากการย่อยส่วนปลายโมเลกุลของ sucrose ในโครงสร้าง ของ fructans ได้แก่

2.3 galactans และ mannans เป็น hexans ที่ประกอบด้วยโมเลกุลของ galactose และ mannose ตามลำดับ พบ galactans ได้มากในผนังเซลล์ของพืช ในเมล็ดของพืชตระกูลถั่ว หลากชนิด เช่น ถั่ว clover และ ถั่ว lucerne ขณะที่ mannans พบได้มากในผนังเซลล์ของเปลือก และในส่วนของ endosperm ของเมล็ดปาล์มบางชนิด เช่น ปาล์ม tagau ของทวีปอเมริกาใต้ซึ่งพบว่า มี mannans อยู่ในปริมาณมาก เพราะพืชเก็บ mannans ไว้เป็นแหล่งอาหารสำรอง และในขณะที่พืช กำลังงอกอยู่นั้น ก็จะใช้คาร์โบไฮเดรตส่วนนี้เพื่อการเจริญของต้นอ่อนไปจนหมด

นอกจาก pentosans และ hexans แล้ว ยังมี homoglycans ที่เกิดจากโมเลกุลของ monosaccharide ที่เป็น glucose ซึ่งถูกทำปฏิกิริยาไปเป็น glucosamine และอยู่ในสภาพเชิงซ้อน ที่เป็น glucosaminans ได้แก่ homoglycans ที่เรียกว่า chitin (ภาพที่ 5.22) ซึ่งจัดเป็น homopolysaccharide ชนิดหนึ่งที่มีบทบาทสำคัญในธรรมชาติ เนื่องจากเป็นส่วนประกอบหลักของ โครงสร้างของสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังที่มีเปลือกแข็งหุ้ม ร่างกายได้แก่สัตว์ที่อยู่ใน class crustaceans เช่น กุ้ง กั้ง ปู และ แมลง และยังพบได้มากใน รา และสาหร่ายหลายชนิด ในเชิง ปริมาณถ้าไม่นับ cellulose แล้ว chitin จัดเป็น polysaccharides ที่มีมากที่สุด นั่นคือ chitin เป็น polysaccharides มีมากในธรรมชาติเป็นอันดับสองรองจาก cellulose



ภาพที่ 5.22 โครงสร้างของ chitin ที่มีหน่วยย่อยเป็น N-acetylglucosamine
ที่มา:

ในทางเคมี chitin จัดเป็น glucosaminans ที่เป็น homopolymer ของ N-acetyl-D-glucosamine ที่ต่อกันด้วยพันธะชนิด β (1, 4) linkage ที่มีโครงสร้างคล้ายกับ cellulose เป็น

#

อย่างมาก ดังนั้น หากตรวจสอบด้วย X-ray analysis จะพบว่า chitin และ cellulose มีโครงสร้างที่เหมือนกัน

chitin มีความสำคัญทางด้านการเป็นโครงสร้างของสัตว์พวก กุ้ง ปู และแมลง เมื่อนำสัตว์พวกนี้ไปต้มเปลือกจะเปลี่ยนสี (แดง-ส้ม) ในทางอาหารสัตว์ได้มีการทดลองเอาเปลือกกุ้ง ปู เป็นส่วนผสมในอาหารไก่เพื่อหวังให้ไข่มีสีแดงขึ้นซึ่งได้ผลในระดับหนึ่ง แต่สีแดงดังกล่าวไม่ใช่สีอันเกิดจากสารสี (pigment) พวก xanthophyll เช่นในใบไม้หรือกลีบดอกไม้บางชนิด แต่เป็นสีที่เกิดจากการที่ chitin ถูกกับความร้อน และกลไกในเรื่องนี้ยังต้องการคำอธิบายอีกมาก

4.2.2.2 Heteroglycans (heteropolysaccharides) เป็น polysaccharides ที่เมื่อถูก hydrolyzed แล้วได้เป็น monosaccharides หลากๆ ชนิด และสารเคมีอย่างอื่น ซึ่งมักจะเป็นอนุพันธ์ของน้ำตาลเชิงเดี่ยว (monosaccharide derivatives) ตัวอย่างของ heteroglycans ที่สำคัญได้แก่

1.) Hemicellulose เป็นคาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อนที่ประกอบอยู่ในผนังเซลล์ของพืช สามารถถูกละลายได้ด้วยสารละลายที่เป็นด่าง จัดเป็น heteroglycans ที่เมื่อถูกย่อยแล้วจะให้ xylose, arabinose, mannose galactose และ glucose และสารพวก uronic acid สามารถพบ hemicellulose ได้ทั้ๆ ไปในพืชอาหารสัตว์ทุกชนิดทั้งในหญ้าและถั่ว สามารถถูกย่อยได้ง่ายกว่า cellulose

ชื่อ hemicellulose อาจจะเป็นสาเหตุให้เข้าใจผิดว่ามันเป็นสารตัวกลางของการสร้าง cellulose แต่ในความเป็นจริงแล้ว hemicellulose กับ cellulose ไม่ได้มีส่วนเกี่ยวข้องกันเลยในทางการสังเคราะห์ และเป็นคาร์โบไฮเดรตที่แตกต่างกันทางด้านโครงสร้างเป็นอย่างมาก ขณะที่ cellulose ถูกจัดเป็น homoglycans ที่เป็น glucans แต่ hemicellulose ถูกจัดเป็น heteroglycans ที่ประกอบด้วยน้ำตาลต่างชนิดกันหลายๆ ชนิด รวมทั้งอนุพันธ์ของน้ำตาลด้วย อย่างไรก็ตาม ทั้ง cellulose และ hemicellulose ต่างก็เป็นส่วนประกอบในผนังเซลล์ของพืชในปริมาณที่มาก โดยเฉพาะในพืชที่มีอายุมาก และคาร์โบไฮเดรตทั้ง 2 นี้ก็เป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญของสัตว์เคี้ยวเอื้อง

โครงสร้างทางเคมีของ hemicellulose ในพืชอาหารสัตว์พวกหญ้าประกอบด้วยโครงสร้างหลักที่เป็น polymer ของ xylose ที่เรียกว่า xylans ที่เกิดจากหน่วยย่อยของน้ำตาล D-Xylose เชื่อมต่อกันด้วยพันธะชนิด β -1, 4 linkage และมี side chain ที่เป็น methylglucuronic acids ที่มักจะเป็น glucose galactose และ arabinose

ระดับของ hemicellulose ในพืชแต่ละชนิดจะแตกต่างกันและจะผันแปรตามอายุของพืช ในหญ้าอ่อนมี hemicellulose ประมาณ 14% แต่เมื่อถึงระยะออกดอกอาจจะเพิ่มขึ้นเป็น 23% ได้

(Holmes, 1989) โดยเฉลี่ยแล้วมีค่าอยู่ในช่วง 10-40% โดยพบได้มากใน secondary wall ของพืช ในพืชเขตร้อนพบว่าปริมาณ Hemicellulose สูงกว่าพืชเขตหนาว

2.) **gum (ยางไม้)** เป็นสารที่พืชขับออกมา (exudate gum) ตามปกติจากต้น หรือใบ หรือเมื่อต้นไม้เกิดบาดแผล และเมื่อนั้นถูกกับอากาศมักจะแข็งตัวและมีสีใส gum ที่พบในธรรมชาติอยู่ในรูปของเกลือของ calcium และ magnesium และโดยมากแล้ว มักจะถูกทำปฏิกิริยา esterified ได้เป็น acetate ในทางเคมีพบว่า gum เป็นสารที่ซับซ้อนและเมื่อถูก hydrolyzed จะได้เป็นน้ำตาลเชิงเดี่ยวหลายชนิดเช่น arabinose galactose rhamnose และ glucuronic acid ตัวอย่างของ gum ที่รู้จักและใช้กันมานานแล้วได้แก่ gum arabic (acacia gum) ซึ่งพบได้มากในพืชใน genus acacia

3.) **mucilages (กาว หรือเมือกไม้)** เป็นเมือกของส่วนต้น ใบ ราก และเมล็ดของไม้ บางอย่าง เช่น แมงลัก เมล็ด linseed และ สาหร่ายทะเล ถ้านำไป hydrolyzed จะได้ น้ำตาลพวก arabinose, galactose rhamnose และ monosaccharides derivatives พวก galactouronic acid

4.) **pectic substance** พบได้มากใน ผนัง เซลล์ ทั้งในชั้น primart wall และ intercellular ของพืชจำพวก ส้ม และ ผลไม้ สามารถแบ่งได้เป็น 1). protopectic พบในผลไม้ที่ยังไม่สุก (ดิบ) 2). pectin เป็นวุ้น ในน้ำผลไม้บางอย่าง ใช้ทำ jelly เป็นอาหารคน และ 3). pectic acid พบในผิวผลไม้ที่สุกแล้ว

5.) **glycosaminoglycans หรือ mucopolysaccharides** (ภาพที่ 5.23) ได้แก่น้ำตาลเชิงซ้อนที่ไม่มีกิ่งก้าน (unbranched polysaccharides) ที่ประกอบด้วยหน่วยย่อยของ uronic acid และ hexosamine สลับกันไปมาในโครงสร้างได้แก่

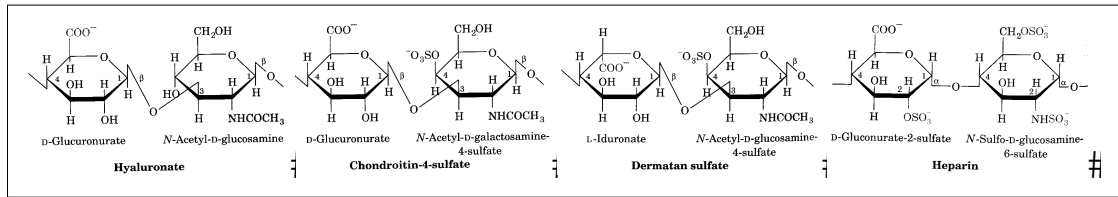
5.1 hyaluronic acids ที่พบใต้ผิวหนัง ใต้ผิวหนัง ในน้ำมันไขข้อ และในสายสะดือ สารละลายของ hyaluronic acids เป็นสารที่มีลักษณะเหนียว ทำหน้าที่สำคัญในการหล่อลื่นในไขข้อต่างๆและเป็นประโยชน์ในการหล่อลื่นลูกตาในกระบอกตา

5.2 chondroitin เป็นสารที่มีโครงสร้าง คล้ายกับ hyaluronic acids แต่มี galactouronic acid แทน glucosamine เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของกระดูกอ่อน (cartilage) และเนื้อเยื่อเกี่ยวพัน (connective tissue) อื่นๆ

5.3 heparin ไม่ได้เป็นส่วนประกอบในเนื้อเยื่อเกี่ยวพันแต่เป็นส่วนประกอบภายในของ Mast cell ของผนังหลอดเลือด โดยเฉพาะหลอดเลือดตับ ปอด และ ผิวหนัง เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวต่อต้านการแข็งตัวของเลือด (blood clot) เมื่อร่างกายเกิดบาดแผลก็จะหลั่งสารชนิดนี้ออกมา ในการผ่าตัดมักจะใช้ heparin sulfate เพื่อเป็นสารห้ามเลือด

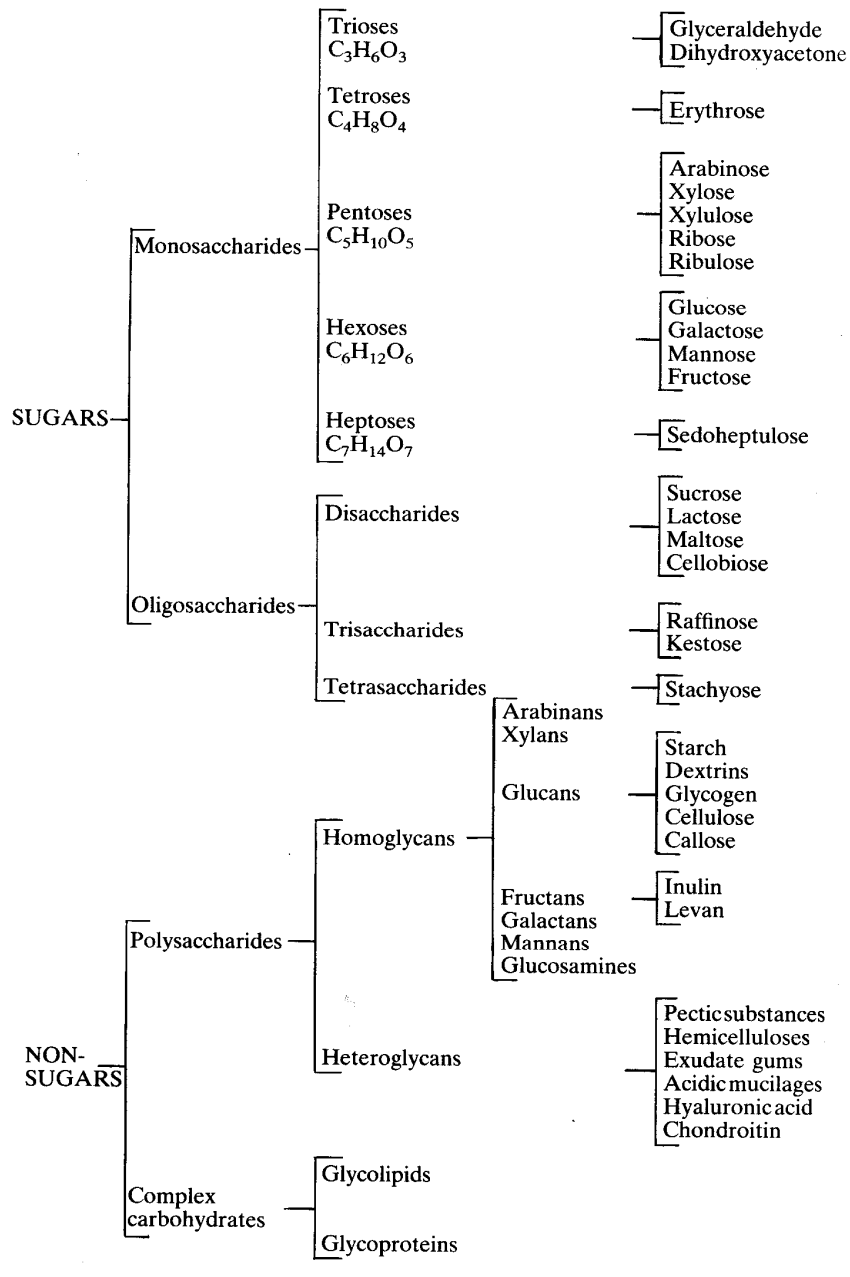
5.4 dermatan sulfate เป็นสารมีอยู่มากในผิวหนัง ทำให้ผิวหนังแข็งแรง

#



ภาพที่ 5.23 โครงสร้างของ glycosaminoglycans ที่สำคัญบางชนิด

ที่มา: Voet and Voet (1990)

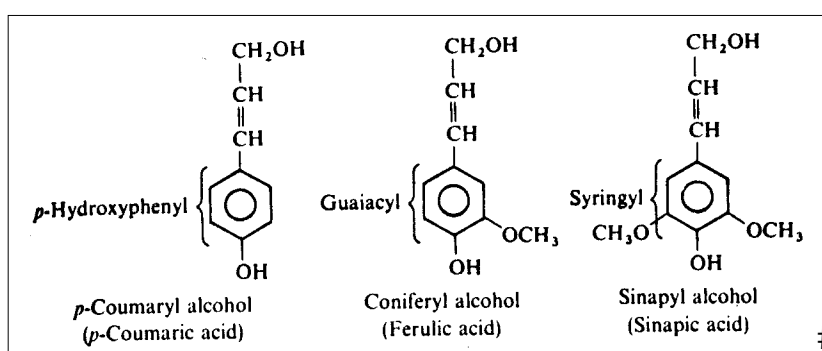


ภาพที่ 5.24 แสดงการจำแนกคาร์โบไฮเดรตชนิดต่างๆโดยสังเขป
ที่มา: McDonald *et al.*, 1998

#

4.2.3 ลิกนิน (Lignin)

lignin เป็นสารเคมีที่มีในอาหารทั่วไป และมีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับ คาร์โบไฮเดรต ทั้งนี้เนื่องจากว่าเมื่อไทรก็ตามทีพบคาร์โบไฮเดรตมักจะมี lignin ควบคู่ไปด้วยเสมอ lignin เป็นสารประกอบเชิงซ้อน (polymer) ของ alcohol 3 ชนิด ได้แก่ coniferyl alcohol, p-coumaryl alcohol และ sinapyl alcohol (ภาพที่ 5.25)



ภาพที่ 5.25 โครงสร้างของแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ ที่ประกอบกันเป็น lignin

ที่มา: Chesson and Forsberg (1988)

ถึงแม้ว่าในโครงสร้างหลักของ lignin จะมี alcohol ทั้ง 3 ชนิดเป็นโครงสร้างหลัก แต่ในโมเลกุลของ lignin จริงๆ ยังประกอบด้วย alcohol อื่นๆ อีกหลายชนิด (ภาพที่ 1.11) และมีหน่วยย่อยของ phenylpropanoid ที่มาเชื่อมเกาะกันเป็นโครงสร้างเชิงซ้อน (complex cross-link structure) อีกด้วย จึงจัดว่า lignin เป็น phenolic compound ที่สำคัญที่สุดของผนังเซลล์ของพืช (Chesson and Forsberg, 1988)

lignification เป็นสภาวะที่ lignin ไปเกาะอยู่กับสารเคมีอย่างอื่น เช่น hemicellulose หรือ cellulose ในส่วนของผนังเซลล์ของพืช ทำให้ส่วนนั้นๆ ของพืชมีความแข็งมากขึ้น สามารถทนทานต่อสภาวะแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงและแมลงศัตรูได้ดี นอกจากนี้ lignin ยังสามารถไปเกาะกับสารเคมีอย่างอื่นเช่นโปรตีนได้เรียกโปรตีนในรูปนี้ว่า lignified protein ซึ่งมีผลให้การย่อยได้ลดลง เพราะการเข้าถึงของเอนไซม์ เป็นไปได้อย่างมีข้อจำกัดมาก ปริมาณของ lignin ในส่วนของพืช และในวัตถุดิบอาหารสัตว์จะผันแปรตามปัจจัยจากชนิด สัตว์ส่วนของส่วนต่างๆ ของพืช และอายุของพืชที่นำมาใช้เป็นอาหารสัตว์ ซึ่งในหญ้าอาหารสัตว์ทั่วไป มี lignin ประกอบอยู่ตั้งแต่ 3 – 7 เปอร์เซ็นต์ (Holmes, 1989)

แนวทางในการเพิ่มความย่อยได้ของอาหารที่มี lignin ประกอบอยู่โดยการ treat ด้วยสารเคมีบางอย่าง เช่น สารละลายยูเรีย (6%) หรือ formaldehyde gas ก็เป็นแนวทางหนึ่งในการเพิ่มโอกาสการย่อยได้ของอาหารนั้นๆ ให้สูงขึ้นได้

4.3 การจำแนกคาร์โบไฮเดรตตามความสามารถในการย่อยได้ (digestibility)

เมื่อพิจารณาจำแนกคาร์โบไฮเดรตตามความสามารถในการย่อยได้ (digestibility) สามารถจำแนกได้ 2 ประเภทคือ

4.3.1 nitrogen free extract (NFE) เป็นคาร์โบไฮเดรตที่สามารถละลายน้ำได้ง่าย (soluble carbohydrate) ได้แก่ แป้ง และน้ำตาล รวมทั้ง hemicellulose บางส่วน ซึ่งโดยปกติเราสามารถคำนวณได้โดยอาศัยผลการวิเคราะห์จากการวิเคราะห์โดยวิธีวิเคราะห์โดยประมาณ (proximate analysis) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสูตรดังต่อไปนี้คือ

$$\% \text{ NFE} = 100 - (\% \text{ CP} + \% \text{ CF} + \% \text{ EE} + \% \text{ Ash} + \% \text{ Moisture}) \text{ หรือ}$$

$$\% \text{ NFE} = \% \text{ DM} - (\% \text{ CP} + \% \text{ CF} + \% \text{ EE} + \% \text{ Ash})$$

4.3.2 crude fiber (CF) เยื่อใย หรือ กาก เป็นคาร์โบไฮเดรตที่ย่อยได้ยาก และไม่ค่อยละลายน้ำ ได้แก่ cellulose และ hemicellulose

นอกจากนี้ในอาหารคาร์โบไฮเดรตโดยทั่วไป มักจะมีสารอีกอย่างหนึ่งซึ่งมักจะพบว่ายู่ร่วมกับคาร์โบไฮเดรตเสมอๆ แม้ว่าสารดังกล่าวไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต แต่มักพบว่ามีความสัมพันธ์ใกล้ชิดกับคาร์โบไฮเดรตอย่างมากซึ่งเคมีชนิดนั้นคือ lignin ที่มักพบว่าจะจับตัวอยู่กับ cellulose หรือ hemicellulose และทำให้เกิดเป็นโครงสร้างที่แข็งแรงและมีผลให้การย่อยได้ก็ลดลงตามไปด้วย

4.4 หน้าที่และแหล่งของคาร์โบไฮเดรต

4.4.1 หน้าที่ของคาร์โบไฮเดรตในร่างกาย

คาร์โบไฮเดรตมีบทบาทที่สำคัญในร่างกายในด้านต่างๆดังนี้

#

1. สัตว์ใช้คาร์โบไฮเดรตเป็นแหล่งพลังงานโดยคาร์โบไฮเดรตจะให้พลังงานได้ 4.15 kcal/g ถึงแม้ว่า ไขมันจะให้พลังงานสูงกว่าคาร์โบไฮเดรตก็ตาม (ไขมันให้ 9.40 kcal/g) แต่พลังงานที่สัตว์ใช้ส่วนใหญ่มาจากคาร์โบไฮเดรต
2. สัตว์ใช้คาร์โบไฮเดรตในการสังเคราะห์ไขมันในกรณีที่มีคาร์โบไฮเดรตเหลือใช้ และใช้ไขมันนั้นเพื่อเผาผลาญเพื่อให้พลังงานได้
3. ช่วยให้ร่างกายสัตว์ประหยัดโปรตีนเพราะถ้าสัตว์ขาดคาร์โบไฮเดรตทำให้สัตว์นำโปรตีนเพื่อใช้เป็นพลังงาน ซึ่งถือเป็นการสูญเสียอย่างมาก เพราะอาหารโปรตีนเป็นอาหารที่มีราคาแพง แต่ถ้าสัตว์กินคาร์โบไฮเดรตอย่างพอเพียง สัตว์ก็จะนำโปรตีนไปสร้างอย่างอื่นเช่น เอนไซม์ ฮอร์โมน และ protein regulator อื่นๆ
4. คาร์โบไฮเดรตเป็นองค์ประกอบของสารเคมีที่สำคัญในร่างกาย เช่น DNA, RNA ซึ่งเป็นสารพันธุกรรม ที่สำคัญ
5. คาร์โบไฮเดรต เป็นส่วนประกอบของเซลล์สมองและเซลล์ ประสาท เช่น คาร์โบไฮเดรต พวก calactolipid ซึ่งมีส่วนช่วยให้สมองมีการพัฒนาที่ดี
6. คาร์โบไฮเดรตที่เป็นเยื่อใยมีบทบาทสำคัญในการระบายท้องโดยเฉพาะในสัตว์ท้องแก่ใกล้คลอดและการที่สัตว์กินเยื่อใยมากๆ จะช่วยให้การใช้ประโยชน์จากอาหารได้มากขึ้น

4.4.2 แหล่งของคาร์โบไฮเดรตในอาหารสัตว์

คาร์โบไฮเดรตที่สัตว์สามารถใช้ประโยชน์ได้ในร่างกายอาจจะได้มาจากแหล่งต่างๆดังนี้คือ

1. จากพืช ได้แก่จากเมล็ดธัญพืช เช่น ข้าว ข้าวโพด ข้าวฟ่าง และผลพลอยได้จากอุตสาหกรรม การเกษตรเช่น รำ ปลายข้าว กากน้ำตาล จากพืชหัวเช่น มันสำปะหลัง และจากพืชอาหารสัตว์ชนิดต่างๆ นอกจากนี้ยังได้จาก เศษผัก เศษผลไม้ ฯลฯ
2. จากการสังเคราะห์ขึ้นเองภายในร่างกาย จากโภชนาชนิดอื่น เช่นจากไขมัน และโปรตีนได้ถ้าจำเป็น

4.4.3 คาร์โบไฮเดรต ในร่างกาย

ในร่างกายของสัตว์จะมีปริมาณคาร์โบไฮเดรตอยู่น้อยมาก คือมีอยู่ไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์ ของ น้ำหนักตัว โดยอยู่ในรูปของน้ำตาลกลูโคสในเลือด (blood glucose) และไกลโคเจนในตับและ กล้ามเนื้อ (liver or muscle glycogen) ทั้งนี้เนื่องจากว่าคาร์โบไฮเดรตที่สัตว์กินเข้าไปส่วนใหญ่ถูก ใช้เป็นแหล่งพลังงานจนหมด จึงสะสมได้น้อย จึงทำให้มีคาร์โบไฮเดรตในร่างกายเพียงเล็กน้อยเท่านั้น

4.4.4 อากาการขาดคาร์โบไฮเดรต

เนื่องจากคาร์โบไฮเดรตเป็นแหล่งพลังงานของร่างกาย ฉะนั้นการขาดคาร์โบไฮเดรตจึงเป็นการขาดพลังงาน ซึ่งโดยปกติการขาดพลังงาน อย่างเดียวในสัตว์มักจะไม่ค่อยปรากฏ ทั้งนี้เพราะว่าถึงแม้ว่าสัตว์จะขาดคาร์โบไฮเดรตสัตว์ก็สามารถเปลี่ยนไขมัน และ โปรตีนไปใช้เป็นแหล่งพลังงานได้ ดังนั้นการขาดพลังงานของสัตว์จึงมักจะพบว่าเป็นภาวะการขาดที่เกิดขึ้นพร้อมกับการขาดโปรตีน (protein-calories malnutrition) ซึ่งจะมีผลทำให้ ปริมาณน้ำตาลในเลือดลดลง น้ำหนักตัวลด และ ประสิทธิภาพการทำงานก็ลดลงด้วย

4.5 เมทาบอลิซึมของคาร์โบไฮเดรต

เมื่อสัตว์กินอาหารที่มีคาร์โบไฮเดรตเข้าไป อาหารเหล่านั้นจะถูกย่อยด้วยกลไกต่างๆของร่างกายทั้งที่เป็นกลวิธี (mechanical mean) โดยการกัด ฉีก ขบเคี้ยว การบีบรัดตัวของกระเพาะ และลำไส้ หรือโดยชีววิธี (biological mean) ซึ่งส่วนใหญ่เกิดขึ้นจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ (microbial mean) รวมทั้งโดยวิธีทางเคมี (chemical mean) ซึ่งได้แก่การย่อย (hydrolysis) ที่มีเอนไซม์เป็นตัวกระตุ้น จนได้สารอาหารที่มีอนุภาคที่มีขนาดเล็กพอที่จะดูดซึมและขนส่งไปยังอวัยวะต่างๆเพื่อการเปลี่ยนแปลงเพื่อให้ได้มาซึ่งพลังงานและสารตัวกลางชนิดต่างๆเพื่อใช้สำหรับการสร้างสารต่างๆขึ้นมาใหม่สำหรับการดำรงชีพ การสร้างผลผลิต และการสืบพันธุ์ของสัตว์ต่อไป ซึ่งกิจกรรมการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเกิดขึ้นที่อวัยวะสำคัญของร่างกายโดยเฉพาะที่ตับซึ่งเป็นบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงของสารอาหารมากที่สุดแห่งหนึ่งในร่างกาย

ในกรณีของคาร์โบไฮเดรตนั้นสารอาหารที่ได้จากการย่อยส่วนใหญ่ก็คือกลูโคส ซึ่งร่างกายสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในกิจกรรมต่างๆได้ต่อไป โดยกลูโคสที่ได้จะต้องมีการเปลี่ยนแปลงเพื่อเกิดเป็นสารตัวกลางชนิดต่างๆที่สามารถนำไปใช้เพื่อการสังเคราะห์เป็นสารอื่นหรือเพื่อการเกิดเป็นสารที่สามารถนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานได้ต่อไป ซึ่งเรียกรวมการเปลี่ยนแปลงของสารอาหารที่เกิดขึ้นภายในเซลล์ของอวัยวะสำคัญของร่างกายโดยรวมว่า metabolism ซึ่งรวมถึงการเปลี่ยนแปลงในเชิงการสลาย (catabolism) และการเปลี่ยนแปลงในเชิงการสร้าง (anabolism) ตลอดจนการปลดปล่อยพลังงาน (energy release) ที่ได้จากการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวด้วย ซึ่งของคาร์โบไฮเดรตมีการเปลี่ยนแปลงต่างๆเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก แต่สามารถสรุปได้เป็น 3 แนวทางหลักๆได้แก่

#

4.5.1 การเปลี่ยนแปลงโมเลกุลของคาร์โบไฮเดรตในเชิงการสลาย (catabolism) เป็นการเปลี่ยนแปลงเพื่อให้ได้มาซึ่งพลังงาน และสารตัวกลางสำหรับใช้ในกระบวนการต่างๆ ซึ่ง catabolism ที่สำคัญของคาร์โบไฮเดรตได้แก่

4.5.1.1 Glycolysis เป็นลำดับของปฏิกิริยาการเปลี่ยนแปลงในการสลายคาร์โบไฮเดรตโมเลกุลใหญ่ ซึ่งได้แก่ glycogen ที่ร่างกายเก็บสะสมไว้ในตับและกล้ามเนื้อเพื่อให้ได้เป็นกลูโคสและสารตัวกลางอื่นๆจนในที่สุดก็ได้เป็น pyruvic acid เพื่อที่จะส่งต่อเข้าไปสู่วัฏจักร Krebs' ต่อไป ทั้งนี้เนื่องจาก glycolysis เกิดขึ้นในสภาพไร้ออกซิเจน (anaerobic) จึงไม่สามารถทำการเผาผลาญสารประกอบอินทรีย์ให้เป็นน้ำ (H_2O) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และออกซิเจน (O_2) ได้อย่างสมบูรณ์ ดังนั้น pyruvic acid จึงต้องถูกส่งต่อไปยังวัฏจักร Krebs' ซึ่งจากการสลายกลูโคสตามวิถีของ glycolysis จะได้ 2 โมเลกุล pyruvic acid ต่อ 1 โมเลกุลของกลูโคส (ภาพที่ 5.26)

จากวัฏจักร glycolysis จะมีการใช้ ATP ไปจำนวนหนึ่ง และมีการได้ ATP กลับคืนมาเช่นกัน แต่เมื่อหักกลับกันแล้ว 1 โมเลกุลของกลูโคสเมื่อถูกสลายตามวัฏจักร glycolysis จะได้กำไร ATP จำนวน 2 ATP ต่อ 1 โมเลกุลของกลูโคส นอกจากนี้ยังได้ reducing equivalent ที่เป็น NAD และ $NADH + H^+$ ซึ่งเมื่อถูกส่งเข้าสู่กระบวนการขนส่งอิเล็กตรอน (electron transport system: ETS) ก็สามารถให้ ATP ได้เช่นกัน นอกจากนี้ pyruvic acid เองเมื่อถูกส่งเข้าสู่วัฏจักร Krebs' ก็จะได้ GTP และ reducing equivalent ทั้งที่เป็น $NADH + H^+$ และ $FADH_2$ ซึ่งเมื่อสารเหล่านี้ถูกส่งเข้าสู่กระบวนการขนส่งอิเล็กตรอนก็ได้ ATP ได้เช่นกัน ซึ่งเมื่อคิดคำนวณสุทธิแล้วพบว่า 1 โมเลกุลของกลูโคสเมื่อถูกสลายโดย glycolysis และวัฏจักร Krebs' จะได้จำนวน ATP ทั้งหมด 40 ATP แต่เนื่องจากต้องใช้ ATP ไปในการกระตุ้น (activation) ในตอนต้นของปฏิกิริยาจำนวน 2 ATP ดังนั้นเมื่อหักกลับกันแล้วจึงได้สุทธิ 38 ATP ต่อ 1 โมเลกุลของกลูโคส แต่ถ้าหากกลูโคสที่ใช้ได้มาจากการสลาย glycogen ซึ่งจะได้เป็น glucose-6-phosphate จึงไม่ต้องใช้ ATP ในการกระตุ้นปฏิกิริยาแรก ดังนั้นถ้าเป็นในกรณีนี้จึงได้พลังงานสุทธิ 39 ATP ต่อ 1 โมเลกุลของกลูโคส

#

#

#

#

#

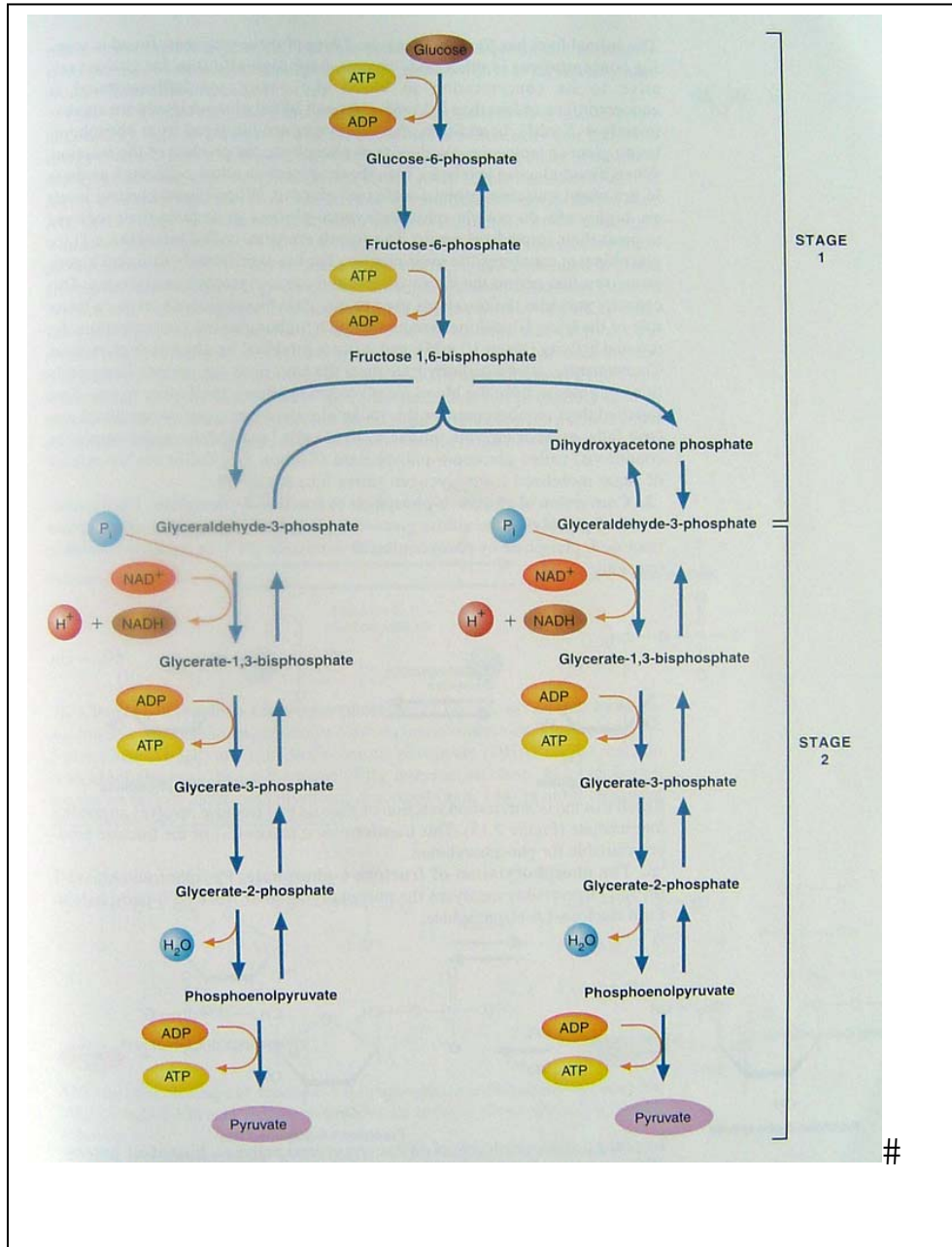
#

#

#

#

#



ภาพที่ 5.26 วิถีจักร Glycolysis แสดงสารตัวกลางของแต่ละขั้นตอนของการเปลี่ยนแปลงจากกลูโคส จนถึง pyruvate และตำแหน่งที่เกิดและใช้ ATP และ reducing equivalent ทั้งที่เป็น ATP, $NADH + H^+$ และ $FADH_2$ ในแต่ละ ปฏิกิริยา

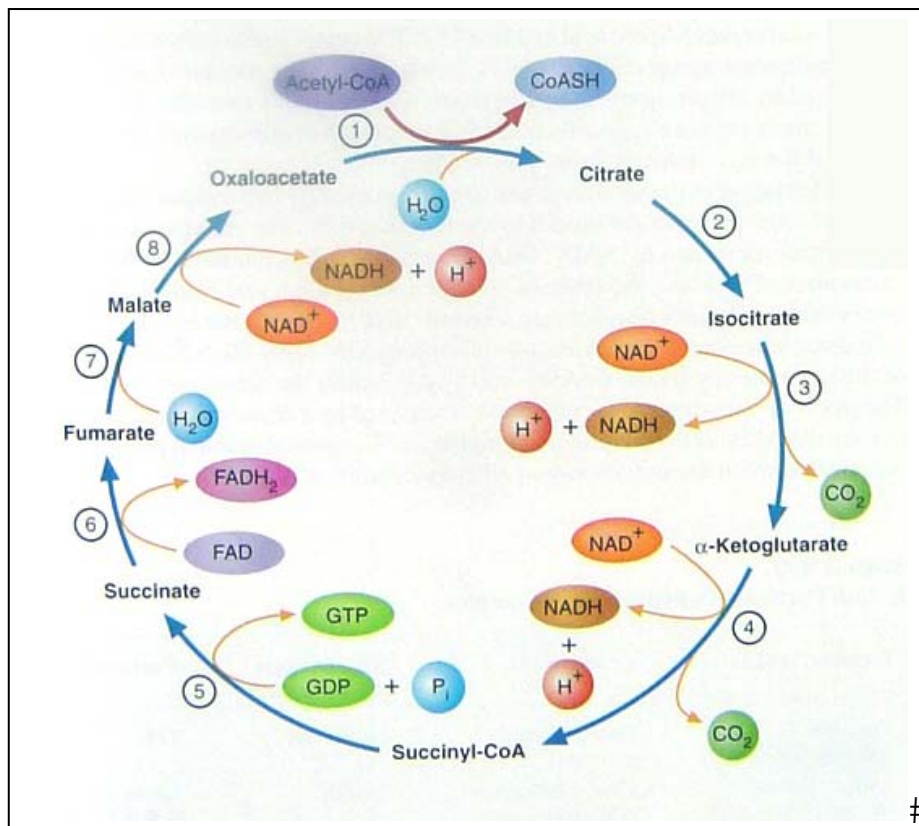
ที่มา: McKee and McKee (2003)

#

4.5.1.2 Citric acid cycle (Kreb's cycle)

เป็นวัฏจักรของการเปลี่ยนแปลงของสารอินทรีย์ที่มีคาร์บอนแตกต่างกัน 3 จำนวน คือ ที่มี 4 5 และ 6 คาร์บอน ดังนั้นจึงเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า tricarboxylic acid cycle หรือ TCA cycle และเนื่องจากสารตัวกลางชนิดแรกของวัฏจักรนี้ซึ่งเกิดจาก oxaloacetic acid ที่มี 4 คาร์บอนและรับ acetyl CoA ซึ่งเป็นสารที่มี 2 คาร์บอนรวมเป็นสาร 6 คาร์บอนที่เรียกว่า citric acid ดังนั้นบางครั้งจึงเรียกววัฏจักรนี้ว่า citric acid cycle แต่คนส่วนใหญ่นิยมเรียกตามชื่อของผู้ค้นพบคือ Hans Krebs จึงเรียกว่า Kreb's cycle (ภาพที่ 5.27)

เนื่องจาก pyruvate ที่ได้จาก glycolysis ไม่สามารถถูก oxidized ต่อไปได้ภายใน cytosol จึงต้องส่งเข้าไปใน mitochondria เพื่อการ oxidized ต่อไปในปฏิกิริยาตามขั้นตอนต่างๆของ Kreb's cycle โดยเริ่มจาก pyruvate (3 C) จะถูกเปลี่ยนไปเป็น acetyl CoA (2 C) ก่อนที่จะส่งเข้าสู่ Kreb's cycle จากนั้น acetyl CoA ก็จะได้รับ oxaloacetate เข้ามาเพื่อได้เป็น citrate ในปฏิกิริยาที่ 1 และปฏิกิริยาก็ดำเนินไปตามลำดับทั้ง 8 ปฏิกิริยา ซึ่งเป็นผลให้ acetyl CoA ถูกเผาผลาญไปในรูปของคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ในปฏิกิริยาที่ 3 และ 4 และจะได้สารตัวสุดท้ายในปฏิกิริยาที่ 8 ที่เป็น oxaloacetate ที่มี 4 คาร์บอน ที่พร้อมจะรับ acetyl CoA ใหม่เข้ามาและปฏิกิริยาจะดำเนินเช่นนี้ไปเรื่อยๆ



ภาพที่ 5.27 วัฏจักร Kreb's แสดงสารตัวกลางและขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงตามลำดับของทั้ง 8 ปฏิกิริยา รวมทั้ง reducing equivalent ทั้ง $\text{NADH} + \text{H}^+$ และ FADH_2 ที่ใช้และที่ได้ และ GDP ที่ใช้และ GTP ที่ได้จากปฏิกิริยา

ที่มา: McKee and McKee (2003)

ดังนั้นใน 1 รอบของ Kreb's cycle จึงเป็นการ oxidation ของสาร 2 คาร์บอนคือ acetyl CoA และปฏิกิริยาก็จะดำเนินอย่างนี้ไปโดยตลอดตราบเท่าที่มี acetyl CoA ที่มาจาก pyruvate มาสนับสนุน ซึ่งผลที่ได้จาก Kreb's cycle คือ reducing equivalent ที่เป็น $\text{NADH} + \text{H}^+$ และ FADH_2 รวมทั้ง GTP ซึ่งสามารถเปลี่ยนไปเป็น ATP ได้ ขณะที่ reducing equivalent นั้นจะต้องส่งต่อไปยังเยื่อชั้นใน (inner membrane) ของ mitochondria (ภาพที่ 5.28) เพื่อถูก oxidized และเกิดเป็น ATP ในปริมาณที่แตกต่างกันตามตำแหน่งของส่วนประกอบ (complex) ของการขนส่งอิเล็กตรอนที่ต่างกัน ซึ่งถ้าหากเป็น $\text{NADH} + \text{H}^+$ ก็จะถูกส่งเข้าสู่ complex I (ภาพที่ 5.28) และถูก oxidized ไปจนครบ complex ที่ 4 จึงสามารถให้ 3 ATP/ 1 $\text{NADH} + \text{H}^+$ ขณะที่ FADH_2 นั้นถูกส่งเข้าทาง complex II (ภาพที่ 5.29) จึงได้เพียง 2 ATP/ 1 FADH_2

ดังนั้นหากคำนวณค่าพลังงานตามปฏิกิริยาต่างๆที่เกิดขึ้นใน glycolysis ที่ต่อเนื่องมาถึงวัฏจักร Kreb's และรวมถึงการขนส่งอิเล็กตรอนก็สามารถคำนวณค่าของ ATP ได้ดังนี้

1. ปฏิกิริยาใน glycolysis (ภาพที่ 5.26)

- | | | |
|-------------------------------------|---|--|
| | → | |
| 1.) จาก glucose | | glucose-6-phosphate ใช้ 1 ATP (-1) |
| | → | |
| 2.) จาก fructose-6-phosphate | | Fructose 1, 6, bisphosphate ใช้ 1 ATP (-1) |
| | → | |
| 3.) จาก glycerate 1, 3 bisphosphate | | glyceraldehyde 3-phosphate ได้ 1ATP (2x1=2) |
| | → | |
| 4.) จาก glyceraldehyde 3- phosphate | | glycerate 1, 3 bisphosphate ได้ 1 NADH + H ⁺ = (2 x 3 =6) |
| | → | |
| 5.) จาก phosphoenolpyruvate (PEP) | | pyruvic acid ได้ 1 ATP = (2 x1 = 2) |

#

6.) จาก pyruvic acid \longrightarrow acetyl CoA ได้ $\text{NADH} + \text{H}^+ = [(2 \times 1) \times 3 = 6 \text{ ATP}]$

สุทธิ = 14 ATP

2. ปฏิกิริยาใน Kreb's cycle (ภาพที่ 5.27)

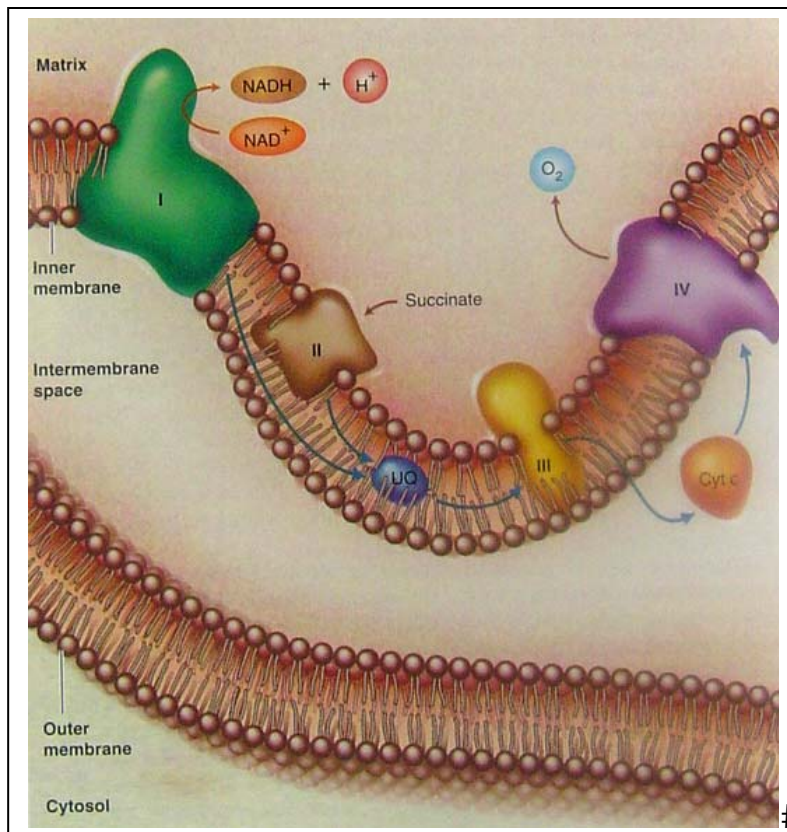
1.) ในปฏิกิริยาที่ 3, 4 และ 8 ได้อย่างละ 1 $\text{NADH} + \text{H}^+ = 2 \times (3 \times 3) = 18 \text{ ATP}$

2.) ในปฏิกิริยาที่ 5 ได้ 1 GTP ซึ่งเปลี่ยนเป็น ATP ได้ $= 2 \times 1 = 2 \text{ ATP}$

3.) ในปฏิกิริยาที่ 6 ได้ 1 $\text{FADH}_2 = 2 \times (1 \times 2) = 4 \text{ ATP}$

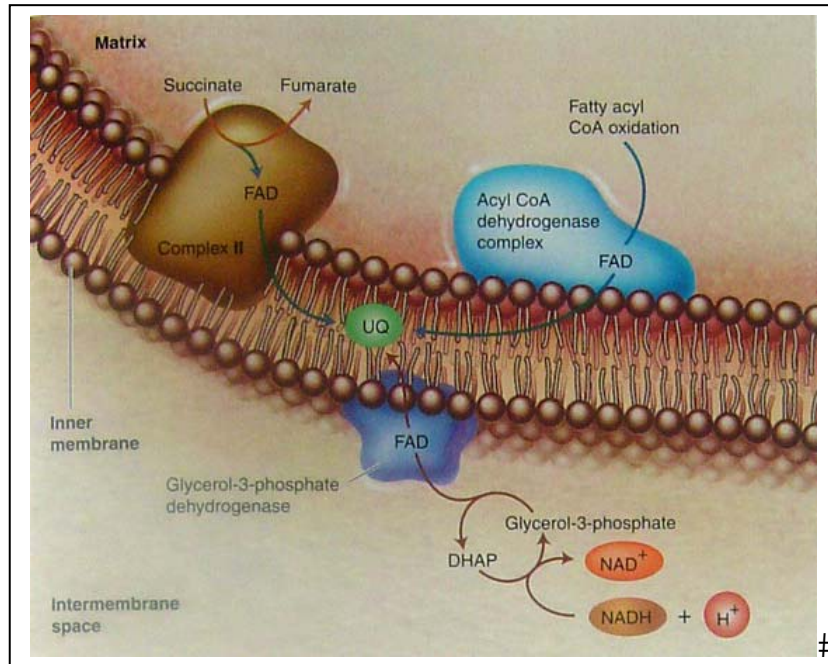
สุทธิ = 24 ATP

รวมสุทธิ = 38 ATP/ 1 โมเลกุลของกลูโคส



ภาพที่ 5.28 บริเวณเนื้อเยื่อชั้นใน (inner membrane) ของ mitochondria ซึ่งเป็นบริเวณของการเกิดกระบวนการขนส่งอิเล็กตรอนที่ประกอบด้วยส่วนประกอบ (complex) ต่างๆ 4 complex ซึ่งถ้าเป็น $\text{NADH} + \text{H}^+$ จะถูกส่งเข้าสู่ complex I และจะถูกส่งต่อไปจนถึง complex IV จึงได้เป็น ATP จำนวน 3 ATP/ 1 $\text{NADH} + \text{H}^+$

ที่มา: McKee and McKee (2003)



ภาพที่ 5.29 การส่ง FADH_2 เข้าสู่ complex II ของกระบวนการขนส่งอิเล็กตรอน จึงสามารถเกิดเป็น 2 ATP/ 1 FADH_2

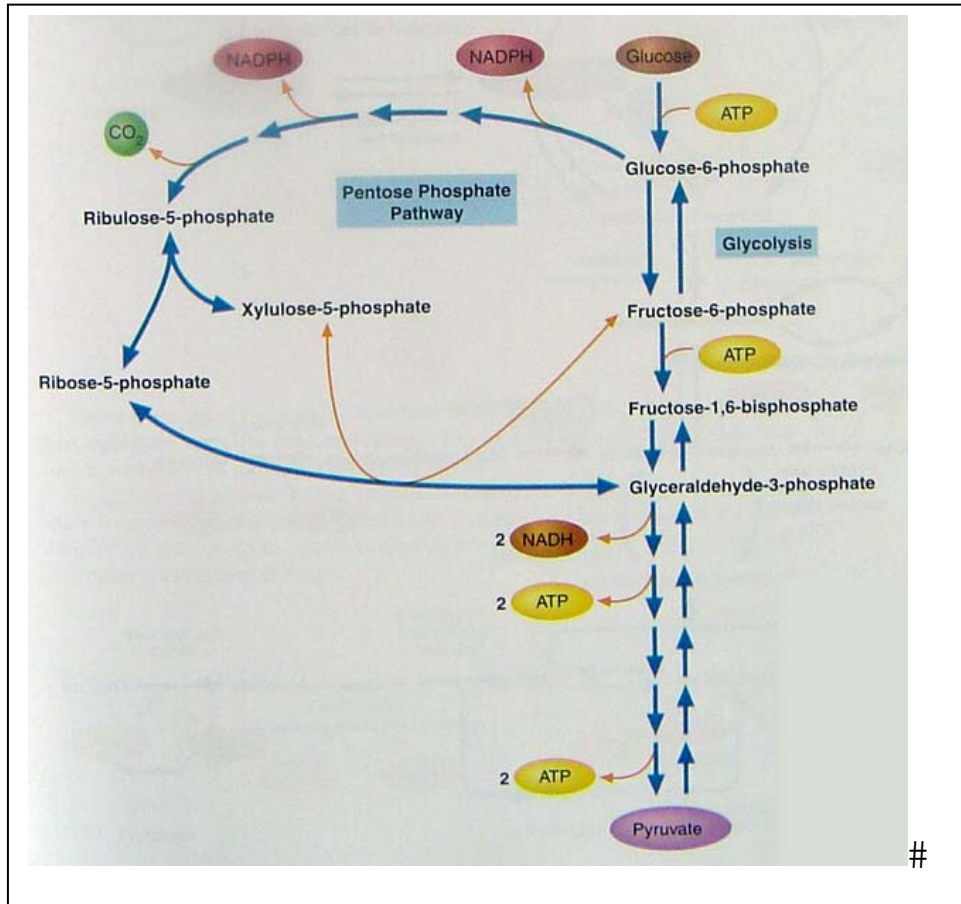
ที่มา: McKee and McKee (2003)

4.5.1.3 Pentose phosphate pathway (PPP cycle)

Pentose phosphate pathway เป็นลำดับของปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นใน cytosol เช่นเดียวกับ glycolysis ค้นพบเนื่องจากมีข้อสงสัยว่าแม้ว่าปฏิกิริยาใน glycolysis ถูกยับยั้งแต่สารตัวกลางบางชนิดใน glycolysis ก็สามารถเกิดขึ้นได้ ซึ่งคล้ายกับว่ามี pathway บางอย่างมาเชื่อมโยงกับ glycolysis และเมื่อศึกษาจึงพบว่า เพราะมี Pentose phosphate pathway นั้นเองที่มาเชื่อมโยงกับ glycolysis (ภาพที่ 5.30)

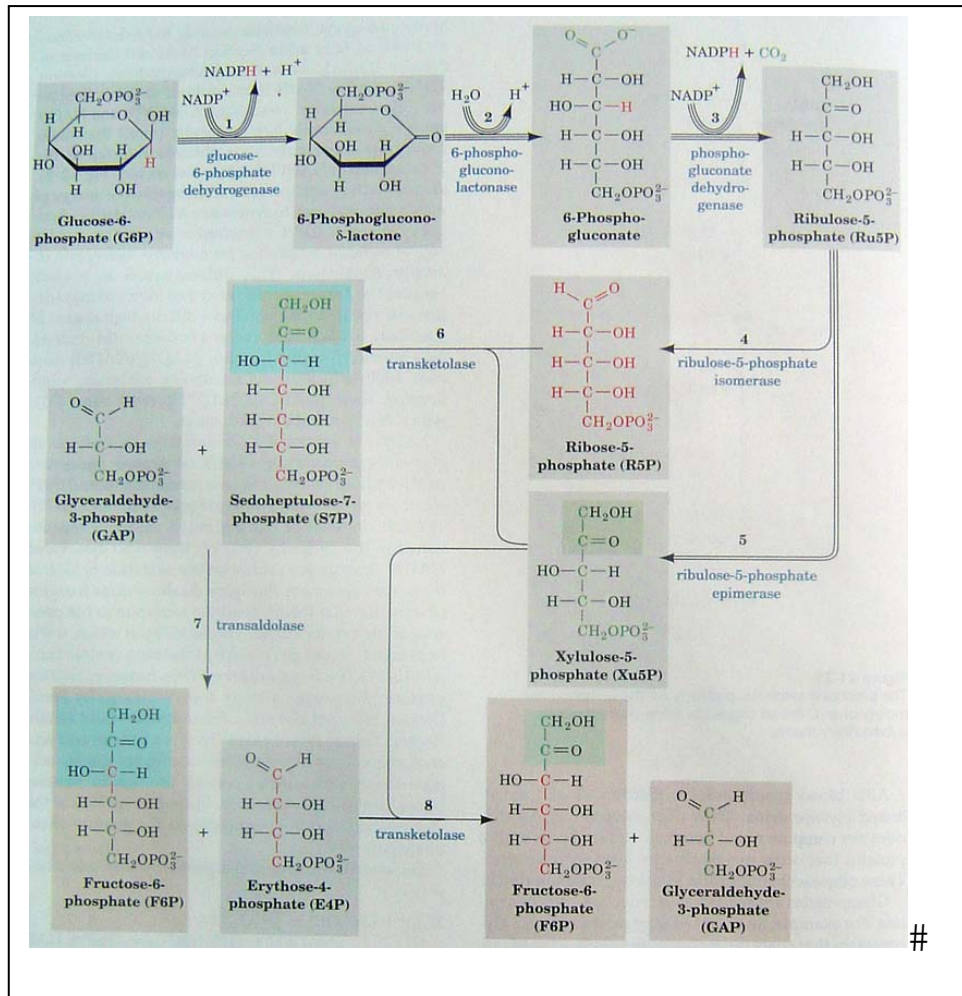
Pentose phosphate pathway (ภาพที่ 5.31) เกิดขึ้นในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมหลายชนิด เนื่องจากสัตว์ประเภทนี้เปลี่ยน glucose-6-phosphate เพื่อการผลิตเป็นน้ำตาลที่มีคาร์บอนตั้งแต่ 3, 4, 5, 6 และ 7 คาร์บอนได้ เพื่อสำหรับใช้ในโอกาสต่างๆกัน ซึ่ง ที่เป็น pathway นี้เป็น pathway สำคัญที่เป็นแหล่งผลิต NADPH เพื่อใช้สำหรับการสังเคราะห์ กรดไขมัน และ steroid หลายชนิด จึงมีความสำคัญต่อการสังเคราะห์ไขมัน ฮอรโมนและการทำหน้าที่ของเต้านมในการสังเคราะห์ องค์ประกอบทางเคมีของน้ำนม เช่น ไขมัน เป็นต้น

#



ภาพที่ 5.30 แสดงเส้นทางการเชื่อมโยงกันระหว่าง pentose phosphate pathway กับ glycolysis ดังนั้นถึงแม้ว่า glycolysis จะถูกระงับในบางปฏิกิริยาทั้ง glyceraldehyde-3-phosphate และ pyruvate ก็ยังสามารถเกิดขึ้นได้โดยอาศัย pentose phosphate pathway นั้นเอง

ที่มา: McKee and McKee (2003)



ภาพที่ 5.31 ปฏิกิริยาต่างๆ ทั้ง 8 ปฏิกิริยาใน Pentose phosphate pathway ซึ่งเป็นเส้นทางการเปลี่ยนแปลงของน้ำตาล ตั้งแต่ 3 ถึง 7 คาร์บอน และยังเป็นแหล่งผลิต NADPH+H⁺ ที่สำคัญเพื่อใช้ในการสังเคราะห์ไขมัน และ steroid ชนิดต่างๆ

ที่มา: Voet and Voet (1990)

วัฏจักร Pentose phosphate pathway สามารถจำแนกปฏิกิริยาออกเป็น 2 ระยะ (phase) คือในระยะที่ 1 และ 2 ซึ่งในระยะที่ 1 เป็นการเปลี่ยน glucose-6-phosphate ไปเป็น ribulose-5-phosphate ซึ่งต้องอาศัย 4 ปฏิกิริยาที่เป็นชนิด rodox, hydrolysis, oxidative decarboxylation และ isomerization ตามลำดับ (ภาพที่ 5.31) ส่วนในระยะที่ 2 เป็นการเปลี่ยนจาก ribulose-5-phosphate ไปเป็นสารตัวกลางของคาร์โบไฮเดรตที่มีทั้ง 3, 4, 5 และ 7 คาร์บอน ซึ่งได้แก่ glyceraldehyde-3-phosphate, erythrose-3-phosphate, xylulose-5-phosphate และ sedoheptulose-7-phosphate ตามลำดับ ซึ่งปฏิกิริยาระยะที่ 2 เป็นปฏิกิริยาการเปลี่ยน

#

กลับไปมา (interconversion) ของสารซึ่งเป็นทั้งปฏิกิริยา transketolase และ transaldolase และสิ่งสำคัญที่ได้จาก Pentose phosphate pathway คือ NADPH ดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น

4.5.1.4 Glycogenolysis

เป็นลำดับของปฏิกิริยาเพื่อการสลาย glycogen ที่เก็บสะสมไว้ในตับหรือกล้ามเนื้อเพื่อให้ได้เป็น glucose-6-phosphate ที่มีเส้นทางซึ่งต่างไปจากการสังเคราะห์ glycogen โดยที่ glycogen จะทำปฏิกิริยา phosphorylation เพื่อให้ได้ glucose-1-phosphate และจะถูกเปลี่ยนต่อไปเป็น glucose-6-phosphate โดยใช้เอนไซม์ phosphoglucomutase และการเปลี่ยนจาก glucose-6-phosphate ไปเป็น glucose นั้นจะมีเส้นทางที่ต่างกันโดยอวัยวะแต่ละส่วน กล่าวคือถ้าเป็นในกล้ามเนื้อ glucose-6-phosphate จะถูกเปลี่ยนไปตามเส้นทางของ glycolysis แต่ถ้าเป็นในตับสามารถใช้ glucose-6-phosphatase เพื่อเปลี่ยน glucose-6-phosphate ไปเป็น glucose ได้เลย (Kuchel and Ralston, 1988)

เนื่องจาก glycogen เป็นแหล่งที่เก็บคาร์โบไฮเดรตสำรองของร่างกาย ดังนั้นเมื่อร่างกายขาดพลังงานจึงจำเป็นต้องสลาย glycogen เพื่อให้ได้เป็นกลูโคสเพื่อจะนำไปใช้เป็นพลังงานต่อไป ดังนั้นเส้นทางการเปลี่ยนแปลงในปฏิกิริยานี้จึงเป็นการสลายเพื่อให้ได้มาซึ่งแหล่งพลังงานของร่างกาย

4.5.2 การเปลี่ยนแปลงโมเลกุลคาร์โบไฮเดรตในเชิงการสร้าง (anabolism of carbohydrate)

เป็นการเปลี่ยนแปลงของคาร์โบไฮเดรตในเชิงการสร้าง ซึ่งอาจจะเป็นการสร้างโดยการใช้สารโมเลกุลเล็กๆมาประกอบกันเป็นสารที่มีโมเลกุลใหญ่ รวมทั้งการสร้างคาร์โบไฮเดรตบางชนิดขึ้นมาใหม่จากสารอื่น ซึ่งมีหลายปฏิกิริยาแต่ในที่นี้ขอกกล่าวถึงเพียง 3 กระบวนการที่สำคัญได้แก่ปฏิกิริยาในวัฏจักรต่อไปนี้

4.5.2.1 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์ไกลโคเจน (Glycogenesis)

เป็นลำดับของปฏิกิริยาการสังเคราะห์ไกลโคเจน (glycogen synthesis) ที่เกิดขึ้นในตับและกล้ามเนื้อเพื่อเก็บไว้ในเนื้อเยื่อของอวัยวะเหล่านั้นในรูปของเม็ดไกลโคเจน (glycogen granules) เพื่อเป็นแหล่งพลังงานสำรองที่สามารถสลายมาใช้ได้อย่างรวดเร็วเมื่อร่างกายต้องใช้พลังงานโดยการสลายเป็น glucose-6-phosphate แล้วเข้าสู่วิถี glycolysis จนได้ pyruvate และส่งเข้าสู่วัฏจักร Kreb's ต่อไป

ซึ่งที่มาของ glucose-6-phosphate เพื่อใช้สำหรับการสังเคราะห์ไกลโคเจนนั้นในเนื้อเยื่อของอวัยวะแต่ละส่วนก็มีความแตกต่างกันบ้าง กล่าวคือ glucose-6-phosphate ในกล้ามเนื้อได้มาจากน้ำตาลกลูโคสในเลือด (blood glucose) เท่านั้น แต่ถ้าเป็นในตับ glucose-6-phosphate สามารถได้มาจากทั้งน้ำตาลกลูโคสในเลือดและจากกลูโคสที่สร้างขึ้นใหม่จากกระบวนการ gluconeogenesis (Kuchel and Ralston, 1988) ซึ่งปฏิกิริยาที่สำคัญของการสร้างไกลโคเจนในตับและกล้ามเนื้อมี 3 ขั้นตอนสำคัญได้แก่

1. การสังเคราะห์ glucose-1-phosphate จาก glucose-6-phosphate ซึ่งเป็นการเปลี่ยน Isomer (การย้ายตำแหน่งของ phosphate) โดยมีเอนไซม์ phosphoglucomutase เป็นตัวกระตุ้น
2. การสังเคราะห์ UDP glucose จาก glucose-1-phosphate โดยใช้ UTP (Uridine triphosphate) เป็น co-enzyme ที่สำคัญเพื่อทำปฏิกิริยา esterification โดยมีเอนไซม์ UDP-glucose pyrophosphorylase เป็นตัวกระตุ้น
3. ขั้นตอนการสังเคราะห์ไกลโคเจนจาก UDP-glucose โดยมีเอนไซม์ glycogen synthase เป็นตัวกระตุ้นเพื่อให้ได้เป็นไกลโคเจน ซึ่งถ้าปฏิกิริยาเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องก็จะมี การต่อโซ่ของไกลโคเจนให้ยาวขึ้น (chain elongation) ก็จะได้เป็นไกลโคเจนโมเลกุลใหญ่ขึ้น ซึ่งในการที่กลูโคสที่จะมาต่อกับไกลโคเจนในกรณีนี้จะต้องมีความจำเพาะโดยที่ glycosidic linkage นั้นต้องใช้คาร์บอนตำแหน่งที่ 4 (C_4) ของกลูโคสตัวสุดท้ายของไกลโคเจนเพื่อมาต่อกับกลูโคสตัวที่จะเข้ามาใหม่ตรงตำแหน่งของคาร์บอนตำแหน่งที่ 1 (C_1) ได้เป็นพันธะแบบ α 1, 4 glycosidic linkage

4.5.2.2 Gluconeogenesis

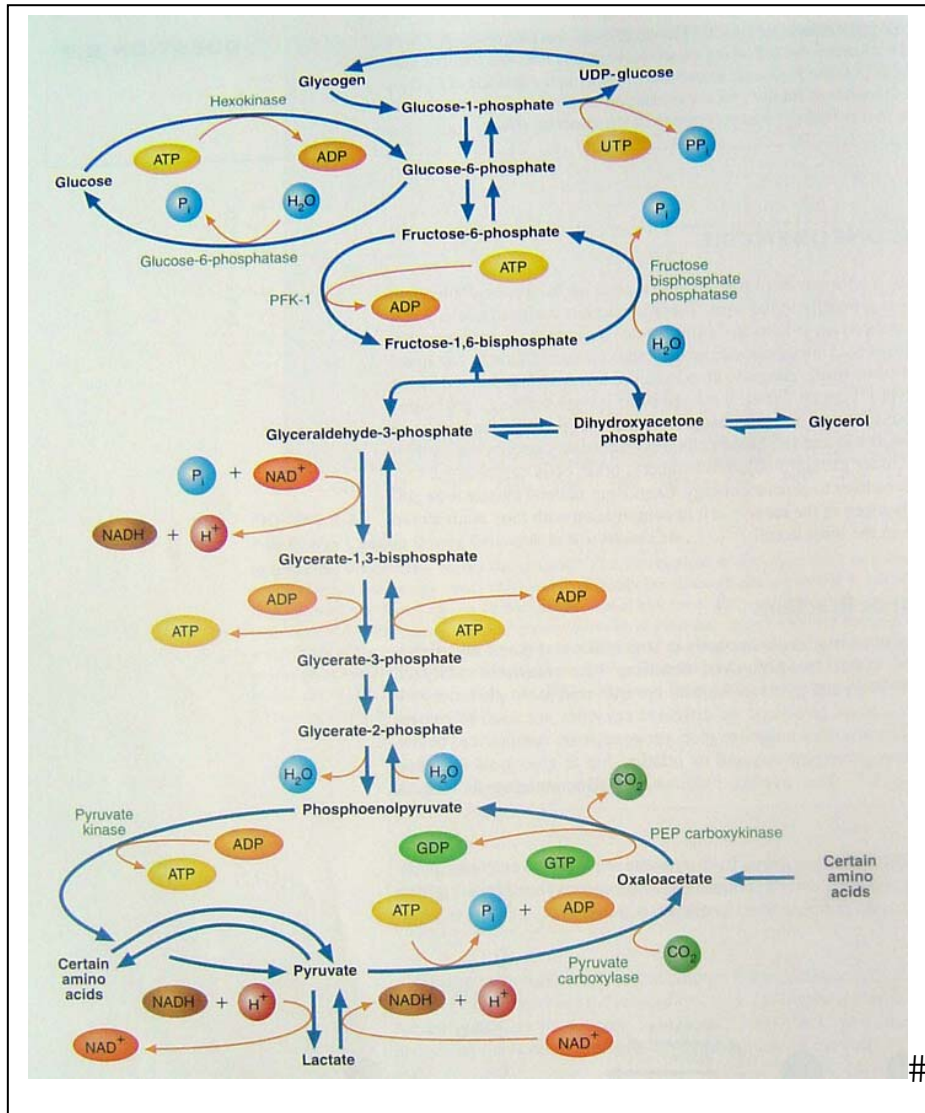
เป็นลำดับของปฏิกิริยาในการสังเคราะห์กลูโคสขึ้นใหม่โดยใช้สารตั้งต้นที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต ซึ่งส่วนใหญ่เกิดขึ้นในเซลล์ของตับและไต ซึ่งสารตั้งต้นที่ใช้อาจจะเป็น lactate, pyruvate, glycerol และ α -keto acid ที่มาจากกรดอะมิโนบางชนิด โดยมีลำดับการสังเคราะห์ที่เป็นการย้อนทิศทางการสลายไกลโคเจน (glycolysis) เพียงแต่มี 3 ขั้นตอนที่ไม่สามารถย้อนกลับทิศทางของ glycolysis ได้ (irreversible) จึงจำเป็นต้องใช้เอนไซม์ที่แตกต่างไปจาก glycolysis ดังนี้ (ภาพที่ 5.32)

1. การสังเคราะห์ phosphoenol pyruvate จาก pyruvate โดยใช้เอนไซม์ pyruvate carboxylase
2. การเปลี่ยนจาก fructose 1, 6 biphosphate ไปเป็น fructose-6-phosphate โดยใช้เอนไซม์ fructose 1, 6 biphosphatase

#

3. การเปลี่ยนจาก glucose-6-phosphate ไปเป็น glucose โดยใช้เอนไซม์ glucose-6-phosphatase

ซึ่งปฏิกิริยาทั้ง 3 นี้เกิดขึ้นได้พร้อมกับปฏิกิริยาอื่นๆใน glycolysis จึงเป็นผลให้วัฏจักรสามารถย้อนกลับได้ (reversible) และสามารถสังเคราะห์กลูโคสจากสารอื่นที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรตได้

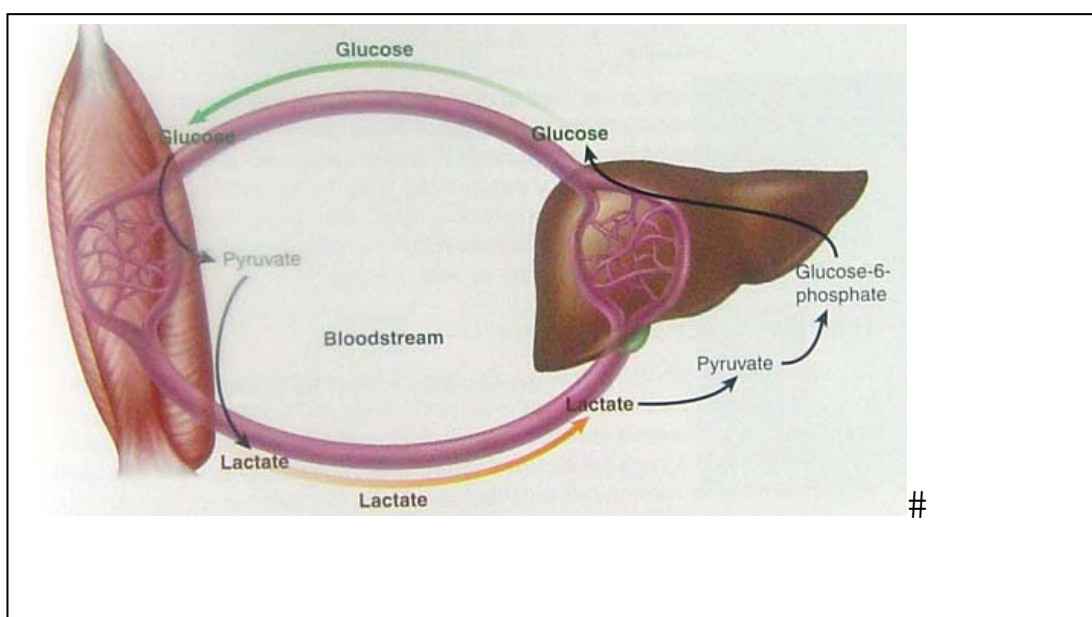


ภาพที่ 5.32 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์กลูโคสขึ้นมาใหม่ (Gluconeogenesis) และการสลายไกลโคเจน (glycolysis) แสดงปฏิกิริยาที่สามารถย้อนกลับได้และย้อนกลับไม่ได้โดยใช้เอนไซม์ที่ต่างกันระหว่างกระบวนการทั้ง 2 และแสดงแหล่งของโครงคาร์บอนจากแหล่งที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรตเพื่อใช้ในการสังเคราะห์กลูโคส

ที่มา: McKee and McKee (2003)

4.5.2.3 วัฏจักรคอรื (Cori cycle)

เป็นวัฏจักรที่แสดงให้เห็นถึงการทำหน้าที่ร่วมกันของอวัยวะในร่างกายของสัตว์เพื่อส่งเสริมให้การเปลี่ยนแปลงของสารสามารถเกิดขึ้นได้อย่างสมบูรณ์และมีประสิทธิภาพ เนื่องจากระบบเอนไซม์เดียวกันในอวัยวะที่ต่างกันก็มีความสามารถในการกระตุ้นปฏิกิริยาได้ไม่เหมือนกัน กล่าวคือในสภาพที่ร่างกายออกกำลังกายนั้นพลังงานที่ใช้ในกล้ามเนื้อส่วนใหญ่ได้จาก glycolysis และภายหลังจากการออกกำลังกายจะเกิดเป็น lactic acid ขึ้นได้ในกล้ามเนื้อ ซึ่ง lactic acid ที่เกิดขึ้นจะถูกส่งเข้าสู่กระแสเลือดเพื่อไปยังตับ เพื่อเปลี่ยนไปเป็น pyruvate โดยใช้เอนไซม์ lactate dehydrogenase ซึ่งตับสามารถเปลี่ยนได้อย่างรวดเร็วและสามารถใช้ pyruvic ที่ได้เพื่อสร้างเป็นกลูโคสขึ้นมาใหม่ (gluconeogenesis) เพื่อส่งไปให้กล้ามเนื้อใช้เป็นแหล่งพลังงานในการออกกำลังกายต่อไป ดังนั้นจึงเห็นได้ว่าในกล้ามเนื้อ lactate dehydrogenase ทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้น pyruvate ไปเป็น lactate แต่เอนไซม์ชนิดเดียวกันนี้กลับทำหน้าที่ในการกระตุ้น lactate ไปเป็น pyruvate ในตับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเอนไซม์แต่ละชนิดก็มีความจำเพาะกับอวัยวะแต่ละอย่างว่าทำหน้าที่ไปในทิศทางใด (ภาพที่ 5.33)



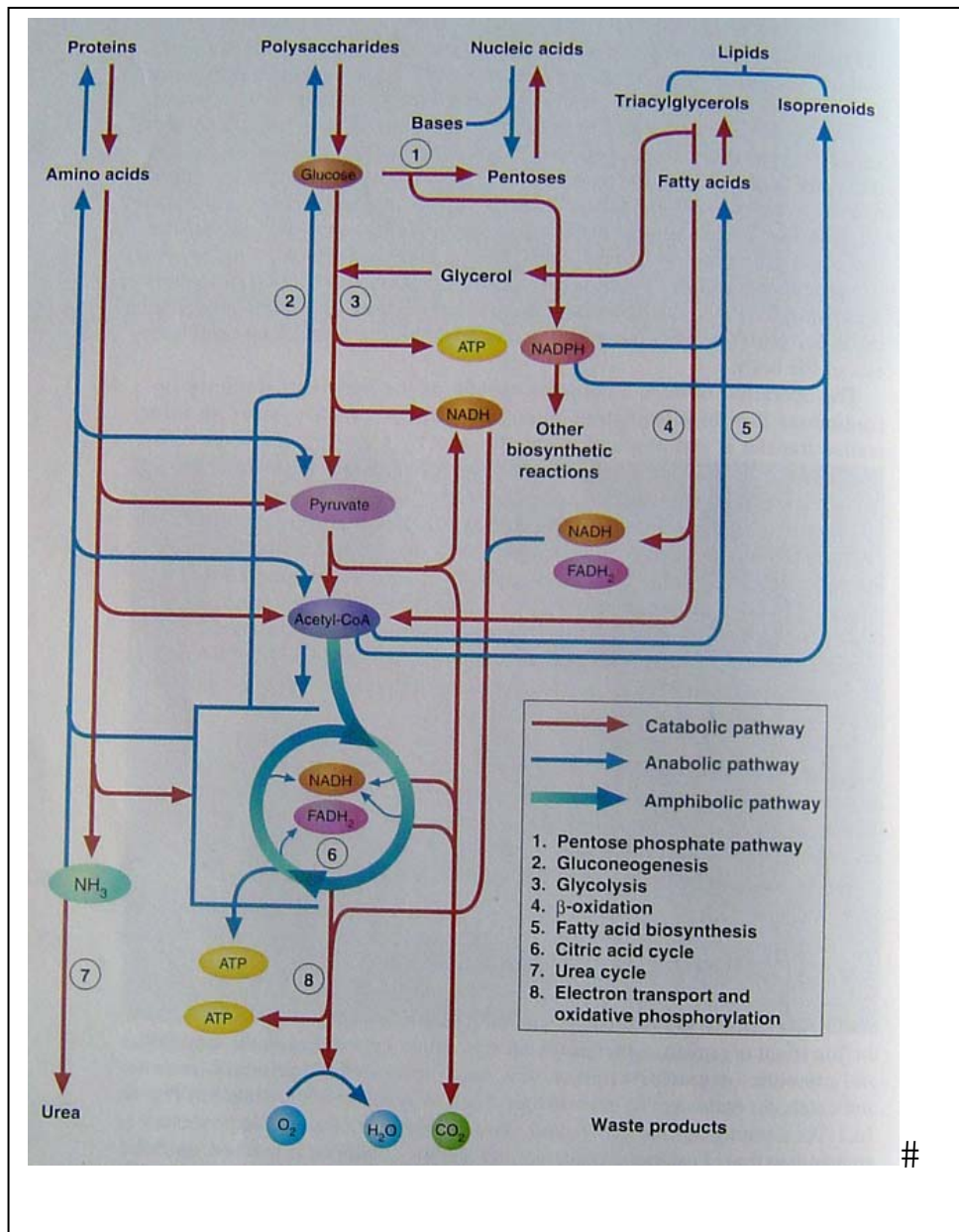
ภาพที่ 5.33 วัฏจักรคอรื (Cori cycle) ที่แสดงการทำหน้าที่ร่วมกันของตับและกล้ามเนื้อโดย lactate ที่เกิดขึ้นภายหลังจากการออกกำลังกายจะถูกส่งไปยังตับเพื่อให้ตับเปลี่ยนเป็น pyruvate สำหรับสร้างเป็นกลูโคสขึ้นมาใหม่

ที่มา: McKee and McKee (2003)

#

4.5.3 การเปลี่ยนกลับไปมาระหว่างคาร์โบไฮเดรตกับสารอาหารประเภทอื่นๆ (interconversion of carbohydrate and other nutrients)

คาร์โบไฮเดรตและโภชนาอื่น ทั้งโปรตีน และไขมันต่างก็สามารถถูกเปลี่ยนแปลงกลับไปมาถึงกันได้ด้วยเส้นทางการเปลี่ยนแปลงที่มีความจำเพาะของสารแต่ละชนิดที่สามารถถูกจะเปลี่ยนแปลงเพื่อให้อาหารเชื่อมโยงถึงกัน ซึ่งการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเกิดขึ้นใน organelles ของเซลล์ที่แตกต่างกันไปตามความจำเพาะของปฏิกิริยาต่างๆ โดยปัจจัยสำคัญที่ควบคุมให้ปฏิกิริยาเป็นไปในทิศทางใดก็ได้แก่ ฮอร์โมน ดังนั้นคาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงกลับไปมาได้ (ภาพที่ 5.34)



#

ภาพที่ 5.34 แสดงภาพรวมของการเปลี่ยนแปลงของโมโนแซ็กคาไรด์ต่างๆทั้งคาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมันและกรดนิวคลีอิก ซึ่งมีเส้นทางการเปลี่ยนแปลงที่กลับไปมาถึงกันได้ โดยมีทั้งการเปลี่ยนแปลงในเชิงการสร้าง (anabolism pathway) การสลาย (catabolism pathway) และทั้ง 2 ปฏิกริยาร่วมกัน (amphibolic pathway)

ที่มา: McKee and McKee (2003)

คำถามท้ายบท

1. จงอธิบายความหมายของคาร์โบไฮเดรตมาพอสังเขป
2. จงบอกส่วนประกอบทางเคมีของคาร์โบไฮเดรต
3. จงบอกประเภทของคาร์โบไฮเดรต
4. จงอธิบายความหมายของ Monosaccharides
5. จงอธิบายความหมายของ Derived Monosaccharides
6. จงอธิบายความหมายของ Oligosaccharides
7. บอกหน้าที่ของคาร์โบไฮเดรตมาพอสังเขป
8. จงบอกอาการขาดคาร์โบไฮเดรตในร่างกายสัตว์

เอกสารอ้างอิง

1. ปุณทริกา หาริณสุต. 2528. คาร์โบไฮเดรต. หน้า 117-138. ในจิตตภาพร วัฒนเสรี, ดวงพร วรรณโรสถ, ปุณทริกา หาริณสุต, ยงยุทธ เจริญไชยศรี, ลลิต้า เมฆสองสี, วิไล สันติโสภาศรี, สุนันทา รัตนานโ และอรุณี อิงคากุล (บรรณาธิการ). บทปฏิบัติการชีวเคมี. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 224 หน้า.
2. Chesson, A. and C. W. Forsberg. 1988. Polysaccharide degradation by rumen microorganisms. pp 251-284. In: Hobson, P. N. (ed.). The rumen microbial ecosystem. Elsevier Applied Science, Essex, England.
3. Ensminger, M. E., J. E. Oldfield and W. W. Heinemann. 1990. Feed & Nutrient. The Ensminger Publishing Company. U.S.A. 1544 p.

46#

#

4. Kirchgeßner, M. 1987. *Tierernahrung. Institut für Ernährungsphysiologie der Technischen Universität München in Freising-Weihenstephan*. DLG-Verlag – Frankfurt (M), German. 533 p.
5. Linder, H. 1959. *Linder Biologie*. Metzlerschen verlag. 376 p.
6. McDonald, P., R. A. Edwards, J. F. D. Greenhalgh and C. A. Morgan. 1998. *Animal Nutrition*. 5th Ed. Addison Wesley Longman Ltd., Edinburg Gate, Harlow Essex. UK. 607 p.
7. Van Soest, P. J. 1987. *Nutrition ecology of the ruminant*. Comstock publishing associates A division of Cornell University press. USA. 373 p.
8. Voet, D. and Voet, J. G. 1990. *Biochemistry*. John wiley & Sons. Canada. 1,223 p.

#