

บทที่ 2

รวบรวมเอกสาร

2.1 ความสำคัญและความต้องการพลังงานของสัตว์

พลังงานที่สิ่งมีชีวิตสามารถใช้ประโยชน์ได้ส่วนใหญ่เป็นผลผลิตที่ได้จากขบวนการ oxidation ของคาร์โบไฮเดรต (carbohydrate), ไขมัน (lipid) และโปรตีน (protein) ที่เป็นส่วนประกอบอยู่ในอาหาร (Whittemore, 1993) สัตว์จะใช้พลังงานที่ได้รับจากอาหาร 2 รูปแบบคือ ในรูปของสารเคมีพลังงานสูงเช่น ATP (adenosine triphosphate) ซึ่งร่างกายจะใช้เป็นแหล่งพลังงานสำหรับการทำงานของกล้ามเนื้อส่วนต่าง ๆ , การสังเคราะห์โปรตีน, การสร้างอวัยวะส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย ฯลฯ นอกจากนี้ยังได้พลังงานความร้อน ซึ่งร่างกายสัตว์จะใช้ในการรักษาอุณหภูมิของร่างกายให้คงที่ เมื่อมีพลังงานความร้อนเหลือจากการใช้รักษาอุณหภูมิของร่างกายให้คงที่ จึงจะทำการระบายพลังงานความร้อนออกจากร่างกาย มิฉะนั้นจะทำให้อุณหภูมิของตัวสัตว์สูงขึ้น ดังนั้นจะเห็นว่าพลังงานที่ร่างกายของสัตว์ต้องการจริง ๆ คือสารเคมีพลังงานสูง แต่ในการวัดความต้องการพลังงานในรูปของสารเคมีพลังงานสูงนั้นทำได้ยาก เราจึงเปรียบเทียบค่าความต้องการพลังงานนั้นเป็นค่าพลังงานความร้อนซึ่งมีหน่วยเป็น แคลอรี (calory, cal) ออกมาโดยกำหนดให้ 1 แคลอรี คือ พลังงานความร้อนที่ทำให้ น้ำ 1 กรัม มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น 1 องศาเซลเซียส (อุทัย, 2529) นั่นคือจากน้ำอุณหภูมิ 14.5 องศาเซลเซียสเปลี่ยนเป็น 15.5 องศาเซลเซียส นอกจากนี้การวัดค่าพลังงานความร้อนยังสามารถวัดได้โดยอาศัยระบบอังกฤษซึ่งมีหน่วยเป็น BTU (british thermal units) ซึ่งก็คือพลังงานความร้อนที่ทำให้ น้ำ 1 ปอนด์ มีอุณหภูมิสูงขึ้น 1 องศาฟาเรนไฮต์ ซึ่ง 1 BTU มีค่าเท่ากับ 252 แคลอรี หรือ 1 กิโลแคลอรีมีค่าประมาณ 4 BTU แต่การวัดค่าพลังงานความร้อนโดยอาศัยการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำนั้นอาจมีข้อผิดพลาดขึ้นได้ ทั้งนี้เนื่องจากน้ำที่อุณหภูมิต่างกันจะมีความร้อนจำเพาะแตกต่างกัน ฉะนั้นจึงนิยมวัดค่าพลังงานโดยอาศัยไฟฟ้าแทนเพราะเป็นวิธีการที่มีความแม่นยำมากกว่าและหน่วยที่วัดได้นี้เรียกว่า จูล (Joule) ซึ่ง 1 จูลมีค่าเท่ากับ 0.233 แคลอรีหรือ 1 แคลอรีมีค่าเท่ากับ 4.184 จูล (บุญล้อม, 2532)

พลังงานมีความสำคัญต่อร่างกายของสิ่งมีชีวิตมากซึ่ง Pateince and Thacker (1989) รายงานว่า กรดอะมิโน (amino acid) จะไม่สามารถเปลี่ยนเป็นกล้ามเนื้อได้, อาหารไม่สามารถย่อย หรือของเสียไม่สามารถขับถ่ายออกมาได้, สัตว์ไม่สามารถรักษาอุณหภูมิของร่างกายให้คงที่ได้, แม่สุกรไม่สามารถให้กำเนิดลูกได้ หรือแม่สุกรเลี้ยงลูกไม่สามารถผลิตน้ำนมได้หากปราศจากพลังงาน ดังนั้นพลังงานถือได้ว่าเป็นพื้นฐานของชีวิต นอกจากนี้กระบวนการต่าง ๆ ในการทำงานของร่างกายของสิ่งมีชีวิตเช่น การทำงานของหัวใจ, การรักษาความดันโลหิต, การเคลื่อนย้ายไอออนผ่านผนังเซลล์, การดูดซึมกลับของสารบางชนิดที่ไต, การสร้างโปรตีนและไขมันตลอดจนการผลิตกำลังเพื่อผลักดันกระบวนการต่างๆ ในร่างกายก็ต้องใช้พลังงาน (Emsminger et al., 1990) ซึ่ง Whitemore (1993) ได้สรุปความสำคัญของพลังงานในสุกรดังนี้

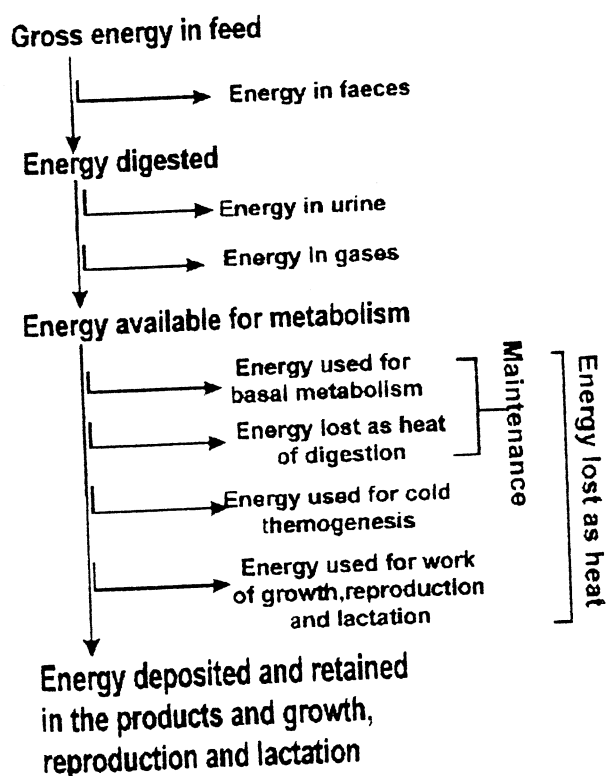
1. สุกรจะใช้พลังงานจากอาหารสัตว์เพื่อการดำรงชีพ (maintenance) โดยรักษาให้ร่างกายมีกิจกรรมต่าง ๆ เป็นไปตามปกติเช่น การเคลื่อนไหวของกล้ามเนื้อ, การย่อยและการดูดซึมอาหาร, การหายใจ, การไหลเวียนโลหิต, การซ่อมแซมเนื้อเยื่อที่ชำรุดเสียหาย ตลอดจนการหมุนเวียนของเนื้อเยื่อในร่างกาย เป็นต้น
2. สุกรจะใช้พลังงานที่ได้รับจากอาหารสัตว์เพื่อผลักดันให้เกิดการสร้างผลผลิตต่าง ๆ ของร่างกายเช่น การสังเคราะห์น้ำนม, การสืบพันธุ์, การเพิ่มปริมาณของโปรตีนและไขมันในร่างกาย
3. สุกรจะใช้พลังงานที่ได้รับจากอาหารสัตว์เพื่อรักษาอุณหภูมิของร่างกายให้คงที่
4. สุกรจะใช้พลังงานที่ได้รับจากอาหารสัตว์เพื่อรักษาผลผลิตต่าง ๆ ของร่างกายให้คงที่เช่น การหลั่งน้ำนม, การคลอด, การเจริญเติบโตของเนื้อเยื่อโปรตีนและไขมัน และการขับถ่ายความร้อนที่เกิดจากกิจกรรมและการทำงานต่างๆ ของร่างกายไม่ว่าจะเป็นเพื่อการดำรงชีพหรือการสร้างผลผลิต

ดังนั้นสัตว์ที่มีอายุและให้ผลผลิตแตกต่างกันจะมีความต้องการพลังงานแตกต่างกันดังตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 ความต้องการพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้ (metabolizable energy) ของสุกรระยะต่าง ๆ (กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัมของอาหาร)

แหล่งข้อมูล	น้ำหนักตัว (กิโลกรัม)					พ่อแม่พันธุ์	
	1 - 5	5 - 10	10 - 20	20 - 50	50 - 110	แม่, พ่อสุกร	แม่สุกรช่วงให้นมลูก
อุทัย (2529)	-	3,250	3,150	3,150	3,150	3,150	3,150
NRC (1988)	3,220	3,240	3,250	3,260	3,275	3,210	3,210

โภชนะที่เป็นส่วนประกอบในอาหารแต่ละชนิดจะให้พลังงานทั้งหมดแตกต่างกัน โดยคาร์โบไฮเดรต เช่น แป้ง, เซลลูโลส (cellulose) มีพลังงานทั้งหมดเท่ากับ 4.18 kcal ต่อกรัม ของคาร์โบไฮเดรต, ไขมันหรือน้ำมันมีพลังงานทั้งหมดเท่ากับ 9.39 kcal ต่อกรัมของไขมันหรือน้ำมัน และโปรตีนจะมีพลังงานทั้งหมดเท่ากับ 5.64 kcal ต่อกรัมของโปรตีน แต่พลังงานที่มีทั้งหมดในอาหารนั้นสัตว์ไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้หมด เนื่องจากการสูญเสียในระหว่างการย่อย, การดูดซึมและการขนส่ง โดยสรุปแล้วพลังงานที่ได้จากอาหารจะมีลำดับการใช้ประโยชน์ของพลังงานในร่างกายดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 การใช้พลังงานจากอาหารและการสูญเสียพลังงานในร่างกายสัตว์
ที่มา : Whittemore (1993)

2.2 การใช้ประโยชน์ของพลังงานจากแหล่งพลังงานต่าง ๆ ในอาหารของร่างกายสัตว์

คาร์โบไฮเดรต, โปรตีน และไขมันนอกจากจะให้พลังงานทั้งหมดแตกต่างกันแล้วยังมีความแตกต่างในเรื่องของการใช้ประโยชน์ในร่างกายอีกด้วย โดยการใช้โปรตีนเพื่อเป็นแหล่งพลังงานในร่างกายนั้นจะต้องมีการสูญเสียพลังงานในขบวนการขับถ่ายในโตรเจนออกนอกร่างกาย 50.85 เปอร์เซ็นต์ของพลังงานทั้งหมดที่มีอยู่ของโปรตีน โดยจะสูญเสียพลังงานในขบวนการสลาย

2.3 ความสำคัญและชนิดของคาร์โบไฮเดรต (carbohydrate)

คาร์โบไฮเดรตมาจากคำว่า “hydrate of carbon” มีสูตรโครงสร้างทางเคมีง่าย ๆ คือ $(CH_2O)_n$ เมื่อ n คือจำนวนอะตอม (atom) ของคาร์บอน (carbon) และเป็นสารประกอบประเภท อัลดีไฮด์ (aldehyde) หรือ คีโตน (keton) (Champ and Harvey, 1987, 1994 ; Styer, 1988; Murray et al., 1993, 1995; Zubay, 1993; Campbell, 1995) Styer (1988) และ Campbell (1995) ได้รายงานว่าคาร์โบไฮเดรตเป็น 1 ใน 4 ของสารชีวโมเลกุล (biomolecule) หลัก ๆ ที่มีความสำคัญต่อสิ่งมีชีวิต (ได้แก่ โปรตีน, กรดนิวคลีอิก (nucleic acid), ไขมัน และคาร์โบไฮเดรต) ซึ่งมีความสำคัญต่อสิ่งมีชีวิตดังนี้คือ คาร์โบไฮเดรตเป็นแหล่งเก็บสำรองพลังงาน, เชื้อเพลิง และเป็นสารตัวกลางทางเมตาบอลิซึม (metabolic intermediates) เช่น แป้ง (starch) ในพืช และ ไกลโคเจน (glycogen) ในสัตว์เป็นคาร์โบไฮเดรตชนิดโพลีแซคคาไรด์ (polysaccharide) เมื่อถูกเมตาบอลิซ์ (metabolized) จะได้เป็นน้ำตาลกลูโคสซึ่งเป็นเชื้อเพลิงในการสร้างพลังงานในเซลล์และ ATP ที่สิ่งมีชีวิตทั้งหลายใช้เป็นแหล่งพลังงานนั้นก็มีคาร์โบไฮเดรตเป็นส่วนประกอบ นอกจากนี้ คาร์โบไฮเดรตเป็นส่วนประกอบของโคเอนไซม์ (coenzyme) อีกหลายชนิด และคาร์โบไฮเดรตเป็นส่วนประกอบของสารพันธุกรรมและช่วยในการถ่ายทอดพันธุกรรมของสิ่งมีชีวิตได้แก่ น้ำตาลไรโบส (ribose) และดีออกซีไรโบส (deoxyribose) ซึ่งเป็นส่วนประกอบของ DNA และ RNA ทั้งนี้เนื่องจากคุณสมบัติของวงแหวนน้ำตาลนั้นทำให้เกิดการบิดงอภายในสายของ DNA และ RNA ซึ่งมีส่วนสำคัญในการเก็บและขยายข่าวสารทางพันธุกรรม คาร์โบไฮเดรตชนิดโพลีแซคคาไรด์เป็นส่วนประกอบของโครงสร้างของผนังเซลล์ (cell wall) ของพืช, แบคทีเรีย และเป็นส่วนประกอบในโครงสร้างภายนอกที่แข็งหุ้มตัวแมลง (exoskeleton) คาร์โบไฮเดรตบางชนิดจะเชื่อมต่อกับโปรตีนหรือไขมันเช่น อนุของน้ำตาลเป็นส่วนประกอบอยู่ใน glycoprotein ทำให้เมคโคทิตแควมีลักษณะเป็นขั้วลบเคลือบอยู่ที่ผิวนอกและนอกจากนี้คาร์โบไฮเดรตที่อยู่ผิวของเซลล์ยังเป็นกุญแจสำคัญในการจดจำข้อมูลระหว่างเซลล์ (cell recognized) ในระหว่างการพัฒนาของเซลล์

Champ and Harvey (1987, 1994), Emsminger และคณะ (1990) และ Murray และคณะ (1993, 1995) ได้แบ่งชนิดของคาร์โบไฮเดรตตามจำนวนน้ำตาลที่เป็นส่วนประกอบดังนี้

1. โมโนแซคคาไรด์ (monosaccharide) เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (simple sugar) ซึ่งพบว่าเป็นส่วนประกอบของคาร์โบไฮเดรตที่มีโมเลกุลใหญ่ หรือที่มีโมเลกุลสลับซับซ้อน และโมโนแซคคาไรด์ยังแบ่งตามจำนวนอะตอมของคาร์บอนที่เป็นส่วนประกอบในโมเลกุลได้อีก ดังนี้คือ

- 1.1. น้ำตาลไตรโอส (triose) คือคาร์โบไฮเดรตที่มีอะตอมของคาร์บอนเป็นส่วนประกอบในโมเลกุล 3 อะตอม เช่น ไกลเซอรอลดีไฮด์ (glyceraldehyde) และ ไดไฮดร็อกซีอะซิโตน (dihydroxyacetone) เป็นต้น
- 1.2. น้ำตาลเตโตรส (tetrose) คือคาร์โบไฮเดรตที่มีอะตอมของคาร์บอนเป็นส่วนประกอบในโมเลกุล 4 อะตอม เช่น อีไรโทรส (erythrose) เป็นต้น
- 1.3. น้ำตาลเพนโตส (pentose) คือคาร์โบไฮเดรตที่มีอะตอมของคาร์บอนเป็นส่วนประกอบในโมเลกุล 5 อะตอม เช่น ไรโบส (ribose), ไรบูลอส (ribulose), ซิโลส (xylose) และไซลูโลส (xylulose) เป็นต้น
- 1.4. น้ำตาลเฮกโซส (hexose) คือคาร์โบไฮเดรตที่มีอะตอมของคาร์บอนเป็นส่วนประกอบในโมเลกุล 6 อะตอม เช่น กลูโคส (glucose), กาแล็คโตส (galactose), แมนโนส (mannose) และ ฟรุคโตส (fructose) เป็นต้น
- 1.5. น้ำตาลเฮปโตส (heptose) คือคาร์โบไฮเดรตที่มีอะตอมของคาร์บอนเป็นส่วนประกอบในโมเลกุล 7 อะตอม เช่น เซโดเฮปทูโลส (sedoheptulose) เป็นต้น
- 1.6. น้ำตาลโนโนส (nonose) คือคาร์โบไฮเดรตที่มีอะตอมของคาร์บอนเป็นส่วนประกอบในโมเลกุล 9 อะตอม เช่น กรดนิวรามินิก (neuraminic acid) เป็นต้น
- ซึ่งความสำคัญทางชีวโมเลกุลและแหล่งที่พบน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวบางชนิดได้แสดงในตารางที่ 2.3
- ตารางที่ 2.3 แหล่งที่พบและความสำคัญทางชีวเคมีของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวบางชนิด

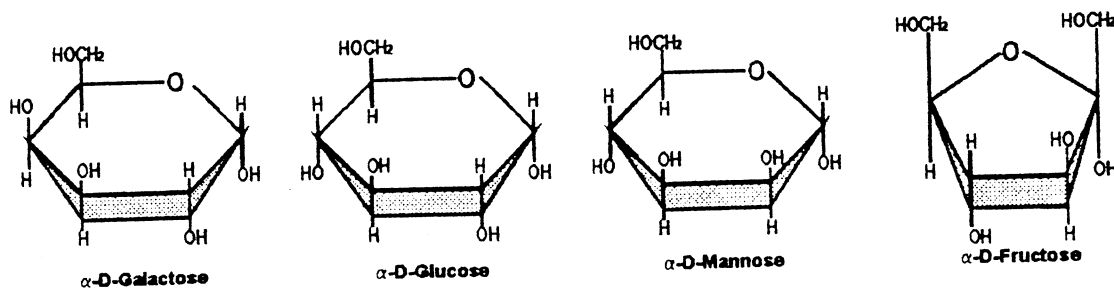
ชนิดของน้ำตาล	แหล่งที่พบ	ความสำคัญทางชีวเคมี
D-Ribose	กรดนิวคลีอิก	เป็นส่วนประกอบของโครงสร้างของกรดนิวคลีอิก และ Coenzyme เช่น ATP, NAD, NADP, Flavoprotein และเป็นตัวกลางใน Pentose phosphate pathway
D-Ribulose	เกิดระหว่าง metabolism	เป็นสารตัวกลางใน Pentose phosphate pathway
D-Arabinose	ยางจากต้นไม้	เป็นส่วนประกอบของไกลโคโปรตีน (Glycoprotein)
D-Xylose	ยางของต้นไม้อีก	เป็นส่วนประกอบของไกลโคโปรตีน
	Proteoglycan, Glycoaminoglycan	
D-Lyxose	กล้ามเนื้อหัวใจ	เป็นส่วนประกอบของไรโบฟลาวิน (Riboflavin) ในกล้ามเนื้อหัวใจ

ตารางที่ 2.3 แหล่งที่พบและความสำคัญทางชีวเคมีของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวบางชนิด (ต่อ)

ชนิดของน้ำตาล	แหล่งที่พบ	ความสำคัญทางชีวเคมี
D-Xylulose	เป็นสารตัวกลางใน Uric acid pathway	
D-Glucose	น้ำผลไม้, การย่อยสลายแป้ง, น้ำตาลอ้อย	เป็นน้ำตาลของร่างกายที่ถูกลำเลียงไปตามกระแสโลหิตเพื่อเป็นแหล่งพลังงานให้กับเนื้อเยื่อต่างๆ
D-Fructose	น้ำผลไม้, น้ำผึ้งและการย่อยสลายน้ำตาลอ้อย และ Inulin ซึ่งสกัดจากต้นอาทิโชค(Artichoke)	ถูกเปลี่ยนไปเป็นกลูโคสได้ในตับและลำไส้เล็กเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานต่อไป
D-Galactose	การสลายน้ำตาล Lactose	ถูกเปลี่ยนไปเป็นกลูโคสได้ในตับ, สร้างได้ที่ต่อมน้ำนมเพศหญิงของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม เป็นส่วนประกอบของไกลโคไลปิด (Glycolipid) และไกลโคโปรตีน
D-Mannose	การสลาย Mannan และ ยางไม้จากพืช	เป็นส่วนประกอบของไกลโคโปรตีน

ที่มา : Murray และคณะ (1993, 1995)

น้ำตาลที่พบอยู่ในธรรมชาติในรูปอิสระได้แก่ น้ำตาลกลูโคสและฟรุคโตส (Emsminger et al., 1990) ซึ่งโครงสร้างทางเคมีของน้ำตาลกลูโคส, ฟรุคโตส และน้ำตาลเฮกโซสอื่น ๆ มีดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 โครงสร้างทางเคมีของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวชนิดเฮกโซสบางชนิด

ที่มา: Murray และคณะ (1993, 1995)

2. โอลิโกแซคคาไรด์ (Oligosaccharide) คือน้ำตาลที่ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตชนิดโมโนแซคคาไรด์ตั้งแต่ 2 ถึง 10 โมเลกุลโดยแบ่งตามจำนวนโมเลกุลของโมโนแซคคาไรด์ที่มาเชื่อมต่อซึ่งได้แก่

2.1. ไดแซคคาไรด์ (disaccharide) ประกอบด้วยโมเลกุลของโมโนแซคคาไรด์ที่มาเชื่อมต่อกันจำนวน 2 โมเลกุลได้แก่

2.1.1. เซลโลไบโอส (cellobiose) ประกอบด้วยโมเลกุลของน้ำตาลกลูโคส 2 โมเลกุลที่เชื่อมต่อกันโดยพันธะ β -1,4 ไกลโคไซด์ิก (β -1,4 glycosidic bond)

2.1.2. มอลโตส (maltose) ประกอบด้วยโมเลกุลของน้ำตาลกลูโคส 2 โมเลกุลที่เชื่อมต่อกันโดยพันธะ α -1,4 ไกลโคไซด์ิก (α -1,4 glycosidic bond) ซึ่งพบในแป้งที่ผ่านกระบวนการหมักหรือแป้งที่ผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิส (hydrolysis)

2.1.3. แล็กโตส (lactose) ประกอบด้วยโมเลกุลของน้ำตาลกลูโคส 1 โมเลกุลเชื่อมต่อกับน้ำตาลกาแล็กโตส 1 โมเลกุลโดยพันธะ β -1,4 ไกลโคไซด์ิก (β -1,4 glycosidic bond) ซึ่งพบในน้ำนมของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม

2.1.4. ซูโครส (sucrose) ประกอบด้วยโมเลกุลของน้ำตาลกลูโคส 1 โมเลกุลเชื่อมต่อกับน้ำตาลฟรุกโตส 1 โมเลกุลโดยพันธะ α -1,2 ไกลโคไซด์ิก (α -1,2 glycosidic bond) ซึ่งพบในน้ำตาลที่ใช้ปรุงอาหารและพบในแครรีธ, sorghum molass และน้ำอ้อย เป็นต้น

2.2. ไตรแซคคาร์ไรด์ (trisaccharide) คือคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วย โมโนแซคคาร์ไรด์เชื่อมต่อกัน 3 โมเลกุล แต่ไม่พบมากในธรรมชาติได้แก่ ราฟฟิโนส (raffinose) ซึ่งประกอบด้วย การเชื่อมต่อกันของน้ำตาลกลูโคส, ฟรุ็กโตส และกาแล็คโตส ชนิดละ 1 โมเลกุล พบใน sugar beet และเมเลซิโตส (melezitose) ประกอบด้วยกลูโคส 2 โมเลกุล และฟรุ็กโตส 1 โมเลกุลพบในพืชบางชนิด

2.3. เตตราแซคคาร์ไรด์ (tetrasaccharide) คือคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วย โมโนแซคคาร์ไรด์ 4 โมเลกุล ได้แก่ stachylose ประกอบด้วย กาแล็คโตส 2 โมเลกุล, กลูโคส 1 โมเลกุล และฟรุ็กโตส 1 โมเลกุลซึ่งย่อยได้ยากในระบบทางเดินอาหารของสัตว์กระเพาะเดียว หากมีปริมาณในอาหารมากจะทำให้เกิดแก๊สเนื่องจากถูกย่อยโดยจุลินทรีย์ และมอลโตเตโตรอส (maltotetrose) ประกอบด้วยกลูโคส 4 โมเลกุลซึ่งได้จากการย่อยแป้ง

2.4. เพนต้าแซคคาร์ไรด์ (pentasaccharide) คือคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วย โมโนแซคคาร์ไรด์ 5 โมเลกุล ได้แก่ verbascose ที่เกิดจากการเชื่อมต่อกันของราฟฟิโนสกับ กาแล็คโตส 2 หรือมากกว่า 2 โมเลกุล

3. โพลีแซคคาร์ไรด์ (polysaccharide) คือคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วย โมโนแซคคาร์ไรด์ตั้งแต่ 10 โมเลกุลขึ้นไปเป็นสายโพลีเมอร์ (polymer) ที่มีโครงสร้างที่ใหญ่และ สลับซับซ้อนมากกว่าโอลิโกแซคคาร์ไรด์แบ่งออกเป็น 2 ประเภทได้แก่

3.1. โฮโมโพลีแซคคาร์ไรด์ (homopolysaccharide) คือโพลีแซคคาร์ไรด์ที่มีสาย โพลีเมอร์ประกอบขึ้นจากโมโนแซคคาร์ไรด์ชนิดเดียวกันได้แก่

3.1.1. เพนโตแซน (pentosan) มีสูตรโครงสร้างทางเคมีคือ $(C_5H_8O_4)_n$ เมื่อ n คือจำนวนโมโนแซคคาร์ไรด์ที่เป็นส่วนประกอบซึ่งมีค่าตั้งแต่ 10 ขึ้นไป พบในหญ้าหมัก

3.1.2. เฮกโซแซน (hexosan) ประกอบด้วยน้ำตาลโมโนแซคคาร์ไรด์ ชนิดเฮกโซสตั้งแต่ 10 โมเลกุลขึ้นไปได้แก่

3.1.2.1. เซลลูโลส (cellulose) เป็นโพลีแซคคาร์ไรด์ที่ประกอบด้วยกลูโคสตั้งแต่ 10 โมเลกุลขึ้นไปเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ β -1,4 ไกลโคไซด์ิก (β -1,4 glycosidic bond) ซึ่งมีความต้านทานในการไฮโดรไลซิสโดยกรดหรือด่างและในสัตว์ กระเพาะเดียวไม่สามารถย่อยเซลลูโลสได้ต้องอาศัยจุลินทรีย์ในระบบทางเดินอาหาร

3.1.2.2. เด็กซ์ตริน (dextrin) ได้จากการย่อยแป้งมีความสามารถในการละลายน้ำดีกว่าแป้ง พบในเมล็ดพืช

3.1.2.3. ไกลโคเจน (glycogen) เป็นโพลีแซคคาร์ไรด์ที่ประกอบด้วยกลูโคสตั้งแต่ 10 โมเลกุลขึ้นไปเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,4 ไกลโคไซด์ิก

(α -1,4 glycosidic bond) และ α -1,6 ไกลโคไซด์ิก (α -1,6 glycosidic bond) ทำให้มีลักษณะเป็นโพลิเมอร์ที่แตกกิ่งก้านสาขา (branching) ใช้เป็นแหล่งเก็บสำรองกลูโคสในตับและกล้ามเนื้อ ซึ่งในตับมีไกลโคเจนเป็นส่วนประกอบ 10 % ของน้ำหนักตับ

3.2.2.4. แป้ง (starch) เป็นโพลิแซคคาไรด์ที่ประกอบด้วย

โพลิเมอร์ 2 ชนิดคือ อะมัยโลส (amylose) และ อะมัยโลเพกทิน (amylopectin) โดยอะมัยโลสประกอบด้วยกลูโคสที่เชื่อมต่อกันโดยพันธะ α -1,4 ไกลโคไซด์ิก (α -1,4 glycosidic bond) ซึ่งมีลักษณะเป็นโพลิเมอร์ที่เป็นเส้นตรง (linear polymer) ในขณะที่อะมัยโลเพกทินประกอบด้วยกลูโคสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,4 ไกลโคไซด์ิก (α -1,4 glycosidic bond) และ α -1,6 ไกลโคไซด์ิก (α -1,6 glycosidic bond) ทำให้มีลักษณะเป็นโพลิเมอร์ที่แตกกิ่งก้านสาขาเหมือนไกลโคเจน พบมากในเมล็ดธัญพืช เมล็ดถั่วและพืชหัว

3.2.2.5. ฟรุคแตน (fructan) เป็นแหล่งเก็บสำรอง

คาร์โบไฮเดรตในราก ลำต้น และเมล็ด แบ่งออกเป็น 2 ชนิดคือ ลีแวน (levan) และ อินูลิน (inulin)

นอกจากนี้ยังมี กาแล็คแตน (galactan) และ แมนแนน (mannan) ซึ่งพบในผนังเซลล์ของพืช โดยกาแล็คแตนพบในพืชตระกูลถั่ว และแมนแนนพบในผนังเซลล์ของเมล็ดปาล์ม

3.2. เซโทพอโรโพลิแซคคาไรด์ (heteropolysaccharide) คือโพลิแซคคาไรด์ที่มีสายโพลิเมอร์ที่ประกอบด้วยโมโนแซคคาไรด์ตั้งแต่ 1 ชนิดขึ้นไปได้แก่ ยางไม้ (gum), เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) พบในผนังเซลล์ของพืชประกอบด้วยอะราบิโนส, กาแล็คโตส, แมนโนส, ไซโลส, ไซโลบิโอส และน้ำตาลอื่น ๆ, มิวซิโลส (mucilose) พบในพืชและเมล็ดพืช, มิวโคโพลิแซคคาไรด์ (mucopolysaccharide) พบในเนื้อเยื่อเกี่ยวพัน (connective tissue) ของสัตว์ และเพกทิน (pectin) พบในผนังเซลล์พืช ประกอบด้วยกรดกลูโคนิก (glucolonic acid), กาแล็คโตส และอะราบิโนส

กลูโคสนับว่าเป็นหน่วยพื้นฐานของคาร์โบไฮเดรต ซึ่งมีความสำคัญในการใช้เป็นแหล่งเชื้อเพลิงและเป็นส่วนประกอบในโครงสร้างของสิ่งมีชีวิตทั้งหมด เนื่องจากมีคุณสมบัติในการละลายน้ำได้มากและสามารถแพร่ผ่านผนังเซลล์ได้ (Cahill, 1986)

2.4 การย่อย (digestion) และการดูดซึม (absorption) คาร์โบไฮเดรตเข้าสู่ร่างกายสุกร

เมื่อสัตว์ได้รับคาร์โบไฮเดรตจากอาหารที่กินซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นชนิดที่มีโมเลกุลใหญ่และโครงสร้างที่สลับซับซ้อนเช่น โอลิโกแซคคาไรด์และโพลีแซคคาไรด์ ดังนั้นจะต้องจะผ่านกระบวนการย่อยเพื่อให้โมเลกุลของอาหารมีขนาดเล็กลงโดยอาศัยวิธีการต่าง ๆ เช่น วิธีการทางกายภาพ (physical process) ได้แก่การเคี้ยว (mastication), การบิวดัของกระเพาะอาหาร เป็นต้น และวิธีการทางเคมี (chemical process) ได้แก่ กรด HCl ในกระเพาะอาหาร, น้ำย่อยในระบบทางเดินอาหาร เป็นต้น (Chunningham, 1992) สำหรับน้ำย่อยในระบบทางเดินอาหารที่ใช้อยู่ คาร์โบไฮเดรตนั้นมีดังตารางที่ 2.4

ตารางที่ 2.4 น้ำย่อยที่ใช้อยู่คาร์โบไฮเดรตในระบบทางเดินอาหารสุกร (จำแนกทางชีวเคมี)

ชนิดน้ำย่อย	แหล่งที่พบ	ตัวกระตุ้น	สารตั้งต้น	catalized function or product
α -Amylase	ต่อมน้ำลาย น้ำย่อยจากตับอ่อน	Cl^-	แป้ง	hydrolyze พันธะ α -1,4 glycosidic bond ได้ limit dextrin, maltotriose และ maltose
Glucoamylase	Intestinal mucosa	-	maltose และ maltotriose	glucose
Maltase	Intestinal mucosa	-	maltose	glucose
Isomaltase	Intestinal mucosa	-	α -limit dextrin (α -1,6 linear)	glucose
α -limit dextrinase ¹	Intestinal mucosa	-	α -limit dextrin (α -1,6 link)	glucose
Lactase	Intestinal mucosa	-	lactose	glucose และ galactose
Sucrase ¹	Intestinal mucosa	-	Sucrose	glucose และ fructose
Tehalase	Intestinal mucosa	-	tehalose	glucose

¹ α -limit dextrinase และ Sucrase เป็นน้ำย่อยที่อยู่ใน subunit ของโปรตีนชนิดเดียวกัน แต่ไม่ได้อยู่ในสายโพลีเปปไทด์ (polypeptide) เดียวกัน

ที่มา: คัดแปลงจาก Kidder and Manners (1978); Chunningham (1992) และ

Ganong (1993, 1995)

การย่อยคาร์โบไฮเดรตจะเริ่มตั้งแต่ปากโดยใช้วิธีการเช่น การเคี้ยว และวิธีทางเคมีเช่น การใช้เอนไซม์ α -amylase ที่เป็นส่วนประกอบอยู่ในน้ำลาย ซึ่งจะย่อยแป้งให้มีโมเลกุลที่เล็กลง แต่การย่อยที่ปากจะไม่สามารถย่อยแป้งได้อย่างสมบูรณ์ หลังจากนั้นจะเข้าสู่กระเพาะอาหารซึ่งจะทำให้เอนไซม์ α -amylase หยุดการทำงานลงชั่วคราวและอาศัยการย่อยโดยวิธีการจากการบีบตัวของกระเพาะอาหารส่วนปลาย (distal stomach) เพื่อลดขนาดอนุภาคของอาหารให้เล็กลง หลังจากนั้นจะเข้าสู่ลำไส้เล็กซึ่งในลำไส้เล็กจะแบ่งการย่อยคาร์โบไฮเดรตออกเป็น 2 ระยะคือ luminal phase โดยเอนไซม์ α -amylase จากน้ำลายจะเริ่มทำงานอีกครั้ง และมีเอนไซม์ α -amylase จากน้ำย่อยของตับอ่อน (pancreatic juice) ออกมาช่วยร่วมด้วยซึ่งจะทำให้โมเลกุลของคาร์โบไฮเดรตมีขนาดเล็กลงเป็นไดแซ็กคาไรด์และไตรแซ็กคาไรด์ หลังจากนั้นจะเข้าสู่ระยะ membranous phase ซึ่งจะมีการหลั่งน้ำย่อยออกมาบริเวณผนัง membrane ของ enterocyte ในลำไส้เล็ก ซึ่งน้ำย่อยและสารตั้งต้น (substrate) จะทำปฏิกิริยากันที่ผนัง membrane ของ enterocyte ได้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวและดูดซึมเข้าสู่ร่างกาย (Chummingham, 1992 ; Ganong, 1993, 1995) ซึ่ง Prosser and DeVillez (1991) รายงานว่าการย่อยคาร์โบไฮเดรตในระดับ membranous phase ในร่างกายสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมนี้จะอาศัยน้ำย่อย disaccharidase ซึ่งน้ำย่อยชนิดนี้จะถูกสังเคราะห์ขึ้นที่ brush border epithelium และสามารถแบ่งออกเป็น 2 หน่วยย่อย (subunit) ภายหลังจากที่มีการ translation ในเซลล์ก่อนที่จะหลั่งออกไปสู่ผนังของลำไส้เล็ก (lumen) โดยหน่วยย่อยแต่ละหน่วยจะเป็น single catalytic side และมี cytosolic side อยู่ที่ผนังเซลล์ (membrane) ซึ่งน้ำย่อยชนิดนี้จะคือน้ำย่อยชนิด glycosidase ซึ่งมีอยู่ 4 ชนิดคือ

1. sucrase-isomaltase complex น้ำย่อยชนิดนี้มี 2 หน่วยย่อย โดยหน่วยย่อยแรกจะมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 120 KD ทำหน้าที่ไฮโดรไลซ์มอลโตสและซูโครส ส่วนอีกหน่วยย่อยหนึ่งมีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 140 KD ทำหน้าที่เป็นน้ำย่อยชนิด glucopyranosidase (ไฮโดรไลซ์ไอโซมอลโตส (isomaltase)) และพบว่า complex นี้จะทำหน้าที่เป็นน้ำย่อยที่ใช้อยู่ในลำไส้เล็ก 80 เปอร์เซ็นต์ของน้ำย่อยที่สัตว์ใช้ย่อยน้ำตาลมอลโตสทั้งหมด

2. maltase-glucoamylase (γ -amylase) เป็นน้ำย่อยที่ทำหน้าที่เหมือนกับ α -amylase แต่ไม่ต้องการ Cl^- กระตุ้นการทำงานเหมือนน้ำย่อย α -amylase มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 250 KD มี 2 หน่วยย่อย และทำหน้าที่เป็นน้ำย่อยที่ย่อยมอลโตสในลำไส้เล็ก 20 เปอร์เซ็นต์ของน้ำย่อยที่ย่อยน้ำตาลมอลโตสทั้งหมด

3. β -glycosidase complex หรือ lactose-hetero- β -glucosidase มีน้ำหนักโมเลกุลประมาณ 320 KD ทำหน้าที่เป็น lactase ซึ่งสามารถไฮโดรไลซ์น้ำตาลแลคโตสในน้ำนม, เซลโลไบโอส และฟลอไรซิน (phlorizin)

4. Trehalase เป็นน้ำย่อยที่มีหน่วยเดียว (1 unit หรือ single enzyme) ทำหน้าที่ไฮโดรไลซ์น้ำตาลชนิด α -trehalose ซึ่งเป็นคาร์โบไฮเดรตชนิดโคแซคคาร์ไรด์ที่พบใน สาหร่าย, เห็ดและแมลง

Shu และคณะ (1992) รายงานว่า สุกแรกเกิดจะมีกิจกรรมของน้ำย่อย lactase สูงโดยมีกิจกรรมสูงที่สุดเมื่ออายุ 5 วัน และหลังจากอายุ 14 วันกิจกรรมของน้ำย่อยจะลดลง ในขณะที่กิจกรรมของน้ำย่อย maltase ต่ำและไม่พบ sucrase ในลำไส้เล็กของสุกรแรกเกิด แต่ภายหลังจากอายุ 3 วัน กิจกรรมของน้ำย่อย maltase จะสูงขึ้นตามอายุ

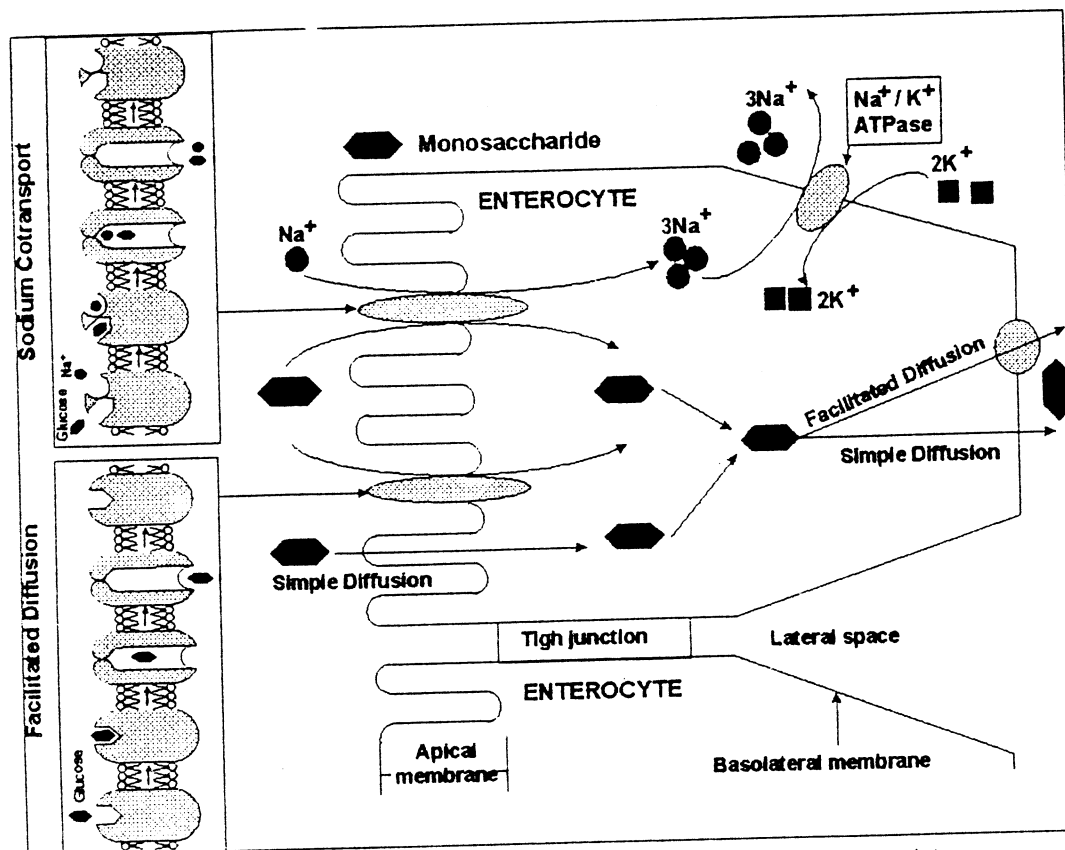
คาร์โบไฮเดรตเมื่อถูกย่อยในระดับ membranous phase แล้วจะได้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว เช่น กลูโคส, กาแล็คโตส และฟรุคโตส หลังจากนั้นจะทำการดูดซึมเข้าสู่ร่างกายโดยวิธี

1. Sodium Cotransport ซึ่งเป็นวิธี active transport วิธีหนึ่งโดยอาศัยโปรตีนเป็นตัวพา (carrier) ซึ่งคือ Sodium-dependent glucose transporter เข้าสู่เซลล์ enterocyte พร้อมกับโซเดียม (sodium, Na) ดังภาพที่ 5 ซึ่งโปรตีนตัวพานั้นจะมีความจำเพาะเจาะจงต่อกลูโคส และกาแล็คโตส ดังนั้นฟรุคโตสจะไม่ถูกดูดซึมโดยวิธีนี้ (Chunmigham, 1992 ; Devlin, 1992 ; Withers, 1992 ; Ganong, 1993, 1995)

2. Facilitated diffusion ซึ่งเป็นวิธี diffusion วิธีหนึ่งโดยอาศัย glucose transporter ซึ่งมีความจำเพาะเจาะจงต่อกลูโคส หรือน้ำตาลที่มีคาร์บอนตำแหน่ง 3 ตัวแรกที่เหมือนกับกลูโคส ดังภาพที่ 5 (Devlin, 1992 ; Withers, 1992 ; Ganong, 1993, 1995)

3. Simple diffusion วิธีนี้ใช้กับน้ำตาลทุกชนิด ดังภาพที่ 5 (Chunmigham, 1992 ; Withers, 1992 ; Ganong, 1993, 1995)

บริเวณที่มีการดูดซึมน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวคือ ลำไส้เล็ก โดยจะมีการดูดซึมมากที่สุดที่บริเวณลำไส้เล็กส่วนกลาง และมีการดูดซึมรองลงมาคือ บริเวณลำไส้เล็กส่วนต้นและลำไส้เล็กส่วนปลายตามลำดับ และที่ลำไส้ใหญ่บริเวณ colon จะไม่มีการดูดซึมน้ำตาลเลย (Ganong, 1993, 1995) เมื่อคาร์โบไฮเดรตถูกดูดซึมผ่าน enterocyte แล้วจะเข้าสู่ Hepatic portal vein เข้าสู่ตับเพื่อเก็บสะสมหรือเมตาโบไลซ์เพื่อใช้ประโยชน์ในร่างกายต่อไป (Champe and Harvey, 1987 ; Chunmigham, 1992 ; Ganong, 1993, 1995 ; Murray et al., 1993, 1995) แต่น้ำตาลบางชนิด เช่น น้ำตาลฟรุคโตสบางครั้งจะถูกเปลี่ยนเป็นกลูโคสใน mucosal cell ของลำไส้เล็ก (Ganong, 1993, 1995)



ภาพที่ 5 การดูดซึมโมโนแซ็กคาไรด์ในลำไส้เล็กของ enterocyte cell โดยวิธีต่าง ๆ

ที่มา : คัดแปลงจาก Darnell และคณะ (1990); Cunningham (1992); Devlin (1992);

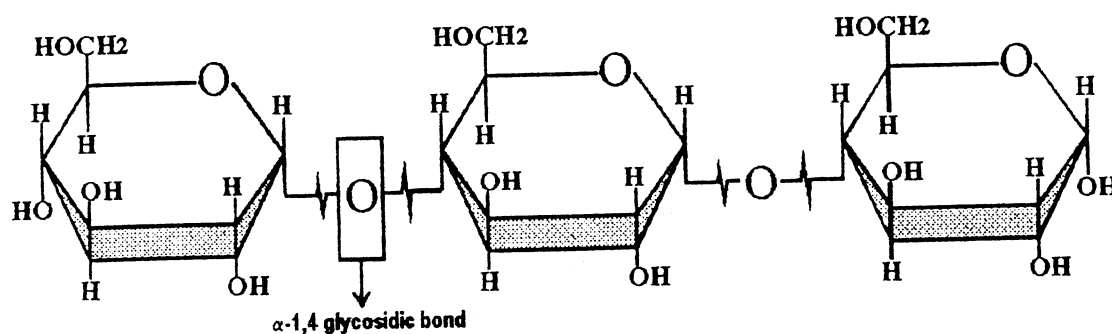
Serves (1992); Ganong (1993, 1995); Murray และคณะ (1993, 1995); Goodman (1994)

2.5 แป้งและส่วนประกอบของแป้ง

ถึงแม้ว่ากลูโคสจะมีความสำคัญมากในการใช้เป็นแหล่งพลังงานในการเมตาบอลิซึม (metabolism) ของเซลล์และเนื้อเยื่อ แต่หากเซลล์มีปริมาณกลูโคสในรูปอิสระปริมาณที่มากเกินไป จะเป็นอันตรายเนื่องจากแรงดันออสโมซิส (osmotic pressure) ดังนั้นเซลล์ที่มีปริมาณกลูโคสที่มาก โดยเฉพาะเซลล์ที่ทำหน้าที่เก็บสำรองกลูโคสเพื่อใช้ประโยชน์ในอนาคตจะเก็บกลูโคสในรูปของ simple homopolymer เพื่อลดแรงดันออสโมซิสของเซลล์ ซึ่งการเก็บกลูโคสโดยวิธีการนี้จะลดแรงดันออสโมซิสได้หลายเท่ากว่าการเก็บกลูโคสในรูปอิสระเช่น หากโพลีเมอร์นั้นประกอบด้วยอนุของกลูโคส 1,000 อนุจะมีแรงดันออสโมซิสเพียง 1/1,000 เมื่อเทียบกับการเก็บกลูโคสในรูปอิสระในเซลล์ โดยกลูโคสที่เก็บในรูปของโพลีเมอร์นี้เซลล์จะเก็บสำรองไว้จนกว่าจะต้องการใช้ ซึ่งปกติแล้วจะมีโพลีแซ็กคาไรด์ 2 ชนิดที่เซลล์เก็บสะสมไว้เพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานคือ แป้งในเซลล์ของพืชและไกลโคเจนในเซลล์ของสัตว์ (Zubay, 1993)

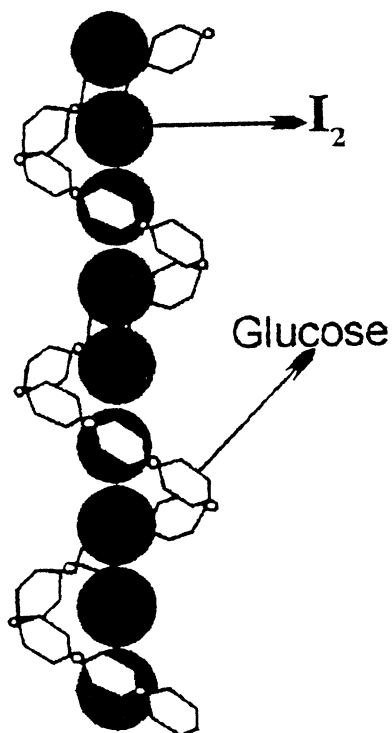
แป้งเป็นคาร์โบไฮเดรตชนิดพอลิแซ็กคาไรด์ที่เกิดจากโมเลกุลของกลูโคสมาเชื่อมกันเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานสำรองของพืช โดยส่วนใหญ่จะพบในธัญพืชเช่น ข้าว, ข้าวโพด, ข้าวไรต์ และข้าวสาลี พืชตระกูลถั่ว และ พืชหัวเช่น มันฝรั่ง ซึ่งในเมล็ดธัญพืชนั้นประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตชนิดที่เป็นแป้งถึง 70 เปอร์เซ็นต์ เมล็ดของพืชตระกูลถั่วจะมีแป้งเป็นส่วนประกอบในเมล็ด 40 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งในพืชนั้นนอกจากจะพบแป้งในส่วนของเมล็ดแล้วยังพบในส่วนของลำต้น ใบ รวมถึงรากด้วยแต่พบในปริมาณที่น้อย (Reed, 1980; Emsminger *et al.*, 1990)

60 ถึง 70 เปอร์เซ็นต์ของแป้งจะประกอบด้วยอะมัยโลสและอะมัยโลเพกทิน (Gray, 1992) โดยอะมัยโลสประกอบขึ้นจากกลูโคสที่เชื่อมต่อกันจำนวน 250 ถึง 600 อนุด้วยพันธะไกลโคไซด์ิก (glycosidic bond) แบบ α -1, 4 linkage ดังภาพที่ 6 ทำให้เป็นสายโมเลกุลที่มีลักษณะเป็นเส้นตรง (linear chain) และเป็นเกลียว (helix) ชนิดเวียนซ้าย โดยแต่ละรอบของเกลียวจะประกอบด้วยกลูโคส 6 อนุ ดังภาพที่ 7 ทำให้รูปร่างของอะมัยโลสเหมาะที่จะอัดตัวเป็นกลุ่มก้อนอยู่ภายในเซลล์ โดยมีโมเลกุลของน้ำเข้ามาจับอยู่ด้านนอกด้วยพันธะไฮโดรเจน (มนตรี *et al.*, 2530; Murray *et al.*, 1993; 1995)



ภาพที่ 6 การเชื่อมต่อกันโดยพันธะ α -1,4 linkage glycosidic bond ของกลูโคสในโมเลกุลของอะมัยโลส

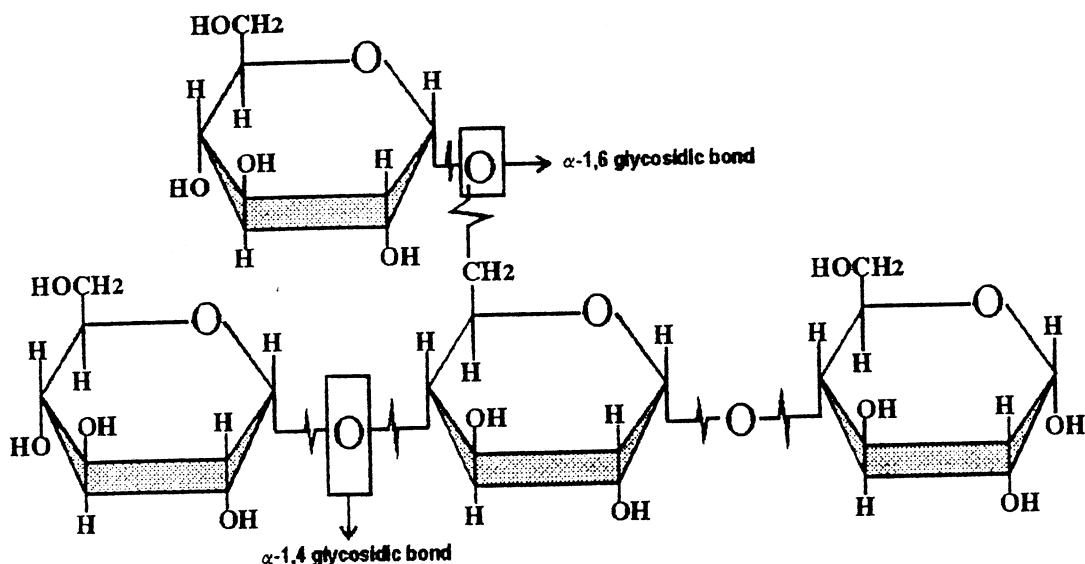
ที่มา: คัดแปลงจาก มนตรีและคณะ (2530), Murray และคณะ (1993, 1995), Stryer (1988) และ Emsminger และคณะ (1990)



ภาพที่ 7 การเชื่อมต่อกันของกลูโคสภายในสายอะมัยโลส

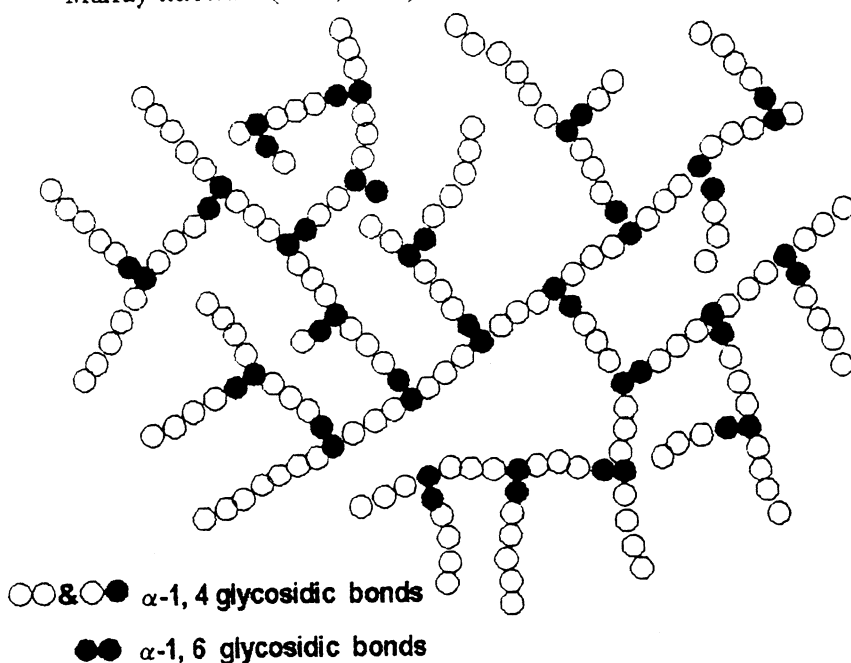
ที่มา : มนตรีและคณะ (2530)

สำหรับอะมัยโลเพคตินนั้นประกอบขึ้นจากการเชื่อมต่อกันโดยโมเลกุลของกลูโคสเหมือนกับอะมัยโลส แต่การเชื่อมต่อกันของอนุของกลูโคสนั้นจะมีทั้งการเชื่อมต่อกันโดยพันธะไกลโคไซด์ิก (glycosidic bond) แบบ α -1, 4 linkage และยังมีการเชื่อมต่อกันโดยพันธะไกลโคไซด์ิกแบบ α -1, 6 linkage ทำให้อะมัยโลเพคตินมีลักษณะของสายโมเลกุลเป็นแบบแตกแขนงหรือแตกกิ่งก้านสาขา (branching) ออกเป็นหลาย ๆ สาย ดังภาพที่ 8 และภาพที่ 9 โดยเฉลี่ยจะมีอนุของกลูโคสประมาณ 250 อนุต่อสายและจะมีการแตกแขนงออกเป็นกิ่งก้านสาขาย่อยทุก ๆ 5 ถึง 8 อนุ (มนตรี *et al.*, 2530; เขาวมาลัยและสาโรช, 2530; Stryer, 1988; Emsminger *et al.*, 1990 ; Murray *et al.*, 1993, 1995) หรือทุก ๆ 20 อนุของกลูโคสในสายโมเลกุลของอะมัยโลเพคติน (Gray, 1992) ซึ่งส่งผลให้อะมัยโลเพคตินอัดตัวกันเป็นโครงสร้างผลึก (crystalline form) ภายในเม็ดแป้ง (starch granule) (Kerr, 1950)



ภาพที่ 8 การเชื่อมต่อกันโดยพันธะ α -1,4 linkage glycosidic bond และพันธะ α -1,6 linkage glycosidic bond ของกลูโคสในโมเลกุลของอะมัยโลเพคติน

ที่มา: คัดแปลงจาก มนตรีและคณะ (2530), Stryer (1988), Emsminger และคณะ (1990) และ Murray และคณะ (1993, 1995)



ภาพที่ 9 การแตกแขนงของอะมัยโลเพคติน เนื่องจากพันธะ α -1,4 glycosidic bond และพันธะ α -1,6 glycosidic bond ของกลูโคส

ที่มา: คัดแปลงจาก Champe and Harvey (1987, 1994)

จากลักษณะการจัดเรียงตัวของกลูโคสภายในโมเลกุลของอะมัยโลสและอะมัยโลเพคติน ที่แตกต่างกันนั้นก่อให้เกิดคุณสมบัติของสารทั้งสองชนิดแตกต่างกันคือ ทำให้อะมัยโลเพคตินสามารถละลายในน้ำร้อนได้น้อยกว่าอะมัยโลส เพราะอะมัยโลเพคตินมีโมเลกุลที่ใหญ่กว่าและมี

ธาตุฟอสฟอรัสปนอยู่ด้วย ดังนั้นเมื่อทดสอบอะมัยโลเพคตินด้วยน้ำยาไอโอดีนเจือจางจะเกิดสีม่วงแดง เนื่องจากเกลียวโซ่ของกลูโคสที่ประกอบอยู่ในโมเลกุลของอะมัยโลเพคตินมีความยาวไม่เพียงพอที่จะให้โมเลกุลของไอโอดีนแทรกตัวเข้าไป (มนตรี *et al.*, 2530; เขาวมาลย์ และสาโรช, 2530) และอะมัยโลเพคตินยังเป็นตัวที่ทำให้เกิดความข้นของแป้ง (thickening) ด้วย (Reed, 1980) ส่วนอะมัยโลสเมื่อทำการทดสอบด้วยน้ำยาไอโอดีนเจือจางแล้วจะเกิดสีน้ำเงินเข้ม เนื่องจากการที่อะมัยโลสมีรูปร่างเป็นเส้นตรงและกลูโคสเชื่อมต่อกันเป็นเกลียว ทำให้โมเลกุลของไอโอดีนสามารถเข้าไปแทรกตัวอยู่ภายในเกลียวได้แต่ไม่ก่อให้เกิดปฏิกิริยาทางเคมี (มนตรี *et al.*, 2530; เขาวมาลย์ และสาโรช, 2530) ซึ่งสีของไอโอดีนที่ได้จากการทดสอบความยาวของสายโมเลกุลของอะมัยโลสมีดังตารางที่ 2.5 และนอกจากนี้พบว่าอะมัยโลสเป็นตัวทำให้เกิดขบวนการ Gel Formation ขึ้น (Reed, 1980) ทำให้แป้งมีคุณสมบัติบางประการแตกต่างจากคาร์โบไฮเดรตชนิดอื่น ๆ ดังตารางที่ 2.6

ตารางที่ 2.5 สีของไอโอดีนเมื่อทดสอบกับอะมัยโลสที่มีความยาวของโมเลกุลต่างกัน

ความยาวของโมเลกุล (จำนวนกลูโคส)	จำนวนรอบของเกลียว	สี
12	2	ไม่เกิดสี
12 - 15	2	สีน้ำตาล
20 - 30	3 - 5	สีแดง
35 - 40	6 - 7	สีม่วง
มากกว่า 45	9	สีน้ำเงิน

ที่มา: deMan (1990)



ตารางที่ 2.6 คุณสมบัติบางประการของคาร์โบไฮเดรต

Carbohydrate	Relative Sweetness	Solubility in water	Gel formation	Relative thickening power
Glucose	*****	+	-	-
Galactose	**	+	-	-
Fructose	*****	+	-	-
Sucrose	*****	+	-	-
Lactose	*	+	-	-
Maltose	**	+	-	-
Starch	-	-	+	**
Dextrin	*	+	เล็กน้อย	*
Cellulose	-	-	+	-

+ สามารถเกิดขึ้นได้

- ไม่สามารถเกิดขึ้นได้

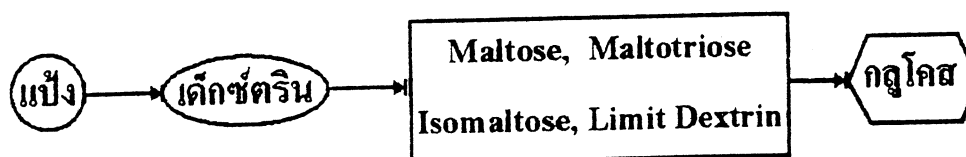
* คะแนนในการเปรียบเทียบ

ที่มา : Reed (1980)

โดยทั่วไปแล้วแป้งที่ได้จากพืชชนิดต่าง ๆ แต่ละชนิดจะมีสัดส่วนของอะมัยโลสและอะมัยโลเพกตินแตกต่างกัน (เขาวมาลย์และสาโรช, 2530; Emsminger et al., 1990) ซึ่งตามปกติแล้วแป้งที่ได้จากพืชชนิดต่าง ๆ จะมีอะมัยโลสเป็นส่วนประกอบประมาณ 20 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ (เขาวมาลย์และสาโรช, 2530) หรือ 18 ถึง 26 เปอร์เซ็นต์ (Wurzburg, 1987) หรือ 10 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ และมีอะมัยโลเพกตินเป็นส่วนประกอบประมาณ 70 ถึง 90 เปอร์เซ็นต์ (Garrett and Grisham, 1995) เช่น แป้งข้าวโพดมีอะมัยโลสเป็นส่วนประกอบ 26 เปอร์เซ็นต์ แป้งข้าวเจ้า 17 ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ แป้งมันสำปะหลัง 18 เปอร์เซ็นต์ ข้าวญี่ปุ่น 10 ถึง 17 เปอร์เซ็นต์ แป้งข้าวเหนียวไม่เกิน 5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแป้งข้าวเหนียวมีปริมาณของอะมัยโลสน้อย แต่มีปริมาณของอะมัยโลเพกตินมากส่งผลให้ข้าวเหนียวเมื่อหุงสุกแล้วจับกันเป็นก้อน (เขาวมาลย์และสาโรช, 2530)

แป้งเมื่อถูกย่อยด้วยความร้อน, กรด หรือน้ำย่อยจะทำให้อนุของแป้งถูกย่อยให้เล็กลงเกิดเป็นเด็คซ์ทรินและเมื่อถูกย่อยต่อไปอีกจะมีโมเลกุลที่เล็กลงเกิดเป็น มอลโตส, มอลโตไตรโอส,

ไอโซมอลโตสและ limit dextrin (Kidder and Manners, 1978; Cunningham, 1992) และเมื่อถูกย่อยลงไปอีกจะได้โมเลกุลของกลูโคส (เขาวมาลย์และสาโรช, 2530) ดังภาพที่ 10



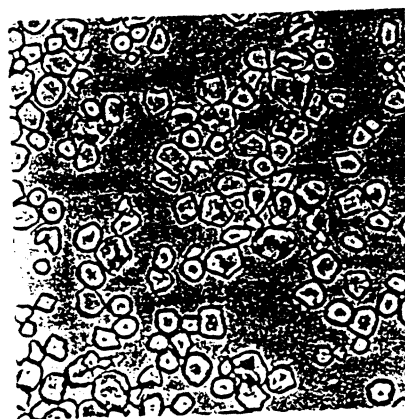
ภาพที่ 10 การเปลี่ยนแปลงของแป้งเมื่อถูกย่อยด้วยความร้อน กรด หรือน้ำย่อย

ที่มา: ดัดแปลงจาก เขาวมาลย์และสาโรช (2530) และ Cunningham (1992)

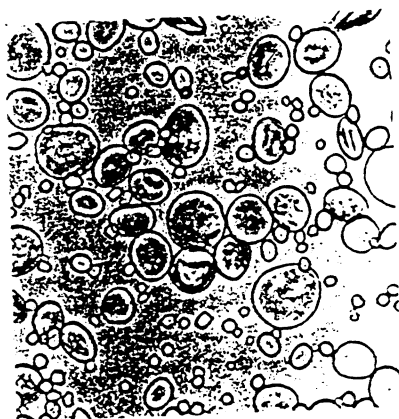
พืชจะเก็บสะสมแป้งไว้ในเมล็ดแป้ง (Benion, 1980; Bowers, 1992) เพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานสำรองสำหรับการเจริญเติบโตและสืบพันธุ์โดยเมล็ดแป้งของพืชนั้นจะพัฒนาภายในเซลล์ที่เรียกว่า พลาสติค (plastid) ในระหว่างการเจริญเติบโตและขบวนการพัฒนาเพื่อการโตเต็มวัย (maturation) หาก 1 พลาสติค ประกอบด้วย 1 เม็ดแป้งจะเรียกพลาสติคชนิดนี้ว่า simple granule หากมีเท่ากับหรือมากกว่า 2 เม็ดแป้งใน 1 พลาสติคจะเรียกว่าเป็นชนิด compound granule และหากในระยะแรก ๆ ของการเจริญเติบโตในพลาสติคมี 1 เม็ดแป้ง แต่เมื่อเจริญเติบโตเต็มที่แล้วมีเมล็ดแป้งเท่ากับ 2 หรือมากกว่า 2 เม็ดแป้งใน 1 พลาสติคจะเรียกว่าเป็นชนิด semicompound granule พืชแต่ละชนิดจะมีรูปร่างและขนาดของเมล็ดแป้งแตกต่างกันโดยรูปร่างนั้นมีหลายแบบ ได้แก่ spherical, lenticular, oval, polygonal เป็นต้น (Bowers, 1992) เช่น แป้งจากข้าวโพดมีเมล็ดแป้งรูปร่าง round shaped แต่ข้าวโพดบางพันธุ์จะมีรูปร่าง polygonal shape, แป้งจากมันฝรั่งจะมีรูปร่างของเมล็ดแป้งแบบ egg shape, แป้งจากข้าวสาลีมีเมล็ดแป้งรูปร่าง round and thin shape, แป้งจากข้าวมีเมล็ดแป้งรูปร่าง round shape แต่บางพันธุ์จะมีรูปร่าง polygonal shape, แป้งจากข้าวบาร์เลย์มีเมล็ดแป้งรูปร่าง round shape (Kerr, 1950) และสำหรับขนาดของเมล็ดแป้งของแป้งจากพืชแต่ละชนิดจะมีขนาดแตกต่างกันโดยจะมีขนาดตั้งแต่ 1 μm จนถึง 150 μm (Bowers, 1992) เช่น เม็ดแป้งของแป้งข้าวโพดมีขนาดตั้งแต่ 5 - 26 μm (Kerr, 1950) หรือ 10 - 25 μm (Redley, 1976), เม็ดแป้งของแป้งมันฝรั่งมีขนาดตั้งแต่ 15 - 100 μm (Kerr, 1950; Redley, 1976), เม็ดแป้งของแป้งข้าวสาลีมีขนาดตั้งแต่ 2 - 35 μm (Kerr, 1950; Redley, 1976), เม็ดแป้งของแป้งจากข้าวมีขนาดตั้งแต่ 3 - 8 μm (Kerr, 1950) หรือ 3-5 μm (Redley, 1976), เม็ดแป้งของแป้งข้าวบาร์เลย์ขนาดตั้งแต่ 2 - 35 μm (Kerr, 1950; Redley, 1976) ซึ่งรูปร่างและขนาดของเมล็ดแป้งของแป้งจากพืชแต่ละชนิดแสดงดังภาพที่ 11



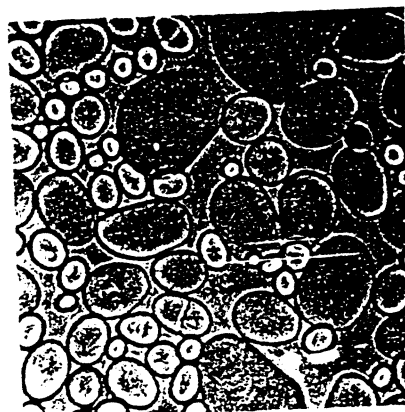
(a)



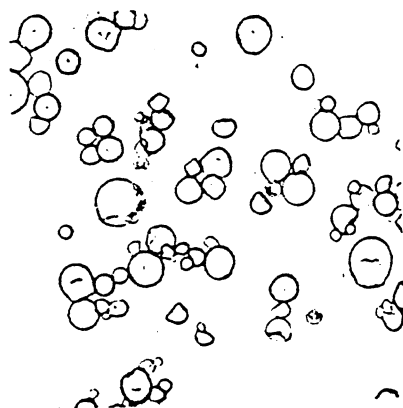
(b)



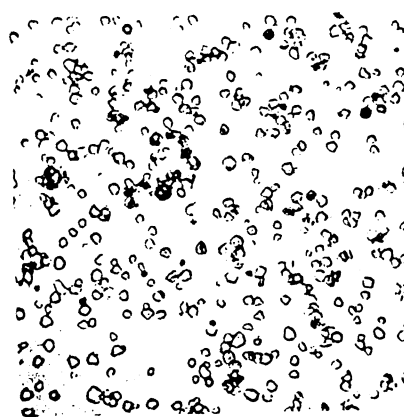
(c)



(d)



(e)



(f)

ภาพที่ 11 รูปร่างและขนาดของเม็ดแป้งจากแป้งที่ได้จากพืชแต่ละชนิด (กำลังขยาย 500 เท่า)

a = corn starch, b = waxy corn starch, c = wheat starch, d = potato starch

e = tapioca starch, f = rice starch

ที่มา : Bennion (1980)

2.6 การย่อยแป้งในระบบทางเดินอาหารสูง

แป้งจะถูกย่อยที่ปากเป็นจุดแรกโดยวิธีทางกายภาพ เช่น การเคี้ยวซึ่งทำให้อาหารมีขนาดอนุภาคเล็กลงและทำให้เม็ดแป้งบางส่วนแตก ส่งผลให้โมเลกุลของแป้งที่อยู่ภายในเม็ดแป้งสามารถออกมาผสมกับน้ำลายและคลุกเคล้าอาหารกับน้ำลายทำให้การย่อยโดยอาศัยวิธีทางเคมีเกิดขึ้น โดยในน้ำลายจะมีน้ำย่อย α -amylase (salivary amylase) ซึ่งจะทำการย่อยโกลิเมอร์ของแป้งที่เป็นทั้งอะมัยโลสและอะมัยโลเพกทินให้มีขนาดโมเลกุลที่เล็กลงเป็นมอลโตส, มอลโตไตรโอส และเด็คซ์ทรินในระหว่างการลำเลียงอาหารจากปากสู่กระเพาะอาหาร (Cunningham, 1992) แต่อย่างไรก็ตามการย่อยแป้งในปากมีบทบาทต่อการย่อยแป้งในอาหารน้อย เนื่องจากอาหารจะถูกกลืนผ่านหลอดอาหารสู่กระเพาะอาหารอย่างรวดเร็ว (บุญล้อม, 2532)

เมื่ออาหารเข้าสู่กระเพาะอาหารน้ำย่อย α -amylase ในน้ำลายจะเริ่มหยุดการทำงานลงเนื่องจากสภาวะแวดล้อมที่เป็นกรด (pH ต่ำ) ในกระเพาะอาหาร (Cunningham, 1992; Ganong, 1993, 1995; Murray et al., 1993, 1995) ทำให้น้ำย่อย α -amylase ซึ่งเป็นโปรตีนชนิดหนึ่งเกิด denature ได้ง่ายในสภาวะแวดล้อมที่มี pH ต่ำเช่น ใน acid chyme (Strombeck and Guilford, 1991) แต่อย่างไรก็ตามน้ำย่อย α -amylase จากน้ำลายจะไม่หยุดการทำงานที่กระเพาะอาหารอย่างทันที แป้งสามารถถูกย่อยต่อไปในกระเพาะอาหารได้บ้างเพราะอาหารจะไม่ถูกผสมกับกรดและน้ำย่อยในกระเพาะอาหารอย่างทันที (บุญล้อม, 2532) กรด HCl และการบีบตัวของกระเพาะอาหารทำให้เม็ดแป้งในอาหารแตกออก และทำให้อาหารมีขนาดอนุภาคเล็กลง ทำให้เพิ่มพื้นที่ผิว (surface area) ให้กับน้ำย่อยที่ทำงานในลำไส้เล็กต่อไป นอกจากนี้ที่กระเพาะอาหารของสุกรยังมีจุลินทรีย์ (micro organism) บางชนิดเช่น Lactobacilli ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่ผลิตกรดแลคติก (lactic acid) จะทำการย่อยแป้งบางส่วน โดยจะเปลี่ยนแป้งเป็นกรดแลคติกและกรดไขมันระเหยได้ ซึ่งจะช่วยปรับสภาวะแวดล้อมของลำไส้เล็กและมีผลต่อประชากรของจุลินทรีย์ในลำไส้เล็กโดยจะลดประชากรของจุลินทรีย์ที่เป็นโทษเช่น E. Coli, Salmonella เป็นต้น (Fuller, 1992)

เมื่ออาหารผ่านกระเพาะอาหารเข้าสู่ลำไส้เล็ก น้ำย่อย α -amylase จากต่อมน้ำลายจะเริ่มทำงานอีกครั้งเนื่องจากมีน้ำย่อยจากตับอ่อน (pancreatic juice) ที่หลั่งออกมาที่ลำไส้เล็กทำให้ที่ลำไส้เล็กมี pH สูงขึ้น เนื่องจากมี carbonate เป็นส่วนประกอบอยู่ปริมาณมากและน้ำย่อยจากตับอ่อนก็มี α -amylase (pancreatic amylase) เป็นส่วนประกอบทำให้แป้งถูกย่อยต่อไปและถูกย่อยในอัตราที่เร็วขึ้น แป้งและเด็คซ์ทรินจะถูกย่อยโดย α -amylase ให้มีโมเลกุลที่เล็กลงเปลี่ยนเป็นมอลโตส, มอลโตไตรโอส และ limit dextrin หลังจากนั้นจะเป็นการย่อยแป้งที่ชั้น mucosa ของผนังลำไส้เล็กโดยมอลโตส และ มอลโตไตรโอสจะถูกย่อยโดยน้ำย่อย maltase และพันธะ α -1,6 glycosidic ของ limit dextrin จะถูกย่อยโดยน้ำย่อย maltase Ia (Isomaltase), Maltase II

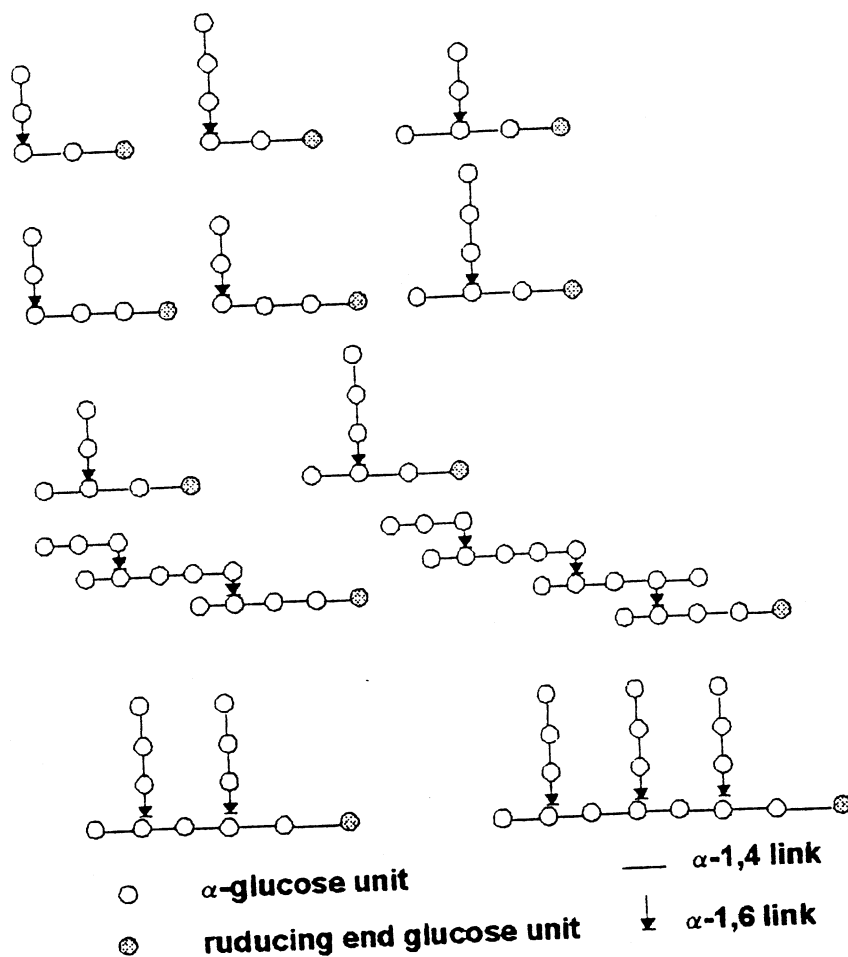
และ maltase III แต่จะมีอัตราการถูกย่อยโดย maltase II และ maltase III ในอัตราที่ช้ามาก และการย่อยที่ชั้น mucosa ของผนังลำไส้เล็กนอกจากจะมีการย่อยโมเลกุลของแป้งที่มีโมเลกุลเล็กคือ ประกอบด้วยกลูโคส 2-3 อณูแล้ว เด็กซ์ทรินที่ประกอบด้วยกลูโคสที่น้อยกว่า 5 อณูและสามารถละลายน้ำได้จะสามารถถูกย่อยได้โดยน้ำย่อย maltase II และ maltase III (glucoamylase) และผลสุดท้ายของการย่อยแป้งที่สมบูรณ์จะได้อณูของกลูโคสเดี่ยว ๆ เพื่อดูดซึมและใช้ประโยชน์ในร่างกายต่อไป นอกจากนี้แป้งที่ผ่านเข้าที่ลำไส้เล็กจะถูกย่อยโดยจุลินทรีย์ที่อาศัยในลำไส้เล็ก ซึ่งผลจากการย่อยโดยจุลินทรีย์นั้นก็คือกรดแลคติกและกรดไขมันระเหยได้ โดยกรดไขมันระเหยได้จะถูกดูดซึมเพื่อใช้ประโยชน์ในร่างกายสัตว์ต่อไป (Kidder and Manners, 1978)

2.7 น้ำย่อย (enzyme) ที่ใช้ในการย่อยแป้งของสุกร

2.7.1 α -amylase เป็นน้ำย่อยที่พบในระบบทางเดินอาหารของสุกร โดยเป็นส่วนประกอบในน้ำลายและน้ำย่อยจากตับอ่อน ซึ่งทำหน้าที่ในการย่อยแป้งและไกลโคเจน (Blanshard and Mitchell, 1979; Murray et al., 1993, 1995) ในสัตว์แรกเกิดหรือสัตว์ที่มีอายุน้อย α -amylase จากน้ำลายจะมีความสำคัญมาก เนื่องจากช่วงนี้ น้ำย่อย α -amylase จากตับอ่อนยังไม่พัฒนาเต็มที่ ทำให้มีการทำงานไม่สมบูรณ์และหลั่งออกมาในปริมาณที่น้อย แต่เมื่อสัตว์มีอายุมากขึ้น α -amylase จากน้ำลายจะลดบทบาทลง เนื่องจากการพัฒนาของน้ำย่อย α -amylase จากตับอ่อนที่สมบูรณ์และมีปริมาณที่มากขึ้น (West, 1990) ในการทำงานของน้ำย่อย α -amylase นั้นต้องการ Cl^- (Blanshard and Mitchell, 1979; Kidder and Manners, 1978; Murray et al., 1993, 1995), F^- และ Br^- เป็นตัวกระตุ้นการทำงาน (ปราณี, 2535) และมีช่วง pH ในการทำงานคือ 3.8-8.9 แต่ pH ที่เหมาะสมในการทำงานคือ 6.5-6.9 (Blanshard and Mitchell, 1979; Kidder and Manners, 1978)

Murray และคณะ (1993, 1995) ได้แยก pH ที่เหมาะสมในการทำงานของน้ำย่อย α -amylase ในน้ำลายและน้ำย่อยจากตับอ่อนโดย pH ที่เหมาะสมต่อการทำงานของ α -amylase ในน้ำลายประมาณ 6.6-6.8 และ α -amylase จากตับอ่อนคือ 7.1 และ Kidder and Manners (1978) รายงานว่าหาก pH ต่ำกว่า 3.8 น้ำย่อย α -amylase จะหยุดทำงาน แต่ Gray (1992) รายงานว่าเมื่อ α -amylase อยู่ในสภาวะแวดล้อมที่มี pH ต่ำกว่า 3 และมีแป้งเป็นสารตั้งต้น อะมัยโลสจะมีอัตราการถูกย่อยลดลง 70 เปอร์เซ็นต์ ในการทำงานของน้ำย่อย α -amylase ต่ออะมัยโลสที่เป็นส่วนประกอบของแป้งนั้น α -amylase จะทำลายพันธะ α -1, 4 glycosidic โดยวิธีไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ทำให้ได้มอลโตสและมอลโตไตรโอสในสัดส่วน 2.25 : 1 และเมื่อปริมาณของ

α -amylase สูงขึ้น มอลโตไทรโอสจะถูกย่อยให้เป็นมอลโตสและกลูโคสต่อไป และสำหรับการย่อยอะมัยโลเพคตินโดย α -amylase นั้น α -amylase จะทำลายได้เฉพาะพันธะ α -1, 4 glycosidic เท่านั้นและไม่สามารถทำลายพันธะ α -1, 6 glycosidic ของอะมัยโลเพคตินได้ ในการทำลายพันธะ α -1, 4 glycosidic ในอะมัยโลเพคตินนั้นจะทำลายพันธะ α -1, 4 glycosidic ที่อยู่ห่างจากจุดแขนง (α -1, 6 glycosidic bond) ซึ่งผลที่ได้จากการย่อยอะมัยโลเพคตินโดย α -amylase นั้นจะได้มอลโตส, มอลโตไทรโอสและโอลิโกแซคคาไรด์คือ α -limit dextrin ซึ่ง α -limit dextrin ที่ได้จากการทำงานของ α -amylase จะมีลักษณะดังภาพที่ 12

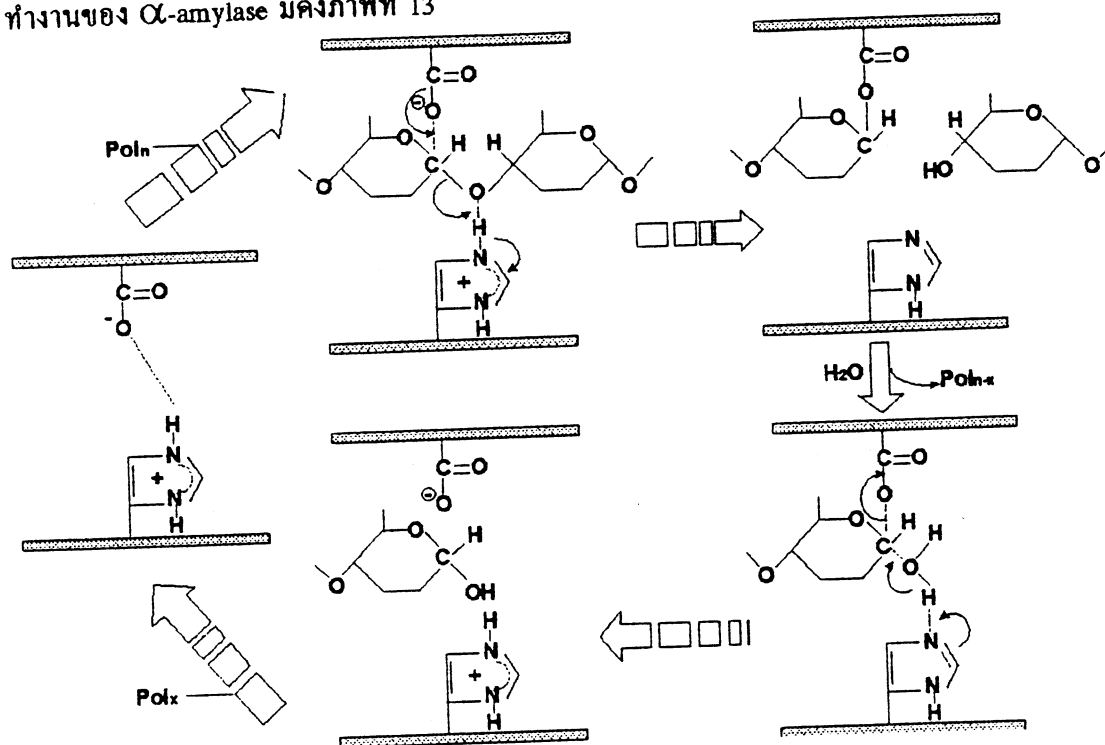


ภาพที่ 12 ลักษณะของ α -limit dextrin ที่ได้จากการย่อยแป้งโดย α -amylase ในสุกร

ที่มา : Kidder and Manners (1978)

และข้อแตกต่างของ α -amylase จากน้ำลาย (salivary α -amylase) และ α -amylase จากตับอ่อน (pancreatic α -amylase) คือ α -amylase ในน้ำลายจะทำงานโดยการทำลายพันธะ α -1, 4 glycosidic ของกลูโคสตำแหน่งที่ 5 นับจาก reducing glucose ที่อยู่ปลายของสายโพลีเมอร์ของแป้ง แต่ α -amylase จากตับอ่อนจะทำงานแบบ multiple attack ต่อพันธะ α -1, 4

glycosidic ของโพลีเมอร์ที่เป็นเส้นตรง และเมื่ออยู่ในสภาวะที่เหมาะสมจะทำการตัดพันธะโดยวิธีสุ่ม (random) (Blanshard and Mitchell, 1979; Kidder and Manners, 1978) ซึ่งลักษณะการทำงานของ α -amylase มีดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 การทำงานของ α -amylase ในการย่อยแป้ง
ที่มา : Whitaker (1994)

2.7.2 Maltase เป็นน้ำย่อยที่พบในชั้น mucosa ของลำไส้เล็ก โดยทำหน้าที่ย่อยคาร์โบไฮเดรตในระดับ membranouse phase (Cunningham, 1992; Ganong, 1993, 1995) ซึ่ง Dahlguis (1962) อ้างโดย Kidder and Manners (1978) ได้จำแนกชนิดของ maltase ออกเป็น 3 ชนิดดังตารางที่ 2.7

ตารางที่ 2.7 ชนิดของน้ำย่อย maltase และสารตั้งต้นของน้ำย่อย maltase ชนิดต่าง ๆ

ชนิด	ชื่ออื่น ๆ	สารตั้งต้น
Maltase Ia	Isomaltase	maltose, isomaltose, limit dextrin
Maltase Ib	Sucrase	sucrose
Maltase II	Glucoamylase	maltose, maltodextrin, isomaltose, limit dextrin
Maltase III	Glucoamylase (heat stable maltase)	maltose, maltodextrin, isomaltose, limit dextrin

ที่มา Dahlguis (1962) อ้างโดย Kidder and Manners (1978)

จากตารางที่ 2.7 พบว่า น้ำย่อย maltase I ถูกแบ่งออกเป็น Maltase Ia และ Maltase Ib ทั้งนี้เนื่องจากทั้งสองเป็นน้ำย่อยที่ย่อยบนโปรตีนเดียวกันแต่ไม่ใช่สายเปปไทด์ (peptide) เดียวกันและมีสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยาแตกต่างกันกล่าวคือ maltase Ia (isomaltase) (Kidder and Manners, 1978) หรือ α -limit dextrinase (Ganong, 1993, 1995) ใช้มอลโตส, ไอโซมอลโตส (isomaltose) และ limit dextrin เป็นสารตั้งต้น ในขณะที่ maltase Ib (Kidder and Manners, 1978) หรือ sucrase (Ganong, 1993, 1995; Murray et al., 1993, 1995) ใช้ซูโครสเป็นสารตั้งต้นทำให้ maltase I มีชื่อว่า sucrase-isomaltase complex สำหรับช่วง pH ที่เหมาะสมต่อการทำงานของ maltase Ia, maltase Ib, maltase II, maltase III คือ 6.0, 6.5, 6.5 และ 7.5 ตามลำดับ (Kidder and Manners, 1978) และ Murray และคณะ (1993, 1995) ได้รายงานว่า pH ที่เหมาะสมต่อการทำงานของ maltase คือ 5.8 - 6.2 และ sucrase คือ 5.0 - 7.0 นอกจากนี้ maltase ทั้ง 3 ชนิดมีความแตกต่างในการทำงานดังตารางที่ 2.8

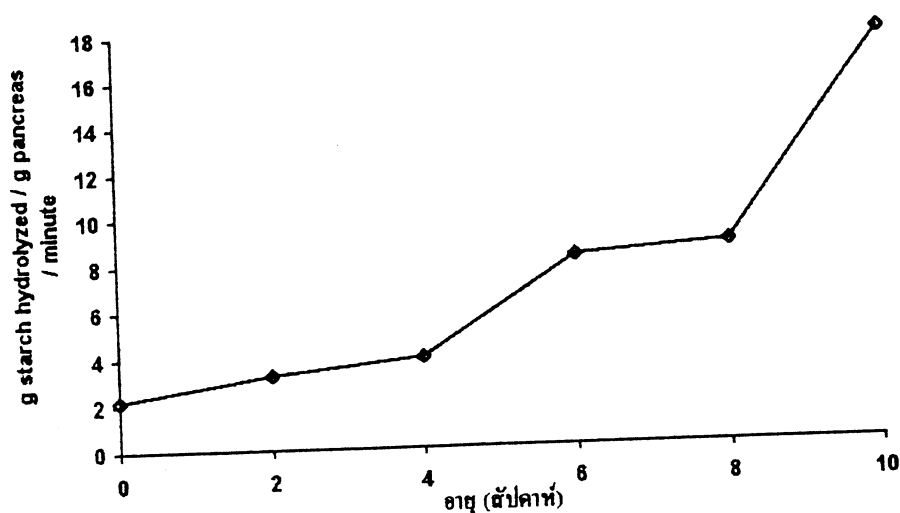
ตารางที่ 2.8 อัตราการไฮโดรไลซิสของ maltase ชนิดต่าง ๆ เมื่อใช้สารตั้งต้นที่มีความเข้มข้น 0.1388 M

ชนิดของ maltase	Relation rate of hydrolysis	สารตั้งต้น
Maltase I (Invertase)	100	Maltose
	170	Sucrose
	7.5	Turanose
	80	Maltosucrose
Maltase II	100	Maltose
	2	Isomaltose
	4	Turanose
	3	Phenyl α -D-glucopyranoside
	40	Maltosucrose
Maltase III	0.1	Melezitose
	100	Maltose
	5	Isomaltose
	6	Turanose
	5	Phenyl α -D-glucopyranoside
	40	Maltosucrose
	0.4	Melezitose

ที่มา : Dahlgvist (1960) อ้าง โดย Kidder and Manners (1978)

2.8 ปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยแป้งของสุกร

2.8.1. อายุ สุกรที่มีอายุน้อยน้ำย่อย α -amylase จากน้ำลายจะมีบทบาทสำคัญในการย่อยแป้ง เนื่องจากการพัฒนาของน้ำย่อย α -amylase จากตับอ่อนไม่สมบูรณ์และหลั่งออกมาในปริมาณที่น้อย แต่เมื่อสุกรมีอายุเพิ่มขึ้น α -amylase ในน้ำลายจะลดบทบาทลงเนื่องจาก α -amylase จากตับอ่อนจะมีปริมาณและการทำงานที่พัฒนาขึ้นตามอายุ (Kidder and Manners, 1978) ซึ่ง Shields และคณะ (1980) พบว่าปริมาณของน้ำย่อย α -amylase ที่ผลิตจากตับอ่อนจะเพิ่มขึ้นตามอายุดังภาพที่ 14



กราฟที่ 14 การพัฒนาทางด้านการทำงานของน้ำย่อย α -amylase ในสุกรอายุต่าง ๆ

ที่มา : Shields และคณะ (1980)

2.8.2. โรค ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพของชั้น mucosa ของลำไส้เล็กส่งผลให้ปริมาณและความสามารถในการทำงานน้ำย่อยที่ผนังลำไส้เล็กลดลง เช่น exotoxin จากแบคทีเรียที่ลำไส้เล็ก (Strombeck and Guilford, 1991)

2.8.3. อาหาร Jenkins (1986) รายงานว่า ขนาดของอนุภาคอาหาร, สัดส่วนของอะมัยโลส และอะมัยโลเพคตินของแป้งในอาหาร, การปรุงแต่ง (cooking) และระดับเยื่อใยของอาหารจะมีผลต่อการย่อยได้ของแป้ง โดยพบว่าข้าวโพดบดจะสามารถย่อยได้ดีกว่าข้าวโพดที่ไม่บด, อะมัยโลเพคตินย่อยได้ง่ายและเร็วกว่าอะมัยโลส, อาหารที่ผ่านความร้อนเช่น การอบแห้งเป็นเวลา 10 ชั่วโมงจะเพิ่มอัตราการย่อยได้ของแป้ง และเยื่อใยในอาหารจะลดการย่อยได้ของแป้ง และ Emsminger และคณะ (1990) รายงานว่า เม็ดแป้งของมันฝรั่งจะมีความต้านทานต่อการย่อยทำให้แป้งจากมันฝรั่งที่ไม่ผ่านการแปรรูปจะย่อยยาก และ Cummings และคณะ (1986) รายงานว่าถึงแม้สัตว์จะมีสุขภาพที่ดี แป้งอาจไม่สามารถย่อยได้ดีหากแป้งนั้นอยู่ในเม็ดแป้งที่เป็น ungelatinization หรือเป็นแป้งเกิดขบวนการ complex formation กับส่วนประกอบอื่น ๆ ในอาหาร เช่น ไขมันและโปรตีน หรือแป้งที่ใช้ประโยชน์ได้น้อยเช่น แป้งจากเมล็ดพืชหรือเมล็ดธัญพืชที่ไม่ผ่านการบด เป็นต้น นอกจากนี้การย่อยได้ของแป้งยังขึ้นอยู่กับสารยับยั้งการทำงานของน้ำย่อย (enzyme inhibitor) เช่น α -amylase inhibitor หรือ starch blocker ซึ่งมีชื่อทางเคมีว่า 1,4 α -D glucan glucanohydrolase (E.C. 3.2.1.1) (Pusztai et al., 1995) ซึ่งพบในเมล็ดธัญพืชเช่น ส่วน albumin ของข้าวสาลี (wheat kernel) (Vittozzi et al., 1976; Silano et al., 1982) และพบในพืช

ตระกูลถั่ว (Pusztai *et al.*, 1995) ซึ่งจะยับยั้งการทำงานของน้ำย่อย α -amylase ส่งผลให้ลดประสิทธิภาพการใช้ประโยชน์ได้ของแป้งและโปรตีนในอาหาร (Vittozzi *et al.*, 1976; Silano *et al.*, 1982; Pusztai *et al.*, 1995) ซึ่งปัจจัยทางอาหารที่มีผลต่อการย่อยได้ของแป้งแสดงดังตารางที่ 2.9

ตารางที่ 2.9 ปัจจัยทางอาหารที่มีผลต่อการย่อยได้ของแป้ง

Food Form	Fiber (type)
Particle size	Antinutrients:
Nature of the starch :	phytate
amylose content	lectins
amylopectin content	tannins
degree of gelatinization	saponins
processing	enzyme inhibitors
Starch-nutrient interactions	
(protein, fat)	

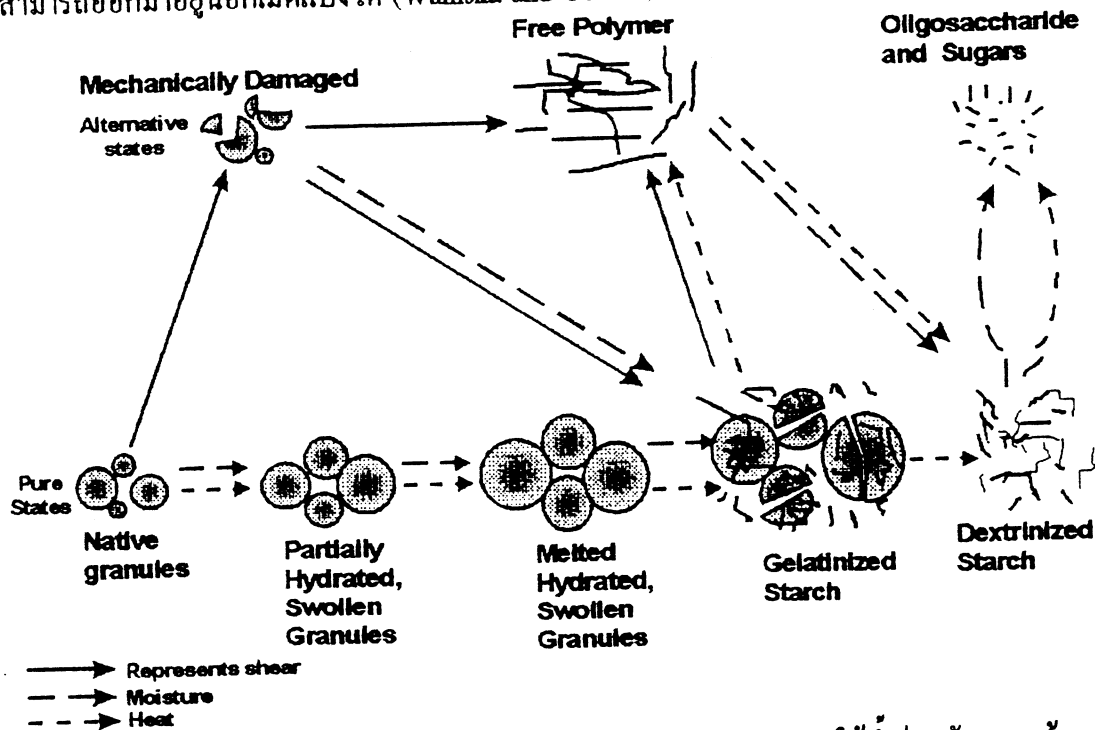
ที่มา : Jenkins และคณะ (1986)

นอกจากนี้พบว่าอะมัยโลเพคตินที่อยู่ในเมล็ดแป้งนั้นจะมีการจัดเรียงโมเลกุลอัดตัวกันแน่น ทำให้มีโครงสร้างคล้ายผลึก (Kerr, 1950; Waniska and Gomez, 1992; Brody, 1994) และอะมัยโลสจะมีการจัดเรียงตัวของสายโมเลกุลแบบมีรูปร่างไม่แน่นอน ซึ่งจากการจัดเรียงตัวของโมเลกุลของแป้งในเมล็ดแป้งนั้นทำให้แป้งถูกน้ำย่อย α -amylase ย่อยได้น้อย ดังนั้นแป้งในข้าวสาลี, มันฝรั่ง และในอาหารบางชนิดจะสามารถถูกย่อยโดยน้ำย่อยได้เพียง 50 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณแป้งทั้งหมด แต่เมื่อมีการปรุงแต่ง (cooking) เช่น การใช้ขบวนการ hydration กับโมเลกุลของแป้งและทำให้แห้ง หรือการทำให้แป้งเกิดขบวนการ gelatinization จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของน้ำย่อยและเพิ่มการย่อยได้ของแป้ง (Brody, 1994) และการใช้แป้งเป็นส่วนประกอบของอาหารในปริมาณที่มากจะกระตุ้นให้น้ำย่อย α -amylase หลั่งออกมามากขึ้น แต่การเปลี่ยนส่วนประกอบของอาหารเช่น การเปลี่ยนจากการใช้นมเป็นแหล่งของคาร์โบไฮเดรตหลักในอาหารเป็นการใช้แป้งเป็นแหล่งของคาร์โบไฮเดรตหลักในอาหารจะต้องให้สัตว์มีการปรับตัว 4 ถึง 5 วัน เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของเซลล์ที่ผนังลำไส้เล็ก โดยมีการ migration ของเซลล์และที่ตับอ่อนจะมีการผลิตสารยับยั้งการทำงานของ α -amylase บางชนิด (Strombeck and Guilford, 1992)

2.9 การแปรรูปแป้งในอุตสาหกรรมอาหาร

แป้งในธรรมชาตินั้นจะถูกเก็บสะสมไว้ในเมล็ดแป้งซึ่งมีคุณสมบัติไม่ละลายในน้ำเย็น (Kerr, 1950; Waniska and Gomez, 1992) ซึ่งภายในเมล็ดแป้งจะมีการจัดเรียงโมเลกุลของอะมัยโลสและอะมัยโลเพคตินในลักษณะที่เป็นอุปสรรคต่อการย่อยของน้ำย่อยที่สร้างจากร่างกายสัตว์ ทำให้สัตว์สามารถใช้ประโยชน์จากแป้งที่เป็นส่วนประกอบในวัตถุดิบอาหารสัตว์บางชนิดได้น้อย (Brody, 1994) ดังนั้นจึงควรมีการแปรรูปแป้งโดยใช้วิธีการต่าง ๆ เพื่อเพิ่มความสามารถในการใช้ประโยชน์ของแป้งในวัตถุดิบอาหารได้ดียิ่งขึ้นซึ่งวิธีเหล่านี้ได้แก่

2.9.1 วิธีทางกายภาพ (physical process) เช่น การบด (grinding), การใช้ความร้อน (heating) เป็นต้น วิธีนี้จะทำให้เม็ดแป้งบางอันแตกและโมเลกุลของแป้งที่อยู่ภายในเม็ดแป้งสามารถออกมาอยู่นอกเม็ดแป้งได้ (Waniska and Gomez, 1992; Kokini et al., 1992) ดังภาพที่ 15

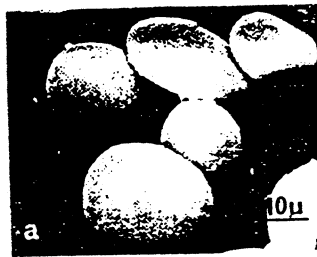


ภาพที่ 15 การแปรรูปแป้งโดยการทำลายเม็ดแป้ง โดยวิธีการบดและการใช้น้ำร่วมกับความร้อน

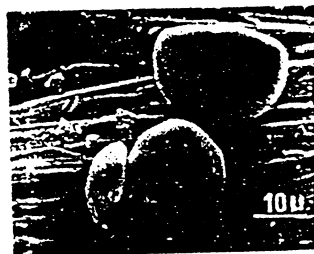
ที่มา : คัดแปลงจาก Kokini และคณะ (1992) และ Waniska and Gomez (1992)

ซึ่งการบดจะทำให้วัตถุดิบอาหารสัตว์มีขนาดอนุภาคที่เล็กลง (อุทัย, 2529; Patience and Thacker, 1989) ทำให้ compound granule แยกออกเป็น individual granule (Bowers, 1992) และทำให้เม็ดแป้งบางส่วนแตก ซึ่งเปิดโอกาสให้แป้งที่อยู่ในเม็ดแป้งสามารถออกมาผสมกับน้ำหรือน้ำย่อยในร่างกายสัตว์ได้มากขึ้น (Kokini et al., 1992; Waniska and Gomez, 1992) ดังนั้นการแปรรูปแป้งจากวัตถุดิบอาหารสัตว์โดยการบดวัตถุดิบอาหารสัตว์จึงเหมาะที่จะใช้กับวัตถุดิบอาหาร

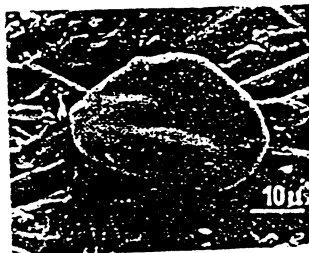
สัตว์ที่มีอนุภาคใหญ่เช่น เมล็ดข้าวโพด, เมล็ดข้าวฟ่าง, เมล็ดข้าวกล้องและ เมล็ดข้าวเปลือก เป็นต้น (อุทัย, 2529) สำหรับการใช้ความร้อนในการแปรรูปแป้งนั้นจะเป็นการใช้ความร้อนขึ้น หรือการใช้ความร้อนร่วมกับความชื้น เพื่อให้แป้งเกิดขบวนการ gelatinization โดยเมื่อให้ความร้อนที่มีอุณหภูมิและความชื้นที่เหมาะสมต่อเม็ดแป้งของพืชแต่ละชนิดจะทำให้เม็ดแป้งนั้นบวม และเมื่อให้ความร้อนและความชื้นต่อไปอีก เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำจากภายนอกเข้าไปภายในมากขึ้น อีกส่งผลให้เม็ดแป้งบวมมากขึ้นดังภาพที่ 16



อุณหภูมิ 20 °C



อุณหภูมิ 40 °C



อุณหภูมิ 50 °C



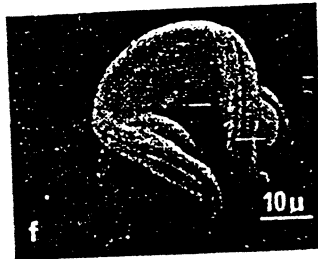
อุณหภูมิ 60 °C

ภาพที่ 16 เม็ดแป้งข้าวสาลี (wheat starch granule) ในน้ำที่มีอุณหภูมิต่าง ๆ ขณะเกิด gelatinization

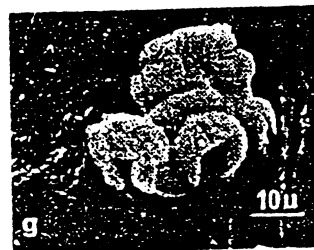
ที่มา : Bowers (1992)



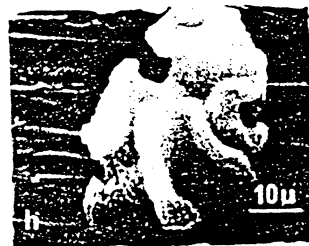
อุณหภูมิ 70 °C



อุณหภูมิ 80 °C



อุณหภูมิ 90 °C



อุณหภูมิ 97 °C

ภาพที่ 16 เม็ดแป้งข้าวสาลี (wheat starch granule) ในน้ำที่มีอุณหภูมิต่าง ๆ ขณะเกิด gelatinization (ต่อ)

ที่มา : Bowers (1992)

ในขณะที่เกิดขบวนการ gelatinization นั้นจะได้สารแขวนลอยที่มีความข้น และในขณะเดียวกันภายในเม็ดแป้งจะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสขึ้นระหว่างโมเลกุลของแป้งกับโมเลกุลของน้ำ ส่งผลให้อะมัยโลสที่อยู่ในสภาพที่เป็นสายโมเลกุลที่ยาวถูกย่อยให้มีขนาดโมเลกุลที่เล็กลง ทำให้อะมัยโลสสามารถละลายออกมาภายนอกเม็ดแป้งได้ และอะมัยโลเพคตินที่มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลคล้ายกับโครงสร้างผลึกอยู่ภายในเม็ดแป้งจะถูกย่อยโดยปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับโมเลกุล

ของน้ำทำให้อะมัยโลเพคตินมีรูปร่างผลึกที่เล็กลง (Kerr, 1950; Waniska and Gomez, 1992) หรือเปลี่ยนเป็นรูปร่างที่ไม่แน่นอน (amorphous state) (Best, 1993) และเปลี่ยนเป็นมอลโตเด็คซ์ตริน (maltodextrin) ซึ่งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 25 อนุตต่อ 1 โมเลกุลของมอลโตเด็คซ์ตรินและจุดที่แตกแขนง (branch chain) จะมีจำนวนลดลง แต่เมื่อลดอุณหภูมิลงภายหลังการเกิด gelatinization แล้ว อะมัยโลสจะอยู่ในรูปเจล (gel) ภายนอกเม็ดแป้งและอะมัยโลเพคตินที่อยู่ภายในเม็ดแป้งจะกลับมาอยู่ในรูปผลึกอีกครั้งหนึ่ง แต่จะเป็นการเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ และหากให้ความร้อนต่อไปอีกจะทำให้เม็ดแป้งแตกส่งผลให้อะมัยโลสและอะมัยโลเพคตินสามารถเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับโมเลกุลของน้ำได้มากขึ้น ทำให้แป้งมีขนาดโมเลกุลที่เล็กลงเกิดเป็นเด็คซ์ตริน (Kerr, 1950; Waniska and Gomez, 1992) สำหรับผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการใช้ความร้อนขึ้นในการแปรรูปแป้งนั้นเช่น การผลิต pregelatinization starch ซึ่งเป็นการปรุงแต่งแป้งล่วงหน้า (precooking) แป้งชนิดนี้จะมีคุณสมบัติในการละลายน้ำเย็นได้และมีความชื้นโดยไม่ต้องใช้ความร้อนขึ้นแก่แป้งใหม่อีกครั้งเมื่อนำมาประกอบอาหาร โดยแป้งชนิดนี้จะได้จากการใช้ความร้อนทำให้เม็ดแป้งบางส่วนแตกและทำแป้งให้แห้ง ซึ่งแป้งชนิดนี้จะมีความสะดวกรวดเร็วในการประกอบอาหาร (Bennion, 1980; Bowers, 1992) แต่หากอุณหภูมิและความร้อนไม่เหมาะสมจะทำให้แคลเซียมเกิด bridge กับโมเลกุลของเพคตินได้เนื่องจากการกระตุ้นของน้ำย่อย pectin methylesterase ซึ่งจะทำให้ middle lamellae และผนังเซลล์ของพืชมีความคงทนสูงขึ้น (Andersson et al., 1994) และเกิดปฏิกิริยารวมตัวกัน (formation) ระหว่างไขมันและแป้ง โดยไขมันจะเป็นหยดไขมันเล็ก ๆ แทรกตัวอยู่ในเกลียวของอะมัยโลสและไขมันบางส่วนจะเกิดขบวนการออกซิเดชันได้ (Best, 1993)

2.9.2 วิธีทางเคมี (Chemical process) เป็นวิธีการแปรรูปแป้งโดยใช้สารเคมีช่วยในการย่อยให้แป้งมีโมเลกุลที่เล็กลงเช่น การใช้กรด การใช้น้ำย่อย เป็นต้น แป้งที่ได้จากการแปรรูปโดยวิธีนี้ได้แก่

2.9.2.1 acid modified starch โดยแป้งชนิดนี้จะผ่านการให้ความร้อนในขณะที่แป้งอยู่ในสารละลายที่เป็นกรด และอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่ต่ำกว่าอุณหภูมิในการเกิด gelatinization ของแป้ง เมื่อเย็นแป้งจะอยู่ในรูปเจล (Bennion, 1980; Wurzburg, 1986; Bowers, 1992) ซึ่งกรดที่ใช้ในการแปรรูปแป้งชนิดนี้เช่น hydrochloric acid, sulfuric acid เป็นต้น โดยกรดจะทำปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับพันธะไกลโคไซด์ในโมเลกุลของแป้ง ทำให้แป้งมีโมเลกุลที่เล็กลง ซึ่งพันธะ α -1,4 glycosidic จะมีความไวต่อปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสมากกว่าพันธะ α -1,6 glycosidic และในการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกับพันธะ α -1,6 glycosidic ของอะมัยโลเพคตินนั้นจะเกิดที่บริเวณรอบนอกของโครงสร้างที่มีลักษณะคล้ายผลึกของอะมัยโลเพคตินก่อน (Wurzburg, 1986)

2.9.2.2 Cross linked starch คือแป้งที่ได้จากการใช้สารเคมีที่มีมากกว่าหรือเท่ากับ 2 functional group ทำปฏิกิริยากับแป้ง ทำให้แป้งมีโมเลกุลที่เล็กลงและเกิด bridge ระหว่างสายโมเลกุลของแป้งที่อยู่ใกล้กัน โดยการทำปฏิกิริยาของสารเคมีกับแป้งนั้นจะเกิดขึ้นที่กลุ่ม starch-OH ซึ่งสารเคมีที่ใช้เช่น phosphoryl chloride, sodium trimetaphosphate (Bowers, 1992), epichlorohydrin (Wurzburg, 1989; Bowers, 1992), phosphorus oxychloride, metaphosphate, citric acid, acidic acid, 0.075-7.5 % formaldehyde หรือ acetaldehyde เป็นต้น ซึ่งการแปรรูปแป้งวิธีนี้จะเป็นการทำลายพันธะของ oxygen ระหว่างโมเลกุลของแป้ง โดย 1 cross linked จะมีกลูโคส 100 - 3,000 อณู (Wurzburg, 1989) หรืออาจประกอบด้วยกลูโคสถึง 9,000 อณูและแป้งชนิดนี้จะมีความต้านทานต่อการย่อยด้วยกรด (Bowers, 1992)

2.9.2.3. Derivative starch หรือ Stabilized starch เป็นแป้งที่ได้จากทำ cross linked starch แต่ในขณะที่เกิด cross linked ระหว่างโมเลกุลของแป้งนั้นจะมีการควบคุมการเกิด เจล และ syneresis (weeping) ในขณะที่แป้งเย็นและในระหว่างเก็บรักษาผลิตภัณฑ์โดยการใช้ hydroxy propyl, phosphate หรือ acetyl ดังนั้นจะทำให้แป้งชนิดนี้อยู่ในรูปของอนุพันธ์ของแป้ง (starch derivative) เช่น การใช้ hydroxy propyl แป้งจะอยู่ในรูป ether หรือเมื่อใช้ acetyl แป้งจะอยู่ในรูป ester (Bennion, 1980)

2.9.2.4. การใช้น้ำย่อยเพื่อการแปรรูปแป้งเช่น α -amylase, β -amylase, γ -amylase และ isomerase เป็นต้น ซึ่งการแปรรูปแป้งสามารถแปรรูปแป้งให้เป็นไซรัป (syrup) โดยมีการผลิตอยู่ 4 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนที่ 1 เป็นการทำให้แป้งเกิด gelatinization โดยทำให้สารละลายแป้งร้อนขึ้นคือมีอุณหภูมิ 60 °C หรือสูงกว่านี้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของแป้ง เพื่อให้เม็ดแป้งแตกออกมามีลักษณะคล้ายกับโมเลกุลของน้ำเกิดเป็นเจลเรียกขั้นตอนนี้ว่า gelatinization และแป้งจะมีความหนืดสูงขึ้น หลังจากนั้นจะเข้าสู่ขั้นตอนที่ 2 คือ liquefaction จะมีการเติมสารช่วยเจือจาง (thinning reagent) เช่น กรด หรือน้ำย่อยเพื่อลดความหนืด ซึ่งขั้นตอนนี้ใช้กระบวนการ thinning และ dextrinization โดยลด pH ให้เหลือประมาณ 1.5 - 2 และเพิ่มอุณหภูมิให้เป็น 140-155 °C จะทำให้แป้งเกิดเป็นเจลได้อย่างสมบูรณ์พร้อมกับการย่อยสลายบางส่วน ถ้าในขั้นตอนนี้ใช้น้ำย่อยแทนการเพิ่มอุณหภูมิจะช่วยเพิ่มผลผลิตและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ได้ โดยน้ำย่อยที่ใช้คือ α -amylase และผลผลิตในขั้นตอนนี้ส่วนใหญ่เป็นมอลโตเด็คซ์ทรินเนื่องจากน้ำย่อย α -amylase ไม่สามารถทำลายพันธะ α -1, 6 glycosidic ได้ ทำให้บางส่วนคงรูปเป็น limit dextrin ที่มีกลูโคส 2-6 อณู หลังจากนั้นจะเข้าสู่ขั้นตอนที่ 3 คือ saccharification ในขั้นตอนนี้จะใช้น้ำย่อย 2 ชนิดคือ β -amylase และ γ -amylase เพื่อที่จะไฮโดรไลซ์ผลผลิตจากขั้นตอนที่ 2 (liquefaction) ให้ได้เป็นมอลโตสและกลูโคส ซึ่งในขั้นตอนนี้จะต้องมีการใช้ debranching enzyme เพื่อที่จะย่อยสลายพันธะ α -1, 6 glycosidic และ α -1, 3 glycosidic และอาจมีการใช้

A. niger glucoamylase ซึ่งผลิตในขั้นตอนนี้จะได้สารผสมระหว่างกลูโคสและฟรุคโตส (glucose-fructose mixture) และเข้าสู่ขั้นตอนที่ 4 คือ isomerization เป็นการใช้น้ำย่อยที่เตรียมจากเชื้อจุลินทรีย์ชนิดต่าง ๆ ที่มีประสิทธิภาพสูง, ปลอดภัยต่อการเป็น Co-factor และมีความคงทนสูง (stability) ซึ่งปกติจะได้จาก *Streptomyces* spp., *B. coagulans*, *Actinophaneia missouriensis*, *Arthrobacter* spp. ซึ่งเป็นน้ำย่อยชนิด isomerase ทำการเปลี่ยนน้ำตาลกลูโคสให้เป็นน้ำตาลฟรุคโตส หรือเปลี่ยนไซโลสเป็นน้ำตาลฟรุคโตส ทำให้ผลผลิตสุดท้ายเกิดเป็นฟรุคโตสไซรัปหรือไอโซกลูโคส (isoglucose) ซึ่งประกอบด้วยน้ำตาลฟรุคโตสถึง 90 เปอร์เซ็นต์ (ปราณี, 2535)

2.10 การใช้ประโยชน์จากแหล่งคาร์โบไฮเดรตในสุกรที่มีอายุน้อย

สัตว์จะเก็บสำรองกลูโคสเพื่อใช้ในขบวนการเมตาบอลิซึมของร่างกายในอนาคตรูปของไกลโคเจนที่ตับและกล้ามเนื้อตามส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย ซึ่งไกลโคเจนนั้นเป็นสายโพลีเมอร์ของคาร์โบไฮเดรตชนิดโกลิแซคคาร์ไรด์ที่ประกอบจากอนุของกลูโคสหลาย ๆ อนุมาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,4 glycosidic และ α -1,6 glycosidic ซึ่งมีลักษณะเหมือนกับอะมัยโลเพคตินในแป้ง (มนตรี *et al.*, 2530; Champe and Harvey, 1987, 1992; Stryer, 1988; Emsminger *et al.*, 1990; Murray *et al.*, 1993, 1995)

สุกรจะมีการเก็บสะสมไกลโคเจนในร่างกายตั้งแต่อยู่ในท้องแม่สุกร โดยเก็บสะสมไกลโคเจนที่ตับและซาก แต่เป็นการสะสมในปริมาณที่น้อย จนกระทั่งก่อนคลอด 4 สัปดาห์จะมีการสะสมไกลโคเจนในร่างกายถูกสุกรเพิ่มขึ้นและ 90 เปอร์เซ็นต์ของไกลโคเจนที่เพิ่มขึ้นนั้นจะสะสมอยู่ตามซากโดยเฉพาะบริเวณหัวใจและปอด แต่หลังจากคลอดและลูกสุกรมีอายุมากขึ้นจะมีการสะสมไกลโคเจนที่ซากลดลงและมีการสะสมที่บริเวณตับเพิ่มขึ้นแทน (Okai *et al.*, 1979)

สำหรับแหล่งคาร์โบไฮเดรตที่ลูกสุกรได้รับจากภายนอกนั้น Steele และคณะ (1974) รายงานว่า ลูกสุกรแรกเกิดแทบที่จะไม่สามารถใช้ประโยชน์จากน้ำตาลฟรุคโตสได้เลย ซึ่งหากลูกสุกรได้รับอาหารที่มีน้ำตาลทรายหรือน้ำตาลฟรุคโตสเป็นส่วนประกอบในปริมาณที่มากจะทำให้ลูกสุกรแรกเกิดเสียชีวิตได้ ทั้งนี้เนื่องจากระดับของกลูโคสในกระแสโลหิตลดลง (hypoglycemia) และสุกรที่มีอายุน้อยจะมีกิจกรรมและปริมาณของน้ำย่อย sucrase ต่ำและมีความสามารถในการเปลี่ยนน้ำตาลฟรุคโตสไปเป็นกลูโคสในร่างกายได้น้อยและ NRC (1988) รายงานว่า ลูกสุกรที่มีอายุต่ำกว่า 10 วันจะสามารถใช้ประโยชน์จากกลูโคสและกาแล็คโตสได้มีประสิทธิภาพมากที่สุด และภายหลังจากอายุ 7-10 วัน ลูกสุกรจึงสามารถใช้ประโยชน์จากซูโครสและฟรุคโตสได้ แต่การใช้น้ำตาลซูโครสหรือฟรุคโตสผสมในอาหารลูกสุกรช่วงนี้จะทำให้ลูกสุกรท้องเสีย, สูญเสีย

น้ำหนักตัวและมีอัตราการตายสูง ทั้งนี้เนื่องมาจากระบบทางเดินอาหารของลูกสุกรถูกเตรียมมาเพื่อการรองรับการใช้ประโยชน์จากโภชนาการในน้ำนมเช่น น้ำตาลแลคโตส ซึ่งเป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตที่พบมากในน้ำนม โดยในระบบทางเดินอาหารของสุกรที่มีอายุน้อยจะมีการผลิตน้ำย่อย lactase ที่มีกิจกรรมสูงและมีปริมาณที่มากกว่าน้ำย่อยที่ใช้ย่อยคาร์โบไฮเดรตชนิดอื่น ๆ เช่น amylase, isomaltase, maltase, sucrase เป็นต้น แต่เมื่อลูกสุกรมีอายุมากขึ้นปริมาณและกิจกรรมของน้ำย่อย lactase จะลดลง ในขณะที่น้ำย่อยคาร์โบไฮเดรตชนิดอื่น ๆ เช่น amylase, isomaltase, maltase, sucrase เป็นต้น มีปริมาณและกิจกรรมที่สูงขึ้นตามอายุที่เพิ่มขึ้น (Kidder and Manners, 1978; Patience and Thacker, 1989; Lometillo, 1994) และจากรายงานของ Veum and Meteo (1981) พบว่าเมื่อลูกสุกรอายุ 8-36 วัน ลูกสุกรจะสามารถตอบสนองต่อน้ำตาลซูโครสในอาหารได้ดีใกล้เคียงกับอาหารที่มีกลูโคสเป็นองค์ประกอบในด้านของอัตราการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพการใช้อาหาร และมีการตอบสนองของการใช้ประโยชน์จากกลูโคสและซูโครสได้ดีกว่าการใช้แป้งข้าวโพดผสมในอาหาร และแหล่งคาร์โบไฮเดรตแต่ละแหล่งมีความเหมาะสมต่อลูกสุกรที่มีอายุน้อยแตกต่างกันดังตารางที่ 2.10

ตารางที่ 2.10 ความเหมาะสมของแหล่งคาร์โบไฮเดรตในอาหารลูกสุกร

ชนิด	การตอบสนอง
Glucose	เหมาะสมมากกับสุกรทุกช่วงอายุ
Fructose	ไม่เหมาะสมกับสุกรที่มีอายุน้อย
Xylose	ไม่เหมาะสมกับลูกสุกรที่มีอายุต่ำกว่า 2 สัปดาห์
Lactose	เหมาะสมมากต่อลูกสุกรที่มีอายุน้อย แต่ความเหมาะสมจะลดลงตามอายุที่เพิ่มขึ้น
Maltose	เหมาะสมกับลูกสุกรทุกช่วงอายุ แต่ในสุกรที่มีอายุน้อยจะมีความเหมาะสมน้อยกว่ากลูโคส
Sucrose	ไม่เหมาะสมมากในสุกรที่มีอายุน้อย แต่เมื่อสุกรอายุมากขึ้นจะมีความเหมาะสมมากขึ้นและสุกรจะสามารถใช้ประโยชน์จากซูโครสได้เหมาะสมเมื่อมีอายุมากกว่าหรือเท่ากับ 9 สัปดาห์

ที่มา: Kidder and Manners (1978)

วัตถุดิบอาหารสัตว์ที่ได้จากเมล็ดธัญพืช, พืชหัว และพืชตระกูลถั่วจะมีแป้งเป็นส่วนประกอบประมาณ 60 - 90 % ของน้ำหนักแห้ง (Bowers, 1992) แต่ทั้งนี้ปริมาณแป้งที่เป็นส่วนประกอบในวัตถุดิบอาหารสัตว์นั้นขึ้นอยู่กับชนิดและส่วนของพืชที่นำมาทำวัตถุดิบอาหารสัตว์เช่น ถั่วจะมีแป้งเป็นส่วนประกอบ 40 % และเมล็ดธัญพืชจะประกอบด้วยแป้งโดยเฉลี่ย

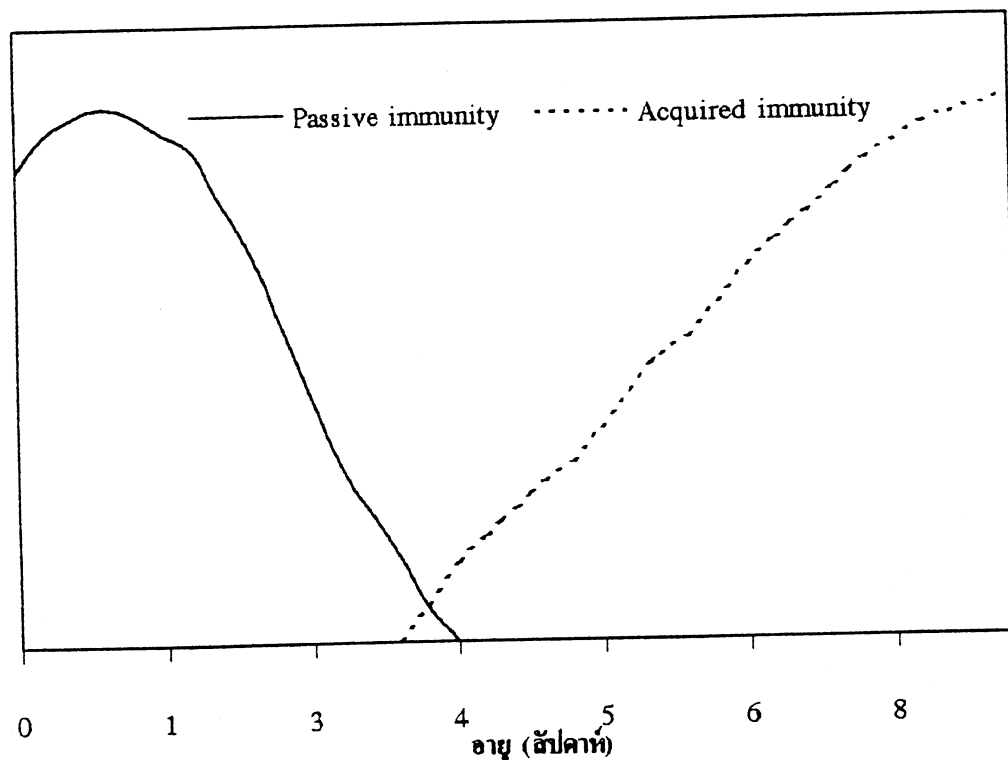
ประมาณ 70% และแป้งจะมีการสะสมมากในส่วนของเมล็ดมากกว่าส่วนของลำต้นและใบ (Emsminger et al., 1990)

เมื่อสุกรได้รับแป้งเข้าไป แป้งจะถูกย่อยในระบบทางเดินอาหารโดยน้ำย่อย α -amylase จากน้ำลายและตับอ่อน ทำให้แป้งมีความยาวโมเลกุลลดลงจนในที่สุดแป้งจะถูกย่อยจนมีความยาวโมเลกุลที่ประกอบด้วยกลูโคส 2-5 อณูแล้วจึงจะถูกย่อยต่อไปโดยน้ำย่อย glucoamylase, maltase และ α -dextrinase (isomaltase) ในลำไส้เล็ก ซึ่งหากแป้งถูกย่อยได้หมดจะได้น้ำตาลกลูโคสโมเลกุลเดี่ยว ๆ เป็นผลิตภัณฑ์สุดท้ายและถูกดูดซึมเข้าไปใช้ประโยชน์ในร่างกายต่อไป แต่แป้งนอกจากจะถูกย่อยโดยน้ำย่อยที่ผลิตจากร่างกายสุกรแล้วยังถูกย่อยโดยจุลินทรีย์ในระบบทางเดินอาหารซึ่งทำให้เกิดขบวนการหมักขึ้นในระบบทางเดินอาหาร (Kidder and Manners, 1978)

สุกรที่มีอายุต่ำกว่า 2-3 วันหากได้รับแป้งเป็นส่วนประกอบในอาหารในปริมาณที่สูงจะทำให้ไม่เจริญเติบโตเท่ากับสุกรที่ได้รับน้ำตาลกลูโคส, แล็กโตส และซูโครสเป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตในอาหาร ทั้งนี้เนื่องจากน้ำย่อย α -amylase จากตับอ่อนและน้ำย่อย disaccharase ในลำไส้เล็กมีปริมาณและกิจกรรมต่ำไม่เพียงพอต่อความต้องการ แต่อย่างไรก็ตามเมื่อสุกรมีอายุมากกว่า 2-3 สัปดาห์ ระบบทางเดินอาหารจะมีการพัฒนาสำหรับการย่อยแป้งที่เป็นส่วนประกอบในเมล็ดธัญพืชซึ่งได้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น (NRC, 1988) และถึงแม้ว่าสุกรจะมีการพัฒนาของระบบทางเดินอาหารเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ประโยชน์จากแป้งแล้วก็ตาม การย่อยได้ของแป้งยังขึ้นอยู่กับเมล็ดแป้ง ซึ่งเป็นส่วนที่ใช้เก็บสะสมแป้งของพืช โดยเมล็ดแป้งของพืชแต่ละชนิดจะมีความต้านทานต่อการย่อยแตกต่างกัน (Emsminger et al., 1990)

ในระบบทางเดินอาหารเช่น กระเพาะอาหาร, ลำไส้เล็ก และลำไส้ใหญ่ เป็นต้น จะมีจุลินทรีย์หลายชนิดอาศัยอยู่ซึ่งมีทั้งชนิดที่เป็นประโยชน์และชนิดที่ก่อให้เกิดโทษ ซึ่งสุกรจะได้รับเชื้อจุลินทรีย์เข้าไปจากการปนเปื้อนในอาหารที่กินเข้าไป แป้งบางส่วนจะถูกย่อยโดยจุลินทรีย์ในระบบทางเดินอาหาร เช่น lactobacilli ที่อาศัยอยู่ในกระเพาะอาหารและลำไส้เล็กส่วนบน โดยผลผลิตที่ได้จากการย่อยแป้งจาก lactobacilli นั้นคือกรดแล็กติก ซึ่งกรดนี้จะช่วยปรับปรุงสภาวะแวดล้อมของกระเพาะอาหารและลำไส้เล็กเช่น ช่วยปรับปรุงระบบนิเวศน์วิทยาของประชากรจุลินทรีย์ในลำไส้ โดยช่วยควบคุมประชากรของจุลินทรีย์บางชนิด (Fuller, 1992) และยังมีส่วนช่วยกระตุ้นให้กระเพาะอาหารสามารถผลิต HCl เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในลูกสุกรที่มีอายุน้อย ซึ่งกระเพาะอาหารจะมี pH ที่ค่อนข้างสูง และ pH จะลดลงเรื่อย ๆ เมื่อมีอายุมากขึ้นและเมื่อมีอายุประมาณ 5 สัปดาห์จึงจะมี pH คงที่ ซึ่ง HCl และกรดที่ผลิตโดยเชื้อจุลินทรีย์ที่ได้จากการย่อยแป้งจะช่วยกระตุ้นน้ำย่อยที่ใช้ย่อยโปรตีนในกระเพาะอาหารให้ทำงานดีขึ้น ทำให้ให้เพิ่มความสามารถในการใช้ประโยชน์ได้ของโภชนา และนอกจากนี้สภาพ pH ที่เป็นกรดมาก ๆ นั้น จะช่วยป้องกันลูกสุกรจากเชื้อจุลินทรีย์บางชนิดที่ปนเปื้อนในอาหาร (Kidder and Manners, 1978) แต่

หากใช้แปรงที่ข่อยได้ยากจะทำให้เกิดขบวนการหมักที่ลำไส้เล็กส่วนปลายและลำไส้ใหญ่แทน ซึ่งจะ
ทำให้จุลินทรีย์บางชนิดที่ก่อให้เกิดโรคเจริญเติบโตมากขึ้นโดยเฉพาะเชื้อ *E. coli* ซึ่งจะทำให้ลูก
สุกรท้องเสีย (Strombeck and Guilford, 1991) ทั้งนี้ลูกสุกรจะท้องเสียและมีโอกาสเกิดโรคต่าง ๆ
ที่เกิดจากการติดเชื้อได้มาก เนื่องจากสุกรที่มีอายุน้อยจะมีภูมิคุ้มโรคลดลงช่วงหนึ่งซึ่งพบว่าสุกร
ที่มีอายุน้อยจะมีภูมิคุ้มกันที่ได้รับจากแม่สุกรลดลงเมื่อสุกรมีอายุมากกว่า 1 สัปดาห์ และจะมีการ
สร้างภูมิคุ้มโรคขึ้นเองแต่ต้องใช้เวลาถึงภาพที่ 17 ดังนั้นหากลูกสุกรได้รับเชื้อจุลินทรีย์ที่ก่อให้เกิด
โทษในช่วงนี้จะทำให้ร่างกายอ่อนแอและตายได้ (Lometillo, 1994) ในขณะที่เดียวกันการติดเชื้อ
จุลินทรีย์บางชนิดเช่น *Yersinia enterocolitica* ในสุกรอายุน้อยจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการ
ทำงานของน้ำย่อยที่ลำไส้เล็ก โดยพบว่าจะทำให้กิจกรรมของน้ำย่อย maltase เพิ่มขึ้น แต่จะลด
กิจกรรมของน้ำย่อย sucrase และ lactase และถึงแม้ว่าจะใช้ยาปฏิชีวนะ (antibiotic) ก็ไม่อาจจะ
ทำให้กิจกรรมของน้ำย่อย lactase คีขึ้นได้ (Shu et al., 1992)



ภาพที่ 17 การเปลี่ยนแปลงของภูมิคุ้มโรคในลูกสุกร

ที่มา : คัดแปลงจาก Lometillo (1994)

2.11 อิทธิพลของการใช้แป้งแปรรูปชนิดต่าง ๆ ในอาหารลูกสุกรที่มีอายุน้อย

Leibholz (1981) ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบแหล่งคาร์โบไฮเดรตในอาหารลูกสุกร 4 แหล่งคือน้ำตาลแล็คโตส, แป้งข้าวสาลี, ข้าวสาลี, และข้าวสาลีที่ผ่านการเอ็กซ์ทรูด โดยทำการทดลองเมื่อสุกรอายุ 7 วันและสิ้นสุดการทดลองเมื่อสุกรมีอายุ 28 วัน จากการทดลองพบว่าลูกสุกรที่ได้รับแป้งข้าวสาลีจะมีน้ำหนักเพิ่ม, ปริมาณอาหารที่กิน และอัตราแลกเนื้อไม่แตกต่างกับการใช้น้ำตาลแล็คโตส, ข้าวสาลี และข้าวสาลีที่ผ่านการเอ็กซ์ทรูด และในระหว่างสัปดาห์แรกของการทดลอง (ลูกสุกรอายุ 7 ถึง 14 วัน) นั้นลูกสุกรจะมีการตอบสนองต่อการใช้น้ำตาลแล็คโตสเป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตมากกว่าการใช้แป้งข้าวสาลี, ข้าวสาลี และข้าวสาลีที่ผ่านการเอ็กซ์ทรูดเป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตในอาหาร เมื่อสุกรอายุ 13 ถึง 18 วันและ 23 ถึง 28 วันได้ทำการทดลองวัดการย่อยได้ของโภชนะในอาหาร (apparent digestibility) ซึ่งพบว่าลูกสุกรที่ได้รับน้ำตาลแล็คโตสและแป้งข้าวสาลีจะมีการย่อยได้ของสิ่งแห้ง, ไนโตรเจน, และแป้งสูงกว่าลูกสุกรที่ได้รับข้าวสาลีและข้าวสาลีที่ผ่านการเอ็กซ์ทรูดเป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตในอาหาร แต่อย่างไรก็ตามเมื่อสุกรมีอายุมากขึ้นลูกสุกรที่ได้รับข้าวสาลีและข้าวสาลีที่ผ่านการเอ็กซ์ทรูดจะมีการย่อยได้ทั้งหมดเพิ่มขึ้น ในขณะที่ลูกสุกรที่ได้รับน้ำตาลแล็คโตสและแป้งจากข้าวสาลีเป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตในอาหารจะมีการย่อยได้ของไนโตรเจนค่อนข้างคงที่ นอกจากนี้พบว่าลูกสุกรอายุ 13 ถึง 18 วันที่ได้รับน้ำตาลแล็คโตสเป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตในอาหารจะมีการสะสมหรือเก็บกักไนโตรเจนในร่างกาย (nitrogen retention) สูงกว่าลูกสุกรที่ได้รับแป้งเป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตในอาหาร (แป้งข้าวสาลี, ข้าวสาลี และข้าวสาลีที่ผ่านการเอ็กซ์ทรูด) แต่เมื่อสุกรมีอายุมากขึ้น (23 ถึง 28 วัน) ลูกสุกรที่ได้รับคาร์โบไฮเดรตประเภทแป้งในอาหาร (แป้งข้าวสาลี, ข้าวสาลี และข้าวสาลีที่ผ่านการเอ็กซ์ทรูด) จะมีการสะสมหรือเก็บกักไนโตรเจนในร่างกายได้ใกล้เคียงกับลูกสุกรที่ได้รับน้ำตาลแล็คโตสเป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตในระยะนี้

Veum and Mateo (1981) ได้ทำการทดลองถึงการใช้ประโยชน์ของแหล่งคาร์โบไฮเดรต 3 ชนิดคือ กากูโคส, ซูโครส และแป้งข้าวโพด ในอาหารลูกสุกรที่มีอายุ 8 ถึง 36 วันและแบ่งการทดลองออกเป็น 2 ระยะคือ ระยะที่ 1 เป็นช่วงที่ลูกสุกรอายุ 8 ถึง 15 วัน และระยะที่ 2 ช่วงลูกสุกรอายุ 15 ถึง 36 วัน จากการทดลองพบว่าลูกสุกรในระยะที่ 1 ที่ได้รับกากูโคส, ซูโครส และแป้งข้าวโพดเป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตในอาหารจะมีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) ในด้านของการเพิ่มน้ำหนักเฉลี่ยต่อวัน, ปริมาณการกินอาหารเฉลี่ยต่อวัน, และอัตราการตายของลูกสุกร และเมื่อศึกษาถึงการย่อยได้ของโภชนะของสุกรในระยะนี้ (วัดการย่อยได้ในช่วงที่ลูกสุกรอายุ 11 ถึง 15 วัน) พบว่าลูกสุกรที่ได้รับกากูโคส, ซูโครส และแป้งข้าวโพดเป็น

แหล่งคาร์โบไฮเดรตในอาหารจะมีการย่อยได้ของโปรตีน, ไขมันมีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) แต่ลูกสุกรที่ได้รับซูโครสเป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตในอาหารจะมีการย่อยได้ของแป้งหยาบ (nitrogen free extract) สูงกว่าลูกสุกรที่ได้รับกลูโคส และแป้งข้าวโพดเป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตในอาหารอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) และลูกสุกรที่ได้รับกลูโคสและแป้งข้าวโพดเป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตในอาหารจะมีการย่อยได้ของสิ่งแห้งและพลังงานสูงกว่าลูกสุกรที่ได้รับซูโครสเป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตในอาหารอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) และนอกจากนี้พบว่าลูกสุกรที่ได้รับแป้งข้าวโพดเป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตในอาหารจะมีการย่อยได้ของเถ้าสูงกว่าลูกสุกรที่ได้รับกลูโคสและซูโครสเป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตในอาหารอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) และผลการทดลองในลูกสุกรระยะที่ 2 พบว่าลูกสุกรที่ได้รับกลูโคสและซูโครสเป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตในอาหารจะมีน้ำหนักตัวที่เพิ่มต่อวันและปริมาณอาหารที่กินเฉลี่ยต่อวันสูงกว่าลูกสุกรที่ได้รับแป้งข้าวโพดเป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตในอาหารอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) และเมื่อศึกษาถึงการย่อยได้ของสุกรในระยะที่ 2 (วัดการย่อยได้ในช่วงที่ลูกสุกรอายุ 32 ถึง 35 วัน) พบว่าลูกสุกรที่ได้รับแป้งข้าวโพดเป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตในอาหารจะมีการย่อยได้ของโปรตีน, พลังงานและเถ้าสูงกว่าลูกสุกรที่ได้รับกลูโคสและซูโครสเป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตในอาหารอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) และลูกสุกรที่ได้รับซูโครสและแป้งข้าวโพดเป็นแหล่งของคาร์โบไฮเดรตในอาหารจะมีการย่อยได้ของสิ่งแห้งสูงกว่าลูกสุกรที่ได้รับกลูโคสเป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตในอาหารอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) และพบว่าลูกสุกรที่ได้รับซูโครสเป็นแหล่งของคาร์โบไฮเดรตในอาหารจะมีการย่อยได้ของแป้งสูงกว่าลูกสุกรที่ได้รับกลูโคสและแป้งข้าวโพดเป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตในอาหารอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

Drizt และคณะ (1993) ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบการใช้แหล่งคาร์โบไฮเดรต 5 แหล่ง คือ ข้าวโพด แป้งข้าวโอ๊ต, แป้งมันฝรั่งแปรรูป 1 (แป้งที่ได้จากการแปรรูปมันฝรั่งโดยวิธีการต่าง ๆ เพื่อทำให้คาร์โบไฮเดรตในมันฝรั่งเปลี่ยนเป็นกลูโคสโมเลกุลเดี่ยวและผ่านกรรมวิธี spray-dried), แป้งมันฝรั่งแปรรูป 2 (แป้งที่ได้จากการแปรรูปมันฝรั่งโดยวิธีการต่าง ๆ เพื่อทำให้แป้งในมันฝรั่งถูกย่อยให้มีสายโมเลกุลเล็กหรือโมเลกุลของแป้งมีความยาวปานกลางซึ่งจะอยู่ในรูป primarily malto dextran และผ่านกรรมวิธี spray-dried) และน้ำตาลแล็กโตส โดยใช้ข้าวโพดและแป้งข้าวโอ๊ตเป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตในอาหารในระดับ 36.56 เปอร์เซ็นต์เปรียบเทียบกับการใช้แป้งมันฝรั่งแปรรูป 1, 2 และแล็กโตสในสูตรอาหารร่วมกับข้าวโพด (แป้งมันฝรั่งแปรรูป 1, 2 และ แล็กโตส 12 เปอร์เซ็นต์ร่วมกับการใช้ข้าวโพด 23.92 เปอร์เซ็นต์ในอาหาร) โดยทำการทดลองกับสุกรหลังหย่านม (อายุ 21 วัน) โดยแบ่งระยะการทดลองออกเป็น 2 ระยะคือ ระยะที่ 1 เป็นช่วงที่ลูกสุกรหย่านม 0 ถึง 14 วัน และระยะที่ 2 คือช่วงลูกสุกรหย่านมไปแล้ว 14 ถึง 35 วัน

จากการทดลองพบว่า ในระยะที่ 1 นั้นลูกสุกรที่ได้รับแป้งมันฝรั่งแปรรูป 1 จะมีอัตราการเพิ่มน้ำหนักตัวเฉลี่ยต่อวันและปริมาณการกินอาหารเฉลี่ยต่อวันสูงกว่าลูกสุกรที่ได้รับข้าวโพดและแป้งข้าวโอ๊ตเป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตในอาหารอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) และมีค่าสูงที่สุดในการใช้เป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตในอาหารทดลอง และลูกสุกรที่ได้รับน้ำตาลแล็กโตสเป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตในอาหารจะมีอัตราการเพิ่มน้ำหนักเฉลี่ยสูงกว่าการใช้ข้าวโพดเป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตในอาหารอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) แต่ในระยะที่ 2 และตลอดการทดลองพบว่ามีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) ของอัตราการเพิ่มน้ำหนักตัวเฉลี่ย, ปริมาณการกินอาหารต่อวันและประสิทธิภาพการใช้อาหารของสุกรที่ได้รับแหล่งคาร์โบไฮเดรตทั้ง 5 ชนิดในอาหาร

Kerr และคณะ (1994) ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบการใช้แหล่งคาร์โบไฮเดรตโดยใช้แป้งมันฝรั่งแปรรูปซึ่งเป็นแป้งที่ได้จากการแปรรูปมันฝรั่งโดยใช้น้ำย่อยเพื่อทำให้คาร์โบไฮเดรตในมันฝรั่งถูกย่อยเป็นน้ำตาลกลูโคส 1.5%, มอลโตส 4.5%, มอลโตไตรโอส 8.5% และ 85.5% ของคาร์โบไฮเดรตเป็นสายโพลีเมอร์ของกลูโคสทดแทนข้าวโพดและน้ำตาลแล็กโตสในอาหารลูกสุกร โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 2 การทดลองคือ การทดลองที่ 1 ใช้ลูกสุกรอายุ 19 วัน สิ้นสุดการทดลองเมื่ออายุ 54 วันพบว่า ลูกสุกรที่ได้รับอาหารที่ใช้แป้งมันฝรั่งแปรรูปชนิดนี้ทดแทนข้าวโพด 12 เปอร์เซ็นต์จะมีอัตราการเพิ่มน้ำหนักตัวเฉลี่ยไม่แตกต่างจากการใช้ข้าวโพดและน้ำตาลแล็กโตสในอาหาร แต่พบว่ามีปริมาณการกินอาหารเฉลี่ยสูงกว่าลูกสุกรที่ได้รับข้าวโพดในอาหาร และการทดลองที่ 2 ใช้ลูกสุกรอายุ 14 วัน โดยใช้แป้งมันฝรั่งแปรรูป 1 ซึ่งเป็นแป้งที่ได้จากการแปรรูปมันฝรั่งโดยใช้น้ำย่อยเพื่อทำให้คาร์โบไฮเดรตในมันฝรั่งถูกย่อยเป็นน้ำตาลกลูโคส 1.5%, มอลโตส 4.5%, มอลโตไตรโอส 8.5% และ 85.5% ของคาร์โบไฮเดรตเป็นสายโพลีเมอร์ของกลูโคส และแป้งมันฝรั่งแปรรูป 2 ซึ่งเป็นแป้งที่ได้จากการแปรรูปมันฝรั่งโดยใช้น้ำย่อยเพื่อทำให้คาร์โบไฮเดรตในมันฝรั่งถูกย่อยเป็นน้ำตาลกลูโคส 3.0%, มอลโตส 10.0%, มอลโตไตรโอส 12.5% และ 74.5% ของคาร์โบไฮเดรตเป็นสายโพลีเมอร์ของกลูโคสทดแทนข้าวโพดและน้ำตาลแล็กโตสในสูตรอาหาร 12 เปอร์เซ็นต์ พบว่าเมื่อทำการทดลอง 0 ถึง 7 วัน ลูกสุกรที่ได้รับแป้งมันฝรั่งแปรรูปทั้ง 2 ชนิดทดแทนข้าวโพดจะมีอัตราการเพิ่มน้ำหนักต่อวันสูงกว่าลูกสุกรที่ได้รับแป้งมันฝรั่งแปรรูปทั้ง 2 ชนิดทดแทนน้ำตาลแล็กโตส และเมื่อทำการทดลอง 0 ถึง 14 วันและ 0 ถึง 21 วันพบว่าลูกสุกรที่ได้รับแป้งมันฝรั่งแปรรูปทั้ง 2 ชนิดทดแทนข้าวโพดจะมีอัตราการเพิ่มน้ำหนักต่อวันและการกินอาหารดีกว่าลูกสุกรที่ได้รับข้าวโพดในอาหาร และลูกสุกรที่ได้รับแป้งมันฝรั่งแปรรูปทั้ง 2 ชนิดทดแทนข้าวโพดมีการกินอาหารสูงกว่าลูกสุกรที่ได้รับแป้งมันฝรั่งแปรรูปทั้ง 2 ชนิดทดแทนน้ำตาลแล็กโตสในอาหาร และทั้งสามช่วงการทดลอง (0-7, 0-14 และ

0-21 วัน) พบว่าลูกสุกรที่ได้รับแป้งมันฝรั่งแปรรูป 1 มีอัตราการเพิ่มน้ำหนักตัวและปริมาณการกินอาหารดีกว่าลูกสุกรที่ได้รับแป้งมันฝรั่งแปรรูป 2 ในอาหาร

Kim และคณะ (1995) ได้ทำการทดลองใช้ข้าวโพดบดที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกันคือ 1,000 μm . และ 500 μm . ในอาหารสุกรอายุ 21 ถึง 45 วัน ซึ่งพบว่าสุกรที่ได้รับข้าวโพดที่มีขนาดอนุภาคเล็กมีอัตราการเจริญเติบโตต่อวัน, อัตราแลกเนื้อดีกว่า ($P < 0.05$) สุกรที่ได้รับข้าวโพดที่มีอนุภาคใหญ่ในอาหาร และเมื่อวัดการย่อยได้เมื่อสุกรอายุ 44 วันพบว่า สุกรที่ได้รับข้าวโพดที่มีขนาดอนุภาคที่เล็กลงมีผลทำให้มีการย่อยได้ของสิ่งแห้ง และพลังงานสูงกว่าสุกรที่ได้รับข้าวโพดที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ ($P < 0.05$)