บทที่ 7 เมแทบอลิซึมของโภชนะในกระเพาะอาหารและลำไส้
Metabolism of Nutrients in Stomach and Intestine

จุดประสงค์การเรียนรู้

1. สามารถอธิบายถึงกระบวนการเมแทบอลิซึมของโภชนะต่างๆ ที่เกิดขึ้นในกระเพาะอาหารและลำไส้
2. มีความเข้าใจและสามารถเปรียบเทียบกระบวนใช้ประโยชน์ของโภชนะในสัตว์แต่ละกลุ่มได้

สิ่งมีชีวิตทุกชนิด เมื่อได้รับอาหารเข้าสู่ร่างกายแล้ว โภชนะต่างๆ จะมีกระบวนการย่อยสลายให้มีขนาดโมเลกุลเล็กลงและสามารถดูดซึมไปใช้ประโยชน์ต่อไปได้ โดยกระบวนการประกอบด้วยการทำให้อาหารเกิดการสลายตัว ซึ่งอาหารจะถูก oxidize เกิดเป็นพลังงานและความร้อน และขบวนการสร้าง ซึ่งนำเอาพลังงานและสารประกอบคาร์บอนสร้าง หรือซ่อมแซมเนื้อเยื่อต่างๆ ของร่างกาย ก่อให้เกิดการเจริญเติบโต การแบ่งเซลล์ ตลอดจนการเคลื่อนไหวและการขับถ่ายของเสียออกจากเซลล์ การเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีต่างๆ ที่เกิดจะอาศัยเอนไซม์ที่มีความจำเพาะต่อประเภทของโภชนะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ขึ้นเพื่อให้ได้เป็นโภชนะต่างๆ ซึ่งกระบวนการเปลี่ยนแปลงนี้ เรียกว่า เมแทบอลิซึม (metabolism) โดยกระบวนการเมแทบอลิซึม สามารถจำแนกตามประเภทของปฏิกิริยาเป็น 2 แบบ คือ

1. แคแทบอลิซึม (catabolism) เป็นปฏิกิริยาที่ทาให้เกิดการสลายของสารโมเลกุลใหญ่ให้เป็นสารโมเลกุลเล็ก โดยปฏิกิริยาเหล่านี้มักมีการให้พลังงานออกมา ซึ่งถูกใช้ในการสร้าง ATP และมีการถ่ายโอนอีเล็คตรอนสู่ตัวรับอีเล็คตรอนด้วย

2. แอนาบอลิซึม (anabolism) เป็นปฏิกิริยาซึ่งสร้างสารโมเลกุลใหญ่ที่ร่างกายต้องการใช้ จากสารโมเลกุลเล็กที่เป็นผลิตภัณฑ์ของแคแทบอลิซึมโดยอาศัยพลังงานในการผลักดันปฏิกิริยา จาก ATP และใช้อีเล็คตรอนจาก NADPH

สำหรับกระเพาะอาหารและลำไส้ ถือเป็นอวัยวะส่วนหนึ่งที่มีบทบาทต่อการย่อยสลายและการดูดซึมของโภชนะ ไม่ว่าจะเป็น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน (Riis, 1983; McDonald et al., 2011) โดยกระบวนการย่อยสลายโภชนะแต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกันและมีการทำงานของเอนไซม์ที่มีความจำเพาะเจาะจงต่อสารตั้งต้น (substrate) ดังแสดงดังตารางที่ 7.1 นอกจากนี้ในสิ่งมีชีวิตต่างชนิดกันจะมีอวัยวะที่ใช้ในการย่อยโภชนะที่แตกต่างกันด้วย ตัวอย่างเช่น ในสัตว์เคี้ยวเอื้อง นอกจากจะมีกระเพาะจริงเพื่อทำหน้าที่ในการย่อยสลาย

ตารางที่ 7.1 เอนไซม์ชนิดต่างๆ ที่ทำหน้าที่ในการย่อยสลายโภชนะ

Name	Trivial name	Source	Substrate
Enzymes hydrolysing peptide links			
Pepsin		Gastric mucosa	Proteins and peptides
Chymosin	Rennin	Gastric mucosa	Proteins and peptides
Trypsin		Pancreas	Proteins and peptides
Chymotrypsin		Pancreas	Proteins and peptides
Carboxypeptidase A	Carboxypeptidase	Small intestine	Peptides
Carboxypeptidase B	Protaminase	Small intestine	Peptides
Aminopeptidases		Small intestine	Peptides
Dipeptidases		Small intestine	Dipeptides
Enzymes hydrolysing glycoside links			
α–Amylase	Diastase	Saliva, pancreas	Starch, glycogen, dextrin
α–Glucosidase	Maltase	Small intestine	Maltose
Oligo–1,6–glucosidase	Isomaltase	Small intestine	Dextrins
β–Galactosidase	Lactase	Small intestine	Lactose
β–Frutofuranosidase	Sucrase	Small intestine	Sucrose
Enzymes acting on ester links			
Triacylglycerol lipase	Lipase	Pancreas	Triacylglycerols
Cholesterol esterase		Pancreas and small intestine	Cholesterol esters
Phospholipase A2	Lecithinase A	Pancreas and small intestine	Lecithins and cephalins
Lysophospholipase	Lysolecithinase	Small intestine	Lysolecithin
Deoxyribonuclease	DNase	Pancreas and small intestine	DNA
Ribonuclease 1	RNase	Pancreas and small intestine	RNA
Nucleosidase		Small intestine	Nucleosides

ที่มา: McDonald et al. (2011)

โภชนะเหมือนกับสัตว์อื่นๆแล้ว ยังมีกระเพาะรูเมนที่ประกอบไปด้วยจุลินทรีย์จำนวนมาก หน้าที่ย่อยสลายและดูดซึมโภชนะเพิ่มขึ้นมาด้วย ซึ่งแตกต่างจากสัตว์ไม่เคี้ยวเอื้องและมนุษย์ที่การย่อยส่วนใหญ่จะอาศัยกระเพาะจริงและลำไส้เป็นหลัก ดังนั้น จึงมีความจำเป็นที่จะต้องทำความเข้าใจถึงกระบวนกาย่อยสลายและการดูดซึมโภชนะต่างๆ ในสิ่งมีชนิดต่างชนิดกัน

เมแทบอลิซึมของคาร์โบไฮเดรตในกระเพาะอาหาร

กระบวนการย่อยอาหารพวกคาร์โบไฮเดรตโดยทั่วไป เริ่มตั้งแต่อาหารเข้าสู่ปาก ฟันจะทำหน้าที่เคี้ยวบดอาหารให้มีขนาดเล็กลง และในน้ำลายมีเอนไซม์ที่มีชื่อว่า salivary amylase หรือ α– amylase สามารถย่อยแป้งให้มีขนาดเล็กลงเป็น dextrin แต่การย่อยอาหารในปากเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย เพราะอาหารอยู่ในปากช่วงระยะเวลาสั้นๆ เท่านั้น จากนั้นอาหารจะถูกกลืนผ่านหลอดอาหารไปยังกระเพาะอาหาร แต่ที่กระเพาะอาหารนี้ไม่มีเอนไซม์ที่ย่อยคาร์โบไฮเดรต เพราะ α– amylase จะถูกทำลายด้วยกรดในกระเพาะอาหาร ดังนั้นการย่อยอาหารพวกคาร์โบไฮเดรตจึงหยุดไปชั่วคราว จะเริ่มย่อยอีกครั้ง เมื่ออาหารผ่านเข้าไปในลำไส้เล็กซึ่งมีสภาพเป็นด่าง โดยน้ำย่อยจากตับอ่อนและจากผนังลำไส้เล็ก (เมธา, 2533)

ส่วนในสัตว์เคี้ยวเอื้องการย่อยคาร์โบไฮเดรตเกิดขึ้นครั้งแรกในกระเพาะรูเมน โดยอาศัยน้ำย่อย หรือเอนไซม์จากจุลินทรีย์ในกระเพาะรูเมนเท่านั้น เนื่องจากผนังของกระเพาะรูเมนมีเคอราทิน (keratin) ที่เรียงตัวกันเป็นชั้น ๆ โดยไม่มีต่อมที่ผลิตน้ำย่อยหรือต่อมมีท่อชนิดต่างๆ ที่ทำหน้าที่ในการผลิตและหลั่งน้ำย่อยปรากฏอยู่เลย การย่อยคาร์โบไฮเดรตในกระเพาะรูเมนอาจแบ่งเป็นขั้นตอนดังนี้ คือ

1. การย่อยคาร์โบไฮเดรตในกลุ่มโพลี่แซคคาไรด์ ให้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว เช่น กลูโคส โดยอาศัยเอนไซม์จากจุลินทรีย์ (extracellular microbial enzyme) เช่น เอนไซม์ที่ย่อยเซลลูโลสคือ เบต้า 1,4 ไกลโคซิเดส (β –1, 4 glycosidase) เอนไซม์ที่ย่อยเพคติน คือ เพคตินเอสเทอเรส (pectinesterase) และเอนไซม์ amylase (α – amylase) เอนไซม์ดังกล่าวจะย่อยคาร์โบไฮเดรตประเภทโพลี่แซคคาไรด์ ที่เป็นส่วนประกอบส่วนใหญ่ของพืชอาหารสัตว์ ในขั้นตอนการสลายตัวของโพลี่แซคคาไรด์ จะไม่มี ATP เกิดขึ้น ในการย่อยโพลี่แซคคาไรด์เอนไซม์ของจุลินทรีย์จะเข้าย่อยตรงรอยต่อเชื่อมระหว่างพันธะไกลโคซิดิก ทำให้น้ำตาลเชิงเดี่ยวหรือโมโนแซคคาไรด์แต่ละโมเลกุลแยกออกจากกัน ผลผลิตจากการย่อยจะได้ไดแซค

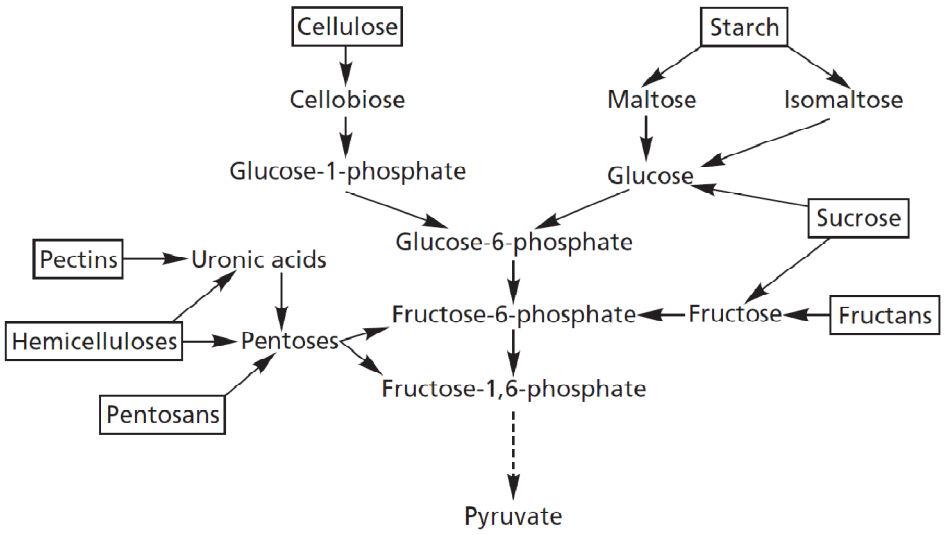
คาไรด์ที่จะถูกเปลี่ยนเป็นโมโนแซคคาไรด์ในขั้นสุดท้าย ไดแซคคาไรด์ที่เกิดขึ้นบางส่วนอาจผ่านเข้าในขบวนการเติมกลุ่มฟอสเฟต (phosphorylation) ได้ผลผลิตเป็นโมโนแซคคาไรด์ฟอสเฟต เช่น กลูโคสฟอสเฟต (glucose–1– phosphate) เป็นต้น ขั้นตอนในการย่อยโพลี่แซคคาไรด์แต่ละชนิด มีดังนี้

1.1 เซลลูโลสจะถูกย่อยให้เป็นเซลโลไบโอส (cellobiose) โดยเอนไซม์จาก จุลินทรีย์ที่ใช้เซลลูโลสเป็นอาหาร (cellulolytic bacteria) เอนไซม์ดังกล่าว คือ β–1, 4 glycosidase ซึ่งจะย่อยเซลลูโลสที่พันธะ β–1, 4 glycosidic linkage ได้ผลผลิต คือ เซลโลไบโอส (cellobiose) เซลโลไบโอสจะถูกย่อยเป็นกลูโคส หรือ กลูโคสฟอสเฟต (glucose–1–phosphate) ต่อไป โดยเอนไซม์เซลโลไบโอฟอสโฟรีเลส (cellobiose phosphorylase) แบคทีเรียที่ย่อยเซลลูโลสได้แก่ *Bacteroides succinogenes* , *Ruminococcus albus* และ *Ruminococcus flavefaciens* เป็นต้น

1.2 เฮมิเซลลูโลสจะถูกย่อยที่พันธะ β–1, 4 xylosidic linkage โดยเอนไซม์จากจุลินทรีย์ ได้ผลผลิตคือ เซลโลไบโอส ซึ่งจะถูกย่อยให้เป็นน้ำตาลไซโลสต่อไปโดยผ่านวิถีเพนโตสฟอสเฟต (pentose phosphate pathway) โดยทั่วไปจุลินทรีย์ที่ย่อยเซลลูโลสได้จะย่อยเฮมิเซลลูโลสได้ เนื่องจากเฮมิเซลลูโลสมีการละลายได้ดีกว่า แบคทีเรียที่สำคัญที่เกี่ยวข้องกับการย่อยเฮมิเซลลูโลสได้แก่ *Bacteroides succinogenes*

1.3 เพคตินจะถูกย่อยโดยเอนไซม์เพคตินเอสเทอเรสที่พันธะเอสเทอร์ (ester bond) ได้ผลผลิตคือ เมทธานอล (methanol) และกรดเพคติก (pectic acid) กรดเพคติกเป็นกรดโพลี่กาแลคทูโรนิก (polygalacturonic acid) ซึ่งจะถูกย่อยโดยเอนไซม์โพลี่กาแลคทูโรนิเดส (polygalacturonidase) ที่พันธะไกลโคซิดิก (α–1, 4 glycosidic linkage)ได้ผลผลิตคือ กรดกาแลคทูโรนิก (galacturonic acid) ซึ่งเป็นกรดยูโรนิก (uronic acid) ประเภทหนึ่ง ซึ่งถูกเปลี่ยนให้เป็นน้ำตาลไซโลสได้ น้ำตาลไซโลสเมื่อเข้าสู่วิถีเพนโตสฟอสเฟตจะได้ฟรุคโตสฟอสเฟต (fructose–6–phosphate) และกลีเซอรอลดีไฮด์ฟอสเฟต (glyceraldehyde–3–phosphate) เช่นเดียวกับน้ำตาลไซโลสที่เป็นผลผลิตที่เกิดจากการย่อยเฮมิเซลลูโลส กลุ่มของจุลินทรีย์ที่สำคัญ คือ *B. succinogenes*, *B. ruminocola* และ *B. fibrisovenes* โปรโตซัวบางชนิดสามารถย่อยเพคตินได้เช่นกัน โดยทั่วไปต้องใช้เอนไซม์อย่างน้อยสองชนิดเพื่อย่อยเพคติน คือ เมททิลเอสเทอเรส (methylesterase)และโพลีกาแลคทูโรนิเดส (polygalacturonidase) แป้ง เป็นโพลี่แซคคาไรด์ที่ถูกใช้เป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญของจุลินทรีย์

ในกระเพาะรูเมน แป้งจะถูกย่อยโดยเอนไซม์ amylase (α–amylase หรือ amylase) ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่ย่อยพันธะที่เชื่อมต่อระหว่างน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวภายในโครงสร้างของแป้ง (endoenzyme) เอนไซม์นี้จะย่อยแป้งที่ตำแหน่ง α–1, 4 glycosidic linkage ผลผลิตจากการย่อยคือน้ำตาลมอลโตสและโอลิโกแซคคาไรด์ (oligosaccharides) ที่ประกอบด้วยส่วนที่เป็นรอยต่อตรงพันธะ α–1, 6 glycosidic linkage ของกิ่งก้านของอะไมโลเพคติน ซึ่งเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า เดร็กติก (limit dextrin) ซึ่งจะถูกย่อยต่อไปโดยเอนไซม์โอลิโกไกลโคซิเดส (oligo α–1, 6 glycosidase) ได้เป็นกลูโคสหรือกลูโคสฟอสเฟต (glucose–1–phosphate) น้ำตาลมอลโตสจะถูกย่อยต่อไปด้วยเอนไซม์มอลเตส (maltase) และมอลเตสฟอสโฟรีเลส (maltase phosphorylase) ได้ผลผลิตคือ กลูโคสหรือกลูโคสฟอสเฟต แบคทีเรียที่เกี่ยวข้องกับการย่อยแป้ง ได้แก่ *B. amylophilus, Streptococcus bovis, Succinimomas amylolytica* และ *Succinivibrio dextrinosolvens* เป็นต้น



ภาพที่ 7.1 การเปลี่ยนคาร์โบไฮเดรตเพื่อให้ได้ไพรูเวตในกระเพาะรูเมน

ที่มา: McDonald et al. (2011)

2. การเปลี่ยนน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวให้เป็นไพรูเวท (pyruvate) น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวหรือโมโนแซคคาไรด์ เช่น น้ำตาลกลูโคสเป็นผลผลิตจากการย่อยโพลี่แซคคาไรด์ โดยเอนไซม์ที่ผลิตจากจุลินทรีย์ น้ำตาลกลูโคสจะถูกเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วให้เป็นไพรูเวท จึงทำให้ไม่

สามารถพบน้ำตาลกลูโคสในกระเพาะรูเมน หรืออาจพบได้แต่น้อยมาก ในกระเพาะรูเมนการเปลี่ยนแปลงน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวให้เป็นไพรูเวทอาจ เรียกว่า เมตาโบลิซึมในรูเมน (rumen metabolism) การเปลี่ยนแปลงกลูโคสเป็นไพรูเวทสามารถเกิดได้ 2 ทาง คือ การเปลี่ยนน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่มีคาร์บอน 6 อะตอม เช่น กลูโคสให้เป็นไพรูเวทโดยวิถีไกลโคไลซีส (glycolysis) หรือ (Embden Mayerhof pathway) และการเปลี่ยนน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่มีคาร์บอน 5 อะตอมเช่น เพนโตส (pentose) ให้เป็นไพรูเวทโดยผ่านวิถีเพนโตสฟอสเฟต (pentose phosphate pathway) (ภาพที่ 7.1)

3. การเปลี่ยนไพรูเวทเป็นกรดไขมันระเหยง่าย (volatile fatty acids, VFA) คาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สมีเทน (methane : CH_4) กรดไขมันระเหยง่ายที่เกิดขึ้นในกระเพาะรูเมน ได้แก่ กรดอะซิติก (acetic acid) กรดโพรพิโอนิก (propionic acid) และกรดบิวทิริก (butyric acid) (ภาพที่ 7.2) กรดอะซิติกจะเป็นกรดไขมันระเหยง่ายที่พบมากที่สุด นอกจากนี้ยังพบกรดไขมันอื่นๆ เช่น กรดไอโซบิวทิริก (isobutyric acid) กรดเมททิลบิวทิริก (methylbutyric cid) และกรดวาริลริก (varelic acid) เป็นต้น กรดไขมันที่ระเหยง่ายเหล่านี้จะถูกใช้เป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญในสัตว์เคี้ยวเอื้อง โดยให้พลังงานประมาณ 80% ของพลังงานที่สัตว์ต้องการทั้งหมดในแต่ละวัน ขั้นตอนที่สำคัญในการสังเคราะห์กรดไขมันระเหยง่ายในกระเพาะรูเมนมีดังนี้ (บุญล้อม, 2546)

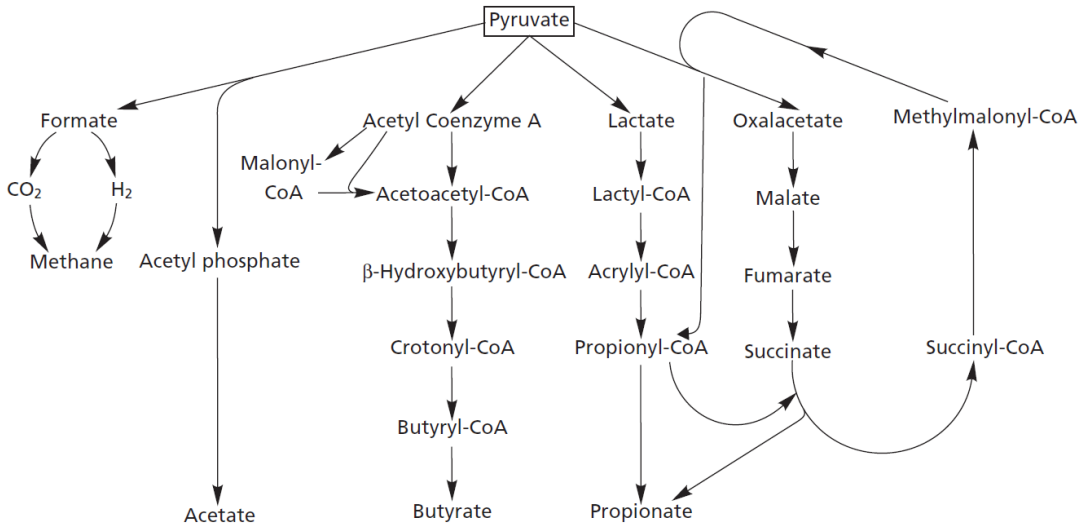
3.1 การสังเคราะห์กรดอะซิติกจากไพรูเวท โดยการทำปฏิกิริยากันระหว่างไพรูเวทกับโคเอนไซม์เอได้เป็นอะซิติลโคเอนไซม์เอ (acetyl CoA) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และแก๊สไฮโดรเจน หรือได้ผลผลิตเป็น อะซิติลโคเอ็นไซม์เอ และฟอร์เมตหรือกรดฟอร์มิก (formate หรือ formic acid) อะซิติลโคเอนไซม์เอที่เกิดขึ้น ส่วนหนึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงไปเป็นกรดอะซิติก (acetic acid) หรืออะซิเตต (acetate) โดยตรง หรือถูกเปลี่ยนให้เป็นอะซิติลฟอสเฟตก่อน (acetyl phosphate) แล้วจึงดึงกลุ่มฟอสเฟตออก เกิดเป็นกรดอะซิติกหรืออะเซทเตตในขั้นสุดท้าย กรดฟอร์มิกหรือฟอร์เมตที่เกิดขึ้นจะถูกออกซิไดส์อย่างรวดเร็ว ได้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และไฮโดรเจน (H_2) ซึ่งจะถูกนำไปใช้สร้างแก๊สมีเทน (CH_4) ต่อไป นอกจากการเข้าทำปฏิกิริยากับอะซิติลโคเอนไซม์เอแล้ว ไพรูเวทอาจเข้าทำปฏิกิริยากับกลุ่มฟอสเฟตโดยตรง แล้วเปลี่ยนไปเป็นอะซิติลฟอสเฟต แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไฮโดรเจน หรือเปลี่ยนเป็นอะซิติลฟอสเฟตและฟอร์เมตได้เช่นกัน

กรดอะซิติกเป็นกรดไขมันระเหยง่ายที่พบมากที่สุดในกระเพาะรูเมน โดยเฉพาะเมื่อสัตว์ได้กินอาหารหยาบหรืออาหารที่มีปริมาณเยื่อใยสูง กรดอะซิติกที่ผลิตได้คิดเป็น

ประมาณ 60–70% ของกรดไขมันระเหยง่ายที่ผลิตได้ทั้งหมด หากสัดส่วนของอาหารหยาบที่สัตว์ได้รับลดลงและอาหารข้นมีสัดส่วนสูงขึ้น ปริมาณการผลิตกรดอะซิติกจะลดลง แต่กรดโพรพิโอนิกจะมีสัดส่วนที่เพิ่มขึ้นแทน กรดอะซิติกนอกจากจะถูกใช้เป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญของร่างกายสัตว์แล้ว ยังถูกใช้เป็นแหล่งวัตถุดิบที่สำคัญในการผลิตไขมันนม (milk fat) ด้วย

3.2 การสังเคราะห์กรดโพรพิโอนิกสามารถเกิดขึ้นได้ 2 วิธี ขึ้นกับแหล่งคาร์โบไฮเดรตที่สัตว์ได้รับ ในกรณีที่ได้รับอาหารหยาบสูง ไพรูเวทที่เกิดขึ้นจากการย่อยจะถูกเปลี่ยนแปลงตามวิถีไดคาร์บอกซาลิกแอซิค (dicarboxylic acid cycle) เป็นอ๊อกซาโลอะซิเตต (oxaloacetate) และซัคซิเนต (succinate) ก่อน จึงเปลี่ยนเป็นกรดโพรพิโอนิกหรือโพรพิโอเนต กรณีสัตว์เคี้ยวเอื้องได้รับอาหารพวกธัญพืชมากขบวนการในการสังเคราะห์โพรพิโอเนตจะใช้วิถีอาครีเลท (acrylate pathway หรือ direct reductive pathway) ซึ่งจะเปลี่ยนไพรูเวทเป็นอาครีเลท (acrylate) ซึ่งเป็นสารตัวกลาง (intermediate) ที่สำคัญในการเปลี่ยนเป็นกรดโพรพิโอนิก ซึ่งเป็นกรดที่มีบทบาทสำคัญเกี่ยวกับการรักษาปริมาณน้ำตาล (กลูโคส) ในเลือด และเป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์น้ำตาลแลคโตสในนม เอนไซม์ที่สำคัญในปฏิกิริยาการใช้ไพรูเวทเป็นแหล่งพลังงาน ได้แก่ ฟอสโฟอิเนลไพรูเวทคาร์บอกซีไคเนส (phosphoenalpyruvate carboxykinase) ทำหน้าที่เปลี่ยน ฟอสโฟอินอลไพรูเวท (PEP) ให้เป็นอ๊อกซาโลอะซิเตท และ เอทีพี (ATP,adenosine triphosphate) โดยการรวมตัวกับเอดีพี (ADP,adenosine diphosphate) หรือเปลี่ยนกัวอานีนไดฟอสเฟต (guanidine diphosphate,GDP)เป็นกัวอานีนไตรฟอสเฟต (guanidinetriphosphate,GTP) โดยรวมกับคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนเอนไซม์ไพรูเวทคาร์บอกไซเลส เปลี่ยนไพรูเวทให้เป็นออกซาโลอะซิเตท และเอดีพี โดยรวมกับคาร์บอนไดออกไซด์และเอทีพี และเอนไซม์เมททิลมาโลนิลโคเอนไซม์ methylmalonyl–CoA transferase จะเปลี่ยนซัคซิเนตผ่านมาโลนิลโคเอนไซม์เอ เป็นโพรพิโอเนต

3.3 การสังเคราะห์กรดบิวทิริก ในกระเพาะรูเมนส่วนใหญ่เกิดจากปฏิกิริยาย้อนกลับของวิถีเบต้าออกซิเดชั่น (reverse of β– oxidation) โดยการรวมอะซิติลโคเอนไซม์เอเข้าด้วยกัน 2 โมเลกุล ก่อนที่จะเปลี่ยนเป็นบิวทีริลโคเอนไซม์เอแล้วดึงโคเอนไซม์เอออกจะได้บิวทิเรทต่อไป ปฏิกิริยาที่สามารถเกิดกรดบิวทิริกได้อีกปฏิกิริยาหนึ่งคือ การใช้มาโลนิลโคเอนไซม์เอ (malonyl CoA) ทำปฏิกิริยากับอะซิติลโคเอนไซม์เอ(acetyl CoA) ได้เป็นอะซิโตอะซิติลโคเอนไซม์เอ (acetoacetly CoA) ผ่านโครโทนิลโคเอนไซม์เอ (croronyl CoA) เกิดเป็นกรดบิวทิริกต่อไป (บุญล้อม, 2546)



ภาพที่ 7.2 การสังเคราะห์หกรดไขมันที่ระเหยง่ายจากไพรูเวตโดยจุลินทรีย์ในกระเพาะรูเมน
ที่มา: McDonald et al. (2011)

3.4 การสังเคราะห์แก๊สมีเทน ส่วนใหญ่สังเคราะห์ขึ้นจากการรวมตัวกันของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจน หรือใช้กรดฟอร์มิกหรือฟอร์เมตรวมตัวกับแก๊สไฮโดรเจน การสังเคราะห์แก๊สมีเทนจัดเป็นการลด หรือการขับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากกระเพาะรูเมนวิธีหนึ่ง ในการขับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกจากกระเพาะรูเมนโดยการนำไปสังเคราะห์เป็นแก๊สมีเทน นับเป็นการสูญเสียพลังงานจากร่างกายอย่างหนึ่งด้วย การสูญเสียพลังงานในรูปการสังเคราะห์แก๊สมีเทนนี้ มีค่าประมาณ 7% ของพลังงานทั้งหมดที่สัตว์ได้รับจากอาหาร แก๊สที่มีปริมาณมากที่สุดในกระเพาะรูเมนคือ แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ประมาณ 65% และแก๊สมีเทนมีปริมาณ 27% การขับแก๊สที่เกิดขึ้นในกระเพาะรูเมน เพื่อไม่ให้มีการสะสมแก๊สในกระเพาะรูเมนมากจนกระทั่งสัตว์เกิดอาการท้องอืดคือ วิธีการเรอ (eructation หรือ bleaching) บางส่วนของแก๊สที่เกิดขึ้นในกระเพาะรูเมนอาจถูกดูดซึมผ่านผนังกระเพาะเข้าสู่ระบบไหลเวียนของเลือดเพื่อไปที่ปอด และถูกขับออกจากร่างกายผ่านการหายใจออก การมีแก๊สสะสมมากในกระเพาะรูเมนโดยไม่มีการระบายออกด้วยการเรอหรือการดูดซึมผ่านกระเพาะไปที่ระบบไหลเวียนของเลือด จะมีผลให้กระเพาะรูเมนมีการขยายใหญ่มาก และสัตว์เกิดอาการท้องอืด (bloat) หากไม่มีการระบายแก๊สออกจากกระเพาะรูเมน จะมีผลให้สัตว์ตายได้

เมแทบอลิซึมของโปรตีนในกระเพาะอาหาร

การย่อยโปรตีนที่เกิดขึ้นที่กระเพาะจริงนั้น จะมีตับอ่อนเข้ามามีบทบาทเกี่ยวข้องในการผลิตเอนไซม์ร่วมกับกระบวนการย่อยด้วย โดยทั่วไปแล้วในกระเพาะจริง (abomasums) จะแบ่งออกเป็นสามส่วนคือ cardia, fundus และ pylorus ซึ่งเมื่อร่างกายรับอาหารโปรตีนเข้าสู่กระเพาะแล้ว G-cell ที่กระเพาะจะถูกกระตุ้นให้หลั่งฮอร์โมน gastrin ระดับของฮอร์โมน gastrin ที่สูงในกระแสเลือดกระตุ้นให้ parietal cell ของกระเพาะหลั่งกรดเกลือ (hydrochloric, HCl) โดยมีกลไกเริ่มจากการแตกตัวของกรดไบคาร์บอเนตในเซลล์ได้ H^+ ที่จะขับออกจากเซลล์แลกเปลี่ยนกับ K^+ เข้าเซลล์โดยใช้ ATP และเอนไซม์ H^+-K ATPase จากนั้น H^+ จะรวมกับ Cl^- หรือกรด gastric ซึ่งมีความเข้มข้น 0.1 HCl, pH 1.0 เมื่อหลั่งออกมาในช่องทางเดินอาหารของกระเพาะ จะมีค่า pH 2.0

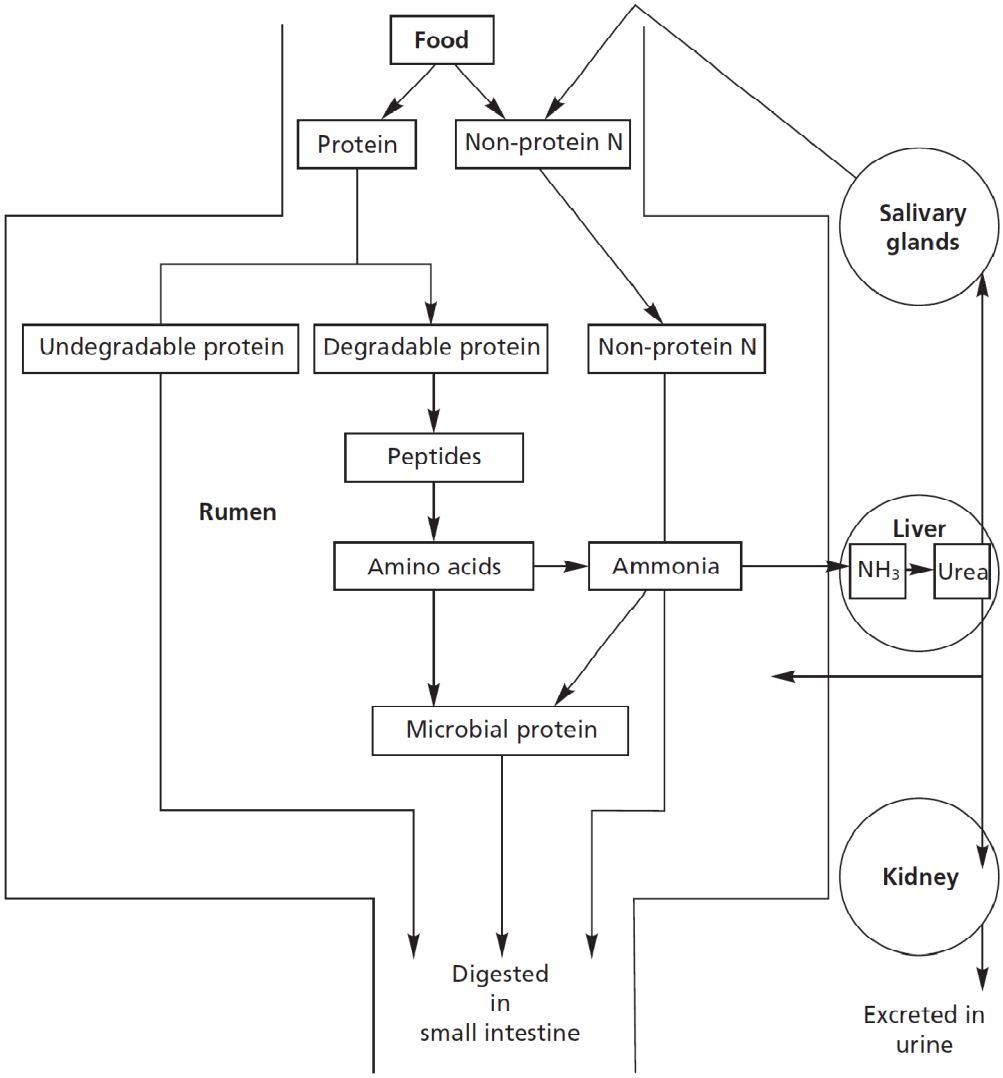
โปรตีนในอาหารจะมีรูปร่างเป็นเกลียวหรือพับซ้อนกัน ทำให้มีส่วนหลบซ่อน ซึ่งจะไม่สัมผัสกับเอนไซม์ ขั้นตอนแรกของการย่อยโปรตีนเป็นการทำลายพันธะที่เชื่อมภายในโมเลกุลของโมเลกุลของโปรตีนที่เป็นเกลียวหรือพับซ้อน ซึ่งเป็นพันธะอย่างอ่อน และสามารถทำลายด้วยกรดในกระเพาะ ทำให้ได้สายโพลี่เพปไทด์ที่ง่ายต่อการย่อยสลายต่อไป จากนั้นฮอร์โมน gastrin จะกระตุ้นเซลล์ที่กระเพาะอาหารหลั่ง pepsinogen ซึ่งเป็นน้ำย่อยโปรตีนที่อยู่ในรูปที่ยังไม่สามารถทำงานได้ (inactive) น้ำย่อยดังกล่าวจะถูกกระตุ้นด้วยกรด HCl โดยทำการตัดส่วนสายเพปไทด์ส่วนเกินของ pepsinigen ที่ปกปิดบริเวณเร่งของเอนไซม์ ทำให้ pepsinogen เปลี่ยนเป็น pepsin และอยู่ในรูปที่สามารถทำงานได้ โดยการเข้าสลายของ pepsin จะเข้าย่อยโปรตีนตรงตำแหน่งที่มีพันธะเพปไทด์เฉพาะที่มีกรดอะมิโนกลุ่ม aromatic เช่น phenylalanine, tryptophan และ tyrosin เป็นต้น นอกจากนี้แล้ว pepsin ยังมีบทบาทต่อกระบวนการตกตะกอนของน้ำนม โดยเฉพาะในลูกสัตว์ จะมีน้ำย่อยที่เรียกว่า rennin หรือ chymosin ที่หลั่งจากกระเพาะอาหาร ที่ทำหน้าที่ช่วยเปลี่ยนเคซีน (casein) ซึ่งเป็นโปรตีนในน้ำนมแล้ว รวมกับแคลเซียมทำให้มีลักษณะเป็นลิ่ม ๆ หรือเป็นตะกอน จากนั้นจะถูก pepsin ย่อยต่อไป

สำหรับสัตว์เคี้ยวเอื้องพบว่าการย่อยสลายโปรตีนในกระเพาะจะแตกต่างกับสิ่งมีชีวิตอื่น โดยเฉพาะอย่างยิ่งการย่อยสลายโปรตีนในกระเพาะรูเมน โดยโปรตีนและสารประกอบไนโตรเจนที่ไม่ใช่โปรตีนในอาหาร เมื่อเข้าสู่ร่างกายทางปากจะถูกคลุกเคล้ากับน้ำลาย จากนั้นจึงถูกกลืนผ่านหลอดอาหารเพื่อส่งไปยังกระเพาะรูเมนเพื่อทำการย่อยต่อไป (ภาพที่ 7.3) โปรตีนประมาณ 70% จะถูกจุลินทรีย์พวก proteiolytic microorganism ซึ่งพบว่ามีมากกว่า 40% ของประชากรจุลินทรีย์ทั้งหมดในกระเพาะหมักที่สามารถย่อยสลายโปรตีนได้ โดยเฉพาะ

แบคทีเรียซึ่งมีจำนวนมากที่สุดคือ 10^{10-11}เซลล์/มล. แบคทีเรียที่ย่อยโปรตีน (proteolytic bacteria) ได้แก่ พวก *Bacterroides spp., Butyrivibrio spp.* และ *Selenomonasspp.* แบคทีเรียกลุ่มนี้จะผลิตเอนไซม์ protease เพื่อย่อยโปรตีน และสารประกอบไนโตรเจนโดยขบวนการไฮโดรไลซีส (hydrolysis) ส่วนโปรโตซัวที่ย่อยสลายโปรตีน ได้แก่ Entodinium และ Eudiplodinium เป็นต้น (เมธา, 2533) ในของเหลวจากกระเพาะหมักซึ่งจะเข้าย่อยสลายด้วยเอนไซม์ protenase ที่ผิวเซลล์โดยจะย่อยโปรตีนที่ละลายง่ายก่อน ผลผลิตจากการย่อยจะได้เพปไทด์และกรดอะมิโน จากนั้นจะถูกนำเข้าสู่เซลล์เพื่อ deamination ได้แกนคาร์บอน (carbon skeleton) หรือ กรดอินทรีย์ และแอมโมเนีย โดยบางส่วนที่เหลือใช้จะถูกปลดปล่อยออกมา ส่วนโปรตีนที่เหลืออีกประมาณ 30% จะสามารถหลีกเลี่ยงการย่อยสลายและไหลผ่านไปยังลำไส้เล็ก (Wallace et al., 1999) มีหลายรายงานพบว่า จุลินทรีย์ใช้แอมโมเนียที่ได้จากการย่อยสลายโปรตีนแท้และไนโตรเจนที่ไม่ใช่โปรตีนแท้ เป็นแหล่งไนโตรเจนประมาณ 80% ที่เหลืออีก 20% จำเป็นต้องได้รับจากกรดอะมิโน (Griswold et al., 2003) จากนั้นจะนำแอมโมเนียไปรวมกับกรดคีโต (keto acid) ที่ได้จากการย่อยสลายคาร์โบไฮเดรต เช่น เยื่อใย แป้งและน้ำตาล เพื่อนำไปสังเคราะห์จุลินทรีย์โปรตีน ซึ่งต่อมาจะเป็นแหล่งโปรตีนที่สำคัญที่สุดของสัตว์เคี้ยวเอื้อง โดยพบว่าโปรตีนประมาณ 70% ที่สัตว์ได้รับคือ จุลินทรีย์โปรตีนซึ่งมีความสมดุลของกรดอะมิโนสูง นอกจากนี้ α– keto acid อาจถูกย่อยสลายต่อไปเพื่อใช้สร้างสารประกอบอื่นๆ หรือเป็นแหล่งพลังงาน เช่น acetic butyric, iso – butyric และ iso – valeric เป็นต้น อย่างไรก็ตามจากการศึกษาพบว่าผลผลิตจุลินทรีย์โปรตีนอาจลดลงได้เนื่องจากโปรโตซัวกินแบคทีเรีย (NRC, 2001)

ขั้นตอนในการย่อยสลายโปรตีน และสารประกอบไนโตรเจนในอาหารโดยเอนไซม์จากจุลินทรีย์สามารถแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอน คือ

1. การไฮโดรไลซีส (hydrolysis) เกิดขึ้นจากเอนไซม์ที่ผลิตจากจุลินทรีย์เข้าย่อยโปรตีนตรงรอยต่อของพันธะเพปไทด์ ได้ผลผลิตเป็นเพปไทด์และกรดอะมิโน ขบวนการ hydrolysis เป็นขบวนการที่เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง เริ่มจากการเปลี่ยนโปรตีนที่อยู่ในรูปที่ไม่ละลาย (insoluble protein) เป็นโปรตีนที่อยู่ในรูปละลายได้ (soluble protein) จากนั้นโปรตีนที่ละลายได้จะถูกย่อยโดยเอนไซม์ตรงตำแหน่งของพันธะเพปไทด์ เอนไซม์ที่ใช้อาจเป็นเอนไซม์ที่ย่อยภายในโครงสร้าง (endoproteinase) หรือย่อยจากภายนอกโครงสร้าง (exoproteinase) ของโปรตีนได้ผลผลิตเป็นเพปไทด์และกรดอะมิโนชนิดต่างๆ กรดอะมิโนอิสระจะถูกดูดซึมผ่านผนังกระเพาะรูเมนเข้าเส้นเลือดไปตับเพื่อใช้ประโยชน์ต่อไป



ภาพที่ 7.3 เมแทบอลิซึมของโปรตีนและไนโตรเจนในกระเพาะรูเมน

ที่มา: McDonald et al. (2011)

2. ขั้นตอนการสลายตัวของกรดอะมิโน เพื่อดึงกลุ่มอะมิโนออกจากกรดอะมิโนตามขบวนการ deamination ได้ผลผลิตคือ แอมโมเนีย และกรดอินทรีย์ เป็นต้น กรดอะมิโนบางส่วนอาจถูกเปลี่ยนเป็นกรดไขมันสายสั้น ๆ (short chain fatty acid) ซึ่งอาจถูกใช้ไปในการสังเคราะห์เซลล์ของแบคทีเรียโดยตรง หรือถูกดูดซึมผ่านผนังกระเพาะรูเมนไปใช้ประโยชน์ ส่วนแอมโมเนียที่เกิดขึ้นในกระเพาะรูเมนและอยู่ในสภาพที่ละลายน้ำ

ได้ (solubleammonia) อาจถูกแบคทีเรียดึงไนโตรเจนที่เป็นองค์ประกอบของโปรตีนออกไป สังเคราะห์เป็นโปรตีนในเซลล์ของแบคทีเรียได้ โดยเฉพาะเมื่อมีแหล่งคาร์โบไฮเดรตอย่างเพียงพอในกระเพาะรูเมน เนื่องจากจุลินทรีย์ต้องการแหล่งพลังงานในการสังเคราะห์โปรตีน ปริมาณแอมโมเนียที่ผลิตได้ในกระเพาะรูเมน หากมีปริมาณมากเกินกว่าความต้องการของในการสังเคราะห์โปรตีนของจุลินทรีย์ จะถูกดูดซึมผ่านผนังกระเพาะรูเมนเข้าสู่ระบบเลือดไปสู่ตับ (portal vein) ที่เซลล์ของตับแอมโมเนียจะถูกเปลี่ยนเป็นยูเรียต่อไป ยูเรียที่สังเคราะห์ได้ที่เซลล์ตับส่วนใหญ่จะถูกขับออกจากร่างกายทางปัสสาวะ ยูเรียบางส่วนจะถูกดูดซึมผ่านผนังกระเพาะรูเมนเข้ากระแสเลือดโดยขบวนการแพร่ (diffusion) บางส่วนของยูเรียจะถูกเก็บสะสมไว้ที่ต่อมน้ำลาย และกลับเข้าสู่กระเพาะรูเมน เพื่อทำหน้าที่ในการควบคุมความเป็นกรดเป็นด่างหรือค่า pHในกระเพาะรูเมนต่อไป การดูดซึมยูเรียผ่านผนังกระเพาะรูเมนเพื่อเข้าสูกระแสเลือดจะเกิดขึ้นเร็วหรือช้าขึ้นกับค่า pH ในกระเพาะรูเมน ในสภาพ pH เป็นกลาง อัตราการดูดซึมแอมโมเนียผ่านผนังกระเพาะรูเมนจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งอาจมีผลให้สัตว์แสดงอาการผิดปกติหรือถึงตายได้ เนื่องจากความเป็นพิษของแอมโมเนียในเลือด ในทางตรงกันข้ามหาก pH ของกระเพาะรูเมนต่ำ หรือมีฤทธิ์เป็นกรด เนื่องจากสาเหตุใดก็ตาม ปริมาณการดูดซึมแอมโมเนียผ่านผนังกระเพาะรูเมนจะลดน้อยลงด้วย

แบคทีเรีย และโปรโตซัวมีวิธีการที่แตกต่างกันไปในการย่อยสลายโปรตีน ให้ได้ เป็นกรดอินทรีย์ คาร์บอนไดออกไซด์ แอมโมเนีย และน้ำ สำหรับแบคทีเรียขบวนการ hydrolysis จะเกิดขึ้นภายนอกเซลล์ เนื่องเกิดจากแบคทีเรียหลั่งเอนไซม์ออกมาจากเซลล์ เพื่อย่อยโปรตีนให้เป็นเพปไทด์สายสั้น ๆ และกรดอะมิโนชนิดต่าง ๆ จากนั้นแบคทีเรียจึงนำผลผลิตที่ได้จากการ hydrolysis เข้าไปภายในเซลล์ เพื่อสังเคราะห์เป็นโปรตีนภายในเซลล์ ส่วนเพปไทด์จะถูก hydrolysis ต่อไปได้เป็นกรดอะมิโน กรดอะมิโนบางส่วนจะถูกสังเคราะห์เป็นโปรตีนในเซลล์ของแบคทีเรีย กรดอะมิโนบางส่วนจะถูกย่อยต่อไปโดยผ่านขบวนการดึงกลุ่มอะมิโนออกได้ผลผลิตเป็นกรดไขมันระเหยง่าย แอมโมเนีย คาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สมีเทน โดยผลผลิตต่าง ๆ ดังกล่าวจะถูกขับออกจากเซลล์แบคทีเรียต่อไป

สำหรับพวกโปรโตซัวการย่อยโปรตีนและขบวนการต่าง ๆ จะเกิดขึ้นภายในเซลล์ทั้งหมด เนื่องจากลักษณะการกินอาหารของโปรโตซัวจะใช้วิธีการใช้ตัวเองห่อหุ้มชิ้นอาหารเอาไว้ (engulfment) นอกจากชิ้นอาหารที่อยู่ในกระเพาะรูเมนแล้วแบคทีเรียบางชนิดก็เป็นอาหารของโปรโตซัวเช่นกัน ชิ้นอาหารที่ถูกกินเข้าไปในเซลล์ของโปรโตซัวจะถูกย่อยโดยผ่านขบวนการ hydrolysis ได้กรดอะมิโน ซึ่งจะถูกสร้างเป็นโปรตีนภายในเซลล์ บางส่วนของ

กรดอะมิโนและสารอื่นจะถูกขับออกภายนอกเซลล์ ปริมาณการสังเคราะห์โปรตีนหรือการเพิ่มปริมาณประชากรของจุลินทรีย์ในกระเพาะรูเมนจะเกิดขึ้นมากน้อยเพียงใด ขึ้นกับชนิดของอาหารที่สัตว์ได้รับว่ามีปริมาณโปรตีนที่ย่อยสารได้ง่าย (degradable intake protein, DIP) และคาร์โบไฮเดรตที่ย่อยง่าย (ready available carbohydrate, RAC) มากน้อยเพียงใด

เมแทบอลิซึมของลิปิดในกระเพาะอาหาร

โดยทั่วไปแล้วลิพิดจะไม่ถูกย่อยในกระเพาะอาหาร เพราะที่กระเพาะอาหารมีเอนไซม์สำหรับย่อยลิพิดในปริมาณที่น้อยและสภาพ pH ในกระเพาะอาหารไม่เอื้อต่อการทำงานของเอนไซม์ (McDonald et al., 2011) อย่างไรก็ตาม การย่อยไขมันในสัตว์เคี้ยวเอื้องจะแตกต่างจากสัตว์ไม่เคี้ยวเอื้อง เนื่องจากอาหารที่มีไขมันจะถูกย่อยครั้งแรกที่กระเพาะรูเมนโดยเอนไซม์จากจุลินทรีย์ และสามารถใช้ประโยชน์จากไขมันในอาหารได้ทันที หลังจากที่อาหารไขมันเข้าสู่กระเพาะรูเมนโดยแบคทีเรียกลุ่มที่ใช้ลิพิดเป็นอาหาร (lipolytic bacteria) และโปรโตซัวบางชนิดจะเปลี่ยนลิพิดเป็นสารประกอบอื่นๆ เช่น กรดไขมันชนิดต่างๆ และกลีเซอรอล โดยมีขบวนการทางเคมีที่สำคัญ 3 กระบวนการได้แก่

1. ขบวนการไฮโดรไลซีส (hydrolysis) เกิดขึ้นทันทีโดยแบคทีเรียที่ใช้ลิพิดเป็นอาหาร ทำให้เกิดกรดไขมันอิสระ รวมถึงกรดไขมันที่ระเหยง่ายชนิดต่างๆ โดยแบคทีเรียจะหลั่งเอนไซม์ออกมาย่อยลิพิดจากพืช (กาแลคโตไลปิด ฟอสโฟไลปิด และไตรกลีเซอไรด์) ทำให้แตกตัวเป็นน้ำตาล กาแลคโตส กลีเซอรอล และกรดไขมันชนิดต่างๆ กลีเซอรอลและกาแลคโตจะถูกหมักต่อไปได้เป็นกรดไขมันที่ระเหยง่าย เช่น กรดอะซิติก และกรดโพรพิโอนิก กรดไขมันที่ระเหยง่าย และกรดไขมันอิสระชนิดต่างๆ สามารถจะถูกดูดซึมผ่านผนังกระเพาะรูเมนไปใช้ประโยชน์ต่อไปได้ โดยกรดอะซิติกจะถูกเปลี่ยนเป็นอะซิติลโคเอนไซม์เอโดยรวมตัวกับโคเอนไซม์เอ(coenzyme A) จากนั้นจะเข้าสู่วัฏจักรเครบส์เพื่อทำให้ได้มาซึ่งพลังงานในรูป ATP ต่อไป ส่วนกรดโพรพิโอนิกจะถูกเปลี่ยนไปเป็นน้ำตาลกลูโคส และกลีเซอรอล บางส่วนของกรดไขมันอิสระสามารถถูกแบคทีเรียนำไปสร้างเป็นลิพิดในเซลล์ได้ สำหรับขบวนการ hydrolysis ส่วนใหญ่จะเป็นขบวนการที่เกิดขึ้นเฉพาะเซลล์ของแบคทีเรียเท่านั้น และลิพิดจากพืชจะเกิดขบวนการ hydrolysis ในกระเพาะรูเมนได้ดีกว่าลิพิดจากสัตว์

2. ขบวนการไฮโดรจีเนชั่น (hydrogenation) เป็นขั้นตอนที่เกิดขึ้นได้ทั้งในเซลล์แบคทีเรียและโปรโตซัว หากไม่มีโปรโตซัวในกระเพาะรูเมนขบวนการดังกล่าวจะเกิดขึ้นได้น้อยมาก ขบวนการไฮโดรจีเนชั่น เป็นขบวนการเติมไฮโดรเจนไอออนให้กับกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวหรือกรด

ไขมันที่มีพันธะคู่ที่เกิดขึ้นในกระเพาะรูเมน โดยไฮโดรเจนไอออนที่ใช้เป็นไฮโดรเจนไอออนที่เกิดจากขบวนการหมักอาหารในกระเพาะรูเมน ซึ่งนับเป็นการลดปริมาณไฮโดรเจนไอออนที่เกิดขึ้นและเป็นการปรับสภาพแวดล้อมให้เหมาะสมแก่การเจริญของจุลินทรีย์วิธีหนึ่ง ผลจากการเติมไฮโดรเจนไอออนแก่พันธะคู่ของกรดไขมัน ทำให้กรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวถูกเปลี่ยนเป็นกรดไขมันที่อิ่มตัวมากขึ้น วิธีนี้จัดเป็นวิธีสังเคราะห์กรดไขมันที่อิ่มตัววิธีหนึ่ง กรดไขมันที่อิ่มตัวที่พบมากในกระเพาะรูเมนคือกรดสเตียริก (stearic acid) เนื่องจากอาหารที่กินส่วนใหญ่เป็นกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวพวกกรดโอเลอิก (olelic acid) และกรดไลโนเลอิก (linoleic acid) ปริมาณกรดสเตรียริกในกระเพาะรูเมนจะมากหรือน้อยขึ้นกับชนิดของอาหารที่สัตว์กิน ถ้าสัตว์ได้รับอาหารข้นสูงหรือมีเมล็ดธัญพืชสูงขบวนการนี้จะลดลง และขบวนการไฮโดรจีเนชั่นที่เกิดขึ้นในกระเพาะรูเมนมักเป็นขบวนการที่เกิดขึ้นอย่างไม่สมบูรณ์ จึงยังคงพบกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวในกระเพาะรูเมนได้ด้วย

3. ขบวนการไอโซเมอไรเซชั่น (isomerization) เป็นขบวนการที่ต่อจากขั้นตอนการไฮโดรจีเนชั่น โดยพันธะคู่ของกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัวที่เป็นแบบซีส (cis) จะถูกเปลี่ยนเป็นแบบทรานส์ (trans) ทำให้กรดไขมันที่มีพันธะคู่แบบท trans ซึ่งผ่านการไฮโดรจีเนชั่นแล้ว ถูกดูดซึมผ่านผนังกระเพาะรูเมนและผนังลำไส้เล็ก เพื่อนำไปสร้างเป็นไขมันในร่างกาย ไขมันที่ได้จึงมีสภาพเป็นของแข็งเนื่องจากมีจุดหลอมเหลวสูงขึ้น ในสัตว์กระเพาะเดี่ยวไม่เกิดขบวนการไอโซเมอไรส์เซชั่นไขมันที่นำมาสร้างผลผลิตจึงเป็นแบบ cis ไขมันในสุกรจึงมีลักษณะเหลวกว่าไขมันในโค

เมแทบอลิซึมของคาร์โบไฮเดรตในลำไส้เล็ก

การย่อยคาร์โบไฮเดรตในลำไส้เล็กโดยทั่วไปนั้น จะอาศัยเอนไซม์จากตับอ่อน โดยแป้งประกอบด้วย amylase (กลูโคสต่อกันด้วย α–1,4 glucosidic) และ amylopectin (กลูโคสต่อกันด้วย α–1,4 และ 1,6 glucosidic) เอนไซม์ที่มีบทบาทสำคัญ คือ α–amylase จะทำหน้าที่ในการย่อยสลายแป้งและไกลโคเจน ซึ่งจะสามารถทำการย่อยสลายเฉพาะพันธะ α–1,4 glucosidic ได้ผลผลิตสุดท้ายหลายชนิด ได้แก่ น้ำตาลมอลโตส (กลูโคส 2 โมเลกุล ที่ต่อกันด้วยพันธะ α–1,4) ไอโซมอลโตส (กลูโคส 2 โมเลกุล ที่ต่อกันด้วยพันธะ α–1,6) มอลโทไตรโอส (กลูโคส 3 โมเลกุล ที่ต่อกันด้วยพันธะ α–1,4) และ dextrin (กลูโคสที่ต่อกันด้วยพันธะ α–1,4 และ α–1,6) จากนั้นผลผลิตดังกล่าวจะถูกย่อยต่อด้วยเอนไซม์ที่สร้างจากเยื่อบุของ

ลำไส้เล็ก เช่น α–glucosidase, maltase, α–dextrinase เป็นต้น ทำให้ได้ผลผลิตเป็นโมโนแซคคาไรด์ ได้แก่ กลูโคส รองลงมาคือกาแลกโตส และฟรักโตส ตามลำดับ

ในสัตว์เคี้ยวเอื้องนั้น คาร์โบไฮเดรตที่ผ่านส่วนกระเพาะแท้เข้าสู่ลำไส้เล็กมีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ คาร์โบไฮเดรตที่เป็นส่วนประกอบของอาหารที่ไม่ได้ถูกย่อยโดยจุลินทรีย์ในกระเพาะรูเมนทั้งคาร์โบไฮเดรตที่เป็นโครงสร้างของพืช และคาร์โบไฮเดรตที่ไม่ได้เป็นโครงสร้างของพืช คาร์โบไฮเดรตในโครงสร้างของจุลินทรีย์ (แบคทีเรียและโปรโตซัวที่สามารถสังเคราะห์โพลลี่เพปไทด์ที่ประกอบด้วย α–glucan ที่เป็นส่วนประกอบของแป้ง) นอกจากนี้ยังมีน้ำตาลชนิดต่าง ๆ เช่น กลูโคส กาเลคโตส แมนโนส และไรโบสที่ถูกสังเคราะห์ในกระเพาะรูเมน สัดส่วนของคาร์โบไฮเดรตที่เป็นโครงสร้างและไม่เป็นโครงสร้างที่มาจากอาหาร รวมถึงสัดส่วนของคาร์โบไฮเดรตที่เป็นส่วนโครงสร้างของจุลินทรีย์ที่ผ่านเข้ามาในส่วนลำไส้เล็ก จะมีปริมาณมากน้อยเท่าใดขึ้นกับปริมาณและชนิดของอาหารที่สัตว์ได้รับ รวมถึงอัตราการย่อยอาหารของจุลินทรีย์แต่ละชนิดด้วย

สัตว์เคี้ยวเอื้องที่กินอาหารปกติ ในกลุ่มของคาร์โบไฮเดรตที่ได้ไม่เป็นโครงสร้างจะถูกจุลินทรีย์ในกระเพาะรูเมนใช้เป็นแหล่งพลังงานจนหมด อย่างไรก็ดีการให้อาหารอย่างเต็มที่อาจมีคาร์โบไฮเดรตหลงเหลือมาที่ลำไส้ได้ ส่วนของแป้งที่เข้ามาในลำไส้ส่วนใหญ่จะถูกย่อยหมดก่อนที่อาหารจะเคลื่อนตัวผ่านส่วนของลำไส้เล็กตอนปลาย (ileum) คาร์โบไฮเดรตเมื่อเคลื่อนตัวเข้าสู่ลำไส้เล็ก เซลล์ที่ผนังลำไส้เล็กและเซลล์ของตับอ่อนจะผลิต และหลั่งเอนไซม์ที่สำคัญที่การย่อยเฉพาะคาร์โบไฮเดรตในส่วนที่ไม่เป็นโครงสร้างเท่านั้น แต่กลุ่มคาร์โบไฮเดรตที่เป็นโครงสร้าง เช่น เซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสไม่สามารถถูกย่อยได้ในลำไส้เล็กได้ คาร์โบไฮเดรตที่เป็นโครงสร้างจึงผ่านเข้าไปในลำไส้ใหญ่และถูกย่อยโดยอาศัยเอนไซม์จากจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ที่ลำไส้ใหญ่ โดยเฉพาะที่ส่วนของไส้ติ่ง (caecum) ผลผลิตที่ได้จากการย่อยจะคล้ายกับผลผลิตที่เกิดขึ้นในกระเพาะรูเมน เช่น กรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก และกรดบิวทิริก เป็นต้น โดยสัดส่วนของกรดไขมันระเหยได้แต่ละชนิดจะแตกต่างกันไป ขึ้นกับชนิดหรือประเภทของคาร์โบไฮเดรตที่ผ่านเข้าไปในลำไส้ใหญ่ ถ้ามีคาร์โบไฮเดรตที่ไม่เป็นโครงสร้างมากสัดส่วนของกรดโพรพิโอนิกจะสูง ปริมาณการย่อยคาร์โบไฮเดรตที่เป็นโครงสร้างของพืชจะมากหรือน้อยขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ เช่น อายุของพืช ปริมาณของอาหารหยาบและอาหารข้นที่กิน หรือการแปรรูปอาหารที่กิน เป็นต้น

น้ำตาลกลูโคสซึ่งเป็นผลผลิตจากการย่อยแป้งและน้ำตาล โดยเอนไซม์จากลำไส้เล็กและตับอ่อน สามารถดูดซึมผ่านผนังลำไส้เพื่อไปใช้ประโยชน์ต่อร่างกายได้โดยตรง นอกจาก

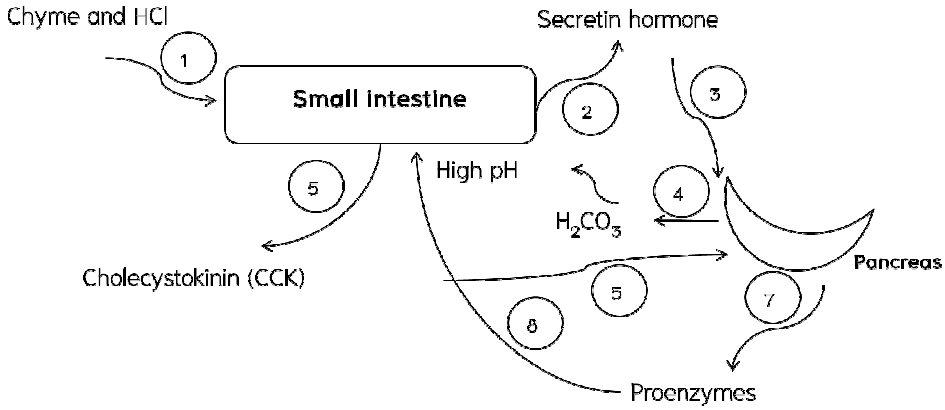
จะพบกลูโคสที่เป็นผลผลิตจากการย่อยแป้งและน้ำตาลในลำไส้เล็กแล้ว ยังพบว่ามีกรดไขมันระเหยง่ายที่ผลิตจากจุลินทรีย์บางชนิดที่อาศัยอยู่บริเวณส่วนปลายของลำไส้เล็กที่ต่อกับลำไส้ใหญ่ด้วย โดยจุลินทรีย์สามารถใช้แป้งที่ไม่ได้ถูกย่อยโดยเอนไซม์จากลำไส้เล็ก และตับอ่อน และสังเคราะห์เป็นกรดไขมันระเหยง่ายได้ เนื่องจากเอนไซม์ชนิดต่าง ๆ ที่ผลิตจากลำไส้เล็กและตับอ่อน มีคุณสมบัติและประสิทธิภาพในการย่อยคาร์โบไฮเดรตแตกต่างกันไป โดยจะทำงานอย่างมีประสิทธิภาพเมื่ออยู่ในสภาพที่เหมาะสมเท่านั้น เช่น เอนไซม์อะไมเลสจากตับอ่อนจะย่อยแป้งได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อสภาพแวดล้อมมีความเป็นกรด-ด่างประมาณ 6.9 ส่วนเอนไซม์มอลเตสจะทำงานได้ดีเมื่อสภาพ pH อยู่ระหว่าง 6.8–7.0 การที่เอนไซม์แต่ละชนิดทำงานอย่างมีประสิทธิภาพแตกต่างกันไป จึงมีผลให้คาร์โบไฮเดรตที่ผ่านเข้ามาในลำไส้เล็กไม่สามารถถูกย่อยได้ทั้งหมด

โมโนแซคคาไรด์ที่ได้จากการย่อยสลายที่ลำไส้เล็ก ส่วนใหญ่จะเป็น D–glucose, และมี D–galactose, D–fructose บ้าง โดยน้ำตาลกลุ่มนี้จะมีการดูดซึมที่ต้องอาศัยตัวพาซึ่งเป็นโปรตีนที่จำเพาะที่เยื่อหุ้มเซลล์ และจำเป็นต้องใช้พลังงาน (active transport) และต้องการ Na^+ ร่วม โดยกลูโคสและ Na^+ จะจับกับโปรตีนที่เยื่อหุ้มเซลล์ ทำให้กลูโคสและ Na^+ เข้าสู่เซลล์พร้อมกัน เมื่อเขาไปแล้วกลูโคสจะถูกลำเลียงต่อไป ส่วน Na^+ จะถูกขับออกนอกเซลล์โดยแลกเปลี่ยนกับการนำ K^+ เข้าสู่เซลล์ โดยปฏิกิริยา Na^+– K^+ ATPase ซึ่งต้องใช้พลังงานจากการสลาย ATP หลังจากดูดซึมแล้วโมโนแซคคาไรด์จะถูกนำเข้าสู่เส้นเลือดฝอย เพื่อลำเลียงไปยังตับและเซลล์ต่างๆ ทั่วร่างกาย

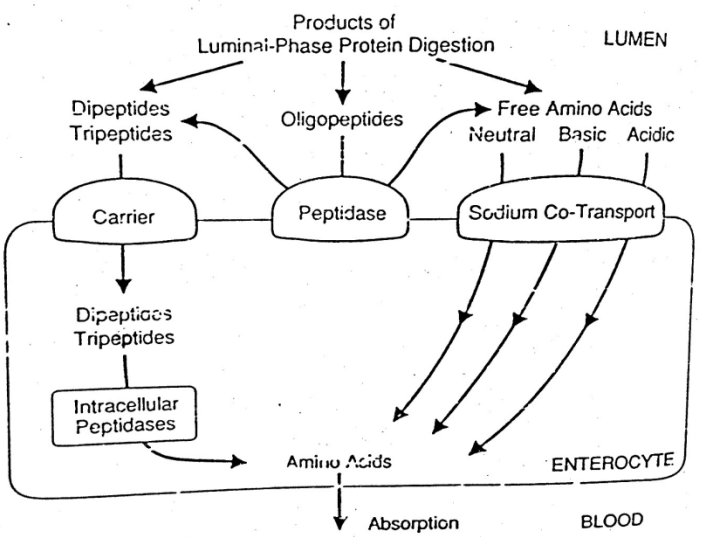
เมแทบอลิซึมของโปรตีนในลำไส้เล็ก

ลำไส้เล็กส่วนต้น (duodenum) จะมี HCl ปะปนไหลออกมาจากส่วนของกระเพาะ ซึ่งจะเป็นปัจจัยกระตุ้นให้เกิดการหลั่งเอนไซม์จากตับอ่อน โดยเมื่อมีกรดหลั่งมาถึงลำไส้ส่วนต้น จะมีฮอร์โมน secretin ผลิตออกมาจากเนื้อเยื่อของลำไส้เล็ก จากนั้น secretin จะเข้าสู่กระแสเลือดไปที่ตับอ่อน เพื่อกระตุ้นให้เซลล์ตับอ่อนมีการหลั่ง bicarbonate ไอออน มาที่ลำไส้เพื่อรักษาเพิ่มระดับค่า pH จากนั้นจะมีการหลั่งฮอร์โมน cholecystokinin (CCK) ออกมาจากลำไส้เล็กออกมา เมื่อมีเพปไทด์หรืออาหารส่วนที่ย่อยแล้วมีขนาดเล็กไหลผ่านมายังลำไส้เล็กส่วนต้น CCK จะไปกระตุ้นการกลั่งเอนไซม์ต่างๆ จากตับอ่อนและส่วนผนังของลำไส้เล็ก ซึ่งเอนไซม์อาจจะอยู่ทั้งในรูปที่พร้อมทำงานและยังไม่พร้อมทำงานก็ได้ เช่น trypsinogen, chymotripsinigen, procarboxypeptidases A และ B, protease, α–amylase และ nuclease

เป็นต้น และจะถูกกระตุ้นให้อยู่ในรูปทำงานได้ เช่น ใช้เอนไซม์ enterokinase กระตุ้น trypsinogen ให้อยู่ในรูปสามารถทำงานได้ คือ trypsin จากนั้น trypsin จะมีหน้าที่ในการกระตุ้นเอนไซม์ตัวอื่นๆ ให้อยู่ในรูปที่ทำงานได้ต่อไป ภาพที่ 7.4 แสดงกลไกการย่อยสลายโปรตีนที่ลำไส้เล็ก โดยเรียงลำดับเหตุการณ์ด้วยหมายเลข 1–8



ภาพที่ 7.4 กลไกการย่อยสลายโปรตีนในลำไส้เล็ก



ภาพที่ 7.5 กลไกการดูดซึมโปรตีนในลำไส้เล็กและออกสู่กระแสเลือด

ผลจากการย่อยอาหารโปรตีนในลำไส้เล็ก จะได้ผลผลิตสุดท้ายคือ กรดอะมิโนอิสระและเพปไทด์ขนาดเล็ก สำหรับกรดอะมิโนจะดูดซึมแบบ sodium co–transport และ co–transport เป็นแบบ specific transport protein ได้แก่ acidic, basic และ neutral amino acids

ส่วนเพปไทด์สายสั้นๆ อาจอาศัยโปรตีนตัวพา (carrier protein) หรือ sodium co-transport เพื่อเป็นตัวพาให้ผ่านเข้าสู่เซลล์ลำไส้เล็กและเข้าสู่กระแสเลือดเพื่อดูดซึมไปใช้ประโยชน์ต่อไป แสดงดังภาพที่ 7.5

เมแทบอลิซึมของลิปิดในลำไส้เล็ก

ลิพิดในอาหารซึ่งส่วนใหญ่อยู่ในรูปไตรเอซิลกลีเซอรอลจะถูกย่อยที่ลำไส้เล็ก โดยมีน้ำดี (bile salts) เป็น emulsifier หรือตัวที่ทำให้เกิดอิมัลชัน น้ำดีจัดเป็นสาร detergent ชนิดหนึ่ง เพราะสามารถทำให้เกิดอิมัลชันได้ โดยน้ำดีมีองค์ประกอบหลักเป็นกรดน้ำดี (bile acids) เมื่อกระบวนการย่อยอาหารเริ่มต้นขึ้น ฮอร์โมนโคลีซิสโทคินิน (cholecystokinin หรือ pancreozymin) และฮอร์โมนซีครีทิน (secretin) จะกระตุ้นให้ถุงน้ำดีบีบตัวและขับน้ำดีออกมาตามท่อน้ำดีสู่ลำไส้เล็กส่วนต้นเพื่อคลุกเคล้ากับอาหาร โดยกรดน้ำดีจะรวมตัวกับลิพิดเกิดเป็นโครงสร้างไมเซลล์ผสม (mixed micelle) ขึ้น ซึ่งลิพิดที่ไม่มีขั้ว เช่น ไตรเอซิลกลีเซอรอลจะรวมกันอยู่ภายในส่วนไม่มีขั้วของไมเซลล์ เมื่อเสร็จสิ้นการทำงานของน้ำดีแล้ว ประมาณ 95% ของน้ำดีจะถูกนำกลับไปใช้ใหม่ ส่วนอีกประมาณ 5% จะสูญเสียไปกับอุจจาระ โดยตับจะต้องสังเคราะห์น้ำดีขึ้นเพื่อทดแทนส่วนที่สูญเสียไป ประมาณวันละ 200-500 มิลลิกรัม

ในสัตว์เคี้ยวเอื้องนั้น ไขมันที่มีคาร์บอนต่ำกว่า 12 ตัว จะถูกดูดซึมผ่านผนังกระเพาะรูเมน ส่วนไขมันที่มีคาร์บอนมากกว่า 12 ตัว ไม่มีการดูดซึมที่กระเพาะรูเมน ประกอบกับจุลินทรีย์ใช้ประโยชน์จากกรดไขมันเหล่านี้ได้น้อย โดยกรดไขมันเหล่านี้จะผ่านมาถึงลำไส้เล็กซึ่ง ส่วนมากจะเป็นกรดสเตียริคและไขมันในตัวจุลินทรีย์ ไขมันดังกล่าวจะถูกดูดซึมส่วนกลางของลำไส้เล็กส่วนเจจูนัม (jejunum) และลำไส้เล็กส่วนปลาย (Ileum)

เอนไซม์สำหรับย่อยลิพิดที่ลำไส้เล็กสามารถจำแนกได้เป็น 3 กลุ่มใหญ่ๆ คือ 1) เอนไซม์ pancreatic lipase (triacylglycerol lipase) เป็นเอนไซม์ที่หลั่งจากตับอ่อน ทำหน้าที่ย่อยสลายไตรเอซิลกลีเซอรอล ได้ผลิตภัณฑ์ (products) เป็น กรดไขมันอิสระ (free fatty acids), 1,2-diacylglycerols และ 2-acylglycerols 2) เอนไซม์ phospholipase เป็นเอนไซม์ที่หลั่งจากตับอ่อน ทำหน้าที่ย่อยสลายฟอสโฟลิพิด จะได้ผลิตภัณฑ์เป็น lysophospholipid และ 3) เอนไซม์ cholesteryl ester hydrolase ทำหน้าที่ย่อยสลายพันธะเอสเทอร์ที่เชื่อมระหว่าง คอเลสเตอรอลกับกรดไขมันในคอเลสเตอริลเอสเทอร์ (cholesteryl ester) ทำให้ได้ผลิตภัณฑ์เป็นคอเลสเตอรอลกับกรดไขมันอิสระ

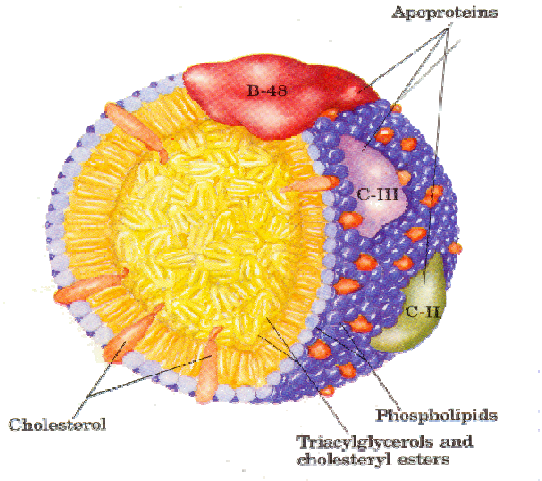
การดูดซึมลิพิดที่ลำไส้เล็ก

ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อยสลายลิพิด เช่น กรดไขมันอิสระ monoacylglycerol และ diacylglycerol จะถูกดูดซึมเข้าสู่เซลล์เยื่อบุผนังลำไส้เล็ก (intestinal mucosa) ซึ่งกระบวนการดูดซึมนี้ต้องการน้ำดีเป็นตัวช่วยทำให้ผลิตภัณฑ์เหล่านี้สามารถผ่านชั้น aqueous boundary layer ที่ผนังลำไส้เล็กได้ และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซึมวิตามินที่ละลายในลิพิด (lipid-soluble vitamins) อีกด้วย (Klaus, 1994) ตัวอย่างเช่น วิตามินเอ วิตามินดี วิตามินอี และวิตามินเค เป็นต้น กรดไขมันที่ถูกดูดซึมเข้าสู่เซลล์เยื่อบุผนังลำไส้เล็ก จะจับกับโปรตีนในไซโทพลาซึม (cytoplasm) ที่มีชื่อว่า Intestinal fatty acid binding protein (I-FABP) ซึ่งจะช่วยทำให้กรดไขมันละลายน้ำได้ดีขึ้นและป้องกันเซลล์ไม่ให้ได้รับอันตรายจาก detergent-like effects ของกรดไขมันอิสระ

การดูดซึมกรดไขมันที่ย่อยได้จากลำไส้เล็กจะเป็นแบบ passive diffusion โดยจะมีการดูดซึมสูงที่สุดที่ลำไส้ส่วนกลาง ส่วนกรดน้ำดี จะถูกดูดซึมที่บริเวณลำไส้เล็กส่วนปลายและมีการหมุนเวียนนำกลับไปใช้ใหม่ได้ ในการดูดซึมกรดไขมันขนาดกลางและสายสั้นๆ รวมทั้ง กรดไขมันที่ระเหยได้ง่าย จะสามารถดูดซึมได้โดยตรงอย่างรวดเร็วจากลำไส้เข้าสู่เส้นเลือดดำที่เข้าสู่ตับและในการดูดซึมกรดไขมันนี้ มีความต้องการโซเดียมเป็นตัวพาในกระบวนการ active transport

การขนส่งลิพิดไปยังส่วนต่างๆ ของร่างกาย

กรดไขมันอิสระ (free fatty acids), monoacylglycerols และ diacylglycerols ที่ถูกดูดซึมเข้าสู่เซลล์เยื่อบุผนังลำไส้เล็กจะกลับมารวมตัวกันใหม่ได้เป็นไตรเอซิลกลีเซอรอล จากนั้นไตรเอซิลกลีเซอรอลจะรวมตัวกับคอเลสเตอริลเอสเทอร์ ฟอสโฟลิพิด และโปรตีน ได้เป็นไลโพโปรตีน (lipoprotein) ชนิดหนึ่ง เรียกว่า ไคโลไมครอน (chylomicron) (ภาพที่ 7.6) โดยไคโลไมครอนนี้ เป็นไลโพโปรตีนที่มีบทบาทสำคัญในการขนส่งไตรเอซิลกลีเซอรอลที่ได้รับจากอาหาร ไปยังอวัยวะหรือส่วนต่างๆ ของร่างกาย สำหรับหน้าที่ของไลโพโปรตีนชนิดอื่นจะได้กล่าวถึงต่อไป ไลโพโปรตีนทุกชนิดจะมีลักษณะเป็นรูปทรงกลม (spherical particle) ประกอบด้วยลิพิดที่ไม่มีขั้วหรือไม่มีประจุ (neutral lipids) อยู่ด้านในของทรงกลม และมีฟอสโฟลิพิด คอเลสเตอรอล และโปรตีนอยู่บริเวณผิวด้านนอกของทรงกลม โดยจัดเรียงตัวให้บริเวณที่มีประจุหรือมีขั้วของโมเลกุลอยู่ทางด้านนอกของทรงกลม เพื่อทำให้ไลโพโปรตีนสามารถละลายน้ำได้ ซึ่งโปรตีนที่เป็นองค์ประกอบของไลโพโปรตีน จะเรียกว่า “apoprotein”



ภาพที่ 7.6 ส่วนประกอบโมเลกุลของไคโลไมครอน

ที่มา: Nelson and Cox (2000)

ไคโลไมครอนจะถูกปล่อยเข้าสู่ระบบน้ำเหลือง (lymph system) แล้วเข้าสู่กระแสเลือด (blood stream) เพื่อลำเลียงไปยังเนื้อเยื่อ (tissues) ต่างๆ ของร่างกายต่อไป ไคโลไมครอนจะเคลื่อนที่ไปสู่เนื้อเยื่อต่างๆ ตามกระแสเลือดที่ไปเลี้ยงเนื้อเยื่อนั้นๆ เช่น กล้ามเนื้อ (muscle) ตับ (liver) และเนื้อเยื่อไขมัน (adipose tissue) ซึ่งเส้นเลือดฝอย (capillary) ในเนื้อเยื่อเหล่านี้จะมีเอนไซม์ lipoprotein lipase สำหรับย่อยสลายไตรเอซิลกลีเซอรอลให้ได้กรดไขมันและกลีเซอรอล แล้วค่อยดูดซึมผ่านเข้าสู่เซลล์ของเนื้อเยื่อดังกล่าวต่อไป โดยเอนไซม์ lipoprotein lipase จะเกาะอยู่ที่ผนังเส้นเลือดฝอย และอยู่ในรูปที่ไม่ทำงานจนกว่าจะได้รับการกระตุ้นด้วยโปรตีนชนิด apoprotein C–II ซึ่งเป็นองค์ประกอบในโมเลกุลของไคโลไมครอนนั่นเอง

สำหรับกรดไขมันที่ซึมเข้าไปในเซลล์จะจับกับโปรตีน fatty acid binding protein (FABP) และถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของ fatty acyl–CoA ก่อนจะถูกนำเข้าสู่ไมโทคอนเดรีย เพื่อย่อยสลายต่อไป ส่วนกลีเซอรอลจะถูกเปลี่ยนเป็นสารตัวกลาง (intermediate) ในวิถีไกลโคลิซิส (glycolysis)

ไลโพโปรตีนชนิดอื่นนอกเหนือจากไคโลไมครอน จะเรียกชื่อตามระดับความหนาแน่น (density) ของโมเลกุล โดยไลโพโปรตีนแต่ละชนิดจะประกอบด้วย โปรตีน ฟอสโฟลิพิด ไตรเอซิลกลีเซอรอล และคอเลสเตอรอลในปริมาณที่แตกต่างกัน โดยเรียงลำดับไลโพโปรตีนที่มีความหนาแน่นจากน้อยไปมากเป็น (1) chylomicron, (2) very low–density lipoprotein (VLDL), (3) intermediate–density lipoprotein (IDL), (4) low–density lipoprotein (LDL) และ (5) high–

density lipoprotein (HDL) ไคโลไมครอนมีความหนาแน่นน้อยที่สุด แต่มีขนาดใหญ่ที่สุด และมีไตรเอซิลกลีเซอรอลเป็นองค์ประกอบมากที่สุด ส่วนไลโพโปรตีนชนิด VLDL จะมีไตรเอซิลกลีเซอรอลเป็นองค์ประกอบมากเป็นอันดับสองรองจากไคโลไมครอน โดย VLDL จะทำหน้าที่ในการขนส่งไตรเอซิลกลีเซอรอลจากตับไปยังเนื้อเยื่อไขมัน สำหรับ LDL และ HDL จะทำหน้าที่ในการขนส่งคอเลสเตอรอล โดย LDL ทำหน้าที่ขนส่งคอเลสเตอรอลที่สังเคราะห์จากตับไปยังเนื้อเยื่อต่างๆ ส่วน HDL ทำหน้าที่ขนส่งคอเลสเตอรอลส่วนเกินจากเนื้อเยื่อต่างๆ กลับมาสู่ตับ ส่วนไลโพโปรตีนชนิด IDL นั้นจะทำหน้าที่เป็นตัวตั้งต้นสำหรับการสังเคราะห์ไลโพโปรตีนชนิด LDL สำหรับ apoproteins ชนิดต่างๆ ซึ่งเป็นองค์ประกอบในโมเลกุลของไลโพโปรตีน จะมีบทบาทและหน้าที่แตกต่างกัน

เมแทบอลิซึมของโภชนะในลำไส้ใหญ่

ในลำไส้ใหญ่มีการย่อยไขมันเกิดขึ้นน้อย เนื่องจากส่วนใหญ่ไขมันจะถูกย่อยโดยเอนไซม์ในลำไส้เล็ก จุลินทรีย์ในลำไส้สามารถหมักย่อยไขมันได้ผลผลิตเช่นเดียวกับการหมักย่อยในกระเพาะรูเมน แต่มีการนำไปใช้ประโยชน์ได้น้อย ส่วนอาหารที่ไม่ถูกย่อยหรือย่อยไม่ได้ เช่น เซลลูโลส ก็จะถูกส่งไปยังลำไส้ใหญ่ ส่วนต้นของลำไส้ใหญ่มีไส้เล็ก ๆ ปลายตัน เรียกว่า ไส้ติ่ง ไส้ติ่งของคนไม่ได้ทำหน้าที่อะไรแต่ก็อาจเกิดการอักเสบถึงกับต้องผ่าตัดไส้ติ่งออกไป ซึ่งอาจเกิดจากการอาหารผ่านช่องเปิดลงไป หรือเส้นเลือดที่ไปเลี้ยงไส้ติ่งเกิดการอุดตัน อาหารที่เหลือจากการย่อยและดูดซึมแล้วจะผ่านเข้าสู่ลำไส้ใหญ่ ลำไส้ใหญ่มีแบคทีเรียอยู่จำนวนมาก ซึ่งจะใช้ประโยชน์จากกากอาหารนี้ นอกจากนั้นแบคทีเรียบางชนิดยังสังเคราะห์ วิตามินบางชนิด เช่น วิตามินเค วิตามินบี 12 เซลล์ที่บุผนังลำไส้ใหญ่ สามารถดูดน้ำ แร่ธาตุ วิตามิน และกลูโคสจากกากอาหารเข้ากระแสเลือด ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นน้ำ จึงทำให้กากอาหารข้นขึ้น จนเป็นก้อนกากอาหารจะผ่านไปถึงไส้ตรง ท้ายสุดของไส้ตรงเป็นกล้ามเนื้อหูรูดแข็งแรงมาก มีลักษณะเป็นวงรอบปากทวารหนักทำหน้าที่บีบตัวในการขับถ่าย และผนังภายในลำไส้ใหญ่จะขับเมือกออกมาหล่อลื่นก้อนอาหาร

สำหรับคาร์โบไฮเดรตที่ไม่ได้ถูกย่อยในกระเพาะรูเมนและในลำไส้เล็ก จะถูกส่งผ่านเข้าไปในลำไส้ใหญ่ ซึ่งเป็นส่วนสุดท้ายของระบบทางเดินอาหารที่มีความจุประมาณ 20% ของกระเพาะรูเมน อาหารจะพักอยู่ในลำไส้ใหญ่ประมาณ 10–29 ชั่วโมง การย่อยคาร์โบไฮเดรตที่ไม่ใช่โครงสร้างและคาร์โบไฮเดรตที่ไม่เป็นโครงสร้างที่ผ่านเข้ามาในลำไส้ใหญ่ จะใช้เอนไซม์จากจุลินทรีย์ประเภทไม่ต้องการอากาศ แป้งที่ส่งผ่านเข้ามาในส่วนของลำไส้จะเป็นอาหาร

แหล่งพลังงานที่ดีของจุลินทรีย์ ทำให้ประชากรของจุลินทรีย์มีการเพิ่มปริมาณ และผลิตกรดไขมันระเหยง่ายที่สัตว์สามารถดูดซึมไปใช้ประโยชน์ได้บ้าง แต่จำนวนจุลินทรีย์ที่เพิ่มปริมาณขึ้นนี้สัตว์ไม่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้เช่นเดียวกันกับจุลินทรีย์ที่เกิดขึ้นในกระเพาะรูเมน จุลินทรีย์เหล่านี้จึงถูกขับถ่ายออกมาพร้อมกับอาหารหรือโภชนะต่าง ๆ ที่ไม่ได้ย่อยและผลผลิตอื่นในรูปของมูล

สรุป

กระบวนการเมแทบอลิซึม คือการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีต่างๆ ของโภชนะ โดยอาศัยเอนไซม์ที่มีความจำเพาะต่อประเภทของโภชนะเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สามารถจำแนกเป็น 2 แบบ คือ แคแทบอลิซึม เป็นปฏิกิริยาที่ทาให้เกิดการสลายของสารโมเลกุลใหญ่ ให้เป็นสารโมเลกุลเล็ก และแอแนบอลิซึม เป็นปฏิกิริยาซึ่งสร้างสารโมเลกุลใหญ่ที่ร่างกายต้องการใช้ จากสารโมเลกุลเล็กที่เป็นผลิตภัณฑ์ของแคแทบอลิซึม

กระบวนการเมแทบอลิซึมในกระเพาะอาหารของโภชนะต่างๆ ในสิ่งมีชีวิตต่างชนิดกันจะมีกระบวนการเมแทบอลิซึมที่แตกต่างกัน ซึ่งโดยทั่วไปแล้วสัตว์กระเพาะเดี่ยวหรือสัตว์ไม่เคี้ยวเอื้อง โปรตีนจะถูกย่อยในกระเพาะอาหารได้ โดยอาศัยการทำงานของเอนไซม์และฮอร์โมนเพื่อให้ได้เป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กลง เช่นเพปไทด์ หรือกรดอะมิโน แต่คาร์โบไฮเดรตและไขมันจะไม่สามารถย่อยสลายได้เนื่องจากในกระเพาะอาหารไม่เอื้อต่อการทำงานของเอนไซม์ amylase หรือ lipase ส่วนในกลุ่มสัตว์เคี้ยวเอื้องนั้น เมแทบอลิซึมของโภชนะโปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมันจะเกิดขึ้นในกระเพาะรูเมน และจะอาศัยการทำงานของจุลินทรีย์เพื่อหลั่งเอนไซม์ออกมาย่อยสลายโภชนะต่างๆ เป็นหลัก และได้ผลผลิตสุดท้าย เช่น แอมโมเนีย กรดอะมิโน ไขมัน และกรดไขมันที่ระเหยได้ง่าย เป็นต้น

หลังจากนั้นโภชนะต่างๆ ที่ไหลผ่านมาจากกระเพาะจะถูกย่อยสลายที่ลำไส้เล็กส่วนต้น และจะมีการทำงานของเอนไซม์ ฮอร์โมน และน้ำดี เพื่อมาช่วยในการย่อยสลายโภชนะให้มีอนุภาคเล็กที่สุด และจะนำเข้าสู่ระบบการดูดซึมที่ลำไส้ส่วนกลาง และขนส่งไปยังอวัยวะเป้าหมายต่อไป สำหรับการย่อสลายที่ลำไส้ใหญ่นั้น จะเกิดค่อนข้างน้อยมาก โดยอวัยวะส่วนนี้จะมีบทบาทที่เกี่ยวข้องกับการดูดซึมโภชนะและแร่ธาตุกลับสู่ร่างกาย แต่ในส่วนที่ไม่สามารถย่อยสลายได้อีก จะมีการขับถ่ายออกนอกร่างกายต่อไป

คำถามท้ายบท

1. จงอธิบายถึงกระบวนการเมแทบอลิซึมของโปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมันที่เกิดขึ้นในกระเพาะอาหาร
2. จงอธิบายถึงกระบวนการเมแทบอลิซึมของโปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมันที่เกิดขึ้นในลำไส้
3. จงเปรียบเทียบความแตกต่างกระบวนการย่อยและดูดซึมโปรตีนในกระเพาะของสัตว์เคี้ยวเอื้องและสัตว์ไม่เคี้ยวเอื้อง
4. ปัจจัยใดที่มีบทบาทต่อการย่อยสลายอาหารในกระเพาะรูเมนสัตว์เคี้ยวเอื้อง

เอกสารอ้างอิง

เมธา วรรณพัฒน์. 2533. โภชนศาสตรสัตว์เคี้ยวเอื้อง. ทพฯกรุงเ ,ฟันนี่ พลับลิชชิ่ง จำกัด.

บุญล้อม ชีวะอิสระกุล. 2546. ชีวเคมีทางสัตวศาสตร์. ปรับปรุงครั้งที่ 2. ห้างหุ้นส่วนจำกัด ธนบรรณการพิมพ์, เชียงใหม่. จำนวน 202 หน้า.

Griswold, K.E., G.A. Apgar, J. Bouton, and J.L. Firkin. 2003. Effects of urea infusion and ruminal degradeble protein concentration on microbial growth, digestibility and fermentation in continuose culture. J. Anim. Sci. 81:329–336.

Klaus, U. 1994. Comparative Animal Biochemistry. Springer– Verlag, Berlin Heidelberg, Germany. 782 pp.

McDonald, P., R. A. Edwards, J. F. D. Greenhalgh, C. A. Morgan, L. A. Sinclair, R. G. Wilkinson. 2011. Animal Nutrition (7th ed). Pearson, Harlow, England. 692 pp

National Research Council. 2001. Nutrient Requirements of Dairy Cattle, 7th edn,Washington, DC, National Academy Press.

Nelson, D.L. and M.M. Cox 2000. Lehninger Principles of Biochemistry. 3rd edition. p 601.

Riis, P.M. 1983. Dynamic biochemistry of animal production. Elsevier Science Publisher B.V., The Netherlands. 501 pp.

Wallace, R.J., C. Atasoglu, and C.J. Newbold. 1999. Role of peptides in rumen microbial metabolism:Review. Asian–Aust J. Anim. Sic. 12: 139–149.