

## บทที่ 4

## โภชนศาสตร์สัตว์เคี้ยวเอื้อง

## Ruminant nutrition

เป็นศาสตร์ที่ศึกษาถึงอาหาร องค์ประกอบทางเคมีและการใช้ประโยชน์ของโภชนะต่างๆ ในอาหารตลอดจนกระบวนการเมแทบอลิซึมของโภชนะต่างๆ ที่เกิดขึ้นในกระเพาะหมัก (รูเมน) และภายในเซลล์ร่างกายของสัตว์เคี้ยวเอื้อง ซึ่งสัตว์เคี้ยวเอื้องมีวิวัฒนาการและพัฒนาการที่มีความเฉพาะตัวในการที่มีระบบการหมักของพืชอาหารสัตว์ในกระเพาะหมักโดยอาศัยการทำงานร่วมกันของเชื้อจุลินทรีย์ได้แก่แบคทีเรีย โปรโตซัวและเชื้อรา ซึ่งจุลินทรีย์จะผลิตผลผลิตสุดท้ายที่สำคัญให้กับสัตว์เคี้ยวเอื้องคือ กรดไขมันที่ระเหยได้ (volatile fatty acids, VFAs) โปรตีนจากจุลินทรีย์ (microbial protein, MP) และวิตามินบีรวม

สมดุลของนิเวศวิทยาภายในกระเพาะหมัก มีสภาพที่มีลักษณะเฉพาะหลายอย่างเพื่อให้เหมาะสมต่อการเจริญของประชากรจุลินทรีย์และ มีความแตกต่างจากกระบวนการหมักแบบไร้ออกซิเจนอื่นๆ เช่น สามารถรักษาระดับอุณหภูมิได้คงที่โดยกระบวนการ homeothermic metabolism จากตัวสัตว์เอง กระบวนการหมักที่เกิดขึ้นได้ผลผลิตเป็นกรดไขมันที่ระเหยได้ง่าย (volatile fatty acids; VFA) และมีระดับความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมอยู่ในช่วง 6.5-7.0 และมีอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 39-40 องศาเซลเซียส (Van Soest, 1982) จุลินทรีย์ในกระเพาะหมักมีทั้ง obligate anaerobes คือไม่สามารถอยู่ได้ในสภาวะที่มีออกซิเจนและ facultative anaerobes คืออยู่ได้ในสภาวะที่มีออกซิเจนอยู่บ้าง แต่การมีระดับของออกซิเจนมากเกินไปอาจส่งผลกระทบต่อจุลินทรีย์เหล่านี้ได้ (เมธา, 2533) จุลินทรีย์ที่พบในกระเพาะหมักมีหลากหลายชนิด แต่จุลินทรีย์เหล่านี้มีคุณสมบัติคือ ต้องดำรงชีวิตอยู่ในสภาวะที่ไร้ออกซิเจน และมีการสร้างผลผลิตสุดท้าย (end products) ชนิดใดชนิดหนึ่งซึ่งพบในกระเพาะหมักเท่านั้น

## ปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการย่อยได้ของอาหารในรูเมน (Factors affecting ruminal digestion)

1.อิทธิพลของ Rumen pH ถ้าระดับ pH ในรูเมนลดต่ำลงเนื่องจากโคได้รับอาหารชั้นสูง อัตราการย่อยได้ของอาหารเยื่อใยหรืออาหารหยาบจะลดลง เพราะจุลินทรีย์กลุ่มที่ย่อยเยื่อใยจะทำงานได้ดีที่ระดับ pH ประมาณ 6-7 และยิ่งเหมาะสำหรับจุลินทรีย์ที่ย่อยโปรตีนได้แอมโมเนียด้วย ดังนั้นจึงทำให้การทำงานของจุลินทรีย์ได้สูงสุด ในกรณีที่ระดับ pH ในรูเมนต่ำกว่า 5.5 จะมีผลลดการทำงานและเป็นอันตรายต่อจุลินทรีย์ได้ ต้องให้สัตว์กินสาร buffers เช่น  $\text{NaHCO}_3$  โดยการเติมในอาหารชั้น จะทำให้ pH สูงขึ้นได้และทำให้เพิ่มการทำงานของจุลินทรีย์ในการหมักย่อยของอาหารหยาบ

2.อิทธิพลของอัตราการไหลผ่านของ digesta จากกระเพาะรูเมน (effect of passage rate) ระดับการกินได้ของอาหารจะมีผลต่ออัตราการไหลผ่านของอาหารออกจาก reticulo-rumen คือ เมื่อระดับการกินได้เพิ่มขึ้น ปริมาณของเหลวรูเมน digesta และอัตราการไหลผ่านจะเพิ่มขึ้น ส่วนการบีบตัวของรูเมนจะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลผ่านของ digesta ด้วย ดังนั้น อัตราการไหลผ่านเพิ่มขึ้นจะทำให้การย่อยได้ของอาหารในรูเมนลดลง เพราะ digesta มีระยะเวลาอยู่ในรูเมนน้อย จุลินทรีย์มีระยะเวลาในการเข้าย่อยสลายอาหารน้อยลง แต่การไหลผ่านที่เร็วจะทำให้สัตว์กินอาหารได้มากขึ้น

3.ระดับการกินได้ ระดับการกินได้เพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการไหลผ่านเร็วขึ้น การย่อยได้จึงน้อยลง

4.ปริมาณเยื่อใยในอาหาร อาหารที่มีสารเยื่อใยและ/หรือลิกนินสูงจะทำให้การย่อยได้ลดลง

5. ชนิดสัตว์ โคสามารถย่อยอาหารหยาบได้ดีกว่าแกะ แต่แกะย่อยอาหารชั้นได้ดีกว่า และแกะย่อยอาหารหยาบได้ดีกว่าโค

6. โภชนะที่สำคัญ (nutrient) สำหรับจุลินทรีย์ อาหารโปรตีนต่ำจะมีผลต่อการย่อยได้ของพลังงานและทำให้การกินได้ลดลง ถ้าทำการเสริมอาหารที่มีโปรตีนสูง หรือ NPN เช่น urea กับสัตว์ที่กินฟางเป็นอาหารหลัก การย่อยได้ของฟางข้าวจะเพิ่มขึ้น การขาดแร่ธาตุที่สำคัญ เช่น Mg, P, S, Fe, Co, Mn และ Zn จะทำให้การย่อยได้ของอาหารในรูเมนลดลง

7. ความเข้มข้นของแอมโมเนียในรูเมน จุลินทรีย์ในรูเมนมีความต้องการไนโตรเจนในปริมาณมากเพื่อการสังเคราะห์โปรตีนของตัวเอง โดยไนโตรเจนที่จุลินทรีย์จะนำไปใช้ประโยชน์ได้จะอยู่ในรูป  $\text{NH}_3\text{-N}$  ที่อยู่ของเหลวรูเมน ระดับความเข้มข้นที่เหมาะสมทำให้จุลินทรีย์ทำงานได้เต็มที่ คือ 6-90  $\text{mgNH}_3\text{-N/L}$  และอัตราการไหลผ่านของ microbial protein จากรูเมนไปยัง abomasums สูงสุดเมื่อความเข้มข้นของแอมโมเนีย 90-200  $\text{mgNH}_3\text{-N/L}$  of rumen fluid

8. อุณหภูมิสภาพแวดล้อม (Thermal environment) โคจะรักษาระดับอุณหภูมิของร่างกายให้คงที่ ประมาณ 37 องศาเซลเซียส เมื่อสภาพแวดล้อมมีอุณหภูมิสูงขึ้น สัตว์จะพยายามลดปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นภายในร่างกาย โดยการลดการกินอาหารโดยเฉพาะอาหารพลังงาน เมื่อการกินอาหารลดลง การเคลื่อนไหวของสัตว์ของกระเพาะก็ลดลง

## 1. Fermentation and digestion of carbohydrate in Rumen

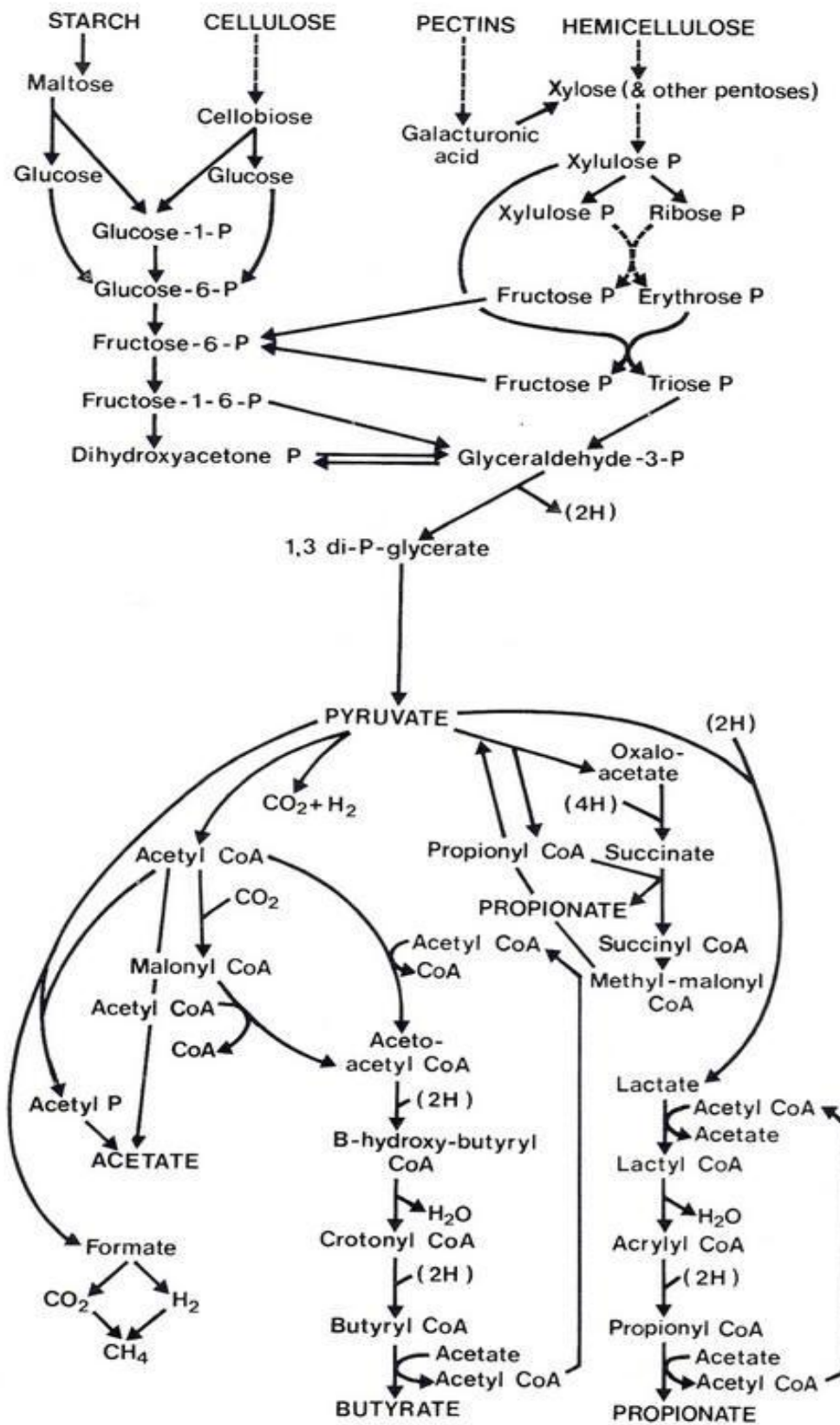
ในสัตว์เคี้ยวเอื้องคาร์โบไฮเดรตส่วนใหญ่ไม่ว่าจะเป็นประเภทโครงสร้างหรือประเภทแป้งและน้ำตาล จะถูกย่อยในรูเมนโดยจุลินทรีย์ได้เป็นกรดไขมันระเหยได้ (volatile fatty acids, VFA) ซึ่งส่วนใหญ่ได้แก่ กรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก และกรดบิวทีริก (acetic, propionic and butyric acids) กรดไขมันระเหยได้เหล่านี้จะถูกดูดซึมผ่านผนังรูเมนเพื่อเมแทบอลิซึมต่อไป โดยกลูโคส 1 โมล ถูกเปลี่ยนกรดโพรพิโอนิกได้ 2 โมล โดยไม่มีการสูญเสีย  $\text{CO}_2$  ส่วนการเปลี่ยนเป็นกรดอะซิติก หรือบิวทีริกนั้นจะได้ 2 และ 1 โมล ตามลำดับ โดยมีการสูญเสีย  $\text{CO}_2$  อย่างละ 2 อะตอม ซึ่ง  $\text{CO}_2$  ที่เกิดขึ้นบางส่วนอาจรวมตัวกับ  $\text{H}_2$  ได้เป็นแก๊สมีเทน แก๊สเหล่านี้ไม่มีประโยชน์ต่อตัวสัตว์จำเป็นต้องระบายออก มิฉะนั้นอาจเกิดอาการท้องอืด ซึ่งเป็นอันตรายได้

กระบวนการย่อยคาร์โบไฮเดรตส่วนใหญ่เกิดที่ กระเพาะส่วนหน้า และเกิดต่อเนื่องกันตลอดการหมัก (fermentation) ทำให้ไม่มีคาร์โบไฮเดรตที่ย่อยได้หลงเหลือไปสู่ลำไส้ เป็นผลให้สัตว์เคี้ยวเอื้องไม่ได้รับกลูโคสเพียงพอจากขบวนการย่อยคาร์โบไฮเดรต ซึ่งทำให้สัตว์เคี้ยวเอื้องต้องปรับเปลี่ยน metabolism ให้มีประสิทธิภาพในการสร้างและเก็บรักษา กลูโคสให้เพียงพอกับความต้องการของร่างกาย สัตว์เคี้ยวเอื้องได้กลูโคสจากกระบวนการ gluconeogenesis ซึ่งมี precursor ที่สำคัญคือ โพรพิโอเนต โดยโพรพิโอเนตจะถูกเปลี่ยนเป็น succinate แล้วเข้าสู่วัฏจักรเครบส์ได้เป็น oxaloacetate ซึ่งจะเปลี่ยนเป็นกลูโคส โดยกระบวนการ gluconeogenesis สำหรับ VFA ตัวอื่นๆ เช่น อะซิเตทและ บิวทีเรท สามารถเข้าสู่วัฏจักรเครบส์ได้ แต่เป็น long-chain fatty acids คือจะเข้าสู่เครบส์ในรูปแบบของ acetyl coA แต่เนื่องจาก acetyl coA ไม่สามารถเปลี่ยนเป็น oxaloacetate หรือ กลูโคสได้ ดังนั้นในสัตว์เคี้ยวเอื้อง จาก VFA จึงมีเพียงโพรพิโอเนตเท่านั้นที่สามารถผลิตกลูโคสได้จำนวนมาก โพรพิโอเนตเกือบทั้งหมดที่ถูกดูดซึมที่รูเมนจะถูกดึงไปสู่ตับผ่านทาง portal vein โดยไม่เข้าสู่ระบบหมุนเวียน ซึ่งแสดงว่าโพรพิโอเนตทั้งหมดถูกนำไปสร้างเป็นกลูโคสที่ตับ นอกจากอาศัย gluconeogenesis แล้วสัตว์เคี้ยวเอื้องต้องอาศัยกระบวนการเก็บรักษากลูโคส (conserving glucose) เพื่อให้มีกลูโคสเพียงพอกับการใช้ในร่างกาย เช่นใน

การสร้าง fatty acid (ในสัตว์อื่นๆ เช่น primates, rats, dogs สร้างที่ตับ) สัตว์เคี้ยวเอื้องจะสร้างกรดไขมันที่ adipose tissue เท่านั้น ไม่สร้างที่ตับ และก็ใช้อะซิเตทไม่ใช่กลูโคส ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่มีมากที่สุดที่สัตว์เคี้ยวเอื้องมาเป็น substrate กลูโคสจะถูกนำมาใช้เพียงกรณีเดียว คือ สร้าง glycerol เพื่อใช้ในการสร้าง triglyceride ในสัตว์ที่กำลังให้นม fatty acid ที่เป็น fat ในน้ำนมถูกสร้างจาก acetate หรือ ketone bodies โดยไม่ใช่ กลูโคส แต่นำไปสร้างเป็นน้ำตาลในนม

### การสลายคาร์โบไฮเดรตในรูเมนของสัตว์เคี้ยวเอื้อง

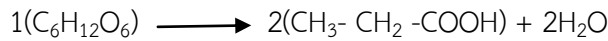
คาร์โบไฮเดรตเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญสำหรับจุลินทรีย์ในรูเมนและตัวสัตว์เอง คาร์โบไฮเดรตที่พบในพืชส่วนใหญ่ คือ พวกลูกประคบน้ำตาล (polysaccharide) ได้แก่ น้ำตาล แป้ง cellulose, hemicellulose , pectin และ lignin เป็นต้น เมื่อคาร์โบไฮเดรตเข้าสู่รูเมนจะถูกย่อย hydrolytic enzyme ของจุลินทรีย์ ในกรณีที่คาร์โบไฮเดรตที่ย่อยไม่ได้ จะอาศัยการที่แบคทีเรียติดกับผิวของพืชแล้วเอนไซม์จึงจะทำงานได้ ผลที่ได้คือ กลูโคส และ monosaccharide ต่างๆ ตลอดจน shortchain polysaccharide ซึ่งจะถูกล่อยออกมาสู่ของเหลวรอบๆ เซลล์ของแบคทีเรีย ผลผลิตเหล่านี้จะถูก metabolize ต่อไปโดย จุลินทรีย์ โดยสัตว์ที่เป็น host ไม่สามารถนำไปใช้ได้ กลูโคสและน้ำตาลต่างๆ จะถูกดูดซึมเข้าสู่เซลล์ของจุลินทรีย์แล้วเข้าสู่ glycolytic pathway โดยจากการกระบวนการนี้ กลูโคส 1 โมเลกุล จะได้ ไพรูเวท 2 โมเลกุล และไพรูเวทจะถูกเปลี่ยนต่อไปเป็น กรดไขมันระเหยได้ ดังแสดงในภาพที่ 4.1



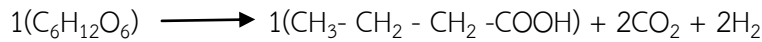
ภาพที่ 4.1 การหมักย่อยคาร์โบไฮเดรตชนิดต่างๆ โดยจุลินทรีย์ในรูเมนได้ผลิตเป็นกรดไขมันระเหยง่าย  
 ที่มา : <http://www.utafoundation.org/P&L/chapter3.htm>



Glucose acetate + carbondioxide + methane



Glucose propionate + น้ำ



Glucose butyrate + carbondioxide + ไฮโดรเจน

### การดูดซึมกรดไขมันระเหยได้

VFA ซึ่งเป็นผลผลิตจากขบวนการหมักของจุลินทรีย์ หากสะสมอยู่ในรูเมนจะทำให้กระบวนการหมักถูกยับยั้ง และ VFA ยังเป็น energy substrate ของร่างกายสัตว์ด้วย (supply 60-80% ของอาหารพลังงานแก่สัตว์เคี้ยวเอื้อง) ดังนั้นกลไกการดูดซึม VFA ในกระเพาะส่วนหน้าจึงเป็นสิ่งสำคัญ VFA เกือบทั้งหมดจะถูกดูดซึมที่กระเพาะส่วนหน้ามีเพียงเล็กน้อยที่หลุดลอดไปยังทางเดินอาหารส่วนถัดไป

ขบวนการดูดซึม VFA จะช่วยรักษาระดับ pH ในรูเมน โดยแยกเอากรดออกไปจาก ingesta ในขณะเดียวกัน  $\text{HCO}_3^-$  จะถูกปลดปล่อยออกมาสู่รูเมน โดยขบวนการนี้ด้วย

Epithelial cell ของรูเมนทำหน้าที่ดูดซึม VFA จะมีโครงสร้างต่างจาก absorptive epithelium ของท่อทางเดินอาหารส่วนอื่น โดยเป็น stratified squamous epithelium ประกอบด้วยเซลล์หลายชั้นมี maturity ลดหลั่นต่างกันไป ชั้นที่ลึกที่สุด (stratum basale) จะแบ่งตัวและเคลื่อนย้ายขึ้นไปสู่ผิวถัดไป (stratum spinosum) ซึ่งชั้นนี้จะเริ่มมี keratinization แล้วเจริญไปเป็น stratum granulosum ส่วนชั้นนอกสุดซึ่งเป็น keratinized layer เรียกว่า stratum corneum โดยเซลล์ชั้น stratum corneum และชั้น stratum granulosum จะเชื่อมต่อกัน (ทั้งระหว่างชั้นในและชั้นเดียวกัน) โดย tight junction ส่วนเซลล์ในชั้น stratum spinosum และ stratum basale จะเชื่อมต่อกันโดย intercellular channel (bridge) พบว่า VFA, electrolytes และน้ำจะถูกดูดซึมผ่านชั้น stratum corneum และผ่านจากเซลล์หนึ่ง ไปยังอีกเซลล์หนึ่ง โดยผ่าน intercellular bridge ไปสู่ชั้น stratum spinosum และ stratum basale และผ่านไปตาม intercellular space ไปยัง capillaries

กลไกการดูดซึม VFA เกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงของ pH ที่บริเวณ absorptive area เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงของ pH จะมีผลให้ VFA เปลี่ยนรูประหว่าง ionic form กับ free-acid form เนื่องจาก pKa ของ VFA ประมาณ 4.8 (ซึ่งต่ำกว่าค่า pH ปกติของรูเมน) ดังนั้นในภาวะปกติ VFA ส่วนใหญ่จะอยู่ในรูป ionic form อย่างไรก็ตาม Na-H exchange ของ epithelial cell จะมีผลลด pH ที่บริเวณ absorptive area เป็นผลให้ VFA ที่บริเวณนั้นเปลี่ยนจาก ionic form ไปเป็น free-acid form ซึ่งเซลล์เมมเบรนจะ permeable ต่อ VFA free acid form ทำให้ VFA ถูกดูดซึมเข้าสู่เซลล์ โดยอาศัย concentration gradient ระหว่าง lumen กับ เซลล์ของ epithelium นอกจากนี้คาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเกิดจากขบวนการหมักยังช่วยเสริมให้ VFA เปลี่ยนเป็น free-acid form ในขบวนการดูดซึมนั้นเมื่อ VFA 1 โมเลกุล ถูกดูดซึมเข้าไปในเซลล์ก็จะมี  $\text{HCO}_3^-$  ถูกปล่อยออกมาสู่ lumen ดังนั้นการดูดซึม VFA จึงช่วย buffer และรักษา pH ของรูเมน โดยเป็นการกำจัดกรดออกจากรูเมน และสร้าง base ภายในรูเมน VFA ทุกชนิดใช้กลไกเดียวกัน แต่เมื่อเข้าสู่ epithelial cell แล้วกลไกจะแตกต่างกันไป

Acetate บางส่วนจะถูก oxidized ภายในเซลล์ ส่วนที่เหลือจะถูกดูดซึมเข้าสู่กระแสเลือดในรูป acetate ตามเดิม

Propionate ส่วนมากถูกดูดซึมเข้าสู่กระแสเลือด มีส่วนน้อยถูกเปลี่ยนเป็น lactate ภายในเซลล์

Butyrate จะถูกเปลี่ยนเป็น beta-hydroxybutyrate ก่อนจะถูกดูดซึมเข้าสู่กระแสเลือด ซึ่ง beta-hydroxybutyrate นั้นเป็น ketone body ซึ่งในสัตว์พวกกระเพาะเคี้ยว นั้น ketone body มักเกิดจากการออกซิโดลีสของกรดไขมันสายยาว ในขณะที่สัตว์เคี้ยวเอื้องรูเมนเป็นแหล่งสำคัญที่สร้าง ketone body

Rumen epithelium จะ form papillae เพื่อเป็นการเพิ่ม absorptive surface area และ VFA โดยเฉพาะ โพรพิโอเนทและบิวทีเรท ช่วยกระตุ้น papillar growth จึงพบว่าในสัตว์ที่อดอยากหรือได้รับอาหารเฉพาะอาหารที่ย่อยยาก ทำให้การสร้าง VFA ไม่เพียงพอรูเมนจะมี papillae สั้นเตี้ย

### การใช้กรดอะซิติกเป็นแหล่งพลังงาน

การหมักย่อยคาร์โบไฮเดรตในรูเมนจะได้กรดอะซิติกเป็นหลัก (ประมาณ 60 % ) ซึ่งอะซิติกเป็นกรดไขมันระเหยได้ชนิดเดียวที่มี มากในกระแสเลือด โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อได้รับอาหารหยาบ ปริมาณสูง กรดนั้นนอกจากจะใช้ในการสังเคราะห์ไขมันแล้วยังใช้เป็นแหล่งพลังงานได้ด้วย โดยปฏิกิริยาขั้นแรก คือ การเปลี่ยนจากอะซิติก เป็นอะซิลโคเอ โดยใช้พลังงาน ATP จากนั้นอะซิลโคเอจะถูกออกซิโดลีสในวัฏจักรเครบส์ ได้ ATP 12 โมล แต่เนื่องจากตอนต้นได้ใช้ ATP ไปแล้ว 2 โมล จึงได้ 10 ATP ต่ออะซิติก 1 โมล นั่นคือ ได้ 20 โมล ต่อ กลูโคส 1 โมล

### การใช้กรดโพรพิโอนิกเป็นแหล่งพลังงาน

กรดโพรพิโอนิกถูกสร้างจากการย่อยสลายคาร์โบไฮเดรตในกระเพาะรูเมนมากพอสมควร (ประมาณ 25 %) โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อได้รับอาหารข้น (concentrate) ปริมาณสูง จะมีสัดส่วนของกรดนี้เพิ่มขึ้น ส่วนใหญ่กรดนี้จะถูกดูดซึมผ่านผนังรูเมนเข้าสู่สายเลือด ไปยังตับเพื่อเปลี่ยนเป็นกลูโคส โดยในขั้นแรกจะเปลี่ยนเป็นซักซินิลโคเอ (succinyl CoA) แล้วจึงเข้าวัฏจักรเครบส์เปลี่ยนเป็นมาเลท และฟอสโฟอินนอลไพรูเวต ตามลำดับ จากนั้นจึงย้อนวิถีไกลโคไลซิสเพื่อเปลี่ยนเป็นกลูโคส แล้วกลูโคสอาจถูกเผาผลาญต่อไปเพื่อให้ได้พลังงาน โดยโพรพิโอนิกจะให้พลังงานทั้งสิ้น 34 ATP หรือ 17 ATP ต่อ โพรพิโอเนท 1 โมล นอกจากนี้โพรพิโอเนทยังอาจสลายตัวโดยไม่ต้องเปลี่ยนไปเป็นกลูโคส แต่เปลี่ยนจากมาเลทเป็นฟอสโฟอินนอลไพรูเวต แล้วกลับลงมาเป็นไพรูเวต แล้วเปลี่ยนเป็นอะซิลโคเอเข้าวัฏจักรเครบส์ได้ ATP ทั้งสิ้น 18 โมลต่อ 1 โมลของโพรพิโอเนท

### การใช้กรดบิวทีริกเป็นแหล่งพลังงาน

กรดบิวทีริกที่เกิดขึ้นในกระเพาะรูเมนจะถูกเปลี่ยนเป็นเบต้า-ไฮดรอกซีบิวทีเรท ( $\beta$ -hydroxybutyrate) ในระหว่างที่ถูกดูดซึมผ่านผนังรูเมน แล้วเบต้า-ไฮดรอกซีบิวทีเรทจะเปลี่ยนต่อไป โดยเนื้อเยื่อต่างๆ โดยเฉพาะกล้ามเนื้อ ในที่สุดได้เป็นอะซิลโคเอ 2 โมล ซึ่งจะถูกเมแทบอลิซึมต่อไปในวัฏจักรเครบส์ ได้พลังงานทั้งสิ้น 25 ATP ต่อ 1 โมลของบิวทีริก นอกจากนี้อะซิโตอะซิเตทยังอาจเปลี่ยนเป็นอะซิโตอะซิลโคเอ โดยเอนไซม์ทรานสเฟอเรส (transferase) ซึ่งใช้ ATP เพียงโมลเดียว เพราะฉะนั้นจะได้ ATP ทั้งหมด 26 โมลต่อบิวทีเรท 1 โมล

จะเห็นว่าโพรพิโอเนทมีประสิทธิภาพในการให้พลังงานได้ดีที่สุดในขณะที่อะซิเตทมีประสิทธิภาพต่ำที่สุด

ตารางที่ 4.1 ประสิทธิภาพการใช้กรดไขมันระเหยได้ เป็นแหล่งพลังงาน

จากกลูโคส 1 โมลได้	ATP/ต่อโมลกรด	ATP/โมลกลูโคส	ประสิทธิภาพ* (%)

Acetate 2 mole	10	20	53
Propionate 2 mole	17 (18)	34 (36)	90
Butyrate 1 mole	25 (26)	25 (26)	66

\*คิดเทียบกับการเผาไหม้ของไฮโดรเจนในร่างกายได้พลังงาน 38 ATP

ที่มา : บุญล้อม (2546)

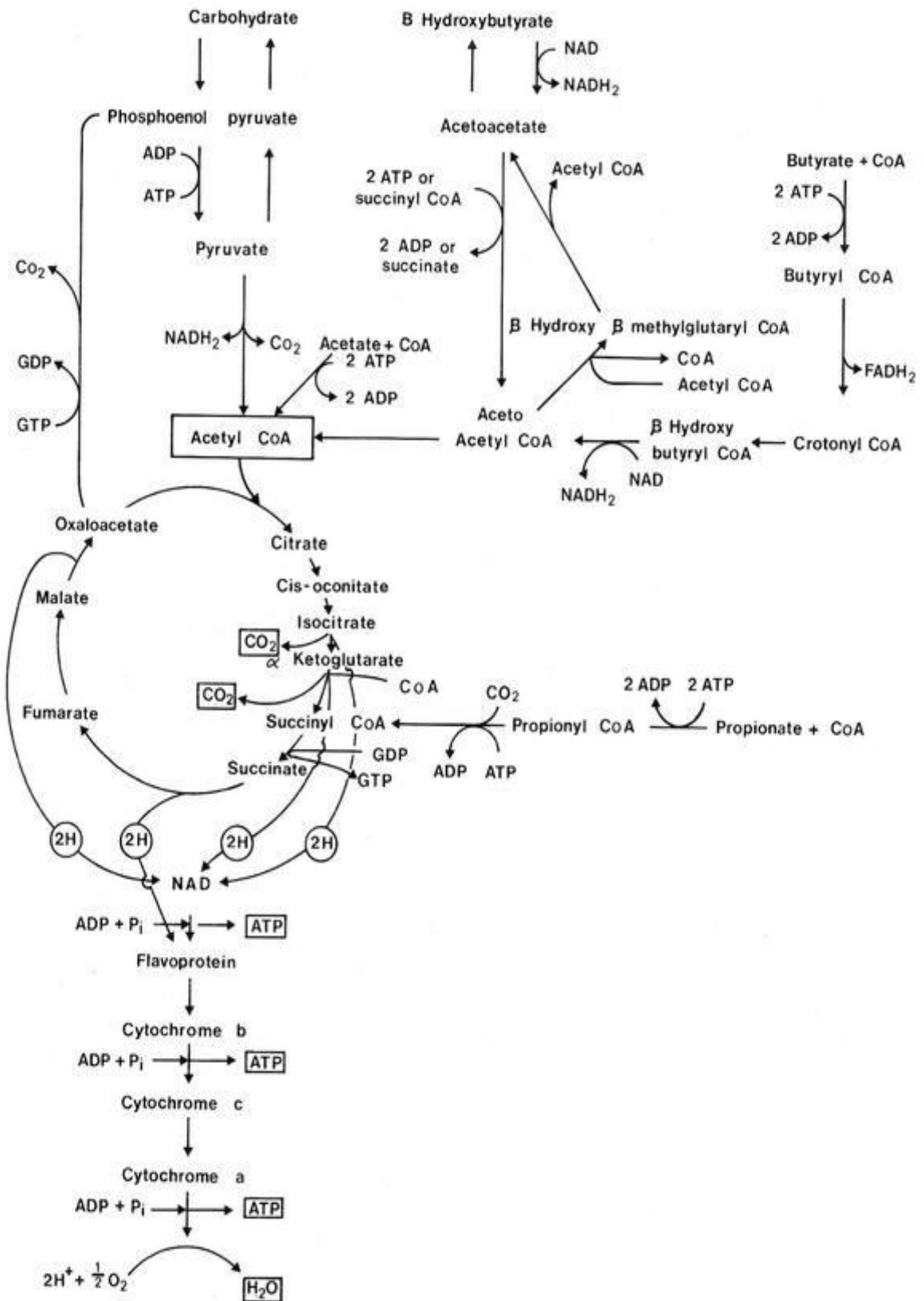
### ปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตกรดไขมันที่ระเหยได้

กรดอะซิติกจะผลิตได้สูงเมื่อสัตว์กินอาหารพืชหมัก พืชแก่ ที่มีสัดส่วนของอาหารหยาบสูงแต่ถ้ามีการบดหยาบจะทำให้สัดส่วนของอะซิติกลดลง การได้รับโปรตีนระดับสูงการผลิตกรดบิวทิริกจะเพิ่มขึ้น การอัดเม็ดธัญพืชด้วยความร้อน มีผลทำให้กรดโปรพิโอนิคผลิตสูงขึ้น

ตารางที่ 4.2 แสดงผลผลิตกรดไขมันที่ระเหยได้ในโคและแกะที่ได้รับอาหารต่าง ๆ ชนิดกัน

Animal	Die	Total VFA (mmole/l)	Individual VFA molarporportion			
			Acetat	Propion	Butyrate	Other
Cattle	Grass silage	108	74	17	7	3
Cattle	Long hay(40) + Concentrate(60)	96	61	18	13	8
	Pelleted hay(40) + Concentrate(60)	140	50	30	11	9
Sheep	Hay : Concentrate 100 : 0	97	66	22	9	3
	80 : 20	80	61	25	11	3
	60 : 40	87	61	23	13	2
	40 : 60	76	52	24	12	3

ที่มา : จลอง (2541)



ภาพที่ 4.2 แผนภาพการใช้กรดไขมันระเหยง่ายเป็นแหล่งพลังงาน



ที่มา : <http://www.utaoundation.org/P&L/chapter4.htm>

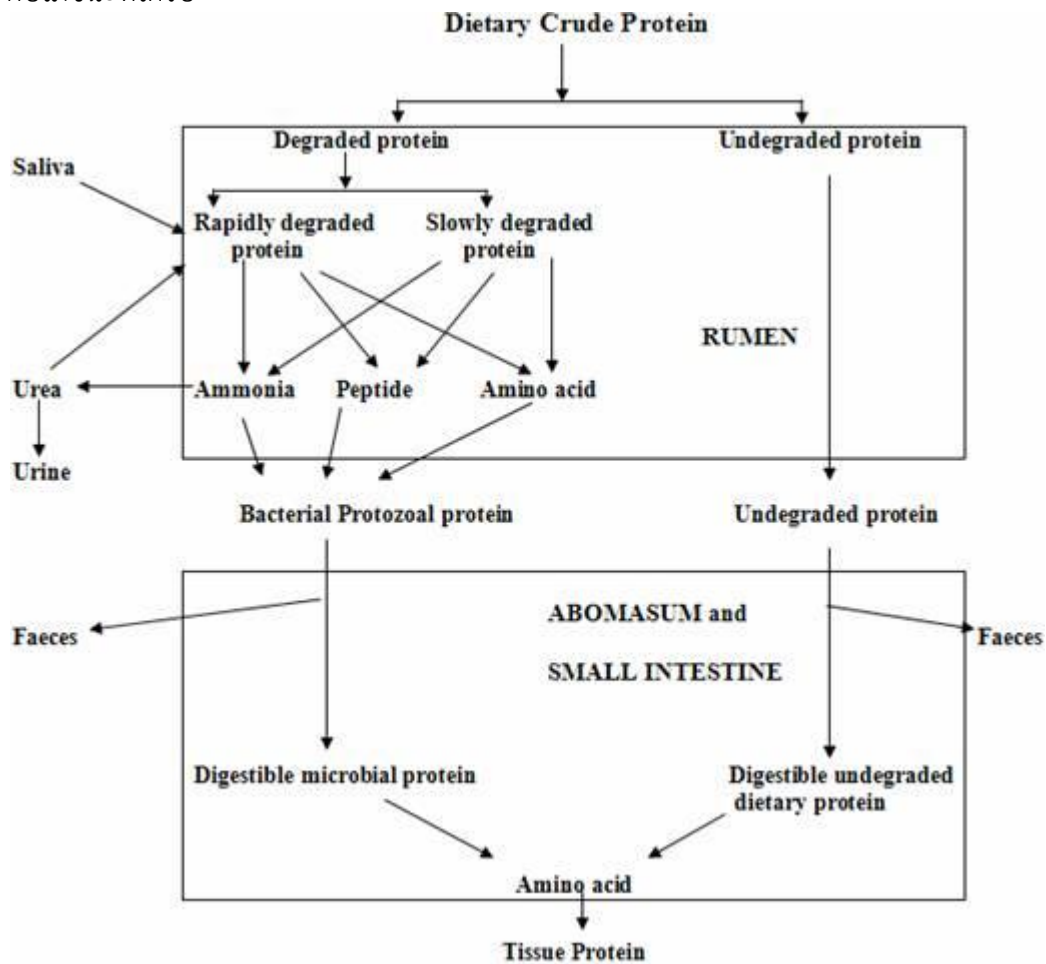
## 2. Fermentation and digestion of protein in rumen

เมื่ออาหารโปรตีนเข้าสู่รูเมนจะถูกย่อยโดย extracellular protease ของจุลินทรีย์ซึ่งจะเป็นพวก endopeptidase แบคทีเรียและโปรโตซัวจะทำหน้าที่เข้าย่อยสลายโปรตีน กิจกรรมของจุลินทรีย์นั้นแตกต่างกันไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอาหาร แต่อย่างไรก็ตาม pH ในรูเมนก็มีอิทธิพลมากกว่า ซึ่ง pH ที่เหมาะสมต่อการทำงานของจุลินทรีย์ในการย่อยสลายโปรตีน คือ 6-7 และผลของการย่อยจะได้ short-chain peptide ซึ่งจะถูกดูดซึมเข้าสู่เซลล์ของจุลินทรีย์ ภายในเซลล์พบว่าเปปไตท์จะถูก utilize ต่อเป็นกรดอะมิโน จากนั้นจะผลิตแอมโมเนียและกรดอินทรีย์ต่างๆ โดยขบวนการ deamination แล้วถูกนำไปใช้ต่อไป เช่นถูกนำไปสร้างเป็น microbial protein นำไปสร้างเป็นแอมโมเนีย แล้วไปสร้างเป็น VFA นำสร้างเป็นแอมโมเนีย แล้วนำแอมโมเนียมาเป็น substrate ในการสร้าง กรดอะมิโนและ microbial protein ต่อไป ทั้งนี้พบว่า 80% ของไนโตรเจนของจุลินทรีย์ถูกสังเคราะห์โดยการใช้แอมโมเนีย ส่วน 20% ใช้กรดอะมิโนโดยตรง และประมาณ 59% ของไนโตรเจนในอาหารจะถูกย่อยในรูเมน อย่างไรก็ตามปริมาณของไนโตรเจนที่ถูกย่อย 29% จะถูกใช้ประโยชน์ในรูปของกรดอะมิโน และ อีก 71% จะถูกเปลี่ยนให้เป็นแอมโมเนีย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะตามธรรมชาติของชนิดอาหารโปรตีนแต่ละชนิด

สำหรับ VFA ที่ได้นี้มีความสำคัญต่อ แบคทีเรียบางชนิด ที่ไม่สามารถสร้างโปรตีนได้จากกรดอะมิโน ที่ได้จากเปปไตน์นอกเซลล์ แบคทีเรียพวกนี้ต้องสร้างกรดอะมิโนจากแอมโมเนีย และ metabolize ของ VFA โดยพบว่าแบคทีเรียกลุ่มนี้มีความสำคัญต่อการย่อย cellulose โปรตีนส่วนมากที่เข้าสู่รูเมนจะถูกย่อยสลายจนถึงส่วนขั้นที่ได้แอมโมเนีย แต่ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลายได้ (solubility) ของโปรตีน เช่นโปรตีนมีความสามารถละลายได้มากก็จะละลายได้มาก ตัวอย่างเช่น casein สำหรับ fishmeal protein และ blood albumin จะมี resistant มาก ทำให้ส่วนใหญ่โปรตีนเหล่านี้จะผ่านรูเมนไปโดยไม่ถูกย่อย ในขณะที่พวก forage และ grain protein จะมี resistant ปานกลางต่อการย่อยโดยจุลินทรีย์ และพบว่าไนโตรเจนประมาณ 55-57% ในรูเมนจะอยู่ในเซลล์ของจุลินทรีย์ ซึ่งส่วนใหญ่เป็น protein nitrogen ในการเปลี่ยนแปลงความสามารถละลายได้ของโปรตีนให้ละลายได้น้อยในรูเมน จะช่วยให้โปรตีนนั้นรอดพ้นจากการถูกย่อยสลายภายในรูเมน และโปรตีนนั้นก็จะถูกลำเลียงไปสู่ลำไส้ ย่อยและดูดซึมที่ลำไส้ สำหรับวิธีการเปลี่ยนความสามารถละลายได้ของโปรตีนแล้วสามารถป้องกันโปรตีนบางชนิดถูกทำลายได้ในรูเมน อาจทำได้หลายวิธี เช่น heating คือการให้ความร้อนแก่ soybean protein หรือโดยทำให้โปรตีนอยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อน (protein complex) กับ casein และ safflower oil ก็จะช่วยลดความสามารถละลายได้ของโปรตีนในรูเมนได้

แบคทีเรียบางชนิดในรูเมนต้องการกรดอะมิโนเป็นแหล่งไนโตรเจน แต่ส่วนมากแล้วแบคทีเรียในรูเมนจะใช้แอมโมเนียเป็นแหล่งไนโตรเจน นอกจากโปรตีนแล้ว สัตว์เคี้ยวเอื้องยังสามารถใช้ non-protein nitrogen (NPN) ซึ่งมีอยู่หลายชนิด เช่น กรดอะมิโน peptide, amides, amines, volatile amines, ammonium salts ไนเตรท ไนไตร ยูเรีย และ ไบยูเรท ปริมาณของ NPN ในอาหารมีค่าตั้งแต่ 4-5% ในเมล็ด จนถึง 60-75% ในอาหารหมักที่ไม่มีการตากแดด (unwilted) เมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของไนโตรเจนทั้งหมด นอกจากได้รับจากอาหารแล้วยังได้จาก metabolism ในร่างกายเช่น ยูเรีย ส่วนใหญ่ NPN จะถูกเปลี่ยนไปเป็นแอมโมเนียภายในรูเมน และ NPN ที่เสริมในอาหารไม่มีผลร้ายแรงต่อการเปลี่ยนแปลงส่วนประกอบอาหาร ทั้งนี้เนื่องจากแอมโมเนียเป็น common intermediate ที่สำคัญในขบวนการย่อยโปรตีนและ NPN ในรูเมน ดังนั้นสิ่งสำคัญคือการเปลี่ยนแอมโมเนียให้เป็น microbial protein ให้มากที่สุด ในขณะที่เดียวกันก็จะเป็นการลดการสูญเสียแอมโมเนีย ที่จะสูญเสียไปโดยการดูดซึมที่รูเมน

เนื่องจากโปรตีนจากอาหารจะถูกหมักในรูเมนได้เป็น microbial protein สัตว์เคี้ยวเอื้องจึงต้องอาศัย microbial protein เป็นแหล่งโปรตีนสำคัญของร่างกาย โดยจุลินทรีย์จะถูกชะล้างออกมาจากรูเมนเข้าสู่ abomasum และลำไส้ ซึ่งประสิทธิภาพการย่อย microbial protein จึงขึ้นอยู่กับอัตราการพาดจุลินทรีย์เข้าสู่ abomasum ซึ่งจะขึ้นอยู่กับอัตราการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วของประชากรจุลินทรีย์และจะขึ้นอยู่กับโภชนาที่ได้รับ



ภาพที่ 4.3 แสดงขบวนการเมแทบอลิซึมของโปรตีนในสัตว์เคี้ยวเอื้อง

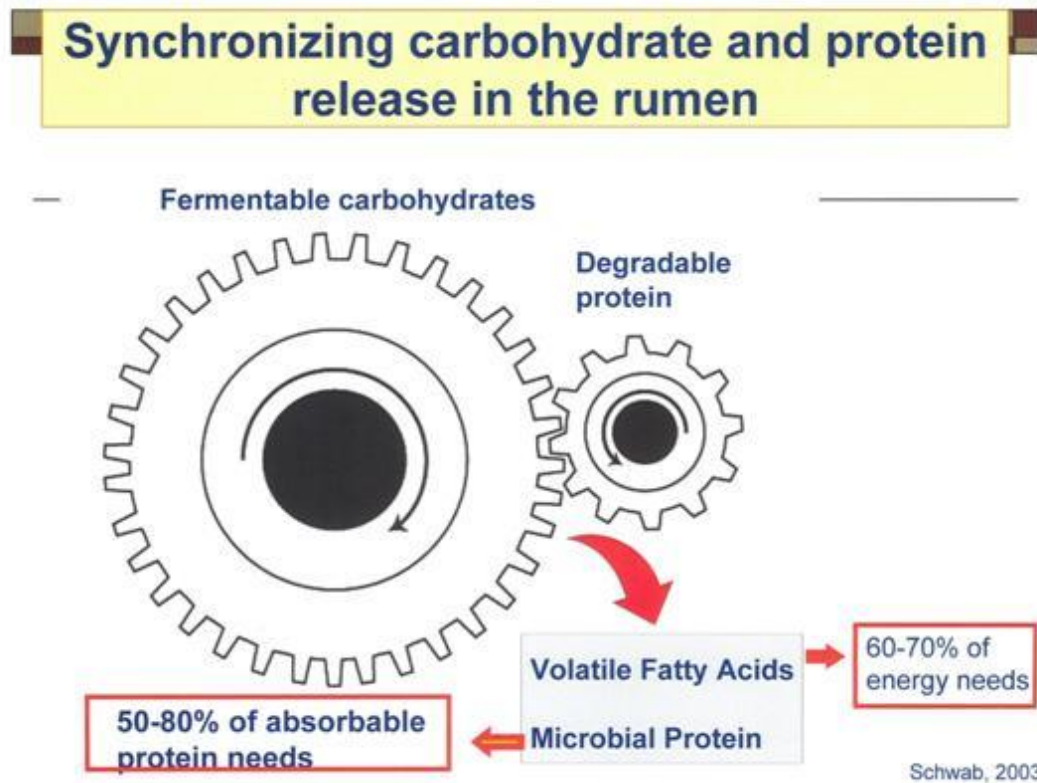
### Glucose and peptide proportion

สัดส่วนของกลูโคสและเปปไทด์ในรูเมน จะมีผลอย่างมากต่อการเจริญเติบโตและการแบ่งตัวเพิ่มจำนวนของจุลินทรีย์ ซึ่งสามารถแบ่งได้ 3 กรณี คือ

1. กลูโคสและเปปไทด์ พอเหมาะเซลล์จะได้รับพลังงานเพื่อการอยู่รอด (maintenance) จากกลูโคส และเปปไทด์จะให้ไนโตรเจนสำหรับการสร้างโปรตีนและการหมักกลูโคสจะให้ VFA เพื่อเป็นพลังงาน สำหรับการแบ่งตัวและเจริญเติบโตของเซลล์ รวมทั้งแอมโมเนียที่เกิดจากการย่อยโปรตีนก็จะหมุนเวียนมาใช้ในการสร้างโปรตีนของเซลล์ต่อไป

2. กรณีกลูโคสมากเกินไปกว่าเปปไตท์ จะมีพลังงานสำหรับการอยู่รอดของเซลล์มากเกินไป แต่ขาดไนโตรเจนสำหรับสังเคราะห์โปรตีน และการแบ่งตัวเพิ่มจำนวนเซลล์ลดลง ในกรณีนี้ พลังงานที่มากเกินไปจะทำให้เกิดการหมักของกลูโคสสูงเกิด VFA สูง แต่แอมโมเนียลดลง

3. ในกรณีเปปไตท์มากเกินไปกว่ากลูโคส จะมีไนโตรเจนจำนวนมาก สำหรับการสร้างโปรตีนแต่กลูโคสต่ำ ทำให้การสร้าง VFA ไม่พอจึงขาดพลังงานในการแบ่งตัวของเซลล์ และการสร้างโปรตีนตลอดจนการ maintenance ทำให้ต้องนำเปปไตท์มาใช้ในการสร้างพลังงาน แทนที่จะไปสร้างโปรตีน ทำให้การแบ่งตัวลดลง



ภาพที่ 4.4 การประสานเวลาระหว่างโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตที่หมักในรูเมนได้ผลผลิตจุลินทรีย์และ VFAs

ที่มา : <http://www.eclipsefeeds.com/rumendevlopment>

ดังนั้นสัดส่วนของกลูโคสกับเปปไตท์ จึงมีผลต่อ urea cycle คือ ถ้าเปปไตท์สูงจะทำให้ยูเรียในเลือดสูง ยูเรียส่วนใหญ่จะถูกขับทิ้งที่ไต ทำให้ประสิทธิภาพการใช้อาหารต่ำ แต่ถ้ากลูโคสสูง ทำให้ยูเรียจากเลือดถูกดึงกลับไปใช้ที่รูเมนเพื่อนำไปใช้สร้างโปรตีน แอมโมเนียที่ถูกดูดซึมที่รูเมนจะเข้าสู่กระแสเลือดไปสู่ตับแล้วเปลี่ยนเป็นยูเรีย และแอมโมเนียยังได้รับจากกระบวนการ metabolism ของอาหารโปรตีนแต่ถ้ามีการสะสมของแอมโมเนียมากเกินไป จะเป็นพิษต่อเซลล์ของร่างกาย ร่างกายจึงต้องเปลี่ยนให้เป็นยูเรีย และกำจัดออกนอกร่างกายผ่านทางปัสสาวะ และยูเรียยังถูกนำกลับมาใช้ใหม่โดยผ่านทางน้ำลายและซึมผ่านผนังรูเมนโดยตรง อัตราของยูเรียที่ถูกนำกลับมาใช้อีก จะขึ้นอยู่กับไนโตรเจนในอาหาร เช่น 20-55% ของอาหารไนโตรเจน

### โปรตีนไหลผ่าน (By pass protein)

อาหารโปรตีนที่สัตว์เคี้ยวเอื้องกินลงสู่กระเพาะรูเมนจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ โปรตีนถูกย่อยสลายได้ในรูเมน (Rumen degradable protein, RDP) และโปรตีนที่ไม่ย่อยสลายในกระเพาะรูเมน (Rumen undegradable protein, RUP)

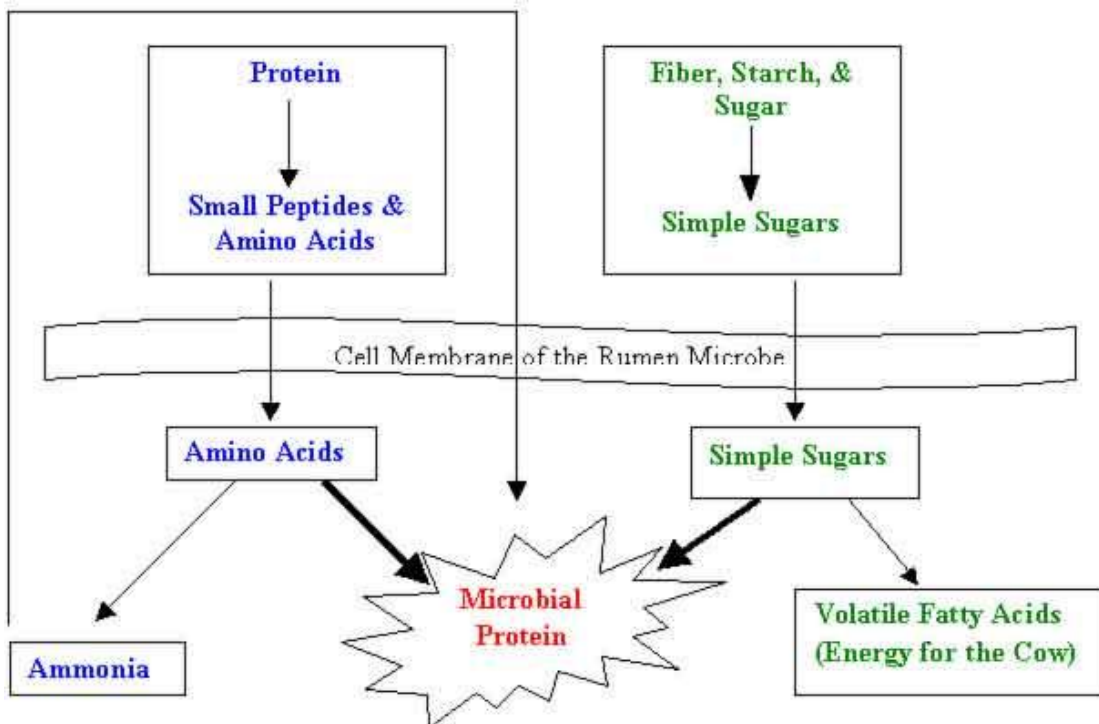
**โปรตีนที่ย่อยสลายได้ในรูเมน** หมายถึงโปรตีนในอาหารโคเมื่อผ่านเข้าสู่กระเพาะรูเมนจะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ ได้เป็นเปปไทด์ แอมโมเนีย และกรดอะมิโน เปอร์เซ็นต์ของการย่อยสลายของโปรตีนในวัตถุดิบแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน มีตั้งแต่ 20% พบในโปรตีนจากสัตว์ เช่น ปลาป่น เลือด ไปจนถึง 80% ซึ่งพบในโปรตีนจากพืช เช่น ถั่วเหลือง ผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น เช่น แอมโมเนีย จะถูกจุลินทรีย์จับเอาไปใช้สร้างตัวมันเองขึ้นมาซึ่งโคจะสามารถนำจุลินทรีย์โปรตีนนี้ไปใช้ประโยชน์ได้สูงถึง 60-65% ของความต้องการโปรตีนของโค ในโคนมที่ให้ผลผลิตไม่สูงมากนักโปรตีนจากจุลินทรีย์จะเพียงพอสำหรับการสร้างน้ำนม แต่ในกรณีโคให้นมสูงจะต้องมีการเสริมโปรตีนไหลผ่าน (by pass protein) หรือ RUP ให้เพียงพอต่อการสร้างน้ำนมด้วย

**โปรตีนที่ไม่ย่อยสลายในกระเพาะรูเมน** หมายถึง โปรตีนที่สามารถคงตัวอยู่ได้ในกระเพาะรูเมนโดยไม่ถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ ซึ่งส่วนที่ไม่ถูกย่อยสลายจะผ่านออกไปยังทางเดินอาหารส่วนหลังและถูกย่อยสลายโดยเอนไซม์ต่างๆ จากตัวสัตว์ และร่างกายสัตว์นำไปใช้ประโยชน์ได้ โปรตีนชนิดนี้จะพบอยู่ทั้งในโปรตีนจากพืชและสัตว์ หรืออาจเป็นโปรตีนที่ผ่านกระบวนการที่ทำให้คุณสมบัติทางกายภาพหรือเคมีเปลี่ยนไป เช่น ถั่วเหลืองที่ผ่านกระบวนการเอ็กซ์ทรูด (Extruded soyabean) กากถั่วเหลืองที่ผ่านความร้อนสูงถึง 140 องศาเซลเซียส ถั่วที่ผ่านสารฟอร์มัลดีไฮด์ (Formaldehyde) โปรตีนที่ผ่านกระบวนการเหล่านี้ เรียกว่าโปรตีนห่อหุ้ม (Protected protein) โปรตีนหลบเลี่ยง (escapes protein) หรือ โปรตีนไหลผ่าน (By pass protein) โปรตีนชนิดนี้มีความจำเป็นสำหรับโคนมมาก โดยเฉพาะโคนมที่ให้ผลผลิตสูง เช่น ให้นมมากกว่า 20 กก. เพราะโปรตีนจากจุลินทรีย์เพียงอย่างเดียวจะไม่เพียงพอสำหรับการสร้างน้ำนม

โปรตีนทั้งสองชนิด มีความสำคัญต่อการผลิตนม เพราะโปรตีนที่ย่อยสลายจะถูกนำไปใช้ประโยชน์โดยผ่านทางจุลินทรีย์ และมีความจำเป็นต่อระบบนิเวศน์วิทยาของกระเพาะรูเมนและกระบวนการหมักย่อยของอาหาร ส่วนโปรตีนที่ไม่ย่อยสลายจะเป็นแหล่งของกรดอะมิโนหลายชนิดที่ไม่สามารถผลิตได้มากเพียงพอจากกระเพาะรูเมนของโค เพื่อให้เพียงพอต่อการผลิตนมโดยเฉพาะโคนมที่ให้นมสูง อัตราส่วนที่เหมาะสมแนะนำโปรตีนที่ย่อยสลายได้ควรมีอยู่ในสูตรอาหารโคนมรวม 60 ถึง 65% ที่เหลือเป็นโปรตีนไม่ถูกย่อยสลาย

### การใช้สารประกอบไนโตรเจนที่ไม่ใช่โปรตีนในสัตว์เคี้ยวเอื้อง

สัตว์เคี้ยวเอื้อง มีจุลินทรีย์ในกระเพาะรูเมนที่สามารถสังเคราะห์กรดอะมิโนที่จำเป็นได้ จึงทำให้สัตว์เคี้ยวเอื้องไม่ต้องพึ่งพาโปรตีนจากอาหารเท่าใดนัก คือสามารถใช้อาหารโปรตีนคุณภาพแล้ว หรือสารประกอบไนโตรเจนที่ไม่ใช่โปรตีน (Non- protein nitrogen, NPN) ได้ ซึ่งมีหลายชนิด เช่น ยูเรีย ไบยูเรท (biuret) เกลือแอมโมเนีย และมูลสัตว์ แต่ควรใช้ด้วยความเข้าใจและระมัดระวัง มิฉะนั้นอาจเป็นอันตรายได้ การเสริมสารดังกล่าวในอาหารสัตว์เคี้ยวเอื้องเพื่อช่วยลดต้นทุน เพราะสามารถให้ไนโตรเจนในราคาถูก และจุลินทรีย์สามารถนำไปใช้สังเคราะห์เป็นโปรตีนของตัวเองได้เช่นเดียวกับโปรตีนแท้จากอาหาร



[http://www.milkproduction.com/NR/rdonlyres/33C0FEF4-415F-4E7E-B600-5E50BA13FAD7/0/6\\_non\\_fiber.jpg](http://www.milkproduction.com/NR/rdonlyres/33C0FEF4-415F-4E7E-B600-5E50BA13FAD7/0/6_non_fiber.jpg)

ภาพที่ 4.5 แสดงภาพรวมของการสังเคราะห์ microbial protein จากขบวนการหมักในรูเมน  
กลไกการสลายและการใช้ประโยชน์จากยูเรีย

ยูเรีย (46-0-0) สามารถละลายน้ำได้ดี มีไนโตรเจน 46% หรือ เทียบเท่าโปรตีนหยาบ 288% เมื่อ ยูเรียเข้าไปในกระเพาะรูเมนจะถูกย่อยด้วยเอนไซม์ยูรีเอส (urease) จากแบคทีเรีย อย่างรวดเร็วได้เป็น แอมโมเนีย จากนั้นแอมโมเนียจะถูกจุลินทรีย์นำไปทำปฏิกิริยากับกรดคีโต (keto acid) ที่ได้จากการสลาย คาร์โบไฮเดรต กลายเป็นกรดอะมิโน ซึ่งจะถูกรวบรวมเป็นโปรตีนของจุลินทรีย์เอง แล้วจุลินทรีย์โปรตีนนี้จะ ถูกย่อยด้วยเอนไซม์จากตัวสัตว์ที่กระเพาะแท้และลำไส้เล็กได้เป็นกรดอะมิโน ซึ่งสัตว์จะดูดซึมนำไปใช้ ประโยชน์ในร่างกายต่อไป

ส่วนการที่แอมโมเนียจะถูกจับไปสร้างโปรตีนได้มากน้อยเพียงใด ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ โดยปกติยูเรียจะถูกใช้ได้ดีที่สุดเมื่อยูเรียมีอัตราการสลายตัวไปแอมโมเนียอย่างช้าๆ และอาหารมี คาร์โบไฮเดรตที่สลายตัวได้ง่ายอยู่สูง (readily fermentable carbohydrate, RFC) เช่น อาหารจำพวก ธัญพืช มันเส้น หรือ กากน้ำตาล เป็นต้น เพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานในการสร้างโปรตีนของจุลินทรีย์

ในทางตรงกันข้ามหากยูเรียสลายตัวเร็ว แต่สัตว์ได้รับอาหารคาร์โบไฮเดรตที่สลายได้ง่ายไม่ เพียงพอ จะทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถจับแอมโมเนียไปใช้ได้ทัน ทำให้แอมโมเนียมีความเข้มข้นสูงในรูเมน เกิดผลเสียเพราะตับอาจจะทำกาการกำจัดพิษโดยเปลี่ยนให้เป็นยูเรียไม่ทัน ทำให้ความเข้มข้นของ แอมโมเนียในเลือดสูง กระทบกระเทือนต่อสมดุลของกรด-ด่างในร่างกาย ทำให้สัตว์อาจตายได้ ดังนั้นการ ใช้ยูเรียจึงควรระมัดระวัง โดยทำให้ยูเรียสลายอย่างช้าๆ ด้วยการผสมกับแป้ง (มันเส้น) ภายใต้อุณหภูมิและความดัน หรืออัดเป็นก้อน ได้ผลิตภัณฑ์อาหารสัตว์ที่เรียกว่า สเตาเรีย (starea) คาซาเรีย (cassarea) แคสพูเรีย (caspurea) เป็นต้น หรือการทำให้เป็นก้อนอาหารเสริมซึ่งมีการผสมยูเรีย แร่ธาตุและกากน้ำตาล แล้วอัดเป็นก้อนให้สัตว์เลียกินก็ดี

### ข้อควรระวังในการใช้ยูเรีย (บุญล้อม, 2546)

1. ใช้อาหารผสมยูเรียเลี้ยงสัตว์เคี้ยวเอื้องที่มีกระเพาะรูเมนเจริญเต็มที่แล้วเท่านั้น อย่าใช้ยูเรียกับลูกสัตว์และสัตว์กระเพาะเดี่ยว
2. เนื่องจากยูเรียมีรสขาคัดฝาดเคี้ยว สัตว์จะไม่ชอบกิน จึงควรผสมอาหารที่มีรสชาตขวนกิน เช่น กากน้ำตาล
3. ยูเรียไม่มีฟอสฟอรัสและกำมะถัน อีกทั้งยังมีพลังงานต่ำ ฉะนั้นการใช้ยูเรียเป็นแหล่งของไนโตรเจนแทนโปรตีนธรรมชาติ จึงควรเสริมโภชนะเหล่านี้ในอาหารด้วย โดยทั่วไปแนะนำสัดส่วนของ N:S = 12:1- 15:1 ในโค-กระบือ และ 10:1 ในแพะ-แกะ
4. ควรใช้ยูเรียผสมลงในอาหารวันละน้อย แล้วเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนถึงระดับที่ต้องการ ทั้งนี้เพราะตัวสัตว์เองและจุลินทรีย์ต้องการปรับตัวในการใช้ยูเรียเป็นแหล่งไนโตรเจน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในโคที่ได้รับอาหารคุณภาพต่ำมาก่อน ระยะปรับตัวนี้จะกินเวลาประมาณ 1-2 สัปดาห์ และถ้าสัตว์เล็กกินยูเรียไป 2-3 วัน ก็ต้องการระยะปรับตัวใหม่
5. ไม่ควรใช้ยูเรียผสมอาหารคิดเป็นวัตถุแห้งกิน 3% ของอาหารชั้น หรือ 1% ของปริมาณวัตถุแห้งที่กินได้ หรือ เกิน 30 กรัมต่อน้ำหนักตัว 100 กก.
6. ในการใช้ยูเรียผสมลงในอาหารจะต้องผสมให้เข้ากันดี ระวังอย่าให้จับตัวเป็นก้อน และไม่ควรรใช้ยูเรียละลายน้ำให้โคกินโดยตรง เพราะโคอาจจะกินน้ำครั้งละมากๆ เกิดเป็นอันตรายได้
7. การให้ยูเรีย ควรให้ร่วมกับอาหารที่มีคาร์โบไฮเดรตที่ย่อยได้ง่ายอย่างเพียงพอ เช่น ธัญพืช หรือ มันเส้น เป็นต้น เพื่อจุลินทรีย์จะได้สามารถนำไปใช้ร่วมกับแอมโมเนีย สร้างเป็นโปรตีนได้

### รูปแบบการใช้ยูเรียเป็นอาหารโค

1. ผสมในอาหารชั้น ไม่ควรใช้เกิน 3% และต้องผสมให้เข้ากันดี มีการกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ ไม่จับตัวเป็นก้อน เพื่อป้องกันไม่ให้โคได้รับยูเรียมากเกินไปในแต่ละมื้อ
2. ผสมกับกากน้ำตาล วิธีนี้เป็นที่นิยมใช้กันมากเพราะช่วยให้รสชาติของยูเรียดีขึ้นและยังได้รับพลังงานที่มีอยู่มากในกากน้ำตาล แต่ต้องระมัดระวังเรื่องปริมาณที่กินเพราะความนำกินจะมีมาก อาจทำให้โคนมกินกากน้ำตาลที่มียูเรียอยู่มากเกินไปจนเกิดพิษ การให้อาจให้ในรูปของยูเรียผสมกับกากน้ำตาลแล้วราดบนฟางข้าวจะช่วยเพิ่มความนำกินของฟางข้าว หรือ อาจใช้วิธีเทส่วนดังกล่าวลงในถาดให้โคเลียกิน
3. การให้ในรูปอาหารก้อน โดยการผสมกับวัตถุดิบหลายชนิด เช่น รำข้าว มันเส้น กากเมล็ดพืช กากน้ำตาล แร่ธาตุ และปูนซีเมนต์ ผสมให้เข้ากันแล้วอัดเป็นก้อน เรียกว่า urea molasses block (UMB) หรือ urea mineral molasses block (UMMB) อาจให้กิน 5 10 หรือ 15% ของปริมาณอาหารที่กิน วิธีนี้เหมาะสมสำหรับให้เป็นอาหารเสริมในฟาร์มขนาดเล็ก
4. การใช้ยูเรียผสมกับอาหารหยาบ วัตถุประสงค์การใช้ยูเรียผสมกับอาหารหยาบมีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มคุณค่าทางอาหารของอาหารหยาบ วิธีที่นิยมมากคือการใช้ยูเรียในอัตราส่วนไม่เกิน 2% ของน้ำหนักอาหารหยาบผสมน้ำราดลงไปบนอาหารหยาบคุณภาพต่ำ เช่น ฟางข้าว หรืออาจใช้เติมลงไปบนหญ้าหมัก ซึ่งอาจใช้ได้สูงถึง 4% นอกจากนี้ใช้ยูเรียในการปรับปรุงคุณภาพของอาหารหยาบคุณภาพต่ำได้ เช่น การทำฟางปรุงแต่ง

### อาการเป็นพิษและการแก้พิษเนื่องจากยูเรีย

ถ้าระดับแอมโมเนียในเลือดสูงเกิน 10 มก./ลิตร สัตว์จะแสดงอาการเป็นพิษเนื่องจากยูเรีย คือ มีน้ำลายไหล ชัก (tetany) กล้ามเนื้อไม่สัมพันธ์กัน (ataxia) ท้องอืด (bloat) การหายใจผิดปกติและถ้าระดับแอมโมเนียในเลือดสูง 30 มก./ลิตร สัตว์จะตาย ถ้าสัตว์มีอาการให้รีบแก้ไขโดยใช้น้ำส้มสายชู หรือกรดอะซิติกผสมน้ำเย็น กรดออกปาก กรดจะช่วยลดความเป็นด่างในกระเพาะรูเมนและกระแสเลือด อีกทั้งน้ำเย็นยังช่วยลดอุณหภูมิของกระเพาะรูเมน ทำให้แอมโมเนีย ถูกดูดซึมช้าลง ลดอันตรายลงได้

### 3. Fermentation and digestion of fat in rumen

ไขมันธรรมชาติ หรือไตรกลีเซอไรด์ ประกอบด้วยกลีเซอรอล 1 โมเลกุล และกรดไขมัน 3 โมเลกุล และกรดไขมันก็แบ่งออกได้เป็น 2 ชนิด คือ กรดไขมันไม่อิ่มตัวซึ่งไม่มีพันธะคู่ในโมเลกุล และไม่อิ่มตัวซึ่งมีพันธะคู่ในโมเลกุล กรดไขมันชนิดอิ่มตัวประกอบด้วยกรด acetic (C 2), propionic (C3), butyric (C 4), palmitic (C16), stearic (C18), Arachidic (C20) และ lignoceric (C 22) เป็นต้น ส่วนกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวได้แก่กรด palmitoleic(C16:1) , oleic (C18:1), linoleic (C18:2), linolenic (C18:3), arachidonic (C20 : 4) และ timnodonic (C22:4) เป็นต้น ไขมันที่พบในธรรมชาติส่วนใหญ่จะเป็นคาร์บอนอะตอมคู่ และไขมันเป็นส่วนประกอบในอาหารสัตว์ทั้งในอาหารหยาบและอาหารข้น ในพืชอาหารสัตว์จะมีไขมันประมาณ 0.82-4 % ส่วนในอาหารขั้วมีไขมันประมาณ 4-5%

ไขมันที่อยู่ในรูปของกรดไขมันไม่อิ่มตัว (unsaturated fatty acid) จะถูก hydrogenate ในรูเมนให้เป็น stearic acid ซึ่งอยู่ในรูปอิสระและรูปที่จับกับสารอื่นได้ ถ้าสัตว์ได้รับอาหารหยาบในระดับสูง จะมี stearic acid 40% ของ rumen digesta และ 80 % ถ้าสัตว์ได้รับอาหารเมล็ดธัญพืชในระดับสูง ที่เป็นเช่นนี้ก็เพราะว่าในอาหารหยาบ (พืชอาหารสัตว์) จะประกอบด้วย กรดปาล์มมิติก (C16) 1/3 ของไขมันทั้งหมด และ 2/3 เป็นสเตียริก (C18) ส่วนในเมล็ดธัญพืชประกอบด้วย unsaturated fatty acid (C18) ถึง 90% ส่วนที่เหลือเป็นปาล์มมิติกน้อยกว่า 10 % ส่วนใหญ่อาหารไขมันของสัตว์เคี้ยวเอื้องมักจะประกอบไปด้วยกรดไขมันไม่อิ่มตัวเป็นปริมาณมาก เพราะกินพืชอาหารสัตว์เป็นหลัก และกรดไขมันไม่อิ่มตัวในเมล็ดธัญพืชบ้าง ลิพิดที่พบในกระเพาะหมักกลับแตกต่างจากอาหาร อันเนื่องจากจุลินทรีย์ในรูเมนจะย่อยสลายไตรกลีเซอไรด์ ได้กรดไขมันอิสระ และยังมีกระบวนการหมักกลีเซอรอล ให้กลายเป็นกรดไขมันที่ระเหยได้ และเนื่องจากสภาพแวดล้อมภายในรูเมนเหมาะสมอย่างยิ่ง ในการรีดิวซ์กรดไขมันไม่อิ่มตัวให้เป็นกรดไขมันที่อิ่มตัว โดยการเติมไฮโดรเจนเข้าไปอย่างรวดเร็ว (hydrogenation) กรดไขมันไม่อิ่มตัวที่ได้ส่วนใหญ่ คือ กรดสเตียริก นอกจากนั้น จุลินทรีย์ยังสามารถสังเคราะห์กรดไขมันที่จำนวนคาร์บอนเป็นเลขคี่ได้จากกรดไพรูฟิอิก (C3) รวมทั้งกรดไขมันที่ไฮโดรคาร์บอนมีแขนงแยกออกไป ซึ่งสังเคราะห์จากคาร์บอนของกรดอะมิโนพวก วาลีน (valine) ลิวซีน (leucine) และ ไอโซลิวซีน (isoleucine)

#### รูปแบบการใช้ไขมันในสัตว์เคี้ยวเอื้อง

โดยปกติสัตว์เคี้ยวเอื้องที่กินพืชอาหารสัตว์ มักได้รับ linoleic และ linolenic acid อย่างพอเพียง จึงมีความต้องการปริมาณของกรดไขมันที่จำเป็นในระดับต่ำมาก และมักไม่ขาด แต่เนื่องจากในกรณีที่เกิดขบวนการเติมไฮโดรเจน (hydrogenation) ในกระเพาะหมัก โดยจุลินทรีย์ทำให้ไขมันไม่อิ่มตัวกลายเป็นไขมันอิ่มตัว อาจขาดกรดไขมันที่จำเป็นได้ ดังนั้นควรมีการเสริมในอาหารบ้าง แต่โดยทั่วไปสัตว์จะได้รับจากการที่ไขมันหลบเลี่ยงจากการเกิดขบวนการเติมไฮโดรเจน ซึ่งกระบวนการนี้เกิดโดยโปรโตซัวเป็นตัวขัดขวาง โดยโปรโตซัวจะดูดซึมนำไปใช้เพื่อการเจริญเติบโตของตัวเอง ซึ่งโปรโตซัวจะมีกรดไขมันไม่

อิ่มตัว เช่น linoleic และ linolenic acid อยู่สูงประมาณ 20% เมื่อเกิดการย่อยโปรโตซัวที่กระเพาะแพะแทะ สัตว์ก็จะได้รับกรดไขมันที่จำเป็นดังกล่าว

รูปแบบการเสริมไขมันในสัตว์เคี้ยวเอื้องต้องให้อยู่ในรูปไขมันไหลผ่าน (protected fat, protected lipid, by-pass fat) ซึ่งหมายถึงไขมันที่ทำการป้องกันไม่ให้ถูกย่อยในกระเพาะหมัก แต่ไหลผ่านไปถึงถูกย่อยที่ลำไส้เล็ก เพื่อให้สัตว์จะได้ย่อยและดูดซึมไปใช้ได้โดยตรง ซึ่งกระบวนการทำไขมันไหลผ่านนี้ นิยมใช้กระบวนการ saponification คือ ทำให้ไขมันหรือกรดไขมันอยู่ในรูปของ Ca-soap ทำให้เกิดสบู่แคลเซียมของกรดไขมันสายยาว (Ca-soap of long chain fatty acids, CA-LCFA) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นกรดปาล์มิติก และสเตียริก ผลิตภัณฑ์นี้ถูกย่อยได้น้อยใน pH ของกระเพาะหมัก จึงไม่รบกวนการทำงานของจุลินทรีย์ แต่เมื่อมาถึงกระเพาะแทะ pH ต่ำ สบู่จะแตกออกได้เป็นกรดไขมันอิสระ ซึ่งจะถูกย่อยต่อไปที่ลำไส้เล็ก ทำให้สามารถดูดซึมไปใช้ประโยชน์ได้ในตัวสัตว์ได้

ปัจจุบันการเสริมไขมันในสัตว์เคี้ยวเอื้องมีอยู่ 3 วิธี คือ การเสริมในรูปแบบไขมันโดยตรง การเสริมโดยใช้วัตถุดิบอาหารสัตว์ที่เป็นแหล่งไขมัน และการเสริมในรูปแบบการปรับไขมันให้อยู่ในรูปไขมันไหลผ่าน หรือการเสริม CLA กำลังเป็นที่นิยม โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อต้องการให้ผลิตภัณฑ์จากสัตว์ เช่น เนื้อ นม มีส่วนประกอบของ CLA อยู่ด้วย และลดการสะสมของกรดไขมันอิ่มตัว อันซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อผู้บริโภคต่อไป

### ข้อจำกัดในการเสริมไขมันในสัตว์เคี้ยวเอื้อง

จุลินทรีย์ไม่ชอบอาหารที่มีไขมันสูงเกิน 5% ของอาหารทั้งหมด เพราะกรดไขมันไม่อิ่มที่เกิดขึ้นจะไปเคลือบผิวของจุลินทรีย์และผิวของอนุภาคอาหาร ทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถเข้าจับเกาะอนุภาคของอาหารได้ จุลินทรีย์ทำงานไม่ได้ เพราะเป็นพิษต่อเซลล์จุลินทรีย์ โดยทำให้เกิดแรงตึงผิวสูง เป็นผลให้การซึมผ่านเมมเบรนลดลง เนื่องจากจุลินทรีย์ไม่สามารถใช้กรดไขมันเป็นแหล่งพลังงานได้ จึงทำให้การเพิ่มประชากรและ การทำงานมีประสิทธิภาพลดลงด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งการย่อยเยื่อใย เป็นผลให้สัตว์กินอาหารได้ลดลง ในกรณีที่ต้องการใช้ไขมันปรับพลังงานในสูตรอาหาร เลี้ยงสัตว์ที่ต้องการพลังงานสูง เช่น โคเนื้อที่ให้นมสูง ซึ่งต้องการพลังงานในการไปใช้สร้างน้ำนม เพราะให้อาหารชั้นสูงอาจเป็นผลให้เกิดภาวะเป็นกรดในกระเพาะหมัก (acidosis) ทำให้จุลินทรีย์ไม่ทำงาน อาหารไม่ย่อย สัตว์ไม่ยอมกินอาหาร ทำให้สัตว์ได้พลังงานไม่พอกับความต้องการ ในกรณีนี้ควรมีการเสริมไขมันปรับเป็นแหล่งพลังงานแทน แต่ควรมีการปรับรูปแบบของไขมันไม่ให้เป็นพิษต่อจุลินทรีย์ในกระเพาะหมัก เช่น ให้อยู่ในรูปไขมันไหลผ่าน อย่างไรก็ตามการเสริมไขมันในอาหารปริมาณสูงอาจทำให้มีการสะสมกรดไขมันไม่อิ่มตัวในเนื้อเยื่อสูง ทำให้ท้องอืด และเกิดความผิดปกติของกระเพาะหมัก ทำให้ระดับไขมันนมลดลง ทั้งนี้อาจเพราะมีผลทำให้การย่อยได้ของเยื่อใยลดลง โดยทำให้สัดส่วนของ acetate : propionate ลดลง ซึ่งอาจมีเหตุผลมาจาก ไขมันอาจไปเกาะติดตามผิวของอาหารเยื่อใย หรือ ไขมันอาจทำให้ประชากรของจุลินทรีย์ในรูเมนเปลี่ยนแปลงไป หรือไขมันอาจจะขัดขวางการเข้าย่อยสลายของจุลินทรีย์ โดยจุลินทรีย์ไม่สามารถเข้าจับเกาะบนเซลล์เมมเบรนได้ (ขัดขวาง surface-active effects) และการเสริมอาหารพลังงานสูงต้องให้สมดุลกับโปรตีนด้วย

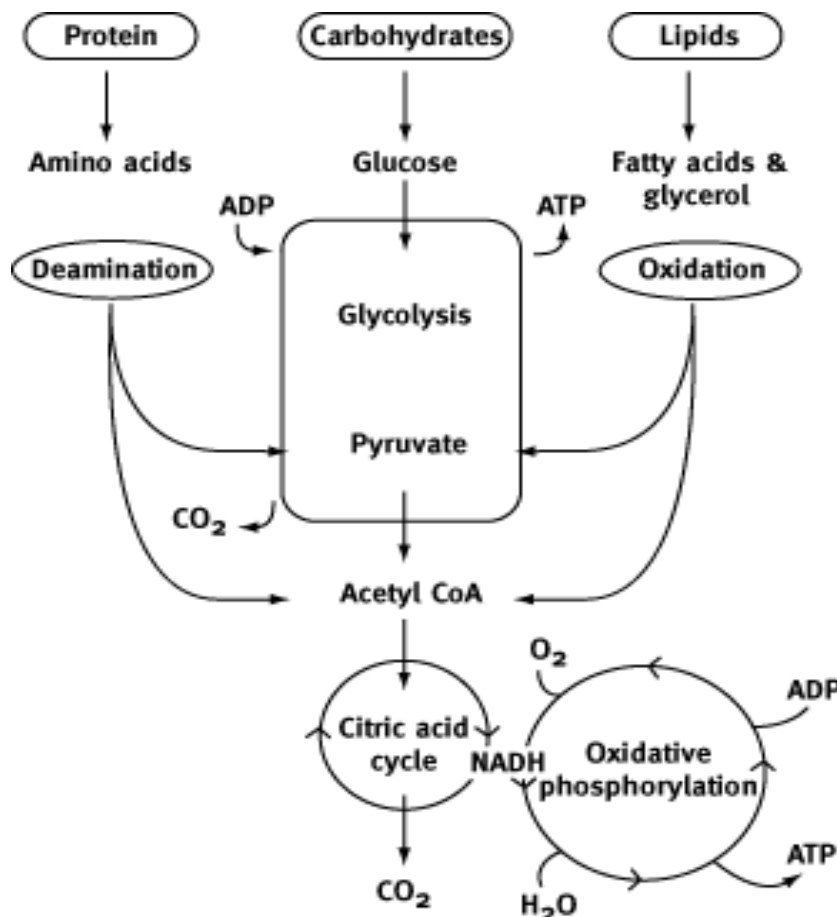
### การย่อยไขมันในรูเมน



โดยปกติสัตว์เคี้ยวเอื้องจะได้รับไขมันไม่สูงนัก เพราะพืชอาหารสัตว์มีไขมันค่อนข้างต่ำ กรดไขมันในพืชมักเป็นชนิดที่ไม่อิ่มตัว โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรดนิโนเลอิกและลิโนเลนิก ไขมันในใบพืชมักเป็น galactolipids ส่วนที่อยู่ในเมล็ดเป็น triacylglycerol จุลินทรีย์จะทำการเปลี่ยนไขมันที่กินเข้าไปโดย

1. ย่อย (hydrolyse) ไขมันให้เป็น glycerol กับกรดไขมัน
2. เปลี่ยนตำแหน่งของพันธะคู่หรือเปลี่ยนพันธะคู่แบบ cis ให้เป็นแบบ trans ซึ่งจะตรวจพบได้ในรูเมน
3. เติมไฮโดรเจนเข้าไปในพันธะคู่ (hydrogenation) ทำให้กรดไขมันที่อิ่มตัวกลายเป็นชนิดไม่อิ่มตัว

ดังนั้นไขมันในนมและในซากสัตว์เคี้ยวเอื้องจึงมีกรดไขมันประเภทไม่อิ่มตัว เช่น stearic acid สูง นอกจากนี้อาจเกิดไขมันเลวคี่ หรือกรดไขมันที่แตกแขนง (branched-chain fatty acid) ด้วย เช่น ไขมันนมอาจมีกรดไขมันที่มีคาร์บอน 9,11, 13, 15, 17, และ 19 อะตอม ซึ่งไม่ใช่ลักษณะของไขมันในพืช และการที่จะพบไขมันไม่อิ่มตัว เช่น CLA ในผลิตภัณฑ์สัตว์ (เนื้อ หรือ นม) ได้นั้น ก็อาจจะเกิดจากการที่จุลินทรีย์ในรูเมนทำงานหรือขบวนการเติมไฮโดรเจนในพันธะคู่นั้นเกิดไม่สมบูรณ์ เพราะเนื่องจากว่าในรูเมนมีการหมุนเวียนและการเคลื่อนที่ของอาหาร ออกไปตามทางเดินอาหารอย่างต่อเนื่อง ทำให้มีไขมันไม่อิ่มตัวเล็ดลอดผ่านไปทีละเล็กละน้อยและไปสะสมที่เนื้อและนมได้



ภาพที่ 4.6 ภาพรวมความเกี่ยวข้องของ metabolism ของโภชนะหลักที่ให้พลังงาน

[http://www.aqualex.org/elearning/fish\\_feeding/english/bioenergetics/fr\\_metabolism.html](http://www.aqualex.org/elearning/fish_feeding/english/bioenergetics/fr_metabolism.html)

เอกสารอ้างอิง

- บุญล้อม ชีวะอิสระกุล. 2546. ชีวเคมีทางสัตวศาสตร์. ภาควิชาสัตวศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. : เชียงใหม่ 202 หน้า
- เมธา วรณพัฒน์, 2533. โภชนศาสตร์สัตว์เคี้ยวเอื้อง. คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น : ขอนแก่น. 473 หน้า
- วิศิษฐ์พร สุขสมบัติ. 2538. โภชนศาสตร์สัตว์เคี้ยวเอื้อง. เอกสารประกอบการสอน. สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตสัตว์ สำนักวิชาเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี นครราชสีมา 97 หน้า
- McDonald, P., R.A. Edwards, J. F. D. Greenhalgh, C. A. Morgan. 1995. *Animal Nutrition*. 5<sup>th</sup> Ed. Longman Scientific & Technical. New York. 607 pp.
- Pond W.G., D. C. Church, K.R. Pond, P.A. Schokecht, 2005. *Basic Animal Nutrition and Feeding*. John Wiley & Sons, Inc. 580 pp.