# บทที่ 2
# เอกสารที่เกี่ยวข้อง

## 2.1 ความสำคัญของสัตว์เคี้ยวเอื้อง

สัตว์เคี้ยวเอื้อง (ruminant) จัดอยู่ใน order artiodactyla ซึ่งจัดเป็นสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมมีกีบคู่ และอยู่ใน suborder ruminantia คำว่า ruminant มาจากภาษาลาติน ruminare แปลว่า นำมาเคี้ยวใหม่ (chew over again) จึงเรียกสัตว์พวกนี้ว่า ruminant (Church, 1983) ในระบบทางเดินอาหาร (gastro-intestinal tract) ของสัตว์เคี้ยวเอื้องนั้นเมื่อสัตว์กินอาหารเข้าไป อาหารจะถูกหมักโดยเอนไซม์จากจุลินทรีย์ก่อนที่จะถูกย่อยสลายตามปกติในส่วนกระเพาะแท้และลำไส้เล็ก ซึ่งเป็นความแตกต่างจากที่พบในสัตว์ไม่เคี้ยวเอื้องทั่วไป (Taylor and Field, 2001) อีกทั้งกระเพาะของสัตว์เคี้ยวเอื้องแบ่งออกเป็น 4 ส่วน คือ กระเพาะหมักหรือผ้าขี้ริ้ว (rumen) รังผึ้ง (reticulum) สามสิบกีบ (omasum) และ กระเพาะจริง (abomasum) สามส่วนแรกเป็น proventiculi ซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากการขยายตัวของ หลอดอาหาร (esophagus) ส่วนของ reticulum และ rumen เชื่อมติดต่อกัน เรียกรวมว่า เรทติคูโล-รูเมน (reticulo-rumen) หรือ รูเมนเรติคูลั่ม (rumenreticulum) (กฤตพล, 2546) ซึ่งกระเพาะส่วนนี้มีความสำคัญในการเคี้ยวเอื้อง อำนวยต่อสภาวะการเจริญเติบโตและการทำกิจกรรมของจุลินทรีย์ในการย่อยสลายอาหาร โดยเฉพาะอาหารเยื่อใย จุลินทรีย์ที่พบอยู่ภายในกระเพาะหมักประกอบด้วยจุลินทรีย์หลายชนิด ได้แก่ แบคทีเรีย โปรโตซัว เชื้อรา และยีสต์ (Van Soest, 1994) จุลินทรีย์เหล่านี้มีผลต่อความต้องการโภชนะและเมทธาโบลิซึมของสัตว์ (Ørskov, 1992; NRC, 2001) นอกจากนี้แล้วจุลินทรีย์ยังสามารถใช้ประโยชน์จากสารประกอบไนโตรเจนที่มีโครงสร้างไม่ซับซ้อน เช่น แอมโมเนีย ($NH_3$) เพื่อสังเคราะห์เป็นโปรตีนของจุลินทรีย์ (microbial protein) ซึ่งเป็นแหล่งโปรตีนที่สำคัญต่อสัตว์เคี้ยวเอื้อง (Ørskov, 1992; Taylor and Field, 2001)

ลักษณะพิเศษของกระเพาะและความสามารถของจุลินทรีย์ภายในกระเพาะหมักของสัตว์เคี้ยวเอื้อง ทำให้มีความสามารถพิเศษต่างจากที่พบในสัตว์ไม่เคี้ยวเอื้องทั่วไป โดยเฉพาะอย่างยิ่งการใช้ประโยชน์ได้จากอาหารหยาบ อาหารที่ได้จากเศษเหลือและผลพลอยได้ทางการเกษตร อีกทั้งยังสามารถใช้อาหารโปรตีนที่มีคุณภาพต่ำและใช้ยูเรีย ($2NH_2CO$) เป็นแหล่งโปรตีนทดแทนในอาหารได้ (กฤตพล, 2546; NRC, 2001) สัตว์เคี้ยวเอื้องมีบทบาทสำคัญและเป็นประโยชน์ต่อมนุษย์มาก เพราะมนุษย์ได้รับประโยชน์หลายอย่าง เช่น เนื้อ นม ใช้เป็นอาหารและใช้หนัง ขน เขา กระดูก เป็นเครื่องนุ่งห่มและเครื่องใช้ต่าง ๆ นอกจากนี้แล้วยังได้อาศัยแรงงานในด้านการเกษตรและการ

คมนาคม อีกทั้งยังให้ความเพลิดเพลินด้วย โดยเฉพาะในปัจจุบันนับได้ว่ามีความสำคัญยิ่ง เนื่องจากสัตว์เคี้ยวเอื้องสามารถปรับตัวได้ดีกับระบบการผลิตพืช รวมทั้งในพื้นที่ที่ไม่มีความเหมาะสมกับการปลูกพืช สัตว์เคี้ยวเอื้องก็ยังสามารถใช้ประโยชน์จากพื้นที่เหล่านั้นได้ดี (กฤตพล, 2546; Taylor and Field, 2001)

## 2.2 การเลี้ยงโคเนื้อในประเทศไทย

การเลี้ยงโคเนื้อในประเทศไทยเป็นส่วนประกอบสำคัญยิ่งในระบบการเกษตรเพื่อการดำรงชีพ การเลี้ยงโคเนื้อกระจายทั่วไปในประเทศไทย แต่จะพบการเลี้ยงจำนวนมากในภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคเหนือ การเลี้ยงโคเนื้อฝูงใหญ่มักเลี้ยงกันมากในบริเวณที่มีทุ่งกว้างในภาคตะวันออกเฉียงเหนือและในป่าโปร่งบางแห่งในภาคกลางตอนบน การเลี้ยงทำโดยไล่ต้อนออกไปหากินหญ้าตามธรรมชาติในที่สาธารณะที่ไม่มีการปลูกหญ้าเพื่อเลี้ยงสัตว์โดยเฉพาะ โคอาจจะได้รับการเสริมฟางข้าวในฤดูแล้ง (ชาญชัย, 2546; เรืองฤทธิ์, 2548; บัญญัติ, 2549)

การเลี้ยงโคเนื้อในประเทศไทยส่วนใหญ่ทำเป็นอาชีพเสริม ทำนาเป็นอาชีพหลัก มีการใช้แรงงานโคและกระบือในฤดูทำนาและเก็บเกี่ยว เมื่อว่างจากการทำนาก็จะเลี้ยงโคเนื้อไว้เป็นอาชีพเสริม ถ้าเศรษฐกิจไม่ดีเกษตรกรจะขายโคเพื่อเอารายได้มาใช้ในครอบครัว ถ้าปีไหนเศรษฐกิจดี เกษตรกรจะซื้อโคเข้ามาใหม่ ทำให้การกระจายตัวของอาชีพนี้เป็นไปอย่างล่าช้า แต่ในปัจจุบันการเลี้ยงโคกำลังมีความสำคัญทางเศรษฐกิจ เพราะมีการขยายตัวกันมากขึ้นทำให้สามารถยึดเป็นอาชีพได้โดยระบบการเลี้ยงโคเนื้อในประเทศไทยปัจจุบันมี 3 ลักษณะ คือ การเลี้ยงโคแม่พันธุ์เพื่อจำหน่ายโคพันธุ์ การเลี้ยงโคมัน คือ การนำโคที่มีอายุมากหรือโคปลดจากการใช้งานมาเลี้ยงขุนแล้วส่งขายเป็นเนื้อ และการเลี้ยงโคขุน คือ การเลี้ยงโคเนื้อที่มีอายุ 2 ปีขึ้นไป โดยใช้อาหารคุณภาพให้เจริญเติบโตได้อย่างรวดเร็วและได้เนื้อที่มีคุณภาพตามที่ตลาดต้องการ (ชาญชัย, 2546; จีรสิทธิ์, 2549)

การผลิตโคเนื้อภายในประเทศมีแนวโน้มขยายตัวเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณการผลิตเนื้อไม่เพียงพอต่อความต้องการบริโภคของประชากรภายในประเทศ ปัญหาไข้หวัดนกและไข้หวัดใหญ่สายพันธุ์ใหม่ที่มีต้นกำเนิดเชื้อมาจากหมูทำให้ผู้บริโภคหันมาบริโภคเนื้อโคแทน จากรายงานของกรมปศุสัตว์ (2551) พบว่า สถานการณ์การผลิตโคเนื้อในปี 2552 ประเทศไทยมีโคเนื้อจำนวนประมาณ 8,595,428 ตัว ซึ่งมีจำนวนเพิ่มขึ้นจากปี 2542 ร้อยละ 46 ดังตารางที่ 2.1 เนื่องจากจำนวนโคเนื้อในทุกภูมิภาคปรับตัวเพิ่มขึ้น โดยจำนวนโคเนื้อในภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีจำนวนมากที่สุดของประเทศเป็นจำนวนประมาณ 4,655,444 ตัว อย่างไรก็ตามปริมาณโคเนื้อในประเทศกลับไม่เพียงพอกับความต้องการของประชากร ส่งผลให้ราคาโคมีชีวิตที่เกษตรกรขายมีราคาสูงขึ้น

อย่างต่อเนื่อง รวมทั้งรัฐบาลยังมีนโยบายส่งเสริมสนับสนุนให้มีการเลี้ยงโคเนื้อ โดยมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อแก้ไขปัญหาความยากจนโดยให้เลี้ยงโคเป็นอาชีพเสริมเพื่อเพิ่มรายได้ การปรับเปลี่ยนรูปแบบการเลี้ยง การปรับปรุงพันธุกรรมให้ได้โคสายพันธุ์ที่ดี การจัดการด้านอาหารอย่างถูกต้อง เพื่อช่วยลดต้นทุนการผลิต จึงเป็นแนวทางใหม่ในการผลิตโคเนื้อในปัจจุบัน

**ตารางที่ 2.1** จำนวนประชากรโคเนื้อ (ตัว) แสดงเป็นรายภาค ตั้งแต่ปี 2542 - 2552

| ปี พ.ศ. | ภาคกลาง | ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ | ภาคเหนือ | ภาคใต้ | รวมทั่วประเทศ |
|---|---|---|---|---|---|
| 2542 | 855,232 | 2,219,437 | 875,403 | 685,669 | 4,635,741 |
| 2543 | 849,237 | 2,522,961 | 943,251 | 585,165 | 4,900,614 |
| 2544 | 1,022,264 | 2,573,233 | 1,025,750 | 606,357 | 5,227,604 |
| 2545 | 936,075 | 2,910,823 | 1,132,292 | 570,995 | 5,550,185 |
| 2546 | 984,069 | 3,078,149 | 1,297,460 | 556,645 | 5,916,323 |
| 2547 | 1,001,425 | 3,693,782 | 1,326,987 | 646,138 | 6,668,332 |
| 2548 | 1,296,820 | 4,092,206 | 1,636,851 | 770,395 | 7,796,272 |
| 2549 | 1,315,270 | 4,316,949 | 1,564,797 | 839,041 | 8,036,057 |
| 2550 | 1,516,298 | 4,501,769 | 1,953,406 | 876,919 | 8,848,392 |
| 2551 | 1,553,668 | 4,931,389 | 1,847,601 | 779,435 | 9,112,093 |
| 2552 | 1 ,496,033 | 4,655,444 | 1 ,677,932 | 7 66,019 | 8 ,595,428 |

ที่มา: กรมปศุสัตว์ (2552)

## 2.3 พันธุ์โคเนื้อที่เลี้ยงในประเทศไทย

โดยทั่วไปถ้าแบ่งสายพันธุ์โคตามถิ่นกำเนิดจะมี 2 สายพันธุ์ คือโคอินเดียหรือโคซีบู (*Bos indicus*) และโคยุโรป (*Bos taurus*) (Pond and Pond, 2000; Taylor and Field, 2001) โดยมีลักษณะความแตกต่างดังนี้ คือ โคอินเดียเป็นโคในเขตร้อน และเขตร้อนชื้น ได้แก่ โคพื้นเมืองไทย โคพันธุ์บราห์มัน เป็นต้น มีการเลี้ยงในประเทศแถบเอเชียเป็นจำนวนมาก (กฤตพล, 2546; บัญญัติ, 2549) โคพวกนี้จะมีลักษณะร่างกายขนาดเล็ก โตช้า แต่ทนต่อสภาพอากาศร้อนและร้อนชื้น ทนต่อโรคและแมลงได้ดี ลักษณะเด่นคือ มีอัตราการผสมติดสูงมาก ส่วนโคยุโรปเป็นโคในเขตอบอุ่น เช่น พันธุ์ชอร์ตฮอร์น พันธุ์เฮียฟอร์ด และพันธุ์ชาร์โรเลส์ เป็นต้น โคพวกนี้มีร่างกายใหญ่ โตเร็ว แต่ไม่ทนต่อสภาพอากาศร้อนและร้อนชื้น ไม่ทนต่อโรคและแมลง รวมทั้งพยาธิ

แต่มีลักษณะซากและคุณภาพเนื้อมากกว่าโคอินเดีย (ชาญชัย, 2546; เรืองฤทธิ์, 2548) เนื่องจากโคเนื้อมีหลายพันธุ์ แต่ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะพันธุ์ที่มีอยู่ค่อนข้างแพร่หลายในประเทศไทย ที่สามารถหาซื้อพันธุ์หรือสามารถหาน้ำเชื้อในการผสมพันธุ์ได้

2.3.1 โคพื้นเมืองไทย (Thai native cattle)

โคพื้นเมืองไทยมีลักษณะโดยทั่วไปใกล้เคียงกับโคพื้นเมืองของประเทศเพื่อนบ้านในแถบเอเชีย เลี้ยงง่าย หากินเก่งและไม่เลือกอาหาร เพราะผ่านการคัดเลือกตามธรรมชาติในการเลี้ยงแบบไล่ต้อน ใช้แรงงานได้ดีและสามารถปรับตัวเข้ากับสภาพแวดล้อมในการเลี้ยงโดยใช้ทรัพยากรที่มีอยู่ในพื้นที่ ทนต่อโรคและแมลง ให้ลูกดก ส่วนใหญ่ให้ลูกปีละตัว แม่โคพื้นเมืองไทยเหมาะที่จะนำมาผสมกับพ่อพันธุ์หรือผสมเทียมกับพันธุ์อื่น ๆ เช่น พันธุ์บราห์มัน พันธุ์ตาก และพันธุ์กำแพงแสน เป็นต้น (ชาญชัย, 2546; จีรสิทธิ์, 2549)

เนื่องจากเป็นโคขนาดเล็กเพราะถูกคัดเลือกมาในสภาพการเลี้ยงที่มีอาหารจำกัด โคพื้นเมืองไทยจึงไม่เหมาะที่จะนำมาเลี้ยงขุนเพราะไม่สามารถทำน้ำหนักซากได้ตามที่ตลาดโคขุนต้องการ คือ น้ำหนักมีชีวิต 450 กิโลกรัม และเนื้อมีไขมันแทรกน้อย และเนื่องจากแม่โคมีขนาดเล็กจึงไม่เหมาะที่จะผสมกับโคพันธุ์ที่มีขนาดใหญ่ เช่น ชาร์โลเลย์ และซิมเมนทัล เพราะอาจมีปัญหาการคลอดยาก (กฤตพล, 2546; ชาญชัย, 2546; ประสาน, 2546; บัญญัติ, 2549) โคพื้นเมืองไทยสามารถจำแนกออกตามภูมิภาคต่าง ๆ ของประเทศดังนี้ (กรมปศุสัตว์, 2553)

ก. โคพื้นเมืองสายภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (สายอีสาน) ลักษณะประจำพันธุ์มีขนสั้นเกรียน โดยทั่วไปมีลำตัวสีน้ำตาลแกมแดง แต่อาจมีสีแตกต่างกันหลายสี เช่น ดำ แดง น้ำตาล ขาว เหลือ เป็นต้น หน้าผากแคบ ตะโหนกเล็ก เหนียงคอและหนังใต้ท้องไม่มากนัก มีรูปร่างขนาดเล็ก น้ำหนักแรกเกิด 16 กิโลกรัม น้ำหนักหย่านมเมื่ออายุ 200 วัน เฉลี่ย 94 กิโลกรัม น้ำหนักโตเต็มที่ เพศผู้ 300-350 กิโลกรัม เพศเมีย 220-250 กิโลกรัม อายุเมื่อให้ลูกตัวแรก 2.71 ปี ระยะการอุ้มท้อง 270-275 วัน ช่วงห่างการให้ลูก 395 วัน โคในภาคนี้ได้รับการปะปนจากโคสายพันธุ์อื่นโดยเฉพาะอย่างยิ่งโคบราห์มันอยู่พอสมควร เพราะได้รับการส่งเสริมจากหน่วยงานของกรมปศุสัตว์ซึ่งตั้งอยู่ทั่วทุกพื้นที่ การกระจายตัวของประชากรมีการเลี้ยงทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือทั้งตอนบนและตอนล่าง

ข. โคพื้นเมืองสายภาคกลาง (วัวลาน) ลักษณะประจำพันธุ์ นิสัยเปรียว ตื่นตกใจง่าย ลำตัวยาวบาง มีสีแดง สีน้ำตาลอ่อน น้ำตาลแก่ ดำ และด่าง ไม่มีเหนียงสะดือ มีเหนียงคอบาง น้ำหนักแรกเกิด 14 กิโลกรัม น้ำหนักหย่านมเมื่ออายุ 200 วัน เฉลี่ย 78 กิโลกรัม น้ำหนักโตเต็มที่ เพศผู้ 280-300 กิโลกรัม เพศเมีย 200-260 กิโลกรัม อายุเมื่อให้ลูกตัวแรก 3 ปี ระยะการอุ้มท้อง

270-275 วัน การกระจายของประชากรมีเลี้ยงทางภาคกลางโดยเฉพาะแถบจังหวัดสุพรรณบุรี กาญจนบุรี เพชรบุรี นครปฐม และประจวบคีรีขันธ์

ค. โคพื้นเมืองสายภาคใต้ (โคชน) ลักษณะประจำพันธุ์ มีสีแดง สีน้ำตาลอ่อน ดำ และด่าง ไม่มีเหนียงสะดือ มีเหนียงคอบาง น้ำหนักแรกเกิด 15 กิโลกรัม น้ำหนักหย่านมเมื่ออายุ 200 วัน เฉลี่ย 88 กิโลกรัม น้ำหนักโตเต็มที่ เพศผู้ 280-320 กิโลกรัมเพศเมีย 230-280 กิโลกรัม อายุเมื่อให้ลูกตัวแรก 3 ปี ระยะการอุ้มท้อง 270-275 วัน โคในภาคนี้สันนิษฐานว่า อาจมีเลือดผสมจากโคแขกหรือโคซีบูพันธุ์ใดพันธุ์หนึ่งนานมาแล้ว แต่ก็ไม่มีหลักฐานแน่ชัดโคชนมีหัวไหล่ใหญ่หนา โหนกใหญ่บั้นท้ายเล็ก บั้นหน้าค่อนข้างใหญ่ จึงเหมาะสำหรับใช้เป็น “โคชน” เพราะลำตัวส่วนหน้ามีกล้ามเนื้อมาก โดยเฉพาะในตัวผู้ทำให้มีแรงยืนหยัดยันพื้นดินดียิ่ง ส่วนบั้นท้ายเล็กมากจึงเคลื่อนไหวได้ปราดเปรียวเมื่อต่อสู้จะใช้เขาชนกัน ดังนั้นในภาคนี้นอกจากเลี้ยงโคลากเข็น ไถนา รวมทั้งใช้เนื้อแล้วก็ยังใช้เป็นสัตว์เพื่อเกมส์กีฬาด้วยการกระจายของประชากรมีเลี้ยงทางภาคใต้และมีมากที่สุดในแถบจังหวัดนครศรีธรรมราช พัทลุง ตรัง และ สงขลา

ง.โคพื้นเมืองสายภาคเหนือ (ขาวลำพูน) ลักษณะประจำพันธุ์ เขา และกีบเท้า มีสีน้ำตาลส้ม ขอบตา และเนื้อจมูก มีสีชมพูส้ม ขนพู่หาง สีขาวไม่มีเหนียงสะดือ ขนาดเหนียงคอปานกลางไม่พับย่นมากเหมือนกับโคบราห์มัน น้ำหนักแรกเกิด 18 กิโลกรัม น้ำหนักหย่านมเมื่ออายุ 200 วัน เฉลี่ย 122 กิโลกรัม น้ำหนักโตเต็มที่เพศผู้ 350-450 กิโลกรัมเพศเมีย 300-350 กิโลกรัม อายุเมื่อให้ลูกตัวแรก 2.5 ปี ระยะการอุ้มท้อง 290-295 วัน ช่วงห่างการให้ลูก 460 วัน โคขาวลำพูนเป็นโคพื้นเมืองประเภทหนึ่งซึ่งมีการเลี้ยงแพร่หลายในเขตภาคเหนือตอนบน คือจังหวัดลำพูน เชียงใหม่ และรองลงไปคือจังหวัดอื่น ๆ ที่ใกล้เคียง

2.3.2 โคพันธุ์บราห์มัน (American Brahman)

โคพันธุ์บราห์มันมีต้นกำเนิดในประเทศอินเดีย แต่ถูกปรับปรุงพันธุ์ที่ประเทศสหรัฐอเมริกาและออสเตรเลีย ถูกนำมาคัดเลือกปรับปรุงพันธุ์โดยกรมปศุสัตว์และฟาร์มต่าง ๆ เป็นโคที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่ ลำตัวกว้าง ยาวและลึก ได้สัดส่วน หลังตรง หนอกใหญ่ หูใหญ่ยาว จมูก ริมฝีปาก ขนตา กีบเท้าเป็นสีดำ เหนียงคอและหนังใต้ท้องหย่อนยาน โคนหางใหญ่ พู่หางสีดำ ลำตัวมีสีขาว เทา และแดง ที่นิยมเลี้ยงกันมากคือ สีขาว เพศผู้โตเต็มที่หนักประมาณ 800-1,200 กิโลกรัม เพศเมียโตเต็มที่หนักประมาณ 500-700 กิโลกรัม สามารถปรับตัวเข้ากับสภาพอากาศร้อนของเมืองไทยได้ดี ทนทานต่อโรคและแมลง โตเร็ว เหมาะสำหรับใช้เป็นโคพื้นฐานเพื่อผลิตโคเนื้อคุณภาพดี เช่น ผสมกับโคพันธุ์ชาร์โลเลย์เพื่อผลิตโคขุน และผสมกับพันธุ์ซิมเมนทัลเพื่อผลิตโคเนื้อกึ่งนม (ชาญชัย, 2546; วิชัย, 2547; สุณีรัตน์, 2547)

โคพันธุ์บราห์มันมีข้อด้อยบางประการคือ มีอัตราการผสมติดค่อนข้างต่ำ ให้ลูกตัวแรกช้าและให้ลูกค่อนข้างห่าง ส่วนใหญ่เลือกกินหญ้าที่มีคุณภาพดี เมื่อหญ้าขาดแคลนอาหารจะสูญเสียน้ำหนักตัวง่าย ซึ่งจะเห็นได้จากเมื่อปล่อยเข้าแปลงหญ้า จะเดินตระเวนไปทั่วแปลงหญ้าก่อนแล้วจึงค่อยเลือกกินหญ้า (สุรชัย, 2541; ชาญชัย, 2546; Pond and Pond, 2000; Taylor and Field, 2001)

2.3.3 โคพันธุ์ชาร์โลเลย์ (Chalolasis)

เป็นโคเนื้อที่มีถิ่นกำเนิดในประเทศฝรั่งเศส ลำตัวเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีสีขาวถึงครีม อาจมีสีแดงปะปนโดยเฉพาะบริเวณจมูก รอบตา และใต้สะดือ มีกล้ามเนื้อตลอดตัว เมื่อโตเต็มที่เพศผู้จะมีน้ำหนักประมาณ 1,000 กิโลกรัม เพศเมียจะมีน้ำหนักประมาณ 800 กิโลกรัม มีการเจริญเติบโตเร็วมาก ถ้าให้อาหารอย่างดีจะสามารถเจริญเติบโตได้วันละ 1.27 กิโลกรัมต่อวัน มีคุณภาพซากดีมากและเนื้อมีคุณภาพดี โคพันธุ์แท้เลี้ยงในประเทศไทยค่อนข้างยาก เนื่องจากสภาพอากาศไม่เหมาะสม (ประสาน, 2546; Taylor and Field, 2001; Gillespie, 2004)

2.3.4 โคพันธุ์ลิมัวซีน (Limousine)

เป็นโคเนื้อที่มีถิ่นกำเนิดในประเทศฝรั่งเศส มีหัวและขนสีน้ำตาลแดงจนถึงแดงเข้ม มีลักษณะตัวเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ลำตัวลึก อ้วนและยาว มีอัตราการเจริญเติบโตดีมาก ถ้าให้อาหารอย่างดีจะสามารถเจริญเติบโตได้วันละ 1.19 กิโลกรัมต่อวัน เมื่อโตเต็มที่เพศผู้จะมีน้ำหนักประมาณ 800-900 กิโลกรัม เพศเมียจะมีน้ำหนักประมาณ 600 กิโลกรัม มีคุณภาพซากและคุณภาพเนื้อดี (ชาญชัย, 2546; Taylor and Field, 2001; Gillespie, 2004)

2.3.5 โคพันธุ์เฮียฟอร์ด (Hereford)

เป็นโคพันธุ์พื้นเมืองของอังกฤษ และเป็นพันธุ์ที่มีชื่อเสียงมาก มีขนาดปานกลางถึงใหญ่มาก เมื่อโตเต็มที่เพศผู้จะมีน้ำหนักประมาณ 1,000 กิโลกรัม เพศเมียจะมีน้ำหนักประมาณ 860 กิโลกรัม มีสีและลักษณะที่เป็นพิเศษคือ มีหน้าขาว แผงลำคอสีแดง มีแถบขาวตรงคอ อกและใต้ท้อง หากินเก่ง ปรับตัวเก่ง เชื่อง ประสิทธิภาพการสืบพันธุ์สูง กระดูกใหญ่และเนื้อมาก (ชาญชัย, 2546; จีรสิทธิ์, 2549; Taylor and Field, 2001)

2.3.6 โคพันธุ์ตาก (Tak)

เป็นโคพันธุ์ลูกผสมระหว่างโคพันธุ์ชาร์โลเลย์กับโคพันธุ์บราห์มัน ได้รับการปรับปรุงพันธุ์โดยกรมปศุสัตว์ เพื่อใช้เป็นโคพันธุ์ใหม่ที่โตเร็ว เนื้อนุ่ม เพื่อทดแทนการนำเข้าพันธุ์โคและเนื้อโคจากต่างประเทศ โคพันธุ์ตากมีสายเลือดโคพันธุ์ชาร์โลเลย์สูงถึง 62.50 เปอร์เซ็นต์ และไม่มีสายเลือดโคพื้นเมืองไทยอยู่ จึงสามารถใช้ผสมกับแม่โคพื้นเมืองที่จะให้ลูกเพศผู้ใช้เลี้ยงขุนได้ (ชาญชัย, 2546; บัญญัติ, 2549; ประสาน, 2546)

2.3.7 โคพันธุ์กำแพงแสน (Kampangsan)

เป็นโคพันธุ์ใหม่ปรับปรุงโดยมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ มีสายเลือดโคพื้นเมืองไทย 25 เปอร์เซ็นต์ พันธุ์บราห์มัน 25 เปอร์เซ็นต์ และพันธุ์ชาร์โลเลย์ 50 เปอร์เซ็นต์ จุดประสงค์ของการมีโคพันธุ์นี้เพื่อต้องการสร้างโคที่มีคุณสมบัติให้เป็นโคเนื้อที่ดี ครบถ้วนสำหรับการเลี้ยงในสภาพทั่วไปของประเทศไทยโดยใช้ทรัพยากรที่มีอยู่ เมื่อโตเต็มที่เพศผู้จะมีน้ำหนักประมาณ 800-1,000 กิโลกรัม เพศเมียจะมีน้ำหนักประมาณ 500-600 กิโลกรัม ลำตัวมีสีขาวครีมหรือเหลือง (ปราถนา, 2544; ชาญชัย, 2546; บัญญัติ, 2549; ศรเทพ, 2549)

2.3.8 โคพันธุ์กบินทร์บุรี

เป็นโคพันธุ์ลูกผสมระหว่างโคพันธุ์ซิมเมนทอลกับโคพันธุ์บราห์มัน เป็นโคกึ่งเนื้อกึ่งนม โดยลูกโคเพศผู้ใช้เป็นโคขุนได้ดี และแม่โคใช้รีดนมได้ โคพันธุ์กบินทร์บุรีมีสีแดงเข้มคล้ายโคพันธุ์ซิมเมนทอล เป็นโคขนาดกลาง เมื่อโตเต็มที่เพศผู้จะมีน้ำหนักประมาณ 900-1,000 กิโลกรัม เพศเมียจะมีน้ำหนักประมาณ 600-700 กิโลกรัม ทนทานต่อสภาพอากาศร้อนได้ดีพอสมควร เหมาะที่จะนำมาผสมกับแม่โคพื้นเมืองไทย โคพันธุ์บราห์มัน และโคพันธุ์ลูกผสมบราห์มัน เพื่อนำลูกโคเพศผู้มาเลี้ยงเป็นโคขุน ลูกโคเพศเมียใช้รีดนมได้ดี หากเลี้ยงแบบโคเนื้อมีการเจริญเติบโตเร็ว ซากมีขนาดใหญ่เป็นที่ต้องการของตลาด (ชาญชัย, 2546; บัญญัติ, 2549)

## 2.4 อาหารสำหรับโคเนื้อ

การจำแนกวัตถุดิบอาหารสัตว์ตามส่วนประกอบทางเคมี ลักษณะของวัตถุดิบและวัตถุประสงค์ของการนำวัตถุดิบมาใช้ จะสามารถแบ่งวัตถุดิบอาหารสัตว์ออกเป็น 2 ประเภท คือ อาหารหยาบ (roughage) และอาหารข้น (concentrate) ซึ่งแต่ละประเภทจะประกอบด้วยวัตถุดิบประเภทและชนิดต่าง ๆ ดังนี้ (พันทิพา, 2547; Ensminger et al., 1990; Kellems and Church, 2002; Gillespie, 2004; Pond et al., 2005; Tyler and Ensminger, 2006)

2.4.1 อาหารหยาบ

อาหารหยาบ หมายถึง อาหารที่มีลักษณะฟ่ามและเบา มีเยื่อใยหยาบสูงกว่าร้อยละ 18 ของน้ำหนักแห้ง มีพลังงานและโภชนะที่ย่อยได้ต่ำ เพราะได้จากพืชจึงมีลิกนินและซิลิก้าสูง ซึ่งสัตว์ไม่สามารถย่อยได้ โดยเฉลี่ยแล้วโภชนะที่ย่อยได้รวม (total digestible nutrient, TDN) จะต่ำกว่าร้อยละ 60 แต่สำหรับอาหารหยาบที่ได้จากพืชต้นอ่อนบางชนิดอาจมีโภชนะที่ย่อยได้รวมสูงถึงร้อยละ 70 เพราะยังมีการสะสมลิกนินน้อย อย่างไรก็ตามจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ในกระเพาะของสัตว์เคี้ยวเอื้อง เช่น โค กระบือ แพะ และแกะ เป็นต้น สามารถย่อยส่วนเยื่อใยได้ อาหารหยาบจึงจัดเป็นอาหารที่สำคัญสำหรับสัตว์เหล่านี้ อาหารหยาบแบ่งออกได้เป็น 3 ประเภท คือ อาหารหยาบสด

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

(pasture and green forage) เป็นอาหารหยาบที่สัตว์กินในสภาพสด อาหารหยาบแห้ง (hay) หรือเรียกกันโดยทั่วไปว่าหญ้าหรือถั่วแห้ง และอาหารหยาบหมัก (silage) คืออาหารสัตว์ต่าง ๆ ที่เก็บเกี่ยวในขณะที่มีความชื้นพอเหมาะแล้วเก็บถนอมไว้ในสภาพสูญญากาศ (พันทิพา, 2547; Ensminger et al., 1990; McDonald et al., 2002; Tyler and Ensminger, 2006)

2.4.2 อาหารข้น

อาหารข้นเป็นอาหารที่มีโภชนะที่สัตว์ย่อยได้สูง มีเยื่อใยหยาบต่ำกว่าร้อยละ 18 ของน้ำหนักแห้ง ถ้าผู้เลี้ยงสัตว์ต้องการให้สัตว์เคี้ยวเอื้องมีสุขภาพดี มีการเจริญเติบโตให้ผลผลิตสูง และเพื่อให้มีโภชนะพลังงานและโปรตีน รวมทั้งแร่ธาตุและวิตามินครบในปริมาณที่สัตว์ต้องการ จะต้องเสริมอาหารข้นด้วย (เมธา, 2533; ฉลอง, 2541)

ตามปกติการผสมอาหารข้นสำหรับสัตว์มักจะมีการเสริมแร่ธาตุชนิดต่าง ๆ ลงไปในอาหารในรูปของหัวแร่ธาตุ ซึ่งส่วนใหญ่สัตว์ต้องการในปริมาณน้อย ยกเว้นธาตุแคลเซียมและฟอสฟอรัสในอาหารสัตว์ แหล่งของแคลเซียม ได้แก่ เปลือกหอยป่น ไดแคลเซียมฟอสเฟต กระดูกป่น เป็นต้น ต้องใช้ปริมาณมาก วัตถุดิบที่ใช้กันอยู่ทั่วไปมักจะมีวิตามินชนิดต่าง ๆ อยู่แล้ว แต่อาจมีวิตามินบางชนิดไม่เพียงพอกับความต้องการของสัตว์หรืออาจอยู่ในสถานะที่สัตว์ไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้อย่างเต็มที่ วิตามินที่แนะนำให้เสริมลงในอาหารได้แก่ วิตามินเอ ดี อี วัตถุดิบที่จัดเป็นประเภทเสริมวิตามิน ได้แก่ น้ำมันตับปลา วิตามินสังเคราะห์ชนิดต่าง ๆ (Ensminger et al., 1990; Kellems and Church, 2002; McDonald et al., 2002)

## 2.5 อาหารคาร์โบไฮเดรต

คาร์โบไฮเดรต (carbohydrates) ประกอบด้วยธาตุคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) และออกซิเจน (O) โดยคาร์โบไฮเดรตเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของอาหารที่ได้จากพืช (พจน์ และคณะ, 2543; NRC, 2001) เมื่อสัตว์เคี้ยวเอื้องกินพืชเป็นอาหารจะได้รับคาร์โบไฮเดรตไปด้วย คาร์โบไฮเดรตมีหน้าที่ช่วยให้พลังงานในการทำงานต่าง ๆ ของร่างกาย ให้ความอบอุ่น มีอิทธิพลต่อการให้ผลผลิตของสัตว์ และช่วยให้สัตว์อ้วน (กฤตพล, 2546) ในทางอาหารสัตว์แบ่งคาร์โบไฮเดรตตามโครงสร้างออกเป็น 2 กลุ่มหลัก (NRC, 2001) คือ

1. คาร์โบไฮเดรตประเภทที่ไม่เป็นโครงสร้าง (non structural carbohydrate) เป็นคาร์โบไฮเดรตที่ย่อยได้ง่ายโดยเอนไซม์จากตัวสัตว์เอง จึงใช้ประโยชน์ได้ดีทั้งในสัตว์เคี้ยวเอื้องและสัตว์ไม่เคี้ยวเอื้อง ส่วนใหญ่ประกอบด้วยแป้งและน้ำตาลชนิดต่าง ๆ เช่น กลูโคส กาแลคโตส ฟรุคโตส อะราบิโนส และไซโลส เป็นต้น

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
ห้องสมุดงานวิจัย
วันที่ 26 ส.ค. 2555
เลขทะเบียน 203377
เลขเรียกหนังสือ

2. คาร์โบไฮเดรตประเภทที่เป็นโครงสร้าง (structural carbohydrate) เป็นพวกน้ำตาลเชิงซ้อน (polysaccharides) ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และเพคติน พวกนี้อยู่ในผนังเซลล์ของพืช ช่วยสร้างความแข็งแรงให้แก่พืชแต่ย่อยได้ยาก เอนไซม์จากตัวสัตว์ไม่สามารถย่อยได้ต้องอาศัยการย่อยโดยจุลินทรีย์ที่อยู่ในทางเดินอาหารของสัตว์จึงจะใช้ประโยชน์ได้ (กฤตพล, 2546) การย่อยอาหารคาร์โบไฮเดรตอาจจัดแบ่งออกได้เป็น 2 ระยะ คือ ระยะแรก เป็นการย่อยโดยอาศัยน้ำย่อยจากจุลินทรีย์ที่ปล่อยออกมาภายนอกเซลล์ เข้าย่อยคาร์โบไฮเดรตที่มีโครงสร้างซับซ้อนให้ได้น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว คือ กลูโคส (glucose) และไซโลส (xylose) เป็นหลัก หลังจากนั้นจะถูกจุลินทรีย์นำเข้าสู่เซลล์ทันที ในระยะที่สอง เป็นการใช้ประโยชน์จากคาร์โบไฮเดรตโดยจุลินทรีย์ในระยะนี้มีเส้นทางด้านขบวนการเมทธาโบลิซึมคล้ายกับในเซลล์ของสัตว์ อย่างไรก็ตามต้องผ่านเส้นทางหลัก โดยมีสารที่เป็นตัวกลาง (intermediate) คือ ไพรูเวต (pyruvate) (บุญล้อม, 2541; พจน์ และคณะ 2543) ผลผลิตสุดท้ายจากกระบวนการหมักอาหารคาร์โบไฮเดรตในกระเพาะหมักได้เป็น กรดไขมันระเหยได้ (volatile fatty acids, $VFA_s$) ที่สำคัญได้แก่ กรดอะซิติก (acetic acid, $C_2$) กรดโพรพิออนิก (propionic acid, $C_3$) และกรดบิวทีริค (butyric acid, $C_4$) นอกจากนี้ยังมีแก๊ส คาร์บอนไดออกไซด์และมีเทนด้วย (Van Soest, 1994; NRC, 2001)

กรดไขมันระเหยได้ที่ผลิตได้ประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ ถูกดูดซึมที่กระเพาะหมัก (Dijkstra, 1994) และอีกประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ ถูกดูดซึมที่ สามสิบกีบ (omasum) กระเพาะจริง (abomasum) และลำไส้เล็ก (Frobes and France, 1993) กรดไขมันระเหยได้ที่ถูกดูดซึมเข้าสู่ portal blood หมุนเวียนอยู่ในรูปของประจุลบที่เป็นกลางในสภาวะความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของเลือด (เมธา, 2533; Van Soest, 1994) จากนั้นจะถูกเมทาบอไลท์เพื่อใช้ประโยชน์ในร่างกายของสัตว์ ดังนี้

1. กรดอะซิติก จะถูกนำไปใช้เพื่อให้พลังงานโดยผ่านทาง acetyl-CoA เข้าสู่ Kreb's cycle (บุญล้อม, 2541) หรือใช้ในการสังเคราะห์ไขมัน (lipogenesis) ในเนื้อเยื่อผ่านทางกระบวนการ carboxylation เป็น malonyl-CoA (ฉลอง, 2541) ในโคนมที่กำลังให้ผลผลิต ต่อมน้ำนมจะใช้กรดอะซิติกเพื่อเป็นแหล่งของคาร์บอนในการสังเคราะห์ กรดไขมันในน้ำนม (Van Soest, 1994)

2. กรดโพรพิออนิก จะถูกเมทาบอไลท์ที่ตับ 80-90 เปอร์เซ็นต์ และมีบทบาทสำคัญในการใช้เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์กลูโคส (gluconeogenesis) และถูกนำไปใช้ในการ สังเคราะห์น้ำตาลแลคโตสในนม (Van Soest, 1994) โดยเริ่มจากการเปลี่ยนกรดโพรพิออนิกเป็น propionyl-CoA เกิดคาร์บอกซิเลชั่นได้ methylmalonyl-CoA ตามด้วยการจัดเรียงตัวของคาร์บอน เป็น succinyl-CoA จากนั้นจะถูกดูดซึมเข้าสู่ TCA cycle ผ่าน oxaloacetate (บุญล้อม, 2541) จากจุดนี้

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดงานวิจัย

สามารถนำไปสังเคราะห์กลูโคสโดยผ่านทาง Embden-Meyerhof pathway (Van Soest, 1994) หรือรวมตัวกับ acetyl-CoA เป็น citrate หรือนำไปสังเคราะห์เป็นกรดแอมิโนที่ไม่จำเป็น (ฉลอง, 2541)

3. กรดบิวทีริก ส่วนมากจะถูกเมทาบอไลท์ที่ผนังกระเพาะหมักเป็นสารคีโตน (ketone body) ได้แก่ อะซีโตอะซีเตท (acetoacetate) และเบตา-ไฮดรอกซีบิวทีเรท (β-hydroxybutyrate) ซึ่งสามารถเปลี่ยนแปลงระหว่างกันได้ในตับ (บุญล้อม, 2541) ในบางสถานการณ์โดยเฉพาะภายใต้สภาวะการสลายไขมัน หรือมีความต้องการพลังงานในสภาวะขาดอาหารทำให้พบ β-hydroxybutyrate ใน peripheral blood จำนวนมาก ถ้ามากเกินไปจะมีผลทำให้เกิดภาวะคีโตซีสได้ ในสภาวะปกติสารคีโตนก็จะถูกใช้ในเนื้อเยื่อต่าง ๆ เช่นเดียวกับ กรดอะซิติก (เมธา, 2533; Van Soest, 1994)

## 2.6 อาหารโปรตีน

โปรตีน (proteins) เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีโมเลกุลใหญ่และมีน้ำหนักมาก ประกอบด้วยกรดแอมิโน (amino acid) มาเรียงตัวกันด้วยพันธะเพปไทด์ (peptide bond) เกิดเป็นสายเพปไทด์ (peptide chain) ประกอบด้วยธาตุไนโตรเจน (N) เป็นองค์ประกอบสำคัญ โดยมีไนโตรเจนประมาณ 16 เปอร์เซ็นต์ มีคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) และออกซิเจน (O) เป็นหลัก อาจมีฟอสฟอรัส (P) และกำมะถัน (S) บ้าง (กฤตพล, 2546; NRC, 2001) โปรตีนมีความสำคัญเป็นส่วนประกอบของร่างกาย เช่น อวัยวะต่าง ๆ เลือด เนื้อ หนัง เอนไซม์ ภูมิคุ้มกัน ฮอร์โมน ฯลฯ เป็นต้น (พจน์ และคณะ, 2543) โดยเฉพาะสัตว์ที่อยู่ ในระยะเจริญเติบโต ระยะอุ้มท้อง และให้นม มีความต้องการโปรตีนมากเป็นพิเศษ (NRC, 2001) แหล่งของโปรตีนแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ (กฤตพล, 2546)

1. โปรตีนแท้ (true protein) ได้จากการจับกันด้วยพันธะเพปไทด์ (peptide bond) ของกรดแอมิโนตั้งแต่ 20 โมเลกุลขึ้นไป เช่น โปรตีนจากพืชและสัตว์ หรือได้จากการสังเคราะห์ของจุลินทรีย์ เป็นต้น

2. ไนโตรเจนที่ไม่ใช่โปรตีน (non-protein nitrogen, NPN) มีหลายชนิด ได้แก่ ยูเรีย ไบยูเรท แอมโมเนีย ไนไตรท์ กรดแอมิโนอิสระ ฯลฯ เป็นต้น

ในขบวนการย่อยและเมทธาโบลิซึมอาหารโปรตีนในระบบสัตว์เคี้ยวเอื้อง อาหารโปรตีนถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์หลายกลุ่ม (อาศัย extra cellular enzymes) (กฤตพล, 2546; Van Soest, 1994; NRC, 2001) จุลินทรีย์ที่พบในกระเพาะรูเมนมี 3 กลุ่ม หลัก ๆ ได้แก่ แบคทีเรีย (bacteria) โปรโตซัว (protozoa) และ เชื้อรา (fungi) โดยเชื่อว่าเชื้อราเป็นจุลินทรีย์กลุ่มแรกที่เข้าย่อย โดยทำการย่อยสลายอนุภาคอาหารจากด้านในของอนุภาค ทำให้อนุภาคอาหารมีการจับตัวกันอย่างหลวม ๆ ซึ่งมีผลโดย

อ้อมในการช่วยจุลินทรีย์ที่อยู่ในกลุ่มอื่น ๆ ย่อยสลายโปรตีนต่อไป (Hungate, 1966) ส่วนแบคทีเรียที่ทำหน้าที่ในการย่อยสลายอาหารโปรตีนได้แก่ *Bacteroides amylophilus*, *Clostridium sporgens* และ *Bacilus inchefermis* เป็นต้น ซึ่งใช้เอนไซม์เพปติเดสที่ผลิตขึ้นในการย่อยโปรตีน (Van Soest, 1994) และโปรโตซัวที่สามารถย่อยโปรตีน (proteolytic protozoa) ได้แก่ *Entodinium caudatum* จะมีเอนไซม์ดีอะมิเนส (deaminase) (Hungate, 1966) นอกจากนี้ยังมีเอนไซม์อะมิเนส (aminase) ซึ่งทำหน้าที่ในการย่อยสลายกรดแอมิโน ดังนั้นโปรตีนถูกย่อยโดยน้ำย่อยของจุลินทรีย์โดยเกิดไฮโดรไลซีสที่พันธะเพปไทด์ได้ เพปไทด์และกรดแอมิโน (กฤตพล, 2546) กรดแอมิโนที่ได้จากการย่อยจะถูกหมักต่อไป (เกิดขึ้นภายในเซลล์โดยอาศัย intra cellular enzymes) ผลผลิตสุดท้ายจากกระบวนการหมักที่ปลดปล่อยออกมาจากเซลล์อยู่ในของเหลวที่กระเพาะหมักได้แก่ แอมโมเนีย แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ($CO_2$) (บุญล้อม, 2541; Van Soest, 1994) และกรดอินทรีย์ที่มีสายสั้น ๆ (short chain fatty acid, VFA) ในปริมาณเล็กน้อย (กฤตพล, 2546) คือ กรดไขมันสายสั้นที่ระเหยได้ง่าย ที่เกิดจากขบวนการ deamination ของกรดแอมิโน เช่น ผลผลิตจากการย่อยกรดแอมิโน valine จะได้ iso-butyric acid การย่อยกรดแอมิโน proline จะได้ valeric acid การย่อยกรดแอมิโน iso leucine 2-methyl จะได้ butyric acid เป็นต้น ซึ่งกระบวนการย่อยสลายนี้มีหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้องทั้งความสามารถในการละลายและค่า pH ภายในกระเพาะหมัก (Van Soest, 1994; NRC, 2001) โดยค่าที่เหมาะสมอยู่ระหว่าง 6.0-7.0 (บุญล้อม, 2541; กฤตพล, 2546)

ไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนีย (ammonia nitrogen, $NH_3$-N) ที่อยู่ในรูปของเหลวในกระเพาะหมักรวมทั้งกรดแอมิโนอิสระและเพปไทด์บางส่วนถูกจุลินทรีย์หลายกลุ่มนำไปใช้ประโยชน์เพื่อสังเคราะห์เป็นโปรตีนของจุลินทรีย์ (microbial protein synthesis) (กฤตพล, 2546) โดยโปรตีนของจุลินทรีย์สร้างมาจาก $NH_3$-N ประมาณ 61 เปอร์เซ็นต์ ที่เหลือมาจากกรดแอมิโนและเพปไทด์อีกประมาณ 39 เปอร์เซ็นต์ โปรตีนของจุลินทรีย์มีความสำคัญต่อสัตว์เคี้ยวเอื้องมากเนื่องจากเป็นแหล่งโปรตีนที่สัตว์จะย่อยและดูดซึมนำไปใช้ประโยชน์ต่อไปได้ (NRC, 2001) บุญล้อม (2541) กล่าวว่า โปรตีนของจุลินทรีย์ที่ผลิตได้ในกระเพาะหมักจะเป็นโปรตีนที่มีคุณภาพดี มีค่า biological value (BV) ประมาณ 66-87 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งใกล้เคียงกับโปรตีนของสัตว์ และดีกว่าโปรตีนจากพืชส่วนใหญ่

ความเข้มข้น $NH_3$-N ในของเหลวจากกระเพาะหมัก สามารถใช้เป็นตัวบ่งชี้การย่อยและการสังเคราะห์โปรตีน โดยระดับความเข้มข้นที่เหมาะสมของ $NH_3$-N สำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์อยู่ในช่วงประมาณ 85-300 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่หากต่ำกว่า 50 มิลลิกรัมต่อลิตร จะมีผลทำให้ การเจริญเติบโตและการเพิ่มจำนวนของจุลินทรีย์ลดลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการสังเคราะห์โปรตีนต่ำลง จะเกิดขึ้นในกรณีที่อาหารมีโปรตีนต่ำ หรือโปรตีนนั้นมีโปรตีนที่ไหลผ่าน (bypass)

สูงเกินไป แต่ถ้ามีการย่อยอาหารโปรตีนเกิดขึ้นรวดเร็วเกินกว่าอัตราการนำเอา $NH_3$-N ไปสังเคราะห์โปรตีน $NH_3$-N ที่มากเกินพอจะถูกดูดซึมผ่านผนังของกระเพาะหมัก รวมทั้งส่วนที่ไหลผ่านไปที่ลำไส้เล็กจะถูกดูดซึมสู่กระแสเลือด และส่งไปยังตับเพื่อเปลี่ยนเป็นไนโตรเจนในรูปของยูเรีย (urea nitrogen) โดยอาศัยวัฏจักรยูเรีย (urea cycle หรือ Krebs-Henseleit cycle) (พจน์ และคณะ, 2543; Van Soest, 1994) ทั้งนี้เพื่อลดพิษจาก $NH_3$-N ในเลือดที่สูงเกินไป อย่างไรก็ตาม ยูเรียบางส่วนอาจจะหมุนเวียนกลับ (nitrogen recycling) ไปใช้ประโยชน์อีกครั้งที่กระเพาะหมักได้ 2 ทาง คือ ทางต่อมน้ำลาย (salivary gland) และการซึมผ่านโดยอาศัยกระบวนการแพร่ (simple diffusion) ผ่านทางผนังกระเพาะหมักโดยตรง ส่วนที่เหลือซึ่งเป็นส่วนใหญ่จะถูกขับถ่ายเป็นของเสียในปัสสาวะโดยการกรองที่ไตในรูปของยูเรีย (บุญล้อม, 2541; Van Soest, 1994) ในกรณีที่อัตราการดูดซึมแอมโมเนียเกิดขึ้นเร็วกว่าความสารถของตับในการเปลี่ยนแอมโมเนียให้เป็นยูเรียได้ทัน จะเกิดการสะสมของแอมโมเนียในเลือด ซึ่งจะก่อให้เกิดสภาวะเป็นพิษเนื่องจากแอมโนเนีย (hyperammonemia) โดยสัตว์จะมีอาการกระวนกระวาย น้ำลายฟูมปาก กล้ามเนื้อชักกระตุก หายใจลำบาก ปัสสาวะและอุจจาระบ่อย ๆ เดินโซเซ ล้มนอนเดินไม่ได้ กล้ามเนื้อกระตุกบ่อยครั้งและรุนแรง สัตว์จะถึงตายได้ ความเข้มข้นของ $NH_3$-N ที่อาจก่อให้เกิดพิษได้คือ ประมาณ 80 มิลลิกรัมต่อเดซิลิตร สำหรับในกระเพาะรูเมน หรือ ประมาณ 1 มิลลิกรัมต่อเดซิลิตร สำหรับในกระแสเลือด (เมธา, 2533)

## 2.7 การประเมินคุณค่าทางโภชนะของอาหารสัตว์

การประเมินคุณค่าทางโภชนะวัตถุดิบอาหารสัตว์ เป็นวิธีการดำเนินการทดสอบเพื่อให้ได้ความรู้ทางด้านศักยภาพหรือความสามารถของวัตถุดิบอาหารที่ใช้ประโยชน์ทางโภชนาการต่อสัตว์ที่เราใช้ศึกษา ความรู้ดังกล่าวสามารถนำไปใช้เพื่อการสร้างมาตรฐานค่าความต้องการโภชนะ ซึ่งเป็นวิธีการให้อาหารสัตว์ที่ถูกต้องและแม่นยำ ตรงตามความต้องการโภชนะของสัตว์ตามศักยภาพทางพันธุกรรมและระดับการให้ผลผลิตที่ต้องการ (กฤตพล, 2550) นอกจากนี้การประเมินคุณค่าทางโภชนะของอาหารสัตว์และวัตถุดิบอาหารสัตว์ยังเป็นแนวทางการชี้นำและช่วยตัดสินใจในการเลือกใช้วัตถุดิบอาหารสัตว์ชนิดต่าง ๆ เพื่อให้การผลิตสัตว์เป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ (ทรงศักดิ์, 2545) รวมทั้งสามารถใช้ในการประเมินสมรรถนะทางการให้ผลผลิตของสัตว์ด้วย (กฤตพล, 2552)

ปัจจุบันมีวิธีการตรวจประเมินคุณค่าทางโภชนะวัตถุดิบอาหารสัตว์หลากหลายวิธี โดยการตรวจวิเคราะห์ส่วนประกอบทางเคมี (chemical composition procedure) ด้วยขั้นตอนเฉพาะเพื่อหาปริมาณโภชนะที่ประกอบอยู่ในวัตถุดิบอาหาร แต่การตรวจสอบทางเคมีมีข้อเสียในด้านขาดข้อมูลที่สัตว์สามารถใช้ประโยชน์ได้โดยตรง เนื่องจากโภชนะที่มีในอาหารบางครั้งสัตว์ไม่สามารถ

นำไปใช้ประโยชน์ได้จริง ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาค่าความสามารถในการใช้ประโยชน์วัตถุดิบอาหารในตัวสัตว์ร่วมด้วย ซึ่งอาจใช้การทดสอบได้ทั้งในตัวสัตว์ หรือการทดสอบด้วยวิธีการในหลอดทดลอง (กฤตพล, 2550)

2.7.1 การทดลองเพื่อวัดการย่อยได้ (digestion trials)

เป็นการทดสอบเพื่อวัดการย่อยได้หรือการใช้ประโยชน์ได้ของโภชนะในอาหารสัตว์ ซึ่งการวัดการย่อยได้สามารถทำได้หลายวิธีดังนี้

1. การวัดการย่อยได้โดยวิธีการชั่งทั้งหมด (total collection)

เป็นการทดลองเพื่อวัดการย่อยได้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความสามารถของอาหารที่สามารถดูดซึมเข้าสู่ร่างกายได้ภายในระบบทางเดินอาหาร ดังนั้นจึงจำเป็นต้องทราบองค์ประกอบของอาหารที่สัตว์กิน และอาหารส่วนที่ไม่ย่อยหรือขับออกทางมูล หากเราเก็บรวบรวมบันทึกข้อมูลด้านอาหารที่กินได้และมูลที่ขับถ่ายออก พร้อมสุ่มเก็บตัวอย่างทั้งสองส่วนนำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมี ก็จะทำให้สามารถคิดคำนวณโภชนะที่สูญหายไปหรือส่วนที่สัตว์สามารถย่อยหรือดูดซึมไว้ได้ (Schnider and Flatt, 1975)

การวัดการย่อยได้โดยวิธีการชั่งทั้งหมด สามารถทำได้โดยการเลี้ยงสัตว์ด้วยอาหารที่ต้องการทดสอบ การจัดการให้อาหารสัตว์ควรเป็นแบบจำกัดในปริมาณคงที่ (constant daily feed intake) เพื่อป้องกันความแปรปรวนของปริมาณมูลที่ขับออกมาในแต่ละวัน ระยะเวลาที่จำเป็นต้องใช้เพื่อให้อาหารเก่าขับออกมาทางมูลในสัตว์เคี้ยวเอื้องจะใช้เวลานานกว่าสัตว์ชนิดอื่น ซึ่งใช้เวลาประมาณ 1-2 วัน ดังนั้นระยะเวลาจึงจำเป็นสำหรับการเตรียมสัตว์ เรียกว่าระยะการปรับสัตว์ (preliminary period) เพื่อให้สัตว์ทดลองได้คุ้นเคยกับอาหารที่ใช้ทดสอบและกำจัดผลกระทบจากอาหารที่อาจตกค้างจากอาหารอื่นที่สัตว์ได้รับก่อนการทดสอบ รวมถึงเป็นการปรับสภาพสัตว์ให้เข้ากับสภาพแวดล้อมในการทดลอง ดังนั้นจึงควรมีระยะเวลาในการปรับสัตว์นานประมาณ 3-10 วัน ต่อจากระยะการปรับสัตว์จึงจะทำการสุ่มเก็บตัวอย่าง เรียกว่า ระยะการสุ่มเก็บตัวอย่าง (collection period) ซึ่งควรมีระยะเวลานานประมาณ 4-10 วัน จากนั้นนำตัวอย่างอาหารและตัวอย่างมูลไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมี และนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณการย่อยได้ดังสูตรต่อไปนี้ (Schnider and Flatt, 1975)

$$\text{ค่าสัมประสิทธิ์การย่อยได้ของโภชนะ} = \frac{(\text{โภชนะที่กิน} - \text{โภชนะที่ขับออกในมูล})}{\text{โภชนะที่กิน}}$$

การวัดการย่อยได้โดยวิธีการชั่งทั้งหมดเป็นวิธีที่ยอมรับกันมาก เนื่องจากอาหารทดสอบและสัตว์ทดลองที่ใช้เพื่อวัดการย่อยได้สามารถควบคุมได้ง่าย การจัดการดูแลอย่างใกล้ชิดมากกว่าการทดลองเลี้ยงสัตว์ด้วยอาหารในระยะยาว ดังนั้นระยะเวลาที่ใช้จึงน้อยกว่าและความแปรปรวนระหว่างตัวสัตว์มีต่ำกว่า แต่ใช้แรงงานและค่าใช้จ่ายที่ค่อนข้างสูง (ทรงศักดิ์, 2545) จำนวนสัตว์ที่ใช้ในการทดสอบการย่อยได้ควรอยู่ในช่วงประมาณ 4-6 ตัวต่อกลุ่ม (treatment) ก็สามารถทดสอบและเพียงพอสำหรับการทดสอบในทางสถิติ (กฤตพล, 2552)

2. การศึกษาการย่อยได้โดยวิธีการใช้ตัวบ่งชี้ (indirect method)

เป็นวิธีการที่ใช้เพื่อศึกษาค่าการย่อยได้ของอาหารในตัวสัตว์ โดยอาศัยสารประกอบที่ไม่สามารถย่อยได้เป็นตัวบ่งชี้ วิธีนี้มีความเหมาะสมในกรณีที่ไม่สามารถดำเนินการหรือไม่สะดวกในการวัดปริมาณการกินได้ทั้งหมด หรือไม่สามารถเก็บรวบรวมมูลที่ขับถ่ายได้ สารที่ใช้เป็นตัวบ่งชี้มีหลายชนิด และควรมีคุณสมบัติ คือ 1) ไม่สามารถย่อยได้ 2) ไม่สามารถถูกดูดซึม 3) ไม่เป็นพิษต่อสัตว์ 4) มีอัตราการไหลและเคลื่อนย้ายคงที่ 5) สามารถวิเคราะห์ได้ง่ายทั้งในอาหารและมูล และ 6) จัดหาได้ง่ายมีราคาถูก (กฤตพล, 2552) สารที่ใช้เป็นตัวบ่งชี้แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ

1) ตัวบ่งชี้ภายใน (internal indicators) ได้แก่ สารที่มีอยู่แล้วในอาหารสัตว์ตามธรรมชาติ เช่น ลิกนิน (lignin) โครโมเจน (chromogen) ซิลิก้า (silica) หรือเถ้าที่ไม่ละลายในกรด (acid insoluble ash, AIA) เป็นต้น ลิกนินมีการใช้เป็นตัวบ่งชี้เป็นเวลานาน แต่ปัจจุบันพบว่า ลิกนินสามารถถูกย่อยและดูดซึมในระบบทางเดินอาหาร ค่าที่ได้จึงค่อนข้างแปรปรวนมาก ปัจจุบันตัวบ่งชี้ที่ได้รับความนิยมคือ เถ้าที่ไม่ละลายในกรด ซึ่งค่าจากการเปรียบเทียบกับการย่อยได้แบบชั่งทั้งหมด พบว่า มีค่าสหสัมพันธ์ และค่า recovery สูง (ฉลอง, 2541)

2) ตัวบ่งชี้ภายนอก (external indicators) ได้แก่ สารที่เติมลงไปในอาหาร เช่น โครมิคออกไซด์ (chromic oxide, $Cr_2O_3$) โพลีเอทาเลนไกลคอล (polyethalene glycol, PEG) dyes และ iron เป็นต้น (เมธา, 2533; ฉลอง, 2541; กฤตพล, 2550; Pond et al., 2005)

ในกรณีที่ปล่อยสัตว์แทะเล็มจะเกิดการเลือกกินอาหาร โดยเฉพาะการเลี้ยงด้วยทุ่งหญ้าผสมถั่วจะเกิดการเลือกกินสูง การประมาณการกินได้และการย่อยได้ทำได้ลำบาก แต่อย่างไรก็ตาม สามารถประยุกต์ใช้เทคนิคตัวบ่งชี้ในการประเมินได้ โดยใช้ตัวบ่งชี้พร้อมกันครั้งละหลายอย่าง ซึ่งอาจเป็นตัวบ่งชี้ภายนอกและตัวบ่งชี้ภายใน (กฤตพล, 2550)

3. การวัดการย่อยได้ด้วยวิธีการเปรียบเทียบความแตกต่างค่าการย่อยได้กรณีวัตถุดิบมีสองชนิดขึ้นไป (digestibility by difference)

การหาค่าความสามารถในการย่อยได้วิธีนี้ใช้ในกรณีที่ต้องการหาค่าการย่อยได้ของวัตถุดิบอาหารที่ต้องการศึกษา ซึ่งมีส่วนผสมจากวัตถุดิบอาหารสัตว์หลายชนิดร่วมกัน เช่น อาหารข้นผสมสำเร็จรูป อาหารผสมครบส่วน (total mixed ration, TMR) หรืออาหารที่มีส่วนผสมมากกว่า 1 ชนิดขึ้นไป เป็นต้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่ธรรมชาติของอาหารไม่สามารถใช้อาหารชนิดเดียวได้ ในทางปฏิบัติจึงต้องมีการให้อาหารพื้นฐาน (basal diet) เปรียบเทียบกับสัตว์ที่ได้รับอาหารพื้นฐานร่วมกับอาหารที่ต้องการทดสอบจำนวนหนึ่งหรือมากกว่าหนึ่งระดับ หลังจากวัดและวิเคราะห์การย่อยได้ของอาหารในแต่ละกลุ่มได้แล้ว จะสามารถคำนวณค่าการย่อยได้ของวัตถุดิบที่ต้องการทดสอบ (digestibility of test feed) โดยการคำนวณจากค่าการย่อยได้จากอาหารพื้นฐาน (basal feed) ร่วมกับอาหารที่ต้องการทดสอบ (test feed) ตามวิธีการของ Pond et al. (2005)

การทดสอบด้วยวิธีนี้มีแนวคิดว่า ค่าความสามารถการย่อยได้ของอาหารพื้นฐานจะต้องไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อทำการให้อาหารร่วมกับอาหารที่ต้องการทดสอบ แต่ในความเป็นจริงแล้วการให้อาหารตามปกติที่ประกอบด้วยวัตถุดิบอาหารสองอย่างขึ้นไปจะมีผลกระทบต่อกัน เรียกว่า ปฏิสัมพันธ์ระหว่างอาหาร (associative effects) อย่างไรก็ตามวิธีการให้อาหารหลายแหล่งพร้อมกันจะเป็นวิธีการที่มีสภาพใกล้เคียงกับธรรมชาติความเป็นจริงของการให้อาหารสัตว์มากที่สุด (กฤตพล, 2550; McDonald et al., 2002)

4. การวัดการย่อยได้ด้วยวิธีการทดสอบในกระเพาะหมัก (*in sacco* techniques)

การวัดค่าการย่อยสลายของอาหารโดยการบ่มในกระเพาะหมักของสัตว์ (nylon bag) เป็นอีกวิธีหนึ่งที่ได้รับความนิยมเพื่อประเมินการย่อยสลายของอาหารที่กระเพาะหมัก มีความจำเป็นที่จะต้องอาศัยสัตว์ทดลองที่ได้รับการเจาะกระเพาะ (rumen fistulation) (Ørskov et al., 1980; Lopez, 2005) เทคนิคนี้เป็นที่ทราบในชื่อ *in situ* หรือ *in sacco* หรือ nylon bag techniques เป็นวิธีการที่สะดวกและรวดเร็วอีกวิธีหนึ่งในการวัดค่าการย่อยได้ เนื่องจากสามารถใช้จำนวนตัวอย่างพร้อมกันจำนวนมากได้ หลักการปฏิบัติของวิธีนี้เริ่มจากการเตรียมวัตถุดิบอาหารน้ำหนักประมาณ 3-5 กรัม บรรจุลงในถุงที่ทำจากผ้าไหมหรือใยสังเคราะห์ที่มีขนาดรู 40-60 ไมโครเมตร จากนั้นเย็บถุงและมัดปากให้แน่นเพื่อป้องกันการเล็ดรอดออกนอกถุงแล้วนำไปแขวนเพื่อบ่มหมักให้เกิดการย่อยสลายภายใต้สภาพแวดล้อมตามปกติในกระเพาะหมักเป็นเวลา 24-48 ชั่วโมงในอาหารข้น หรือนาน 24-96 ชั่วโมงในอาหารหยาบ (Ørskov et al., 1980; Ørskov, 2000)

5. การประเมินการย่อยได้ในห้องปฏิบัติการ หรือ วิธีการทดสอบในหลอดทดลอง (*in vitro* technique)

การทดสอบการย่อยได้ในตัวสัตว์ (*in vivo*) ด้วยวิธีการชั่งทั้งหมดมีหลายขั้นตอน อีกทั้งต้องใช้เวลาและจำนวนสัตว์มาก ทำให้ไม่สะดวก จึงได้มีการพัฒนาวิธีการทดแทนการวัดการย่อยได้ในตัวสัตว์ โดยอาศัยหลักการจำลองสภาวะปฏิกิริยาการย่อยให้คล้ายคลึงกับสภาวะที่เกิดขึ้นในทางเดินอาหารของสัตว์ แม้ว่าการจำลองสภาวะให้เหมือนกับสภาวะจริงทั้งหมดในทางเดินอาหารจะทำได้ลำบาก แต่ก็เป็นวิธีการที่ได้รับการยอมรับในการตรวจวัดค่าการย่อยได้ของโภชนะ (Dijkstra et al., 2005; Lopez, 2005)

การศึกษาโดยวิธีนี้ควรใช้สัตว์ที่เจาะกระเพาะแล้วเพื่อสะดวกในการเก็บของเหลวหรือตัวอย่างจากกระเพาะรูเมน วิธีการเหล่านี้ได้แก่

1) วิธีการ 2 ขั้นตอน (two-stage *in vitro* medthod) ของ Tilley and Terry (1963) ซึ่งทำโดยหมักตัวอย่างอาหารร่วมกับของเหลวจากกระเพาะรูเมน (rumen fluid หรือ rumen liquor) และเอมไซม์เปปซิน

2) วิธีใช้เอมไซม์เปปซินและเซลลูเลส (pepsin and cellulose method) ซึ่งเป็นเอนไซม์สังเคราะห์ที่สกัดจากตับอ่อนของสุกรและโค และเอนไซม์จากจุลินทรีย์ ตามวิธีการของ McLeod and Minson (1978) คือ ย่อยตัวอย่างด้วย pepsin ในสภาพเป็นกรด เป็นเวลา 48 ชั่วโมง แล้วย่อยต่อไปอีกด้วย cellulose acetate buffer ที่อุณหภูมิ 39 °C และคำนวณค่าการย่อยได้จากน้ำหนักที่หายไปหลังถูกย่อย

3) วิธีการวัดปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้น (gas production method) วิธีนี้พัฒนาขึ้นในประเทศเยอรมัน โดย Menke et al. (1979) อาศัยหลักการที่ว่าการหมักอาหารของจุลินทรีย์ในกระเพาะส่วนหน้าจะทำให้เกิดแก๊สขึ้น ซึ่งจะมีปริมาณมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับอัตราการย่อยได้ของอาหารนั้น ดังนั้นปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นจะสามารถนำมาทำนายค่าการย่อยได้และปริมาณพลังงานในอาหารได้

2.7.2 การศึกษาการดูดซึมและการใช้ประโยชน์โภชนะด้วยเทคนิคการผ่าตัด

ปัจจุบันได้มีการพัฒนาเทคนิควิธีการเพื่อช่วยในการศึกษาเกี่ยวกับการย่อยและดูดซึมโภชนะด้วยการผ่าตัด การเจาะกระเพาะหมักในโค กระบือ แพะ และแกะ เป็นที่ยอมรับและศึกษากันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากสามารถสุ่มเก็บตัวอย่างได้ตามความต้องการโดยไม่รบกวนสัตว์มากนัก ขณะเดียวกันก็สามารถนำโภชนะหรืออาหารฉีดผ่านท่อสายยางเข้าโดยตรงที่กระเพาะหมักหรือระบบทางเดินอาหารแต่ละส่วนได้ กระบอกหรือสายยางสามารถสอดผ่านไปยังอวัยวะและระบบทางเดินอาหารได้หลาย ๆ ส่วน เช่น กระเพาะ ลำไส้เล็ก ไส้ติ่ง หรือแม้กระทั่งในระบบ

หมุนเวียนเลือด เป็นต้น เทคนิคนี้สามารถประยุกต์ใช้กับสัตว์ที่ไม่ใช่สัตว์เคี้ยวเอื้องได้ (กฤตพล, 2550)

เทคนิคการสอดใส่ท่อพลาสติกนุ่ม (catheters) เข้าไปในเส้นเลือดดำ-แดง (artery-vein different technique) ณ จุดต่าง ๆ ของระบบหมุนเวียนเลือดได้รับความนิยมและเป็นประโยชน์สูงในด้านการศึกษาปริมาณการดูดซึมโภชนะจากระบบทางเดินอาหาร เช่น ปริมาณการดูดซึมกลูโคส หรือ กรดแอมิโนจากลำไส้เล็กสู่ portal vein ก่อนส่งเข้าไปในตับ เป็นต้น (กฤตพล, 2550)

2.7.3 การทดลองเพื่อวัดความสมดุลของโภชนะ (balance trials)

เป็นการศึกษาที่มีขั้นตอนและวิธีการคล้ายกับการศึกษาการวัดค่าความสามารถในการย่อยได้ แต่การศึกษาวิธีนี้ต้องทำการเก็บรวบรวมข้อมูลเพิ่มมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในด้านการใช้ประโยชน์ของโภชนะที่สัตว์ดูดซึมได้จากทางเดินอาหาร วัตถุประสงค์หลักของวิธีการนี้เพื่อเป็นการวัดปริมาณที่เก็บกักสะสมในร่างกายของโภชนะที่เราสนใจ ซึ่งอาจมีค่าเป็นบวก (positive balance) หากสัตว์สามารถเก็บสะสมไว้ในร่างกาย หรืออาจมีค่าเป็นลบ (negative balance) ในกรณีที่เกิดการสูญเสียหรือขับออกนอกร่างกาย ดังนั้นการศึกษาวิธีนี้จึงเป็นการศึกษาในด้านปริมาณที่มีความจำเป็นต้องให้มีความถูกต้องและแม่นยำ ใช้ความละเอียดในการวัดปริมาณการกินได้ทั้งหมด (total feed intake) และปริมาณที่ขับถ่ายออกของโภชนะ การทดลองเพื่อวัดความสมดุลของโภชนะอาจเป็นการศึกษาด้านสมดุลของไนโตรเจน (โปรตีน) ด้านความสมดุลของพลังงาน รวมทั้งแร่ธาตุหลักต่าง ๆ โดยทั่วไปสัตว์จะมีการสูญเสียหรือขับโภชนะหรือสารอาหารออกทางมูล ปัสสาวะ ขน เซลล์ผิวหนัง เหงื่อ และแก๊ส หากเป็นด้านพลังงานสัตว์อาจสูญเสียพลังงานในรูปของความร้อนผ่านทางอากาศที่หายใจออก การขับเหงื่อ รวมทั้งการนำความร้อน การพาความร้อนและการแผ่รังสีความร้อนออกนอกร่างกาย (กฤตพล, 2550)

ยกตัวอย่างในกรณีการวัดสมดุลของไนโตรเจน มีความจำเป็นที่จะต้องรวบรวมปริมาณการขับถ่ายมูลและปัสสาวะ เนื่องจากปัสสาวะเป็นเส้นทางหลักของการขับถ่ายไนโตรเจน นอกจากนี้แล้วเพื่อให้มีความแม่นยำมากขึ้นอาจต้องรวบรวมขน ชั้นผิวหนังที่หล่นร่วมกับการเก็บรวบรวมมูลและปัสสาวะเพิ่มอีกด้วย หากศึกษาในตัวสัตว์ที่กำลังให้นม (lactating animal) จำเป็นต้องรวบรวมปริมาณน้ำนมทั้งหมดและวิเคราะห์องค์ประกอบไนโตรเจนในน้ำนมร่วมด้วย ส่วนกรณีการศึกษาความสมดุลของโภชนะด้านพลังงานในตัวสัตว์จำเป็นที่ต้องใช้คอกที่ออกแบบสำหรับการเก็บรวบรวมตัวอย่างเป็นพิเศษ เรียกว่า คอกเมแทบอลิซึม (metabolism cage) หรือห้องวัดการหายใจ (respiration chamber) ซึ่งสามารถวัดค่าพลังงานที่สัตว์ได้รับ ค่าพลังงานที่

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ ห้องสมุดเงินวิจัย

ขับออกในมูล พลังงานที่ขับออกในปัสสาวะ และพลังงานความร้อนที่สร้างขึ้นภายในเซลล์ของร่างกาย (total heat production) (กฤตพล, 2550)

แม้ว่าการศึกษาด้วยวิธีนี้จะมีความยุ่งยาก หลายขั้นตอน และต้องอาศัยเครื่องมือที่ได้รับการออกแบบเฉพาะ ทำให้ใช้งบประมาณสูงกว่าวิธีอื่น แต่เป็นวิธีที่ให้ประโยชน์ข้อมูลด้านการใช้ประโยชน์ของวัตถุดิบและความต้องการโภชนะของสัตว์ที่แม่นยำสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งการนำไปประยุกต์ใช้เพื่อการประเมินความต้องการโภชนะของสัตว์ในแต่ละเพศ อายุ และการให้ผลผลิตระดับต่าง ๆ นอกจากนี้แล้วยังมีประโยชน์ในการศึกษาประสิทธิภาพการใช้โภชนะจากวัตถุดิบอาหาร วิธีนี้มีข้อจำกัดหรือสิ่งที่ควรคำนึงถึงคือ ส่วนใหญ่เป็นการศึกษาในช่วงระยะเวลาอันสั้น ดังนั้นข้อมูลที่ได้รับสามารถใช้อธิบายค่าสังเกตุได้เพียงช่วงระยะเวลาใดเวลาหนึ่งหรือการตอบสนองเพียงช่วงใดช่วงหนึ่งของสัตว์เท่านั้น และหากต้องการทราบข้อมูลทั้งหมดจะต้องศึกษาให้ครอบคลุมทั้งวงจรชีวิตของสัตว์ ซึ่งต้องใช้ค่าใช้จ่ายจำนวนมาก (กฤตพล, 2550)

2.7.4 การทดลองเลี้ยงสัตว์ด้วยอาหารในระยะยาว (long-term feeding trials)

เป็นการทดลองเพื่อทดสอบอาหารสัตว์ที่ต้องการทราบคุณภาพ โดยการเลี้ยงสัตว์ด้วยอาหารที่ต้องการทดสอบเปรียบเทียบกับสัตว์ทดลองที่ได้รับอาหารมาตรฐานที่ทราบคุณค่าทางโภชนะแล้ว ทำการวัดการเพิ่มน้ำหนักตัวจากการใช้ประโยชน์โภชนะหรืออาหารที่ย่อยในระบบทางเดินอาหาร ซึ่งสามารถแสดงการเจริญเติบโตได้เป็นค่าของการเพิ่มน้ำหนักต่อช่วงเวลา นิยมแสดงในรูปของอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวัน (average daily gain, ADG) และยังทราบถึงปริมาณการกินได้ของอาหาร (feed intake) และประสิทธิภาพการใช้ประโยชน์อาหาร (feed efficiency) อย่างไรก็ตามการทดสอบนี้สามารถบ่งบอกได้เพียงว่าอาหารสัตว์ชนิดนี้สัตว์ชอบกินหรือไม่ และเมื่อกินเข้าไปแล้วเจริญเติบโตเท่าใด แต่ไม่สามารถอธิบายว่าเหตุใดวัตถุดิบอาหารสัตว์นั้นมีผลในการเจริญเติบโตของสัตว์ไม่เท่ากัน (ทรงศักดิ์, 2545; กฤตพล, 2550)

2.7.5 การทดลองด้วยอาหารสกัดบริสุทธิ์ (purified diets)

การศึกษาวิธีนี้มีประโยชน์เพื่อศึกษาค่าความต้องการโภชนะที่มีความจำเป็นแต่สัตว์มีความต้องการในปริมาณต่ำ สามารถใช้เทคนิคนี้ได้ทั้งในสัตว์เคี้ยวเอื้องและสัตว์ไม่เคี้ยวเอื้อง โดยการทดลองวิธีการนี้สามารถคำนวณสูตรอาหารให้มีส่วนประกอบเฉพาะโภชนะที่ต้องการศึกษาตามระดับหรือสัดส่วนที่กำหนด เพื่อใช้ในการทดสอบค่าความต้องการโภชนะหรือการใช้ประโยชน์โภชนะของสัตว์ เนื่องจากการคำนวณสูตรอาหารทดลองด้วยวิธีนี้อาหารทดลองจะต้องผ่านขั้นตอนการแยกความบริสุทธิ์สูง หรืออาจเรียกว่า อาหารสังเคราะห์ (synthetic หรือ semi-semi purified diet) จึงเป็นวิธีที่สามารถลดหรือกำจัดปัญหาการปนเปื้อนของสารอาหารหรือโภชนะอื่นที่อาจมีในวัตถุดิบอาหารตามธรรมชาติ (unidentified growth factor) ซึ่งอาจมีผลกระทบ

ในทางอ้อมต่อการใช้ประโยชน์โภชนะ หรือค่าความต้องการโภชนะของสัตว์เลี้ยงที่ต้องการทดสอบ

ประเภทอาหารที่ใช้เป็นแหล่งโภชนะอาจขึ้นอยู่กับชนิดและอายุของสัตว์ทดลอง แหล่งพลังงานมักใช้แหล่งที่ให้น้ำตาล เช่น กลูโคส แป้ง เซลลูโลส เป็นต้น แหล่งธาตุไนโตรเจนอาจมาจากแหล่งโปรตีนสกัดจากถั่วเหลือง หรือกรดแอมิโนบริสุทธิ์ ส่วนการศึกษาความต้องการแร่ธาตุอนินทรีย์ (inorganic element requirement) อาจศึกษาด้วยการใช้เกลือของแร่ธาตุที่ละลายและย่อยได้ แหล่งวิตามินอาจใช้จากยีสต์ จากตับสกัด หรือวิตามินสังเคราะห์ แหล่งกรดไขมันที่จำเป็นอาจได้จากน้ำมันข้าวโพด ไขสัตว์ หรือแหล่งไขมันสกัดบริสุทธิ์อื่น (กฤตพล, 2550)

2.7.6 การใช้สัตว์ทดลองต้นแบบเพื่อการศึกษาด้านโภชนศาสตร์ (laboratory animals as models for farm animal nutrition)

ในบางกรณีการศึกษาในคนหรือสัตว์ขนาดใหญ่อาจไม่สามารถดำเนินการได้สะดวก มีข้อจำกัดด้านความปลอดภัย จำนวนสัตว์ โรงเรือน อุปกรณ์ ตลอดทั้งอาจต้องใช้วัสดุจำนวนมาก หรือมีราคาแพง การใช้สัตว์ทดลองต้นแบบ (model animal) เพื่อศึกษาวิจัยในด้านความต้องการโภชนะและการใช้ประโยชน์อาหารสัตว์ จึงอาจเป็นแนวทางแก้ปัญหาดังกล่าว สัตว์ทดลองต้นแบบที่ได้รับความนิยมใช้ศึกษาในปัจจุบัน เช่น หนู กระต่าย สุกร นก กบ เป็นต้น สัตว์เหล่านี้มีขนาดเล็ก ขยายพันธุ์รวดเร็วและจำนวนมาก และวงจรชีวิตใช้ระยะเวลาสั้น จึงสามารถทำการทดลอง เก็บข้อมูลได้ในจำนวนมาก หากเปรียบเทียบกับสัตว์ใหญ่ ข้อมูลที่ได้สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ (กฤตพล, 2550)

## 2.8 ความต้องการพลังงานของสัตว์

พลังงานมีหลายรูป เช่น พลังงานความร้อน พลังงานจลน์ พลังงานแสง และพลังงานไฟฟ้า เป็นต้น แต่ที่สำคัญในทางโภชนศาสตร์คือ พลังงานชีวเคมี (biological energy) (กฤตพล, 2550) สัตว์มีความจำเป็นต้องได้รับโภชนะจากวัตถุดิบอาหารสัตว์ที่อยู่ในรูปสารอินทรีย์ ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน เพื่อเป็นวัตถุดิบในการสร้างเนื้อเยื่อของร่างกายเรียกว่า การเจริญเติบโต (growth) การสังเคราะห์หรือการให้ผลผลิตสัตว์ที่ขับออกในน้ำนม ขน หนัง เขา แรงงาน และไข่ เรียกว่า การให้ผลผลิตสัตว์ (production) รวมทั้งสัตว์มีความต้องการโภชนะเพื่อเป็นแหล่งพลังงานในการดำเนินกิจกรรมพื้นฐานของร่างกาย หรือเรียกว่าเพื่อการดำรงชีพ ความต้องการพลังงานทั้งเพื่อการให้ผลผลิตและการดำรงชีพดังกล่าวมีความเกี่ยวข้องกับการเปลี่ยนแปลงรูปแบบของพลังงานที่มีอยู่ในรูปพลังงานเคมี (chemical energy) โดยพลังงานเคมีจากอาหารเมื่อเกิดการเผาผลาญในร่างกายจะถูกเปลี่ยนรูปแบบเป็นพลังงานกล (mechanical energy)

และพลังงานความร้อน (heat energy) นอกจากนี้แล้วพลังงานเคมีในโภชนะยังสามารถเปลี่ยนรูปแบบเพื่อการเก็บสะสมได้ เช่น กรณีสังเคราะห์อาหารคาร์โบไฮเดรตเพื่อไปเก็บสะสมในรูปไขมันของร่างกาย เป็นต้น (บุญล้อม, 2541; กฤตพล, 2550)

พลังงานที่สัตว์ได้รับจากอาหารจะถูกนำไปใช้เพื่อการดำรงชีพเป็นอันดับแรก ส่วนพลังงานที่เหลือนี้จะถูกนำไปใช้เพื่อการให้ผลผลิตสัตว์ ซึ่งมีหลากหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับชนิดและช่วงอายุของสัตว์ ทั้งนี้สัตว์ในระยะรุ่นหรือระยะกำลังเจริญเติบโตจะสะสมพลังงานส่วนเกินที่เหลือจากการดำรงชีพในรูปของโปรตีนไว้ในเนื้อเยื่อที่ร่างกายสร้างขึ้นใหม่ ขณะที่สัตว์เจริญเต็มวัยจะสะสมพลังงานส่วนใหญ่ในรูปไขมัน นอกจากนี้แล้วสัตว์ยังสามารถเปลี่ยนพลังงานเคมีจากอาหารเป็นผลผลิตสัตว์ในรูปอื่นได้อีก เช่น การให้กำลังแรงงาน การสร้างขนสัตว์ และการให้ผลผลิตไข่ เป็นต้น (กฤตพล, 2550; Ensminger et al., 1990; McDonald et al., 2002)

เมื่อเกิดการใช้พลังงานเคมีจากอาหารที่ได้รับเพื่อการดำรงชีพขั้นพื้นฐานในการทำงานของกล้ามเนื้อและการทำงานเพื่อรักษาสภาพความสมดุลทางเคมีภายในเซลล์ พลังงานที่ไม่สามารถถูกนำมาใช้งานได้หรือส่วนพลังงานที่สูญเสียที่ถูกเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อน พลังงานที่สูญเสียในรูปพลังงานความร้อนนี้มีประโยชน์ในกรณีการให้ความอบอุ่นต่อร่างกายเพื่อการรักษาระดับอุณหภูมิของร่างกายให้คงที่ กรณีที่สัตว์อยู่ในภาวะอดอาหาร (fasting animal) ปริมาณพลังงานความร้อนที่สร้างขึ้นในร่างกายมีค่าเท่ากับพลังงานความร้อนที่เกิดจากการสลายของเนื้อเยื่อเป็นพลังงานขั้นพื้นฐานที่ต้องการเพื่อการทำให้ร่างกายสามารถดำรงชีพอยู่ได้ ซึ่งในทางปฏิบัติประเมินได้จากค่าแมทาบอลิซึมพื้นฐาน (basal metabolism) ในสัตว์ที่อยู่ในภาวะขั้นพื้นฐานของร่างกาย โดยในขณะที่สัตว์อยู่อย่างสงบ (Bruinenberg et al., 2002; McDonald et al., 2002; Agnew and Yan, 2005)

2.8.1 หน่วยของพลังงาน

หน่วยของพลังงานนั้นมีหลายรูปแบบ พลังงานสามารถที่จะเปลี่ยนจากรูปหนึ่งไปเป็นอีกรูปหนึ่งได้ เช่น จากพลังงานเคมีเป็นพลังงานความร้อน ยกตัวอย่างคือ การออกซิไดซ์ไขมัน กลูโคส และกรดแอมิโน จะได้ความร้อน จากพลังงานเคมีเป็นพลังงานจลน์ ยกตัวอย่างคือ การทำงานของกล้ามเนื้อ การเปลี่ยนจากพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้า ยกตัวอย่างคือ การเผาผลาญกลูโคสเพื่อให้ได้พลังงานในการส่งสัญญาณไฟฟ้าของกระแสประสาท เป็นต้น เนื่องจากพลังงานทุกรูปสามารถเปลี่ยนเป็นพลังงานความร้อนได้ง่ายที่สุด ดังนั้นการวัดพลังงานจึงวัดออกมาในรูปของความร้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการวัดพลังงานในอาหารและในร่างกาย หน่วยของพลังงานเรียกว่า แคลอรี (caroly) หรือ เขียนย่อ ๆ ว่า cal (บุญล้อม, 2541; Blaxter, 1989)

พลังงานความร้อน 1 แคลอรี คือปริมาณความร้อนที่ทำให้น้ำ 1 กรัม มีอุณหภูมิสูงขึ้น 1 องศาเซลเซียส คือจาก 14.5 องศาเซลเซียส เป็น 15.5 องศาเซลเซียส เนื่องจากแคลอรีมีค่าน้อย จึงมักนิยมระบุเป็นกิโลแคลอรี (kilo calory, Kcal) และ เมกะแคลอรี (mega calory, Mcal) โดย

1 กิโลแคลอรี (Kcal) = 1,000 cal

1 เมกะแคลอรี (Mcal) = 1,000 Kcal หรือ $10^6$ cal

ในการเขียนตัวย่อนี้ บางครั้งอาจใช้ c (ตัวเล็ก) แทนแคลอรี และ C (ตัวใหญ่) แทนกิโลแคลอรี ซึ่งจะทำให้เกิดความสับสนได้ จึงควรหลีกเลี่ยงโดยใช้ Kcal แทนกิโลแคลลอรี (กฤตพล, 2550)

ในระบบอังกฤษอาจใช้หน่วยเป็น BTU (british thermal unit) ซึ่งเป็นปริมาณความร้อนที่ทำให้น้ำ 1 ปอนด์ มีอุณหภูมิสูงขึ้น 1 องศาฟาเรนไฮต์ (1 BTU = 252 cal) แต่อย่างไรก็ตาม หน่วย BTU ไม่ค่อยได้รับความนิยมใช้เท่าใดนัก แต่กลับนิยมใช้หน่วยเป็นจูล (joule, J = volts x amperes x seconds) ซึ่งทำการวัดด้วยไฟฟ้าเพราะมีความเห็นว่าการวัดพลังงานความร้อนโดยอาศัยการเปลี่ยนอุณหภูมิของน้ำอาจมีข้อผิดพลาดได้ ทั้งนี้เพราะน้ำที่อุณหภูมิต่างกันมีความร้อนจำเพาะต่างกัน จึงนิยมวัดพลังงานโดยอาศัยไฟฟ้าแทน เพราะเป็นวิธีที่แม่นยำกว่า หน่วยที่ได้จากการวัดแบบนี้เรียกว่า จูล (joule, J) (กฤตพล, 2550; บุญล้อม, 2541; WTSR, 2008)

1 แคลอรี (cal) = 4.184 จูล (joule, J)

1 จูล = 0.233 แคลอรี

1 กิโลจูล = 1,000 จูล

1 เมกะจูล = 1,000,000 จูล

2.8.2 การใช้ประโยชน์ของพลังงานในตัวสัตว์

พลังงาน (energy) หมายถึง ศักยภาพในการทำงาน ขณะที่ งาน หมายถึง ผลจากการออกแรงเพื่อเคลื่อนย้ายวัตถุให้ได้ในระยะทางหนึ่ง อย่างไรก็ตามคำจำกัดความในทางอาหารสัตว์ส่วนใหญ่จะเป็นการใช้พลังงานเคมีที่ได้จากอาหารสัตว์ ซึ่งจำนวนพลังงานเคมีที่สัตว์ได้รับจากอาหารสามารถวัดได้จากการประเมินค่าจำนวนพลังงานความร้อนที่ปล่อยออกมาจากการเผาไหม้อาหารอย่างสมบูรณ์ เรียกว่า ค่าพลังงานทั้งหมด (gross energy, GE) การวัดค่าพลังงานทั้งหมดใช้เครื่องมือวัดค่าพลังงานความร้อนที่เรียกว่า บอมบ์คาลอริมิเตอร์ (bomb calorimeter) เมื่อนำอาหารให้สัตว์กินสามารถแบ่งประเภทพลังงานตามการกักเก็บและการขับออกดังนี้ (ภาพที่ 2.1) (กฤตพล, 2550; Ensminger et al., 1990; Sundstol, 1993; McDonald et al., 2002)

1. ค่าพลังงานทั้งหมดในอาหาร (gross energy, GE)

ค่าพลังงานทั้งหมด หมายถึง ค่าปริมาณความร้อนที่ได้ทั้งหมดจากการออกซิเดชันหรือเผาไหม้อย่างสมบูรณ์ของวัตถุดิบอาหารที่ศึกษา บางครั้งอาจเรียกว่า พลังงานความร้อนจากการเผาไหม้ ดังนั้นค่าพลังงานทั้งหมด (GE) จึงหมายถึง ปริมาณพลังงานเคมีที่มีอยู่ในอาหารสัตว์ สามารถทำการตรวจวัดได้โดยการเปลี่ยนพลังงานเคมีในอาหารให้อยู่ในรูปพลังงานความร้อนก่อนแล้ววัดจำนวนในหน่วยพลังงานความร้อนที่ถูกปลดปล่อยออกมา

2. ค่าพลังงานที่ย่อยได้ (digestible energy, DE)

ค่าพลังงานที่ย่อยได้ปรากฏ (apparent DE) สามารถคำนวณได้จากค่าพลังงานรวมทั้งหมดที่มีอยู่ในปริมาณน้ำหนักอาหารที่กินได้ (gross energy intake) หักลบด้วยค่าพลังงานรวมทั้งหมดที่ขับออกมาทางมูล (fecal energy excretion) การปฏิบัติทำได้ด้วยการวัดปริมาณการกินได้ สุ่มเก็บตัวอย่างอาหารและมูลที่ถ่ายในช่วงเวลาที่กำหนด แล้วนำตัวอย่างอาหารและมูลไปวิเคราะห์ค่าพลังงานจะสามารถคำนวณค่าพลังงานที่ย่อยได้ปรากฏได้ โดยทั่วไปแล้วปริมาณพลังงานที่สูญเสียผ่านทางมูลจะคิดเป็นสัดส่วนที่สูงกว่าส่วนอื่น ๆ แต่ก็ขึ้นอยู่กับชนิดของสัตว์ชนิดอาหาร สัดส่วนพลังงานที่สูญเสียไปกับการขับถ่ายมูลอาจมีค่า 30 เปอร์เซ็นต์ ของค่าพลังงานรวมทั้งหมด และจะสูญเสียมากขึ้นถ้าได้รับอาหารหยาบคุณภาพต่ำ (Sundstol, 1993; McDonald et al., 2002)

3. ค่าพลังงานที่สัตว์สามารถใช้ประโยชน์ได้ (metabolizable energy, ME)

สามารถคำนวณได้จากการหักลบค่าพลังงานที่ย่อยได้ด้วยค่าพลังงานที่ขับออกมาทางปัสสาวะ (urine energy excretion) และแก๊สมีเทน (methane, $CH_4$) ปัสสาวะที่สัตว์ขับออกมาจะประกอบด้วยสารอินทรีย์ที่ให้พลังงานออกมาด้วย เช่น ยูเรีย น้ำตาล อนุพันธ์ของพิวรีน เป็นต้น (บุญล้อม, 2541; กฤตพล, 2550; Bruinenberg et al., 2002; Agnew and Yan, 2005) การสูญเสียพลังงานในรูปแก๊สของสัตว์เคี้ยวเอื้องเกิดขึ้นจากการหมักประกอบด้วย แก๊สมีเทน แก๊สไฮโดรเจน (hydrogen) อะซีโตน (acetone) อีเทน (ethane) และแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (hydrogen sulfide) แก๊สที่เผาไหม้ได้จากกระเพาะหมักส่วนใหญ่เป็นแก๊สมีเทน ซึ่งปริมาณการผลิตแก๊สขึ้นอยู่กับประเภทของอาหารและระดับปริมาณการกินได้ของสัตว์ (Rossi et al., 2001; Agnew and Yan, 2005) โดยทั่วไปแล้ว ณ ที่ระดับการให้อาหารเพื่อการดำรงชีพ พลังงานที่สูญเสียในรูปแก๊สมีเทน มีสัดส่วนประมาณ 8 เปอร์เซ็นต์ของค่าพลังงานทั้งหมด (GE) หรือคิดเป็นสัดส่วนประมาณ 11-13 เปอร์เซ็นต์ของค่าพลังงานที่ย่อยได้ (DE) ค่าพลังงานที่สูญเสียในรูปแก๊สจะลดต่ำลงหากสัตว์ได้รับอาหารที่ย่อยได้สูงหรืออาหารที่ผ่านการหมักมาก่อน (กฤตพล, 2550; ฉัตรชัย และ กฤตพล, 2551; Blaxter, 1989)

ในปัจจุบันค่าพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้ของอาหารถือเป็นหน่วยพื้นฐานของระบบค่าพลังงานในอาหารที่ทั่วโลกยอมรับ (Yan et al., 2000)

4. ค่าพลังงานสุทธิ (net energy, NE)

พลังงานสุทธิที่สัตว์ได้รับจากอาหาร สามารถคำนวณได้จากการหักลบค่าพลังงานที่สัตว์สามารถใช้ประโยชน์ได้ ด้วยค่าปริมาณพลังงานความร้อนที่เพิ่มขึ้นจากการกินอาหาร (heat increment, HI) และพลังงานความร้อนจากกการหมักย่อยอาหาร (heat of fermentation) หรือหากประเมินจากค่าพลังงานความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเผาผลาญภายในร่างกายก็จะเท่ากับ ค่าการผลิตความร้อนของร่างกาย (heat production) ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบระหว่างสัตว์ที่ได้รับอาหาร (fed animal) กับสัตว์ที่อดอาหาร (fasting animal)

ค่าพลังงานสุทธิเป็นพลังงานที่สัตว์ได้รับจากอาหารและสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้จริง สามารถแยกออกเป็นสองส่วนหลัก คือ พลังงานที่ใช้เพื่อการดำรงชีพของร่างกาย (net energy for maintenance) และพลังงานที่ใช้เพื่อให้ผลผลิต (net energy for production) หรือพลังงานที่เก็บกักได้ในตัวสัตว์ (animal energy retention) (กฤตพล, 2550; Blaxter, 1989; McDonald et al., 2002; Agnew and Yan, 2005; Pond et al., 2005) (Pond et al., 2005) และ McDonald et al. (2002) ได้อธิบายว่า สัตว์จะสามารถนำพลังงานไปใช้ประโยชน์ได้จริงเพียงประมาณ 40 เปอร์เซ็นต์ จากพลังงานทั้งหมด พลังงานส่วนมากมักสูญเสียไปในรูปของมูลซึ่งเป็นส่วนที่ย่อยไม่ได้ และการใช้ประโยชน์ของพลังงานในสัตว์แต่ละชนิดจะแตกต่างกัน

2.8.3 ระบบการประเมินค่าการใช้ประโยชน์พลังงานจากอาหารแบบอื่น

1. starch equivalents (SE)

เป็นระบบพลังงานที่ใช้ในประเทศเยอรมัน โดยอาศัยหลักการวัดพลังงานเก็บกักของร่างกาย โดยการวัดค่าสมดุลธาตุคาร์บอน-ไนโตรเจน (carbon-nitrogen balance method) และค่าพลังงานในวัตถุดิบอาหารแสดงออกมาโดยการเปรียบเทียบกับค่าปริมาณแป้ง (starch) ซึ่งเปรียบเทียบกับระบบพลังงานสุทธิ (กฤตพล, 2550; Wiseman and Cole, 1990; Sundstol, 1993)

2. scandinavian food system

การประเมินค่าในวัตถุดิบของอาหารระบบนี้ ดำเนินการทดลองโดยทำการทดลองกับการกินอาหารที่ต้องการทดสอบหรือศึกษาทดแทนในข้าวบาร์เลย์ แล้วทำการเปรียบเทียบค่า มีหน่วยเป็นจำนวนเท่าของข้าวบาร์เลย์ที่ใช้ในการกินอาหาร ระบบนี้จะมีความคล้ายกับระบบ SE (กฤตพล, 2550; Sundstol, 1993)

3. ค่าโภชนะที่ย่อยได้รวม (total digestible nutrient, TDN)

เป็นระบบที่นิยมใช้กันอย่างกว้างขวางในอาหารสัตว์เคี้ยวเอื้องเป็นเวลากว่า 100 ปีมาแล้ว โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศสหรัฐอเมริกาและอีกหลาย ๆ ประเทศรวมทั้งประเทศไทย โดยค่า TDN สามารถประเมินค่าได้จากการทำการทดลองเพื่อวัดการย่อยได้ของโภชนะที่สามารถให้พลังงานต่อสัตว์ (กฤตพล, 2550; Ensminger et al., 1990; Pond et al., 2005) โดยการรวมปริมาณโภชนะที่ย่อยได้ทั้งหมดที่มีในอาหาร 100 กิโลกรัม คือ

$$TDN = DCP + DCF + DNFE + (2.25 \times DEE)$$

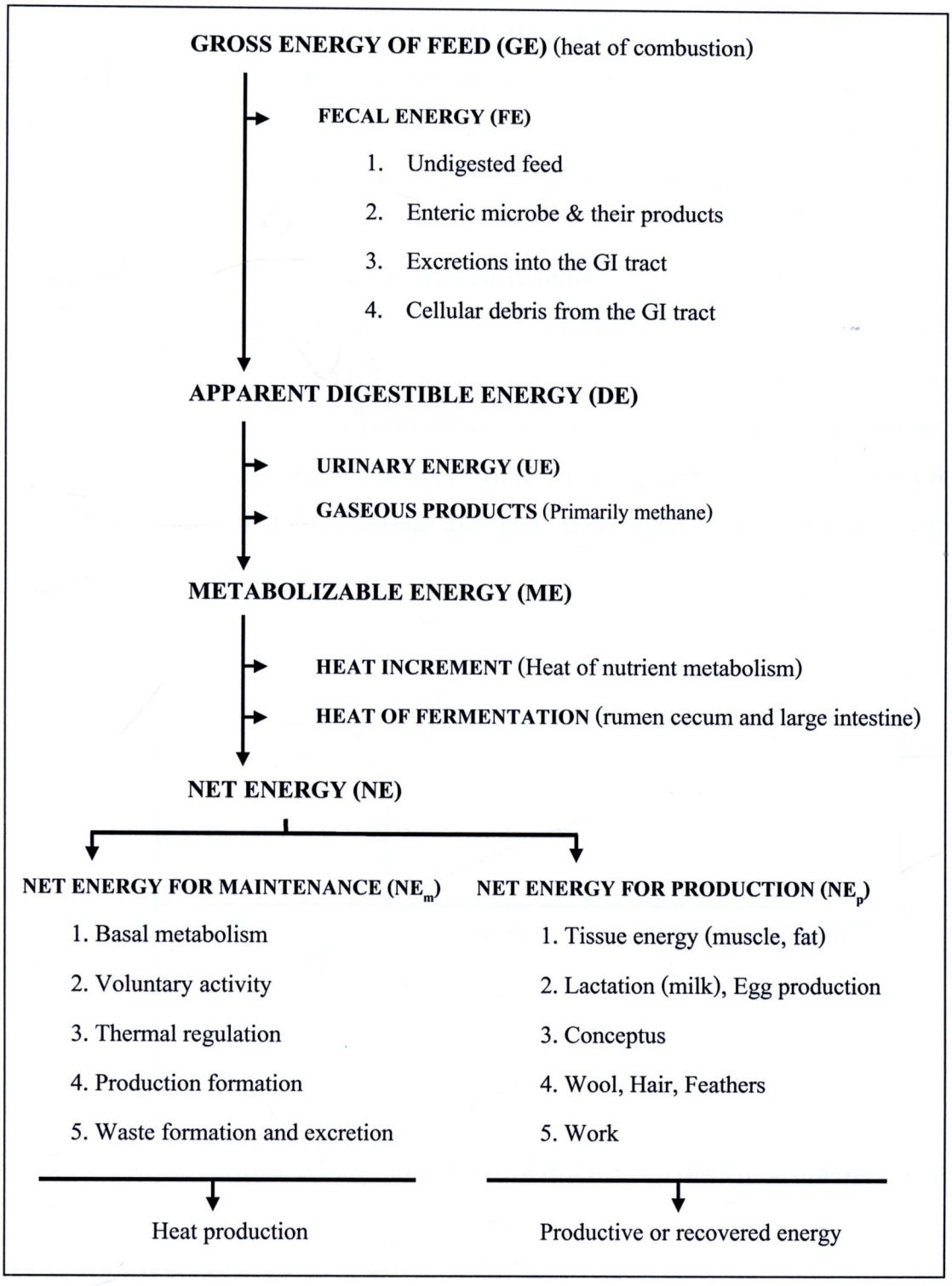
เมื่อ DCP = โปรตีนที่ย่อยได้ (กิโลกรัมต่อ 100 กิโลกรัมวัตถุแห้ง)

DCF = เยื่อใยที่ย่อยได้ (กิโลกรัมต่อ 100 กิโลกรัมวัตถุแห้ง)

DNFE = คาร์โบไฮเดรตย่อยง่ายที่ย่อยได้ (กิโลกรัมต่อ 100 กิโลกรัมวัตถุแห้ง)

DEE = ไขมันที่ย่อยได้ (กิโลกรัมต่อ 100 กิโลกรัมวัตถุแห้ง)

โดยค่าคงที่ 2.25 มาจากการที่ไขมันมีพลังงานสูงกว่าคาร์โบไฮเดรตประมาณ 2.25 เท่า ดังนั้นจึงใช้ค่า 2.25 เป็นสัมประสิทธิ์ปรับค่าปริมาณไขมันที่ย่อยได้



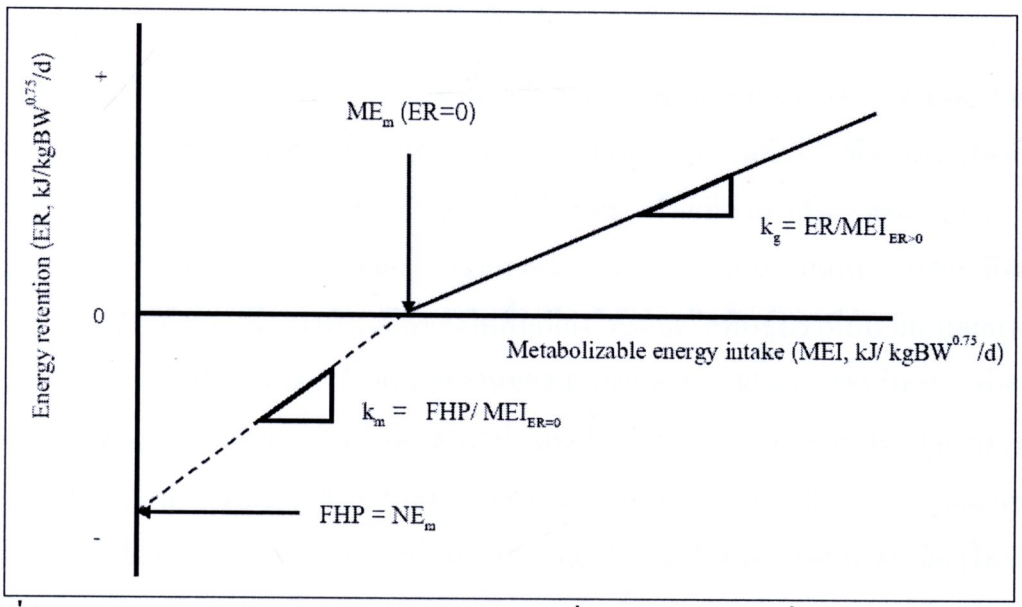

**ภาพที่ 2.1** ขั้นตอนการใช้ประโยชน์ของพลังงานในตัวสัตว์

ที่มา: Pond et al. (2005)

หากเปรียบเทียบค่า DE กับ TDN ค่า TDN จะมีความถูกต้องต่ำกว่าในการประเมินค่าพลังงานในอาหารสัตว์ เนื่องจากข้อผิดพลาดจากการตรวจวิเคราะห์ทางเคมีแบบประมาณ อย่างไรก็ตามค่า TDN ยังมีการใช้และยอมรับในอเมริกาเนื่องจากหาค่าได้ง่าย สะดวก มีราคาวิเคราะห์ถูก รวมทั้งสามารถเข้าใจได้ง่าย NRC (2000) และ NRC (2001) ยังคงใช้ค่า TDN เพื่อการประเมินหรือทำนายค่า ME หรือ NE (กฤตพล, 2550)

2.8.4 การประเมินค่าความต้องการพลังงานในโคเนื้อ

หลักการประเมินค่าค่าความต้องการพลังงานในโคเนื้อสามารถทำได้โดยนำข้อมูลที่มีมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระ (แกน X = ค่าพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้ที่กินได้) กับตัวแปรตาม (แกน Y = ค่าพลังงานที่ร่างกายเก็บกักได้) (ภาพที่ 2.2) (ARC, 1980; Williams and Jenkins, 2003a, b; WTSR, 2008) ในกรณีของการศึกษาแบบ long-term feeding trials สามารถใช้ค่าอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวัน (average dairy gain; ADG) เป็นตัวแปรอิสระได้ (ARC, 1980; WTSR, 2008; Chaokaur, 2009)




**ภาพที่ 2.2** แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้ที่กินได้กับค่าพลังงานที่ร่างกายสามารถเก็บกักไว้ได้

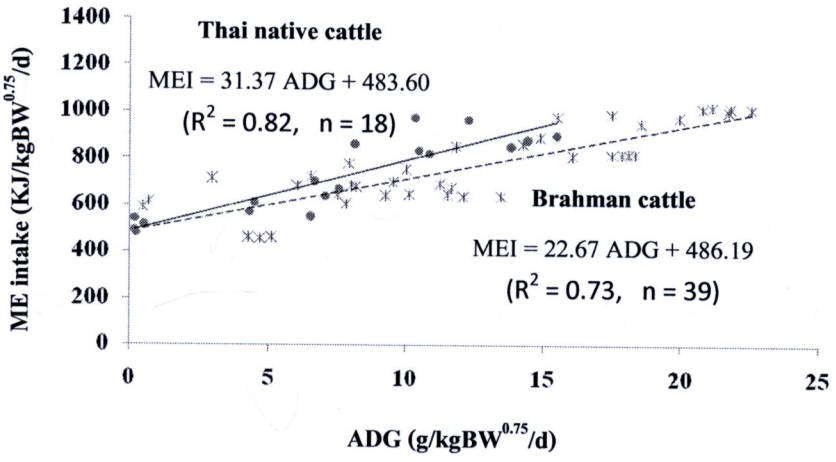
ที่มา: ดัดแปลงจาก McDonald et al. (2002)

จากภาพที่ 2.2 ณ จุดตัดแกน X หมายถึง ค่าการเก็บกักของพลังงานในร่างกายเท่ากับศูนย์ ถือว่าเป็นค่าความต้องการพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้เพื่อการดำรงชีพ ($ME_m$ หรือ ที่ค่า $MEI_{ER=0}$) และค่าความชันของเส้นกราฟที่อยู่ใต้แกน X (ที่ค่า ER < 0) เป็นค่าประสิทธิภาพการใช้

ประโยชน์ของพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้เพื่อการดำรงชีพ ($k_m$) ซึ่งคำนวณได้จากสมการ $k_m$ เท่ากับ $FHP/MEI_{ER=0}$ โดยที่ FHP คือ พลังงานขั้นพื้นฐานเพื่อกระบวนการเมแทบอลิซึม (fasting heat production หรือ basal metabolism) ค่าความชันของเส้นกราฟที่อยู่เหนือแกน X ซึ่งปริมาณการกินได้ของพลังงานสูงกว่าระดับดำรงชีพ เป็นจุดที่แสดงค่าประสิทธิภาพการใช้ประโยชน์ของพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้เพื่อการเจริญเติบโต ($k_g$) คำนวณได้จาก $k_g$ เท่ากับ $ER/MEI_{ER>0}$ โดยที่ ER คือ พลังงานที่เก็บกักในร่างกาย และ $MEI_{ER>0}$ คือ พลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้ที่กินได้ในระดับสูงกว่าดำรงชีพ (WTSR, 2008)

ในทางปฏิบัติการใช้ค่าพลังงานสุทธิเพื่อประเมินค่าความต้องการพลังงานของโคเนื้อนั้นอาจมีความยุ่งยากในการนำมาใช้ ทั้งนี้เพราะต้องใช้เครื่องมืออุปกรณ์ที่ซับซ้อนและมีราคาแพง การวิเคราะห์ส่วนประกอบพลังงานสุทธิของอาหารสัตว์ในประเทศไทยจึงยังไม่สามารถดำเนินการได้ แต่อย่างไรก็ตามปัจจุบันมีห้องปฏิบัติการของสถาบันการศึกษาในประเทศสามารถวิเคราะห์ค่าพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้ในอาหารทั้งโดยตรงและโดยอ้อม การวัดความต้องการพลังงานและส่วนประกอบพลังงานในรูปพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้จึงมีความเหมาะสมในปัจจุบัน (WTSR, 2008)

จากการประมวลผลข้อมูลทางสถิติและการวิเคราะห์อภิมานของ WTSR (2008) (ภาพที่ 2.3) ตามวิธีการของ St-Pierre (2001) พบว่า ค่าความต้องการพลังงานเพื่อการดำรงชีพของโคพื้นเมืองไทยและโคพันธุ์บราห์มันมีค่าที่ใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเท่ากับ 484 และ 486 $kJ/kgBW^{0.75}/d$ ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ นัทธมน และ กฤตพล (2550) ที่พบว่าค่าความต้องการพลังงานเพื่อการดำรงชีพของโคพื้นเมืองไทยและโคพันธุ์บราห์มัน มีค่าแตกต่างกันประมาณ 2 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Ferrell and Jenkins (1998) ที่พบว่า ค่าความต้องการพลังงานเพื่อการดำรงชีพในโคพันธุ์บราห์มันที่เลี้ยงในประเทศสหรัฐอเมริกา มีค่าประมาณ 488 $kJ/kgBW^{0.75}/d$ WTSR (2008) รายงานว่า ค่าความต้องการพลังงานเพื่อการเจริญเติบโตของโคพื้นเมืองไทยมีค่าสูงกว่าโคพันธุ์บราห์มัน ประมาณ 28 เปอร์เซ็นต์ โดยโคพื้นเมืองไทยและโคพันธุ์บราห์มัน มีค่าความต้องการพลังงานเพื่อการเพิ่มน้ำหนักตัว 100 $g/kgBW^{0.75}/d$ ประมาณ 3,620.60 และ 2,753.19 $kJ/kgBW^{0.75}/d$ ตามลำดับ




**ภาพที่ 2.3** ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวันกับค่าพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้ที่กินได้ของโคพื้นเมืองไทย (—, เส้นทึบ) และโคพันธุ์บราห์มัน (┈┈, เส้นประ)
ที่มา: WTSR (2008)

## 2.9 ความต้องการโปรตีนของสัตว์

โปรตีน เป็นสารประกอบอินทรีย์ที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ มีโครงสร้างซับซ้อนประกอบด้วยกรดแอมิโนเรียงตัวต่อกันเป็นสายด้วยพันธะเพปไทด์ (peptide bond) (McDonald et al., 2002) WTSR (2008) รายงานว่า ร่างกายของสัตว์มีโปรตีนเป็นองค์ประกอบ ประมาณ 12-16 เปอร์เซ็นต์ พบในทุกส่วนของร่างกาย ยกเว้นปัสสาวะและน้ำดี หนึ่งในสามของโปรตีนในร่างกายพบในกล้ามเนื้อ โปรตีนมีความสำคัญและหน้าที่ดังนี้

1. เป็นโครงสร้างของร่างกาย ช่วยบำรุงรักษาและซ่อมแซมเนื้อเยื่อที่สึกหรอ
2. ใช้ในการสังเคราะห์สารอินทรีย์ที่จำเป็นต่อร่างกาย เช่น เอ็นไซม์ ฮอร์โมน และสารภูมิคุ้มกัน
3. ช่วยในการควบคุมสภาพหรือสภาวะของร่างกายให้เป็นไปตามปกติ
4. ใช้เป็นแหล่งพลังงานได้ (โปรตีน 1 กรัม จะให้พลังงานประมาณ 16.736 กิโลจูล หรือ 4.0 แคลอรี)

การวิเคราะห์หาปริมาณโปรตีนในอาหารสัตว์ นิยมทำการวิเคราะห์โดยวิธีประมาณ (proximate analysis) เพื่อหาธาตุไนโตรเจนทั้งหมดที่มีอยู่ในอาหารนั้น คูณด้วยปริมาณของไนโตรเจนที่หาได้ด้วยค่า 6.25 (เนื่องจากโปรตีนมีธาตุไนโตรเจนเฉลี่ย ประมาณ 16 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก เพราะฉะนั้น ธาตุไนโตรเจน 1 หน่วย จะมีค่าเทียบเท่ากับโปรตีน 6.25 หน่วย) โปรตีน

ที่วิเคราะห์ได้โดยวิธีนี้เรียกว่า โปรตีนรวมหรือโปรตีนหยาบ (crude protein, CP) ค่าโปรตีนที่วิเคราะห์ได้ประกอบด้วย โปรตีนแท้และสารที่ไม่ใช่โปรตีนแต่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ การวิเคราะห์โดยวิธีนี้เป็นที่นิยมใช้ เนื่องจากทำได้ง่ายสะดวกและต้นทุนต่ำ (WTSR, 2008)

ตั้งแต่ ปี ค.ศ. 1988 หรือ พ.ศ. 2531 เป็นต้นมา NRC (1988) ได้ให้ความสำคัญ และคำนึงถึงการสลายตัวที่แตกต่างกันของโปรตีนในกระเพาะหมัก ซึ่งมีผลต่อประสิทธิภาพการใช้ประโยชน์ของโปรตีนในสัตว์เคี้ยวเอื้อง โดยมีแนวคิดว่าโปรตีนจากแหล่งวัตถุดิบอาหารต่างชนิดกันจะถูกย่อยสลายได้แตกต่างกัน ค่าการย่อยสลายได้ของโปรตีนในกระเพาะหมักสามารถประเมินได้โดยวิธี protein solubility test เช่น การประเมินโดยการวัดการละลายได้ในสารละลายบัฟเฟอร์ การละลายได้ในเอ็นไซม์ และการย่อยสลายโดยวิธีถุงไนล่อน (nylon bag, *in sacco* หรือ *in situ*) เป็นต้น จึงจัดแบ่งโปรตีน ออกเป็น 2 ส่วน ตามความสามารถในการย่อยสะลายได้ คือ โปรตีนที่ถูกย่อยสลายได้ในกระเพาะหมัก (rumen-degradable protein, RDP) และโปรตีนที่ไม่ถูกย่อยสลายในกระเพาะหมัก (rumen-undegradable protein, RUP) (NRC, 2000; McDonald et al., 2002; Pond et al., 2005)

โปรตีนจากอาหารประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ จะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ในกระเพาะหมักให้เป็นเพปไทด์ กรดแอมิโน และ $NH_3$-N หลังจากนั้นจุลินทรีย์จะนำไปสังเคราะห์เป็นโปรตีนของจุลินทรีย์ โดยประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ ของโปรตีนของจุลินทรีย์ที่สังเคราะห์ได้มาจากการใช้ $NH_3$-N ส่วนอีก 20 เปอร์เซ็นต์ ได้มาจากกรดแอมิโน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับแหล่งของโปรตีน แหล่งของพลังงาน และแร่ธาตุ (Nolan, 1993) กรดแอมิโนสำหรับสัตว์เคี้ยวเอื้อง ได้มาจากการย่อยสลายอาหารโปรตีนและย่อยสลายโปรตีนของตัวจุลินทรีย์ ซึ่งจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ในกระเพาะหมักสามารถสังเคราะห์กรดแอมิโนได้ทั้งชนิดที่จำเป็น (essential amino acid) ซึ่งหมายถึง กรดแอมิโนที่จำเป็นต้องมีในอาหาร เพราะร่างกายสัตว์ไม่สามารถสังเคราะห์จากสารอื่นได้ หรือสังเคราะห์ได้แต่ไม่พอเพียงกับความต้องการของร่างกาย และกรดแอมิโนชนิดที่ไม่จำเป็น (non-essential amino acid) ซึ่งหมายถึงกรดแอมิโนที่ไม่จำเป็นต้องมีในอาหาร เพราะร่างกายสามารถสังเคราะห์จากสารอื่นได้ในปริมาณที่พอเพียงกับความต้องการของร่างกาย

เป็นที่ทราบกันดีว่าโปรตีนจากจุลินทรีย์เป็นโปรตีนที่มีคุณภาพ กล่าวคือ มีคุณค่าทางชีววิทยา (biological value, BV) สูง ประมาณ 66-87 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งใกล้เคียงกับโปรตีนจากสัตว์ และดีกว่าโปรตีนจากพืชส่วนใหญ่ จึงอาจกล่าวได้ว่าความต้องการโปรตีนของสัตว์เคี้ยวเอื้องเพื่อการดำรงชีพ หรือการให้ผลผลิตระดับต่ำ ไม่จำเป็นต้องเสริมกรดแอมิโนชนิดที่จำเป็น แนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพในการสังเคราะห์โปรตีนของจุลินทรีย์สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การประสานเวลาระหว่างอัตราการย่อยสลายอาหารพลังงานและการปลดปล่อยไนโตรเจน

(synchronization the rate of degradation of dietary energy and nitrogen release) เป็นวิธีการหนึ่งที่ช่วยควบคุมการย่อยสลายสารอาหารที่ให้พลังงานกับโปรตีนให้เกิดขึ้นด้วยอัตราและปริมาณที่สมดุลในเวลาอันเหมาะสม ทำให้ไนโตรเจนที่ย่อยสลายได้ในกระเพาะหมักถูกนำไปใช้อย่างมีประสิทธิภาพ และเป็นผลให้ความต้องการโปรตีนที่ไม่ถูกย่อยสลายในกระเพาะหมักลดลง การขับไนโตรเจนทางปัสสาวะลดลง (Sinclair et al., 1993) รวมทั้งทำให้ค่า pH และความเข้มข้นของ $NH_3$-N ในกระเพาะหมัก มีความผันแปรต่ำ (Chumpawadee et al., 2006) ส่งผลให้ประสิทธิภาพการนำ $NH_3$-N ไปใช้ประโยชน์เพื่อการสังเคราะห์โปรตีนของจุลินทรีย์ได้สูงขึ้น (Sinclair et al., 1993; Kolver et al., 1998; Shabi et al., 1998)

2.9.1 การประเมินค่าความต้องการโปรตีนในโคเนื้อ

ความต้องการโปรตีนมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องมากมาย ได้แก่ อายุ ขนาดร่างกาย พันธุ์ (ARC, 1980; NRC, 2000) สิ่งแวดล้อมที่โคอาศัยอยู่ รวมถึงคุณภาพของอาหาร (Ørskov, 1992) สามารถจำแนกออกเป็นสองส่วน ได้แก่ ความต้องการโปรตีนเพื่อการดำรงชีพ (protein requirements for maintenance) และความต้องการโปรตีนเพื่อให้ผลผลิต (protein requirements for production) การประเมินหาค่าความต้องการโปรตีน สามารถทำได้ด้วยวิธีต่อไปนี้ (McDonald et al., 2002; Pond et al., 2005)

1. ประเมินได้จาก endogenous nitrogen losses โดยวิธีแฟคทอเรียล (factorial method) เพื่อคำนวณค่าความต้องการโปรตีน อธิบายโดย Swanson (1977) และ NRC (1984)

2. ประเมินได้จากวิธีการวัดสมดุลไนโตรเจน (nitrogen balance) ด้วยการให้อาหารที่มีระดับโปรตีนแตกต่างกัน โดย ณ ที่ระดับโปรตีนต่ำสุดที่ทำให้สมดุลไนโตรเจนเท่ากับศูนย์ (ไม่มีการเก็บกักหรือสูญเสียไนโตรเจน) ถือว่าเป็นระดับความต้องการโปรตีนเพื่อการดำรงชีพ (ARC, 1980; Silva et al., 2003)

3. ประเมินได้จากวิธีการชำแหละซาก (comparative slaughter technique) จากการให้อาหารที่มีระดับโปรตีนแตกต่างกัน เพื่อเปรียบเทียบการสะสมโปรตีนในซาก และวัดการกักเก็บไนโตรเจน (โปรตีน) ในซากต่อปริมาณโปรตีนที่ได้รับ (Lofgreen, 1965; Chizzotti et al., 2007)

4. ประเมินได้จากการทดสอบการกินอาหารระยะยาว (long-term feeding trials) เป็นวิธีที่วัดค่าการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักตัวต่อหนึ่งหน่วยของโปรตีนที่สัตว์กินได้ (Taylor et al., 1981; Luo et al., 2004)

จากการประมวลผลข้อมูลทางสถิติและการวิเคราะห์อภิมานของ WTSR (2008) ตามวิธีการของ St-Pierre (2001) โดยการสร้างสมการเชิงเส้นตรงระหว่าง ค่าอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวัน (ADG, g/kg$BW^{0.75}$/d) เป็นตัวแปรอิสระ (X) และค่าโปรตีนหยาบที่กินได้เฉลี่ยต่อวัน

(CPI, gCP/kgBW$^{0.75}$/d) เป็นตัวแปรตาม (Y) พบว่าค่าความต้องการโปรตีนเพื่อการดำรงชีพและเพื่อการเจริญเติบโตของโคพื้นเมืองไทย พันธุ์บราห์มัน และโคลูกผสมพื้นเมืองไทยกับพันธุ์บราห์มัน เท่ากับ 5.03, 4.52 และ 5.47 gCP/kgBW$^{0.75}$/d ตามลำดับ และมีค่าความต้องการโปรตีนเพื่อการเพิ่มน้ำหนักตัว 100 g/kgBW$^{0.75}$/d เท่ากับ 43.03, 60.52 และ 64.47 gCP/kgBW$^{0.75}$/d ตามลำดับ ค่าความต้องการโปรตีนเพื่อการดำรงชีพของโคเนื้อพื้นเมืองไทยและโคลูกผสม ใกล้เคียงกับค่าแนะนำของ Kearl (1982) และ NRC (1976) มีค่าเท่ากับ 5.35 และ 5.55 gCP/kgBW$^{0.75}$/d ตามลำดับ ในขณะที่ความต้องการโปรตีนของโคเนื้อพันธุ์บราห์มันมีค่าที่ใกล้เคียงกับ ARC (1980) มีค่าเท่ากับ 4.42 gCP/kgBW$^{0.75}$/d