บทที่ 2

การตรวจเอกสาร

ฟางข้าว

ฟางข้าวเป็นวัสดุเศษเหลือที่นิยมใช้เลี้ยงสัตว์ในช่วงฤดูแล้ง เพื่อบรรเทาปัญหาขาดแคลนแหล่งอาหารหยาบที่ใช้เลี้ยงสัตว์ ฟางข้าวเป็นวัสดุเศษเหลือที่ได้จากการปลูกข้าวซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย มีการเพาะปลูกกันทั่วประเทศ โดยในปี พ.ศ. 2541 มีพื้นที่เพาะปลูกข้าวนาปี 57.2 ล้านไร่ สามารถให้ผลผลิตได้ 17.8 ล้านตัน คิดเป็นผลผลิตต่อไร่เท่ากับ 312 กก. และมีพื้นที่เพาะปลูกข้าวนาปรัง 5.16 ล้านไร่ ให้ผลผลิตได้ 3.6 ล้านตันคิดเป็นผลผลิตต่อไร่ เท่ากับ 695 กก. (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2541)

โครงสร้างภายในเซลล์ของฟางข้าว

โครงสร้างภายในเซลล์ของฟางข้าวประกอบด้วยองค์ประกอบที่สำคัญคือ

1. สิ่งที่อยู่ภายในเซลล์ (cell content)

สิ่งที่อยู่ภายในเซลล์คือค่าที่เรียกว่า neutral detergent soluble (NDS) ซึ่งคำนวณจาก NDS = 100 - NDF สิ่งที่อยู่ภายในเซลล์ประกอบด้วย โปรตีนที่ละลายได้ (soluble protein) ไนโตรเจนที่ไม่ใช่โปรตีน (non protein nitrogen, NPN) น้ำตาล (sugar) แป้ง (starch) ไขมัน (lipid) และแร่ธาตุ (mineral)

ฟางข้าวประกอบด้วยสิ่งที่อยู่ภายในเซลล์ประมาณ 14-46 % ค่าการย่อยได้ของส่วนนี้สูงถึง 98 % (Van Soest, 1976 อ้างโดย Doyle *et al.*, 1986) แต่ถ้ามีสิ่งที่อยู่ภายในเซลล์ต่ำกว่า 20% จะทำให้การย่อยได้ลดลงอยู่ในช่วง 86-96 % (Moir, 1974 - 1982 อ้างโดย Doyle *et al.*, 1986) สาเหตุที่ค่าการย่อยได้ของสิ่งที่อยู่ภายในเซลล์สูงมากเนื่องจากส่วนใหญ่ประกอบด้วยอินทรียวัตถุได้แก่ โปรตีน และ คาร์โบไฮเดรต ซึ่งมีการย่อยได้สูง

2. ผนังเซลล์ (cell wall)

ผนังเซลล์คือค่าที่เรียกว่า neutral detergent fibre (NDF) ประกอบด้วย เซลยูโลส (cellulose) เฮมิเซลยูโลส (hemi-cellulose) ลิกนิน (lignin) และเถ้า (ash) ฟางข้าวประกอบด้วยส่วนต่างๆ ของผนังเซลล์ดังนี้ cellulose 30-51% hemi-cellulose 6-28% lignin 4-10% ค่าการย่อยได้ของผนังเซลล์ในฟางข้าวที่วัดได้จากห้องปฏิบัติการ (*in vitro* technique) เท่ากับ 35-50% (Doyle *et al.*, 1986)

สาเหตุที่ผนังเซลล์มีค่าการย่อยได้ต่ำกว่าสิ่งที่อยู่ภายในเซลล์ เนื่องจากผนังเซลล์มีลิกนินซึ่งจะไปเกาะอยู่กับเฮมิเซลยูโลส ทำให้ไม่ถูกย่อยสลาย นอกจากนี้สาร phenolic acid ที่มีอยู่ในลิกนินยังมีผลยับยั้งการทำงานของเอนไซม์จากจุลินทรีย์ (microbial enzyme) โดยสารดังกล่าวจะไปขวางกั้นบริเวณที่เอนไซม์จะเข้าไปทำปฏิกริยา

นอกจากลิกนินที่มีผลต่อการย่อยได้แล้ว ผนังเซลล์ยังประกอบด้วยซิลิกา (silica) ที่มีผลต่อการย่อยได้ ทำให้ซิลิกามีความสัมพันธ์กับค่าการย่อยได้แบบผกผัน ซิลิกามักจะพบในพืชอาหารสัตว์คุณภาพต่ำ เช่น ฟางข้าว จะประกอบด้วยซิลิกา 13 - 23 %

องค์ประกอบทางเคมีของฟางข้าว

ฟางข้าวจัดเป็นแหล่งอาหารประเภทให้พลังงาน แต่มีโภชนะและความน่ากินต่ำ คือมีโปรตีนเพียง 2-4% ซึ่งอยู่ในระดับที่ต่ำกว่าความต้องการเพื่อดำรงชีพ คือประมาณ 6-7% และมีส่วนของผนังเซลล์ประมาณ 70-80% โดยเฉพาะส่วนที่จับตัวกันระหว่างลิกนิน และเซลยูโลส (ligno-cellusic fraction) ฟางข้าวมีปริมาณแร่ธาตุที่จำเป็นอยู่น้อยมาก เช่น มีฟอสฟอรัส 0.1% ซึ่งต่ำกว่าระดับความต้องการเพื่อการเจริญเติบโตตามปกติและเพื่อความสมบูรณ์พันธุ์ ถึงแม้ว่าจะมีแคลเซียมปริมาณมากแต่ก็อยู่ในรูปของเกลือออกซาเลท (oxalate) หรือ ซิลิเคท (silicate) ทำให้การนำไปใช้ประโยชน์ลดลง (เมธา, 2528) นอกจากนี้ฟางข้าวยังมีปริมาณซิลิกาสูงถึง 22 % ซึ่งมากกว่าฟางธัญพืชชนิดอื่น ๆ

องค์ประกอบทางเคมีของฟางข้าวจากรายงานต่าง ๆ แสดงไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1. องค์ประกอบทางเคมีของฟางข้าวจากรายงานต่าง ๆ (% ของวัตถุแห้ง)

Chemical composition of rice straw (%DM)

DM	OM	CP	EE	CF	NFE	NDF	ADF	ADL	Reference
86.0	82.6	2.3	1.8	38.4	40.2	85.6	63.1	5.2	Cheva-Isarakul and Cheva-Isarakul (1984)
90.5	80.9	4.3	1.4	-	-	78.6	59.5	3.3	Cheva-Isarakul and Cheva-Isarakul (1986)
86.0	-	2.3	1.8	38.4	40.2	-	-	-	Potikanond *et al.* (1987)
97.7	82.3	2.9	2.0	33.4	44.1	74.1	56.6	-	Cheva-Isarakul and Cheva-Isarakul (1991)
-	-	1.7	1.7	43.0	66.8	47.6	-	-	Promma *et al.* (1994)
89.3	83.9	2.7	-	-	-	77.8	55.0	3.0	เจริญ (2529)
90.8	85.9	3.5	2.3	-	-	82.4	56.4	-	เสาวลักษณ์ (2541)

ฟางข้าวมีสัมประสิทธิ์การย่อยได้ของวัตถุแห้งในสัตว์เคี้ยวเอื้องประมาณ 35-55% โดยปกติแล้วโคและกระบือสามารถกินฟางข้าวได้ 1.2-2.7 เปอร์เซนต์ของน้ำหนักตัว แต่แกะและแพะสามารถกินฟางข้าวได้เพียง 1.0-2.7 เปอร์เซนต์ของน้ำหนักตัว ซึ่งเมื่อคิดเป็นค่า metabolic liveweight ($LW^{0.75}$) พบว่าสัตว์เคี้ยวเอื้องขนาดใหญ่สามารถกินฟางข้าวได้ 46-105 g/kg $LW^{0.75}$ ในขณะที่สัตว์เคี้ยวเอื้องขนาดเล็กสามารถกินฟางข้าวได้ 25 - 60 g/kg $LW^{0.75}$ แสดงว่าสัตว์เคี้ยวเอื้องขนาดใหญ่สามารถกินฟางข้าวได้มากกว่า (Doyle *et al.*, 1986)

ปัจจัยที่มีผลต่อคุณค่าทางโภชนะของฟางข้าว

ปัจจัยที่มีผลต่อคุณค่าทางโภชนะของฟางข้าวมีหลายประการ เช่น ชนิดและพันธุ์ข้าว ส่วนต่างๆ ของฟางข้าว สัดส่วนของใบและลำต้น นอกจากนี้ยังมีปัจจัยจากสภาพแวดล้อมอีก เช่น ปริมาณน้ำฝน อุณหภูมิ ความอุดมสมบูรณ์ของดิน ชนิดและอัตราการใส่ปุ๋ย วิธีการเก็บเกี่ยว ลักษณะและวิธีการรักษาหลังการเก็บเกี่ยว และการปลอมปนของวัสดุอื่นๆ (Cheva-Isarakul and Cheva-Isarakul, 1984) ปัจจัยบางอย่างที่มีผลต่อคุณค่าทางโภชนะของฟางข้าว จะกล่าวถึงดังต่อไปนี้

1. ชนิดและพันธุ์ข้าว

ฟางที่ได้จากข้าวต่างชนิดกันจะมีองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างกัน ดังเช่นรายงานของวรพงษ์ และคณะ (2517) ได้กล่าวไว้ว่า ฟางข้าวเหนียวมีเปอร์เซนต์เยื่อใย (crude fibre) สูงกว่าฟางข้าวจ้าว (30.5% และ 27.5%) นอกจากนี้ส่วนประกอบต่าง ๆ ของเยื่อใยในฟางข้าวต่างชนิดกันจะแตกต่างกันด้วย ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่าฟางข้าวจ้าวมีเซลยูโลสและลิกนินต่ำกว่า แต่มีซิลิกาสูงกว่าฟางข้าวชนิดอื่น

ตารางที่ 2. ส่วนประกอบเยื่อใยส่วนต่างๆ ของฟางข้าวต่างชนิดกัน (% ของวัตถุแห้ง)

Fibre component of different kinds of straws (% DM basis)

Varieties	Cell content	Cell wall	Cellulose	Hemi-cellulose	Lignin	Silica
Rice straw	21	79	33	26	7	13
Barley straw	19	81	44	27	7	3
Wheat straw	20	80	39	36	10	6
Oat straw	27	73	41	16	11	3

ที่มา : ดัดแปลงจาก Jackson (1977 อ้างโดย เมธา, 2528)

Cheva-Isarakul and Cheva-Isarakul (1985a) ได้ทำการศึกษาความแตกต่างของโภชนะในฟางข้าวจ้าว (non-glutinous) และฟางข้าวเหนียว (glutinous) หลายพันธุ์พบว่ามีความแตกต่างกันน้อยมาก ส่วนที่แตกต่างกันคือ ลิกนิน (ADL) และพลังงาน (DE , ME) เท่านั้น ดังแสดงไว้ในตารางที่ 3

ตารางที่ 3. องค์ประกอบทางเคมี การย่อยได้ของอินทรียวัตถุที่วัดในห้องปฏิบัติการ และพลังงานของฟางข้าวจ้าวและฟางข้าวเหนียว (% ของวัตถุแห้ง)
Chemical composition, *in vitro* organic matter digestibility (IVOMD) and energy content of glutinous and non-glutinous rice (% DM basis)

Item	Glutinous	Non-glutinous
OM,%	81.8	81.7
CP,%	4.0	4.1
NDF,%	74.1	73.6
ADF,%	53.8	53.0
ADL,%	4.9[a]	4.5[b]
IVOMD,%	46.9	48.6
DE, MJ/Kg DM	7.4[a]	7.7[b]
ME, MJ/Kg DM	5.8[a]	6.0[b]

ab $P < 0.05$

ที่มา : Cheva-Isarakul and Cheva-Isarakul (1985a)

และเมื่อทดลองหาการย่อยได้กับสัตว์โดยตรงพบว่ามีความแตกต่างน้อยมากระหว่างฟางข้าวจ้าวและข้าวเหนียว ในด้านสัมประสิทธิ์การย่อยได้ของส่วนประกอบต่าง ๆ ยกเว้นการย่อยได้ของ NDF ในฟางข้าวจ้าวซึ่งมีค่าสูงกว่า (49.4% เทียบกับ 54.2%) (Cheva-Isarakul and Cheva-Isarakul, 1985b)

นอกจากส่วนประกอบต่าง ๆ ของเยื่อใยแล้ว องค์ประกอบทางเคมีอื่น ๆ ของฟางข้าวต่างสายพันธุ์จะแตกต่างกันด้วย Devendra (1982) ได้รายงานองค์ประกอบทางเคมีของพันธุ์ข้าว 7 พันธุ์ในประเทศมาเลเซีย พบว่า มีความแตกต่างกันมาก ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4 จะเห็นได้ว่าฟางข้าวมีโปรตีนประมาณ 3.3-4.5% แต่ปริมาณโปรตีนของฟางข้าวบางพันธุ์ที่ปลูกในบางสภาพอาจสูงหรือต่ำกว่านี้บ้างก็ได้ ดังรายงานของ Cheva-Isarakul and Cheva-Isarakul (1985a)

ตารางที่ 4. องค์ประกอบทางเคมีและปริมาณแร่ธาตุ (% ของวัตถุแห้ง) ของฟางข้าวต่างสายพันธุ์ในประเทศมาเลเซีย
Chemical composition and mineral content (% DM basis) of selected rice straw varieties in Malaysia

Variety	DM	CP	CF	Ash	GE	Ca	P	Mg	K	Zn
	----------(%)----------				(MJ/kg)	----------(%)----------				(ppm)
Bahagia	91.0	4.2	30.4	18.4	16.23	0.11	0.14	0.30	0.61	69
Mahsuri	91.0	3.6	32.1	17.5	14.73	0.41	0.13	0.20	2.40	68
Mat Candu	90.1	3.3	28.8	10.9	15.40	0.49	0.41	0.45	1.92	78
Malinja	90.1	3.7	33.6	18.7	16.15	0.47	0.14	0.17	2.19	79
Murni	90.8	4.5	30.3	15.1	14.27	0.49	0.30	0.48	1.76	81
Ria	90.1	3.3	28.8	10.9	14.27	0.58	0.17	0.32	2.40	77
Sir Malaysia I	93.3	4.5	26.0	16.8	14.06	-	-	-	-	-

ที่มา : Devendra (1982)

2. องค์ประกอบของฟางข้าว

องค์ประกอบทางเคมีต่างๆ จะมีผลต่อการย่อยได้แตกต่างกัน Roxas *et al.* (1984) และ Cheva-Isarakul and Cheva-Isarakul (1985a) พบว่า NDF ADF และ ADL มีสหสัมพันธ์ในทางตรงข้ามกับค่าการย่อยได้ของวัตถุแห้ง (IVDMD) และค่าการย่อยได้ของอินทรียวัตถุ (IVOMD) หมายความว่า ฟางข้าวที่มีองค์ประกอบเหล่านี้อยู่มากจะทำให้ค่าการย่อยได้ลดลง ในทางตรงกันข้าม DE และ ME มีค่าสหสัมพันธ์ในทางเดียวกันกับการย่อยได้ดังแสดงไว้ในตารางที่ 5 อย่างไรก็ดีสหสัมพันธ์เหล่านี้มีค่าไม่สูงนัก ยกเว้นค่าของลิกนิน

ตารางที่ 5. ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างการย่อยได้ของวัตถุแห้งและอินทรียวัตถุที่วัดในห้องปฏิบัติการกับองค์ประกอบทางเคมีต่าง ๆ ของฟางข้าว
Correlation coefficients between *in vitro* dry matter / organic matter digestibility (IVDMD / IVOMD) and other parameters

X_1	X_2	r	X_1	X_2	r
IVDMD[1]	NDF	-0.44	IVOMD[2]	NDF	-0.12
	Cellulose	-0.03		ADF	-0.20
	Lignin	-0.71		ADL	0.27
	Silica	0.48		DE	0.25
	IVOMD	0.97		ME	0.13

ที่มา : 1/ Roxas *et al.* (1984) 2/ Cheva-Isarakul and Cheva-Isarakul (1985a)

3. **ส่วนต่าง ๆ ของฟ่างข้าว**

องค์ประกอบทางเคมีของส่วนต่าง ๆ ของฟ่างข้าวจะแตกต่างกัน คือ โปรตีนจะมีค่าสูงสุดในใบ (5.6%) และต่ำสุดในลำต้น (3.1%) แต่ปริมาณซิลิกาจะตรงกันข้ามกับโปรตีน นอกจากนี้ %IVOMD จะสูงในส่วนที่มีซิลิกาประกอบอยู่น้อย ดังแสดงไว้ในตารางที่ 6

ตารางที่ 6. องค์ประกอบทางเคมี และการย่อยได้ของอินทรียวัตถุที่วัดในห้องปฏิบัติการของส่วนต่างๆ ของฟ่างข้าว 9 สายพันธุ์

Chemical composition and *in vitro* organic matter digestibility (IVOMD) of the entire plant and various plant parts from nine varieties rice

Plant Component	CP	CF	Ash	NDF	ADF	Cellulose	Hemi - cellulose	Silica	IVOMD
Entire plant	5.4	35.0	12.1	76.6	48.9	38.9	27.7	7.1	35.4
Leaf	5.6	30.3	11.2	73.2	44.9	27.8	31.7	5.8	31.9
Leaf-sheath	3.9	33.9	11.2	76.0	50.0	33.7	27.8	5.7	30.9
Stem	3.1	38.2	9.6	74.2	49.8	36.9	33.3	2.1	43.5
Node	5.2	27.9	10.6	73.1	38.3	30.6	36.9	4.1	47.0
Panicle	4.5	33.2	8.0	75.1	48.1	35.1	30.6	3.6	34.2

ที่มา : ดัดแปลงจาก Sannasgala and Jayasuriya (1984)

ในทำนองเดียวกัน Pearce (1985) ได้รายงานให้เห็นว่า %IVOMDในส่วนต่าง ๆ ของฟางข้าวมีความแตกต่างกัน คือ มีค่าสูงสุดในลำต้น (ข้อ + ปล้อง) รองลงมาคือ ใบ ดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7. การย่อยได้ของอินทรียวัตถุที่วัดในห้องปฏิบัติการของส่วนต่างๆ ของฟางข้าว

In vitro organic matter digestibility (IVOMD) of fractions of mature rice plants

Fraction	%IVOMD (±SD)	Fraction	%IVOMD (±SD)
Husk	20 ± 3.7	Leaf blade	52 ± 3.4
Rachis	28 ± 3.2	Leaf sheath	45 ± 3.4
Stem internode	54 ± 6.6	Stem (internode + node)	55 ± 6.0
Stem node	58 ± 4.5	Leaf (blade + sheath)	48 ± 2.8
		Whole plant, excluding grain	43 ± 3.7

ที่มา : Pearce (1985)

4. ฤดูกาล

ฤดูกาลมีผลต่อคุณค่าทางโภชนะของฟางข้าว เนื่องจากฤดูกาลมีผลต่อความชื้นในอากาศ อุณหภูมิ ปริมาณน้ำฝน และการจัดการอื่น ๆ เช่นใส่ปุ๋ยและยาฆ่าแมลงด้วย เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง ข้าวนาปี ซึ่งปลูกในฤดูฝน (wet season) กับข้าวนาปรัง ซึ่งปลูกในฤดูแล้ง (dry season) พบว่า ข้าวนาปรังมี %CP สูงกว่าทั้งข้าวจ้าวและข้าวเหนียวและ %OM ของข้าวจ้าวนาปีสูงกว่าข้าวนาปรัง (Cheva-Isarakul and Cheva-Isarakul,1985a) ดังแสดงในตารางที่ 8

ตารางที่ 8. องค์ประกอบทางเคมี การย่อยได้ของอินทรียวัตถุที่วัดในห้องปฏิบัติการ และพลังงานของฟางข้าวจ้าวและฟางข้าวเหนียวในฤดูแล้งและฤดูฝน (% ของวัตถุแห้ง)
Chemical composition, *in vitro* organic matter digestibility (IVOMD) and energy content of wet and dry season of glutinous rice and non-glutinous rice (% DM basis)

Item	Glutinous		Non-glutinous	
	Wet season	Dry season	Wet season	Dry season
OM, %	83.7	81.1	83.0[a]	81.0[b]
CP, %	3.6[a]	5.1[b]	3.4[a]	4.4[b]
NDF, %	73.7	75.3	73.1	73.8
ADF, %	53.2	55.6	52.9	53.0
ADL, %	4.9	4.9	4.8	4.4
IVDMD, %	46.3	48.8	46.9	49.5
DE, MJ/kg DM	7.4	7.5	7.8	7.6
ME, MJ/kg DM	5.7	6.0	6.0	6.0

ab $P < 0.05$

ที่มา : Cheva-Isarakul and Cheva-Isarakul (1985a)

5. แสงสว่าง

แสงสว่างมีความสำคัญต่อองค์ประกอบทางเคมีของพืช พืชที่เจริญเติบโตโดยได้รับแสงสว่างน้อยเกินไป จะทำให้การย่อยได้ลดลง 1-5 % เนื่องจากทำให้คาร์โบไฮเดรตที่ละลายได้ (soluble carbohydrate) ลดลง แต่มีผนังเซลล์เพิ่มขึ้น (Smith, 1973 อ้างโดย Doyle *et al.* 1986)

6. การเก็บรักษาหลังการเก็บเกี่ยว

Devendra (1982) ได้เปรียบเทียบวิธีการเก็บฟาง 3 แบบ คือ การเก็บในร่ม การปิดด้านบน และการเก็บกลางแจ้ง พบว่า การเก็บในร่มจะทำให้คุณค่าทางโภชนะของฟางข้าวสูงที่สุด โดยเฉพาะค่าโปรตีน พลังงาน แคลเซียม และฟอสฟอรัส ซึ่งจะมีค่าลดลงตามลักษณะการเก็บตามลำดับ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 9

ตารางที่ 9. องค์ประกอบทางเคมีของฟางข้าวที่เก็บรักษาหลังการเก็บเกี่ยวแบบต่าง ๆ

The effect on chemical composition of rice straw due to sunlight and rain

Constituent (%)	Under shade	Partial exposure	Full exposure
Dry matter	90.5	61.2	56.6
Crude protein	5.6	5.2	3.4
Crude fibre	27.6	24.7	24.2
Ash	16.7	16.5	16.6
Energy (MJ/kg)	15.31	14.24	12.21
Calcium	0.31	0.24	0.21
Phosphorus	0.11	0.05	0.02
Magnesium	0.15	0.13	0.14

ที่มา : Devendra (1982)

7. การใส่ปุ๋ย

การใส่ปุ๋ยไนโตรเจนในนาข้าวพันธุ์ต่าง ๆ มีแนวโน้มทำให้โปรตีน และ %IVDMD เพิ่มขึ้น แต่ส่วนประกอบอื่น ๆ ไม่มีการเปลี่ยนแปลงมากนัก (Sannasgala *et al*., 1985 และ Roxas *et al*., 1984)

ปัจจัยที่มีผลต่อการกินและปริ มาณการกินได้ของฟางข้าวในสัตว์เคี้ยวเอื้อง

เนื่องจากฟางข้าวมีโภชนะย่อยได้รวม (total digestible nutrient, TDN) ในระดับต่ำ คือ ประมาณ 45% และจากลักษณะของฟางข้าว คือ มีความฟ่ามสูง มีความหนาแน่นต่ำ จึงทำให้สัตว์กินฟางได้น้อย ทั้งนี้เพราะปัจจัยความจุของกระเพาะเข้ามาจำกัดการกินได้ นอกจากนั้นแล้วยังมีข้อจำกัดอื่น ๆ อีกคือ อัตราการย่อยสลายอนุภาคของฟางข้าวให้เล็กลง เพื่อให้เหมาะสมกับ การย่อยได้ มีในระดับต่ำ เป็นเหตุให้สัตว์ได้รับโภชนะต่ำกว่าระดับที่ต้องการ แม้แต่เพื่อดำรงชีพ ดังจะเห็นจากการที่สัตว์มีน้ำหนักลดในช่วงฤดูแล้งของแต่ละปี (เมธา, 2528)

เมธา (2528) ได้รวบรวมผลการทดลองต่าง ๆ ในประเทศไทย พบว่า โค กระบือ และแกะ สามารถกินฟางข้าวได้ในระดับต่ำประมาณ 2% ของน้ำหนักตัว และมีสัมประสิทธิ์การย่อยได้ของวัตถุแห้ง (dry matter digestibility) ประมาณ 45% เท่านั้น (ตารางที่10) ดังนั้นทั้งปริมาณที่สัตว์กินได้และการย่อยได้ของฟางข้าวเป็นตัวจำกัดการใช้ประโยชน์ของฟางข้าวในสัตว์เคี้ยวเอื้อง เป็นที่น่าสังเกตว่าโคกินฟางข้าวได้น้อยกว่าแกะและกระบือ เมื่อคิดเป็นร้อยละของน้ำหนักตัว

ตารางที่ 10. ปริมาณอาหารที่กินได้และค่าการย่อยได้ของฟางข้าวในสัตว์เคี้ยวเอื้อง
Intake and digestibility of rice straw by ruminants

Species	Physical Form	Dry matter intake (DMI)		Dry matter digestibility	References
		%BW	gDM/kgW$^{0.75}$		
Baffalo	Long	1.8	75.1	49.5	Wanapat *et al.* (1984)
		-	78.8	50.2	Wanapat *et al.* (1983)
Baffalo	Long	2.0	83.6	-	Wongsrikeao and Wanapat (1984)
Sheep	Chopped	1.8	43	42.6	Cheva-Isarakul and
Baffalo	Chopped	1.9	70	48.7	Cheva-Isarakul (1984)
Cattle	Chopped	1.2	46	51.2	
Cattle	Long	-	86.6	44.0	Wanapat *et al.* (1984)

ที่มา : ดัดแปลงจาก เมธา (2528)

การปรับปรุงคุณภาพของฟางข้าว

เมื่อเปรียบเทียบกับพืชอาหารสัตว์ชนิดอื่น ๆ แล้วพบว่าฟางข้าวเป็นอาหารหยาบที่มีคุณภาพต่ำ มีความน่ากินน้อย มีปริมาณโภชนะที่เป็นประโยชน์ต่ำ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง โปรตีน แต่มีเยื่อใยสูง ทำให้ย่อยได้ยาก จึงไม่สามารถใช้ฟางข้าวเป็นอาหารหลักเลี้ยงสัตว์เพียงอย่างเดียวได้ เพราะได้รับโภชนะไม่เพียงพอต่อความต้องการเพื่อการดำรงชีพ ดังนั้นการใช้ฟางข้าวเลี้ยงสัตว์จึงต้องมีการปรับปรุงคุณภาพของฟางข้าวหรือทำให้สามารถใช้ประโยชน์ได้ดีขึ้น ซึ่งสามารถทำได้หลายวิธีดังนี้

1. การใช้กรรมวิธีทางเคมี

กรรมวิธีในการปรับปรุงคุณค่าทางโภชนะของอาหารหยาบคุณภาพต่ำแบ่งออกได้ 4 วิธี คือ วิธีทางกายภาพ วิธีทางเคมี วิธีกายภาพร่วมกับเคมี และวิธีทางชีววิทยา (Ibrahim, 1983)

ในบรรดาวิธีการต่าง ๆ เหล่านี้ การใช้สารเคมีดูจะได้รับความนิยมมากที่สุด โดยเดิมนิยมใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ซึ่งมีฤทธิ์เป็นด่าง พบว่าได้ผลดีเป็นที่น่าพอใจ เพราะด่างช่วยสลายพันธะระหว่างลิกนินกับเฮมิเซลยูโลส ทำให้จุลินทรีย์เข้าย่อยสลายโภชนะที่อยู่ในเซลล์ได้ดีขึ้น ทำให้การย่อยได้ของฟางข้าวดีขึ้น และสัตว์กินอาหารได้มากขึ้น แต่วิธีนี้มีข้อจำกัดในแง่ที่ว่าด่างมีสภาพการกัดอย่างแรง (corrosive) นอกจากนี้ยังมีปัญหาเรื่องการชะล้างด่างออกก่อนที่จะให้สัตว์กิน ซึ่งต้องใช้น้ำเป็นปริมาณมากจึงไม่สะดวกในทางปฏิบัติ ต่อมาประเทศแถบยุโรปหันมานิยมใช้แอมโมเนีย (NH_3) ซึ่งสามารถใช้ได้ผลดี แต่เนื่องจากวิธีนี้ต้องมีเครื่องอัดแก๊สซึ่งไม่สะดวกสำหรับเกษตรกรในประเทศที่กำลังพัฒนา จึงได้มีการพัฒนาวิธีการหมักฟางโดยใช้ยูเรียแทน ซึ่งยูเรีย สามารถถูกย่อยสลายให้เป็นแอมโมเนียได้ และเมื่อละลายน้ำจะเกิดเป็นแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ ซึ่งมีฤทธิ์เป็นด่างเช่นกัน จากผลการศึกษาต่าง ๆ พบว่าการหมักฟางด้วยยูเรีย สามารถทำให้การย่อยได้เพิ่มขึ้น สัตว์กินอาหารได้มากขึ้น นอกจากนี้ยังได้รับไนโตรเจนเพิ่มขึ้น เป็นผลให้สมรรถภาพในการผลิตดีขึ้น (สมคิด, 2527)

2. การเสริมด้วยพืชตระกูลถั่ว

นอกจากการใช้กรรมวิธีทางเคมีดังได้กล่าวมาแล้วอาจทำได้โดยการเสริมด้วยอาหารที่มีคุณภาพดี เช่น ใบพืชตระกูลถั่ว ซึ่งได้แก่ ใบกระถิน ใบแคฝรั่ง และถั่ว verano stylo เป็นต้น พบว่าช่วยทำให้สัตว์สามารถเพิ่มน้ำหนักตัวได้ (Vearasilp, 1981)

Cheva-Isarakul (1991) ได้ศึกษาผลของการเสริมใบกระถินต่อการย่อยได้ของฟางข้าว โดยให้แกะได้รับฟางข้าวที่เสริมด้วยใบกระถิน 0.5, 1.0 และ 1.5 %BW พบว่าการเสริมด้วยใบกระถินระดับสูงขึ้นจะทำให้สัตว์ได้รับวัตถุแห้งและโภชนะเพิ่มขึ้นตามระดับของใบกระถิน (3.0, 3.1 และ 3.4% นน.ตัว ตามลำดับ) ทำให้โภชนะที่ย่อยได้เพิ่มขึ้นด้วย ดังจะเห็นได้จากค่าการย่อยได้ของโปรตีนเพิ่มขึ้น ในขณะที่ส่วนของเยื่อใยลดลง นอกจากนี้ยังทำให้การเจริญเติบโตเพิ่มขึ้น

การเสริมฟางข้าวด้วยใบกระถินนี้ เมื่อนำไปทดลองในโครุ่น เปรียบเทียบกับฟางหมักยูเรีย พบว่าทำให้โคได้รับอินทรียวัตถุที่ย่อยได้ (digestible organic matter, DOM) เท่ากัน และมีอัตราการเจริญเติบโตตลอดจนประสิทธิภาพการเปลี่ยนอาหารไม่แตกต่างกัน (Cheva-Isarakul and Potikanond, 1985) แสดงว่าการเสริมฟางข้าวด้วยใบกระถินเป็นทางเลือกอีกทางหนึ่งในการช่วยให้ฟางข้าวสามารถใช้ประโยชน์ได้ดีขึ้น เหมาะสำหรับเกษตรกรที่ผลิตใบกระถินได้เอง ทำให้ไม่ต้องลงทุนมากนัก และในบางกรณีอาจให้ผลดีกว่าด้วยดังการทดลองของ Cheva-Isarakul and Cheva-Isarakul (1986) ที่ศึกษาในโครุ่น

3. การราดด้วยสารละลายยูเรียและกากน้ำตาล

การใช้สารละลายยูเรียผสมกากน้ำตาลในอัตราส่วนที่เหมาะสม ราดลงบนฟาง พบว่าช่วยทำให้ปริมาณอาหารที่กินได้ การย่อยได้ของโภชนะ และสมรรถภาพในการผลิตของสัตว์ทัดเทียมกับการใช้ฟางหมักยูเรีย ดังผลการทดลองของ Cheva-Isarakul and Kanjanapruthipong (1985) ในโครุ่น เป็นต้น ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากยูเรียและกากน้ำตาลสามารถให้โภชนะที่เป็นประโยชน์ต่อจุลินทรีย์ในรูเมนในการเพิ่มประชากร จึงทำให้ฟางถูกย่อยได้ดีขึ้น ได้โภชนะที่เป็นประโยชน์มากขึ้นและจุลินทรีย์ที่เพิ่มขึ้นก็สามารถถูกย่อยให้โภชนะที่เป็นประโยชน์ต่อสัตว์ด้วย

ผลการศึกษาของนิรันดร และคณะ (2536) ที่ให้สัตว์เลี้ยกินสารละลายยูเรียและกากน้ำตาลผสมแร่ธาตุก็สามารถใช้ทดแทนอาหารข้นได้บางส่วน แสดงว่าการใช้สารละลายยูเรีย-กากน้ำตาลช่วยส่งเสริมกิจกรรมของจุลินทรีย์ในกระเพาะหมักของสัตว์เคี้ยวเอื้อง ทำให้สามารถใช้ฟางให้เป็นประโยชน์ได้ดีขึ้น

4. การใช้ฟางหมักยูเรียหรือฟางราดกากน้ำตาลเสริมด้วยใบกระถิน

Cheva-Isarakul (1988) ได้ทดลองเสริมฟางข้าวหมักยูเรีย (urea-treated rice straw, UTS) และฟางราดกากน้ำตาล (urea molassed mixed rice straw, UMS) ด้วยใบกระถินเปรียบเทียบกับหญ้าขนสด (fresh para grass) พบว่าแกะที่ได้รับหญ้าสดเจริญเติบโตดีที่สุด (80 ก./วัน) เนื่องจากได้รับโปรตีนมากกว่า (18.4 ก./วัน) และย่อยได้ดีกว่า (80.9 ก./วัน)

แกะที่ได้รับฟางข้าวหมักและฟางข้าวราดกากน้ำตาลมีสมรรถภาพในการผลิตไม่ต่างกัน ทั้งกลุ่มที่เสริมและไม่เสริมใบกระถิน การย่อยได้ของโภชนะและการสะสมโปรตีนอยู่ในระดับปานกลาง คือ 10.6 ก./วัน และสัตว์มีน้ำหนักเพิ่ม 38 ก. แสดงว่าทั้งฟางข้าวหมักและฟางข้าวราดกากน้ำตาลสามารถให้โภชนะเกินระดับดำรงชีพเพียงเล็กน้อยเท่านั้น เมื่อเสริมใบกระถินสดให้แกะที่ได้รับฟางข้าวทั้งสองชนิด วันละ 1 กก. แกะจะโตขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ แม้ว่ากระถินจะทำให้สัตว์กินฟางข้าวได้ลดลงบ้างอันเนื่องมาจากการแย่งที่ (substitution effect) ของฟางข้าวด้วยใบกระถินในทางเดินอาหารสัตว์

แต่ปริมาณอาหารทั้งหมดที่กินได้จะเพิ่มขึ้น แสดงว่าการปรับปรุงคุณภาพฟางข้าวโดยวิธีการหมักด้วยยูเรีย หรือราดด้วยสารละลายยูเรียและกากน้ำตาลช่วยปรับปรุงการใช้ประโยชน์ของฟางข้าวได้ระดับหนึ่ง และเมื่อเสริมด้วยพืชตระกูลถั่ว หรืออาหารที่มีคุณภาพสูงขึ้นก็จะยิ่งทำให้การใช้ประโยชน์ของฟางข้าวยิ่งดีขึ้น และสัตว์มีสมรรถภาพในการผลิตดีขึ้น

5. การเสริมด้วยอาหารเข้มข้นแบบก้อน (multinutrient block, MNB)

Cheva-Isarakul and Cheva-Isarakul (1991) ได้ศึกษาหาสูตรและวิธีการที่เหมาะสมในการทำหัวอาหารเข้มข้นแบบก้อน (multinutrient block, MNB) ที่มีโภชนะต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง แร่ธาตุ โปรตีนที่ย่อยสลายได้ง่าย โปรตีนไหลผ่าน วิตามิน และคาร์โบไฮเดรต โดยมีส่วนผสมดังนี้คือ ยูเรีย 10% กากน้ำตาล 18% กากถั่วเหลือง 20% กากงา 32% แร่ธาตุหลักและปลีกย่อย 20%และวิตามินเอ 500,000 หน่วยต่อกิโลกรัม หัวอาหารก้อนดังกล่าวมีโปรตีน 56% เมื่อนำไปทดลองเสริมฟางข้าวและฟางหมักยูเรีย เพื่อดูสมรรถภาพการย่อยได้และการกินได้ของแกะเพศผู้ พบว่า การเสริมหัวอาหารเข้มข้นทำให้การย่อยได้ของอาหารสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญใกล้เคียงกับฟางหมัก และทำให้ปริมาณการกินอาหารเพิ่มขึ้น 40% เป็นผลให้สัตว์ได้รับโภชนะต่าง ๆ เพิ่มขึ้น แสดงว่าการเสริมด้วยหัวอาหารก้อนเป็นอีกวิธีหนึ่งที่ช่วยปรับปรุงสมรรถภาพการผลิตได้

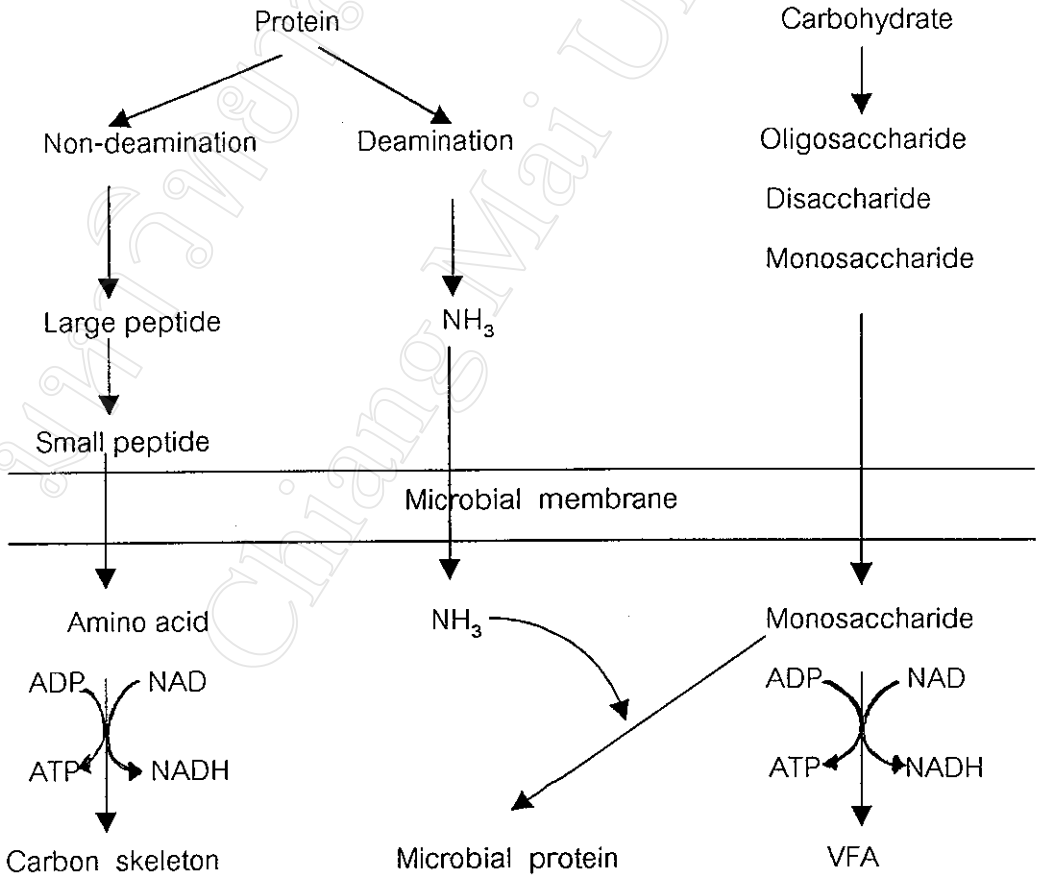
นอกจากนี้ บุญล้อม และ สมคิด (2536) ยังได้ทดลองใช้หัวอาหารเข้มข้นชนิดก้อนดังกล่าวเลี้ยงโครุ่นลูกผสมขาว-ดำ จำนวน 18 ตัว โดยให้โคทุกตัวได้รับฟางหมักยูเรียเป็นอาหารหยาบให้กินเต็มที่ แบ่งโคออกเป็น 3 กลุ่ม กลุ่มแรกให้ได้รับอาหารข้น 1 % ของน.น.ตัว กลุ่มที่ 2 ให้ได้รับอาหารข้น 0.7% ของน.น.ตัว และให้เลียกินหัวอาหารเข้มข้นชนิดก้อน อย่างเต็มที่ ส่วนกลุ่มที่ 3 ให้ได้รับอาหารเช่นเดียวกับกลุ่มที่ 2 แต่เสริมข้าวโพดบดอีก 0.3 % ของน.น.ตัว พบว่าโค 2 กลุ่มแรกมีอัตราการเจริญเติบโต อัตราแลกน้ำหนัก และต้นทุนการผลิตไม่แตกต่างกัน แสดงว่าหัวอาหารเข้มข้นชนิดก้อนสามารถใช้ทดแทนอาหารข้นได้ดี และเมื่อทำการเสริมด้วยข้าวโพดอีก 0.3% ของน.น.ตัว (กลุ่ม 3) จะทำให้โคมีอัตราการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้เนื่องจากหัวอาหารเข้มข้นชนิดก้อน เป็นแหล่งของโปรตีน แร่ธาตุ และวิตามิน เมื่อนำมาใช้ร่วมกับอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรตจะทำให้การใช้ประโยชน์ของโภชนะมีประสิทธิภาพขึ้น และช่วยให้สามารถใช้ฟางเป็นประโยชน์ได้ดีขึ้น

การย่อยอาหารที่ตำแหน่งต่าง ๆ

อาหารแต่ละชนิดมีการย่อยได้ในทางเดินอาหารแต่ละส่วนไม่เท่ากัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับความสามารถในการย่อยของทางเดินอาหารส่วนนั้น ๆ และธรรมชาติของอาหาร เช่น อาหารที่มีเยื่อใยสูงไม่สามารถย่อยได้ที่กระเพาะแท้และลำไส้เล็ก เพราะเอนไซม์จากตัวสัตว์ไม่สามารถย่อยเยื่อใยได้แต่มันอาจถูกย่อยได้บ้างในกระเพาะรูเมน ไส้ติ่ง และลำไส้ใหญ่ โดยอาศัยเอนไซม์ของจุลินทรีย์เกิดผลผลิตคือ

1. กรดไขมันระเหยได้ (short chain fatty acid, SCFA หรือ volatile fatty acid, VFA)
2. โปรตีนของจุลินทรีย์ (microbial protein)
3. แกสมีเธน และ คาร์บอนไดออกไซด์

ปฏิกริยาการย่อยสลายอาหารโดยจุลินทรีย์ มีทั้งส่วนที่เกิดขึ้นนอกเซลล์จุลินทรีย์ โดยจุลินทรีย์ปล่อยน้ำย่อยออกมาย่อยอาหาร และส่วนที่เกิดภายในเซลล์ของจุลินทรีย์เอง ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1. การย่อยสลายโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตในกระเพาะรูเมน

Degradation of protein and carbohydrate in the rumen

ที่มา : ดัดแปลงจาก Van Soest (1994)

การย่อยสลายโปรตีนในกระเพาะรูเมน

เมื่ออาหารโปรตีนเข้าสู่กระเพาะรูเมน โปรตีนที่ย่อยสลายได้จะเกิดกระบวนการ 2 ขั้นตอนคือ

1. การย่อยสลายภายนอกเซลล์จุลินทรีย์ จุลินทรีย์จะขับเอนไซม์ออกมาย่อยโปรตีนโดยทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลง 2 ลักษณะคือ

1.1 เกิดปฏิกริยา deamination ทำให้ได้ NH_3 ซึ่งจุลินทรีย์สามารถดูดซึมนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

1.2 ไม่เกิดปฏิกริยา deamination แต่โปรตีนจะถูกย่อยสลายโดยเอนไซม์ protein kinase กลายเป็น peptide สายสั้น ๆ หลังจากนั้นจะถูกย่อยสลายต่อไปกลายเป็น amino acid ซึ่งจุลินทรีย์บางชนิดสามารถดูดซึมนำไปใช้ประโยชน์ได้

2. เมทาบอลิซึมภายในเซลล์จุลินทรีย์ จุลินทรีย์จะดูดซึมกรดอะมิโนเข้าไป ซึ่งส่วนหนึ่งจะสลายตัวเหลือเป็นโครงสร้างคาร์บอน (carbon skeleton) เพื่อนำไปเผาผลาญให้เป็นพลังงานต่อไป อีกส่วนหนึ่งจะถูกจุลินทรีย์ใช้ในการสังเคราะห์ microbial protein ขณะเดียวกัน NH_3 ที่เข้าสู่เซลล์ของจุลินทรีย์จะทำปฏิกริยากับ monosaccharide (glucose) ซึ่งสลายตัวให้เป็นโครงสร้างคาร์บอนและแหล่งพลังงานที่จุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ในการสร้าง microbial protein ได้เช่นกัน ในกระบวนการนี้ต้องใช้พลังงานเข้าร่วมด้วย ทำให้มีการสูญเสียพลังงาน

การย่อยสลายคาร์โบไฮเดรตในกระเพาะรูเมน

คาร์โบไฮเดรตที่สัตว์กินเข้าไปจะถูกย่อยในกระเพาะส่วนหน้าภายนอกเซลล์ของจุลินทรีย์กลายเป็นน้ำตาลที่มีโมเลกุลเล็กลงตามลำดับ จากนั้น monosaccharide จะถูกดูดซึมผ่านผนังเซลล์และเกิดการย่อยสลายต่อไป ได้ผลผลิตดังนี้

- กรดไขมันระเหยได้ (short chain fatty acid, SCFA) ได้แก่ acetic acid (C_2), propionic acid (C_3) และ butyric acid (C_4)

- โปรตีนของจุลินทรีย์ (microbial protein) ซึ่งเกิดจากการที่จุลินทรีย์ดึง NH_3 จากกระบวนการ deamination มารวมตัวกับ monosaccharide หรือโครงสร้างสายคาร์บอน กระบวนการนี้ต้องใช้พลังงานเพื่อสร้าง microbial protein ซึ่งสัตว์สามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อไปได้

ประโยชน์จากการทราบตำแหน่งของการย่อยอาหาร

เนื่องจากการย่อยอาหารที่ตำแหน่งต่าง ๆ เกิดผลต่างกัน เช่น การย่อยสลายอาหารโปรตีนในกระเพาะรูเมนจะถูกนำไปใช้สังเคราะห์เป็น microbial protein ซึ่งมีคุณภาพค่อนข้างดี เพราะมีสัดส่วนของกรดอะมิโนที่จำเป็นใกล้เคียงกับความต้องการของสัตว์ (Schwab, 1995 อ้างโดย บุญล้อม, 2541) ดังนั้นถ้าโปรตีนที่สัตว์เคี้ยวเอื้องกินเข้าไปมีคุณภาพเลว หรือเป็นสารประกอบไนโตรเจนที่ไม่ใช่โปรตีน (non protein nitrogen, NPN) การย่อยสลายในรูเมนจะมีประโยชน์มาก แต่ถ้าโปรตีนที่กินเข้าไปมีคุณภาพสูง การย่อยสลายในรูเมนอาจไม่สู้มีประโยชน์นัก เพราะการสลายตัวของโปรตีนไปเป็นแอมโมเนียในกระเพาะรูเมนมักมีการสูญเสียเนื่องจากจุลินทรีย์ไม่สามารถจับแอมโมเนียไปใช้ได้ทั้งหมด และ microbial protein ที่เกิดขึ้นอาจมีสัดส่วนของกรดอะมิโนด้อยกว่าโปรตีนเดิมที่สัตว์กินเข้าไป ดังนั้นถ้าโปรตีนประเภทนี้ถูกย่อยสลายด้วยเอนไซม์ในตัวสัตว์ที่กระเพาะแท้และลำไส้เล็กก็จะเกิดประโยชน์มากกว่า เพราะได้กรดอะมิโนที่มีสัดส่วนเหมาะสมซึ่งสัตว์สามารถดูดซึมได้โดยตรง (บุญล้อม, 2541)

สำหรับคาร์โบไฮเดรตที่ย่อยสลายในกระเพาะรูเมน ถ้าอยู่ในอัตราที่เหมาะสม จะเกิดประโยชน์มาก เนื่องจากใช้เป็นแหล่งพลังงานให้แก่จุลินทรีย์อีกทั้งยังเป็นโครงสร้างคาร์บอนในการทำปฏิกริยากับแอมโมเนีย เพื่อนำไปใช้สังเคราะห์ microbial protein ด้วย อย่างไรก็ดีการย่อยสลายคาร์โบไฮเดรตในกระเพาะรูเมน มีการสูญเสียพลังงานส่วนหนึ่งไปในรูปของแก๊สมีเธน และคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งมีประมาณ 8 % ของ gross energy ที่สัตว์ได้รับ ดังนั้นในกรณีของอาหารหยาบที่มีเยื่อใยสูง ซึ่งไม่สามารถถูกย่อยที่ลำไส้เล็กได้ การย่อยสลายในกระเพาะรูเมนนับว่ามีประโยชน์กว่า ส่วนอาหารข้นหรืออาหารเยื่อใยต่ำที่สามารถถูกย่อยได้ดีที่ลำไส้เล็ก การย่อยในลำไส้เล็กน่าจะเป็นประโยชน์กว่าเพราะได้เป็น monosaccharide ซึ่งสัตว์สามารถดูดซึมไปใช้ประโยชน์ได้โดยตรง ดังนั้นจึงควรให้อาหารประเภทนี้มีการย่อยสลายในกระเพาะรูเมนเท่าที่จำเป็นเท่านั้น

การประเมินคุณค่าทางอาหาร

การประเมินคุณค่าทางอาหารที่เป็นพื้นฐานที่สุด คือ การวิเคราะห์ทางเคมีโดยวิธีของ Weende หรือ Proximate analysis วิธีนี้นิยมใช้กันมานานและสามารถบอกองค์ประกอบทางเคมีในอาหารได้ระดับหนึ่ง แต่ยังมีจุดอ่อนหลายประการโดยเฉพาะอย่างยิ่งในเรื่องของเยื่อใย ดังนั้นจึงได้มีการพัฒนาการวิเคราะห์เยื่อใยขึ้น เรียกว่า Detergent method (Georing and Van Soest, 1970) อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีนี้ ยังไม่สามารถบอกปริมาณอาหารที่สัตว์กินได้และโภชนะที่สัตว์จะได้รับ ดังนั้นจึงต้องมีการทดลองหาการย่อยได้ซึ่งมีทั้งวิธีที่ทดลองกับตัวสัตว์โดยตรง (*in vivo*) และวิธีที่ทดลองในห้องปฏิบัติการ (*in vitro*) หรือ *in sacco* เป็นต้น

การหาการย่อยได้กับตัวสัตว์โดยตรง (*in vivo*)

การหาการย่อยได้กับตัวสัตว์โดยตรงแบบ conventional method ทำโดยนำอาหารชนิดนั้นไปให้สัตว์กินโดยตรง ทำการทดลอง 2 ช่วง คือ

1. Preliminary period เป็นช่วงที่ให้สัตว์และจุลินทรีย์คุ้นเคยกับอาหาร และเพื่อขับอาหารเดิมออกจากทางเดินอาหาร สำหรับสัตว์เคี้ยวเอื้องถ้าเป็นอาหารปกติใช้เวลา 7-10 วัน แต่ถ้าเป็นอาหารแปลกใหม่อาจจะต้องใช้เวลา 14-21 วัน

2. Collection period เป็นช่วงที่วัดปริมาณอาหารที่สัตว์กินได้จริง และมูลที่สัตว์ขับออกมาทั้งหมด ถ้าให้อาหารระดับคงที่จะใช้เวลาประมาณ 7 วัน แต่ถ้าให้อาหารแบบเต็มที่ เพื่อต้องการวัดปริมาณอาหารที่สัตว์กินได้ ต้องใช้เวลานานกว่า คือ 7-10 วัน ทำการสุ่มตัวอย่างอาหารและมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์ทางเคมี แล้วนำค่าต่าง ๆ มาคำนวณหาการย่อยได้จากสูตร

$$\% \text{ Nutrient digestibility} = \frac{\text{Nutrient consumed (kg)} - \text{Nutrient in feces (kg)}}{\text{Nutrient consumed (kg)}} \times 100$$

ในกรณีที่อาหารนั้นไม่สามารถให้สัตว์กินเป็นอาหารเดี่ยวได้ ควรหาค่าการย่อยได้โดยวิธีหาความแตกต่าง (difference method) แต่อาหารบางอย่างเมื่อให้ร่วมกับอาหารอื่นอาจมีผลทำให้ค่าการย่อยได้เปลี่ยนไป (เกิด associative effect) จึงควรหาการย่อยได้โดยวิธีใช้สมการถดถอย (regression method) โดยให้อาหารทั้งสองชนิดในสัดส่วนต่าง ๆ กันหลายระดับแล้วใช้สมการทำนายค่าการย่อยได้ของโภชนะในวัตถุดิบแต่ละชนิด จะทำให้ได้ค่าที่ถูกต้องยิ่งขึ้น (บุญล้อม, 2541)

บุญล้อม (2535) ได้ศึกษาการย่อยได้ของใบถั่วมะแฮะโดยวิธีหาความแตกต่างโดยใช้ฟางข้าวเป็นอาหารฐานและหาการย่อยได้ของเมล็ดถั่วมะแฮะด้วยวิธีสมการถดถอยโดยเสริมเมล็ดถั่วมะแฮะลงในฟางข้าวที่ระดับต่าง ๆ คือ 17.3 31.9 45.0 และ 57.2% พบว่าเมื่อระดับถั่วมะแฮะเพิ่มขึ้น สัตว์จะกินอาหารได้มากขึ้นจาก 3.0 เป็น 3.6%นน.ตัว และมีการย่อยได้ของโภชนะเพิ่มขึ้น ยกเว้นไขมัน เยื่อใย (CF) และ ADF ค่าสหสัมพันธ์ระหว่างระดับถั่วมะแฮะกับค่าการย่อยได้อยู่ในเกณฑ์สูง ($r = 0.88$-0.95) นอกจากนี้ยังพบว่าค่าพลังงานย่อยได้ (DE), TDN และการสะสมไนโตรเจน (N - retention) เพิ่มขึ้นตามระดับถั่วมะแฮะในอาหาร การใช้วิธี regression สามารถใช้ทำนายค่าการย่อยได้ พลังงาน (DE, TDN) และสมดุลไนโตรเจน (N - retention) ได้ทั้งของอาหารฐาน (ฟางข้าว) และอาหารที่ใช้เสริม (ถั่วมะแฮะ)

การเปรียบเทียบการย่อยได้ในโคและแกะ

เนื่องจากการศึกษาการย่อยได้ในตัวสัตว์โดยตรง (*in vivo*) เป็นวิธีที่ใช้เวลาและค่าใช้จ่ายสูง นอกจากนี้ยังใช้พืชอาหารสัตว์เป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งถ้าทำการทดลองกับสัตว์เคี้ยวเอื้องขนาดใหญ่ เช่น โค และกระบือ เป็นต้น ดังนั้นจึงมีการใช้สัตว์นำร่อง (pilot animal) ในการประเมินคุณภาพอาหารหยาบ เพื่อลดค่าใช้จ่ายและช่วยให้ทำงานได้สะดวกยิ่งขึ้น คุณสมบัติของสัตว์นำร่องคือ

- มีขนาดเล็ก เพื่อการจัดการดูแลได้ง่ายขึ้น และลดค่าใช้จ่าย
- ให้ข้อมูลที่สามารถนำมาประเมินผลการทดลองกับสัตว์ที่ต้องการทดลองได้

สำหรับสัตว์นำร่องที่นำมาใช้ในการศึกษาเกี่ยวกับสัตว์เคี้ยวเอื้อง คือ แกะ เนื่องจากมีจำนวนมากและกระจายอยู่ทั่วโลก นอกจากนี้ทั้งโคและแกะกินอาหารที่คล้ายคลึงกัน จึงน่าจะนำข้อมูลที่ได้จากแกะมาใช้กับโคได้ อย่างไรก็ตามพบว่าสัตว์ทั้ง 2 ประเภทนี้มีข้อแตกต่างกันบางประการ เช่น

1. **การย่อยได้** โดยทั่วไปโคสามารถย่อยอาหารได้ดีกว่าแกะ แต่สำหรับอาหารหยาบที่มีคุณภาพดี (DM>55–60 %) จะมีความแตกต่างกันน้อยมาก (1–3 %) ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ในอาหารหยาบคุณภาพต่ำค่าการย่อยได้ของโคและแกะจะต่างกันมาก โดยโคสามารถย่อยอาหารหยาบคุณภาพต่ำได้ดีกว่าแกะ แสดงว่าความแตกต่างในด้านการย่อยได้ของโคและแกะจะมีเพิ่มขึ้นถ้าอาหารมีการย่อยได้ลดลง (Heaney, 1980)

Cheva-Isarakul and Cheva-Isarakul (1984) ได้ทำการศึกษาการย่อยได้ของฟางข้าวและ ต้นข้าวโพด เปรียบเทียบในแกะ โค และกระบือ พบว่า ค่าการย่อยได้ของวัตถุแห้ง (dry matter digestibility, DMD) ในโคจะใกล้เคียงกับกระบือ แต่จะสูงกว่าแกะ (51.2%, 48.7% และ 42.6% ตามลำดับ)

2. **ปริมาณอาหารที่กินได้** ปริมาณอาหารที่สัตว์สามารถกินได้เต็มที่ (voluntary feed intake, VFI) สามารถบ่งบอกคุณภาพอาหารได้ทางอ้อม คือ ถ้าอาหารคุณภาพดีสัตว์จะสามารถกินได้มาก แต่ถ้าอาหารคุณภาพเลวสัตว์จะกินอาหารลดลง ซึ่งแกะสามารถตอบสนองคุณภาพของอาหารได้ดีกว่าโค โดยอาหารคุณภาพต่ำแกะจะกินได้น้อยกว่าโค (Heaney, 1980)

Cheva-Isarakul and Cheva-Isarakul (1984) ได้รายงานปริมาณวัตถุแห้งที่สัตว์กินได้ (dry matter intake, DMI) ของฟางข้าวเปรียบเทียบในแกะ โค และกระบือ ไว้เท่ากับ 43, 46 และ 70 g/kg$W^{0.75}$ ตามลำดับ จะเห็นได้ว่ากระบือกินฟางข้าวได้ดีกว่าโคและแกะมาก

เทคนิคที่นิยมใช้ศึกษาการย่อยสลายของอาหารในห้องปฏิบัติการ

เนื่องจากการวัดการย่อยได้ของอาหารในตัวสัตว์ (*in vivo* digestibility) เป็นวิธีที่ต้องใช้เวลา แรงงาน และค่าใช้จ่ายสูง โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อทำกับสัตว์เคี้ยวเอื้องขนาดใหญ่ จึงได้มีนักวิจัยพยายามค้นคว้าและพัฒนาวิธีการทดลองย่อยอาหารในห้องปฏิบัติการ (*in vitro* technique) ซึ่งที่นิยมกันมีหลายวิธี ซึ่งบุญล้อม (2541) ได้แนะนำไว้คือ

1. วิธีการ 2 ขั้นตอน (2 stages method) ของ Tilley and Terry วิธีนี้ได้รับความนิยมมานาน แต่ในภายหลังเมื่อมีการพัฒนาวิธีอื่นที่สามารถให้ข้อมูลได้มากกว่าและมีความแม่นยำสูงกว่า วิธีนี้จึงได้รับความนิยมลดลง

2. วิธีการเอนไซม์เปบซิน - เซลยูเลส ทำโดยใช้เอนไซม์ที่สกัดจากจุลินทรีย์มา incubated กับตัวอย่าง วิธีนี้มีข้อดีในแง่ที่สามารถทำได้รวดเร็ว ในปัจจุบันได้มีการพัฒนาทั้งคุณภาพของเอนไซม์และวิธีการวิเคราะห์ทำให้ได้ค่าที่แม่นยำขึ้น สะดวกสำหรับห้องปฏิบัติการที่ไม่มีสัตว์เจาะกระเพาะ

De Boever *et al.* (1986) ได้ศึกษาการใช้เอนไซม์ pepsin - cellulase ในการหาการย่อยได้ของอาหาร 40 ชนิด พบว่าค่าการย่อยได้ของอินทรียวัตถุที่วัดโดยวิธีนี้สัมพันธ์การย่อยได้ที่ทดลองในตัวสัตว์มากกว่าวิธี *in vitro* ของ Tilley and Terry

3. วิธีใช้ถุงไนลอน (nylon bag technique) หรือ *in sacco* ได้รับการพัฒนาขึ้นในประเทศอังกฤษ และได้รับความนิยมอย่างกว้างขวาง เพราะให้ข้อมูลเกี่ยวกับอัตราการย่อยสลายของอาหารซึ่งนับว่าเป็นประโยชน์มาก

4. วิธีวัดปริมาณแกส (gas production technique) ได้รับการพัฒนาขึ้นในประเทศเยอรมัน เพื่อให้สามารถทำนายการย่อยได้ของวัตถุแห้ง อินทรียวัตถุ และค่าพลังงานในอาหารได้ ต่อมาได้มีการดัดแปลงให้สามารถวัดอัตราการย่อยสลายของอาหารได้ด้วย

5. วิธีใช้อ่างรูเมนเทียม (rumen simulation technique) ทำโดยจำลองสภาพการหมักในกระเพาะรูเมน ทำให้สามารถบอกถึงการย่อยสลายของโภชนะในอาหารเช่นกัน แต่เป็นวิธีการที่ต้องอาศัยเครื่องมือที่ค่อนข้างซับซ้อน จึงยังไม่เหมาะสมกับประเทศไทยในสภาพปัจจุบัน ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จะขอกล่าวถึงเฉพาะวิธีการที่ 3 และ 4 เท่านั้น

การวัดการย่อยสลายในกระเพาะรูเมนโดยใช้ถุงไนลอน (*in sacco*)

วิธีนี้อาศัยหลักการที่ว่าเมื่ออาหารเข้าสู่กระเพาะรูเมน จะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือ

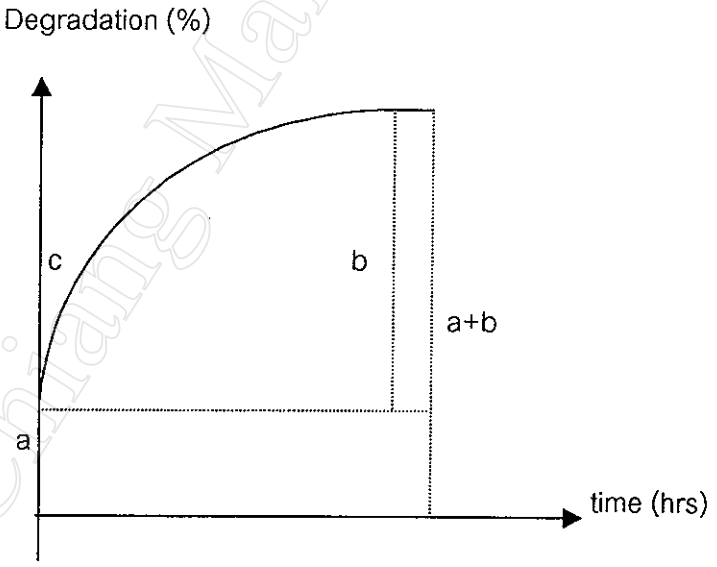
1. ส่วนที่ไม่ย่อยสลายในกระเพาะรูเมน (ruminal undegradable substance, RUS) แต่อาจถูกย่อยสลายได้ในทางเดินอาหารส่วนท้ายหรือไม่ถูกย่อยสลายเลย ซึ่งจะถูกขับออกในมูล

2. ส่วนที่ย่อยสลายในกระเพาะรูเมน (ruminal degradable substance, RDS) ซึ่งจะแบ่งได้อีก 2 ส่วนคือ

2.1 ส่วนที่ละลายได้ (soluble material) คือส่วนที่สามารถย่อยสลายได้ทันทีเมื่ออาหารตกสู่กระเพาะรูเมน

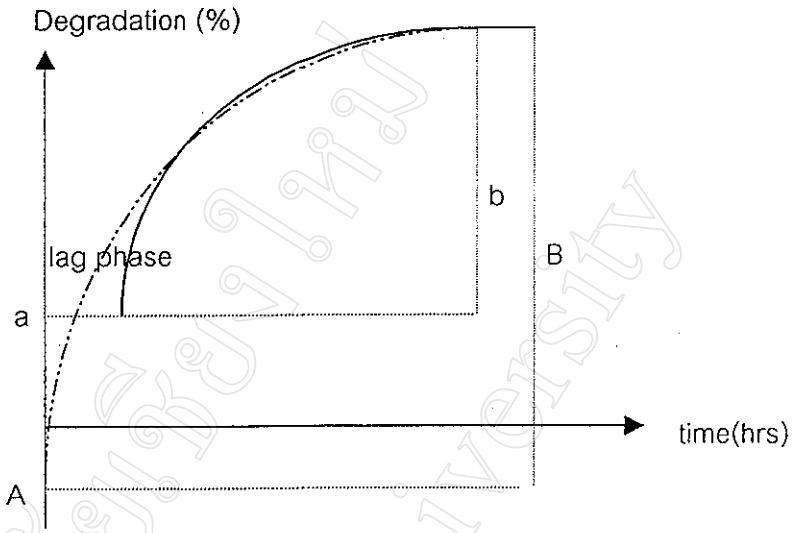
2.2 ส่วนที่ไม่ละลายแต่สามารถเกิดกระบวนการหมักย่อยได้ (insoluble fermentable material)

เนื่องจากอาหารมีองค์ประกอบที่แตกต่างกันจึงทำให้ลักษณะการย่อยสลายในกระเพาะรูเมนแตกต่างกันด้วย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอาหารข้นและอาหารหยาบ ดังแสดงในภาพที่ 2 และ 3



ภาพที่ 2. การย่อยสลายอาหารข้นในกระเพาะรูเมน ; Degradation of concentate in the rumen

อาหารข้นมักมีส่วนที่ละลายได้ (a) ค่อนข้างสูง ดังนั้นเมื่ออาหารเข้าสู่กระเพาะรูเมน ส่วนที่ละลายได้นี้จะย่อยสลายได้ทันทีจึงทำให้ค่า degradation เริ่มต้นที่ a หลังจากนั้นส่วนที่ไม่ละลายแต่สามารถเกิดกระบวนการหมักย่อยได้ จะย่อยสลายต่อไปทันทีจนถึงระดับ b ดังนั้นค่าการย่อยสลายสูงสุดของอาหารคือ a+b โดยมีอัตราการย่อยสลายคือค่า c (Orskov, 1992)



ภาพที่ 3. การย่อยสลายอาหารหยาบในกระเพาะรูเมน ; Degradation of roughage in the rumen

อาหารหยาบอาจมีส่วนที่สามารถละลายได้ (a) เช่นกัน แต่เนื่องจากอาหารหยาบมักมีเยื่อใยสูง จึงต้องรอเวลาให้จุลินทรีย์เข้าสัมผัสและทำการย่อยสลาย (lag phase, L) หลังจากนั้นอาหารส่วนที่ไม่ละลายนี้จะถูกย่อยสลายได้ระดับหนึ่ง (b) ดังนั้นความสามารถในการย่อยสลายจึงเท่ากับ a+b เช่นกัน แต่เนื่องจากการย่อยสลายอาหารหยาบมี lag phase จึงทำให้รูปกราฟต่างจากอาหารข้น และเมื่อลากกราฟให้ตัดแกน y ค่า a ที่ได้จะเปลี่ยนเป็น a' หรือ A ซึ่งสามารถติดลบได้ และค่า b' หรือ B = (a+ b)–A (Orskov, 1992)

Nylon bag technique เป็นวิธีการวัดค่าโภชนะ เช่น วัตถุแห้ง อินทรียวัตถุ หรือโปรตีน ที่หายไปในช่วงเวลาต่าง ๆ โดยวัดจากปริมาณโภชนะที่เหลืออยู่ในถุงไนลอน (residue material) ซึ่งมีหลักการว่าอาหารส่วนที่หายไปคือส่วนที่ย่อยสลายได้ (degraded fraction) และส่วนที่เหลืออยู่ในถุงคือส่วนที่ไม่ย่อยสลาย (undegraded fraction) ดังนั้นเมื่อนำค่าทั้งสองส่วนนี้มาหักลบกันก็จะสามารถคำนวณค่าโภชนะที่ถูกย่อยในช่วงเวลาต่าง ๆ ได้ และสามารถคำนวณอัตราการย่อยสลายได้ด้วย จากสมการ

$$P = A + B\,(1 - e^{-ct})$$

เมื่อ P = โภชนะที่หายไปที่เวลา t (degradation at time t)

A = ส่วนที่ละลายได้ (immediately soluble material)

B = ส่วนที่ไม่ละลายแต่สามารถหมักย่อยได้ (insoluble but potentially fermentable material)

c = อัตราการย่อยสลาย (degradation rate)

จะเห็นได้ว่า nylon bag technique นอกจากจะบอกค่าการละลาย (A) และค่าการย่อยสลายสูงสุด (A+B) ซึ่งเป็นค่าที่ทำให้ทราบปริมาณการย่อยสลายของอาหารในกระเพาะรูเมนแล้ว nylon bag technique ยังช่วยให้ทราบค่าอัตราการย่อยสลาย (c) ซึ่งทำให้ทราบอัตราเร็วและปริมาณอาหารที่เคลื่อนที่จากกระเพาะรูเมนไปยังลำไส้เล็ก ค่าดังกล่าวนี้นับว่าเป็นประโยชน์มากกว่าการทราบค่าการย่อยได้สูงสุดของอาหารแต่เพียงอย่างเดียวดังวิธีการของ Tilley and Terry (1963) เพราะในความเป็นจริงแล้วอาหารไม่ได้อยู่ในกระเพาะรูเมนนานจนเกิดการย่อยสลายได้หมด แต่จะเคลื่อนที่ออกจากรูเมนในอัตราที่แตกต่างกันแล้วแต่ปริมาณอาหารที่สัตว์กินเข้าไปและปัจจัยอื่น ๆ ด้วย ดังนั้นถ้าสามารถทราบอัตราการเคลื่อนที่ของอาหาร (rate of passage) จะทำให้ข้อมูลเหล่านี้มีประโยชน์เพิ่มขึ้น

การหาการย่อยได้โดยวิธีวัดปริมาณแกส (*in vitro* gas production)

วิธีนี้อาศัยหลักการที่ว่า เมื่ออาหารถูกหมักย่อยในกระเพาะรูเมนจะเกิดแกสขึ้น ถ้าเกิดแกสมากแสดงว่าอาหารถูกย่อยได้มาก Menke *et al.* (1979) ได้ทำการศึกษากับอาหารกว่า 200 ชนิด โดยหาการย่อยได้แบบ *in vitro* และวัดค่าพลังงานใช้ประโยชน์ (metabolizable energy, ME) แล้วหาความสัมพันธ์ระหว่างค่าดังกล่าวกับปริมาณแกสที่เกิดขึ้นในหลอดทดลอง ซึ่งเป็นหลอดแก้วขนาดใหญ่ ลักษณะคล้ายหลอดฉีดยา และมีขีดบอกปริมาตรด้านข้างหลอด พบว่าค่าแกสมีความสัมพันธ์กันสูงกับปริมาณอาหารที่ย่อยได้ จึงได้สร้างสมการ regression เพื่อนำปริมาณแกสที่เกิดขึ้นในหลอดทดลองไปทำนายค่าการย่อยได้ของอินทรียวัตถุและพลังงาน ซึ่งต่อมาได้ปรับปรุงโดย Menke and Steingass (1988) ดังนี้

$$OMD\ (\%) = 15.38 + 0.8453GP + 0.0595XP + 0.0675\ XA \quad (R^2=0.91)$$

$$ME\ (\text{Mcal/kg}) = 2.20 + 0.1357\ GP + 0.0057XP + 0.0002859(XP)^2 \quad (R^2=0.94)$$

$$NEL\ (\text{Mcal/kg}) = 0.54 + 0.0959\ GP + 0.0038XP + 0.0001733(XP)^2 \quad (R^2=0.93)$$

เมื่อ GP = ปริมาณ gas (ml) ที่เกิดขึ้นเมื่อ incubate ตัวอย่างอาหาร 200 มก. เป็นเวลา 24ชั่วโมง

XP = ปริมาณโปรตีน (g/kgDM)

XA = ปริมาณเถ้า (g/kgDM)

วิธีนี้นับว่ามีข้อดีหลายประการเพราะช่วยประหยัดเวลา แรงงาน สามารถทำได้ง่ายและไม่ต้องใช้เครื่องมือที่ซับซ้อนนัก จึงได้รับความนิยมพอสมควรโดยเฉพาะอย่างยิ่งในยุโรป

ต่อมา Bluemmel และ Orskov (1993) ได้พัฒนาวิธีการนี้เพื่อให้ได้ข้อมูลเพิ่มขึ้นโดยอาศัยหลักการที่ว่า เมื่ออาหารถูกหมักในกระเพาะรูเมนจะเกิดเป็นกรดไขมันระเหยได้ (volatile fatty acid, VFA) หรือที่ปัจจุบันนิยมเรียกว่า short chain fatty acid, SCFA และแกส อาหารส่วนที่ไม่ถูกย่อยสลายจะคงเหลืออยู่ (undegraded substrate) การนำอาหารมาหมักย่อยในหลอดทดลองในสภาพเลียนแบบกระเพาะรูเมน (*in vitro* technique) ก็ได้ผลในทำนองนี้เช่นกัน ดังนั้นถ้านำอาหารที่เหลือไปหักออกจากอาหารเมื่อเริ่มต้น (incubated substrate) จะสามารถทราบปริมาณอาหารที่ย่อยสลายแบบปรากฏ (apparent degraded substrate)ได้ ซึ่งปริมาณอาหารส่วนนี้ก็คือส่วนที่ทำให้เกิด short chain fatty acid และแกส ดังได้กล่าวมาแล้ว จึงสามารถเขียนเป็นสมการได้ดังนี้

Short chain fatty acid + Gas = Incubated substrate – Apparent undegraded substrate

แต่ความจริงแล้วอาหารส่วนที่ไม่ย่อยสลายแบบปรากฏนี้ (apparent undegraded substrate) มีจุลินทรีย์ (microbial biomass) ปนอยู่ด้วย เพราะในกระบวนการหมักย่อยมีการสร้างเซลล์ของจุลินทรีย์ด้วยดังได้กล่าวมาแล้ว ดังนั้นการไม่แยกค่านี้ออกจึงทำให้ค่าที่ได้ไม่ถูกต้อง เพราะได้ค่าโภชนะส่วนที่ไม่ถูกย่อยสลายสูงเกินความเป็นจริง และมีปริมาณโภชนะที่ย่อยสลายได้ต่ำกว่าความเป็นจริง ดังนั้นเพื่อความถูกต้องจึงต้องแยกเซลล์จุลินทรีย์ออกไป โดยการนำส่วนที่ไม่ย่อยสลาย (apparent undegraded substrate) มาต้มกับ neutral detergent solution ส่วนที่เหลือจะเป็นโภชนะที่ไม่ถูกย่อยสลายในกระเพาะรูเมนอย่างแท้จริง (true undegraded substrate) ซึ่งจะมีค่าต่ำกว่า apparent undegraded substrate

Microbial biomass + Short chain fatty acid + Gas = Incubated substrate - true undegraded substrate

ดังนั้นถ้านำค่า apparent undegraded substrate มาหักลบด้วยค่า true undegraded substrate ก็จะทำให้ทราบค่าของ microbial biomass ดังสมการ ทั้งนี้เพราะ apparent undegraded substrate มีค่า microbial biomass อยู่ด้วย ขณะที่ true undegraded substrate ไม่มีค่า microbial biomass ดังได้กล่าวมาแล้ว

Microbial biomass = Apparent undegraded substrate - true undegraded substrate

การคำนวณค่า Partitioning Factor

Partitioning Factor (PF) คือ สัดส่วนของปริมาณ degraded substrate ต่อปริมาณแกสที่เกิดขึ้น (Bluemmel and Bullerdieck, 1997)

$$\text{Partitioning Factor (PF)} = \frac{\text{Degraded substrate (mg)}}{\text{Gas volume (ml)}}$$

เนื่องจากการวัดปริมาณแกสเพียงอย่างเดียวไม่สามารถนำมาประเมินคุณภาพอาหารได้ถูกต้องนัก จึงควรคำนวณหาปริมาณอาหารที่ย่อยสลายได้ (degraded substrate) ต่อแกสที่ผลิตขึ้น 1 หน่วย เพื่อใช้ในการระบุคุณภาพของอาหาร ทั้งนี้เพราะแกสเป็นส่วนที่ร่างกายสัตว์ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ ถือเป็นการสูญเสียกรดไขมันระเหยได้กับโปรตีนจากจุลินทรีย์ ดังนั้นถ้าอาหารมีค่า PF สูงจึงควรมีคุณภาพสูง เพราะโภชนะที่ย่อยสลายถูกนำไปใช้ในการสร้างแกสน้อย แต่นำไปใช้ในการสร้าง SCFA และ microbial protein มากซึ่งสัตว์สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ นอกจากนี้ยังมีรายงานว่าเมื่อนำค่า PF มาใช้ร่วมกับค่า a, b และ c จะสามารถทำนายค่า ปริมาณวัตถุแห้งที่สัตว์กินได้ (DMI) ได้แม่นยำยิ่งขึ้น โดยเพิ่มค่า R^2 จาก 0.75 เป็น 0.85 (Bluemmel and Bullerdieck, 1997)

การใช้ค่า *in vitro* และ *in sacco* ทำนายการย่อยได้ในตัวสัตว์และคุณค่าทางอาหาร

Orskov *et al.* (1988) ได้ใช้ *in sacco* technique ในการประเมินคุณค่าทางอาหารของฟางข้าวชนิดต่าง ๆ พบว่า ค่า A, B และ c ที่ได้จากการทดลอง *in sacco* technique มีความสัมพันธ์กับค่าการย่อยได้ของวัตถุแห้งที่ได้จากการทดลองกับตัวสัตว์โดยตรง *(in vivo* DMD) โดยมีค่า $R^2 = 0.96$ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Shem *et al.* (1995) ซึ่งได้ศึกษาคุณค่าทางโภชนะของพืชเขตร้อนหลายชนิด โดยใช้ *in sacco* technique พบว่าค่า A, B และ c มีความสัมพันธ์กับปริมาณวัตถุแห้งย่อยได้ที่สัตว์กินได้ (digestible dry matter intake, DDMI) ในเกณฑ์สูง ($R^2 = 0.93$)

นอกจากนี้ยังพบว่าการนำค่า L (lag time, hours) ซึ่งเป็นระยะเวลาที่อาหารรอให้จุลินทรีย์เข้าทำการย่อยสลาย มาใช้ในสมการทำนายปริมาณวัตถุแห้งย่อยได้ที่สัตว์กินได้ จะทำให้ค่าสหสัมพันธ์ (R^2) เพิ่มจาก 0.88 เป็น 0.98 (Kibon and Orskov, 1993)

Bluemmel and Orskov (1993) ได้ศึกษาคุณค่าทางอาหารของฟางข้าวชนิดต่าง ๆ โดยใช้วิธี Gas production พบว่า ค่าแกสที่เกิดขึ้นที่ 24 ชั่วโมง มีความสัมพันธ์กับปริมาณอินทรียวัตถุที่ย่อยสลายได้ (true fermented organic matter) โดยมีค่า R^2= 0.98

Khazaal *et al.* (1993) ได้เปรียบเทียบความสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ได้จากการทดลอง Gas production และ *in sacco* technique กับค่าการย่อยได้ของวัตถุแห้ง พบว่าค่าที่ได้จากการทดลอง *in sacco* technique จะมีความสัมพันธ์กับการย่อยได้มากกว่าค่าที่ได้จากการทดลอง Gas production (R^2 = 0.89 กับ 0.78) นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณแกสที่เกิดขึ้นที่ 3-6 ชั่วโมง มีความสัมพันธ์กับค่าการย่อยได้ของวัตถุแห้งที่ได้จาการการทดลองกับตัวสัตว์โดยตรง (*in vivo* DMD) โดยมีค่า R^2=0.84 และจะลดลงเมื่อถึงชั่วโมงที่ 24 (R^2= 0.58) และจะสูงขึ้นอีกครั้งเมื่อถึงชั่วโมงที่ 96 (R^2= 0.78)

ในขณะที่การย่อยสลายของวัตถุแห้งในรูเมน (*in sacco* DM degradation) ในชั่วโมงที่ 6 มีความสัมพันธ์กับ *in vivo* DMD มากที่สุด (R^2 = 0.78) แต่จะลดลงในชั่วโมงที่ 12 (R^2 = 0.61) และจะสูงขึ้นอีกครั้งเมื่อถึงชั่วโมงที่ 24 (R^2 = 0.72) และเพิ่มขึ้นตามลำดับ จนกระทั่งชั่วโมงที่ 96 มีค่า R^2 = 0.77

การใช้ค่า *in vitro* และ *in sacco* ทำนายปริมาณอาหารที่กินได้

ปริมาณอาหารที่สัตว์กินได้ (dry matter intake, DMI) เป็นข้อมูลที่สำคัญที่จะทำให้ทราบว่าอาหารนั้นมีความน่ากินเพียงใด และเมื่อใช้พิจารณาร่วมกับค่าการย่อยได้แล้วจะทำให้ทราบว่าปริมาณโภชนะที่สัตว์ได้รับจะเพียงพอกับความต้องการของสัตว์หรือไม่ ปัจจัยที่กำหนดปริมาณอาหารที่กินได้คือ ส่วนที่ละลายได้ (solubility หรือ cell content) ส่วนที่ไม่ละลายแต่สามารถย่อยสลายได้ (insoluble fermentable fraction) อัตราการย่อยสลาย (degradation rate) อัตราการไหลผ่านของอาหารออกจากรูเมน (outflow rate) และอัตราที่อาหารถูกย่อยให้มีขนาดเล็กลงเพื่อไหลออกจากรูเมนได้ (Orskov and Ryle, 1990) ดังนั้นการทราบค่าดังกล่าวทำให้สามารถทำนายปริมาณอาหารที่กินได้

Shem *et al.* (1995) ได้ใช้ค่า A, B และ c ที่ได้จากการทดลอง *in sacco* technique ทำนายปริมาณวัตถุแห้งที่กินได้ (DMI) การย่อยได้ของวัตถุแห้ง (DMD) ปริมาณวัตถุแห้งย่อยได้ที่สัตว์กินได้ (DDMI) และอัตราการเจริญเติบโตของโครุ่น สมการที่ได้คือ

DMI (kg/day) = -8.286 + 0.226A + 0.102B + 17.696c (r=0.90)

DDMI (kg/day) = -7.609 + 0.219A + 0.080B + 24.191c (r=0.93)

Growth rate = -0.649 + 0.017A + 0.006B + 3.87 c (r=0.93)

Orskov *et al.* (1988) ได้รายงานไว้ว่า ค่า A, B และ c ที่ได้จากการทดลอง *in sacco* technique มีความสัมพันธ์กับปริมาณวัตถุแห้งที่กินได้ (DMI) การย่อยได้ของวัตถุแห้ง (DMD) ปริมาณวัตถุแห้งย่อยได้ที่สัตว์กินได้ (DDMI) และอัตราการเจริญเติบโต ในเกณฑ์สูง โดยมีค่า R^2=0.88, 0.96 และ 0.95 ตามลำดับ

Chenoest *et al.* (1970 อ้างโดย Orskov *et al.*, 1988) ได้รายงานค่าการย่อยสลายในรูเมนที่ 12 ชั่วโมง จากการทดลอง *in sacco* technique มีความสัมพันธ์กับปริมาณอาหารที่กินได้มากกว่าค่าการย่อยได้ที่ได้จากการทดลองกับสัตว์โดยตรง *(in vivo* digestibility) (r=0.82 กับ r=0.79)

Bluemmel and Orskov (1993) ได้สร้างสมการทำนายปริมาณวัตถุแห้งที่กินได้ (DMI) ปริมาณวัตถุแห้งย่อยได้ที่สัตว์ได้รับ (DDMI) และอัตราการเจริญเติบโตของโคขุน โดยใช้ค่า a, b และ c ที่ได้จากการทดลอง gas production ซึ่งดัดแปลงจากสมการที่ใช้ในวิธี *in sacco* technique $P = A + B(1 - e^{-ct})$ โดยที่ P คือ ปริมาณแกสที่เกิดขึ้นที่เวลาต่าง ๆ (t) สมการที่ได้คือ

DMI (kg/day) = 1.529 + 0.455a + 0.0324b (r=0.88)

DDMI (kg/day) = -0.933 + 0.301a + 0.0496b (r=0.93)

Growth rate = -391 + 112.5a + 6.37b (r=0.95)

เมื่อเปรียบเทียบค่าที่ได้ทั้งจากการทดลอง gas production และ *in sacco* technique พบว่า ค่าที่ได้จากการทดลอง *in sacco* technique มีความสัมพันธ์กับค่าที่ต้องการทำนายมากกว่าค่าที่ได้จาก gas production เล็กน้อย (R^2=0.77 กับ R^2 =0.74)

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณแกสที่เกิดขึ้นที่ชั่วโมงต่าง ๆ กับปริมาณวัตถุแห้งที่กินได้ พบว่า ปริมาณแกสที่เกิดขึ้นมีความสัมพันธ์กับปริมาณวัตถุแห้งที่กินได้ใกล้เคียงกัน ตลอดช่วงการทดลอง (R^2=0.73-0.8) ในขณะที่วัตถุแห้งที่ย่อยสลายในรูเมนจาก *in sacco* technique ที่ชั่วโมงต่าง ๆ จะมีความสัมพันธ์กับปริมาณวัตถุแห้งที่กินได้ต่างกัน คือ ที่ชั่วโมงที่ 6 จะมีความสัมพันธ์กับปริมาณวัตถุแห้งที่กินได้ต่ำที่สุด (R^2=0.7) หลังจากนั้นจะมีความสัมพันธ์สูงขึ้นตามระยะเวลาที่แช่ในรูเมน จนกระทั่งชั่วโมงที่ 96 ค่า R^2=0.83

นอกจากนี้ยังพบว่า ค่าวัตถุแห้งที่ย่อยสลายในรูเมนมีความสัมพันธ์กับปริมาณวัตถุแห้งที่กินได้มากกว่าค่าการย่อยได้ของวัตถุแห้งที่ได้จากการทดลองกับสัตว์โดยตรง (*in vivo* DMD) ซึ่งมีค่า R^2 = 0.78 (Khazaal *et al.*, 1993)

การประเมินค่าพลังงานในอาหาร

ระบบพลังงานเป็นข้อมูลสำคัญในการคำนวณสูตรอาหาร แต่การวัดค่าพลังงานแต่ละระบบมีความยากง่ายและมีข้อดีข้อเสียต่างกัน ซึ่งจะขอกล่าวโดยสังเขปดังนี้ (บุญล้อม และ สมคิด, 2539a)

TDN (total digestible nutrient) : เป็นวิธีที่สามารถวัดได้ง่าย เพราะคำนวณจากปริมาณโภชนะย่อยได้ แต่มีข้อเสียคือมีอคติ (bias) กล่าวคือ TDN ประเมินพลังงานของอาหารหยาบคุณภาพต่ำได้สูงกว่าความเป็นจริง ทำให้ 1 กก. TDN ของฟางให้ค่า NE น้อยกว่า 1กก. TDN ของหญ้าแห้งหรือข้าวโพด

DE (digestible energy) : สามารถทำได้โดยหาการย่อยได้และวิเคราะห์พลังงานในอาหารและในมูล แต่มีจุดอ่อนคล้ายคลึงกับ TDN คือไม่สามารถบอกค่าพลังงานที่สัตว์จะนำไปใช้ได้จริง เนื่องจากไม่ได้คำนึงถึงปริมาณพลังงานที่สูญเสียไปในขั้นตอนอื่น ๆ

ME (metabolizable energy) : สามารถประเมินพลังงานอาหารได้ใกล้เคียงกับความจริงได้มากขึ้น เนื่องจากได้คำนึงถึงพลังงานที่สูญเสียไปในส่วนของมูล ปัสสาวะ และแกสแล้ว แต่การวัดปริมาณแกสจำเป็นต้องใช้เครื่องมือ เช่น หน้ากากวัดการหายใจ (respiration mask) เป็นต้น ซึ่งประเทศไทยยังมีเครื่องมือดังกล่าวน้อย จึงทำให้มีข้อมูลจำกัด

NE (net energy) : เป็นระบบพลังงานที่ดีที่สุด เพราะเป็นค่าที่บอกปริมาณพลังงานที่สัตว์สามารถนำไปใช้ได้จริง เนื่องจากหักค่าพลังงานที่สูญเสียไปทุกขั้นตอนแล้ว ทำให้ค่าที่ได้มีความยุติธรรมมากขึ้นเช่น 1 Mcal NE ในฟางข้าวสามารถให้พลังงานที่สัตว์นำไปใช้ประโยชน์ในร่างกายได้เท่ากับ 1 Mcal NE ในข้าวโพด แต่ NE วัดได้ยากและต้องใช้อุปกรณ์ที่ซับซ้อนมาก

ปริมาณพลังงานที่สัตว์จะนำไปใช้ได้จริงนี้ไม่สามารถวัดได้ง่ายนัก เพราะต้องใช้เครื่องมือ เวลา แรงงาน และค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้นจึงมีผู้พยายามหาวิธีคำนวณโดยอาศัยค่าการย่อยได้ทั้งแบบ *in vivo*, *in vitro* หรืออาศัยองค์ประกอบทางเคมี

การวัดพลังงานจากค่าการย่อยได้

ปริมาณพลังงานย่อยได้ (digestible energy, DE) สามารถวัดได้โดยตรง โดยนำค่าพลังงานในมูล (fecal energy, FE) เมื่อนำพลังงานในมูลมาหักออกจากพลังงานทั้งหมดในอาหาร

นอกจากนี้ยังสามารถคำนวณค่าโภชนะย่อยได้รวม (TDN) พลังงานย่อยได้ (DE) และพลังงานเมแทบอไลซ์ (ME) จากค่าการย่อยได้ของโภชนะแต่ละชนิด ดังเช่นที่ อิทธิพล (2528) ได้ประเมินค่าพลังงานของวัสดุเศษเหลือทางการเกษตร ได้แก่ ฟางข้าว ต้นข้าวโพดหวาน ต้นข้าวโพดอ่อน และ ถั่วลิสงแห้ง โดยคำนวณค่า TDN, DE และ ME จากสูตร ที่บุญล้อม (2532) ได้รวบรวมไว้คือ

TDN = dig. CP + dig. CF + dig. NFE + (2.25 x dig. EE)

DE = 5.79 x dig. CP + 8.15 x dig. EE + 4.42 x dig.CF + 4.06 x dig. NFE

ME = 4.32 x dig. CP + 7.73 x dig. EE + 3.59 x dig.CF + 3.63 x dig. NFE

Cheva-Isarakul and Cheva-Isarakul (1984) ได้ศึกษาค่าการย่อยได้ของฟางข้าวและต้นข้าวโพด โดยวิธีใช้ acid insoluble ash (AIA) เป็นตัวบ่งชี้และคำนวณค่าพลังงานย่อยได้ (DE) และพลังงานเมแทบอไลซ์ (ME) จากค่าการย่อยได้ของโภชนะต่างๆ พบว่า ค่า DE และ ME ของฟางข้าวและต้นข้าวโพดในโค เท่ากับ 2.1, 1.8 และ 2.6, 2.2 Mcal/kg ตามลำดับ

นอกจากนี้บุญล้อม (2535) ยังได้ศึกษาค่าการย่อยได้ และคำนวณค่าพลังงานย่อยได้ (DE) ของถั่วมะแฮะและฟางข้าว โดยวิธี regression method ซึ่งทำโดยให้สัตว์ได้รับถั่วมะแฮะแทนที่ฟางข้าว (basal diet) ที่ระดับต่างๆ แล้วนำมาเข้าสมการถดถอยเพื่อคำนวณค่าพลังงานเมื่อได้รับถั่วมะแฮะอย่างเดียว หรือฟางข้าวเพียงอย่างเดียว พบว่าได้ค่า DE ของฟางข้าวเท่ากับ 3.2 kcal/g

การวัดพลังงานจากค่าการย่อยได้โดยวัดปริมาณแกส

ปริมาณแกสที่เกิดขึ้นจากการหมักอาหารในรูเมน มีความสัมพันธ์กับอาหารที่ถูกย่อย Menke *et al.* (1979) ได้พัฒนาวิธีการทำนายการย่อยได้และค่าพลังงานในอาหาร โดยวัดปริมาณแกสที่เกิดขึ้นที่ 24 ชั่วโมง (Gb) แล้วนำมาหาความสัมพันธ์กับค่าการย่อยได้ที่ทดลองในแกะโดยศึกษากับอาหาร 89 ชนิด พบว่าปริมาตรแกสที่เกิดขึ้นเมื่อนำมาพิจารณาร่วมกับโปรตีน (CP) และไขมัน (XL) ในอาหารสามารถใช้ทำนายค่าอินทรียวัตถุที่ย่อยได้ และพลังงานเมแทบอไลซ์ (ME) ได้ดี โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจสูง (R^2 = 0.98)

Nataraja *et al.* (1998) ได้ทำการศึกษาค่าพลังงานในอาหารโดยใช้สมการของ Menke *et al.* (1979) เปรียบเทียบกับค่าพลังงานที่คำนวณจากค่าการย่อยได้ (digestion trial) ซึ่งคำนวณเป็นค่า TDN, DE และ ME ตามลำดับ โดยใช้สูตร

1 kg TDN = 18.45 MJ DE

ME = 0.82 DE

พบว่าค่า ME ที่คำนวณจากค่าการย่อยได้ (y) มีความสัมพันธ์กับค่า ME ที่คำนวณจากค่าแกส (x) สูง คือมีค่า r = 0.86 และมีสมการถดถอย y = 1.11 + 0.98x

Menke and Steingass (1988) ได้ทำการวัดปริมาณแกสจากตัวอย่างอาหารประมาณ 1000 ชนิด ที่ทราบค่าการย่อยได้แบบ *in vivo* แล้วนำปริมาณแกสที่เกิดขึ้นและค่าโภชนะในอาหารมาสร้างสมการ regression สำหรับใช้ทำนายค่าการย่อยได้ของอินทรียวัตถุ (OMD) พลังงานเมแทบอไลซ์ (ME) และ พลังงานสุทธิ (NEL) ได้สมการเป็นจำนวนมาก ซึ่งในกรณีอาหารหยาบพอสรุปสมการได้ดังนี้

$$OMD\ (\%) = 15.38 + 0.8453GP + 0.0595XP + 0.0675\,XA \quad (R^2=0.91)$$

$$ME\ (Mcal/kg) = 2.20 + 0.1357\,GP + 0.0057XP + 0.0002859(XP)^2 \quad (R^2=0.94)$$

$$NEL\ (Mcal/kg) = 0.54 + 0.0959\,GP + 0.0038XP + 0.0001733(XP)^2 \quad (R^2=0.93)$$

เมื่อ GP = ปริมาณ gas (ml) ที่เกิดขึ้นเมื่อ incubated 24 ชั่วโมง

XP = ปริมาณโปรตีน (g/kgDM)

XA = ปริมาณเถ้า (g/kgDM)

สมการเหล่านี้จะเป็นประโยชน์ในการทำนายตัวอย่างอาหารที่ไม่ได้ศึกษาการย่อยได้หรือวัดพลังงานโดยตรงต่อไป

การคำนวณค่าพลังงานจากองค์ประกอบทางเคมี

การคำนวณค่า TDN อาจคำนวณได้โดยใช้สมการแบบ Theoretically based model (Weiss *et al.*,1992 อ้างโดย บุญล้อม และ สมคิด, 2539a) สมการดังกล่าวคำนวณค่าพลังงานของอาหารหยาบหรือวัตถุดิบจากองค์ประกอบทางเคมีที่มีความเป็นเอกภาพ (uniform fraction) คือมีการย่อยได้คงที่ไม่ว่าจะอยู่ในอาหารใด แล้วรวมค่าพลังงานย่อยได้ขององค์ประกอบเหล่านี้เข้าด้วยกัน

พลังงานจากโปรตีน

โปรตีนเป็นองค์ประกอบทางเคมีที่มีความเป็นเอกภาพ เพราะค่าการย่อยได้ที่แท้จริง (true digestibility, TD) ของโปรตีนมีค่าคงที่ ในพืชส่วนมากจะมีค่าอยู่ระหว่าง 0.9-1.0 สำหรับอาหารข้นที่ไม่ผ่านความร้อนจะมี TD = 1.0 แต่การย่อยได้ของโปรตีนและอัตราการถูกย่อยสลายด้วยความร้อนจะมีความสัมพันธ์กับ acid detergent insoluble nitrogen (ADIN) ดังนั้นจึงสามารถคำนวณค่า TD ของอาหารข้น ($TD_{cp\text{-}C}$) และของอาหารหยาบ ($TD_{cp\text{-}F}$) ได้จากสมการ

$$TD_{cp\text{-}C} = 1 - 0.4\ ADIN \quad ; \quad TD_{cp\text{-}F} = e^{-1.2\ ADIN}$$

ซึ่งในกรณีของอาหารหยาบที่ไม่ได้ผ่านความร้อน ค่า TD_{cp-F} มีค่าประมาณ 0.92 จากนั้นคำนวณค่าพลังงานของโปรตีน (E_{cp}) จากสมการ

$$E_{cp} = TD \times CP$$

พลังงานจากไขมัน

การหาปริมาณไขมันควรวิเคราะห์กรดไขมัน (fatty acid, FA) มากกว่าการวิเคราะห์ค่า ether extract (EE) เพราะค่า FA เป็นค่าที่มีความเป็นเอกภาพ แต่ EE ไม่มีความเป็นเอกภาพ เพราะประกอบด้วย FA, wax และสิ่งอื่นอีกเล็กน้อย การวิเคราะห์ FA ทำได้ยาก แต่สามารถคำนวณ FA จาก EE ได้ เพราะ EE จะมีส่วนที่ไม่ใช่ FA อยู่ประมาณ 1% ดังนั้นจึงคำนวณ FA ได้จากสมการ

$$FA = EE - 1$$

ค่า TD ของ FA ขึ้นอยู่กับปริมาณ FA ในอาหาร โดยทั่วไปอาหารมี FA ประมาณ 3% และมี TD ประมาณ 0.94 ถ้าค่า FA เพิ่มขึ้น 1% ค่า TD ของ FA จะลดลง 0.03 พลังงานของไขมันคำนวณโดย

$$E_{FA} = [1.03 - (0.03\ FA)]\ 2.25\ FA$$

พลังงานจาก NDF

NDF (neutral detergent fibre) เป็นค่าที่ไม่เป็นเอกภาพ แต่ NDF ส่วนที่ย่อยได้ (potential digestible NDF, pdNDF) เป็นค่าเป็นเอกภาพ โดยมีการย่อยได้ = 1.0 ค่า pdNDF สามารถคำนวณโดยอาศัย lignified surface area ทั้งนี้เพราะลิกนินย่อยไม่ได้จึงควรนำมาลบออกจาก NDF เพื่อให้ได้ค่า lignin - free NDF นอกจากนี้ลิกนินยังไปขัดขวางการย่อยได้ของเซลยูโลส และ เฮมิเซลยูโลส จึงต้องคำนวณสัดส่วนของพื้นที่ผิว NDF ที่ถูกปกคลุมด้วยลิกนิน เพื่อนำมาหักลบออก ค่า pdNDF คำนวณได้โดย

$$pdNDF = (NDF - Lignin)\ [1 - Lignin / NDF^{0.667}]$$

ในวัสดุเศษเหลืออาจมีค่า NDF สูงเกินไป เนื่องจากมี CP ปนมาด้วย ทำให้ค่าพลังงานในอาหารต่ำไป จึงต้องวิเคราะห์ neutral detergent insoluble nitrogen (NDIN) เพื่อนำมาคำนวณ NDICP โดยนำไปคูณกับ 6.25 แล้วนำค่า NDICP มาคำนวณค่า NDF ที่ปราศจากไนโตรเจน (NDF_N) ดังสมการ

$$NDF_N = NDF - NDIN$$

พลังงานจาก NDF คำนวณได้โดยคูณค่า pdNDF ด้วยสัมประสิทธิ์การย่อยได้ ถึงแม้ว่าค่า TD ของ pdNDF เท่ากับ 1.0 แต่ความจริงแล้ว pdNDF มีระยะเวลาอยู่ในอาหารจำกัดทำให้การย่อยไม่สมบูรณ์ จากสมการ regression ประมาณค่าการย่อยได้ของ pdNDF ในสัตว์ที่ได้รับอาหารระดับดำรงชีพมีค่าเท่ากับ 0.75 ดังนั้นพลังงานจาก NDF คำนวณได้โดย

$$E_{NDF} = 0.75 (NDF_N) - Lignin [1 - Lignin / NDF_N^{0.667}]$$

พลังงานจาก NFC

NFC (non fibre carbohydrate) เป็นองค์ประกอบทางเคมีที่มีความเป็นเอกภาพ คำนวณได้จาก

$$NFC = 100 - Ash - CP - NDF_N - EE$$

ค่า TD ของ NFC ประมาณ 0.98 ถ้าสัตว์ได้รับอาหารที่ระดับดำรงชีพ พลังงานจาก NFC คำนวณได้โดยสมการ

$$E_{NFC} = 0.98 [100 - NDF_N - CP - Ash - (FA + 1)]$$

สมการคำนวณค่า TDN ที่ปรับปรุงแล้ว

ค่า TDN ระบบใหม่คำนวณโดยรวมค่าโปรตีน ไขมัน NDF และ NFC ที่ย่อยได้เข้าด้วยกัน พลังงานที่ได้จากองค์ประกอบเหล่านี้คำนวณโดยอาศัยค่า true digestibility ในขณะที่ TDN เป็นค่าที่คิดจาก apparent digestibility จึงต้องนำค่าพลังงานจาก metabolic fecal material มาหักออกด้วย ซึ่งประมาณค่า metabolic TDN ได้เท่ากับ 7 ดังนั้นสมการ TDN ที่สมบูรณ์คือ

$$TDN = E_{CP} + E_{FA} + E_{NDF} + E_{NFC} - 7$$

จะเห็นได้ว่าค่า TDN ในระบบใหม่นี้มีความถูกต้องแม่นยำยิ่งขึ้น และสามารถใช้ได้กับพืชอาหารสัตว์ทุกชนิดโดยไม่มีอคติ ดังนั้นจึงน่าจะลบข้อบกพร่องของระบบเดิมได้ ทำให้สามารถประเมินค่าพลังงานในอาหารได้ดีขึ้น

การแปลงค่า TDN ให้เป็นค่าพลังงานต่าง ๆ

หลังจากที่ได้ค่า TDN แล้วสามารถนำไปคำนวณหาค่า DE หรือ NEL ได้ ส่วนค่า ME สามารถคำนวณได้จากค่า DE ดังสมการที่ NRC (1988) ได้เสนอไว้ดังนี้คือ

DE (Mcal/kg) = 0.04409 x TDN (%)

ME (Mcal/kg) = -0.45 + 1.01 DE

NEL(Mcal/kg) = 0.0245 x TDN (%) - 0.12

มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ Chiang Mai University