บทที่ 2

การตรวจเอกสาร

ถั่วเหลือง (Soybeans)

ถั่วเหลืองที่ปลูกเป็นการค้ามีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Glycine max* (L.) Merril อยู่ในวงศ์ (Family): Leguminosae, วงศ์ย่อย (Sub-Family): Papilionoideae มี Chromosome 2n = 40 ชื่อสามัญ soybeans และชื่อพื้นเมืองอื่นๆ เช่น soya, soja เป็นต้น (กฤษฎา, 2531)

2.1 ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

ถั่วเหลืองเป็นพืชล้มลุก (annual) ที่ผสมตัวเอง (self-pollinated crop) ชอบอากาศค่อนข้างร้อน มีลักษณะเป็นพุ่ม มีใบมาก สูงประมาณ 45-120 เซนติเมตร อายุเก็บเกี่ยวประมาณ 75-150 วัน เกือบทุกพันธุ์จะมีแกนลำต้นอย่างเห็นได้ชัด และมีกิ่งแขนงออกมาบริเวณข้อล่างๆ เมื่อมีระยะปลูกที่ห่างหลายๆ พันธุ์จะแสดงลักษณะการออกดอกที่สิ้นสุดในช่วงเวลาอันสั้น ใบสองใบแรกเป็นใบเดี่ยว และใบหลังๆ เป็นแบบสามเส้า ใบย่อยอาจมีรูปร่างและมีรูปร่างและขนาดต่างๆ กันแล้วแต่พันธุ์ เมื่อถึงระยะแก่เต็มที่ใบเริ่มเปลี่ยนสีเป็นสีเหลือง และร่วงก่อนที่ฝักจะแก่เต็มที่ พืชทั้งต้นจะปกคลุมไปด้วยขนอ่อนค่อนข้างแข็ง สีเทา

ดอก จะมีสีขาวหรือสีม่วง มีก้านดอกสั้นๆ งอกออกมาจากข้อของลำต้น

เมล็ด เมล็ดถั่วเหลืองตั้งแต่เก็บเกี่ยวถึงก่อนงอก มีรูปร่างกลมด้านหนึ่งจะเว้าเข้า ซึ่งมีจมูกหรือตา (hilum) ติดอยู่ มีขนาดน้ำหนักแตกต่างกันตั้งแต่ 5-45 กรัม ต่อ 100 เมล็ด พันธุ์ที่นิยมปลูกเป็นการค้ากันมากมักมีเมล็ดสีเหลือง แต่พันธุ์อื่นๆ อาจสีเขียว

ฝัก หลังจากผสมเกสรแล้วดอกจะร่วง รังไข่ (ovary) จะขยายตัวออกมาเป็นฝัก เปลือกหุ้มรังไข่จะกลายเป็นฝัก (pod) ซึ่งมีฝา 2 ชิ้นประกบกันอยู่ เมล็ดเกิดจากไข่ที่ผสมแล้ว เมล็ดที่อยู่ด้านล่างจะเจริญเติบโตก่อน แล้วเมล็ดที่สองและสามจึงจะทยอยเติบโตตามลำดับ ในฝักหนึ่งอาจจะมีถึง 5 เมล็ด แต่โดยทั่วไปจะมีเพียง 2-3 เมล็ดเท่านั้น ฝักเล็กตรงหรือโค้งงอเล็กน้อย มีสีต่างๆ ตั้งแต่สีฟาง แห้ง เทา น้ำตาล หรือเกือบดำ ในฝักหนึ่งจะมีเมล็ดประมาณ 1-4 เมล็ด

เมื่อเมล็ดเติบโตเต็มที่ ฝักนอกจะเริ่มจากสีเขียวเป็นสีเหลืองและเป็นสีน้ำตาล (หรือสีอื่นที่ใกล้เคียงกัน) จากปลายไปหาโคนฝัก ฝักแก่จะแตกง่ายหรือยาก ขึ้นอยู่กับการคัดเลือกพันธุ์และฝักจะเริ่มแก่จากโคนต้นไปหาส่วนยอด

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

เมื่อถั่วเหลืองแก่ใบจะเริ่มเปลี่ยนจากเขียวเป็นเหลือง และแห้งโดยเริ่มจากโคนต้นไปหาส่วนยอด ในกรณีที่มีน้ำในดินมากใบจะยังเขียวและไม่ร่วงจากต้นตามเวลาที่กำหนด แม้ฝักจะแก่แห้งไปแล้วก็ตาม

พันธุ์ที่ใช้ปลูก

ประมาณกันว่ามีอย่างน้อย 100 สายพันธุ์ ซึ่งปลูกเป็นการค้าอยู่ในเขตอบอุ่น มีอายุการเก็บเกี่ยวตั้งแต่ 75-150 วันการเลือกพันธุ์ก็ต้องคำนึงถึงระยะช่วงกลางวันยาว เพื่อการเจริญเติบโตของต้นและช่วงกลางวันสั้น เพื่อให้พืชผลผลิตดอกจนถึงเก็บเกี่ยว มีหลายพันธุ์ที่เหมาะจะปลูกในเขตร้อนและกึ่งเขตร้อน แต่ก็ควรมีโครงการปรับปรุงพันธุ์เพื่อให้เหมาะกับท้องที่เหล่านี้ พันธุ์ที่แนะนำให้เกษตรกรปลูกในประเทศไทยมีหลายพันธุ์ ซึ่งสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม ตามลักษณะอายุการเก็บเกี่ยว คือ พันธุ์ที่มีอายุการเก็บเกี่ยวสั้น เช่น พันธุ์นครสวรรค์ 1 และเชียงใหม่ 2 พันธุ์ที่มีอายุเก็บเกี่ยวปานกลาง เช่น ชม.60 สจ.4 พันธุ์ที่มีอายุการเก็บเกี่ยวยาว เช่น พันธุ์ มข. จักรพันธ์ 1 ราชมงคล พันธุ์ถั่วเหลืองที่เหมาะสำหรับปลูกในฤดูแล้งคือ พันธุ์ สจ. 4, สจ. 5, เชียงใหม่ 60, สุโขทัย 2 และเชียงใหม่ 2

การปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อม

ถั่วเหลืองต้องการสภาพแวดล้อมคล้ายข้าวโพด ต้องการความชื้นพอสมควร เพื่อการงอกที่รวดเร็วและสามารถจะทนแล้งในช่วงเวลาสั้นๆ ระหว่างฤดูปลูก โดยทั่วไปถั่วเหลืองไม่ชอบสภาพที่มีอุณหภูมิสูงและมีปริมาณน้ำฝนน้อย ซึ่งทำให้ผลผลิตและปริมาณน้ำมันในเมล็ดตลอดจนคุณภาพของน้ำมันลดลง ถั่วเหลืองขึ้นได้ดีในสภาพฝนตกชุก แต่ต้องไม่มีน้ำขังหรือเปียกแฉะ ในช่วงของการปลูกอุณหภูมิของดินควรสูงเกิน 15 องศาเซลเซียส และดินต้องชื้น อุณหภูมิประมาณ 20-25 องศาเซลเซียสเป็นอุณหภูมิที่เหมาะในการปลูกถั่วเหลือง

ปกติถั่วเหลืองขึ้นได้บนดินเกือบทุกประเภทที่มีการระบายน้ำ แต่จะให้ผลผลิตดีในดินโลมซึ่งมีความอุดมสมบูรณ์สูง ไม่ไวต่อความเป็นกรดของดินเหมือนพืชตระกูลอื่นๆ แต่มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องคลุกเชื้อแบคทีเรียก่อนปลูก เพื่อให้มีไนโตรเจนพอเพียงกับความต้องการของพืช นอกเสียจากว่าแปลงปลูกจะมีการปลูกถั่วเหลืองมาก่อน และให้ผลผลิตได้ในระดับดี

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

2.2 สถานการณ์ถั่วเหลืองในประเทศไทย

พื้นที่เพาะปลูกถั่วเหลืองในประเทศไทย ในปีเพาะปลูก 2543/2544 เพิ่มจากปีเพาะปลูก 2542/2543 จาก 1,451,000 ไร่ เพิ่มเป็น 1,461,000 ไร่ ทำให้ผลผลิตทั้งประเทศเพิ่มขึ้นเช่นกันคือ จาก 319,000 ตัน ในปีเพาะปลูก 2542/2543 เพิ่มเป็น 324,000 ตัน ในปีเพาะปลูก 2543/2544 และผลผลิตต่อไร่ในปีเพาะปลูก 2543/2544 ก็เพิ่มขึ้นเป็น 230 กิโลกรัมต่อไร่ (ดังตารางที่ 1) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากถั่วเหลืองยังคงเป็นที่ต้องการของตลาด (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2544)

ตาราง 1: พื้นที่เพาะปลูกถั่วเหลือง ผลผลิต และผลผลิตเฉลี่ยไร่ ปีเพาะปลูก 2540/2541-2543/2544

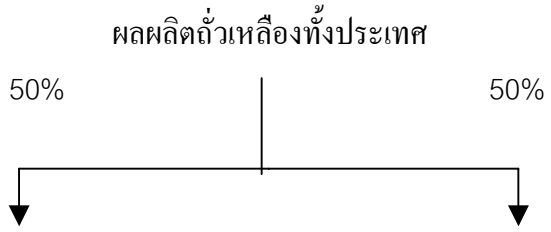
ปี	พื้นที่เพาะปลูก (1,000 ไร่)	ผลผลิต (1,000 ตัน)	ผลผลิตเฉลี่ยต่อไร่ (กก.)
2540/2541	1,548	338	229
2541/2542	1,467	321	234
2542/2543	1,451	319	227
2543/2544	1,461	324	230

ที่มา: สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (2544)

ในแต่ละปีจะมีเปลือกเมล็ดถั่วเหลือง ที่เหลือจากการผลิตในปริมาณที่มาก ซึ่งในการผลิตถั่วเหลือง 100 กิโลกรัม จะเหลือเปลือกเมล็ดถั่วเหลืองประมาณ 8 กิโลกรัม หรือเท่ากับ 8 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณการผลิต ถั่วเหลืองที่ผลิตได้ในประเทศไทยถูกนำไปใช้ในโรงงานสกัดน้ำมันพืช 50 เปอร์เซ็นต์ของผลผลิตและอีก 50 เปอร์เซ็นต์จะใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมทำอาหารทั่วๆไปดังภาพ 1

กระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลืองในต่างประเทศ ได้มีการแยกเอาเปลือกเมล็ดถั่วเหลืองออกจากกากถั่วเหลือง เพื่อให้โปรตีนในกากถั่วเหลืองเพิ่มสูงขึ้นจาก 49.9 เปอร์เซ็นต์เป็น 56.7 เปอร์เซ็นต์ (Göhl, 1981) ส่งผลให้ราคาของกากถั่วเหลืองเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วยเช่นกัน เนื่องจากมีโปรตีนสูงขึ้น อีกทั้งสัตว์กระเพาะเดี่ยวสามารถใช้ประโยชน์จากกากถั่วเหลืองได้ดียิ่งขึ้น เนื่องจากสัตว์กระเพาะเดี่ยวไม่สามารถย่อยองค์ประกอบของเปลือกเมล็ดถั่วเหลืองที่มีส่วนของเยื่อใยอยู่สูง

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved



อุตสาหกรรมการทำอาหารทั่ว ๆ ไป
- การทำเต้าหู้
- น้ำนมถั่วเหลือง
- เมล็ดถั่วเหลืองป่น (kinako)
- เต้าเจี้ยว
- ซีอิ๊ว
- เทมเป้ (tempeh) และ อื่น ๆ

โรงงานสกัดน้ำมัน
↓
กากถั่วเหลือง
↓
อุตสาหกรรมการทำอาหารสัตว์

ภาพ 1: การใช้ประโยชน์ของถั่วเหลืองในประเทศไทย

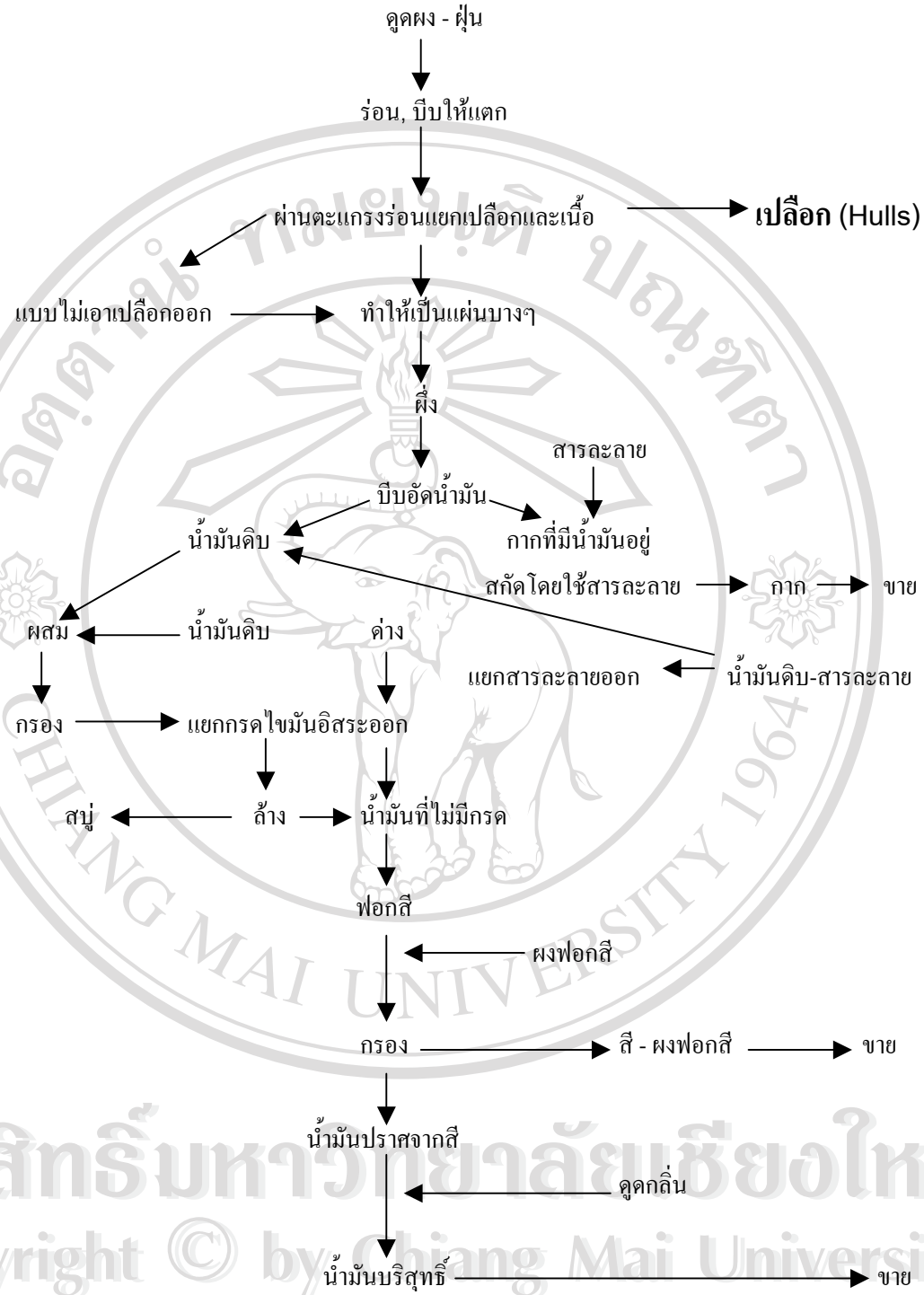
ซึ่งเราจะได้เปลือกเมล็ดถั่วเหลืองมาจาก 2 ทางใหญ่ๆ คือ

1. อุตสาหกรรมการทำอาหารทั่วไป เช่น การทำเต้าหู้, น้ำนมถั่วเหลือง, เมล็ดถั่วเหลืองป่น (kinako), เต้าเจี้ยว, ซีอิ๊ว, เทมเป้ (tempeh) และอื่นๆ เป็นต้น ซึ่งพบว่าจำนวนโรงงานที่รับกระเทาะเปลือกเมล็ดถั่วเหลืองในจังหวัดเชียงใหม่ ที่เป็นแหล่งของเปลือกเมล็ดถั่วเหลืองมีทั้งหมด 6 โรงงาน ได้แก่ อ. เมือง 3 โรงงาน, อ. ดอยสะเก็ด 2 โรงงาน, อ. สันทราย 1 โรงงาน (สุกัญญา, 2546) หรือโรงงานผลิตน้ำนมถั่วเหลือง เช่น ไวตามิลค์และแลคตาซอย เป็นต้น

2. โรงงานสกัดน้ำมัน ซึ่งในการผลิตถั่วเหลือง 100 กิโลกรัม จะเหลือเปลือกเมล็ดถั่วเหลืองประมาณ 8 กิโลกรัม หรือเท่ากับ 8 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณการผลิต ซึ่งกระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลืองในต่างประเทศ ได้มีการแยกเอาเปลือกเมล็ดถั่วเหลืองออกจากกากถั่วเหลืองเพื่อให้โปรตีนในกากถั่วเหลืองเพิ่มสูงขึ้น

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

เมล็ดถั่วเหลือง
↓



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ภาพ 2: กระบวนการผลิตของโรงงานสกัดน้ำมันพืช

ที่มา : กรมวิชาการเกษตร (2544)

2.3 **องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกเมล็ดถั่วเหลือง** (chemical composition)

เปลือกเมล็ดถั่วเหลืองเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์จากถั่วเหลือง (ภาพ 2) องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกเมล็ดถั่วเหลืองโดยส่วนใหญ่ พบว่ามีคุณค่าทางโภชนะโดยประมาณ คือ วัตถุแห้ง โปรตีนรวม เยื่อใยรวม ไขมัน เยื่อใยที่ละลายในด่าง เยื่อใยที่ละลายในกรด เถ้า มีค่าเท่ากับ 90.9, 12.13, 41.5, 3.4, 65.57, 47.8 และ 4.65 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (Mikled *et al.*, 1987; Belyea *et al.*, 1988; Zervas *et al.*, 1998; DeFrain *et al.*, 2002) ตามตาราง 2 และพบว่ากากถั่วเหลืองเมื่อทำการแยกเปลือกเมล็ดถั่วเหลืองออกจากกากถั่วเหลืองทำให้โปรตีนรวมสูงขึ้นจาก 49.9 เปอร์เซ็นต์เป็น 56.7 เปอร์เซ็นต์ ตามตาราง 3

ตาราง 2: องค์ประกอบทางเคมีของเปลือกเมล็ดถั่วเหลือง (ร้อยละของวัตถุแห้ง)

Nutrients	แหล่งข้อมูล			
	Mikled *et al.*(1987)	Belyea *et al.*(1988)	Zervas *et al.* (1998)	DeFrain *et al.*(2002)
Dry matter (DM)	NA	NA	90.9	91.0
Crude protein (CP)	11.10	11.8	12.2	13.5
Crude fiber (CF)	42.3	NA	NA	NA
Ether extract (EE)	1.45	NA	3.9	2.9
Neutral detergent fiber (NDF)	NA	72.5	66.1	58.7
Acid detergent fiber (ADF)	NA	52.8	47.3	43.3
Ash	5.0	3.7	4.5	5.4

หมายเหตุ : NA = not available (ไม่มีข้อมูล)

ตาราง 3: องค์ประกอบทางโภชนะของกากถั่วเหลืองและเปลือกเมล็ดถั่วเหลือง

	As % of dry matter					
	DM	CP	CF	Ash	EE	NFE
Oil meal with hulls, solvent extracted, Israel	89.2	49.9	5.0	6.3	0.7	38.1
Oil meal without hulls, solvent extracted, USA	89.8	56.7	3.1	6.2	0.9	33.1

ที่มา : Göhl (1981)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

2.4 การใช้เปลือกเมล็ดถั่วเหลืองเป็นอาหารโคนม

เปลือกเมล็ดถั่วเหลืองเป็นผลพลอยได้ที่ได้จากการผลิตน้ำมันถั่วเหลืองและกากถั่วเหลืองซึ่งมีเยื่อใยสูง และเป็นแหล่งที่มีค่าของพลังงานจากการย่อยได้สูง

MacGregor *et al*. (1976) ได้รายงานถึงการใช้เปลือกเมล็ดถั่วเหลืองแทนข้าวโพดที่ระดับ 0, 27 และ 48 เปอร์เซ็นต์ในอาหารโคนม พบว่าไม่มีแตกต่างของผลผลิตน้ำนม ซึ่งสอดคล้องกับ Bernard and McNeill (1991) ได้รายงานถึงการเสริมเปลือกเมล็ดถั่วเหลืองและ corn gluten แทนสัดส่วนข้าวโพดหมัก 22 เปอร์เซ็นต์วัตถุแห้งในอาหารโครระยะให้นม พบว่าไม่มีความแตกต่างกันของปริมาณน้ำนมในแต่ละ treatment แต่เปอร์เซ็นต์ไขมันนมจะสูงขึ้น เมื่อให้อาหารเสริมด้วยเปลือกเมล็ดถั่วเหลือง

Hsu *et al*. (1987) ได้รายงานถึงการย่อยได้ทั้งหมดของเปลือกเมล็ดถั่วเหลืองที่ให้แกะกินเพียงอย่างเดียว ซึ่งมีค่าการย่อยได้ของวัตถุแห้งเท่ากับ 79.8 เปอร์เซ็นต์ เยื่อใยที่ละลายในด่างเท่ากับ 76.8 เปอร์เซ็นต์ เยื่อใยที่ละลายในกรดเท่ากับ 71.8 เปอร์เซ็นต์ และโปรตีนรวมเท่ากับ 61.0 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามได้มีรายงานผลของการย่อยได้ของเยื่อใยในแกะและวัวเพศผู้ที่ให้กินเปลือกเมล็ดถั่วเหลืองซึ่งมีการย่อยได้ประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ (Quicke *et al*., 1959; Garrigus *et al*., 1960) การทดลองด้วยการเสริมถั่วเหลืองอบ (soybean flakes) และเสริมด้วยหญ้าแห้ง ในอาหารที่มีเปลือกเมล็ดถั่วเหลืองสามารถเพิ่มการย่อยได้ของเยื่อใยเพิ่มมากขึ้น (Grant, 1997) เปลือกเมล็ดถั่วเหลืองมีพลังงานในระดับสูงเนื่องจากมีความสามารถย่อยเยื่อใยได้สูงตาม NRC, ซึ่งเปลือกเมล็ดถั่วเหลืองมี โภชนะรวมย่อยได้เท่ากับ 77 เปอร์เซ็นต์ พลังงานสุทธิเท่ากับ 1.22 Mcal/kg และพลังงานสุทธิเพื่อการให้นมเท่ากับ 1.77 Mcal/kg

Anderson *et al*. (1988) ได้ศึกษาการย่อยได้ของโคนมโดยการใช้เปลือกเมล็ดถั่วเหลืองทดลองในโคที่เจาะกระเพาะทั้งหมด 7 ตัว ที่ระดับ 0, 12.5, 25 และ 50 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้ง พบว่าค่าการย่อยได้ของ neutral detergent fiber (NDF) จะเพิ่มขึ้น ตามระดับของเปลือกเมล็ดถั่วเหลืองที่เพิ่มขึ้น แต่อัตราการย่อยได้ของ NDF (*in situ*) มีแนวโน้มลดลงตามระดับพลังงานที่เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับการศึกษาของ Klopfenstein and Owen (1988) ถึงผลของการเสริมเปลือกเมล็ดถั่วเหลืองในสูตรอาหารของโคนมที่ระดับ 12.5, 25 และ 50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม โดยพบว่าประสิทธิภาพการย่อยได้ของวัตถุแห้งและปริมาณการกินได้ของวัตถุแห้งมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ส่วนค่าความเป็นกรดด่างในกระเพาะหมักมีแนวโน้มลดลง

Nakamura and Owen (1989) ได้ศึกษาในอาหารโคนมระยะการให้นมที่เสริมเปลือกเมล็ดถั่วเหลือง พบว่าทำให้ผลผลิตน้ำนมลดลง (27.3 กิโลกรัมต่อวัน) และไขมันนมมากขึ้น (เปอร์เซ็นต์ไขมันนม 3.49 เปอร์เซ็นต์) เมื่อเปรียบเทียบกับอาหารที่มีข้าวโพด (29.8 กิโลกรัมต่อวัน, เปอร์เซ็นต์ไขมันนม 3.13 เปอร์เซ็นต์) ในแง่ของประสิทธิภาพของวัตถุดิบในอาหารระหว่างข้าวโพดและเปลือกเมล็ดถั่วเหลืองที่เสริมในสูตรอาหาร พบว่าเปลือกเมล็ดถั่วเหลืองมีระดับพลังงานที่เท่าๆ กันกับข้าวโพดในอาหารโคนม

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

Firkins and Eastridge (1992) พบว่าการแทนที่สัดส่วนของข้าวโพดหมักด้วยเปลือกเมล็ดถั่วเหลือง (62.5 % of total dietary NDF) สามารถลดอาหารหยาบลง โดยไปเพิ่มปริมาณน้ำนมและเปอร์เซ็นต์ไขมันนมซึ่งเป็นส่วนที่สำคัญมากในการผลิตน้ำนม

Cunningham *et al.* (1993) ได้ศึกษาถึงการเสริมเปลือกเมล็ดถั่วเหลืองในอาหารโคนม ที่ระดับ 25 และ 50 เปอร์เซ็นต์ พบว่าปริมาณวัตถุแห้งที่กินได้ มีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณเปลือกเมล็ดถั่วเหลืองในอาหาร อาจเป็นไปได้ว่าเปลือกเมล็ดถั่วเหลืองที่มีขนาดเล็ก จะถูกย่อยที่กระเพาะหมัก แต่ถ้ามีขนาดใหญ่จะไหลผ่านกระเพาะหมักก่อนที่จะเกิดกระบวนการหมัก

Bach *et al.* (1996) ได้รายงานถึงการเสริมเปลือกเมล็ดถั่วเหลืองทำให้เกิดการหมักย่อยเยื่อใยได้พลังงานเร็วขึ้นซึ่งอาจจะดีกว่าการเสริมแป้ง (หรือข้าวโพด) ในอาหารพวกหญ้าสดซึ่งการแตกตัวของโปรตีนจะมีปริมาณมาก จากการเสริมเปลือกเมล็ดถั่วเหลืองจะส่งผลมากในการลด bacterial nitrogen ที่ได้จากโปรตีนจากพืช และกระบวนการหมักย่อยสุดท้ายจะมีอัตราส่วนของ acetate : propionate ในระดับสูง

Zervas *et al.* (1998) ได้ศึกษาถึงการใช้เปลือกเมล็ดถั่วเหลืองในอาหารของแกะ ซึ่งแบ่งอาหารเป็น 3 treatments โดยใช้หญ้าแห้ง 400 กรัม ซึ่งมีข้าวโพด 60 เปอร์เซ็นต์เป็นกลุ่มควบคุม (control:C) กลุ่มที่ 2 ใช้เปลือกเมล็ดถั่วเหลือง 60 เปอร์เซ็นต์ (soybean hulls:SH) กลุ่มที่ 3 ใช้เปลือกเมล็ดถั่วเลืองร่วมกับน้ำมันถั่วเหลืองน้ำมันถั่วเหลือง 5 เปอร์เซ็นต์ (soybean hulls+soybean oil:SHF) ซึ่งค่าการย่อยได้ของวัตถุแห้งและอินทรียวัตถุ ไม่แตกต่างกันในแต่ละ treatments ถึงแม้ว่าค่าการย่อยได้ของไขมันรวมในอาหารที่เสริมเปลือกเมล็ดถั่วเหลือง จะมีนัยสำคัญยิ่ง ($P<0.01$) ซึ่งค่าที่ได้มีค่าต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับอาหารกลุ่ม control และ SBF แต่ค่าการย่อยได้ของโปรตีนรวมในกลุ่ม control จะสูงกว่ากลุ่ม SH และ SBF ($P<0.05$) ค่าการย่อยได้ของเยื่อใยที่ละลายในด่างและเยื่อใยที่ละลายในกรด ในอาหารกลุ่ม SH จะเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($P<0.01$) และคาร์โบไฮเดรทที่ไม่ใช่โครงสร้างมีค่าลดต่ำลงเมื่อเพิ่มน้ำมันถั่วเหลือง 5 เปอร์เซ็นต์ ไม่แตกต่างทางสถิติ ($P>0.05$)

Ipharraguerre *et al.* (2002) ได้รายงานถึงการใช้เปลือกเมล็ดถั่วเหลืองแทนข้าวโพดที่ระดับ 0, 10, 20, 30 และ 40 เปอร์เซ็นต์ในอาหารโคนม พบว่าปริมาณน้ำนมลดลงที่ระดับ 40 เปอร์เซ็นต์ แต่ ไม่มีผลต่อองค์ประกอบทางเคมีของน้ำนม และระดับการใช้เปลือกเมล็ดถั่วเหลืองที่เพิ่มขึ้นในสูตรอาหาร ทำให้กรดไขมันระเหยได้ทั้งหมด (total volatile fatty acid) เพิ่มขึ้น และค่า pH ในกระเพาะหมักลดลง

ตาราง 4: การย่อยได้ของเปลือกเมล็ดถั่วเหลืองในโค[/1]และแกะ[/2]

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

	Digestibility (%)			
	CP	CF	EE	NFE
Soybean Hulls[/1]	64.4	61.1	43.8	78.6
Soybean Hulls[/2]	52.4	89.3	48.4	84.6

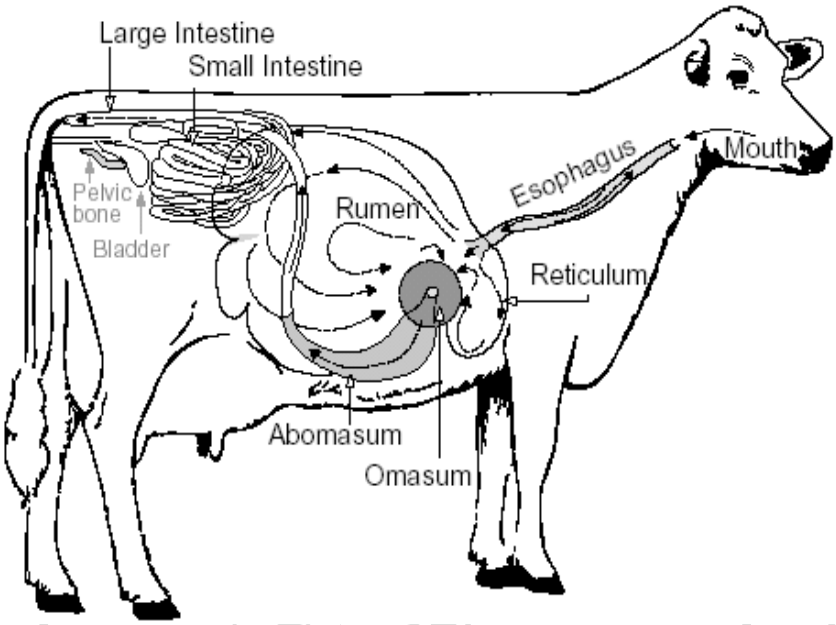
ที่มา : ดัดแปลงจาก Göhl (1981) [/1] และ Mikled *et al*. (1987) [2]

การย่อยได้ของเปลือกเมล็ดถั่วเหลืองในโคที่ศึกษาโดย Göhl (1981) พบว่าการย่อยได้ของโปรตีนรวม, เยื่อใยรวม, ไขมัน และคาร์โบไฮเดรทที่ย่อยได้ง่ายมีค่าเท่ากับ 64.4, 61.1, 43.8 และ 78.6 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และการย่อยได้ของเปลือกเมล็ดถั่วเหลืองในแกะที่ศึกษาโดย Mikled *et al*. (1987) พบว่าการย่อยได้ของโปรตีนรวม, เยื่อใยรวม, ไขมัน และคาร์โบไฮเดรทที่ย่อยได้ง่ายมีค่าเท่ากับ 52.4, 89.3, 48.4 และ 84.6 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

2.5 การย่อยอาหารที่ตำแหน่งต่างๆ ของระบบทางเดินอาหารในโคนม

การย่อยอาหาร (digestion) หมายถึงการเตรียมอาหารให้มีขนาดเล็กและพอดีที่ร่างกายจะสามารถดูดซึม (absorb) และนำไปใช้ประโยชน์ (utilize) การย่อยอาหารของโคนม โดยส่วนใหญ่เกิดขึ้นในทางเดินอาหารแสดงในภาพ 3 โดยที่อาหารแต่ละชนิดมีการย่อยได้ในทางเดินอาหารแต่ละส่วนไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพการย่อยได้ของทางเดินอาหารในแต่ละส่วนนั้น ตัวอย่างเช่น อาหารที่ส่วนประกอบประเภทเยื่อใยสูงไม่สามารถถูกย่อยได้ที่กระเพาะแท้ (abomasum) และลำไส้เล็ก ทั้งนี้เพราะโคนมไม่สามารถผลิตเอมไซม์ที่ย่อยเยื่อใยได้ดี แต่อาหารที่เยื่อใยสูงจะย่อยสลายในกระเพาะหมัก (rumen) ไส้ติ่ง (caecum) และลำไส้ใหญ่ (colon) โดยอาศัยเอมไซม์จากจุลินทรีย์

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved



ภาพ 3: แผนภาพแสดงทางเดินอาหารของโคนม

ที่มา : Wattiaux and Howard, no date

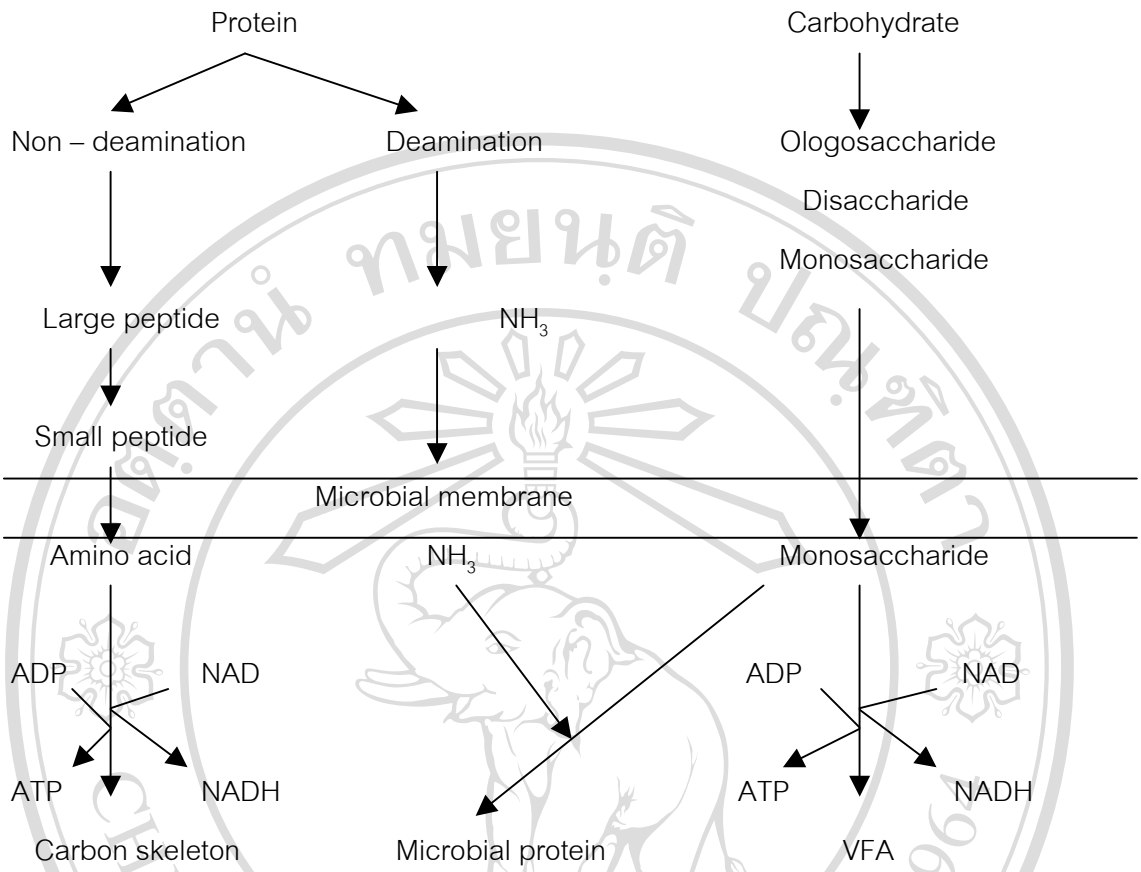
2.5.1 การย่อยอาหารในกระเพาะหมัก

อาหารที่ละชนิดมีการย่อยได้ในทางเดินอาหารแต่ละส่วนไม่เท่ากัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับ น้ำย่อยที่สัตว์ขับออกมา ชนิดและปริมาณของจุลินทรีย์ที่มีและธรรมชาติของอาหาร เช่น อาหารที่มีเยื่อใยสูงไม่สามารถย่อยได้ที่กระเพาะแท้และลำไส้เล็ก เพราะเอมไซม์จากตัวสัตว์ไม่สามารถย่อยเยื่อใยได้แต่มันอาจถูกย่อยได้บ้างในกระเพาะหมัก ไส้ติ่ง และลำไส้ใหญ่ โดยอาศัยเอมไซม์ของจุลินทรีย์เกิดผลผลิตคือ

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

ปฏิกิริยาการย่อยสลายอาหาร โดยจุลินทรีย์ปล่อยน้ำย่อยออกมาย่อยอาหาร และส่วนที่เกิดภายในเซลล์ของจุลินทรีย์เอง ดังแสดงในภาพ 4

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved



ภาพ 4 : การย่อยสลายโปรตีนและคาร์โบไฮเดรทในกระเพาะหมัก

ที่มา : ดัดแปลงจาก Van Soest (1994)

2.5.1.1 **การย่อยคาร์โบไฮเดรทในกระเพาะหมัก**

การย่อยอาหารที่เกิดในกระเพาะหมักซึ่งจะเกิดขึ้นจากเอมไซม์ที่ผลิตโดยจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ภายในกระเพาะส่วนนี้เท่านั้น เนื่องจากกระเพาะหมักโคนมไม่มีการผลิตเอมไซม์ที่ใช้ในการย่อยอาหารแต่อย่างใด

ขบวนการย่อยและเมตาบอลิซึมของคาร์โบไฮเดรทในกระเพาะหมัก แบ่งได้เป็นขั้นตอนต่างๆ ดังต่อไปนี้

- การย่อย Polysaccharides ให้เป็น Monosaccharide
- การเปลี่ยน Monosaccharide ให้เป็น Polysaccharides
- การเปลี่ยนไพรูเวท (pyruvate) ให้เป็นกรดไขมันที่ระเหยได้ (volatile fatty acid) เช่น กรดอะซีติก (acetic, C_2) กรดโพรพิโอนิก (propionic acid, C_3) และกรดบิวทีริก (butyric acid, C_4)
- การสังเคราะห์แก๊สมีเทน (methane, CH_4)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

การย่อยแป้งในกระเพาะหมักเกิดขึ้นโดยจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ในนั้นผลิตเอมไซม์ออกมาย่อยเช่นพวกแบคทีเรียและพวกโปรโตซัวได้ผลผลิตคือ น้ำตาล (glucose) ซึ่งจะถูกจุลินทรีย์นำไปใช้ประโยชน์โดยทันทีจึงพบน้ำตาลพวกนี้เป็นจำนวนน้อยในกระเพาะหมัก และจุลินทรีย์จะให้ผลผลิตได้แก่กรดไขมันระเหยได้ คาร์บอนไดออกไซด์และมีเทน ความเข้มข้นและสัดส่วนของกรดไขมันระเหยได้ที่เกิดขึ้น จะไม่คงที่แต่จะเกิดขึ้นอยู่กับชนิดของอาหารและระยะเวลาในการกินอาหารของโคนม ดังแสดงในตาราง 5

ตาราง 5: สัดส่วนของอาหารข้นต่ออาหารหยาบที่มีผลต่อกรดไขมันระเหยได้ในกระเพาะหมักโคนม

อาหารหยาบ:อาหารข้น	กรดไขมันระเหยได้ (%)		
	กรดอะซิติก	กรดโพรพิโอนิก	กรดบิวทีริก
100:0	71.4	16.0	7.9
75:25	68.2	18.1	8.0
50:50	65.3	18.4	10.4
40:60	59.8	25.9	10.2
20:80	53.6	30.6	10.7

ที่มา : Phillipson (1970)

ปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยคาร์โบไฮเดรทในกระเพาะหมัก

1. ชนิดและส่วนประกอบของธัญพืชในอาหารข้นที่โคนมได้รับ
2. อายุความแก่อ่อนของแป้งในธัญพืช
3. อัตราส่วนของของธัญพืชในอาหารข้นที่โคนมได้รับ
4. ปริมาณอาหารที่โคนมได้รับ ที่มีผลต่ออัตราการไหลผ่าน (rate of passage) เร็วขึ้น
5. กรรมวิธีในการแปรรูปอาหาร วัตถุดิบหรือธัญพืชที่นำมาใช้เลี้ยงโคนม

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

2.5.1.2 **การย่อยสลายโปรตีนในกระเพาะหมัก**

โปรตีนและสารประกอบอินทรียไนโตรเจนในอาหาร (dietary nitrogenous organic compound) รวมทั้ง mucoproteins ที่มีอยู่ในน้ำลาย เมื่อเข้าไปถึงกระเพาะหมัก จะถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรียและโปรโตซัวหลายชนิดที่อาศัยอยู่ในบริเวณนั้น

การสลายตัวของโปรตีนแบ่งได้เป็น 2 ขั้นตอนดังนี้ คือ

- ขบวนการ Proteolysis แยกรอยต่อของโครงสร้างโปรตีนด้วยวิธี hydrolysis ตรง peptide bond ทำให้ได้ peptide และกรดอะมิโนบางส่วนออกมา
- ขบวนการสลายตัวของกรดอะมิโน โดยขบวนการ deamination และผลิตกรดอินทรีย์และแอมโมเนีย (NH_3) ซึ่งจะถูกนำไปใช้ประโยชน์ต่อไป (เทอดชัย, 2542)

จุลินทรีย์ที่อยู่ในกระเพาะหมักโดยเฉพาะแบคทีเรียจะเข้าย่อยสลายโปรตีน กิจกรรมของ จุลินทรีย์นั้นจะแตกต่างกันออกไป ทั้งนี้ขึ้นกับชนิดของอาหาร แต่อย่างไรก็ตาม pH ภายในกระเพาะหมักอาจมีอิทธิพลมากกว่าโดย pH ที่เหมาะสมของการเข้าสลายโปรตีนของจุลินทรีย์อยู่ระหว่าง 6-7 กว่า 80 เปอร์เซ็นต์ของไนโตรเจนของจุลินทรีย์ถูกสังเคราะห์โดยใช้แอมโมเนีย ส่วนอีก 20 เปอร์เซ็นต์ใช้กรดอะมิโนโดยตรง ประมาณ 59 เปอร์เซ็นต์ของไนโตรเจนจากอาหารจะถูกย่อยสลายในกระเพาะหมัก ปริมาณไนโตรเจนที่ถูกย่อย 29 เปอร์เซ็นต์จะถูกใช้ประโยชน์ในรูปของกรดอะมิโน และอีก 71 เปอร์เซ็นต์จะถูกเปลี่ยนให้เป็นแอมโมเนีย อย่างไรก็ตาม เรื่องนี้ขึ้นอยู่กับลักษณะธรรมชาติของชนิดอาหารโปรตีนแต่ละชนิด (เมธา, 2533)

ปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายโปรตีนในกระเพาะหมัก

1. ความสามารถในการสลายโปรตีน (protein solubility) โดยโปรตีนที่สลายได้มาก มีโอกาสที่จะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ในกระเพาะหมักได้มากขึ้น
2. วิธีการให้อาหารเป็นปัจจัยที่สำคัญอีกประการหนึ่งที่มีผลต่อการย่อยสลายโปรตีนในกระเพาะหมัก ถ้าโคนมได้รับอาหารในปริมาณที่มาก ระยะเวลาที่อาหารจะอยู่ในกระเพาะหมัก (retention time) ก็จะลดลง มีผลทำให้อาหารเคลื่อนที่ไปยังทางเดินอาหารส่วนต่อไปเร็วขึ้น จุลินทรีย์มีโอกาสสลายโปรตีนลดลง รวมถึงอาหารที่มีผลต่อการคงอยู่ในกระเพาะหมักด้วยเช่นกัน
3. ปัจจัยจากตัวสัตว์ สำหรับสัตว์ต่างชนิดกัน เช่นโคนมและแกะโดยโคนมจะมีค่า retention time สูงกว่าแกะ (1.37-3.7 วัน และ 0.8-2.2 วัน) เมื่อมี retention time สูงโอกาสที่โคจะเคี้ยวเอื้องอาหารจึงมีมากกว่าแกะ และทำให้ชิ้นอาหารมีขนาดเล็กกว่า จึงเป็นการเพิ่มโอกาสจุลินทรีย์เข้าย่อยอาหารมากขึ้นด้วย

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

2.5.1.3 การย่อยและการดูดซึมในลำไส้

คาร์โบไฮเดรทที่เดินทางถึงลำไส้เล็กประกอบด้วยชนิดที่เป็นโครงสร้าง (structural) และที่ไม่เป็นโครงสร้าง (non-structural) ที่รอดพ้นจากการถูกย่อยสลายจากจุลินทรีย์ในกระเพาะหมัก รวมไปถึงคาร์โบไฮเดรทที่ได้จากการสังเคราะห์ของจุลินทรีย์ทั้งนี้ปริมาณ structural carbohydrate หรืออาหารประเภทเยื่อใยจะมีปริมาณมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับอัตราการย่อยได้ของกระเพาะหมัก โดยปกติ เมื่อพืชอาหารสัตว์มีอายุเพิ่มขึ้นเยื่อใยจะเพิ่มมากขึ้น

ตามลำดับไปด้วย แต่ในทางตรงกันข้ามการย่อยได้จะลดน้อยลงสวนทางกัน นอกจากนี้ การที่สัตว์ได้รับอาหารหยาบเป็นจำนวนมากหรือวิธีการแปรรูปอาหารให้มีขนาดเล็กลง เช่นการบดละเอียดและนำไปอัดเม็ด (pellet) ที่มีผลทำให้ retention time ของอาหารในกระเพาะหมักลดลง หรือการให้อาหารข้นที่มีเมล็ดธัญญพืชเป็นจำนวนมาก ทั้งหมดนี้จะทำให้การย่อยได้ของเยื่อใยลดลงได้เช่นกัน โดยปกติในลำไส้เล็กของโคนมไม่สามารถที่จะผลิตเอมไซม์ออกมาย่อยอาหารพวกย่อยเยื่อใยเหล่านี้ได้ พบว่า cellulose และ hemicellulose จะมีการสูญหายหรือถูกย่อยสลายในส่วนนี้ของทางเดินอาหารส่วนเป็นจำนวนน้อยมาก ซึ่งจำนวนที่หายไปนี้ อาจจะเกิดจากการเข้าย่อยของจุลินทรีย์ที่อาจจะมีอยู่บ้างในส่วนปลายของลำไส้เล็ก แต่ในทางปฏิบัติแล้วเป็นที่ยอมรับกันว่า การย่อยเยื่อใยในลำไส้เล็กนี้ ไม่มีความสำคัญต่อตัวสัตว์ แต่อย่างใด (เทอดชัย, 2542)

แป้งที่ผ่านเข้ามาในลำไส้เล็กโดยส่วนใหญ่เป็นแป้งจากอาหารที่เหลือ หรือรอดพ้นจากการถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ในกระเพาะหมัก ดังนั้น อาจมีปริมาณแป้งที่เข้ามาในบริเวณนี้จะมีมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับอัตราการย่อยได้ของแป้งในกระเพาะหมักเป็นสำคัญ ในกรณีที่สัตว์ได้รับแป้งเป็นจำนวนน้อย และถูกย่อยภายในกระเพาะหมักเกือบสมบูรณ์ การย่อยแป้งในลำไส้เล็กจะเกิดขึ้นน้อยมาก แทบไม่มีความสำคัญต่อโคนม สำหรับแป้งอีกส่วนหนึ่งที่เดินทางถึงลำไส้เล็กเป็นแป้งที่เกิดจากการสังเคราะห์ของจุลินทรีย์ ในกระเพาะหมัก (เทอดชัย, 2542)

โปรตีนที่เดินทางมาถึงลำไส้เล็กของโคนมประกอบด้วย โปรตีนจากอาหารที่รอดพ้นจากการถูกย่อยสลายในกระเพาะหมัก (undegradable intake protein, UIP) โปรตีนจากจุลินทรีย์ (microbial protein) และโปรตีนที่ย่อยสลายตัวจากเนื้อเยื่อทางเดินอาหาร (endogenous protein) ปริมาณและสัดส่วนของโปรตีนแต่ละชนิดจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิด และปริมาณอาหารที่สัตว์ได้รับ โดยทั่วไปการย่อยโปรตีนในโคนมจะมีความคล้ายคลึงในสัตว์กระเพาะเดี่ยวทั่วๆ ไปกล่าวคือตับอ่อนจะทำหน้าที่ผลิตเอมไซม์ Chymotrypsinogen, Trypsinogen, Pancretopeptidase E (Elastase) และ Procarboxypeptidase A และ Procarboxypeptidase B ซึ่งเอมไซม์ทั้งหมดเหล่านี้จะถูกกระตุ้นให้อยู่ในรูปที่ย่อยได้ด้วยเอมไซม์ Trypsin และ Enterokinase ที่ผลิตจากลำไส้เล็กให้อยู่ในรูปที่ย่อยโปรตีนได้ โดย Chymotrypsinogen เปลี่ยนเป็น Chymotrypsin และ Trypsinogen เปลี่ยนเป็น Trypsin เอมไซม์ทั้งสองชนิดนี้รวมทั้ง Pancretopeptidase E (Elastase) เป็นเอมไซม์ประเภท Endopeptidase จะแยกสลาย Peptide bonds ที่อยู่ในโครงสร้างของโปรตีน ส่วนเอมไซม์ Procarboxypeptidase A และ Procarboxypeptidase B ก็จะถูกกระตุ้นด้วย Trypsin และ Enterokinase ด้วยเช่นกัน ให้เป็น Carboxypeptidase A และ Carboxypeptidase B ซึ่งเป็นรูปที่ทำการย่อยโปรตีนได้ เอมไซม์ประเภทนี้จะเป็นเอมไซม์ประเภท Exopeptidase ที่จะแยกสลาย Peptide bond เฉพาะบริเวณส่วนปลายของโครงสร้างโปรตีนหรือ Peptide เท่านั้น ในขณะที่อาหารเดินทางมาจากกระเพาะแท้ (abomasum) เริ่มเข้ามาถึงลำไส้เล็กค่า pH ของอาหาร (digesta) จะลดต่ำลงเนื่องจากยังมีสภาพความเป็นกรดตกค้างจากเอมไซม์ Pepsin และเริ่มสูงขึ้นเมื่อมีปริมาณเอมไซม์จากลำไส้เล็กเพิ่มขึ้น โปรตีนเหล่านี้จะถูกย่อยสลายกลายเป็นกรดอะมิโน และ Peptide ซึ่งจะถูกดูดซึมในลำไส้เล็กต่อไป โดยทั่วไปค่าเฉลี่ยการดูดซึมกรดอะมิโน ในลำไส้เล็กมีค่าเฉลี่ยประมาณ 75 เปอร์เซ็นต์ของจำนวนกรดอะมิโนที่เดินทางมาถึงลำไส้เล็กทั้งหมด (เทอดชัย, 2542)

โปรตีนที่เข้ามาถึงลำไส้ใหญ่ ได้แก่อาหารโปรตีนที่ไม่ถูกย่อยในทางเดินอาหารส่วนหน้าและในลำไส้เล็ก โปรตีนจากจุลินทรีย์ โปรตีนของ endogenous protein ซึ่งได้แก่เยื่อบุผนังลำไส้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

เล็ก เอมไซม์ ตลอดจนโปรตีนที่หลั่งจากเซลล์ของเยื่อบุผนังลำไส้เล็ก (Hecker, 1973) โปรตีนเหล่านี้มีการย่อยและเปลี่ยนแปลง โดยกิจกรรมของจุลินทรีย์ที่อยู่ในลำไส้ใหญ่ การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นนั้นมีทั้งการสลายสารประกอบไนโตรเจนที่ไม่ใช่โปรตีน เช่น ยูเรีย (ureolytic activity) การสลายโปรตีน (proteolytic activity) ตลอดจนการแยกแอมโมเนียออกจากกรดอะมิโน (deamination) โดยเฉพาะในส่วนของไส้ติ่งของแกะ ที่พบมีการย่อยโปรตีนสูงกว่าการย่อยโปรตีนที่เกิดขึ้นในกระเพาะหมัก ส่วนการสลายยูเรีย และแอมโมเนียออกจากกรดอะมิโนนั้นต่ำกว่าที่เกิดขึ้นในกระเพาะหมักเพียงเล็กน้อย (Hecker, 1971) ซึ่งปริมาณการย่อยได้ของโปรตีนในลำไส้ใหญ่เกิดขึ้นได้มากน้อยก็ขึ้นอยู่กับชนิดของอาหารด้วย (Ørskov *et al.*, 1970)

ที่บริเวณลำไส้ใหญ่ โปรตีนที่เดินทางมาถึงมีลักษณะคล้ายคลึงกับลำไส้เล็ก นอกจากนี้อาจมียูเรียที่หมุนเวียนกลับเข้ามาและถูกเปลี่ยนเป็นแอมโมเนีย (NH_3) สำหรับปริมาณไนโตรเจน (N) ที่เข้ามาสู่ลำไส้ใหญ่จะอยู่ระหว่าง 25-40 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับไนโตรเจนทั้งหมดที่สัตว์ได้รับจากอาหาร และค่าการย่อยได้ของไนโตรเจนจะอยู่ระหว่าง 8-11 เปอร์เซ็นต์ แต่ถ้ามีส่วนประกอบของอาหารหยาบเช่น หญ้าสดอยู่ด้วย ก็จะมีค่าการย่อยได้ของไนโตรเจนระหว่าง 9-20 เปอร์เซ็นต์ ขบวนการย่อยที่เกิดขึ้นในลำไส้ใหญ่โดยจุลินทรีย์จะมีความคล้ายคลึงกับที่เกิดขึ้นในกระเพาะหมัก ซึ่งจะให้ผลผลิตคือ NH_3 ซึ่งส่วนหนึ่งจะถูกดูดกลับเข้าสู่กระแสโลหิตนำไปใช้ประโยชน์ได้อีก (เทอดชัย, 2542)

2.5.1.4 ประโยชน์จากการทราบตำแหน่งของการย่อยอาหาร

เนื่องจากการย่อยอาหารที่ตำแหน่งต่างๆ เกิดผลต่างกัน เช่น การย่อยสลายอาหารโปรตีนในกระเพาะหมักจะถูกนำไปใช้สังเคราะห์เป็น microbial protein ซึ่งมีคุณภาพค่อนข้างดีเพราะมีสัดส่วนของกรดอะมิโนที่จำเป็นใกล้เคียงกับความต้องการของสัตว์ (Schwab, 1995) ดังนั้นถ้าโปรตีนที่สัตว์เคี้ยวเอื้องกินเข้าไปมีคุณภาพไม่ดี หรือเป็นสารประกอบไนโตรเจนที่ไม่ใช่โปรตีน (non protein nitrogen, NPN) การย่อยสลายในกระเพาะหมักจะมีประโยชน์มาก แต่ถ้าโปรตีนที่กินเข้าไปมีคุณภาพสูงการย่อยสลายในกระเพาะหมักอาจไม่มีประโยชน์มากนัก เพราะการสลายตัวของโปรตีนไปเป็นแอมโมเนียในกระเพาะหมัก มีการสูญเสียเนื่องจากจุลินทรีย์ไม่สามารถจับแอมโมเนียไปใช้ได้ทั้งหมดและ microbial protein ที่เกิดขึ้นอาจจะมีสัดส่วนของกรดอะมิโนด้อยกว่าโปรตีนเดิมที่สัตว์กินเข้าไป ดังนั้นถ้าโปรตีนประเภทนี้ถูกย่อยสลายด้วยเอมไซม์ในตัวสัตว์ที่กระเพาะแท้และลำไส้เล็กก็จะเกิดประโยชน์มากกว่า เพราะได้กรดอะมิโนที่มีสัดส่วนเหมาะสมซึ่งสัตว์สามารถดูดซึมได้โดยตรง (บุญล้อม, 2541)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

สำหรับคาร์โบไฮเดรทที่ย่อยสลายในกระเพาะหมัก ถ้าอยู่ในอัตราส่วนที่เหมาะสมจะเกิดประโยชน์มาก เนื่องจากจะนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานให้จุลินทรีย์ อีกทั้งยังเป็นโครงสร้างคาร์บอนในการทำปฏิกิริยากับแอมโมเนียเพื่อนำไปสังเคราะห์ microbial protein ด้วย อย่างไรก็ดีการย่อยสลายคาร์โบไฮเดรทในกระเพาะหมัก มีการสูญเสียพลังงานส่วนหนึ่งในรูปของแก๊สมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งมีประมาณ 8 เปอร์เซ็นต์ ของ gross energy ที่สัตว์ได้รับ ดังนั้นในกรณีของอาหารหยาบที่มีเยื่อใยสูง ซึ่งไม่สามารถถูกย่อยที่ลำไส้เล็กได้ การย่อยสลายในกระเพาะหมักจึงมีประโยชน์มากกว่า เพราะจะได้เป็น monosaccharide ซึ่งสัตว์สามารถดูดซึมนำไปใช้ประโยชน์ได้โดยตรง ดังนั้นจึงควรให้อาหารประเภทที่มีการย่อยสลายได้ดีในกระเพาะหมักเท่านั้น

2.6 **การศึกษาการย่อยได้ในโคนม** (Digestibility studies in dairy cows)

การศึกษาการย่อยได้ (digestibility studies) มีความหมายกว้างๆ คือการวัดปริมาณโภชนะหรืออาหารที่สูญหายไปในทางเดินอาหารส่วนต่างๆ ของโคนม วัตถุประสงค์หลักของการศึกษาคือเพื่อประเมินความสามารถหรือประสิทธิภาพของโคนมในการนำเอาโภชนะหรืออาหารชนิดนั้นๆ ไปใช้ประโยชน์ และเพื่อศึกษาให้รู้ถึงปริมาณโภชนะที่ย่อยได้ในแต่ละส่วนของทางเดินอาหารว่ามีมากน้อยเพียงใด และนอกจากนี้ ยังอาจมีวัตถุประสงค์เพื่อที่จะใช้ในการศึกษาเกี่ยวกับผลการเตรียมหรือการแปรรูปอาหาร การใช้อาหารเสริม อัตราส่วนของวัตถุดิบที่ให้เป็นอาหาร อิทธิพลของอายุ ชนิดและพันธุ์สัตว์ ที่จะมีผลต่อการย่อยได้ของอาหารนั้นๆ อีกด้วย (เทอดชัย, 2540)

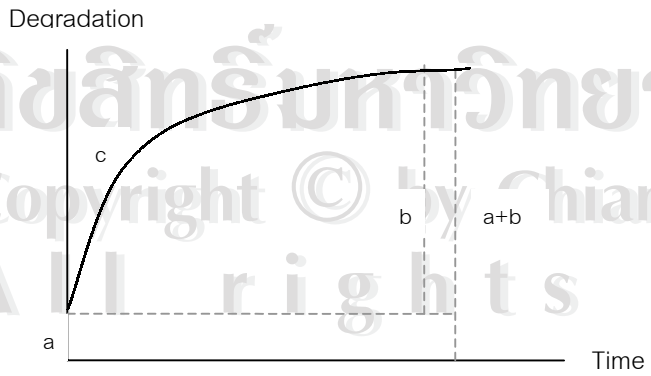
การประเมินคุณค่าทางอาหารที่เป็นพื้นฐานคือ วิธีการวิเคราะห์แบบ proximate analysis (AOAC., 2000) ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้กันมานานและสามารถบอกองค์ประกอบทางเคมีของอาหารได้ในระดับหนึ่ง แต่ยังมีข้อจำกัดในเรื่องการวิเคราะห์องค์ประกอบส่วนที่เป็นเยื่อใย จึงมีการพัฒนาการวิเคราะห์เยื่อใยขึ้น เรียกว่า detergent method (Van Soest, 1982) อย่างไรก็ตาม การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีนี้ ยังไม่สามารถบอกปริมาณอาหารที่สัตว์กินได้ และโภชนะที่สัตว์จะได้รับ การย่อยได้ของโภชนะในตัวสัตว์ ตลอดจนการนำโภชนะต่างๆ ไปใช้ประโยชน์ได้จริง ดังนั้นจึงต้องมีการทดลองหาค่าการย่อยได้ ทั้งจากห้องปฏิบัติการ (*in vitro*) ได้แก่การศึกษาการสลายตัวของโภชนะในกระเพาะหมัก โดยวิธีการใช้ถุงไนล่อน และการประเมินค่าการย่อยได้และพลังงานด้วยวิธีการวัดปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้น และกับการทดลองในตัวสัตว์โดยตรง (*in vivo*) ได้แก่การศึกษาการย่อยได้โดยวิธีการดั้งเดิมเพื่อหาค่าการย่อยได้ปรากฏและการใช้สารบ่งชี้ ทั้งนี้เพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความละเอียดและให้ประโยชน์มากยิ่งขึ้น

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

2.6.1 การศึกษาการสลายตัวของโภชนะภายในกระเพาะหมักโดยวิธีการใช้ถุงไนล่อน *(in situ/in sacco* rumen degradability technique)

การศึกษาเพื่อประเมินการย่อยได้ของโภชนะในกระเพาะหมัก โดยวิธีการใช้ถุงไนล่อน *(in situ/in sacco)* เป็นวิธีการศึกษาการย่อยได้ในห้องปฏิบัติการที่นิยมกันอย่างกว้างขวาง เพราะเป็นวิธีการที่ทำได้ง่าย มีค่าใช้จ่ายไม่สูงนัก สามารถทำได้โดยเอาตัวอย่างอาหารที่ต้องการทดสอบใส่ลงในถุงผ้าแล้วนำไปแช่ในกระเพาะหมักของโคนมผู้ที่ทำการศึกษาเป็นคนแรกคือ Quin *et al.* (1938) โดยใช้ถุงผ้าที่ทำจากผ้าไหม (cylindrical bags) ทดลองในแกะที่ผ่าตัดสอดท่อ fistula ที่กระเพาะหมัก ข้อมูลที่ได้จากวิธีการนี้สามารถนำไปใช้อธิบายลักษณะการย่อยสลายของเยื่อใยและโปรตีนรวมในอาหารได้ และยังใช้เปรียบเทียบวัตถุดิบอาหารสัตว์เพื่อใช้ในการประกอบสูตรอาหารด้วย (Huntington and Givens, 1997)

หลักการของการศึกษาการสลายตัวของโภชนะในกระเพาะหมัก โดยวิธีการใช้ถุงไนล่อนคือ อาหารเดินทางถึงกระเพาะหมักจะประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนที่ไม่สลายตัวในกระเพาะหมัก (undegradable part) แต่อาจถูกย่อยสลายหรือสลายตัวที่ทางเดินอาหารส่วนต่อไป หรือไม่ถูกย่อยสลายเลยและถูกขับออกมาในมูล และส่วนที่สลายตัวในกระเพาะหมัก (degradable part) ที่ประกอบด้วยส่วนที่ละลายได้ทันที (fraction of feed degradable rapidly, a) และส่วนที่ไม่ละลายได้ทันที แต่ถูกหมักย่อยได้โดยจุลินทรีย์ในกระเพาะหมัก (fraction of feed degradable slowly, b) ทั้งนี้อาหารแต่ละชนิดมีความสามารถในการสลายตัวของโภชนะสูงสุดเท่ากับ a+b (potential degradable) และมีอัตราการสลายตัวเท่ากับ c และสามารถแสดงความสัมพันธ์ดังกล่าวได้ดังภาพ 5 (Ørskov, 1982)



ภาพ 5: การสลายตัวของโภชนะของอาหารข้นในกระเพาะหมัก

ที่มา: Ørskov (1982)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

วิธีการใช้ถุงไนล่อนสามารถวัดการสลายตัวของโภชนะได้โดยตรง รวมทั้งการบ่ม (incubate) อาหารในกระเพาะหมักที่เวลาต่างกัน สามารถใช้อธิบายถึงเรื่องความสัมพันธ์ระหว่างเวลาและความสามารถในการสลายตัวของโภชนะได้ Ørskov and McDonald (1970) รายงานว่ามีสองวิธีการที่อธิบายเรื่องการสลายตัวของโภชนะในกระเพาะหมัก นั่นคือการวัดปริมาณอาหารที่ผ่านมายังกระเพาะแท้ (abomasum) และ/หรือการบ่มอาหารในกระเพาะหมัก สำหรับวิธีการแรกมีความลำบากในการรักษาแผลสัตว์ทดลองเพราะต้องใช้ระยะเวลานาน และต้องระมัดระวังในการแยกจุลินทรีย์ออกจากอาหาร

วิธีวัดการสลายตัวของโภชนะในกระเพาะหมักโดยวิธีการใช้ถุงไนล่อน เป็นวิธีการวัดค่าโภชนะ เช่น วัตถุแห้ง อินทรียวัตถุ หรือโปรตีนที่หายไป ณ ช่วงเวลาต่างๆ โดยวัดปริมาณอาหารที่เหลืออยู่ในถุงไนล่อน โดยมีหลักการคือ อาหารส่วนที่หายไปนั่นคือส่วนที่สลายตัว (degraded fraction) และส่วนที่เหลืออยู่ในถุงคือ ส่วนที่ไม่สลายตัว (undegraded fraction) ดังนั้นเมื่อนำค่าทั้ง 2 ส่วนนี้มาคำนวณก็จะได้ค่าโภชนะที่สลายตัวที่ช่วงเวลาต่างๆ ได้ และสามารถคำนวณอัตราการสลายตัวได้จากสมการที่ (1)

$$P = a + b\,(l - e^{-ct}) \qquad (1)$$

เมื่อ P = ค่าการย่อยสลายได้ที่ช่วงเวลาต่างกัน

a = ส่วนที่ละลายได้ทันที (%)

b = ส่วนที่ไม่ละลายแต่สามารถเกิดการหมักย่อยได้ (%)

l = ระยะเวลาที่รอให้จุลินทรีย์เข้าสัมผัสอาหารและทำการย่อยสลาย (lag phase)

e = $\log_{10}$

c = อัตราการสลายตัวของ b

t = ช่วงระยะเวลาต่างๆ

จะเห็นได้ว่าวิธีการนี้นอกจากจะบอกค่าการละลาย (A) และค่าการสลายตัวสูงสุด (A+B) ซึ่งเป็นค่าที่บ่งบอกปริมาณการสลายตัวของอาหารในกระเพาะหมักแล้ว ยังช่วยให้ทราบอัตราการสลายตัว (c) ซึ่งทำให้ทราบอัตราเร็วและปริมาณอาหารที่เคลื่อนที่จากกระเพาะหมักไปสู่ลำไส้เล็ก อย่างไรก็ตาม อาหารที่สัตว์กินเข้าไปจะไม่ถูกย่อยในกระเพาะหมักทั้งหมด แต่จะเคลื่อนที่ออกจากกระเพาะหมักในอัตราที่แตกต่างกัน (rate of passage) ขึ้นกับปริมาณอาหารที่สัตว์กินเข้าไป ชนิดของอาหาร และปัจจัยอื่นๆ

วิธีการใช้ถุงไนล่อนอาจมีความไม่แน่นอนเมื่อใช้ประเมินค่าการย่อยได้ของอาหารหยาบที่มีการเสริมด้วยอาหารข้นหรือโปรตีน เพราะในวัตถุดิบเหล่านั้นมีค่าการละลายได้ (solubility) สูง จึงสามารถผ่านออกจากถุงก่อนเกิดการหมักได้ และไม่สามารถใช้ประเมินค่าในอาหารที่มีปริมาณของเยื่อใยที่ละลายในกรดสูงกว่า 25 เปอร์เซ็นต์ (Dewhuest *et al*., 1995)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

Broderrick *et al*. (1991) รายงานว่า เมื่อเปรียบเทียบกับการศึกษาการย่อยได้ในตัวสัตว์ (*in vivo*) การประเมินค่าการสลายตัวของโภชนะด้วยวิธีใช้ถุงไนล่อนอาจให้ค่าที่ไม่สมบูรณ์มากนัก แต่วิธีการนี้สามารถทำได้อย่างรวดเร็ว ประหยัดเวลา และใช้เครื่องมืออุปกรณ์น้อย

2.6.1.1 ปัจจัยที่มีผลต่อการสลายตัวของโภชนะในกระเพาะหมักโดยวิธีการใช้ถุงไนล่อน

ถึงแม้ว่าการศึกษาการสลายตัวของโภชนะภายในกระเพาะหมักโดยวิธีการใช้ถุงไนล่อนจะเป็นวิธีที่สะดวก ค่าใช้จ่ายถูกกว่าการศึกษาในตัวสัตว์ แต่ก็มีปัจจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งมีผลทำให้ความแม่นยำและข้อมูลที่ได้น่าเชื่อถือ ดังนี้

1. **ลักษณะเฉพาะถุง** (bag specification)

ชนิดของวัสดุที่ใช้ทำถุง ขนาดของถุง ตลอดจนขนาด และความสม่ำเสมอของรูถุง (pore size) มีผลต่อค่าการสลายตัว โดยรูถุงควรมีขนาดกว้างพอที่ของเหลวและจุลินทรีย์ภายในกระเพาะหมักสามารถไหลผ่านเข้าออกได้ แต่ต้องไม่กว้างจนชิ้นอาหารที่ไม่ถูกย่อยไหลผ่านออกจากถุง หากใช้ถุงที่มีขนาดรูเล็กเกินไปจะทำให้จุลินทรีย์ทั้งหมด จำนวนแบคทีเรียที่ย่อยสลายเซลลูโลสและโปรโตซัวตลอดจนค่าความเป็นกรด-ด่างในถุงไนล่อนลดลง และถ้าใช้ถุงที่มีขนาดรูกว้างเกินไป ค่าการสลายตัวของวัตถุแห้งก็จะเพิ่มขึ้น ขณะเดียวกันอนุภาคของอาหารที่หายไปจากการล้างก็เพิ่มขึ้นด้วย ขนาดของรูถุงที่เหมาะสมควรมีขนาดช่องประมาณ 20-40 μm. และถุงควรมีขนาด 140 x 90 เซนติเมตร (Ørskov *et al*., 1985)

ขนาดของถุงไม่ค่อยมีผลต่อค่าที่วัดมากนัก แต่สัดส่วนของปริมาณตัวอย่างอาหารต่อพื้นที่ผิวของถุงมีผลมากกว่า หากเพิ่มปริมาณตัวอย่างอาหาร โดยไม่เพิ่มขนาดถุงให้ได้สัดส่วนกัน ค่าการสลายตัวจะลดลง โดยทั่วไปควรใส่อาหารตัวอย่าง 10-15 มิลลิกรัมต่อตารางเซนติเมตรของพื้นที่ทั้งหมดของถุง อัตราส่วนความกว้างและความยาวถุงควรอยู่ระหว่าง 1:1 ถึง 1:2.5 และควรหลีกเลี่ยงการเย็บถุงที่ทำให้เกิดมุมแหลมที่ก้นถุง เพราะจะทำให้อาหารบางส่วนไปอุดอยู่ที่ก้นถุง (Madsen and Hvelplund, 1994)

2. **ลักษณะของอาหารตัวอย่าง** (diets characteristic)

ตัวอย่างอาหารที่จะใช้ควรทำให้แห้งหรืออบที่อุณหภูมิต่ำกว่า 60 องศาเซลเซียส หากอุณหภูมิที่ใช้อบตัวอย่างสูงเกินไปจะมีผลทำให้มีการสลายตัวและการละลายได้ของไนโตรเจนในตัวอย่างลดลงได้ (Lopez *et al*., 1995) หรืออาจทำให้แห้งด้วยวิธีการ freeze drying เพื่อคงคุณภาพของอาหารตัวอย่างเอาไว้ ขนาดชิ้น (particle size) ของตัวอย่างขึ้นอยู่กับชนิดของอาหารดังนี้ อาหารธัญพืชและอาหารหยาบ ควรบดผ่านตะแกรงขนาด 2.5-3 มิลลิเมตร และอาหารหมักอาจใช้เครื่องบดเกลียว (mincer) บดให้มีขนาดประมาณ 5 มิลลิเมตร (Madsen and Hvelplund, 1994)

3. **การเตรียมตัวอย่างอาหาร** (sample preparation)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

น้ำหนักของตัวอย่างที่ใช้ทดลองอาจแตกต่างกันตามชนิดของอาหาร ดังนี้ ถ้าเป็นอาหารหยาบใช้ประมาณ 3 กรัม ส่วนตัวอย่างอาหารโปรตีนหรือธัญพืชใช้ประมาณ 4-5 กรัม โดยขนาดตัวอย่างควรมีความสัมพันธ์กับพื้นที่ถุง คือประมาณ 10-15 mg/cm^2 (Madsen and Hvelplund, 1994) ทั้งนี้เพื่อให้ตัวอย่างสามารถเคลื่อนที่ได้อย่างอิสระในถุงจะได้ย่อยได้ทั่วถึง เมื่อชั่งตัวอย่างอาหารใส่ถุงแล้วนำไปมัดติดกับท่อยางให้เรียบร้อย ทำเครื่องหมายก่อนนำไปบ่มในกระเพาะหมักที่ชั่วโมงต่างๆ

4. **การใส่ถุงตัวอย่างอาหารลงในกระเพาะหมัก** (incubation in rumen)

ควรจัดอาหารในถุงให้กระจายอย่างสม่ำเสมอก่อนนำไปแช่ในกระเพาะหมัก โดยปกติควรแช่ถุงไว้ในกระเพาะหมักส่วนล่าง (ventral sac) โดยต้องให้ถุงทุกใบสัมผัสกับของเหลวในกระเพาะหมักเป็นอย่างดี เพราะถ้ามีการสัมผัสน้อยการสลายตัวอาจลดลง (เมธา, 2533) ทั้งนี้แบคทีเรียส่วนใหญ่จะอยู่ในส่วนที่เป็นของเหลวในกระเพาะหมักส่วนล่าง ที่สามารถรวมกลุ่มและเข้าย่อยผิวส่วนหน้าของอาหารได้ (Stewart, 1979) สำหรับเชือกไนล่อนที่ใช้ผูกท่อยางมัดถุงตัวอย่างอาหารจากฝาปิดกระเพาะหมักนั้นก็มีผลต่อการย่อยได้หรือการสลายตัวของโภชนะในถุง นั้นคือถ้าเชือกสั้นเกินไปจะทำให้ถุงทั้งหมดจมไม่ถึงส่วนของของเหลวในกระเพาะหมักส่วนล่าง ค่าการสลายตัวของโภชนะอาจไม่ดีนัก (Stritsler *et al.*, 1990) ทั้งนี้ Ørskov (1985) และ Linberg (1983) ได้รายงานถึงการทดลองในโคโดยเชือกที่ใช้ควรมีความยาวอย่างน้อย 50 เซนติเมตร เพื่อให้เกิดความคล่องตัวในการเคลื่อนที่ของถุงไนล่อนในกระเพาะ

5. **การล้างถุง** (washing method)

การล้างถุงไนล่อนที่มีตัวอย่างอาหารภายหลังนำออกจากกระเพาะหมักที่ชั่วโมงต่างๆ แล้วก็เป็นสิ่งสำคัญเช่นกัน เพราะจะมีผลต่อค่าการสลายตัว โดย Chermey *et al.* (1990) ได้ศึกษาเปรียบเทียบการล้างถุงด้วยมือกับการล้างด้วยเครื่องซักผ้า พบว่าค่าการสลายตัวไม่ต่างกันมากนัก แต่การล้างด้วยเครื่องซักผ้าเป็นเวลา 2 นาที ทำให้ค่าคลาดเคลื่อนมาตราฐาน (SE) ต่ำกว่า การล้างถุงด้วยเครื่องซักผ้าจะเป็นมาตราฐานที่ดี เพราะสามารถกำหนดโปรแกรมและเวลาในการล้างได้ สามารถล้างถุงได้คราวละมากๆ เป็นการประหยัดเวลา โดยเวลาที่แนะนำให้ใช้อยู่ที่ประมาณ 10-15 นาที (Mehrez and Ørskov, 1977)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

6. **การอบถุง** (drying)

หลังจากล้างถุงจนแน่ใจว่าสะอาด จากนั้นนำถุงไปอบในตู้อบ (oven) โดยใช้อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 48 ชั่วโมง หรือจนน้ำหนักคงที่แล้วจึงชั่งน้ำหนักที่เหลือ

7. **สัตว์ทดลองและการให้อาหาร** (animal and feeding)

สัตว์ทดลองที่ใช้ควรเป็นชนิดเดียวกันกับที่ต้องศึกษา เช่นหากต้องการศึกษาการสลายตัวของโภชนะของโคนม ก็ควรใช้โคนมสำหรับศึกษา เพราะการย่อยได้และอัตราการไหลผ่านของอาหารของสัตว์แต่ละชนิด พันธุ์ มี

ความแตกต่างกัน สำหรับอิทธิพลของอาหารที่ให้สัตว์ทดลองย่อมมีผลต่อการสลายตัว ดังนั้นสิ่งที่สำคัญคืออาหารที่ให้สัตว์ทดลองควรเป็นอาหารที่มีความคล้ายคลึงกับอาหารที่ต้องการทดสอบ (เมธา, 2533) อาหารที่ใช้เลี้ยงสัตว์ต้องมีโภชนะอยู่ในระดับที่ใช้ดำรงชีพหรือมากกว่าเล็กน้อย โดยทั้งอาหารข้นและอาหารหยาบ ในอัตราส่วนของอาหารข้นต่ออาหารหยาบเท่ากับ 2:1 และมีปริมาณโปรตีนในสูตรไม่ต่ำกว่า 13 เปอร์เซ็นต์ ควรให้อาหาร 2 ครั้งต่อวัน โดยแต่ละมื้อควรห่างกันอย่างน้อย 8 ชั่วโมง (Madsen and Hvelplund, 1994)

8. **ระยะเวลาที่แช่ถุงไนล่อน** (timeing)

ระยะเวลาที่เหมาะสมในการแช่ถุงไนล่อนในกระเพาะหมัก เพื่ออธิบายอัตราการย่อยสลายได้ดีนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะของ degradation curve ที่จะเกิดขึ้น จึงไม่สามารถระบุช่วงเวลาที่เหมาะสมได้แน่ชัด ควรขึ้นอยู่กับประเภทของอาหารดังนี้

- อาหารโปรตีน (อาหารข้น) ระยะเวลาที่เหมาะสมคือ 2, 6, 12, 24 และ36 ชั่วโมง
- อาหารหยาบ ระยะเวลาที่เหมาะสมคือ 12, 24, 48 และ 72 ชั่วโมง (Ørskov, 1985)

2.6.1.2 **การทำนายปริมาณการกินได้ของวัตถุแห้ง** (dry matter intake, DMI) **ปริมาณวัตถุแห้งย่อยได้ที่สัตว์ได้รับ** (digestible dry matter intake, DDMI) **อัตราการเจริญเติบโต** (growth rate) **และดัชนีบ่งชี้คุณภาพ** (index value)

การทำนายปริมาณอาหารที่โคนมกินได้ ถือเป็นเป้าหมายสำคัญในระบบการให้อาหาร โดยที่การกินได้ของโคนมมีผลต่อการเคลื่อนที่ของ digesta ออกจากกระเพาะหมักขึ้นอยู่กับการย่อยอาหารและตัวโคนมที่จะลดปริมาณอาหารที่อยู่ในกระเพาะหมัก โดยทำให้มีขนาดเล็กลงและเดินทางผ่านกระเพาะไปยังทางเดินอาหารส่วนต่อไป (Carro *et al*., 1991) ส่วนประกอบของส่วนอาหารก็มีความสำคัญเช่นกัน ตัวอย่างเช่นในอาหารข้นที่มีคาร์โบไฮเดรทที่เป็นโครงสร้างของพืชสูง จะถูกหมักและสลายตัวได้ช้ากว่าอาหารประเภทอื่นๆ (Van Soest, 1975) สำหรับเยื่อใยที่ละลายในด่างเป็นตัวชี้วัดได้ว่ากระบวนการหมักและสลายตัวของอาหารเกิดขึ้นช้าๆ ได้เช่นกัน และส่วนที่ไม่ถูกย่อยในช่องว่างภายในกระเพาะหมักเหลือน้อยลง ซึ่งจะมีความสำคัญกับปริมาณอาหารที่กินและปริมาณในการเคี้ยว ซึ่งเป็นกลไกสำหรับลดขนาดของอาหารให้เล็กลงให้สามารถเดินทางผ่านทางเดินอาหารได้ต่อไป มีความเป็นไปได้ที่ลักษณะการย่อยได้ในกระเพาะหมักส่งผลให้อาหารส่วนที่เหลือมีความสัมพันธ์กับปริมาณที่กินได้ของโคนมและสามารถนำไปทำนายปริมาณอาหารที่โคกินได้อีกด้วย (Carro *et al.,* 1991)

Shem *et al*. (1995) ได้สร้างสมการสำหรับการทำนายค่าวัตถุแห้งที่กินได้ (dry matter intake, DMI) วัตถุแห้งย่อยได้ที่สัตว์ได้รับ (digestibility dry matter intake, DDMI) และอัตราการเจริญเติบโต (growth rate) จากลักษณะของการสลายตัวของอาหารหยาบเขตร้อน ซึ่งพบว่า ค่าสหสัมพันธ์ของการใช้ค่าพารามิเตอร์ A, B และ c ในสมการ multiple regression กับค่า DMI, DDMI และ growth rate มีค่าสูงทั้งนี้สมการที่ {2, 3, 4, 5} ได้เสนอไว้คือ

$$\text{DMI (Kg/d)} = -8.286 + 0.266A + 0.102B + 17.696c \qquad (2)$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

DDMI (Kg/d) = - 7.609 + 00.219A + 0.080B + 24.191c (3)

Growth rate = - 0.649 + 0.017A + 0.006B + 3.870c (4)

Index value = A + 0.38B + 66.5c (5)

2.6.2 การประเมินค่าพลังงานการย่อยได้และพลังงานโดยวิธีวัดปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้น (gas production technique)

การศึกษาการย่อยได้ในห้องปฏิบัติการ (*in vitro*) โดยวิธีการวัดปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นเป็นอีกวิธีการที่ได้รับความนิยม โดยอาศัยหลักการที่ว่า เมื่ออาหารถูกบ่ม (incubate) ในกระเพาะหมักจะได้ผลผลิตคือ แก๊สมีเทน (CH_4) แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และกรดไขมันที่ระเหยได้ (volatile fatty acids, VFA) ซึ่งมีสหสัมพันธ์กับการย่อยได้ของอาหารโคนม (Menke *et al.*, 1979) ลักษณะของการเกิดแก๊สที่กระเพาะหมักนั้น Beuvink and Kogut (1993) ได้อธิบายไว้ว่าแก๊สที่เกิดขึ้นแบ่งออกเป็น 3 ช่วงเวลาดังต่อไปนี้

1. ระยะ initial phase ระยะนี้เป็นระยะที่แก๊สเกิดขึ้นอย่างช้าๆ เนื่องจากอาหารส่วนที่ไม่ละลายในทันทีแต่จะถูกจุลินทรีย์เข้าย่อยสลายอย่างช้าๆ ด้วยกระบวนการ hydration และ colonization
2. ระยะ exponential phase แก๊สจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วในระยะนี้ เนื่องจากอาหารส่วนที่ละลายได้ทันทีในกระเพาะหมักถูกจุลินทรีย์เข้าย่อยอย่างรวดเร็ว
3. ระยะ asmptotic phase เป็นระยะซึ่งอาหารไม่ละลายทันทีจะถูกย่อย แต่จะย่อยได้น้อยและกระบวนการเกิดขึ้นได้ช้า

Menke and Steingass (1988) ได้พัฒนาวิธีการ *in vitro* gas production technique ขึ้นมาโดยยึดหลักคล้ายคลึงกับวิธีการที่เสนอโดย Tilley and Terry (1963) แต่ทั้งนี้มีความแตกต่างในรายละเอียดคือ เป็นการวัดปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นจากการบ่มอาหารตัวอย่างแทนที่การวัดปริมาณวัตถุแห้งและอินทรียวัตถุที่หายไปโดยนำค่าแก๊สที่วัดได้มาทำนายค่าการย่อยได้ของอินทรียวัตถุ (organic matter digestibility, OMD) และค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้ (metabolizable energy, ME) และค่าพลังงานสุทธิเพื่อการให้นม (net energy of lactation, NE_L) วิธีการนี้สามารถทำได้สะดวกรวดเร็ว สามารถทำได้ที่ละหลายๆ ตัวอย่าง และให้ข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อการศึกษามากกว่า

Pell and Schofield (1993) และ Dewhurst *et al.* (1995) ได้กล่าวว่า *in vitro* gas production technique เป็นวิธีที่มีความเหมาะสมในการศึกษากระบวนการย่อยสลายอาหาร (Kinetic of fermentation) ประเภทคาร์โบไฮเดรทได้ดีกว่าวิธี *in vitro* อื่นๆ นอกจากนี้ Theodorou *et al.* (1991) และ Pell and Schofield (1993) ได้ปรับปรุงวิธีวัดค่าแก๊สที่เรียกว่า pressue transducer technique เพื่อให้สะดวกต่อการวัดปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้น จากวิธีเดิมที่ใช้ตัวอย่างอาหารบ่มกับของเหลวจากกระเพาะหมักในหลอดที่คล้ายกับเข็มฉีดยาขนาด 100 มิลลิลิตร มาเป็นขวดทดลองที่ปิดด้วย butyl rubber ที่มีตัววัดที่ไวต่อแรงดันของแก๊สที่เกิดขึ้น (pressure senser) เชื่อมต่อเข้ากับระบบคอมพิวเตอร์ เมื่อมีแก๊สเกิดขึ้นก็จะถูกบันทึกไว้ ปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อปริมาณแก๊ส และความแม่นยำของการศึกษา โดยวิธี gas production technique นี้อาจมีได้หลายปัจจัย เช่น อุปกรณ์ เครื่องมือ การเตรียม

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

สารละลาย สภาวะไร้ออกซิเจนในการเก็บของเหลวที่ได้จากกระเพาะหมักและขณะทำการทดลองอุณหภูมิขณะบ่ม ระดับความร้อนที่ใช้ในการทำตัวอย่างให้แห้ง (drying temperature)

Blümmel and Ørskov (1993) ได้ปรับปรุงวิธีการหาค่าการย่อยได้โดยวิธีการวัดแก๊สด้วยการนำค่าแก๊สที่อ่านได้ที่ช่วงเวลาต่างๆ ใน 24 ชั่วโมงมาคำนวณด้วยสมการ $P = a + b (1 - e^{-ct})$ (Ørskov and McDonald, 1979) เพื่อนำมาอธิบายค่าการย่อยได้ที่เกิดจากกระบวนการหมักและยังพบว่า ปริมาณแก๊สที่เกิดขึ้นทั้งหมด (a+b) มีความสัมพันธ์กับปริมาณวัตถุแห้งที่กินได้ (dry matter intake, DMI) วัตถุแห้งย่อยได้ที่สัตว์ได้รับ (digestibility dry matter intake, DDMI) และอัตราการเจริญเติบโต (growth rate) ที่ได้จากการคำนวณด้วยสมการที่เสนอโดย Shem *et al*. (1995)

สำหรับสมการที่ {6, 7, 8} ใช้ในการทำนายค่าการย่อยได้ของอินทรียวัตถุ และพลังงานใช้ประโยชน์ได้นั้นเป็นดังนี้คือ (Menke and Steingass, 1988)

$$OMD\ (\%) = 9.00 + 0.9991GP + 0.0595XP + 0.0181\ XA \quad (6)$$

$$ME\ (MJ/Kg) = 1.06 + 0.157GP + 0.0084XP + 0.022XL - 0.0081XA \quad (7)$$

$$NE_L\ (MJ/Kg) = -0.36 + 0.1149GP + 0.0054XP + 0.0139XL - 0.0054XA \quad (8)$$

เมื่อ GP = ปริมาณแก๊ส (มิลลิลิตร) ที่เกิดขึ้นเมื่อ incubated 24 ชั่วโมง

XP = ปริมาณโปรตีน (g/Kg DM)

XL = ปริมาณลิกนิน (g/Kg DM)

XA = ปริมาณเถ้า (g/Kg DM)

2.6.3 การศึกษาการย่อยได้ของโภชนะในตัวสัตว์ (*in vivo* digestibility) **โดยวิธีการแบบดั้งเดิม** (conventional method)

หลักการโดยทั่วไปของการศึกษาการย่อยได้ของโภชนะในตัวสัตว์โดยวิธีการแบบดั้งเดิม คือ การศึกษาในโคทดลองที่มีอายุ ขนาดน้ำหนักตัวที่ใกล้เคียงกัน มีสุขภาพดี ไม่ตื่นตกใจง่าย ควรใช้โคทดลองมากกว่า 1 ตัว ทั้งนี้แม้ว่าจะเป็นสัตว์ชนิดเดียวกัน อายุและเพศเดียวกัน ก็อาจมีความสามารถในการย่อยแตกต่างกัน การมีจำนวนซ้ำมากจะทำให้ค่าที่ได้มีความแม่นยำมากขึ้น ยิ่งมีสัตว์ทดลองมากเท่าไรก็จะยิ่งให้ผลที่น่าเชื่อถือมากขึ้นเท่านั้น แต่อาจทำให้สิ้นเปลืองแรงงานและค่าใช้จ่ายมาก อย่างไรก็ตามพบว่าควรใช้โคทดลองอย่างน้อย 4 ตัว (บุญล้อม, 2540) วิธีการศึกษาการย่อยได้แบบนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ช่วง คือ

1. **ระยะการปรับตัว** (preliminary period) เป็นช่วงเวลาที่ให้สัตว์และจุลินทรีย์ภายในกระเพาะหมักได้ปรับตัวให้เข้ากับอาหารที่ศึกษา และเพื่อขับอาหารเดิมที่โคนมได้รับออกจากทางเดินอาหารได้หมด สำหรับโคนมควรให้เวลาสำหรับระยะนี้ประมาณ 10-14 วัน
2. **ระยะการเก็บข้อมูล** (collection period) เป็นช่วงเวลาสำหรับเก็บและบันทึกปริมาณอาหารที่สัตว์กินและมูลที่ขับออกมา โดยวิธีการสุ่ม และเก็บตัวอย่างที่สุ่มมา 5-10 เปอร์เซ็นต์ไว้ เพื่อวิเคราะห์องค์

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

ประกอบทางเคมีเพื่อนำไปคำนวณค่าการย่อยได้ต่อไป โดยทั่วไปใช้เวลาประมาณ 7-10 วัน หากจำกัดปริมาณอาหารที่ให้ (restrict feeding) และ 10-14 วัน หากมีการให้อาหารแบบเต็มที่ (*ad lib*)

หลังจากเสร็จขั้นตอนหลังจากเก็บตัวอย่างในช่วง collection period แล้ว นำตัวอย่างไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมี ปริมาณโภชนะที่มีในอาหารที่ศึกษาและในมูลที่โคนมขับออกมา เพื่อนำค่าที่ได้ไปคำนวณสัมประสิทธิ์การย่อยได้ของสมการที่ (9) ที่เสนอโดย บุญล้อม (2540)

$$\text{สัมประสิทธิ์การย่อยได้ของสมการ (\%)} = \frac{\text{โภชนะที่กินได้} - \text{โภชนะที่ขับออก}}{\text{โภชนะที่กิน}} \times 100 \quad (9)$$

2.6.4 **การศึกษาการย่อยได้ของโภชนะในตัวสัตว์** (*in vivo*) **โดยวิธีการใช้สารบ่งชี้** (indicator method)

การหาค่าการย่อยได้ของโภชนะของอาหารที่โคนมได้รับในกรณีที่ขาดเครื่องมือที่เหมาะสม ในสภาพการทดลองที่ไม่ทราบปริมาณอาหารที่กิน มูลที่ขับออกหรือต้องการทราบปริมาณโภชนะที่โคนมสามารถย่อยและใช้ประโยชน์ได้จริงที่ทางเดินอาหารส่วนต่างๆ โดยวิธีการแบบดั้งเดิม บางครั้งอาจทำได้ยากเนื่องจากต้องทราบปริมาณอาหารที่กินและมูลที่โคนมขับออกมาทั้งหมด วิธีการใช้สารบ่งชี้ (indicator or marker) ผสมรวมกับอาหารที่ศึกษาและใช้ปริมาณสารบ่งชี้ดังกล่าวเป็นตัวแปรในการคำนวณหาค่าการย่อยได้ก็เป็นวิธีการที่จะช่วยแก้ปัญหาเหล่านี้ได้ วิธีการหาค่าการย่อยได้ด้วยการใช้สารบ่งชี้คล้ายคลึงกับหาค่าการย่อยได้โดยวิธีการแบบดั้งเดิม

คุณสมบัติของสารบ่งชี้ (properties of markers)

โดยทั่วไปนั้นสารที่สามารถนำมาเป็นสารบ่งชี้ได้ต้องมีคุณสมบัติคือ ต้องเป็นสารที่ไม่ถูกย่อยสลาย ไม่ถูกดูดซึมหรือมีผลต่อระบบทางเดินอาหารอีกทั้งต้องไม่มีผลต่อประชากรจุลินทรีย์ภายในทางเดินอาหารของโคทดลอง และเมื่อผ่านทางเดินอาหารจะต้องเป็นเนื้อเดียวกับอาหารที่กำลังศึกษา มีอัตราการไหลผ่านที่ใกล้เคียงกันโดยเฉพาะเมื่อไหลผ่านกระเพาะหมักซึ่งมีความแปรปรวนของอัตราการไหลผ่านของอาหารอย่างมาก นอกจากนี้ยังต้องสามารถตรวจพบได้ง่ายเมื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณที่พบในอาหารหรือตัวอย่างทดลอง (Marais, 2000) สารบ่งชี้ที่ใช้ในการศึกษาการย่อยได้เมื่อผสมอาหารและให้โคทดลองกินแล้วจะต้องขับออกมาทั้งหมด (Omed, 1968 อ้างโดย Rymer, 2000)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

1. **ประเภทของสารบ่งชี้** (type of markers)

โดยทั่วไป สารบ่งชี้ที่ใช้เพื่อการศึกษาการย่อยได้ในตัวสัตว์ แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท คือ

1.1 Internal indicator เป็นสารหรือสารประกอบที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ โดยอาจอยู่ในอาหารที่สัตว์กิน หรือเป็นส่วนหนึ่งของพืชอาหารสัตว์ สารบ่งชี้ประเภทนี้มีข้อดีคือมีราคาถูก และสะดวกในการใช้งาน

เพราะมีอยู่ตามธรรมชาติ เหมาะสำหรับการศึกษาในสัตว์ป่าหรือสัตว์ที่เลี้ยงปล่อยแปลงซึ่งยากต่อการให้กินสารบ่งชี้ที่ผสมในอาหาร สารบ่งชี้ประเภทนี้ที่สำคัญได้แก่ ลิกนิน (lignin) โดยพบว่าสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมไม่มีเอมไซม์ที่สามารถสลายพันธะ polymerized phenolic compouds ของลิกนินได้ (Marais, 2000) การใช้ลิกนินเป็นสารบ่งชี้จะได้ผลดีถ้ามีลิกนินเป็นส่วนประกอบอยู่ในอาหารมากกว่า 6 เปอร์เซ็นต์ของวัตถุแห้ง (เทอดชัย, 2542) แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากลิกนินเป็นสารประกอบที่มีโครงสร้างซับซ้อนองค์ประกอบทางเคมีของมันอาจมีความหลากหลายทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของพืช ส่งผลให้ปริมาณที่กลับคืน (recovery rate) อาจไม่คงที่ทั้งนี้ขึ้นกับชนิดของอาหาร สารสีในพืช (plant chromogen) พบว่าสารชนิดนี้ไม่ถูกย่อยโดยจุลินทรีย์ในกระเพาะหมัก และเถ้าที่ไม่ละลายในกรด (acid insoluble ash, AIA) ส่วนใหญ่ได้แก่ซิลิก้า (silica) ซึ่งนิยมเพื่อใช้ในการศึกษาหาพลังงานใช้ประโยชน์ได้ (metabolizable energy) ในไก่ และการย่อยได้ในโคนม (Marais, 2000) การใช้เถ้าที่ไม่ละลายในกรดเป็นสารบ่งชี้อาจมีความคลาดเคลื่อน ในกรณีที่อาหารศึกษานั้นมีส่วนประกอบของดินหรือทรายปลอมปนมาด้วย

2.2 External indicator คือสารเคมีที่เทลงไปในอาหารทดลองโดยปกติการให้สารชนิดนี้แก่สัตว์นิยมให้ทางปาก ช่องเปิดบริเวณทางเดินอาหารสัตว์ต่างๆ (rumen fistula or intestine canulae) หรือให้โดยอุปกรณ์ควบคุมอัตโนมัติ (Marais, 2000) สารบ่งชี้ประเภทนี้อาจให้เป็นแบบครั้งหรือเป็นจังหวะ (single pulse dose) หรือให้อย่างต่อเนื่องตลอดช่วงของการทดลองทั้งนี้เพื่อให้ปริมาณของสารบ่งชี้ใน digesta มีความสม่ำเสมอและเป็นเนื้อเดียวกัน ช่วงเวลาสำหรับสัตว์ได้ปรับตัวเพื่อสารบ่งชี้ขับออกมากับมูลอย่างสม่ำเสมอขึ้นกับชนิดอาหารและสัตว์ทดลอง โดยปกติใช้เวลา 6 และ 8 วัน ในแกะและโคตามลำดับก่อนเริ่มเก็บตัวอย่าง (Marais, 2000) สารบ่งชี้ประเภทนี้ที่นิยมได้แก่ Chromium EDTA หรือ Polyethylene glycol ซึ่งเป็นสารบ่งชี้ชนิด soluble markers ที่นิยมใช้กันมาก สารประกอบประเภท metal oxides และ salts ซึ่งเป็นสารประกอบอินทรียที่ไม่ละลายน้ำ ได้แก่ โครเมียมออกไซด์ (Cr_2O_3) ไม่ละลายน้ำแต่ละลายได้เล็กน้อยในอัลคาไลน์และกรด นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายเพื่อวัดปริมาณมูลของสัตว์ทดลองที่ขับออกมา ให้โดยวิธีการผสมกับอาหารใส่ในแคปซูลเจลาตินหรืออุปกรณ์ควบคุมอัตโนมัติ สารบ่งชี้ประเภท external marker ซึ่งได้รับความนิยมอีกชนิดคือ ไททาเนียมออกไซด์ (TiO_2) มีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำและกรดเจือจาง ไม่ถูกดูดซึมโดยพืช ในแกะพบว่าไม่มีผลกระทบใดๆ แม้ว่าจะได้รับไททาเนียมออกไซด์ปริมาณ 2-3 กรัมต่อวัน นอกจากนี้ยังถูกขับออกมากับมูลได้เกือบหมด (98 % recovery) วิธีตรวจหาไททาเนียมออกไซด์ทำได้โดยใช้ Spectrophotometer หลังจากเกิดปฏิกิริยา oxidation กับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (Hydrogenperoxide) (Brandt *et al*, 1983)

การคำนวณค่าการย่อยได้ของโภชนะเมื่อศึกษาโดยวิธีการใช้สารบ่งชี้โดยสมการที่ (10) ที่เสนอโดย เทอดชัย (2540)

$$\text{ประสิทธิ์การย่อยได้ (\%)} = 100 - 100 \times \frac{\text{\% สารบ่งชี้ในอาหาร}}{\text{\%สารบ่งชี้ในมูล}} \times \frac{\text{\% โภชนะในมูล}}{\text{\% โภชนะในอาหาร}} \qquad (10)$$

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved