



ใบรับรองวิทยานิพนธ์
บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (โภชนศาสตร์และเทคโนโลยีอาหารสัตว์)

ปริญญา

โภชนศาสตร์และเทคโนโลยีอาหารสัตว์

สัตว์บาล

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การใช้กากถั่วเหลืองที่ผ่านการเอ็กซ์ทรูดเป็นแหล่งโปรตีนไหลผ่านในโคนม

Utilization of Extruded Soybean Meal as a Source of By-pass Protein in Dairy Cows

นามผู้วิจัย นายวัชร นิลเพชร

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์เลอชาติ บุญเอก, Ph.D.)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(รองศาสตราจารย์อุทัย กันโร, วท.ม.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์เสกสม อาตมางกูร, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญญา วีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การใช้กากถั่วเหลืองที่ผ่านการเอ็กซ์ทราดเป็นแหล่งโปรตีนไพลผ่านในโคนม

Utilization of Extruded Soybean Meal as a Source of By-pass Protein in Dairy Cows

โดย

นายวัชร นิลเพชร

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (โภชนศาสตร์และเทคโนโลยีอาหารสัตว์)

พ.ศ. 2553

ลิขสิทธิ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วัชร นิลเพชร 2553: การใช้กากถั่วเหลืองที่ผ่านการเอ็กซ์ทราคต์เป็นแหล่งโปรตีนไหลผ่านใน
โคนม ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (โภชนศาสตร์และเทคโนโลยีอาหารสัตว์)
สาขาโภชนศาสตร์และเทคโนโลยีอาหารสัตว์ ภาควิชาสัตวบาล อาจารย์ที่ปรึกษา
วิทยานิพนธ์หลัก: ผู้ช่วยศาสตราจารย์เลขาธิ บุญเอก, Ph.D. 116 หน้า

การศึกษาการใช้กากถั่วเหลืองที่ผ่านการเอ็กซ์ทราคต์เป็นแหล่งโปรตีนไหลผ่านในโคนม แบ่ง
ออกเป็น 3 การทดลอง การทดลองที่ 1 การทดสอบเบื้องต้นเพื่อศึกษาผลของการให้ความร้อนกากถั่วเหลือง
โดยการเอ็กซ์ทราคต์อย่างเดียวหรือเอ็กซ์ทราคต์ร่วมกับมันเส้นและไบมันสำปะหลังแห้งต่อการละลายได้ของ
โปรตีน กากถั่วเหลืองที่ใช้ในการทดลองได้แก่ กากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน และกากถั่วเหลืองบีบน้ำมัน ผลการ
ทดลองพบว่า การให้ความร้อนโดยการเอ็กซ์ทราคต์ทำให้ค่าดัชนีการละลายได้ของโปรตีนลดลงเมื่อ
เปรียบเทียบกับกากถั่วเหลืองที่ไม่ผ่านการเอ็กซ์ทราคต์ ในขณะที่การผสมไบมันสำปะหลังแห้งและมันเส้นกับ
กากถั่วเหลือง แสดงค่าดัชนีการละลายได้ของโปรตีน (PDI) ไม่แตกต่างจากกลุ่มที่ไม่ผสม

การทดลองที่ 2 ศึกษาเปรียบเทียบค่าการละลายและการย่อยสลายได้ในกระเพาะหมักของโปรตีน
รวม โดยใช้เทคนิคถุงในลอนในโคนมเจาะกระเพาะเพศผู้ 2 ตัว กากถั่วเหลืองทดลอง ได้แก่ กากถั่วเหลือง
สกัดน้ำมัน (SSBM) กากถั่วเหลืองบีบน้ำมัน (ESBM) กากถั่วเหลืองสกัดน้ำมันเอ็กซ์ทราคต์ (E-SSBM) กากถั่ว
เหลืองบีบน้ำมันเอ็กซ์ทราคต์ (E-ESBM) กากถั่วเหลืองสกัดน้ำมันเอ็กซ์ทราคต์ร่วมกับไบมันสำปะหลังแห้ง 5%
และมันเส้น 2.5% (E-SCLC) และกากถั่วเหลืองบีบน้ำมันเอ็กซ์ทราคต์ร่วมกับไบมันสำปะหลังแห้ง 5% และมัน
เส้น 2.5% (E-ECLC) พบว่าค่าประสิทธิภาพการย่อยสลายได้ของโปรตีนในกระเพาะหมักของกากถั่วเหลือง
เอ็กซ์ทราคต์ ประเมินที่อัตราการไหลออก 5% ต่อชั่วโมง มีค่าต่ำกว่า ($P < 0.05$) เมื่อเทียบกับกากถั่วเหลืองที่ไม่
ผ่านการเอ็กซ์ทราคต์ การผสมไบมันสำปะหลังแห้งร่วมกับมันเส้นมีผลทำให้ระดับโปรตีนรวมในวัตถุดิบลดลง
แต่ไม่มีผลต่อค่าประสิทธิภาพการย่อยสลายได้ในกระเพาะหมัก

การทดลองที่ 3 ศึกษาสมรรถภาพการผลิตของโคนมที่ได้รับอาหารชั้นที่มี SSBM, ESBM, E-SSBM
และ E-ESBM เป็นวัตถุดิบโปรตีนหลักในโครีดนม 20 ตัว ผลการทดลองพบว่าปริมาณการกินได้ ผลผลิต
และองค์ประกอบน้ำนม มีค่าแตกต่างกันอย่างไม่นัยสำคัญทางสถิติ แต่โคนมในกลุ่มที่ได้รับ SSBM มีค่า
ผลผลิตน้ำนมเฉลี่ยต่อตัวต่อวันต่ำกว่ากลุ่มอื่นๆ ประมาณ 10-15% ในขณะที่เดียวกันโคกลุ่มที่ได้รับ ESBM,
E-SSBM และ E-ESBM มีแนวโน้มรักษาระดับการให้น้ำนมตลอดการทดลองได้ดีกว่ากลุ่มที่ได้รับ SSBM

Watchara Ninphet 2010: Utilization of Extruded Soybean Meal as a Source of By-pass Protein in Dairy Cows. Master of Science (Animal Nutrition and Feed Technology),
Major Field: Animal Nutrition and Feed Technology, Department of Animal Science.
Thesis Advisor: Assistant Professor Lerchat Boonek, Ph.D. 116 pages.

Three experiments were conducted to study the utilization of extruded soybean meal as a source of by-pass protein in dairy cows. Experiment 1: preliminary study was conducted to evaluate effect of various bypass protein processing by using short barrel extruder on protein dispersibility index (PDI). The results showed that extrusion of soybean meal resulted in lower value of PDI than those of without extrusion. While extrusion of soybean meal mixed with dried cassava leaves meal and cassava chips meal showed similar PDI value as compared to unmixed soybean meal.

Experiment 2: the protein degradability of various processing soybean meals were evaluated by the *in sacco* nylon bag method using 2 rumen fistulated dairy bull. Experimental soybean meals were solvent extracted soybean meal (SSBM), expeller soybean meal (ESBM), extruded solvent extracted soybean meal (E-SSBM), extruded expeller soybean meal (E-ESBM), extruded solvent extracted soybean meal mixed with 5% dried cassava leaves meal and 2.5% cassava chips meal (E-SCLC) and extruded expeller soybean meal mixed with 5% dried cassava leaves meal and 2.5% cassava chips meal (E-ECLC). The results showed that effective degradability of the CP at 5% per h of solid out flow rates of extruded soybean meal was significant ($p<0.05$) lower in all group than those of soybean meal. The mixed dried cassava leaves and cassava chips resulted in lower CP content of the experimental diet however the effective degradability of CP was not different compared to the unmixed diet.

Experiment 3: the experiment was carried out to determine the effects of SSBM, ESBM, E-SSBM and E-ESBM as basal feed protein source on performance of 20 dairy cows. There were no significant difference of feed intake, milk yield and milk composition. However, the cows fed SSBM diet with low by-pass protein showed 10-15% lower average milk yield (kg/cow/day) compared to other groups. While the cows fed ESBM, E-SSBM and E-ESBM tended to maintain milk yield through out the experiment as compared to SSBM group.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เลอชาติ บุญเอก อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ที่ได้ให้การช่วยเหลือทางด้านการศึกษา การวางแผนงานวิจัย การทดลอง และขอทุนสนับสนุนงานวิจัย ตลอดจนให้คำปรึกษาแนะนำ ตรวจสอบและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอกราบขอบพระคุณรองศาสตราจารย์ อุทัย กัน โธ อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำ และช่วยตรวจสอบแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ข้าพเจ้าขอขอบพระคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่สนับสนุนงบประมาณสำหรับการทำวิจัย ขอขอบพระคุณคุณพรเทพ ธนกุลรังสฤษฎ์ เจ้าของห้างหุ้นส่วนลพบุรีบรรจุกภัณฑ์ จำกัด ที่ให้การสนับสนุนและคำแนะนำเกี่ยวกับเครื่องมือและอุปกรณ์ปั๊มน้ำมันขนาดเล็กด้วยเครื่องอัดเกลียวขนาดเล็ก รวมถึงให้ความอนุเคราะห์ดำเนินการปั๊มน้ำมันจากถั่วเหลืองไขมันเต็มเพื่อให้ได้กากถั่วเหลืองปั๊มน้ำมันสำหรับการทดลองโดยไม่คิดค่าใช้จ่ายจนสิ้นสุดการทดลอง ขอขอบคุณศูนย์วิจัยและพัฒนาการผลิตนม สถาบันสุวรรณวาลกกลกิจฯ ที่เอื้อเฟื้อสัตว์ทดลอง สถานที่ทำการทดลอง รวมทั้งอำนวยความสะดวก และให้คำปรึกษาแนะนำต่างๆ ขอขอบคุณศูนย์ค้นคว้าและพัฒนาวิชาการอาหารสัตว์ สถาบันสุวรรณวาลกกลกิจฯ และห้องปฏิบัติการวิเคราะห์อาหารสัตว์ ภาควิชาสัตวบาล คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ที่กรุณาให้ความช่วยเหลือในการวิเคราะห์ผลการทดลองต่างๆ และขอขอบคุณพี่ๆ น้องๆ เพื่อนๆ และผู้เกี่ยวข้องทุกๆ คนที่คอยเป็นกำลังใจและให้การช่วยเหลือการวิจัยครั้งนี้จนเสร็จสมบูรณ์ด้วยดี

ด้วยความดีหรือประโยชน์อันใดแห่งวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบแต่คุณพ่อทวี คุณแม่ประดับ นิลเพชร ผู้เป็นบิดามารดาอันประเสริฐของลูกๆ ทุกคนในครอบครัวที่ผลักดัน ให้ความรัก ความห่วงใย และกำลังใจมาโดยตลอด ขอขอบคุณ คุณวัชรินทร์ นิลเพชร พี่สาวผู้เป็นที่รัก ยิ่งและเสียสละเพื่อข้าพเจ้าตลอดมา ผู้ที่ทำให้ข้าพเจ้าได้มีโอกาสศึกษาระดับมหาวิทยาลัย จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ได้เกิดขึ้น ขอขอบพระคุณบูรพาจารย์ทุกท่านที่ได้ประสิทธิ์ประสาทวิชาและให้การอบรมสั่งสอนตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน โดยเฉพาะครูวิโรจน์ เรืองหนู ครูในดวงใจของข้าพเจ้า ตลอดกาล ผู้ล่วงลับไปแล้ว

วัชระ นิลเพชร

พฤษภาคม 2553

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการ	42
ผลและวิจารณ์	55
สรุปและข้อเสนอแนะ	83
สรุป	83
ข้อเสนอแนะ	85
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	86
ภาคผนวก	99
ภาคผนวก ก ลักษณะทางกายภาพภายนอกของกากถั่วเหลืองที่ผ่านการเอ็กซ์ทราค	100
ภาคผนวก ข กระบวนการบีบน้ำมันถั่วเหลือง	107
ภาคผนวก ค กระบวนการเอ็กซ์ทราคกากถั่วเหลือง	109
ภาคผนวก ง ดัชนีการละลายได้ของโปรตีน (Protein Dispersibility Index; PDI)	112
ประวัติการศึกษาและการทำงาน	116

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	คุณลักษณะในการย่อยสลายของโปรตีนในวัตถุดิบอาหารชั้น โปรตีนที่ไม่ถูกย่อยสลายในกระเพาะหมัก โดยเทคนิคถุงไนลอนและเทคนิคเอนไซม์	17
2	คุณลักษณะในการย่อยสลายของโปรตีนในถั่วเหลืองและถั่วลิสง และโปรตีนที่ไม่ถูกย่อยสลายในกระเพาะหมักโดยเทคนิคถุงไนลอน	27
3	ค่าการประเมินจากการถูกย่อยสลายได้ของโปรตีนกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน (SSBM) กากถั่วเหลืองทรีตด้วย backer' yeast (YSBM) กากถั่วเหลืองบีบน้ำมัน (ESBM) และกากถั่วเหลืองทรีตด้วยลิกโนซัลโฟเนต (LSBM)	31
4	ค่าการประเมินจากการถูกย่อยสลายได้ของโปรตีนกากถั่วเหลืองทั้ง 9 กรรมวิธี	34
5	ผลของการให้ความร้อนโดยการเอ็กซ์ทรูดกากถั่วเหลืองบีบน้ำมัน	35
6	องค์ประกอบทางเคมีของกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน	36
7	อิทธิพลของกากถั่วเหลืองและถั่วเหลืองไขมันเต็มที่ผ่านมาการอบในอาหารที่มีระดับโปรตีนต่างกัน 2 ระดับต่อประสิทธิภาพการผลิตของโคนม	39
8	การเปรียบเทียบถั่วเหลืองไขมันเต็มที่ผ่านมาและไม่ผ่านการอบ รวมทั้งการบดต่อประสิทธิภาพการผลิตของโคในช่วงให้นม	39
9	การทดสอบที่ 1 การเอ็กซ์ทรูดกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน (SSBM) ร่วมกับไขมันสำปะหลังแห้งที่ระดับต่างๆ แบ่งเป็น 3 กลุ่ม	43
10	การทดสอบที่ 2 การเอ็กซ์ทรูดกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน (SSBM) ร่วมกับไขมันสำปะหลังแห้งและมันเส้นที่ระดับต่างๆ แบ่งเป็น 6 กลุ่ม	44
11	การทดสอบที่ 3 การเอ็กซ์ทรูดกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน (SSBM) ร่วมกับไขมันสำปะหลังแห้งและมันเส้นที่ระดับต่างๆ โดยผันแปรด้วยความชื้น แบ่งเป็น 18 กลุ่ม	45
12	การทดสอบที่ 4 การเอ็กซ์ทรูดกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน (SSBM) และกากถั่วเหลืองบีบน้ำมัน (ESBM) โดยผันแปรด้วยความชื้นที่ระดับต่างๆ แบ่งเป็น 6 กลุ่ม	46
13	การทดสอบที่ 5 การเอ็กซ์ทรูดกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน (SSBM) และกากถั่วเหลืองบีบน้ำมัน (ESBM) ร่วมกับไขมันสำปะหลังแห้งและมันเส้นที่ระดับต่างๆ โดยกำหนดปริมาณน้ำที่ใส่เพิ่มเข้าไปในส่วนผสมวัตถุดิบอาหารอีก 15% แบ่งเป็น 14 กลุ่ม	47

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า	
14	ค่าดัชนีการละลายได้ของโปรตีนจากการทดสอบที่ 1 การเอ็กซ์ทรูดกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน (SSBM) ร่วมกับไขมันสำปะหลังแห้งที่ระดับต่างๆ แบ่งเป็น 3 กลุ่ม	55
15	ค่าดัชนีการละลายได้ของโปรตีนจากการทดสอบที่ 2 การเอ็กซ์ทรูดกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน (SSBM) ร่วมกับไขมันสำปะหลังแห้งและมันเส้นที่ระดับต่างๆ แบ่งเป็น 6 กลุ่ม	56
16	ค่าดัชนีการละลายได้ของโปรตีนจากการทดสอบที่ 3 การเอ็กซ์ทรูดกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน (SSBM) ร่วมกับไขมันสำปะหลังแห้งและมันเส้นที่ระดับต่างๆ โดยกำหนดความผันแปรด้วยความชื้น แบ่งเป็น 18 กลุ่ม	57
17	ค่าดัชนีการละลายได้ของโปรตีนจากการทดสอบที่ 4 การเอ็กซ์ทรูดกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน (SSBM) และกากถั่วเหลืองบีบน้ำมัน (ESBM) โดยกำหนดความผันแปรด้วยความชื้นที่ระดับต่างๆ แบ่งเป็น 6 กลุ่ม	58
18	ค่าดัชนีการละลายได้ของโปรตีนจากการทดสอบที่ 5 การเอ็กซ์ทรูดกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน (SSBM) และกากถั่วเหลืองบีบน้ำมัน (ESBM) ร่วมกับไขมันสำปะหลังแห้งและมันเส้นที่ระดับต่างๆ โดยกำหนดปริมาณน้ำที่ใส่เพิ่มเข้าไปในส่วนผสมวัตถุดิบอาหารอีก 15% แบ่งเป็น 14 กลุ่ม	59
19	คุณสมบัติของกากถั่วเหลืองที่ผ่านการเอ็กซ์ทรูดทั้ง 6 กลุ่ม จากการทดสอบเบื้องต้นเพื่อหากระบวนการผลิตโปรตีนไหลผ่านที่เหมาะสม	61
20	แสดงค่าการสลายตัวของวัตถุแห้งในโคเจาะกระเพาะหมักโดยใช้เทคนิคถุงไนลอน (%)	63
21	แสดงค่าการย่อยได้ของโปรตีนในโคเจาะกระเพาะหมักโดยใช้เทคนิคถุงไนลอน (%)	64
22	แสดงประสิทธิภาพการย่อยได้ของโปรตีนในอาหารทดลองในกระเพาะหมักของโคนมโดยใช้เทคนิคถุงไนลอน	65
23	สูตรอาหารขั้นที่ใช้ในการทดลองที่ 3	68
24	องค์ประกอบทางเคมีของอาหารทดลอง	69
25	กระบวนการหมักในกระเพาะหมักและค่าชีวเคมีในเลือด ภายหลังจากกินอาหาร 4 กลุ่ม ที่เวลาแตกต่างกัน	71
26	ค่าปริมาณกรดไขมันระเหยง่าย (กรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก และกรดบิวทิริก) ของของเหลวในกระเพาะหมักที่เวลา 0, 2 และ 4 ชั่วโมงหลังการให้อาหาร (%)	75

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่

หน้า

27 ผลผลิตและองค์ประกอบน้ำมันของโคนมที่ได้รับอาหารทดลองทั้ง 4 สูตร

79



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 โครงสร้างของโปรตีนและพันธะเปปไทด์	4
2 เส้นทางการใช้โปรตีนในสัตว์กระเพาะรวม	8
3 การเกิด maillard reaction ระหว่างน้ำตาลและไลซีนจากการให้ความร้อนในอาหารโปรตีน	19
4 ไดอะแกรมแสดงขั้นตอนการแยกน้ำมันถั่วเหลืองโดยกรรมวิธีต่างๆ	21
5 องค์ประกอบเครื่องเอ็กซ์ทราคเตอร์	22
6 การรวมตัวกันของแทนนินและโปรตีน	25
7 การป้องกันการสลายตัวของโปรตีนโดยแทนนินในกระเพาะหมัก และการสลายตัวของ tannin-protein complex ในกระเพาะแทะและลำไส้เล็กของสัตว์กระเพาะรวม	26
8 methylene cross linkage ของสารประกอบเมไธลอลระหว่างโปรตีนกับฟอร์มัลดีไฮด์	28
9 methylene cross linkage ของสารประกอบเมไธลอลระหว่างโปรตีนกับฟอร์มัลดีไฮด์	29
10 การคลายตัวของสารประกอบเมไธลอลทำให้เอนไซม์ protease เข้าย่อยโปรตีนได้	29
11 โปรตีนในแป้งที่เป็น gelatin จะละลายน้ำได้น้อยลง	33
12 ผลของอุณหภูมิต่อการละลายได้และการเสียดสภาพของโปรตีน	33
13 ปริมาณผลผลิตน้ำนมตลอดการทดลอง (กก./วัน)	81
ภาพผนวกที่	
ก 1 การทดสอบที่ 1	101
ก 2 การทดสอบที่ 2	102
ก 3 การทดสอบที่ 3 กลุ่มที่ 1 - 6	103
ก 4 การทดสอบที่ 3 กลุ่มที่ 7 - 12	104
ก 5 การทดสอบที่ 3 กลุ่มที่ 13 - 18	105
ก 6 การทดสอบที่ 4	106
ข 1 กระบวนการบีบน้ำมันถั่วเหลือง	108
ค 1 เครื่องเอ็กซ์ทราคเตอร์ที่ใช้ในการทดลองพร้อมองค์ประกอบ	110
ค 2 ขั้นตอนและวิธีการเอ็กซ์ทราคตจากถั่วเหลือง	111

สารบัญภาพ (ต่อ)

ภาพผนวกที่	หน้า
ง 1 แสดงอุปกรณ์ ขั้นตอน และวิธีการละลายโปรตีนในน้ำ	114
ง 2 แสดงขั้นตอน อุปกรณ์ และวิธีการวิเคราะห์หาไนโตรเจน (AOAC, 1990)	115



คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

ADF	=	acid detergent fiber
ADL	=	acid detergent lignin
BG	=	blood glucose
BUN	=	blood urea nitrogen
CF	=	crude fiber
CP	=	crude protein
CRD	=	Completely Randomized Design
DM	=	dry matter
EE	=	ether extract
E-ESBM	=	extruded- expellered soybean meal
ESBM	=	expellered soybean meal
E-SSBM	=	extruded- solvent extracted soybean meal
FCM	=	fat corrected milk
GE	=	gross energy
LSBM	=	lignosulfonate-treated soybean meal
NDF	=	neutral detergent fiber
NFC	=	non-fiber carbohydrate
NPN	=	non-protein nitrogen
PDI	=	protein dispersibility index
PRP	=	proline-rich protein
RCBD	=	Randomized Complete Block Design
RDP	=	rumen degradable protein
RPLM	=	ruminal protected lysine and methionine
RUP	=	rumen undegradable protein
SSBM	=	solvent extracted soybean meal
STHT	=	short-time high-temperature
TA	=	tannic acid
TDN	=	total digestible nutrient
TMR	=	total mixed ratio
VFA	=	volatile fatty acid
YSBM	=	SSBM treat with 0.05% backer' yeast

การใช้กากถั่วเหลืองที่ผ่านการเอ็กซ์ทรูดเป็นแหล่งโปรตีนไหลผ่านในโคนม

Utilization of Extruded Soybean Meal as a Source of By-pass Protein in Dairy Cows

คำนำ

ปัจจุบันการปรับปรุงพันธุ์กรรมของโคนม ทำให้แม่โคมีศักยภาพในการให้นมสูงขึ้น แต่โคเหล่านี้มักจะเกิดความเครียดเนื่องจากการเกิดเมแทบอลิซึมที่สูงทำให้เกิดความผิดปกติ (metabolic disorder) เช่น ketosis, acidosis ส่งผลให้มีสมรรถภาพการสืบพันธุ์และการผลิตต่ำลง ปัญหาของโคที่ให้นมสูงมักเกิดรุนแรงในช่วงต้นของการให้นม (ประมาณ 100 วันแรกของการให้นม) เพราะโคได้รับโภชนาโดยเฉพาะอย่างยิ่งพลังงานและโปรตีนไม่เพียงพอต่อความต้องการเพื่อดำรงชีพและสร้างน้ำนม ในกรณีของการขาดพลังงานมีการแนะนำให้เสริมไขมัน โดยเฉพาะอย่างยิ่งไขมันไหลผ่าน (by-pass fat) เพื่อป้องกันการย่อยโดยเอนไซม์จากจุลินทรีย์ในกระเพาะหมัก ส่วนกรณีของโปรตีน ควรทำให้โปรตีนคุณภาพดี เช่นกากถั่วเหลืองซึ่งเป็นวัตถุดิบอาหารโปรตีนจากพืชที่นิยมใช้กันมากถูกย่อยสลายในกระเพาะหมักลดลง เพื่อให้มีโปรตีนไหลผ่าน (by-pass protein) เพิ่มขึ้น ทำให้โคนมได้รับโปรตีนโดยตรง อีกทั้งการลดการย่อยสลายโปรตีนในกระเพาะหมักทำให้มีพลังงานถูกดูดซึมในทางเดินอาหารสูงขึ้น และลดการสูญเสียโปรตีนในรูปของแอมโมเนียอีกทางหนึ่งด้วย แต่การที่โปรตีนไหลผ่านจะใช้ประโยชน์ได้ดีเพียงใดนั้น ขึ้นอยู่กับความสามารถในการย่อยสลายและดูดซึมไปใช้ประโยชน์ที่ลำไส้เล็ก ถ้าโปรตีนไหลผ่านถูกย่อยด้วยเอนไซม์จากตัวสัตว์ได้มาก จะส่งผลให้มีกรดอะมิโนที่เป็นประโยชน์ต่อตัวสัตว์มากขึ้น อาหารที่มีโปรตีนไหลผ่านเพิ่มขึ้นจะทำให้โคนมได้รับโภชนาเพื่อการสังเคราะห์น้ำนมและโปรตีนในน้ำนมสูงขึ้นด้วย ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษากรรมวิธีการใช้กากถั่วเหลืองเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตในโคนมโดยการลดการสลายตัวของโปรตีนในกระเพาะหมัก

กากถั่วเหลือง (Soybean meal) เป็นวัตถุดิบอาหารโปรตีนจากพืชที่นิยมใช้เป็นอาหารสัตว์กันอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีกรดอะมิโนที่จำเป็นในปริมาณสูง และมีสัดส่วนของกรดอะมิโนค่อนข้างสมดุล แต่การใช้กากถั่วเหลืองเป็นอาหารโคนมนั้น โปรตีนจากกากถั่วเหลืองจะละลายและถูกย่อยสลายในกระเพาะหมักในปริมาณที่สูง ทำให้เกิดการสูญเสียไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนียที่เกิดจากกระบวนการหมักย่อยโดยจุลินทรีย์ การนำกากถั่วเหลืองมาผ่านกรรมวิธีให้ความร้อนโดยการเอ็กซ์ทรูดเป็นวิธีหนึ่งในการลดการถูกย่อยสลายของโปรตีนในกระเพาะหมัก เพื่อให้กากถั่วเหลืองเป็นแหล่งของโปรตีนไหลผ่านที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตโคนมต่อไป

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาหาค่าดัชนีการละลายได้ของโปรตีน (protein dispersibility index; PDI) ของกากถั่วเหลืองที่ผ่านการเอ็กซ์ทราดอย่างเดี่ยวหรือร่วมกับไขมันลำปะหลังแห้งและมันเส้นในระดับที่ต่างๆ กัน
2. เพื่อศึกษาเปรียบเทียบหาอัตราการย่อยสลายได้ในกระเพาะหมักของกากถั่วเหลืองที่ผ่านการเอ็กซ์ทราดโดยวิธีที่แตกต่างกัน
3. เพื่อศึกษาผลของการใช้กากถั่วเหลืองที่ผ่านการเอ็กซ์ทราดในอาหารโคนม ต่อการให้ผลผลิตของแม่โคนม

การตรวจเอกสาร

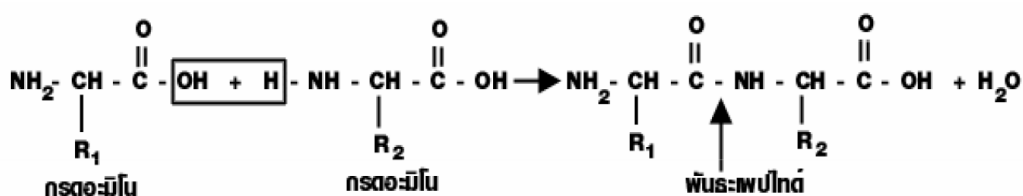
โปรตีน (protein)

โปรตีนเป็นสารอินทรีย์ที่มีความสำคัญเพราะเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของอวัยวะของสิ่งมีชีวิตโดยเฉพาะในกล้ามเนื้อของสัตว์จะมีโปรตีนเป็นองค์ประกอบอยู่สูงมาก ทุกๆ เซลล์ในร่างกายสามารถสังเคราะห์โปรตีนได้และหากไม่มีการสังเคราะห์โปรตีนก็ไม่สามารถอยู่รอดได้ ดังนั้นโปรตีนจึงในพบทุกๆ เซลล์ของสิ่งมีชีวิต สัตว์แต่ละชนิดจะมีรูปแบบในการสังเคราะห์โปรตีนแบบจำเพาะของตัวเอง และในพืชหรือพวกจุลชีพจะมีโปรตีนที่แตกต่างกันในแต่ละเซลล์ ดังนั้นจึงมีโปรตีนเกิดขึ้นมากมายในธรรมชาติ (ทรงศักดิ์, 2551)

โปรตีน หมายถึง สารชีวโมเลกุลที่ประกอบด้วยธาตุ คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) และไนโตรเจน (N) นอกจากนี้ยังมีสารอื่นๆ เป็นองค์ประกอบร่วมอยู่ด้วย เช่น กำมะถัน (S) ฟอสฟอรัส (P) เหล็ก (Fe) ไอโอดีน (I) และโคบอลต์ (Co) แต่มีอยู่ในปริมาณค่อนข้างน้อย องค์ประกอบอย่างคร่าวๆ ของโปรตีนคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ได้ดังนี้ (บุญล้อม, 2546)

C = 51-56 %	O = 21-23.5 %
H = 6.5-7.3 %	N = 15.5-18 %
S = 0.5-2.0 %	P = 0-1.5 %

โปรตีนเป็นสารอินทรีย์ที่มีโครงสร้างสลับซับซ้อน มีโมเลกุลใหญ่ มีน้ำหนักโมเลกุลสูง ประกอบด้วยกรดอะมิโนมาเรียงต่อกันด้วยพันธะเปปไทด์ (peptide bond) เกิดเป็นสายเปปไทด์ (peptide chain) โปรตีนแต่ละชนิดมีองค์ประกอบทางเคมี (chemical composition) น้ำหนักโมเลกุล การเรียงลำดับ และความยาวของกรดอะมิโนที่จำเพาะ (ทรงศักดิ์, 2551) โดยทั่วไปแล้วโปรตีนจะพบในทุกส่วนของร่างกาย ยกเว้นปัสสาวะและน้ำดี ร่างกายสัตว์ประกอบด้วยโปรตีนระหว่าง 12-16% หรือถ้าคิดหักน้ำ (water free) และน้ำกับไขมัน (water and fat free basis) ออกแล้ว ร่างกายจะประกอบด้วยโปรตีนถึง 50% และ 80% ตามลำดับ ซึ่งในกล้ามเนื้อจะพบมากที่สุด โดยพบว่าโปรตีนเป็นส่วนประกอบในกล้ามเนื้อถึงหนึ่งในสามของโปรตีนทั้งหมด (ทรงศักดิ์, 2551)



ภาพที่ 1 โครงสร้างของโปรตีนและพันธะเพปไทด์

ที่มา: บุญล้อม (2546)

โดยเฉลี่ยแล้วโปรตีนในอาหารทั่วไปจะมีธาตุไนโตรเจนอยู่ประมาณ 16% โดยน้ำหนัก ดังนั้นการวิเคราะห์หาโปรตีนในอาหารจึงวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจนจากนั้นจึงนำไปคำนวณหาปริมาณโปรตีน โดยคูณเปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนที่หาได้ด้วยค่า 6.25 (เนื่องจากโปรตีนมีธาตุไนโตรเจน 16% โดยน้ำหนัก เพราะฉะนั้นธาตุไนโตรเจนหนึ่งหน่วยจะมีค่าเท่ากับโปรตีน 6.25 หน่วย ซึ่ง 6.25 มาจาก 100 หารด้วย 16) (ทรงศักดิ์, 2551)

โปรตีนทั้งหมด (total protein) หมายถึงโปรตีนที่ประกอบด้วยโปรตีนแท้และไนโตรเจนที่ไม่ใช่โปรตีนแท้ หรือบางทีอาจเรียกว่าโปรตีนหยาบ (crude protein) เมื่อวิเคราะห์หาโปรตีนในอาหารจะวิเคราะห์หาโปรตีนหยาบโดยหาเปอร์เซ็นต์ไนโตรเจนทั้งหมดในอาหารแล้วคูณด้วย 6.25 ได้เป็นเปอร์เซ็นต์โปรตีนหยาบในอาหารนั้น (เมธา, 2533)

โปรตีนแท้ (true protein) หมายถึงโปรตีนที่มีกรดอะมิโนจับกันเป็นสายยาวโดยพันธะโควาเลนต์ ที่เรียกว่า พันธะเพปไทด์ (peptide bond) (เมธา, 2533)

ไนโตรเจนที่ไม่ใช่โปรตีนแท้ (non-protein nitrogen, NPN) หมายถึงไนโตรเจนที่ไม่ได้มาจากในส่วนของโปรตีนแท้ ซึ่งได้แก่ ยูเรีย ไบยูเรท เปปไทด์ เอมีน เอไมด์ ไนเตรท ไนไตรท์ (เมธา, 2533)

โปรตีนที่สามารถถูกย่อยสลายได้ในกระเพาะหมัก (rumen degradable protein, RDP) หมายถึงโปรตีนที่สามารถถูกย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์ที่อยู่ในกระเพาะหมัก หรือเนื่องจากความสามารถในการละลายในกระเพาะหมักสูง (soluble protein) เช่น ซีรัมอัลบูมิน เป็นต้น (เมธา, 2533)

โปรตีนที่ไม่สามารถถูกย่อยสลายในกระเพาะหมัก (rumen undegradable protein, RUP) หมายถึงโปรตีนที่ไม่สามารถถูกย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์ที่อยู่ในกระเพาะหมัก ซึ่งเกิดจากโครงสร้างของโปรตีนเองทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถเข้าย่อยได้ แต่โปรตีนชนิดนี้สามารถย่อยได้ที่ลำไส้เล็กของสัตว์กระเพาะรวมและถูกนำไปใช้ประโยชน์ได้ บางทีเรียกโปรตีนชนิดนี้ว่าโปรตีนไพลผ่าน (by pass protein หรือ escape protein) นอกจากนี้ยังมีอีกคำหนึ่งที่มีความหมายใกล้เคียงกันคือ protected protein ซึ่งหมายถึงการป้องกันการย่อยสลายในกระเพาะหมักในวัตถุดิบอาหารประเภทโปรตีนโดยอาจใช้ความร้อนหรือสารเคมีก็ได้ (เมธา, 2533)

โปรตีนที่สามารถละลายได้ (soluble protein) หมายถึงโปรตีนที่สามารถละลายได้ในของเหลวในกระเพาะหมัก เช่น ซีรัมอัลบูมิน โดยโปรตีนที่ละลายได้จะถูกย่อยสลายได้ง่ายกว่าโปรตีนที่ไม่สามารถละลายได้ (กฤตพล, 2543)

โปรตีนที่ไม่สามารถละลายได้ (insoluble protein) เป็นโปรตีนที่ไม่สามารถละลายได้ในของเหลวในกระเพาะหมัก ซึ่งประกอบด้วยโปรตีนที่สามารถย่อยสลายได้โดยจุลินทรีย์และโปรตีนที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ (กฤตพล, 2543)

หน้าที่ของโปรตีน (protein function)

สัตว์ต้องการโปรตีนเพื่อการเจริญเติบโต สืบพันธุ์ ให้นม และไข่ นอกจากนี้ยังใช้ทดแทนส่วนที่สึกหรอ โปรตีนจึงมีหน้าที่หลายประการในร่างกายดังนี้ (ทรงศักดิ์, 2551 และบุญล้อม, 2546)

1. เป็นส่วนประกอบของโครงสร้างร่างกาย เช่น กล้ามเนื้อ ผิวหนัง ผม ขน เล็บ จะย่อยปาก กระดูกอ่อน และกีบเท้า
2. ใช้ในการสังเคราะห์สารเคมีต่างๆ ที่จำเป็นต่อร่างกาย เช่น เอนไซม์ และฮอร์โมน ได้แก่ เอนไซม์ในทางเดินอาหาร ฮอร์โมนอินซูลิน โกรทฮอร์โมน โกรนาโดโทรปินฮอร์โมน พาราไทรอยด์ฮอร์โมน และแคลซิโตนิน
3. รักษาแรงดันออสโมติก (osmotic pressure) เช่น โปรตีนในเลือด ได้แก่ อัลบูมิน และกลอบูลิน ซึ่งช่วยรักษาแรงดันออสโมติกในเลือดตลอดจนการดูดซึมน้ำเข้าและออกจากเลือด

4. ช่วยขนส่งสารต่างๆ เช่น ฮีโมโกลบิน (hemoglobin) ซึ่งช่วยในการขนส่งออกซิเจน และไลโปโปรตีน (lipoprotein) ซึ่งช่วยในการขนส่งวิตามินที่ละลายได้ในไขมัน

5. ช่วยในการแข็งตัวของเลือด เช่น ไฟบริโนเจน (fibrinogen, thromboplastin)

6. ช่วยป้องกันสิ่งแปลกปลอมจากภายนอก หรือระบบภูมิคุ้มกันของร่างกาย เช่น อิมมูโนโกลบูลินในเลือด

7. เป็นแหล่งสะสมอาหารสำหรับตัวอ่อนหรือลูกสัตว์ เช่น โอวัลบูมิน (ovalbumin) ในไข่ขาว และไวเทลลิน (vitellin) ในไข่แดง หรือเคซีนในน้ำนม เป็นต้น

8. สามารถให้พลังงานแก่ร่างกายได้ แต่มีประสิทธิภาพน้อยกว่าไขมันและคาร์โบไฮเดรต

คุณภาพของโปรตีน

โดยทั่วไปจะมีการพิจารณาจากการย่อยได้รวมทั้งปริมาณและสัดส่วนของกรดอะมิโนที่จำเป็น (essential amino acid pattern) ทั้งนี้เพราะเมื่อโปรตีนถูกย่อยและถูกดูดซึมเข้าไปในร่างกาย สัตว์จะสามารถนำกรดอะมิโนไปใช้เพื่อการสร้างโปรตีนในร่างกายได้ แต่ถ้าโปรตีนชนิดนั้นย่อยได้ยาก อีกทั้งมีสัดส่วนของกรดอะมิโนที่จำเป็นไม่เหมาะสมกับความต้องการของสัตว์ โดยขาดตัวใดตัวหนึ่งหรือหลายตัว ก็จะทำให้สัตว์ไม่สามารถนำกรดอะมิโนตัวอื่นๆ ไปใช้สร้างโปรตีนได้ (บุญล้อม, 2546) ระบบของการย่อยอาหารของสัตว์กระเพาะรวมจะแตกต่างกับสัตว์กระเพาะเดี่ยวมากที่สุดตรงกระเพาะ โดยอาหารส่วนใหญ่ของสัตว์กระเพาะรวมจะประกอบด้วย ดิน และใบของพืชเป็นส่วนใหญ่ มีเยื่อใยสูง ซึ่งเอนไซม์จากสัตว์กระเพาะเดี่ยวไม่สามารถย่อยได้ แต่ถูกย่อยได้ด้วยเอนไซม์จากจุลินทรีย์ ดังนั้น ทางเดินอาหารของสัตว์กระเพาะรวมจึงมีลักษณะที่เอื้อต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ (บุญล้อม, 2541)

ความสำคัญของโปรตีนในสัตว์กระเพาะรวม

โปรตีนมีความสำคัญเป็นอันดับสองรองจากพลังงาน โปรตีนมีความสำคัญมากในโคระยะรุ่นหรือกำลังเจริญเติบโต ระยะตั้งท้อง และระยะให้นมลูก เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของเอนไซม์ ฮอร์โมน น้ำเมือก ขน กีบ และเนื้อเยื่อ มีความสำคัญต่อการซ่อมแซมเนื้อเยื่อที่สึกหรอของร่างกาย เป็นสารอาหารที่ทำให้ร่างกายเจริญเติบโตเป็นปกติ ในลูกโคถ้าได้รับโปรตีนไม่เพียงพอลูกโคจะ

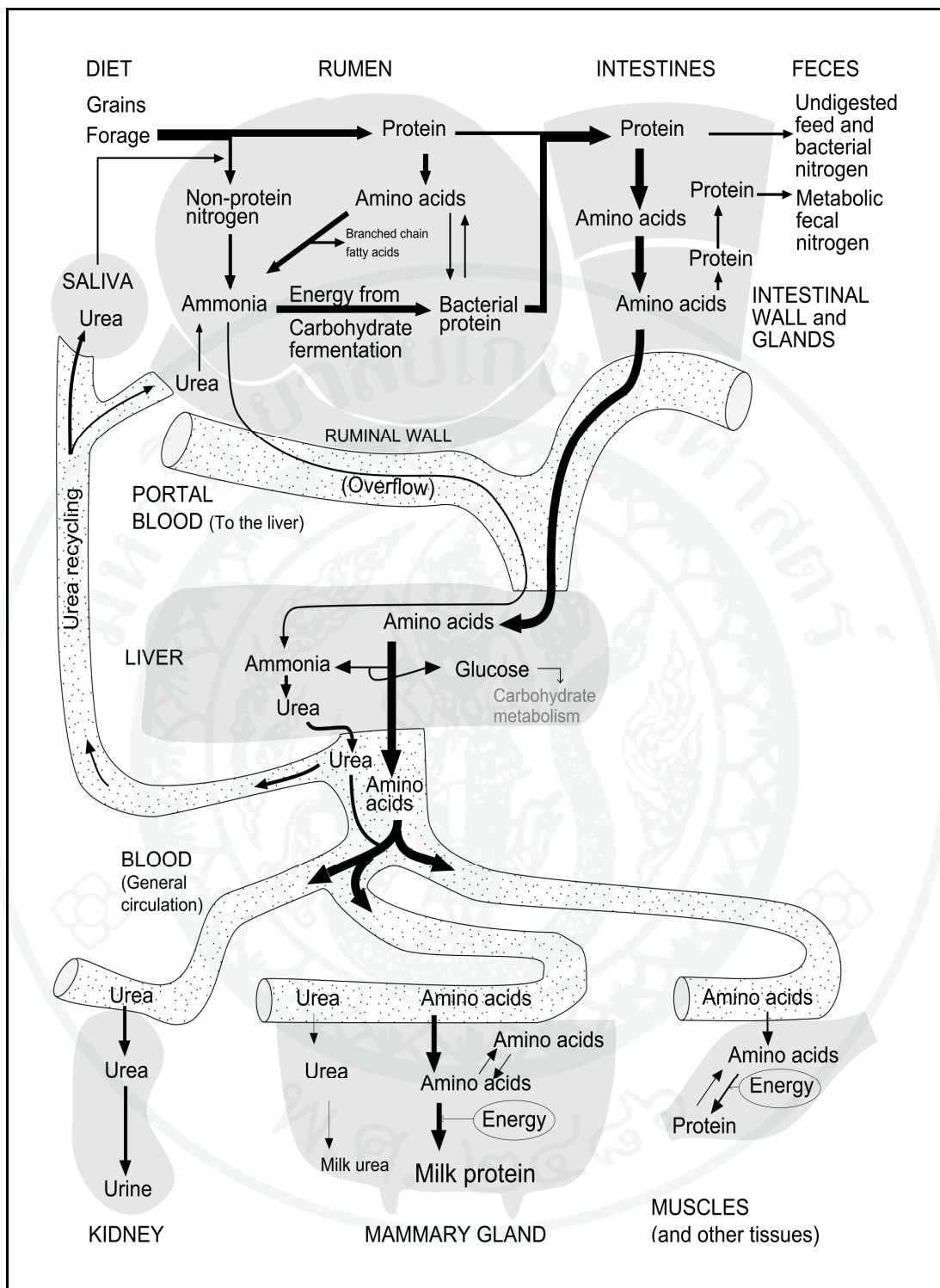
แคะแกร็น อ่อนแอ ระดับโปรตีนที่แม่โคได้รับมีความสัมพันธ์กับปริมาณการให้ผลผลิตน้ำนม นอกจากนี้ระบบภูมิคุ้มกันของร่างกายจะลดลงถ้าโคได้รับอาหารที่มีโปรตีนต่ำติดต่อกันเป็นระยะเวลานาน

ผลเสียหายทางเศรษฐกิจจากการให้โปรตีนที่เกินความต้องการ ทำให้สิ้นเปลืองเงินต้นทุนการผลิต และยังทำให้เกิดปัญหาหมกภาวะเป็นพิษอันเนื่องจากระดับไนโตรเจนที่มากเกินไปถูกขับออกมาทางมูลลงสู่สิ่งแวดล้อม (NRC, 1978; 2000) ข้อเสียอีกประการหนึ่งคือในการกำจัดของเสีย (ไนโตรเจน) ออกจากร่างกายสัตว์จะต้องใช้พลังงานเพื่อการกำจัดแอมโมเนีย และขับถ่ายออกในรูปของยูเรียทางปัสสาวะ นอกจากนี้แล้วหากโคได้รับสารประกอบที่ไม่ใช่โปรตีนมากเกินไปจะเกิดเป็นพิษได้ กรณีที่ให้ระดับโปรตีนหยাবเกิน 20% ของอาหารสูตรรวม มีผลทำให้ตับทำงานมากและมีระดับไนโตรเจนในเลือดมากเกินไป (19 มก.%) มีผลทำให้ฮอร์โมนโปรเจสเตอโรนในเลือดลดลงมากซึ่งส่งผลให้อัตราการผสมติดและการตั้งท้องลดลง (Butler, 1998; Carroll *et al.*, 1988; Howard *et al.*, 1987)

ผลของการขาดโปรตีนมีผลทำให้ระบบภูมิคุ้มกันโรค ฮอร์โมนและโปรตีนในเลือดต่ำ ป่วยง่าย บาดแผลหายช้า รวมถึงขน กีบเท้า จะหยาบกร้าน แคะแกร็น และอัตราการเจริญเติบโตต่ำ (NRC, 1996) การขาดโปรตีนมีผลทำให้ประสิทธิภาพการย่อยของจุลินทรีย์ในกระเพาะหมักลดลงซึ่งส่งผลกระทบต่อการใช้ประโยชน์ได้ของพลังงานลดต่ำลงด้วย (ARC, 1984) นอกจากนี้แล้วการขาดโปรตีนในโคที่กำลังตั้งท้องจะมีผลชะงักการเจริญเติบโตของลูกโคในท้อง ทำให้ลูกโคตัวเล็ก และอ่อนแอเมื่อคลอด ถ้าขาดโปรตีนรุนแรงลูกโคแรกเกิดอาจตายหรือมีการแท้งลูกก่อนกำหนด มีอัตราการตายสูง อัตราการเจริญเติบโตของลูกจะลดลง ส่วนในโครีคนมมีผลทำให้น้ำนมลดลง เปอร์เซ็นต์เนื้อนม (total solid) กับโปรตีนนมลดลง และถ้าโคขาดอาหารโปรตีนรุนแรงในช่วงแรกของการให้น้ำนม โคจะซูบผอม ไม่สามารถเพิ่มน้ำนมได้ (NRC, 1996; NRC, 2001) ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อสมรรถภาพการสืบพันธุ์ (ทรงศักดิ์, 2551)

การย่อยสลายและการใช้ประโยชน์ของโปรตีนในโคนม

การย่อยสลายและการใช้ประโยชน์ของโปรตีนในโคนมซึ่งเป็นสัตว์กระเพาะรวมมีความแตกต่างจากสัตว์ไม่กระเพาะรวมในส่วนของการย่อยสลายซึ่งจะมีจุลินทรีย์อยู่ช่วยในการย่อยสลาย ให้ได้ผลผลิตสุดท้ายต่างๆ (end products) เพื่อใช้ประโยชน์ต่อไป ดังภาพการย่อยสลายและการใช้ประโยชน์ของโปรตีนในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 เส้นทางการใช้โปรตีนในสัตว์กระเพาะรวม

ที่มา: Michel (2002)

การย่อยสลายโปรตีนโดยจุลินทรีย์ในกระเพาะหมัก

จุลินทรีย์ที่เข้าย่อยสลายโปรตีนในกระเพาะหมักที่สำคัญได้แก่ แบคทีเรีย (Bach *et al.*, 2005) แต่อย่างไรก็ตามมีหลักฐานยืนยันว่าโปรโตซวาก็สามารถเข้าย่อยสลายโปรตีนได้เช่นเดียวกัน แต่สำหรับเข็รยั้งมีความไม่ชัดเจนว่าสามารถเข้าย่อยโปรตีนได้หรือไม่ การเข้าย่อยสลายโปรตีนในกระเพาะหมักต้องอาศัยสภาวะที่เหมาะสม เช่นจุลินทรีย์ต้องทำงานภายใต้สภาวะไร้ออกซิเจน (Tamminga, 1979) และสภาพความเป็นกรดค้างที่เหมาะสม ซึ่งอยู่ระหว่าง 6.3 - 7 (เมธา, 2533) มีปัจจัยหลายประการที่มีอิทธิพลต่อการย่อยสลายโปรตีน เช่น ความสามารถในการละลายได้ของโปรตีน โดยโปรตีนที่ละลายได้ (soluble protein) จะถูกย่อยสลายได้ง่ายกว่าโปรตีนที่ไม่สามารถละลายได้ (insoluble protein) (Russell *et al.*, 1999) ความแตกต่างทางด้านโครงสร้างของโปรตีน เช่นพันธะไดซัลไฟด์ การขาดอาหาร อัตราการหมุนเวียนอาหาร (turn over rate) การคงอยู่ของอาหารในกระเพาะหมัก (retention time) และความแตกต่างระหว่างตัวสัตว์ จุลินทรีย์ที่่อยสลายโปรตีนในกระเพาะหมักมี 3 กลุ่มหลักๆ คือ แบคทีเรีย โปรโตซัว และรา

การย่อยสลายโปรตีนโดยแบคทีเรีย

แบคทีเรียเป็นจุลินทรีย์ที่มีจำนวนมากที่สุดในกระเพาะหมัก โดยมีประมาณ 10^{10} - 10^{11} เซลล์ต่อมิลลิลิตร ดังนั้นแบคทีเรียจึงมีบทบาทสำคัญในการย่อยสลายโปรตีน (NRC, 2001) หลังจากทีสัตว์กระเพาะรวมกินอาหารที่มีโปรตีนเข้าไปแบคทีเรียที่อยู่ในกระเพาะหมักจะเข้าย่อยโปรตีน โดยแบคทีเรียกลุ่มที่่อยโปรตีน ได้แก่ *Bacteroides amylophilus*, *Clostridium sporogens*, *Prevotella (Bacteriodes) ruminicola*, *Bacteriodes fibrisolvents*, *Bacillus inchefermis*, *Eubacterium ruminantium*, *Fusobacterium sp.*, *R. amylophilus*, *S. ruminantium* และ *S. bovis* เป็นต้น แต่แบคทีเรียกลุ่มที่่อยโปรตีนที่พบในกระเพาะหมักโดยส่วนมากจะเป็นพวก *P.ruminicola* โดยมีมากกว่า 60% แต่ในสัตว์บางชนิด *B. fibrisolvent* จะมีบทบาทในการย่อยสลายโปรตีนมากกว่าชนิดอื่นโดยเฉพาะเมื่อสัตว์ได้รับอาหารที่มีโปรตีนที่ไม่สามารถย่อยสลายในกระเพาะหมักในระดับสูง (ทรงศักดิ์, 2551)

การเข้าย่อยโปรตีนขั้นแรกแบคทีเรียจะเข้าจับกับอนุภาคอาหารซึ่งในกระเพาะหมักจะมีจุลินทรีย์ที่เกาะอยู่กับอาหารประมาณ 70 - 80% และประมาณ 30 - 50% ของจุลินทรีย์ที่เกาะอยู่กับอนุภาคอาหารจะสามารถย่อยสลายโปรตีนได้ (Bach *et al.*, 2005) แบคทีเรียที่จับอยู่กับอนุภาคอาหารจะหลั่งเอนไซม์ที่่อยโปรตีน (protease) ออกมานอกเซลล์และเข้าย่อยโปรตีน โดยขั้นตอนแรกการเข้าย่อยจะเริ่มจากสายโซ่โพลีเปปไทด์ของโปรตีนทำให้สายโซ่โพลีเปปไทด์แตกออกเป็น

เปปไทด์สายสั้นๆ และกรดอะมิโน ซึ่งกระบวนการนี้เรียกไฮโดรไลซิสซึ่งเกิดภายนอกเซลล์ของแบคทีเรีย หลังจากนั้นแบคทีเรียจะดูดซึมเปปไทด์สายสั้นๆ และกรดอะมิโนเข้าสู่เซลล์ของแบคทีเรีย และทำการย่อยสลายต่อจนได้เป็นกรดอะมิโน จากนั้นกรดอะมิโนจะถูกดีเอมีเนชัน (deamination) จนได้เป็นแอมโมเนีย คาร์บอนไดออกไซด์ ความร้อน และกรดไขมันที่ระเหยง่ายที่มีกิ่งก้าน ซึ่งสิ่งเหล่านี้เรียกผลผลิตสุดท้าย (end product) ผลผลิตสุดท้ายจะถูกขับออกมานอกเซลล์ของแบคทีเรียกลับเข้าสู่ของเหลวในกระเพาะหมัก แอมโมเนียบางส่วนถูกดูดกลับเข้าสู่เซลล์ของแบคทีเรียเพื่อใช้ในการสังเคราะห์โปรตีนของจุลินทรีย์โดยรวมกับคีโตแอซิก (keto acid) ที่เกิดจากการย่อยสลายคาร์โบไฮเดรต (ทรงศักดิ์, 2551)

การย่อยสลายโปรตีนโดยโปรโตซัว

โปรโตซัวในกระเพาะหมักมีจำนวนมากเป็นอันดับสองรองจากแบคทีเรีย โดยมีประมาณ 10^5 - 10^6 เซลล์ต่อมิลลิลิตร (NRC, 2001) โปรโตซัวในกระเพาะหมักมีสองจำพวกใหญ่ๆ คือ พวกที่มีซิเลีย (ciliated protozoa) และพวกที่มีแฟลกเจลล่า (flagellated protozoa) ชนิดหลังนี้จะพบเฉพาะในสัตว์วัยอ่อนหรือสัตว์แรกเกิดเท่านั้น (เมธา, 2533) โปรโตซัวมีขนาดใหญ่กว่าแบคทีเรียมากและสามารถมองเห็นได้ด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดธรรมดา โปรโตซัวที่สามารถย่อยสลายโปรตีนเรียกโปรตีโอไลติกโปรโตซัว (proteolytic protozoa) ซึ่งมีอยู่หลายชนิด เช่น *Ophryoscolex spp.*, *Endodinium caudatum* และ *Eundiplodinium* โปรโตซัวที่มีซิเลียมินิย่อย protease หลายชนิด แต่ที่สำคัญที่สุดคือ ซิสเตอีน โปรตีเอส (cystein protease) และแอสปาดิก โปรตีเอส (aspartic protease) (Forsberg *et al.*, 1984) โปรโตซัวจะไม่เข้าย่อยสลายโปรตีนที่ละลายได้ง่ายเหมือนแบคทีเรียแต่โปรโตซัวในกระเพาะหมักส่วนใหญ่จะอาศัยแหล่งไนโตรเจนจากการกลืนกินแบคทีเรีย (engulf) และอาหารที่มีอนุภาคเล็กๆ ถึงแม้โปรโตซัวจะมีน้ำย่อยโปรตีเอสที่หลั่งออกมานอกเซลล์และอยู่ในเซลล์ แต่กิจกรรมการย่อยสลายโปรตีนของโปรโตซัวส่วนมากมักเกิดภายในเซลล์ของโปรโตซัว ซึ่งกรดอะมิโนที่ได้จากการย่อยสลายภายในเซลล์จะถูกขับออกมานอกเซลล์เข้าสู่ของเหลวในกระเพาะหมักมากกว่าที่จะสลายต่อไป จากสาเหตุที่โปรโตซัวใช้แหล่งไนโตรเจนโดยการกลืนกินแบคทีเรียนี้เองทำให้มีนักวิจัยพยายามที่จะกำจัดโปรโตซัวออกจากกระเพาะหมัก (defaunation) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ไนโตรเจน (ทรงศักดิ์, 2551)

การย่อยสลายโปรตีนโดยรา

ราที่อยู่ในกระเพาะหมักเป็นกลุ่มที่ไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic fungi) บทบาทหลักของราจะช่วยลดการจับยึดแน่นของอนุภาคอาหาร ราในกระเพาะหมักมีวงจรชีวิต 2 ระยะด้วยกันคือ ระยะ

ที่เคลื่อนที่ได้โดยมีหางในการโบกพัด (motile flagellated zoospore) และระยะที่หยุดการเคลื่อนที่ (non-motile vegetative หรือ reproductive phase) จะมีไรซอยด์ (rhizoid) ทำหน้าที่คล้ายรากของต้นไม้และจะแทงเข้าไปในเนื้อเยื่อของพืชและสามารถนำคาร์บอนมาใช้ได้ (ฉลอง, 2541) ส่วนบทบาทในการย่อยสลายโปรตีนนั้นพบว่าเราสามารถหลั่งเอนไซม์เมททอลโลโปรตีเอส (metalloprotease) ออกมานอกเซลล์ได้ (Wallace, 1994) แต่มีระดับต่ำมากในกระเพาะหมัก และโดยส่วนมากเราจะไม่มีเอนไซม์โปรตีเอสที่หลั่งออกมาย่อยโปรตีน ดังนั้นความต้องการไนโตรเจนและการเข้าย่อยสลายแหล่งไนโตรเจนในเชื้อราจึงควรมีการศึกษาต่อไป

กลไกการย่อยสลายโปรตีนในกระเพาะหมัก

แหล่งของไนโตรเจนที่ใช้ในการสังเคราะห์โปรตีนของจุลินทรีย์ในกระเพาะหมักมาจาก 3 แหล่ง คือ โปรตีนที่ถูกย่อยสลายในกระเพาะหมัก ไนโตรเจนที่ไม่ใช่โปรตีนแท้ และไนโตรเจนที่มาจาก การหลุดลอกของทางเดินอาหาร และยังมีส่วนที่หมุนเวียนกลับมาใช้ใหม่ของไนโตรเจน (endogenous recycle) โปรตีนที่เข้าสู่กระเพาะหมักจะถูกย่อยสลายโดยแบคทีเรียและโปรโตซัว (Timminga, 1979) แบคทีเรียเป็นจุลินทรีย์ที่มีบทบาทอย่างมากในการย่อยโปรตีนในกระเพาะหมัก นอกจากนี้โปรโตซัวและราบางชนิดก็สามารถผลิตเอนไซม์มาย่อยโปรตีน เปปไทด์ หรือทำให้เกิดกระบวนการดีเอมีเนชัน (deamination) ซึ่งเอนไซม์เหล่านั้นได้แก่ โปรตีเอส (protease) เปปติเดส (peptidase) ดีเอมีเนส (deaminase) แต่โปรโตซัวและรา มีบทบาทน้อยกว่าแบคทีเรีย (Broderick *et al.*, 1991; Wallace, 1996) อาหารโปรตีนที่เข้าสู่กระเพาะหมักจะมีกลไกการถูกย่อยสลายถึงสองขั้นตอน

ขั้นตอนแรกจุลินทรีย์ที่อยู่ในกระเพาะหมัก โดยเฉพาะแบคทีเรียจะทำหน้าที่ผลิตเอนไซม์เข้าย่อยสลายโปรตีน กิจกรรมของจุลินทรีย์นั้นแตกต่างกันออกไป ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดและลักษณะของอาหาร (Bach *et al.*, 2005) ระดับความเป็นกรดต่างของกระเพาะอาหาร ถ้าระดับของแอมโมเนียในกระเพาะหมักต่ำจะทำให้การย่อยสลายของโปรตีนสูงขึ้น ส่วนความเป็นกรดที่เหมาะสมของการเข้าย่อยสลายโปรตีนจะอยู่ระหว่าง 6 - 7 แต่ความเป็นกรดต่ำไม่ได้มีผลทำให้กิจกรรมของจุลินทรีย์ในการเข้าย่อยสลายโปรตีนต่างกัน (Ørskov, 1992) โปรตีนจะถูกไฮโดรไลซ์ได้เป็นเปปไทด์และกรดอะมิโน ในขั้นตอนนี้เกิดขึ้นภายนอกเซลล์ของจุลินทรีย์

ขั้นตอนที่สองกรดอะมิโนและเปปไทด์ที่เกิดจากการย่อยสลายภายนอกเซลล์จะถูกดูดซึมเข้าสู่เซลล์ของจุลินทรีย์ เปปไทด์จะถูกย่อยสลายต่อโดยเอนไซม์เปปติเดส (peptidase) ซึ่งมีหลายตัว ได้แก่ ไดเปปติดีลเปปติเดส (dipeptidylpeptidase) ไตรเปปติเดส (tripeptidase) และไดเปปติเดส (dipeptidase) ได้เป็นกรดอะมิโน หลังจากนั้นกรดอะมิโนจะถูกนำไปสังเคราะห์โปรตีนของจุลินทรีย์

หรือเกิดดีเอมีนขึ้นและดีคาร์บอกซิเลชัน (decarboxylation) ได้ผลผลิตสุดท้ายคือกรดไขมันที่ระเหยง่าย คาร์บอนไดออกไซด์ แอมโมเนียในโตรเจน (Nolan, 1993; Tamminga, 1979) การดูดซึมเปปไทด์และกรดอะมิโนเข้าสู่เซลล์ของจุลินทรีย์จะขึ้นอยู่กับความสามารถในการใช้ประโยชน์ได้ของพลังงาน (คาร์โบไฮเดรต) ถ้าพลังงานมีมากพอกรดอะมิโนจะถูกนำไปใช้สังเคราะห์โปรตีนของจุลินทรีย์โดยตรง แต่ถ้าพลังงานมีอยู่อย่างจำกัดกรดอะมิโนจะถูกดีเอมีนขึ้นและคาร์บอนแกนกลาง (carbon skeleton) จะถูกหมักต่อไปเป็นกรดไขมันระเหยง่าย (Bach *et al.*, 2005) จุลินทรีย์บางชนิดไม่มีกลไกในการขนส่งกรดอะมิโนจากภายในเซลล์ออกสู่ภายนอกเซลล์ ดังนั้นถ้ามีการดูดซึมกรดอะมิโนเข้าสู่เซลล์มากเกินไปจะถูกขับออกมาในรูปของแอมโมเนีย (Tamminga, 1979)

ปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยสลายโปรตีนในกระเพาะหมัก

มีปัจจัยหลายปัจจัยที่มีผลต่อการย่อยอาหารโปรตีนในกระเพาะหมัก แต่ที่สำคัญที่สุดคือโครงสร้างทางเคมีของโปรตีน ซึ่งมีสองอย่างที่ควรให้ความสนใจในเรื่องโครงสร้างทางเคมีของโปรตีนคือ สัดส่วนของไนโตรเจนที่ไม่ใช่โปรตีนแท้ โปรตีนแท้ คุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของโปรตีน (NRC, 2001) ส่วนปัจจัยอื่นได้แก่ปฏิสัมพันธ์ระหว่างโปรตีนและโภชนาอื่น เช่น คาร์โบไฮเดรต และประชากรของจุลินทรีย์ที่อยู่ในกระเพาะหมัก ซึ่งจะขึ้นอยู่กับชนิดของสูตรอาหาร ความเป็นกรด่างในกระเพาะหมัก กิจกรรมของเอนไซม์โปรตีเอส และอัตราการไหลผ่าน (Bach *et al.*, 2005)

ความสามารถในการละลายได้ของโปรตีนเป็นปัจจัยสำคัญที่สุดที่ทำให้โปรตีนสามารถถูกย่อยสลายได้ในกระเพาะหมัก ตัวอย่าง เช่น โปรลามีนและกลูเตลินไม่สามารถละลายได้ในกระเพาะหมักจึงทำให้ย่อยสลายได้อย่างช้าๆ แต่ในขณะเดียวกันกลูบูลินสามารถละลายได้ในกระเพาะหมักจึงสามารถย่อยสลายได้สูง แต่อย่างไรก็ตามโครงสร้างภายในของโปรตีนก็มีความสำคัญต่อการย่อยสลายโปรตีนเช่นกัน อัลบูมินสามารถละลายได้ในกระเพาะหมักแต่ประกอบไปด้วยพันธะไดซัลไฟด์จึงทำให้ถูกย่อยสลายได้อย่างช้าๆ ในกระเพาะหมัก (Bach *et al.*, 2005)

พันธะไดซัลไฟด์เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อการย่อยสลายโปรตีน เช่น โปรตีนในขนสัตว์มีพันธะไดซัลไฟด์มากทำให้ขนสัตว์ย่อยสลายได้ยาก (NRC, 2001) นอกจากนั้นพันธะระหว่างสายโซ่โปรตีน (โครงสร้างตติยภูมิและโครงสร้างจตุรภูมิ) ก็มีบทบาทที่สำคัญต่อการย่อยสลาย เช่น เอซิดิก ไกลซีนิน (acidic glycinin) เบสิกไกลซีนิน (basic glycinin) และสายเปปไทด์ที่มีลิซีนเป็นองค์ประกอบที่ด้าน N-terminal ในกากถั่วเหลืองจะต้านการย่อยสลาย (Schwingel and Bates, 1996) นอกจากนั้นพันธะเปปไทด์บางชนิดจะต้านการย่อยสลายในกระเพาะหมัก เช่น เปปไทด์ที่สร้าง

จากไลซีนและโปรตีนจะย่อยสลายได้ช้ากว่าไคเปปไทด์ที่สร้างจากไลซีนและอลานีน และไคเปปไทด์ที่สร้างจากโปรตีนกับเมทไธโอนีนจะย่อยสลายได้ช้ากว่าไคเปปไทด์ที่สร้างจากเมทไธโอนีนกับอลานีน (Yang and Russell, 1992)

แหล่งของโปรตีนรวมทั้งชนิดของอาหารมีผลต่อการทำงานของเอนไซม์ ในหญ้าสดจะมีโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตที่ละลายได้สูง (Corbett, 1987) ในขณะที่โปรตีนจากธัญพืชมีความสามารถในการย่อยสลายได้ต่ำกว่าโปรตีนจากสัตว์ และโปรตีนจากพืชโดยเฉพาะที่ผ่านกระบวนการแปรรูปด้วยความดัน การสกัดน้ำมันซึ่งจะทำให้มีการสูญเสียสภาพทำให้การย่อยสลายลดต่ำลง (NRC, 2001) นอกจากนั้นยังมีปัจจัยอื่นที่ทำให้ความสามารถในการย่อยสลายโปรตีนลดต่ำลง เช่นการใช้ความร้อนและสารเคมี (Broderick *et al.*, 1991) แหล่งไนโตรเจนที่ไม่ใช่โปรตีนแท้ เช่น กรดนิวคลีอิก กรดอะมิโนอิสระ เปปไทด์ เอมีน เอไมด์ในเตรท ไนไตร์ ยูเรีย และแอมโมเนียสามารถละลายได้ง่ายในกระเพาะหมักและถูกย่อยสลายได้อย่างรวดเร็วประมาณ 300% ต่อชั่วโมง (NRC, 2001) Plomkot and Wanapat (2004) พบว่าสัดส่วนของ NPN และโปรตีนแท้ในวัตถุดิบมีผลต่อความสามารถในการย่อยสลายในกระเพาะหมักเช่นกัน นอกจากนี้ Huntington and Archibeque (1999) รายงานว่าไนโตรเจนที่จับอยู่กับลิกโนเซลลูโลสจะถูกย่อยสลายได้ยาก

การใช้ประโยชน์ของโปรตีนในโคนม

การใช้ประโยชน์ของโปรตีนในเนื้อเยื่อ

การใช้ประโยชน์ของโปรตีนในเนื้อเยื่อจะเป็นไปได้มากในช่วงต้นระยะการให้นมซึ่งปริมาณการกินได้ของสัตว์ไม่เพียงพอต่อความต้องการในการให้ผลผลิต ในการประเมินอัตราการสลายโปรตีนจากเนื้อเยื่อมาใช้นั้นประเมินในรูปกิโลกรัมของโปรตีนหรือเปอร์เซ็นต์ของโปรตีนในร่างกายซึ่งอยู่ในช่วง 8 - 22 %ของโปรตีนในร่างกาย (Huber and Kung, 1981) ส่วนค่าการประเมินจากการวิเคราะห์โดยใช้สมมูลของไนโตรเจนอยู่ในช่วง 8 - 15 กิโลกรัมของโปรตีน (Paquay *et al.*, 1972) Verite *et al.* (1982) อธิบายว่าในช่วง 2 เดือนแรกของระยะการให้นม โคนมจะใช้ประโยชน์จากโปรตีนในการผลิตน้ำนมมากกว่า 15 กิโลกรัม ทำให้มีปริมาณโปรตีนที่ใช้ในการผลิตน้ำมน้อยกว่า 15 กิโลกรัมต่อวัน ซึ่งหากโคนมมีการสลายโปรตีนใช้มากกว่า 15 กิโลกรัมของโปรตีนแล้วนั้นแสดงว่าในการผลิตนมต้องมีโปรตีนสำรองจากโปรตีนที่ถูกดูดซึมจากอาหาร แสดงให้เห็นว่าการให้อาหารโปรตีนในช่วงต้นระยะการให้นมนั้นมีความสำคัญมาก

การสังเคราะห์โปรตีนของจุลินทรีย์ในกระเพาะหมัก

โปรตีนประมาณสองในสามที่โคนมได้รับเป็นโปรตีนที่ได้จากจุลินทรีย์และอีกส่วนหนึ่งจะมาจากโปรตีนที่ไม่ถูกย่อยสลายในกระเพาะหมัก (Verbic, 2002) ดังนั้นการสังเคราะห์โปรตีนของจุลินทรีย์ในกระเพาะหมักจึงมีความสำคัญต่อโคนมเป็นอย่างมาก การสังเคราะห์โปรตีนของจุลินทรีย์ในกระเพาะหมักส่วนใหญ่ขึ้นอยู่กับการใช้ประโยชน์ของคาร์โบไฮเดรตและโปรตีนในกระเพาะหมัก (NRC, 2001) โปรตีนของจุลินทรีย์ที่สังเคราะห์ขึ้นโดยจุลินทรีย์ในกระเพาะหมักมีองค์ประกอบของกรดอะมิโนคล้ายกับโปรตีนจากสัตว์ (Ørskov, 1992) และเมื่อเปรียบเทียบกับกากเมล็ดพืชน้ำมันและพืชตระกูลถั่วพบว่าโปรตีนของจุลินทรีย์มีเมทไธโอนีนและไลซีนสูงกว่า (Storm and Ørskov, 1983) โปรตีนของจุลินทรีย์มีคุณค่าทางชีววิทยา (biological value) สูงถึง 78% (เมธา, 2533) จึงถือเป็นแหล่งโปรตีนชั้นดี

อาหารโปรตีนกับการผลิตน้ำนม

ผลของอาหารโปรตีนกับการผลิตน้ำนม

อาหารโปรตีนมีผลต่อการผลิตน้ำนม เนื่องจาก 1). สามารถใช้กรดอะมิโนที่เพียงพอ 2). เพิ่มการใช้ประโยชน์ได้ของพลังงาน และ 3). เปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพหรือรูปแบบของการดูดซึมใช้ประโยชน์ของโภชนาให้ดีขึ้น (Chalupa, 1984) ประมาณ 35 - 75% ของผลผลิตน้ำนมที่ได้ นั้น เนื่องจากผลโดยตรงของโปรตีน สำหรับการเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพหรือรูปแบบของการดูดซึมใช้ประโยชน์ของโภชนาให้ดีขึ้นนั้นเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของระบบต่อมไร้ท่อต่างๆ ซึ่งทำให้มีผลต่อการเมแทบอลิซึมของไขมันและกลูโคสจึงเพิ่มการไหลของโภชนาต่างๆ ไปยังต่อมผลิตน้ำนมโดยทางกระแสเลือด (Bine and Hart, 1982)

การศึกษาโดยการเพิ่มปริมาณการกินได้ของโปรตีนหยาบ (crude protein intake) แล้วผลผลิตของน้ำนมจะเพิ่มสูงขึ้น (Clark and Davis, 1980; Leng and Nolan, 1984, Oldham, 1984) การเพิ่มขึ้นของผลผลิตน้ำนมจะเห็นได้อย่างชัดเจนเมื่อความเข้มข้นของโปรตีนหยาบเพิ่มจาก 9 - 10% เป็น 13 - 14%

ปริมาณอาหารที่กินได้และอัตราการย่อยได้ของอาหารจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มโปรตีนในอาหาร (Oldham, 1984) อัตราการย่อยได้ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากมีจุลินทรีย์ทั้งชนิดและปริมาณที่เหมาะสมเพียงพอต่อการใช้ประโยชน์จากโปรตีน ส่วนปริมาณการกินได้ที่สูงขึ้นนั้นเนื่องมาจากการ

เปลี่ยนแปลงอัตราการย่อยได้ที่ดีขึ้น แม้ว่าอาหารโปรตีนจะมีผลต่อผลผลิตน้ำนม แต่ยังมีปัจจัยหลายอย่างที่มีผลต่อการเพิ่มปริมาณการกินได้ของโปรตีนหยายนั่น อันได้แก่พันธุ์สัตว์ ระยะของช่วงการให้นม และช่วงการตั้งท้อง (Oldham, 1984) โคนมในช่วงการให้นมระยะที่หนึ่งจะให้ผลตอบสนองกับอาหารโปรตีนแตกต่างจากโคที่สมบูรณ์แล้ว (Chalupa, 1984)

อย่างไรก็ตามมีรายงานว่า ปริมาณการกินได้ การย่อยได้และผลผลิตน้ำนมเพิ่มขึ้นในโคไฮลสไตน์ที่ได้รับอาหารเพิ่มขึ้นในระดับ 12 15 และ 18% โปรตีน (Norman *et al.*, 1982) ที่สำคัญหากพิจารณาโดยการจำเพาะเจาะจงปริมาณของโปรตีนที่ถูกสลาย (degraded) และโปรตีนที่ไม่ถูกสลาย (undegradable) แล้ว แหล่งต่างๆ ของอาหารโปรตีนจะมีความสำคัญ มีผลต่อการกินได้และการให้ผลผลิตน้ำนม (Chalupa, 1984)

Oldham (1984) ได้ให้ข้อสรุปเกี่ยวกับสัดส่วนของโปรตีนต่อพลังงานที่มีผลต่อการดูดซึมโภชนะเพื่อใช้ในการผลิตน้ำนมไว้ดังนี้

1. เมื่อกรดอะมิโนมีไม่เพียงพอ ผลผลิตน้ำนมจะน้อยกว่าปกติ และพลังงานมากเกินไปที่ไม่สมดุลกับกรดอะมิโน จะสะสมในรูปไขมันและเกิดการออกซิไดซ์ไป จึงลดประสิทธิภาพการใช้ประโยชน์ได้ของพลังงาน
2. ถ้ากรดอะมิโนมีอยู่อย่างเพียงพอแล้ว จะทำให้เกิดสมดุลกับการใช้ประโยชน์ของพลังงาน นอกจากนี้กรดอะมิโนจะช่วยเพิ่มการผลิตน้ำนมโดยตรง โดยการดึงโภชนะจากเนื้อเยื่อมาใช้เป็นการกระตุ้นให้มีการผลิตน้ำนมเพิ่มสูงขึ้น
3. หากกรดอะมิโนมีสูงเกินไป จะถูกหลั่งเข้าไปในน้ำนมส่วนหนึ่ง นอกนั้นจะถูก deaminate ทำให้มีการสูญเสียพลังงาน ทั้งในขั้นตอนการสังเคราะห์กรดอะมิโนที่มากเกินไปและการหลังสูญเสียไปในรูปของยูเรีย

การให้อาหารโปรตีนที่เกินความต้องการต่อผลผลิตน้ำนม

หากโคนมได้รับอาหารโปรตีนมากเกินไป จะมีผลในทางลบคือ ทำให้ผลผลิตน้ำนมลดลง ผลผลิตน้ำนมที่ปรับเปอร์เซ็นต์ไขมันนมแล้ว (fat corrected milk, FCM) ในโคนมลดลงจาก 24.5 เหลือเพียง 23.1 กิโลกรัมต่อวัน เมื่อให้โปรตีนหยายนเพิ่มขึ้นจาก 19% เป็น 23% (Edwards *et al.*, 1980) ทั้งนี้ผลผลิตน้ำนมที่ลดลงนั้นเนื่องมาจากการใช้พลังงานที่สูญเสียไปในการขับไนโตรเจนในรูป

ยูเรียออกทางปัสสาวะ (Oldham, 1984) ซึ่งนอกจากจะมีผลต่อการผลิตน้ำนมแล้วยังมีผลต่อระบบสืบพันธุ์ โดยทำให้อัตราการผสมติดลดลงอีกด้วย (Edwards *et al.*, 1980) ทั้งนี้เนื่องมาจากแอมโมเนียที่ถูกดูดซึมที่กระเพาะหมักอาจจะถูกนำไปผลิตเป็นสารที่มีความเกี่ยวข้องกับระบบต่อมไร้ท่อต่างๆ จึงทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของการจัดเรียงตัวของเนื้อเยื่อ ประกอบกับการเพิ่มการดูดซึมของโปรตีนจะเปลี่ยนแปลงสมดุลของโปรตีนและพลังงานสุทธิ ซึ่งเป็นสาเหตุโน้มนำทำให้เกิดการขาดพลังงานได้ (Chalupa, 1984)

เป้าหมายของการให้อาหารโปรตีนในสัตว์กระเพาะรวม

เป้าหมายทางโภชนาศาสตร์โปรตีนสำหรับสัตว์กระเพาะรวม คือการให้อาหารโปรตีนที่ย่อยสลายได้ในกระเพาะหมักอย่างเพียงพอต่อการสังเคราะห์โปรตีนของจุลินทรีย์ (microbial protein) และมีประสิทธิภาพสูงสุด ในโตรเจนที่ได้รับต้องไม่มากเกินไป นอกจากนี้ชนิดและปริมาณของโปรตีนที่ไม่ถูกย่อยสลายในกระเพาะหมักต้องอยู่ในระดับที่เหมาะสม เพื่อนำไปสู่การให้ผลผลิตสูงสุดและใช้โปรตีนหยวนน้อยที่สุด ซึ่งการเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ประโยชน์โปรตีนจะช่วยลดค่าอาหารต่อหน่วยของผลผลิตทั้งเนื้อและน้ำนม ส่งผลให้ลดต้นทุนการผลิตด้วย เพราะต้นทุนค่าอาหารเป็นต้นทุนหลักในการผลิตสัตว์ (ทรงศักดิ์, 2551)

การป้องกันการย่อยสลายโปรตีนในกระเพาะหมัก

การย่อยสลายโปรตีนในกระเพาะหมักของวัตถุดิบอาหารมีความแตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 1 ในการป้องกันการย่อยสลายโปรตีนในกระเพาะหมักเป็นการทำให้โปรตีนผ่านไปสู่ถูกย่อยที่กระเพาะจริงและลำไส้เล็กเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งที่จะทำให้สัตว์ได้รับกรดอะมิโนสูงขึ้น โดยมักมุ่งศึกษาไปที่เมล็ดพืชน้ำมันและกากเมล็ดพืชน้ำมัน (NRC, 2001) เพราะมีโปรตีนในระดับสูงและถูกย่อยสลายในกระเพาะหมักได้สูงโดยเฉพาะอย่างยิ่งกากถั่วเหลือง วัตถุดิบบางชนิดมีโปรตีนที่ไม่ถูกย่อยสลายในกระเพาะหมักสูงอยู่แล้วโดยลักษณะทางธรรมชาติ เช่น ปลาป่น เลือดป่น กูลเด้นข้าวโพด (corn gluten meal) กากเบียร์แห้ง และกากเบียร์สด (Santos *et al.*, 1998) ใบมันสำปะหลัง และกากเมล็ดฝ้าย (Wanapat, 1999) โดยทั่วไปการป้องกันการย่อยสลายอาหารโปรตีนในกระเพาะหมักจะได้ผลดีและคุ้มค่าเชิงเศรษฐกิจในสัตว์ที่ให้ผลผลิตสูง เพราะสัตว์ที่ให้ผลผลิตต่ำอาศัยเฉพาะโปรตีนของจุลินทรีย์ก็เพียงพอต่อความต้องการ แต่ในสัตว์ที่ให้ผลผลิตสูงการได้รับเฉพาะโปรตีนของจุลินทรีย์เพียงอย่างเดียวนั้นไม่เพียงพอต่อความต้องการในการให้ผลผลิตในระดับสูง จึงจำเป็นต้องได้รับโปรตีนจากแหล่งโปรตีนที่ไม่สามารถถูกย่อยสลายในกระเพาะหมักจึงจะเพียงพอ นอกจากนั้นการให้โปรตีนที่ไม่ถูกย่อยสลายในกระเพาะหมักยังเป็นการป้องกันการ

ได้รับโปรตีนที่ถูกย่อยสลายในกระเพาะหมักสูงเกินไป ซึ่งจะมีผลเสียต่อประสิทธิภาพของระบบ
สืบพันธุ์ด้วย

ตารางที่ 1 คุณลักษณะในการย่อยสลายของโปรตีนในวัตถุดิบอาหารชั้น โปรตีนที่ไม่ถูกย่อยสลาย
ในกระเพาะหมัก โดยเทคนิคถุงไนลอนและเทคนิคเอนไซม์

วัตถุดิบ	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	RUP, %	UIP, %
ข้าวโพดบด	29.75	45.50	0.051	47.21	67.52
มันเส้น	60.06	19.81	0.065	28.77	46.60
ปลายข้าว	6.77	82.56	0.058	48.75	78.03
รำละเอียด	36.73	42.81	0.156	30.86	58.48
รำหยาบ	36.48	29.39	0.410	37.33	46.07
กากปาล์มหีบน้ำมัน	18.04	27.32	0.328	58.25	54.23
กากปาล์มสกัดน้ำมัน	13.75	78.95	0.015	68.50	61.60
เมล็ดนุ่น	10.22	61.80	0.264	37.82	23.60
กากถั่วเหลือง	10.98	89.02	0.038	30.90	25.32
กระถินบด	27.00	42.42	0.061	49.73	40.47
กากมะพร้าวหีบน้ำมัน	15.16	72.16	0.017	66.59	43.45
กากมะพร้าวสกัดน้ำมัน	16.01	65.38	0.017	67.39	54.23
กากถั่วลิสง	15.14	84.86	0.028	54.66	48.67
กากถั่วเขียว	27.15	53.00	0.133	34.31	35.23
กากเปียร์	4.90	58.50	0.042	68.50	51.42
เมล็ดฝ้ายทั้งเมล็ด	37.68	46.60	0.181	25.83	31.82
ปลาป่น	27.85	36.40	0.058	52.68	36.62

หมายเหตุ *a* = ส่วนที่ละลายได้ง่าย

b = ส่วนที่มีศักยภาพในการย่อยสลายที่เวลา *t*

c = อัตราการย่อยสลายของส่วน *b*

RUD = โปรตีนที่ไม่ถูกย่อยสลายจากเทคนิคถุงไนลอน จำนวนที่อัตราการไหลผ่าน 5%/h

UIP = โปรตีนที่ไม่ถูกย่อยสลายในกระเพาะหมักจากเทคนิคเอนไซม์

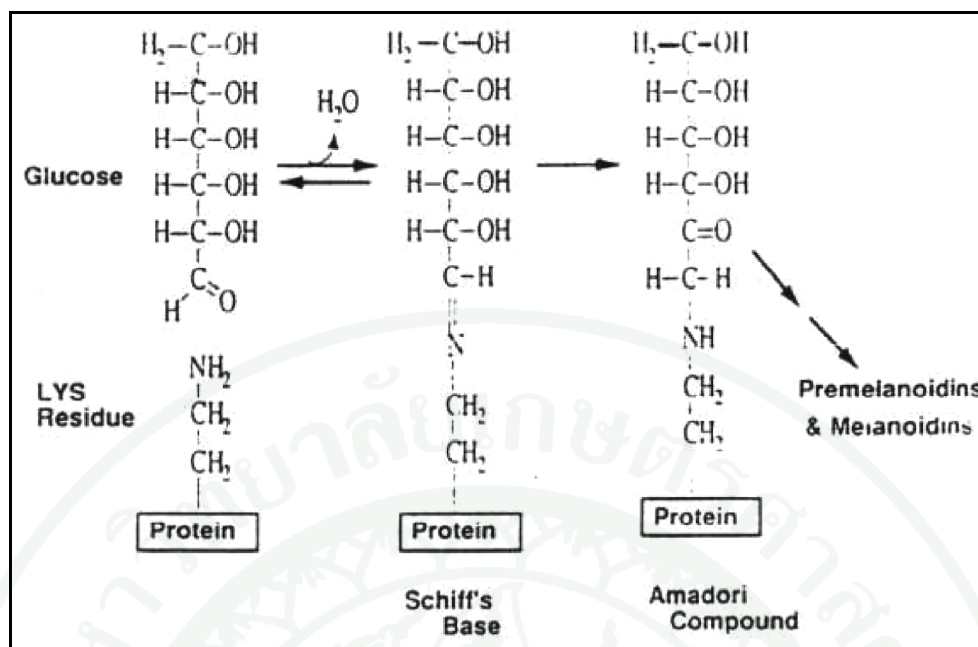
ที่มา: Chumpawadee *et al.* (2005)

กรรมวิธีป้องกันการย่อยสลายโปรตีนในกระเพาะหมัก

การทำให้โปรตีนทนต่อการย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ในกระเพาะหมักนั้น สามารถทำได้โดยใช้กรรมวิธีทางกายภาพ (physical treatment) โดยการใช้ความร้อน เช่น การคั่ว การอบ เป็นต้น การเคลือบป้องกันโปรตีน และกรรมวิธีทางเคมี (chemical treatment) สารเคมีที่ใช้มีหลายชนิด แต่ที่นิยมใช้คือ ฟอรั่มัลดีไฮด์ และแทนนิน โดยการไปสร้างพันธะกับกรดอะมิโนที่บริเวณหมู่ amide ของโปรตีน ทำให้การละลายของโปรตีนภายใต้สภาวะ pH ในกระเพาะหมักลดลง แต่เนื่องจากปฏิกิริยานี้ย้อนกลับได้ พันธะดังกล่าวจึงถูกทำลายที่สภาวะเป็นกรดในกระเพาะแท้ของสัตว์ ทำให้โปรตีนถูกนำไปใช้ประโยชน์ได้ (Chalupa, 1974)

การใช้ความร้อน (heat treatment)

การทำให้โปรตีนทนต่อการย่อยสลายในกระเพาะหมัก โดยวิธีการให้ความร้อนที่เหมาะสม เช่น การคั่ว อบ หรือนำวัตถุดิบมาผ่านกระบวนการเอ็กซ์ทรูดนั้น ช่วยป้องกันการย่อยสลายในกระเพาะหมักได้ โดยความร้อนจะทำให้โปรตีนเสียสภาพ และเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (maillard reaction) (Broderick *et al.*, 1991) ระหว่าง carbonyl group ของน้ำตาล กับกรดอะมิโน เกิดเป็น amino-sugar complex (Wang *et al.*, 1999) ซึ่งมีการ schiff ' base ระหว่างกรดอะมิโนและน้ำตาล ได้เป็นสารประกอบ amadori โดยทำให้โปรตีนเกิดการเกาะกัน เป็นผลทำให้ลดพื้นที่เข้าย่อยของเอนไซม์ (ภาพที่ 3) การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโปรตีนและแป้งหลังจากได้รับความร้อน จะส่งผลกระทบต่ออัตราการย่อยสลายในกระเพาะหมัก ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิที่ได้รับ ระยะเวลา และความชื้นในกระบวนการผลิต (Stern *et al.*, 1985) ในขณะเดียวกันขนาด และเปลือกหุ้มเมล็ดจะมีผลต่อการถ่ายเทความร้อนและความชื้นระหว่างกระบวนการผลิต (Goelema *et al.*, 1997) โดยปกติแล้วการให้ความร้อนที่มากเกินไปจะไปลดประสิทธิภาพการย่อยได้ของกรดอะมิโนที่บริเวณลำไส้ (Van Soest, 1994) ดังนั้น การให้ความร้อนในระดับที่เหมาะสมในการผลิตวัตถุดิบอาหารสัตว์จะช่วยทำให้ประสิทธิภาพการย่อยได้ดีขึ้น และความร้อนยังช่วยทำลายสารพิษที่ยับยั้งการใช้ประโยชน์ได้ของโภชนาอีกด้วย



ภาพที่ 3 การเกิด maillard reaction ระหว่างน้ำตาลและไลซีนจากการให้ความร้อนในอาหารโปรตีน
ที่มา: Tsuda *et al.* (1991)

วิธีการให้ความร้อนและแปรรูป เพื่อการผลิตและเพิ่มคุณภาพวัตถุดิบอาหารโปรตีน เช่น กากถั่วเหลืองที่ใช้ในวงการอาหารสัตว์โดยทั่วไป (De Schutter and Morris, 1990) ได้แก่

การคั่วหรืออบ (roasting)

เป็นการเคลื่อนของถั่วเหลืองที่ผ่านดูลอบ ที่หมุนอยู่ตลอดเวลา (rotating chamber) ถั่วเหลืองจะสัมผัสกับเปลวไฟโดยตรงที่อุณหภูมิประมาณ 140°C เป็นระยะเวลาสั้นๆ ประมาณ 3-5 นาที อุณหภูมิของถั่วที่ออกจากห้องอบอยู่ที่ประมาณ 125°C

จากการศึกษาของ Faldet and Satter (1991) พบว่าตัวอย่างถั่วเหลืองที่ผ่านการอบร้อนจากผู้ผลิต 13 รายในสหรัฐอเมริกา มีโปรตีนที่ไม่ถูกย่อยสลายในกระเพาะหมักอยู่ในช่วง 36-58% ของโปรตีนรวม โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 48% ความเข้มข้นของไลซีนทั้งหมดเพื่อการดูดซึมไปใช้ในลำไส้เล็กมีค่าระหว่าง 2.1 - 2.4% การที่ไลซีนลดลงเป็นผลมาจากการอบร้อนที่อุณหภูมิสูงเกินไป Faldet and Satter (1992a) ศึกษาต่อไปถึงวิธีทดสอบอุณหภูมิที่เหมาะสมในการให้ความร้อนถั่วเหลืองระหว่างการคั่วอบ โดยการคั่วที่อุณหภูมิต่างกัน ในระยะเวลาที่ต่างกัน และวิเคราะห์การย่อยสลายได้ของโปรตีนในหลอดแก้ว (*in vitro* protein degradability) และปริมาณไลซีนที่นำไปใช้ได้ (nutrition

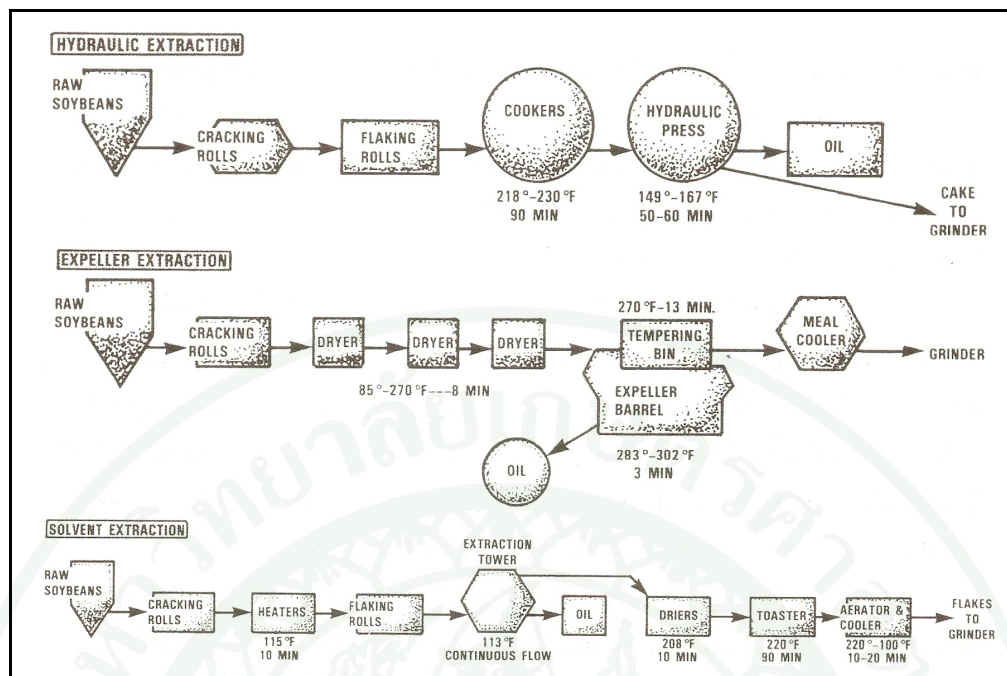
available lysine, NAL) พบว่าการให้ความร้อนในระยะเวลาที่ต่างกันเช่น 140 °C เป็นเวลา 120 นาที 150 °C เป็นเวลา 69 นาที และ 160 °C เป็นเวลา 30 นาที มีผลทำให้ถั่วเหลือง อมมีค่าการป้องกันการถูกย่อยสลายของโปรตีนอยู่ในระดับที่เหมาะสมหรือใกล้เคียง

นอกจากนี้ยังได้ศึกษาการเก็บถั่วเหลืองให้ร้อนต่อไปเป็นเวลา 0, 15 และ 30 นาที ก่อนทำให้เย็นลงหลังคั่วอบ พบว่าอุณหภูมิที่ต่างกันเมื่อคั่วอบและเวลาการเก็บให้ร้อนต่อไป (steeping) หลังการอบมีผลต่อปริมาณ โปรตีนที่ไม่ถูกย่อยสลาย และปริมาณไลซีนที่ใช้ประโยชน์ได้

วัตถุประสงค์ของการเก็บความร้อน (steeping) หลังการคั่วหรืออบ เพื่อให้ความร้อนสามารถเข้าสู่เนื้อของถั่วเหลืองได้อย่างทั่วถึงและสม่ำเสมอ การเก็บถั่วเหลืองให้ร้อนต่อไปอย่างน้อย 30 นาทีหลังการอบคั่ว ทำให้โปรตีนที่ไม่ถูกย่อยสลายเพิ่มขึ้นเป็น 61% เมื่อเทียบกับถั่วอบที่ถูกทำให้เย็นทันทีซึ่งมีค่า 57% ในขณะที่ไลซีนที่ใช้ประโยชน์ได้มีค่าสูงสุดในถั่วเหลืองที่อบแล้วเก็บให้ร้อนต่อเนื่องมีค่าระดับกลางในถั่วเหลืองอบที่ทำให้เย็นทันที และมีค่าต่ำสุดในถั่วเหลืองคั่ว (1.23, 1.10 และ 0.59 %ของวัตถุแห้ง) ตามลำดับ ถั่วอบที่อุณหภูมิประมาณ 146 °C แล้วเก็บให้ร้อนต่ออีก 30 นาที น่าจะเป็นวิธีการที่เหมาะสมที่สุดในการเพิ่มค่าโปรตีนที่ไม่ถูกย่อยสลายของถั่วเหลือง (Faldet *et al.*, 1992b)

การบีบน้ำมันด้วยเครื่องอัดเกลียว (expeller processing หรือ screw pressing)

เป็นกรรมวิธีการแยกน้ำมันออกจากเมล็ดพืชน้ำมันโดยวิธีการด้วยแรงอัดแบบต่อเนื่อง (continuous pressing) โดยเครื่องอัดเกลียว ขั้นตอนเริ่มจาก (ภาพที่ 4) การบดเมล็ดพืชน้ำมันให้แตก แล้วนำไปอบแห้ง และทำให้สุกในเตาอบที่เพิ่มอุณหภูมิขึ้นจาก 29 °C จนถึง 132 °C เป็นเวลา 8 นาที เมล็ดพืชสุกซึ่งมีความชื้นประมาณ 2% จะถูกลำเลียงเข้าสู่ห้องคั่วด้วยหม้ออบไอน้ำ 2 ชั้น (steam jacketed tempering device) ซึ่งมีอุณหภูมิ 132 °C และมีเครื่องคนตลอดเวลาให้เมล็ดพืชได้รับความร้อนโดยทั่วถึง เมล็ดพืชจะอยู่ในห้องคั่ว 10 - 15 นาที แล้วจึงถูกปล่อยลงสู่ถังอัด (expeller barrel) ซึ่งมีเกลียวอัดตัวหนอน (screw press) ติดตั้งอยู่ตรงกลาง เกลียวตัวหนอนจะดันเมล็ดพืชไปข้างหน้าด้วยแรงอัดประมาณ 6,000 psi และอัดเอาน้ำมันไหลแยกออกจากกาก เมล็ดพืชขณะถูกอัดมีอุณหภูมิประมาณ 139-150 °C และถูกอัดนานประมาณ 3 นาที กากพืชที่ได้จะออกมาเป็นแผ่นบาง (flake) มีความร้อนสูง จึงถูกลำเลียงเข้าสู่ส่วนที่ปล่อยให้เย็น แล้วจึงบดและนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ต่อไป กากเมล็ดพืชน้ำมันที่ถูกอัดด้วยเครื่องอัดเกลียวนี้จะมีไขมันตกค้างอยู่ 4 - 5% (สาริธ, 2547)



ภาพที่ 4 โคอะแกรมแสดงขั้นตอนการแยกน้ำมันถั่วเหลืองโดยกรรมวิธีต่างๆ

ที่มา: Ensminger *et al.* (1990)

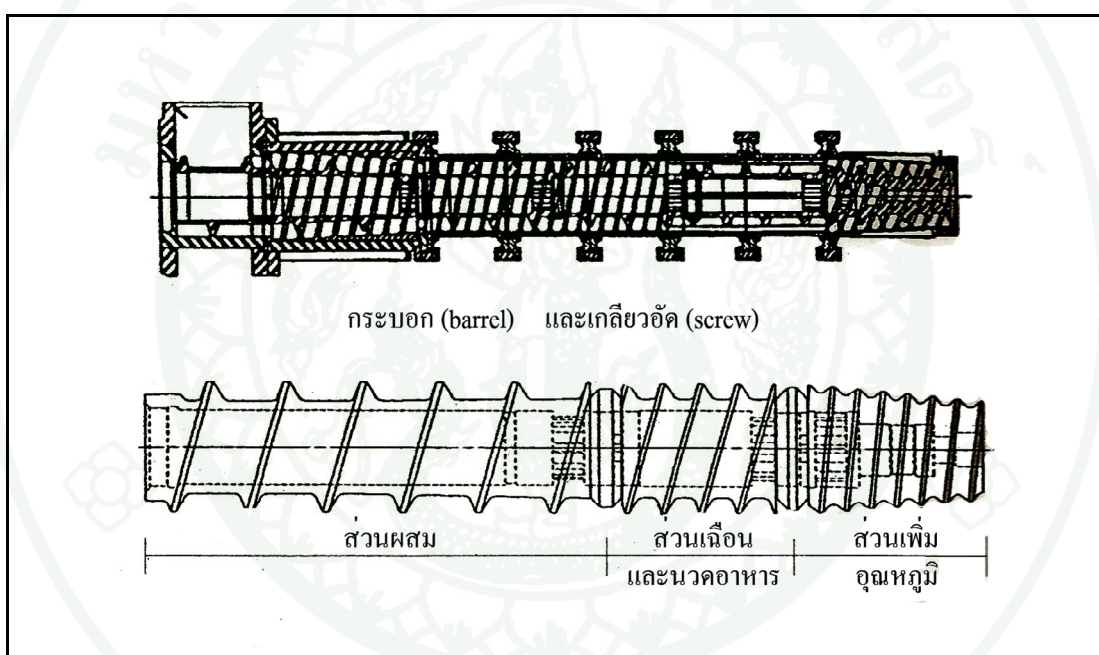
ขั้นตอนการบีบน้ำมันออกจากเมล็ดพืช จะมีความร้อนเกิดขึ้น ทำให้เกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด เช่นเดียวกับการคั่วหรืออบร้อน กากถั่วเหลืองที่ได้จากเครื่องอัดน้ำมัน (expellered soybean meal; ESBM) ประกอบด้วยโปรตีน 42 - 46% และไขมัน 4.5 - 6%ของน้ำหนักสด

การศึกษาการใช้กากถั่วเหลืองจากกระบวนการบีบน้ำมัน (expellered soybean meal; ESBM) เปรียบเทียบกับกากถั่วเหลืองจากกระบวนการสกัดด้วยตัวทำละลายเคมี (solvent soybean meal; SSBM) พบว่าการใช้กากถั่วเหลืองบีบน้ำมัน (ESBM) มีค่าโปรตีนที่ไม่ละลายเพิ่มขึ้นจาก 0% เป็น 4% ค่าไนโตรเจนที่ไม่ละลายตัวในกระเพาะหมักเพิ่มขึ้นจาก 50% เป็น 56% เมื่อทำการบ่มในกระเพาะหมักเป็นระยะเวลา 16 ชั่วโมง และค่าการย่อยได้ที่ต่ำได้เล็กของไนโตรเจนที่ไม่ละลายตัวในกระเพาะหมักเพิ่มขึ้นจาก 82.5% เป็น 85.9% และเมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพการผลิต พบว่าปริมาณน้ำนมเพิ่มขึ้นจาก 33.0 เป็น 34.2 กิโลกรัมต่อวัน โปรตีนนมเพิ่มขึ้นจาก 1.012 เป็น 1.050 กิโลกรัมต่อวัน (Awawdeh *et al.*, 2007) ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการศึกษาของ Borucki *et al.* (2007) พบว่าส่วนของโปรตีนที่ละลายได้ลดลงจาก 9.9 เป็น 8.4% ส่วนของโปรตีนที่ละลายได้ซ้ำเพิ่มขึ้นจาก 87.0 เป็น 88.5% โดยมีอัตราการสลายตัวลดลงจาก 0.105 เป็น 0.030 %ต่อชั่วโมง ยิ่งไปกว่านั้น การศึกษาของ Waltz and Stern (1989) ที่ทดสอบโดยใช้ระบบการหมักย่อยจำลองในห้องปฏิบัติการ ยังรายงานว่ากากถั่วเหลืองบีบน้ำมัน (ESBM) มีค่าอัตราการย่อยสลายได้ที่ต่ำกว่ากากถั่วเหลืองสกัด

น้ำมัน (SSBM) เมื่อใส่กากถั่วเหลืองบีบน้ำมัน (ESBM) แทนที่กากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน (SSBM) ในอาหารที่เติมลงในระบบการหมักย่อยจำลอง พบว่าการย่อยสลายโปรตีนและประสิทธิภาพการสังเคราะห์จุลินทรีย์โปรตีนลดลง ประสิทธิภาพการสังเคราะห์จุลินทรีย์โปรตีนที่ลดลงนี้ เป็นผลมาจากการมีค่าการละลายได้ของไนโตรเจนในอาหารลดลงนั่นเอง

การเอ็กสทรูชัน (extrusion)

เป็นการอัดเม็ดอาหารที่มีความชื้น อุณหภูมิ และความดันสูงมาก ทำให้อาหารสุก เครื่องมือที่ใช้เรียกว่า เครื่องอัดเม็ดแบบเอ็กสทรูชัน หรือเครื่องเอ็กสทรูเดอร์ (extruder)



ภาพที่ 5 องค์ประกอบเครื่องเอ็กสทรูชัน

ที่มา: อุทัย (2543)

ตัวเครื่องเอ็กสทรูชันประกอบด้วยกระบอก (barrel) และเกลียวอัด (screw) ส่วนของเกลียวอัดแบ่งได้เป็น 3 ส่วน คือ 1). ส่วนผสมอาหาร (mixing zone) 2). ส่วนเลี่ยนและนวดอาหาร (kneading zone) และ 3). ส่วนเพิ่มอุณหภูมิอาหารและทำให้อาหารสุก (cooking zone) เกลียวอัดแต่ละส่วนจะมีรูปร่างไม่เหมือนกัน (ภาพที่ 5) ระหว่างเกลียวอัดแต่ละส่วนจะมีส่วนกักอาหาร (shear lock) ไม่ให้อาหารไหลได้สะดวก ทำให้แรงดันของอาหารในกระบอกสูงขึ้นและส่งผลให้อาหารมีอุณหภูมิสูงขึ้นและแข็งสุกมากขึ้น ส่วนปลายกระบอกจะมีแผ่นอัดเม็ดหรือแผ่นคาย (die) ซึ่งเป็น

แผ่นโลหะผสมที่มีความทนทานต่อการเสียดสี และทนความร้อนสูงปิดท้าย บนแผ่นดาจะมีรูตาย (die hole) ซึ่งมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางต่างๆ ตามขนาดของเม็ดอาหารที่ต้องการให้อาหารสามารถลอดออกจากเครื่องอัดได้ อาหารตรงส่วนปลายกระบอกจะมีแรงดันสูงมาก มีอุณหภูมิสูงและมีความหนืดต่ำ อาหารที่ลอดรูดาออกมาจะมีลักษณะเป็นเส้นยาว พองตัว จากนั้นอาหารจะถูกตัดให้เป็นท่อนสั้นๆ โดยใบมีดหมุน (rotating knife) อาหารอาจจะถูกฉีกออกมาจากกระบอกในสภาพเป็นของเหลวร้อนก็ได้ถ้าอาหารนั้นไม่สามารถจับตัวกันเป็นเส้นได้ อย่างไรก็ตามอาหารที่ออกมาไม่ว่าจะมีลักษณะใดจะได้รับความร้อนมาก

ขณะที่เครื่องทำงาน เกลียวอัดจะหมุนรอบตัวเอง อาหารจะถูกป้อนเข้าไปในกระบอกส่วนผสมอาหาร (ส่วนที่1)ซึ่งมีลักษณะเป็นเกลียวยาวและลึก ทำการผสมอาหารให้เข้าอีกครั้ง เมื่ออาหารเดินทางมาถึงส่วนที่กักอาหารจะเกิดการสะสมอาหารตรงส่วนนั้น ทำให้แรงดันในกระบอกสูงขึ้น เมื่ออาหารเข้ามามากขึ้นเรื่อยๆ แรงดันส่วนนี้จะเพิ่มมากขึ้นจนแรงดันอาหารมากพอทำให้อาหารสามารถข้ามส่วนกักอาหารเข้าไปยังสกรูส่วนเนียนและนวดอาหาร (ส่วนที่2) ซึ่งสกรูส่วนนี้จะมีเกลียวสั้นกว่าและร่องตื้นกว่าสกรูส่วนแรก ส่งผลให้อาหารเกิดการเสียดสีกับตัวสกรูได้มากขึ้น อาหารจะถูกเนียนให้มีขนาดเล็กลงๆ จนไม่มีรูปร่าง (amorphous) อาหารจะถูกเกลียวอัดจนเนื้ออาหารมีลักษณะเหนียวหนืด (dough) เมื่อเกิดการสะสมของอาหารในกระบอกส่วนเนียนและนวดมากพอจะเกิดแรงดันมากพอที่จะผ่านส่วนกักอาหารเข้าสู่สกรูเพิ่มความร้อนและทำให้สุก (ส่วนที่3) สกรูส่วนนี้จะมีการออกแบบให้มีเกลียวถี่มากและสามารถเกิดการเสียดสีกับอาหารในกระบอกได้สูงสุด อาหารจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นมากและเปลี่ยนสภาพจากเนื้ออาหารที่มีลักษณะเหนียวหนืดเป็นลักษณะเหลวมากขึ้น เมื่ออาหารสะสมมากขึ้นจะทำให้เกิดแรงดันไปข้างหน้าจนลอดรูดาออกไปนอกเครื่องเอ็กซ์ทรูด ซึ่งมีสภาวะอุณหภูมิและความดันต่ำกว่าในกระบอกมาก เกิดการพองตัวดูดอากาศเข้าไปในเม็ดอาหาร ประกอบกับแป้งในอาหารจะแข็งตัวอย่างรวดเร็ว ทำให้อาหารยังคงรูปร่างพองตัวนั้นเอาไว้ได้

การเอ็กซ์ทรูดอาหารที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ แบ่งได้เป็น 2 ประเภทตามหลักการทำงานดังนี้ คือ 1). การเอ็กซ์ทรูดอาหารแบบแห้งหรือแบบมีความชื้นต่ำ (dry extrusion) เป็นการเอ็กซ์ทรูดอาหารในสภาพความชื้นต่ำหรือสภาพวัตถุดิบอาหารสัตว์โดยทั่วไป การทำงานต้องการวัตถุดิบอาหารสัตว์ที่มีความชื้นหรือมีไขมันสูง เพื่อป้องกันไม่ให้อาหารติดขัดในกระบอก เครื่องเอ็กซ์ทรูดแบบแห้งยังช่วยในการให้ความร้อนเมล็ดถั่วเหลืองเพื่อทำลายสารยับยั้งทริปซินและทำให้เซลล์ของเมล็ดถั่วเหลืองแตกออก ทำให้อาหารสามารถใช้ประโยชน์ได้ดีขึ้น 2). การเอ็กซ์ทรูดอาหารแบบเปียกหรือแบบความชื้นสูง (wet extrusion) เป็นการเอ็กซ์ทรูดอาหารในสภาพความชื้นสูง (25 - 30%) อาหารจะมีความชื้นและไม่ติดในกระบอก ทำให้แป้งในอาหารสุกอย่างเต็มที่ ซึ่งใช้ได้

กับอาหารที่ไขมันต่ำหรือสูงก็ได้ เครื่องเอ็กซ์ทрудแบบเปียกนี้สามารถปรับความดันของอาหารในกระบอกได้ เนื่องจากตัวกระบอกจะมีช่องสำหรับฉีดน้ำเข้าไปเพื่อเพิ่มความชื้นของอาหารในกระบอกได้ตามต้องการ จึงทำให้อาหารในกระบอกเกิดแรงดัน เกิดความร้อน จึงสามารถควบคุมความพองของอาหารที่ออกมาจากเครื่องได้ และอาหารสุกมากกว่าเครื่องเอ็กซ์ทрудแบบแห้ง (อุทัย, 2543)

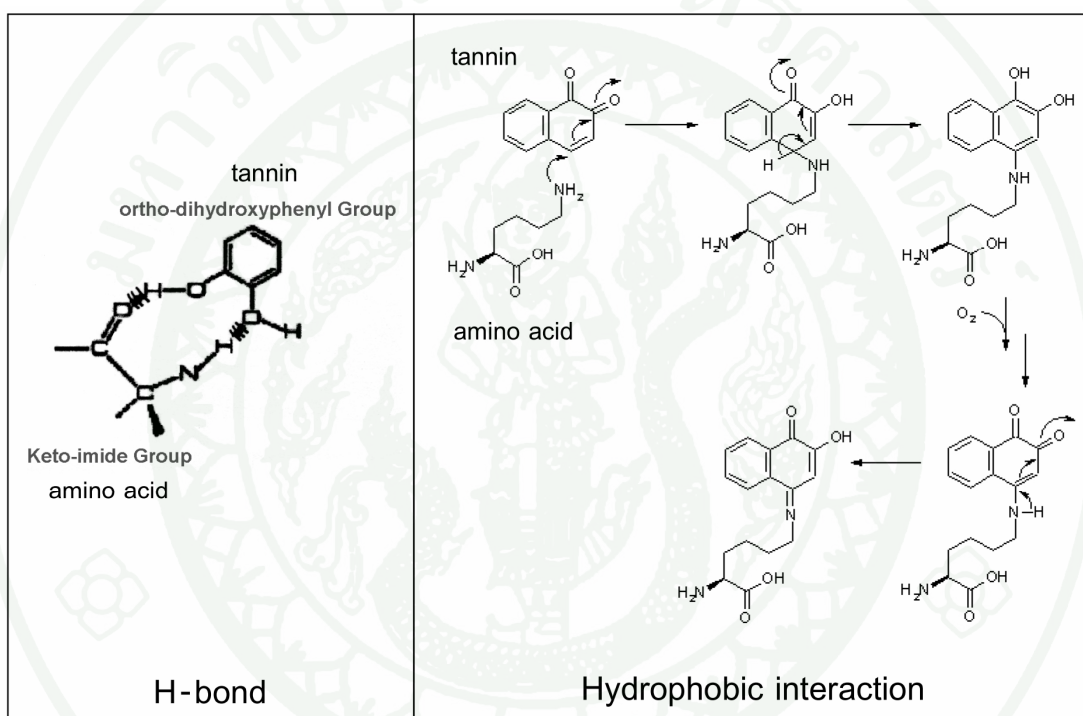
โปรตีนไหลผ่านของถั่วเหลืองที่ผ่านการเอ็กซ์ทрудที่ 104°C มีค่าเพิ่มขึ้น 3-4 เท่า เมื่อเทียบกับถั่วเหลืองดิบ และเมื่อเพิ่มอุณหภูมิการเอ็กซ์ทрудขึ้นไปถึง 160°C จะส่งผลให้ค่าโปรตีนที่ไม่ถูกย่อยสลายสูงขึ้นไปอีก เป็น 63.30% ที่อุณหภูมิ 149°C และ 69.90% ที่ 160°C (Aldrich and Merchen, 1995) การศึกษาโดยใช้ระบบการหมักย่อยจำลองในห้องปฏิบัติการ เพื่อการประเมินการเอ็กซ์ทрудและวิธีการอื่นๆ ในการป้องกันการย่อยสลายโปรตีนในกากถั่วเหลือง พบว่ากากถั่วเหลืองเอ็กซ์ทрудมีค่าหมุนเวียนของไนโตรเจนที่ไม่ใช่แอมโมเนียสูงกว่า และมีค่าการย่อยสลายโปรตีนที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับกากถั่วเหลืองที่ไม่ได้เอ็กซ์ทруд (65.50% และ 85.50%) (Waltz and Stern, 1989) เป็นที่น่าสังเกตว่าการทดแทนกากถั่วเหลืองในอาหารโคสาวด้วยกากถั่วเหลืองเอ็กซ์ทрудที่ 149°C ไม่ทำให้ค่าการย่อยสลายโปรตีนในกระเพาะหมักเปลี่ยนแปลง ทั้งนี้อาจเป็นไปได้ว่า อุณหภูมิที่ต่ำ (149°C) ประกอบกับระยะเวลาการเอ็กซ์ทрудที่สั้น อาจไม่มีผลต่อการเพิ่มการป้องกันการย่อยสลายโปรตีนของกากถั่วเหลืองได้ (Waltz and Stern, 1989)

การเคลือบโปรตีน (protein encapsulation)

เป็นการป้องกันโดยกระบวนการทางกายภาพสามารถทำได้โดยการเคลือบ (encapsulation) โปรตีนด้วยแคปซูลต่างๆ และอาจเคลือบด้วยไขมันหรือเคลือบด้วยเล็คติน เพื่อป้องกันการย่อยสลายโปรตีนในกระเพาะหมัก (pH6) แต่มีการละลายและแตกตัวถูกดูดซึมที่บริเวณลำไส้เล็กส่วนต้น (pH3) (Schwab, 1995) โดยวิธีการนี้ไม่เป็นที่นิยมทำกับอาหารโปรตีน แต่นิยมทำกับกรดอะมิโนอิสระที่ต้องการโดยเฉพาะเมทไธโอนีนและไลซีน เนื่องจากเป็นกรดอะมิโนที่มีปริมาณต่ำในพืชอาหารสัตว์ โดยเมทไธโอนีนเป็นกรดอะมิโนที่สัตว์กระเพาะรวมมักแสดงอาการขาดเป็นอันดับแรก ส่วนไลซีนเป็นกรดอะมิโนที่มักแสดงอาการขาดเป็นอันดับสอง ซึ่งล้วนแต่มีบทบาทต่อการให้ผลผลิตน้ำนม และเพิ่มการสังเคราะห์โปรตีนในนม จากการทดลองเสริม ruminal protected lysine and methionine (RPLM) 50 กรัมต่อวันในรูปแคปซูล (protected L-Lys*HCl 19 กรัมต่อวันและ DL-Met 6.5 กรัมต่อวัน) พบว่ามีผลทำให้โปรตีนในนม ไขมันนม พลังงานในน้ำนม และคะแนนร่างกายของโคเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม (Robinson *et al.*, 1995)

การใช้แทนนิน

แทนนิน (tannin) เป็นสารประกอบโพลีฟีนอล (polyphenol) ซึ่งพบในส่วนต่างๆ ของพืช สามารถละลายน้ำได้โดยมีน้ำหนักโมเลกุลอยู่ระหว่าง 500 ถึง 5000 และมีความสามารถในการตกตะกอนโปรตีนได้ แทนนินแบ่งได้เป็น 2 ชนิด ได้แก่ condensed tannins และ hydrolysable tannins แทนนินทั้ง 2 ชนิด มีคุณสมบัติแตกต่างกันตามลักษณะโครงสร้าง และปฏิกิริยาการเกิดแทนนินชนิดนั้นๆ

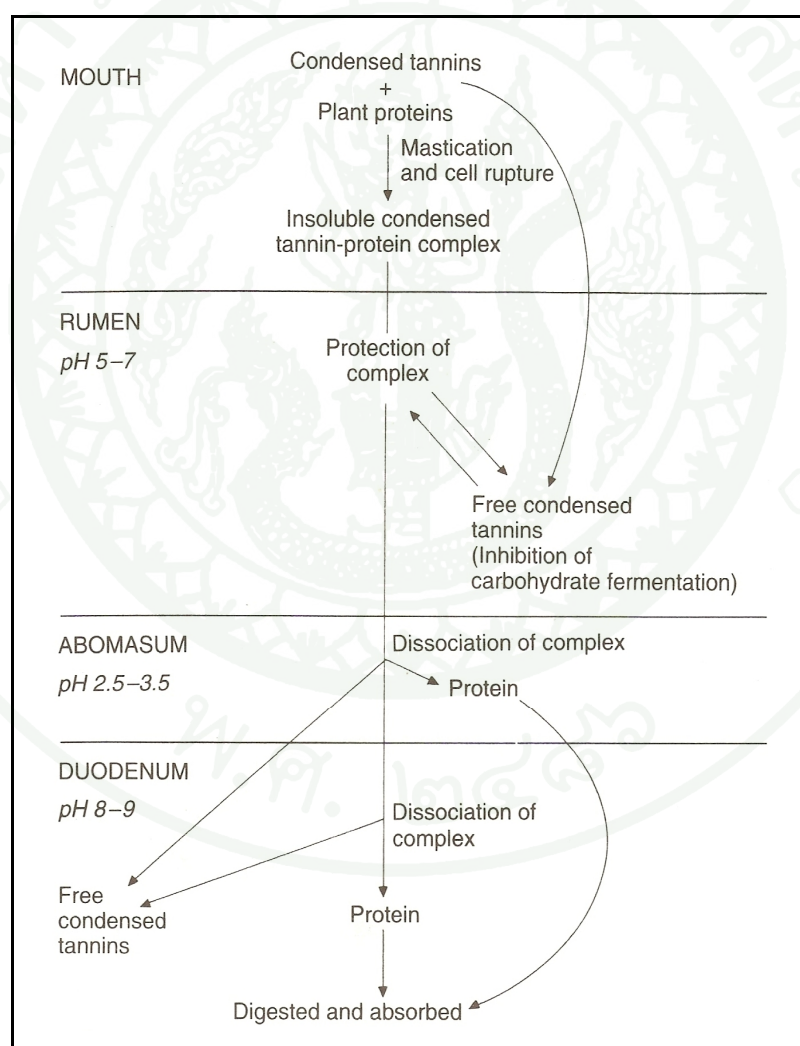


ภาพที่ 6 การรวมตัวกันของแทนนินและโปรตีน

ที่มา: Kumar and D' Mello (1995)

การรวมตัวกันของแทนนินและโปรตีนเป็นการจับกันด้วยพันธะไฮโดรเจน (H-bond) ระหว่างกลุ่ม phenolic ของแทนนินกับกลุ่ม ketoimide ของโปรตีน และโดย hydrophobic interaction ระหว่างโครงสร้างที่เป็นวงแหวนของแทนนินกับส่วนที่เป็น hydrophobic ของโปรตีน เกิดเป็น tannin-protein complex (ภาพที่ 6) กระบวนการในการรวมตัวกันของแทนนินและโปรตีน เป็นกระบวนการที่สามารถผันกลับได้ง่าย โดยโปรตีนที่มีขนาดใหญ่จะจับกับแทนนินได้แน่น (Kumar and D'Mello, 1995) การสลายตัวของ tannin-protein complex ในกระเพาะแพ้งสัตว์ กระเพาะรวม เกิดได้ในสภาพ pH ต่ำกว่า 3 และสูงกว่า 8 ได้เป็นโปรตีน และ free tannin สภาวะ

ภายในกระเพาะแท้ของสัตว์มี pH 2.5-3.5 มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพของ tannin-protein complex โดยทำให้โปรตีนถูกทำลายจนเสียสภาพ และคลายพันธะที่จับกับแทนนิน หลังจากนั้นโปรตีนจะถูกย่อยโดยเอนไซม์ในกระเพาะแท้ และลำไส้เล็ก (ภาพที่ 7) กลไกของการสลายตัวของ tannin-protein complex นี้ในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมมีความแตกต่างจากสัตว์กระเพาะเดี่ยวโดยจะมีการผลิต proline-rich protein (PRP) ในน้ำลาย ซึ่งโคเป็นสัตว์กระเพาะรวมที่มีการผลิตน้ำลายเป็นจำนวนมาก ทำให้มี PRP มากพอที่จะไปจับกับ tannin-protein complex ในขณะที่มีการเคี้ยวเอื้องและอยู่ในกระเพาะหมัก และเมื่อ tannin-protein complex เกิดการแตกตัวที่กระเพาะจริงจึงมีส่วนช่วยลดพิษของ free tannins ที่แตกตัว เพราะเปลี่ยนไปเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่มีเสถียรภาพสูง ส่วนโปรตีนที่แตกตัวจะถูกย่อยและไปใช้ประโยชน์ต่อไป ส่งผลให้สามารถใช้ประโยชน์จากโปรตีนได้มากขึ้น



ภาพที่ 7 การป้องกันการสลายตัวของโปรตีนโดยแทนนินในกระเพาะหมัก และการสลายตัวของ tannin-protein complex ในกระเพาะแท้และลำไส้เล็กของสัตว์กระเพาะรวม

ที่มา: Kumar and D' Mello (1995)

การเสริม tannic acid (TA) ซึ่งเป็นแทนนินรูปหนึ่งที่ผลิตทางการค้า ในถั่วเหลืองและถั่วลิสง พบว่าการเสริมที่ระดับ 50 กรัมต่อกิโลกรัมวัตถุดิบแห้ง ส่งผลให้ถั่วเหลืองและถั่วลิสงมีส่วนของโปรตีนที่ละลายได้ง่ายในกระเพาะหมักน้อยกว่าการไม่เสริมแทนนิน คือมีค่าลดลงจาก 26.39 เป็น 10.89% ในถั่วเหลือง และ 32.85 เป็น 16.351% ในถั่วลิสง (Martinez *et al.*, 2004) ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณลักษณะในการย่อยสลายของโปรตีนในถั่วเหลืองและถั่วลิสง และโปรตีนที่ไม่ถูกย่อยสลายในกระเพาะหมักโดยเทคนิคถุงไนลอน

ถั่ว	TA(g kg ⁻¹)	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	RUP, %
ถั่วเหลือง	0	26.39	73.61	0.077	71.02
	10	19.79	80.21	0.051	60.29
	25	14.26	85.74	0.036	50.15
	50	10.89	89.11	0.029	43.60
ถั่วลิสง	0	32.85	67.11	0.084	74.92
	10	25.01	74.25	0.059	65.20
	25	22.74	77.24	0.042	58.00
	50	16.35	82.59	0.032	48.58

หมายเหตุ TA = tannic acid

a = ส่วนที่ละลายได้ง่าย

b = ส่วนที่มีศักยภาพในการย่อยสลายที่เวลา *t*

c = อัตราการย่อยสลายของส่วน *b*

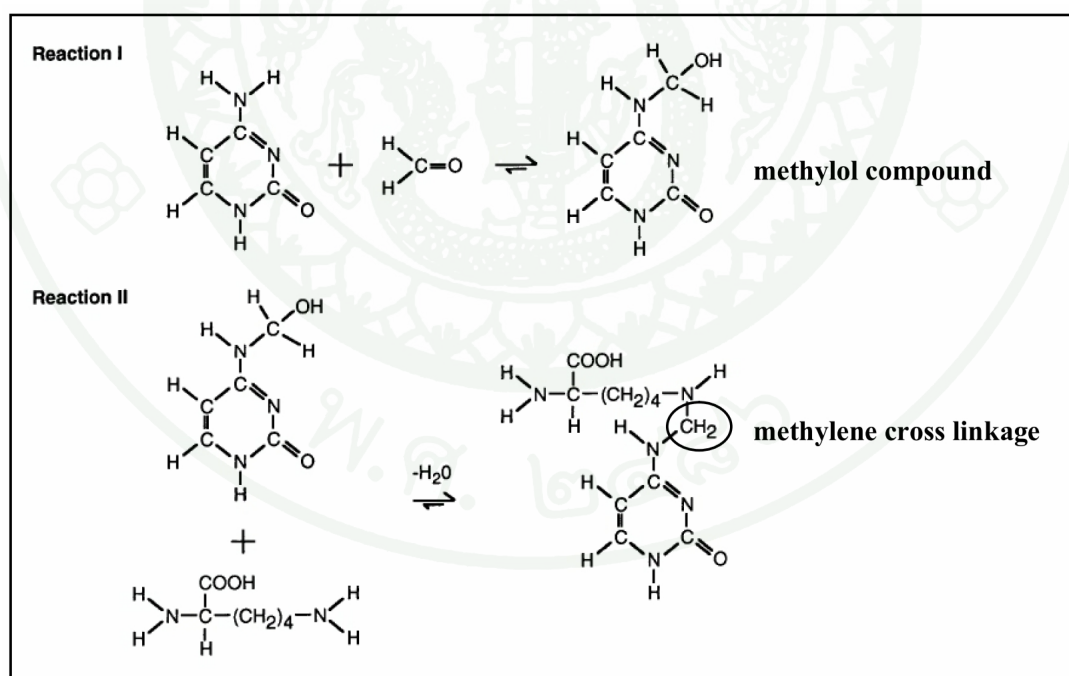
RUD = โปรตีนที่ไม่ถูกย่อยสลายจากเทคนิคถุงไนลอน จำนวนที่อัตราการไหลผ่าน 5%/h

ที่มา: Martinez *et al.* (2004)

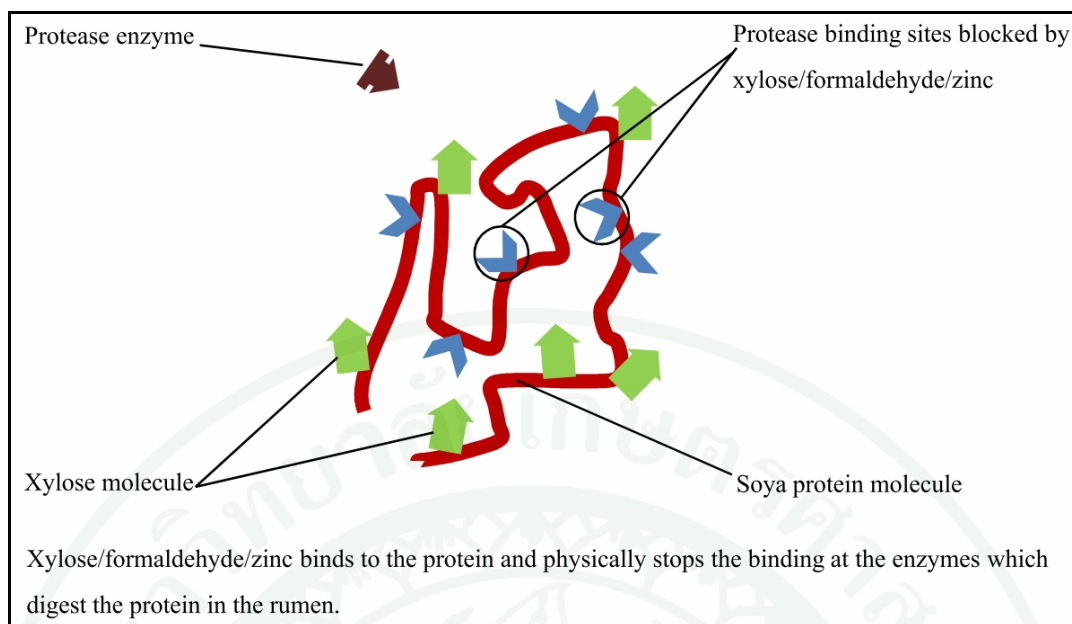
การใช้ฟอร์มัลดีไฮด์

ฟอร์มัลดีไฮด์ (formaldehyde) เป็นสารประกอบอัลดีไฮด์ที่มีสูตรทางเคมีคือ HCHO มีสถานะเป็นก๊าซ ไม่มีสี มีน้ำหนักโมเลกุล 30.3 กรัมต่อโมล ละลายได้ดีในน้ำที่อุณหภูมิห้อง ฟอร์มัลดีไฮด์ที่อยู่ในรูปสารละลายเรียกว่า ฟอร์มาลิน ซึ่งมีฟอร์มัลดีไฮด์อยู่ 37 - 50% โดยน้ำหนัก มีคุณสมบัติในการยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์และสามารถลดการย่อยสลายของโปรตีนในกระเพาะหมักได้ เมื่อทำปฏิกิริยากับโปรตีนจะกลายเป็นสารประกอบเมไธลอล (methylol compound) ซึ่งจะเกิดปฏิกิริยา

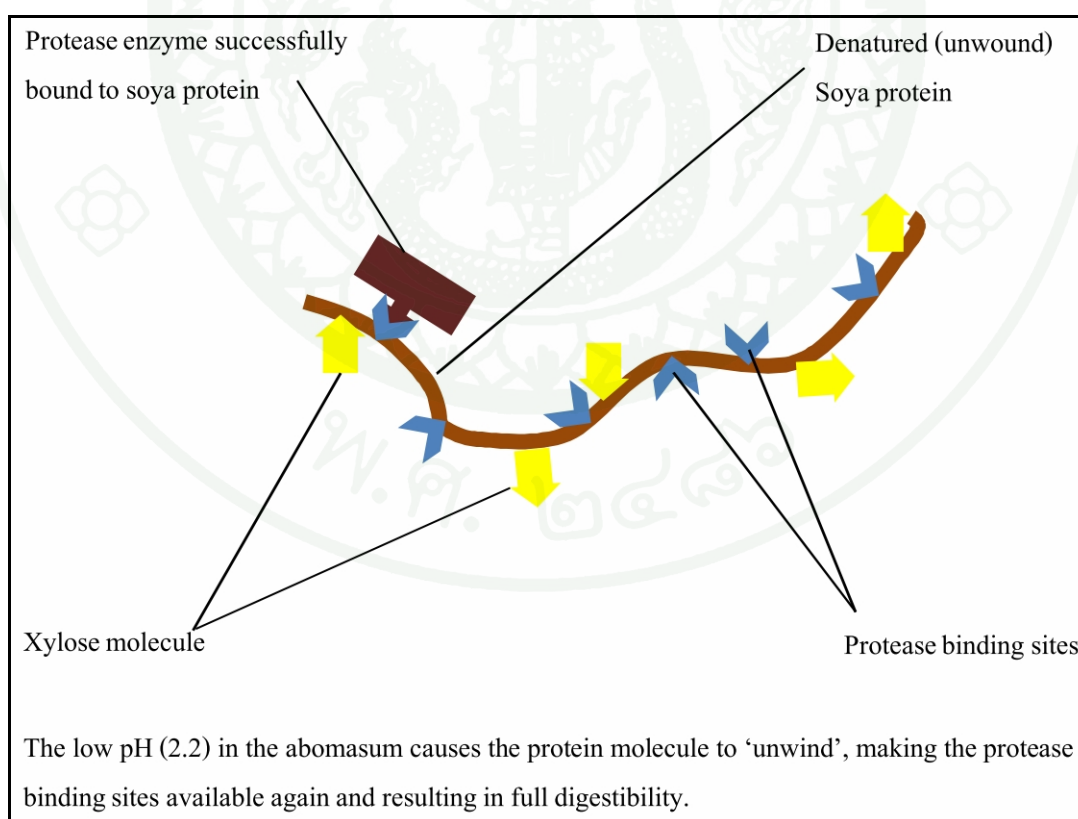
ต่อไป ทำให้เกิดการจับกันแบบ methylene cross linkage ระหว่างหรือภายในสายโซ่ของโปรตีน (ภาพที่ 8) ซึ่งจุลินทรีย์ในกระเพาะหมักไม่สามารถย่อยได้ (บุญล้อม, 2546) แต่การจับกันระหว่างฟอร์มัลดีไฮด์กับโปรตีนสามารถแยกออกจากกันได้ภายใต้สภาวะที่เป็นกรดในกระเพาะแท้ (abomasum) ทำให้เอนไซม์จากตัวสัตว์สามารถย่อยโปรตีนเหล่านี้ได้ (Barry, 1976) ซึ่งเหตุผลนี้สอดคล้องกับ Metcalf (2001) ที่พบว่าเอนไซม์ protease ไม่สามารถย่อย methylene bridge ของฟอร์มัลดีไฮด์กับโปรตีนได้ (ภาพที่ 9) แต่เมื่อผ่านไปถึงกระเพาะแท้ซึ่งมีสภาพเป็นกรด (pH2.2) เส้นสายโมเลกุลของโปรตีนจะคลายออกทำให้เอนไซม์ protease เข้าย่อยได้อย่างสมบูรณ์ (ภาพที่ 10) การทรีตกากั่วเหลียงด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ ที่ระดับ 1.1% พบว่าสัมประสิทธิ์การย่อยได้ของโปรตีนในกากั่วเหลียงลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) (Amos *et al.* 1974) การทรีตกากั่วเหลียงด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ 0.3% ในสูตรอาหารข้นโคนมที่มีกากั่วเหลียงเป็นส่วนผสม 7% ของสูตรอาหารข้น เปรียบเทียบกับกากั่วเหลียงปกติและปลาป่น พบว่าผลผลิตน้ำนมและนมที่ปรับไขมัน 4% ของโคทั้ง 3 กลุ่มแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ แต่มีแนวโน้มว่าโคกลุ่มที่ได้รับกากั่วเหลียงทรีตด้วยฟอร์มัลดีไฮด์ และกลุ่มที่ได้รับปลาป่นให้ผลผลิตน้ำนมสูงกว่ากลุ่มควบคุม (กมร, 2546)



ภาพที่ 8 methylene cross linkage ของสารประกอบเมไธลอลระหว่างโปรตีนกับฟอร์มัลดีไฮด์
ที่มา: Metcalf (2001)



ภาพที่ 9 methylene cross linkage ของสารประกอบเมไธลอลระหว่างโปรตีนกับฟอร์มัลดีไฮด์
ที่มา: Metcalf (2001)



ภาพที่ 10 การคลายตัวออกของสารประกอบเมไธลอลทำให้เอนไซม์ protease เข้าย่อยโปรตีนได้
ที่มา: Metcalf (2001)

การใช้ลิกโนซัลโฟเนต

ลิกโนซัลโฟเนต (lignosulfonate) เป็นสารที่ได้ระหว่างกระบวนการย่อยซัลไฟต์ (sulfite digestion) ของไม้ ซึ่งทำให้เกิดของเหลวซัลไฟต์ที่ประกอบด้วยเฮมิเซลลูโลส น้ำตาล และกรดลิกโนซัลโฟนิกหรือเกลือของกรด การใช้สารลิกโนซัลโฟเนตเพื่อเพิ่มโปรตีนไหลผ่านในกากถั่วเหลืองได้สนับสนุนในเบื้องต้นว่าสารลิกนินที่พบในของเหลวซัลไฟต์น่าจะเป็นตัวป้องกันไม่ให้โปรตีนถูกย่อยสลาย โดยจุลินทรีย์ในกระเพาะหมัก แต่อย่างไรก็ตาม นอกเหนือจากลิกโนซัลโฟเนตแล้วยังมีปัจจัยอื่นๆ เข้ามาเกี่ยวข้อง คือความร้อนที่ใช้และปริมาณน้ำตาลที่เป็นส่วนประกอบ เช่น ไซโลส (xylose) ก็มีความสำคัญต่อการป้องกันไม่ให้โปรตีนถูกย่อยได้ในกระเพาะหมักเช่นกัน (Winowski and Stern, 1987) การศึกษาเปรียบเทียบการใช้กากถั่วเหลืองทรีตด้วยลิกโนซัลโฟเนต (lignosulfonate-treated soybean meal; LSBM) เปรียบเทียบกับกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน (solvent soybean meal; SSBM) พบว่า กากถั่วเหลืองทรีตด้วยลิกโนซัลโฟเนต (LSBM) มีค่าโปรตีนที่ละลายได้ทันทีลดลงจาก 21 เป็น 7% ค่าโปรตีนที่ไม่ละลายเพิ่มขึ้นจาก 0% เป็น 31% ค่าของไนโตรเจนที่ไม่ละลายตัวในกระเพาะหมักเพิ่มขึ้นจาก 50% เป็น 81% เมื่อทำการบ่มในกระเพาะหมักเป็นระยะเวลา 16 ชั่วโมง แต่ค่าการย่อยได้ที่ลำไส้เล็กของไนโตรเจนที่ไม่ละลายตัวในกระเพาะหมักลดลงจาก 82.5 เป็น 78.5% และเมื่อพิจารณาถึงประสิทธิภาพการผลิต พบว่าผลผลิตน้ำนมเพิ่มขึ้นจาก 33.0 เป็น 33.6 กิโลกรัมต่อวัน โปรตีนนมเพิ่มขึ้นจาก 1.012 เป็น 1.035 กิโลกรัมต่อวัน (Awawdeh *et al.*, 2007) ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการการศึกษาของ Borucki *et al.* (2007) โดยพบว่าส่วนของโปรตีนที่ละลายได้ลดลงจาก 9.9 เป็น 7.4% ส่วนของโปรตีนที่ละลายได้ช้าเพิ่มขึ้นจาก 87.0 เป็น 88.4% โดยมีอัตราการสลายตัวลดลงจาก 0.105 เป็น 0.044% ต่อชั่วโมง

การวัดอัตราการย่อยสลายของโปรตีนจากกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน (SSBM) เปรียบเทียบกับกากถั่วเหลืองทรีตด้วย baker's yeast (SSBM treat with 0.05% baker's yeast; YSBM), กากถั่วเหลืองบีบน้ำมัน (ESBM) และกากถั่วเหลืองทรีตด้วยลิกโนซัลโฟเนต (LSBM) ในอาหารโคนม พบว่าการละลายได้ของโปรตีนลดลงยกเว้นกากถั่วเหลืองบีบน้ำมัน (ESBM) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะอุณหภูมิที่ใช้ด้วย ส่วนการย่อยได้ในลำไส้เล็กของไนโตรเจนที่ไม่ละลายตัวมีค่าใกล้เคียงกัน ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ค่าการประเมินจากการถูกย่อยสลายได้ของโปรตีนกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน (SSBM) กากถั่วเหลืองทรีตด้วย baker's yeast (YSBM) กากถั่วเหลืองบีบน้ำมัน (ESBM) และ กากถั่วเหลืองทรีตด้วยลิกโนซัลโฟเนต (LSBM)

Item	SSBM	YSBM	ESBM	LSBM
Instantly degraded N (%)	21.00	11.0	25.00	7.00
Slowly degraded protein fraction (%)	78.00	89.00	70.00	61.00
Completely undegraded protein fraction (%)	0.00	0.00	4.00	31.00
Intestinal digestibility				
RUN (% , 16h ruminal incubation in situ)	47.70	83.00	55.50	81.50
Intestinal digestibility (% of RUN)	82.50	80.00	85.90	78.50

หมายเหตุ RUN = rumen undegradable nitrogen

SSBM = กากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน

YSBM = กากถั่วเหลืองทรีตด้วย baker's yeast 0.05%

ESBM = กากถั่วเหลืองบีบน้ำมัน

LSBM = กากถั่วเหลืองทรีตด้วยลิกโนซัลโฟเนต

ที่มา: Awawdeh *et al.* (2007)

ดัชนีการละลายได้ของโปรตีน (Protein dispersibility Index; PDI)

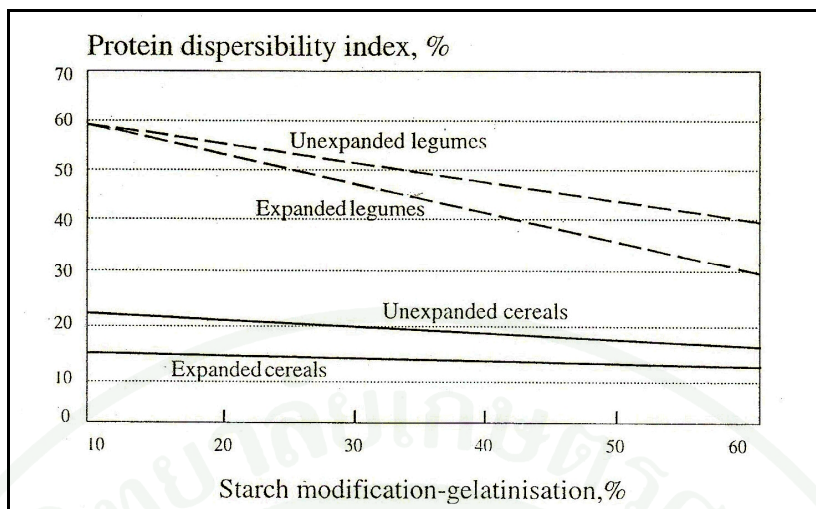
ดัชนีการละลายได้ของโปรตีน (protein dispersibility index; PDI) เป็นค่าเปอร์เซ็นต์ที่ได้จากเปอร์เซ็นต์โปรตีนที่ละลายในน้ำ (protein solubility in water) เทียบกับเปอร์เซ็นต์โปรตีนทั้งหมดในตัวอย่าง (AOCS, 2001) ปกติถั่วเหลืองดิบมีค่า PDI ประมาณ 85% โปรตีนที่ละลายน้ำส่วนใหญ่เป็นพวก albumin ซึ่งถูกทำลายได้ง่ายโดยความร้อน เมื่อเข้าเครื่องเอ็กซ์ทราด albumin บางส่วนจะถูกเปลี่ยนแปลงไป ทำให้ละลายน้ำได้น้อยลง ดังนั้นถั่วเหลืองที่ผ่านการเอ็กซ์ทราดแล้วจะต้องมีค่า PDI ไม่ต่ำกว่า 20 - 25% ถ้าค่า PDI ต่ำกว่า 20% แสดงว่าความร้อนขณะเอ็กซ์ทราดสูงเกินไป ถ้าค่า PDI ต่ำกว่า 15% แสดงว่าถั่วสุกเกินไป ทำให้โปรตีนถูกทำลายไปมาก โปรตีนที่เหลืออยู่ก็ใช้ประโยชน์ได้น้อย (Frank, 1988)

สำหรับค่า PDI นี้ บางท่านอาจเสนอเป็นค่าเปอร์เซ็นต์โปรตีนทั้งหมดที่ละลายได้ พบว่าถั่วเหลืองที่สุกได้ที่ที่มีค่า PDI (ในกรณีนี้) ประมาณ 75-80% จะดีที่สุด หากสูงกว่า 80% แสดงว่าถั่วยัง

สุกไม่พอ และหากต่ำกว่า 75% แสดงว่าถั่วสุกเกินไป (Dale and Araba, 1988; Araba and Dale, 1990 และ Dale and Whitte, 1991) และบางท่านอาจสับสนกับค่าโปรตีนที่ละลายได้ในสารละลาย โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 0.2% (0.2%KOH) ซึ่งเรียกค่านี้ว่า protein dispersibility index (PDI) เหมือนกัน แต่ในความเป็นจริงแล้วค่าดังกล่าวเป็นค่าการละลายได้ของโปรตีนในสารละลาย โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (protein solubility in potassium hydroxide, PS in KOH) โดยคิดออกมาเป็นเปอร์เซ็นต์ของปริมาณโปรตีนที่ละลายได้ทั้งหมดในถั่วเหลือง (Araba and Dale, 1990)

Chris (2008) รายงานว่า การใช้กากถั่วเหลืองในอาหารโคนมในเขตร้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ช่วงที่โคให้น้ำนมสูงสุดนั้นจำเป็นต้องนำมาผ่านความร้อน เนื่องจากโปรตีนในถั่วเหลืองดิบนั้นจะถูกจุลินทรีย์ในกระเพาะหมักย่อยได้ถึง 60 - 70% แต่เมื่อนำมาผ่านความร้อนแล้วจะทำให้ระดับของโปรตีนไหลผ่านเพิ่มขึ้นถึง 60% การให้ความร้อนแก่กากถั่วเหลืองสามารถกระทำได้โดยการ เอ็กชทรูด การอบหรือคั่ว หรือการใช้สารเคมีด้วยลิกโนซัลโฟเนต แล้วนำมาวัดค่า PDI ซึ่งค่า PDI ที่เหมาะสมจากการให้ความร้อนกากถั่วเหลืองสำหรับอาหารสัตว์กระเพาะรวมสำหรับใช้ในรูปอาหารข้นหรืออาหารผสมเสร็จ (TMR) ที่เหมาะสม คือ 9 - 11%

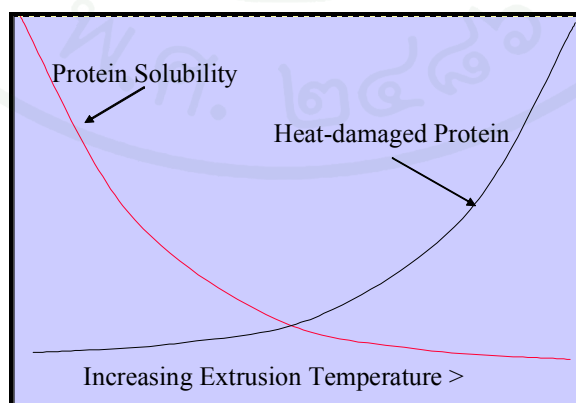
การ expansion ซึ่งเป็นกระบวนการทำให้อาหารพองตัวหรือขยายตัวด้วยเครื่อง expander ซึ่งมีหลักการคล้ายกับเครื่อง extruder แต่ให้อาหารที่ผ่านออกมาครั้งละมากกว่า โดยใช้ต้นทุนต่ำกว่า ไม่มี die ที่จะทำให้อาหารออกมารูปทรงแปลกๆ และที่สำคัญคือ จะไม่ใช่เตรียมอาหารผสมพร้อมกิน แต่จะใช้เตรียมวัตถุดิบสำหรับนำไปผสมเพื่อทำอาหารอัดเม็ด อาหารที่ผ่านเครื่อง expander จะมีผลต่อลักษณะทางกายภาพของโปรตีนเช่นเดียวกับอาหารที่ผ่านเครื่อง extruder เพราะเป็นระบบที่ใช้อุณหภูมิสูงในระยะเวลาอันสั้น (short-time high-temperature, STHT) เหมือนกัน โดยมีแนวโน้มที่ทำให้โปรตีนที่ละลายน้ำได้ลดลง ซึ่งวัดได้จากค่า PDI แต่ถึงอย่างไรก็ตาม การที่แป้งมีการเปลี่ยนแปลง จะมีการดึงเอาโปรตีนไปรวมอยู่ด้วย โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ดังนั้นโปรตีนจะไม่ละลายในน้ำด้วยวิธีง่ายๆ เพราะถูกหุ้มไว้ด้วยแป้ง แต่เอนไซม์ในทางเดินอาหารสามารถละลายเม็ดแป้ง gelatin ได้อย่างสม่ำเสมอ ทำให้โปรตีนถูกปล่อยออกมาเป็นอิสระ แต่ถึงอย่างไรก็ตาม expander มีแนวโน้มที่จะทำให้ค่า PDI ลดลง และการค้นคว้าส่วนใหญ่พบว่า กระบวนการ expansion เป็นต้นเหตุให้โปรตีนถูกทำลาย ทำให้กรดอะมิโนถูกปลดปล่อยออกมาใช้น้อยลง แต่จากการวิเคราะห์ทางเคมี พบว่าไลซีนที่ใช้ประโยชน์ได้จากข้าวสาลีบาร์เลย์ ถั่วทุกชนิด เมื่อผ่านเครื่อง expander แล้วจะไม่ลดลง



ภาพที่ 11 โปรตีนในแป้งที่เป็น gelatin จะละลายน้ำได้น้อยลง

ที่มา: Peisker (1992)

จากภาพที่ 11 ทำให้ทราบถึงอาหารที่โปรตีนสูงย่อมมีค่า PDI สูงตาม แต่เมื่อผ่าน expander ค่า PDI จะลดลงเมื่อแป้งถูกเปลี่ยนแปลงมากขึ้น แต่เมื่อเปรียบเทียบระหว่างแหล่งคาร์โบไฮเดรตจากเมล็ดธัญพืชและแหล่งโปรตีนจากถั่ว เมื่อมีการให้พลังงานมากขึ้น (แรงอัดมาก อุณหภูมิสูง) ค่า PDI ของเมล็ดธัญพืชจะลดลงน้อยกว่าพวกถั่ว ในขณะที่ค่าการเปลี่ยนแปลงของแป้งเท่าๆ กัน กรณีที่ใช้ความร้อนมากเกินไป ค่า PDI จะลดลง เช่นถั่วเหลืองที่คั่วจนไหม้ ค่า PDI อาจลดลงอยู่ในช่วง 15-20 ก็ได้ เมื่อสัตว์ได้รับถั่วประเภทนี้จะทำให้ผลผลิตลดลง ผลกระทบของเครื่อง expander ต่อค่า PDI ที่ต่ำกว่ากำหนดยังไม่เป็นที่ปรากฏ แต่จากการศึกษาการใช้เครื่อง expander ที่ผ่านมา พบว่าค่าความย่อยได้ของโปรตีนยังไม่เคยต่ำกว่าที่กำหนด (พันทิพา, 2539)



ภาพที่ 12 ผลของอุณหภูมิต่อการละลายได้และการเสถียรภาพของโปรตีน

ที่มา: Peisker (1992)

Virginia and Gabriella (2009) รายงานค่า PDI สำหรับโคนมไว้ว่า ค่า PDI เป็นค่าที่นิยมในการทดสอบระดับความร้อนที่ใช้ในการทรีตคากั่วเหลืองสำหรับใช้เป็นอาหาร โคม เพื่อทราบระดับที่เพียงพอและไม่มากเกินไป โดยให้รายละเอียดว่า การละลายได้ของโปรตีนในวัตถุดิบอาหารสัตว์จะลดลงเมื่อเพิ่มระดับความร้อนและระยะเวลาที่ใช้ ค่า PDI ที่เหมาะสมจากการให้ความร้อนถั่วเหลืองควรอยู่ในช่วง 9 - 11 ถั่วเหลืองที่มีค่า PDI สูงกว่า 14 อาจได้รับความร้อนต่ำเกินไป

ตารางที่ 4 ค่าการประเมินจากการถูกย่อยสลายได้ของโปรตีนคากั่วเหลืองทั้ง 9 กรรมวิธี

Soybean treatment	Undegraded Protein	PDI
	% of total CP	% of total CP
Unheated	33 ^a	86.3 ^a
253 °F-30 min	44 ^{bc}	30.9 ^b
275 °F-0 min	46 ^{cd}	18.5 ^c
275 °F-30 min	55 ^{de}	14.3 ^d
295 °F-0 min	57 ^{ef}	10.8 ^e
295 °F-15 min	63 ^{efg}	9.6 ^e
295 °F-30 min	61 ^{efg}	9.5 ^e
307 °F-30 min	65 ^{fg}	9.4 ^e
320 °F-30 min	66 ^g	8.6 ^e
SE	2.9	.78

หมายเหตุ ^{a-h} อักษรที่ต่างกันแถวเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05)
ที่มา: Satter *et al.* (1994)

จากตารางที่ 4 เมื่อพิจารณาค่า RUP และ ค่าการใช้ประโยชน์ได้ของไลซีน เมื่อมีการผันแปรความร้อน พบว่าระดับที่เหมาะสมในโคนมคือ การใช้อุณหภูมิ 295°F และเก็บให้ร้อนต่ออีก 30 นาที ก่อนทำให้เย็น

จากการทดลองของ Webster *et al.* (2003) ซึ่งทำการเอ็กซ์ทราคกั่วเหลืองบีบน้ำมัน (extruded-expellered soybean meal;E-ESBM) โดยใช้อุณหภูมิในการเอ็กซ์ทราค 143.3, 148.9,

154.4, 160 และ 165.6 °C (ตารางที่ 5) พบว่าค่า PDI มีค่า 19.7, 13.1, 12.9, 12.5 และ 12.2 % ตามลำดับ โดยที่ค่า PDI จะลดลงเมื่อเพิ่มอุณหภูมิของการเอ็กซ์ทรูด

ตารางที่ 5 ผลของการให้ความร้อนโดยการเอ็กซ์ทรูดกากถั่วเหลืองบีบน้ำมัน

	Extrusion temperature, °C				
	143.30	148.90	154.40	160.00	165.60
Dry matter, %	92.70	93.10	93.30	93.20	94.10
Crude protein, %	44.00	43.80	43.90	43.90	45.10
Ether extract, %	7.68	7.71	7.41	7.05	7.04
Protein dispersibility index, %	19.70	13.10	12.90	13.10	12.20
Nitrogen solubility index, %	22.80	19.70	15.20	12.70	9.00
Potassium hydroxide solubility, %	80.50	81.80	76.40	73.40	71.70
Trypsin, mg of TI/g	2.95	2.25	1.56	1.00	0.81
Urease, change in pH	0.38	0.12	0.01	0.01	0.00

ที่มา: Webster *et al.* (2003)

กากถั่วเหลือง (soybean meal)

ถั่วเหลือง (*Glycine max*) เป็นพืชน้ำมันที่ปลูกเพื่อเป็นอาหารและเพื่อสกัดน้ำมันสูงที่สุดในกลุ่มพืชให้น้ำมันทั้งหลาย แหล่งผลิตที่สำคัญคือ สหรัฐอเมริกา (60%) บราซิล (18%) และประเทศจีน (9%) ประเทศไทยผลิตถั่วเหลืองได้ประมาณปีละ 5,000,000 ตัน โดยมีแหล่งผลิตในจังหวัดภาคเหนือตอนล่างและภาคกลางตอนบน ในจำนวนผลผลิตถั่วเหลืองในประเทศประมาณกว่า 50% ใช้เป็นอาหาร ส่วนที่เหลือนำไปสกัดน้ำมัน ซึ่งเมื่อรวมกับถั่วเหลืองเมล็ดที่นำเข้าด้วยแล้ว ประเทศไทยผลิตกากถั่วเหลืองเพื่อเป็นอาหารสัตว์ได้ปีละประมาณ 400,000 ตัน จำเป็นต้องนำเข้ากากถั่วเหลืองปีละกว่า 1.0 ล้านตัน จึงนับได้ว่ากากถั่วเหลืองเป็นข้อจำกัดในการพัฒนาอุตสาหกรรมการเลี้ยงสัตว์ของไทยในอนาคต

กากถั่วเหลืองที่ใช้ในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ ได้จากการแยกน้ำมัน 2 วิธี ได้แก่ กากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน (solvent extracted soybean meal; SSBM) ได้จากการสกัดน้ำมันด้วยตัวทำละลายเคมี

(solvent extraction) และกากถั่วเหลืองบีบน้ำมัน (expellered soybean meal; ESBM) ได้จากการบีบน้ำมันด้วยเครื่องอัดเกลียว (expellered process)

ตารางที่ 6 องค์ประกอบทางเคมีของกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน

	Soybean hulls	Soybean meal 44%	Soybean meal 48%	Soybean meal, Treat/high RUP expeller	Soybean meal, Soybeans, heated	Soybeans, raw
DM %	90.0	88.0	88.0	92.0	91.0	90.0
CP %	12.1	50.0	54.5	48.7	48.5	40.9
RUP % of CP	30.0	35.0	35.0	51.0	60.0	50.0
RUP % of DM	3.6	17.5	19.1	24.8	29.1	20.5
ADF %	50.0	10.0	6.0	8.2	8.5	11.0
NDF %	67.0	14.0	8.0	20.6	12.5	13.8
TDN %	77.0	84.0	87.0	85.0	85.0	94.0
NFC %	13.5	27.3	30.0	18.1	27.1	21.9
Fat %	2.3	1.4	1.0	6.8	5.4	18.3
Ash %	5.1	7.3	6.5	5.8	6.5	5.1
Ca %	0.59	0.30	0.29	0.54	0.29	0.28
P %	0.21	0.68	0.70	0.73	0.65	0.65

ที่มา: Virginia and Gabriella (2009)

กากถั่วเหลืองมีโปรตีนประมาณ 44 - 50% ผันแปรไปกับกรรมวิธีการสกัดน้ำมันและปริมาณเปลือกที่แยกออกไป โปรตีนของกากถั่วเหลืองนับว่าเป็นโปรตีนที่คุณภาพดีที่สุดในจำนวนโปรตีนจากพืชด้วยกัน กล่าวคือ มีกรดอะมิโนสูง โดยเฉพาะไลซีน (6.8% ของโปรตีน) และอัตราส่วนกรดอะมิโนใกล้เคียงกับโปรตีนจากสัตว์มาก เนื่องจากมีเชื้อไขอยู่ต่ำ กากถั่วเหลืองจึงมีพลังงานสูงกว่ากากเมล็ดพืชน้ำมันอื่นมาก คือ อาจมีระดับพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้ (ME) สำหรับสัตว์กระเพาะเดียว 2.4 - 2.8 Mcal/กก. ผันแปรไปตามระดับของเปลือกที่ถูกแยกออกจากเมล็ดก่อนสกัดน้ำมัน กากถั่วเหลืองมีไขมันตกค้างอยู่ไม่มากนัก คือ กากถั่วเหลืองสกัดน้ำมันมีไขมันอยู่ประมาณ 1% ส่วนกากถั่วเหลืองบีบน้ำมันจะมีไขมันอยู่ 4 - 5% ไขมันถั่วเหลืองอุดมสมบูรณ์ด้วยกรดไขมันไม่อิ่มตัว ซึ่งมีกรดไขมันที่จำเป็น ลิโนเลอิก อยู่ประมาณ 50% กากถั่วเหลืองมีแคลเซียมต่ำ แต่มีฟอสฟอรัสสูงปานกลาง (0.65%) ประมาณ 50 - 70% ของฟอสฟอรัสอยู่ในรูปไฟเตทที่สัตว์

กระเพาะเดียวใช้ประโยชน์ไม่ได้ ในขณะที่ให้ความร้อนแก่ถั่วเหลือง ไฟเตทจะทำปฏิกิริยากับโปรตีนและแร่ธาตุทำให้การใช้ประโยชน์ได้ของแคลเซียม สังกะสี ทองแดง แมงกานีส โมลิบดีนัม และเหล็กลดลง ถั่วเหลืองมีวิตามินที่ละลายในไขมันต่ำ แต่มีโคลีนและไทอามีนอุดมสมบูรณ์และเป็นแหล่งที่ดีพอประมาณของไนอาซิน ไรโบฟลาวิน และกรดแพนโททีนิก การให้ความร้อนถั่วเหลืองจะทำลายไทอามีนไปประมาณ 10 - 75% แต่ระดับการสูญเสียนี้อาจลดลงได้โดยการให้ความร้อนขึ้นด้วยวิธีผ่านไอน้ำเข้าโดยตรง (สาริธ, 2547) องค์ประกอบทางเคมีของกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน (SSBM) แสดงในตารางที่ 4

สารยับยั้งการใช้โภชนะในกากถั่วเหลือง

ถั่วเหลืองดิบมีสารยับยั้งการใช้โภชนะอยู่หลายชนิด ที่สำคัญๆ มีอยู่ 2 ชนิด คือ สารยับยั้งเอนไซม์ย่อยโปรตีน (protease inhibitors) อันมี Kunitz factor (ยับยั้งทริปซิน) และ Bowman-Birk factor (ยับยั้งทริปซินและคัยโมทริปซิน) เป็นสารยับยั้งหลัก และสารกระตุ้นการจับตัวเป็นก้อนของเม็ดเลือดแดง (hemagglutinin หรือ lectins) นอกจากนั้นยังมีสารยับยั้งที่ไม่ค่อยมีความสำคัญในการใช้กากถั่วเหลืองในทางปฏิบัติอีกหลายชนิด เช่น สารทำให้เกิดอาการแพ้ (allergens) กระตุ้นการสลายเม็ดเลือด คอหอยพอก ขัดขวางการสร้างกระดูก ขัดขวางการใช้แร่ธาตุ โอลิโกแซคคาไรด์ และสารที่เกิดจาก maillard reaction เป็นต้น

ในจำนวนสารยับยั้งการใช้โภชนะเหล่านี้มีเฉพาะ protease inhibitions และ hemagglutinins เท่านั้นที่ถือว่าสำคัญในการยับยั้งการใช้โภชนะในอาหารสัตว์ โชคดีที่สารยับยั้งทั้งหมดกลุ่มนี้ถูกทำลายไปด้วยความร้อน ดังนั้นการให้ความร้อนที่พอเหมาะจึงมีความสำคัญในการใช้กากถั่วเหลืองเป็นแหล่งโปรตีนในอาหารสัตว์ วิธีการที่จะระบุความพอเหมาะของการใช้ความร้อนอาจแสดงด้วยระดับของสารยับยั้งทริปซิน หรือแสดงโดยตัวชี้บ่งอื่นๆ กากถั่วเหลืองที่สุกพอดีควรมีคุณสมบัติดังนี้

- มี trypsin inhibitor unit (TIU, มก.ของทริปซินที่ถูกยับยั้งโดยกากถั่วเหลือง 1 กรัม) ไม่เกิน 3.0 มก./กรัม

- มี Urease index (pH ของสารละลายยูเรียต่อ 0.2 กรัมกากถั่วเหลือง บ่มที่ 30 °C เป็นเวลา 30 นาที) ไม่เกิน 0.02 - 0.2 ถ้าให้ดีไม่ควรเกิน 0.15

- มี Urease activity (มก.ของไนโตรเจนของสารละลายยูเรียที่ถูกปลดปล่อยโดยกากถั่วเหลือง 1 กรัม บ่มที่ 30 °C นาน 1 นาที) ไม่เกิน 0.4 มก./กรัม/นาที

- มี protein dispersibility index (PDI คือปริมาณของโปรตีนที่ละลายใน KOH 0.2% เมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์โปรตีนที่มีในถั่วเหลือง) ในระหว่าง 75 - 80% หรือถ้าคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของกากถั่วเหลือง ควรมีค่าอยู่ระหว่าง 20 - 25%

- นอกจากนี้ยังอาจวัดได้โดยการข้อมสี วัดหาไลซีนที่ใช้ประโยชน์ได้ และอื่นๆ

ผลการใช้กากถั่วเหลืองที่ผ่านกรรมวิธีป้องกันการย่อยสลายโปรตีนในกระเพาะหมักในโคนม

Stern *et al.* (1985) ได้ทำการศึกษการย่อยได้ในกระเพาะหมักของโปรตีนในอาหารโคนมที่ได้รับกากถั่วเหลือง ถั่วเหลืองทั้งเมล็ด และถั่วเหลืองทั้งเมล็ดที่ผ่านการเอ็กซ์ทราคที่ 132 และ 149 °C พบว่า มีค่าการย่อยได้ 73, 80, 66 และ 60% ตามลำดับ และการใช้ประโยชน์ได้ของกรดอะมิโนที่จำเป็นและการดูดซึมในลำไส้เล็กของถั่วเหลืองที่ผ่านการเอ็กซ์ทราคมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับอาหารที่ใช้กากถั่วเหลือง และถั่วเหลืองทั้งเมล็ด สอดคล้องกับการศึกษาของ Reddy and Morrill (1993) ที่ศึกษาการใช้ถั่วเหลืองที่ผ่านการอบที่อุณหภูมิ 99, 127 และ 143 °C และมีการทำให้เย็นทันทีหลังจากผ่านการอบ พบว่าลูกโคที่ได้รับถั่วเหลืองที่ผ่านการอบที่ 143 °C มีการกินได้ น้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น และค่าเฉลี่ยของพลังงานมากกว่ากลุ่มของถั่วเหลืองที่ผ่านการอบที่ 99 และ 127 °C เช่นเดียวกับการศึกษาของ Faldet and Satter (1991) ที่พบว่า ถั่วเหลืองไขมันเต็มที่ผ่านขบวนการให้ความร้อนจะช่วยเพิ่มปริมาณน้ำนม 4.5 กิโลกรัมต่อวัน และโปรตีนในน้ำนม 0.09 กิโลกรัมต่อวัน ที่มากกว่ากากถั่วเหลือง และถั่วเหลืองที่ไม่ผ่านขบวนการผลิต Owen and Edlowe (1986) พบว่า โคนมที่ได้รับถั่วเหลืองที่ผ่านการอบจะทำให้ปริมาณน้ำนมเพิ่มขึ้นมีค่าเท่ากับ 1.4% เปรียบเทียบกับถั่วเหลืองดิบ ในขณะที่ Rueggsegger and Schultz (1985) พบว่าโคนมที่อยู่ในช่วงแรกของการให้น้ำนมที่ได้รับอาหารที่ใช้ถั่วเหลืองทั้งเมล็ดที่ผ่านการให้ความร้อน ให้ปริมาณน้ำนมเพิ่มขึ้น 1 กิโลกรัมต่อวัน เมื่อเทียบกับกากถั่วเหลือง Kung and Huber (1983) ได้ศึกษาการใช้กากถั่วเหลือง และถั่วเหลืองไขมันเต็มที่ผ่านการอบเป็นแหล่งโปรตีนในสูตรอาหารที่มีโปรตีนหยาบ 14 และ 17% (ตารางที่ 7) พบว่า ถั่วเหลืองไขมันเต็มที่ผ่านการอบทำให้ปริมาณน้ำนมสูงกว่ากลุ่มที่ใช้กากถั่วเหลืองทั้ง 2 ระดับโปรตีน แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ แต่เปอร์เซ็นต์ไขมันเนยทั้ง 2 ระดับมีค่าต่ำกว่าในกลุ่มที่ได้รับกากถั่วเหลือง แต่เมื่อพิจารณาเป็นค่าผลผลิตไขมันเนยต่อวัน พบว่าไม่มีความแตกต่างกัน คือ มีค่า 1.046 และ 1.027 กิโลกรัม ในโคนมที่ได้รับอาหารโปรตีน 14% และ 1.068 และ 1.074 กิโลกรัมในโคนมที่ได้รับอาหารโปรตีน 17% ซึ่งเป็นในทิศทางเดียวกันกับการทดลองของ Owen *et al.* (1985) ที่ได้ศึกษา

เปรียบเทียบระหว่างถั่วเหลืองไขมันเต็ม ถั่วเหลืองไขมันเต็มที่ผ่านการอบ และถั่วเหลืองไขมันเต็มที่ผ่านการอบและบดต่อประสิทธิภาพการผลิตของโคในช่วงที่ให้นมดังแสดงในตารางที่ 8 ซึ่งพบว่า ถั่วเหลืองไขมันเต็มที่ผ่านการอบทำให้ปริมาณการกินได้ของวัตถุดิบ ไขมันเนย และปริมาณน้ำนมเพิ่มขึ้น ในขณะที่การบดของถั่วเหลืองช่วยให้ผลผลิตไขมันเนยเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับการใช้โดยไม่บด

ตารางที่ 7 อิทธิพลของกากถั่วเหลืองและถั่วเหลืองไขมันเต็มที่ผ่านการอบในอาหารที่มีระดับโปรตีนต่างกัน 2 ระดับต่อประสิทธิภาพการผลิตของโคนม

	ระดับโปรตีนในอาหาร (%)			
	14		17	
	ถั่วเหลืองไขมันเต็ม ที่ผ่านการอบ	กากถั่วเหลือง	ถั่วเหลืองไขมันเต็ม ที่ผ่านการอบ	กากถั่วเหลือง
ปริมาณน้ำนม (กก./วัน)	35.10	34.00	35.60	34.90
ช่วงระยะเวลาการให้นม	110.40	106.40	113.20	109.90
ไขมันเนย (%)	2.98	3.02	3.00	3.08

ที่มา: Kung and Huber (1983)

ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบถั่วเหลืองไขมันเต็มที่ผ่านและไม่ผ่านการอบ รวมทั้งการบดต่อประสิทธิภาพการผลิตของโคในช่วงให้นม

	วิธีการเกี่ยวกับถั่วเหลืองไขมันเต็ม			
	ไม่มีการบด	มีการบด	ผ่านการอบแต่ ไม่ได้บด	ผ่านการอบแต่มี การบด
ปริมาณการกินได้ (วัตถุดิบ, กก./วัน)	21.40	20.50	22.80	22.30
ปริมาณน้ำนม (กก./วัน)	29.50	29.80	31.40	30.70
ไขมันเนย (%)	3.28	3.40	3.46	3.57
โปรตีนในน้ำนม (%)	2.87	2.99	3.04	2.93
ไขมันสะสมในนม (กก./วัน)	25.60	26.30	28.60	28.10

ที่มา: Owen *et al.* (1985)

จากข้อมูลการศึกษาและการทดสอบในฟาร์ม Linn (1986) ได้แนะนำแนวทางการใช้ถั่วเหลืองทั้งดิบและที่ผ่านความร้อนในโคนม ดังต่อไปนี้

1. โคนมควรได้รับในระดับไม่เกิน 2.27 กิโลกรัมต่อตัวต่อวัน และในสูตรอาหารข้นควรต่ำกว่า 20%
2. สูตรอาหารควรมีแคลเซียม 0.8 - 1.0% น้ำหนักแห้ง เพื่อให้แน่ใจว่าแม่โคนมได้รับแคลเซียมอย่างเพียงพอ เนื่องจากไขมันบางส่วนจะจับกับแคลเซียมทำให้การนำแคลเซียมไปใช้ได้น้อยลง
3. โคนมได้รับอาหารหยาบเยื่อใยที่เพียงพอ เนื่องจากไขมันในถั่วเหลืองไขมันเต็มอาจมีผลทำให้การย่อยได้ของเยื่อใยลดลง และเปอร์เซ็นต์ไขมันในน้ำนมอาจลดลงหากองค์ประกอบเยื่อใย ADF ในสูตรอาหารต่ำกว่า 19% ของน้ำหนักแห้ง
4. ไม่ควรเก็บถั่วเหลืองที่บดให้แตกแล้วไว้นานเกิน 1 สัปดาห์ เพราะอาจเกิดการเหม็นหืน (rancidity) โดยเฉพาะในฤดูร้อนได้

การใช้โปรตีนไหลผ่านในอาหารโคนมได้มีการแนะนำ และมีการใช้ในการเลี้ยงโคนมในประเทศต่างๆ ที่พัฒนาแล้วมานาน แต่โปรตีนไหลผ่านที่แนะนำมักเป็นโปรตีนธรรมชาติที่ทนต่อการย่อยของจุลินทรีย์ในกระเพาะหมัก เช่น โปรตีนในกากเมล็ดฝ้าย โปรตีนปลาป่น เป็นต้น หรือโปรตีนที่ผ่านการปรุงแต่งด้วยสารเคมี เช่น โปรตีนจากกากถั่วเหลืองที่ถูกทรีตด้วยลิกโนซัลโฟเนต หรือฟอร์มาลดีไฮด์ เป็นต้น แต่โปรตีนเหล่านั้นมีปริมาณค่อนข้างจำกัด เกษตรกรไม่สามารถหาซื้อมาใช้ได้อย่างเพียงพอ รวมทั้งอาจมีราคาแพง ทำให้ต้นทุนการผลิตน้ำนมแพงตามไปด้วย จึงอาจไม่เหมาะกับการแนะนำให้แหล่งโปรตีนไหลผ่านหลักในอาหารโคนมสำหรับประเทศไทย

การทำให้โปรตีนสามารถทนทานต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ในกระเพาะหมัก โดยการทำให้อาหารหรือวัตถุดิบอาหารโปรตีนผ่านความร้อนในระดับและระยะเวลาที่แตกต่างกันไปด้วยกระบวนการเอ็กซ์ทรูด สามารถทำให้องค์ประกอบโปรตีนคงทนในกระเพาะหมัก โดยเกิดการสลายตัวในกระเพาะหมักลดลง และเมื่อไหลผ่านเข้าสู่กระเพาะจริงและลำไส้เล็ก อาหารและโปรตีนในอาหารก็จะถูกย่อยและดูดซึมเข้าสู่ร่างกาย เพื่อนำไปสร้างผลผลิตน้ำนมได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด ดังนั้นในการศึกษารุ่นนี้จึงตั้งสมมติฐานว่า การให้ความร้อนโดยผ่านการเอ็กซ์ทรูดอย่างเดียว หรือการเอ็กซ์ทรูดร่วมกับมันเส้นและแทนนินจากพืชอาหารสัตว์ในระดับที่

เหมาะสม สามารถเพิ่มโปรตีนไหลผ่านจากกากถั่วเหลืองทั้งที่ได้จากการสกัดด้วยตัวทำละลายเคมี (solvent extracted soybean meal; SSBM) และกากถั่วเหลืองที่ได้จากการบีบน้ำมัน (expellered soybean meal; ESBM) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเป็นวิธีการที่มีศักยภาพสูงในการเพิ่มคุณภาพกากถั่วเหลืองให้เป็นแหล่งวัตถุดิบโปรตีนสำหรับการเลี้ยงโคนมที่สำคัญในประเทศไทยต่อไป



อุปกรณ์และวิธีการ

การดำเนินการวิจัยเพื่อให้บรรลุตามวัตถุประสงค์ ได้แบ่งงานวิจัยออกเป็น 3 การทดลอง ดังนี้ คือ

การทดลองที่ 1 การทดสอบเบื้องต้นเพื่อหากระบวนการผลิตโปรตีนไหลผ่านที่เหมาะสมในกากถั่วเหลืองที่ผ่านการเอ็กซ์ทรูด โดยใช้ค่าดัชนีการละลายได้ของโปรตีน (Protein dispersibility Index; PDI) เป็นตัวชี้วัด

กากถั่วเหลืองที่ใช้ในการทดลองได้จากการแยกน้ำมัน 2 วิธี คือ กากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน (solvent extracted soybean meal; SSBM) ได้จากการสกัดน้ำมันด้วยตัวทำละลายเคมี (solvent extraction) และกากถั่วเหลืองบีบน้ำมัน (expellered soybean meal; ESBM) ที่ได้จากการบีบน้ำมันด้วยเครื่องอัดเกลียว (expellered process) ขนาดเล็ก แล้วนำมาผ่านกระบวนการเพิ่มโปรตีนไหลผ่านด้วยความร้อนจากการเอ็กซ์ทรูด (extrusion) ผ่านเครื่องเอ็กซ์ทรูด (extruder) และวัดค่าดัชนีการละลายได้ของโปรตีน (protein dispersibility index; PDI) เป็นตัวชี้วัดเบื้องต้น ในแต่ละกระบวนการเอ็กซ์ทรูดมีการผันแปรความชื้น อุณหภูมิ ระยะเวลา รวมทั้งเสริมแทนนินจากไบมันสำปะหลังแห้ง และมันเส้นระดับต่างๆ ในกากถั่วเหลืองขณะทำการเอ็กซ์ทรูด เพื่อให้ได้กระบวนการผลิตที่เหมาะสมที่สุด

อุปกรณ์

อุปกรณ์ที่ใช้ทดลอง

- อุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับการเอ็กซ์ทรูด ได้แก่ เครื่องบดวัตถุดิบอาหาร เครื่องร่อนวัตถุดิบอาหาร และเครื่องเอ็กซ์ทรูด
- อุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับการวิเคราะห์โปรตีนและค่าดัชนีการละลายได้ของโปรตีน

วิธีการ

วิธีการทดลอง

นำวัตถุดิบ (กากถั่วเหลือง มันเส้น และไขมันสำปะหลังแห้ง) มาบดละเอียด จากนั้นนำมา ร่อนเพื่อแยกอนุภาคขนาดใหญ่ออก แล้วจึงนำวัตถุดิบทั้งหมดมาผสมให้เข้ากันตามอัตราส่วน จากนั้นผสมน้ำเพื่อปรับระดับความชื้น คลุกให้เข้ากันในภาชนะโดยใช้มือ แล้วจึงทำการเอ็กซ์ทรูด โดยใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูด แล้วจึงนำกากถั่วเหลืองเอ็กซ์ทรูดที่ได้มาผึ่งให้แห้งในที่โล่ง และวิเคราะห์ ค่าโปรตีนและค่าดัชนีการละลายได้ของโปรตีนเพื่อทดสอบหากระบวนการผลิตโปรตีนไหลผ่านที่ เหมาะสมจากกากถั่วเหลืองเบื้องต้น

การทดสอบที่ 1 การเอ็กซ์ทรูดกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน (SSBM) ร่วมกับไขมันสำปะหลัง แห้งที่ระดับต่างๆ แบ่งเป็น 3 กลุ่ม ดังแสดงในตารางที่ 9

ตารางที่ 9 การทดสอบที่ 1 การเอ็กซ์ทรูดกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน (SSBM) ร่วมกับไขมันสำปะหลัง แห้งที่ระดับต่างๆ แบ่งเป็น 3 กลุ่ม

กลุ่มที่	กากถั่วเหลือง (%)	ไขมัน (%)	น้ำ ^{1/} (%)
1	SSBM 100	0	20
2	SSBM 95	5	20
3	SSBM 90	10	20

หมายเหตุ ^{1/} เปรอร์เซ็นต์น้ำที่ใส่เพิ่มเข้าไปในส่วนผสมวัตถุดิบอาหาร

การทดสอบที่ 2 การเอ็กซ์ทรูดกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน (SSBM) ร่วมกับไขมันสำปะหลังแห้งและมันเส้นที่ระดับต่างๆ แบ่งเป็น 6 กลุ่ม ดังแสดงในตารางที่ 10

ตารางที่ 10 การทดสอบที่ 2 การเอ็กซ์ทรูดกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน (SSBM) ร่วมกับไขมันสำปะหลังแห้งและมันเส้นที่ระดับต่างๆ แบ่งเป็น 6 กลุ่ม

กลุ่มที่	กากถั่วเหลือง (%)	ไขมันสำปะหลัง (%)	มันเส้น (%)	น้ำ ^{1/} (%)
1	SSBM 97.5	0	2.50	30
2	SSBM 92.5	5	2.50	30
3	SSBM 87.5	10	2.50	30
4	SSBM 95.0	0	5.00	30
5	SSBM 90.0	5	5.00	30
6	SSBM 85.0	10	5.00	30

หมายเหตุ ^{1/} เปอร์เซ็นต์น้ำที่ใส่เพิ่มเข้าไปในส่วนผสมวัตถุดิบอาหาร

การทดสอบที่ 3 การเอ็กซ์ทรูดกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน (SSBM) ร่วมกับไขมันลำปะหลังแห้งและมันเส้นที่ระดับต่างๆ โดยกำหนดความผันแปรด้วยความชื้น แบ่งเป็น 18 กลุ่ม ดังแสดงในตารางที่ 11

ตารางที่ 11 การทดสอบที่ 3 การเอ็กซ์ทรูดกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน (SSBM) ร่วมกับไขมันลำปะหลังแห้งและมันเส้นที่ระดับต่างๆ โดยผันแปรด้วยความชื้น แบ่งเป็น 18 กลุ่ม

กลุ่มที่	กากถั่วเหลือง (%)	ไขมัน (%)	มันเส้น (%)	น้ำ ^{1/} (%)
1	SSBM 97.5	0	2.50	15
2	SSBM 92.5	5	2.50	15
3	SSBM 87.5	10	2.50	15
4	SSBM 97.5	0	2.50	20
5	SSBM 92.5	5	2.50	20
6	SSBM 87.5	10	2.5	20
7	SSBM 97.5	0	2.50	25
8	SSBM 92.5	5	2.50	25
9	SSBM 87.5	10	2.50	25
10	SSBM 95.0	0	5.00	15
11	SSBM 90.0	5	5.00	15
12	SSBM 85.0	10	5.00	15
13	SSBM 95.0	0	5.00	20
14	SSBM 90.0	5	5.00	20
15	SSBM 85.0	10	5.00	20
16	SSBM 95.0	0	5.00	25
17	SSBM 90.0	5	5.00	25
18	SSBM 85.0	10	5.00	25

หมายเหตุ ^{1/} เปอร์เซ็นต์น้ำที่ใส่เพิ่มเข้าไปในส่วนผสมวัตถุดิบอาหาร

การทดสอบที่ 4 การเอ็กซ์ทรูดกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน (SSBM) และกากถั่วเหลืองบีบน้ำมัน (ESBM) โดยกำหนดความผันแปรด้วยความชื้นที่ระดับต่างๆ แบ่งเป็น 6 กลุ่ม ดังแสดงในตารางที่ 12

ตารางที่ 12 การทดสอบที่ 4 การเอ็กซ์ทรูดกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน (SSBM) และกากถั่วเหลืองบีบน้ำมัน (ESBM) โดยผันแปรด้วยความชื้นที่ระดับต่างๆ แบ่งเป็น 6 กลุ่ม

กลุ่มที่	กากถั่วเหลือง (%)	น้ำ ^{1/} (%)
1	SSBM 100	25
2	SSBM 100	20
3	SSBM 100	15
4	ESBM 100	25
5	ESBM 100	20
6	ESBM 100	15

หมายเหตุ ^{1/} เปอร์เซ็นต์น้ำที่ใส่เพิ่มเข้าไปในส่วนผสมวัตถุดิบอาหาร

การทดสอบที่ 5 การเอ็กซ์ทรูดกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน (SSBM) และกากถั่วเหลืองบีบน้ำมัน (ESBM) ร่วมกับไขมันสำปะหลังแห้งและมันเส้นที่ระดับต่างๆ โดยกำหนดปริมาณน้ำที่ใส่เพิ่มเข้าไปในส่วนผสมวัตถุดิบอาหารอีก 15% แบ่งเป็น 14 กลุ่ม ดังแสดงในตารางที่ 13

ตารางที่ 13 การทดสอบที่ 5 การเอ็กซ์ทรูดกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน (SSBM) และกากถั่วเหลืองบีบน้ำมัน (ESBM) ร่วมกับไขมันสำปะหลังแห้งและมันเส้นที่ระดับต่างๆ โดยกำหนดปริมาณน้ำที่ใส่เพิ่มเข้าไปในส่วนผสมวัตถุดิบอาหารอีก 15% แบ่งเป็น 14 กลุ่ม

กลุ่มที่	กากถั่วเหลือง (%)	ไขมัน (%)	มันเส้น (%)	น้ำ ^{1/} (%)
1	SSBM ^{2/}	-	-	-
2	SSBM	0.00	0.00	15
3	SSBM 95	5.00	0.00	15
4	SSBM 90	10.00	0.00	15
5	SSBM 97.5	0.00	2.50	15
6	SSBM 92.5	5.00	2.50	15
7	SSBM 87.5	10.00	2.50	15
8	ESBM ^{2/}	-	-	-
9	ESBM 100	0.00	0.00	15
10	ESBM 95	5.00	0.00	15
11	ESBM 90	10.00	0.00	15
12	ESBM 97.5	0.00	2.50	15
13	ESBM 92.5	5.00	2.50	15
14	ESBM 87.5	10.00	2.50	15

หมายเหตุ ^{1/} เปอร์เซ็นต์น้ำที่ใส่เพิ่มเข้าไปในส่วนผสมวัตถุดิบอาหาร

^{2/} กลุ่มควบคุม (ไม่ได้เอ็กซ์ทรูด)

การวิเคราะห์ทางเคมี

วิเคราะห์ค่าโปรตีนหยาบ ตามวิธีของ AOAC. (1990) และวิเคราะห์ค่าดัชนีการละลายได้ของโปรตีน (PDI) ตามวิธีของ AOCS. (2001)

แผนการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

เปรียบเทียบค่าดัชนีการละลายได้ของโปรตีน (PDI) ระหว่างกลุ่มทดลองกับกลุ่มควบคุม และค่ามาตรฐานที่ใช้โดยทั่วไปสำหรับสัตว์กระเพาะรวม ร่วมกับกระบวนการผลิตที่เหมาะสม (ความสะดวก ความง่ายในการปฏิบัติงาน ความพร้อมและประสิทธิภาพของเครื่องมือ) เพื่อคัดเลือกเป็นกลุ่มการทดลองสำหรับนำไปศึกษาค่าการละลายและการย่อยสลายได้ของโปรตีนในกระเพาะหมักของโปรตีนรวม โดยเทคนิคถุงไนลอนในการทดลองที่ 2 ต่อไป

การทดลองที่ 2 การศึกษาเปรียบเทียบค่าการละลายและการย่อยสลายได้ในกระเพาะหมักของโปรตีนรวม ในกากถั่วเหลืองที่ผ่านการเอ็กซ์ทราด โดยเทคนิคถุงไนลอน

อุปกรณ์

สัตว์ทดลอง

โคนมเพศผู้ พันธุ์โฮลไดน์ฟรีเซียน x พื้นเมือง ที่ได้ทำการเจาะกระเพาะหมักไว้แล้ว อายุประมาณ 2 ปี น้ำหนักเฉลี่ยประมาณ 450 กิโลกรัม จำนวน 2 ตัว เลี้ยงในคอกเลี้ยงเดี่ยว พื้นคอนกรีต มีรางอาหารหยاب และน้ำอยู่ด้านหน้าคอกให้กินตลอดเวลา

อาหารทดลอง

เป็นการเปรียบเทียบระหว่างกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน (SSBM) ที่ใช้กันทั่วไปในอาหารสัตว์ (กลุ่มควบคุม) กากถั่วเหลืองบีบน้ำมัน (ESBM) ที่ได้จากการบีบน้ำมันด้วยเครื่องอัดเกลียวขนาดเล็ก และกากถั่วเหลืองที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนโดยการเอ็กซ์ทราดอย่างเดียว หรือการเอ็กซ์ทราดร่วมกับไบมันสำปะหลัง และมันเส้น ที่ได้รับการทดสอบเบื้องต้นแล้วจากการทดลองที่ 1

อุปกรณ์ที่ใช้ทดลอง

- อุปกรณ์และเครื่องมือสำหรับการหาค่าการละลายและการย่อยสลายได้ในกระเพาะหมักของโปรตีน โดยเทคนิคถุงไนลอน ได้แก่ ถุงไนลอนขนาด 7 x 14 เซนติเมตร ที่ทำจาก polyester cloth (ขนาดรู 20 - 60 ไมครอน) ก้านสายยางยาว 20 - 45 เซนติเมตรสำหรับผูกถุงไนลอน ขางเส้น

สำหรับมัดปากถุงในลอน เส้นเอ็นสำหรับผูกถุงในลอนเข้ากับก้านสายยาง ลูกแก้วเล็กสำหรับถ่วงถุงในลอนให้กระจายอยู่ทั่วไปในกระเพาะหมัก

- เครื่องชั่งน้ำหนักสำหรับชั่งตัวอย่างอาหารทดลอง
- อุปกรณ์ในห้องวิเคราะห์อาหารสัตว์ เพื่อหาองค์ประกอบทางเคมี

วิธีการ

แผนการทดลอง

ใช้แผนการทดลองแบบบล็อกสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design, RCBD) โดยใช้โคเจาะกระเพาะจำนวน 2 ตัว

วิธีการทดลอง

ชั่งน้ำหนักอาหาร 3 - 5 กรัม (วัตถุแห้ง) ใส่ในถุงในลอน (ถ่วงน้ำหนักถุงในลอนโดยใช้ลูกแก้ว) มัดปากถุงด้วยหนังยางแล้วผูกเข้ากับสายยางด้วยเส้นเอ็น จุ่มแช่ในกระเพาะหมัก ที่ 0, 2, 4, 8, 12, 24 และ 48 ชั่วโมง แต่ละช่วงเวลาใช้ตัวอย่างกลุ่มละ 2 ถุง ซึ่งจะใช้ระยะเวลาในการทดลองทั้งหมด 48 ชั่วโมง เมื่อครบระยะเวลาที่กำหนด จึงนำถุงในลอนออกมาจากกระเพาะหมักพร้อมกันทั้งหมด ซึ่งภายในถุงในลอนจะคงยังเหลือส่วนอาหารที่ยังไม่ถูกย่อยสลาย จากนั้นนำไปล้างด้วยน้ำสะอาดเพื่อขจัดอาหารหรือจุลินทรีย์ที่ติดมากับถุงในลอนออกจนสะอาด แล้วนำไปอบในตู้อบอุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

การบันทึกผล

ในช่วงก่อนการทดลองจะมีการชั่งน้ำหนักถุงเปล่า และน้ำหนักของตัวอย่างอาหารทดลอง และจดบันทึกไว้ ส่วนในช่วงหลังการทดลอง เมื่อนำไปอบเรียบร้อยแล้วนำออกมาชั่งหาน้ำหนักที่เหลือ และจดบันทึกไว้แล้วคำนวณอัตราการย่อยสลายในกระเพาะหมัก โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป NEWAY (Ørskov and McDonald, 1979)

การวิเคราะห์ทางเคมี

อาหารที่เหลืออยู่ในถุงในตอนที่ผ่านการอบที่ระยะเวลาเดียวกัน จะถูกนำมาวิเคราะห์หาปริมาณวัตถุแห้งและโปรตีน ตามวิธีของ AOAC. (1990)

การวิเคราะห์ข้อมูล

จากแผนการทดลองที่ 2 เป็นการทดลองแบบบล็อกสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design, RCBD) ซึ่งมีแบบแผนจำลองทางสถิติดังนี้

$$Y_{ij} = \mu + \rho_i + \tau_j + \varepsilon_{ij}$$

เมื่อ

Y_{ij} = ค่าสังเกตที่ได้จากบล็อกที่ i ทรีตเมนต์ที่ j เมื่อ $i = 1, 2$ และ $j = 1, 2, 3, \dots, n$

μ = คือ ค่าเฉลี่ยของประชากรทั้งหมด

ρ_i = คือ อิทธิพลเนื่องจากบล็อกที่ i เมื่อ $i = 1, 2$

τ_j = คือ อิทธิพลเนื่องจากทรีตเมนต์ ที่ j เมื่อ $j = 1, 2, 3, \dots, n$

ε_{ij} = คือ ความคลาดเคลื่อนของการทดลอง

ข้อมูลจากการทดลองนี้ นำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance) ตามแผนการทดลองดังกล่าว และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกลุ่มโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SAS (2003)

การทดลองที่ 3 การศึกษาสมรรถภาพการผลิตของโคนมที่ได้รับกากถั่วเหลืองที่ผ่านการให้ความร้อนโดยการเอ็กซ์ทรูดเป็นแหล่งโปรตีนไหลผ่าน

อุปกรณ์

สัตว์ทดลอง

โคนมลูกผสมพันธุ์โฮสต์ไดน์ฟรีเซียน x พันธุ์เมือง ในระยะให้นมช่วงต้นที่มีปีการให้นม 1-3 ปี โดยได้รับการทำวัคซีน และถ่ายพยาธิก่อนเริ่มการทดลอง

อาหารทดลอง

เป็นอาหารชั้นที่มีระดับโปรตีนหยาบ 18% ซึ่งมีกากถั่วเหลืองที่ผ่านการให้ความร้อนโดยการเอ็กซ์ทราด เป็นแหล่งวัตถุดิบโปรตีน โดยเลือกกลุ่มที่มีค่าโปรตีนไหลผ่านที่เหมาะสมจากการทดลองที่ 2 มาทำการทดสอบในการทดลองนี้ และมีหญ้าขนสด เปลือกสับประดหมักร่วมกับชานอ้อยเป็นอาหารหยาบ

คอกสัตว์ทดลอง

คอกทดลองอยู่ภายในโรงเรือนที่เป็นแบบหน้าจั่ว 2 ชั้น เป็นโรงเรือนโปร่ง หลังคากระเบื้อง และพื้นคอนกรีตเรียบเดี่ยวขนาด 5 x 2.5 ตารางเมตร มีรางสำหรับใส่อาหาร และมีอ่างสำหรับใส่น้ำสะอาดให้กินตลอดเวลา

อุปกรณ์ทดลอง

- เครื่องชั่งน้ำหนักอาหารและเครื่องผสมอาหารสัตว์
- เครื่องชั่งน้ำหนักสัตว์ทดลอง
- อุปกรณ์ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการวิเคราะห์อาหารสัตว์
- อุปกรณ์เก็บเลือด ได้แก่ เข็มเจาะเลือด (เบอร์ 18 ยาว 1.5 นิ้ว) กระบอกฉีดยาขนาด 10 มิลลิลิตร หลอดเก็บเลือดตัวอย่างพร้อมฝาปิด
- อุปกรณ์และสารเคมีสำหรับเก็บตัวอย่างของเหลวในกระเพาะหมัก ได้แก่ เครื่องปั๊มสุญญากาศพร้อมสายยาง ขวดเก็บตัวอย่าง
- อุปกรณ์และสารเคมีสำหรับการเก็บตัวอย่างน้ำนมดิบ ตามวิธีของ ฉนิธิมา และคณะ (2546) และเครื่อง Milk Analyzer รุ่น Lacto Scan 90 (Milkotronic Ltd., Bulgaria) เพื่อวิเคราะห์องค์ประกอบน้ำนม (โปรตีน ไขมัน แลคโตส ของแข็งไม่รวมไขมัน ของแข็งทั้งหมด ค่าความเป็นกรด-ด่าง ความหนาแน่น และจุดเยือกแข็ง)

วิธีการ

แผนการทดลอง

ใช้แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) โดยใช้โครีดนมที่สุ่มออกเป็นกลุ่มการทดลอง กลุ่มละ 5 ซ้ำ เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกลุ่มทดลอง

การให้อาหารสัตว์ทดลอง

ให้อาหารข้นวันละ 4 ครั้งๆ ละ 2 กิโลกรัม คือ ช่วงเช้าขณะทำการรีดนม (5.00 น.) ช่วงสาย (10.00 น.) ช่วงบ่ายขณะทำการรีดนม (15.00 น.) และช่วงเย็น (16.00 น.) รวมเป็นโคได้รับอาหารข้นทั้งหมด 8 กิโลกรัมต่อตัว โดยมีอาหารพื้นฐานเป็นเปลือกสับประดหมักร่วมกับขานอ้อย วันละ 2 ครั้งๆ ละ 4 กิโลกรัม คือ ช่วงสาย (10.00 น.) และช่วงเย็น (16.00 น.) และหญ้าขนสดเป็นแหล่งอาหารหยาบอย่างเต็มที่ตลอดการทดลอง โดยที่ปริมาณหญ้าขนสดที่ให้ในแต่ละครั้งจะชั่งน้ำหนักก่อน และหญ้าขนสดที่เหลือจะชั่งออกทุกวันก่อนให้อาหารใหม่ในเวลาเช้าวันถัดไป เพิ่มปริมาณหญ้าขนสดขึ้นหากเหลือในรางอาหารน้อยกว่า 10% และมีน้ำสะอาดให้กินอย่างเพียงพอตลอดเวลา

การบันทึกข้อมูล

1. การเก็บข้อมูลการกินอาหาร โดยทำการบันทึกปริมาณอาหารที่ให้ และเหลือในแต่ละวัน เพื่อนำไปหาปริมาณการกินอาหาร (feed intake) ของแต่ละวันตลอดระยะเวลาการทดลองเป็นระยะเวลา 45 วัน

2. การชั่งน้ำหนักสัตว์ทดลอง ชั่งน้ำหนักสัตว์ทดลองแต่ละตัวก่อนเข้าระยะการทดลองและชั่งน้ำหนักสัตว์ทุกตัว เมื่อสิ้นสุดการทดลอง เพื่อคำนวณการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักตัว

3. สุ่มเก็บตัวอย่างอาหารทดลองเพื่อนำไปวิเคราะห์คุณค่าทางโภชนาด้วยวิธี proximate analysis ตามวิธีการของ AOAC. (1990) และวิเคราะห์องค์ประกอบเซลล์พืชตามวิธีของ Goering and Van Soest (1970)

4. สุ่มเก็บตัวอย่างเลือด การเจาะเลือดเพื่อวิเคราะห์สภาวะโภชนาที่สัตว์ได้รับตามวิธีของ Blowey *et al.* (1973) สุ่มเก็บตัวอย่างเลือดจากเส้นเลือดดำที่คอ (jugular vein) ของโคทดลองแต่ละ

ตัวในวันสุดท้ายของการทดลอง โดยเจาะที่เวลา 0, 2 และ 4 ชั่วโมง ภายหลังการให้อาหารในตอนเช้า ปริมาณ 10 มิลลิลิตร ตัวอย่างเลือดจะถูกเก็บรักษาด้วย Heparin ก่อนนำไปปั่นแยกส่วนของพลาสมาเพื่อตรวจหาความเข้มข้นของยูเรีย-ไนโตรเจนในเลือด (Blood urea nitrogen, BUN) ตามวิธีของ Tiffany *et al.* (1972) และวิเคราะห์หากกลูโคสในเลือด (Blood glucose, BG) ตามวิธีของ Slein (1963)

5. บันทึกผลผลิตน้ำนมต่อวันและสูตรวัดค่าองค์ประกอบน้ำนม โดยสุ่มเก็บตัวอย่างน้ำนมทำการเก็บตัวอย่างน้ำนมทุกสัปดาห์ๆ ละครั้ง โดยเก็บในตอนเย็นและตอนเช้าเป็นเวลา 2 วันแล้วนำมาผสมกัน เก็บตัวอย่างปริมาณ 50 มิลลิลิตร และเก็บที่อุณหภูมิ 2-4 °C ตามวิธีของ ฉิมมา และคณะ (2546) เพื่อวิเคราะห์โปรตีน ไขมัน แลคโตส ของแข็งไม่รวมไขมัน ของแข็งทั้งหมด ค่าความเป็นกรด-ด่าง ความหนาแน่น และจุดเยือกแข็ง โดยเครื่อง Milkoscan Tester นอกจากนั้นผลผลิตนมของแม่โคแต่ละตัวจะถูกคำนวณเป็นน้ำนมปรับไขมัน 4% (4% Fat Corrected Milk; FCM)

6. เก็บของเหลวในกระเพาะหมักในวันสุดท้ายของการทดลองที่เวลา 0, 2 และ 4 ชั่วโมง ภายหลังการให้อาหารในตอนเช้า โดยทำการเก็บตัวอย่างของเหลวในกระเพาะหมัก ด้วยวิธี stomach tube โดยใช้ปั๊มสุญญากาศ (vacuum pump) ต่อกับท่อยาง (stomach tube) สอดผ่านทางปากลงไปจนสุดอาหารไปจนถึงกระเพาะหมักแล้วทำการดูดของเหลวในกระเพาะหมัก ประมาณ 200 - 300 มิลลิลิตร หลังจากนั้นกรองของเหลวผ่านผ้าขาวบาง นำของเหลวที่ได้ไปใส่ขวดปลอดเชื้อ ปริมาตร 50 มิลลิลิตรและเติม 6N HCL 0.5 มิลลิลิตร (เพื่อหยุดกระบวนการหมักจุลินทรีย์ และตกตะกอนโปรตีน) จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที รินเอาส่วนใส (supernatant) และเก็บรักษาไว้ในอุณหภูมิ -20 °C เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณแอมโมเนีย-ไนโตรเจน ตามวิธีของ Bromner and Keeney (1965) และไขมันระเหยง่าย (VFAs)

การวิเคราะห์ทางสถิติ

นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกลุ่มโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SAS (2003) โดยมีแบบแผนจำลองทางสถิติดังนี้

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij}$$

เมื่อ

Y_{ij} = ค่าสังเกตที่ได้จากทรีตเมนต์ที่ i ซ้ำที่ j เมื่อ $i = 1, 2, 3, \dots, n$ และ $j = 1, 2, 3, 4, 5$

μ = ค่าเฉลี่ยของประชากรทั้งหมด

τ_i = อิทธิพลเนื่องจากทรีตเมนต์ที่ i เมื่อ $i = 1, 2, 3, \dots, n$

ε_{ij} = ความคลาดเคลื่อนของการทดลอง

สถานที่ทำการทดลอง

1. คอกสัตว์ทดลองศูนย์วิจัยและพัฒนาการผลิตนม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จ.นครปฐม
2. โรงงานผสมอาหารสัตว์ ศูนย์ค้นคว้าและพัฒนาวิชาการอาหารสัตว์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จ.นครปฐม
3. ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์อาหารสัตว์ ภาควิชาสัตวบาล คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จ.นครปฐม
4. โรงพยาบาลสัตว์ คณะสัตวแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จ.นครปฐม

ระยะเวลาในการทดลอง

เริ่มการทดลองเดือนพฤษภาคม 2552 และสิ้นสุดการทดลองเดือนสิงหาคม 2552

ผลและวิจารณ์

การทดลองที่ 1 การทดสอบเบื้องต้นเพื่อหากระบวนการผลิตโปรตีนไหลผ่านที่เหมาะสมในกากถั่วเหลืองที่ผ่านการเอ็กซ์ทราคต์ โดยใช้ค่าดัชนีการละลายได้ของโปรตีน (Protein dispersibility Index; PDI) เป็นตัวชี้วัด

การทดสอบที่ 1 การเอ็กซ์ทราคต์กากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน (SSBM) ร่วมกับไขมันสำปะหลังแห้งที่ระดับต่างๆ แบ่งเป็น 3 กลุ่ม ดังแสดงในตารางที่ 14

ตารางที่ 14 ค่าดัชนีการละลายได้ของโปรตีนจากการทดสอบที่ 1 การเอ็กซ์ทราคต์กากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน (SSBM) ร่วมกับไขมันสำปะหลังแห้งที่ระดับต่างๆ แบ่งเป็น 3 กลุ่ม

กลุ่มที่	กากถั่วเหลือง (%)	ไขมัน (%)	น้ำ ^{1/} (%)	โปรตีน (%)	ค่า PDI	ความชื้น ^{2/} (%)	อุณหภูมิ
1	SSBM 100	0	20	46.25	9.46	23.33	87 °C
2	SSBM 95	5	20	44.18	8.91	23.25	87 °C
3	SSBM 90	10	20	42.51	11.32	23.17	87 °C

หมายเหตุ ^{1/} เปอร์เซ็นต์น้ำที่ใส่เพิ่มเข้าไปในส่วนผสมวัตถุดิบอาหาร

^{2/} เปอร์เซ็นต์ความชื้นของส่วนผสมวัตถุดิบทั้งหมด

การทดสอบที่ 2 การเอ็กซ์ทรูดกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน (SSBM) ร่วมกับไขมันสำปะหลังแห้งและมันเส้นที่ระดับต่างๆ แบ่งเป็น 6 กลุ่ม ดังแสดงในตารางที่ 15

ตารางที่ 15 ค่าดัชนีการละลายได้ของโปรตีนจากการทดสอบที่ 2 การเอ็กซ์ทรูดกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน (SSBM) ร่วมกับไขมันสำปะหลังแห้งและมันเส้นที่ระดับต่างๆ แบ่งเป็น 6 กลุ่ม

กลุ่มที่	กากถั่วเหลือง (%)	ไขมัน (%)	มันเส้น (%)	น้ำ ^{1/} (%)	โปรตีน (%)	ค่า PDI	ความชื้น ^{2/} (%)	อุณหภูมิ
1	SSBM 97.5	0	2.50	30	44.57	7.84	29.25	88 °C
2	SSBM 92.5	5	2.50	30	44.02	8.93	29.17	85 °C
3	SSBM 87.5	10	2.50	30	42.57	7.19	29.10	86 °C
4	SSBM 95.0	0	5.00	30	43.37	8.09	29.27	89 °C
5	SSBM 90.0	5	5.00	30	42.47	8.23	29.19	90 °C
6	SSBM 85.0	10	5.00	30	41.10	7.45	29.12	87 °C

หมายเหตุ ^{1/} เปอร์เซ็นต์น้ำที่ใส่เพิ่มเข้าไปในส่วนผสมวัตถุดิบอาหาร

^{2/} เปอร์เซ็นต์ความชื้นของส่วนผสมวัตถุดิบทั้งหมด

การทดสอบที่ 3 การเอ็กซ์ทรูดกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน (SSBM) ร่วมกับไขมันสำปะหลังแห้งและมันเส้นที่ระดับต่างๆ โดยกำหนดความผันแปรด้วยความชื้น แบ่งเป็น 18 กลุ่ม ดังแสดงในตารางที่ 16

ตารางที่ 16 ค่าดัชนีการละลายได้ของโปรตีนจากการทดสอบที่ 3 การเอ็กซ์ทรูดกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน (SSBM) ร่วมกับไขมันสำปะหลังแห้งและมันเส้นที่ระดับต่างๆ โดยกำหนดความผันแปรด้วยความชื้น แบ่งเป็น 18 กลุ่ม

กลุ่มที่	กากถั่วเหลือง (%)	ไขมัน (%)	มันเส้น (%)	น้ำ ^{1/} (%)	โปรตีน (%)	ค่า PDI	ความชื้น ^{2/} (%)	อุณหภูมิ
1	SSBM 97.5	0	2.50	15	48.94	8.03	20.02	78 °C
2	SSBM 92.5	5	2.50	15	48.03	9.10	19.93	87 °C
3	SSBM 87.5	10	2.50	15	46.33	7.54	19.85	88 °C
4	SSBM 97.5	0	2.50	20	49.57	6.17	23.35	87 °C
5	SSBM 92.5	5	2.50	20	48.53	8.09	23.27	86 °C
6	SSBM 87.5	10	2.50	20	46.20	6.60	23.19	87 °C
7	SSBM 97.5	0	2.50	25	49.39	7.08	26.42	89 °C
8	SSBM 92.5	5	2.50	25	47.17	6.46	26.34	89 °C
9	SSBM 87.5	10	2.50	25	45.60	7.67	26.26	87 °C
10	SSBM 95.0	0	5.00	15	47.14	7.42	20.04	81 °C
11	SSBM 90.0	5	5.00	15	46.96	8.36	19.96	90 °C
12	SSBM 85.0	10	5.00	15	45.57	6.72	19.87	90 °C
13	SSBM 95.0	0	5.00	20	49.01	8.02	23.38	90 °C
14	SSBM 90.0	5	5.00	20	47.14	9.28	23.29	87 °C
15	SSBM 85.0	10	5.00	20	45.88	8.55	23.21	89 °C
16	SSBM 95.0	0	5.00	25	49.39	7.96	26.44	91 °C
17	SSBM 90.0	5	5.00	25	49.84	7.02	26.36	88 °C
18	SSBM 85.0	10	5.00	25	47.19	8.34	26.28	89 °C

หมายเหตุ ^{1/} เปอร์เซ็นต์น้ำที่ใส่เพิ่มเข้าไปในส่วนผสมวัตถุดิบอาหาร

^{2/} เปอร์เซ็นต์ความชื้นของส่วนผสมวัตถุดิบทั้งหมด

การทดสอบที่ 4 การเอ็กซ์ทรูดกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน (SSBM) และกากถั่วเหลืองบีบน้ำมัน (ESBM) โดยกำหนดความผันแปรด้วยความชื้นที่ระดับต่างๆ แบ่งเป็น 6 กลุ่ม ดังแสดงในตารางที่ 17

ตารางที่ 17 ค่าดัชนีการละลายได้ของโปรตีนจากการทดสอบที่ 4 การเอ็กซ์ทรูดกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน (SSBM) และกากถั่วเหลืองบีบน้ำมัน (ESBM) โดยกำหนดความผันแปรด้วยความชื้นที่ระดับต่างๆ แบ่งเป็น 6 กลุ่ม

กลุ่มที่	กากถั่วเหลือง (%)	น้ำ ^{1/} (%)	โปรตีน (%)	ค่า PDI	ความชื้น ^{2/} (%)	อุณหภูมิ
1	SSBM 100	25	46.66	5.62	26.40	84 °C
2	SSBM 100	20	48.70	7.19	23.33	88 °C
3	SSBM 100	15	49.19	6.22	20.00	87 °C
4	ESBM 100	25	40.53	5.40	26.40	86 °C
5	ESBM 100	20	39.76	5.50	22.40	86 °C
6	ESBM 100	15	39.42	5.55	20.00	87 °C

หมายเหตุ ^{1/} เปอร์เซ็นต์น้ำที่ใส่เพิ่มเข้าไปในส่วนผสมวัตถุดิบอาหาร

^{2/} เปอร์เซ็นต์ความชื้นของส่วนผสมวัตถุดิบทั้งหมด

การทดสอบที่ 5 การเอ็กซ์ทรูดกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน (SSBM) และกาก ถั่วเหลืองบีนน้ำมัน (ESBM) ร่วมกับไขมันสำปะหลังแห้งและมันเส้นที่ระดับต่างๆ โดยกำหนดปริมาณน้ำที่ใส่เพิ่มเข้าไปในส่วนผสมวัตถุดิบอาหารอีก 15% แบ่งเป็น 14 กลุ่ม ดังแสดงในตารางที่ 18

ตารางที่ 18 ค่าดัชนีการละลายได้ของโปรตีนจากการทดสอบที่ 5 การเอ็กซ์ทรูดกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน (SSBM) และกากถั่วเหลืองบีนน้ำมัน (ESBM) ร่วมกับไขมันสำปะหลังแห้งและมันเส้นที่ระดับต่างๆ โดยกำหนดปริมาณน้ำที่ใส่เพิ่มเข้าไปในส่วนผสมวัตถุดิบอาหารอีก 15% แบ่งเป็น 14 กลุ่ม

กลุ่มที่	กากถั่วเหลือง (%)	ไขมัน (%)	มันเส้น (%)	น้ำ ^{1/} (%)	โปรตีน (%)	ค่า PDI	ความชื้น ^{2/} (%)	อุณหภูมิ
1	SSBM ^{3/}	-	-	-	49.15	14.24	-	-
2	SSBM 100	0.00	0.00	15	48.70	7.19	20.00	87 °C
3	SSBM 95	5.00	0.00	15	42.18	11.32	19.91	87 °C
4	SSBM 90	10.00	0.00	15	49.57	6.17	19.83	87 °C
5	SSBM 97.5	0.00	2.50	15	44.57	7.84	20.02	87 °C
6	SSBM 92.5	5.00	2.50	15	48.53	8.09	19.93	87 °C
7	SSBM 87.5	10.00	2.50	15	46.20	6.60	19.85	87 °C
8	ESBM ^{3/}	-	-	-	39.94	35.62	-	-
9	ESBM 100	0.00	0.00	15	39.76	5.50	20.00	87 °C
10	ESBM 95	5.00	0.00	15	36.98	9.47	19.91	84 °C
11	ESBM 90	10.00	0.00	15	35.24	9.93	19.83	84 °C
12	ESBM 97.5	0.00	2.50	15	34.60	10.11	20.02	84 °C
13	ESBM 92.5	5.00	2.50	15	37.30	7.03	19.93	84 °C
14	ESBM 87.5	10.00	2.50	15	36.73	7.14	19.85	84 °C

หมายเหตุ ^{1/} เปอร์เซ็นต์น้ำที่ใส่เพิ่มเข้าไปในส่วนผสมวัตถุดิบอาหาร

^{2/} เปอร์เซ็นต์ความชื้นของส่วนผสมวัตถุดิบทั้งหมด

^{3/} กลุ่มควบคุม (ไม่ผ่านการเอ็กซ์ทรูด)

จากผลการทดสอบเบื้องต้นทั้ง 5 ครั้ง เพื่อหากระบวนการผลิตโปรตีนไหลผ่านที่เหมาะสมในกากถั่วเหลืองที่ผ่านการเอ็กซ์ทรูดโดยใช้ค่าดัชนีการละลายได้ของโปรตีน (PDI) เป็นตัวชี้วัด โดยทำการเพิ่มน้ำเข้าไปในส่วนผสมวัตถุดิบอาหาร 4 ระดับ ได้แก่ 15, 20, 25 และ 30% ร่วมกับการเสริมไขมันสำปะหลังแห้งบด 3 ระดับ คือ 0, 5 และ 10% และมันเส้นบด 3 ระดับ คือ 0, 2.5 และ

5% พบว่า ระดับที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเพิ่มน้ำเข้าไปในส่วนผสมวัตถุดิบ คือ 20% (ความชื้น 26.26 - 26.44%) ซึ่งเป็นความชื้นที่ใช้ในการเอ็กซ์ทรูดโดยเครื่องเอ็กซ์ทรูดแบบเปียก (ใช้ความชื้น 20 - 25%) เป็นระดับความชื้นที่อาหารไหลผ่านกระบอกละเลี้ยวอัดภายในเครื่องเอ็กซ์ทรูดที่ใช้ในการทดลองได้สะดวกและได้ค่า PDI อยู่ในช่วง 5.5 - 11.32 ซึ่งค่า PDI ที่เหมาะสมสำหรับสัตว์กระเพาะรวมคืออยู่ในช่วง 9 - 11 (Chris, 2008 และ Virginia and Gabriella, 2009) ส่วนการเพิ่มน้ำเข้าไปในระดับ 15% (ความชื้น 19.83 - 20.02) นั้นเป็นระดับความชื้นที่ต่ำเกินไป เนื่องจากอาหารจะไหลผ่านกระบอกละเลี้ยวอัดภายในเครื่องเอ็กซ์ทรูดได้ยาก เกิดการอัดและติดกันเป็นก้อนภายในกระบอกละเลี้ยวอัด อาหารไหม้ มอเตอร์ไม่สามารถทำงานได้ และเครื่องหยุดการทำงานในที่สุด ทำให้ต้องเสียเวลาถอดกระบอกละเลี้ยวอัดมาทำความสะอาดและประกอบเครื่องใหม่ ความชื้นในระดับนี้ใช้ในการเอ็กซ์ทรูดแบบแห้งหรือสภาพวัตถุดิบอาหารสัตว์โดยทั่วไป ซึ่งในการทำงานต้องการวัตถุดิบอาหารสัตว์ ที่มีความชื้นสูงหรือมีไขมันสูง เพื่อป้องกันไม่ให้อาหารติดขัดในกระบอกละ (อุทัย, 2543) ส่วนการเพิ่มน้ำเข้าไปในระดับสูงกว่า 20% คือ 25 (ความชื้น 26.26-26.44) และ 30% (ความชื้น 29.10 - 29.27) นั้นเป็นความชื้นในระดับสูง เกิดความร้อนสูง ไหลผ่านกระบอกละเลี้ยวอัดได้ดี แต่ความร้อนในระดับสูงนี้ส่งผลให้โปรตีนเสียสภาพไปมาก ค่า PDI ต่ำมาก คือมีค่า 5.40 - 8.37 สำหรับการเพิ่มน้ำ 25% และ 7.19 - 8.93 สำหรับการเพิ่มน้ำ 30%

การให้ความร้อนด้วยการเอ็กซ์ทรูดแก่กากถั่วเหลืองทั้ง 2 ชนิด ทำให้ค่า PDI ของกากถั่วเหลืองลดลง จากการทดสอบเบื้องต้นครั้งนี้ อุณหภูมิของการเอ็กซ์ทรูดมีค่าอยู่ในช่วง 84 - 91 °C ขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่เติมเข้าไปในส่วนผสมวัตถุดิบอาหารเพื่อผันแปรระดับความชื้น กากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน (SSBM) มีค่า PDI เป็น 14.24 เมื่อผ่านการเอ็กซ์ทรูดแล้วค่า PDI ลดลง คือมีค่าอยู่ในช่วง 5.62 - 11.32 ขึ้นอยู่กับการผันแปรความชื้น ส่วนกากถั่วเหลืองบีบน้ำมัน (ESBM) มีค่า PDI เป็น 35.62 เมื่อผ่านการเอ็กซ์ทรูดแล้วค่า PDI ลดลง คือมีค่าอยู่ในช่วง 5.40 - 10.11 ขึ้นอยู่กับการผันแปรความชื้น จากการทดสอบในครั้งนี้เป็นการวัดอุณหภูมิของวัตถุดิบอาหารที่ออกจากเครื่องเอ็กซ์ทรูดมาแล้ว ทำให้อุณหภูมิที่วัดได้มีค่าใกล้เคียงกัน ซึ่งไม่ใช่อุณหภูมิที่แท้จริงที่เกิดขึ้นในกระบอกละเลี้ยวอัดภายในเครื่องเอ็กซ์ทรูดเนื่องจากใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูดขนาดเล็ก แต่ค่า PDI ที่ลดลงนั้นเป็นผลมาจากระดับของความชื้น เนื่องจากความชื้นในระดับที่สูงกว่าจะทำให้อาหารไหลผ่านกระบอกละเลี้ยวอัดภายในเครื่องเอ็กซ์ทรูดได้ดีกว่าจึงทำให้ระยะเวลาที่อาหารอยู่ในกระบอกละเลี้ยวอัดภายในเครื่องเอ็กซ์ทรูดนั้นมีระยะเวลาดลดลง ทำให้อาหารได้รับความร้อนเป็นระยะเวลาน้อยกว่าเกิดโปรตีนไหลผ่านต่ำกว่า ค่า PDI จึงสูงกว่า แต่จากการทดสอบในครั้งนี้ไม่ได้ทำการวัดระยะเวลาที่อาหารอยู่ในกระบอกละเลี้ยวอัดภายในเครื่องเอ็กซ์ทรูด

ส่วนการเสริมไขมันสำปะหลังแห้งบดและมันเส้นบดนั้น พบว่าการเสริมในระดับสูงจะทำให้โปรตีนรวมในวัตถุดิบอาหารลดลง ดังนั้นระดับที่เหมาะสมจึงเป็นระดับที่ต่ำที่สุด คือทำการเสริมไขมันสำปะหลังแห้งบดในระดับ 5% และมันเส้นบดในระดับ 2.5%

จากผลการทดสอบทั้ง 5 ครั้ง เพื่อหากระบวนการผลิตโปรตีนไหลผ่านที่เหมาะสมในกากถั่วเหลืองที่ผ่านการเอ็กซ์ทราด โดยเปรียบเทียบค่าดัชนีการละลายได้ของโปรตีน (PDI) ระหว่างกลุ่มทดลองกับกลุ่มควบคุม และค่ามาตรฐานที่ใช้โดยทั่วไปสำหรับสัตว์กระเพาะรวม ร่วมกับความสะดวก ความง่ายในการปฏิบัติงาน ความพร้อมและประสิทธิภาพของเครื่องมือที่สามารถปฏิบัติได้ทั้งระดับฟาร์มและระดับอุตสาหกรรม จึงได้ทำการคัดเลือกกากถั่วเหลือง 6 กลุ่ม เพื่อทดสอบค่าการละลายและการย่อยสลายได้ในกระเพาะหมักของโปรตีนรวม โดยเทคนิคดังต่อไปนี้ ดังแสดงในตารางที่ 19

ตารางที่ 19 คุณสมบัติของกากถั่วเหลืองที่ผ่านการเอ็กซ์ทราดทั้ง 6 กลุ่ม จากการทดสอบเบื้องต้นเพื่อหากระบวนการผลิตโปรตีนไหลผ่านที่เหมาะสม

กากถั่วเหลือง	โปรตีน (%)	ค่า PDI	น้ำ ^{1/} (%)	อุณหภูมิ (°C)	ความชื้น ^{2/} (%)
SSBM	49.15	14.24	-	-	-
ESBM	39.94	35.62	-	-	-
E-SSBM	48.70	7.19	20	88	23.33
E-ESBM	39.76	5.50	20	86	22.40
E-SCLC	48.64	8.10	20	86	23.27
E-ECLC	37.30	7.03	20	84	23.27

หมายเหตุ SSBM คือ กากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน (กลุ่มควบคุม; ไม่ได้ผ่านการเอ็กซ์ทราด)

ESBM คือ กากถั่วเหลืองบีบน้ำมัน (กลุ่มควบคุม; ไม่ได้ผ่านการเอ็กซ์ทราด)

E-SSBM คือ กากถั่วเหลืองสกัดน้ำมันเอ็กซ์ทราด

E-ESBM คือ กากถั่วเหลืองบีบน้ำมันเอ็กซ์ทราด

E-SCLC คือ กากถั่วเหลืองสกัดน้ำมันเอ็กซ์ทราดร่วมกับไขมันสำปะหลังแห้ง 5% และมันเส้น 2.5%

E-ECLC คือ กากถั่วเหลืองสกัดน้ำมันเอ็กซ์ทราดร่วมกับไขมันสำปะหลังแห้ง 5% และมันเส้น 2.5%

^{1/} เปอร์เซ็นต์น้ำที่ใส่เพิ่มเข้าไปในส่วนผสมวัตถุดิบอาหาร

^{2/} เปอร์เซ็นต์ความชื้นของส่วนผสมวัตถุดิบทั้งหมด

การทดลองที่ 2 การศึกษาเปรียบเทียบค่าการละลายและการย่อยสลายได้ในกระเพาะหมักของโปรตีนรวม ในกากถั่วเหลืองที่ผ่านการเอ็กซ์ทราด โดยเทคนิคถุงไนลอน

ค่าการย่อยสลายได้ของวัตถุแห้งและโปรตีนในกระเพาะหมักของกากถั่วเหลืองที่ใช้ในการทดลองแสดงในตารางที่ 20 และ 21 ตามลำดับ ส่วนค่าจุลศาสตร์การย่อยสลายและประสิทธิภาพการย่อยสลายได้ของโปรตีนแสดงในตารางที่ 20 จากผลการทดลอง (ตารางที่ 18) พบว่าค่าการย่อยสลายได้ของวัตถุแห้งของกากถั่วเหลืองทุกกลุ่มการทดลองมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ในทุกช่วงเวลาของการบ่มในกระเพาะหมัก (0, 2, 4, 8, 12, 24 และ 48 ชั่วโมง) เมื่อพิจารณาที่ 24 ชั่วโมงของการบ่มพบว่า กากถั่วเหลืองบีบน้ำมัน (ESBM) มีค่าการย่อยสลายได้ของวัตถุแห้งสูงที่สุด ($P < 0.05$) เมื่อเทียบกับกลุ่มการทดลองอื่นๆ ในขณะที่กากถั่วเหลืองที่ผ่านการให้ความร้อนโดยการเอ็กซ์ทราดในทุกกลุ่ม (E-SSBM E-ESBM E-SCLC และ E-ECLC) มีค่าต่ำกว่าและใกล้เคียงกัน

จากตารางที่ 21 เมื่อพิจารณาค่าโปรตีนที่หายไปในช่วงเวลาที่ 2 ของการบ่มกากถั่วเหลืองทุกกลุ่มการทดลอง พบว่ามีค่า 34.27, 67.51, 16.31, 15.36, 27.80 และ 19.23% ตามลำดับ แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) และเช่นเดียวกับในช่วงเวลาที่ 24 ของการบ่มมีค่าโปรตีนที่หายไป 76.88, 92.48, 36.60, 30.78, 42.30 และ 42.04% ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยกากถั่วเหลืองบีบน้ำมันเอ็กซ์ทราด (E-ESBM) มีค่าการย่อยสลายได้ของโปรตีนต่ำสุด ส่วนในช่วงเวลาที่ 48 ของการบ่ม การย่อยสลายของโปรตีนในกลุ่ม E-SSBM และ E-ESBM มีค่าต่ำสุดใกล้เคียงกันคือ 73.30 และ 66.95% ตามลำดับ โดยที่ 48 ชั่วโมงนี้ องค์ประกอบของกากถั่วเหลืองในกลุ่มอื่นๆ มีค่าการย่อยได้เกือบ 100% โดยทั่วไปแล้วการย่อยสลายได้ของโปรตีนจะเริ่มต้นจากส่วนของโปรตีนที่ละลายน้ำได้ และจากบางส่วนของอนุภาคอาหารขนาดเล็กที่สูญเสียออกจากถุงไนลอนเมื่อบ่มที่กระเพาะหมักที่ 0 ชั่วโมง (Nocek and Grant, 1968) ดังนั้น ค่าการย่อยสลายได้ของโปรตีนที่เวลาการบ่ม 0 ชั่วโมงจึงมีค่าต่ำสุด และมีค่าเพิ่มขึ้นตามเวลาที่เพิ่มขึ้นของการบ่มวัตถุดิบอาหารทดลองในกระเพาะหมัก ซึ่งมีค่าสูงสุดที่การบ่มเป็นเวลา 48 ชั่วโมง

ตารางที่ 20 แสดงค่าการสลายตัวของวัตถุแห้งในโคเจาะกระเพาะหมักโดยใช้เทคนิคถุงไนลอน (%)

Time	SSBM	ESBM	E-SSBM	E-ESBM	E-SCLC	E-ECLC	SEM
2	45.26 ^b	64.34 ^a	31.14 ^d	39.84 ^c	45.42 ^b	42.13 ^{bc}	3.03
4	46.32 ^c	71.31 ^a	33.95 ^d	42.32 ^c	47.90 ^b	47.51 ^b	3.45
8	57.47 ^b	76.04 ^a	38.59 ^d	47.37 ^c	50.41 ^c	51.95 ^{bc}	3.51
12	59.75 ^b	77.30 ^a	46.21 ^d	52.56 ^c	52.84 ^c	58.07 ^{cb}	2.98
24	76.38 ^b	94.28 ^a	60.22 ^{cd}	55.52 ^d	59.88 ^{cd}	63.64 ^c	4.04
48	97.93 ^b	99.09 ^a	81.38 ^c	78.42 ^c	94.72 ^{ab}	89.67 ^b	2.45

หมายเหตุ SSBM คือ กากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน (กลุ่มควบคุม; ไม่ได้ผ่านการเอ็กซ์ทราด)

ESBM คือ กากถั่วเหลืองบีบน้ำมัน (กลุ่มควบคุม; ไม่ได้ผ่านการเอ็กซ์ทราด)

E-SSBM คือ กากถั่วเหลืองสกัดน้ำมันเอ็กซ์ทราด

E-ESBM คือ กากถั่วเหลืองบีบน้ำมันเอ็กซ์ทราด

E-SCLC คือ กากถั่วเหลืองสกัดน้ำมันเอ็กซ์ทราดร่วมกับไขมันสำปะหลังแห้ง 5% และ
มันเส้น 2.5%

E-ECLC คือ กากถั่วเหลืองสกัดน้ำมันเอ็กซ์ทราดร่วมกับไขมันสำปะหลังแห้ง 5% และ
มันเส้น 2.5%

^{a-d} อักษรที่ต่างกันแถวเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ
($P < 0.05$)

ตารางที่ 21 แสดงค่าการย่อยได้ของโปรตีนในโคเจาะกระเพาะหมักโดยใช้เทคนิคถุงไนลอน (%)

Time	SSBM	ESBM	E-SSBM	E-ESBM	E-SCLC	E-ECLC	SEM
2	34.27 ^b	67.51 ^a	16.31 ^d	15.36 ^d	27.80 ^c	19.23 ^d	5.45
4	34.34 ^b	73.41 ^a	18.62 ^e	16.46 ^e	30.61 ^c	23.01 ^d	5.81
8	43.74 ^b	74.78 ^a	23.37 ^d	20.49 ^d	33.78 ^c	36.23 ^c	5.41
12	47.60 ^b	81.75 ^a	26.40 ^d	24.88 ^d	37.89 ^c	38.93 ^c	5.74
24	76.88 ^b	92.48 ^a	36.60 ^{cd}	30.78 ^d	42.30 ^c	42.04 ^c	6.91
48	98.31 ^a	99.68 ^a	73.30 ^c	66.95 ^c	94.49 ^{ab}	86.04 ^b	3.89

หมายเหตุ SSBM คือ กากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน (กลุ่มควบคุม; ไม่ได้ผ่านการเอ็กซ์ทราด)

ESBM คือ กากถั่วเหลืองบีบน้ำมัน (กลุ่มควบคุม; ไม่ได้ผ่านการเอ็กซ์ทราด)

E-SSBM คือ กากถั่วเหลืองสกัดน้ำมันเอ็กซ์ทราด

E-ESBM คือ กากถั่วเหลืองบีบน้ำมันเอ็กซ์ทราด

E-SCLC คือ กากถั่วเหลืองสกัดน้ำมันเอ็กซ์ทราดร่วมกับไขมันสำปะหลังแห้ง 5% และ
มันเส้น 2.5%

E-ECLC คือ กากถั่วเหลืองสกัดน้ำมันเอ็กซ์ทราดร่วมกับไขมันสำปะหลังแห้ง 5% และ
มันเส้น 2.5%

^{a-c} อักษรที่ต่างกันแถวเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ
($P < 0.05$)

ตารางที่ 22 แสดงประสิทธิภาพการย่อยได้ของโปรตีนในอาหารทดลองในกระเพาะหมักของโคนม โดยใช้เทคนิคถุงในลอน

Digestibility character	SSBM	ESBM	E-SSBM	E-ESBM	E-SCLC	E-ECLC
Washing loss (a). %	27.11 ^b	43.47 ^a	16.21 ^d	10.23 ^c	21.31 ^c	11.23 ^c
Insoluble but fermentable fractions (b)	72.89 ^d	56.54 ^c	83.80 ^b	89.78 ^a	78.69 ^c	88.04 ^a
Rate constant (c), fraction/h	00.02	00.05	00.00	00.00	00.00	00.00
Lag time (L), h	00.37	00.00	03.20	00.00	00.00	00.00
* Effective degradability						
k=2 Solid outflow rates (% per h)	85.10 ^a	92.45 ^a	70.30 ^b	62.85 ^b	88.75 ^a	82.20 ^a
k=5 Solid outflow rates (% per h)	60.75 ^b	83.80 ^a	36.95 ^d	32.90 ^d	49.45 ^c	45.60 ^c
k=8 Solid outflow rates (% per h)	50.65 ^b	79.25 ^a	28.20 ^c	24.80 ^f	39.20 ^c	35.75 ^d

หมายเหตุ SSBM คือ กากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน (กลุ่มควบคุม; ไม่ได้ผ่านการเอ็กซ์ทราด)

ESBM คือ กากถั่วเหลืองบีบน้ำมัน (กลุ่มควบคุม; ไม่ได้ผ่านการเอ็กซ์ทราด)

E-SSBM คือ กากถั่วเหลืองสกัดน้ำมันเอ็กซ์ทราด

E-ESBM คือ กากถั่วเหลืองบีบน้ำมันเอ็กซ์ทราด

E-SCLC คือ กากถั่วเหลืองสกัดน้ำมันเอ็กซ์ทราดร่วมกับไขมันสำปะหลังแห้ง 5% และ
มันเส้น 2.5%

E-ECLC คือ กากถั่วเหลืองสกัดน้ำมันเอ็กซ์ทราดร่วมกับไขมันสำปะหลังแห้ง 5% และ
มันเส้น 2.5%

^{a-d} อักษรที่ต่างกันแถวเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ
($P < 0.05$)

จากตารางที่ 22 ผลการประเมินค่าจุลศาสตร์การย่อยสลายและประสิทธิภาพการย่อยสลาย
ได้ของโปรตีน พบว่า โปรตีนที่ละลายได้หรือย่อยสลายได้ทันทีที่ 0 ชั่วโมง (Washing loss, %) และ
โปรตีนที่ไม่ละลายแต่สามารถถูกย่อยสลายได้ในกระเพาะหมัก (Insoluble but fermentable
fraction, %) ของกากถั่วเหลืองกลุ่ม SSBM ESBM E-SSBM E-ESBM E-SCLC และ E-ECLC มี
ค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยโปรตีนที่ละลายได้มีค่า 27.11, 43.47, 16.21,
10.23 และ 21.31% ตามลำดับ และโปรตีนที่ไม่ละลายแต่สามารถถูกย่อยสลายได้ในกระเพาะหมักมี

ค่า 72.89, 56.54, 83.80, 89.78, 78.69 และ 88.04% ตามลำดับ โดยมีอัตราการย่อยสลายโปรตีนที่ไม่ละลายแต่สามารถถูกย่อยสลายได้ในกระเพาะหมัก (Rate constant, fraction/h) ของทั้ง 6 กลุ่มการทดลองมีค่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) ส่วนค่าประสิทธิภาพการย่อยได้ของโปรตีน (effective CP degradability) ที่อัตราการไหลผ่านของอาหารออกจากกระเพาะหมัก 5% ต่อชั่วโมงของกากถั่วเหลืองทั้ง 6 กลุ่มมีค่า 60.75, 81.40, 36.95, 32.90, 49.45 และ 45.60% ต่อชั่วโมงตามลำดับ โดยกากถั่วเหลืองกลุ่ม E-ESBM มีค่าต่ำที่สุด

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การให้ความร้อนกากถั่วเหลืองทั้งกากถั่วเหลืองสกัดสารเคมี กากถั่วเหลืองบีบน้ำมัน และกระบวนการเอ็กซ์ทรูดไม่ว่าจะร่วมกับไขมันสำปะหลังหรือไม่ มีผลทำให้ค่าการย่อยสลายได้ของโปรตีนในกระเพาะหมัก (rumen degradable protein, RDP) ลดลง ทั้งนี้เป็นผลมาจากความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเอ็กซ์ทรูดจะทำให้โปรตีนเสียสภาพ และเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (maillard reaction) (Broderick *et al.*, 1991) ระหว่าง carbonyl group ของน้ำตาล กับกรดอะมิโน เกิดเป็น amino-sugar complex (Wang *et al.*, 1999) ซึ่งมีการ schiff' base ระหว่างกรดอะมิโนและน้ำตาล ได้เป็นสารประกอบ amadori โดยทำให้โปรตีนเกิดการเกาะกัน เป็นผลทำให้ลดพื้นที่เข้าย่อยของเอนไซม์ การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโปรตีนและแป่งหลังจากได้รับความร้อน จะส่งผลกระทบต่อการย่อยสลายในกระเพาะหมัก (Stern *et al.*, 1985)

ถั่วเหลืองหรือกากถั่วเหลืองที่ใช้ในอาหารสัตว์กระเพาะรวมเมื่อถูกนำมาผ่านกระบวนการเอ็กซ์ทรูด ซึ่งเป็นวิธีที่นำถั่วเหลืองมาผ่านการให้ความร้อนหรือไอน้ำที่ฉีดเข้าไประหว่างกระบวนการผลิต เพื่อช่วยลดการย่อยสลายของถั่วเหลืองในกระเพาะหมัก และลดปริมาณสารยับยั้งโภชนะ จะส่งผลให้สัตว์สามารถนำถั่วเหลืองไปใช้ในการเพิ่มการสะสมในโตรเจน ประสิทธิภาพการเจริญเติบโตและการสร้างผลผลิตที่สูงขึ้น จากการศึกษาของ Aldrich and Merchen (1995) พบว่า ถั่วเหลืองที่ผ่านการเอ็กซ์ทรูดที่อุณหภูมิ 104°C ที่ทดลองในสัตว์มีค่าโปรตีนไหลผ่าน 54.3% โดยความร้อนที่ใช้ในการเอ็กซ์ทรูดมีผลทำให้ค่าการย่อยได้ของโปรตีนในกระเพาะหมักลดลง Faldet *et al.* (1992a) รายงานว่า การนำถั่วเหลืองมาผ่านวิธีการอบ (ทำให้ร้อนและมีการเก็บแช่ให้ร้อนต่อระยะหนึ่งหลังให้ความร้อน) และการเอ็กซ์ทรูดทำให้มีค่าโปรตีนไหลผ่านในกระเพาะหมักมากกว่าถั่วเหลืองที่ไม่ได้นำมาผ่านกระบวนการ แต่การอบเป็นวิธีการป้องกันการย่อยสลายของโปรตีนได้ดีที่สุด ในการศึกษาของ Aguilera *et al.* (1992) รายงานว่า การอบถั่วเหลืองโดยเครื่อง autoclave ที่อุณหภูมิที่ 120°C เป็นเวลา 30 นาที ช่วยลดอัตราการแตกตัวและประสิทธิภาพการย่อยสลายโปรตีนในกระเพาะหมัก Faldet and Satter (1991) รายงานว่า ถั่วเหลืองที่ผ่านการอบแล้วบ่มทิ้งไว้ก่อนทำให้เย็นเป็นเวลา 0, 15 หรือ 30 นาที พบว่าอุณหภูมิเมื่อถั่วออกจากเครื่องอบและระยะเวลาที่อบหรือบ่มให้ร้อนหลังออกจากเครื่องสามารถลดการย่อยสลายของ

โปรตีนในกระเพาะหมัก และปรับปรุงการใช้ประโยชน์ของไลซีนหลังจากผ่านกระเพาะหมักได้ จุดประสงค์ของการอบแห้งให้ร้อนระยะหนึ่งก่อนถูกทำให้เย็นเพื่อเป็นการกระจายความร้อนใน ถั่วเหลืองได้ทั่วถึง Faldet *et al.* (1992b) รายงานว่า ถั่วเหลืองที่ถูกแช่ความร้อนเป็นเวลาน้อยที่สุด 30 นาทีภายหลังจากการอบ ช่วยเพิ่มการไม่ถูกย่อยสลายของโปรตีนเป็น 61% ในหลอดทดลองเมื่อ เทียบกับโปรตีนที่ไม่ย่อยสลายที่มีค่า 51% ในถั่วเหลืองปกติ การใช้ประโยชน์ได้ของไลซีนหลังจาก ผ่านกระเพาะหมักมีค่าสูงสุดสำหรับถั่วเหลืองที่ผ่านการอบและแช่เก็บความร้อนไว้ก่อนทำให้เย็นมี ระดับปานกลางในถั่วเหลืองอบที่ถูกทำให้เย็นลงทันที และมีค่าต่ำที่สุดในถั่วเหลืองทั่วไป

การให้ความร้อนแก่กากถั่วเหลืองด้วยการเอ็กซ์ทรูด สามารถลดการย่อยสลายโปรตีนใน กระเพาะหมักในโคนมลงได้ การเอ็กซ์ทรูดกากถั่วเหลืองบิบน้ำมัน และการเอ็กซ์ทรูดกากถั่วเหลือง สกัดน้ำมันช่วยลดการย่อยสลายของโปรตีนในกระเพาะหมักได้ดีที่สุด รองลงมาเป็นการเอ็กซ์ทรูด กากถั่วเหลืองบิบน้ำมันร่วมกับไบมันสำปะหลังแห้ง 5% และมันเส้น 2.5% และการเอ็กซ์ทรูด กากถั่วเหลืองสกัดน้ำมันร่วมกับไบมันสำปะหลังแห้ง 5% และมันเส้น 2.5% เปรียบเทียบกับกลุ่ม ควบคุมซึ่งไม่ได้ผ่านการเอ็กซ์ทรูด การเสริมไบมันสำปะหลังแห้งที่มีแทนนินมีผลทำให้ระดับ โปรตีนรวมในวัตถุดิบลดลงแล้ว แต่ไม่มีผลต่อการเพิ่มการลดการย่อยสลายของโปรตีน ดังนั้นการ เอ็กซ์ทรูดกากถั่วเหลืองแต่เพียงอย่างเดียวโดยไม่เสริมไบมันสำปะหลังแห้ง และมันเส้นจึงเป็น กรรมวิธีที่ให้ผลดีกว่าในการลดการย่อยสลายของโปรตีนในกระเพาะหมัก จึงได้นำกากถั่วเหลือง บิบน้ำมันเอ็กซ์ทรูด และกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมันเอ็กซ์ทรูด มาทำการศึกษาสมรรถภาพการผลิต ของโคนมในการทดลองที่ 3 โดยเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุมซึ่งเป็นกากถั่วเหลืองบิบน้ำมันและ กากถั่วเหลืองสกัดน้ำมันที่ไม่ได้ผ่านการเอ็กซ์ทรูด

การทดลองที่ 3 การศึกษาสมรรถภาพการผลิตของโคนมที่ได้รับกากถั่วเหลืองที่ผ่านการให้ความ ร้อนโดยการเอ็กซ์ทรูด เป็นแหล่งโปรตีนไหลผ่าน

1. อาหารข้นและองค์ประกอบทางเคมีของอาหารทดลอง

อาหารข้นที่ใช้ในการทดลองทั้ง 4 กลุ่มทดลองประกอบด้วยวัตถุดิบอาหารสัตว์ชนิด เดียวกัน แตกต่างกันในส่วนของวัตถุดิบโปรตีนหลัก ได้แก่ TRT1 เป็นอาหารข้นสูตรกากถั่วเหลือง สกัดน้ำมันเป็นวัตถุดิบโปรตีนหลัก, TRT2 เป็นอาหารข้นสูตรกากถั่วเหลืองบิบน้ำมันเป็นวัตถุดิบ โปรตีนหลัก, TRT3 เป็นอาหารข้นสูตรกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมันเอ็กซ์ทรูดเป็นวัตถุดิบโปรตีนหลัก และ TRT4 เป็นอาหารข้นสูตรกากถั่วเหลืองบิบน้ำมันเอ็กซ์ทรูดเป็นวัตถุดิบโปรตีนหลัก ดังแสดง ในตารางที่ 23

ตารางที่ 23 สูตรอาหารชั้นที่ใช้ในการทดลองที่ 3

วัตถุดิบ (%)	TRT1	TRT2	TRT3	TRT4
กากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน (SSBM)	20.00	-	-	-
กากถั่วเหลืองบีบน้ำมัน (ESBM)	-	20.00	-	-
กากถั่วเหลืองสกัดน้ำมันเอ็กซ์ทรา (E-SSBM)	-	-	20.00	-
กากถั่วเหลืองบีบน้ำมันเอ็กซ์ทรา (E-ESBM)	-	-	-	20.00
มันเส้น	36.00	36.00	36.00	36.00
ผิวถั่ว	10.00	10.00	10.00	10.00
กากเบียร์	8.00	8.00	8.00	8.00
กากปาล์ม	7.00	7.00	7.00	7.00
รำสาลี	7.00	7.00	7.00	7.00
กากน้ำตาล	8.00	8.00	8.00	8.00
วิตามิน	0.50	0.50	0.50	0.50
Dicalcium	2.00	2.00	2.00	2.00
กำมะถัน	0.05	0.05	0.05	0.05
ยูเรีย	1.00	1.00	1.00	1.00
เกลือ	0.45	0.45	0.45	0.45
รวม	100.00	100.00	100.00	100.00

องค์ประกอบของโภชนาในอาหารที่ใช้ทดลอง อาหารหยาบคือ หญ้าขนสด เปลือก
 สับประสมหมักร่วมกับขาน้อย และอาหารชั้นทั้ง 4 สูตร (ตารางที่ 24) พบว่าหญ้าขนสดที่อายุการ
 ตัด 40 - 45 วัน ประกอบด้วยวัตถุแห้ง (DM) 28.51% โปรตีนหยาบ (CP) ไขมัน (EE) เยื่อใย (CF)
 เถ้า (Ash) ฟังก์ชันเซลล์ (NDF) ลิกโนเซลลูโลส (ADF) และลิกนิน (ADL) เท่ากับ 7.18, 1.36, 28.62,
 5.14, 68.79, 31.48 และ 3.82% วัตถุแห้ง ตามลำดับ และมีค่าพลังงานทั้งหมด (GE) 4165.46 cal/g
 ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับพิชิตพล (2552) ที่รายงานไว้ว่า หญ้าขนที่อายุการตัด 40 - 45 วัน มีค่าวัตถุแห้ง
 (DM) โปรตีนหยาบ (CP) ไขมัน (EE) เยื่อใย (CF) เถ้า (Ash) ฟังก์ชันเซลล์ (NDF) ลิกโนเซลลูโลส
 (ADF) และลิกนิน (ADL) เท่ากับ 28.11, 6.32, 1.77, 32.73, 8.98, 72.69, 41.31 และ 3.81%
 ตามลำดับ แตกต่างจากจิระชัย (2549) ที่รายงานค่าวัตถุแห้ง (DM) โปรตีนหยาบ (CP) ไขมัน (EE)
 เถ้า (Ash) ฟังก์ชันเซลล์ (NDF) ลิกโนเซลลูโลส (ADF) และลิกนิน (ADL) เท่ากับ 20.69, 7.47, 2.86,
 13.66, 63.36, 38.68 และ 3.61% ตามลำดับ และบุญฤตา (2528) ที่รายงานค่าวัตถุแห้ง (DM) โปรตีน
 หยาบ (CP) ไขมัน (EE) เยื่อใย (CF) เถ้า (Ash) ของหญ้าขนที่อายุการตัด 30 วัน เท่ากับ 28.4, 10.3,

1.0, 27.5, และ 10.3 % ตามลำดับ เนื่องจากหญ้าขนจากการทดลองมีอายุการตัดสูงกว่าและปลูกในพื้นที่ที่มีความอุดมสมบูรณ์ของดินต่ำกว่า ทำให้มีระดับโปรตีนและเถ้าต่ำกว่า แต่เยื่อใยและวัตถุแห้งสูงกว่า เนื่องจากหญ้าขนมีอายุการตัด 30 - 45 วัน และเมื่ออายุการตัดเพิ่มขึ้นมีผลให้คุณค่าทางอาหารลดลงและองค์ประกอบของเยื่อใยเพิ่มขึ้น ตลอดจนมีปัจจัยที่มีผลต่อคุณภาพของอาหารหยาบแตกต่างกัน ได้แก่ สภาพภูมิอากาศ ปริมาณน้ำฝน อุณหภูมิ ชั่วโมงแสง ลักษณะทางกายภาพ ค่า pH ความอุดมสมบูรณ์ของดิน และวิธีการปลูก (สาขันธ์, 2520) ส่วนเปลือกสับประดหมักร่วมกับขานอ้อย ประกอบด้วยวัตถุแห้ง (DM) 16.35% โปรตีนหยาบ (CP) ไขมัน (EE) เยื่อใย (CF) เถ้า (Ash) ผนังเซลล์ (NDF) ลิกโนเซลลูโลส (ADF) และลิกนิน (ADL) เท่ากับ 5.37, 1.14, 29.53, 1.86, 63.50, 34.44 และ 5.70% วัตถุแห้ง ตามลำดับ และมีค่าพลังงานทั้งหมด (GE) 4397.23 cal/g

ตารางที่ 24 องค์ประกอบทางเคมีของอาหารทดลอง

องค์ประกอบทางเคมี	อาหารข้น				หญ้าขน เปลือกสับประดหมัก	
	TRT1	TRT2	TRT3	TRT4	สด	ร่วมกับขานอ้อย
วัตถุแห้ง (DM)	92.37	92.48	91.00	91.10	28.51	16.35
----- (เปอร์เซ็นต์ของวัตถุแห้ง) -----						
โปรตีนหยาบ (CP)	18.59	18.16	18.49	17.98	7.18	5.37
ไขมัน (EE)	1.49	1.95	1.81	1.52	1.36	1.14
เยื่อใย (CF)	4.05	4.36	3.65	4.23	28.62	29.53
เถ้า (Ash)	9.22	9.36	9.58	9.09	5.14	1.86
พลังงานทั้งหมด (GE)	4142.97	4121.02	4203.53	4051.47	4165.46	4397.23
ผนังเซลล์ (NDF)	-	-	-	-	68.79	63.50
ลิกโนเซลลูโลส (ADF)	-	-	-	-	31.48	34.44
ลิกนิน (ADL)	-	-	-	-	3.82	5.70

หมายเหตุ TRT1 = อาหารข้นสูตรกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมันเป็นวัตถุดิบโปรตีนหลัก

TRT2 = อาหารข้นสูตรกากถั่วเหลืองบิบน้ำมันเป็นวัตถุดิบโปรตีนหลัก

TRT3 = อาหารข้นสูตรกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมันเอ็กชทรูดเป็นวัตถุดิบโปรตีนหลัก

TRT4 = อาหารข้นสูตรกากถั่วเหลืองบิบน้ำมันเอ็กชทรูดเป็นวัตถุดิบโปรตีนหลัก

อาหารชั้นที่ใช้ในการทดลอง ใช้อาหารชั้นสูตรเดียวกัน โดยทำการเปรียบเทียบกรรมวิธีใช้กากถั่วเหลืองที่ผ่านการให้ความร้อนโดยกระบวนการเอ็กซ์ทราค เป็นแหล่งวัตถุดิบอาหารโปรตีนหลัก พบว่าองค์ประกอบของโภชนะในอาหารชั้นทั้ง 4 กลุ่ม มีค่าใกล้เคียงกัน (ตารางที่ 24) โดยกลุ่มที่ 1 ประกอบด้วยวัตถุแห้ง (DM) 92.37% โปรตีนหยาบ (CP) ไขมัน (EE) เยื่อใย (CF) และเถ้า (Ash) เท่ากับ 18.59, 1.49, 4.05 และ 9.22% วัตถุแห้ง ตามลำดับ และมีค่าพลังงานทั้งหมด (GE) 4142.97 cal/g กลุ่มที่ 2 ประกอบด้วยวัตถุแห้ง (DM) 92.48% โปรตีนหยาบ (CP) ไขมัน (EE) เยื่อใย (CF) และเถ้า (Ash) เท่ากับ 18.16, 1.49, 4.05 และ 9.22% วัตถุแห้ง ตามลำดับ และมีค่าพลังงานทั้งหมด (GE) 4121.02 cal/g กลุ่มที่ 3 ประกอบด้วยวัตถุแห้ง (DM) 91.00% โปรตีนหยาบ (CP) ไขมัน (EE) เยื่อใย (CF) และเถ้า (Ash) เท่ากับ 18.49, 1.81, 3.65 และ 9.58% วัตถุแห้ง ตามลำดับ และมีค่าพลังงานทั้งหมด (GE) 4203.53 cal/g และกลุ่มที่ 4 ประกอบด้วยวัตถุแห้ง (DM) 91.10% โปรตีนหยาบ (CP) ไขมัน (EE) เยื่อใย (CF) และเถ้า (Ash) เท่ากับ 17.98, 1.52, 4.23 และ 9.09% วัตถุแห้ง ตามลำดับ และมีค่าพลังงานทั้งหมด (GE) 4051.47 cal/g ทั้งนี้ระดับของโปรตีนหยาบ (CP) มีค่าใกล้เคียงกับที่ต้องการ คือ 18% เป็นที่น่าสังเกตว่ากลุ่มที่ 2 ซึ่งใช้กากถั่วเหลืองบิบน้ำมันเป็นแหล่งวัตถุดิบโปรตีน มีระดับไขมัน (EE) ค่อนข้างสูงกว่ากลุ่มอื่นๆ ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการแยกน้ำมันออกจากกากถั่วเหลืองโดยการบิบน้ำมันนั้นจะยังมีน้ำมันเหลืออยู่มากกว่าการแยกน้ำมันโดยการสกัดด้วยสารเคมี (สาโรช, 2547)

2. ผลของอาหารทดลองต่อกระบวนการหมักย่อยในกระเพาะหมักและค่าชีวเคมีในเลือดของโคนม

2.1 ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของของเหลวในกระเพาะหมัก

จากการทดลอง พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างของของเหลวในกระเพาะหมักโครีดนมที่ได้รับอาหารชั้นสูตรกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน (TRT1) กากถั่วเหลืองบิบน้ำมัน (TRT2) กากถั่วเหลืองสกัดน้ำมันเอ็กซ์ทราค (TRT3) และกากถั่วเหลืองบิบน้ำมันเอ็กซ์ทราค (TRT4) เป็นวัตถุดิบโปรตีนหลัก ซึ่งมีค่าโปรตีนที่ละลายตัวได้ง่ายในกระเพาะหมักที่แตกต่างกัน ที่เวลา 0, 2 และ 4 ชั่วโมงหลังการให้อาหาร (ตารางที่ 25) พบว่าค่าความเป็นกรด-ด่างของของเหลวในกระเพาะหมักในทุกกลุ่มการทดลองแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 7.00-7.24 ทั้งนี้เนื่องจากโคทดลองได้รับอาหารหยาบเต็มที่ (*ad libitum*) ทำให้มีการเคี้ยวเอื้องซึ่งกระตุ้นการผลิตน้ำลายซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารบัฟเฟอร์ช่วยปรับค่า pH ในกระเพาะหมักให้เป็นกลางและไม่เปลี่ยนแปลงเร็วเกินไป (บุญล้อม, 2546) ตลอดจนมีความเหมาะสมต่อระบบนิเวศในกระเพาะหมัก ส่งผลให้มีการเจริญเติบโตและการนำไปใช้ประโยชน์ในการสังเคราะห์เป็นจุลินทรีย์โปรตีนได้ดี (เมธา, 2533) แสดงให้เห็นว่า อาหารโปรตีนที่ถูกย่อยสลาย

ตารางที่ 25 กระบวนการหมักในกระเพาะหมักและค่าชีวเคมีในเลือด ภายหลังการกินอาหาร 4 กลุ่ม ที่เวลาแตกต่างกัน

	TRT1	TRT2	TRT3	TRT4	SEM
pH					
0 ชั่วโมง	7.53	7.63	7.57	7.67	0.03
2 ชั่วโมง	7.10	7.00	6.97	7.12	0.10
4 ชั่วโมง	7.10	7.25	6.76	6.50	0.12
เฉลี่ย	7.24	7.29	7.10	7.10	0.10
แอมโมเนีย-ไนโตรเจน, มก.%					
0 ชั่วโมง	6.63	6.43	5.80	6.40	0.19
2 ชั่วโมง	7.17 ^b	10.60 ^a	4.63 ^c	5.10 ^c	0.71
4 ชั่วโมง	3.83 ^b	3.48 ^b	5.25 ^b	9.25 ^a	0.65
เฉลี่ย	5.88	6.83	5.23	6.91	0.60
กลูโคสในเลือด, มก.%					
0 ชั่วโมง	58.53 ^{ab}	48.06 ^b	63.70 ^a	55.73 ^{ab}	2.30
2 ชั่วโมง	47.77 ^{ab}	38.53 ^b	52.63 ^{ab}	58.16 ^a	3.03
4 ชั่วโมง	54.64 ^b	56.49 ^{ab}	62.35 ^a	63.73 ^a	1.53
เฉลี่ย	53.65	47.70	59.56	59.21	2.14
ยูเรีย-ไนโตรเจนในเลือด, มก.%					
0 ชั่วโมง	7.58 ^b	15.35 ^a	15.55 ^a	15.39 ^a	1.04
2 ชั่วโมง	15.75 ^b	21.15 ^a	21.03 ^a	21.83 ^a	0.94
4 ชั่วโมง	13.25 ^b	20.19 ^a	17.19 ^{ab}	21.94 ^a	1.20
เฉลี่ย	12.23 ^b	18.91 ^{ab}	17.92 ^{ab}	19.72 ^a	1.24

หมายเหตุ TRT1 = อาหารชั้นสูตรกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมันเป็นวัตถุดิบโปรตีนหลัก

TRT2 = อาหารชั้นสูตรกากถั่วเหลืองบิบน้ำมันเป็นวัตถุดิบโปรตีนหลัก

TRT3 = อาหารชั้นสูตรกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมันเอ็กซ์ทราเป็นวัตถุดิบโปรตีนหลัก

TRT4 = อาหารชั้นสูตรกากถั่วเหลืองบิบน้ำมันเอ็กซ์ทราเป็นวัตถุดิบโปรตีนหลัก

^{a-b} อักษรที่ต่างกันแถวเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

ได้ช้าหรือเร็วต่างกันในกระเพาะหมัก ไม่มีผลต่อความเป็นกรด-ด่างในกระเพาะหมัก (พิทยา, 2536 และ Kung *et al.*, 1983) และมีค่าลดลงในชั่วโมงที่ 2 และ 4 เมื่อเปรียบเทียบกับชั่วโมงที่ 0 เนื่องจากจุลินทรีย์ในกระเพาะหมักมีกิจกรรมการหมักย่อยและผลิตกรดได้สูงสุดหลังจากกินอาหารเป็นเวลา 2-4 ชั่วโมง (เมธา, 2540) สอดคล้องกับ พันทิพา (2539) รายงานค่า pH 5.5-7.2 คือช่วงที่เหมาะสมต่อกิจกรรมการหมักย่อย การดูดซึมสารอาหาร และการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในกระเพาะหมัก ค่า pH ที่ต่ำกว่า 5.5 มีผลให้สัตว์มีความเสี่ยงต่อการเป็นโรคภาวะกรดเกินในกระเพาะหมัก (acidosis) จุลินทรีย์ในกระเพาะหมักมีการเจริญเติบโตลดลง ตลอดจนการดูดซึมสารอาหาร กรดไขมันระเหยง่าย และแอมโมเนียของโคมีประสิทธิภาพลดลง (กฤษ, 2547)

2.2 ความเข้มข้นของแอมโมเนีย-ไนโตรเจน ($\text{NH}_3\text{-N}$) ของของเหลวในกระเพาะหมัก

ความเข้มข้นของแอมโมเนีย-ไนโตรเจนของของเหลวกระเพาะหมักเป็นค่าบ่งชี้ถึงความแตกต่างของกระบวนการหมักย่อยอาหารโปรตีนโดยจุลินทรีย์ในกระเพาะหมัก โดยทั่วไปความเข้มข้นของสารประกอบไนโตรเจนในกระเพาะหมักนั้นมีความผันแปรมาก ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ กรดอะมิโนอิสระมีประมาณ 0.1 - 1.5 มก.% แอมโมเนีย-ไนโตรเจน ($\text{NH}_3\text{-N}$) มีประมาณ 0 - 130 มก.% และโปรตีน-ไนโตรเจน (protein-N) มีประมาณ 100 - 400 มก.% (เมธา, 2533)

จากการทดลองการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของแอมโมเนีย-ไนโตรเจนของของเหลวในกระเพาะหมักโครีดนมที่ได้รับอาหารชั้นสูตรกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน (TRT1) กากถั่วเหลืองบิบน้ำมัน (TRT2) กากถั่วเหลืองสกัดน้ำมันเอ็กซ์ทรา (TRT3) และกากถั่วเหลืองบิบน้ำมันเอ็กซ์ทรา (TRT4) เป็นวัตถุดิบโปรตีนหลัก ซึ่งมีค่าโปรตีนที่สลายตัวได้ง่ายในกระเพาะหมักที่แตกต่างกัน ที่เวลา 0, 2 และ 4 ชั่วโมงหลังการให้อาหาร (ตารางที่ 25) พบว่ามีค่าเฉลี่ยของทั้ง 4 กลุ่ม อยู่ในช่วง 5.23 - 6.91 ซึ่งอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ในกระเพาะหมัก คือ 5.0 - 8.0 มก.% (Satter and Slyter, 1974) ความเข้มข้นของแอมโมเนีย-ไนโตรเจน ที่ 0 ชั่วโมงก่อนการให้อาหารมีค่าใกล้เคียงกัน คือ 6.63, 6.43, 5.80 และ 6.40 มก.% ตามลำดับ เมื่อวัดที่ 2 ชั่วโมงหลังการให้อาหารพบว่าความเข้มข้นของแอมโมเนีย-ไนโตรเจนกลุ่ม TRT1 และ TRT2 มีค่า 7.17 และ 10.60 มก.% ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่า กลุ่ม TRT3 และ TRT4 ซึ่งมีค่า 4.63 และ 5.10 มก.% ตามลำดับ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) และเมื่อวัดที่ 4 ชั่วโมงหลังการให้อาหารพบว่ากลุ่ม TRT4 มีความเข้มข้นของแอมโมเนีย-ไนโตรเจนสูงที่สุด คือ 9.25 มก.% ซึ่งสูงกว่ากลุ่ม TRT1 TRT2 และ TRT3 ซึ่งมีค่า 3.83, 3.48 และ 5.25 มก.% ตามลำดับ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ในชั่วโมงที่ 4 นี้ TRT1 และ TRT2 มีค่าลดลงจากชั่วโมงที่ 2 แต่ TRT3 และ TRT4 มีค่าเพิ่มขึ้นจากชั่วโมงที่ 2

แสดงให้เห็นว่าที่ 2 ชั่วโมงหลังการให้อาหาร TRT1 และ TRT2 มีคุณสมบัติละลายได้และถูกย่อยสลายได้เร็วจึงมีปริมาณสูง จากนั้นจึงลดลงอย่างรวดเร็วในชั่วโมงที่ 4 ซึ่งแสดงถึงความไม่สม่ำเสมอของความเข้มข้นของแอมโมเนีย-ไนโตรเจน แต่ TRT3 และ TRT4 ในชั่วโมงที่ 2 มีค่าต่ำกว่าและรักษาระดับไปจนถึงชั่วโมงที่ 4 แสดงถึงการค่อยๆ ถูกย่อยสลายไปเรื่อยๆ แสดงให้เห็นว่าการให้ความร้อนโดยการเอ็กซ์ทรูดกากถั่วเหลืองมีผลทำให้ลดการถูกย่อยสลายของโปรตีนในกระเพาะหมักลงได้

2.3 ความเข้มข้นของกลูโคสในเลือด (Blood glucose, BG)

แหล่งที่มาของกลูโคสเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในร่างกายโคมน มาจากการดูดซึมจากลำไส้เล็ก และกระบวนการกลูโคนีโอเจเนซิส (gluconeogenesis) เป็นสำคัญ (เมธา, 2533) จากการทดลองการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของกลูโคสในเลือด (BG) โครีดนมที่ได้รับอาหารชั้นสูตรกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน (TRT1) กากถั่วเหลืองบิบน้ำมัน (TRT2) กากถั่วเหลืองสกัดน้ำมันเอ็กซ์ทรูด (TRT3) และกากถั่วเหลืองบิบน้ำมันเอ็กซ์ทรูด (TRT4) เป็นวัตถุดิบโปรตีนหลัก ซึ่งมีค่าโปรตีนที่สลายตัวได้ง่ายในกระเพาะหมักที่แตกต่างกัน ที่เวลา 0, 2 และ 4 ชั่วโมงหลังการให้อาหาร (ตารางที่ 25) พบว่ามีค่าเฉลี่ยของทั้ง 4 กลุ่มใกล้เคียงกันอยู่ในช่วง 47.70 - 59.21 คือ 53.65, 47.70, 59.56 และ 59.21 มก.% ตามลำดับ เพราะว่ากลูโคสเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญต่อกระบวนการเมแทบอลิซึมและอวัยวะต่างๆ ในร่างกายโดยเฉพาะสมองและเม็ดเลือดแดง ร่างกายสัตว์จึงมีกลไกในการควบคุมระดับกลูโคสในเลือดให้เป็นปกติ คือ กระบวนการไกลโคเจเนซิส (glycogenesis) และไกลโคเจเนไลซิส (glycogenolysis) (บุญล้อม, 2546) ขณะที่ในชั่วโมงที่ 2 หลังการให้อาหาร พบว่ากลุ่ม TRT4 มีค่า BG สูงกว่า กลุ่ม TRT2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ คือมีค่า 58.16 และ 38.53 ตามลำดับ และที่ชั่วโมงที่ 4 หลังการให้อาหารพบว่า กลุ่ม TRT3 มีค่า BG สูงกว่า กลุ่ม TRT1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ คือมีค่า 62.35 และ 54.64 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจาก กลุ่ม TRT3 และ TRT4 เป็นกลุ่มที่ผ่านความร้อนโดยการเอ็กซ์ทรูด ทำให้ลดการละลายและย่อยสลายได้ของโปรตีนในกระเพาะหมักลง จึงมีกรดอะมิโนไหลผ่านไปย่อยและดูดซึมที่ลำไส้เล็กได้ในปริมาณสูง ทำให้สัตว์ได้รับกรดอะมิโนสูงกว่ากลุ่ม TRT1 และ TRT2 โดยกรดอะมิโนสามารถนำไปสร้างเป็นกลูโคสได้โดยการเปลี่ยนส่วนที่เป็นคาร์บอนแกนกลางของกรดอะมิโนให้เป็นไพรูเวทหรือสารตัวกลาง (intermediate) อื่นๆ ในวัฏจักรเครบส์ในตำแหน่งที่ต่างๆ กัน กรดอะมิโนที่ใช้สังเคราะห์เป็นกลูโคสเรียกว่า glucogenic amino acid อย่างไรก็ตามการนำกรดอะมิโนไปสังเคราะห์เป็นกลูโคสในทางโภชนาศาสตร์ถือเป็นการสูญเสียเพราะโดยส่วนมากแหล่งโปรตีนจะมีราคาแพงกว่าแหล่งพลังงาน ดังนั้นการให้กรดอะมิโนเป็นแหล่งพลังงานจึงถือเป็นการสูญเสีย แต่โดยส่วนมากการนำกรดอะมิโนมาสังเคราะห์เป็นกลูโคสนั้นจะเกิดเมื่อสัตว์ได้รับพลังงานไม่

เพียงพอ โดยเฉพาะในช่วงที่อดอาหารหรือขาดสารอาหาร ถึงแม้ว่ากรดอะมิโนทุกตัวจะสามารถสังเคราะห์เป็นกลูโคสได้ แต่ในสัตว์กระเพาะรวมมักใช้อะลานีนและกลูตามีนเป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์กลูโคส ในโคนมพบว่า 25% ของกลูโคสที่ผลิตได้ทั้งหมด มาจากกรดอะมิโนอะลานีน (เมธา, 2533)

2.4 ความเข้มข้นของยูเรีย-ไนโตรเจนในเลือด (Blood urea nitrogen, BUN)

ยูเรีย-ไนโตรเจนในเลือดเป็นค่าหนึ่งที่สามารถบ่งชี้ถึงกลไกการเปลี่ยนแปลงของโปรตีนในสัตว์กระเพาะรวมได้ จากการทดลองการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของยูเรีย-ไนโตรเจนในเลือดโครีดนมที่ได้รับอาหารชั้นสูตรกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน (TRT1) กากถั่วเหลืองบิบน้ำมัน (TRT2) กากถั่วเหลืองสกัดน้ำมันเอ็กซ์ทรา (TRT3) และกากถั่วเหลืองบิบน้ำมันเอ็กซ์ทรา (TRT4) เป็นวัตถุดิบโปรตีนหลัก ซึ่งมีค่าโปรตีนที่สลายตัวได้ง่ายในกระเพาะหมักที่แตกต่างกัน ที่เวลา 0 2 และ 4 ชั่วโมงหลังการให้อาหาร (ตารางที่ 25) พบว่า TRT1 มีค่า 7.58, 15.75 และ 13.25 มก.% ตามลำดับ TRT2 มีค่า 15.35, 21.15 และ 20.19 มก.% ตามลำดับ TRT3 มีค่า 15.55, 21.03 และ 17.19 มก.% ตามลำดับ และ TRT4 มีค่า 15.39, 21.83 และ 21.94 มก.% ตามลำดับ โดย TRT4 มีค่าเฉลี่ยทุกชั่วโมงสูงที่สุด คือมีค่า 19.72 รองลงมาเป็น TRT2 มีค่า 18.91 และ TRT3 มีค่า 17.92 ส่วน TRT1 มีค่าต่ำที่สุด ซึ่งมีค่า 12.23 เมื่อวัดที่ 2 ชั่วโมงหลังการให้อาหารในกลุ่ม TRT1 TRT2 และ TRT3 ความเข้มข้นของยูเรีย-ไนโตรเจนในเลือดมีค่าสูงที่สุด และจะลดลงในชั่วโมงที่ 4 คือมีค่าลดลงจาก 15.75 เป็น 13.25 จาก 21.15 เป็น 20.19 และ 21.03 เป็น 17.19 ใน TRT1 TRT2 และ TRT3 ตามลำดับ เช่นเดียวกับความเข้มข้นของแอมโมเนีย-ไนโตรเจนของของเหลวในกระเพาะหมัก ซึ่งมีค่าสูงที่สุดในชั่วโมงที่ 2 หลังการให้อาหารและลดลงในชั่วโมงที่ 4 หลังการให้อาหาร เนื่องมาจากในช่วงนี้แอมโมเนียถูกนำไปสังเคราะห์จุลินทรีย์โปรตีนมากถึง 80% (Hino and Russell, 1986) แต่กลุ่ม TRT4 นั้นความเข้มข้นของยูเรีย-ไนโตรเจนในเลือดที่ชั่วโมงที่ 4 กลับเพิ่มสูงขึ้นจากชั่วโมงที่ 2 โดยมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 21.83 เป็น 21.94 แสดงให้เห็นว่าการให้ความร้อนแก่กากถั่วเหลืองโดยการเอ็กซ์ทราได้ผลลดการย่อยสลายของโปรตีนในกระเพาะหมักลงได้ เนื่องจากรักษาระดับความเข้มข้นของยูเรีย-ไนโตรเจนในเลือดไปจนถึงชั่วโมงที่ 4 แสดงถึงการค่อยๆ ถูกย่อยสลายไปเรื่อยๆ อันเป็นผลมาจากการใช้ความร้อนโดยการเอ็กซ์ทรากากถั่วเหลือง

3. ปริมาณของกรดไขมันระเหยง่ายของของเหลวในกระเพาะหมัก (Volatile fatty acid, VFA)

ตารางที่ 26 ค่าปริมาณกรดไขมันระเหยง่าย (กรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก และกรดบิวทิริก) ของของเหลวในกระเพาะหมักที่เวลา 0, 2 และ 4 ชั่วโมงหลังการให้อาหาร (%)

เวลา (ชั่วโมง)	TRT1	TRT2	TRT3	TRT4	SEM
กรดอะซิติก					
0	38.01	40.22	38.98	39.08	0.57
2	49.19	48.67	42.26	45.77	3.52
4	66.20	63.20	61.12	62.04	1.97
กรดโพรพิโอนิก					
0	16.84	16.41	14.62	16.24	0.61
2	18.29	22.89	20.56	21.51	1.26
4	24.67	23.49	22.15	26.79	0.94
กรดบิวทิริก					
0	4.98	5.63	4.88	5.86	0.25
2	5.58	6.52	6.41	6.46	0.44
4	8.19	7.95	7.31	7.33	0.16

หมายเหตุ TRT1 = อาหารชั้นสูงตรากากถั่วเหลืองสกัดน้ำมันเป็นวัตถุดิบโปรตีนหลัก

TRT2 = อาหารชั้นสูงตรากากถั่วเหลืองบิบน้ำมันเป็นวัตถุดิบโปรตีนหลัก

TRT3 = อาหารชั้นสูงตรากากถั่วเหลืองสกัดน้ำมันเอ็กซ์ทราดเป็นวัตถุดิบโปรตีนหลัก

TRT4 = อาหารชั้นสูงตรากากถั่วเหลืองบิบน้ำมันเอ็กซ์ทราดเป็นวัตถุดิบโปรตีนหลัก

^{a-b} อักษรที่ต่างกันแถวเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

3.1 กรดอะซิติก (Acetic acid)

จากการทดลองการเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดอะซิติกในของเหลวในกระเพาะหมักโครีดนมที่ได้รับอาหารชั้นสูงตรากากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน (TRT1) กากถั่วเหลืองบิบน้ำมัน (TRT2) กากถั่วเหลืองสกัดน้ำมันเอ็กซ์ทราด (TRT3) และกากถั่วเหลืองบิบน้ำมันเอ็กซ์ทราด (TRT4) เป็นวัตถุดิบโปรตีนหลัก ซึ่งมีค่าโปรตีนที่ละลายตัวได้ง่ายในกระเพาะหมักที่แตกต่างกัน ที่เวลา 0, 2 และ 4 ชั่วโมงหลังการให้อาหาร (ตารางที่ 26) พบว่ามีค่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) คือ กลุ่มที่ 1

มีค่า 38.01, 49.19 และ 66.20% ตามลำดับ กลุ่มที่ 2 มีค่า 40.22, 48.67 และ 63.20% ตามลำดับ กลุ่มที่ 3 มีค่า 38.98, 42.26 และ 61.12% ตามลำดับ และกลุ่มที่ 4 มีค่า 39.08, 45.77 และ 62.04% ตามลำดับ เนื่องจากปริมาณกรดอะซิติกในของเหลวในกระเพาะหมักมีความสัมพันธ์โดยตรงกับระดับของอาหารหยาบที่สัตว์ได้รับ (เมธา, 2533) จากการทดลองโคทั้ง 4 กลุ่มทดลองได้รับอาหารหยาบ (หญ้าขน) เต็มที่และมีปริมาณการกินได้ใกล้เคียงกัน คือ 3.24, 3.55, 3.52 และ 3.63 กิโลกรัมต่อวันในรูปวัตถุแห้ง ในกลุ่ม TRT1 TRT2 TRT3 และ TRT4 ตามลำดับ (ตารางที่ 27) จึงส่งผลให้ปริมาณกรดอะซิติกในของเหลวในกระเพาะหมักมีค่าใกล้เคียงกัน จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าปริมาณกรดอะซิติกที่ 0 ชั่วโมงหลังการให้อาหารมีค่าต่ำที่สุด และจะเพิ่มขึ้นที่ 2 ชั่วโมงหลังการให้อาหาร จนมีค่าสูงสุดเมื่อวัดค่าที่ 4 ชั่วโมงหลังการให้อาหาร เนื่องจากเมื่ออาหารหยาบถูกหมักย่อยอยู่ในกระเพาะหมักนานขึ้นจะทำให้จุลินทรีย์จะสามารถเข้าหมักย่อยอาหารหยาบได้มากขึ้น จึงทำให้ปริมาณกรดอะซิติกมีค่าสูงขึ้นด้วย

3.2 กรดโพรพิโอนิก (Propionic acid)

จากการทดลองการเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดโพรพิโอนิกในของเหลวในกระเพาะหมักโครีดนมเมื่อมีการใช้วัตถุดิบอาหารโปรตีนจากกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน (TRT1) กากถั่วเหลืองบีนน้ำมัน (TRT2) กากถั่วเหลืองสกัดน้ำมันเอ็กซ์ทรา (TRT3) และกากถั่วเหลืองบีนน้ำมันเอ็กซ์ทรา (TRT4) ซึ่งมีค่าโปรตีนที่สลายตัวได้ง่ายในกระเพาะหมักที่แตกต่างกัน ที่เวลา 0, 2 และ 4 ชั่วโมงหลังการให้อาหาร (ตารางที่ 26) พบว่ามีค่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) คือ กลุ่มที่ 1 มีค่า 16.84, 18.29 และ 24.67% ตามลำดับ กลุ่มที่ 2 มีค่า 16.41, 22.89 และ 23.49% ตามลำดับ กลุ่มที่ 3 มีค่า 14.62, 20.56 และ 22.15% ตามลำดับ และ กลุ่มที่ 4 มีค่า 16.24, 21.51 และ 26.79% ตามลำดับ ปริมาณกรดโพรพิโอนิกในของเหลวในกระเพาะหมักถูกสร้างจากการย่อยสลายคาร์โบไฮเดรตมากพอควร (ประมาณ 25%) โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อได้รับอาหารชั้นในปริมาณสูง (บุญล้อม, 2546) จากการทดลองสัตว์ทดลองทั้ง 4 กลุ่มได้รับอาหารชั้นในระดับที่เท่าเทียมกัน คือ 7.09 กก./วันในรูปวัตถุแห้ง ร่วมกับเปลือกสับประดหมักร่วมกับชานอ้อย ในระดับที่เท่าเทียมกัน คือ 1.30 กก./วันในรูปวัตถุแห้ง (ตารางที่ 27) จึงส่งผลให้ปริมาณกรดโพรพิโอนิกในของเหลวในกระเพาะหมักของโคทดลองทั้ง 4 กลุ่ม มีค่าใกล้เคียงกัน จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าปริมาณกรดโพรพิโอนิกที่ 0 ชั่วโมงหลังการให้อาหารมีค่าต่ำที่สุด และจะเพิ่มขึ้นที่ 2 ชั่วโมงหลังการให้อาหาร จนมีค่าสูงสุดเมื่อวัดค่าที่ 4 ชั่วโมงหลังการให้อาหาร ซึ่งเป็นการเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการหมักย่อยในกระเพาะหมัก

3.3 กรดบิวทิริก (Butyric acid)

จากการทดลองการเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดบิวทิริกในของเหลวในกระเพาะหมักโครีดนมเมื่อมีการใช้วัตถุดิบอาหาร โปรตีนจากกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน (TRT1) กากถั่วเหลืองบิบน้ำมัน (TRT2) กากถั่วเหลืองสกัดน้ำมันเอ็กซ์ทรา (TRT3) และกากถั่วเหลืองบิบน้ำมันเอ็กซ์ทรา (TRT4) ซึ่งมีค่าโปรตีนที่ละลายตัวได้ง่ายในกระเพาะหมักที่แตกต่างกัน ที่เวลา 0 2 และ 4 ชั่วโมงหลังการให้อาหาร (ตารางที่ 26) พบว่ามีค่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) คือ กลุ่มที่1 มีค่า 4.98, 5.58 และ 8.19% ตามลำดับ กลุ่มที่2 มีค่า 5.63, 6.52 และ 7.95% ตามลำดับ กลุ่มที่3 มีค่า 4.88, 6.41 และ 7.31% ตามลำดับ และ กลุ่มที่4 มีค่า 5.86, 6.46 และ 7.33% ตามลำดับ จากการทดลองสัตว์ทดลองทั้ง 4 กลุ่มได้รับอาหารชั้นในระดับที่เท่าเทียมกัน คือ 7.09 กก./วันในรูปวัตถุแห้ง ร่วมกับเปลือกสับประดหมักร่วมกับขานอ้อย ในระดับที่เท่าเทียมกัน คือ 1.30 กก./วันในรูปวัตถุแห้ง และได้รับอาหารหยาบ (หญ้าขน) เต็มที่และมีปริมาณการกินได้ใกล้เคียงกัน คือ 3.24, 3.55, 3.52 และ 3.63 กิโลกรัมต่อวันในรูปวัตถุแห้ง ในกลุ่ม TRT1 TRT2 TRT3 และ TRT4 ตามลำดับ (ตารางที่27) ปริมาณกรดบิวทิริกในของเหลวในกระเพาะหมักมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมาก (บุญล้อม, 2546) จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่าปริมาณกรดกรดบิวทิริกที่ 0 ชั่วโมงหลังการให้อาหารมีค่าต่ำที่สุด และจะเพิ่มขึ้นที่ 2 ชั่วโมงหลังการให้อาหาร จนมีค่าสูงสุดเมื่อวัดค่าที่ 4 ชั่วโมงหลังการให้อาหาร ซึ่งเป็นการเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาของการหมักย่อยในกระเพาะหมัก

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การป้องกันการย่อยสลายของโปรตีนในกระเพาะหมักไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายทั้ง 3 ชนิด ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการทดลองของ พิทยา (2536) ที่ได้ทำการทดลองในโคนมโดยใช้อาหารชั้นที่มีส่วนผสมของมันเส้น ปลาข้าว และรำอ่อน เป็นแหล่งพลังงานหลัก ใช้แหล่งของโปรตีนที่มีความสามารถในการถูกย่อยสลายของโปรตีนในกระเพาะหมักได้แตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 34, 38 และ 42% ซึ่งปรับระดับด้วยกากถั่วเหลืองและปลาป่นในสัดส่วน 6.2:2.2, 3.1:3.9 และ 1.5:4.9%ตามลำดับ แล้วปรับทุกสูตรให้มีโปรตีนหยาบเท่ากันด้วยยูเรียในระดับ 0.9, 0.8, 0.7 % ตามลำดับ พบว่าความเข้มข้นของกรดไขมันระเหยได้ทั้งหมดในชั่วโมงที่ 4 หลังการให้อาหารมีค่า 89.1, 77.9 และ 72.5 m mole/l แตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ แต่แนวโน้มจะมีค่าความเข้มข้นที่สูงขึ้นในอาหารสูตรที่มีโปรตีนที่ไม่ถูกย่อยสลายได้ต่ำกว่า (34%) ทั้งนี้เนื่องจากในสูตรอาหารที่ใช้มันเส้นซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่ถูกย่อยสลายได้เร็วในอัตราที่สูงกว่า คือ 32.8, 24.9 และ 18.7 % ตามลำดับ มันเส้นจึงสามารถหมักย่อยสลายให้ค่ากรดไขมันระเหยได้ที่สูงกว่า (กฤตพล และคณะ, 2534) ทั้งนี้ Wohlt *et al.* (1976) ได้ให้เหตุผลว่า การเปลี่ยนแปลงปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายไม่น่าจะมีผลมาจากความสามารถในการถูกย่อยสลายของโปรตีนในกระเพาะหมัก แต่น่าจะมาจากรูปแบบของกรดอะมิโนต่างๆ ที่เป็น

องค์ประกอบของโปรตีนในอาหารมากกว่า ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายในกระเพาะหมัก คือ แหล่งอาหารหยาบ และปริมาณคาร์โบไฮเดรตที่ละลายได้ง่ายในกระเพาะหมัก (Kranse *et al.*, 2002) สัดส่วนของกรดไขมันระเหยง่ายขึ้นอยู่กับชนิดของอาหารหยาบที่สัตว์ได้รับ หากสัตว์ได้รับอาหารหยาบในปริมาณสูง การหมักย่อยในกระเพาะหมักจะให้ผลผลิตสุดท้ายเป็นกรดอะซิติกในสัดส่วนที่สูง หากมีการเสริมอาหารข้นมากขึ้นจะทำให้มีสัดส่วนของกรดโพรพิโอนิกเพิ่มมากขึ้น และมีสัดส่วนของกรดอะซิติกลดลง (ฉลอง, 2541) ซึ่งจะเห็นได้ชัดจากการศึกษาของ Sutton *et al.* (2004) โดยพบว่าการให้อาหารหยาบต่ออาหารข้นในสัดส่วน 9.4 ต่อ 90.6 ทำให้ปริมาณของกรดโพรพิโอนิกเป็นสองเท่าของการให้อาหารหยาบต่ออาหารข้นในสัดส่วน 39.5 ต่อ 60.5 ทำให้ปริมาณของกรดอะซิติกและกรดบิวทิริกมีค่าลดลง

4. สมรรถภาพการผลิตของโคนม

4.1 ปริมาณการกินได้ (feed intake, FI)

จากการทดลองพบว่าปริมาณการกินได้อย่างอิสระ (voluntary feed intake, VFI) ของอาหารหยาบ (หญ้าขนสด) ในโครีดนมที่ได้รับอาหารข้นสูตรกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน (TRT1) กากถั่วเหลืองบิบน้ำมัน (TRT2) กากถั่วเหลืองสกัดน้ำมันเอ็กชทруд (TRT3) และกากถั่วเหลืองบิบน้ำมันเอ็กชทруд (TRT4) เป็นวัตถุดิบโปรตีนหลัก ซึ่งมีค่าโปรตีนที่ละลายตัวได้ง่ายในกระเพาะหมักที่แตกต่างกัน (ตารางที่ 27) มีค่า 3.24, 3.55, 3.52 และ 3.63 กก./วัน วัตถุแห้ง ส่วนปริมาณการกินได้ของวัตถุแห้งทั้งหมด (total dry matter intake) (ตารางที่ 26) มีค่า 11.64, 11.95, 11.93 และ 12.00 กก./วัน ตามลำดับ จากผลการทดลองค่าปริมาณการกินได้อย่างอิสระของอาหารหยาบ และปริมาณการกินได้ของวัตถุแห้งทั้งหมด มีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) ทั้งนี้เพราะโคทุกตัวได้รับอาหารข้น และเปลือกสับประดหมักร่วมกับซานอ้อยในปริมาณที่เท่ากันและกินได้หมด ผลการทดลองเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการศึกษาของ พิทยา (2536) ที่ได้ทำการทดลองในโคนมโดยใช้อาหารข้นที่มีส่วนผสมของมันเส้น ปลายข้าว และรำอ่อน เป็นแหล่งพลังงานหลัก ใช้แหล่งของโปรตีนที่มีความสามารถในการถูกย่อยสลายของโปรตีนในกระเพาะหมักได้แตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 34, 38 และ 42% ซึ่งปรับระดับด้วยกากถั่วเหลืองและปลาป่นในสัดส่วน 6.2:2.2, 3.1:3.9 และ 1.5:4.9 %ตามลำดับ แล้วปรับทุกสูตรให้มีโปรตีนหยาบเท่ากันด้วยยูเรียในระดับ 0.9, 0.8, 0.7 %ตามลำดับ ใช้หญ้าธัญที่แห้งเป็นแหล่งอาหารหยาบ ในสัดส่วนอาหารหยาบต่ออาหารข้นประมาณ 60:40 พบว่าปริมาณการกินได้อย่างอิสระของอาหารหยาบและปริมาณการกินได้ทั้งหมดในรูปวัตถุแห้งแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ และ ธนียา (2551) ที่พบว่าระดับที่แตกต่างกันของโปรตีนที่ย่อยสลายได้ง่าย ไม่มีผลต่อปริมาณการกินได้

ตารางที่ 27 ผลผลิตและองค์ประกอบน้ำมันของโคนมที่ได้รับอาหารทดลองทั้ง 4 สูตร

สมรรถภาพการผลิต	TRT1	TRT2	TRT3	TRT4	SEM
น้ำหนักเริ่มทดลอง, กก.	413.40	396.40	411.20	382.80	14.41
น้ำหนักสิ้นสุดการทดลอง, กก.	410.00	392.00	420.00	395.00	14.41
น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลง, กก.	-3.40	-4.40	8.80	12.20	4.31
ปริมาณการกินได้ของวัตถุดิบ, กก./วัน					
หญ้าขน	3.24	3.55	3.52	3.63	0.20
เปลือกสับประรดหมักร่วมกับขานอ้อย	1.30	1.30	1.30	1.30	0.00
อาหารข้น	7.09	7.09	7.09	7.09	0.00
รวม	11.64	11.95	11.93	12.00	0.20
ผลผลิตน้ำมัน, กก./วัน	13.50	15.37	15.33	14.68	0.65
ผลผลิตน้ำมันปรับไขมัน 4%, กก./วัน	13.50	15.37	15.33	14.68	0.65
องค์ประกอบน้ำมัน, %					
ไขมันนม	4.27	4.24	4.42	4.38	0.12
โปรตีน	3.26	3.25	3.27	3.21	0.02
แลคโตส	4.32	4.39	4.34	4.31	0.03
ของแข็งไม่รวมไขมัน	8.21	8.31	8.26	8.19	0.06
ของแข็งทั้งหมด	0.67	0.66	0.66	0.65	0.01
ค่าความเป็นกรด-ด่าง	6.86	6.82	6.81	6.80	0.01
ความหนาแน่น	28.35	28.77	28.46	28.24	0.20
จุดเยือกแข็ง	-0.50	-0.51	-0.51	-0.58	0/02

หมายเหตุ TRT1 = อาหารข้นสูตรกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมันเป็นวัตถุดิบโปรตีนหลัก

TRT2 = อาหารข้นสูตรกากถั่วเหลืองบิบน้ำมันเป็นวัตถุดิบโปรตีนหลัก

TRT3 = อาหารข้นสูตรกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมันเอ็กสทราดเป็นวัตถุดิบโปรตีนหลัก

TRT4 = อาหารข้นสูตรกากถั่วเหลืองบิบน้ำมันเอ็กสทราดเป็นวัตถุดิบโปรตีนหลัก

^{a-b}อักษรที่ต่างกันในแต่ละแถวแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

เป็นที่น่าสังเกตว่าการศึกษาของ Winsryg *et al.* (1991) และ Hoffman *et al.* (1991) กลับให้ผลที่ขัดแย้งกัน แต่อย่างไรก็ตามปริมาณการกินได้ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ตัวสัตว์ การเมแทบอลิซึม สัดส่วนอาหารหยาดต่ออาหารข้น ช่วงการให้นม ความถี่ของการให้อาหาร กระบวนการหมักในกระเพาะหมัก และการใช้ประโยชน์ได้ของโภชนะ เป็นต้น (เมธธา, 2533)

4.2 การเปลี่ยนแปลงน้ำนมโค

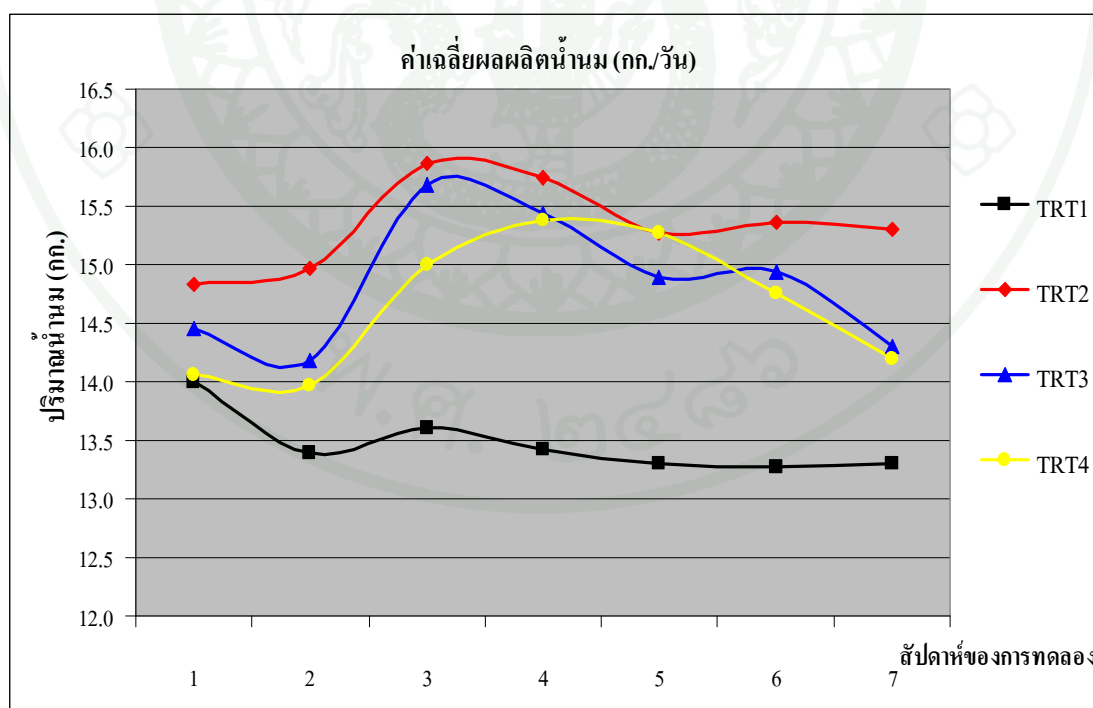
จากการทดลองพบว่าการเปลี่ยนแปลงน้ำนมโครีดนมที่ได้รับอาหารข้นสูตรกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน (TRT1) กากถั่วเหลืองบีบน้ำมัน (TRT2) กากถั่วเหลืองสกัดน้ำมันเอ็กซ์ทรา (TRT3) และกากถั่วเหลืองบีบน้ำมันเอ็กซ์ทรา (TRT4) เป็นวัตถุดิบโปรตีนหลัก ซึ่งมีค่าโปรตีนที่ละลายตัวได้ง่ายในกระเพาะหมักที่แตกต่างกัน (ตารางที่ 27) มีค่า -3.40, -4.40, 8.80 และ 12. กิโลกรัม ซึ่งมีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการศึกษาของ Broderick *et al.* (1990) และ ธนียา (2551) ทั้งนี้การเพิ่มหรือเปลี่ยนแปลงน้ำนมของโคนมจะขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย ได้แก่ อาหาร โรค พันธุกรรม การให้ผลผลิตน้ำนม ซึ่งในโคนมนั้นปริมาณการให้ผลผลิตน้ำนมมีผลต่อการเพิ่มหรือลดน้ำนมอย่างเห็นได้ชัด น้ำนมของโคหลังคลอดลูกและให้น้ำมนั้นจะลดลงจากเดิมมาก ซึ่งอาจถึง 40-60 กิโลกรัม แต่หลังจากสัปดาห์ที่ 6 น้ำนมโคจะค่อยๆ เพิ่มขึ้น และผลผลิตน้ำนมจะค่อยๆ ลดลงเช่นกัน (Folman *et al.*, 1981)

4.3 ผลผลิตน้ำนมและองค์ประกอบน้ำนม (milk yield and milk composition)

จากการทดลองพบว่าผลผลิตน้ำนมโคที่ได้รับอาหารข้นสูตรกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน (TRT1) กากถั่วเหลืองบีบน้ำมัน (TRT2) กากถั่วเหลืองสกัดน้ำมันเอ็กซ์ทรา (TRT3) และกากถั่วเหลืองบีบน้ำมันเอ็กซ์ทรา (TRT4) เป็นวัตถุดิบโปรตีนหลัก ซึ่งมีค่าโปรตีนที่ละลายตัวได้ง่ายในกระเพาะหมักที่แตกต่างกัน (ตารางที่ 27) มีค่า 13.50, 15.37, 15.33 และ 14.68. กก./วัน ส่วนองค์ประกอบน้ำมนั้นพบว่าไขมันนมมีค่า 4.27, 4.24, 4.42 และ 4.38% ตามลำดับ โปรตีนนมมีค่า 3.26, 3.25, 3.27 และ 3.21% ตามลำดับ แลคโตสมีค่า 4.32, 4.39, 4.34 และ 4.31% ตามลำดับ ของแข็งไม่รวมไขมันมีค่า 8.21, 8.31, 8.26 และ 8.19% ตามลำดับ และของแข็งทั้งหมดมีค่า 0.67, 0.66, 0.66 และ 0.65% ตามลำดับ ซึ่งผลผลิตน้ำนมและองค์ประกอบน้ำนมทั้งหมดมีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) Nocek and Russell (1988) สรุปว่าผลของโปรตีนที่ไม่ถูกย่อยสลายในกระเพาะหมักจะเห็นเด่นชัด เมื่อการกินได้ของโปรตีนหยาดน้อยกว่า 14% แต่จะไม่แสดงผลเด่นชัดเมื่อการกินได้ของโปรตีนหยาดสูงกว่า 16% แต่จากการทดลองนี้การกินได้ของโปรตีนหยาดอยู่ในช่วง 13.39 - 13.56% ของปริมาณการกินได้ของวัตถุดิบทั้งหมด ซึ่งใกล้เคียง 14% จึงเห็นผลไม่เด่นชัด เนื่องจากโคนมที่

ใช้ในการทดลองครั้งนี้ให้ผลผลิตเฉลี่ยไม่สูงมากนัก และการเก็บบันทึกข้อมูลอยู่ในระยะหลังการคลอดไปแล้วมากกว่าสี่สัปดาห์ ซึ่งเป็นระยะเข้าสู่การให้นมช่วงกลางที่การให้น้ำนมเริ่มลดลง เหล่านี้อาจเป็นสาเหตุที่ทำให้ผลของอาหารทดลองต่อผลผลิตน้ำนมในครั้งนี้ไม่เด่นชัด Chalupa (1974) กล่าวว่า การตอบสนองในการให้ผลผลิตน้ำนมในทางบวกต่อโปรตีนไหลผ่าน จะชัดเจนมากขึ้นเมื่อสัตว์อยู่ในภาวะที่ได้รับกรดอะมิโนที่ไม่เพียงพอต่อการนำไปใช้สร้างเป็นผลผลิต แต่ถ้าโคนมอยู่ในภาวะที่ได้รับกรดอะมิโนที่พอเพียงจากความต้องการที่เริ่มลดลงหลังการให้น้ำนมสูงสุดอาจไม่แสดงการตอบสนองต่อการได้รับกรดอะมิโนที่เพิ่มขึ้น

เมื่อพิจารณาค่าตัวเลขของปริมาณน้ำนมมีค่าต่ำสุดในกลุ่ม TRT1 เมื่อเทียบกับกลุ่ม TRT2 TRT3 และ TRT4 โดยมีค่า 13.28, 15.18, 14.73 และ 14.40 กิโลกรัมต่อวันตามลำดับ ซึ่งเมื่อคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์แล้วมีค่าการให้น้ำนมที่สูงกว่า TRT1 เท่ากับ 14.30, 10.91 และ 8.43% ตามลำดับ ในขณะเดียวกัน แม่โคในกลุ่มที่ได้รับอาหารที่มีกากถั่วเหลืองบดน้ำมัน (TRT2) และกากถั่วเหลืองที่ผ่านการเอ็กซ์ทราด (TRT3 และ TRT4) แสดงค่าปริมาณน้ำนมที่สูงติดต่อกันหลายสัปดาห์ และรักษาระดับการให้น้ำนมได้ดีกว่า เมื่อเทียบกับโคที่ได้รับอาหารทดลองในกลุ่ม TRT1 ดังแสดงในภาพที่ 13



ภาพที่ 13 ปริมาณผลผลิตน้ำนมตลอดการทดลอง (กก./วัน)

เป็นที่น่าสังเกตว่า โคนมในกลุ่ม TRT2 (กากถั่วเหลืองบิบน้ำมัน) มีค่าการให้น้ำมันเฉลี่ยที่สูงกว่ากลุ่ม TRT1 (กากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน) ถึงเกือบ 15% สันนิษฐานได้ว่า กากถั่วเหลืองจากการบิบน้ำมันมีค่าไขมันที่หลงเหลืออยู่ประมาณ 8% ซึ่งส่วนหนึ่งเป็นไขมันในเซลล์ไขมันของเมล็ดถั่วเหลืองที่ไม่เสียหายจากการบิบน้ำมันจึงมีโอกาสไหลผ่านไปสู่ถูกย่อยเป็นแหล่งพลังงานโดยตรงที่ลำไส้เล็ก ทำให้โคนมที่อยู่ในช่วงให้นมที่สมดุลพลังงานเป็นลบบตอบสนองต่ออาหารอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับกลุ่มอื่นๆ แต่อย่างไรก็ตามโคนมในกลุ่ม TRT4 ซึ่งได้รับกากถั่วเหลืองบิบน้ำมันเอ็กซ์ทราด์ ที่คาดว่าแม่โคนมจะให้การตอบสนองที่ดีเพราะเป็นได้ทั้งแหล่งโปรตีนไหลผ่านและไขมัน กลับมีค่าที่ดีกว่ากลุ่ม TRT1 (กากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน) แค่ 8.43% เท่านั้น การตอบสนองที่ไม่ชัดเจนนี้อาจเป็นไปได้ว่ากากถั่วเหลืองบิบน้ำมันเอ็กซ์ทราด์ (TRT4) มีการผ่านกระบวนการให้ความร้อนถึง 3 ครั้ง คือ การคั่วให้ร้อนก่อนเข้าเครื่องบิบน้ำมัน การเกิดความร้อนระหว่างการบิบน้ำมัน และ ความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างการเอ็กซ์ทราด์ การผ่านความร้อนถึง 3 ครั้งนี้อาจมีผลทำให้โปรตีนบางส่วน หรือกรดอะมิโนไลซีนบางส่วน ถูกทำลายได้ ขณะเดียวกัน เซลล์ไขมันที่รอดพ้นจากการบิบดในกลุ่ม TRT2 จะถูกบิบอีกครั้งในเครื่องเอ็กซ์ทราด์ ทำให้ไขมันถูกบิออกมาได้เพิ่มขึ้น ซึ่งระดับไขมันที่มากขึ้นในกระเพาะหมักจะมีผลเสียต่อการทำงานของจุลินทรีย์ที่ย่อยเชื้อใยเพื่อเป็นแหล่งพลังงานสำหรับแม่โคนม Falder and Satter (1991) สรุปไว้ว่า โปรตีนไหลผ่านจะให้ประโยชน์สูงสุดในโคนมที่ให้ผลผลิตสูง โดยเฉพาะในช่วงต้นของการให้นม ซึ่งเป็นระยะที่โคได้รับโปรตีนและพลังงานไม่เพียงพอต่อการให้ผลผลิตและการดำรงชีพ การเพิ่มความเข้มข้นของโภชนามีผลทำให้สมดุลพลังงานกลับมาเป็นบวก และส่งผลที่ดีต่อประสิทธิภาพการสืบพันธุ์ และสุขภาพโดยรวมด้วย

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

การศึกษาการใช้กากถั่วเหลืองที่ผ่านการเอ็กซ์ทราคต์เป็นแหล่งโปรตีนไหลผ่านในโคนมสรุปได้ดังนี้

การทดลองที่ 1 การทดสอบเบื้องต้นเพื่อหากระบวนการผลิตโปรตีนไหลผ่านที่เหมาะสมในกากถั่วเหลืองที่ผ่านการเอ็กซ์ทราคต์ โดยใช้ค่าดัชนีการละลายได้ของโปรตีน (Protein dispersibility Index; PDI) เป็นตัวชี้วัด

การเอ็กซ์ทราคต์กากถั่วเหลืองที่ได้จากการแยกน้ำมัน 2 วิธี คือ กากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน และกากถั่วเหลืองบีบน้ำมัน ร่วมกับไขมันสำปะหลังแห้ง และมันเส้นระดับต่างๆ เพื่อทดสอบกระบวนการผลิตโปรตีนไหลผ่านที่เหมาะสมในโคนมเบื้องต้น โดยการเพิ่มน้ำเข้าไปในส่วนผสมวัตถุดิบอาหารเมื่อทำการเอ็กซ์ทราคต์อีก 20% มีความเหมาะสมกับความพร้อมและประสิทธิภาพของเครื่องมือที่สามารถปฏิบัติได้ทั้งระดับฟาร์มและระดับอุตสาหกรรม ส่วนการเสริมไขมันสำปะหลังแห้ง 5% และมันเส้น 2.5% เพื่อเป็นแหล่งของพลังงานที่ละลายได้ง่ายในกระเพาะหมักและเป็นแหล่งแทนนินเพื่อการเพิ่มโปรตีนไหลผ่าน ไม่มีผลทำให้ค่า PDI แตกต่างแต่อย่างใด อุณหภูมิที่วัดได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน แต่ค่า PDI ที่ลดลงเป็นผลมาจากความชื้นในระดับที่ต่ำทำให้อาหารไหลผ่านกระบอกและเกลียวอัดภายในเครื่องเอ็กซ์ทราคต์ได้ช้าลง ทำให้อาหารได้รับความร้อนเป็นระยะเวลานาน เกิดการเกาะกันของโปรตีนมากกว่า ทำให้โปรตีนไหลผ่านเพิ่มขึ้น ค่า PDI ลดลง

การทดลองที่ 2 การศึกษาเปรียบเทียบค่าการละลายและการย่อยสลายได้ในกระเพาะหมักของโปรตีนรวม ในกากถั่วเหลืองที่ผ่านการเอ็กซ์ทราคต์ โดยเทคนิคถุงในลอน

การให้ความร้อนแก่กากถั่วเหลืองด้วยการเอ็กซ์ทราคต์ สามารถลดการย่อยสลายโปรตีนในกระเพาะหมักในโคนมลงได้ การเอ็กซ์ทราคต์กากถั่วเหลืองบีบน้ำมัน และการเอ็กซ์ทราคต์กากถั่วเหลืองสกัดน้ำมันช่วยลดการย่อยสลายของโปรตีนในกระเพาะหมักได้ดีที่สุด รองลงมาเป็นการเอ็กซ์ทราคต์กากถั่วเหลืองบีบน้ำมันร่วมกับไขมันสำปะหลังแห้ง 5% และมันเส้น 2.5% และการเอ็กซ์ทราคต์

กากถั่วเหลืองสกัดน้ำมันร่วมกับไขมันสำปะหลังแห้ง 5% และมันเส้น 2.5% เปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุมซึ่งไม่ได้ผ่านการเอ็กซ์ทราด การเสริมไขมันสำปะหลังแห้งที่มีแทนนินมีผลทำให้ระดับโปรตีนรวมในวัตถุดิบลดลงแล้ว แต่ไม่มีผลต่อการเพิ่มการลดการย่อยสลายของโปรตีน ดังนั้นการเอ็กซ์ทราดกากถั่วเหลืองแต่เพียงอย่างเดียวโดยไม่เสริมไขมันสำปะหลังแห้ง และมันเส้นจึงเป็นกรรมวิธีที่ให้ผลดีกว่าในการลดการย่อยสลายของโปรตีนในกระเพาะหมัก

การทดลองที่ 3 การศึกษาสมรรถภาพการผลิตของโคนมที่ได้รับกากถั่วเหลืองที่ผ่านการให้ความร้อนโดยการเอ็กซ์ทราด เป็นแหล่งโปรตีนไหลผ่าน

ค่าความเป็นกรด-ด่าง และ ความเข้มข้นของกลูโคสในเลือด โคนมหลังจากได้รับอาหารทดลองทั้ง 4 กลุ่ม ที่ 0, 2 และ 4 ชั่วโมงหลังให้อาหารมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 7.0 - 7.24 และ 47.70 - 59.56 มก.% ตามลำดับ ความเข้มข้นของแอมโมเนีย-ไนโตรเจนของของเหลวในกระเพาะหมัก ที่ 2 ชั่วโมงหลังให้อาหารในกลุ่มที่ได้รับกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน (TRT1) และกากถั่วเหลืองบิบน้ำมัน (TRT2) มีค่า 7.17 และ 10.60 มก.% ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่า กลุ่มที่ได้รับกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมันเอ็กซ์ทราด (TRT3) และกลุ่มที่ได้รับกากถั่วเหลืองบิบน้ำมันเอ็กซ์ทราด (TRT4) ซึ่งมีค่า 4.63 และ 5.10 มก.% ตามลำดับ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ความเข้มข้นของยูเรีย-ไนโตรเจนในเลือดโคกลุ่มที่ได้รับกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน (TRT1) ทุกช่วงเวลามีค่าต่ำที่สุด โดยที่ 2 ชั่วโมงจะมีค่าสูงที่สุด และจะค่อยๆ ลดลงในทุกกลุ่มการทดลอง ส่วนปริมาณของกรดไขมันระเหยง่ายของของเหลวในกระเพาะหมักหลังจากได้รับอาหารที่ 0, 2 และ 4 ชั่วโมงในทุกกลุ่มการทดลองมีค่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$)

ด้านสมรรถภาพการผลิต น้ำหนักเริ่มต้น น้ำหนักสุดท้าย และปริมาณการกินได้ของวัตถุดิบ ทุกกลุ่มการทดลองแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ถึงแม้ว่าผลผลิตและองค์ประกอบน้ำนมไม่แตกต่างกัน แต่โคนมที่ได้รับกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมันมีค่าตัวเลขผลผลิตน้ำนมต่ำกว่ากลุ่มอื่นๆ คือ มีค่า 13.28, 15.18, 14.73 และ 14.40 กิโลกรัมต่อวันตามลำดับ ในขณะที่เดียวกัน แม่โคกลุ่มที่ได้รับกากถั่วเหลืองบิบน้ำมัน (TRT2) และกากถั่วเหลืองที่ผ่านการเอ็กซ์ทราด (TRT3 และ TRT4) แสดงค่าผลผลิตน้ำนมที่สูงติดต่อกันหลายสัปดาห์ และรักษาระดับการให้น้ำนมได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับกลุ่มที่ได้รับกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน (TRT1) ทั้งนี้ผลการทดลองมีความแตกต่างอย่างไม่เด่นชัดเพราะ โคนมที่ใช้ทดลองให้ผลผลิตปานกลางและอยู่ในช่วงเข้าสู่ระยะกลางของการให้นม

การศึกษาในครั้งนี้สรุปได้ว่า การใช้กากถั่วเหลืองให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในโคนม สำหรับกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมันควรนำมาผ่านการเอ็กซ์ทราดเพื่อเพิ่มโปรตีนไหลผ่าน ส่วนกากถั่วเหลือง

บิบน้ำมันควรใช้ในรูปแบบปกติ ไม่ควรนำมาเอ็กซ์ทรูด เนื่องจากให้สมรรถภาพการผลิตที่ดีกว่า ส่วนการเสริมไบโอมันสำปะหลังแห้งและมันเส้นนอกจากมีผลทำให้ระดับ โปรตีนรวมในวัตถุดิบ ลดลงแล้ว ยังไม่มีผลต่อการเพิ่มการลดการย่อยสลายของโปรตีนแต่อย่างใด

ข้อเสนอแนะ

ถึงแม้ว่ากากถั่วเหลืองที่ผ่านการให้ความร้อนโดยการเอ็กซ์ทรูดจะเป็นแหล่งวัตถุดิบ โปรตีนที่มีคุณภาพสำหรับโคนม แต่การใช้ให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดยังจำเป็นต้องมีการศึกษา ต่อไปถึงแนวทางที่ดีที่สุดในการนำไปใช้ โดยต้องมีความชัดเจนในหัวข้อต่อไปนี้

1. การใช้ร่วมกับชนิดที่ต่างกันของอาหารหยาบและสัดส่วนของอาหารหยาบในอาหาร
2. ระดับสูงสุดที่ใช้ได้โดยไม่มีผลเสีย
3. กระบวนการผลิตที่เหมาะสมที่สุดก่อนนำไปใช้ การเพิ่มอุณหภูมิที่สูงขึ้น และระยะเวลา การรักษาความร้อนก่อนทำให้เย็นลง
4. ค่าการย่อยได้ที่ลำไส้เล็กของกากถั่วเหลืองที่ผ่านกระบวนการต่างๆ
5. ระดับการได้รับและนำไปใช้ได้ของแมโครของกรดอะมิโนที่สำคัญ เช่น เมทไธโอนีน
6. ควรสนับสนุนให้มีการจัดตั้งโรงงานบิบน้ำมันถั่วเหลืองด้วยเครื่องอัดเกลียว เพื่อนำ กากถั่วเหลืองบิบน้ำมัน ซึ่งเป็นผลพลอยได้มาใช้ในการอาหารสัตว์กระเพาะรวมโดยตรง
7. ควรให้ความรู้แก่เกษตรกรในการเลือกใช้กากถั่วเหลืองให้เกิดประโยชน์สูงสุดในสัตว์ กระเพาะรวม

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- กฤตพล สมมาตรย์. 2543. เทคนิคการวิจัยด้านโภชนศาสตร์สัตว์เคี้ยวเอื้อง. ภาควิชาสัตวศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น. ขอนแก่น.
- กฤตพล สมมาตรย์, เมธา วรรณพัฒน์, นลอง วชิราภากร, ศักดิ์สิทธิ์ วันทร์ไทย และ เวชสิทธิ์ โทบุราณ. 2543. ความสามารถในการย่อยสลายอินทรีย์วัตถุของอาหารพลังงาน ในกระเพาะหมักของโคและกระบือปลัก. รายงานผลการวิจัยการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 29 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- กฤษ อังคนาพร. 2547. สรีรวิทยาของกระเพาะอาหารสัตว์เคี้ยวเอื้อง. โรงพิมพ์ดีธรรสาร, กรุงเทพฯ.
- จิระชัย กาญจนพุดพิงศ์. 2549. การจัดการฝูงโคนม. ภาควิชาสัตวบาล คณะเกษตร กำแพงแสน, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน. นครปฐม.
- พันทิพา พงษ์เพียจันทร์. 2539. การผลิตอาหารสัตว์. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, ภาควิชาสัตวศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. เชียงใหม่.
- พิชิตพล อังธีระนุวงศ์. 2552. การใช้ใบมันสำปะหลังทดแทนกากอ้อยเหลือทิ้งในสูตรอาหารโคขุน. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- พิทยา ปาละนิษฐ์. 2536. ผลของอาหารโปรตีนที่ไม่ถูกย่อยสลายในกระเพาะหมักต่อขบวนการหมัก, ผลผลิตและองค์ประกอบของน้ำนมในโคนม. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- นลอง วชิราภากร. 2541. โภชนศาสตร์และการให้อาหารสัตว์เคี้ยวเอื้อง. มหาวิทยาลัยขอนแก่น. ขอนแก่น.

ณัฐมา เกลิมแสน, ประวีร์ วิชชุตา, พรศรี ชัยรัตนายุทธ, สมจิตร สุรพัฒน์,
สิรินทร์พร สินธุวิชย์ และ อรุณี อิงคากุล. 2546. อิทธิพลของวัตถุดิบเสียต่อการ
วิเคราะห์ห่อหุ้มประกอบและจำนวนโซมาติเซลล์ในนมดิบ. ใน การประชุมทางวิชาการ
สาขาสัตว ครั้งที่ 41 หน้า 127-135, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

ทรงศักดิ์ จำปาอะดี. 2551. โภชนศาสตร์โปรตีนในสัตว์เคี้ยวเอื้อง. คณะสัตวแพทย์และสัตวศาสตร์,
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม. มหาสารคาม.

ธนิยา ปฐมสุบรรณกุล. 2551. การใช้ถั่วเหลืองไขมันเต็มผ่านการให้ความร้อนเป็นแหล่งโปรตีน
ไหลผ่านในอาหารสัตว์เคี้ยวเอื้อง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

บุญล้อม ชีวะอิสระกุล. 2541. โภชนศาสตร์สัตว์. ภาควิชาสัตวศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์,
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. เชียงใหม่.

_____. 2546. ชีวเคมีทางสัตวศาสตร์. ภาควิชาสัตวศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์,
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. เชียงใหม่.

บุญญา วิไลพล. 2528. พืชอาหารสัตว์เขตร้อนและการจัดการ. ภาควิชาสัตวศาสตร์
คณะเกษตรศาสตร์, มหาวิทยาลัยขอนแก่น. ขอนแก่น.

ภมร ปันมาเรือน. 2546. วิธีลดการย่อยสลายโปรตีนของกากถั่วเหลืองในกระเพาะหมักและผลต่อ
การผลิตน้ำนมโค. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่. เชียงใหม่.

เมธา วรรณพัฒน์. 2533. โภชนศาสตร์สัตว์เคี้ยวเอื้อง. ฟันนี้พับลิชชิง. กรุงเทพฯ.

เมธา วรรณพัฒน์. 2540. โคนมกับวิกฤติการณ์อาหารโคนม: ปัญหาและการแก้ไข. วารสารโคนม.
สำนักพิมพ์ฟันนี้พับลิชชิง. กรุงเทพฯ.

สาโรช คำเจริญ. 2547. อาหารและการให้อาหารสัตว์ไม่เคี้ยวเอื้อง. โรงพิมพ์คลังนานากรรมวิทยา,
มหาวิทยาลัยขอนแก่น. ขอนแก่น.

อุทัย คั่นโธ. 2543. กระบวนการผลิตอาหารสัตว์. สาขาวิชาส่งเสริมการเกษตรและสหกรณ์, มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช. นนทบุรี.

Aguilera, J.F., M. Bustors and E. Molina. 1992. The degradability of legume seed meals in the rumen: effect of heat treatment. **Anim. Feed Sci. Technol.** 36:101-112.

Aldrich, C. G. and N. R. Merchen. 1995. Heat Treatment of Whole Soybeans: Influence on Protein Digestion by Ruminants. **J. Anim. Sci.** 73:95.

Amos, H. E., A. R. S., Southern and T. L. Huber. 1974. Effects of Formaldehyde Treatment of Sunflower and Soybean Meal on Nitrogen Balance in Lambes. **J. Anim. Sci.** 38: 702-707.

AOAC. 1990. **Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists.** 15th ed. Association of Official Analytical Chemists, Washington D. C.

AOCS. 2001. Official and Tentative Methods of the Amercian Oil Chemists' Society. Protein Dispersibility Index. Method Replaces AOCS Official Method Ba 10-65. **Am. Oil Chem. Soc.,** Champaign, IL.

Araba, M. and N.M. Dale. 1990. Evaluation of Protein Solubility as an Indicator of over Processing Sorbean Meal. **J. Poultry Sci.** 69: 76-83.

ARC. 1984. **The Nutrition Requirements of Ruminant Livestock.** (Supplement) Common wealth Agriculture Bureaux. The Gresham Press, Surrey.

Awawdeh, M. S., E. C. Titgemeyer, J. S. Drouillard, R. S. Beter and J. E. Shirley. 2007. Ruminant Degradability and Lysine Bioavailability of Soybean Meals and Effects on Performance of Dairy Cows. **J. Dairy Sci.** 90:4740-4753.

- Bach, A., S. Calsamang and M. D. Stern. 2005. Nitrogen Metabolism in the Rumen. **J. Dairy Sci.** 88 (E. Suppl.) E9-E21.
- Barry, T.N. 1976. The Effectiveness of Formaldehyde treatment in Protecting Dietary Protein from Rumen Microbial Degradation. **Proc. Nutri. Soc.** 35: 221-229.
- Bines, J. A., and A. C. Hart. 1982. Metabolic Limits to Milk Production, Especially Roles of Growth Hormone and Insulin. **J. Dairy Sci.** 65: 1375-83.
- Blowey, R. W., D. W. Wood and J. R. Davies. 1973. A national Monitoring System for Dairy Herds based on Blood Glucose, Urea and Albumin Levels. **Vet Rec.** 92: 691-696.
- Borucki C. S. I., L. E. Phillip, H. Lapierre, P. W. Jardon and R. Berthiaume. 2007. Ruminant Degradability and Intestinal Digestibility of Protein and Amino Acids in Treated Soybean Meal Products. **J. Dairy Sci.** 90:810-822.
- Broderick, G.A., D.B. Ricker and L.S. Drive. 1990. Expeller Soybean Meal and Corn Byproducts Versus Solvent Sorbean Meal for Lactating Dairy Cows Fed Alfafa Silage as Sole Forage. **J.Dairy Sci.** 73: 453.
- Broderick, G. A., R. J. Wallace and E. R. Ørskov. 1991. Control of Rate and Extent of Protein Degradation. *In* **Physiological Aspects of Digestion and Metabolism in Ruminant**, Inc, San Diego, California, U.S.A..
- Bromner, J. M. and P. Keeney. 1965. Steam Distillation Methods of Determination of Ammonia, Nitrate and Nitrite. **Food Chem.** 88: 425-428.
- Butler, W. R. 1998. Review: Effect of Protein Nutrition on Ovarian and Uterine Physiology in Dairy Cattle. **J. Dairy Sci.** 81: 2533-2539.

- Carroll, D. J., B. A. Barton, G. W. Anderson and R. D. Smith. 1988. Influence of Protein Intake and Feeding Strategy on Reproductive Performance of Dairy Cows. **J. Dairy Sci.** 71: 3470-3482.
- Chalupa, W. 1984. Degradation of Amino Acids by the Mixed Rumen Microbial Population. **J. Anim Sci.** 43: 828-834.
- Chalupa, W. 1974. Rumen Bypass and Protection of Proteins and Amino Acids. **J. Dairy Sci.** 58(8): 1198-1212.
- Chris Y, L, C. 2008. Benefits of Bypass Protein in Ruminant Nutrition. **Technical Bulletin.** AN 37: 1-3.
- Chumpawadee, S., K. Sommart, T. Vongpralub And V. Pattarajinda. 2005. Estimating Rumen Undegradable Protein with *In situ* Nylon Bag and *In vitro* Enzymatic Technique in Tropical Concentrate Feedstuffs. **Walailak J Sci and Tech.** 2: 23-33.
- Clark, J. H. and C. L. Davis. 1980. Some Aspects of Feeding High Producing Dairy Cows. **J. Dairy Sci.** 63: 873-84.
- Corbett, M. A. 1987. Energy and Protein Utilization by Grazing Animals. **In Temperature Pasture, Used and Management**, (Eds, J. L. Wheeler, C. J. Pearson and G. E. Robard, pp. 341-355). CSIRO/Australian Wool Corporation, Melbourne.
- Dale, N,M. and M.A. Araba. 1988. Protein Solubility as an Indicator of Underprocessing of Soybean Meal for Broiler Chicks. **Poultry Sci.** 67: 11-17 (suppl. 1).
- Dale, N.M. and E. Whittle. 1991. Protein Solubility as a Measure of over Processing in commercial Soybean Meal. **Poultry Sci.** 70: 155-161 (suppl. 1).

- De Schutter, A. C. and J. R. Morris. 1990. Soybean: Full-Fat. pp. 439-452. *In* P. A. Thacker and R. N. Kirkwood, eds. **Nontraditional Feed Sources for Use in Swine Production**. Butterworth Publ. M.A., U.S.A.
- Edwards, J. S., E. E. Bartley and A. A. Dayton. 1980. Effect of Dietary Protein Concentration in Lactating Cows. **J. Dairy Sci.** 63:243-251.
- Ensminger, H.E., J.E. Oldfield and W.W. Heinemann. 1990. **Feeds & Nutrition**. 2 nd ed. The Ensminger Publ. Co., CA., U.S.A.
- Faldet, M.A., and L.D. Satter. 1991. Feeding Heat Treated Full Fat Soybeans to Cows in early Lactation . **J.Dairy Sci.** 74: 3047-3055.
- Faldet, M.A., Y. S. Son And L. D. Satter. 1992a. Chemical *in vitro* and *in vivo* Evaluation of Soybeans Heated-Treated by various Processing Methods. **J. Dairy Sci.** 75: 789-795.
- Faldet, M.A., L. D. Satter and G. A. Broderick. 1992b. Determinating optimal Heat Treatment of Soybeans by Measuring Available Lysine Chemically and Biologically with Rates to maximize Protein Utilization by Ruminant. **J. Nutr.** 122: 151-157.
- Folman, Y.H. Neumark, M. Kaim and W. Kaufman. 1981. Performance rumen and Blood Metabolites in High-yielding Cows Fed Varying Protein Percentr and Protected Soybean. **J.Dairy Sci.** 64:759.
- Forsberg, C. W., L. K. A. Lovelock, L. Krumholz And J. G. Bruchanan-Smith. 1984. Protease Activities of Rumen Protozoa. **Appl. Environ. Microbial.** 47: 101-108.
- Frank, G. 1988. How to Improve the Quality of Full-fat Soya Beans and other Legumes by hydrothemat Treatment. **Feed Magazine International**. Nov./Dec. 42-46 p.

- Georing, H. K. and P. J. Van Soest. 1970. Forage Fiber Analysis. USDA, Agricultural Research Service. **Agricultural Handbook No. 379**. Washington D.C.
- Goelema, J. O., G. Hof, A. F. B. Van Der Poel and S. Tamminga. 1997. Effect of Particle Size, Cold Pelleting, Steam Pelleting and Expander Treatment on the Rumen Degradability of a Compound Feed for Ruminant. **J. Dairy Sci.** 79:142.
- Hino, T. and J.B. Russell. 1986. Relative Contributions of Ruminal Bacteria and Protozoa to the Degradation of Protein in vitro. **J. Anim. Sci.** 64: 261.
- Hoffman, P.C., R.R. Graummer, R.D. Skarver, G.A. Broderick and T.R. Drendel. 1991. Feeding Supplement Fat and Undegraded intame Protein to Early Lactation Dairy Cows. **J.Dairy Sci.** 74: 3468.
- Howard, H. J, E. P. Aalscth, G. D. Adams, L. J. Bush, R. W. McNew and L. J. Dawson. 1987. Influence of Dietary Protein on Reproductive Performance of Dairy Cows. **J. Dairy Sci.** 70: 1563-1571.
- Huber, J. T. and L. Kung, Jr. 1981. Protein and Nonprotein Nitrogen Utilization in Dairy Cattle. **J. Dairy Sci.** 51: 595.
- Huntington, G. B. And A. S. L. Archibeque. 1999. Practical Aspect of Urea and Ammonia Metabolism in Ruminants. **Proceeding of the American Society of Animal Science**. U.S.A.
- Kranse, K.M., D.K. Commbs and K.A. Beauchemin. 2002. Effects of forage size and gain fermentability in midlactation cow. II. Ruminal pH and chewing activity. **J. Dairy Sci.** 85: 1947.
- Kung, L. Jr.and Huber, J.T. 1983. Performance of high producing cows in early lactation fed protein of varying amounts, sources and degradability. **J. Dairy Sci.** 66: 227-234.

Kumar, R. and J. P. F. D'Mello. 1995. Anti-Nutritional Factors in Forage Legumes, pp. 95–133.

In Tropical Legumes in Animal Nutrition. (eds. J. P. F. D'Mello and C. Devendra),
Cab International, UK.

Leng, R. A. and J. V. Nolan. 1984. Symposium: Protein Nutrition of the Lactating Dairy Cow:
Nitrogen Metabolism in the Rumen. **J. Dairy Sci.** 67: 1972-1980.

Linn, J.E. 1986. Soybeans in dairy rations. **Minn Forage Update.** Vol XI, no 5, p 3.

Metcalf, J. 2001. Understanding Bypass Vegetable Proteins. **Feed Mix.** 9(4/5): 15-16.

Martinez, T. F., F. J. Moyano, M. Diaz, F. G. Barroso and F. J. Alarcon. 2004. Ruminal
Degradation of Tannin-Treated Legume Meals. **J. Sci Food Agr.** 84: 1979-1987.

Michel, A. W. 2002. **Protein Metabolism in Dairy Cows.** Babcock Institute for International
Dairy Research and Development. University of Wisconsin-Madison.

Nocek, J.E. and J.B. Russell. 1988. Protein and Energy as an Integrated System Relationship of
Ruminal Protein and Carbohydrate Availability to Microbial Synthesis and Milk
Production. **J. Dairy Sci.** 71: 2070-2081.

_____. and, A.I. Grant. 1986. Characterisation of in situ nitrogen and fiber digestion and
bacterial nitrogen contamination of hay crib forages preserved at different dry matter
percentages. **J. Anim. Sci.** 64: 552-564.

Nolan, J. V. 1993. Nitrogen kinetics. *In Quantitative Aspects of Ruminant Digestion and
Metabolism.* (eds, Forbes, J. M. and France) CAB International Wallingford, UK.

Norman, A. W., P. T. Chandler and C. S. Park. 1982. The Effect of Ration Protein Lactation.
J. Dairy Sci. 65: 126-134.

- NRC. 1978. **Nutrition Requirement of Dairy Cattle**. 5th ed. National Academic Press, Washington D.C.
- NRC. 1996. **Nutrition Requirement of Beef Cattle**. 7th rev. ed. National Academic Press, Washington D.C.
- NRC. 2000. **Nutrition Requirement of Beef Cattle**. 7th rev. ed. National Academic Press, Washington D.C.
- NRC. 2001. **Nutrition Requirement of Dairy Cattle**. 7th rev. ed. National Academic Press, Washington D.C.
- Oldham, J. D. 1984. Protein Energy Interrelationships in Dairy Cows. **J. Dairy Sci.** 67: 1090-1098.
- Ørskov, E. R. and I. McDonald. 1979. The Estimation of Protein Degradability in the Rumen from incubation Measurements Weighted Recording to Rate of Passage. **J. Agr. Sci. Camb.** 92: 499-503.
- Ørskov, E. R. 1992. **Protein Nutrition in Ruminant**. 2nd ed. Academic Press Inc., San Diego, U.S.A.
- Owen, F.G. and A. Edionwe. 1986. **Nebraska Dairy report**. p. 33.
- _____, Larson, L.I. and Lowry, S.R. 1985. Effects of roasting and grinding of soybeans on lactation performance. **J. Dairy Sci.** 68: 123.
- Paquay, R., R. DeBaere and A. Lousse. 1972. The Capacity of the Mature Cow to Lose and Recover Nitrogen and Significance of Protein Reserves. **J. Nutr.** 27:27.

Peisker, M. 1992. High-temperature-short-time conditioning : Physical and chemical changes during “expansion”. *Feed international*. 13 (2).

Promkot, C. and M. Wanapat. 2004. Ruminal Degradation and Intestinal Digestion of Crude Protein of Tropical Resources Using Nylon Bag and three-step *in vitro* Procedure in Dairy Cattle. *In Proceeding of the Agriculture Seminar, Animal Science/Animal Husbandry*. Held at Aofitel Raja Orchid Hotel 27-28 January 2004.

Reddy, P.V., J.L. Morrill and L.S. Bates. 1993. Effect of Roasting Temperatures on Soybean Utilization by Young Dairy Calves. *J. Dairy Sci.* 76(5): 1387-1393.

Robinson, P. H., A. H. Fredeen, W. Chalupa, W. E. Julien, S. Sato, T. Fujiea and S. Suzuki. 1995. Ruminally Protected Lysine or Lysine and Methionine for Lactating Dairy Cows fed a Ratio Designed to Meet Requirements for Microbial and Postruminal Protein. *J. Dairy Sci.* 78: 582-594.

Rueggsegger, G.J. and L.H. Schultz. 1985. Response of high producing dairy cows in early lactation to the feeding of heat-treated whole soybeans. *J. Dairy Sci.* 78: 3272.

Russel, J. R., J. M. Hermann, K. J. Moore And P. K. Patrick. 1999. **Effect of Chemical Composition on Forage Intake of Heifers fed Hay of Difference Species**. Iowa State University, Beef Research Report. 441: 47-52.

Santos, F. A., P. Santos, V. B. Theurer and J. T. Huber. 1998. Effects of Rumen Undegradable Protein on Dairy Cow Performance: A 12-Year Literature Review. *J. Dairy Sci.* 81: 3182-3213.

SAS. 2003. **SAS/STAT User’ Guide**. SAS Instiute Inc., Cary, North Carolina.

Satter, L.D. and L.L. Slyter. 1974. Effect of Ammonia Concentration on Rumen Microbial Production *in vitro*. *Br. J. Nutri.* 32:199-204.

- Satter, L.D., T.R. Dhiman and J.T. Hsu. 1994. Use of Heat Processed Soybeans in Dairy Rations. **Cornell Nutrition Conference Proceeding.**
- Schwab, C. G. 1995. Protected Proteins and Amino Acids for Ruminants, pp. 115-141. *In* **Biotechnology in Animal Feeds and Animal Feeding.** (eds. R. J. Wallace and A. Chesson). VCH Publishers Inc., Weinheim. Soybeans Heated-Treated by various Processing Methods. **J. Dairy Sci.** 75: 789-795.
- Schwinggel, W. R. and D. B. Bates. 1996. Used of Sodiumdodecylsulfate Polycramide Gel Electrophoresis to Measue Degradation of Soluble Soybean Proteins by *Preventella ruminicola* GA.33 or Mixed Ruminal Microbes *in vitro*. **J. Anim. Sci.** 74: 475-482.
- Slein, M. W. 1963. **Methods of Enzymatic Analysis.** Academic Press, New York.
- Stern, M. D., K. A. Santos and L. D. Satter. 1985. Protein Degradation in Rumen and Amino Acids Absorption in the Intestine of Lactating Dairy Cattle fed Heat-Treated whole Soybeans. **J. Dairy Sci.** 68: 45-56.
- Storm, E. and E. R. Ørskov. 1983. The Nutritive Value of Rumen Microorganism in Ruminants
1. Larg Scale Isolation and Chemical Composition of Rumen Microorganism. **J. Nutr.** 49: 419-424.
- Sutton, J.D., M.S. Dhanoa, S.V. Morant, J. France, D.J. Napper and E. Schuller. 2004. Rates of production of acetate, propionate and butyrate in the rumen of lactating dairy cows given normal and low u roughage diets. **J. Dairy Sci.** 86: 3620.
- Tamminga, S. 1979. Protein Degradation in the Forestomachs of Ruminant. **J. Anim Sci.** 49: 1614-1623.

- Tiffany, T. O., J. M. Jansen, C. A. Burtis, J. B. Overton and C. D. Scott. 1972. Enzymatic Kinetic Rate and End Point Analyses of Substrate by the use of a GeMSAEC fast analyser. **Clin Chem.** 18: 829-840.
- Tsuda, T., Y. Sasaki and R. Kawashima. 1991. **Physiological Aspects of Digestion and Metabolism in Ruminant.** Academic Press, nc. San Diego, California.
- Van Soest, P. J. 1994. **Nutritional Ecology of the Ruminant.** 2nd ed. Comstock Publishing Cornell University Press, Ithaca, New York.
- Verbic, J. 2002. **Factors affecting Microbial Protein Synthesis in the Rumen with Emphasis on Diets containing Forages.** Milchproduktion und Rindermast Bundesanstalt. Furlponlandische Landwirtschaft Gumpenstein, 8952. Irdning 29. Viehwirtschaftliche Fachtagung 24-25 April 2002.
- Verite, R., J. P. Dulphy and M. Journet. 1982. Protein Supplementation of Silage Diets for Dairy Cows. p 175 **In Forage Protein Conservation and Utilization.** The Agricultural Insitue.
- Virginia, I. and V. Gabriella. 2009. **Soybeans and Soybean Byproducts for Dairy Cattle.** Department of Dairy and Animal Science, The Pennsylvania State University.
- Wallace, R. J. 1994. Amino Acid and Protein Synthesis Turnover and Breakdown by Rumen Microorganisms: **In Principles of protein metabolism in ruminants** (eds. Asplund, J. M.) pp. 71-111. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Wallace, R. J. 1996. Ruminant Microbial Metabolism of Peptides and Amino Acids. **J. Nutr.** 126: 1326S-1334S.
- Waltz, D. M. and M. D. Stern. 1989. Evaluation of Various Methods for Protecting Soya-Bean Protein from Degradation by Rumen Bacteria. **Anim. Feed Sci. Tech.** 25: 111.

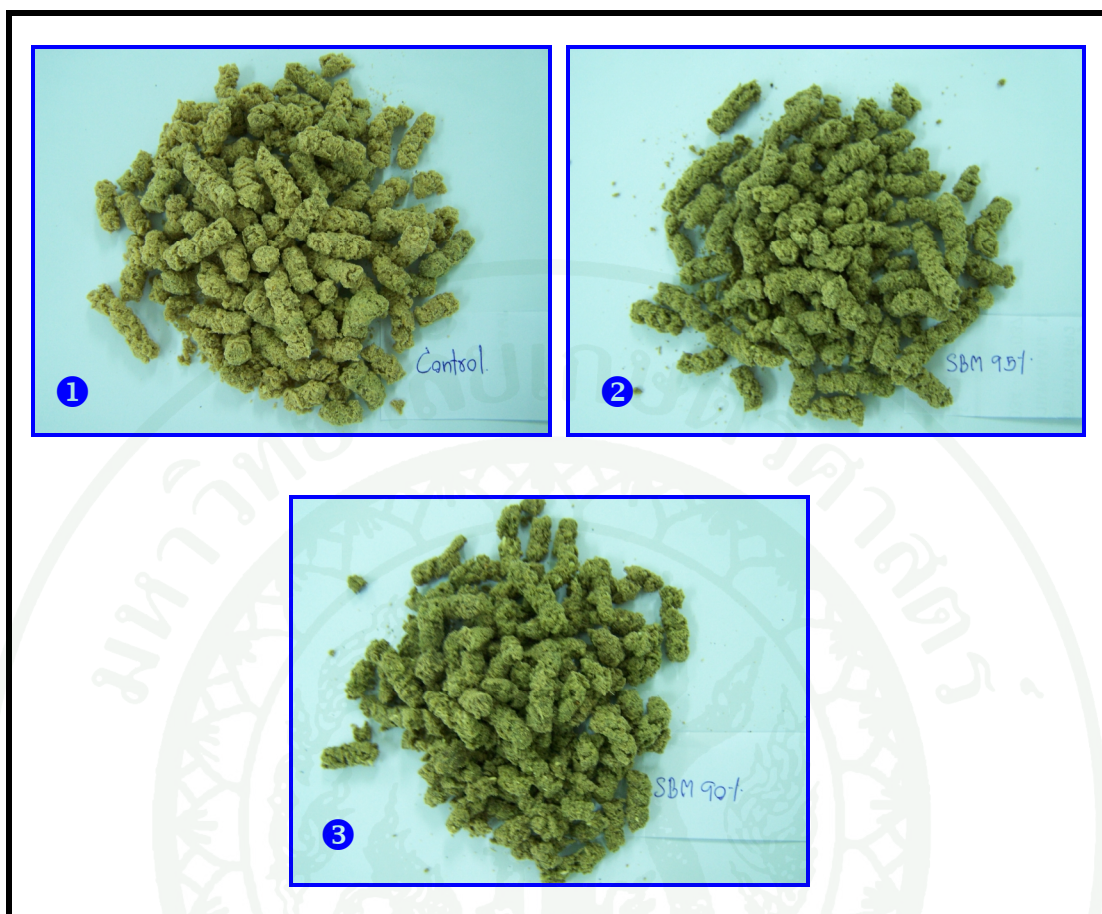
- Wanapat, M. 1999. Feeding of Ruminant in the Tropic based on Local Feed Resources. Khon Kaen Publishing Co Ltd., Khon Kaen, Thailand.
- Wang, Y. T. A. McAllister, M. D. Pickard, Z. Xu, L. M. Rode and K. J. Cheng. 1999. Effect of Micronizing Full Fat Canola Seed on Amino Acid Disappearance in the Gastrointestinal Tract of Dairy Cows. **J. Dairy Sci.** 82: 537-544.
- Webster, M.J., R.D. Goodband, M.D. Tokach, J.L. Nelssen, S.S. Dritz, J.C. Woodworth, M. De La Lata, and N.W. Said. 2003. Evaluating Processing Temperature and Feeding Value of Extruded-expelled Soybean meal on nursery and Finishing Pig Grower Performance. **J. Anim. Sci.** 81: 2032-2040.
- Winowiski, T. S. and M. D. Stern. 1987. Identification of Process Factor Affecting Degradability of Lignosulfonate-Treated Soybeans Meal by Rumen Microbes. **J. Anim. Sci.** 65: 468.
- Winsryg, M.D., M.J. Arambel and J.L. Walters. 1991. The Effect of Protein Degradability on Milk Composition and Production of early Lactation Somatotropin Injected Cows. **J. Dairy Sci.** 74: 1648.
- Wohlt, J.D., J. Sniffen, W.H. Hoover, L.L. John and C.K. Walker, 1976. Nitrogen Metabolism in Wether as Affected by Dietary Protein Solubility and Amino Acid Profile. **J. Anim. Sci.** 42: 1280.
- Yang, C. M. and J. B. Russell. 1992. Resistance of Praline-Containing Peptides to Ruminant Degradation in vitro. **Appl. Env. Micro.** 58: 3954-3959.





ภาคผนวก ก

ลักษณะทางกายภาพภายนอกของกากั่วเหลืองที่ผ่านการเอ็กซ์ทราค

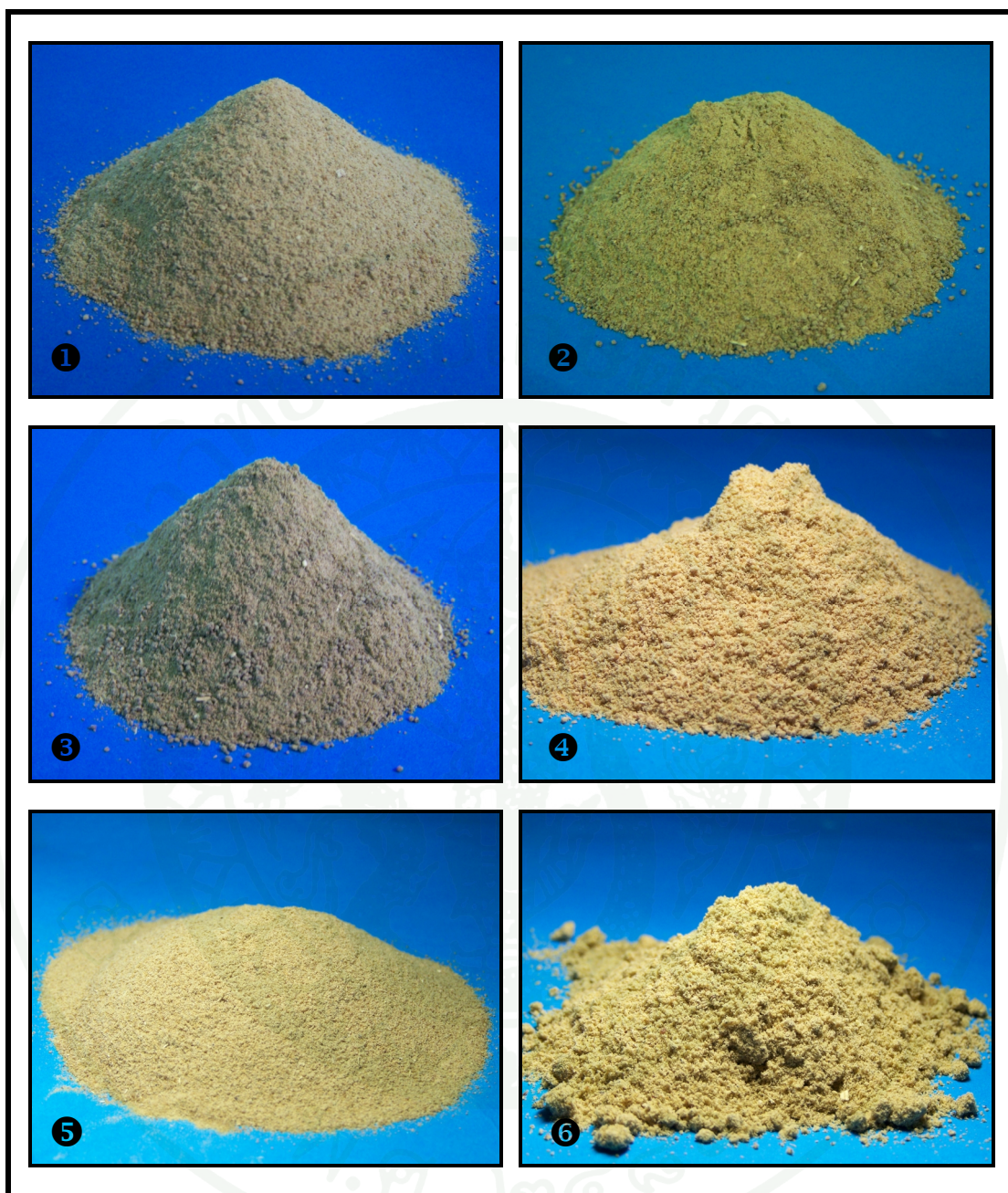


ภาพผนวกที่ ก 1 การทดสอบที่ 1

(1) กลุ่มที่ 1

(2) กลุ่มที่ 2

(3) กลุ่มที่ 3



ภาพผนวกที่ ก 2 การทดสอบที่ 2

(1) กลุ่มที่ 1

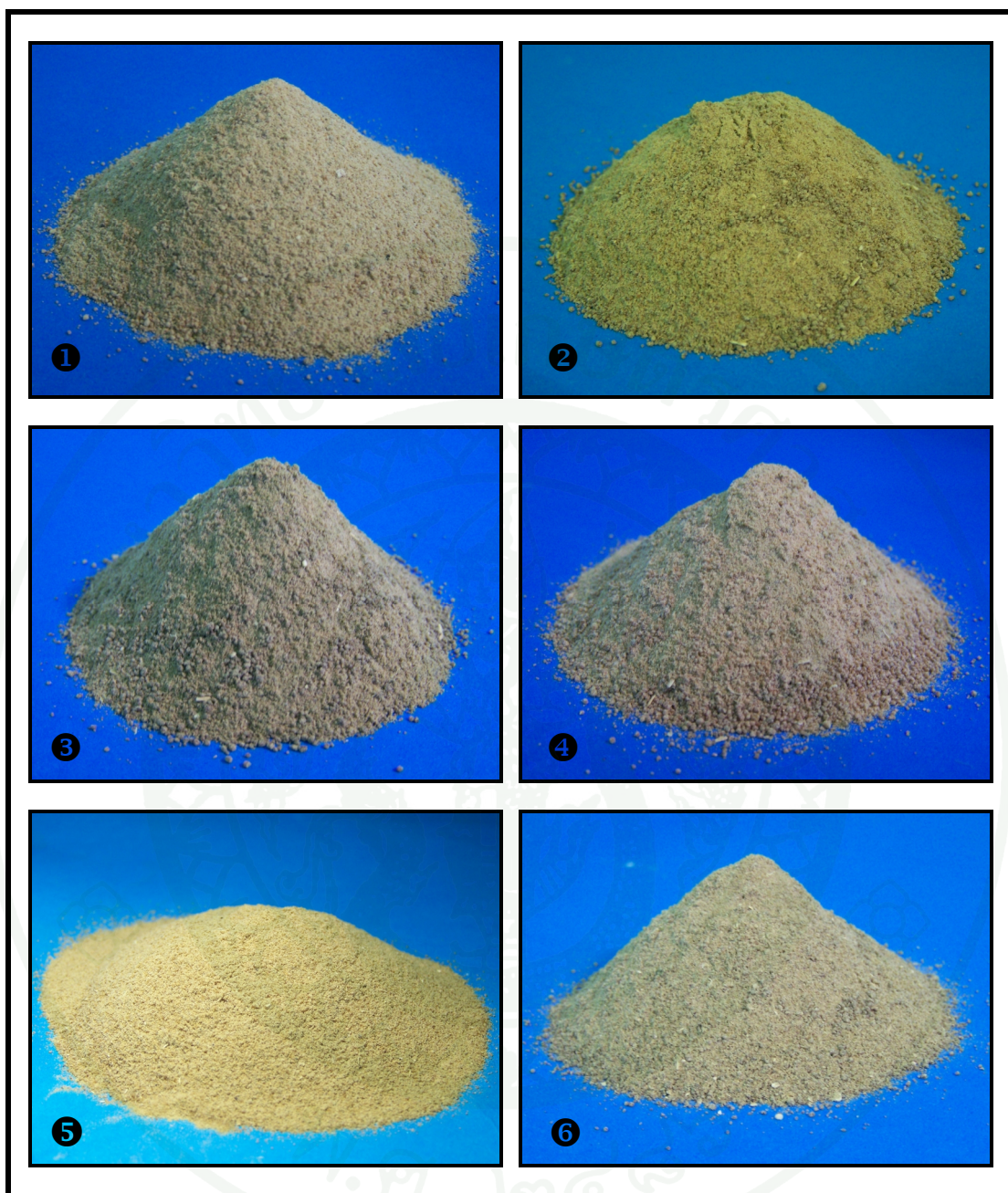
(3) กลุ่มที่ 3

(5) กลุ่มที่ 5

(2) กลุ่มที่ 2

(4) กลุ่มที่ 4

(6) กลุ่มที่ 6



ภาพผนวกที่ ก 3 การทดสอบที่ 3 กลุ่มที่ 1 - 6

(1) กลุ่มที่ 1

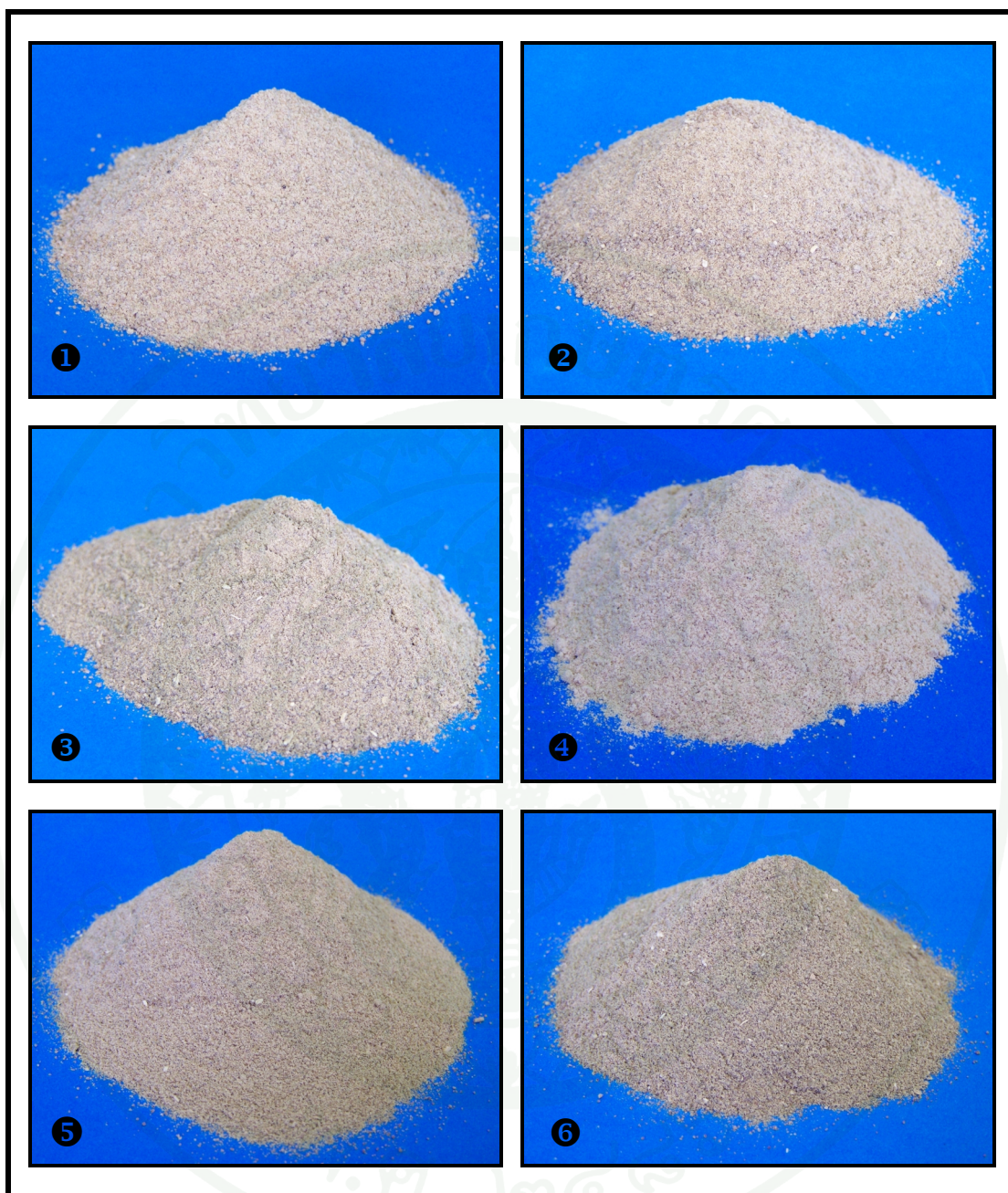
(2) กลุ่มที่ 2

(3) กลุ่มที่ 3

(4) กลุ่มที่ 4

(5) กลุ่มที่ 5

(6) กลุ่มที่ 6



ภาพผนวกที่ ก 4 การทดสอบที่ 3 กลุ่มที่ 7 - 12

(1) กลุ่มที่ 7

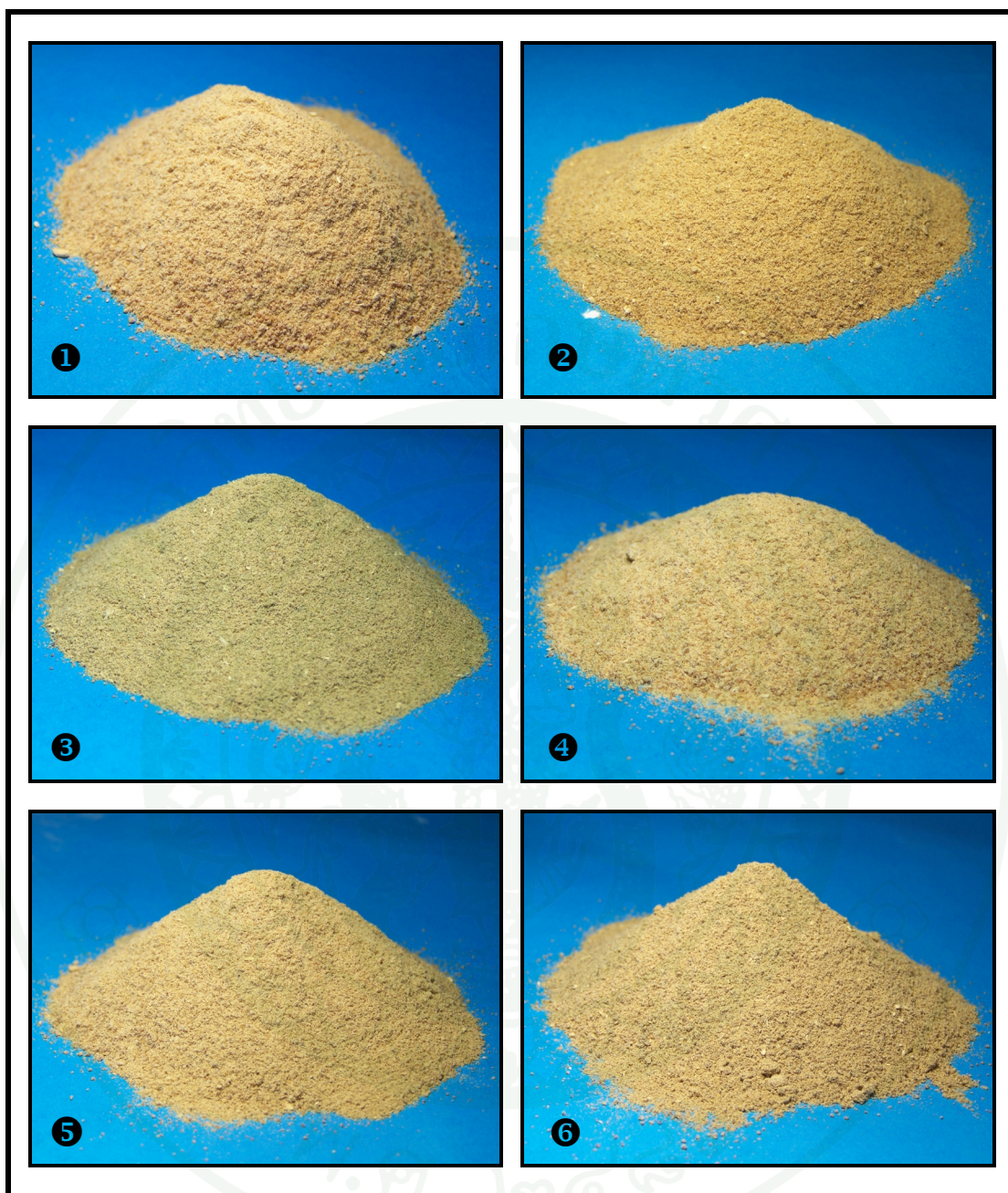
(3) กลุ่มที่ 9

(5) กลุ่มที่ 11

(2) กลุ่มที่ 8

(4) กลุ่มที่ 10

(6) กลุ่มที่ 12



ภาพผนวกที่ ก 5 การทดสอบที่ 3 กลุ่มที่ 13 - 18

(1) กลุ่มที่ 13

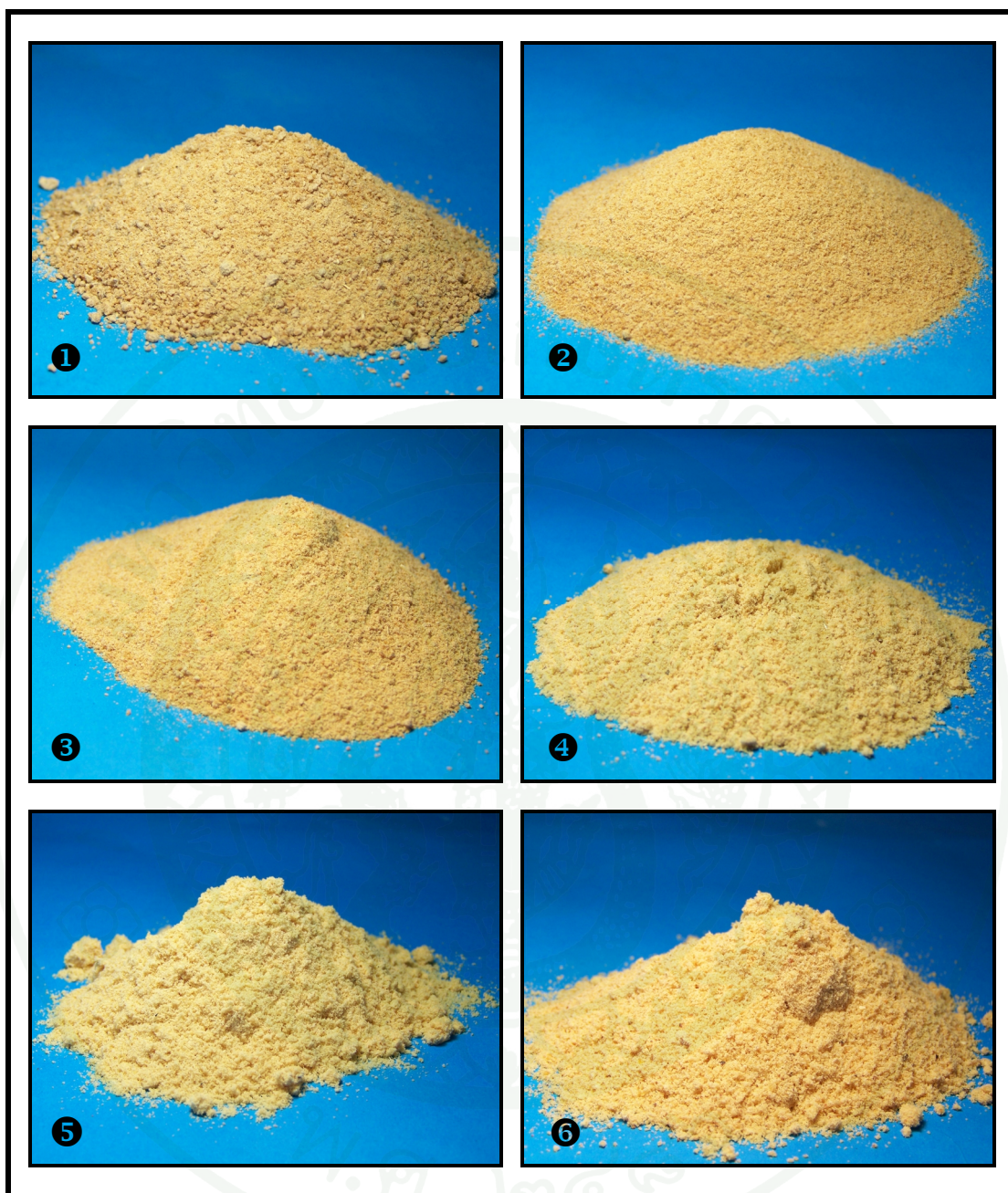
(2) กลุ่มที่ 14

(3) กลุ่มที่ 15

(4) กลุ่มที่ 16

(5) กลุ่มที่ 17

(6) กลุ่มที่ 18



ภาพผนวกที่ ก 6 การทดสอบที่ 4

(1) กลุ่มที่ 1

(3) กลุ่มที่ 3

(5) กลุ่มที่ 5

(2) กลุ่มที่ 2

(4) กลุ่มที่ 4

(6) กลุ่มที่ 6



ภาคผนวก ข
กระบวนการบีบน้ำมันถั่วเหลือง



ภาพผนวกที่ ข 1 กระบวนการบีบน้ำมันถั่วเหลือง

- (1) การเทถั่วที่คั่วแล้วลงในคั่ว
- (2) ถากถั่วที่ได้จากการบีบน้ำมันผ่านเกลียวอัด
- (3) น้ำมันที่ได้จากการบีบน้ำมันถั่วเหลือง
- (4) ถากถั่วเหลืองจากการบีบน้ำมัน มีลักษณะเป็นแผ่น



กระบวนการเอ็กซ์ทรูดกากั่วเหลือง

หลักการ

วัตถุดิบอาหารจะผ่านความร้อนและความดันภายในกระบอกโลหะ โดยมีไอน้ำเป็นตัวช่วยเพิ่มความร้อน ภายในกระบอกจะมีสกรู (screw) เป็นตัวส่งให้อาหารเคลื่อนที่ไปได้ ในสภาวะที่มีความดันและความร้อนอาหารจะถูกเหนียว จนอ่อน นุ่ม และละลาย เป็นของหนืด เมื่อออกมาจากกระบอกแล้วสัมผัสกับอากาศภายนอกกระบอก อาหารจะพองตัวขึ้นแล้วแข็งตัว ตามลำดับ โดยออกมาเป็นเส้นแล้วจะถูกใบมีดตัดให้เป็นท่อนสั้นๆ ตามความเร็วและระยะห่างของใบมีดกับปลายกระบอก

เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องเอ็กซ์ทรูด (Extruder) ซึ่งประกอบด้วย ถังกวนอาหาร ซึ่งภายในมีใบพัดช่วยกวนอาหาร สายพานส่งอาหารไปยังกระบอกโลหะ กระบอกท่อโลหะซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดการเอ็กซ์ทรูด และใบมีดตัดอาหารที่ออกจากกระบอกโลหะให้เป็นท่อนสั้นๆ ดังภาพ



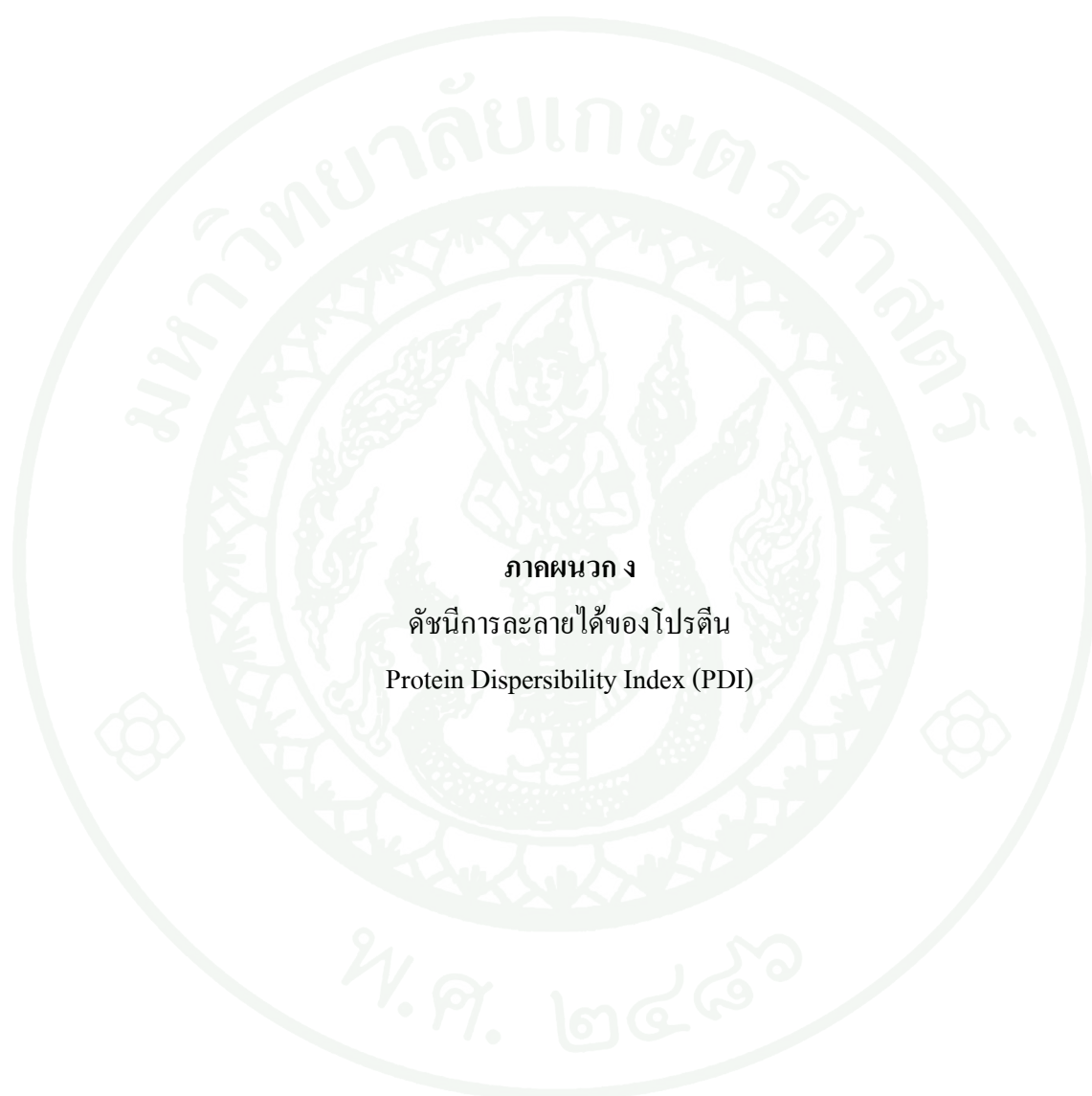
ภาพผนวกที่ ค 1 เครื่องเอ็กซ์ทรูดที่ใช้ในการทดลองพร้อมองค์ประกอบ

- | | |
|---|-----------------------------|
| (1) ถังกวนอาหาร | (2) ท่อและสกรูส่งอาหาร |
| (3) กระบอกท่อโลหะ | (4) ใบมีดตัดอาหารและมอเตอร์ |
| (5) ตู้ควบคุมระบบไฟฟ้าและการทำงานของมอเตอร์ | |
| (6) ถังน้ำ สำหรับหล่อเย็นเพื่อลดความร้อนของกระบอกโลหะ | |



ภาพผนวกที่ ค 2 ขั้นตอนและวิธีการเอ็กซ์ทรูดกากถั่วเหลือง

- (1) ตรวจสอบสภาพความพร้อมของเครื่อง พร้อมทั้งทำการอุ่นเครื่อง
- (2) การผสมวัตถุดิบอาหารให้เข้ากันด้วยใบพาย
- (3) อาหารที่ออกจากท่อกระบอกลอดจะมีลักษณะเป็นของหนืดเป็นเส้น
- (4) การใช้ใบมีดตัดอาหารให้สั้นลงเป็นท่อนเล็กๆ
- (5) การผึ่งอาหารให้แห้งเพื่อไล่ความชื้นออก
- (6) ลักษณะของเม็ดอาหารที่ผึ่งจนแห้งแล้ว



ภาคผนวก ง
ดัชนีการละลายได้ของโปรตีน
Protein Dispersibility Index (PDI)

ดัชนีการละลายได้ของโปรตีน (Protein Dispersibility Index; PDI)
(AOCS Recommended Practice Ba 10a-05)

ขั้นตอนและวิธีการ

1. ชั่งน้ำหนักตัวอย่าง 20 ± 0.2 กรัม ใส่ลงในโถปั่น
2. เติมน้ำกลั่น (อุณหภูมิ 25 ± 1 °C) ลงในโถปั่นที่มีตัวอย่าง 300 ml. แล้วนำไปปั่นด้วยเครื่องปั่นแบบเปิกที่ความเร็ว 8,500 rpm. 10 นาที
3. นำตัวอย่างที่ปั่นเสร็จแล้วเทลงใน Beaker 600 ml. ตั้งทิ้งไว้ให้ตกตะกอนสักครู่ แล้ว Pipet ส่วนบนมา 50 ml. ใส่ลงใน centrifuge tube แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 2,700 rpm. 10 นาที
4. Pipet สารละลายที่ทำการเหวี่ยงแล้ว 15 ml. ใส่ลงใน digestion tube เพื่อนำไปวิเคราะห์หาไนโตรเจน ด้วยวิธีของ AOAC (1990)
5. ขั้นตอนการย่อย เติม Potassium bicarbonate 7 กรัม และ H_2SO_4 conc. 15 มิลลิลิตร แล้วนำเข้าย่อยด้วยเครื่องย่อย (อุณหภูมิประมาณ 400 องศาเซลเซียส) ใช้เวลาประมาณ 1 ชั่วโมง หรือนานกว่าสารละลายใน digestion tube เปลี่ยนเป็นสีใส (ในขณะที่ทำการย่อยจะต้องเปิด hood และเครื่องดูดไอรก) เมื่อย่อยเสร็จนำออกมาตั้งทิ้งไว้ใน hood ให้เย็น ประมาณ 1 ชั่วโมง
6. ขั้นตอนการกลั่นไนโตรเจน นำ digestion tube ที่ทำการย่อยเรียบร้อยแล้วมาเข้าเครื่องกลั่นไนโตรเจน และนำ Erlenmeyer flask ขนาด 250 มิลลิลิตร เติม Boric acid 4 % จำนวน 25 มิลลิลิตร และ indicator 2-3 หยด นำไปรองกับปลายสายยางทางด้านขวาของตัวเครื่องกลั่นไนโตรเจน (เครื่องกลั่นจะเติมน้ำกลั่นและ NaOH 45 %) แล้วนำสารละลายใน Erlenmeyer flask ที่กลั่นเสร็จแล้ว มาทำการไตเตรทกับ Std. H_2SO_4 0.1 N จนเป็นกลาง (เปลี่ยนสีจากสีฟ้าใสกลับไปเป็นสีชมพูอ่อนเช่นเดิม) แล้วทำการคำนวณค่าไนโตรเจน



ภาพผนวกที่ 1 แสดงอุปกรณ์ ขั้นตอน และวิธีการละลายโปรตีนในน้ำ

- (1) เครื่องชั่งน้ำหนักตัวอย่าง
- (2) โถปั่น พร้อมอุปกรณ์สำหรับตวง
- (3) Beaker ตัวอย่างที่ปั่นเสร็จแล้ว พร้อมอุปกรณ์สำหรับปิเปต
- (4) เครื่องปั่นเหวี่ยง (centrifuge)
- (5) การปิเปตสารละลายที่ทำการเหวี่ยงแล้ว 15 ml. ใส่ใน digestion tube เพื่อนำไปวิเคราะห์หาไนโตรเจน



ภาพผนวกที่ 2 แสดงขั้นตอน อุปกรณ์ และวิธีการวิเคราะห์หาไนโตรเจน (AOAC, 1990)

- | | |
|-------------------------------|--|
| (1) การชั่งตัวอย่างและสารเคมี | (2) เติม H_2SO_4 conc. |
| (3) การเข้าย่อยใน hood | (4) เครื่องกลั่นไนโตรเจน |
| (5) การกลั่นตัวอย่าง | (6) การไตเตรท |

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ-นามสกุล	นายวัชร นิลเพชร
วัน เดือน ปีที่เกิด	วันที่ 4 มีนาคม พ.ศ. 2526
สถานที่เกิด	อ.สทิงพระ จ.สงขลา
ประวัติการศึกษา	มัธยมศึกษาตอนปลายโรงเรียนมหาวิชราวุธ จ.สงขลา พ.ศ. 2544 วท.บ. (เทคโนโลยีการเกษตร) มหาวิทยาลัยรามคำแหง พ.ศ. 2547
ประวัติการทำงาน	สัตว์บาลประจำฟาร์มสุกร พ.ศ. 2548-2549 สมาคมโคเนื้อพันธุ์กำแพงแสน พ.ศ. 2552 - ปัจจุบัน