



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต (โภชนศาสตร์และเทคโนโลยีอาหารสัตว์)

ปริญญา

โภชนศาสตร์และเทคโนโลยีอาหารสัตว์

สัตวบาล

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง ผลของข้าวโพดเอกซ์ทรูดและรูปแบบอาหารต่อการใช้ประโยชน์ได้ของสารอาหาร
และสมรรถภาพการผลิตในสุกรอนุบาล

Effects of Extruded Corn and Feed Form on Nutrient Utilization and Growth

Performance in Nursery Pigs

نامผู้วิจัย นางสาวพิมพ์ประกาย เลือคำ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์เสกสม อาคมางกูร, Ph.D.)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรประพันธ์ ส่งเสริม, Ph.D.)

กรรมการ

(อาจารย์ยวเรศ เรืองพานิช, Ph.D.)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฐชนก อมรเทวภัทร, Ph.D.)

หัวหน้าภาควิชา

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์นวลจันทร์ พารักษา, Dr.Agr.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์วินัย อางคงหาญ, M.A.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ 3 เดือน พ.ค. พ.ศ. 2549

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

ผลของข้าวโพดเอกซ์ทรูดและรูปแบบอาหารต่อการใช้ประโยชน์ได้ของสารอาหาร
และสมรรถภาพการผลิตในสุกรอนุบาล

Effects of Extruded Corn and Feed Form on Nutrient Utilization and Growth
Performance in Nursery Pigs

โดย

นางสาวพิมพ์ประภา เสือคำ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (โภชนศาสตร์และเทคโนโลยีอาหารสัตว์)

พ.ศ. 2549

ISBN 974-16-1538-8

พิมพ์ประจำ เลือคำ 2549: ผลของข้าวโพดเอกซ์ทรุดและรูปแบบอาหารต่อการใช้ประโยชน์ได้ของ
สารอาหาร และสมรรถภาพการผลิตในสุกรอนุบาล ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (โภชนศาสตร์
และเทคโนโลยีอาหารสัตว์) สาขาโภชนศาสตร์และเทคโนโลยีอาหารสัตว์ ภาควิชาสัตวบาล
ประธานกรรมการที่ปรึกษา: ผู้ช่วยศาสตราจารย์เสกสม อาตมางกูร, Ph.D. 69 หน้า
ISBN 974-16-1538-8

การศึกษาผลของข้าวโพดเอกซ์ทรุดและรูปแบบอาหารต่อการใช้ประโยชน์ได้ของสารอาหาร และสมรรถภาพการผลิตในลูกสุกรอนุบาล แบ่งออกเป็น 3 การทดลอง การทดลองที่ 1 ศึกษาผลของกระบวนการเอกซ์ทรุดขั้น ต่อการใช้ประโยชน์ได้ของแป้งในข้าวโพด (โดยใช้เอนไซม์) ทำการผลิตข้าวโพดเอกซ์ทรุดจากข้าวโพดเมล็ด ที่มีอัตราการใช้ของน้ำเข้าเครื่องเอกซ์ทรุดเดอร์ 3 ระดับคือ 15 21 และ 30 ลิตร/ชั่วโมง วางแผนการทดลองแบบสุ่มทดลอง (CRD) ผลการศึกษาพบว่ากระบวนการเอกซ์ทรุดขั้นมีผลทำให้ผลทำให้ค่าการย่อยได้ของแป้งเพิ่มขึ้น ($P < 0.01$) แต่เมื่อเพิ่มอัตราการใช้ของน้ำเข้าเครื่องเอกซ์ทรุดเดอร์ จาก 21 ลิตร/ชั่วโมง เป็น 30 ลิตร/ชั่วโมง พบว่าค่าการย่อยได้ของแป้งลดลง ($P < 0.01$)

การทดลองที่ 2 ศึกษาผลของกระบวนการเอกซ์ทรุดขั้นข้าวโพดต่อการใช้ประโยชน์ได้ของวัตถุดิบ พลังงานและโปรตีนในอาหารสุกรอนุบาล โดยใช้สุกรลูกผสม 3 สายพันธุ์ ($D \times LW \times LR$) อายุ 6 สัปดาห์ เพศผู้จำนวน 20 ตัว วางแผนการทดลองแบบสุ่มทดลอง โดยแบ่งลูกสุกรออกเป็น 5 กลุ่มๆ 4 ตัว กลุ่มสุกรแต่ละตัวให้ได้รับอาหารทดลอง 5 สูตรดังนี้ สูตรที่ 1 สูตรควบคุมใช้ปลายข้าวเป็นแหล่งพลังงานหลัก (C) สูตรที่ 2 C (80%) + ข้าวโพด (20%) สูตรที่ 3 C (80%) + ข้าวโพดเอกซ์ทรุดที่ระดับอัตราการใช้ของน้ำ 15 ลิตร/ชั่วโมง (20%) สูตรที่ 4 C (80%) + ข้าวโพดเอกซ์ทรุดที่ระดับอัตราการใช้ของน้ำ 21 ลิตร/ชั่วโมง (20%) สูตรที่ 5 C (80%) + ข้าวโพดเอกซ์ทรุดที่ระดับอัตราการใช้ของน้ำ 30 ลิตร/ชั่วโมง (20%) ทำการเลี้ยงสุกรบนกรงแบบตาข่าย ผลการทดลองพบว่า การใช้ประโยชน์ได้ของพลังงาน วัตถุดิบ และโปรตีนในอาหารของลูกสุกร รวมทั้งพลังงานใช้ประโยชน์ได้ของข้าวโพดเอกซ์ทรุดของลูกสุกรแต่ละกลุ่มไม่แตกต่างกัน ($P > 0.05$)

การทดลองที่ 3 ศึกษาผลของการใช้ข้าวโพดเอกซ์ทรุดต่อสมรรถภาพการผลิตในลูกสุกรอนุบาลโดยใช้ลูกสุกรลูกผสม 3 สายเลือด ($D \times LW \times LR$) อายุ 4 สัปดาห์ จำนวน 192 ตัว (เพศผู้ 96 ตัว และเพศเมีย 96 ตัว) แบ่งออกเป็น 4 กลุ่มๆ ละ 6 ตัวๆ ละ 8 ตัวแต่ละตัวมีเพศเมีย 4 ตัว และเพศผู้ 4 ตัว โดยมีสูตรอาหารทดลองดังนี้ กลุ่มที่ 1 สูตรอาหารผงที่ใช้ปลายข้าวเป็นแหล่งพลังงานหลัก กลุ่มที่ 2 สูตรอาหารผงที่ใช้ข้าวโพดเป็นแหล่งพลังงานหลัก กลุ่มที่ 3 สูตรอาหารผงที่ใช้ข้าวโพดเอกซ์ทรุดเป็นแหล่งพลังงานหลัก และ กลุ่มที่ 4 สูตรอาหารอัดเม็ดที่ใช้ข้าวโพดเอกซ์ทรุดเป็นแหล่งพลังงานหลัก โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มทดลอง ผลการทดลองพบว่า ลูกสุกรกลุ่มที่เลี้ยงด้วยอาหารผงจะมีปริมาณการกินสูงอาหารกว่ากลุ่มที่เลี้ยงด้วยอาหารอัดเม็ด ($P < 0.05$) แต่อัตราการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพการใช้อาหาร ไม่มีความแตกต่างกัน ($P > 0.05$)

พิมพ์ประจำ เลือคำ

ลายมือชื่อนิติ



ลายมือชื่อประธานกรรมการ

๑๙, ๑๖, ๒๕๔๙

Pimprapa Suakam 2006: Effects of Extruded Corn and Feed Form on Nutrient Utilization and Growth Performance in Nursery Pigs. Master of Science (Animal Nutrition and Feed Technology), Major Field: Animal Nutrition and Feed Technology, Department of Animal Science.
Thesis Advisor: Assistant Professor Seksom Attamangkune, Ph.D. 69 pages.
ISBN 974-16-1538-8

Three experiments were conducted in order to study the effects of extruded corn and feed form on nutrient utilization and growth performance in nursery pigs. In experiment 1, three different water flow rates (15, 21 and 30 l/h) were used in extrusion process to determine the corn's starch digestibility (enzyme assay). Extruded corn in either water flow rates were found to have better ($P<0.01$) starch digestibility than ground corn. Increased the water flow rate from 21 to 30 l/h, however, demonstrated the reduction ($P<0.01$) in starch digestibility.

In experiment 2, twenty 6-WOA D $\times$ LW $\times$ LR piglets were kept individually in metabolic cage and randomly assigned to 5 dietary treatments in order to elucidate the effects of extrusion process on nutrient utilization. The dietary treatments were as following: 1) control feed containing broken rice as carbohydrate source (C); 2) C (80 %) + ground corn (20 %); 3) C (80 %) + extruded corn using water flow rate at 15 l/h (20 %); 4) C (80 %) + extruded corn using water flow rate at 21 l/h (20 %) and 5) C (80 %) + extruded corn using water flow rate at 30 l/h (20 %). There were no significant differences among the regimes on the utilization of dry matter, protein and metabolizable energy.

In experiment 3, one hundred and ninety two 4-WOA D $\times$ LW $\times$ LR piglets were randomly allocated to 4 dietary treatments from 4-8 weeks of age. Each treatment consisted of 6 replications with 8 piglets per replication. The dietary treatments were as following: 1) mash feed containing broken rice as carbohydrate source; 2) mash feed containing ground corn as carbohydrate source; 3) mash feed containing extruded corn as carbohydrate source and 4) pellet feed containing extruded corn as carbohydrate source. No significant differences in body weight gain and feed conversion rate were found among the dietary treatments despite the feed consumption was higher ($P<0.05$) in piglets fed mash feed compared to pellet feed.

Pimprapa Suakam

Student's signature

Seksom Attamangkune

Thesis Advisor's signature

19, April, 2006

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสกสม อาตมางกูร ประธานกรรมการที่ปรึกษา ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรประพันธ์ ส่งเสริม ดร.ยุวเรศ เรืองพานิช และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐชนก อมรเทวภัทร กรรมการวิชาเอก ที่ได้ช่วยเหลือในการวางแผนงานวิจัยในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ตลอดจนให้คำปรึกษาแนะนำและตรวจแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ขอกราบขอบพระคุณ รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระ รักความสุข ผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัยที่กรุณาให้คำปรึกษาแนะนำและช่วยเหลือในการทำวิทยานิพนธ์ให้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี

ขอกราบขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นวลจันทร์ พารักษา ที่ได้ช่วยเหลือในการให้คำปรึกษาและแนะนำในวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์อาหารสัตว์ ภาควิชาสัตวบาล คณะเกษตรกำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ที่ให้คำแนะนำในการวิเคราะห์อาหารสัตว์ ขอขอบคุณ คุณฉัตรวรรณ บุญญวรรณ คุณกาญจนา ทองทา บริษัท ไบโอ-เจน ฟีดมิลล์ จำกัดและไบโอ-เจน ฟาร์ม อ.เมือง จ.ลำพูน ที่สนับสนุนและให้ความอนุเคราะห์ในการผลิตอาหารทดลองและสถานที่ในการวิจัยครั้งนี้

การสนับสนุนและให้ความช่วยเหลือในทุกๆ ด้านจากมารดา พี่ชาย น้องชาย พี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ ทุกคน เป็นกำลังใจให้ข้าพเจ้าทำวิทยานิพนธ์เล่มนี้สมบูรณ์ และความดีของวิทยานิพนธ์เล่มนี้ข้าพเจ้าขอมอบให้บิดาที่ล่วงลับไปแล้ว มารดา พี่ชาย และน้องชาย ที่ให้การสนับสนุนทุกอย่าง และขอกราบขอบพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ได้อบรมสั่งสอนตลอดมาจนสำเร็จการศึกษา

พิมพ์ประกาศ เลือคำ

เมษายน 2549

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(3)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	2
การตรวจเอกสาร	3
อุปกรณ์และวิธีการทดลอง	17
ผลและวิจารณ์การทดลอง	28
สรุปผลการทดลอง	52
ข้อเสนอแนะ	53
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	55
ภาคผนวก	62

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ส่วนประกอบและองค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดข้าวโพด (เปอร์เซ็นต์)	4
2	ส่วนประกอบของสูตรอาหารพื้นฐานที่ใช้ในการทดลองที่ 2	24
3	ส่วนประกอบของสูตรอาหารที่ใช้ในการทดลองที่ 3	26
4	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของโภชนะต่างๆ ของข้าวโพดเอกซ์ทรา	30
5	ผลของอัตราการไหลของน้ำในระหว่างกระบวนการเอกซ์ทรา	
	ต่อประสิทธิภาพการผลิตข้าวโพดเอกซ์ทรา	35
6	ผลการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นและการย่อยได้ของแป้ง	36
7	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของโภชนะต่างๆ ของอาหารในการทดลองที่ 2	37
8	ผลของการใช้ข้าวโพดเอกซ์ทราต่อค่าการย่อยได้ และค่าการคงอยู่ของ	
	วัตถุแห้ง พลังงาน และโปรตีนของอาหารทดลองในสุกรอนุบาล	40
9	ผลของการใช้ข้าวโพดเอกซ์ทราต่อพลังงานย่อยได้	
	และพลังงานใช้ประโยชน์ได้ในสุกรอนุบาล	41
10	ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของโภชนะต่างๆ ของอาหารในการทดลองที่ 3	42
11	ผลการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นของอาหารและค่าการย่อยได้ของแป้ง	45
12	สมรรถภาพการผลิตของลูกสุกรอนุบาล	49
13	ต้นทุนค่าพลังงานในการผลิตอาหารทดลอง	51
14	ต้นทุนค่าอาหารในการเพิ่มน้ำหนักตัวของลูกสุกร 1 กิโลกรัม	51

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	โครงสร้างโมเลกุลของอะไมโลส	5
2	แบบจำลองโครงสร้างอะไมโลสที่อยู่กับอะไมโลเพคตินและไขมัน	6
3	โครงสร้างโมเลกุลของอะไมโลเพคติน	7
4	ส่วนประกอบของเครื่องเอกซัทรูดเดอร์	12
5	ลักษณะการสุกของแป้งภายใต้สภาวะความร้อน ความชื้น และความดัน	13

ผลของข้าวโพดเอกซ์ทรูดและรูปแบบอาหารต่อการใช้ประโยชน์ได้ของสารอาหาร และสมรรถภาพการผลิตในสุกรอนุบาล

Effects of Extruded Corn and Feed Form on Nutrient Utilization and Growth Performance in Nursery Pigs

คำนำ

ในอุตสาหกรรมการผลิตอาหารสัตว์ ข้าวโพดถูกนำมาใช้เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิตอาหาร โดยเฉพาะในสุกรระยะเล็ก แต่เนื่องจากในลูกสุกรอนุบาลระบบการย่อยอาหารยังพัฒนาไม่สมบูรณ์ ประกอบกับการเกิดความเครียดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงแหล่งอาหารจากน้ำนมแม่มาเป็นอาหารสำเร็จรูป และความเครียดจากการเปลี่ยนสภาพแวดล้อม ส่งผลให้การหลั่งน้ำย่อยในทางเดินอาหารของลูกสุกรลดลง ทำให้การใช้ประโยชน์ของสารอาหารในลูกสุกรต่ำลง ดังนั้นการเพิ่มการใช้ประโยชน์ได้ของแป้งโดยการทำให้โครงสร้างเอื้อต่อการเข้าย่อยได้ของเอนไซม์ การทำให้แป้งสุก จะช่วยเพิ่มการใช้ประโยชน์ของแป้งมากขึ้น ซึ่งกระบวนการที่นำมาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพทางโภชนาของข้าวโพดที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการเลี้ยงสัตว์ คือ กระบวนการเอกซ์ทรูด (extrusion) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่ใช้ความร้อน ความชื้น ความดัน และแรงเฉือน ทำให้โครงสร้างของเม็ดแป้งในข้าวโพดเกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีและฟิสิกส์ทั้งในระดับโครงสร้างและโมเลกุล โดยจะทำให้เม็ดแป้งเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างที่เรียกว่า การเกิดเจลาติไนซ์ (gelatinize) ทำให้โครงสร้างของเม็ดแป้งง่ายต่อการเข้าย่อยของเอนไซม์ (กัลลันรงค์ และเกื้อกูล, 2543) ส่งผลให้การย่อยและใช้ประโยชน์ของแป้งข้าวโพดในลูกสุกรสูงขึ้น อย่างไรก็ตามในประเทศไทยยังไม่พบรายงานการวิจัยถึงผลของกระบวนการเอกซ์ทรูดต่อการใช้ประโยชน์ได้ของสารอาหาร และสมรรถภาพการผลิตในลูกสุกรอนุบาล ในขณะที่อุตสาหกรรมการเลี้ยงสุกรในประเทศไทยมีการนำข้าวโพดเอกซ์ทรูดมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตอาหารเพิ่มมากขึ้น ดังนั้นข้อมูลที่ได้จากการวิจัยทั้งในเรื่องของการใช้ประโยชน์ได้ของพลังงานและสารอาหาร รวมทั้งสมรรถภาพการผลิตของลูกสุกรอนุบาลจะก่อให้เกิดประโยชน์อย่างมากต่ออุตสาหกรรมการเลี้ยงสุกรในประเทศไทย รวมทั้งเป็นประโยชน์ต่อนักวิชาการอาหารสัตว์ที่จะใช้เป็นข้อมูลในการประกอบสูตรอาหาร เพื่อให้สัตว์สามารถใช้ประโยชน์จากข้าวโพดเอกซ์ทรูดได้อย่างเต็มที่และคุ้มค่าทางเศรษฐกิจต่อต้นทุนการผลิตสุกร

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาผลของกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อการใช้ประโยชน์ได้ของแป้งในข้าวโพด (การย่อยได้ของแป้งโดยใช้เอนไซม์)
2. ศึกษาผลของกระบวนการเอกซ์ทรูชันข้าวโพดต่อการใช้ประโยชน์ได้ของวัตถุดิบแห้ง พลังงาน และโปรตีนในอาหารสุกรอนุบาล และพลังงานใช้ประโยชน์ได้ของข้าวโพดเอกซ์ทรูค
3. ศึกษาผลของการใช้ข้าวโพดเอกซ์ทรูคและรูปแบบของอาหาร ต่อสมรรถภาพการผลิตของสุกรอนุบาล

การตรวจเอกสาร

การพัฒนาการทำงานของเอนไซม์ในระบบการย่อยอาหารของลูกสุกร

การหลั่งเอนไซม์ในระบบทางเดินอาหารของลูกสุกรในช่วงแรกเกิดนั้น เอนไซม์ไลเปส (lipase) ไคโมทริปซิน (chymotrypsin) และทริปซิน (trypsin) ที่สร้างจากตับอ่อนจะมีปริมาณน้อย โดยเอนไซม์ไลเปสที่ทำหน้าที่ย่อยไขมันจะมีปริมาณสูงขึ้นและจะลดปริมาณลงในช่วงหย่านม หลังจากนั้นจะเพิ่มขึ้นตามอายุของลูกสุกร ส่วนเอนไซม์ที่ย่อยโปรตีนซึ่งได้แก่ ทริปซิน และไคโมทริปซิน จะลดลงในช่วงที่อายุ 2 หรือ 3 สัปดาห์ โดยที่อายุ 4 สัปดาห์ ซึ่งอยู่ในช่วงหย่านม ปริมาณเอนไซม์ไคโมทริปซินและทริปซินจะลดปริมาณลงอย่างรวดเร็ว ส่วนเอนไซม์อื่นๆ ที่ย่อยโปรตีนโปรตีน (protease) จะเพิ่มขึ้นหลังจากหย่านม 2 สัปดาห์ เมื่อลูกสุกรอายุ 6 หรือ 8 สัปดาห์ เอนไซม์ที่ย่อยโปรตีนและไขมันจะพัฒนาอย่างสมบูรณ์ (Veum and Jack, 2001)

การผลิตเอนไซม์อะไมเลส (amylase) ที่ย่อยแป้งในช่วงแรกเกิดจะมีปริมาณต่ำ แต่หลังจากนั้นจะเพิ่มขึ้นตามอายุของลูกสุกร โดยจะสร้างได้เต็มที่เมื่ออายุ 8 สัปดาห์ เอนไซม์ที่ย่อยน้ำตาลโมเลกุลคู่ ได้แก่ มอลเตส (maltase) จะพบตั้งแต่แรกเกิดแต่มีปริมาณต่ำ ในขณะที่เอนไซม์ซูเครส (sucrase) จะพบหลังจากเกิด 1 สัปดาห์ และสามารถทำงานได้เมื่ออายุ 2 สัปดาห์ แล้วจะค่อยๆ เพิ่มขึ้นตามอายุของลูกสุกร จนกระทั่งสร้างได้เต็มที่เมื่ออายุ 8 สัปดาห์ ในขณะที่เอนไซม์แลคเตส (lactase) ที่ทำหน้าที่ย่อยน้ำตาลแลคโตสในน้ำนมแม่จะมีปริมาณสูงมากในช่วงแรกเกิด และจะค่อยๆ ลดลงในช่วงสัปดาห์ที่ 6 โดยลูกสุกรจะมีการสร้างเอนไซม์ในระบบทางเดินอาหารสมบูรณ์เมื่ออายุ 8 สัปดาห์ (Veum and Jack, 2001) Lindermann *et al.* (1986) รายงานว่าการพัฒนาของเอนไซม์ที่ย่อยโปรตีน ไขมัน และแป้งในทางเดินอาหารของลูกสุกรจะสมบูรณ์เมื่อลูกสุกรมีอายุที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณเอนไซม์จะส่งผลต่อประสิทธิภาพการย่อยอาหารและการเจริญเติบโตของลูกสุกร (Efird *et al.*, 1982a, b) ดังนั้นการปรับปรุงการใช้ประโยชน์ของวัตถุดิบจะช่วยเพิ่มการย่อยได้ในลูกสุกร โดยลูกสุกรหย่านมมักได้รับอาหารที่ประกอบด้วยวัตถุดิบที่มาจากพืช แต่ระบบการย่อยอาหารยังพัฒนาไม่เต็มที่ (Van der Poel *et al.*, 1989) ประกอบกับในช่วงหย่านม ลูกสุกรจะเกิดความเครียดเนื่องจากการเปลี่ยนสภาพแวดล้อมที่อยู่อาศัย และเปลี่ยนอาหารจากน้ำนมแม่มาเป็นแหล่งพลังงานซึ่งส่วนใหญ่เป็นแป้งที่มาจากพืช ดังนั้นแป้งจึงเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญของลูกสุกรระยะเล็กหลังจากหย่านม

ซึ่งความสามารถในการย่อยแป้งจะขึ้นอยู่กับน้ำหนักของลูกสุกร (Van der Poel *et al.*, 1990) อายุของลูกสุกร ประสบการณ์ในการได้รับวัตถุดิบชนิดใหม่ๆ ในช่วงก่อนหย่านมที่จะช่วย กระตุ้นการพัฒนาการหลั่งเอนไซม์ที่ใช้ในการย่อยแป้ง รวมทั้งองค์ประกอบและโครงสร้างของแป้งที่ลูกสุกรได้รับ (สัดส่วนของอะไมโลเพคติน) โดยแป้งที่มีปริมาณอะไมโลเพคตินสูงจะย่อยได้ง่าย (Maxwell and Carter, 2001)

ข้าวโพดและองค์ประกอบของแป้ง

ข้าวโพด (corn) หรือ *Zea mays* เป็นเมล็ดธัญพืชที่ใช้ประโยชน์เป็นทั้งอาหารมนุษย์และอาหารสัตว์ การนำมาใช้ประโยชน์ส่วนใหญ่ได้จากเมล็ดซึ่งประกอบด้วยเอนโดสเปิร์ม (endosperm) คัพภะ และเปลือก ในสัดส่วนร้อยละ 82.6 11.1 และ 6.2 ตามลำดับ (ตารางที่ 1) (ชูศักดิ์, 2542) โดย องค์ประกอบภายในเมล็ดข้าวโพดประกอบด้วยแป้ง ซึ่งเป็นองค์ประกอบไม่ต่ำกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ (นวลจันทร์ และสินชัย, 2544) แป้งในเมล็ดข้าวโพดแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ แป้งแข็ง (hard starch) และแป้งอ่อน (soft starch) (ชูศักดิ์, 2542; นวลจันทร์ และสินชัย, 2544) ส่วนของแป้งแข็งจะเป็นส่วน ที่ย่อยได้ยากโดยเฉพาะในลูกสุกรที่ระบบทางเดินอาหารยังพัฒนาไม่สมบูรณ์ ดังนั้นการนำข้าวโพด ไปผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชัน จะช่วยให้เม็ดแป้งในข้าวโพดเปลี่ยนโครงสร้างทำให้ง่ายต่อการเข้าย่อยของเอนไซม์ในทางเดินอาหาร นอกจากนี้กลิ่นหอมของข้าวโพดที่ผ่านกระบวนการ เอกซ์ทรูชันจะช่วยกระตุ้นการกินอาหารของลูกสุกรอีกด้วย (Björck *et al.*, 1985) ทำให้ผู้ผลิตอาหารสัตว์นิยมนำข้าวโพดเอกซ์ทรูดมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตอาหารลูกสุกรระยะเล็ก

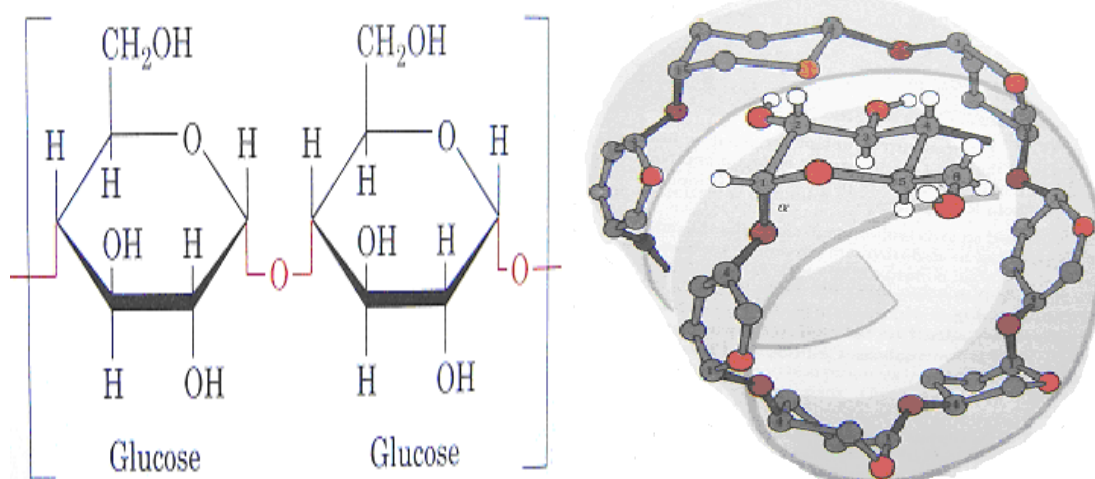
ตารางที่ 1 ส่วนประกอบและองค์ประกอบทางเคมีของเมล็ดข้าวโพด (เปอร์เซ็นต์)

ส่วนของเมล็ด	ทั้งเมล็ด	แป้ง	โปรตีน	น้ำมัน	น้ำตาล	เถ้า
ทั้งหมด	100	73.5	9	4.3	1.9	15
เอนโดสเปิร์ม	82.6	87.6	7	0.83	0.62	0.33
คัพภะ	11.1	8.0	18.3	33.5	10.5	10.6
เปลือก	6.2	7.0	4.3	1.4	-	0.9

ที่มา: ชูศักดิ์ (2542)

แป้ง (starch) เป็นแหล่งสะสมพลังงานที่สำคัญของพืช ส่วนใหญ่อยู่ในเมล็ด หัว และราก ประกอบด้วยหน่วยย่อยที่เป็นกลูโคสทั้งหมดเรียกว่า กลูแคนส์ (glucans) ซึ่งโมเลกุลของเม็ดแป้งมีองค์ประกอบต่างๆ ดังนี้

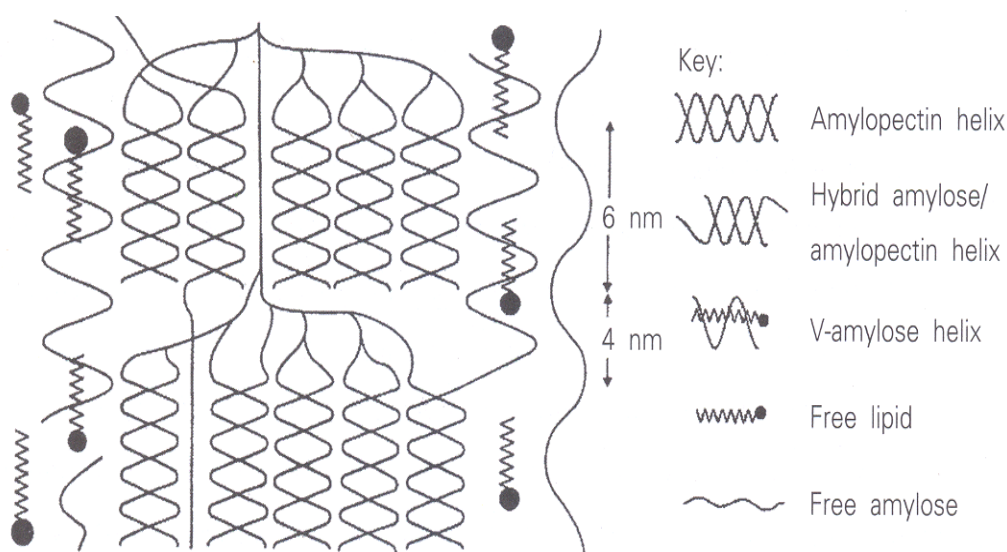
1. อะไมโลส (amylose) คือกลูโคสเป็นจำนวนมากจับกันเป็นเส้นตรงด้วยพันธะแบบ α -(1 $\rightarrow$ 4) มีโครงสร้างขดกันเป็นเกลียวเฮลิคซ์ (helix structure) (ภาพที่ 1) (พันทิพา, 2543; บุญล้อม, 2546) โดยมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย 100 – 200 หน่วยกลูโคส (Guy, 2001) อะไมโลสละลายน้ำได้ดี และเมื่อทำปฏิกิริยากับไอโอดีนในสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) จะได้สารประกอบสีน้ำเงิน (พันทิพา, 2543; บุญล้อม, 2546) โดยตำแหน่งของอะไมโลสบางส่วนจะอยู่ในส่วนของอะไมโลเพคตินบางส่วนกระจายอยู่ทั้งในส่วนของอสัณฐาน (amorphous) และส่วนผลึก (crystalline) (ก้านรงค์ และเกื้อกุล, 2546) ซึ่งแป้งข้าวโพดจะพบอะไมโลสกระจายอยู่ทั่วไปในส่วนของอะไมโลเพคติน มากกว่าที่จะรวมกันเป็นกลุ่ม (Jane *et al.*, 1992; Kasemsuwan and Jane, 1994) นอกจากนี้อะไมโลสภายในเม็ดแป้งมีทั้งอยู่ในสภาพอิสระ สภาพที่อยู่ร่วมกับไขมัน และอยู่ร่วมกับอะไมโลเพคตินเป็นเกลียวคู่ โดยโครงสร้างอะไมโลสที่อยู่ร่วมกับอะไมโลเพคตินและไขมัน (monoacyl lipid) จะพบในส่วนผลึกของเม็ดแป้ง (ภาพที่ 2) (Biliaderis, 1992)



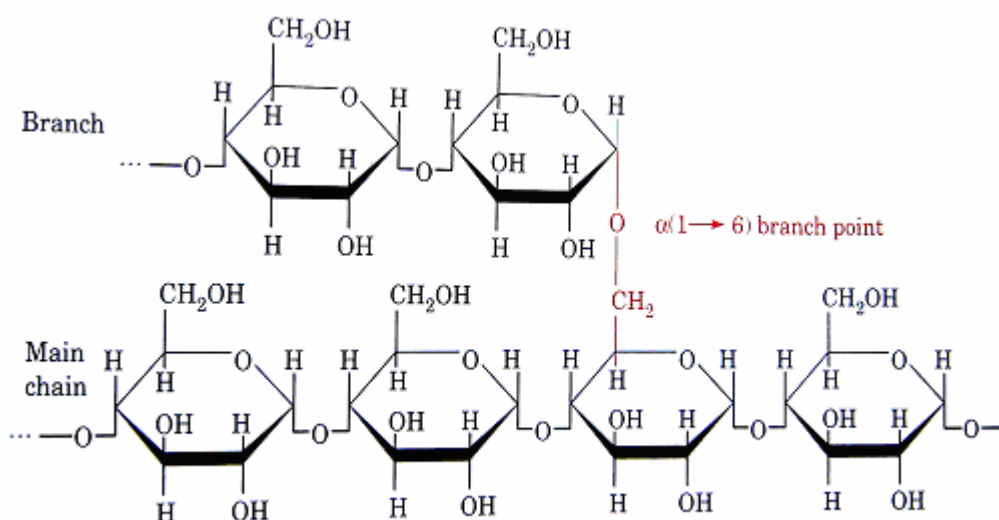
ภาพที่ 1 โครงสร้างโมเลกุลของอะไมโลส

ที่มา: Voet and Voet (2004)

2. อะไมโลเพคติน (amylopectin) เป็นส่วนของโมเลกุลแป้งที่ไม่ละลายน้ำ ประกอบด้วย กลูโคสจำนวนมากจับกันด้วยพันธะ α (1 $\rightarrow$ 4) และมีการแตกแขนงด้วยพันธะแบบ α (1 $\rightarrow$ 6) อย่างไม่มีรูปแบบ (ภาพที่ 3) (พันทิพา, 2543; บุญล้อม, 2546) อะไมโลเพคตินจะมีขนาดของโมเลกุลที่ใหญ่กว่าโมเลกุลของอะไมโลส โดยมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย 500,000 หน่วยกลูโคส และสาขาของโมเลกุลอะไมโลเพคตินจะพบในทุก 20 หน่วยของกลูโคส (Guy, 2001) ขนาดของสายโซ่จะมีตั้งแต่ขนาดโมเลกุลเล็ก จนถึงขนาดโมเลกุลใหญ่ ซึ่งจะอยู่รวมกันเป็นกลุ่มก้อน (cluster) นอกจากนี้การจับกันเป็นกลุ่มของอะไมโลเพคตินทำให้เกิดเป็นเกลียวคู่ (double helix) ช่วยให้เม็ดแป้งมีความคงทนต่อการทำปฏิกิริยาของกรดและเอนไซม์ โดยเกลียวคู่ของอะไมโลเพคตินจะอยู่รวมกันเป็นผลึกรวมทั้งส่วนของอะไมโลสที่อยู่อย่างอิสระหรืออยู่ร่วมกับไขมัน จะพบในแป้งจาก ธัญพืช (กล้าณรงค์ และเกื้อกูล, 2546) และเมื่อทำปฏิกิริยากับไอโอดีนในสารละลายโพแทสเซียมไอโอไดด์ (KI) จะได้สารประกอบสีม่วง (พันทิพา, 2543; บุญล้อม, 2546)



ภาพที่ 2 แบบจำลองโครงสร้างอะไมโลสที่อยู่กับอะไมโลเพคตินและไขมัน
ที่มา: กล้าณรงค์ และเกื้อกูล (2546)



ภาพที่ 3 โครงสร้างโมเลกุลของอะไมโลเพคติน

ที่มา: Voet and Voet (2004)

ในธรรมชาติแป้งจะมีลักษณะเป็นเม็ด (granule) ซึ่งมีขนาดและรูปร่างต่างกันแล้วแต่ชนิดของพืช โดยทั่วไปจะมีสัดส่วนของอะไมโลสประมาณ 15-20 เปอร์เซ็นต์ และอะไมโลเพคตินประมาณ 75-85 เปอร์เซ็นต์ สัดส่วนนี้จะผันแปรไปแล้วแต่ชนิดและสายพันธุ์ของพืช เช่น ข้าวและมันฝรั่งมีอะไมโลส 20 เปอร์เซ็นต์ อะไมโลเพคติน 80 เปอร์เซ็นต์ ข้าวสาลีและข้าวโพดธรรมชาติมีสัดส่วนของอะไมโลสต่ออะไมโลเพคติน 24 : 76 เปอร์เซ็นต์ แต่ข้าวโพดเทียน (waxy maize) มีอะไมโลสเพียง 1 เปอร์เซ็นต์ และอะไมโลเพคตินถึง 99 เปอร์เซ็นต์ (บุญล้อม, 2546; Guy, 2001) อะไมโลเพคตินถือว่ามีความสำคัญมากกว่าอะไมโลสทั้งด้านโครงสร้างหน้าที่ และการนำไปใช้ประโยชน์ ดังนั้นเมื่อมีอะไมโลเพคตินเพียงอย่างเดียวสามารถรวมตัวเพื่อสร้างเม็ดแป้งได้ ปริมาณของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินที่แตกต่างกันทำให้คุณสมบัติของแป้งแตกต่างกัน (Oates, 1997) ซึ่งแป้งที่มีอะไมโลสเป็นองค์ประกอบในสัดส่วนที่สูงจะทำให้การย่อยได้ของแป้งลดลง (Svihus *et al.*, 2005)

3. ส่วนประกอบอื่นๆ ภายในเม็ดแป้งที่มีผลต่อลักษณะและคุณสมบัติของเม็ดแป้งที่สำคัญ ได้แก่ ไขมัน โปรตีนและแร่ธาตุ ซึ่งมีปริมาณแตกต่างกันในแป้งแต่ละชนิด

3.1 ไขมัน

แป้งจะมีองค์ประกอบของไขมันอยู่ต่ำกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ ชนิดของไขมันที่มีอยู่ในแป้งจะมีผลต่อคุณสมบัติของแป้ง เช่น มีผลต่อความหนืด ไขมันที่อยู่บริเวณพื้นผิวของเม็ดแป้งจะประกอบไปด้วย ไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) กรดไขมันอิสระ (free fatty acid) กลูโคลิปิด (glucolipids) ฟอสโฟลิปิด (phospholipids) และไขมันที่กระจายอยู่ทั่วไปภายในเม็ดแป้งโดยเชื่อมพันธะกับคาร์โบไฮเดรตอย่างหลวมๆ (กล้านรงค์ และเกื้อกูล, 2546) ซึ่งแป้งจากพืชหัวและแป้งจากถั่วไม่มีไขมันภายในเม็ดแป้ง แต่แป้งจากเมล็ดธัญพืชมีไขมันภายในเม็ดแป้ง ซึ่งในเม็ดแป้งธัญพืชจะมีปริมาณไขมันในช่วง 1 – 14 กรัมต่อกิโลกรัม แต่ส่วนมากจะพบประมาณ 5 – 10 กรัมต่อกิโลกรัม (Svihus *et al.*, 2005) โดยคุณสมบัติและปริมาณของไขมันจะแตกต่างกันในพืชแต่ละชนิด ซึ่งพบว่าแป้งข้าวโพดมีไขมัน 0.6 ถึง 0.8 เปอร์เซ็นต์ ประกอบด้วยกรดไขมันอิสระ 60 เปอร์เซ็นต์ และไลโซฟอสโฟลิปิด (lysophospholipid) 38 เปอร์เซ็นต์ (กล้านรงค์ และเกื้อกูล, 2546) กรดไขมันที่สำคัญของไลโซฟอสโฟลิปิดคือ กรดไขมันอิ่มตัวคาร์บอน 16 อะตอม (กรดปาล์มิติก, palmitic acid) และกรดไขมันไม่อิ่มตัวคาร์บอน 18 อะตอม (ลิโนเลอิก, linoleic acid) กรดไขมันเหล่านี้จะรวมตัวกับโมเลกุลของอะไมโลสเกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (amylose – lipid complexes) ได้ (กล้านรงค์ และเกื้อกูล, 2546; Svihus *et al.*, 2005)

สารประกอบของไขมันและแป้งจะมีผลต่อกระบวนการย่อยแป้งโดยลดการจับตัวของเอนไซม์และสารตั้งต้น (substrate) นอกจากนี้จะทำให้การพองตัวของแป้งต่ำลงเนื่องจากเม็ดแป้งไม่รวมตัวกับน้ำ (กล้านรงค์ และเกื้อกูล, 2546; Svihus *et al.*, 2005) ซึ่งจะส่งผลต่อการย่อยได้ของแป้งทางตรงคือ ทำให้โมเลกุลของแป้งไม่รวมตัวกับน้ำซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการทำงานของเอนไซม์ และทางผลอ้อมคือ การที่เม็ดแป้งไม่รวมตัวกับน้ำทำให้เกิดการเจลาติไนซ์ต่ำลง (Svihus *et al.*, 2005) อย่างไรก็ตามสารประกอบเชิงซ้อนของไขมันและอะไมโลสจะไม่เกิดกลิ่นหืนเนื่องจากสามารถต้านทานการเกิดกระบวนการออกซิเดชัน (oxidation) ได้ (กล้านรงค์ และเกื้อกูล, 2546)

3.2 โปรตีน

ภายในเมล็ดแป้งมีส่วนประกอบของโปรตีนอยู่ต่ำกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ (กล้าณรงค์ และเกื้อกูล, 2546) โดยสัดส่วนของโปรตีนจะช่วยเพิ่มพื้นที่ผิวของเมล็ดแป้ง (Baldwin, 2001) ซึ่งโปรตีนจะเกาะอยู่บริเวณพื้นที่ผิวของเมล็ดแป้ง ทำให้เกิดผลกระทบต่อกิจกรรมของแป้ง คือทำให้เกิดประจุบนพื้นที่ผิวของเมล็ดแป้งซึ่งจะส่งผลต่อการกระจายตัวของเมล็ดแป้ง ทำให้มีอัตราการดูดซับน้ำ อัตราการพองตัวลดลง (กล้าณรงค์ และเกื้อกูล, 2546; Baldwin, 2001) นอกจากนี้ยังทำให้การเกิดเจลาคีโนสเปลี่ยนแปลงไปเป็นการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) ระหว่างกรดอะมิโนกับน้ำตาลรีดิวซิง สีและกลิ่นของผลิตภัณฑ์จะเปลี่ยนแปลงไป (โดยส่วนใหญ่จะเกิดขึ้นกับแป้งจากธัญพืช เนื่องจากมีปริมาณโปรตีนสูง) (กล้าณรงค์ และเกื้อกูล, 2546) ในข้าวสาลีจะพบโปรตีนเฟรียบิลิน (friabilin) ในเมล็ดแป้งซึ่งส่งผลต่อความแข็งแรงของเอนโดสเปิร์ม และส่งผลต่อคุณภาพการบดและการผลิตของแป้งข้าวสาลี (Baldwin, 2001)

3.3 แร่ธาตุ

แป้งโดยทั่วไปมีองค์ประกอบของสารอนินทรีย์ เช่น ฟอสฟอรัส โซเดียม โพแทสเซียม แมกนีเซียม และแคลเซียม ซึ่งสามารถวิเคราะห์หาปริมาณได้จากส่วนที่เหลือหรือปริมาณเถ้าจากการเผาไหม้โดยสมบูรณ์ (กล้าณรงค์ และเกื้อกูล, 2546) แป้งส่วนใหญ่มีองค์ประกอบของฟอสฟอรัสอยู่น้อยกว่า 0.1 เปอร์เซ็นต์ โดยแป้งจากธัญพืชมีฟอสฟอรัสในรูปฟอสโฟลิปิดประมาณ 0.02 ถึง 0.06 เปอร์เซ็นต์ สำหรับแป้งจากพืชหัวและราก เช่น ในแป้งมันฝรั่งจะมีฟอสฟอรัสอยู่สูง (กล้าณรงค์ และเกื้อกูล, 2546; Blennow *et al.*, 2000) ประมาณ 0.3 ถึง 0.4 เปอร์เซ็นต์ โดยอยู่ในรูปของฟอสเฟตเชื่อมกับหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl) ที่คาร์บอนตำแหน่งที่ 3 และ 6 (C_3 และ C_6) ของหน่วยกลูโคส (กล้าณรงค์ และเกื้อกูล, 2546) ซึ่งจะส่งผลต่อโครงสร้างของเมล็ดแป้ง และส่งผลถึงการพองตัวและการย่อยได้ของแป้ง (Blennow *et al.*, 2000) โดยทำให้ประจุพื้นผิวเป็นลบ แรงผลักระหว่างประจุลบทำให้แป้งมันฝรั่งมีคุณสมบัติพองตัวง่าย และมีความหนืดสูงกว่าแป้งชนิดอื่นๆ

กระบวนการย่อยของแป้ง

สัตว์จะได้รับคาร์โบไฮเดรตจากอาหารในรูปของแป้งและน้ำตาลซูโครส รวมทั้งน้ำตาลแลคโตสจากน้ำนม ซึ่งกระบวนการย่อยคาร์โบไฮเดรตจะเกิดขึ้นที่ลำไส้เล็กเป็นหลัก (นวลจันทร์ และสินชัย, 2544) แป้งจะถูกย่อยด้วยเอนไซม์ แอลฟา – อะไมเลส (α - amylase) ที่สร้างจากตับอ่อนได้เป็นสารที่เรียกว่า ลิมิเตดเดกซ์ตริน (limited dextrin) ประกอบด้วยน้ำตาลจำนวนน้อยจับกันด้วยพันธะแบบ α - (1 $\rightarrow$ 4) และ α - (1 $\rightarrow$ 6) เพราะเอนไซม์อะไมเลสย่อยได้เฉพาะพันธะแบบ α - (1 $\rightarrow$ 4) เท่านั้นส่วนพันธะแบบ α - (1 $\rightarrow$ 6) ต้องถูกย่อยด้วยเอนไซม์ α - (1 $\rightarrow$ 6) กลูโคซิเดส (α - (1 $\rightarrow$ 6) glucosidase) หรือเรียกว่าเดกซ์ตรินเนส (dextrinase) (บุญล้อม, 2546) ได้น้ำตาลมอลโตส (maltose) จากนั้นที่ผนังลำไส้ของสัตว์ มอลโตสจะถูกย่อยด้วยเอนไซม์ α - กลูโคซิเดส ได้เป็นน้ำตาลกลูโคสซึ่งสามารถถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายได้ (นวลจันทร์ และสินชัย, 2544) แต่การใช้ประโยชน์ของแป้งในลูกสุกรหย่านมมักมีปัญหา เนื่องจากในลูกสุกรระยะเล็กมีการผลิตเอนไซม์ที่ย่อยแป้งได้ค่อนข้างน้อย ซึ่งการทำงานของเอนไซม์อะไมเลสจะสมบูรณ์เมื่อลูกสุกรอายุ 6 - 8 สัปดาห์

กระบวนการเอกซ์ทรูชัน

กระบวนการเอกซ์ทรูชันเป็นกระบวนการที่ใช้ความร้อนทั้งแบบแห้งหรือชื้น (เปียก) รวมทั้ง การผสม การกดบีบ (Fellowes, 1998) และแรงเฉือน (Asp, 1986; Guy, 2001) ทำให้วัตถุดิบอาหารสัตว์โดยเฉพาะวัตถุดิบประเภทแป้งหรือโปรตีนเกิดกระบวนการทำให้สุก (cooking starch) หรือเกิดกระบวนการเจลาติไนซ์ (gelatinization) (พันทิพา, 2539; Guy, 2001) โปรตีนเสียสภาพ (denature) (Asp, 1986; Guy, 2001) วัตถุดิบจะอยู่ในสภาพที่อ่อนตัว พร้อมทั้งจะเปลี่ยนรูปร่างได้ จึงอัดผ่านตะแกรงที่มีความหนา (die) ที่มีรูปร่างต่างๆ ตามที่ต้องการ และเมื่อวัตถุดิบออกจากเครื่องเอกซ์ทรูด ไปกระทบความเย็นจะทำให้วัตถุดิบพองตัวขึ้น ความหนาแน่นของวัตถุดิบจะเปลี่ยนแปลงไป (พันทิพา, 2539; Fellowes, 1998)

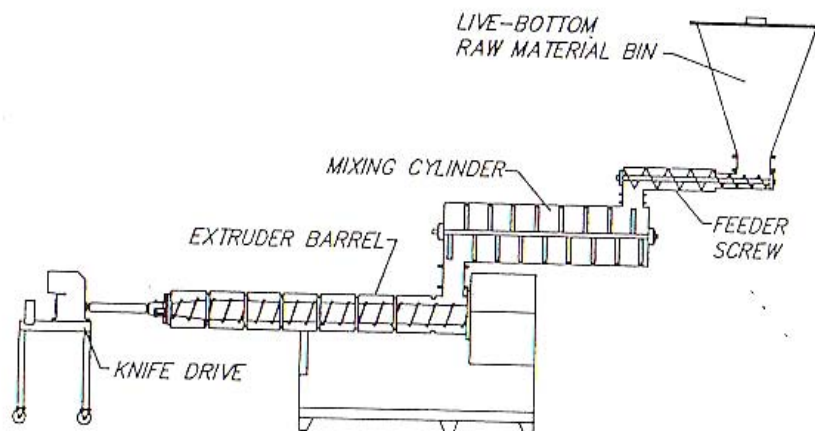
เครื่องเอกซทรูดเดอร์มีองค์ประกอบดังต่อไปนี้

1. สกรู (screw) ทำหน้าที่ลำเลียงอาหารผ่านกระบอกเครื่องเอกซทรูดเดอร์ ซึ่งสกรูที่ใช้มีทั้งชนิดเกลียวเดี่ยวและเกลียวคู่ และมีการออกแบบหลายลักษณะแตกต่างตามการใช้งาน เช่น ระยะห่างระหว่างเกลียวสกรู ความหนาของเส้นเกลียว ความลึกของเส้นเกลียวและแนวของเส้นเกลียวสกรู และลักษณะอื่น ซึ่งความแตกต่างเหล่านี้จะมีผลต่ออุณหภูมิ ความดัน และแรงเฉือนที่เพิ่มขึ้น จากลักษณะดังกล่าวพบว่าสกรูของเครื่องเอกซทรูดเดอร์ แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ช่วงลำเลียง (feeding zone) ช่วงเกลียวจะลึก ระยะห่างระหว่างเกลียวจะมาก เพื่อใช้ในการลำเลียงวัตถุดิบ (Galen, 2000; Forte and Young, 2005) ซึ่งในส่วนนี้เป็นส่วนที่ความดันในกระบอกเครื่องเอกซทรูดเดอร์จะต่ำ (Forte and Young, 2005) ส่วนที่ 2 ช่วงทำให้สุก (cooking zone) จะเป็นส่วนของการผสมและทำให้สุก ในส่วนนี้ความหนาแน่นของวัตถุดิบจะเพิ่มขึ้นเพราะมีการเพิ่มน้ำและไอน้ำ ระยะห่างระหว่างเกลียวสกรูจะลดลง แต่เกลียวสกรูจะตื้นขึ้น เพื่อช่วยให้มีการผสมเพิ่มมากขึ้น ในระหว่างนี้ความดันจะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ ซึ่งในระหว่างที่วัตถุดิบมีการเคลื่อนที่ไปข้างหน้า วัตถุดิบบางส่วนจะเคลื่อนที่ย้อนกลับส่งผลให้เกิดความร้อนเนื่องจากแรงเฉือนจากการเคลื่อนของวัตถุที่เพิ่มขึ้นทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในลักษณะของการหลอมเหลว (melting) ส่วนสุดท้ายคือช่วงหลอมเหลว (melting zone) ในส่วนนี้เกลียวของสกรูจะมีลักษณะตื้นขึ้น ระยะห่างระหว่างเกลียวจะสั้นเพื่อลดการเคลื่อนที่ของวัตถุดิบทำให้ตรงบริเวณนี้เป็นส่วนที่เกิดแรงเฉือนมากที่สุดหลังจากนั้นวัตถุดิบจะถูกดันผ่านออกจากเครื่องเอกซทรูดเดอร์ (ภาพที่ 4) (Galen, 2000; Forte and Young, 2005)

2. บาร์เรล (barrel) เป็นท่อทรงกระบอกภายนอกเครื่องเอกซทรูดเดอร์โดยครอบสกรูไว้ภายใน บริเวณผนังของบาร์เรลมีการออกแบบให้เป็นร่อง เพื่อลดความสิ้นของวัตถุดิบทำให้เคลื่อนที่ช้าลง ซึ่งจะช่วยเพิ่มอุณหภูมิและแรงเฉือนในระหว่างที่สกรูลำเลียงวัตถุดิบ

3. จานได (die) มีการออกแบบให้มีลักษณะต่างๆ เพื่อให้ทำให้อาหารที่อัดผ่านจานไดมีรูปแบบต่างๆ ตามแบบรูปของจานไดร์

4. ชุดใบมีดและมอเตอร์ (knife drive) ทำหน้าที่ในการตัดอาหารให้เป็นชิ้นๆ ซึ่งจำนวนใบมีด องศาของการวางใบมีด และความเร็วรอบของมอเตอร์จะมีผลต่อการตัดอาหารออกเป็นชิ้นๆ (Galen, 2000)



ภาพที่ 4 ส่วนประกอบของเครื่องเอกซ์ทรูดเดอร์

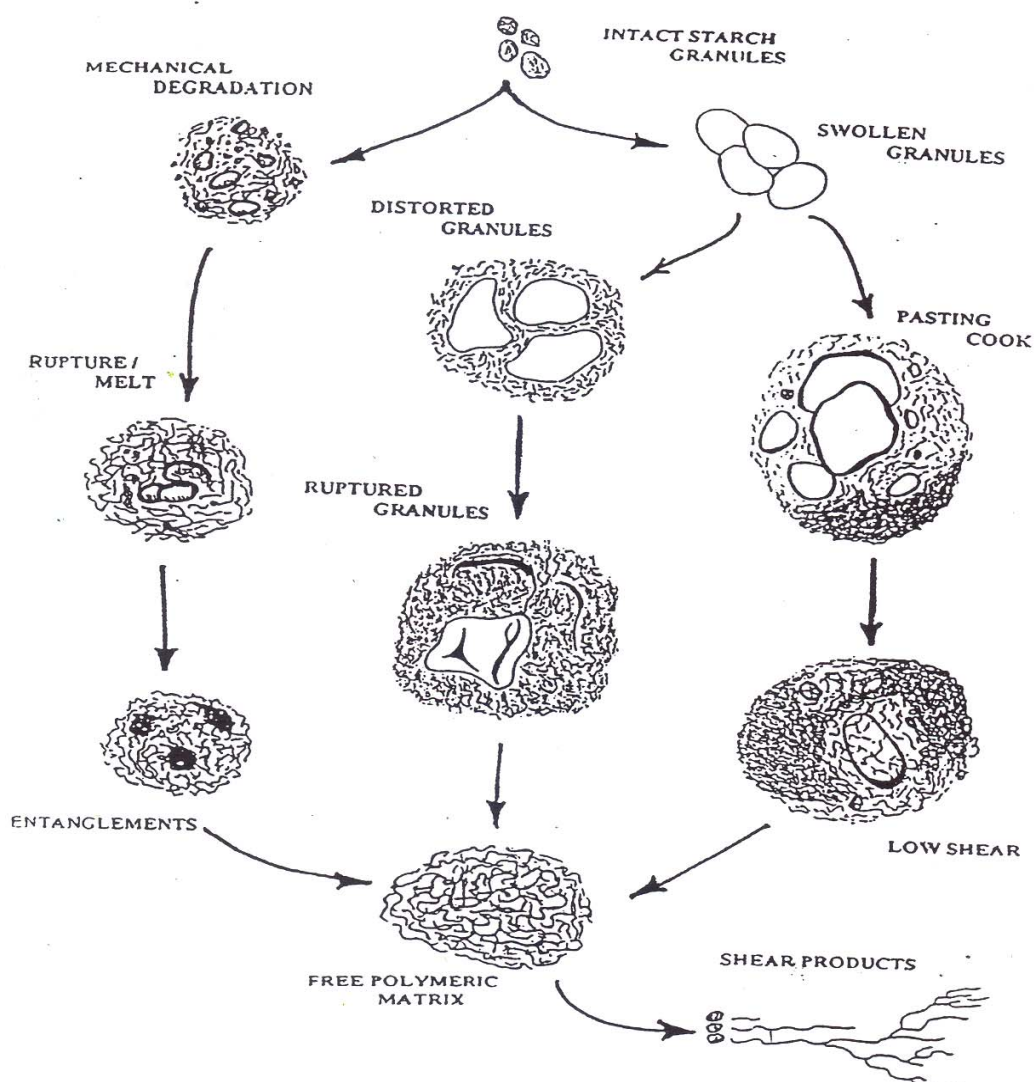
ที่มา: Hancock and Behnke (2001)

ผลของกระบวนการเอกซ์ทรูดขึ้นต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ของโมเลกุลแป้ง

1. การเกิดแป้งที่ย่อยได้ (digestible starch) โดยการแตกตัวของแป้งซึ่งแบ่งออกเป็น 2 ลักษณะคือ

1.1 การแตกตัวของแป้งโดยวิธีกล คือ การเพิ่มพลังงานให้สูงขึ้นและให้อัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องเอกซ์ทรูดเดอร์ในปริมาณต่ำ ซึ่งกระบวนการผลิตดังกล่าวจะส่งผลให้เกิดแรงเฉือนและความร้อนที่สูงขึ้นจนกระทั่งเม็ดแป้งแตกออก (Forte, 2004)

1.2 การแตกตัวของแป้งโดยการเกิดแป้งเปียก ซึ่งเกิดขึ้นโดยการเพิ่มพลังงานความร้อนและน้ำในกระบวนการผลิต โดยปริมาณน้ำที่เพิ่มสูงขึ้นจะทำให้เกิดการพองตัวของเม็ดแป้ง (swelling) ทำให้แป้งแตกออกส่งผลให้แป้งสุก ซึ่งความร้อน ความชื้นที่เพียงพอจะทำให้เม็ดแป้งเปลี่ยนสภาพเป็นแป้งเปียก เรียกว่ากระบวนการเจลาติไนซ์ (Forte, 2004) ซึ่งกระบวนการแตกตัวของแป้งทั้ง 2 วิธีจะทำให้แป้งสุก ดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ลักษณะการสูกของแป้งภายใต้สภาวะความร้อน ความชื้น และความดัน
ที่มา: Forte (2004)

2. การเกิดแป้งที่ย่อยไม่ได้ (indigestible starch)

กระบวนการเอกซ์ทรูชัน จะทำให้แป้งในข้าวโพดเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างทำให้การย่อยได้ของเอนไซม์เพิ่มขึ้น แต่อย่างไรก็ตามการให้ความร้อนจากการเอกซ์ทรูชันสามารถจะทำให้เกิดแป้งที่ย่อยไม่ได้ (resistant starch) (สาริจน์, 2547; Haralampu, 2000; Thompson, 2000; Mun and Malshick, 2005) แป้งชนิดนี้เอนไซม์อะไมเลสในลำไส้เล็กจะไม่สามารถย่อยได้ และร่างกายสัตว์ไม่สามารถดูดซึมไปใช้ประโยชน์ได้ แป้งที่ย่อยไม่ได้ในกระบวนการเอกซ์ทรูชันนี้

เกิดจากกระบวนการรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) ซึ่งเกิดจากการที่โมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินเกิดการจับเรียงตัวใหม่ เป็นโครงสร้างที่เอนไซม์ไม่สามารถย่อยหรือทำลายพันธะได้ (เบต้า – อะไมโลส และฟลักโมเลกุลของอะไมโลเพคติน) โดยส่วนมากเมล็ดแป้งที่มีอะไมโลสเป็นองค์ประกอบ เมื่อได้รับความร้อนและความชื้น ที่อุณหภูมิสูงกว่า 100 องศาเซลเซียสจะทำให้เกิดแป้งที่ย่อยไม่ได้มากกว่าโมเลกุลของอะไมโลเพคตินที่โครงสร้างมีกิ่งสาขา ซึ่งก็คืขบวนการเคลื่อนที่ในการเปลี่ยนโครงสร้างของโมเลกุล (Haralampu, 2000; Thompson, 2000)

นอกจากนี้ในระหว่างที่เมล็ดแป้งเกิดการเจลาติไนซ์ โมเลกุลของอะไมโลสบางส่วนมีการรวมตัวกับไขมัน ซึ่งส่วนมากได้แก่ กรดไขมันอิสระที่อยู่บริเวณพื้นผิวของเมล็ดแป้ง ทำให้เมล็ดแป้งไม่รวมตัวกับน้ำและการพองตัวของเมล็ดแป้งลดลง เอนไซม์เข้าไปย่อยแป้งได้ลดลงส่งผลให้การใช้ประโยชน์ของแป้งลดลง โดยเฉพาะแป้งข้าวโพดที่มีปริมาณอะไมโลสอยู่ในระดับสูงซึ่งการเกิดการรวมตัวของอะไมโลสและไขมันจะเกิดขึ้นมากกว่าการรวมตัวของอะไมโลเพคตินและไขมัน (Novarro *et al.*, 1996; Svihus *et al.*, 2005)

ผลของกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อการย่อยได้ของเอนไซม์ของแป้งข้าวโพด

เนื่องจากกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ส่งผลให้เมล็ดแป้งของข้าวโพดเกิดการเจลาติไนซ์ ทำให้เมล็ดแป้งแตกออกและส่งผลให้เอนไซม์เข้าย่อยเมล็ดแป้งได้เพิ่มขึ้น Van der Poel *et al.* (1990) รายงานว่าข้าวโพดที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันด้วยเครื่องเอกซ์ทรูดเดอร์ชนิดเกลียวคู่ ความชื้น 18 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส มีผลให้การใช้ประโยชน์ได้ของแป้งเพิ่มขึ้น 20 – 90 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากการเกิดเจลาติไนซ์ของแป้งในข้าวโพด ซึ่งในกระบวนการเอกซ์ทรูชันพบว่าเมื่ออัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องเอกซ์ทรูดเดอร์ลดลง จะส่งผลให้ระดับการเจลาติไนซ์และการเข้าย่อยได้ของเอนไซม์ของข้าวโพดเพิ่มขึ้น (ณัฐชนก และคณะ, 2547; Van der Poel *et al.*, 1989; Hongtrakul *et al.*, 1998) อย่างไรก็ตามระดับของการเจลาติไนซ์ของแป้งไม่ได้เป็นตัวบ่งบอกถึงการใช้ประโยชน์ได้ของแป้งและสมรรถภาพการผลิตของลูกสุกร (Hongtrakul *et al.*, 1998; Medel *et al.*, 1999) เนื่องจากการเกิดเจลาติไนซ์โมเลกุลของแป้งบางส่วนเกิดรีโทรเกรเดชัน นอกจากนี้ระดับการเจลาติไนซ์ของแป้งที่เพิ่มขึ้นยังส่งผลให้เกิดสูญเสียกรดอะมิโนและวิตามินบางชนิดจากกระบวนการ Millard reaction (Hongtrakul *et al.*, 1998)

การใช้ข้าวโพดเอกซ์ทรูตในอาหารสัตว์

Hongtrakul *et al.* (1998) ได้ทำการศึกษาผลของระดับการเจลาติไนซ์ของแป้ง ที่ระดับ 14.5 38.7 52.7 64.4 และ 89.3 เปอร์เซ็นต์ จากกระบวนการเอกซ์ทรูตขึ้นของข้าวโพดและการอัดเม็ดในอาหารของลูกสุกรอนุบาลต่อสมรรถภาพการผลิตพบว่า น้ำหนักตัวเฉลี่ยต่อตัวต่อวันของลูกสุกร ปริมาณอาหารที่กินต่อตัวต่อวัน การย่อยได้ในรูปวัตถุแห้ง โปรตีน และพลังงาน ไม่มีความสัมพันธ์กับระดับการใช้ประโยชน์ของแป้งที่เพิ่มขึ้นจากการเกิดเจลาติไนซ์ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการเกิดรีโทรแกรเดชันในข้าวโพดเอกซ์ทรูต และการเกิด Millard reaction ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Van der Poel *et al.* (1990) ที่ทำการศึกษาค่าการย่อยได้ของสูตรอาหารที่ใช้ข้าวโพดที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูตขึ้นแบบแห้ง ที่อุณหภูมิ 190 – 210 องศาเซลเซียส ในลูกสุกรที่มีน้ำหนักเริ่มต้น 5.8 และ 7.2 กิโลกรัม และมีอายุ 7 และ 19 วันหลังจากหย่านม ตามลำดับ โดยใช้ข้าวโพดเอกซ์ทรูตที่ระดับ 60 เปอร์เซ็นต์ พบว่าไม่มีความแตกต่างระหว่างค่าการย่อยได้ของสารอาหารในลูกสุกรในแต่ละกลุ่มการทดลอง แต่พบว่าลูกสุกรกลุ่มที่มีน้ำหนักเริ่มต้น 7.2 กิโลกรัม จะมีค่าการย่อยได้ของพลังงาน วัตถุแห้ง และโปรตีนสูงกว่ากลุ่มที่มีน้ำหนักเริ่มต้น 5.8 กิโลกรัม ($P < 0.05$) แสดงให้เห็นว่าอายุและน้ำหนักของลูกสุกรจะมีผลต่อค่าการย่อยได้ ซึ่งสอดคล้องกับการรายงานของ Van der Poel *et al.* (1989) ที่ทำการศึกษาค่าการย่อยได้และสมรรถภาพการผลิตของลูกสุกรอนุบาล โดยใช้ข้าวโพดในสูตรอาหารที่ระดับ 60 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิของการเอกซ์ทรูตขึ้น 160 องศาเซลเซียส ความชื้น 18 เปอร์เซ็นต์ พบว่าสูตรอาหารที่ใช้ข้าวโพดเอกซ์ทรูตมีผลทำให้ค่าการย่อยได้จากลำไส้เล็กส่วนปลายของคาร์โบไฮเดรตและวัตถุแห้งสูงขึ้น แต่ไม่มีผลต่อค่าการย่อยได้จากมูล ส่งผลให้กระบวนการเอกซ์ทรูตขึ้นในข้าวโพดไม่มีผลต่อน้ำหนักตัวและสมรรถภาพของลูกสุกรหลังจากหย่านมแล้ว 1 สัปดาห์

Herkelman *et al.* (1990) ได้ทำการศึกษาค่าการย่อยได้ของสูตรอาหารที่ใช้ข้าวโพดเอกซ์ทรูตเปรียบเทียบกับข้าวโพดบดในสุกรระยะเล็กพบว่า สูตรอาหารที่ใช้ข้าวโพดเอกซ์ทรูตช่วยเพิ่มค่าพลังงานย่อยได้ (digestible energy) และพลังงานใช้ประโยชน์ได้ (metabolizable energy) ($P < 0.05$) สอดคล้องกับการศึกษาของ Medel *et al.* (2004) ที่ทำการศึกษาค่าการให้ความร้อนในอาหารลูกสุกร ต่อค่าการย่อยได้และสมรรถภาพการผลิต พบว่าการนำข้าวโพดไปผ่านกระบวนการให้ความร้อนโดยไอน้ำแล้วผ่านการบีบให้อาหารสุก จะช่วยเพิ่มค่าการย่อยได้ของแป้งในลูกสุกรอายุ 22 วัน ($P < 0.10$) และเพิ่มการเจริญเติบโตของลูกสุกรอนุบาลที่อายุ 32 วัน ($P < 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับ Medel *et al.* (1999) ที่พบว่ากระบวนการเอกซ์ทรูตขึ้นของข้าวโพด จะช่วยเพิ่มการเจริญเติบโตต่อวัน

และประสิทธิภาพการใช้อาหารของลูกสุกร 11 และ 10 เปอร์เซ็นต์ ที่อายุ 15 วัน และ 12 วัน และ 3.2 เปอร์เซ็นต์ที่อายุ 25 วันหลังจากหย่านม ตามลำดับ

นอกจากนี้แล้ว Amornthewaphat *et al.* (2005) ได้ทำการศึกษาผลของการใช้ข้าวโพดเอกซ์ทราดในอาหารไก่เนื้อ โดยใช้ข้าวโพดเอกซ์ทราด 25 เปอร์เซ็นต์ในสูตรอาหารในรูปของการอัดเม็ด และนำไปเลี้ยงไก่เนื้อจำนวน 1,600 ตัว เป็นเวลา 42 วัน พบว่าอาหารอัดเม็ดสูตรที่ใช้ข้าวโพดเอกซ์ทราดช่วยเพิ่มน้ำหนักตัวของไก่ 10 – 11 เปอร์เซ็นต์ และเพิ่มประสิทธิภาพการใช้อาหาร 5 - 6 เปอร์เซ็นต์เมื่อเปรียบเทียบกับอาหารผงที่ใช้ข้าวโพดเอกซ์ทราด

กระบวนการเอกซ์ทราชันจะทำให้แป้งสุกโดยอาศัยความร้อน ความชื้น และความดัน ซึ่งจะช่วยปรับปรุงการย่อยได้ของแป้งให้สูงขึ้น โดยเฉพาะในลูกสุกรอนุบาลที่ระบบทางเดินอาหารยังพัฒนาไม่สมบูรณ์ อย่างไรก็ตามผลของการนำข้าวโพดเอกซ์ทราดมาใช้เลี้ยงลูกสุกรอนุบาลจากงานวิจัยดังกล่าวเบื้องต้น พบว่ามีผลทั้งในด้านช่วยปรับปรุงการย่อยได้และสมรรถภาพการผลิต และไม่ได้ช่วยปรับปรุงการย่อยได้และสมรรถภาพการผลิตของลูกสุกรอนุบาล ซึ่งผลการวิจัยที่แตกต่างกันจะมีปัจจัยหลายอย่างเข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น กระบวนการผลิตข้าวโพดเอกซ์ทราด อายุและน้ำหนักของลูกสุกร ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้จึงต้องการศึกษาผลของการใช้ข้าวโพดเอกซ์ทราดต่อการใช้ประโยชน์ได้ของพลังงานและสมรรถภาพการผลิตของลูกสุกรอนุบาล เพื่อใช้เป็นข้อมูลเบื้องต้นในการนำข้าวโพดเอกซ์ทราดมาผลิตเป็นอาหารลูกสุกรอนุบาลในประเทศไทย

อุปกรณ์และวิธีการทดลอง

การทดลองที่ 1

การศึกษาผลของกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อการใช้ประโยชน์ได้ของแป้งในข้าวโพด

1. การผลิตข้าวโพดเอกซ์ทรูด

ใช้ข้าวโพดเมล็ดป้อนเข้าเครื่องเอกซ์ทรูดเดอร์แบบสกรูเดี่ยวด้วยอัตรา 294 กิโลกรัมต่อชั่วโมง โดยเครื่องเอกซ์ทรูดเดอร์ประกอบด้วยบาร์เรล 3 ท่อนเรียงต่อกันมีความยาว 81 เซนติเมตร รูจานอัด (die hole) มีจำนวนรูเปิด 24 รู ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเปิด 0.6 เซนติเมตร และอัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องเอกซ์ทรูดเดอร์ที่ระดับ 15 21 และ 30 ลิตรต่อชั่วโมง

2. การเก็บตัวอย่างและการบันทึกผล

เก็บข้อมูลของกระบวนการผลิตที่เกี่ยวข้องซึ่งประกอบด้วย กระแสไฟฟ้าที่ใช้ กำลังการผลิต (กิโลกรัมต่อชั่วโมง) อุณหภูมิบาร์เรล และอุณหภูมิข้าวโพดเอกซ์ทรูดทันทีหลังจากออกจากเครื่อง และเก็บข้อมูลของกระแสไฟฟ้าที่ใช้และปริมาณของข้าวโพดเอกซ์ทรูดที่ผ่านการบดแล้ว สุ่มเก็บตัวอย่างข้าวโพดเอกซ์ทรูดและข้าวโพดบด เพื่อนำมาวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของตัวอย่าง

3. แผนการทดลอง

วางแผนการทดลองแบบสุ่มตลอด (Completely Randomized Design : CRD) โดยมีปัจจัยหลักคืออัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องเอกซ์ทรูด แบ่งออกเป็น 3 ระดับๆ ละ 3 ซ้ำ เปรียบเทียบกับข้าวโพดบด และเปรียบเทียบความแตกต่างโดยวิธี Duncan's new multiple range test ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SAS (1998) โดยมีแบบหุนทางสถิติ (statistical model) คือ

$$Y_{ij} = \mu + T_i + E_{ij}$$

โดยที่ Y_{ij} คือ ค่าสังเกตจากทรีทเมนต์ที่ i ซ้ำที่ j

μ คือ ค่าเฉลี่ยรวม

T_i คือ อิทธิพลของทรีทเมนต์ (treatment effect) ที่ i โดย $i = 1, \dots, 4$

E_{ij} คือ ความคลาดเคลื่อนของการทดลอง

4. การวิเคราะห์ตัวอย่าง

1. วิเคราะห์การย่อยได้ของแป้ง ด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส และอะไมโลกลูโคซิเดส (Gibson *et al.*, 1993)
2. วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของข้าวโพดเอกซ์ทรูด (proximate analysis) ตามวิธีของ A.O.A.C. (1990)

การทดลองที่ 2

การศึกษาผลของกระบวนการเอกซ์ทรูดข้าวโพดต่อการใช้ประโยชน์ได้ของวัตถุดิบ พลังงาน และโปรตีนของอาหารในสุกรอนุบาล และพลังงานใช้ประโยชน์ได้ของข้าวโพดเอกซ์ทรูด

1. สัตว์ทดลอง

ใช้ลูกสุกรลูกผสม 3 สายพันธุ์ ($D \times LW \times LR$) เพศผู้ อายุ 6 สัปดาห์ จำนวน 20 ตัว น้ำหนักประมาณ 12-15 กิโลกรัม แบ่งเป็น 5 กลุ่มๆ ละ 4 ตัว กลุ่มลูกสุกรแต่ละตัวแยกเลี้ยงเดี่ยวในกรงเมตาบอลิซึม แล้วเลี้ยงด้วยอาหารทดลองเป็นเวลา 14 วัน โดย 7 วันแรกให้อาหารทดลองเพื่อปรับสภาพทางเดินอาหาร และให้อาหารทดลองที่ผสมสารบ่งชี้ (indicator) ต่อไปอีก 7 วัน เพื่อทำการเก็บมูลและปัสสาวะ รวมทั้งบันทึกข้อมูลของน้ำหนักอาหารที่ใช้และน้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น

2 อาหารทดลองและการให้อาหาร

ลูกสุกรแต่ละกลุ่มได้รับอาหารในปริมาณ 5.7 เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักตัว เพื่อให้ลูกสุกรใช้ประโยชน์จากโภชนาในอาหารได้ดีขึ้น และกระตุ้นการกินโดยการให้อาหารลูกสุกรวันละ 4 ครั้ง คือ เวลา 7.00 น. 10.00 น. 13.00 น. และ 16.00 น. ซึ่งน้ำหนักอาหารที่ให้และอาหารที่เหลือเพื่อคำนวณปริมาณอาหารที่กิน โดยมีสูตรอาหารทดลอง (สูตรควบคุม) ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2

สูตรที่ 1 สูตรควบคุม ใช้ปลายข้าวเป็นแหล่งพลังงานหลัก

สูตรที่ 2 สูตรควบคุม (80 เปอร์เซ็นต์) + ข้าวโพดบด (20 เปอร์เซ็นต์)

สูตรที่ 3 สูตรควบคุม (80 เปอร์เซ็นต์) + ข้าวโพดเอกซ์ทราที่ระดับอัตราการไหลของน้ำ 15 ลิตรต่อชั่วโมง (20 เปอร์เซ็นต์)

สูตรที่ 4 สูตรควบคุม (80 เปอร์เซ็นต์) + ข้าวโพดเอกซ์ทราที่ระดับอัตราการไหลของน้ำ 21 ลิตรต่อชั่วโมง (20 เปอร์เซ็นต์)

สูตรที่ 5 สูตรควบคุม (80 เปอร์เซ็นต์) + ข้าวโพดเอกซ์ทราที่ระดับอัตราการไหลของน้ำ 30 ลิตรต่อชั่วโมง (20 เปอร์เซ็นต์)

3. การเก็บตัวอย่างและการบันทึกผล

การเก็บตัวอย่างมูลและปัสสาวะโดยการผสมสารบ่งชี้ คือ โครมิกซ์ออกไซด์ ในสูตรอาหารทดลองที่ระดับความเข้มข้น 0.4 เปอร์เซ็นต์ ให้สัตว์กินตลอดระยะการเก็บตัวอย่าง โดยเก็บตัวอย่างมูลวันละ 2 ครั้ง เช้าและเย็น เริ่มสุมเก็บตั้งแต่มูลมีสีเขียวของโครมิกซ์ออกไซด์ แล้วนำตัวอย่างมูลไปเก็บไว้ในตู้เย็นแช่แข็ง หลังจากนั้นนำไปอบจนแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส แล้วนำมาบด ตัวอย่างที่บดแล้วเก็บใส่ภาชนะให้มิดชิดเพื่อการวิเคราะห์ต่อไป การเก็บตัวอย่างปัสสาวะจะเก็บวันละ 2 ครั้ง เช่นเดียวกับการเก็บตัวอย่างมูล โดยการเติมกรดซัลฟิวริกที่มีความเข้มข้น 6 N ลงในถุงพลาสติกที่รองรับปัสสาวะที่สัตว์ทดลองขับถ่ายในแต่ละวัน บันทึกน้ำหนักปัสสาวะในแต่ละครั้ง สุมเก็บตัวอย่างปัสสาวะ 10 เปอร์เซ็นต์ บรรจุขวดพลาสติกเพื่อนำมาวิเคราะห์และคำนวณค่าพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้และการใช้ประโยชน์ได้ของวัตถุดิบและโปรตีน

4. การวางแผนการทดลองและการวิเคราะห์ทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design : CRD) วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองโดยวิธี Proc GLM และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's new multiple range test ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SAS (1998)

5. การวิเคราะห์ตัวอย่าง

1. วิเคราะห์หาค่าประกอบทางเคมีของอาหารทดลอง คือ ความชื้น โปรตีน ไขมัน เถ้าละลาย และฟอสฟอรัส (proximate analysis) ตามวิธีของ A.O.A.C. (1990) วิเคราะห์ค่าพลังงานโดยใช้เครื่อง Bomb calorimeter (PARR 1261)

2. วิเคราะห์ปริมาณโครมิกซ์ออกไซด์ในอาหารและมูล โดยดัดแปลงตามวิธีของ Bolin *et al.* (1952)

3. วิเคราะห์หาปริมาณโปรตีน พลังงาน และโครมิกซ์ออกไซด์ ในอาหาร มูล และ ปัสสาวะ นำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์มาคำนวณหาค่าการย่อยได้ และค่าการคงอยู่ในร่างกาย ของวัตถุแห้ง พลังงานและโปรตีนในอาหารลูกสุกรอนุบาล พลังงานย่อยได้ (digestible energy, DE) และพลังงานใช้ประโยชน์ได้ (metabolizable energy, ME) ของข้าวโพดเอกซ์ทราด

ค่าการย่อยได้แบบปรากฏ (%)

$$= 100 - 100 \times \frac{(\% \text{ โครมิกซ์ออกไซด์ในอาหาร} \times \% \text{ โภชนะในมูล})}{(\% \text{ โครมิกซ์ออกไซด์ในมูล} \times \% \text{ โภชนะในอาหาร})}$$

ค่าการคงอยู่ในร่างกายแบบปรากฏ (%)

$$= 100 \times \frac{(\text{ปริมาณโภชนะที่กิน} - \text{ปริมาณโภชนะในมูล} - \text{ปริมาณโภชนะในปัสสาวะ})}{\text{ปริมาณโภชนะที่กิน}}$$

พลังงานย่อยได้ (DE) = พลังงานในอาหาร (GE) – พลังงานในมูล (FE)

พลังงานใช้ประโยชน์ได้ (ME) = พลังงานย่อยได้ (DE) – พลังงานในปัสสาวะ (UE)

GE = Gross Energy, FE = Fecal Energy, UE = Urinary Energy

การทดลองที่ 3

การศึกษาผลของการใช้ข้าวโพดเอกซ์ทราและรูปแบบของอาหาร ต่อสมรรถภาพการผลิตของสุกรอนุบาล

1. สัตว์ทดลอง

ใช้ลูกสุกรอนุบาลลูกผสม 3 สายพันธุ์ ($D \times LW \times LR$) อายุ 4 สัปดาห์ จำนวน 192 ตัว (เพศผู้ 96 ตัว และเพศเมีย 96 ตัว) แบ่งออกเป็น 4 กลุ่มๆ ละ 6 ซ้ำๆ ละ 8 ตัว โดยแบ่งเป็นเพศผู้ 4 ตัว และเพศเมีย 4 ตัว ลูกสุกรแต่ละกลุ่มได้รับอาหารทดลองโดยการสุม โดยได้รับน้ำและอาหารตลอดเวลา ทำการเลี้ยงลูกสุกรอายุ 4 จนถึง 8 สัปดาห์

2. อาหารทดลองและการให้อาหาร

อาหารทดลองแบ่งออกเป็น 4 สูตร อาหารทุกสูตรคำนวณให้มีโภชนะต่างๆ ตามความต้องการของลูกสุกรตามคำแนะนำของ NRC (1998) โดยมีสูตรอาหารดังนี้ (ตารางที่ 3)

สูตรที่ 1 อาหารผงที่ใช้ปลายข้าวเป็นแหล่งพลังงานหลัก

สูตรที่ 2 อาหารผงที่ใช้ข้าวโพดเป็นแหล่งพลังงานหลัก

สูตรที่ 3 อาหารผงที่ใช้ข้าวโพดเอกซ์ทราเป็นแหล่งพลังงานหลัก

สูตรที่ 4 อาหารอัดเม็ดที่ใช้ข้าวโพดเอกซ์ทราเป็นแหล่งพลังงานหลัก

ลูกสุกรได้รับน้ำและอาหารอย่างเต็มที่ตลอดระยะเวลาการทดลอง

ข้าวโพดเอกซ์ทราที่นำมาใช้ประกอบสูตรอาหารในการทดลองที่ 3 มีการผลิตโดยใช้อัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องเอกซ์ทราเดอร์ ที่ระดับ 21 ลิตรต่อชั่วโมง เนื่องจากผลจากการทดลองที่ 1 และ การทดลองที่ 2 พบว่าการผลิตข้าวโพดเอกซ์ทราที่มีอัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องเอกซ์ทราเดอร์ที่ 21 ลิตรต่อชั่วโมง มีความคุ้มค่าในด้านการการใช้ประโยชน์ได้ของแป้ง การย่อยได้และการใช้ประโยชน์ของสารอาหาร กระแสไฟฟ้าและต้นทุนที่ใช้ในการผลิต

3. การเก็บตัวอย่างและการบันทึกผล

ทำการเก็บข้อมูลในขั้นตอนของการผลิตอาหารได้แก่ กระแสไฟฟ้าที่ใช้ ระยะเวลาที่ใช้ในการผลิต ปริมาณอาหารที่ผลิตได้ เพื่อนำมาคำนวณกำลังการผลิต (กิโลกรัมต่อชั่วโมง) และสุ่มเก็บตัวอย่างอาหารเพื่อนำไปวิเคราะห์ปริมาณโภชนะ และการใช้ประโยชน์ได้ของแป้งในอาหารทดลอง ในด้านสมรรถภาพการผลิตของลูกสุกรอนุบาลทำการบันทึกน้ำหนักของลูกสุกรก่อนและหลังการทดลอง ปริมาณการกินอาหารทั้งหมด และอัตราการตาย นำมาคำนวณน้ำหนักเฉลี่ยที่เพิ่มขึ้นต่อวัน (average daily gain) ปริมาณอาหารที่กินเฉลี่ยต่อวัน (average daily feed intake) และประสิทธิภาพการใช้อาหารของลูกสุกร (feed conversion rate)

4. การวางแผนการทดลองและการวิเคราะห์ทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design : CRD) วิเคราะห์ข้อมูลต่างๆ ที่ได้จากการทดลองโดยวิธี Proc GLM และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยโดยวิธี Orthogonal contrasts ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SAS (1998)

5. การวิเคราะห์ตัวอย่าง

5.1. วิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีของอาหารทดลอง คือ ความชื้น โปรตีน ไขมัน เถ้า แคลเซียม และฟอสฟอรัส (proximate analysis) ตามวิธีของ A.O.A.C. (1990) วิเคราะห์ค่าพลังงานโดยใช้เครื่อง Bomb calorimeter (PARR 1261)

5.2. วิเคราะห์การย่อยได้ของแป้งด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส และอะไมโลกลูโคซิเดส (Gibson *et al.*, 1993)

สถานที่ทำการทดลอง

1. ทำการผลิตข้าวโพดเอกซ์ทรา และอาหารทดลอง ณ บริษัท ไบโอ – เจน ฟีดมิลล์ จำกัด อ. เมือง จ. ลำพูน
2. ศึกษาการใช้ประโยชน์ได้สารอาหารและสมรรถภาพการผลิตของลูกสุกรอนุบาล ณ ไบโอ – เจน ฟาร์ม อ. เมือง จ. ลำพูน
3. วิเคราะห์โภชนะต่างๆ ของอาหารทดลอง มูล และปัสสาวะ ณ ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์อาหารสัตว์ ภาควิชาสัตวบาล คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จ. นครปฐม
4. วิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี ฟิสิกส์ และโภชนะของข้าวโพดเอกซ์ทรา ณ โครงการจัดตั้งภาควิชาเทคโนโลยีกระบวนการทางเคมีและฟิสิกส์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน

ระยะเวลาการทดลอง

เริ่มต้นการทดลอง เดือนธันวาคม พ.ศ. 2548

สิ้นสุดการทดลอง เดือนมีนาคม พ.ศ. 2549

ตารางที่ 2 ส่วนประกอบของสูตรอาหารพื้นฐานที่ใช้ในการทดลองที่ 2

หมายเหตุ ¹ ยาพรีมิกซ์ 1 กิโลกรัม ประกอบด้วย: โคเลสติน (10%) 200 กรัม; ลินโคมัยซิน (82%) 60 กรัม; แอมม็อกซิซิลิน (50%) 40 กรัม และ ซิงออกไซด์ 400 กรัม

² วิตามิน และแร่ธาตุพรีมิกซ์ 1 กิโลกรัม ประกอบด้วย: วิตามินเอ 3.75 MIU; วิตามินดี3 0.75 MIU; วิตามินอี 10 กรัม; วิตามินเค3 0.75 กรัม; วิตามินบี1 0.50 กรัม; วิตามินบี2 2.00 กรัม; วิตามินบี6 1.50 กรัม; วิตามินบี12 10.00 มิลลิกรัม; ไนอาซิน 9.00 กรัม; แพนโททีนิก แอซิด 4.50 กรัม; โฟลิก แอซิด 0.25 กรัม; ไบโอติน 50.00 มิลลิกรัม; ธาตุเหล็ก 35.00 กรัม; ทองแดง 5.00 กรัม; แมงกานีส 20.00 กรัม; สังกะสี 40.00 กรัม; ไอโอดีน 0.50 กรัม และซีรีเนียม 0.10 กรัม

วัตถุดิบ	ปริมาณ (เปอร์เซ็นต์)
ปลายข้าว	40.55
ถั่วเหลืองไขมันเต็ม	30.00
หางนมผงชนิดหวาน	8.00
กากถั่วเหลือง (47% CP)	8.00
รำข้าวสาลี	6.65
ปลาป่น (60% CP)	3.26
โมโน – ไคแคลเซียมฟอสเฟต (P/21)	1.40
หินฟูน	1.14
ยาพรีมิกซ์ ¹	0.53
เกลือ	0.23
พรีมิกซ์ ²	0.20
กลีนาวนิลา	0.03
ดีแอล – เมทไทโอนีน	0.01
รวม	100.00
<u>ส่วนประกอบโภชนาจากการคำนวณ</u>	
โปรตีน	22.00
พลังงานใช้ประโยชน์ได้ (แคลอรีต่อกรัม)	3,395.49
ไขมัน	7.39
เยื่อใย	2.82
แคลเซียม	1.00
ฟอสฟอรัสรวม	0.70
ฟอสฟอรัสใช้ประโยชน์ได้	0.54
ไลซีน	1.31
เมทไทโอนีน	0.39
เมทไทโอนีน + ซีสทีน	0.70

ตารางที่ 3 ส่วนประกอบของสูตรอาหารที่ใช้ในการทดลองที่ 3

หมายเหตุ ¹ ยาพรีมิกซ์ 1 กิโลกรัม ประกอบด้วย: โคลิสติน (10%) 200 กรัม; ลินโคมัยซิน (82%) 60 กรัม; แอมม็อกซิซิลิน (50%) 40 กรัม และ ซิงออกไซด์ 400 กรัม

² วิตามิน และแร่ธาตุพรีมิกซ์ 1 กิโลกรัม ประกอบด้วย: วิตามินเอ 3.75 MIU; วิตามินดี3 0.75 MIU; วิตามินอี 10 กรัม; วิตามินเค3 0.75 กรัม; วิตามินบี1 0.50 กรัม; วิตามินบี2 2.00 กรัม; วิตามินบี6 1.50 กรัม; วิตามินบี12 10.00 มิลลิกรัม; ไนอาซิน 9.00 กรัม; แพนโททีนิก แอซิด 4.50 กรัม; โฟลิก แอซิด 0.25 กรัม; ไบโอดีน 50.00 มิลลิกรัม; ธาตุเหล็ก 35.00 กรัม; ทองแดง 5.00 กรัม; แมงกานีส 20.00 กรัม; สังกะสี 40.00 กรัม; ไอโอดีน 0.50 กรัม และซีรีเนียม 0.10 กรัม

วัตถุดิบ	ปริมาณ (เปอร์เซ็นต์)			
	สูตรที่ 1	สูตรที่ 2	สูตรที่ 3	สูตรที่ 4
	ปลายข้าว (ผง)	ข้าวโพด (ผง)	ข้าวโพด เอกซ์ทรา (ผง)	ข้าวโพด เอกซ์ทรา (อัดเม็ด)
ปลายข้าว	40.55	-	-	-
ข้าวโพด	-	41.05	-	-
ข้าวโพดเอกซ์ทรา	-	-	41.68	41.68
ถั่วเหลืองไขมันเต็ม	30.00	29.75	29.07	29.07
หางนมผงชนิดหวาน	8.00	8.00	8.00	8.00
กากถั่วเหลือง (47% CP)	8.00	8.00	8.00	8.00
รำข้าวสาลี	6.65	6.67	6.67	6.67
ปลาป่น (60% CP)	3.26	3.00	3.00	3.00
โมโน – ไคแคลเซียม	1.40	1.13	1.13	1.13
ฟอสเฟต (P/21)				
หินฟูล	1.14	1.37	1.37	1.37
ยาพรีมิกซ์ ¹	0.53	0.53	0.53	0.53
เกลือ	0.23	0.26	0.31	0.31
พรีมิกซ์ ²	0.20	0.20	0.20	0.20
กลีเซอริน	0.03	0.03	0.03	0.03
ดีแอล – เมทไทโอนีน	0.01	0.01	0.01	0.01
รวม	100.00	100.00	100.00	100.00
<u>ส่วนประกอบโภชนาการจากการคำนวณ</u>				
โปรตีน	22.00	22.00	22.00	22.00
พลังงานใช้ประโยชน์ได้ (แคลอรีต่อกรัม)	3,395.49	3,375.42	3,383.31	3,383.31
ไขมัน	7.39	8.81	8.29	8.29
เยื่อใย	2.82	3.54	3.52	3.52
แคลเซียม	1.00	1.00	1.00	1.00
ฟอสฟอรัสรวม	0.70	0.70	0.70	0.70
ฟอสฟอรัสใช้ประโยชน์ได้	0.54	0.48	0.48	0.48
ไลซีน	1.31	1.28	1.27	1.27
เมทไทโอนีน	0.39	0.35	0.35	0.35
เมทไทโอนีน + ซีสทีน	0.70	0.71	0.71	0.71

ผลและวิจารณ์การทดลอง

การทดลองที่ 1

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางโภชนาของข้าวโพดเอกซ์ทรา

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของข้าวโพดเอกซ์ทรา ที่มีอัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องเอกซ์ทราเตอร์ 3 ระดับ คือ 15 21 และ 30 ลิตรต่อชั่วโมงเปรียบเทียบกับข้าวโพดเมล็ด พบว่าการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องเอกซ์ทราเตอร์มีผลต่อองค์ประกอบทางเคมีของข้าวโพดเอกซ์ทร่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$) (ตารางที่ 4) เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องเอกซ์ทราเตอร์จาก 15 เป็น 21 และ 30 ลิตรต่อชั่วโมง มีผลทำให้ความชื้นของข้าวโพดเพิ่มขึ้นจาก 8.22 เป็น 8.90 และ 10.39 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ($P < 0.01$) โดยกระบวนการเอกซ์ทราชันจะส่งผลให้ความชื้นของข้าวโพดลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับความชื้นของข้าวโพดเมล็ดซึ่งมีค่าเท่ากับ 12.10 เปอร์เซ็นต์ ($P < 0.01$) แต่การเพิ่มอัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องเอกซ์ทราเตอร์จาก 15 เป็น 21 และ 30 ลิตรต่อชั่วโมงไม่ส่งผลต่อปริมาณโปรตีนในข้าวโพดเอกซ์ทรา ($P > 0.05$) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 7.92 7.93 8.04 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยปริมาณโปรตีนจะลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวโพดเมล็ดซึ่งมีค่าเท่ากับ 8.68 เปอร์เซ็นต์ ($P < 0.01$) ปริมาณไขมันรวมข้าวโพดเอกซ์ทราต่ำกว่าข้าวโพดเมล็ด (4.38 เปอร์เซ็นต์) ($P < 0.01$) ซึ่งการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำจะส่งผลต่อไขมันรวมของข้าวโพดเอกซ์ทรา ($P < 0.01$) โดยที่อัตราการไหลของน้ำที่ระดับ 21 ลิตรต่อชั่วโมง (2.93 เปอร์เซ็นต์) มีปริมาณไขมันรวมต่ำกว่าที่อัตราการไหลของน้ำที่ระดับ 30 ลิตรต่อชั่วโมง (3.20 เปอร์เซ็นต์) ($P < 0.01$) แต่ปริมาณไขมันรวมที่อัตราการไหลของน้ำที่ระดับ 15 ลิตรต่อชั่วโมง กับ 21 ลิตรต่อชั่วโมง และ 15 ลิตรต่อชั่วโมง กับ 30 ลิตรต่อชั่วโมง แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) การเพิ่มอัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องเอกซ์ทราเตอร์จาก 15 เป็น 21 และ 30 ลิตรต่อชั่วโมงจะไม่ส่งผลต่อปริมาณเยื่อใยของข้าวโพดเอกซ์ทราซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.38 1.33 และ 1.40 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวโพดเมล็ดซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.32 เปอร์เซ็นต์ ($P > 0.05$) สำหรับปริมาณเถ้าของข้าวโพดเอกซ์ทรา มีค่าเท่ากับ 1.49 1.51 และ 1.54 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ โดยที่อัตราการไหลของน้ำระดับ 30 ลิตรต่อชั่วโมงมีปริมาณเถ้าสูงกว่าที่อัตราการไหลของน้ำที่ระดับ 15 และ 21 ลิตรต่อชั่วโมง ($P < 0.01$) โดยปริมาณเถ้าของข้าวโพดเอกซ์ทราจะลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณเถ้าของข้าวโพดเมล็ดซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.61 เปอร์เซ็นต์ ($P < 0.01$) และจากข้อมูลการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบต่างๆ ทางเคมีของข้าวโพดเอกซ์ทราเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำจาก 15 เป็น 21 และ 30 ลิตรต่อชั่วโมง ส่งผลทำให้ค่าไนโตรเจนฟรีเอกซ์แทรกของข้าวโพด

เอกซ์ทรูดลดลง โดยค่าในโตรเจนฟรีเอกซ์แทรกมีค่าเท่ากับ 86.20 86.30 และ 85.82 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แต่พบว่าค่าในโตรเจนฟรีเอกซ์แทรกข้าวโพดเอกซ์ทรูดสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวโพดเมล็ด (84.01 เปอร์เซ็นต์) ($P < 0.01$) จากการทดลองนี้พบว่าข้าวโพดเมล็ดเมื่อนำไปผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูดจะส่งผลให้องค์ประกอบทางเคมีของข้าวโพดเอกซ์ทรูดซึ่งได้แก่ ความชื้น โปรตีน ไขมัน และเถ้า มีค่าลดลง ($P < 0.01$)

ในระหว่างกระบวนการเอกซ์ทรูดขณะที่อาหารเคลื่อนที่ผ่านกระบอกบาร์เรล แรงเสียดสีที่เกิดขึ้นระหว่างวัตถุดิบ สกรู และผนังบาร์เรลจะทำให้เกิดความร้อน แรงดัน และแรงเฉือน ความร้อนจะทำให้น้ำที่อยู่ภายในเกิดการระเหยออก และส่งผลให้ความชื้นของอาหารที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูดต่ำกว่าความชื้นของอาหารที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูด (Alonso, *et al.*, 2001) อุณหภูมิที่สูงขึ้นยังส่งผลให้โปรตีนเสียสภาพ และสูญเสียการละลายน้ำ ทำให้การใช้ประโยชน์ได้ของโปรตีนลดลง แต่กระบวนการเอกซ์ทรูดสามารถทำลายพันธะไดซัลไฟด์ (disulfide bonds) และเกิดการจัดเรียงโครงสร้างใหม่ส่งผลให้เอนไซม์สามารถย่อยได้สูงขึ้น (Camire, 2000) อย่างไรก็ตามในสภาพกระบวนการผลิตที่อุณหภูมิสูงขึ้นแต่มีปริมาณความชื้นต่ำ จะส่งผลให้เกิดกระบวนการ Millard reaction โดยแรงเฉือนที่เกิดขึ้นระหว่างวัตถุดิบ สกรู และผนังบาร์เรล จะทำให้น้ำตาลรีดิวซิง (reducing sugars) เกิดการทำปฏิกิริยากับกรดอะมิโนไลซีนและกรดอะมิโนตัวอื่น ทำให้คุณภาพของโปรตีนต่ำลง (Camire, 2000; 2001) นอกจากนี้ความดันและแรงเฉือนที่สูงขึ้นจะส่งผลทำให้น้ำเซลล์ของพืชแตกออก โมเลกุลของไขมันจะเคลื่อนที่ออกมาเกาะอยู่บริเวณผนังบาร์เรล หรือเกิดการสูญเสียไขมันในรูปของกรดไขมันอิสระ และไขมันบางส่วนเกิดการรวมตัวกับโปรตีน (Camire, 2000; 2001) หรือโมเลกุลของอะไมโลส (Camire, 2000; 2001; Svihus *et al.*, 2005) ปริมาณไขมันที่วิเคราะห์ได้โดยวิธีเอเทอร์เอกซ์แทรกมีค่าต่ำลง แต่ปริมาณไขมันรวมของข้าวโพดเอกซ์ทรูดอาจจะไม่ได้ลดปริมาณลงมากนัก ซึ่งพันธะของกรดไขมันที่รวมตัวกับอะไมโลสหรือโปรตีนจะสามารถทำลายโดยการย่อยด้วยกรดหรือเอนไซม์อะไมเลส ก่อนที่จะนำไปสกัดไขมัน (Camire, 2001) โดยเอนไซม์ในระบบทางเดินอาหารของสัตว์สามารถย่อยสลายพันธะของกรดไขมันที่รวมตัวกับอะไมโลสได้อย่างช้าๆ (Gelders *et al.*, 2005) นอกจากนี้ยังพบว่ากระบวนการเอกซ์ทรูดจะทำให้โมเลกุลของเพคติน (pectin) และเฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) มีขนาดเล็กลงซึ่งจะช่วยให้เยื่อใยที่ละลายน้ำเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะที่กระบวนการเอกซ์ทรูดที่ความชื้น 30 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส แต่พบว่ากระบวนการเอกซ์ทรูดจะไม่ส่งผลต่อปริมาณเยื่อใยรวมของวัตถุดิบเช่น ข้าวโพด ข้าว รำสาลี เป็นต้น (Camire, 2001) ในการทดลองครั้งนี้จะเห็นได้ว่ากระบวนการเอกซ์ทรูดจะส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางโภชนาของข้าวโพดโดยทำให้ข้าวโพดเอกซ์ทรูดมีความชื้นลดลง ซึ่งจะส่งผลต่อ ปริมาณโปรตีน ไขมัน เยื่อใย

เถา และไนโตรเจนฟรีเอ็กซ์แทรค นอกจากนี้กระบวนการเอกซ์ทรูชันยังส่งผลให้เกิดการเสียดสภาพของโปรตีน และการเปลี่ยนโครงสร้างของโมเลกุลที่เป็นองค์ประกอบของแป้ง ซึ่งการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางโภชนาของข้าวโพดเอกซ์ทรูดจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิต

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของโภชนาต่างๆ ของข้าวโพดเอกซ์ทรูด (ร้อยละของวัตถุดิบแห้ง)

(%) โภชนะ	ข้าวโพด	ข้าวโพดเอกซ์ทราด			Pooled SEM
		อัตราการไหลของน้ำ (ลิตร/ชั่วโมง)			
		15	21	30	
ความชื้น	12.10 ^a	8.22 ^d	8.90 ^c	10.39 ^b	±0.03
โปรตีน	8.68 ^a	7.92 ^b	7.93 ^b	8.04 ^b	±0.02
ไขมัน	4.38 ^a	3.01 ^{bc}	2.93 ^c	3.20 ^b	±0.03
เยื่อใย	1.32	1.38	1.33	1.40	±0.01
เถ้า	1.61 ^a	1.49 ^c	1.51 ^c	1.54 ^b	±0.01
NFE	84.01 ^c	86.20 ^a	86.30 ^a	85.82 ^b	±0.04

หมายเหตุ ^{a, b, c, d} อักษรที่แตกต่างกันในแนวนอนแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$)

ผลของอัตราการไหลของน้ำในระหว่างกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อประสิทธิภาพการผลิตข้าวโพดเอกซ์ทรูด

ผลของการศึกษาอัตราการไหลของน้ำ 3 ระดับ คือ 15 21 และ 30 ลิตรต่อชั่วโมง ในระหว่างกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อประสิทธิภาพของข้าวโพด พบว่าเมื่ออัตราการไหลของน้ำเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อุณหภูมิบาร์เรลในการผลิตข้าวโพดเอกซ์ทรูดที่มีอัตราการไหลของน้ำทั้ง 3 ระดับแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) โดยอุณหภูมิบาร์เรลที่ระดับน้ำทั้ง 3 ระดับ มีค่าเท่ากับ 119.1 107.73 และ 112.0 องศาเซลเซียส ตามลำดับ (ตารางที่ 5) แต่การเพิ่มอัตราการไหลของน้ำที่ระดับ 15 เป็น 21 และ 30 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่าส่งผลให้อุณหภูมิของข้าวโพดเอกซ์ทรูดแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) โดยอุณหภูมิของข้าวโพดเอกซ์ทรูดที่ระดับน้ำ 15 21 และ 30 ลิตรต่อชั่วโมง มีค่าเท่ากับ 85.00 84.33 และ 87.67 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องเอกซ์ทรูดเดอรันน้ำจะทำหน้าที่ในการหล่อลื่น ลดแรงเสียดทาน ทำให้

วัตถุดิบเคลื่อนที่เร็วขึ้นอุณหภูมิบาร์เรลจึงลดลง (Huber, 2000) และส่งผลให้อุณหภูมิของข้าวโพดและการแตกตัวของเม็ดแป้งที่มีการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำลดลงด้วย ในการทดลองครั้งนี้พบว่าเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องเอกซ์ทรูดเดอร์ที่ระดับ 30 ลิตรต่อชั่วโมง อุณหภูมิบาร์เรลจะเพิ่มสูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับอุณหภูมิบาร์เรลที่อัตราการไหลของน้ำที่ระดับ 21 ลิตรต่อชั่วโมง เนื่องจากในการทดลองครั้งนี้ได้ทำการผลิตข้าวโพดเอกซ์ทรูดที่มีอัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องเอกซ์ทรูดเดอร์ที่ระดับ 21 15 และ 30 ลิตรต่อชั่วโมง อย่างต่อเนื่องโดยไม่มีการหยุดพักการเดินเครื่องเอกซ์ทรูดเดอร์ ดังนั้นจึงเกิดความร้อนสะสมขึ้นในกระบวนการผลิตข้าวโพดเอกซ์ทรูดและส่งผลให้อุณหภูมิบาร์เรลที่อัตราการไหลของน้ำ 30 ลิตรต่อชั่วโมง เพิ่มสูงขึ้น การศึกษาปริมาณความชื้นของข้าวโพดเอกซ์ทรูด พบว่าเมื่ออัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องเอกซ์ทรูดเดอร์เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ความชื้นของข้าวโพดเอกซ์ทรูดเพิ่มสูงขึ้น ($P < 0.01$) โดยเมื่ออัตราการไหลของน้ำเพิ่มจาก 15 เป็น 21 และ 30 ลิตรต่อชั่วโมง ความชื้นของข้าวโพดเอกซ์ทรูดจะเพิ่มขึ้นจาก 8.80 เป็น 9.73 และ 11.60 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และเมื่อทิ้งไว้ให้เย็นเป็นเวลา 12 ชั่วโมง ความชื้นของข้าวโพดจะลดลงเหลือ 8.22 8.90 และ 10.39 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ($P < 0.01$) ซึ่งจะเห็นว่าในกระบวนการผลิตครั้งนี้อัตราการไหลของน้ำที่เพิ่มขึ้นไม่ได้ช่วยเพิ่มอุณหภูมิความร้อนให้สูงขึ้น แต่มีผลในการเพิ่มความชื้น นอกจากนี้กระบวนการเอกซ์ทรูดยังทำให้เกิดการสูญเสียความชื้นเริ่มต้นในข้าวโพด (ตารางที่ 4 และ 5) ซึ่งแรงเฉือนและการเสียดสีของข้าวโพดทำให้อุณหภูมิภายในกระบอบบาร์เรลสูงขึ้น ส่งผลให้เกิดการระเหยของน้ำ จึงทำให้ความชื้นของข้าวโพดหลังจากผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูดชั้นลดลง (Alonso *et al.*, 2001)

กระแสไฟฟ้ารวมที่ใช้ในการผลิตข้าวโพดเอกซ์ทรูดที่อัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 15 21 และ 30 ลิตรต่อชั่วโมง จะประกอบด้วยกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเอกซ์ทรูดชั้นและกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการบดละเอียด จากการทดลองพบว่า ค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในกระบวนการเอกซ์ทรูดชั้นและกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการบดละเอียดที่อัตราการไหลของน้ำทั้ง 3 ระดับ แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($P < 0.01$) (ตารางที่ 6) โดยกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเอกซ์ทรูดชั้นที่อัตราการไหลของน้ำ 15 ลิตรต่อชั่วโมง มีค่าสูงที่สุด (78.84 กิโลวัตต์ต่อตัน) เมื่อเทียบกับกระแสไฟฟ้าที่ใช้ที่มีอัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องที่ 21 (74.31 กิโลวัตต์ต่อตัน) และ 30 ลิตรต่อชั่วโมง (53.34 กิโลวัตต์ต่อตัน) กระแสไฟฟ้าในการบดละเอียดจะเพิ่มขึ้นจาก 2 กิโลวัตต์ต่อตันที่อัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่อง 15 ลิตรต่อชั่วโมง เป็น 2.2 และ 3.36 กิโลวัตต์ต่อตัน เมื่ออัตราการไหลของน้ำเพิ่มสูงขึ้นเป็น 21 และ 30 ลิตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ ($P < 0.01$) เนื่องจากเมื่ออัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องเอกซ์ทรูดเดอร์เพิ่มขึ้นจะทำให้เนื้อของข้าวโพดเอกซ์ทรูดเหนียวและแข็ง จึงส่งผลให้ค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการบดละเอียดสูงมากขึ้น (ณัฐชนก และคณะ, 2547) แต่พบว่าเมื่ออัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่อง

เพิ่มสูงขึ้นกระแสไฟฟ้ารวมที่ใช้จะมีค่าลดลง ($P < 0.01$) โดยกระแสไฟฟ้ารวมที่ใช้ในการผลิตข้าวโพดเอกซ์ทราจะมีค่าเท่ากับ 80.84 76.53 และ 56.70 กิโลวัตต์ต่อตัน ตามลำดับ ซึ่งกระแสไฟฟ้ารวมที่ใช้ในการผลิตลดลงส่งผลให้ต้นทุนค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตมีค่าลดลง ($P < 0.01$) โดยต้นทุนค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตที่อัตราการไหลของน้ำ 15 ลิตรต่อชั่วโมง มีค่าเท่ากับ 158.61 บาทต่อตัน และจะลดลงเหลือ 150.16 และ 111.24 บาทต่อตัน ตามลำดับ เมื่ออัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องเพิ่มขึ้นเป็น 21 และ 30 ลิตรต่อชั่วโมง ($P < 0.01$) เนื่องจากน้ำที่เพิ่มสูงขึ้นจะทำให้เป็นสื่อทำความร้อน (Huber, 2000) ตัวหล่อลื่น และช่วยลดภาระของมอเตอร์ในการหมุนสกรูภายในเครื่อง (Skoch *et al.*, 1983) ทำให้กำลังการผลิตเพิ่มสูงขึ้นและพลังงานที่ใช้ต่ำลงส่งผลให้ต้นทุนการผลิตลดลง (Huber, 2000) ซึ่งสอดคล้องกับงานทดลองของณัฐชนก และคณะ (2547) ที่รายงานว่า เมื่ออัตราการไหลของน้ำในกระบวนการผลิตข้าวโพดเอกซ์ทราเพิ่มขึ้นจาก 16 ลิตรต่อชั่วโมง เป็น 19 และ 22 ลิตรต่อชั่วโมง จะส่งผลให้กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตข้าวโพดเอกซ์ทราลดลงจาก 74.60 เป็น 72.90 และ 62.40 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการบดละเอียดจะเพิ่มขึ้นจาก 1.1 เป็น 2.2 และ 3.6 กิโลวัตต์ต่อชั่วโมง แต่กระแสไฟฟ้าและต้นทุนค่ากระแสไฟฟ้าโดยรวมที่ใช้ในการผลิตจะลดลง ($P < 0.01$)

กำลังการผลิตข้าวโพดเอกซ์ทราจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องเอกซ์ทราเดอร์เพิ่มขึ้นโดยอัตราการไหลของน้ำที่ระดับ 30 ลิตรต่อชั่วโมง มีกำลังการผลิตสูงที่สุดเท่ากับ 547.6 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังการผลิต 440.90 และ 411.60 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ที่อัตราการไหลของน้ำที่ระดับ 21 และ 15 ลิตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ ($P < 0.01$) ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำสูงขึ้นจะทำให้กำลังการผลิตเพิ่มสูงขึ้น เพราะน้ำทำหน้าที่เป็นตัวหล่อลื่นและลดแรงเสียดทานทำให้ข้าวโพดเอกซ์ทราเคลื่อนที่เร็วขึ้น (Skoch *et al.*, 1983) จากการทดลองนี้พบว่าเมื่ออัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องเอกซ์ทราเดอร์สูงขึ้น กำลังการผลิตต่อชั่วโมงเพิ่มขึ้น ข้าวโพดเอกซ์ทราที่ได้จะมีลักษณะแข็งและเหนียว ส่งผลให้การผลิตต่อชั่วโมงในการบดละเอียดลดลง โดยกำลังการผลิตที่ใช้ในการบดละเอียดของข้าวโพดเอกซ์ทราที่อัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 15 21 และ 30 ลิตรต่อชั่วโมงลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$) โดยมีค่าเท่ากับ 2,980 2,898 และ 2,539 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของณัฐชนก และคณะ (2547) ที่รายงานว่า เมื่ออัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องเอกซ์ทราเดอร์เพิ่มขึ้นจาก 16 เป็น 19 และ 22 ลิตรต่อชั่วโมง กำลังการผลิตในการบดละเอียดของข้าวโพดเอกซ์ทราจะลดลงจาก 2,256 เป็น 1,350 และ 1,433 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับ ($P < 0.01$)

ผลการวิเคราะห์ความหนาแน่นและการย่อยได้ของแป้งของข้าวโพดเอกซ์ทรูด

ผลการศึกษาค่าความหนาแน่นของข้าวโพดเอกซ์ทรูดที่มีอัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องที่ระดับ 15 21 และ 30 ลิตรต่อชั่วโมง เปรียบเทียบกับข้าวโพดบด พบว่าข้าวโพดบดจะมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 701.33 กรัมต่อลิตร ซึ่งสูงกว่าความหนาแน่นของข้าวโพดเอกซ์ทรูดที่มีค่าอยู่ในช่วง 508 – 578 กรัมต่อลิตร ($P < 0.01$) (ตารางที่ 6) เมื่ออัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องเอกซ์ทรูดเดอร์เพิ่มขึ้นที่ระดับ 21 และ 30 ลิตรต่อชั่วโมง ความหนาแน่นของข้าวโพดเอกซ์ทรูดจะเพิ่มขึ้น โดยมีค่าเท่ากับ 536.50 และ 577.73 กรัมต่อลิตร เมื่อเปรียบเทียบกับค่าความหนาแน่นของข้าวโพดเอกซ์ทรูดที่อัตราการไหลของน้ำเท่ากับ 15 ลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งมีค่าความหนาแน่นเท่ากับ 507.93 กรัมต่อลิตร ($P < 0.01$) ในกระบวนการผลิตข้าวโพดเอกซ์ทรูด ความร้อนที่เกิดจากการเสียดสีของผนังบาร์เรลและพื้นผิวสกรู รวมทั้งแรงดันที่เกิดขึ้นในระดับสูงจะส่งผลให้แป้งเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง เมื่อข้าวโพดถูกอัดผ่านจานไค แรงดันที่แตกต่างระหว่างแรงดันของอากาศภายในเครื่องเอกซ์ทรูดที่สูงและแรงดันของอากาศภายนอกที่ต่ำ ส่งผลให้อากาศภายนอกแทรกเข้าไปในเม็ดแป้งทำให้เกิดการพองตัว (Huber, 2000) ทำให้ข้าวโพดเอกซ์ทรูดเกิดการพองตัว ความหนาแน่นจึงลดลง (Yusuf *et al.*, 1996; Wai and Jinchau, 2003) แต่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องเอกซ์ทรูดเดอร์น้ำจะทำหน้าที่เป็นตัวหล่อลื่นและลดแรงเสียดทานซึ่งส่งผลให้ความดันภายในเครื่องเอกซ์ทรูดลดลง (Huber, 2000) เมื่อข้าวโพดเอกซ์ทรูดถูกอัดผ่านจานไคออกมาความต่างระหว่างความดันของอากาศภายในและภายนอกลดลง อากาศภายนอกจึงแทรกตัวเข้าไปในเม็ดแป้งน้อยลง การพองตัวจึงลดลงส่งผลให้ความหนาแน่นของข้าวโพดเอกซ์ทรูดเพิ่มขึ้น

ผลการศึกษาอัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องเอกซ์ทรูดเดอร์ต่อค่าการย่อยได้ของแป้งโดยใช้เอนไซม์ แอลฟา-อะไมเลส (α -amylase) และอะไมโล-กลูโคซิเดส (amylase – glucosidase) พบว่าข้าวโพดเมื่อผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูดชันจะทำให้ค่าการย่อยได้ของแป้งเพิ่มสูงขึ้น ($P < 0.01$) โดยข้าวโพดจะมีค่าการย่อยได้ของแป้ง (8.16 เปอร์เซ็นต์) ต่ำกว่าข้าวโพดเอกซ์ทรูดที่มีอัตราการไหลของน้ำทั้ง 3 ระดับ ($P < 0.01$) ซึ่งค่าการย่อยได้ของแป้งข้าวโพดเกิดจากในกระบวนการบด ข้าวโพดจะถูกตีให้ละเอียดผ่านตะแกรงออกมา ส่งผลให้เม็ดแป้งแตกออกและมีพื้นที่ผิวมากขึ้นทำให้สามารถแป้งสามารถถูกย่อยด้วยเอนไซม์เพิ่มสูงขึ้น (วิไล, 2545) เมื่ออัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องเอกซ์ทรูดเดอร์เพิ่มสูงขึ้นจาก 15 เป็น 21 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่าค่าการย่อยได้ของแป้งมีค่าเท่ากับ 36.50 และ 35.90 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) แต่เมื่อเพิ่มอัตราการไหลของน้ำเป็น 30 ลิตรต่อชั่วโมง ค่าการย่อยได้ของแป้งลดลงเหลือ 24.30 เปอร์เซ็นต์ ($P < 0.01$) ทั้งนี้เนื่องจากแรงเฉือนที่เพิ่มสูงขึ้นในระหว่างกระบวนการเอกซ์ทรูดชัน จะทำให้เม็ดแป้ง

ในข้าวโพดเกิดการแตกออก โมเลกุลของอะไมโลสจะเคลื่อนที่ออกมาจนเม็ดแป้ง ทำให้แป้งเปลี่ยนโครงสร้างและไม่กลับคืนสู่สภาพเดิม (Forte, 2004) ส่งผลให้เอนไซม์สามารถย่อยแป้งได้เพิ่มสูงขึ้น (Van der Poel *et al.*, 1989, 1990) ซึ่งสอดคล้องกับการรายงานของ Van der Poel *et al.* (1990) ที่รายงานว่า ข้าวโพดที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันโดยใช้เครื่องเกลียวคู่ที่มีความขึ้น 18 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิ 160 องศาเซลเซียส จะช่วยเพิ่มการใช้ประโยชน์ได้ของแป้ง 20 – 90 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามกระบวนการเอกซ์ทรูชันที่มีความขึ้นต่ำจะเพิ่มเปอร์เซ็นต์การย่อยได้ของแป้งให้สูงขึ้น (Hongtrakul *et al.*, 1998) แต่เมื่อเพิ่มปริมาณน้ำเข้าไปในกระบวนการเอกซ์ทรูชันจะส่งผลให้การย่อยได้ของแป้งลดลง เนื่องจากเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำให้สูงขึ้น น้ำจะเป็นตัวหล่อลื่นและลดแรงเสียดทานของแป้ง (Huber, 2000; Skoch *et al.*, 1983) ทำให้โครงสร้างของแป้งถูกทำให้แตกน้อยลง จึงส่งผลให้ค่าการย่อยได้ของแป้งลดลง (Skoch *et al.*, 1983)

ในการทดลองครั้งนี้พบว่า กระบวนการเอกซ์ทรูชันมีผลทำให้ปริมาณโภชนะต่างๆ ของข้าวโพดเปลี่ยนแปลงไป โดยพบว่าความชื้น โปรตีน ไขมัน และเถ้าของข้าวโพดที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันลดลง แต่กระบวนการเอกซ์ทรูชันจะไม่ส่งผลต่อปริมาณเยื่อใย ซึ่งการเปลี่ยนแปลงปริมาณโภชนะต่างๆ ของข้าวโพดที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันส่งผลให้ในโตรเจนฟรีเอกซ์แทรกเพิ่มสูงขึ้น นอกจากนี้กระบวนการเอกซ์ทรูชันยังส่งผลให้ข้าวโพดมีความหนาแน่นลดลง และช่วยเพิ่มการย่อยได้ของแป้งโดยใช้เอนไซม์ให้สูงขึ้น ซึ่งการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของโภชนะ ความหนาแน่น และการย่อยได้ของแป้งของข้าวโพดเอกซ์ทรูดจะมากหรือน้อยขึ้นอยู่กับกระบวนการและขั้นตอนในการผลิตข้าวโพดเอกซ์ทรูด

ตารางที่ 5 ผลของอัตราการไหลของน้ำในระหว่างกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อประสิทธิภาพการผลิตของข้าวโพดเอกซ์ทรูด

	อัตราการไหลของน้ำ ลิตร/ชั่วโมง			
	15	21	30	Pooled SEM
อุณหภูมิ (°C)				
อุณหภูมิบาร์เรล	119.10 ^A	107.73 ^B	112.00 ^{AB}	±1.24
อุณหภูมิข้าวโพดเอกซ์ทรูด	85.00	84.33	87.67	±1.81
ความชื้น (%)				
ความชื้นออกจากเครื่อง	8.80 ^c	9.73 ^b	11.60 ^a	±0.07
ความชื้นสุดท้าย	8.22 ^c	8.90 ^b	10.39 ^a	±0.04
กระแสไฟฟ้า (กิโลวัตต์/ตัน)				
การเอกซ์ทรูด	78.84 ^a	74.31 ^b	53.34 ^c	±0.22
การบดละเอียด	2.00 ^c	2.22 ^b	3.36 ^a	±0.03
กระแสไฟฟ้ารวม	80.84 ^a	76.53 ^b	56.70 ^c	±0.22
ค่ากระแสไฟฟ้ารวม (บาท/ตัน)	158.61 ^a	150.16 ^b	111.24 ^c	±0.44
อัตราการผลิต (กิโลกรัม/ชั่วโมง)				
การเอกซ์ทรูด	411.60 ^c	440.90 ^b	547.60 ^a	±0.01
การบด	2,980 ^a	2,898 ^b	2,539 ^c	±0.01

หมายเหตุ ^{A, B} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวนอนแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05)

^{a, b, c} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวนอนแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ (P<0.01)

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นและการย่อยได้ของแป้ง

	ข้าวโพด บด	ข้าวโพดเอกซ์ทราด			Pooled SEM
		อัตราการไหลของน้ำ (ลิตร/ชั่วโมง)			
		15	21	30	
ความหนาแน่น (กรัม/ลิตร)	701.33 ^a	507.93 ^d	536.53 ^c	577.73 ^b	± 3.39
การย่อยได้ของแป้ง (%)	8.16 ^c	36.60 ^a	35.90 ^a	24.30 ^b	± 0.01

หมายเหตุ ^{a, b, c, d} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวนอนแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$)

การทดลองที่ 2

องค์ประกอบทางโภชนาของอาหารทดลอง

ผลการวิเคราะห์ทางเคมีขององค์ประกอบทางโภชนาต่างๆ ในอาหารทดลองของการทดลองที่ 2 พบว่าสูตรอาหารควบคุมที่ใช้ปลายข้าวเป็นแหล่งพลังงานหลัก มีปริมาณโภชนาในอาหารสูงกว่าสูตรอาหารที่ใช้ข้าวโพดและข้าวโพดเอกซ์ทรู๊ดเป็นแหล่งพลังงานหลัก เนื่องจากในการทดลองครั้งนี้จะใช้สูตรอาหารควบคุม 80 เปอร์เซ็นต์ และอีก 20 เปอร์เซ็นต์ เป็นข้าวโพดและข้าวโพดเอกซ์ทรู๊ดที่ผลิตจากระดับน้ำทั้ง 3 ระดับ ดังนั้นค่าโภชนาที่คำนวณได้จึงต่ำกว่าโภชนาในสูตรอาหารควบคุม (ตารางที่ 7)

ตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของโภชนาต่างๆ ของอาหารในการทดลองที่ 2 (ร้อยละของวัตถุดิบแห้ง)

(%) โภชนา	อาหารทดลอง				
	สูตร ปลายข้าว	สูตร ข้าวโพด	สูตรข้าวโพด เอกซ์ทรู๊ด ¹	สูตรข้าวโพด เอกซ์ทรู๊ด ²	สูตรข้าวโพด เอกซ์ทรู๊ด ³
ความชื้น	9.67	9.72	9.84	9.77	9.87
โปรตีน	24.35	20.66	20.84	20.80	21.15
ไขมัน	8.08	7.33	7.21	7.67	7.08
เยื่อใย	2.79	2.51	2.49	2.57	2.57
เถ้า	7.60	6.58	6.51	6.78	6.70
แคลเซียม	1.07	0.94	0.93	0.95	0.92
ฟอสฟอรัส	0.84	0.73	0.75	0.73	0.74
พลังงานรวม					
แคลอรี/กรัม	4343.61	4344.47	4336.15	4304.26	4283.56

หมายเหตุ ¹ อัตราการไหลของน้ำในกระบวนการเอกซ์ทรู๊ดขึ้น 15 ลิตรต่อชั่วโมง

² อัตราการไหลของน้ำในกระบวนการเอกซ์ทรู๊ดขึ้น 21 ลิตรต่อชั่วโมง

³ อัตราการไหลของน้ำในกระบวนการเอกซ์ทรู๊ดขึ้น 30 ลิตรต่อชั่วโมง

ผลของการย่อยได้และการคงอยู่ในร่างกายของวัตถุแห้ง พลังงาน และโปรตีนของอาหารทดลอง

ผลของการใช้โพดเอกซ์ทรูคที่มีอัตราการไหลของน้ำผ่านเข้าเครื่องเอกซ์ทรูคเดอร์ทั้ง 3 ระดับ คือ 15 21 และ 30 ลิตรต่อชั่วโมง เปรียบเทียบกับปลายข้าวและข้าวโพดในอาหารลูกสุกรอนุบาล พบว่าค่าการย่อยได้และการคงอยู่ในร่างกายของวัตถุแห้ง พลังงาน และโปรตีนของอาหารทดลองทั้ง 5 สูตร แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) (ตารางที่ 8) ค่าการย่อยได้ของวัตถุแห้งของสูตรอาหารที่ใช้ปลายข้าว ข้าวโพด และข้าวโพดเอกซ์ทรูคที่มีอัตราการไหลของน้ำทั้ง 3 ระดับมีค่าเท่ากับ 91.26 90.89 91.04 91.21 และ 90.85 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และค่าการคงอยู่ในร่างกายของวัตถุแห้งมีค่าเท่ากับ 79.48 81.15 80.58 81.16 และ 81.99 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$)

ผลการศึกษาค่าการย่อยได้และการใช้ประโยชน์ได้ของพลังงาน พบว่าค่าการย่อยได้และการใช้ประโยชน์ได้ของพลังงานของสูตรอาหารทั้ง 5 สูตร แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) ซึ่งค่าการย่อยได้ของสูตรอาหารที่ใช้ปลายข้าว ข้าวโพด และ ข้าวโพดเอกซ์ทรูคที่มีอัตราการไหลของน้ำ 15 21 และ 30 ลิตรต่อชั่วโมง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 84.85 85.26 84.83 85.30 และ 86.14 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และค่าการคงอยู่ในร่างกายของพลังงานค่าเท่ากับ 81.69 82.90 82.59 82.65 และ 83.53 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ตารางที่ 8)

ผลการศึกษาการใช้ข้าวโพดเอกซ์ทรูคที่มีอัตราการไหลของน้ำทั้ง 3 ระดับ เปรียบเทียบกับปลายข้าวและข้าวโพด พบว่าค่าการย่อยได้และการคงอยู่ในร่างกายของโปรตีนของสูตรอาหารที่ใช้ปลายข้าว ข้าวโพด และข้าวโพดเอกซ์ทรูคที่มีอัตราการไหลของน้ำทั้ง 3 ระดับ แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) (ตารางที่ 8) โดยค่าการย่อยได้ของโปรตีนของสูตรอาหารทดลองทั้ง 5 สูตรมีค่าเท่ากับ 85.61 84.09 83.74 84.07 และ 85.15 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และค่าการคงอยู่ในร่างกายของโปรตีนมีค่าเท่ากับ 60.64 56.57 58.18 58.05 และ 60.27 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

ในการทดลองครั้งนี้พบว่ากระบวนการเอกซ์ทรูชัน ไม่ได้ช่วยปรับปรุงค่าการย่อยได้และการคงอยู่ในร่างกายของวัตถุแห้ง พลังงาน และโปรตีน แม้ว่ากระบวนการเอกซ์ทรูชันของข้าวโพดจะทำให้เม็ดแป้งในข้าวโพดเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างทำให้เอนไซม์ย่อยแป้งได้เพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการรายงานของ Van der Poel *et al.* (1989, 1990) ที่รายงานว่าอาหารลูกสุกรอนุบาลที่ใช้ข้าวโพดเอกซ์ทรูคในระดับ 60 เปอร์เซ็นต์ในสูตรอาหาร พบว่าค่าการย่อยได้ของวัตถุแห้ง โปรตีน เยื่อใย ไขมัน ในโตรเจนฟร็อกซ์แทรกแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($P>0.05$) และสอดคล้องกับการรายงานของ

Hongtrakul *et al.* (1998) ที่รายงานว่าวัตถุดิบกลุ่มที่ให้พลังงานได้แก่ ข้าวโพด แป้งข้าวโพด แป้งสาลี ปลายข้าว และข้าวฟ่าง เมื่อนำไปผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันแล้วนำมาผลิตเป็นอาหารของลูกสุกรอนุบาลโดยใช้ที่ระดับ 32 เปอร์เซ็นต์ในสูตรอาหารพบว่า ค่าการย่อยได้ของวัตถุดิบ พลังงาน และโปรตีนในลูกสุกรอนุบาลอายุ 0 - 14 วันหลังจากหย่านมมีค่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) เนื่องจากในลูกสุกรอนุบาลหลังจากหย่านม 1 สัปดาห์จะเป็นช่วงที่ลูกสุกรเครียด เพราะต้องปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมและอาหาร จึงส่งผลให้การหลั่งเอนไซม์ในระบบทางเดินอาหารลดลง (Van der Poel *et al.*, 1990) ทำให้ปริมาณเอนไซม์ที่ย่อยแป้งลดลง แต่เมื่อลูกสุกรมีอายุมากขึ้น ลูกสุกรจะเริ่มปรับตัวได้ เมื่อได้รับวัตถุดิบอาหารใหม่ๆ เพิ่มขึ้นซึ่งจะเป็นการกระตุ้นให้เกิดการหลั่งเอนไซม์ในระบบทางเดินอาหารเพิ่มขึ้น (Lindermann *et al.*, 1986; Maxwell and Carter, 2001) ส่งผลให้ลูกสุกรสามารถย่อยและดูดซึมสารอาหารได้เพิ่มขึ้นตามอายุที่มากขึ้น ดังนั้นข้าวโพดที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันจึงไม่ได้ช่วยปรับปรุงการย่อยได้ของลูกสุกรอนุบาล

ผลของการใช้ข้าวโพดเอกซ์ทรูตต่อพลังงานย่อยได้ และพลังงานใช้ประโยชน์ได้ในสุกรอนุบาล

ผลของการศึกษาการใช้ข้าวโพดเอกซ์ทรูตที่มีอัตราการไหลของน้ำผ่านเข้าเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ 3 ระดับ คือ 15 21 และ 30 ลิตรต่อชั่วโมง เปรียบเทียบกับข้าวโพดในอาหารลูกสุกรอนุบาล พบว่าค่าพลังงานย่อยได้และพลังงานใช้ประโยชน์ได้ของข้าวโพดเอกซ์ทรูตที่มีอัตราการไหลของน้ำทั้ง 3 ระดับ แตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวโพด ($P>0.05$) (ตารางที่ 9) ซึ่งพลังงานย่อยได้ของข้าวโพดและข้าวโพดเอกซ์ทรูตที่มีอัตราการไหลของน้ำผ่านเข้าเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ทั้ง 3 ระดับมีค่าเท่ากับ 3395.80 3298.20 3247.40 และ 3269.60 แคลอรีต่อกรัม ตามลำดับ และพลังงานใช้ประโยชน์ได้ของข้าวโพดและข้าวโพดเอกซ์ทรูตที่มีอัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องทั้ง 3 ระดับ มีค่าเท่ากับ 3385.80 3271.30 3139.00 และ 3178.30 แคลอรีต่อกรัม ตามลำดับ เนื่องจากลูกสุกรที่อายุมากขึ้นจะมีการพัฒนาระบบทางเดินอาหารที่สมบูรณ์ขึ้น ส่งผลให้ปริมาณการหลั่งเอนไซม์เพิ่มสูงขึ้น (Veum and Jack, 2001) ซึ่งหลังจากหย่านม 2 สัปดาห์ เอนไซม์อะไมเลสจะเพิ่มสูงขึ้น (Lindermann *et al.*, 1986) ลูกสุกรจึงสามารถย่อยและดูดซึมแป้งได้เพิ่มมากขึ้น ในการทดลองครั้งนี้ใช้ลูกสุกรที่มีอายุประมาณ 6 สัปดาห์ ซึ่งลูกสุกรจะมีการปรับตัวและการพัฒนาการหลั่งเอนไซม์ในระบบทางเดินอาหารเกือบจะสมบูรณ์แล้ว ดังนั้นลูกสุกรจะสามารถย่อยและใช้ประโยชน์จากอาหารได้เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ค่าการย่อยได้และการคงอยู่ในร่างกายของวัตถุดิบ พลังงานและโปรตีนของอาหารทดลอง และพลังงานย่อยได้และพลังงานใช้ประโยชน์ได้ของข้าวโพดเอกซ์ทรูตในการทดลองครั้งนี้แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$)

ตารางที่ 8 ผลของการใช้ข้าวโพดเอกซ์ทราดต่อค่าการย่อยได้ และค่าการคงอยู่ในร่างกายของวัตถุแห้ง พลังงาน และโปรตีนของอาหารทดลองในสุกรอนุบาล (ร้อยละของวัตถุแห้ง)

	อาหารทดลอง					Pooled SEM	P- value
	สูตรปลายข้าว	สูตรข้าวโพด	สูตรข้าวโพด	สูตรข้าวโพด	สูตรข้าวโพด		
			เอกซ์ทราด ¹	เอกซ์ทราด ²	เอกซ์ทราด ³		
วัตถุแห้ง							
ค่าการย่อยได้แบบปรากฏ (%)	91.26	90.89	91.04	91.21	90.85	0.06	0.1103
ค่าการคงอยู่ในร่างกายแบบปรากฏ (%)	79.48	81.15	80.58	81.16	81.99	0.46	0.5307
พลังงาน							
พลังงานย่อยได้แบบปรากฏ (%)	84.85	85.26	84.83	85.30	86.14	0.44	0.8756
พลังงานใช้ประโยชน์ได้แบบปรากฏ (%)	81.69	82.90	82.59	82.65	83.53	0.54	0.8688
โปรตีน							
ค่าการย่อยได้แบบปรากฏ (%)	85.61	84.09	83.74	84.07	85.15	0.50	0.7218
ค่าการคงอยู่ในร่างกายแบบปรากฏ (%)	60.64	56.57	58.18	58.05	60.27	0.84	0.5411

หมายเหตุ ¹ อัตราการไหลของน้ำในกระบวนการเอกซ์ทราดขึ้น 15 ลิตรต่อชั่วโมง

² อัตราการไหลของน้ำในกระบวนการเอกซ์ทราดขึ้น 21 ลิตรต่อชั่วโมง

³ อัตราการไหลของน้ำในกระบวนการเอกซ์ทราดขึ้น 30 ลิตรต่อชั่วโมง

ตารางที่ 9 ผลของการใช้ข้าวโพดเอกซ์ทราต่อพลังงานย่อยได้ และพลังงานใช้ประโยชน์ได้ในสุกรอนุบาล (as fed)

	อาหารทดลอง				Pooled	P- value
	สูตรข้าวโพด	สูตรข้าวโพด เอกซ์ทรา ¹	สูตรข้าวโพด เอกซ์ทรา ²	สูตรข้าวโพด เอกซ์ทรา ³	SEM	
พลังงานย่อยได้ (แคลอรีต่อกรัม)	3395.80	3298.20	3247.40	3269.60	109.18	0.9703
พลังงานใช้ประโยชน์ได้ (แคลอรีต่อกรัม)	3385.80	3271.30	3139.00	3178.30	125.64	0.9122

หมายเหตุ ¹ อัตราการไหลของน้ำในกระบวนการเอกซ์ทราชั้น 15 ลิตรต่อชั่วโมง

² อัตราการไหลของน้ำในกระบวนการเอกซ์ทราชั้น 21 ลิตรต่อชั่วโมง

³ อัตราการไหลของน้ำในกระบวนการเอกซ์ทราชั้น 30 ลิตรต่อชั่วโมง

การทดลองที่ 3

องค์ประกอบทางโภชนาของอาหารทดลอง

ผลการวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมีของโภชนาต่างๆ ในอาหารที่ใช้ในการทดลองที่ 3 แสดงไว้ในตารางที่ 10 พบว่าปริมาณโภชนาของอาหารทดลองแต่ละสูตรมีค่าใกล้เคียงกัน โดยความชื้นของอาหารสูตรที่ 1 และ 2 สูงกว่าอาหารสูตรที่ 3 และ 4 เนื่องจากข้าวโพดเอกซ์ทราที่ใช้ผลิตอาหารทดลองมีความชื้นต่ำกว่าปลายข้าวและข้าวโพด แต่โดยรวมแล้วโภชนาที่วิเคราะห์ได้ทางเคมีมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณ (ตารางที่ 3)

ตารางที่ 10 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของโภชนาต่างๆ ของอาหารในการทดลองที่ 3 (ร้อยละของวัตถุแห้ง)

(%) โภชนา	อาหารทดลอง			
	อาหารผงสูตร ปลายข้าว	อาหารผงสูตร ข้าวโพด	อาหารผงสูตร ข้าวโพดเอกซ์ทรา	อาหารอัดเม็ดสูตร ข้าวโพดเอกซ์ทรา
ความชื้น	9.33	9.22	8.23	8.09
โปรตีน	23.85	23.69	23.42	23.32
ไขมัน	7.82	8.64	8.06	8.35
เยื่อใย	3.22	3.84	3.39	3.33
เถ้า	7.42	7.33	7.27	7.23
แคลเซียม	1.10	1.24	1.25	1.18
ฟอสฟอรัส	0.77	0.74	0.76	0.77
พลังงานรวม				
แคลอรีต่อกรัม	4574.51	4469.08	4473.56	4510.14

ค่าความหนาแน่นของอาหาร

ผลการศึกษาความหนาแน่นของอาหารในลูกสุกรอนุบาล จากอาหารผงสูตรที่ใช้ ปลายข้าว สูตรที่ใช้ข้าวโพด สูตรที่ใช้ข้าวโพดเอกซ์ทรา และอาหารอัดเม็ดที่ใช้ข้าวโพดเอกซ์ทราเป็นแหล่งพลังงานหลักมีค่าเท่ากับ 587.67 576.60 501.60 และ 601.20 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ (ตารางที่ 11) เมื่อทำการเปรียบเทียบความหนาแน่นของอาหารผง (587.67 576.60 และ 501.60 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ) กับอาหารอัดเม็ด (601.20 กรัมต่อลิตร) พบว่า แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$) ส่วนความหนาแน่นของอาหารผงสูตรที่ใช้ปลายข้าวและสูตรที่ใช้ข้าวโพด (587.67 และ 576.60 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ) กับอาหารสูตรที่ใช้ข้าวโพดเอกซ์ทราเป็นแหล่งพลังงานหลักทั้งในรูปแบบอาหารผงและอาหารเม็ด (501.60 และ 601.20 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ) พบว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$) ทั้งนี้เนื่องจากในขั้นตอนการผลิตข้าวโพดเอกซ์ทราความร้อนที่เกิดจากการเสียดสีของข้าวโพดกับผนังบาร์เรลและพื้นผิวสกรู มีผลทำให้เม็ดแป้งในข้าวโพดเกิดการเปลี่ยนแปลงและแตกออก (Yusuf *et al.*, 1996; Wai and Jinchyau, 2003) ประกอบกับความดันภายในกระบอกเครื่องเอกซ์ทราเดอร์ที่สูงมากแต่ความดันภายนอกกระบอกมีค่าต่ำทำให้ข้าวโพดที่เคลื่อนที่ออกมาจากเครื่องเอกซ์ทราเดอร์จะถูกอากาศจากภายนอกเคลื่อนที่เข้าไปในเม็ดแป้งข้าวโพด ทำให้เกิดช่องว่างในเม็ดแป้งข้าวโพดจึงเกิดการพองตัว (pop) (Galen, 2000) ส่งผลให้ข้าวโพดเอกซ์ทราที่มีความหนาแน่นลดลง (Yusuf *et al.*, 1996; Wai and Jinchyau, 2003) ดังนั้นเมื่อนำข้าวโพดเอกซ์ทรา (ประมาณ 42 เปอร์เซ็นต์) มาผลิตเป็นอาหารผง จึงทำให้อาหารมีความหนาแน่นต่ำหรือมีความฟามสูงขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบความหนาแน่นของอาหารผงที่ใช้ข้าวโพดเอกซ์ทรา (501.60 กรัมต่อลิตร) กับอาหารอัดเม็ดที่ใช้ข้าวโพดเอกซ์ทราเป็นแหล่งพลังงานหลัก (601.20 กรัมต่อลิตร) พบว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$) เนื่องจากในกระบวนการอัดเม็ดระหว่างที่อาหารคลุกเคล้ากับไอน้ำและถูกกลิ้งอัดผ่านจานอัด แรงอัดและไอน้ำจะทำให้เกิดการยึดกันของอนุภาคของอาหารทำให้อัดแน่นมากขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นเพิ่มขึ้น และลดความฟามของอาหารได้ (Skoch *et al.*, 1983; Hancock and Behnke, 2001)

ค่าการย่อยได้ของแป้งโดยใช้เอนไซม์

ผลการศึกษาเปอร์เซ็นต์การย่อยได้ของแป้งโดยใช้ เอนไซม์แอลฟา – อะไมเลส และ เอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดสในสูตรอาหารทดลองทั้ง 4 สูตร มีค่าเท่ากับ 2.62 1.58 15.20 และ 17.10 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ตารางที่ 11) เมื่อทำการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การย่อยได้ของแป้งในอาหารผง (2.62 1.58 และ 15.20 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ) กับอาหารอัดเม็ด (17.10 เปอร์เซ็นต์) พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$) และเมื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์ค่าการย่อยได้ของอาหารผงสูตรที่ใช้ปลายข้าวและสูตรที่ใช้ข้าวโพด (2.62 และ 1.58 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ) กับอาหารสูตรที่ใช้ข้าวโพดเอกซ์ทรูดเป็นแหล่งพลังงานหลักทั้งในรูปอาหารผงและอาหารเม็ด 15.20 และ 17.10 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ) นั้นพบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$) ทั้งนี้เนื่องจากความร้อน ความชื้น และแรงเฉือนในกระบวนการเอกซ์ทรูดส่งผลให้เม็ดของแป้งข้าวโพดเกิดเปลี่ยนโครงสร้างพันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย (บุญล้อม, 2546) ทำให้เม็ดแป้งแตกออกและเอนไซม์เข้าย่อยเม็ดแป้งได้ง่ายขึ้น การย่อยได้ของแป้งเพิ่มมากขึ้น (Van der Poel *et al.*, 1989; 1990) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Amornthewaphat *et al.* (2005) ที่พบว่าการใช้ข้าวโพดเอกซ์ทรูดในอาหารไก่เนื้อที่ระดับ 25 เปอร์เซ็นต์ ช่วยเพิ่มเปอร์เซ็นต์การย่อยได้ของแป้งให้สูงขึ้น และเมื่อเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การย่อยได้ของอาหารผงสูตรที่ใช้ข้าวโพดเอกซ์ทรูด (15.20 เปอร์เซ็นต์) กับอาหารอัดเม็ดที่ใช้ข้าวโพดเอกซ์ทรูดเป็นแหล่งพลังงานหลัก (17.10 เปอร์เซ็นต์) พบว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$) ทั้งนี้เนื่องจากในกระบวนการอัดเม็ดอาหารผงจะถูกนำไปคลุกไอน้ำและอัดเม็ด ซึ่งในระหว่างการขึ้นรูปเป็นเม็ดอาหาร ความร้อนที่เกิดขึ้นจากการเสียดสีระหว่างอาหารและจานอัด ทำให้เม็ดของแป้งในอาหารอัดเม็ดเปิดออก เอนไซม์เข้าย่อยได้ง่ายขึ้น ส่งผลให้ค่าการย่อยได้ของแป้งในอาหารอัดเม็ดสูงกว่าอาหารผง (Medel *et al.*, 2004)

ตารางที่ 11 ผลการวิเคราะห์ค่าความหนาแน่นของอาหารและค่าการย่อยได้ของแป้ง

	อาหารทดลอง				Pool SEM	Contrasts ¹		
	อาหารผงสูตร ปลายข้าว	อาหารผงสูตร ข้าวโพด	อาหารผงสูตร ข้าวโพดเอกซ์ทรูด	อาหารอัดเม็ดสูตร ข้าวโพดเอกซ์ทรูด		1	2	3
ความหนาแน่น (กรัม/ลิตร)	587.67	576.60	501.60	601.20	0.78	**	**	**
การย่อยได้ ของแป้ง (%)	2.62	1.58	15.2	17.1	0.06	**	**	**

หมายเหตุ ¹ เปรียบเทียบ 1. อาหารผงกับอาหารอัดเม็ด

2. อาหารผงที่ใช้ปลายข้าวและข้าวโพด กับอาหารที่ใช้ข้าวโพดเอกซ์ทรูดทั้งในรูปอาหารผงและอาหารอัดเม็ด

3. อาหารผงที่ใช้ข้าวโพดเอกซ์ทรูดกับอาหารอัดเม็ด

** แสดงถึงความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ยที่ทำการเปรียบเทียบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$)

สมรรถภาพการผลิต

ผลของการใช้ข้าวโพดเอกซ์ทราต่อสมรรถภาพการผลิตในลูกสุกรอนุบาลพบว่า ลูกสุกรกลุ่มที่ได้รับอาหารผงสูตรที่ใช้ปลายข้าว ข้าวโพดและข้าวโพดเอกซ์ทรา และอาหารอัดเม็ดสูตรที่ใช้ข้าวโพดเอกซ์ทราเป็นแหล่งพลังงานหลัก มีน้ำหนักเริ่มต้นเฉลี่ยเท่ากับ 7.43 7.43 7.45 และ 7.41 กิโลกรัม ตามลำดับ และน้ำหนักสุดท้ายเมื่อสิ้นสุดการทดลองของลูกสุกรทั้ง 4 กลุ่ม เฉลี่ยเท่ากับ 18.51 18.65 18.04 และ 18.05 กิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งน้ำหนักเริ่มต้นและน้ำหนักสุดท้ายของลูกสุกรทั้ง 4 กลุ่ม แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$)

สมรรถภาพการผลิตของลูกสุกรอนุบาลที่ได้รับอาหารทดลองทั้ง 4 กลุ่ม (ตารางที่ 12) พบว่าสมรรถภาพการผลิตได้แก่ อัตราการเจริญเติบโตของลูกสุกรอนุบาลที่ได้รับอาหารผงสูตรที่ใช้ปลายข้าว ข้าวโพดและข้าวโพดเอกซ์ทรา และอาหารอัดเม็ดสูตรที่ใช้ข้าวโพดเอกซ์ทราเป็นแหล่งพลังงานหลัก มีค่าเท่ากับ 398.19 396.96 378.27 และ 378.63 กรัมต่อวัน ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบอัตราการเจริญเติบโตของลูกสุกรทุกกลุ่ม พบว่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) เนื่องจากถึงแม้ในขั้นตอนการผลิตข้าวโพดเอกซ์ทราระหว่างที่เป่าเกิดการสุกเนื่องจากแรงดันและแรงเหวี่ยง (Forte, 2004) จะส่งผลให้การย่อยได้ของแป้งเพิ่มขึ้น แต่โมเลกุลของแป้งบางส่วนสามารถเกิดกระบวนการรีโทเรชั่น โดยการเปลี่ยนโครงสร้างโมเลกุลของเม็ดแป้งจากแอลฟา-อะไมโลส เป็นเบต้า-อะไมโลส และการเกิดผลึกโมเลกุลของอะไมโลเพคตินส่งผลให้อาหารในระบบทางเดินอาหารของลูกสุกรไม่สามารถย่อยหรือทำลายพันธะได้ (Hongtrakul *et al.*, 1998; Svihus *et al.*, 2005) นอกจากนี้โมเลกุลของแป้งยังสามารถรวมตัวกับโมเลกุลของไขมันทำให้การย่อยได้ของแป้งลดลง (Svihus *et al.*, 2005) ซึ่งหลังจากหย่านมแล้วเมื่อลูกสุกรมีอายุมากขึ้นความสามารถในการหลั่งเอนไซม์ในระบบทางอาหารจะมีเพิ่มมากขึ้น การย่อยและการดูดซึมสารอาหารก็จะเพิ่มขึ้นด้วย (Lindermann *et al.*, 1986) ซึ่งลูกสุกรจะสามารถย่อยแป้งจากปลายข้าว และข้าวโพดที่ไม่ได้ผ่านกระบวนการให้ความร้อนได้เพิ่มขึ้น ดังนั้นการใช้ข้าวโพดเอกซ์ทราเป็นแหล่งพลังงานในอาหารลูกสุกรจึงไม่ได้ส่งผลดีในการเพิ่มอัตราการเจริญเติบโตของลูกสุกรให้สูงขึ้น (Van der Poel *et al.*, 1989; Hongtrakul *et al.*, 1998; Svihus *et al.*, 2005) ในช่วงสัปดาห์แรกของการหย่านมเอนไซม์ในทางเดินอาหารของลูกสุกรจะลดลง ดังนั้นการใช้ข้าวโพดเอกซ์ทราในลูกสุกรระยะนี้จึงน่าจะมีการเจริญเติบโตที่แตกต่างกัน แต่การทดลองครั้งนี้ไม่ได้ทำการชั่งน้ำหนักลูกสุกรเพื่อวัดการเจริญเติบโตในแต่ละสัปดาห์ และเมื่อวัดการเจริญเติบโตของลูกสุกรตลอดระยะเวลาการทดลองจึงพบว่าอัตราการเจริญเติบโตของลูกสุกรทุกกลุ่มแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ

ปริมาณการกินอาหารเฉลี่ยต่อวันของลูกสุกรที่เลี้ยงด้วยอาหารผงสูตรที่ใช้ปลายข้าว ข้าวโพด ข้าวโพดเอกซ์ทรา และอาหารอัดเม็ดสูตรที่ใช้ข้าวโพดเอกซ์ทราเป็นแหล่งพลังงานหลักมีค่าเท่ากับ 640.03 669.37 672.84 และ 613.83 กรัมต่อวัน ตามลำดับ (ตารางที่ 12) จากการทดลองพบว่าลูกสุกรที่ได้รับอาหารผงมีปริมาณการกินอาหารสูงกว่ากลุ่มที่เลี้ยงด้วยอาหารอัดเม็ด ($P < 0.05$) โดยอาหารผงสูตรที่ใช้ข้าวโพดเอกซ์ทราเป็นแหล่งพลังงานจะมีปริมาณการกินอาหารมากที่สุด (672.84 กรัมต่อวัน) เนื่องจากอาหารผงสูตรนี้มีความหนาแน่นต่ำ (501.60 กรัมต่อลิตร) (ตารางที่ 12) ทำให้เกิดการสูญเสียของอาหารจากการตกหล่นในขณะลูกสุกรกินอาหาร เมื่อเปรียบเทียบกับอาหารทดลองสูตรอื่นๆ ส่งผลให้ค่าโดยรวมของปริมาณการกินอาหารสูงขึ้น แต่เมื่อนำอาหารผงสูตรที่ใช้ข้าวโพดเอกซ์ทราไปผ่านกระบวนการอัดเม็ด ปริมาณการกินอาหารจะลดลง (613.83 กรัมต่อวัน) ($P < 0.05$) และเมื่อเปรียบเทียบอัตราการเจริญเติบโตต่อวันของลูกสุกรกลุ่มที่ใช้ข้าวโพดเอกซ์ทราเป็นแหล่งพลังงานหลักทั้งในรูปอาหารผง (378.27 กรัมต่อวัน) และอาหารอัดเม็ด (378.63 กรัมต่อวัน) พบว่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับการรายงานของ Wandra *et al.* (1995); Medel *et al.* (2004) ว่าอาหารอัดเม็ดช่วยลดปริมาณการสูญเสียอาหารที่ตกหล่นในสุกรอนุบาลช่วงอายุ 22-42 วัน ส่งผลให้ปริมาณการกินอาหารลดลงได้ถึง 18.2 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับอาหารผง โดยไม่ส่งผลกระทบต่อน้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้นของลูกสุกร นอกจากนี้แล้วการอัดเม็ดอาหารช่วยเพิ่มความหนาแน่นของอาหาร ลดความเป็นฝุ่น ลดการตกหล่นของอาหาร และทำให้อาหารนำกินขึ้น (Skoch *et al.*, 1983)

ประสิทธิภาพการใช้อาหารของสุกรอนุบาลที่ได้รับอาหารทดลองทั้ง 4 สูตร คือ อาหารผงสูตรที่ใช้ปลายข้าว ข้าวโพด และข้าวโพดเอกซ์ทรา และอาหารอัดเม็ดที่ใช้ข้าวโพดเอกซ์ทราเป็นแหล่งพลังงานหลัก มีค่าเท่ากับ 1.62 1.69 1.77 และ 1.64 ตามลำดับ (ตารางที่ 12) ซึ่งแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งสอดคล้องกับการรายงานของ Van der Poel *et al.* (1989); Hongtrakul *et al.* (1998) ที่พบว่ากระบวนการเอกซ์ทราชั้นในวัตถุดิบกลุ่มพลังงานไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการใช้อาหารในลูกสุกรอนุบาล ถึงแม้ว่าการเจลาติไนซ์ของแป้งจะช่วยให้การย่อยได้สูงขึ้น แต่ไม่ได้ช่วยปรับปรุงการเจริญเติบโตหรือประสิทธิภาพการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัวของลูกสุกรแต่อย่างใด เนื่องจากหลังจากหย่านม 2 สัปดาห์ เอนไซม์อะไมเลสจะเพิ่มปริมาณมากขึ้นส่งผลให้การย่อยแป้งของลูกสุกรในช่วงนี้เพิ่มสูงขึ้นด้วย หลังจากลดลงในช่วงสัปดาห์แรกของการหย่านม (Lindermann *et al.*, 1986) ซึ่งเมื่อลูกสุกรได้รับข้าวโพดที่ไม่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรา ลูกสุกรจึงสามารถพัฒนาและปรับสภาพร่างกายให้ผลิตเอนไซม์อะไมเลสให้มีปริมาณที่เพียงพอและเหมาะสมในการย่อยข้าวโพดได้ (Van der Poel *et al.*, 1989) ดังนั้นในการทดลองครั้งนี้เมื่อเลี้ยงลูกสุกรครบอายุ 8 สัปดาห์

ตลอดระยะเวลาการทดลองจึงพบว่า อัตราการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพการใช้อาหารของลูกสุกรแต่ละกลุ่มแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$)

เปอร์เซ็นต์การคั่งทิ้งของลูกสุกรอนุบาลที่เลี้ยงด้วยอาหารทดลองทั้ง 4 สูตร พบว่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) โดยเปอร์เซ็นต์การคั่งทิ้งของลูกสุกรที่เลี้ยงด้วยอาหารผสมสูตรที่ใช้ปลายข้าว ข้าวโพด ข้าวโพดเอกซ์ทรา และอาหารอัดเม็ดสูตรที่ใช้ข้าวโพดเอกซ์ทรา มีค่าเท่ากับ 2.08 2.08 2.08 และ 4.17 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสาเหตุของการคั่งทิ้งลูกสุกรทั้งนี้เนื่องจากการติดเชื้อที่บริเวณข้อเท้าทำให้ลูกสุกรไม่สามารถลุกขึ้นกินอาหารได้

ตารางที่ 12 สมรรถภาพการผลิตของลูกสุกรอนุบาล

	อาหารทดลอง				Pool SEM	P-value	Contrasts ¹		
	อาหารผงสูตร ปลายข้าว	อาหารผงสูตร ข้าวโพด	อาหารผงสูตร ข้าวโพดเอกซ์ทรา	อาหารอัดเม็ดสูตร ข้าวโพดเอกซ์ทรา			1	2	3
น้ำหนักเริ่มต้น (กิโลกรัม)	7.43	7.43	7.45	7.41	0.05	0.9952	-	-	-
น้ำหนักสิ้นสุด (กิโลกรัม)	18.51	18.65	18.04	18.05	0.14	0.3123	-	-	-
อัตราการเจริญเติบโต (กรัม/วัน)	398.19	396.96	378.27	378.63	7.45	0.1873	-	-	-
ปริมาณอาหารที่กินต่อวัน (กรัม/วัน)	640.03	669.37	672.84	613.83	4.10	0.0434	*	ns	*
ประสิทธิภาพการใช้อาหาร	1.62	1.69	1.77	1.64	0.03	0.2379	-	-	-
การคัดทิ้ง (%)	2.08	2.08	2.08	4.17	1.16	0.8948	-	-	-

หมายเหตุ ¹ เปรียบเทียบ 1. อาหารผงกับอาหารอัดเม็ด

2. อาหารผงที่ใช้ปลายข้าว และข้าวโพด กับอาหารที่ใช้ข้าวโพดเอกซ์ทราทั้งในรูปอาหารผงและอาหารอัดเม็ด

3. อาหารผงที่ใช้ข้าวโพดเอกซ์ทรา กับอาหารอัดเม็ด

* แสดงถึงความแตกต่างกันของค่าเฉลี่ยที่ทำการเปรียบเทียบอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05)

ns ไม่แตกต่างกันทางสถิติ

- ไม่ได้ทำการเปรียบเทียบ Contrasts

ต้นทุนค่ากระแสไฟฟ้าในการผลิตอาหาร

ต้นทุนค่ากระแสไฟฟ้าในการผลิตอาหาร พบว่ากระแสไฟฟ้ารวมที่ใช้ในการผลิตอาหารอัดเม็ดสูตรที่ใช้ข้าวโพดเอกซ์ทรา (5.85 กิโลวัตต์ต่อตัน) จะสูงกว่ากระแสไฟฟ้ารวมที่ใช้ในการผลิตอาหารผงสูตรที่ใช้ปลายข้าว (0.38 กิโลวัตต์ต่อตัน) ข้าวโพด (0.21 กิโลวัตต์ต่อตัน) และข้าวโพดเอกซ์ทรา (0.41 กิโลวัตต์ต่อตัน) เนื่องจากในการผลิตอาหารอัดเม็ดค่ากระแสไฟฟ้ารวมที่คำนวณได้นั้นจะมาจากค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในขั้นตอนของการผสมรวมกับค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการอัดเม็ด ในด้านกำลังการผลิต พบว่าในขั้นตอนของการผสมกำลังการผลิตของอาหารแต่ละสูตรจะมีปริมาณใกล้เคียงกัน โดยอาหารผงสูตรที่ใช้ปลายข้าว สูตรที่ใช้ข้าวโพด สูตรที่ใช้ข้าวโพดเอกซ์ทราที่ผลิตเป็นอาหารผงและอัดเม็ด มีค่าเท่า 5778.49 5822.37 5564.14 และ 5564.14 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับ แต่ในขั้นตอนการอัดเม็ดมีกำลังการผลิตเท่ากับ 2542.75 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เนื่องจากในขั้นตอนนี้อาหารต้องผ่านการคลุกเคล้าไอน้ำและการอัดผ่านรูใดซึ่งต้องใช้ระยะเวลา แต่ในขั้นตอนการผสมอาหารใช้ระยะเวลาในการเทวัตถุดิบลงถึงผสมและเวลาในการผสมเพียงสั้นๆ ดังนั้นเมื่อคิดต้นทุนค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิต จะเห็นได้ว่าอาหารอัดเม็ดมีต้นทุนค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิต (11.49 บาทต่อตัน) สูงกว่าอาหารทดลองสูตรที่ใช้ปลายข้าว (0.74 บาทต่อตัน) สูตรที่ใช้ข้าวโพด (0.40 บาทต่อตัน) และสูตรที่ใช้ข้าวโพดเอกซ์ทราผง (0.81 บาทต่อตัน) (ตารางที่ 13)

ต้นทุนค่าอาหารต่อการเพิ่มน้ำหนักตัว 1 กิโลกรัม

ผลของการใช้ข้าวโพดเอกซ์ทราในอาหาร ต่อสมรรถภาพการผลิตของลูกสุกรอนุบาล พบว่าอัตราการเจริญเติบโตของลูกสุกรที่เลี้ยงด้วยอาหารสูตรที่ใช้ข้าวโพดเอกซ์ทราทั้งในรูปแบบอาหารผงและอาหารอัดเม็ดแตกต่างจากกลุ่มที่ใช้ปลายข้าวและข้าวโพดอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) โดยปริมาณการกินอาหารของลูกสุกรกลุ่มที่เลี้ยงด้วยอาหารผง สูงกว่ากลุ่มที่เลี้ยงด้วยอาหารอัดเม็ด ($P<0.05$) แต่ประสิทธิภาพการใช้อาหารของลูกสุกรพบว่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) (ตารางที่ 12) ดังนั้นเมื่อคำนวณต้นทุนค่าอาหารต่อการเพิ่มน้ำหนักตัว 1 กิโลกรัม โดยใช้ราคาต้นทุนของวัตถุดิบจึงส่งผลให้ต้นทุนค่าอาหารต่อการเพิ่มน้ำหนักตัว 1 กิโลกรัม ของลูกสุกรที่เลี้ยงด้วยอาหารทั้ง 4 สูตร มีค่าเท่ากับ 20.74 20.32 22.70 และ 21.88 บาทต่อกิโลกรัม ซึ่งแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) (ตารางที่ 14)

ตารางที่ 13 ต้นทุนค่ากระแสไฟฟ้าในการผลิตอาหารทดลอง

	อาหารทดลอง			
	อาหารผง	อาหารผง	อาหารผงสูตร	อาหารอัดเม็ด
	สูตรปลายข้าว	สูตรข้าวโพด	ข้าวโพดเอกซ์ทรา	สูตรข้าวโพดเอกซ์ทรา
กระแสไฟฟ้า (กิโลวัตต์/ตัน)				
การผสม	0.38	0.21	0.41	0.43
การอัดเม็ด	-	-	-	5.42
กระแสไฟฟ้ารวม (กิโลวัตต์/ตัน)	0.38	0.21	0.41	5.85
ค่ากระแสไฟฟ้ารวม (บาท/ตัน)	0.74	0.40	0.81	11.47
อัตราการผลิต (กิโลกรัม/ชั่วโมง)				
การผสม	5778.49	5822.37	5564.14	5564.14
การอัดเม็ด	-	-	-	2542.75

ตารางที่ 14 ต้นทุนค่าอาหารในการเพิ่มน้ำหนักตัวของลูกสุกร 1 กิโลกรัม

อาหารทดลอง	ปริมาณอาหารที่ใช้ในการเพิ่มน้ำหนักตัว 1 กิโลกรัม	ต้นทุนค่าอาหาร (บาท/กิโลกรัม)	ต้นทุนค่าอาหารในการเพิ่มน้ำหนักตัว 1 กิโลกรัม (บาท/กิโลกรัม)
อาหารผงสูตรปลายข้าว	1.62	12.85	20.74
อาหารผงสูตรข้าวโพด	1.69	11.98	20.32
อาหารผงสูตรข้าวโพดเอกซ์ทรา	1.77	12.77	22.70
อาหารอัดเม็ดสูตรข้าวโพดเอกซ์ทรา	1.64	13.27	21.88
Pool SEM	4.10		0.43
P -value	0.2379		0.2226

สรุปผลการทดลอง

1. ผลของกระบวนการเอกซ์ทรูชันในข้าวโพดโดยใช้อัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องเอกซ์ทรูดเดอร์ 3 ระดับ คือ 15 21 และ 30 ลิตรต่อชั่วโมง พบว่าค่าการย่อยได้ของแป้งโดยใช้เอนไซม์แอลฟาอะไมเลส และเอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดส ของข้าวโพดหลังผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$) อย่างไรก็ตามการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำที่ระดับ 30 ลิตรต่อชั่วโมงจะมีผลทำให้การย่อยได้ของแป้งลดลง ($P < 0.01$)

2. กระบวนการเอกซ์ทรูชันในข้าวโพดโดยใช้อัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องเอกซ์ทรูดเดอร์ 3 ระดับ คือ 15 21 และ 30 ลิตรต่อชั่วโมง มีผลทำให้ค่าการย่อยได้และการคงอยู่ในร่างกายของวัตถุแห้ง พลังงาน และโปรตีนในอาหารของลูกสุกรอนุบาล แตกต่างจากกลุ่มที่ใช้ปลายข้าว และกลุ่มที่ใช้ข้าวโพดเป็นแหล่งพลังงานอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) และค่าพลังงานย่อยได้และพลังงานใช้ประโยชน์ได้ของข้าวโพดเอกซ์ทรูด แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวโพด ($P > 0.05$)

3. อัตราการเจริญเติบโต และประสิทธิภาพการใช้อาหารของลูกสุกรอนุบาลทุกกลุ่ม แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) ส่วนทางด้านปริมาณการกินอาหารพบว่าลูกสุกรกลุ่มที่เลี้ยงด้วยอาหารผงจะมีปริมาณการกินสูงอาหารกว่ากลุ่มที่เลี้ยงด้วยอาหารอัดเม็ด ($P < 0.05$)

4. ต้นทุนค่าอาหารต่อการเพิ่มน้ำหนักตัวของลูกสุกร 1 กิโลกรัม ที่เลี้ยงด้วยอาหารทดลองทั้ง 4 สูตรแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$)

ข้อเสนอแนะ

1. การศึกษาค่าการย่อยได้ และการใช้ประโยชน์ได้ของข้าวโพดเอกซ์ทรูดควรทำการศึกษาในทันทีหลังจากทำการห่านมลูกสุกร เนื่องจากลูกสุกรในระยะนี้ มีปริมาณของเอนไซม์อะไมเลสในทางเดินอาหารต่ำ ประกอบกับลูกสุกรเกิดความเครียดจากการเปลี่ยนอาหารและสภาพแวดล้อม ส่งผลให้การย่อยและการใช้ประโยชน์ของแป้งลดลง ลูกสุกรจะป่วยและท้องเสียได้ง่าย ดังนั้นการทำการศึกษาลูกสุกรระยะนี้จึงน่าจะเห็นผลของการย่อยและการใช้ประโยชน์ของข้าวโพดเอกซ์ทรูดที่ชัดเจนยิ่งขึ้น

2. เนื่องจากกระบวนการเอกซ์ทรูดชันมีผลทำให้โมเลกุลของอะไมโลสเกิดการรวมตัวกับโมเลกุลของไขมัน และเกิดการเปลี่ยนโครงสร้างของโมเลกุลของแป้งเป็นแป้งที่ย่อยไม่ได้ ดังนั้นการศึกษาค่าการย่อยได้ และพลังงานใช้ประโยชน์ได้ของข้าวโพดเอกซ์ทรูดในลูกสุกรอนุบาล ควรศึกษาถึงปริมาณของแป้งที่เอนไซม์สามารถย่อยได้ และแป้งที่ย่อยไม่ได้ในทางเดินอาหารของลูกสุกรในแต่ละช่วงอายุหลังจากห่านม เพื่อเปรียบเทียบว่าเมื่อลูกสุกรอายุมากขึ้น การหลั่งเอนไซม์อะไมเลสที่สูงขึ้น ส่งผลให้การย่อยได้ของแป้งเพิ่มขึ้น โดยที่ปริมาณสัดส่วนของแป้งที่ย่อยไม่ได้ที่เกิดจากกระบวนการเอกซ์ทรูดชันลดลงหรือไม่

3. เนื่องจากกระบวนการเอกซ์ทรูดชันจะส่งผลให้เกิดการรวมตัวของอะไมโลสกับโมเลกุลของไขมัน หรือกรดไขมันสามารถรวมตัวกับโปรตีนซึ่งส่งผลให้การวิเคราะห์หาปริมาณไขมันโดยวิธีอีเทอร์เอกซ์แทรก ไม่สามารถสกัดไขมันออกมาได้หมด ค่าเปอร์เซ็นต์ไขมันที่วิเคราะห์ได้จึงต่ำกว่าความเป็นจริง ดังนั้นการวิเคราะห์หาปริมาณไขมันรวมของข้าวโพดเอกซ์ทรูด จึงควรใช้กรดย่อยทำลายพันธะที่เกิดขึ้นกับอะไมโลส หรือ โปรตีน ก่อนที่จะนำไปสกัดด้วยวิธีอีเทอร์เอกซ์แทรก ปริมาณไขมันที่ได้จึงมีค่าใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด

4. การประกอบสูตรอาหารในการทดลองครั้งนี้ อาหารทดลองสูตรที่ใช้ข้าวโพดเอกซ์ทรูดเป็นแหล่งพลังงานหลักจะใช้ค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้ที่คำนวณเท่ากับข้าวโพด ซึ่งพลังงานใช้ประโยชน์ได้ของข้าวโพดเอกซ์ทรูดที่ลูกสุกรได้รับอาจจะมีค่าต่ำกว่าข้าวโพด ส่งผลให้ลูกสุกรได้รับพลังงานต่ำกว่าความเป็นจริง และเมื่อนำมาเลี้ยงลูกสุกรจึงพบว่าทำให้การใช้ข้าวโพดเอกซ์ทรูดไม่ได้ช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตของลูกสุกรอนุบาล ดังนั้นถ้าพลังงานใช้ประโยชน์ได้ของข้าวโพด

เอกซ์ทราที่ได้รับเป็นค่าที่ใกล้เคียงกับค่าจริงมากที่สุด การใช้ข้าวโพดเอกซ์ทราจะช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตของลูกสุกรอนุบาล

5. ในการศึกษาผลของข้าวโพดเอกซ์ทราและรูปแบบอาหารต่อสมรรถภาพการผลิตของลูกสุกรอนุบาล ใช้ลูกสุกรหย่านมที่อายุ 4 สัปดาห์ ซึ่งในระหว่างที่ลูกสุกรยังอยู่ในเล้าคลอดได้มีการฝึกให้ลูกสุกรกินอาหารและน้ำ นอกจากนี้โดยลักษณะนิสัยที่สนใจสิ่งรอบๆ ตัวของลูกสุกรจึงทำให้ลูกสุกรกินอาหารของแม่สุกรด้วย ซึ่งการที่ลูกสุกรถูกฝึกให้กินอาหารและการกินอาหารของแม่สุกรจะช่วยกระตุ้นให้การหลั่งเอนไซม์ต่างๆ ในระบบทางเดินอาหารของลูกสุกรมีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ระบบทางเดินอาหารของลูกสุกรสามารถย่อยและใช้ประโยชน์จากสารอาหารต่างๆ ได้ดีขึ้นระดับหนึ่ง ดังนั้นเมื่อนำลูกสุกรมาเลี้ยงทดสอบสมรรถภาพการผลิตโดยใช้อาหารทดลองทั้ง 4 สูตรเป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์ และมีการจัดการเลี้ยงดูที่กระตุ้นลูกสุกรกินอาหารบ่อยครั้ง จึงพบว่าสมรรถภาพการผลิตของลูกสุกรทั้ง 4 กลุ่มแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งในสภาวะที่ลูกสุกรมีการหย่านมที่เร็วขึ้น ระบบทางเดินอาหารยังพัฒนาไม่สมบูรณ์ และลูกสุกรสามารถกินอาหารได้ในปริมาณเพียงเล็กน้อยเท่านั้น การใช้ข้าวโพดเอกซ์ทราจะช่วยทำให้ลูกสุกรสามารถใช้ประโยชน์จากแป้งข้าวโพดได้ดีขึ้นและช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตของลูกสุกรอนุบาล ทั้งนี้ต้องขึ้นอยู่กับกระบวนการผลิตข้าวโพดเอกซ์ทรา และการจัดการเลี้ยงดูลูกสุกรเป็นองค์ประกอบที่สำคัญอีกด้วย

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

- กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกูล ปิยะอมขวัญ. 2543. เทคโนโลยีแปรง. พิมพ์ครั้งที่ 2. สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกูล ปิยะอมขวัญ. 2546. เทคโนโลยีแปรง. พิมพ์ครั้งที่ 3. สำนักพิมพ์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- ชูศักดิ์ จอมพุท. 2542. ข้าวโพด, น. 30 – 49. ใน นพพร สายัมพล, บรรณาธิการ. **พืชเศรษฐกิจ**. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- ณัฐชนก อมรเทวภัทร เสกสม อาตมางกูร และสายชล เลิศสุวรรณ. 2547. ผลของอัตราการใช้ของน้ำในกระบวนการเอกซทูล์ขึ้นต่อการใช้ประโยชน์ได้ของแป้งในข้าวโพด, น. 24 – 32 ใน รายงานการประชุมทางวิชาการ ครั้งที่ 43. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- นวลจันทร์ พารักษา และสินชัย พารักษา. 2544. **อาหารสัตว์**. ภาควิชาสัตวบาล คณะเกษตร, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.
- บุญล้อม ชีวะอิสระกุล. 2546. **ชีวเคมีทางสัตวศาสตร์**. ธนบรรณการพิมพ์, เชียงใหม่.
- พันทิพา พงษ์เพียจันทร์. 2539. **หลักการอาหารสัตว์ เล่ม 2 หลักโภชนศาสตร์และการประยุกต์**. โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ.
- พันทิพา พงษ์เพียจันทร์. 2543. **หลักการอาหารสัตว์ เล่ม 1 โภชนะ**. โอเดียนสโตร์, กรุงเทพฯ.
- วิไล รังสาดทอง. 2545. **เทคโนโลยีการแปรรูปอาหาร**. พิมพ์ครั้งที่ 2. เท็กซ์ แอนด์ เจอร์นัล พับลิเคชั่น จำกัด, กรุงเทพฯ.
- สาโรจน์ คำเจริญ. 2547. **อาหารและการให้อาหารสัตว์ไม่เลี้ยงเอื้อง**. หจก. โรงพิมพ์คลังนานาวิทยา, ขอนแก่น.

- Alonso, R., L.A. Rubio, M. Muzquiz and F. Marzo. 2001. The effect of extrusion cooking on mineral bioavailability in pea and kidney bean seed meals. **Anim. Feed Sci. Technol.** 94: 1– 13.
- Amornthewaphat, N., S. Lerdsuwan and S. Attamangkune. 2005. Effect of extrusion of corn and feed form on feed quality and growth performance in poultry in tropical environment. **Poultry Sci.** 84: 1640-1647.
- A. O. A. C. 1990. **Official Methods of Analysis Association of Official; Analytical Chemist.** 15th ed. A. O. A. C., Washington, D. C.
- Asp, N. G. 1986. Nutrition Aspects, pp. 16 - 34. *In* C. O. Conner, ed. **Extrusion Technology for the Food Industry.** Elsevier Science Publishing Co., Inc., New york.
- Baldwin, P. M. 2001. Starch granule-associated proteins and polypeptide. **Starch** 53: 475- 503.
- Blennow, A., A. M. Bay-Smidt, C.E. Olsen and B. L. Moller. 2000. The distribution of covalently bound phosphate in the starch granule in relation to starch crystallinity. **Int. J. Biol. Macromol.** 27: 211-218.
- Björck, I., T. Mataba and B. M. Nair. 1985. *In vitro* enzymatic determination of the protein nutritional value and the amount of available lysine in extruded cereal-based products. **Agric. Biol. Chem.** 49: 945 - 951.
- Biliaderis, G. C. 1992. Structures and phase transition of starch in food systems. **Food Technol.** 46: 98-109
- Bolin, D. W., R. P. King and E. W. Klosterman. 1952. A simplified method for the determination of chromic oxide (Cr_2O_3) when used as an index substance. **Science** 116: 634 -635.

- Camire, M. E. 2000. Chemical and nutritional changes in food during extrusion, pp. 127-147. *In* M. N. Riaz, ed. **Extruders in Food Application**. Techomic Publishing Co., Pennsylvania.
- _____. 2001. Extrusion and nutritional quality, pp 108-129. *In* R. Guy and M. E. Camire, eds. **Extrusion Cooking Technologies and Application**. Woodhead Publishing Limited and CRC Press, New York.
- Donald, A. M. 2001. Review. Plasticization and self – assembly in the starch granule. **Cereal Chem.** 78: 307 – 314.
- Efird, R. C., W. D. Armstrong and D. L. Herman. 1982a. The development of digestive capacity in young pigs: effects of weaning regimen and dietary treatment. **J. Anim. Sci.** 55: 1370 – 1379.
- _____, _____ and _____. 1982b. The development of digestive capacity in young pigs: effect of age and weaning system. **J. Anim. Sci.** 55 : 1380 – 1387.
- Fellowes, P. J. 1998. **Feed Processing Technology Principles and Practice**. Woodhead Publishing limited and CRC Press , New York.
- Forte, D. 2004. Effect of processing on the feeding quality of pet food. **Food and Feed Extrusion Course Notes**, Bangkok, Thailand. Personality.
- _____ and G. Young. 2005. Principles of extruder configuration, pp. 7–17. *In* **Food & Feed Extrusion I**. Short Course, Bangkok, Thailand. Personality.
- Galen. J. R. 2000. Single – Screw Extruders, pp. 25 – 50. *In* M. N. Riaz, ed. **Extruders in Food Application**. Techomic Publishing Co., Pennsylvania.

- Gelders, G. G., J. P. Duyck, H. Goesaert and J. A. Delcour. 2005. Enzyme and acid resistance of amylose – lipid complexes differing in amylose chain length, lipid and complexation temperature. **Carbohydrate Polymers** 60: 379–389.
- Gibson, T. S., C. J. Kaldor and B. V. Meeleary. 1993. Collaborative evaluation of an enzymatic starch damage assay kit and comparison with other method. **Cereal Chem.** 70: 47-51.
- Guy, R. 2001. Raw materials for extrusion cooking, pp. 5–28. *In* R. Guy and M. E. Camire, eds. **Extrusion Cooking Technologies and Application**. Woodhead Publishing Limited and CRC Press, New York.
- Hancock, J. D. and K. C. Behnke. 2001. Use of ingredient and diet processing technologies (grinding, mixing, pelleting, and extruding) to produce quality feeds for pigs, pp. 469-492. *In* A. J. Lewis and L. L. Southern, eds. **Swine Nutrition** 2nd ed. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Haralampu, S. G. 2000. Resistant starch – a review of the physical properties and biological impact of RS₃. **Carbohydrate Polymers** 41: 285–292.
- Harper, J. M. 1981. **Extrusion of Foods Volume II**. CRC Press, Inc, Florida.
- Herkelman, K. L., S. L. Rodhouse, T. L. Veum, and M. R. Ellersieck. 1990. Effect of extrusion on the ileal and fecal digestibilities of lysine in yellow corn in diets for young pigs. **J. Anim. Sci.** 68: 2414- 2424.
- Hongtrakul, K., R. D. Goodband, K. C. Behnke, J. L. Nelssen, M. D. Tokach, J. R. Bergstrom, W. B. Nessmith, Jr. and I. H. Kim. 1998. The effects of extrusion processing of carbohydrate sources on weanling pig performance. **J. Anim. Sci.** 76: 3034-3042.
- Huber, G. R. 2000. Twin- Screw Extruders, pp. 81 – 114. *In* M. N. Riaz, ed. **Extruders in Food Application**. Techomic Publishing Co., Pennsylvania.

- Jane, J., A. Xu, M. Radosavljevic and P. A. Seib. 1992. Location of amylose in normal starch granules. I. Susceptibility of amylose and amylopectin to cross-linking reagents. **Cereal Chem.** 69: 405-409.
- Kasemsuwan, T. and J. Jane. 1994. Location of amylose in normal starch granules. II. Location of phosphodiester crosslinking revealed by phosphorus- 31 nuclear magnetic resonance. **Cereal Chem.** 71: 282-287.
- Lindermann, M. D., S. G. Cornelius, S. M. El. Kandelgy, R. L. Moser and J. E. Pettigrew. 1986. Effect of age, weaning and diet on digestive enzyme levels in the piglet. **J. Anim. Sci.** 62: 1298–1307.
- Maxwell, C. V., Jr. and S. D. Carter. 2001. Feeding the Weaned Pig, pp. 691 -716. *In* A. J. Lewis and L. L. Southern, eds. **Swine Nutrition** 2nd ed. CRC Press, Boca Raton, Florida.
- Medel, P., M. A. Latorre, C. de Blas, R. La'zaro and G.G. Mateos. 2004. Heat processing of cereals in mash or pellet diets for young pigs. **Anim. Feed Sci. Technol.** 113: 127-140.
- , S. Salado, J. C. de Bla and G. G. Mateos. 1999. Processed cereal in diets for early-weaned piglets. **Anim. Feed Sci. Technol.** 82: 145–156.
- Mun, S. H. and S. Malshick. 2005. Mild hydrolysis of resistant starch from maize. **Food Chemistry** Impress.
- Novarro, A. S., M. N. Martino and N. E. Zaritzky. 1996. Modelling of rheological behaviour in starch – lipid systems. **Lebensm-Wiss. u.-Technol.** 29: 632–639.
- NRC. 1998. **Nutrient Requirement of Swine** 10th ed. National Academy Press, Washington, DC.

Oates, C. G. 1997. Towards an understanding of starch granule structure and hydrolysis. **Trends Food Sci. Technol.** 8: 375-382.

SAS. 1998. **SAS User's Guide: Statistics**. SAS institute Inc., North Carolina.

Skoch, E. R., S. F. Binder, C. W. Deyoe, G. L. Allee and K. C. Behnke. 1983. Effects of steam pelleting conditions and extrusion cooking on a swine diet containing wheat middling. **J. Anim. Sci.** 57: 929-935.

Svihus, B., A. K. Uhlen and O. M. Harstad. 2005. Effect of starch granule structure, associated components and processing on nutritive value of cereal starch: A review. **Anim. Feed Sci. Technol.** 122: 303-320.

Thompson, D. B. 2000. Strategies for the manufacture of resistant starch. **Trends Food Sci. Technol.** 11: 245 -253.

Van der Poel, A. F. B., L. A. den Hartog, T. H. van den Abeele, H. Boer and D. J. H. Van Zuilchem. 1989. Effect of infrared irradiation or extrusion processing of maize on its digestibility in piglets. **Anim. Feed Sci. Technol.** 26: 29-43.

_____, _____, W. A. A. Van Stiphout, R. Bremmers and J. Huisman. 1990. Effect of extrusion processing of maize on ileal and fecal digestibility of nutrients and performance of young piglets. **Anim. Feed Sci. Technol.** 29: 309-320.

Veum, T. L. and O. Jack. 2001. Feeding Neonatal Pigs, pp. 671 – 690. In A. J. Lewis and L. L. Southern, eds. **Swine Nutrition** 2nd ed. CRC Press, Boca Raton, Florida.

Voet, D. and J. G. Voet. 2004. **Biochemistry**. John Wiley & Sons, Inc., Canada.

- Wai, B. L. and P, Jinchyau. 2003. Effects of operating conditions on the cellular structure and the thermal properties of extruded foams made from corn. **J. Cell. Plas.** 39: 439-449.
- Wandra, K. J., J.D. Honcock, K.C. Behnke, R. H. Hines, and C. R. Stark. 1995. Effects of particle size and pelleting on growth performance, nutrient digestibility, and stomach morphology in finishing pig. **J. Anim. Sci.** 73: 757-763.
- Yusuf, A., A. M. Hanna and R. Chinnaswamy. 1996. Expansion characteristics of extruded corn grits. **Lebnsn-Wiss. u.-Technol.** 29: 702-707.

ภาคผนวก

วิธีการวิเคราะห์โครมิกซ์ออกไซม์ในอาหารและมูล (Bolin *et al.*, 1952)

อุปกรณ์

1. เตาหย่อย (kjeldahl apparatus)
2. เตาหย่อยพลาสติก (kjeldahl flask) ขนาด 500 มิลลิลิตร
3. ขวดวัดปริมาตร (volumetric flask) ขนาด 100 และ 1000 มิลลิลิตร
4. กรวยกรอง (funnel)
5. กระดาษกรอง (filter paper) เบอร์ 40
6. เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารละลาย (spectrophotometer)

สารเคมีที่ใช้

1. สารโซเดียมโพลิบเดท (sodium molybdate : $\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)
2. กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) ความเข้มข้น 96 เปอร์เซ็นต์
3. กรดเปอร์คลอริก (HClO_4) ความเข้มข้น 70-72 เปอร์เซ็นต์

ขั้นตอนการเตรียมสารเคมี

สารละลายออกซิไดซิงรีเอเจนต์ (oxidizing reagent)

ซังโซเดียมโพลิบเดท (sodium molybdate) 11.75 กรัม ใส่ลงในพลาสติกปริมาตร 1000 มิลลิลิตร แล้วเติมน้ำกลั่น 150 มิลลิลิตร นำลงไปวางในอ่างน้ำแข็ง จากนั้นค่อยเติมกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) เข้มข้น 96 เปอร์เซ็นต์ ปริมาตร 150 มิลลิลิตร แบ่งใส่ 3 ครั้ง ครั้งละ 50 มิลลิลิตร (พัก 5-10 นาทีแล้วค่อยใส่ครั้งต่อไป) ในการเทควรค่อยๆ เทลงตามขอบพลาสติก เมื่อเสร็จแล้วขั้นต่อมาเติม กรดเปอร์คลอริก (HClO_4) ความเข้มข้น 70-72 เปอร์เซ็นต์ จำนวน 200 มิลลิลิตร แบ่งใส่ครั้งละ 50 มิลลิลิตร เช่นกัน ทิ้งไว้ให้เย็นก่อนนำไปใช้

ขั้นตอนการวิเคราะห์

1. ขั้นตอนการย่อย

1.1 ชั่งตัวอย่างใส่เจาคาร์บพลาสติกขนาด 500 มิลลิลิตร โดยชั่งตัวอย่างอาหารประมาณ 1.5 กรัม และชั่งตัวอย่างมูลประมาณ 0.5 กรัม

1.2 เติมน้ำละลายออกซิไดซิงรีเอเจนต์ 12 มิลลิลิตร

1.3 นำไปย่อยบนเตาย่อยด้วยไฟปานกลางจนสารละลายเป็นสีเหลืองหรือส้ม และมีไอน้ำเกาะบริเวณผิวด้านในของหลอด ในขณะที่ย่อยทำการเขย่าพลาสติกเป็นครั้งคราว เพื่อให้ตัวอย่างที่ติดอยู่รอบๆ ขวดถูกออกซิไดซิงรีเอเจนต์ย่อยจนสมบูรณ์ จากนั้นนำไปทิ้งในช่องดูดควันจนเย็น

1.4 เติมน้ำกรดเปอร์คลอริก 3 มิลลิลิตร และนำไปย่อยอีกครั้งจนปรากฏไอน้ำบริเวณผิวด้านในพลาสติก ทิ้งไว้สักครู่จึงนำออกมาใส่ช่องดูดควัน

2. ขั้นตอนการปรับปริมาตร

เทสารละลายที่ได้จากการย่อยลงในขวดวัดปริมาตร 100 มิลลิลิตร ล้างด้วยน้ำกลั่น 3-4 ครั้ง ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น เขย่าให้เข้ากัน แล้วทิ้งไว้ให้เย็น

3. ขั้นตอนการกรอง

กรองสารละลายที่ปรับปริมาตรด้วยกระดาษกรองเบอร์ 40

4. ขั้นตอนการวัดค่าการดูดกลืนแสง

นำสารละลายที่กรองแล้วไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 440 นาโนเมตร เปรียบเทียบกับ blank (ทำทุกขั้นตอนเหมือนตัวอย่างแต่ไม่ได้ใส่ตัวอย่าง) โดยปรับค่าการดูดกลืนแสงของ blank ให้เป็นศูนย์ด้วยการตั้งค่า auto zero

5. ขั้นตอนการคำนวณ

จากวิธีการดังกล่าวเราสามารถคำนวณหาปริมาณโครมิกซ์ออกไซด์ในตัวอย่างอาหาร และผลที่ได้จากการทดลองได้ดังสมการ

$$\text{ปริมาณโครมิกซ์ออกไซด์ (\%)} = \frac{A \times EF \times \text{ml Al} \times 1000}{1000 \times W}$$

A : ค่าการดูดกลืนแสงที่วัดได้

mlAl : ปริมาตรของสารละลายที่ได้หลังจากขั้นตอนการปรับปริมาตร

W : น้ำหนักตัวอย่างที่ใช้ย่อย

EF : ค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นของโครมิกซ์ออกไซด์ระดับต่างๆ จากการทำ standard curve
ค่าการดูดกลืนแสง

ค่า EF โดยปกติมีค่า 389-400 มิลลิกรัมต่อลิตร

วิธีการวิเคราะห์การย่อยได้ของแป้ง (Gibson *et al.*, 1993)

อุปกรณ์

1. หลอดทดลองขนาด 16×100 mm หรือ มีความจุ 12 มิลลิลิตร
2. ไมโครปิเปต (micro – pipettor) ขนาด 100 ไมโครลิตร
3. Combitip ขนาด 12.5 5.0 50.0 มิลลิลิตร
4. Bench centrifuge ความเร็วรอบ 3,000 rpm
5. spectrophotometer
6. เครื่องชั่ง
7. Vortex mixer
8. thermostatted water bath
9. นาฬิกาจับเวลา

สารเคมีที่ใช้และการเตรียม

1. เอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (α -amylase) ความเข้มข้น 10 มิลลิลิตร หรือ 1000 U ต่อ มิลลิลิตร ในแอมโมเนียมซัลเฟต (ammonium sulphate) 3.2 โมลาล์ ทำการเจือจางโดยใช้เอนไซม์ 20 มิลลิลิตรกับ 100 มิลลิโมลาล์ โซเดียมอะซิเตตบัฟเฟอร์ (sodium acetate buffer) เขย่าให้เข้ากัน เก็บไว้ในที่เย็น

2. เอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดส (amylglucosidase) ความเข้มข้น 4 มิลลิลิตร หรือ 200 U ต่อ มิลลิลิตร ในแอมโมเนียมซัลเฟต 3.2 โมลาล์ เจือจางโดยใช้เอนไซม์ 10 มิลลิลิตร ในโซเดียมอะซิเตตบัฟเฟอร์ 100 มิลลิลิตรเก็บไว้ในที่เย็นระหว่างการใช้

3. กลูโคสดีเทอร์มินันซ์ รีเอเจนท์ (glucose determination reagent) (1 ลิตร) เก็บที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของสารหลังจากแตกตัว

กลูโคสออกซิเดส (glucose oxidase) > 12,000 U ต่อลิตร

เปอร์ออกซิเดส (peroxidase) > 650 U ต่อลิตร

4-อะมิโนแอนติไพรีน (4-aminoantipyrine) 0.4 มิลลิโมลาล์

4. กลูโคส รีเอเจนท์บัฟเฟอร์ (เข้มข้น) ((glucose reagent buffer (concentrate)) เก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส มีอายุการใช้งานไม่เกิน 1 ปี เก็บที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส มีอายุการใช้งานมากกว่า 1 ปี ใช้กลูโคส รีเอเจนท์บัฟเฟอร์เข้มข้น 50 มิลลิลิตร การเจือจางโดยใช้น้ำกลั่นปรับปริมาตรให้ได้ 1 ลิตร สารที่ได้เรียกว่า กลูโคสดีเทอร์มิเนชัน รีเอเจนท์ (glucose determination reagent, GOPOD reagent) ความคงตัวของสาร เก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส มีอายุการใช้งาน 2-3 เดือน เก็บที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส มีอายุการใช้งาน 12 เดือน

5. กลูโคสสแตนดาร์ดโซลูชัน (glucose standard solution) ใช้กลูโคส 150 ไมโครกรัม ต่อ 0.1 มิลลิลิตร ในสารละลาย 0.2 เปอร์เซ็นต์ เบนโซอิกแอซิด (benzoic acid)

6. แป้งข้าวสาลี (wheat flour standard)

7. โซเดียมอะซิเตท บัฟเฟอร์ (sodium acetate buffer) 100 มิลลิโมลาล์ pH 5 ใช้แคลเซียมคลอไรด์ 5 มิลลิโมลาล์

7.1 การเตรียมใช้กลาเซียลอะซิติก แอซิด (glacial acetic acid) (5.7 มิลลิลิตร 1.05 กรัม ต่อ มิลลิลิตร)เติมน้ำกลั่น 900 มิลลิลิตร ปรับ pH ให้ได้ 5 โดยการเติม 2 โมลาล์ (8 กรัมต่อ 100 มิลลิลิตร) ของสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide solution) ปริมาณการใช้ 60 มิลลิลิตร

7.2 แคลเซียมคลอไรด์ ในรูปที่ปราศจากน้ำ 0.74 กรัม เติมลงในสารละลายคนให้ละลาย ปรับด้วยน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 1 ลิตร เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

8. กรดซัลฟูริก เจือจาง 0.2 เปอร์เซ็นต์ (dilute sulphuric acid 0.2 % v/v) ใช้กรดซัลฟูริกเข้มข้น ปริมาตร 2.0 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 998 มิลลิลิตร เก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง

ขั้นตอนการวิเคราะห์

1. ชั่งตัวอย่างแป้งประมาณ 100 ± 10 มิลลิกรัม ใส่ลงในหลอด centrifuge ที่มีความจุ 12 มิลลิลิตร
2. อุ่นสารละลาย แอลฟาอะไมเลส (50 U ต่อมิลลิลิตร) ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (5-10 นาที) ในบีกเกอร์ขนาดเล็ก
3. เติมสารละลายแอลฟาอะไมเลสที่อุ่นแล้วในหลอด centrifuge 1.0 มิลลิลิตร ทุกหลอดหลังจากนั้นคนสารละลายกับแป้งให้เข้ากันและนำไปผสมโดยใช้เครื่อง vertex mixer เป็นเวลา 5 นาที และอุ่นที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 10 นาที (เริ่มจับเวลาตั้งแต่ใส่เอนไซม์แอลฟาอะไมเลส)
4. เติมกรดซัลฟูริกเจือจาง 80 มิลลิลิตร และนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3,000 rpm เป็นเวลา 5 นาที หรือนำไปกรอง
5. ผสมสารละลายส่วนใสปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร ใส่ลงในหลอดทดลอง 2 หลอด
6. ใส่สารละลายอะไมโลกลูโคซิเดส 0.1 มิลลิลิตร และนำไปอุ่นที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที
7. เติม GOPOD รีเอเจนท์ 4.0 มิลลิลิตร ลงในหลอดทดลอง (รวมทั้งในหลอดกลูโคสสแตนดาร์ดและหลอดรีเอเจนท์ blank) และนำไปอุ่นที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที
8. นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร

ขั้นตอนการคำนวณ

สมการที่ใช้ในการคำนวณ

$$\begin{aligned}\text{Starch Damage \%} &= \Delta E \times F \times 90 \times \frac{1}{1000} \times \frac{100}{W} \times \frac{162}{180} \\ &= \Delta E \times \frac{F}{W} \times 8.1\end{aligned}$$

ΔE = ผลต่างระหว่างค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่างและรีเอเจนต์ blank

F = $\frac{150 \text{ (นาโนกรัมของกลูโคส)}}{\text{ค่าการดูดกลืนแสง 150 นาโนกรัมของกลูโคส}}$ (เปลี่ยนหน่วยจากค่าการดูดกลืนแสงเป็นนาโนกรัม)

90 = ปรับปริมาตร (0.1 มิลลิกรัม มาจาก 9.0 มิลลิกรัม)

$\frac{1}{1000}$ = เปลี่ยนหน่วยจากไมโครกรัมเป็นมิลลิกรัม

$\frac{100}{W}$ = เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแป้ง

W = น้ำหนักเป็นมิลลิกรัมของแป้งที่ทำการทดสอบ

$\frac{162}{180}$ = การปรับจากกลูโคสอิสระให้มาอยู่ในรูปไฮโดรไรด์กลูโคส