



ใบรับรองวิทยานิพนธ์

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

วิทยาศาสตร์คณิบัณฑิต (สัตวศาสตร์)

ปริญญา

สัตวศาสตร์

สัตวบาล

สาขา

ภาควิชา

เรื่อง การศึกษาการเอกซ์ทรูชั่นข้าวโพด และการใช้ประโยชน์ของข้าวโพดเอกซ์ทรูดในลูกสุกร และไก่กระพง

The Studies of Extrusion Process and Utilization of Extruded Corn in Piglets and Broiler Chickens.

นามผู้วิจัย นางสาวสายชล เลิศสุวรรณ

ได้พิจารณาเห็นชอบโดย

ประธานกรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์เสกสม อามามกุล, Ph.D.)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์นวลจันทร์ พารักษา, Dr. Agr.)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ชัยภูมิ ปัญชาศักดิ์, Ph.D.)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณัฐชนก อมรเทวภัทร, Ph.D.)

กรรมการ

(รองศาสตราจารย์ปณทริกา หะริณสูตร, Dr. Agr.)

หัวหน้าภาควิชา

(รองศาสตราจารย์ชัยภูมิ ปัญชาศักดิ์, Ph.D.)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์รับรองแล้ว

(รองศาสตราจารย์กัญจนา ชีระกุล, D.Agr.)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

วันที่ เดือน พ.ศ.

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

การศึกษาการเอกซ์ทรูชันข้าวโพด และการใช้ประโยชน์ของข้าวโพดเอกซ์ทรูดในลูกสุกรและ
ไก่กระตัง

The Studies of Extrusion Process and Utilization of Extruded Corn in Piglets and
Broiler Chickens.

โดย

นางสาวสายชล เลิศสุวรรณ

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต (สัตวศาสตร์)

พ.ศ. 2551

สาขชล เลิศสุวรรณ 2551: การศึกษาการเอกซ์ทรูชันข้าวโพด และการใช้ประโยชน์ของข้าวโพดเอกซ์
ทรูดในลูกสุกรและไก่กระทอง ปริญญาวิทยาศาสตรดุษฎีบัณฑิต (สัตวศาสตร์) สาขาสัตวศาสตร์
ภาควิชาสัตวบาล ประธานกรรมการที่ปรึกษา: ผู้ช่วยศาสตราจารย์เสกสม อาคมางกูร, Ph.D. 110 หน้า

การทดลองที่ 1 อัตราการไหลของน้ำในกระบวนการเอกซ์ทรูชันข้าวโพดต่อกระบวนการผลิตและ
การใช้ประโยชน์ของแป้ง การเอกซ์ทรูดข้าวโพดทั้งเมล็ดใช้อัตราการไหลของน้ำในกระบวนการผลิต 3 ระดับ
คือที่ระดับ 16, 19 และ 22 l/h ส่วนการเอกซ์ทรูดข้าวโพดบดหยาบใช้อัตราการไหลของน้ำในกระบวนการผลิต
ที่ระดับ 18, 22 และ 24 l/h ผลการศึกษาจากทั้งกระบวนการเอกซ์ทรูดข้าวโพดทั้งเมล็ดและข้าวโพดบดหยาบ
พบว่า เมื่ออัตราการไหลของน้ำเพิ่มขึ้น จะใช้ค่าพลังงานไฟฟ้าในการเอกซ์ทรูดลดลง ($P<0.01$) ความชื้นและ
ความหนาแน่นในวัตถุดิบหลังกระบวนการผลิตมีค่าสูงขึ้น ($P<0.05$) พลังงานที่ใช้ในการบดละเอียดเพิ่มสูงขึ้น
($P<0.01$) และค่าการเข้าย่อยได้ของเอนไซม์ลดลง ($P<0.05$) นอกจากนี้ข้าวโพดเอกซ์ทรูดที่ได้จากทั้ง 2
กระบวนการผลิตพบว่ามีความชื้นและไขมันลดลงเมื่อเทียบกับข้าวโพดที่ไม่ผ่านกระบวนการ

การทดลองที่ 2 ระยะเวลาการเก็บรักษาต่อองค์ประกอบทางโภชนะและการหีนของข้าวโพด
เอกซ์ทรูด การเอกซ์ทรูชันข้าวโพดมีผลทำให้ความชื้น, ไขมัน และค่า TBA ในข้าวโพดลดลง ($P<0.01$) และ
เมื่อเก็บรักษาวัตถุดิบข้าวโพดและข้าวโพดเอกซ์ทรูดเป็นระยะเวลา 2 เดือน พบว่าปริมาณความชื้นและค่า TBA
ของทั้งสองวัตถุดิบเพิ่มขึ้น ($P<0.01$) แต่ไม่มีผลต่อปริมาณโปรตีน, ไขมัน และเถ้า นอกจากนี้ปริมาณความชื้นมี
ความสัมพันธ์ในทางบวกกับค่า TBA ทั้งในข้าวโพดและข้าวโพดเอกซ์ทรูด และเมื่อระยะเวลาเก็บรักษาที่นาน
ขึ้นมีแนวโน้มว่าข้าวโพดจะมีค่า TBA สูงขึ้นมากกว่าในข้าวโพดเอกซ์ทรูด

การทดลองที่ 3 การใช้ประโยชน์ของข้าวโพดเอกซ์ทรูดในอาหารลูกสุกรระยะอนุบาล โดยศึกษาค่า
พลังงานใช้ประโยชน์ได้ของข้าวโพดเอกซ์ทรูดและสมรรถภาพการผลิต ค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้ของ
ข้าวโพดเอกซ์ทรูดมีค่าเท่ากับ 3653 kcal/kg เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวโพดมีค่าเท่ากับ 3497 kcal/kg สุกรได้รับ
อาหารที่มีการใช้ข้าวโพดเอกซ์ทรูดมีอัตราการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพการใช้อาหารต่ำกว่าสุกรได้รับ
อาหารที่มีการใช้ข้าวโพดหรือปลายข้าว ($P<0.05$) แต่ไม่มีผลกระทบต่อการกินได้และอัตราการตายของสุกร

การทดลองที่ 4 ศึกษาการใช้ข้าวโพดเอกซ์ทรูดต่อค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้และสมรรถภาพการ
ผลิตในไก่กระทอง ค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้ของข้าวโพดเอกซ์ทรูดมีค่าเท่ากับ 2716 kcal/kg เมื่อเปรียบเทียบกับ
ข้าวโพดมีค่าเท่ากับ 3127 kcal/kg ไก่ได้รับอาหารที่มีการใช้ข้าวโพดเอกซ์ทรูดมีอัตราการเจริญเติบโต
ปริมาณอาหารที่กิน และประสิทธิภาพการใช้อาหาร แตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญกับกลุ่มควบคุม การให้อาหาร
ข้าวโพดเอกซ์ทรูดในลักษณะอาหารอัดเม็ดมีผลในการปรับปรุงอัตราการผลิตไข่ และประสิทธิภาพการใช้อาหาร
($P<0.01$)

Saichon Lerdswon 2008: The Studies of Extrusion Process and Utilization of Extruded Corn in Piglets and Broiler Chickens. Doctor of Philosophy (Animal Science), Major Field: Animal Science, Department of Animal Science. Thesis Advisor: Assistant Professor Seksom Attamangkune, Ph. D. 110 pages.

Experiment 1: Rate of water flow (l/h) in extrusion process of corn were studied in order to determine the processing characteristics and starch utilization. Whole corn kernel was extruded with three different water flow rate (16, 19 and 22 l/h) whereas the ground corn was extruded at 18, 22 and 24 l/h of water flow rate. The results from both studies indicated that the increase in water flow rate subsequently decreased ($P<0.01$) the extruding electrical energy consumption, increased ($P<0.05$) the moisture and bulk density of coarse extruded corn, increased ($P<0.01$) the grinding electrical energy consumption and decreased ($P<0.05$) the enzyme susceptibility. In addition extruded corn from both studies was found to have lower moisture and fat contents compared to the whole corn kernel.

Experiment 2: The storage time of ground corn and extruded corn was studied to elucidate its effect on nutrients and rancidity characteristics. The extrusion process decreased ($P<0.01$) the moisture, fat and TBA value of corn. The increase in storage time (up to 2 months period) increased ($P<0.01$) both moisture and TBA value. However, the protein, fat and ash contents were not significantly different. Besides the moisture content in both ground corn and extruded corn had positive correlation with TBA value and ground corn subjected to longer storage time tended to have higher TBA value than extruded corn.

Experiment 3: Extruded corn was utilized in nursery pigs diets in order to determine the ME value of extruded corn and growth performance characteristics. The ME of extruded corn was found to be 3653 kcal/kg compared to 3497 kcal/kg in ground corn. Pigs fed extruded corn diets demonstrated lower ($P<0.05$) ADG and FCR than those fed ground corn or broken rice diets. No significant differences in daily feed intake and mortality were observed among the dietary treatments.

Experiment 4: ME value and growth performance of broilers fed extruded corn were studied in this experiment. The ME value of extruded corn were 2716 kcal/kg compared to 3127 kcal/kg in ground corn. Broiler chickens fed extruded corn diet were not significantly different in growth rate, feed intake and FCR compared to control diet. Feed pelletization of extruded corn diet was found to improved ($P<0.01$) ADG and FCR.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

____ / ____ / ____

กิตติกรรมประกาศ

ความสำเร็จในงานวิจัยครั้งนี้ ข้าพเจ้าได้รับความช่วยเหลือจากหลายฝ่ายด้วยกัน ณ โอกาสนี้จึงใคร่ขอกราบขอบพระคุณ ผศ.ดร.เสกสม อาตมางกูร ประธานกรรมการที่ปรึกษา รศ.ดร. นวลจันทร์ พารักษา รศ.ดร.ชัยภูมิ บัญชาศักดิ์ และ ผศ.ดร. ณัฐชนก อมรเทวภัทร กรรมการวิชาหลัก และ รศ.ดร.ปทุมทริกา หะริณสูตร กรรมการวิชาการ ที่กรุณาให้คำปรึกษา แนะนำ ในด้านการทดลอง การเรียบเรียงและการตรวจสอบวิทยานิพนธ์ จนเสร็จสมบูรณ์ ขอกราบขอบพระคุณผู้แทนบัณฑิตวิทยาลัย ศ.ดร.สายัณห์ ทัดศรี ที่กรุณาให้คำแนะนำและแก้ไขวิทยานิพนธ์

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้การสนับสนุนเงินทุนในการทดลอง และขอขอบคุณบริษัทไบ-โอเจน ฟีดมิลล์ จำกัด ที่กรุณาให้อาหารสัตว์และอาหารทดลองที่ใช้ในการทดลอง

ขอขอบคุณบิดา มารดา ขอขอบคุณพี่ชาย ที่ให้การสนับสนุนและให้กำลังใจเสมอมาในการศึกษา ขอขอบคุณเพื่อนๆ น้องๆ นิสิตที่บางเขนและกำแพงแสน ที่ให้กำลังใจช่วยเหลือตลอดมา

ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการสาขาวิชากระบวนการทางเคมีและฟิสิกส์ คณะอุตสาหกรรมและห้องปฏิบัติการภาควิชาสัตวบาล วิทยาเขตกำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในระหว่างการทดลอง ขอขอบคุณศูนย์วิจัยและพัฒนาการผลิตสัตว์ปีก, ศูนย์วิจัยและพัฒนาการผลิตสุกรมมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และบริษัท ไบ-โอเจน ฟีดมิลล์ จำกัด จ.ลำพูน ที่ให้การสนับสนุนสถานที่ทดลอง อาหารสัตว์ และสัตว์ทดลองในการทดลองในครั้งนี้

สายชล เลิศสุวรรณ

พฤศจิกายน 2551

สารบัญ

	หน้า
สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(5)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	23
อุปกรณ์	23
วิธีการ	24
ผลและวิจารณ์	42
สรุปและข้อเสนอแนะ	76
สรุป	76
ข้อเสนอแนะ	77
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	78
ภาคผนวก	89
ภาคผนวก ก วิธีการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ	90
ภาคผนวก ข ค่าคุณสมบัติสภาพแวดล้อมในการทดลอง	102
ภาคผนวก ค ข้าวโพดเอกซ์ทรัค	107
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	110

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
1 องค์ประกอบทางโภชนาของข้าวโพดและข้าวโพดเอกซ์ทรูด	5
2 ส่วนประกอบวัตถุดิบของอาหารทดลองพลังงานใช้ประโยชน์ได้ในสุกร	29
3 ส่วนประกอบวัตถุดิบของอาหารทดลองสำหรับสุกรในระยะอนุบาล	32
4 ส่วนประกอบทางโภชนาจากการคำนวณในอาหารทดลอง	33
5 ส่วนประกอบวัตถุดิบของอาหารสูตรควบคุมที่ใช้ในการศึกษาค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้ของไก่กระตัง	35
6 กระบวนการผลิตข้าวโพดเอกซ์ทรูด	37
7 วัตถุดิบและส่วนประกอบทางโภชนาของอาหารทดลองในการศึกษาสมรรถภาพการผลิตไก่กระตัง	39
8 ส่วนประกอบทางโภชนาของอาหารทดลองในการศึกษาสมรรถภาพการผลิตไก่กระตัง	40
9 ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิและความชื้น ($\pm$ SD) ในกระบวนการเอกซ์ทรูดข้าวโพดทั้งเมล็ดที่อัตราการไหลของน้ำระดับต่าง ๆ	43
10 ค่าเฉลี่ยพลังงานไฟฟ้าและกำลังการผลิต($\pm$ SD) ในกระบวนการเอกซ์ทรูดข้าวโพดทั้งเมล็ดที่อัตราการไหลของน้ำระดับต่าง ๆ	44
11 คุณลักษณะทางกายภาพของข้าวโพดเอกซ์ทรูดที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูดข้าวโพดทั้งเมล็ดที่อัตราการไหลของน้ำระดับต่าง ๆ	46
12 ค่าเฉลี่ยองค์ประกอบทางเคมี ($\pm$ SD) ของข้าวโพดบดและข้าวโพดเอกซ์ทรูดที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูดข้าวโพดทั้งเมล็ดที่อัตราการไหลของน้ำระดับต่าง ๆ	47
13 ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิและความชื้น ($\pm$ SD) ในกระบวนการเอกซ์ทรูดข้าวโพดบดหยาบที่อัตราการไหลของน้ำระดับต่าง ๆ	48
14 ค่าเฉลี่ยพลังงานไฟฟ้าและกำลังการผลิต($\pm$ SD) ในกระบวนการเอกซ์ทรูดข้าวโพดบดหยาบที่อัตราการไหลของน้ำระดับต่าง ๆ	50

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่	หน้า	
15	คุณลักษณะทางกายภาพของข้าวโพดเอกซ์ทรูดที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูดชั้นข้าวโพดบดหยาบ ($\pm$ SD) ที่อัตราการไหลของน้ำระดับต่าง ๆ	51
16	ค่าเฉลี่ยองค์ประกอบทางเคมี ($\pm$ SD) ของข้าวโพดบดและข้าวโพดเอกซ์ทรูดที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูดชั้นข้าวโพดบดหยาบที่อัตราการไหลของน้ำระดับต่าง ๆ	52
17	องค์ประกอบทางโภชนาและค่า TBA number ($\pm$ SD) ในข้าวโพดบดและข้าวโพดเอกซ์ทรูดในช่วงระยะเวลาเก็บ 0 – 8 สัปดาห์	54
18	ส่วนประกอบทางโภชนาของวัตถุดิบข้าวโพดและข้าวโพดเอกซ์ทรูด ($\pm$ SD) จากการวิเคราะห์คิดเป็นน้ำหนักแห้ง	58
19	ผลของข้าวโพดและข้าวโพดเอกซ์ทรูดต่อสมรรถภาพการผลิตของลูกสุกร ($\pm$ SD) ในช่วงระยะอายุ 4 – 7 สัปดาห์	59
20	ผลของข้าวโพดและข้าวโพดเอกซ์ทรูดต่อสมรรถภาพการผลิต ($\pm$ SD) ของลูกสุกรในช่วงระยะอายุ 8 – 9 สัปดาห์	60
21	ผลของข้าวโพดและข้าวโพดเอกซ์ทรูดต่อสมรรถภาพการผลิต ($\pm$ SD) ของลูกสุกรในช่วงระยะอายุ 4 – 9 สัปดาห์	61
22	ส่วนประกอบทางโภชนาของวัตถุดิบข้าวโพดและข้าวโพดเอกซ์ทรูด ($\pm$ SD) จากการวิเคราะห์ คิดเป็นน้ำหนักแห้ง	63
23	ผลของกระบวนการเอกซ์ทรูดชั้นและลักษณะของอาหารต่อสมรรถภาพการผลิต ($\pm$ SD) ในไก่กระทองในช่วงระยะอายุ 1 – 21 วัน	66
24	ผลของกระบวนการเอกซ์ทรูดชั้นและลักษณะของอาหารต่อสมรรถภาพการผลิต ($\pm$ SD) ในไก่กระทองในช่วงระยะอายุ 22 – 42 วัน	67
25	อิทธิพลร่วม (interaction) ระหว่างกระบวนการผลิตและลักษณะอาหารต่อสมรรถภาพการผลิตไก่กระทอง ($\pm$ SD) ในระยะอายุ 1 - 21 และ 22 – 42 วัน	68
26	ผลของกระบวนการเอกซ์ทรูดชั้นและลักษณะของอาหารต่อสมรรถภาพการผลิต ($\pm$ SD) ในไก่กระทองในช่วงระยะอายุ 43 - 49 วัน	70

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
27	ผลของกระบวนการเอกซ์ทรูชันและลักษณะของอาหารต่อสมรรถภาพการผลิต ($\pm$ SD) ในไก่กระทงในช่วงระยะอายุ 1 - 49 วัน	71
28	อิทธิพลร่วม (interaction) ระหว่างกระบวนการผลิตและลักษณะอาหารต่อสมรรถภาพการผลิต ($\pm$ SD) ไก่กระทงในระยะอายุ 43 - 49 และ 1 - 49 วัน	72
ตารางผนวกที่		
ข1	อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ตลอดระยะเวลาในการศึกษาระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อองค์ประกอบทางเคมี และการหีนในข้าวโพดและข้าวโพดเอกซ์ทรูด	103
ข2	อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ตลอดระยะเวลาในการศึกษาค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้ของข้าวโพดและข้าวโพดเอกซ์ทรูดในสุกรระยะอนุบาล	104
ข3	อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ตลอดระยะเวลาในการศึกษาผลของข้าวโพดและข้าวโพดเอกซ์ทรูดต่อสมรรถภาพการผลิตสุกรในระยะอนุบาล	104
ข4	อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ตลอดระยะเวลาในการศึกษาค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้ของข้าวโพดและข้าวโพดเอกซ์ทรูดในไก่กระทง	105
ข5	อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ตลอดระยะเวลาในการศึกษาผลของข้าวโพดและข้าวโพดเอกซ์ทรูดในลักษณะอาหารผงและอาหารอัดเม็ดต่อสมรรถภาพการผลิตไก่กระทง	106

สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
1 เครื่องเอกซัทรูชั่นแบบเกลียวเดี่ยว	9
2 เครื่องคลุกไอน้ำและอัดเม็ดอาหารสัตว์	14
3 ลักษณะงานอัดและคลุกกลิ้งภายในเครื่องอัดเม็ด	14
4 โครงสร้างของเม็ดแป้ง	15
5 ระยะเวลาในการเกิดเจลลิตินในเซชันของเม็ดแป้ง	16
6 การเกิดปฏิกิริยาของ 2-Thiobarbituric acid กับ Malonaldehyde	21
7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการหืน (TBA number) กับความชื้นในข้าวโพดบด	55
8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการหืน (TBA number) กับความชื้นในข้าวโพดเอกซัทรูด	56
9 ค่า TBA number ในข้าวโพดบดและข้าวโพดเอกซัทรูดในระยะเวลาการเก็บรักษา 0-8 สัปดาห์	56
ภาพผนวกที่	
ก1 ข้าวโพดทั้งเมล็ดที่ผ่านกระบวนการเอกซัทรูชั่น ณ อัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่อง ที่ 16, 19 และ 22 ลิตร/ชั่วโมง	108
ก2 ข้าวโพดบดหยาบที่ผ่านกระบวนการเอกซัทรูชั่น ณ อัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องที่ 18, 22 และ 24 ลิตร/ชั่วโมง	108
ก3 รางอาหารของลูกสุกรที่ใช้อาหารสูตรปลายข้าว, ข้าวโพด และข้าวโพดเอกซัทรูด	109

การศึกษาการเอกซ์ทรูชันข้าวโพด และการใช้ประโยชน์ของข้าวโพดเอกซ์ทรูดในลูก สุกรและไก่กระตัง

The Studies of Extrusion Process and Utilization of Extruded Corn in Piglets and Broiler Chickens

คำนำ

ในการเลี้ยงสัตว์เศรษฐกิจนั้น ต้นทุนค่าอาหารสัตว์ถือว่าเป็นต้นทุนส่วนใหญ่ในการผลิตสัตว์ และราคาอาหารสัตว์นั้นจะผันแปรไปตามราคาวัตถุดิบอาหารสัตว์ ซึ่งข้าวโพดถือว่าเป็นแหล่งอาหารพลังงานที่นิยมใช้ และผลผลิตสองในสามของข้าวโพดทั่วโลกถูกใช้ในอุตสาหกรรมการผลิตอาหารสัตว์ อนึ่งเนื่องจากสถานการณ์ในปีที่ผ่านมา น้ำมันมีราคาแพงขึ้น ข้าวโพดถูกนำไปใช้ในการผลิตเอทานอลเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานทดแทน ทำให้เกิดการแข่งขันกันระหว่างอุตสาหกรรมการผลิตเอทานอลและอาหารสัตว์ ส่งผลให้เกิดการขาดแคลนข้าวโพดที่ใช้ในการผลิตอาหารสัตว์ ดังนั้นด้วยเหตุผลดังกล่าวนี้จึงมีการศึกษาและวิจัยในการใช้ข้าวโพดให้เกิดประโยชน์สูงสุดในการผลิตอาหารสัตว์ โดยนำกระบวนการแปรรูปอาหารสัตว์ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งที่มีความสำคัญ และเป็นการส่งเสริมให้สัตว์กินอาหารโดยปราศจากการสูญเสีย ทำให้สามารถนำโภชนะในอาหารไปใช้ประโยชน์อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

กระบวนการเอกซ์ทรูชัน (extrusion) เป็นวิธีการหนึ่งที่นิยมใช้ในกระบวนการแปรรูปอาหารสัตว์ ส่วนใหญ่ในโรงงานอาหารสัตว์จะใช้เครื่องเอกซ์ทรูชันแบบแห้งในการผลิตกากถั่วเหลืองไขมันเต็ม (full fat soybean) ดังนั้นจึงมีแนวความคิดในการนำกระบวนการเอกซ์ทรูชันมาใช้ในการแปรรูปข้าวโพดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการใช้ประโยชน์ของข้าวโพด เนื่องจากกระบวนการเอกซ์ทรูชัน เป็นเทคนิคการแปรรูปอาหารที่ใช้อุณหภูมิและความดันสูง โดยอาศัยแรงอัดและการเสียดสี ทำให้วัตถุดิบเกิดการเจลาติไนเซชัน (gelatinization) โครงสร้างของเม็ดแป้งภายในข้าวโพดเกิดการเปลี่ยนแปลง มีการพองตัวมีลักษณะฟู มีกลิ่นหอมของข้าวโพด เพิ่มความน่ากินให้แก่วัตถุดิบอาหารสัตว์ และการเกิดเป็นรูปพูนในวัตถุดิบ ซึ่งเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวสัมผัสของวัตถุดิบกับเอนไซม์ มีผลทำให้เอนไซม์อะไมเลส สามารถเข้าย่อยแป้งได้มากขึ้น (Hongtrakul *et al.* ,1998; Moraru and Kokini , 2003) นอกจากนี้ยังพบว่าระดับการเจลาติไนซ์ของแป้งใน

ข้าวโพดที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันจะเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องลดลง (Hongtrakul *et al.*, 1998) ทำให้การย่อยได้ของแป้งเพิ่มขึ้น (Riaz, 2000) และจากงานวิจัยต่างๆ พบว่า กระบวนการเอกซ์ทรูชันปรับปรุงพลังงานการย่อยได้ (Noland *et al.*, 1976; Skoch *et al.*, 1983) การย่อยได้ของโปรตีน (Noland *et al.*, 1976) และ เพิ่มประสิทธิภาพการใช้อาหารในสุกร (Chae *et al.*, 2000)

ดังนั้นในงานวิจัยครั้งนี้จึงทำการศึกษาดังแต่กระบวนการผลิตข้าวโพดเอกซ์ทรูด โดย การศึกษาระดับอัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องเอกซ์ทรูชันที่เหมาะสมต่อกระบวนการผลิต และการ ใช้ประโยชน์ได้ของแป้งในข้าวโพด ศึกษาผลของระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อองค์ประกอบทาง โภชนะและการเกิดการหืน นอกจากนี้มีการศึกษาในสัตว์ทดลองเพื่อหาค่าพลังงานการใช้ ประโยชน์และสมรรถภาพการผลิตทั้งในสุกรระยะอนุบาลและไก่กระທ

วัตถุประสงค์

1. ศึกษาผลของอัตราการใช้ของน้ำในกระบวนการเอ็กซ์ทรักชันต่อกระบวนการผลิตและการใช้ประโยชน์ได้ของแป้งในข้าวโพด
2. ศึกษาระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อองค์ประกอบทางโภชนาและการหืน (rancidity) ในข้าวโพดเอ็กซ์ทรักต์
3. ศึกษาผลของการใช้ข้าวโพดเอ็กซ์ทรักต์ต่อค่าพลังงานการใช้ประโยชน์ (metabolizable energy) และสมรรถภาพการผลิตในสุกรระยะอนุบาล
4. ศึกษาผลของการใช้ข้าวโพดเอ็กซ์ทรักต์ต่อค่าพลังงานการใช้ประโยชน์ (metabolizable energy) และสมรรถภาพการผลิตในไก่กระທ

การตรวจเอกสาร

ข้าวโพด

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของข้าวโพด มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Zea Mays* L. ชื่อสามัญว่า Maize และ corn มีต้นกำเนิดในทวีปอเมริกา แล้วกระจายไปยังทวีปแอฟริกา อินเดีย ออสเตรเลีย และประเทศในยุโรปที่มีอากาศอบอุ่น ข้าวโพดมีหลายพันธุ์ เช่น หัวแข็ง (dent) หัวนุบ (flint) ป๊อป (pop) แป้ง (flour) และข้าวเหนียว (waxy) (กล้าณรงค์และเกื้อกูล, 2546) โดยข้าวโพดเลี้ยงสัตว์จัดว่าเป็นพืชที่มีความสำคัญอันดับ 3 ของโลกรองจากข้าวสาลีและข้าว มีการผลิตโดยทั่วไปในเขตอากาศอบอุ่น (temperate) เขตอากาศกึ่งร้อนชื้น (subtropics) และพื้นที่ราบเขตร้อน (lowland tropic) (กรมวิชาการเกษตร, 2547) แหล่งที่ปลูก ข้าวสาลี ข้าว และข้าวโพด มากที่สุดในโลกได้แก่ สหรัฐอเมริกา รองลงมาคือ สาธารณรัฐประชาชนจีน บราซิล เม็กซิโก แอฟริกาใต้ และในประเทศไทยข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ เป็นพืชไร่ที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ สามารถทำรายได้ให้ประเทศคิดเป็นมูลค่าปีละประมาณ 20,000 ล้านบาท โดยตลาดส่งออกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ของไทยที่สำคัญได้แก่ เวียดนาม ฟิลิปปินส์ อินโดนีเซีย มาเลเซีย ปากีสถาน ไต้หวัน กัมพูชา สิงคโปร์ ญี่ปุ่น และ พม่า เป็นต้น (กระทรวงพาณิชย์, 2549) และประเทศไทยมีพื้นที่การเพาะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ปีละประมาณ 8.6 ล้านไร่ ผลผลิตที่ได้ส่วนใหญ่จะใช้เพื่อบริโภคภายในประเทศ ส่วนที่เหลือส่งออกไปจำหน่ายยังตลาดต่างประเทศ โดยพื้นที่การปลูกที่สำคัญอยู่ใน 3 ภาคของประเทศไทย ได้แก่ภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และภาคกลาง คิดเป็นร้อยละ 48, 26 และ 25 ของพื้นที่เพาะปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ทั้งหมด ซึ่งข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ที่ผลิตได้ประมาณร้อยละ 90 ใช้เป็นวัตถุดิบทางด้านอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ (กรมวิชาการเกษตร, 2547)

นักวิทยาศาสตร์ได้จัดข้าวโพดไว้เป็นหมวดหมู่ดังนี้

วงศ์ (family): Gramineae

วงศ์ย่อย (sub family): Panicoideae

สกุล (genus): Zea

ชนิด (species): Mays

พันธุ์ที่นิยมปลูก ส่วนใหญ่จะนิยมปลูกพันธุ์ลูกผสม ประมาณร้อยละ 90 ของพื้นที่ปลูกทั้งหมด ได้แก่ ซีพีเค 888, ซีพี 989, ไพโอเนีย 3013, ข้าวไร่ 11, เอ 33, แปซิฟิก 983, คาร์กิลล์ 919, บิ๊ก 717 เป็นต้น และข้าวโพดที่นำมาใช้เป็นอาหารสัตว์มี 2 ชนิดคือ ข้าวโพดไร่ชนิดหัวแข็ง (flint corn) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Zea mays indurata* มีลักษณะเมล็ดค่อนข้างแข็งแรง กลม เรียบ หัวไม่บุบ เพราะมีแป้งชนิดอ่อน (soft starch) อยู่ตอนกลาง แต่ด้านนอกถูกห่อหุ้มด้วยแป้งชนิดแข็ง (hard starch) เมื่อตากแห้งจึงไม่หดตัว มีขนาดฝักและจำนวนแถวน้อยกว่าชนิดหัวบุบ ส่วนข้าวโพดไร่ชนิดหัวบุบ (dent corn) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Zea mays indentata* เมล็ดตอนบนมีรอยบุบสีขาว เนื่องจากตอนบนเป็นแป้งชนิดอ่อน และด้านข้างเมล็ดเป็นแป้งชนิดแข็ง เมื่อตากให้แห้งส่วนที่เป็นแป้งอ่อนจึงหดยุบตัวและเกิดลักษณะหัวบุบดังกล่าว (กรมวิชาการเกษตร, 2547)

คุณค่าทางโภชนาของข้าวโพดและความสำคัญของการโบไฮเดรต

ข้าวโพดเป็นธัญพืชที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้หลายประเภท ไม่ว่าจะเป็นอาหารมนุษย์หรืออาหารสัตว์ ได้แก่อาหารสัตว์ปีกและปศุสัตว์ เนื่องจากเมล็ดข้าวโพดมีองค์ประกอบที่สำคัญหลายชนิดได้แก่ คาร์โบไฮเดรต 70 - 73 เปอร์เซ็นต์ โปรตีน 8 - 9 เปอร์เซ็นต์ ไขมัน 3 - 4 เปอร์เซ็นต์ และวิตามิน 1 - 2 เปอร์เซ็นต์ ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางโภชนาของข้าวโพดและข้าวโพดเอกซ์ทรา

ส่วนประกอบโภชนา	ข้าวโพด			ข้าวโพดเอกซ์ทรา
	Lee <i>et al.</i> (2001)	Hongtrakul <i>et al.</i> (1998)	Herkelman <i>et al.</i> (1990)	Herkelman <i>et al.</i> (1990)
ความชื้น (%)	13.29	12.36	12.16	12.14
โปรตีน (%)	8.22	8.57	8.84	8.25
ไขมัน (%)	3.40	3.51	3.56	2.94
เยื่อใย (%)	1.88	1.85	2.30	2.32
เถ้า (%)	1.22	1.03	1.20	1.24
NFE (%) ¹	71.99	72.68	71.94	73.11

¹ ไนโตรเจนฟรีเอกซ์แทรก (NFE) = %วัตถุแห้ง - %โปรตีนรวม - %ไขมัน - %เยื่อใย - %เถ้า

องค์ประกอบส่วนใหญ่ที่มีในข้าวโพดคือคาร์โบไฮเดรต ซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญในอาหารสัตว์ และคาร์โบไฮเดรตในอาหารสัตว์ส่วนใหญ่ได้มาจากพืช โดยมีแป้งและน้ำตาลเป็นส่วนประกอบหลัก แบ่งออกเป็น 2 ประเภทคือ

1) ส่วนของคาร์โบไฮเดรตที่เป็นแป้ง เป็นส่วนของคาร์โบไฮเดรตที่ข่อยง่าย (nitrogen free extract; NFE) ทำหน้าที่เป็นแหล่งพลังงานหลักในอาหารสัตว์ (บุญล้อม, 2546) แต่ในเมล็ดธัญพืชมีสัดส่วนของแป้ง NFE ที่แตกต่าง ทำให้ความสามารถในการย่อยแป้งแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับพื้นที่ผิวสัมผัสของเมล็ดแป้ง โครงสร้างของแป้ง ระดับการจับตัวแน่น และขนาดของเมล็ดแป้ง วัตถุดิบที่มีเมล็ดแป้งขนาดเล็กจะถูกย่อยได้เร็วกว่าวัตถุดิบที่มีเมล็ดแป้งขนาดใหญ่ เม็ดแป้งประกอบด้วยโมเลกุลของอะมิโลสและอะมิโลเพกติน อะมิโลส (amylose) หรือพอลิเมอร์เชิงเส้น ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 2,000 หน่วย เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,4 Glucosidic linkage ขณะที่อะมิโลเพกติน (amylopectin) หรือพอลิเมอร์เชิงกิ่งประกอบด้วยส่วนที่เป็นเส้นตรงของกลูโคสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,4 Glucosidic linkage และส่วนที่เป็นกิ่งก้านสาขาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ α -1,6 Glucosidic linkage ซึ่งสัดส่วนของอะมิโลสและอะมิโลเพกตินในข้าวโพดคือ 28 : 72 และในมันสำปะหลังคือ 17 : 83 และแป้งที่มีอะมิโลสสูงจะย่อยได้น้อยกว่าแป้งที่มีอะมิโลสต่ำ เนื่องจากอะมิโลสสามารถรวมตัวกับไขมันเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของอะมิโลสกับไขมัน เกิดเป็นผลึกอย่างอ่อนไปเสริมความแข็งแรงให้แก่เม็ดแป้ง ทำให้เม็ดแป้งพองตัวช้า (Classen, 1996; กล้าณรงค์ และ เกื้อกุล, 2546) ซึ่งแป้งในข้าวโพดจะเป็นแป้งชนิดแข็ง (hard starch) ควบน้ำได้ช้า และเกิดการเจลาคีไนซ์ในระบบทางเดินอาหารช้าตามไปด้วย สัตว์ต้องใช้เวลานานขึ้นในการย่อยข้าวโพดเมื่อเทียบกับแป้งมันสำปะหลังเป็นแป้งชนิดอ่อน (soft starch) สามารถควบน้ำได้เร็ว และเกิดการเจลาคีไนซ์ (gelatinization) ได้เร็วในระบบทางเดินอาหารของสัตว์ จึงทำให้แป้งข้าวโพดละลายน้ำและพองตัวได้ยาก จับตัวเป็นก้อน สัตว์จึงย่อยข้าวโพดได้ยากกว่ามันสำปะหลัง และมากกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ ของอินทรีย์สารและวัตถุแห้งของมันเส้นและมันอัดเม็ดถูกย่อยในลำไส้เล็กส่วนต้น และมีการย่อยเพิ่มอีกเพียงเล็กน้อย (< 2 เปอร์เซ็นต์) ในส่วนของอีเลียม ขณะที่ข้าวโพดถูกย่อยในลำไส้เล็กส่วนต้นเพียง 57 - 58 เปอร์เซ็นต์ และมีการย่อยเพิ่มเติม (4 เปอร์เซ็นต์) ในส่วนของอีเลียม ซึ่งน้อยกว่ามันเส้นและมันอัดเม็ด (สุวรรณ, 2548) เนื่องจากขนาดอนุภาคของแป้งในมันสำปะหลังมีขนาดเล็กกว่าแป้งในข้าวโพด เมื่อบดผ่านตะแกรงขนาด 2.75 มิลลิเมตร ทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสกับเอนไซม์มากกว่า (Weurding *et al.*, 2001)

2) ส่วนของคาร์โบไฮเดรตที่ไม่ใช่แป้ง (non-starch carbohydrate, NSC) คาร์โบไฮเดรตประเภทนี้ไม่สามารถถูกย่อยด้วยเอนไซม์ในสัตว์กระเพาะเดี่ยว แต่จุลินทรีย์ในไส้ติ่งและลำไส้ใหญ่ของสุกรสามารถย่อยให้เป็นกรดไขมันระเหยได้ (volatile fatty acids, VFA) และดูดซึมไปใช้เป็นพลังงานได้ถึง 50 เปอร์เซ็นต์ ของพลังงานที่กินเข้าไป แต่ในไก่การย่อยโดยจุลินทรีย์และการนำไปใช้ประโยชน์มีน้อยเพียง 2-3 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งความสามารถในการย่อยได้ของ NSC ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ชนิดของตัวสัตว์ โครงสร้างทางเคมีของ NSC ความสามารถในการละลายน้ำ และปริมาณของ NSC ในอาหาร (Choct and Kocker, 2000; บุญล้อม, 2546) NSC แบ่งออกเป็น 2 ชนิดได้แก่

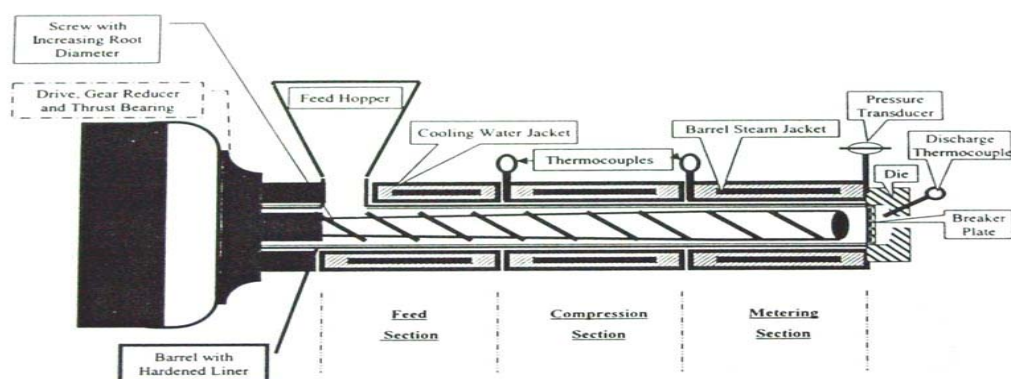
2.1 พอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) ประกอบด้วยน้ำตาลหลายชนิดนอกเหนือจากกลูโคส จับกันด้วยพันธะ β -1,3 และ β -1,4 glycosidic โดยแบ่งออกเป็น 3 ประเภทคือ 1) เซลลูโลส (cellulose) ไม่ละลายในน้ำ ในค่าง หรือ กระดอง 2) พอลิเมอร์ที่ไม่ใช่เซลลูโลส (non-cellulosic polymers) ละลายน้ำได้บ้าง เช่น arabinoxylan, β -glucans, mannans, galactans, xyloglucan และ fructans และ 3) เพคติน (pectin polysaccharide) ละลายน้ำได้ ประกอบด้วยกัม (gum) และเพคติน (pectin) ซึ่งเป็นยางเหนียวหนืดและหมักย่อยอย่างรวดเร็วในลำไส้ใหญ่ส่วนต้น (Morz *et al.*, 2000; บุญล้อม, 2546; สุวรรณ, 2548) จากการที่ NSP มีสูตรโครงสร้างและการละลายหลากหลาย ด้วยเหตุนี้เอนไซม์ในสัตว์กระเพาะเดี่ยวจึงไม่สามารถย่อยสลาย NPS ได้ นอกจากนี้ NPS ที่ละลายน้ำ จะมีคุณสมบัติอุ้มน้ำ ฟองตัวเป็นสารคล้ายวุ้นไปห่อหุ้มสารอาหารชนิดอื่น ทำให้เพิ่มความหนืดของสิ่งย่อยและเคลื่อนตัวอย่างช้าๆ ในทางเดินอาหาร ซึ่งเป็นอุปสรรคในการเข้าย่อยของเอนไซม์จากสัตว์ NPS จึงเป็นสารยับยั้งการใช้ประโยชน์ของโภชนาอื่น (anti-nutrients) โดยเฉพาะไขมัน เนื่องจาก NSP ไปห่อหุ้มเกลือน้ำดี ไขมันและโคเลสเตอรอล ทำให้มีการเร่งการสร้างเกลือน้ำดีจากโคเลสเตอรอลที่ตับ และถูกขับออกทางมูล จึงมีผลกระทบต่อกรย่อยและดูดซึมของกรดไขมันและโคเลสเตอรอลในทางเดินอาหาร ซึ่งถือว่าเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญในสัตว์ ทำให้สัตว์มีการเจริญเติบโตและสมรรถภาพการผลิตลดลง (Choct and Kocker, 2000; บุญล้อม, 2546; สุวรรณ, 2548)

2.2 โอลิโกแซ็กคาไรด์ (oligosaccharide) เป็นคาร์โบไฮเดรตที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ ประกอบด้วย monosaccharide 2-15 หน่วยต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิก เช่น ฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์ (fructo-oligosaccharide, FOS) กาแลกโตโอลิโกแซคคาไรด์ (galacto-oligosaccharide, GOS) หรือ แมนโนโอลิโกแซคคาไรด์ (manno-oligosaccharide, MOS) (สุวรรณ, 2548) สุกรสามารถย่อยโอลิโกแซ็กคาไรด์ในลำไส้เล็กเพียง 40-50 เปอร์เซ็นต์ ส่วนที่่อยได้ 50-60

เปอร์เซ็นต์ และที่เหลือจะถูกย่อยต่อในลำไส้ใหญ่และไส้ติ่ง ซึ่งคาร์โบไฮเดรตที่ย่อยไม่ได้ในลำไส้เล็ก จะส่งเสริมการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์เช่น แลคโตแบซิลลัส (*Lactobacillus spp.*) และไบฟิโดแบคทีเรีย (*Bifidobacterium spp.*) แต่ขัดขวางการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่มีโทษ เช่น อีโคไล (*E. coli*) กลอสตริเดียม (*clostridium*) และโคลิฟอร์ม (*Coliforms*) เป็นต้น มีผลกระทบภูมิคุ้มกันของสัตว์ (Choct and Kocker, 2000) ทำให้สัตว์มีสุขภาพและสมรรถภาพการผลิตขึ้น ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากโอลิโกแซ็กคาไรด์และคาร์โบไฮเดรตที่ย่อยไม่ได้นี้ ถูกหมักย่อยโดยจุลินทรีย์ในลำไส้ใหญ่ เกิดเป็นกรดไขมันระเหยได้และกรดไขมันสายสั้น (short chain fatty acids, SCFA) เช่น กรดอะซิติก กรดบิวทีริก และกรดโพรพิโอนิก กรดแลคติก และคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งผลผลิตที่ได้สามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานในกระบวนการเมตาบอลิซึม เพื่อการเจริญเติบโตของแบคทีเรียและใช้คาร์บอนอะตอมที่ได้จากการหมักย่อยคาร์โบไฮเดรตเป็นโครงกระดูก (C-skeletal) ในการสังเคราะห์โปรตีนของจุลินทรีย์ (Gibson and Roberfroid, 1995 อ้างโดย สุวรรณ, 2548) ซึ่งกรดไขมันเหล่านี้จะทำให้ pH ในลำไส้ลดลง ไม่เหมาะสมแก่การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่มีโทษ แต่ส่งเสริมการเจริญของจุลินทรีย์ที่มีประโยชน์ (บุญล้อม, 2546)

กระบวนการเอกซ์ทรูชัน

เครื่องเอกซ์ทรูชัน (extrusion) แรกเริ่มคิดค้นโดย Joseph Bramah ชาวอังกฤษ ตั้งแต่ปีคริสต์ศักราช 1797 เป็นการอัดวัตถุดิบผ่านท่อลูกสูบตะกั่วด้วยมือ ต่อจากนั้นได้รับการพัฒนาเรื่อยมาจนกระทั่งปัจจุบัน เครื่องเอกซ์ทรูชันแบ่งตามลักษณะของสกรู (screw) มี 2 ชนิด คือ แบบเกลียวเดี่ยว (single screw extruders) คือการใช้เกลียวอัดตัวเดียว และแบบเกลียวคู่ (twin-screw extruders) คือการใช้เกลียวอัด 2 ตัว ซึ่งการทำงานของเกลียวเดี่ยว (ดังภาพที่ 1) ทำงานโดยใช้หลักการหมุนของเกลียวบีบอัดส่งวัตถุดิบออกจากเครื่องเอกซ์ทรูดผ่านหัวได (die) ส่วนเกลียวคู่เป็นการขบกันของเกลียว 2 ตัว จะเป็นแรงช่วยเพิ่มการบีบอัด และแรงที่ดันอาหารผ่านหัวได อาหารจึงผ่านหัวไดอย่างสม่ำเสมอผลผลิตที่ได้ มีรูปทรงและขนาดออกมาสม่ำเสมอ ความหนาแน่นไม่แปรปรวน (Riaz, 2000)



ภาพที่ 1 เครื่องเอกซ์ทรูชันแบบเกลียวเดี่ยว

ที่มา: Riaz (2000)

กระบวนการเอกซ์ทรูชันเป็นกระบวนการแปรรูปอาหารที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการผลิตอาหาร ทั้งอาหารมนุษย์และอาหารสัตว์ และสามารถปรับเปลี่ยนรูปร่างผลิตภัณฑ์ได้หลากหลายแบบ เช่น ขนมอบบี้แข็งต่างๆ อาหารจำพวกธัญพืช อาหารสัตว์เลี้ยงอาหารปลาเป็นต้น (Williams, 2000; Thymi *et al.*, 2005) กระบวนการนี้เป็นเทคนิคการแปรรูปอาหารที่ใช้ความร้อนและความดันสูง ทำให้โครงสร้างของแป้งภายในวัตถุดิบเกิดการเปลี่ยนแปลง (Smith, 1976) โดยความร้อนและความดันเกิดขึ้นจากการหมุนของสกรูที่อยู่ภายในทอบาร์เรล ซึ่งก่อให้เกิดแรงอัดและเสียดสีของวัตถุดิบกับผนังทอบาร์เรล ทำให้โครงสร้างของแป้งภายในวัตถุดิบเกิดการเปลี่ยนแปลง เรียกว่าการเกิดเจลละตินเซชัน (gelatinization) เม็ดแป้งอยู่ในสภาพที่ยึดตัวพร้อมที่จะปรับเปลี่ยนรูปร่างได้ หลังจากนั้นวัตถุดิบจะถูกอัดให้ผ่านหัวใด เมื่อวัตถุดิบหลุดออกมาจากหัวใดจะพบความเย็นที่อยู่ภายนอกเครื่องเอกซ์ทรูชันอย่างทันทีทันใดจะเกิดการพองตัวขึ้น (Tait and Beames, 1988) และการให้ความร้อนในกระบวนการเอกซ์ทรูชันสามารถแบ่งออกเป็น 2 ระบบ คือแบบแห้ง (dry process) ซึ่งไม่ใช่น้ำระหว่างกระบวนการผลิต ความร้อนเกิดจากการเสียดสีและแรงอัดเท่านั้น ความชื้นในเมล็ดวัตถุดิบต่ำกว่า 22 เปอร์เซ็นต์ และแบบเปียก (wet process) จะใช้น้ำในการช่วยกระจายความร้อนกับเมล็ด เพื่อเพิ่มความชื้นแก่วัตถุดิบช่วยให้แป้งเกิดการเจลละตินเซชันเพิ่มขึ้น (พันทิพา, 2539) โดยทั่วไปนิยมใช้ความชื้นของวัตถุดิบก่อนเข้าเครื่องเอกซ์ทรูชันในช่วง 8 – 27 เปอร์เซ็นต์ขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบ ถ้าความชื้นต่ำกว่านี้ การทำให้วัตถุดิบเกิดเจลละตินเซชันจะต้องใช้พลังงานสูง (Smith, 1976) นอกจากนี้ขนาดของวัตถุดิบก่อนเข้าเครื่องเอกซ์ทรูชันมีผลต่อการเกิดเจลละตินเซชันของแป้ง การบดหยาบข้าวโพดก่อนการเอกซ์ทรูชันจะเพิ่มการเกิดเจลละตินเซชันและพื้นที่ผิวของเม็ดแป้ง (Bjorck *et al.*, 1985 อ้างโดย Herkelman *et al.*, 1990) เพิ่มความน่ากินและกลิ่นหอมในข้าวโพด (Hongtrakul *et al.*, 1998)

การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีและโภชนาในระหว่างกระบวนการเอกซ์ทรูชัน

วัตถุดิบที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันมีการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบทางเคมีของโภชนาและลักษณะทางกายภาพของวัตถุดิบ ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงได้แก่ อุณหภูมิของท่อบาร์เรล, ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวใด, ลักษณะของเครื่องเอกซ์ทรูชัน, ส่วนประกอบของอาหาร, ความชื้นของอาหาร, ขนาดของอาหาร, อัตราการไหลของอาหารลงเครื่องเอกซ์ทรูชัน, รูปทรงของสกรู และความเร็วในการหมุนของสกรู ซึ่งปัจจัยต่างๆ เหล่านี้จะมีผลต่อ อุณหภูมิของผลผลิต แรงดันของเครื่อง และพลังงานของเครื่องที่ใช้ (Camire, 2000; Thymi *et al.*, 2005) และวัตถุดิบที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันมีการเปลี่ยนแปลงโภชนาภายในของวัตถุดิบ ดังนี้

ความชื้น (moisture) ในกระบวนการผลิตเอกซ์ทรูชันแบบแห้ง ความชื้นของวัตถุดิบก่อนเข้าเครื่องเอกซ์ทรูดควรอยู่ในช่วง 8 – 22 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งในระหว่างกระบวนการผลิตมีการสูญเสียความชื้นไป 10 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อวัตถุดิบผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันความชื้นในวัตถุดิบจะสูญเสียไป 50 เปอร์เซ็นต์ของความชื้นเริ่มต้น และหลังจากกระบวนการผลิตจะต้องอบแห้งผลผลิตที่ได้ให้เหลือความชื้นต่ำกว่า 12 เปอร์เซ็นต์ (Said, 2000)

แป้ง (starch) ในกระบวนการเอกซ์ทรูชันเมื่อแป้งได้รับความร้อนและความชื้นจากการกระจายตัวของไอน้ำ ภายในเครื่องเอกซ์ทรูชัน ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและเคมี โดยเซลล์ของเมล็ดแป้งที่ยึดเกาะติดกันนั้นเมื่อโดนความร้อน น้ำในวัตถุดิบเกิดการขยายตัวทำให้เซลล์เมล็ดแป้งพองตัว แตกตัวออก เกิดการเจลาติไนซ์ (gelatinization) และพื้นที่ที่วัตถุดิบหลุดออกจากเครื่องเอกซ์ทรูชันน้ำระเหยออกไป พลังเซลล์เกิดรอยแตก เม็ดแป้งเกิดการพองตัว และเกิดรูพรุนในตัววัตถุดิบ ทำให้มีลักษณะทางกายภาพที่ พองฟูและเบา ความหนาแน่น (bulk density) ต่ำ (Boonyasirikool and Charunuch, 2000) ซึ่งเพิ่มความน่ากินและกลิ่นหอมในข้าวโพด (Hongtrakul *et al.*, 1998) และเอื้อต่อการเข้าย่อยแป้งของเอนไซม์อะไมเลสได้เพิ่มขึ้น (พันทิพา, 2539)

เยื่อใย (dietary fiber) ข้าวโพดที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันมีปริมาณเยื่อใยรวมลดลงเนื่องจากกระบวนการทำให้เยื่อใยมีโมเลกุลเล็กลง สามารถที่จะละลายในน้ำ กรด หรือด่างได้ เพิ่มขึ้นในการวิเคราะห์หาปริมาณเยื่อใย (Ning *et al.*, 1991) ส่วนข้าวโอ๊ตและมันฝรั่งที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันมีปริมาณ soluble nonstarch polysaccharides เพิ่มขึ้น (Camire, 2000)

โปรตีน (protein) การเปลี่ยนแปลงโปรตีนเนื่องจากกระบวนการเอกซ์ทรักชันพบว่า เอนไซม์ส่วนใหญ่อยู่ในสภาพที่ไม่สามารถทำงานได้ภายในเครื่องเอกซ์ทรักชัน และมีการลดลงของโปรตีนที่ละลายได้ (soluble protein) และยิ่งอุณหภูมิของท่อบาร์เรลเพิ่มสูงขึ้นจะยิ่งเกิดการเสื่อมสภาพของโปรตีน (Della Valle *et al.*, 1994) โดยเฉพาะในสภาพที่อุณหภูมิสูงและความชื้นต่ำ มีการเกิด Millard reactions คือการที่หมู่คาร์บอนิล (carbonyl group; C=O) ของโมเลกุลน้ำตาลอิสระ (free sugars) ที่เกิดขึ้นในกระบวนการเอกซ์ทรักชันไปทำปฏิกิริยากับหมู่อะมิโนที่เป็นอิสระที่อยู่ปลายสุดของไลซีนและกรดอะมิโนอื่นๆ ทำให้ลดการใช้ประโยชน์ได้ของไลซีนและกรดอะมิโนที่จำเป็น ดังนั้นในประเทศอเมริกาไม่นิยมใช้อาหารที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรักชันเป็นอาหารแหล่งโปรตีน แต่การสูญเสียของไลซีนและกรดอะมิโนที่เป็นประโยชน์นั้นเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อยจากการศึกษาในหนู พบว่าหนูที่กินถั่วเหลืองที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรักชันไม่มีการเปลี่ยนแปลงของโคเรสเตอรอลในซีรัม การขับสารสเตอรอยด์ (steroid) ในมูล การย่อยได้ของโปรตีน และคุณค่าทางชีวภาพของโปรตีน (biological value) เมื่อเปรียบเทียบกับหนูที่กินถั่วเหลืองที่ไม่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรักชัน และในกระบวนการเอกซ์ทรักชันนั้นพันธะไดซัลไฟด์ของโปรตีนที่เกิดการแตกหักนั้นจะมาเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะ Electrostatic และ Hydrophobic ซึ่งการเรียงตัวกันใหม่ของพันธะเปปไทด์ (peptide bonds) ในกระบวนการเอกซ์ทรักชันนั้นยังเป็นที่ถกเถียงกันอยู่ แต่การที่โมเลกุลของโปรตีนเกิดการแตกหักเป็นโมเลกุลที่เล็กลงเป็นการส่งเสริมให้เอนไซม์เข้าย่อยได้ดีขึ้นส่งผลให้ปรับปรุงการย่อยได้ของโปรตีน (Camire, 2000)

ไขมัน (lipids) วัตถุดิบที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรักชันจะมีปริมาณไขมันลดลง เนื่องจากมีการสูญเสียไขมันตรงบริเวณหัวใด ในรูปของไขมันอิสระ (free oil) และเกิดการรวมตัวกับอะมิโลส (lipid-amylose complexes) หรือโปรตีน แต่ไขมันที่รวมตัวนี้สามารถถูกย่อยได้ด้วยกรดหรือเอนไซม์อะไมเลส ทำให้ไขมันใช้ประโยชน์ได้ นอกจากนี้กระบวนการเอกซ์ทรักชันช่วยในการลดการปลดปล่อยไขมันในรูปอิสระ (free fatty acids) โดยการทำให้ Hydrolytic enzyme เสื่อมสภาพลดการเหม็นหืน (rancidity) ในอาหารได้ แต่ถ้าอาหารที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรักชันเก็บไว้ระยะเวลานานอาจก่อให้เกิดการหืนได้ (Wang *et al.* 1993)

วิตามิน (vitamins) ในกระบวนการเอกซ์ทรักชันมีการเปลี่ยนแปลงของวิตามิน โดยวิตามินในกลุ่มที่ละลายได้ในไขมัน อาทิ วิตามินดีและวิตามินเค ไม่มีการเปลี่ยนแปลง ส่วนวิตามินเอ วิตามินอี และสารประกอบที่สามารถเปลี่ยนเป็นวิตามินได้ เช่น คาร์โรทีนอยด์ (carotenoids) และโทโคฟีรอล (tocopherols) มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากออกซิเจนและความร้อนที่เกิดขึ้น ดังเช่น

เบตาแคโรทีน (β -carotene) เป็นสารตั้งต้นในการเปลี่ยนเป็นวิตามินเอที่เสริมในอาหารสัตว์เพื่อเพิ่มสีส้มและป้องกันการหืนในอาหารสัตว์ (antioxidant) มีการสูญเสียในกระบวนการเอกซ์ทรูชันจากการศึกษาการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าวสาลีที่อุณหภูมิของทอบาร์เรล 200 องศาเซลเซียส มีการลดลงของ Trans β -carotene มากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับอุณหภูมิของทอบาร์เรล 125 องศาเซลเซียส (Guzman-Tello and Cheftel, 1990) และวิตามินในกลุ่มที่ละลายในน้ำ เช่น ไทอามีน ในกระบวนการเอกซ์ทรูชัน มีความแปรปรวนมากในช่วง 5 – 100 เปอร์เซ็นต์ (Killeit, 1994) ส่วนในวิตามินซีซึ่งมีความไวในการตอบสนองกับความร้อนและการเกิดออกซิเดชัน ในการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าวสาลีในสภาวะที่อุณหภูมิของทอบาร์เรลสูงและความชื้นต่ำ (10 เปอร์เซ็นต์) พบว่ามีปริมาณวิตามินซีลดลง (Andersson and Hedlund, 1990)

แร่ธาตุ (minerals) ในกระบวนการเอกซ์ทรูชันมีการศึกษาเกี่ยวกับแร่ธาตุน้อยมาก เนื่องจากในกระบวนการผลิตอาหารอื่นๆ นั้นแร่ธาตุมีความคงตัวสูง ดังนั้นการศึกษาจึงมุ่งประเด็นในด้านการจับกันของแร่ธาตุกับเยื่อใย และสารโมเลกุลใหญ่ (macromolecules) อื่นๆ และการเพิ่มขึ้นของแร่ธาตุเนื่องจากสกรูและทอบาร์เรล ซึ่งกระบวนการเอกซ์ทรูชันมีผลต่อการดูดซึมแร่ธาตุเนื่องจากกระบวนการเอกซ์ทรูชันมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของไฟเตท (phytate) ซึ่งโดยปกติแล้วไฟเตทในเมล็ดพืช จะจับอยู่กับแร่ธาตุ เช่นในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าวสาลีพบที่มีการลดลงของไฟเตท (phytate) ดังนั้นจึงเป็นการเพิ่มปริมาณของแร่ธาตุ (Camire, 2000) นอกจากนี้อาหารที่มีส่วนประกอบของเยื่อใยอยู่สูงจะเพิ่มการสึกของสกรูและทอบาร์เรลของเครื่องเอกซ์ทรูชันลงไปยังอาหาร เช่นจากการเอกซ์ทรูชันเปลือกมันฝรั่งพบว่ามีแร่เหล็กเพิ่มขึ้นไม่น้อยกว่า 38 เปอร์เซ็นต์ และจะเพิ่มสูงขึ้นถ้าอุณหภูมิของทอบาร์เรลเพิ่มสูงขึ้น (Camire *et al.*, 1994)

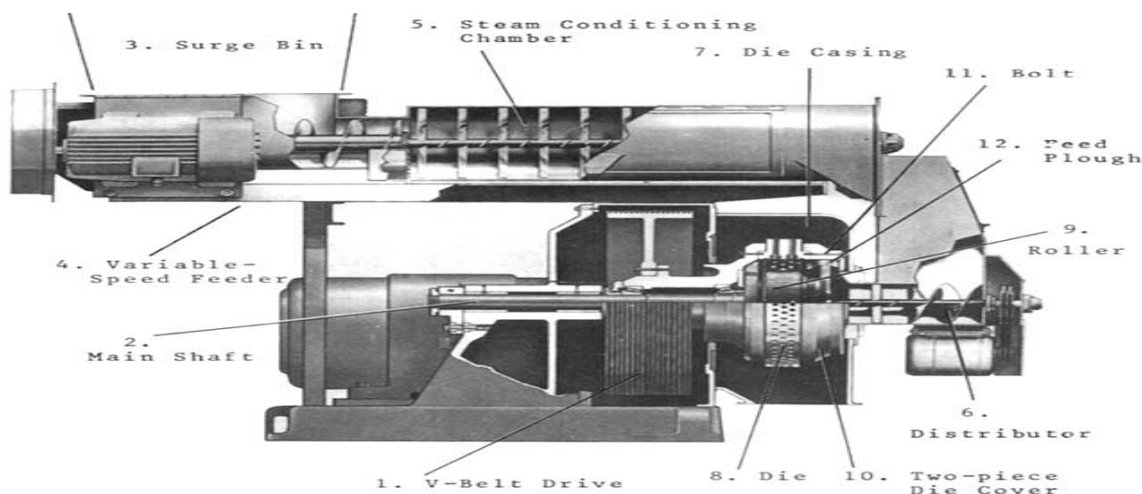
กลิ่น (flavors) ในกระบวนการเอกซ์ทรูชันระยะเวลาในการสร้างกลิ่นน้อยมาก ในการสร้างกลิ่นจะมีการระเหยของกลิ่นออกมาพร้อมกับน้ำที่บริเวณหัวไค ทันทีที่อาหารหลุดออกมาจากเครื่องเอกซ์ทรูด เช่น ในการเอกซ์ทรูชันแป้งข้าวโพดในสภาวะที่อุณหภูมิของทอบาร์เรลต่ำและความชื้นในแป้งข้าวโพดสูง กลิ่นที่เกิดขึ้นเกิดจากการทำปฏิกิริยาของไขมัน ส่วนการเอกซ์ทรูชันในสภาวะที่อุณหภูมิของทอบาร์เรลสูงและความชื้นในแป้งข้าวโพดต่ำกลิ่นที่เกิดขึ้นเกิดจากสารประกอบที่เกิดจาก Maillard reaction และกลิ่นที่เกิดจากสารประกอบทางเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการผลิตถือว่าเป็นส่วนสำคัญในการจำแนกกลิ่นเฉพาะของธัญพืชที่ผ่านกระบวนการทำให้สุก (Camire, 2000)

กระบวนการอัดเม็ด

การบดอาหารเป็นการลดขนาดของวัตถุดิบทำให้มีพื้นที่ในการสัมผัสกับน้ำย่อยในระบบทางเดินอาหารได้เพิ่มขึ้น แต่ในการเก็บรักษาวัตถุดิบที่ผ่านการบดก่อให้เกิดการสูญเสียโภชนะและเกิดการหืนได้ โดยเฉพาะกรดไขมันไม่อิ่มตัว (Kellems and Church, 2002) ในบางครั้งวัตถุดิบที่ผ่านการบดมีความเป็นฝุ่นฟุ้งกระจาย มีความฟาม ไม่น่ากิน และยากในการจัดการ ดังนั้นในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ จึงนิยมอัดเม็ดอาหารเพื่อลดการสูญเสียของอาหารเนื่องจากการตกหล่นของอาหาร การเลือกกินของสัตว์ เพิ่มความหนาแน่นและลดความเป็นฝุ่นของอาหาร นอกจากนี้ยังเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ประโยชน์จากอาหาร โดยเฉพาะในอาหารสุกรและสัตว์ปีก (Robinson, 1976; Tait and Beames, 1988)

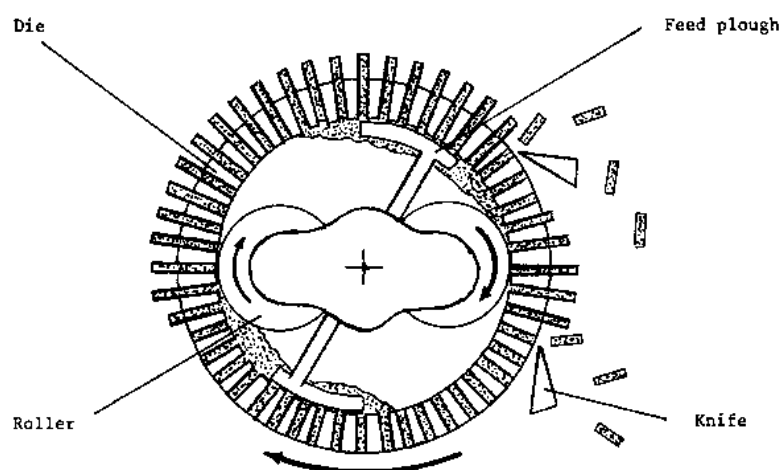
การอัดเม็ดอาหารในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์สหรัฐอเมริกาเริ่มมีการใช้ตั้งแต่ช่วงกลางปี 1920 จุดประสงค์เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้อาหาร เพิ่มความหนาแน่นของอาหารและปรับปรุงลักษณะทางกายภาพของอาหารเพื่อสะดวกในการจัดการ (Gao *et al.*, 1999) การอัดเม็ดคือกระบวนการผลิตอาหารแบบร้อนชื้น (hydrothermal process) โดยการให้ความร้อน ความชื้น และความดัน กับวัตถุดิบ (Robinson, 1976) การทำงานของเครื่องอัดเม็ดประกอบไปด้วยการคลุกไอน้ำและการอัดเม็ดที่อยู่ภายในเครื่องเดียวกัน และในกระบวนการผลิต อาหารผงจะถูกส่งลงมาในส่วนของการคลุกไอน้ำ คลุกเคล้ากันด้วยการหมุนของใบพายที่ยึดติดกับเพลากลางในเครื่อง จนภายในอาหารมีความชื้นประมาณ 17 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิ 60-90 องศาเซลเซียส (เม็ดแบ่งเกิดการเจลาติไนซ์ 16-25 เปอร์เซ็นต์) หลังจากนั้นอาหารจะถูกส่งผ่านไปยังส่วนของการอัดเม็ด (ภาพที่ 2) ที่ประกอบด้วยจานอัดและลูกกลิ้ง ซึ่งการหมุนของลูกกลิ้งจะดันอาหารผ่านรูเปิดของจานอัด โดยใบมีดที่อยู่ภายนอกจานหมุนจะตัดและกำหนดขนาดของเม็ดอาหาร ขึ้นอยู่กับชนิดของอาหาร ทำให้ได้อาหารที่มีลักษณะเป็นเม็ดแข็งรูปทรงกระบอกขนาดต่างๆ (ภาพที่ 3) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเม็ดอาหารทางการค้ามีขนาด 4-10 มิลลิเมตร (Robinson, 1976; Tait and Beames, 1988; Kellems and Church, 2002) ซึ่งขนาดของเม็ดอาหารจะมีผลต่อการประสิทธิภาพการใช้อาหารเนื่องจากถ้าเม็ดอาหารมีขนาดเล็กจะไหลผ่านระบบทางเดินอาหารเร็ว ลดระยะเวลาในการย่อยของโภชนะ และสัตว์กินอาหารในปริมาณที่เพิ่มขึ้น ทำให้ดูดซึมและเก็บกักโภชนะจากอาหารได้เพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้อาหารอัดเม็ดเพิ่มประสิทธิภาพการใช้อาหารเนื่องจากมีความน่ากินและมีความหนาแน่นอาหารเพิ่มขึ้น สัตว์จึงได้รับอาหารในปริมาณที่สูงขึ้น และในสุกรการอัดเม็ดช่วยเพิ่มการ

ใช้ประโยชน์ของกรดอะมิโนในข้าวโพด (Kellems and Church, 2002) เพิ่มการใช้ประโยชน์จากแหล่งพลังงานในอาหาร 15 เปอร์เซ็นต์ (Skoch *et al.*, 1983)



ภาพที่ 2 เครื่องคลุกไอน้ำและอัดเม็ดอาหารสัตว์

ที่มา: Hasting and Higgs (1980)

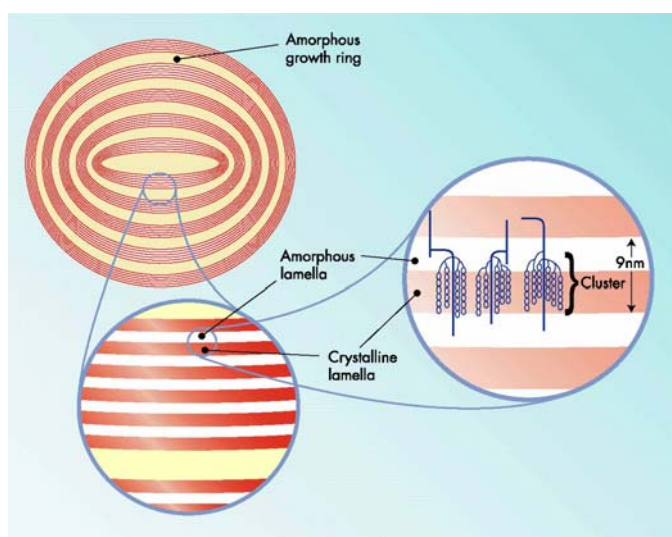


ภาพที่ 3 ลักษณะงานอัดและถูกกลึงภายในเครื่องอัดเม็ด

ที่มา: Hasting and Higgs (1980)

ผลการให้ความร้อนขึ้นต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบแป้ง

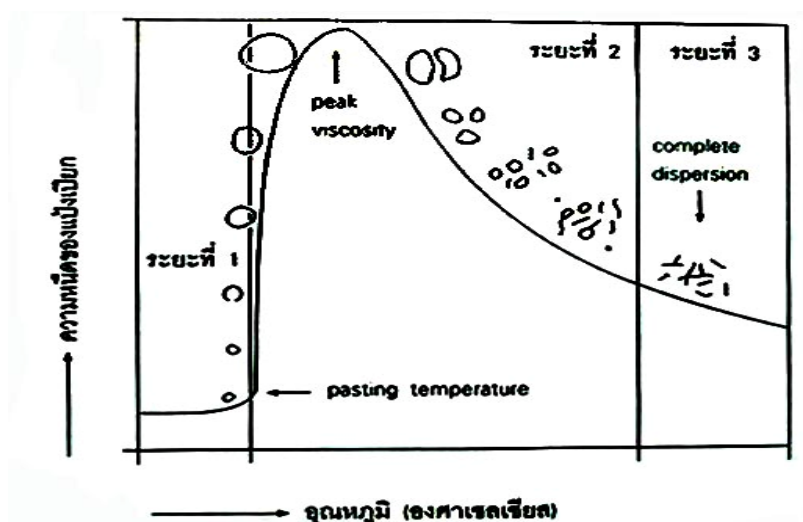
แป้งที่พบในธรรมชาติจะพบอยู่ในรูปเม็ดแป้ง (granule) ซึ่งมีขนาดรูปร่าง และลักษณะแตกต่างกันออกไปขึ้นอยู่กับแหล่งของแป้ง เม็ดแป้งมีโครงสร้างเป็นแบบกึ่งผลึก (semi-crystalline) (ภาพที่ 4) ประกอบด้วยโครงสร้างส่วนที่เป็นผลึก (crystalline) ประมาณ 25 – 50 เปอร์เซ็นต์ มีความหนาประมาณ 120 – 400 นาโนเมตร ประกอบด้วยสายโซ่สั้นของอะมิโลเพกตินจัดเรียงตัวในลักษณะเกลียวม้วนคู่ (double helices) และส่วนของอสัณฐาน (amorphous หรือ gel phase) ความหนาประมาณ 9 – 10 นาโนเมตร ประกอบด้วยโมเลกุลของอะมิโลสและสายโซ่ยาวของอะมิโลเพกติน (กล้าณรงค์ และ เกื้อกูล, 2546; Moraru and Kokini, 2003) ในเม็ดแป้งจะมีลักษณะโครงสร้างผลึกอยู่ 3 แบบ ขึ้นอยู่กับความหนาแน่นในการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่ ถ้าเกิดการเรียงตัวหนาแน่นมากจะเกิดเป็นผลึกแบบ A-type starch (มีความยาวของสายกลูโคส 23-29 หน่วย) พบในแป้งจากธัญพืชต่างๆ เช่น ข้าวโพด ถ้าเรียงตัวกันหลวมๆ จะเกิดผลึกแบบ B-type starch (มีความยาวของสายกลูโคส 30-44 หน่วย) พบในแป้งจากพืชหัว เช่น มันฝรั่ง และถ้าเกิดการเรียงตัวทั้งแบบ A และ B รวมกันจัดเป็นผลึกแบบ C-type starch (มีความยาวของสายกลูโคส 25-33 หน่วย) พบในแป้งจากพืชตระกูลถั่ว แต่มีแป้งบางชนิดอาจให้ลักษณะผลึกของแป้งมากกว่า 1 ชนิด เช่น แป้งมันสำปะหลัง มีลักษณะผลึกทั้งแบบ A และ C (Oates, 1997; Topping and Clifton, 2001; กล้าณรงค์ และ เกื้อกูล, 2546)



ภาพที่ 4 โครงสร้างของเม็ดแป้ง

ที่มา : Donald *et al.*, (2006)

โมเลกุลของแป้งประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (hydroxyl group) จำนวนมากยึดเกาะกันด้วยพันธะไฮโดรเจน มีคุณสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) แต่เนื่องจากเม็ดแป้งอยู่ในรูปของร่างแห (micelles) การเรียงตัวในลักษณะนี้จะทำให้แป้งละลายในน้ำเย็นได้ยาก ดังนั้นในขณะที่เม็ดแป้งอยู่ในน้ำเย็นเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำและพองตัวได้เล็กน้อย (Leach *et al.*, 1959) และในกระบวนการทำให้สุกหรือกระบวนการผลิตต่างๆ เมื่อเม็ดแป้งได้รับความร้อนและความชื้น ส่วนของ Amorphous growth ring จะเป็นส่วนแรกที่ดูดซึมน้ำ แต่ในส่วนของ Amorphous lamellae น้ำเกิดการเคลื่อนตัวออก และในส่วนของ Crystalline lamellae ไม่มีการดูดซึมน้ำจนกระทั่งใกล้จุดสิ้นสุดกระบวนการให้ความร้อนหรือเม็ดแป้งเกิดการแตกหักจึงมีการดูดซึมน้ำ ดังนั้นส่วนของ Amorphous growth ring จึงเป็นส่วนที่ควบคุมการแตกหักของเม็ดแป้งในกระบวนการผลิต (Donald *et al.*, 2006) การที่เม็ดแป้งเกิดการแตกหักหรือเรียกว่าการเกิดเจลาติไนเซชัน (gelatinization) (ภาพที่ 5) แป้งได้ 3 ระยะ คือระยะแรกเม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำเย็นได้อย่างจำกัดและเกิดการพองตัวแบบผันกลับได้เนื่องจากร่างแหระหว่างโมเลกุลยึดหยุ่นได้อย่างจำกัด เม็ดแป้งยังคงรักษารูปร่าง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิไปเรื่อยๆ เข้าสู่ระยะที่ 2 เม็ดแป้งจะพองตัวอย่างรวดเร็ว ร่างแหระหว่างโมเลกุลภายในเม็ดแป้งจะอ่อนแอลง เนื่องจากพันธะไฮโดรเจนถูกทำลาย เม็ดแป้งจะดูดซึมน้ำเข้ามาและเกิดการพองตัวแบบผันกลับไม่ได้เม็ดแป้งมีการเปลี่ยนรูปร่าง ความหนืดของสารละลายน้ำแป้งจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว แป้งที่ละลายได้เริ่มละลายออกมา เมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิต่อไปอีกจนเข้าสู่ระยะที่ 3 รูปร่างเม็ดแป้งจะไม่แน่นอน การละลายของแป้งเพิ่มขึ้น เมื่อนำไปทำให้เย็นจะเกิดเจล (กลั่นรงค์ และ เกื้อกูล, 2546)



ภาพที่ 5 ระยะในการเกิดเจลาติไนเซชันของเม็ดแป้ง

ที่มา: กลั่นรงค์ และ เกื้อกูล (2546)

ระดับการเจลาติไนเซชันขึ้นอยู่กับ อุณหภูมิ ปริมาณน้ำที่เติม และระยะเวลาในการทำให้สุก ซึ่งที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียสขึ้นไปเม็ดแป้งจะเกิดการแตกหัก นอกจากนี้การเกิดการเจลาติไนเซชันของแป้งนี้จะทำให้หมู่ไฮดรอกซิล ของแป้งสามารถทำปฏิกิริยากับสารอื่นๆ ได้ดีขึ้น พร้อมทั้งจะถูกย่อยด้วยน้ำย่อยต่างๆ ได้ดีกว่า (Topping and Clifton, 2001) แต่เมื่อแป้งได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดการเจลาติไนเซชันแล้วยังให้ความร้อนต่อไปจะทำให้เม็ดแป้งเกิดการพองตัวเพิ่มขึ้นและแตกออก โมเลกุลของอะมิโลสขนาดเล็กระจัดกระจายออกมาทำให้ความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้เย็นตัวลง โมเลกุลอะมิโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการจับเรียงตัวใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล เกิดเป็นร่างแหสามมิติ โครงสร้างใหม่นี้สามารถอุ้มน้ำและไม่มีการคูดน้ำเข้ามาอีก มีความหนืดคงตัวมากขึ้น เกิดลักษณะเจลเหนียวคล้ายฟิล์มหรือฟลิก เรียกว่าปรากฏการณ์นี้ว่า การเกิดรีโทรเกรเดชัน (retrogradation) เมื่อลดอุณหภูมิต่ำลงไปอีกลักษณะการเรียงตัวของโครงสร้างจะแน่นมากขึ้น โมเลกุลของน้ำที่อยู่ภายในถูกบีบออกมานอกเจล (Topping and Clifton, 2001; กล้าณรงค์ และ เกื้อกูล, 2546) และการจัดเรียงตัวกันใหม่นี้มีผลทำให้แป้งไม่สามารถถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (α -amylase) ในลำไส้เล็กเรียกว่า Resistance starch (RS) แต่สามารถผ่านไปสู่ลำไส้ใหญ่ได้ RS แบ่งออกเป็น 4 ชนิด ได้แก่ 1) RS 1 คือส่วนของแป้งที่มีลักษณะทางกายภาพที่ไม่เหมาะสมต่อการย่อย เช่น เซลล์ของเม็ดแป้งที่ไม่แตกบวมสลาย (NSP) 2) RS 2 คือส่วนของแป้งที่มีโครงสร้างเป็นผลึก และการเกิดรีโทรเกรเดชันของอะมิโลเพกทิน 3) RS 3 คือส่วนของแป้งที่เกิดรีโทรเกรเดชันของอะมิโลส และ 4) RS 4 คือส่วนของแป้งที่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมี (ในกระบวนการผลิต) ซึ่ง RS ชนิด RS1 และ RS 2 สามารถย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส ได้อย่างสมบูรณ์แบบช้าๆ แต่ชนิด RS 3 จะไม่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (Ankrah *et al.*, 1999 ; Topping and Clifton, 2001; Higgins, 2004) และปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณ Resistance starch ได้แก่ ปริมาณน้ำตาลและไขมันในแป้ง ความยาวของสายอะมิโลส สัดส่วนของอะมิโลสและอะมิโลเพกทินในเม็ดแป้ง ลักษณะทางกายภาพของวัตถุดิบว่าเป็นเมล็ดหรือผ่านการบดให้เล็กลง ความชื้นของแป้ง ค่าความเป็นกรดเป็นด่าง (pH) อุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการให้ความร้อน ระยะเวลาที่ใช้ในกระบวนการทำให้เย็น กระบวนการทำให้แห้ง และ ระยะเวลาและอุณหภูมิที่ใช้ในกระบวนการบ่มแป้ง (Hoover and Zhou, 2003 ; กล้าณรงค์ และ เกื้อกูล, 2546) เช่นแป้งที่มีอะมิโลสสูงจะต้องใช้อุณหภูมิและความดันสูงในการทำให้เกิดเจลาติไนซ์ของแป้ง และจะเกิดการคืนตัวได้มากและเร็วกว่าแป้งที่มีปริมาณอะมิโลเพกทินสูง (Topping and Clifton, 2001) สำหรับแป้งข้าวโพดและแป้งข้าวสาลีจะมีอัตราการคืนตัวสูงกว่าแป้งมันฝรั่งและแป้งมันสำปะหลัง เนื่องจากมีปริมาณอะมิโลส (ประมาณ 28 %) และไขมันในปริมาณสูงกว่า ทำให้เกิดการจับตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของอะมิโลสและไขมัน

(กล้านรงค์ และ เกื้อกุล, 2546) นอกจากนี้กระบวนการผลิตมีผลต่อการเกิด RS ในกระบวนการให้ความร้อนแบบไอน้ำ (steam-heated) และความร้อนแบบแรงดันไอน้ำสูง (high-pressure steaming) มีผลทำให้ปริมาณ RS เพิ่มขึ้น 3 – 5 เท่า (Hoover and Zhou, 2003) และการเก็บรักษาข้าวโพดที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันเป็นระยะเวลานานทำให้ปริมาณ RS3 เพิ่มขึ้น เพราะเกิดการรีโทรเกรเดชันของแป้ง (Villalobos *et al.*, 2002)

ในกระบวนการเอกซ์ทรูชันแบบร้อนขึ้นจะไม่มีผลต่ออัตราการพองตัวของแป้งในเอกซ์ทรูเดอร์ จนกว่าวัตถุดิบจะมีความชื้นมากกว่า 22 เปอร์เซ็นต์ และแป้งที่มีปริมาณอะมิโลสต่ำมีอัตราการพองตัวสูงกว่าแป้งที่มีปริมาณอะมิโลสสูง (รุ่งนภา และ ประชา, 2540) ซึ่งการที่ปริมาณความชื้นของวัตถุดิบมีค่าต่ำจะมีผลทำให้เพิ่มระดับการเจลาติไนซ์ของแป้ง ซึ่งส่งผลทำให้การย่อยได้ของแป้งด้วยเอนไซม์ (enzyme susceptibility) มีค่าเพิ่มขึ้น (Gomez and Aguilera, 1983) แต่ถ้าปริมาณความชื้นของวัตถุดิบมีค่าสูงมากเกินไป จะมีผลทำให้อัตราส่วนการพองตัวและระดับการเจลาติไนซ์ของเอกซ์ทรูเดอร์ลดลง (Obaldo *et al.*, 1999) ส่วนความหนาแน่น และแรงกดทะลุจะมากขึ้น เนื่องจากปริมาณความชื้นที่สูงขึ้นมีผลทำให้ความหนืดของหัวไคในเครื่องเอกซ์ทรูชันลดต่ำลง เกิดแรงดันภายในต่ำ ทำให้เอกซ์ทรูเดอร์ที่ออกจากเครื่องมีการพองตัวน้อยลง ทำให้เนื้อสัมผัสแข็งและความหนาแน่นมากขึ้น (รุ่งนภา และ ประชา, 2540)

การหืน

การหืน (rancidity) คือ การที่ไขมันเกิดการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากถูกออกซิไดซ์ (oxidise) ทำให้กลิ่น รสชาติ และสภาพทางกายภาพเปลี่ยนไป คือ ไขมันมีลักษณะขุ่นขึ้น แข็งขึ้น วิตามิน เอ ดี อี และ เค ถูกทำลาย การนำไปใช้ประโยชน์ของโภชนะและพลังงานลดลง การหืนเกิดขึ้นได้ทั้งไขมันในอาหารและไขมันที่อยู่ในร่างกาย ในกรณีที่สัตว์ได้รับอาหารที่มีการหืน อาหารนั้นจะไปชักนำให้ไขมันที่มีอยู่ในร่างกายสัตว์เกิดการหืน เป็นปฏิกิริยาลูกโซ่ซึ่งเป็นอันตรายต่อร่างกายสัตว์ (พันทิพา, 2535)

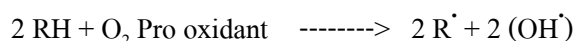
การหืนที่เกิดจากการทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเรียกว่า Oxidative rancidity และการหืนที่เกิดขึ้นจากการทำงานของเอนไซม์ เรียกว่า Hydrolytic rancidity ซึ่งการเกิดการหืนจากการทำงานของเอนไซม์จะเกิดขึ้นเล็กน้อยเมื่อมีการเก็บในที่อุณหภูมิต่ำ การฆ่าเชื้อ (sterilization) การขนส่ง และการบรรจุที่ดี ส่วนการเกิด Oxidative rancidity นั้นเกิดขึ้นโดยอัตโนมัติ (autooxidation) ไม่

สามารถหยุดปฏิกิริยาด้วยการเก็บรักษาและอุณหภูมิต่ำได้ เนื่องจากปฏิกิริยาเคมีในการเกิดโดยอัตโนมัติจะใช้พลังงานต่ำในการกระตุ้นปฏิกิริยา ซึ่งใช้ในขั้นต้นเพียง 4 – 5 kcal / mol และในขั้นกระจาย 6 – 9 kcal / mol (Rossell, 1994) ดังนั้นการเกิดการเหม็นหืนในวัตถุดิบระหว่างการเก็บรักษาส่วนใหญ่เนื่องมาจากการออกซิเดชันของไขมัน โดยเฉพาะในวัตถุดิบที่มีกรดไขมันไม่อิ่มตัวเป็นส่วนประกอบเช่น ข้าวสาลี ข้าวบาร์เลย์ และข้าวโพด ซึ่งมี Linoleic acid (18:2) และ Linolenic acid (18:3) อยู่มาก (Chow, 1980; Galliard, 1994)

การเกิดปฏิกิริยา Oxidative rancidity นี้ทำให้พลังงานในไขมันหรือน้ำมันนั้น ๆ ลดลง ในขั้นแรกของปฏิกิริยา กรดไขมันไม่อิ่มตัวจะสูญเสีย H^+ ทำให้กรดไขมันอยู่ในสภาพอนุมูลอิสระตรงตำแหน่งของพันธะคู่ (double bond) ซึ่งปฏิกิริยานี้จะถูกกระตุ้นหรือเร่งโดยแร่ธาตุในบรรยากาศที่มีออกซิเจนอยู่ด้วย ถ้าอาหารเหล่านั้นไม่ได้เติมสารป้องกันการหืน (antioxidants) เช่น ไวตามินอี และอนุมูลอิสระ เหล่านี้จะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในสภาพ Fatty acid peroxide free radical อย่างรวดเร็วในบรรยากาศที่มีออกซิเจน แล้วเปลี่ยนต่อไปเป็น Fatty acid hydroperoxide จากนั้น Hydroperoxide จะสลายไปเป็นอัลดีไฮด์ (aldehyde) หรือคีโตน (ketone) ซึ่งเป็นผลให้ไขมันที่ถูกออกซิไดซ์ มีลักษณะขื่นขื่น แข็งขึ้น มีกลิ่นเหม็นของคีโตน จึงเรียกว่ากลิ่นเหม็นหืน (ketone rancidity) นั่นเอง (พันทิพา, 2535; Rossell, 1994)

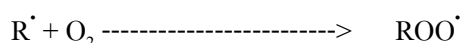
ในขั้นตอนการเกิด Oxidative rancidity (พันทิพา, 2535; Antolovich *et al.*, 2002) แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

1. ขั้นต้น (initiation)

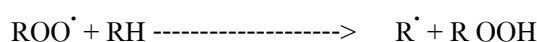


Unsat. fatty acid + Temp & Hum. Fatty acid radical + Hydroxy radical

2. ขั้นกระจาย (propagation)

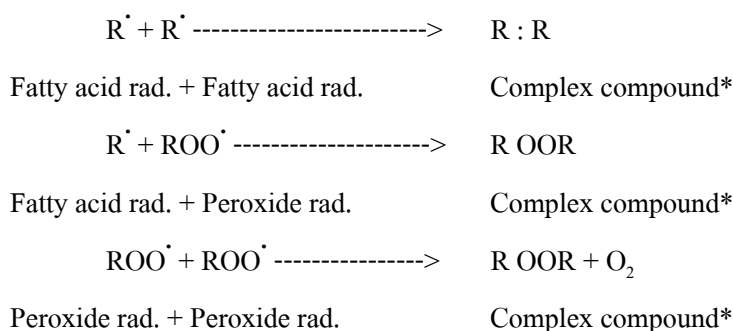


Fatty acid rad. Peroxide rad.



Peroxide rad. + unsat fatty acid Fatty acid rad. + Hydroperoxide

3. ขั้นสุดท้าย (termination)



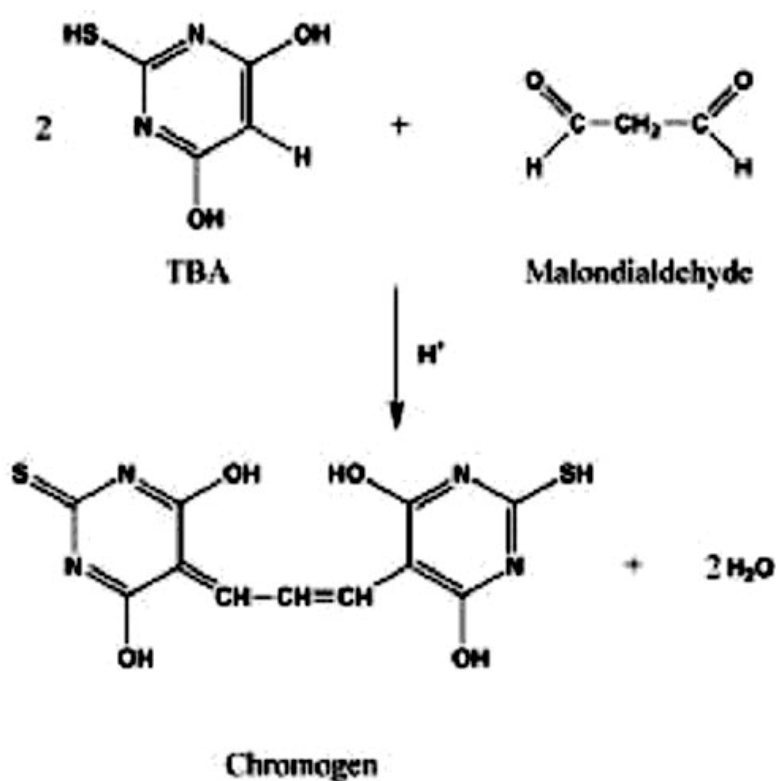
*Complex compound จะอยู่ในสภาพที่คงที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงอีกต่อไป มีลักษณะแข็งขึ้นกว่าเดิม

ไขมันที่อยู่ในอาหารสัตว์ต่างๆ ไป มักเกิดถึงขั้นที่ 2 แล้ว ถ้าทิ้งต่อไปจะเกิดการหืนในขั้นตอนที่ 3 แต่สารกันหืนจะเข้าไปช่วยได้ในขั้นตอนนี้ โดยยับยั้งไม่ให้เปอร์ออกไซด์แตกตัวต่อไป แต่ถ้าเป็นไขมันที่สดใหม่ อาจอยู่ในขั้นที่ 1 สารกันหืนจะทำหน้าที่เติม H^+ ให้กับ Fatty acid rad. ให้กลับเป็นกรดไขมันดั้งเดิม ฉะนั้นสารกันหืนจะทำหน้าที่เป็นตัวให้ H^+ หรืออิเล็กตรอน หรือ Aromatic ring และสารประกอบเชิงซ้อนเพื่อรวมกับไขมัน (พันทิพา, 2535)

สภาวะที่ทำให้เกิดการออกซิไดซ์ของไขมันที่ไม่อึดตัวได้ คือ การที่ไขมันได้รับออกซิเจน ความร้อนสูง ความชื้น เอนไซม์ แสงสว่าง โดยเฉพาะแสงอุลตราไวโอเลต และโลหะหนักบางตัวเช่น Cu, Ni, Fe สำหรับกลุ่มโลหะหนักนี้ไม่ได้มีผลต่อปฏิกิริยาโดยตรงเริ่มแรก แต่เป็นตัวเร่งให้ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเร็วกว่าปกติ จึงเรียกกลุ่มโลหะหนักนี้ว่า โปรออกซิแดนซ์ (prooxidants) ส่วนออกซิเจน ความร้อน ความชื้น แสงสว่างจัดเป็นออกซิแดนซ์ (oxidants) (Chow, 1980) นอกจากนี้ปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดการหืนในธัญพืชต่างๆ เช่น คุณภาพของวัตถุดิบ สภาวะของกระบวนการแปรรูป การเก็บรักษา และขนาดของวัตถุดิบ หากวัตถุดิบมีขนาดเล็กจะเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวในการสัมผัสกับออกซิเจน (Galliard, 1994)

การตรวจสอบการหืนจากการวัดค่าอนุมูลอิสระโดยตรงจะทำได้ยาก เนื่องจากสารอนุมูลอิสระมีครึ่งชีวิตที่ค่อนข้างสั้นมาก (จันทร์จรัสและคณะ, 2547) ดังนั้นการวัดปริมาณการหืนจึงใช้การวัดจากปริมาณตัวบ่งชี้ (markers) ซึ่งสามารถวิเคราะห์ได้หลายวิธี เช่น Peroxide value, Anisidine value และ Thiobarbituric acid test เป็นต้น ซึ่งวิธี Peroxide value เป็นการวัดความเข้มข้นของ Peroxides และ Hydroperoxides ที่เกิดขึ้นในขั้นตอนแรกของการเกิด Oxidative

rancidity โดยทำปฏิกิริยากับ Iodide ion ของ Potassium iodide แต่วิธีการนี้มีข้อบกพร่องคือ Iodide สามารถทำปฏิกิริยากับพันธะคู่ของกรดไขมันไม่อิ่มตัว และมีการเพิ่มขึ้นของ Iodide ในสารละลาย เนื่องจากออกซิเจนทำปฏิกิริยากับ Potassium iodide ทำให้ค่า Peroxide value ที่ได้มีค่าสูง (Rossell, 1994) ส่วนวิธี Thiobarbituric acid test (TBA test) จะอาศัยหลักการที่กรดไขมันเมื่อถูก peroxidized จะแตกตัวเป็นแอลดีไฮด์ และตัวที่ถูกตรวจวัดบ่งชี้ที่สุด คือ malondialdehyde (MDA) (จันทร์จรัสและคณะ, 2547) การทดสอบการหืนในอาหารสัตว์ โดยวิธี TBA test นี้เป็นการวิเคราะห์หาปริมาณของ Malonaldehyde (MDA) ที่เกิดจากการออกซิเดชันของกรดไขมันในอาหาร แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 538 nm ของสารสีแดง (chromogen) ที่เกิดจากปฏิกิริยาของ 2-Thiobarbituric acid 2 โมเลกุลรวมตัวกับ Malonaldehyde 1 โมเลกุล ดังภาพที่ 1 (Pearson, 1976; Antolovich *et al.*, 2002) โดยค่า TBA ในช่วง 0.6 – 2.0 เป็นปริมาณที่สามารถรับรู้กลิ่นหืนของอาหารได้ (Greene and Cumuze, 1981; Liu *et al.*, 1995)



ภาพที่ 6 การเกิดปฏิกิริยาของ 2-Thiobarbituric acid กับ Malonaldehyde

ที่มา: Antolovich *et al.* (2002)

ผลการให้ความร้อนขึ้นในกระบวนการเอกซทรีชันและอัดเม็ดอาหารต่อสมรรถภาพการผลิตของสัตว์

จากรายงานการศึกษาผลของการอัดเม็ดอาหารต่อสมรรถภาพการผลิตของสัตว์ Svihus *et al.* (2004) รายงานว่าการให้อาหารอัดเม็ดช่วยเพิ่มปริมาณการกินอาหาร น้ำหนักตัวที่เพิ่ม และประสิทธิภาพการใช้อาหาร ($P < 0.05$) เมื่อเทียบกับการให้อาหารผง เช่นเดียวกับ Johnston *et al.* (1999) รายงานว่าสุกรที่ได้รับอาหารอัดเม็ดมีน้ำหนักที่เพิ่มต่อปริมาณอาหารสูงกว่าสุกรที่ได้รับอาหารผง ($P < 0.01$) และสุกรที่ได้รับอาหารที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนขึ้นในกระบวนการผลิต มีแนวโน้มว่ามีอัตราการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้น ($P < 0.07$) เนื่องจากการอัดเม็ดเป็นการลดการสูญเสียของอาหารเนื่องจากการกินและการอัดเม็ดเป็นการช่วยเพิ่มการย่อยได้ของอาหาร (Stark, 1994)

ส่วนการศึกษาผลของกระบวนการเอกซทรีชันต่อสมรรถภาพการผลิตของสัตว์นั้น จากรายงานผลการวิจัยต่างๆ ให้ผลทั้งในด้านบวกและด้านลบ Edwards *et al.*, (1999) รายงานว่าค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้ของอาหารที่ผ่านกระบวนการเอกซทรีชันในไก่กระทงมีค่าเท่ากับ 3,535 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ซึ่งมีค่าต่ำกว่าอาหารที่ไม่ผ่านกระบวนการเอกซทรีชัน ที่มีค่าเท่ากับ 3,725 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ($P < 0.01$) และ Herkelman *et al.* (1990) รายงานว่าการใช้ข้าวโพดเอกซทรีดไม่ได้เพิ่มการย่อยได้ของโปรตีนในอาหารของสุกร จากผลการทดลองพบว่าการย่อยได้ของโปรตีนและพลังงานการย่อยได้ของอาหารในส่วนของลำไส้เล็กตอนปลาย (ileal) และการย่อยได้ของโปรตีนที่วัดจากมูลของอาหารสูตรข้าวโพดเอกซทรีดและข้าวโพดในสุกรมีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) แต่การย่อยได้ที่วัดจากมูลของ NFE (nitrogen free extract) พลังงานการย่อยได้ (DE) และพลังงานการใช้ประโยชน์ (ME) เมื่อคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของพลังงานที่ได้รับ (GE) ของข้าวโพดเอกซทรีดมีค่าสูงกว่าในข้าวโพด ($P < 0.05$) และพลังงานที่ย่อยได้และพลังงานใช้ประโยชน์ได้ในข้าวโพดเอกซทรีด (มีค่าเท่ากับ 3.82 และ 3.73 กิโลแคลอรี/กรัมอาหาร ในรูปวัตถุแห้ง ตามลำดับ) สูงกว่าในข้าวโพด (มีค่าเท่ากับ 3.66 และ 3.57 กิโลแคลอรี/กรัมอาหาร ในรูปวัตถุแห้ง ตามลำดับ) แต่การใช้ข้าวโพดเอกซทรีดไม่ได้ช่วยเพิ่มอัตราการเจริญเติบโตและปริมาณการกินอาหาร ($P > 0.05$) (Hongtrakul *et al.*, 1998; Chae *et al.*, 2000) แต่ช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้อาหารในสุกรระยะหลังหย่านม ($P < 0.01$) (Chae *et al.*, 2000) นอกจากนี้ Skoch *et al.* (1983) รายงานว่ากระบวนการเอกซทรีชันสามารถช่วยปรับปรุงพลังงานการย่อยได้ของอาหารผสมระหว่างข้าวโพดกับข้าวสาลี (ในสัดส่วน 1:1) ในสุกร และ Noland *et al.* (1976) รายงานว่ากระบวนการเอกซทรีชันของข้าวฟ่างที่มีคุณภาพต่ำสามารถปรับปรุงค่าพลังงานการย่อยได้และการย่อยได้ของโปรตีนที่วัดจากมูลในสุกร

อุปกรณ์และวิธีการ

อุปกรณ์

1. เทอร์โมมิเตอร์วัดอุณหภูมิ (dry and wet thermometer)
2. เครื่องวัดกระแสไฟฟ้า (B & K Precision Corp., Yorba Linda, CA) รุ่น Model 5330A
3. เครื่องเอกซเรย์ (Wuhan Machinery) ของประเทศจีน รุ่น Model PHG 135
4. เครื่องวัดอุณหภูมิ (Testo Lenzkirch, Germany) รุ่น Model Testo 925
5. เครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์
6. เครื่องอัดเม็ดอาหาร (Jiang Zhengchang, China) รุ่น Model SZLH40
7. เครื่องมือและสารเคมีในการวิเคราะห์การหืน (rancidity)
8. สัตว์ทดลอง ใช้ลูกสุกร 3 สายพันธุ์ (พันธุ์คูร็อก x พันธุ์ลาร์จไวท์ x พันธุ์แลนด์เรซ) เพศผู้ตอนอายุประมาณ 5 สัปดาห์น้ำหนักประมาณ 10 กิโลกรัม จำนวน 12 ตัว (การทดลองที่ 3) และลูกสุกร 3 สายพันธุ์ (พันธุ์คูร็อก x พันธุ์ลาร์จไวท์ x พันธุ์แลนด์เรซ) อายุประมาณ 4 สัปดาห์ จำนวน 192 ตัว (การทดลองที่ 3) ไก่กระทงพันธุ์อาร์เบอร์เอเคอร์ อายุ 4 สัปดาห์ จำนวน 18 ตัว (การทดลองที่ 4) และไก่กระทงพันธุ์อาร์เบอร์เอเคอร์ อายุ 1 วัน จำนวน 1,600 ตัว (การทดลองที่ 4)
9. กรงเลี้ยงสัตว์ทดลอง การทดลองในไก่ใช้กรงแบบขังเดี่ยวขนาด 0.5 x 0.5 เมตร จำนวน 18 กรง การทดลองในสุกรใช้กรงแบบขังเดี่ยว (metabolic cage) ขนาด 0.5 x 1.0 เมตร จำนวน 12 กรง
10. คอกเลี้ยงสัตว์ สำหรับการศึกษาศรรณภาพการผลิตในไก่ใช้คอกขนาด 1.5 x 3.9 เมตร จำนวน 32 คอก และสุกรใช้คอกขนาด 1.8 X 2.0 เมตร จำนวน 24 คอก
11. เครื่องชั่งอาหาร และเครื่องชั่งน้ำหนักไก่และสุกร
12. เครื่องมือและสารเคมีในการวิเคราะห์ส่วนประกอบโภชนะของวัตถุดิบ อาหารทดลอง และสิ่งขับถ่าย
13. เครื่องมือและสารเคมีในการวิเคราะห์ปริมาณโครมิกออกไซด์ (chromic oxide; Cr₂O₃) ของ อาหารทดลอง และสิ่งขับถ่าย

วิธีการ

การศึกษากาการเอกซ์ทรูชันข้าวโพด ต่อระยะเวลาการเก็บรักษา การย่อยได้ของโภชนะ และสมรรถภาพการผลิตของลูกสุกรหย่านมและไก่กระตัง ได้แบ่งงานวิจัยออกเป็น 4 การทดลองย่อยดังต่อไปนี้

การทดลองที่ 1 ผลของอัตราการไหลของน้ำในกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อกระบวนการผลิตและการใช้ประโยชน์ได้ของแป้งในข้าวโพด

การทดลองนี้แบ่งออกเป็น 2 การทดลองย่อย คือ การทดลองที่ 1.1 การศึกษาอัตราการไหลของน้ำในกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อกระบวนการผลิตและการใช้ประโยชน์ได้ของแป้งในข้าวโพดทั้งเมล็ด และการทดลองที่ 1.2 การศึกษาอัตราการไหลของน้ำในกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อกระบวนการผลิตและการใช้ประโยชน์ได้ของแป้งในข้าวโพดบดหยาบ มีขั้นตอนในการศึกษาประกอบด้วย

1. วัตถุดิบ

ข้าวโพดทั้งเมล็ดและข้าวโพดบดหยาบ ความชื้นประมาณ 11 เปอร์เซ็นต์

2. การบดหยาบ

นำข้าวโพดทั้งเมล็ดบดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มีลล์ผ่านตะแกรงบดขนาด 2 มิลลิเมตร ทำการบันทึกค่ากระแสไฟฟ้าที่ใช้ น้ำหนักข้าวโพดก่อนและหลังบด ระยะเวลาที่ใช้ในการบด และสุ่มเก็บตัวอย่างเพื่อนำไปวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (particle sizes)

3. กระบวนการเอกซ์ทรูชัน

การทดลองใช้กระบวนการเอกซ์ทรูชันแบบร้อนแห้ง (dry extrusion) โดยตัวอย่างข้าวโพดถูกป้อนเข้าเครื่องเอกซ์ทรูชันแบบสกรูเดี่ยว ผ่านวาล์วควบคุมอัตราการไหลของน้ำก่อนเข้าเครื่องเอกซ์ทรูชัน โดยในการทดลองที่ 1.1 การเอกซ์ทรูชันข้าวโพดทั้งเมล็ดที่อัตราการไหลของน้ำ 3 ระดับ คือ 16 , 19 และ 22 ลิตรต่อชั่วโมง ในการทดลองที่ 1.2 การเอกซ์ทรูชันข้าวโพดบดหยาบที่อัตราการไหลของน้ำ 3 ระดับ คือ 18 , 22 และ 24 ลิตรต่อชั่วโมง ทำการ

บันทึก อุณหภูมิของท่อบาร์เรล อุณหภูมิของข้าวโพดเอกซ์ทรูดทันทีที่ออกจากเครื่อง ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิต ระยะเวลาที่ใช้ในการผลิต และทำการสุ่มเก็บตัวอย่างข้าวโพดเอกซ์ทรูดเพื่อวิเคราะห์หาค่าความหนาแน่น (Khajarearn and Khajarearn, 1999)

หลังจากนั้นนำข้าวโพดในการทดลองที่ 1.1 และ 1.2 ที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูดขึ้นไปบดละเอียดด้วยเครื่องแฮมเมอร์มิลล์ ทำการบันทึกน้ำหนักข้าวโพดเอกซ์ทรูดก่อนและหลังการบด ปริมาณกระแสไฟฟ้าและระยะเวลาที่ใช้ในการบด ทำการสุ่มเก็บตัวอย่างข้าวโพดบดละเอียดเพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ ประกอบด้วย ปริมาณความชื้น (AOAC, 1990) ระดับการเจลาติไนซ์ (Kim, 1995) การเข้าย่อยได้ของเอนไซม์ (Gibson *et al.*, 1993) ปริมาณแป้ง (McCleary *et al.*, 1997) ขนาคอนูภาค (ASAE, 1983) และคำนวณต้นทุนการผลิต

4. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

นำข้อมูลการวิเคราะห์หองค์ประกอบทางเคมีมาเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างปัจจัย โดยวิธี Orthogonal contrast ส่วนข้อมูลในด้านกระบวนการผลิตนำมาเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างปัจจัยแบบลีสตแควร์ (The Least Significant Difference ;LSD) ที่ระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ในแผนการทดลองแบบสุ่มตลอด (completely randomized design) และแสดงข้อมูลเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยมีแบบหุนการวิเคราะห์ทางสถิติดังนี้

$$Y_{ij} = \mu + T_i + \epsilon_{ij}, \quad i = 1, 2, 3$$

$$j = 1, 2, 3$$

- เมื่อ Y_{ij} = ค่าสังเกตจากผลกระบวนการผลิต
 μ = ค่าเฉลี่ยร่วมของค่าสังเกต
 T_i = อิทธิพลของอัตราการใช้ของน้ำที่ระดับต่างๆ
 ϵ_{ij} = ความคลาดเคลื่อนของการทดลอง

การทดลองที่ 2 ผลของระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อองค์ประกอบทางโภชนาและการหืน (rancidity) ของข้าวโพดเอกซ์ทรูด

การทดลองนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาระยะเวลาในการเก็บรักษาวัตถุดิบข้าวโพดเอกซ์ทรูด ต่อองค์ประกอบทางโภชนาและการหืน ที่เกิดจากการออกซิเดชันของกรดไขมันในอาหาร โดยการเก็บวัตถุดิบไว้ในสภาพแวดล้อมของโรงงานโดยมีขั้นตอนในการศึกษาประกอบด้วย

1. วัตถุดิบข้าวโพดบด และข้าวโพดเอกซ์ทรูด

ข้าวโพดที่ใช้ได้จากการเพาะปลูกในบริเวณเขตจังหวัดเชียงราย และในการผลิตข้าวโพดเอกซ์ทรูดจะใช้กระบวนการเอกซ์ทรูดแบบร้อนแห้ง (dry extrusion) โดยใช้น้ำเป็นตัวช่วยหล่อลื่น ซึ่งในกระบวนการผลิตข้าวโพดถูกป้อนเข้าเครื่องเอกซ์ทรูดแบบสกรูเดี่ยวด้วยอัตรา 288 กิโลกรัมต่อชั่วโมง โดยเครื่องเอกซ์ทรูดประกอบด้วยทอบาร์เรล 3 ท่อนเรียงต่อกันมีความยาว 81 เซนติเมตร หัวไค (die) มีจำนวนรูเปิด 24 รู และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเปิด 0.6 เซนติเมตร ข้าวโพดที่ใช้มีความชื้นในเมล็ด 12.20 เปอร์เซ็นต์ โดยมีอัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องเอกซ์ทรูด 14 ลิตร/ชั่วโมง อุณหภูมิของทอบาร์เรล (โดยอ่านจากเทอร์โมคัปเปิลที่เสียบอยู่ที่ผนังทอบาร์เรลท่อนกลางของเครื่องเอกซ์ทรูด) 107.37 องศาเซลเซียส อุณหภูมิของข้าวโพดเอกซ์ทรูดทันทีที่ออกจากเครื่อง 53.57 องศาเซลเซียส ความชื้นของข้าวโพดเอกซ์ทรูดทันทีที่ออกจากเครื่อง 8.63 เปอร์เซ็นต์ ค่าความหนาแน่นของเมล็ดข้าวโพดและข้าวโพดที่ผ่านเอกซ์ทรูดโดยไม่ผ่านการบดละเอียด 823.80 และ 135.37 กรัม/ลิตร ตามลำดับ นอกจากนี้ปริมาณกระแสไฟฟ้าและอัตราการผลิตที่ใช้ในการเอกซ์ทรูดมีค่า 68.04 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ตัน และ 385.02 กิโลกรัม/ชั่วโมง ตามลำดับ ปริมาณกระแสไฟฟ้าและอัตราการผลิตที่ใช้ในการบดละเอียดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ที่มีขนาดตะแกรงบด 1.7 มิลลิเมตรมีค่า 4.41 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ตัน และ 1310.94 กิโลกรัม/ชั่วโมง ตามลำดับ ดังนั้นมีปริมาณกระแสไฟฟ้ารวมที่ใช้ 72.80 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ตัน และมีมูลค่ารวมที่ใช้ในการผลิต 142.78 บาท/ตัน

2. การเก็บรักษา

นำข้าวโพดและข้าวโพดเอกซ์ทรูด บรรจุในกระสอบพลาสติกสานที่รองด้วยถุงพลาสติกอีกชั้นหนึ่ง (ขนาด 50 กิโลกรัม) ชนิดละ 2 กระสอบ เก็บรักษาในโกดังของโรงงาน ณ สภาพแวดล้อมของโรงงาน อุณหภูมิเฉลี่ยที่ 28 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยที่ร้อยละ 70 หลังจากนั้นสุ่มเก็บตัวอย่างในวันที่ทำการผลิต และทำการเก็บสัปดาห์ที่ 1 2 3 4 5 6 7 และ

8 ของการเก็บรักษา เก็บสัปดาห์ละ 2 ชั่วโมง/ชนิดของตัวอย่าง เก็บตัวอย่างละ 150 กรัมใส่ลงในถุงพลาสติก เติมน้ำส้มสายชู (Etoxyquin 29 % Citric acid 5 % Propyl gallate 4 %) ในอัตราส่วน 0.1 กรัม / กิโลกรัมตัวอย่าง เพื่อหยุดปฏิกิริยา oxidation แล้วนำไปเก็บในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 10 องศาเซลเซียส ตามวิธีการของ DeRouchey *et al.* (2004)

3. การวิเคราะห์ทางเคมี

นำตัวอย่างที่ผ่านการเก็บรักษาที่ระยะเวลาต่าง ๆ นำไปวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ความชื้น เถ้า ไขมัน และ โปรตีน โดยวิธี Proximate analysis (AOAC, 1990) และวิเคราะห์การหืน (rancidity) โดยวิธี Thiobarbituric acid numbers (TBA test) ตามวิธีการของ Pearson (1976) เป็นการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 538 nm ของสารสีแดงที่เกิดจากปฏิกิริยาของ 2-Thiobarbituric acid กับสารที่เกิดจากการออกซิเดชันของกรดไขมันในอาหาร ได้แก่ Malonaldehyde โดยสารสีแดงนี้เกิดจาก 2-Thiobarbituric acid 2 โมเลกุลรวมตัวกับ Malonaldehyde 1 โมเลกุล มีหน่วยการวัดคือ จำนวนมิลลิกรัมของ Malonaldehyde ต่อ กิโลกรัมตัวอย่าง (Lin *et al.*, 1998)

4. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างปัจจัยแบบลีสสแควร์ ที่ระดับนัยสำคัญที่ 0.05 โดยมีการวัดซ้ำในแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (repeated measurements in completely randomized design) และแสดงข้อมูลเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยมีแบบหุนการวิเคราะห์ทางสถิติดังนี้

$$Y_{ijk} = \mu + A_i + B_{k(i)} + C_j + AC_{ij} + \epsilon_{ijk} \quad \begin{matrix} i = 1, 2 \\ j = 1, 2, \dots, 9 \\ k = 1, 2 \end{matrix}$$

เมื่อ Y_{ijk} = ค่าสังเกตจากผลการวิเคราะห์ทางเคมี
 μ = ค่าเฉลี่ยร่วมของค่าสังเกต

A_i	= อิทธิพลของชนิดวัตถุดิบ คือข้าวโพด และข้าวโพดเอกซ์ทรา
$B_{k(i)}$	= อิทธิพลของหน่วยทดลอง
C_j	= อิทธิพลของระยะเวลาที่ทำการเก็บ
AC_{ij}	= อิทธิพลรวมเนื่องจากชนิดวัตถุดิบและเวลา
ε_{ij}	= ความคลาดเคลื่อนของการทดลอง

การทดลองที่ 3 การศึกษาค่าพลังงานการใช้ประโยชน์ (metabolizable energy) ของข้าวโพดเอกซ์ทรา และผลของการใช้ข้าวโพดเอกซ์ทราต่อสมรรถภาพการผลิตในสุกรระยะอนุบาล

ทำการศึกษาหาค่าพลังงานการใช้ประโยชน์ของข้าวโพดเอกซ์ทรา และผลของการใช้ข้าวโพดเอกซ์ทราต่อสมรรถภาพการผลิตของสุกรระยะอนุบาล โดยมีขั้นตอนในการศึกษาประกอบด้วย

ค่าพลังงานการใช้ประโยชน์

1. สุกรทดลอง

สุกรที่ใช้ในการศึกษาเป็นลูกสุกร 3 สายพันธุ์ (พันธุ์คูร์ว็อก x พันธุ์ลาร์จไวท์ x พันธุ์แลนค์เรซ) อายุประมาณ 5 สัปดาห์น้ำหนักประมาณ 10 กิโลกรัม เพศผู้ตอนจำนวน 12 ตัว แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มๆ ละ 4 คอกๆ ละ 1 ตัว ตามวิธีการของ Herkelman *et al.* (1990)

2. อาหารทดลอง อาหารทดลองแบ่งออกเป็น 3 สูตร ดังตารางที่ 2 ได้แก่ สูตรที่ 1 อาหารสูตรควบคุม (ใช้แป้งข้าวโพดเป็นแหล่งอาหารพลังงาน) สูตรที่ 2 อาหารสูตรควบคุม + ข้าวโพดบดทดแทนในสูตร 60 เปอร์เซ็นต์ และสูตรที่ 3 อาหารสูตรควบคุม + ข้าวโพดเอกซ์ทราทดแทนในสูตร 60 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งส่วนประกอบของวัตถุดิบที่ใช้ในสูตรอาหารควบคุม ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ส่วนประกอบวัตถุดิบของอาหารสูตรควบคุมที่ใช้ในการศึกษาค่าพลังงานใช้ประโยชน์
ได้ของสุกร

วัตถุดิบ (%)	อาหารสูตรควบคุม
แป้งข้าวโพด ¹	75
กากถั่วเหลือง (48 % CP)	19.0
หางนมผง	5.0
พรีมิกซ์ ²	0.5
เกลือ	0.5
รวม	100

¹ แป้งข้าวโพดบริสุทธิ์ 100 เปอร์เซนต์ (corn starch) ตราครัววังทิพย์

² ส่วนประกอบ ต่อ 100 กิโลกรัมอาหาร: vitamin A 4,500,000 IU ; vitamin D 750,000 IU; vitamin E 10 mg; vitamin K3 0.75 mg; vitamin B1 1.1 mg; vitamin B2 3.0 mg; vitamin B3 10.0 mg; vitamin B6 2.0 mg; vitamin B12 12.5 µg; pantothenic acid 7.0 mg; folic acid 425.0 µg; biotin 0.1 mg; Cu 5.0 mg; Fe 48.0 mg; I 0.5 mg; Mn 30 mg; Se 0.1 mg และ Zn 50 mg.

3. วิธีการทดลอง

สุกรจะได้รับอาหารทดลองเป็นระยะเวลา 12 วัน แบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือช่วง 7 วันแรกจะให้สัตว์ทดลองปรับตัวกับอาหารทดลองและสภาพแวดล้อม และ 5 วันหลังจะให้อาหารทดลองที่ผสมโครมิกซ์ออกไซด์ 0.4 เปอร์เซนต์ สุกรทุกตัวได้รับอาหารต่อวันในปริมาณ 80 เปอร์เซนต์ของการกินอาหารเต็มที่ โดยให้อาหารวันละ 2 ครั้ง คือเวลาเช้าและเย็น เก็บตัวอย่างปัสสาวะและมูลวันละ 2 ครั้ง คือเวลาเช้าและเย็น โดยเริ่มสุ่มเก็บเมื่อมูลมีสีเขียวของโครมิกซ์ออกไซด์ปรากฏจนกระทั่งหมดสีเขียว โดยเก็บเศษขนที่ตกลงในมูลออกให้หมด เก็บตัวอย่างใส่ถุงพลาสติก นำตัวอย่างมูลไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิต่ำกว่า 60 องศาเซลเซียสจนแห้งแล้วนำไปบดให้มีขนาด 1 มิลลิเมตร เก็บตัวอย่างปัสสาวะในถังเก็บปัสสาวะมีการเติม 6 N HCl จำนวน 25 มิลลิลิตร เพื่อกักเก็บไนโตรเจน (Herkelman *et al.*, 1990) วัดปริมาตรแล้วนำตัวอย่างที่ได้ไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นนำตัวอย่างมูลและปัสสาวะที่ได้ไปวิเคราะห์ทางเคมีต่อไป

4. การวิเคราะห์ทางเคมี

ทำการวิเคราะห์หา ความชื้น และ โปรตีน ในตัวอย่างอาหาร ปัสสาวะ และมูล ตามวิธีการ A.O.A.C. (1990) วิเคราะห์หาค่าพลังงานแบบ adiabatic (PARR 1261 bomb calorimeter) ตามวิธีการ A.O.A.C. (2000) และวิเคราะห์หาปริมาณโครมิกซ์ออกไซด์ในอาหารและมูลตามวิธีการของ Bolin *et al.* (1952) เพื่อนำมาคำนวณพลังงานการใช้ประโยชน์ โดยใช้สมการ

$$\text{พลังงานการใช้ประโยชน์} = \text{พลังงานรวมของอาหาร} - (\text{พลังงานรวมในมูล} + \text{ปัสสาวะ})$$

5. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

นำข้อมูลส่วนประกอบทางเคมีและพลังงานใช้ประโยชน์ที่ได้ปรากฏที่ได้มาเปรียบเทียบความแตกต่างของกลุ่มด้วยวิธี T-test

สมรรถภาพการผลิตสุกรระยะอนุบาล

1. สุกรทดลอง

ใช้สุกร 3 สายพันธุ์ (พันธุ์คร็อก x พันธุ์ลาร์จไวท์ x พันธุ์แลนด์เรซ) อายุประมาณ 4 สัปดาห์ จำนวน 192 ตัวแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มๆ ละ 8 คอกๆ ละ 8 ตัว มีรางน้ำที่สัตว์สามารถกินได้ตลอดเวลา ทำการเลี้ยงตั้งแต่อายุ 4 สัปดาห์ไปจนถึงอายุ 9 สัปดาห์ ในโรงเรือนแบบเปิด

2. ข้าวโพดและข้าวโพดเอกซ์ทรูด

ข้าวโพดที่ใช้ได้จากการเพาะปลูกในบริเวณเขตจังหวัดเชียงราย และในการผลิตข้าวโพดเอกซ์ทรูดจะใช้กระบวนการเอกซ์ทรูดแบบร้อนแห้ง (dry extrusion) โดยใช้ไอน้ำเป็นตัวช่วยหล่อลื่น ซึ่งในกระบวนการผลิตข้าวโพดถูกป้อนเข้าเครื่องเอกซ์ทรูดแบบสกรูเดี่ยวด้วยอัตรา 288 กิโลกรัมต่อชั่วโมง โดยเครื่องเอกซ์ทรูดขึ้นประกอบด้วยทอบาร์เรล 3 ท่อนเรียงต่อกันมีความยาว 81 เซนติเมตร หัวไค (die) มีจำนวนรูเปิด 24 รู และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเปิด 0.6 เซนติเมตร ข้าวโพดที่ใช้มีความชื้นในเมล็ด 12.20 เปอร์เซ็นต์ โดยมีอัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องเอกซ์ทรูดขึ้น 14 ลิตร/ชั่วโมง อุณหภูมิของทอบาร์เรล (โดยอ่านจากเทอร์โมคัปเปิลที่เสียบอยู่ที่ผนังทอบาร์เรลท่อนกลางของเครื่องเอกซ์ทรูดขึ้น) 107.37 องศาเซลเซียส อุณหภูมิของข้าวโพดเอกซ์ทรูดทันทีที่ออกจากเครื่อง 53.57 องศาเซลเซียส ความชื้นของข้าวโพดเอกซ์ทรูดทันทีที่ออกจาก

เครื่อง 8.63 เปอร์เซ็นต์ ค่าความหนาแน่นของเมล็ดข้าวโพดและข้าวโพดที่ผ่านเอกซ์ทรูดโดยไม่ผ่านการบดละเอียด 823.80 และ 135.37 กรัม/ลิตร ตามลำดับ นอกจากนี้ปริมาณกระแสไฟฟ้าและอัตราการผลิตที่ใช้ในการเอกซ์ทรูดชั้นมีค่า 68.04 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ตัน และ 385.02 กิโลกรัม/ชั่วโมง ตามลำดับ ปริมาณกระแสไฟฟ้าและอัตราการผลิตที่ใช้ในการบดละเอียดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์ มิลล์ที่มีขนาดตะแกรงบด 1.7 มิลลิเมตรมีค่า 4.41 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ตัน และ 1310.94 กิโลกรัม/ชั่วโมง ตามลำดับ ดังนั้นมีปริมาณกระแสไฟฟ้ารวมที่ใช้ 72.80 กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ตัน และมีมูลค่ารวมที่ใช้ในการผลิต 142.78 บาท/ตัน

3. อาหารทดลอง

อาหารทดลองคำนวณให้มีสารอาหารพอเพียงตามความต้องการของสุกร โดยสูตรที่ 1 ใช้ปลายข้าวเป็นวัตถุดิบแหล่งพลังงาน สูตรที่ 2 ใช้ข้าวโพดบดเป็นวัตถุดิบแหล่งพลังงาน และอาหารสูตรที่ 3 ใช้ข้าวโพดเอกซ์ทรูดเป็นวัตถุดิบแหล่งพลังงานอาหาร ส่วนประกอบวัตถุดิบอาหาร สัตว์และองค์ประกอบทางโภชนาการจากการคำนวณของอาหารทดลอง ดังแสดงในตารางที่ 3 และ 4 ตามลำดับ

4. วิธีการทดลอง

- 1) สุ่มสุกรลงในแต่ละกลุ่มอาหารทดลองโดย ใช้เพศเมีย 4 ตัว และเพศผู้ตอน 4 ตัว แบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ๆ ละ 8 คอก ๆ ละ 8 ตัว
- 2) ทำการบันทึกปริมาณอาหาร น้ำหนักสุกรเริ่มต้น และน้ำหนักสิ้นสุดการทดลอง
- 3) ทำการบันทึกอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศตลอดระยะเวลาการทดลอง
- 4) นำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหา อัตราการเจริญเติบโต ปริมาณอาหารที่กิน ประสิทธิภาพการใช้อาหาร อัตราการตาย และต้นทุนการผลิต

ตารางที่ 3 ส่วนประกอบวัตถุดิบของอาหารทดลองสำหรับสุกรในระยะอนุบาล

ระยะอายุ (สัปดาห์)	4 - 7			8 - 9		
วัตถุดิบ (%)	ปลายข้าว	ข้าวโพด	ข้าวโพด เอกซ์ทรา	ปลายข้าว	ข้าวโพด	ข้าวโพด เอกซ์ทรา
ปลายข้าว	46.05	-	-	53.33	-	-
ข้าวโพด	-	46.94	-	-	54.65	-
ข้าวโพดเอกซ์ทรา	-	-	47.70	-	-	55.95
รำข้าวสาลี	6.67	6.67	6.67	8.00	8.00	8.00
กากถั่วเหลือง (44%CP)	8.00	8.00	8.00	23.84	22.93	22.00
กากถั่วเหลืองไขมันเต็ม	24.43	23.58	22.73	6.67	6.67	6.67
ปลาป่น (60%CP)	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00	3.00
หางนมผง (13%CP)	8.00	8.00	8.00	-	-	-
ไขมันพืช	-	-	-	1.07	0.93	0.53
หินฟูน	1.20	1.43	1.43	1.52	1.43	1.43
ไคเคลเซียมฟอสเฟต (21%P)	1.51	1.16	1.16	1.46	1.18	1.18
เกลือ	0.21	0.25	0.31	0.22	0.27	0.27
พรีมิกซ์ ¹	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
ไลซีน	0.10	0.15	0.17	0.10	0.15	0.18
ดีแอล- เมทไธโอนีน	0.07	0.06	0.07	0.03	0.03	0.03
สารปรุงแต่งกลิ่น	0.03	0.03	0.03	-	-	-
สารให้ความหวาน	-	-	-	0.03	0.03	0.03
ยาปฏิชีวนะ ²	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53	0.53
รวม	100	100	100	100	100	100
ราคา(บาท)/กิโลกรัม	12.26	11.17	11.86	9.63	8.41	9.19

¹ ส่วนประกอบต่อ 100 กิโลกรัมอาหาร: vitamin A 5,000,000 IU; vitamin D 1,000,000 IU; vitamin E 10.0 mg; vitamin K₃ 750 µg; vitamin B₁ 500 µg; vitamin B₂ 3.0 mg; vitamin B₃ 10.0 mg; vitamin B₆ 2.0 mg; vitamin B₁₂ 12.5 µg; pantothenic acid 5.0 mg; folic acid 250 µg; biotin 50 µg; Cu 5.0 mg; Fe 37.5 mg; I 500 µg; Mn 20 mg; Se 100 µg และ Zn 50.0 mg.

² ส่วนประกอบต่อ 100 กิโลกรัมอาหาร: Colistin 150 ppm; Lincomycin 50 ppm; zinc oxide 300 ppm

ตารางที่ 4 ส่วนประกอบทางโภชนาจากการคำนวณในอาหารทดลอง

ระยะอายุ (สัปดาห์)	4 - 7			8 - 9		
ส่วนประกอบโภชนา	ปลาย ข้าว	ข้าวโพด เอกซ์ ทรูค	ข้าวโพด เอกซ์ ทรูค	ปลาย ข้าว	ข้าวโพด เอกซ์ ทรูค	ข้าวโพด เอกซ์ ทรูค
พลังงานรวม (ME) , kcal/kg	3350	3350	3350	3300	3300	3300
โปรตีนรวม (%)	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00
แคลเซียม (%)	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
ฟอสฟอรัสทั้งหมด (%)	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70	0.70
ไลซีน (%)	1.25	1.25	1.25	1.20	1.20	1.20
เมทไธโอนีน (%)	0.43	0.38	0.38	0.41	0.35	0.35
เมทไธโอนีน + ซีสทีน (%)	0.70	0.70	0.70	0.66	0.66	0.66
ทรีโอนีน (%)	0.82	0.78	0.77	0.80	0.75	0.74
ทรีปโตเฟน (%)	0.26	0.24	0.23	0.27	0.24	0.24
ความหนาแน่นอาหาร (กรัม/ลิตร)	633.35	591.81	433.82	614.28	562.54	498.80

4. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

นำข้อมูลเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างปัจจัยแบบอิสระที่ระดับนัยสำคัญที่ 0.05 โดยใช้แผนการทดลองแบบสุ่มตลอด (Completely Randomized Design; CRD) และแสดงข้อมูลเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยมีแบบหุนการวิเคราะห์ทางสถิติดังนี้

$$Y_{ij} = \mu + T_i + \varepsilon_{ij}, \quad i = 1, 2, 3$$

$$j = 1, 2, \dots, 8$$

เมื่อ Y_{ij} = ค่าสังเกตจากผลสมรรถภาพการผลิต

μ = ค่าเฉลี่ยร่วมของค่าสังเกต

T_i = อิทธิพลของชนิดแหล่งพลังงานในอาหารทดลอง

ε_{ij} = ความคลาดเคลื่อนของการทดลอง

การทดลองที่ 4 การศึกษาค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้ (metabolizable energy) ของข้าวโพดเอกซ์ทรูด และผลของการใช้ข้าวโพดเอกซ์ทรูดต่อสมรรถภาพการผลิตของไก่กระตอง

การศึกษาค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้ของข้าวโพดเอกซ์ทรูด และผลของการใช้ข้าวโพดเอกซ์ทรูดต่อสมรรถภาพการผลิตในไก่กระตอง โดยมีขั้นตอนในการศึกษาประกอบด้วย

ค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้

1. ไก่ทดลอง

ใช้ไก่กระตองพันธุ์อาร์เบอร์เอเคอร์ อายุ 4 สัปดาห์ จำนวน 18 ตัว แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มๆ ละ 7 ตัว เลี้ยงไก่ในกรงเมตาบอลิซึม ที่มีรางน้ำให้กินตลอดเวลา ในโรงเรือนแบบปิด ที่มีอุณหภูมิในช่วง 29 – 31 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ในช่วง 75 – 83 เปอร์เซ็นต์

2. อาหารทดลอง แบ่งออกเป็น 3 สูตร ได้แก่ สูตรที่ 1 อาหารสูตรควบคุม (ใช้เดกซ์โทสเป็นแหล่งอาหารพลังงาน) สูตรที่ 2 อาหารสูตรควบคุม + ข้าวโพดบดทดแทนในสูตร 40 เปอร์เซ็นต์ และสูตรที่ 3 อาหารสูตรควบคุม + ข้าวโพดเอกซ์ทรูดทดแทนในสูตร 40 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งส่วนประกอบของวัตถุดิบที่ใช้ในสูตรอาหารควบคุม ดังแสดงในตารางที่ 5

3. วิธีการทดลอง

ในการทดลองไก่จะได้รับอาหารทดลองเป็นระยะเวลา 12 วัน แบ่งออกเป็น 2 ช่วง คือช่วง 7 วันแรกจะให้สัตว์ทดลองปรับตัวกับอาหารทดลองและสภาพแวดล้อม และ 5 วันหลังจะให้อาหารทดลองที่ผสมโครมิกซ์ออกไซด์ 0.5 เปอร์เซ็นต์ ไก่ทุกตัวได้รับอาหารต่อวันในปริมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ของการกินอาหารเต็มที่ โดยให้อาหารวันละ 2 ครั้ง คือเวลาเช้าและเย็น เก็บตัวอย่างมูลวันละ 2 ครั้ง โดยเริ่มสุ่มเก็บเมื่อมูลมีสีเขียวของโครมิกซ์ออกไซด์ปรากฏจนกระทั่งหมดสีเขียว โดยเก็บเศษขนที่ตกลงในมูลออกให้หมด เก็บตัวอย่างใส่ถุงพลาสติก นำตัวอย่างมูลไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิต่ำกว่า 60 องศาเซลเซียสจนแห้งแล้วนำไปบดให้มีขนาด 1 มิลลิเมตร

ตารางที่ 5 ส่วนประกอบวัตถุดิบของอาหารสูตรควบคุมที่ใช้ในการศึกษาค่าพลังงานใช้ประโยชน์
ได้ของไก่กระทง

วัตถุดิบ (กิโลกรัม)	สูตรควบคุม
เดกซ์โทรส (dextrose)	45.70
กากถั่วเหลือง (44%CP)	48.30
ปลาป่น (56%CP)	5.00
วิตามินพรีมิกซ์ ¹	0.50
โครมิกซ์ออกไซด์	0.50
รวม	100.00

¹ ส่วนประกอบต่อ 100 กิโลกรัมอาหาร: vitamin A 1,000,000 IU, vitamin D3 126,000 IU, vitamin E 1.12 g, vitamin K3 0.17 g, vitamin B1 0.13 g, vitamin B2 0.5 g, vitamin B6 0.17 g, vitamin B12 1.4 mg, folic acid 42 mg, nicotinic acid 1.68 g, pantothenic acid 0.76 g, biotin 3.5 mg, choline chloride 15 g, Mn 6 g, Fe 3.8 g, Zn 6 g, Cu 0.6 g, I 70 mg, Se 7 mg และ Ca 11.15 g

4. การวิเคราะห์ทางเคมี

วิเคราะห์หาความชื้น และโปรตีนในอาหารทดลองและมูล ตามวิธีการ A.O.A.C. (1990) วิเคราะห์หาค่าพลังงานแบบ adiabatic (PARR 1261 bomb calorimeter) และวิเคราะห์หาปริมาณโครมิกซ์ออกไซด์ ตามวิธีการ Bolin *et al.* (1952) แล้วนำค่าการวิเคราะห์ที่ได้มาคำนวณค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้ ตามวิธี Scott *et al.* (1982)

5. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ความแตกต่างของข้อมูลค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้ด้วยวิธี T-test

สมรรถภาพการผลิตไก่กระทง

1. ไก่ทดลอง

ใช้ไก่กระทงพันธุ์อาร์เบอร์เอเคอร์ จำนวน 1,600 ตัว อายุ 1 วัน แบ่งออกเป็น 4 กลุ่มๆ ละ 8 คอกๆ ละ 50 ตัว มีรางน้ำที่สัตว์สามารถกินได้ตลอดเวลา ระยะเวลาในการเลี้ยงตั้งแต่ อายุ 1 วันไปจนถึงอายุ 49 วัน เลี้ยงในโรงเรือนแบบเปิด

2. ข้าวโพดเอกซ์ทรูด

ข้าวโพดที่ใช้ ได้จากการเพาะปลูกในบริเวณเขตจังหวัดเชียงราย และในการผลิต ข้าวโพดเอกซ์ทรูดจะใช้กระบวนการเอกซ์ทรูชันแบบร้อนแห้ง (dry extrusion) โดยใช้น้ำเป็นตัว ช่วยหล่อลื่น ซึ่งในกระบวนการผลิต ข้าวโพดถูกป้อนเข้าเครื่องเอกซ์ทรูดแบบสกรูเดี่ยวด้วยอัตรา 288 กิโลกรัมต่อชั่วโมง โดยเครื่องเอกซ์ทรูชันประกอบด้วยทอบาร์เรล 3 ท่อนเรียงต่อกันมีความ ยาว 81 เซนติเมตร หัวไค (die) มีจำนวนรูเปิด 24 รู และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของรูเปิด 0.6 เซนติเมตร โดยมีอัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องเอกซ์ทรูชัน อุณหภูมิของทอบาร์เรล (โดยอ่านจาก เทอร์โมคัปเปิลที่เสียบอยู่ที่ผนังทอบาร์เรลท่อนกลางของเครื่องเอกซ์ทรูชัน) อุณหภูมิและความชื้น ของข้าวโพดเอกซ์ทรูดทันทีที่ออกจากเครื่อง ค่าความหนาแน่นของเมล็ดข้าวโพดและข้าวโพดที่ ผ่านเอกซ์ทรูดโดยไม่ผ่านการบดละเอียด ปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการเอกซ์ทรูชัน ปริมาณ กระแสไฟฟ้าในการบดละเอียดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ที่มีขนาดตะแกรงบด 1.7 มิลลิเมตร ปริมาณกระแสไฟฟ้ารวมที่ใช้ มูลค่ารวมที่ใช้ในการผลิต อัตราในการผลิตข้าวโพดเอกซ์ทรูชัน และในการบดละเอียด ของสูตรอาหารทดลองทั้ง 3 ระยะเวลาไก่กระทง คือ ระยะเวลา 1 – 21 วัน , ระยะเวลา 22 – 42 วัน และ ระยะเวลา 43 – 49 วัน ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 กระบวนการผลิตข้าวโพดเอกซ์ทรูด

ลักษณะที่ศึกษา	ระยะอายุ (วัน)		
	1 – 21	22 - 42	43 - 49
อัตราการไหลของน้ำ, ลิตร/ชั่วโมง	14.00	14.00	15.00
อุณหภูมิ, °C			
ท่อบาร์เรล	103.23	117.20	130.57
ข้าวโพดเอกซ์ทรูดทันทีที่ออกจากเครื่อง	74.33	63.87	62.57
ความชื้น, % ^a			
ข้าวโพดเริ่มต้น	12.17	11.30	11.83
ข้าวโพดเอกซ์ทรูดทันทีที่ออกจากเครื่อง	9.27	8.27	9.30
ความหนาแน่น, กรัม/ลิตร			
ข้าวโพด	831.53	819.60	838.53
ข้าวโพดเอกซ์ทรูด ^b	183.58	132.13	136.65
พลังงาน, กิโลวัตต์-ชั่วโมง/ตัน			
เอกซ์ทรูดขึ้น	85.15	81.42	78.02
บดละเอียด	2.19	1.89	3.38
รวม	87.34	82.68	81.40
ราคา, บาท/ตัน	171.29	162.15	159.64
กำลังการผลิต, กิโลกรัม/ชั่วโมง			
เอกซ์ทรูดขึ้น	329.22	278.94	296.36
บดละเอียด	1,037.73	1,717.94	1,062.76

^a วิเคราะห์ความชื้นด้วยเครื่อง Infrared moisture determination balance instrument.

^b ไม่ผ่านการบดละเอียด

3. อาหารทดลอง

ในการเลี้ยงแบ่งออกเป็น 3 ระยะการเลี้ยงคือ ช่วงอายุ 1 – 21 วัน, 22 – 42 วัน และ 43 – 49 วัน และอาหารทดลองแบ่งออกเป็น 4 สูตร คือ สูตรที่ 1 และ 2 ใช้ข้าวโพดบดเป็นวัตถุดิบแหล่งพลังงานในสูตรอาหาร ส่วนอาหารสูตรที่ 3 และ 4 ใช้ข้าวโพดเอกซ์ทราดเป็นวัตถุดิบแหล่งพลังงานอาหารในสูตรอาหาร

สูตรที่ 1 อาหารสูตรข้าวโพดบด (อาหารผง)

สูตรที่ 2 อาหารสูตรข้าวโพดบด (อาหารอัดเม็ด)

สูตรที่ 3 อาหารสูตรข้าวโพดเอกซ์ทราด (อาหารผง)

สูตรที่ 4 อาหารสูตรข้าวโพดเอกซ์ทราด (อาหารอัดเม็ด)

ซึ่งส่วนประกอบของวัตถุดิบและคุณค่าทางโภชนาของอาหารทดลองดังแสดงในตารางที่ 7 และ 8 ตามลำดับ

4. วิธีการทดลอง

- 1) ทำการจัดไก่ลงในแต่ละกลุ่มปัจจัยแบบสุ่ม ปัจจัยละ 8 ซ้ำๆ ละ 50 ตัว โดยเลี้ยงแบบแยกเพศ
- 2) ทำการชั่งน้ำหนักและบันทึกปริมาณอาหารที่กินที่ 21 , 42 และ 49 วัน ของการเลี้ยง
- 3) ทำการบันทึกอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ของอากาศตลอดระยะการทดลอง
- 4) สุ่มเก็บตัวอย่างอาหารทดลองในแต่ละระยะการเลี้ยงเพื่อวิเคราะห์หาองค์ประกอบของโภชนา โดยวิธี Proximate analysis ตามวิธี A.O.A.C. (1990)
- 5) นำข้อมูลที่ได้มาคำนวณค่า อัตราการเจริญเติบโต (ADG) ปริมาณอาหารที่กิน ประสิทธิภาพการใช้อาหาร (FCR) อัตราการตาย (คิดจากไก่ที่ตายและคัดทิ้ง) และต้นทุนการผลิต

ตารางที่ 7 วัตถุดิบและส่วนประกอบทางโภชนาของอาหารทดลองในการศึกษาสมรรถภาพการผลิตไก่กระตัง

ระยะอายุ (วัน)	1 – 21		22 - 42		43 - 49	
วัตถุดิบ, %	ข้าวโพด	ข้าวโพด เอกซ์ ทรูค	ข้าวโพด	ข้าวโพด เอกซ์ ทรูค	ข้าวโพด	ข้าวโพด เอกซ์ ทรูค
ข้าวโพด	47.51	23.22	52.79	28.70	58.77	34.64
ข้าวโพดเอกซ์ทรูค	-	25.00	-	25.00	-	25.00
ปลายข้าว	9.10	9.25	10.00	10.00	10.00	10.00
กากถั่วเหลือง(44% CP)	18.74	18.66	14.23	14.20	9.93	9.90
กากถั่วเหลืองไขมันเต็ม	11.07	10.63	9.73	9.23	8.20	7.74
ปลาป่น(60% CP)	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
ไขมันพืช	3.00	2.67	3.00	2.60	3.00	2.60
หินฟุ้ง	0.84	0.85	0.79	0.79	0.70	0.71
ไดแคลเซียมฟอสเฟต (21%P)	0.69	0.70	0.57	0.57	0.49	0.49
เกลือ	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19	0.19
ดีแอล-เมทไธโอนีน	0.19	0.20	0.17	0.18	0.17	0.18
พรีมิกซ์ ¹	0.33	0.33	0.20	0.20	0.20	0.20
ยาปฏิชีวนะ ²	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33
รวม	100	100	100	100	100	100
ราคา(บาท)/กิโลกรัม	11.72	12.24	11.02	11.54	10.14	10.65

¹ ส่วนประกอบต่อ 100 กิโลกรัมอาหาร: vitamin A 4,500,000 IU ; vitamin D 750,000 IU; vitamin E 10 mg; vitamin K3 0.75 mg; vitamin B1 1.1 mg; vitamin B2 3.0 mg; vitamin B3 10.0 mg; vitamin B6 2.0 mg; vitamin B12 12.5 µg; pantothenic acid 7.0 mg; folic acid 425.0 µg; biotin 0.1 mg; Cu 5.0 mg; Fe 48.0 mg; I 0.5 mg; Mn 30 mg; Se 0.1 mg และ Zn 50 mg.

² ส่วนประกอบต่อ 100 กิโลกรัมอาหาร: Elancoban 100 ppm; antifungals 500 ppm และ propionic acid 300 ppm.

ตารางที่ 8 ส่วนประกอบทางโภชนาของอาหารทดลองจากการคำนวณในการศึกษาสมรรถภาพการผลิตไก่กระทอง

ระยะอายุ (วัน)	1 – 21		22 - 42		43 - 49	
ส่วนประกอบโภชนา	ข้าวโพด	ข้าวโพด เอกซ์ทรา	ข้าวโพด	ข้าวโพด เอกซ์ทรา	ข้าวโพด	ข้าวโพด เอกซ์ทรา
พลังงานรวม (ME), kcal/kg	3100	3100	3150	3150	3200	3200
โปรตีนรวม (%)	22.00	22.00	20.00	20.00	18.00	18.00
ไขมันรวม (%)	9.12	8.75	9.12	8.67	9.00	8.54
เยื่อใย (%)	4.00	4.00	3.79	3.78	3.50	3.50
แคลเซียม (%)	0.90	0.90	0.85	0.85	0.80	0.80
ฟอสฟอรัสรวม (%)	0.85	0.85	0.82	0.82	0.78	0.78
ไลซีน (%)	1.31	1.30	1.18	1.16	1.03	1.02
เมทไธโอนีน (%)	0.59	0.59	0.54	0.54	0.52	0.52
เมทไธโอนีน + ซีสทีน (%)	0.92	0.92	0.85	0.85	0.80	0.80

5. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ทำการวิเคราะห์ข้อมูลแบบแฟคทอเรียลในแผนการทดลองแบบบล็อกสมบูรณ์ (2x2 factorial experiment in randomized complete block design; RCBD) ประกอบด้วย 2 ปัจจัยหลักคือ ข้าวโพดบด และ ข้าวโพดเอกซ์ทรา และ 2 ปัจจัยรองคือ อาหารผง และอาหารอัดเม็ด และบล็อกเพศของไก่ นำข้อมูลมาเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยแบบลิสต์สแควร์ ที่ระดับนัยสำคัญที่ 0.05 และแสดงข้อมูลเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน โดยแบบหุนการวิเคราะห์ทางสถิติดังนี้

$$Y_{ijk} = \mu + A_i + B_j + C_k + BC_{jk} + \epsilon_{ijk} \quad , i = 1, 2$$

$$j = 1, 2$$

$$k = 1, 2$$

เมื่อ	Y_{ijk}	= ค่าสังเกตจากผลสมรรถภาพการผลิต
	μ	= ค่าเฉลี่ยร่วมของค่าสังเกต
	A_i	= อิทธิพลของบล็อก (block) คือเพศผู้และเพศเมีย
	B_j	= อิทธิพลของปัจจัยหลัก A คือ ข้าวโพดบด และ ข้าวโพดเอกซ์ทราด
	C_k	= อิทธิพลของปัจจัยรอง B คือ อาหารผง และอาหารอัดเม็ด
	BC_{jk}	= อิทธิพลของอิทธิพลร่วมของปัจจัย A และ B
	ε_{ij}	= ความคลาดเคลื่อนของการทดลอง

สถานที่ทำการวิจัย

1. ห้องปฏิบัติการสาขาวิชากระบวนการทางเคมีและฟิสิกส์ คณะอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
2. ห้องปฏิบัติการภาควิชาสัตวบาล คณะเกษตรกำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
3. ศูนย์วิจัยและพัฒนาการผลิตสัตว์ปีก มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
4. บริษัทไบ-โอเจน ฟีดมิลล์ จำกัด อ.เมือง จ.ลำพูน
5. ไบ-โอเจน ฟาร์ม อ.เมือง จ.ลำพูน

ระยะเวลาทำการวิจัย

การวิจัยในครั้งนี้ใช้ระยะเวลาในการวิจัย 2 ปี ระยะเวลาตั้งแต่เดือน กุมภาพันธ์ 2547 – กุมภาพันธ์ 2549

ผลและวิจารณ์

การทดลองที่ 1 ผลของอัตราการไหลของน้ำในกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อกระบวนการผลิตและการใช้ประโยชน์ได้ของแป้งในข้าวโพด

การศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำในกระบวนการเอกซ์ทรูชันต่อกระบวนการผลิตและการใช้ประโยชน์ได้ของแป้งในข้าวโพด ได้ทำการศึกษากการเอกซ์ทรูชันทั้งในข้าวโพดทั้งเมล็ดและข้าวโพดที่ผ่านการบดหยาบก่อน จึงแบ่งการทดลองออกเป็น 2 การทดลองย่อยดังนี้

การทดลองที่ 1.1 การเอกซ์ทรูชันข้าวโพดทั้งเมล็ด

เมล็ดข้าวโพดที่ใช้ศึกษามีความชื้น 10.5 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิของท่อบาร์เรลที่ใช้อยู่ในช่วง 108 – 115 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องที่ใช้คือ 16, 19 และ 22 ลิตรต่อชั่วโมง ในการเอกซ์ทรูชันข้าวโพดทั้งเมล็ดพบว่า การใช้อัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องที่ระดับ 22 ลิตรต่อชั่วโมง มีผลทำให้อุณหภูมิและความชื้นของข้าวโพดเอกซ์ทรูด์ที่ออกจากเครื่องเอกซ์ทรูชัน และความชื้นในข้าวโพดเอกซ์ทรูด์หลังทิ้งไว้ให้เย็นเป็นเวลา 12 ชั่วโมง มีค่าสูงกว่าการใช้อัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องที่ระดับ 19 และ 16 ลิตรต่อชั่วโมง ($P < 0.01$) ตามลำดับ (ตารางที่ 9) ทั้งนี้เนื่องจากวัตถุที่ป้อนเข้าเครื่องมีปริมาณความชื้นมากทำให้ผลผลิตจากการเอกซ์ทรูชันที่ออกจากเครื่องมีความชื้นมากขึ้นด้วย (Thymi *et al.*, 2005 ; รุ่งนภาและประชา, 2540)

ส่วนต้นทุนและพลังงานที่ใช้ในการผลิตนั้น พลังงานรวม (total energy consumption) ที่ใช้ในการผลิตประกอบด้วยพลังงานที่ใช้ในการเอกซ์ทรูชัน (extrusion energy consumption) และพลังงานที่ใช้ในการบดละเอียด (fine grinding energy consumption) จากการศึกษาพบว่า การใช้อัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องที่ระดับ 22 ลิตรต่อชั่วโมงใช้พลังงานการเอกซ์ทรูชันเฉลี่ยเท่ากับ 62.44 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตัน ต่ำกว่าการใช้อัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องที่ระดับ 16 และ 19 ลิตรต่อชั่วโมงเฉลี่ยเท่ากับ 74.64 และ 72.90 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตัน ($P < 0.01$) สำหรับพลังงานที่ใช้ในการบดละเอียดข้าวโพดเอกซ์ทรูด์พบว่า การเพิ่มอัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องที่ 16, 19 และ 22 ลิตรต่อชั่วโมงมีผลในการเพิ่มการใช้พลังงานในการบดละเอียดเพิ่มมากขึ้น ($P < 0.01$) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.12, 2.15 และ 3.59 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตัน ตามลำดับ ดังนั้นการใช้อัตราการ

ไหลของน้ำเข้าเครื่อง 22 ลิตรต่อชั่วโมงมีผลต่อพลังงานรวมที่ใช้ในการผลิตและต้นทุนในการผลิตต่ำกว่าการใช้อัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่อง 16 และ 19 ลิตรต่อชั่วโมง ($P<0.01$) แต่อัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องที่ 16 และ 19 ลิตรต่อชั่วโมงมีพลังงานรวมและต้นทุนการผลิตไม่แตกต่างกันทางสถิติ (ตารางที่ 10) จากผลการทดลองเมื่ออัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องเพิ่มขึ้นมีผลทำให้พลังงานที่ใช้ในการเอ็กซ์ทรูชัน และต้นทุนในการผลิตโดยรวมลดลง แต่พลังงานในการบดละเอียดเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณน้ำที่เพิ่มเข้าไปในเครื่อง เมื่อกระทบกับความร้อนที่เกิดจากแรงดันของสกรูภายในทอบาร์เรล จะถูกเปลี่ยนเป็นไอน้ำ และทำหน้าที่เป็นตัวหล่อลื่นในเครื่อง ช่วยลดภาระของมอเตอร์ในการหมุนสกรูภายในเครื่อง (Skock *et al.*, 1983) จึงมีผลทำให้พลังงานที่ใช้ในการเอ็กซ์ทรูชันลดลง

ตารางที่ 9 ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิและความชื้น ($\pm$ SD) ในกระบวนการเอ็กซ์ทรูชันข้าวโพดทั้งเมล็ดที่อัตราการไหลของน้ำระดับต่าง ๆ

ลักษณะที่ศึกษา	อัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่อง (ลิตร/ชั่วโมง)		
	16	19	22
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
ทอบาร์เรล	115.30 ± 2.82	108.10 ± 5.19	109.10 ± 0.70
ออกจากเครื่อง ¹	$64.80 \pm 2.31^{\text{a}}$	$75.33 \pm 2.72^{\text{b}}$	$87.93 \pm 1.63^{\text{c}}$
ความชื้น (เปอร์เซ็นต์)			
เมล็ดข้าวโพด	10.50 ± 0.17	10.50 ± 0.17	10.50 ± 0.17
ข้าวโพดเอ็กซ์ทรูด (ทันทีที่ออกจากเครื่อง)	$8.23 \pm 0.21^{\text{a}}$	$9.03 \pm 0.38^{\text{b}}$	$10.73 \pm 0.31^{\text{c}}$
ข้าวโพดเอ็กซ์ทรูด (ทิ้งให้เย็นเป็นเวลา 12 ชม.)	$6.01 \pm 0.10^{\text{a}}$	$6.64 \pm 0.06^{\text{b}}$	$7.14 \pm 0.32^{\text{c}}$

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

¹ อุณหภูมิข้าวโพดเอ็กซ์ทรูดที่ทำการบันทึกทันทีที่ออกจากเครื่องเอ็กซ์ทรูชัน

ในด้านกำลังการผลิต พบว่าการใช้อัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องที่ 16 ลิตรต่อชั่วโมงสามารถผลิตข้าวโพดเอ็กซ์ทรูดได้มากถึง 420.34 กิโลกรัมต่อชั่วโมง เมื่อเทียบกับการใช้อัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องที่ 19 และ 22 ลิตรต่อชั่วโมงมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 382.27 และ 395.43 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับ ($P<0.05$) และในการบดละเอียดข้าวโพดเอ็กซ์ทรูดก่อนนำไปใช้ในการผสม

อาหารเลี้ยงสัตว์พบว่า การใช้อัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องที่ 16 ลิตรต่อชั่วโมง สามารถบดละเอียดข้าวโพดเอกซ์ทราหุคมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 2255.66 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ได้มากกว่าการใช้อัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องที่ 19 และ 22 ลิตรต่อชั่วโมงมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1350.2 และ 1433.3 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับ ($P<0.01$) (ตารางที่ 10) การเอกซ์ทราหุคข้าวโพดที่อัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องเพิ่มขึ้น จะทำให้กำลังการผลิตต่อนาฬิกาของข้าวโพดลดลง และเนื้อสัมผัสของข้าวโพดเอกซ์ทราหุคที่ได้มีลักษณะเหนียวและแข็ง ทำให้กำลังการผลิตต่อชั่วโมงในการบดละเอียดมีค่าน้อยลง (Hongtrakul *et al.*, 1988)

ตารางที่ 10 ค่าเฉลี่ยพลังงานไฟฟ้าและกำลังการผลิต($\pm$ SD) ในกระบวนการเอกซ์ทราหุคข้าวโพดทั้งเมล็ดที่อัตราการไหลของน้ำระดับต่าง ๆ

ลักษณะที่ศึกษา	อัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่อง (ลิตร/ชั่วโมง)		
	16	19	22
พลังงานไฟฟ้า(กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตัน)			
เอกซ์ทราหุค	$74.64 \pm 1.67^{\text{ก}}$	$72.90 \pm 0.53^{\text{ก}}$	$62.44 \pm 2.68^{\text{ข}}$
บดละเอียด	$1.12 \pm 0.17^{\text{ก}}$	$1.15 \pm 0.09^{\text{ข}}$	$3.59 \pm 0.25^{\text{ก}}$
รวม	$75.76 \pm 1.74^{\text{ก}}$	$75.05 \pm 0.46^{\text{ก}}$	$64.83 \pm 0.71^{\text{ข}}$
ราคา (บาทต่อตัน) ¹	$148.59 \pm 3.41^{\text{ก}}$	$147.19 \pm 0.90^{\text{ก}}$	$129.49 \pm 1.39^{\text{ข}}$
กำลังการผลิต(กิโลกรัมต่อชั่วโมง)			
เอกซ์ทราหุค	$420.34 \pm 13.42^{\text{อ}}$	$382.27 \pm 8.22^{\text{ส}}$	$395.43 \pm 10.19^{\text{ส}}$
บดละเอียด	$2255.66 \pm 158.47^{\text{ก}}$	$1350.20 \pm 44.24^{\text{ข}}$	$1433.31 \pm 185.23^{\text{ข}}$

ก, ข, ค อักษรที่แตกต่างกันในแถวเดียวกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.01$)

อ, ส อักษรที่แตกต่างกันในแถวเดียวกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$)

¹ อัตราค่าพลังงานไฟฟ้า 1.70 บาทต่อหน่วย และอัตราค่าไฟฟ้าผันแปร 0.2 บาทต่อหน่วย

นอกจากนี้อัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่อง 22 ลิตรต่อชั่วโมงมีผลทำให้ค่าความหนาแน่น (bulk density) ของข้าวโพดเอกซ์ทราหุคก่อนการบดละเอียดเฉลี่ยที่ 223.90 กรัมต่อลิตร สูงกว่าอัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่อง 16 และ 19 ลิตรต่อชั่วโมงเฉลี่ยที่ 133.75 และ 161.03 กรัมต่อลิตร ตามลำดับ ($P<0.01$) และอัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องที่ 16 และ 19 ลิตรต่อชั่วโมงมีผลทำให้

ค่าความหนาแน่นของข้าวโพดเอกซ์ทรูตก่อนการบดละเอียดแตกต่างกัน ($P < 0.01$) ส่วนปริมาณแป้งทั้งหมดในข้าวโพดเอกซ์ทรูตที่ผ่านกระบวนการผลิตที่ใช้อัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องทั้ง 3 ระดับมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ แต่อัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องมีผลต่อระดับการเจลาติไนซ์ของแป้งในข้าวโพดเอกซ์ทรูต พบว่าการใช้อัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องที่ 16 ลิตรต่อชั่วโมงมีค่าระดับการเจลาติไนซ์มากกว่าการใช้อัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องที่ 19 และ 22 ลิตรต่อชั่วโมง ($P < 0.01$) นอกจากนี้อัตราการไหลของน้ำมีผลต่อค่าการย่อยได้ของเอนไซม์ (enzyme susceptibility) ซึ่งใช้เป็นดัชนีการประเมินการใช้ประโยชน์ได้ของแป้งในสัตว์ พบว่าการใช้อัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องที่ 16 ลิตรต่อชั่วโมงมีค่าการย่อยได้ของเอนไซม์มากกว่าการใช้อัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องที่ 19 และ 22 ลิตรต่อชั่วโมง ($P < 0.01$) และที่การใช้อัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องที่ 19 และ 22 ลิตรต่อชั่วโมงมีค่าการย่อยได้ของเอนไซม์แตกต่างกัน ($P < 0.01$) โดยมีค่าเฉลี่ยที่ 56.00, 51.81 และ 46.73 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ตารางที่ 11) เนื่องจากปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้น มีผลทำให้ความหนืดของหัวไคในเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์ลดลง เกิดแรงดันภายในต่ำ ข้าวโพด เอกซ์ทรูตที่ออกจากเครื่องมีการพองตัวน้อยลงเมื่อแป้งเกิดการเจลาติไนซ์ลดลง เนื้อสัมผัสของข้าวโพดเอกซ์ทรูตแข็งมากขึ้นทำให้ความหนาแน่นเพิ่มมากขึ้น (Obaldo *et al.*, 1999; รุ่งนภา และ ประชา, 2540) จึงส่งผลทำให้การย่อยแป้งโดยเอนไซม์ลดลง ซึ่งผลการทดลองเป็นไปในแนวทางเดียวกับ Thymi *et al.* (2005) รายงานว่าเมื่อความชื้นของวัตถุดิบที่ใช้ในการเอกซ์ทรูตเพิ่มสูงขึ้น มีผลทำให้ผลผลิตที่ได้มีความหนาแน่นที่เพิ่มสูงขึ้น

เมื่อข้าวโพดเอกซ์ทรูตถูกบดด้วยเครื่องแฮมเมอร์มิลล์ ขนาดอนุภาค (D_{gw}) อยู่ในช่วง 352.18 – 440 ไมครอน และมีค่าความเป็นเนื้อเดียวกันของข้าวโพดเอกซ์ทรูตบดละเอียด (S_{gw}) อยู่ในช่วง 1.66 – 1.73 (ตารางที่ 11) ซึ่งกล่าวได้ว่าข้าวโพดเอกซ์ทรูตมีความเป็นเนื้อเดียวกันและการที่อนุภาคของอาหารมีขนาดเล็กจะทำให้เพิ่มพื้นที่ในการที่ในการสัมผัสกับเอนไซม์ ช่วยเพิ่มการใช้ประโยชน์ของอาหาร แต่ถ้าขนาดเล็กเกินไปจะเป็นการเพิ่มต้นทุนการผลิตในการบดและเป็นการเพิ่มฝุ่นในอาหาร Wondra *et al.* (1995) เสนอว่าขนาดอนุภาคอาหารควรจะเล็กกว่า 600 ไมครอน

ตารางที่ 11 คุณลักษณะทางกายภาพของข้าวโพดเอกซ์ทรูดที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูดชั้นข้าวโพดทั้งเมล็ด ($\pm$ SD) ที่อัตราการไหลของน้ำระดับต่าง ๆ

ลักษณะที่ศึกษา	อัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่อง (ลิตร/ชั่วโมง)		
	16	19	22
ความหนาแน่น (กรัมต่อลิตร)	$133.75 \pm 6.80^{\text{ก}}$	$161.03 \pm 1.08^{\text{ข}}$	$223.90 \pm 21.25^{\text{ก}}$
ปริมาณแป้ง (เปอร์เซ็นต์)	73.34 ± 2.64	73.49 ± 2.04	72.00 ± 2.11
ระดับการเจลาติไนซ์ (เปอร์เซ็นต์)	$95.04 \pm 1.56^{\text{ก}}$	$94.59 \pm 2.17^{\text{ก}}$	$87.56 \pm 0.42^{\text{ข}}$
การย่อยได้ของเอ็นไซม์ (เปอร์เซ็นต์)	$56.00 \pm 1.12^{\text{ก}}$	$51.81 \pm 1.40^{\text{ข}}$	$46.73 \pm 1.95^{\text{ก}}$
ขนาดอนุภาค			
$D_{\text{gw}}, \text{microns}$	$407.70 \pm 5.34^{\text{ก}}$	$352.18 \pm 13.32^{\text{ข}}$	$440.23 \pm 29.36^{\text{ก}}$
S_{gw}	$1.73 \pm 0.03^{\text{อ}}$	$1.76 \pm 0.03^{\text{อ}}$	$1.66 \pm 0.06^{\text{ส}}$

ก, ข, ค อักษรที่แตกต่างกันในแถวเดียวกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$)

อ, ส อักษรที่แตกต่างกันในแถวเดียวกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

ในด้านองค์ประกอบทางโภชนาของข้าวโพดเอกซ์ทรูดพบว่า ข้าวโพดที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูดชั้นจะมีปริมาณความชื้นและปริมาณไขมันลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวโพดที่ไม่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูดชั้น ($P < 0.01$) ส่วนปริมาณโปรตีนและเถ้าไม่แตกต่างกันทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับข้าวโพดที่ไม่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูด และในกระบวนการผลิตข้าวโพดเอกซ์ทรูดที่อัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องทั้ง 3 ระดับต่อองค์ประกอบทางโภชนาที่พบว่าอัตราการไหลของน้ำที่เพิ่มขึ้นจาก 16 ถึง 22 ลิตรจะมีผลทำให้ปริมาณความชื้นในข้าวโพดเอกซ์ทรูดเพิ่มสูงขึ้น ($P < 0.01$) เฉลี่ยที่ 6.01, 6.64 และ 7.14 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และปริมาณไขมันในข้าวโพดเอกซ์ทรูดมีปริมาณเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการไหลของน้ำเพิ่มขึ้น ($P < 0.05$) เฉลี่ยที่ 2.82, 2.89 และ 3.17 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แต่อัตราการไหลของน้ำทั้ง 3 ระดับไม่มีผลต่อปริมาณโปรตีนและเถ้าในข้าวโพดเอกซ์ทรูด (ตารางที่ 12) เนื่องจากในกระบวนการเอกซ์ทรูดชั้นพื้นที่ที่วัตถุดิบหลุดออกจากเครื่องเอกซ์ทรูดน้ำระเหยออกไป ซึ่งความชื้นในวัตถุดิบจะสูญเสียไป 50 เปอร์เซ็นต์ (Said, 2000) นอกจากนี้มีการสูญเสียไขมันตรงบริเวณหัวไค (die) ในรูปของไขมันอิสระ (Free oil) และเกิดการรวมตัวกับอะมิโลส (Lipid-amylose complexes) หรือโปรตีน (Wang et al. 1993)

ตารางที่ 12 ค่าเฉลี่ยของค่าประกอบทางเคมี ($\pm$ SD) ของข้าวโพดบดและข้าวโพดเอกซ์ทราคท์ที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทราคชันข้าวโพดทั้งเมล็ดที่อัตราการไหลของน้ำระดับต่าง ๆ

ลักษณะที่ศึกษา (% วัตถุแห้ง)	ข้าวโพด	อัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่อง (ลิตร/ชั่วโมง)			ความแตกต่าง ¹	
		16	19	22	1	2
ความชื้น	10.81 $\pm$ 0.23	6.01 $\pm$ 0.10	6.64 $\pm$ 0.06	7.14 $\pm$ 0.32	***	**
ไขมัน	5.22 $\pm$ 1.33	2.82 $\pm$ 0.02	2.89 $\pm$ 0.10	3.17 $\pm$ 0.21	**	*
โปรตีน	8.12 $\pm$ 0.82	7.65 $\pm$ 0.08	8.08 $\pm$ 0.17	7.97 $\pm$ 0.26	NS	NS
เถ้า	1.51 $\pm$ 0.36	1.55 $\pm$ 0.02	1.53 $\pm$ 0.06	1.63 $\pm$ 0.07	NS	NS

¹ ความแตกต่าง: 1) ข้าวโพดบด กับ ข้าวโพดเอกซ์ทราคท์ที่อัตราการไหลของน้ำ 16, 19 และ 22 ลิตรต่อชั่วโมง

2) ความแตกต่างระหว่างระดับอัตราการไหลของน้ำ 16, 19 และ 22 ลิตรต่อชั่วโมง

*** = $P < 0.001$; ** = $P < 0.01$; * = $P < 0.05$; NS = ไม่แตกต่างทางสถิติ ($P > 0.05$)

การทดลองที่ 1.2 การเอกซ์ทราคชันข้าวโพดบดหยาบ

ข้าวโพดจะถูกบดหยาบด้วยเครื่องแฮมเมอร์มีล้นขนาดตะแกรงที่ใช้บด 6 มิลลิเมตร ให้ขนาดของอนุภาคเฉลี่ย (D_{gw}) 1521 ไมครอน และค่าความเป็นเนื้อเดียวกันของขนาดอนุภาค (S_{gw}) เฉลี่ยที่ 2.11 และข้าวโพดบดหยาบที่ใช้ศึกษามีความชื้น 10.97 เปอร์เซ็นต์ อุณหภูมิของท่อบาร์เรลที่ให้อยู่ในช่วง 111 – 126 องศาเซลเซียส และอัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องที่ใช้คือ 18, 22 และ 24 ลิตรต่อชั่วโมง ผลการทดลองพบว่า เมื่ออัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องเพิ่มขึ้น อุณหภูมิของข้าวโพดเอกซ์ทราคท์ทันทีที่ออกจากเครื่องมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ และการใช้อัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องที่ระดับ 24 ลิตรต่อชั่วโมง มีผลทำให้ความชื้นของข้าวโพดเอกซ์ทราคท์ที่ออกจากเครื่องเอกซ์ทราคชัน มีค่าสูงกว่าการใช้อัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องที่ระดับ 18 และ 22 ลิตรต่อชั่วโมง ($P < 0.05$) ซึ่งอัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องที่ระดับ 18 และ 22 ลิตรต่อชั่วโมงมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ นอกจากนี้ที่อัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องที่ 24 และ 22 ลิตรต่อชั่วโมงมีผลทำให้ความชื้นในข้าวโพดเอกซ์ทราคท์หลังทิ้งไว้ให้เย็นเป็นเวลา 12 ชั่วโมงมีค่าสูงกว่าการใช้อัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องที่ 18 ลิตรต่อชั่วโมง ($P < 0.05$) ดังตารางที่ 13

ทั้งนี้เนื่องจากวัตถุที่ป้อนเข้าสู่เครื่องมีปริมาณความชื้นมากทำให้ผลผลิตจากการเอกซ்தรูล์ที่ออกจากเครื่องมีความชื้นมากขึ้นด้วย (Thymi *et al.*, 2005 ; รุ่งนภาและประชา, 2540)

ตารางที่ 13 ค่าเฉลี่ยอุณหภูมิและความชื้น ($\pm$ SD) ในกระบวนการเอกซ்தรูล์ชั้นข้าวโพดบดหยาบที่อัตราการไหลของน้ำระดับต่าง ๆ

ลักษณะที่ศึกษา	อัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่อง (ลิตร/ชั่วโมง)		
	18	22	24
อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)			
ท่อบาร์เรล	125.63 $\pm$ 1.40 ^ก	111.20 $\pm$ 1.64 ^ข	122.83 $\pm$ 1.99 ^ก
ออกจากเครื่อง ¹	68.30 $\pm$ 7.75	70.70 $\pm$ 6.07	78.30 $\pm$ 5.97
ความชื้น (เปอร์เซ็นต์)			
เมล็ดข้าวโพด	10.97 $\pm$ 0.49	10.97 $\pm$ 0.49	10.97 $\pm$ 0.49
ข้าวโพดเอกซ்தรูล์ (ทันทีที่ออกจากเครื่อง)	7.87 $\pm$ 0.55 ^ข	8.70 $\pm$ 0.78 ^ข	9.90 $\pm$ 0.36 ^ข
ข้าวโพดเอกซ்தรูล์ (ทิ้งให้เย็นเป็นเวลา 12 ชม)	5.64 $\pm$ 0.52 ^ข	6.45 $\pm$ 0.34 ^ข	6.95 $\pm$ 0.24 ^ข

ก, ข, ค อักษรที่แตกต่างกันในแถวเดียวกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$)

อ, ฮ อักษรที่แตกต่างกันในแถวเดียวกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

¹ อุณหภูมิข้าวโพดเอกซ்தรูล์ที่ทำการบันทึกทันทีที่ออกจากเครื่องเอกซ்தรูล์

ในด้านการใช้พลังงาน ค่าพลังงานที่ใช้ในการบดหยาบข้าวโพดทั้งเมล็ดก่อนเข้าสู่กระบวนการเอกซ்தรูล์ชั้น เท่ากับ 0.7 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตัน จากการศึกษาพบว่าการใช้อัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องที่ 18 ลิตรต่อชั่วโมงใช้พลังงานในการเอกซ்தรูล์ชั้นต่ำกว่าการใช้อัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องที่ 22 และ 24 ลิตรต่อชั่วโมง ($P < 0.01$) แต่อัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องที่ 22 และ 24 ลิตรต่อชั่วโมงไม่แตกต่างกันทางสถิติ ส่วนพลังงานที่ใช้ในการบดละเอียดก่อนนำไปเลี้ยงสัตว์ พบว่าการเพิ่มอัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องมีผลในการเพิ่มการใช้พลังงานในการบดละเอียด ($P < 0.01$) มีค่าเท่ากับ 1.30, 1.98 และ 3.18 กิโลวัตต์-ชั่วโมงต่อตัน ที่อัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องที่ 18, 22 และ 24 ลิตรต่อชั่วโมง ตามลำดับ ดังนั้นเมื่อคิดพลังงานรวม คือที่ใช้ในการบดหยาบ พลังงานในการเอกซ்தรูล์ชั้น และพลังงานในการบดละเอียด พบว่าการใช้อัตราการไหลของน้ำที่ 18 ลิตรต่อชั่วโมงมีพลังงานรวมสูงกว่าการใช้อัตราการไหลของน้ำที่ 22 และ 24 ลิตร

($P < 0.01$) แต่การใช้อัตราการใช้ของน้ำที่ 22 และ 24 ลิตรต่อชั่วโมงมีค่าพลังงานรวมไม่แตกต่างกันทางสถิติ (ตารางที่ 14) ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณน้ำที่เพิ่มเข้าไปในเครื่อง เมื่อกระทบกับความร้อนที่เกิดจากแรงดันของสกรูภายในท่อบาร์เรล จะถูกเปลี่ยนเป็นไอน้ำ และทำหน้าที่เป็นตัวหล่อลื่นในเครื่อง ช่วยลดภาระของมอเตอร์ในการหมุนสกรูภายในเครื่อง (Skock *et al.*, 1983) จึงมีผลทำให้พลังงานที่ใช้ในการเอกซ்தรุชั้นลดลง

กำลังการผลิตในการเอกซ்தรุชั้นข้าวโพดคดยาบที่อัตราการใช้ของน้ำที่ 18, 22 และ 24 ลิตรต่อชั่วโมงมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 385.16, 414.76 และ 363.52 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับ แต่การใช้อัตราการใช้ของน้ำเข้าเครื่องที่ 18 ลิตรต่อชั่วโมงมีกำลังการผลิตในการบดละเอียดสูงกว่าการใช้ของน้ำเข้าเครื่องที่ 22 และ 24 ลิตรต่อชั่วโมง ($P < 0.01$) มีค่าเท่ากับ 1659.42, 1283.44 และ 1131.49 กิโลกรัมต่อชั่วโมงตามลำดับ (ตารางที่ 14) การเอกซ்தรุชั้นข้าวโพดที่อัตราการใช้ของน้ำเข้าเครื่องเพิ่มขึ้น จะทำให้กำลังการผลิตต่อนาฬิกาของข้าวโพดลดลง และเนื้อสัมผัสของข้าวโพดเอกซ்தรุคที่ได้มีลักษณะเหนียวและแข็ง ต้องใช้พลังงานในการบดละเอียดเพิ่มมากขึ้น ทำให้กำลังการบดละเอียดลดลง (Hongtrakul *et al.*, 1988)

ตารางที่ 14 ค่าเฉลี่ยพลังงานไฟฟ้าและกำลังการผลิต($\pm$ SD) ในกระบวนการเอกซทูลชันข้าวโพด
บดหยาบที่อัตราการไหลของน้ำระดับต่าง ๆ

ลักษณะที่ศึกษา	อัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่อง (ลิตร/ชั่วโมง)		
	18	22	24
พลังงานไฟฟ้า(กิโลวัตต์ชั่วโมงต่อตัน)			
บดหยาบ	0.70 ± 0.01	0.70 ± 0.01	0.70 ± 0.01
เอกซทูลชัน	$85.04 \pm 3.6^{\text{ก}}$	$68.16 \pm 0.92^{\text{ข}}$	$67.53 \pm 1.73^{\text{ข}}$
บดละเอียด	$1.30 \pm 0.05^{\text{ก}}$	$1.98 \pm 0.54^{\text{ข}}$	$3.18 \pm 0.11^{\text{ก}}$
รวม	$87.04 \pm 3.68^{\text{ก}}$	$70.56 \pm 0.58^{\text{ข}}$	$71.41 \pm 1.62^{\text{ข}}$
ราคา (บาทต่อตัน) ¹	$170.69 \pm 7.23^{\text{ก}}$	$138.29 \pm 1.14^{\text{ข}}$	$140.04 \pm 3.18^{\text{ข}}$
กำลังการผลิต(กิโลกรัมต่อชั่วโมง)			
เอกซทูลชัน	385.16 ± 27.82	414.76 ± 34.63	363.52 ± 29.02
บดละเอียด	$1659.42 \pm 42.05^{\text{อ}}$	$1283.44 \pm 113.77^{\text{ส}}$	$1131.49 \pm 33.98^{\text{ส}}$

ก,ข,ค อักษรที่แตกต่างกันในแถวเดียวกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$)

อ, ส อักษรที่แตกต่างกันในแถวเดียวกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

¹ อัตราค่าพลังงานไฟฟ้า 1.70 บาทต่อหน่วย และอัตราค่าไฟฟ้าผันแปร 0.2 บาทต่อหน่วย

คุณลักษณะทางกายภาพของข้าวโพดเอกซทูล พบว่าการใช้อัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่อง ทั้ง 3 ระดับ มีปริมาณแป้งรวมในข้าวโพดเอกซทูลมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ แต่ระดับการเจลาติไนซ์ของแป้งมีแนวโน้มลดลงเมื่ออัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องเพิ่มขึ้น ($P=0.15$) แต่การใช้ อัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องที่ 24 ลิตรต่อชั่วโมงมีผลทำให้ค่าความหนาแน่น (bulk density) ของข้าวโพดเอกซทูลที่ไม่ผ่านการบดละเอียดมีค่าสูงกว่าการใช้อัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องที่ 18 และ 22 ลิตรต่อชั่วโมง ($P < 0.01$) และการใช้อัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องที่ 24 ลิตรต่อ ชั่วโมงมีค่าการเข้าย่อยได้ของเอนไซม์ต่ำกว่าการใช้อัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องที่ 22 ลิตรต่อ ชั่วโมง ($P < 0.05$) (ตารางที่ 15) เนื่องจากปริมาณความชื้นที่เพิ่มขึ้นมีผลทำให้ความหนืดของหัวไค ในเครื่องเอกซทูลเดอร์ลดต่ำลง เกิดแรงดันภายในต่ำ ข้าวโพดเอกซทูลที่ออกจากเครื่องมีการพองตัวน้อยลงเม็ดแป้งเกิดการเจลาติไนซ์ลดลง เนื้อสัมผัสของข้าวโพดเอกซทูลแข็งมากขึ้นทำให้ความ หนาแน่นเพิ่มมากขึ้น จึงส่งผลทำให้การย่อยแป้งโดยเอนไซม์ลดลง (Obaldo *et al*, 1999; รุ่งนภา

และ ประชา, 2540) ส่วนขนาดอนุภาคของข้าวโพดบดละเอียดมีค่าอยู่ในช่วง 397 – 434 ไมครอน และมีความเป็นเนื้อเดียวกันอยู่ในช่วง 1.9 – 2.2 ตามลำดับ Amornthewaphat *et al.* (2005) กล่าวว่า วัตถุดิบอาหารสัตว์หลังบดแล้ว ควรมีค่าความเป็นเนื้อเดียวกันน้อยกว่าหรือเท่ากับ 2.0 ซึ่งหมายถึง วัตถุดิบมีความเป็นเนื้อเดียวกันดี

ตารางที่ 15 คุณลักษณะทางกายภาพของข้าวโพดเอกซ์ทรูดที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูดชั้นข้าวโพด บดหยาบ ($\pm$ SD) ที่อัตราการไหลของน้ำระดับต่าง ๆ

ลักษณะที่ศึกษา	อัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่อง (ลิตร/ชั่วโมง)		
	18	22	24
ความหนาแน่น (กรัมต่อลิตร)	133.58 $\pm$ 0.11 ^u	137.25 $\pm$ 13.34 ^u	206.25 $\pm$ 0.78 ⁿ
ปริมาณแป้ง (เปอร์เซ็นต์)	73.75 $\pm$ 1.19	74.59 $\pm$ 1.76	71.30 $\pm$ 2.00
การเกิดเจลลาติน (เปอร์เซ็นต์)	97.80 $\pm$ 0.57	95.86 $\pm$ 1.82	94.72 $\pm$ 1.99
การย่อยได้ของเอ็นไซม์ (เปอร์เซ็นต์)	54.63 $\pm$ 0.62 ^{os}	56.25 $\pm$ 1.52 ^o	51.60 $\pm$ 2.26 ^s
ขนาดอนุภาค			
D _{gw} , microns	423.02 $\pm$ 34.10	397.24 $\pm$ 34.90	434.57 $\pm$ 46.21
S _{gw}	1.85 $\pm$ 0.11 ^u	2.22 $\pm$ 0.18 ⁿ	1.88 $\pm$ 0.04 ^u

u, u อักษรที่แตกต่างกันในแถวเดียวกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$)

o, s อักษรที่แตกต่างกันในแถวเดียวกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

องค์ประกอบทางโภชนาของข้าวโพดเอกซ์ทรูดที่ได้จากการเอกซ์ทรูดชั้นข้าวโพดบดหยาบ พบว่าความชื้นและไขมันในข้าวโพดที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูดมีค่าลดลงเมื่อเทียบกับข้าวโพดที่ไม่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูด ($P < 0.05$) ส่วนปริมาณโปรตีนและเถ้ามีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติเมื่อเทียบกับข้าวโพดที่ไม่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูด เนื่องจากในกระบวนการเอกซ์ทรูดชั้น ทนที่ที่วัตถุดิบหลุดออกจากเครื่องเอกซ์ทรูดน้ำระเหยออกไป ซึ่งความชื้นในวัตถุดิบจะสูญเสียไป 50 เปอร์เซ็นต์ (Said, 2000) นอกจากนี้มีการสูญเสียไขมันตรงบริเวณหัวใด (die) ในรูปของไขมันอิสระ (Free oil) และเกิดการรวมตัวกับอะมิโลส (Lipid-amylose complexes) หรือโปรตีน (Wang *et al.* 1993) และเมื่อเปรียบเทียบผลการใช้อัตราไหลของน้ำในกระบวนการเอกซ์ทรูดชั้นต่อองค์ประกอบทางโภชนาของข้าวโพดเอกซ์ทรูด พบว่า เมื่อใช้อัตราไหลของน้ำเพิ่มขึ้นมีผลทำให้ปริมาณความชื้นในข้าวโพดเอกซ์

ทรูคมีค่าเพิ่มขึ้น ($P<0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากวัตถุที่ป้อนเข้าสู่เครื่องมีปริมาณความชื้นมากทำให้ผลผลิตจากการเอกซ์ทรูชันที่ออกจากเครื่องมีความชื้นมากขึ้นด้วย (Thymi *et al.*, 2005 ; รุ่งนภาและประชา, 2540) และการใช้อัตราการไหลของน้ำที่ 22 ลิตรต่อชั่วโมง มีปริมาณโปรตีนในข้าวโพดเอกซ์ทรูคต่ำกว่าการใช้อัตราการไหลของน้ำที่ 18 และ 24 ลิตรต่อชั่วโมง ($P<0.05$) ส่วนปริมาณไขมันและเถ้ามีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ดังตารางที่ 16

ตารางที่ 16 ค่าเฉลี่ยองค์ประกอบทางเคมี ($\pm$ SD) ของข้าวโพดคดและข้าวโพดเอกซ์ทรูคที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันข้าวโพดคดหยาบที่อัตราการไหลของน้ำระดับต่าง ๆ

ลักษณะที่ศึกษา (% วัตถุแห้ง)	ข้าวโพด	อัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่อง (ลิตร/ชั่วโมง)			ความแตกต่าง ¹	
		18	22	24	1	2
ความชื้น	10.81 $\pm$ 0.23	5.64 $\pm$ 0.52	6.45 $\pm$ 0.34	6.95 $\pm$ 0.24	***	*
ไขมัน	5.22 $\pm$ 1.33	3.13 $\pm$ 0.07	2.70 $\pm$ 0.26	3.10 $\pm$ 0.35	*	NS
โปรตีน	8.12 $\pm$ 0.82	8.00 $\pm$ 0.16	7.63 $\pm$ 0.09	8.04 $\pm$ 0.22	NS	*
เถ้า	1.51 $\pm$ 0.36	1.45 $\pm$ 0.06	1.49 $\pm$ 0.08	1.64 $\pm$ 0.10	NS	NS

¹ ความแตกต่าง: 1) ข้าวโพดคดกับข้าวโพดเอกซ์ทรูคที่อัตราการไหลของน้ำ 18, 22 และ 24 ลิตรต่อชั่วโมง

2) ความแตกต่างระหว่างระดับอัตราการไหลของน้ำ 18, 22 และ 24 ลิตรต่อชั่วโมง

*** = $P<0.001$; ** = $P<0.01$; * = $P<0.05$; NS = ไม่แตกต่างทางสถิติ ($P>0.05$)

การทดลองที่ 2 ระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อองค์ประกอบทางโภชนะและการหืน (rancidity) ของข้าวโพดเอกซ์ทรูค

การศึกษาระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อองค์ประกอบทางโภชนะและการหืน (rancidity) ของข้าวโพดเอกซ์ทรูค โดยการเกิดการหืนวัดจากค่า TBA เป็นค่าที่บอกระดับการเกิดออกซิเดชันในอาหารโดยการวัดความเข้มข้นของสีแดงที่เกิดจากปฏิกิริยาทางเคมีระหว่าง 2 - Thiobarbituric acid กับ Malonaldehyde ซึ่งเป็นสารประกอบที่เกิดจากการออกซิเดชันของไขมัน (Pearson, 1976) พบว่า ข้าวโพดมีปริมาณความชื้น ไขมัน เถ้า และ ค่า TBA สูงกว่าในข้าวโพดเอกซ์ทรูค ($P < 0.01$) ส่วนปริมาณโปรตีนไม่แตกต่างกันทางสถิติ (ตารางที่ 17) เนื่องจากในกระบวนการเอกซ์ทรูชันทันทีที่วัตถุดิบหลุดออกจากเครื่องเอกซ์ทรูชันน้ำจะระเหยออกไป ทำให้ความชื้นใน

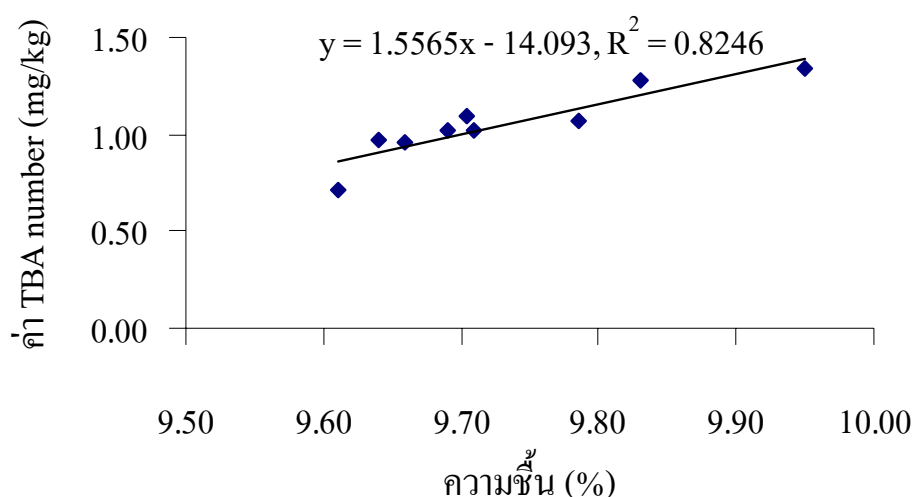
วัตถุดิบจะสูญเสียไป 50 เปอร์เซ็นต์ (Said, 2000) นอกจากนี้ยังมีการสูญเสียไขมันตรงบริเวณหัวใจ (die) ในรูปของไขมันอิสระ (Free oil) และยังเกิดการรวมตัวกับอะมิโลส (Lipid-amylose complexes) หรือโปรตีน (Wang *et al.* 1993) ซึ่งในข้าวโพดส่วนใหญ่มีกรดไขมันลิโนเลอิก (linoleic acid) อยู่สูง (Chow, 1980; Galliard, 1994) จึงส่งผลให้ข้าวโพดเอกซ์ทรูดมีค่า TBA ต่ำกว่าในข้าวโพด ส่วนปริมาณเถ้าในนั้นให้ผลไม่เป็นในแนวทางเดียวกับการทดลองของ Herkelman *et al.*, (1990) และ Amornthewaphat *et al.*, (2005) รายงานว่าข้าวโพดที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูดขึ้นไม่มีการเปลี่ยนแปลงของปริมาณเถ้า แต่เป็นไปในแนวทางเดียวกับผลการศึกษาของ Rendon-Villalobos *et al.* (2002) พบว่าข้าวโพดที่ไม่ผ่านกระบวนการ มีปริมาณเถ้าเท่ากับ 2.37 เปอร์เซ็นต์ เมื่อผ่านการทำให้สุกด้วยการต้มและนำไปผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูดเพื่อผลิตเป็น Tortilla มีปริมาณเถ้าลดลงมีปริมาณเท่ากับ 1.59 เปอร์เซ็นต์ ($P < 0.01$) ทั้งนี้เพราะมีการสูญเสียแร่ธาตุไประหว่างกระบวนการผลิต

เมื่อศึกษาปัจจัยระยะเวลาการเก็บรักษา 0 – 8 สัปดาห์ ต่อองค์ประกอบทางโภชนะ พบว่าเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษาที่นานขึ้นมีผลทำให้ข้าวโพดและข้าวโพดเอกซ์ทรูดมีปริมาณความชื้นและค่า TBA เพิ่มขึ้น ($P < 0.01$) ในขณะที่เปอร์เซ็นต์โปรตีน ไขมัน และ เถ้า มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ (ตารางที่ 17) เนื่องจากการเก็บข้าวโพดและข้าวโพดเอกซ์ทรูดไว้นานกว่า 8 สัปดาห์ น่าจะมีผลทำให้ค่า TBA เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะอย่างยิ่งในข้าวโพดมีการเกิดออกซิเดชันเร็วกว่าข้าวโพดเอกซ์ทรูด เนื่องจากในข้าวโพดมีกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัวเช่น กรดลิโนเลอิก (linoleic acid) อยู่สูง กรดไขมันไม่อิ่มตัวเหล่านี้จะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนในอากาศ และเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องโดยมีความร้อน ความชื้น แสงสว่าง และโลหะหนักบางตัวเช่น Cu, Ni, Fe เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา (Allen and Hamilton, 1994 ; Gray, 1978)

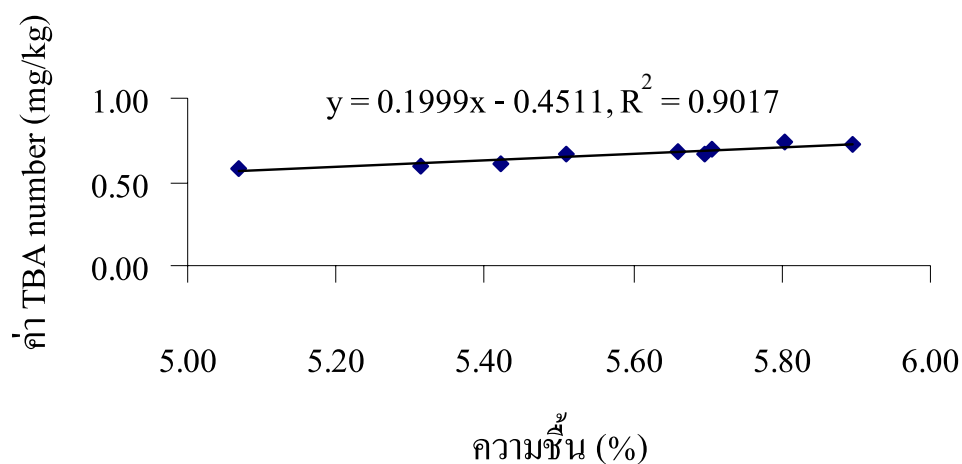
ตารางที่ 17 องค์ประกอบทางโภชนาและค่า TBA number ($\pm$ SD)ในข้าวโพดบดและข้าวโพดเอกซ์ทราในช่วงระยะการเก็บ 0 – 8 สัปดาห์

องค์ประกอบทางโภชนา (% วัตถุแห้ง)		ระยะเวลาการเก็บ (สัปดาห์)								
		0	1	2	3	4	5	6	7	8
ความชื้น	ข้าวโพด	9.61 $\pm$ 0.10	9.66 $\pm$ 0.13	9.64 $\pm$ 0.09	9.71 $\pm$ 0.04	9.70 $\pm$ 0.01	9.69 $\pm$ 0.01	9.79 $\pm$ 0.21	9.83 $\pm$ 0.06	9.95 $\pm$ 0.09
	ข้าวโพดเอกซ์ทรา	5.07 $\pm$ 0.01	5.32 $\pm$ 0.02	5.42 $\pm$ 0.15	5.51 $\pm$ 0.04	5.66 $\pm$ 0.04	5.69 $\pm$ 0.05	5.71 $\pm$ 0.09	5.81 $\pm$ 0.16	5.90 $\pm$ 0.08
ปัจจัยระยะเวลา		$P < 0.01$								
ปัจจัยพื้นที่เมล็ด		$P < 0.01$								
โปรตีน	ข้าวโพด	8.14 $\pm$ 0.27	8.14 $\pm$ 0.27	8.04 $\pm$ 0.14	8.09 $\pm$ 0.07	8.14 $\pm$ 0.01	8.24 $\pm$ 0.14	8.24 $\pm$ 0.13	7.96 $\pm$ 0.01	8.36 $\pm$ 0.27
	ข้าวโพดเอกซ์ทรา	8.23 $\pm$ 0.07	8.11 $\pm$ 0.20	8.08 $\pm$ 0.06	8.11 $\pm$ 0.01	8.04 $\pm$ 0.13	8.29 $\pm$ 0.07	8.06 $\pm$ 0.13	8.06 $\pm$ 0.13	8.17 $\pm$ 0.01
ปัจจัยระยะเวลา		$P > 0.05$								
ปัจจัยพื้นที่เมล็ด		$P > 0.05$								
ไขมัน	ข้าวโพด	4.64 $\pm$ 0.10	4.71 $\pm$ 0.01	4.70 $\pm$ 0.53	5.08 $\pm$ 0.23	5.07 $\pm$ 0.06	5.00 $\pm$ 0.08	4.86 $\pm$ 0.11	4.77 $\pm$ 0.10	4.65 $\pm$ 0.24
	ข้าวโพดเอกซ์ทรา	3.21 $\pm$ 0.26	2.76 $\pm$ 0.45	2.70 $\pm$ 0.18	3.18 $\pm$ 0.38	2.68 $\pm$ 0.09	2.69 $\pm$ 0.56	3.62 $\pm$ 0.30	3.43 $\pm$ 0.25	4.00 $\pm$ 0.76
ปัจจัยระยะเวลา		$P > 0.05$								
ปัจจัยพื้นที่เมล็ด		$P < 0.01$								
เถ้า	ข้าวโพด	1.40 $\pm$ 0.03	1.42 $\pm$ 0.04	1.37 $\pm$ 0.03	1.36 $\pm$ 0.03	1.33 $\pm$ 0.07	1.38 $\pm$ 0.06	1.34 $\pm$ 0.02	1.34 $\pm$ 0.01	1.31 $\pm$ 0.02
	ข้าวโพดเอกซ์ทรา	1.34 $\pm$ 0.09	1.30 $\pm$ 0.05	1.28 $\pm$ 0.01	1.29 $\pm$ 0.02	1.28 $\pm$ 0.03	1.32 $\pm$ 0.01	1.27 $\pm$ 0.04	1.27 $\pm$ 0.01	1.31 $\pm$ 0.06
ปัจจัยระยะเวลา		$P > 0.05$								
ปัจจัยพื้นที่เมล็ด		$P < 0.01$								
TBA number	ข้าวโพด	0.71 $\pm$ 0.01	0.96 $\pm$ 0.03	0.97 $\pm$ 0.02	1.02 $\pm$ 0.07	1.10 $\pm$ 0.02	1.03 $\pm$ 0.01	1.07 $\pm$ 0.06	1.28 $\pm$ 0.02	1.34 $\pm$ 0.02
	ข้าวโพดเอกซ์ทรา	0.58 $\pm$ 0.01	0.60 $\pm$ 0.02	0.61 $\pm$ 0.02	0.66 $\pm$ 0.03	0.68 $\pm$ 0.01	0.67 $\pm$ 0.10	0.74 $\pm$ 0.01	0.69 $\pm$ 0.03	0.73 $\pm$ 0.02
ปัจจัยระยะเวลา		$P < 0.01$								
ปัจจัยพื้นที่เมล็ด		$P < 0.01$								

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างองค์ประกอบทางโภชนาที่มีผลก่อให้เกิดการหืนที่เกิดจากการออกซิไดซ์ของวัตถุดิบ พบว่าความชื้นมีความสัมพันธ์ทางบวกกับค่า TBA ทั้งในข้าวโพด ($R^2 = 0.82$) และข้าวโพดเอกซ์ทรา ($R^2 = 0.90$) ดังภาพที่ 7 และ 8 ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากสถานะที่ทำให้เกิดการออกซิไดซ์ของไขมันที่ไม่อิ่มตัวได้ก็คือ การที่ไขมันได้รับออกซิเจน ความร้อน ความชื้น แสงสว่าง และโลหะหนักบางตัวเช่น Cu, Ni, Fe (Allen and Hamilton, 1994) จะเห็นได้ว่าในข้าวโพดเอกซ์ทราให้ค่าความสัมพันธ์ของความชื้นกับการหืนที่สูงกว่าในข้าวโพด เพราะอยู่ในขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการผลิตข้าวโพดเอกซ์ทราต้องทำให้ข้าวโพดแห้งสนิท และปล่อยให้เย็นเพื่อระบายความร้อนออก แล้วนำมาบดละเอียด เมื่อมาเก็บรักษาไว้ทำให้มีการดูดความชื้นและสัมผัสกับออกซิเจนจากสิ่งแวดล้อม (Galliard, 1994)

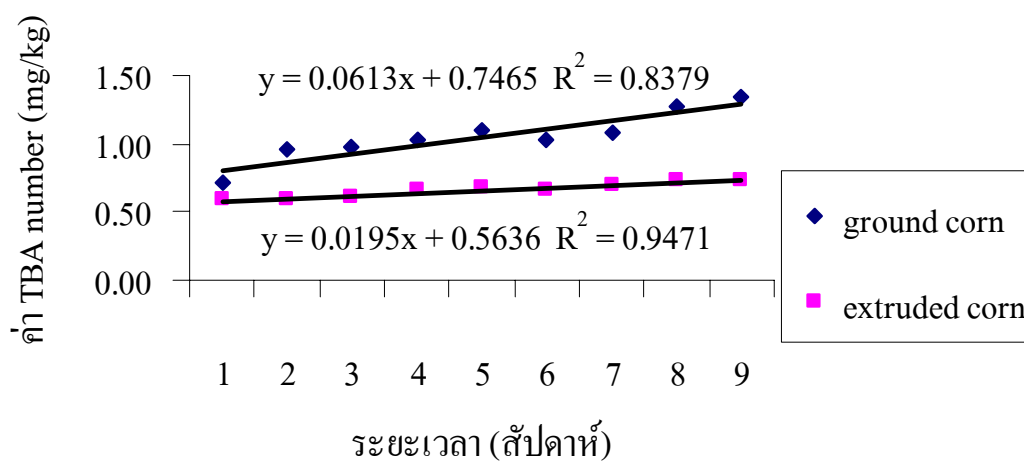


ภาพที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการหืน (TBA number) กับความชื้นในข้าวโพดบด



ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างค่าการหืน (TBA number) กับความชื้นในข้าวโพดเอกซ์ทรูด

ผลการทดลองพบว่าในข้าวโพดมีปริมาณความชื้นและไขมันอยู่สูงกว่าในข้าวโพดเอกซ์ทรูด ดังนั้นในข้าวโพดจึงเกิดการหืนได้สูงกว่าในข้าวโพดเอกซ์ทรูด จากผลการทดลองพบว่าข้าวโพดมีปริมาณความชื้นและไขมันอยู่สูงกว่าในข้าวโพดเอกซ์ทรูด ดังนั้นข้าวโพดจึงเกิดการหืนได้สูงกว่าข้าวโพดเอกซ์ทรูดเมื่อระยะเวลาเก็บรักษานานขึ้น ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 ค่า TBA number ในข้าวโพดบดและข้าวโพดเอกซ์ทรูดในระยะเวลาการเก็บรักษา 0 – 8 สัปดาห์

การทดลองที่ 3 การศึกษาค่าพลังงานการใช้ประโยชน์ (metabolizable energy) ของข้าวโพด เอกซ์ทรา และผลของการใช้ข้าวโพดเอกซ์ทราต่อสมรรถภาพการผลิตในสุกรระยะอนุบาล

พลังงานใช้ประโยชน์ได้

การศึกษาค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้ของข้าวโพดและข้าวโพดเอกซ์ทราในสุกรระยะอนุบาล พบว่ามีค่าความชื้น เถ้า โปรตีน ไขมัน เยื่อใย ไนโตรเจนฟรีเอ็กซ์แทรก (nitrogen free extract, NFE) แคลเซียม และฟอสฟอรัส เท่ากับ 9.61, 1.40, 8.14, 4.64, 3.35, 72.86, 0.07 และ 0.24 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับในข้าวโพด และเท่ากับ 5.07, 1.34, 8.23, 3.21, 2.54, 79.61, 0.06 และ 0.25 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับในข้าวโพดเอกซ์ทรา จากการทดลอง พบว่าในข้าวโพดเอกซ์ทรามีเปอร์เซ็นต์ความชื้น ไขมัน และเยื่อใยต่ำกว่าในข้าวโพด 4.54, 1.43 และ 0.81 เปอร์เซ็นต์ ($P<0.05$) ตามลำดับ แต่มีไนโตรเจนฟรีเอ็กซ์แทรก สูงกว่าในข้าวโพด 6.75 เปอร์เซ็นต์ ($P<0.01$) ส่วนปริมาณเถ้า โปรตีน แคลเซียม และฟอสฟอรัส มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ (ตารางที่ 18) จากผลการทดลองมีค่าไปในแนวทางเดียวกับผลการทดลอง Lee *et al.*, (2001), Bartov and Barzur (1995) และ Herkelman *et al.*, (1990) รายงานว่าความชื้นเถ้า โปรตีน ไขมัน และ เยื่อใย (ในรูป as-fed basis) ในข้าวโพดมีค่าเท่ากับ 12.16, 1.20, 8.84, 3.56 และ 2.30 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และในข้าวโพดเอกซ์ทราที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูชันแบบร้อนชื้น (Hydrothermal extrusion) มีค่าเท่ากับ 12.14, 1.24, 8.25, 2.94 และ 2.32 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

จากผลองค์ประกอบทางเคมีนี้จะเห็นได้ว่าในข้าวโพดเอกซ์ทราที่มีปริมาณไขมันลดลง แต่มีปริมาณเยื่อใยลดลงและไนโตรเจนฟรีเอ็กซ์แทรก สูงกว่าในข้าวโพด จึงเป็นการปรับปรุงการใช้ประโยชน์ได้ของแหล่งคาร์โบไฮเดรตเพิ่มขึ้น และในสุกรนั้นมีการย่อยได้ของอาหารคาร์โบไฮเดรตตั้งแต่ในปากด้วยเอนไซม์อะไมเลส และมีการย่อยต่อที่ลำไส้เล็ก ดังนั้นค่าพลังงานการย่อยได้ในข้าวโพดเอกซ์ทรา สูงกว่าในข้าวโพด ($P<0.01$) มีค่าเท่ากับ 3,840.50 และ 3,682.45 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้ในข้าวโพดเอกซ์ทรา มีแนวโน้มสูงกว่าในข้าวโพด ($P=0.10$) มีค่าเท่ากับ 3,652.90 และ 3,497.17 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (ตารางที่ 18) ซึ่งเป็นไปในแนวทางเดียวกันกับการทดลองของ Herkelman *et al.*, (1990) รายงานว่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้ในอาหารของสุกร (น้ำหนักเฉลี่ยประมาณ 20 กิโลกรัม) ที่ได้รับข้าวโพดเอกซ์ทรา มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติกับสุกรที่ได้รับแป้งข้าวโพดในสูตรอาหาร ซึ่งมีค่าเท่ากับ 3.80 และ 3.76 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัมอาหาร (% วัตถุแห้ง) ตามลำดับ นอกจากนี้ค่าพลังงานการย่อยได้และค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้ของข้าวโพดที่ได้จากการทดลองมีค่าใกล้เคียงกับค่าพลังงาน

การย่อยได้และค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้ที่รายงานใน NRC (1998) มีค่าเท่ากับ 3,525 และ 3,420 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ส่วนข้อมูลการศึกษาค่าพลังงานการย่อยได้และค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้ในข้าวโพดเอกซ์ทราของสุกรยังมีการศึกษาน้อยมาก

ตารางที่ 18 ส่วนประกอบทางโภชนาของวัตถุดิบข้าวโพดและข้าวโพดเอกซ์ทรา ($\pm$ SD) จากการวิเคราะห์คิดเป็นน้ำหนักแห้ง

ส่วนประกอบโภชนา	ข้าวโพด	ข้าวโพดเอกซ์ทรา
ความชื้น (%)	$9.71 \pm 0.04^{\text{ก}}$	$5.90 \pm 0.08^{\text{ข}}$
เถ้า (%)	1.40 ± 0.03	1.34 ± 0.09
โปรตีน (%)	8.14 ± 0.28	8.36 ± 0.07
ไขมัน (%)	$4.65 \pm 0.10^{\text{อ}}$	$3.21 \pm 0.26^{\text{ส}}$
เยื่อใย (%)	$3.35 \pm 0.22^{\text{อ}}$	$2.54 \pm 0.05^{\text{ส}}$
ไนโตรเจนฟรีเอ็กซ์แทรก (%) ¹	$72.75 \pm 0.67^{\text{ข}}$	$78.65 \pm 0.32^{\text{ก}}$
แคลเซียม (%)	0.07 ± 0.01	0.06 ± 0.01
ฟอสฟอรัส (%)	0.24 ± 0.02	0.25 ± 0.02
พลังงานการย่อยได้ (kcal/kg)	$3682.45 \pm 38.23^{\text{ข}}$	$3840 \pm 67.31^{\text{ก}}$
พลังงานใช้ประโยชน์ได้ (kcal/kg)	3497.17 ± 122.53	3652.90 ± 98.95

^{ก, ข} อักษรที่แตกต่างกันในแถวเดียวกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$)

^{อ, ส} อักษรที่แตกต่างกันในแถวเดียวกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

¹ ไนโตรเจนฟรีเอ็กซ์แทรก (NFE) = %วัตถุดิบแห้ง - %โปรตีนรวม - %ไขมัน - %เยื่อใย - %เถ้า

สมรรถภาพการผลิตสุกรระยะอนุบาล

การศึกษาผลของการใช้ข้าวโพดและข้าวโพดเอกซ์ทราต่อสมรรถภาพการผลิตสุกรในระยะอนุบาล จะแบ่งออกเป็น 2 ระยะตามสูตรอาหารทดลองคือ ระยะหลังหย่านมที่ 4 – 7 สัปดาห์ และ 8 – 9 สัปดาห์ ดังนี้

1. อิทธิพลของข้าวโพดเอกซ์ทราต่อประสิทธิภาพการผลิตสุกรในระยะอายุ 4-7 สัปดาห์

จากผลการทดลองในระยะอายุ 4-7 สัปดาห์ พบว่าสุกรทั้ง 3 กลุ่มมีน้ำหนักตัวที่อายุ 7 สัปดาห์ อัตราการเจริญเติบโต ปริมาณอาหารที่กิน และอัตราการตายแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ แต่มีแนวโน้มว่าสุกรในกลุ่มที่ได้รับอาหารที่ใช้ปลายข้าวมีอัตราการเจริญเติบโตดีกว่ากลุ่มที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพด และกลุ่มที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดมีอัตราการเจริญเติบโตดีกว่ากลุ่มที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดเอกซ์ทรา ($P=0.16$) นอกจากนี้พบว่า กลุ่มสุกรที่ได้รับอาหารที่ใช้ปลายข้าวและข้าวโพดมีประสิทธิภาพการใช้อาหารดีกว่ากลุ่มสุกรที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดเอกซ์ทรา ($P<0.05$) แต่สุกรกลุ่มที่ได้รับอาหารที่ใช้ปลายข้าวและข้าวโพด มีประสิทธิภาพการใช้อาหารไม่แตกต่างกันทางสถิติ ดังตารางที่ 19

ตารางที่ 19 ผลของข้าวโพดและข้าวโพดเอกซ์ทราต่อสมรรถภาพการผลิตของลูกสุกร ($\pm$ SD) ในช่วงระยะอายุ 4-7 สัปดาห์

ลักษณะที่ศึกษา	แหล่งอาหารพลังงาน		
	ปลายข้าว	ข้าวโพด	ข้าวโพดเอกซ์ทรา
จำนวนสุกร (ตัว)	64	64	64
น้ำหนักสุกรเริ่มต้น (กิโลกรัม/ตัว)	7.63 ± 1.28	7.80 ± 1.01	7.71 ± 1.48
น้ำหนักตัวที่ 7 สัปดาห์ (กิโลกรัม/ตัว)	15.22 ± 1.49	14.97 ± 1.10	14.62 ± 1.35
อัตราการเจริญเติบโต (กรัม/วัน)	361.42 ± 35.33	341.17 ± 23.23	329.05 ± 38.64
ปริมาณอาหารที่กิน (กรัม/ตัว/วัน)	561.91 ± 52.94	547.65 ± 31.99	572.77 ± 48.47
ประสิทธิภาพการใช้อาหาร	$1.56 \pm 0.08^{\text{a}}$	$1.61 \pm 0.09^{\text{a}}$	$1.76 \pm 0.21^{\text{b}}$
อัตราการตาย, % ของสุกรทั้งหมด	3.13 ± 5.79	1.56 ± 4.42	4.69 ± 6.47

^{a, b} อักษรที่แตกต่างกันในแถวเดียวกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$)

2. อิทธิพลของข้าวโพดเอกซ์ทราต่อประสิทธิภาพการผลิตสุกรในระยะอายุ 8-9 สัปดาห์

ในระยะอายุ 8-9 สัปดาห์พบว่ากลุ่มสุกรที่ได้รับอาหารที่ใช้ปลายข้าวและข้าวโพดมีอัตราการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพการใช้อาหาร ดีกว่ากลุ่มที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดเอกซ์ทรา ($P<0.05$) ส่วนกลุ่มสุกรที่ได้รับอาหารที่ใช้ปลายข้าวกับกลุ่มสุกรที่ได้รับอาหารที่ใช้

ข้าวโพดมีอัตราการเจริญเติบโตไม่แตกต่างกันทางสถิติ ส่วนน้ำหนักตัวที่อายุ 9 สัปดาห์ ปริมาณอาหารที่กิน และอัตราการตาย ของทั้ง 3 กลุ่มมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ แต่มีแนวโน้มว่าน้ำหนักตัวที่อายุ 9 สัปดาห์ ของกลุ่มสุกรที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดเอกซ์ทราต่ำว่าสุกรกลุ่มที่ได้รับอาหารที่ใช้ปลายข้าวและกลุ่มสุกรที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพด ดังตารางที่ 20

ตารางที่ 20 ผลของข้าวโพดและข้าวโพดเอกซ์ทราต่อสมรรถภาพการผลิต ($\pm$ SD) ของลูกสุกรในช่วงระยะอายุ 8 – 9 สัปดาห์

ลักษณะที่ศึกษา	แหล่งอาหารพลังงาน		
	ปลายข้าว	ข้าวโพด	ข้าวโพดเอกซ์ทรา
น้ำหนักตัวที่ 9 สัปดาห์ (กิโลกรัม/ตัว)	24.24 $\pm$ 1.67	23.84 $\pm$ 1.54	22.75 $\pm$ 1.39
อัตราการเจริญเติบโต (กรัม/วัน)	642.91 $\pm$ 41.46 ^o	633.68 $\pm$ 38.24 ^o	582.52 $\pm$ 48.92 ^o
ปริมาณอาหารที่กิน (กรัม/ตัว/วัน)	1146.63 $\pm$ 81.77	1180.65 $\pm$ 101.54	1120.70 $\pm$ 90.60
ประสิทธิภาพการใช้อาหาร	1.76 $\pm$ 0.12 ^o	1.86 $\pm$ 0.07 ^{oii}	1.96 $\pm$ 0.21 ^o
อัตราการตาย, % ของสุกรทั้งหมด	3.13 $\pm$ 5.79	0	0

^{o, ii} อักษรที่แตกต่างกันในแถวเดียวกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

เมื่อนำข้อมูลทั้ง 2 ระยะอายุมาพิจารณารวมกัน (อายุ 4 – 9 สัปดาห์) พบว่ากลุ่มสุกรที่ได้รับอาหารที่ใช้ปลายข้าวและข้าวโพดมีอัตราการเจริญเติบโตดีกว่ากลุ่มที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดเอกซ์ทรา ($P < 0.05$) ส่วนกลุ่มสุกรที่ได้รับอาหารที่ใช้ปลายข้าวและกลุ่มสุกรที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดมีอัตราการเจริญเติบโตไม่แตกต่างกันทางสถิติ และสุกรกลุ่มที่ได้รับอาหารที่ใช้ปลายข้าวมีประสิทธิภาพการใช้อาหารดีกว่ากลุ่มที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดเอกซ์ทรา ($P < 0.05$) แต่ประสิทธิภาพการใช้อาหารของสุกรกลุ่มที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดเอกซ์ทรากับกลุ่มที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ส่วนปริมาณอาหารที่กิน และอัตราการตาย ของสุกรทั้ง 3 กลุ่มมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ และเมื่อคิดต้นทุนรวมค่าอาหารต่อตัวสุกร พบว่ากลุ่มสุกรที่ได้รับอาหารที่ใช้ปลายข้าวและข้าวโพดเอกซ์ทรามีต้นทุนค่าอาหารรวมต่อตัว (ส่วนต่างกับกลุ่มสุกรที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดมีค่าเท่ากับ 31.79 และ 19.37 บาทต่อตัว) สูงกว่ากลุ่มที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพด ($P < 0.05$) และต้นทุนค่าอาหารต่อการเพิ่มน้ำหนักตัว 1 กิโลกรัม (ส่วนต่างกับกลุ่มข้าวโพดมีค่าเท่ากับ 1.33 และ 2.44 บาท/กิโลกรัม ตามลำดับ) สูงกว่ากลุ่มที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพด ($P < 0.01$) แต่กลุ่มสุกรที่ได้รับอาหารที่ใช้ปลายข้าวและข้าวโพดเอกซ์ทรา

ต้นทุนค่าอาหารรวมต่อตัว และต้นทุนค่าอาหารต่อการเพิ่มน้ำหนักตัว 1 กิโลกรัม ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ดังตารางที่ 21

ตารางที่ 21 ผลของข้าวโพดและข้าวโพดเอกซ์ทราต่อสมรรถภาพการผลิต ($\pm$ SD) ของลูกสุกรในช่วงระยะอายุ 4 – 9 สัปดาห์

ลักษณะที่ศึกษา	แหล่งอาหารพลังงาน		
	ปลายข้าว	ข้าวโพด	ข้าวโพดเอกซ์ทรา
อัตราการเจริญเติบโต (กรัม/วัน)	474.58 $\pm$ 24.65 ^ก	458.23 $\pm$ 25.04 ^ก	429.82 $\pm$ 30.60 ^ก
ปริมาณอาหารที่กิน (กรัม/ตัว/วัน)	801.83 $\pm$ 58.63	801.92 $\pm$ 52.05	792.74 $\pm$ 58.63
ประสิทธิภาพการใช้อาหาร	1.69 $\pm$ 0.09 ^ก	1.75 $\pm$ 0.06 ^{กก}	1.85 $\pm$ 0.16 ^ก
อัตราการตาย, % ของสุกรทั้งหมด	6.25 $\pm$ 6.68	1.56 $\pm$ 4.42	4.69 $\pm$ 6.47
ราคาอาหาร(บาท/ตัว)	299.26 $\pm$ 22.54 ^ก	267.47 $\pm$ 16.88 ^ก	286.84 $\pm$ 21.50 ^ก
ราคาอาหารต่อการเพิ่มน้ำหนักตัว 1 กิโลกรัม (บาท)	18.01 $\pm$ 0.84 ^ก	16.68 $\pm$ 0.51 ^ข	19.12 $\pm$ 1.62 ^ก

ก, ข อักษรที่แตกต่างกันในแถวเดียวกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$)

ก, ก อักษรที่แตกต่างกันในแถวเดียวกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

จากผลการทดลองในระยะอายุ 4 – 7, 8 – 9 และ 4 – 9 สัปดาห์ พบว่ากลุ่มสุกรที่ใช้ปลายข้าวและข้าวโพด มีอัตราการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพการใช้อาหารดีกว่ากลุ่มที่ใช้ข้าวโพดเอกซ์ทรา ซึ่งผลการทดลองเป็นไปในแนวทางเดียวกันกับการทดลองของ Hongtrakul *et al.* (1998) รายงานว่าสุกรที่ใช้ปลายข้าวเป็นแหล่งอาหารพลังงานจะมีอัตราการเจริญเติบโตดีกว่ากลุ่มที่ใช้ข้าวโพด ($P < 0.05$) และในสุกรระยะอายุ 10 – 17 วัน การใช้ข้าวโพดเอกซ์ทราไม่มีผลต่ออัตราการเจริญเติบโตและปริมาณอาหารที่กิน แต่ Gain : feed ลดลง ($P < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ข้าวโพด จะเห็นได้ว่าจากผลการทดลองการใช้ข้าวโพดเอกซ์ทราได้ผลทำให้อัตราการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพการใช้อาหารด้อยกว่าการใช้ปลายข้าวและข้าวโพด เนื่องจากกระบวนการเอกซ์ทราทำให้โครงสร้างของแป้งภายในข้าวโพดเกิดการเปลี่ยนแปลง มีผลทำให้การย่อยได้ของแป้งเพิ่มขึ้น (Riaz, 2000) ได้ก็จริง แต่เมื่อวัตถุดิบผ่านกระบวนการเอกซ์ทราทำให้เมล็ดวัตถุดิบพองตัวขึ้น น้ำระเหยออก ทำให้ความหนาแน่นลดลง (Tait and Beames, 1998; Thymi *et al.*, 2005)

ข้าวโพดที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทรูดจึงมีลักษณะฟ้ามี่ค่าความหนาแน่นต่ำกว่าปลายข้าวและข้าวโพด (ตารางที่ 4) และในการทดลองนี้มีการให้อาหารในลักษณะอาหารผง ด้วยลักษณะทางกายภาพของข้าวโพดเอกซ์ทรูดที่ฟ้ามี่มีผลต่อการกินอาหารของสุกร ซึ่งสุกรจะกินอาหารตามความจุของกระเพาะ (ศรีสกุล และ รณชัย, 2539) มีผลลดปริมาณการกินอาหารของสัตว์ (Anguita *et al.*, 2007) แต่จากงานทดลองของ Kyriazakis and Emmans (1995) รายงานว่าอาหารที่มีความฟ้ามี่ (รำข้าวสาลี) ไม่มีผลต่อปริมาณการกินแต่มีผลในการลดการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพการใช้อาหาร เนื่องจากความฟ้ามี่ของอาหารมีผลต่อลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของอาหาร เช่น ความหนืดของอาหารและอัตราการไหลผ่านของอาหารในทางเดินอาหาร (Kyriazakis and Emmans, 1995; Anguita *et al.*, 2007) นอกจากนี้การเอกซ์ทรูดขึ้นเป็นการเพิ่มปริมาณแป้งที่ละลายได้ (soluble starch) ในข้าวโพด (Gomez and Aguilera, 1983) เมื่อสัมผัสกับน้ำจะอมน้ำ พองตัวเป็นสารคล้ายวุ้นไปห่อหุ้มสารอาหารชนิดอื่น ทำให้เพิ่มความหนืดของสิ่งย่อยและเคลื่อนตัวอย่างช้าๆ ในทางเดินอาหาร ซึ่งเป็นอุปสรรคในการเข้าย่อยของเอนไซม์จากสัตว์ จึงเป็นสารยับยั้งการใช้ประโยชน์ของโภชนาอื่น (anti-nutrients) โดยเฉพาะไขมัน เนื่องจาก NSP ไปห่อหุ้มเกลือน้ำดีไขมันและ คอเรสเตอรอล ทำให้มีการเร่งการสร้างเกลือน้ำดีจากคอเรสเตอรอลที่ตับ และถูกขับออกทางมูล จึงมีผลกระทบต่อการย่อยและดูดซึมของกรดไขมันและคอเรสเตอรอลในทางเดินอาหาร ซึ่งถือว่าเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญในสัตว์ ทำให้สัตว์มีการเจริญเติบโตและสมรรถภาพการผลิตลดลง (Choct and Kocker, 2000; บุญล้อม, 2546; สุวรรณ, 2548)

การทดลองที่ 4 การศึกษาค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้ (metabolizable energy) และผลของการใช้ข้าวโพดเอกซ์ทรูดต่อสมรรถภาพการผลิตในไก่กระตัง

พลังงานใช้ประโยชน์ได้

จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี พบว่าในข้าวโพดมีค่าความชื้น เถ้าโปรตีน ไขมัน เยื่อใย และไนโตรเจนฟรีเอกซ์แทรก แล้วยเท่ากับ 10.81, 1.51, 8.12, 5.22, 2.07 และ 72.27 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับมีค่าไปในแนวทางเดียวกับผลการทดลอง Lee *et al.*, (2001), Bartov and Barzur (1995) และ Herkelman *et al.*, (1990) รายงานว่าความชื้น เถ้า โปรตีน ไขมัน และ เยื่อใย (ในรูป as-fed basis) ในข้าวโพดมีค่าเท่ากับ 12.16, 1.20, 8.84, 3.56 และ 2.30 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และผลการทดลองพบว่าในข้าวโพดเอกซ์ทรูดมีค่าความชื้น เถ้า โปรตีน ไขมัน เยื่อใย และไนโตรเจนฟรีเอกซ์แทรก แล้วยเท่ากับ 6.64, 1.53, 8.08, 2.89, 1.05 และ 79.82 เปอร์เซ็นต์

ตามลำดับ มีค่าไปในแนวทางเดียวกันกับการทดลองของ Herkelman *et al.*, (1990) รายงานว่า ความชื้น เถ้า โปรตีน ไขมัน และ เยื่อใย (ในรูป as-fed basis) ในข้าวโพดเอกซ์ทรูดที่ผ่าน กระบวนการเอกซ์ทรูดแบบร้อนชื้น (Hydrothermal extrusion) มีค่าเท่ากับ 12.14, 1.24, 8.25, 2.94 และ 2.32 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากผลการทดลอง พบว่าในข้าวโพดเอกซ์ทรูดมีเปอร์เซ็นต์ ความชื้น ไขมัน และเยื่อใยต่ำกว่าในข้าวโพด 4.17, 2.33 และ 1.02 เปอร์เซ็นต์ ($P < 0.01$) ตามลำดับ แต่มีไนโตรเจนฟรีเอ็กซ์แทรกสูงกว่าในข้าวโพด 7.55 เปอร์เซ็นต์ ($P < 0.05$) ส่วนปริมาณเถ้า โปรตีน แคลเซียม และฟอสฟอรัส มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ดังตารางที่ 22

ตารางที่ 22 ส่วนประกอบทางโภชนาของข้าวโพดและข้าวโพดเอกซ์ทรูด ($\pm$ SD) จากการวิเคราะห์ คัดเป็นน้ำหนักแห้ง

ส่วนประกอบโภชนา	ข้าวโพดบด	ข้าวโพดเอกซ์ทรูด
ความชื้น (%)	$10.81 \pm 0.23^{\text{ก}}$	$6.64 \pm 0.06^{\text{ข}}$
เถ้า (%)	1.51 ± 0.36	1.53 ± 0.06
โปรตีน (%)	8.12 ± 0.82	8.08 ± 0.17
ไขมัน (%)	$5.22 \pm 0.12^{\text{ก}}$	$2.89 \pm 0.10^{\text{ข}}$
เยื่อใย (%)	$2.07 \pm 0.16^{\text{ก}}$	$1.05 \pm 0.21^{\text{ข}}$
ไนโตรเจนฟรีเอ็กซ์แทรก (%) ¹	$72.27 \pm 2.15^{\text{ค}}$	$79.82 \pm 0.19^{\text{ค}}$
พลังงานใช้ประโยชน์ได้ (kcal/kg)	3127.18	2716.20

ก, ข, ค อักษรที่แตกต่างกันในแถวเดียวกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$)

อ, ฮ อักษรที่แตกต่างกันในแถวเดียวกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

¹ ไนโตรเจนฟรีเอ็กซ์แทรก (NFE) = วัตถุแห้ง - โปรตีนรวม - ไขมัน - เยื่อใย - เถ้า

การประเมินค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้ของข้าวโพดและข้าวโพดเอกซ์ทรูดในไก่กระทาง ปรากฏว่าค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้ของข้าวโพดมีค่าสูงกว่าข้าวโพดเอกซ์ทรูด ($P < 0.01$) ซึ่งมี ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3,127.18 และ 2,716.20 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ตามลำดับ (ตารางที่ 22) เนื่องจากผล การวิเคราะห์ทางโภชนาการนั้นจะเห็นได้ว่าในข้าวโพดเอกซ์ทรูดมีค่าไนโตรเจนฟรีเอ็กซ์แทรกสูงขึ้น ดังนั้นการใช้ประโยชน์ของแป้งควรจะเพิ่มขึ้น แต่ในข้าวโพดเอกซ์ทรูดมีปริมาณไขมันต่ำกว่าใน ข้าวโพด 2.33 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากพลังงานใช้ประโยชน์ได้จะผันแปรไปตามปริมาณไขมัน (Dale

and Whittle, 1991 ; Han *et al.*, 1987) ดังนั้นจึงทำให้ในข้าวโพดมีค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้สูงกว่าในข้าวโพดเอกซ์ทруд ซึ่งผลการทดลองเป็นไปในแนวทางเดียวกับงานวิจัยของ Edwards *et al.*, (1999) รายงานว่าค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้ในไก่กระตังที่ได้รับอาหารที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทрудชันมีค่าเท่ากับ 3,535 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ซึ่งมีค่าต่ำกว่าไก่กระตังที่ได้รับอาหารที่ไม่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทрудชัน มีค่าเท่ากับ 3,725 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ($P < 0.01$)

สมรรถภาพการผลิตไก่กระตัง

การศึกษาผลของการใช้ข้าวโพดเอกซ์ทрудต่อสมรรถภาพการผลิตไก่กระตัง แบ่งออกเป็น 3 ระยะการทดลองตามอาหารทดลองคือระยะ 1 – 21 วัน, 22 – 42 วัน และ 43 – 49 วัน ผลการทดลองเป็นดังนี้

1. ผลของข้าวโพดเอกซ์ทрудต่อประสิทธิภาพการผลิตไก่กระตังในระยะอายุ 1 – 21 วัน

ผลการทดลองในช่วงอายุ 1 – 21 วันพบว่า อัตราการเจริญเติบโต ปริมาณอาหารที่กิน และอัตราการตายของไก่ที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดและข้าวโพดเอกซ์ทрудมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ แต่ไก่ที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดมีประสิทธิภาพการใช้อาหารดีกว่าไก่ที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดเอกซ์ทруд ($P < 0.05$) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 1.41 และ 1.43 ตามลำดับ และไก่ที่ได้รับอาหารอัดเม็ดมีน้ำหนักตัวที่ 21 วัน อัตราการเจริญเติบโต ปริมาณอาหารที่กิน และประสิทธิภาพการใช้อาหารดีกว่าไก่ที่ได้รับอาหารผง ($P < 0.01$) ส่วนอัตราการตายนั้นไม่แตกต่างกันทางสถิติ ดังตารางที่ 23 และเมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลร่วม (interactions) ของทั้ง 2 ปัจจัยพบว่าไม่มีอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย ดังตารางที่ 25

2. ผลของข้าวโพดเอกซ์ทрудต่อประสิทธิภาพการผลิตไก่กระตังในระยะอายุ 22 – 42 วัน

ผลการทดลองระยะอายุ 22 – 42 วันพบว่า น้ำหนักตัวที่ 42 วัน อัตราการเจริญเติบโต ปริมาณอาหารที่กิน ประสิทธิภาพการใช้อาหาร และอัตราการตายของไก่ที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดและข้าวโพดเอกซ์ทрудมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ และไก่ที่ใช้อาหารอัดเม็ดมีน้ำหนักตัวที่ 42 วัน อัตราการเจริญเติบโต ปริมาณอาหารที่กิน ประสิทธิภาพการใช้อาหาร และอัตราการ

ตายที่สูงกว่าไก่ที่ได้รับอาหารผง ($P<0.01$) ดังตารางที่ 24 และเมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลร่วม (interactions) ของทั้ง 2 ปัจจัยพบว่า ไก่ที่ได้รับข้าวโพดเอกซ์ทราดในลักษณะอาหารอัดเม็ดมีประสิทธิภาพการใช้อาหารดีกว่าไก่ที่ได้รับข้าวโพดเอกซ์ทราดในลักษณะอาหารผงและได้รับข้าวโพดในลักษณะอาหารผงและอาหารอัดเม็ด ($P<0.01$) ส่วนน้ำหนักตัวที่อายุ 42 วัน อัตราการเจริญเติบโต ปริมาณอาหารที่กิน และอัตราการตายไม่แตกต่างกันทางสถิติ ดังตารางที่ 25

ตารางที่ 23 ผลของกระบวนการเอกซ์ทรูชันและลักษณะของอาหารต่อสมรรถภาพการผลิต ($\pm$ SD) ในไก่กระทงในช่วงระยะอายุ 1 – 21 วัน

ลักษณะที่ศึกษา	กระบวนการผลิต ¹		ลักษณะอาหาร ²	
	ข้าวโพดเอกซ์ทรูด	ข้าวโพดบด	อาหารผง	อาหารอัดเม็ด
จำนวนไก่ (ตัว)	400	400	400	400
น้ำหนักเริ่มต้น (กรัม/ตัว)	41.23 $\pm$ 0.51	41.41 $\pm$ 0.62	41.26 $\pm$ 0.62	41.38 $\pm$ 0.52
น้ำหนักตัวที่ 21 วัน (กรัม/ตัว)	773.36 $\pm$ 48.58	785.01 $\pm$ 50.26	748.88 $\pm$ 43.55 ^ก	809.49 $\pm$ 33.21 ^ก
อัตราการเจริญเติบโต (กรัม/วัน)	34.86 $\pm$ 2.31	35.41 $\pm$ 2.38	33.70 $\pm$ 2.07 ^ก	36.58 $\pm$ 1.57 ^ก
ปริมาณอาหารที่กิน (กรัม/ตัว/วัน)	49.83 $\pm$ 1.83	49.76 $\pm$ 2.32	49.07 $\pm$ 2.16 ^ก	50.52 $\pm$ 1.71 ^ก
ประสิทธิภาพการใช้อาหาร	1.43 $\pm$ 0.06 ^ข	1.41 $\pm$ 0.04 ^ข	1.46 $\pm$ 0.04 ^ก	1.38 $\pm$ 0.02 ^ก
อัตราการตาย (% ของไก่ทั้งหมด)	3.40 $\pm$ 2.52	2.74 $\pm$ 2.16	3.64 $\pm$ 2.24	2.50 $\pm$ 2.36

¹ วิเคราะห์ในปัจจัยกระบวนการผลิต

² วิเคราะห์ในปัจจัยลักษณะอาหาร

^{ก, ข} อักษรที่แตกต่างกันในแถวเดียวกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$)

^{ข, ค} อักษรที่แตกต่างกันในแถวเดียวกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

ตารางที่ 24 ผลของกระบวนการเอกซ์ทรูชันและลักษณะของอาหารต่อสมรรถภาพการผลิต ($\pm$ SD) ในไก่กระทงในช่วงระยะอายุ 22 – 42 วัน

ลักษณะที่ศึกษา	กระบวนการผลิต ¹		ลักษณะอาหาร ²	
	ข้าวโพดเอกซ์ทรูด	ข้าวโพดบด	อาหารผง	อาหารอัดเม็ด
น้ำหนักตัวที่ 42 วัน (กรัม/ตัว)	2,062.49 $\pm$ 207.89	2,069.53 $\pm$ 168.23	1,980.38 $\pm$ 162.07 ^ข	2,151.64 $\pm$ 172.15 ^ก
อัตราการเจริญเติบโต (กรัม/วัน)	61.39 $\pm$ 7.94	61.17 $\pm$ 6.21	58.67 $\pm$ 6.19 ^ข	63.89 $\pm$ 6.97 ^ก
ปริมาณอาหารที่กิน (กรัม/ตัว/วัน)	122.32 $\pm$ 11.28	123.95 $\pm$ 9.85	119.48 $\pm$ 9.20 ^ข	126.79 $\pm$ 10.60 ^ก
ประสิทธิภาพการใช้อาหาร	2.00 $\pm$ 0.10	2.03 $\pm$ 0.10	2.07 $\pm$ 0.08 ^ข	1.96 $\pm$ 0.12 ^ข
อัตราการตาย (% ของไก่ทั้งหมด)	5.71 $\pm$ 4.29	7.21 $\pm$ 4.95	4.05 $\pm$ 3.02 ^ข	8.88 $\pm$ 4.75 ^ก

¹ วิเคราะห์ในปัจจัยกระบวนการผลิต

² วิเคราะห์ในปัจจัยลักษณะอาหาร

ก, ข อักษรที่แตกต่างกันในแถวเดียวกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$)

อ, ฮ อักษรที่แตกต่างกันในแถวเดียวกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

ตารางที่ 25 อิทธิพลร่วม (interaction) ระหว่างกระบวนการผลิตและลักษณะอาหารต่อสมรรถภาพการผลิตไก่กระพง ($\pm$ SD) ในระยะอายุ 1 - 21 และ 22 – 42 วัน

ลักษณะที่ศึกษา	ข้าวโพดบด		ข้าวโพดเอกซ์ทราด	
	อาหารผง	อาหารอัดเม็ด	อาหารผง	อาหารอัดเม็ด
ระยะอายุ 1 – 21 วัน				
จำนวนไก่ (ตัว)	400	400	400	400
น้ำหนักเริ่มต้น (กรัม/ตัว)	41.20 $\pm$ 0.66	41.62 $\pm$ 0.54	41.32 $\pm$ 0.62	41.15 $\pm$ 0.40
น้ำหนักตัวที่ 21 วัน (กรัม/ตัว)	760.32 $\pm$ 53.06	809.71 $\pm$ 34.71	737.44 $\pm$ 30.82	809.27 $\pm$ 34.04
อัตราการเจริญเติบโต (กรัม/วัน)	34.24 $\pm$ 2.51	36.58 $\pm$ 1.64	33.15 $\pm$ 1.47	36.58 $\pm$ 1.61
ปริมาณอาหารที่กิน (กรัม/ตัว/วัน)	49.19 $\pm$ 2.79	50.34 $\pm$ 1.73	48.96 $\pm$ 1.49	50.71 $\pm$ 1.79
ประสิทธิภาพการใช้อาหาร	1.44 $\pm$ 0.03	1.38 $\pm$ 0.02	1.48 $\pm$ 0.04	1.39 $\pm$ 0.03
อัตราการตาย (% ของไก่ทั้งหมด)	3.48 $\pm$ 2.31	2.01 $\pm$ 1.85	3.80 $\pm$ 2.31	3.00 $\pm$ 2.81
ระยะอายุ 22 – 42 วัน				
น้ำหนักตัวที่ 42 วัน (กรัม/ตัว)	1,999.58 $\pm$ 168.81	2,139.47 $\pm$ 144.79	1,961.18 $\pm$ 164.16	2,163.80 $\pm$ 205.43
อัตราการเจริญเติบโต (กรัม/วัน)	59.01 $\pm$ 6.25	63.32 $\pm$ 5.75	58.27 $\pm$ 6.53	64.50 $\pm$ 8.38
ปริมาณอาหารที่กิน (กรัม/ตัว/วัน)	118.84 $\pm$ 9.12	129.06 $\pm$ 8.08	120.11 $\pm$ 9.87	124.53 $\pm$ 12.80
ประสิทธิภาพการใช้อาหาร	2.04 $\pm$ 0.08 ^ก	2.01 $\pm$ 0.13 ^ก	2.11 $\pm$ 0.09 ^ก	1.90 $\pm$ 0.08 ^ข
อัตราการตาย (% ของไก่ทั้งหมด)	4.16 $\pm$ 2.75	10.27 $\pm$ 4.85	3.94 $\pm$ 3.45	7.49 $\pm$ 4.51

ก, ข อักษรที่แตกต่างกันในแถวเดียวกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$)

3. ผลของข้าวโพดเอกซ์ทราดต่อประสิทธิภาพการผลิตไก่กระทางในระยะเวลาอายุ 43 - 49 วัน

การทดลองช่วงอายุ 43 – 49 วัน พบว่า น้ำหนักตัวที่ 49 วัน อัตราการเจริญเติบโต ปริมาณอาหารที่กิน ประสิทธิภาพการใช้อาหาร และอัตราการตายของไก่ที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดและข้าวโพดเอกซ์ทราดมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ และไก่ที่ได้รับอาหารอัดเม็ดมีน้ำหนักตัวที่ 49 วัน สูงกว่าไก่ที่ได้รับอาหารผง ($P<0.01$) แต่มีปริมาณอาหารที่กินน้อยกว่าไก่ที่ได้รับอาหารผง ($P<0.05$) ส่วนอัตราการเจริญเติบโต ประสิทธิภาพการใช้อาหารและอัตราการตายไม่แตกต่างกันทางสถิติ ดังตารางที่ 26 และเมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลร่วม (interactions) ของทั้ง 2 ปัจจัยพบว่าไม่มีอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัย ดังตารางที่ 28

เมื่อพิจารณารวมทั้ง 3 ระยะ คือระยะ 1 – 49 วันพบว่า อัตราการเจริญเติบโต ปริมาณอาหารที่กิน ประสิทธิภาพการใช้อาหาร และอัตราการตาย ของไก่ที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดและข้าวโพด เอกซ์ทราดมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ แต่ไก่ที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดเอกซ์ทราดมีราคาอาหาร (บาท/ตัว) และราคาอาหารต่อการเพิ่มน้ำหนัก 1 กิโลกรัมสูงกว่าไก่ที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพด ($P<0.01$) ดังตารางที่ 27 และไก่ที่ได้รับอาหารในลักษณะอาหารอัดเม็ดมีอัตราการเจริญเติบโต และประสิทธิภาพการใช้อาหาร ดีกว่าไก่กลุ่มที่ได้รับอาหารผง ($P<0.05$) แต่มีอัตราการตาย, ราคาอาหาร (บาท/ตัว) และราคาอาหารต่อการเพิ่มน้ำหนัก 1 กิโลกรัมสูงกว่าไก่กลุ่มที่ได้รับอาหารผง ($P<0.05$) ส่วนปริมาณอาหารที่กินไม่แตกต่างกันทางสถิติ และเมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลร่วม (interactions) ของทั้ง 2 ปัจจัยพบว่าไม่มีอิทธิพลร่วมในอัตราการเจริญเติบโต ปริมาณอาหารที่กิน ประสิทธิภาพการใช้อาหาร อัตราการตาย และราคาอาหาร (บาท/ตัว) ของไก่ทั้ง 4 กลุ่ม แต่ไก่ที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดเอกซ์ทราดและข้าวโพดในลักษณะอาหารอัดเม็ด มีราคาอาหารต่อการเพิ่มน้ำหนัก 1 กิโลกรัมไม่แตกต่างกันทางสถิติ แต่มีราคาสูงกว่าไก่ที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดเอกซ์ทราดและข้าวโพดในลักษณะอาหารผง ($P<0.01$) และไก่ที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดเอกซ์ทราดในลักษณะอาหารผงมีราคาอาหารต่อการเพิ่มน้ำหนัก 1 กิโลกรัมสูงกว่าไก่ที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดในลักษณะอาหารผง ($P<0.01$) ดังตารางที่ 28

ตารางที่ 26 ผลของกระบวนการเอกซ์ทรูชันและลักษณะของอาหารต่อสมรรถภาพการผลิต ($\pm$ SD) ในไก่กระทงในช่วงระยะอายุ 43 - 49 วัน

ลักษณะที่ศึกษา	กระบวนการผลิต ¹		ลักษณะอาหาร ²	
	ข้าวโพดเอกซ์ทรูด	ข้าวโพดบด	อาหารผง	อาหารอัดเม็ด
น้ำหนักตัวที่ 49 วัน (กรัม/ตัว)	2,402.14 $\pm$ 226.09	2,395.22 $\pm$ 173.48	2,341.02 $\pm$ 197.35 ^ก	2,456.35 $\pm$ 187.61 ^ข
อัตราการเจริญเติบโต (กรัม/วัน)	46.60 $\pm$ 4.51	46.70 $\pm$ 7.28	49.46 $\pm$ 5.45	43.85 $\pm$ 5.19
ปริมาณอาหารที่กิน (กรัม/ตัว/วัน)	147.55 $\pm$ 14.41	142.45 $\pm$ 13.19	148.96 $\pm$ 13.23 ^ค	141.04 $\pm$ 13.59 ^ง
ประสิทธิภาพการใช้อาหาร	3.18 $\pm$ 0.32	3.10 $\pm$ 0.41	3.04 $\pm$ 0.33	3.24 $\pm$ 0.37
อัตราการตาย (% ของไก่ทั้งหมด)	3.22 $\pm$ 3.34	2.39 $\pm$ 2.83	2.14 $\pm$ 3.12	3.47 $\pm$ 2.98

¹ วิเคราะห์ในปัจจัยกระบวนการผลิต

² วิเคราะห์ในปัจจัยลักษณะอาหาร

^{ก, ข} อักษรที่แตกต่างกันในแถวเดียวกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$)

^{ค, ง} อักษรที่แตกต่างกันในแถวเดียวกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

ตารางที่ 27 ผลของกระบวนการเอกซ์ทรูชันและลักษณะของอาหารต่อสมรรถภาพการผลิต ($\pm$ SD) ในไก่กระทงในช่วงระยะอายุ 1 - 49 วัน

ลักษณะที่ศึกษา	กระบวนการผลิต ¹		ลักษณะอาหาร ²	
	ข้าวโพดเอกซ์ทรูด	ข้าวโพดบด	อาหารผง	อาหารอัดเม็ด
อัตราการเจริญเติบโต (กรัม/วัน)	47.86 $\pm$ 4.45	47.90 $\pm$ 3.67	46.51 $\pm$ 3.74 ^ข	49.24 $\pm$ 3.87 ^ก
ปริมาณอาหารที่กิน (กรัม/ตัว/วัน)	95.70 $\pm$ 7.06	94.01 $\pm$ 7.17	93.98 $\pm$ 6.04	95.73 $\pm$ 7.85
ประสิทธิภาพการใช้อาหาร	2.00 $\pm$ 0.07	1.97 $\pm$ 0.14	2.02 $\pm$ 0.06 ^อ	1.95 $\pm$ 0.13 ^ส
อัตราการตาย (% ของไก่ทั้งหมด)	11.34 $\pm$ 6.51	12.05 $\pm$ 6.39	9.02 $\pm$ 4.94 ^ส	14.38 $\pm$ 6.57 ^อ
ราคาอาหาร (บาท/ตัว)	57.05 $\pm$ 6.00 ^ก	54.63 $\pm$ 5.75 ^ข	51.59 $\pm$ 3.91 ^ข	60.09 $\pm$ 4.29 ^ก
ราคาอาหารต่อการเพิ่มน้ำหนัก 1 กิโลกรัม (บาท)	24.17 $\pm$ 1.11 ^ก	23.21 $\pm$ 1.74 ^ข	22.47 $\pm$ 1.12 ^ข	24.90 $\pm$ 0.58 ^ก

¹ วิเคราะห์ในปัจจัยกระบวนการผลิต

² วิเคราะห์ในปัจจัยลักษณะอาหาร

^{ก, ข} อักษรที่แตกต่างกันในแถวเดียวกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$)

^{อ, ส} อักษรที่แตกต่างกันในแถวเดียวกันแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

ตารางที่ 28 อิทธิพลร่วม (interaction) ระหว่างกระบวนการผลิตและลักษณะอาหารต่อสมรรถภาพการผลิตไก่กระทง ($\pm$ SD) ในระยะอายุ 43 - 49 และ 1 - 49 วัน

ลักษณะที่ศึกษา	ข้าวโพดบด		ข้าวโพดเอกซ์ทราด	
	อาหารผง	อาหารอัดเม็ด	อาหารผง	อาหารอัดเม็ด
ระยะอายุ 43 - 49 วัน				
น้ำหนักตัวที่ 49 วัน (กรัม/ตัว)	2,354.93 $\pm$ 182.04	2,435.52 $\pm$ 166.27	2,327.11 $\pm$ 223.33	2,477.18 $\pm$ 216.30
อัตราการเจริญเติบโต (กรัม/วัน)	50.47 $\pm$ 6.61	42.93 $\pm$ 6.17	48.44 $\pm$ 4.13	44.77 $\pm$ 4.45
ปริมาณอาหารที่กิน (กรัม/ตัว/วัน)	146.84 $\pm$ 13.41	138.06 $\pm$ 12.35	151.07 $\pm$ 14.10	144.02 $\pm$ 15.10
ประสิทธิภาพการใช้อาหาร	2.94 $\pm$ 0.35	3.26 $\pm$ 0.44	3.13 $\pm$ 0.32	3.23 $\pm$ 0.33
อัตราการตาย (% ของไก่ทั้งหมด)	1.85 $\pm$ 2.62	2.93 $\pm$ 3.10	2.44 $\pm$ 3.71	4.00 $\pm$ 2.96
ระยะอายุ 1 - 49 วัน				
อัตราการเจริญเติบโต (กรัม/วัน)	47.02 $\pm$ 3.92	48.77 $\pm$ 3.47	46.00 $\pm$ 3.56	49.72 $\pm$ 4.41
ปริมาณอาหารที่กิน (กรัม/ตัว/วัน)	93.77 $\pm$ 5.83	94.24 $\pm$ 8.78	94.18 $\pm$ 6.68	97.22 $\pm$ 7.37
ประสิทธิภาพการใช้อาหาร	2.00 $\pm$ 0.05	1.94 $\pm$ 0.19	2.05 $\pm$ 0.06	1.96 $\pm$ 0.04
อัตราการตาย (% ของไก่ทั้งหมด)	9.12 $\pm$ 4.57	14.98 $\pm$ 6.88	8.92 $\pm$ 5.65	13.77 $\pm$ 6.71
ราคาอาหาร (บาท/ตัว)	50.06 $\pm$ 3.47	59.21 $\pm$ 3.32	53.12 $\pm$ 3.92	60.98 $\pm$ 5.16
ราคาอาหารต่อการเพิ่มน้ำหนัก 1 กิโลกรัม (บาท)	21.65 $\pm$ 0.56 ^ก	24.76 $\pm$ 0.79 ^ก	23.29 $\pm$ 0.91 ^ข	25.04 $\pm$ 0.27 ^ก

ก, ข, ค อักษรที่แตกต่างกันในแถวเดียวกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$)

จากผลการทดลองสมรรถภาพการผลิตของไก่ในระยะอายุ 1 – 21 วัน และ 22 – 42 วัน จะเห็นได้ว่าการใช้ข้าวโพดเอกซ์ทราดมีผลทำให้อัตราการเจริญเติบโต ปริมาณอาหารที่กิน และ ประสิทธิภาพการใช้อาหารไม่แตกต่างทางสถิติกับการใช้ข้าวโพด ยกเว้นในระยะ 1 – 21 วัน ไก่กลุ่มที่ใช้ข้าวโพดเอกซ์ทราดมีประสิทธิภาพการใช้อาหารน้อยกว่าไก่กลุ่มที่ใช้ข้าวโพด ($P < 0.05$) เนื่องจากในกระบวนการเอกซ์ทราดมีการสูญเสียไขมันในรูปของไขมันอิสระตรงบริเวณหัวใจ (Wang *et al.* 1993) ซึ่งในข้าวโพดส่วนใหญ่มีกรดไขมันลิโนเลอิก (linoleic acid) อยู่สูง (Chow, 1980; Galliard, 1994) และเป็นกรดไขมันจำเป็น เพราะมีความสำคัญในการเจริญเติบโตของสัตว์ และไขมันเป็นแหล่งพลังงานที่สูงกว่าคาร์โบไฮเดรต 2.25 เท่า (ศรีสกุล และ รณชัย, 2539) และจาก ผลการทดลองพลังงานการใช้ประโยชน์ในข้าวโพดเอกซ์ทราดมีค่าต่ำกว่าในข้าวโพด

การให้อาหารในลักษณะอัดเม็ดจะทำให้ไก่มีการกินอาหารที่สูงกว่าการให้อาหารผง ($P < 0.01$) จึงส่งผลให้ไก่ที่ได้รับอาหารอัดเม็ดมีอัตราการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพการใช้อาหารที่สูงกว่าการให้อาหารผง ($P < 0.01$) ซึ่งเป็นไปในแนวทางเดียวกับการทดลองของ Svihus *et al.* (2004) รายงานว่าการให้อาหารอัดเม็ดช่วยเพิ่มปริมาณการกินอาหาร น้ำหนักตัวที่เพิ่ม และ ประสิทธิภาพการใช้อาหาร ($P < 0.05$) เมื่อเทียบกับการให้อาหารผง เนื่องจากการอัดเม็ดเป็นการลด การสูญเสียของอาหารเนื่องจากการกิน และการอัดเม็ดเป็นการช่วยเพิ่มการย่อยได้ของอาหาร (Stark, 1994) และจะเห็นได้ว่าในระยะอายุ 22 – 42 วันนั้นไก่กลุ่มที่ให้อาหารข้าวโพดเอกซ์ทราด ในลักษณะอาหารอัดเม็ดมีประสิทธิภาพการใช้อาหารได้ดีกว่าไก่ในกลุ่มอื่นๆ ($P < 0.01$) เพราะจาก การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ในข้าวโพดเอกซ์ทราดมีค่าในโตรเจนฟรีเอ็กซ์แทรกสูงกว่าใน ข้าวโพด และเชื้อยต่ำกว่าในข้าวโพด ($P < 0.05$) แต่ข้าวโพดที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทราดมี ลักษณะทางกายภาพที่ฟองฟูเบา และความหนาแน่นต่ำ ซึ่งจะมีผลต่อการกินอาหารของไก่ แต่เมื่อ อัดเม็ดแล้วจึงทำให้มีประสิทธิภาพการใช้อาหารที่เพิ่มขึ้น

จากผลการทดลองพบว่าไก่ในกลุ่มที่ได้รับอาหารอัดเม็ดมีอัตราการตายสูงกว่าไก่ในกลุ่มที่ ได้รับอาหารผง ($P < 0.05$) เนื่องจากไก่ในปัจจุบันมีการปรับปรุงพันธุ์ให้มีการเจริญเติบโตเร็ว เพื่อ ลดระยะเวลาในการเลี้ยง ดังนั้นไก่ที่มีการเจริญเติบโตเร็วจึงต้องการออกซิเจนในปริมาณมากเพื่อใช้ ในกระบวนการเมตาบอลิซึมของร่างกาย และเมื่อไก่ได้รับออกซิเจนไม่เพียงพอกับร่างกายที่ ต้องการทำให้หัวใจทำงานหนัก ไก่จะตายกะทันหัน (sudden death syndrome; SDS) (Jacky *et al.*, 2005) ซึ่งจากผลการทดลองไก่ในกลุ่มที่กินอาหารอัดเม็ดจะมีปริมาณการกินอาหาร และมี อัตราการเจริญเติบโตที่สูงกว่าในกลุ่มที่ให้อาหารผง ดังนั้นไก่ในกลุ่มที่กินอาหารอัดเม็ดจึงเกิด

SDS ได้สูงกว่า และจากเหตุผลนี้จึงเป็นผลต่อเนื่องทำให้ในระยะอายุ 43 – 49 วันไก่ในกลุ่มที่ใช้อาหารอัดเม็ดมีอัตราการเจริญเติบโตต่ำกว่าไก่ในกลุ่มที่ใช้อาหารผง ($P < 0.05$) และมีแนวโน้มว่ามีปริมาณการกินอาหารและประสิทธิภาพการใช้อาหารต่ำกว่าไก่ในกลุ่มที่ใช้อาหารผง เนื่องมาจากในระยะอายุ 22 – 42 วันไก่ในกลุ่มที่ใช้อาหารอัดเม็ดมีปริมาณการตายที่สูงกว่า และไก่ที่ตายส่วนใหญ่เป็นไก่ที่เจริญเติบโตเร็วกินอาหารปริมาณสูงและมีน้ำหนักตัวมาก เมื่อไก่เหล่านี้ตาย ไก่ที่เหลือเป็นไก่ที่มีน้ำหนักไม่สูงจึงมีผลทำให้ปริมาณการกินอาหารและอัตราการเจริญเติบโตของไก่ทั้งกลุ่มที่ใช้อาหารอัดเม็ดลดลง

กระบวนการเอกซ์ทรูชันและการอัดเม็ดเป็นการเพิ่มต้นทุนค่าอาหาร (บาท/ตัว) และต้นทุนค่าอาหารต่อการเพิ่มน้ำตัว 1 กิโลกรัม เพราะต้องเสียค่าใช้จ่ายเพิ่มในกระบวนการเอกซ์ทรูชัน ข้าวโพด 159 – 171 บาทต่อตัน และการอัดเม็ดอาหารเป็นการเพิ่มต้นทุน 1.50 บาทต่อกิโลกรัม

ดังนั้นเมื่อพิจารณาโดยรวมของทั้ง 4 การทดลองกล่าวได้ว่า การเอกซ์ทรูชันข้าวโพดมีผลทำให้ปริมาณความชื้นและไขมันในข้าวโพดลดลง เนื่องจากการระเหยของน้ำและสูญเสียไขมันตรงบริเวณหัวโค ในรูปของไขมันอิสระ และเกิดการรวมตัวกับอะมิโลส หรือโปรตีน (Wang *et al.* 1993) โดยปกติข้าวโพดส่วนใหญ่จะมีกรดไขมันลิโนเลอิก (linoleic acid) อยู่สูง (Chow, 1980; Galliard, 1994) จึงส่งผลให้ข้าวโพดเอกซ์ทรูดเกิดการหืนได้น้อยกว่าข้าวโพด เมื่อเก็บรักษาเป็นระยะเวลานาน นอกจากนี้ข้าวโพดที่ผ่านการเอกซ์ทรูชันมีการใช้ประโยชน์ได้ของแป้งเพิ่มสูงขึ้น โดยดูจากค่าในโตรเจนฟรีเอกซ์แทรกที่ได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ทั้งนี้เนื่องจากกระบวนการเอกซ์ทรูชันเป็นการแปรรูปอาหารที่เกิดจากการหมุนของสกรูที่อยู่ภายในทอบาร์เรล ซึ่งก่อให้เกิดความร้อนและความดันสูง เกิดแรงอัดและเสียดสีของวัตถุดิบกับผนังทอบาร์เรล ทำให้โครงสร้างของแป้งภายในวัตถุดิบเกิดการเปลี่ยนแปลง (Smith, 1976) เม็ดแป้งเกิดการเจลาติไนซ์ โดยเฉพาะในกระบวนการผลิตที่มีอัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่องที่ต่ำ จึงเป็นการส่งเสริมการย่อยแป้งของเอนไซม์ได้ดีขึ้น ดังจะเห็นได้จากค่าพลังงานการย่อยได้และค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้ในข้าวโพดเอกซ์ทรูดของสุกรมีค่าสูงกว่าในข้าวโพด แต่ผลการทดลองในไก่นั้นให้ผลในทางตรงกันข้ามคือค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้ของข้าวโพดในไก่มิค่าสูงกว่าในข้าวโพดเอกซ์ทรูด เนื่องจากสุกรที่ใช้ในการศึกษาเป็นสุกรหลังหย่านมอายุ 4 สัปดาห์ ซึ่งลูกสุกรในระยะหลังหย่านมจะมีความเครียดสูง เพราะลูกสุกรถูกแยกจากแม่สุกร นอกจากนี้ยังมีการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อม และอาหาร โดยเปลี่ยนจากได้รับพลังงานจากไขมันนม (milk fat) และน้ำตาลแลคโตส (lactose) ในน้ำนมแม่สุกร มาเป็นแหล่งพลังงานจากพืช ดังนั้นการเปลี่ยนอาหารทำให้ต้องมี

การปรับตัวของน้ำย่อยในระบบทางเดินอาหาร โดยเฉพาะการหลั่งของเอนไซม์อะไมเลสในการย่อยแป้ง และปริมาณของเอนไซม์อะไมเลส (amylase) จากตับอ่อนจะเพิ่มสูงขึ้น จนกระทั่งอายุ 10 สัปดาห์ (Shields *et al.*, 1980) เพราะลูกสุกรสามารถใช้ประโยชน์จากแป้งของข้าวโพดเอกซ์ทราได้ดีกว่าแป้งจากข้าวโพดบดหยาบ นอกจากนี้ในระบบทางเดินอาหารของสุกรมีการย่อยแป้งตั้งแต่ในปากไปสิ้นสุดที่ลำไส้เล็ก จึงให้ค่าพลังงานการย่อยได้และพลังงานใช้ประโยชน์ได้ที่สูงกว่าในข้าวโพด ส่วนในไก่อ้นั้นเป็นการศึกษาในระยะเวลาอายุ 4 สัปดาห์ ซึ่งเป็นระยะที่มีการเจริญเติบโตสมบูรณ์แล้ว (maturity) มีการทำงานของเอนไซม์ในระบบทางเดินอาหารที่สมบูรณ์ ดังนั้นความสามารถในการย่อยแป้งจากข้าวโพดบดหยาบซึ่งเป็นอาหารปกติที่ใช้เลี้ยงไก่จึงทำได้ดีกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับความสามารถในการย่อยแป้งจากข้าวโพดเอกซ์ทรา ซึ่งมีการสูญเสียคุณค่าทางโภชนาการไปในระหว่างกระบวนการเอกซ์ทราขึ้น จึงทำให้ค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้ในข้าวโพดของไก่อีกดีกว่าในข้าวโพดเอกซ์ทรา

ส่วนผลของสมรรถภาพการผลิตของสัตว์นั้น สุกรที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดเอกซ์ทรา มีอัตราการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพการใช้อาหารที่ต่ำกว่าในสุกรที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดและปลายข้าว เนื่องจากกระบวนการเอกซ์ทราขึ้นทำให้โครงสร้างของแป้งภายในข้าวโพดเกิดการเปลี่ยนแปลง ทำให้แป้งในเมล็ดข้าวโพดพองตัวขึ้น น้ำระเหยออก ทำให้ความหนาแน่น (bulk density) ลดลง (Tait and Beames, 1998; Thymi *et al.*, 2005) จากผลการทดลองข้าวโพดที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทราจะมีลักษณะฟาม ความหนาแน่นต่ำกว่าปลายข้าวและข้าวโพด และเมื่ออาหารข้าวโพดเอกซ์ทราสัมผัสกับน้ำลายของสุกร จะมีลักษณะขึ้นเหนียวจับเป็นก้อน ติดบริเวณปาก รางอาหาร และร่วงหล่นบริเวณพื้นคอก ทำให้เกิดการสูญเสียของอาหารโดยไม่ก่อเกิดให้ประโยชน์กับตัวสุกร ส่งผลให้การเจริญเติบโตของลูกสุกรที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดเอกซ์ทรา มีค่าต่ำกว่าในสุกรที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดและปลายข้าว ส่วนผลต่อสมรรถภาพการผลิตในไก่อ้นั้น การเจริญเติบโตของไก่ที่ได้รับอาหารข้าวโพดและข้าวโพดเอกซ์ทราไม่แตกต่างกันทางสถิติ และการให้อาหารในลักษณะอาหารเม็ดมีผลในการส่งเสริมการเจริญเติบโตของไก่อีกมากกว่าการใช้อาหารผง ดังนั้นการใช้ข้าวโพดเอกซ์ทราในลักษณะอาหารอัดเม็ดในไก่จึงเป็นการส่งเสริมการเจริญเติบโตของไก่ เนื่องจากการอัดเม็ดมีผลลดความฟามในข้าวโพดเอกซ์ทราลง ทำให้พลังงานที่ใช้ในการจิกกินอาหารของไก่อลดลง (Amornthewaphat *et al.*, 2005) ทำให้ไก่เจริญเติบโตดีขึ้น

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

จากผลการศึกษาการใช้ข้าวโพดที่ผ่านการเอกซ์ทราซัน ต่อระยะเวลาการเก็บรักษา, การย่อยได้ของโภชนะ และสมรรถภาพการผลิตของไก่กระตังและลูกสุกร สรุปได้ดังต่อไปนี้

1. อัตราการไหลของน้ำในกระบวนการเอกซ์ทราซันเพิ่มขึ้นทั้งในข้าวโพดทั้งเมล็ดและข้าวโพดบดหยาบ จะใช้ค่าพลังงานไฟฟ้าในการเอกซ์ทราซันลดลง ความชื้นและความหนาแน่นในวัตถุดิบหลังกระบวนการผลิตมีค่าสูงขึ้น จึงส่งผลให้พลังงานที่ใช้ในการบดละเอียดเพิ่มสูงขึ้น การเกิดเจลาตินไนซ์และค่าการเข้าย่อยได้ของเอนไซม์ลดลง

2. การเอกซ์ทราซันข้าวโพดมีผลทำให้ความชื้น ไขมัน และค่า TBA ในข้าวโพดลดลง เมื่อเก็บรักษาวัตถุดิบข้าวโพดและข้าวโพดเอกซ์ทราซันเป็นระยะเวลา 2 เดือน พบว่าปริมาณความชื้น และค่า TBA ของทั้งสองวัตถุดิบเพิ่มขึ้น แต่ไม่มีผลต่อปริมาณโปรตีน, ไขมัน และเถ้า นอกจากนี้ปริมาณความชื้นมีความสัมพันธ์ในทางบวกกับค่า TBA ทั้งในข้าวโพดและข้าวโพด เอกซ์ทราซัน และเมื่อระยะเวลาเก็บรักษาที่นานขึ้นมีแนวโน้มว่าข้าวโพดจะมีค่า TBA สูงขึ้นมากกว่าในข้าวโพดเอกซ์ทราซัน

3. ค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้ของข้าวโพดและข้าวโพดเอกซ์ทราซันในสุกรระยะอนุบาลมีค่าเท่ากับ 3497 และ 3653 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และการใช้ข้าวโพดเอกซ์ทราซันไม่มีผลกระทบต่อการกินได้และอัตราการตายของสุกรเมื่อเทียบกับกลุ่มที่ใช้ข้าวโพดและปลายข้าว แต่มีผลทำให้อัตราการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพการใช้อาหารดีกว่าการใช้ข้าวโพดและการใช้ปลายข้าว ($P < 0.05$) นอกจากนี้ยังเป็นการเพิ่มต้นทุนค่าอาหารรวม 19.37 บาทต่อตัว และต้นทุนค่าอาหารต่อการเพิ่มน้ำหนักตัว 1 กิโลกรัม 2.44 บาท/กิโลกรัม เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ข้าวโพด ดังนั้นในสภาพการเลี้ยงของการทดลองนี้ในลักษณะอาหารผง จึงไม่แนะนำให้ใช้ข้าวโพดเอกซ์ทราซัน เพราะเป็นการเพิ่มต้นทุนการผลิต

4. ค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้ของข้าวโพดและข้าวโพดเอกซ์ทราซันในไก่กระตังมีค่าเท่ากับ 3127 และ 2716 กิโลแคลอรีต่อกิโลกรัม ตามลำดับ และการใช้ข้าวโพดเอกซ์ทราซันมีผลทำ

ให้อัตราการเจริญเติบโต ปริมาณอาหารที่กิน และประสิทธิภาพการใช้อาหารไม่แตกต่างทางสถิติกับการใช้ข้าวโพด และการให้อาหารในลักษณะอาหารอัดเม็ดทำให้อัตราการเจริญเติบโต และประสิทธิภาพการใช้อาหารดีกว่าการให้อาหารในลักษณะอาหารผง แต่การให้อาหารอัดเม็ดมีผลเสียคือไก่มีอัตราการตายที่สูงขึ้น นอกจากนี้การเอกซ์ทราซันและการอัดเม็ดอาหารเป็นการเพิ่มต้นทุนการผลิต ดังนั้นจากผลการทดลองในครั้งนี้สรุปได้ว่าการใช้ข้าวโพดเอกซ์ทราซันในระดับ 25% ในสูตรอาหาร ในลักษณะอาหารอัดเม็ด มีผลในการเพิ่มสมรรถภาพการผลิตในไก่

ข้อเสนอแนะ

1. ข้าวโพดที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทราซันจะมีความหนาแน่นต่ำ อาหารมีความฟาม ดังนั้นในการศึกษาครั้งต่อไปควรมีการศึกษาการใช้ข้าวโพดเอกซ์ทราซันในลักษณะอัดเม็ดอาหาร เพื่อลดปัญหาความฟามของข้าวโพดเอกซ์ทราซัน ซึ่งจะมีผลต่อระบบทางเดินอาหารของสุกร

2. จากรายงานต่าง ๆ เกี่ยวกับองค์ประกอบทางเคมีของข้าวโพดที่ผ่านกระบวนการเอกซ์ทราซัน รายงานว่าการให้ความร้อนในการกระบวนการเอกซ์ทราซันนั้นเมื่อแป้งได้รับความร้อนจนถึงอุณหภูมิที่เกิดเจลลาติไนเซชันแล้วให้ความร้อนต่อไป จะทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้นจนถึงจุดพองตัวเต็มที่แล้วแตกออก โมเลกุลของอะมิโลสขนาดเล็กจะแตกกระจายออกมาทำให้ความหนืดลดลง เมื่อปล่อยให้เย็นตัว โมเลกุลของอะมิโลสที่อยู่ใกล้กันจะเกิดการเรียงตัวกันใหม่ด้วยพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุล เกิดเป็นร่างแหสามมิติ และเมื่อลดอุณหภูมิให้ต่ำลงไปอีก ลักษณะการเรียงตัวของโครงสร้างจะแน่นมากขึ้น ทำให้ไม่สามารถถูกย่อยด้วยเอนไซม์ α -amylase ในลำไส้เล็กได้ หรือที่เรียกว่าเกิด Resistance starch ทำให้การใช้ประโยชน์ของแป้งได้ลดน้อยลง (Ankrah *et al.*, 1999 ; Higgins, 2004) ดังนั้นในการศึกษาเกี่ยวกับข้าวโพดเอกซ์ทราซันน่าจะมีการศึกษาในเรื่องของ Resistance starch ด้วย เนื่องจากข้าวโพดจะมีส่วนประกอบของอะมิโลสอยู่สูง

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

กระทรวงพาณิชย์. 2549. ตลาดส่งออกข้าวโพดไทย. Available Source : http://www.doa.go.th/fieldcrops/corn/oth/ph_2.HTM. November 1, 2549.

กรมวิชาการเกษตร. 2547. การข้าวโพดเลี้ยงสัตว์. เอกสารทางวิชาการ ลำดับที่ 11/2547. กรมวิชาการเกษตร, กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. 116 น.

กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกูล ปิยะจอมขวัญ. 2546. เทคโนโลยีของแป้ง. บริษัท เท็กซ์ แอนด์ เจอร์นัล พับลิเคชั่น จำกัด, กรุงเทพฯ.

จันทร์จรัส เรี่ยวเดชะ, กฤษ อังคนาพร และเปล่งศรี อิงคนินันท์. 2547. คู่มือการวิจัยสมุนไพรในการผลิตสัตว์ 2. โรงพิมพ์ดีธรรมาสาร, จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, กรุงเทพฯ.

บุญล้อม ชีวอิสระกุล. 2546. ชีวเคมีทางสัตวศาสตร์. พิมพ์ครั้งที่ 2. หจก. ธนบรรณการพิมพ์, เชียงใหม่.

พันทิพา พงษ์เพียจันทร์. 2535. หลักการอาหารสัตว์ เล่ม 1 โภชนะ. พิมพ์ครั้งที่ 1. โอ.เอส.พรินติ้ง เฮ้าส์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, กรุงเทพฯ.

พันทิพา พงษ์เพียจันทร์. 2539. การผลิตอาหารสัตว์. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์, มหาวิทยาลัยเชียงใหม่, กรุงเทพฯ.

รุ่งนภา วิสิฐอุตรการ และ ประชา บุญญศิริกุล. 2540. ผลของความชื้นและขนาดอนุภาคของข้าวเจ้าและข้าวเหนียวต่อคุณภาพของเอกซ์ทราคเตด, น. 657-665. ใน รายงานการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 35 (สาขาพืช สัตวศาสตร์และนิเทศศาสตร์ เกษตร อุตสาหกรรม). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

- ศรีสกุล วรจันทรา และ รณชัย สิทธิไกรพงษ์. 2539. โภชนศาสตร์สัตว์. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์โอเดียน สโตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพฯ.
- สุวรรณา พรหมทอง. 2548. การศึกษาเปรียบเทียบลักษณะทางสรีระวิทยา จุลกายวิภาค และ จุลินทรีย์ ในทางเดินอาหารไก่กระตังที่ได้รับอาหารสูตรมันสำปะหลังกับอาหารสูตร ข้าวโพด. วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.
- Adeola, O. 2001. Digestion and balance techniques in pigs, pp 904-915. In Lewis, A.J. and L.L. Southern. **Swine Nutrition**. 2nd eds. CRC Press LLC, Florida.
- Allen, J.C. and R.J. Hamilton. 1994. **Rancidity in Foods**. 3rd ed. Chapman & Hall, New York.
- Amornthewaphat, N., S. Lerdsuwan and S. Attamangkune. 2005. Effect of extrusion corn and feed form on feed quality and growth performance of poultry in a tropical environment. **Poult. Sci.** 84: 1640-1647.
- Andersson, Y. and B. Hedlund. 1990. Extruded wheat flour: correlation between processing and product quality parameters. **Food Qual. Prefer.** 2:201-216.
- Anguita, M., J. Gasa, M. Nofrarias, S.M. Martin-Orue and J.F. Perez. 2007. Effect of coarse ground corn, sugar beet pulp and wheat bran on the voluntary intake and physicochemical characteristics of digesta of growing pigs. **Livestock Science**. 107: 182-191.
- Ankrah, N.O., G.L. Campbell, R.T. Tyler, B.G. Rossnagel and S.R.T. Sokhansanj. 1999. Hydrothermal and β -glucanase effect on the nutritional and physical properties of starch in normal and waxy hull-less barley. **Anim. Feed. Sci. Technol.** 81: 205-219.

Antolovich, M., P.D. Prenzler, E. Patsalides, S. McDonald and K. Robards. 2002. Methods for testing antioxidant activity. **Analyst.** 127: 183-198.

A.O.A.C. 2000. **Official Methods for Analysis.** 17th ed. Association of Official Analytical Chemists, Washington DC.

_____. 1990. **Official Methods for Analysis.** 5th ed. Association of Official Analytical Chemists, Washington DC.

ASAE. 1983. Method of determining and expressing fineness of feed material by sieving. **ASAE Standard S319, Agriculture Engineering Yearbook of Standard.** P 325. American Society of Agriculture Engineering, St Joseph, MI.

Bartov, I., and A. Barzur. 1995. The nutritional value of high-oil corn for broiler chicks. **Poultry. Sci.** 74: 517–522.

Bjorck, I., T. Matoba 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. cited by 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.

Bolin, D.W., R.P. King and E.W. Klosterman. 1952. A simplified method for the determination of chromic oxide (Cr₂O₃) when use as an index substance. **Science.** 116:634-635.

Boonyasirikool, P. and C. Charunuch. 2000. Development of corngrit-broken rice based snack food by extrusion cooking. **Kasetsart J. (Nat. Sci.)** 34: 279-288.

- Camire, M.E. 2000. Chemical and nutritional changes in food during extrusion, pp. 127-147. In M.N. Riaz, eds. **Extruders in food applications**. 1st ed. Technomic publishing company, Inc, U.S.A.
- _____, J. Zhao and D.A. Violette. 1994. *In vitro* binding of bile acids by extruded potato peels. **J. Agric. Food. Chem.** 41: 2391-2394.
- Chae, B.J., Y.K. Kim, J.D. Kim, W.T. Cho and I.K. Han. 2000. Effects of extruding corn and wheat grain on growth performance and digestibility of amino acids in early-weaned pigs. **J. Anim. Sci.** 78 (Suppl): 309.
- Choct, M. and A. Kocker. 2000. Non-starch carbohydrates: Digestion and its secondary effects in monogastrics. **Proceedings of the Nutrition Society of Australia.** 24: 31-38.
- Chow, K.W. 1980. Chapter 13. Storage Problems of Feedstuffs. **FAO Corporate Document Repository**. Available Source: <http://www.fao.org/docrep/X5738E/x5738e0e.htm>, February 20, 1980.
- Classen, H.L. 1996. Cereal grain starch and exogenous enzymes in poultry diets. **Anim. Feed. Sci. Technol.** 62: 21-27.
- Dale, N.M., and E. Whittle. 1991. Effect of oil content on true metabolizable energy of yellow corn. **Poultry. Sci.** 70 (Suppl. 1): 32. (Abstr.)
- Della Valle, G., L. Quillien and J. Gueguen. 1994. Relationships between processing conditions and starch and protein modifications during extrusion-cooking of pea flour. **J. Sci. Food Agric.** 64: 509-517.

- DeRouchey, J.M., J.D. Hancock, R.H. Hines, C.A. Moloney, D.J. Lee, H. Cao, D.W. Dean and J.S. Park. 2004. Effects of rancidity and free fatty acids in choices white grease on growth performance and nutrient digestibility in weanling pigs. **J. Anim. Sci.** 82: 2937-2944.
- Donald, A.M., P.J. Jenkins and T.A. Waigh. 2006. **Cooking corn on LOQ**. Available Source : <http://www.isis.rl.ac.uk/ISIS97/feature9.htm>. November 1, 2006.
- Edwards, H.M., JR.A.B. Carlos, A.B. Kasim and R.T. Toledo. 1999. Effect of steam pelleting and extrusion of feed on phytate phosphorus utilization in broiler chickens. **Poultry. Sci.** 78: 96-101.
- Galliard, T. 1994. Rancidity in cereal product, pp 141-159. In Allen, J.C. and R.J. Hamilton. **Rancidity in foods**. 3rd ed. Chapman & Hall, New York.
- Gao, Q., B.W. Moechnig and J.D. Crenshaw. 1999. Animal feed pelleting process and animal feed pellets produced therefrom. **US Patent**. Available Source: <http://www.patentstorm.us/patents/5871802-fulltext.html>, February 16, 1999.
- Gibson, G.R and M.B. Roberfroid. 1995. Dietary modulation of the human colonic microflora: Introducing the concept of prebiotic. **J. Nurt.** 125: 1404-1412. อ้างโดย สุวรรณพรหมทอง. 2548. การศึกษาเปรียบเทียบลักษณะทางสรีระวิทยา จุลกายวิภาค และ จุลินทรีย์ ในทางเดินอาหารไก่อกระโทงที่ได้รับอาหารสูตรมันสำปะหลังกับอาหารสูตรข้าวโพด. วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.
- _____, T.S., C.J. Kaldor and B.V. McCleary. 1993. Collaborative evaluation of an enzymic starch damage assay kit. **Cereal Chem.** 70: 47-51.
- Gomez, M.H. and J.M. Aguilera. 1983. Change in the starch fraction during extrusion-cooking of corn. **J. Food. Sci.** 48:378-381.

- Gray, J.I. 1978. Measurement of lipid oxidation: review. **JAOCS**. 55(6): 539-546.
- Greene, B.E. and T.H. Cumuze. 1981. Relationship between TBA numbers and inexperienced panelists assessments of oxidized flavor in cooked beef. **J. Food Sci.** 47(1): 52.
- Guzman-Tello, R. and J.C. Cheftel. 1990. Colour loss during extrusion cooking of beta-carotene wheat flour mixes as an indicator of the intensity of thermal and oxidative processing. **Intel. J. Food Sci. Technol.** 25: 420-434.
- Han, Y., C.M. Parsons and D.E. Alexander. 1987. Nutritive value of high oil corn for poultry. **Poultry. Sci.** 66: 103-111.
- Hasting, W.H. and D. Higgs. 1980. Feed milling process. In Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Fish Feed Technology**, Rome.
- 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.
- Higgins, J. 2004. Glycemic and insulineric responses to resistance starch ingestion: effect of cooking and metabolic ramifications. Available Source: http://ift.confex.com/ift/2004/techprogram/paper_21072.htm. July 26, 2004.
- 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 effect of extrusion processing of carbohydrate source on weanling pig performance. **J. Anim. Sci.** 76: 3034-3042.
- Hoover, R. and Y. Zhou. 2003. *In vitro* and *in vivo* hydrolysis of legume starches by α -amylase and resistance starch formation in legumes—a review. **Carbohydrate Polymers**, 54: 401-417.

- Jacky, T., G. Leah and S. Wendy. 2005. The welfare of broiler chickens in the European Union. Compassion in world farming trust. 35 p.
- Johnston, S.L., R.H. Hines, J.D. Hancock, K.C. Behnke, S.L. Traylor, B.J. Chae and I.K. Han. 1999. Effects of conditioners (standard, long-term and expander) on pellet quality and growth performance in nursery and finishing pigs. **Asian-Aus. J. Anim. Sci.** 12: 558-564.
- Kellems, R.O and D.C. Church. 2002. **Livestock Feeds and Feeding**. 5th ed. Upper Saddle River, New Jersey.
- Khajarearn, J. and S. Khajarearn. 1999. **Manual of Feed Microscopy and Quality Control**. 3rd ed. American soybean association and US council, Thailand.
- Killeit, U. 1994. Vitamin retention in extrusion cooking. **Food Chem.** 49: 149-155.
- Kim, Y.S., D.P. Wiesenborn, P.H. Orr and H.A. Grant. 1995. Differential Scanning Calorimetry. **J. Food Sci.** 60 (5): 1060-1065.
- Kyriazakis, I. and G.C. Emmans. 1995. The voluntary feed intake of pigs given feeds based on wheat bran, dried citrus pulp and grass meal, in relation to measurements of feed bulk. **British Journal of Nutrition.** 73: 191-207.
- Leach, H.W., L.D. McCowen and T.J. Schoch. 1959. Structure of the starch granule I. Swelling and solubility patterns of various starches. **Cereal Chem.** 36: 534-544.
- Lee, B.D., D.J. Kim and S.J. Leet. 2001. Nutritive and economic values of high oil corn in layer diet. **Poultry. Sci.** 80: 1527-1534.

- Lin, S., F. Hsieh and H.E. Huff. 1998. Effects of lipids and processing conditions on lipid oxidation of extruded dry pet food during storage. **Anim. Feed. Sci. Technol.** 71: 283-294.
- Liu, Q., M.C. Lanari and D.M. Schaefer. 1995. A review of dietary vitamin E supplementation for improvement of beef quality. **J. Anim. Sci.** 73: 3131-3140.
- Mccleary, B.V., T.S. Gibson and D.C. Mugford. 1997. Measurement of total starch in cereal products by amyloglucosidase α -amylase method: Collaborative study. **J. Assoc. Off. Anal. Chem.** 80: 571-579.
- Moraru, C.I. and J.L. Kokini. 2003. Nucleation and expansion during extrusion and microwave heating of cereal foods. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety.** 2: 120-138.
- Morz, Z., A.J. Moeser, K. Vreman, J.T. van Diepen, T. van Kempen, T.T. Canh and A.W. Jongbloed. 2000. Effect of dietary carbohydrates and buffering capacity on nutrient digestibility and manure characteristics in finishing pigs. **J. Anim. Sci.** 78: 3096-3106.
- National Research Council (NRC). 1998. **Nutrition of Requirement of Swine.** 9th ed., National Academy Press, Washington D.C.
- Ning, L., R. Villota and W.E. Artz. 1991. Modification of corn fiber through chemical treatments in combination with twin-screw extrusion. **Cereal Chem.** 68: 632-636.
- Noland, P.R., D.R. Campbell, R.K. Gage, Jr., R.N. Sharp and Z.B. Johnson. 1976. Evaluation of processed soybeans and grains in diets for young pigs. **J. Anim. Sci.** 43: 763.
- Oates, C.G. 1997. Toward an understanding of starch granule structure and hydrolysis. **Trends Food Sci. Technol.** 8: 375-382.

- Obaldo, L.G., W.G. Dominy and G.H. Ryu. 1999. Growth, survival, and diet utilization of pacific white shrimp, *penaeus vannamei*, fed dry extruded diets with different levels of shear and moisture. **J. Apply. Aquac.** 9: 47-57.
- Pearson, D. 1976. **The Chemical Analysis of Foods.** 7th ed. Churchill Livingstone. London. England.
- Rendon-Villalobos, R., L. A. Bello-Pérez, P. Osorio-Díaz, J. Tovar and O. Paredes-López . 2002. Effect of storage time on *In vitro* digestibility and resistance starch content of nixtamal, masa and tortilla. **Cereal Chem.** 79: 340-344.
- Riaz, M.N. 2000. Introduction to extruders and their principles, pp. 1-24. In M.N. Riaz, ed. **Extruders in food Applications.** 1st ed. Technomic Publishing Company, Inc, U.S.A.
- Robinson, R. 1976. Pelleting- Introduction and general definitions, pp. 103-110. In H.B. Pfost, ed. **Feed Manufacturing Technology.** American Feed Manufacturers Association. Inc., Virginia.
- Rossell, J.B. 1994. Measurement of rancidity, pp. 22-53. In Allen, J.C. and R.J. Hamilton. **Rancidity in Foods.** 3rd ed. Chapman & Hall, New York.
- Said, N.W. 2000. Dry extruders. pp. 51-62. In M.N. Riaz, ed. **Extruders in Food Applications.** Technomic Publishing Company, Inc, U.S.A.
- Scott, M.L., M.C. Nesheim and R.J. Young. 1982. **Nutrition of the Chicken.** 3rd ed. M.L. Scott & Associates, Ithaca, New York.
- Shields, R.G., K.E. Ekstrom and D.C. Mahan. 1980. Effect of weaning age and feeding method on digestive enzyme development in swine from birth to ten weeks. **J. Anim. Sci.** 50: 257-265.

- 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 middlings. **J. Anim. Sci.** 57: 929.
- Smith, O.B. 1976. Extrusion and cooking systems, pp. 110-120. In H.B. Pfoest, ed. **Feed Manufacturing Technology**. American Feed Manufacturers Association. Inc., Virginia, USA.
- Stark, C.R. 1994. **Pellet Quality I. Pellet Quality and Its Effect on Swine Performance II. Functional Characteristics of Ingredients in the Formation of Quality Pellets**. Ph.D. Dissertation. Kansas State University, Manhattan.
- Strahm, B.S. 2000. Preconditioning. pp. 115-126. In M. N. Riaz, ed. **Extruders in Food Applications**. Technomic Publishing Company, Inc, U.S.A.
- Svihus, B., K. H. Klovstad, V. Perez, O. Zimonja, S. Sahlstrom, R. B. Schuller, W. K. Jeksrud and E. Prestokken. 2004. Physical and nutrition effect of pelleting of broiler chicken diets made from wheat ground to different coarsenesses by the use of roller mill and hammer mill. **Anim. Feed. Sci. Technol.** 117: 281 - 293.
- Tait, R.M. and R.M. Beames. 1988. Processing and preservation of cereals and protein concentrates. pp 151-175. In Orskov, E. R., ed. **Feed Science**. Elsevier Science Publishers B.V., New York.
- Thymi, S., M.K. Krokida, A. Pappa and Z.B. Maroulis. 2005. Structure property of extruded corn starch. **J. Food Eng.** 68: 519-526.
- Topping, D.L and P.M. Clifton. 2001. Short-chain fatty acids and human colonic function: roles of resistance starch and nonstarch polysaccharide. **Physiological Review.** 81(3): 1031-1064.

- Villalobos, R.R., L.A. Bello-Perez, P.O. Diaz, J. Tovar and O.P. Lopez. 2002. Effect of storage time on *In vitro* digestibility and resistance starch content of nixtamal, masa and tortilla. **Cereal Chem.** 79: 340-344.
- Wang, W.M., C.F. Klopfenstein and J.G. Ponte. 1993. Effects of twin-screw extrusion on the physical properties of dietary fiber and other components of whole wheat and wheatbran and on the baking quality of the wheat bran. **Cereal Chem.** 70: 707-711.
- Weurding, R.E., A. Veldman, W.A.G. Veen, P.J. Van der Aar and M.W.A. Verstegen. 2001. Starch digestion rate in the small intestine of broiler chickens differs among feedstuffs. **J. Nutr.** 131: 2329-2335.
- Williams, M.A. 2000. Interrupted-flight expanders-extruders, pp. 63-80. In M.N. Riaz, ed. **Extruders in Food Applications.** 1st ed. Technomic Publishing Company, Inc, U.S.A.
- Wondra, K.L., J.D. Hancock, 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 pigs. **J. Anim. Sci.** 73: 757-763.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก
วิธีการวิเคราะห์ในห้องปฏิบัติการ

การวิเคราะห์การเกิดเจลลาทีไนซ์ของแป้งโดยเครื่อง DSC (Kim, 1995)

การวิเคราะห์การเกิดเจลลาทีไนซ์ และรีโทรเกรเดชัน ของแป้งโดยเครื่อง DSC ทำได้โดยให้ความร้อนแก่ตัวอย่างสารผสมของแป้งกับน้ำในอัตรา 30/70 จนถึงอุณหภูมิที่คาดว่าเลยช่วงในการเกิดเจลลาทีไนซ์จะได้ thermogram ซึ่งเป็นกราฟระหว่าง heat flow และอุณหภูมิ พลังงานที่ใช้ในการเกิดเจลลาทีไนซ์ (enthalpy ΔH , J/g) ได้จากพื้นที่ใต้กราฟหารด้วยน้ำหนักแป้งตัวอย่าง

วิธีการ

1. เตรียมตัวอย่างแป้งที่ทราบค่าความชื้นแน่นอน โดยทำเป็นสารละลายให้มีความเข้มข้น 30 % (w/w โดยน้ำหนักแห้ง) ด้วยน้ำกลั่น
2. คัดสารละลายแป้งโดยคำนวณให้มีปริมาณแป้ง 3.5- 4.0 มิลลิกรัม (โดยน้ำหนักแห้ง) ใส่ในภาชนะ (pan) ของเครื่อง DSC (0219-0062) บ่มไว้นานกว่า 1 ชั่วโมง
3. นำภาชนะ (pan) ใส่ในช่อง sample ของเครื่อง DSC – 7 (Perkin- Elmer) และวาง reference pan โดยใส่ profile อุณหภูมิ 25 – 90 องศาเซลเซียส ที่อัตรา 10 องศาเซลเซียส/นาที โดยใช้ indium ในการ calibrate
4. คำนวณค่าทางเทอร์โมไดนามิกส์ โดยใช้ระบบ autocalculation และบันทึกค่าต่างๆที่เกี่ยวข้องกับการเกิดเจลลาทีไนซ์ ได้แก่

อุณหภูมิเริ่มต้นในการเกิดเจลลาทีไนซ์ (onset temperature, T_o , องศาเซลเซียส)

อุณหภูมิสูงสุดในการเกิดเจลลาทีไนซ์ (peak temperature, T_p , องศาเซลเซียส)

อุณหภูมิสุดท้ายในการเกิดเจลลาทีไนซ์ (conclusion temperature, T_c , องศาเซลเซียส)

พลังงานที่เปลี่ยนแปลงระหว่างเกิดเจลลาทีไนซ์ (enthalpy, ΔH , J/g)

วิธีการวิเคราะห์การย่อยได้ของแป้ง (Gibson *et al.*, 1993)

อุปกรณ์

1. หลอดทดลองขนาด 160 x 100 mm หรือ มีความจุ 12 มิลลิลิตร
2. ไมโครปิเปต (micro-pipetter) 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. thermosttted water bath
9. นาฬิกาจับเวลา

สารเคมีที่ใช้ และการเตรียม

1. อะไมเลส (α - amylase) ความเข้มข้น 10 มิลลิลิตร หรือ 1000 U ต่อ มิลลิลิตร ในแอมโมเนียมซัลเฟต (ammonium sulphate) 3.2 โมลาร์ ทำการเจือจางโดยใช้เอนไซม์ 20 มิลลิลิตร กับ 100 มิลลิโมลาร์ โซเดียมอะซิเตทบัฟเฟอร์ (sodium acetate buffer) เขย่าให้เข้ากันเก็บไว้ในที่เย็น
2. เอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดส (amylglucosidase) ความเข้มข้น 4 มิลลิลิตรหรือ 200 U ต่อ มิลลิลิตร ในแอมโมเนียมซัลเฟต 3.2 โมลาร์ เจือจางโดยใช้เอนไซม์ 10 มิลลิลิตร ในโซเดียมอะซิเตทบัฟเฟอร์ 100 มิลลิลิตรเก็บไว้ในที่เย็นระหว่างการใส่
3. กลูโคสดีเทอร์มินันซ์ รีเอเจนท์ (glucose determination reagent) (1 ลิตร) เก็บที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส ความเข้มข้นของสารหลังจากแตกตัว
 กลูโคสออกซิเดส (glucose oxidase) > 12,000 U ต่อลิตร

เปอร์ออกซิเดส (peroxidase) > 650 U ต่อลิตร

อะมิโนแอนติไพรีน (4- aminoantipyrine) 0.4 มิลลิโมลาร์

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 กลูโคสดีเทอร์มินันซ์ 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

6. แป้งข้าวสาลี (wheat flour standard)

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

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

7.2 แคลเซียมคลอไรด์ ในรูปที่ปราศจากน้ำ 0.74 กรัม เติมลงในสารละลาย คนให้ละลาย ปรับให้ได้ปริมาตร 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. อุ่นสารละลายแอลฟาอะไมเลส (50 Uต่อมิลลิลิตร) ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส (5-10 นาที) ในบีกเกอร์ขนาดเล็ก
3. เติมสารละลายแอลฟาอะไมเลสที่อุ่นแล้วในหลอด centrifuge 1.0 มิลลิลิตร ทุกหลอด หลังจากนั้นคนสารละลายกับแป้งให้เข้ากันและนำไปผสมโดยใช้เครื่อง vortex mixer เป็นเวลา 5 วินาที และอุ่นที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที (เริ่มจับเวลาตั้งแต่ใส่เอนไซม์แอลฟาอะไมเลส)
4. เติมกรดซัลฟูริกเจือจาง 8 มิลลิลิตร และนำไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ 3,000 rpm เป็นเวลา 5 นาที หรือนำไปกรอง
5. ดูดสารละลายส่วนใสปริมาตร 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 (รวมทั้งในหลอดกลูโคสสแตนดาร์ด และหลอดรีเอเจนท์ blank) และนำไปอุ่นที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที
8. นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 510 นาโนเมตร

ขั้นตอนการคำนวณ

สมการที่ใช้ในการคำนวณดังนี้

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

เมื่อ ΔE = ผลต่างระหว่างค่าการดูดกลืนแสงของตัวอย่าง และรีเอเจนต์ blank

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

ค่าการดูดกลืนแสง 150 นาโนกรัมของกลูโคส

90 = ปรับปริมาตร (0.1 มิลลิกรัม มาจาก 9.0 มิลลิกรัม)

1/1000 = เปลี่ยนหน่วยจากไมโครกรัม เป็นมิลลิกรัม

100/W = เปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักแป้ง

W = น้ำหนักเป็นมิลลิกรัมของแป้งที่ทำการทดสอบ

162/180 = การปรับจากกลูโคสอิสระให้มาอยู่ในรูปไฮโดรไรด์กลูโคส

การวิเคราะห์ TBA value (Pearson, 1976)

การทดสอบการหืนในอาหารสัตว์ โดยวิธี TBA test นี้ใช้วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 538 nm ของสารสีแดงที่เกิดจากปฏิกิริยาของ 2-Thiobarbituric acid กับสารที่เกิดจากการออกซิเดชันของกรดไขมันในอาหารได้แก่ Malonaldehyde โดยสารสีแดงนี้เกิดจาก 2-Thiobarbituric acid 2 โมเลกุลรวมตัวกับ Malonaldehyde 1 โมเลกุล

การเตรียมสารเคมี

1. TBA solution : ทำการละลายกรดไทโอบาร์บิทริก 2.883 กรัม ในสารละลายกรดอะซิติกเข้มข้นร้อยละ 90 โดยอุ่นเบาๆ แล้วปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร โดยใช้น้ำกลั่น

2. HCl 4 โมลาร์ (HCl เข้มข้น 37 % จำนวน 333.33 มิลลิลิตร แล้วปรับปริมาตรเป็น 1 ลิตร โดยใช้น้ำกลั่น)

วิธีการ

1. ชั่งตัวอย่างอาหาร 5 กรัม ปั่นกับน้ำกลั่น 25 มิลลิลิตร แล้วเทใส่ขวดสำหรับกลั่น
ล้างเครื่องปั่นด้วยน้ำกลั่น 23.75 มิลลิลิตร
2. เติม HCl 4 โมลาร์ จำนวน 1.25 มิลลิลิตร แล้วเติม anti-foaming 1-2 หยด ต่อเข้ากับชุดเครื่องกลั่น
3. กลั่นจนได้ของเหลว 50 มิลลิลิตร
4. ปิเปตของเหลว 5 มิลลิลิตร ใส่ในหลอดทดลองมีฝาปิด เติม TBA solution จำนวน 5 มิลลิลิตร ปิดฝาแล้วเขย่า คัมในน้ำเคือดนาน 35 นาที
5. หลังจากนั้น ทำให้เย็นทันทีภายใน 10 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 538 นาโนเมตร
6. พร้อมกันนั้นเตรียม Blank ด้วย โดยการใช้ น้ำกลั่น 5 มิลลิลิตรแทนตัวอย่างอาหาร

การคำนวณ

$$TBA = 7.8 \times O.D.$$

เมื่อ O.D. = ค่าการดูดกลืนแสง

ค่า TBA มีหน่วยเป็น มิลลิกรัมของ malonaldehyde ต่อกรัมของตัวอย่าง

การวิเคราะห์ปริมาณโครมิกซ์ออกไซด์ในอาหารและในมูล (Bolin *et al.*; 1952)

อุปกรณ์

1. เตาหย่อย (kjeldahl apparatus)
2. เฉากัฟลาสก์ (kjeldahl flask) ขนาด 500 มิลลิลิตร

3. ขวดวัดปริมาตร (volumetric flask) ขนาด 100 และ 1000 มิลลิลิตร
4. กรวยกรอง (funnel)
5. กระดาษกรอง (filter paper) เบอร์ 40
6. เครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง (spectrophotometer)

การเตรียมสารเคมี

1. สารละลายออกซิไดซิงรีเอเจนซ์ (oxidizing reagent)

เตรียมโดย ชั่งโซเดียมโมลิบเดต (sodium molybdate) 11.75 กรัม ใส่ลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 1,000 มิลลิลิตร เติมน้ำกลั่น 150 มิลลิลิตร นำไปวางลงในอ่างน้ำเย็นหลังจากนั้นค่อยๆ เติมกรดซัลฟูริก (H_2SO_4) เข้มข้น 96 เปอร์เซ็นต์จำนวน 150 มิลลิลิตร โดยแบ่งเติม 3 ครั้งๆ ละ 50 มิลลิลิตร (พัก 5–10 นาที เพื่อให้สารละลายเย็นลงแล้วจึงค่อยเติมครั้งต่อไป) โดยค่อยๆ เทให้ไหลลงตามขอบของขวดวัดปริมาตร หลังจากนั้นเติมกรดเปอร์คลอริก (HClO_4) เข้มข้น 70–72 เปอร์เซ็นต์ จำนวน 200 มิลลิลิตร แบ่งเติมครั้งละ 50 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นก่อนนำไปใช้

2. กรดเปอร์คลอริกเข้มข้น 70–72 เปอร์เซ็นต์

ขั้นตอนการวิเคราะห์

1. ชั่งตัวอย่างใส่เจตาห์ฟลาสขนาด 500 มิลลิลิตร โดยถ้าเป็นตัวอย่างอาหารใช้ 1.5 กรัม ส่วนถ้าเป็นตัวอย่างมูลใช้ 0.5 กรัม
2. เติมออกซิไดซิงรีเอเจนซ์ 12 มิลลิลิตร
3. นำไปย่อยบนเตาย่อยด้วยไฟปานกลาง จนเปลี่ยนเป็นสารละลายสีเหลืองหรือสีส้มและมีไอน้ำเกาะบริเวณผิวด้านในของหลอด ทิ้งไว้สักครู่นำออกมาใส่ช่องดูดควัน ทิ้งไว้ให้เย็น
4. เติมกรดเปอร์คลอริก 3 มิลลิลิตร แล้วนำไปย่อยอีกครั้งจนเกิดไอน้ำบริเวณผิวด้านในของหลอด ทิ้งไว้สักครู่นำออกมาใส่ช่องดูดควัน ทิ้งไว้ให้เย็น

5. นำสารละลายที่ได้ไปปรับปริมาตร โดยเทสารละลายที่ได้จากการย่อยลงในขวดวัดปริมาตรขนาด 100 มิลลิลิตร นิดล้างด้วยน้ำกลั่น 3 – 4 ครั้ง ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่น แล้วทิ้งไว้ให้เย็น

6. กรองสารละลายที่ปรับปริมาตรแล้วด้วยกระดาษกรองเบอร์ 40

7. นำสารละลายที่กรองแล้วไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 440 นาโนเมตร เปรียบเทียบกับ Blank (ทำทุกขั้นตอนเช่นเดียวกับการทำตัวอย่าง แต่ไม่ได้ใส่ตัวอย่าง) โดยปรับค่าการดูดกลืนแสงของ Blank ให้เป็นศูนย์ด้วยการ set auto zero

การคำนวณ

นำค่าการดูดกลืนแสงมาคำนวณหาปริมาณโครมิกซ์ออกไซด์ในตัวอย่างอาหารและมูลโดยใช้สมการ

$$\text{ปริมาณโครมิกซ์ออกไซด์} = \frac{A \times EF \times \text{mlAl} \times 1000}{1000 \times W}$$

เมื่อ A = ค่าการดูดกลืนแสง

mlAl = ปริมาตรของสารละลายที่ได้หลังจากขั้นตอนการปรับปริมาตร

W = น้ำหนักตัวอย่างที่ใช้ย่อย

EF = ค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นของโครมิกซ์ออกไซด์ระดับต่างๆ¹
ค่าการดูดกลืนแสง

หมายเหตุ : ¹ได้จากการทำ standard curve

ค่า EF โดยปกติมีค่า 389 – 400 มิลลิกรัมต่อลิตร

การคำนวณค่าพลังงานการใช้ประโยชน์ในไก่ (Scott *et al.*, 1982)

เนื่องจากในไก่นั้นมีการขับถ่ายมูลและปัสสาวะออกมารวมกัน ดังนั้นจึงมีการปรับให้ปริมาณไนโตรเจน (N) กักเก็บในร่างกาย (nitrogen retention) มีค่าเป็นศูนย์ โดยการเพิ่มพลังงานของสิ่งขับถ่าย (excreta) ด้วยจำนวนของกรดยูริก (uric acid) ซึ่ง กรดยูริกไนโตรเจน (uric acid nitrogen) 1 กรัม มีค่าพลังงานเท่ากับ 8.22 กิโลแคลอรี ดังนั้นสมการที่ใช้ในการคำนวณค่าพลังงานการใช้ประโยชน์ (ME) ในสูตรอาหารมีดังนี้

$$\text{พลังงานการใช้ประโยชน์ (Kcal/gm diet)} = \text{พลังงานในอาหาร} - (\text{พลังงานในมูล} + 8.22 \times \text{ปริมาณของ N ที่ย่อยได้})$$

$$\text{เมื่อ} \quad \text{พลังงานในมูล (Kcal/gm diet)} = \text{พลังงานในมูล} \times \frac{\text{Cr}_2\text{O}_3 \text{ ในอาหาร}}{\text{Cr}_2\text{O}_3 \text{ ในมูล}}$$

$$\text{ปริมาณของ N ที่ย่อยได้} = \text{N ในอาหาร} - \text{N ในมูล} \times \frac{\text{Cr}_2\text{O}_3 \text{ ในอาหาร}}{\text{Cr}_2\text{O}_3 \text{ ในมูล}}$$

แล้วนำค่าที่ได้มาคำนวณหาพลังงานการใช้ประโยชน์ในวัตถุดิบ โดยคิดเป็นสัดส่วนในการทดแทนกลูโคส ดังสมการ

$$\text{ME ในวัตถุดิบ} = \frac{3.64 - (\text{ME ในสูตรอาหารควบคุม}) - (\text{ME ในสูตรอาหารวัตถุดิบที่ศึกษา})}{\text{สัดส่วนของวัตถุดิบที่ทดแทนในสูตรอาหารควบคุม}}$$

สัดส่วนของวัตถุดิบที่ทดแทนในสูตรอาหารควบคุม

$$\text{เมื่อ} \quad \text{ค่าพลังงานการใช้ประโยชน์ของกลูโคส 1 กรัม ในสภาพแห้ง} = 3.64$$

การคำนวณค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้ในสุกร (Adeola, 2001)

การคำนวณค่าพลังงานในสูตรอาหารสุกรหาได้จากสมการดังนี้

พลังงานการใช้ประโยชน์ (Kcal/gm diet)

$$= \text{พลังงานในอาหาร} - (\text{พลังงานในมูล} + \text{พลังงานในปัสสาวะ})$$

ในการหาค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้ในวัตถุดิบนั้นสามารถหาได้จาก การคำนวณค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้โดยการนำวัตถุดิบที่ต้องการทดสอบไปทดแทนในอาหารสูตรพื้นฐาน โดยคิดเป็นสัดส่วนในการทดแทนอาหารสูตรพื้นฐาน ดังสมการ

$$\text{ME ในวัตถุดิบ} = 100 \times [(T \times t) - (B \times b)] / a$$

เมื่อ

T = ME ในสูตรอาหารวัตถุดิบที่ศึกษา

t = ปริมาณของอาหารทดสอบที่ใช้

B = ME ในสูตรอาหารควบคุม

b = ปริมาณของอาหารสูตรพื้นฐานที่ใช้

a = สัดส่วนการทดแทนวัตถุดิบที่ทดสอบในสูตรอาหารควบคุม

$$(t = b + a)$$

การคำนวณค่าสมรรถภาพการผลิต

สมการที่ใช้ในการคำนวณค่าพารามิเตอร์สมรรถภาพการผลิต มีดังนี้

$$\text{อัตราการเจริญเติบโต (ADG)} = \frac{\text{น้ำหนักตัวที่เพิ่ม}}{\text{จำนวนวันที่เลี้ยง} \times \text{จำนวนสุกรที่เลี้ยง}}$$

$$\text{ประสิทธิภาพการใช้อาหาร (FCR)} = \frac{\text{น้ำหนักอาหารที่กิน}}{\text{น้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น}}$$

$$\text{อัตราการตาย (\%)} = \frac{\text{จำนวนสุกรที่ตาย} \times 100}{\text{จำนวนสุกรทั้งหมด}}$$

$$\text{ราคาอาหาร (บาท)} = \text{ปริมาณอาหารที่กิน (กก.)} \times \text{ราคาอาหาร (บาท/กก.)}$$

$$\begin{aligned} \text{ต้นทุนค่าอาหารในการเพิ่มน้ำหนัก} &= \frac{\text{ราคาอาหารทั้งหมดในแต่ละคอก}}{\text{น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นเฉลี่ยของสุกรในแต่ละคอก}} \\ &(\text{บาท/กิโลกรัม}) \end{aligned}$$

ภาคผนวก ข

ค่าอนุภูมิสภาพแวดล้อมในการทดลอง

ตารางผนวกที่ ข 1 อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ตลอดระยะเวลาในการศึกษาระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อองค์ประกอบทางเคมี และการหืนในข้าวโพดและข้าวโพดเอกซ์ทราด¹

ระยะเวลา (วันที่)	อุณหภูมิ (°C)			ความชื้นสัมพัทธ์ (%)		
	เช้า	บ่าย	เฉลี่ย	เช้า	บ่าย	เฉลี่ย
1	19.71	32.71	26.21	79.14	57.43	68.29
2	20.43	30.57	25.50	78.00	59.71	68.86
3	22.43	30.14	26.29	76.71	57.71	67.21
4	23.71	32.71	28.21	82.14	68.00	75.07
5	23.86	32.43	28.14	84.71	63.57	74.14
6	24.86	31.86	28.36	72.71	58.57	65.64
7	22.14	30.71	26.43	79.00	74.57	76.79
8	28.86	34.14	31.50	67.86	65.29	66.57

¹ ในการทดลองที่ 2

ตารางผนวกที่ ข2 อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ตลอดระยะเวลาในการศึกษาค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้ของข้าวโพดและข้าวโพดเอกซ์ทрудในสุกกระยะอนุบาล¹

ระยะเวลา (สัปดาห์ที่)	อุณหภูมิ (°C)			ความชื้นสัมพัทธ์ (%)		
	เช้า	บ่าย	เฉลี่ย	เช้า	บ่าย	เฉลี่ย
1	19.00	29.00	24.00	79.00	54.00	66.50
2	21.00	30.00	25.50	89.00	55.00	72.00
3	20.00	32.00	26.00	79.00	56.00	67.50
4	24.00	35.00	29.50	72.00	58.00	65.00
5	25.00	35.00	30.00	75.00	58.00	65.50

¹ ในการทดลองที่ 3

ตารางผนวกที่ ข3 อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ตลอดระยะเวลาในการศึกษาผลของข้าวโพดและข้าวโพดเอกซ์ทрудต่อสมรรถภาพการผลิตสุกรในระยะอนุบาล¹

ระยะเวลา (สัปดาห์ที่)	อุณหภูมิ (°C)			ความชื้นสัมพัทธ์ (%)		
	เช้า	บ่าย	เฉลี่ย	เช้า	บ่าย	เฉลี่ย
1	20.14	30.00	25.07	77.86	58.43	68.14
2	22.29	32.71	27.50	79.43	58.43	68.93
3	23.57	33.71	28.64	90.00	58.00	74.00
4	24.86	34.71	29.79	82.57	57.71	70.14
5	25.29	34.71	30.00	75.86	58.86	67.36

¹ ในการทดลองที่ 3

ตารางผนวกที่ ข4 อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ตลอดระยะเวลาในการศึกษาค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้ของข้าวโพดและข้าวโพดเอกซ์ทราดในไก่กระทาง¹

ระยะเวลา (วันที่)	อุณหภูมิ (°C)			ความชื้นสัมพัทธ์ (%)		
	เช้า	บ่าย	เฉลี่ย	เช้า	บ่าย	เฉลี่ย
1	29.00	33.00	31.00	83.00	83.00	83.00
2	30.00	29.00	29.50	83.00	83.00	83.00
3	30.00	29.00	29.50	75.00	83.00	79.00
4	29.00	29.00	29.00	83.00	83.00	83.00
5	27.00	35.00	31.00	82.00	69.00	75.50
6	30.00	30.00	30.00	75.00	83.00	79.00
7	29.00	32.00	30.50	75.00	76.00	75.50

¹ ในการทดลองที่ 4

ตารางผนวกที่ ข5 อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ตลอดระยะเวลาในการศึกษาผลของข้าวโพดและข้าวโพดเอกซ์ทรัคในลักษณะอาหารผงและอาหารอัดเม็ดต่อสมรรถภาพการผลิตไก่กระทอง¹

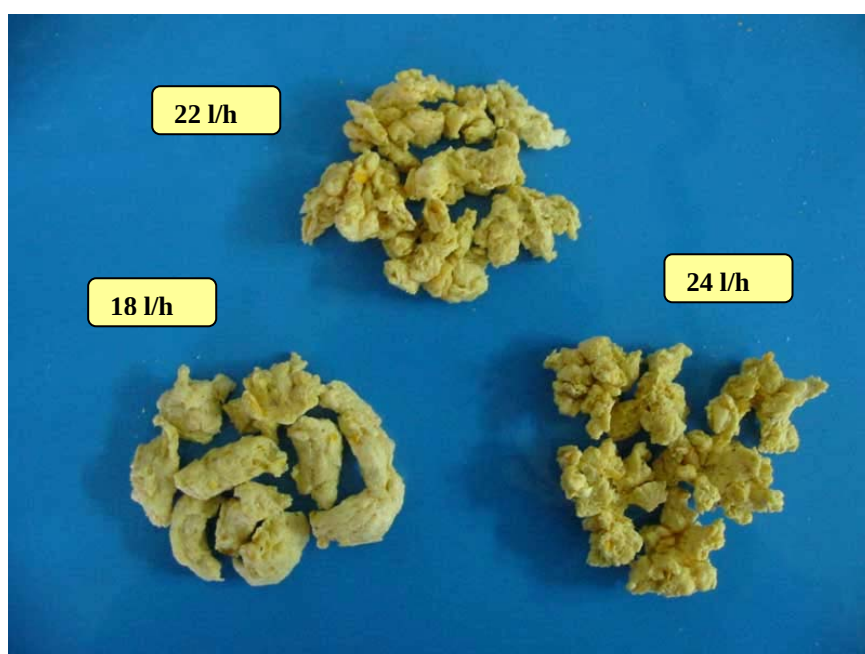
ระยะเวลา (สัปดาห์ที่)	อุณหภูมิ (°C)			ความชื้นสัมพัทธ์ (%)		
	เช้า	บ่าย	เฉลี่ย	เช้า	บ่าย	เฉลี่ย
1	31.57	35.29	33.43	66.00	63.14	64.57
2	31.29	34.43	32.86	65.57	65.29	65.43
3	30.57	32.86	31.71	66.43	66.86	66.64
4	29.43	31.14	30.29	68.00	66.71	67.36
5	29.43	30.57	30.00	64.57	64.57	64.57
6	29.57	29.86	29.71	63.00	64.00	63.50
7	28.29	29.57	28.93	74.29	75.86	75.07

¹ ในการทดลองที่ 4

ภาคผนวก ค
ข่าวโพดเอกซ์ทรุด



ภาพผนวกที่ ค1 ข้าวโพดทั้งเมล็ดที่ผ่านกระบวนการเอกซ்தรูล์ชั้น ณ อัตราการไหลของน้ำเข้าเครื่อง
ที่ 16, 19 และ 22 ลิตร/ชั่วโมง



ภาพผนวกที่ ค2 ข้าวโพดบดหยาบที่ผ่านกระบวนการเอกซ்தรูล์ชั้น ณ อัตราการไหลของน้ำเข้า
เครื่องที่ 18, 22 และ 24 ลิตร/ชั่วโมง

Broken rice



Ground corn



Extruded corn



ภาพผนวกที่ ค4 รังอาหารของลูกสุกรที่ใช้อาหารสูตรปลายข้าว, ข้าวโพด และข้าวโพดเอกซ์ทรูด

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล	นางสาวสายชล เลิศสุวรรณ
วัน เดือน ปี ที่เกิด	1 พฤศจิกายน 2517
สถานที่เกิด	จังหวัดพะเยา
ประวัติการศึกษา	วท.บ. (สัตวศาสตร์) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า คุณทหารลาดกระบัง วท.ม. (สัตวศาสตร์) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้า คุณทหารลาดกระบัง
ตำแหน่งหน้าที่การงานปัจจุบัน	อาจารย์
สถานที่ทำงานปัจจุบัน	สาขาสัตวศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณ ทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพร ต.ชุมโค อ.ปะทิว จ. ชุมพร 86160
ทุนการศึกษาที่ได้รับ	ทุนโครงการพัฒนาอาจารย์ วิทยาเขตสารสนเทศ (ทุนโท-เอก)