

วิทยานิพนธ์

เรื่อง

ผลของชนิดเครื่องบดและขนาดของอนุภาคข้าวโพดต่อลักษณะทางกายภาพและเคมีของอาหารผง
คุณภาพไข่ และสมรรถภาพการผลิตของไก่ไข่ เลี้ยงดูภายใต้สภาวะการเลี้ยงแบบหนาแน่น

Effect of Mill Types and Corn Particle Sizes on Physical and Chemical Properties of Mash Feed,
Egg Quality and Laying Performances under High Stock Density Condition

โดย

นางสาวชลพร มารคทรัพย์

เสนอ

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เพื่อความสมบูรณ์แห่งปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (โภชนศาสตร์และเทคโนโลยีอาหารสัตว์)

พ.ศ. 2551

ชลาพร มารคทรัพย์ 2551: ผลของชนิดเครื่องบดและขนาดของอนุภาคข้าวโพดต่อลักษณะทาง
กายภาพและเคมีของอาหารผง คุณภาพไข่ และสมรรถภาพการผลิตของไก่ไข่ เลี้ยงดูภายใต้สภาพการ
เลี้ยงแบบหนาแน่น ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (โภชนศาสตร์และเทคโนโลยีอาหารสัตว์) สาขา
โภชนศาสตร์และเทคโนโลยีอาหารสัตว์ ภาควิชาสัตวบาล อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก:
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ยุวเรศ เรืองพานิช, Ph.D. 99 หน้า

การศึกษาผลของชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาคข้าวโพดที่ต่างกัน ต่อลักษณะทางกายภาพของ
อาหารผง คุณภาพไข่ และสมรรถภาพการผลิตของไก่ไข่ภายใต้สภาพการเลี้ยงแบบหนาแน่น การศึกษาแบ่งออกเป็น
2 การทดลอง การทดลองที่ 1 ศึกษาผลของชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาคข้าวโพด ต่อลักษณะทางกายภาพของ
ข้าวโพดและอาหารผง แบ่งกลุ่มการทดลองออกเป็น ข้าวโพดบดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ ขนาด 1,000 ไมครอน
(กลุ่มที่ 1) 1,300 ไมครอน (กลุ่มที่ 2) ข้าวโพดบดด้วยเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์ ขนาด 1,000 ไมครอน (กลุ่มที่ 3) 1,300
ไมครอน (กลุ่มที่ 4) จากการทดลองพบว่าข้าวโพดบดมีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกับที่กำหนดไว้ โดยข้าวโพดที่บดด้วย
เครื่องบดโรลเลอร์มิลล์มีความสม่ำเสมอของอนุภาค (Sgw), จำนวนอนุภาค ($P < 0.01$) ความหนาแน่นและพื้นที่ผิวของ
ข้าวโพดบด แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวโพดที่บดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์
ด้านลักษณะทางกายภาพของอาหารผงมีผลสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของข้าวโพดบด การทดลองที่ 2 ใช้ไก่
ไข่พันธุ์ โรม่าบราวน์ อายุ 43 สัปดาห์ จำนวน 480 ตัว แบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม กลุ่มละ 5 ซ้ำ ซ้ำละ 6 กรง กรงละ 4 ตัว
รวมซ้ำละ 24 ตัว ทำการเก็บข้อมูล 5 ระยะ ระยะละ 28 วัน ใช้แผนการทดลองแฟคทอเรียลแบบสุ่มสมบูรณ์ ไก่ไข่
ได้รับอาหารแบบสุ่ม โดยมีกลุ่มการทดลองตามการทดลองที่ 1 จากการทดลองพบว่ามีอิทธิพลร่วมของทั้ง 2 ปัจจัย
ต่อคะแนนสีไข่แดง ความแปรปรวนของสีไข่แดง และความแปรปรวนของน้ำหนักไข่ โดยไก่ไข่กลุ่มที่ 1 มีความ
แปรปรวนของสีไข่แดงและความแปรปรวนของน้ำหนักไข่สูงที่สุด ไก่ไข่กลุ่มที่ 4 มีค่าคะแนนสีไข่แดงสูงที่สุดและไก่
ไข่กลุ่มที่ 1 มีสัดส่วนน้ำหนักไข่แดงสูงที่สุด โดยพบว่าไก่ไข่ที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดบดด้วยเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์มี
อัตราการเลี้ยงรอดของแม่ไก่และน้ำหนักไข่และสัดส่วนเกรดไข่เบอร์ 0 สูงกว่าไก่ไข่ที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดบดด้วย
เครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ ($P < 0.05$) ในขณะที่ไก่ไข่ที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดบดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์มีความหนาเปลือก
ไข่และสัดส่วนน้ำหนักเปลือกไข่ที่สูงกว่าไก่ไข่ที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดบดด้วยเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์ ($P < 0.05$)
ไก่ไข่ที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดบดขนาดอนุภาค 1,300 ไมครอน มีปริมาณอาหารที่กินต่อตัวต่อวัน ($P < 0.05$) ความ
สูงไข่ขาว ความหนืดของไข่ขาว และฮอฟยูนิต ($P < 0.01$) สูงกว่าไก่ไข่ที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดบดขนาด 1,000
ไมครอน และไม่พบอิทธิพลร่วมและอิทธิพลหลักของชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาคข้าวโพดต่อค่าสัมประสิทธิ์
ความแปรปรวนของเกรดไข่ สัดส่วนน้ำหนักไข่แดง สัดส่วนน้ำหนักเปลือกไข่ ความถ่วงจำเพาะ ความหนาเปลือกไข่
สัดส่วนน้ำหนักไข่ขาว ความสูงไข่ขาว ฮอฟยูนิตและความหนืดไข่ขาว เมื่อพิจารณาถึงสมรรถภาพการผลิตของแม่ไก่
และคุณภาพไข่ประกอบกัน การใช้อาหารที่ใช้ข้าวโพดบดด้วยเครื่องบดชนิดโรลเลอร์มิลล์ ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1,300
ไมครอน มีความเหมาะสมมากที่สุดในการประกอบสูตรอาหารไก่ไข่ ในสภาพการเลี้ยงแบบหนาแน่น

Chalaporn Marksup 2008: Effect of Mill Types and Corn Particle Sizes on Physical and Chemical Properties of Mash Feed, Egg Quality and Laying Performances under High Stock Density Condition. Master of Science (Animal Nutrition and Feed Technology), Major Field: Animal Nutrition and Feed Technology, Department of Animal Science. Thesis Advisor: Assistant Professor Yuwares Ruangpanit, Ph.D. 99 pages.

The objectives of this study were to determine the effect of mill types and corn particle sizes ground with hammer mill and roller mill in mash feed on physical properties of mash feed, egg quality and laying performances under high stock density condition. The dietary treatments were complete feed containing corn ground with hammer mill to have particle size 1,000 micron (T1), 1,300 micron (T2) and complete feed containing corn ground with roller mill to have particle size 1,000 micron (T3), 1,300 micron (T4). Experimental 1, study for effect of mill types and corn particle sizes on corn and feed physical properties The results indicated that the particle sizes of ground corn in treatments were similar to that in the experimental designed. Corn ground with roller mill had significantly S_{gw} and number of particle size ($P<0.01$) bulk density and surface area significant ($P<0.05$) when compare with corn ground with hammer mill. The physical properties of complete feed were similar to that in the ground corn. Experimental 2, study for effect of mill types and corn particle sizes on egg quality and laying performances. Four hundred and eighty Rohmannbrown laying hens, approximately 43 weeks of age, were divided into 4 dietary treatments. Each treatment consisted of five replications with twenty-four laying hens per replication. The 2x2 Factorial Experiment in completely randomized design were use in the experiment. The results indicated that experimental have interaction of mill types and corn particle sizes on yolk color score and coefficient of variance of yolk color score and coefficient of variance of egg weight. Hens in group 1 had coefficient of variance of egg weight, coefficient of variance of yolk color score and % egg yolk higher than the other group. Hens in group 4 had the highest yolk color score. Hens fed complete feed containing corn ground with roller mill had significant higher survival rate egg weight and %egg grades number 0 than that of the hens fed complete feed containing corn ground with hammer mill ($P<0.05$). However, hens fed complete feed containing corn ground with hammer mill had significant higher shell thickness and % egg shell than that of the hens fed complete feed containing corn ground with roller mill ($P<0.05$). Hens fed complete feed containing ground corn with 1,300 micron had feed/hen/day ($P<0.05$) albumin high, haugh unit ($P<0.01$) higher than that the hens fed complete feed containing 1,000 micron of corn particle size. The results indicated that experimental havn't interaction of mill types and corn particle sizes on coefficient of variance of egg grades, % yolk weight, % shell weight, specific gravity, egg shell thickness, % albumin weight, albumin high, haugh unit and albumin viscosity. Results from the present indicated that corn ground with roller mill obtained average particle size of 1,300 micron optimized the high efficiency in laying hens diet under high stock density condition.

Student's signature

Thesis Advisor's signature

กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ยวเรศ เรืองพานิช อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสกสม อาคมมากร ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรประพันธ์ ส่งเสริม และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐชนก อมรเทวภัทร อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม ที่กรุณาให้คำปรึกษาด้านการศึกษาและให้คำแนะนำและข้อคิดต่างๆ ที่เป็นประโยชน์ในการทำวิทยานิพนธ์ และมีประโยชน์เป็นอย่างมากในการดำรงชีวิต และยังได้ช่วยเรียบเรียงและแก้ไขข้อบกพร่องต่างๆ ที่เกิดขึ้นซึ่งส่งผลให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณกรุงเทพมหานครอาหารสัตว์ พระประแดงในเครือบริษัท ป.เจริญพันธุ์ ที่ให้ความกรุณาในการเข้าศึกษาข้อมูลด้านประสิทธิภาพการบดข้าวโพด ตลอดจนเจ้าหน้าที่และพนักงานทุกท่านที่ให้ความรู้และอำนวยความสะดวกในการปฏิบัติงาน ขอขอบพระคุณศูนย์วิจัยและพัฒนาการผลิตสัตว์ปีก สถาบันสุวรรณวาทกสิกิจฯ ที่เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ในการเลี้ยงสัตว์ทดลอง และเจ้าหน้าที่ภายในศูนย์ที่ให้คำแนะนำและฝึกสอนทักษะต่างๆ ในการปฏิบัติงาน ขอขอบพระคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการอาหารสัตว์ ภาควิชาสัตวบาล คณะเกษตร กำแพงแสน ที่ให้คำปรึกษาแนะนำ และเอื้อเฟื้อสถานที่ในการวิเคราะห์อาหารสัตว์ ขอขอบคุณเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการภาควิชาเทคโนโลยีกระบวนการทางเคมีและฟิสิกส์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน ที่ให้คำปรึกษาแนะนำเอื้อเฟื้อสถานที่ในการวิเคราะห์ขนาดอนุภาคอาหาร ตลอดจนเจ้าหน้าที่ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์อาหาร ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน ที่กรุณาให้คำปรึกษาและเอื้อเฟื้อสถานที่ในการวิเคราะห์คุณภาพไข่ขาว

ขอกราบขอบพระคุณพ่อสรวุฒิ คุณแม่อุษา และญาติพี่น้องทุกท่านที่เป็นผู้ให้กำลังใจในการปฏิบัติงาน และเป็นผู้อบรมสั่งสอนให้ข้าพเจ้ามีความรู้ มีระเบียบวินัย มีคุณธรรมจริยธรรม มีจรรยาบรรณ มีความคิดที่ดี และเป็นคนดีต่อสังคม รวมถึงเพื่อนๆ พี่ๆ และน้องๆ นิสิตปริญญาโททุกคนที่คอยเป็นกำลังใจ และให้ความช่วยเหลือในด้านต่างๆ เป็นอย่างดี เป็นกำลังใจสำคัญในการปฏิบัติงาน จากความตั้งใจและความพยายามในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ข้าพเจ้าขอบแต่บิดา มารดา ที่ข้าพเจ้าเคารพรักเป็นอย่างยิ่ง อีกทั้งจะพยายามรักษาคุณงามความดี ความเพียรพยายาม เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาคุณภาพของผลงานต่อไป

ชลพร มารคทรัพย์

กันยายน 2551

สารบัญ

หน้า

สารบัญ	(1)
สารบัญตาราง	(2)
สารบัญภาพ	(4)
คำนำ	1
วัตถุประสงค์	3
การตรวจเอกสาร	4
อุปกรณ์และวิธีการ	26
อุปกรณ์	26
วิธีการ	27
ผลและวิจารณ์	40
สรุปและข้อเสนอแนะ	70
สรุป	70
ข้อเสนอแนะ	72
เอกสารและสิ่งอ้างอิง	73
ภาคผนวก	80
ประวัติการศึกษา และการทำงาน	99

สารบัญตาราง

ตารางที่		หน้า
1	ส่วนประกอบทางโภชนาการของข้าวโพด	5
2	ผลของการบดข้าวโพดด้วยเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์และเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ ต่อสมรรถภาพการบด	21
3	ผลของขนาดอนุภาคต่อสมรรถภาพการผลิตและน้ำหนักเครื่องในของไก่เนื้อที่อายุ 7-21 วัน	22
4	ผลของขนาดอนุภาคของข้าวโพดในอาหารผงดต่อลักษณะกายภาพทางเดินอาหารไก่ เนื้อที่อายุ 42 วัน	23
5	ผลของขนาดอนุภาคของข้าวโพดในอาหารผงดต่อจำนวนความกว้างและความลึก ของวิลโลจากส่วนไอลีียมของลำไส้ของไก่เนื้อที่อายุ 42 วัน	23
6	ส่วนประกอบของวัตถุดิบอาหารที่ใช้ในอาหารทดลอง	31
7	ส่วนประกอบใน 1 กิโลกรัมของพรีมิกซ์ไวดามิน-แร่ธาตุ	32
8	ผลการวิเคราะห์หองค์ประกอบทางโภชนะของอาหารทดลอง	40
9	ผลของชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาคข้าวโพดต่อประสิทธิภาพการบดเฉลี่ย	43
10	ผลของชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาคข้าวโพดต่อประสิทธิภาพการบด ครั้งที่1	44
11	ผลของชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาคข้าวโพดต่อประสิทธิภาพการบด ครั้งที่2	44
12	ผลของชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาคข้าวโพดต่อประสิทธิภาพการบด ครั้งที่3	44
13	ผลของชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาคข้าวโพดต่อลักษณะทางกายภาพของ ข้าวโพดบด	47
14	ผลของชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาคข้าวโพดต่อลักษณะทางกายภาพของ อาหารผงด	49
15	ความแปรปรวนของโภชนะในอาหารทดลอง	51

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตารางที่		หน้า
16	ผลของชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาคของข้าวโพดบดในอาหารผงสำหรับไก่ไข่ต่อประสิทธิภาพการผลิตของแม่ไก่	54
17	ผลของชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาคของข้าวโพดบดในอาหารผงสำหรับไก่ไข่ ต่อดื้อน้ำหนักไข่และคะแนนสีไข่แดง	58
18	ผลของชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาคของข้าวโพดบดในอาหารผงสำหรับไก่ไข่ต่อสัดส่วนเกรดไข่และสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของเกรดไข่	60
19	ผลของชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาคของข้าวโพดบดในอาหารผงสำหรับไก่ไข่ต่อสัดส่วนองค์ประกอบภายในฟองไข่	63
20	ผลของชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาคของข้าวโพดบดในอาหารผงสำหรับไก่ไข่ต่อคุณภาพเปลือกไข่	66
21	ผลของชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาคของข้าวโพดบดในอาหารผงสำหรับไก่ไข่ต่อคุณภาพไข่ขาว	69
 ตารางผนวกที่		
1	อนุกรมสำหรับวิเคราะห์วัตถุดิบอาหารสัตว์และอาหารสัตว์	82
2	อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนตลอดการทดลอง	92

สารบัญภาพ

ภาพที่		หน้า
1	เครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ (hammer mill)	10
2	หัวค้อนของเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ที่ผ่านการใช้งานและเกิดการสึกหรอ	11
3	ตะแกรงบดแฮมเมอร์มิลล์	12
4	ระบบดูดอากาศที่ใช้กับเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์	13
5	เครื่องบดโรลเลอร์มิลล์ (Roller mill)	16
6	ผลของขนาดอนุภาคข้าวโพดต่อประสิทธิภาพการบด	20
ภาพผนวกที่		
1	เครื่องเขย่าวีเคราะห์ขนาดอนุภาคและชุดตะแกรงร่อน	81
2	ตัวอย่างการคำนวณขนาดอนุภาคโดยใช้โปรแกรม excel	84
3	เครื่องวัดความหนืดของเหลวชนิดแกนหมุน	85
4	ลักษณะทางกายภาพของข้าวโพดบดทรีตเมนต์ที่ 1	88
5	ลักษณะทางกายภาพของข้าวโพดบดทรีตเมนต์ที่ 2	89
6	ลักษณะทางกายภาพของข้าวโพดบดทรีตเมนต์ที่ 3	89
7	ลักษณะทางกายภาพของข้าวโพดบดทรีตเมนต์ที่ 4	90
8	อุณหภูมิภายในโรงเรือนระหว่างการทดลองในเวลาเช้าและเวลาบ่าย	98
9	ความชื้นสัมพัทธ์ในโรงเรือนระหว่างการทดลอง	98

คำอธิบายสัญลักษณ์และคำย่อ

D_{gw}	=	geometric mean diameter
S_{gw}	=	geometric standard deviation
N	=	number of particles per gram
A	=	surface area of particles

**ผลของชนิดเครื่องบดและขนาดของอนุภาคข้าวโพดต่อลักษณะทางกายภาพและเคมีของ
อาหารผง คุณภาพไข่ และสมรรถภาพการผลิตของไก่ไข่
เลี้ยงดูภายใต้สภาพการเลี้ยงแบบหนาแน่น**

**Effect of Mill Types and Corn Particle Sizes on Physical and Chemical Properties
of Mash Feed, Egg Quality and Laying Performances
under High Stock Density Condition**

คำนำ

ปัจจุบันไก่ไข่ได้รับการพัฒนาสายพันธุ์อย่างรวดเร็วโดยเฉพาะสายพันธุ์ที่ให้ผลผลิตไข่สูง ซึ่งเฉลี่ยสูงกว่า 85% ดังนั้นการผลิตอาหารไก่ไข่จึงต้องคำนึงถึงระดับโภชนา คุณภาพของอาหาร และควรให้ความสนใจในด้านกระบวนการผลิตอาหาร เพื่อให้อาหารที่ผลิตได้มีความเหมาะสม สามารถรองรับศักยภาพทางพันธุกรรม เพื่อให้ไก่ไข่สามารถให้ผลผลิตและคุณภาพไข่ที่ตรงกับความ ต้องการ ปัจจุบันอาหารไก่ไข่ส่วนใหญ่อยู่ในรูปผง ซึ่งมีข้าวโพดเป็นส่วนประกอบหลักประมาณ 50-60% ของส่วนผสมอาหารทั้งหมด ดังนั้นลักษณะทางกายภาพ ความสม่ำเสมอและอนุภาคของ ข้าวโพดในอาหารจึงเป็นสิ่งที่มีความสำคัญในการประกอบสูตรอาหาร เนื่องจากไก่ไข่มีพฤติกรรมที่ เลือกจิกกินอาหารที่มีขนาดอนุภาคขนาดใหญ่ (พันทิพา, 2539) โดยขนาดอนุภาคข้าวโพดที่เหมาะสม สำหรับไก่ไข่อยู่ในช่วง 700-1,000 ไมครอน (อุทัย, ม.ป.ป.) เนื่องจากสามารถกระตุ้นการจิกกินได้เป็น อย่างดี และส่งผลให้ไก่ไข่มีประสิทธิภาพการผลิตสูงที่สุด

อุตสาหกรรมการเลี้ยงไก่ไข่นิยมเลี้ยงในสภาวะหนาแน่น (4 ตัวต่อ 1 กรงคับ) ที่มีช่องเปิดให้ กินอาหารเพียง 3 ช่อง ทำให้ไก่ไข่ที่แข็งแรง และมีลำดับชั้นที่สูงกว่าเข้ากินอาหารได้ก่อน จึงสามารถ เลือกกินข้าวโพดที่มีขนาดใหญ่ก่อน ส่วนไก่ที่เข้ามากินภายหลังจึงได้กินเพียงกากถั่วเหลือง ไรตามิน หรือฟอสฟอรัส ที่มีขนาดเล็ก (ภาวิณี, 2549) ด้วยเหตุนี้เองทำให้แม่ไก่ได้รับโภชนาในอาหารไม่สม่ำเสมอ จึง เกิดความไม่สม่ำเสมอของผลผลิต โดยเฉพาะขนาดของฟองไข่ที่ได้จากแม่ไก่ภายในกรงเดียวกัน ซึ่ง ปัญหาดังกล่าวสามารถปรับปรุงแก้ไขได้โดยการบดวัตถุดิบอาหารสัตว์ให้มีขนาดอนุภาคสม่ำเสมอขึ้น สัตว์ปีกตอบสนองต่อลักษณะความน่ากินของอาหารด้านฟิสิกส์มากกว่าด้านเคมี (พันทิพา, 2539) ดังนั้น การบดอาหารเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในกระบวนการผลิตอาหารสัตว์ เนื่องจากการลด

ขนาดของอนุภาควัตถุดิบอาหารให้มีรูปร่างสม่ำเสมอและขนาดใกล้เคียงกัน (ณัฐชนก, 2548) เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการผสม ส่งผลให้ลักษณะทางกายภาพของอาหารไม่เกิดการแยกชั้น ช่วยลดพฤติกรรม การเลือกจิกกินอาหารของสัตว์ปีก เป็นผลให้สัตว์ได้รับโภชนาที่สม่ำเสมอ ครบถ้วน และเพิ่มระดับ การเข้าย่อยได้ของเอนไซม์ในวัตถุดิบอาหารอีกด้วย

เครื่องบดวัตถุดิบอาหารสัตว์ที่ใช้ในโรงงานผลิตอาหารสัตว์ปัจจุบันนิยมใช้อยู่ 2 ประเภทคือ เครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ (hammer mill) และเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์ (roller mill) ซึ่งมีหลักในการทำงาน ที่แตกต่างกัน เพื่อให้ได้มาซึ่งอนุภาคของอาหารที่สม่ำเสมอกัน โดยปกติโรงงานอาหารสัตว์และ เกษตรกรมักบดข้าวโพดโดยใช้เครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ชนิดตะแกรงหยาบ เนื่องจากสะดวกและ สามารถบดวัตถุดิบต่างๆ ได้หลากหลาย แต่ในโรงงานผลิตอาหารสัตว์หลายโรงงานได้มีการนำ เครื่องบดชนิดโรลเลอร์มิลล์เข้ามาใช้ในการบดข้าวโพด เนื่องจากประหยัดไฟฟ้าและมีประสิทธิภาพการ ผลิตสูงกว่าเครื่องบดชนิดแฮมเมอร์มิลล์ แต่อย่างไรก็ตามการบดข้าวโพดด้วยเครื่องบดชนิดโรลเลอร์มิลล์ มักพบปัญหาเรื่องของการปะปนของซังข้าวโพด เนื่องจากเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์ใช้หลักการบีบหรือขบ วัตถุดิบให้เกิดการแตกออกโดยใช้ลูกกลิ้ง 2 ลูก จึงไม่สามารถบดซังข้าวโพดที่มีความเหนียวให้ละเอียดได้ จึงพบซังข้าวโพดปะปนในข้าวโพดที่ผ่านการบด ส่งผลให้ความสม่ำเสมอของขนาดอนุภาคของ ข้าวโพดมีน้อยกว่าเครื่องบดชนิดแฮมเมอร์มิลล์ การศึกษาจึงได้มุ่งเน้นศึกษาถึงชนิดของเครื่องบด อาหาร และขนาดอนุภาคของข้าวโพดที่มีความเหมาะสมในอาหารไก่ไข่ ต่อคุณภาพไข่และสมรรถภาพ การผลิตไข่ ภายใต้สภาพการเลี้ยงแบบหนาแน่น (4 ตัวต่อ 1 กรงตับ) เพื่อเป็นข้อมูลให้กับเกษตรกรหรือ โรงงานอาหารสัตว์ในการเลือกใช้ขนาดอนุภาคและเครื่องบดที่เหมาะสม และสามารถประยุกต์ใช้งาน ได้จริงในอุตสาหกรรมการเลี้ยงไก่ไข่ของประเทศไทย

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาถึงชนิดของเครื่องบด (แฮมเมอร์มิลล์และโรลเลอร์มิลล์) และขนาดของอนุภาคข้าวโพดบดต่อคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของอาหารไก่ไข่
2. เพื่อศึกษาผลของชนิดของเครื่องบดและขนาดของอนุภาคข้าวโพดบด ต่อคุณภาพไข่และสมรรถภาพการผลิตของไก่ไข่ เลี้ยงดูภายใต้สภาวะการเลี้ยงแบบหนาแน่น

การตรวจเอกสาร

ข้าวโพด (corn, maize)

ข้าวโพด มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า ซีเมส (Zea mays) เป็นพืชตระกูลเดียวกับหญ้ามีลำต้นสูง โดยเฉลี่ย 2.2 เมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของลำต้น 0.5-2.0 นิ้ว สามารถปลูกได้ในสภาพที่ภูมิอากาศแตกต่างกันมาก ๆ ข้าวโพดถูกจัดเป็นธัญพืชอาหารพลังงานที่สำคัญที่สุด เพราะสามารถนำมาเลี้ยงสัตว์ได้ทั้งต้น ใบ และเมล็ด ข้าวโพดที่ใช้เลี้ยงสัตว์เป็นชนิดหัวแข็ง (flint corn) เมล็ดมีแข็งห่อหุ้ม หัวเรียบไม่บุบ เมล็ดค่อนข้างกลม สีของเมล็ดอาจเป็นสีขาว สีเหลือง สีม่วง หรือสีอื่นแล้วแต่ชนิดของพันธุ์ (ชุดิมา, 2550)

สถานการณ์การปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ปัจจุบันในประเทศไทยมีแนวโน้มลดลง โดยในปี 2548 มีการปลูก 5.67 ล้านไร่ ปี 2549 มีการปลูก 5.14 ล้านไร่ และในปี 2550 มีปริมาณการปลูกลดลงเหลือเพียง 5.08 ล้านไร่ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ คาดว่า ในปี 2550/51 จะมีผลผลิตรวม 3.77 ล้านตันใกล้เคียงกับปี 2549 ซึ่งมีผลผลิต 3.75 ล้านตัน ซึ่งยังไม่เพียงพอต่อความต้องการใช้ข้าวโพดอาหารสัตว์ในประเทศที่มีสูงถึง 5-5.5 ล้านตันต่อปี ซึ่งมีแนวโน้มความต้องการเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง แหล่งผลิตสำคัญ ได้แก่ จังหวัดเพชรบูรณ์ นครราชสีมา ตาก ลพบุรี นครสวรรค์ เชียงราย อุทัยธานี สระแก้ว พิจิตร โขงเจียม ผลผลิตต่อไร่เฉลี่ย 600-630 กิโลกรัมต่อปี มีต้นทุนการผลิต กิโลกรัมละ 4.00-4.16 บาท ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ออกสู่ตลาดมากในช่วงเดือนกันยายน-ธันวาคม คิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 85 ของทั้งปี (สำนักส่งเสริมการค้าเกษตร, 2550) ซึ่งราคาข้าวโพดปัจจุบันในเดือนสิงหาคม 2551 กิโลกรัมละ 9.80-10.00 บาท ขึ้นอยู่กับปริมาณการซื้อ การผลิตข้าวโพดอาหารสัตว์ของโลก มีสหรัฐอเมริกาเป็นผู้ผลิตอันดับ 1 และจีนเป็นผู้ผลิตอันดับ 2 ของโลก กระทรวงเกษตรสหรัฐอเมริกา คาดว่าในปี 2550/51 จะมีผลผลิตรวม 771.50 ล้านตัน เพิ่มขึ้นจากปีก่อนซึ่งมีผลผลิต 702.16 ล้านตัน หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 9.87 โดย ความต้องการใช้ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ของโลกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยคาดว่าในปี 2550/51 จะมีความต้องการประมาณ 769.48 ล้านตัน เพิ่มขึ้นจากปีก่อนซึ่งมีปริมาณ 724.87 ล้านตัน หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 6.15

คุณค่าทางโภชนาการของข้าวโพด

ข้าวโพดเป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญในอาหารสัตว์ แต่คุณภาพโปรตีนค่อนข้างต่ำ เนื่องจากขาดกรดอะมิโนที่จำเป็นสำหรับสัตว์เคี้ยวเอื้องและสัตว์กระเพาะเดียวอยู่หลายชนิด คือ ทริปโตเฟน ไลซีน

และทรินโอนิน ซึ่งถือว่าเป็นกรดอะมิโนที่ขาดอันดับที่หนึ่งถึงสาม ตามลำดับ (Baker, 1991) ข้าวโพดมีเยื่อใยต่ำจึงมีค่าการย่อยได้สูง อีกทั้งมีไขมันอยู่สูงเมื่อเปรียบเทียบกับธัญพืชอื่นๆ ประกอบกับเป็นแหล่งที่มี provitamin A คือ cryptoxanthin อยู่สูง นอกจากนี้ยังมีสารสี xanthophylls อยู่สมบูรณ์ ทำให้ผิวหนังของไก่มีสีเหลืองน่ารับประทาน และสีไข่แดงเข้มขึ้น สร้างความพึงพอใจให้กับผู้บริโภค จึงใช้ข้าวโพดเป็นวัตถุดิบหลักในอาหารสัตว์โดยมีสัดส่วนตั้งแต่ร้อยละ 20-60 ของสูตรอาหาร แตกต่างกันไป ตามประเภทของสัตว์เลี้ยง (ชุดิมา, 2550) ส่วนประกอบทางโภชนาการของข้าวโพด แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบทางโภชนาการของข้าวโพด

โภชนะ	ปริมาณ
ความชื้น (%)	88.00
โปรตีน (%)	8.50
พลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้ (kcal/kg) สำหรับสัตว์ปีก	3,420
เยื่อใย (%)	2.30
ไขมัน (%)	3.60
กรดลิโนเลอิก (%)	2.20
แคลเซียม (%)	0.03
ฟอสฟอรัส (%)	0.28

ที่มา: National Research Council (1994)

ข้าวโพดที่เหมาะสมแก่การใช้เป็นอาหารสัตว์ ควรเป็นข้าวโพดที่บดละเอียด สะอาด ไม่มีมอด และสิ่งปลอมปนซึ่งโดยทั่วไปได้แก่ ชังและเปลือกข้าวโพด แกลบ หินฝุ่น ทั้งนี้เพราะสิ่งเหล่านี้มีคุณค่าทางอาหารต่ำ หรือไม่มีเลย และที่สำคัญที่สุด ข้าวโพดนั้นจะต้องไม่ขึ้นหรือขึ้นรา เชื้อราที่ขึ้นบนข้าวโพดมักจะเป็นชนิดแอสเพอจิลลัสเฟลวัส (*Aspergillus flavus*) ซึ่งสามารถสร้างสารพิษอะฟลาท็อกซิน (aflatoxin) สำหรับอาหารสัตว์ปีกระดับของสารพิษอะฟลาท็อกซิน ควรมีระดับไม่เกิน 0.61-1.83 ppm (อุทัย, 2529) และไม่ควรมีสิ่งแปลกปลอมมากเกินไป 4%

การบด (grinding)

การบดเป็นการแปรรูปวัตถุดิบอาหารที่ใช้บ่อยที่สุดและมีราคาถูกที่สุดวิธีหนึ่ง ในการประกอบสูตรอาหารสัตว์การบดเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญอย่างยิ่ง เนื่องจากวัตถุดิบที่ใช้ในการประกอบสูตรอาหาร โดยเฉพาะข้าวโพดมีขนาดเมล็ดใหญ่ มีความจำเป็นต้องทำให้มีขนาดเล็กลงได้ ขนาดตามที่ต้องการ เพื่อที่จะสามารถทำการผสมอาหารให้เข้ากันได้อย่างทั่วถึง มีลักษณะทางกายภาพของอาหารที่ไม่เกิดการแยกชั้นกัน ซึ่งส่งผลต่อประสิทธิภาพการผลิตของสัตว์ตามมา เนื่องจากในสัตว์ปีกมีการสนองตอบต่ออาหาร ด้านรูปทรง ขนาด และสี แตกต่างกันไป ซึ่งต้องให้ความสำคัญอย่างยิ่ง เพราะมีผลต่อการตอบสนองต่อการกินอาหารของไก่ นั่นคือการสะท้อนความน่ากินของอาหารทางด้านฟิสิกส์ จะมากกว่าทางด้านประสาทการรับรู้ทางด้านเคมี ในสัตว์ปีกการมองเห็นสำคัญกว่ากลิ่นและรส การกระตุ้นด้วยรูปทรงของเม็ดอาหาร ขนาด และสีมีผลมากกว่า ส่วนในไก่ที่โตแล้วพบว่ามินิสัยชอบเลือกกินอาหารอย่างอิสระ โดยเฉพาะอาหารที่มีสีแดงมากที่สุด รองลงมาคือสีน้ำเงิน เหลือง และเขียว (พันทิพา, 2539) ดังนั้นข้าวโพดก่อนที่จะนำมาใช้เลี้ยงสัตว์นั้นจะต้องนำมาผ่านกระบวนการบดลดขนาดเพื่อให้ได้รูปร่างสม่ำเสมอและขนาดใกล้เคียงกันก่อนการผสมอาหาร โดยส่วนมากจะบดวัตถุดิบให้อยู่ในช่วงระหว่าง 400-1000 ไมครอน ยกเว้นในอาหารสัตว์น้ำ เช่น อาหารกุ้ง ขนาดอนุภาคจะอยู่ในช่วง 350-400 ไมครอน (ฉัฐชนก, 2548) การบดจะเป็นการลดขนาดของเมล็ดด้วยอุปกรณ์ที่จะใช้แรงกระทำด้วยวิธีการต่างๆ กัน เพื่อให้ได้มาซึ่งความสม่ำเสมอของวัตถุดิบอาหารสัตว์ เดิมการบดใช้สำหรับเมล็ดธัญพืชที่จะใช้ผสมอาหารสัตว์โดยตรงเท่านั้น แต่ต่อมาได้มีการนำเอาการบดไปใช้ในแง่อื่นด้วย เช่น บดวัตถุดิบที่จะใช้อัดเม็ด บดวัตถุดิบที่จะเข้าขบวนการใช้ความร้อน ขบวนการสกัดน้ำมัน หรือแม้แต่อาหารที่ผ่านกระบวนการใช้ความร้อนแล้วแต่มีขนาดใหญ่ต้องการให้มีขนาดเล็กลง จึงต้องทำการบดอีกครั้ง (พันทิพา, 2539)

วัตถุประสงค์ของการบด

การบดวัตถุดิบอาหารคือ การทำให้วัตถุดิบอาหารหรือวัสดุต่างๆ มีขนาดชิ้นเล็กลง ซึ่งจะเกิดผลดีในเชิงการผลิตอาหารสัตว์ คือ

1. ทำให้วัตถุดิบอาหารสัตว์ผสมเข้ากันได้ดียิ่งขึ้น เนื่องจากวัตถุดิบที่ผ่านการบดจะมีขนาดของอนุภาคที่มีความสม่ำเสมอ และสามารถผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีกว่าอาหารที่มีขนาดอนุภาคที่แตกต่างกัน หากวัตถุดิบในสูตรอาหารมีขนาดชิ้นแตกต่างกันมากเมื่อนำมาผสมกัน การ

ผสมจะไม่เป็นเนื้อเดียวกัน หรือผสมเข้ากันแต่มีการแยกส่วนได้ง่ายเมื่ออาหารมีการกระทบกระเทือน เมื่อวัตถุดิบที่เป็นองค์ประกอบของสูตรอาหารมีความละเอียดหรือมีขนาดเล็กเท่าใด การผสมเป็นเนื้อเดียวกันและความคงทนของส่วนผสมก็จะยิ่งมากขึ้น (อุทัย, ม.ป.ป.) และเมื่ออาหารเกิดความไม่สม่ำเสมอจะส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมของสัตว์โดยเฉพาะสัตว์ปีก ที่จะเลือกกินอาหารที่มีขนาดใหญ่ก่อน เมื่อหมดแล้วจึงกินอาหารที่มีขนาดเล็ก เป็นผลให้สัตว์ได้รับโภชนาพันธ์แปรไปตามองค์ประกอบของอาหารที่กิน เมื่อทำการบดจะส่งผลให้วัตถุดิบอาหารมีขนาดสม่ำเสมอเข้ากันเป็นเนื้อเดียวไม่เกิดการแยกชั้น สัตว์เลือกกินอาหารไม่ได้จึงได้รับอาหารที่มีโภชนาพันธ์ที่สม่ำเสมอครบถ้วนและให้ผลผลิตไข่ที่มีความสม่ำเสมอ ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตอีกทางหนึ่ง (สาริธ, 2547)

2. เพิ่มระดับการเข้าย่อยได้ของเอนไซม์ในวัตถุดิบอาหารที่ผ่านการบด ในวัตถุดิบอาหารบางชนิด เช่น ข้าวโพด ข้าวฟ่าง มันเส้น ฯลฯ มักจะมีขนาดไม่สม่ำเสมอ และมีการเปลือกแข็งห่อหุ้มเมล็ด เมื่อผ่านกระบวนการบดส่งผลให้ขนาดเล็กลง เปลือกเมล็ดจะแตกออก สัตว์สามารถเคี้ยวได้ง่ายและละเอียดยิ่งขึ้น และยังเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวของวัตถุดิบอาหาร เปิดโอกาสให้เอนไซม์ในน้ำย่อยเข้าทำปฏิกิริยาได้อย่างมีประสิทธิภาพ ประกอบกับวัตถุดิบบางชนิด เช่น ข้าวโพด มีแป้งแข็งและย่อยยาก หากมีขนาดใหญ่เกินไป การย่อยและการใช้ประโยชน์ได้ในสัตว์กระเพาะเดียวทำได้น้อยลง มีการสูญเสียแป้งทางอุจจาระมากขึ้น สัตว์อาจมีอาการท้องเสีย เนื่องจากมีแป้งเหลือในส่วนของลำไส้ใหญ่มากและมีการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ที่เป็นเชื้อโรค (สาริธ, 2547; อุทัย, ม.ป.ป.; Waldroup, 2007) ส่งผลต่อประสิทธิภาพการผลิตสัตว์โดยตรง

3. เพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการอาหาร ได้แก่ การทำให้แห้ง การทำให้สุก การทำลายสารพิษ การอัดเม็ด การเอ็กซ์ทรูด ตลอดจนการให้อาหารแก่สัตว์ เนื่องจากอาหารมีขนาดใกล้เคียงกัน เมื่อเข้าสู่กระบวนการผลิตจึงต้องการอุณหภูมิและเวลาแปรรูปเท่ากัน อาหารมีความแห้งและสุกสม่ำเสมอ เมื่อผสมในสูตรอาหารจึงเข้ากันได้ดี เมื่อใช้เลี้ยงสัตว์อาหารจึงมีความสม่ำเสมอ และเมื่อทำการอัดเม็ดจะได้เม็ดอาหารที่เกาะตัวกันดี มีปริมาณโภชนาพันธ์ครบถ้วนจากการผสมที่ทั่วถึงกัน (สาริธ, 2547; Behnke, 1983)

4. สร้างความพึงพอใจให้กับลูกค้าหรือผู้ซื้อ การบดวัตถุดิบอาหารเป็นการทำให้วัตถุดิบอาหารสัตว์เข้ากันเป็นเนื้อเดียว ได้อาหารที่มีความสม่ำเสมอ ได้เม็ดอาหารที่มีคุณภาพ เป็นการสร้างความเชื่อมั่นว่าอาหารสำเร็จรูปมีปริมาณของโภชนาพันธ์ที่ครบถ้วน เนื่องจากผู้ซื้ออาหารสัตว์ให้ความสำคัญต่อลักษณะทางกายภาพของอาหาร ไม่ว่าจะเป็นอาหารผงหรืออาหารอัดเม็ด ประกอบการตัดสินใจเลือกซื้อผลิตภัณฑ์อาหารเป็นสำคัญ

เครื่องบดวัตถุดิบอาหารที่ใช้ในโรงงานอาหารสัตว์

เครื่องบดวัตถุดิบอาหาร (grinder) ที่ใช้อยู่ในโรงงานอาหารสัตว์ปัจจุบันมีหลายประเภท ซึ่งใช้แรงสามแรงผสมกัน ประกอบด้วย แรงบีบอัด (compression) แรงกระแทก (impact) และแรงเฉือน (shear) ซึ่งจะขึ้นกับลักษณะและชนิดของเครื่องมือที่ใช้บด (ณัฐชนก, 2548) ทำให้เมล็ดพืชแตกและขนาดลดลงจนสามารถลอดผ่านลอดผ่านรูตะแกรงขนาดต่างๆ ที่เลือกใช้ เครื่องบดอาหาร ได้รับการพัฒนาตามวัตถุประสงค์จำเพาะจนมีความหลากหลายในด้านประสิทธิภาพการบด ความสิ้นเปลืองพลังงาน การเลือกใช้งานจะขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการใช้งาน ประสิทธิภาพการทำงาน และความเหมาะสมของลักษณะงานประกอบการเลือกใช้ โดยเครื่องบดวัตถุดิบอาหารที่ใช้มากในโรงงานอาหารสัตว์ในประเทศไทยมี 2 ชนิด ได้แก่

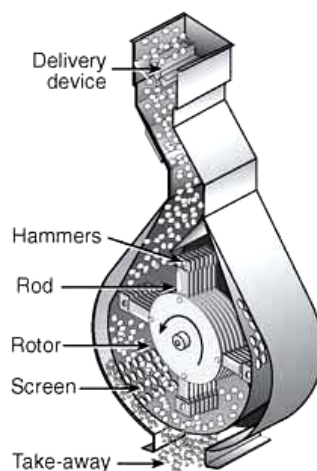
1. เครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ (hammer mill) เป็นเครื่องบดอาหารที่นิยมใช้มากที่สุดในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ทั้งการผลิตอาหารใช้เองในฟาร์มและโรงงานอาหารสัตว์ (อุทัย, ม.ป.ป.) และใช้มากในการบดวัตถุดิบสำหรับการผลิตอาหารสัตว์บก เช่น อาหารสัตว์ปีก สุกร และสัตว์เคี้ยวเอื้อง ขนาดอนุภาคของวัตถุดิบจากการบดด้วยเครื่องแฮมเมอร์มิลล์อยู่ในช่วง 400-1200 ไมครอน

2. เครื่องบดโรลเลอร์มิลล์ (roller mill) เป็นเครื่องบดที่เริ่มใช้ในการบดวัตถุดิบอาหารสัตว์ เช่น ถั่วเหลืองไขมันเต็ม (full fat soybean) และปัจจุบันกำลังได้รับความนิยมในการบดวัตถุดิบอาหารสัตว์เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากส่งผลให้วัตถุดิบอาหารที่ผ่านการบดมีความสม่ำเสมอ (uniformity) ที่ดีและสิ้นเปลืองพลังงานน้อย

หลักการทำงานของเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์

เครื่องบดแบบแฮมเมอร์มิลล์ (ภาพที่ 1) ประกอบด้วย ชุดของค้อนหรือใบตี (hammer) ติดตั้งโดยห้อยอยู่กับโรเตอร์ (rotor) ซึ่งติดกับเพลาลำดับ (drive shaft) ชุดใบตีจะหมุนอยู่ในห้องบด (grinding chamber) ซึ่งมีตะแกรง (screen) ห่อหุ้มหรือล้อมรอบอยู่ ขณะที่เครื่องบดทำงานอยู่เครื่องต้นกำลัง (power source) ซึ่งอาจจะเป็นมอเตอร์ไฟฟ้าหรือเครื่องยนต์ จะทำการขับเคลื่อนให้เพลาลำดับหมุนด้วยความเร็วประมาณ 3,000 รอบต่อนาที (อุทัย, ม.ป.ป.) ขณะที่ Herrman (n.d.) รายงานว่าความเร็วรอบต่ำสุดที่ 4,800 รอบต่อนาทีและสูงสุดที่ 7,000 รอบต่อนาที และเมื่อเพลาลำดับหมุน ชุดโรเตอร์จะหมุนด้วยทำให้ใบตีที่ห้อยอยู่สวิง (swing) หรือกางออกตีเป็นมุมฉากกับโรเตอร์ และพร้อมที่จะตีหรือทุบวัตถุดิบอาหาร

ที่จะเข้ามาในห้องบดให้แตกออกหรือมีขนาดลดลง ฌ์ซุนก (2548) รายงานว่าการบดวัตถุดิบอาหาร โดยใช้เครื่องบดแฮมเมอร์มีลล์เป็นการใช้แรงกระแทกที่เกิดขึ้นระหว่างหัวค้อนกับวัตถุดิบ โดยวัตถุดิบที่ต้องการบดจะถูกลำเลียงเข้าสู่เครื่องบดและตกลงด้วยแรงโน้มถ่วง จากนั้นวัตถุดิบจะถูกหัวค้อนพาเข้าสู่บริเวณเพิ่มความเร่ง (acceleration zone) เพื่อให้ความเร็วของวัตถุดิบเพิ่มขึ้นจนเท่ากับความเร็วรอบ (tip speed) ของเครื่องบด ขณะที่วัตถุดิบพาไปตามการเหวี่ยงของหัวค้อน จะถูกทำให้เล็กลงเนื่องจากการกระแทกกันระหว่างวัตถุดิบกับวัตถุดิบ และการกระแทกระหว่างวัตถุดิบกับหัวค้อน ขนาดของวัตถุดิบที่เท่ากับหรือเล็กกว่าขนาดของรูตะแกรงจะลอดผ่านรูตะแกรงออกไปได้ ซึ่งในระหว่างที่วัตถุดิบลอดผ่านรูตะแกรง จะเกิดการขัดสีทำให้รูปร่างของวัตถุดิบที่ลอดผ่านรูตะแกรงมีลักษณะเป็นทรงกลมผิวเรียบ การลดขนาดจะเกิดขึ้นในช่วงแรกบนตะแกรงไม่มากที่สุด และเรียกช่วงดังกล่าวว่า บริเวณการบดขั้นแรก (primary destruction zone) ส่วนของวัตถุดิบอาหารที่ยังมีขนาดใหญ่กว่ารูตะแกรงและยังไม่สามารถลอดผ่านรูตะแกรงออกมาได้ ก็จะถูกตีหรือทุบไปจนกระทั่งมีขนาดเล็กลงจนสามารถลอดผ่านรูตะแกรงออกมาได้ ดังนั้นจึงสามารถกำหนดขนาดขึ้นของวัตถุดิบอาหารที่ต้องการบดหรือความละเอียดของการบดด้วยการกำหนดขนาดของรูตะแกรงบดเป็นหลัก (อุทัย, ม.ป.ป.) จากคุณสมบัติดังกล่าวเครื่องบดแฮมเมอร์มีลล์จึงถือได้ว่าเป็นเครื่องบดอาหารอเนกประสงค์ บดวัตถุดิบได้หลากหลาย (Waldroup, 2007) สามารถใช้ได้ทั้งวัตถุดิบที่แข็ง เป็นผลึก มีเยื่อใยสูง พืชต่างๆ และวัตถุดิบที่มีความเหนียวนุ่ม (พันธิพา, 2539) เครื่องบดอาจมีอุปกรณ์อื่นๆ ที่ช่วยเสริมประสิทธิภาพการทำงาน หรือเพื่อช่วยให้ปฏิบัติงานได้สะดวกขึ้น และอุปกรณ์ที่มักใช้กันทั่วไปได้แก่ อุปกรณ์การป้อนวัตถุดิบอาหารเข้าสู่เครื่องบด เพื่อให้วัตถุดิบสามารถเข้าเครื่องบดได้อย่างสม่ำเสมอ ระบบให้ความเย็น (cooling) ช่วยลดอุณหภูมิของวัตถุดิบอาหารหลังการบด ที่เป็นสาเหตุของการเกิดเชื้อราและการเสื่อมสภาพของสารอาหารในวัตถุดิบ อุปกรณ์ดักฝุ่น อุปกรณ์ดักเหล็กหรือแยกสิ่งเจือปนที่อาจก่อความเสียหายแก่เครื่องบดอาหารได้



ภาพที่ 1 เครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ (hammer mill)

ที่มา: Koch (2002)

ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการบดแฮมเมอร์มิลล์

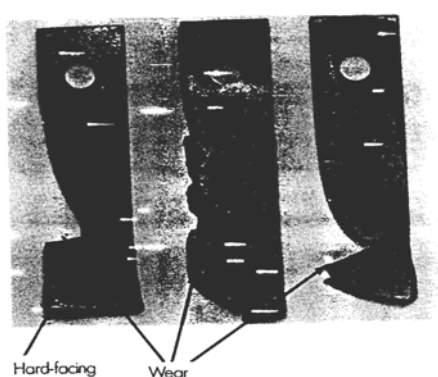
ประสิทธิภาพของการบดวัตถุดิบอาหารสัตว์ในแง่ความยาก-ง่ายในการบด การสูญเสียระหว่างการบด ความสม่ำเสมอของวัตถุดิบที่ผ่านการบดและอื่นๆ อาจผันแปรได้จากปัจจัยต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. อัตราการป้อนวัตถุดิบ ควรที่จะต้องมีอัตราการป้อนวัตถุดิบอย่างสม่ำเสมอเข้าสู่ห้องบดซึ่งอุปกรณ์สำคัญที่ใช้ในการป้อนลำเลียงวัตถุดิบ ได้แก่ ระบบลำเลียงชนิดสั่น (vibratory feeder) ระบบลำเลียงชนิดปล่องหมุน (rotary feeder) เป็นต้น (ณัฐชนก, 2548)

2. ความเร็วรอบของการบด มีความสัมพันธ์ต่อขนาดอนุภาคของวัตถุดิบอาหารที่ผ่านการบด (ความเร็วรอบของการบดสูงส่งผลให้ได้ขนาดอนุภาคอาหารที่มีขนาดเล็กมากยิ่งขึ้น) ณัฐชนก (2548) รายงานว่า ความเร็วรอบของเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ส่วนใหญ่อยู่ที่ประมาณ 5,300–7,700 เมตรต่อนาที หรือ 13,000–18,000 ฟุตต่อนาที ถ้าความเร็วรอบช้าเกินไปเป็นผลให้การกระแทกกระหว่างหัวค้อนกับวัตถุดิบลดลง แต่ถ้าความเร็วรอบเร็วเกินไปจะทำให้สิ้นเปลืองพลังงานในการขับเคลื่อนเครื่องบดโดยไม่จำเป็น ความเร็วรอบของการบดสามารถคำนวณได้จากสมการ

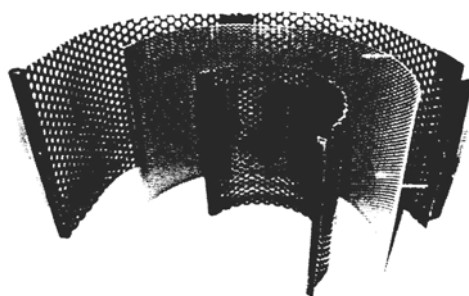
$$\begin{aligned}
 \text{ความเร็วรอบต่อนาที} &= 2\pi D \times \text{rpm} \\
 \text{โดยที่ } \pi &= 3.14 \\
 D &= \text{เส้นผ่านศูนย์กลางของเครื่องบด (เมตร)} \\
 \text{rpm} &= \text{รอบต่อนาทีของเครื่องบด (รอบต่อนาที)} \quad (\text{Herrman, n.d.})
 \end{aligned}$$

3. จำนวนและลักษณะของหัวค้อน หัวค้อนเป็นส่วนที่สร้างแรงดันและแรงกระแทก ระหว่างวัตถุคืบกับวัตถุคืบ หรือวัตถุคืบกับหัวค้อน เครื่องบดที่มีจำนวนหัวค้อนมากจะเพิ่มพื้นที่ให้ วัตถุคืบตีกระแทกกับหัวค้อนมากขึ้น เครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ที่มีจำนวนหัวค้อน 8 แฉก มีประสิทธิภาพ การบดดีกว่าเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ที่มีหัวค้อนเพียง 4 แฉก สำหรับวัตถุคืบที่กรอบหรือแตกง่ายอย่าง ข้าวโพด ควรมีความเร็วต่อจำนวนค้อนที่ 1-1.5 หรือ 2.5-3.5 (ณัฐชนก, 2548) การพิจารณาใช้หัวค้อนควร คำนึงถึงความเร็วรอบของเครื่องบดประกอบด้วย Koch (2002) รายงานว่าเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ที่มีความเร็ว รอบ 1,800 rpm หัวค้อนควรมีขนาดกว้าง x ยาว x สูง เท่ากับ 10 x 2.5 x 0.25 นิ้ว และเครื่องบดที่มีความเร็ว รอบ 3,600 rpm หัวค้อนควรมีขนาด 2 x 6-8 x 0.25 นิ้ว ตามลำดับ เครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ทำงาน โดยหมุน ตามเข็มนาฬิกา หัวค้อนหมุนขวาก็เกิดการสึกซีกเดียว (ภาพที่ 2) จึงนิยมทำการกลับหัวค้อนเพื่อให้สามารถ ใช้งานได้อีกครั้งเมื่อผ่านการใช้งานหัวค้อนจะเกิดการสึกอย่างสมบูรณ์ ซึ่งจะทำให้เกิดแรงดันหรือแรงกระแทก ลดลงไม่สามารถบดวัตถุคืบอาหารได้ละเอียดเท่าเดิม ประสิทธิภาพการบดจะลดลง การสึกของหัวค้อนจะทำ ให้เม็ดอาหารหลุดติดไปอยู่บริเวณตะแกรงและหัวค้อนเป็นจำนวนมาก ทำให้หัวค้อนเกิดแรงเสียดสีมากขึ้น เม็ดอาหารไปติดกับตะแกรง ส่งผลให้ตะแกรงเกิดการแตกหักเสียหายเร็วยิ่งขึ้น (พันทิพา, 2539)



ภาพที่ 2 หัวค้อนของเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ที่ผ่านการใช้งานและเกิดการสึกหรอ
ที่มา: Owens and Heimann (1994)

4. ลักษณะตะแกรงและขนาดของรูเปิดบนตะแกรง ตะแกรงที่นิยมใช้กับเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์มี 3 ชนิด คือ ตะแกรงแบบเต็มวง (full circle screen) ตะแกรงบดครึ่งวง (half circle screen) และตะแกรงบดแยก (ภาพที่ 3) ในการบดวัตถุดิบอาหารสัตว์นิยมใช้ตะแกรงแบบชนิดแยก เนื่องจากง่ายต่อการจัดการ การเปลี่ยนตะแกรง และได้ขนาดอนุภาคที่มีความเป็นเนื้อเดียวกันได้ดี และระยะระหว่างหัวค้อนและตะแกรงไม่สำหรับข้าวโพดควรอยู่ที่ประมาณ 10 - 12 มิลลิเมตร (ณัฐชนก, 2548)



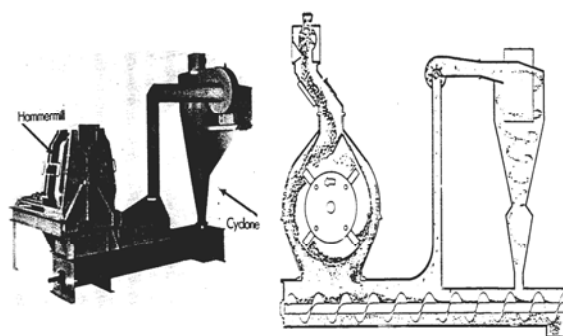
ภาพที่ 3 ตะแกรงบดแฮมเมอร์มิลล์

ที่มา: Owens and Heimann (1994)

ขนาดของรูตะแกรง มีผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการบด อัตราการผลิต ขนาดอนุภาคที่ได้จากการบด อัตราส่วนที่แนะนำระหว่างรูเปิดของตะแกรงมีค่าประมาณ 55 ตารางเซนติเมตรต่อแรงม้าเครื่องบด หากพื้นที่เปิดของรูตะแกรงต่อแรงม้าของเครื่องบดไม่เพียงพอ จะส่งผลให้เกิดความร้อนระหว่างการบด และเมื่อความร้อนเพิ่มสูงขึ้นมากกว่า 45 องศาเซลเซียส ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบดลดลงมากกว่า 50% การเลือกขนาดรูเปิดของตะแกรงบดขึ้นอยู่กับชนิดของสัตว์ ลักษณะของเมล็ดธัญพืชและความชื้นในวัตถุดิบ (Herrman, n.d.)

5. ระบบดูดอากาศ Herrman (n.d.) รายงานว่า ระบบดูดอากาศเป็นระบบที่ช่วยในการปรับปรุงประสิทธิภาพการบดและขนาดอนุภาคของวัตถุดิบให้ดีขึ้น (ภาพที่ 4) เนื่องจากจะช่วยลดแรงดันภายในห้องบดให้ลดลง ระบบดูดอากาศเป็นระบบที่ช่วยดึงและดูดอากาศ รวมทั้งอนุภาคให้ลอดผ่านตะแกรงบด ป้องกันการเกิดชั้นของอนุภาควัตถุดิบที่เกาะอยู่บนรูเปิดของตะแกรงบด (fluidized bed of material) การเกิดชั้นดังกล่าวจะขัดขวางการลอดผ่านรูเปิดของอนุภาค ทำให้วัตถุดิบสะสมอยู่บนชั้นของตะแกรง และเป็นผลทำให้มอเตอร์ทำงานหนัก โดยการหมุนเหวี่ยงหัวค้อนให้เร็วขึ้น เพื่อดันให้อนุภาคที่ขวางอยู่ลอดผ่านรูตะแกรงออกไปได้ นอกจากนี้อนุภาคชั้นที่ขวางยังทำให้เกิดการลดขนาดอนุภาค

ของวัตถุดิบลดลงไปเรื่อยๆ เนื่องจากวัตถุดิบมีการขัดสีกันตลอดเวลา ทำให้เกิดเป็นฝุ่นที่ไม่ต้องการ และหากมีการสะสมของฝุ่นมากเกินไปสามารถทำให้เกิดการระเบิดขึ้นได้ (ณัฐชนก, 2548)



ภาพที่ 4 ระบบดูดอากาศที่ใช้กับเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์

ที่มา: Owens and Heimann (1994)

6. คุณสมบัติของวัตถุดิบที่ทำการบด เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในการบด โดยคุณสมบัติและลักษณะของวัตถุดิบที่มีผลต่อการบด แบ่งออกได้ดังนี้

6.1 ความละเอียดของการบด

กำลังการบดอาหารจะผันแปรกับเวลาที่ใช้ในการบด เนื่องจากเครื่องบดอาหารจะมีกำลังการผลิตหรือปริมาณการบดอาหารต่อหน่วยเวลาที่มีความจำกัด อุทัย (ม.ป.ป.) รายงานว่าหากต้องการบดอาหารให้มีความละเอียดมาก เครื่องบดจะมีกำลังการผลิตหรือปริมาณอาหารที่บดได้ต่อหน่วยเวลาลดลง อีกทั้งต้องใช้ปริมาณกำลังงานหรือพลังงานในการบดอาหารต่อหน่วยของอาหารสูงขึ้น อาหารยังบดหยาบมากเท่าใด (ละเอียดน้อยลง) ปริมาณการบดต่อหน่วยเวลาจะเพิ่มขึ้น และปริมาณการใช้พลังงานในการบดก็จะลดลงด้วย

6.2 ความชื้นของวัตถุดิบอาหาร

ความชื้นและความหนาแน่นของวัตถุดิบก่อนบด มีผลต่อประสิทธิภาพการบดอย่างมาก คือเมื่อเมล็ดวัตถุดิบมีความชื้นสูงจะเป็นผลให้เมล็ดมีความยืดหยุ่นมาก การบดกระแทกทำได้ยากขึ้น จึงทำให้แนวโน้มของประสิทธิภาพการบดลดลง และจากงานวิจัยของ Kansas State University ที่ได้

ศึกษาวิจัยถึงผลของความหนาแน่นของเมล็ดของวัตถุดิบต่อประสิทธิภาพการบดพบว่า วัตถุดิบที่มีความหนาแน่นต่ำจะลดประสิทธิภาพการบดลงถึง 45 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุดิบที่มีความหนาแน่นสูง (ณัฐชนก, 2548) นอกจากนี้เครื่องบดบางชนิดขณะทำงานจะมีความร้อนเกิดขึ้น หากวัตถุดิบอาหารมีความชื้นสูง แป้งในวัตถุดิบอาหารจะแปรสภาพเป็นแป้งสุกมากขึ้น และมีลักษณะเหนียวจับติดกับรูตะแกรง ทำให้บดอาหารไม่ออก วัตถุดิบที่สามารถบดได้ดีควรมีความชื้นไม่เกินร้อยละ 13 (สาโรช, 2547; อุทัย, ม.ป.ป.)

6.3 ปริมาณไขมันในวัตถุดิบ

วัตถุดิบอาหารมีไขมันสูงจะทำให้วัตถุดิบอาหารมีลักษณะลื่น เมื่อเครื่องบดทำการตีหรือขัดสีวัตถุดิบอาหารให้มีขนาดเล็กลง ทำให้บดละเอียดได้ยากขึ้น อาหารมีแนวโน้มจะติดในเครื่องบดมากขึ้นเพราะผ่านรูตะแกรงได้ยาก หากมีความจำเป็นต้องบดวัตถุดิบอาหารเหล่านี้จริงๆ ควรทำการบดรวม (mixed grinding) กับวัตถุดิบอาหารที่มีลักษณะกรอบและไขมันต่ำ จะทำให้วัตถุดิบอาหารไขมันสูงสามารถบดง่ายขึ้น (อุทัย, ม.ป.ป.)

6.4 ปริมาณเยื่อใยและความฟามของอาหาร

อาหารมีปริมาณเยื่อใยและความฟามสูงจะมีผลให้ทำการบดยากขึ้น ทั้งนี้เพราะเยื่อใยมีลักษณะเหนียวและลดขนาดขึ้นให้เล็กลงได้ยาก นอกจากนี้อาหารที่มีเยื่อใยสูงมักจะมีลักษณะฟาม การเคลื่อนตัวของอาหารในเครื่องบดต่ำ อาจทำให้ชุดเครื่องบด (grinding element) ทำงานได้ไม่เต็มที่ และอาจทำให้เครื่องบดติดขัด และอาหารที่ผ่านการบดรูดผ่านรูตะแกรงได้ยาก และไม่ค่อยออกจากห้องบด แต่กลับเคลื่อนตัวไปกับหัวค้อนมากกว่าจะเคลื่อนตัวไปกับผนังห้องบดทำให้บดอาหารได้ช้า หากมีความจำเป็นต้องบดวัตถุดิบอาหารที่มีเยื่อใยสูง ควรทำการป้อนวัตถุดิบเข้าเครื่องทีละน้อยๆ หรือป้อนอาหารในปริมาณที่ไม่ทำให้เกิดการติดขัด (อุทัย, ม.ป.ป.) จะทำให้การบดมีประสิทธิภาพสูงขึ้น

ข้อดีของเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์

ณัฐชนก (2548) รายงานว่า

1. สะดวกในการใช้งาน โดยสามารถกำหนดขนาดอนุภาคของวัตถุดิบได้จากขนาดของรูตะแกรงที่ใช้

2. มีหลักการทำงานไม่ซับซ้อน เข้าใจง่ายและสามารถวัตถุดิบต่างๆ ได้อย่างหลากหลาย
3. เครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์มีความเหมาะสมในการใช้บดวัตถุดิบอาหารสัตว์ เนื่องจากสามารถใช้ตะแกรงขนาดต่างๆ ในการกำหนดอนุภาคของวัตถุดิบอาหารสัตว์ที่เหมาะสมในสัตว์แต่ละชนิด
4. การดูแลและบำรุงรักษาง่ายกว่าเครื่องบดชนิดอื่นๆ โดยสามารถถอดอุปกรณ์ของเครื่องออกเพื่อซ่อมแซมและทำความสะอาดได้ง่าย ไม่ยุ่งยาก

ข้อเสียของเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์

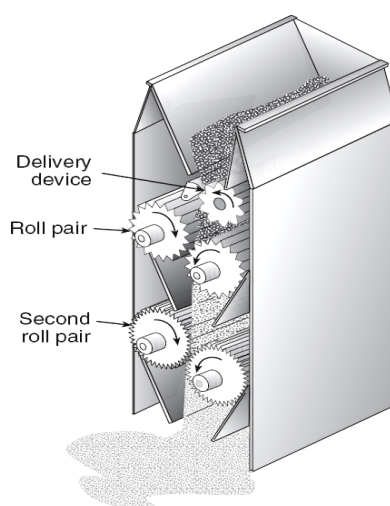
ณัฐชนก (2548) รายงานว่า

1. ประสิทธิภาพการบดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ด้อยกว่าเครื่องบดชนิดโรลเลอร์มิลล์
2. เกิดเสียงดังในระหว่างการทำงานของเครื่อง เนื่องจากเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์เดินเครื่องที่ความเร็วรอบสูงและใช้แรงม้าสูง
3. ในระหว่างการบดเกิดฝุ่นมาก ซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพการบดลดลงเนื่องจากมอเตอร์ทำงานหนัก เกิดความร้อนระหว่างการบด เกิดการสูญเสียน้ำหนักของวัตถุดิบ อาจเกิดการระเบิด จำเป็นต้องทำการติดตั้งระบบดูดฝุ่นเพิ่มเติม
4. เนื่องจากเกิดเสียงดังและปัญหาฝุ่นในระหว่างการบด เป็นสาเหตุให้เกิดผลเสียต่อสุขภาพของผู้ปฏิบัติงาน
5. ลักษณะของอนุภาคที่ได้จากเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์มีลักษณะเป็นทรงกลม ทำให้เกิดการอัดตัวได้ง่ายและเคลื่อนไหลไม่ดีในระหว่างการผสมอาหาร ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการผสมอาหารตามมา

หลักการทำงานของเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์

การลดขนาดของวัตถุดิบอาหารสัตว์โดยใช้เครื่องบดโรลเลอร์มิลล์ เป็นการทำให้วัตถุดิบอาหารที่ต้องการมีขนาดชิ้นเล็กลงโดยตัวเครื่องประกอบด้วยลูกกลิ้งหรือโรลเลอร์ (roll) เพื่อบีบ

หรือขัดสี ให้วัตถุดิบอาหารสัตว์แตกออกเป็นผลจากแรงบีบอัดและแรงเสียดของลูกกลิ้ง 2 ลูกที่หมุนเข้าหากันด้วยความเร็วรอบต่างกัน แต่ถ้าลูกกลิ้งหมุนด้วยความเร็วรอบที่เท่ากันจะส่งผลให้อาหารไม่เกิดการลดขนาดลง แต่จะทำให้วัตถุดิบเกิดการรีดแบนเท่านั้น (ภาพที่ 5) ปกติเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์อาจมีชุดลูกกลิ้งมากกว่า 1 ชุด (2 ลูก) ทั้งนี้เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการบดให้มากขึ้น โดยลูกกลิ้งชุดแรกจะทำหน้าที่ลดขนาดของวัตถุดิบให้มีขนาดเล็กลง โดยการขบหรือการบีบให้แตก จากนั้นเมื่อวัตถุดิบถูกส่งเข้าลูกกลิ้งชุดที่ 2 ซึ่งจะทำให้วัตถุดิบมีขนาดเล็กลงตามความต้องการ ทั้งนี้จำนวนชุดของลูกกลิ้งขึ้นกับวัตถุประสงค์ของการบดประกอบด้วย (อุทัย, ม.ป.ป.) ญัฐชนก (2548) รายงานว่าเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์ส่วนใหญ่ที่ประกอบด้วยชุดลูกกลิ้ง 2 ชุด จะให้อนุภาคเฉลี่ยของวัตถุดิบอาหารที่ประมาณ 600 ไมครอน และถ้าประกอบด้วยชุดลูกกลิ้ง 3 ชุดจะบดอนุภาคของวัตถุดิบได้น้อยกว่า 600 ไมครอน



ภาพที่ 5 เครื่องบดโรลเลอร์มิลล์ (Roller mill)

ที่มา: Kock (2002)

ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพของการบดโรลเลอร์มิลล์

1. อัตราการป้อนวัตถุดิบ ควรต้องทำการป้อนวัตถุดิบเข้าสู่ห้องบดอย่างสม่ำเสมอ เช่นเดียวกับในเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ ทั้งนี้เพื่อให้วัตถุดิบที่จะทำการบดลงสู่ห้องบดได้อย่างสม่ำเสมอ ไม่ขาดระยะ ซึ่งนับเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการบดอีกทางหนึ่ง การป้อนลำเลียงวัตถุดิบใช้อุปกรณ์ต่างๆ ใกล้เคียงกับเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ (ญัฐชนก, 2548)

2. ความเร็วรอบของลูกกลิ้ง สามารถคำนวณความเร็วรอบของลูกกลิ้งในแต่ละคู่ได้ด้วยสมการเดียวกับสมการที่ใช้ในการคำนวณในเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ ลูกกลิ้งในแต่ละชุดจะต้องหมุนในทิศทางตรงกันข้ามกันและมีความเร็วรอบของลูกกลิ้งที่แตกต่างกัน เพื่อให้เกิดแรงบีบอัดและแรงเฉือนของวัตถุดิบให้ได้เป็นชิ้นเล็กกล ซึ่งทำให้วัตถุดิบที่ได้จากการบดมีลักษณะเป็นรูปลูกบาศก์หรือรูปหลายเหลี่ยมที่มีความสม่ำเสมอและเป็นเนื้อเดียวกัน (uniformity) ของอนุภาคที่บดมากกว่าเครื่องบดชนิดแฮมเมอร์มิลล์ โดยความเร็วของลูกกลิ้งเครื่องบดอยู่ที่ประมาณ 50-300 รอบต่อนาที (สาริธ, 2547)

3. จำนวนร่องบากบนผิวลูกกลิ้ง สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการบดของเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์ได้คือ ถ้าร่องบากบนลูกกลิ้งเป็นชนิดร่องห่อจะได้ของที่บดแล้วมีลักษณะละเอียด แต่อัตราการบดจะลดลง ในขณะที่ถ้าร่องบากเป็นชนิดร่องห่อจะได้อนุภาคของวัตถุดิบอาหารที่บดมีลักษณะหยาบและอัตราการบดจะเพิ่มสูงขึ้น (อุทัย, ม.ป.ป.) พันธิพา(2539) รายงานว่าลอนลูกกลิ้งแบบ Le page เหมาะสมที่สุดในการใช้บดข้าวโพด เนื่องจากมีคุณสมบัติในการตัดเมล็ดธัญพืชได้ดีมาก ได้ขนาดและรูปทรงที่มีความสม่ำเสมอและมีลักษณะเป็นลูกบาศก์ เกิดฝุ่นน้อย ในขณะที่ ฌัฐชนก (2548) รายงานว่ารอยบากชนิด round bottom V ได้รับความนิยม เนื่องจากทำความสะอาดง่ายและไม่มีมุมหรือจุดบอดของการสะสมของวัตถุดิบ

4. ขนาดของช่องว่างระหว่างลูกกลิ้ง (nip) Behnke (1983) รายงานว่าสามารถกำหนดขนาดของอนุภาคอาหารที่ผ่านการบดได้โดยการปรับช่องว่างระหว่างลูกกลิ้งตามขนาดของอนุภาควัตถุดิบอาหารที่ต้องการ โดยเมื่อต้องการวัตถุดิบอาหารที่มีขนาดเล็กก็ทำการปรับระยะระหว่างลูกกลิ้งให้มีขนาดเล็ก และเมื่อต้องการวัตถุดิบอาหารที่มีขนาดใหญ่ก็ทำการปรับระยะห่างออกได้ตามต้องการ ทั้งนี้ในการตั้งความห่างของลูกกลิ้งไม่มีทฤษฎีในการปฏิบัติ ขึ้นอยู่กับประสบการณ์และความชำนาญของผู้ปฏิบัติงานเป็นสำคัญ

ข้อดีของเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์

ฌัฐชนก(2548) รายงานว่า

1. อนุภาคของวัตถุดิบที่ผ่านการบดด้วยเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์มีความเป็นเนื้อเดียวหรือสม่ำเสมอที่ดีกว่าเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์

2. อนุภาคของวัตถุดิบที่ได้จากเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์ มีลักษณะรูปร่างเป็นรูปทรงลูกบาศก์หรือรูปร่างหลายเหลี่ยม ทำให้เกิดการอัดตัวกันน้อยกว่าอนุภาคที่มีลักษณะเป็นทรงกลม ทำให้มีการไหลของวัตถุดิบดีกว่าวัตถุดิบที่ได้จากเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์

3. เครื่องบดโรลเลอร์มิลล์ให้ประสิทธิภาพการบดดีกว่าเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์

4. ไม่ต้องทำการติดตั้งเครื่องไซโคลน เนื่องจากการบดเกิดฝุ่นในปริมาณน้อยซึ่งไม่รบกวนกระบวนการผลิต รวมทั้งไม่ก่อให้เกิดฝุ่นที่รบกวนการกินอาหารของสัตว์

ข้อเสียของเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์

ฉันทน (2548) รายงานว่า

1. เครื่องบดโรลเลอร์มิลล์มีความซับซ้อนของการทำงานมากกว่าเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ จึงจำเป็นต้องใช้บุคลากรที่มีความรู้ความสามารถในการปฏิบัติงาน

2. การบำรุงรักษาทำได้ยากกว่าเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์

3. หากต้องการบดละเอียดจะต้องมีการตั้งลูกกลิ้งให้ชิดมากจะทำให้เกิดการสึกหรอ และค่าใช้จ่ายในซ่อมบำรุงสูง และต้องมีลูกกลิ้งสำรอง 1 ชุดตลอดเวลา

4. ผู้ปฏิบัติงานจำเป็นต้องมีประสบการณ์และความชำนาญในการปรับระยะระหว่างลูกกลิ้งแต่ละคู่เพื่อให้ได้ขนาดอนุภาคตามต้องการ

5. มีปัญหาในระหว่างการผลิตจากการเจือปนของวัตถุดิบ เช่น ชัง เศษเชือก ฟาง กิ่งไม้ ต่างๆทำให้เครื่องบดทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ และเกิดการปนเปื้อนอย่างชัดเจนในอาหารที่ผ่านการบด จึงควรติดตั้งเครื่องร่อนแยกส่งเจือปนออกก่อนลงสู่เครื่องบด

การวิเคราะห์ขนาดวัตถุดิบอาหารสัตว์ที่ผ่านการบด

ในการบดวัตถุดิบอาหารสัตว์ ขนาดอนุภาคที่เหมาะสมควรพิจารณาจากชนิดของสัตว์ เนื่องจากสัตว์แต่ละชนิดมีความชอบอาหารที่มีขนาดแตกต่างกัน โดยสัตว์ปีกชอบอาหารที่มีขนาด

พอเหมาะที่จะสามารถจิกกินได้มากกว่าอาหารที่บดละเอียดมากเกินไป อาหารบางชนิดเมื่อบดละเอียดมากเกินไปจะเกิดเป็นฝุ่นและเมื่อถูกน้ำลายสัตว์จะเหนียวเหนอะติดปาก สัตว์ไม่ชอบกิน และการที่ได้รับอาหารที่บดละเอียดมากเกินไปจะเกิดแผลในกระเพาะอาหาร (ulcer) และทางเดินอาหาร ในการบดวัตถุดิบอาหารสามารถกำหนดขนาดของอนุภาคอาหารได้โดยการเลือกชนิดของรูตะแกรง American Society of Agricultural Engineers (1983) รายงานว่า การระบุขนาดของอนุภาควัตถุดิบอาหารมักระบุเป็นค่าเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยทางเรขาคณิตของอนุภาค (geometric mean diameter: GMD หรือ D_{gw}) ซึ่งมีหน่วยในการวัดเป็นไมครอน และวัดค่าความสม่ำเสมอทางเรขาคณิตของอนุภาคตัวอย่างที่บด (geometric standard deviation: GSD หรือ S_{gw}) โดยที่

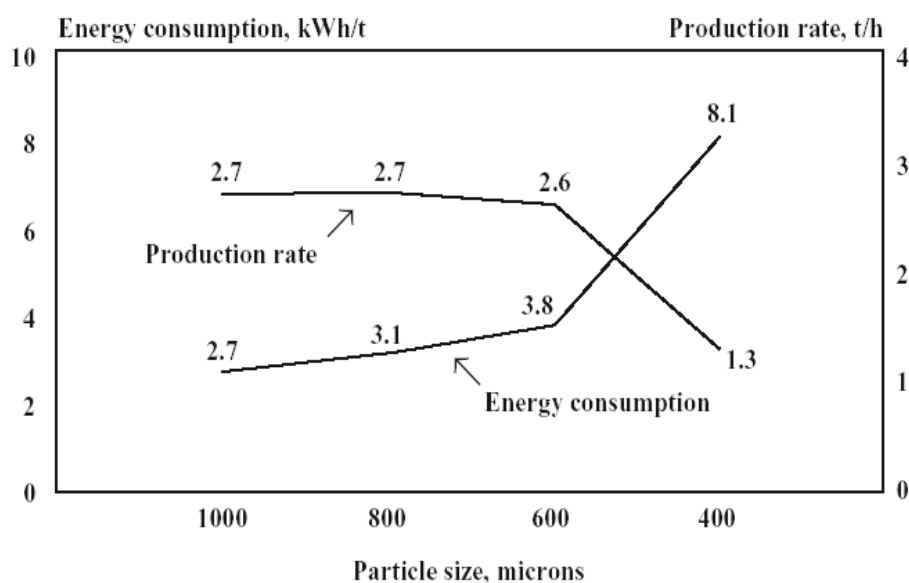
$$\begin{aligned} 1 \text{ ไมครอน} &= 1 / 1,000,000 \text{ เมตร} \\ \text{หรือ} \quad 1 \text{ ไมครอน} &= 1 / 1,000 \text{ มิลลิเมตร} \end{aligned}$$

วิธีมาตรฐานที่ใช้วิเคราะห์ขนาดและความสม่ำเสมอของวัตถุดิบอาหารสัตว์และอาหารสัตว์ผสมคือ การเขย่าวัตถุดิบผ่านชุดอนุกรมและตะแกรงร่อน Tyler หรือ U.S. sieve (ณัฐชนก, 2548) โดยอนุกรมทั้ง 2 ชนิดแตกต่างกันเนื่องจากวิธีการในการใช้หาเส้นผ่านศูนย์กลางรูเปิดของตะแกรงร่อน ซึ่งอนุกรม Tyler จำแนกตะแกรงร่อนโดยใช้จำนวนของรูเปิดของตาข่ายต่อนิ้ว ในขณะที่ U.S. sieve จำแนกรูเปิดของตะแกรงแบบไม่เฉพาะเจาะจงและไม่คำนึงถึงจำนวนของตาข่ายต่อนิ้ว แต่ทำการจำแนกขนาดรูเปิดเป็นไมครอน ซึ่งอนุกรมทั้ง 2 สามารถใช้ทดแทนกันได้ (Herrman, n.d.) โดยพบว่าค่า GSD จะผกผันกับความสม่ำเสมอของวัตถุดิบอาหารหรืออาหารผสม คือเมื่อค่า GSD มีค่าต่ำแสดงให้เห็นว่ามีความสม่ำเสมอของวัตถุดิบอาหารสูง

ผลของการบดวัตถุดิบอาหารสัตว์ต่อการผลิต

ในการบดวัตถุดิบอาหารสัตว์ นอกจากต้องการให้สัตว์ใช้ประโยชน์จากอาหารสำเร็จรูปได้อย่างมีประสิทธิภาพแล้ว ด้านโรงงานอาหารสัตว์ยังคำนึงถึงกำลังการผลิตและค่าพลังงานที่ใช้ในการบดประกอบด้วย เพราะนั้นแสดงถึงปริมาณต้นทุนต่อชั่วโมงในการผลิตอาหารและเกี่ยวข้องกับผลกำไรที่จะได้รับตามมา ในการบดวัตถุดิบอาหารสัตว์จึงจำเป็นต้องคำนึงถึงขนาดอนุภาคของอาหารที่ต้องการบดให้มีความเหมาะสม เนื่องจากค่าพลังงานที่ใช้ในการบดและกำลังการผลิตขึ้นอยู่กับความละเอียดของขนาดอนุภาค หากทำการบดอาหารให้มีความละเอียดจะต้องการพลังงานที่ใช้และเวลาในการบดมากกว่าการบดหยาบ และต้องการปริมาณพลังงานในการบดอาหารต่อหน่วยของอาหารสูงขึ้น

สอดคล้องกับผลการทดลองของ พันธิพา (2539) ที่รายงานว่า การใช้ตะแกรงที่ละเอียดมากขึ้นเพื่อให้ได้ขนาดอนุภาคนาเล็กกลงทำให้ประสิทธิภาพการบดอาหารลดลง ในกรณีใช้มอเตอร์ขนาด 50 แรงม้าเมื่อทำการบดหยาบจะสามารถบดข้าวโพดและข้าวโอตได้ถึง 4,309.13 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ในขณะที่บดละเอียดปานกลางและบดละเอียดที่สุดจะสามารถบดได้เพียง 2,948.53 และ 2,267.96 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ตามลำดับ สอดคล้องกับ Wondra *et al.* (1995a) ที่รายงานว่า การบดข้าวโพดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ให้มีขนาดเล็กลง ที่ขนาดอนุภาค 1,000, 800, 600 และ 400 ไมครอน ส่งผลให้ค่าพลังงานที่ใช้ในการบดเพิ่มสูงขึ้นโดยมีค่า 2.7, 3.1, 3.8 และ 8.1 กิโลวัตต์ต่อตัน ตามลำดับ ในขณะที่จะลดกำลังการผลิตลงที่ระดับ 2.7, 2.7, 2.6 และ 1.3 ตันต่อชั่วโมง ตามลำดับ เมื่อทำการบดข้าวโพดที่ขนาด 400 ไมครอน ต้องการค่าพลังงานการบดสูงเป็น 3 เท่าของการบดข้าวโพดที่มีขนาด 1,000 ไมครอน เห็นได้ว่าเมื่อทำการบดข้าวโพดให้มีขนาดอนุภาคที่ละเอียดมากขึ้น ส่งผลให้ค่าพลังงานที่ใช้ในการบดเพิ่มสูงขึ้น และลดอัตราการผลิตอาหารลง โดยเฉพาะเมื่อทำการลดขนาดอนุภาคของข้าวโพดลงจากระดับ 600 ถึง 400 ไมครอน ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 ผลของขนาดอนุภาคข้าวโพดต่อประสิทธิภาพการบด

ที่มา: Wondra *et al.* (1995a)

Wondra *et al.* (1995b) ที่รายงานว่า การบดข้าวโพดด้วยเครื่องโรลเลอร์มิลล์มีความต้องการพลังงานในการบดที่ต่ำกว่าให้ประสิทธิภาพการบดสูงกว่าเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ และเมื่อบดข้าวโพดให้ละเอียดเพิ่มขึ้นจะสิ้นเปลืองค่าพลังงานในการบดสูงขึ้นและมีประสิทธิภาพการบดลดต่ำลง ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลของการบดข้าวโพดด้วยเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์และเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ต่อสมรรถภาพการบด

รายการ	แฮมเมอร์มิลล์		โรลเลอร์มิลล์	
	800 μm	400 μm	800 μm	400 μm
พลังงานที่ใช้ในการบด (kWh/t)	4.6	12.9	4.3	9.8
ประสิทธิภาพการบด (t/h)	3.9	2.0	1.7	1.1
อัตราการบด (kg/Hph)	130.0	66.7	170.0	73.3

ที่มา: Wondra *et al.* (1995b)

พันทิพา (2539) รายงานว่าการบดข้าวโพดที่อนุภาคละเอียด สิ้นเปลืองพลังงานที่ใช้ในการบดสูงกว่า และมีกำลังการผลิตต่ำกว่าการบดข้าวโพดที่มีอนุภาคหยาบ อีกทั้งเครื่องบดชนิดโรลเลอร์มิลล์มีประสิทธิภาพการใช้งานเหนือกว่าเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ เปรียบเทียบเมื่อทำการบดข้าวโพดที่ขนาดอนุภาคเดียวกัน เครื่องบดโรลเลอร์มิลล์มีประสิทธิภาพการบด และกำลังการผลิตสูงกว่าเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ เมื่อเปรียบเทียบการทำงานถ้ายบคอาหารขนาดหยาบ (coarse) โรลเลอร์มิลล์สามารถบดได้ 680-1,134 kg./hp.hr. ในขณะที่แฮมเมอร์มิลล์บดได้ 136-318 kg./hp.hr. และเมื่อทำการบดละเอียด (fine) จะได้ 158-227 kg./hp.hr. กับ 45-136 kg./hp.hr. ตามลำดับ

ผลของขนาดอนุภาควัตถุดิบต่อสมรรถภาพการผลิตของสัตว์ปีก

ในการประกอบสูตรอาหารสำหรับไก่ไข่ นั้นขนาดอนุภาคของวัตถุดิบมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งต่อประสิทธิภาพการให้ผลผลิตของสัตว์ เนื่องจากสัตว์ปีกเป็นสัตว์ที่มีความไวต่อขนาดอนุภาคของวัตถุดิบอาหาร โดยเฉพาะข้าวโพด โดยไก่จะเลือกจิกกินอาหารที่มีขนาดใหญ่ก่อนจึงเลือกย่อยอาหารที่มีขนาดเล็กต่อไป ประกอบกับอาหารไก่ไข่ในปัจจุบันนิยมทำในรูปอาหารผง ดังนั้นจะเห็นได้ว่าความสม่ำเสมอของอนุภาควัตถุดิบอาหารเป็นสิ่งสำคัญ ในการผลิตอาหารไก่ไข่จึงจำเป็นต้องผ่านกระบวนการบด เพื่อทำการลดขนาดวัตถุดิบให้มีขนาดเล็กลง ความสม่ำเสมอเพิ่มมากขึ้น เพื่อให้สัตว์มีประสิทธิภาพการให้ผลผลิตที่ดีขึ้น ในขณะที่ในอาหารไก่เนื้อที่นิยมผลิตอาหารในรูปอัดเม็ดหรืออาหารขบแตก ความสม่ำเสมอของอนุภาควัตถุดิบมีผลไม่เด่นชัดต่อประสิทธิภาพการผลิต Cabrera (1994) รายงานว่าไม่พบความแตกต่างในด้านสมรรถภาพการผลิตของไก่เนื้อที่เลี้ยงด้วยอาหารขบแตก เมื่อขนาด

อนุภาคอาหารมีขนาดใหญ่ขึ้นจาก 400 เป็น 1,000 ไมครอน และให้ข้อเสนอแนะว่า ควรใช้ข้าวโพดที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ในอาหารไก่ไข่เนื่องจากจะส่งผลให้มีค่าประสิทธิภาพการใช้อาหาร (FCR) ต่ำที่สุดและให้ประสิทธิภาพการผลิตที่ดี สอดคล้องกับ Herrman (n.d.) ที่รายงานว่าในอาหารรูปขบแตกไม่จำเป็นต้องทำการลดขนาดของข้าวโพดลงต่ำกว่า 1,000 ไมครอน และจากการศึกษาในอาหารไก่ไข่พบว่า ไม่พบข้อดีในการลดขนาดของวัตถุดิบลงต่ำกว่า 800 ไมครอน ซึ่งสอดคล้องกับ Cabrera (1994) ที่รายงานว่าขนาดอนุภาคที่เหมาะสมสำหรับไก่ไข่อยู่ในช่วง 800 ไมครอน ส่งผลให้ไก่ไข่มีประสิทธิภาพการผลิตสูงที่สุดในขณะเดียวกัน Nir *et al.* (1994) ได้ศึกษาถึงขนาดของข้าวโพด ข้าวสาลี และข้าวฟ่าง โดยที่มีขนาดอนุภาคละเอียดอยู่ในช่วง 500-600 ไมครอน ขนาดอนุภาคละเอียดปานกลางในช่วงขนาด 1100-1200 ไมครอน และขนาดอนุภาคหยาบในช่วงขนาด 2000-2100 ไมครอน ต่อสมรรถภาพการผลิตและน้ำหนักของเครื่องในไก่เนื้อ พบว่าสมรรถภาพการผลิตของไก่เนื้อมีประสิทธิภาพดีที่สุดเมื่ออาหารมีขนาดอนุภาคละเอียดปานกลาง แต่เมื่อขนาดอนุภาคเพิ่มขึ้นจากขนาดละเอียดจนถึงขนาดหยาบมีผลทำให้น้ำหนักเครื่องในเพิ่มขึ้นตามลำดับ (ตารางที่ 3)

ตารางที่ 3 ผลของขนาดอนุภาคต่อสมรรถภาพการผลิตและน้ำหนักเครื่องในของไก่เนื้อที่อายุ 7-21 วัน

รายการ	ขนาดอนุภาค (ไมครอน)		
	ละเอียด	ปานกลาง	หยาบ
	(500-600)	(1100-1200)	(2000-2100)
น้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น (กรัม)	357 ^b	427 ^a	401 ^a
ปริมาณอาหารที่กินต่อวัน (กรัม)	591 ^b	662 ^a	645 ^a
ประสิทธิภาพการใช้อาหาร (น้ำหนักตัว/อาหาร)	0.604 ^b	0.642 ^a	0.622 ^{ab}
น้ำหนักกึ๋น (กรัม)	3.95 ^b	4.50 ^a	4.87 ^a
น้ำหนักตับ (กรัม)	4.41 ^a	3.73 ^b	4.24 ^{ab}
น้ำหนักตับอ่อน (กรัม)	0.48	0.48	0.48
น้ำหนักลำไส้ส่วนบน (กรัม)	1.79	1.50	1.71
น้ำหนักลำไส้ส่วนล่าง (กรัม)	4.82	4.40	4.27

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

ที่มา: Nir *et al.* (1994)

Dahlke *et al.* (2003) ศึกษาผลกระทบของขนาดอนุภาคที่แตกต่างกันของข้าวโพดที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย (GMD) 0.336, 0.856 และ 1.120 mm. ในอาหารผงไก่เนื้อที่อายุ 42 วัน พบว่าขนาดอนุภาคของอาหารส่งผลให้ค่า pH ของก๊นและลำไส้แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) แต่ขนาดอนุภาคข้าวโพดที่ใหญ่ขึ้น มีผลทำให้น้ำหนักก๊น ($P<0.007$) ความสูงของวิลไล และความลึกของ crypt cell เพิ่มขึ้น ($P<0.05$) ทำให้สัตว์สามารถดูดซึมสารอาหารเข้าสู่ร่างกายได้ดียิ่งขึ้นด้วย (ตารางที่ 4 และ 5)

ตารางที่ 4 ผลของขนาดอนุภาคของข้าวโพดในอาหารผงต่อลักษณะกายภาพทางเดินอาหารไก่เนื้อที่อายุ 42 วัน

ทรีตเมนต์	น้ำหนัก (กรัม)		
	ก๊น	คูโอตินัม	เจจูนัม+ไอเลียม
อาหารผง-0.336 mm.	20.05 ^d	8.76	27.35
อาหารผง-0.585 mm.	29.52 ^c	13.89	43.77
อาหารผง-0.856 mm.	36.03 ^b	12.48	42.56
อาหารผง-1.120 mm.	41.56 ^a	13.84	41.90

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

ที่มา: Dahlke *et al.* (2003)

ตารางที่ 5 ผลของขนาดอนุภาคของข้าวโพดในอาหารผงต่อจำนวน ความกว้าง และความลึกของวิลไล จากส่วนไอเลียมของลำไส้ของไก่เนื้อที่อายุ 42 วัน

ทรีตเมนต์	จำนวนวิลไล	ความสูงของวิลไล	ความลึกของ crypt
	(วิลไล / พื้นที่ตัดขวางของลำไส้เล็ก)	(μm)	cell (μm)
อาหารผง-0.336 mm.	51	1509 ^c	137 ^c
อาหารผง-0.585 mm.	46	1744 ^b	184 ^b
อาหารผง-0.856 mm.	51	1811 ^a	228 ^a
อาหารผง-1.120 mm.	50	1831 ^a	200 ^a

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

ที่มา: Dahlke *et al.* (2003)

Reece *et al.* (1985) ทำการเปรียบเทียบผลของขนาดอนุภาคข้าวโพดที่ผ่านการบดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 813 ไมครอน และเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์ ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1,343 ไมครอน ต่อประสิทธิภาพการผลิตของไก่เนื้อที่อายุ 1-21 วัน ที่เลี้ยงในรูปอาหารผง พบว่าไก่ที่ได้รับข้าวโพดที่บดด้วยเครื่องโรลเลอร์มิลล์ มีประสิทธิภาพการผลิต น้ำหนักตัว และประสิทธิภาพการใช้อาหารดีกว่าไก่ที่ได้รับอาหารที่บดด้วยเครื่องแฮมเมอร์มิลล์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) ในขณะที่ Douglas *et al.* (1990) ทำการเปรียบเทียบการบดข้าวโพด ข้าวฟ่างแทนนินต่ำ และข้าวฟ่างแทนนินสูง ด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์และ โรลเลอร์มิลล์ ในอาหารผงสำหรับไก่เนื้อที่อายุ 21 วัน โดยขนาดอนุภาควัตถุดิบที่บดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์มีขนาดเฉลี่ย 874 ไมครอน และขนาดอนุภาคของวัตถุดิบที่ได้จากเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์มีขนาดเฉลี่ย 1,681 ไมครอน พบว่าไก่เนื้อที่ได้รับอาหารที่ใช้วัตถุดิบบดโดยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ มีน้ำหนักตัวและประสิทธิภาพการใช้อาหารดีกว่าอาหารที่ใช้วัตถุดิบที่บดโดยเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์ที่ขนาดอนุภาคดังกล่าว อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ขณะที่ Nir *et al.* (1995) ทำการศึกษาปฏิกิริยาร่วมระหว่างขนาดอนุภาคของวัตถุดิบอาหาร และรูปแบบของอาหารสำหรับไก่เนื้อ โดยใช้ข้าวสาลีและข้าวโพดที่บดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์และโรลเลอร์มิลล์ในรูปของอาหารผง และอาหารอัดเม็ด พบว่าไก่เนื้อที่ได้รับอาหารอัดเม็ดที่บดด้วยเครื่องบดทั้ง 2 ชนิด มีน้ำหนักตัว อัตราการกิน และประสิทธิภาพการใช้อาหาร แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) ในขณะที่เมื่ออาหารอยู่ในรูปผง ไก่ที่ได้รับวัตถุดิบอาหารที่มีอนุภาคหยาบที่บดด้วยเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์ มีน้ำหนักตัวและประสิทธิภาพการใช้อาหารดีกว่าไก่ที่กินอาหารที่วัตถุดิบบดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์

Deaton *et al.* (1989) ทำการเปรียบเทียบผลของการใช้ข้าวโพดบดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์และโรลเลอร์มิลล์ ให้ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 814-873 และ 1,343-1,501 ไมครอน ในอาหารผงสำหรับไก่ไข่ พบว่าประสิทธิภาพการผลิต น้ำหนักตัว ปริมาณอาหารที่กินต่อวัน ประสิทธิภาพการใช้อาหาร อัตราการตาย และน้ำหนักไข่ ตลอดระยะเวลาการเลี้ยง แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งสรุปได้ว่าขนาดอนุภาคของธัญพืชและชนิดของเครื่องบด ไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการผลิตของไก่ไข่ ขณะที่ ภาวิณี (2549) ทำการเปรียบเทียบผลของขนาดอนุภาคข้าวโพดที่ผ่านการบดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ที่ขนาดรูตะแกรง 3 และ 10 มิลลิเมตร ซึ่งมีขนาดอนุภาคของข้าวโพดเฉลี่ย 638 และ 870 ไมครอน ตามลำดับ และเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์ที่มีระยะห่างของลูกกลิ้ง 1.8 เซนติเมตร และลอดผ่านรูตะแกรงขนาด 10 มิลลิเมตร ซึ่งมีขนาดอนุภาคของข้าวโพดเฉลี่ย 1,079 ไมครอน โดยนำมาใช้ประกอบสูตรอาหารเลี้ยงไก่ไข่ในสภาพหนาแน่น (4 ตัวต่อ 1 กรงตับ) พบว่า ไก่กลุ่มที่ได้รับข้าวโพดที่บดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ที่ขนาดรูตะแกรง 10 มิลลิเมตร มีสมรรถภาพการผลิตและคุณภาพไข่ดีกว่า เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มที่ได้รับข้าวโพดที่บดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ที่ขนาดรูตะแกรง 3 มิลลิเมตร และกลุ่มที่ได้รับข้าวโพดที่บดด้วยเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์ที่มีระยะห่างของลูกกลิ้ง 1.8 เซนติเมตร อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ในขณะที่กลุ่มที่ได้รับ

ข้าวโพดที่บดด้วยเครื่องโรลเลอร์มิลล์ มีค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของน้ำหนักไข่และสีไข่แดงสูงที่สุด เนื่องมาจากพฤติกรรมการเลือกจิกกินข้าวโพดที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ที่ได้จากการบดด้วยเครื่องโรลเลอร์มิลล์ ทำให้สัตว์ได้รับสารอาหารไม่เท่ากันและเกิดความไม่สม่ำเสมอของผลผลิตไข่

ในอุตสาหกรรมไก่ไข่ ขนาดของอนุภาควัตถุดิบถือว่ามีความสำคัญ เนื่องจากมีผลต่อความสม่ำเสมอของสมรรถภาพการผลิตของแม่ไก่และคุณภาพไข่ การเลี้ยงไก่ไข่ในอุตสาหกรรมปัจจุบันเป็นการเลี้ยงภายใต้สภาวะหนาแน่น (4-5 ตัวต่อ 1 กรงคับ) ซึ่งจะเกิดพฤติกรรมการแบ่งชั้นและความไม่เท่าเทียมกันของไก่ในกรงในการเข้ามาจิกกินอาหาร มีผลให้ไก่ตัวที่สามารถเข้ามากินอาหารก่อนนั้นเลือกจิกกินอาหารที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ก่อน ทำให้เกิดความไม่สม่ำเสมอของผลผลิตไข่ของไก่ไข่ที่ทำการเลี้ยงภายในกรงเดียวกัน ซึ่งปัจจุบันกำลังเป็นปัญหาสำหรับผู้เลี้ยงไก่ไข่ในประเทศไทยอย่างมาก

จากข้อมูลข้างต้นชนิดของเครื่องบดวัตถุดิบอาหารและขนาดอนุภาคเฉลี่ยของข้าวโพดที่เหมาะสมสำหรับอาหารไก่ไข่ยังไม่สามารถระบุแน่ชัด ประกอบกับการศึกษาวิจัยในด้านดังกล่าวในประเทศไทยมีค่อนข้างจำกัด ทั้งทางด้านขนาดอนุภาคที่เหมาะสมสำหรับเครื่องบดแต่ละชนิดและรวมถึงในด้านของประสิทธิภาพการผลิต อัตราการผลิต และปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ใช้ในการบดข้าวโพด ที่มีความสำคัญในระดับโรงงานอาหารสัตว์ การศึกษาครั้งนี้จึงเพื่อให้เกิดประโยชน์ในด้านการผลิตสัตว์ที่ส่งผลถึงประสิทธิภาพการผลิตของไก่ไข่และในระดับโรงงานอาหารสัตว์ที่จะเกิดความคุ้มค่าและผลกำไร ซึ่งจะทำได้ผลผลิตไข่ที่มีต้นทุนการผลิตต่ำและเกิดผลตอบแทนสูงสุด ดังนั้นจึงทำการศึกษาผลของชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาคของข้าวโพดที่มีผลต่อคุณภาพไข่ และสมรรถภาพการผลิตของแม่ไก่ เพื่อให้ได้ข้อมูลที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้อย่างถูกต้องและมีความเหมาะสมกับอุตสาหกรรมการผลิตไก่ไข่ของประเทศไทย

อุปกรณ์และวิธีการ

การทดลองที่ 1

วัตถุประสงค์

ศึกษาผลของชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาคข้าวโพด ต่อลักษณะทางกายภาพของข้าวโพดบด และลักษณะทางกายภาพและเคมีของอาหารผงไก่ไข่

อุปกรณ์

1. เครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ ผลิตในประเทศไทย ความเร็วรอบ 1,450 R.P.M
2. เครื่องบดโรตเลอร์มิลล์ ผลิตในประเทศไทย Model SMT170-290D: 0611-569 Capacity 900 M³/hr. Static pressure 1,000 Pa. มอเตอร์ 1.5 EL V102760 kW. ความเร็วรอบ 2,900 R.P.M
3. เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับวิเคราะห์ความสม่ำเสมอของอนุภาค คุณสมบัติทางกายภาพ และลักษณะกายภาพของอาหารไก่ไข่ (ASAE, 1983)
4. เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับวิเคราะห์ขนาดอนุภาคของอาหารไก่ไข่ Shaker Model AS 200 BASIC S/N 1260712071 ตามวิธีการของ ASAE Standard: ASAE S319 (ASAE, 1983)
5. เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับวิเคราะห์ค่าความหนาแน่น (bulk density) ตามวิธีการของ ASAE Standard: ASAE 5269.3 (ASAE, 1983)
6. เครื่องมือ อุปกรณ์และสารเคมี สำหรับวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของอาหารทดลอง
7. ข้าวโพดที่ผ่านการบดด้วยเครื่องบด 2 ชนิด คือเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์และโรตเลอร์มิลล์ และกำหนดขนาดอนุภาคเฉลี่ย 2 ขนาดดังนี้

กลุ่มที่ 1 ข้าวโพดที่บดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1,000 ไมครอน

กลุ่มที่ 2 ข้าวโพดที่บดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1,300 ไมครอน

กลุ่มที่ 3 ข้าวโพดที่บดด้วยเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์ ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1,000 ไมครอน

กลุ่มที่ 4 ข้าวโพดที่บดด้วยเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์ ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1,300 ไมครอน

วิธีการ

1. วิธีการทดลอง

1.1 บดข้าวโพดสำหรับประกอบสูตรอาหารไก่ไข่ โดยกำหนดสภาวะการบดของเครื่องบดดังนี้

1.1.1 บดข้าวโพดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ให้มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1,000 ไมครอน การบดใช้ตะแกรงแฮมเมอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเปิด 6 มิลลิเมตร กำหนดหัวค้อน 4 ใบ

1.1.2 บดข้าวโพดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ให้มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1,300 ไมครอน การบดใช้ตะแกรงแฮมเมอร์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเปิด 6 มิลลิเมตร กำหนดหัวค้อน 2 ใบ

1.1.3 บดข้าวโพดด้วยเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์ให้มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1,000 ไมครอน การตั้งระยะห่างลูกกลิ้งที่คู่บน 65.5 และลูกกลิ้งคู่ล่าง 68.5 unit roller

1.1.4 บดข้าวโพดด้วยเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์ให้มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1,300 ไมครอน การตั้งระยะห่างลูกกลิ้งที่คู่บน 63 และลูกกลิ้งคู่ล่าง 67 unit roller

1.2 บันทึกข้อมูลในการบดแต่ละขนาดของข้าวโพด ได้แก่ ปริมาณการบดต่อชั่วโมง และ ค่าพลังงานการบด

1.3 วิเคราะห์ขนาดอนุภาคเฉลี่ย ความหนาแน่น และลักษณะทางกายภาพของข้าวโพดบด (ASAE, 1983)

1.4 นำข้าวโพดที่ผ่านการบดไปประกอบสูตรอาหารไก่ไข่ทดลอง (ตารางที่ 6) แล้วทำการ วิเคราะห์ขนาดอนุภาคเฉลี่ย ความหนาแน่น และลักษณะทางกายภาพของอาหาร (ASAE, 1983)

2. การวางแผนการทดลอง

ใช้แผนการทดลองแบบ 2x2 แฟกทอเรียล ที่ใช้แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Factorial in Completely Randomide Design) โดยแบ่งกลุ่มการทดลองออกเป็น 4 กลุ่ม กลุ่มละ 3 ซ้ำ ข้าวโพดทดลองแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มทดลอง (treatment combination) โดยการสุ่มอิสระ ซึ่งกลุ่มทดลองประกอบด้วย

ปัจจัย A = ชนิดของเครื่องบด ซึ่งมี 2 ทรีตเมนต์ คือ
 a_1 = เครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์
 a_2 = เครื่องบดโรลเลอร์มิลล์

ปัจจัย B = ขนาดอนุภาคของข้าวโพด ซึ่งมี 2 ทรีตเมนต์ คือ
 b_1 = ข้าวโพดบดที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1,000 ไมครอน
 b_2 = ข้าวโพดบดที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1,300 ไมครอน

3. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ใช้การทดลองแบบ 2 x 2 แฟกทอเรียล ที่ใช้แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (2 x 2 Factorial Experiment in Completely Randomide Design) โดยมี 2 ปัจจัยที่ศึกษา คือ ชนิดของเครื่องบด และขนาดอนุภาคของข้าวโพด ซึ่งมีแบบหุนจำลองดังนี้

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \alpha\beta_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

μ = ค่าเฉลี่ยทั้งหมดในการทดลอง

α_i = อิทธิพลเนื่องจากปัจจัย A (ชนิดเครื่องบด) ที่ระดับ i เมื่อ $i = 1, 2$

β_j = อิทธิพลเนื่องจากปัจจัย B (ขนาดอนุภาค) ที่ระดับ j เมื่อ $j = 1, 2$

$\alpha\beta_{ij}$ = อิทธิพลร่วมเนื่องจากปัจจัย A และ B (อิทธิพลร่วม AB) ที่ระดับ ij

ε_{ijk} = ความคลาดเคลื่อนสุ่ม

โดยที่ Y_{ijk} = ค่าสังเกตจากทรีตเมนต์ (combination) ที่ ij ซ้ำที่ k เมื่อ $k = 1, 2, 3$

เมื่อสิ้นสุดการทดลองนำข้อมูลที่ได้ทั้งหมดมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) ตามแผนการทดลองโดยวิธี Proc GLM สำหรับข้อมูลที่วัดค่าเป็นเปอร์เซ็นต์นำมาทำการแปลงข้อมูลแบบอาร์คไซน์ก่อนการวิเคราะห์ความแปรปรวน (พิศมัย, 2545) และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกลุ่มโดยวิธี orthogonal contrast ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป

4. การบันทึกข้อมูล

4.1 การเก็บตัวอย่าง

เก็บตัวอย่างข้าวโพดบด ในแต่ละระยะตามกลุ่มการทดลองดังนี้

- 4.1.1 ข้าวโพดที่บดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1,000 ไมครอน
- 4.1.2 ข้าวโพดที่บดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1,300 ไมครอน
- 4.1.3 ข้าวโพดที่บดด้วยเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์ ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1,000 ไมครอน
- 4.1.4 ข้าวโพดที่บดด้วยเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์ ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1,300 ไมครอน

4.2 เก็บตัวอย่างข้าวโพดบดและอาหารผงเพื่อศึกษาข้อมูลดังต่อไปนี้

- 4.2.1 ลักษณะทางกายภาพของตัวอย่าง
- 4.2.2 เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยทางเรขาคณิตของอนุภาค (geometric mean diameter, D_{gw})
- 4.2.3 ความสม่ำเสมอทางเรขาคณิตของอนุภาคตัวอย่างที่บด (geometric standard deviation, S_{gw})
- 4.2.4 จำนวนอนุภาคต่อกรัม (number of particles per gram, N)
- 4.2.5 พื้นที่ผิวของอนุภาค (surface area of particles, cm^2 , A)

4.3 เก็บตัวอย่างอาหารผงไก่ไข่เพื่อวิเคราะห์ความแปรปรวน (Coefficient of Variance; CV.) ของสารอาหารที่สำคัญ ได้แก่ แคลเซียม ฟอสฟอรัส โปรตีน และพลังงาน โดยทำการสุ่มเก็บตัวอย่าง 5 จุดภายในถังผสมอาหาร

การทดลองที่ 2

วัตถุประสงค์

ศึกษาถึงผลของชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาคของข้าวโพดต่อคุณภาพไข่และประสิทธิภาพการผลิตของแม่ไก่

อุปกรณ์

1 สัตว์ทดลอง

ไก่ไข่พันธุ์ โรมาบรอน อายุ 43 สัปดาห์ จำนวน 480 ตัว แบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม กลุ่มละ 5 ซ้ำ ซ้ำละ 6 กรง กรงละ 4 ตัว รวม จำนวนไก่ไข่ซ้ำละ 24 ตัว การทดลองแบ่งการเก็บข้อมูลออกเป็น 5 ระยะ ระยะละ 28 วัน

2 อาหารทดลองและการให้อาหาร

การทดลองจะทำการนำข้าวโพดที่ได้จากการบดในการทดลองที่ 1 ทำการผสมอาหาร โดยอาหารทดลองสำหรับไก่ไข่ตลอดการทดลอง คำนวณให้มีปริมาณสารอาหารที่เพียงพอกับความต้องการของไก่ไข่ ดังตารางที่ 6 แบ่งอาหารทดลองออกเป็น 4 สูตรดังนี้

- กลุ่มที่ 1 อาหารทดลองที่ใช้ข้าวโพดที่บดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1,000 ไมครอน
- กลุ่มที่ 2 อาหารทดลองที่ใช้ข้าวโพดที่บดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1,300 ไมครอน
- กลุ่มที่ 3 อาหารทดลองที่ใช้ข้าวโพดที่บดด้วยเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์ ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1,000 ไมครอน
- กลุ่มที่ 4 อาหารทดลองที่ใช้ข้าวโพดที่บดด้วยเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์ ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1,300 ไมครอน

ตารางที่ 6 ส่วนประกอบของวัตถุดิบอาหารที่ใช้ในอาหารทดลอง (%) ตลอดการทดลอง

วัตถุดิบ	เปอร์เซ็นต์
ข้าวโพด	57.72
กากถั่วเหลือง (44%)	29.53
น้ำมันถั่วเหลือง	1.68
ดีแอลเมทไทโอนีน	0.13
โมโนไคแคลเซียมฟอสเฟต (21P)	1.66
เปลือกหอยป่น	8.72
เกลือป่น	0.32
พรีมิกซ์ไก่ไข่ ^{1/}	0.25
รวม	100.00
ปริมาณโภชนาที่ได้จากการคำนวณ (%)	
พลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้ (kcal/kg)	2750.03
โปรตีน	17.50
ไขมัน	4.04
เยื่อใย	3.59
แคลเซียม	3.70
ฟอสฟอรัสทั้งหมด	0.63
ฟอสฟอรัสที่ใช้ประโยชน์	0.40
กรดอะมิโน	
ไลซีน	0.94
เมทไทโอนีน	0.41
เมทไทโอนีน+ ซีสทีน	0.68
อาร์จินีน	1.21
ทรีโอนีน	0.69
ทริปโทเฟน	0.23

^{1/}รายละเอียดส่วนประกอบของพรีมิกซ์วิตามิน-แร่ธาตุ แสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ส่วนประกอบใน 1 กิโลกรัมของพรีมิกซ์ไวตามิน-แร่ธาตุ

วิตามิน	ปริมาณ
วิตามินเอ	4.00 IU (ล้านหน่วยสากล)
วิตามินดี	1.20 IU (ล้านหน่วยสากล)
วิตามินอี	4,000 มิลลิกรัม
วิตามินเค	6,000 มิลลิกรัม
วิตามินบี 1	800 มิลลิกรัม
วิตามินบี 2	2,000 มิลลิกรัม
วิตามินบี 6	1,200 มิลลิกรัม
วิตามินบี 12	2.5 มิลลิกรัม
กรดโฟลิก	200 มิลลิกรัม
กรดนิโคตินิก	5,000 มิลลิกรัม
กรดแพนโทเทนิก	3,000 มิลลิกรัม
ไบโอติน	4 มิลลิกรัม
โคลีนคลอไรด์	100,000 มิลลิกรัม
แมงกานีส	24.0 กรัม
เหล็ก	16.0 กรัม
สังกะสี	20.0 กรัม
ทองแดง	4.0 กรัม
ไอโอดีน	0.8 กรัม
โคบอลต์	0.08 กรัม
ซีลีเนียม	0.04 กรัม

3. โรงเรือนและการจัดการเลี้ยงดู

ทำการทดลองในโรงเรือนปิด ที่มีการระบายอากาศด้วยระบบระเหยไอน้ำ (evaporation cooling system) ทำการบันทึกอุณหภูมิและความชื้นภายในโรงเรือนทุกวันเวลา 8.00 และ 15.00 น. ภายในโรงเรือนมีอุณหภูมิเวลาเช้า 16.2-28.9 องศาเซลเซียส อุณหภูมิเวลาบ่าย 24.9-32.0 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ 63-88 ทำการเลี้ยงไก่ไข่ในสภาพหนาแน่น 4 ตัวต่อ 1 กรงตับ ที่มีช่องเปิดในการให้อาหารเพียง

3 ช่อง ซึ่งทรงตบเป็นพื้นลวดขนาด 18x36x16 ลูกบาศก์นิ้ว และมีโปรแกรมการให้ช่วงแสง 16 ชั่วโมงต่อวัน ตลอดการทดลอง ให้อาหารและน้ำเป็นแบบเต็มที (*ad libitum*) โดยให้อาหารวันละ 2 ครั้ง คือ เช้า เวลา 8.00 น. และเย็น เวลา 15.00 น. และสังเกตให้มีอาหารเหลืออยู่ในรางอาหารเพียงเล็กน้อยในแต่ละครั้งที่ทำการให้อาหาร น้ำสะอาดจะให้อ่านระบบน้ำหยด ทำวัคซีนตามอายุของแม่ไก่อย่างสม่ำเสมอ

4. อุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

4.1 อุปกรณ์ในการเลี้ยงซึ่งได้แก่ รางน้ำ รางอาหาร ถังใส่อาหาร อุปกรณ์คักอาหาร เป็นต้น

4.2 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับการผสมอาหาร ได้แก่ เครื่องผสมอาหาร เครื่องชั่งหยาบ เครื่องชั่งละเอียด อุปกรณ์คักอาหาร วัตถุดิบอาหาร ฯลฯ

4.3 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับวิเคราะห์คุณภาพไข่ ได้แก่ พัดสำหรับวัดสีไข่แดง (Roche color fan) เครื่องวัดความสูงไข่ขาว เครื่องชั่งน้ำหนัก เครื่องวัดความหนาเปลือกไข่ อุปกรณ์วัดความถ่วงจำเพาะ ฯลฯ

4.4 เครื่องมือและอุปกรณ์สำหรับวิเคราะห์ความหนืดไข่ขาว ได้แก่ เครื่องวัดความหนืด (viscometer) Brook field Model DV-I+Viscometer วัดที่ความเร็วรอบ 100 R.P.M. ใบกวนหมายเลข 1 ปีกเกอร์ และนาฬิกาจับเวลา

4.5 อุปกรณ์และสารเคมีสำหรับวิเคราะห์หาองค์ประกอบทางโภชนาของอาหารทดลองตามวิธีของ A. O. A. C. (1990)

4.6 เครื่องวิเคราะห์พลังงาน bomb calorimeter และทำการวิเคราะห์พลังงานตามวิธีของ อังคณา และดวงสมร (2532)

4.7 เครื่อง automatic absorption spectrophotometer สำหรับวิเคราะห์หาแร่ธาตุฟอสฟอรัส

วิธีการ

1. วิธีการทดลอง

1.1 จัดกลุ่มการทดลองโดยสุ่ม แบ่งการทดลองออกเป็น 5 ช่วง ช่วงละ 28 วัน ตามช่วงอายุของไก่คือ 43-46, 47-50, 51-54, 55-58 และ 59-62 สัปดาห์

1.2 บันทึกปริมาณอาหารที่กินในแต่ละระยะ น้ำหนักตัวที่เปลี่ยนแปลง ปริมาณผลผลิตไข่และจำนวนไข่ตาย

1.3 เก็บตัวอย่างไข่ไก่จำนวน 8 ฟองเมื่อสิ้นสุดแต่ละช่วงการทดลองเป็นเวลา 3 วัน ติดต่อกันเพื่อนำไปวิเคราะห์คุณภาพไข่

1.4 เก็บตัวอย่างไข่ไก่จำนวน 10 ฟองเมื่อสิ้นสุดแต่ละช่วงการทดลอง เพื่อนำไปวิเคราะห์ความหนืดไข่ขาว

2. แผนการทดลอง

ใช้แผนการทดลองแบบ 2x2 แฟกทอเรียล ที่ใช้แผนการทดลองแบบกลุ่มสมบูรณ์ (Factorial in Completely Randomized Design) โดยแบ่งไก่ไข่ออกเป็น 4 กลุ่ม กลุ่มละ 5 ซ้ำ ซ้ำละ 24 ตัว ไก่ไข่ได้รับอาหารทดลองแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มทดลอง (treatment combination) โดยการสุ่มอิสระ ซึ่งกลุ่มทดลองประกอบด้วย

ปัจจัย A	=	ชนิดของเครื่องบด ซึ่งมี 2 ชนิดคือ
a_1	=	เครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์
a_2	=	เครื่องบดโรลเลอร์มิลล์

ปัจจัย B	=	ขนาดอนุภาคของข้าวโพด ซึ่งมี 2 ชนิดคือ
b_1	=	ข้าวโพดบดที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1,000 ไมครอน
b_2	=	ข้าวโพดบดที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1,300 ไมครอน

3. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ใช้การทดลองแบบ 2 x 2 แฟกตอเรียล ที่ใช้แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (2 x 2 Factorial Experiment in Completely Randomized Design) โดยมี 2 ปัจจัยที่ศึกษา คือ ชนิดของเครื่องบด และ ขนาดอนุภาคของข้าวโพด ซึ่งมีแบบหุ่นจำลองดังนี้

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \alpha\beta_{ij} + \epsilon_{ijk}$$

μ	=	ค่าเฉลี่ยทั้งหมดในการทดลอง
α_i	=	อิทธิพลเนื่องจากปัจจัย A (ชนิดเครื่องบด) ที่ระดับ i เมื่อ i = 1, 2
β_j	=	อิทธิพลเนื่องจากปัจจัย B (ขนาดอนุภาค) ที่ระดับ j เมื่อ j = 1, 2
$\alpha\beta_{ij}$	=	อิทธิพลร่วมเนื่องจากปัจจัย A และ B (อิทธิพลร่วม AB) ที่ระดับ ij
ϵ_{ijk}	=	ความคลาดเคลื่อนสุ่ม
โดยที่ Y_{ijk}	=	ค่าสังเกตจากทรีตเมนต์ (combination) ที่ ij ซ้ำที่ k เมื่อ k = 1, 2, 3, 4, 5

เมื่อสิ้นสุดการทดลองนำข้อมูลที่ได้ทั้งหมดมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) ตามแผนการทดลองโดยวิธี Proc GLM สำหรับข้อมูลที่วัดค่าเป็นเปอร์เซ็นต์นำมาทำการแปลงข้อมูลแบบอาร์คไซน์ก่อนการวิเคราะห์ความแปรปรวน (พิศมัย, 2545) และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกลุ่มโดยวิธี orthogonal contrast ด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำเร็จรูป

4. การบันทึกข้อมูล

1. สมรรถภาพการผลิต

ทำการบันทึกผลการทดลองเป็น 5 ช่วง ช่วงละ 28 วัน อายุของไก่คือ ช่วงอายุ 43-46, 47-50, 51-54, 55-58 และ 59-62 สัปดาห์ โดยแต่ละช่วงอายุทำการบันทึกข้อมูลดังนี้

1. บันทึกการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักตัว โดยชั่งไก่แต่ละกรงเมื่อเริ่มต้น และสิ้นสุดการทดลอง เพื่อนำมาคำนวณค่าน้ำหนักตัวที่เปลี่ยนแปลง

2. บันทึกปริมาณอาหารที่กินตลอดระยะเวลาการทดลอง และปริมาณอาหารที่เหลือ เพื่อนำมาคำนวณหาปริมาณอาหารที่กินต่อตัวต่อวัน และปริมาณอาหารที่กินต่อผลผลิตไข่ 1 โหล

3. บันทึกผลผลิตไข่ โดยบันทึกจำนวนไข่ในแต่ละเช้าทุกวัน และนำมาคำนวณเป็นอัตราการผลิตไข่ของไก่ไข่แต่ละกลุ่มการทดลอง

4. บันทึกจำนวนไก่ตายของแต่ละเช้า แล้วนำมาคำนวณเป็นอัตราการเลี้ยงรอด

5. บันทึกอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนทุกวัน โดยนำค่าที่ได้จากการบันทึกมาทำการวิเคราะห์หาค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานดังต่อไปนี้

$$1. \text{ ปริมาณอาหารที่กินต่อวัน} = \frac{\text{ปริมาณอาหารที่กินในช่วงการทดลอง}}{28 \text{ วัน} \times \text{จำนวนไก่เมื่อสิ้นสุดการทดลอง}}$$

$$2. \text{ ปริมาณอาหารที่กินต่อผลผลิตไข่ 1 โหล} = \frac{\text{ปริมาณอาหารที่กินในช่วงการทดลอง} \times 12}{\text{จำนวนไข่ในช่วงการทดลอง}}$$

$$3. \text{ อัตราการให้ผลผลิตไข่ต่อจำนวนแม่ไก่มีชีวิต} = \frac{\text{จำนวนไข่ในช่วงการทดลอง} \times 100}{\text{จำนวนวัน} \times \text{จำนวนไก่เมื่อสิ้นสุดการทดลอง}}$$

(% hen day egg production)

$$4. \text{ อัตราการให้ผลผลิตไข่ต่อจำนวนแม่ไก่} = \frac{\text{จำนวนไข่ในช่วงการทดลอง} \times 100}{\text{จำนวนวัน} \times \text{จำนวนไก่เมื่อสิ้นสุดการทดลอง}}$$

เริ่มการทดลอง (% hen house egg production)

$$5. \text{ น้ำหนักไข่เฉลี่ยต่อฟอง} = \frac{\text{น้ำหนักไข่ทั้งหมดตลอดการทดลอง}}{\text{จำนวนไข่}}$$

$$6. \text{ มวลไข่ต่อแม่ไก่ต่อวัน} = \text{อัตราการให้ผลผลิตไข่ต่อจำนวนแม่ไก่มีชีวิต} \times \text{น้ำหนักไข่เฉลี่ย}$$

$$7. \text{ อัตราการเลี้ยงรอด} = \frac{\text{จำนวนไก่เมื่อสิ้นสุดการทดลอง} \times 100}{\text{จำนวนไก่เมื่อเริ่มการทดลอง}}$$

$$8. \text{ Haugh unit} = 100 \times \log (H + 7.57 - 1.7W^{0.37})$$

H = ความสูงไข่ขาว (มิลลิเมตร)

W = น้ำหนักไข่ (กรัม)

G = 32.2

(Stadelman and Cotterill, 1995)

2. คุณภาพไข่

ทำการวิเคราะห์คุณภาพไข่ โดยการสุ่มไข่จำนวน 8 ฟอง จากแต่ละซ้ำ เมื่อสิ้นสุดแต่ละช่วงการทดลองเป็นเวลา 3 วันติดต่อกันในช่วงเวลาเดียวกัน ทำการวิเคราะห์คุณภาพไข่ภายในวันที่เก็บและนำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ทั้ง 3 วันจากแต่ละช่วงการทดลองมาหาค่าเฉลี่ย โดยทำการบันทึกข้อมูลดังต่อไปนี้

1. บันทึกปริมาณไข่ทั้งหมดในแต่ละซ้ำการทดลอง

2. บันทึกน้ำหนักไข่ทุกฟองด้วยเครื่องชั่งดิจิทัล ทศนิยม 2 ตำแหน่ง พร้อมคัดแบ่งเกรดไข่ตามน้ำหนักของไข่ ในการทดลองทำการคัดเกรดไข่อีกก่อนการตอกไข่วิเคราะห์ เนื่องจากผลของขนาดอนุภาคข้าวโพดในอาหารไก่ไข่ ส่งผลให้คุณภาพไข่และน้ำหนักไข่ที่แตกต่างกันค่อนข้างสูง จึงทำการคัดเกรดไข่เพื่อให้สามารถสุ่มไข่ให้มีคุณภาพของไข่ทุกเกรดในการวิเคราะห์ เพื่อให้ได้ค่าเฉลี่ยของคุณภาพไข่ที่เป็นตัวแทนที่ดีของไข่แต่ละเกรด โดยแบ่งเป็น 6 ระดับดังนี้

1. ไข่เบอร์ 0 ขนาดไข่ยักษ์ (jumbo) น้ำหนักขึ้นต่อฟอง 70 กรัมขึ้นไป
2. ไข่เบอร์ 1 ขนาดใหญ่พิเศษ (extra large) น้ำหนักขึ้นต่อฟอง 65-69 กรัม
3. ไข่เบอร์ 2 ขนาดใหญ่ (large) น้ำหนักขึ้นต่อฟอง 60-64 กรัม
4. ไข่เบอร์ 3 ขนาดกลาง (medium) น้ำหนักขึ้นต่อฟอง 55-59 กรัม
5. ไข่เบอร์ 4 ขนาดไข่เล็ก (small) น้ำหนักขึ้นต่อฟอง 50-54 กรัม
6. ไข่เบอร์ 5 ขนาดไข่จิ๋ว (pewee) น้ำหนักขึ้นต่อฟอง 45-49 กรัม

3. บันทึกค่าความถ่วงจำเพาะของไข่ทุกฟองในแต่ละซ้ำการทดลอง โดยทำการลอยในน้ำเกลือที่มีความถ่วงจำเพาะต่างๆ ตั้งแต่ 1.060, 1.064, 1.068, 1.072, 1.076, 1.080, 1.084, 1.088, 1.092, 1.096, 1.100 และ 1.104 โดยวัดความถ่วงจำเพาะให้ได้ตามกำหนด โดยใช้ไฮโดรมิเตอร์ (hydrometer)

4. ทำการสุ่มไข่จากแต่ละเกรดในแต่ละซ้ำ จำนวน 8 ฟอง ตอกเพื่อทำการวิเคราะห์คุณภาพภายในฟองไข่ และบันทึกข้อมูลดังนี้

4.1 นำหนักไข่ขาว น้ำหนักไข่แดง และน้ำหนักเปลือกไข่ โดยเครื่องชั่งดิจิตอล ทศนิยม 2 ตำแหน่ง

4.2 วัดความสูงไข่ขาวโดยใช้ชุดตรวจสอบคุณภาพไข่ขาวที่ประกอบด้วย QCD ชุดแสดงผลระบบดิจิตอล และ albumen height gauge ได้ค่าความสูงไข่ขาวเป็นมิลลิเมตร และนำมาคำนวณค่าฮอฟฟ์ยูนิต (Haugh unit) ด้วยสมการที่แสดงข้างต้น

4.3 วัดค่าคะแนนสีของไข่แดงใช้พัดวัดสีไข่แดง (Roche color fan) ที่มีสีเหลืองอ่อนถึงสีส้มแดง ตั้งแต่ 1-15 (คะแนน)

4.4 ความหนาเปลือกไข่ โดยใช้ไมโครมิเตอร์สำหรับวัดความหนาผิวโค้ง ทำการสุ่มเปลือกไข่จำนวน 3 ชิ้น ที่ตำแหน่งป้าน กลาง และแหลมของไข่ ในการวัดเพื่อหาค่าเฉลี่ยความหนาเปลือกไข่

5. สุ่มไข่จากแต่ละซ้ำการทดลองจำนวน 10 ฟอง เพื่อวิเคราะห์ความหนืดไข่ขาว โดยใช้เครื่องวัดความหนืดชนิดแกนหมุน (viscometer) Brook field Model DV-I+Viscometer วัดที่ความเร็วรอบ 100 R.P.M. ใบกวนหมายเลข 1 โดยการตอกไข่ที่สุ่มทุกฟอง และแยกไข่ขาวและไข่แดงออกจากกัน เพื่อให้ได้ไข่ขาวปริมาตรประมาณ 500 มิลลิลิตร ในการวัดความหนืด จับเวลา 1 นาที และบันทึกค่าความหนืดในหน่วย centipoint ของตัวอย่าง

5. สถานที่ทำการทดลอง

1. ศึกษาสมรรถภาพการผลิตของไก่ไข่ ณ ศูนย์วิจัยและพัฒนาการผลิตสัตว์ปีก สถาบันสุวรรณวาทกกลกิจเพื่อการค้นคว้าและพัฒนาปศุสัตว์และผลิตภัณฑ์สัตว์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จ.นครปฐม
2. วิเคราะห์ปริมาณโภชนะในอาหารทดลองที่ห้องปฏิบัติการวิเคราะห์อาหารสัตว์ ภาควิชาสัตวบาล คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จ.นครปฐม
3. วิเคราะห์ขนาดอนุภาคของข้าวโพด ณ ภาควิชาพัฒนาผลิตภัณฑ์ คณะอุตสาหกรรม การเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน จ.กรุงเทพมหานคร
4. วิเคราะห์ความหนืดไข่ขาว ณ ที่ห้องปฏิบัติการอาหาร ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะ วิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จ.นครปฐม
5. ศึกษาข้อมูลด้านประสิทธิภาพการบด ณ กรุงเทพมหานคร อ.พระประแดง จ.สมุทรปราการ

6. ระยะเวลาการทดลอง

เริ่มทำการทดลอง : ตุลาคม 2550

สิ้นสุดการทดลอง : เมษายน 2551

ผลและวิจารณ์

ผลการวิเคราะห์ทางเคมี

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางโภชนาการต่างๆ ของอาหารทดลองที่ใช้ในแต่ละช่วงอายุของไก่ไข่ แสดงไว้ในตารางที่ 8 ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ทางเคมีพบว่าอาหารทดลองมีองค์ประกอบทางโภชนาการต่างๆ ใกล้เคียงกับปริมาณโภชนาการที่ได้จากการคำนวณสูตรอาหาร (ตารางที่ 6)

ตารางที่ 8 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางโภชนาการของอาหารทดลอง

องค์ประกอบทางเคมี	อาหารทดลอง			
	แฮมเมอร์มิลล์	แฮมเมอร์มิลล์	โรตเตอร์มิลล์	โรตเตอร์มิลล์
	1,000 μm	1,300 μm	1,000 μm	1,300 μm
ความชื้น (%)	9.87	9.41	9.47	9.61
วัตถุแห้ง (%)	90.13	90.59	90.53	90.39
ไขมัน (%)	3.61	3.30	3.58	3.52
เยื่อใย (%)	4.45	4.35	4.48	4.20
เถ้า (%)	12.50	12.80	12.35	12.34
โปรตีน (%)	18.03	18.39	18.28	18.19
แคลเซียม (%)	3.96	4.08	3.91	4.09
ฟอสฟอรัส (%)	0.67	0.67	0.65	0.65
พลังงานรวม (kcal/kg)	4154.79	4102.73	4131.15	4135.40

การทดลองที่ 1

1. กระบวนการผลิต

ข้อมูลกระบวนการบดข้าวโพด ซึ่งประกอบด้วย พลังงานไฟฟ้าที่ใช้และประสิทธิภาพการบดข้าวโพดต่อชั่วโมง แสดงไว้ในตารางที่ 9 โดยการศึกษาด้านกระบวนการผลิตในการทดลองครั้งนี้ ทำการกำหนดสภาวะการบดเพื่อให้มีความเหมาะสมกับการทำงานของเครื่องบดแต่ละชนิดเพื่อให้ได้ขนาดอนุภาคข้าวโพดที่ต้องการ จึงไม่ได้กำหนดสภาวะการบดที่สอดคล้องกับการศึกษาที่ได้ศึกษามาก่อนหน้านี้ ดังนั้นจึงไม่สามารถนำผลที่ได้จากการศึกษามาทำการเปรียบเทียบกัน ได้ การศึกษากระบวนการผลิตจึงเป็นเพียงการรายงานข้อมูลที่ได้ภายใต้เงื่อนไขของการศึกษาครั้งนี้เท่านั้น ซึ่งผลการศึกษาพบว่า

1.1 พลังงานไฟฟ้าที่ใช้

จากการศึกษาผลของชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาคข้าวโพดบด ต่อค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ พบว่า การบดด้วยเครื่องโรลเลอร์มิลล์ให้ข้าวโพดที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยทั้ง 1,000 และ 1,300 ไมครอน ใช้พลังงานในการบดสูงกว่าการบดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ และการบดด้วยเครื่องโรลเลอร์มิลล์ให้ข้าวโพดที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1,000 ไมครอนนั้น ใช้พลังงานในการบดเท่ากับ 4104 กิโลวัตต์ต่อตัน ซึ่งสูงกว่าการบดด้วยเครื่องโรลเลอร์มิลล์ให้ข้าวโพดที่มีขนาดอนุภาค 1,300 ไมครอน ที่ใช้พลังงานในการบดเท่ากับ 2,129.90 กิโลวัตต์ต่อตัน อย่างไรก็ตามพบว่าการบดด้วยเครื่องแฮมเมอร์มิลล์ให้ข้าวโพดที่มีขนาดอนุภาค 1,000 และ 1,300 ไมครอน ใช้พลังงานในการบดใกล้เคียงกัน คือ 1,323.11 และ 1,311.51 กิโลวัตต์ต่อตัน ตามลำดับ (ตารางที่ 9)

1.2 ประสิทธิภาพการบดข้าวโพดต่อชั่วโมง

จากการศึกษาผลของชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาคข้าวโพดบด ต่อค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ พบว่า การบดข้าวโพดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ให้ข้าวโพดที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1,000 ไมครอน มีประสิทธิภาพการบดสูงที่สุดโดยสามารถบดข้าวโพดได้ 37.71 ตันต่อชั่วโมง รองลงมาคือการบดข้าวโพดด้วยเครื่องแฮมเมอร์มิลล์และโรลเลอร์มิลล์ให้ข้าวโพดที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1,300 ไมครอน ซึ่งมีประสิทธิภาพการบดไม่แตกต่างกันคือ 28.71 และ 24.43 ตันต่อชั่วโมง ตามลำดับ ในขณะที่การบดข้าวโพดด้วยเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์ให้ข้าวโพดที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1,000 ไมครอน มีประสิทธิภาพการบดต่ำที่สุด โดยสามารถบดข้าวโพดได้เพียง 8.82 ตันต่อชั่วโมง

ซึ่งต่ำกว่าประสิทธิภาพการบดข้าวโพดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ให้มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1,000 ไมครอนถึง 4 เท่า (ตารางที่ 9)

การศึกษาผลของชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาคข้าวโพด พบว่าการบดข้าวโพดด้วยเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์ให้มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1,000 ไมครอน มีความต้องการพลังงานไฟฟ้าในการบดสูงที่สุด และมีประสิทธิภาพการบดต่ำที่สุด เมื่อเปรียบเทียบการบดข้าวโพดด้วยเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์ให้มีขนาดอนุภาค 1,300 ไมครอน หรือการบดข้าวโพดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ให้มีขนาดอนุภาค 1,000 และ 1,300 ไมครอน ทั้งนี้เนื่องจากเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์ที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ เป็นเครื่องบดที่ได้รับการออกแบบมาเพื่อบดวัตถุดิบให้ได้ขนาดหยาบ (1,500-2,000 ไมครอน) ซึ่งหยาบกว่าขนาดของอนุภาควัตถุดิบที่ต้องการในการทดลองครั้งนี้ (1,000-1,300 ไมครอน) ดังนั้นกับการบดข้าวโพดให้มีขนาดอนุภาค 1,000 ไมครอน จึงส่งผลให้ลูกกลิ้งที่ใช้ในการบดวัตถุดิบเกิดการสึกหรอ (ตารางที่ 10, 11 และ 12)

การบดวัตถุดิบให้ละเอียดเพิ่มขึ้นจากขนาดอนุภาค 1,300 ไมครอน ลดลงเหลือขนาดอนุภาค 1,000 ไมครอนนั้น เครื่องบดจะมีกำลังการผลิตหรือ ปริมาณอาหารที่บดได้ต่อหน่วยเวลาลดลง เนื่องจากต้องใช้เวลาในการบดนานขึ้นเพื่อให้เอนโดสเปิร์มของพืชเกิดการแตกออกและได้ขนาดอนุภาคที่กำหนด ทำให้ต้องใช้ปริมาณกำลังงานหรือพลังงานในการบดอาหารต่อหน่วยของอาหารสูงขึ้น เมื่อทำการบดอาหารละเอียดมากขึ้น ปริมาณการบดต่อหน่วยเวลาจะลดลงเป็นผลให้ลดอัตราการผลิตลง (อุทัย, ม.ป.ป.; Healy *et al.*, 1994; Wondra *et al.* 1995a) นอกจากนี้แล้วพบว่าเมื่อทำการบดธัญพืชให้มีขนาดเล็ก เป็นการเพิ่มระยะเวลาที่วัตถุดิบต้องอยู่ในห้องบดนานขึ้น ส่งผลให้เกิดแรงเสียดสีระหว่างอนุภาค วัตถุดิบทำให้บดได้ยากขึ้น และประสิทธิภาพการบดต่ำลง (Behnke, 1983; Reuscher, 2006) ในการบดข้าวโพดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ให้มีขนาดอนุภาค 1,300 ไมครอนนั้น พบว่ามีความต้องการพลังงานไฟฟ้าต่ำที่สุด ซึ่งผลการทดลองในครั้งนี้มีความขัดแย้งกับการทดลองของพันธิพา (2539) ที่ศึกษาการลดขนาดอนุภาคข้าวโพดให้มีขนาดอนุภาค 800 และ 400 ไมครอน ด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์และโรลเลอร์มิลล์ และ Martin (1984) ที่ศึกษาการลดขนาดอนุภาคข้าวโพดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ให้มีขนาดอนุภาค 595-876 ไมครอน (ลอดผ่านรูตะแกรงขนาด 3.2 และ 6.4 มิลลิเมตร) และโรลเลอร์มิลล์ให้มีขนาดอนุภาค 946-1,460 ไมครอน ที่รายงานว่าเครื่องบดชนิดโรลเลอร์มิลล์มีความต้องการพลังงานไฟฟ้าในการบดต่ำกว่าและมีประสิทธิภาพการบดสูงกว่าเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ ทั้งนี้เนื่องจากการทดลองครั้งนี้ใช้เครื่องบดโรลเลอร์มิลล์ที่มีความสามารถไม่เหมาะสมในการบดให้ได้อนุภาคข้าวโพดที่ละเอียดมากดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น ประกอบกับการบดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ในการทดลองครั้งนี้ กำหนดขนาดอนุภาคของข้าวโพดบดที่ต้องการด้วยการปรับแต่งจำนวนของหัวค้อนในเครื่องบดเป็นหลัก โดยใช้ตะแกรงบดขนาด 6 มิลลิเมตรเท่ากัน เมื่อต้องการให้ข้าวโพดมีขนาดอนุภาคละเอียดสูงขึ้นจึงได้ทำ

การเพิ่มจำนวนหัวค้อนมากขึ้นเพื่อเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวให้วัตถุดิบกระทบกับหัวค้อนมากขึ้น สอดคล้องกับณัฐชนก (2548) ที่รายงานว่า การเพิ่มจำนวนหัวค้อนในเครื่องบดสามารถลดขนาดอนุภาคของวัตถุดิบได้ ดังนั้นเมื่อบดข้าวโพดให้มีขนาดอนุภาคหยาบ 1,300 ไมครอน จึงใช้หัวค้อนเพียง 2 หัวค้อน ซึ่งจำนวนน้อยกว่าการบดข้าวโพดให้มีขนาดอนุภาคละเอียด 1,000 ไมครอน ที่ใช้หัวค้อน 4 หัวค้อนจึงบดข้าวโพดได้ช้าและปริมาณน้อย ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบดต่อชั่วโมงและพลังงานที่ใช้ในการบดต่ำลงด้วย

ตารางที่ 9 ผลของชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาคข้าวโพดต่อประสิทธิภาพการบดเฉลี่ย

	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (kWh/t ²)	ประสิทธิภาพการบด (ตัน/ชม.)
ชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาค		
-แฮมเมอร์มิลล์ 1,000 ไมครอน	1323.11	37.71
-แฮมเมอร์มิลล์ 1,300 ไมครอน	1311.51	28.71
-โรลเลอร์มิลล์ 1,000 ไมครอน	4104.00	8.82
-โรลเลอร์มิลล์ 1,300 ไมครอน	2129.90	24.43
ชนิดเครื่องบด		
-แฮมเมอร์มิลล์	1317.31	33.21
-โรลเลอร์มิลล์	3116.70	16.63
ขนาดอนุภาค		
-1,000 ไมครอน	2713.56	23.27
-1,300 ไมครอน	1720.71	26.57

ตารางที่ 10 ผลของชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาคข้าวโพดต่อประสิทธิภาพการบดครั้งที่ 1

	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (kWh/t ²)	ประสิทธิภาพการบด (ตัน/ชม.)
ชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาค		
-แฮมเมอร์มีลล์ 1,000 ไมครอน	1350.64	36.93
-แฮมเมอร์มีลล์ 1,300 ไมครอน	1267.16	29.52
-โรลเลอร์มีลล์ 1,000 ไมครอน	3091.30	10.90
-โรลเลอร์มีลล์ 1,300 ไมครอน	2200.89	29.40

ตารางที่ 11 ผลของชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาคข้าวโพดต่อประสิทธิภาพการบดครั้งที่ 2

	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (kWh/t ²)	ประสิทธิภาพการบด (ตัน/ชม.)
ชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาค		
-แฮมเมอร์มีลล์ 1,000 ไมครอน	1202.28	39.80
-แฮมเมอร์มีลล์ 1,300 ไมครอน	1217.77	29.89
-โรลเลอร์มีลล์ 1,000 ไมครอน	4390.55	7.83
-โรลเลอร์มีลล์ 1,300 ไมครอน	1725.40	25.98

ตารางที่ 12 ผลของชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาคข้าวโพดต่อประสิทธิภาพการบดครั้งที่ 3

	พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (kWh/t ²)	ประสิทธิภาพการบด (ตัน/ชม.)
ชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาค		
-แฮมเมอร์มีลล์ 1,000 ไมครอน	1416.42	36.40
-แฮมเมอร์มีลล์ 1,300 ไมครอน	1449.73	26.73
-โรลเลอร์มีลล์ 1,000 ไมครอน	4830.13	7.74
-โรลเลอร์มีลล์ 1,300 ไมครอน	2463.40	17.92

2. ลักษณะทางกายภาพของข้าวโพดบด

จากการศึกษาผลของชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาคข้าวโพดบด ไม่พบอิทธิพลร่วมของ ทั้ง 2 ปัจจัยต่อลักษณะทางกายภาพของข้าวโพดบด ข้าวโพดบดทั้ง 4 กลุ่มมีขนาดอนุภาคเฉลี่ยใกล้เคียง กับที่ได้กำหนดไว้ ทั้งนี้เนื่องจากการบดข้าวโพดทุกครั้ง ทำการกำหนดสภาวะการบดที่แน่นอน และ ควบคุมปัจจัยต่างๆ ที่อาจส่งผลต่อขนาดอนุภาคของข้าวโพดอย่างเหมาะสม ด้านผลของชนิดเครื่องบด พบว่ามีการบดข้าวโพดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์และโรลเลอร์มิลล์มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่าง ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) เมื่อพิจารณาผลด้านขนาดอนุภาคข้าวโพดพบว่าข้าวโพดที่มีขนาดอนุภาค 1,000 และ 1,300 ไมครอน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($P < 0.01$) ซึ่งขนาดอนุภากดังกล่าว ตรงตามวัตถุประสงค์ของการทดลองที่ได้กำหนดไว้ ดังแสดงในตารางที่ 13

ผลด้านความสม่ำเสมอทางเรขาคณิตของอนุภาคตัวอย่างที่บด (S_{gw}) และความหนาแน่นของ ข้าวโพดบด จากการทดลองไม่พบอิทธิพลร่วมของชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาคข้าวโพดต่อความ สม่ำเสมอทางเรขาคณิตของอนุภาคตัวอย่างที่บด และความหนาแน่นของข้าวโพดบด ($P < 0.05$) แต่พบว่า ชนิดของเครื่องบดมีผลต่อค่าดังกล่าว โดยพบว่าข้าวโพดบดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์มีความ สม่ำเสมอทางเรขาคณิตของอนุภาคและความหนาแน่นสูงกว่ากลุ่มที่บดข้าวโพดด้วยเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์ อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($P < 0.01$) โดยค่าความสม่ำเสมอทางเรขาคณิตของอนุภาคตัวอย่างที่บดแสดง ให้เห็นถึงความแตกต่างกันของขนาดอนุภาคตัวอย่าง Behnke (1983) และ Groesbeck *et al.* (2003) รายงานว่าวัตถุดิบที่มีความสม่ำเสมอทางเรขาคณิตของอนุภาค (S_{gw}) สูง แสดงว่าวัตถุดิบมีขนาดอนุภาค ที่แตกต่างกันสูงด้วย โดยวัตถุดิบที่ผ่านการบดที่ดีควรมีค่า S_{gw} ต่ำ

ด้านจำนวนอนุภาคต่อกรัมของข้าวโพดบด พบว่ามีอิทธิพลร่วมของชนิดเครื่องบดและขนาด อนุภาคของข้าวโพด โดยการบดข้าวโพดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1,000 ไมครอน มี จำนวนอนุภาคต่อกรัมของข้าวโพดสูงที่สุด ($P < 0.01$) รองลงมาคือข้าวโพดที่บดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1,300 ไมครอน และข้าวโพดที่บดด้วยเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1,000 ไมครอน และข้าวโพดที่บดด้วยเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1,300 ไมครอน มีจำนวนอนุภาค ต่อกรัมของข้าวโพดต่ำที่สุด ขณะที่พื้นที่ผิวของอนุภาคนั้น ไม่มีผลมาจากอิทธิพลร่วมของชนิดเครื่องบด และขนาดอนุภาคของข้าวโพดบด แต่พบว่าข้าวโพดที่บดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์มีพื้นที่ผิวของ อนุภาคสูงกว่าข้าวโพดที่บดด้วยเครื่องโรลเลอร์มิลล์ ($P < 0.05$) และข้าวโพดที่มีขนาดอนุภาค 1,000 ไมครอน มีพื้นที่ผิวของอนุภาคสูงกว่าข้าวโพดที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1,300 ไมครอน อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ

($P < 0.01$) เนื่องจากการบดข้าวโพดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มีลล์ ทำการบดโดยใช้หลักการการกระแทกกันระหว่างวัตถุกับวัตถุและวัตถุกับหัวค้อนเพื่อให้วัตถุเกิดการแตกออกและสามารถลดขนาดอนุภาคลงได้ (ฉัฐชนก, 2548) ดังนั้นข้าวโพดที่ผ่านการบดจึงมีลักษณะทางกายภาพที่ละเอียด เป็นฝุ่นสูง จึงมีจำนวนอนุภาคต่อกรัมและพื้นที่ผิวของอนุภาคสูงตามไปด้วย อีกทั้งเมื่อทำการบดวัตถุดิบให้มีความละเอียดสูงขึ้นจะเป็นการเพิ่มจำนวนอนุภาคต่อกรัมและพื้นที่ผิวของอนุภาคให้มากขึ้น

ตารางที่ 13 ผลของชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาคข้าวโพดต่อลักษณะทางกายภาพของข้าวโพดบด

	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย ของอนุภาค (ไมครอน), (D_{gw})	ความสม่ำเสมอของ ขนาดอนุภาค, (S_{gw})	ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	จำนวนอนุภาค (อนุภาค/กรัม)	พื้นที่ผิวของอนุภาค (ตร.ซม./กรัม)
ชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาค					
-แฮมเมอร์มิลล์ 1,000 ไมครอน	999.63	2.00	0.68	25538.50 ^a	113.63
-แฮมเมอร์มิลล์ 1,300 ไมครอน	1337.45	1.97	0.68	9323.65 ^b	83.39
-โรลเลอร์มิลล์ 1,000 ไมครอน	1023.45	1.64	0.61	4586.66 ^{bc}	108.41
-โรลเลอร์มิลล์ 1,300 ไมครอน	1348.38	1.73	0.65	2436.98 ^c	79.77
P-value	0.7969	0.0753	0.3066	0.0031	0.6860
ชนิดเครื่องบด					
-แฮมเมอร์มิลล์	1168.54	1.99 ^a	0.68 ^A	17431.05 ^a	98.51 ^A
-โรลเลอร์มิลล์	1185.92	1.68 ^b	0.63 ^B	3511.92 ^b	94.09 ^B
P-value	0.4915	<0.0001	0.0231	<0.0001	0.0496
ขนาดอนุภาค					
-1,000 ไมครอน	1011.54 ^b	1.82	0.65	15062.56 ^a	111.02 ^a
-1,300 ไมครอน	1342.92 ^a	1.85	0.66	5880.31 ^b	81.58 ^b
P-value	<0.0001	0.4058	0.3177	0.0006	<0.0001
PoolSE±	51.077	0.049	0.011	2818.47	4.563

^{A-B} อักษรที่ต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

^{a-b} อักษรที่ต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($P < 0.01$)

3. ลักษณะทางกายภาพของอาหารผง

จากการศึกษาถึงผลของชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาคข้าวโพดบด ต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคของอาหารผง ไม่พบอิทธิพลร่วมของทั้ง 2 ปัจจัยต่อขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคของอาหารผง โดยอาหารผงทั้ง 4 กลุ่ม มีขนาดอนุภาคเฉลี่ยตรงตามที่คาดไว้ แต่พบว่าอาหารที่ใช้ข้าวโพดที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1,300 ไมครอน มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาคที่สูงกว่าอาหารที่ใช้ข้าวโพดที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1,000 ไมครอน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$) เนื่องจากการนำข้าวโพดที่ผ่านการบดไปทำการผสมอาหารที่มีส่วนผสมของวัตถุดิบอื่น เช่น กากถั่วเหลือง เปลือกหอย โมโนไคแคลเซียมฟอสเฟต และพรีมิกซ์ ที่มีขนาดอนุภาคเล็กกว่าข้าวโพดบดจะทำให้ขนาดอนุภาคเฉลี่ยของอาหารผงลดต่ำลง และเนื่องจากวัตถุดิบดังกล่าวที่ใช้ในปริมาณที่เท่ากันและมีขนาดที่เท่ากันในทุกสูตรอาหารจึงไม่ส่งผลให้เกิดความแตกต่างต่อขนาดของอนุภาคอาหาร ขณะที่ข้าวโพดที่ใช้มีขนาดอนุภาคที่แตกต่างกัน ขนาดอนุภาคข้าวโพดจึงมีผลต่อขนาดอนุภาคอาหาร เมื่อข้าวโพดมีขนาดใหญ่จะส่งผลให้อาหารมีขนาดอนุภาคใหญ่ตามไปด้วย (ตารางที่ 14)

ผลด้านความสม่ำเสมอทางเรขาคณิตของอนุภาคตัวอย่างที่บด (S_{gw}) และความหนาแน่นของอาหาร จำนวนอนุภาคต่อกรัมและพื้นที่ผิวของอนุภาคของอาหารผง จากการศึกษานี้ไม่พบอิทธิพลร่วมของชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาคข้าวโพดต่อค่าความสม่ำเสมอทางเรขาคณิตของอนุภาค ความหนาแน่นของอาหาร จำนวนอนุภาคต่อกรัมและพื้นที่ผิวของอนุภาคของอาหารผง ($P > 0.05$) แต่พบว่าอาหารผงที่ใช้ข้าวโพดบดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์มีความสม่ำเสมอทางเรขาคณิตของอนุภาค (S_{gw}) และจำนวนอนุภาคของอาหารผง สูงกว่าอาหารผงที่ใช้ข้าวโพดบดด้วยเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$) และอาหารผงที่ใช้ข้าวโพดขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1,000 ไมครอน มีพื้นที่ผิวของอนุภาคอาหารผงสูงกว่าที่ใช้ข้าวโพดขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1,300 ไมครอน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในส่วนของการบดข้าวโพดบด (ตารางที่ 14)

ตารางที่ 14 ผลของชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาคข้าวโพดต่อลักษณะทางกายภาพของอาหารผง

	ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาค (ไมครอน), (D_{gw})	ความสม่ำเสมอของ ขนาดอนุภาค, (S_{gw})	ความหนาแน่น (กรัม/มิลลิลิตร)	จำนวนอนุภาค (อนุภาค/กรัม)	พื้นที่ผิวของอนุภาค (ตร.ซม./กรัม)
ชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาค					
-แฮมเมอร์มิลล์ 1,000 ไมครอน	861.59	1.89	0.68	27879.04	126.71
-แฮมเมอร์มิลล์ 1,300 ไมครอน	967.55	1.88	0.67	19571.44	114.11
-โรลเลอร์มิลล์ 1,000 ไมครอน	876.99	1.69	0.64	8161.97	122.49
-โรลเลอร์มิลล์ 1,300 ไมครอน	988.63	1.79	0.65	7306.07	110.44
P-value	0.9221	0.1262	0.6048	0.1602	0.9524
ชนิดเครื่องบด					
-แฮมเมอร์มิลล์	914.57	1.89 ^a	0.67	23725.24 ^a	120.41
-โรลเลอร์มิลล์	932.81	1.74 ^b	0.65	7734.02 ^b	116.47
P-value	0.5353	0.0008	0.1659	0.0002	0.4076
ขนาดอนุภาค					
-1,000 ไมครอน	869.29 ^b	1.79	0.66	18020.50	124.60 ^A
-1,300 ไมครอน	978.09 ^a	1.83	0.66	13438.76	112.28 ^B
P-value	0.0048	0.1543	0.9070	0.0952	0.0259
PoolSE±	20.520	0.026	0.008	2767.09	2.741

^{A-B} อักษรที่ต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

^{a-b} อักษรที่ต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($P < 0.01$)

1. ลักษณะทางเคมีของอาหารผง

ผลจากการศึกษาพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของโภชนะในอาหารทดลองครั้งนี้เป็นไปในทิศทางเดียวกัน โดยอาหารที่มีส่วนประกอบของข้าวโพดที่มีขนาดอนุภาค 1,000 ไมครอน มีค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของระดับโปรตีน แคลเซียม ฟอสฟอรัส และพลังงานรวมในอาหารต่ำกว่าอาหารที่มีส่วนประกอบของข้าวโพดที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ 1,300 ไมครอน (ตารางที่ 15) สอดคล้องกับ Behnke (1983) ที่รายงานว่า การบดข้าวโพดให้ละเอียดเพิ่มขึ้นจาก 1,500 เป็น 1,200 ไมครอน เป็นการเพิ่มจำนวนอนุภาคต่อกรัมและพื้นที่ผิวของวัตถุดิบ ทำให้วัตถุดิบมีการกระจายตัวได้ดีในอาหารผสม ไม่เกิดการแยกชั้นและมีส่วนในการปรับปรุงประสิทธิภาพการผสมอาหาร ทำให้สามารถผสมอาหารเข้ากันได้อย่างทั่วถึงมากขึ้น เมื่อทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางโภชนะจึงมีค่าใกล้เคียงกัน ส่งผลให้มีค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนขององค์ประกอบทางโภชนะลดต่ำลง

เมื่อพิจารณาด้านชนิดของเครื่องบดพบว่าอาหารที่ใช้ข้าวโพดบดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ มีสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของโปรตีน แคลเซียม และพลังงานรวม ในอาหารต่ำกว่าอาหารใช้ข้าวโพดบดด้วยเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์ โดยอาหารที่ใช้ข้าวโพดบดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ขนาดอนุภาค 1,000 ไมครอน มีสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของโปรตีน แคลเซียม และพลังงานรวมที่ต่ำที่สุด มีค่าเท่ากับ 2.76, 4.92 และ 1.66 ตามลำดับ แสดงว่ามีความสม่ำเสมอและการกระจายตัวของโภชนะในอาหารสูงที่สุดในขณะที่อาหารที่ใช้ข้าวโพดบดด้วยเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์ขนาดอนุภาค 1,300 ไมครอน มีสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของโปรตีน แคลเซียม และพลังงานรวมสูงที่สุด แสดงถึงความสม่ำเสมอที่น้อยที่สุด โดยมีค่าเท่ากับ 4.18, 8.01 และ 2.05 ตามลำดับ เนื่องจากการบดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ในการทดลองครั้งนี้ส่งผลให้ข้าวโพดมีความสม่ำเสมอสูงกว่าการบดด้วยเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์ แสดงจากค่า S_{gw} ของข้าวโพดบด (ตารางที่ 13) ซึ่งผลการทดลองที่ได้ขัดแย้งกับข้อเท็จจริงที่ว่าโดยปกติแล้วการบดด้วยโรลเลอร์มิลล์จะให้ความสม่ำเสมอมากกว่าการบดด้วยแฮมเมอร์มิลล์ ทั้งนี้เนื่องจากเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์ที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ เป็นเครื่องบดที่ได้รับการออกแบบให้มีความเหมาะสมกับการบดวัตถุดิบที่มีขนาดหยาบกว่าขนาดวัตถุดิบที่ต้องการใช้ในการทดลอง ดังนั้นในการบดจึงต้องตั้งระยะห่างของลูกกลิ้งให้ชิดกันมาก ลูกกลิ้งที่ใช้ในการบดวัตถุดิบจึงเกิดการสึกหรอสูง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบดลดต่ำลง ซึ่งอาจเป็นสาเหตุให้อนุภาคข้าวโพดมีขนาดขึ้นแตกต่างกันมากขึ้น จึงมีความสม่ำเสมอของอนุภาคต่ำลง (ค่า S_{gw} สูงขึ้น) ส่วนผลการทดลองด้านค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของฟอสฟอรัสพบว่าให้ผลขัดแย้งกับค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของโปรตีน พลังงานและแคลเซียม ทั้งนี้เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของฟอสฟอรัสอาจไม่ใช่ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการนำมาใช้ในการพิจารณาความแปรปรวนของโภชนะในอาหารผสม

ตารางที่ 15 สัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของโภชนะในอาหารทดลอง

องค์ประกอบทางเคมี	อาหารทดลอง			
	แฮมเมอร์มิลล์	แฮมเมอร์มิลล์	โรลเลอร์มิลล์	โรลเลอร์มิลล์
	1,000 μm	1,300 μm	1,000 μm	1,300 μm
ความแปรปรวนของโปรตีน	2.76	4.04	3.56	4.18
ความแปรปรวนของแคลเซียม	4.92	5.43	7.20	8.01
ความแปรปรวนของฟอสฟอรัส	7.21	11.67	5.80	9.23
ความแปรปรวนของพลังงานรวม	1.66	2.01	1.99	2.05

หมายเหตุ สุ่มตัวอย่างอาหารจำนวน 15 ตัวอย่างจากทั้ง 4 กลุ่มการทดลอง เพื่อวิเคราะห์ความแปรปรวนของโภชนะในอาหารผสม

การทดลองที่ 2

1. ผลของชนิดเครื่องบดและข้าวโพดที่ขนาดต่างกันต่อสมรรถภาพการผลิตของไก่ไข่

ผลจากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ โดยวิเคราะห์หาปฏิกริยาร่วมระหว่างกลุ่มทดลองกับช่วงระยะเวลาที่ทำการทดลอง พบว่าไม่มีปฏิกริยาร่วมของปัจจัยทั้ง 2 ที่จะมีผลต่อค่าที่ทำการศึกษาดังนั้นจึงรายงานในส่วนของผลการทดลองเป็นค่าเฉลี่ยรวมของ 5 ช่วงระยะเวลาการทดลอง

1.1 ปริมาณอาหารที่กินต่อตัวต่อวันและปริมาณอาหารที่ใช้ในการผลิตไข่ 1 โหล

จากการศึกษาผลของชนิดเครื่องบดและอนุภาคข้าวโพดที่ขนาดต่างกันในอาหารไก่ไข่ต่อปริมาณอาหารที่กินต่อตัวต่อวันและปริมาณอาหารที่ใช้ในการผลิตไข่ 1 โหล ไม่พบอิทธิพลร่วมระหว่างชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาคข้าวโพดบด และอิทธิพลหลักของชนิดเครื่องบดต่อปริมาณอาหารที่กินต่อตัวต่อวันของแม่ไก่ ด้านปริมาณอาหารที่ใช้ในการผลิตไข่ 1 โหล ($P>0.05$) ไม่พบอิทธิพลของปัจจัยหลัก 2 ปัจจัย คือชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาคต่อปริมาณอาหารที่ใช้ในการผลิตไข่ 1 โหล แต่พบว่าปริมาณอาหารที่กินต่อตัวต่อวันของแม่ไก่ที่ได้รับอาหารที่มีข้าวโพดขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1,300 ไมครอน สูงกว่ากลุ่มที่ได้รับอาหารที่มีข้าวโพดขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1,000 ไมครอน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$)

เนื่องจากอาหารที่ใช้ข้าวโพดที่มีขนาดอนุภาคใหญ่มีผลกระตุ้นการกินอาหารของไก่ไข่ ลักษณะทางกายภาพของอาหารมีผลกระตุ้นความอยากกินอาหารของไก่ไข่มากกว่าลักษณะทางเคมี รูปทรงและขนาดสำคัญกว่ากลิ่นและรสของอาหาร Yo *et al.* (1997) รายงานว่าปริมาณอาหารที่กินต่อวันของไก่ขึ้นอยู่กับการกินลักษณะทางกายภาพของอาหารและขนาดอนุภาคของข้าวโพด เมื่ออาหารมีขนาดอนุภาคใหญ่ขึ้นจะกระตุ้นการจิกกิน และเมื่อแม่ไก่จิกกินอาหารจะได้รับอาหารที่มีความหนาแน่นของเนื้ออาหารสูงกว่าอาหารที่มีขนาดอนุภาคเล็ก จึงทำให้ไก่ไข่สามารถกินอาหารได้ในปริมาณมากขึ้น ประกอบกับข้าวโพดที่มีความละเอียด มีลักษณะทางกายภาพที่เป็นฝุ่นผงสูง ก่อความรำคาญต่อสัตว์ในขณะที่กินอาหาร อาหารเหนียวติดปากสัตว์ต้องกินน้ำเพิ่มขึ้นและลดความอยากกินอาหารลง ส่งผลให้ปริมาณการกินอาหารลดลง (Patrick and Schaible, 1980; Cheeke, 1999) ดังตารางที่ 12

1.2 อัตราการเลี้ยงรอด

จากการศึกษาผลของชนิดเครื่องบดและข้าวโพดที่ขนาดต่างกันในการไก่ไข่ ต่ออัตราการเลี้ยงรอดพบว่าไม่มีอิทธิพลร่วมของทั้งสองปัจจัยต่ออัตราการเลี้ยงรอดของแม่ไก่ ($P>0.05$) เมื่อพิจารณาผลของขนาดอนุภาคข้าวโพดที่ 1,000 และ 1,300 ไมครอน พบว่าแม่ไก่มีอัตราการเลี้ยงรอดแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) ในขณะที่ไก่ไข่ที่ได้รับอาหารที่ข้าวโพดบดด้วยเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์ มีอัตราการเลี้ยงรอดที่สูงกว่าไก่ที่ได้รับอาหารที่ข้าวโพดบดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.01$) ดังแสดงในตารางที่ 16 ซึ่งเมื่อพิจารณาผลของชนิดเครื่องบดจากการทดลองไม่น่าจะมีความสัมพันธ์ต่ออัตราการเลี้ยงรอดของแม่ไก่ แต่สาเหตุหลักการตายของแม่ไก่อาจเกิดจากการเลี้ยงไก่ในสภาพหนาแน่น 4 ตัวต่อกรงตับ พื้นที่กรงเลี้ยงต่อตัวของไก่ไม่เพียงพอเกิดลำดับชั้นของไก่ภายในกรง เป็นสาเหตุให้เกิดความเครียดส่งผลให้แม่ไก่เกิดพฤติกรรมจิกกันภายในกรงสูงขึ้นซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญของการตาย ประกอบกับสาเหตุจากสภาพร่างกายของแม่ไก่เอง เนื่องจากทำการทดลองในไก่ไข่อายุมากที่ 43-63 สัปดาห์ แม่ไก่อยู่ในช่วงปลดการเลี้ยง ซึ่งเริ่มมีอัตราการตายที่สูงขึ้น ส่งผลให้มีอัตราการเลี้ยงรอดที่ต่ำลง

1.3 อัตราการให้ผลผลิตไข่ต่อจำนวนแม่ไก่มีชีวิต (hen-day egg production) และอัตราการให้ผลผลิตไข่ต่อจำนวนแม่ไก่เมื่อเริ่มการทดลอง (hen-house egg production)

การศึกษาผลของชนิดเครื่องบดและข้าวโพดที่ขนาดต่างกันในการไก่ไข่ ต่ออัตราการให้ผลผลิตไข่ต่อจำนวนแม่ไก่มีชีวิตและอัตราการให้ผลผลิตไข่ต่อจำนวนแม่ไก่เริ่มทดลอง พบว่า

ไม่มีอิทธิพลร่วมของทั้งสองปัจจัย และอิทธิพลของทั้ง 2 ปัจจัยหลักต่ออัตราการให้ผลผลิตไข่ต่อจำนวนแม่ไก่มีชีวิตและอัตราการให้ผลผลิตไข่ต่อจำนวนแม่ไก่เมื่อเริ่มการทดลอง ($P>0.05$) แต่พบว่าแม่ไก่ที่ได้รับอาหารที่ข้าวโพดมีขนาดอนุภาคใหญ่ 1,300 ไมครอน มีอัตราการให้ผลผลิตไข่ต่อจำนวนแม่ไก่มีชีวิตและอัตราการให้ผลผลิตไข่ต่อจำนวนแม่ไก่เมื่อเริ่มการทดลอง สูงกว่าไก่ที่ได้รับอาหารที่ข้าวโพดมีขนาดอนุภาค 1,000 ไมครอน ดังตารางที่ 16 เนื่องจากอนุภาคของข้าวโพดขนาด 1,300 ไมครอนในอาหารมีความเหมาะสมในการกระตุ้นการจิกกินอาหารของไก่ ซึ่งปกติไก่เป็นสัตว์ที่มีพฤติกรรมการเลือกจิกกินอาหารที่มีขนาดใหญ่ก่อน ในสภาวะการเลี้ยงแบบหนาแน่นไก่ตัวที่แข็งแรงและมีลำดับชั้นสูงกว่าจะได้กินอาหารก่อนจะเลือกจิกกินข้าวโพดที่เป็นวัตถุดิบอาหารที่ให้พลังงานสูง ซึ่งระดับพลังงานในอาหารนั้นเป็นปัจจัยที่มีผลต่อจำนวนผลผลิตไข่ จึงส่งผลให้แม่ไก่ที่ได้รับพลังงานในอาหารสูงมีปริมาณผลผลิตไข่ที่สูงตามไปด้วย สอดคล้องกับรายงานของ Leeson and Summers (1991) และ Gillespie (2001) ที่พบว่าระดับพลังงานที่ไก่ได้รับในแต่ละวัน มีผลอย่างมากต่อปริมาณของสารอาหารชนิดต่างๆ ที่ใช้ในกระบวนการสร้างไข่ของไก่ และพบว่าถ้าระดับพลังงานที่สัตว์ได้รับสูงจะมีผลอย่างมากต่อปริมาณของผลผลิตไข่ที่ได้รับ จากการที่ข้าวโพดที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ซึ่งกระตุ้นการจิกกินของแม่ไก่เอง เป็นผลให้แม่ไก่สามารถกินอาหารได้ในปริมาณมากในระยะเวลาเท่ากัน จากการทดลองที่พบว่าแม่ไก่กลุ่มดังกล่าวมีปริมาณอาหารที่กินต่อตัวต่อวันที่สูง ทำให้แม่ไก่ได้รับปริมาณโภชนาการอื่นๆ ในอาหารในระดับสูงด้วย และสามารถนำโภชนาการที่ได้ไปใช้ในกระบวนการสร้างผลผลิตไข่อย่างเพียงพอ ส่งผลให้มีผลผลิตไข่ในปริมาณสูง

1.4 น้ำหนักตัวที่เปลี่ยนแปลง

จากการศึกษาผลของชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาคข้าวโพดที่ต่างกันในอาหารไก่ไข่ ต่อน้ำหนักตัวของแม่ไก่ที่เปลี่ยนแปลง พบว่าไม่มีอิทธิพลร่วมของชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาคข้าวโพดบดและอิทธิพลของ 2 ปัจจัยหลักต่อน้ำหนักตัวที่เปลี่ยนแปลง ($P>0.05$) เนื่องจากไก่ทุกกลุ่มมีปริมาณอาหารที่กินต่อตัวต่อวันในระดับที่ใกล้เคียงกัน เนื่องจากได้รับอาหารที่มีการคำนวณระดับโภชนาการเท่ากัน มีการปรับสมดุลโภชนาการในอาหารอย่างครบถ้วน เพียงพอต่อความต้องการ ดังนั้นไก่จึงได้รับสารอาหารที่ไม่แตกต่างกัน นอกจากนี้ไก่ทุกกลุ่มมีการให้ผลผลิตไข่ในระดับใกล้เคียงกัน เพราะฉะนั้นแม่ไก่จึงนำสารอาหารที่ได้รับไปใช้ได้เท่ากัน จึงมีโภชนาการเหลือเพื่อสะสมน้ำหนักตัวได้ใกล้เคียงกัน แม่ไก่ทุกกลุ่มจึงมีน้ำหนักตัวที่เปลี่ยนแปลงไม่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 16

ตารางที่ 16 ผลของชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาคของข้าวโพดคั่วในอาหารผงสำหรับไก่ไข่ ต่อประสิทธิภาพการผลิตของแม่ไก่

	% ผลผลิตไข่ต่อ จำนวนแม่ไก่มีชีวิต	% ผลผลิตไข่ต่อจำนวน แม่ไก่เริ่มทดลอง	อาหารที่กิน/ตัว/วัน (กรัม)	อาหารที่ใช้ในการ ผลิตไข่ 1 โหล (กก.)	อัตราการรอดชีวิต (%)	น้ำหนักตัวที่ เปลี่ยนแปลง (กรัม)
ชนิดเครื่องบด VS ขนาดอนุภาค						
-แฮมเมอร์มิลล์ 1,000 ไมครอน	64.54	62.85	119.15	2.36	97.52	30.27
-แฮมเมอร์มิลล์ 1,300 ไมครอน	69.73	67.27	124.92	2.13	96.68	25.57
-โรลเลอร์มิลล์ 1,000 ไมครอน	63.35	62.54	121.08	2.25	98.80	25.91
-โรลเลอร์มิลล์ 1,300 ไมครอน	67.96	66.97	125.64	2.20	98.66	24.14
P-value	0.9021	0.9780	0.7537	0.4568	0.7060	0.4628
ชนิดเครื่องบด						
-แฮมเมอร์มิลล์	67.14	65.06	122.04	2.25	97.10 ^b	27.92
-โรลเลอร์มิลล์	65.66	64.76	123.36	2.23	98.73 ^a	25.03
P-value	0.6803	0.9388	0.4902	0.8827	0.0095	0.1582
ขนาดอนุภาค						
-1,000 ไมครอน	63.95	62.70	120.12 ^B	2.31	98.16	28.09
-1,300 ไมครอน	68.85	67.12	125.28 ^A	2.12	97.67	24.86
P-value	0.1864	0.2368	0.0142	0.2580	0.2014	0.1172
PoolSE±	1.732	1.7081	1.059	0.059	0.312	1.039

^{A-B} อักษรที่ต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05)

^{a-b} อักษรที่ต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ (P<0.01)

2. ผลของชนิดเครื่องบดและข้าวโพดที่ขนาดต่างกันต่อคุณภาพไข่

2.1 น้ำหนักไข่เฉลี่ยและค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของน้ำหนักไข่

การศึกษาผลของชนิดเครื่องบดและข้าวโพดที่ขนาดต่างกันในอาหารไก่ไข่ต่อน้ำหนักไข่เฉลี่ย จากการทดลองไม่พบอิทธิพลร่วมของชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาคข้าวโพดบดต่อน้ำหนักไข่เฉลี่ย ($P>0.05$) แต่มีอิทธิพลร่วมของชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาคข้าวโพดบด ต่อความแปรปรวนของน้ำหนักไข่ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.01$) โดยไก่ไข่ที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดบดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1,000 ไมครอน มีความแปรปรวนของน้ำหนักไข่เฉลี่ยสูงสุด รองลงมาคือไก่ไข่ที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดบดด้วยเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1,300 ไมครอน และไก่ไข่ที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดบดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1,300 ไมครอน ในขณะที่ไก่ไข่ที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดบดด้วยเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1,000 ไมครอน มีความแปรปรวนของน้ำหนักไข่เฉลี่ยต่ำที่สุด ทั้งนี้อาจเนื่องจากลักษณะทางกายภาพของข้าวโพดที่บดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์มีความแตกต่างกันของชิ้นวัตถุดิบและมีความเป็นฝุ่นสูง มีความสม่ำเสมอของขนาดอนุภาควัตถุดิบต่ำกว่าเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์แสดงจากค่า S_{gw} ของอาหารผงกลุ่มดังกล่าวในการทดลองที่ 1 (ตารางที่ 14) ถึงแม้จะไม่แตกต่างกับกลุ่มการทดลองอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่พบว่ามีค่าสูงที่สุด เป็นผลให้อาหารมีความสม่ำเสมอของขนาดอนุภาคต่ำไปด้วย โดยค่า S_{gw} เป็นค่าที่แสดงถึงความสม่ำเสมอของขนาดอนุภาควัตถุดิบ เมื่อมีค่า S_{gw} สูง แสดงได้ว่าวัตถุดิบมีขนาดอนุภาคที่แตกต่างกันมาก วัตถุดิบที่ผ่านการบดที่ดีควรมีค่า S_{gw} ต่ำ เนื่องจากแสดงว่าวัตถุดิบมีขนาดอนุภาคที่มีขนาดใกล้เคียงกัน ประกอบกับการเลี้ยงไก่ไข่ในสภาพหนาแน่น (4 ตัวต่อกรงตับ) ที่มีช่องเปิดให้อาหารเพียง 3 ช่องและเกิดการจลลาคับขันของแม่ไก่ภายในกรงเดียวกัน ไก่ตัวที่แข็งแรงกว่าจะได้กินอาหารก่อนจึงมีโอกาสเลือกกินอาหารที่มีขนาดอนุภาคใหญ่โดยเฉพาะข้าวโพดที่มีพลังงานสูง ทำให้แม่ไก่ให้ผลผลิตไข่สูงเนื่องจากระดับพลังงานในอาหารมีผลต่อปริมาณผลผลิตไข่ของไก่ไข่ ส่วนไก่ตัวที่เหลือนำได้กินเพียงอาหารที่มีขนาดอนุภาคเล็ก ได้แก่ กากถั่วเหลือง ไวตามินและฟอสฟอรัสเท่านั้น จึงทำให้มีขนาดและน้ำหนักไข่มากกว่า เนื่องจากปริมาณโปรตีนที่ได้รับจะส่งผลต่อขนาดฟองไข่ ความไม่สม่ำเสมอของโภชนาที่แม่ไก่ได้รับทำให้แม่ไก่นำโภชนาไปสะสมในฟองไข่ไม่เท่ากันเกิดความแตกต่างกันของน้ำหนักไข่ และส่งผลให้มีความแปรปรวนของน้ำหนักไข่เฉลี่ยที่สูงขึ้นตามลำดับ ในขณะที่ข้าวโพดบดด้วยเครื่องโรลเลอร์มิลล์มีลักษณะทางกายภาพที่มีขนาดอนุภาคใกล้เคียงกัน มีความสม่ำเสมอสูง เมื่อนำไปผสมอาหารจึงส่งผลให้อาหารมีความสม่ำเสมอสูงตามไปด้วย เมื่อแม่ไก่จิกกินจึงได้รับโภชนาระดับที่เหมาะสมและนำโภชนาในอาหารไปสะสมในฟองไข่ได้ใกล้เคียงกัน มีน้ำหนักเฉลี่ยของฟองไข่แตกต่างกันน้อย

ส่งผลให้มีความแปรปรวนของน้ำหนักไข่ต่ำ

จากการทดลองพบว่า ไก่ไข่ที่ได้รับอาหารที่ข้าวโพดผ่านการบดด้วยเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์ มีน้ำหนักไข่เฉลี่ยสูงกว่าไก่ไข่ที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดบดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากข้าวโพดที่ผ่านการบดด้วยเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์มีลักษณะทางกายภาพที่หยาบและมีความเป็นฝุ่นต่ำ จึงกระตุ้นการจิกกินอาหารและเพิ่มความอยากกินอาหารของไก่ไข่และไม่ก่อความรำคาญขณะจิกกินอาหาร แม่ไก่กินอาหารสะดวกและไม่ต้องกินน้ำเพิ่มขึ้น จึงสามารถใช้ประโยชน์จากโภชนะในอาหารไปใช้สร้างองค์ประกอบภายในฟองไข่ได้อย่างเต็มที่ ทำให้มีน้ำหนักไข่เฉลี่ยที่สูงตามไปด้วย ในขณะที่ไก่ไข่ที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดที่บดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ที่มีลักษณะทางกายภาพของข้าวโพดที่มีความเป็นฝุ่นสูงสูง Cheeke (1999) รายงานว่าการที่อาหารมีความเป็นฝุ่นสูง เมื่อแม่ไก่จิกกินอาหารจะก่อให้เกิดความรำคาญและอาหารเหนียวติดปาก ลดความอยากกินอาหารลงและส่งผลให้สัตว์กินน้ำเพิ่มขึ้น Hocking *et al.* (1997) รายงานว่าการที่ไก่ไข่มีความถี่ในการกินน้ำเพิ่มขึ้นจะกินอาหารได้ลดลงและส่งผลให้การทำงานของน้ำย่อยหรือเอนไซม์ในการย่อยอาหารมีประสิทธิภาพลดลง ดังนั้นจึงสามารถย่อยและใช้ประโยชน์จากโภชนะในอาหารไม่เต็มที่ ส่งผลให้ได้รับโภชนะที่จะใช้ในการสะสมในฟองไข่ลดลง ซึ่งสาเหตุดังกล่าวส่งผลต่อคุณภาพไข่โดยตรงทำให้มีน้ำหนักไข่เฉลี่ยต่ำลง เมื่อพิจารณาด้านขนาดอนุภาคข้าวโพดที่ 1,000 และ 1,300 ไมครอน พบว่ามีน้ำหนักไข่เฉลี่ยแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) (ตารางที่ 17)

2.2 ค่าคะแนนสีไข่แดงและค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรปรวนของสีไข่แดง

การศึกษาผลของชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาคข้าวโพดที่ต่างกันในการให้อาหารไก่ไข่ ต่อค่าคะแนนสีไข่แดงและค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรปรวนของสีไข่แดง พบว่ามีอิทธิพลร่วมของทั้งสองปัจจัยต่อค่าคะแนนสีไข่แดงและค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรปรวนของสีไข่แดง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยไก่ไข่ที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดบดด้วยเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์ขนาดอนุภาค 1,300 ไมครอน มีค่าเฉลี่ยคะแนนสีไข่แดงสูงที่สุด แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับทุกกลุ่มการทดลอง ทั้งนี้เนื่องจากข้าวโพดที่ผ่านการบดด้วยเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์ที่มีขนาดอนุภาค 1,300 ไมครอน มีชิ้นข้าวโพดที่มีความสม่ำเสมอ มีลักษณะเป็นชิ้น ฝุ่นต่ำ ไม่รบกวนการกินอาหารเนื่องจากเหนียวติดปาก ทำให้ไก่ไข่สามารถจิกกินได้สะดวก และมีผลกระตุ้นพฤติกรรมจิกกินของแม่ไก่ จากการทดลองพบว่าไก่ไข่กลุ่มดังกล่าวมีปริมาณอาหารที่กินสูง ถึงแม้จะไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับกลุ่มทดลองอื่นๆ แต่พบว่ามีปริมาณการกินอาหารได้สูงที่สุด ดังนั้นแม่ไก่จึงมีโอกาส

ได้รับข้าวโพดที่เป็นแหล่งของพลังงานและสารสี xanthophylls ในปริมาณสูง (ชุดิมา, 2550; Belyavin and Marangos, 1989) สารสีในไข่แดงนี้ โดยปกติสัตว์ปีกไม่สามารถสังเคราะห์ขึ้นมาเองได้และจำเป็นต้องได้รับจากอาหารเท่านั้น เมื่อได้รับสารสีในปริมาณสูงจึงสามารถนำไปสะสมในไข่แดงในปริมาณมากเช่นกัน ทำให้มีค่าคะแนนสีไข่แดงสูงสุด โดยสีของไข่แดงถึงแม้จะไม่เกี่ยวข้องกับคุณภาพไข่โดยตรงแต่มีความสำคัญ เนื่องจากมีผลต่อความพึงพอใจของผู้บริโภค

ด้านค่าความแปรปรวนของสีไข่แดงพบว่า ไก่ไข่ที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดบดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มีลักษณะขนาดอนุภาค 1,000 ไมครอน มีค่าสัมประสิทธิ์ของความแปรปรวนของสีไข่แดงสูงสุดแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับทุกกลุ่มการทดลอง ทั้งนี้เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของข้าวโพดที่บดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มีลักษณะขนาดอนุภาค 1,000 ไมครอน มีความสม่ำเสมอของอนุภาควัตถุดิบต่ำ แสดงจากค่า S_{gw} ที่มีค่าสูงที่สุด (ตารางที่ 14) เนื่องจากการบดข้าวโพดด้วยเครื่องบดชนิดแฮมเมอร์มีผลให้วัตถุดิบที่ผ่านการบดมีความสม่ำเสมอต่ำ ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ ณัฐชนก (2545), Behnke (1983) และ Groesbeck *et al.* (2003) ที่รายงานว่าวัตถุดิบที่บดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มีลักษณะสม่ำเสมอของขนาดอนุภาคต่ำกว่าการบดวัตถุดิบด้วยเครื่องบดโรลเลอร์มีลล์ และเมื่อนำข้าวโพดบดดังกล่าวไปผสมอาหารทำให้อาหารมีความสม่ำเสมอและมีการกระจายตัวของโภชนะในอาหารต่ำ ประกอบกับในการทดลองครั้งนี้ทำการเลี้ยงไก่ไข่ในสภาพหนาแน่น (4 ตัวต่อกรงตับ) ที่มีช่องเปิดให้อาหารเพียง 3 ช่อง ส่งผลให้แม่ไก่ภายในกรงเดียวกันเกิดการจิกลำดับชั้นขึ้น ไก่ตัวที่แข็งแรงกว่าจะได้กินอาหารก่อนจึงมีโอกาสเลือกกินอาหารที่มีขนาดอนุภาคใหญ่ โดยเฉพาะข้าวโพดที่เป็นแหล่งของสารสีอยู่สูง ทำให้แม่ไก่นำสารสีที่ได้รับไปสะสมในไข่แดงได้ในปริมาณสูง ทำให้ไข่ที่ได้จากแม่ไก่นี้มีค่าคะแนนสีไข่แดงเข้ม ในขณะที่ไก่ตัวที่เหลือนำอาหารที่มีขนาดอนุภาคเล็ก ได้แก่ กากถั่วเหลือง ไวตามิน และพรีมิกซ์ เนื่องจากข้าวโพดในอาหารเหลือน้อย ทำให้ได้รับสารสีที่จะไปสะสมในไข่แดงในปริมาณต่ำ ส่งผลให้แม่ไก่มีสีไข่แดงซีดลง จากการที่แม่ไก่ได้รับโภชนะที่ไม่สม่ำเสมอจึงส่งผลให้มีสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของสีไข่แดงที่สูงตามไปด้วย (ตารางที่ 17)

ตารางที่ 17 ผลของชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาคของข้าวโพดคั่วในอาหารผงสำหรับไก่ไข่ ต่อน้ำหนักไข่และคะแนนสีไข่แดง

	น้ำหนักไข่เฉลี่ย (กรัม)	ความแปรปรวนน้ำหนักไข่	คะแนนสีไข่แดง	ความแปรปรวนของคะแนนสีไข่แดง
ชนิดเครื่องบด VS ขนาดอนุภาค				
-แฮมเมอร์มิลล์ 1,000 ไมครอน	63.97	9.41 ^A	7.83 ^B	14.62 ^A
-แฮมเมอร์มิลล์ 1,300 ไมครอน	65.11	8.14 ^B	7.89 ^B	13.92 ^A
-โรลเลอร์มิลล์ 1,000 ไมครอน	66.07	8.11 ^B	7.95 ^B	11.79 ^B
-โรลเลอร์มิลล์ 1,300 ไมครอน	66.50	9.11 ^A	8.50 ^A	14.25 ^A
P-value	0.6444	0.0016	0.0108	0.0200
ชนิดเครื่องบด				
-แฮมเมอร์มิลล์	64.54 ^B	8.61	7.86 ^b	14.27
-โรลเลอร์มิลล์	66.28 ^A	8.78	8.23 ^a	13.02
P-value	0.0351	0.5773	0.0005	0.0557
ขนาดอนุภาค				
-1,000 ไมครอน	65.02	8.62	7.89 ^b	13.21
-1,300 ไมครอน	65.81	8.76	8.20 ^a	14.08
P-value	0.3121	0.6524	0.0022	0.1588
PoolSE±	0.412	0.1907	0.073	0.375

^{A-B} อักษรที่ต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$)

^{a-b} อักษรที่ต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$)

2.3 สัดส่วนเกรดไข่ และสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของเกรดไข่

การศึกษาผลของชนิดเครื่องบดและข้าวโพดที่ขนาดต่างกันให้อาหารไก่ไข่ ต่อสัดส่วนของเกรดไข่ และสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของเกรดไข่ จากการทดลองไม่พบอิทธิพลร่วมของชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาคข้าวโพดบดต่อสัดส่วนของเกรดไข่ทุกเบอร์ ($P>0.05$) แต่พบว่ามีอิทธิพลหลักของชนิดเครื่องบดต่อค่าเฉลี่ยเกรดไข่เบอร์ 0 อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($P<0.01$) (ตารางที่ 18) ซึ่งเกรดไข่เบอร์ 0 เป็นเกรดไข่ที่ใหญ่ที่สุดในการทดลอง มีน้ำหนักขึ้นต่อฟอง 70 กรัมขึ้นไป ในการกำหนดเกรดไข่ในการทดลองครั้งนี้ กำหนดตามน้ำหนักฟองไข่ โดยไข่ที่มีน้ำหนักมากเมื่อได้รับการคัดแบ่งเกรดจะมีหมายเลขเกรดต่ำ ในขณะที่ไข่ฟองที่มีน้ำหนักน้อยจะได้รับหมายเลขเกรดสูงขึ้นตามลำดับ โดยไก่ไข่ที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดบดด้วยเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์มีสัดส่วนของเกรดไข่เบอร์ 0 สูงกว่าไก่ไข่ที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดบดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในส่วนน้ำหนักฟองไข่เฉลี่ย ทั้งนี้เนื่องจากข้าวโพดที่ผ่านการบดด้วยเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์มีลักษณะทางกายภาพที่มีความหยาบและมีความเป็นฝุ่นต่ำ จึงกระตุ้นการจิกกินและเพิ่มความอยากกินอาหารของไก่ไข่และไม่ก่อความรำคาญขณะจิกกินอาหาร แม้ไก่กินอาหารสะดวก ซึ่งโภชนะในอาหารที่เป็นตัวกำหนดขนาดของฟองไข่ คือปริมาณโปรตีนที่แม่ไก่ได้รับ เมื่ออาหารมีลักษณะทางกายภาพที่กระตุ้นการกินแสดงได้ว่าแม่ไก่ได้รับปริมาณโปรตีนในปริมาณสูงจึงสามารถนำโปรตีนที่ได้จากอาหารไปใช้สร้างองค์ประกอบภายในฟองไข่ได้เป็นอย่างดีส่งผลให้มีน้ำหนักไข่เฉลี่ยที่สูงตามไปด้วย ในขณะที่ไก่ไข่ที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดที่บดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ ที่มีลักษณะทางกายภาพของข้าวโพดที่มีความเป็นฝุ่นสูง ก่อให้เกิดความรำคาญและอาหารเหนียวติดปาก ลดความอยากกินอาหารส่งผลให้สัตว์กินน้ำเพิ่มขึ้น Cheeke (1999) รายงานว่าการที่ไก่กินน้ำเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้การทำงานของน้ำย่อยหรือเอนไซม์ในการย่อยอาหารมีประสิทธิภาพลดลง สัตว์สามารถย่อยและใช้ประโยชน์จากโภชนะในอาหารไม่เต็มที่ ส่งผลให้ได้รับโภชนะที่จะใช้ในการสะสมในฟองไข่ลดลง ซึ่งสาเหตุดังกล่าวส่งผลต่อคุณภาพไข่โดยตรงทำให้มีน้ำหนักไข่เฉลี่ยต่ำลง

ด้านสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของเกรดไข่ จากการทดลองไม่พบอิทธิพลร่วมของชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาคข้าวโพดบด และไม่พบอิทธิพลหลักของปัจจัยทั้ง 2 ปัจจัยต่อสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของเกรดไข่ ($P>0.05$) แสดงได้ว่าค่าเฉลี่ยเกรดไข่ในการทดลองเป็นค่าที่เกิดจากอิทธิพลของทรีดเมนต์ที่ทำการศึกษาเอง ไม่ได้เกิดจากค่าความแปรปรวนภายในทรีดเมนต์ที่ทำการศึกษาดังนั้นจึงสามารถใช้ค่าเฉลี่ยของเกรดไข่ในการอธิบายผลการทดลอง แสดงในตารางที่ 18

ตารางที่ 18 ผลของชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาคของข้าวโพดบดในอาหารผงสำหรับไก่ไข่ ต่อสัดส่วนเกรดไข่และสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของเกรดไข่

	สัดส่วนเกรดไข่ (%)						ความแปรปรวนของเกรดไข่
	เบอร์ 0	เบอร์ 1	เบอร์ 2	เบอร์ 3	เบอร์ 4	เบอร์ 5	
ชนิดเครื่องบด VS ขนาดอนุภาค							
-แฮมเมอร์มิลล์ 1,000 ไมครอน	16.37	30.15	35.56	16.48	0.97	0.47	66.69
-แฮมเมอร์มิลล์ 1,300 ไมครอน	17.13	33.09	34.34	13.79	1.54	0.10	68.38
-โรลเลอร์มิลล์ 1,000 ไมครอน	22.37	33.81	30.81	11.67	1.25	0.11	69.91
-โรลเลอร์มิลล์ 1,300 ไมครอน	26.57	32.09	29.33	10.68	1.33	0.00	72.63
P-value	0.5117	0.2125	0.9535	0.7072	0.6023	0.4748	0.8590
ชนิดเครื่องบด							
-แฮมเมอร์มิลล์	16.75 ^B	31.62	34.95	15.14	1.25	0.29	67.54
-โรลเลอร์มิลล์	24.47 ^A	32.95	30.07	11.17	1.29	0.05	71.27
P-value	0.0088	0.4721	0.0228	0.0971	0.9403	0.2097	0.2128
ขนาดอนุภาค							
-1,000 ไมครอน	19.37	31.98	33.18	14.07	1.11	0.29	68.30
-1,300 ไมครอน	21.85	32.59	31.83	12.24	1.44	0.05	70.51
P-value	0.3499	0.7318	0.4961	0.4267	0.4807	0.2036	0.4512
PoolSE±	1.5201	0.8851	1.0623	1.1512	0.2137	0.0919	1.573

^{A-B} อักษรที่ต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05)

2.4 สัดส่วนน้ำหนักไข่แดงและสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของสัดส่วนน้ำหนักไข่แดง

การศึกษาผลของชนิดเครื่องบดและข้าวโพดที่ขนาดต่างกันในอาหารไก่ไข่ต่อค่าสัดส่วนน้ำหนักไข่แดง พบว่ามีอิทธิพลร่วมของชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาคข้าวโพดต่อค่าสัดส่วนน้ำหนักไข่แดง อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$) พบว่าไก่ไข่ที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดบดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มีลัษณอนุภาค 1,000 ไมครอน มีสัดส่วนน้ำหนักไข่แดงสูงที่สุด ใกล้เคียงกับไก่ไข่ที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดบดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มีลัษณอนุภาค 1,300 ไมครอน และไก่ไข่ที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดบดด้วยเครื่องบดโรลเลอร์มีลัษณอนุภาค 1,300 ไมครอน ขณะที่ไก่ไข่ที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดบดด้วยเครื่องบดโรลเลอร์มีลัษณอนุภาค 1,000 ไมครอน มีสัดส่วนน้ำหนักไข่แดงต่ำที่สุด เนื่องจากสัดส่วนน้ำหนักไข่แดงมีความสัมพันธ์กับสัดส่วนน้ำหนักไข่ขาวและน้ำหนักไข่ทั้งฟอง เมื่อสัดส่วนน้ำหนักไข่ขาวเพิ่มสูงขึ้น จึงส่งผลให้มีสัดส่วนน้ำหนักไข่แดงต่ำลง จากการทดลองพบว่าไก่ไข่ที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดบดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มีลัษณอนุภาค 1,000 ไมครอน มีสัดส่วนน้ำหนักไข่ขาวและน้ำหนักไข่ทั้งฟองต่ำที่สุด เนื่องจากแม่ไก่กลุ่มดังกล่าวมีปริมาณอาหารที่กินต่อวันต่ำที่สุด ถึงแม้จะแตกต่างกับกลุ่มทดลองอื่นอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) โดยมีค่าเพียง 119.15 กรัม เมื่อเปรียบเทียบกับแม่ไก่กลุ่มอื่นๆ ที่มีปริมาณอาหารที่กินต่อวันสูงกว่า 120 กรัม จึงทำให้ได้รับโภชนะในอาหารได้แก่ โปรตีน พลังงาน วิตามิน และแร่ธาตุในปริมาณน้อยตามไปด้วย จากการที่แม่ไก่ได้รับโปรตีนในระดับต่ำนี้เองทำให้สามารถนำโปรตีนไปใช้สะสมในไข่ขาวได้ในปริมาณต่ำซึ่งมีผลให้มีน้ำหนักไข่ขาวลดลง ดังนั้นเมื่อนำมาคำนวณสัดส่วนองค์ประกอบภายในฟองไข่จึงทำให้มีสัดส่วนน้ำหนักไข่ขาวที่ต่ำลง Wu *et al.* (2007) ศึกษาผลของความเข้มข้นของโภชนะในอาหารในไก่ไข่สายพันธุ์ทางการค้าที่อายุ 21-36 สัปดาห์ รายงานว่าไก่ไข่ที่ได้รับอาหารที่มีระดับโปรตีนและกรดอะมิโนในอาหารระดับต่ำจะมีน้ำหนักไข่ขาวที่ลดต่ำลงเมื่อเปรียบเทียบกับไก่ไข่ที่ได้รับอาหารที่มีระดับโปรตีนและกรดอะมิโนระดับสูง ซึ่งจากการทดลองครั้งนี้พบว่าแม่ไก่กลุ่มดังกล่าวมีสัดส่วนน้ำหนักไข่ขาวเพียงร้อยละ 60.21 ซึ่งน้อยกว่ากลุ่มการทดลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$) จึงส่งผลให้มีสัดส่วนน้ำหนักไข่แดงที่เพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากสัดส่วนน้ำหนักไข่ขาวและสัดส่วนน้ำหนักไข่แดงเป็นค่าที่มีความสัมพันธ์กัน

ด้านสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของสัดส่วนน้ำหนักไข่แดง จากการทดลองไม่พบอิทธิพลร่วมของทั้ง 2 ปัจจัย และอิทธิพลหลักของชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาคข้าวโพด ต่อสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของสัดส่วนน้ำหนักไข่แดง ($P > 0.05$) แสดงได้ว่าค่าสัดส่วนของน้ำหนักไข่แดงในการทดลองเป็นค่าที่เกิดจากอิทธิพลของทรีตเมนต์ที่ทำการศึกษานี้เอง ไม่ได้เกิดจากค่าความ

แปรปรวนภายในทรีตเมนต์ที่ทำการศึกษา ดังนั้นจึงสามารถใช้ค่าเฉลี่ยสัดส่วนน้ำหนักไข่แดงในการอธิบายผลการทดลอง แสดงในตารางที่ 19

2.5 สัดส่วนน้ำหนักไข่ขาวและสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของสัดส่วนน้ำหนักไข่ขาว

จากการศึกษาผลของชนิดเครื่องบดและข้าวโพดที่ขนาดต่างกันในการให้อาหารไก่ไข่ต่อสัดส่วนน้ำหนักไข่ขาวพบว่าเมื่ออิทธิพลร่วมของชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาคข้าวโพดต่อค่าสัดส่วนน้ำหนักไข่ขาวอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($P < 0.01$) โดยที่ไก่ไข่กลุ่มที่ใช้ข้าวโพดบดด้วยเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1,000 ไมครอน มีสัดส่วนน้ำหนักไข่ขาวสูงที่สุด ซึ่งใกล้เคียงกับไก่ไข่กลุ่มที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดบดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1,300 ไมครอน และไก่ไข่กลุ่มที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดบดด้วยเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1,300 ไมครอน ในขณะที่ไก่ไข่กลุ่มที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดบดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1,000 ไมครอน มีสัดส่วนน้ำหนักไข่ขาวต่ำที่สุด (ตารางที่ 19) เนื่องจากอาหารกลุ่มที่ใช้ข้าวโพดบดด้วยเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์ขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1,000 ไมครอน เป็นอาหารที่ข้าวโพดมีขนาดอนุภาคละเอียด เมื่อนำไปผสมเป็นอาหารผง ขนาดอนุภาคของข้าวโพดและวัตถุดิบอื่นๆที่ประกอบในสูตรอาหารจึงมีขนาดใกล้เคียงกัน ไก่ไข่ไม่สามารถเลือกจิกกินเฉพาะข้าวโพดในอาหารได้ จึงได้รับโภชนาที่ครบถ้วนและสมดุล การที่ไก่ได้รับข้าวโพดในอาหารลดลง มีผลทำให้ไก่มีโอกาสได้รับโปรตีนในอาหารที่สูงขึ้น เนื่องจากไก่กินอาหารได้ตามความจุของกระเพาะอาหาร สอดคล้องกับ Leeson *et al.* (1991) ที่รายงานว่าสิ่งที่ควบคุมความอยากกินอาหารและปริมาณการกินอาหารของไก่ไข่ขึ้นอยู่กับความจุของกระเพาะอาหาร การที่แม่ไก่ได้รับโปรตีนในสูตรอาหารเพิ่มขึ้นนี้เอง ทำให้สามารถนำโปรตีนไปสะสมในฟองไข่ได้สูงจึงทำให้น้ำหนักไข่ขาวสูงขึ้นและเมื่อนำมาคำนวณสัดส่วนน้ำหนักไข่ขาวจึงส่งผลให้มีสัดส่วนน้ำหนักไข่ขาวที่เพิ่มขึ้น

ด้านสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของสัดส่วนน้ำหนักไข่ขาว จากการทดลองไม่พบอิทธิพลร่วมของทั้ง 2 ปัจจัย และอิทธิพลหลักของชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาคข้าวโพด ต่อสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของสัดส่วนน้ำหนักไข่ขาว ($P > 0.05$) แสดงได้ว่าสัดส่วนน้ำหนักไข่ขาว ในการทดลองเป็นค่าที่เกิดจากอิทธิพลของทรีตเมนต์ที่ทำการศึกษาเอง ไม่ได้เกิดจากค่าความแปรปรวนภายในทรีตเมนต์ที่ทำการศึกษา ดังนั้นจึงสามารถใช้ค่าเฉลี่ยสัดส่วนน้ำหนักไข่ขาวในการอธิบายผลการทดลอง (ตารางที่ 19)

ตารางที่ 19 ผลของชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาคของข้าวโพดคั่วในอาหารผงสำหรับไก่ไข่ ต่อสัดส่วนองค์ประกอบภายในฟองไข่

	สัดส่วน น้ำหนักไข่แดง	ความแปรปรวนของ สัดส่วนน้ำหนักไข่แดง	สัดส่วน น้ำหนักไข่ขาว	ความแปรปรวนของ สัดส่วนน้ำหนักไข่ขาว	สัดส่วนน้ำหนัก เปลือกไข่	ความแปรปรวนของ สัดส่วนน้ำหนักเปลือกไข่
ชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาค						
-แฮมเมอร์มิลล์ 1,000 ไมครอน	26.27 ^a	8.43	60.21 ^b	5.52	9.84	10.33
-แฮมเมอร์มิลล์ 1,300 ไมครอน	25.76 ^a	8.51	61.33 ^a	5.41	9.83	10.86
-โรลเลอร์มิลล์ 1,000 ไมครอน	25.28 ^b	9.04	61.52 ^a	6.23	9.54	9.36
-โรลเลอร์มิลล์ 1,300 ไมครอน	25.93 ^a	9.18	60.91 ^{ab}	4.88	9.61	9.47
P-value	0.0050	0.9717	0.0041	0.3725	0.6353	0.8564
ชนิดเครื่องบด						
-แฮมเมอร์มิลล์	26.02 ^A	8.47	60.77	5.46	9.83 ^A	10.60
-โรลเลอร์มิลล์	25.61 ^B	9.11	61.22	5.56	9.58 ^B	9.41
P-value	0.0364	0.4153	0.1101	0.8927	0.0147	0.3159
ขนาดอนุภาค						
-1,000 ไมครอน	25.78	8.74	60.86	5.87	9.69	9.84
-1,300 ไมครอน	25.85	8.85	61.12	5.15	9.72	10.17
P-value	0.7046	0.8804	0.3411	0.2976	0.7513	0.7803
PoolSE±	0.116	0.3410	0.167	0.3287	0.053	0.5439

^{A-B} อักษรที่ต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05)

^{a-b} อักษรที่ต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ (P<0.01)

2.6 ความถ่วงจำเพาะ ความหนาเปลือกไข่ สัดส่วนน้ำหนักเปลือกไข่ สัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของความถ่วงจำเพาะ สัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของความหนาเปลือกไข่ และสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของสัดส่วนน้ำหนักเปลือกไข่

จากการศึกษาผลของชนิดเครื่องบดและข้าวโพดที่ขนาดต่างกันในอาหารไก่ไข่ ต่อค่าความถ่วงจำเพาะความหนาเปลือกไข่ และสัดส่วนน้ำหนักเปลือกไข่ ไม่พบอิทธิพลร่วมของชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาคข้าวโพดบด ต่อค่าความถ่วงจำเพาะ ความหนาเปลือกไข่และสัดส่วนน้ำหนักเปลือกไข่ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) เมื่อพิจารณาผลของชนิดเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์และโรลเลอร์มิลล์พบว่าไก่ไข่กลุ่มที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดบดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ มีค่าความหนาเปลือกไข่และสัดส่วนน้ำหนักเปลือกไข่ สูงกว่าไก่ไข่กลุ่มที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดบดด้วยเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) อาจเนื่องจากข้าวโพดที่บดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ในการทดลองครั้งนี้มีความเป็นฝุ่นสูง มีค่าจำนวนอนุภาคต่อกรัมและพื้นที่ผิวต่อกรัมของข้าวโพดที่สูงกว่าข้าวโพดที่บดด้วยเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์ (ตารางที่ 13) Wondra *et al.* (1995a) ทำการศึกษาการลดขนาดอนุภาคข้าวโพดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์และโรลเลอร์มิลล์ให้มีขนาดอนุภาค 800 และ 400 ไมครอน พบว่าเมื่อทำการบดข้าวโพดให้มีความละเอียดสูงขึ้น จะส่งผลให้ข้าวโพดบดและอาหารผสมมีพื้นที่ผิวต่อกรัมสูงขึ้น จึงทำให้ในกระบวนการผสมอาหารวัตถุดิบสามารถผสมเข้ากันได้อย่างทั่วถึง เช่นเดียวกันกับในการทดลองครั้งนี้ที่พบว่าค่าความแปรปรวนของแคลเซียมในอาหารที่บดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์มีค่าต่ำเมื่อเปรียบเทียบกับความแปรปรวนของแคลเซียมในอาหารที่ข้าวโพดบดด้วยเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์ (ตารางที่ 15) แสดงได้ว่าการบดข้าวโพดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ส่งผลให้อนุภาคข้าวโพดที่ได้มีการกระจายตัวผสมกับเปลือกหอยปนและโมโนไคแคลเซียมฟอสเฟต ที่เป็นแหล่งแคลเซียมที่เป็นองค์ประกอบของเปลือกไข่ได้เป็นอย่างดี นอกจากนี้ปัจจัยสำคัญที่มีอิทธิพลต่อความหนาของเปลือกไข่คือโภชนาที่ได้รับจากอาหาร การผลิตขน และสภาพแวดล้อมในโรงเรือน (Tullett, 1987) สมดุลกรด-เบสในอาหาร ซึ่งมีผลต่อการใช้ประโยชน์ได้ของแคลเซียม ในการสร้างแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) ที่ใช้ในการสร้างเปลือกไข่ (Nobakht *et al.*, 2007) รวมไปถึงลักษณะทางพันธุกรรม ช่วงเวลาการให้ผลผลิตและน้ำหนักฟองไข่ (Monira *et al.*, 2003) ซึ่งพบว่าไก่ไข่ที่ให้ผลผลิตไข่ที่ดี มีน้ำหนักฟองไข่สูงจะมีคุณภาพของเปลือกไข่ต่ำลง เนื่องจากไก่ที่ให้ไข่ขนาดใหญ่จะได้รับโปรตีนในอาหารในระดับสูงจึงมีโอกาสได้รับแคลเซียมในอาหารที่ต่ำลง จากผลการทดลองพบว่าไก่ไข่ที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดบดด้วยเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์ มีน้ำหนักเฉลี่ยฟองไข่สูงกว่าไก่ไข่ที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดบดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ดังนั้นจึงอาจเป็นสาเหตุให้มีความหนาเปลือกไข่ที่ต่ำกว่าส่วนความถ่วงจำเพาะของไข่พบว่าแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$)

เมื่อพิจารณาผลด้านขนาดอนุภาคของข้าวโพด พบว่าไก่ไข่ที่ได้รับข้าวโพดขนาดอนุภาคต่างกันในการมีความหนาเปลือกไข่ สัดส่วนน้ำหนักเปลือกไข่ และความถ่วงจำเพาะที่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) (ตารางที่ 19 และ 20) เนื่องจากการทดลองครั้งนี้คำนวณสูตรอาหารให้มีระดับแคลเซียมที่ระดับ 3.70 % (ตารางที่ 6) ซึ่งเพียงพอต่อความต้องการในการกระบวนการสร้างฟองไข่ ถึงแม้ขนาดอนุภาคของข้าวโพดบดในอาหารจะส่งผลให้ไก่ไข่มีปริมาณอาหารที่กินต่อตัวต่อวันที่แตกต่างกันซึ่งทำให้ได้รับระดับแคลเซียมในอาหารที่แตกต่างกันก็ตาม ไก่ไข่ทั้งสองกลุ่มก็ยังได้รับระดับของแคลเซียมในอาหารที่เพียงพอ โดยไก่ไข่ที่ได้รับอาหารที่ข้าวโพดมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1,000 ไมครอน มีปริมาณอาหารที่กินต่อตัวต่อวัน 120.12 กรัม ทำให้ได้รับแคลเซียมจากการคำนวณได้เท่ากับ 4.44% ในขณะที่ไก่ไข่ที่ได้รับอาหารที่ข้าวโพดมีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1,300 ไมครอน มีปริมาณอาหารที่กินต่อตัวต่อวันสูงกว่าที่ระดับ 125.28 กรัม ทำให้ได้รับแคลเซียมจากการคำนวณได้เท่ากับ 4.64% ซึ่งระดับแคลเซียมที่ได้รับของไก่ไข่ทั้งสองกลุ่มยังคงอยู่ในระดับที่สูงกว่าความต้องการแคลเซียมในแต่ละวันของแม่ไก่ William Naváez-Solarte *et al.* (2006) รายงานว่าไก่ไข่อายุ 46-62 สัปดาห์มีความต้องการระดับแคลเซียมในอาหาร 3.56% หรือ 4 กรัมต่อตัวต่อวัน ภายใต้อุณหภูมิการเลี้ยงเฉลี่ย 21.65 องศาเซลเซียส ดังนั้นเมื่อแม่ไก่ได้รับแคลเซียมในอาหารในระดับที่เพียงพอต่อกระบวนการสร้างไข่จึงทำให้แม่ไก่มีคุณภาพเปลือกไข่ในระดับที่ใกล้เคียงกัน ประกอบกับการทดลองครั้งนี้ทำการทดลองทำการเลี้ยงในโรงเรือนที่มีระบบระบายความร้อนแบบไอน้ำ ที่มีการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ที่สม่ำเสมอตลอดช่วงวัน ทำให้สัตว์อยู่ในสภาพสุขสบายสามารถระบายความร้อนจากระบบการเมแทบอลิซึมในร่างกายได้สะดวก ไม่เกิดการหอบและสูญเสียก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ใช้ในการสร้างไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) ที่ช่วยในการสะสมแคลเซียมในฟองไข่ (Teeter *et al.*, 1985) จึงส่งผลให้คุณภาพของเปลือกไข่ ได้แก่ความหนาเปลือกไข่ สัดส่วนน้ำหนักเปลือกไข่ของไก่ไข่ทั้ง 2 กลุ่ม แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ทั้งนี้คุณภาพของเปลือกไข่มีความสัมพันธ์กับความถ่วงจำเพาะของไข่ ดังนั้นจึงส่งผลต่อความถ่วงจำเพาะของไก่ทุกกลุ่มที่แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติด้วย ด้านสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของความถ่วงจำเพาะ สัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของความหนาเปลือกไข่ และสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของสัดส่วนน้ำหนักเปลือกไข่ จากการทดลองไม่พบอิทธิพลร่วมของทั้ง 2 ปัจจัย และอิทธิพลหลักของชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาคข้าวโพด ต่อสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของความถ่วงจำเพาะ สัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของความหนาเปลือกไข่ และสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของสัดส่วนน้ำหนักเปลือกไข่ ($P>0.05$) แสดงได้ว่าค่าความถ่วงจำเพาะ ความหนาเปลือกไข่ และสัดส่วนน้ำหนักเปลือกไข่ในการทดลองเป็นค่าที่เกิดจากอิทธิพลของทรีตเมนต์ที่ทำการศึกษามากกว่าไม่ได้เกิดจากค่าความแปรปรวนภายในทรีตเมนต์ที่ทำการศึกษา ดังนั้นจึงสามารถใช้ค่าเฉลี่ยความถ่วงจำเพาะ ความหนาเปลือกไข่ และสัดส่วนน้ำหนักเปลือกไข่ในการอธิบายผลการทดลอง (ตารางที่ 19 และ 20)

ตารางที่ 20 ผลของชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาคของข้าวโพดบดในอาหารผงสำหรับไก่ไข่ ต่อคุณภาพเปลือกไข่

	ความถ่วงจำเพาะ	ความแปรปรวนของความถ่วงจำเพาะ	ความหนาเปลือกไข่ (มม.)	ความแปรปรวนของความหนาเปลือกไข่
ชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาค				
-แฮมเมอร์มิลล์ 1,000 ไมครอน	1.085	0.1702	0.412	7.96
-แฮมเมอร์มิลล์ 1,300 ไมครอน	1.086	0.2010	0.416	7.24
-โรลเลอร์มิลล์ 1,000 ไมครอน	1.085	0.1825	0.406	8.07
-โรลเลอร์มิลล์ 1,300 ไมครอน	1.086	0.1541	0.410	8.14
P-value	0.9879	0.2548	0.8150	0.4405
ชนิดเครื่องบด				
-แฮมเมอร์มิลล์	1.086	0.1856	0.414 ^A	7.60
-โรลเลอร์มิลล์	1.086	0.1682	0.408 ^B	8.10
P-value	0.5145	0.4957	0.0370	0.3361
ขนาดอนุภาค				
-1,000 ไมครอน	1.085	0.1763	0.409	8.01
-1,300 ไมครอน	1.086	0.1776	0.413	7.69
P-value	0.3563	0.9624	0.2719	0.5311
PoolSE±	0.0003	0.2101	0.001	0.2456

^{A-B} อักษรที่ต่างกันในแต่ละแถวแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05)

^{a-b} อักษรที่ต่างกันในแต่ละแถวแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.01)

2.7 สัดส่วนน้ำหนักไข่ขาว ความสูงไข่ขาว และค่าฮอฟฟ์ยูนิต (Haugh unit) สัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของสัดส่วนน้ำหนักไข่ขาว สัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของความสูงไข่ขาว และสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของค่าฮอฟฟ์ยูนิต

จากการศึกษาผลของชนิดเครื่องบดและข้าวโพดที่ขนาดต่างกันในอาหารไก่ไข่ ต่อค่าความสูงไข่ขาวและค่าฮอฟฟ์ยูนิต ไม่พบอิทธิพลร่วมของทั้งสองปัจจัย ต่อค่าความสูงไข่ขาวและค่าฮอฟฟ์ยูนิต ($P>0.05$) เมื่อพิจารณาด้านผลของชนิดเครื่องบดพบว่าไก่ไข่ที่ได้รับอาหารที่ข้าวโพดผ่านการบดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์และโรลเลอร์มิลล์ มีค่าเฉลี่ยความสูงไข่ขาวและฮอฟฟ์ยูนิต แตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) ส่วนด้านขนาดอนุภาคข้าวโพด พบว่าไก่ไข่ที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดมีขนาดอนุภาคขนาดใหญ่ 1,300 ไมครอน มีความสูงไข่ขาวและฮอฟฟ์ยูนิต สูงกว่าไก่ไข่ที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดบดที่มีขนาดอนุภาค 1,000 ไมครอน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) แสดงในตารางที่ 21 เนื่องจากไก่ไข่มีการสนองตอบต่ออาหารด้านรูปทรงและขนาดของอาหารมากกว่ารสและกลิ่นของอาหาร (พันทิพา, 2539) ข้าวโพดที่มีขนาดอนุภาคใหญ่จะกระตุ้นการจิกกินของไก่ไข่ ทำให้กินอาหารได้ในปริมาณมากในระยะเวลาเท่ากัน ส่งผลให้ไก่ไข่ในกลุ่มดังกล่าวมีปริมาณอาหารที่กินต่อตัวต่อวันที่สูง (ตารางที่ 16) ดังนั้นจึงมีโอกาสได้รับโภชนะ ได้แก่ โปรตีน พลังงาน วิตามิน และแร่ธาตุในอาหารสูงตามไปด้วย ซึ่งระดับโปรตีนที่ได้รับในปริมาณสูงนี้เอง ตัวสัตว์สามารถนำไปใช้ในการสร้างองค์ประกอบภายในฟองไข่ และสะสมในไข่ขาวโดยตรง จึงทำให้ไก่ไข่ในกลุ่มดังกล่าวมีความสูงไข่ขาวสูงขึ้น ดังนั้นจึงส่งผลให้ค่าฮอฟฟ์ยูนิตสูงด้วย เนื่องจากค่าฮอฟฟ์ยูนิตเป็นค่าที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความสูงไข่ขาวและน้ำหนักไข่ เพื่อเป็นการปรับความแตกต่างของน้ำหนักไข่ ซึ่งใช้ในการบ่งบอกคุณภาพของไข่ไก่ ค่าฮอฟฟ์ยูนิตสูงแสดงว่าไข่มีคุณภาพดี (Nestor and Jaap, 1963; Silversides, 1994) ดังนั้นข้าวโพดที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1,300 ไมครอน มีความเหมาะสมในอาหารไก่ไข่เนื่องจากส่งผลให้ไก่ไข่มีปริมาณการกินอาหารสูงและสามารถนำโภชนะไปใช้ในการสร้างผลผลิตได้อย่างเหมาะสมและมีคุณภาพไข่ที่ดี

ด้านสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของสัดส่วนน้ำหนักไข่ขาว สัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของความสูงไข่ขาว และสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของค่าฮอฟฟ์ยูนิต จากการทดลองไม่พบอิทธิพลร่วมของทั้ง 2 ปัจจัย และอิทธิพลหลักของชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาคข้าวโพดต่อสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของความสูงไข่ขาว และสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของค่าฮอฟฟ์ยูนิต ($P>0.05$) แสดงได้ว่าความสูงไข่ขาว และค่าฮอฟฟ์ยูนิตในการทดลองเป็นค่าที่เกิดจากอิทธิพลของทรีตเมนต์ที่ทำการศึกษาเอง ไม่ได้เกิดจากค่าความแปรปรวนภายในทรีตเมนต์ที่ทำการศึกษา ดังนั้นจึงสามารถใช้ค่าเฉลี่ยสัดส่วนน้ำหนักไข่ขาว ความสูงไข่ขาว และฮอฟฟ์ยูนิต ในการอธิบายผลการทดลอง (ตารางที่ 21)

2.8 ความหนืดของไข่ขาว

จากการศึกษาผลของชนิดเครื่องบดและข้าวโพดที่ขนาดต่างกันในอาหารไก่ไข่ ต่อค่าความหนืดของไข่ขาว จากการทดลองไม่พบอิทธิพลร่วมของทั้งสองปัจจัยและอิทธิพลหลักของชนิดเครื่องบดต่อค่าความหนืดของไข่ขาว ($P>0.05$) เมื่อพิจารณาผลด้านขนาดอนุภาคข้าวโพดบด พบว่าไก่ไข่ที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดที่มีขนาดอนุภาคขนาดใหญ่ 1,300 ไมครอน มีความหนืดของไข่ขาวสูงกว่าไก่ไข่ที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดที่มีขนาดอนุภาค 1,000 ไมครอน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ตารางที่ 21 ทั้งนี้การที่แม่ไก่ได้รับการกระตุ้นจากอาหารที่มีขนาดอนุภาคขนาดใหญ่ทำให้สามารถกินอาหารได้ในปริมาณมาก ส่งผลให้ไก่ไข่กลุ่มดังกล่าวมีปริมาณอาหารที่กินต่อตัวต่อวันที่สูง (ตารางที่ 16) จึงมีโอกาสดำรงโภชนาการ ได้แก่ โปรตีน พลังงาน วิตามิน และแร่ธาตุในอาหารสูงตามไปด้วย ระดับโปรตีนที่ได้รับในปริมาณสูงนี้เอง ตัวสัตว์สามารถนำไปใช้ในการสร้างองค์ประกอบภายในฟองไข่ และสะสมในไข่ขาวโดยตรง โปรตีนในไข่ขาวเป็นโปรตีนชนิดอัลบูมิน (albumin) ที่โครงสร้างของโปรตีนมีการจับกันด้วยพันธะเพปไทด์ของกรดอะมิโน เมื่อสัตว์ได้รับโปรตีนที่มีคุณภาพมีกรดอะมิโนสมดุลและปริมาณที่เหมาะสม ร่างกายจึงสามารถนำกรดอะมิโนที่ได้รับไปใช้ในการสร้างผลผลิตที่มีคุณภาพ (สาริธ, 2547) ดังนั้นจึงส่งผลให้มีคุณภาพไข่ขาวที่ดี สอดคล้องกับผลการทดลองค่าความสูงไข่ขาว ที่ไก่ไข่กลุ่มที่ได้รับอาหารที่อนุภาคข้าวโพดขนาดใหญ่ 1,300 ไมครอน มีค่าความสูงไข่ขาวที่สูงกว่าไก่ไข่ที่ได้รับอาหารที่ข้าวโพดมีขนาดอนุภาค 1,000 ไมครอน เนื่องจากความสูงของไข่ขาวเป็นค่าที่มีความสัมพันธ์กับค่าความหนืดของไข่ขาว ดังนั้นเมื่อความสูงไข่ขาวมีค่ามากจึงส่งผลให้มีความหนืดของไข่ขาวสูงด้วย จากการทดลองครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าสามารถใช้ความหนืดไข่ขาวในการประเมินคุณภาพฟองไข่ได้เช่นเดียวกับค่าความสูงไข่ขาวและค่าฮอฟฟ์ยูนิต ด้านสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของความหนืดของไข่ขาว จากการทดลองไม่พบอิทธิพลร่วมของทั้ง 2 ปัจจัย และอิทธิพลหลักของชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาคข้าวโพด ต่อสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของความหนืดของไข่ขาว ($P>0.05$) แสดงได้ว่าค่าความหนืดของไข่ขาว ในการทดลองเป็นค่าที่เกิดจากอิทธิพลของทรีตเมนต์ที่ทำการศึกษาเอง ไม่ได้เกิดจากค่าความแปรปรวนภายในทรีตเมนต์ที่ทำการศึกษา ดังนั้นจึงสามารถใช้ค่าเฉลี่ยความหนืดของไข่ขาวในการอธิบายผลการทดลอง (ตารางที่ 21)

ตารางที่ 21 ผลของชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาคของข้าวโพดคั่วในอาหารผงสำหรับไก่ไข่ ต่อคุณภาพไข่ขาว

	ความสูงไข่ขาว (มม.)	ความแปรปรวนของ ความสูงไข่ขาว	สอฟูยูนิต	ความแปรปรวนของ ค่าสอฟูยูนิต	ความหนืดไข่ขาว (centipoint)	ความแปรปรวนของ ความหนืดไข่ขาว
ชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาค						
-แฮมเมอร์มิลล์ 1,000 ไมครอน	5.40	24.32	68.38	18.47	41.64	17.58
-แฮมเมอร์มิลล์ 1,300 ไมครอน	5.93	21.17	72.93	14.91	47.09	19.98
-โรลเลอร์มิลล์ 1,000 ไมครอน	5.65	22.99	70.26	18.02	42.54	14.24
-โรลเลอร์มิลล์ 1,300 ไมครอน	5.73	23.96	70.76	18.15	46.85	28.50
P-value	0.0827	0.1131	0.0825	0.1230	0.7982	0.1382
ชนิดเครื่องบด						
-แฮมเมอร์มิลล์	5.66	22.75	70.66	16.69	44.37	18.78
-โรลเลอร์มิลล์	5.69	23.47	70.51	18.08	44.70	21.37
P-value	0.8617	0.5661	0.8955	0.2362	0.8829	0.4898
ขนาดอนุภาค						
-1,000 ไมครอน	5.52 ^B	23.66	69.32 ^B	18.24	42.09 ^B	15.91
-1,300 ไมครอน	5.83 ^A	22.56	71.85 ^A	16.53	46.50 ^A	24.24
P-value	0.0255	0.3899	0.0344	0.1493	0.0423	0.0440
PoolSE±	0.072	0.6306	0.625	0.6156	1.162	2.1339

^{A-B} อักษรที่ต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05)

^{a-b} อักษรที่ต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ (P<0.01)

สรุปและข้อเสนอแนะ

สรุป

1. การบดข้าวโพดด้วยเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์ส่งผลให้ข้าวโพดบดมีความสม่ำเสมอของขนาดอนุภาคสูงกว่าเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ และเมื่อทำการบดข้าวโพดให้มีความละเอียดสูงขึ้น ส่งผลให้มีปริมาณพื้นที่ผิวต่อกรัมและจำนวนอนุภาคต่อกรัมของข้าวโพดที่สูงขึ้น

2. ไก่ไข่ที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดที่บดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1,000 ไมครอน มีความแปรปรวนของน้ำหนักไข่ ความแปรปรวนของสีไข่แดง และมีสัดส่วนน้ำหนักไข่แดงสูงสุด ในขณะที่แม่ไก่ที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดที่บดด้วยเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์ ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1,000 ไมครอน มีสัดส่วนน้ำหนักไข่ขาวสูงสุด และแม่ไก่ที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดที่บดด้วยเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์ ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1,300 ไมครอน มีค่าคะแนนสีไข่แดงสูงสุด

3. เมื่อพิจารณาด้านผลของชนิดเครื่องบดพบว่า ไก่ไข่ที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดบดด้วยเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์มีอัตราการเลี้ยงรอดของแม่ไก่ น้ำหนักเฉลี่ยของฟองไข่ และค่าเฉลี่ยคะแนนเกรดไข่เบอร์ 0 ในระดับสูงกว่าไก่ไข่ที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดบดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ ในขณะที่ไก่ไข่ที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดบดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ มีสัดส่วนน้ำหนักเปลือกไข่และค่าความหนาเปลือกไข่ สูงกว่าไก่ไข่ที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดบดด้วยเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์

4. เมื่อพิจารณาด้านผลของขนาดอนุภาคข้าวโพดบด พบว่าไก่ไข่ที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดที่มีขนาดอนุภาค 1,300 ไมครอน มีความสูงไข่ขาว ความหนืดไข่ขาว ฮอฟยูนิต และปริมาณอาหารที่กินต่อตัวต่อวัน ที่สูงกว่าไก่ไข่ที่ได้รับอาหารที่ใช้ข้าวโพดขนาด 1,000 ไมครอน แสดงว่าข้าวโพดบดขนาด 1,300 ไมครอนมีความเหมาะสมที่สุดในการนำมาประกอบสูตรอาหารไก่ไข่ที่เลี้ยงในสภาวะหนาแน่น

5. ไม่พบอิทธิพลร่วมและอิทธิพลหลัก ของชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาคข้าวโพดต่อค่าสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของสัดส่วนน้ำหนักไข่แดง สัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของสัดส่วนน้ำหนักเปลือกไข่ สัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของความถ่วงจำเพาะ สัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของความหนาเปลือกไข่ สัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของสัดส่วนน้ำหนักไข่ขาว สัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของความสูงไข่ขาว สัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของค่าฮอฟยูนิต และสัมประสิทธิ์ความแปรปรวนของความหนืดไข่ขาว แสดงได้ว่าค่าดังกล่าวเกิดจากอิทธิพลของทรีตเมนต์ที่ทำการศึกษาเอง ไม่ได้เกิด

จากค่าความแปรปรวนภายในทรีตเมนต์ที่ทำการศึกษา ดังนั้นจึงสามารถใช้ค่าเฉลี่ยในการอธิบายผลการทดลอง

เมื่อพิจารณาผลการทดลองด้านสมรรถภาพการผลิตของแม่ไก่ประกอบกับคุณภาพไข่พบว่า การใช้อาหารที่ใช้ข้าวโพดบดด้วยเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์ที่มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1,300 ไมครอน มีความเหมาะสมมากที่สุดในการประกอบสูตรอาหารไก่ไข่ เนื่องจากส่งผลให้แม่ไก่มีสมรรถภาพการผลิตและคุณภาพไข่ ดีที่สุด คือมีน้ำหนักไข่เฉลี่ย คะแนนสีไข่แดง สัดส่วนน้ำหนักไข่ขาวสูงที่สุด และมีแนวโน้มของความสูงไข่ขาว ฮอฟยูนิต ที่มีค่าอยู่ในระดับที่สูง ดังนั้นอาหารกลุ่มดังกล่าวจึงมีความเหมาะสมมากที่สุดในการประกอบสูตรอาหารไก่ไข่ที่เลี้ยงในสภาพหนาแน่น

ข้อเสนอแนะ

1. จากผลการศึกษาข้อมูลและผลการทดลองข้างต้น แสดงให้เห็นว่าการบดข้าวโพดให้มีขนาดอนุภาคขนาดใหญ่ 1,300 ไมครอน ส่งผลให้แม่ไก่มีสมรรถภาพการผลิตที่ดีและมีความเหมาะสมมากที่สุดในการนำมาประกอบสูตรอาหารไก่ไข่ เมื่อเปรียบเทียบกับข้าวโพดที่มีขนาดอนุภาค 1,000 ไมครอน ในสภาวะการเลี้ยงไก่แบบหนาแน่น ดังนั้นจึงควรทำการศึกษาเพิ่มเติมในด้านขนาดอนุภาคที่มีขนาดใหญ่เพิ่มขึ้นจากการทดลองในครั้งนี้ เนื่องจากการบดข้าวโพดให้มีขนาดอนุภาคใหญ่ มีความต้องการค่าพลังงานในการบดลดลง และมีประสิทธิภาพการบดสูงขึ้น แต่ขนาดอนุภาคที่ทำการทดลองไม่ควรส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการผลิตและคุณภาพไข่ของแม่ไก่ ซึ่งผลการทดลองดังกล่าวมีผลในด้านความคุ้มทุนของโรงงานผลิตอาหารสัตว์และผลกำไรที่ได้รับเพิ่มขึ้น

2. จากการทดลองครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าการบดข้าวโพดด้วยเครื่องบดชนิดแฮมเมอร์มิลล์มีประสิทธิภาพดีกว่าเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์ ซึ่งยังให้ผลขัดแย้งกับรายงานที่มีการศึกษามาก่อนหน้านี้ ดังนั้นจึงควรมีการศึกษาผลของชนิดเครื่องบดทั้ง 2 ชนิดอีกครั้งในสภาวะการบดและเครื่องบดที่แตกต่างจากการทดลองครั้งนี้ เพื่อเป็นการยืนยันผลการทดลองที่ครอบคลุมและชัดเจน เหมาะสมในการประยุกต์ใช้สำหรับโรงงานอุตสาหกรรมในประเทศไทย

3. การบดข้าวโพดให้มีขนาดอนุภาคใหญ่ที่ 1,300 ไมครอน เมื่อนำไปทำการผสมอาหารอาจเกิดการแยกชั้นกันของอาหารผสม ซึ่งส่งผลถึงความแปรปรวนของคุณภาพไข่ของแม่ไก่ ทำให้มีคุณภาพไข่ที่ไม่สม่ำเสมอกันได้ ดังนั้นจึงควรให้ความสำคัญกับการจัดการเลี้ยงภายในฟาร์มประกอบด้วย จะส่งผลให้ไก่ไข่มีสมรรถภาพการผลิตและคุณภาพไข่ที่ดีที่สุด

เอกสารและสิ่งอ้างอิง

ชุติมา คชวัฒน์. 2550. ข้าวโพด: การแปรรูปและการใช้ประโยชน์. กองอาหารสัตว์. แหล่งที่มา:

<http://www.doa.go.th/fieldcrops/corn/002.pdf>, 14 พฤษภาคม 2550.

ณัฐชนก อมรเทวภัทร. 2548. เทคโนโลยีการผลิตอาหารสัตว์. โครงการจัดตั้งภาควิชาเทคโนโลยีทางกระบวนการเคมีและฟิสิกส์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

พิศมัย หาญมงคลพิพัฒน์. 2545. สถิติและการวางแผนการตลาดทางเกษตร. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

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

ภาวิณี ไท่มะวงศ์. 2549. ผลของขนาดข้าวโพดบดในอาหารไก่ไข่ ต่อสมรรถภาพการผลิตไข่และคุณภาพไข่ ภายใต้สภาพการเลี้ยงแบบหนาแน่น. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สาโรช คำเจริญ. 2547. อาหารและการให้อาหารสัตว์ไม่เคี้ยวเอื้อง. ภาควิชาสัตวศาสตร์ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น, ขอนแก่น.

สำนักส่งเสริมการค้าเกษตร. 2550. การผลิตการตลาดข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ ปี 2550/51. กรมการค้าภายในกระทรวงพาณิชย์, กรุงเทพฯ.

อุทัย คันโธ. ม.ป.ป. เอกสารการเรียนการสอนวิชากระบวนการผลิตอาหารสัตว์และวัตถุดิบอาหารสัตว์ขั้นสูง. ภาควิชาสัตวบาล คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, นครปฐม.

_____. 2529. อาหารและการผลิตอาหารสุกรและสัตว์ปีก. ฉบับเรียบเรียงครั้งที่ 2. ศูนย์วิจัยและฝึกอบรมการเลี้ยงสุกรแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน, นครปฐม.

อังคณา หาญบรรจง และ ดวงสมร สีนเจิมศิริ. 2532. การวิเคราะห์และการประเมินคุณภาพอาหารสัตว์. ภาควิชาสัตวบาล คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, กรุงเทพฯ.

American Society of Agricultural Engineers. 1983. Methods of determining and expressing fineness of feed materials by sieving, p. 325. **American Society of Agricultural Engineers Standard S 319**. American Society of Agricultural Engineers Yearbook Standards, American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph. MI.

A. O. A. C. 1990. **Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemist**. 15th ed. A. O. A. C., Washington, D. C.

Baker, D. H. 1991. Partitioning of nutrients for growth and other metabolic functions: Efficiency and priority considerations. **Poult. Sci.** 70: 1797-1805.

Behnke, K. C. 1983. Measuring and defining particle size of feed stuffs, pp. C1-C11. *In* **Proceedings First International Symposium on Particle Size Reduction in the Feed Industry**. Kansas State University, Manhattan.

_____. 2006. A Perspective on Mixing and Mix Uniformity, pp. 56-62. *In* American Soybean Association International Marketing, comp. **Feed Technology**. American Soybean Association International Marketing Southeast Asia, Singapore.

Belyavin, C. G. and A. G. Marangos. 1989. Natural products for egg yolk pigmentation, pp. 239-260. *In* D. J. A. Cole and W. Haresign, eds. **Recent Developments in Poultry Nutrition**. Anchor Press Ltd., Butterworths, London.

Cabrera, M. R. 1994. **Effect of sorghum genotype and particle size on milling characteristics and performance of finishing pigs, broiler chick and laying hens**. M.S. Thesis, Kansas State University.

- Cheeke, R. P. 1999. **Applied Animal Nutrition: Feed and Feeding**. 2nd ed. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ.
- Dahlke, F., A. M. L. Ribeiro, A. M. Kessler, A. R. Lima and A. Maiorka. 2003. Effects of corn particle size and physical form of the diet on the gastrointestinal structures of broiler chickens. **Poult. Sci.** 61: 1516–1535.
- Deaton, J. W., B. D. Lott and J. D. Simmons. 1989. Hammer mill versus roller mill grinding of corn particle size rations for chicks. **Poult. Sci.** 68: 1342-1344.
- Douglas, J. H., T. W. Sullivan, P. L. Bond, F. J. Struwe, J. G. Baier and L. G. Robeson. 1990. Influence of grinding, rolling, and pelleting on the nutritional value of grain sorghums and yellow corn for broilers. **Poult. Sci.** 69: 2150-2156.
- Gillespie, J. R. 2001. **Modern Livestock and Poultry Production**. 6th ed. Delmar Thomson Learning, London.
- Groesbeck, C. N., R. D. Goodband, M. D. Tokach, J. L. Nelssen, S. S. Dritz, K. R. Lawrence and C. W. Hastad. 2003. Particle size, mill type, and added fat influence flow ability of ground corn. **Kansas Swine Industry Day Report of Progress 920**.
- Healy, B. J., J. D. Hancock, G. A. Kennedy, P. J. Bramel-Cox., K. C. Behnkes and R. H. Hines. 1994. Optimum Particle Size of Corn and Hard and Soft Sorghum for Nursery Pigs. **J. Anim. Sci.** 72: 2227-2236.
- Hocking, P. M., B. O. Hughes and S. Keer-Keer. 1997. Comparison of food intake, rate of consumption, pecking activity and behaviour in layer and broiler breeder males. **Br. Poult. Sci.** 38(3): 237 – 240

Herrman, J. T. n.d. **Feed Quality Assurance**. American Soybean Association, Singapore.

Koch, K. 2002. **Hammermill and Roller Mill**. Kansas State University. Agricultural Experiment Station and Cooperative Extension Service, MF-2048.

Leeson, S. and J. D Summers. 1991. **Commercial Poultry Production**. University Books, Guelph, Ontario, Canada.

_____, _____ and L. J. Caston. 1991. Diet dilution and compensatory growth in broilers. **Poult. Sci.** 42: 1093-1097.

Martin, S. A. 1984. **Comparison of hammermill and roller mill grinding and the effect of particle size reduction on mixing and pelleting**. M.S. Thesis, Kansas State University.

Monira, K. N., M. Salahuddin and G. Miah. 2003. Effect of breed and holding period on egg quality characteristics of chicken. **Poult Sci.** 2 (4): 261-263.

National Research Council. 1994. **Nutrient Requirements of Poultry**. 9th ed. National Academy Press, Washington D.C.

Nestor, K. E and R. G. Jaap. 1963. Egg weight may influence albumen height. **Poult Sci.** 42: 1249-1250.

Nir, I., R., M. I. Ptichi and G. Shefet. 1995. Effect of particle size on performance. 3. grinding pelleting interactions. **Poult. Sci.** 74: 771-783.

_____, _____, G. Shefet, and Z. Nitsan. 1994. Effect of grain particle size on performance. 2. grain texture interaction. **Poult. Sci.** 73: 781-791

- _____, J. P. Melcion and M. Picard. 1990. Effect of particle size of sorghum grains on feed intake and performance of young broilers. **Poult. Sci.** 69: 2177-2184.
- Nobakht, A. M. Shivazad, M. Chamany and A. R. Safameher. 2007. The effects of dietary electrolyte balance on the performance and eggshell quality in the early laying period. **J. Nutr.** 6 (6): 543-546.
- Reuscher, D. 2006. **Particle size reduction for animal feed.** Technical Report Series, Feed Technology, American Soybean Association International Marketing Southeast Asia, Singapore.
- Owens, J. M and M. Heimann. 1994. Material processing cost center, pp 81-104. *In* R. R. McElhiney, ed. **Feed Manufacturing Technology IV.** American Feed Industry Association, Arlington.
- Patrick, H. and P. J. Schaible. 1980. **Poultry Feeds and Nutrition.** 2nd ed. AVI Publishing Company Inc, Westport, Connecticut.
- Reece, F. N., B. D. Lott and J. W. Deaton. 1985. The effects of feed form, grinding method, energy level, and gender on broiler performance in a moderate (21°C) environment. **Poult. Sci.** 64: 1834-1839.
- Rozenboim, I., E. Tako, O. Gal-Garber, J. A. Proudman and Z. Uni. 2007. The effect of heat stress on ovarian function of laying hens. **Poult. Sci.** 86: 1760-1765.
- Scott, M. L., M. C. Nesheim and R. J. Young. 1982. **Nutrition of the Chicken.** 3rd ed. M. L. Scott and Associates, New York.
- Silversides, E G. 1994. The Haught unit correction for egg weights not adequate for comparing eggs from chickens of different lines and ages. **J. Appl. Poult. Res.** 3: 120-126.

Stadelman, W. J. and O. J. Cotterill. 1995. **Egg Science and Technology**. 4th ed. The Haworth Press, Inc.

Teeter, R. G., M. O. Smith, F. N. Owens, S. C. Arp, S. Sangiah, and J. E. Breazile. 1985. Chronic heat stress and respiratory alkalosis: Occurrence and treatment in broiler chicks. **Poult. Sci.** 64: 1060–1064.

Tullett, S. G. 1987. Egg shell formation and quality, pp. 123-146. *In* R. G. Well and C. G. Belyavin, eds. **Egg Quality-Current Problems and Recent Advances**. Carfax Publishing Company, London.

Waldroup, P. W. 2007. **Particle size of cereal grains and its significance in poultry nutrition**. Poultry Science Department, University of Arkansas, Arkansas. Available source: http://www.asasea.com/po34_97.html, July 25, 2007.

William Narváez-Solarte., Horácio Santiago Rostagno. and Paulo Rubens Soares. 2006. Nutritional requirement of calcium in white laying hens from 46 to 62 wk of age. **Poult Sci.** 5 (2): 181-184.

Wondra, K. J., J. D. Hancock, K. C. Behnke, R. H. Hines and C. R. Stark. 1995a. Effects of mill type and particle size uniformity on growth performance, nutrient digestibility, and stomach morphology in finishing pigs. **J. Anim. Sci.** 73: 2564-2573.

_____, _____, _____, _____ and _____. 1995b. Effects of particle size and pelleting on growth performance, nutrient digestibility, and stomach morphology in finishing pigs. **J. Anim. Sci.** 73: 757-763.

Wu., G. M., M. Bryant, P. Gunawardana. and D. A. Roland Sr. 2007. Effect of nutrient density on performance, egg components, egg solids, egg quality, and Profits in Eight commercial leghorn strains during phase one. **Poult. Sci.** 86: 691-697.

Yo, T. P., B. Siegel, H. Guerin, and M. Picard. 1997. Self-selection of dietary protein and energy by broilers grown under a tropical climate: Effect of feed particle size on the feed choice. **Poult Sci.** 76: 1467–1473.

ภาคผนวก

การวิเคราะห์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยและความสม่ำเสมอของอนุภาค

การวิเคราะห์หาขนาดและความสม่ำเสมอของวัตถุดิบอาหารสัตว์และอาหารสัตว์ ทำได้โดยการเขย่าวัตถุดิบผ่านชุดอนุกรมตะแกรงร่อน โดยเลือกใช้ชุดอนุกรม 1.4 หรือ 2.0 (อัตราขนาดรูเปิดของตะแกรงที่อยู่ติดกัน) พิจารณาจากอนุภาคของตัวอย่างที่ใช้ในการวิเคราะห์ ซึ่งวัตถุดิบอาหารสัตว์และอาหารสัตว์ส่วนใหญ่มีขนาดอนุภาคในช่วง 150-1200 ไมครอน ในการทดลองเลือกใช้ชุดตะแกรงร่อน 9 ชั้น รายละเอียดแสดงในตารางผนวกที่ 1 เพื่อให้ครอบคลุมขนาดอนุภาคตัวอย่าง ตามมาตรฐานการวิเคราะห์ของ American Society of Agricultural Engineers (ASAE, 1983) ดังแสดงในภาพผนวกที่ 1



ภาพผนวกที่ 1 เครื่องเขย่าวิเคราะห์ขนาดอนุภาคและชุดตะแกรงร่อน

เครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์

1. เครื่องร่อนอนุภาค Shaker Model AS 200 BASIC S/N 1260712071
2. ตะแกรงร่อน (Sieve) อนุกรม 1.4 หมายเลขตะแกรงร่อน U.S. 6, 8, 12, 16, 20, 30, 40, 50 และถาดรอง
3. เครื่องชั่ง 2 ตำแหน่ง

4. แปรงปัดทำความสะอาด
5. ถาดอะลูมิเนียม

ตารางผนวกที่ 1 อนุกรมสำหรับวิเคราะห์วัตถุอาหารสัตว์และอาหารสัตว์

อนุกรมวิเคราะห์		รูเปิดของตะแกรง
Tyler Mesh No.	USBS Sieve No	(ไมครอน)
6	6	3,360
8	8	2,360
10	12	1,700
14	16	1,180
20	20	850
28	30	600
35	40	425
48	50	300
65	70	212
100	100	150
140	150	105
200	200	74
270	270	53
pan	pan	-

วิธีการวิเคราะห์

1. ผสมตัวอย่างให้เข้ากัน และลดขนาดตัวอย่างให้มีปริมาณเหมาะสมในการวิเคราะห์
2. ชั่งตัวอย่างวัตถุดิบอาหารหรืออาหารสัตว์ 100 กรัม
3. เทตัวอย่างลงบนตะแกรงร่อน 9 ชั้น ในชั้นบนสุด (ขนาดช่องเปิดกว้างที่สุด) ของเครื่องเขย่า
4. เปิดเครื่องร่อนเป็นเวลา 15 นาที ที่ความถี่ของการเขย่า 50 amplitude
5. ชั่งน้ำหนักของตัวอย่างที่ค้างบนตะแกรงร่อนแต่ละชั้น (ชั่งน้ำหนักของตะแกรงเขย่าที่มีตัวอย่าง และนำมาหักลบกับน้ำหนักตะแกรงเปล่า)

6. นำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณหาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางเฉลี่ย ความสม่ำเสมอของอนุภาค พื้นที่ผิวของอนุภาค และจำนวนอนุภาคต่อกรัม โดยใช้กราฟฐานลอการิทึม (log) และคำนวณในโปรแกรม excel

การคำนวณ

1. เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยทางเรขาคณิตของอนุภาค (geometric mean diameter, D_{gw})

$$D_{gw} = \log^{-1} \left\{ \frac{\sum W_i \log \bar{d}_i}{\sum W_i} \right\}$$

2. ความสม่ำเสมอทางเรขาคณิตของอนุภาคตัวอย่างที่บด (geometric standard deviation, S_{gw})

$$S_{gw} = \log^{-1} \left\{ \frac{\sum W_i (\log \bar{d}_i - \log d_{gw})^2}{\sum W_i} \right\}$$

เมื่อ $\bar{d}_i$ = เส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยบนตะแกรงร่อนที่ I ซึ่งคำนวณจาก $(d_i \times d_{i-1})^{1/2}$

W_i = น้ำหนักตัวอย่างบนตะแกรงร่อนที่ i

3. จำนวนอนุภาคต่อกรัม (number of particles per gram, N)

$$N = \left\{ \frac{1}{\beta_v \rho} \right\} \exp (4.5 \ln^2 S_{gw} - 3 \ln d_{gw})$$

4. พื้นที่ผิวของอนุภาค (surface area of particles, cm^2 , A)

$$A = \left\{ \frac{\beta_s}{\beta_v \rho} \right\} \exp (0.5 \ln^2 S_{gw} - \ln d_{gw})$$

เมื่อ A = พื้นที่ผิวของอนุภาค, ตารางเซนติเมตร/กรัม

N = จำนวนอนุภาคต่อกรัม

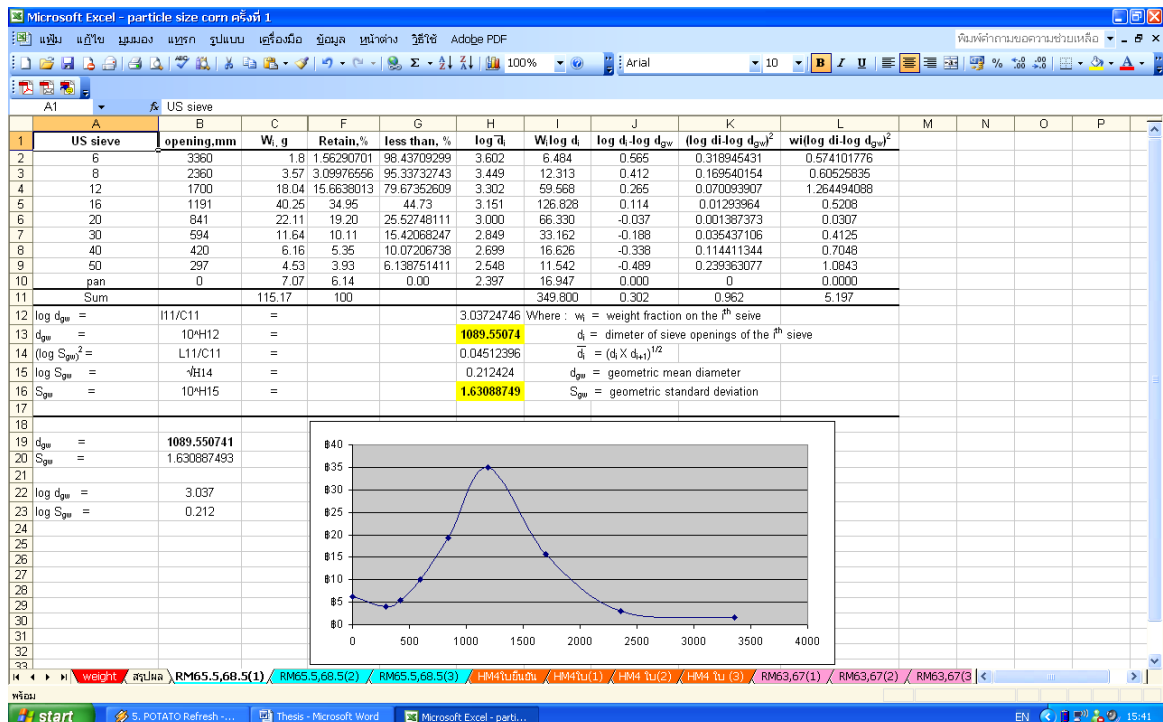
β_s = ค่าคงที่ของรูปร่าง โดยที่รูปร่างลูกบาศก์ $\beta_s = 6$ และรูปร่างทรงกลม $\beta_s = \pi$

β_v = ค่าคงที่ของปริมาตร โดยปริมาตรของลูกบาศก์ $\beta_v = 1$

และปริมาตรของทรงกลม = $\pi/6$

d_{gw} = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ยของอนุภาค, เซนติเมตร

S_{gw} = ความสม่ำเสมอของขนาดอนุภาค



ภาพผนวกที่ 2 ตัวอย่างการคำนวณขนาดอนุภาคโดยใช้โปรแกรม excel

การวิเคราะห์ความหนืด (viscosity)

การวิเคราะห์ความหนืดของอาหาร โดยใช้เครื่องวัดความหนืดชนิดแกนหมุน (rotational viscometer) รุ่น DV-I+ ของบริษัท Brookfield Engineering Laboratories (ภาพผนวกที่ 3) ซึ่งเครื่องวัดความหนืดชนิดนี้มีใบกวนวัดทรงกระบอก (spindle) โดยใบกวนวัดค่าความหนืดมีหลายเบอร์ ซึ่งแต่ละเบอร์ใช้แตกต่างกันออกไปตามความหนืดของอาหารที่ต้องการวัด มีหลักการทำงานโดยใช้ใบกวนซึ่งจุ่มลงไปในของเหลวที่ต้องการวัดค่า เมื่อของเหลวหนืดจะต้านการไหลของก้านจะทำให้เกิดการเบี่ยงเบน (deflection) ของขดลวดสปริง สามารถนำมาใช้หาความหนืดของของเหลวได้ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับชนิดของภาชนะบรรจุและก้านหมุน ในการวัดความหนืดจะเพิ่มความเร็วรอบของเข็มวัดขึ้นเรื่อยๆ เพื่อค่า

แรงบิด (torque) ที่เปลี่ยนไป และนำทั้งค่าแรงบิดมาผ่านกระบวนการคำนวณเพื่อให้ได้ค่าความหนืดที่แสดงเป็น centipoise ตามมาตรฐานการวิเคราะห์ของ American Society of Agricultural Engineers (ASAE, 1983)



ภาพผนวกที่ 3 เครื่องวัดความหนืดของเหลวชนิดแกนหมุน

การคำนวณ

ในการหาค่าความเค้นเฉือน (shear stress) ของอาหารสามารถใช้สมการ

$$\tau = \frac{M}{2\pi R_b^2 L}$$

มีหน่วยเป็น นิวตันต่อตารางเมตร (N/m²)

อัตราเฉือน (shear rate) หาได้จากสมการ

$$S = \frac{2\omega R_c^2 R_b^2}{x^2 (R_c^2 - R_b^2)}$$

มีหน่วยเป็น วินาที⁻¹ (s⁻¹)

การคำนวณความหนืด (viscosity) ใช้สมการดังนี้

$$\mu = \frac{\tau}{S}$$

มีหน่วยเป็น ปาสคาล-วินาที (mPa.sec)

ในที่นี้ M คือแรงบิดที่เกิดขึ้นมีหน่วยเป็นนิวตัน-เมตร (N-m) L คือความยาวของเข็มที่มีผล มีหน่วยเป็นเมตร (m) ω คือความเร็วเชิงมุม (rad/sec) c R คือ รัศมีของภาชนะที่ใช้ใส่อาหารมีหน่วยเป็นเมตร (m) b R คือ รัศมีของเข็มวัดมีหน่วยเป็นเมตร (m) x รัศมีที่ต้องการวัดอัตราเฉือนมีหน่วยเป็นเมตร (m)

เครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์

1. Brookfield Digital Viscometer (DV-I+ Viscometer)
2. เฟรมป้องกันชุดใบกวน (Gard leg RV DV-I+)
3. ชุดใบกวน มี 7 เบอร์ (7 spindle for RV)
4. ชุดขาตั้งเครื่อง
5. บีกเกอร์ขนาด 500 ml
6. นาฬิกาจับเวลา

วิธีการวิเคราะห์

1. เตรียมตัวอย่างไข่ขาวที่ต้องการวัด โดยการแยกไข่แดงและไข่ขาวออกจากกัน ให้มี ปริมาตรประมาณ 500 ml
2. เปิดเครื่อง viscometer โดยทุกครั้งที่เราเริ่มใช้ให้ปรับ zero ก่อน บนหน้าจอจะบอกให้ทำตามขั้นตอนต่อไป หลังจากเปิดเครื่องแล้ว กดปุ่ม on ที่ด้านหลังของเครื่อง หน้าจอจะแสดงดังนี้

BROOKFIELD DV-1+
RV VISCOMETER

หลังจากนั้นหน้าจอจะเปลี่ยนเป็น

REMOVE	SPINDLE
PRESS ANY KEY	

3. โดยก่อนใส่ใบกวน ทำการ set โดยกดปุ่ม select spindle ที่หน้าจอ ค่า SP01 จะกระพริบ กดลูกศรเลื่อนขึ้นลงเพื่อเลือกใบกวนภายใน 3 วินาที หลังจากนั้นกดปุ่ม select spindle อีกครั้ง จากนั้นให้ใส่ใบกวนที่ทำการเลือกไว้ (การเลือกใบกวนโดยปุ่มเลือกใบกวนตั้งแต่ number 1-7 และ ทดลองนำตัวอย่างวิเคราะห์โดยพิจารณาจากค่า % torque ที่สูงที่สุด และใช้ใบกวนเดิมทุกครั้งที่ทำ การวิเคราะห์)

4. กดปุ่มอะไรก็ได้บนหน้าปัดของเครื่อง เครื่องจะทำการ autozeroed ประมาณ 15 วินาที หลังจากนั้นหน้าจอจะเปลี่ยนเป็น replace spindle press any key เมื่อกดปุ่มหน้าจอจะเปลี่ยนเป็น

CP 0.0	SP01
0.0RPM	%0.0

5. จุ่มใบกวนลงในตัวอย่าง โดยเลื่อนปรับสกรูของเครื่องขึ้นลงให้เหมาะสม

6. ทำการเลือก speed ที่ใช้โดยการปรับ rpm เมื่อกดปุ่ม select speed หน้าจอค่า 0.0 rpm จะกระพริบ กดลูกศรเลื่อนขึ้นลงเพื่อเลือกความเร็วที่ต้องการ (ในการทดลองเลือกที่ 100 rpm เนื่องจากเป็น rpm ที่ ส่งผลให้แรงบิดในการวัดความหนืดสูงที่สุด) เมื่อได้แล้วกดปุ่ม set speed หน้าจอขณะทำงานจะ ปรากฏค่าดังนี้

CP ตัวเลข	SP01
100RPM	%ตัวเลข

ถ้าต้องการเปลี่ยนหรือปรับความเร็ว ให้กดลูกศรขึ้นลง พร้อมกดปุ่ม set speed ความเร็วใน การหมุน spindle ก็จะเปลี่ยนไปตามที่กำหนด ถ้าทำการ set speed ในการหมุนหรือเลือกใบกวนที่ไม่ เหมาะสม คือมีค่าแรงบิดที่มากกว่า 100% ใบกวนขับของเหลวไม่ไหว หน้าจอจะปรากฏ

CP ตัวเลข	SP01
100RPM	%EEE

แต่ถ้าเลือกใบกวนทำงานที่รอบการหมุนทำให้ % torque น้อยกว่า 10% หน้าจะแสดงภาพ (แต่สามารถอ่านค่าได้ สำหรับตัวอย่างที่มีความหนืดน้อย)

CP? ตัวเลข	SP01
100RPM20	%? ตัวเลข

และเมื่อ %torque มีค่าติดลบ หน้าจะปรากฏ

CP.....	SP01
100RPM20	% - ตัวเลข

7. การอ่านค่าความหนืดทำการอ่านโดยทำการหมุนใบกวนจับเวลา 1 นาที โดยใช้อุณหภูมิ เทียบเท่ากับ viscosity standard calibration ที่ 25 องศาเซลเซียส

ลักษณะทางกายภาพของข้าวโพดบด

ศึกษาผลของชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาคของข้าวโพดในอาหารผงสำหรับไก่ไข่ แบ่งกลุ่มการทดลองตามลักษณะการบดข้าวโพดดังนี้

1. บดข้าวโพดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มีล้าให้มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1,000 ไมครอน ซึ่งมีลักษณะ กายภาพของข้าวโพดบดดังภาพผนวกที่ 4



ภาพผนวกที่ 4 ลักษณะทางกายภาพของข้าวโพดบดทรีตเมนต์ที่ 1

2. บดข้าวโพดด้วยเครื่องบดแฮมเมอร์มิลล์ให้มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1,300 ไมครอน ซึ่งมีลักษณะ
 ภายนอกของข้าวโพดบดดังภาพผนวกที่ 5



ภาพผนวกที่ 5 ลักษณะทางกายภาพของข้าวโพดบดทรีตเมนต์ที่ 2

3. บดข้าวโพดด้วยเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์ให้มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1,000 ไมครอน ซึ่งมีลักษณะ
 ภายนอกของข้าวโพดบดดังภาพผนวกที่ 6



ภาพผนวกที่ 6 ลักษณะทางกายภาพของข้าวโพดบดทรีตเมนต์ที่ 3

4. บดข้าวโพดด้วยเครื่องบดโรลเลอร์มิลล์ให้มีขนาดอนุภาคเฉลี่ย 1,300 ไมครอน ซึ่งมีลักษณะ
 ภายนอกของข้าวโพดบดดังภาพผนวกที่ 7



ภาพผนวกที่ 7 ลักษณะทางกายภาพของข้าวโพดบดทรีตเมนต์ที่ 4

การวิเคราะห์ผลการทดลอง

การทดลองผลของชนิดเครื่องบดและขนาดอนุภาคของข้าวโพดบด ในอาหารผงสำหรับไก่ไข่ โดยมีปัจจัยที่ทำการศึกษา 2 ปัจจัย ได้แก่ ชนิดของเครื่องบด แสมเมอร์มิลล์และโรลเลอร์มิลล์ ที่มีขนาดอนุภาคของข้าวโพด เท่ากับ 1,000 และ 1,300 ไมครอน ใช้แผนการทดลองแบบแฟคทอเรียล และเปรียบเทียบค่าความแตกต่างแบบ orthogonal contrast

การใช้คำสั่งในโปรแกรม SAS

```
option ps=96 ls=96;
data;
input trt rep x;
cards;
ข้อมูล ;
run;
proc glm;
class trt;
Model x=trt;
lsmeans trt/pdiff stderr;
contrast 'RM&HM'          trt 1 1 -1 -1;
contrast 'Particle size'  trt 1 -1 1 -1;
```

```
contrast 'interaction'      trt 1 -1 -1 1;  
run;
```

ค่า x ในคำสั่งคือปัจจัยที่ต้องการศึกษา โดยจำนวน contrast = จำนวน trt - 1

ตารางผนวกที่ 2 อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนตลอดการทดลอง

วัน/เดือน/ปี	อุณหภูมิเวลาเช้า (°C)	อุณหภูมิเวลาเย็น (°C)	ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย (%)
2/10/2550	24.8	29.1	79
3/10/2550	25.2	27.8	80
4/10/2550	25.0	29.6	80
5/10/2550	24.5	29.0	79
6/10/2550	24.0	29.2	79
7/10/2550	24.5	29.0	80
8/10/2550	24.5	29.3	80
9/10/2550	24.6	29.7	81
10/10/2550	25.9	29.5	80
11/10/2550	24.2	28.8	80
12/10/2550	25.6	30.5	78
13/10/2550	23.8	30.0	78
14/10/2550	24.8	32.0	79
15/10/2550	18.2	27.5	77
16/10/2550	19.5	27.9	70
17/10/2550	19.8	28.0	76
18/10/2550	20.6	28.5	78
19/10/2550	24.9	30.5	79
20/10/2550	24.9	30.1	79
21/10/2550	24.8	29.1	79
22/10/2550	22.5	28.5	77
23/10/2550	21.7	28.0	79
24/10/2550	20.8	27.8	79
25/10/2550	21.7	26.8	79

ตารางภาพผนวกที่ 2 (ต่อ)

วัน/เดือน/ปี	อุณหภูมิเวลาเช้า (°C)	อุณหภูมิเวลาเย็น (°C)	ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย (%)
26/10/2550	21.9	28.7	76
27/10/2550	22.5	28.5	77
28/10/2550	24.4	28.9	78
29/10/2550	23.4	29.6	78
30/10/2550	23.4	30.4	76
31/10/2550	22.7	28.6	77
1/11/2550	24.4	29.9	78
2/11/2550	24.5	29.0	80
3/11/2550	24.5	29.3	80
4/11/2550	24.6	29.7	81
5/11/2550	25.9	29.5	80
6/11/2550	20.1	28.0	79
7/11/2550	19.8	28.0	76
8/11/2550	20.6	28.5	78
9/11/2550	27.2	28.0	75
10/11/2550	24.1	29.6	76
11/11/2550	25.9	29.2	78
12/11/2550	27.2	28.0	75
13/11/2550	23.6	27.9	77
14/11/2550	22.6	28.9	76
15/11/2550	23.9	27.2	77
16/11/2550	21.9	27.4	76
17/11/2550	28.9	29.5	78
18/11/2550	23.4	29.6	78

ตารางภาพผนวกที่ 2 (ต่อ)

วัน/เดือน/ปี	อุณหภูมิเวลาเช้า (°C)	อุณหภูมิเวลาเย็น (°C)	ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย (%)
19/11/2550	24.3	30.0	78
20/11/2550	22.4	27.2	76
21/11/2550	22.5	27.3	76
22/11/2550	23.2	26.8	76
23/11/2550	24.9	30.1	79
24/11/2550	24.8	29.1	79
25/11/2550	25.2	27.8	80
26/11/2550	25.0	29.6	80
27/11/2550	24.5	29.0	79
28/11/2550	24.0	29.2	79
29/11/2550	24.5	29.0	80
30/11/2550	24.5	29.3	80
1/12/2550	24.6	29.7	81
2/12/2550	25.9	29.5	80
3/12/2550	24.2	28.8	80
4/12/2550	26.3	27.8	75
5/12/2550	25.0	27.8	75
6/12/2550	25.6	30.5	78
7/12/2550	23.8	30.0	78
8/12/2550	24.8	32.0	79
9/12/2550	26.5	31.0	79
10/12/2550	24.3	28.4	78
11/12/2550	24.3	27.8	79
12/12/2550	24.6	28.6	78

ตารางภาพผนวกที่ 2 (ต่อ)

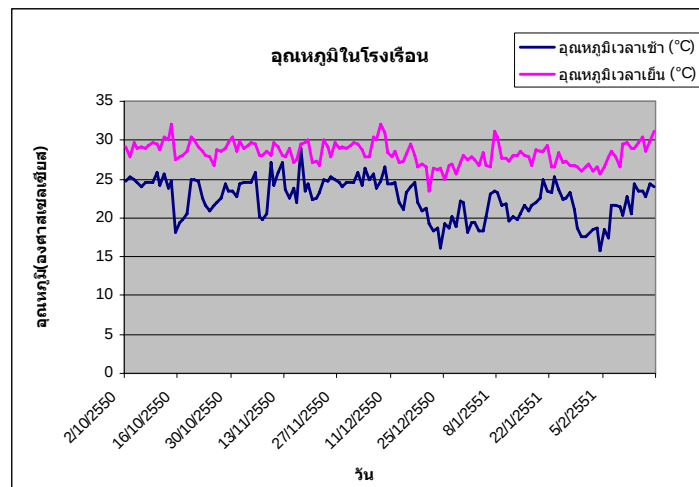
วัน/เดือน/ปี	อุณหภูมิเวลาเช้า (°C)	อุณหภูมิเวลาเย็น (°C)	ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย (%)
13/12/2550	21.9	27.2	88
14/12/2550	21.1	27.3	77
15/12/2550	23.2	28.2	77
16/12/2550	24.0	29.5	76
17/12/2550	24.5	28.0	77
18/12/2550	21.9	26.6	67
19/12/2550	20.9	26.9	68
20/12/2550	21.3	26.6	66
21/12/2550	19.2	23.5	65
22/12/2550	18.3	26.4	63
23/12/2550	18.7	26.2	63
24/12/2550	16.2	26.4	64
25/12/2550	19.2	24.9	64
26/12/2550	18.6	26.8	67
27/12/2550	20.1	27.0	68
28/12/2550	18.9	25.6	68
29/12/2550	22.1	27.1	78
30/12/2550	21.9	28.0	88
31/12/2550	18.2	27.5	77
1/1/2551	19.5	27.9	70
2/1/2551	19.5	27.5	71
3/1/2551	18.4	26.8	72
4/1/2551	18.4	28.4	71
5/1/2551	20.1	26.8	70

ตารางภาพผนวกที่ 2 (ต่อ)

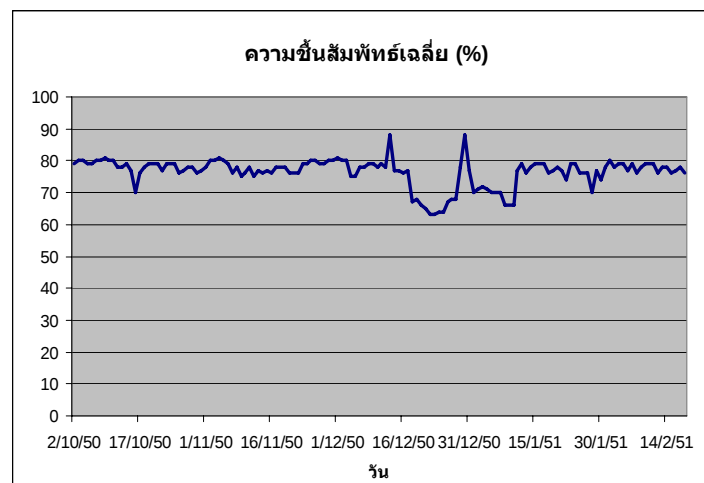
วัน/เดือน/ปี	อุณหภูมิเวลาเช้า (°C)	อุณหภูมิเวลาเย็น (°C)	ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย (%)
6/1/2551	23.0	26.6	70
7/1/2551	23.4	31.2	70
8/1/2551	23.2	30.5	66
9/1/2551	21.7	27.6	66
10/1/2551	21.8	27.6	66
11/1/2551	19.6	27.3	77
12/1/2551	20.1	28.0	79
13/1/2551	19.8	28.0	76
14/1/2551	20.6	28.5	78
15/1/2551	21.7	28.0	79
16/1/2551	20.8	27.8	79
17/1/2551	21.7	26.8	79
18/1/2551	21.9	28.7	76
19/1/2551	22.5	28.5	77
20/1/2551	25.0	28.6	78
21/1/2551	23.4	29.3	77
22/1/2551	23.3	26.5	74
23/1/2551	25.2	26.5	79
24/1/2551	23.6	28.4	79
25/1/2551	22.4	27.2	76
26/1/2551	22.5	27.3	76
27/1/2551	23.2	26.8	76
28/1/2551	21.1	26.8	70
29/1/2551	18.7	26.5	77

ตารางภาพผนวกที่ 2 (ต่อ)

วัน/เดือน/ปี	อุณหภูมิเวลาเช้า (°C)	อุณหภูมิเวลาเย็น (°C)	ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย (%)
30/1/2551	17.6	26.0	74
31/1/2551	17.6	26.5	78
1/2/2551	17.9	26.9	80
2/2/2551	18.5	26.0	78
3/2/2551	18.7	26.5	79
4/2/2551	15.7	25.6	79
5/2/2551	18.5	26.5	77
6/2/2551	17.4	27.8	79
7/2/2551	21.6	28.5	76
8/2/2551	21.7	27.9	78
9/2/2551	21.5	26.5	79
10/2/2551	20.4	29.5	79
11/2/2551	22.8	29.7	79
12/2/2551	20.5	29.0	76
13/2/2551	24.4	28.9	78
14/2/2551	23.4	29.6	78
15/2/2551	23.4	30.4	76
16/2/2551	22.7	28.6	77
17/2/2551	24.4	29.9	78
18/2/2551	24.0	31.2	76



ภาพผนวกที่ 8 อุณหภูมิภายในโรงเรือนระหว่างการทดลองในเวลาเช้าและเวลาบ่าย



ภาพผนวกที่ 9 ความชื้นสัมพัทธ์ในโรงเรือนระหว่างการทดลอง

ประวัติการศึกษา และการทำงาน

ชื่อ –นามสกุล

นางสาวชลพร มงคลทรัพย์

วัน เดือน ปี ที่เกิด

วันที่ 26 พฤษภาคม 2527

สถานที่เกิด

สิงห์บุรี

ประวัติการศึกษา

วิทยาศาสตรบัณฑิต (สัตวศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร)

มหาวิทยาลัยศิลปากร พศ. 2548