



ผลของการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในวัตถุดิบ
อาหารสัตว์ต่อการย่อยได้ในหลอดทดลอง ประสิทธิภาพการผลิต
คุณภาพซากและคุณภาพเนื้อของไก่เนื้อที่เลี้ยงด้วยอาหาร
พลังงานต่ำที่มีข้าวเปลือกเป็นส่วนประกอบ

โดย

ศศิกานต์ นันแก้ว

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการเกษตร)
สาขาวิชาเทคโนโลยีการเกษตร
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ปีการศึกษา 2568

EFFECTS OF NON-STARCH POLYSACCHARIDE-DEGRADING
ENZYME SUPPLEMENTATION IN FEED INGREDIENTS ON
IN VITRO DIGESTIBILITY, PRODUCTION PERFORMANCE,
CARCASS AND MEAT QUALITY OF BROILERS
FED LOW ENERGY DIET COMPOSED OF
PADDY RICE

BY

SASIKAN NUNKAEW

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT OF THE REQUIREMENTS
FOR THE DEGREE OF MASTER OF SCIENCE (AGRICULTURAL TECHNOLOGY)
DEPARTMENT OF AGRICULTURAL TECHNOLOGY
FACULTY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
THAMMASAT UNIVERSITY
ACADEMIC YEAR 2025

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

วิทยานิพนธ์

ของ

ศศิกานต์ นันแก้ว

เรื่อง

ผลของการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในวัตถุดิบอาหารสัตว์ต่อการย่อยได้
ในหลอดทดลอง ประสิทธิภาพการผลิต คุณภาพซากและคุณภาพเนื้อของไก่เนื้อที่เลี้ยงด้วย
อาหารพลังงานต่ำที่มีข้าวเปลือกเป็นส่วนประกอบ

ได้รับการตรวจสอบและอนุมัติ ให้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการเกษตร)

เมื่อ วันที่ 4 กันยายน พ.ศ. 2568

ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(รองศาสตราจารย์ ดร.ไพโชค ปิัญจะ)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ตรุณี ศรีชนะ)

กรรมการและอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิลาวรรณ เชื้อบุญ)

กรรมการ

(ดร.ไพรัตน์ ศรีชนะ)

กรรมการ

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สพ.ญ.ณัฐา จิริพงษ์)

คณบดี

(รองศาสตราจารย์ ดร.สุเพชร จิระจรกุล)

หัวข้อวิทยานิพนธ์	ผลของการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในวัตถุดิบอาหารสัตว์ต่อการย่อยได้ในหลอดทดลอง ประสิทธิภาพการผลิต คุณภาพซากและคุณภาพเนื้อของไก่เนื้อที่เลี้ยงด้วยอาหารพลังงานต่ำที่มีข้าวเปลือกเป็นส่วนประกอบ
ชื่อผู้เขียน	ศศิกานต์ นันแก้ว
ชื่อปริญญา	วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต (เทคโนโลยีการเกษตร)
สาขาวิชา/คณะ/มหาวิทยาลัย	สาขาวิชาเทคโนโลยีการเกษตร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดรุณี ศรีชนะ
อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ร่วม	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิลาวัณย์ เชื้อบุญ
ปีการศึกษา	2568

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ประกอบด้วย 3 การทดลอง การทดลองที่ 1 ศึกษาผลของการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้ง 2 ชนิด ได้แก่ เอนไซม์ไซลานเนส และเอนไซม์รวม (ไซลานเนส เบต้า-กลูคาเนส เซลลูเลส และไซโลกลูคาเนส) ต่อค่าการย่อยได้ของวัตถุดิบในหลอดทดลองของวัตถุดิบอาหารไก่เนื้อ 7 ชนิด ได้แก่ ข้าวโพด กากถั่วเหลือง รำข้าว ข้าวเปลือก กากเนื้อในเมล็ดปาล์ม ข้าวสาลี และรำข้าวสาลี การทดลองเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มไม่เสริมและเสริมเอนไซม์ วิเคราะห์สถิติด้วย t-test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ผลการทดลองพบว่าการเสริมเอนไซม์ไซลานเนสช่วยเพิ่มค่าการย่อยได้ของวัตถุดิบได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$) ในข้าวสาลี (84.90% เทียบกับ 87.34%; $P < 0.01$) และรำข้าวสาลี (52.96% เทียบกับ 56.89%; $P < 0.01$) ขณะที่การเสริมเอนไซม์รวมช่วยเพิ่มค่าการย่อยได้ของวัตถุดิบในข้าวเปลือก (60.53% เทียบกับ 61.58%; $P < 0.05$) ข้าวสาลี (84.91% เทียบกับ 87.42%; $P < 0.01$) และรำข้าวสาลี (52.43% เทียบกับ 56.03%; $P < 0.01$) และไม่พบความแตกต่างของการเสริมเอนไซม์ในวัตถุดิบอาหารอื่น ๆ ($P > 0.05$)

การทดลองที่ 2 แบ่งออกเป็น 2 การทดลองย่อย ได้แก่ 1) การศึกษาผลของการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในอาหารไก่เนื้อต่อการย่อยได้ของวัตถุดิบในหลอดทดลอง การทดลองนี้ดำเนินการในระดับห้องปฏิบัติการ และ 2) การศึกษาผลของการเสริมเอนไซม์

ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในอาหารไก่เนื้อต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโต การย่อยได้ของ วัตถุแห้ง และค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้แบบปรากฏ (apparent metabolizable energy; AME) ของไก่เนื้อ การทดลองนี้ดำเนินการโดยใช้ไก่เนื้อเพศผู้สายพันธุ์ ROSS 308 จำนวน 160 ตัว (อายุ 1 วัน) ทำการทดลองตั้งแต่วันที่ 1 ถึง 23 เพื่อประเมินประสิทธิภาพการเจริญเติบโต และระหว่างวันที่ 19 ถึง 23 เพื่อประเมินการย่อยได้ของวัตถุแห้งและค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้แบบปรากฏของไก่เนื้อ ไก่เนื้อทั้งหมดถูกเลี้ยงภายใต้ระบบกล่องเลี้ยงแบบปิด (closed chambers) ซึ่งมีการควบคุมอุณหภูมิ ความชื้น และแสง เพื่อให้สภาพแวดล้อมในการเลี้ยงมีความเหมาะสมและสม่ำเสมอตลอดระยะเวลา การทดลอง โดยทั้ง 2 การทดลองย่อย วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ แบ่งออกเป็น 4 กลุ่มการ ทดลอง (การทดลองละ 8 ซ้ำ) ได้แก่ 1) กลุ่มควบคุมที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์ 2) กลุ่มที่ได้รับการ เสริมเอนไซม์ไซลานเนส 3) กลุ่มที่ได้รับการเสริมเอนไซม์รวม และ 4) กลุ่มที่ได้รับการเสริมเอนไซม์ ไซลานเนสและเอนไซม์รวม ผลการทดลองย่อยที่ 1 ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในค่า การย่อยได้ของวัตถุแห้งในหลอดทดลองระหว่างกลุ่มการทดลอง ($P>0.05$) อย่างไรก็ตามกลุ่มที่ได้รับการ เสริมเอนไซม์รวมมีแนวโน้มค่าการย่อยได้ของวัตถุแห้งสูงกว่า (77.45%) เมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม ที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์ (76.81%) ($P=0.261$) ผลการทดลองย่อยที่ 2 พบว่าในช่วงอายุ 1 ถึง 14 วัน กลุ่มที่ได้รับการเสริมเอนไซม์รวมมีน้ำหนักตัวและอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวันสูงที่สุด (461.44 กรัม/ตัว และ 32.96 กรัม/ตัว/วัน ตามลำดับ) แต่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) เมื่อเทียบกับกลุ่มที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์ (456.17 กรัม/ตัว และ 32.58 กรัม/ตัว/วัน ตามลำดับ) และกลุ่มที่ได้รับการเสริมเอนไซม์ไซลานเนสและเอนไซม์รวม (452.63 กรัม/ตัว และ 32.33 กรัม/ตัว/วัน ตามลำดับ) ขณะที่กลุ่มที่ได้รับการเสริมเอนไซม์ไซลานเนสมีน้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้นและอัตรา การเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวันต่ำที่สุด และยังไม่พบความแตกต่างระหว่างกลุ่มการทดลองของปริมาณ อาหารที่กินได้และอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัว ($P>0.05$) อย่างไรก็ตามในช่วงอายุ 15 ถึง 18 วัน พบว่ากลุ่มที่ได้รับการเสริมเอนไซม์ไซลานเนสและเอนไซม์รวมมีน้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น อัตราการ เจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวัน และอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัวที่ดีกว่า (260.07 กรัม/ตัว, 65.02 กรัม/ตัว/วัน และ 1.33 ตามลำดับ) เมื่อเทียบกับกลุ่มที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์ (232.95 กรัม/ตัว, 58.24 กรัม/ตัว/วัน และ 1.45 ตามลำดับ) ($P<0.05$) ไม่พบความแตกต่างระหว่างกลุ่มการทดลองของ น้ำหนักตัวสุดท้ายและปริมาณอาหารที่กินได้ ($P>0.05$) และไม่พบความแตกต่างระหว่างกลุ่มการ ทดลองของค่าการย่อยได้ของวัตถุแห้ง ค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้แบบปรากฏ และประสิทธิภาพการ ใช้พลังงานรวมในอาหาร (AME/GE) ($P>0.05$)

การทดลองที่ 3 ศึกษาผลของการใช้อาหารพลังงานต่ำที่มีข้าวเปลือกเป็นส่วนประกอบที่ เสริมด้วยเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโต คุณภาพซาก

และคุณภาพเนื้อของไก่เนื้อ การทดลองนี้ดำเนินการโดยใช้ไก่เนื้อเพศผู้สายพันธุ์ ROSS 308 จำนวน 1,920 ตัว (อายุ 1 วัน) ทำการทดลองตั้งแต่วันที่ 1 ถึง 35 เพื่อประเมินประสิทธิภาพการเจริญเติบโต และในวันที่ 36 เพื่อประเมินคุณภาพซากและคุณภาพเนื้อของไก่เนื้อ ไก่เนื้อทั้งหมดถูกเลี้ยงภายในโรงเรือนแบบปิด ซึ่งมีการควบคุมอุณหภูมิ ความชื้น และแสง เพื่อให้สภาพแวดล้อมในการเลี้ยงมีความเหมาะสมและสม่ำเสมอตลอดระยะเวลาการทดลอง วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ โดยแบ่งออกเป็น 5 กลุ่มการทดลอง ๆ ละ 12 ซ้ำ (ซ้ำละ 32 ตัว) ได้แก่ 1) กลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานปกติที่ไม่มีการเสริมเอนไซม์ 2) กลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่ไม่มีการเสริมเอนไซม์ 3) กลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่มีการเสริมเอนไซม์ไซลาเนส 4) กลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่มีการเสริมเอนไซม์รวม และ 5) กลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่มีการเสริมเอนไซม์ไซลาเนสและเอนไซม์รวม ผลการทดลองในช่วงอายุ 15 ถึง 28 วัน พบว่ากลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำ (ไม่เสริมเอนไซม์ เสริมเอนไซม์ไซลาเนส และเสริมเอนไซม์รวม) มีน้ำหนักตัวสุดท้าย น้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น อัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวัน และปริมาณอาหารที่กินได้สูงกว่ากลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานปกติอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) และในช่วงอายุ 1 ถึง 28 วัน และ 29 ถึง 35 วัน แสดงผลลัพธ์ในทิศทางเดียวกัน โดยพบว่ากลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำ (ไม่เสริมเอนไซม์ เสริมเอนไซม์ไซลาเนส และเสริมเอนไซม์รวม) มีค่าการเจริญเติบโตและปริมาณอาหารที่กินได้สูงกว่ากลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานปกติ ($P < 0.05$) ในช่วงอายุ 1 ถึง 35 วัน พบว่าไก่เนื้อที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำในทุกกลุ่มมีน้ำหนักตัว อัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวัน และปริมาณอาหารที่กินได้สูงกว่ากลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานปกติอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) และตลอดช่วงอายุ 15 ถึง 28 วัน, 1 ถึง 28 วัน และ 1 ถึง 35 วัน พบว่ากลุ่มที่ได้รับการเสริมเอนไซม์รวมมีอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัวที่ดีกว่า (1.31, 1.25 และ 1.32 ตามลำดับ) เมื่อเทียบกับกลุ่มอาหารพลังงานปกติ (1.36, 1.28 และ 1.34 ตามลำดับ) และกลุ่มอาหารพลังงานต่ำที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์ (1.33, 1.26 และ 1.33 ตามลำดับ) ($P < 0.05$) นอกจากนี้กลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำในทุกกลุ่มมีต้นทุนค่าอาหารต่อการเปลี่ยนเป็นน้ำหนักตัวที่ต่ำกว่ากลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) ในด้านของคุณภาพซากพบว่ากลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำทุกกลุ่มมีน้ำหนักมีชีวิต เเปอร์เซ็นต์ซากตัดแต่ง เเปอร์เซ็นต์เนื้อส่วนอก และเปอร์เซ็นต์เนื้อสันในสูงกว่า ($P < 0.05$) เมื่อเทียบกับกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานปกติ ขณะที่กลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานปกติและกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่ได้รับการเสริมเอนไซม์ไซลาเนสและเอนไซม์รวมมีเปอร์เซ็นต์เนื้อส่วนปีกสูงที่สุด และไม่พบความแตกต่างระหว่างกลุ่มการทดลองของเปอร์เซ็นต์ซากและเปอร์เซ็นต์น่องติดสะโพก ($P > 0.05$) ส่วนคุณภาพเนื้อพบว่ากลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำทุกกลุ่มมีค่าความเป็นกรด-ด่างของเนื้ออกหลังการฆ่า (45 นาที) สูงกว่า ($P < 0.05$) เมื่อเทียบกับกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานปกติ และพบว่ากลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่ได้รับการเสริมเอนไซม์ไซลาเนสและเอนไซม์รวมมีค่าความเป็น

กรด-ด่างของเนื้อออกหลังการฆ่า (1 และ 3 วัน) สูงกว่า ($P < 0.05$) เมื่อเทียบกับกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานปกติ และไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างกลุ่มการทดลองของค่าเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักและค่าความแข็งของเนื้อส่วนนอก ($P > 0.05$)

คำสำคัญ: เอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้ง, อาหารพลังงานต่ำ, ไขมัน, ประสิทธิภาพการเจริญเติบโต, คุณภาพซากและคุณภาพเนื้อ



Thesis Title	EFFECTS OF NON-STARCH POLYSACCHARIDE-DEGRADING ENZYME SUPPLEMENTATION IN FEED INGREDIENTS ON <i>IN VITRO</i> DIGESTIBILITY, PRODUCTION PERFORMANCE, CARCASS AND MEAT QUALITY OF BROILERS FED LOW ENERGY DIET COMPOSED OF PADDY RICE
Author	Sasikan Nunkaew
Degree	Master of Science (Agricultural Technology)
Department/Faculty/University	Agricultural Technology Faculty of Science and Technology Thammasat University
Thesis Advisor	Assistant Professor Darunee Srichana, Ph.D.
Thesis Co-Advisor	Assistant Professor Wilawan Chuaboon, Ph.D.
Academic Year	2025

ABSTRACT

This thesis consisted of three experiments. Experiment 1 was investigated the effects of supplementation with two types of non-starch polysaccharide (NSP)-degrading enzymes, xylanase and a multi-enzyme complex (comprising xylanase, β -glucanase, cellulase, and xyloglucanase) on the *in vitro* dry matter digestibility (DMD) of seven broiler feed ingredients: corn, soybean meal, rice bran, paddy rice, palm kernel meal, wheat, and wheat bran. Statistical analysis was performed using a t-test, comparing control groups without enzyme supplementation to groups supplemented with enzymes at a 95% confidence level. The results indicated that xylanase supplementation significantly increased DMD in wheat (from 84.90% to 87.34%; $P < 0.01$) and wheat bran (from 52.96% to 56.89%; $P < 0.01$). Meanwhile, the multi-enzyme complex significantly improved DMD in paddy rice (from 60.53% to 61.58%; $P < 0.05$), wheat (from 84.91% to 87.42%; $P < 0.01$), and wheat bran (from 52.43% to 56.03%;

$P < 0.01$). No significant effects of enzyme supplementation were observed in the other feed ingredients ($P > 0.05$).

Experiment 2 was consisted of two sub-experiments. The first sub-experiment evaluated the effects of supplementing non-starch polysaccharide (NSP)-degrading enzymes on the *in vitro* dry matter digestibility (DMD) of broiler diets under laboratory conditions. The second sub-experiment assessed the effects of enzyme supplementation on growth performance, *in vivo* DMD, apparent metabolizable energy (AME), and energy utilization efficiency (AME/GE) in broilers. A total of 160 one-day-old male ROSS 308 broilers were used. The experiment was conducted from day 1 to 23 to assess growth performance, and from day 19 to 23 to evaluate nutrient digestibility and energy utilization. All birds were housed in closed chambers with controlled temperature, humidity, and lighting to ensure a uniform environment throughout the study period. Both sub-experiments followed a completely randomized design with four dietary treatments (eight replicates per treatment): 1) control (no enzyme), 2) xylanase, 3) multi-enzyme complex, and 4) combination of xylanase and multi-enzyme complex. In sub-experiment 1, no statistically significant differences were observed regarding *in vitro* DMD among the treatment groups ($P > 0.05$). However, the group receiving the multi-enzyme complex exhibited higher DMD value (77.45%) compared to the control group (76.81%) ($P = 0.261$). In sub-experiment 2, during the period from day 1 to 14, the group supplemented with the multi-enzyme complex showed the highest body weight and average daily gain (461.44 g/bird and 32.96 g/bird/day, respectively). However, these differences were not statistically significant ($P > 0.05$) when compared to the control (456.17 g/bird and 32.58 g/bird/day, respectively) and the combination group (452.63 g/bird and 32.33 g/bird/day, respectively). The group supplemented with only xylanase had the lowest weight gain and daily growth rate. No significant differences were found among treatments in feed intake and feed conversion ratio (FCR) during this period ($P > 0.05$). However, from day 15 to 18, broilers in the combination group exhibited significantly greater body weight gain, average daily gain, and improved FCR (260.07 g/bird, 65.02 g/bird/day, and 1.33, respectively) compared to the control group (232.95 g/bird, 58.24 g/bird/day, and 1.45, respectively).

($P < 0.05$). No significant differences were observed among treatments in final body weight, total feed intake, *in vivo* DMD, AME, or AME/GE ($P > 0.05$).

Experiment 3 was investigated the effects of low-energy diets containing paddy rice, supplemented with non-starch polysaccharide (NSP)-degrading enzymes, on the growth performance, carcass quality, and meat quality of broilers. A total of 1,920 one-day-old male ROSS 308 broilers were used. The experiment was conducted from day 1 to 35 to evaluate growth performance, and on day 36 to assess carcass and meat quality. All birds were housed in environmentally controlled closed-house systems with regulated temperature, humidity, and lighting to ensure uniform rearing conditions throughout the study. A completely randomized design was employed with five dietary treatments and 12 replicates per treatment (32 birds per replicate): 1) standard-energy diet without enzyme supplementation (control), 2) low-energy diet without enzyme supplementation, 3) low-energy diet with xylanase supplementation, 4) low-energy diet with a multi-enzyme complex, and 5) low-energy diet with both xylanase and the multi-enzyme complex. From day 15 to 28, broilers were fed with low-energy diets (without enzyme, with xylanase, and with a multi-enzyme complex) showed significantly higher final body weight, weight gain, average daily gain, and feed intake compared to those fed with the standard-energy diet ($P < 0.05$). Similar trends were observed during the periods of day 1 to 28 and day 29 to 35, broilers were fed with low-energy diets (without enzyme, with xylanase, and with a multi-enzyme complex) consistently exhibiting superior growth performance and feed intake compared to the standard-energy group ($P < 0.05$). Over the entire experimental period (day 1 to 35), broilers in all low-energy diet groups showed significantly higher body weight, ADG, and feed intake than those in the standard-energy diet group ($P < 0.05$). During the periods of day 15 to 28, 1 to 28, and 1 to 35, the group supplemented with multi-enzyme complex demonstrated better feed conversion ratios (FCRs) (1.31, 1.25, and 1.32, respectively) than both the standard-energy group (1.36, 1.28, and 1.34, respectively) and the unsupplemented low-energy group (1.33, 1.26, and 1.33, respectively) ($P < 0.05$). Moreover, all low-energy diet groups had significantly lower feed cost per unit of weight gain than the control group ($P < 0.05$). In terms of carcass quality,

all low-energy diet groups showed significantly higher live weight, dressing percentage, breast meat yield, and fillet yield compared to the standard-energy group ($P < 0.05$). The standard-energy group and the group supplemented with both xylanase and the multi-enzyme complex exhibited the highest wing percentages, while no significant differences were observed among treatments for thigh-drumstick yield and overall carcass percentage ($P > 0.05$). Regarding meat quality, all low-energy diet groups had significantly higher pH values of breast meat at 45 minutes postmortem compared to the standard-energy group ($P < 0.05$). Additionally, the group receiving both xylanase and the multi-enzyme complex showed significantly higher breast meat pH values at 1 and 3 days postmortem than the control group ($P < 0.05$). No significant differences were found among treatments for drip loss or wooden breast ($P > 0.05$).

Keywords: non-starch polysaccharide-degrading enzymes, low-energy diet, broiler chickens, growth performance, carcass and meat quality

กิตติกรรมประกาศ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปได้อย่างราบรื่น เนื่องด้วยความช่วยเหลือจากบุคคลหลายท่านที่ช่วยให้คำปรึกษาและแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ในการทำงานหรือการเขียนและวิจารณ์ผลต่าง ๆ ที่ทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จไปได้ด้วยดี จึงอยากขอขอบคุณมา ณ ที่นี้

ขอขอบพระคุณ อาจารย์ที่ปรึกษาหลัก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ดรุณี ศรีชนะ อาจารย์ที่ปรึกษาร่วม ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิลาวัณย์ เชื้อบุญ ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร.ไพโชค ปัญจะ กรรมการสอบวิทยานิพนธ์ ดร.ไพรัตน์ ศรีชนะ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สพ.ญ.ณัฐา จริยภมรกร ที่คอยให้คำปรึกษาและแนะนำสิ่งต่าง ๆ ให้ข้อคิดในการทำงานจนถึงช่วยแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้ จนสำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ ศูนย์วิจัยและนวัตกรรมอาหารสัตว์ บริษัท เจริญโภคภัณฑ์อาหาร จำกัด (มหาชน) และบุคลากรทุกท่าน ที่ได้กรุณาให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนการดำเนินงานวิจัย ตั้งแต่ขั้นตอนการเตรียมการทดลอง ตลอดจนให้คำแนะนำในการดำเนินการทดลอง จนการทดลองสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

ขอขอบพระคุณ เจ้าหน้าที่สาขาวิชาเทคโนโลยีการเกษตร และมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ที่ช่วยประสานงานต่าง ๆ จนทุกอย่างสำเร็จไปได้ด้วยดี

ขอขอบคุณ ทูบบัณฑิตเรียนดีเพื่อศึกษาต่อระดับบัณฑิตศึกษา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2566 ตามสัญญาเลขที่ ทบ.41/2565

สุดท้ายนี้ ขอขอบพระคุณครอบครัวและมิตรสหายที่ให้การสนับสนุนและเป็นกำลังใจอย่างไม่มีเงื่อนไข

ศศิกานต์ นันแก้ว

สารบัญ

	หน้า
บทคัดย่อภาษาไทย	(1)
บทคัดย่อภาษาอังกฤษ	(5)
กิตติกรรมประกาศ	(9)
สารบัญตาราง	(18)
สารบัญภาพ	(21)
รายการสัญลักษณ์และคำย่อ	(22)
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 ที่มาและความสำคัญ	1
1.2 วัตถุประสงค์	3
1.3 สมมุติฐาน	3
1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 สัตว์ปีก	5
2.2 ระบบทางเดินอาหารของสัตว์ปีก	5
2.2.1 ปากและหลอดอาหาร	6
2.2.2 กระเพาะปัสสาวะ	6

2.2.3	กระเพาะอาหาร	6
2.2.4	ลำไส้เล็ก	6
2.2.5	ลำไส้ใหญ่	7
2.2.6	ทวารร่วม	7
2.3	เอนไซม์ที่ผลิตขึ้นในระบบทางเดินอาหาร	7
2.4	ความเป็นกรด-ด่างในระบบทางเดินอาหาร	9
2.5	พลังงาน	10
2.5.1	การแบ่งส่วนพลังงานในร่างกายของสัตว์ปีก	11
2.5.2	สมดุลพลังงาน	13
2.6	พลังงานในอาหารสัตว์ปีก	14
2.6.1	การลดระดับพลังงานในอาหารสัตว์	15
2.7	คาร์โบไฮเดรต	16
2.7.1	ใยอาหาร	17
2.8	โพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้ง	19
2.8.1	เซลลูโลส	21
2.8.2	อะราบิโนไซแลน	22
2.8.3	เบต้ากลูแคน	22
2.8.4	แมนแนน	23
2.9	โพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งต่อการทำงานของระบบทางเดินอาหาร	24
2.10	การเสริมเอนไซม์ในอาหารสัตว์	25
2.10.1	การทำงานของเอนไซม์	26
2.10.2	เอนไซม์ที่เสริมลงในอาหารที่ใช้ในเชิงพาณิชย์	28
2.10.3	เอนไซม์ไซลาลเนส	30
2.10.4	เอนไซม์เซลลูเลส	32
2.10.5	เอนไซม์เบต้ากลูคาเนส	33
2.10.6	เอนไซม์แมนนาเนส	34
2.10.7	ประโยชน์ของการเสริมเอนไซม์ในอาหารสัตว์	35
2.11	เมล็ดธัญพืช	36
2.12	วัตถุดิบอาหารสัตว์	37
2.12.1	ข้าวโพด	38

2.12.2 ข้าวเปลือก	40
2.12.3 รำข้าว	42
2.12.4 กากถั่วเหลือง	44
2.12.5 กากเนื้อในเมล็ดปาล์ม	45
2.12.6 ข้าวสาลี	46
2.12.7 รำข้าวสาลี	49
2.13 การวัดการย่อยได้ในหลอดทดลอง	50
2.14 ผลของการเสริมเอนไซม์ในอาหารต่อประสิทธิภาพการผลิตของไก่เนื้อ	51
2.15 ผลของการเสริมเอนไซม์ในอาหารต่อคุณภาพซากและคุณภาพเนื้อของไก่เนื้อ	52
2.15.1 การเสริมเอนไซม์ในอาหารต่อคุณภาพซากของไก่เนื้อ	53
2.15.2 การเสริมเอนไซม์ในอาหารต่อคุณภาพเนื้อของไก่เนื้อ	54
บทที่ 3 วิธีการวิจัย	57
3.1 การทดลองที่ 1: ศึกษาผลของการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งต่อค่าการย่อยได้ของวัตถุดิบในหลอดทดลองของวัตถุดิบอาหารไก่เนื้อ	57
3.1.1 การวางแผนการทดลอง	57
3.1.2 การเตรียมวัตถุดิบอาหารสัตว์ที่ศึกษาและการวิเคราะห์ทางเคมี	57
3.1.3 การเตรียมเอนไซม์	57
3.1.4 การวิเคราะห์ค่าการย่อยได้ของวัตถุดิบอาหารสัตว์ในหลอดทดลอง	58
3.1.5 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ	59
3.2 การทดลองที่ 2: ศึกษาผลของการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในอาหารไก่เนื้อต่อการย่อยได้ของวัตถุดิบในหลอดทดลอง ประสิทธิภาพการเจริญเติบโต การย่อยได้ของวัตถุดิบและค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้แบบปรากฏของไก่เนื้อ	59
3.2.1 ศึกษาผลของการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในอาหารไก่เนื้อต่อการย่อยได้ของวัตถุดิบในหลอดทดลอง	59
3.2.1.1 แผนการทดลอง	59

3.2.1.2 การเตรียมอาหารสัตว์ที่ศึกษาและการวิเคราะห์ทางเคมี	60
3.2.1.3 การเตรียมเอนไซม์	60
3.2.1.4 การวิเคราะห์ค่าการย่อยได้ของอาหารไก่เนื้อในหลอดทดลอง	60
3.2.1.5 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ	60
3.2.2 ศึกษาผลของการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในอาหารไก่เนื้อต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโต การย่อยได้ของวัตถุดิบและค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้แบบปรากฏของไก่เนื้อ	61
3.2.2.1 จรรยาบรรณการใช้สัตว์	61
3.2.2.2 แผนการทดลอง	61
3.2.2.3 การจัดการโรงเรือนและสัตว์ทดลอง	61
(1) สัตว์ทดลอง	61
(2) เอนไซม์	61
(3) อาหาร	61
(4) อุณหภูมิและความชื้น	62
(5) แสงสว่าง	62
(6) การจัดการอาหารและน้ำ	62
3.2.2.4 การวิเคราะห์ทางเคมี	62
3.2.2.5 การเก็บข้อมูล	64
(1) ประสิทธิภาพการเจริญเติบโต	64
(2) การย่อยได้และค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้แบบปรากฏ	65
3.2.2.6 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ	65
3.3 การทดลองที่ 3: ศึกษาผลของการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในอาหารไก่เนื้อที่มีการลดระดับพลังงานและมีข้าวเปลือกเป็นส่วนประกอบต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโต คุณภาพซากและคุณภาพเนื้อของไก่เนื้อ	66
3.3.1 จรรยาบรรณการใช้สัตว์	66
3.3.2 แผนการทดลอง	66
3.3.3 การจัดการโรงเรือนและสัตว์ทดลอง	67
3.3.3.1 สัตว์ทดลอง	67

3.3.3.2 เอนไซม์	67
3.3.3.3 อาหาร	67
3.3.3.4 อุณหภูมิและความชื้น	67
3.3.3.5 แสงสว่าง	67
3.3.3.6 การจัดการอาหารและน้ำ	67
3.3.4 การวิเคราะห์ทางเคมี	68
3.3.5 การเก็บข้อมูล	71
3.3.5.1 ประสิทธิภาพการเจริญเติบโต	71
3.3.5.2 ศึกษาคุณภาพซาก	72
3.3.5.3 ศึกษาคุณภาพเนื้อ	73
3.3.6 การวิเคราะห์ทางสถิติ	73
3.4 สถานที่ทำการทดลอง	74
3.5 ระยะเวลาในการทำการทดลอง	74
บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผล	75
4.1 การทดลองที่ 1: ผลของการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่ แป้งต่อค่าการย่อยได้ของวัตถุดิบในหลอดทดลองของวัตถุดิบอาหาร ไก่เนื้อ	75
4.1.1 ผลการศึกษาการเสริมเอนไซม์ไซลาลเนสในวัตถุดิบอาหารไก่เนื้อ	75
4.1.2 ผลการศึกษาการเสริมเอนไซม์รวมในวัตถุดิบอาหารไก่เนื้อ	77
4.2 การทดลองที่ 2: ผลของการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่ แป้งในอาหารไก่เนื้อต่อการย่อยได้ของวัตถุดิบในหลอดทดลอง ประสิทธิภาพการเจริญเติบโต การย่อยได้ของวัตถุดิบและค่าพลังงาน ใช้ประโยชน์ได้แบบปรากฏของไก่เนื้อ	78
4.2.1 ผลการศึกษาการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้ง ในอาหารไก่เนื้อต่อการย่อยได้ของวัตถุดิบในหลอดทดลอง	78

4.2.2 ผลการศึกษาการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้ง ในอาหารไก่เนื้อต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโต การย่อยได้ของ วัตถุดิบ ค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้แบบปรากฏของไก่เนื้อ และ ประสิทธิภาพการใช้พลังงานรวมในอาหารของไก่เนื้อ	80
4.2.2.1 ผลการศึกษาการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ ไม่ใช่แป้งในอาหารไก่เนื้อต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโต ของไก่เนื้อในวันที่ 1 ถึง 14	80
4.2.2.2 ผลการศึกษาการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ ไม่ใช่แป้งในอาหารไก่เนื้อต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโต ของไก่เนื้อในวันที่ 15 ถึง 18	82
4.2.2.3 ผลการศึกษาการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ ไม่ใช่แป้งในอาหารไก่เนื้อต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโต ของไก่เนื้อในวันที่ 1 ถึง 18	84
4.2.2.4 ผลการศึกษาการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ ไม่ใช่แป้งในอาหารไก่เนื้อต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโต ของไก่เนื้อในวันที่ 19 ถึง 23	85
4.2.2.5 ผลการศึกษาการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ ไม่ใช่แป้งในอาหารไก่เนื้อต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโต ของไก่เนื้อในวันที่ 1 ถึง 23	86
4.2.2.6 ผลการศึกษาการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ ไม่ใช่แป้งในอาหารไก่เนื้อต่อการย่อยได้ของวัตถุดิบค่า พลังงานใช้ประโยชน์ได้แบบปรากฏ และประสิทธิภาพการ ใช้พลังงานรวมในอาหาร (AME/GE)	88
4.3 การทดลองที่ 3: ผลของการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่ แป้งในอาหารไก่เนื้อที่มีการลดระดับพลังงานและมีข้าวเปลือกเป็น ส่วนประกอบต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโต คุณภาพซากและคุณภาพ เนื้อของไก่เนื้อ	90

4.3.1 ผลของการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในอาหารไก่เนื้อที่มีการลดระดับพลังงานและมีข้าวเปลือกเป็นส่วนประกอบต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อในช่วงอายุ 1-14 วัน	90
4.3.2 ผลของการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในอาหารไก่เนื้อที่มีการลดระดับพลังงานและมีข้าวเปลือกเป็นส่วนประกอบต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อในช่วงอายุ 15-28 วัน	91
4.3.3 ผลของการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในอาหารไก่เนื้อที่มีการลดระดับพลังงานและมีข้าวเปลือกเป็นส่วนประกอบต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อในช่วงอายุ 1-28 วัน	95
4.3.4 ผลของการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในอาหารไก่เนื้อที่มีการลดระดับพลังงานและมีข้าวเปลือกเป็นส่วนประกอบต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อในช่วงอายุ 29-35 วัน	97
4.3.5 ผลของการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในอาหารไก่เนื้อที่มีการลดระดับพลังงานและมีข้าวเปลือกเป็นส่วนประกอบต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อในช่วงอายุ 1-35 วัน	100
4.3.6 ผลของการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในอาหารไก่เนื้อที่มีการลดระดับพลังงานและมีข้าวเปลือกเป็นส่วนประกอบต่อคุณภาพซากของไก่เนื้อ	102
4.3.7 ผลของการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในอาหารไก่เนื้อที่มีการลดระดับพลังงานและมีข้าวเปลือกเป็นส่วนประกอบต่อคุณภาพเนื้อของไก่เนื้อ	105

บทที่ 5 สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ	108
5.1 สรุปผลการวิจัย	108
5.1.1 การทดลองที่ 1	108
5.1.2 การทดลองที่ 2	108
5.1.3 การทดลองที่ 3	108
5.2 ข้อเสนอแนะ	109
5.2.1 การทดลองที่ 1	109
5.2.2 การทดลองที่ 2	109
5.2.3 การทดลองที่ 3	110
รายการอ้างอิง	111
ประวัติผู้เขียน	138

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
2.1 เอนไซม์ที่ผลิตขึ้นเพื่อย่อยสารตั้งต้นในระบบทางเดินอาหารและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อย	8
2.2 ความเป็นกรด-ด่างและระยะเวลาในการขนส่งอาหารของระบบทางเดินอาหารของไก่เนื้อ	9
2.3 การจำแนกประเภทของโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้ง	20
2.4 การทำงานของเอนไซม์ต่อสารตั้งต้นและวัตถุดิบอาหารสัตว์เป้าหมาย	30
2.5 การเปรียบเทียบองค์ประกอบทางโภชนาและลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ร่วมของเมล็ดในปาล์มเทียบกับกากถั่วเหลือง ข้าวโพด และข้าวเปลือก	41
2.6 คุณค่าทางโภชนาของรำข้าว	44
2.7 โพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในส่วนที่ละลายน้ำได้และละลายน้ำไม่ได้ของข้าวโพดและกากถั่วเหลือง	45
2.8 โพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในส่วนที่ละลายน้ำได้และละลายน้ำไม่ได้ของข้าวสาลีและรำข้าวสาลี	49
3.1 ส่วนประกอบของน้ำตาลที่พบในโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งทั้งหมดในวัตถุดิบอาหารสัตว์	58
3.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบอาหารสัตว์	58
3.3 องค์ประกอบทางเคมีของอาหารสัตว์	60
3.4 องค์ประกอบของวัตถุดิบอาหารสัตว์และค่าโภชนาในสูตรอาหารทดลองในวันที่ 1-23	63
3.5 องค์ประกอบทางเคมีของอาหารสัตว์ทดลอง	64
3.6 รายละเอียดกลุ่มการทดลองและค่าพลังงานของอาหารทดลองในแต่ละกลุ่มการทดลอง	66
3.7 องค์ประกอบของวัตถุดิบอาหารสัตว์และค่าโภชนาในสูตรอาหารทดลองในวันที่ 1-28	68
3.8 องค์ประกอบของวัตถุดิบอาหารสัตว์และค่าโภชนาในสูตรอาหารทดลองในวันที่ 29-35	70
3.9 องค์ประกอบทางเคมีของอาหารสัตว์ทดลอง	71

4.1	ค่าการย่อยได้ของวัตถุแห้งในหลอดทดลองของวัตถุดิบอาหารสัตว์ที่เสริมด้วย เอนไซม์โซลานอส	76
4.2	ค่าการย่อยได้ของวัตถุแห้งในหลอดทดลองของวัตถุดิบอาหารสัตว์ที่เสริมด้วย เอนไซม์รวม	78
4.3	ค่าการย่อยได้ของวัตถุแห้งในหลอดทดลองของอาหารไก่เนื้อที่เสริมด้วยเอนไซม์	79
4.4	ผลของการเสริมเอนไซม์ต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อในช่วงอายุ 1-14 วัน	82
4.5	ผลของการเสริมเอนไซม์ต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อในช่วงอายุ 15-18 วัน	84
4.6	ผลของการเสริมเอนไซม์ต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อในช่วงอายุ 1-18 วัน	85
4.7	ผลของการเสริมเอนไซม์ต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อในช่วงอายุ 19-23 วัน	86
4.8	ผลของการเสริมเอนไซม์ต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อในช่วงอายุ 1-23 วัน	88
4.9	ผลของการเสริมเอนไซม์ต่อการย่อยได้ของวัตถุแห้ง ค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้ แบบปรากฏ และประสิทธิภาพการใช้พลังงานรวมในอาหาร (AME/GE) ของ ไก่เนื้อในช่วงอายุ 19-23 วัน	89
4.10	ผลของการเสริมเอนไซม์ในอาหารไก่เนื้อที่มีการลดระดับพลังงานและมี ข้าวเปลือกเป็นส่วนประกอบต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อในช่วง อายุ 1-14 วัน	90
4.11	ผลของการเสริมเอนไซม์ในอาหารไก่เนื้อที่มีการลดระดับพลังงานและมี ข้าวเปลือกเป็นส่วนประกอบต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อในช่วง อายุ 15-28 วัน	95
4.12	ผลของการเสริมเอนไซม์ในอาหารไก่เนื้อที่มีการลดระดับพลังงานและมี ข้าวเปลือกเป็นส่วนประกอบต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อในช่วง อายุ 1-28 วัน	97
4.13	ผลของการเสริมเอนไซม์ในอาหารไก่เนื้อที่มีการลดระดับพลังงานและมี ข้าวเปลือกเป็นส่วนประกอบต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อในช่วง อายุ 29-35 วัน	99

- 4.14 ผลของการเสริมเอนไซม์ในอาหารไก่เนื้อที่มีการลดระดับพลังงานและมี
ข้าวเปลือกเป็นส่วนประกอบต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อในช่วง
อายุ 1–35 วัน 102
- 4.15 ผลของการเสริมเอนไซม์ในอาหารไก่เนื้อที่มีการลดระดับพลังงานและมี
ข้าวเปลือกเป็นส่วนประกอบต่อคุณภาพซากของไก่เนื้อ 104
- 4.16 ผลของการเสริมเอนไซม์ในอาหารไก่เนื้อที่มีการลดระดับพลังงานและมี
ข้าวเปลือกเป็นส่วนประกอบต่อคุณภาพเนื้อของไก่เนื้อ 107



สารบัญภาพ

ภาพที่	หน้า
2.1 การแบ่งส่วนพลังงานในร่างกายของสัตว์ปีก เส้นประ (—) แสดงถึงพลังงานความร้อนที่สูญเสียไปซึ่งสะสมอยู่ในพันธะเคมี และจุดประ (....) แสดงถึงพลังงานจลน์ที่สูญเสียไปในรูปของความร้อน	11
2.2 แนวคิดเรื่องโภชนาการ	17
2.3 แผนผังองค์ประกอบของคาร์โบไฮเดรต	18
2.4 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส	21
2.5 โครงสร้างทางเคมีของอะราบิโนไซด์	22
2.6 โครงสร้างทางเคมีของเบต้ากลูแคน	23
2.7 โครงสร้างทางเคมีของแมนแนน	23
2.8 การทำงานของเอนไซม์ในการจับกับสารตั้งต้น	27
2.9 เอนไซม์ภายนอกที่ใช้มากที่สุดในการย่อยอาหารของสัตว์กระเพาะเดี่ยว	29
2.10 การทำงานของเอนไซม์ไซลันเนสในการสลายไซลัน	31
2.11 การทำงานของเอนไซม์เซลลูเลสในการสลายเซลลูโลส	33
2.12 การทำงานของเอนไซม์เบต้ากลูคาเนสในการสลายกลูแคน	34
2.13 การทำงานของเอนไซม์แมนนาเนสในการสลาย (a) แกนหลัก (backbone) ของกาแลกโตโอลิโกแมนแนน และ (b) โอลิโกแซคคาไรด์ (oligosaccharide)	35
2.14 ส่วนประกอบของใยอาหารในเมล็ดพืช	37
2.15 ผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการบวมการสืขาวเปลือก	43
2.16 ส่วนประกอบของไขมันและใยอาหารในเมล็ดข้าวสาลี	47
2.17 โรคกล้ามเนื้อผิดปกติที่พบในไก่เนื้อ (A) เนื้ออกที่ปกติ, (B) โรคเนื้ออกแบบสปากัดดี, (C) โรคเนื้ออกแข็ง และ (D) โรคเนื้ออกแบบมีตำหนิร้าวสีขาว	55

รายการสัญลักษณ์และคำย่อ

สัญลักษณ์/คำย่อ	คำเต็ม/คำจำกัดความ
ADF	เยื่อใยที่ไม่ละลายในสารละลายที่เป็นกรด (Acid Detergent Fiber)
AME	ค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้แบบปรากฏ (Apparent Metabolizable Energy)
ATTD	ค่าการย่อยได้แบบปรากฏตลอดทางเดินอาหาร (Apparent Total Tract Digestibility)
DMD	การย่อยได้ของวัตถุแห้ง (Dry Matter Digestibility)
GE	พลังงานรวม (Gross Energy)
ME	พลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้ (Metabolizable Energy)
NDF	เยื่อใยที่ไม่ละลายในสารละลายที่เป็นกลาง (Neutral Detergent Fiber)
NSP	โพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้ง (Non-Starch Polysaccharides)

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ที่มาและความสำคัญ

การผลิตปศุสัตว์นั้นมีต้นทุนการผลิตที่ผันผวนตามราคาวัตถุดิบอาหารสัตว์ ซึ่งคิดเป็น 60 ถึง 70 เปอร์เซ็นต์ ของต้นทุนการผลิตทั้งหมด ต้นทุนค่าอาหารสัตว์ปีงบประมาณ 65 เปอร์เซ็นต์ มาจากแหล่งของวัตถุดิบที่ให้พลังงาน (Donohue and Cunningham, 2009) ปัจจุบันราคาวัตถุดิบอาหารสัตว์มีการปรับตัวสูงขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากภาวะเศรษฐกิจโลก ราคาน้ำมันดิบ การเปลี่ยนแปลงทางสภาพภูมิอากาศ และสงครามรัสเซีย-ยูเครน ส่งผลทำให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้นตาม จึงมีความจำเป็นต้องเลือกใช้วัตถุดิบจากพืชที่มีราคาไม่แพงมาเป็นส่วนประกอบในอาหารสัตว์มากขึ้น เพื่อเป็นการลดต้นทุนและเพิ่มกำไรในการผลิต โดยวัตถุดิบอาหารที่มีเยื่อใยสูงได้ถูกนำมาใช้ในอาหารสัตว์ของสัตว์กระเพาะเดี่ยว เช่น ไก่เนื้อ อาหารที่มีเยื่อใยสูงจะส่งผลกระทบทำให้เกิดปัญหาต่อการย่อยได้และประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อ แต่หากสามารถปรับปรุงความสามารถในการย่อยและการดูดซึมสารอาหารต่าง ๆ ในระบบทางเดินอาหารของไก่เนื้อได้ วัตถุดิบอาหารจากพืชที่มีเยื่อใยสูงที่กล่าวมานี้จะกลายมาเป็นแหล่งของพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้ในอาหารสัตว์ที่มีราคาไม่แพง

โพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้ง (non-starch polysaccharides; NSP) ที่พบในส่วนผสมของวัตถุดิบอาหารสัตว์ ส่งผลกระทบโดยตรงต่ออัตราการไหลผ่านของอาหารในระบบทางเดินอาหาร สุขภาพของลำไส้ และจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบทางเดินอาหารของไก่เนื้อ ด้วยเหตุนี้ NSP จึงส่งผลต่อการกินได้และประสิทธิภาพการผลิตของไก่เนื้อ ซึ่งบ่งชี้ว่าการประกอบสูตรอาหารในปัจจุบันควรคำนึงถึงผลกระทบของ NSP ในวัตถุดิบอาหารสัตว์ (Morgan et al., 2021) และเป็นที่ทราบดีว่า NSP ชนิดที่ละลายน้ำได้ เช่น อะราบินอกซ์แลน (arabinoxylan) และเบต้ากลูแคน (beta glucans) ส่งผลกระทบต่อการใช้สารอาหารและประสิทธิภาพการเจริญเติบโต โดย NSP ชนิดที่ละลายน้ำได้มีความสามารถในการเพิ่มความหนืดในทางเดินอาหารของสัตว์ ซึ่งความหนืดที่เกิดขึ้นส่งผลกระทบต่อการย่อยและการดูดซึมสารอาหาร (Munyaka et al., 2016)

NSP ไม่สามารถย่อยได้ในสัตว์ปีก เนื่องจากขาดเอนไซม์ในการสลายพันธะที่เชื่อมกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกชนิดเบต้า (β 1-3, 1-4 และ 1-6) ที่พบใน NSP (Raza et al., 2019) ไก่เนื้อจึงไม่สามารถไฮโดรไลซิส (hydrolysis) ส่วนประกอบต่าง ๆ ของ NSP ในอาหารสัตว์ได้ ดังนั้นการเสริมเอนไซม์ในอาหารสัตว์จะช่วยเพิ่มความพร้อมใช้งานของสารอาหารและพลังงาน ปรับปรุงสุขภาพลำไส้ และเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตของไก่เนื้อ (Slominski, 2011)

การเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้ง (NSP-degrading enzyme; NSPase) สามารถปรับปรุงความพร้อมใช้งานของพลังงานในอาหารและช่วยลดต้นทุนค่าอาหารสัตว์ (Costa et al., 2008) โดยเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งที่นิยมใช้ในอาหารสัตว์ปีก เช่น เอนไซม์ไซลานเนส (Silversides and Bedford, 1999) เบต้า-แมนนาเนส เบต้า-กลูคาเนส แอลฟาอะไมเลส และไฟเตส (Valente Junior et al., 2024) ช่วยลดความหนืดและเพิ่มความสามารถในการย่อยได้ของไก่เนื้อ อย่างไรก็ตามเอนไซม์ที่ใช้จะมีความทำงานที่เฉพาะเจาะจงกับสารตั้งต้นหรือวัตถุดิบซึ่งเป็นส่วนผสมในอาหารสัตว์ การตอบสนองต่อการเสริมเอนไซม์ในไก่เนื้ออาจแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น กิจกรรมของเอนไซม์ ความจำเพาะต่อสารตั้งต้น ปฏิกริยาระหว่างเอนไซม์คุณภาพของวัตถุดิบ และอายุของไก่เนื้อ (Cowieson and Ravindran, 2008) มีรายงานการเสริมไซลานเนสในอาหารช่วยปรับปรุงการใช้พลังงานและเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตในไก่เนื้อ (Williams et al., 2018) การเสริมเบต้ากลูคาเนสช่วยเพิ่มน้ำหนักตัวและปรับปรุงอัตราการแลกเนื้อในไก่เนื้อ (Jozefiak et al., 2006) เบต้าแมนนาเนสช่วยปรับปรุงการใช้พลังงานและเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตในไก่เนื้อ (Shastak et al., 2015) ดังนั้นการศึกษาความเฉพาะเจาะจงของเอนไซม์กับวัตถุดิบอาหารสัตว์จะนำไปสู่การใช้งานของเอนไซม์ในอาหารสัตว์ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด และนำไปสู่การเพิ่มความสามารถในการผลิตของสัตว์ ส่งเสริมสวัสดิภาพสัตว์ และลดต้นทุนด้านอาหารสัตว์ได้อย่างยั่งยืน

ในอุตสาหกรรมการเลี้ยงไก่เนื้อ อาหารส่วนใหญ่ประกอบด้วยวัตถุดิบหลักคือข้าวโพดและกากถั่วเหลือง โดยข้าวโพดมีอะราบิโนไซแลนเป็นส่วนประกอบหลักประมาณ 48.65 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณ NSP ทั้งหมด (Baker et al., 2021) แม้ว่าการเสริมเอนไซม์ไซลานเนส ซึ่งมีหน้าที่เร่งปฏิกิริยาในการย่อยสลายโครงสร้างหลักของไซแลน (Moreira and Filho, 2016) จะถูกนำมาใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อ แต่การตอบสนองของเอนไซม์ไซลานเนสต่อข้าวโพดนั้นยังคงต่ำกว่าวัตถุดิบอื่น ๆ เช่น ข้าวสาลี เนื่องจากข้าวโพดมีปริมาณ NSP ทั้งหมดต่ำกว่า (Kiarie et al., 2014) ปัจจุบันมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในการเลือกใช้วัตถุดิบอาหารสัตว์ที่หาได้ภายในประเทศ เช่น ข้าวเปลือก รำข้าว และกากเนื้อในเมล็ดปาล์ม เนื่องจากมีต้นทุนต่ำและมีปริมาณมาก แต่มีข้อจำกัดในการใช้เนื่องจากวัตถุดิบเหล่านี้มีปริมาณ NSP สูง เช่น รำข้าวประกอบด้วยเบต้ากลูแคน (Kaur et al., 2011) เซลลูโลส และเฮมิเซลลูโลสในระดับสูง (Shaheen et al., 2015) ข้าวเปลือกมีปริมาณ NSP สูงเช่นกัน กากเนื้อในเมล็ดปาล์มประกอบด้วยแมนแนนเป็นส่วนประกอบหลัก และพบเซลลูโลส กลูคูโรโนไซแลน และอาราบินโนไซแลนประกอบอยู่ด้วย (Dusterhoft et al., 1991; Knudsen, 1997) พบการเสริมเอนไซม์รวม (ไซลานเนส เบต้า-กลูคาเนส และเซลลูเลส) ในอาหารที่มีส่วนประกอบของข้าวโพด ข้าวเปลือก และกากถั่วเหลือง ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยได้ในเป็ด (Kang et al., 2013) จากความซับซ้อนของโครงสร้าง NSP ที่พบในวัตถุดิบอาหารสัตว์ต่าง ๆ การใช้เอนไซม์หลายชนิด

ร่วมกันจึงเป็นทางเลือกที่น่าสนใจในการเพิ่มประสิทธิภาพการย่อย NSP และการดูดซึมสารอาหารในสัตว์ปีก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการเสริมเอนไซม์ย่อย NSP ต่อการย่อยได้ ประสิทธิภาพการผลิต คุณภาพซากและคุณภาพเนื้อของไก่เนื้อที่เลี้ยงด้วยอาหารพลังงานต่ำที่มีข้าวเปลือกเป็นส่วนประกอบ ซึ่งจะนำไปสู่การใช้งานของเอนไซม์ในอาหารสัตว์ได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด

1.2 วัตถุประสงค์

1.2.1 ศึกษาผลของการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้ง 2 ชนิด ได้แก่ เอนไซม์ไซลาลเนส และเอนไซม์รวม (ประกอบด้วยเอนไซม์ไซลาลเนส เบต้า-กลูคาเนส เซลลูเลส และไซโคลกลูคาเนส) ต่อค่าการย่อยได้ของวัตถุดิบในหลอดทดลองของวัตถุดิบอาหารไก่เนื้อ 7 ชนิด ได้แก่ ข้าวโพด กากถั่วเหลือง รำข้าว ข้าวเปลือก กากเนื้อในเมล็ดปาล์ม ข้าวสาลี และรำข้าวสาลี

1.2.2 ศึกษาผลของการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในอาหารไก่เนื้อต่อการย่อยได้ของวัตถุดิบในหลอดทดลอง ประสิทธิภาพการเจริญเติบโต การย่อยได้ของวัตถุดิบและค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้แบบปรากฏของไก่เนื้อ

1.2.3 ศึกษาผลของการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในอาหารไก่เนื้อที่มีการลดระดับพลังงานและมีข้าวเปลือกเป็นส่วนประกอบต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโต คุณภาพซาก และคุณภาพเนื้อของไก่เนื้อ

1.3 สมมุติฐาน

1.3.1 การเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในวัตถุดิบอาหารไก่เนื้อช่วยเพิ่มค่าการย่อยได้ของวัตถุดิบในหลอดทดลองได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับการไม่เสริมเอนไซม์

1.3.2 การเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในอาหารไก่เนื้อช่วยเพิ่มค่าการย่อยได้ของวัตถุดิบในหลอดทดลอง ประสิทธิภาพการเจริญเติบโต การย่อยได้ของวัตถุดิบและค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้แบบปรากฏของไก่เนื้อ โดยการเสริมเอนไซม์รวมมีประสิทธิภาพสูงกว่าเอนไซม์ไซลาลเนสหรือการไม่เสริมเอนไซม์ เนื่องจากสามารถสลาย NSP ที่มีความหลากหลายและซับซ้อน ส่งผลทำให้การใช้ประโยชน์จากสารอาหารและพลังงานของไก่เนื้อมีประสิทธิภาพมากขึ้น

1.3.3 การเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในอาหารไก่เนื้อที่มีการลดระดับพลังงานและมีข้าวเปลือกเป็นส่วนประกอบช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเจริญเติบโต คุณภาพซาก

และคุณภาพเนื้อของไก่เนื้อ โดยการเสริมเอนไซม์รวมมีประสิทธิภาพสูงกว่าเอนไซม์โซลานีสหรือการไม่เสริมเอนไซม์ เนื่องจากสามารถสลาย NSP ที่มีความหลากหลายและซับซ้อน ส่งผลทำให้การใช้ประโยชน์จากสารอาหารและพลังงานของไก่เนื้อที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำมีประสิทธิภาพมากขึ้น

1.4 ผลที่คาดว่าจะได้รับ

ทราบผลการใช้เอนไซม์ในอาหารไก่เนื้อที่เหมาะสม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยและการใช้ประโยชน์จากสารอาหาร พร้อมทั้งเพิ่มศักยภาพในการใช้ข้าวเปลือกซึ่งเป็นวัตถุดิบในประเทศให้เกิดประโยชน์สูงสุด โดยไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโต คุณภาพซาก และคุณภาพเนื้อของไก่เนื้อ อีกทั้งช่วยลดต้นทุนการผลิตและเพิ่มความยั่งยืนของอุตสาหกรรมการผลิตไก่เนื้อ



บทที่ 2

วรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 สัตว์ปีก

สัตว์ปีก เช่น ไก่ ไก่วง ไก่ต๊อก ไก่ฟ้า เป็ด ห่าน นกกระทา นกพิราบ หรือนกสายพันธุ์อื่น ๆ ได้ถูกนำมาเลี้ยงเพื่อให้ผลผลิต เช่น เนื้อ ไข่ และผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ โดยไก่ถือเป็นหนึ่งในสายพันธุ์ของสัตว์ปีกที่มีความสำคัญมากที่สุดในโลก และในปัจจุบันมีการผลิตเนื้อสัตว์ปีกและไข่ไก่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเป็นผลมาจากประชากรโลกและอุตสาหกรรมสัตว์ปีกที่เติบโตขึ้นอย่างรวดเร็ว (FAO, 2014; Speedy, 2003) นอกจากนี้อุตสาหกรรมการผลิตไก่เนื้อเพื่อการบริโภคเนื้อสัตว์จัดเป็นอุตสาหกรรมหลักของอุตสาหกรรมการผลิตสัตว์ปีกทั้งหมด (De Vries and De Boer, 2010) ทั่วโลกมีอัตราการผลิตไก่เนื้อที่เพิ่มขึ้นซึ่งเป็นไปตามความต้องการบริโภคของประชากรโลกที่เพิ่มขึ้น โดยเฉพาะในประเทศกำลังพัฒนา (Mottet and Tempio, 2017) และการผลิตไก่เนื้อในปัจจุบันมีเป้าหมายในการเพิ่มผลผลิตควบคู่ไปกับการปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้อาหารที่ดีขึ้น (Siegel, 2014) โดยมีอาหารสัตว์เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการย่อยได้ของสารอาหาร ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการผลิตของไก่เนื้อ

2.2 ระบบทางเดินอาหารของสัตว์ปีก

หน้าที่ของระบบทางเดินอาหาร คือ การย่อยอาหารและการดูดซึมสารอาหารต่าง ๆ ที่สัตว์ได้รับจากการกินอาหาร โดยการย่อยอาหารที่ดีจะนำไปสู่ความสามารถในการใช้สารอาหารต่าง ๆ ให้เกิดประโยชน์สูงสุด และส่งเสริมการเพิ่มจำนวนของจุลินทรีย์ที่ดีในระบบทางเดินอาหารจากการป้องกันการก่อตัวของแบคทีเรียก่อโรคในระบบทางเดินอาหาร เกิดสมดุลของจุลินทรีย์สายพันธุ์ที่ก่อโรคและไม่ก่อโรค เพิ่มการตอบสนองของระบบภูมิคุ้มกันอย่างเหมาะสม ซึ่งการทำงานที่มีประสิทธิภาพของระบบทางเดินอาหารที่กล่าวมานี้เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตของสัตว์ในด้านการเจริญเติบโตและคุณภาพของเนื้อสัตว์ นอกจากนี้การพัฒนาของระบบทางเดินอาหารยังเป็นส่วนสำคัญต่อการพัฒนาของอวัยวะย่อยอาหารในช่วงระยะแรกหลังฟักไข่ของไก่เนื้อ (Jha et al., 2019b) ด้วยเหตุนี้จึงจำเป็นต้องทำความเข้าใจความต้องการสารอาหารต่าง ๆ ระบบเมตาบอลิซึม บทบาทของสรีรวิทยา และผลกระทบจากปัจจัยภายนอก เช่น อาหารสัตว์ ที่ส่งผลต่อสุขภาพและการเจริญเติบโตของสัตว์ปีก (Celi et al., 2017)

โดยระบบทางเดินอาหารของสัตว์ปีกประกอบไปด้วยปากและหลอดอาหาร กระเพาะพัก กระเพาะอาหาร (กระเพาะแท้และกั้น) ลำไส้เล็ก (ลำไส้เล็กส่วนต้น ลำไส้เล็กส่วนกลาง และลำไส้เล็กส่วนปลาย) ลำไส้ใหญ่ (ลำไส้ใหญ่ส่วนต้นและโคลอน) และทวารร่วม

2.2.1 ปากและหลอดอาหาร

ปากเป็นส่วนที่ใช้ในการรวบรวมอาหารและทำให้อาหารชุ่มชื้นด้วยน้ำและน้ำลาย ในช่องปาก ก่อนส่งผ่านไปยังหลอดอาหาร (esophagus) ซึ่งมีต่อมเมือกช่วยหล่อลื่นอาหารระหว่างการเคลื่อนที่ โดยอาหารจะนิ่มขึ้นและเริ่มย่อยด้วยเอนไซม์อะไมเลสหรือน้ำย่อยไทาลิน (ptyalin) ที่มีอยู่ในน้ำลาย ก่อนเคลื่อนเข้าสู่กระเพาะพักอย่างช้า ๆ (Clavijo and Florez, 2018)

2.2.2 กระเพาะพัก

กระเพาะพัก (crop) เป็นส่วนของทางเดินอาหารที่ขยายตัวออกมาจากหลอดอาหาร มีลักษณะเป็นถุงที่มีผนังบาง ทำหน้าที่เป็นแหล่งในการเก็บพักอาหารของไก่เนื้อเพียงชั่วคราว ก่อนที่จะส่งผ่านอาหารไปยังกระเพาะอาหาร โดยอาหารที่กินเข้าไปจะถูกทำให้ชื้นขึ้นด้วยน้ำลายที่กระเพาะพัก เพื่อเพิ่มความสามารถในการย่อยได้ของอาหารในไก่เนื้อ (Feye et al., 2020) ไม่มีการหลั่งเอนไซม์ที่ช่วยในการย่อยอาหาร แต่มีน้ำลาย เมือก และจุลินทรีย์ในกระเพาะพักที่มีบทบาทสำคัญในการหมักเพื่อเริ่มต้นกระบวนการย่อยอาหารในระบบทางเดินอาหารของสัตว์ปีก และเพิ่มความสามารถในการใช้เอนไซม์ที่ได้จากการบริโภคจากน้ำและอาหาร (Bayer et al., 1975)

2.2.3 กระเพาะอาหาร

กระเพาะอาหาร (stomach) แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของกระเพาะแท้ (proventriculus) และส่วนของกั้น (gizzard) ที่ช่วยให้ไก่เนื้อสามารถบริโภควัตถุดิบอาหารหยาบต่าง ๆ ในอาหารได้ กระเพาะแท้ทำหน้าที่ในการย่อยทางเคมีของวัตถุดิบอาหารสัตว์ โดยการหลั่งกรดไฮโดรคลอริก (hydrochloric acid) และเปปซินโนเจน (pepsinogen) ในขณะที่กระเพาะบดหรือกั้นทำหน้าที่ในการย่อยเชิงกลของอาหารผ่านการบดอาหารให้แตกออกเป็นอนุภาคเล็ก ๆ แล้วผสมกับน้ำย่อยในกระเพาะแท้ จากนั้นจึงส่งผ่านอาหารไปยังลำไส้เล็ก (Clavijo and Florez, 2018)

2.2.4 ลำไส้เล็ก

ลำไส้เล็ก (small intestine) แบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ลำไส้เล็กส่วนต้น (duodenum) ลำไส้เล็กส่วนกลาง (jejunum) และลำไส้เล็กส่วนปลาย (ileum) โดยไม่มีความแตกต่างทางเนื้อเยื่อวิทยาและความยาวของลำไส้ที่แปรผันขึ้นอยู่กับพฤติกรรมการกินอาหาร (Svihus, 2014) ลำไส้เล็กเป็นอวัยวะที่มีการย่อยและดูดซึมสารอาหารที่ถูกย่อย เพื่อส่งสารอาหารต่าง ๆ เข้าสู่กระแสเลือดต่อไป โดยมีตับอ่อนเป็นอวัยวะที่หลั่งน้ำย่อยที่อุดมไปด้วยเอนไซม์สำคัญที่

หลังจากออกมาจากตับอ่อน ได้แก่ อะไมเลส (pancreatic amylase) ทริปซิน (trypsin) ไลเปส (lipases) และคาร์บอกซีเปปติเดส (carboxypeptidases) และมีตับที่หลังน้ำดีซึ่งถูกเก็บไว้ในถุงน้ำดีส่งเข้าไปในลำไส้เล็กส่วนต้นซึ่งช่วยในการย่อยไขมัน (Noy and Sklan, 1995; Uni et al., 1999) และอาหารในลำไส้เล็กส่วนปลายที่ไม่ได้ถูกย่อย เช่น เซลลูโลส และโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งชนิดต่าง ๆ จะถูกส่งไปยังลำไส้ใหญ่ส่วนต้น (Clavijo and Florez, 2018) โดยเอนไซม์ย่อยอาหารที่ถูกผลิตในร่างกายของไก่เนื้ออาจได้รับผลกระทบจากปัจจัยต่าง ๆ เช่น อายุ เอนไซม์จากภายนอก และองค์ประกอบของจุลินทรีย์ในลำไส้ (Shakouri et al., 2009)

2.2.5 ลำไส้ใหญ่

ลำไส้ใหญ่ (large Intestine) แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ลำไส้ใหญ่ส่วนต้น (cecum) และโคลอน (colon) โดยลำไส้ใหญ่ส่วนต้นมีบทบาทสำคัญต่อการเจริญเติบโตของไก่เนื้อเนื่องจากเป็นแหล่งหมักที่สำคัญซึ่งมีจุลินทรีย์อาศัยอยู่เป็นจำนวนมาก โดยจุลินทรีย์ในลำไส้ใหญ่สามารถหมักโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้ง เช่น เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส โพลีแซคคาไรด์ เพคติก แป้งที่ทนต่อการย่อย ฟรุคโต-โอลิโกแซคคาไรด์ และลิกนิน จนได้ผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้าย เช่น กรดอินทรีย์ กรดไขมันสายสั้น และวิตามิน จุลินทรีย์ในลำไส้ใหญ่ส่วนต้นจึงมีบทบาทสำคัญในการหมักคาร์โบไฮเดรตหรือเส้นใยต่าง ๆ ที่พบได้ในธัญพืช ดังนั้นการทำงานของระบบทางเดินอาหารสามารถเปลี่ยนแปลงได้โดยอาหาร และสามารถส่งผลกระทบต่อเจริญเติบโต สุขภาพ ระบบภูมิคุ้มกัน และจุลินทรีย์ในระบบทางเดินอาหาร (Svihus, 2014; Celi et al., 2017; Yadav and Jha, 2019) และลำไส้ใหญ่ส่วนปลายมีการดูดซึมน้ำและอิเล็กโทรไลต์ในอุจจาระก่อนส่งไปยังทวารร่วม

2.2.6 ทวารร่วม

เป็นช่องทางออกของปัสสาวะและอุจจาระในสัตว์ปีก เป็นบริเวณที่ใช้ในการสืบพันธุ์ และใช้ในการควบคุมอุณหภูมิของร่างกาย

2.3 เอนไซม์ที่ผลิตขึ้นในระบบทางเดินอาหาร

อาหารจะถูกลดขนาดของโมเลกุลให้เล็กลงเพื่อให้สามารถดูดซึมและนำไปใช้ประโยชน์ได้ โดยคาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน เป็นสารตั้งต้นในอาหารของสัตว์ที่จะถูกย่อยด้วยเอนไซม์ที่ถูกสร้างขึ้นภายในส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย โดยมีเอนไซม์อะไมเลสในน้ำลายที่ช่วยหล่อลื่นและทำให้อาหารนิ่มขึ้น และเป็นการเริ่มต้นการย่อยอาหารในส่วนของคาร์โบไฮเดรต (dextrin) และในส่วนของกระเพาะพักจะมีเมือกแต่ไม่มีการหลั่งเอนไซม์ ซึ่งส่วนมากเอนไซม์ในระบบทางเดินอาหารจะถูกผลิตขึ้นที่กระเพาะแท้และลำไส้เล็กส่วนต้น โดยเอนไซม์แต่ละชนิดจะย่อยและเปลี่ยนสารตั้งต้นนั้น ๆ ให้มี

โมเลกุลเล็กลงและได้เป็นผลิตภัณฑ์ใหม่หลังจากถูกย่อย (ตารางที่ 2.1) อาหารที่ถูกย่อยอย่างสมบูรณ์ จะถูกดูดซึมสารอาหารที่ลำไส้เล็กส่วนกลางเป็นหลัก (Leeson and Summers, 2001)

ตารางที่ 2.1 เอนไซม์ที่ผลิตขึ้นเพื่อย่อยสารตั้งต้นในระบบทางเดินอาหารและผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการย่อย

อวัยวะ	เอนไซม์ที่ผลิต	สารตั้งต้น	ผลิตภัณฑ์
ปาก	น้ำลาย	หล่อลื่นและทำให้อาหารนิ่มลง	
	อะไมเลสในน้ำลาย	แป้ง เด็กซ์ทรีน	เด็กซ์ทรีน น้ำตาลกลูโคส
กระเพาะพัก	เมือก	หล่อลื่นและทำให้อาหารนิ่มลง	
กระเพาะแท้ และกั้น	กรดไฮโดรคลอริก	ลดค่าความเป็นกรด-ด่างของอาหาร, เริ่มการย่อยโปรตีน	
	เพปซิน	โปรตีน	พอลิเปปไทด์ของโปรตีน
	ไลเปส	ไตรกลีเซอไรด์	กรดไขมันและโมโนกลีเซอไรด์
ลำไส้เล็ก ส่วนต้น	อะไมเลส	แป้งและพอลิแซ็กคาไรด์ที่ละลายในน้ำได้	น้ำตาลมอลโทสและกลูโคส
	ทริพซิน, ไคโมทริพซิน และ อีลาสเทส	โปรตีนและเพปไทด์	เพปไทด์และกรดอะมิโน
	คาร์บอกซีเปปทิเดสและ คอลลาเจนเนส	คอลลาเจนเปปไทด์	กรดอะมิโน
	น้ำดี	ไขมัน	แตกตัวเป็นหยดไขมัน
	ไลเปส	ไขมัน	กรดไขมัน, โมโนกลีเซอไรด์ และ ไดกลีเซอไรด์
	คอเลสเทอรอลเอสเทอเรส	คอเลสเทอรอลเอสเทอร์	กรดไขมันและคอเลสเทอรอล
	มอลเทส	น้ำตาลมอลโทส	น้ำตาลกลูโคส
	และไอโซมอลโทส		
	ซูเครส	น้ำตาลซูโครส	น้ำตาลกลูโคส และฟรุกโตส
	แล็กเทส	น้ำตาลแล็กโทส	น้ำตาลกลูโคส และกาแล็กโทส
ลำไส้ใหญ่ ส่วนต้น	เพปซิเดส	เปปไทด์	ไดเปปไทด์และกรดอะมิโน
	พอลิโนวคลีโอไทเดส	กรดนิวคลีอิก	โมนโนวคลีโอไทด์
	จุลินทรีย์	เซลลูโลส, คาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อน, แป้ง และน้ำตาล	กรดไขมันระเหย, วิตามินเคและบี

ที่มา: ดัดแปลงจาก Leeson and Summers (2001)

2.4 ความเป็นกรด-ด่างในระบบทางเดินอาหาร

ค่าความเป็นกรด-ด่างในระบบทางเดินอาหารจะมีค่าความเป็นกรดสูงในส่วนของกระเพาะแท้และก้น และเป็นกลางมากขึ้นตามทางเดินอาหารที่ยาวขึ้น โดยค่าความเป็นกรด-ด่าง ในกระเพาะแท้และก้นมีความเป็นกรดที่สูงกว่าส่วนอื่น ๆ ในระบบทางเดินอาหารของไก่เนื้อ เนื่องจากความเป็นกรดในกระเพาะแท้และก้นช่วยในการสลายโมเลกุลและลดขนาดของอาหารลงภายในกระเพาะ และในส่วนของลำไส้จะมีความเป็นกรดอ่อน ๆ ที่ใกล้เคียงกัน ซึ่งเอนไซม์จากภายนอก (exogenous enzymes) ส่วนใหญ่มีค่าความเป็นกรด-ด่างที่แตกต่างกันไป อย่างไรก็ตามหากเอนไซม์ที่เสริมลงไปให้อาหารนั้นสามารถทนต่อการถูกทำลายโดยเพปซินในระบบทางเดินอาหารได้ เอนไซม์เหล่านั้นจะสามารถคงอยู่ในลำไส้เล็กได้ โดยมีประสิทธิภาพมากขึ้นและมีความคงตัวของโปรตีนสูง (Igbasan et al., 2000) สัตว์ปีกมีระยะเวลาในการไหลผ่านของอาหารในระบบทางเดินอาหารที่ค่อนข้างสั้น ระยะเวลาโดยเฉลี่ยในทางเดินอาหารหากไม่รวมลำไส้ใหญ่ส่วนต้นอยู่ที่ประมาณ 3 ถึง 4 ชั่วโมง (Svihus et al., 2010) ประสิทธิภาพของเอนไซม์ที่เสริมลงไปให้อาหารสัตว์ในระบบทางเดินอาหารขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น อาหาร ค่าความเป็นกรด-ด่าง อุณหภูมิ และเวลาที่ใช้ในการย่อยในทางเดินอาหาร โดยเอนไซม์ส่วนใหญ่ทำงานที่อุณหภูมิระหว่าง 40 ถึง 60 องศาเซลเซียส ภายในร่างกายของสัตว์ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่แตกต่างกันไปตามทางเดินอาหารเป็นปัจจัยหนึ่งที่ส่งผลกระทบต่อกิจกรรมและความคงตัวของเอนไซม์ โดยมีค่าความเป็นกรด-ด่างและเวลาในการขนส่งอาหารของทางเดินอาหารของไก่เนื้อ (ตารางที่ 2.2) ที่ส่งผลกระทบต่อกิจกรรมของเอนไซม์และการย่อยได้ของอาหาร (Ravindran, 2013) และความเป็นกรดในระบบทางเดินอาหารสามารถลดความสามารถในการย่อยของจุลินทรีย์ต่าง ๆ (Clavijo and Florez, 2018) ค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่เป็นกลางของลำไส้เล็ก (ลำไส้เล็กส่วนต้น ลำไส้เล็กส่วนกลาง และลำไส้เล็กส่วนปลาย) จะเอื้อต่อการย่อยของจุลินทรีย์ต่าง ๆ

ตารางที่ 2.2 ความเป็นกรด-ด่างและระยะเวลาในการขนส่งอาหารของระบบทางเดินอาหารของไก่เนื้อ

ระบบทางเดินอาหาร	ค่าความเป็นกรด-ด่าง	เวลาในการขนส่ง (นาท)
กระเพาะพัก	5.5	10 ถึง 50
กระเพาะแท้และก้น	2.5 ถึง 3.5	30 ถึง 90
ลำไส้เล็กส่วนต้น	5 ถึง 6	5 ถึง 10
ลำไส้เล็กส่วนกลาง	6.5 ถึง 7.0	20 ถึง 30
ลำไส้เล็กส่วนปลาย	7.0 ถึง 7.5	50 ถึง 70
ลำไส้ใหญ่ส่วนต้นและโคลอน	8.0	20 ถึง 30

ที่มา: ดัดแปลงจาก Ravindran (2013)

2.5 พลังงาน

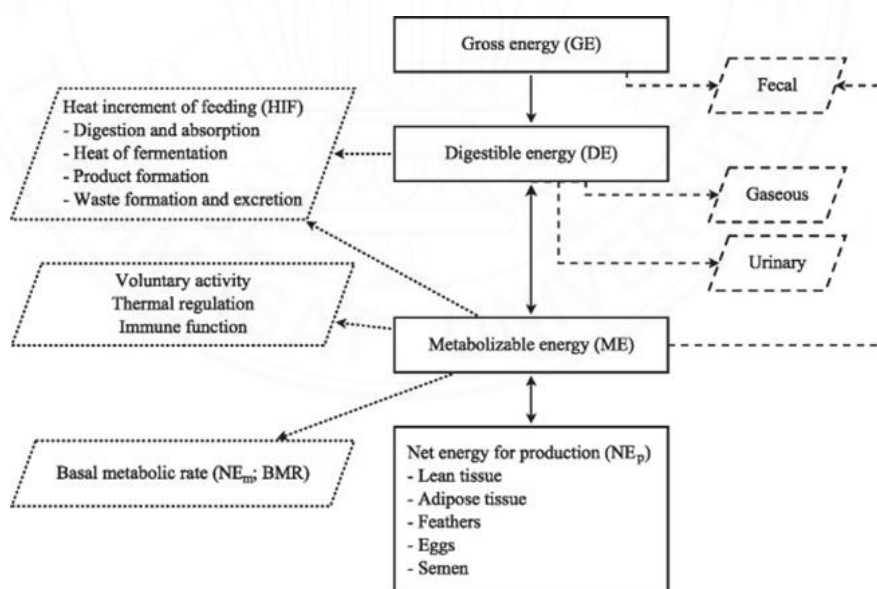
พลังงานที่สัตว์ได้รับนั้นมาจากสารอาหารที่ได้จากแหล่งวัตถุดิบอาหารสัตว์ต่าง ๆ ได้แก่ คาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมัน เมื่ออาหารถูกย่อยและถูกดูดซึมจะทำให้เกิดพลังงาน ซึ่งมีความสำคัญต่อการทำงานของร่างกาย โดยพลังงานในอาหารสัตว์ถือว่าเป็นต้นทุนหลักของอาหารและการผลิตไก่เนื้อ พลังงานที่ได้จากคาร์โบไฮเดรตจะถูกใช้ไปกับการดำรงชีพและการเจริญเติบโต หรือใช้ในกระบวนการทางเคมีต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในร่างกาย โดยธัญพืชในอาหารสัตว์ให้พลังงาน 60 ถึง 70 เปอร์เซ็นต์ ของส่วนประกอบในอาหารสัตว์ปิก ในขณะที่แหล่งพลังงานอื่น ๆ เช่น โปรตีนและไขมัน นั้นจะให้พลังงานในส่วนที่เหลือตามความต้องการของสัตว์ปิก และการกำหนดค่าพลังงานของอาหารที่มาจากพืชอาหารสัตว์อย่างแม่นยำนั้นมีความสำคัญ โดยมีวัตถุประสงค์ในการกำหนดสูตรอาหารที่ใช้ต้นทุนต่ำที่สุดและเพื่อการใช้อาหารสัตว์ให้สอดคล้องกับความต้องการพลังงานของสัตว์อย่างเหมาะสม (Carre et al., 2013)

ธัญพืชสามารถนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานในอาหารสัตว์ปิก เช่น ข้าวโพด ข้าวสาลี ข้าวฟ่าง ข้าวบาร์เลย์ และข้าวไรย์ ซึ่งถือเป็นธัญพืชหลักที่ใช้เป็นแหล่งพลังงานในอาหารไก่เนื้อ โดยมีแป้งในธัญพืชที่ถือเป็นแหล่งพลังงานหลักในธัญพืช ซึ่งแป้งสามารถย่อยได้สูงโดยเฉพาะในสัตว์ปิก พลังงานที่สามารถเผาผลาญได้ของธัญพืชสำหรับสัตว์ปิกอยู่ในช่วงตั้งแต่ 2,734 กิโลแคลอรี/กิโลกรัม ในข้าวไรย์ จนถึง 3,300 กิโลแคลอรี/กิโลกรัม ในข้าวโพด คุณค่าทางโภชนาการของเมล็ดธัญพืชนั้นแตกต่างกันไปตามชนิด แหล่งที่มา ฤดูกาลปลูก การเพาะปลูก การเก็บเกี่ยว และการจัดการต่าง ๆ แม้ว่าธัญพืชจะมีแป้งที่ย่อยได้อยู่สูง แต่ธัญพืชส่วนใหญ่มีสารต้านโภชนา ซึ่งส่งผลเสียต่อการย่อยอาหาร การดูดซึมสารอาหาร และความพร้อมใช้งานของสารอาหาร เนื่องจากธัญพืชชนิดต่าง ๆ ในอาหารสัตว์ที่ให้พลังงาน เช่น ข้าวโพด ข้าวสาลี ข้าวโอ๊ต และข้าวบาร์เลย์ มักพบโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งเป็นส่วนประกอบในปริมาณสูง ได้แก่ อาราบิโนไซแลน (ไซโลสและอาราบิโนส) และเบต้ากลูแคน (Knudsen, 2014) จึงทำให้พลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้ในอาหารสัตว์ไม่ได้ถูกนำไปใช้ประโยชน์สูงสุด และพลังงานที่ได้จากคาร์โบไฮเดรตและไขมันในอาหารถือว่าเป็นแหล่งพลังงานที่มีประสิทธิภาพมากกว่าโปรตีน โดยโปรตีนนั้นมีราคาแพงมากกว่าคาร์โบไฮเดรตและไขมัน และต้องใช้พลังงานในการเผาผลาญที่มากกว่า ส่งผลให้เกิดการสูญเสียพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้มากกว่า (Leeson and Summers, 2001) มีรายงานว่าอาหารมีส่วนประกอบของไขมันมากกว่า 5 เปอร์เซ็นต์ สามารถลดผลกระทบของความเครียดที่เกิดจากความร้อนในไก่เนื้อที่เลี้ยงที่อุณหภูมิ 29 ถึง 36 องศาเซลเซียส เป็นผลมาจากการลดการผลิตความร้อนในร่างกาย ซึ่งไขมันมีความสามารถกระตุ้นให้เกิดการผลิตความร้อนต่ำกว่าคาร์โบไฮเดรตและโปรตีน เนื่องจากพลังงานที่ได้จากคาร์โบไฮเดรต ไขมัน และ

โปรตีนนั้นต่างกัน โดยไขมันให้พลังงานมากกว่าคาร์โบไฮเดรตและโปรตีน ไขมัน 1 กรัม ให้พลังงานอยู่ที่ 9 กิโลแคลอรี/กรัม แต่คาร์โบไฮเดรตและโปรตีน 1 กรัม ให้พลังงานเพียง 4 กิโลแคลอรี/กรัม ด้วยพลังงานที่สูงของไขมันทำให้สามารถลดกิจกรรมในการเผาผลาญได้ (Ghazalah et al., 2008) และลดปริมาณการกินอาหาร และไก่เนื้อจะตอบสนองต่อความเครียดจากความร้อนน้อยกว่าทำให้การเจริญเติบโตและคุณภาพเนื้อ เช่น ค่า pH ของกล้ามเนื้อหลังการฆ่า ความสามารถในการอุ้มน้ำของเนื้อไก่ ความผิดปกติของสี และเนื้อสัมผัสได้รับผลกระทบน้อยกว่า (Nawaz et al., 2021)

2.5.1 การแบ่งส่วนพลังงานในร่างกายของสัตว์ปีก

การแบ่งส่วนพลังงานในร่างกายของสัตว์ปีก คือ ผลรวมของพลังงานจากกระบวนการทางสรีรวิทยาและระบบเมแทบอลิซึมของสัตว์ปีกที่ควบคุมการใช้พลังงานในอาหารที่ได้รับทั้งหมด โดยสามารถอธิบายได้จากกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ที่ว่าพลังงานไม่ได้ถูกสร้างขึ้นหรือถูกทำลายแต่สามารถเปลี่ยนรูปแบบได้ ซึ่งพลังงานทั้งหมดที่สัตว์ได้รับจากอาหารท้ายที่สุดแล้วจะถูกกักเก็บไว้ในรูปของพลังงานสุทธิสำหรับการผลิต (net energy for production; NE_p) และพลังงานที่มากเกินไปความต้องการจะถูกขับออกหรือสูญเสียไปในรูปของความร้อน ดังนั้นพลังงานทั้งหมด (gross energy; GE) ในอาหารและการสูญเสียพลังงานสามารถอธิบายได้โดย (ภาพที่ 2.1)



ภาพที่ 2.1 การแบ่งส่วนพลังงานในร่างกายของสัตว์ปีก เส้นประ (—) แสดงถึงพลังงานความร้อนที่สูญเสียไปซึ่งสะสมอยู่ในพันธะเคมี และจุดประ (....) แสดงถึงพลังงานจลน์ที่สูญเสียไปในรูปของความร้อน
ที่มา: Zuidhof (2019)

สัตว์ปีกจะได้รับพลังงานทั้งหมดที่มีอยู่ในอาหารที่กินเข้าไปและเกิดเป็นความร้อนขึ้นเมื่อสารอินทรีย์หรือสารอาหารถูกสันดาปไปจนหมด ซึ่งได้น้ำ คาร์บอนไดออกไซด์ และไนโตรเจนออกมา สามารถวัดพลังงานทั้งหมดได้โดยใช้เครื่องบอมป์แคลอรีมิเตอร์ (NRC, 1994; NRC, 1981a) เมื่อเกิดกระบวนการย่อยอาหารภายในร่างกายจะได้พลังงานที่ย่อยได้ (digestible energy; DE) หมายถึง GE ในอาหารลบออกด้วย GE ในอุจจาระที่เป็นพลังงานในส่วนที่ย่อยไม่ได้และจะสูญเสียไปผ่านสิ่งขับถ่ายของสัตว์ปีกและการสูญเสียพลังงานโดยรวมของลำไส้ส่วนหนึ่งไปกับอุจจาระ ปัสสาวะ และก๊าซ คงเหลือเป็นพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้ (metabolizable energy; ME) หมายถึง DE (ปัสสาวะและก๊าซที่เกิดจากการย่อยอาหาร) ลบออกด้วย GE ในอุจจาระ แต่ในเชิงพาณิชย์การตรวจวัดค่า DE ไม่เป็นที่นิยมทำในสัตว์ปีก โดยทั่วไปนิยมหาค่า ME จาก GE ในอาหารลบออกด้วย GE ในสิ่งขับถ่าย และถือว่าค่า ME คือ พลังงานทั้งหมดที่สัตว์ได้รับจากอาหาร และมีพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้ที่ไม่รวมพลังงานจากการกักเก็บไนโตรเจน (nitrogen corrected ME; MEN) หมายถึง ME ที่มีการกักเก็บไนโตรเจนเป็นศูนย์ โดยลบออกด้วยพลังงานที่สะสมไว้ในรูปของโปรตีนในร่างกาย คือ 8.22 (GE ของกรดยูริก) (NRC, 1994; NRC, 1981a; Lopez and Leeson, 2008) ซึ่งสะท้อนถึงค่า GE ของไนโตรเจนที่พบในปัสสาวะของสัตว์ปีก และสุดท้ายจะได้ออกมาเป็นพลังงานสุทธิ (net energy; NE) ที่สัตว์สามารถนำไปใช้ได้จริง โดยพลังงานสุทธิเป็นตัวบ่งชี้ของค่าพลังงานที่แม่นยำที่สุดของการใช้อาหาร (Noblet, 2007) โดยจำแนกพลังงานสุทธิต่อออกเป็น 2 กลุ่ม คือ พลังงานสุทธิสำหรับการดำรงชีพ (net energy requirement for maintenance; NEm) และพลังงานสุทธิสำหรับการผลิต (net energy for production; NEp) และการกำหนดค่าพลังงานสุทธิของอาหารจะได้รับอิทธิพลมาจากการประเมินพลังงานสุทธิสำหรับการดำรงชีพและการผลิตความร้อนขณะอดอาหาร (fasting heat production; FHP) ซึ่งแสดงถึงอัตราการเผาผลาญของสัตว์ โดยที่ความร้อนที่เพิ่มขึ้น คือ การเพิ่มขึ้นของการผลิตความร้อนเมื่อสัตว์กินอาหาร อย่างไรก็ตามค่า FHP ที่กำหนดอาจได้รับผลกระทบจากสายพันธุ์ อายุ และเพศของสัตว์ หรือระยะเวลาในการอดอาหาร (Ning et al., 2014)

โดยพลังงานสุทธิสำหรับการดำรงชีพส่งผลต่อการใช้พลังงานและสารอาหารของสัตว์ (Gous and Nonis, 2010) ในสมดุลพลังงานเชิงบวก NEm ทั้งหมดจะสูญเสียไปเป็นความร้อนที่จำเป็นสำหรับกระบวนการเผาผลาญและการทำงานทั้งหมดจึงเท่ากับว่าพลังงานสุทธิสำหรับการดำรงชีพเป็นพลังงานพื้นฐาน (basal metabolic rate; BMR) ที่เป็นพลังงานต่ำสุดที่สัตว์ต้องการใช้เพื่อการดำรงชีวิต และพลังงานสุทธิสำหรับการผลิต หมายถึงพลังงานในอาหารที่จำเป็นสำหรับการเจริญเติบโตและเพิ่มการสะสมของเนื้อเยื่อในร่างกาย (retained in body tissues; NEg) หรือสะสมผลผลิตต่าง ๆ ซึ่งเทียบเท่ากับผลรวมของ ME ทั้งหมดสำหรับการผลิต (MEp)

วัตถุประสงค์ของการผลิตในภาคปศุสัตว์ คือ การรักษา ME ไว้เพื่อเพิ่มผลผลิตเนื้อเยื่อหรือเพื่อสืบพันธุ์ ดังนั้นการกินอาหารเพื่อผลิต ME ควรมากกว่า NEm โดยที่ NE และ ME มีความเชื่อมโยงกันต่อประสิทธิภาพของ ME เพื่อใช้สำหรับ NEp โดย ME ส่วนมากสูญเสียไปในรูปของการผลิตความร้อน (heat production; HP) ที่เกิดจากการเผาผลาญพลังงานสุทธิสำหรับการดำรงชีพ และการผลิตความร้อนเมื่อกินอาหารเข้าไป (heat increment of feeding; HIF) ซึ่งการผลิตความร้อนเหล่านี้เกิดจากการหมัก การย่อยและการดูดซึมสารอาหาร การสังเคราะห์และสร้างผลิตภัณฑ์ การก่อตัวของของเสียและการขับถ่าย รวมถึงการผลิตความร้อนที่เกิดจากกิจกรรมต่าง ๆ ของไก่เนื้อ (การเคลื่อนไหว การกินอาหารและน้ำ และการสืบพันธุ์) (NRC, 1981a) การตอบสนองของระบบภูมิคุ้มกัน และการควบคุมอุณหภูมิของร่างกายเมื่ออุณหภูมิสิ่งแวดล้อมอยู่นอกโซนอุณหภูมิเป็นกลาง (thermoneutral zone) (NRC, 1981b) ทั้งหมดนี้เรียกว่า การผลิตความร้อนทั้งหมด (total heat production; Total HP) และคงเหลือไว้เป็นพลังงานสุทธิสำหรับการผลิต (ภาพที่ 2.1) โดยมีปัจจัยด้านอาหาร การจัดการสิ่งแวดล้อม และตัวสัตว์ ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการใช้พลังงานในอาหารสัตว์ และมีผลกระทบต่อภาคเศรษฐกิจและสิ่งแวดล้อม

อย่างไรก็ตามการให้พลังงานที่สูงกว่าความต้องการของสัตว์ปีกถือว่าเป็นสิ่งที่ไม่มีความจำเป็นต่อการผลิตและเป็นการเพิ่มต้นทุนในการผลิตอีกด้วย ดังนั้นการได้รับพลังงานอย่างสมดุลจึงถือว่าเป็นสิ่งที่เหมาะสมที่สุดในการผลิต

2.5.2 สมดุลพลังงาน

สมดุลของพลังงานสามารถกำหนดได้โดยการวัดปริมาณความร้อนที่เกิดขึ้นโดยตรงด้วยการใช้เครื่องวัดความร้อน และวัดความร้อนโดยอ้อมด้วยการวิเคราะห์การเจริญเติบโตและซากของสัตว์ เพื่อเป็นการตรวจสอบผลของการใช้วัตถุดิบหรือส่วนผสมของอาหารสัตว์ที่มีปริมาณพลังงานที่แตกต่างกัน แต่ยังคงคำนึงถึงความสมดุลของพลังงานในสูตรอาหาร เนื่องจากพลังงานส่งผลถึงการบริโภคอาหารและการเจริญเติบโต ดังนั้นการประเมินพลังงานของอาหารสัตว์อย่างถูกต้องจึงเป็นสิ่งสำคัญในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตของไก่เนื้อ โดยสมดุลของพลังงานสามารถแบ่งได้ดังนี้

สมดุลพลังงานเป็นศูนย์ (zero energy balance) หมายถึง ระดับพลังงานที่ได้รับเท่ากับพลังงานต่ำสุดที่สัตว์ต้องการใช้สำหรับการดำรงชีพ (เทียบเท่ากับ NEm) โดยที่สัตว์ไม่ต้องดึงพลังงานที่เก็บสะสมออกมาใช้และไม่ส่งผลต่อการลดลงของน้ำหนักหรือการสืบพันธุ์ ดังนั้นสมดุลพลังงานเป็นศูนย์จึงมีพลังงานสุทธิสำหรับการผลิตเท่ากับศูนย์ ($NE_p = 0$)

สมดุลพลังงานเชิงลบ (negative energy balance) หมายถึง ระดับพลังงานที่ได้รับมีน้อยกว่าพลังงานต่ำสุดที่สัตว์ต้องการใช้สำหรับการดำรงชีพ ($ME < NEm$) สัตว์ที่มีสมดุลพลังงานเชิงลบจะต้องพึ่งพาพลังงานที่เก็บสะสมไว้ในร่างกายเพื่อนำมาใช้ในการดำรงชีพ และส่งผล

ทำให้น้ำหนักตัวลดลง ดังนั้นสมดุลพลังงานเชิงบวกจึงมีพลังงานสุทธิสำหรับการผลิตน้อยกว่าศูนย์ ($NEp < 0$)

สมดุลพลังงานเชิงบวก (positive energy balance) หมายถึง ระดับพลังงานที่ได้รับมีมากกว่าพลังงานต่ำสุดที่สัตว์ต้องการใช้สำหรับการดำรงชีพ สัตว์สามารถกักเก็บพลังงานไว้ในเนื้อเยื่อของร่างกายหรือเพื่อการสืบพันธุ์ได้ โดยการกักเก็บพลังงานจะเกิดขึ้นก็ต่อเมื่อมีการให้อาหารหรือพลังงานเกินความต้องการสำหรับการดำรงชีพเท่านั้น ดังนั้นสมดุลพลังงานเชิงบวกจึงมีพลังงานสุทธิสำหรับการผลิตมากกว่าศูนย์ ($NEp > 0$) และสัตว์ที่มีสมดุลพลังงานเชิงบวกจะสูญเสีย NEm ทั้งหมด (พลังงานที่จำเป็นสำหรับ BMR) ไปเป็นความร้อน (NRC, 1981a)

ความสัมพันธ์ระหว่างการบริโภคอาหารสัตว์และสมดุลของพลังงานเป็นระบบที่ซับซ้อนของกลไกการควบคุมสมดุลของร่างกาย กลไกเหล่านี้รวมถึงการแสดงออกของโมเลกุลสัญญาณ (signaling molecule) เช่น สารอาหาร สารในกระบวนการสร้างและสลาย (metabolite) ฮอร์โมน นิวโรเพปไทด์ และตัวรับที่มาจากระบบประสาทส่วนกลางและระบบประสาทส่วนปลาย เช่นเดียวกับเนื้อเยื่ออื่น ๆ เช่น ลำไส้ กล้ามเนื้อ ตับ และไขมัน โดยโมเลกุลสัญญาณเหล่านี้ทำงานร่วมกันเพื่อถ่ายทอดสัญญาณที่เกี่ยวกับสถานะของสารอาหารในร่างกายของสิ่งมีชีวิต โดยมีสมองส่วนไฮโปทาลามัสที่ทำหน้าที่ในการส่งสัญญาณต่อเซลล์ประสาทสองกลุ่มที่ทำหน้าที่ตรงกันข้าม โดยไปกระตุ้นการหลั่งของ neuropeptide Y (NPY) และ Agouti-related protein (AgRP) ซึ่งเป็นเพปไทด์ที่มีผลกระตุ้นทำให้เกิดความอยากอาหาร (orexigenic) และเพิ่มปริมาณการกักเก็บพลังงานมากขึ้น ในขณะที่อีกกลุ่มกระตุ้นการหลั่งของ proopiomelanocortin (POMC) และ cocaine-amphetamine-regulated transcript (CART) ทำให้เกิดการบริโภคและการเก็บรักษาพลังงานลดลง (Richards and Proszkowiec-Weglarz, 2007)

2.6 พลังงานในอาหารสัตว์ปีก

ระดับพลังงานในอาหารสัตว์ปีก ส่งผลกระทบโดยตรงต่อน้ำหนักตัว ประสิทธิภาพการกินอาหาร อัตราการเจริญเติบโต และคุณภาพเนื้ออกของสัตว์ปีก การผลิตไก่เนื้อในเชิงพาณิชย์ในปัจจุบันมีอัตราการเจริญเติบโตที่เร็วมาก มีปริมาณเนื้ออกสูงและมีไขมันในซากที่สูง โดยพลังงานในอาหารเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับระบบการเผาผลาญและการสร้างผลผลิตเนื้อสัตว์ของไก่เนื้อ อย่างไรก็ตามเมื่อปริมาณพลังงานที่ได้รับมากเกินไปเกินกว่าความต้องการสำหรับการดำรงชีพและการเจริญเติบโต พลังงานในส่วนที่เหลือจะถูกเก็บสะสมไว้ในรูปของไขมันในส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย ไขมันส่วนเกินในเนื้อไก่ถือเป็นหนึ่งในลักษณะที่ไม่พึงประสงค์สำหรับผู้ผลิตและผู้บริโภค เนื่องจากถือเป็นการ

สิ้นเปลืองพลังงานจากอาหารและเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าทางเศรษฐกิจต่ำ ซึ่งจะลดผลผลิตซาก ลดคุณภาพ และส่งผลต่อการยอมรับของผู้บริโภค (Baeza and Le Bihan-Duval, 2013; Emmerson, 1997) ดังนั้นความสมดุลของพลังงานในอาหารจึงเป็นเรื่องที่สำคัญต่อผู้ผลิตและผู้บริโภค

2.6.1 การลดระดับพลังงานในอาหารสัตว์

การลดระดับพลังงานในอาหารถูกนำมาใช้เพื่อลดการสะสมของไขมันช่องท้อง และช่วยลดต้นทุนการผลิต โดยส่วนผสมที่ให้พลังงานในอาหารสัตว์คิดเป็น 65 เปอร์เซ็นต์ ของต้นทุนค่าอาหารสัตว์ปีก การกำหนดความต้องการพลังงานอาหารขั้นต่ำของไก่เนื้อมีความสำคัญทางเศรษฐกิจ ด้วยราคาวัตถุดิบอาหารสัตว์ที่เพิ่มขึ้นทั่วโลกทำให้ต้นทุนการผลิตไก่เนื้อเพิ่มขึ้น และการลดระดับพลังงานในอาหารเป็นการลดต้นทุนการผลิตอีกหนึ่งทางเลือก (Donohue and Cunningham, 2009) อย่างไรก็ตามการลดระดับพลังงานในอาหารอาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการผลิตของไก่เนื้อ เนื่องจากส่งผลกระทบต่อการกินอาหารและการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักร่าง จากการศึกษานี้ของ Hu et al. (2021) พบว่าไก่เนื้อที่เลี้ยงด้วยอาหารพลังงานสูง 3,500 กิโลแคลอรี/กิโลกรัม มีอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวันที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับไก่เนื้อที่ได้รับพลังงาน 2,900 กิโลแคลอรี/กิโลกรัม ($P < 0.05$) และมีปริมาณการกินได้เฉลี่ยต่อวันและอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักร่างลดลงเมื่อระดับพลังงานในอาหารเพิ่มขึ้น ($P < 0.05$) ดังนั้นจึงต้องมีการศึกษาการลดระดับพลังงานในอาหารไก่เนื้อที่เหมาะสมโดยไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโต

การลดระดับพลังงานในอาหารสัตว์ลง 25 ถึง 50 กิโลแคลอรี/กิโลกรัม ในอุตสาหกรรมไก่เนื้อนั้นไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการผลิตและเป็นการลดต้นทุนค่าอาหารสัตว์ Dozier III and Gehring (2014) ศึกษาผลกระทบของระดับพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้แบบปรากฏทั้งหมด 6 ระดับ (3,000, 3,030, 3,060, 3,090, 3,120 และ 3,150 กิโลแคลอรี/กิโลกรัม) ต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อสายพันธุ์ Ross x Ross 708 พบว่าประสิทธิภาพการเจริญเติบโตไม่ได้รับผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อน้ำหนักร่าง การกินได้ และอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักร่าง และจากการศึกษาของ Ge et al. (2019) พบว่าการลดพลังงานในอาหารลง 90 กิโลแคลอรี/กิโลกรัม (2,940 เป็น 3,030 กิโลแคลอรี/กิโลกรัม) ไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโต ตลอดช่วงการเจริญเติบโต สอดคล้องกับการศึกษาของ Mahdavi et al. (2024) พบว่าการลดพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้ในอาหารลง 100 กิโลแคลอรี/กิโลกรัม ในอาหารระยะเริ่มต้น จาก 2,950 เป็น 2,850 กิโลแคลอรี/กิโลกรัม โดยการลดปริมาณน้ำมันในอาหารลงไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโต ($P > 0.05$) อาจเนื่องจากไก่เนื้อมีการกินได้ที่เพิ่มขึ้นเพื่อเป็นการชดเชยพลังงานจากอาหารที่ลดลงและอาจชดเชยผลกระทบด้านลบของพลังงานจากอาหารที่ลดลงต่อประสิทธิภาพการเติบโตได้

บางส่วน แต่ไม่สอดคล้องกับการศึกษาของ Latham et al. (2016) รายงานว่าการลดพลังงานลง 97 กิโลแคลอรี/กิโลกรัม ส่งผลทำให้น้ำหนักตัวลดลงและมีอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้นในวันที่ 0 ถึง 42 ซึ่งสอดคล้องกับ Hu et al. (2018) รายงานว่าการลดพลังงานในอาหารลง 100 (ME เท่ากับ 3,050 เป็น 2,950 กิโลแคลอรี/กิโลกรัม) ทำให้น้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้นในวันที่ 0 ถึง 14 ลดลง แต่มีการกินได้ที่ไม่ต่างกัน ($P>0.05$) โดยการกินได้และอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัวอาจเป็นตัวบ่งชี้ถึงอัตราการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพการใช้อาหารในไก่เนื้อที่เป็นผลมาจากพลังงานในอาหาร และผลลัพธ์ที่ไม่สอดคล้องกันของงานวิจัยต่าง ๆ ของระดับพลังงานในอาหารและประสิทธิภาพการเจริญเติบโตอาจเนื่องมาจากระดับสารอาหาร สภาพแวดล้อม การจัดการ และอายุของไก่เนื้อที่แตกต่างกัน

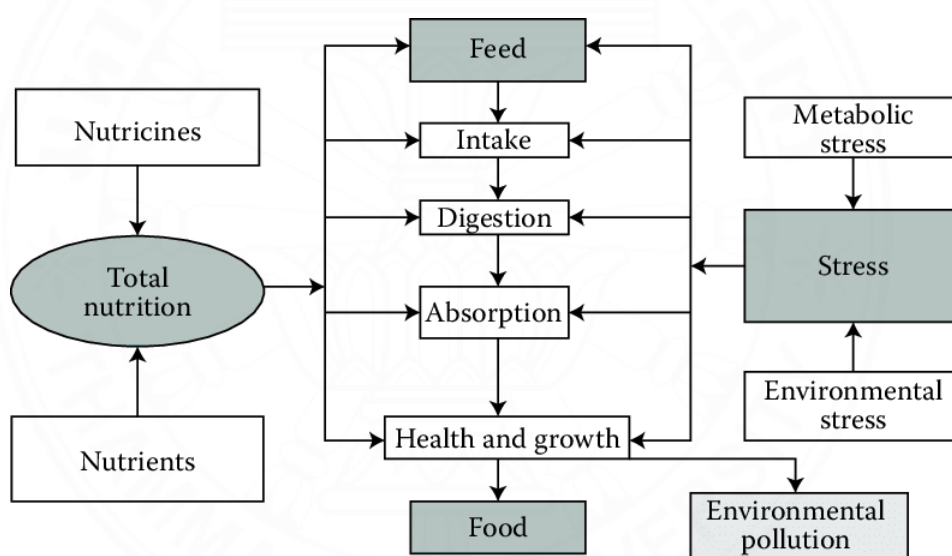
2.7 คาร์โบไฮเดรต

คาร์โบไฮเดรต (carbohydrate) คือ สารประกอบอินทรีย์ที่เป็นแหล่งพลังงานที่สำคัญในอาหารของสัตว์และมนุษย์ ประกอบไปด้วยธาตุคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน โดยมีน้ำตาลกลูโคสเป็นคาร์โบไฮเดรตที่มีขนาดโมเลกุลเล็กที่สุด (monomer) สัตว์จะใช้กลูโคสเป็นแหล่งพลังงานหลักในร่างกาย กลูโคสสามารถพบได้ในแป้งและน้ำตาลในอาหาร สะสมอยู่ในรูปของไกลโคเจนในตับและกล้ามเนื้อ หรือการสังเคราะห์จากโครงคาร์บอน (carbon skeleton) ของกรดอะมิโนแล็กเตท (lactate) กลีเซอรอล (glycerol) หรือโพรพิโอเนต (propionate) จากกระบวนการกลูโคนีโอเจนิซิส (gluconeogenesis) ที่เป็นกระบวนการในการสังเคราะห์กลูโคสจากสารที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต ซึ่งสมองจะใช้กลูโคสเป็นแหล่งพลังงานหลัก (Mergenthaler et al., 2013)

คาร์โบไฮเดรตในอาหารสัตว์ถูกแบ่งออกเป็นคาร์โบไฮเดรตชนิดที่ย่อยได้ ได้แก่ น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว น้ำตาลโมเลกุลคู่ แป้ง และไกลโคเจน (แหล่งสะสมพลังงานในพืช และสัตว์) โดยมีเพียงน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวเท่านั้นที่สามารถถูกดูดซึมจากลำไส้เล็กได้ โดยน้ำตาลโมเลกุลคู่ แป้ง และไกลโคเจนอาจถูกไฮโดรไลซิส (hydrolysis) โดยเอนไซม์ที่เสริมลงในอาหารสัตว์ (endogenous enzyme) ในลำไส้เล็กและส่งผลทำให้เกิดการสลายพันธะของโมเลกุล อย่างไรก็ตามเอนไซม์ที่ผลิตได้ในร่างกายแต่ละตัวจะมีความจำเพาะต่อน้ำตาลเป้าหมายเท่านั้น ซึ่งส่งผลให้มีคาร์โบไฮเดรตในอาหารจำนวนหนึ่งที่สัตว์กระเพาะเดี่ยวไม่สามารถย่อยได้ และคาร์โบไฮเดรตชนิดที่ไม่สามารถย่อยได้จะถูกส่งไปยังลำไส้ใหญ่และอาจถูกย่อยโดยเอนไซม์ที่ผลิตมาจากจุลินทรีย์ (microbial enzyme) ซึ่งคาร์โบไฮเดรตชนิดที่ไม่สามารถย่อยได้ เช่น โอลิโกแซ็กคาไรด์ (oligosaccharide) ที่เป็นพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยโมโนแซ็กคาไรด์ (น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว) ตั้งแต่ 2 ถึง 10 โมเลกุล ที่จับกันด้วยพันธะไกลโคซิดิก

(glycosidic bond) แป้งต้านทานการย่อย (resistant starch) ที่ทนต่อการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ในระบบทางเดินอาหาร และโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้ง ซึ่งทั้งหมดนี้ถูกเรียกรวมกันว่าใยอาหาร (Navarro et al., 2019)

และคาร์โบไฮเดรตที่ไม่สามารถย่อยได้มีจุดเชื่อมโยงกับแนวคิดเรื่องโภชนาการ (ภาพที่ 2.2) โดยคาร์โบไฮเดรต (แป้ง น้ำตาล และใยอาหาร) เป็นสารอาหารหลักที่มีบทบาทสำคัญในโภชนาการของสัตว์ในฐานะแหล่งพลังงานหลัก แต่คาร์โบไฮเดรตบางประเภทสามารถเป็นแหล่งพลังงานสำหรับประชากรของจุลินทรีย์ทั้งที่ทำให้เกิดโรคและไม่ทำให้เกิดโรค ซึ่งตั้งอาณานิคมอยู่ในส่วนของลำไส้ใหญ่ของสัตว์กระเพาะเดี่ยว คาร์โบไฮเดรตที่ไม่สามารถย่อยได้ส่งผลทำให้เกิดความเครียดในสัตว์ที่ไม่ได้เป็นผลมาจากสิ่งแวดล้อม และลดความสามารถในการย่อยและการดูดซึมสารอาหารต่าง ๆ ส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตและสุขภาพของสัตว์



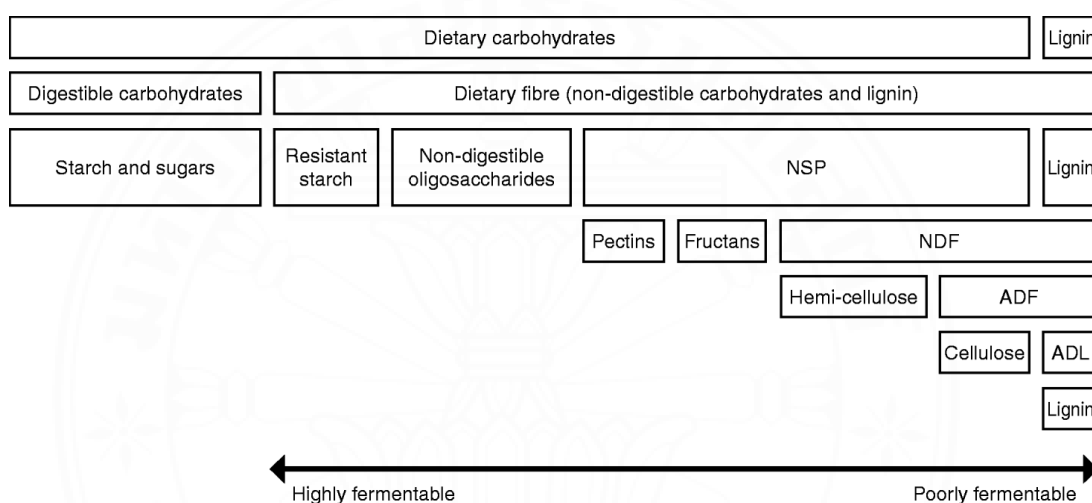
ภาพที่ 2.2 แนวคิดเรื่องโภชนาการ

ที่มา: Adams (2001)

2.7.1 ใยอาหาร

ใยอาหาร (dietary fiber; DF) ถูกจำกัดความหมายในทางสรีรวิทยาว่าเป็นส่วนประกอบในอาหารที่ทนต่อการย่อยสลายด้วยเอนไซม์ที่ถูกผลิตขึ้นในร่างกายของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม ในทางเคมีใยอาหารถูกจำกัดความหมายว่าเป็นโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งและลิกนิน (lignin) และคำจำกัดนี้มีการแนะนำว่าควรเพิ่มในส่วนของโอลิโกแซคคาไรด์ที่ย่อยยาก (non-digestible oligosaccharide; NDOs) และแป้งต้านทานการย่อยที่มีความสามารถทนต่อการย่อยสลายด้วย

เอนไซม์ในระบบทางเดินอาหารเข้าไปในคำจำกัดความของคำว่าใยอาหารด้วย (Champ et al., 2003) โดยส่วนประกอบต่าง ๆ ของใยอาหารนั้นเป็นส่วนหนึ่งของคาร์โบไฮเดรต (ภาพที่ 2.3) และใยอาหารถือเป็นปัจจัยต่อต้านโภชนาการชนิดหนึ่ง เนื่องจากมีผลกระทบต่อการบริโภคอาหารและการย่อยได้ของสารอาหาร อย่างไรก็ตามใยอาหารมีผลกระทบอย่างมากต่อการพัฒนาของระบบทางเดินอาหาร กระบวนการดูดซึมสารอาหาร และการย่อยได้ของโปรตีนและไขมัน โดยใยอาหารจะไม่สามารถถูกไฮโดรไลซ์ด้วยเอนไซม์ย่อยอาหารในลำไส้เล็ก แต่สามารถย่อยโดยการหมักของจุลินทรีย์ในลำไส้ใหญ่ส่วนต้นได้ในระดับหนึ่ง (Williams et al., 2017)



ภาพที่ 2.3 แผนผังองค์ประกอบของคาร์โบไฮเดรต

ที่มา: De Leeuw et al. (2008)

ผลกระทบของใยอาหารในระบบทางเดินอาหาร คือ การเพิ่มความสามารถในการกักเก็บน้ำ การบวมตัว และเกิดความหนืดในระบบทางเดินอาหาร ซึ่งจะส่งผลเสียต่อการไหลผ่านอาหารในกระเพาะอาหารทำให้ใช้เวลาในการย่อยมากขึ้น โดยความหนืดที่เกิดขึ้นส่งผลเสียต่อการย่อยและการดูดซึมสารอาหารในลำไส้เล็กที่เป็นผลมาจากความสามารถของน้ำย่อยและเอนไซม์ต่าง ๆ ที่มีเป้าหมายในการเข้าถึงอาหารเพื่อทำหน้าที่ในการย่อยอาหารให้มีความสามารถในการเข้าถึงอาหารได้ลดลง และเกิดการเพิ่มอัตราการไหลผ่านของลำไส้ส่วนท้ายหลังจากผ่านการย่อยที่ลำไส้เล็ก โดยใยอาหารจะถูกหมักโดยจุลินทรีย์ในลำไส้ใหญ่ เกิดการกระตุ้นการหมักของจุลินทรีย์และมีการผลิตไขมันสายสั้นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่า pH ในลำไส้ลดลง (Den Besten et al., 2013) ดังนั้นจึงเป็นสิ่งสำคัญที่จะต้องกำหนดระดับที่เหมาะสมของใยอาหารในอาหารสัตว์ ในขณะที่เส้นใยในระดับปานกลางสามารถปรับปรุงการทำงานของระบบทางเดินอาหารและเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตของสัตว์ได้

หากแบ่งใยอาหารตามความสามารถในการละลายน้ำ สามารถแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ ใยอาหารที่ละลายน้ำได้ (soluble dietary fiber) อาจถูกหมักบางส่วนหรือทั้งหมดโดยจุลินทรีย์ในลำไส้ใหญ่ (Slavin, 2013) โดยการหลั่งเอนไซม์เบต้ากลูคูโรนิเดส (β -glucuronidase) เบต้ากลูโคซิเดส (β -glucosidase) และเบต้าแมนนาเนส (β -mannase) ที่มีความสามารถในการทำลายพันธะไกลโคซิดิกเพื่อหมักเส้นใยและย่อยสลายคาร์โบไฮเดรต (Das et al., 2012; Makki et al., 2018) ซึ่งได้ผลผลิตเป็นกรดไขมันสายสั้น (short chain fatty acid) เช่น อะซิเตท (acetate) โพรพิโอเนต (propionate) และบิวไทเรต (butyrate) และใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำ (insoluble dietary fiber) อาจถูกหมักโดยจุลินทรีย์ที่อาศัยในลำไส้ใหญ่แต่ถูกหมักได้น้อยกว่าชนิดที่ละลายน้ำได้ จึงทำให้สัตว์ปีกไม่สามารถย่อยและดูดซึมใยอาหารได้ทั้งหมดในระบบทางเดินอาหาร (Sklan et al., 2003; Rezaei et al., 2018) โดยใยอาหารสามารถทำปฏิกิริยากับสารอาหารต่าง ๆ ภายในระบบทางเดินอาหาร (Hetland et al., 2003) รวมทั้งทำปฏิกิริยากับจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ในลำไส้ (Rehman et al., 2009; Mahmood and Guo, 2020) และเปลี่ยนแปลงการทำงานของอวัยวะที่ใช้ในการย่อยอาหาร (Jorgensen et al., 1996; Sittiya et al., 2020) ส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการใช้สารอาหารและประสิทธิภาพการเจริญเติบโต (Sadeghi et al., 2015) โดยการเปลี่ยนแปลงที่กล่าวมานี้ อาจส่งผลทำให้เกิดผลกระทบต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโต ขนาดของอวัยวะ การย่อยได้ของสารอาหาร และจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ในระบบทางเดินอาหารของไก่เนื้อ

2.8 โพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้ง

โพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้ง เป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ที่ประกอบด้วยหน่วยของน้ำตาลโมโนแซ็กคาไรด์หลายหน่วยที่มาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิก โดยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งจัดเป็นกลุ่มของคาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อนที่มีความหลากหลาย ได้แก่ เบต้ากลูแคน เซลลูโลส เพคติน และเฮมิเซลลูโลส ซึ่งมีปริมาณและสัดส่วนที่แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับพืชแต่ละชนิด (Sethya et al., 2015; Caprita et al., 2010) คำจำกัดความของคำว่า NSP นั้นมีหลากหลายและสามารถจำแนกตามเกณฑ์ที่ต่างกัน โดย NSP สามารถจำแนกออกได้เป็นกลุ่มต่าง ๆ ตามคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ เช่น ความหนืด ความสามารถในการกักเก็บน้ำ การหมัก และความสามารถในการจับกับโมเลกุลอินทรีย์และอนินทรีย์ หรือจำแนกคุณสมบัติในการละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ โดย NSP ที่ละลายน้ำได้จะกระจายตัวเมื่อผสมกับน้ำและทำให้เกิดความหนืด ความหนืดที่เกิดขึ้นส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการย่อยและการดูดซึมสารอาหารของสัตว์ลดลง และ NSP ที่ไม่ละลายน้ำไม่ได้เพิ่มความหนืดของอาหารแต่มีความสามารถในการจับกับอูจาระและก่อตัวเป็นก้อน (Davidson and

McDonald, 1998) ซึ่ง NSP ที่พบในอาหารสัตว์ในปริมาณที่ต่ำจะเป็นประโยชน์ในการส่งเสริมการขับถ่ายและรักษาสุขภาพของลำไส้ แต่ในปริมาณที่สูงจะส่งผลทำให้ระยะเวลาในการย่อยอาหารสั้นลง และส่งผลทำให้การย่อยและการดูดซึมสารอาหารของสัตว์ลดลง (Sethya et al., 2015) โดยมีเพียงเซลลูโลสเท่านั้นที่จัดเป็น NSP ชนิดที่ไม่สามารถละลายน้ำได้ ในขณะที่ NSP ประเภทอื่นสามารถละลายน้ำได้หรือละลายได้แค่บางส่วน อย่างไรก็ตาม Bailey (1973) ได้จำแนก NSP ออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ 1) เซลลูโลส (cellulose) 2) โพลีเมอร์ที่ไม่ใช่เซลลูโลส (non-cellulosic polymers) และ 3) โพลีแซคคาไรด์เพกติก (pectic polysaccharides) โดยมีอะราบิโนไซแลน เบต้ากลูแคน แมนแนน กาแล็กโทแมนแนน และกลูโคแมนแนนจัดอยู่ในกลุ่มของโพลีเมอร์ที่ไม่ใช่เซลลูโลส และในส่วนของอะราบิแนนส์ กาแล็กแทน และอะราบิโนกาแล็กแทนจัดอยู่ในกลุ่มของโพลีแซคคาไรด์เพกติก (ตารางที่ 2.3)

ตารางที่ 2.3 การจำแนกประเภทของโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้ง

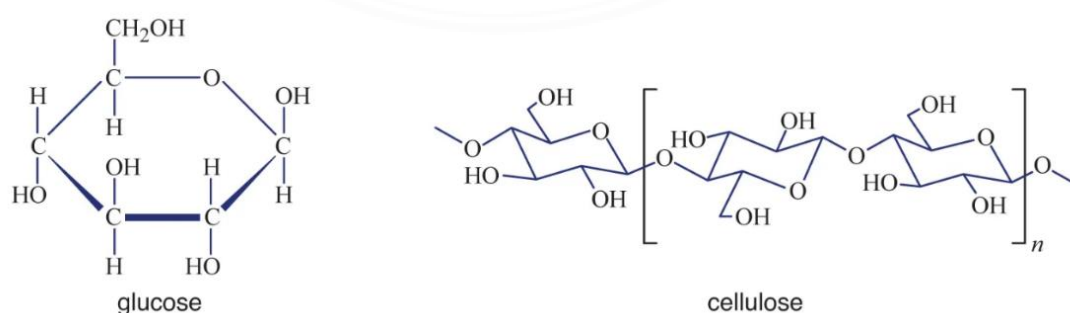
Category	Monomeric residue	Linkage
Cellulose	Glucose	β -(1-4)
Non-cellulosic polymers		
Arabinoxylans	Arabinose and Xylose	β -(1-4) linked xylose units
Mixed-linked β -glucans	Glucose	β -(1-3) and β -(1-4)
Mannans	Mannose	β -(1-4)
Galactomannans	Galactose and mannans	β -(1-4) linking mannan chains with α -(1-6) linked galactosyl side groups
Glucomannans	Glucose and mannans	β -(1-4) linked mannan chain with interspersed glucose residues in the main chain
Pectic polysaccharides		
Arabinans	Arabinose	α -(1-5)
Galactans	Galactose	β -(1-4)
Arabinogalactans (Type I)	Arabinose and Galactose	β -(1-4) galactan backbone substituted with 5-linked and terminal arabinose residues
Arabinogalactans (Type II)	Arabinose and Galactose	β -(1-3,6)-linked galactose polymers associated with 3-or 5-linked arabinose residue

ที่มา: Sinha et al. (2011)

โดย NSP ที่ละลายน้ำได้ มีความหนืดมากกว่าเนื่องจากปัจจัยต่าง ๆ เช่น องค์ประกอบทางเคมี ขนาดและน้ำหนักของโมเลกุลที่ส่งผลทำให้ NSP มีคุณสมบัติหนืด (Caprita et al., 2011) และ NSP ที่ไม่ละลายน้ำ มีผลกระทบเพียงเล็กน้อยต่อความหนืดและการย่อยได้ของสารอาหารต่าง ๆ (Choct et al., 2004) ซึ่งบ่งชี้ว่าไก่เนื้อสามารถเจริญเติบโตได้ดีกว่าเมื่อได้รับอาหารที่มี NSP ที่ไม่ละลายน้ำ และในบรรดา NSP ทั้งหมด อาราบิโนไซแลนและเบต้ากลูแคนเป็นโพลีแซคคาไรด์ที่สำคัญที่สุดและได้รับความสนใจมากที่สุดเนื่องจากคุณสมบัติการละลายน้ำ โดยองค์ประกอบและประเภทของโพลีแซคคาไรด์เหล่านี้มีความสำคัญต่อการทำงานของเอนไซม์ โดย Knudsen et al. (2014) พบว่าอาราบิโนไซแลนและเบต้ากลูแคนส่งผลทำให้เกิดความหนืด โดยเบต้ากลูแคนมีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่าอาราบิโนไซแลนแต่มีความสามารถในการทนต่อการย่อยได้น้อยกว่า ดังนั้นการใช้ธัญพืชที่อุดมไปด้วยเบต้ากลูแคนในอาหารไก่เนื้อจึงส่งผลกระทบมากกว่าเนื่องจากเกิดความหนืดที่มากกว่า

2.8.1 เซลลูโลส

เซลลูโลส เป็นองค์ประกอบหลักที่พบอยู่ในส่วนของผนังเซลล์พืชและเมล็ดธัญพืชประเภทฮอโมพอลิแซคคาไรด์เชิงเส้นที่ประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ β -(1-4) (ภาพที่ 2.4) และเซลลูโลสเป็นโพลิเมอร์ของคาร์โบไฮเดรตที่พบมากที่สุดในธรรมชาติซึ่งประกอบด้วยคาร์บอนมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ ที่พบในพืชทั้งหมด สายโซ่เซลลูโลสมีลักษณะเป็นแถบเส้นตรงยาวแบนที่เกิดจากน้ำตาลกลูโคสที่มาเชื่อมโยงพันธะ β -(1-4) ระหว่างหน่วยของกลูโคสในแต่ละหน่วย สายโซ่เซลลูโลสสามารถเรียงตัวติดกันและสร้างพันธะไฮโดรเจนจำนวนมากระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลของน้ำตาล และสายโซ่สามารถเรียงซ้อนกันเพื่อสร้างไมโครไฟบริลที่มีขนาดใหญ่ ซึ่งทำให้เซลลูโลสทนต่อการละลายด้วยน้ำ โดยไมโครไฟบริลและเซลลูโลสอาจเชื่อมพันธะกับน้ำและแมทริกซ์โพลีแซคคาไรด์ เช่น อาราบิโนไซแลน เบต้ากลูแคน และกลูโคแมนแนน (Fincher and Stone, 1986)

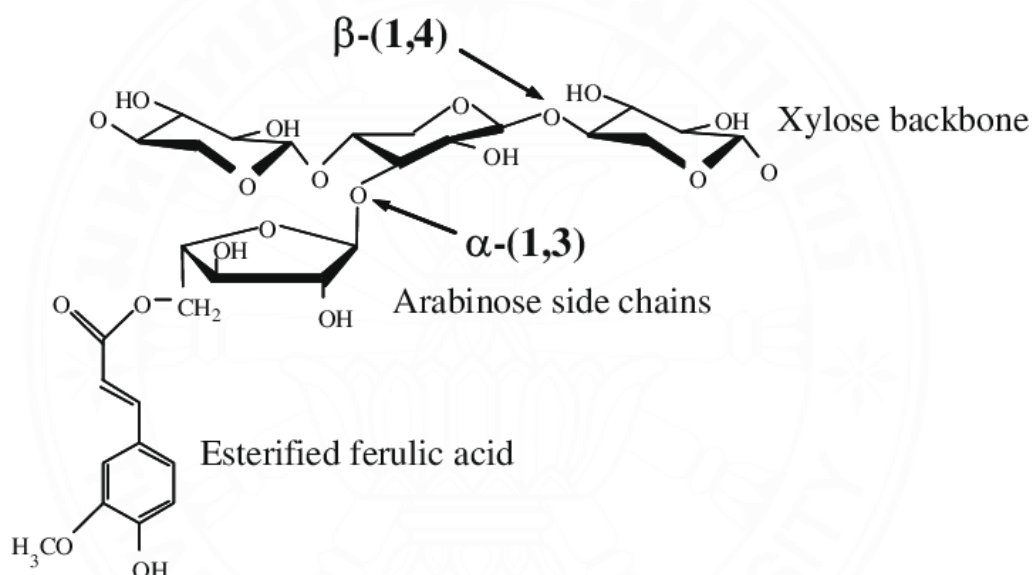


ภาพที่ 2.4 โครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส

ที่มา: Petruzzello (2024)

2.8.2 อะราบินโนไซแลน

อะราบินโนไซแลน ประกอบไปด้วยน้ำตาลอาราบินอส (arabinose) และไซโลส (xylose) เป็นส่วนใหญ่ โดยมีหน่วยย่อยของน้ำตาลไซโลสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ β -(1-4) และมีน้ำตาลอะราบินโนสมาจับกับไซโลสเป็นลักษณะเป็นกิ่งก้านในสายหลักของไซแลนที่ตำแหน่ง O-2 และ O-3 ของน้ำตาลไซโลส ด้วยพันธะ α -(1-3) และอะราบินโนสเชื่อมกับเอสเทอร์อะราบินโนสของสายหลักกรดเฟอร์ูลิก (ferulic acid) ที่ O-5 (Smith and Hartley, 1983) (ภาพที่ 2.5) โดยอะราบินโนไซแลน มีคุณสมบัติหนืดและสามารถกักเก็บน้ำได้ซึ่งจะทำให้เกิดสารละลายน้ำที่มีความหนืดสูง (Izydorczyk and Biliaderis, 1995)

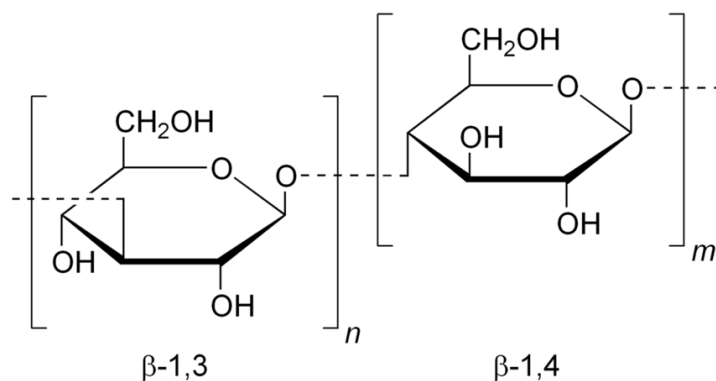


ภาพที่ 2.5 โครงสร้างทางเคมีของอะราบินโนไซแลน

ที่มา: Nino-Medina et al. (2009)

2.8.3 เบต้ากลูแคน

เบต้ากลูแคน มักพบในธัญพืช ข้าวสาลี สาหร่าย ยีสต์ และแบคทีเรียบางชนิด โดยในธัญพืชเบต้ากลูแคนเป็นการเชื่อมกันของพันธะไกลโคซิดิกด้วยพันธะ β -(1,3) และ β -(1,4) ระหว่างโมโนเมอร์ของกลูโคส จึงได้ชื่อว่า (1,3;1,4)-เบต้า-กลูแคน (ภาพที่ 2.6) โดยมีความสามารถในการจับกับน้ำสูงซึ่งนำไปสู่คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ เช่น การละลายน้ำ ความหนืด และการเกิดเจล (Sun et al., 2021)



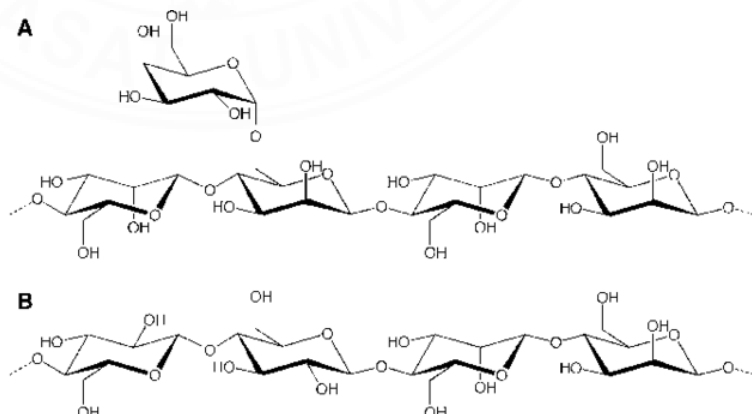
ภาพที่ 2.6 โครงสร้างทางเคมีของเบต้ากลูแคน

ที่มา: Wikimedia Commons (2008)

2.8.4 แมนแนน

แมนแนน เป็นองค์ประกอบที่สำคัญในเฮมิเซลลูโลส โดยแมนแนนประเภทเฮมิเซลลูโลส (mannan-hemicellulose) แบ่งออกเป็นสองประเภทหลัก ได้แก่ (A) กาแลคโตแมนแนน และ (B) กลูโคแมนแนน (Ebringrova, 2006) (ภาพที่ 2.7) แกนหลักของแมนแนนประกอบด้วยแมนโนสที่มาเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ β -1,4 เพียงอย่างเดียว หรืออาจพบกลูโคสและแมนโนสมาเชื่อมพันธะร่วมกันด้วย (Liepman et al., 2007) นอกจากนี้แกนหลักของแมนแนนสามารถถูกแทนที่ด้วยสายด้านข้างของน้ำตาลกาแล็กโทสที่เชื่อมกับพันธะ α -1,6 ของแมนแนน (Petkowicz et al., 2001) ในพืชแมนแนนมีบทบาทเชิงโครงสร้างที่ทำหน้าที่เป็นเฮมิเซลลูโลสที่จับกับเซลลูโลส (Liepman et al., 2007)

Fig. 2 Primary structure of two mannan-type hemicelluloses, **A** galactomannans and **B** glucomannans



ภาพที่ 2.7 โครงสร้างทางเคมีของแมนแนน

ที่มา: Cunha and Gandini (2010)

2.9 โพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งต่อการทำงานของระบบทางเดินอาหาร

โพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งไม่สามารถย่อยได้ในสัตว์ปีกเนื่องจากขาดเอนไซม์ในการย่อย NSP ที่เชื่อมกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกชนิดเบต้า (β 1-3, 1-4 และ 1-6) ที่พบในโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้ง ดังนั้น NSP ที่ไม่ถูกย่อยจะถูกส่งไปยังลำไส้ใหญ่ (Raza et al., 2019) โดยลำไส้ใหญ่จะมีแบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจนที่มีความสามารถเกาะติดกับเส้นใยและเพิ่มจำนวนอาศัยอยู่ (Mahmood and Guo, 2020) ซึ่งมีบทบาทในการย่อยเส้นใยและคาร์โบไฮเดรตที่ย่อยไม่ได้ในส่วนของลำไส้เล็กผ่านการหมักเพื่อสลายเส้นใย นอกจากนี้ยังมีเอนไซม์ที่ผลิตจากแบคทีเรียที่อาศัยอยู่ในลำไส้ใหญ่ส่วนต้นที่ช่วยย่อยสลายเส้นใยเพิ่มเติม จึงทำให้การพัฒนาของลำไส้ในสัตว์ปีกมีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับอาหารที่ได้รับ ซึ่งคาร์โบไฮเดรตที่ไม่สามารถย่อยได้ส่วนใหญ่จะถูกขับออกทางอุจจาระโดยไม่ผ่านการย่อยในลำไส้เล็กและลำไส้ใหญ่ของสัตว์กระเพาะเดียว ซึ่งถือได้ว่าโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งส่งผลต่อประสิทธิภาพการผลิตเนื่องจากทำให้เกิดการดูดซึมสารอาหารที่ลดลง (Adebowale et al., 2019)

ด้วยเหตุนี้อาหารเชิงพาณิชย์จึงมักกำหนดให้มีการใช้วัตถุดิบอาหารที่มีใยอาหารสูงสุดเพียง 2 ถึง 3 เปอร์เซ็นต์ (Choct, 2015) อย่างไรก็ตามใยอาหารในอาหารสัตว์ได้รับการพิสูจน์แล้วว่าช่วยปรับปรุงการใช้สารอาหารได้ดีขึ้น โดยการใช้เปลือกถั่วเหลือง (soybean hulls) 5 เปอร์เซ็นต์ ในอาหารไก่เนื้อ ทำให้เกิดการพัฒนาทางสัณฐานวิทยาของลำไส้และลักษณะซากซึ่งอาจนำไปสู่การย่อยสารอาหารเพิ่มขึ้น โดยไม่ส่งผลเสียต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อ (Sittiya et al., 2020) แต่หากมีความสามารถในการย่อยใยอาหารที่ต่ำ จะไม่สามารถนำเอาสารอาหารที่ได้รับไปใช้ประโยชน์ได้อย่างเต็มที่ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการตรวจสอบการย่อยได้และการเจริญเติบโตของไก่เนื้อ และการได้รับใยอาหารที่ละลายน้ำได้ 3 ถึง 5 เปอร์เซ็นต์ ช่วยปรับปรุงการย่อยได้ของสารอาหาร แต่หากได้รับใยอาหารในระดับสูงกว่านี้อาจไปขัดขวางการย่อยอาหารที่เป็นผลมาจากเส้นใยที่ละลายน้ำได้ซึ่งมีความหนืดและเกิดสารเคลือบที่ลดการเข้าถึงระหว่างเอนไซม์ย่อยอาหารและอาหาร (Walugembe et al., 2015; Jha et al., 2019a) เส้นใยที่ละลายน้ำได้ซึ่งมีความหนืด เช่น เบต้ากลูแคน เพคติน และอาราบีโนไซแลน เพิ่มความหนืดในลำไส้ ลดการดูดซึมสารอาหาร ทำให้อัตราการผ่านในลำไส้เล็กช้าลง ลดการแพร่กระจายของเอนไซม์และการสลายของสารตั้งต้นที่ตามมา เพิ่มสารอาหารอิสระในลำไส้ซึ่งเอื้อต่อการสร้างแบคทีเรียก่อโรคที่ได้รับการยอมรับว่ามีบทบาทสำคัญในการแย่งใช้สารอาหารกับโฮสต์ (Silva et al., 2013; Chaplin, 2003) ดังนั้นความหนืดมีผลกระทบด้านลบต่อการย่อยได้ของสารอาหารที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการย่อยอาหาร อัตราการไหลผ่านของอาหารในลำไส้เล็ก และความสามารถในการหมักในลำไส้เล็ก และผลกระทบเหล่านี้ขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของใยอาหาร ชนิดของใยอาหาร ระดับการใช้งาน องค์ประกอบของอาหาร อายุของสัตว์ และขนาดอนุภาคของอาหาร

ทำให้ใยอาหารที่มีความหนืดที่ละลายน้ำได้จึงอาจส่งผลกระทบต่อในทุกระดับของการรวมไว้ในอาหารไก่เนื้อ โดยมีปัจจัยสองประการที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการย่อยอาหารของสารอาหารเมื่อมีใยอาหารที่ละลายน้ำได้ คือ ความสามารถในการละลายและความสามารถในการหมัก เนื่องจากมีผลกระทบต่ออัตราการผ่านของอาหารในลำไส้เล็กและความสามารถในการหมักในลำไส้เล็กตามลำดับ (Kheravii et al., 2018) ปัจจัยทั้งสองนี้มีความรุนแรงตามประเภทของการเชื่อมพันธะและการแตกแขนงระหว่างหน่วยน้ำตาลต่าง ๆ (Chaplin, 2003) โดยการใช้เอนไซม์ในอาหารสัตว์ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเจริญเติบโตและการย่อยได้ แต่มีข้อจำกัดสำหรับส่วนผสมอาหารในการช่วยย่อยสลายสารตั้งต้นที่ซับซ้อนเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของสัตว์ปีก (Raza et al., 2019)

อย่างไรก็ตามใยอาหารระดับปานกลางสามารถส่งเสริมการพัฒนาของอวัยวะย่อยอาหาร เพิ่มการทำงานของเอนไซม์ย่อยอาหารและการย่อยได้ของสารอาหารในระบบทางเดินอาหาร ปรับปรุงสุขภาพและเพิ่มประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของสัตว์ปีก ปัจจุบันมีการศึกษาเพียงเล็กน้อยเกี่ยวกับความต้องการใยอาหารของไก่เนื้อในระยะไก่อ่อน โดยมีการศึกษาการให้อาหารที่มีใยอาหารในระดับ 7 ถึง 9 เปอร์เซ็นต์ ในอาหารของไก่เนื้อ พบว่าช่วยปรับปรุงการทำงานของภูมิคุ้มกัน เกิดการพัฒนาในระบบทางเดินอาหารและสัณฐานวิทยาของลำไส้ และปรับปรุงการย่อยได้ของสารอาหารและประสิทธิภาพการเจริญเติบโตในไก่เนื้ออายุ 22 ถึง 42 วัน (Zhang et al., 2023) เส้นใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำช่วยปรับปรุงความสามารถในการย่อยแป้ง (Amerah et al., 2009) ไขมัน (Jimenez-Moreno et al., 2009) และโปรตีน (Cao et al., 2003) เมื่อใช้ที่ระดับ 3 ถึง 5 เปอร์เซ็นต์ จึงทำให้ใยอาหารจัดเป็นพรีไบโอติกส์ (prebiotics) ที่นอกเหนือจากผลกระทบต่าง ๆ ที่กล่าวมา (Montagne et al., 2003) ดังนั้นใยอาหารจึงมีบทบาทสำคัญในปฏิสัมพันธ์ที่ซับซ้อนระหว่างอาหาร เอนไซม์ภายนอก การย่อยและการดูดซึมสารอาหาร โอสต์ และไมโครไบโอมในทางเดินอาหาร ซึ่งทั้งหมดนี้ถือเป็นองค์ประกอบที่สำคัญในการทำงานของระบบทางเดินอาหารที่เหมาะสมของสัตว์ และส่งผลต่ออัตราการเจริญเติบโต การกินอาหาร น้ำหนักตัว และสุขภาพของสัตว์ (Ahmed and Abbas, 2013; Pauwels et al., 2015; Borda-Molina et al., 2018)

2.10 การเสริมเอนไซม์ในอาหารสัตว์

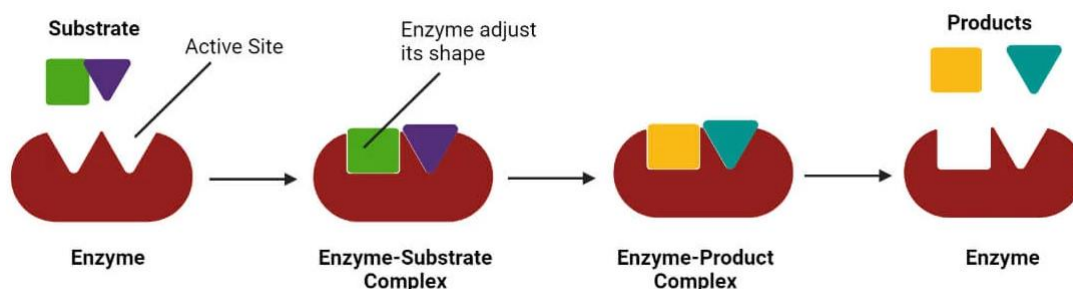
อาหารสัตว์ถือว่าเป็นต้นทุนในการผลิตในภาคปศุสัตว์และสัตว์ปีก คิดเป็น 60 ถึง 70 เปอร์เซ็นต์ ของต้นทุนการผลิตทั้งหมด ผู้ผลิตหลายรายมักเสริมเอนไซม์ในอาหารสัตว์เพื่อเป็นการประหยัดต้นทุนการผลิต เนื่องจากช่วยในการผลิตเนื้อสัตว์ได้มากขึ้น เร็วขึ้น และมีราคาถูกขึ้น โดยเอนไซม์ที่พบในเซลล์สิ่งมีชีวิตทั้งหมดจะกระตุ้นกระบวนการทางเคมีที่เปลี่ยนสารอาหารให้เป็น

พลังงานและเนื้อเยื่อในร่างกาย โดยเอนไซม์เกิดการจับกับสารตั้งต้นในอาหารและสลายพันธะออกเป็นสารประกอบที่มีขนาดเล็กลง เช่น โปรตีนเอนไซม์สลายพันธะของโปรตีนซึ่งเป็นพอลิเพปไทด์ที่เกิดจากเปปไทด์สายสั้น ๆ ของกรดอะมิโนที่มาต่อกันและสลายได้เป็นกรดอะมิโนอิสระ คาร์โบไฮเดรตสลายพันธะของคาร์โบไฮเดรตออกเป็นน้ำตาลเชิงเดี่ยว และไลเปสสลายพันธะของไขมันออกเป็นกรดไขมันและกลีเซอรอล โดยอาหารสัตว์ส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยวัตถุดิบจากพืช เช่น ธัญพืช ผลพลอยได้จากการเกษตร ผลพลอยได้จากการกระบวนการสีเมล็ดพืชต่าง ๆ และของเสียจากการเกษตรที่ประกอบด้วยโพสเทคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้ง โปรตีน และกรดไขมัน โดยทั่วไปแล้วสัตว์กระเพาะเดี่ยวไม่สามารถย่อยได้ทั้งหมดและไม่สามารถใช้ประโยชน์จากอาหารที่มีใยอาหารสูงได้ การเสริมเอนไซม์ในอาหารสัตว์สามารถช่วยเพิ่มการย่อยได้ของสารอาหารเหล่านี้ ส่งผลให้การใช้สารอาหารของสัตว์มีประสิทธิภาพมากขึ้น (Choct, 2006)

การเสริมเอนไซม์ในอาหารสัตว์แบ่งออกเป็น 3 กลุ่มหลัก ได้แก่ 1) การเสริมเอนไซม์ในกลุ่มที่สัตว์สามารถผลิตเอนไซม์ได้เองในระบบทางเดินอาหารเพื่อใช้ในการย่อยแป้ง โปรตีน และไขมัน 2) การเสริมเอนไซม์ในกลุ่มที่สัตว์ไม่สามารถผลิตเอนไซม์ได้เองและอาหารจะไม่ถูกย่อย เช่น เซลลูโลส และ 3) การเสริมเอนไซม์ในกลุ่มที่สัตว์ไม่สามารถผลิตเอนไซม์ได้เองและอาหารจะไม่ถูกย่อยและยังมีฤทธิ์ต้านโภชนาการ เช่น เบต้ากลูแคน เพนโทแซน และไฟเตต จึงทำให้ไม่มีส่วนประกอบอาหารที่ถูกย่อยได้หมด 100 เปอร์เซ็นต์ แม้แต่การย่อยสารตั้งต้นที่พบในอาหารสัตว์ (แป้ง โปรตีน และไขมัน) รวมถึงเอนไซม์ที่ผลิตได้ในร่างกายก็ไม่เพียงพอในการย่อยทั้งหมด โดยมี 10 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ ของสารตั้งต้นเหล่านี้ที่ไม่ได้ถูกย่อยและถูกขับออกทางมูลโดยไม่ได้ใช้ประโยชน์ จึงมีความจำเป็นในการปรับปรุงการย่อยได้ของสารตั้งต้นโดยการเสริมเอนไซม์จากภายนอก (Ravindran, 2013)

2.10.1 การทำงานของเอนไซม์

ความสามารถในการทำงานของเอนไซม์ขึ้นอยู่กับความสามารถในการจับกับสารตั้งต้น (substrate) ในตำแหน่งเฉพาะที่เรียกว่าบริเวณเร่ง (active site) โดยเอนไซม์จะจับกับสารตั้งต้นเพื่อเร่งปฏิกิริยาการสลายพันธะที่บริเวณเร่งและเกิดเป็นเอนไซม์ซับสเตรตคอมเพล็กซ์ (enzyme-substrate complex) และเปลี่ยนไปเป็นเอนไซม์โปรดักส์คอมเพล็กซ์ (enzyme-product complex) ก่อนเปลี่ยนสารตั้งต้นนั้น ๆ ให้เป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ (product) ที่เกิดจากการสลายพันธะของสารตั้งต้น (ภาพที่ 2.8) โดยตำแหน่งการทำงานของเอนไซม์นั้นมีความจำเพาะต่อสารตั้งต้นบางชนิดเท่านั้น จะไม่เกิดการแทรกแซงจากตัวจับอื่น ๆ และในธรรมชาติเอนไซม์มีบทบาทในการสังเคราะห์หรือการย่อยสลายทางชีวภาพของสารประกอบในระหว่างกระบวนการแคแทบอลิซึม (catabolism) และแอนาบอลิซึม (anabolism) (Okpara, 2022)



ภาพที่ 2.8 การทำงานของเอนไซม์ในการจับกับสารตั้งต้น

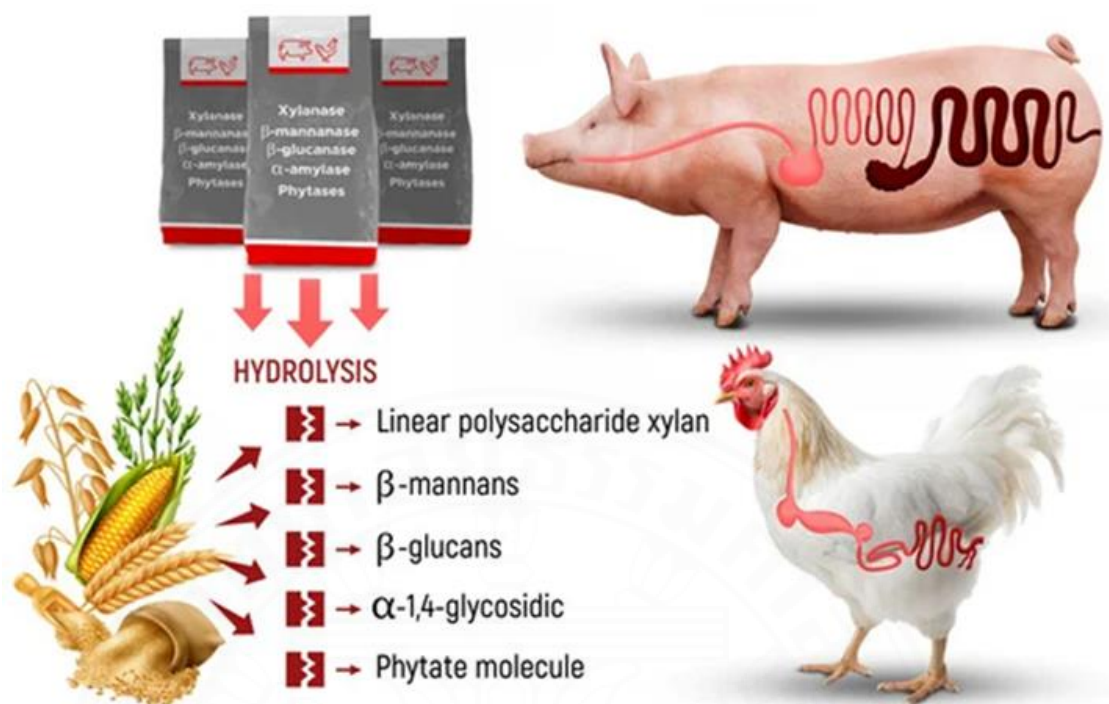
ที่มา: Karki (2023)

การทำงานของเอนไซม์ที่ใช้ในอาหารสัตว์ยังไม่เป็นที่แน่ชัด อย่างไรก็ตามอาจเกิดจากกลไกดังต่อไปนี้ (Ravindran, 2013; Bedford and Cowieson, 2012) 1) การสลายพันธะหรือส่วนประกอบที่ไม่สามารถไฮโดรไลซ์ด้วยเอนไซม์ภายในร่างกาย 2) การสลายตัวของสารต้านโภชนาที่ปลดปล่อยได้และเพิ่มความหนืดของอาหารสัตว์ 3) ผนังเซลล์เกิดความเสียหายและถูกปลดปล่อยสารอาหารที่ติดอยู่กับผนังเซลล์ 4) การย่อยสารอาหาร 5) ลดการสูญเสียโปรตีนภายในลำไส้ และ 6) การเพิ่มเอนไซม์ย่อยอาหารซึ่งไม่เพียงพอหรือไม่มีในสัตว์ ส่งผลให้การย่อยอาหารดีขึ้น โดยเฉพาะในสัตว์เล็กที่ระบบย่อยอาหารยังอยู่ในระยะพัฒนา และการทำงานของเอนไซม์แต่ละตัวนั้นแตกต่างกันและขึ้นอยู่กับเอนไซม์และสารตั้งต้น การใช้ร่วมกับสูตรอาหารจะต้องมีการใช้งานอย่างเหมาะสมเพื่อให้ได้ประโยชน์สูงสุดในการใช้งาน เอนไซม์ออกฤทธิ์ทั้งทางตรงและทางอ้อมต่อสารตั้งต้นหรืออาหาร โดยมีผลต่อสารตั้งต้นที่ได้รับและมีผลข้างเคียงด้วย เช่น เอนไซม์ย่อยสลายลิกนินจะสลายสารตั้งต้นซึ่งเป็นผลทางตรง แต่สามารถช่วยทำให้เอนไซม์อื่น ๆ สามารถเข้าถึงสารอาหารที่เชื่อมพันธะกับลิกนิน (คาร์โบไฮเดรตหรือโปรตีน) ทำให้เกิดการย่อยสลายสารอื่น ๆ ได้ดีขึ้นซึ่งเป็นผลทางอ้อม (Beauchemin et al., 2004) นอกจากนี้กิจกรรมการเร่งปฏิกิริยาของเอนไซม์ยังได้รับอิทธิพลจากอุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ความจำเพาะของสารตั้งต้น และอื่น ๆ ดังนั้นเอนไซม์ที่ใช้เป็นสารเติมแต่งในกระบวนการผลิตอาหารสัตว์จึงต้องทนความร้อน เสถียร และสามารถรักษากิจกรรมของเอนไซม์ในระบบทางเดินอาหารของสัตว์ได้ ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญในการตอบสนองต่อการเร่งปฏิกิริยาของเอนไซม์

2.10.2 เอนไซม์ที่เสริมลงในอาหารที่ใช้ในเชิงพาณิชย์

เอนไซม์ที่ใช้เสริมลงในอาหารสัตว์เพื่อช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพการย่อยและการใช้พลังงานจากอาหารสัตว์ คือ เอนไซม์จากภายนอก (exogenous enzymes) (Yang et al., 2010; Hahn-Didde and Purdum, 2014) โดยเอนไซม์ถือว่าเป็นสารเติมแต่งในอาหารสัตว์ เป็นกลุ่มของโปรตีนที่ช่วยเร่งปฏิกิริยาทางเคมีให้เกิดขึ้นได้เร็วขึ้น ซึ่งจำเป็นต่อการทำงานของเซลล์ในสิ่งมีชีวิตทุกชนิด เนื่องจากความหลากหลาย ความเฉพาะเจาะจง และความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาของเอนไซม์ จึงทำให้ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางจากภาควิทยาศาสตร์และอุตสาหกรรม ซึ่งแต่เดิมได้มีการนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารในการผลิตเบียร์ ขนปัง ซีส น้ำผลไม้ ฯลฯ อย่างไรก็ตามการใช้ในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ยังมีข้อจำกัด (Walsh et al., 1993) ในช่วงทศวรรษที่ 1980 ในภาคปศุสัตว์อุตสาหกรรมสัตว์ปีกจัดเป็นอุตสาหกรรมแรกที่น่าเอนไซม์มาใช้งาน และในปีค.ศ. 2019 ช่วงหลายปีที่ผ่านมามีมูลค่าทางการค้าอยู่ประมาณ 1,280 ล้านดอลลาร์ (Velazquez-De Lucio et al., 2021) เอนไซม์ที่ใช้ในอาหารสัตว์ช่วยปรับปรุงการใช้ประโยชน์จากสารอาหารและคุณค่าทางโภชนาการของอาหารสัตว์ เพิ่มประสิทธิภาพการย่อย การเจริญเติบโต และคุณภาพของเนื้อสัตว์ รวมทั้งลดผลกระทบของสารต้านอนุมูลอิสระและส่งเสริมสุขภาพลำไส้ นอกจากนี้การย่อยอาหารที่ดีขึ้นยังช่วยลดการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ก่อโรคในระบบทางเดินอาหารอีกด้วย โดยสามารถใช้ได้ทั้งแบบเดี่ยวหรือแบบผสม และใช้ได้ในทุกระยะการเจริญเติบโตของสัตว์ (Imran et al., 2016)

เนื่องจากเมล็ดธัญพืชและผลพลอยได้จากเมล็ดธัญพืชที่อยู่ในอาหารของสัตว์กระเพาะเดี่ยวมักประกอบไปด้วยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งและไฟเตต ซึ่งเป็นสารต้านโภชนาการ (antinutritional factors) ที่เอนไซม์ย่อยอาหารภายในร่างกายสัตว์กระเพาะเดียวไม่สามารถย่อยสลายโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งและไฟเตตได้ ดังนั้นจึงมีการเสริมเอนไซม์ภายนอก เช่น คาร์โบไฮเดรสและไฟเตสลงในอาหารสัตว์ เพื่อเพิ่มความพร้อมใช้งานของสารอาหารและพลังงาน ลดต้นทุนการผลิต และปรับปรุงประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของสัตว์กระเพาะเดียว โดยมีเอนไซม์ที่นิยมใช้ในเชิงพาณิชย์ ได้แก่ ไซลานเนส เบต้าแมนนาเนส เบต้ากลูคาเนส แอลฟาอะไมเลส และไฟเตส (ภาพที่ 2.9) (Valente Junior et al., 2024) ซึ่งเอนไซม์แต่ละชนิดมีการทำงานและเป้าหมายต่อสารตั้งต้นที่แตกต่างกัน



ภาพที่ 2.9 เอนไซม์ภายนอกที่ใช้มากที่สุดในอาหารของสัตว์กระเพาะเดี่ยว

ที่มา: Valente Junior et al. (2024)

วัตถุประสงค์ของการเสริมเอนไซม์ในอาหารสัตว์ คือ การปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้ประโยชน์ของอาหารสัตว์ให้ตรงกับความต้องการในการผลิตและลดต้นทุนค่าอาหารสัตว์ (Bedford, 2018) โดยการทำงานของเอนไซม์สามารถจำแนกตามชนิดของสารตั้งต้นที่ออกฤทธิ์แตกต่างกันดังนี้ ไฟเตสออกฤทธิ์กับไฟเตตและช่วยปลดปล่อยฟอสฟอรัสที่จับอยู่ในไฟเตตที่พบในวัตถุดิบที่มาจากพืชทั้งหมด ทำให้สัตว์สามารถดูดซึมฟอสฟอรัสได้ดีขึ้น เบต้ากลูคาเนสออกฤทธิ์กับโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งชนิดเบต้ากลูแคนที่พบในธัญพืช เช่น ข้าวบาร์เลย์ ข้าวโอ๊ต และข้าวไรย์ ช่วยลดความหนืดของลำไส้และสลายใยอาหาร ทำให้การย่อยและการดูดซึมสารอาหารของสัตว์ดีขึ้น โปรตีเอสออกฤทธิ์กับโปรตีนทำให้โปรตีนที่พบในพืชตระกูลถั่วถูกสลายเป็นกรดอะมิโนและเปปไทด์ และเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ประโยชน์จากไนโตรเจนของสัตว์ เซลลูเลสออกฤทธิ์กับเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสในเส้นใยพืช ช่วยสลายใยอาหารที่ย่อยได้ยากและทำให้สัตว์สามารถใช้ประโยชน์จากสารอาหารในพืชได้มากขึ้น และอะไมเลสออกฤทธิ์กับแป้งที่พบในธัญพืชชนิดต่าง ๆ ช่วยปรับปรุงการย่อยและเพิ่มการใช้พลังงานจากวัตถุดิบอาหารสัตว์ โดยเฉพาะอาหารสัตว์ที่มีข้าวโพดและกากั่วเหลืองเป็นส่วนประกอบหลัก (Schramm et al., 2021) (ตารางที่ 2.4)

ตารางที่ 2.4 การทำงานของเอนไซม์ต่อสารตั้งต้นและวัตถุดิบอาหารสัตว์เป้าหมาย

เอนไซม์	เป้าหมายของเอนไซม์	วัตถุดิบอาหารสัตว์เป้าหมาย
Phytases	Phytic acid	All plant-derived ingredients
β -Glucanases	β -Glucan	Barley, oats, and rye
Xylanases	Arabinoxylans	Wheat, rye, triticale, barley, fibrous plant materials
α -Galactosidases	Oligosaccharides	Soybean meal, grain legumes
Proteases	Proteins	All plant protein sources
Amylase	Starch	Cereal grains, grain legumes
Lipases	Lipids	Lipids in feed ingredients
Mannanases, cellulases, hemicellulasespectinases	Cell wall matrix (fiber components)	Plant-derived ingredients, fibrous plant materials

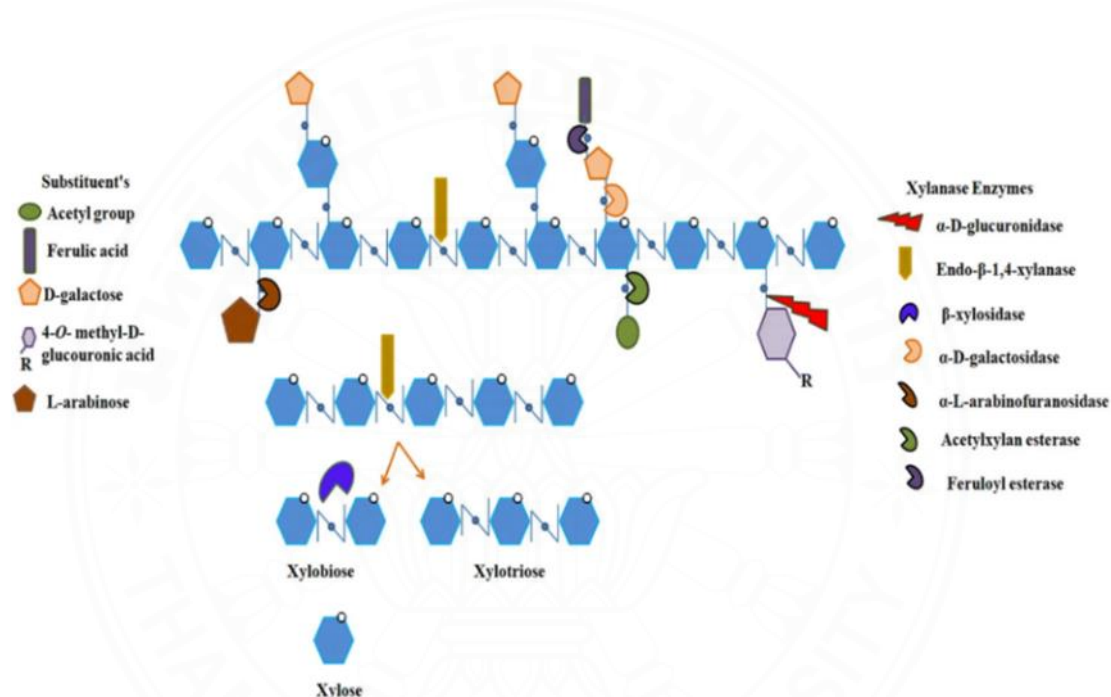
ที่มา: Ravindran (2013)

2.10.3 เอนไซม์ไซลานเนส

ไซแลน เป็นส่วนประกอบหลักของเฮมิเซลลูโลสที่พบอยู่ในผนังเซลล์พืช ประกอบด้วยสายแกนหลัก (backbone) ของน้ำตาลดี-ไซโลส (d-xylose) ที่เชื่อมกันด้วยพันธะ β -1,4-glycosidic และ l-arabinose ประกอบกันเป็นโครงสร้างเฮเทอโรพอลิเมอร์ (heteropolymer) ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่ประกอบด้วยมอนอเมอร์ต่างชนิดมาต่อเข้าด้วยกัน จึงทำให้ไซแลนมีความซับซ้อนและหลากหลายชนิด อย่างไรก็ตามไซแลนที่พบในไม้เนื้อแข็งมักมีโครงสร้างเป็น O-acetyl-4-O-methylglucuronoxylan, ในไม้เนื้ออ่อนมีโครงสร้างเป็น arabino-4-O-methylglucuronoxylan และในหญ้าหรือพืชมีโครงสร้างเป็นอะราบินไซแลนที่เป็นโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่เซลลูโลส ซึ่งพบมากที่สุดในช่วงโพด ถั่วเหลือง กากดีดีจีเอส และในธัญพืชต่าง ๆ และไซแลนที่พบในพืชบกประกอบด้วยสายแกนหลักของน้ำตาลไซโลสที่เชื่อมกันด้วยพันธะ β -1,4 และในสาหร่ายบางชนิดเชื่อมกันด้วยพันธะ β -1,3 เข้าด้วยกัน (Hsieh and Harris, 2019)

เอนไซม์ไซลานเนส ทำหน้าที่ในการสลายโครงสร้างที่ซับซ้อนของไซแลนและการสลายไซแลนที่มีโครงสร้างที่ซับซ้อนได้อย่างสมบูรณ์เพื่อให้ได้เป็นน้ำตาลไซโลสโมเลกุลเดี่ยว จำเป็นต้องมีการทำงานของเอนไซม์ต่าง ๆ ร่วมกัน โดยอาศัยการทำงานของเอนไซม์แต่ละชนิดเพื่อสลายพันธะที่แตกต่างกันไป โดยเอนไซม์ไซลานเนสทำหน้าที่ในการเร่งปฏิกิริยาการสลายพันธะไกลโคซิดิกในสารประกอบน้ำตาลเชิงซ้อนที่เชื่อมกันด้วยพันธะ 1,4- β -D-xylopyranosyl ของไซแลน และได้ น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวจากการสลายพันธะ ซึ่งไซแลนจะถูกไฮโดรไลซิสแบบสุ่มโดย endo-1,4- β -d-

xylanases และในส่วนของโพลีเมอร์ของไซโลสจะถูกสลายพันธะให้อยู่ในรูปของโมโนเมอร์ โดย β -xylosidase ในส่วนของ 4-O-methyl-D glucouronic acid และกลุ่มของอะซิติก (acetyl group) จะถูกสลายพันธะออกโดย α -D-glucuronidase และ acetylxylan esterase ตามลำดับ และ D-galactose ถูกสลายพันธะโดย α -D-galactosidase โดยมี α -L-Arabinofuranosidases ทำหน้าที่ในการกระตุ้นการสลายพันธะด้านข้างของ L-arabinose และในตำแหน่งของพันธะเอสเทอร์ (ester bond) ของกรดเฟอร์ูลิก (ferulic acid) บนไซแลนจะถูกสลายพันธะโดย feruloy esterase (Beg et al., 2001; Collins et al., 2005; Chakdar et al., 2016; Walia et al., 2017) (ภาพที่ 2.10)



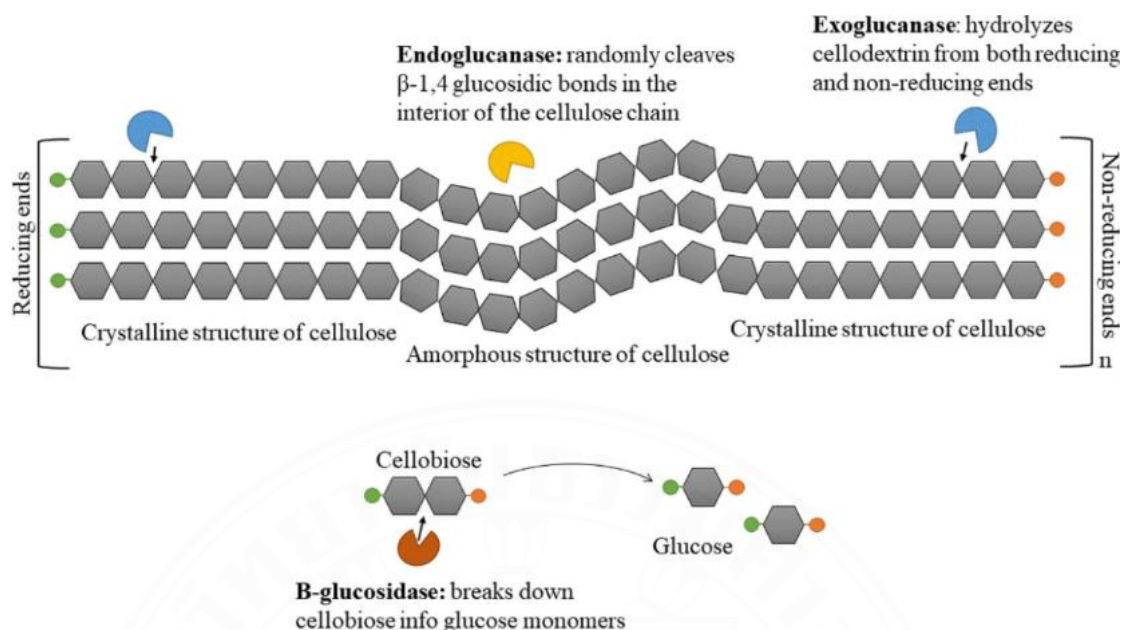
ภาพที่ 2.10 การทำงานของเอนไซม์ไซลานเนสในการสลายไซแลน
ที่มา: Bhardwaj et al. (2019)

ผลที่ได้ของเอนไซม์ไซลานเนสในการสลายพันธะของไซแลน คือ สามารถช่วยลดความหนืดและปลดปล่อยสารอาหารที่ติดอยู่ในโครงสร้างจากการช่วยให้เอนไซม์จากอาหารหรือเอนไซม์ที่ผลิตได้ในร่างกายชนิดอื่น ๆ เข้าถึงสารตั้งต้นได้มากขึ้น ซึ่งนำไปสู่ประโยชน์ในการย่อยสารอาหารและประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของสัตว์ (Singh et al., 2021) นอกจากนี้ยังมีส่วนช่วยในการสร้างสารประกอบต่าง ๆ จากการหมัก NSP ในลำไส้ เช่น ผลผลิตจากการไฮโดรไลซิสอะราบินโนไซแลนทำให้ได้ไซโลโอลิโกแซคคาไรด์และอะราบินโนไซแลน-โอลิโกแซคคาไรด์ ที่สามารถเพิ่มการผลิตพลังงานและมีบทบาทเป็นพรีไบโอติกส์ที่สามารถนำไปสู่การเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบและความ

หลากหลายของจุลินทรีย์ในลำไส้ (Craig et al., 2020) พบว่าการเสริมไซลาเนสช่วยปรับปรุงการทำงานของลำไส้ให้ดีขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการปรับสมดุลของไมโครไบโอมในลำไส้ใหญ่ส่วนต้นและช่วยลดการติดเชื้อของเชื้อก่อโรคในไก่เนื้อ โดยการเพิ่มปริมาณโพรไบโอติกส์ เช่น *B. licheniformis*, *B. subtilis* และ *L. plantarum* เป็นต้น (Zhang et al., 2018)

2.10.4 เอนไซม์เซลลูเลส

เซลลูเลส หรือ เซลลูโลสไลติก (cellulolytic) ผลิตได้จากแบคทีเรีย เชื้อรา และ โปรโตซัว (Annapure and Pratisha, 2022) เป็นเอนไซม์ที่ร่างกายของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมไม่สามารถผลิตขึ้นมาเองได้ยกเว้นในสัตว์เคี้ยวเอื้อง ดังนั้นสัตว์ปีกจึงจำเป็นต้องได้รับการเสริมเอนไซม์เซลลูเลสในอาหารสัตว์ ซึ่งการสลายพันธะของเซลลูโลสด้วยเอนไซม์เซลลูเลสนั้นเป็นกระบวนการที่ซับซ้อน เนื่องจากเซลลูโลสมีโครงสร้างที่แข็งแรง ซึ่งต้องอาศัยการทำงานของเอนไซม์ต่าง ๆ ร่วมกัน โดยแบ่งเอนไซม์เซลลูเลสออกเป็น 3 ประเภท คือ endoglucanases (EC 3.2.1.4), exoglucanases (cellulase 1,4-beta-cellobiosidase (non-reducing end), EC 3.2.1.91) และ β -d-glucosidase หรือ cellobiase (EC 3.2.1.21) เซลลูเลสแต่ละประเภทจะทำงานในส่วนต่าง ๆ ต่อโครงสร้างของเซลลูโลสที่แตกต่างกันไป แต่จะเกิดการทำงานร่วมกันเพื่อสลายผลึก (crystalline) และส่วนที่เป็นอสัณฐาน (amorphous) ให้มีโมเลกุลที่เล็กลงและละลายน้ำได้ เพื่อเปลี่ยนเซลลูโลสให้เป็นน้ำตาลกลูโคส โดยกระบวนการไฮโดรไลซิสเซลลูโลส มีการทำงานดังนี้ endoglucanases ทำหน้าที่สลายพันธะบริเวณอสัณฐานของสายโซ่โพลีแซคคาไรด์และคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เพื่อลดความยาวของสายเซลลูโลสโพลีเมอร์ โดยการทำลายพันธะ β -1,4-glycosidic แบบสุ่มภายในโครงสร้างอสัณฐานของเซลลูโลส (Sajith et al., 2016) เอนไซม์ชนิดนี้สลายพันธะเซลลูโลสอสัณฐานเป็นหลัก และไม่สลายพันธะของเซลลูโลสที่เป็นผลึก นอกจากนี้ยังได้เซลโลเด็กซ์ตริน (cellodextrin) ที่เกิดขึ้นระหว่างการไฮโดรไลซิสเซลลูโลส, exoglucanases ทำหน้าที่สลายพันธะของ cellodextrin จากด้าน non-reducing end และ reducing end และได้น้ำตาลโมเลกุลคู่ออกมา เช่น น้ำตาลเซลโลไบโอส ที่ประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคส 2 โมเลกุล และ exoglucanases ทำหน้าที่สลายพันธะของเซลลูโลสในรูปที่เป็นผลึก (crystalline cellulose) หรือเซลลูโลสที่ไม่ละลายน้ำ และ β -d-glucosidase ทำหน้าที่สลายพันธะเซลโลไบโอสและได้เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่ละลายน้ำ เช่น น้ำตาลกลูโคส โดยขั้นตอนไฮโดรไลซิสทั้งสามขั้นตอนนี้สามารถเกิดขึ้นพร้อมกันได้ (ภาพที่ 2.11)

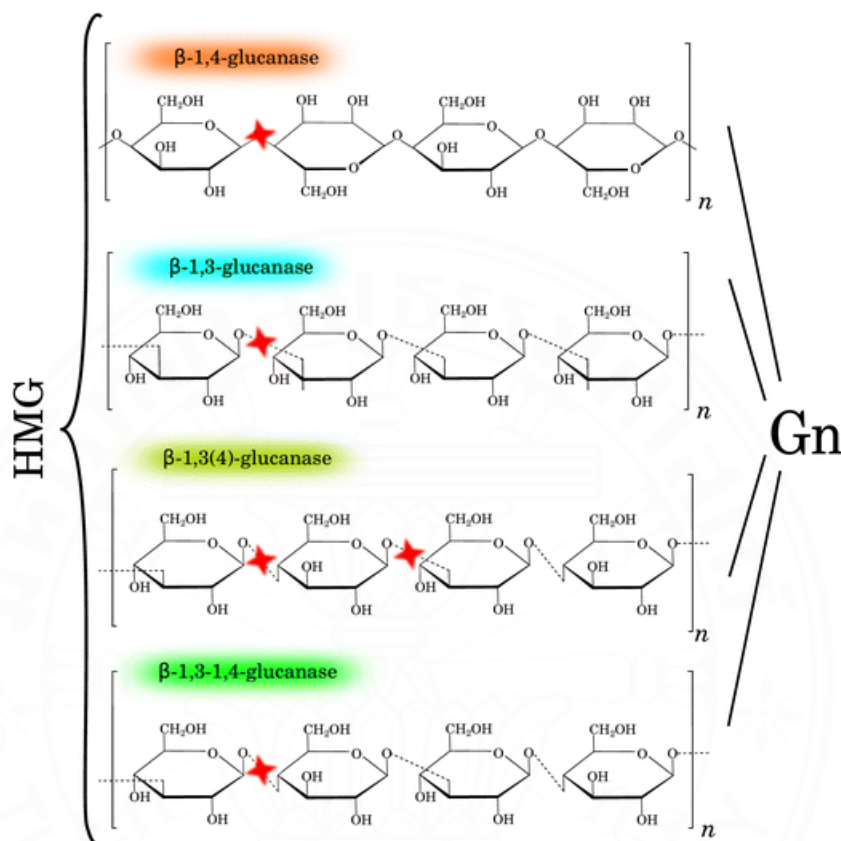


ภาพที่ 2.11 การทำงานของเอนไซม์เซลลูเลสในการสลายเซลลูโลส
ที่มา: Nero et al. (2022)

2.10.5 เอนไซม์เบต้ากลูคาเนส

เบต้ากลูแคน เป็นโพลีแซคคาไรด์ของโมเลกุล D-glucopyranosyl ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกชนิดเบต้า ซึ่งพบได้ในผนังเซลล์ของสิ่งมีชีวิตหลายชนิด เช่น เชื้อรา ยีสต์ สาหร่าย แบคทีเรีย และพืช โดยเบต้ากลูแคนที่พบในเมล็ดธัญพืชมีส่วนผสมของพันธะไกลโคซิดิก β -(1-3) และ β -(1-4) (Izydorczyk and Dexter, 2008) สำหรับสัตว์ปีกเบต้ากลูแคนสามารถช่วยเสริมการทำงานของระบบภูมิคุ้มกันได้ เนื่องจากมีคุณสมบัติเป็นพรีไบโอติกส์ในระบบทางเดินอาหาร อย่างไรก็ตามเบต้ากลูแคนอาจส่งผลกระทบต่อการผลิตของสัตว์ปีก เนื่องจากมีความหนืดสูงในระบบทางเดินอาหารและส่งผลทำให้ความสามารถในการย่อยได้ของสารอาหารลดลง และทำให้เสียสมดุลของจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ การเสริมเอนไซม์เบต้ากลูคาเนส (beta-glucanase) ในอาหารจะช่วยลดผลกระทบที่เกิดจากความหนืดได้อย่างมีประสิทธิภาพและส่งเสริมการทำงานของจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ในระบบทางเดินอาหารของสัตว์ปีก (Fernandes et al., 2015) โดยเบต้ากลูคาเนสมีความเฉพาะเจาะจงในการไฮโดรไลซ์พันธะที่แตกต่างกันไปตามประเภท โดยแบ่งออกเป็น 4 ประเภทหลักตามการทำงาน คือ β -1,4-glucanase เป็นเอนไซม์ที่สลายพันธะที่เชื่อมกันด้วย β -1,4-glucosidic ระหว่างหน่วยของ D-glucopyranose สองหน่วยที่อยู่ติดกัน ที่พบได้ในเซลลูโลส ไลเคน และธัญพืช, β -1,3-glucanase สลายพันธะที่เชื่อมกันด้วย β -1,3-glucosidic ใน 1-3- β -D-glucans, β -1,3(4)-

glucanase สลายพันธะที่เชื่อมกันด้วย β -(1-3) หรือ (1-4) ใน β -D-glucans และ β -1,3-1,4-glucanase สลายพันธะที่เชื่อมกันด้วย β -1,4 glycoside เท่านั้น (ภาพที่ 2.12)

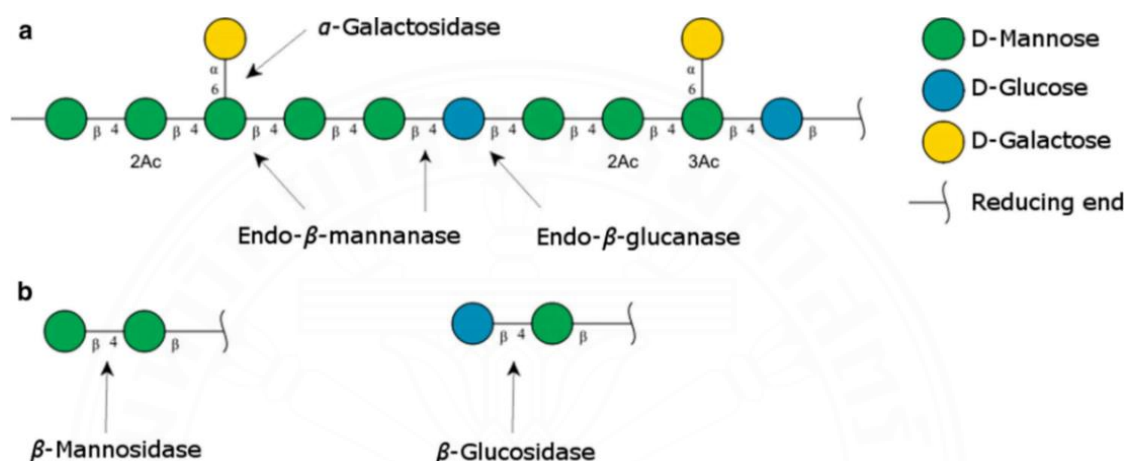


ภาพที่ 2.12 การทำงานของเอนไซม์เบต้ากลูคาเนสในการสลายกลูแคน
ที่มา: Goldenkova-Pavlova et al. (2018)

2.10.6 เอนไซม์แมนนาเนส

ธัญพืชและเมล็ดพืชมักพบเฮมิเซลลูโลสที่สะสมอยู่ในผนังเซลล์อยู่ในรูปของแมนแนน (mannan) (Scheller and Ulvskov, 2010) โดยแมนแนนถูกแบ่งออกเป็น 4 ประเภท คือ แมนแนนเชิงเส้น กาแลคโตแมนแนน กลูโคแมนแนน และกาแลคโตกลูโคแมนแนน ซึ่งแมนแนนมีโครงสร้างสายหลักที่ประกอบไปด้วยน้ำตาลแมนโนสและอาจพบน้ำตาลชนิดอื่น ๆ ประกอบอยู่ด้วย จึงทำให้แมนแนนถูกไฮโดรไลซิสได้ยาก ต้องอาศัยการทำงานร่วมกันของเอนไซม์ต่าง ๆ จึงจะเกิดการสลายพันธะของแมนแนนได้อย่างสมบูรณ์และเพื่อสลายโซ่กิ่งของแมนแนนที่เกิดจากน้ำตาลชนิดอื่น ๆ ที่ไม่ใช่น้ำตาลแมนโนส โดยเอนไซม์แมนนาเนสประเภท endo (1-4)- β -mannanase (EC 3.2.1.78) ทำหน้าที่สลายพันธะแบบสุ่มภายในโครงสร้างที่มีน้ำตาลแมนโนส โดยการสลายพันธะ β -1,4 และมี

exo (1-4)- β -mannanase หรือ β -mannosidase (EC 3.2.1.25) ทำหน้าที่สลายพันธะในสายโซ่หลักของแมนแนนและทำงานร่วมกับ β -glucosidase (EC 3.2.1.21), α -galactosidase (EC 3.2.1.22) และ acetyl mannan esterase (EC 3.1.1.6) เพื่อไฮโดรไลซิสน้ำตาลชนิดต่าง ๆ ได้อย่างสมบูรณ์ (Chauhan et al., 2012; Malgas et al., 2015) (ภาพที่ 2.13)



ภาพที่ 2.13 การทำงานของเอนไซม์แมนแนนสในการสลาย (a) แกนหลัก (backbone) ของกาแล็กโตกลูโคแมนแนน และ (b) โอลิโกแซคคาไรด์ (oligosaccharide)
ที่มา: Von Freiesleben et al. (2018)

2.10.7 ประโยชน์ของการเสริมเอนไซม์ในอาหารสัตว์

การเสริมเอนไซม์ในอาหารสัตว์สามารถเพิ่มการปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตและกำไร ซึ่งเป็นผลมาจากความสามารถที่เพิ่มขึ้นในการย่อยสลายประกอบต่าง ๆ ในอาหารสัตว์ (โปรตีน กรดอะมิโน แป้ง ไขมัน และพลังงาน) อย่างไรก็ตามการเสริมเอนไซม์ในอาหารสัตว์นั้นเป็นที่ยอมรับในวงกว้างเนื่องจากประโยชน์ของการเสริมเอนไซม์ (Ravindran, 2013) ดังต่อไปนี้ 1) เพิ่มความสามารถในการใช้งานของสารอาหารของสัตว์ โดยเพิ่มความสามารถในการย่อยได้ให้ดีขึ้น 2) เพิ่มความแม่นยำในการกำหนดสูตรอาหาร โดยลดความแปรปรวนในด้านคุณค่าทางโภชนาการของวัตถุดิบอาหารสัตว์ต่าง ๆ 3) ลดความชื้นของสิ่งขับถ่ายและวัสดุรองพื้นที่เป็นปัจจัยหลักที่สำคัญต่อการเกิดโรคผิวหนังที่แผ่นเท้าที่อาจนำไปสู่ปัญหาด้านสวัสดิภาพสัตว์ (Collett, 2012) 4) เพิ่มแบคทีเรียสายพันธุ์ที่ดีและทำให้สุขภาพของลำไส้ดีขึ้น (Bedford and Cowieson, 2012) และช่วย

ปรับปรุงการทำงานของระบบภูมิคุ้มกัน (Yegani and Korver, 2008) 5) ปรับปรุงสัณฐานวิทยาของลำไส้และส่งผลทำให้มีการย่อยและการดูดซึมสารอาหารต่าง ๆ ดีขึ้น (Viveros et al., 1994) 6) ลดการขับไนโตรเจนและฟอสฟอรัสในอุจจาระ ซึ่งเกิดจากการใช้ประโยชน์จากสารอาหารและแร่ธาตุได้ดีขึ้น รวมทั้งช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และ 7) เพิ่มความสม่ำเสมอในด้านประสิทธิภาพการผลิตของสัตว์ สัตว์มีการเจริญเติบโตที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยสรุปการเสริมเอนไซม์ในอาหารสัตว์นั้นมีประโยชน์มากกว่าแค่การปรับปรุงการย่อยสารอาหารแต่ยังช่วยปรับปรุงคุณภาพด้านสุขภาพของลำไส้ สวัสดิภาพของไก่เนื้อ และความยั่งยืนทางสิ่งแวดล้อม (Ravindran, 2013)

2.11 เมล็ดธัญพืช

เมล็ดธัญพืช (cereal grain) มีส่วนประกอบหลังอยู่ 3 ส่วน คือ รำ (bran) คัพภะ (germ) และเนื้อแป้ง (endosperm) โดยรำเป็นชั้นนอกสุดของเมล็ดธัญพืชที่ประกอบไปด้วยส่วนของชั้นเยื่อหุ้มเมล็ด (aleurone layer) และเยื่อหุ้มผล (pericarp) คัพภะอยู่บริเวณส่วนปลายของเมล็ด และพบเนื้อแป้งอยู่ภายในเมล็ด โดยธัญพืชจะพัฒนาเป็นพืชชนิดใหม่และเก็บสะสมแป้งและสารอาหารรอง โดยเฉพาะธาตุเหล็ก ไรโบฟลาวิน (riboflavin) ไนอาซิน (niacin) และไทอามิน (thiamin) ไว้ในเนื้อแป้ง (Tullio et al., 2021)

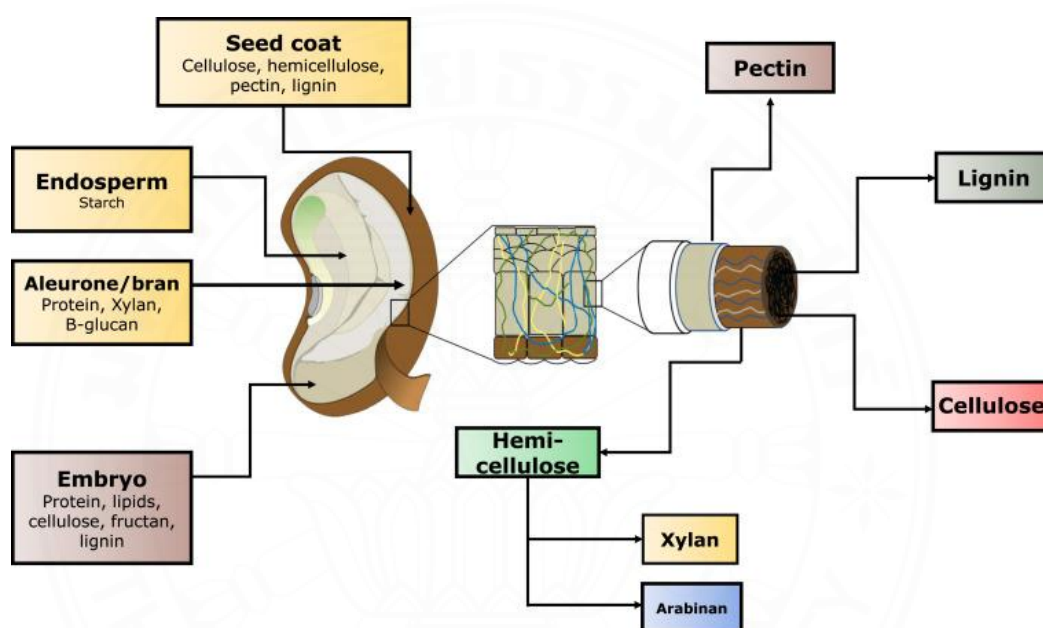
รำ ประกอบไปด้วยเปลือกหุ้ม (pericarp) เปลือกเมล็ด (seed coat) และเพอริสเปิร์ม (perisperm) ที่เป็นส่วนประกอบภายนอกของเมล็ด และในส่วนของเมล็ดพบรำเป็นส่วนประกอบอยู่ประมาณ 13 ถึง 17 เปอร์เซ็นต์ ที่ประกอบไปด้วยเส้นใยมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ โดยเปลือกหุ้มที่อยู่ชั้นนอกสุดเป็นชั้นของแกลบ (husk หรือ hull) ที่ประกอบไปด้วยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลสเป็นหลัก และพบโปรตีน แป้ง (จากเอนโดสเปิร์ม) วิตามินบี แร่ธาตุ และสารประกอบทางชีวภาพหลายชนิด เช่น โพลีฟีนอล (polyphenols)

คัพภะ เช่น เอ็มบริโอ (embryo) พบเพียงเล็กน้อยประมาณ 2 ถึง 3 เปอร์เซ็นต์ ของเมล็ดพืช แต่อุดมไปด้วยโปรตีน ไขมัน และไขมัน อีกทั้งยังมีแร่ธาตุ วิตามินบี และวิตามินอีในปริมาณมาก

เนื้อแป้ง พบมากที่สุดภายในเมล็ดธัญพืช ซึ่งประกอบด้วยคาริออสซิส (caryopsis) มากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ โดยจะถูกนำไปใช้เพื่อให้พลังงานที่จำเป็นสำหรับการงอกของพืชและเส้นใยบางชนิด

โดยพบคาร์โบไฮเดรตที่ไม่สามารถย่อยได้ในแต่ละองค์ประกอบของเมล็ดธัญพืชแตกต่างกันไปตามประเภทและลักษณะทางกายภาพของเมล็ดธัญพืชชนิดนั้น ๆ โดยมีเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส ลิกนิน เพคติน ไสแลน และอะราบิแนน ซึ่งเป็นใยอาหารส่วนใหญ่ที่พบในธัญพืช (ภาพที่ 2.14) และ

อาหารสัตว์ปีกประกอบไปด้วยธัญพืชที่เป็นใยอาหารที่สามารถละลายน้ำและไม่สามารถละลายน้ำได้ในบรรดาเส้นใยเหล่านี้สามารถพบ NSP เช่น เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส เบต้า-กลูแคน และพรุกันแทน ซึ่งเส้นใยส่วนใหญ่ที่พบในธัญพืชที่เลี้ยงสัตว์ปีกมักพบเซลลูโลส อะราบิโนไซแลน และเบต้า-กลูแคนเป็นส่วนประกอบหลัก โดยเฉพาะเบต้า-กลูแคน ซึ่งเป็นปัจจัยด้านโภชนาการที่สำคัญในอาหารสัตว์ เนื่องจากมีความสามารถในการละลายน้ำสูง ส่งผลทำให้เกิดความหนืดในระบบทางเดินอาหารส่วนบน (upper GI tract) ซึ่งลดความพร้อมใช้งานของสารอาหาร (Simon, 2000)



ภาพที่ 2.14 ส่วนประกอบของใยอาหารในเมล็ดพืช

ที่มา: Mahmood and Guo (2020)

2.12 วัตถุดิบอาหารสัตว์

อุตสาหกรรมสัตว์ปีกในหลายประเทศนิยมใช้อาหารสัตว์ที่ผลิตมาจากข้าวโพดและถั่วเหลืองเป็นส่วนประกอบในอาหารสัตว์ปีก เนื่องจากสามารถย่อยได้ดีและมีคุณค่าทางโภชนาการสูง อย่างไรก็ตามในบางประเทศมีการนำธัญพืชที่ปลูกในท้องถิ่น เช่น ข้าวสาลีและข้าวบาร์เลย์ มาใช้เป็นวัตถุดิบอาหารสัตว์ปีกทางเลือกเพื่อทดแทนการใช้กากถั่วเหลือง หรือเลือกใช้ลูฟีน เมล็ดเรพซิด เมล็ดทานตะวัน และเมล็ดคาโนลา ที่สามารถใช้ทดแทนกากถั่วเหลืองในอาหารสัตว์ปีกได้ทั้งหมดหรือทดแทนได้แค่บางส่วน รวมถึงการเลือกใช้ทดแทนแหล่งวัตถุดิบอื่น ๆ โดยนิยมใช้เมล็ดธัญพืชที่มีเส้น

ใยสูงที่มีส่วนประกอบของโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งอยู่ ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นเส้นใยที่อยู่ในรูปที่สามารถละลายน้ำได้ แต่เมล็ดธัญพืชที่กล่าวมานี้ได้ถูกนำมาใช้เป็นส่วนประกอบในอาหารสัตว์ปีกเนื่องจากมีราคาที่ไม่แพงเพื่อทดแทนการใช้ข้าวโพดและถั่วเหลืองที่มีราคาสูงกว่า (Mateos et al., 2013) และโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งที่สำคัญที่พบอยู่ในธัญพืช ได้แก่ อะราบิโนไซแลนและเบต้ากลูแคน โดยมีความแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับพันธุ์พืชและแหล่งที่มา (Saulnier et al., 2007) เมล็ดธัญพืชที่ถูกนำมาใช้เป็นวัตถุดิบอาหารสัตว์ เช่น ข้าวโพด กากถั่วเหลือง ข้าวเปลือก รำข้าว ข้าวสาลี รำข้าวสาลี และกากเนื้อในเมล็ดปาล์มน้ำมันมีโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งเป็นส่วนประกอบที่แตกต่างกันไป

ทั่วโลกมีความต้องการข้าวโพดเพิ่มสูงขึ้น FAO (2009) รายงานว่าความต้องการข้าวโพดที่เพิ่มขึ้นนี้ส่งผลทำให้ราคาข้าวโพดเพิ่มสูงขึ้นและจะสูงขึ้นอีกในอนาคต ราคาวัตถุดิบทางการเกษตรที่เพิ่มขึ้นทำให้ทั่วโลกเกิดความกังวลเกี่ยวกับความมั่นคงด้านอาหาร ดังนั้นอุตสาหกรรมสัตว์ปีกจึงมองหาวัตถุดิบอาหารสัตว์ทางเลือกอื่น ๆ มาทดแทนข้าวโพดที่เป็นส่วนประกอบหลักในอาหารสัตว์ปีก โดยธัญพืชถือเป็นหนึ่งในตัวเลือกที่มีการนำมาใช้ทดแทนข้าวโพดในสูตรอาหารไก่เนื้อในการเป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตทางเลือกในอาหารสัตว์ปีกมากที่สุด แต่ในปัจจุบันแนวโน้มของราคาธัญพืชมีการปรับตัวที่สูงขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลมาจากต้นทุนค่าปุ๋ยที่เพิ่มสูงขึ้นที่ส่งผลทำให้ราคาอาหารสัตว์ปีกสูงขึ้นตาม โดย OECD and FAO (2023) ทำการวิเคราะห์สถานการณ์และคาดการณ์ราคาสินค้าการเกษตร พบว่าราคาปุ๋ยที่เพิ่มขึ้นทุก ๆ 1 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลทำให้ราคาสินค้าการเกษตรเพิ่มขึ้น 0.2 เปอร์เซ็นต์ การเพิ่มขึ้นจะมีนัยสำคัญต่อการผลิตพืชผลที่ใช้ปุ๋ยเป็นปัจจัยหลัก และส่งผลต่อการผลิตเนื้อสัตว์ โดยเฉพาะสัตว์ปีกและสุกรซึ่งต้องอาศัยพืชผลเป็นจำนวนมาก และความผันผวนของราคาพลังงาน เมล็ดพันธุ์พืช ค่าแรงงาน หรือเครื่องจักรก็จะส่งผลกระทบต่อราคาอาหารเช่นกัน ดังนั้นควรมีการศึกษาการใช้ธัญพืชเหล่านี้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดในการผลิตสัตว์ปีก เพื่อเป็นการลดต้นทุนการผลิตด้านอาหารสัตว์และเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตที่ดีขึ้น

2.12.1 ข้าวโพด

สัตว์ปีกไม่สามารถย่อยคาร์โบไฮเดรตได้ทั้งหมด โดยอาหารที่มีใยอาหารสูงจะมีค่าพลังงานต่ำ เว้นแต่ว่าจะมีปริมาณไขมันที่สูงประกอบอยู่ด้วย โดยข้าวโพดมีคุณค่าทางโภชนาการและพลังงานสูงเหมาะสำหรับนำมาใช้เป็นส่วนประกอบในอาหารสัตว์ปีก แต่เนื่องด้วยปัจจุบันมีความต้องการข้าวโพดที่เพิ่มสูงขึ้นทั่วโลกและเกิดความไม่สมดุลระหว่างอุปสงค์และอุปทานของข้าวโพด ส่งผลทำให้ราคาข้าวโพดเพิ่มสูงขึ้นทั่วโลก ด้วยเหตุนี้ผู้ผลิตสัตว์ปีกหลายรายจึงต้องหาวัตถุดิบอาหารทางเลือกในท้องถิ่นมาทดแทนการใช้ข้าวโพดในอาหารสัตว์ปีก โดยไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการผลิตของไก่เนื้อ

ข้าวโพด ถือว่าเป็นแหล่งพลังงานหลักที่ให้พลังงานในอาหารสัตว์ปีกในทั่วโลก และมีสัดส่วนคิดเป็น 65 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณพลังงานที่สามารถเผาผลาญได้ทั้งหมดในอาหารไก่ เนื้อตลอดระยะเวลาการเจริญเติบโต โดยองค์ประกอบของสารอาหารในข้าวโพดจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับปริมาณของแป้ง โปรตีน ไขมัน และโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งที่รวมถึงแป้งทนต่อการย่อย (Cowieson, 2005) การตอบสนองต่อการเสริมเอนไซม์ในอาหารไก่เนื้อจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น กิจกรรมของเอนไซม์ที่เสริม ความจำเพาะและปฏิกิริยาระหว่างเอนไซม์ คุณภาพของส่วนผสม ตลอดจนความเข้มข้นของสารตั้งต้น ระดับของสารอาหารในอาหารสัตว์ และอายุของสัตว์ และความแตกต่างขององค์ประกอบของข้าวโพดมีความสัมพันธ์กับพันธุกรรมของข้าวโพด ลักษณะดิน และพื้นที่ทางภูมิศาสตร์ (Cowieson and Ravindran, 2008)

ข้าวโพดประกอบไปด้วยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งชนิดอะราบิโนไซแลนเป็นส่วนประกอบหลัก และพบเบต้ากลูแคนในปริมาณเล็กน้อย ซึ่งไม่ก่อให้เกิดปัญหาเรื่องความหนืดในระบบทางเดินอาหารของสัตว์ปีก โดยอะราบิโนไซแลนในข้าวโพดคิดเป็นประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ขององค์ประกอบทั้งหมดของผนังเซลล์ และกระจายตัวอยู่ในส่วนของเอนโดสเปิร์มและเปลือกเมล็ด (Bach Knudsen, 1997; Pedersen, 2015) อย่างไรก็ตามอะราบิโนไซแลนมีความสามารถในการละลายน้ำ เมื่อถูกกลายายจะเกิดเป็นของเหลวหนืดที่ไปรบกวนการไฮโดรไลซิสของเอนไซม์ต่าง ๆ ในระบบทางเดินอาหาร โดยข้าวโพดมีอะราบิโนไซแลนที่ละลายน้ำได้ประมาณ 0.1 ถึง 0.64 เปอร์เซ็นต์ (Choct, 2015; Meng et al., 2005) แต่เมื่อเทียบกับธัญพืชชนิดอื่น ๆ พบว่าข้าวโพดมีความหนืดต่ำที่สุดในบรรดาธัญพืช 15 ชนิด เช่น กากถั่วเหลือง ข้าวสาลี รำข้าวสาลี และรำข้าว (Mathlouthi et al., 2002) ดังนั้นข้าวโพดจึงมีข้อจำกัดของปัญหาเรื่องความหนืดเพียงเล็กน้อยเท่านั้น จึงทำให้การใช้ข้าวโพดในอาหารไก่เนื้อไม่ก่อให้เกิดปัญหาเรื่องความหนืดในระบบทางเดินอาหาร เนื่องจากมีส่วนประกอบของ NSP ชนิดที่ละลายน้ำอยู่เพียงเล็กน้อย (ตารางที่ 2.7) แต่ NSP ที่พบนั่นส่งผลเสียต่อการเข้าถึงสารอาหารของเอนไซม์จากภายนอกอาหารโดยการห่อหุ้มสารอาหารในโครงสร้างผนังเซลล์ของข้าวโพด (Cowieson, 2005; Choct, 2006) และแม้ว่าเอนไซม์ไซแลเนสจะสามารถปลดปล่อยสารอาหารที่มีอยู่ในโครงสร้างผนังเซลล์ได้ แต่อาจไม่ส่งผลให้เกิดการตอบสนองที่มีประสิทธิภาพสูงสุดหากไซแลเนสไม่ได้ทำงานพร้อมกับเอนไซม์ชนิดอื่น ๆ เช่น โปรตีเอสและอะไมเลส (Cowieson, 2005) โดย Cowieson et al. (2010a) พบว่าการทำงานร่วมกันระหว่างเอนไซม์ไซแลเนสและกลูคาเนสสามารถย่อยสลายโครงสร้างผนังเซลล์ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ส่งผลทำให้มีการปลดปล่อยสารอาหารออกจากเซลล์มากขึ้น และการเสริมเอนไซม์อาจมีความสัมพันธ์กับผลของการย่อยได้ของลำไส้เล็กส่วนต้นที่ดีขึ้นที่เป็นผลมาจากความสามารถในการเข้าถึงของเอนไซม์ภายนอกที่มีอยู่ในทางเดินอาหารกับสารอาหารในอาหารสัตว์มากขึ้น (Leslie et al., 2007)

2.12.2 ข้าวเปลือก

ประเทศไทยสามารถผลิตข้าวเปลือกได้สูงถึง 31 ถึง 33 ล้านตันต่อปี และนำไปผลิตเป็นข้าวสารได้สูงถึง 20 ถึง 22 ล้านตันต่อปี แต่การใช้ข้าวเพื่อบริโภคภายในประเทศนั้นมีความต้องการเพียง 10 ถึง 12 ล้านตันต่อปี ทำให้ข้าวเปลือกมีมากเกินไปเกินความต้องการภายในประเทศ โดยข้าวเปลือกส่วนที่เหลือต้องนำไปส่งออกในตลาดต่างประเทศและใช้เป็นวัตถุดิบในภาคอุตสาหกรรม เช่น อุตสาหกรรมอาหารสัตว์ ที่มีสัดส่วนประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ ของการใช้ข้าวเปลือกส่วนที่เหลือ และในปัจจุบันราคาวัตถุดิบอาหารสัตว์นั้นมีการปรับตัวสูงขึ้นเนื่องจากหลายปัจจัย เช่น ปรากฏการณ์เอลนีโญและราคาปุ๋ย (ชัยวัฒน์, 2566) จึงทำให้การใช้ข้าวเปลือกเป็นวัตถุดิบทดแทนวัตถุดิบหลักในการผลิตอาหารสัตว์ถือเป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการแก้ปัญหาดังกล่าว

ข้าวเปลือกเป็นตัวเลือกที่นิยมนำมาใช้ทดแทนข้าวโพด โดยเฉพาะในช่วงที่ข้าวโพดมีราคาแพง เนื่องจากมีพลังงานและปริมาณโปรตีนหยาบใกล้เคียงข้าวโพด (ตารางที่ 2.5) โดยมีการศึกษาเกี่ยวกับการใช้ข้าวเปลือกเป็นส่วนประกอบในอาหารไก่เนื้อ พบว่าข้าวเปลือกเป็นอาหารที่ให้พลังงานสูงและสามารถใช้ทดแทนข้าวโพดในอาหารสัตว์ได้บางส่วน (Nanto et al., 2012) หรือทดแทนข้าวโพดในอาหารสัตว์ได้ทั้งหมด โดยไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโต การบริโภคอาหาร การเพิ่มขึ้นของน้ำหนักตัว และประสิทธิภาพการใช้อาหารของไก่เนื้อ (Sittiya et al., 2016) แม้ว่าข้าวเปลือกและข้าวโพดจะมีพลังงานและปริมาณของโปรตีนที่ใกล้เคียงกัน แต่ส่วนประกอบของแป้งและโปรตีนที่พบนั้นต่างกัน โดยข้าวเปลือกมีอะไมโลเพกติน (amylopectin) ที่สูงกว่าและมีขนาดเม็ดแป้งเล็กกว่าข้าวโพด ทำให้สัตว์ย่อยข้าวเปลือกได้ง่ายกว่าข้าวโพด โปรตีนที่โดดเด่นในข้าวโพด คือ โปรลามิน (prolamin) ในขณะที่โปรตีนในข้าว คือ กลูเตลิน ซึ่งย่อยได้ง่ายกว่าและมีความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระได้ดีกว่าโปรลามิน (Wang et al., 2016) อย่างไรก็ตามการใช้ข้าวเปลือกอาจทำให้เกิดปัญหาต่อการผลิตของสัตว์ปีก เนื่องจากมีปริมาณใยอาหารและมีฟอสเฟตคาร์โบไฮเดรตที่ไม่ใช่แป้ง (NSP) อยู่สูง เช่น อะราบิโนไซแลนและเบต้ากลูแคน และมีการศึกษาเปรียบเทียบอัตราการไหลผ่านของข้าวโพดบดและข้าวเปลือกในกระเพาะพักและก้นในไก่เนื้อ โดยพบว่ากลุ่มของไก่เนื้อที่เลี้ยงด้วยข้าวเปลือกมีระยะเวลาในการกักเก็บในกระเพาะพักที่นานกว่าและมีค่าความเป็นกรด-ด่างในก้นน้อยกว่ากลุ่มของไก่เนื้อที่เลี้ยงด้วยข้าวโพดบด และพบว่ากลุ่มของไก่เนื้อที่เลี้ยงด้วยข้าวเปลือกมีน้ำหนักก้นและกระเพาะพักที่สูงกว่ากลุ่มที่เลี้ยงด้วยข้าวโพดบด (Nishii et al., 2016)

ตารางที่ 2.5 การเปรียบเทียบองค์ประกอบทางโภชนาและลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ร่วมของเมล็ดในปาล์มเทียบกับกากถั่วเหลือง ข้าวโพด และข้าวเปลือก

ส่วนประกอบ	กากถั่วเหลือง	ข้าวโพด	เมล็ดในปาล์มสกัดน้ำมัน	กากเนื้อในเมล็ดปาล์ม	ข้าวเปลือก
วัตถุแห้ง (%)	90.0	88.3	91.9	91.9	88.45
พลังงานรวม (kcal/kg)	4,256	3,933	4,482	4,250	3792.87
พลังงานที่ย่อยได้ (kcal/kg)	3,619	3,451	2,892	2,669	-
พลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้ (kcal/kg)	3,294	3,395	2,786	2,542	-
โปรตีนรวม (%)	47.7	8.2	14.3	13.6	8.19
ไขมัน (%)	1.5	3.5	6.9	1.3	2.12
NDF (%)	8.2	9.1	70.6	77.9	26.46
ADF (%)	5.3	2.9	43.0	49.4	14.21
ใยอาหารทั้งหมด (%)	16.71	13.73	63.5	70.9	-
ใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำ (%)	-	-	60.9	68.7	-
ใยอาหารที่ละลายน้ำ (%)	-	-	2.6	2.2	-
ความหนาแน่น (g/L)	-	-	634.1	401.0	589.50
ความสามารถในการอุ้มน้ำ (g/gv)	-	-	1.83	2.17	-

NDF คือ เยื่อใยที่ละลายได้ในสารละลายที่เป็นกลาง; ADF คือ เยื่อใยที่ละลายได้ในสารละลายที่เป็นกรด

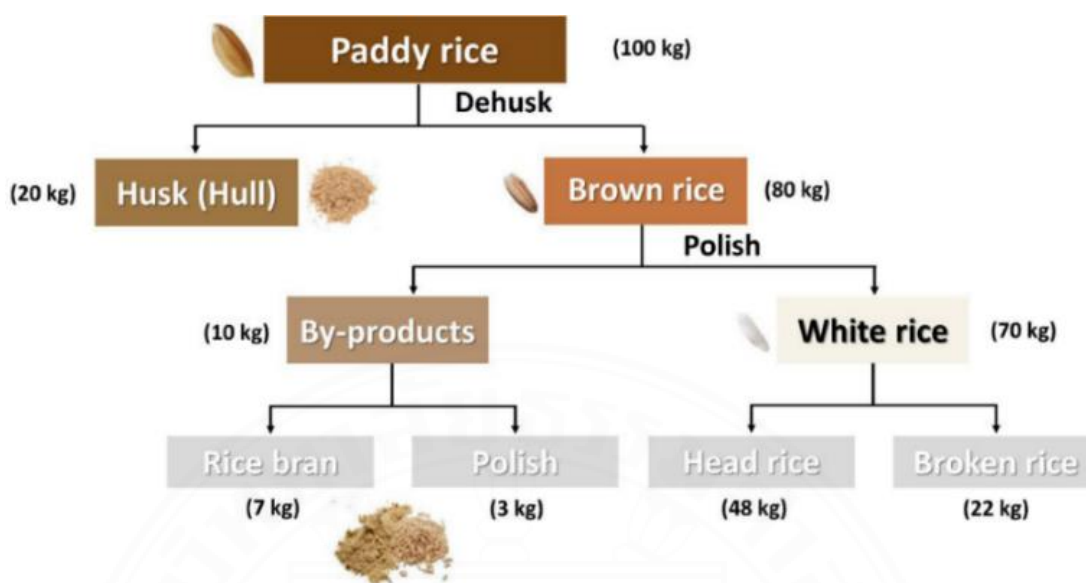
ที่มา: ดัดแปลงจาก Kim et al. (2017) และ Yu et al. (2022)

ไก่เนื้อที่เลี้ยงด้วยอาหารที่มีส่วนประกอบของข้าวเปลือก 10 เปอร์เซ็นต์ พบว่าส่งผลทำให้ไก่เนื้อมีน้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้นและการบริโภคพลังงานลดลง อาจเนื่องมาจากในข้าวเปลือกมีปริมาณเส้นใยเป็นส่วนประกอบอยู่สูงจึงทำให้มีข้อจำกัดในการใช้เป็นส่วนประกอบในอาหารสัตว์ปีก (Nanto et al., 2016) โดยมีการศึกษาผลของการเสริมเอนไซม์รวมผสม (ไซลาลเนส เซลลูเลส เพคติเนส และไฟเตส) ในอาหารที่มีส่วนผสมของข้าวเปลือกทั้ง 3 ระดับ (60, 80 และ 100 เปอร์เซ็นต์) ทดแทนการใช้ข้าวโพดต่อประสิทธิภาพการผลิตและความคุ้มค่าทางเศรษฐกิจของการผลิตไก่เนื้อ พบว่าการเสริมเอนไซม์รวมผสม (50 กรัม/100 กิโลกรัม) ทำให้ประสิทธิภาพการผลิตของไก่เนื้อดีที่สุด ในด้านของน้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้นและสามารถใช้ข้าวเปลือกทดแทนข้าวโพดในอาหารไก่เนื้อได้สูงถึง 60 เปอร์เซ็นต์ ทำให้สามารถสรุปได้ว่าการเสริมเอนไซม์ในอาหารไก่เนื้อที่มีข้าวเปลือกเป็นส่วนประกอบนั้นคุ้มค่าทางเศรษฐกิจ (Sharma et al., 2018) โดยการวิจัยการเสริมเอนไซม์ในอาหารไก่เนื้อที่มี

ส่วนประกอบของข้าวเปลือกยังไม่เป็นที่แพร่หลาย แต่มีรายงานการเสริมเอนไซม์เชิงประกอบที่ประกอบด้วยไซลาเนส เบต้ากลูคาเนส และเซลลูเลสในอาหารเปิด พบว่าเปิดที่ได้รับการเสริมเอนไซม์มีประสิทธิภาพการผลิตและการย่อยได้ของโปรตีน พลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้ และเยื่อใยที่ไม่ละลายในสารละลายที่เป็นกลางดีกว่าเมื่อเทียบกับเปิดที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์ (Kang et al., 2013) และ การใช้ข้าวเปลือกนั้นสามารถส่งผลกระทบต่อคุณภาพเนื้อของสัตว์ปีก เนื่องจากสัตว์ปีกไม่สามารถสังเคราะห์เม็ดสีขึ้นได้เอง เช่น แชนโทฟิลล์ (xanthophyll) หรือแคโรทีนอยด์ (carotenoid) แต่สามารถได้รับจากอาหารที่กินเข้าไป ดังนั้นเมื่อใช้ข้าวเปลือกเป็นส่วนผสมในอาหารสัตว์ปีกจึงควรศึกษาการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพเนื้อในด้านการเปลี่ยนแปลงของสีเนื้อที่อาจส่งผลต่อการตัดสินใจเลือกซื้อของผู้บริโภค โดยพบว่าเนื้ออกของห่านที่เลี้ยงด้วยข้าวเปลือกมีค่าความเป็นสีเหลืองต่ำและสีแดงสูง ($P < 0.05$) (Yu et al., 2022) จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาผลของการใช้ข้าวเปลือกที่เสริมด้วยเอนไซม์ต่อการย่อยได้ ประสิทธิภาพการผลิต คุณภาพซาก และคุณภาพเนื้อของไก่เนื้อ

2.12.3 รำข้าว

ผลิตภัณฑ์จากข้าวทั้งเมล็ดจะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับกระบวนการสีข้าว โดยการสีข้าวจากข้าวเปลือก (paddy rice) ทั้งเมล็ดจะได้ส่วนประกอบหลัก 2 ส่วน ได้แก่ เปลือกข้าว และข้าวกล้อง ซึ่งเกิดจากกระบวนการสีเพื่อแยกเปลือกออกจากเมล็ดข้าว และเมื่อนำข้าวกล้องมาผ่านกระบวนการขัดสีทำให้ได้ผลพลอยได้ออกมาเป็นข้าวขาวและรำข้าว (ภาพที่ 2.15) โดยมีสารอาหารหลักของข้าวอยู่ที่ข้าวกล้องและข้าวขาวที่มีคาร์โบไฮเดรต (70 ถึง 90 เปอร์เซ็นต์) โปรตีน (7 ถึง 8 เปอร์เซ็นต์) และไขมัน (1 ถึง 2 เปอร์เซ็นต์) ซึ่งคาร์โบไฮเดรตส่วนใหญ่เป็นแป้ง (Marsono and Topping, 1993; Saleh et al., 2019a) นอกจากนี้พลังงานรวมของข้าวกล้องและข้าวขาวจะอยู่ที่ประมาณ 3,700 กิโลแคลอรี/กิโลกรัม ข้าวขาวมีสารอาหารที่ย่อยได้สูงและมีเส้นใยต่ำเมื่อเทียบกับผลิตภัณฑ์ข้าวชนิดอื่น ๆ โดยข้าวกล้องมีคาร์โบไฮเดรตต่ำกว่าเมื่อเทียบกับข้าวขาว แต่มีโปรตีน ไขมัน และวิตามินที่สูง เนื่องจากมีรำข้าวและจมูกข้าวเป็นส่วนประกอบอยู่ด้วยทำให้มีคาร์โบไฮเดรต (35 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์) โปรตีน (10 ถึง 15 เปอร์เซ็นต์) และไขมัน (15 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์) และยังมีวิตามินและแร่ธาตุ โดยเฉพาะในกลุ่มของวิตามินบีและฟอสเฟต (Saleh et al., 2019a) อย่างไรก็ตามพบ NSP จำนวนมากเป็นส่วนประกอบในรำข้าว ซึ่งสัตว์กระเพาะเดี่ยวสามารถย่อยได้ยาก โดยข้าวขาวเป็นคาร์โบไฮเดรตที่ย่อยได้ง่ายซึ่งมีเส้นใยต่ำและมีสารอาหารที่ย่อยได้สูงเมื่อเทียบกับข้าวโพด (Bray, 1943) อย่างไรก็ตามการใช้ข้าวขาวนั้นมีต้นทุนที่สูงเนื่องจากกระบวนการสีข้าวและสารอาหารบางชนิด เช่น วิตามิน และกรดไขมัน สามารถถูกทำลายได้ด้วยกระบวนการสี ในทางกลับกันข้าวเปลือกมีต้นทุนการผลิตต่ำแต่มีเส้นใยสูง ด้วยเหตุนี้ข้าวกล้องและผลพลอยได้จากการสีข้าว เช่น รำข้าว อาจเป็นตัวเลือกที่คุ้มค่ากว่า (Kim et al., 2021b)



ภาพที่ 2.15 ผลิตรภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการสีข้าวเปลือก

ที่มา: Kim et al. (2021b)

รำข้าว (rice bran) ยังคงเป็นส่วนผสมที่มีราคาถูกกว่าข้าวโพดและเป็นวัตถุดิบทางเลือกที่สามารถใช้ทดแทนข้าวสาลีหรือข้าวโพดได้ โดยมีโปรตีน ไขมัน และแป้ง (14.32, 16.76 และ 14.79 เปอร์เซ็นต์) และมีพลังงานสูงถึง 2,775 กิโลแคลอรี/กิโลกรัม (ตารางที่ 2.6)

อย่างไรก็ตาม Martin et al. (1998) พบว่าอัตราการเจริญเติบโตและการแลกเนื้อของลูกเป็ดลดลงเมื่อมีการใช้รำข้าวเป็นส่วนประกอบในอาหาร เนื่องจากรำข้าวมีปัจจัยต้านโภชนาการที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของลูกเป็ด เช่น สารยับยั้งทริปซิน (Benedito and Barber, 1978) เบต้ากลูแคน (Kaur et al., 2011) เซลลูโลสที่ไม่ละลายน้ำ และเฮมิเซลลูโลสในระดับสูง (Shaheen et al., 2015) และมีเส้นใยที่ละลายน้ำได้เป็นส่วนประกอบ 5 เปอร์เซ็นต์ โดยปัจจัยต้านโภชนาการเหล่านี้จะส่งผลเสียต่อประสิทธิภาพการผลิตของสัตว์ปีกเนื่องจากมีเส้นใยสูง (33 ถึง 40 เปอร์เซ็นต์) (Tahir et al., 2002) และอุดมไปด้วยเฮมิเซลลูโลสที่มีอะราบิโนไซแลนที่แตกแขนงสูง โดยฤทธิ์ต้านโภชนาการของอะราบิโนไซแลน คือ การลดการใช้ประโยชน์ของสารอาหาร ซึ่งส่งผลให้สัตว์เกิดการเจริญเติบโตที่ช้าลง (Odetallah et al., 2002) เส้นใยจะไปลดความสามารถในการย่อยได้ของสารอาหารต่าง ๆ จากปกติที่ไก่เนื้อไม่สามารถผลิตเอนไซม์เพื่อใช้ย่อยเส้นใยได้อย่างมีประสิทธิภาพอยู่แล้ว (Kras et al., 2013) โดยมีรายงานการแนะนำการใช้รำข้าวในอาหารของไก่เนื้อที่ระดับ 10 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามที่ระดับ 10 เปอร์เซ็นต์ พบว่าไก่เนื้อมีประสิทธิภาพการ

ใช้อาหารที่ลดลงและที่ระดับ 20 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลทำให้มีการเจริญเติบโตที่ลดลง (Gallinger et al., 2004)

ตารางที่ 2.6 คุณค่าทางโภชนาของรำข้าว

ส่วนประกอบ (%)	รำข้าว
วัตถุแห้ง	87.95
โปรตีนรวม	14.32
ไขมัน	16.76
เยื่อใยหยาบ	7.20
เถ้า	7.97
แป้ง	14.79
น้ำตาลซูโครส	9.00
พลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้ (kcal/kg)	2,775

ที่มา: Deniz et al. (2007)

2.12.4 กากถั่วเหลือง

ถั่วเหลือง เป็นพืชตระกูลถั่วที่นิยมนำมาใช้เป็นส่วนประกอบในสูตรอาหารสัตว์ กระเพาะเคี้ยวมากที่สุดในโลก เนื่องจากถั่วเหลืองไม่เพียงแต่เป็นแหล่งของไขมันคุณภาพดี แต่ถั่วเหลืองยังอุดมไปด้วยโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตที่สูง โดยโปรตีนในถั่วเหลืองมีกรดอะมิโนที่สมดุลและย่อยได้สูง อย่างไรก็ตามถั่วเหลืองมีคาร์โบไฮเดรตที่ย่อยได้ยากเป็นองค์ประกอบอยู่ด้วย

กากถั่วเหลืองเป็นแหล่งโปรตีนหลักในอาหารสัตว์ปีก โดยกากถั่วเหลืองได้มาจากการนำถั่วเหลืองมาผ่านกระบวนการสกัดน้ำมันออกและได้ส่วนของกากถั่วเหลืองออกมา กากถั่วเหลืองมีโปรตีนประมาณ 48 เปอร์เซ็นต์ และไขมันประมาณ 2.5 เปอร์เซ็นต์ สัตว์กระเพาะเคี้ยวสามารถย่อยกากถั่วเหลืองได้ดีและย่อยไลซีนได้สูงถึง 91 เปอร์เซ็นต์ และมีเส้นใยหยาบต่ำกว่าอาหารจากเมล็ดพืชน้ำมันชนิดอื่น ๆ จึงทำให้กากถั่วเหลืองจัดเป็นแหล่งโปรตีนที่สำคัญสำหรับสัตว์กระเพาะเคี้ยว (Willis, 2003) อย่างไรก็ตามกากถั่วเหลืองมีสารต้านโภชนาที่ทนต่อความร้อนสูง เช่น แอนติเจน (antigen) ในเมล็ดถั่วเหลือง โอลิโกแซคคาไรด์ และ NSP โดยคาร์โบไฮเดรตในกากถั่วเหลืองจะถูกย่อยไม่สมบูรณ์โดยจุลินทรีย์ในลำไส้ใหญ่ในสัตว์กระเพาะเคี้ยว (Kerley and Allee, 2003) ซึ่งอาจส่งผลกระทบต่อการใช้ประโยชน์และการดูดซึมสารอาหาร ประสิทธิภาพการใช้ประโยชน์และ

การเผาผลาญพลังงาน รวมถึงอัตราการเจริญเติบโตของไก่เนื้อ ทั้งจาก NSP ชนิดที่สามารถละลายน้ำได้และไม่สามารถละลายน้ำได้ที่พบในกากถั่วเหลือง (ตารางที่ 2.7)

ตารางที่ 2.7 โพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในส่วนที่ละลายน้ำได้และละลายน้ำไม่ได้ของข้าวโพดและกากถั่วเหลือง

วัตถุดิบ	อะราบินอส (%)	ไซโลส (%)	อะราบินโนไซแลน (%)	เบต้ากลูแคน (%)	เซลลูโลส (%)	NSP รวม (%)
ข้าวโพด	2.0 (0.3)	2.2 (0.2)	4.7 (0.5)	0.1	2.0	9.0 (1.1)
กากถั่วเหลือง	1.7 (0.9)	1.7 (0.2)	0.4	0.7	6.2	21.7 (6.3)

ค่าในวงเล็บแสดงถึงเปอร์เซ็นต์ของ NSP ส่วนที่สามารถละลายน้ำได้ และค่าที่อยู่นอกวงเล็บแสดงถึงเปอร์เซ็นต์ของ NSP ส่วนที่ไม่สามารถละลายน้ำได้

ที่มา: ดัดแปลงจาก Baker et al. (2021)

2.12.5 กากเนื้อในเมล็ดปาล์ม

กากเนื้อในเมล็ดปาล์ม (palm kernel meal; PKM) เป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมเกษตร เป็นอาหารสัตว์ที่หาได้ในท้องถิ่นและมีราคาไม่แพงในหลายประเทศ กากเนื้อในเมล็ดปาล์มผลิตโดยการสกัดน้ำมันจากเมล็ดในปาล์ม โดยใช้การสกัดหรือใช้ตัวทำละลายเพื่อสกัดน้ำมันเมล็ดในปาล์มออก การใช้ PKM ในอาหารไก่เนื้อนั้นมีข้อจำกัด โดยพบว่าการใช้ PKM ส่งผลทำให้การเจริญเติบโตของไก่เนื้อลดลง และสามารถรวม PKM ไว้ในอาหารไก่เนื้อได้สูงสุด 40 เปอร์เซ็นต์ (Sundu et al., 2006) อย่างไรก็ตามกากเนื้อในเมล็ดปาล์มมีโปรตีน พลังงาน และมีใยอาหารอยู่สูง โดยมีองค์ประกอบของสารอาหารและลักษณะทางกายภาพจากวิธีการสกัดน้ำมันที่แตกต่างกันแสดงไว้ในตารางที่ 2.5

เนื่องจากกากเนื้อในเมล็ดปาล์มมีใยอาหารสูง โดยมีโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้ง ชนิดเบต้าแมนแนนเป็นส่วนประกอบหลักในเส้นใยของ PKM และยังมีกรดอะมิโนที่จำเป็นในระดับต่ำ Abdollahi et al. (2015) รายงานว่าเกือบ 96 เปอร์เซ็นต์ ของ NSP ทั้งหมด ที่พบใน PKM อยู่ในรูปของ NSP ที่ไม่ละลายน้ำและแมนแนนที่พบอยู่ในเส้นใยของ PKM ไม่สามารถถูกย่อยในระบบทางเดินอาหารของสัตว์ปีกได้ เนื่องจากขาดเอนไซม์ที่ย่อยสลายแมนแนน ดังนั้นการให้อาหารที่มีส่วนผสมของ PKM ที่มีเส้นใยสูง อาจทำให้การตอบสนองต่อการเจริญเติบโตของไก่เนื้อลดลง และพบว่าเส้นใยใน PKM มีโครงสร้างที่ซับซ้อน โดยพบแมนแนน (รวมทั้งกลูโคแมนแนนและกาแลคโตแมนแนน) เป็น

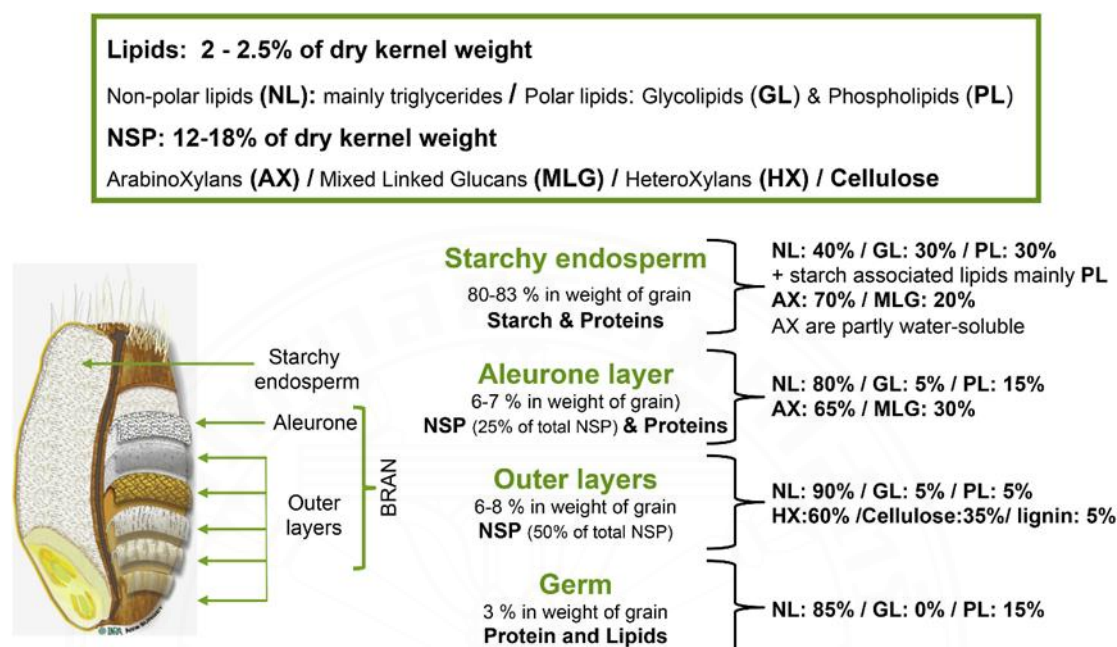
องค์ประกอบหลัก และยังพบเซลล์ลูโลส กลูคูโรโนไซด์แลน และอาราบินไซด์แลนประกอบอยู่ด้วย (Dusterhoft et al., 1991; Knudsen, 1997)

พบว่าการใช้กากเนื้อในเมล็ดปาล์มในระดับ 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์ ในอาหารไก่เนื้อระยะเริ่มต้นและระยะกลาง ไม่ส่งผลกระทบต่ออย่างมีนัยสำคัญต่อการเพิ่มน้ำหนักตัว การบริโภคอาหาร สุขภาพลำไส้ และอัตราการเสียชีวิตของไก่เนื้อ แต่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการใช้อาหาร (Yaophaakdee et al., 2018) นอกจากนี้ Iyayi et al. (2005) รายงานว่าการรวม PKM ในสูตรอาหารไก่เนื้อที่ระดับสูงส่งผลทำให้ไขมันในช่องท้องของไก่เนื้อลดลง ($P < 0.05$) เนื่องจาก PKM มีเส้นใยสูงและการใช้ในปริมาณที่สูงอาจลดประสิทธิภาพการย่อยและการดูดซึมสารอาหารของไก่เนื้อ ส่งผลทำให้พลังงานและสารอาหารไม่ถูกใช้ประโยชน์ จึงทำให้ไม่เกิดการสะสมของไขมันในช่องท้อง และการรวม PKM ในอาหารไก่เนื้อที่ระดับ 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้น้ำหนักตัว น้ำหนักซาก และเปอร์เซ็นต์เนื้ออกเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) (นิยมเดชา, 2558) อย่างไรก็ตาม การเสริมเอนไซม์ส่งเสริมการเจริญเติบโตของไก่เนื้อ และทำให้สามารถใช้ PKM เป็นส่วนประกอบในสูตรอาหารไก่เนื้อได้สูงขึ้น โดยไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อ โดยจากการศึกษาผลของการรวม PKM ทั้ง 4 ระดับ (0, 8, 16 และ 24 เปอร์เซ็นต์) ที่ได้รับการเสริมเอนไซม์รวมผสม (เบต้าแมนนาเนส โซลนาเนส อะไมเลส โปรตีเอส เซลลูเลส และเบต้ากลูคาเนส) ในอาหารไก่เนื้อ พบว่าสามารถรวม PKM ในสูตรอาหารไก่เนื้อได้สูงถึง 16 เปอร์เซ็นต์ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโต (Abdollahi et al., 2016) เนื่องจากความซับซ้อนของใยอาหารใน PKM ทำให้การใช้เอนไซม์หลายชนิดรวมกันอาจช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสารอาหารได้มากขึ้น

2.12.6 ข้าวสาลี

ข้าวสาลี (wheat) เป็นหนึ่งในธัญพืชที่ถูกนำมาใช้เพื่อการบริโภคของมนุษย์และสัตว์มากที่สุด (Onipe et al., 2015) โดยเฉพาะถูกนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในอาหารสัตว์ปีก เนื่องจากข้าวสาลีมีปริมาณแป้งสูง (ประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักแห้ง) มีใยอาหารต่ำ และสามารถย่อยได้ดีในสัตว์กระเพาะเดี่ยว เช่น สัตว์ปีก ข้าวสาลีให้พลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้สูงถึง 3,460 กิโลแคลอรี/กิโลกรัม ซึ่งถือว่าเป็นระดับพลังงานที่เหมาะสมสำหรับสัตว์ปีก ในด้านของโปรตีนข้าวสาลีมีโปรตีนประมาณ 13 ถึง 15 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสูงกว่าข้าวโพดและข้าวบาร์เลย์ (Sansoucy et al., 1985) ดังนั้นจึงทำให้ข้าวสาลีสามารถใช้ทดแทนข้าวโพดในสูตรอาหารไก่เนื้อได้ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโต และ Liu et al. (2024) พบว่า การใช้ข้าวสาลีทดแทนข้าวโพดในปริมาณ 55 เปอร์เซ็นต์ ในอาหารของไก่เนื้อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อในวันที่ 21 อย่างไรก็ตามข้าวสาลีมีองค์ประกอบทางเคมีและคุณค่าทางโภชนาการที่แตกต่างกันไป ตามโครงสร้างของเมล็ด โดยเมล็ดข้าวสาลีประกอบไปด้วยโครงสร้างหลัก 3 ส่วน ได้แก่ เอนโดสเปิร์ม

จมูกข้าวสาลี และรำข้าวสาลี ซึ่งรำข้าวสาลีสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ชั้น ได้แก่ ชั้นอะลูโรน และชั้นเปลือกนอก ดังแสดงในภาพที่ 2.16



ภาพที่ 2.16 ส่วนประกอบของไขมันและใยอาหารในเมล็ดข้าวสาลี

ที่มา: Shewry and Jones (2020)

เอนโดสเปิร์ม (starchy endosperm) เป็นส่วนที่มีปริมาณมากที่สุดของเมล็ด โดยคิดเป็น 80 ถึง 83 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักแห้งทั้งหมดของเมล็ด ซึ่งเป็นส่วนที่มีหน้าที่หลักในการเก็บสะสมแป้งและโปรตีนไว้ในผนังเซลล์ นอกจากนี้ยังพบว่ามีไขมันเป็นส่วนประกอบอยู่สูง ซึ่งส่วนใหญ่เป็นไขมันที่ไม่มีขั้ว (non-polar lipids; NL) ชนิดไตรกลีเซอไรด์กว่า 40 เปอร์เซ็นต์ ของไขมันทั้งหมด และพบไขมันที่มีขั้ว ได้แก่ โกลโคลิปิด (glycolipids; GL) และฟอสโฟลิปิด (phospholipids; PL) พบในสัดส่วนที่เท่ากันประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ และพบโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งเป็นส่วนประกอบอยู่ในผนังเซลล์ โดยส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยอะราบิโนไซแลนทั้งชนิดที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ และพบกลูแคนเป็นส่วนประกอบประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์

ชั้นอะลูโรน (aleurone layer) เป็นส่วนที่ติดอยู่กับเอนโดสเปิร์ม ซึ่งคิดเป็นปริมาณ 6 ถึง 7 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักแห้งทั้งหมดของเมล็ด เป็นส่วนที่มีหน้าที่ในการเก็บสะสมโปรตีนไว้ในผนังเซลล์ โดยพบองค์ประกอบของไขมันชนิดไตรกลีเซอไรด์สูงถึง 80 เปอร์เซ็นต์ ไขมันชนิดโกลโคลิปิด 5 เปอร์เซ็นต์ และฟอสโฟลิปิด 15 เปอร์เซ็นต์ และพบโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งสูง

ถึง 25 เปอร์เซ็นต์ ของโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งทั้งหมดที่พบในเมล็ดข้าวสาลี โดยส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยอะราบิโนไซแลนกว่า 65 เปอร์เซ็นต์ และพบกลูแคนเป็นส่วนประกอบประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์

ชั้นเปลือกนอก (outer layers) เป็นส่วนชั้นนอกสุดของเมล็ดที่ประกอบเข้าด้วยกันเป็นเปลือกหุ้มเมล็ด ซึ่งคิดเป็นปริมาณ 6 ถึง 8 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักแห้งทั้งหมดของเมล็ด โดยเป็นส่วนที่พบโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งสูงที่สุดถึง 50 เปอร์เซ็นต์ ของโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งทั้งหมดที่พบในเมล็ดข้าวสาลี โดยส่วนใหญ่ประกอบไปด้วยเฮเทอโรไซแลน (heteroxylan; HX) กว่า 60 เปอร์เซ็นต์ และพบเซลลูโลสและลิกนินประมาณ 35 และ 5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

จมูกข้าวสาลี (wheat germ) เป็นส่วนหนึ่งของเมล็ดข้าวสาลีที่อยู่ตรงปลายเมล็ด ซึ่งคิดเป็นปริมาณน้อยที่สุดเพียง 3 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักแห้งทั้งหมดของเมล็ด แต่ถือว่าเป็นส่วนสำคัญที่มีการเก็บสะสมโปรตีนและไขมันที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของข้าวสาลี โดยมีองค์ประกอบของไขมันชนิดไตรกลีเซอไรด์สูงถึง 85 เปอร์เซ็นต์ และฟอสโฟลิปิดประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์

อย่างไรก็ตามจากปริมาณของอะราบิโนไซแลน เบต้า-กลูแคน และเซลลูโลส ซึ่งเป็นโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งที่พบมากที่สุดในเมล็ดข้าวสาลี ดังแสดงในตารางที่ 2.8 ทำให้การใช้ข้าวสาลีในสูตรอาหารไก่เนื้ออาจได้รับผลกระทบจาก NSP เหล่านี้ เนื่องจากความสามารถในการเพิ่มความหนืดในระบบทางเดินอาหารและขัดขวางการทำงานของเอนไซม์ย่อยอาหาร จึงมีการศึกษาการเสริมเอนไซม์ เช่น เอนไซม์ไซลานเนส เบต้า-กลูคาเนส และเซลลูเลส ในสูตรอาหารไก่เนื้อที่มีข้าวสาลีเป็นส่วนประกอบ เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อ โดย Kiarie et al. (2014) ทำการศึกษาผลของการเสริมเอนไซม์ไซลานเนสในอาหารสูตรข้าวสาลีเปรียบเทียบกับอาหารสูตรข้าวโพด พบว่าการเสริมเอนไซม์ไซลานเนสในอาหารสูตรข้าวสาลีช่วยเพิ่มน้ำหนักตัวและปรับปรุงอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัวของไก่เนื้อได้ดีกว่าเมื่อเทียบกับกลุ่มอาหารสูตรข้าวโพดที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์ ($P < 0.01$) เนื่องจากข้าวโพดมีปริมาณ NSP ทั้งหมดต่ำกว่า และ Vargas et al. (2024) พบว่าการเสริมเอนไซม์ไซลานเนสที่ระดับ 4,800 หน่วย/กิโลกรัม ในอาหารที่มีส่วนประกอบของข้าวสาลี ทำให้ไก่เนื้อที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำกว่ากลุ่มควบคุม 100 กิโลแคลอรี/กิโลกรัม มีน้ำหนักตัวและอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัวที่ไม่แตกต่างเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุมที่ได้รับการเสริมด้วยเอนไซม์ไซลานเนส ($P > 0.05$) และดีกว่าเมื่อเทียบกับกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำแต่ไม่ได้รับการเสริมด้วยเอนไซม์ไซลานเนส ($P < 0.05$) และพบว่าการเสริมไซลานเนสทุกระดับ (1,200, 2,400 และ 4,800 หน่วย/กิโลกรัม) ช่วยลดความหนืดในส่วนของลำไส้เล็กส่วนปลายอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.01$) เมื่อเทียบกับกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานปกติและกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์ไซลานเนส และ Lei et al. (2017) การเสริมเอนไซม์รวม (ประกอบไปด้วยเอนไซม์ไซลานเนส

เบต้า-กลูคาเนส เซลลูเลส แมนนาเนส เพคติเนส และอะไมเลส) ในสูตรอาหารที่มีส่วนประกอบของ ข้าวโพด ข้าวสาลี และกากถั่วเหลือง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อดีขึ้น โดยเฉพาะ ในช่วงวันที่ 7 ถึง 21, 21 ถึง 35 และ 1 ถึง 35 วัน ซึ่งพบว่าการเพิ่มระดับของเอนไซม์สัมพันธ์กับการ เพิ่มขึ้นของน้ำหนักตัวและการปรับปรุงอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัวอย่างมีนัยสำคัญทาง สถิติ ($P < 0.05$)

ตารางที่ 2.8 โพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในส่วนที่ละลายน้ำได้และละลายน้ำไม่ได้ของข้าวสาลีและรำ ข้าวสาลี

วัตถุดิบ	อะราบิโนไซแลน (%)	เบต้ากลูแคน (%)	เซลลูโลส (%)	NSP รวม (%)
ข้าวสาลี	6.6 (1.7)	0.5 (0.4)	2.3	9.8 (2.3)
รำข้าวสาลี	26.0 (2.6)	(0.4)	10.8	38.4 (3.2)

ค่าในวงเล็บแสดงถึงเปอร์เซ็นต์ของ NSP ส่วนที่สามารถละลายน้ำได้ และค่าที่อยู่นอกวงเล็บแสดงถึง เปอร์เซ็นต์ของ NSP ส่วนที่ไม่สามารถละลายน้ำได้

ที่มา: ดัดแปลงจาก Ravindran and Amerah (2014) และ Englyst (1989)

2.12.7 รำข้าวสาลี

รำข้าวสาลี (wheat bran; WB) เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการขัดสีข้าวสาลี ทำให้ได้ผลพลอยได้ออกมาเป็นรำข้าวสาลี ซึ่งรำข้าวสาลีเป็นวัตถุดิบอาหารสัตว์ที่มีศักยภาพในการ นำมาใช้เพื่อเพิ่มปริมาณโปรตีนในสูตรอาหารไก่เนื้อ เนื่องจากมีปริมาณโปรตีนที่สูง โดยรำข้าวสาลี ประกอบด้วยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้ง (43 ถึง 60 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักแห้งทั้งหมดของเมล็ด) แป้ง (11 ถึง 24 เปอร์เซ็นต์) โปรตีน (14 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์) ไขมัน (3 ถึง 4 เปอร์เซ็นต์) และแร่ธาตุ (3 ถึง 8 เปอร์เซ็นต์) (Prosky et al., 1988; Yan et al., 2015; Li et al., 2017; Sonkar et al., 2021) อย่างไรก็ตามแม้รำข้าวสาลีจะอุดมไปด้วยโปรตีนที่สูง แต่รำข้าวสาลียังคงมีข้อจำกัดในการใช้ งาน เนื่องจากมีปริมาณโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งสูงเช่นกัน ซึ่งประกอบไปด้วยอะราบิโนไซแลนและ เซลลูโลสเป็นหลัก และพบเบต้า-กลูแคนเพียงเล็กน้อย ดังแสดงในตารางที่ 2.8 จากการศึกษาของ Maniraguha et al. (2024) พบว่าการเสริมเอนไซม์ไซเลนเนสที่ระดับ 3,000 หน่วย/กิโลกรัม ในสูตร อาหารที่มีรำข้าวสาลีเป็นส่วนประกอบ ทำให้สามารถใช้ข้าวสาลีเป็นวัตถุดิบในอาหารไก่เนื้อได้ถึง 8 เปอร์เซ็นต์ และส่งผลทำให้มีอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวันที่สูงกว่าเมื่อเทียบกับกลุ่มที่ใช้ข้าวโพด ($P < 0.05$) และจากการศึกษาของ Idan et al. (2023) พบอิทธิพลร่วมระหว่างระดับการใช้รำข้าวสาลี

(0, 4, 8 และ 12 เปอร์เซ็นต์) และการเสริมหรือไม่เสริมเอนไซม์รวม (ประกอบไปด้วยเอนไซม์ไซลาเนส เบต้า-กลูคาเนส และไฟเตส) ต่อน้ำหนักตัว ($P=0.032$) โดยพบว่าการเสริมเอนไซม์รวมในสูตรอาหารที่มีส่วนประกอบของรำข้าวสาลีช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อในด้านของน้ำหนักตัวในช่วงอายุ 7 ถึง 42 วัน อย่างไรก็ตามไม่พบปฏิสัมพันธ์ระหว่างรำข้าวสาลีและการเสริมเอนไซม์รวมต่อน้ำหนักตัวในช่วงอายุ 7 ถึง 14 วัน ($P=0.231$) และ 7 ถึง 28 วัน ($P=0.493$) และพบว่าการเสริมเอนไซม์รวมช่วยปรับปรุงอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัวในช่วงอายุ 7 ถึง 42 วัน ($P<0.05$)

2.13 การวัดการย่อยได้ในหลอดทดลอง

การศึกษาโภชนาการในไก่เนื้อมักศึกษาความสามารถในการย่อยได้ในร่างกายของสัตว์ซึ่งต้องใช้สัตว์ทดลองในการศึกษา และมีต้นทุนและระยะเวลาที่ต้องใช้มากน้อยแตกต่างกันไป โดยการใช้วิธีจำลองการย่อยในหลอดทดลองที่เป็นการเลียนแบบสภาวะการย่อยได้ในร่างกายของสัตว์เป็นอีกหนึ่งตัวเลือกที่ได้รับความนิยม เนื่องจากใช้ระยะเวลาในการทดลองที่เร็วกว่าการทดลองในสัตว์ อย่างไรก็ตามการทดลองในหลอดทดลองควรอยู่บนพื้นฐานของความน่าเชื่อถือของการทดลอง เช่น ผลลัพธ์ที่น่าเชื่อถือและแม่นยำ สามารถทำซ้ำได้และมีผลลัพธ์ที่ไม่แตกต่างกัน ใช้ระยะเวลาในการทดลองที่เร็วกว่าการทดลองในสัตว์ และใช้ต้นทุนที่ต่ำกว่า

การย่อยได้ในหลอดทดลองให้ผลลัพธ์ระหว่างอาหารที่สัตว์ได้รับหรือส่วนผสมที่มีอยู่ในอาหารสัตว์ต่าง ๆ ต่อการทำงานของกรย่อยอาหารหรือจุลินทรีย์ในลำไส้ โดยมีปัจจัยที่ส่งผลการจำลองการย่อยได้ในหลอดทดลอง เช่น อุณหภูมิของร่างกาย เวลาในการย่อย เอนไซม์ และ pH อย่างไรก็ตามการจำลองการย่อยอาหารจะเริ่มตั้งแต่ปากตลอดจนการทำงานของระบบทางเดินอาหาร (การย่อยและการดูดซึม) หรืออาจจำลองในส่วนของลำไส้ใหญ่ส่วนต้น (การหมักของจุลินทรีย์) กระบวนการทั้งหมดนี้มีความซับซ้อนและเกี่ยวข้องกับขั้นตอนการเผาผลาญของร่างกายหลายขั้นตอน ดังนั้นวิธีการที่ใช้ควรเป็นไปตามมาตรฐานสากลเพื่อให้สามารถเปรียบเทียบผลลัพธ์ในการทดลองที่เกี่ยวข้องกับการย่อยและการดูดซึมสารอาหารต่าง ๆ ของสัตว์ เพื่อนำไปใช้พัฒนาสูตรอาหารสัตว์ในการช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิต โดยวิธีที่มีอยู่ในปัจจุบันยังขาดขั้นตอนการดูดซึมในลำไส้เล็กที่เป็นข้อมูลที่มีความสำคัญต่อการผลิต ซึ่งส่งต่อการเจริญเติบโตและสุขภาพที่ดีของสัตว์ โดยสรุปการจำลองการย่อยได้ในหลอดทดลองช่วยลดต้นทุนในการทดสอบสูตรอาหารสัตว์ใหม่ ๆ และช่วยพัฒนาสูตรอาหารของสัตว์ให้เกิดประโยชน์สูงสุดตามความต้องการของสัตว์ (Mota de Carvalho et al., 2020)

2.14 ผลของการเสริมเอนไซม์ในอาหารต่อประสิทธิภาพการผลิตของไก่เนื้อ

Chen et al. (2023) ศึกษาผลของการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้ง ชนิดรวม 200 มิลลิกรัม/กิโลกรัม (เบต้าแมนนาเนส เบต้ากลูคาเนส ไซลานเนส และเซลลูเลส) ในอาหารไก่เนื้อที่มีระดับพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้แตกต่างกัน ผลการศึกษาพบว่าการลดระดับพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้ในอาหารพร้อมกับการเสริมเอนไซม์ NSP ไม่ส่งผลกระทบต่อภาระเจริญเติบโตของไก่เนื้ออย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุมที่ได้รับอาหารที่มีพลังงานในระดับปกติ (3,000 กิโลแคลอรี/กิโลกรัม) แต่พบว่าไขมันช่องท้องของไก่เนื้อในกลุ่มที่มีการลดพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้ลง 100 กิโลแคลอรี/กิโลกรัม ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ และพบว่าในกลุ่มของไก่เนื้อที่ได้รับพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้เท่ากับกลุ่มควบคุมและมีการเสริมเอนไซม์ NSP พบว่ามีไขมันช่องท้องเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$)

Ko et al. (2021) ศึกษาผลของการเสริมเอนไซม์คืออกเทล (แมนนาเนส เบต้ากลูคาเนส และไซลานเนส) ที่ระดับ 0, 0.2, 0.3 และ 20 กรัม/กิโลกรัม ต่อการเจริญเติบโต การย่อยได้ของสารอาหาร และความเข้มข้นของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวในลำไส้เล็กส่วนปลายและลำไส้ใหญ่ส่วนต้นของไก่เนื้อที่เลี้ยงด้วยอาหารที่มีข้าวสาลีเป็นส่วนประกอบ 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์ ในระยะเริ่มต้นและระยะสุดท้ายตามลำดับ โดยการเสริมเอนไซม์ในอาหารลดอัตราการเปลี่ยนอาหารและปรับปรุงความสามารถในการย่อยได้ของลำไส้เล็กในส่วนของวัตถุแห้ง โปรตีน และแป้งที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ และมีการย่อยได้โดยรวมของระบบทางเดินอาหารในส่วนของวัตถุแห้งและพลังงานเพิ่มขึ้น และพบว่าความเข้มข้นของอาราบินอส ไซโลส แมนโนส และกลูโคสในลำไส้เล็กส่วนปลายเพิ่มขึ้น ($P<0.01$) และความเข้มข้นของอาราบินอส ไซโลส แมนโนส และกาแล็กโทสในลำไส้ใหญ่ส่วนต้นเพิ่มขึ้น ($P<0.05$) โดยสรุปการเสริมเอนไซม์คืออกเทลช่วยเพิ่มการใช้ประโยชน์ของสารอาหารในไก่เนื้อได้อย่างมีประสิทธิภาพและไม่ส่งผลกระทบจากการเสริมในปริมาณสูง

Morgan et al. (2022a) ศึกษาผลของการเสริมเอนไซม์ในอาหารของไก่เนื้อที่เลี้ยงด้วยอาหารเชิงพาณิชย์ เพื่อตรวจสอบการย่อยได้ของโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้ง ในระบบทางเดินอาหารของไก่เนื้อที่เลี้ยงด้วยวัตถุดิบอาหารสัตว์ที่แตกต่างกัน 4 ชนิด (ข้าวบาร์เลย์ ข้าวโพด ข้าวฟ่าง และข้าวสาลี) โดยมีการเสริมเอนไซม์ที่แตกต่างกัน 3 แบบ คือ ไซลานเนสในระดับที่แนะนำใช้ในเชิงพาณิชย์ (ระดับ 16,000 BXU/กิโลกรัม) ไซลานเนสเพิ่มขึ้นสองเท่าจากที่แนะนำใช้ในเชิงพาณิชย์ (ระดับ 32,000 BXU/กิโลกรัม) และเอนไซม์รวม (ไซลานเนส เบต้ากลูคาเนส เซลลูเลส เพคตินเนส แมนนาเนส กาแลกตาเนส และอะราบินอฟูราโนซิเดส ในระดับที่แนะนำในเชิงพาณิชย์) พบว่าการเสริมไซลานเนสเพิ่มขึ้นสองเท่าและเอนไซม์รวม ช่วยปรับปรุงอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัว การย่อยได้ของ

NSP และปริมาณความชื้นของมูล เมื่อเปรียบเทียบกับ การเสริมโซลานีสตามที่แนะนำในเชิงพาณิชย์ และพบว่า การเสริมเอนไซม์รวมช่วยปรับปรุงน้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้นและอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็น น้ำหนักตัวของไก่เนื้อที่เลี้ยงด้วยอาหารที่มีข้าวฟ่างเป็นส่วนประกอบ

Saleh et al. (2019b) ศึกษาผลของการเสริมเอนไซม์โซลานีสและอะราบีโนฟูราโนซิ เดสในอาหารที่มีการลดพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้ลงต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโต ลิพิดเปอร์ ออกซิเดชัน องค์ประกอบของเลือด และการตอบสนองทางภูมิคุ้มกันของไก่เนื้อ โดยแบ่งกลุ่มการ ทดลองออกเป็น 3 กลุ่ม คือ 1) กลุ่มที่ไม่มีการลดพลังงานและไม่มีการเสริมเอนไซม์ 2) กลุ่มที่มีการ ลดพลังงานลง 90 กิโลแคลอรี/กิโลกรัม (จาก 3,000 กิโลแคลอรี/กิโลกรัม) และไม่มีการเสริมเอนไซม์ และ 3) กลุ่มที่มีการลดพลังงานลงและมีการเสริมเอนไซม์ พบว่ากลุ่มไก่เนื้อที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำ มีน้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้นลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) เมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม ในขณะที่ กลุ่มที่ได้รับการเสริมเอนไซม์โซลานีสและอะราบีโนฟูราโนซิเดสพบว่ามีน้ำหนักตัว อัตราการเปลี่ยน อาหารเป็นน้ำหนักตัว และการย่อยได้ของโปรตีนไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) เมื่อ เทียบกับกลุ่มควบคุม และไม่พบความแตกต่างของการกินได้ในทุกกลุ่มการทดลอง

Sanchez et al. (2019) ศึกษาปัจจัยผลของการใช้รำข้าว 11 เปอร์เซ็นต์ และไม่ใช้รำ ข้าวในอาหารไก่เนื้อที่มีส่วนประกอบหลักคือข้าวโพดและถั่วเหลืองกับปัจจัยการเสริมเอนไซม์หลาย ชนิดและไม่เสริมเอนไซม์ (multi-enzyme) ที่ประกอบไปด้วยโซลานีส เบต้ากลูคาเนส อินเวอร์เทส โปรตีเอส เซลลูเลส อะไมเลส และแมนนาเนส พบว่าไม่มีความความสัมพันธ์ของอาหารและเอนไซม์ ต่อการเจริญเติบโตของไก่เนื้อ โดยกลุ่มที่ได้รับการเสริมเอนไซม์พบว่ามีน้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น (961 เทียบกับ 858 กรัม) และอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัว (1.69 เทียบกับ 1.86) ดีกว่าเมื่อเทียบ กับกลุ่มที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์ ($P < 0.01$) และกลุ่มที่ใช้รำข้าวทำให้น้ำหนักตัวที่ลดลง โดยสรุป การเสริมเอนไซม์หลายชนิดร่วมกันช่วยเพิ่มการเจริญเติบโตและการใช้พลังงานของไก่เนื้อ

2.15 ผลของการเสริมเอนไซม์ในอาหารต่อคุณภาพซากและคุณภาพเนื้อของไก่เนื้อ

คุณภาพซากและคุณภาพเนื้อของไก่เนื้อ ถือเป็นปัจจัยสำคัญในการผลิตไม่น้อยไปกว่า คุณภาพการเจริญเติบโต ซึ่งมีผลโดยตรงต่อความพึงพอใจของผู้บริโภคที่ให้ความสำคัญกับลักษณะ ทางกายภาพ รสชาติ และความปลอดภัยของเนื้อสัตว์ โดยมีปัจจัยหลายประการที่ส่งผลกระทบต่อ คุณภาพซากและคุณภาพเนื้อของไก่เนื้อ เช่น สายพันธุ์ การจัดการด้านโภชนาการ และการจัดการ ด้านสิ่งแวดล้อม (Baeza et al., 2022) ตลอดจนกระบวนการหลังการเลี้ยง เช่น วิธีการเชือด การเก็บ รักษา และบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ อย่างไรก็ตามการเสริมเอนไซม์ในอาหารไก่เนื้อเป็นวิธีการหนึ่งที่สามารถ

ปรับปรุงคุณภาพซากและคุณภาพเนื้อของไก่เนื้อได้ โดยเฉพาะในสูตรอาหารที่มีปริมาณโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งเป็นส่วนประกอบอยู่สูง

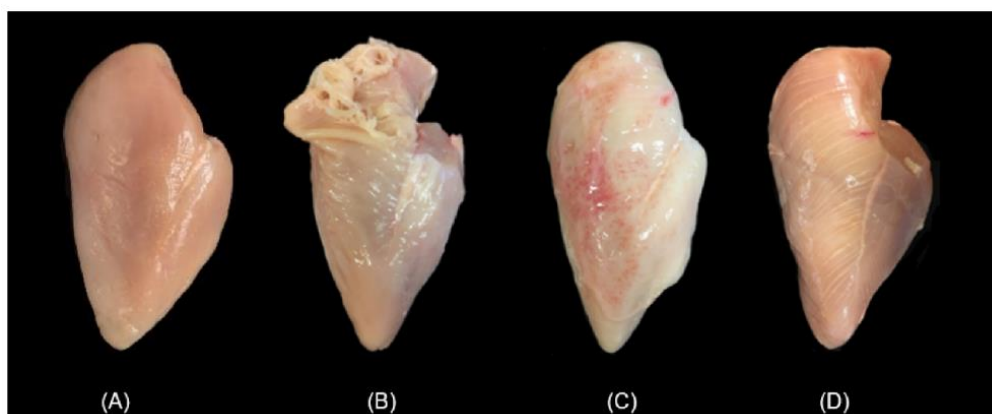
2.15.1 การเสริมเอนไซม์ในอาหารต่อคุณภาพซากของไก่เนื้อ

โพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งที่พบในอาหารสัตว์ส่งผลกระทบต่อคุณภาพซากของไก่เนื้อ ผ่านกลไกที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพการเจริญเติบโตและการใช้ประโยชน์จากสารอาหาร โดยเฉพาะพลังงานและโปรตีน หากไก่เนื้อไม่สามารถย่อย NSP ได้อย่างมีประสิทธิภาพ จะทำให้ไก่เนื้อได้รับพลังงานในอาหารน้อยลง และใช้พลังงานไปกับการดำรงชีพและบำรุงรักษาร่างกายมากกว่าการนำไปใช้เพื่อการสร้างกล้ามเนื้อ อีกทั้ง NSP ยังเพิ่มความหนืดของระบบทางเดินอาหาร ซึ่งเป็นปัจจัยที่อาจส่งผลกระทบต่อการดูดซึมกรดอะมิโน ซึ่งจะส่งผลกระทบโดยตรงต่อคุณภาพซาก (Choct, 1997; Cowieson et al., 2010b) โดยการเสริมเอนไซม์ในอาหารสัตว์ได้รับการพิสูจน์แล้วว่าสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสารอาหารและลดความหนืดในทางเดินอาหาร ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อการปรับปรุงประสิทธิภาพการเจริญเติบโตและน้ำหนักของไก่เนื้อ จากการศึกษาพบว่าการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อย NSP เช่น ไซลานเนสหรือเอนไซม์รวม สามารถปรับปรุงการใช้ประโยชน์จากสารอาหารและพลังงานในอาหารของไก่เนื้อ โดยการลดความหนืดในระบบทางเดินอาหารและเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยและการดูดซึมสารอาหารของไก่เนื้อ ส่งผลทำให้น้ำหนักซากเพิ่มขึ้น สัตส่วนเนื้อแดงดีขึ้น และลดการสะสมของไขมันในช่องท้องและใต้ผิวหนัง (Maniraguha et al., 2024; Cowieson and Bedford, 2009) จากการศึกษาของ Maniraguha et al. (2024) ทำการศึกษาลงของการเสริมเอนไซม์ไซลานเนสที่ระดับ 3,000 หน่วย/กิโลกรัม ในอาหารไก่เนื้อสูตรที่มีรำข้าวสาลีเป็นส่วนประกอบ 3 ระดับ (2, 4 และ 8 เปอร์เซ็นต์) เทียบกับสูตรอาหารที่มีข้าวโพดและกากถั่วเหลืองเป็นส่วนประกอบต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตและคุณภาพซากของไก่เนื้อ พบว่าไก่เนื้อในกลุ่มที่ได้รับอาหารสูตรข้าวโพดและกากถั่วเหลืองที่เสริมด้วยเอนไซม์ไซลานเนส, กลุ่มที่ได้รับอาหารสูตรรำข้าวสาลี 2 เปอร์เซ็นต์ ที่เสริมด้วยเอนไซม์ไซลานเนส และกลุ่มที่ได้รับอาหารสูตรรำข้าวสาลี 4 เปอร์เซ็นต์ ที่เสริมด้วยเอนไซม์ไซลานเนสมีการย่อยได้ของพลังงานในลำไส้เล็กส่วนปลายดีกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) เมื่อเทียบกับกลุ่มที่ใช้อาหารสูตรรำข้าวสาลี 8 เปอร์เซ็นต์ ที่เสริมด้วยเอนไซม์ไซลานเนส ในวันที่ 24 และ 35 ขณะที่กลุ่มที่ได้รับอาหารสูตรข้าวโพดและกากถั่วเหลืองที่เสริมด้วยเอนไซม์ไซลานเนสมีการย่อยได้ของโปรตีนดีที่สุดในวันที่ 24 ซึ่งไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) เมื่อเทียบกับกลุ่มที่ได้รับอาหารสูตรรำข้าวสาลี 4 และ 8 เปอร์เซ็นต์ ที่เสริมด้วยเอนไซม์ไซลานเนส และในส่วนของคุณภาพซากพบว่าไก่เนื้อในกลุ่มที่ใช้อาหารสูตรรำข้าวสาลี 8 เปอร์เซ็นต์ ที่เสริมด้วยเอนไซม์ไซลานเนส มีเปอร์เซ็นต์ไขมันในส่วนน่องติดสะโพกน้อยที่สุด ($P < 0.05$) เมื่อเทียบกับกลุ่มที่

ได้รับอาหารสูตรข้าวโพดและกากถั่วเหลืองในวันที่ 35 และจากการศึกษาของ Alqhtani et al. (2022) พบว่าการเสริมเอนไซม์รวมทำให้ไก่เนื้อมีเปอร์เซ็นต์ซากตัดแต่งเพิ่มขึ้น 1.3 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับกลุ่มที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์ ($P < 0.01$) และการลดระดับพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้ในอาหารลง 60 กิโลแคลอรี/กิโลกรัม ในระยะเริ่มต้น และ 90 กิโลแคลอรี/กิโลกรัม ในระยะกลางและสุดท้ายของการเลี้ยง ส่งผลทำให้ไก่เนื้อมีเปอร์เซ็นต์ไขมันในส่วนของการชั่งลดลง เมื่อเทียบกับกลุ่มที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์ ($P < 0.05$)

2.15.2 การเสริมเอนไซม์ในอาหารต่อคุณภาพเนื้อของไก่เนื้อ

คุณภาพของเนื้อไก่ ถือเป็นสิ่งสำคัญในอุตสาหกรรมการผลิตและแปรรูปไก่เนื้อ โดยปัจจุบันด้วยเทคโนโลยีด้านสายพันธุ์หรือด้านโภชนาการ ทำให้สามารถผลิตไก่เนื้อได้อย่างรวดเร็วและมีคุณภาพ อย่างไรก็ตามความหมายของคำว่าคุณภาพของเนื้อสัตว์ในสายการผลิตอาจแตกต่างกันไปตามมุมมองของการผลิต โดยผู้ผลิตให้ความสำคัญกับการเจริญเติบโตและการใช้อาหารเป็นหลัก ขณะที่โรงงานให้ความสำคัญกับความสม่ำเสมอของฝูงและปริมาณเนื้อที่ได้คุณภาพ และผู้บริโภคให้ความสำคัญกับรสชาติ เนื้อสัมผัส ความชุ่มฉ่ำ และลักษณะทางกายภาพของเนื้อ (Barbut and Leishman, 2022) จึงทำให้การผลิตเนื้อไก่ที่มีคุณภาพและตอบสนองต่อความต้องการของทุกฝ่ายถือเป็นความท้าทายที่สำคัญในอุตสาหกรรมการผลิตไก่เนื้อ และปัจจุบันอุตสาหกรรมการผลิตไก่เนื้อได้รับผลกระทบจากการปรับปรุงสายพันธุ์และโภชนาการที่ทำให้ไก่เนื้อเติบโตและมีน้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้นสูงในระยะเวลานาน แต่ในขณะเดียวกันการเจริญเติบโตที่เร็วเกินไปอาจส่งผลทำให้ไก่เนื้อมีปัญหาด้านสุขภาพในส่วนของเนื้อส่วนอก โดยเฉพาะโรคกล้ามเนื้อผิดปกติ เช่น โรคเนื้ออกไก่แบบสปาเก็ตตี้ (spaghetti meat) โรคเนื้ออกไก่แข็ง (wooden breast) และโรคเนื้ออกไก่มีตำหนิริ้วสีขาว (white striping) (ภาพที่ 2.17)



ภาพที่ 2.17 โรคกล้ามเนื้อผิดปกติที่พบในไก่เนื้อ (A) เนื้ออกที่ปกติ, (B) โรคเนื้ออกแบบสปากัดดี, (C) โรคเนื้ออกแข็ง และ (D) โรคเนื้ออกแบบมีตำหนิสีขาว

ที่มา: Barbut and Leishman (2022)

โรคเนื้ออกไก่แบบสปากัดดี เป็นความผิดปกติของกล้ามเนื้อที่มีผลกระทบโดยตรงต่อกล้ามเนื้อส่วนอก มักพบในไก่เนื้อที่มีอัตราการเจริญเติบโตเร็วผิดปกติ โดยมีลักษณะทางกายภาพของเนื้ออกที่มีความนุ่ม เหลว และหย่อนผิดปกติคล้ายเส้นสปากัดดี ซึ่งส่งผลกระทบต่อองค์ประกอบทางเคมีและคุณค่าทางโภชนาการของเนื้อ เนื้อไก่ที่มีลักษณะดังกล่าวจะถูกลดระดับคุณภาพและลดราคาลง ส่งผลทำให้เกิดความสูญเสียทางเศรษฐกิจ และเนื่องจากการศึกษาในปัจจุบันเกี่ยวกับโรคเนื้ออกไก่แบบสปากัดดียังมีอยู่เพียงเล็กน้อย ทำให้ยังไม่สามารถอธิบายกลไกการเกิดโรคได้อย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับโรคกล้ามเนื้อผิดปกติชนิดอื่น ๆ อย่างไรก็ตามมีสมมติฐานว่าอาจมีสาเหตุมาจากปัจจัยด้านความเครียดในระดับเซลล์และภาวะขาดออกซิเจนเฉพาะส่วนที่เกิดขึ้นจากการขยายตัวของกล้ามเนื้อที่มีอัตราขยายสูงเกินไป (Baldi et al., 2021)

โรคเนื้ออกไก่แข็ง เป็นความผิดปกติของกล้ามเนื้อส่วนอกมีลักษณะทางกายภาพของเนื้ออกที่แข็งและเหนียวผิดปกติเมื่อสัมผัส อาจมีอาการบวมและมีสีซีด โดยเฉพาะบริเวณส่วนบนและส่วนล่างของเนื้ออก นอกจากนี้ยังอาจพบจุดเลือดและของเหลวหนืดไหลออกมาจากเนื้อ (Barbut et al., 2024) อย่างไรก็ตามอัตราการเกิดโรคเนื้ออกไก่แข็งอาจมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามน้ำหนักตัวของไก่เนื้อ จากการศึกษาของ Lake et al. (2020) พบว่าไก่ที่เป็นโรคเนื้ออกไก่แข็งมีน้ำหนักเนื้อส่วนอกและส่วนปีกที่สูงกว่าไก่ปกติอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) และพบความผิดปกติของค่าก๊าซในเลือด ได้แก่ ความดันของก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ในเลือดที่สูงขึ้น และค่า pH ในเลือดที่ลดลง ซึ่งบ่งชี้ถึงประสิทธิภาพในการแลกเปลี่ยนก๊าซของระบบทางเดินหายใจที่ลดลง และอาจเกิดจากการพัฒนาของกล้ามเนื้อที่เร็วกว่าการพัฒนาของเส้นเลือดฝอยในกล้ามเนื้อ ส่งผลทำให้การไหลเวียนของ

เลือดและการส่งออกซิเจนไปเลี้ยงกล้ามเนื้อไม่เพียงพอ และจากการศึกษาของ Li et al. (2024) พบว่าความรุนแรงของภาวะกล้ามเนื้อออกแข็งในไก่เนื้อที่อยู่ในระดับปานกลางและความรุนแรงส่งผลทำให้ค่า pH ทั้งในช่วงเริ่มต้นและช่วงสุดท้ายของเนื้อออกสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) เมื่อเทียบกับกลุ่มปกติ และพบว่าไก่เนื้อที่มีภาวะกล้ามเนื้อออกแข็งมีปริมาณกลูโคสและแลคเตตที่พบในกล้ามเนื้อหลังการตายลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) และมีศักยภาพในการเผาผลาญพลังงานแบบไกลโคไลซิสดลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) เมื่อเทียบกับกลุ่มไก่เนื้อปกติ และ Bian et al. (2024) พบว่าไก่เนื้อที่มีภาวะกล้ามเนื้อออกแข็งมีค่า pH ในกล้ามเนื้อที่สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) เมื่อเทียบกับกลุ่มเนื้อปกติ อาจเนื่องมาจากไก่เนื้อที่มีภาวะกล้ามเนื้อออกแข็งมีปริมาณไกลโคเจนสะสมในกล้ามเนื้อลดลง และพบว่ามี การสูญเสีย น้ำ ที่สูงกว่ากลุ่มเนื้อปกติอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) โดยพบว่าอัตราการสูญเสีย น้ำ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับความรุนแรงของภาวะกล้ามเนื้อออกแข็ง ($P < 0.05$) อาจเนื่องมาจากเกิดการเสื่อมสภาพของกล้ามเนื้อ และมีการสะสมของเนื้อเยื่อเกี่ยวพันระหว่างกล้ามเนื้อและไขมันในกล้ามเนื้อที่เพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลทำให้ความสามารถในการอุ้มน้ำของโปรตีนในกล้ามเนื้อลดลง โดยเยื่อหุ้มเส้นใยกล้ามเนื้อที่ถูกทำลายจากการเสื่อมของเซลล์กล้ามเนื้อจะส่งผลทำให้เกิดการสูญเสีย น้ำ ระหว่างการปรุงสุก

โรคเนื้ออกไก่แบบมีตำหนิหรือสีขาว เป็นความผิดปกติของกล้ามเนื้อส่วนนอกที่มีลักษณะทางกายภาพของเนื้ออกที่ปรากฏให้เห็นเป็นเส้นสีขาวบนผิวของกล้ามเนื้ออกไก่ โดยพบว่าแถบเส้นสีขาวนี้มีความกว้างหลายมิลลิเมตร และมีการเรียงตัวในแนวขนานไปกับทิศทางของเส้นใยกล้ามเนื้อ และความผิดปกติของโรคนี้ยังส่งผลต่อการยอมรับของผู้บริโภค รวมถึงคุณค่าทางโภชนาการของเนื้อไก่ (Barbut et al., 2024)

อย่างไรก็ตามการเสริมเอนไซม์ในอาหารไก่เนื้อยังไม่ได้มีการพิสูจน์ว่าช่วยลดความรุนแรงของโรคกล้ามเนื้อผิดปกติหรือช่วยปรับปรุงคุณภาพเนื้อได้อย่างชัดเจน แต่ความรุนแรงของโรคกล้ามเนื้อผิดปกติ มักมีความสัมพันธ์กับการเจริญเติบโตและน้ำหนักของไก่เนื้อที่โตเร็วเกินไป และจากการศึกษาของ Yaqoob et al. (2022) พบว่าการเสริมเอนไซม์รวม (ไซลาลเนส แอลฟา-อะไมเลส และโปรติเอส) ในอาหารไก่เนื้อที่มีระดับพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้ต่ำกว่ากลุ่มควบคุม 50 กิโลแคลอรี/กิโลกรัม ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยโปรตีน พัฒนาความยาวของลำไส้ส่วนต้นซึ่งแสดงถึงการทำงานของลำไส้ที่เพิ่มขึ้น และเพิ่มกิจกรรมของเอนไซม์ช่วยย่อยไลเปสและโปรติเอสในลำไส้เล็กส่วนกลาง รวมถึงช่วยรักษาการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ของเนื้อส่วนอกส่งผลทำให้เนื้ออกไก่มีค่า pH ที่ต่ำลงต่ำกว่าปกติอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ดังนั้นจึงควรมีการศึกษอย่างต่อเนื่องเพื่อยืนยันผลของการเสริมเอนไซม์ในอาหารไก่เนื้อต่อคุณภาพของเนื้อไก่และความผิดปกติของโรคกล้ามเนื้อ

บทที่ 3

วิธีการวิจัย

3.1 การทดลองที่ 1: ศึกษาผลของการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งต่อค่าการย่อยได้ของวัตถุดิบในหลอดทดลองของวัตถุดิบอาหารไก่เนื้อ

3.1.1 การวางแผนการทดลอง

เปรียบเทียบ 2 กลุ่ม (two-group comparison) ได้แก่ กลุ่มที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์ และกลุ่มที่ได้รับการเสริมเอนไซม์ เพื่อประเมินผลของการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งต่อค่าการย่อยได้ของวัตถุดิบในวัตถุดิบอาหารไก่เนื้อ 7 ชนิด (8 ซ้ำ) ได้แก่ ข้าวโพด กากถั่วเหลือง รำข้าว ข้าวเปลือก กากเนื้อในเมล็ดปาล์ม ข้าวสาลี และรำข้าวสาลี โดยการทดลองแบ่งออกเป็น 2 ชุด ได้แก่ 1) ชุดการเสริมเอนไซม์ไซลาลเนส และ 2) ชุดการเสริมเอนไซม์รวม (ประกอบด้วย ไซลาลเนส เบต้า-กลูคาเนส เซลลูเลส และไซโลกลูคาเนส)

3.1.2 การเตรียมวัตถุดิบอาหารสัตว์ที่ศึกษาและการวิเคราะห์ทางเคมี

นำวัตถุดิบอาหารสัตว์ทั้งหมด 7 ชนิด (ข้าวโพด กากถั่วเหลือง รำข้าว ข้าวเปลือก กากเนื้อในเมล็ดปาล์ม ข้าวสาลี และรำข้าวสาลี) ที่ได้จากโรงงานผลิตอาหารสัตว์บก กม.21 ของบริษัท เจริญโภคภัณฑ์อาหาร จำกัด (มหาชน) มาบดผ่านตะแกรงขนาด 1 มิลลิเมตร และนำตัวอย่างวัตถุดิบอาหารสัตว์ที่ใช้ในการทดลองส่งตรวจวิเคราะห์หาส่วนประกอบของน้ำตาลที่พบในโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งทั้งหมด โดยห้องปฏิบัติการผลิตภัณฑ์อาหารกรุงเทพฯ (ถนนบางนา-ตราด กม.21 สมุทรปราการ) ตามวิธีของ Englyst et al. (1994) ดังแสดงในตารางที่ 3.1 และตรวจสอบค่าโภชนะต่าง ๆ ได้แก่ ความชื้น โปรตีนหยาบ ไขมันหยาบ เยื่อใยหยาบ NDF และ ADF ตามวิธีของ AOAC (2000) และวิเคราะห์ค่าพลังงานรวมด้วยเครื่อง Bomb calorimeter ยี่ห้อ Leco รุ่น AC600 ตามวิธีของ AOAC (2000) ดังแสดงในตารางที่ 3.2

3.1.3 การเตรียมเอนไซม์

นำเอนไซม์ 2 ชนิด ได้แก่ เอนไซม์ไซลาลเนส (Endo-1, 4- β -xylanase) และเอนไซม์รวมประกอบด้วยไซลาลเนส (Endo-1, 4- β -xylanase), เบต้า-กลูคาเนส (Endo-1,3(4)- β -glucanase และ Endo-1,4- β -glucanase), เซลลูเลส และไซโลกลูคาเนส ซึ่งเป็นเอนไซม์ทางการค้าของบริษัท ดีเอสเอ็ม นิวทริชั่นแนล โปรดักส์ (ประเทศไทย) จำกัด มาผสมในวัตถุดิบอาหารสัตว์ทั้ง 7 ชนิด ที่เตรียมจากข้อ 3.1.2 ที่ระดับ 0 และ 1 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 3.1 ส่วนประกอบของน้ำตาลที่พบในโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งทั้งหมดในวัตถุดิบอาหารสัตว์

วัตถุดิบอาหาร	อะราบินอส	ฟรุกโตส	ซูโคส	กาแล็กโทส	กลูโคส	แมนโนส	แรมโนส	ไรโบส	ไซโลส
ข้าวโพด	1.79	0.00	0.00	0.46	3.70	0.08	0.02	0.00	2.16
กากถั่วเหลือง	1.82	0.00	0.25	2.99	2.91	0.37	0.21	0.00	0.87
รำข้าว	2.36	0.00	0.02	0.66	3.82	0.20	0.06	0.00	2.67
ข้าวเปลือก	0.74	0.00	0.00	0.27	6.19	0.05	0.03	0.00	3.19
กากเนื้อในเมล็ดปาล์ม	0.89	0.00	0.00	1.42	6.71	27.40	0.00	0.00	2.60
ข้าวสาลี	2.13	0.00	0.00	0.23	2.46	0.14	0.00	0.00	3.21
รำข้าวสาลี	6.86	0.00	0.00	0.57	7.07	0.17	0.05	0.00	8.45

ปริมาณน้ำตาลแต่ละชนิดมีหน่วย คือ กรัม/100 กรัม

ตารางที่ 3.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบอาหารสัตว์

วัตถุดิบอาหาร	ความชื้น	โปรตีน	ไขมัน	เยื่อใย	NDF	ADF	GE
ข้าวโพด	12.60	7.83	3.31	1.95	7.51	2.71	3,966
กากถั่วเหลือง	10.20	48.20	1.42	3.42	8.28	4.97	4,208
รำข้าว	9.59	13.10	14.60	5.69	11.50	5.82	4,673
ข้าวเปลือก	11.00	6.73	1.90	11.60	19.20	13.60	3,738
กากเนื้อในเมล็ดปาล์ม	3.65	15.90	8.59	14.40	54.80	31.90	4,333
ข้าวสาลี	11.00	10.20	2.00	1.92	8.86	3.10	3,924
รำข้าวสาลี	12.40	16.80	4.78	9.06	34.10	11.00	4,207

องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบอาหารแต่ละชนิดมีหน่วย คือ กรัม/100 กรัม และค่าพลังงานรวมมีหน่วย คือ กิโลแคลอรี/กิโลกรัม

3.1.4 การวิเคราะห์ค่าการย่อยได้ของวัตถุดิบอาหารสัตว์ในหลอดทดลอง

แบ่งระยะในการจำลองสภาวะการย่อยอาหารในระบบทางเดินอาหารของไก่เนื้อในหลอดทดลองออกเป็น 2 ระยะ คือ ระยะการย่อยอาหารในกระเพาะอาหารและลำไส้เล็ก ซึ่งดัดแปลงมาจากวิธีของ Yegani et al. (2013) โดยทำการชั่งตัวอย่างอาหาร 0.5 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ขนาด 250 มิลลิลิตร และเติมฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 0.1 โมลาร์ 25 มิลลิลิตร หลังจากนั้นเติมกรดไฮโดรคลอริก 0.2 โมลาร์ 10 มิลลิลิตร และทำการปรับ pH ให้มีค่าเท่ากับ 2 หลังจากนั้นเติมเอนไซม์เปปซิน (pepsin) 1 มิลลิลิตร และเติมคลอแรมเฟนิคอล (chloramphenicol) 0.5 มิลลิลิตร และนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 41 องศาเซลเซียส ที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ขั้นตอนนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อจำลองระยะการย่อยอาหารในกระเพาะอาหาร

หลังจากครบเวลาในการบ่มทำการเติมฟอสเฟตบัฟเฟอร์ 0.2 โมลาร์ 10 มิลลิลิตร และโซเดียมไฮดรอกไซด์ 0.6 โมลาร์ 5 มิลลิลิตร และทำการปรับ pH ให้มีค่าเท่ากับ 6.8 หลังจากนั้นเติมเอนไซม์แพนครีเอติน (pancreatin) 1 มิลลิลิตร และนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 41 องศาเซลเซียส ที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 4 ชั่วโมง ขั้นตอนนี้มีจุดมุ่งหมายเพื่อจำลองระยะการย่อยอาหารในลำไส้เล็ก และทำการเติมกรดซัลโฟซาลิไซลิก 20 เปอร์เซ็นต์ 5 มิลลิลิตร เพื่อยุติกิจกรรมเอนไซม์ โดยตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้อง 30 นาที หลังจากนั้นนำไปกรองและทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 108 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 ชั่วโมง และทำการบันทึกน้ำหนักเพื่อนำไปคำนวณหาค่าการย่อยได้ของวัตถุแห้งในหลอดทดลองตามสูตรดังต่อไปนี้

$$\text{ค่าการย่อยได้ของวัตถุแห้งในหลอดทดลอง} = \frac{\text{น้ำหนักแห้งก่อนย่อย} - \text{น้ำหนักแห้งหลังย่อย}}{\text{น้ำหนักแห้งก่อนย่อย}} \times 100$$

3.1.5 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ใช้การวิเคราะห์ทางสถิติแบบ t-test แบบอิสระ (independent samples t-test) เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าการย่อยได้ระหว่างกลุ่มวัตถุดิบอาหารสัตว์ที่ได้รับการเสริมและไม่เสริมเอนไซม์ โดยกำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติไว้ที่ $P < 0.05$

3.2 การทดลองที่ 2: ศึกษาผลของการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในอาหารไก่เนื้อต่อการย่อยได้ของวัตถุแห้งในหลอดทดลอง ประสิทธิภาพการเจริญเติบโต การย่อยได้ของวัตถุแห้งและค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้แบบปรากฏของไก่เนื้อ

3.2.1 ศึกษาผลของการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในอาหารไก่เนื้อต่อการย่อยได้ของวัตถุแห้งในหลอดทดลอง

3.2.1.1 แผนการทดลอง

การทดลองนี้วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design; CRD) ประกอบไปด้วย 4 กลุ่มการทดลอง กลุ่มการทดลองละ 8 ซ้ำ ได้แก่

- 1) อาหารที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์
- 2) อาหารที่ได้รับการเสริมด้วยเอนไซม์ไซลานเนส 100 กรัม/ตัน
- 3) อาหารที่ได้รับการเสริมด้วยเอนไซม์รวม 100 กรัม/ตัน
- 4) อาหารที่ได้รับการเสริมด้วยเอนไซม์ไซลานเนสและเอนไซม์รวม 100

และ 100 กรัม/ตัน ตามลำดับ

3.2.1.2 การเตรียมอาหารสัตว์ที่ศึกษาและการวิเคราะห์ทางเคมี

นำอาหารไก่เนื้อแบบผสมสำเร็จ (complete feed) ที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์ ที่ได้จากโรงงานผลิตอาหารสัตว์บก กม.21 ของบริษัท เจริญโภคภัณฑ์อาหาร จำกัด (มหาชน) มาบดผ่านตะแกรงขนาด 1 มิลลิเมตร เพื่อเตรียมไว้สำหรับการผสมกับเอนไซม์ในแต่ละกลุ่มการทดลอง และนำตัวอย่างอาหารไก่เนื้อที่ใช้ในการทดลองส่งตรวจวิเคราะห์ค่าโภชนะต่าง ๆ ได้แก่ ความชื้น โปรตีนหยาบ ไขมันหยาบ เยื่อใยหยาบ NDF และ ADF โดยห้องปฏิบัติการผลิตภัณฑ์อาหาร กรุงเทพฯ (ถนนบางนา-ตราด กม.21 สมุทรปราการ) ตามวิธีของ AOAC (2000) และวิเคราะห์ค่าพลังงานรวมด้วยเครื่อง Bomb calorimeter ยี่ห้อ Leco รุ่น AC600 ตามวิธีของ AOAC (2000) ดังแสดงในตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 องค์ประกอบทางเคมีของอาหารสัตว์

กลุ่มการทดลอง	ความชื้น	โปรตีน	ไขมัน	เยื่อใย	NDF	ADF	GE
อาหารทดลอง	10.10	20.70	8.40	4.77	12.10	6.24	4,296

องค์ประกอบทางเคมีของอาหารทดลองมีหน่วย คือ กรัม/100 กรัม และค่าพลังงานรวมมีหน่วย คือ กิโลแคลอรี/กิโลกรัม

3.2.1.3 การเตรียมเอนไซม์

นำเอนไซม์ 2 ชนิด ได้แก่ เอนไซม์ไซลาลเนส (Endo-1, 4- β -xylanase) และเอนไซม์รวมประกอบด้วยไซลาลเนส (Endo-1, 4- β -xylanase), เบต้า-กลูคาเนส (Endo-1,3(4)- β -glucanase และ Endo-1,4- β -glucanase), เซลลูเลส และไซโลกลูคาเนส ซึ่งเป็นเอนไซม์ทางการค้าของบริษัท ดีเอสเอ็ม นิวทริชั่นแนล โปรดักส์ (ประเทศไทย) จำกัด มาผสมในอาหารไก่เนื้อที่เตรียมจากข้อ 3.2.1.2 โดยระดับที่เลือกใช้เป็นไปตามระดับที่บริษัทแนะนำที่ 100 กรัม/ตัน

3.2.1.4 การวิเคราะห์ค่าการย่อยได้ของอาหารไก่เนื้อในหลอดทดลอง

แบ่งระยะในการจำลองสภาวะการย่อยอาหารในระบบทางเดินอาหารของไก่เนื้อในหลอดทดลองออกเป็น 2 ระยะ คือ ระยะการย่อยอาหารในกระเพาะอาหารและลำไส้เล็ก ซึ่งดัดแปลงมาจากวิธีของ Yegani et al. (2013) ดังวิธีที่แสดงในข้อ 3.1.4

3.2.1.5 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

นำข้อมูลการย่อยได้ของวัตถุแห้งในแต่ละกลุ่มการทดลองมาวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (Analysis of variance; ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของ

ค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan New's Multiple Range Test โดยกำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติไว้ที่ $P < 0.05$

3.2.2 ศึกษาผลของการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในอาหารไก่เนื้อต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโต การย่อยได้ของวัตถุดิบและค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้แบบปรากฏของไก่เนื้อ

3.2.2.1 จรรยาบรรณการใช้สัตว์

การทดลองนี้ดำเนินการอย่างมีจริยธรรมตามแนวทางการดูแลสัตว์และการใช้สัตว์ทดลองในการวิจัย ได้รับการอนุมัติโดยคณะกรรมการการดูแลและการใช้สัตว์จากศูนย์วิจัยและนวัตกรรมอาหารสัตว์ 1 (FRIC1) หมายเลข 2508003

3.2.2.2 แผนการทดลอง

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design; CRD) ประกอบไปด้วย 4 กลุ่มการทดลอง กลุ่มการทดลองละ 8 ซ้ำ (ซ้ำละ 5) เช่นเดียวกับการทดลองการวิเคราะห์ค่าการย่อยได้ของอาหารไก่เนื้อในหลอดทดลอง จากข้อ 3.2.1.1

3.2.2.3 การจัดการโรงเรือนและสัตว์ทดลอง

(1) สัตว์ทดลอง

ใช้ไก่เนื้อเพศผู้สายพันธุ์ ROSS 308 อายุ 1 วัน ที่มีน้ำหนักเฉลี่ยใกล้เคียงกัน จำนวนทั้งหมด 160 ตัว โดยมีการจัดการวัคซีนตามมาตรฐานจากโรงฟัก FRIC1 และการทดลองนี้ดำเนินการเป็นระยะเวลาทั้งหมด 23 วัน

(2) เอนไซม์

เอนไซม์ที่ใช้ผสมในอาหารไก่เนื้อเป็นเอนไซม์ทางการค้าของบริษัท ดีเอสเอ็ม นิวทริชั่นแนล โปรดักส์ (ประเทศไทย) จำกัด ได้แก่ เอนไซม์ไซลานเนส (Endo-1, 4- β -xylanase) และเอนไซม์รวมประกอบด้วยไซลานเนส (Endo-1, 4- β -xylanase), เบต้า-กลูคาเนส (Endo-1,3(4)- β -glucanase และ Endo-1,4- β -glucanase), เซลลูเลส และไซโลกลูคาเนส โดยระดับที่เลือกใช้เป็นไปตามระดับที่บริษัทแนะนำที่ 100 กรัม/ตัน

(3) อาหาร

แบ่งอาหารทดลองออกเป็น 2 ระยะ คือ ระยะไก่เล็ก (starter; อายุ 1–14 วัน) ระยะไก่รุ่น (grower; อายุ 15–23 วัน) ตามคำแนะนำของสายพันธุ์ไก่เนื้อ ROSS 308 โดยแสดงองค์ประกอบของวัตถุดิบอาหารสัตว์และค่าโภชนาในสูตรอาหาร ดังแสดงในตารางที่ 3.4

(4) อุณหภูมิและความชื้น

ตั้งอุณหภูมิภายในกล่องทดลองแบบปิดอยู่ที่ 36 องศาเซลเซียส ในวันแรกของการทดลอง หลังจากนั้นค่อย ๆ ลดอุณหภูมิลงอย่างต่อเนื่องจนถึง 25 องศาเซลเซียส จนถึงวันที่ 13 และตั้งแต่วันที่ 13 ถึง 23 ทำการรักษาอุณหภูมิไว้ที่ 25 องศาเซลเซียส และควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนให้อยู่ระหว่าง 60 ถึง 75 เปอร์เซ็นต์

(5) แสงสว่าง

ช่วงอายุ 1 ถึง 2 วัน ให้แสงสว่างตลอด 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นค่อย ๆ ลดระยะเวลาในการให้แสงสว่างเป็น 16 ชั่วโมง โดยปิดการให้แสงตั้งแต่เวลา 22.00 น. ถึง 06.00 น. จนถึงอายุ 14 วัน และในช่วงอายุ 14 ถึง 23 วัน ทำการให้แสงสว่างแก่สัตว์ทดลองที่ 16 ชั่วโมง

(6) การจัดการอาหารและน้ำ

ให้อาหารและน้ำแบบเต็มที่ (*ad libitum*) ตั้งแต่วันที่ 1 ถึง 23 ของการทดลอง โดยให้อาหารแบบเม็ดบี้ (crumble) ตั้งแต่ช่วงอายุ 1 ถึง 14 วัน และจะเปลี่ยนเป็นอาหารแบบเม็ดใหญ่ (pellet) ตั้งแต่ช่วงอายุ 15 ถึง 23 วัน และในวันที่ 18 มีการอดอาหารเป็นระยะเวลา 8 ชั่วโมง (ตั้งแต่เวลา 00.00 น. ถึง 08.00 น.) เพื่อเตรียมตรวจสอบการย่อยได้ของวัตถุดิบและค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้แบบปรากฏ

3.2.2.4 การวิเคราะห์ทางเคมี

นำตัวอย่างอาหารไก่เนื้อที่ใช้ในการทดลองส่งตรวจวิเคราะห์หาค่าโภชนะต่าง ๆ ได้แก่ ความชื้น โปรตีนหยาบ ไขมันหยาบ เยื่อใยหยาบ NDF และ ADF โดยห้องปฏิบัติการผลิตภัณฑ์อาหารกรุงเทพฯ (ถนนบางนา-ตราด กม.21 สมุทรปราการ) ตามวิธีของ AOAC (2000) และวิเคราะห์ค่าพลังงานรวมด้วยเครื่อง Bomb calorimeter ยี่ห้อ Leco รุ่น AC600 ตามวิธีของ AOAC (2000) ดังแสดงในตารางที่ 3.5

ตารางที่ 3.4 องค์ประกอบของวัตถุดิบอาหารสัตว์และค่าโภชนะในสูตรอาหารทดลองในวันที่ 1–23

Ingredients (%)	Starter 1–14 days				Grower 15–23 days			
	1	2	3	4	1	2	3	4
Corn	41.53	41.52	41.52	41.51	22.37	22.36	22.36	22.35
Paddy rice	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
Wheat	0.00	0.00	0.00	0.00	15.00	15.00	15.00	15.00
Full fat soybean	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
Soybean meal	27.40	27.40	27.40	27.40	20.70	20.70	20.70	20.70
Rice bran fresh	3.00	3.00	3.00	3.00	10.00	10.00	10.00	10.00
Palm kernel meal	3.00	3.00	3.00	3.00	5.00	5.00	5.00	5.00
Palm kernel oil	1.10	1.10	1.10	1.10	3.40	3.40	3.40	3.40
Multi-enzyme	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01
Xylanase	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01
Others*	3.97	3.97	3.97	3.97	3.53	3.53	3.53	3.53
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Calculated Analysis (%)								
Moisture	11.44	11.44	11.44	11.44	10.82	10.82	10.82	10.82
ME (kcal/kg)	2,981	2,980	2,980	2,980	3,080	3,080	3,080	3,079
Crude protein	21.98	21.98	21.98	21.98	20.00	20.00	20.00	20.00
Crude fat	5.96	5.96	5.96	5.96	8.89	8.89	8.89	8.89
Crude fiber	3.95	3.95	3.95	3.95	4.42	4.42	4.42	4.42
Starch	33.98	33.97	33.97	33.97	32.92	32.92	32.92	32.91
Ash	6.59	6.59	6.59	6.59	6.58	6.58	6.58	6.58
Calcium	0.75	0.75	0.75	0.75	0.65	0.65	0.65	0.65
Total Phosphorus	0.64	0.64	0.64	0.64	0.66	0.66	0.66	0.66
Available Phosphorus	0.35	0.35	0.35	0.35	0.31	0.31	0.31	0.31
Digestible Lysine	1.31	1.31	1.31	1.31	1.19	1.19	1.19	1.19

*Premix added according to ROSS 308 nutrient specifications.

ตารางที่ 3.5 องค์ประกอบทางเคมีของอาหารสัตว์ทดลอง

กลุ่มการทดลอง	ความชื้น	โปรตีน	ไขมัน	เยื่อใย	NDF	ADF	GE
Starter 1–14 days							
1	10.70	20.90	4.28	3.69	8.97	4.63	4,029
2	10.90	20.60	3.74	3.67	8.57	5.11	4,034
3	10.90	20.70	4.23	3.51	9.14	4.50	4,038
4	10.50	20.90	4.30	3.88	9.59	4.70	4,030
Grower 15–23 days							
1	10.30	19.90	8.46	4.46	10.8	5.04	4,233
2	10.10	19.80	7.35	4.15	10.0	5.36	4,262
3	9.690	19.90	8.14	4.46	10.8	5.84	4,213
4	9.960	19.70	8.18	4.35	11.1	4.87	4,225

องค์ประกอบทางเคมีของอาหารทดลองมีหน่วย คือ กรัม/100 กรัม และค่าพลังงานรวมมีหน่วย คือ กิโลแคลอรี/กิโลกรัม

3.2.2.5 การเก็บข้อมูล

(1) ประสิทธิภาพการเจริญเติบโต

บันทึกข้อมูลด้านประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อในวันที่ 1 ถึง 23 ซึ่งดัดแปลงมาจากวิธีของ Tay-Zar et al. (2023) โดยทำการบันทึกน้ำหนักเริ่มต้นและน้ำหนักสุดท้าย ปริมาณอาหารที่ได้รับและอาหารที่คงเหลือในวันที่ 1, 14, 18 และ 23 เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณหาน้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น (weight gain; WG) อัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวัน (average daily growth; ADG) ปริมาณอาหารที่กินได้ (feed intake; FI) และอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัว (feed conversion ratio; FCR) ตามสูตรดังต่อไปนี้

$$\text{น้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น (กรัม/ตัว)} = \text{น้ำหนักสุดท้าย} - \text{น้ำหนักเริ่มต้น}$$

$$\text{อัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวัน (กรัม/ตัว/วัน)} = \frac{\text{น้ำหนักสุดท้าย} - \text{น้ำหนักเริ่มต้น}}{\text{จำนวนวันที่เลี้ยง}}$$

$$\text{ปริมาณอาหารที่กิน (กรัม/ตัว)} = \frac{\text{ปริมาณอาหารที่กิน}}{\text{จำนวนไก่ที่เลี้ยง}}$$

$$\text{อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักรีด} = \frac{\text{ปริมาณอาหารที่กิน}}{\text{น้ำหนักรีดที่เพิ่มขึ้น}}$$

(2) การย่อยได้และค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้แบบปรากฏ

ประเมินค่าการย่อยได้ของวัตถุดิบ (dry matter digestibility; DMD) และค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้แบบปรากฏ (apparent metabolizable energy; AME) ใช้วิธีการเก็บรวบรวมทั้งหมด (total collection method) ตามวิธีของ Bourdillon et al. (1990) ในวันที่ 19 ถึง 23 โดยทำการเก็บตัวอย่างมูลของสัตว์ทดลองในช่วงเวลาเดียวกันในทุกวัน เก็บอาหารและขนที่ปนอยู่ในมูลออกทุกครั้งก่อนทำการเก็บมูลทั้งหมดใส่ในถุงพลาสติก และนำไปแช่แข็งที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เมื่อสิ้นสุดระยะเวลาในการเก็บตัวอย่างมูลของสัตว์ทดลอง นำมูลทั้งหมดมาคลุกเคล้าให้เป็นเนื้อเดียวกันและนำมาชั่งเป็นน้ำหนักมูลสด หลังจากนั้นนำมูลสดไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน จนมีน้ำหนักคงที่ และนำมาชั่งเป็นน้ำหนักมูลแห้ง หลังจากนั้นนำมูลที่ถูกทำให้แห้งมาบดผ่านตะแกรงขนาด 1 มิลลิเมตร ก่อนนำไปวิเคราะห์หาพลังงานรวมในมูลด้วยเครื่อง Bomb calorimeter ยี่ห้อ Leco รุ่น AC600 ตามวิธีของ AOAC (2000) นอกจากนี้ได้มีการบันทึกปริมาณอาหารที่กินและน้ำหนักมูล เพื่อใช้คำนวณค่าการย่อยได้ของวัตถุดิบและค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้แบบปรากฏโดยใช้สูตร

$$\text{DMD (\%)} = \frac{\text{ปริมาณวัตถุดิบที่กิน} - \text{ปริมาณวัตถุดิบในมูล}}{\text{ปริมาณวัตถุดิบที่กิน}} \times 100$$

$$\text{AME (Kcal/kg)} = \frac{\text{พลังงานรวมทั้งหมดที่กิน} - \text{พลังงานรวมในมูลที่ขับออกมา}}{\text{ปริมาณอาหารที่กิน}}$$

3.2.2.6 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

นำข้อมูลด้านประสิทธิภาพการเจริญเติบโต การย่อยได้ของวัตถุดิบและค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้แบบปรากฏของไก่เนื้อมาวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (Analysis of variance; ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan New's Multiple Range Test โดยกำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติไว้ที่ $P < 0.05$

3.3 การทดลองที่ 3: ศึกษาผลของการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในอาหารไก่เนื้อที่มีการลดระดับพลังงานและมีข้าวเปลือกเป็นส่วนประกอบต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโต คุณภาพซากและคุณภาพเนื้อของไก่เนื้อ

3.3.1 จรรยาบรรณการใช้สัตว์

การทดลองนี้ดำเนินการอย่างมีจริยธรรมตามแนวทางการดูแลสัตว์และการใช้สัตว์ทดลองในการวิจัย ได้รับการอนุมัติโดยคณะกรรมการการดูแลและการใช้สัตว์จากศูนย์วิจัยและนวัตกรรมอาหารสัตว์ 1 (FRIC1) หมายเลข 2508007

3.3.2 แผนการทดลอง

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (completely randomized design; CRD) ประกอบไปด้วย 5 กลุ่มการทดลอง ทั้งหมด 12 ซ้ำ (ซ้ำละ 32) ได้แก่ 1) กลุ่มที่ใช้อาหารพลังงานปกติที่ไม่มีการเสริมเอนไซม์ 2) กลุ่มที่ใช้อาหารพลังงานต่ำที่ไม่มีการเสริมเอนไซม์ 3) กลุ่มที่ใช้อาหารพลังงานต่ำที่มีการเสริมเอนไซม์ไซลาเนส 4) กลุ่มที่ใช้อาหารพลังงานต่ำที่มีการเสริมเอนไซม์รวม และ 5) กลุ่มที่ใช้อาหารพลังงานต่ำที่มีการเสริมเอนไซม์ไซลาเนสและเอนไซม์รวม ดังแสดงในตารางที่ 3.6 โดยอาหารไก่เนื้อมีพลังงานและโปรตีนเพียงพอต่อความต้องการตามคำแนะนำของไก่เนื้อสายพันธุ์ ROSS 308

ตารางที่ 3.6 รายละเอียดกลุ่มการทดลองและค่าพลังงานของอาหารทดลองในแต่ละกลุ่มการทดลอง

กลุ่มการทดลอง	สิ่งทดลอง	ระยะการเลี้ยงและค่าพลังงานในอาหาร		
		1-14 วัน	15-28 วัน	29-35 วัน
		ME (kcal/kg)	ME (kcal/kg)	ME (kcal/kg)
1	อาหารพลังงานปกติ	2,980	3,080	3,080
2	อาหารพลังงานต่ำ	2,980	2,980	2,980
3	อาหารพลังงานต่ำ + เอนไซม์ไซลาเนส	2,980	2,980	2,980
4	อาหารพลังงานต่ำ + เอนไซม์รวม	2,980	2,980	2,980
5	อาหารพลังงานต่ำ + เอนไซม์ไซลาเนส + เอนไซม์รวม	2,980	2,980	2,980

ME คือ พลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้

3.3.3 การจัดการโรงเรือนและสัตว์ทดลอง

3.3.3.1 สัตว์ทดลอง

ใช้ไก่เนื้อเพศผู้สายพันธุ์ ROSS 308 อายุ 1 วัน ที่มีน้ำหนักเฉลี่ยใกล้เคียงกัน จำนวนทั้งหมด 1,920 ตัว โดยมีการจัดการวัคซีนตามมาตรฐานจากโรงฟัก FRIC1 และการทดลองนี้ดำเนินการเป็นระยะเวลาทั้งหมด 35 วัน

3.3.3.2 เอนไซม์

เอนไซม์ที่ใช้ผสมในอาหารไก่เนื้อเป็นเอนไซม์ทางการค้าของบริษัท ดีเอสเอ็ม นิวทริชั่นแนล โปรดักส์ (ประเทศไทย) จำกัด ได้แก่ เอนไซม์ไซลานเนส (Endo-1, 4- β -xylanase) และเอนไซม์รวมประกอบด้วยไซลานเนส (Endo-1, 4- β -xylanase), เบต้า-กลูคาเนส (Endo-1,3(4)- β -glucanase และ Endo-1,4- β -glucanase), เซลลูเลส และไซโลกลูคาเนส โดยระดับที่เลือกใช้เป็นไปตามระดับที่บริษัทแนะนำที่ระดับ 100 กรัม/ตัน

3.3.3.3 อาหาร

แบ่งอาหารทดลองออกเป็น 3 ระยะ คือ ระยะไก่เล็ก (starter; อายุ 1–14 วัน) ระยะไกรุ่น (grower; อายุ 15–28 วัน) และระยะไก่โตเต็มที่ (finisher; อายุ 29–35 วัน) ตามคำแนะนำของสายพันธุ์ไก่เนื้อ ROSS 308 โดยแสดงองค์ประกอบของวัตถุดิบอาหารสัตว์และค่าโภชนาในสูตรอาหาร ดังแสดงในตารางที่ 3.7 และ 3.8

3.3.3.4 อุณหภูมิและความชื้น

ตั้งอุณหภูมิภายในโรงเรือนแบบปิดไว้ที่ 36 องศาเซลเซียส ในวันแรกของการทดลอง หลังจากนั้นค่อย ๆ ลดอุณหภูมิลงอย่างต่อเนื่องจนถึง 25 องศาเซลเซียส จนถึงวันที่ 14 และตั้งแต่วันที่ 14 ถึง 35 ทำการรักษาอุณหภูมิไว้ที่ 25 องศาเซลเซียส และควบคุมความชื้นสัมพัทธ์ภายในโรงเรือนให้อยู่ระหว่าง 60 ถึง 75 เปอร์เซ็นต์

3.3.3.5 แสงสว่าง

ช่วงอายุ 1 ถึง 7 วัน ทำการให้แสงสว่างแก่สัตว์ทดลองตลอดเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมงต่อวัน ในวันแรกของการทดลอง (ความเข้มแสงอยู่ในช่วง 30–40 ลักซ์) หลังจากนั้นค่อย ๆ ลดระยะเวลาในการให้แสงลงมาวันละ 1 ชั่วโมง จนถึงวันที่ 7 และหลังจากวันที่ 7 ถึง 35 ทำการให้แสงสว่างแก่สัตว์ทดลองเป็นระยะเวลา 18 ชั่วโมงต่อวัน โดยปิดการให้แสงตั้งแต่วันที่ 22.00 น. ถึง 04.00 น. (ความเข้มแสงอยู่ในช่วง 5–10 ลักซ์)

3.3.3.6 การจัดการอาหารและน้ำ

ให้อาหารและน้ำแบบเต็มที่ (*ad libitum*) ตั้งแต่วันที่ 1 ถึง 35 ของการทดลอง โดยให้อาหารแบบเม็ดบี้ (crumble) ตั้งแต่ช่วงอายุ 1 ถึง 14 วัน และจะเปลี่ยนเป็นอาหาร

แบบเม็ดใหญ่ (pellet) ตั้งแต่ช่วงอายุ 15 ถึง 35 วัน และในวันที่ 35 มีการอดอาหารเป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อเตรียมตรวจสอบคุณภาพซากและคุณภาพเนื้อของไก่เนื้อในวันที่ 36

3.3.4 การวิเคราะห์ทางเคมี

นำตัวอย่างอาหารไก่เนื้อที่ใช้ในการทดลองส่งตรวจวิเคราะห์หาค่าโภชนะต่าง ๆ ได้แก่ ความชื้น โปรตีนหยาบ ไขมันหยาบ เยื่อใยหยาบ NDF และ ADF โดยห้องปฏิบัติการผลิตภัณฑ์อาหารกรุงเทพฯ (ถนนบางนา-ตราด กม.21 สมุทรปราการ) ตามวิธีของ AOAC (2000) และวิเคราะห์ค่าพลังงานรวมด้วยเครื่อง Bomb calorimeter ยี่ห้อ Leco รุ่น AC600 ตามวิธีของ AOAC (2000) ดังแสดงในตารางที่ 3.9

ตารางที่ 3.7 องค์ประกอบของวัตถุดิบอาหารสัตว์และค่าโภชนะในสูตรอาหารทดลองในวันที่ 1–28

Ingredients (%)	Starter	Grower 15–28 days				
	1–14 days	1	2	3	4	5
Corn	41.53	22.82	25.12	25.11	25.11	25.10
Rice	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Paddy rice	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
Wheat	0.00	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00
Full fat soybean	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
Soybean meal	27.40	20.30	19.90	19.90	19.90	19.90
Rice bran fresh	3.00	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
Palm kernel meal	3.00	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
Palm kernel oil	1.10	3.30	1.40	1.40	1.40	1.40
Multi-enzyme	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01
Xylanase	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01
Others*	3.97	3.58	3.58	3.58	3.58	3.58
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

*Premix added according to ROSS 308 nutrient specifications.

ตารางที่ 3.7 องค์ประกอบของวัตถุดิบอาหารสัตว์และค่าโภชนะในสูตรอาหารทดลองในวันที่ 1-28 (ต่อ)

Ingredients (%)	Starter	Grower 15-28 days				
	1-14 days	1	2	3	4	5
Calculated Analysis (%)						
Moisture	11.44	10.83	11.08	11.08	11.08	11.08
ADF	5.64	6.47	6.51	6.51	6.51	6.51
NDF	10.04	12.03	12.18	12.17	12.17	12.17
ME (kcal/kg)	2,980	3,078	2,978	2,978	2,978	2,977
Crude protein	21.98	20.02	20.01	20.01	20.01	20.01
Crude fat	5.96	8.80	6.99	6.98	6.98	6.98
Crude fiber	3.95	4.45	4.48	4.48	4.48	4.48
Starch	33.98	33.09	34.52	34.51	34.51	34.51
Ash	6.59	6.57	6.57	6.57	6.57	6.57
Calcium	0.75	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65
Total Phosphorus	0.64	0.66	0.66	0.66	0.66	0.66
Available Phosphorus	0.35	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31
Digestible Lysine	1.31	1.20	1.19	1.19	1.19	1.19

*Premix added according to ROSS 308 nutrient specifications.

ตารางที่ 3.8 องค์ประกอบของวัตถุดิบอาหารสัตว์และค่าโภชนะในสูตรอาหารทดลองในวันที่ 29–35

Ingredients (%)	Finisher 29–35 days				
	1	2	3	4	5
Corn	22.40	24.51	24.50	24.50	24.49
Rice	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
Paddy rice	10.00	10.00	10.00	10.00	10.00
Wheat	15.00	15.00	15.00	15.00	15.00
Full fat soybean	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
Soybean meal	19.60	19.40	19.40	19.40	19.40
Rice bran fresh	5.00	5.00	5.00	5.00	5.00
Palm kernel meal	4.90	4.90	4.90	4.90	4.90
Palm kernel oil	4.60	2.70	2.70	2.70	2.70
Multi-enzyme	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01
Xylanase	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01
Others*	3.50	3.49	3.49	3.49	3.49
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Calculated Analysis (%)					
Moisture	11.10	11.35	11.35	11.35	11.35
ADF	5.76	5.81	5.81	5.81	5.81
NDF	10.59	10.74	10.74	10.74	10.73
ME (kcal/kg)	3,175	3,074	3,073	3,073	3,073
Crude protein	18.05	18.11	18.11	18.11	18.11
Crude fat	8.40	6.58	6.58	6.58	6.58
Crude fiber	3.84	3.88	3.88	3.88	3.88
Starch	38.60	39.93	39.92	39.92	39.91
Ash	5.72	5.72	5.72	5.72	5.72
Calcium	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65
Total Phosphorus	0.52	0.52	0.52	0.52	0.52
Available Phosphorus	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Digestible Lysine	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09

*Premix added according to ROSS 308 nutrient specifications.

ตารางที่ 3.9 องค์ประกอบทางเคมีของอาหารสัตว์ทดลอง

กลุ่มการทดลอง	ความชื้น	โปรตีน	ไขมัน	เยื่อใย	NDF	ADF	GE
Starter 1–14 days							
1–5	10.70	20.50	5.65	3.54	9.35	5.91	4,095
Grower 15–28 days							
1	10.20	19.70	8.91	3.82	10.50	6.07	4,256
2	10.50	20.00	6.25	4.50	10.70	5.98	4,142
3	10.30	20.60	6.59	4.16	11.20	6.35	4,138
4	10.40	20.20	5.55	4.18	11.00	7.11	4,161
5	11.10	20.10	6.56	4.05	10.70	7.09	4,137
Finisher 29–35 days							
1	9.92	18.20	8.24	3.49	9.160	5.27	4,224
2	9.81	18.20	6.87	3.89	10.10	5.97	4,144
3	9.66	18.40	6.83	3.37	9.79	6.26	4,130
4	9.79	18.10	7.16	3.80	9.64	6.29	4,154
5	10.10	18.00	6.80	3.80	9.15	6.67	4,130

องค์ประกอบทางเคมีของอาหารทดลองมีหน่วย คือ กรัม/100 กรัม และค่าพลังงานรวมมีหน่วย คือ กิโลแคลอรี/กิโลกรัม

3.3.5 การเก็บข้อมูล

3.3.5.1 ประสิทธิภาพการเจริญเติบโต

บันทึกข้อมูลด้านประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อ โดยบันทึกน้ำหนักเริ่มต้นและน้ำหนักสุดท้าย ปริมาณอาหารที่ได้รับและอาหารที่คงเหลือ ในวันที่ 1, 14, 28 และ 35 เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณหาน้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น (weight gain; WG) อัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวัน (average daily growth; ADG) ปริมาณอาหารที่กินได้ (feed intake; FI) อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัว (feed conversion ratio; FCR) และต้นทุนค่าอาหารต่อการเปลี่ยนเป็นน้ำหนักตัว (feed cost per gain; FCG) ตามสูตรดังต่อไปนี้

$$\text{น้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น (กรัม/ตัว)} = \text{น้ำหนักสุดท้าย} - \text{น้ำหนักเริ่มต้น}$$

$$\text{อัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวัน (กรัม/ตัว/วัน)} = \frac{\text{น้ำหนักสุดท้าย} - \text{น้ำหนักเริ่มต้น}}{\text{จำนวนวันที่เลี้ยง}}$$

$$\text{ปริมาณอาหารที่กิน (กรัม/ตัว)} = \frac{\text{ปริมาณอาหารที่กิน}}{\text{จำนวนไก่ที่เลี้ยง}}$$

$$\text{อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัว} = \frac{\text{ปริมาณอาหารที่กิน}}{\text{น้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น}}$$

$$\text{ต้นทุนค่าอาหารต่อการเปลี่ยนเป็นน้ำหนักตัว (บาท/กิโลกรัม)} = \frac{\text{ปริมาณอาหารที่กิน} \times \text{ราคาอาหาร}}{\text{น้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น}}$$

3.3.5.2 ศึกษาคุณภาพซาก

ศึกษาคุณภาพซากของไก่เนื้อในวันที่ 36 จากการสุ่มไก่เนื้อทั้ง 5 กลุ่ม การทดลอง การทดลองละ 12 ซ้ำ (ซ้ำละ 4 ตัว) ทั้งหมด 240 ตัว โดยทำการอดอาหารไก่เนื้อเป็นระยะเวลา 12 ชั่วโมง (ตั้งแต่เวลา 16.00 น. ถึง 04.00 น.) เพื่อป้องกันการปนเปื้อนของซากด้วยมูล และชั่งน้ำหนักไก่ที่มีชีวิตก่อนทำการการุณยฆาตด้วยการเชือดที่หลอดเลือดดำบริเวณคอและปล่อยให้เลือดไหลออกประมาณ 3 นาที หลังจากนั้นนำไปถอนขนด้วยการลวกในน้ำอุณหภูมิ 58 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 55 วินาที จากนั้นจึงนำไปถอนขนด้วยเครื่องถอนขนไก่แบบหมุน เป็นระยะเวลา 20 วินาที และชั่งเป็นน้ำหนักซากหลังขั้วรวมเครื่องใน และนำข้อมูลน้ำหนักไก่ที่มีชีวิต และน้ำหนักซากหลังขั้วรวมเครื่องในที่ได้มาคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ซากตามสูตรดังต่อไปนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์ซาก} = \frac{\text{น้ำหนักซากหลังฆ่า (กรัม)}}{\text{น้ำหนักมีชีวิต (กรัม)}} \times 100$$

หลังจากนั้นทำการผ่าซากเพื่อนำเอาเครื่องในออกและชั่งเป็นน้ำหนักซากหลังฆ่าที่ไม่รวมเครื่องใน และนำซากที่เอาเครื่องในออกไปล้างด้วยน้ำสะอาดก่อนนำไปแช่ในห้องเย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และทำการตัดแต่งเพื่อหาน้ำหนักชิ้นส่วนตัดแต่งของเนื้อส่วนหน้าอก (ไม่มีหนังและกระดูก) น่องติดสะโพก (ไม่มีหนังและกระดูก) สันใน และปีก และนำข้อมูลน้ำหนักไก่ที่มีชีวิต น้ำหนักซากหลังฆ่าที่ไม่รวมเครื่องใน และน้ำหนักชิ้นส่วนตัดแต่งต่าง ๆ มาคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์ซากตัดแต่งและเปอร์เซ็นต์ชิ้นส่วนตัดแต่ง ตามวิธีของ Moses et al. (2022) ตามสูตรดังต่อไปนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์ซากตัดแต่ง} = \frac{\text{น้ำหนักซากหลังฆ่าที่ไม่รวมเครื่องใน (กรัม)}}{\text{น้ำหนักมีชีวิต (กรัม)}} \times 100$$

$$\text{เปอร์เซ็นต์ชิ้นส่วนตัดแต่ง} = \frac{\text{น้ำหนักชิ้นส่วนตัดแต่ง (กรัม)}}{\text{น้ำหนักซากหลังฆ่าที่ไม่รวมเครื่องใน (กรัม)}} \times 100$$

3.3.5.3 ศึกษาคุณภาพเนื้อ

ศึกษาคุณภาพเนื้อของไก่เนื้อในวันที่ 36 จากชิ้นส่วนตัดแต่งของเนื้ออก ทั้ง 5 กลุ่มการทดลอง การทดลองละ 12 ซ้ำ ทั้งหมด 60 ชิ้น เพื่อนำมาวิเคราะห์หาค่าความแข็งของเนื้อ ค่าความเป็นกรด-ด่าง และค่าการสูญเสียน้ำจากการแช่แข็งของเนื้อส่วนอก ดังต่อไปนี้

วัดค่าความแข็งของเนื้อส่วนอก (wooden breast) โดยการใช้การตรวจสอบด้วยมือและการสังเกตลักษณะภายนอก แบ่งระดับความรุนแรงออกเป็น 3 ระดับ ตามเกณฑ์ของ Kuttappan et al. (2013) ได้แก่ 0 คือ ระดับปกติ (เนื้อไม่แสดงความผิดปกติใด ๆ นุ่มและสม่ำเสมอทั่วทั้งชิ้น), 1 คือ ระดับปานกลาง (เนื้อมีความแข็งบางส่วน โดยเฉพาะบริเวณเนื้ออกส่วนบนและท้าย และอาจพบผิวขรุขระหรือขนเล็กน้อย) และ 2 คือ ระดับรุนแรง (เนื้อมีความแข็งตลอดทั้งชิ้น มีลักษณะผิวขรุขระและไม่สม่ำเสมอ พบการแตกเลือดบริเวณผิว สีของเนื้อซีดอย่างชัดเจน และอาจมีเมือกสีเหลืองใสบนเนื้อ)

วัดค่า pH ด้วยเครื่องวัดค่า pH แบบพกพาพร้อมอิเล็กโทรด โดยทำการเจาะชิ้นเนื้อเพื่อวัด pH ของเนื้อส่วนอกทั้งหมด หลังการฆ่าเป็นเวลา 45 นาที และ 1, 3 และ 5 วัน

วัดค่าการสูญเสียน้ำ (drip loss) หลังการฆ่าเป็นเวลา 1, 3 และ 5 วัน โดยทำการชั่งน้ำหนักเนื้อส่วนอกก่อนแช่เย็น หลังจากนั้นทำการห่อหุ้มเนื้อส่วนอกด้วยผ้าก๊อต เพื่อใช้ในการซับน้ำของเนื้อที่สูญเสียออกมา ใส่เนื้อส่วนอกในถุงพลาสติกให้สูงจากกันถุงและทำการปิดปากถุงไม่ให้มีอากาศเข้าออก หลังจากนั้นนำเนื้อส่วนอกไปแขวนแช่เย็นไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส และชั่งน้ำหนักที่ลดลงในวันต่าง ๆ เพื่อนำมาคำนวณเป็นเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักตามสูตรดังต่อไปนี้

$$\text{เปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนัก} = \frac{\text{น้ำหนักก่อนแช่เย็น} - \text{น้ำหนักหลังแช่เย็น (กรัม)}}{\text{น้ำหนักก่อนแช่เย็น (กรัม)}} \times 100$$

3.3.6 การวิเคราะห์ทางสถิติ

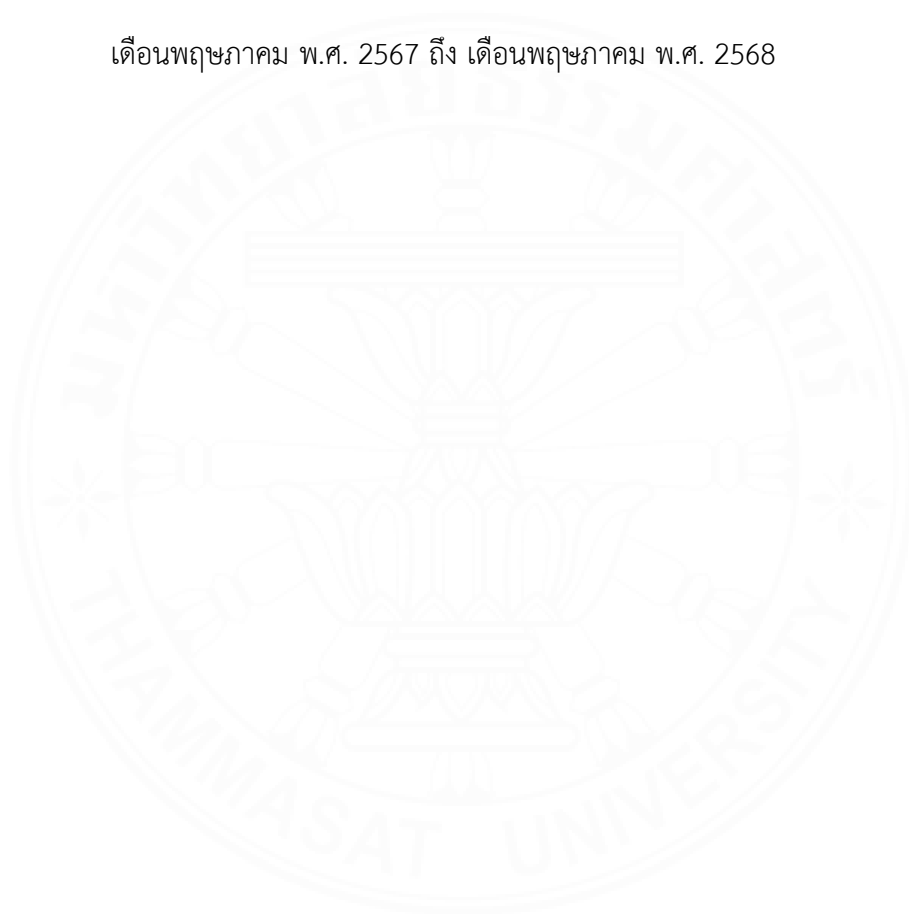
นำข้อมูลด้านประสิทธิภาพการเจริญเติบโต คุณภาพซากและคุณภาพเนื้อของไก่เนื้อมาวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (Analysis of variance; ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan New's Multiple Range Test โดยกำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติไว้ที่ $P < 0.05$

3.4 สถานที่ทำการทดลอง

ศูนย์วิจัยและนวัตกรรมอาหารสัตว์ 1 (FRIC1) ของบริษัท เจริญโภคภัณฑ์อาหาร จำกัด (มหาชน) ตำบลคลองกาว อำเภอบ้านบึง จังหวัดชลบุรี

3.5 ระยะเวลาในการทำการทดลอง

เดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2567 ถึง เดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2568



บทที่ 4

ผลการวิจัยและอภิปรายผล

4.1 การทดลองที่ 1: ผลของการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งต่อค่าการย่อยได้ของวัตถุดิบในหลอดทดลองของวัตถุดิบอาหารไก่เนื้อ

4.1.1 ผลการศึกษาการเสริมเอนไซม์ไซลานเนสในวัตถุดิบอาหารไก่เนื้อ

จากการศึกษาผลของการเสริมเอนไซม์ไซลานเนสในวัตถุดิบอาหารไก่เนื้อ 7 ชนิด ได้แก่ ข้าวโพด กากถั่วเหลือง รำข้าว ข้าวเปลือก กากเนื้อในเมล็ดปาล์ม ข้าวสาลี และรำข้าวสาลี ต่อการย่อยได้ของวัตถุดิบในหลอดทดลอง พบว่าการเสริมเอนไซม์ไซลานเนสสามารถช่วยปรับปรุงค่าการย่อยได้ของวัตถุดิบในข้าวสาลีและรำข้าวสาลี เมื่อเทียบกับกลุ่มที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์ไซลานเนสอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$) โดยมีค่าการย่อยได้ของวัตถุดิบในข้าวสาลีและรำข้าวสาลีของกลุ่มที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์ไซลานเนสเทียบกับกลุ่มที่ได้รับการเสริมเอนไซม์ไซลานเนส เท่ากับ 84.90 เทียบกับ 87.34 เปอร์เซ็นต์ และ 52.96 เทียบกับ 56.89 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ($P < 0.01$) และการเสริมเอนไซม์ไซลานเนสไม่ได้ช่วยปรับปรุงการย่อยได้ของวัตถุดิบในข้าวโพด กากถั่วเหลือง รำข้าว ข้าวเปลือก และกากเนื้อในเมล็ดปาล์ม เมื่อเทียบกับกลุ่มที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์ไซลานเนสอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) โดยมีค่าการย่อยได้ของวัตถุดิบในข้าวโพด กากถั่วเหลือง รำข้าว ข้าวเปลือก และกากเนื้อในเมล็ดปาล์มของกลุ่มที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์ไซลานเนสเทียบกับกลุ่มที่ได้รับการเสริมเอนไซม์ไซลานเนส เท่ากับ 72.16 เทียบกับ 72.11, 72.12 เทียบกับ 72.47, 76.91 เทียบกับ 77.47, 61.81 เทียบกับ 62.20 และ 30.62 เทียบกับ 31.22 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ($P > 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 4.1 ผลที่ได้ดังกล่าวอาจเนื่องมาจากในข้าวโพด กากถั่วเหลือง รำข้าว ข้าวเปลือก และกากเนื้อในเมล็ดปาล์ม มีปริมาณของน้ำตาลอะราบินโนสและไซโลส (arabinose และ xylose) ที่เป็นสารตั้งต้นของอะราบินโนไซแลน (arabinoxylan) เป็นส่วนประกอบอยู่เพียงเล็กน้อย เท่ากับ 1.79 และ 2.16, 1.82 และ 0.87, 2.36 และ 2.67, 0.74 และ 3.19 และ 0.89 และ 2.60 กรัม/100 กรัม ตามลำดับ (ตารางที่ 3.1) จึงทำให้การเสริมเอนไซม์ไซลานเนสที่ทำหน้าที่ในการย่อยสลายโครงสร้างของไซแลนในวัตถุดิบเหล่านี้ไม่ได้ช่วยปรับปรุงค่าการย่อยได้ของวัตถุดิบในหลอดทดลอง

เนื่องมาจากการไฮโดรไลซิสไซแลนที่อยู่ในรูปของอะราบินโนไซแลนที่มีโครงสร้างซับซ้อนและต้องการเอนไซม์ที่มีความเฉพาะเจาะจงสูง โดยอะราบินโนไซแลนมีคุณสมบัติหนืดและสามารถกักเก็บน้ำได้ ซึ่งจะทำให้เกิดสารละลายน้ำที่มีความหนืดสูง (Izydorczyk and Biliaderis,

1995) ความหนืดที่เกิดขึ้นจะไปยับยั้งการไฮโดรไลซิสของเอนไซม์กับสารอาหารต่าง ๆ (Fabek et al., 2014) สอดคล้องกับงานทดลองของ Jo et al. (2021) พบว่าการเสริมเอนไซม์ไซลานเนสไม่ได้ช่วยปรับปรุงค่าการย่อยได้ของวัตถุแห้งในหลอดทดลองของข้าวโพดและกากเนื้อในเมล็ดปาล์ม เนื่องจากข้าวโพดมีอะราบิโนไซแลนเป็นส่วนประกอบอยู่เพียง 5 เปอร์เซ็นต์ (Masey O'Neill et al., 2014) และกากเนื้อในเมล็ดปาล์มมีอะราบิโนไซแลนเป็นส่วนประกอบต่ำเพียง 3 เปอร์เซ็นต์ (Alshelmani et al., 2014) และจากงานทดลองของ Kim et al. (2024) พบว่าการเสริมเอนไซม์ไซลานเนสไม่ได้ช่วยปรับปรุงค่าการย่อยได้ของวัตถุแห้งในหลอดทดลองของข้าวโพดและกากถั่วเหลืองเช่นกัน

อย่างไรก็ตามข้าวสาลีและรำข้าวสาลีมีปริมาณของน้ำตาลอะราบิโนสและไซโลสเป็นส่วนประกอบอยู่สูง เท่ากับ 2.13 และ 3.21 กรัม/100 กรัม และ 6.86 และ 8.45 กรัม/100 กรัม ตามลำดับ (ตารางที่ 3.1) จึงทำให้การเสริมเอนไซม์ไซลานเนสในข้าวสาลีและรำข้าวสาลีสามารถช่วยปรับปรุงค่าการย่อยได้ของวัตถุแห้งในหลอดทดลอง ซึ่งสอดคล้องกับงานทดลองของ Jo et al. (2021) พบว่าการเสริมไซลานเนสช่วยปรับปรุงค่าการย่อยได้ของวัตถุแห้งในข้าวสาลีและรำข้าวสาลีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$) โดยเฉพาะในรำข้าวสาลีที่มีปริมาณอะราบิโนไซแลนเป็นส่วนประกอบสูงถึง 23.2 เปอร์เซ็นต์ (Knudsen, 2014)

ตารางที่ 4.1 ค่าการย่อยได้ของวัตถุแห้งในหลอดทดลองของวัตถุดิบอาหารสัตว์ที่เสริมด้วยเอนไซม์ไซลานเนส

ค่าการย่อยได้ (เปอร์เซ็นต์)	เอนไซม์ไซลานเนส (เปอร์เซ็นต์)		P-value
	0	1	
ข้าวโพด	72.16 $\pm$ 1.70	72.11 $\pm$ 1.66	0.897
กากถั่วเหลือง	72.12 $\pm$ 1.42	72.47 $\pm$ 1.61	0.854
รำข้าว	76.91 $\pm$ 0.51	77.47 $\pm$ 0.36	0.339
ข้าวเปลือก	61.81 $\pm$ 1.46	62.20 $\pm$ 2.36	0.243
กากเนื้อในเมล็ดปาล์ม	30.62 $\pm$ 0.34	31.22 $\pm$ 0.65	0.192
ข้าวสาลี	84.90 $\pm$ 0.93 ^b	87.34 $\pm$ 0.58 ^a	0.000
รำข้าวสาลี	52.96 $\pm$ 0.61 ^b	56.89 $\pm$ 0.93 ^a	0.000

Data are expressed as mean $\pm$ standard deviation (Mean $\pm$ S.D.).

^{a,b} Mean values in the same row with different superscripts differ significantly ($P < 0.05$).

4.1.2 ผลการศึกษาการเสริมเอนไซม์รวมในวัตถุดิบอาหารไก่เนื้อ

จากการศึกษาผลของการเสริมเอนไซม์รวมในวัตถุดิบอาหารไก่เนื้อ 7 ชนิด ได้แก่ ข้าวโพด กากถั่วเหลือง รำข้าว ข้าวเปลือก กากเนื้อในเมล็ดปาล์ม ข้าวสาลี และรำข้าวสาลี ต่อการย่อยได้ของวัตถุดิบในหลอดทดลอง พบว่าการเสริมเอนไซม์รวมสามารถช่วยปรับปรุงค่าการย่อยได้ของวัตถุดิบในข้าวเปลือกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) และช่วยปรับปรุงค่าการย่อยได้ของวัตถุดิบในข้าวสาลีและรำข้าวสาลีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$) โดยมีค่าการย่อยได้ของวัตถุดิบในข้าวเปลือก ข้าวสาลี และรำข้าวสาลีของกลุ่มที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์รวมเทียบกับกลุ่มที่ได้รับการเสริมเอนไซม์รวม เท่ากับ 60.53 เทียบกับ 61.58, 84.91 เทียบกับ 87.42 และ 52.43 เทียบกับ 56.03 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ($P < 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 4.2 อาจเนื่องมาจากส่วนประกอบของ NSP ในข้าวเปลือก ข้าวสาลี และรำข้าวสาลีประกอบไปด้วยน้ำตาลกลูโคสและไซโลสเป็นส่วนใหญ่ เท่ากับ 6.19 และ 3.19, 2.46 และ 3.21, 7.07 และ 8.45 กรัม/100 กรัม ตามลำดับ (ตารางที่ 3.1) เมื่อเสริมเอนไซม์รวมที่ประกอบไปด้วยไซลานเนสที่ทำหน้าที่ในการย่อยสลายไซโลส, เบต้า-กลูคาเนสที่ทำหน้าที่ในการย่อยสลายเบต้า-กลูแคนที่เกิดจากโมโนเมอร์ของกลูโคส, เซลลูเลสที่ทำหน้าที่ในการย่อยสลายเซลลูโลสที่เกิดจากโมโนเมอร์ของกลูโคส และไซโลกลูคาเนสที่ทำหน้าที่ในการย่อยสลายไซโลกลูแคนที่มีโครงสร้างหลักเป็นสายโซ่ของกลูโคสและมีแขนงเป็นไซโลส จึงทำให้การเสริมเอนไซม์รวมสามารถช่วยปรับปรุงค่าการย่อยได้ของวัตถุดิบในข้าวเปลือก ข้าวสาลี และรำข้าวสาลีให้ดีขึ้น ดังนั้นการเสริมเอนไซม์หลายชนิดร่วมกันอาจมีประสิทธิภาพในการปรับปรุงการย่อยได้ของอาหารสัตว์ที่มีส่วนประกอบของ NSP ที่ซับซ้อน ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น เนื่องจากเอนไซม์แต่ละชนิดสามารถทำงานร่วมกันในการย่อยสลายโครงสร้างที่ซับซ้อนของ NSP การใช้เอนไซม์ไซลานเนสร่วมกับเบต้า-กลูคาเนส สามารถช่วยลดความหนืดในวัตถุดิบอาหารสัตว์ เช่น ข้าวบาร์เลย์ มากกว่าเมื่อเทียบกับการใช้เอนไซม์ไซลานเนสหรือเบต้า-กลูคาเนสเพียงอย่างเดียว (Mathlouthi et al., 2002) อย่างไรก็ตามการเสริมเอนไซม์รวมไม่ได้ช่วยปรับปรุงการย่อยได้ของวัตถุดิบในข้าวโพด กากถั่วเหลือง รำข้าว และกากเนื้อในเมล็ดปาล์ม เมื่อเทียบกับกลุ่มที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์รวมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) โดยมีค่าการย่อยได้ของวัตถุดิบในข้าวโพด กากถั่วเหลือง รำข้าว และกากเนื้อในเมล็ดปาล์ม ของกลุ่มที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์รวมเทียบกับกลุ่มที่ได้รับการเสริมเอนไซม์รวมเท่ากับ 72.34 เทียบกับ 72.82, 74.30 เทียบกับ 74.99, 77.06 เทียบกับ 77.40 และ 30.00 เทียบกับ 30.69 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ($P > 0.05$) ดังตารางที่ 4.2 ซึ่งสอดคล้องกับงานทดลองของ Shipman et al. (2025) พบว่าการเสริมเอนไซม์รวม (ไซลานเนส

เบต้า-กลูคาเนส เซลลูเลส อะไมเลส โพรตีเอส เพคติเนส และอินเวอร์เทส) ทำให้การย่อยได้ของ โภชนะแบบปรากฏ (apparent total tract digestibility; ATTD) ของวัตถุดิบแห้ง เยื่อใยที่ไม่ละลายใน สารละลายที่เป็นกรด และพลังงานรวมในข้าวสาลีเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.01$) รวมถึงปรับปรุงค่าพลังงานที่ย่อยได้ พลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้ และพลังงานสุทธิในข้าวสาลีให้เพิ่มขึ้น อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.01$) ขณะที่การเสริมเอนไซม์รวมไม่มีผลต่อการย่อยได้ของ สารอาหารและค่าพลังงานในข้าวโพดและข้าวฟ่าง ($P>0.05$)

ตารางที่ 4.2 ค่าการย่อยได้ของวัตถุดิบแห้งในหลอดทดลองของวัตถุดิบอาหารสัตว์ที่เสริมด้วยเอนไซม์รวม

ค่าการย่อยได้ (เปอร์เซ็นต์)	เอนไซม์รวม (เปอร์เซ็นต์)		P-value
	0	1	
ข้าวโพด	72.34±1.36	72.82±1.26	0.810
กากถั่วเหลือง	74.30±1.46	74.99±0.95	0.459
รำข้าว	77.06±0.39	77.40±0.52	0.634
ข้าวเปลือก	60.53±1.68 ^b	61.58±0.92 ^a	0.047
กากเนื้อในเมล็ดปาล์ม	30.00±0.30	30.69±0.59	0.179
ข้าวสาลี	84.91±0.39 ^b	87.42±0.32 ^a	0.000
รำข้าวสาลี	52.43±0.70 ^b	56.03±0.54 ^a	0.000

Data are expressed as mean ± standard deviation (Mean ± S.D.).

^{a,b} Mean values in the same row with different superscripts differ significantly ($P<0.05$).

4.2 การทดลองที่ 2: ผลของการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในอาหารไก่เนื้อ ต่อการย่อยได้ของวัตถุดิบแห้งในหลอดทดลอง ประสิทธิภาพการเจริญเติบโต การย่อยได้ของวัตถุดิบแห้งและค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้แบบปรากฏของไก่เนื้อ

4.2.1 ผลการศึกษาการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในอาหารไก่เนื้อต่อการย่อยได้ของวัตถุดิบแห้งในหลอดทดลอง

จากการศึกษาผลของการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในอาหารไก่เนื้อ ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) ต่อการย่อยได้ของวัตถุดิบแห้งในหลอดทดลองในทุกกลุ่มการทดลอง อย่างไรก็ตามกลุ่มที่ได้รับการเสริมเอนไซม์รวมมีค่าการย่อยได้

ของวัตถุแห้งสูงที่สุด เท่ากับ 77.45 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุมที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์ เท่ากับ 76.81 เปอร์เซ็นต์ ($P=0.261$) นอกจากนี้กลุ่มที่ได้รับการเสริมเอนไซม์ไซลานเนสเพียงอย่างเดียวและกลุ่มที่ได้รับการเสริมทั้งเอนไซม์ไซลานเนสร่วมกับเอนไซม์รวมมีค่าการย่อยได้ของวัตถุแห้งสูงกว่ากลุ่มควบคุมที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์ เท่ากับ 76.85 และ 76.92 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ($P>0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 4.3 สอดคล้องกับงานทดลองของ Zhang et al. (2014) พบว่าการเสริมเอนไซม์ไซลานเนสที่ระดับ 1,000 กรัม/ตัน ในอาหารไก่เนื้อไม่ได้ช่วยเพิ่มความสามารถในการย่อยได้ของวัตถุแห้งในส่วนของลำไส้เล็กอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) เมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุมที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์ และจากงานทดลองของ Lei et al. (2017) พบว่าการเสริมเอนไซม์รวม (ไซลานเนส เบต้า-กลูคาเนส แมนนาเนส เซลลูเลส เพกตินเนส และอะไมเลส) ที่ระดับ 120 มิลลิกรัม/กิโลกรัม (เทียบเท่า 108.86 กรัม/ตัน) ในสูตรอาหารที่มีส่วนประกอบของข้าวโพด ข้าวสาลี และกากถั่วเหลือง ไม่ได้ช่วยเพิ่มความสามารถในการย่อยได้ของวัตถุแห้งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) เมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุมที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์ แต่พบแนวโน้มที่ดีขึ้นต่อค่าการย่อยได้ดังกล่าว แต่การเสริมเอนไซม์รวมที่ระดับ 180 มิลลิกรัม/กิโลกรัม (เทียบเท่า 163.29 กรัม/ตัน) สามารถปรับปรุงการย่อยได้ของวัตถุแห้งได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) เมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม และทั้งสองระดับการเสริมเอนไซม์ส่งผลทำให้ค่าการย่อยได้ของโปรตีนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) และ Yaqoob et al. (2022) พบว่าการเสริมเอนไซม์รวม (ไซลานเนส แอลฟา-อะไมเลส และโปรตีเอส) ในอาหารที่มีการลดพลังงาน 50 กิโลแคลอรี/กิโลกรัม ไม่ช่วยเพิ่มค่าการย่อยได้ของวัตถุแห้ง ไขมัน และเยื่อใย ($P>0.05$) อย่างไรก็ตามแม้ผลการเสริมเอนไซม์จะไม่แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อค่าการย่อยได้ แต่แนวโน้มของผลการทดลองนี้ชี้ให้เห็นว่าการเสริมเอนไซม์ในอาหารไก่เนื้อ โดยเฉพาะเอนไซม์รวมแสดงแนวโน้มปรับปรุงการย่อยได้ของวัตถุแห้งได้ในระดับหนึ่ง

ตารางที่ 4.3 ค่าการย่อยได้ของวัตถุแห้งในหลอดทดลองของอาหารไก่เนื้อที่เสริมด้วยเอนไซม์

กลุ่มการทดลอง	ค่าการย่อยได้ (เปอร์เซ็นต์)
ไม่เสริมเอนไซม์	76.81±0.62
เสริมเอนไซม์ไซลานเนส	76.85±0.78
เสริมเอนไซม์รวม	77.45±0.61
เสริมเอนไซม์ไซลานเนสและเอนไซม์รวม	76.92±0.79
P-value	0.261

Data are expressed as mean ± standard deviation (Mean ± S.D.).

4.2.2 ผลการศึกษาการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในอาหารไก่เนื้อต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโต การย่อยได้ของวัตถุดิบ ค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้แบบปรากฏของไก่เนื้อ และประสิทธิภาพการใช้พลังงานรวมในอาหารของไก่เนื้อ

4.2.2.1 ผลการศึกษาการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในอาหารไก่เนื้อต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อในวันที่ 1 ถึง 14

จากการศึกษาผลของการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในอาหารไก่เนื้อต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อในวันที่ 1 ถึง 14 พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ในด้านของน้ำหนักตัวและอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวัน ดังแสดงในตารางที่ 4.4 พบว่าไก่เนื้อในกลุ่มที่ได้รับการเสริมด้วยเอนไซม์รวม (กลุ่มการทดลองที่ 3) มีน้ำหนักตัวและอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวันสูงที่สุด เท่ากับ 461.44 กรัม/ตัว และ 32.96 กรัม/ตัว/วัน ตามลำดับ แต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) เมื่อเทียบกับกลุ่มที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์ (กลุ่มการทดลองที่ 1) และกลุ่มที่ได้รับการเสริมด้วยเอนไซม์ไซลานเนสร่วมกับเอนไซม์รวม (กลุ่มการทดลองที่ 4) ที่มีน้ำหนักตัวและอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวัน เท่ากับ 456.17 กรัม/ตัว และ 32.58 กรัม/ตัว/วัน และ 452.63 กรัม/ตัว และ 32.33 กรัม/ตัว/วัน ตามลำดับ ($P > 0.05$) ขณะที่กลุ่มการเสริมเอนไซม์ไซลานเนส (กลุ่มการทดลองที่ 2) มีน้ำหนักตัวและอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวันต่ำที่สุด เท่ากับ 443.16 กรัม/ตัว และ 31.65 กรัม/ตัว/วัน ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 4.4 และไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) ในด้านของน้ำหนักตัวของไก่เนื้ออายุหนึ่งวัน ปริมาณอาหารที่กินได้ และอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัวในทุกกลุ่มการทดลอง อย่างไรก็ตาม กลุ่มที่ได้รับการเสริมเอนไซม์รวมมีอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัวดีที่สุดเมื่อเทียบกับทุกกลุ่มการทดลอง ($P = 0.179$) และมีปริมาณอาหารที่กินได้ต่ำกว่ากลุ่มการทดลองที่ 1 และ 4 ($P > 0.05$) สอดคล้องกับงานทดลองของ Yang et al. (2008) พบว่าการเสริมเอนไซม์ไซลานเนสในอาหารที่มีข้าวสาลีเป็นส่วนประกอบ ไม่ได้ช่วยปรับปรุงปริมาณอาหารที่กินได้ น้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น และอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัวของไก่เนื้อในวันที่ 7 เมื่อเทียบกับกลุ่มที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์ ($P > 0.05$) และจากการทดลองของ Lei et al. (2017) พบว่าการเสริมเอนไซม์รวมในอาหารไก่เนื้อที่มีข้าวโพด ข้าวสาลี และกากถั่วเหลืองเป็นส่วนประกอบ ไม่ได้ช่วยปรับปรุงน้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้นและอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัวของไก่เนื้อในวันที่ 1 ถึง 7 เมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม ($P > 0.05$)

โดยการเสริมเอนไซม์ในอาหารไก่เนื้อช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซึมสารอาหารและลดผลกระทบจากสารต้านโภชนาในวัตถุดิบอาหารสัตว์ เช่น ข้าวโพด กากถั่วเหลือง และข้าวสาลี ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต (Bromfield et al., 2021) อย่างไรก็ตามการทำงานของเอนไซม์อาจมีข้อจำกัดในไก่อายุน้อย โดย Noy et al. (2001) รายงานว่าความยาวของลำไส้เล็ก

ในแต่ละส่วน ได้แก่ ลำไส้เล็กส่วนต้น ลำไส้เล็กส่วนกลาง และลำไส้เล็กส่วนปลาย มีความยาวเพิ่มขึ้นตามอายุของไก่เนื้อ และ Iji et al. (2001) รายงานว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักทางเดินอาหารมีมากกว่าอัตราการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักตัวในระยะแรกหลังฟัก โดยน้ำหนักของลำไส้เล็กจะเพิ่มขึ้นสูงสุดในช่วงวันที่ 7 ถึง 14 หลังฟัก ดังนั้นอายุของลูกไก่เนื้อจึงอาจเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความสามารถในการตอบสนองต่อการเสริมเอนไซม์ภายนอก เช่น เอนไซม์ไซลาเนส และอาจเป็นข้อจำกัดในการเสริมเอนไซม์ในสูตรอาหารสำหรับสัตว์อายุน้อย เนื่องจากระบบทางเดินอาหารและกิจกรรมของเอนไซม์ภายในร่างกายยังอยู่ในระยะพัฒนาและอาจทำงานได้ไม่เต็มประสิทธิภาพ ส่งผลให้การย่อยและการดูดซึมสารอาหารที่ถูกปลดปล่อยโดยเอนไซม์ภายนอกยังไม่เกิดประโยชน์อย่างเต็มที่ในช่วงอายุดังกล่าว จากการทดลองของ Noy and Sklan (1995) พบว่าการหลังของเอนไซม์อะไมเลส ทริปซิน และไลเปสจากลำไส้เล็กส่วนต้นนั้นเพิ่มขึ้นจากระดับต่ำในวันที่ 4 และสูงขึ้นในวันที่ 21 ถึง 100, 50 และ 20 เท่า ตามลำดับ ดังนั้นการเสริมเอนไซม์ไซลาเนสหรือเอนไซม์รวมจึงอาจให้ผลที่ชัดเจนมากขึ้นในสัตว์ที่มีอายุมากกว่า และจากการทดลองของ Wang et al. (2021) พบว่าอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวัน ปริมาณอาหารที่กินได้เฉลี่ยต่อวัน และอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัวได้รับอิทธิพลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากอายุของไก่เนื้อ ($P < 0.01$) โดยพบว่าไก่เนื้อในกลุ่มที่ได้รับการเสริมเอนไซม์ไซลาเนสในอาหารที่มีส่วนประกอบหลักเป็นข้าวสาลี ข้าวโพด และกากถั่วเหลือง มีอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวันสูงกว่ากลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญในวันที่ 14 ถึง 21 และ 21 ถึง 42 ($P < 0.05$) อย่างไรก็ตามการเสริมเอนไซม์รวมในอาหารไก่เนื้อช่วยปรับปรุงอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัว ส่งผลให้ไก่เนื้อมีน้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้นและอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวันสูงที่สุด แม้ไม่ได้มีการกินได้สูงที่สุดในวันที่ 1 ถึง 14 ($P > 0.05$) (ตารางที่ 4.4) และการเสริมเอนไซม์ไซลาเนสเพียงอย่างเดียวหรือเสริมร่วมกับเอนไซม์รวมอาจไม่ช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อในช่วงเวลาดังกล่าว

ตารางที่ 4.4 ผลของการเสริมเอนไซม์ต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อในช่วงอายุ 1–14 วัน

Days 1–14	Treatments				P-value
	1	2	3	4	
DOC body weight (g/bird)	42.85±0.42	42.90±0.21	42.85±0.21	42.93±0.10	0.922
Body weight (g/bird)	456.17±10.85 ^a	443.16±11.45 ^b	461.44±12.06 ^a	452.63±9.66 ^{ab}	0.019
ADG (g/bird/day)	32.58±0.77 ^a	31.65±0.82 ^b	32.96±0.86 ^a	32.33±0.69 ^{ab}	0.019
FI (g/bird)	478.35±23.94	475.35±21.22	477.05±24.65	482.68±17.42	0.921
FCR	1.05±0.05	1.07±0.03	1.03±0.04	1.07±0.04	0.179

Data are expressed as mean ± standard deviation (Mean ± S.D.); DOC: day-old chick.

^{a,b} Mean values in the same row with different superscripts differ significantly (P<0.05).

4.2.2.2 ผลการศึกษาการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในอาหารไก่เนื้อต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อในวันที่ 15 ถึง 18

จากการศึกษาผลของการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในอาหารไก่เนื้อต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อในวันที่ 15 ถึง 18 พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05) ในด้านของน้ำหนักตัวเริ่มต้น น้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น อัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวัน และอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัว พบว่าไก่เนื้อในกลุ่มที่ได้รับการเสริมด้วยเอนไซม์ไซลานเนสร่วมกับเอนไซม์รวมมีน้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น อัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวัน และอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัวดีที่สุด เท่ากับ 260.07 กรัม/ตัว, 65.02 กรัม/ตัว/วัน และ 1.33 ตามลำดับ (P<0.05) และดีกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุมที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์ที่มีน้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น อัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวัน และอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัว เท่ากับ 232.95 กรัม/ตัว, 58.24 กรัม/ตัว/วัน และ 1.45 ตามลำดับ (P<0.05) และพบว่ากลุ่มที่ได้รับการเสริมเอนไซม์ไซลานเนสและกลุ่มที่ได้รับการเสริมเอนไซม์รวมมีแนวโน้มของน้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น อัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวัน และอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัวดีกว่าเมื่อเทียบกับกลุ่มที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์แต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P>0.05) ดังแสดงในตารางที่ 4.5 ในด้านของน้ำหนักตัวสุดท้ายและปริมาณอาหารที่กินได้ ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างกลุ่มการทดลอง (P>0.05) อย่างไรก็ตามกลุ่มที่ได้รับการเสริมเอนไซม์ไซลานเนสร่วมกับเอนไซม์รวมมีน้ำหนักตัวสุดท้ายสูงที่สุด และมีปริมาณอาหารที่กินได้มากกว่ากลุ่มการทดลองที่ 1 และ 3 แม้ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P>0.05) ดังแสดงในตารางที่ 4.5 โดยไซลานเนสมีความสามารถในการส่งเสริมการเจริญเติบโตของสัตว์จากการย่อย NSP ทำให้เกิดการปลดปล่อยโอลิโกแซคคาไรด์ เช่น ไซโลสและอาราบินอส ซึ่งช่วยลดผลกระทบจากสารต้านโภชนาใน

สูตรอาหาร (Maniraguha et al., 2024) สอดคล้องกับงานทดลองของ Yang et al. (2008) พบว่าการเสริมเอนไซม์ไซลานเนสในอาหารที่มีข้าวสาลีเป็นส่วนประกอบช่วยปรับปรุงน้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้นและอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัวของไก่เนื้อในวันที่ 8 ถึง 21 ($P < 0.05$) ขณะที่ปริมาณอาหารที่กินได้ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) เมื่อเทียบกับกลุ่มที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์ และ Zhang et al. (2014) พบว่าการเสริมเอนไซม์ไซลานเนสช่วยเพิ่มน้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้นของไก่เนื้อได้ถึง 5.8 เปอร์เซ็นต์ และปรับปรุงอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัว 5.3 เปอร์เซ็นต์ ในวันที่ 7 ถึง 21 เมื่อเทียบกับกลุ่มที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์ไซลานเนส ($P < 0.05$) และไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในด้านของปริมาณอาหารที่กินได้ ($P > 0.05$) และจากการศึกษาผลของการเสริมเอนไซม์รวมในสูตรอาหารที่มีข้าวโพด ข้าวสาลี และกากถั่วเหลืองต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตพบว่าในวันที่ 7 ถึง 21 การเพิ่มระดับของเอนไซม์รวมในอาหารส่งผลทำให้ไก่เนื้อมีน้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้นและอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัวดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยเป็นการปรับตัวแบบเชิงเส้น (linear improvement) ตามระดับเอนไซม์ที่เพิ่มขึ้น และไม่พบความแตกต่างในด้านของปริมาณอาหารที่กินได้ระหว่างกลุ่มที่ได้รับการหรือไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์ ($P > 0.05$) (Lei et al., 2017) และจากการทดลองของ Kim et al. (2021a) พบว่าการเสริมเอนไซม์ไฟเตสและเอนไซม์รวม (อะไมเลส โปรตีเอส แมนนาเนส และไซลานเนส) ที่ระดับ 0.05 เปอร์เซ็นต์ ในอาหารไก่เนื้อที่มีส่วนประกอบของข้าวโพด ข้าวสาลี และกากถั่วเหลือง ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพการเจริญเติบโตและการใช้ประโยชน์จากสารอาหารดีขึ้นอย่างมีผลเสริมฤทธิ์กัน โดยไก่เนื้อมีน้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้นและอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัวดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในช่วงเริ่มต้นและช่วงสุดท้ายของการทดลอง ($P < 0.05$) และ Bautil et al. (2019) พบว่าความสามารถของจุลินทรีย์ในลำไส้ใหญ่ในการหมักและย่อยอะราบิโนไซด์เพิ่มขึ้นตามอายุ ซึ่งแสดงให้เห็นจากการย่อยได้ของอะราบิโนไซด์ โดยเฉพาะอะราบิโนไซด์ที่ไม่สามารถละลายในน้ำในส่วนของลำไส้เล็กส่วนกลางและส่วนปลายลำไส้ใหญ่ และมูลไก่เนื้อที่มีค่าการย่อยได้ของอะราบิโนไซด์เพิ่มขึ้นตามอายุ และการย่อยได้ในตัวอย่างมูลของอะราบิโนไซด์ที่ไม่สามารถละลายในน้ำแสดงผลที่ชัดเจนในวันที่ 15 เมื่อเทียบกับวันที่ 5 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) อย่างไรก็ตามจากข้อมูลประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อในวันที่ 15 ถึง 18 พบว่าการเสริมเอนไซม์ไซลานเนสหรือเอนไซม์รวมเพียงอย่างเดียวอย่างหนึ่งแสดงแนวโน้มส่งเสริมการเจริญเติบโตของไก่เนื้อให้ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุมที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์ และพบว่าการเสริมเอนไซม์ไซลานเนสร่วมกับเอนไซม์รวมแสดงผลเสริมฤทธิ์กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ในการเพิ่มน้ำหนักตัวและอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวัน และปรับปรุงอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัวของไก่เนื้อในช่วงเวลาดังกล่าว (ตารางที่ 4.5)

ตารางที่ 4.5 ผลของการเสริมเอนไซม์ต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อในช่วงอายุ 15–18 วัน

Days 15–18	Treatments				P-value
	1	2	3	4	
Initial body weight (g/bird)	456.17±10.85 ^a	443.16±11.45 ^b	461.44±12.06 ^a	452.63±9.66 ^{ab}	0.019
Final body weight (g/bird)	689.12±17.25	689.33±22.71	705.82±25.81	712.70±16.07	0.071
Weight gain (g/bird)	232.95±9.77 ^b	246.16±15.52 ^{ab}	244.38±17.67 ^{ab}	260.07±16.41 ^a	0.013
ADG (g/bird/day)	58.24±2.44 ^b	61.54±3.88 ^a	61.10±4.42 ^{ab}	65.02±4.10 ^a	0.013
FI (g/bird)	337.15±20.10	345.43±17.17	343.75±21.12	345.28±12.81	0.549
FCR	1.45±0.08 ^a	1.41±0.08 ^{ab}	1.41±0.04 ^{ab}	1.33±0.08 ^b	0.027

Data are expressed as mean ± standard deviation (Mean ± S.D.).

^{a,b} Mean values in the same row with different superscripts differ significantly ($P < 0.05$).

4.2.2.3 ผลการศึกษาการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในอาหารไก่เนื้อต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อในวันที่ 1 ถึง 18

จากการศึกษาผลของการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในอาหารไก่เนื้อต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อในวันที่ 1 ถึง 18 ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างกลุ่มการทดลอง ($P > 0.05$) ในทุกพารามิเตอร์ อย่างไรก็ตามไก่เนื้อกลุ่มที่ได้รับการเสริมเอนไซม์รวมมีแนวโน้มของอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัวดีที่สุด ($P = 0.131$) และกลุ่มที่ได้รับการเสริมด้วยเอนไซม์ไซลาเนสรวมกับเอนไซม์รวมมีน้ำหนักตัว อัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวัน และปริมาณอาหารที่กินได้สูงที่สุด ($P = 0.071$, 0.071 และ 0.936 ตามลำดับ) (ตารางที่ 4.6)

ตารางที่ 4.6 ผลของการเสริมเอนไซม์ต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อในช่วงอายุ 1–18 วัน

Days 1–18	Treatments				P-value
	1	2	3	4	
DOC body weight (g/bird)	42.85±0.42	42.90±0.21	42.85±0.21	42.93±0.10	0.922
Body weight (g/bird)	689.12±17.25	689.33±22.71	705.82±25.81	712.70±16.07	0.071
ADG (g/bird/day)	38.28±0.96	38.30±1.26	39.21±1.43	39.59±0.89	0.071
FI (g/bird)	815.50±42.79	820.78±37.49	820.80±42.99	827.95±30.78	0.936
FCR	1.18±0.03	1.18±0.02	1.16±0.02	1.18±0.02	0.131

Data are expressed as mean ± standard deviation (Mean ± S.D.); DOC: day-old chick.

4.2.2.4 ผลการศึกษาการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในอาหารไก่เนื้อต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อในวันที่ 19 ถึง 23

จากการศึกษาผลของการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในอาหารไก่เนื้อต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อในวันที่ 19 ถึง 23 ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างกลุ่มการทดลอง ($P>0.05$) ในทุกพารามิเตอร์ อย่างไรก็ตามไก่เนื้อกลุ่มที่ได้รับการเสริมเอนไซม์รวมมีแนวโน้มของน้ำหนักตัวสุดท้ายและอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัวดีที่สุด ($P=0.153$ และ 0.189 ตามลำดับ) และกลุ่มที่ได้รับการเสริมเอนไซม์ไซลานเนสมีน้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น อัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวัน และปริมาณอาหารที่กินได้สูงที่สุด ($P=0.192$, 0.192 และ 0.593 ตามลำดับ) ดังแสดงในตารางที่ 4.7 สอดคล้องกับงานทดลองของ Liu and Kim (2017) พบว่าการเสริมเอนไซม์ไซลานเนสในอาหารที่มีข้าวสาลีเป็นส่วนประกอบไม่ได้ช่วยปรับปรุงน้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น ปริมาณอาหารที่กินได้ และอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัวของไก่เนื้อในวันที่ 19 ถึง 35 เมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม ($P>0.05$) และ Walker et al. (2024) พบว่าการเสริมเอนไซม์ไฟเตสร่วมกับเอนไซม์รวม (ไซลานเนส เพคตินเนส โปรตีเอส เบต้า-กลูแคนเนส เซลลูเลส และอะไมเลส) ที่ระดับ 200 และ 400 กรัม/ตัน ในอาหารที่มีการลดระดับพลังงานลงเหลือ 12.18 เมกะจูล/กิโลกรัม (เทียบเท่า 2,913.48 กิโลแคลอรี/กิโลกรัม) ไม่ได้ช่วยเพิ่มน้ำหนักตัวและปริมาณอาหารที่กินได้ของไก่เนื้อเมื่อเทียบกับกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานปกติหรืออาหารพลังงานต่ำที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์ ($P>0.05$)

ตารางที่ 4.7 ผลของการเสริมเอนไซม์ต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อในช่วงอายุ 19–23 วัน

Days 19–23	Treatments				P-value
	1	2	3	4	
Initial body weight (g/bird)	689.12±17.25	689.33±22.71	705.82±25.81	712.70±16.07	0.071
Final body weight (g/bird)	1,135.55±60.86	1,165.76±31.80	1,180.15±23.27	1,164.76±25.33	0.153
Weight gain (g/bird)	466.43±53.82	476.44±23.17	474.33±22.02	452.06±22.65	0.192
ADG (g/bird/day)	89.29±10.76	95.29±4.63	94.87±4.40	90.41±4.53	0.192
FI (g/bird)	611.025±38.16	628.375±30.21	613.23±18.52	615.45±17.21	0.593
FCR	1.38±0.10	1.32±0.07	1.30±0.07	1.37±0.09	0.189

Data are expressed as mean ± standard deviation (Mean ± S.D.).

4.2.2.5 ผลการศึกษาการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในอาหารไก่เนื้อต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อในวันที่ 1 ถึง 23

จากการศึกษาผลของการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในอาหารไก่เนื้อต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อในวันที่ 1 ถึง 23 ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างกลุ่มการทดลอง ($P>0.05$) ในทุกพารามิเตอร์ ดังแสดงในตารางที่ 4.8 อย่างไรก็ตามไก่เนื้อกลุ่มที่ได้รับการเสริมเอนไซม์รวมมีแนวโน้มของน้ำหนักตัว อัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวัน และอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัวดีที่สุดที่สุด ($P=0.153$, 0.153 และ 0.188 ตามลำดับ) และในกลุ่มที่ได้รับการเสริมเอนไซม์ไซลานีสมีปริมาณอาหารที่กินได้สูงที่สุด ($P=0.879$) สอดคล้องกับงานทดลองของ Wang et al. (2024) พบว่าการเสริมเอนไซม์ไซลานีส 3 ระดับ ได้แก่ 50, 100 และ 150 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ในอาหารไก่เนื้อที่มีส่วนประกอบของข้าวสาลี ไม่ได้ช่วยปรับปรุงน้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น อัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวัน และปริมาณอาหารที่กินได้เฉลี่ยต่อวันของไก่เนื้อในวันที่ 1 ถึง 21 เมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุมที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์ ($P>0.05$) และ Morgan et al. (2022b) พบว่าการเสริมเอนไซม์ไซลานีสหรือเอนไซม์รวมไม่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักตัวของไก่เนื้อเพศผู้ที่ได้รับสูตรอาหารที่แตกต่างจากข้าวบาร์เลย์ ข้าวโพด หรือข้าวสาลี ในช่วงอายุ 0 ถึง 35 วัน ($P>0.05$) โดยรายงานว่า การเสริมเอนไซม์ไซลานีสในปริมาณที่สูงเกินไปหรือการเสริมเอนไซม์รวมอาจทำให้เกิดการสลายของโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งมากเกินไปจนความเหมาะสมส่งผลทำให้มีการสะสมของโอลิโกแซคคาไรด์ในปริมาณสูง ซึ่งอาจรบกวนสมดุลของจุลินทรีย์ในระบบทางเดินอาหารและส่งผลต่อสภาพแวดล้อมในลำไส้ โดยเฉพาะในกรณีที่ไม่มีแบคทีเรียโปรไบโอติกที่สามารถใช้ประโยชน์จากโอลิโกแซคคาไรด์เหล่านี้ได้ สารเหล่านี้อาจกลายเป็นแหล่งอาหารของแบคทีเรียก่อโรคแทน ซึ่งนำไปสู่การแย่งใช้สารอาหารและอาจเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้ความสามารถใน

การเจริญเติบโตของสัตว์ลดลง และเอนไซม์ที่ผลิตโดยจุลินทรีย์ในระบบทางเดินอาหารของไก่เนื้อ ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการย่อยสลาย NSP มีความสามารถในการทำงานแตกต่างกันไปตามช่วงอายุของสัตว์ ตำแหน่งของลำไส้ (ลำไส้เล็กส่วนปลายหรือลำไส้ใหญ่ส่วนต้น) และองค์ประกอบของจุลินทรีย์ จากการศึกษาของ Bautil et al. (2019) พบว่ากิจกรรมของเอนไซม์เอนโดไซลานเนสที่ผลิตโดยจุลินทรีย์ (microbial endoxylanase) ในบริเวณลำไส้เล็กส่วนปลายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจนถึงอายุ 15 วัน ก่อนลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงอายุ 35 วัน โดยมีลักษณะเป็นแนวโน้มแบบควอดราติก ($P=0.09$) ขณะที่ในบริเวณลำไส้ใหญ่ส่วนต้น พบว่ากิจกรรมของเอนไซม์ดังกล่าวสูงกว่าบริเวณลำไส้เล็กส่วนปลาย ประมาณ 18 เท่า โดยมีกิจกรรมสูงสุดในช่วงอายุ 21 วัน และลดลงจนถึงวันที่ 35 และในส่วนของกิจกรรมของเอนไซม์อะราบินอฟิวราโนซิเดสที่ผลิตโดยจุลินทรีย์ (microbial arabinofuranosidase) พบว่ามีระดับสูงในบริเวณลำไส้ใหญ่ส่วนต้นมากกว่าบริเวณลำไส้เล็กส่วนปลาย และแสดงแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอายุของไก่ในบริเวณลำไส้เล็กส่วนปลาย ($P=0.01$) ขณะที่ในลำไส้ใหญ่ส่วนต้นมีกิจกรรมของเอนไซม์ดังกล่าวสูงในวันที่ 10 จากนั้นลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงวันที่ 21 ก่อนเพิ่มขึ้นในวันที่ 28 และ 35 และจากการศึกษาของ Wang et al. (2021) พบว่ากลุ่มไก่เนื้อที่ได้รับการเสริมเอนไซม์ไซลานเนสมีความเข้มข้นของอะซิเตทต่ำกว่ากลุ่มควบคุมที่ไม่มีการเสริมไซลานเนสอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในวันที่ 21 ($P=0.039$) อย่างไรก็ตามในวันที่ 42 ไม่พบความแตกต่างของความเข้มข้นของอะซิเตทและแลคเตตระหว่างกลุ่มการทดลอง โดยการที่ความเข้มข้นของอะซิเตทลดลงในส่วนของลำไส้เล็กส่วนปลายในวันที่ 21 อาจเกิดการเปลี่ยนแปลงของจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตกรดอะซิติก โดยกรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก และกรดบิวไทริก ซึ่งเป็นกรดไขมันระเหยง่ายชนิดหลักที่ผลิตจากกระบวนการหมักโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในทางเดินอาหารของสัตว์ปีก มีบทบาทสำคัญต่อสุขภาพลำไส้ของสัตว์ปีก โดยช่วยเสริมการทำงานของเยื่อลำไส้ รักษาสมดุลของจุลินทรีย์ เพิ่มภูมิคุ้มกัน และลดการอักเสบในลำไส้ และการเสริมอาหารด้วยเส้นใยที่เป็นอาหารของจุลินทรีย์หรือจุลินทรีย์ที่ผลิตกรดไขมันระเหยง่ายสามารถเพิ่มการผลิตกรดไขมันระเหยง่ายได้ อย่างไรก็ตามหากมีกรดไขมันระเหยง่ายมากเกินไป โดยเฉพาะในลำไส้ใหญ่ส่วนปลาย อาจส่งผลเสียต่อร่างกาย เช่น เพิ่มความเสี่ยงต่อภาวะเมตาบอลิกซินโดรม (metabolic syndrome) อาจทำให้เกิดความผิดปกติของการเผาผลาญอาหารในร่างกาย (Liu et al., 2021) ในทางกลับกันการที่ไม่พบความแตกต่างของอะซิเตทหรือแลคเตต อาจเนื่องมาจากกลุ่มจุลินทรีย์ที่ผลิตกรดอะซิติกไม่ได้รับผลกระทบจากเอนไซม์ ดังนั้นปัจจัยจากอายุของไก่เนื้อ โปรไบโอติก พรีไบโอติก ความสามารถของจุลินทรีย์ในการสร้างเอนไซม์ รวมถึงการเปลี่ยนแปลงของจุลินทรีย์ตลอดช่วงการเลี้ยง อาจเป็นสาเหตุสำคัญต่อประสิทธิภาพการเสริมเอนไซม์ในอาหารสัตว์ อย่างไรก็ตามไก่เนื้อในกลุ่มที่ได้รับการเสริมเอนไซม์รวม

แสดงแนวโน้มของน้ำหนักตัว อัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวัน และอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัวดีที่สุดในช่วงอายุ 1 ถึง 23 วัน

ตารางที่ 4.8 ผลของการเสริมเอนไซม์ต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อในช่วงอายุ 1–23 วัน

Days 1–23	Treatments				P-value
	1	2	3	4	
DOC body weight (g/bird)	42.85±0.42	42.90±0.21	42.85±0.21	42.93±0.10	0.922
Body weight (g/bird)	1,135.55±60.86	1,165.76±31.80	1,180.15±23.27	1,164.76±25.33	0.153
ADG (g/bird/day)	63.09±3.38	64.76±1.77	65.56±1.29	64.71±1.41	0.153
FI (g/bird)	1,426.53±77.15	1,449.15±66.21	1,434.03±47.48	1,443.40±41.52	0.879
FCR	1.26±0.03	1.24±0.04	1.22±0.04	1.24±0.05	0.188

Data are expressed as mean ± standard deviation (Mean ± S.D.); DOC: day-old chick.

4.2.2.6 ผลการศึกษาการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในอาหารไก่เนื้อต่อการย่อยได้ของวัตถุดิบ ค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้แบบปรากฏ และประสิทธิภาพการใช้พลังงานรวมในอาหาร (AME/GE)

จากการศึกษาผลของการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในอาหารไก่เนื้อต่อการย่อยได้ของวัตถุดิบ ค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้แบบปรากฏ และประสิทธิภาพการใช้พลังงานรวมในอาหาร (AME/GE) ของไก่เนื้อในช่วงอายุ 19 ถึง 23 วัน ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างกลุ่มการทดลอง ($P>0.05$) ในทุกพารามิเตอร์ ดังแสดงในตารางที่ 4.9 อย่างไรก็ตามไก่เนื้อกลุ่มที่ได้รับการเสริมเอนไซม์รวมมีแนวโน้มของการย่อยได้ของวัตถุดิบ ค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้แบบปรากฏ และประสิทธิภาพการใช้พลังงานรวมในอาหาร (AME/GE) ดีที่สุด ($P=0.767$, 0.596 และ 0.646 ตามลำดับ) สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Sta Cruz et al. (2024) พบว่าการเสริมเอนไซม์ไซลาลเนสในระดับ 2,000 และ 3,000 หน่วย/กิโลกรัม ในอาหารไก่เนื้อที่มีการลดพลังงานลง 80 และ 100 กิโลแคลอรี/กิโลกรัม ไม่ส่งผลทำให้ไก่เนื้อมีการย่อยได้ของพลังงาน วัตถุดิบ และโปรตีนเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) ในวันที่ 24 และ 35 เมื่อเทียบกับกลุ่มที่ได้รับการลดพลังงานในอาหารที่ไม่เสริมเอนไซม์ไซลาลเนส และจากงานทดลองของ Lei et al. (2017) พบว่าการเสริมเอนไซม์รวม (ไซลาลเนส แมนเนเนส เบต้า-กลูแคนเนส เซลลูเลส เพคติเนส และอะไมเลส) ในอาหารไก่เนื้อที่มีส่วนประกอบของข้าวโพด ข้าวสาลี และกากถั่วเหลือง ไม่ส่งผลทำให้ไก่เนื้อมีการย่อยได้ของพลังงานรวมที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) เมื่อเทียบกับกลุ่มที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์รวม อย่างไรก็ตาม Williams et al. (2018) รายงานว่า

แม้การย่อยสลายอาหารจะไม่เปลี่ยนแปลง แต่สมรรถภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อกลับดีขึ้นเมื่อเสริมด้วยเอนไซม์ไซเลเนส นอกจากนี้ผลของการเสริมเอนไซม์หรือการใช้ประโยชน์จากเอนไซม์ไซเลเนสอาจมีข้อจำกัดเนื่องจากความแตกต่างของสูตรอาหาร และระดับของพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้แบบปรากฏ (AME) ในสูตรอาหาร โดย Glamocic et al. (2011) รายงานว่าประสิทธิภาพของเอนไซม์จะเห็นผลได้ชัดเจนที่สุดเมื่อใช้ในสูตรอาหารที่มีการลดระดับพลังงานลง และผลของการย่อยได้ของสารอาหารที่ลำไส้ส่วนปลายกับสมรรถภาพการเจริญเติบโตที่ไม่สอดคล้องกัน อาจเนื่องมาจากได้รับอิทธิพลจากหลายปัจจัย เช่น อายุของไก่เนื้อ วัตถุดิบในอาหารสัตว์ และตำแหน่งของระบบทางเดินอาหารที่ใช้ในการวิเคราะห์ที่อาจส่งผลทำให้อัตราการย่อยสลายอาหารคลาดเคลื่อนได้ ดังนั้นอาจต้องพิจารณาทั้งในส่วนของลำไส้เล็กส่วนปลายและระบบทางเดินอาหารโดยรวม (Cowieson, 2010)

โดยผลของการย่อยได้ของวัตถุดิบ ค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้แบบปรากฏ และประสิทธิภาพการใช้พลังงานรวมในอาหาร (AME/GE) ในงานทดลองนี้ สอดคล้องกับผลของการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในอาหารไก่เนื้อต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อในวันที่ 19 ถึง 23 ในตารางที่ 4.7 แม้ไม่พบความแตกต่างทางสถิติ

ตารางที่ 4.9 ผลของการเสริมเอนไซม์ต่อการย่อยได้ของวัตถุดิบ ค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้แบบปรากฏ และประสิทธิภาพการใช้พลังงานรวมในอาหาร (AME/GE) ของไก่เนื้อในช่วงอายุ 19–23 วัน

Days 19–23	Treatments				P-value
	1	2	3	4	
DMD (%)	66.48±2.10	67.05±1.78	67.45±2.26	66.52±2.33	0.767
AME (Kcal/kg)	3,287.00±127.43	3,322.63±83.97	3,353.00±96.71	3,288.63±131.22	0.596
AME/GE (%)	70.02±2.72	70.80±1.79	71.50±2.06	70.10±2.80	0.646

Data are expressed as mean ± standard deviation (Mean ± S.D.).

4.3 การทดลองที่ 3: ผลของการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในอาหารไก่เนื้อที่มีการลดระดับพลังงานและมีข้าวเปลือกเป็นส่วนประกอบต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโต คุณภาพซากและคุณภาพเนื้อของไก่เนื้อ

4.3.1 ผลของการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในอาหารไก่เนื้อที่มีการลดระดับพลังงานและมีข้าวเปลือกเป็นส่วนประกอบต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อในช่วงอายุ 1-14 วัน

จากการศึกษาผลของการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในอาหารไก่เนื้อที่มีการลดระดับพลังงานและมีข้าวเปลือกเป็นส่วนประกอบต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อในช่วงอายุ 1 ถึง 14 วัน ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างกลุ่มการทดลอง ($P>0.05$) ในทุกพารามิเตอร์ ดังแสดงในตารางที่ 4.10

ตารางที่ 4.10 ผลของการเสริมเอนไซม์ในอาหารไก่เนื้อที่มีการลดระดับพลังงานและมีข้าวเปลือกเป็นส่วนประกอบต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อในช่วงอายุ 1-14 วัน

Days	Treatments					P-value
	1	2	3	4	5	
DOC BW	43.35±0.58	43.28±0.49	43.23±0.64	42.91±0.38	42.98±0.45	0.162
BW	440.78±13.12	437.68±12.08	435.25±16.94	429.22±17.86	435.39±6.60	0.358
ADG	31.48±0.94	31.26±0.86	31.09±1.21	30.66±1.28	31.10±0.47	0.356
FI	464.45±13.42	462.82±10.34	460.78±11.64	451.11±13.42	457.60±7.78	0.052
FCR	1.05±0.02	1.06±0.02	1.06±0.02	1.05±0.02	1.05±0.02	0.706
FCG	17.59±0.28	17.65±0.33	17.68±0.35	17.55±0.30	17.54±0.25	0.739

1: Normal energy diet; 2: Low energy diet; 3: Low energy diet supplemented with xylanase enzyme; 4: Low energy diet supplemented with a multi-enzyme complex; 5: Low energy diet supplemented with both xylanase and a multi-enzyme complex; DOC BW: day-old chick body weight (g/bird); BW: body weight (g/bird); ADG: average daily gain (g/bird/day); FI: feed intake (g/bird); FCR: feed conversion ratio; FCG: feed cost per gain (baht/kg.); Data are expressed as mean ± standard deviation (Mean ± S.D.).

โดยในช่วงอายุ 1 ถึง 14 วัน ไก่เนื้อในทุกกลุ่มการทดลองได้รับอาหารสูตรเดียวกันที่ยังไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์ เนื่องจากในช่วงเวลาดังกล่าวไก่เนื้อยังไม่สามารถใช้ประโยชน์จากสารอาหารและเอนไซม์ที่เสริมในอาหารสัตว์ได้อย่างเต็มที่ จึงทำให้การเสริมเอนไซม์ในระยะแรกเป็นการเพิ่มต้นทุนในด้านของการผลิตที่อาจไม่ทำให้เกิดประโยชน์ต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโต

ของไก่เนื้อ และในด้านของการวิจัยความไม่แตกต่างกันของประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อในแต่ละกลุ่มการทดลองที่ได้รับอาหารสูตรเดียวกันยังช่วยยืนยันผลของกลุ่มการทดลองในการเสริมเอนไซม์ในระยะถัดไปได้ชัดเจนมากขึ้น จากงานทดลองของ Ma et al. (2024) พบว่ากิจกรรมของเอนไซม์ทริปซินและคิมทริปซินเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในวันที่ 5 ถึง 10 และมีแนวโน้มคงที่ในวันที่ 10 ถึง 21 และในส่วนของการเสริมเอนไซม์คาร์บอกซีเปปติเดสและอะมิโนเปปติเดส พบว่ามีระดับกิจกรรมเพิ่มขึ้นตามอายุของไก่เนื้อเช่นกัน โดยในวันที่ 5 ถึง 10 พบว่ามีปริมาณต่ำ และมีกิจกรรมเพิ่มขึ้นตั้งแต่วันที่ 10 ถึง 21 ซึ่งเอนไซม์เหล่านี้เป็นเอนไซม์ช่วยย่อยโปรตีนที่สำคัญในไก่เนื้อ ดังนั้นไก่เนื้อจึงอาจตอบสนองต่อการเสริมเอนไซม์ได้ดีขึ้นเมื่อมีอายุมากขึ้น ซึ่งเป็นข้อสนับสนุนว่าการเริ่มเสริมเอนไซม์หลังอายุ 14 วัน อาจมีประสิทธิภาพมากกว่าการเสริมเอนไซม์ในระยะแรก

4.3.2 ผลของการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในอาหารไก่เนื้อที่มีการลดระดับพลังงานและมีข้าวเปลือกเป็นส่วนประกอบต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อในช่วงอายุ 15-28 วัน

จากการศึกษาผลของการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในอาหารไก่เนื้อที่มีการลดระดับพลังงานและมีข้าวเปลือกเป็นส่วนประกอบต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อในช่วงอายุ 15 ถึง 28 วัน พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($P < 0.01$) ในด้านของน้ำหนักตัวสุดท้าย น้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น อัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวัน ปริมาณอาหารที่กินได้ อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัว และต้นทุนค่าอาหารต่อการเปลี่ยนเป็นน้ำหนักตัว ดังแสดงในตารางที่ 4.11 พบว่าไก่เนื้อที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่เสริมเอนไซม์ไซลานเนส (กลุ่มการทดลองที่ 3) มีน้ำหนักตัวสุดท้าย น้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น และอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวัน สูงที่สุด เท่ากับ 1,736.30 กรัม/ตัว, 1,301.06 กรัม/ตัว และ 92.93 กรัม/ตัว/วัน ตามลำดับ ($P < 0.05$) และสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุมที่ได้รับอาหารพลังงานปกติ (กลุ่มการทดลองที่ 1) เท่ากับ 1,653.17 กรัม/ตัว, 1,212.39 กรัม/ตัว และ 86.60 กรัม/ตัว/วัน ตามลำดับ และกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่เสริมด้วยเอนไซม์ไซลานเนสและเอนไซม์รวม (กลุ่มการทดลองที่ 5) เท่ากับ 1,678.18 กรัม/ตัว, 1,242.79 กรัม/ตัว และ 88.77 กรัม/ตัว/วัน ตามลำดับ ($P < 0.05$) แต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์ (กลุ่มการทดลองที่ 2) เท่ากับ 1,732.39 กรัม/ตัว, 1,294.71 กรัม/ตัว และ 92.48 กรัม/ตัว/วัน ตามลำดับ และกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่เสริมด้วยเอนไซม์รวม (กลุ่มการทดลองที่ 4) เท่ากับ 1,727.28 กรัม/ตัว, 1,298.06 กรัม/ตัว และ 92.72 กรัม/ตัว/วัน ตามลำดับ ($P > 0.05$) อย่างไรก็ตามกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่เสริมด้วยเอนไซม์ไซลานเนสและเอนไซม์รวมมีน้ำหนักตัวสุดท้ายไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุมที่ได้รับอาหารพลังงานปกติ ($P > 0.05$) แต่มีน้ำหนักตัว

ที่เพิ่มขึ้นและอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวันสูงกว่าเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุมที่ได้รับอาหารพลังงานปกติที่มีน้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้นและอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวันต่ำที่สุด ($P < 0.05$)

ในด้านของปริมาณอาหารที่กินได้ พบว่ากลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์มีปริมาณอาหารที่กินได้สูงที่สุด เท่ากับ 1,725.10 กรัม/ตัว แต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่เสริมด้วยเอนไซม์ไซลานเนสและกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่เสริมด้วยเอนไซม์รวม เท่ากับ 1,714.00 และ 1,701.44 กรัม/ตัว ตามลำดับ ($P > 0.05$) ขณะที่กลุ่มควบคุมที่ได้รับอาหารพลังงานปกติมีปริมาณอาหารที่กินได้ต่ำที่สุด เท่ากับ 1,645.71 กรัม/ตัว แต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่เสริมด้วยเอนไซม์ไซลานเนสและเอนไซม์รวม เท่ากับ 1,666.05 กรัม/ตัว ($P > 0.05$) อย่างไรก็ตามไก่เนื้อในทุกกลุ่มการทดลองที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำ (ไม่เสริมเอนไซม์ เสริมเอนไซม์ไซลานเนส เสริมเอนไซม์รวม และเสริมเอนไซม์ไซลานเนสและเอนไซม์รวม) พบว่ามีปริมาณการกินได้ที่สูงกว่ากลุ่มควบคุมที่ได้รับอาหารพลังงานปกติ โดยการกินอาหารที่เพิ่มขึ้นอาจเป็นการชดเชยการลดลงของพลังงานในอาหาร เนื่องจากไก่เนื้อมีพฤติกรรมการกินอาหารตามพลังงานที่ร่างกายต้องการ เพื่อรักษาสสมดุลของพลังงานให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต (Classen, 2017) สอดคล้องกับการศึกษาของ Toghyani et al. (2024) พบว่าการลดพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้ในอาหารไก่เนื้อลง 100 และ 150 กิโลแคลอรี/กิโลกรัม ส่งผลให้ปริมาณการกินได้ของไก่เนื้อเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับกลุ่มที่ไม่ได้รับการลดพลังงานในอาหาร ($P < 0.01$) อย่างไรก็ตามไก่เนื้อกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำยังคงมีการเจริญเติบโตที่ดี ซึ่งอาจบ่งชี้ว่าการบริโภคอาหารที่เพิ่มขึ้นช่วยชดเชยพลังงานและโปรตีนที่ลดลงในสูตรอาหาร ส่งผลทำให้ไก่เนื้อยังคงได้รับสารอาหารในปริมาณที่เพียงพอต่อการเจริญเติบโต

ในด้านของอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัว พบว่ากลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่เสริมด้วยเอนไซม์รวมมีอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัวดีที่สุด เท่ากับ 1.31 เมื่อเทียบกับกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานปกติ เท่ากับ 1.36, กลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์ เท่ากับ 1.33 และกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่เสริมเอนไซม์ไซลานเนสและเอนไซม์รวม เท่ากับ 1.34 ($P < 0.05$) แต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่เสริมเอนไซม์ไซลานเนส เท่ากับ 1.32 ($P > 0.05$) และพบว่ากลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานปกติมีอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัวที่สูงที่สุดและไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่เสริมเอนไซม์ไซลานเนสและเอนไซม์รวม ($P < 0.05$)

และในด้านของต้นทุนค่าอาหารต่อการเปลี่ยนเป็นน้ำหนักตัว พบว่าไก่เนื้อในทุกกลุ่มการทดลองที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำ (ไม่เสริมเอนไซม์ เสริมเอนไซม์ไซลานเนส เสริมเอนไซม์รวม และเสริมเอนไซม์ไซลานเนสและเอนไซม์รวม) มีต้นทุนค่าอาหารต่อการเปลี่ยนเป็นน้ำหนักตัวต่ำกว่า

อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานปกติ ($P < 0.05$) โดยกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่เสริมเอนไซม์รวมมีต้นทุนค่าอาหารต่อการเปลี่ยนเป็นน้ำหนักตัวต่ำที่สุด เท่ากับ 20.88 บาท/กิโลกรัม และต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) เมื่อเทียบกับกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานปกติ เท่ากับ 22.88 บาท/กิโลกรัม แต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์ และกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่เสริมเอนไซม์ไซลานเนส เท่ากับ 21.15 และ 20.99 บาท/กิโลกรัม ตามลำดับ ($P > 0.05$) และพบว่ากลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่เสริมเอนไซม์ไซลานเนสและเอนไซม์รวมมีต้นทุนค่าอาหารต่อการเปลี่ยนเป็นน้ำหนักตัวสูงกว่ากลุ่มการทดลองที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำอื่น ๆ เท่ากับ 21.43 บาท/กิโลกรัม แต่ยังคงต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานปกติ ($P < 0.05$) แต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์ ($P > 0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 4.11 โดยพลังงานถือเป็นต้นทุนหลักในอาหารไก่เนื้อ จึงทำให้กลุ่มการทดลองที่ได้รับการลดระดับพลังงานในอาหารมีต้นทุนที่ต่ำกว่าเมื่อเทียบกับกลุ่มที่ได้รับพลังงานที่สูงกว่า และหากการลดพลังงานนั้นไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อในด้านของน้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น การลดพลังงานในอาหารจึงเป็นกลยุทธ์ที่สามารถนำไปใช้ได้จริงในเชิงการผลิต

จากผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการเสริมเอนไซม์ไซลานเนสหรือเอนไซม์รวมในช่วงอายุ 15 ถึง 28 วัน ในสูตรอาหารพลังงานต่ำที่มีข้าวเปลือกเป็นส่วนประกอบสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อและช่วยลดต้นทุนการผลิต โดยเฉพาะการเสริมเอนไซม์รวมที่ช่วยปรับปรุงการเจริญเติบโตของไก่เนื้อ จากประสิทธิภาพของอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัวและต้นทุนค่าอาหารต่อการเปลี่ยนเป็นน้ำหนักที่ดีที่สุด สอดคล้องกับผลงานทดลองของ Kim et al. (2025) พบว่าไก่เนื้อที่ได้รับอาหารที่ลดพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้ลง 100 กิโลแคลอรี/กิโลกรัม และเสริมด้วยเอนไซม์ไซลานเนสหรือเอนไซม์รวม (ไซลานเนสและเบต้ากลูคาเนส) ส่งผลให้อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัวดีขึ้น ($P < 0.05$) เมื่อเทียบกับกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์ และ Govil et al. (2017) พบว่าการเสริมเอนไซม์รวม (ไซลานเนส เบต้ากลูคาเนส และเซลลูเลส) ในสูตรอาหารที่ได้รับการลดพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้ลง 100 กิโลแคลอรี/กิโลกรัม ทำให้ไก่เนื้อมีน้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้นสูงกว่าเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุมที่ได้รับอาหารพลังงานปกติและกลุ่มที่ได้รับการลดพลังงานแต่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์

โดยการเสริมเอนไซม์ไซลานเนสในสูตรอาหารไก่เนื้อที่มีโยอาอาหารที่ละลายน้ำได้สูง และพลังงานต่ำ สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตของไก่เนื้อ โดยการส่งเสริมการย่อยและการดูดซึมสารอาหาร ทำให้ร่างกายสามารถใช้ประโยชน์จากพลังงานและสารอาหารได้ดีขึ้น นอกจากนี้ยัง

ช่วยปรับสมดุลระบบทางเดินอาหารผ่านการเพิ่มปริมาณของพรีไบโอติกประเภทไซโลโอลิโกแซคคาไรด์ (XOS) ในลำไส้ ส่งผลต่อสุขภาพลำไส้ที่ดีขึ้นและลดภาวะเครียดของสัตว์ (Baker et al., 2021; Bedford and Apajalahti, 2022; Kiarie et al., 2013) และจากการศึกษาของ Ko et al. (2021) พบว่าการเสริมเอนไซม์คืออกเทลในอาหารที่มีข้าวสาลีเป็นส่วนประกอบช่วยปรับปรุงอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัวของไก่เนื้อในช่วงอายุ 0 ถึง 35 วัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติแบบเชิงเส้น ($P=0.007$) เมื่อเสริมด้วยเอนไซม์คืออกเทลในระดับ 0, 0.2, 0.3 และ 20 กรัม/กิโลกรัม

อย่างไรก็ตามในทุกกลุ่มการทดลองที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำ พบว่ากลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่เสริมเอนไซม์ไซลานเนสและเอนไซม์รวมมีปริมาณอาหารที่กินได้ อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัว น้ำหนักตัวสุดท้าย น้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น อัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวันเฉลี่ยที่สุดเมื่อเทียบกับกลุ่มอาหารพลังงานต่ำอื่น ๆ แม้จะมีการเสริมเอนไซม์ในระดับสูงก็ตาม ผลดังกล่าวอาจสะท้อนถึงการเสริมไซลานเนสและเอนไซม์รวมในอาหารไก่เนื้ออาจไม่ก่อให้เกิดผลเสริมฤทธิ์กันตามที่คาดไว้ และอาจส่งผลกระทบต่ออาการกินอาหารของไก่เนื้อ จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการเจริญเติบโตลดลงตาม และในกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานปกติที่มีปริมาณการกินได้ น้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น และอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัวที่ต่ำกว่ากลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์ แสดงถึงการตอบสนองต่อการลดระดับพลังงานในอาหารที่ไม่เพียงพอหรืออัตราส่วนของพลังงานต่อโปรตีนที่ไม่สมดุล จึงส่งผลทำให้ไก่เนื้อในกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานปกติมีปริมาณอาหารที่กินได้ต่ำ รวมถึงได้รับโปรตีนต่ำกว่ากลุ่มการทดลองอื่น ๆ สำหรับการสร้างกล้ามเนื้อ และอาจใช้พลังงานส่วนเกินจากอาหารเปลี่ยนเป็นไขมันแทนการสร้างกล้ามเนื้อ จึงทำให้ประสิทธิภาพการเจริญเติบโตโดยรวมนั้นต่ำกว่ากลุ่มที่มีการลดพลังงานในอาหารกลุ่มอื่น ๆ ในทางกลับกันไก่เนื้อในกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำแต่ยังคงมีการกินได้ที่สูง ส่งผลทำให้ไก่เนื้อได้รับโปรตีนสำหรับการสร้างกล้ามเนื้อสูงขึ้นตาม และเมื่อโปรตีนถูกเปลี่ยนไปเป็นไกลโคเจนและถูกเก็บสะสมในกล้ามเนื้อแทนไขมัน จึงทำให้ไก่เนื้อในกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำมีอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัวที่ดีกว่ากลุ่มพลังงานปกติ และจากงานทดลองของ Liu et al. (2016) พบว่าการเพิ่มพลังงานจากโปรตีนจะช่วยเพิ่มน้ำหนักตัวของไก่เนื้อได้ดีที่สุด ขณะที่พลังงานที่ได้จากแป้งและไขมันมีผลต่อการเพิ่มน้ำหนักตัวน้อยกว่า ซึ่งบ่งชี้ว่าไก่เนื้อใช้พลังงานจากโปรตีนได้มีประสิทธิภาพมากกว่าในการสร้างกล้ามเนื้อและการสะสมโปรตีนในร่างกาย (muscle protein deposition) สอดคล้องกับผลงานทดลองของ Toghyani et al. (2024) พบว่าการเพิ่มระดับกรดอะมิโนในอาหารพลังงานปกติหรือพลังงานต่ำช่วยปรับปรุงน้ำหนักตัว น้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น และอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัวของไก่เนื้อในวันที่ 0 ถึง 24 ($P<0.01$, $P<0.01$ และ $P<0.01$ ตามลำดับ) เมื่อเทียบกับกลุ่มไก่เนื้อที่ได้รับกรดอะมิโนใน

ระดับมาตรฐาน ดังนั้นความสมดุลระหว่างพลังงานและโปรตีนในสูตรอาหารไก่เนื้อ จึงมีความสำคัญต่อการปรับปรุงอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัวและการเจริญเติบโตที่เหมาะสมของไก่เนื้อ

ตารางที่ 4.11 ผลของการเสริมเอนไซม์ในอาหารไก่เนื้อที่มีการลดระดับพลังงานและมีข้าวเปลือกเป็นส่วนประกอบต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อในช่วงอายุ 15–28 วัน

Days 15–28	Treatments					P-value
	1	2	3	4	5	
IW	440.78±13.12	437.68±12.08	435.25±16.94	429.22±17.86	435.39±6.60	0.358
FW	1,653.17±40.78 ^b	1,732.39±37.25 ^a	1,736.30±52.25 ^a	1,727.28±49.07 ^a	1,678.18±31.51 ^b	0.000
WG	1,212.39±34.73 ^c	1,294.71±30.50 ^a	1,301.06±37.59 ^a	1,298.06±33.37 ^a	1,242.79±31.21 ^b	0.000
ADG	86.60±2.48 ^c	92.48±2.18 ^a	92.93±2.68 ^a	92.72±2.38 ^a	88.77±2.23 ^b	0.000
FI	1,645.71±48.54 ^b	1,725.10±33.83 ^a	1,714.00±52.04 ^a	1,701.44±40.69 ^a	1,666.05±30.10 ^b	0.000
FCR	1.36±0.03 ^a	1.33±0.02 ^{b,c}	1.32±0.02 ^{cd}	1.31±0.02 ^d	1.34±0.02 ^{ab}	0.000
FCG	22.88±0.55 ^a	21.15±0.32 ^{bc}	20.99±0.33 ^c	20.88±0.31 ^c	21.43±0.35 ^b	0.000

1: Normal energy diet; 2: Low energy diet; 3: Low energy diet supplemented with xylanase enzyme; 4: Low energy diet supplemented with a multi-enzyme complex; 5: Low energy diet supplemented with both xylanase and a multi-enzyme complex; IW: initial body weight (g/bird); FW: final body weight (g/bird); WG: weight gain (g/bird); ADG: average daily gain (g/bird/day); FI: feed intake (g/bird); FCR: feed conversion ratio; FCG: feed cost per gain (baht/kg.); Data are expressed as mean ± standard deviation (Mean ± S.D.); ^{a, b, c, d} Mean values in the same row with different superscripts differ significantly (P<0.05).

4.3.3 ผลของการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในอาหารไก่เนื้อที่มีการลดระดับพลังงานและมีข้าวเปลือกเป็นส่วนประกอบต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อในช่วงอายุ 1-28 วัน

จากการศึกษาผลของการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในอาหารไก่เนื้อที่มีการลดระดับพลังงานและมีข้าวเปลือกเป็นส่วนประกอบต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อในช่วงอายุ 1 ถึง 28 วัน พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.01) ในด้านของน้ำหนักตัว อัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวัน ปริมาณอาหารที่กินได้ อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัว และต้นทุนค่าอาหารต่อการเปลี่ยนเป็นน้ำหนักตัว ดังแสดงในตารางที่ 4.12 พบว่าไก่เนื้อที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่เสริมด้วยเอนไซม์ไซลานาสน้ำหนักตัวและอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวันสูงสุด เท่ากับ 1,736.30 กรัม/ตัว และ 62.01 กรัม/ตัว/วัน ตามลำดับ (P<0.05) และสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุมที่ได้รับอาหารพลังงานปกติ เท่ากับ 1,653.17 กรัม/ตัว และ 59.04 กรัม/ตัว/วัน ตามลำดับ และกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่

เสริมด้วยเอนไซม์โซลานเนสและเอนไซม์รวม เท่ากับ 1,678.18 กรัม/ตัว และ 59.93 กรัม/ตัว/วัน ตามลำดับ ($P < 0.05$) แต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์ เท่ากับ 1,732.39 กรัม/ตัว และ 61.87 กรัม/ตัว/วัน ตามลำดับ และกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่เสริมด้วยเอนไซม์รวม เท่ากับ 1,727.28 กรัม/ตัว และ 61.69 กรัม/ตัว/วัน ตามลำดับ ($P > 0.05$) และพบว่ากลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่เสริมด้วยเอนไซม์โซลานเนสและเอนไซม์รวมมีน้ำหนักตัวและอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวันไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุมที่ได้รับอาหารพลังงานปกติที่มีน้ำหนักตัวและอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวันต่ำที่สุด ($P > 0.05$)

ในด้านของปริมาณอาหารที่กินได้ พบว่ากลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์มีปริมาณอาหารที่กินได้สูงที่สุด เท่ากับ 2,190.36 กรัม/ตัว แต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่เสริมด้วยเอนไซม์โซลานเนสและกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่เสริมด้วยเอนไซม์รวม เท่ากับ 2,176.06 และ 2,156.62 กรัม/ตัว ตามลำดับ ($P > 0.05$) ขณะที่กลุ่มควบคุมที่ได้รับอาหารพลังงานปกติมีปริมาณอาหารที่กินได้ต่ำที่สุด เท่ากับ 2,111.66 กรัม/ตัว แต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่เสริมด้วยเอนไซม์โซลานเนสและเอนไซม์รวม เท่ากับ 2,123.60 กรัม/ตัว ($P > 0.05$) อย่างไรก็ตามไก่เนื้อในทุกกลุ่มการทดลองที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำ (ไม่เสริมเอนไซม์ เสริมเอนไซม์โซลานเนส เสริมเอนไซม์รวม และเสริมเอนไซม์โซลานเนสและเอนไซม์รวม) พบว่ามีปริมาณการกินได้ที่สูงกว่ากลุ่มควบคุมที่ได้รับอาหารพลังงานปกติ

ในด้านของอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัว พบว่ากลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่เสริมด้วยเอนไซม์รวมมีอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัวดีที่สุด เท่ากับ 1.25 เมื่อเทียบกับกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานปกติ เท่ากับ 1.28, กลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์ เท่ากับ 1.26 และกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่เสริมเอนไซม์โซลานเนสและเอนไซม์รวม เท่ากับ 1.27 ($P < 0.05$) แต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่เสริมเอนไซม์โซลานเนส เท่ากับ 1.25 ($P > 0.05$) และพบว่ากลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานปกติมีอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัวที่สูงที่สุดและไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่เสริมเอนไซม์โซลานเนสและเอนไซม์รวม ($P < 0.05$)

ในด้านของต้นทุนค่าอาหารต่อการเปลี่ยนเป็นน้ำหนักตัว พบว่าไก่เนื้อในทุกกลุ่มการทดลองที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำ (ไม่เสริมเอนไซม์ เสริมเอนไซม์โซลานเนส เสริมเอนไซม์รวม และเสริมเอนไซม์โซลานเนสและเอนไซม์รวม) มีต้นทุนค่าอาหารต่อการเปลี่ยนเป็นน้ำหนักตัวต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานปกติ ($P < 0.05$) โดยกลุ่มที่ได้รับอาหาร

พลังงานต่ำที่เสริมเอนไซม์รวมมีต้นทุนค่าอาหารต่อการเปลี่ยนเป็นน้ำหนักตัวต่ำที่สุด เท่ากับ 20.09 บาท/กิโลกรัม และต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) เมื่อเทียบกับกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานปกติ เท่ากับ 21.48 บาท/กิโลกรัม แต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์และกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่เสริมเอนไซม์ไซลานเนส เท่ากับ 20.29 และ 20.17 บาท/กิโลกรัม ตามลำดับ ($P>0.05$) และพบว่ากลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่เสริมเอนไซม์ไซลานเนสและเอนไซม์รวมมีต้นทุนค่าอาหารต่อการเปลี่ยนเป็นน้ำหนักตัว เท่ากับ 20.42 บาท/กิโลกรัม ซึ่งต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) เมื่อเทียบกับกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานปกติ แต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์ ดังแสดงในตารางที่ 4.12

ตารางที่ 4.12 ผลของการเสริมเอนไซม์ในอาหารไก่เนื้อที่มีการลดระดับพลังงานและมีข้าวเปลือกเป็นส่วนประกอบต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อในช่วงอายุ 1–28 วัน

Days	Treatments					P-value
1–28	1	2	3	4	5	
DOC BW	43.35±0.58	43.28±0.49	43.23±0.64	42.91±0.38	42.98±0.45	0.162
BW	1,653.17±40.78 ^b	1,732.39±37.25 ^a	1,736.30±52.25 ^a	1,727.28±49.07 ^a	1,678.18±31.51 ^b	0.000
ADG	59.04±1.46 ^b	61.87±1.33 ^a	62.01±1.87 ^a	61.69±1.75 ^a	59.93±1.13 ^b	0.000
FI	2,111.66±54.96 ^c	2,190.36±38.33 ^a	2,176.06±60.77 ^a	2,156.62±54.18 ^{ab}	2,123.60±26.34 ^{bc}	0.001
FCR	1.28±0.02 ^a	1.26±0.01 ^{bc}	1.25±0.01 ^{cd}	1.25±0.01 ^d	1.27±0.01 ^{ab}	0.000
FCG	21.48±0.35 ^a	20.29±0.19 ^{bc}	20.17±0.24 ^c	20.09±0.20 ^c	20.42±0.23 ^b	0.000

1: Normal energy diet; 2: Low energy diet; 3: Low energy diet supplemented with xylanase enzyme; 4: Low energy diet supplemented with a multi-enzyme complex; 5: Low energy diet supplemented with both xylanase and a multi-enzyme complex; DOC BW: day-old chick body weight (g/bird); BW: body weight (g/bird); ADG: average daily gain (g/bird/day); FI: feed intake (g/bird); FCR: feed conversion ratio; FCG: feed cost per gain (baht/kg.); Data are expressed as mean ± standard deviation (Mean ± S.D.); ^{a, b, c, d} Mean values in the same row with different superscripts differ significantly ($P<0.05$).

4.3.4 ผลของการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในอาหารไก่เนื้อที่มีการลดระดับพลังงานและมีข้าวเปลือกเป็นส่วนประกอบต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อในช่วงอายุ 29–35 วัน

จากการศึกษาผลของการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในอาหารไก่เนื้อที่มีการลดระดับพลังงานและมีข้าวเปลือกเป็นส่วนประกอบต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อในช่วงอายุ 29 ถึง 35 วัน พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

($P < 0.01$) ในด้านของน้ำหนักตัวเริ่มต้น น้ำหนักตัวสุดท้าย และต้นทุนค่าอาหารต่อการเปลี่ยนเป็นน้ำหนักตัว และแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ในด้านของปริมาณอาหารที่กินได้ ดังแสดงในตารางที่ 4.13 พบว่าไก่เนื้อที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่เสริมด้วยเอนไซม์ไซลานเนสมีน้ำหนักตัวเริ่มต้นและน้ำหนักตัวสุดท้ายสูงที่สุด เท่ากับ 1,736.30 กรัม/ตัว และ 2,720.84 กรัม/ตัว ตามลำดับ ($P < 0.05$) และสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุมที่ได้รับอาหารพลังงานปกติ เท่ากับ 1,653.17 กรัม/ตัว และ 2,597.68 กรัม/ตัว ตามลำดับ และกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่เสริมด้วยเอนไซม์ไซลานเนสและเอนไซม์รวม เท่ากับ 1,678.18 กรัม/ตัว และ 2,643.17 กรัม/ตัว ตามลำดับ ($P < 0.05$) แต่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์ เท่ากับ 1,732.39 และ 2,712.73 กรัม/ตัว ตามลำดับ และกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่เสริมด้วยเอนไซม์รวม เท่ากับ 1,727.28 และ 2,706.37 กรัม/ตัว ตามลำดับ ($P > 0.05$) และพบว่ากลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่เสริมด้วยเอนไซม์ไซลานเนสและเอนไซม์รวมมีน้ำหนักตัวเริ่มต้นไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุมที่ได้รับอาหารพลังงานปกติ ($P > 0.05$) แต่มีน้ำหนักตัวสุดท้ายสูงกว่าเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุมที่ได้รับอาหารพลังงานปกติที่มีน้ำหนักตัวสุดท้ายต่ำที่สุด ($P < 0.05$)

ในด้านของปริมาณอาหารที่กินได้ พบว่ากลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่เสริมด้วยเอนไซม์รวมมีปริมาณอาหารที่กินได้สูงที่สุด เท่ากับ 1,412.94 กรัม/ตัว แต่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับกลุ่มการทดลองอื่นๆ ที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำ (ไม่เสริมเอนไซม์ เสริมเอนไซม์ไซลานเนส และเสริมเอนไซม์ไซลานเนสและเอนไซม์รวม) เท่ากับ 1,407.95, 1,409.88 และ 1,376.48 กรัม/ตัว ตามลำดับ ($P > 0.05$) ขณะที่กลุ่มควบคุมที่ได้รับอาหารพลังงานปกติมีปริมาณอาหารที่กินได้ต่ำที่สุด เท่ากับ 1,364.64 กรัม/ตัว แต่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่เสริมด้วยเอนไซม์ไซลานเนสและเอนไซม์รวม ($P > 0.05$) อย่างไรก็ตาม ไก่เนื้อในทุกกลุ่มการทดลองที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำ (ไม่เสริมเอนไซม์ เสริมเอนไซม์ไซลานเนส เสริมเอนไซม์รวม และเสริมเอนไซม์ไซลานเนสและเอนไซม์รวม) พบว่ามีปริมาณการกินได้ที่สูงกว่ากลุ่มควบคุมที่ได้รับอาหารพลังงานปกติ

และในด้านของต้นทุนค่าอาหารต่อการเปลี่ยนเป็นน้ำหนักตัว พบว่าไก่เนื้อในทุกกลุ่มการทดลองที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำ (ไม่เสริมเอนไซม์ เสริมเอนไซม์ไซลานเนส เสริมเอนไซม์รวม และเสริมเอนไซม์ไซลานเนสและเอนไซม์รวม) มีต้นทุนค่าอาหารต่อการเปลี่ยนเป็นน้ำหนักตัวต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานปกติ ($P < 0.05$) โดยกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่เสริมเอนไซม์ไซลานเนสและเอนไซม์รวมมีต้นทุนค่าอาหารต่อการเปลี่ยนเป็นน้ำหนักตัวต่ำที่สุด เท่ากับ 23.15 บาท/กิโลกรัม และต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) เมื่อ

เทียบกับกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานปกติ เท่ากับ 24.71 บาท/กิโลกรัม แต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับกลุ่มการทดลองที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำ (ไม่เสริมเอนไซม์ เสริมเอนไซม์ไซลาเนส และเสริมเอนไซม์รวม) เท่ากับ 23.16, 23.16 และ 23.36 บาท/กิโลกรัม ตามลำดับ ($P>0.05$)

และไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในด้านของน้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น อัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวัน และอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัวระหว่างกลุ่มการทดลอง ($P>0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 4.13 โดยในช่วงอายุ 15 ถึง 28 วัน, 1 ถึง 28 วัน และ 29 ถึง 35 วัน ยังคงแสดงผลลัพธ์ในทิศทางเดียวกัน โดยพบว่ากลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำ (ไม่เสริมเอนไซม์ เสริมเอนไซม์ไซลาเนส และเสริมเอนไซม์รวม) มีค่าการเจริญเติบโตและปริมาณอาหารที่กินได้สูงกว่ากลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานปกติ ($P<0.05$) โดยเฉพาะกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่มีการเสริมเอนไซม์รวม พบว่ามีอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัวดีที่สุดในช่วงอายุ 15 ถึง 28 วัน และ 1 ถึง 28 วัน

ตารางที่ 4.13 ผลของการเสริมเอนไซม์ในอาหารไก่เนื้อที่มีการลดระดับพลังงานและมีข้าวเปลือกเป็นส่วนประกอบต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อในช่วงอายุ 29–35 วัน

Days	Treatments					P-
29–35	1	2	3	4	5	value
IW	1,653.17±40.78 ^b	1,732.39±37.25 ^a	1,736.30±52.25 ^a	1,727.28±49.07 ^a	1,678.18±31.51 ^b	0.000
FW	2,597.68±61.09 ^c	2,712.73±38.50 ^a	2,720.84±63.50 ^a	2,706.37±65.21 ^a	2,643.17±40.02 ^b	0.000
WG	944.52±51.73	980.34±31.73	984.53±30.06	979.09±48.48	964.99±33.17	0.107
ADG	134.93±7.39	140.05±4.53	140.65±4.29	139.87±6.93	137.86±4.74	0.107
FI	1,364.64±52.86 ^b	1,407.95±34.00 ^a	1,409.88±40.63 ^a	1,412.94±42.87 ^a	1,376.48±44.00 ^{ab}	0.021
FCR	1.45±0.05	1.44±0.03	1.43±0.03	1.44±0.04	1.43±0.05	0.742
FCG	24.71±0.78 ^a	23.16±0.44 ^b	23.16±0.41 ^b	23.36±0.62 ^b	23.15±0.83 ^b	0.000

1: Normal energy diet; 2: Low energy diet; 3: Low energy diet supplemented with xylanase enzyme; 4: Low energy diet supplemented with a multi-enzyme complex; 5: Low energy diet supplemented with both xylanase and a multi-enzyme complex; IW: initial body weight (g/bird); FW: final body weight (g/bird); WG: weight gain (g/bird); ADG: average daily gain (g/bird/day); FI: feed intake (g/bird); FCR: feed conversion ratio; FCG: feed cost per gain (baht/kg.); Data are expressed as mean ± standard deviation (Mean ± S.D.); ^{a, b, c} Mean values in the same row with different superscripts differ significantly ($P<0.05$).

4.3.5 ผลของการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในอาหารไก่เนื้อที่มีการลดระดับพลังงานและมีข้าวเปลือกเป็นส่วนประกอบต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อในช่วงอายุ 1-35 วัน

จากการศึกษาผลของการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในอาหารไก่เนื้อที่มีการลดระดับพลังงานและมีข้าวเปลือกเป็นส่วนประกอบต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อในช่วงอายุ 1 ถึง 35 วัน พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$) ในด้านของน้ำหนักตัว อัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวัน ปริมาณอาหารที่กินได้ อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัว และต้นทุนค่าอาหารต่อการเปลี่ยนเป็นน้ำหนักตัว ดังแสดงในตารางที่ 4.14 พบว่าไก่เนื้อที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่เสริมด้วยเอนไซม์ไซลานเนสมีน้ำหนักตัวและอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวันสูงที่สุด เท่ากับ 2,720.84 กรัม/ตัว และ 77.51 กรัม/ตัว/วัน ตามลำดับ ($P < 0.05$) และสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุมที่ได้รับอาหารพลังงานปกติ เท่ากับ 2,597.68 กรัม/ตัว และ 74.22 กรัม/ตัว/วัน ตามลำดับ และกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่เสริมด้วยเอนไซม์ไซลานเนสและเอนไซม์รวม เท่ากับ 2,643.17 กรัม/ตัว และ 75.52 กรัม/ตัว/วัน ตามลำดับ ($P < 0.05$) แต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์ เท่ากับ 2,712.73 กรัม/ตัว และ 77.51 กรัม/ตัว/วัน ตามลำดับ และกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่เสริมด้วยเอนไซม์รวม เท่ากับ 2,706.37 กรัม/ตัว และ 77.32 กรัม/ตัว/วัน ตามลำดับ ($P > 0.05$) และพบว่ากลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่เสริมด้วยเอนไซม์ไซลานเนสและเอนไซม์รวมมีน้ำหนักตัวและอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวันสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุมที่ได้รับอาหารพลังงานปกติที่มีน้ำหนักตัวและอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวันต่ำที่สุด ($P < 0.05$)

ในด้านของปริมาณอาหารที่กินได้ พบว่ากลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์มีปริมาณอาหารที่กินได้สูงที่สุด เท่ากับ 3,604.17 กรัม/ตัว แต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับกลุ่มการทดลองที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่เสริมด้วยเอนไซม์ไซลานเนสและเสริมด้วยเอนไซม์ไซลานเนสและเอนไซม์รวม เท่ากับ 3,592.02 และ 3,568.94 กรัม/ตัว ตามลำดับ ($P > 0.05$) ขณะที่กลุ่มควบคุมที่ได้รับอาหารพลังงานปกติมีปริมาณอาหารที่กินได้ต่ำที่สุด เท่ากับ 3,481.64 กรัม/ตัว แต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่เสริมด้วยเอนไซม์ไซลานเนสและเอนไซม์รวม ($P > 0.05$) อย่างไรก็ตามไก่เนื้อในทุกกลุ่มการทดลองที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำ (ไม่เสริมเอนไซม์ เสริมเอนไซม์ไซลานเนส และเสริมเอนไซม์) พบว่ามีปริมาณการกินได้ที่สูงกว่ากลุ่มควบคุมที่ได้รับอาหารพลังงานปกติ

ในด้านของอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักร่าง พบว่ากลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่เสริมด้วยเอนไซม์รวมมีอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักร่างดีที่สุด เท่ากับ 1.32 เมื่อเทียบกับกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานปกติ เท่ากับ 1.34, กลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์ เท่ากับ 1.33 และกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่เสริมเอนไซม์ไซลาลเนสและเอนไซม์รวม เท่ากับ 1.33 ($P < 0.05$) แต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่เสริมเอนไซม์ไซลาลเนส เท่ากับ 1.32 ($P > 0.05$) และพบว่ากลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานปกติมีอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักร่างที่สูงที่สุด ($P < 0.05$)

และในด้านของต้นทุนค่าอาหารต่อการเปลี่ยนเป็นน้ำหนักร่าง พบว่าไก่เนื้อในทุกกลุ่มการทดลองที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำ (ไม่เสริมเอนไซม์ เสริมเอนไซม์ไซลาลเนส เสริมเอนไซม์รวม และเสริมเอนไซม์ไซลาลเนสและเอนไซม์รวม) มีต้นทุนค่าอาหารต่อการเปลี่ยนเป็นน้ำหนักร่างต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานปกติ ($P < 0.05$) โดยกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่เสริมเอนไซม์รวมมีต้นทุนค่าอาหารต่อการเปลี่ยนเป็นน้ำหนักร่างต่ำที่สุด เท่ากับ 21.26 บาท/กิโลกรัม และต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) เมื่อเทียบกับกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานปกติ เท่ากับ 22.68 บาท/กิโลกรัม แต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับกลุ่มการทดลองที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำ (ไม่เสริมเอนไซม์และเสริมเอนไซม์ไซลาลเนส) เท่ากับ 21.36 และ 21.29 บาท/กิโลกรัม ตามลำดับ ($P > 0.05$) และกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่เสริมด้วยเอนไซม์ไซลาลเนสและเอนไซม์รวมมีต้นทุนค่าอาหารต่อการเปลี่ยนเป็นน้ำหนักร่าง เท่ากับ 21.52 บาท/กิโลกรัม ซึ่งต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานปกติ ($P < 0.05$)

ตลอดช่วงอายุการทดลอง พบว่ากลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำ (ไม่เสริมเอนไซม์ เสริมเอนไซม์ไซลาลเนส และเสริมเอนไซม์รวม) มีค่าการเจริญเติบโตและปริมาณอาหารที่กินได้สูงกว่ากลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานปกติ ($P < 0.05$) โดยเฉพาะกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่มีการเสริมเอนไซม์รวม พบว่ามีอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักร่างดีที่สุดในช่วงอายุ 1 ถึง 35 วัน

ดังนั้นการเสริมเอนไซม์รวมในสูตรอาหารพลังงานต่ำที่มีข้าวเปลือกเป็นส่วนประกอบอาจช่วยลดผลกระทบจากการลดระดับพลังงานในอาหาร และส่งเสริมประสิทธิภาพการเจริญเติบโต โดยการปรับปรุงอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักร่างของไก่เนื้อได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 4.14 ผลของการเสริมเอนไซม์ในอาหารไก่เนื้อที่มีการลดระดับพลังงานและมีข้าวเปลือกเป็นส่วนประกอบต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อในช่วงอายุ 1–35 วัน

Days 1–35	Treatments					P-value
	1	2	3	4	5	
DOC BW	43.35±0.58	43.28±0.49	43.23±0.64	42.91±0.38	42.98±0.45	0.162
BW	2,597.68±61.09 ^c	2,712.73±38.50 ^a	2,720.84±63.50 ^a	2,706.37±65.21 ^a	2,643.17±40.02 ^b	0.000
ADG	74.22±1.75 ^c	77.51±1.10 ^a	77.74±1.81 ^a	77.32±1.86 ^a	75.52±1.14 ^b	0.000
FI	3,481.64±78.80 ^c	3,604.17±50.68 ^a	3,592.02±79.64 ^a	3,568.94±78.51 ^{ab}	3,517.75±43.39 ^{bc}	0.000
FCR	1.34±0.01 ^a	1.33±0.01 ^{bc}	1.32±0.01 ^{cd}	1.32±0.01 ^d	1.33±0.01 ^b	0.000
FCG	22.68±0.22 ^a	21.36±0.11 ^c	21.29±0.13 ^c	21.26±0.18 ^c	21.52±0.16 ^b	0.000

1: Normal energy diet; 2: Low energy diet; 3: Low energy diet supplemented with xylanase enzyme; 4: Low energy diet supplemented with a multi-enzyme complex; 5: Low energy diet supplemented with both xylanase and a multi-enzyme complex; DOC BW: day-old chick body weight (g/bird); BW: body weight (g/bird); ADG: average daily gain (g/bird/day); FI: feed intake (g/bird); FCR: feed conversion ratio; FCG: feed cost per gain (baht/kg.); Data are expressed as mean ± standard deviation (Mean ± S.D.); ^{a, b, c, d} Mean values in the same row with different superscripts differ significantly (P<0.05).

4.3.6 ผลของการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในอาหารไก่เนื้อที่มีการลดระดับพลังงานและมีข้าวเปลือกเป็นส่วนประกอบต่อคุณภาพซากของไก่เนื้อ

จากการศึกษาผลของการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในอาหารไก่เนื้อที่มีการลดระดับพลังงานและมีข้าวเปลือกเป็นส่วนประกอบต่อคุณภาพซากของไก่เนื้อ ในวันที่ 36 พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.01$) ในด้านของน้ำหนักมีชีวิต เปอร์เซ็นต์ซากตัดแต่ง เปอร์เซ็นต์เนื้อส่วนนอก เปอร์เซ็นต์สันใน และเปอร์เซ็นต์ปีก ดังแสดงในตารางที่ 4.15 พบว่าไก่เนื้อที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่เสริมด้วยเอนไซม์รวมมีน้ำหนักมีชีวิตสูงที่สุด เท่ากับ 2,591.08 กรัม และสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุมที่ได้รับอาหารพลังงานปกติ และกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่เสริมด้วยเอนไซม์ไซลาลเนสและเอนไซม์รวม เท่ากับ 2,470.56 และ 2,529.50 กรัม ตามลำดับ ($P<0.05$) แต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์ เท่ากับ 2,578.48 กรัม และกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่เสริมด้วยเอนไซม์ไซลาลเนส เท่ากับ 2,588.92 กรัม ตามลำดับ ($P>0.05$) โดยพบว่า น้ำหนักมีชีวิตและน้ำหนักตัวของไก่เนื้อตลอดช่วงอายุ 1 ถึง 35 วัน แสดงประสิทธิภาพการผลิตในทิศทางเดียวกัน ในส่วนของเปอร์เซ็นต์ซากตัดแต่งและเปอร์เซ็นต์เนื้อส่วนนอก พบว่าไก่เนื้อในทุกกลุ่มการทดลองที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำ (ไม่เสริมเอนไซม์ เสริมเอนไซม์ไซลาลเนส เสริมเอนไซม์รวม และเสริมเอนไซม์ไซลาลเนสและเอนไซม์รวม) มีเปอร์เซ็นต์ซากตัดแต่งและเปอร์เซ็นต์เนื้อส่วนนอก เท่ากับ

82.04 และ 20.61 เปอร์เซ็นต์, 82.27 และ 20.87 เปอร์เซ็นต์, 82.13 และ 20.68 เปอร์เซ็นต์ และ 82.09 และ 20.42 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานปกติ เท่ากับ 81.56 และ 19.63 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ($P < 0.05$) จากการศึกษาแสดงให้เห็นว่าเปอร์เซ็นต์ซากตัดแต่งและเปอร์เซ็นต์เนื้อส่วนนอกที่สูงขึ้นเป็นไปตามการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักมีชีวิตของไก่เนื้อ (ตารางที่ 4.15) โดยเฉพาะในกลุ่มการทดลองที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำ (กลุ่มการทดลองที่ 2, 3, 4 และ 5) ซึ่งมีน้ำหนักมีชีวิตที่สูงกว่ากลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากน้ำหนักซากมีความสัมพันธ์โดยตรงกับน้ำหนักตัวของไก่เนื้อ ตามรายงานของ Fereidoun et al. (2007) รายงานว่าน้ำหนักซากของไก่เนื้อคิดเป็น 69 ถึง 71 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักตัว ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่ากลุ่มที่มีน้ำหนักมีชีวิตที่สูงทำให้มีเปอร์เซ็นต์ซากตัดแต่งสูงขึ้นตาม นอกจากนี้กล้ามเนื้ออก (pectoralis major) ถือเป็นกล้ามเนื้อหลักที่ใช้ในการสะสมพลังงานในการเจริญเติบโต (primary growth muscles) และมีส่วนสำคัญในการสร้างกล้ามเนื้อส่วนอื่น ๆ จึงทำให้เป็นส่วนที่ได้รับผลกระทบจากโภชนาการอาหารที่สัตว์กินมากที่สุด จึงทำให้เปอร์เซ็นต์ของเนื้อส่วนนอกมักถูกนำมาใช้เป็นตัวชี้วัดหนึ่งของการเจริญเติบโตและคุณภาพเนื้อ โดยโภชนาการจากอาหารที่เหมาะสมมีบทบาทสำคัญต่อการเจริญเติบโตและคุณภาพเนื้อของสัตว์ปีก (Jankowski et al., 2020) สอดคล้องกับงานทดลองของ Tesseraud et al. (2009) พบว่ากลุ่มไก่เนื้อที่ได้รับอาหารไลซีนต่ำมีปริมาณโปรตีนในกล้ามเนื้ออกต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับกลุ่มที่ได้รับอาหารไลซีนระดับปานกลางและสูง ($P < 0.05$) และ Siddik et al. (2025) พบว่าไก่เนื้อกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่มีระดับโปรตีนเท่ากับกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานสูงกว่ากลับมีเปอร์เซ็นต์เนื้ออกที่สูงกว่า เท่ากับ 38.84 และ 42.03 กรัม ตามลำดับ ($P < 0.05$) อาจเนื่องมาจากกลุ่มพลังงานต่ำมีการกินได้ที่มากขึ้นและมากกว่ากลุ่มที่ได้รับพลังงานสูง ดังนั้นผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการลดระดับพลังงานในสูตรอาหารไม่ได้ส่งผลทำให้ไก่เนื้อได้รับพลังงานและโปรตีนลดลงเสมอไปหากไก่เนื้อมีการกินได้ที่เพิ่มขึ้นซึ่งทำให้พลังงานและโปรตีนที่ได้รับสูงขึ้นตาม และส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์ซากตัดแต่งและเปอร์เซ็นต์เนื้อส่วนนอกของไก่เนื้อ ในส่วนของเปอร์เซ็นต์สันในพบว่ากลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่เสริมด้วยเอนไซม์ไซลานเนสมีเปอร์เซ็นต์สันในสูงที่สุด เท่ากับ 3.79 เปอร์เซ็นต์ และสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุมที่ได้รับอาหารพลังงานปกติและกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่เสริมด้วยเอนไซม์รวม เท่ากับ 3.59 และ 3.67 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ($P < 0.05$) แต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์ เท่ากับ 3.71 เปอร์เซ็นต์ และกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่เสริมด้วยเอนไซม์ไซลานเนสและเอนไซม์รวม เท่ากับ 3.71 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ($P > 0.05$) ในส่วนของเปอร์เซ็นต์ปีกพบว่ากลุ่มควบคุมที่ได้รับอาหารพลังงานปกติและกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่เสริมด้วยเอนไซม์ไซลานเนสและเอนไซม์รวมมีเปอร์เซ็นต์ปีกสูงที่สุด เท่ากับ

7.26 และ 7.26 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ($P < 0.05$) ขณะที่กลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่เสริมด้วยเอนไซม์รวมมีเปอร์เซ็นต์ปีกต่ำที่สุด เท่ากับ 7.09 เปอร์เซ็นต์ และไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์ เท่ากับ 7.10 เปอร์เซ็นต์ และกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่เสริมด้วยเอนไซม์ไซลาลเนส เท่ากับ 7.20 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ($P > 0.05$) ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าน้ำหนักตัวของไก่เนื้อไม่ส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มขึ้นของเนื้อส่วนปีกเหมือนที่พบในเนื้อส่วนอกและสันในที่แสดงความสัมพันธ์ของน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นตามน้ำหนักตัวของไก่เนื้อ อาจเนื่องมาจากกล้ามเนื้ออกของไก่เนื้อ ซึ่งเป็นกล้ามเนื้อชนิดไกลโคไลติกมีความต้องการกลูโคสสูง และไวต่อการเปลี่ยนแปลงของพลังงานและสารอาหารมากที่สุด ในขณะที่กล้ามเนื้อชนิดออกซิเดชัน เช่น กล้ามเนื้อส่วนขาและน่อง อาจได้รับผลกระทบจากโภชนาการน้อยกว่า เนื่องจากเป็นกล้ามเนื้อที่ใช้กรดไขมันเป็นแหล่งพลังงานหลัก โดยมีความหนาแน่นของไมโทคอนเดรียสูงกว่ากล้ามเนื้อชนิดไกลโคไลติก อีกทั้งยังมีโปรตีน fatty acid translocase/differentiation cluster 36 (FAT/CD36) ในปริมาณมาก ซึ่งเป็นโปรตีนเยื่อหุ้มเซลล์ที่ทำหน้าที่ในการลำเลียงกรดไขมันเข้าสู่เซลล์ (Schiaffino and Reggiani, 2011) และไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) จากการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในอาหารไก่เนื้อที่มีการลดระดับพลังงานและมีข้าวเปลือกเป็นส่วนประกอบต่อคุณภาพซากในส่วนของเปอร์เซ็นต์ซากและเปอร์เซ็นต์น่องติดสะโพก

ตารางที่ 4.15 ผลของการเสริมเอนไซม์ในอาหารไก่เนื้อที่มีการลดระดับพลังงานและมีข้าวเปลือกเป็นส่วนประกอบต่อคุณภาพซากของไก่เนื้อ

Carcass quality	Treatments					P-value
	1	2	3	4	5	
LW	2,470.56±104.63 ^c	2,578.48±83.12 ^a	2,588.92±95.85 ^a	2,591.08±91.46 ^a	2,529.50±79.00 ^b	0.000
CW ¹	91.55±0.70	91.41±0.74	91.39±0.77	91.28±0.75	91.40±0.81	0.532
CW ²	81.56±0.92 ^b	82.04±0.85 ^a	82.27±0.76 ^a	82.13±0.92 ^a	82.09±0.98 ^a	0.003
SBB	19.63±1.48 ^b	20.61±1.11 ^a	20.87±1.55 ^a	20.68±1.11 ^a	20.42±1.28 ^a	0.000
SBL	14.79±0.67	14.67±0.72	14.94±0.75	15.10±0.79	14.85±0.86	0.078
Fillet	3.59±0.22 ^c	3.71±0.26 ^{ab}	3.79±0.21 ^a	3.67±0.28 ^{bc}	3.71±0.22 ^{ab}	0.004
Wings	7.26±0.31 ^a	7.10±0.30 ^b	7.20±0.27 ^{ab}	7.09±0.30 ^b	7.26±0.37 ^a	0.008

1: Normal energy diet; 2: Low energy diet; 3: Low energy diet supplemented with xylanase enzyme; 4: Low energy diet supplemented with a multi-enzyme complex; 5: Low energy diet supplemented with both xylanase and a multi-enzyme complex; LW: live weight (g); CW¹: carcass weight with visceral organ (%); CW²: carcass weight without visceral organ (%); SBB: skinless boneless breast (%); SBL: skinless boneless leg (%); Data are expressed as mean ± standard deviation (Mean ± S.D.); ^{a, b, c} Mean values in the same row with different superscripts differ significantly ($P < 0.05$).

4.3.7 ผลของการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในอาหารไก่เนื้อที่มีการลดระดับพลังงานและมีข้าวเปลือกเป็นส่วนประกอบต่อคุณภาพเนื้อของไก่เนื้อ

จากการศึกษาผลของการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในอาหารไก่เนื้อที่มีการลดระดับพลังงานและมีข้าวเปลือกเป็นส่วนประกอบต่อค่าความเป็นกรด-ด่างของเนื้อส่วนอกหลังการฆ่าเป็นเวลา 45 นาที และ 1, 3 และ 5 วัน พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$) ต่อค่าความเป็นกรด-ด่างของเนื้ออกหลังการฆ่าเป็นเวลา 45 นาที, 1 วัน และ 3 วัน ดังแสดงในตารางที่ 4.16 โดยหลังการฆ่าที่ 45 นาที พบว่าไก่เนื้อในทุกกลุ่มการทดลองที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำ (ไม่เสริมเอนไซม์ เสริมเอนไซม์ไซลานเนส เสริมเอนไซม์รวม และเสริมเอนไซม์ไซลานเนสและเอนไซม์รวม) มีค่าความเป็นกรด-ด่างของเนื้ออกสูงกว่า (6.13, 6.13, 6.14 และ 6.10 ตามลำดับ) เมื่อเทียบกับกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานปกติที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 5.99 ($P < 0.01$) อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นกรด-ด่างที่เกิดขึ้น โดยเฉพาะในกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำ อาจสะท้อนถึงการเปลี่ยนแปลงของระบบเมตาบอลิซึมและคุณภาพเนื้อที่ต่างจากกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานปกติ โดยหลังกระบวนการฆ่าการไหลเวียนของเลือดจะหยุดลงทำให้ไม่มีออกซิเจนเข้าสู่เซลล์กล้ามเนื้อ เกิดการเปลี่ยนแปลงกระบวนการเมตาบอลิซึมภายในกล้ามเนื้อจากการหายใจระดับเซลล์แบบใช้ออกซิเจนเปลี่ยนมาเป็นกระบวนการไกลโคไลซิสแบบไม่ใช้ออกซิเจนแทน ซึ่งกระบวนการไกลโคไลซิสแบบไม่ใช้ออกซิเจนดังกล่าวยังคงเกิดขึ้นอยู่ในระยะหนึ่งหลังการตาย ส่งผลทำให้ไกลโคเจนที่สะสมอยู่ในกล้ามเนื้อถูกเปลี่ยนเป็นกรดแลคติกจากการสลายกลูโคสภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจน กรดแลคติกที่เพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างในกล้ามเนื้อลดลงซึ่งภายในเวลา 45 นาทีหลังการตาย กล้ามเนื้อจะเริ่มมีการสะสมกรดแลคติกเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน แต่ค่าความเป็นกรด-ด่างของกล้ามเนื้อยังไม่ลดลงถึงระดับต่ำสุด ที่เรียกว่าค่าความเป็นกรด-ด่างสุดท้าย (ultimate pH หรือ pHu) ที่มักจะเกิดขึ้นภายในช่วงเวลา 18 ถึง 24 ชั่วโมง หลังการฆ่า (Warriss, 2000; Barbut, 1997)

ในวันที่ 1 พบว่ากลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่เสริมด้วยเอนไซม์ไซลานเนสและเอนไซม์รวมมีค่าความเป็นกรด-ด่างของเนื้ออกสูงที่สุด (6.06) เมื่อเทียบกับกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานปกติและกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์ที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 5.95 และ 5.93 ตามลำดับ ($P < 0.05$) แต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่ได้รับการเสริมด้วยเอนไซม์ไซลานเนส (5.99) และกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่เสริมด้วยเอนไซม์รวม (5.98) ตามลำดับ ($P > 0.05$) สอดคล้องกับงานทดลองของ Yaqoob et al. (2022) พบว่าไก่เนื้อกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำ 50 กิโลแคลอรี/กิโลกรัม และเสริมเอนไซม์รวมมีค่าความเป็นกรด-ด่างของเนื้ออกหลังการฆ่า 24 ชั่วโมง สูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับกลุ่ม

ควบคุมที่ได้รับอาหารพลังงานปกติและไม่เสริมเอนไซม์ เท่ากับ 6.14 เทียบกับ 5.90 ตามลำดับ ($P < 0.05$) อย่างไรก็ตามในทุกกลุ่มการทดลองมีค่าความเป็นกรด-ด่างสุดท้ายอยู่ระหว่าง 5.93 ถึง 6.06 และการวัดค่าความเป็นกรด-ด่างหลังถูกฆ่าเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง ถือว่าเป็นช่วงที่กระบวนการเมตาบอลิซึมหลังการตายสิ้นสุดลง เนื้อควรมีค่าความเป็นกรด-ด่างสุดท้ายอยู่ระหว่าง 5.7 ถึง 6.1 หากต่ำกว่า 5.7 เนื้อจะถูกจัดเป็นเนื้อที่มีลักษณะสีซีด เนื้อนุ่ม และเหลว (pale soft and exudative; PSE) และถ้าสูงกว่า 6.1 จะถูกจัดเป็นเนื้อลักษณะสีคล้ำ เนื้อเหนียว และแห้ง (dark firm and dry; DFD) ซึ่งทั้งสองลักษณะจัดเป็นเนื้อที่ผู้บริโภคไม่ต้องการ (Barbut, 1997; Fletcher et al., 2000; Qiao et al., 2001) และในวันที่ 3 พบว่ากลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่เสริมด้วยเอนไซม์ โซลานเนสและเอนไซม์รวมมีค่าความเป็นกรด-ด่างของเนื้ออกสูงที่สุด (5.89) เมื่อเทียบกับกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานปกติที่มีค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 5.66 ($P < 0.05$) แต่ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับกลุ่มการทดลองที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำ (ไม่เสริมเอนไซม์ เสริมเอนไซม์โซลานเนส และเสริมเอนไซม์รวม) เท่ากับ 5.81, 5.73 และ 5.82 ตามลำดับ ($P > 0.05$) และผลการศึกษาไม่พบความแตกต่างของค่าความเป็นกรด-ด่างในกลุ่มไก่เนื้อที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำร่วมกับการเสริมเอนไซม์ต่างชนิด ได้แก่ เอนไซม์โซลานเนส เอนไซม์รวม และเอนไซม์โซลานเนสร่วมกับเอนไซม์รวม ตลอดระยะเวลาการเก็บข้อมูลหลังการฆ่า แสดงให้เห็นว่าการเสริมเอนไซม์ในสูตรอาหารพลังงานต่ำไม่ได้ส่งผลต่อค่าความเป็นกรด-ด่างของเนื้ออกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดย Peron et al. (2005) ศึกษาการใช้เอนไซม์ช่วยย่อย NSP ในสูตรอาหารไก่เนื้อ พบว่าแม้จะมีผลต่อการย่อยและการดูดซึมสารอาหาร แต่ไม่ส่งผลโดยตรงต่อค่าความเป็นกรด-ด่างของเนื้อหลังการฆ่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และ Nian et al. (2011) รายงานว่าการเสริมเอนไซม์ในอาหารพลังงานต่ำอาจช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการย่อย แต่ไม่ได้ส่งผลต่อการสะสมไกลโคเจนในกล้ามเนื้อจึงไม่ส่งผลกระทบต่อค่าความเป็นกรด-ด่างของเนื้อหลังการฆ่า

ดังนั้นผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการลดระดับพลังงานในอาหารของไก่เนื้อจะส่งผลให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของเนื้ออกหลังการฆ่า (45 นาที, 1 วัน และ 3 วัน) มีค่าสูงขึ้นเมื่อเทียบกับกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานปกติ แต่ค่าความเป็นกรด-ด่างที่วัดหลังการฆ่ายังคงอยู่ในช่วงมาตรฐานที่ยอมรับได้ (5.7 ถึง 6.1) ซึ่งเป็นช่วงที่ไม่ก่อให้เกิดลักษณะเนื้อที่ผิดปกติ และไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) จากการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในอาหารไก่เนื้อที่มีการลดระดับพลังงานและมีข้าวเปลือกเป็นส่วนประกอบต่อของคุณภาพเนื้อในส่วนของการสูญเสียน้ำหนักและค่าความแข็งของเนื้อส่วนอก ดังแสดงในตารางที่ 4.16 จากการศึกษาของ Kuttappan et al. (2017) พบว่าไก่เนื้อที่มีภาวะกล้ามเนื้อผิดปกติ เช่น ภาวะอกไก่แข็ง (wooden breast) มักมีการเผาผลาญคาร์โบไฮเดรตที่ลดลงและมีการแสดงออกของโปรตีนที่เกี่ยวข้องกับการส่ง

สัญญาณภายในเซลล์ (signaling proteins) เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับไก่เนื้อที่มีภาวะกล้ามเนื้อปกติ โดยการเปลี่ยนแปลงเหล่านี้สะท้อนถึงการลดลงของศักยภาพในกระบวนการไกลโคไลซิส ซึ่งอาจส่งผลทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่างของกล้ามเนื้อหลังการเชือดสูงขึ้น (ultimate pH) ทั้งนี้จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าทุกกลุ่มการทดลองมีค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ในช่วงปกติ (5.7 ถึง 6.1) และไม่พบความผิดปกติของค่าการสูญเสีย น้ำและค่าความแข็งของเนื้อส่วนอกระหว่างกลุ่มการทดลอง ($P>0.05$) ดังแสดงในตารางที่ 4.16 ดังนั้นผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการลดระดับพลังงานหรือการเสริมเอนไซม์ในอาหารของไก่เนื้อไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพเนื้อของไก่เนื้อในเชิงลบ

ตารางที่ 4.16 ผลของการเสริมเอนไซม์ในอาหารไก่เนื้อที่มีการลดระดับพลังงานและมีข้าวเปลือกเป็นส่วนประกอบต่อคุณภาพเนื้อของไก่เนื้อ

Meat quality	Treatments					P-value
	1	2	3	4	5	
pH value						
45 min	5.99±0.03 ^b	6.13±0.06 ^a	6.13±0.09 ^a	6.14±0.08 ^a	6.10±0.06 ^a	0.000
1 day	5.95±0.06 ^b	5.93±0.14 ^b	5.99±0.08 ^{ab}	5.98±0.02 ^{ab}	6.06±0.11 ^a	0.022
3 day	5.66±0.23 ^b	5.81±0.16 ^{ab}	5.73±0.22 ^{ab}	5.82±0.13 ^{ab}	5.89±0.10 ^a	0.032
5 day	5.97±0.06	5.97±0.13	6.02±0.10	6.03±0.04	6.05±0.06	0.092
Drip loss (%)						
1 day	2.16±0.30	2.22±0.44	2.20±0.47	2.06±0.52	2.48±0.63	0.366
3 day	3.88±0.58	3.69±0.44	3.71±0.86	3.49±0.77	4.04±0.75	0.448
5 day	5.70±1.02	5.58±0.28	5.14±0.87	5.80±1.65	5.82±0.93	0.574
Wooden breast (%)						
Score 0	57.29±26.38	41.67±28.38	39.58±22.51	33.33±25.75	37.50±14.10	0.152
Score 1	34.38±24.50	33.33±28.37	37.50±17.68	37.50±27.70	47.92±20.53	0.602
Score 2	8.33±12.31	25.00±26.11	22.92±23.13	29.17±18.72	14.58±21.61	0.118

1: Normal energy diet; 2: Low energy diet; 3: Low energy diet supplemented with xylanase enzyme; 4: Low energy diet supplemented with a multi-enzyme complex; 5: Low energy diet supplemented with both xylanase and a multi-enzyme complex; Data are expressed as mean ± standard deviation (Mean ± S.D.); ^{a, b} Mean values in the same row with different superscripts differ significantly ($P<0.05$).

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัยและข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 การทดลองที่ 1

การเสริมเอนไซม์ไซลาเนสช่วยเพิ่มค่าการย่อยได้ของวัตถุดิบในข้าวสาลี และรำข้าวสาลี และการเสริมเอนไซม์รวมช่วยเพิ่มค่าการย่อยได้ของวัตถุดิบในข้าวเปลือก ข้าวสาลี และรำข้าวสาลี

5.1.2 การทดลองที่ 2

การเสริมเอนไซม์ไม่แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อการย่อยได้ของวัตถุดิบในหลอดทดลอง แต่ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าการเสริมเอนไซม์ในอาหารไก่เนื้อ โดยเฉพาะเอนไซม์รวมสามารถปรับปรุงการย่อยได้ของวัตถุดิบได้ในระดับหนึ่ง

การเสริมเอนไซม์ไซลาเนสร่วมกับเอนไซม์รวมในวันที่ 15 ถึง 18 ช่วยเพิ่มน้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น อัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวัน และอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัวของไก่เนื้อ ได้ดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์ และในวันที่ 1 ถึง 23 กลุ่มที่ได้รับการเสริมเอนไซม์รวมมีแนวโน้มของน้ำหนักตัว อัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวัน และอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัวดีที่สุด แม้ไม่ได้มีปริมาณการกินได้ที่สูงที่สุด

การเสริมเอนไซม์ไม่แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติต่อการย่อยได้ของวัตถุดิบ ค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้แบบปรากฏ และประสิทธิภาพการใช้พลังงานรวมในอาหาร (AME/GE) อย่างไรก็ตามกลุ่มที่ได้รับการเสริมเอนไซม์รวมมีแนวโน้มของการย่อยได้ของวัตถุดิบ ค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้แบบปรากฏ และประสิทธิภาพการใช้พลังงานรวมในอาหารดีที่สุด ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่า แม้การเสริมเอนไซม์จะไม่ส่งผลแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญในด้านการย่อย หรือค่าพลังงานในระยะสั้น แต่การเสริมเอนไซม์มีแนวโน้มที่ดีต่อประสิทธิภาพการย่อยอาหารและการใช้พลังงาน และช่วยปรับปรุงการเจริญเติบโตของไก่เนื้อ โดยเฉพาะเมื่อเสริมด้วยเอนไซม์หลายชนิดร่วมกัน

5.1.3 การทดลองที่ 3

ตลอดช่วงระยะเวลาการทดลอง พบว่าไก่เนื้อที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำไม่ว่าจะเป็นสูตรที่ไม่เสริมเอนไซม์ เสริมเอนไซม์ไซลาเนส หรือเสริมเอนไซม์รวม มีค่าการเจริญเติบโตและปริมาณอาหารที่กินได้สูงกว่ากลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานปกติ โดยเฉพาะกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงาน

ต่ำที่มีการเสริมเอนไซม์รวม พบว่ามีอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักรวมน้ำหนักตัวที่ต่ำที่สุด เมื่อเทียบกับกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานปกติหรือกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่ไม่มีการเสริมเอนไซม์ และพบว่ากลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่มีการเสริมเอนไซม์โซลานเนสรวมกับเอนไซม์รวมไม่แสดงผลในการเพิ่มประสิทธิภาพการเจริญเติบโตที่แตกต่างอย่างชัดเจนเมื่อเทียบกับกลุ่มอาหารพลังงานต่ำที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์ ทั้งนี้กลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำทั้งหมดมีต้นทุนค่าอาหารต่อการเปลี่ยนเป็นน้ำหนักตัวต่ำกว่ากลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานปกติ

ไก่เนื้อที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำ ไม่ว่าจะเป็นสูตรที่ไม่เสริมเอนไซม์ เสริมเอนไซม์โซลานเนส เสริมเอนไซม์รวม หรือเสริมเอนไซม์โซลานเนสและเอนไซม์รวม ส่งผลให้ไก่เนื้อมีน้ำหนักมีชีวิต เพอร์เซ็นต์ซากตัดแต่ง และเปอร์เซ็นต์เนื้อส่วนอก สูงกว่ากลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานปกติ ทั้งนี้ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างกลุ่มดังกล่าวต่อเปอร์เซ็นต์ซากของไก่เนื้อและเปอร์เซ็นต์เนื้อติดสะโพก และยังพบว่ากลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่มีการเสริมเอนไซม์โซลานเนสและเอนไซม์รวมมีน้ำหนักมีชีวิตต่ำกว่าเมื่อเทียบกับกลุ่มอาหารพลังงานต่ำที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์

ไก่เนื้อที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำ มีค่าความเป็นกรด-ด่างของเนื้ออกหลังการฆ่า (45 นาที, 1 วัน และ 3 วัน) สูงกว่าเมื่อเทียบกับกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานปกติ โดยเฉพาะกลุ่มที่ได้รับอาหารพลังงานต่ำที่มีการเสริมเอนไซม์โซลานเนสและเอนไซม์รวมมีค่าสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติตลอดระยะเวลาการทดลอง อย่างไรก็ตามการลดระดับพลังงานหรือการเสริมเอนไซม์ในอาหารของไก่เนื้อไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพเนื้อของไก่เนื้อในเชิงลบ

5.2 ข้อเสนอแนะ

5.2.1 การทดลองที่ 1

ควรมีการศึกษาระดับการใช้เอนไซม์ที่เหมาะสมในแต่ละชนิดวัตถุดิบ เพื่อประสิทธิภาพการใช้งานและความคุ้มค่าเชิงเศรษฐกิจ

5.2.2 การทดลองที่ 2

ควรมีการศึกษาระดับการใช้เอนไซม์ที่เหมาะสมในอาหารสัตว์ เพื่อประสิทธิภาพการใช้งานและความคุ้มค่าเชิงเศรษฐกิจ

ควรมีการศึกษาการเสริมเอนไซม์ในแต่ละช่วงอายุของไก่เนื้ออย่างเฉพาะเจาะจง เพื่อให้สามารถกำหนดช่วงเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการใช้เอนไซม์แต่ละชนิด

ควรมีการศึกษาการย่อยได้และการเปลี่ยนแปลงของจุลินทรีย์ในระบบทางเดินอาหารต่อการเสริมเอนไซม์ในทุกช่วงอายุของไก่เนื้อ เพื่อติดตามผลของการเสริมเอนไซม์ต่อการ

ทำงานของระบบย่อยอาหารอย่างต่อเนื่อง รวมถึงควรมีการศึกษาการย่อยได้ในระดับการใช้พลังงาน
สุทธิ

5.2.3 การทดลองที่ 3

ควรมีการศึกษาการใช้เอนไซม์ในสูตรอาหารที่มีระดับพลังงานหลากหลายมากขึ้น เพื่อประเมินประสิทธิภาพของเอนไซม์ต่อระดับพลังงานที่แตกต่างกัน และเพื่อวิเคราะห์ความ
คุ้มค่าทางเศรษฐกิจ

ควรมีการศึกษาความพึงพอใจของผู้บริโภคต่อคุณภาพเนื้อไก่เนื้อเพิ่มเติม โดยเฉพาะด้านลักษณะเนื้อสัมผัส รสชาติ กลิ่น และความนุ่ม เพื่อประเมินการยอมรับของผู้บริโภค

ควรมีการตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเนื้อเพิ่มเติมในระดับโภชนา เช่น ปริมาณโปรตีน ไขมัน ความชื้น และพลังงาน เพื่อให้ได้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับคุณค่าทางโภชนาการ
ของเนื้อไก่เนื้อ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อผู้บริโภคทั้งในด้านสุขภาพและการเลือกซื้อผลิตภัณฑ์ที่มี
คุณภาพ

รายการอ้างอิง

- ชัยวัฒน์ สาวเจริญสุข. 2566. แนวโน้มธุรกิจ/อุตสาหกรรม 2566–2568: อุตสาหกรรมข้าว. แนวโน้มธุรกิจ-อุตสาหกรรม. แหล่งที่มา: <https://www.krungsri.com/th/research/industry/industry-outlook/agriculture/rice/io/io-rice-2023-2025>. 18 เมษายน 2567.
- นิยมเดชา อัจฉรา บุญแก้ว เปลื้อง และ คงเสน มงคล. 2558. ผลของการเสริมกากเนื้อในเมล็ดปาล์มน้ำมันในอาหารไก่เนื้อ ต่อคุณภาพซากของไก่เนื้อ. วารสารมหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์. 7(3): 1–12.
- Abdollahi, M. R., Hosking, B. and Ravindran, V. 2015. Nutrient analysis, metabolizable energy and ileal amino acid digestibility of palm kernel meal for broilers. *Anim. Feed Sci. Technol.* 206: 119–125.
- Abdollahi, M. R., Hosking, B. J., Ning, D. and Ravindran, V. 2016. Influence of palm kernel meal inclusion and exogenous enzyme supplementation on growth performance, energy utilization, and nutrient digestibility in young broilers. *Asian-Australas. J. Anim. Sci.* 29(4): 539–548.
- Adams, C. A. 2001. Total nutrition. feeding animals for health and growth. Nottingham: University Press, Nottingham. 244 p.
- Adebowale, T. O., Yao, K. and Oso, A. O. 2019. Major cereal carbohydrates in relation to intestinal health of monogastric animals: A review. *Anim. Nutr.* 5(4): 331–339.
- Ahmed, M. E. and Abbas, T. E. 2013. The effect of feeding pellets versus mash on performance and carcass characteristics of broiler chicks. *Bull. Environ. Life Sci.* 2: 31–34.
- Alqhtani, A. H., Al Sulaiman, A. R., Alharthi, A. S. and Abudabos, A. M. 2022. Effect of exogenous enzymes cocktail on performance, carcass traits, biochemical metabolites, intestinal morphology, and nutrient digestibility of broilers fed normal and low-energy corn-soybean diets. *Animals.* 12(9): 1094.
- Alshelmani, M. I., Loh, T. C., Foo, H. L., Lau, W. H. and Sazili, A. Q. 2014. Biodegradation of palm kernel cake by cellulolytic and hemicellulolytic bacterial cultures through solid state fermentation. *Sci. World J.* 2014: 1–8.

- Amerah, A. M., Ravindran, V. and Lentle, R. G. 2009. Influence of insoluble fibre and whole wheat inclusion on the performance, digestive tract development and ileal microbiota profile of broiler chickens. *Br. Poult. Sci.* 50: 366–375.
- Annapure, U. S. and Pratisha, N. 2022. Psychrozymes: A novel and promising resource for industrial applications. *Microb. Extrem.* 185–95.
- AOAC. 2000. *Official Methods of Analysis of the Association of Official Analytical Chemists*. 15th edition. Virginia: Association of Official Analytical Chemists, Inc.
- Bach Knudsen, K. E. 1997. Carbohydrate and lignin contents of plant materials used in animal feeding. *Anim. Feed Sci. Tech.* 67: 319–338.
- Baeza, E. and Le Bihan-Duval, E. 2013. Chicken lines divergent for low or high abdominal fat deposition: a relevant model to study the regulation of energy metabolism. *Animal: an international journal of animal bioscience*. 7(6): 965–973.
- Baeza, E., Guillier, L. and Petracci, M. 2022. Review: production factors affecting poultry carcass and meat quality attributes. *Animal*. 16(1): 100331.
- Bailey, R. W. 1973. Structural carbohydrates. In *chemistry and biochemistry of herbage*. Academic Press, London. 162 p.
- Baker, J. T., Duarte, M. E., Holanda, D. M. and Kim, S. W. 2021. Friend or foe? impacts of dietary xylans, xylooligosaccharides, and xylanases on intestinal health and growth performance of monogastric animals. *Animals*. 11: 1–25.
- Baldi, G., Soglia, F. and Petracci, M. 2021. Spaghetti meat abnormality in broilers: current understanding and future research directions. *Front. Physiol.* 12: 684497.
- Barbut, S. 1997. Problem of pale soft exudative meat in broiler chickens. *Br. Poult. Sci.* 38: 355–358.
- Barbut, S. and Leishman, E. M. 2022. Quality and processability of modern poultry meat. *Animals*. 12(20): 2766.
- Barbut, S., Mitchell, R., Hall, P., Bacon, C., Bailey, R., Owens, C. M. and Petracci, M. 2024. Review: Myopathies in broilers: supply chain approach to provide solutions to challenges related to raising fast growing birds. *Poult. Sci.* 103(8): 103801.

- Bautil, A., Verspreet, J., Buyse, J., Goos, P., Bedford, M. R. and Courtin, C. M. 2019. Age-related arabinoxylan hydrolysis and fermentation in the gastrointestinal tract of broilers fed wheat-based diets. *Poult. Sci.* 98(10): 4606–4621.
- Bayer, R. C., Chawan, C. B. and Bird, F. H. 1975. Scanning electron microscopy of the chicken crop-the avian rumen?. *Poult. Sci.* 54(3): 703–707.
- Beauchemin, K. A., Colombatto, D., Morgavi, D. P., Yang, W. Z. and Rode, L. M. 2004. Mode of action of exogenous cell wall degrading enzymes for ruminants. *Can. J. Anim. Sci.* 84: 13–22.
- Bedford, M. R. 2018. The evolution and application of enzymes in the animal feed industry: The role of data interpretation. *Br. Poult. Sci.* 59: 486–493.
- Bedford, M. R. and Apajalahti, J. H. 2022. The role of feed enzymes in maintaining poultry intestinal health. *J. Sci. Food Agric.* 102: 1759–70.
- Bedford, M. R. and Cowieson, A. J. 2012. Exogenous enzymes and their effects on intestinal microbiology. *Anim. Feed Sci. Tech.* 173: 76–85.
- Beg, Q., Kapoor, M., Mahajan, L. and Hoondal, G. S. 2001. Microbial xylanases and their industrial applications: a review. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 56: 326–338.
- Benedito, D. B. C. and Barber, S. 1978. Toxic constituents of rice bran. *Rev. Agroquim Technol. Aliment.* 18: 89–92.
- Bhardwaj, N., Kumar, B. and Verma, P. A. 2019. Detailed overview of xylanases: an emerging biomolecule for current and future prospective. *Bioresour. Bioprocess.* 6: 40.
- Bian, T., Xing, T., Zhao, X. and Xu, X. 2024. Effects of wooden breast myopathy on meat quality characteristics of broiler pectoralis major muscle and its changes with intramuscular connective tissue. *Foods.* 13(4): 507.
- Borda-Molina, D., Seifert, J. and Camarinha-Silva, A. 2018. Current perspectives of the chicken gastrointestinal tract and its microbiome. *Comput. Struct. Biotechnol. J.* 16: 131–139.

- Bourdillon, A., Carre, B., Conan, L., Francesch, M., Fuentes, M., Huyghebaert, G., Janssen, W. M., Leclercq, B., Lessire, M. and McNab, J. 1990. European reference method of in vivo determination of metabolisable energy in poultry: reproducibility, effect of age, comparison with predicted values. *Br. Poult. Sci.* 31(3): 567–576.
- Bray, C. I. 1943. Rice and rice byproducts for fattening swine. Baton Rouge: Louisiana State University: Louisiana Bulletin. 368 p.
- Bromfield, J. I., Hoffman, L. C., Horyanto, D. and Soumeh, E. A. 2021. Enhancing growth performance, organ development, meat quality, and bone mineralisation of broiler chickens through multi-enzyme super-dosing in reduced energy diets. *Animals*. 11(10): 2791.
- Cao, B. H., Zhang, X. P., Guo, Y. M., Karasawa, Y. and Kumao, T. 2003. Effects of dietary cellulose levels on growth, nitrogen utilization, retention time of diets in digestive tract and caecal microflora of chickens. *Asian-Australas. J. Anim. Sci.* 16: 863–866.
- Caprita, R., Caprita, A. and Cretescu, C. I. 2011. Effective extraction of soluble non-starch polysaccharides and viscosity determination of aqueous extracts from wheat and barley. *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science*. 2: 1–4.
- Caprita, R., Caprita, A. and Julean, C. 2010. Biochemical Aspects of Non-Starch Polysaccharides. *J. Anim. Sci. Biotechnol.* 43(1): 1–8.
- Carre, B., Lessire, M. and Juin, H. 2013. Prediction of metabolisable energy value of broiler diets and water excretion from dietary chemical analyses. *Animal*. 7(08): 246–258.
- Celi, P., Cowieson, A. J., Fru-Nji, F., Steinert, R. E., Kluenter, A. M. and Verlhac, V. 2017. Gastrointestinal functionality in animal nutrition and health: New opportunities for sustainable animal production. *Anim. Feed Sci. Technol.* 234: 88–100.
- Chakdar, H., Kumar, M., Pandiyan, K., Singh, A., Nanjappan, K., Kashyap, P. L. and Srivastava, A. K. 2016. Bacterial xylanases: biology to biotechnology. *3 Biotech.* 6(2): 150.

- Champ, M., Langkilde, A. M., Brouns, F., Kettlitz, B. and Collet, Y. L. B. 2003. Advances in dietary fibre characterisation. 1. Definition of dietary fibre, physiological relevance, health benefits and analytical aspects. *Nutr. Res. Rev.* 16(1): 71–82.
- Chaplin, M. F. 2003. Fibre and water binding. *Proc. Nutr. Soc.* 62: 223–227.
- Chauhan, P. S., Puri, N., Sharma, P. and Gupta, N. 2012. Mannanases: microbial sources, production, properties and potential biotechnological applications. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 93: 1817–1830.
- Chen, X., Zhang, G. M., Wang, W. W., Liu, G. H., Cai, H. Y., Purba, A. and Zheng, A. J. 2023. Compound non-starch polysaccharide enzymes improve growth performance, slaughter performance, immune function, and apparent utilization rate of nutrients in broiler chickens fed a low-metabolizable energy diet. *Front. Vet. Sci.* 10: 1–8.
- Choct, M. 1997. Feed non-starch polysaccharides: chemical structures and nutritional significance. *Feed Milling International*. 191: 13–26.
- Choct, M. 2006. Enzymes for the feed industry: past, present and future. *World's Poult. Sci. J.* 62(1): 5–16.
- Choct, M. 2015. Feed non-starch polysaccharides for monogastric animals: classification and function. *Anim. Prod. Sci.* 55: 1360–1366.
- Choct, M., Kocher, A., Waters, D. L., Pettersson, D. and Ross, G. 2004. A comparison of three xylanases on the nutritive value of two wheats for broiler chickens. *Br. J. Nutr.* 92(1): 53–61.
- Classen, H. L. 2017. Diet energy and feed intake in chickens. *Anim. Feed Sci. Technol.* 233: 13–21.
- Clavijo, V. and Florez, M. J. V. 2018. The gastrointestinal microbiome and its association with the control of pathogens in broiler chicken production: a review. *Poult. Sci.* 97(3): 1006–1021.
- Collett, S. R. 2012. Nutrition and wet litter problems in poultry. *Animal Feed Sci. Technol.* 173: 65–75.
- Collins, T., Gerday, C. and Feller, G. 2005. Xylanases, xylanase families and extremophilic xylanases. *FEMS Microbiol. Rev.* 29(1): 3–23.

- Costa, F. G. P., Goular, C. C., Figueiredo, D. F., Oliveira, C. F. S. and Silva, J. H. V. 2008. Economic and environmental impact of using exogenous enzymes on poultry feeding. *Int. Poult. Sci.* 88: 140–148.
- Cowieson, A. J. 2005. Factors that affect the nutritional value of maize for broilers. *Anim. Feed Sci. Technol.* 119:293–305.
- Cowieson, A. J. 2010. Strategic selection of exogenous enzymes for corn/soy-based poultry diets. *J. Poult. Sci.* 47: 1–7.
- Cowieson, A. J. and Bedford, M. R. 2009. The effect of phytase and carbohydrase on ileal amino acid digestibility in monogastric diets. *Anim. Feed Sci. Technol.* 149(1-2): 70–82.
- Cowieson, A. J. and Ravindran, V. 2008. Effect of exogenous enzymes in maize-based diets varying in nutrient density for young broilers: growth performance and digestibility of energy, minerals and amino acids. *Br. Poult. Sci.* 49: 37–44.
- Cowieson, A. J., Bedford, M. R. and Ravindran, V. 2010a. Interactions between xylanase and glucanase in maize-soy-based diets for broilers. *Br. Poult. Sci.* 51: 246–257.
- Cowieson, A. J., Hruby, M. and Faurschou-Isaksen, M. 2010b. The effect of conditioning temperature and exogenous xylanase addition on the viscosity of wheat-based diets and the performance of broiler chickens. *Br. Poult. Sci.* 51(3): 340–349.
- Craig, A. D., Khattak, F., Hastie, P., Bedford, M. R. and Olukosi, O. A. 2020. Xylanase and xylo-oligosaccharide prebiotic improve the growth performance and concentration of potentially prebiotic oligosaccharides in the ileum of broiler chickens. *Br. Poult. Sci.* 61: 70–78.
- Cunha, A. and Gandini, A. 2010. Turning polysaccharides into hydrophobic materials: A critical review. Part 2. Hemicelluloses, chitin/chitosan, starch, pectin and alginates. *Cellulose.* 17: 1045–1065.
- Das, L., Bhaumik, E. and Raychaudhuri, U. 2012. Role of nutraceuticals in human health. *J. Food Technol.* 49(2): 173–183.
- Davidson, M. H. and McDonald, A. 1998. Fiber: Forms and functions. *Nutr. Res.* 18: 617–624.

- De Leeuw, J. A., Bolhuis, J. E., Bosch, G. and Gerrits, W. J. J. 2008. Effects of dietary fibre on behaviour and satiety in pigs: Symposium on behavioural nutrition and energy balance in the young. *Proc. Nutr. Soc.* 67(4): 334–342.
- De Vries, M. and De Boer, I. J. M. 2010. Comparing environmental impacts for livestock products: a review of life cycle assessments. *Livest. Sci.* 128: 1–11.
- Den Besten, G., van Eunen, K., Groen, A. K., Venema, K., Reijngoud, D. and Bakker, B. M. 2013. The role of short-chain fatty acids in the interplay between diet, gut microbiota, and host energy metabolism. *J. Lipid Res.* 54: 2325–2340.
- Deniz, G., Orhan, F., Gencoglu, H., Eren, M., Cengiz, S. and Turkmen, I. 2007. Effects of different levels of rice bran with and without enzyme on performance and size of the digestive organs of broiler chickens. *Rev. Med. Vet.* 158.
- Donohue, M. and Cunningham, D. L. 2009. Effects of grain and oilseed prices on the costs of US poultry production. *J. Appl. Poult. Res.* 18: 325–337.
- Dozier III, W. and Gehring, C. 2014. Growth performance of Hubbard × Cobb 500 and Ross × Ross 708 male broilers fed diets varying in apparent metabolizable energy from 14 to 28 days of age. *J. Appl. Poult. Res.* 23:494–500.
- Dusterhoft, E. M., Voragen, A. G. J. and Engles, F. M. 1991. Nonstarch polysaccharides from sunflower (*Helianthus annuus*) meal and palm kernel (*Elaeis guineensis*) meal-preparation of cell wall material and extraction of polysaccharide fractions. *J. Sci. Food Agric.* 55: 411–422.
- Ebringerova, A. 2006. Structural diversity and application potential of hemicelluloses. *Macromolecular Symposia*: 232: 1–12.
- Emmerson, D. A. 1997. Commercial approaches to genetic selection for growth and feed conversion in domestic poultry. *Poult. Sci.* 76(8): 1121–1125.
- Englyst, H. 1989. Dietary fibre and resistant starch. *Anim. Feed Sci. Technol.* 23(1-3): 27–42.
- Englyst, H. N., Quigley, M. E. and Hudson, G. J. 1994. Determination of dietary fibre as non-starch polysaccharides with gas-liquid chromatographic, high-performance liquid chromatographic or spectrophotometric measurement of constituent sugars. *The Analyst.* 119(7): 1497–1509.

- Fabek, H., Messerschmidt, S., Brulport, V. and Goff, H. D. 2014. The effect of in vitro digestive processes on the viscosity of dietary fibres and their influence on glucose diffusion. *Food Hydrocoll.* 35: 718–726.
- FAO. 2009. State of agricultural commodity markets 2009: High food prices and the food crisis–Experiences. Food and Agricultural Organization of the United Nations. Available Source: <https://www.fao.org/3/i0753e/i0753e.pdf>, February 27, 2024.
- FAO. 2014. Decision tools for family poultry development. FAO Animal Production and Health Guidelines, Rome. 1–123 p.
- Fereidoun, H., Bahram, A., Soltanieh, K., Sadraddin, A. A. and Pouria, H. 2007. Mean percentage of skin and visible fat in 10 chicken carcass weight. *Int. J. Poult. Sci.* 6(1): 43–47.
- Fernandes, V. O., Costa, M., Ribeiro, T., Serrano, L., Cardoso, Vania., Santos, H., Lordelo, M., Ferreira, Luis. And Fontes, C. M. G. A. 2015. 1,3-1,4- β -Glucanases and not 1,4- β -glucanases improve the nutritive value of barley-based diets for broilers. *Anim. Feed Sci. Technol.* 153–156.
- Feye, K. M., Baxter, M. F. A., Tellez-Isaias, G., Kogut, M. H. and Ricke, S. C. 2020. Influential factors on the composition of the conventionally raised broiler gastrointestinal microbiomes. *Poult. Sci.* 99: 653–659.
- Fincher, G. B. and Stone, B. A. 1986. Cell walls and their components in cereal grain technology. *Adv. Cereal Sci. Technol.* 8: 207–295.
- Fletcher, D. L., Qiao, M. and Smith, D. P. 2000. The relationship of raw broiler breast meat color and pH to cooked meat color and pH. *Poult. Sci.* 79: 784–788.
- Gallinger, C. I., Suarez, D. M. and Irazusta, A. 2004. Effects of rice bran inclusion on performance and bone mineralization in broiler chicks. *J. Appl. Poult. Res.* 13: 183–190.
- Ge, X., Wang, A., Ying, Z., Zhang, L., Su, W., Cheng, K., Feng, C., Zhou, Y., Zhang, L. and Wang, T. 2019. Effects of diets with different energy and bile acids levels on growth performance and lipid metabolism in broilers. *Poult. Sci.* 98: 887–895.

- Ghazalah, A. A., Abd-Elsamee, M. O. and Ali, A. M. 2008. Influence of dietary energy and poultry fat on the response of broiler chicks to heat therm. *Int. J. Poult. Sci.* 7(4): 355–359.
- Glamocic, D., Polovinski Horvatovic, M., Ivkovic, M., Beukovic, D. and Bjedov, S. 2011. Effects of enzymes supplementation on digestibility and energy utilizations of broilers diets with different metabolizable energy level. *Biotechnol. Anim. Husb.* 27(3): 583–591.
- Goering, H. K. and Van Soest, P. J. 1970. Forage Fiber Analysis (Apparatus Reagents, Procedures and Some Applications). *Agriculture Handbook*. United States Department of Agriculture, Washington D. C. 20 p.
- Goldenkova-Pavlova, I. V., Tyurin, A. A., and Mustafaev, O. N. 2018. The features that distinguish lichenases from other polysaccharide-hydrolyzing enzymes and the relevance of lichenases for biotechnological applications. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 102(9): 3951–3965.
- Gous, R. M. and Nonis, M. K. 2010. Modelling egg production and nutrient responses in broiler breeder hens. *J. Agric. Sci.* 148: 287–301.
- Govil, K., Nayak, S., Baghel, R. P. S., Patil, A. K., Malapure, C. D. and Thakur, D. 2017. Performance of broiler chicken fed multicarbohydases supplemented low energy diet. *Vet. World.* 10(7): 727–731.
- Hahn-Didde, D. and Purdum, S. E. 2014. The effects of an enzyme complex in moderate and low nutrient-dense diets with dried distillers grains with soluble in laying hens. *J. Appl. Poult.* 23: 23–33.
- Helrich, K. 1990. *Official Method of Analysis of the AOAC*. 15th Edition, Arlington, Association of Official Analytical Chemists, Washington D. C. 298 p.
- Hetland, H., Svihus, B. and Krogdahl, A. 2003. Effects of oat hulls and wood shavings on digestion in broilers and layers fed diets based on whole or ground wheat. *Br. Poult. Sci.* 44: 275–282.
- Hsieh, Y. S. Y. and Harris, P. J. 2019. Xylans of red and green algae: What is known about their structures and how they are synthesised?. *Polymers.* 11: 354.

- Hu, X., Li, X., Xiao, C., Kong, L., Zhu, Q. and Song, Z. 2021. Effects of dietary energy level on performance, plasma parameters, and central AMPK levels in stressed broilers. *Front. Vet. Sci.* 8: 681858.
- Hu, Y., Lan, D., Zhu, Y., Pang, H., Mu, X. and Hu, X. 2018. Effect of diets with different energy and lipase levels on performance, digestibility and carcass trait in broilers. *Anim. Biosci.* 31(8): 1275–1284.
- Idan, F., Paulk, C. B., Pokoo-Aikins, A. and Stark, C. R. 2023. Growth performance, intestinal morphometry, and blood serum parameters of broiler chickens fed diets containing increasing levels of wheat bran with or without exogenous multi-enzyme supplementation. *Livest. Sci.* 275: 105296.
- Igbasan, F. A., Manner, K., Miksch, G., Borriss, R., Farouk, A. and Simon, O. 2000. Comparative studies on the in vitro properties of phytases from various microbial origins. *Arch. Tierernahr.* 53(4): 353–373.
- Iji, P. A., Saki, A. and Tivey, D. R. 2001. Body and intestinal growth of broiler chicks on a commercial starter diet. 1. Intestinal weight and mucosal development. *British Poult. Sci.* 42(4): 505–513.
- Imran, M., Nazar, M., Saif, M., Khan, M. A., Sanaullah, V. M. and Javed, O. 2016. Role of Enzymes in Animal Nutrition: A Review. *PSM Vet. Res.* 1: 38–45.
- Iyayi, E. A., Ogunsola, O. and Ijaya. R. 2005. Effect of three sources of fibre and period of feeding on the performance, carcass measures, organs relative weight and meat quality in broilers. *Int. J. Poult. Sci.* 4(9): 695–700.
- Izydorczyk, M. S. and Biliaderis, C. G. 1995. Cereal arabinoxylans: Advances in structure and physicochemical properties. *Carbohydr. Polym.* 28: 33–48.
- Izydorczyk, M. S. and Dexter, J. E. 2008. Barley β -glucans and arabinoxylans: molecular structure, physicochemical properties, and uses in food products—a review. *Food Res. Int.* 41: 850–868.
- Jankowski, J., Mikulski, D., Mikulska, M., Ognik, K., Calyniuk, Z., Mroz, E. and Zdunczyk, Z. 2020. The effect of different dietary ratios of arginine, methionine, and lysine on the performance, carcass traits, and immune status of turkeys. *Poult. Sci.* 99(2): 1028–1037.

- Jha, R., Fohse, J. M., Tiwari, U. P., Li, L. and Willing, B. P. 2019a. Dietary fiber and intestinal health of monogastric animals. *Front. Vet. Sci.* 6: 48.
- Jha, R., Singh, A. K., Yadav, S., Berrocoso, J. F. D. and Mishra, B. 2019b. Early nutrition programming (in ovo and post-hatch feeding) as a strategy to modulate gut health of poultry. *Front. Vet. Sci.* 6: 82.
- Jimenez-Moreno, E., Gonzalez-Alvarado, J. M., Gonzalez-Serrano, A., Lazaro, R. and Mateos, G. G. 2009. Effect of dietary fiber and fat on performance and digestive traits of broilers from one to twenty-one days of age. *Poult. Sci.* 88: 2562–2574.
- Jo, H., Sung, J. Y. and Kim, B. G. 2021. Effects of supplemental xylanase on in vitro disappearance of dry matter in feed ingredients for swine. *Rev. Colomb. Cienc. Pecu.* 34(4): 316–323.
- Jorgensen, H., Zhao, X. Q., Knudsen, K. E. B. and Eggum, B. O. 1996. The influence of dietary fiber source and level on the development of the gastrointestinal tract, digestibility and energy metabolism in broiler chickens. *Br. J. Nutr.* 75: 379–395.
- Jozefiak, D., Rutkowski, A., Jensen, B. B. and Engberg, R. M. 2006. The effect of beta-glucanase supplementation of barley and oat-based diets on growth performance and fermentation in broiler chicken gastrointestinal tract. *Br. Poult. Sci.* 47(1): 57–64.
- Kang, P., Hou, Y. Q., Toms, D., Yan, N. D., Ding, B. Y. and Gong, J. 2013. Effects of enzyme complex supplementation to a paddy-based diet on performance and nutrient digestibility of meat-type ducks. *Asian-Aust. J. Anim. Sci.* 26(2): 253–259.
- Karki, P. 2023. Induced fit model-definition, mechanism, advantages. *Microbenotes*. Available Source: <https://microbenotes.com/induced-fit-model-definition-mechanismadvantages/>, February 23, 2024.
- Kaur, S., Savita, S. and Nagi, H. P. S. 2011. Functional properties and anti-nutritional factors in cereal bran. *Asian J. Food Agro Industr.* 4: 122–131.
- Kerley, M. S. and Allee, G. L. 2003. Modifications in soybean seed composition to enhance animal feed use and value: Moving from dietary ingredient to a functional dietary component. *AgBioForum.* 6(1–2): 14–17.

- Kheravii, S. K., Morgan, N. K., Swick, R. A., Choct, M. and Wu, S. B. 2018. Roles of dietary fiber and ingredient particle size in broiler nutrition. *Worlds Poult. Sci. J.* 74: 301–316.
- Kiarie, E., Romero, L. F. and Nyachoti, C. M. 2013. The role of added feed enzymes in promoting gut health in swine and poultry. *Nutr. Res. Rev.* 26: 71–88.
- Kiarie, E., Romero, L. F. and Ravindran, V. 2014. Growth performance, nutrient utilization, and digesta characteristics in broiler chickens fed corn or wheat diets without or with supplemental xylanase. *Poult. Sci.* 93(5): 1186–1196.
- Kim, D. Y., Kim, K. H., Lee, E. C., Oh, J. K., Park, M. A. and Kil, D. Y. 2025. Effect of dietary supplementation of xylanase alone or combination of xylanase and β -glucanase on growth performance, meat quality, intestinal measurements, and nutrient utilization in broiler chickens. *Anim. Biosci.* 38(2): 325–335.
- Kim, H. Y., Moon, J. O. and Kim, S. W. 2024. Development and application of a multi-step porcine in vitro system to evaluate feedstuffs and feed additives for their efficacy in nutrient digestion, digesta characteristics, and intestinal immune responses. *Anim. Nutr.* 15: 265–282.
- Kim, M., Ingale, S. L., Hosseindoust, A., Choi, Y., Kim, K. and Chae, B. 2021a. Synergistic effect of exogenous multi-enzyme and phytase on growth performance, nutrients digestibility, blood metabolites, intestinal microflora and morphology in broilers fed corn-wheat-soybean meal diets. *Anim. Biosci.* 34(8): 1365–1374.
- Kim, S., Cho, J. H., Kim, H. B. and Song, M. 2021b. Rice as an alternative feed ingredient in swine diets. *J. Anim. Sci. Technol.* 63(3): 465–474.
- Kim, S., Kim, B., Kim, Y., Jung, S., Kim, Y., Park, J., Song, M. and Oh, S. 2017. Value of palm kernel co-products in swine diets. *Korean J. Agric. Sci.* 761–768.
- Knudsen, K. E. 2014. Fiber and nonstarch polysaccharide content and variation in common crops used in broiler diets. *Poult. Sci.* 93(9): 2380–2393.
- Knudsen, K. E. B. 1997. Carbohydrate and lignin contents of plant materials used in animal feeding. *Anim. Feed Sci. Technol.* 67(4): 319–338.

- Ko, H., Kang, H. K., Moturi, J., Ingale, S. L. and Kim, J. 2021. Supplementation of enzyme cocktail in chickens diet is an effective approach to increase the utilization of nutrient in wheat-based diets. *J. Anim. Sci. Technol.* 63(1): 69–76.
- Kras, R. V., Kessler, A. M., Ribeiro, A. M. L., et al. 2013. Effect of dietary fiber and genetic strain on the performance and energy balance of broiler chickens. *Brazil. J. Poult. Sci.* 15: 15–19.
- Kuttappan, V. A., Bottje, W., Ramnathan, R., Hartson, S. D., Coon, C. N., Kong, B. W., Owens, C. M., Vazquez-Anon, M. and Hargis, B. M. 2017. Proteomic analysis reveals changes in carbohydrate and protein metabolism associated with broiler breast myopathy. *Poult. Sci.* 96(8): 2992–2999.
- Kuttappan, V.A., G.R. Huff, W.E. Huff, B.M. Hargis, J.K. Apple, C. Coon, and C.M. Owens. 2013. Comparison of hematologic and serologic profiles of broiler birds with normal (NORM) and severe (SEV) degrees of WS in breast fillets. *Poult. Sci.* 92: 339–345.
- Lake, J. A., Brannick, E. M., Papah, M. B., Lousenberg, C., Velleman, S. G. and Abasht, B. 2020. Blood gas disturbances and disproportionate body weight distribution in broilers with wooden breast. *Front. Physiol.* 11: 304.
- Latham, R. E., Williams, M., Smith, K., Stringfellow, K., Clemente, S., Brister, R. and Lee, J. T. 2016. Effect of β -mannanase inclusion on growth performance, ileal digestible energy, and intestinal viscosity of male broilers fed a reduced-energy diet. *J. Appl. Poult. Res.* 25: 40–47.
- Lei, X. J., Lee, J., Park, J., Lee, I., Ingale, S. L. and Kim, I. S. 2017. Influence of exogenous multi-enzymes in broiler chickens fed on maize-wheat-soybean meal-based diets. *Eur. Poult. Sci.* 81: 1–11.
- Leeson, S. and Summers, J. D. 2001. *Scott's nutrition of the chicken*. 4th edition. University Books, Ontario. 591 p.
- Leslie, M. A., Moran-Jr, E. T. and Bedford, M. R. 2007. The effect of phytase and glucanase on the ileal digestible energy of corn and soybean meal fed to broilers. *Poult. Sci.* 86(11): 2350–2357.

- Li, B., Kalmu, N., Dong, X., Zhang, Y., Puolanne, E. and Ertbjerg, P. 2024. Relationship between wooden breast severity in broiler chicken, antioxidant enzyme activity and markers of energy metabolism. *Poult. Sci.* 103(8): 10387.
- Li, Q., Liu, R., Wu, T. and Zhang, M. 2017. Aggregation and rheological behavior of soluble dietary fibers from wheat bran. *Food Res. Int.* 102: 291–302.
- Liepman, A. H., Nairn, C. J., Willats, W. G. T., Sorensen, I., Roberts, A. W. and Keegstra, K. 2007. Functional genomic analysis supports conservation of function among cellulose synthase-like A gene family members and suggest diverse roles of mannans in plants. *Plant Physiol.* 143: 1881–1893.
- Liu, L., Li, Q., Yang, Y. and Guo, A. 2021. Biological function of short-chain fatty acids and its regulation on intestinal health of poultry. *Front. Vet. Sci.* 8: 736739.
- Liu, L., Wang, Z., Wei, B., Wang, L., Zhang, Q., Si, X., Huang, Y., Zhang, H. and Chen, W. 2024. Replacement of Corn with Different Levels of Wheat Impacted the Growth Performance, Intestinal Development, and Cecal Microbiota of Broilers. *Animals.* 14(11): 1536.
- Liu, S. Y., Selle, P. H., Raubenheimer, D., Cadogan, D. J., Simpson, S. J. and Cowieson, A. J. 2016. An assessment of the influence of macronutrients on growth performance and nutrient utilisation in broiler chickens by nutritional geometry. *Br. J. Nutr.* 116(12): 2129–2138.
- Liu, W. C. and Kim, I. H. 2017. Effects of dietary xylanase supplementation on performance and functional digestive parameters in broilers fed wheat-based diets. *Poult. Sci.* 96(3): 566–573.
- Lopez, G. and Leeson, S. 2008. Assessment of the nitrogen correction factor in evaluating metabolizable energy of corn and soybean meal in diets for broilers. *Poult. Sci.* 87: 298–306.
- Ma, C. L., Yin, Z. C., Zhang, X. Y., Zhang, C. X., Zhang, W. Y., Li, Y. X. and Yang, X. J. 2024. Early addition of enzyme-treated soybean in the diet improves amino acid absorption and protein digestibility by promoting digestive enzyme activity in broilers. *Animal.* 18(12): 101364.

- Mahdavi, R., Ghazi Harsini, S. and Piray, A. H. 2024. The effect of reducing dietary energy on performance, intestinal morphology and intestinal peptide and amino acid transporters in broiler chicks. *Vet. Med. Sci.* 10(2): e1364.
- Mahmood, T. and Guo, Y. 2020. Dietary fiber and chicken microbiome interaction: Where will it lead to?. *Anim. Nutr.* 6(1): 1–8.
- Makki, K., Deehan, E., Walter, J. and Backhed, F. 2018. The impact of dietary fiber on gut microbiota in host health and disease. *Cell and host microbe.* 23(6): 705–715.
- Malgas, S., van Dyk, J. S. and Pletschke, B. I. 2015. A review of the enzymatic hydrolysis of mannans and synergistic interactions between β -mannanase, β -mannosidase and α -galactosidase. *World J. Microbiol. Biotechnol.* 31: 1167–1175.
- Maniraguha, V., Hong, J. S., Yu, M., Oketch, E. O., Yi, Y. J., Yun, H., Jayasena, D. D. and Heo, J. M. 2024. Feeding dietary non-starch polysaccharides supplemented with xylanase could improve the performance of broilers. *J. Anim. Sci. Technol.* 66(5): 999–1009.
- Marsono, Y. and Topping, D. L. 1993. Complex carbohydrates in Australian rice products-influence of microwave cooking and food processing. *Food Sci. Technol.* 26: 364–70.
- Martin, E. A., Nolan, J. V., Nitsan, Z. and Farrell, D. J. 1998. Strategies to improve the nutritive value of rice bran in poultry diets. IV. Effects of addition of fish meal and a microbial phytase to duckling diets on bird performance and amino acid digestibility. *Br. Poult. Sci.* 39(5): 612–621.
- Masey O'Neill, H. V., Smith, J. A. and Bedford, M. R. 2014. Multicarbohydrase enzymes for non-ruminants. *Asian-Australas. J. Anim. Sci.* 27(2): 290–301.
- Mateos, G., Guzman, P., Saldana, B., Bonilla, A. P., Lazar, R. and Jimenez-Moreno, E. 2013. Relevance of dietary fiber in poultry feeding. *Eur. Symp. Poult. Nutr.* 1–11.

- Mathlouthi, N., Saulnier, L., Quemener, B. and Larbier, M. 2002. Xylanase, beta-glucanase, and other side enzymatic activities have greater effects on the viscosity of several feedstuffs than xylanase and beta-glucanase used alone or in combination. *J. Agric. Food Chem.* 50(18): 5121–5127.
- Meng, X., Slominski, B. A., Nyachoti, C. M., Campbell, L. D. and Guenter, D. 2005. Degradation of cell wall polysaccharides by combinations of carbohydrase enzymes and their effect on nutrient utilization and broiler chicken performance. *Poult. Sci.* 84: 37–47.
- Mergenthaler, P., Lindauer, U., Dienel, G. A. and Meisel, A. 2013. Sugar for the brain: the role of glucose in physiological and pathological brain function. *Trends Neurosci.* 36(10): 587–597.
- Montagne, L., Pluske, J. R. and Hampson, D. J. 2003. A review of interactions between dietary fiber and the intestinal mucosa: and their consequences on digestive health in young non-ruminant animals. *Anim. Feed Sci. Tech.* 108: 95–117.
- Moreira, L. R. and Filho, E. X. 2016. Insights into the mechanism of enzymatic hydrolysis of xylan. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 100(12): 5205–5214.
- Morgan, N. K., Gomes, G.A. and Kim, J. C. 2021. Comparing the efficacy of stimbiotic and a combination of xylanase and beta-glucanase, in broilers fed wheat-barley based diets with high or low AME. *Poult. Sci.* 100(10): 1–8.
- Morgan, N., Bhuiyan, M. M. and Hopcroft, R. 2022a. Non-starch polysaccharide degradation in the gastrointestinal tract of broiler chickens fed commercial-type diets supplemented with either a single dose of xylanase, a double dose of xylanase, or a cocktail of non-starch polysaccharide-degrading enzymes. *Poult. Sci.* 101(6): 101846.
- Morgan, N., Bhuiyan, M. M., Wallace, A. and Hopcroft, R. 2022b. Comparing a single dose of xylanase to a double dose or cocktail of non-starch polysaccharide-degrading enzymes in broiler chicken diets. *J. Appl. Anim. Nutr.* 10(2): 91–102.
- Moses, C., Manyeula, F., Radikara, M. V., Mareko, M. H. D. and Madibela, O. R. 2022. Carcass characteristics and meat quality of Ross 308 broiler chickens fed malted red and white sorghum-based diets. *Poultry.* 1: 169–179.

- Mota de Carvalho, N., Oliveira, D. L., Saleh, M. A., Pintado, M.E. and Madureira, A. R. 2020. Importance of gastrointestinal *in vitro* models for the poultry industry and feed formulations. *Anim. Feed Sci. Technol.* 1–16.
- Mottet, A. and Tempio, G. 2017. Global poultry production: current state and future outlook and challenges. *World's Poult. Sci. J.* 73: 245–256.
- Munyaka, P. M., Nandha, N. K., Kiari, E., Nyachoti, C. M. and Khafipour, E. 2016. Impact of combined β -glucanase and xylanase enzymes on growth performance, nutrients utilization and gut microbiota in broiler chickens fed corn or wheat-based diets. *Poult. Sci.* 95: 528–540.
- Nanto, F., Ito, C., Kikusato, M. and Toyomizu, M. 2016. Effect of Feeding diets combining whole-grain paddy rice and high levels of fat on broiler chicken growth. *J. Poult. Sci.* 53(1): 34–39.
- Nanto, F., Kikusato, M., Ito, C., Sudo, S. and Toyomizu, M. 2012. Effects of dehulled, crushed and untreated whole-grain paddy rice on growth performance in broiler chickens. *J. Poult. Sci.* 49: 291–299.
- Navarro, D. M. D. L., Abelilla, J. J. and Stein, H. H. 2019. Structures and characteristics of carbohydrates in diets fed to pigs: a review. *J. Anim. Sci. Biotechnol.* 10: 39.
- Nawaz, A. H., Amoah, K., Leng, Q. Y., Zheng, J. H., Zhang, W. L. and Zhang, L. 2021. Poultry response to heat stress: Its physiological, metabolic, and genetic implications on meat production and quality including strategies to improve broiler production in a warming world. *Front. Vet. Sci.* 8: 699081.
- Nero, G., Kivirand, K., Ben Othman, S. and Rinken, T. 2022. Amperometric method for the determination of cellulase activity and its optimization using response surface method. *J. Anal. Sci. Technol.* 13: 21.
- Nian, F., Guo, Y. M., Ru, Y. J., Li, F. D. and Peron, A. 2011. Effect of energy and nutrient density in diets supplemented with multienzyme on performance, nutrient utilization and digestive enzyme activities in broilers. *Asian-Australas. J. Anim. Sci.* 24(2): 186–194.

- Ning, D., Yuan, J. M., Wang, Y. W., Peng, Y. Z. and Guo, Y. M. 2014. The net energy values of corn, dried distillers grains with solubles and wheat bran for laying hens using indirect calorimetry method. *Asian-Australas. J. Anim. Sci.* 27(2): 209–216.
- Nino-Medina, G., Carvajal-Millan, E., Lizardi-Mendoza, J., Rascon, A., Marquez-Escalante, J., Gardea, A., Martinez-Lopez, A. and Guerrero, 2009. Victor. Maize processing waste water arabinoxylans: Gelling capability and cross-linking content. *Food Chem.* 115: 1286–1290.
- Nishii, M., Yasutomi, M. and Sone, Y. 2016. Effects of a whole-grain paddy rice diet on the pH distribution in the gizzard and retention time of digesta in the crop of broiler chicks. *J. Poult. Sci.* 53(3): 181–191.
- Noblet, J. 2007. Recent developments in net energy research for swine. *Agric. Food Sci.* 18: 149–56.
- Noy, Y. and Sklan, D. 1995. Digestion and absorption in the young chick. *Poult. Sci.* 74(2): 366–373.
- Noy, Y., Geyra, A. and Sklan, D. 2001. The effect of early feeding on growth and small intestinal development in the posthatch poult. *Poult. Sci.* 80(7): 912–919.
- NRC. 1981a. Nutritional energetics of domestic animals and glossary of energy terms. Second revised edition, National Academy Press, Washington, D. C. 54 p.
- NRC. 1981b. Effect of environment on nutrient requirements of domestic animals. National Academy Press, Washington, D. C. 168 p.
- NRC. 1994. Nutrient requirements of poultry. 9th edition, The National Academy of Sciences, Washington, D. C. 173 p.
- Odetallah, N. H., Parks, C. W. and Ferket, P. R. 2002. Effect of wheat enzyme preparation on the performance characteristics of Tom turkeys fed wheat-based rations. *Poult. Sci.* 81(7): 987–994.
- OECD and FAO. 2023. OECD-FAO Agricultural Outlook 2023-2032. OECD. Available Source: <https://www.oecd.org/publications/oecd-fao-agricultural-outlook-19991142.htm>, February 27, 2024.
- Okpara, M. 2022. Microbial enzymes and their applications in food industry: A mini-review. *Adv. Enzyme Res.* 10: 23–47.

- Onipe, O. O., Jideani, A. I. O. and Beswa, D. 2015. Composition and functionality of wheat bran and its application in some cereal food products. *Int. J. Food Sci. Technol.* 50(12): 2509–2518.
- Pauwels, J., Coopman, F., Cools, A., Michiels, J., Fremaut, D., De Smet, S. and Janssens, G. P. J. 2015. Selection for growth performance in broiler chickens associates with less diet flexibility. *PLoS ONE*. 10(6): 1–13.
- Pedersen, M. B. 2015. Xylanases to Improve the Nutritional Value of High Fibre Diets based on Corn and Wheat DDGS. Ph.D. Thesis., Department of Animal Science, Aarhus University, Aarhus, Denmark.
- Peron, A., Bastianelli, D., Oury, F. X., Gomez, J. and Carre, B. 2005. Effects of wheat cultivar and enzyme addition on performance and nutrient digestibility in broiler chickens. *Poult. Sci.* 84(6): 923–932.
- Petkowicz, C. L. O., Reicher, F., Chanzy, H., Taravel, F. R. and Vuong, R. 2001. Linear mannan in the endosperm of *Schizolobium amazonicum*. *Carbohydr. Polym.* 44: 107–112.
- Petruzzello, M. 2024. Cellulose (plant cell structure). *Britannica*. Available Source: <https://www.britannica.com/science/cellulose>, February 23, 2024.
- Prosky, L., Asp, N. G., Schweizer, T. F., DeVries, J. W. and Furda, I. 1988. Determination of insoluble, soluble, and total dietary fiber in foods and food products: Interlaboratory study. *J. Assoc. Off. Anal. Chem.* 71(6): 1017–1023.
- Qiao, M., Fletcher, D. L., Smith, D. P. and Northcutt, J. K. 2001. The effect of broiler breast meat color on pH, moisture, water-holding capacity, and emulsification capacity. *Poult. Sci.* 80: 676–680.
- Ravindran, V. 2013. Feed enzymes: The science, practice, and metabolic realities. *J. Appl. Poult.* 22: 628–636.
- Ravindran, V. and Amerah, A. M. 2014. Wheat: Composition and feeding value for poultry. soybean and wheat crops: growth, fertilization and yield. Nova Science Publishers, New Zealand. 245–259 p.
- Raza, A., Bashir, S. and Tabassum, R. 2019. An update on carbohydrases: Growth performance and intestinal health of poultry. *Heliyon*. 5: e01437.

- Rehman, H., Vahjen, W., Kohl-Parisini, A., Ijaz, A. and Zentek, J. 2009. Influence of fermentable carbohydrates on the intestinal bacteria and enteropathogens in broilers. *Worlds Poult. Sci. J.* 65: 75–89.
- Rezaei, M., Torshizi, M. A. K., Wall, H. and Ivarsson, E. 2018. Body growth, intestinal morphology and microflora of quail on diets supplemented with micronised wheat fibre. *Br. Poult. Sci.* 59: 422–429.
- Richards, M. P. and Proszkowiec-Weglarz, M. 2007. Mechanisms regulating feed intake, energy expenditure, and body weight in poultry. *Poult. Sci.* 86(7): 1478–1490.
- Sadeghi, A., Toghyani, M. and Gheisari, A. 2015. Effect of various fiber types and choice feeding of fiber on performance, gut development, humoral immunity, and fiber preference in broiler chicks. *Poult. Sci.* 94: 2734–2743.
- Sajith, S., Priji, P., Sreedevi, S. and Benjamin, S. 2016. An overview on fungal cellulases with an industrial perspective. *J. Nutr. Food Sci.* 6(1): 461.
- Saleh, A. A., Kirrella, A. A., Abdo, S. E., Mousa, M. M., Badwi, N. A., Ebeid, T. A., Nada, A. L. and Mohamed, M. A. 2019b. Effects of dietary xylanase and arabinofuranosidase combination on the growth performance, lipid peroxidation, blood constituents, and immune response of broilers fed low-energy diets. *Animals.* 9: 467.
- Saleh, A. S. M., Wang, P., Wang, N., Yang, L. and Xiao, Z. 2019a. Brown rice versus white rice: nutritional quality, potential health benefits, development of food products, and preservation technologies. *Compr. Revs. Food Sci. Food Saf.* 18: 1070–96.
- Sanchez, J., Thanabalan, A., Khanal, T., Patterson, R., Slominski, B. A. and Kiarie, E. 2019. Growth performance, gastrointestinal weight, microbial metabolites and apparent retention of components in broiler chickens fed up to 11% rice bran in a corn-soybean meal diet without or with a multi-enzyme supplement. *Anim. Nutr.* 5(1): 41–48.

- Sansoucy, R., Preston, T. R. and Leng, R. A. 1985. Proceedings of the FAO Expert Consultation on the substitution of imported concentrate feeds in animal production systems in developing countries. FAO Regional Office for Asia and the Pacific, Bangkok. 242 p.
- Saulnier, L., Sado, P. E., Branlard, G., Charmet, G. and Guillon, F. 2007. Wheat arabinoxylans: exploiting variation in amount and composition to develop enhanced varieties. *J. Cereal Sci.* 46(3): 261–281.
- Scheller, H. V. and Ulvskov, P. 2010. Hemicelluloses. *Annu. Rev. Plant Biol.* 61: 263–289.
- Schiaffino, S. and Reggiani, C. 2011. Fiber types in mammalian skeletal muscles. *Physiol. Rev.* 91(4): 1447–1531.
- Schramm, V. G., Massuquetto, A., Bassi, L. S., Zavelinski, V. A. B., Sorbara, J. O. B., Cowieson, A. J., Felix, A. P. and Maiorka, A. 2021. Exogenous α -amylase improves the digestibility of corn and corn-soybean meal diets for broilers. *Poult. Sci.* 100(4): 101019.
- Sethya, K., Mishra, S. K., Mohanty, P. P., Agarwal, J., Meher, P., Satapathy, D., Sahoo, J. K., Pandey, S. K. and Nayak, S. M. 2015. An overview of non starch polysaccharide. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* 1: 17–22.
- Shaheen, M., Ahmad, I., Anjum, F., Syed, Q. and Saeed, M. K. 2015. Effect of processed rice bran on growth performance of broiler chicks from Pakistan. *Bulgar. J. Agri. Sci.* 21: 440–445.
- Shakouri, M. D., Iji, P. A., Mikkelsen, L. L. and Cowieson, A. J. 2009. Intestinal function and gut microflora of broiler chickens as influenced by cereal grains and microbial enzyme supplementation. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* 93(5): 647–658.
- Sharma, R., Baghel, R. P. S., Sharma, S., Mishra, R. K., Nayak, S. and Yadav, V. 2018. Effect of varying levels of enzyme supplementation with high levels of paddy replacing maize on the performance and economics of broiler production. *J. Entomol. Zool. Stud.* 6(4): 05–09.

- Shastak, Y., Ader, P., Feuerstein, D., Ruehle, R. and Matuschek, M. 2015. β -mannan and mannanase in poultry nutrition. *Worlds Poult. Sci. J.* 71(1): 161–174.
- Shewry, P. R. and Jones, H. D. 2020. Minor components and wheat quality: Perspectives on climate changes. *J. Cereal Sci.* 56(2): 247–251.
- Shipman, G. L., Perez-Palencia, J. Y., Hong, J., Niu, Y., Rogiewicz, A., Patterson, R. and Levesque, C. L. 2025. Effects of multienzyme supplementation on energy and nutrient digestibility in various feed ingredients for pregnant gilts. *Journal of Anim. Sci.* 103(1): 1–12.
- Siddik, A., Rahman, M., Chowdhury, R. and Islam, K. M. 2025. Feeding trial on the effects of high-protein, low-energy diets on lean meat production in broiler. *Vet. Int. Sci.* 2026(3): 2026003–2026004.
- Siegel, P. B. 2014. Evolution of the modern broiler and feed efficiency. *Annu. Rev. Anim. Biosci.* 2: 375–385.
- Silva, V. K., de Souza Morita, V. and Boleli, I. C. 2013. Effect of pectin extracted from citrus pulp on digesta characteristics and nutrient digestibility in broilers chickens. *Rev. Bras. Zootec.* 42: 575–583.
- Silversides, F. G. and Bedford, M. R. 1999. Effect of pelleting temperature on the recovery and efficacy of a xylanase enzyme in wheat-based diets. *Poult. Sci.* 78: 1184–1190.
- Simon, O. 2000. Non starch polysaccharide (NSP) hydrolysing enzymes as feed additives: mode of action in the gastrointestinal tract. *Agric. Food Sci.* 1–7.
- Singh, A. K., Mishra, B., Bedford, M. R. and Jha, R. 2021. Effects of supplemental xylanase and xylooligosaccharides on production performance and gut health variables of broiler chickens. *J. Anim. Sci. Biotechnol.* 12: 98.
- Sinha, A. K., Kumar, V., Makkar, H. P., Boeck, G. D., and Becker, K. 2011. Non-starch polysaccharides and their role in fish nutrition—A review. *Food Chem.* 127: 1409–1426.
- Sittiya, J., Yamauchi, K. and Takata, K. 2016. Effect of replacing corn with whole-grain paddy rice and brown rice in broiler diets on growth performance and intestinal morphology. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* 100(2): 381–390.

- Sittiya, J., Yamauchi, K., Nimanong, W. and Thongwittaya, N. 2020. Influence of levels of dietary fiber sources on the performance, carcass traits, gastrointestinal tract development, fecal ammonia nitrogen and intestinal morphology of broilers. *Braz. J. Poult. Sci.* 22(10): 1–8.
- Sklan, D., Smirnov, A. and Plavnik, I. 2003. The effect of dietary fibre on the small intestines and apparent digestion in the turkey. *Br. Poult. Sci.* 44: 735–740.
- Slominski, B. A. 2011. Recent advances in research on enzymes for poultry diets. *Poult. Sci.* 90(9): 2013–2023.
- Slavin, J. 2013. Fiber and prebiotics: mechanisms and health benefits. *Nutrients.* 5(4): 1417–1435.
- Smith, M. M. and Hartley, R. D. 1983. Occurrence and nature of ferulic acid substitution of cell wall polysaccharides in graminaceous plants. *Carbohydr. Res.* 118: 65–80.
- Sonkar, R. M., Gade, P. S., Bokade, V., Mudliar, S. N. and Bhatt, P. 2021. Ozone assisted autohydrolysis of wheat bran enhances xylooligosaccharide production with low generation of inhibitor compounds: A comparative study. *Bioresour. Technol.* 338: 125559.
- Speedy, A. W. 2003. Global production and consumption of animal source foods. *J. Nutr.* 133(11): 4048S–4053S.
- Sta Cruz, B. G., Hong, J. S., Yu, M., Oketch, E. O., Yun, H., Jayasena, D. D. and Heo, J. M. 2024. Xylanase supplementation in energy-deficient corn-based diets: Impact on broiler growth, nutrient digestibility, chyme viscosity and carcass proximates. *Anim. Biosci.* 37(7): 1246–1254.
- Sun, L., Hu, M., Zhao, J., Lv, L., Zhang, Y., Liu, Q., Zhang, L., Yu, C., Wang, P., Li, Q., Li, H. and Zhang, Y. 2021. Molecular characteristics, synthase, and food application of cereal β -glucan. *J. Food Qual.* 1–8.
- Sundu, B., Kumar, A. and Dingle, A. 2006. Palm kernel meal in broiler diets: effect on chicken performance and health. *Worlds Poult. Sci. J.* 62: 316–325.
- Svihus, B. 2014. Function of the digestive system. *J. Appl. Poult. Res.* 23: 306–314.

- Svihus, B., Sacranie, A., Denstadli, V. and Choct, M. 2010. Nutrient utilization and functionality of the anterior digestive tract caused by intermittent feeding and inclusion of whole wheat in diets for broiler chickens. *Poult. Sci.* 89(12): 2617–2625.
- Tahir, M. I., Khalique, A., Pasha, T. N. and Bhatti, J. A. 2002. Comparative evaluation of maize bran, wheat bran and rice bran on milk production of Holstein Friesian cattle. *Int. J. Agri. Biol.* 4: 559–560.
- Tay-Zar, A. C., Wongphatcharachai, M., Srichana, P., Geraert, P. A. and Noblet, J. 2023. Prediction of net energy of feeds for broiler chickens. *Anim. nutr.* 16: 241–250.
- Tesseraud, S., Bouvarel, I., Collin, A., Audouin, E., Crochet, S., Seiliez, I. and Leterrier, C. 2009. Daily variations in dietary lysine content alter the expression of genes related to proteolysis in chicken pectoralis major muscle. *J. Nutr.* 139(1): 38–43.
- Toghyani, M., MacElline, S., Selle, P. H. and Liu, S. Y. 2024. Interactive effects of dietary energy levels with amino acid density on growth performance and optimal digestible Lys to energy ratio of male broiler chickens. *Poult. Sci.* 103(12): 104361.
- Tullio, V., Gasperi, V., Catani, M.V. and Savini, I. 2021. The impact of whole grain intake on gastrointestinal tumors: A focus on colorectal, gastric, and esophageal cancers. *Nutrients.* 13(1): 81.
- Uni, Z., Noy, Y. and Sklan, D. 1999. Posthatch development of small intestinal function in the poult. *Poult. Sci.* 78: 215–222.
- Valente Junior, D. T., Genova, J. L., Kim, S. W., Saraiva, A. and Rocha, G. C. 2024. Carbohydrases and phytase in poultry and pig nutrition: A review beyond the nutrients and energy matrix. *Animals.* 14(2): 226.
- Vargas, J., Gulizia, J., Hernandez, J., Simoes, C. T., Guzman, E., Lee, J., Adhikari, R., Han, S. E. and Pachecos, W. J. 2024. Dose response of xylanase enzyme on ileal viscosity, digestibility of nutrients, and performance of broiler chickens fed wheat-based diets. *J. Appl. Poult. Res.* 33(4): 100479.

- Velazquez-De Lucio, B. S., Hernandez-Dominguez, E. M., Villa-Garcia, M., Diaz-Godinez, G., Mandujano-Gonzalez, V., Mendoza-Mendoza, B. and Alvarez-Cervantes, J. 2021. Exogenous enzymes as zootechnical additives in animal feed: a review. *Catalysts*. 11(7): 851.
- Viveros, A., Brenes, A., Pizarro, M. and Castano. M. 1994. Effect of enzyme supplementation of a diet based on barley, and autoclave treatment, on apparent digestibility, growth performance and gut morphology of broilers. *Anim. Feed Sci. Technol.* 48: 237–251.
- Von Freiesleben, P., Spodsberg, N., Stenbæk, A. et al. 2018. Boosting of enzymatic softwood saccharification by fungal GH5 and GH26 endomannanases. *Biotechnol. Biofuels*. 11: 1–14.
- Walia, A., Guleria, S., Mehta, P., Chauhan, A. and Parkash, J. 2017. Microbial xylanases and their industrial application in pulp and paper biobleaching: a review. *3 Biotech*. 7(1): 11.
- Walker, H., Vartiainen, S., Apajalahti, J., Taylor-Pickard, J., Nikodinoska, I. and Moran, C. A. 2024. The effect of including a mixed-enzyme product in broiler diets on performance, metabolizable energy, phosphorus and calcium retention. *Animals*. 14(2): 328.
- Walsh, G. A., Ronan, F. P. and Denis, R. H. 1993. Enzymes in the animal-feed industry. *Trends Biotechnol.* 11: 424–430.
- Walugembe, M., Hsieh, J. C. F., Koszewski, N. J., Lamont, S. J., Persia, M. E. and Rothschild, M. F. 2015. Effects of dietary fiber on cecal short-chain fatty acid and cecal microbiota of broiler and laying-hen chicks. *Poult. Sci.* 94: 2351–2359.
- Wang, J., Liu, S., Ma, J. and Piao, X. 2021. Changes in Growth Performance and Ileal Microbiota Composition by Xylanase Supplementation in Broilers Fed Wheat-Based Diets. *Front. Microbiol.* 12: 706396.
- Wang, X., Li, D., Xu, Y., Ding, X., Liang, S., Xie, L., Wang, Y. and Zhan, X. 2024. Xylanase supplement enhances the growth performance of broiler by modulating serum metabolism, intestinal health, short-chain fatty acid composition, and microbiota. *Animals*. 14(8): 1182.

- Wang, Z., Li, H., Liang, M. and Yang, L. 2016. Glutelin and prolamin, different components of rice protein, exert differently *in vitro* antioxidant activities. *J. Cereal Sci.* 72: 108–116.
- Warriss, P. D. 2000. *Meat science: an introductory text*. CABI Publishing. New York. 310 p.
- Wikimedia Commons. 2008. Chemical structure of Beta-1,3-1,4-glucan. Wikimedia Commons. Available Source: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Beta-1,3-1,4-glucan.png>, February 23, 2024.
- Williams, B. A., Grant, L. J., Gidley, M. J. and Mikkelsen, D. 2017. Gut fermentation of dietary fibers: physico-chemistry of plant cell walls and implications for health. *Int. J. Mol. Sci.* 18(10): 2203.
- Williams, M. P., O'Neill, H. V. M., York, T. and Lee, J. T. 2018. Effects of nutrient variability in corn and xylanase inclusion on broiler performance, nutrient utilisation, and volatile fatty acid profiles. *J. Appl. Anim. Nutr.* 6(1): 1–10.
- Willis, S. 2003. The use of soybean meal and full fat soybean meal by the animal feed industry. *Agric. Food Sci.* 1–8.
- Yadav, S. and Jha, R. 2019. Strategies to modulate the intestinal microbiota and their effects on nutrient utilization, performance, and health of poultry. *J. Anim. Sci. Biotechnol.* 10: 2.
- Yan, X., Ye, R. and Chen, Y. 2015. Blasting extrusion processing: The increase of soluble dietary fiber content and extraction of soluble fiber polysaccharides from wheat bran. *Food Chem.* 180: 106–115.
- Yang, Y. Y., Iji, P. A., Kocher, A., Mikkelsen, L. L. and Choct, M. 2008. Effects of xylanase on growth and gut development of broiler chickens given a wheat-based diet. *Anim. Biosci.* 21(11): 1659–1664.
- Yang, Z. B., Yang, W. R., Jiang, S. Z., Zhang, G. G., Zhang, Q. Q. and Siow, K. C. 2010. Effects of a thermotolerant multi-enzyme product on nutrient and energy utilization of broilers fed mash or crumbled corn-soybean meal diets. *J. Appl. Poult.* 19: 38–45.

- Yaophakdee, N., Ruangpanit, Y. and Attamangkune, S. 2018. Effects of palm kernel meal level on live performance and gut morphology of broilers. *Agric. Nat. Resour.* 52: 75–78.
- Yaqoob, M. U., Yousaf, M., Iftikhar, M., Hassan, S., Wang, G., Imran, S., Zahid, M. U. I. and Wang, M. 2022. Effect of multi-enzymes supplementation on growth performance, meat quality, ileal digestibility, digestive enzyme activity and caecal microbiota in broilers fed low-metabolizable energy diet. *Anim. Biosci.* 35(7): 1059–1068.
- Yegani, M. and Korver, D. R. 2008. Factors affecting intestinal health in poultry. *Poult. Sci.* 87: 2052–2063.
- Yegani, M., Swift, M. L., Zijlstra, R. T. and Korver, D. R. 2013. Prediction of energetic value of wheat and triticale in broiler chicks: a chick bioassay and an in vitro digestibility technique. *Anim. Feed Sci. Technol.* 183: 40–50.
- Yu, J., Zhang, H., Yang, H. M. and Wang, Z. Y. 2022. Effects of dietary paddy rice on growth performance, carcass traits, bare skin color, and nutrient digestibility in geese. *Poult. Sci.* 101(6): 101865.
- Zhang, C., Hao, E., Chen, X., Huang, C., Liu, G., Chen, H., Wang, D., Shi, L., Xuan, F. Chang, D., et al. 2023. Dietary fiber level improve growth performance, nutrient digestibility, immune and intestinal morphology of broilers from day 22 to 42. *Animals.* 13(7): 1227.
- Zhang, L., Xu, J., Lei, L., Jiang, Y., Gao, F., and Zhou, G. H. 2014. Effects of xylanase supplementation on growth performance, nutrient digestibility and non-starch polysaccharide degradation in different sections of the gastrointestinal tract of broilers fed wheat-based diets. *Asian-Australas. J. Anim. Sci.* 27(6): 855–861.
- Zhang, S., Wang, C., Sun, Y., Wang, G., Chen, H., Li, D., Yu, X. and Chen, G. 2018. Xylanase and fermented polysaccharide of *Hericium caputmedusae* reduce pathogenic infection of broilers by improving antioxidant and anti-Inflammatory properties. *Oxidative medicine and cellular longevity.* 2018(2): 1–11.
- Zuidhof, M. J. 2019. A review of dietary metabolizable and net energy: Uncoupling heat production and retained energy 1. *J. Appl. Poult. Res.* 28: 231–241.

ประวัติผู้เขียน

ชื่อ	ศศิกานต์ นันแก้ว
วุฒิการศึกษา	ปีการศึกษา 2564: วิทยาศาสตรบัณฑิต (เทคโนโลยีการเกษตร) มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ทุนการศึกษา	ปีงบประมาณ 2566: ทุนบัณฑิตเรียนดีเพื่อศึกษาต่อระดับ บัณฑิตศึกษา คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัย ธรรมศาสตร์ ตามสัญญาเลขที่ ทบ. 41/2565

ผลงานทางวิชาการ

ศศิกานต์ นันแก้ว, ญัฐปภัสร ธนพิมพ์วงศ์ และ ดร.ณิ ศรีชนะ. 2568. ผลของการเสริมเอนไซม์ช่วยย่อยโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งในวัตถุดิบอาหารไก่เนื้อต่อการย่อยได้ของวัตถุดิบในหลอดทดลอง. ใน การประชุมวิชาการระดับชาติ การพัฒนาอย่างยั่งยืน ครั้งที่ 1 วันที่ 5 มิถุนายน 2568. คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล จ. นครปฐม. หน้า 349-357.