



การประเมินระดับที่เหมาะสมของใยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำในสูตรอาหารไก่เนื้อต่อ  
สมรรถภาพการเจริญเติบโตและการเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยาของลำไส้เล็ก



ชัตติยา ล้านแปง

วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนครสวรรค์  
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาสัตวศาสตร์  
ปีการศึกษา 2563  
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนครสวรรค์

การประเมินระดับที่เหมาะสมของใยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำในสูตรอาหารไก่เนื้อต่อ  
สมรรถภาพการเจริญเติบโตและการเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยาของลำไส้เล็ก



วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนเรศวร  
เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา หลักสูตรวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต  
สาขาวิชาสัตวศาสตร์  
ปีการศึกษา 2563  
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนเรศวร

วิทยานิพนธ์ เรื่อง "การประเมินระดับที่เหมาะสมของใยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำในสูตรอาหารไก่เนื้อ  
ต่อสมรรถภาพการเจริญเติบโตและการเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยาของลำไส้เล็ก"

ของ ชัตติยา ล้วนแปง

ได้รับการพิจารณาให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร  
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาสัตวศาสตร์

### คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

..... ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นรินทร์ ทองวิทยา)

..... ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

(รองศาสตราจารย์ ดร.ทศพร อินเจริญ)

..... กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นรภัทร หวันเหลี่ยม)

อนุมัติ

.....  
(ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล มณีสว่าง)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

|                 |                                                                                                                                           |
|-----------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ชื่อเรื่อง      | การประเมินระดับที่เหมาะสมของใยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำในสูตรอาหารไก่เนื้อต่อสมรรถภาพการเจริญเติบโตและการเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยาของลำไส้เล็ก |
| ผู้วิจัย        | ชัตติยา ล้วนแปง                                                                                                                           |
| ประธานที่ปรึกษา | รองศาสตราจารย์ ดร. ทศพร อินเจริญ                                                                                                          |
| ประเภทสารนิพนธ์ | วิทยานิพนธ์ วท.ม. สาขาวิชาสัตวศาสตร์, มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2563                                                                             |
| คำสำคัญ         | ไก่เนื้อ, ใยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำ, สมรรถภาพการเจริญเติบโต, สัณฐานวิทยาของลำไส้                                                             |

### บทคัดย่อ

ในปัจจุบันมีผลิตภัณฑ์ประเภทใยอาหารกลุ่มลิกโนเซลลูโลส ออกมาจำหน่ายเพื่อใช้เป็นสารเสริมสำหรับสัตว์หลายชนิด ซึ่งประกอบไปด้วยใยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำ (insoluble dietary fiber, IDF) เป็นหลัก แต่อย่างไรก็ตามวัตถุดิบอาหารสัตว์ที่ใช้ในสูตรอาหารส่วนใหญ่มักได้มาจากกลุ่มธัญพืช และผลพลอยได้ที่มาจากอุตสาหกรรมเกษตรและอาหาร วัตถุดิบอาหารสัตว์เหล่านี้มีองค์ประกอบของใยอาหารไม่ละลายน้ำในระดับที่สูงอยู่แล้ว หากทราบชนิดและระดับของใยอาหารที่เป็นองค์ประกอบในวัตถุดิบที่จะนำมาใช้ในสูตรอาหารไก่เนื้อ แล้วนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณและประกอบสูตรอาหาร อาจเป็นปัจจัยที่ช่วยส่งเสริมสุขภาพและสมรรถภาพการเจริญเติบโตให้ดีขึ้นได้ โดยที่ไม่จำเป็นต้องใช้สารเสริมกลุ่มลิกโนเซลลูโลสที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศและมีราคาแพง การศึกษาที่ 1 ประเมินระดับของใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำในอาหารไก่เนื้อที่บริสุทธ์ต่อสมรรถภาพการเจริญเติบโตและสัณฐานวิทยาของลำไส้ โดยใช้ไก่เนื้อสายพันธุ์ รอส 308 (Ross 308) เพศผู้ อายุ 10 วัน จำนวน 160 ตัว แบ่งออกเป็น 4 กลุ่มๆ ละ 8 ซ้ำๆ ละ 5 ตัว ไก่แต่ละกลุ่มได้รับ อาหารไก่เนื้อที่บริสุทธ์ที่ประกอบไปด้วย IDF ที่ระดับ 0 (T1), 6 (T2), 8 (T3) และ 10 (T4) เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ผลการศึกษาพบว่า น้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น และอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัว มีค่าดีขึ้น ( $P < 0.05$ ) ในกลุ่มที่ได้รับ IDF ในอาหารทั้ง 3 ระดับ แต่ในทางตรงกันข้าม ปริมาณอาหารที่กิน มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ความสูงวิลโล อัตราส่วนของความสูงวิลโลต่อความลึกของครีปต์ พื้นที่ของวิลโล มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ( $P < 0.05$ ) ในกลุ่มที่ได้รับ IDF ที่ระดับ 6, 8 และ 10 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ความลึกของครีปต์ มีค่าต่ำสุด ( $P < 0.05$ ) ในกลุ่มที่ได้รับ IDF ที่ระดับ 8 และ 10 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มอื่น การศึกษาที่ 2 ศึกษาผลของระดับใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำในสูตรอาหารไก่เนื้อต่อสมรรถภาพการผลิต อัตราการย่อยได้ ระยะเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของอาหารในท่อทางเดิน



อาหารและสัณฐานวิทยาของลำไส้ โดยใช้ไก่เนื้อสายพันธุ์ รอส 308 (Ross 308) เพศผู้ อายุ 10 วัน จำนวน 160 ตัว แบ่งออกเป็น 4 กลุ่มๆ ละ 8 ซ้ำๆ ละ 5 ตัว ไก่แต่ละกลุ่มได้รับอาหารไก่เนื้อที่ ประกอบไปด้วย IDF ที่ระดับ 9 (T1), 10 (T2), 11 (T3) และ 12 (T4) เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อสิ้นสุดการทดลอง พบว่า น้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น และอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัว มีค่าที่เพิ่มขึ้น ( $P < 0.05$ ) ตามระดับของ IDF ที่เพิ่มสูงขึ้น แต่ปริมาณอาหารที่กินกลับมีค่าลดลง ( $P < 0.05$ ) การประเมินสัณฐานวิทยาของลำไส้เล็ก พบว่า ความสูงของวิลไลและอัตราส่วนความสูงของวิลไลต่อความ ลึกของคริปต์ มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ( $P < 0.05$ ) ในกลุ่มที่ได้รับ IDF ที่ระดับ 10, 11 และ 12 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ นอกจากนั้นแล้วพื้นที่ของวิลไล มีค่าเพิ่มขึ้น ( $P < 0.05$ ) ในกลุ่มที่ได้รับ IDF ที่ระดับ 12 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ความลึกของคริปต์บริเวณลำไส้เล็กต้น มีค่าลดลง ( $P < 0.05$ ) และมีค่าต่ำสุดใน กลุ่มที่ได้รับ IDF ที่ระดับ 11 และ 12 เปอร์เซ็นต์ ค่าสัมประสิทธิ์การย่อยได้ปรากฏของวัตถุดิบ โปรตีน หยาบ และไขมัน มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ( $P < 0.05$ ) ตามระดับของ IDF ที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การ ย่อยได้ปรากฏของเยื่อใยหยาบและเก่า มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $P > 0.05$ ) นอกจากนั้น ระยะเวลา ที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของอาหารในท่อทางเดินอาหารของไก่เนื้อใช้ระยะเวลาสั้นลง ( $P < 0.05$ ) และ ปริมาณอาหารที่กินเฉลี่ยสะสมเพิ่มขึ้น ในกลุ่มที่ได้รับ IDF ในอาหาร ที่ระดับ 10, 11 และ 12 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่า โยอาหารไม่ละลายน้ำในสูตรอาหารไก่เนื้อ ที่ระดับ 12 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลดีที่สุดต่อสมรรถภาพการเจริญเติบโต การพัฒนาโครงสร้างวิลไลของลำไส้เล็ก รวมถึง สามารถช่วยเพิ่มอัตราการย่อยได้ของวัตถุดิบ โปรตีนหยาบ และไขมัน ในขณะที่อัตราการเคลื่อนที่ ของอาหารในท่อทางเดินอาหารจนกระทั่งขับถ่ายมูลใช้ระยะเวลาสั้นลง

|                       |                                                                                                                                                          |
|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Title</b>          | ASSESSMENTS OF THE OPTIMUM LEVEL OF INSOLUBLE DIETARY FIBER IN BROILER RATION ON GROWTH PERFORMANCE AND MORPHOLOGICAL ALTERATIONS OF THE SMALL INTESTINE |
| <b>Author</b>         | KHATTIYA LANPANG                                                                                                                                         |
| <b>Advisor</b>        | Associate Professor Dr. Tossaporn Incharoen, Ph.D.                                                                                                       |
| <b>Academic Paper</b> | Thesis M.S. in Animal Science - (Type A2), Naresuan University, 2020                                                                                     |
| <b>Keywords</b>       | Broiler, Insoluble dietary fiber, Growth performance, Intestinal morphology                                                                              |

### ABSTRACT

Nowadays, lignocellulose (LC) products mainly contain insoluble dietary fiber (IDF) which many brands of those products have been sold using as feed supplement for livestock. Anyways, most of the feedstuff in rations are derived from cereals and by-products of agricultural and food industries. These feedstuffs compose of high level of IDF already. Knowing the IDF type and level in each feed ingredient is necessary information for feed calculation and formulation. Because these data may be important factors to promote the health and growth performance without using imported and expensive LC products. In the first experiment, the effect of the level of insoluble dietary fiber in a semi-purified broiler diet on growth performance and intestinal morphology was investigated. A total of one hundred sixty 10-day-old male broilers (Ross 308) were divided into 4 groups with 8 replications (5 birds/pen). Each group was provided the semi-purified diet included with IDF at 0 (T1), 6 (T2), 8 (T3), and 10 (T4) %, respectively. The current study resulted showed that body weight gain and feed conversion ratio ( $P < 0.05$ ) improved in three experimental groups (6, 8, and 10 % IDF), while feed intake decreased significantly ( $P < 0.05$ ). Villus height, villus height to crypt depth ratio, and villus area increased ( $P < 0.05$ ) in the 6, 8, and 10 % IDF groups. Conversely, crypt depth showed the lowest values ( $P < 0.05$ ) in the 8, and 10 % IDF

groups compared with another group. In the second experiment, the effects of levels of insoluble dietary fiber in broiler ration on growth performance, nutrient digestibility, intestinal morphology, and feed movement time through the alimentary canal were determined. A total of one hundred sixty 10-day-old male broilers (Ross 308) were divided into 4 groups with 8 replications (5 birds/pen). Each group was provided the diet containing different levels of IDF at 9 (T1), 10 (T2), 11 (T3), and 12 (T4) %, respectively. At the end of the trial, weight gain and feed conversion ratio tended to be better with increasing IDF levels ( $P < 0.05$ ), whereas feed intake was decreased ( $P < 0.05$ ). For intestinal morphological analysis, villus height, villus height to crypt depth ratio increased ( $P < 0.05$ ) in the 10, 11, and 12 % IDF groups, respectively. Moreover, villus area ( $P < 0.05$ ) increased in the 12 % IDF groups. While, duodenal crypt depth decreased ( $P < 0.05$ ), and lowest values were found in the 11, and 12 % IDF groups. Apparent digestibility of dry matter, crude protein, and ether extract increased ( $P < 0.05$ ) when increasing the IDF levels. On the other hand, crude fiber, and ash digestibility were not significantly ( $P > 0.05$ ) different among groups. In addition, feed movement through the alimentary canal until excretion used a short time ( $P < 0.05$ ) and cumulative feed intake increased ( $P < 0.05$ ) in the 10, 11, and 12 % IDF groups. Therefore, the current results can be concluded that 12 % IDF in broiler rations affects the best growth performance and morphological intestinal development, as well as the increasing apparent digestibility of dry matter, crude protein, and ether extract was observed. While feed movement time after eating was shorter when digesta passed through the alimentary canal until excretion.

## ประกาศคุณูปการ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณา ช่วยเหลือ แนะนำ และให้คำปรึกษาอย่างดียิ่งจาก รองศาสตราจารย์ ดร. ทศพร อินเจริญ ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ ที่ได้ให้คำแนะนำถ่ายทอดความรู้ แนวคิด และกระบวนการในการวางแผนงานวิจัย ตลอดจนแก้ไขข้อบกพร่องของวิทยานิพนธ์ด้วยความเอาใจใส่ จนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างสมบูรณ์ ตลอดระยะเวลาในการทำวิทยานิพนธ์ฉบับนี้

ขอขอบพระคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นรินทร์ ทองวิทยา ประธานสอบวิทยานิพนธ์ และ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นรภัทร หวันเหลี่ยม ผู้ทรงคุณวุฒิ ที่กรุณาให้คำแนะนำ ทำให้วิทยานิพนธ์นี้ถูกต้องสมบูรณ์ยิ่งขึ้น เหนือสิ่งอื่นใดขอกราบขอบพระคุณบิดา มารดา ของผู้วิจัยที่ให้กำลังใจและให้การสนับสนุนในทุกๆ ด้านอย่างดีเสมอมา

ขอขอบพระคุณการสนับสนุนทุนวิจัยบัณฑิตศึกษา ด้านการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร ภายใต้สัญญารับทุนอุดหนุนการวิจัยเลขที่ HRD6305058 จากสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์กรมมหาชน) ประจำปีงบประมาณ 2563

ขอขอบคุณ นายศราวุฒิ ตรีถัน นายศราวุธ นคร นางสาวธิดิมา เพ็ชรคง นางสาววิภารัตน์ จอมจันยวง พี่ๆ เพื่อนๆ และน้องๆ นิสิตสาขาวิชาสัตวศาสตร์และเทคโนโลยีอาหารสัตว์ทุกท่าน ที่ได้ให้คำแนะนำ ส่งเสริม และให้กำลังใจเสมอมา นอกจากนี้แล้ว ผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ที่ให้ความช่วยเหลือ และสนับสนุนอีกหลายท่าน ที่ผู้วิจัยไม่สามารถกล่าวนามได้ทั้งหมด

สุดท้ายนี้ขอขอบคุณและอุทิศส่วนบุญส่วนกุศลให้แก่สัตว์ทดลองที่ได้ใช้สำหรับการศึกษาค้นคว้า และทำให้วิทยานิพนธ์เล่มนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี ข้าพเจ้าจะขอนำความรู้จากการศึกษาในครั้งนี้ ไปใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดต่อไปในอนาคต

ชัตติยา ล้วนแปง

## สารบัญ

|                                                                   | หน้า |
|-------------------------------------------------------------------|------|
| บทคัดย่อภาษาไทย.....                                              | ค    |
| บทคัดย่อภาษาอังกฤษ.....                                           | จ    |
| ประกาศคุณูปการ.....                                               | ช    |
| สารบัญ.....                                                       | ซ    |
| สารบัญตาราง.....                                                  | ฅ    |
| สารบัญภาพ.....                                                    | ฉ    |
| บทที่ 1 บทนำ.....                                                 | 1    |
| ความเป็นมาของปัญหา.....                                           | 1    |
| วัตถุประสงค์ของการวิจัย.....                                      | 2    |
| กรอบแนวคิดและสมมติฐานของการวิจัย.....                             | 2    |
| ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ.....                                    | 3    |
| บทที่ 2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....                       | 4    |
| ระบบย่อยอาหารของสัตว์ปีก.....                                     | 4    |
| โภชนศาสตร์สัตว์.....                                              | 7    |
| เยื่อใยหยาบ.....                                                  | 28   |
| ใยอาหาร.....                                                      | 29   |
| ใยอาหารในวัตถุดิบอาหารสัตว์.....                                  | 32   |
| บทบาทของใยอาหารที่ละลายน้ำ (soluble dietary fiber, SDF).....      | 35   |
| บทบาทของใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำ (insoluble dietary fiber, IDF)..... | 36   |

|                                                                                                                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| กลไกการทำงานของใยอาหารในสัตว์ปีกต่อประสิทธิภาพการผลิต.....                                                                                                                                            | 37 |
| ใยอาหารต่อสรีระวิทยาของระบบทางเดินอาหาร .....                                                                                                                                                         | 38 |
| ใยอาหารต่อสัณฐานวิทยาของลำไส้เล็ก.....                                                                                                                                                                | 38 |
| ผลของใยอาหารต่ออัตราการเคลื่อนที่ของอาหารในท่อทางเดินอาหาร.....                                                                                                                                       | 40 |
| ผลของใยอาหารต่อประสิทธิภาพการย่อยได้ของโภชนะ.....                                                                                                                                                     | 42 |
| ผลของใยอาหารต่อการส่งเสริมจุลินทรีย์ในระบบทางเดินอาหาร.....                                                                                                                                           | 42 |
| บทที่ 3 วิธีดำเนินงานวิจัย .....                                                                                                                                                                      | 44 |
| อุปกรณ์และสารเคมี .....                                                                                                                                                                               | 44 |
| วิธีการดำเนินงานวิจัย .....                                                                                                                                                                           | 45 |
| 1. การศึกษาที่ 1: ประเมินระดับของใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำในอาหารไก่เนื้อถึง<br>บริสุทธิ์ต่อสมรรถภาพการเจริญเติบโต และสัณฐานวิทยาของลำไส้ .....                                                           | 45 |
| 2. การศึกษาที่ 2: ศึกษาผลของระดับใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำในสูตรอาหารไก่เนื้อ<br>ต่อสมรรถภาพการผลิต อัตราการย่อยได้ ระยะเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของ<br>อาหารในท่อทางเดินอาหารและสัณฐานวิทยาของลำไส้..... | 51 |
| สถานที่ทำการวิจัยและเก็บข้อมูล .....                                                                                                                                                                  | 55 |
| บทที่ 4 ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย .....                                                                                                                                                          | 56 |
| การศึกษาที่ 1: ประเมินระดับของใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำในอาหารไก่เนื้อถึงบริสุทธิ์ต่อ<br>สมรรถภาพการเจริญเติบโต และสัณฐานวิทยาของลำไส้.....                                                               | 56 |
| การศึกษาที่ 2: ศึกษาผลของระดับใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำในสูตรอาหารไก่เนื้อต่อ<br>สมรรถภาพการผลิต อัตราการย่อยได้ ระยะเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของอาหารใน<br>ท่อทางเดินอาหารและสัณฐานวิทยาของลำไส้.....    | 61 |
| บทที่ 5 บทสรุป.....                                                                                                                                                                                   | 70 |
| บรรณานุกรม .....                                                                                                                                                                                      | 71 |

ภาคผนวก.....83

อภิธานศัพท์..... 120

ประวัติผู้วิจัย ..... 121





## สารบัญตาราง

|                                                                                                                                             | หน้า |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ตาราง 1 กลไกการป้องกันในระบบทางเดินอาหารของสัตว์ปีก.....                                                                                    | 40   |
| ตาราง 2 ส่วนประกอบและองค์ประกอบทางเคมีของสูตรอาหารไก่เนื้อถึงบริสุทธิ์.....                                                                 | 47   |
| ตาราง 3 ปริมาณองค์ประกอบของใยอาหารในวัตถุดิบอาหารสัตว์.....                                                                                 | 52   |
| ตาราง 4 วัตถุดิบและองค์ประกอบทางเคมีของสูตรอาหารไก่เนื้อ .....                                                                              | 54   |
| ตาราง 5 ผลของใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำในอาหารไก่เนื้อถึงบริสุทธิ์ต่อสมรรถภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อ ที่ช่วงอายุ 10-45 วัน.....                | 58   |
| ตาราง 6 ผลของใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำในอาหารไก่เนื้อถึงบริสุทธิ์ต่อการเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยาของลำไส้เล็กในไก่เนื้อ ที่อายุ 45 วัน .....     | 60   |
| ตาราง 7 ผลของระดับใยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำที่แตกต่างกันในสูตรอาหารต่อสมรรถภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อ ที่ช่วงอายุ 10-45 วัน .....            | 62   |
| ตาราง 8 ผลของระดับใยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำที่แตกต่างกันในสูตรอาหารต่อการเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยาของลำไส้เล็กของไก่เนื้อ ที่อายุ 45 วัน ..... | 64   |

## สารบัญภาพ

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | หน้า |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| ภาพ 1 กรอบแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 3    |
| ภาพ 2 ระบบทางเดินอาหารในสัตว์ปีก.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | 4    |
| ภาพ 3 ลักษณะโครงสร้างกระเพาะอาหารของสัตว์ปีก.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 6    |
| ภาพ 4 การแบ่งประเภทของโภชนะในอาหาร.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 8    |
| ภาพ 5 โครงสร้างของโปรตีนทั้ง 4 ระดับ.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | 10   |
| ภาพ 6 โครงสร้างทางเคมีของโมโนแซ็กคาไรด์ (1) xylose ( $\beta$ -d-xylopyranose), (2) arabinose ( $\alpha$ -l-arabinofursnose), (3) glucose ( $\beta$ -d-glucopyranose), (4) fructose ( $\beta$ -d-fructofuranose), (5) d-galacturonic acid, (6) ribose ( $\beta$ -d-ribofuranose), (7) deoxyribose( $\beta$ -d-deoxyribofuranose) and (8) mannose ( $\alpha$ -d-manno-pyranose). .... | 25   |
| ภาพ 7 การแบ่งประเภทของคาร์โบไฮเดรต.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 28   |
| ภาพ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างเยื่อใยหยาบและใยอาหาร.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 29   |
| ภาพ 9 องค์ประกอบของใยอาหารที่พบในเมล็ดธัญพืช.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | 33   |
| ภาพ 10 กลไกการหมักของใยอาหารที่บริเวณลำไส้เล็ก.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | 43   |
| ภาพ 11 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ ARBOCEL <sup>®</sup> RC FINE.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 46   |
| ภาพ 12 โครงสร้างของวิลไล เมื่อ a คือ ความสูงของวิลไล (villus height), b คือ ความลึกของคริปต์ (crypt depth), c คือ ความกว้างส่วนต้น และ d คือ ความกว้างส่วนปลาย.....                                                                                                                                                                                                                 | 50   |
| ภาพ 13 ค่าสัมประสิทธิ์การย่อยได้ปรากฏของไก่เนื้อที่ได้รับใยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำแต่ละลายได้ในสุตรอาหาร.....                                                                                                                                                                                                                                                                          | 66   |
| ภาพ 14 ระยะเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของอาหารในท่อทางเดินอาหารของไก่เนื้ออายุ 24 วัน.....                                                                                                                                                                                                                                                                                            | 68   |

|                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ภาพ 15 ปริมาณการกินอาหารเฉลี่ยสะสมตลอดระยะเวลา 4 ชั่วโมงในไก่เนื้ออายุ 24 วัน<br>.....       | 68 |
| ภาพ 16 ระยะเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของอาหารในท่อทางเดินอาหารของไก่เนื้ออายุ 45 วัน<br>..... | 69 |
| ภาพ 17 ปริมาณการกินอาหารเฉลี่ยสะสมตลอดระยะเวลา 4 ชั่วโมงในไก่เนื้ออายุ 45 วัน<br>.....       | 69 |
| ภาพ 18 รายละเอียดข้อมูลของการทำวิจัยและตารางปฏิบัติงาน .....                                 | 91 |
| ภาพ 19 การทำความสะอาดเตรียมคอกทดลอง .....                                                    | 91 |
| ภาพ 20 การเตรียมความพร้อมเชื้อระบบการให้น้ำอัตโนมัติแบบหัวหยด (nipple).....                  | 92 |
| ภาพ 21 การเตรียมคอกกักก่อนลูกไก่มาถึง .....                                                  | 92 |
| ภาพ 22 การเตรียมคอกทดลอง .....                                                               | 93 |
| ภาพ 23 พื้นที่เก็บวัตถุดิบอาหารสำหรับการทดลอง .....                                          | 93 |
| ภาพ 24 การผสมอาหารก่อนเริ่มงานทดลอง .....                                                    | 94 |
| ภาพ 25 ช่วงระยะกักลูกไก่ที่อายุ 1-10 วัน .....                                               | 94 |
| ภาพ 26 ลูกไก่ที่อายุ 1 วัน.....                                                              | 95 |
| ภาพ 27 การเยี่ยมชมจากคณะกรรมการกำกับดูแลการดำเนินการต่อสัตว์เพื่องานทาง<br>วิทยาศาสตร์ ..... | 95 |
| ภาพ 28 ลักษณะการจัดการคอกทดลองภายในโรงเรือนและการจัดคอกทดลอง .....                           | 96 |
| ภาพ 29 การชั่งน้ำหนักไก่ทดลองในแต่ละสัปดาห์ .....                                            | 96 |
| ภาพ 30 การสังเกตระยะเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของอาหารในการศึกษาที่ 2.....                    | 97 |
| ภาพ 31 การเก็บตัวอย่างลำไส้เล็กทั้ง 3 ส่วน ขนาดประมาณ 2 เซนติเมตร .....                      | 97 |
| ภาพ 32 การเก็บรักษาตัวอย่างลำไส้เล็กทั้ง 3 ส่วน .....                                        | 98 |
| ภาพ 33 การเตรียมตัวอย่างชิ้นเนื้อ .....                                                      | 98 |

|                                                                           |     |
|---------------------------------------------------------------------------|-----|
| ภาพ 34 กระบวนการดึงน้ำออกจากเซลล์ด้วยเครื่องเตรียมชิ้นเนื้ออัตโนมัติ..... | 99  |
| ภาพ 35 การตัดตัวอย่างชิ้นเนื้อด้วยเครื่องตัดชิ้นเนื้ออัตโนมัติ .....      | 99  |
| ภาพ 36 กระบวนการขจัดพาราฟินและย้อมสีตัวอย่างชิ้นเนื้อ .....               | 100 |



# บทที่ 1

## บทนำ

### ความเป็นมาของปัญหา

แนวคิดเรื่องการใช้อาหารเป็นยา (food as medicine) สำหรับมนุษย์ไม่ใช่เรื่องใหม่ ซึ่งในอดีตอาหารเป็นสิ่งที่ใช้รักษาโรคขาดสารอาหาร แต่ปัจจุบันเป็นที่ทราบกันดีว่าอาหารมีประโยชน์ต่อสุขภาพมากกว่าแค่สารอาหารหลักๆ ที่มีอยู่ เช่น คาร์โบไฮเดรต โปรตีน ไขมัน วิตามิน และเกลือแร่ เท่านั้น ด้วยเหตุนี้ นักวิจัยจึงมีแนวคิดในการพัฒนาอาหารสัตว์เป็นยาเพื่อใช้ในการผลิตไก่เนื้อ โดยอาศัยองค์ความรู้ด้านโภชนศาสตร์ (nutrition) ซึ่งนักโภชนาการได้แนะนำให้ผู้บริโภคนำมารับประทานอาหารประเภทใยอาหารสูง (high dietary fiber) เพื่อส่งเสริมสุขภาพ และลดอัตราการเกิดโรคต่างๆ ที่มีสาเหตุหลักมาจากพฤติกรรมการบริโภคอาหาร แต่ในทางกลับกัน เมื่อพิจารณาตามหลักโภชนศาสตร์สัตว์ (animal nutrition) แล้ว กลับพบว่า เยื่อใยหยาบ (crude fiber) เป็นปัจจัยอันดับต้นๆ ที่มักจะถูกจำกัดการใช้ในสูตรอาหารไก่เนื้อ โดยเยื่อใยหยาบจะถูกกำหนดไว้ให้อยู่ระหว่าง 3-5 เปอร์เซ็นต์ในสูตรอาหารไก่เนื้อ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับอายุของไก่ด้วย (Swennen et al., 2010) เพราะเยื่อใยหยาบไปมีผลเจือจางความหนาแน่นของโภชนะ (nutrient density) รวมทั้งมีผลยับยั้งการใช้ประโยชน์ได้ของโภชนะอื่นๆ อีกด้วย ดังนั้นการคำนวณสูตรอาหารสัตว์ จึงคำนึงเฉพาะโภชนะหลักๆ เช่น พลังงาน โปรตีน วิตามิน แร่ธาตุ และกรดอะมิโน เพราะโภชนะดังกล่าวมีผลโดยตรงต่อการเจริญเติบโต ปริมาณและคุณภาพของผลผลิต แต่ในทางตรงกันข้าม ปัจจุบันมีผลิตภัณฑ์สารเสริมประเภทใยอาหาร (dietary fiber) กลุ่มลิกโนเซลลูโลส (lignocellulose) ออกมาจำหน่ายมากมายหลายยี่ห้อ เช่น Arbocel, Opticell และ Jeluvet เป็นต้น ซึ่งอาจเป็นผลสืบเนื่องมาจากการที่สหภาพยุโรปมีคำสั่งห้ามใช้ยาปฏิชีวนะในการผลิตปศุสัตว์โดยเด็ดขาด จึงส่งผลให้สารเสริมประเภทนี้ได้รับความนิยมนำมาใช้เป็นสารส่งเสริมสุขภาพสัตว์แทนการใช้ยาปฏิชีวนะกันมากขึ้น อย่างไรก็ตามการเสริมใยอาหารที่มีจำหน่ายในเชิงการค้าอยู่ในปัจจุบัน อาจยังไม่ใช่ทางออกเดียวหรือเป็นคำตอบสุดท้ายก็เป็นได้ เพราะวัตถุดิบที่นิยมนำไปใช้ในการผลิตอาหารสัตว์ส่วนใหญ่มักมาจากวัตถุดิบที่ได้จากธัญพืช สูงถึง 50 - 60 เปอร์เซ็นต์ หรือผลพลอยได้ทางการเกษตร เช่น กากถั่วเหลือง สูงถึง 25 เปอร์เซ็นต์ คิดเป็นสัดส่วนทั้งหมดในสูตรอาหารผสมเกือบ 75-85 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งวัตถุดิบผสมอาหารสัตว์เหล่านี้ก็จะประกอบไปด้วยใยอาหาร หรือลิกโนเซลลูโลสอยู่แล้ว และในอนาคตสัดส่วนการใช้แหล่งวัตถุดิบอาหารสัตว์จากพืชมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพราะแหล่งวัตถุดิบอาหารจากสัตว์

เช่น ปลาปน เนื้อปน เลือดปน และกระดูกปน มีแนวโน้มค่อยๆ ลดลง ทำให้ไม่เพียงพอกับความ ต้องการใช้ที่เพิ่มขึ้น

ลิกโนเซลลูโลส (lignocellulose) เป็นองค์ประกอบหลักของผนังเซลล์พืช และเป็น สารประกอบเชิงซ้อนของเซลลูโลส (cellulose) และ เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) รวมไปถึง ลิกนิน (lignin) ซึ่งถูกจัดเป็นเส้นใยอาหารที่ไม่ละลายในน้ำ (insoluble dietary fiber, IDF) มี คุณสมบัติความหนืดต่ำ ความพองตัวสูงช่วยเพิ่มอัตราการเคลื่อนที่ของอาหารในระบบทางเดินอาหาร ได้ดีขึ้น เป็นตัวช่วยทำความสะอาดระบบทางเดินอาหาร กระตุ้นการพัฒนาโครงสร้างของกระเพาะ อาหารและลำไส้ กระตุ้นการผลิตเซลล์ดูซึม (epithelial cells) ช่วยลดค่า pH ในระบบทางเดิน อาหาร ซึ่งเป็นปัจจัยร่วมในการยับยั้งจุลินทรีย์ก่อโรค ทำให้เกิดความสมดุลของจุลินทรีย์ประจำถิ่น ภายในลำไส้ สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้า ที่พบว่า การเสริม IDF จากเมล็ดข้าวในอาหารไก่เนื้อมีผล ช่วยให้เกิดการพัฒนาของวิลไลและเซลล์ดูซึมของลำไส้เล็ก รวมไปถึงสมรรถภาพการผลิตโดยรวม เพิ่มขึ้นตามมา (Incharoen, 2013) นอกจากนั้นแล้วยังส่งผลเชิงบวกต่อความสม่ำเสมอของไข่ไข่ รุ่ง และแม่ไก่ที่กำลังให้ไข่ (Incharoen, & Maneechote, 2013) ซึ่งสอดคล้องกับ Adibmoradi et al. (2016) ที่รายงานว่า สูตรอาหารไก่เนื้อที่ประกอบด้วย IDF จากเมล็ดข้าวและเปลือกข้าวบาร์เลย์ ที่ระดับ 12 เปอร์เซ็นต์ มีส่วนช่วยเพิ่มสมรรถภาพการเจริญเติบโตและการย่อยได้ของโปรตีน รวมไปถึง ช่วยกระตุ้นสัณฐานวิทยาของวิลไล ดังนั้นหากสูตรอาหารไก่เนื้อประกอบไปด้วย IDF ในระดับที่ เหมาะสม อาจเป็นปัจจัยสำคัญที่มีส่วนช่วยให้ระบบย่อยและดูดซึมอาหารมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น ส่งผลดีต่อสมรรถภาพการผลิต คุณภาพผลผลิต รวมไปถึงสุขภาพของสัตว์

### วัตถุประสงค์ของการวิจัย

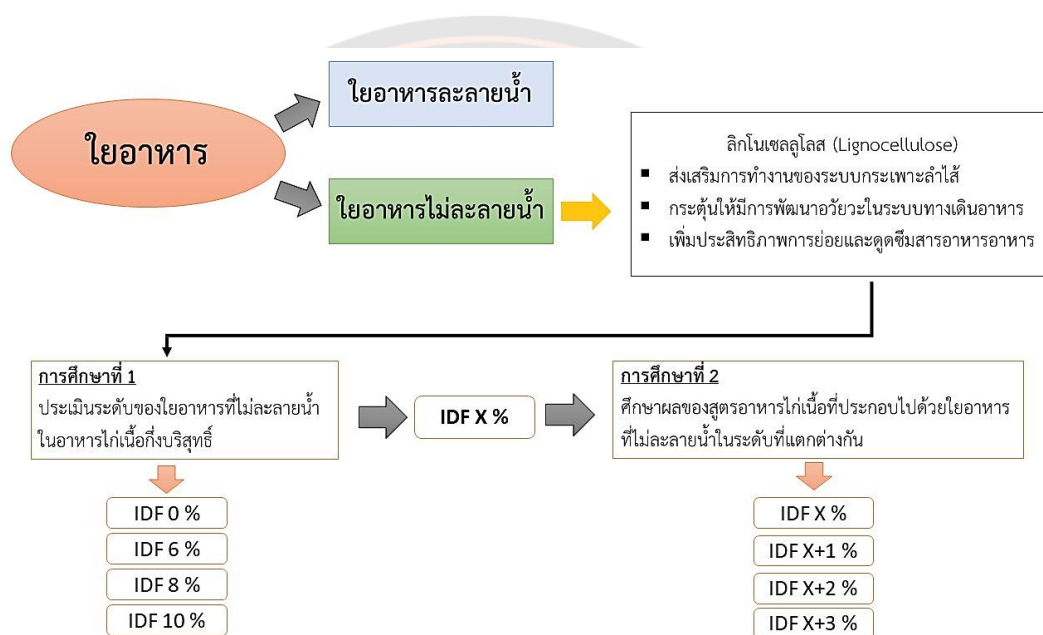
เพื่อศึกษาผลของใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำในสูตรอาหารไก่เนื้อต่อสมรรถภาพการผลิต อัตรา การย่อยได้ ระยะเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของอาหารในท่อทางเดินอาหาร และสัณฐานวิทยาของลำไส้

### กรอบแนวคิดและสมมติฐานของการวิจัย

กรอบแนวคิดของงานวิจัยครั้งนี้ (ภาพ 1) แบ่งการทดลองออกเป็น 2 การศึกษา ประกอบด้วย การศึกษาที่ 1 การประเมินระดับของใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำในอาหารไก่เนื้อกึ่งบริสุทธิ์ เพื่อให้ทราบระดับที่เหมาะสมของใยอาหารไม่ละลายน้ำในสูตรอาหารก่อนเป็นอันดับแรก โดยยึด 2 หลักเกณฑ์ ดังนี้ 1) พิจารณาจากผลกระทบต่อสมรรถภาพการเจริญเติบโต และ 1) ประเมินผลของ การเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยาของลำไส้เล็ก หลังจากนั้นจึงทำการคัดเลือกระดับใยอาหารที่ไม่ ละลายน้ำที่เหมาะสมที่สุด มาใช้เป็นค่าอ้างอิงในการศึกษาที่ 2 เพื่อศึกษาผลของระดับใยอาหารที่ไม่ ละลายน้ำในสูตรอาหารไก่เนื้อ โดยทำการวิเคราะห์หาระดับของใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำในวัตถุดิบ



อาหารสัตว์ที่นำมาใช้ประกอบสูตรอาหารทดลอง และคำนวณองค์ประกอบทางเคมีและคุณค่าทางโภชนาให้ตรงตามความต้องการของไก่เนื้อ โดยสูตรอาหารทดลองจะถูกกำหนดให้มีระดับใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำแตกต่างกัน 4 ระดับ เพื่อหาระดับที่เหมาะสมของการใช้ใยอาหารไม่ละลายน้ำในสูตรอาหารไก่เนื้อ ดังนั้นหากนักวิจัยสามารถประกอบสูตรอาหารไก่เนื้อที่มีระดับของใยอาหารไม่ละลายน้ำในระดับที่เหมาะสมอาจเป็นอีกปัจจัยสำคัญที่ช่วยส่งเสริมสุขภาพและสมรรถภาพการเจริญเติบโตให้ดีขึ้นได้ โดยที่ไม่จำเป็นต้องใช้สารเสริมกลุ่มลิกโนเซลลูโลสที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศและมีราคาแพง



ภาพ 1 กรอบแนวคิดที่ใช้ในงานวิจัย

### ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. สามารถนำองค์ความรู้เกี่ยวกับการใช้ประโยชน์จากใยอาหารในการประกอบสูตรอาหารไก่เนื้อทางการค้าได้
2. เพื่อเป็นแนวทางในการผลิตอาหารสัตว์เป็นยา (feed as medicine) ได้ในอนาคต โดยการประยุกต์ใช้ใยอาหารที่มีอยู่ในวัตถุดิบอาหารสัตว์

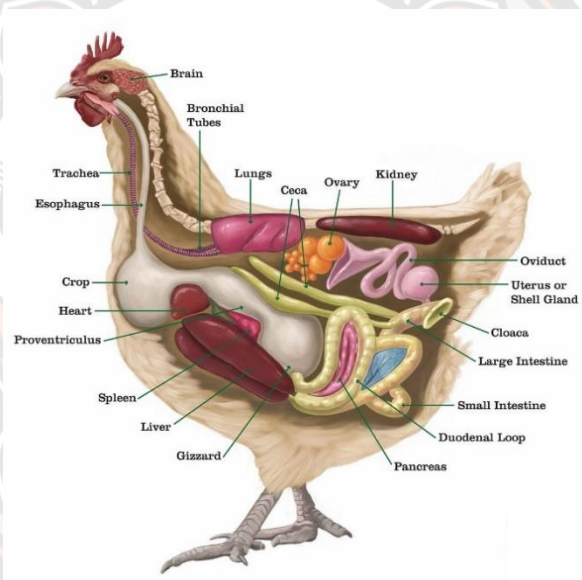


## บทที่ 2

### เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### ระบบย่อยอาหารของสัตว์ปีก

ระบบการย่อยอาหารเป็นกระบวนการลดขนาดอนุภาคของอาหารที่สัตว์ที่กินเข้าไปให้มีขนาดเล็กลง โดยจะเกิดขึ้นอย่างรวดเร็วและต่อเนื่องตั้งแต่เริ่มต้นกินอาหารเข้าไปจนกระทั่งร่างกายสามารถดูดซึมและนำไปใช้ประโยชน์ในการให้ผลผลิตเนื้อและไข่ ระบบย่อยอาหารในไก่ประกอบด้วยอวัยวะต่างๆ (ดังแสดงภาพ 2) ดังนี้



ภาพ 2 ระบบทางเดินอาหารในสัตว์ปีก

ที่มา: <https://backyardpoultry.iamcountryside.com/chickens-101/a-chickens-digestive-system-from-feed-to-egg/>

1) ปาก (mouth) ลักษณะของปากไก่ จะมีลักษณะแตกต่างจากสัตว์ชนิดอื่นๆ คือ ไม่มีริมฝีปาก ฟัน และกระพุ้งแก้ม แต่จะมีจอยปาก (beak) เข้ามาแทนที่ ทำหน้าที่ในการจิกและจับชิ้นอาหารเข้าปาก ลิ้นมีลักษณะแข็ง รูปร่างคล้ายหัวลูกศร ทำหน้าที่ในการบังคับและดันให้อาหารไหลลงสู่หลอดอาหาร โดยในปากจะพบต่อมน้ำลายอยู่บริเวณด้านข้างทั้งสองข้าง ทำหน้าที่ในการผลิตน้ำลาย ซึ่งมีลักษณะเป็นต่างอ่อนๆ ทำให้อาหารเปียกชื้นและอ่อนนุ่ม และเอนไซม์ Ptyalin

ซึ่งทำหน้าที่ในการย่อยแบ่งไปเป็นน้ำตาล แต่อย่างไรก็ตามการย่อยในปากเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย เนื่องจากอาหารจะอยู่ในปากเพียงช่วงระยะเวลาสั้นๆ

2) หลอดอาหาร (esophagus) เป็นท่อกล้ามเนื้อที่เชื่อมต่อระหว่างหลอดคอกับกระเพาะอาหารส่วนต้น ทำหน้าที่ในการลำเลียงอาหารหรือของเหลวที่กินไปยังบริเวณกระเพาะอาหาร บริเวณจุดเชื่อมต่อจะมีกล้ามเนื้อหูรูด ทำหน้าที่ควบคุมการเข้า-ออก ของอาหารสู่กระเพาะ ซึ่งในส่วนของผนังหลอดอาหารจะประกอบไปด้วยชั้นเนื้อเยื่อต่างๆ เช่น

- ชั้นเยื่อเมือก (mucosa) อยู่บริเวณส่วนเปิดด้านในสุดของท่อหลอดอาหาร โดยปกคลุมด้วยเยื่อบางๆชนิด สความัส (squamous epithelium) ทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการแพร่ผ่านของสาร

- ชั้นใต้เยื่อบุ (submucosa) เป็นชั้นที่อยู่ถัดจากชั้นเยื่อเมือก โดยจะประกอบด้วยต่อมต่างๆ

- ชั้นกล้ามเนื้อเรียบ (muscular layer) อยู่ถัดจากชั้นเยื่อบุ ทำหน้าที่ในการเคลื่อนไหวบีบอาหารให้ผ่านไปยังบริเวณกระเพาะ

- ชั้นเยื่อหุ้ม (serosa) อยู่ชั้นนอกสุด มีลักษณะเป็นเนื้อเยื่อเกี่ยวพันบางๆ

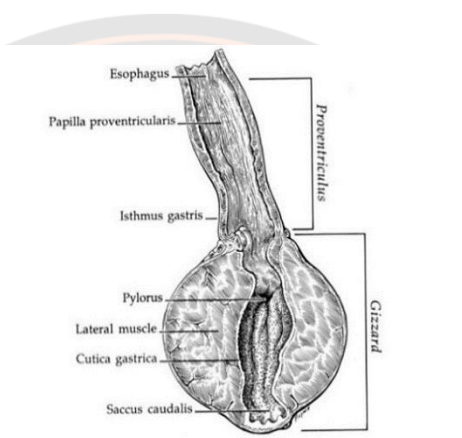
ซึ่งในสัตว์ปีกนั้นที่บริเวณส่วนท้ายของหลอดอาหารจะเกิดการขยายตัวโป่งพองเพื่อเป็นที่พักหรือกักเก็บอาหาร มีการหลั่งน้ำเมือกเพื่อคลุกเคล้าอาหารให้อ่อนนุ่มขึ้น ซึ่งมักเรียกอวัยวะตรงส่วนนี้ว่า “กระเพาะพัก (crop)” ก่อนที่จะส่งต่อไปยังกระเพาะแท้ (proventriculus) ในกระเพาะพักไม่มีการสร้างเอนไซม์ แต่มีเอนไซม์ Ptyalin จากปากทำหน้าที่ในการย่อยแบ่งต่อไป

3) กระเพาะอาหาร (stomach) เป็นส่วนที่ต่อจากหลอดอาหารส่วนปลาย จัดได้ว่าเป็นอวัยวะที่มีความสำคัญหลักๆในการย่อยอาหาร และดูดซึมสารอาหารได้บางส่วน มีความจุได้มากกว่าอวัยวะส่วนอื่นๆ มีหน้าที่บีบตัวเพื่อบดและลดขนาดของอนุภาคของอาหารให้มีขนาดเล็กลง รวมทั้งหลั่งน้ำย่อยเข้ามาช่วยคลุกเคล้าอาหาร จนได้อาหารที่มีลักษณะกึ่งแข็งกึ่งเหลว (chyme) ผลิตและหลั่งน้ำย่อยบางชนิด เพื่อย่อยอาหารประเภทไขมัน และช่วยในการเก็บพักอาหารก่อนที่จะถูกส่งไปยังบริเวณลำไส้เล็กส่วนต้น สำหรับกระเพาะอาหารของสัตว์ปีกนั้นสามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน (ภาพ 3) คือ

- ส่วนหน้า เรียกว่า กระเพาะแท้ (proventriculus or true stomach) ต่อบริเวณทางด้านหลังของกระเพาะพัก ซึ่งอยู่ภายในช่องลำตัว เป็นบริเวณที่มีต่อมต่างๆ อยู่มากมายจึงเรียกว่า “Glandular stomach” ทำหน้าที่ในการผลิตเอนไซม์เปปซิน (pepsin) และกรดไฮโดรคลอริก (HCl) โดยเอนไซม์เปปซินจะทำหน้าที่ในการย่อยโปรตีนที่มีโมเลกุลใหญ่ให้มีขนาดเล็กลง ส่วนกรดไฮโดรคลอริกทำหน้าที่ในการปรับสภาพกรด-ด่าง (pH) ในกระเพาะให้มีสภาพเป็นกรดและช่วยในการ

ย่อยโปรตีน เนื่องจากกระเพาะส่วนนี้มีขนาดเล็กและสั้น อาหารจึงผ่านจากส่วนนี้ไปสู่กระเพาะบดอย่างรวดเร็ว ทำให้การย่อยเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย

- ส่วนหลัง เรียกว่า กระเพาะบดหรือกิน (gizzard) อยู่ถัดจากกระเพาะแท้เป็นอวัยวะที่มีผนังหนา และมีกล้ามเนื้อแข็งแรงจึงเรียกว่า “Muscular stomach” ทำหน้าที่บดอาหารแทนการเคี้ยวด้วยฟันในสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม ทำให้อาหารมีขนาดเล็กลง เอนไซม์จึงสามารถย่อยอาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งการเสริมก่อนการบดลงในอาหารจะทำให้การบดและการย่อยอาหารมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น บริเวณกระเพาะส่วนนี้ไม่มีการหลั่งเอนไซม์



ภาพ 3 ลักษณะโครงสร้างกระเพาะอาหารของสัตว์ปีก

ที่มา: <https://slideplayer.com/slide/5985083/>

4) ลำไส้เล็ก (small intestine) เป็นอวัยวะที่มีหน้าที่หลักในการย่อยและดูดซึมสารอาหารเข้าสู่ร่างกาย มีโครงสร้างทั่วไปคล้ายกับท่อทางเดินอาหารส่วนอื่นๆ ประกอบด้วย 1) ชั้นเยื่อเมือก (mucosa) 2) ชั้นใต้เยื่อ (submucosa) 3) ชั้นกล้ามเนื้อเรียบ (muscular layer) และ 4) ชั้นเยื่อหุ้ม (serosa) อยู่ชั้นนอกสุด สามารถแบ่งลำไส้เล็กได้ออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่

- ลำไส้ส่วนต้น (duodenum) มีลักษณะโครงสร้างเป็นท่อทางเดินอาหารที่มีลักษณะโค้งเป็นห่วง (loop) เรียกว่า Duodenal loop เป็นที่ยึดตับอ่อน (pancreas) ซึ่งตับอ่อนจะทำหน้าที่ในการผลิตน้ำย่อย (pancreatic juice) เข้าสู่ลำไส้เล็ก

- ลำไส้เล็กส่วนกลาง (jejunum) อยู่ระหว่างลำไส้เล็กส่วนต้นและลำไส้เล็กส่วนปลาย สังเกตได้จากถุงยื่นของเมคเคล (meckel's diverticulum) เกิดจากท่อวิเทลลิน (vitelline duct) ที่ต่อกับไข่แดงในช่วงที่ยังเป็นเอ็มบริโอ

- ลำไส้เล็กส่วนปลาย (ileum) เป็นส่วนปลายสุดของลำไส้เล็ก

5) ไส้ตั้ง (cecum) ในสัตว์ปีกเกือบทุกชนิดมีไส้ตั้ง 2 พู (ซ้ายและขวา) มีลักษณะเป็นถุงตอนปลายขยายใหญ่กว่าตอนโคนถุงเชื่อมต่อกับท่อทางเดินอาหารบริเวณรอยต่อ ระหว่างลำไส้เล็กและลำไส้ใหญ่ (Ileo-caeco-rectal junction) เป็นส่วนสุดท้ายสำหรับการย่อยอาหารและการดูดซึมน้ำ ซึ่งเป็นบริเวณที่เกิดการหมักและย่อยเยื่อใยในอาหารโดยแบคทีเรีย

6) ไส้ตรง (rectum) เป็นท่อตรงขนาดเล็กและสั้นกว่าส่วนอื่นๆ ลำไส้ส่วนนี้จะมีการควบคุมการเคลื่อนที่เหมือนกับโคลอน มีต่อมหลั่งน้ำเมือกจำนวนมาก และประกอบไปด้วยต่อมรับความรู้สึกจำนวนมาก เพื่อคอยตอบสนองต่อแรงดึงที่เกิดจากการยืดหรือขยายตัว เพราะเกี่ยวข้องกับโดยตรงกับการขับถ่ายอุจจาระ

7) ทวารร่วม (cloaca) เป็นท่อเปิดร่วมกันระหว่างท่อทางเดินอาหารและปัสสาวะกับท่อทางเดินสืบพันธุ์ ในสัตว์ปีกเพศผู้จะเป็นท่อทวารร่วมกับท่อน้ำเชื้อ จะอยู่บริเวณตรงกลางของลำตัวส่วนในเพศเมีย จะเป็นท่อทวารร่วมกับท่อน้ำไข แต่เนื่องจากส่วนปลายของท่อน้ำไขจะอยู่ทางซ้ายและมีขนาดใหญ่ ท่อทวารร่วมจึงถูกดันค่อนไปอยู่ทางด้านขวา ทั้งนี้จะมีรูเปิดที่กัน (vent) เพื่อใช้ในการขับถ่ายอุจจาระและขับต้นไขหรือหลั่งน้ำเชื้อออกมา

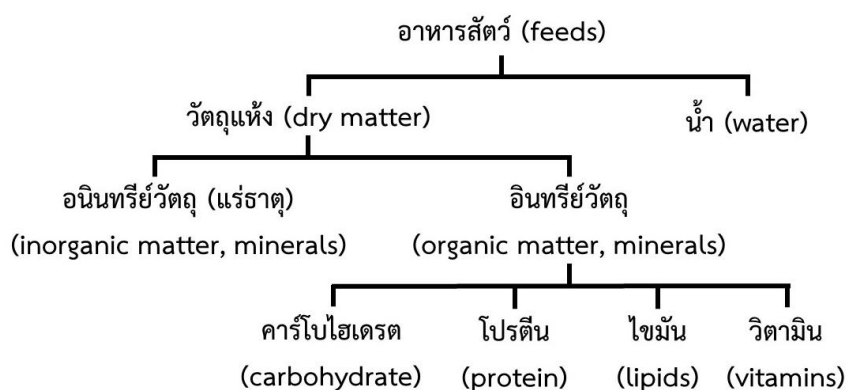
### โภชนศาสตร์สัตว์

โภชนะ (nutrients) หรือ สารอาหาร เมื่อบริโภคเข้าไปแล้วร่างกายสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เช่น ช่วยในการส่งเสริมการเจริญเติบโต ซ่อมแซมเนื้อเยื่อส่วนที่สึกหรอ อย่างไรก็ตามใน ส่วนประกอบทางเคมีของร่างกายสัตว์จะมีการเปลี่ยนแปลงไปตามอายุและสถานภาพของสัตว์เมื่อ สัตว์มีอายุมากขึ้น โดยจะมีสัดส่วนของน้ำที่ลดลง ในขณะที่สัตว์ที่เพิ่งเกิดใหม่จะมีน้ำในร่างกายประมาณ 75 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อโตเต็มที่แล้วจะมีน้ำในร่างกายลดลงเหลือประมาณ 50-60 เปอร์เซ็นต์ รวมไปถึงส่วนประกอบทางเคมีของพืชอาจมีการแปรผันตามชนิดของพืช อายุ และส่วนต่างๆของพืชที่นำมาใช้เป็นอาหารสัตว์ เช่น หัว ใบ เมล็ด ลำต้น เป็นต้น นอกจากนี้ความอุดมสมบูรณ์ของดินที่ปลูก การให้ปุ๋ย การเพาะปลูก และฤดูกาล สิ่งเหล่านี้ส่งผลต่อส่วนประกอบทางเคมีของพืชเช่นเดียวกัน

ในทางโภชนศาสตร์สัตว์สามารถแบ่งโภชนะออกเป็น 6 ประเภท ได้แก่ น้ำ (water) โปรตีน (protein) ไขมัน (lipid) วิตามิน (vitamins) แร่ธาตุ (minerals) และคาร์โบไฮเดรต (carbohydrate) (ดังแสดงในภาพ 4)

### น้ำ (water)

เป็นองค์ประกอบของของเหลวในร่างกายสัตว์ ซึ่งมีผลต่อการทำงานทางชีวเคมีและระบบสรีรวิทยาของเซลล์ ในร่างกายของสัตว์ที่เพิ่งเกิดใหม่จะประกอบด้วยน้ำปริมาณถึง 3 ใน 4 ส่วน หรือประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักร่างกาย ดังนั้นน้ำจึงเป็นสิ่งจำเป็นต่อร่างกาย



ภาพ 4 การแบ่งประเภทของโภชนะในอาหาร

หน้าที่ของน้ำที่มีต่อร่างกาย ได้แก่

- เป็นโครงสร้างและส่วนประกอบของเซลล์ เลือด น้ำเหลือง น้ำลาย น้ำตา เหงื่อ ปัสสาวะ ตลอดจนน้ำย่อย ทำให้เซลล์คงรูปและยืดหยุ่นได้
- เป็นตัวทำละลาย เพื่อทำการเคลื่อนย้าย เช่น การดูดซึมโภชนะผ่านบริเวณผนังลำไส้ ผ่านบริเวณผนังหลอดเลือดเข้าสู่เซลล์ การขับถ่ายของเสียจากการเมตาบอลิซึม เช่น คาร์บอนไดออกไซด์ แอมโมเนีย และอิเล็กโทรไลต์ ออกจากร่างกายผ่านช่องทางต่างๆ
- เป็นตัวกลางที่จำเป็นสำหรับการทำงานของเซลล์
- เป็นตัวช่วยควบคุมอุณหภูมิของร่างกาย โดยการกระจายความร้อนจากอวัยวะหนึ่งไปยังอวัยวะอื่นๆ ทำให้ร่างกายมีอุณหภูมิสม่ำเสมอ หรือระบายความร้อนที่มากเกินไปในร่างกายออก
- ช่วยรักษาสมดุลของกรดต่างในร่างกาย รักษาสมดุลน้ำหรือควบคุมแรงดันออสโมติก (osmotic pressure) คือ แรงดันที่เกิดขึ้นในกระบวนการแพร่ของน้ำ ออสโมซิส (osmosis) ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ โดยปริมาณน้ำภายในเซลล์จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไอออนของโปรตีนเซียมและฟอสเฟต ส่วนปริมาณน้ำภายนอกเซลล์ จะขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของไอออนของโซเดียมและคลอไรด์

### โปรตีน (protein)

เป็นสารประกอบอินทรีย์ ซึ่งเป็นพอลิเมอร์สายยาวของกรดอะมิโน (amino acid) โปรตีนจัดเป็นส่วนประกอบของร่างกาย ที่มีปริมาณมากเป็นอันดับสองรองจากน้ำ โดยเป็นส่วนประกอบพื้นฐานของเซลล์ของสิ่งที่มีชีวิตทุกชนิด



โดยประกอบไปด้วยกรดอะมิโนหลายตัวมาเรียงต่อกันด้วยพันธะเปปไทด์ โดยเอาหมู่อะมิโน ( $-NH_2$ ) ของกรดอะมิโนตัวหนึ่งต่อกับหมู่คาร์บอกซิล ( $-COOH$ ) ของกรดอะมิโนอีกตัวหนึ่งในโมเลกุลของโปรตีนประกอบด้วยธาตุหลายชนิด ได้แก่ คาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) ออกซิเจน (O) ไนโตรเจน (N) ซัลเฟอร์ (S) ฟอสฟอรัส (P) เป็นต้น โครงสร้างของโปรตีน ประกอบด้วยโพลีเพปไทด์ (polypeptides) สายเดี่ยวหรือหลายสาย ซึ่งโพลีเพปไทด์สายยาวที่ประกอบด้วยกรดอะมิโนชนิดต่างๆ จึงต้องมีการขดตัว (folding) ให้มีรูปร่างต่างๆ เพื่อทำหน้าที่ที่เหมาะสม โดยโครงสร้างของโปรตีน สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ระดับ (ดังแสดงในภาพ 5) ได้แก่

1) โครงสร้างปฐมภูมิ (primary structure) เป็นโครงสร้างหลักพื้นฐานของโปรตีน เกิดจากการเชื่อมต่อกันของกรดอะมิโน (amino acid) เป็นสายยาว ระหว่างกรดอะมิโนเชื่อมต่อกันด้วยพันธะเปปไทด์ (peptide) เกิดเป็นโพลีเพปไทด์ โดยมีปลายด้านหนึ่งของสายเป็นปลายกรดอะมิโน และปลายอีกด้านหนึ่งเป็น ปลายของหมู่คาร์บอกซิล โดยชนิดและการเรียงลำดับของกรดอะมิโนในสายของโพลีเพปไทด์มีความเฉพาะเจาะจง ทำให้เกิดเป็นโปรตีนชนิดต่างๆ มากมาย การย่อยสลายโครงสร้างปฐมภูมิของโปรตีน จะทำให้ได้กรดอะมิโน (amino acid) และ โปรตีนสายสั้นๆ เช่น dipeptide แต่ความร้อนระดับการหุงต้ม ไม่สามารถทำลายโครงสร้างปฐมภูมิได้

2) โครงสร้างลำดับที่สอง หรือโครงสร้างทุติยภูมิ (secondary structure) เป็นโครงสร้างที่เกิดจากกรดอะมิโน (amino acid) ที่อยู่ภายในสายโพลีเพปไทด์เดียวกัน ทำปฏิกิริยากันด้วยพันธะไฮโดรเจน ซึ่งเกิดขึ้นในตำแหน่งที่เว้นระยะห่างสม่ำเสมอ ทำให้เกิดโครงสร้างสามมิติของโปรตีน มี 2 รูปแบบหลัก คือ

2.1) แบบเกลียวแอลฟา (alpha-helix) ซึ่งมีลักษณะเป็นเกลียวขดคล้ายสปริง เกลียวแอลฟาเป็นโครงสร้างพื้นฐานทั้งในโปรตีนเส้นใย (fibrous protein) และในโปรตีนก้อนกลม (globular protein)

2.2) แบบ beta sheets หรือ pleated sheet ซึ่งเป็นแผ่นพับซ้อนกันไปมา

3) โครงสร้างลำดับที่สาม (tertiary structure) เป็นโครงสร้างที่เกิดขึ้นภายหลังจากที่เกิดโครงสร้างลำดับสองแล้ว เป็นโครงสร้างที่เกิดเนื่องจากพันธะต่างๆ ระหว่าง หมู่ R (side chain) ต่างๆ ของกรดอะมิโนสายเดียวกัน เช่น

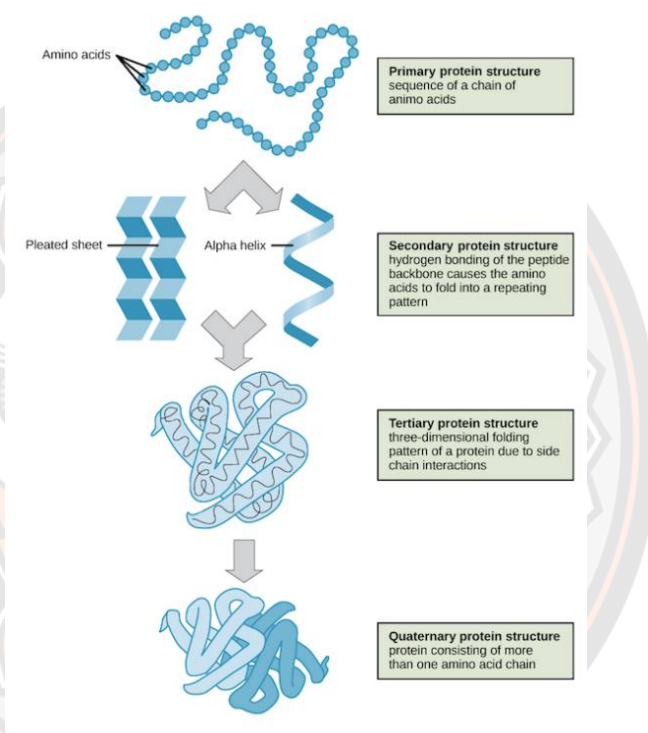
3.1) พันธะไอออนิกเกิดระหว่างหมู่ R ของกรดอะมิโนที่มีประจุบวกและประจุลบ

3.2) พันธะไฮโดรเจน

3.3) พันธะไดซัลไฟด์ (disulfide bond) เป็นพันธะโควาเลนต์ที่เกิดจากหมู่ไทออล (thiol group) ของกรดอะมิโน ซิสเตอีน (cysteine) 2 โมเลกุล

3.4) แรงดึงดูดระหว่างหมู่ที่ไม่ชอบน้ำ และแรงแวนเดอร์วาล (hydrophobic and van der wall interaction) ทำให้โพลีเพปไทด์พับไปมา มีรูปร่างเปลี่ยนไป ตามชนิดและแรงดึงดูดของพันธะ

4) โครงสร้างลำดับที่สี่ (quaternary structure) เกิดจากการรวมกันของสายโพลีเพปไทด์มากกว่า 1 สาย ด้วยแรงดึงดูดอย่างอ่อน ระหว่างหมู่ R ระหว่างสายโพลีเพปไทด์ที่ยังไม่เกิดพันธะ ซึ่งอยู่บริเวณผิวด้านนอกของโครงสร้าง พบในโมเลกุลของเอนไซม์ (enzyme)



ภาพ 5 โครงสร้างของโปรตีนทั้ง 4 ระดับ

ที่มา: <https://www.khanacademy.org/science/biology/macromolecules/proteins-and-amino-acids/a/orders-of-protein-structure>

ในการจำแนกรดอะมิโนที่มีความจำเป็นต่อสัตว์ สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม

1) กรดอะมิโนที่จำเป็น หรือขาดไม่ได้ (essential or indispensable amino acid) คือกรดอะมิโนที่ร่างกายสัตว์ชั้นสูงสร้างไม่ได้ หรืออาจสร้างได้ไม่เพียงพอกับความต้องการของร่างกาย จึงจำเป็นต้องได้รับจากอาหาร หากขาดจะทำให้เกิดการผิดปกติ โดยกรดอะมิโนที่จำเป็นมีทั้งหมด 10 ชนิด ได้แก่



- |                                 |                            |
|---------------------------------|----------------------------|
| 1) อาร์จินีน (arginine)         | 2) ฮีสติดีน (histidine)    |
| 3) ไอโซลิวซีน (isoleucine)      | 4) ลิวซีน (leucine)        |
| 5) ไลซีน (lysine)               | 6) เมทไธโอนีน (methionine) |
| 7) เบนิลอะลานีน (phenylalanine) | 8) ทรีโอนีน (threonine)    |
| 9) ทริปโตเฟน (tryptophane)      | 10) วาลีน (valine)         |

2) กรดอะมิโนที่ไม่จำเป็น (non-essential or dispensable amino acids) คือ กรดอะมิโนที่ร่างกายสัตว์สามารถสร้างเองได้อย่างเพียงพอ หรือถ้าขาดก็ไม่สามารถทำให้เกิดอาการผิดปกติได้ เพราะร่างกายสามารถสร้างได้จากกรดอะมิโนชนิดอื่นๆ ได้แก่

- |                                |                                  |
|--------------------------------|----------------------------------|
| 1) อะลานีน (alanine)           | 2) กรดแอสพาร์ติก (aspartic acid) |
| 3) แอสพาราจีน (asparagine)     | 4) ซีสเทอีน (cysteine)           |
| 5) กรดกลูตามิก (glutamic acid) | 6) กลูตามีน (glutamine)          |
| 7) ไกลซีน (glycine)            | 8) โพรลีน (proline)              |
| 9) ซีรีน (serine)              | 10) ไทโรซีน (tyrosine)           |

โปรตีนสามารถแบ่งตามโครงสร้างและรูปร่างของโมเลกุลได้ 3 กลุ่ม ดังนี้

#### 1) การจำแนกตามรูปร่าง

1.1) โปรตีนที่มีรูปร่างเป็นสายยาวหรือสานกันเป็นร่างแห (fibrous protein) เป็นโปรตีนที่ละลายน้ำได้ยากและให้ความเหนียว (tough) จึงเป็นโปรตีนที่ทำหน้าที่เป็นโครงสร้าง เช่น collagen ซึ่งเป็นโปรตีนที่พบมากที่สุด เนื้อเยื่อเกี่ยวพัน (connective tissue) อีลาสติน (elastin) เคอราติน (keratin) เป็นโปรตีนที่พบที่ผิวหนังผมและเล็บ เป็นต้น

1.2) โปรตีนที่มีรูปร่างกลมหรือรี (globular protein) เป็นโปรตีนที่ละลายน้ำได้ดี ทำหน้าที่ต่างๆ เช่น เป็นเอนไซม์ ฮอร์โมน อิมมูโนโกลบูลินชนิดต่างๆ โดยโปรตีนจะทำหน้าที่ขนส่งสารต่างๆในร่างกาย เช่น ฮีโมโกลบิน ทำหน้าที่ขนส่ง  $O_2$  ในเลือด และอัลบูมินทำหน้าที่ขนส่งกรดไขมัน เป็นต้น

นอกจากนี้ โปรตีนบางชนิดอาจมีทั้งส่วนที่เป็น fibrous และ globulin อยู่ด้วยกัน เช่น myosin ซึ่งทำหน้าที่เป็นโปรตีนของกล้ามเนื้อ

#### 2) การจำแนกตามส่วนประกอบทางเคมี

2.1) โปรตีนอย่างง่าย (simple protein) คือ โปรตีนที่ถูกไฮโดรไลซ์แล้วได้กรดอะมิโนชนิดต่างๆ เท่านั้น เช่น อัลบูมิน เคอราติน

2.2) คอนจูเกตโปรตีน (conjugated protein) เป็นโปรตีนที่รวมกับสารชนิดอื่นที่ไม่ใช่โปรตีน ยกตัวอย่างเช่น

2.2.1) ลิโปโปรตีน เป็นโปรตีนที่รวมกับลิพิด พบมากในเลือด เช่น ลิโปโปรตีนที่มีความหนาแน่นต่ำมาก (very low density lipoprotein, VLDL) ลิโปโปรตีนที่มีความหนาแน่นต่ำ (low density lipoprotein, LDL) และลิโปโปรตีนที่มีความหนาแน่นสูง (high density lipoprotein, HDL)

2.2.2) นิวคลีโอโปรตีน เป็นโปรตีนที่รวมกับกรดนิวคลีอิก พบมากในนิวเคลียสของเซลล์ เช่น ไรโบนิวคลีอิก (RNA) และดีออกซีไรโบนิวคลีอิก (DNA)

2.2.3) มิวโคโปรตีน เป็นโปรตีนที่รวมกับพอลิแซ็กคาไรด์ เช่น เมือกมิวซิน

2.2.4) ฟอสโฟโปรตีน เป็นโปรตีนที่รวมกับกรดฟอสฟอริก พบมากคือโปรตีนเคซีนในน้ำนม

2.2.5) เมทอลโลโปรตีน เป็นโปรตีนที่รวมกับโลหะ เช่น เฟอร์ริทิน และฮีโมซิดริน

3) โปรตีนอนุพันธ์ (derived protein) เป็นโปรตีนที่เกิดจากกระบวนการเมตาบอลิซึมของโปรตีน

โดยหน้าที่หลักของโปรตีนมีความสำคัญเป็นส่วนประกอบในส่วนต่างๆของร่างกายรวมทั้งการสร้างเซลล์ใหม่ทดแทนเซลล์ที่สึกหรอไปภายในร่างกายสัตว์ โดยทำหน้าที่เกี่ยวกับปฏิกิริยาต่างๆ ในร่างกาย เช่น เอนไซม์ ฮอรโมน ซึ่งเป็นตัวคอยควบคุมการทำงานต่อมต่างๆที่เกี่ยวข้องกับเมตาบอลิซึมการย่อยอาหาร ตลอดทั้งสร้างความเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิต

### ไขมัน (lipids)

เป็นสารอินทรีย์ที่ประกอบด้วยธาตุคาร์บอน (C) ไฮโดรเจน (H) และออกซิเจน (O) โดยจะมีการรวมตัวกันระหว่างกรดไขมันและแอลกอฮอล์ พบในเนื้อเยื่อสัตว์และพืช ไม่ละลายในน้ำ แต่ละลายได้ดีในสารละลายอินทรีย์ เช่น เบนซีน (benzene) อีเธอร์ (ethers) คลอโรฟอร์ม (chloroform) โดยไขมันจะทำหน้าที่เป็นตัวพาอิเล็กตรอน โดยเป็นสารตัวพาในปฏิกิริยาของเอนไซม์ ซึ่งลิพิดส์เป็นองค์ประกอบที่สำคัญของเยื่อหุ้มเซลล์ รวมถึงเป็นแหล่งที่เก็บสำรองของพลังงาน

การจัดจำแนกประเภทของลิพิดส์ สามารถแบ่งออกได้เป็น 4 ประเภทใหญ่ๆ ได้แก่

1) ลิพิดส์อย่างง่าย (simple lipid) คือ ลิพิดส์ที่เป็นเอสเทอร์ของกรดไขมัน (fatty acids) กับแอลกอฮอล์ชนิดต่างๆ แบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ

1.1) ไขมัน (fat) และน้ำมัน (oil) เป็นเอสเทอร์ของกรดไขมัน และกลีเซอรอล (glycerol) ในรูปของไตรเอซิลกลีเซอรอล (triacylglycerol) โดยถ้าไตรเอซิลกลีเซอรอลอยู่ในสภาวะที่เป็นของเหลวจะเรียกว่า น้ำมัน แต่ถ้าอยู่ในรูปของแข็งจะเรียกว่า ไขมัน

1.2) แวกซ์ หรือไข (waxes) เป็นเอสเทอร์ของกรดไขมันกับแอลกอฮอล์ ที่มีน้ำหนักโมเลกุลสูงๆ ที่ไม่ใช่กลีเซอรอล เป็นสารที่ไม่ละลายน้ำ เมื่อเย็นจะมีลักษณะแข็งและจะอ่อนตัวเมื่อได้รับความร้อน ตัวอย่างที่พบเห็นได้ คือ ขี้ผึ้ง

2) ลิพิดส์เชิงประกอบ (compound lipid) คือ ลิพิดส์ที่เป็นเอสเทอร์ของกรดไขมันกับแอลกอฮอล์และสารอื่น แบ่งออกเป็น 3 ชนิดใหญ่ๆ ได้แก่

2.1) ฟอสโฟลิพิดส์ (phospholipids) ประกอบด้วย กรดไขมัน แอลกอฮอล์ และกรดฟอสฟอริก บางครั้งอาจจะพบเบสที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบรวมอยู่ด้วย เช่น กลีเซอโรฟอสโฟลิพิดส์ (glycerophospholipids) และ สฟิงโกฟอสโฟลิพิด (sphingophospholipids)

2.2) ไกลโคลิพิดส์ (glycolipids) ประกอบด้วยกรดไขมัน สฟิงโกไชน์ และคาร์โบไฮเดรต

2.3) ลิพิดส์เชิงประกอบชนิดอื่นๆ เช่น ลิโปโปรตีน (lipoproteins) เป็นสารประกอบเชิงซ้อนของลิพิดส์และโปรตีน หรือ ซัลโฟลิพิดส์ (sulfolipids) เป็นสารประกอบเชิงซ้อนของลิพิดส์และซัลเฟอร์ เป็นต้น

3) อนุพันธ์ของลิพิดส์ (derived lipid) เป็นสารที่ได้จากการย่อยสลายลิพิดส์ทั้ง 2 ประเภทที่กล่าวมาข้างต้น ได้แก่ กรดไขมัน กลีเซอรอล แอลกอฮอล์ตัวอื่นๆ ที่มีขนาดใหญ่กว่ารวมไปถึงสารอื่นๆ ที่มีอยู่ร่วมกับลิพิดส์ เช่น คอเลสเทอรอล แคโรทีน สเตอรอยด์ และพาวิตามินที่ละลายในไขมัน เช่น A, D, E, K

3.1) กรดไขมัน (fatty acid) เป็นอนุพันธ์ของลิพิดส์ เกิดจากการย่อยสลายตัวของลิพิดส์ ซึ่งกรดไขมันประกอบด้วยคาร์บอนเป็นโซ่ยาวมีหมู่  $-COOH$  ที่ส่วนปลาย กรดไขมันมีคาร์บอนตั้งแต่ 3-20 อะตอม แต่ที่พบบ่อยมีคาร์บอน 16-18 อะตอม สูตรทั่วไปของกรดไขมัน คือ  $RCOOH$  แบ่งออกเป็น 2 ชนิดตามพันธะที่มีอยู่ในโมเลกุล

3.1.1) กรดไขมันอิ่มตัว (saturated fatty acid, SFA) เป็นกรดไขมันที่มีพันธะเดี่ยวในโมเลกุลมีโครงสร้างเป็นโซ่ตรง มีสูตรทั่วไปคือ  $C_nH_{2n}O_2$  เมื่อ n แทนจำนวนคาร์บอนอะตอม เช่น กรดบิวทีริก (butyric acid,  $C_4H_8O_2$ ) พบในไขมันเนย กรดปาล์มิติก (palmitic acid,  $C_{16}H_{32}O_2$ ) และกรดสเตียริก (stearic acid,  $C_{18}H_{36}O_2$ ) ซึ่งพบในไขมันพืชและไขมันสัตว์ทั่วไป

3.1.2) กรดไขมันไม่อิ่มตัว (unsaturated fatty acid, UFA) เป็นกรดไขมันที่มีพันธะคู่หรือพันธะสามในโมเลกุล ที่พบบ่อยที่สุดคือ กรดโอเลอิก (oleic acid,  $C_{18}H_{34}O_2$ ) ไขมันต่างๆไปจะมีกรดโอเลอิกประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ ของกรดไขมันทั้งหมด ในน้ำมันมะกอก (olive oil)

น้ำมันถั่วลิสง (peanut oil) จะมีกรดโอเลอิกมากกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งกรดไขมันไม่อิ่มตัวมีความจำเป็นต่อร่างกายเนื่องจากร่างกายสังเคราะห์ไม่ได้หรือถ้าได้ก็อาจไม่เพียงพอ จึงต้องได้รับจากสารอาหารที่รับประทานในแต่ละวันจึงเรียกว่า กรดไขมันไม่อิ่มตัวว่า กรดไขมันจำเป็น (essential fatty acid) ส่วนกรดไขมันที่ร่างกายสังเคราะห์ได้เรียกว่า กรดไขมันไม่จำเป็น (nonessential fatty acid)

ซึ่งลปิดส์มีความสำคัญต่อสัตว์ ดังนี้

- เป็นแหล่งพลังงานเช่นเดียวกับคาร์โบไฮเดรต แต่ให้พลังงานมากกว่าคาร์โบไฮเดรตถึง 2.25 เท่า

- เป็นแหล่งพลังงานที่สามารถสะสมไว้ในร่างกายเพื่อใช้ในยามขาดอาหารหรือช่วงที่ร่างกายต้องใช้พลังงานมาก ร่างกายต้องอยู่ในสภาวะอากาศหนาว ใช้ในระหว่างการสืบพันธุ์ การเจริญเติบโต และการจำศีล

- เป็นตัวพาหรือแหล่งของวิตามินที่ละลายได้ในไขมัน ได้แก่ วิตามินเอ ดี อี และเค  
- ให้กรดไขมันที่จำเป็นแก่สัตว์ (essential fatty acid) ซึ่งมีอยู่ 3 ตัว คือ กรดลิโนเลอิก (linoleic acid) กรดลิโนเลนิก (linolenic acid) และกรดอราชีดอิก (arachidonic acid)

- เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของเซลล์โดยเฉพาะเซลล์สมอง จึงจำเป็นมากต่อชีวิตและการเจริญเติบโตของสัตว์เล็ก

- สามารถช่วยเพิ่มความน่ากินของอาหาร แต่อย่างไรก็ตามหากอาหารที่มีไขมันเป็นส่วนประกอบต่ำเกินไป จะทำให้มีลักษณะแห้งเป็นฝุ่น และความน่ากินต่ำ จึงส่งผลให้สัตว์กินได้น้อยลง ซึ่งโดยทั่วไปอาหารสัตว์ควรมีไขมันเป็นองค์ประกอบไม่ต่ำกว่า 2 เปอร์เซ็นต์ และไม่ควรมีไขมันในระดับสูงมากเกินไปเพราะจะทำให้อาหารเกิดการจับตัวเป็นก้อนและเสี้ง่ายเนื่องจากการหืน

### วิตามิน (vitamins)

เป็นสารประกอบอินทรีย์ ทำหน้าที่เกี่ยวข้องกับการสร้างพลังงานและเป็น cofactors ในกระบวนการเมตาบอลิซึมของสารอาหาร ดังนั้นหากร่างกายได้รับปริมาณวิตามินไม่เพียงพอเป็นระยะเวลานาน อาจส่งผลทำให้กระบวนการเมตาบอลิซึมของสารอาหารผิดปกติได้

วิตามินแบ่งเป็น 2 ประเภท คือ วิตามินที่ละลายในไขมัน (fat-soluble vitamins) และวิตามินที่ละลายในน้ำ (water-soluble vitamins)

1) วิตามินที่ละลายในไขมัน (fat-soluble vitamins) ได้แก่ A, D, E และ K

1.1) วิตามินเอ (A) สูตรโครงสร้าง คือ  $C_{20}H_{29}OH$  ชื่อทางเคมี คือ เป็นสารประกอบประเภท unsaturated monohydric alcohol โดยมีลักษณะเป็นผลึกสีเหลืองอ่อน ไม่ละลายน้ำ แต่ละลายในไขมันและตัวทำละลายไขมันหลายชนิด สามารถถูกออกซิไดส์ได้ง่าย เมื่อ

สัมผัสกับอากาศและแสงแดด วิตามินเอจะถูกสะสมในร่างกาย โดยเฉพาะที่ตับ ดังนั้นตับจึงเป็นแหล่งที่คั่งของวิตามินเอ ซึ่งปริมาณวิตามินเอที่เก็บสะสมไว้นั้นมีมากมายทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ของสัตว์ ส่วนมากมักพบวิตามินเอใน น้ำมันตับปลา ไข่แดง และนม ทั้งนี้ปริมาณวิตามินเอที่ปรากฏในตัวสัตว์นั้น ขึ้นอยู่กับปริมาณวิตามินเอที่สัตว์ได้รับจากอาหารด้วย

ซึ่งในพืชจะพบวิตามินเอในรูปของสารตั้งต้น ได้แก่ สารแคโรทีนอยด์ (carotenoids) มักพบเป็นสีเหลือง ส้ม หรือแดง แต่สีเหล่านี้มักถูกปกปิดด้วยสีของคลอโรฟิลล์ เมื่อสัตว์กินเข้าไปจะกลายเป็นสารสีธรรมชาติ เช่น สีของไข่แดงในไข่ สีของไขมันในเนื้อหมูและเนื้อโค เป็นต้น สารแคโรทีนอยด์ (carotenoids) แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ แคโรทีน (carotenes) และ แซนโทโรฟิลล์ (xanthophylls) ส่วนใหญ่สารตั้งต้นในกลุ่มแคโรทีนอยด์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในธุรกิจอาหารสัตว์ เช่น เบต้าแคโรทีน ( $\beta$ -carotene)

1.2) วิตามินดี (D) พบในธรรมชาติ มี 2 รูปแบบ คือ ergocalciferol ( $D_2$ ) และ cholecalciferol ( $D_3$ ) ซึ่งสารตั้งต้นในการสังเคราะห์วิตามินดี ได้แก่ ergosterol และ 7-dehydrocholesterol โดยสัตว์สามารถสังเคราะห์วิตามินดีจากการได้รับรังสีอัลตราไวโอเล็ตเพื่อเปลี่ยน 7-dehydrocholesterol ในร่างกายให้เป็น cholecalciferol

โดยกระบวนการเมตาบอลิซึมของวิตามินดี เริ่มต้นจากการดูดซึมผ่านทางลำไส้เล็ก ขนส่งผ่านเลือดไปยังบริเวณตับ และถูกเปลี่ยนเป็น 25-hydroxycholecalciferol ที่ตับ หลังจากนั้นจะถูกขนส่งไปยังไตและถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูป active form คือ 1,25-dihydroxycholecalciferol และส่งไปยังเนื้อเยื่อต่างๆ ลำไส้เล็ก กระดูก และต่อมสร้างเปลือกไข่ (eggshell gland)

1.3) วิตามินอี (E) เป็นสารอาหารที่จำเป็นต่อกระบวนการทำงานต่างๆ ของร่างกายและเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่ละลายได้ดีในไขมัน ซึ่งร่างกายสามารถดึงมาใช้ได้เมื่อมีความจำเป็น โดยวิตามินอี จะพบได้ในอาหารหลากหลายชนิด เช่น ถั่ว เมล็ดพันธุ์ ผักใบเขียว ผลไม้เนื้อสัตว์ ไข่ จมูกข้าวสาลี ขนมน้ำตาลโฮลวีต ซีเรียลชนิดโฮลเกรน ถั่วเหลือง น้ำมันพืช น้ำมันดอกคำฝอย น้ำมันเมล็ดฝ้าย น้ำมันข้าวโพด ถั่ว เมล็ดทานตะวัน เป็นต้น ในร่างกายของสัตว์ปีกไม่สามารถสะสมในปริมาณมาก ดังนั้นจึงต้องได้รับจากอาหารอย่างเพียงพอ อาทิเช่น ข้าวสาลีและข้าวบาร์เลย์ อยู่ในรูปของ  $\alpha$ -tocopherol ข้าวโพด พบอยู่ในรูปของ  $\alpha$ -tocopherol และ  $\gamma$ -tocopherol นอกจากนี้ในระหว่างการเก็บรักษา ความชื้นมีอิทธิพลทำให้ปริมาณวิตามินอีลดลง ในผลิตภัณฑ์จากสัตว์มักจะพบวิตามินอีในปริมาณน้อยมาก ทั้งนี้อาจขึ้นอยู่กับปริมาณวิตามินอีที่ได้รับจากอาหาร

ซึ่งบทบาทสำคัญของวิตามินอีจะเกี่ยวข้องกับการต้านอนุมูลอิสระ โดยการทำงานร่วมกับ selenium-containing enzyme และ glutathione peroxidase โดยในการป้องกันเซลล์จากการทำลายของอนุมูลอิสระเกิดจากกระบวนการเมตาบอลิซึมภายในเซลล์ อนุมูลอิสระจะทำลายเยื่อหุ้มเซลล์ เอนไซม์ และสารประกอบอื่นๆ ภายในเซลล์ รวมไปถึงวิตามินอียังช่วยทำหน้าที่



ในการป้องกันการเกิดออกซิเดชันของกรดไขมันไม่อิ่มตัว ซึ่งเป็นองค์ประกอบสำคัญของเยื่อหุ้มเซลล์ และเป็นสารตั้งต้นในการสร้างโพรสตาแกลนดิน (prostaglandins) โดยเป็นตัวอิเล็คตรอนให้แก่อนุมูลอิสระที่เกิดขึ้น ลดความเป็นพิษของอนุมูลอิสระ และทำให้ร่างกายสามารถกำจัดออกนอกร่างกายได้ง่ายขึ้น

1.4) วิตามินเค (K) เป็นวิตามินสำคัญที่ช่วยในกระบวนการแข็งตัวของเลือด โดยวิตามินเค ที่พบในธรรมชาติมีอยู่ 2 รูปแบบคือวิตามิน K<sub>1</sub> (phylloquinone) จะพบในผักสีเขียวเข้ม และวิตามิน K<sub>2</sub> (menaquinone) สร้างโดยแบคทีเรียในลำไส้ ทั้ง K<sub>1</sub> และ K<sub>2</sub> และยังมีวิตามินเค รูปแบบต่างๆที่ได้จากการสังเคราะห์ ซึ่งรูปแบบที่สามารถละลายในน้ำได้เรียกว่าวิตามิน K<sub>3</sub> (menadione) เป็นสารสังเคราะห์ที่มีประสิทธิภาพเป็น 3 เท่า ของวิตามินเคหนึ่ง จะใช้สำหรับรักษาคนไข้ที่ไม่สามารถใช้วิตามินเคที่สร้างขึ้นที่ลำไส้ได้ เนื่องจากขาดน้ำดี หรือน้ำย่อยที่จำเป็นสำหรับการดูดซึมวิตามินที่ละลายในไขมัน โดย วิตามิน K<sub>3</sub> มีสมบัติละลายน้ำได้ เมื่อเข้าไปในร่างกายแล้ว จะเปลี่ยนเป็นเมนาควิโนนที่ดับ

2) วิตามินที่ละลายในน้ำ (water-soluble vitamins) ได้แก่ B complex และ C

2.1) วิตามินบี หรือ เรียกว่า Vitamin B complex เป็นองค์ประกอบของโคเอนไซม์หลายชนิด โดยร่างกายไม่สามารถเก็บวิตามินบีทุกชนิดไว้ในเนื้อเยื่อได้ ยกเว้น cyanocobalamin ดังนั้นสัตว์จึงต้องได้รับจากอาหาร ซึ่งวิตามินบีมีหลายชนิดด้วยกัน ได้แก่ วิตามิน B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, B<sub>3</sub>, B<sub>5</sub>, B<sub>6</sub> และ B<sub>12</sub>

2.1.1) วิตามินบี 1 (B<sub>1</sub>) ถูกทำลายได้ง่ายด้วยความร้อนจากการอบหรือการอัดเม็ดอาหาร และอาหารที่มีซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (SO<sub>2</sub>) จะไปยับยั้งการใช้ประโยชน์ของวิตามินบี 1 โดยส่วนมากจะพบวิตามินบี 1 ในกลุ่มวัตถุดิบกลุ่มของธัญพืช พืชน้ำมัน ผลิตภัณฑ์จากนม และวัตถุดิบที่ได้จากการหมักยีสต์ ซึ่งบทบาทและหน้าที่ของ วิตามินบี 1 ส่วนใหญ่จะเกี่ยวข้องในรูปของ Thiamin pyrophosphate (TPP) โดยเป็นโคเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับหลายๆกระบวนการ ได้แก่

- โคเอนไซม์ของเอนไซม์ pyruvate dehydrogenase ซึ่งมีความสำคัญโดยทำหน้าที่เชื่อมระหว่าง glycolytic pathway และ citric acid cycle
- โคเอนไซม์ของ  $\alpha$  - ketoglutarate dehydrogenase ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของ citric acid cycle
- โคเอนไซม์ของเอนไซม์ transketolase ซึ่งเกี่ยวข้องกับ pentose phosphate pathway
- โคเอนไซม์ของเอนไซม์ branched-chain keto acid dehydrogenase ในกระบวนการเมตาบอลิซึมของกรดอะมิโนชนิดโซ่กิ่ง

สำหรับ TPP เป็นส่วนประกอบสำคัญของเยื่อประสาท (neural membrane) ถูกหลั่งออกจากสมอง ไขสันหลัง และ sciatic nerves เมื่อได้รับการกระตุ้นโดยสื่อไฟฟ้า โดยมีหลักฐานบ่งชี้ว่า TPP เกี่ยวข้องกับการทำงานของระบบประสาทการส่งผ่านกระแสความรู้สึก

2.1.2) วิตามินบี 2 (B<sub>2</sub>) หรือ ไรโบฟลาวิน (riboflavin) ถูกพบครั้งแรกในรูปของรงควัตถุเรืองแสงสีเหลือง ถูกทำลายได้ง่ายในสภาวะที่เป็นด่าง แสงแดด และแสงอัลตราไวโอเล็ต โดยไรโบฟลาวินเป็นองค์ประกอบของเอนไซม์ (flavoprotein) ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการเผาผลาญสารอาหารที่ให้พลังงาน ได้แก่ ไขมัน (fat) คาร์โบไฮเดรต (carbohydrate) และโปรตีน (protein) สำคัญต่อการเจริญเติบโตของร่างกายและการผลิตเม็ดเลือดแดง

2.1.3) วิตามินบี 3 (B<sub>3</sub>) หรือ ไนโคตินาไมด์ (nicotinamide) เป็นวิตามินที่มีการคงตัวมากที่สุด ไม่สามารถถูกทำลายด้วยความร้อน กรด-ด่าง หรือกระบวนการออกซิเดชันสามารถสังเคราะห์ได้จากกรดอะมิโนทริปโตเฟนในเนื้อเยื่อของสิ่งมีชีวิต โดยเฉพาะในตับ ส่วนใหญ่จะพบในรูปของ Nicotinamide adenine dinucleotide (NAD) และ Nicotinamide adenine dinucleotide phosphate (NADP) ซึ่งเป็นโคเอนไซม์สำคัญที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการขนส่งไฮโดรเจนในเซลล์ของสิ่งมีชีวิต บทบาทและหน้าที่ของ NAD และ NADP จะพบทั้งในรูปออกซิไดซ์ (NAD<sup>+</sup> และ NADP<sup>+</sup>) และรูปรีดิวซ์ (NADH และ NADPH) เป็นโคเอนไซม์ในปฏิกิริยาออกซิเดชันและรีดักชันในกระบวนการสลายสารอาหารให้ได้พลังงาน และเป็นโคเอนไซม์ที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ไขมัน

2.1.4) วิตามินบี 5 (B<sub>5</sub>) หรือกรดแพนโทเทนิค เป็นสารในกลุ่มของวิตามินบี ประกอบด้วย pantoic acid และกรดอะมิโนอะลานีน เชื่อมต่อกันด้วยพันธะเอไมด์ (amide linkage) พบได้ในหลายๆแหล่ง แต่จะพบมากที่สุดได้แก่ ตับ ไข่แดง ถั่ว ยีสต์ กากน้ำตาล ธัญพืช และมันฝรั่ง ซึ่งกรดแพนโทเทนิคเป็นองค์ประกอบของโคเอนไซม์ A เป็นโคเอนไซม์ที่สำคัญในกระบวนการออกซิเดชันของกรดไขมัน กระบวนการเมตาบอลิซึมของกรดอะซิเตท และการสังเคราะห์คลอเลสเตอรอลและสารสเตอรอยด์

2.1.5) วิตามินบี 6 (B<sub>6</sub>) พบได้ 3 รูปแบบหลัก คือ สารตั้งต้นหรือไพริดอกซิน (pyridoxine) รูปอัลดีไฮด์ เรียกว่า ไพริดอกซาล (pyridoxal) และในรูปเอมีน เรียกว่า ไพริดอกซามีน (pyridoxamine) ในพืชจะพบอยู่ในรูปของ pyridoxine ส่วนในสัตว์จะพบทั้งในรูปของ pyridoxal และ pyridoxamine ซึ่งทำหน้าที่เป็นองค์ประกอบของเอนไซม์ transaminases, decarboxylases และเอนไซม์อีกกว่า 50 ชนิด มีบทบาทสำคัญเกี่ยวกับกระบวนการขนส่งกรดอะมิโนและสารประกอบไนโตรเจน ไขมันและคาร์โบไฮเดรตภายในเซลล์ การดูดซึมกรดอะมิโนที่ลำไส้เล็ก นอกจากนี้วิตามินบี 6 ยังเกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์สารสื่อประสาท ในอาหารสัตว์นิยมใช้เสริมในรูปของ pyridoxine hydrochloride



2.1.6) วิตามินบี 12 (B<sub>12</sub>) มีโครงสร้างที่ซับซ้อนและมีโลหะเป็นองค์ประกอบในโมเลกุล คือ โคบอลท์และฟอสฟอรัส อย่างละ 1 อะตอม พบได้ 2 รูปแบบ คือ cobalamin และ cyanocobalamin ซึ่งรูปแบบที่ออกฤทธิ์ในร่างกายสัตว์ คือ cyanocobalamin สามารถสังเคราะห์ได้จากจุลินทรีย์ โดยสัตว์จะได้รับจากการสังเคราะห์โดยจุลินทรีย์ที่บริเวณลำไส้ใหญ่

2.2) วิตามินซี (C) หรือชื่อทางเคมี คือ L-ascorbic acid มีลักษณะเป็นสารสีขาวหรือสีเหลือง สามารถละลายได้ในน้ำ มีความคงทนต่ออุณหภูมิสูงในสารละลายที่เป็นกรด แต่ไม่เสถียรในสารละลายที่เป็นด่างและแสงแดด พบมากในพืชตระกูลส้มและผักใบเขียว วิตามินซีที่ใช้ในทางการค้าได้จากการสังเคราะห์ทางเคมี โดยหน้าที่ของวิตามินซี เกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์คอลลาเจน สารต้านอนุมูลอิสระภายในเซลล์ และเกี่ยวข้องกับระบบภูมิคุ้มกัน โดยกระบวนการต่อต้านอนุมูลอิสระของเซลล์นั้น เกิดจากการทำงานร่วมกันของวิตามินซี วิตามินอี และเบต้า-แคโรทีน รวมถึงเอนไซม์ที่สำคัญในกระบวนการต้านอนุมูลอิสระ ได้แก่ glutathione peroxidase (selenium) catalase (iron) และ superoxide dismutase (ร่วมกับ copper, zinc และ manganese)

### แร่ธาตุ (minerals)

เป็นสารประกอบอนินทรีย์ที่มีบทบาทสำคัญต่อสิ่งมีชีวิต สามารถแบ่งออกเป็น 2 ประเภทใหญ่ๆ ได้แก่ แร่ธาตุหลัก และแร่ธาตุรอง ดังนี้

1) แร่ธาตุหลัก (major element) ได้แก่ แคลเซียม (calcium), ฟอสฟอรัส (phosphorus), แมกนีเซียม (magnesium), โซเดียม (sodium), โพแทสเซียม (potassium), กำมะถัน (sulphur) และคลอไรด์ (chloride)

1.1) แคลเซียม (calcium) เป็นแร่ธาตุที่พบมากที่สุดในร่างกาย โดยร้อยละ 99 ของแคลเซียมในร่างกายจะเป็นส่วนประกอบของกระดูกและฟัน หน้าที่สำคัญ เช่น พัฒนาและสร้างความแข็งแรงให้กระดูกและฟัน ควบคุมการทำงานของหลอดเลือด กล้ามเนื้อ การเต้นของหัวใจ การส่งความรู้สึกไปตามเส้นประสาท การปลดปล่อยฮอร์โมน เป็นต้น แหล่งของแคลเซียมที่พบ โดยส่วนใหญ่จะพบในวัตถุดิบอาหารสัตว์ประเภทผลพลอยได้จากสัตว์ เช่น กระดูกป่น ปลาป่น อย่างไรก็ตาม สิ่งหนึ่งที่ควรคำนึงในการพิจารณาปริมาณแคลเซียมในการประกอบสูตรอาหารสัตว์ คือ สัดส่วนของแคลเซียมต่อฟอสฟอรัส ถ้าหากสัดส่วนไม่เหมาะสมจะส่งผลให้ขาดแร่ธาตุตัวใดตัวหนึ่งได้ โดยสัดส่วนของ Ca : P ที่เหมาะสมคืออยู่ในช่วง 1:1 ถึง 2:1 ซึ่งสัดส่วนอาจมีปริมาณมากขึ้นในไก่ไข่ เนื่องจากไก่ไข่ต้องใช้แคลเซียมในการนำมาสร้างเปลือกไข่ รูปแบบของการเสริมแคลเซียมอาจใช้ในรูปของหินปูนผสมในอาหาร หรือให้เสริมในรูปแบบของหินกรวด

1.2) ฟอสฟอรัส (phosphorus) เป็นแร่ธาตุที่สำคัญมีบทบาทหน้าที่มากกว่าแร่ธาตุชนิดอื่นในร่างกาย ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับแคลเซียมที่ได้กล่าวไปตั้งข้างต้น นอกจากนี้ฟอสฟอรัสยังเป็นส่วนประกอบของฟอสโฟโปรตีน กรดนิวคลีอิกและฟอสโฟลิปิด โดยมีบทบาทเกี่ยวกับกระบวนการเมตาบอลิซึมของพลังงาน โดยรวม sugar-phosphates และ adenosine diphosphates และ triphosphates ซึ่งมีความสำคัญต่อวิตามิน D ในกระบวนการควบคุมเมตาบอลิซึมจะแตกต่างกับแคลเซียม ถ้าฟอสฟอรัสอยู่ในรูปที่สามารถใช้ประโยชน์ได้ ฟอสฟอรัสจะถูกดูดซึมได้ดีถึงแม้ว่าจะอยู่ในปริมาณที่เกินความต้องการ ซึ่งส่วนที่เกินจะถูกขับออกทางไต หรือทางระบบทางเดินอาหารผ่านทางน้ำลาย ในสัตว์กระเพาะเดี่ยวไตเป็นอวัยวะหลักในการขับฟอสฟอรัสออก แหล่งของฟอสฟอรัสที่พบได้แก่ ธัญพืช และปลาป่น ซึ่งรูปของฟอสฟอรัสที่พบในธัญจะอยู่ในรูปของไฟเตท (phytate) ซึ่งเป็นเกลือของกรดไฟติก (phytic acid) ซึ่งเป็นอนุพันธ์ของกรดฟอสฟอริก

1.3) แมกนีเซียม (magnesium) เป็นแร่ธาตุที่พบทั้งในพืชและสัตว์ ในพืชแมกนีเซียมเป็นองค์ประกอบในโมเลกุลของคลอโรฟิลล์ โดยแมกนีเซียมจะถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายโดยการขนย้ายที่อาศัยพลังงาน (active transport) และมีตำแหน่งของตัวพา (carrier site) กับแคลเซียม อาหารที่มีแคลเซียมหรือแมกนีเซียมมากเกินไป จะมีผลกระทบต่อ การดูดซึมของอีกแร่ธาตุหนึ่ง ภาวะความเป็นกรดจะช่วยเพิ่มการดูดซึมของแคลเซียมและแมกนีเซียม ซึ่งการมีออกซาเลตหรือกรดไฟติก จะลดการดูดซึมของแร่ธาตุทั้งสอง วิตามินดีและพาราไทรอยด์ฮอร์โมนซึ่งช่วยในการดูดซึมแคลเซียม จะไม่มีผลต่อการดูดซึมของแมกนีเซียม โดยแหล่งที่พบจะมีมากในผักใบเขียวทุกชนิด เนื่องจากแมกนีเซียมเป็นองค์ประกอบในโมเลกุลของคลอโรฟิลล์ซึ่งเป็นสารสีเขียวในพืช ดังนั้นอาหารพวกผักและผลไม้สดจะมีแมกนีเซียมมาก และยังพบในเมล็ดมะม่วงหิมพานต์ ถั่วเหลือง ถั่วลิสง วอลนัท แป้งข้าวสาลี หอยนางรม ถั่วดำ เต้าหู้ ถั่วลิสง เมล็ดทานตะวัน อัลมอนต์ รำข้าว และข้าวโพด

1.4) โซเดียม (sodium) ส่วนใหญ่ในร่างกายสัตว์จะพบในเนื้อเยื่ออ่อนและของเหลวในร่างกาย โดยโซเดียมมีหน้าที่เกี่ยวกับการสมดุลกรด-ด่างในร่างกาย ควบคุมออสโมติกของเหลวในร่างกาย ซึ่งโซเดียมจะเป็นประจุบวกหลักในพลาสมาของเลือดและของเหลวนอกเซลล์อื่นๆ ของร่างกาย หากความเข้มข้นของโซเดียมภายในเซลล์ที่มีอยู่ต่ำ แร่ธาตุโซเดียมจะถูกแทนที่ในปริมาณมากด้วยแร่ธาตุโพแทสเซียมและแมกนีเซียม โซเดียมมีบทบาทในการเคลื่อนย้ายสื่อกระแสประสาท และกระบวนการดูดซึมน้ำตาลและกรดอะมิโนจากระบบทางเดินอาหาร แมกนีเซียมจะถูกดูดซึมได้จากลำไส้เล็กและลำไส้ใหญ่ในสัตว์กระเพาะเดี่ยว โดยส่วนใหญ่สัตว์จะได้รับโซเดียมในรูปแบบของโซเดียมคลอไรด์หรือเกลือแกง อย่างไรก็ตามในวัตถุดิบอาหารส่วนใหญ่ที่ได้มาจากพืชจะพบโซเดียมอยู่น้อย แต่ถ้าเป็นแหล่งอาหารสัตว์ที่มาจากทะเล เช่น ปลาป่น เปลือกกุ้ง เปลือกหอยป่น จะมีปริมาณโซเดียมอยู่มาก ดังนั้นการใช้เสริมในอาหารสัตว์ที่สามารถทำได้ คือ การเสริมในรูปแบบของเกลือแกง

1.5) โพแทสเซียม (potassium) มีบทบาทสำคัญที่เกี่ยวข้องกับ โซเดียมคลอไรด์ และไอออนคาร์บอเนต ในการควบคุมแรงดันออสโมติกของเหลวในร่างกาย และรักษาสสมดุลกรด-ด่างในร่างกาย โพแทสเซียมมีบทบาทสำคัญในส่วนของกระบวนการกระตุ้นเส้นประสาทและกล้ามเนื้อ และเกี่ยวข้องกับกระบวนการเมตาบอลิซึมคาร์โบไฮเดรต ส่วนประกอบของโพแทสเซียมจะพบอยู่ปริมาณมากในพืช ซึ่งจะเห็นได้ว่าการเลี้ยงสัตว์ในสภาพธรรมชาติจะได้รับโพแทสเซียมโดยตรงจากพืช ดังนั้นจึงทำให้ไม่ค่อยขาดแร่ธาตุโพแทสเซียม ยกเว้นผลพลอยได้ทางอุตสาหกรรมที่ได้จากการหมัก เช่น ส่าเหล้า ส่าเปียร์ ซึ่งในกระบวนการจะมีการชะล้างเอาของเหลวหลังการหมักออกไป กากที่เหลือจึงมีแร่ธาตุอยู่ต่ำรวมทั้งโพแทสเซียมด้วย การขาดโพแทสเซียมในไก่จะทำให้การเจริญเติบโตลดลง อ่อนแอ เกิดอาการชัก และตายในที่สุด ส่วนหากการให้โพแทสเซียมในปริมาณมากเกินไปร่างกายจะมีการขับออกอย่างรวดเร็วในรูปแบบของปัสสาวะ

1.6) กำมะถัน (sulphur) หรือ ซัลเฟอร์ ส่วนใหญ่ในร่างกายของสัตว์จะอยู่รวมกับโปรตีน ในส่วนของกรดอะมิโน cystine, cysteine และ methionine รวมทั้งในส่วนของวิตามิน biotin และ thiamin ฮอร์โมน insulin และเมตาบอไลต์โคเอนไซม์ A โดยปกติแล้วเรามักให้ความสำคัญกับซัลเฟอร์ในอาหารสัตว์น้อย อาจเป็นเพราะซัลเฟอร์เป็นส่วนประกอบที่มีอยู่ในโปรตีนอยู่แล้ว ซึ่งในการขาดซัลเฟอร์มักเกิดร่วมกับการขาดโปรตีน แต่อย่างไรก็ตามสำหรับในสัตว์กระเพาะเดี่ยวอาจมีความสำคัญที่น้อย เนื่องจากความเป็นพิษของซัลเฟอร์หากมีมากและเสริมในรูปอนินทรีย์ซัลเฟตจะทำให้เกิดการ hydrogen sulphide ซึ่งจะก่อให้เกิดพิษต่อระบบจุลินทรีย์ในทางเดินอาหาร ส่งผลต่อระบบประสาท และระบบหายใจ

1.7) คลอไรด์ (chloride) มีความเกี่ยวข้องกับโพแทสเซียมและแมกนีเซียมในกระบวนการควบคุมออสโมติก ความสัมพันธ์กรด-ด่าง แหล่งของคลอไรด์หลักที่พบ คือ กรดแกมมาคลอไรด์ มีบทบาทสำคัญในส่วนของสารคัดหลั่งจากกระเพาะเพราะเป็นส่วนประกอบของกรดเกลือ (hydrochloric acid) รวมทั้งเกลือคลอไรด์ โดยจะถูกขับออกจากร่างกายพร้อมปัสสาวะร่วมกับโซเดียมและโพแทสเซียม

2) แร่ธาตุรอง (minor element) ได้แก่ เหล็ก (iron), สังกะสี (zinc), แมงกานีส (manganese), ทองแดง (copper), ไอโอดีน (iodine), โครเมียม (chromium), ซีลีเนียม (selenium), โมลิบดีนัม (molybdenum), ฟลูออไรด์ (fluoride), วานาเดียม (vanadium) และโคบอลต์ (cobalt)

2.1) เหล็ก (iron) พบมากกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ ในร่างกายรวมอยู่กับโปรตีน มีบทบาทสำคัญในปฏิกิริยาทางชีวเคมี โดยเฉพาะการเชื่อมต่อของเอนไซม์ในกระบวนการเคลื่อนย้ายอิเล็กตรอนด้วยกิจกรรมออกซิเดชันและรีดักชันการควบคุมของธาตุเหล็ก ระหว่างเอนไซม์ที่มีธาตุเหล็กหรือการกระตุ้นโดยธาตุเหล็ก ได้แก่ catalase, peroxidases, phenylalanine hydroxylase

เป็นต้น รวมทั้งเอนไซม์ในวงจร tricarboxylic acid แหล่งที่พบธาตุเหล็ก คือ พืชใบเขียว พืชตระกูลถั่วและเยื่อหุ้มเมล็ด แหล่งอาหารสัตว์ที่ได้มาจากสัตว์ เช่น เลือดปน ปลาปน โดยธาตุเหล็กจะถูกดูดซึมผ่านระบบทางเดินอาหารในส่วนของลำไส้เล็ก ซึ่งประสิทธิภาพในการดูดซึมจะขึ้นอยู่กับความต้องการของร่างกาย ถ้าร่างกายต้องการในปริมาณมากประสิทธิภาพในการดูดซึมก็จะเพิ่มขึ้นและลดลงเมื่อมีปริมาณเพียงพอต่อร่างกายหรือเกินความต้องการ

2.2) สังกะสี (zinc) พบในทุกส่วนของเนื้อเยื่อร่างกายสัตว์ มีหน้าที่ช่วยกระตุ้นระบบเอนไซม์หลากหลายชนิดที่เกี่ยวข้องกับการแบ่งเซลล์ โดยเฉพาะกระบวนการเมตาบอลิซึมของกรดนิวคลีอิก และในส่วนของหน้าที่ทางสรีระวิทยาธาตุสังกะสีจะเกี่ยวข้องกับการผลิต เก็บสำรอง และการหลั่งฮอร์โมน ที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมกล้ามเนื้อและอิเล็กโตรไลต์ แหล่งที่ของธาตุสังกะสีจะพบโดยทั่วไปจากอาหาร แต่ที่มีอยู่ปริมาณมาก ได้แก่ ยีสต์ ราและจุลินทรีย์ (germ) ของเมล็ดธัญพืช และในแหล่งของผลพลอยได้โปรตีนจากสัตว์ เช่น ปลาปน

2.3) แมงกานีส (manganese) เป็นเกลือแร่ส่วนน้อย พบมากที่สุดในโครงกระดูก ตับ ตับอ่อน หัวใจและต่อมพิทูอิทารี (pituitary gland) แมงกานีสทำหน้าที่เป็นตัวกระตุ้นเอนไซม์หลายตัว เช่น hydrolases และ kinases และเป็นองค์ประกอบของเอนไซม์ arginase, pyruvate carboxylase และ manganese superoxide dismutase แมงกานีสจัดได้ว่าเป็นแร่ธาตุที่มีความสำคัญในอาหารสำหรับลูกไก่ เนื่องจากการขาดแมงกานีสทำให้เกิดอาการเอ็นเลื่อนหลุด (perosis) การสร้างกระดูกไม่สมบูรณ์

2.4) ทองแดง (copper) เป็นหนึ่งในแร่ธาตุที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของร่างกาย โดยทองแดงมีส่วนช่วยในการสร้างเม็ดเลือดแดงและเม็ดเลือดขาว และมีหน้าที่ไปกระตุ้นให้ร่างกายใช้ธาตุเหล็กเพื่อสร้างฮีโมโกลบิน นอกจากนี้ยังจำเป็นต่อการทำงานของสมองและระบบประสาท ระบบภูมิคุ้มกัน และช่วยเสริมสร้างกระดูกให้แข็งแรง เมื่อร่างกายสัตว์เกิดการขาดแร่ธาตุทองแดงอาจแสดงความผิดปกติได้ เช่น โลหิตจาง การเจริญเติบโตลดลง กระดูกผิดปกติ ท้องเสีย ไม่สมบูรณ์พันธุ์ สีขนผิดปกติ เป็นต้น

2.5) ไอโอดีน (iodine) แร่ธาตุที่มีความสำคัญอย่างมากต่อการทำงานของต่อมไทรอยด์ ซึ่งช่วยควบคุมระบบเผาผลาญอาหารในร่างกาย โดยไอโอดีนที่พบส่วนใหญ่จะมาจากแหล่งอาหารจากทะเล ส่วนไอโอดีนที่มาจากพืชนั้นอาจขึ้นอยู่กับปริมาณไอโอดีนที่มีอยู่ในอาหาร การเสริมไอโอดีนในอาหารส่วนมากจะใช้ในรูปของเกลือไอโอดีน

2.6) โครเมียม (chromium) เป็นแร่ธาตุจำเป็นสำหรับการใช้ประโยชน์จากกลูโคส โดยมีบทบาทกับการทนต่อระดับของกลูโคส มีการจับอยู่ในรูปเชิงซ้อนระหว่างอินซูลิน นอกจากนี้ยังมีบทบาทต่อการสังเคราะห์ลิพิดส์และกระบวนการเมตาบอลิซึมของโปรตีนและกรดนิวคลีอิก แต่โดยปกติแล้วจะไม่พบความเป็นพิษของโครเมียมเพราะเป็นแร่ธาตุประจุบวกสาม จึงมี



ระดับความปลอดภัยที่กว้าง แต่ถ้าอยู่ในรูปประจุบวกหกจะมีความเป็นพิษมากกว่า เนื่องจากสามารถเข้าสู่เซลล์ได้ในปริมาณมากกว่า จึงทำให้เข้าไปกีดขวางได้รับออกซิเจนของเซลล์ และทำลายดีเอ็นเอ ซึ่งในปัจจุบันได้มีการใช้โครเมียมในรูปของออกไซด์ไม่ละลายน้ำ หรือ โครมิกซ็อกไซด์ เพื่อเป็น maker ในการทดสอบการย่อยได้ในสัตว์

2.7) ซีลีเนียม (selenium) พบในปริมาณเพียงเล็กน้อยในร่างกายและเป็นส่วนประกอบสำคัญของเอนไซม์ Glutathione peroxidase ซึ่งบทบาทของซีลีเนียมเป็นส่วนประกอบของน้ำย่อย Glutathione peroxidase โดยเอนไซม์ Glutathione Peroxidase เป็นส่วนที่ถูกเปลี่ยนมาจากกลูต้าไธโอน ซึ่งจะกระตุ้นการกำจัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์และออกแกนิคเปอร์ออกไซด์ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันต่างๆ แหล่งของซีลีเนียมที่พบจะอยู่ในรูปที่จับกับโปรตีนที่เรียกว่า seleno-methionine การเสริมซีลีเนียมทำได้โดยการให้ในรูปของเกลือโซเดียมซีลีไนท์ อย่างไรก็ตามหากร่างกายขาดแร่ธาตุซีลีเนียมจะพบอาการผิดปกติเช่นเดียวกับการขาดไอโอดีน เนื่องจากแร่ธาตุซีลีเนียมจะเกี่ยวข้องกับบทบาทของฮอร์โมนไทรอยด์เช่นเดียวกับแร่ธาตุไอโอดีน

2.8) โมลิบดีนัม (molybdenum) แร่ธาตุที่สามารถพบได้ในเนื้อเยื่อของพืชและสัตว์ หน้าที่ทางชีววิทยาโมลิบดีนัมเป็นส่วนหนึ่งของการทำงานร่วมกับทองแดง เกี่ยวข้องกับการสร้างและการทำงานของเอนไซม์ แหล่งที่พบโมลิบดีนัมตามธรรมชาติ ได้แก่ ผักใบเขียวเข้ม ธัญพืชไม่ขัดสี พืชผักตระกูลถั่ว นมและผลิตภัณฑ์จากนม เครื่องในสัตว์ เป็นต้น

2.9) ฟลูออไรด์ (fluoride) เป็นเกลือของฟลูออรีน ( $F_2$ ) มีประจุไฟฟ้าเป็นลบ พบได้ในแหล่งแร่ ดิน อาหาร น้ำดื่ม และฟลูออรีน ( $F_2$ ) เป็นธาตุหมู่ที่ 7 ที่เบาที่สุด และมีความไวต่อการทำปฏิกิริยาเร็วที่สุด จึงไม่พบฟลูออรีนรูปอิสระในธรรมชาติ แต่จะพบอยู่ในรูปฟลูออไรด์ที่มีประจุลบ และฟลูออไรด์ไอออน ( $F^-$ ) ซึ่งมีขนาดประจุใกล้เคียงกับไฮดรอกไซด์ไอออน ( $OH^-$ ) จึงมักจะแทนที่กันได้ดีในแร่ธาตุ โดยแหล่งที่มาหลักๆของฟลูออรีนที่ทำให้สัตว์เป็นพิษมักมาจากน้ำดื่ม พืชที่ปนเปื้อนมาจากฝุ่นผงในโรงงานอุตสาหกรรมและการใช้หินฟอสเฟตดิบซึ่งไม่ผ่านกระบวนการเผาไล่ฟลูออรีนออกไป

2.10) วานาเดียม (vanadium) เป็นแร่ธาตุที่ไม่มีความจำเป็นของหน้าที่ในทางชีวเคมี แต่อาจมีบทบาทเกี่ยวข้องกับกลไกของเอนไซม์ sodium-potassium ATPase, phosphoryl transferase enzyme, adenyl cyclase และ protein kinase และอาจเป็น cofactor สำหรับเอนไซม์เหล่านี้ อาการความผิดปกติที่ขาดวานาเดียม เช่น การเจริญเติบโตลดลงและการสืบพันธุ์แย่งลง เป็นต้น

2.11) โคบอลต์ (cobalt) เป็นแร่ธาตุที่เป็นส่วนหนึ่งของวิตามิน  $B_{12}$  ซึ่งการขาดโคบอลต์ทำให้ความอยากอาหารลดลง น้ำหนักลดลง ตามด้วยอาการกล้ามเนื้ออ่อนแรง ซึ่งความต้องการแร่ธาตุโคบอลต์ในสัตว์เคี้ยวเอื้องจะมากกว่าสัตว์กระเพาะเดี่ยว เนื่องจากมีการสูญเสียในการสังเคราะห์สารประกอบอินทรีย์ที่ไม่มีผลต่อสรีรวิทยาในสัตว์

อย่างไรก็ตามการจำแนกชนิดของแร่ธาตุที่จำเป็นแบ่งออกเป็นแร่ธาตุหลักและแร่ธาตุรองนั้น ขึ้นอยู่กับความเข้มข้นในตัวสัตว์หรือปริมาณที่ต้องการในอาหารของสัตว์ ซึ่งโดยปกติแล้วแร่ธาตุรองจะมีอยู่ในร่างกายของสัตว์ไม่เกิน 50 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ของน้ำหนักตัว และสัตว์ต้องการในปริมาณน้อยกว่า 100 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ในอาหาร โดยความจำเป็นของแร่ธาตุจะอยู่ในรูปที่แตกต่างกันในร่างกายขึ้นอยู่กับว่าแร่ธาตุชนิดนั้นๆจะเข้าไปทำหน้าที่หรือมีบทบาทในส่วนใด

### คาร์โบไฮเดรต (carbohydrate)

จัดได้ว่าเป็นองค์ประกอบหลักที่สำคัญของสิ่งมีชีวิตทุกชนิด และเป็นชีวโมเลกุลที่พบมากที่สุดในพื้นที่ และธาตุพืช มากถึง 70 เปอร์เซ็นต์ ของวัตถุแห้งต้นพืช และอาจมีมากถึง 85 เปอร์เซ็นต์ ในเมล็ดธัญพืช โดยหลักสำคัญของคาร์โบไฮเดรต คือ แป้ง ผงของโพลีแซ็กคาไรด์ (เช่น เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และเพคติน) และโมโนแซ็กคาไรด์ (เช่น กลูโคส ฟรักโทส และกาแลคโตส) เป็นต้น ซึ่งพืชสามารถสังเคราะห์คาร์โบไฮเดรตได้เองจากคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) และน้ำ (H<sub>2</sub>O) โดยอาศัยพลังงานจากแสงอาทิตย์ในกระบวนการสังเคราะห์แสง (photosynthesis) ซึ่งมีปฏิกิริยาดังนี้



จะเห็นได้ว่า จากปฏิกิริยาดังกล่าว การเกิดคาร์โบไฮเดรตและออกซิเจนจำเป็นต่อการหายใจของสิ่งมีชีวิต ซึ่งเป็นกระบวนการสำคัญที่ทำให้ดำรงชีวิตอยู่ได้ ในร่างกายของสัตว์มีคาร์โบไฮเดรตอยู่น้อย เนื่องจากคาร์โบไฮเดรตถูกนำไปใช้อยู่ตลอดเวลา เช่น การถูกนำไปใช้ในรูปของพลังงานเพื่อกระบวนการต่างๆของชีวิตสัตว์ ซึ่งพืชที่เป็นแหล่งอาหารคาร์โบไฮเดรตที่สำคัญสำหรับสัตว์ เช่น น้ำตาล แป้ง เซลลูโลส กัมส์ ฯลฯ เป็นต้น

คาร์โบไฮเดรตสามารถจัดแบ่งตามโครงสร้างทางเคมีได้ 4 ประเภท ได้แก่ (ประภากร ชาราฉาย, 2560)

#### 1) โมโนแซ็กคาไรด์ (monosaccharide)

เป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่มีขนาดเล็กที่สุด มีจำนวนคาร์บอนตั้งแต่ 3-9 อะตอม มีสูตรทั่วไปคือ (CH<sub>2</sub>O)<sub>n</sub> โดยโครงสร้างโมเลกุลแบ่งตามหมู่ได้ 2 กลุ่ม คือ กลุ่มน้ำตาลที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นแอลดีไฮด์ มีโครงสร้างเป็นพอลิไฮดรอกซีแอลดีไฮด์ (polyhydroxy aldehyde) เรียกว่าน้ำตาลกลุ่มนี้ว่า น้ำตาลอัลโดส (aldose) และ กลุ่มน้ำตาลที่มีหมู่ฟังก์ชันเป็นคีโตน มีโครงสร้างเป็น พอลิไฮดรอกซี คีโตน (polyhydroxy ketone) (ดังแสดงในภาพ 6) ซึ่งเรียกลูกน้ำน้ำตาลกลุ่มนี้ว่าน้ำตาลคีโตส (ketose) ซึ่งตัวอย่างของน้ำตาลประเภทนี้ได้แก่ กลูโคส (glucose) และฟรักโทส (fructose) ทั้ง

กลูโคส และฟรักโทสเป็นน้ำตาลที่พบได้ในผัก ผลไม้ และน้ำผึ้ง น้ำตาลส่วนใหญ่ที่พบในเลือด คือ กลูโคส ซึ่งเป็นตัวให้พลังงานที่สำคัญ

- กลูโคส (glucose) อาจเรียกว่า dextrose มีความหวานน้อยกว่าน้ำตาลฟรักโทส (fructose) และซูโครส (sucrose) มักพบในเลือด เป็นน้ำตาลที่ไม่ต้องผ่านกระบวนการย่อย และดูดซึม จึงเข้าสู่กระแสเลือดและสามารถนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานได้ทันที พบใน Disaccharide, Polysaccharide

- ฟรักโทส (fructose) หรือน้ำตาลผลไม้ มักพบในผลไม้ มีมากในน้ำผึ้ง เป็นน้ำตาลชั้นเดียวที่ไม่แตกผลึก มีรสหวานมาก มักอยู่รวมกับน้ำตาลกลูโคสได้เป็นน้ำตาล disaccharide ที่มีชื่อเรียกว่า ซูโครส (sucrose)

- กาแลคโตส (galactose) มีโครงสร้างคล้ายคลึงกับกลูโคส แตกต่างกันเฉพาะที่กลุ่มของ OH ที่ C ตำแหน่งที่ 4 โดยมีคาร์บอน 6 อะตอม (hexose) โครงสร้างเป็นชนิดแอลโดส (aldose) จัดเป็นน้ำตาลรีดิวซ์ (reducing sugar) โดยปกติจะไม่พบน้ำตาลกาแลคโทสอิสระในพืช และสัตว์แต่พบโมเลกุลของน้ำตาลกาแลคโทส เชื่อมต่อกับโมเลกุลของน้ำตาลกลูโคส (glucose) ได้เป็นน้ำตาลโมเลกุลคู่คือ น้ำตาลแล็กโทส (lactose) พบเฉพาะในน้ำนม (milk)

- แมนโนส (mannose) เป็นน้ำตาล aldohexose ที่มีโครงสร้างคล้ายคลึงกับกลูโคส แตกต่างกันเฉพาะที่กลุ่มของ OH ที่ C ตำแหน่งที่ 2 โดยมีคาร์บอน 6 อะตอม (hexose) เป็น epimer กับกลูโคส และเป็นองค์ประกอบของคาร์โบไฮเดรตหรือจับกับโปรตีน

- ไรโบส (ribose) หรือ deoxyribose เป็นองค์ประกอบของกรดนิวคลีอิก (nucleic acid) คือ ดีเอ็นเอ (DNA) และอาร์เอ็นเอ (RNA) ตามลำดับ ซึ่งเป็นสารพันธุกรรมในเซลล์ของสิ่งมีชีวิต นอกจากนี้น้ำตาลไรโบสยังเป็นองค์ประกอบของวิตามินบี 2 ซึ่งมีชื่อว่า riboflavin และเป็นองค์ประกอบของสารพลังงานสูง เช่น ATP (adenosine triphosphate) ซึ่งมีบทบาทเกี่ยวข้องกับเมตาบอลิซึมในร่างกาย น้ำตาล pentose บางตัว เช่น ไซโลส (xylose) อาจเป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์พืช เช่น เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน เป็นต้น

## 2) ไดแซ็กคาไรด์ (disaccharide)

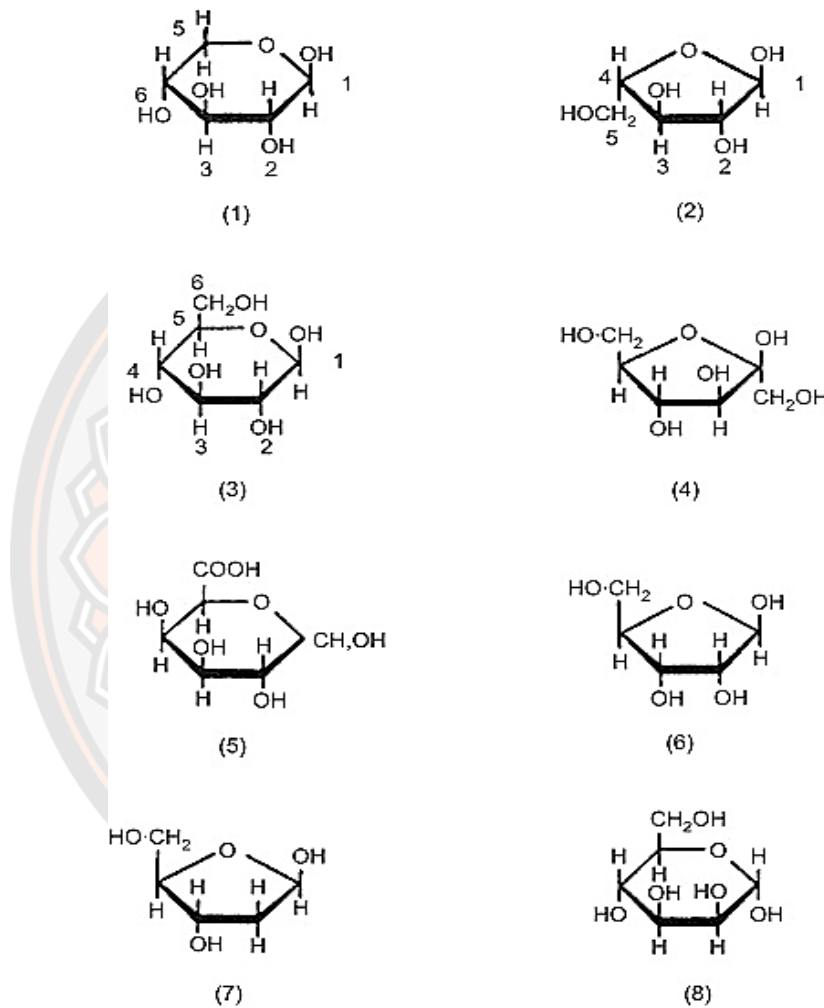
ประกอบด้วยโมโนแซ็กคาไรด์ 2 ตัวมาต่อกันอาจเป็นชนิดเดียวกัน หรือต่างชนิดกันก็ได้เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ (glycosidic bond) เมื่อผ่านการไฮโดรไลซิส (hydrolysis) จะให้น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว 2 โมเลกุล ซึ่งน้ำตาลไดแซ็กคาไรด์ที่พบมาก ได้แก่

- มอลโทส (maltose) ประกอบด้วย glucose จับกับ glucose ด้วยพันธะ (bond) แบบ  $\alpha$ -1,4 เป็นน้ำตาลที่เกิดจากการย่อยแป้งด้วยเอนไซม์ แอลฟาอะไมเลส ( $\alpha$ -amylase)

- ซูโครส (sucrose) ประกอบด้วย glucose จับกับ fructose ด้วยพันธะ  $\alpha$ -1,2 น้ำตาลซูโครส พบได้ตามธรรมชาติ เป็นน้ำตาลที่ใช้รับประทานอยู่ทั่วไป



- แลคโตส (lactose) ประกอบด้วย glucose จับกับ galactose ด้วยพันธะ  $\beta$ -1,4 พบในน้ำนม
- เซลโลไบโอส (cellobiose) ประกอบด้วย glucose จับกับ glucose ด้วยพันธะ  $\beta$ -1,4 เป็นองค์ประกอบของเซลลูโลส



ภาพ 6 โครงสร้างทางเคมีของโมโนแซ็กคาไรด์ (1) xylose ( $\beta$ -d-xylopyranose), (2) arabinose ( $\alpha$ -l-arabinofursnose), (3) glucose ( $\beta$ -d-glucopyranose), (4) fructose ( $\beta$ -d-fructofuranose), (5) d-galacturonic acid, (6) ribose ( $\beta$  -d-ribofuranose), (7) deoxyribose( $\beta$ -d-deoxyribofuranose) and (8) mannose ( $\alpha$  -d-manno-pyranose).

ที่มา: Rosentrater, & Evers, 2018

### 3) ไตรแซ็กคาไรด์ (Trisaccharide)

ประกอบด้วยโมโนแซ็กคาไรด์ 3 โมเลกุลขึ้นไป โดยการเกิดปฏิกิริยาไฮโดรลิซิส (hydrolysis) แล้วได้โมโนแซ็กคาไรด์ 3 โมเลกุล ไตรแซ็กคาไรด์ที่พบในธรรมชาติ ได้แก่ ราฟฟิโนส (raffinose) ประกอบด้วย glucose, fructose และ galactose พบในเมล็ดฝ้าย และน้ำตาลจากหัวบีท (sugar beet)

### 4) โพลีแซ็กคาไรด์ (polysaccharide)

เป็นโมเลกุลขนาดใหญ่ ประกอบด้วยโมโนแซ็กคาไรด์จำนวนมาก ตั้งแต่ 10 - 1,000 โมเลกุล เชื่อมกันด้วย glycosidic linkage ซึ่งโพลีแซ็กคาไรด์ที่พบอยู่ในธรรมชาติ ได้แก่

- แป้ง (starch) ประกอบด้วยกลูโคส (glucose) เป็นมอนอเมอร์ของน้ำตาลกลูโคสที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ (glycosidic bond) ที่ตำแหน่ง  $\alpha$ -1,4 ได้เป็นโครงสร้างแบบอะไมโลส (amylose) ส่วนที่ตำแหน่ง  $\alpha$ -1,4 และ  $\alpha$ -1,6 จะได้เป็นอะไมโลเพกติน (amylopectin) ซึ่งแป้งไม่สามารถละลายในน้ำเย็น แต่จะเป็นสารแขวนลอยเมื่อได้รับความร้อนโดยจะเกิดการพองตัว (swelling) และในที่สุดจะเกิดการแตกออกและละลายน้ำได้ ทำให้เป็นเอนไซม์ย่อยแป้ง สามารถย่อยเม็ดแป้งได้ กระบวนการนี้จึงเรียกว่า เจลลาติไนซ์ (gelatinization) โดยบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมการผลิตอาหารสัตว์ เมื่อแป้งถูกย่อยด้วยเอนไซม์อะไมเลส (amylase) จะได้สารที่เรียกว่า ลิมิเตดเด็กซ์ตริน (limited dextrin) เนื่องจากเอนไซม์นี้ย่อยได้เฉพาะพันธะ  $\alpha$ -1,4 linkage ไม่สามารถย่อยพันธะแบบ  $\alpha$ -1,6 linkage ได้ พันธะนี้จึงต้องถูกย่อยด้วยเอนไซม์  $\alpha$ -1,6 glucosidase ซึ่งจะช่วยให้ย่อยอะไมโลเพกตินให้สมบูรณ์ กลายเป็นมอลโทส และกลูโคส ตามลำดับ

- เด็กซ์ตริน (dextrin) เป็นผลผลิตขั้นแรกที่เกิดจากกระบวนการสลายตัวของแป้งโดยความร้อน และสามารถละลายน้ำได้

- ไกลโคเจน (glycogen) ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 5,000-25,000 โมเลกุล เป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตที่สะสมในอาหารสัตว์ และเป็นแหล่งเมตาบอลิซึมของพลังงาน พบมากในตับและกล้ามเนื้อ มีโครงสร้างเหมือนอะไมโลเพกติน (amylopectin) ประกอบด้วย กลูโคสต่อกันด้วยพันธะแบบ  $\alpha$ -1,4 และ  $\alpha$ -1,6 แต่มีการแตกแขนงมากกว่า อาจเรียกว่า แป้งในสัตว์ (animal starch) สามารถละลายน้ำได้ดี เมื่อไกลโคเจนถูกย่อยด้วยเอนไซม์ Phosphorylase จะได้เป็น Glucose-1-phosphate ซึ่งจะถูกลูเมตาบอลิซึมต่อไป

- เซลลูโลส (cellulose) เป็นโพลีแซ็กคาไรด์ที่พบมากที่สุดในธรรมชาติ จัดเป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์พืชที่ถือว่าเป็นแหล่งของเยื่อใย มีความสามารถทนต่อการย่อยด้วยกรดและด่าง ประกอบด้วยกลูโคสต่อกันเป็นเส้นตรงด้วยพันธะแบบ  $\beta$ -1,4 ซึ่งพันธะนี้ไม่สามารถย่อยได้ด้วยเอนไซม์ในสัตว์ชั้นสูง แต่จุลินทรีย์จะมีเอนไซม์เซลลูเลส (cellulase) ที่สามารถย่อยได้ใน

สัตว์เคี้ยวเอื้อง ซึ่งจะมีจุลินทรีย์ช่วยย่อยในกระเพาะหมักส่วนในสัตว์กระเพาะเดี่ยวจะมีจุลินทรีย์ช่วยย่อยในลำไส้ใหญ่

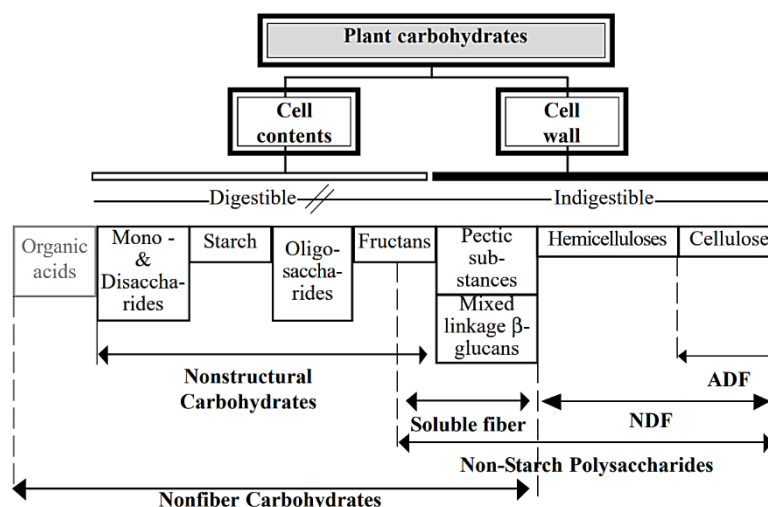
- เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) เป็นคาร์โบไฮเดรตที่รวมอยู่กับเซลลูโลส ในใบและส่วนอ่อนของพืช นอกจากนี้ยังมีอยู่ในเมล็ดของพืช เฮมิเซลลูโลสนอกจากจะเป็นส่วนประกอบของผนังเซลล์ของพืช ยังเป็นแหล่งเก็บอาหารสำรองของพืช เช่น ในรากของพืชจะมีเฮมิเซลลูโลสอยู่เป็นจำนวนมาก ซึ่งคาร์โบไฮเดรตชนิดนี้มีความต้านทานสารเคมีได้น้อยกว่าเซลลูโลส ฉะนั้นแล้วเฮมิเซลลูโลสจึงสลายตัวได้โดยกรดเจือจางหรือด่างเจือจาง ซึ่งปกติจะให้ ไซโลส, กลูโคส, กาแลคโตส, อะราบินอส (arabinose) และ uronic acid ดังนั้น จึงจัดเฮมิเซลลูโลส เป็นคาร์โบไฮเดรตที่สัตว์ย่อยได้และพบมากในพืชอ่อน แต่จะลดน้อยลงเมื่อพืชมีอายุเพิ่มมากขึ้น

- ลิกนิน (lignin) ไม่ได้เป็นคาร์โบไฮเดรต แต่มักจะพบเป็นส่วนประกอบอยู่ตามส่วนแข็งๆของพืช เป็นสารที่ไม่มีน้ำย่อยชนิดใดสามารถย่อยได้ จึงไม่มีประโยชน์ในทางอาหาร โครงสร้างทางเคมีของลิกนิน ยังไม่ทราบแน่นอน ซึ่งลิกนินจะประกอบด้วยธาตุ C, H, และ O แต่สัดส่วนของ H ในลิกนิน สูงกว่าคาร์โบไฮเดรต ในลิกนินจะมีไนโตรเจนอยู่ตั้งแต่ 1-5 เปอร์เซ็นต์ ถ้ามีลิกนินอยู่ในอาหาร จะทำให้การย่อยได้ของโภชนาต่างๆ ในอาหารนั้นลดลง นอกจากนี้คุณค่าทางอาหารของลิกนินยังไม่ทราบแน่ชัด ทราบแต่เพียงว่าลิกนินมีคุณสมบัติเป็น bulk factor

แต่ปัจจุบันในด้านทางโภชนศาสตร์สัตว์ สามารถแบ่งประเภทคาร์โบไฮเดรตออกเป็น 2 ประเภท (ดังแสดงในภาพ 7) (บุญล้อม ชีวะอิสสระกุล, 2546) คือ

1) ส่วนที่เป็นแป้ง (starch)

2) ส่วนที่ไม่ใช่แป้ง (non-starch carbohydrate, NSP) ประกอบด้วย โอลิโกแซ็กคาไรด์ และโพลีแซ็กคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้ง (non-starch polysaccharide, NSP) โดยคาร์โบไฮเดรตประเภทนี้ไม่สามารถย่อยได้ในสัตว์กระเพาะเดี่ยว แต่จะถูกย่อยโดยจุลินทรีย์ที่บริเวณลำไส้ส่วนปลาย เกิดเป็นกรดไขมันที่ระเหยได้ (volatile fatty acid, VFA) แต่อีกในทางหนึ่งของอุตสาหกรรมอาหาร สัตว์อาจเรียกคาร์โบไฮเดรตประเภทนี้ว่า “ใยอาหาร (dietary fiber)” ซึ่งในการนำเยื่อใยมาใช้ในอาหารสัตว์เราจะทำการวิเคราะห์คาร์โบไฮเดรตในอาหารสัตว์โดยวิธี Proximate analysis โดยไม่ใช่วิเคราะห์หาคาร์โบไฮเดรตโดยตรง แต่เป็นการวิเคราะห์เป็นกลุ่มตามความทนทานต่อการย่อยด้วยกรดและด่าง แบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ 1) เยื่อใย (crude fiber) หมายถึง คาร์โบไฮเดรตที่เป็นโครงสร้าง รวมทั้งลิกนินซึ่งไม่ใช่คาร์โบไฮเดรตด้วย และ 2) ไนโตรเจนฟรีเอกซ์แทร็กต์ (nitrogen free extract) เป็นคาร์โบไฮเดรตที่ย่อยสลายได้ง่าย คือ แป้ง และน้ำตาล



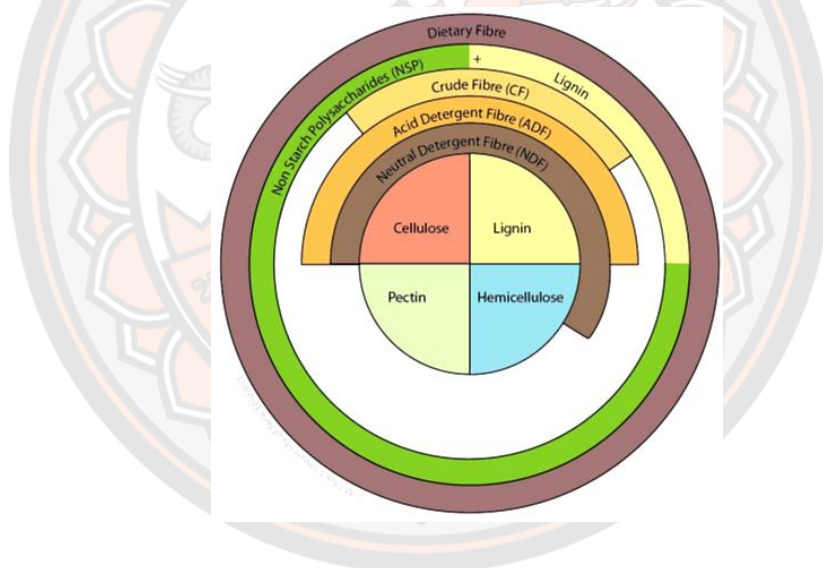
ภาพ 7 การแบ่งประเภทของคาร์โบไฮเดรต

ที่มา : Hall, 2007

### เยื่อใยหยาบ

จัดเป็นโครงสร้างของคาร์โบไฮเดรตที่เป็นส่วนผนังเซลล์พืชที่เหลือหลังจากผ่านกระบวนการวิเคราะห์ทางเคมีโดยการย่อยด้วยกรดและด่าง โดยสารเคมีจะละลายเอาส่วนของใยอาหารที่ละลายน้ำและใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำทั้งหมดในบางส่วนออกไป โดยส่วนที่เหลือ จะเรียกว่า เยื่อใยรวมหรือเยื่อใยหยาบ ซึ่งวิธีการวิเคราะห์ดังกล่าวเรียกว่า “Weender analysis” ภายหลังได้ทำการปรับเปลี่ยนชื่อมาเป็น การวิเคราะห์แบบประมาณการ (proximate analysis) หรือ Weende system วิธีการวิเคราะห์แบบดังกล่าว ประกอบด้วย ส่วนหลัก คือ ลิกโนเซลลูโลส เช่น เซลลูโลส (cellulose) ลิกนิน (lignin) และเฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) ซึ่งปัจจุบันจะเห็นได้ว่า ปริมาณเยื่อใยหยาบ และปริมาณใยอาหารจะมีความแตกต่างกัน เนื่องจากผนังเซลล์พืชมี องค์ประกอบในสัดส่วนที่แตกต่างกัน ทั้งนี้อาจขึ้นอยู่กับปัจจัยอื่น ๆ ร่วมด้วย อย่างไรก็ตามเนื่องจากในการวิเคราะห์ปริมาณเยื่อใยโดยวิธี Proximate analysis พบว่า วิธีการนี้มีจุดอ่อนบางประการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการวิเคราะห์เยื่อใย เพราะส่วนที่เป็นโครงสร้างของพืช เช่น เพคติน เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน บางส่วนอาจละลายออกมาอยู่ในส่วนของ Nitrogen free extract (NFE) ทำให้ค่าที่ได้ไม่ถูกต้องมากนัก นอกจากนี้การวิเคราะห์ดังกล่าว ยังไม่สามารถแยกองค์ประกอบของผนังเซลล์พืชได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อทำการวิเคราะห์ตัวอย่างพืชหรือวัตถุดิบที่มาจากธัญพืชซึ่งมีเยื่อใยสูง ดังนั้นจึงได้มีการเสนอวิธีวิเคราะห์เยื่อใยวิธีใหม่เรียกว่า “Detergent fiber analysis” ซึ่งวิธีวิเคราะห์ดังกล่าวถูกพัฒนาโดย Van Soest, 1991 มีข้อดี คือ สามารถแยกแยะองค์ประกอบของผนังเซลล์พืชได้ ทำให้ได้ข้อมูล

เพิ่มเติมที่เป็นประโยชน์ในการประเมินคุณค่าทางอาหารได้ดีขึ้น ซึ่งจะทำให้ค่าของระดับเยื่อใยใกล้เคียงกับค่าจริงได้มากกว่าการวิเคราะห์แบบประมาณการ ซึ่งเยื่อใยที่ไม่ละลายในดีเทอร์เจนต์สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มหลักๆ ได้แก่ 1) Neutral detergent fiber (NDF) หมายถึง การวิเคราะห์ผนังเซลล์ทั้งหมด ซึ่งประกอบด้วย เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ถ้าหักส่วนนี้ออกจากวัตถุแห้งส่วนที่เหลือก็จะเป็นคาร์โบไฮเดรตที่อยู่ในเซลล์ ซึ่งส่วนใหญ่จะเป็นพวกแป้งและน้ำตาล 2) Acid detergent fiber (ADF) หมายถึง ส่วนที่เป็นลิกนิน และเซลลูโลส ถ้าหักส่วนที่ออกจาก NDF จะได้ค่าของเฮมิเซลลูโลส และ 3) Acid detergent lignin (ADL) หรืออาจเรียกว่า ลิกนิน ซึ่งเอนไซม์และจุลินทรีย์ไม่สามารถย่อยได้ อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าวิธีการวิเคราะห์โดย Detergent analysis จะสามารถทำให้ทราบค่าเยื่อใยได้ละเอียดยิ่งขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการวิเคราะห์แบบ “Proximate analysis” แต่ยังไม่สามารถอ้างอิงได้ว่า NDF เป็นค่าของพอลิแซ็กคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้ง (non-starch polysaccharides, NSP) ทั้งหมดได้ (ดังแสดงในภาพ 8)



ภาพ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างเยื่อใยหยาบและใยอาหาร

ที่มา: Choct, 2015

### ใยอาหาร

ใยอาหาร เป็นที่รู้จักกันโดยทั่วไปว่าเป็นส่วนหนึ่งของผนังเซลล์พืช สามารถพบได้ทั่วไปตามธรรมชาติในส่วนของผลของอาหารสัตว์ และเป็นส่วนประกอบสำคัญในอาหารสัตว์ปีก แต่ไม่สามารถย่อยสลายโดยเอนไซม์ของสัตว์กระเพาะเดี่ยว โดยองค์ประกอบส่วนใหญ่จะประกอบด้วยสารประกอบที่มีโครงสร้างเป็นโพลีแซ็กคาไรด์ เช่น เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส เพคติน มิวซิเลจ กัมส์ และสารประกอบที่



ไม่มีโครงสร้างเป็นโพลีแซ็กคาไรด์ เช่น ลิกนิน ซึ่งองค์ประกอบดังกล่าวข้างต้นอาจขึ้นอยู่กับชนิดของพืช ส่วนคำจำกัดความทางเคมี อธิบายได้ว่า โยอาหาร เป็น plant non starch polysaccharides และลิกนิน ซึ่งโยอาหารนั้นเราสามารถแบ่งประเภทได้ตามคุณสมบัติการละลายน้ำได้เป็น 2 ประเภท (ประภากร ธาราฉาย, 2560) คือ

1) โยอาหารที่ละลายน้ำ (soluble dietary fiber, SDF) เป็นส่วนของโยอาหารที่มีคุณสมบัติละลายน้ำได้ โดยเมื่อสัมผัสกับน้ำสารจะเกิดลักษณะเหนียว มีความสามารถกระจายตัว ดูดซับน้ำได้ดี และพองตัวได้ เมื่อพองตัวจะเกิดเป็นลักษณะเจล หรือทำให้สารนั้นมีความหนืดสูง ทำให้ไปเคลือบผนังกระเพาะอาหารและลำไส้ ทำให้มีความหนามากขึ้น จึงใช้ทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความหนืดและความคงตัว แต่จะส่งผลกระทบต่อกรดไขมันในลำไส้ ทำให้มีความหนืดมากขึ้น จึงใช้ทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความหนืดและเพิ่มความคงตัว แต่จะส่งผลกระทบต่อกรดไขมันในลำไส้ ทำให้มีความหนืดมากขึ้น จึงใช้ทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความหนืดและความคงตัว แต่จะส่งผลกระทบต่อกรดไขมันในลำไส้ ทำให้มีความหนืดมากขึ้น จึงใช้ทำหน้าที่เป็นสารเพิ่มความหนืดและความคงตัว

1.1) เพคติน (pectin) เป็นส่วนประกอบของกลุ่มโพลีแซ็กคาไรด์ที่พบใน มิติเดิลลาเมลลา (middle lamella) ของผนังเซลล์พืช โดยการรวมตัวอยู่กับเซลลูโลส มีลักษณะโครงสร้างเป็นกิ่งก้านสาขา ประกอบด้วยกรดในน้ำตาลหลายชนิด มีคุณสมบัติละลายน้ำและอุ้มน้ำได้ เมื่อละลายน้ำจะพองตัวเป็นเจล (gel) เพคตินสามารถย่อยสลายได้หมดในร่างกายโดยแบคทีเรียในลำไส้ใหญ่ องค์ประกอบพื้นฐานของสารกลุ่มเพคติน คือ กรดกาแลคทูโรนิก (galacturonic acid) ที่เป็นอนุพันธ์ของน้ำตาลกาแลคโตส โดยเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ  $\alpha$ -1, 4 ซึ่งเพคติน เป็นสารประกอบกลุ่มเชิงซ้อนสามารถแบ่งออกได้ดังนี้

- โปรเพคติน เป็นสารประกอบตั้งต้นของเพคตินที่ไม่ละลายน้ำ พบมากในผลไม้ดิบ โดยจะถูกไฮโดรไลซ์โดยการใช้เอนไซม์ให้ได้เป็นกรดเพคตินิก (pectinic acid) ซึ่งเป็นสารประกอบของเพคตินที่ละลายน้ำได้

- กรดเพคตินิก เป็นสารประกอบของเพคตินหรือพอลิเมอร์ของกรดกาแลคทูโรนิก (galacturonic acid) ที่มีหมู่เมทิลเอสเทอร์เหลืออยู่บางส่วน เมื่อถูกไฮโดรไลซ์เอาหมู่เมทิลออกจนหมดจะได้กรดเพคติก (pectic acid)

- กรดเพคติก เป็นสารประกอบเพคตินหรือพอลิเมอร์ของกรดกาแลคทูโรนิกที่ไม่มีหมู่เมทิลเอสเทอร์อยู่ในโมเลกุลเลย

ดังนั้นเพคตินหรือเพคติก จึงเป็นชื่อเรียกโดยรวมของกรดเพคตินิก ที่มีร้อยละของหมู่เมทอกซิล หรือ degree of methoxylation แตกต่างกัน ซึ่ง เพคติน เป็นสารเพิ่มความหนืดที่ดี โดยสมบัติในการเกิดเจลของเพคตินจะขึ้นอยู่กับ 2 ปัจจัย คือ ความยาวของสายพอลิเมอร์ และ degree of methoxylation และจะเกิดเจลได้ในภาวะที่มีกรดและน้ำตาล

1.2) เบต้ากลูแคน (beta glucan) เป็นโมเลกุลของกลูโคสหลายหน่วย เชื่อมกันด้วย glycoside – beta – link แบบ  $\beta$ -1, 3 และ  $\beta$ -1, 6 คุณสมบัติโดยทั่วไปสามารถละลายน้ำได้

สามารถกระตุ้นภูมิคุ้มกันของสัตว์ ส่งผลให้ลดอัตราการใช้จ่ายปฏิชีวนะ และลดอัตราการตกค้างในเนื้อสัตว์ได้

1.3) กัมส์ (gums) ไม่ได้เป็นส่วนประกอบของผนังเซลล์ แต่มีคุณสมบัติทางชีวเคมีที่มีผลต่อร่างกายเหมือนกับเพคติน และเฮมิเซลลูโลส ซึ่งกัมส์จะเป็นสารที่พืชหลั่งออกมาเมื่อเกิดบาดแผล จัดได้ว่าเป็นสารไฮโดรคอลลอยด์หรือไฮโดรฟิลิกคอลลอยด์ ซึ่งเป็นพอลิแซ็กคาไรด์กัมส์ (polysaccharide gums) ที่มีโพลีเมอร์สายยาวมีน้ำหนักโมเลกุลสูง ในโมเลกุลจะประกอบด้วยโมโนแซ็กคาไรด์ชนิดเดียวกันทั้งหมด โดยเรามักพบการใช้กัมส์ในอุตสาหกรรมต่างๆ มีอยู่หลายชนิดซึ่งมีความสามารถช่วยในการกระจายไขมัน ทำให้อาหารข้น และให้ความอยู่ตัว กัมส์ที่รู้จักกันโดยทั่วไปคือ

- กัมส์จากเมล็ดพืช หรือ กัวกัมส์ (guar gums) ได้มาจากเอนโดสเปิร์มของเมล็ดจากต้น Guar (*Cyamopsis tetragonolobus*) มีถิ่นกำเนิดในประเทศอินเดีย และปากีสถาน เป็นพืชตระกูลถั่วเช่นเดียวกัน ทนแล้งได้ดี ซึ่งกัวกัมส์ได้นำมาใช้ในอุตสาหกรรมตั้งแต่ ปี ค.ศ. 1950 เนื่องจากตลาดแคลนโลคัสต์บัมกัม โครงสร้างของกัวกัมส์เป็นแบบพอลิเมอร์สายยาวของกาแลคโทแมนแนนในโมเลกุลจะประกอบด้วยน้ำตาลแมนโนสต่อกาแลคโตสเป็น 2:1 กัวกัมส์ไม่สามารถเกิดเจลได้แต่อุ้มน้ำและกระจายตัวได้ดีในน้ำเย็น สารละลายที่ได้มีความหนืดสูง ความหนืดของกัวกัมส์นั้นจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ ค่าความเป็นกรดต่าง เวลา ความเข้มข้น และขนาดของอนุภาค เมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้นความหนืดก็จะเพิ่มขึ้นตามไปด้วย

- กัมส์จากยางไม้ และสารสกัดจาก พืช เช่น กัมส์อะราบิก (gum arabic) หรือกัมส์อะคาเซีย (gum acacia) กัมส์ทราคาแคนต์ (gum tragacanth) และ กัมส์คารายา (gum karaya) เป็นเฮเทอโรโพลีแซ็กคาไรด์ที่มีโครงสร้างซับซ้อน โดยจะประกอบด้วยน้ำตาลโมโนแซ็กคาไรด์ และอนุพันธ์ของน้ำตาลหลายๆ ชนิดต่อกัน เช่น กาแลคโตส แรมโนส ไซโลส อะราบิโนส และกรดกลูโครินิก เป็นต้น ซึ่งกัมส์แต่ละชนิดมีน้ำตาลในอัตราส่วนต่างกัน ซึ่งกัมส์อะราบิกจะใช้เป็นสารให้ความข้นหนืดในผลิตภัณฑ์ขนมหวานส่วนกัมส์ทราคาแคนต์ ใช้เป็นสารให้ความข้นหนืดสารช่วยในการยึดเกาะ นอกจากนั้นสารอิมัลซิไฟเออร์และกัมส์คารายา เป็นกัมส์ที่คงตัวได้ดีในกรด และใช้เป็นสารให้ความข้นหนืดและความคงตัวในอาหาร

2) โยอาหารที่ไม่ละลายน้ำ (insoluble dietary fiber, IDF) เป็นคาร์โบไฮเดรตประเภทโครงสร้างรวมอยู่กับเยื่อใยหยาบในผนังเซลล์พืช ช่วยสร้างความแข็งแรงให้ผนังเซลล์พืช โดยเมื่อพืชอายุมากขึ้นจะมีปริมาณลิกนินเพิ่มมากขึ้น โยอาหารที่ไม่ละลายน้ำจะไม่เกิดการหนืด และไม่ถูกหมักย่อย หรือถูกหมักย่อยได้น้อยในบริเวณลำไส้ใหญ่ มีความสามารถช่วยให้ระบบขับถ่ายเป็นไปอย่างปกติเนื่องจากมีกากใยเหลือเป็นจำนวนมาก ช่วยลดอาการท้องผูก และช่วยควบคุมค่าความเป็นกรดต่างของลำไส้ โดยโยอาหารไม่ละลายน้ำจะประกอบไปด้วยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส รวมไปถึงลิกนิน



2.1) เซลลูโลส (cellulose) เป็นองค์ประกอบหลักของผนังเซลล์พืช ประมาณร้อยละ 10-25 ของส่วนประกอบทั้งหมด เป็นโพลิเมอร์ของน้ำตาลกลูโคส จับกันด้วยพันธะ  $\beta$ -1,4 glycosidic bond มีลักษณะโครงสร้างเป็นโซ่ตรง จะไม่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์แอลฟา - อะไมเลส ( $\alpha$ -amylase) ทนต่อการย่อยด้วยกรดและด่าง แต่ในจุลินทรีย์จะมีเอนไซม์เซลลูเลส (cellulase) ที่สามารถย่อยพันธะนี้ได้ ดังนั้นในสัตว์กระเพาะเดี่ยวจึงไม่สามารถย่อยอาหารที่มีใยอาหารสูงได้ ซึ่งใน ส่วนมากจะพบการใช้เซลลูโลสเป็นองค์ประกอบในอาหารทดลองกึ่งบริสุทธิ์ในการศึกษาทางด้าน โภชนาการ (Anderson, & Hill, 1955; Sibbald et al., 1961; Nakahiro, & Isshiki, 1975; Nahm, & Carlson, 1987; Summers et al., 1990; Muramatsu et al., 1991; Siri et al., 1992; Siri et al., 1994)

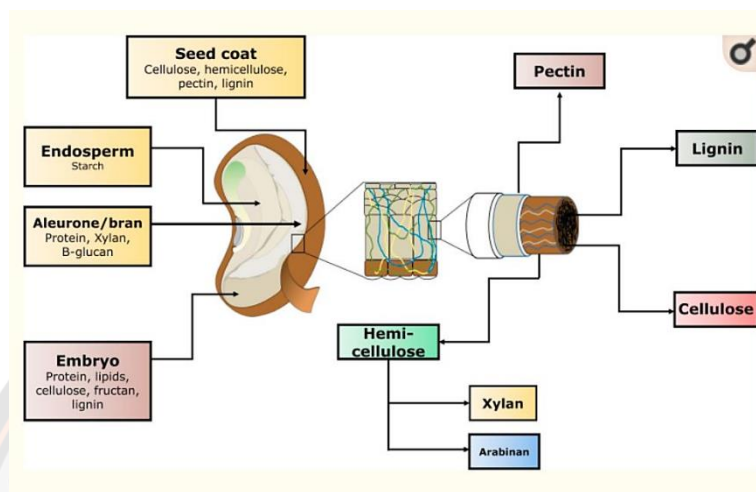
2.2) เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) เป็นส่วนประกอบของผนังเซลล์พืชเช่นกัน ประกอบด้วยน้ำตาลหลายชนิด เช่น น้ำตาลไซโลส (xylose) เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ  $\beta$ -1,4 glycosidic bond เป็นโซ่หลัก อาจมีน้ำตาลแมนโนส (mannose) กาแล็กโทส (galactose) หรือกลูโคส (glucose) มาต่อกันเป็นโซ่หลักด้วย และมีน้ำตาลชนิดอื่นมาต่อกันเป็นโซ่สาขา หรือโซ่แขนงได้แก่ น้ำตาลอะราบินโนส (arabinose) และกรดกลูคูโรนิก (glucuronic acid) โดยเอนไซม์จากสัตว์ กระเพาะเดี่ยวไม่สามารถย่อยได้ แต่จะมีจุลินทรีย์สามารถย่อยได้เช่นเดียวกับเซลลูโลส ซึ่งเฮมิเซลลูโลสไม่ได้มีโครงสร้างคล้ายเซลลูโลสแต่เป็นส่วนหนึ่งของผนังเซลล์ต่อกัน เรียกว่า Middle lamella ซึ่งจะมี เพคติน (pectin) บรรจุอยู่ช่วยยึดเซลล์ให้อยู่ติดกัน

2.3) ลิกนิน (lignin) เป็นสารประกอบเชิงซ้อน มักพบรวมอยู่ในเซลลูโลส ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน รวมกันเป็นหน่วยย่อยหลายชนิด ซึ่งเป็นสารอะโรมาติก โดยจะอยู่ในช่องว่างของผนังเซลล์ ระหว่างองค์ประกอบเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และเพคติน มีคุณสมบัติ คือ ไม่ละลายน้ำ ไม่มีการยืดหยุ่น จึงทำให้พืชที่มีลิกนินมีความแข็งแรงทนทาน ซึ่งในไม้แต่ละชนิดจะมีอัตราส่วนระหว่างเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน แตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดและอายุของไม้ ถ้าหากไม้ที่มีลิกนินอยู่มาก จะทำให้มีความแข็งแรงทนทาน อีกทั้งลิกนินยังสามารถช่วยกำจัดอนุมูลอิสระและดึงเอาสารพิษที่ปนเปื้อนเข้าไปกับอาหาร และเมื่อเกิดการรวมกันระหว่างลิกนินกับเส้นใย จะส่งผลให้กระบวนการหมักของกากอาหารในลำไส้ดีขึ้น ทำให้ลดการเกิดมะเร็งในลำไส้มนุษย์อีกด้วย

### ใยอาหารในวัตถุดิบอาหารสัตว์

โดยปกติแล้วเรามักจะพบแหล่งของใยอาหารในวัตถุดิบอาหารสัตว์ทั่วไปในกลุ่มของธัญพืช เช่น ข้าวโพด ข้าวสาลี ข้าวโอ๊ต ข้าวบาเลย์ และข้าวฟ่าง เป็นต้น ซึ่งที่ได้กล่าวมาข้างต้นเป็นแหล่งใยอาหารที่สามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานให้แก่สัตว์ได้ แต่อย่างไรก็ตามในธัญพืชแต่ละชนิด จะมี

องค์ประกอบของคาร์โบไฮเดรตและใยอาหารที่แตกต่าง (ดังแสดงในภาพ 9) และยิ่งไปกว่านั้นเราอาจพบแหล่งของใยอาหารจากผลพลอยได้ทางการเกษตรจำนวนมาก เช่น แกลบข้าว ปลายข้าว ผิวถั่ว เหลือง ชังข้าวโพด และรำสกัดน้ำมัน เป็นต้น



ภาพ 9 องค์ประกอบของใยอาหารที่พบในเมล็ดธัญพืช

ที่มา: Mahmood, & Guo, 2020

1) แกลบข้าว (rice hull) เป็นส่วนเปลือกแข็งหุ้มเมล็ดข้าว โดยจะมีองค์ประกอบทางเคมีส่วนใหญ่เป็นใยอาหารชนิดที่ไม่ละลายน้ำ มากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ เช่น เซลลูโลส (25-30 เปอร์เซ็นต์) เฮมิเซลลูโลส (18-21 เปอร์เซ็นต์) ลิกนิน (26-31 เปอร์เซ็นต์) และซิลิกา (15-17 เปอร์เซ็นต์) ซึ่งโดยปกติแล้วมักจะไม่นิยมนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในอาหารสัตว์ เนื่องจากมีคุณค่าทางโภชนาที่สัตว์สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ค่อนข้างต่ำมาก แต่ในทางกลับกันจะมีเยื่อใยและปริมาณซิลิกาในระดัสูง อย่างไรก็ตามในปัจจุบันได้มีการวิจัยได้ระบุถึงคุณประโยชน์ในการเสริมแกลบในอาหารสัตว์ Incharoen (2013) รายงานว่า การเสริมแกลบข้าว (rice hull meal) ที่ระดับ 10 เปอร์เซ็นต์ ในอาหารไก่เนื้อสามารถช่วยกระตุ้นอัตราการเจริญเติบโต โดยไม่ส่งผลเสียต่อคุณภาพซาก การพัฒนาของอวัยวะทางเดินอาหาร และลักษณะทางจุลกายวิภาคเนื้อเยื่อของวิลโลในลำไส้ นอกจากนี้แล้ว Nakhon et al. (2019) พบว่า การใช้ซิลิกอนที่สกัดจากแกลบข้าว (rice hull silicon) ที่ระดับ 7.5 mg/kg ในอาหารไก่เนื้อ สามารถเพิ่มความแข็งแรงของกระดูกและลดการสูญเสียคุณภาพเนื้อ โดยปราศจากผลกระทบในเชิงลบต่อสมรรถภาพการเจริญเติบโต ดังนั้นจึงเห็นได้ว่า แกลบมีประสิทธิภาพพอที่จะสามารถนำมาใช้เป็นสารเสริมประเภทใยอาหารในอาหารสัตว์ปีกได้

2) ปลายข้าว เป็นผลพลอยได้ในกระบวนการสุดท้ายของการสีข้าว โดยผ่านการร่อน เมล็ดข้าวผ่านตะแกรงเพื่อทำการคัดเลือกเมล็ดข้าวที่สมบูรณ์ ส่วนเมล็ดที่แตกหักหรือไม่ได้ขนาด จะเรียกว่า “ปลายข้าว” มีโปรตีนประมาณ 9-10 เปอร์เซ็นต์ ไชมัน 0.9 เปอร์เซ็นต์ และมีเยื่อใยต่ำอยู่ที่ประมาณ 1.0 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่พบได้ทั่วทุกภาคของประเทศไทย นิยมใช้เลี้ยงในสัตว์ กระเพาะเดี่ยว ปลายข้าวที่ใช้เลี้ยงสัตว์ สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ชนิด เช่น 1) ปลายข้าวเจ้า 2) ปลายข้าวเหนียว และ 3) ปลายข้าวหนึ่ง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับพันธุ์ข้าวเปลือกที่นำมาสี ปลายข้าวจัดเป็น วัตถุดิบอาหารสัตว์แหล่งพลังงานเหมาะแก่การนำไปประกอบสูตรอาหารสัตว์ทั้งสัตว์ปีกและสุกร โดยมีแบ่งเป็นองค์ประกอบหลักสูงถึง 80 เปอร์เซ็นต์ สัตว์สามารถย่อยและใช้ประโยชน์จากโภชนะได้ดี นอกจากนี้ยังไม่มีสารพิษใดๆ จึงไม่มีข้อจำกัดในการนำไปใช้เลี้ยงสัตว์

3) ผิวถั่วเหลือง (soy hull) เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากกระบวนการผลิตกากถั่วเหลืองชนิด กะเทาะผิว เป็นวัตถุดิบอาหารที่มีโปรตีน 11-12 เปอร์เซ็นต์ และมีระดับเยื่อใยสูงถึง 36 เปอร์เซ็นต์ ประกอบด้วยเพคติน 30 เปอร์เซ็นต์ และเฮมิเซลลูโลส 50 เปอร์เซ็นต์ของเยื่อใยทั้งหมด แต่อย่างไรก็ตาม Leung et al. (2018) ได้ทำการศึกษาการใช้ประโยชน์จากผิวถั่วเหลือง เปลือกข้าวโอ๊ต และ กากเมล็ดฝ้าย ในไก่พ่อแม่พันธุ์ พบว่า การใช้ผิวถั่วเหลืองที่มีปริมาณเยื่อใยสูงส่งผลกระทบต่อน้ำหนัก ตัวและปริมาณอาหารที่กิน อาจเป็นผลมาจากแหล่งที่มาของใยอาหารและความแตกต่างในคุณสมบัติ ทางเคมี

4) ชังข้าวโพด เป็นวัสดุเศษเหลือทิ้งจากการปลูกข้าวโพด ที่ก่อปัญหาหมอกควัน เนื่องจากเป็นสาเหตุของการเผาทำลายโดยเฉพาะในเขตภาคเหนือตอนบน ซึ่งในปัจจุบันมีความ พยายามที่จะนำชังข้าวโพดมาใช้ประโยชน์ เช่น การนำไปอัดเป็นก้อนถ่านให้ความร้อน การนำไปใช้ในการ เพาะเห็ด และการนำไปใช้เป็นวัสดุรองพื้น เป็นต้น ชังข้าวโพด มีองค์ประกอบส่วนใหญ่เป็น เซลลูโลส (cellulose) โดยจะนำไปใช้เป็นวัสดุรองพื้นในการดูดซับหรือใช้เป็นอาหารสัตว์ โดยนำไป ผสมกับกากน้ำตาลและนำไปให้สัตว์เคี้ยวเอื้องกิน เนื่องจากสัตว์เคี้ยวเอื้องสามารถย่อยสลายเซลลูโลส ได้ ซึ่งชังข้าวโพดที่เลี้ยงสัตว์โดยทั่วไปจะประกอบไปด้วยวัตถุดิบ 90 เปอร์เซ็นต์ โปรตีน 1.9 เปอร์เซ็นต์ และเยื่อใย 33.03 เปอร์เซ็นต์ จากการศึกษาของ Iheukwumere et al. (2009) พบว่า สามารถใช้ชังข้าวโพดในอาหารไก่เนื้อในรูปแบบทั้งชังข้าวโพดสดและชังข้าวโพดหมัก ที่ระดับ 5 เปอร์เซ็นต์ โดยไม่ส่งผลกระทบต่ออัตราการกินได้ อัตราการเจริญเติบโต การเปลี่ยนอาหารเป็น น้ำหนักตัว น้ำหนักอวัยวะภายในและอัตราการย่อยได้ นอกจากนี้การใช้ชังข้าวโพดเป็นวัตถุดิบในสูตร อาหารของ Ochetim, (1993) ซึ่งทดลองในไก่เนื้อ โดยการใช้ชังข้าวโพดประกอบสูตรอาหารในระดับ 11.6 เปอร์เซ็นต์ พบว่า ไม่ส่งผลต่อการเพิ่มน้ำหนักตัวอัตราการกินได้ คุณภาพซากและเปอร์เซ็นต์ ซาก แต่ในทางตรงกันข้ามหากใช้ชังข้าวโพดในอาหารที่ระดับที่ถึง 23.2 เปอร์เซ็นต์ จะส่งผลกระทบต่อ น้ำหนักตัว การใช้ประโยชน์ได้ของโภชนะและเปอร์เซ็นต์ซากมีค่าที่ลดลง

5) รำสกัดน้ำมัน (defatted rice bran) เป็นแหล่งพลังงานราคาถูก ที่มีการใช้อย่างแพร่หลาย ได้จากการนำรำละเอียดหรือรำสดที่ได้จากการสีข้าวเปลือกชนิดต่างๆ นำไปสกัดเอาน้ำมันออกด้วยวิธีการทางเคมี ซึ่งโดยปกติแล้วรำที่ยังไม่ได้สกัดน้ำมันออกจะมีน้ำมันในปริมาณค่อนข้างสูง เมื่อนำมาเป็นวัตถุดิบอาหารสัตว์จึงไม่สามารถเก็บไว้ได้นาน เนื่องจากจะเกิดการออกซิเดชัน ทำให้เกิดการเหม็นหืน ดังนั้นจึงต้องมีการนำรำไปสกัดน้ำมันออกก่อน รำสกัดน้ำมันประกอบไปด้วยวัตถุแห้ง 91 เปอร์เซ็นต์ เยื่อใย 13 เปอร์เซ็นต์ โปรตีน 13.5 เปอร์เซ็นต์ ไขมัน 0.6 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้ยังมีสารไฟติกและสารโพลีแซ็กคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้ง (NSP) ในระดับสูงและอาจสูงกว่ารำละเอียด เพราะกระบวนการสกัดน้ำมันมีการดึงเอาไขมันออกไป จึงทำให้สารดังกล่าวในรำสกัดน้ำมันมีความเข้มข้นมากขึ้น ซึ่งสารทั้ง 2 ชนิดจะส่งผลกระทบต่อการย่อยได้ของโภชนะในระบบทางเดินอาหารสัตว์โดยตรง จากรายงานของ วิทวัส โมหี, (2545) แนะนำว่า การใช้รำสกัดน้ำมันในอาหารไก่เนื้อสามารถใช้ได้ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อสมรรถภาพการผลิตและคุณภาพซาก

6) รำข้าวสาลี (wheat bran) เป็นผลพลอยได้จากการขัดสีข้าวสาลีที่เป็นโฮลเกรนให้เป็นข้าวสาลีขาว รำข้าวสาลีเป็นส่วนที่หุ้มผิวด้านนอกของข้าวสาลีหลังจากผ่านกระบวนการสีเอาเปลือกออกแล้ว โดยทั่วไปแล้วมีลักษณะฟาม จัดเป็นแหล่งของเยื่อใยที่สำคัญ รวมถึงยังเป็นแหล่งของแร่ธาตุและวิตามินบางชนิด ในรำข้าวสาลีมีองค์ประกอบของวัตถุแห้ง 89.69 เปอร์เซ็นต์ โปรตีน 18.01 เปอร์เซ็นต์ ไขมัน 5.27 เปอร์เซ็นต์ เยื่อใย 9.53 เปอร์เซ็นต์ เกล็ด 5.51 เปอร์เซ็นต์ แคลเซียม 0.01 เปอร์เซ็นต์ ฟอสฟอรัส 1.10 เปอร์เซ็นต์ (โสภณ บุญกล้า, 2556) รวมไปถึงมีกรดไขมันโอเมกา 3 และ 6 จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าข้าวสาลีอุดมไปด้วยสารอาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการอย่างหลากหลาย จึงมีงานวิจัยทางวิทยาศาสตร์ได้ค้นคว้าถึงคุณประโยชน์ของข้าวสาลีที่มีต่อสุขภาพด้านต่างๆ เช่น เสริมสร้างสุขภาพลำไส้ ป้องกันมะเร็งลำไส้ และอาจช่วยควบคุมระดับน้ำตาลในเลือด อย่างไรก็ตามด้านของสุขภาพสัตว์จะเห็นได้ว่าในรำข้าวสาลีจะมีเยื่อใยหรือเซลลูโลสที่ค่อนข้างสูง ทำให้สัตว์สามารถขับถ่ายได้ง่ายขึ้น จึงนิยมนำมาใช้แทนรำข้าวในสูตรอาหารสัตว์ได้ในระดับที่เหมาะสม Gallinger et al. (2004) ได้แนะนำว่าใช้รำข้าวสาลีในอาหารไก่เนื้อที่ระดับ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ สามารถช่วยเพิ่มสมรรถภาพการเจริญเติบโตได้ โดยปราศจากผลกระทบใดๆ รวมไปถึงสามารถช่วยเพิ่มการเปลี่ยนแปลงทางแร่ธาตุ (mineralization) ของกระดูกได้

### **บทบาทของใยอาหารที่ละลายน้ำ (soluble dietary fiber, SDF)**

ใยอาหารที่ละลายน้ำ (soluble dietary fiber, SDF) จะเกิดกระบวนการหมักย่อยที่บริเวณไส้ตั้งเป็นแหล่งสารอาหารของจุลินทรีย์ โดยได้ผลผลิตเป็นกรดไขมันสายสั้น (short chain fatty acids) เช่น กรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก และกรดบิวทีริก ซึ่งกรดบิวทีริกจะให้พลังงานสำหรับเซลล์เยื่อที่บริเวณไส้ตั้ง มีความสำคัญต่อการดูดซึมน้ำ สามารถช่วยป้องกันอาการท้องเสีย โดย SDF



นั้นจะมีลักษณะเป็นเจล สามารถจับกับน้ำตาล ดูดซับน้ำมันได้ ความหนืดสูง และแบคทีเรียที่อาศัยในลำไส้ใหญ่สามารถย่อยและใช้ประโยชน์ได้ เช่น เพคติน (pectin) กลูโคแมนแนน (glucomannan) กัมส์ (gums) มิวซิเลจ (mucilage) เป็นต้น สอดคล้องกับ Silva et al. (2013) ที่พบว่าการเสริมเพคตินในอาหารไก่เนื้อ ระหว่าง 3-5 เปอร์เซ็นต์ มีผลต่อการเพิ่มความหนืดและลดอัตราการเคลื่อนที่ของอาหารในระบบทางเดินอาหาร รวมทั้งช่วยเพิ่มการใช้ประโยชน์ของพลังงานในอาหารให้ดีขึ้นสำหรับไก่เนื้อระยะแรกแต่ไปมีผลกระทบต่ออัตราการย่อยได้ของโภชนะที่ลดลงในไก่เนื้อระยะเจริญเติบโต นอกจากนี้ SDF มีส่วนช่วยในการป้องกันการจับตัวของคลอเลสเทอรอลในเส้นเลือด ช่วยป้องกันโรคหัวใจ รวมทั้งช่วยคงระดับน้ำตาลในเลือด ซึ่งมีประโยชน์สำหรับผู้ป่วยโรคเบาหวาน แหล่งของใยอาหารที่ละลาย ได้แก่ เบต้ากลูแคน กัม มิวซิเลจ เป็นต้น ซึ่ง Maisonnier et al. (2003) ได้ทำการทดลองเสริมกัวกัมส์ (guar gum) ในอาหารไก่เนื้อ พบว่า ความเข้มข้นและประสิทธิภาพในการหลังกรดเกลือลดลง และส่งผลให้อัตราการย่อยได้ของไขมันลดลง และยิ่งไปกว่านั้น ยังมีบทบาทสำคัญในการควบคุมการย่อยและการดูดซึมในลำไส้เล็ก และมีผลต่อลักษณะทางฟิสิกส์และทางเคมีในทางเดินอาหารโดยการเพิ่มความหนืดของของเหลวในลำไส้ ทำให้ช่วยเพิ่มระยะเวลาเคลื่อนผ่านในระบบทางเดินอาหาร ชะลอความว่างของพื้นที่ในกระเพาะและชะลอการดูดซึมกลูโคส เพิ่มการหลังของตับอ่อนและการดูดซึมต่ำลง (Stephen, & Cummings, 1980) นอกจากนี้แล้ว SDF ยังสามารถช่วยเพิ่มจำนวนประชากรและกิจกรรมของจุลินทรีย์ในส่วนของลำไส้เล็กส่วนปลายและลำไส้ใหญ่มากกว่าใยอาหารไม่ละลายน้ำ (Wenk, 2001) เนื่องจากเกิดการถูกหมักย่อยอย่างรวดเร็วในระบบทางเดินอาหาร (Nyman et al., 1986; Bach Knudsen et al., 2012) ดังนั้นหากอาหารไก่เนื้อที่ประกอบไปด้วย SDF ในระดับที่เหมาะสม และจุลินทรีย์ประจำถิ่นที่อยู่อาศัยอยู่ในระบบทางเดินอาหารส่วนท้ายสามารถนำ SDF ไปใช้ประโยชน์ได้อย่างสมดุล อาจจะทำให้เกิดความสมดุลจุลินทรีย์ประจำถิ่น ทำให้สามารถควบคุมจำนวนจุลินทรีย์ก่อโรคในระบบทางเดินอาหารได้

### **บทบาทของใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำ (insoluble dietary fiber, IDF)**

ใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำ (insoluble dietary fiber, IDF) มีคุณสมบัติในทางตรงกันข้ามกับใยอาหารที่ละลายน้ำ (SDF) คือ จะมีความหนืดต่ำ ความพองตัวสูง ช่วยเพิ่มอัตราการเคลื่อนที่ของอาหารในระบบทางเดินอาหารได้ดีขึ้น ช่วยทำความสะอาดระบบทางเดินอาหาร กระตุ้นการพัฒนาโครงสร้างของกระเพาะอาหารและลำไส้ (gastrointestinal tract) กระตุ้นการผลิตเซลล์ดูดซึม (absorptive epithelial cells) ช่วยลดค่า pH ในระบบทางเดินอาหาร ซึ่งเป็นปัจจัยร่วมในการยับยั้งจุลินทรีย์ก่อโรค และส่งเสริมจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ ทำให้เกิดความสมดุลของจุลินทรีย์ประจำถิ่นภายในลำไส้ ซึ่งได้มีรายงานการวิจัยก่อนหน้านี้ที่พบว่าการใช้แกลบข้าวโอ๊ตเป็นแหล่งของใยอาหารไม่ละลายน้ำ ส่งผลให้อาหารถูกบดอยู่บริเวณในกินได้เป็นเวลานานขึ้น (Jiménez-Moreno et al.,

2009) และการที่แกลบข้าวโอ๊ตใช้เวลาย่อยที่บริเวณก้นได้นานกว่าอาหารประเภทอื่นๆ ลักษณะดังกล่าวจะทำให้ปริมาตรของก้นเพิ่มขนาดขึ้นเมื่อถูกกระตุ้นในเชิงสรีรวิทยา โดยคุณสมบัติของใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำ อาจส่งผลดีต่อประสิทธิภาพการย่อยอาหารได้ สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้าของ Incharoen (2013) ที่พบว่า การเสริมใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำจากแกลบข้าวในอาหารไก่เนื้อมีผลช่วยให้เกิดการพัฒนาวงเวียนและเซลล์ดูดซึมของลำไส้เล็ก รวมไปถึงสมรรถภาพการผลิตโดยรวมเพิ่มขึ้น นอกจากนี้แล้วยังส่งผลเชิงบวกต่อความสม่ำเสมอของฝูงไก่ไข่อุ่น และแม่ไก่ที่กำลังให้ไข่ (Incharoen, & Maneechote, 2013)

### กลไกการทำงานของใยอาหารในสัตว์ปีกต่อประสิทธิภาพการผลิต

ใยอาหารในสัตว์ปีก จัดได้ว่าเป็นสารต้านโภชนา (anti-nutrition) ซึ่งในอดีตใยอาหารได้รับการพิจารณาว่าเป็นอาหารที่มีผลกระทบในเชิงลบต่อปริมาณอาหารที่กิน ประสิทธิภาพการผลิต และคุณภาพซาก (Janssen, & Carré, 1985; Mateos et al., 2002; Rougère, & Carré, 2010) แต่อย่างไรก็ตามใยอาหารสามารถนำมาใช้ได้ในการสัตว์ ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับองค์ประกอบทางเคมีและกลไกการทำงานทางสรีรวิทยา ซึ่งองค์ประกอบทางเคมีของใยอาหาร คือ ผลรวมของโพลีแซ็กคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้ง (NSP) และลิกนิน (lignin) โดยในทางมุมมองของนักโภชนาการศาสตร์สัตว์ อาจเรียกอีกอย่างได้ว่า เป็นคาร์โบไฮเดรตที่ไม่สามารถย่อยได้ด้วยเอนไซม์ภายนอก ซึ่งในวัตถุดิบอาหารสัตว์ที่พบโดยทั่วไปจะอุดมไปด้วยใยอาหาร คือ ธัญพืช เช่น ข้าวบาร์เลย์ ข้าวโอ๊ต แกลบข้าว คาโนล่า ข้าวสาลี ฯลฯ เป็นต้น โดยทั่วไปใยอาหาร จะรวมถึงส่วนประกอบของผนังเซลล์ ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และสารประกอบเชิงโครงสร้างอื่นๆ รวมไปถึงโครงสร้างที่ไม่ใช่โครงสร้างแป้ง (RS), อินนูลิน (inulin), เพคติน (pectin), เบต้ากลูแคน (beta glucan) และโอลิโกแซ็กคาไรด์ (oligosaccharides) ซึ่งการใช้ประโยชน์ใยอาหารในสัตว์ปีก ขึ้นอยู่กับปริมาณของใยอาหาร ระดับการหมักของจุลินทรีย์ในลำไส้ใหญ่ การดูดซึม และการใช้ประโยชน์ของกรดไขมันระเหย (VFA) ที่ผลิตขึ้น (Jha, & Berrocso, 2015) โดยชนิดของใยอาหารที่ละลายน้ำได้ เมื่อรวมตัวกับสารอาหารต่างๆ ในระบบทางเดินอาหาร จะทำให้อาหารที่สัตว์กินเข้าไปเกิดลักษณะเหนียวคล้ายเจล โดยความเหนียวที่เกิดขึ้นอาจส่งผลกระทบต่อตัวสัตว์หลายประการ เช่น ลดปริมาณอาหารที่กิน เนื่องจากความอึดของสัตว์ที่เพิ่มขึ้น การเกิดความเหนียว อาจเกิดการยึดเกาะแน่นของอาหาร ทำให้เอนไซม์ไม่สามารถแทรกตัวเข้าไปทำปฏิกิริยากับอาหารได้ส่งผลให้ประสิทธิภาพการย่อยได้ต่ำ ร่างกายจึงสร้างเซลล์เยื่อผิวเพื่อหลั่งมิวซิน (mucin) มาช่วยย่อย (Choct, 1997) ทำให้เกิดการหมักย่อยได้ดีกว่าใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำ (Montagne et al., 2003) โดยใยอาหารจะเกิดการหมักย่อยของจุลินทรีย์ที่บริเวณลำไส้ใหญ่ (colon) ให้ได้ผลผลิตเป็นกรดไขมันสายสั้น (short chain fatty acid, SCFA) ได้แก่ กรดอะซิติก กรดโพรพิโอนิก และกรดบิวทีริก ในขณะที่ใยอาหารที่ละลายน้ำได้ เกิดการหมักย่อยได้น้อย แต่จะมีการพองตัวเมื่อดูดซับน้ำ



ส่งผลให้อาหารมีปริมาณเพิ่มขึ้น อีกทั้งส่วนของกระเพาะพักถูกดันให้ขยายขึ้นทำให้เก็บอาหารได้มากขึ้น กระเพาะบดถูกการกระตุ้นให้มีการบีบรัด และเพิ่มขนาดขึ้นเอื้อต่อการย่อยและการนำไปใช้ประโยชน์ได้ อีกทั้งยังช่วยควบคุมค่าความเป็นกรด-ด่างของลำไส้ ซึ่งจะส่งผลต่อการลดเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรค โดยนักวิจัยได้รายงานเกี่ยวกับผลดีของใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำระดับปานกลาง พบว่า การใช้ใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำในอาหารอาจช่วยเพิ่มกรดไฮโดรคลอริก (HCl) (Jiménez-Moreno et al., 2010) โดยกรดน้ำดีจะทำการหลั่งเอนไซม์ (Hetland et al., 2003) และช่วยปรับปรุงการทำงานของกระเพาะบดให้ดีขึ้น (Hetland et al., 2005) ซึ่งทั้งหมดนี้นำไปสู่การย่อยได้ของโภชนะ และประสิทธิภาพการผลิตที่ดีขึ้น (Jiménez-Moreno et al., 2009) แต่อย่างไรก็ตามสิ่งสำคัญของการใช้ใยอาหาร คือ ควรเข้าใจองค์ประกอบของชนิดเยื่อใยทั้ง 2 ชนิด คือ ใยอาหารที่ละลายน้ำได้ (soluble dietary fiber, SDF) และใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำ (insoluble dietary fiber, IDF) ต่อผลกระทบทางโภชนะและสรีรวิทยา ก่อนที่จะนำมาประกอบเป็นสูตรอาหารสัตว์กระเพาะเดี่ยว ได้แก่ แหล่งที่มาและการใช้ประโยชน์ในส่วนต่าง ๆ ของระบบทางเดินอาหาร (GIT) (Jha, & Berrocoso, 2015)

### ใยอาหารต่อสรีรวิทยาของระบบทางเดินอาหาร

ลักษณะจุลกายวิภาคของระบบทางเดินอาหาร ได้รับอิทธิพลจากคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีที่แตกต่างกันของวัตถุดิบอาหาร ซึ่งมีผลต่อความสามารถในการย่อยได้และการหมักย่อยใยอาหารเป็นส่วนหนึ่งของผนังเซลล์พืชที่สัตว์กระเพาะเดี่ยวไม่สามารถย่อยได้ แต่เป็นองค์ประกอบของสารอาหารที่สำคัญ ใยอาหารที่มีอยู่ในวัตถุดิบอาหารสัตว์ส่วนใหญ่จะได้อาจมาจากพืชมีความแตกต่างกันทั้งชนิดและปริมาณ โดยมีทั้งประโยชน์และโทษต่อตัวสัตว์ ในระบบทางเดินอาหารส่วนบน (upper gut) ใยอาหารจะไม่สามารถย่อยได้ด้วยเอนไซม์บริเวณลำไส้เล็ก แต่จะสามารถหมักย่อยโดยแบคทีเรียที่บริเวณลำไส้ใหญ่ จะช่วยย่อยสลายใยอาหารที่อยู่ในกระเพาะอาหาร และลำไส้เล็กส่วนปลาย โดยสามารถทำลายส่วนประกอบของผนังเซลล์ของใยอาหารบางส่วน ซึ่งจะนำไปสู่การย่อยได้บางส่วน ในระบบทางเดินอาหารส่วนล่าง (lower gut) (Varel, & Yen, 1997) องค์ประกอบของ NSP ในส่วนที่ละลายน้ำ เช่น เบต้ากลูแคน อะราบิโนไซเลน และเพคติน จะถูกย่อยสลายได้อย่างรวดเร็วในลำไส้ใหญ่ และไส้ติ่ง ในขณะที่เยื่อใยที่ไม่ละลายน้ำ เช่น เซลลูโลส จะถูกย่อยสลายอย่างช้าๆ ในบริเวณส่วนปลายของลำไส้ใหญ่ (Dinsa, G. N. 2017)

### ใยอาหารต่อสรีรวิทยาของลำไส้เล็ก

ลำไส้เล็กจัดได้ว่าเป็นส่วนที่ได้รับประโยชน์มากที่สุดจากการได้รับใยอาหาร และยังส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงกลไกในการทำงานของลำไส้ โดยนักวิจัยได้มีการตั้งข้อสังเกตถึงปัจจัยในหลายประการในความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงภายในลำไส้ อาทิเช่น ความหนืดที่เพิ่มขึ้นจะไปลด

ความสามารถในการย่อยได้ของสารอาหารทั้งหมด โดยการแพร่กระจายน้ำภายในช่องว่างของเซลล์ เกิดผลกระทบทำให้ช่องว่างขยายตัวเพิ่มมากขึ้น ทำให้ไมเซลล์ (micelles) มีปริมาณมากพอสำหรับกรดไขมันสายยาว (Danicke et al., 2000) นอกจากนี้เมื่อความหนืดในระบบทางเดินอาหารเพิ่มขึ้น จึงส่งผลทำให้สัตว์จะต้องปรับตัวเพื่อรักษาการรวมกันระหว่างอาหารกับระบบท่อทางเดินอาหาร ซึ่งมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการทำให้มีผลชันของไขมัน จะเห็นได้ว่าวิตามินที่ละลายในไขมันนั้นมีแนวโน้มที่จะเกิดปฏิกิริยาระหว่างชนิดไขมัน และเนื่องจากความหนืดของลำไส้จะเกิดการรวมตัวกับไมเซลล์ขนาดใหญ่ ทำให้เกิดการย่อยได้น้อยกว่า ทำให้มีผลกระทบต่อตับและการย่อยได้ โดยส่วนมากวิตามินอีจะพบได้ในอาหารที่มีข้าวไรย์ (rye-based) เป็นแหล่งของไขมันหลัก (Danicke et al., 1999) ซึ่งความหนืดในระบบลำไส้เล็กจะเกิดขึ้นได้ ขึ้นอยู่กับระดับใยอาหาร และคุณสมบัติของใยอาหารชนิดนั้นๆ โดยความหนืดจะเพิ่มขึ้นเมื่ออาหารเคลื่อนที่จากบริเวณกระเพาะไปยังบริเวณลำไส้เล็ก (Bedford, & Classen, 1993; Choct et al., 1999; Lázaro et al., 2004) นอกจากนี้ Bedford, & Classen, (1992) ได้รายงานไว้ว่า ที่ระดับความหนืด 20-30 mPas จะส่งผลกระทบต่อการทำงานของอวัยวะและการเคลื่อนที่ของอาหารในลำไส้ และอาจจะไปส่งผลกระทบต่ออัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ โดยคุณสมบัติของใยอาหารที่ละลายน้ำจะช่วยเพิ่มความหนืดของระบบทางเดินอาหาร และความหนืดที่เพิ่มขึ้นในระบบทางเดินอาหาร จะสามารถเกิดปฏิกิริยาการทำงานร่วมกันระหว่างสารอาหารและเอนไซม์ที่ช่วยทำให้เกิดน้ำในชั้นผนังลำไส้ จึงทำให้เกิดสิ่งกีดขวางการย่อยอาหารและการดูดซึมสารอาหาร ซึ่งสอดคล้องกับ Molist et al. (2014) ที่รายงานไว้ว่า การเพิ่มขึ้นของความหนืดที่บริเวณลำไส้อาจลดการย่อยและลดการดูดซึมของสารอาหารในลำไส้ แต่ในทางกลับกันใยอาหารจะช่วยเพิ่มการผลิตเอนไซม์ของตับอ่อนและจำนวนกอบเล็ทเซลล์ (goblet cells) (Schneeman et al., 1982) นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มการผลิตของเยื่อเมือก (Mariscal-Landín et al., 1995) ซึ่งอาจเกิดจากผลกระทบเชิงกลบริเวณผนังลำไส้ที่มีผลต่อความสมบูรณ์ของชั้นเยื่อเมือก และทำการหลั่งเมือกเพื่อป้องกันการบาดเจ็บของเซลล์ที่เยื่อบุผิวชั้นนอก (Schmidt-Wittig et al., 1996) ในขณะที่กลุ่มของใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำ เช่น แกลบข้าวสาลี (wheat bran) จะค่อนข้างทนต่อความต้านทานในการย่อยได้ของกรดและด่างที่บริเวณลำไส้ (Jorgensen et al., 1996) อีกทั้งยังช่วยเพิ่มปริมาณอุจจาระแห้งอีกด้วย ซึ่งโดยทั่วไปแล้วใยอาหารชนิดละลายน้ำได้จะเพิ่มระยะเวลาในการขนส่งอาหารภายในลำไส้ ทำให้กระเพาะอาหารว่างช้า ส่งผลต่อการชะลอการดูดซึมของกลูโคส แต่จะเพิ่มการผลิตเอนไซม์ของตับอ่อน ทำให้การดูดซึมช้าลง ในขณะที่ใยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำ จะลดระยะเวลาในการขนส่ง ทำให้เพิ่มความสามารถในการอุ้มน้ำ และช่วยเพิ่มปริมาณอุจจาระแห้งในสัตว์กระเพาะเดี่ยว ซึ่งจะเป็นผลดีต่อสุขภาพในสัตว์ อีกทั้งยังช่วยลดปัญหาปริมาณแอมโมเนียและความชื้นของพื้นคอกเช่นกัน ดังนั้นในปัจจุบันจึงมีอีกหลายงานวิจัยได้ทำการวิจัยเพื่อชี้แจงปฏิสัมพันธ์

ที่ซับซ้อนเหล่านี้อาจนำไปสู่การค้นพบแนวทางใหม่ๆ ในการส่งเสริมความสมบูรณ์ของลำไส้และการส่งเสริมสุขภาพในสัตว์ปีก ดังแสดงในตารางที่ 1

**ตาราง 1 กลไกการป้องกันในระบบทางเดินอาหารของสัตว์ปีก**

| Mechanism                      | Mode of action                                                            | Reference                             |
|--------------------------------|---------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| <b>Physical barriers</b>       |                                                                           |                                       |
| Mucin                          | Mucin secretion and type affect microflora                                | Deplanke and Gaskins, 2001            |
| pH                             | Low pH of upper GIT inhibits growth of some enteric bacteria              | Fooks and Gibson, 2002                |
| Nutrient competition           | Bacteria must compete with the GIT for nutrients                          | Bedford, 2000                         |
| Peristalsis                    | Movement of digesta and mucin prevents bacterial adherence                | Montagne et al., 2004                 |
| Oxygen tension                 | The anaerobic environment of the GIT inhibits some microbes               | Rychlik and Barrow, 2005              |
| <b>Gut microflora</b>          |                                                                           |                                       |
| Competition for adhesion sites | Bacteria compete for adhesion sites                                       | Bailey, 1987                          |
| Nutrient competition           | Bacteria compete for nutrients                                            | Bedford, 2000                         |
| Bacteriocins                   | Bacteriocins                                                              |                                       |
| Bacteriocins                   | Antimicrobial compounds produced by other bacteria to inhibit competitors | Cole et al., 2005; Stern et al., 2005 |
| Bacteriophages                 | Viruses that replicate within and lyse specific bacteria                  | Berchieri et al., 1999                |
| Short-chain fatty acids        | Antimicrobial compounds that can inhibit the growth of some bacteria      | Ricke, 2003                           |

ที่มา: Perry, 2006

### ผลของใยอาหารต่ออัตราการเคลื่อนที่ของอาหารในท่อทางเดินอาหาร

อัตราการเคลื่อนที่ของอาหารในท่อทางเดินอาหาร จัดว่าเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่มีอิทธิพลโดยตรงต่อการใช้ประโยชน์ได้ของโภชนะ เมื่อสัตว์กินอาหารเข้าไปแล้ว อาหารเหล่านั้นจะเคลื่อนตัวผ่านอวัยวะย่อยอาหารแต่ละส่วน และสัมผัสกับเอนไซม์ย่อยอาหารชนิดต่างๆ เพื่อลดอนุภาคของ

สิ่งย่อย (digesta) ให้มีขนาดเล็กลงจนสามารถดูดซึมผ่านผนังลำไส้เข้าไปในร่างกายได้ ซึ่งจะเห็นได้ว่า อัตราเคลื่อนที่ของอาหารมีความสัมพันธ์โดยตรงกับประสิทธิภาพการย่อยและดูดซึมโภชนะ

ซึ่งคุณสมบัติหลักที่เกี่ยวข้องกับอัตราการไหลผ่านนั้นขึ้นอยู่กับประเภทของการละลายได้ และความหนืดขององค์ประกอบทางเคมีในวัตถุดิบอาหารสัตว์นั้นๆ ซึ่งผลกระทบของการใช้ใยอาหาร ต่อระยะเวลาการขนส่งของทางเดินอาหาร และการพัฒนาของอวัยวะย่อยอาหารแตกต่างกันออกไป ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติทางเคมี กายภาพ และระดับของการใช้ใยอาหาร (Bach Knudsen et al., 2012) อาทิเช่น

ใยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำ มีคุณสมบัติช่วยกระตุ้นการบดอาหารของกระเพาะบด ควบคุม การเคลื่อนที่ของอาหารไปยังบริเวณลำไส้และการหลั่งน้ำย่อยดีขึ้น อีกทั้งการเพิ่มขึ้นระดับของใย อาหารส่งผลให้ระบบทางเดินอาหารของโคระยะเล็กมีการปรับตัว (González-Alvarado et al., 2007) อย่างไรก็ตามผลกระทบของใยอาหารต่อลำไส้ใหญ่นั้นอาจขึ้นอยู่กับชนิดของใยอาหารและระดับ ของการใช้ใยอาหารที่จะทำให้เกิดการขยายตัวของผนังในท่อระบบทางเดินอาหาร และการเพิ่มขนาด อวัยวะ (Jiménez-Moreno et al., 2013) รวมไปถึงช่วยเพิ่มความสามารถในการทำงานของ กระเพาะบด ซึ่งที่บริเวณกระเพาะบดจะช่วยลดการไหลย้อนของอาหารในทางเดินอาหารส่วน กระเพาะลำไส้ ทำให้ประสิทธิภาพของกระบวนการย่อยอาหารลดลงได้ (Hetland et al., 2003; Sacranie et al., 2012) ในทางตรงกันข้าม กระเพาะอาหารที่ได้รับการพัฒนาจะมีการเพิ่มการหลั่ง กรดไฮโดรคลอริก (HCl) ซึ่งกรดไฮโดรคลอริกทำหน้าที่ช่วยทำให้กระเพาะมีสภาพเป็นกรด เหมาะแก่ การทำงานของน้ำย่อย ช่วยทำให้อาหารอ่อนตัว และช่วยในการดูดซึมธาตุเหล็ก อีกทั้งหน้าที่สำคัญคือ เปลี่ยน "เพปซิโนเจน" ซึ่งเป็นน้ำย่อยที่ไม่มีฤทธิ์ ให้กลายเป็น "เพปซิน" ที่จะช่วยย่อยโปรตีนจากพืช และสัตว์ให้เป็น "เปปไทด์" ทำให้มีโมเลกุลขนาดเล็กลงได้ แต่ยังไม่เล็กพอที่จะแพร่เข้าสู่เซลล์ โดยต้อง ไปย่อยต่อที่บริเวณลำไส้เล็ก และลดการไหลย้อน (refluxes) ซึ่งขนาดของใยอาหารที่มีผลกระทบต่อ สรีรวิทยา และการพัฒนาของอวัยวะย่อยอาหาร อาจไม่ได้ขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาจากรวมชาติ และ ขนาดของใยอาหาร แต่อาจขึ้นอยู่กับระดับของใยอาหาร (Jiménez-Moreno et al., 2013) แต่ ในทางตรงกันข้ามหากเป็นกลุ่มของใยอาหารละลายน้ำ มีคุณสมบัติในการเพิ่มความหนืด เกิดลักษณะ เป็นเจลเมื่อเข้าสู่ระบบทางเดินอาหาร การที่ความหนืดในระบบทางเดินอาหารเพิ่มขึ้น จะส่งผลให้การ ทำงานของระบบท่อทางเดินอาหารร่วมกันระหว่างสารอาหารอาจไม่ส่งผลดีมากนัก เนื่องจากความ หนืดจะส่งผลทำให้เกิดสิ่งกีดขวางการย่อยอาหารและการดูดซึมสารอาหาร จึงทำให้สัตว์ไม่สามารถนำ โภชนะไปใช้สำหรับการเจริญเติบโตได้อย่างเต็มที่ จากที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าใยอาหารในแต่ละ ชนิดมีอิทธิพลโดยตรงต่ออัตราการเคลื่อนที่ของอาหารในระบบท่อทางเดินอาหาร ซึ่งอาจเป็นปัจจัย สำคัญที่จะส่งผลต่อประสิทธิภาพการย่อยได้ของสารอาหารและสุขภาพสัตว์ได้



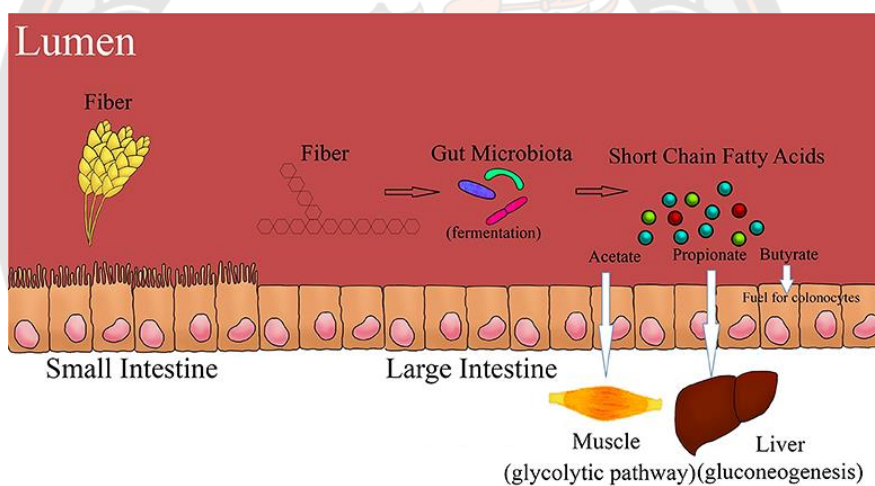
### ผลของใยอาหารต่อประสิทธิภาพการย่อยได้ของโภชนะ

สัตว์ปีกไม่สามารถสร้างเอนไซม์มาย่อยใยอาหารกลุ่มที่ไม่ละลายน้ำ ส่วนใยอาหารกลุ่มที่ละลายน้ำจะมีความหนืดซึ่งเป็นสารขัดขวางโภชนะที่ขัดขวางการย่อยได้ของอาหาร ซึ่งกระบวนการย่อยได้ของใยอาหารในไก่เนื้อจะเกิดขึ้นที่บริเวณไส้ติ่ง (cecum) โดยจุลินทรีย์เกิดการย่อยสลายเยื่อใย โปรตีน กรดยูริก และดูดซึมโดยกระบวนการหมัก (Thomas, & Skadhauge, 1988) เมื่อเทียบกับสุกรและหนู การทำลายของจุลินทรีย์ในเยื่อใยที่บริเวณไส้ติ่ง และลำไส้ใหญ่ของสัตว์ปีก มีค่าที่ต่ำกว่า (Carré, & Leclercq, 1985; Longstaff, & McNab, 1989) ถึงแม้ว่าจะมีบางรายงานกล่าวว่า มีค่าสูงขึ้นบางส่วน (Pettersson, & Aman, 1989) นักวิจัยได้รายงานไว้ว่า NSP ที่ละลายน้ำได้จะถูกย่อยได้สมบูรณ์ ในขณะที่ส่วน NSP ที่ไม่ละลายน้ำยังคงไม่ถูกย่อยได้สมบูรณ์ (Carré et al., 1990; Anison, 1991) โดยทั่วไปแล้วใยอาหารถือว่าเป็นส่วนหนึ่งของส่วนประกอบของอาหารที่ยังคงเหลืออยู่จากการละลายได้ในสารละลาย detergent ตามวิธีของ Van Soest, & Wine, (1967) หรือเป็นที่รู้จักกันทั่วไปในชื่อ Neutral detergent fiber (NDF) โดยมีงานวิจัยหลายชิ้นที่แสดงให้เห็นว่าพลังงานจากการเผาผลาญอาหาร (ME) จะเพิ่มขึ้นตามอายุของสัตว์ปีก (Zelenka, 1968; Sell, 1996; Batal, & Parsons, 2002) นอกจากนี้จากรายงานวิจัยของ Shires et al. (1987) พบว่า ไก่เนื้อที่อายุเพิ่มมากขึ้นอัตราการไหลผ่านของอาหารและการสัมผัสของอาหารเป็นระยะเวลานาน จะส่งผลให้การหมักของเชื้อจุลินทรีย์ในไส้ติ่ง อาจช่วยเพิ่มความสามารถย่อยได้ของใยอาหาร แต่ในทางกลับกัน Siregar, & Farrel (1980) กลับพบว่าค่า ME ไม่ได้รับอิทธิพลจากอายุไก่เนื้อตั้งที่กล่าวไปข้างต้น อย่างไรก็ตามการศึกษาก่อนการย่อยอาหารถือเป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งจะเห็นได้ว่าอาหารที่อุดมไปด้วยใยอาหารไม่ละลายน้ำจะส่งผลดีช่วยกระตุ้นการทำงานของกิ้น (gizzard) และการหลั่งของอะไมเลสและกรดน้ำดีในไก่เนื้อและไก่ไข่ (Hetland et al., 2003) สอดคล้องกับ Hetland, & Svihus, (2001) รายงานว่า การให้ใยอาหารไม่ละลายน้ำจากแกลบข้าวโอ๊ตในไก่เนื้อ สามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการย่อย อย่างไรก็ตามประโยชน์ของใยอาหารต่อความสามารถในการย่อยได้ของโภชนะอาจมีความแตกต่างกันไปตามแหล่งที่มาและระดับการใช้ใยอาหาร รวมถึงองค์ประกอบของอาหารพื้นฐาน

### ผลของใยอาหารต่อการส่งเสริมจุลินทรีย์ในระบบทางเดินอาหาร

การหมักย่อยของใยอาหาร ไม่สามารถถูกย่อยด้วยเอนไซม์ แต่จะถูกหมักย่อยโดยแบคทีเรียที่ไม่ใช้ออกซิเจนที่อยู่ในส่วนของส้วทวารหนักและไส้ติ่ง โดยจะได้ผลผลิตเป็น กรดไขมันสายสั้น (short chain fatty acid, SCFA) ประกอบด้วย กรดอะซิติก โพรพิโนอิก และบิวทีริก (ดังแสดงในภาพ 10) เมื่อเข้าไปที่บริเวณส่วนของลำไส้ใหญ่ กรดไขมันดังกล่าวจะกระตุ้นการหลั่งเอนไซม์จากตับอ่อน และช่วยเพิ่มการดูดซึมโซเดียมและน้ำที่บริเวณส้วทวารหนัก ทำให้สามารถช่วยควบคุมอาการ

ท้องเสีย (Evans, & Shronts, 1992; Scheppach, 1994) ส่งผลให้ระบบทางเดินอาหารให้มีค่า pH ลดลง รวมถึงเกิดการกระตุ้นการแบ่งเซลล์ในคริปต์ของโคลอน กระตุ้นการผลิตของเซลล์ในสวนคริปต์ และกระตุ้นการเพิ่มขึ้นของเซลล์เยื่อบุผิว (epithelium cell proliferation) ของโคลอน โดยกระบวนการหมักจะมีผลทำให้ไปช่วยควบคุมจำนวนจุลินทรีย์ที่เป็นโทษ เช่น *Clostridium* spp., *Salmonella* spp. และ *E.coli* อีกทั้งยังช่วยส่งเสริมจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์จึงส่งผลในการควบคุมโรค ดังนั้นจึงสามารถช่วยป้องกันอาการท้องเสียที่เกิดจากการติดเชื้อได้และจึงช่วยให้ขับถ่ายง่ายขึ้น อย่างไรก็ตามอาจขึ้นอยู่กับองค์ประกอบที่แตกต่างของใยอาหารทั้งสองชนิด มีผลโดยตรงต่อสภาพแวดล้อมของลำไส้ และการย่อยอาหาร (Jha et al., 2010) ดังนั้นจึงมีผลต่อสภาวะการแพร่กระจายของ microbiota ในลำไส้ (Hogberg, & Lindberg, 2004) ใยอาหารจะทำหน้าที่เป็นแหล่งพลังงานให้แก่จุลินทรีย์และช่วยในการสนับสนุนการแพร่กระจายตัว



ภาพ 10 กลไกการหมักของใยอาหารที่บริเวณลำไส้เล็ก

ที่มา: Jha et al., 2019



## บทที่ 3

### วิธีดำเนินงานวิจัย

#### อุปกรณ์และสารเคมี

##### 1. เครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์

- 1.1 Bomb calorimeter (automatic calorimeter) ยี่ห้อ Lego รุ่น AC-500, USA
- 1.2 ตู้อบลมร้อน ยี่ห้อ Memmert รุ่น UNB500, Germany
- 1.3 เครื่องเตรียมตัวอย่างเนื้อเยื่อ (tissue processing ) ยี่ห้อ AMOS รุ่น ATP140, Australia
- 1.4 เครื่องตัดตัวอย่างชิ้นเนื้อ (microtome) ยี่ห้อ AMOS รุ่น AEM450, Australia
- 1.5 อ่างปรับอุณหภูมิสำหรับชิ้นเนื้อ (tissue floating bath) ยี่ห้อ Premiere รุ่น XH-1001, USA
- 1.6 เครื่องจ่ายพาราฟินหรือหม้อต้มพาราฟิน (paraffin dispenser) ยี่ห้อ Premiere รุ่น XH-4002, USA
- 1.7 แท่นอุ่นสไลด์ (slide warmers) ยี่ห้อ Premiere รุ่น XH-2002, USA
- 1.8 เครื่องปั่นอนุภาคประสงค์ ยี่ห้อ Philips รุ่น HR2118, บริษัท ฟิลิปส์ อิเล็กทรอนิกส์ (ประเทศไทย) จำกัด
- 1.9 กล้องจุลทรรศน์ไมโครสโคป ยี่ห้อ Optika® รุ่น B-510 series, Italy พร้อมโปรแกรม Sxview Software

##### 2. สารเคมี

- 2.1 Acetone, AR grade
- 2.2 Boric acid 4% (w/v)
- 2.3 Bromocresol green
- 2.4 Celite®, analytical grade (Megazyme cat no. G-CELITE)
- 2.5 Copper sulfate ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ )
- 2.6 Deionized water
- 2.7 Eosin
- 2.8 Ethanol 70%
- 2.9 Ethanol 80%

- 2.10 Ethanol 95%
- 2.11 Ethanol 100%
- 2.12 Hematoxylin
- 2.13 Methyl red
- 2.14 Mounting median
- 2.15 Neutral buffer formalin 10%
- 2.16 Normal Saline 0.9%
- 2.17 Paraffin
- 2.18 Potassium sulfate ( $K_2SO_4$ )
- 2.19 Sodium hydroxide 0.1 N
- 2.20 Sodium Hydroxide 40% (w/v)
- 2.21 Sodium Hydroxide 1.25%
- 2.22 Sulfuric acid 0.1 N
- 2.23 Sulfuric acid 1.25%
- 2.24 Sulfuric acid 95 - 98% ( $H_2SO_4$  conc., AR grade)
- 2.25 Xylene
- 2.26 ซุดเอนไซม์ Megazyme Total dietary fiber K-TDFR 100A (Megazyme International Ireland, Co. Wicklow, Ireland; cat.no. K-TDFR-100A)
- 2.27 น้ำกลั่น

### วิธีการดำเนินงานวิจัย

โครงการวิจัยนี้ได้รับการรับรองจากคณะกรรมการกำกับ ดูแลการดำเนินการต่อสัตว์เพื่อ งานทางวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร เอกสารรับรองเลขที่ 60 01 011

### 1. การศึกษาที่ 1: ประเมินระดับของใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำในอาหารไก่เนื้อที่บริสุทธ์ ต่อสมรรถภาพการเจริญเติบโต และสัณฐานวิทยาของลำไส้

#### การเตรียมอาหารทดลองที่บริสุทธ์

คัดเลือกแหล่งวัตถุดิบอาหารสัตว์สำหรับใช้ผสมอาหารทดลอง เป็นวัตถุดิบที่ไม่ได้มาจากพืช ปราศจากใยอาหารหรือเยื่อใย โดยใช้ Lignocellulose ยี่ห้อ ARBOCEL<sup>®</sup> RC FINE (ภาพ 11) จากบริษัท J. RETTENMAIER & SÖHNE GMBH + CO KG, Germany ซึ่งเป็นสารประกอบเชิงซ้อน

ของลิกนิน เฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลส เป็นแหล่งของ IDF เพื่อใช้ปรับระดับของใยอาหารไม่ละลายน้ำให้มีค่าแตกต่างกันในแต่ละกลุ่มการทดลอง ในการประกอบสูตรอาหารทดลองจะทำการคำนวณให้มีคุณค่าโภชนะใกล้เคียงกับความต้องการของไก่เนื้อสายพันธุ์รอส 308 อ้างอิงมาจาก บริษัท Aviagen ross308 (2018) ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยโปรแกรมการให้อาหาร แบ่งออกเป็น 2 ระยะ คือ อาหารระยะเจริญเติบโต (grower diet) ที่อายุ 10-24 วัน และอาหารระยะสุดท้าย (finisher diet) ที่อายุ 25-45 วัน



ภาพ 11 ตัวอย่างผลิตภัณฑ์ ARBOCEL® RC FINE

ที่มา: <http://www.lab-inter.com/industrys.php?pid=39>

#### การออกแบบการทดลองและจัดการสัตว์ทดลอง

ซื้อไก่เนื้อสายพันธุ์รอส 308 เพศผู้ อายุ 1 วัน จำนวน 200 ตัว จากโรงฟักไข่ป่าซาง บริษัท ซีพีเอฟ จำกัด (มหาชน) อำเภอป่าซาง จังหวัดลำพูน ลูกไก่ทุกตัวถูกเลี้ยงดูภายในโรงเรือนทดลองระบบปิด คอกที่ใช้เลี้ยงปูรองด้วยแกลบมีความหนาประมาณ 8-10 เซนติเมตร และทำการกักลูกไก่แบบล้อมวงกักด้วยหลอดไฟฟ้า 200 วัตต์ เพื่อปรับอุณหภูมิในบริเวณพื้นที่กักให้อยู่ที่ 32 องศาเซลเซียส ในช่วงสัปดาห์แรก จากนั้นจึงค่อย ๆ ลดอุณหภูมิลงประมาณสัปดาห์ละ 2.8-3.0 องศาเซลเซียส จนกระทั่งอุณหภูมิภายในโรงเรือนอยู่ระหว่าง 27-29 องศาเซลเซียส ทั้งนี้ในช่วงระยะกักไก่ทุกตัวจะได้รับไก่ทุกตัวได้รับน้ำสะอาดและอาหารเชิงการค้าระยะ Starter อย่างไม่จำกัด

เมื่อลูกไก่อายุครบ 10 วัน ทำการชั่งน้ำหนักไก่ทั้งหมด และคัดเลือกไก่ที่มีน้ำหนักใกล้เคียงกัน จำนวน 160 ตัว มาแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มๆ ละ 8 ซ้ำๆ ละ 5 ตัว โดยใช้แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) ดังนี้

กลุ่มที่ 1 อาหารควบคุม (ไม่ได้รับ IDF) (T1)

กลุ่มที่ 2 อาหารไก่เนื้อกิ่งบริษัทที่ประกอบไปด้วย IDF ที่ระดับ 6 เปอร์เซ็นต์ (T2)

กลุ่มที่ 3 อาหารไก่เนื้อกิ่งบริษัทที่ประกอบไปด้วย IDF ที่ระดับ 8 เปอร์เซ็นต์ (T3)

กลุ่มที่ 4 อาหารไก่เนื้อกิ่งบริษัทที่ประกอบไปด้วย IDF ที่ระดับ 10 เปอร์เซ็นต์ (T4)

ตาราง 2 ส่วนประกอบและองค์ประกอบทางเคมีของสูตรอาหารไก่เนื้อที่งบริษัท

| Item                             | Grower |       |       |       | Finisher |       |       |       |
|----------------------------------|--------|-------|-------|-------|----------|-------|-------|-------|
|                                  | T1     | T2    | T3    | T4    | T1       | T2    | T3    | T4    |
| Ingredients                      |        |       |       |       |          |       |       |       |
| Wheat flour                      | 58.0   | 58.0  | 58.0  | 58.0  | 62.5     | 62.5  | 62.5  | 62.5  |
| Vegetable oil                    | 4.5    | 4.5   | 4.5   | 4.5   | 5.0      | 5.0   | 5.0   | 5.0   |
| Fish meal                        | 9.0    | 9.0   | 9.0   | 9.0   | 8.0      | 8.0   | 8.0   | 8.0   |
| Porcine meal                     | 16.5   | 16.5  | 16.5  | 16.5  | 12.6     | 12.6  | 12.6  | 12.6  |
| Dicalcium phosphate              | 0.2    | 0.2   | 0.2   | 0.2   | 0.1      | 0.1   | 0.1   | 0.1   |
| Calcium carbonate                | 0.2    | 0.2   | 0.2   | 0.2   | 0.1      | 0.1   | 0.1   | 0.1   |
| Sodium chloride                  | 0.0    | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.1      | 0.1   | 0.1   | 0.1   |
| Premix <sup>1</sup>              | 0.4    | 0.4   | 0.4   | 0.4   | 0.4      | 0.4   | 0.4   | 0.4   |
| L-lysine                         | 0.6    | 0.6   | 0.6   | 0.6   | 0.6      | 0.6   | 0.6   | 0.6   |
| DL-Methionine                    | 0.6    | 0.6   | 0.6   | 0.6   | 0.6      | 0.6   | 0.6   | 0.6   |
| Lignocellulose                   | 0.0    | 6.0   | 8.0   | 10.0  | 0.0      | 6.0   | 8.0   | 10.0  |
| Kaolin                           | 10.0   | 4.0   | 2.0   | 0.0   | 10.0     | 4.0   | 2.0   | 0.0   |
| Calculated chemical compositions |        |       |       |       |          |       |       |       |
| ME, kcal/kg                      | 3,157  | 3,157 | 3,157 | 3,157 | 3,213    | 3,213 | 3,213 | 3,213 |
| Crude protein, %                 | 22.11  | 22.11 | 22.11 | 22.11 | 20.14    | 20.14 | 20.14 | 20.14 |
| Ether extract, %                 | 6.74   | 6.74  | 6.74  | 6.74  | 6.78     | 6.78  | 6.78  | 6.78  |
| Calcium, %                       | 2.51   | 2.51  | 2.51  | 2.51  | 1.96     | 1.96  | 1.96  | 1.96  |
| Total phosphorus, %              | 1.16   | 1.16  | 1.16  | 1.16  | 0.90     | 0.90  | 0.90  | 0.90  |
| Available phosphorus, %          | 0.60   | 0.60  | 0.60  | 0.60  | 0.48     | 0.48  | 0.48  | 0.48  |
| Crude fiber, %                   | 0.62   | 4.68  | 6.03  | 7.38  | 0.64     | 4.70  | 6.05  | 7.40  |
| NDF                              | 1.76   | 6.82  | 8.51  | 10.20 | 1.81     | 6.88  | 8.57  | 10.25 |
| ADF                              | 0.92   | 5.17  | 6.58  | 8.00  | 0.95     | 5.20  | 6.61  | 8.03  |
| ADL                              | 1.45   | 2.88  | 3.36  | 3.83  | 1.50     | 2.93  | 3.40  | 3.88  |

**Note:** T1 = 0% IDF in semi-purified diets; T2 = 6% IDF in semi-purified diets; T3 = 8% IDF in semi-purified diets; T4 = 10% IDF in semi-purified diets; ME = Metabolizable energy; NDF = Neutral detergent fiber; ADF = Acid detergent fiber; ADL = Acid detergent lignin.

<sup>1</sup>Premix provided the following per kilogram of complete diet: 14,000,000 IU of vitamin A; 3,000,000 IU of vitamin D3; 2,500 IU of vitamin E; 35 g of vitamin K; 2.5 g of vitamin B1; 6.5 g of vitamin B2; 275 g of vitamin B6; 25 mg of vitamin B12; 11.00 g of pantothenic acid; 35 g of nicotinic acid; 15 mg of biotin; 250 g of choline chloride; 1.5 g of copper; 60 g of manganese; 1.5 g of iron; 45 g of zinc; 400 mg of iodine; 150 mg of selenium.

สัตว์ทดลองจะถูกเลี้ยงในโรงเรือนแบบระเหยไอเย็น (evaporative cooling system) ใช้ผ้ามา่านีต่าปิดข้างโรงเรือนเพื่อลดรังสีความร้อนจากภายนอกเข้าสู่โรงเรือน ใช้พัดลมดูดอากาศในการระบายอากาศตลอดแนวความยาวโรงเรือน โดยมีแผ่นรังผึ้ง (cooling pad) เป็นตัวช่วยลดอุณหภูมิของอากาศที่เข้ามาภายในโรงเรือน ใช้ระบบการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นแบบอัตโนมัติ คอกที่ใช้เลี้ยงปูรองด้วยแกลบที่ผ่านการฆ่าเชื้อโรค โดยมีความหนาประมาณ 8-10 เซนติเมตร อุณหภูมิภายในโรงเรือนอยู่ระหว่าง 25-28 องศาเซลเซียส โดยมีความชื้นสัมพัทธ์ 60-70 เปอร์เซ็นต์ และกำหนดโปรแกรมแสงสว่าง 18 ชั่วโมงต่อวัน ใช้ถังแขวนให้อาหาร และระบบการให้น้ำอัตโนมัติแบบหัวหยด (nipple) ไก่ทดลองทุกตัวจะได้รับอาหารและน้ำอย่างไม่จำกัด (*ad libitum*) ไปจนกระทั่งอายุ 45 วัน ทั้งนี้การเลี้ยงดูและจัดการสัตว์ทดลองปฏิบัติตามแนวปฏิบัติและคำแนะนำของคู่มือประจำสายพันธุ์รอส 308 อ้างอิงมาจาก บริษัท Aviagen ross308 (2018)

#### การเก็บข้อมูลและการคำนวณสมรรถภาพการเจริญเติบโต

ก) ทำการเก็บบันทึกข้อมูลสมรรถภาพการผลิตโดยรวม เช่น น้ำหนักตัว และปริมาณอาหารที่กิน เป็นประจำทุกสัปดาห์ ไปจนกระทั่งสิ้นสุดการทดลอง

ข) นำข้อมูลน้ำหนักตัว และปริมาณอาหารที่กินมาคำนวณค่าน้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้นต่อตัว ปริมาณอาหารที่กินต่อตัว และประสิทธิภาพการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัว ดังสูตรต่อไปนี้

$$\text{น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นต่อตัว (กรัม)} = \frac{\text{น้ำหนักตัวสุดท้าย} - \text{น้ำหนักตัวเริ่มต้น}}{\text{จำนวนไก่ทั้งหมด}}$$

$$\text{ปริมาณอาหารที่กินต่อตัว (กรัม)} = \frac{\text{ปริมาณอาหารที่ให้} - \text{ปริมาณอาหารที่เหลือ}}{\text{จำนวนไก่ทั้งหมด}}$$

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

#### การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของวิลไลในลำไส้เล็ก

เมื่อสิ้นสุดการทดลอง ที่อายุ 45 วัน สุ่มไก่ที่มีน้ำหนักใกล้เคียงกันในแต่ละกลุ่มๆ ละ 4 ตัว เพื่อทำการการุณยฆาต แล้วทำการเก็บตัวอย่างลำไส้เล็กทั้ง 3 ส่วน ความยาวประมาณ 2 เซนติเมตร ซึ่งประกอบด้วย ส่วนต้น (duodenum) ส่วนกลาง (jejunum) และส่วนปลาย (ileum) บริเวณลำไส้เล็กส่วนต้น ทำการเก็บตัวอย่างบริเวณจุดกึ่งกลางของส่วนที่เชื่อมต่อกับกระเพาะ



ไปจนถึง Bile duct entry และจุดกึ่งกลางจากตำแหน่งนี้ไปจนถึง Meckel's diverticulum จะถือว่าเป็นตัวอย่างลำไส้เล็กส่วนกลาง ในขณะที่ลำไส้เล็กส่วนปลายจะเก็บตัวอย่างบริเวณ Distal end of lower ileum มีตำแหน่งห่างจากจุด ileocecal junction ประมาณ 10-12 เซนติเมตร หลังจากนั้นทำการล้างสิ่งเหลือภายในด้วยสารละลาย Normal Saline 0.9 เปอร์เซ็นต์ นำตัวอย่างบรรจุลงในขวดแก้วที่มีสารละลายบัฟเฟอร์ฟอร์มาลิน 10 เปอร์เซ็นต์ (สารละลาย 1 ลิตร ประกอบด้วย ฟอรั่มัลดีไฮด์ที่มีความเข้มข้น 37- 40 เปอร์เซ็นต์ 100 มิลลิลิตร โซเดียมไธโอไตรเจนฟอสเฟตโมโนไฮเดรต 1.683 กรัม และไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟตแอนไฮดรัส 5.836 กรัม) เพื่อเป็นการเก็บรักษาเนื้อเยื่อให้คงสภาพ นำขวดเก็บตัวอย่างไปเก็บไว้ในตู้แช่เย็น ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ตัวอย่างทั้งหมดจะถูกนำไปผ่านขั้นตอนการเตรียมชิ้นเนื้อ โดยวิธีการเตรียมตัวอย่าง ได้อ้างอิงมาจาก Incharoen et al. (2013) ซึ่งตัวอย่างเนื้อเยื่อแต่ละส่วนจะถูกนำไปผ่านกระบวนการเตรียมตัวอย่างเนื้อเยื่อด้วยเครื่องเตรียมชิ้นเนื้ออัตโนมัติ (automatic tissue processor) ดังขั้นตอนต่อไปนี้

- เอทานอล 70% ครั้งละ 4 ชั่วโมง 1 ครั้ง
- เอทานอล 70% ครั้งละ 2 ชั่วโมง 1 ครั้ง
- เอทานอล 80% ครั้งละ 1 ชั่วโมง 2 ครั้ง
- เอทานอล 90% ครั้งละ 1 ชั่วโมง 2 ครั้ง
- เอทานอล 95% ครั้งละ 1 ชั่วโมง 2 ครั้ง
- เอทานอล 100% ครั้งละ 1 ชั่วโมง 2 ครั้ง
- ไซลีน ครั้งละ 1 ชั่วโมง 2 ครั้ง
- พาราฟินหลอมเหลว ครั้งละ 1 ชั่วโมง 2 ครั้ง ๆ ละ 30 นาที
- นำเนื้อเยื่อปรับความดันสูญญากาศ ที่ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว นาน 30

นาทีหลังจากนั้นนำเนื้อเยื่อมาฝังลงในพาราฟิน (embedding) แล้วนำไปตัดชิ้นเนื้อเยื่อให้มีความหนา 4-5 ไมโครเมตร ด้วยเครื่องตัดบล็อกชิ้นเนื้อ (manual microtome) แล้วนำชิ้นเนื้อเยื่อที่ตัดได้ (section) มาวางบนแผ่นกระจกสไลด์ ทิ้งตัวอย่างไว้บนแท่นอุ่นสไลด์ (slide warmers) ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส นาน 12 ชั่วโมง หลังจากนั้นจะทำการย้อมสีด้วยฮีมาทอกซิลิน (hematoxylin) และอีโอซิน (eosin) โดยก่อนอื่นจะนำไปผ่านขั้นตอนการขจัดพาราฟิน (deparaffinization) ดังขั้นตอนต่อไปนี้

- ไซลีน ครั้งละ 10 นาที 2 ครั้ง
- เอทิลแอลกอฮอล์ 100% 2 นาที
- เอทิลแอลกอฮอล์ 95% 2 นาที
- เอทิลแอลกอฮอล์ 70% 2 นาที
- ล้างด้วยน้ำสะอาด ไหลผ่านตลอดเวลา 2 นาที

- ย้อมสีด้วยฮีมาทอกซิลิน ประมาณ 4 นาที แล้วล้างด้วยน้ำสะอาด ไหลผ่านตลอดเวลา จนกระทั่งน้ำที่ไหลผ่านอยู่ใต้อ้อมสีไม่มีสีม่วงออกมาอีก

- จุ่มลงในเอทิลแอลกอฮอล์ 1 ครั้ง เพื่อล้างสีส่วนเกิน แล้วล้างด้วยน้ำสะอาดไหลผ่าน ตลอดเวลา นาน 1-2 นาที

- ย้อมสีด้วย Eosin นาน 2 นาที

- เอทิลแอลกอฮอล์ 70% 30 วินาที

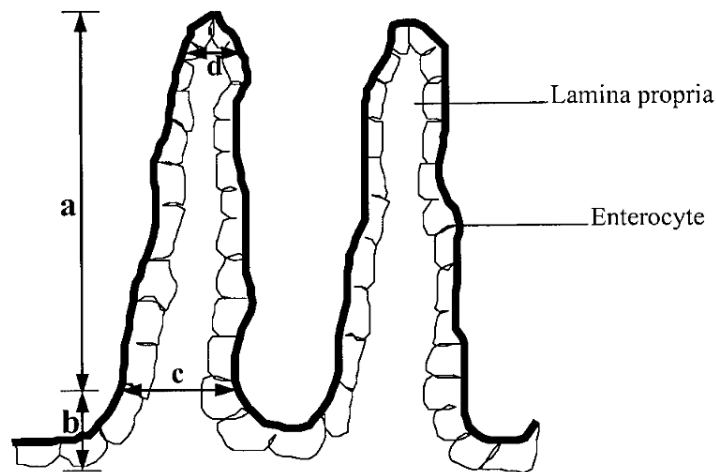
- เอทิลแอลกอฮอล์ 95% 2 นาที 2 ครั้ง

- เอทิลแอลกอฮอล์ 100% 2 นาที 2 ครั้ง

- ไซลีน ครั้งละ 5 นาที 3 ครั้ง

- หยด Mounting median ลงบนกระจกสไลด์แล้วปิดด้วยกระจกปิดสไลด์

นำกระจกสไลด์ที่มีเนื้อเยื่อที่ย้อมสีเสร็จแล้วไปศึกษาด้วยกล้องจุลทรรศน์ โดยใช้โปรแกรม Sxview เพื่อนำมาศึกษาการเปลี่ยนแปลงของลักษณะทางจุลกายวิภาค (histology) ดังภาพ 12 เพื่อประเมินความสูงของวิลโล (villus height) ความกว้างส่วนต้นและส่วนปลาย และความลึกของคริปต์ (crypt depth)



ภาพ 12 โครงสร้างของวิลโล เมื่อ a คือ ความสูงของวิลโล (villus height), b คือ ความลึกของคริปต์ (crypt depth), c คือ ความกว้างส่วนต้น และ d คือ ความกว้างส่วนปลาย

ที่มา: Iji et al., 2001

จากนั้นนำมาคำนวณหาค่าพื้นที่ของวิลไล และอัตราส่วนความสูงของวิลไลต่อความลึกของคริปต์ (villus height to crypt depth ratio, VH:CD) ดังสูตรต่อไปนี้

$$\text{พื้นที่ของวิลไล} = \frac{(\text{ความกว้างส่วนต้น} + \text{ความกว้างส่วนปลาย})}{2} \times \text{ความสูงของวิลไล}$$

$$\text{อัตราส่วนความสูงของวิลไลต่อความลึกของคริปต์} = \frac{\text{ความสูงของวิลไล } (\mu\text{m})}{\text{ความลึกของคริปต์ } (\mu\text{m})}$$

### การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

นำข้อมูลสมรรถภาพการเจริญเติบโต และสัญญาณวิทยาของวิลไลในลำไส้เล็ก ไปวิเคราะห์หาความแปรปรวน (analysis of variance) ตามแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test ที่ระดับ  $P < 0.05$  (Steel, & Torrie, 1980)

**2. การศึกษาที่ 2: ศึกษาผลของระดับใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำในสูตรอาหารไก่เนื้อต่อสมรรถภาพการผลิต อัตราการย่อยได้ ระยะเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของอาหารในท่อทางเดินอาหารและสัญญาณวิทยาของลำไส้**

### การเตรียมอาหารทดลอง

เมื่อสิ้นสุดการศึกษาที่ 1 จะได้ทำการคัดเลือกระดับที่เหมาะสมของใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำในอาหารไก่เนื้อมา 1 ระดับ เพื่อใช้เป็นระดับอ้างอิงในการศึกษาที่ 2 ซึ่งหลักเกณฑ์ที่ใช้ในการคัดเลือกจะพิจารณาจากผลกระทบต่อสมรรถภาพการผลิตเป็นอันดับแรก และการเปลี่ยนแปลงทางสัญญาณวิทยาของลำไส้เล็กเป็นอันดับที่สอง ซึ่งจากผลการศึกษาที่ 1 ชี้ให้เห็นว่าแนวโน้มประสิทธิภาพการผลิตและสัญญาณวิทยาของลำไส้เล็ก มีค่าที่เพิ่มสูงขึ้นตามระดับของ IDF ที่เพิ่มขึ้น ซึ่งในระดับที่ดีที่สุด คือ 8 และ 10 เปอร์เซ็นต์ หลังจากนั้นทำการคัดเลือกค่ากลางของระดับ IDF นำมาใช้เป็นระดับอ้างอิงในการศึกษาที่ 2 จากนั้นทำการเพิ่มค่าของ IDF ในระดับที่เพิ่มขึ้น ที่ระดับ 9, 10, 11 และ 12 เปอร์เซ็นต์ เพื่อทำการศึกษาต่อไปว่าหากค่า IDF ที่เพิ่มขึ้น ส่งผลดีต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตโดยรวมอย่างไร

หลังจากนั้นคัดเลือกวัตถุดิบอาหารสัตว์ที่จะนำมาใช้ในการประกอบสูตรอาหารไก่เนื้อ เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณของใยอาหาร (dietary fiber component) จากวัตถุดิบที่จะนำมาใช้

ประกอบสูตรอาหาร เช่น โยอาหารชนิดละลายน้ำ (soluble dietary fiber, SDF) และโยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำ (insoluble dietary fiber, IDF) ตามวิธีการของ AOAC (2010) โดยแบ่งกลุ่มออกเป็น 3 กลุ่มหลัก ได้แก่

- วัตถุดิบกลุ่มพลังงาน ได้แก่ ข้าวโพด และ รำสกัดน้ำมัน
- วัตถุดิบกลุ่มโปรตีน ได้แก่ กากถั่วเหลือง และปลาป่น
- วัตถุดิบกลุ่มปลื้กย่อย (แหล่งไวมิน และแร่ธาตุ) ได้แก่ ฟรืมิกรี แคลเซียม-

คาร์บอนเต ไดแคลเซียมฟอสเฟส และดีแอลเมธไอนีน

เมื่อทราบองค์ประกอบทางเคมี และระดับโยอาหารของทั้ง 2 ชนิดแล้ว ดังตารางที่ 3 จึงทำการคำนวณและประกอบสูตรอาหารทดลองให้มีคุณค่าโภชนะไม่ต่ำกว่าความต้องการทางโภชนะของไก่เนื้อสายพันธุ์รอส 308 โดยใช้ Lignocellulose (ARBOCEL® RC FINE, Germany) ซึ่งเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของลิกนิน เฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลส เป็นแหล่งของ IDF และใช้ Guar gums (LOTUS INTERNATIONAL, India) ที่สกัดได้จากเนื้อในเมล็ดถั่ว เป็นแหล่งของ SDF เพื่อใช้ปรับสัดส่วนให้ระดับ TDF ของอาหารทดลองทุกกลุ่มมีค่าเท่ากัน ดังแสดงในตารางที่ 4 โดยโปรแกรมการให้อาหาร แบ่งออกเป็น 2 ระยะ คือ อาหารระยะเจริญเติบโต (grower diet) ที่อายุ 10-24 วัน และอาหารระยะสุดท้าย (finisher diet) ที่อายุ 25-45 วัน

**ตาราง 3 ปริมาณองค์ประกอบของโยอาหารในวัตถุดิบอาหารสัตว์**

| Item               | Dietary fiber<br>(g/100g) | Insoluble dietary fiber<br>(g/100g) | Soluble dietary fiber<br>(g/100g) |
|--------------------|---------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| Corn               | 12.53                     | 7.15                                | 5.38                              |
| Defatted rice bran | 26.68                     | 18.82                               | 7.86                              |
| Soybean meal 46%   | 22.29                     | 21.23                               | 1.06                              |

#### การออกแบบการทดลองและการจัดการสัตว์ทดลอง

ซื้อไก่เนื้อสายพันธุ์รอส 308 เพศผู้ อายุ 1 วัน จำนวน 200 ตัว จากโรงฟักไข่ป่าซาง บริษัท ซีพีเอฟ จำกัด (มหาชน) อำเภอป่าซาง จังหวัดลำพูน สำหรับการออกแบบการทดลองและการจัดการสัตว์ทดลองคล้ายคลึงกับการศึกษาที่ 1 ทุกประการ เมื่อลูกไก่อายุครบ 10 วัน ทำการชั่งน้ำหนักไก่ทั้งหมด และคัดเลือกไก่ที่มีน้ำหนักใกล้เคียงกัน จำนวน 160 ตัว มาแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มๆ ละ 8 ซ้ำๆ ละ 5 ตัว โดยใช้แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) ดังนี้

- กลุ่มที่ 1 สูตรอาหารไก่เนื้อที่ประกอบไปด้วย IDF ที่ระดับ 9 เปอร์เซ็นต์
- กลุ่มที่ 2 สูตรอาหารไก่เนื้อที่ประกอบไปด้วย IDF ที่ระดับ 10 เปอร์เซ็นต์
- กลุ่มที่ 3 สูตรอาหารไก่เนื้อที่ประกอบไปด้วย IDF ที่ระดับ 11 เปอร์เซ็นต์
- กลุ่มที่ 4 สูตรอาหารไก่เนื้อที่ประกอบไปด้วย IDF ที่ระดับ 12 เปอร์เซ็นต์

### การเก็บข้อมูล

เก็บข้อมูลด้านสมรรถภาพการเจริญเติบโต และการวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของวิลโล ในลำไส้เล็กจะทำการเก็บข้อมูลคล้ายคลึงกับการศึกษาที่ 1

### การประเมินอัตราการย่อยได้ของโภชนะ

การวิเคราะห์ประเมินหาอัตราการย่อยได้ เพื่อเป็นการทดสอบว่าปริมาณโภชนะในวัตถุดิบที่ทดสอบเมื่อสัตว์กินเข้าไปแล้วจะถูกย่อยและนำไปใช้ประโยชน์ในร่างกายได้มากหรือน้อยเพียงใด เมื่อสิ้นสุดการทดลอง ที่อายุ 45 วัน สุ่มไก่ที่มีน้ำหนักใกล้เคียงกันในแต่ละกลุ่มๆ ละ จำนวน 5 ตัว เพื่อทำการประเมินอัตราการย่อยได้ของโภชนะ ไก่แต่ละตัวถูกเลี้ยงบนกรงขังเดี่ยว (individual cage) ที่ติดตั้งถาดรองมูลไว้ได้กรง ให้กินน้ำสะอาดผ่านหัวนิปเปิดได้อย่างอิสระ เริ่มทำการเก็บข้อมูลโดยการสุ่มเก็บตัวอย่างมูลไก่ ด้วยวิธี Total tract digestibility ระยะเวลา 3 วัน โดยทำการเก็บมูลที่ปราศจากการปนเปื้อนของอาหารทดลองและเศษขี้ไก่ ซึ่งในการเก็บตัวอย่างมูลไก่แต่ละครั้งจะต้องนำมาแช่แข็งทันที เพื่อยับยั้งการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ จากนั้นนำมูลไก่ที่เก็บไว้ทั้ง 3 วันรวมเข้าด้วยกัน โดยการนำเอามูลของแต่ละชั่วโมงในกลุ่มการทดลองเดียวกันรวมกัน แล้วนำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 65-70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 72 ชั่วโมง หรือจนกว่ามูลจะแห้ง หลังจากนั้นตัวอย่างที่ผ่านการอบแล้วนำไปบดให้ละเอียดและเก็บไว้ในตู้แช่แข็ง -20 องศาเซลเซียส เพื่อรอนำไปวิเคราะห์ทางเคมีต่อไป วิธีการดังกล่าวข้างต้นอ้างอิงมาจาก Clement et al. (2017) ซึ่งการวิเคราะห์ทางเคมีจะทำโดยนำตัวอย่างวัตถุดิบอาหารและมูลมาวิเคราะห์หาพลังงานรวม (gross energy, GE) โดยใช้วิธี bomb calorimeter พร้อมทั้งวิเคราะห์หาองค์ประกอบของโภชนะต่างๆ ได้แก่ วัตถุแห้ง โปรตีน ไขมัน เยื่อใย และเถ้า โดยวิธีการวิเคราะห์แบบประมาณ (proximate analysis) ตามวิธีของ AOAC (1995) จากนั้นนำมาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การย่อยได้ปรากฏของสารอาหาร ดังสูตรต่อไปนี้

$$\text{Apparent nutrient digestibility (\%)} = \frac{(\text{nutrient intake} - \text{nutrient excreted}) \times 100}{\text{nutrient intake}}$$



ตาราง 4 วัตถุดิบและองค์ประกอบทางเคมีของสูตรอาหารไก่เนื้อ

| Item                            | Grower |       |       |       | Finisher |       |       |       |
|---------------------------------|--------|-------|-------|-------|----------|-------|-------|-------|
|                                 | T1     | T2    | T3    | T4    | T1       | T2    | T3    | T4    |
| Ingredients                     |        |       |       |       |          |       |       |       |
| Corn                            | 45.2   | 45.2  | 45.2  | 45.2  | 46.25    | 46.25 | 46.25 | 46.25 |
| Defatted rice bran              | 8.0    | 8.0   | 8.0   | 8.0   | 13.85    | 13.85 | 13.85 | 13.85 |
| Vegetable oils                  | 8.3    | 8.3   | 8.3   | 8.3   | 9.5      | 9.5   | 9.5   | 9.5   |
| Soybean meal 46%                | 20.1   | 20.1  | 20.1  | 20.1  | 14.5     | 14.5  | 14.5  | 14.5  |
| Fish meal (58% CP)              | 14.6   | 14.6  | 14.6  | 14.6  | 12.1     | 12.1  | 12.1  | 12.1  |
| Dicalcium phosphate             | 0.1    | 0.1   | 0.1   | 0.1   | 0.1      | 0.1   | 0.1   | 0.1   |
| Calcium carbonate               | 0.2    | 0.2   | 0.2   | 0.2   | 0.2      | 0.2   | 0.2   | 0.2   |
| Premix <sup>1</sup>             | 0.3    | 0.3   | 0.3   | 0.3   | 0.3      | 0.3   | 0.3   | 0.3   |
| DL-Methionine                   | 0.2    | 0.2   | 0.2   | 0.2   | 0.2      | 0.2   | 0.2   | 0.2   |
| Lignocellulose                  | 0.0    | 1.0   | 2.0   | 3.0   | 0.0      | 1.0   | 2.0   | 3.0   |
| Guar gum                        | 3.0    | 2.0   | 1.0   | 0.0   | 3.0      | 2.0   | 1.0   | 0.0   |
| Calculated chemical composition |        |       |       |       |          |       |       |       |
| ME (kcal/kg)                    | 3,150  | 3,150 | 3,150 | 3,150 | 3,200    | 3,200 | 3,200 | 3,200 |
| Crude protein, %                | 22.00  | 22.00 | 22.00 | 22.00 | 19.00    | 19.00 | 19.00 | 19.00 |
| Ether extract, %                | 11.58  | 11.58 | 11.58 | 11.58 | 12.54    | 12.54 | 12.54 | 12.54 |
| Crude fiber, %                  | 3.46   | 3.46  | 3.46  | 3.46  | 3.82     | 3.82  | 3.82  | 3.82  |
| Calcium, %                      | 1.15   | 1.15  | 1.15  | 1.15  | 0.98     | 0.98  | 0.98  | 0.98  |
| Total phosphorus, %             | 0.81   | 0.81  | 0.81  | 0.81  | 0.81     | 0.81  | 0.81  | 0.81  |
| Available phosphorus, %         | 0.51   | 0.51  | 0.51  | 0.51  | 0.45     | 0.45  | 0.45  | 0.45  |
| IDF                             | 9.00   | 10.00 | 11.00 | 12.00 | 9.00     | 10.00 | 11.00 | 12.00 |
| SDF                             | 6.27   | 5.27  | 4.27  | 3.27  | 6.73     | 5.73  | 4.73  | 3.73  |
| IDF/SDF                         | 1.43   | 1.89  | 2.57  | 3.66  | 1.33     | 1.74  | 2.32  | 3.21  |
| TDF                             | 15.27  | 15.27 | 15.27 | 15.27 | 15.73    | 15.73 | 15.73 | 15.73 |

**Note:** T1 = 9% IDF in broiler ration; T2 = 10% IDF in broiler ration; T3 = 11% IDF in broiler ration; T4 = 12% IDF in broiler ration; ME = Metabolizable energy; IDF = Insoluble dietary fiber; SDF = Soluble dietary fiber; IDF/SDF = Insoluble to soluble dietary fiber; TDF = Total dietary fiber.

<sup>1</sup>Premix provided the following per kilogram of complete diet: 14,000,000 IU of vitamin A; 3,000,000 IU of vitamin D3; 2,500 IU of vitamin E; 35 g of vitamin K; 2.5 g of vitamin B1; 6.5 g of vitamin B2; 275 g of vitamin B6; 25 mg of vitamin B12; 11.00 g of pantothenic acid; 35 g of nicotinic acid; 15 mg of biotin; 250 g of choline chloride; 1.5 g of copper; 60 g of manganese; 1.5 g of iron; 45 g of zinc; 400 mg of iodine; 150 mg of selenium.

### การประเมินระยะเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของอาหารในท่อทางเดินอาหาร

เมื่อไก่อายุครบ 24 วันและ 45 วัน คัดเลือกไก่ที่มีน้ำหนักตัวใกล้เคียงกัน จำนวนกลุ่มละ 5 ตัว เพื่อทำการประเมินระยะเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของอาหารในท่อทางเดินอาหาร โดยดัดแปลงวิธีการอ้างอิงจาก Washburn (1990) ซึ่งไก่แต่ละตัวถูกเลี้ยงบนกรงขังเดี่ยว (individual cage) ที่ติดตั้งถาดรองมูลไว้ใต้กรง งดให้อาหารเป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อให้ไก่ได้ขับถ่ายมูลออกมาให้หมด แต่ปล่อยให้กินน้ำสะอาดผ่านหัวนิปเปิ้ลได้อย่างอิสระ เมื่อครบกำหนดระยะเวลาอดอาหาร ไก่ทุกตัวจะได้รับอาหารทดลองแต่ละสูตรพร้อมกัน และใช้นาฬิกาจับเวลา (นาฬิกาที่ 0) โดยนักวิจัยจะทยอยเทอาหารลงไปบนรางอาหารทั้งหมด จำนวน 8 ครั้งๆ ละ 30 กรัม การให้อาหารในแต่ละครั้งจะมีช่วงเวลาห่างกัน ครั้งละ 30 นาที ไปจนกระทั่งครบระยะเวลา 240 นาที ก่อนการให้อาหารครั้งถัดไป นักวิจัยจะเทอาหารที่เหลืออยู่ในรางอาหารออกทุกครั้งเพื่อชั่งน้ำหนักอาหารที่เหลือ และบันทึกข้อมูลเพื่อนำไปคำนวณหาปริมาณอาหารที่กินทุกๆ 30 นาที และอัตราการกินอาหารสะสม ระหว่างช่วงเวลา 0 ถึง 240 นาที ตลอดระยะเวลาการทดสอบนักวิจัยจะสังเกตการขับถ่ายมูลของไก่แต่ละตัว หากไก่ตัวใดขับถ่ายมูลที่มีลักษณะเป็นก้อนของแข็ง หรือเป็นก้อนปนน้ำเล็กน้อย จะถือว่าไก่ตัวนั้นขับถ่ายมูลได้อย่างสมบูรณ์ แล้วจะทำการหยุดเวลาและบันทึกผล ในกรณีที่ไก่ขับถ่ายมูลที่มีลักษณะเป็นน้ำ หรือกึ่งแข็งกึ่งเหลว ยังไม่นับว่าเป็นการขับถ่ายมูล

### การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

นำข้อมูลสมรรถภาพการเจริญเติบโต อัตราการย่อยได้ ระยะเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของอาหารในท่อทางเดินอาหาร และสัณฐานวิทยาของวิลโลในลำไส้เล็ก ไปวิเคราะห์หาค่าความแปรปรวน (analysis of variance) ตามแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test ที่ระดับ  $P < 0.05$  (Steel, & Torrie, 1980)

### สถานที่ทำการวิจัยและเก็บข้อมูล

- 1) หน่วยวิจัยโภชนศาสตร์และทดสอบอาหารสัตว์ปีก ณ แปลงฝึกงานนิสิตคณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร
- 2) ห้องปฏิบัติการอาหารสัตว์ AG 2315 ภาควิชาวิทยาศาสตร์การเกษตร คณะเกษตรศาสตร์ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร
- 3) ห้องปฏิบัติการอาหารสัตว์ทางกายภาพ AG 2202 ภาควิชาวิทยาศาสตร์การเกษตร คณะเกษตรศาสตร์ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร

## บทที่ 4

### ผลการวิจัยและอภิปรายผลการวิจัย

#### การศึกษาที่ 1: ประเมินระดับของใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำในอาหารไก่เนื้อกึ่งบริสุทธ์ต่อสมรรถภาพการเจริญเติบโต และสัณฐานวิทยาของลำไส้

##### สมรรถภาพการเจริญเติบโต

การประเมินผลของใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำในอาหารไก่เนื้อกึ่งบริสุทธ์ต่อสมรรถภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อช่วงอายุ 10-45 วัน ดังแสดงในตารางที่ 5 พบว่า ที่ช่วงอายุ 10-24 วัน น้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้นเฉลี่ย มีค่าเพิ่มสูงขึ้น และปริมาณอาหารที่กิน มีค่าลดลง ( $P < 0.05$ ) ในกลุ่มที่ได้รับใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำ (insoluble dietary fiber, IDF) ในอาหารไก่เนื้อกึ่งบริสุทธ์ ที่ระดับ 6 (T2), 8 (T3) และ 10 เปอร์เซ็นต์ (T4) ตามลำดับ และมีค่าสูงสุดในกลุ่ม T4 ( $P < 0.05$ ) เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มที่ไม่ได้รับ IDF (T1) จึงมีผลทำให้อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัว มีแนวโน้มดีขึ้นในกลุ่มที่ได้รับ IDF ในระดับที่เพิ่มสูงขึ้น และมีค่าดีที่สุดในกลุ่มที่ T3 และ T4 ( $P < 0.05$ ) ที่ช่วงอายุ 25-45 วัน พบว่า น้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้นเฉลี่ยของกลุ่มที่ได้รับ IDF แต่ละระดับมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ( $P < 0.05$ ) ตามระดับของ IDF ที่เพิ่มสูงขึ้น และมีค่าสูงสุดในกลุ่มที่ได้รับ IDF ที่ระดับ 10 เปอร์เซ็นต์ (T4) เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มที่ได้รับ IDF ที่ระดับ 0 เปอร์เซ็นต์ (T1) แต่อย่างไรก็ตาม ปริมาณอาหารที่กิน และอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัว มีค่าลดลง ตามการเพิ่มขึ้นของ ระดับ IDF ในอาหาร และมีค่าต่ำที่สุด ( $P < 0.05$ ) ในกลุ่มที่ได้รับ IDF ที่ระดับ 10 (T4) และ 8 เปอร์เซ็นต์ (T3) ตามลำดับ ที่ช่วงอายุ 10-45 วัน พบว่า น้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้นเฉลี่ย มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) ในกลุ่มที่ได้รับ IDF ที่ระดับ 6 (T2), 8 (T3) และ 10 เปอร์เซ็นต์ (T4) ตามลำดับ และมีค่าดีที่สุดในกลุ่ม T4 เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มที่ไม่ได้รับ IDF (T1) แต่ในทางกลับกัน ปริมาณอาหารที่กิน มีค่าลดลง ( $P < 0.05$ ) และมีค่าต่ำสุดในกลุ่ม T3 และ T4 แต่อย่างไรก็ตาม อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัวมีค่าดีขึ้น ( $P < 0.05$ ) ตามระดับของ IDF ที่เพิ่มสูงขึ้น และมีค่าดีที่สุดในกลุ่ม T3 และ T4 เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มอื่นๆ

ถึงแม้ว่าอาหารทดลองของแต่ละกลุ่มมีองค์ประกอบทางโภชนา (โปรตีนรวมและพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้) ที่มีค่าทัดเทียมกัน แต่จะเห็นได้ว่าไก่กลุ่มที่ได้รับใยอาหารไม่ละลายน้ำในอาหารไก่เนื้อกึ่งบริสุทธ์ในระดับที่เพิ่มสูงขึ้น มีสมรรถภาพการเจริญเติบโตที่ดีขึ้น ตามลำดับ ทั้งนี้อาจ

มีความเป็นไปได้ว่าการใช้ใยอาหารไม่ละลายน้ำในระดับที่เหมาะสม เป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ช่วยสนับสนุน และเพิ่มประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อได้ เพราะสูตรอาหารสัตว์ที่ดี นอกจากจะต้อง ประกอบไปด้วยวัตถุดิบที่มีคุณภาพและมีองค์ประกอบทางเคมีที่เหมาะสมแล้ว ยังจำเป็นต้อง ตระหนักถึงปัจจัยสนับสนุนอื่นๆที่เกี่ยวข้องกับการกระตุ้นการทำงานในเชิงสรีระวิทยาของระบบ ทางเดินอาหารเพื่อให้เกิดกระบวนการย่อยและดูดซึมสารอาหารที่มีประสิทธิภาพ โดยผลการทดลอง ที่สามารถยืนยันข้อสันนิษฐานดังกล่าวนี้ คือ อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัวทุกช่วงอายุ มีค่าที่ เพิ่มขึ้น ( $P < 0.05$ ) ในกลุ่มที่ได้รับ IDF ในอาหารที่เพิ่มขึ้น คล้ายคลึงกับ การทดลองของ Kermanshahi et al. (2018) ที่ใช้อาหารกึ่งบริสุทธิ์เลี้ยงไก่เนื้อสายพันธุ์ รอส 308 ที่อายุ 0-14 วัน พบว่า อัตราการกิน อาหารเฉลี่ยมีค่าลดลง โดยไม่ส่งผลกระทบต่ออัตราการเจริญเติบโต เช่นเดียวกับการเสริมลิกโน เซลลูโลสจากฝักถั่วลิสง ที่ระดับ 7.5 เปอร์เซ็นต์ ในสูตรอาหารไก่เนื้อ (broiler ration) ส่งผลทำให้ อัตราการกินอาหารลดลง แต่กลับส่งผลเชิงบวกต่อสมรรถภาพการผลิตในระยะเจริญเติบโต (Sarbaz et al., 2018) ในขณะที่ Jiménez-Moreno et al. (2011) กล่าวว่า การใช้ใยอาหารไม่ละลายน้ำจาก เปลือกถั่วที่ระดับ 5 เปอร์เซ็นต์ สามารถช่วยเพิ่มน้ำหนักตัวได้ถึง 15 เปอร์เซ็นต์แต่หากใช้ไปจนถึงใน ระดับ 7.5 เปอร์เซ็นต์ จะเกิดผลกระทบในเชิงลบต่อสมรรถภาพการผลิต ส่วนการใช้ใยอาหารไม่ ละลายน้ำจากแกลบข้าวโอ๊ตในอาหารไก่เนื้อที่ระดับ 10 เปอร์เซ็นต์ สามารถช่วยกระตุ้นการพัฒนา กระเพาะและช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพการเจริญเติบโตได้ดีขึ้นได้ (Hetland et al., 2003) เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับ Incharoen (2013) ที่ได้ทำการทดลองโดยใช้ใยอาหารไม่ละลายน้ำจาก แกลบข้าวในอาหารไก่เนื้อที่ระดับ 100 กรัม/กิโลกรัม พบว่า สามารถช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพการ ผลิตได้ โดยปราศจากผลเสียใดๆ ต่อคุณภาพซาก อย่างไรก็ตามการใช้ใยอาหารไม่ละลายน้ำในอาหาร ไก่ มีบทบาทในการลดค่า pH ในกระเพาะ ระยะเวลาการเก็บรักษาอาหารในระบบทางเดินอาหาร การกระตุ้นการทำงานของกระเพาะและลำไส้ในการผลิตกรดไขมันสายสั้น การหลั่งของเอนไซม์ และ ปรับปรุงการเข้าถึงของโภชนาในอาหาร นอกจากนี้ยังมีงานวิจัยชี้ให้เห็นว่าระดับที่แตกต่างกันของ ใยอาหารจะส่งผลดีต่อระบบทางเดินอาหารและสมรรถภาพการผลิตของไก่เนื้อ (Kheravii et al., 2018)

ตาราง 5 ผลของใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำในอาหารไก่เนื้อถึงประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อ ที่ช่วงอายุ 10-45 วัน

| Item                     | T1                    | T2                     | T3                     | T4                     | Pooled-SEM | P-value |
|--------------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------|---------|
| Initial body weight, g/b | 224.23                | 224.14                 | 224.11                 | 223.98                 | 0.153      | 0.956   |
| <b>Weight gain, g/b</b>  |                       |                        |                        |                        |            |         |
| 10-24 day old            | 566.53 <sup>b</sup>   | 559.19 <sup>b</sup>    | 584.29 <sup>ab</sup>   | 605.73 <sup>a</sup>    | 6.346      | 0.036   |
| 25-45 day old            | 1,304.25 <sup>c</sup> | 1,379.43 <sup>bc</sup> | 1,416.85 <sup>ab</sup> | 1,478.05 <sup>a</sup>  | 17.352     | 0.001   |
| 10-45 day old            | 1,870.78 <sup>c</sup> | 1,938.61 <sup>bc</sup> | 2,001.14 <sup>ab</sup> | 2,083.78 <sup>a</sup>  | 21.536     | 0.001   |
| <b>Feed intake, g/b</b>  |                       |                        |                        |                        |            |         |
| 10-24 day old            | 1,275.50 <sup>a</sup> | 1,157.50 <sup>ab</sup> | 1,013.25 <sup>c</sup>  | 1,051.75 <sup>bc</sup> | 28.138     | 0.001   |
| 25-45 day old            | 4,014.50 <sup>a</sup> | 3,565.25 <sup>b</sup>  | 3,004.25 <sup>c</sup>  | 3,220.75 <sup>c</sup>  | 78.424     | <0.001  |
| 10-45 day old            | 5,290.00 <sup>a</sup> | 4,722.75 <sup>b</sup>  | 4,017.50 <sup>c</sup>  | 4,272.50 <sup>c</sup>  | 101.171    | <0.001  |
| <b>FCR</b>               |                       |                        |                        |                        |            |         |
| 10-24 day old            | 2.26 <sup>a</sup>     | 2.08 <sup>a</sup>      | 1.74 <sup>b</sup>      | 1.74 <sup>b</sup>      | 0.060      | 0.001   |
| 25-45 day old            | 3.08 <sup>a</sup>     | 2.59 <sup>b</sup>      | 2.13 <sup>c</sup>      | 2.18 <sup>c</sup>      | 0.077      | <0.001  |
| 10-45 day old            | 2.83 <sup>a</sup>     | 2.44 <sup>b</sup>      | 2.02 <sup>c</sup>      | 2.05 <sup>c</sup>      | 0.068      | <0.001  |

**Note:** T1 = 0% IDF in semi-purified diets; T2 = 6% IDF in semi-purified diets; T3 = 8% IDF in semi-purified diets; T4 = 10% IDF in semi-purified diets; FCR = Feed conversion ratio.

<sup>a-c</sup>Different superscripts within rows indicate significant differences (P<0.05).

### สัณฐานวิทยาของลำไส้เล็ก

การประเมินผลของใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำในอาหารไก่เนื้อถึงประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยาของลำไส้เล็กในไก่เนื้อที่อายุ 45 วัน ดังแสดงในตารางที่ 6 พบว่า บริเวณลำไส้เล็กส่วนต้น (duodenum) เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มที่ไม่ได้รับ IDF (T1) ความสูงของวิลไล พื้นที่ของวิลไล และอัตราส่วนความสูงของวิลไลต่อความลึกของคริปต์ มีค่าเพิ่มขึ้น (P<0.05) ในกลุ่มที่ได้รับ IDF ในอาหารไก่เนื้อถึงประสิทธิภาพที่ระดับ 6 (T2), 8 (T3) และ 10 เปอร์เซ็นต์ (T4) ตามลำดับ และมีค่าสูงสุดในกลุ่ม T4 (P<0.05) ในขณะที่ความลึกของคริปต์ มีค่าลดลง (P<0.05) ตามการเพิ่มขึ้นของระดับ IDF ในอาหาร และมีค่าต่ำที่สุด (P<0.05) ในกลุ่มที่ได้รับ IDF ที่ระดับ 8 (T3) และ 10 เปอร์เซ็นต์ (T4) บริเวณลำไส้เล็กส่วนกลาง (jejunum) พบว่า ความสูงของวิลไล และ



อัตราส่วนความสูงของวิลโล่ต่อความลึกของคริปต์ มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) ในกลุ่มที่ได้รับ IDF ในอาหารไก่เนื้อที่ระดับ 6 (T2), 8 (T3) และ 10 เปอร์เซ็นต์ (T4) ตามลำดับ และมีค่าสูงที่สุดในกลุ่ม T3 และ T4 ในขณะที่ความลึกของคริปต์ มีแนวโน้มลดลง ( $P < 0.05$ ) ตามการเพิ่มขึ้นของ ระดับ IDF ในอาหาร อย่างไรก็ตามพื้นที่ของวิลโล่มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $P > 0.05$ ) และบริเวณลำไส้เล็กส่วนปลาย (ileum) พบว่า ความสูงของวิลโล่ และอัตราส่วนความสูงของวิลโล่ต่อความลึกของคริปต์ มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ( $P < 0.05$ ) ในกลุ่มที่ได้รับ IDF ในระดับที่เพิ่มขึ้น และมีค่าสูงสุดในกลุ่มที่ได้รับ IDF ที่ระดับ 8 (T3) และ 10 เปอร์เซ็นต์ (T4) อย่างไรก็ตามพื้นที่ของวิลโล่และความลึกของคริปต์ทุกกลุ่มการทดลองมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $P > 0.05$ )

จากผลการทดลองเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับ Rohe et al. (2019) รายงานว่า การใช้ใยอาหารไม่ละลายน้ำจากลิกโนเซลลูโลสในอาหารไก่ไข่ที่ระดับ 10 เปอร์เซ็นต์ สามารถช่วยเพิ่มความยาวของวิลโล่ อัตราส่วนความยาวของวิลโล่ต่อความลึกของคริปต์ และพื้นที่ของวิลโล่ให้มีค่าที่ดีขึ้น ซึ่งมีความคล้ายคลึงกับการเติมใยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำในอาหารไก่เนื้อที่ระดับ 0.75 เปอร์เซ็นต์ พบว่า ความยาวของวิลโล่ และอัตราส่วนความยาวของวิลโล่ต่อความลึกของคริปต์ มีค่าเพิ่มขึ้น (Sarikhani et al., 2010) อย่างไรก็ตามจากผลการศึกษาของการเปลี่ยนแปลงสัณฐานวิทยาของลำไส้เล็กทั้ง 3 ส่วน เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับข้อมูลสมรรถภาพการผลิต ซึ่งพบว่า ถึงแม้ว่าปริมาณอาหารที่กินของไก่ที่ได้รับใยอาหารไม่ละลายน้ำมีค่าที่ลดลง แต่น้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้นกลับมีค่าที่สูงขึ้น จึงส่งผลให้อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัวมีค่าที่ดีขึ้นตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับ Incharoen (2010) ที่รายงานว่า ความสูงและพื้นที่ของวิลโล่ที่มีค่าเพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซึมสารอาหาร และกระตุ้นอัตราการเจริญเติบโตได้มากที่สุด จากที่กล่าวมาข้างต้นคล้ายคลึงกับรายงานของ Yamauchi, & Isshiki, (1991); Yu, & Chiou, (1996) พบว่า ระดับใยอาหารที่เพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ไก่เนื้อระยะแรกมีการพัฒนาโครงสร้างของวิลโล่ในระบบทางเดินอาหาร ทำให้ช่วยเพิ่มพื้นที่ในการดูดซึมของสารอาหารและสมรรถภาพการเจริญเติบโตดีขึ้น

ตาราง 6 ผลของใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำในอาหารไก่เนื้อที่บริสุทธ์ต่อการเปลี่ยนแปลงทาง  
สัณฐานวิทยาของลำไส้เล็กในไก่เนื้อ ที่อายุ 45 วัน

| Item                            | T1                    | T2                     | T3                    | T4                    | Pooled-SEM | P-value |
|---------------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|------------|---------|
| <b>Duodenum</b>                 |                       |                        |                       |                       |            |         |
| Villus height ( $\mu\text{m}$ ) | 1,924.44 <sup>c</sup> | 2,145.00 <sup>b</sup>  | 2,212.16 <sup>b</sup> | 2,354.59 <sup>a</sup> | 41.388     | <0.001  |
| Villus area ( $\text{mm}^2$ )   | 274.83 <sup>c</sup>   | 331.25 <sup>b</sup>    | 338.60 <sup>b</sup>   | 391.23 <sup>a</sup>   | 12.591     | 0.001   |
| Crypt depth ( $\mu\text{m}$ )   | 144.30 <sup>a</sup>   | 145.91 <sup>a</sup>    | 142.06 <sup>ab</sup>  | 136.69 <sup>b</sup>   | 1.311      | 0.048   |
| VH:CD ratio                     | 13.35 <sup>c</sup>    | 14.73 <sup>b</sup>     | 15.57 <sup>b</sup>    | 17.24 <sup>a</sup>    | 0.391      | <0.001  |
| <b>Jejunum</b>                  |                       |                        |                       |                       |            |         |
| Villus height ( $\mu\text{m}$ ) | 1,425.78 <sup>b</sup> | 1,493.62 <sup>ab</sup> | 1,624.44 <sup>a</sup> | 1,623.21 <sup>a</sup> | 28.635     | 0.011   |
| Villus area ( $\text{mm}^2$ )   | 208.17                | 217.42                 | 224.94                | 224.90                | 8.761      | 0.931   |
| Crypt depth ( $\mu\text{m}$ )   | 131.44 <sup>a</sup>   | 125.81 <sup>b</sup>    | 125.71 <sup>b</sup>   | 124.11 <sup>b</sup>   | 0.855      | 0.002   |
| VH:CD ratio                     | 10.87 <sup>c</sup>    | 11.89 <sup>b</sup>     | 12.93 <sup>a</sup>    | 13.07 <sup>a</sup>    | 0.262      | <0.001  |
| <b>Ileum</b>                    |                       |                        |                       |                       |            |         |
| Villus height ( $\mu\text{m}$ ) | 978.49 <sup>c</sup>   | 1,044.37 <sup>c</sup>  | 1,120.86 <sup>b</sup> | 1,206.72 <sup>a</sup> | 24.595     | <0.001  |
| Villus area ( $\text{mm}^2$ )   | 131.48                | 129.54                 | 148.74                | 153.50                | 6.093      | 0.435   |
| Crypt depth ( $\mu\text{m}$ )   | 127.38                | 127.55                 | 123.68                | 122.32                | 0.901      | 0.073   |
| VH:CD ratio                     | 7.69 <sup>c</sup>     | 8.19 <sup>c</sup>      | 9.08 <sup>b</sup>     | 9.87 <sup>a</sup>     | 0.231      | <0.001  |

**Note:** T1 = 0% IDF in semi-purified diets; T2 = 6% IDF in semi-purified diets; T3 = 8% IDF in semi-purified diets; T4 = 10% IDF in semi-purified diets; VH:CD = Villus height to crypt depth ratio.

<sup>a-c</sup>Different superscripts within rows indicate significant differences ( $P < 0.05$ ).

## การศึกษาที่ 2: ศึกษาผลของระดับใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำในสูตรอาหารไก่เนื้อต่อสมรรถภาพการผลิต อัตราการย่อยได้ ระยะเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของอาหารในท่อทางเดินอาหารและสัญญาณวิทยาของลำไส้

### สมรรถภาพการเจริญเติบโต

ผลของระดับใยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำที่แตกต่างกันในสูตรอาหารต่อสมรรถภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อ ที่ช่วงอายุ 10-45 วัน ดังแสดงในตารางที่ 7 พบว่า ที่ช่วงอายุ 10-24 วัน น้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้นเฉลี่ย และอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ มีแนวโน้มดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) ในกลุ่มที่ได้รับ IDF ที่ระดับ 9 (T1), 10 (T2), 11 (T3) และ 12 เปอร์เซ็นต์ (T4) ตามลำดับ และมีค่าดีที่สุดในกลุ่ม T4 แต่อย่างไรก็ตามปริมาณอาหารที่กิน ของทุกกลุ่มการทดลองมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $P > 0.05$ ) ที่ช่วงอายุ 25-45 วัน พบว่า น้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้นเฉลี่ย มีค่าเพิ่มขึ้น ( $P < 0.05$ ) ในกลุ่มที่ได้รับ IDF ในระดับที่เพิ่มขึ้น และมีค่าสูงสุดในกลุ่มที่ได้รับ IDF ที่ระดับ 12 เปอร์เซ็นต์ (T4) แต่ในทางกลับกัน ปริมาณอาหารที่กิน มีค่าลดลง ( $P < 0.05$ ) ตามการเพิ่มขึ้นของระดับ IDF ในอาหาร และมีค่าต่ำที่สุด ( $P < 0.05$ ) ในกลุ่มที่ได้รับ IDF ที่ระดับ 12 เปอร์เซ็นต์ (T4) แต่อย่างไรก็ตามอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัวมีค่าที่ดีขึ้น ( $P < 0.05$ ) ตามระดับของ IDF ที่เพิ่มขึ้น และมีค่าดีที่สุดในกลุ่ม T3 และ T4 เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มอื่นๆ ที่ช่วงอายุ 10-45 วัน ตลอดระยะเวลาการทดลอง พบว่า น้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น และอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัว มีแนวโน้มดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) ตามระดับของ IDF ที่เพิ่มสูงขึ้น ระดับ 9 (T1), 10 (T2), 11 (T3) และ 12 เปอร์เซ็นต์ (T4) ตามลำดับ แต่ในทางตรงกันข้ามปริมาณอาหารที่กิน มีค่าลดลง ( $P < 0.05$ )

จากผลการทดลองเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับ Adibmoradi et al. (2016) ที่ได้ทำการศึกษาสูตรอาหารไก่เนื้อที่ประกอบไปด้วยใยอาหารจากแกลบข้าวและเปลือกข้าวบาร์เลย์ ที่ระดับ 12 เปอร์เซ็นต์ พบว่า ใยอาหารสามารถช่วยกระตุ้นอัตราการเจริญเติบโต การย่อยได้ของโปรตีน และการพัฒนาโครงสร้างของวิลโล นอกจากนั้นแล้ว การใช้ใยอาหารไม่ละลายน้ำจากเปลือกถั่ว ที่ระดับ 5 เปอร์เซ็นต์ ยังสามารถช่วยเพิ่มน้ำหนักตัวได้ถึง 15 เปอร์เซ็นต์ แต่หากใช้ไปจนถึงระดับ 7.5 เปอร์เซ็นต์ จะส่งผลกระทบต่อสมรรถภาพการผลิต (Jiménez-Moreno et al., 2011) สอดคล้องกับงานวิจัย ชัตติยา ล้านแปงและทศพร อินเจริญ (2563) บันทึกไว้ว่า หากสูตรอาหารไก่เนื้อประกอบไปด้วยใยอาหารไม่ละลายน้ำประเภทลิกโนเซลลูโลสในระดับที่เหมาะสม อาจเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่จะช่วยสนับสนุนให้เกิดจากตอบสนองทางสรีรวิทยาของอวัยวะในระบบทางเดินอาหาร เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยและดูดซึมโภชนะที่มีอยู่ในอาหารที่สัตว์กินเข้าไป

ตาราง 7 ผลของระดับใยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำที่แตกต่างกันในสูตรอาหารต่อสมรรถภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อ ที่ช่วงอายุ 10-45 วัน

| Item                     | T1                     | T2                    | T3                     | T4                    | Pooled-SEM | P-value |
|--------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|------------|---------|
| Initial body weight, g/b | 198.34                 | 198.15                | 197.98                 | 197.71                | 0.438      | 0.968   |
| <b>Weight gain, g/b</b>  |                        |                       |                        |                       |            |         |
| 10-24 day old            | 214.50 <sup>d</sup>    | 263.01 <sup>c</sup>   | 334.78 <sup>b</sup>    | 447.59 <sup>a</sup>   | 16.242     | <0.001  |
| 25-45 day old            | 671.91 <sup>d</sup>    | 770.56 <sup>c</sup>   | 950.49 <sup>b</sup>    | 1,081.47 <sup>a</sup> | 31.959     | <0.001  |
| 10-45 day old            | 886.41 <sup>d</sup>    | 1,033.56 <sup>c</sup> | 1,285.26 <sup>b</sup>  | 1,529.06 <sup>a</sup> | 47.231     | <0.001  |
| <b>Feed intake, g/b</b>  |                        |                       |                        |                       |            |         |
| 10-24 day old            | 870.50                 | 909.06                | 823.44                 | 813.75                | 15.634     | 0.106   |
| 25-45 day old            | 2,994.91 <sup>ab</sup> | 3,270.00 <sup>a</sup> | 2,995.63 <sup>ab</sup> | 2,688.00 <sup>b</sup> | 65.446     | 0.012   |
| 10-45 day old            | 3,865.41 <sup>ab</sup> | 4,179.06 <sup>a</sup> | 3,819.06 <sup>ab</sup> | 3,501.75 <sup>b</sup> | 73.934     | 0.008   |
| <b>FCR</b>               |                        |                       |                        |                       |            |         |
| 10-24 day old            | 4.08 <sup>a</sup>      | 3.46 <sup>b</sup>     | 2.46 <sup>c</sup>      | 1.82 <sup>d</sup>     | 0.165      | <0.001  |
| 25-45 day old            | 4.53 <sup>a</sup>      | 4.25 <sup>a</sup>     | 3.21 <sup>b</sup>      | 2.50 <sup>c</sup>     | 0.177      | <0.001  |
| 10-45 day old            | 4.40 <sup>a</sup>      | 4.05 <sup>a</sup>     | 3.00 <sup>b</sup>      | 2.30 <sup>c</sup>     | 0.167      | <0.001  |

**Note:** T1 = 9% IDF in broiler ration; T2 = 10% IDF in broiler ration; T3 = 11% IDF in broiler ration; T4 = 12% IDF in broiler ration; FCR = Feed conversion ratio.

<sup>a-c</sup>Different superscripts within rows indicate significant differences (P<0.05).

แต่ในทางตรงกันข้าม ทศพร อินเจริญ และคณะ (2562) รายงานว่า อาหารไก่เนื้อ ช่วงอายุ 10-24 วัน ที่มีใยอาหารละลายน้ำจากกัวกัมส์ (guar gum) เป็นองค์ประกอบ ตั้งแต่ระดับ 5-7 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลกระทบเชิงลบต่อน้ำหนักตัว และอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัว เช่นเดียวกับการเสริมกัวกัมส์ ที่ระดับ 0.5 เปอร์เซ็นต์ ในอาหารพื้นฐาน ส่งผลเสียต่อปริมาณการหลั่งและความเข้มข้นของกรดเกลือ รวมไปถึงอัตราการย่อยได้ของไขมัน น้ำหนักตัว และอัตราการแลกเนื้อของไก่เนื้ออายุ 7-21 วัน (Maisonier et al., 2003) ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกัน งานวิจัยหลายชิ้นที่บันทึกว่า ระดับใยอาหารชนิดละลายน้ำในอาหารไก่ที่เพิ่มสูงขึ้นมีความสัมพันธ์กับสมรรถภาพการเจริญเติบโตและอัตราการย่อยได้ที่ลดลง (Maisonier et al., 2001; Carré et al., 2002) ซึ่งอาจมีความสัมพันธ์กับความหนืดจากใยอาหารชนิดละลายน้ำที่เพิ่มสูงขึ้น จึงส่งผลให้ในระบบทางเดิน

อาหาร (gastrointestinal system) มีอัตราการไหลของอาหาร (feed passage rate) ภายในท่อทางเดินอาหารข้าง สัตว์จึงลดอัตราการกินอาหาร และส่งผลให้อัตราการเจริญเติบโตลดลงตามไปด้วย (Shakouri et al., 2006)

### สัณฐานวิทยาของลำไส้เล็ก

เมื่อสิ้นสุดการทดลอง การประเมินผลของระดับใยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำที่แตกต่างกันในสูตรอาหารต่อการเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยาของลำไส้เล็กทั้ง 3 ส่วน ในไก่เนื้อที่อายุ 45 วัน ดังแสดงในตารางที่ 8 พบว่า บริเวณลำไส้เล็กส่วนต้น (duodenum) ของไก่กลุ่มที่ได้รับ IDF ที่ระดับ 9 (T1), 10 (T2), 11 (T3) และ 12 เปอร์เซ็นต์ (T4) ตามลำดับ ส่งผลให้ความสูงของวิลไล และอัตราส่วนความสูงของวิลไลต่อความลึกของคริปต์ มีค่าที่เพิ่มสูงขึ้น ( $P < 0.05$ ) ในขณะที่ความลึกของคริปต์ มีค่าลดลง ( $P < 0.05$ ) ตามการเพิ่มขึ้นของ ระดับ IDF แต่อย่างไรก็ตามพื้นที่ของวิลไลมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $P > 0.05$ ) บริเวณลำไส้เล็กส่วนกลาง (jejunum) พบว่า ความสูงของวิลไล พื้นที่ของวิลไล และอัตราส่วนความสูงของวิลไลต่อความลึกของคริปต์ มีค่าที่เพิ่มสูงขึ้น ( $P < 0.05$ ) ในกลุ่มที่ได้รับ IDF ที่เพิ่มขึ้น และมีค่าที่สูงสุดในกลุ่มที่ได้รับ IDF ที่ระดับ 12 เปอร์เซ็นต์ (T4) เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มที่ได้รับ IDF 9 เปอร์เซ็นต์ (T1) แต่อย่างไรก็ตามความลึกของคริปต์มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $P > 0.05$ ) และบริเวณลำไส้เล็กส่วนปลาย (ileum) พบว่า ความสูงของวิลไล และอัตราส่วนความสูงของวิลไลต่อความลึกของคริปต์ มีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้น ( $P < 0.05$ ) ตามระดับของ IDF ที่เพิ่มสูงขึ้น ที่ระดับ 9 (T1), 10 (T2), 11 (T3) และ 12 เปอร์เซ็นต์ (T4) ตามลำดับ และมีค่ามากที่สุดในกลุ่ม T4 แต่อย่างไรก็ตามพื้นที่ของวิลไล และความลึกของคริปต์ของทุกกลุ่มการทดลองมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $P > 0.05$ )

จากผลการทดลองเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการศึกษาที่ 1 ที่พบว่าหากในอาหารไก่เนื้อ มีระดับของ IDF ที่เพิ่มขึ้นจะมีส่วนช่วยในการกระตุ้นการพัฒนาสัณฐานวิทยาของลำไส้เล็ก ซึ่งมีความสอดคล้องกับรายงานของ Shang et al. (2020) ที่ได้ทำการศึกษาการใช้รำข้าวสาลีในสูตรอาหารไก่เนื้อ และมี IDF เป็นองค์ประกอบ 124.3-128.7 กรัม/กิโลกรัมอาหาร พบว่า ปริมาณเอนไซม์อะไมเลส ที่หลังบริเวณลำไส้เล็กส่วนกลาง น้ำหนักกระเพาะบด และความสูงของวิลไล มีค่าเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม แต่ในทางกลับกันหากในสูตรอาหารมีองค์ประกอบของ SDF ในระดับที่เพิ่มสูงขึ้นอาจส่งผลกระทบต่อสัณฐานวิทยาของลำไส้ ซึ่งคล้ายคลึงกับงานวิจัยของ Saki et al. (2011) พบว่า อาหารที่มีระดับเพคตินและเซลลูโลสในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น มีผลทำให้ความสูงของวิลไล พื้นที่ผิวของวิลไล และอัตราส่วนความสูงของวิลไลต่อความลึกของคริปต์มีค่าลดลง ซึ่งผลของการเปลี่ยนแปลงสัณฐานวิทยาของลำไส้เล็กที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับข้อมูลสมรรถภาพการผลิต ที่พบว่า ถึงแม้ปริมาณการกินอาหารของไก่กลุ่มที่ได้รับระดับของ IDF ที่เพิ่ม



สูงขึ้น จะมีค่าที่ลดลง แต่น้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้นกลับมีค่าเพิ่มสูงขึ้นจึงส่งผลให้อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัวมีค่าดีขึ้นตามไปด้วย ซึ่งความยาวของวิลโลสามารถช่วยบ่งบอกถึงความสามารถในการดูดซึมของสารอาหารในลำไส้ได้ดีขึ้น (Caspary, 1992) นอกจากนั้นความสูงของวิลโลอาจมีความสัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของเซลล์ไมโทซิส ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการดูดซึมสารอาหารของวิลโล สอดคล้องกับ Incharoen (2013) ที่รายงานว่า ความสูงและพื้นที่ผิวของวิลโลที่มีค่าเพิ่มขึ้น สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซึมสารอาหาร และกระตุ้นอัตราการเจริญเติบโตได้ในที่สุด

ตาราง 8 ผลของระดับใยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำที่แตกต่างกันในสูตรอาหารต่อการเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยาของลำไส้เล็กของไก่เนื้อ ที่อายุ 45 วัน

| Item                            | T1                    | T2                     | T3                    | T4                    | Pooled-SEM | P-value |
|---------------------------------|-----------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------|------------|---------|
| <b>Duodenum</b>                 |                       |                        |                       |                       |            |         |
| Villus height ( $\mu\text{m}$ ) | 1,944.68 <sup>b</sup> | 2,035.38 <sup>b</sup>  | 2,229.15 <sup>a</sup> | 2,327.79 <sup>a</sup> | 41.579     | <0.001  |
| Villus area ( $\text{mm}^2$ )   | 290.01                | 306.12                 | 301.48                | 314.71                | 11.377     | 0.910   |
| Crypt depth ( $\mu\text{m}$ )   | 214.29 <sup>a</sup>   | 188.13 <sup>b</sup>    | 159.85 <sup>c</sup>   | 153.26 <sup>c</sup>   | 6.164      | <0.001  |
| VH:CD                           | 9.15 <sup>c</sup>     | 10.93 <sup>b</sup>     | 14.02 <sup>a</sup>    | 15.21 <sup>a</sup>    | 0.597      | <0.001  |
| <b>Jejunum</b>                  |                       |                        |                       |                       |            |         |
| Villus height ( $\mu\text{m}$ ) | 1,272.51 <sup>c</sup> | 1,317.77 <sup>bc</sup> | 1,361.83 <sup>b</sup> | 1,569.67 <sup>a</sup> | 28.192     | <0.001  |
| Villus area ( $\text{mm}^2$ )   | 141.00 <sup>b</sup>   | 146.13 <sup>b</sup>    | 152.48 <sup>b</sup>   | 190.36 <sup>a</sup>   | 5.163      | <0.001  |
| Crypt depth ( $\mu\text{m}$ )   | 130.77                | 125.92                 | 124.48                | 122.09                | 1.495      | 0.216   |
| VH:CD                           | 9.76 <sup>c</sup>     | 10.48 <sup>bc</sup>    | 10.99 <sup>b</sup>    | 12.87 <sup>a</sup>    | 0.286      | <0.001  |
| <b>Ileum</b>                    |                       |                        |                       |                       |            |         |
| Villus height ( $\mu\text{m}$ ) | 743.60 <sup>b</sup>   | 753.55 <sup>b</sup>    | 820.29 <sup>a</sup>   | 868.36 <sup>a</sup>   | 14.503     | 0.001   |
| Villus area ( $\text{mm}^2$ )   | 90.87                 | 86.33                  | 103.65                | 99.07                 | 3.111      | 0.193   |
| Crypt depth ( $\mu\text{m}$ )   | 116.68                | 116.33                 | 117.55                | 117.74                | 1.144      | 0.973   |
| VH:CD                           | 6.41 <sup>b</sup>     | 6.50 <sup>b</sup>      | 7.09 <sup>ab</sup>    | 7.44 <sup>a</sup>     | 0.157      | 0.048   |

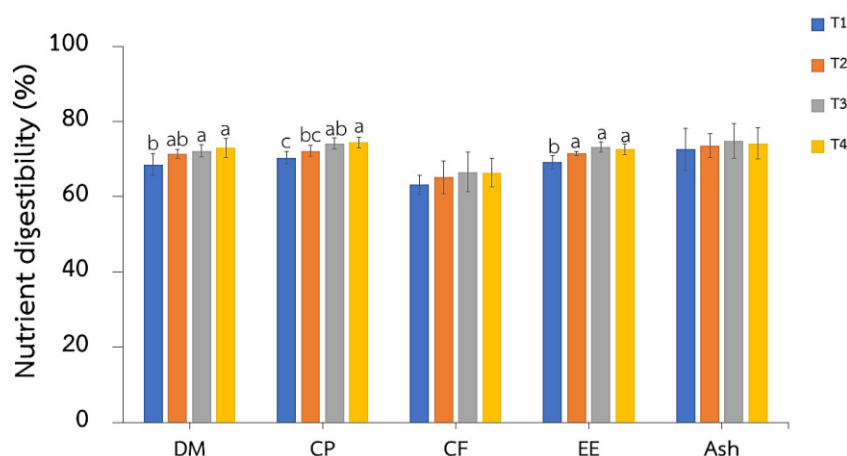
**Note:** T1 = 9% IDF in broiler ration; T2 = 10% IDF in broiler ration; T3 = 11% IDF in broiler ration; T4 = 12% IDF in broiler ration; VH:CD = Villus height to crypt depth ratio.

<sup>a-c</sup>Different superscripts within rows indicate significant differences ( $P < 0.05$ ).

### อัตราการย่อยได้ของโภชนะ

ผลของระดับใยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำที่แตกต่างกันในสูตรอาหารไก่เนื้อต่อค่าสัมประสิทธิ์การย่อยได้ที่ปรากฏ (ภาพ 13) พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์การย่อยได้ที่ปรากฏของวัตถุดิบแห้ง โปรตีนหยาบ และไขมัน มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ( $P < 0.05$ ) ตามระดับของ IDF ที่เพิ่มขึ้น ในกลุ่ม T2, T3 และ T4 ในขณะที่ค่าสัมประสิทธิ์การย่อยได้ที่ปรากฏของเยื่อใยหยาบ และเถ้า มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ( $P > 0.05$ ) ซึ่งคล้ายคลึงกับ Shang et al. (2020) ที่ได้ทำการศึกษาค่าการใช้ธัญพืชในสูตรอาหารไก่เนื้อ และมี IDF เป็นองค์ประกอบ 124.3-128.7 กรัม/กิโลกรัมอาหาร พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์วัตถุดิบแห้ง อินทรีย์วัตถุ โปรตีนหยาบ และพลังงานรวม (gross energy, GE) มีค่าเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับรายงานวิจัยของ Adibmoradi et al. (2016) ได้ทำการวิจัยเกี่ยวกับการใช้ใยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำจาก แกลบข้าวและแกลบข้าวบาร์เลย์ พบว่า แกลบข้าวสามารถช่วยเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์การย่อยได้ที่ โปรตีนหยาบที่เพิ่มขึ้นได้ดีกว่าการใช้แกลบข้าวบาร์เลย์ แต่กลับไม่ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การย่อยได้ที่ของไขมัน

จากผลจากการศึกษาจะเห็นได้ว่า หากในสูตรอาหารมีองค์ประกอบของใยอาหารไม่ละลายน้ำในระดับที่เหมาะสม มีอิทธิพลต่อการย่อยได้ที่ของโปรตีนหยาบ ทั้งนี้อาจมีความเป็นไปได้ว่า ใยอาหารไม่ละลายน้ำมีส่วนช่วยในการกระตุ้นการพัฒนาระบบทางเดินอาหาร และการหลั่งของกรดไฮโดรคลอริกที่เพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้กิจกรรมของเอนไซม์เปปซินมีค่าที่ดีขึ้น (Gabriel et al., 2003) เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับ Hetland et al. (2005) รายงานว่าหากใช้เยื่อใยในอาหารไก่ในระดับที่เหมาะสม จะมีส่วนช่วยเพิ่มปริมาณการหลั่งกรดไฮโดรคลอริก กรดน้ำดีและเอนไซม์ต่างๆ นอกจากนั้นแล้ว การใช้ใยอาหารไม่ละลายน้ำจากแกลบข้าวโอ๊ต สามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของกระเพาะบด ซึ่งส่งผลดีต่ออัตราการย่อยได้และเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตของไก่เนื้อให้ดีขึ้น (Jiménez-Moreno et al., 2010) แต่ในทางกลับกัน หากในอาหารไก่เนื้อมีองค์ประกอบของใยอาหารละลายน้ำในระดับที่สูง อาจส่งผลกระทบต่อค่าสัมประสิทธิ์การย่อยได้ที่ปรากฏ จากรายงานการวิจัยของ Silva et al. (2013) ที่ได้ทำการศึกษาค่าใช้เพคตินที่ได้จากการสกัดผิวเปลือกส้ม ที่ระดับ 5 เปอร์เซ็นต์ มีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การย่อยได้ที่ของวัตถุดิบแห้งและโปรตีนหยาบมีค่าลดลง สอดคล้องกับ Maisonnier et al. (2003) ได้ทำการศึกษาค่าใช้กากมันสำปะหลังในอาหารไก่เนื้อ ส่งผลให้อัตราการย่อยได้ที่ของไขมันมีค่าลดลง อาจเป็นผลมาจากกากมันสำปะหลังทำให้ประสิทธิภาพในการหลั่งกรดเกลือหรือกรดไฮโดรคลอริกลดลง จึงมีความเป็นไปได้ว่าใยอาหารละลายน้ำเป็นสาเหตุที่สำคัญในการลดอัตราการย่อยได้ที่ เนื่องจากคุณสมบัติของในการอุ้มน้ำสูงและการเกิดเจลในระบบท่อทางเดินอาหาร ทำให้ไปขัดขวางการใช้ประโยชน์ได้ของโภชนะ



ภาพ 13 ค่าสัมประสิทธิ์การย่อยได้ปรากฏของไก่เนื้อที่ได้รับใยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำแต่ละระดับในสูตรอาหาร

**Note:** T1 = 9% IDF in broiler ration; T2 = 10% IDF in broiler ration; T3 = 11% IDF in broiler ration; T4 = 12% IDF in broiler ration; DM = Dry matter; CP = Crude protein; CF = Crude fiber; EE = Ether extract. Bars indicate standard deviation for each plot (n = 5).

<sup>a,b,c</sup>Each bar with a different letters denotes a significant difference ( $P < 0.05$ ).

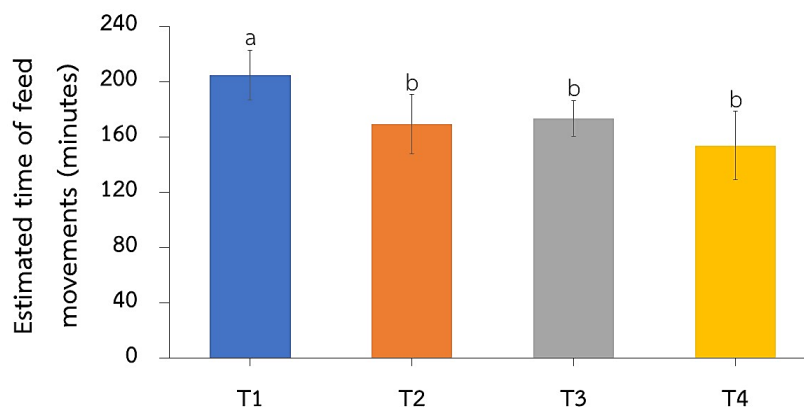
#### ระยะเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของอาหารในท่อทางเดินอาหาร

ระยะเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของอาหารในท่อทางเดินอาหารหลังจากได้รับอาหารจนกระทั่งขับถ่ายมูลออกมาของไก่เนื้อที่อายุ 24 วัน พบว่า ในกลุ่มที่ได้รับ IDF ที่ระดับ 10 (T2), 11 (T3) และ 12 เปอร์เซ็นต์ (T4) ตามลำดับ มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) ตามระดับของ IDF ที่เพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มที่ได้รับ IDF ที่ระดับ 9 เปอร์เซ็นต์ (T1) ดังแสดงในภาพ 14 อย่างไรก็ตาม จากผลการประเมินระยะเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของอาหาร พบว่า มีความสอดคล้องกับปริมาณการกินอาหารเฉลี่ยสะสมตลอดระยะเวลาที่ทำการเก็บข้อมูลทุกๆ 30 นาที ไปจนกระทั่งครบ 240 นาที (ภาพ 15) มีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) ตามระดับของ IDF ที่เพิ่มสูงขึ้นในกลุ่ม T2, T3 และ T4 เมื่อเทียบกับกลุ่มที่ได้รับ IDF ที่ระดับ 9 เปอร์เซ็นต์ (T1) ยกเว้นปริมาณการกินอาหารเฉลี่ยสะสมในนาที่ที่ 90, 210 และ 240 ของไก่กลุ่ม T2 มีค่าไม่แตกต่างกับกลุ่ม T1 ( $P > 0.05$ )

ในขณะที่ระยะเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของอาหารในท่อทางเดินอาหารหลังจากได้รับอาหารจนกระทั่งขับถ่ายมูลออกมาของไก่เนื้อที่อายุ 45 วัน มีแนวโน้มลดลงตามระดับของ IDF ที่เพิ่มขึ้น และมีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) ในกลุ่มที่ได้รับ IDF ระดับ 12 เปอร์เซ็นต์

(T4) เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่ม ได้รับ IDF ระดับ 9 เปอร์เซ็นต์ (T1) ดังแสดงในภาพ 16 ซึ่งมีความสอดคล้องกับปริมาณอาหารที่กินเฉลี่ยสะสม ของไก่กลุ่ม T2, T3 และ T4 ที่มีแนวโน้มที่เพิ่มสูงขึ้น ( $P < 0.05$ ) ตามระดับของ IDF ที่เพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับกลุ่ม T1 ยกเว้นปริมาณการกินอาหารเฉลี่ยสะสม ในนาที่ที่ 180 มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติในทุกกลุ่มการทดลอง (ภาพ 17) จากผลการศึกษาที่เกิดขึ้นชี้ให้เห็นว่าระดับของ IDF ในอาหารไก่เนื้อที่เพิ่มขึ้น มีผลทำให้การเคลื่อนที่ของอาหารในท่อทางเดินอาหารจนกระทั่งขับถ่ายมูลใช้ระยะเวลาสั้นลง

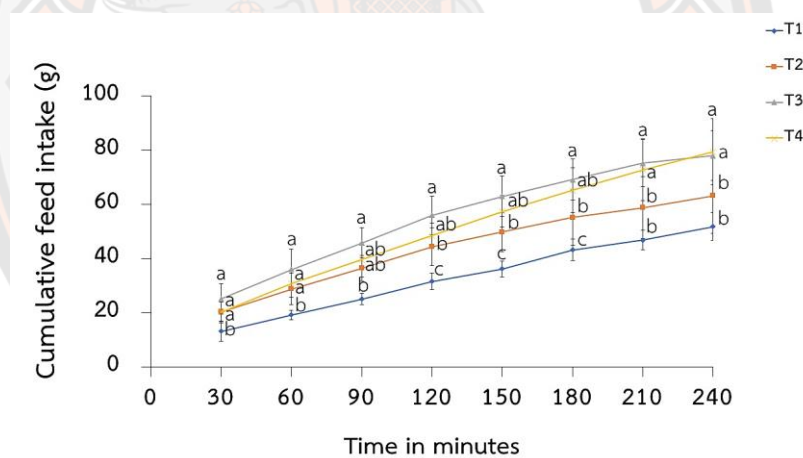
ซึ่งจากผลการศึกษาการประเมินระยะเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของอาหารในท่อทางเดินอาหารของทั้ง 2 ช่วงอายุ เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับ Mateos et al. (2013) ที่รายงานว่า แหล่งของใยอาหารละลายน้ำจากเพคติน ไปมีผลต่อความหนืด และลดอัตราการเคลื่อนที่ของสิ่งย่อยในระบบทางเดินอาหาร Silva et al. (2013) บันทึกว่า เมื่อไก่เนื้อได้รับอาหารพื้นฐานเสริมเพคติน ที่ระดับ 3-5 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้ความหนืดในระบบทางเดินอาหารเพิ่มขึ้น อัตราการเคลื่อนที่ของอาหารลดลง และอัตราการย่อยได้ช่วงเจริญเติบโตมีค่าลดลง Saki et al. (2011) พบว่า สัตว์ส่วนของเพคติน 2 ส่วน ต่อเซลลูโลส 1 ส่วน มีผลทำให้ค่าความหนืดของสิ่งย่อยในลำไส้เล็กส่วนปลายและไส้ติ่งของไก่เนื้อที่ช่วงอายุ 14, 21 และ 42 วัน มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มที่ได้รับอาหารที่มีสัตว์ส่วนของเพคติน 1 ส่วน ต่อเซลลูโลส 2 ส่วน อาจเป็นไปได้ว่าหากในอาหารมีองค์ประกอบของเส้นใยที่ละลายน้ำจะช่วยเพิ่มความหนืดซึ่งจะเชื่อมโยงกับความอืดที่เพิ่มขึ้น เกิดจากการขยายตัวของกระเพาะอาหารและอัตราการไหลที่ช้าลง ทำให้การบริโภคอาหารลดลง ส่วนหนึ่งอาจเกิดจากการเกาะตัวและการพองตัวของส่วนที่เป็นใยอาหาร ผลของการอืดอาหารนั้นเกิดจากกรดไขมันสายสั้นที่เกิดกระบวนการผลิตในระบบทางเดินอาหารส่วนล่างอาจมีความสำคัญเช่นกัน เนื่องจากบทบาทการบดอาหารของสัตว์ปีกที่บริเวณกระเพาะบด จะเห็นได้ว่ากลุ่มของใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำจะมีผลต่อการพัฒนาโครงสร้างกล้ามเนื้อกระเพาะบด แต่อย่างไรก็ตามถึงแม้ว่าการพัฒนาของกระเพาะบด อาจไม่ส่งผลกระทบต่อปริมาณอาหารที่กิน แต่ความสามารถในการบดอาหารที่เพิ่มขึ้นอาจส่งผลไปยังระบบการเคลื่อนที่ของอาหาร ทำให้สามารถช่วยปรับปรุงการย่อยของสารอาหารให้ดีขึ้นได้ (Svihus, & Hervik, 2019)



ภาพ 14 ระยะเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของอาหารในท่ทางเดินอาหารของไก่เนื้ออายุ 24 วัน

**Note:** T1 = 9% IDF in broiler ration; T2 = 10% IDF in broiler ration; T3 = 11% IDF in broiler ration; T4 = 12% IDF in broiler ration. Bars indicate standard deviation for each plot (n = 5).

<sup>a,b</sup>Each bar with a different letters denotes a significant difference (P<0.05).

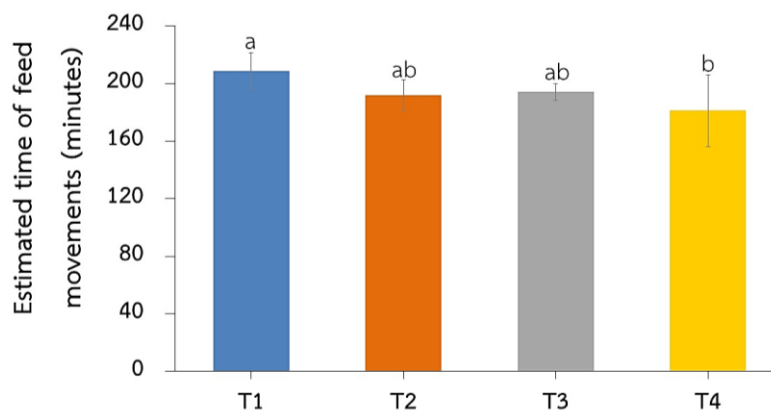


ภาพ 15 ปริมาณการกินอาหารเฉลี่ยสะสมตลอดระยะเวลา 4 ชั่วโมงในไก่เนื้ออายุ 24 วัน

**Note:** T1 = 9% IDF in broiler ration; T2 = 10% IDF in broiler ration; T3 = 11% IDF in broiler ration; T4 = 12% IDF in broiler ration. Bars indicate standard deviation for each plot (n = 5).

<sup>a,b,c</sup>Each bar with a different letters denotes a significant difference (P<0.05).

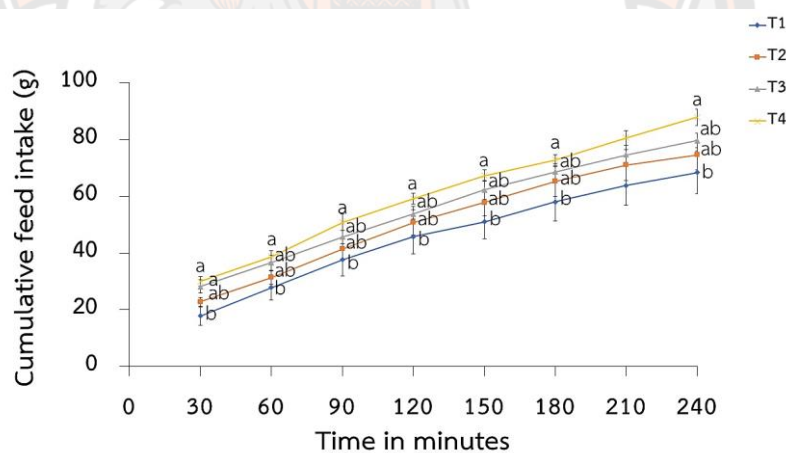




ภาพ 16 ระยะเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของอาหารในท่อทางเดินอาหารของไก่เนื้ออายุ 45 วัน

**Note:** T1 = 9% IDF in broiler ration; T2 = 10% IDF in broiler ration; T3 = 11% IDF in broiler ration; T4 = 12% IDF in broiler ration. Bars indicate standard deviation for each plot (n = 5).

<sup>a,b</sup>Each bar with a different letters denotes a significant difference (P<0.05).



ภาพ 17 ปริมาณการกินอาหารเฉลี่ยสะสมตลอดระยะเวลา 4 ชั่วโมงในไก่เนื้ออายุ 45 วัน

**Note:** T1 = 9% IDF in broiler ration; T2 = 10% IDF in broiler ration; T3 = 11% IDF in broiler ration; T4 = 12% IDF in broiler ration. Bars indicate standard deviation for each plot (n = 5).

<sup>a,b</sup>Each bar with a different letters denotes a significant difference (P<0.05).

## บทที่ 5

### บทสรุป

#### สรุปผลการวิจัย

โยอาหารไม่ละลายน้ำในสูตรอาหารไก่เนื้อระยะเจริญเติบโต (SDF = 3.27; TDF = 15.27) และระยะสุดท้าย (SDF = 3.73; TDF = 15.73) ที่ระดับ 12 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลดีที่สุดต่อสมรรถภาพการเจริญเติบโต การพัฒนาโครงสร้างวิลโลของลำไส้เล็ก รวมถึงสามารถช่วยเพิ่มอัตราการย่อยได้ของวัตถุดิบ โปรตีนหยาบ และไขมัน ในขณะที่อัตราการเคลื่อนที่ของอาหารในท่อทางเดินอาหารจนกระทั่งขับถ่ายมูลใช้ระยะเวลาสั้นลง

#### ข้อเสนอแนะ

ควรมีการวิจัยเพิ่มเติมในประเด็นที่เกี่ยวข้องกับระดับที่เหมาะสมของโยอาหารรวมในสูตรอาหาร โดยอ้างอิงจากระดับของ IDF ที่ได้จากการศึกษานี้ไปเป็นแนวทางในการศึกษาต่อไป

# บรรณานุกรม



## บรรณานุกรม

- ชัตติยา ล້านแปง และ ทศพร อินเจริญ. (2563). อิทธิพลของลิกโนเซลลูโลสในอาหารกึ่งบริสุทธ์ต่อสมรรถภาพการเจริญเติบโตและการเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยาของลำไส้เล็กส่วนต้นในไก่เนื้อ. *วารสารแก่นเกษตร ปีที่ 48, (ฉบับพิเศษ 1), 221-226.*
- ทศพร อินเจริญ, ชัตติยา ล້านแปง, รองเดช ตั้งตระการพงษ์ และพรพรรณ รัตนะสังจะ. (2562). ผลกระทบเชิงลบของใยอาหารชนิดละลายน้ำในอาหารกึ่งบริสุทธ์ต่อสมรรถภาพการผลิตและจุลินทรีย์ในไส้ติ่งของไก่เนื้อระยะแรก. *วารสารแก่นเกษตร ปีที่ 47, (ฉบับพิเศษ 2), 647-652.*
- บุญล้อม ชีวะอิสระกุล. (2546). *ชีวเคมีทางสัตวศาสตร์.* (พิมพ์ครั้งที่ 1 ปรับปรุงครั้งที่ 2). เชียงใหม่ : ธนบรรณการพิมพ์.
- ประภากร ธารฉาย. (2560). *การผลิตสัตว์ปีก บทที่ 6 อาหารและการให้อาหารสัตว์ปีก.* คณะสัตวศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยแม่โจ้. จาก [http://www.as2.mju.ac.th/E-Book/t\\_prapakorn.aspx](http://www.as2.mju.ac.th/E-Book/t_prapakorn.aspx)
- วิฑริช โมฬี. (2545). *ผลของการใช้รำสกัดน้ำมันในอาหารต่อสมรรถภาพการผลิตของไก่เนื้อ* (รายงานการวิจัย). นครราชสีมา: สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตสัตว์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี.
- โสภณ บุญล้ำ. (2556). *การวิจัยและถ่ายทอดเทคโนโลยีการใช้รำข้าวสาลีในอาหารเป็ดไข่ที่มีผลต่อสมรรถภาพการผลิตและคุณภาพไข่* (รายงานการวิจัย). สุราษฎร์ธานี: มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี.
- แลบ อินเตอร์ จำกัด. (2013). *Arbocel RC Fine.* สืบค้น 3 มีนาคม 2562, จาก <http://www.lab-inter.com/industrys.php?pid=39>
- Adibmoradi, M., Navidshad, B., & Faseleh Jahromi, M. (2016). The effect of moderate levels of finely ground insoluble fibre on small intestine morphology, nutrient digestibility and performance of broiler chickens. *Italian Journal of Animal Science, 15(2), 310-317.*
- Anderson, D., & Hill, F. (1955). Determination of metabolizable energy values for chicks of pure carbohydrates, cellulose, fat and casein. *Poultry Science, 34, 1176.*

- Annison, G. (1991). Relationship between the levels of soluble non-starch polysaccharides and the apparent metabolizable energy of wheats assayed in broiler chickens. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 39(7), 1252-1256.
- Association of official analytical chemists (AOAC). (1995). Official method of analysis of AOAC international. 16<sup>th</sup> ed. Washington DC. USA.
- Association of official analytical chemists (AOAC). (2000). Official methods of analysis. 17th Edition, The association of official analytical chemists, Gaithersburg, MD, USA.
- Aviagen ross 308. (2018). *Broiler Nutrition Specifications*. สืบค้น 5 มีนาคม 2562, จาก [https://en.aviagen.com/assets/Tech\\_Center/Ross\\_Broiler/RossBroilerNutritionSpecs2019-EN.pdf](https://en.aviagen.com/assets/Tech_Center/Ross_Broiler/RossBroilerNutritionSpecs2019-EN.pdf)
- Bach Knudsen, K. E., Hedemann, M. S., & Laerke, H. N. (2012). The role of carbohydrates in intestinal health of pigs. *Animal Feed Science and Technology*, 173 (1-2), 41-53.
- Bedford, M., & Classen, H. (1993). An in vitro assay for prediction of broiler intestinal viscosity and growth when fed rye-based diets in the presence of exogenous enzymes. *Poultry Science*, 72(1), 137-143.
- Bedford, M. R., & Classen, H. L. (1992). Reduction of intestinal viscosity through manipulation of dietary rye and pentosanase concentration is effected through changes in the carbohydrate composition of the intestinal aqueous phase and results in improved growth rate and food conversion efficiency of broiler chicks. *The Journal of nutrition*, 122(3), 560-569.
- Batal, A. B., & Parsons, C. (2002). Effects of age on nutrient digestibility in chicks fed different diets. *Poultry Science*, 81(3), 400-407.
- Branton, S., Lott, B., Deaton, J., Maslin, W., Austin, F., Pote, L., Keirs, R., Latour, M., & Day, E. (1997). The effect of added complex carbohydrates or added dietary fiber on necrotic enteritis lesions in broiler chickens. *Poultry Science*, 76(1), 24-28.



- Carré, B., & Leclercq, B. (1985). Digestion of polysaccharides, protein and lipids by adult cockerels fed on diets containing a pectic cell-wall material from white lupin (*Lupinus albus L.*) cotyledon. *British Journal of Nutrition*, 54(3), 669-680.
- Carré, B., Derouet, L., & Leclercq, B. (1990). The digestibility of cell-wall polysaccharides from wheat (bran or whole grain), soybean meal, and white lupin meal in cockerels, muscovy ducks, and rats. *Poultry Science*, 69(4), 623-633.
- Carré, B., Idi, A., Maisonnier, S., Melcion, J.-P., Oury, F.-X., Gomez, J., & Pluchard, P. (2002). Relationships between digestibilities of food components and characteristics of wheats (*Triticum aestivum*) introduced as the only cereal source in a broiler chicken diet. *British poultry science*, 43(3), 404-415.
- Caspary, W. F. (1992). Physiology and pathophysiology of intestinal absorption. *The American journal of clinical nutrition*, 55(1), 299S-308S.
- Choct, M. (1997). Feed non-starch polysaccharides: chemical structures and nutritional significance. *Feed milling international*, 191(June issue), 13-26.
- Choct, M., Hughes, R. J., & Bedford, M. (1999). Effects of a xylanase on individual bird variation, starch digestion throughout the intestine, and ileal and caecal volatile fatty acid production in chickens fed wheat. *British poultry science*, 40(3), 419-422.
- Choct, M. (2015). Fibre-Chemistry and functions in poultry nutrition. LII Simposio Científico de Avicultura, Málaga, 113-119.
- Clement, A., Dankasa, K. I., Uchei, I. J., Bala, A. S., & Siaka, D. S. (2017). Nutrient digestibility and growth performance of broiler chickens fed processed tropical sicklepod (*Senna obtusifolia* (L.)) seed meal based diets. *Journal of Agricultural Sciences (Belgrade)*, 62(4), 371-384.
- Danicke, S., Vahjen, W., Simon, O., & Jeroch, H. (1999). Effects of dietary fat type and xylanase supplementation to rye-based broiler diets on selected bacterial groups adhering to the intestinal epithelium. on transit time of feed, and on nutrient digestibility. *Poultry Science*, 78(9), 1292-1299.
- Danicke, S., Jeroch, H., & Simon, O. (2000). Endogenous N-losses in broilers estimated by a [15N]-isotope dilution technique: Effect of dietary fat type and xylanase addition. *Archives of Animal Nutrition*, 53(1), 75-97.

- Dinsa, N. G. (2017). Review on fiber digestion in non ruminant animals and effect of dietary fiber. *International Journal of Research Studies in Agricultural Sciences*, 10(3), 37-44.
- Evans, M. A., & Shrouts, E. P. (1992). Intestinal fuels: glutamine, short-chain fatty acids, and dietary fiber. *Journal of the American Dietetic Association*, 92(10), 1239-1246, 1249.
- Gallinger, C. I., Suárez, D. M., & Irazusta, A. (2004). Effects of rice bran inclusion on performance and bone mineralization in broiler chicks. *Journal of Applied Poultry Research*, 13(2), 183-190.
- González-Alvarado, J., Jiménez-Moreno, E., Lázaro, R., & Mateos, G. (2007). Effect of type of cereal, heat processing of the cereal, and inclusion of fiber in the diet on productive performance and digestive traits of broilers. *Poultry Science*, 86(8), 1705-1715.
- Hall, M. B. (2007). Methodological challenges in carbohydrate analyses. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 36, 359-367.
- Hetland, H., & Svihus, B. (2001). Effect of oat hulls on performance, gut capacity and feed passage time in broiler chickens. *British poultry science*, 42(3), 354-361.
- Hetland, H., Svihus, B., & Krogdahl, Å. (2003). Effects of oat hulls and wood shavings on digestion in broilers and layers fed diets based on whole or ground wheat. *British poultry science*, 44(2), 275-282.
- Hetland, H., Svihus, B., & Choct, M. (2005). Role of insoluble fiber on gizzard activity in layers. *Journal of Applied Poultry Research*, 14(1), 38-46.
- Hillary, H. (2016). Bird notes. External structure and movement. The covering of feathers on a bird is called the plumage. Feathers have 2 primary functions that are essential. Retrieved February 9, 2021, from <https://slideplayer.com/slide/5985083/>
- Hogberg, A., & Lindberg, J. E. (2004). Influence of cereal non-starch polysaccharides on digestion site and gut environment in growing pigs. *Livestock Production Science*, 87(2-3), 121-130.

- Iheukwumere, F., Ndubuisi, E., & Mazi, E. (2009). Effect of feeding corn cob meal on the growth, nutrient digestibility and organ characteristics of finisher broilers. *International Journal of Natural and Applied Sciences*, 5(1).
- Iji, P. A., Saki, A., & Tivey, D. R. (2001). Body and intestinal growth of broiler chicks on a commercial starter diet. 1. Intestinal weight and mucosal development. *British Poultry Science*, 42(4), 505–513.
- Incharoen, T., Yamauchi, K., & Thongwittaya, N. (2010). Intestinal villus histological alterations in broilers fed dietary dried fermented ginger. *Journal of animal physiology and animal nutrition*, 94(5), e130-e137.
- Incharoen, T. (2013). Histological adaptations of the gastrointestinal tract of broilers fed diets containing insoluble fiber from rice hull meal. *American Journal of Animal and Veterinary Sciences*, 8(2), 79-88.
- Incharoen, T., & Maneechote, P. (2013). The effects of dietary whole rice hull as insoluble fiber on the flock uniformity of pullets and on the egg performance and intestinal mucosa of laying hens. *American Journal of Agricultural and Biological Sciences*, 8(4), 323-329.
- Janssen, W. M. M. A. & Carré, B. (1985). Influence of fiber on digestion of broilers feeds. In Haresign, W., & Cole, D.J.A. (Eds.), *Recent Advances in Animal Nutrition* (pp. 71-88). London, UK: Butterworths.
- Jha, R., Rossnagel, B., Pieper, R., Van Kessel, A., & Leterme, P. (2010). Barley and oat cultivars with diverse carbohydrate composition alter ileal and total tract nutrient digestibility and fermentation metabolites in weaned piglets. *Animal*, 4(5), 724-731.
- Jha, R., & Berrocoso, J. (2015). Dietary fiber utilization and its effects on physiological functions and gut health of swine. *Animal*, 9(9), 1441-1452.
- Jha, R., Fohuse, J. M., Tiwari, U. P., Li, L., & Willing, B. P. (2019). Dietary fiber and intestinal health of monogastric animals. *Frontiers in veterinary science*, 6, 48.
- Jiménez-Moreno, E., González-Alvarado, J., González-Serrano, A., Lázaro, R., & Mateos, G. (2009). Effect of dietary fiber and fat on performance and digestive traits of broilers from one to twenty-one days of age. *Poultry Science*, 88(12), 2562-2574.

- Jiménez-Moreno, E., González-Alvarado, J., González-Sánchez, D., Lázaro, R., & Mateos, G. (2010). Effects of type and particle size of dietary fiber on growth performance and digestive traits of broilers from 1 to 21 days of age. *Poultry Science*, *89*(10), 2197-2212.
- Jiménez-Moreno, E., Chamorro, S., Frikha, M., Safaa, H., Lázaro, R., & Mateos, G. (2011). Effects of increasing levels of pea hulls in the diet on productive performance, development of the gastrointestinal tract, and nutrient retention of broilers from one to eighteen days of age. *Animal Feed Science and Technology*, *168*(1-2), 100-112.
- Jiménez-Moreno, E., Frikha, M., de Coca-Sinova, A., García, J., & Mateos, G. (2013). Oat hulls and sugar beet pulp in diets for broilers 1. Effects on growth performance and nutrient digestibility. *Animal Feed Science and Technology*, *182*(1-4), 33-43.
- Jorgensen, H., Zhao, X.-q., & Eggum, B. O. (1996). The influence of dietary fibre and environmental temperature on the development of the gastrointestinal tract, digestibility, degree of fermentation in the hind-gut and energy metabolism in pigs. *British Journal of Nutrition*, *75*(3), 365-378.
- Kermanshahi, H., Shakouri, M. D., & Daneshmand, A. (2018). Effects of non-starch polysaccharides in semi-purified diets on performance, serum metabolites, gastrointestinal morphology, and microbial population of male broiler chickens. *Livestock Science*, *214*, 93-97.
- Khan academy. (2016). OpenStax Biology's modification of work by the national human genome research Institute. Retrieved February 9, 2021, from <https://www.khanacademy.org/science/biology/macromolecules/proteins-and-amino-acids/a/orders-of-protein-structure>
- Kheravii, S. K., Swick, R. A., Choct, M., & Wu, S. B. (2018). Effect of oat hulls as a free choice feeding on broiler performance, short chain fatty acids and microflora under a mild necrotic enteritis challenge. *Animal nutrition*, *4*(1), 65-72.
- Knudsen, K. E. B., Hedemann, M. S., & Lærke, H. N. (2012). The role of carbohydrates in intestinal health of pigs. *Animal Feed Science and Technology*, *173*(1-2), 41-53.

- Lázaro, R., Latorre, M., Medel, P., Gracia, M., & Mateos, G. (2004). Feeding regimen and enzyme supplementation to rye-based diets for broilers. *Poultry Science*, *83*(2), 152-160.
- Leung, H., Arrazola, A., Torrey, S., & Kiarie, E. (2018). Utilization of soy hulls, oat hulls, and flax meal fiber in adult broiler breeder hens. *Poultry Science*, *97*(4), 1368-1372.
- Longstaff, M., & McNab, J. (1989). Digestion of fibre polysaccharides of pea (*Pisum sativum*) hulls, carrot and cabbage by adult cockerels. *British Journal of Nutrition*, *62*(3), 563-577.
- Mahmood, T., & Guo, Y. (2020). Dietary fiber and chicken microbiome interaction: Where will it lead to? *Animal nutrition*, *6*(1), 1-8.
- Maisonnier, S., Gomez, J., & Carré, B. (2001). Nutrient digestibility and intestinal viscosities in broiler chickens fed on wheat diets, as compared to maize diets with added guar gum. *British poultry science*, *42*(1), 102-110.
- Maisonnier, S., Gomez, J., Bree, A., Berri, C., Baeza, E., & Carré, B. (2003). Effects of microflora status, dietary bile salts and guar gum on lipid digestibility, intestinal bile salts, and histomorphology in broiler chickens. *Poultry Science*, *82*(5), 805-814.
- Mariscal-Landín, G., Sève, B., Colléaux, Y., & Lebreton, Y. (1995). Endogenous amino nitrogen collected from pigs with end-to-end ileorectal anastomosis is affected by the method of estimation and altered by dietary fiber. *The Journal of nutrition*, *125*(1), 136-146.
- Mateos, G., Lázaro, R., & Gracia, M. (2002). The feasibility of using nutritional modifications to replace drugs in poultry feeds. *Journal of Applied Poultry Research*, *11*(4), 437-452.
- Mateos, G. G., Serrano, M. P., Berrocoso, J., Perez-Bonilla, A., & Lázaro, R. (2013). Improving the utilization of raw materials in poultry feeding: new technologies and inclusion levels. In *XXXIV Worlds Poultry Congress*. Salvador de Bahia, Brazil (pp. 1-13).



- Molist, F., Van Oostrum, M., Pérez, J., Mateos, G., Nyachoti, C., & Van Der Aar, P. (2014). Relevance of functional properties of dietary fibre in diets for weanling pigs. *Animal Feed Science and Technology*, *189*, 1-10.
- Montagne, L., Pluske, J. R., & Hampson, D. J. (2003). A review of interactions between dietary fibre and the intestinal mucosa, and their consequences on digestive health in young non-ruminant animals. *Animal Feed Science and Technology*, *108(1-4)*, 95–117.
- Muramatsu, T., Kodama, H., Morishita, T., Furuse, M., & Okumura, J. (1991). Effect of intestinal microflora on digestible energy and fiber digestion in chickens fed a high-fiber diet. *American journal of veterinary research*, *52(7)*, 1178-1181.
- Nahm, K. H. & Carlson, C. W. (1987). The effect of dietary fiber levels on the size of broiler's gut and chromium turnover time in each segment. *Poultry Science* *14*, 9-13.
- Nakahiro, Y. & Isshiki, Y. (1975). Effect of cecal ligation on digestibility of crude fiber, cellulose and pentosan in chickens. *Japanese poultry science*, *12(3)*, 138-140.
- Nakhon, S., Numthuam, S., Charoensook, R., Tartrakoon, W., Incharoen, P., & Incharoen, T. (2019). Growth performance, meat quality, and bone-breaking strength in broilers fed dietary rice hull silicon. *Animal Nutrition*, *5(2)*, 152-155.
- Nyman, M., Asp, N. G., Cummings, J., & Wiggins, H. (1986). Fermentation of dietary fibre in the intestinal tract: comparison between man and rat. *British journal of nutrition*, *55(3)*, 487-496.
- Ochetim, S. (1993). The feeding and economic value of maize cob meal for broiler chickens. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, *6(3)*, 367-371.
- Perry, G. C. (Ed.). (2006). *Avian gut function in health and disease*. CABI. Retrieved March 26, 2019, from <http://dx.doi.org/10.1079/9781845931803.0000>
- Pettersson, D., & Åman, P. (1989). Enzyme supplementation of a poultry diet containing rye and wheat. *British journal of Nutrition*, *62(1)*, 139-149.
- Purina Animal Nutrition LLC. (2019). A chicken's digestive system: The journey from feed to egg. Chicken anatomy 101: how do chickens digest Feed?. Retrieved February 9, 2021, from <https://backyardpoultry.iamcountryside.com/chickens-101/a-chickens-digestive-system-from-feed-to-egg/>

- Rohe I., W. Vahjen., Metzger F., & J. Zentek. (2019). Effect of a “diluted” diet containing 10% lignocellulose on the gastrointestinal tract, intestinal microbiota, and excreta characteristics of dual purpose laying hens. *Poultry science*, 1-10.
- Rosentrater, K. A., & Evers, A. D. (2018). Part 1. Chemical composition (4.2 Carbohydrates). *Kent’s Technology of Cereals*, 269-290.
- Rougière, N., & Carré, B. (2010). Comparison of gastrointestinal transit times between chickens from D<sup>+</sup> and D<sup>-</sup> genetic lines selected for divergent digestion efficiency. *Animal*, 4(11), 1861-1872.
- Sacranie, A., Svihus, B., Denstadli, V., Moen, B., Iji, P. A., & Choct, M. (2012). The effect of insoluble fiber and intermittent feeding on gizzard development, gut motility, and performance of broiler chickens. *Poultry science*, 91(3), 693-700.
- Saki, A. A., Matin, H. H., Zamani, P., Tabatabai, M. M., & Vatanchian, M. (2011). Various ratios of pectin to cellulose affect intestinal morphology, DNA quantitation, and performance of broiler chickens. *Livestock Science*, 139(3), 237-244.
- Sarbaz, E., Navidshad, B., & Aghjeshlagh, F. M. (2018). The effect of peanut pod on performance, small intestine pH and ileum bacteria population in broiler chickens. *South African Journal of Animal Science*, 48(3), 435-444.
- Sarikhan, M., Shahryar, H. A., Gholizadeh, B., Hosseinzadeh, M. H., Beheshti, B., & Mahmoodnejad, A. (2010). Effects of insoluble fiber on growth performance, carcass traits and ileum morphological parameters on broiler chick males. *International Journal of Agriculture and Biology*, 12(4), 531-536.
- Scheppach, W. (1994). Effects of short chain fatty acids on gut morphology and function. *Gut*, 35(1 Suppl), S35-S38.
- Schmidt-Wittig, U., Enss, M. L., Coenen, M., Gärtner, K., & Hedrich, H. J. (1996). Response of rat colonic mucosa to a high fiber diet. *Annals of Nutrition and Metabolism*, 40(6), 343-350.
- Schneeman, B. O., Richter, B. D., & Jacobs, L. R. (1982). Response to dietary wheat bran in the exocrine pancreas and intestine of rats. *The Journal of nutrition*, 112(2), 283-286.

- Sell, J. L. (1996). Physiological limitations and potential for improvement in gastrointestinal tract function of poultry. *Journal of Applied Poultry Research*, 5(1), 96-101.
- Shakouri, M. D., Kermanshahi, H., & Mohsenzadeh, M. (2006). Effect of different non starch polysaccharides in semi purified diets on performance and intestinal microflora of young broiler chickens. *International Journal of Poultry Science*, 5(6), 557-561.
- Shang, Q., Wu, D., Liu, H., Mahfuz, S., & Piao, X. (2020). The Impact of Wheat Bran on the Morphology and Physiology of the Gastrointestinal Tract in Broiler Chickens. *Animals*, 10(10), 1831.
- Shires, A., Thompson, J. R., Turner, B. V., Kennedy, P. M., & Goh, Y. K. (1987). Rate of passage of corn-canola meal and corn-soybean meal diets through the gastrointestinal tract of broiler and white leghorn chickens. *Poultry Science*, 66(2), 289-298.
- Sibbald, I. R., Slinger, S. J., & Ashton, G. C. (1961). Factors Affecting the Metabolizable Energy Content of Poultry Feeds: 3. The Influence of Kaolin and Alphacel when used as Ration Diluents. *Poultry Science*, 40(2), 454-458.
- Silva, V. K., Morita, V. D. S., & Boleli, I. C. (2013). Effect of pectin extracted from citrus pulp on digesta characteristics and nutrient digestibility in broilers chickens. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 42(8), 575-583.
- Siri, S., Tobioka, H., & Tasaki, I. (1992). Effects of dietary cellulose level on nutrient utilization in chickens. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 5(4), 741-746.
- Siri, S., Tobioka, H., & Tasaki, I. (1994). Effects of dietary cellulose and protein levels on nutrient utilization in chickens. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 7(2), 207-212.
- Siregar, A. P., & Farrell, D. J. (1980). A comparison of the energy and nitrogen metabolism of fed ducklings and chickens. *British Poultry Science*, 21(3), 213-227.
- Stephen, A. M., & Cummings, J. H. (1980). The microbial contribution to human faecal mass. *Journal of Medical Microbiology*, 13(1), 45-56.

- Steel, R.G.D., & Torrie, J.H. (1980). Principles and procedures of statistics. A biometrical approach, 2<sup>nd</sup> Edition, McGraw-Hill Book Company, New York.
- Summers, J. D., Spratt, D., & Atkinson, J. L. (1990). Restricted feeding and compensatory growth for broilers. *Poultry Science*, 69(11), 1855-1861.
- Svihus, B., & Hervik, A. K. (2019). Chapter 7 The influence of fibre on gut physiology and feed intake regulation. *The Value of Fibre*, 127–139.
- Swennen, Q., Everaert, N., Debonne, M., Verbaeys, I., Careghi, C., Tona, K., Janssens, G. P. J., Decuyper, E., Bruggeman, V., & Buyse, J. (2010). Effect of macronutrient ratio of the pre-starter diet on broiler performance and intermediary metabolism. *Journal of animal physiology and animal nutrition*, 94(3), 375-384.
- Thomas, D. H., & Skadhauge, E. (1988). Transport function and control in bird caeca. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Physiology*, 90(4), 591–596.
- Van Soest, P.J., & Wine, R.H. (1967). Use of detergents in the analysis of fibrous feeds IV. Determination of plant cell-wall constituents. *Journal of the Association of Official Analytical Chemists*, 50(1), 50-55.
- Van Soest, P. V., Robertson, J. B., & Lewis, B. (1991). Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of dairy science*, 74(10), 3583-3597.
- Varel, V. H., & Yen, J. T. (1997). Microbial perspective on fiber utilization by swine. *Journal of Animal Science*, 75(10), 2715-2722.
- Wenk, C. (2001). The role of dietary fibre in the digestive physiology of the pig. *Animal Feed Science and Technology*, 90(1-2), 21–33.
- Yamauchi, K., & Isshiki, Y. (1991). Scanning electron microscopic observations on the intestinal villi in growing white leghorn and broiler chickens from 1 to 30 days of age. *British Poultry Science*, 32(1), 67–78.
- Yu, B., & Chiou, P. W. (1996). Effects of crude fibre level in the diet on the intestinal morphology of growing rabbits. *Laboratory Animals*, 30(2), 143–148.
- Zelenka, J. (1968). Influence of the age of chicken on the metabolisable energy values of poultry diets. *British Poultry Science*, 9(2), 135–142.



ภาคผนวก



## ภาคผนวก ก

## การตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบพื้นฐานทางเคมี

## ภาคผนวก ก.1 การวิเคราะห์ปริมาณใยอาหาร (Total dietary fiber) ตามวิธีการของ AOAC 2010

## ก. เครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์

1. เครื่องชั่งละเอียด (analytical balance) ที่มีความละเอียด 0.0001 g
2. ปีกเกอร์ทรงสูง ขนาด 600 มิลลิลิตร
3. ถ้วยสำหรับเผา (crucible) ขนาด 50 มิลลิลิตร โดยมีการเตรียมดังนี้
  - 3.1 เเผถ้วยเปล่าที่อุณหภูมิ 525 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เพื่อทำความสะอาดก่อนนำมาใช้งาน
  - 3.2 เมื่อนำถ้วยออกมาแล้ว ทำการพักไว้จนถ้วยเย็น นำมาแช่ cleaning solution 2% 1 ชั่วโมง
  - 3.3 ทำการล้างทำความสะอาดด้วย deionized water จากนั้นล้างด้วย acetone 1 ครั้ง
  - 3.4 ทำการเติม Celite® 1.0 กรัม จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 130 องศาเซลเซียส
  - 3.5 ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น ประมาณ 1 ชั่วโมง
4. Gooch crucible
5. อ่างน้ำร้อนควบคุมอุณหภูมิ (water bath) ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส
6. ตู้อบลมร้อน (hot oven) ที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส
7. เตาเผาความร้อนสูง (muffle furnace) ที่อุณหภูมิ 525 องศาเซลเซียส
8. เครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง
9. ชุดปั๊มสุญญากาศ

## ข. สารเคมี

1. ชุดเอนไซม์ Megazyme Total dietary fiber K-TDFR 100A (Megazyme International Ireland, Co. Wicklow, Ireland; cat.no. K-TDFR-100A) ประกอบด้วย
  - 1.1 Thermostable  $\alpha$ -amylase (Megazyme cat no. E-BLAAM)
  - 1.2 Purified protease (Megazyme cat no. E-BSPRT)
  - 1.3 Purified amyloglucosidase (Megazyme cat no. E-AMGDF)
2. Ethanol, 95%

3. Ethanol, 78% เตรียมโดยใช้ 95% Ethanol จำนวน 821 มิลลิลิตร เจือจางในน้ำกลั่น ให้ได้ปริมาตร 1 ลิตรใน Volumetric flask
4. Acetone, reagent grade
5. Deionized water
6. Celite®, analytical grade (Megazyme cat no. G-CELITE)
7. Cleaning solution เตรียมให้อยู่ในรูปของสารละลายความเข้มข้น 2%
8. สารละลาย MES/TRIS buffer, 0.05M pH 8.2 เตรียมโดยสารละลาย 2 (N-morpholino) ethane sulfonic acid (MES) (Megazyme cat no. B-MES250) 19.52 กรัม และ tris(hydroxymethyl) aminomethane (TRIS) (Megazyme cat no. B-TRIS500) 12.2 กรัม ในน้ำกลั่น 1.7 ลิตร ปรับ pH ให้อยู่ที่ 8.0 ด้วย 6.0N NaOH จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ ปริมาตร 2 ลิตร
9. 0.561N HCl เตรียมโดยละลาย 6.0 N HCl 93.5 มิลลิลิตร ในน้ำกลั่น ให้ได้ปริมาตร 1 ลิตร

#### ค. วิธีการหา Total dietary fiber (TDF)

1. ชั่งน้ำหนักตัวอย่างประมาณ  $1.0 \pm 0.1$  กรัม ใส่ลงในบีกเกอร์ทรงสูง โดยทำการชั่งตัวอย่างจำนวน 2 ซ้ำต่อ 1 ตัวอย่าง และทำการเตรียม blank เช่นเดียวกันโดยไม่ใส่ตัวอย่าง
2. ใส่สารละลาย MES/TRIS ปริมาณ 40 มิลลิลิตร
3. ทำการเติมเอนไซม์ Thermostable  $\alpha$ -amylase ปริมาณ 50 ไมโครลิตร ปิดบีกเกอร์ ด้วยอะลูมิเนียมฟลอยด์ นำไปต้มใน water bath ที่อุณหภูมิ 98-100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที
4. เมื่อครบเวลา นำบีกเกอร์ออกจาก water bath ทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ล้างตะกอนข้างบีกเกอร์ด้วย deionized water ปริมาณ 10 มิลลิลิตร
5. ทำการเติมเอนไซม์ protease ปริมาณ 100 ไมโครลิตร ปิดบีกเกอร์ด้วยอะลูมิเนียมฟลอยด์ นำไปต้มใน water bath ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที (เริ่มจับเวลาเมื่ออุณหภูมิภายใน water bath อยู่ที่ 60 องศาเซลเซียส)
6. เมื่อครบเวลา นำบีกเกอร์ออกจาก water bath เติมสารละลาย 0.561N HCl ปริมาณ 5 มิลลิลิตร ปรับ pH ให้อยู่ในช่วง 4.1-4.8 ด้วยสารละลาย 5% NaOH หรือสารละลาย 5% HCl
7. ทำการเติมเอนไซม์ amyloglucosidase ปริมาณ 200 ไมโครลิตร ปิดบีกเกอร์ด้วย อะลูมิเนียมฟลอยด์ นำไปต้มใน water bath ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที (เริ่มจับเวลาเมื่ออุณหภูมิภายใน water bath อยู่ที่ 60 องศาเซลเซียส)

8. เมื่อครบเวลา นำบีกเกอร์ออกจาก water bath เติม Ethanol 95% ปริมาณ 225 มิลลิตร ทิ้งไว้ในอุณหภูมิห้องจนกระทั่งตกตะกอน เป็นเวลา 1 ชั่วโมง

9. เมื่อครบเวลา ทำการกรองตะกอนด้วย Gooch crucible และชุดกรองสุญญากาศ ก่อนทำการกรอง จากนั้นเติม Ethanol 78% ปริมาณ 15 มิลลิตร ใน Gooch crucible และดูดออกด้วยเครื่องดูดสุญญากาศเพื่อล้าง Celite®

10. ทำการล้างตะกอนด้วย

- Ethanol 78% ปริมาณ 20 มิลลิตร จำนวน 3 ครั้ง
- Ethanol 95% ปริมาณ 10 มิลลิตร จำนวน 2 ครั้ง
- Acetone ปริมาณ 10 มิลลิตร จำนวน 2 ครั้ง

11. นำกากตะกอนใน Gooch crucible นำเข้าตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำมาทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น ทำการจดบันทึกน้ำหนัก

12. นำ Gooch crucible ในซ้ำแรกของตัวอย่าง และ blank ไปวิเคราะห์หาปริมาณเถ้า โดยนำไปเผาที่อุณหภูมิ 525 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง จากนั้นนำมาคำนวณหาปริมาณเถ้า ( $B_{ash}$ ,  $mg_{ash}$ ) จากนั้นนำ Gooch crucible ในซ้ำที่สองไปวิเคราะห์หาปริมาณโปรตีน ด้วยวิธี Kjeldahl method ( $Crude\ protein = \%N \times 6.25$ ) ( $B_{protein}$ ,  $mg_{protein}$ )

13. ทำการคำนวณหาค่าใยอาหารรวม (Total dietary fiber, TDF)

$$TDF\ (g/100g) = \left[ \frac{(R1 + R2)}{2} - mg_{protein} - mg_{ash} - \frac{B}{\left( \frac{M1 + M2}{2} \right)} \right] \times 100$$

เมื่อ  $R1/R2$  = Residue weight (mg) ของตัวอย่างในแต่ละซ้ำ

Residue weight (R) = (residue + celite + crucible) หลังอบ - (celite + crucible)

Blank (B, mg) =  $(B1 + B2)/2 - B_{protein} - B_{ash}$

$B1/B2$  = Residue individual blank value (mg)

$B_{protein}$  = Protein (mg) in blank

$B_{ash}$  = Ash (mg) in blank

$mg_{protein}$  = Protein (mg) in sample residue

$mg_{ash}$  = Ash (mg) in sample residue

$M1/M2$  = Sample weight (mg)

### ง. วิธีการวิเคราะห์หาใยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำ Insoluble dietary fiber (IDF)

1. ทำการวิเคราะห์คล้ายคลึงกับการวิเคราะห์หาค่า TDF ดังกล่าวข้างต้น ในข้อ 1-7 หลังจากนั้นทำการย่อยด้วย amyloglucosidase เป็นเวลา 30 นาที นำมากรองและทำการล้างด้วยน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ปริมาณ 10 มิลลิลิตร จำนวน 2 ครั้ง

2. ทำการล้างตะกอนด้วย

- Ethanol 78% ปริมาณ 20 มิลลิลิตร จำนวน 3 ครั้ง

- Ethanol 95% ปริมาณ 10 มิลลิลิตร จำนวน 2 ครั้ง

- Acetone ปริมาณ 10 มิลลิลิตร จำนวน 2 ครั้ง

3. นำตัวอย่างอบที่อุณหภูมิ 103 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น และทำการบันทึกน้ำหนัก

4. นำตัวอย่างจำนวน 1 ซ้ำไปวิเคราะห์หาปริมาณเถ้า โดยทำการเผาที่อุณหภูมิ 525 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง และนำตัวอย่างในซ้ำที่สองไปวิเคราะห์หาปริมาณโปรตีน ด้วยวิธี Kjeldahl method (Crude protein = %N x 6.25)

### จ. วิธีการคำนวณหาปริมาณใยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำ Insoluble dietary fiber (IDF) และละลายน้ำ Soluble dietary fiber (SDF)

วิธีการคำนวณหาปริมาณ IDF และ SDF ใช้สูตรคล้ายคลึงกับการหาค่า TDF จะได้ปริมาณ IDF และ SDF ซึ่ง  $TDF = IDF + SDF$

ภาคผนวก ก.2 การวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน ตามวิธีการของ Kjeldahl method (AOAC, 2000)

### ก. เครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์

1. เครื่องย่อย
2. เครื่องกลั่น
3. ขวดแก้วสำหรับวิเคราะห์โปรตีน (kjeldahl Flask)
4. ขาตั้งและบิวเรตสำหรับการไทเทรตสารละลาย
5. ขวดรูปชมพู่ (erlenmeyer flask) ขนาด 250 มิลลิลิตร
6. กระบอกตวงขนาด 25,100 และ 300 มิลลิลิตร
7. ปีกเกอร์
8. น้ำกลั่น
10. เครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง

### ข. สารเคมี

1. Conc. Sulfuric acid
2. Mix Catalyst (สารผสมระหว่าง copper sulfate : potassium sulfate ในอัตราส่วน 1:10)
3. Sodium hydroxide ความเข้มข้นร้อยละ 40 โดยใช้ Sodium hydroxide 40 กรัม ละลายในน้ำกลั่น ปรับปริมาตรให้ได้ 100 มิลลิลิตร
4. Hydrochloric เข้มข้น 0.1 N
5. Boric acid ความเข้มข้นร้อยละ 4 เตรียมสารละลายโดย ต้มน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตรให้ร้อน ใส่ผงกรด บอริกลงไป 4.0 กรัม ต้มจนละลายทั้งหมด จากนั้นทิ้งไว้จนสารละลายเย็นตัวลง
6. Indicator เตรียมสารละลายโดยใช้ (mixed indicator: methylred 0.1 กรัม : bromocresol green 0.1 กรัม ใน ethanol 100 ml)

### ค. วิธีการวิเคราะห์หาปริมาณโปรตีน

1. ชั่งตัวอย่าง 2-5 กรัม ใส่ลงใน Kjeldahl flask เติม Mix Catalyst:  $\text{CuSO}_4$  0.1 กรัม,  $\text{NaSO}_4$  2.0 กรัม และ  $\text{Conc.H}_2\text{SO}_4$  25 ml
2. ทำการย่อยบน Heating mantle โดยให้ความร้อนจนกระทั่งหมดฟอง แล้วค่อยเพิ่มความร้อนอุณหภูมิ 400 องศาเซลเซียส จนกระทั่งสารละลายเปลี่ยนเป็นสีใสจากนั้นทิ้งไว้ให้เย็น การกลั่น (Distillation)
3. เติมน้ำกลั่นลงในหลอดย่อย 10-15 มิลลิลิตร นำหลอดย่อยมาต่อเข้ากับเครื่องกลั่น



4. เติม 40% NaOH 40-50 มิลลิลิตร
5. นำ receiving flask ที่มี 4% boric acid อยู่ 20-25 มิลลิลิตร และทำการเติม indicator เพื่อนำมารองรับสารละลายที่ผ่านกระบวนการกลั่นแล้ว
6. ทำการกลั่นจนได้สารละลายประมาณ 25 มิลลิลิตร
7. นำสารละลายที่กลั่นได้มาไทเทรตด้วย 0.1N HCl จนกระทั่งสีของสารละลายเปลี่ยนสีจากเขียวเป็นม่วงอมชมพู
8. ทำ blank ตามข้อ 1-7 โดยไม่ต้องใส่ตัวอย่าง

#### ง. วิธีการคำนวณหาค่าโปรตีน

$$\text{ปริมาณโปรตีน (ร้อยละ)} = \frac{(A-B) \times N \times 1.4 \times F}{W_t}$$

|         |                                                                     |
|---------|---------------------------------------------------------------------|
| เมื่อ A | คือ ปริมาณของกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการไทเทรตกับตัวอย่าง (มิลลิลิตร) |
| B       | คือ ปริมาณของกรดไฮโดรคลอริกที่ใช้ในการไทเทรตกับ blank (มิลลิลิตร)   |
| $W_t$   | คือ น้ำหนักของตัวอย่าง                                              |
| N       | คือ ความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริก (N)                                |
| F       | คือ ค่าแฟคเตอร์ (= 6.25)                                            |

### ภาคผนวก ก.3 การวิเคราะห์ปริมาณเถ้า ตามวิธีการของ (AOAC, 2000)

#### ก. เครื่องมือและวัสดุอุปกรณ์

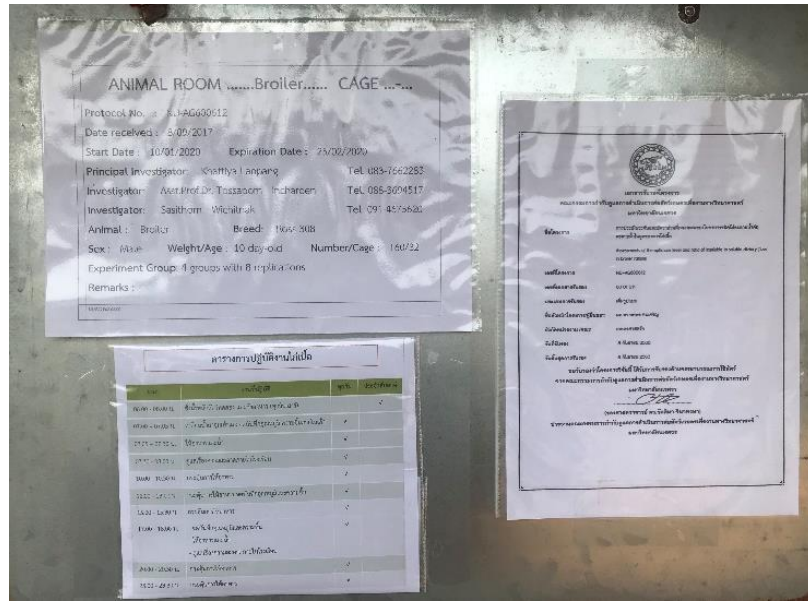
1. ถ้วยกระเบื้องเคลือบ (porcelain crucible) สำหรับใส่ตัวอย่าง
2. เตาเผา (muffle furnace)
3. เตาไฟฟ้า (hot plate)
4. เครื่องชั่งละเอียดทศนิยม 4 ตำแหน่ง
5. โถดูดความชื้น (desiccator)

#### ข. วิธีการวิเคราะห์หาปริมาณเถ้า

1. เมาถ้วยกระเบื้องในเตาเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 3 ชั่วโมง ปิดสวิทช์เตาเผา แล้วรอประมาณ 30-45 นาทีเพื่อให้อุณหภูมิภายในเตาลดลง จากนั้นนำถ้วยกระเบื้องออกจากเตาเผา ใส่ลงในโถดูดความชื้น วางทิ้งไว้จนกระทั่งอุณหภูมิลดลงเท่ากับอุณหภูมิห้อง (ใช้เวลาประมาณ 15-30 นาที) ชั่งน้ำหนัก และบันทึกผล
2. เมาถ้วยกระเบื้องซ้ำอีกประมาณครั้งละ 30 นาที และทำเช่นเดียวกับข้อ 1 จนกระทั่งได้น้ำหนักคงที่ (ผลต่างของน้ำหนักที่ชั่ง 2 ครั้งติดต่อกันไม่ควรเกิน 0.001-0.003 กรัม) และทำการบันทึกน้ำหนักที่ได้
3. ชั่งตัวอย่างที่บดละเอียดประมาณ 3-5 กรัม (จดบันทึกน้ำหนัก) ใส่ลงในถ้วยกระเบื้อง แล้วนำไปเผาโดยใช้ hot plate จนไม่มีควัน จากนั้นนำไปเผาต่อในเตาเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส จนกระทั่งตัวอย่างกลายเป็นเถ้าสีขาวหรือสีเทาอ่อน
4. ทำให้เย็นโดยนำไปเข้าโถดูดความชื้น
5. ทำการชั่งน้ำหนักเถ้าและหาเปอร์เซ็นต์ที่ได้จากเถ้า

#### ค. วิธีการคำนวณหาค่าเถ้า

$$\text{ปริมาณเถ้า (ร้อยละโดยน้ำหนัก)} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างหลังเผา (กรัม)}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างก่อนเผา (กรัม)}} \times 100$$



ภาพ 18 รายละเอียดข้อมูลของการทำวิจัยและตารางปฏิบัติงาน



ภาพ 19 การทำความสะอาดเตรียมคอกทดลอง



ภาพ 20 การเตรียมความพร้อมเชิงระบบการให้น้ำอัตโนมัติแบบหัวหยด (nipple)



ภาพ 21 การเตรียมคอกกกก่อนลูกไก่มาถึง





ภาพ 22 การเตรียมคอกทดลอง



ภาพ 23 พื้นที่เก็บวัตถุดิบอาหารสำหรับการทดลอง





ภาพ 24 การผสมอาหารก่อนเริ่มงานทดลอง



ภาพ 25 ช่วงระยะกกลูกไก่ที่อายุ 1-10 วัน



ภาพ 26 ลูกไก่ที่อายุ 1 วัน



ภาพ 27 การเยี่ยมชมจากคณะกรรมการกำกับดูแลการดำเนินการต่อสัตว์เพื่องานทาง  
วิทยาศาสตร์





ภาพ 28 ลักษณะการจัดการคอกทดลองภายในโรงเรือนและการจัดคอกทดลอง



ภาพ 29 การชั่งน้ำหนักไก่ทดลองในแต่ละสัปดาห์



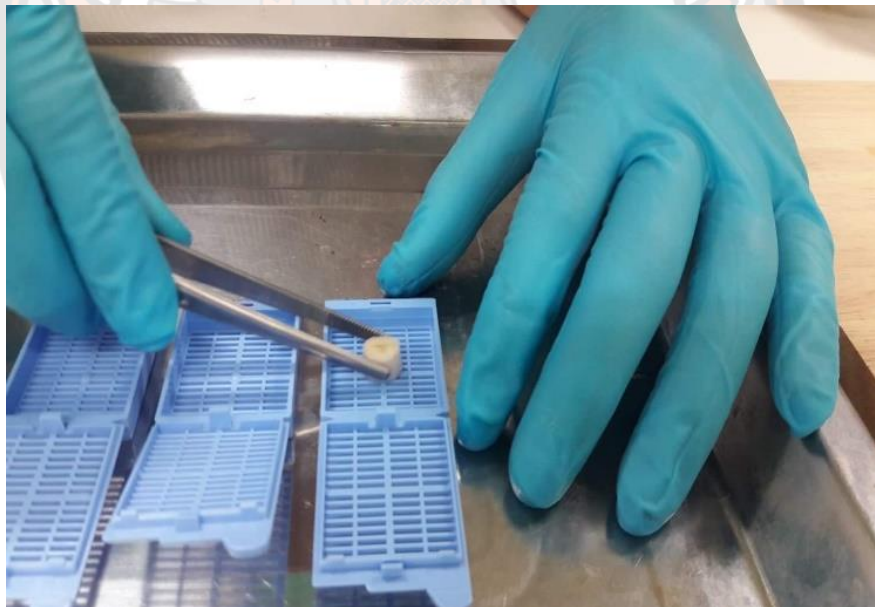
ภาพ 30 การสังเกตระยะเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของอาหารในการศึกษาที่ 2



ภาพ 31 การเก็บตัวอย่างลำไส้เล็กทั้ง 3 ส่วน ขนาดประมาณ 2 เซนติเมตร



ภาพ 32 การเก็บรักษาตัวอย่างลำไส้เล็กทั้ง 3 ส่วน



ภาพ 33 การเตรียมตัวอย่างชิ้นเนื้อ





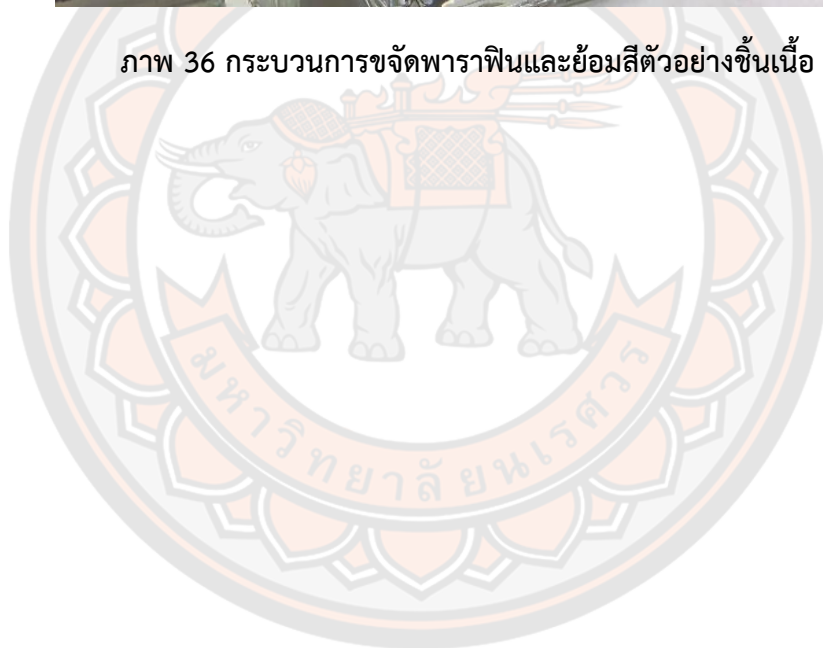
ภาพ 34 กระบวนการดึงน้ำออกจากเซลล์ด้วยเครื่องเตรียมชิ้นเนื้ออัตโนมัติ



ภาพ 35 การตัดตัวอย่างชิ้นเนื้อด้วยเครื่องตัดชิ้นเนื้ออัตโนมัติ



ภาพ 36 กระบวนการจัดพาราฟินและย้อมสีตัวอย่างชิ้นเนื้อ



ภาคผนวก ข ผลงานตีพิมพ์งานวิจัยและเกียรติบัตร

# แก่นเกษตร

KHON KAEN AGRICULTURE JOURNAL

## AG

AGRICULTURAL  
CONFERENCE  
2020

*สืบสานงานพ่อ  
ต่อ ยอดคนปณิธาน  
รากฐานเกษตรอินทรีย์*

**ประชุมวิชาการเกษตร ครั้งที่ 21**  
27-28 มกราคม 2563  
คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ปีที่ 48 ฉบับพิเศษ 1 (2563) VOL. 48 SUPPLEMENT 1 (2020)



## อิทธิพลของลิกโนเซลลูโลสในอาหารกึ่งบริสุทธิ์ต่อสมรรถภาพการเจริญเติบโต และการเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยาของลำไส้เล็กส่วนต้นในไก่เนื้อ

### Influence of lignocellulose in semi-purified diet on growth performance and duodenal morphological alteration of broilers

ชัตติยา ล้านแปง<sup>1</sup> และ ทศพร อินเจริญ<sup>1,2\*</sup>

Khattiya Lanpang<sup>1</sup> and Tossaporn Incharoen<sup>1,2\*</sup>

**บทคัดย่อ:** งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินผลของลิกโนเซลลูโลสในอาหารกึ่งบริสุทธิ์ต่ออัตราการเจริญเติบโต และสัณฐานวิทยาของลำไส้เล็กส่วนต้น ใช้ไก่เนื้อ สายพันธุ์ รอส 308 (Ross 308) เพศผู้ อายุ 10 วัน จำนวน 160 ตัว โดยแบ่งออกเป็น 4 กลุ่มๆ ละ 8 ซ้ำๆ ละ 5 ตัว ไก่แต่ละกลุ่มได้รับลิกโนเซลลูโลสในอาหารที่ระดับ 0 (T1), 60 (T2), 80 (T3) และ 100 (T4) กรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่ม T1 พบว่า น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น และอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัว มีค่าดีขึ้น ( $P<0.05$ ) ในกลุ่มที่ได้รับลิกโนเซลลูโลสในอาหารทั้ง 3 ระดับ แต่ในทางตรงกันข้าม ปริมาณอาหารที่กิน มีค่าลดลง ( $P<0.05$ ) ด้านการประเมินทางสัณฐานวิทยาของลำไส้เล็กส่วนต้น พบว่า ความสูงวิลไล อัตราส่วนของความสูงวิลไลต่อความลึกของคริปต์ พื้นที่ผิววิลไล มีค่าเพิ่มสูงขึ้น ( $P<0.05$ ) ในกลุ่ม T2, T3 และ T4 ตามลำดับ ในขณะที่ความลึกของคริปต์ มีค่าต่ำสุด ( $P<0.05$ ) ในกลุ่ม T3 และ T4 เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่ม T1 ดังนั้น การศึกษานี้จึงสามารถสรุปได้ว่า การใช้ลิกโนเซลลูโลส ที่ระดับ 80-100 กรัม/กิโลกรัมในอาหารไก่เนื้อกึ่งบริสุทธิ์ สามารถกระตุ้นและพัฒนาโครงสร้างของวิลไลในลำไส้เล็กส่วนต้นได้ จึงส่งผลให้อัตราการเจริญเติบโต และการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัวมีค่าดีขึ้น

**คำสำคัญ:** ไก่เนื้อ, ลิกโนเซลลูโลส, สมรรถภาพการเจริญเติบโต, สัณฐานวิทยาของลำไส้, อาหารกึ่งบริสุทธิ์

**ABSTRACT:** The present research was to determine the effect of dietary lignocellulose (LC) in semi-purified diet on growth performance and duodenal morphological alterations of broilers. One hundred sixty 10-day-old Ross 308 chicks were divided into 4 groups with 8 replications (5 birds/pen). Each group was provided the semi-purified diet included with LC at 0 (T1), 60 (T2), 80 (T3), and 100 (T4) g/kg, respectively. Compared with the control, weight gain and FCR ( $P<0.05$ ) improved in all LC groups, while lower feed intake ( $P<0.05$ ) were found. For duodenal morphological analysis, villus height, villus height to crypt depth ratio and villus area increased ( $P<0.05$ ) in T2, T3 and T4 groups, while lower crypt depth ( $P<0.05$ ) was observed in T3 and T4 groups compare with the T1 group. Therefore, the current results concluded that dietary 80 to 100 g/kg LC could stimulate and develop the duodenal villus structure resulting in improved growth rate and FCR.

**Keywords:** Broilers, Lignocellulose, Growth performance, Intestinal morphology, Semi-purified diet

<sup>1</sup> สาขาสัตวศาสตร์และเทคโนโลยีอาหารสัตว์ คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร  
Division of Animal Science and Feed Technology, Faculty of Agriculture Natural Resources and Environment,  
Naresuan University

<sup>2</sup> สถานวิจัยเพื่อความเป็นเลิศทางวิชาการด้านนวัตกรรมเกษตรและปศุสัตว์ คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร

Center of Excellence for Agricultural and Livestock Innovations, Faculty of Agriculture Natural Resources and Environment, Naresuan University

\* Corresponding author: tossaporni@nu.ac.th

## บทนำ

ตลอดหลายทศวรรษที่ผ่านมา เยื่อใยหยาบ (Crude fiber) มักถูกจัดจำแนกว่าเป็นสารต้านโภชนา (Anti-nutrition) ที่มีผลกระทบในเชิงลบโดยตรงต่อความสามารถในการย่อยอาหาร และพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้ในสัตว์ปีก แต่ในขณะเดียวกัน นักวิจัยด้านโภชนาศาสตร์สัตว์ กลับพบว่า การใช้เยื่อใยในอาหารไก่ในระดับที่เหมาะสม มีส่วนช่วยเพิ่มปริมาณการหลั่งกรดไฮโดรคลอริก กรดน้ำดีและเอนไซม์ต่าง ๆ รวมทั้งยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของกระเพาะบด (Hetland et al., 2003; Hetland et al., 2005) ซึ่งส่งผลดีต่ออัตราการย่อยได้และเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตของไก่เนื้อให้ดีขึ้น (Jiménez-Moreno et al., 2010) อย่างไรก็ตามปัจจุบันนี้มีผลิตภัณฑ์เสริมกลุ่มลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose) ออกมาจำหน่ายมากมายหลายยี่ห้อ เช่น Arbocel, Opticell และ Jeluvet เป็นต้น ลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose) เป็นองค์ประกอบหลักของผนังเซลล์พืช และเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของลิกนิน เฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลส ซึ่งถูกจัดเป็นเส้นใยอาหารที่ไม่ละลายในน้ำ (Insoluble fiber) มีคุณสมบัติความเหนียว ความคงตัวสูง ช่วยเพิ่มอัตราการเคลื่อนที่ของอาหารในระบบทางเดินอาหารได้ดีขึ้น เป็นตัวช่วยทำความสะอาดระบบทางเดินอาหาร กระตุ้นการพัฒนาโครงสร้างของระบบทางเดินอาหาร และกระตุ้นการผลิตเซลล์ดูดซึม (Absorptive epithelial cells) รวมทั้งช่วยลดค่า pH ในระบบทางเดินอาหาร ซึ่งเป็นปัจจัยร่วมในการยับยั้งจุลินทรีย์ก่อโรค ทำให้เกิดความสมดุลของจุลินทรีย์ประจำถิ่นภายในลำไส้ส่วนท้าย สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้าของ Incharoen (2013) ที่พบว่า การเสริมใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำจากแกลบข้าวในอาหารไก่เนื้อมีผลช่วยให้เกิดการพัฒนารูปร่างของวิลไลและเซลล์ดูดซึมของลำไส้เล็ก รวมไปถึงสมรรถภาพการผลิตโดยรวมเพิ่มขึ้น นอกจากนี้แล้วยังส่งผลเชิงบวกต่อความสม่ำเสมอของฝูงไก่ไข่รุ่น และแม่ไก่ที่กำลังให้ไข่ (Incharoen and Maneechote, 2013) ซึ่งคล้ายคลึงกับ Adibmoradi et al. (2016) ที่รายงานว่าการเสริมใยอาหารที่ประกอบด้วยเยื่อใยจากแกลบข้าว และเปลือกข้าวบาร์เลย์ ที่ระดับ 12% มีส่วนช่วยเพิ่มสมรรถภาพการเจริญเติบโตและการย่อยได้ของโปรตีน รวมไปถึงช่วยกระตุ้นพื้นฐานวิทยาของ

วิลไล แต่อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่ศึกษาระดับที่เหมาะสมในการเติมลิกโนเซลลูโลส หรือใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำในสูตรอาหารไก่เนื้อปกติ นั้น อาจยังไม่สามารถทำให้เราทราบค่าที่เหมาะสมแท้จริงได้ เนื่องจากการประกอบสูตรอาหารไก่เนื้อทั่วไปจะมีแหล่งลิกโนเซลลูโลสหรือใยอาหารไม่ละลายน้ำเป็นองค์ประกอบที่มีอยู่ในวัตถุดิบอาหารสัตว์อยู่แล้ว โดยเฉพาะวัตถุดิบที่ได้จากพืช และผลพลอยได้ทางการเกษตรต่าง ๆ ด้วยเหตุนี้โครงการวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาระดับที่เหมาะสมของการใช้ลิกโนเซลลูโลสในอาหารไก่เนื้อที่สอดคล้องต่อการเจริญเติบโตและการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาของลำไส้เล็กส่วนต้นในไก่เนื้อ

## วิธีการศึกษา

**การเตรียมสัตว์ทดลองและออกแบบการทดลอง**  
 ใช้อุจไก่เนื้อ สายพันธุ์ รอส 308 (Ross 308) เพศผู้ อายุ 1 วัน จำนวน 200 ตัว จาก บริษัท ซีพีเอฟ จำกัด (มหาชน) นำมาเลี้ยงภายในโรงเรือนทดลองระบบปิด พื้นคอกปูรองด้วยแกลบมีความหนา ประมาณ 3-4 นิ้ว ควบคุมอุณหภูมิบริเวณพื้นที่กกให้มีค่าเท่ากับ  $32 \pm 1$  องศาเซลเซียส ไก่ทุกตัวได้รับน้ำสะอาดและอาหารระยะแรก (24% CP; 3,050 kcal/kg) ให้กินอย่างเต็มที่ เมื่ออายุครบ 10 วัน ทำการชี้แนะนักไก่ทุกตัว เพื่อคัดเลือกไก่ที่มีความสม่ำเสมอ และน้ำหนักใกล้เคียงกัน จำนวน 160 ตัว มาแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม ๆ ละ 8 ซ้ำ ๆ ละ 5 ตัว โดยใช้แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely randomized design) ไก่แต่ละกลุ่มได้รับอาหารพื้นฐาน (Basal diet) + ลิกโนเซลลูโลส (ARBOCEL®) ที่ระดับ 0 (T1), 60 (T2), 80 (T3) และ 100 (T4) g/kg. อาหาร ตามลำดับ (Table 1) ตลอดระยะเวลาการทดลองทั้งหมด 35 วัน ไก่ทุกตัวถูกเลี้ยงในโรงเรือนระบบระเหยไอน้ำ (Evaporative cooling system) พื้นที่เฉลี่ยต่อตัว 0.16 ตร.ม. พื้นคอกทดลองปูรองด้วยแกลบที่ผ่านการฆ่าเชื้อโรค หนาประมาณ 2-3 นิ้ว ควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ระหว่าง 27-29 องศาเซลเซียส มีถังอาหารและน้ำเปิดให้น้ำอัตโนมัติ ให้แสงสว่างวันละ 17 ชั่วโมง ไก่ทุกตัวได้รับอาหารและน้ำให้กินอย่างเต็มที่ (*ad libitum*) ทำการบันทึกปริมาณอาหารที่กินและชั่งน้ำหนักรายตัว ทุก ๆ สัปดาห์ เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณหาสมรรถภาพการเจริญเติบโต เช่น



**Table 1** Ingredients and chemical compositions of experimental semi-purified diets

| Item                             | Grower |       |       |       | Finisher |       |       |       |
|----------------------------------|--------|-------|-------|-------|----------|-------|-------|-------|
|                                  | T1     | T2    | T3    | T4    | T1       | T2    | T3    | T4    |
| Ingredients                      |        |       |       |       |          |       |       |       |
| Wheat flour                      | 58.0   | 58.0  | 58.0  | 58.0  | 62.5     | 62.5  | 62.5  | 62.5  |
| Vegetable oil                    | 4.5    | 4.5   | 4.5   | 4.5   | 5.0      | 5.0   | 5.0   | 5.0   |
| Fish meal                        | 9.0    | 9.0   | 9.0   | 9.0   | 8.0      | 8.0   | 8.0   | 8.0   |
| Porcine meal                     | 16.5   | 16.5  | 16.5  | 16.5  | 12.6     | 12.6  | 12.6  | 12.6  |
| Dicalcium phosphate              | 0.2    | 0.2   | 0.2   | 0.2   | 0.1      | 0.1   | 0.1   | 0.1   |
| Calcium carbonate                | 0.2    | 0.2   | 0.2   | 0.2   | 0.1      | 0.1   | 0.1   | 0.1   |
| Sodium chloride                  | 0.0    | 0.0   | 0.0   | 0.0   | 0.1      | 0.1   | 0.1   | 0.1   |
| Premix <sup>1</sup>              | 0.4    | 0.4   | 0.4   | 0.4   | 0.4      | 0.4   | 0.4   | 0.4   |
| L-lysine                         | 0.6    | 0.6   | 0.6   | 0.6   | 0.6      | 0.6   | 0.6   | 0.6   |
| DL-Methionine                    | 0.6    | 0.6   | 0.6   | 0.6   | 0.6      | 0.6   | 0.6   | 0.6   |
| Lignocellulose                   | 0.0    | 6.0   | 8.0   | 10.0  | 0.0      | 6.0   | 8.0   | 10.0  |
| Kaolin                           | 10.0   | 4.0   | 2.0   | 0.0   | 10.0     | 4.0   | 2.0   | 0.0   |
| Calculated chemical compositions |        |       |       |       |          |       |       |       |
| ME <sup>2</sup> , kcal/kg        | 3,157  | 3,157 | 3,157 | 3,157 | 3,213    | 3,213 | 3,213 | 3,213 |
| Crude protein, %                 | 22.11  | 22.11 | 22.11 | 22.11 | 20.14    | 20.14 | 20.14 | 20.14 |
| Ether extract, %                 | 6.74   | 6.74  | 6.74  | 6.74  | 6.78     | 6.78  | 6.78  | 6.78  |
| Calcium, %                       | 2.51   | 2.51  | 2.51  | 2.51  | 1.96     | 1.96  | 1.96  | 1.96  |
| Total phosphorus, %              | 1.16   | 1.16  | 1.16  | 1.16  | 0.90     | 0.90  | 0.90  | 0.90  |
| Available phosphorus, %          | 0.60   | 0.60  | 0.60  | 0.60  | 0.48     | 0.48  | 0.48  | 0.48  |
| Crude fiber, %                   | 0.62   | 4.68  | 6.03  | 7.38  | 0.64     | 4.70  | 6.05  | 7.40  |
| NDF <sup>3</sup>                 | 1.76   | 6.82  | 8.51  | 10.20 | 1.81     | 6.88  | 8.57  | 10.25 |
| ADF <sup>4</sup>                 | 0.92   | 5.17  | 6.58  | 8.00  | 0.95     | 5.20  | 6.61  | 8.03  |
| ADL <sup>5</sup>                 | 1.45   | 2.88  | 3.36  | 3.83  | 1.50     | 2.93  | 3.40  | 3.88  |

<sup>1</sup>Premix provided the following per kilogram of complete diet: 14,000,000 IU of vitamin A; 3,000,000 IU of vitamin D3; 2,500 IU of vitamin E; 35 g of vitamin K; 2.5 g of vitamin B1; 6.5 g of vitamin B2; 275 g of vitamin B6; 25 mg of vitamin B12; 11.00 g of pantothenic acid; 35 g of nicotinic acid; 15 mg of biotin; 250 g of choline chloride; 1.5 g of copper; 60 g of manganese; 1.5 g of iron; 45 g of zinc; 400 mg of iodine; 150 mg of selenium.

<sup>2</sup>Metabolizable energy

<sup>3</sup>Neutral detergent fiber

<sup>4</sup>Acid detergent fiber

<sup>5</sup>Acid detergent lignin

น้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น ปริมาณอาหารที่กิน และอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัว เป็นต้น โครงการวิจัยนี้ได้ผ่านการรับรองจากคณะกรรมการกำกับดูแลการดำเนินการต่อสัตว์เพื่องานทางวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ เอกสารรับรองเลขที่ 60 01 011

#### การประเมินสัณฐานวิทยาของลำไส้เล็กส่วนต้น

เมื่อสิ้นสุดการทดลอง ที่อายุ 45 วัน คัดเลือกไก่ที่มีน้ำหนักใกล้เคียงกันจำนวน 4 ตัว/กลุ่ม เพื่อนำมาทำการการุณยฆาต หลังจากนั้นเก็บตัวอย่างลำไส้เล็กส่วนต้น ตามวิธีของ Incharoen et al. (2013) โดยตัดตัวอย่างให้มีความยาวประมาณ 2 ซม. ล้างสิ่งเหลือภายในลำไส้ ด้วย Phosphate buffered saline นำตัวอย่างบรรจุลงในขวดแก้วที่มีสารละลาย 10 % นิวทรัลบัฟเฟอร์ฟอร์มาลิน (Neutral buffer formalin) เพื่อเป็นการเก็บรักษาเนื้อเยื่อให้คงสภาพ หลังจากนั้น นำขวดเก็บตัวอย่างทั้งหมดไปเก็บไว้ในตู้เย็น ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ตัวอย่างทั้งหมดจะถูกนำไปผ่านขั้นตอนการเตรียมชิ้นเนื้อ โดยดึงนำออกจากเซลล์เนื้อเยื่อด้วยเอทานอลระดับต่าง ๆ และนำไปฝังลงในบล็อกพาราฟิน หลังจากนั้น นำบล็อกพาราฟินมาตัดตามแนวขวางให้มีความหนาประมาณ 4-5  $\mu\text{m}$  ด้วยเครื่องตัดตัวอย่างชิ้นเนื้อแบบกึ่งอัตโนมัติ (AEM 450, Amos Scientific Pty. Ltd., Australia) และนำไปวางบนแผ่นกระจกสไลด์ที่อยู่บนแท่นอุ่นสไลด์อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ย้อมสีด้วย Hematoxylin และ Eosin และหยด Mounting media ลงบนกระจกสไลด์แล้วปิดด้วยกระจกปิดสไลด์ หลังจากนั้นนำตัวอย่างที่เตรียมไว้ไปวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optika B-510 Series, Optika S.r.l., Italy) ที่กำลังขยาย 40x โดยใช้โปรแกรม SXView Software เพื่อประเมินความสูงวิลไล พื้นที่ผิววิลไล และความลึกของครีปต์ รวมทั้งคำนวณค่าสัดส่วนของความสูงวิลไล ต่อความลึกของครีปต์

#### การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

นำข้อมูลสมรรถภาพการเจริญเติบโต และสัณฐานวิทยาของวิลไลในลำไส้เล็กต้น ไปวิเคราะห์หาค่าความแปรปรวน (Analysis of variance) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's New Multiple range Test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

#### ผลการศึกษาและวิจารณ์

Table 2 แสดงอิทธิพลของลิกลินเซลลูโลสที่ระดับต่าง ๆ ในอาหารกึ่งบริสุทธ์ต่อสมรรถภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อ จากผลการศึกษาพบว่า น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น มีค่าสูงชันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) ในกลุ่มที่ได้รับลิกลินเซลลูโลสในอาหารทั้ง 3 ระดับ และมีค่าสูงที่สุดในกลุ่ม T3 และ T4 ( $P < 0.05$ ) เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม แต่ในทางตรงกันข้าม ปริมาณอาหารที่กิน มีค่าลดลงในกลุ่มที่ได้รับลิกลินเซลลูโลสในอาหารทั้ง 3 ระดับ และมีค่าต่ำสุดในกลุ่ม T3 และ T4 ( $P < 0.05$ ) ในขณะที่อาหารทดลองของไก่แต่ละกลุ่มมีองค์ประกอบทางโภชนาะ (โปรตีนรวมและพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้) ที่มีค่าที่เหมือนกัน (Table 1) แต่ไก่กลุ่มที่ได้รับระดับลิกลินเซลลูโลสในอาหารที่ระดับเพิ่มสูงขึ้น มีสมรรถภาพการเจริญเติบโตที่ดีขึ้นตามลำดับ ทั้งนี้อาจมีความเป็นไปได้ว่าอาหารสัตว์ที่ดีไม่ควรมีค่านึงถึงโภชนาะหลักเพียงอย่างเดียว หากแต่จำเป็นต้องตระหนักถึงความต้องการปัจจัยสนับสนุนเพิ่มเติมอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการกระตุ้นการทำงานในเชิงสรีระวิทยาของระบบทางเดินอาหาร เพื่อให้เกิดการย่อยและดูดซึมสารอาหารที่มีประสิทธิภาพสูงสุด และสัตว์สามารถนำไปใช้ในการพัฒนาโครงสร้างร่างกายและการเจริญเติบโตได้อย่างเต็มที่ สำหรับการทดลองนี้ ชี้ให้เห็นได้ว่าการเติมลิกลินเซลลูโลสเข้ามาในสูตรอาหารไก่เนื้อในระดับที่เหมาะสม เป็นอีกปัจจัยที่ช่วยสนับสนุนและเพิ่มประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อได้ โดยผลการทดลองที่สามารถยืนยันข้อสันนิษฐานดังกล่าวนี้คือ อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัวที่มีค่าสูงขึ้น ( $P < 0.05$ ) ในกลุ่มที่ได้รับลิกลินเซลลูโลสในอาหารทั้ง 3 ระดับ และมีค่าที่สูงสุดในกลุ่ม T3 และ T4 ( $P < 0.05$ ) ซึ่งผลการศึกษาที่ได้รับเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับ Incharoen (2013) ที่ได้ทำการทดลองโดยใช้อาหารไม่ละลายน้ำจากแหล่งชีวในอาหารไก่เนื้อที่ระดับ 100 ก./กก. พบว่า สามารถช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพการผลิตได้ โดยปราศจากผลเสียใด ๆ ต่อลักษณะคุณภาพซาก Jimenez-Moreno et al. (2011) ได้กล่าวว่า การใช้ใยอาหารไม่ละลายน้ำจากเปลือกถั่วที่ระดับ 5 % สามารถช่วยเพิ่มน้ำหนักตัวได้ถึง 15 % แต่หากใช้ไปจนถึงระดับ 7.5 % จะเกิดผลกระทบต่อสมรรถภาพการผลิต

**Table 2** Different levels of lignocellulose in semi-purified diets on growth performance of broiler chickens during 10 to 45 day of age (Mean  $\pm$  SE)

| Item                     | T1                                | T2                                | T3                                | T4                                 |
|--------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|------------------------------------|
| Initial body weight, g/b | 224.2 $\pm$ 0.88                  | 224.1 $\pm$ 0.92                  | 224.1 $\pm$ 0.89                  | 224.3 $\pm$ 0.90                   |
| Weight gain, g/b         |                                   |                                   |                                   |                                    |
| 10-24 day old            | 566.5 $\pm$ 10.95 <sup>b</sup>    | 559.2 $\pm$ 14.00 <sup>b</sup>    | 584.3 $\pm$ 10.22 <sup>ab</sup>   | 605.7 $\pm$ 10.76 <sup>a</sup>     |
| 25-45 day old            | 1,304.3 $\pm$ 9.94 <sup>c</sup>   | 1,379.4 $\pm$ 36.42 <sup>bc</sup> | 1,416.9 $\pm$ 30.46 <sup>ab</sup> | 1,478.1 $\pm$ 26.73 <sup>a</sup>   |
| 10-45 day old            | 1,870.8 $\pm$ 16.22 <sup>c</sup>  | 1,938.6 $\pm$ 45.18 <sup>bc</sup> | 2,001.1 $\pm$ 33.09 <sup>ab</sup> | 2,083.8 $\pm$ 35.89 <sup>a</sup>   |
| Feed intake, g/b         |                                   |                                   |                                   |                                    |
| 10-24 day old            | 1,275.5 $\pm$ 56.09 <sup>a</sup>  | 1,157.5 $\pm$ 30.30 <sup>ab</sup> | 1,013.3 $\pm$ 39.39 <sup>b</sup>  | 1,051.75 $\pm$ 49.70 <sup>bc</sup> |
| 25-45 day old            | 4,014.5 $\pm$ 67.99 <sup>a</sup>  | 3,565.3 $\pm$ 104.56 <sup>b</sup> | 3,004.3 $\pm$ 53.87 <sup>c</sup>  | 3,220.75 $\pm$ 84.72 <sup>c</sup>  |
| 10-45 day old            | 5,290.0 $\pm$ 108.84 <sup>a</sup> | 4,722.8 $\pm$ 115.98 <sup>b</sup> | 4,017.5 $\pm$ 81.67 <sup>c</sup>  | 4,272.50 $\pm$ 125.39 <sup>c</sup> |
| FCR                      |                                   |                                   |                                   |                                    |
| 10-24 day old            | 2.25 $\pm$ 0.11 <sup>a</sup>      | 2.08 $\pm$ 0.95 <sup>a</sup>      | 1.73 $\pm$ 0.05 <sup>b</sup>      | 1.74 $\pm$ 0.09 <sup>b</sup>       |
| 25-45 day old            | 3.08 $\pm$ 0.05 <sup>a</sup>      | 2.59 $\pm$ 0.09 <sup>b</sup>      | 2.12 $\pm$ 0.06 <sup>c</sup>      | 2.18 $\pm$ 0.07 <sup>c</sup>       |
| 10-45 day old            | 2.83 $\pm$ 0.07 <sup>a</sup>      | 2.44 $\pm$ 0.08 <sup>b</sup>      | 2.01 $\pm$ 0.05 <sup>c</sup>      | 2.05 $\pm$ 0.07 <sup>c</sup>       |

<sup>a-c</sup> Different superscripts within rows indicate significant differences ( $P < 0.05$ )

การประเมินผลของลิกโนเซลลูโลสในอาหารไก่เนื้อที่ประสิทธิภาพต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะสัณฐานวิทยาของลำไส้เล็กส่วนต้น (Table 3) พบว่าเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม ความสูงวิลโล และอัตราส่วนของความยาววิลโลต่อความลึกของคริปต์ มีค่าเพิ่มขึ้น ( $P < 0.05$ ) ในกลุ่ม T2, T3 และ T4 ตามลำดับ นอกจากนั้นแล้ว พื้นที่ผิววิลโล มีค่าสูงสุด ( $P < 0.05$ ) ในกลุ่ม T4 ในขณะที่ความลึกของคริปต์ มีค่าต่ำสุด ( $P < 0.05$ ) ในกลุ่ม T3 และ T4 ตามลำดับ คล้ายคลึงกับการเติมใยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำในอาหารไก่เนื้อที่ระดับ 0.75% ซึ่งพบว่า ความยาววิลโล และอัตราส่วนของความยาววิลโลต่อความลึกของคริปต์ มีค่าเพิ่มขึ้น (Sarikhani et al., 2010) เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับ Rohe et al. (2019) ที่กล่าวว่า การใช้ลิกโนเซลลูโลสในอาหารไก่เนื้อที่ระดับ 10% สามารถช่วยเพิ่มความยาวของวิลโล อัตราส่วนของความยาววิลโลต่อความลึกของคริปต์

และพื้นที่ผิวของวิลโลให้มีค่าที่เพิ่มขึ้นได้ อย่างไรก็ตาม ผลของการเปลี่ยนแปลงสัณฐานวิทยาของลำไส้เล็กที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับข้อมูลสมรรถภาพการผลิต ซึ่งพบว่า ถึงแม้ปริมาณการกินอาหารของไก่กลุ่มที่ได้รับลิกโนเซลลูโลสมีค่าลดลง แต่น้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้นกลับมีค่าเพิ่มสูงขึ้น จึงส่งผลให้อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัวมีค่าที่เพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับ Incharoen (2010) ที่รายงานว่า ความสูงและพื้นที่ผิวของวิลโลที่มีค่าเพิ่มขึ้น จะไปมีผลช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซึมสารอาหาร และกระตุ้นอัตราการเจริญเติบโตได้ในที่สุด ดังนั้นมีความเป็นไปได้สูงว่า ลิกโนเซลลูโลสอาจมีบทบาทสำคัญและเป็นอีกปัจจัยหนึ่งในการกระตุ้นและพัฒนาโครงสร้างของลำไส้เล็ก จึงส่งผลให้สมรรถภาพการเจริญเติบโตดีขึ้นได้ในที่สุด

**Table 3** Different levels of lignocellulose in semi-purified diets on duodenal morphological alterations of broiler chickens during 10 to 45 day of age (Mean  $\pm$  SE)

| Item                               | T1                             | T2                              | T3                              | T4                               |
|------------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
| Villus height ( $\mu$ m)           | 914.3 $\pm$ 20.02 <sup>c</sup> | 969.1 $\pm$ 16.22 <sup>ab</sup> | 970.3 $\pm$ 17.17 <sup>ab</sup> | 1,026.8 $\pm$ 12.83 <sup>a</sup> |
| Villus area ( $\text{mm}^2$ )      | 106.1 $\pm$ 6.24 <sup>b</sup>  | 105.4 $\pm$ 5.84 <sup>b</sup>   | 118.5 $\pm$ 5.84 <sup>ab</sup>  | 128.0 $\pm$ 5.84 <sup>a</sup>    |
| Crypt depth ( $\mu$ m)             | 40.7 $\pm$ 1.45 <sup>a</sup>   | 38.5 $\pm$ 0.73 <sup>a</sup>    | 33.9 $\pm$ 0.93 <sup>b</sup>    | 33.7 $\pm$ 0.83 <sup>b</sup>     |
| Villus height to crypt depth ratio | 16.6 $\pm$ 1.25 <sup>c</sup>   | 23.4 $\pm$ 1.25 <sup>b</sup>    | 27.8 $\pm$ 1.34 <sup>a</sup>    | 31.0 $\pm$ 1.25 <sup>a</sup>     |

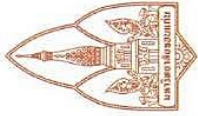
<sup>a-c</sup> Different superscripts within rows indicate significant differences ( $P < 0.05$ )

### สรุปผล

การใช้ลิกนินเซลลูโลส ที่ระดับ 80-100 กรัม/กิโลกรัม ในอาหารไก่เนื้อก็ง่บรสิฐหธิ สขามรทกระตุนและพัฒนหคอรงสร้งของวิลไลในล่ำได้เล็กสรวนต่นได้ จึงส่งผลให้ อุตกรหจรริญเติบโต และการเปลียนอาหารเป็น นำนกตัวมีค้ำตขึ้น

### เอกสารอ้างอิง

- Adibmoradi, M., B. Navidshad, and M. Faseleh. Jahromi. 2016. The effect of moderate levels of finely ground insoluble fibre on small intestine morphology, nutrient digestibility and performance of broiler chickens. *Ital. J. Anim. Sci.* 15(2): 310-317.
- Hetland, H., B. Svihus, and A. Krogdahl. 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 (2): 275-282.
- Hetland, H., B. Svihus, and M. Choct. 2005. Role of Insoluble Fiber on Gizzard Activity in Layers. *J. Appl. Poult. Res.* 14(1):38-46.
- Incharoen, T., K. Yamauchi, and N. Thongwittaya. 2010. Intestinal villus histological alterations in broilers fed dietary dried fermented ginger. *J. Anim. Physiol. Anim. Nutr.* 94. e130-e137.
- Incharoen, T. and P. Maneechote. 2013. The Effects of Dietary Whole Rice Hull as Insoluble Fiber on the Flock Uniformity of Pullets and on the Egg Performance and Intestinal Mucosa of Laying Hens. *Am. J. Agric. Biol. Sci.* 8(4):323-329.
- Incharoen, T. 2013. Histological adaptations of the gastrointestinal tract of broilers fed diets containing insoluble fiber from rice hull meal. *Am. J. Anim. Vet. Sci.* 8:79-88.
- Jiménez-Moreno E., J. M. González-Alvarado., D. González-Sánchez., R. Lázaro, and G. G. Mateos. 2010. Effects of type and particle size of dietary fiber on growth performance and digestive traits of broilers from 1 to 21 days of age. *Poult. Sci.* 89:2197-2212
- Jiménez-Moreno E., S. Chamorro., M. Frikha, H.M. Safaa., R. Lázaro, and G.G. Mateos. 2011. Effects of increasing levels of pea hulls in the diet on productive performance, development of the gastrointestinal tract, and nutrient retention of broilers from one to eighteen days of age. *Anim. Feed Sci. Technol.* 168:100-112.
- Rohe I., W. Vahjen., Metzger F, and J. Zentek. 2019. Effect of a "diluted" diet containing 10% lignocellulose on the gastrointestinal tract, intestinal microbiota, and excreta characteristics of dual purpose laying hens. *Poult. Sci.* 0:1-10.
- Sarikhan, M., H. A. Shahryar., B. Gholizadeh., M. H. Hosseinzadeh., B. Beheshti, and A. Mahmoodnejad. 2010. Effects of insoluble fiber on growth performance, carcass traits and ileum morphological parameters on broiler chick males. *Int. J. Agric. Biol.* 12: 531-536



## มหาวิทยาลัยขอนแก่น และ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์

ขอมอบเกียรติบัตร รางวัลระดับชมเชย ในการนำเสนอแบบบรรยาย

แต่

ชัตติยา ล้านแปง\* และ ทศพร อินเจริญ

เรื่อง “อิทธิพลของลิโมนะเซลล์ในอาหารกึ่งบริสุทธิ์ต่อสมรรถภาพการเจริญเติบโต และการเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยาของลำไ้ได้แก่ส่วนต้นในไก่เนื้อ”

ในงานประชุมวิชาการเกษตร ครั้งที่ ๒๑ ประจำปี ๒๕๖๓

ระหว่างวันที่ ๒๗-๒๘ มกราคม ๒๕๖๓

ณ คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

(รองศาสตราจารย์ นพ.ชาญชัย พานทองวิริยะกุล)  
รักษาการแทนอธิการบดีมหาวิทยาลัยขอนแก่น

(นายเฉลิมชัย ศรีอ่อน)  
รัฐมนตรีว่าการกระทรวงเกษตรและสหกรณ์



**KU KASSETSART UNIVERSITY**  
KAMPHAENG SAEN CAMPUS

เกษตรกำแพงแสน ตามรอยพ่อ สานต่อศาสตร์แห่งแผ่นดิน

**Proceedings**

**การประชุมวิชาการระดับชาติ**  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ครั้งที่ 17

The 17<sup>th</sup> National Kasetsart University Kamphaeng Saen Conference

ระหว่างวันที่ 2 - 3 ธันวาคม 2563  
ณ อาคารศูนย์เรียนรวม  
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม

**ผลงานทางวิชาการ 8 สาขา**

1. พืชและเทคโนโลยีชีวภาพ
2. สัตว์และสัตวแพทย์
3. วิศวกรรมศาสตร์
4. ศึกษาศาสตร์และพัฒนศาสตร์
5. มนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์
6. วิทยาศาสตร์สุขภาพและการกีฬา
7. วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม  
และความหลากหลายทางชีวภาพ
8. ส่งเสริมการเกษตร

Logos at the bottom: ThaiBev, and various institutional logos.

การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 17 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตกำแพงแสน วันที่ 2-3 ธันวาคม 2563

**สัดส่วนที่แตกต่างกันของชนิดใยอาหารต่อสมรรถภาพการเจริญเติบโตและระยะเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของอาหารในท่อทางเดินอาหารของไก่เนื้อ ที่อายุ 10 ถึง 24 วัน**

**Different ratio of dietary fiber type on growth performance and feed movement time through the alimentary canal of broilers during 10 to 24 days of age**

**ชัชติยา ล้วนแปง<sup>1</sup>, ทศพร อินเจริญ<sup>1</sup>, ศศิธร วิชิตนาค<sup>1</sup> และ นฤมล พรหมรัตน์<sup>1</sup>**

**Khattiya Lanpang<sup>1</sup>, Tossaporn Incharoen<sup>1</sup>, Sasithorn Wichitnak<sup>1</sup> and Narumon Promrat<sup>1</sup>**

**บทคัดย่อ**

ใยอาหารแต่ละชนิดมีบทบาทสำคัญโดยตรงต่ออัตราการเคลื่อนที่ของสิ่งย่อยในท่อทางเดินอาหาร ประสิทธิภาพการย่อยอาหาร การดูดซึมโภชนะ และอัตราการเจริญเติบโตของไก่เนื้อ ดังนั้นการศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินสัดส่วนที่แตกต่างกันของใยอาหารไม่ละลายน้ำต่อละลายน้ำ (IDF:SDF) ในสูตรอาหารต่อสมรรถภาพการเจริญเติบโต และระยะเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของอาหารในท่อทางเดินอาหารของไก่เนื้อ ที่อายุ 10 ถึง 24 วัน ใช้ไก่เนื้อ สายพันธุ์ รอส 308 เพศผู้ อายุ 10 วัน จำนวน 160 ตัว แบ่งเป็น 4 กลุ่มๆ ละ 8 ซ้ำๆ ละ 5 ตัว แต่ละกลุ่มได้รับอาหารที่มีสัดส่วน IDF:SDF ต่างกัน 4 ระดับ คือ 1.43 (T1), 1.89 (T2), 2.57 (T3) และ 3.66 (T4) เมื่อสิ้นสุดการทดลอง พบว่า น้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น และอัตราการแลกเนื้อ มีแนวโน้มดีขึ้น ( $P<0.05$ ) ตามสัดส่วนของ IDF:SDF ที่เพิ่มสูงขึ้น อัตราการกินอาหารของกลุ่ม T2 และ T4 มีค่าสูงสุด และต่ำสุด ( $P<0.05$ ) ตามลำดับ ระยะเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของอาหารของกลุ่ม T2, T3 และ T4 มีค่าลดลง ( $P<0.05$ ) เมื่อเทียบกับกลุ่ม T1 การทดลองนี้สามารถสรุปได้ว่า อัตราการเคลื่อนที่ของอาหารในท่อทางเดินอาหารจนกระทั่งขับถ่ายมูลใช้ระยะเวลาสั้นลง และสมรรถภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อที่อายุ 10 ถึง 24 วัน มีค่าดีขึ้น ตามการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนใยอาหารไม่ละลายน้ำต่อละลายน้ำในสูตรอาหาร

**คำสำคัญ :** สัดส่วนใยอาหาร, ใยอาหารไม่ละลายน้ำต่อละลายน้ำ, สมรรถภาพการเจริญเติบโต, ระยะเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของอาหาร

**Abstract**

Each type of dietary fiber plays an important role on the feed passage rate, digestive efficiency, nutrients absorption and broiler performance. The objective of this study was to investigate the different ratio of insoluble dietary fiber to soluble dietary fiber (IDF:SDF) on growth performance and feed movement time through the alimentary canal of broilers during 10 to 24 days of age. One hundred sixty 10-day-old male broilers (Ross 308) were divided into 4 groups with 8 replications (5 birds/pen). Each group was provided the grower diet containing different ratio of IDF:SDF described in the following;

<sup>1</sup> สาขาสัตวศาสตร์และเทคโนโลยีอาหารสัตว์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์การเกษตร คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร  
Division of Animal Science and Feed Technology, Department of Agricultural Science, Faculty of Agriculture Natural Resources and Environment, Naresuan University

การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 17 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตกำแพงแสน วันที่ 2-3 ธันวาคม 2563

1.43 (T1), 1.89 (T2), 2.57 (T3) and 3.66 (T4). At the end of trial, body weight gain and feed conversion ratio tended to be better with increased IDF:SDF ratio. Feed intake showed the highest and lowest values ( $P<0.05$ ) in T2 and T4 groups, respectively. Feed movement time of T2, T3 and T4 groups showed a lower value ( $P<0.05$ ) compared to T1 group. The current trial can conclude that increasing ratio of IDF:SDF in broiler ration decreased the feed movement time through the alimentary canal until excretion and improved the growth performance of broiler during 10 to 24 days old.

**Keyword :** Dietary fiber ratio, insoluble dietary fiber to soluble dietary fiber, growth performance, feed movement time  
E-mail address : [tossapomi@nu.ac.th](mailto:tossapomi@nu.ac.th)

### คำนำ

ใยอาหาร (Dietary fiber) เป็นองค์ประกอบหลักของผนังเซลล์ของพืช (Plant cell wall) จัดเป็นกลุ่มพอลิแซ็กคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้ง (Non-starch polysaccharides) โดยสามารถจำแนกได้เป็น 2 ชนิดคือ ใยอาหารละลายน้ำ (Soluble dietary fiber; SDF) และใยอาหารไม่ละลายน้ำ (Insoluble dietary fiber; IDF) โดยที่ SDF จะมีลักษณะเป็นเจล สามารถจับกับน้ำตาล ดูดซับน้ำมันได้ ความหนืดสูง และแบคทีเรียที่อาศัยในลำไส้ใหญ่สามารถย่อยและใช้ประโยชน์ได้ เช่น เพคติน (Pectin) กลูโคแมนแนน (Glucomannan) กัม (Gums) มิวซิลเลจ (Mucilage) เป็นต้น แต่ในทางตรงกันข้าม คุณสมบัติของ IDF จะมีความหนืดต่ำ ความพองตัวสูง ช่วยเพิ่มอัตราการเคลื่อนที่ของอาหารในระบบทางเดินอาหาร ได้แก่ เซลลูโลส (Cellulose) และ เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) รวมไปถึง ลิกนิน (Lignin) Incharoen (2013) รายงานว่า การเสริมใยอาหารไม่ละลายน้ำจากกลีบข้าวในอาหารไก่เนื้อมีส่วนช่วยในการพัฒนาของวิลโลและเซลล์ดูดซึมของลำไส้เล็ก รวมไปถึงสมรรถภาพการผลิตโดยรวมมีค่าดีขึ้นสอดคล้องกับ Adibmoradi et al. (2016) ที่บันทึกว่า การเสริมใยอาหารจากกลีบข้าวและเปลือกข้าวบาร์เลย์ ที่ระดับ 12 เปอร์เซ็นต์ ในสูตรอาหารไก่เนื้อ สามารถกระตุ้นการเจริญเติบโตและการย่อยได้ของโปรตีน รวมไปถึงช่วยพัฒนาโครงสร้างวิลโล ปัจจุบันจึงมีผลิตภัณฑ์เสริมสุขภาพสัตว์กลุ่มลิกนินเซลลูโลส (Lignocellulose) ออกมาจำหน่ายหลายยี่ห้อ ได้แก่ Arbocel, Opticell และ Jeluvet เป็นต้น แต่อย่างไรก็ตาม วัตถุประสงค์อาหารสัตว์ที่ใช้กันอยู่ในประเทศ ส่วนใหญ่เป็นผลพลอยได้ที่ได้จากสิ่งเหลือในอุตสาหกรรมเกษตรและอาหาร ซึ่งวัตถุประสงค์เหล่านี้มีใยอาหารทั้งชนิดไม่ละลายน้ำและละลายน้ำเป็นองค์ประกอบ หากเราทราบชนิดและระดับของใยอาหารที่เป็นองค์ประกอบในวัตถุประสงค์ที่นำมาใช้ในสูตรอาหารไก่เนื้อ จะทำให้อาหารไก่เนื้อที่ผสมได้มีระดับและอัตราส่วนของใยอาหารแต่ละชนิดที่เหมาะสม ซึ่งอาจเป็นอีกปัจจัยที่ช่วยส่งเสริมสุขภาพและอัตราการเจริญเติบโตให้ดีขึ้นได้ โดยที่ไม่จำเป็นต้องใช้สารเสริมกลุ่มลิกนินเซลลูโลสที่ต้องนำเข้าจากต่างประเทศและมีราคาแพง

อัตราการเคลื่อนที่ของอาหารในท่อนำทางเดินอาหาร ถือว่าเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีอิทธิพลโดยตรงต่อการใช้ประโยชน์ได้ของโภชนะ เพราะเมื่อสัตว์กินอาหารเข้าไปแล้ว อาหารเหล่านั้นจะเคลื่อนตัวผ่านอวัยวะย่อยอาหารส่วนต่างๆ และสัมผัสกับเอนไซม์ย่อยอาหาร เพื่อลดอนุภาคของสิ่งย่อย (Digesta) ให้มีขนาดเล็กลงจนสามารถดูดซึมผ่านผนังลำไส้เข้าไปในร่างกาย จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง Saki et al. (2011) พบว่า อาหารที่มีระดับเพคตินและเซลลูโลสในสัดส่วนที่เพิ่มขึ้น มีผลทำให้ค่าความหนืดของสิ่งย่อยในลำไส้เล็กส่วนปลายและไส้ติ่งของไก่เนื้อที่ช่วงอายุ 14, 21 และ 42 วัน มีค่าสูงขึ้นตามไปด้วย คล้ายคลึงกับ การเสริมเพคตินในอาหารพื้นฐาน ที่ระดับ



การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 17 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตกำแพงแสน วันที่ 2-3 ธันวาคม 2563

3-5 เปอร์เซ็นต์ มีผลทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้น และลดอัตราการเคลื่อนที่ของอาหารในระบบทางเดินอาหาร รวมทั้งช่วยเพิ่มการใช้ประโยชน์ได้ของพลังงานให้ดีขึ้นในไก่เนื้อระยะแรก แต่ไปมีผลกระทบต่ออัตรการย่อยได้ในไก่เนื้อระยะเจริญเติบโต (Silva et al., 2013) อย่างไรก็ตาม จะเห็นได้ว่าระดับและชนิดของใยอาหารมีผลโดยตรงต่อความหนืดของอาหารหรือสิ่งย่อย ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อระยะเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของอาหารในท่อนำเดินอาหาร ประสิทธิภาพการย่อยและดูดซึมสารอาหาร รวมทั้งการใช้ประโยชน์ของโภชนะและอัตราการเจริญเติบโตของไก่เนื้อ จากที่ได้กล่าวมาทั้งหมดจะเห็นได้ว่า ใยอาหารแต่ละชนิดมีบทบาทสำคัญโดยตรงต่ออัตราการเคลื่อนที่ของสิ่งย่อยในท่อนำเดินอาหาร ประสิทธิภาพการย่อยอาหาร การดูดซึมโภชนะ และอัตราการเจริญเติบโต ซึ่งงานวิจัยนี้มีเป้าหมายเพื่อศึกษาผลของใยอาหารแต่ละชนิดในไก่เนื้อระยะเจริญเติบโต (Grower phase) เนื่องจากเป็นระยะที่ระบบทางเดินอาหารมีการพัฒนาทั้งโครงสร้าง (Morphology) และการทำงาน (Function) อย่างสมบูรณ์ เมื่อเปรียบเทียบกับไก่ระยะแรก (Starter phase) ดังนั้นการทดลองนี้ จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินสัดส่วนที่แตกต่างกันของใยอาหารไม่ละลายน้ำต่อละลายน้ำ (IDF:SDF) ในสูตรอาหาร ต่อสมรรถภาพการเจริญเติบโตและระยะเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของอาหารในท่อนำเดินอาหารของไก่เนื้อ ที่อายุ 10 ถึง 24 วัน

## วิธีการศึกษา

### การเตรียมอาหารทดลอง

คัดเลือกวัตถุดิบอาหารสัตว์ แหล่งคาร์โบไฮเดรต 2 ชนิด ได้แก่ ข้าวโพด และรำสักรัดน้ำมัน และแหล่งโปรตีน 1 ชนิด คือ กากถั่วเหลือง สำหรับส่วนผสมอื่นๆ เป็นวัตถุดิบอาหารสัตว์ที่ปราศจากใยอาหารจากพืช หลังจากนั้นนำวัตถุดิบที่ได้กำหนดไว้ไปทำการวิเคราะห์หองค์ประกอบทางเคมี ระดับใยอาหารรวม (Total dietary fiber; TDF) ใยอาหารละลายน้ำ และใยอาหารไม่ละลายน้ำ ตามวิธีการของ AOAC (2010) เมื่อทราบองค์ประกอบทางเคมี และระดับใยอาหารของทั้ง 2 ชนิดแล้ว จึงทำการคำนวณและประกอบสูตรอาหารทดลองให้มีคุณค่าโภชนะไม่ต่ำกว่าความต้องการโภชนะของไก่เนื้อสายพันธุ์รอส 308 โดยใช้ Lignocellulose (ARBOCEL® RC FINE, Germany) ซึ่งเป็นสารประกอบเชิงซ้อนของลิกนิน เฮมิเซลลูโลส และเซลลูโลส เป็นแหล่งของ IDF และใช้ Guar gums (LOTUS INTERNATIONAL, India) ที่สกัดได้จากเนื้อในเมล็ดถั่ว เป็นแหล่งของ SDF เพื่อใช้ปรับสัดส่วนของ IDF:SDF ให้มีค่าแตกต่างกัน โดยกำหนดให้ระดับ TDF ของอาหารทดลองทุกกลุ่มมีค่าเท่ากัน

### สัตว์ทดลองและออกแบบการทดลอง

โครงการวิจัยนี้ได้รับการรับรองจากคณะกรรมการกำกับดูแลการดำเนินการต่อสัตว์เพื่องานทางวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ (เอกสารรับรองเลขที่ 60 01 011) ชื่อไก่เนื้อ สายพันธุ์ รอส 308 (Ross 308) เพศผู้ อายุ 1 วัน จำนวน 200 ตัว มาจาก บริษัท ซีพีเอฟ จำกัด (มหาชน) ลูกไก่ทุกตัวถูกนำมาเลี้ยงในโรงเรือนทดลองระบบปิด ควบคุมอุณหภูมิบริเวณพื้นที่ได้กักอยู่ที่  $32 \pm 2$  องศาเซลเซียส และพื้นคอกปูรองด้วยแกลบที่ผ่านการฉีดพ่นน้ำยาฆ่าเชื้อ ความหนาประมาณ 3-4 นิ้ว ไก่ทุกตัวได้รับน้ำสะอาดและอาหารระยะ Starter (24% CP; 3,050 kcal/kg) อย่างไม่จำกัด เมื่ออายุครบ 10 วัน ทำการชั่งน้ำหนักรายตัว เพื่อคัดเลือกไก่ที่มีน้ำหนักใกล้เคียงกัน จำนวน 160 ตัว แบ่งเป็น 4 กลุ่มๆ ละ 8 ซ้ำๆ ละ 5 ตัว โดยใช้แผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely randomized design; CRD) แต่ละกลุ่มได้รับอาหารทดลองที่มีสัดส่วนของ IDF:SDF แตกต่างกัน 4 ระดับ คือ

การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 17 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตกำแพงแสน วันที่ 2-3 ธันวาคม 2563

1.43 (T1), 1.89 (T2), 2.57 (T3) และ 3.66 (T4) แต่กำหนดให้ระดับ TDF ของอาหารทดลองทุกกลุ่มมีค่าเท่ากัน คือ 15.27 (Table 1) ไก่ทุกตัวถูกเลี้ยงในโรงเรือนระบบระเหยไอเย็น (Evaporative cooling system) มีพื้นที่คอกเฉลี่ย 0.16 ตารางเมตรต่อตัว ควบคุมอุณหภูมิภายในโรงเรือน อยู่ระหว่าง 27-29 องศาเซลเซียส ติดตั้งถังอาหาร และมีปั๊มเปิดให้น้ำในคอกทดลอง กำหนดโปรแกรมแสง 17 ชั่วโมงต่อวัน ไก่ทุกตัวได้รับอาหารทดลองแต่ละสูตรและน้ำให้กินอย่างเต็มที่ (Ad libitum) ไปจนกระทั่งอายุ 24 วัน ตลอดระยะเวลาการทดลอง ทำการบันทึกปริมาณอาหารที่กิน และชั่งน้ำหนักรายตัว สัปดาห์ละ 1 ครั้ง เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณหาสมรรถภาพการเจริญเติบโต ได้แก่ น้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น ปริมาณอาหารที่กิน และอัตราการแลกเนื้อ เป็นต้น

**Table 1** Ingredients and calculated chemical compositions of experimental diets

| Item                                   | T1    | T2    | T3    | T4    |
|----------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| <b>Ingredients</b>                     |       |       |       |       |
| Com                                    | 45.2  | 45.2  | 45.2  | 45.2  |
| Defatted rice bran                     | 8.0   | 8.0   | 8.0   | 8.0   |
| Vegetable oils                         | 8.3   | 8.3   | 8.3   | 8.3   |
| Soybean meal, 46% CP                   | 20.1  | 20.1  | 20.1  | 20.1  |
| Fish meal, 58% CP                      | 14.6  | 14.6  | 14.6  | 14.6  |
| Dicalcium phosphate                    | 0.1   | 0.1   | 0.1   | 0.1   |
| Calcium carbonate                      | 0.2   | 0.2   | 0.2   | 0.2   |
| Premix <sup>1</sup>                    | 0.3   | 0.3   | 0.3   | 0.3   |
| DL-Methionine                          | 0.2   | 0.2   | 0.2   | 0.2   |
| Lignocellulose                         | 0.0   | 1.0   | 2.0   | 3.0   |
| Guar gums                              | 3.0   | 2.0   | 1.0   | 0.0   |
| <b>Calculated chemical composition</b> |       |       |       |       |
| ME <sup>2</sup> , kcal/kg              | 3,150 | 3,150 | 3,150 | 3,150 |
| CP <sup>3</sup> , %                    | 22.00 | 22.00 | 22.00 | 22.00 |
| TDF <sup>4</sup> , %                   | 15.27 | 15.27 | 15.27 | 15.27 |
| IDF <sup>5</sup> , %                   | 9.00  | 10.00 | 11.00 | 12.00 |
| SDF <sup>6</sup> , %                   | 6.27  | 5.27  | 4.27  | 3.27  |
| IDF/SDF ratio                          | 1.43  | 1.89  | 2.57  | 3.66  |

<sup>1</sup>Premix provided the following per kilogram of complete diet: 14,000,000 IU of vitamin A; 3,000,000 IU of vitamin D3; 2,500 IU of vitamin E; 35 g of vitamin K; 2.5 g of vitamin B1; 6.5 g of vitamin B2; 275 g of vitamin B6; 25 mg of vitamin B12; 11.00 g of pantothenic acid; 35 g of nicotinic acid; 15 mg of biotin; 250 g of choline chloride; 1.5 g of copper; 60 g of manganese; 1.5 g of iron; 45 g of zinc; 400 mg of iodine; 150 mg of selenium. <sup>2</sup>Metabolizable energy. <sup>3</sup>Crude protein. <sup>4</sup>Total dietary fiber. <sup>5</sup>Insoluble dietary fiber. <sup>6</sup>Soluble dietary fiber.



การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 17 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตกำแพงแสน วันที่ 2-3 ธันวาคม 2563

#### การประเมินระยะเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของอาหารในท้องทางเดินอาหาร

เมื่อไก่อายุครบ 24 วัน คัดเลือกไก่ที่มีน้ำหนักตัวใกล้เคียงกัน จำนวนกลุ่มละ 5 ตัว เพื่อทำการประเมินระยะเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของอาหารในท้องทางเดินอาหาร โดยดัดแปลงวิธีการตาม Washburn (1990) ซึ่งไก่แต่ละตัวถูกเลี้ยงบนกรงขังเดี่ยว (Individual cage) ที่ติดตั้งถาดรองมูลไว้ใต้กรง งดให้อาหารเป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อให้ไก่ได้ขับถ่ายมูลออกมาให้หมด แต่ปล่อยให้กินน้ำสะอาดผ่านหัวน้ำปัสสาวะได้อย่างอิสระ เมื่อครบกำหนดระยะเวลาอดอาหาร ไก่ทุกตัวจะได้รับอาหารทดลองแต่ละสูตรพร้อมกัน และใช้นาฬิกาดิจิตอลจับเวลา (นาฬิกาที่ 0) โดยนักวิจัยจะทยอยเทอาหารลงไปบนรางอาหารทั้งหมด จำนวน 8 ครั้งๆ ละ 30 กรัม การให้อาหารในแต่ละครั้งจะมีช่วงเวลาห่างกัน ครั้งละ 30 นาที ไปจนกระทั่งครบระยะเวลา 240 นาที ก่อนการให้อาหารครั้งถัดไป นักวิจัยจะเทอาหารที่เหลืออยู่ในรางอาหารออกทุกครั้งเพื่อชั่งน้ำหนักอาหารที่เหลือ และบันทึกข้อมูลเพื่อนำไปคำนวณหาปริมาณอาหารที่กินทุกๆ 30 นาที และอัตราการกินอาหารสะสม ระหว่างช่วงเวลา 0 ถึง 240 นาที ตลอดระยะเวลาการทดสอบนักวิจัยจะสังเกตการขับถ่ายมูลของไก่แต่ละตัว หากไก่ตัวใดขับถ่ายมูลที่มีลักษณะเป็นก้อนของแข็งหรือเป็นก้อนปนน้ำเล็กน้อย จะถือว่าไก่ตัวนั้นขับถ่ายมูลได้อย่างสมบูรณ์ แล้วจะหยุดเวลาและบันทึกผล ในกรณีที่ไก่ขับถ่ายมูลที่มีลักษณะเป็นน้ำ หรือกึ่งแข็งกึ่งเหลว ยังไม่นับว่าเป็นการขับถ่ายมูล

#### การวิเคราะห์ทางสถิติ

นำข้อมูลเก็บได้ทั้งหมดมาวิเคราะห์หาความแปรปรวน (Analysis of variances) ตามแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely randomized design) และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยด้วย Duncan's New Multiple Range Test ที่ระดับนัยสำคัญ  $P < 0.05$

#### ผลการทดลองและวิจารณ์

ตลอดระยะเวลาการเก็บข้อมูลการทดลอง พบว่า น้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น และอัตราการแลกเนื้อ มีแนวโน้มดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $P < 0.05$ ) ตามสัดส่วน IDF:SDF ที่เพิ่มสูงขึ้น (1.89, 2.57, 3.66 ตามลำดับ) อัตราการกินอาหารของกลุ่ม T2 และ T4 มีค่าสูงสุด และต่ำสุด ตามลำดับ ( $P < 0.05$ ) คล้ายคลึงกับงานวิจัยของ ทศพร และคณะ (2562) ที่รายงานไว้ สูตรอาหารไก่เนื้อกึ่งบริสุทธ์ (อายุ 10-24 วัน) ที่มีใยอาหารละลายน้ำจากกัวกัม (Guar gum) เป็นองค์ประกอบ ตั้งแต่ระดับ 5-7 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลกระทบเชิงลบต่อน้ำหนักตัว และอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัว เช่นเดียวกับ การเสริมกัวกัม ที่ระดับ 0.5 เปอร์เซ็นต์ ในอาหารพื้นฐาน ส่งผลเสียต่อปริมาณการหลังและความเข้มข้นของกรดเกลือ รวมไปถึงอัตราการย่อยได้ของไขมัน น้ำหนักตัว และอัตราการแลกเนื้อของไก่เนื้ออายุ 7-21 วัน (Maisonier et al., 2003) เป็นไปในทิศทางเดียวกัน งานวิจัยหลายชิ้นที่บันทึกว่า ระดับใยอาหารชนิดละลายน้ำในอาหารไก่ที่เพิ่มสูงขึ้นมีความสัมพันธ์กับสมรรถภาพการเจริญเติบโตและอัตราการย่อยได้ที่ลดลง (Maisonier et al., 2001; Carre et al., 2002) แต่ในทางตรงกันข้าม กลับพบว่า การเพิ่มระดับใยอาหารไม่ละลายน้ำในอาหาร สามารถช่วยพัฒนาโครงสร้างของวิลโลและประสิทธิภาพการทำงานของเซลล์ดูคซิม และส่งผลดีต่อสมรรถภาพการเจริญเติบโตโดยรวมของไก่เนื้อ (Incharoen, 2013) สอดคล้องกับ Adibmoradi et al. (2016) ที่กล่าวว่า สูตรอาหารไก่เนื้อที่ประกอบไปด้วยใยอาหารจากเกล็ดข้าวและเปลือกข้าวบาร์เลย์ ที่ระดับ 12

การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 17 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตกำแพงแสน วันที่ 2-3 ธันวาคม 2563

เปอร์เซ็นต์ มีส่วนช่วยกระตุ้นอัตราการเจริญเติบโต และการย่อยได้ของโปรตีน รวมไปถึงช่วยพัฒนาโครงสร้างวิลได นอกจากนี้แล้ว การใช้ใยอาหารไม่ละลายน้ำจากเปลือกถั่ว ที่ระดับ 5 เปอร์เซ็นต์ ยังสามารถช่วยเพิ่มน้ำหนักตัวได้ถึง 15 เปอร์เซ็นต์ แต่หากใช้ไปจนถึงระดับ 7.5 เปอร์เซ็นต์ จะส่งผลกระทบต่อสมรรถภาพการผลิต (Jiménez-Moreno et al., 2011)

Table 2 Different IDF:SDF ratio on growth performance of broilers during 10 to 24 days old (Mean±SD)

| Item                     | T1                         | T2                        | T3                          | T4                        |
|--------------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Initial body weight, g/b | 198.3 ± 2.6                | 198.2± 2.6                | 198.0 ± 2.6                 | 198.0 ± 2.5               |
| Weight gain, g/b         | 214.5 ± 17.9 <sup>d</sup>  | 263.0 ± 13.2 <sup>c</sup> | 334.8 ± 18.1 <sup>b</sup>   | 447.6 ± 37.3 <sup>a</sup> |
| Feed intake, g/b         | 870.5 ± 78.9 <sup>ab</sup> | 909.1 ± 67.8 <sup>a</sup> | 823.4 ± 114.6 <sup>ab</sup> | 813.8 ± 63.3 <sup>b</sup> |
| FCR                      | 4.1 ± 0.4 <sup>a</sup>     | 3.5 ± 0.3 <sup>b</sup>    | 2.5 ± 0.3 <sup>c</sup>      | 1.8 ± 0.1 <sup>d</sup>    |

<sup>abc,d</sup> Different superscripts within rows indicate significant differences (P < 0.05).

จากข้อมูลที่ได้กล่าวมาข้างต้นชี้ให้เห็นว่า ชนิดใยอาหารและระดับใยอาหารแต่ละชนิดที่ใช้ในสูตรอาหารส่งผลกระทบต่อสมรรถภาพการเจริญเติบโต และประสิทธิภาพการย่อยอาหาร ซึ่งผลที่ได้รับจากการศึกษาชี้ให้เห็นชัดเจนว่า หากในสูตรอาหารมีระดับใยอาหารละลายน้ำในปริมาณที่สูงจนเกินไปจะส่งผลกระทบต่อเชิงลบมากกว่าเชิงบวก ซึ่งเป็นที่ทราบกันดีอยู่แล้วว่า ใยอาหารละลายน้ำ มีความหนืดสูง และมีลักษณะเป็นเจล ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ว่าลักษณะเฉพาะตัวดังกล่าว อาจส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการย่อยอาหารและดูดซึมโภชนะของลำไส้เล็ก (Small intestine) แต่ในทางตรงกันข้าม ใยอาหารที่ไม่ละลายในน้ำในกลุ่มของลิกโนเซลลูโลส มีคุณสมบัติความหนืดต่ำ ความพองตัวสูง ช่วยเพิ่มอัตราการเคลื่อนที่ของอาหารในระบบทางเดินอาหารได้ดีขึ้นเป็นตัวช่วยทำความสะอาดระบบทางเดินอาหาร กระตุ้นการพัฒนาโครงสร้างของระบบทางเดินอาหาร และกระตุ้นการผลิตเซลล์ดูดซึม (Absorptive epithelial cells) สอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้าของ ชิตติยา และ ทศพร (2563) บันทึกไว้ว่า หากสูตรอาหารไก่เนื้อประกอบไปด้วยใยอาหารไม่ละลายน้ำประเภทลิกโนเซลลูโลส ที่ระดับ 8-10 เปอร์เซ็นต์ อาจเป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่ช่วยสนับสนุนให้เกิดจากตอบสนองทางสรีระวิทยาของอวัยวะในระบบทางเดินอาหาร เพื่อเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยและดูดซึมโภชนะที่มีอยู่ในอาหารที่สัตว์กินเข้าไป

ระยะเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของอาหารในท้องทางเดินอาหารหลังจากได้รับอาหารจนกระทั่งขับถ่ายมูลออกมาของไก่กลุ่ม T2, T3 และ T4 มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05) เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่ม T1 (Figure 1) ผลที่เกิดขึ้นชี้ให้เห็นว่า สัดส่วน IDF:SDF ในอาหารไก่เนื้อที่เพิ่มขึ้น มีผลทำให้การเคลื่อนที่ของอาหารในท้องทางเดินอาหารจนกระทั่งขับถ่ายมูลใช้ระยะเวลาสั้นลง อย่างไรก็ตามก็ตีจากผลการประเมินระยะเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ของอาหาร พบว่า มีความสอดคล้องกับปริมาณการกินอาหารเฉลี่ยสะสมตลอดระยะเวลาที่ทำการเก็บข้อมูลทุกๆ 30 นาที ไปจนกระทั่งครบ 240 นาที (Figure 2) ของไก่กลุ่ม T4, T3 และ T2 ที่มีค่าเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อเทียบกับกลุ่ม T1 (P<0.05) ยกเว้นปริมาณการกินอาหารเฉลี่ยสะสมในนาทีที่ 90, 210 และ 240 ของไก่กลุ่ม T2 ที่มีค่าไม่แตกต่างกับกลุ่ม T1 (P>0.05) เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับ Mateos et al., 2013 ที่

การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 17 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตกำแพงแสน วันที่ 2-3 ธันวาคม 2563

รายงานว่าการย่อยอาหารละลายน้ำจากเพคติน ไปมีผลต่อความหนืด และลดอัตราการเคลื่อนที่ของสิ่งย่อยในระบบทางเดินอาหาร Silva et al. (2013) บันทึกว่า เมื่อไก่เนื้อได้รับอาหารพื้นฐานเสริมเพคติน ที่ระดับ 3-5 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้ความหนืดในระบบทางเดินอาหารเพิ่มขึ้น อัตราการเคลื่อนที่ของอาหารลดลง และอัตราการย่อยได้ช่วงเจริญเติบโตมีค่าลดลง Saki et al. (2011) พบว่า สัดส่วนของเพคติน 2 ส่วน ต่อเซลลูโลส 1 ส่วน มีผลทำให้ค่าความหนืดของสิ่งย่อยในลำไส้เล็กส่วนปลายและไส้ติ่งของไก่เนื้อที่ช่วงอายุ 14, 21 และ 42 วัน มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มที่ได้รับอาหารที่มีสัดส่วนของเพคติน 1 ส่วน ต่อเซลลูโลส 2 ส่วน

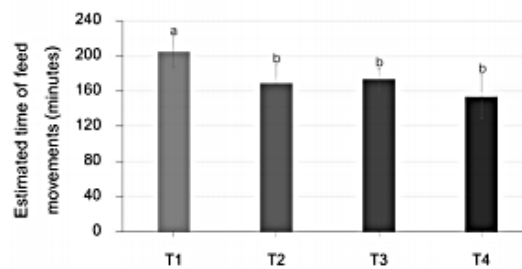


Figure 1 Estimated time of feed movements that has passed through the alimentary canal after eating to excreting (min). The data represent the means  $\pm$  SD of 5 replicates. <sup>a,b</sup>Each bar with a different letters denotes a significant difference ( $P < 0.05$ ).

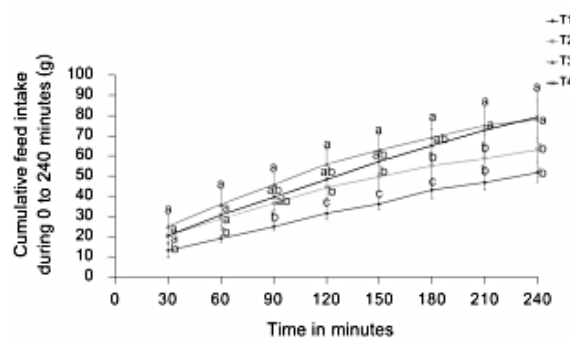


Figure 2 Cumulative feed intake of broilers during 0 to 240 minutes after access to feed containing different IDF:SDF ratio. The data represent the means  $\pm$  SD of 5 replicates. <sup>a,b,c</sup>Each bar with a different letters denotes a significant difference ( $P < 0.05$ ).

#### สรุปผลและเสนอแนะ

อัตราการเคลื่อนที่ของอาหารในท่อนำทางเดินอาหารจนกระทั่งขับถ่ายมูลใช้ระยะเวลาสั้นลง และสมรรถภาพการเจริญเติบโตของไก่เนื้อที่อายุ 10 ถึง 24 วัน มีค่าดีขึ้น ตามการเพิ่มขึ้นของสัดส่วนใยอาหารไม่

การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 17 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตกำแพงแสน วันที่ 2-3 ธันวาคม 2563

ละลายน้ำต่อละลายน้ำในสุตรอาหาร แต่อย่างไรก็ดี ควรมีการวิจัยเพิ่มเติมในประเด็นที่เกี่ยวข้องกับระดับที่เหมาะสมของใยอาหารรวมในสุตรอาหาร โดยอ้างอิงสัดส่วน IDF:SDF ที่ได้จากการศึกษานี้ไปเป็นแนวทางในการศึกษาต่อไป

#### กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ สำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) สำหรับการสนับสนุนทุนวิจัยบัณฑิตศึกษา ด้านการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร ประจำปีงบประมาณ 2563 ภายใต้สัญญาฉบับเลขที่ HRD6305058

#### เอกสารอ้างอิง

- ทศพร อินเจริญ, ชัดติยา ล้านแปง, รองเดช ตั้งตระกูลพงษ์ และพรพรรณ วัฒนะสังข์จะ. 2562. ผลกระทบเชิงลบของใยอาหารชนิดละลายน้ำในอาหารกึ่งบริสุทธิ์ต่อสมรรถภาพการผลิต และจุลินทรีย์ในไส้ติ่งของไก่เนื้อระยะแรก. *แก่นเกษตร* 47 (ฉบับพิเศษ 2): 647-652.
- ชัดติยา ล้านแปง และ ทศพร อินเจริญ. 2563. อิทธิพลของลิกโนเซลลูโลสในอาหารกึ่งบริสุทธิ์ต่อสมรรถภาพการเจริญเติบโตและการเปลี่ยนแปลงทางสัณฐานวิทยาของลำไส้เล็กส่วนต้นในไก่เนื้อ. *แก่นเกษตร* 48 (ฉบับพิเศษ 1): 221-226.
- Adibmoradi, M., B. Navidshad, and M.F. Jahromi. 2016. The effect of moderate levels of finely ground insoluble fibre on small intestine morphology, nutrient digestibility and performance of broiler chickens. *Ital. J. Anim. Sci.* 15: 310–317.
- Association of official analytical chemists. AOAC. 2010. Official methods of analysis of association of official analytical chemists. 18th Edition, Washington DC. USA.
- Carre, B., A. Idi, S. Maisonnier, J. P. Melcion, F. X. Oury, J. Gomez, and P. Pluchard. 2002. Relationships between digestibilities of food components and characteristics of wheats (*Triticum aestivum*) introduced as the only cereal source in a broiler chicken diet. *Br. Poult. Sci.* 43: 404–415.
- Jiménez-Moreno E., S. Chamorro., M. Frikha, H.M. Safaa., R. Lázaro, and G.G. Mateos. 2011. Effects of increasing levels of pea hulls in the diet on productive performance, development of the gastrointestinal tract, and nutrient retention of broilers from one to eighteen days of age. *Anim. Feed Sci. Technol.* 168: 100-112.
- Incharoen, T. 2013. Histological adaptations of the gastrointestinal tract of broilers fed diets containing insoluble fiber from rice hull meal. *Am. J. Anim. Vet. Sci.* 8: 79-88.
- Maisonnier, S., J. Gomez, and B. Carre. 2001. Nutrient digestibility and intestinal viscosities in broiler

การประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 17 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์วิทยาเขตกำแพงแสน วันที่ 2-3 ธันวาคม 2563

- chickens fed on wheat diets, as compared to maize diets with added guar gum. *Br. Poult. Sci.* 42: 102–110.
- Maisonnier, S., J. Gomez, A. Bree, C. Berri, E. Baeza, and B. Carre. 2003. Effects of microflora status, dietary bile salts and guar gum on lipid digestibility, intestinal bile salts, and histomorphology in broiler chickens. *Poult. Sci.* 82: 805–814.
- Mateos, G.G., M.P. Serrano., J. Berrocoso., A. Perez-bonilla., R. Lazaro. 2013. Improving the utilization of raw materials in poultry feeding: new technologies and inclusion levels. XXIV. World's Poultry Congress. Salvador de Bahia, Brazil.1-13
- Saki, A. A., Matin, H. R. H., Zamani, P., Tabatabai, M. M., and Vatanchian, M. 2011. Various ratios of pectin to cellulose affect intestinal morphology, DNA quantitation, and performance of broiler chickens. *Livestock Science.* 139: 237–244.
- Silva, V.K., V. de Souza Morita, and I.C. Boleli. 2013. Effect of pectin extracted from citrus pulp on digesta characteristics and nutrient digestibility in broilers chickens. *R. Bras. Zootec.* 42: 575-583.
- Washburn, K. W. 1991. Efficiency of Feed Utilization and Rate of Feed Passage Through the Digestive System. *Poult. Sci.* 70: 447–452.





## มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

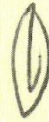
ขอมอบเกียรติบัตรเพื่อรับรองว่าผลงานวิจัย ภาคโปสเตอร์  
เรื่อง สัตว์ส่วนที่แตกต่ากันของชนิดโยอาหารต่อสมรรถภาพการเจริญเติบโตและระยะเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่  
ของอาหารในท่อทางเดินอาหารของไก่เนื้อ ที่อายุ 10 ถึง 24 วัน

โดย

ชัตติยา ล้านแปง ทศพร อินเจริญ ศศิธร วิชิตนาค และ นฤมล พรหมรัตน์

ได้ผ่านการพิจารณาจากคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ สาขาสัตว์และสัตวแพทย์  
และได้นำเสนอในการประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 17 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

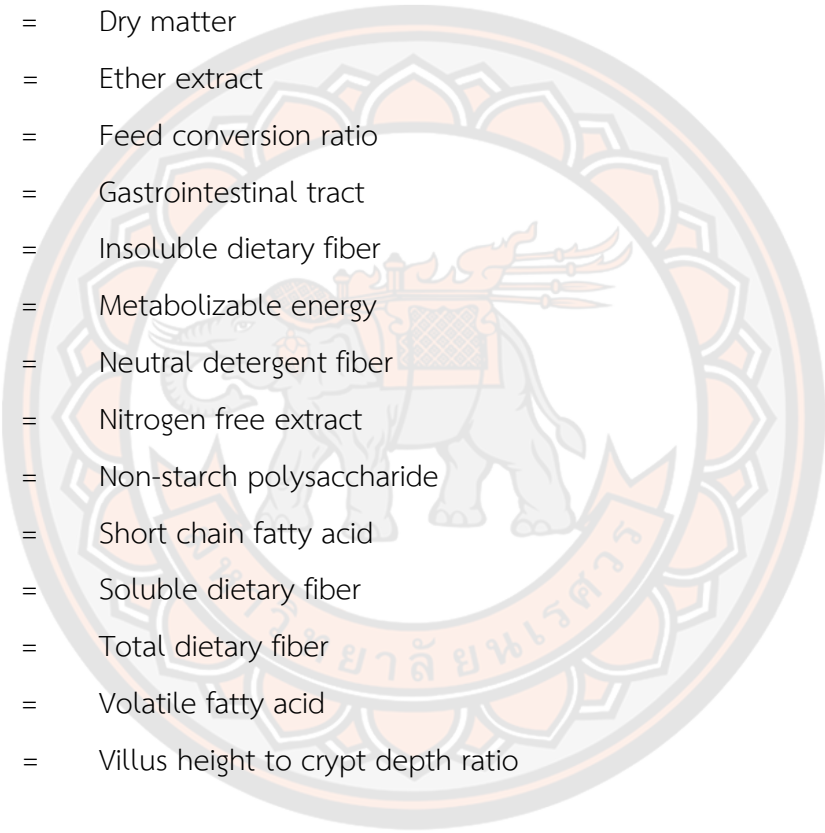
ระหว่างวันที่ 2-3 ธันวาคม พ.ศ. 2563



(รองศาสตราจารย์ น.สพ.ดร.อนุชัย ภิญญูภูมิรินทร์)  
รองอธิการบดีวิทยาเขตกำแพงแสน

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภเดช สุจินพรัหม)  
ประธานคณะกรรมการฝ่ายจัดสัมมนาและ  
ประชุมวิชาการระดับชาติ ครั้งที่ 17

## อภิธานศัพท์



|       |   |                                    |
|-------|---|------------------------------------|
| ADF   | = | Acid detergent fiber               |
| ADL   | = | Acid detergent lignin              |
| ATP   | = | Adenosine triphosphate             |
| CP    | = | Crude protein                      |
| CF    | = | Crude fiber                        |
| DM    | = | Dry matter                         |
| EE    | = | Ether extract                      |
| FCR   | = | Feed conversion ratio              |
| GIT   | = | Gastrointestinal tract             |
| IDF   | = | Insoluble dietary fiber            |
| ME    | = | Metabolizable energy               |
| NDF   | = | Neutral detergent fiber            |
| NFE   | = | Nitrogen free extract              |
| NSP   | = | Non-starch polysaccharide          |
| SCFA  | = | Short chain fatty acid             |
| SDF   | = | Soluble dietary fiber              |
| TDF   | = | Total dietary fiber                |
| VFA   | = | Volatile fatty acid                |
| VH:CD | = | Villus height to crypt depth ratio |