

การศึกษาใยอาหารฟังก์ชันในอาหารสำหรับสุกรหย่านม



วิทยานิพนธ์เสนอบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ เพื่อเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษา
หลักสูตรปริญญาปรัชญาดุษฎีบัณฑิต
สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การเกษตร
กุมภาพันธ์ 2563
ลิขสิทธิ์เป็นของมหาวิทยาลัยนครสวรรค์

วิทยานิพนธ์

เรื่อง “การศึกษาใยอาหารฟังก์ชันในอาหารสำหรับสุกรหย่านม”

ของนางสาวนุจิรา ทักขิณานันต์

ได้รับการพิจารณาให้นับเป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตร

ปรัชญาดุษฎีบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การเกษตร

คณะกรรมการสอบวิทยานิพนธ์

.....ประธานกรรมการสอบวิทยานิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. นรินทร์ ทองวิทยา)

.....ประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(รองศาสตราจารย์ ดร. วันดี ทาตระกูล)

.....กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เสกสม อาตมากร)

.....กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทศพร อินเจริญ)

.....กรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รัชสรรค์ เจริญสุข)

.....กรรมการผู้ทรงคุณวุฒิภายใน
(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สนธยา นุ่มท้วม)

อนุมัติ

(ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล มณีสว่าง)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

28 2563

ประกาศคุณูปการ

วิทยานิพนธ์ฉบับนี้ ได้รับทุนอุดหนุนการทำกิจกรรมส่งเสริมและสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

ขอขอบพระคุณประธานที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ รองศาสตราจารย์ ดร. วันดี ทาตระกูล ที่ให้โอกาสในการศึกษา ให้คำปรึกษาและชี้แนะแนวทางในการเรียนและทำวิทยานิพนธ์ ตลอดจนคณะกรรมการที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ อันได้แก่ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เสกสม อาตมางกูร ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ทศพร อินเจริญ และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. รังสรรค์ เจริญสุข ที่คอยให้คำปรึกษาจนทำให้วิทยานิพนธ์ฉบับนี้สำเร็จลุล่วงโดยสมบูรณ์

ขอขอบพระคุณบิดา มารดา และครอบครัวที่ให้การสนับสนุน เข้าใจ และให้กำลังใจในการเรียนและทำวิทยานิพนธ์จนเสร็จสมบูรณ์ และขอขอบคุณกัลยาณมิตร พี่ น้อง เจ้าหน้าที่ทุกท่านที่ให้การสนับสนุนทั้งแรงกาย แรงใจ และแนวคิด จนทำให้การทำงานเป็นไปอย่างราบรื่นเสมอมา ในทุกการทำงาน ทุกอุปสรรค และความสำเร็จ จะเป็นประสบการณ์อันล้ำค่าที่ถูกจดจำเรียนรู้ และใช้ในการก้าวผ่านทุกปัญหาและเติบโตต่อไปในอนาคต

นุจิรา ทักษิณานันต์

ชื่อเรื่อง	การศึกษาใยอาหารฟังก์ชันในอาหารสำหรับสุกรหย่านม
ผู้วิจัย	นุจิรา ทักษิณานันต์
ประธานที่ปรึกษา	รองศาสตราจารย์ ดร. วันดี ทาตระกูล
กรรมการที่ปรึกษา	ดร. เสกสม อาตมางกูร ดร. ทศพร อินเจริญ ดร. รัชสรรค์ เจริญสุข
ประเภทสารนิพนธ์	วิทยานิพนธ์ ปริญญาโท สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การเกษตร มหาวิทยาลัยนเรศวร, 2563
คำสำคัญ	ใยอาหาร แกลบ สุกรหย่านม

บทคัดย่อ

ใยอาหารเป็นสารประกอบที่ไม่สามารถย่อยและใช้ประโยชน์ได้โดยสัตว์กระเพาะเดี่ยว แต่มีงานวิจัยสมัยใหม่หลายงานที่ชี้ให้เห็นว่า ใยอาหาร โดยเฉพาะอย่างยิ่งใยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำ สามารถช่วยปรับปรุงฐานวิทยาของลำไส้เล็ก ลดเชื้อแบคทีเรียก่อโรคในทางเดินอาหาร ส่วนท้าย และเพิ่มการกินได้ของสุกรหลังหย่านม ซึ่งการศึกษาในครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาแหล่งใยอาหารที่เหมาะสมจากผลพลอยได้จากการแปรรูปสินค้าเกษตร และศึกษาอิทธิพลของสัดส่วนใยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำต่อใยอาหารชนิดละลายน้ำ (insoluble dietary fiber: soluble dietary fiber ratio; IDF:sDF) และระดับของใยอาหาร (dietary fiber; DF) การทดลองแบ่งออกเป็น 3 การทดลองดังนี้

การทดลองที่ 1 เป็นการประเมินองค์ประกอบทางเคมีและทางกายภาพของแกลบดิบ กากมันสำปะหลัง ผีถั่วเหลือง และรำสกัดน้ำมัน ผลการทดลองพบว่าแกลบดิบมีปริมาณของใยอาหารและปริมาณใยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำสูงกว่าวัตถุดิบชนิดอื่น คือเท่ากับ 68.01 ± 1.97 และ $62.52 \pm 3.22\%$ ตามลำดับ จึงถูกคัดเลือกเพื่อใช้เป็นแหล่งของใยอาหารในการทดลองต่อไป

การทดลองที่ 2 ศึกษาระดับของใยอาหารในอาหารสุกรหลังหย่านม โดยใช้แกลบดิบเป็นแหล่งของใยอาหาร ในสุกรจำนวน 30 ตัว หย่านมที่อายุ 21 ± 3 วัน น้ำหนักเริ่มต้นเฉลี่ย 6.05 ± 0.46 กิโลกรัม สุกรได้รับอาหารทดลอง 3 กลุ่มที่มีระดับของใยอาหารแตกต่างกัน คือ 130 (DF130), 140 (DF140) และ 150 (DF150) กรัมต่อกิโลกรัมอาหาร เป็นระยะเวลา 28 วัน และในวันที่ 29 ของการทดลอง ทำการการุณยฆาตสุกร 1 ตัวต่อคอก ($n=4$) เพื่อเก็บน้ำหนักอวัยวะ ได้แก่ ตับ กระเพาะอาหาร ลำไส้ใหญ่และลำไส้เล็ก ตัวอย่างเนื้อเยื่อของลำไส้เล็กเพื่อประเมิน

สัณฐานวิทยา และปริมาณเชื้อแบคทีเรียในลำไส้เล็กส่วนปลาย ลำไส้ติ่ง และลำไส้ใหญ่ สำหรับการทดลองหาการย่อยได้ของสารอาหาร ในสุกรหย่านมจำนวน 12 ตัว สุกรได้รับอาหารทดลอง ปริมาณ 4% ของน้ำหนักตัว การประเมินค่าการย่อยได้ของโภชนะใช้โครมิกซ์ออกไซด์ 0.5% เป็นสารบ่งชี้ในอาหาร ผลการทดลองพบว่าระดับของใยอาหารมีแนวโน้มทำให้การย่อยได้แบบปรากฏของไขมันและเยื่อใยเพิ่มขึ้น ($P = 0.082$ และ 0.074 ตามลำดับ) สุกรกลุ่ม DF140 กรัมต่อกิโลกรัมมีน้ำหนักลำไส้เล็กเมื่อเทียบน้ำหนักตัวไม่แตกต่างกับกลุ่ม DF130 แต่สูงกว่า DF150 ($P = 0.012$) ทางด้านประสิทธิภาพการผลิต สัณฐานวิทยาของลำไส้เล็ก และเชื้อ *E. coli*, *Salmonella* spp. และ Lactic acid bacteria ในทางเดินอาหารส่วนท้ายไม่มีความแตกต่างทางสถิติระหว่างกลุ่มทดลอง ดังนั้นใยอาหารที่เหมาะสมในอาหารสุกรหลังหย่านมคือ 140 กรัมต่อกิโลกรัมอาหาร

การทดลองที่ 3 เป็นการศึกษาสัดส่วน IDF:sDF ในอาหารสุกรหลังหย่านม ในสุกรจำนวน 64 ตัว หย่านมที่อายุ 21 ± 3 วัน น้ำหนักเริ่มต้น 6.13 ± 0.23 กิโลกรัม สุกรจะได้รับอาหารทดลอง ที่มีระดับของ IDF:sDF แตกต่างกัน 4 ระดับคือ 3 (กลุ่มควบคุม), 4, 5 และ 6 (R4, R5 และ R6 ตามลำดับ) อาหารทดลองทุกสูตรควบคุมปริมาณ DF ให้ใกล้เคียง 140 ± 0.5 กรัมต่อกิโลกรัมอาหาร ทดลองเป็นระยะเวลา 28 วัน และในวันที่ 29 ของการทดลอง สุ่มสุกร 1 ตัวต่อคอก ($n = 4$) ทำการการุณยฆาตเพื่อเก็บตัวอย่างเนื้อเยื่อของลำไส้เล็ก น้ำหนักของอวัยวะ และปริมาณแบคทีเรียจากทวารหนักของสุกร ผลการศึกษาพบว่า ในสัปดาห์แรกหลังหย่านมสุกรที่ได้รับอาหาร R4, R5 และ R6 มีแนวโน้มเพิ่มปริมาณอาหารที่กิน ($P = 0.070$) แต่ทั้งสามกลุ่มก็มีปริมาณอาหารที่กินน้อยกว่ากลุ่มควบคุม และเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการผลิตโดยรวมพบว่า สุกรที่ได้รับอาหาร R4 มีค่า FCR ดีกว่ากลุ่มอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P = 0.035$) ทางด้านสัณฐานวิทยาของลำไส้เล็กส่วนต้นพบว่าสัดส่วน VH:CD ระหว่างกลุ่ม R4 และกลุ่มควบคุมไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P = 0.016$) แต่มีค่าสูงกว่ากลุ่ม R6 ทั้งนี้ น้ำหนักอวัยวะเมื่อเทียบน้ำหนักตัว ปริมาณเชื้อ *E. coli*, *Salmonella* spp. และ Lactic acid bacteria ไม่มีความแตกต่างระหว่างกลุ่มการทดลอง ดังนั้นสัดส่วน IDF:sDF ที่เหมาะสมในอาหารสุกรหลังหย่านม คือ 4.0

โดยสรุป แกลบข้าวบดมีความเหมาะสมที่จะใช้เป็นแหล่งของใยอาหารสำหรับสุกรหลังหย่านม และเมื่อใช้แกลบบดเป็นแหล่งใยอาหารในอาหารสุกรหลังหย่านม โดยระดับ DF ที่เหมาะสมคือ 140 กรัมต่อกิโลกรัมจะช่วยปรับปรุงสัณฐานวิทยาของลำไส้เล็กส่วนปลาย และสัดส่วน IDF:sDF เท่ากับ 4.0 เป็นระดับที่ส่งเสริมประสิทธิภาพการผลิตของสุกรและปรับปรุงสัณฐานวิทยาของลำไส้เล็กส่วนกลางและส่วนปลาย

Title	STUDIES ON FUNCTIONAL DIETARY FIBER IN POST-WEANING PIG DIETS
Author	Nujira Taksinanan
Advisor	Associate Professor Wandee Tartrakoon, Ph.D.
Co-advisors	Seksom Attamangkune, Ph.D. Tossaporn Incharoen, Ph.D. Rangsun Charoensook, Ph.D.
Academic Paper	Ph.D. Thesis in Agricultural Science Naresuan University, 2020
Keywords	dietary fiber, rice hull, weaning pigs

ABSTRACT

Dietary fiber is an indigestible nutrient in non-ruminant animals. Recent studies indicate that dietary fiber, especially insoluble dietary fiber, can improve gut morphology, reduce harmful bacteria in the hindgut, and increase feed intake in newly weaning pigs. This research was designed to determine the dietary fiber content in some agricultural by-products and its effects on weaning pig diets as dietary fiber sources with various insoluble dietary fiber-to-soluble dietary fiber ratios (IDF:sDF) and dietary fiber levels (DF). This research was divided into three experiments.

Experiment 1: determination of chemical compositions and some physical properties of rice hull, cassava pulp, soybean hull, and defat rice bran. The results showed that rice hull was the best source of dietary fiber and high insoluble dietary fiber content (68.01 ± 1.97 and $62.52 \pm 3.22\%$, respectively). Thus, we selected rice hull as the dietary fiber source for experiments 2 and 3.

Experiment 2: determination of dietary fiber level in post-weaning pig diets by using ground rice hull as the dietary fiber source. A total of 30 weaning pigs with initial weights of 5–6 kg were weaned at 21 ± 3 days. The pigs were divided into three groups and fed different dietary levels for 28 days: 130 (DF130), 140 (DF140), and 150 (DF150) g/kg. On day 29 of the experiment, one pig per pen ($n = 4$) was euthanized. The

digestive organs were weighed, and the tissues of the small intestine were collected for morphological evaluation. The bacteria count was collected from the digestive content. For the digestibility trial, 12 weaning pigs were fed with the same experimental diets as the diets that were given in the performance trial at 4% of live body weight. The nutrient digestibility was determined using 0.5% chromic oxide as the indicator. The results revealed that increasing the DF levels improved fat and fiber digestibility ($P = 0.082$ and 0.074 respectively). Moreover, the pigs fed with the DF140 diet were not statistically different from those fed with DF130 but were better than those fed with DF150 ($P = 0.012$). The pigs' growth performances, intestinal morphology, and amounts of *E. coli*, *Salmonella* spp., and lactic acid bacteria were not affected by the treatments. Therefore, the DF of 140 g/kg diet was suitable for weaning pig diets.

Experiment 3: evaluation of IDF:sDF ratio in post-weaning pig diets. A total of 64 pigs with initial weights of 6.13 ± 0.23 kg were weaned at 21 ± 3 days. All pigs were offered diets with different IDF:sDF ratios with the same dietary level (140 g/kg diet) for 28 days: 3.0 (control), 4.0, 5.0, and 6.0 (R4, R5, and R6, respectively). On day 29 of the experiment, one pig per pen ($n = 4$) was euthanized, the organs were weighed, and the intestinal tissues were collected for morphological evaluation. The quantity of intestinal microbes was determined by a rectal swab. The results showed that the pigs fed with R4, R5, and R6 tended to increase their feed intake, but it remained lower than the intake of the control diet ($P = 0.070$). However, the overall performances of the pigs fed the R4 diet had significantly better FCR than did the other groups ($P = 0.035$). For the duodenal VH:CD, there are no statistically different between the R4 and control groups ($P = 0.016$) but those had higher the duodenal VH:CD than the R6 group. The organ weights and the amounts of *E. coli*, *Salmonella* spp., and lactic acid bacteria were not statistically different among the groups. Therefore, the suitable IDF:sDF ratio was 4.0.

In conclusion, ground rice hull was suitably used as a dietary fiber source for post- weaning pig diets. A DF level of 140 g/kg improved the pigs' ileal intestinal morphology. An IDF:sDF of 4.0 improved their growth performance and jejunal and ileal intestinal morphologies.

สารบัญ

บทที่	หน้า
1 บทนำ.....	1
ความเป็นมาของปัญหา	1
วัตถุประสงค์.....	2
ความสำคัญของการวิจัย	2
สมมติฐานของการวิจัย.....	3
2 เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง.....	4
ใยอาหาร (Dietary fiber)	4
การวิเคราะห์ปริมาณเยื่อใยและใยอาหาร	8
คุณสมบัติทางกายภาพของใยอาหาร	13
การหมักย่อยของใยอาหารในระบบทางเดินอาหาร	16
สรีระและสัณฐานวิทยาของลำไส้เล็กของสุกร	22
สมดุลของจุลินทรีย์ในระบบทางเดินอาหารของสุกรหย่านม	29
การศึกษาการใช้ใยอาหารในอาหารสุกร	32
วัตถุดิบที่มีใยอาหารสูงในประเทศไทย.....	34
3 วิธีดำเนินการวิจัย.....	39
การทดลองที่ 1 ศึกษาลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของ แหล่งใยอาหาร.....	39
การทดลองที่ 2 การศึกษาผลของระดับใยอาหาร (DFในอาหารสุกรหลังหย่านมต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโต สัณฐานวิทยาของลำไส้ และการย่อยได้ของสารอาหาร.....	41

สารบัญ (ต่อ)

บทที่	หน้า
การทดลองที่ 3 การทดลองเพื่อหาสัดส่วนของที่เหมาะสมของเยื่อใยชนิด ไม่ละลายน้ำต่อเยื่อใยชนิดละลายน้ำ (iDF:sDF) ในอาหาร สุกรหลังหย่านม โดยใช้แหล่งใยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำ (จากการคัดเลือกวัตถุดิบจากการทดลองที่ 1) และผลต่อ การพัฒนาของระบบทางเดินอาหาร สัณฐานวิทยาของ ลำไส้เล็ก ปริมาณเชื้อแบคทีเรียในทางเดินอาหารส่วนท้าย และสมรรถภาพการผลิต.....	48
4 ผลการวิจัย.....	53
ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของแหล่งของใยอาหาร ชนิดต่างๆ.....	53
ผลการศึกษาผลของระดับใยอาหาร (DF) ที่แตกต่างกันในอาหารต่อ ประสิทธิภาพการเจริญเติบโต สัณฐานวิทยาของลำไส้เล็ก และการย่อยได้ ของสารอาหาร.....	54
ผลการศึกษาสัดส่วน iDF:sDF ที่เหมาะสมในสูตรอาหารสำหรับสุกร หลังหย่านม.....	59
5 บทสรุป.....	66
สรุปผลการวิจัย.....	77
ข้อเสนอแนะ.....	78
บรรณานุกรม.....	79
ภาคผนวก.....	101
ประวัติผู้วิจัย.....	107

สารบัญตาราง

ตาราง

หน้า

1	Classification of dietary fiber according to water solubility.....	8
2	Dietary fiber content in whole wheat and toasted soy bean determined by different methods (mean $\pm$ standard deviation) in g/100 Gdm.....	13
3	Roles of volatile fatty acids in digestive system	17
4	Physical changing of dietary fiber during transit digestive system (human model)	19
5	Total, soluble and insoluble dietary fiber composition of rice hull.....	36
6	Total, soluble and insoluble dietary fiber composition of soybean hull	37
7	Ingredients and nutrient composition of experimental diets with different dietary fiber levels.....	45
8	Ingredients and nutrient composition of experimental diets with different ratio of IDF:SDF	51
9	Physical properties and chemical composition of various dietary fiber sources (mean $\pm$ SD).....	53
10	Ingredients and nutrient composition of experimental diets with different ratio of IDF: SDF	55
11	Nutrient digestibility (%) of weaning pigs fed the experimental diets with different level of dietary fiber	56
12	Intestinal morphology of weaning pigs fed the experimental diets with different levels of dietary fiber	57
13	Organ weight of weaning pigs fed experimental diets with different levels of dietary fiber.....	58
14	Large intestinal pH and bacterial cell count of Ileum, caecum and colon of weaning pigs fed the experimental diets with different levels of dietary fiber	59

สารบัญตาราง (ต่อ)

ตาราง

หน้า

15	Growth performance of weaning pigs fed experimental diets with difference iDF:sDF	60
16	Organ weight and small intestine length of digestive system and in pigs fed the experimental diets with difference iDF:sDF ratio	62
17	Gut morphology of weaning pigs fed experimental diets with different ration of iDF:sDF	64
18	Bacterial count by rectal swab test of pigs fed the experimental diets with different ratio of iDF:sDF at 29 days after weaning (log CFU/g)	65
19	Comparison organ weight of this result with previous research in weaning pigs (% of body weight)	73

สารบัญภาพ

ภาพ	หน้า
1 โครงสร้างของใยอาหารแต่ละชนิด	6
2 องค์ประกอบของใยอาหารที่ได้จากการวิเคราะห์แบบต่างๆ.....	11
3 ขอบเขตการวิเคราะห์ใยอาหารของวิธีแบบดั้งเดิม (AOAC 985.29 และ AOAC 991.43) และวิธีการดัดแปลง (AOAC 2001.09 /2011.25)	12
4 ลักษณะทางกายวิภาคของผนังลำไส้เล็ก โดย (a), (b) ลักษณะพื้นผิวของผนัง ลำไส้เล็ก (c) วิลไล และ (d) เซลล์เยื่อทางเดินอาหารและไมโครวิลไล	24
5 ชนิดของเซลล์เยื่อผนังลำไส้เล็กชนิดต่างๆ ซึ่งพัฒนามาจากเซลล์ ต้นกำเนิด (stem cells)	24
6 ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อสุขภาพของระบบทางเดินอาหาร	34
7 ลักษณะคอกและร่องเรื้อนทดลอง	41
8 การวัดค่าความสูงของวิลไล (villus height; VH) ความกว้างของวิลไล (villus width) และความลึกของคริปต์ (crypt depth; CD)	44
9 ลักษณะการทดลองการย่อยได้แบบปรากฏของสุกร	47

บทที่ 1

บทนำ

ความเป็นมาของปัญหา

สุกรช่วงหลังหย่านม เป็นช่วงเวลาที่วิกฤติต่อสุขภาพและสมรรถภาพการผลิตโดยรวมของระบบการผลิตสุกร อันเนื่องมาจากการกินอาหารลดลง และอาการท้องเสียหลังหย่านม (Post-weaning diarrhea; PWD) ทำให้สุกรได้รับโภชนาไม่เพียงพอ ปัญหาเหล่านี้มักส่งผลกระทบต่อการทำงานและการพัฒนาทางสรีระวิทยาของลำไส้ของสัตว์ เพราะลำไส้ทำหน้าที่สำคัญ เช่น การย่อยอาหาร การดูดซึมสารอาหาร การรักษาสมดุลของน้ำและแร่ธาตุ เป็นที่อยู่อาศัยของจุลินทรีย์หลากหลายกลุ่ม และมีระบบภูมิคุ้มกันแบบเยื่อเมือก (mucosal immune system) (Lallès et al., 2007) ส่งผลต่อการทำงานของลำไส้ ระบบนิเวศของจุลินทรีย์ และการตอบสนองของระบบภูมิคุ้มกันเปลี่ยนแปลงไป

ในอดีตการใช้ยาปฏิชีวนะในอาหารสัตว์ โดยเฉพาะในระยะหลังหย่านม ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตของสุกรหลังหย่านมได้ จึงมีการใช้ยาปฏิชีวนะในลักษณะเป็นการกระตุ้นการเจริญเติบโตของสุกร (antibiotic for growth promoter) จากบทวิจารณ์ของ Li (2017) การใช้ยาปฏิชีวนะเพื่อเป็นสารกระตุ้นการเจริญเติบโตในอาหารสัตว์โดยใช้เป็นระยะเวลานานนั้น ทำให้แบคทีเรียเกิดการกลายพันธุ์จนสามารถมีชีวิตรอดจากยาปฏิชีวนะนั้นได้ และถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมดังกล่าวต่อไป ซึ่งจากการศึกษาพบแบคทีเรียจำนวนมากที่มีการดื้อยา และเมื่อแบคทีเรียเหล่านั้นก่อโรคในมนุษย์ ทำให้การรักษามีค่าใช้จ่ายสูงหรือต้องพักรักษาตัวเป็นเวลานานขึ้น ก่อให้เกิดปัญหาทางสาธารณสุขตามมา การกระจายของเชื้อแบคทีเรียดื้อยาในธรรมชาติ เกิดจากการนำมูลสัตว์มาใช้เป็นปุ๋ยสำหรับพืช ซึ่งมีหลายงานวิจัยที่สามารถจำแนกเชื้อแบคทีเรียที่มียีนต้านทานต่อยาต้านจุลชีพอยู่ในมูลสัตว์ ส่วนใหญ่เป็นแบคทีเรียแกรมลบ สำหรับประเทศไทยนั้น ตามประกาศกระทรวงเกษตรและสหกรณ์ เรื่อง กำหนดชื่อ ประเภท ชนิด ลักษณะหรือคุณสมบัติของวัตถุที่ห้ามใช้ผสมในอาหารสัตว์ พ.ศ. 2558 ในพระราชบัญญัติควบคุมคุณภาพอาหารสัตว์ พ.ศ. 2558 ได้ห้ามใช้ยาต้านจุลชีพทุกชนิดผสมลงในอาหารสัตว์ในวัตถุประสงค์เพื่อกระตุ้นการเจริญเติบโต หรือเพิ่มประสิทธิภาพการใช้อาหารสัตว์ (กองควบคุมอาหารและยาสัตว์ กรมปศุสัตว์, 2562)

ดังนั้นจึงมีการศึกษาวิจัยสารเสริม หรือวัตถุดิบที่สามารถ ส่งเสริมสุขภาพของทางเดินอาหารของสุกร และลดการใช้ยาต้านจุลชีพในอาหารสัตว์ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการผลิตของสุกร ยกตัวอย่างเช่น วัตถุดิบประเภทที่มีใยอาหารสูง สารสกัดจากพืช กรดอินทรีย์ แร่ธาตุสังกะสี โปรไบโอติก เป็นต้น (Li, 2017)

วัตถุดิบประเภท

เพื่อศึกษาอิทธิพลของระดับของใยอาหาร (dietary fiber; DF) และสัดส่วนใยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำ (insoluble dietary fiber; iDF) ต่อใยอาหารชนิดละลายน้ำ (soluble dietary fiber; sDF) ในอาหารสุกรหลังหย่านม โดยการคัดเลือกวัตถุดิบเยื่อใยสูงที่เป็นผลพลอยได้ในอุตสาหกรรมเกษตร และศึกษาผลจากการใช้วัตถุดิบชนิดนั้นต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโต การพัฒนาของทางเดินอาหาร สัณฐานวิทยาของลำไส้ และการเปลี่ยนแปลงของแบคทีเรียในทางเดินอาหารของสุกรหลังหย่านม

ความสำคัญของการวิจัย

ช่วงเวลาลงหย่านมถือเป็นช่วงวิกฤติที่สุดในการผลิตสุกร เนื่องจากความเครียดจากการเปลี่ยนสภาพแวดล้อมและโภชนาการ สัตว์มีปริมาณการกินอาหารลดลง ส่งผลให้เกิดการฝ่อตัวของวิลโลซของลำไส้เล็ก ภายใน 24- 48 ชั่วโมงหลังหย่านม (Kitt et al., 2001; Moeser et al., 2017) ส่งผลกระทบต่อสมรรถภาพการผลิต และการรุกรานของเชื้อแบคทีเรียก่อโรค ทำให้เกิดการท้องเสียหลังหย่านม (post weaning diarrhea) (Lallès et al., 2007; Superchi et al., 2017) เมื่อวิลโลซฝ่อตัว (villus atrophy) จะต้องใช้เวลาประมาณ 7 – 14 วันในการฟื้นฟู ซึ่งใยอาหารเป็นสารอาหารหนึ่งที่มีการศึกษาอย่างแพร่หลายในการใช้เพื่อช่วยการฟื้นฟู และลดผลกระทบจากการฝ่อตัวของวิลโลซในลำไส้เล็ก เช่น การใช้เปลือกข้าวโอ๊ตร่วมกับฟางข้าวสาลี (Gerritsen et al., 2012) แกลบข้าวบาร์เลย์ (Hedemann et al., 2006) เซลลูโลส (Hanczakowska et al., 2008) และหญ้าบด (Skiba et al., 2005) เป็นต้น นอกจากนี้ใยอาหารยังช่วยเพิ่มการหลั่งเอนไซม์ เช่น เอนไซม์อะไมเลส และเอนไซม์ที่สร้างจากบรัชเบอร์ (brush border enzymes) (Gerritsen et al., 2012) แต่ถึงอย่างไรก็ตามการใช้ใยอาหารในระดับที่สูงเกินไป อาจส่งผลกระทบต่อการย่อยได้ของสารอาหารของสุกรหลังหย่านมได้ โดยเฉพาะการย่อยได้ของโปรตีนและพลังงาน (Yu et al., 2016) ซึ่งใยอาหารชนิดละลายน้ำ (soluble dietary fiber; sDF) และชนิดไม่ละลายน้ำ (insoluble dietary fiber; iDF) มีผลต่อระบบทางเดินอาหารต่างกัน โดย iDF ช่วยเพิ่มการหลั่งเอนไซม์ในระบบทางเดินอาหาร เพิ่มน้ำหนักของกระเพาะอาหาร และส่งเสริมการทำงานของระบบทางเดินอาหาร

(Gerritsen et al., 2012; Hermes et al., 2009) ในขณะที่ sDF ทำหน้าที่เป็นพรีไบโอติก คือสามารถหมักย่อยโดยจุลินทรีย์ในระบบทางเดินอาหารส่วนท้าย ได้ผลผลิตเป็นกรดไขมันระเหยง่ายซึ่งมีส่วนสำคัญในการฟื้นฟูเซลล์เยื่อบุทางเดินอาหาร เพิ่มจำนวนจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์และควบคุมจุลินทรีย์ก่อโรค (Pluske et al., 2014)

ประเทศไทยมีศักยภาพในการผลิตและแปรรูปสินค้าทางการเกษตร วัตถุดิบหลักในการผลิตอาหารสัตว์แบ่งเป็นแหล่งของพลังงาน ได้แก่ ข้าว ข้าวโพด มันสำปะหลัง และข้าวสาลี คิดเป็นประมาณ 60% ส่วนแหล่งของโปรตีน คือถั่วเหลืองและกากถั่วเหลือง คิดเป็น 28% ปลาป่นประมาณ 3% และอื่นๆ อีก 9% (สมาคมผู้ผลิตอาหารสัตว์ไทย, 2561) ซึ่งวัตถุดิบผลพลอยได้จากการเกษตรเหล่านี้มีปริมาณเยื่อใยอยู่สูง จึงจะนำมาศึกษาปริมาณใยอาหารชนิดละลายน้ำ (soluble dietary fiber; sDF) และใยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำ (insoluble dietary fiber; iDF) เพื่อเป็นแหล่งของใยอาหารสำหรับอาหารสัตว์ได้ แต่ทั้งนี้จะต้องมีการศึกษาระดับและสัดส่วนของใยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำต่อใยอาหารชนิดละลายน้ำ (iDF:sDF) ที่เหมาะสม เพื่อให้เกิดประสิทธิผลสูงสุดและไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการผลิตของสัตว์

สมมติฐานของการวิจัย

วัตถุดิบใยอาหารสูงที่คัดเลือกจากผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมทางการเกษตร เมื่อใช้ในอาหารสุกรหลังหย่านม ในระดับ (dietary fiber level) และมีสัดส่วนของ iDF:sDF ที่เหมาะสม สามารถส่งเสริมการพัฒนาระบบทางเดินอาหาร สันฐานวิทยาของลำไส้ และระบบนิเวศของแบคทีเรียในทางเดินอาหารส่วนท้ายของสุกรหลังหย่านม ทั้งนี้จะต้องไม่มีผลกระทบต่อการย่อยได้ของสารอาหาร และประสิทธิภาพการผลิตของสัตว์

บทที่ 2

เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ใยอาหาร (Dietary fiber)

สมาคมนักเคมีธัญพืชแห่งอเมริกา (American Association of Cereals Chemists: AACC) ให้คำจำกัดความของใยอาหาร (dietary fiber) คือสารประกอบของคาร์โบไฮเดรตที่มีตั้งแต่ 3 พอลิเมอร์ขึ้นไป หรือคาร์โบไฮเดรตที่มีโครงสร้างคล้ายกันและเป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์พืช ซึ่งไม่สามารถถูกย่อยโดยเอนไซม์ที่ผลิตจากตัวสัตว์ (endogenous enzymes) และดูดซึมในลำไส้เล็กของสัตว์ได้ สำหรับทางด้านองค์การอนามัยโลก (World health organization: WHO) และองค์การอาหารและการเกษตรแห่งสหประชาชาติ (Food and Agriculture Organization: FAO) ได้ให้คำจำกัดความของ ใยอาหาร ไว้ว่าคือสารประกอบคาร์โบไฮเดรตที่มีตั้งแต่ 10 พอลิเมอร์ขึ้นไป และไม่สามารถย่อยสลายได้ภายในลำไส้เล็กของสัตว์ (McCleary, 2003) ดังนั้นใยอาหาร จึงเป็นสารที่เป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์พืช ประกอบด้วยสารโพลีแซคคาไรด์ โอลิโกแซคคาไรด์ ลิกนิน และสารอื่นๆ ที่มีบทบาทในการส่งเสริมการทำงานเชิงสรีระในร่างกายของมนุษย์และสัตว์ เช่น การระบาย (laxation) การรักษาระดับของคอเลสเตอรอลและน้ำตาลในเลือด เป็นต้น

ดังนั้น ใยอาหารจึงครอบคลุมสารประกอบที่มีโครงสร้างแตกต่างกันหลายชนิด สารเหล่านี้มีความแตกต่างของโมโนเมอร์ที่เป็นองค์ประกอบ พันธะระหว่างโมโนเมอร์ ความยาวของสายโพลีเมอร์ แหล่งที่พบ และชนิดของแขนงข้าง (Capuano, 2017) ซึ่งสามารถแบ่งได้ดังนี้ (Dhingra et al., 2012)

1. เซลลูโลส (cellulose) เป็นองค์ประกอบหลักของผนังเซลล์ เป็นสารที่ประกอบด้วยกลูโคสต่อกันด้วยพันธะไกลโคไซด์ที่ตำแหน่ง β -1,4 เป็นสายยาว ไม่มีแขนง โครงสร้างของเซลลูโลส จะเกิดการสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างหมู่ไฮดรอกซิลที่ว่างอยู่ ทำให้เกิดโครงสร้างที่ซับซ้อนหรือเป็นผลึกที่มีความหนาแน่นมาก ทำให้โครงสร้างของพืชมีความแข็งแรงและยืดหยุ่น สามารถโค้งงอได้โดยไม่แตกหัก โครงสร้างส่วนที่เป็นผลึกจะดูดซับน้ำได้น้อยกว่าจึงทำให้เซลลูโลสละลายน้ำได้น้อย และถูกจัดอยู่ในกลุ่มใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำ อีกทั้งยังทนต่อการย่อยด้วยการย่อยเชิงกล และการย่อยของเอนไซม์ในระบบทางเดินอาหาร (สิริมา ชินสาร, และกฤษณะ ชินสาร, 2558)

2. เฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) เป็น heteropolysaccharides ที่เป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์พืชร่วมกับเซลลูโลสและลิกนิน มีชนิดของน้ำตาลตั้งแต่ 2-4 ชนิดขึ้นไป ทั้งน้ำตาล

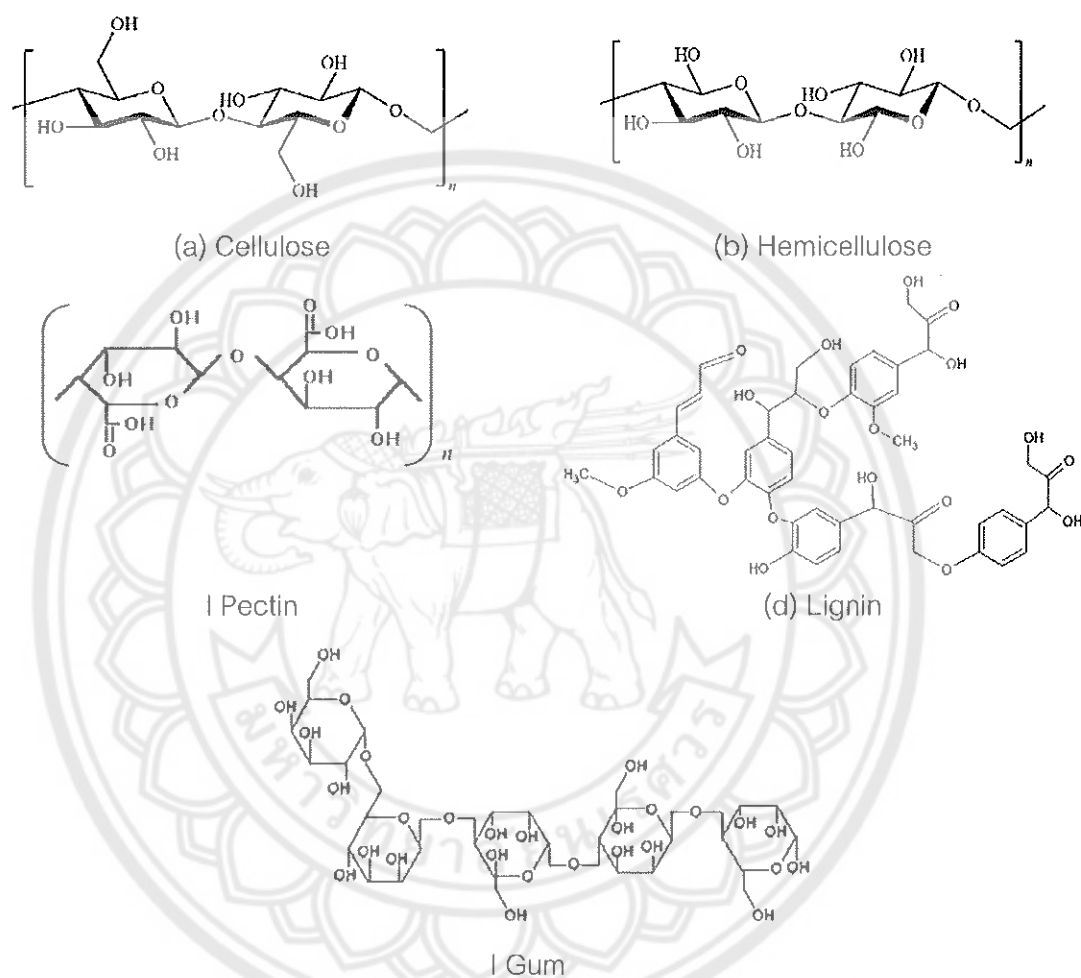
เพนโทสและน้ำตาลเฮกโซส โดยโมเลกุลของน้ำตาลต่อกันด้วยพันธะ β -1,4 glucosidic linkage เหมือนเซลลูโลส แต่แตกต่างที่เฮมิเซลลูโลสมีน้ำตาลหลายชนิด รวมทั้งสารโมเลกุลเล็ก ๆ เป็นแขนง เช่น xylose, mannose, arabinose และน้ำตาลอื่นอีกหลายชนิด ทำให้เฮมิเซลลูโลสมีทั้งส่วนที่ละลายน้ำและไม่ละลายน้ำ พบเป็นองค์ประกอบของพืชผัก ผลไม้ พืชตระกูลถั่ว และผลไม้เปลือกแข็ง พบประมาณ 1 ใน 3 ของใยอาหารทั้งหมด (Perry, & Ying, 2016)

3. ลิกนิน (lignin) เป็นโครงสร้างเชิงซ้อนของอะโรมาติกแอลกอฮอล์ (aromatic alcohols) ไม่จัดเป็นสารในกลุ่มโพลีแซคคาไรด์ แต่ลิกนินเป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์ชั้นที่สองและระหว่างชั้นเส้นใย ทำหน้าที่เชื่อมโยงโมเลกุลของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส เพื่อเสริมสร้างความแข็งแรงของผนังเซลล์ ลดการสูญเสียน้ำจากเนื้อเยื่อไซเล็มและผนังเซลล์ และป้องกันการเข้าทำลายของจุลินทรีย์ ลิกนินเป็นสารที่ไม่ละลายน้ำ และไม่มีคุณสมบัติทางกายภาพที่ยืดหยุ่น มีความคงทนมาก ซึ่งพืชแต่ละชนิดมีปริมาณลิกนินไม่เท่ากัน ขึ้นอยู่กับชนิดและอายุของพืช พืชที่มีอายุมากจะมีปริมาณลิกนินสูง

4. เพคติน (pectin) เป็นสารกลุ่มโพลีแซคคาไรด์ ที่มีหน่วยย่อยเป็น D-galacturonic acid ประมาณ 30-1,000 หน่วย เรียงตัวเป็นสายยาว อาจมีแขนงข้างเป็น arabinose, xylose, galactose หรือ rhamnose เป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์พืช และทำหน้าที่ประสานระหว่างเซลล์ของพืช เพคตินมีคุณสมบัติละลายน้ำได้ดี ความสามารถในการอุ้มน้ำสูง และมีคุณสมบัติการเกิดเจล และเกิดความข้นหนืดในระหว่างที่อยู่ในทางเดินอาหารได้ นอกจากนี้สามารถถูกเมตาบอลิส์ได้โดยแบคทีเรียในลำไส้ใหญ่ และสามารถชะลอการไหลผ่านของอาหารในลำไส้เล็ก ลดระยะเวลาที่กระเพาะอาหารว่าง (gastric emptying) พบมากในผลไม้ โดยเฉพาะส่วนเปลือก เช่น แอปเปิ้ล ลูกแพร์ แอปริคอต เชอร์รี่ และส้ม และยังพบในผักและพืชตระกูลถั่ว ประมาณ 15-20% สำหรับในอาหารสัตว์พบในกากจากพืชตระกูลส้มและกากจากหัวชูการ์บีท (Drochner et al., 2004; Perry, & Ying, 2016)

5. กัม (gums) และยาง (mucilages) เป็นใยอาหารประเภทหนึ่ง ไม่ได้ทำหน้าที่เป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์ แต่เป็นสารคัดหลั่งพิเศษของพืช โครงสร้างแขนงเป็นโพลีแซคคาไรด์สายยาว ซึ่งทำให้มีคุณสมบัติการเกิดเจล จับกับน้ำหรือสารอินทรีย์ชนิดอื่น ใยอาหารประเภทนี้ได้แก่ กัวกัม (guar gum) และกัมอะราบิก (gum arabic) กัวกัม เป็นสารที่สกัดได้จากเมล็ดกัว (*Cyamopsis tetragonolobus*; guar) ประกอบด้วยน้ำตาล galactomannan เป็นหลัก มักใช้เป็นตัวแทนของใยอาหารชนิดที่ละลายน้ำ ส่วนกัมอะราบิก เป็นยางที่ขับออกจากต้นไม้สกุลอะคาเซีย (*acacia*) เป็นเฮเทอโรพอลิแซคคาไรด์ขนาดใหญ่ ประกอบด้วยน้ำตาลและอนุพันธ์ 4 ชนิด คือ

น้ำตาลกาแลคโตส (galactose, 44%) อะราบินโนส (arabinose, 27%) แรมโนส (L-rhamnose, 13%) และกรดกลูคูโรนิก (glucuronic acid, 14.5%) สำหรับยาง (mucilage) พบการหลังภายใน เอ็นโนสเปิร์มของพืช เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการคายน้ำมากเกินไป



ภาพ 1 โครงสร้างของใยอาหารแต่ละชนิด

ที่มา: หยาดฝน ทะนงการกิจ, 2557

นอกจากนี้ หากจำแนกใยอาหารตามคุณสมบัติการละลายน้ำ สามารถแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ ชนิดละลายน้ำ (soluble dietary fiber, sDF) และชนิดไม่ละลายน้ำ (insoluble dietary fiber, iDF) ซึ่งคุณสมบัติการละลายน้ำมีความเกี่ยวข้องกับคุณสมบัติการอุ้มน้ำ (water holding

capacity) ความชื้นหนืดและระดับของการเกิดการหมักย่อย (degree of fermentation) โดยจุลินทรีย์ในระบบทางเดินอาหาร ซึ่งจะกล่าวในรายละเอียดดังนี้ (Williams et al., 2017)

1. โยอาหารชนิดละลายน้ำ (soluble dietary fiber; sDF)

โยอาหารกลุ่มละลายน้ำมีคุณสมบัติเพิ่มความชื้นหนืดของสิ่งย่อยในลำไส้ ทั้งนี้ระดับของการละลายขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมี และน้ำหนักโมเลกุลของโยอาหาร โยอาหารกลุ่มนี้ช่วยเพิ่มระยะเวลาของโยอาหารในทางเดินอาหาร ทำให้อาหารอยู่ในทางเดินอาหารนานขึ้น ลดช่วงเวลาที่กระเพาะอาหารว่าง (gastric emptying) ช่วยลดความเร็วของการปลดปล่อยน้ำตาลผ่านการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์อะไมเลส ทำให้สามารถควบคุมระดับน้ำตาลในเลือด โยอาหารในกลุ่มนี้ได้แก่ เพคติน (Pectin) อะราบินอกซ์แลน (Arabinoxylan) และ Mixed-Linkage Glucans

2. โยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำ (insoluble dietary fiber; iDF)

โยอาหารกลุ่มนี้ทำหน้าที่เป็นโครงสร้างหลักของผนังเซลล์พืช ทนต่อการหมักย่อยในทางเดินอาหารส่วนท้าย โยอาหารกลุ่มนี้ได้แก่ เซลลูโลส แป้งต้านทานการย่อย (resistant starch) ลิกนิน และเฮมิเซลลูโลสบางส่วน

ชนิดของโยอาหารในวัตถุดิบมีความแปรปรวนอันเนื่องมาจากสายพันธุ์ การเก็บเกี่ยว และองค์ประกอบของเนื้อเยื่อของพืช ซึ่งแปรผันตามสภาพแวดล้อมของการปลูก สำหรับวัตถุดิบที่เป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตในอุตสาหกรรมอาหาร กรรมวิธีในการผลิตนั้นมีความสัมพันธ์กับชนิดและปริมาณของโยอาหารโดยตรง (Fushai et al., 2019) ซึ่งรายละเอียดการจำแนกโยอาหารและแหล่งที่มักพบดังแสดงใน ตาราง 1

ตาราง 1 Classification of dietary fiber according to water solubility

ชนิดของใยอาหาร	องค์ประกอบ	คำอธิบาย	แหล่งที่พบ
ใยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำ	เซลลูโลส	เป็นโครงสร้างหลักของผนังเซลล์พืช ไม่ละลายในน้ำ แต่ละลายได้ในกรดแก่	พืชทุกชนิด (พืชผัก หัวธูปการบีท รำ ต่างๆ)
	เฮมิเซลลูโลส	เป็นโพลีแซคคาไรด์ที่เป็นองค์ประกอบหนึ่งของผนังเซลล์พืช โครงสร้างแกนต่อกันด้วยพันธะ β -1,4 glycosidic linkage ละลายได้ในน้ำอุ่น	ธัญพืช
	ลิกนิน	เป็นสารที่ไม่จัดอยู่ในกลุ่มคาร์โบไฮเดรต แต่พบในผนังเซลล์ มีโครงสร้างซับซ้อน ทนต่อการย่อยสลายโดยแบคทีเรีย	เปลือกไม้
ใยอาหารชนิดละลายน้ำ	เพคติน	เป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์ปฐมภูมิ (primary cell wall) ประกอบด้วย D-galacturonic acid สามารถละลายได้ในน้ำ และมีคุณสมบัติการเกิดเจล	ผลไม้ พืชผัก พืชตระกูลถั่ว
	กัม	เป็นสารที่พืชหลั่งเมื่อเกิดการบาดเจ็บ โดยเซลล์ที่ทำหน้าที่พิเศษ ใช้ในเชิงอาหารและยา	เมล็ดของพืชตระกูลถั่ว สารสกัดจากสาหร่ายทะเล
	ยาง	สังเคราะห์ขึ้นโดยพืชเพื่อป้องกันการคายน้ำของเอ็นโดสเปิร์ม มีคุณสมบัติชอบน้ำ (hydrophilic) เป็นสารให้ความคงตัว (stabilizer)	สารสกัดจากพืช (gum acacia, gum karaya, gum tragacanth)

ที่มา: Dhingra et al., 2012

การวิเคราะห์ปริมาณเยื่อใยและใยอาหาร

จากคำจำกัดความของใยอาหาร ซึ่งหมายถึงสารกลุ่มคาร์โบไฮเดรตที่เป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์ รวมถึงสารที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรตอย่าง ลิกนิน ที่ไม่สามารถย่อยได้โดยเอ็นไซม์ภายในลำไส้เล็กของสัตว์ ดังนั้นการประเมินปริมาณของใยอาหารนั้น มีความเกี่ยวข้องกับการวิเคราะห์ โดยการวิเคราะห์เยื่อใยทางด้านอาหารสัตว์มักแสดงในรูปของเยื่อใยรวม

(crude fiber; CF) และการวิเคราะห์ผงซักฟอก (detergent fiber) สำหรับทางด้านโภชนาการ อาหารสัตว์เลี้ยงจะมีการวิเคราะห์ในรูปปริมาณใยอาหารทั้งหมด (total dietary fiber; DF) ซึ่งแต่ละวิธีมีความแตกต่างกัน ดังนี้ (Schenkel, 2017)

1. การวิเคราะห์เยื่อใยรวม หรือเยื่อใยหยาบ (crude fiber; CF) หรืออาจเรียกในอีกชื่อว่า Weende analysis เป็นวิธีการดั้งเดิมในการวิเคราะห์ประมาณเยื่อใยในอาหาร ใช้มานานกว่า 200 ปี คิดค้นโดย Henneberg, & Strohmman (1859) โดยค่าที่ได้จากการวิเคราะห์เรียกว่าเยื่อใยหยาบ หรือเยื่อใยรวม คือส่วนที่เหลือจากการย่อยตัวอย่างด้วยกรดอ่อน (สารละลายกรดซัลฟิวริก 1.25%) และด่างอ่อน (สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1.25%) ก่อนการวิเคราะห์จะต้องเตรียมตัวอย่าง โดยการบด ทำให้แห้ง และสกัดไขมันออกจากตัวอย่างก่อน กากที่เหลือจากการย่อยนำไปอบแห้ง และวิเคราะห์หาเถ้า เพื่อนำมาคำนวณปริมาณเยื่อใยหยาบ องค์ประกอบหลักของกากที่ได้จากการย่อย เป็นเซลลูโลส ลิกนิน และเฮมิเซลลูโลสบางส่วน โดยจะมีสัดส่วนขององค์ประกอบจากการวิเคราะห์ เยื่อใยหยาบโดยประมาณคือ เซลลูโลส 50-80% เฮมิเซลลูโลส 20% และลิกนิน 10-50% (Ziggers, 2012) วิธีการนี้อาจทำให้คาร์โบไฮเดรตที่ละลายน้ำได้บางส่วนจะถูกชะล้างออกไปกับ สารละลาย

2. การวิเคราะห์แบบใช้สารชะล้าง (Detergent fiber) เป็นการหาปริมาณเยื่อใย โดยใช้ สารชะล้าง ตามวิธีการของ Goering, & Van Soest (1970) และพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ปัจจุบันได้อ้างอิงตามวิธีการของ Van Soest et al. (1991) วิธีการนี้อาจเรียกอีกชื่อหนึ่งว่า Van Soest system เป็นการหาองค์ประกอบของผนังเซลล์พืช แบ่งเป็น

2.1 Neutral detergent fiber (NDF) เป็นการวัดค่าองค์ประกอบของผนังเซลล์พืชที่ไม่ละลายในสารชะล้างที่เป็นกลาง ส่วนที่เหลือประกอบด้วย cellulose, hemicellulose และ lignin แต่วิธีนี้มีข้อจำกัดคือจะมีการสูญเสียสารประกอบบางส่วนที่ละลายได้ในสารละลายที่เป็นกลางไป และไม่สามารถชะล้างแบ่งในตัวอย่างออกได้หมด

2.2 Acid detergent fiber (ADF) ใช้การละลายตัวอย่างในสารละลายที่เป็นกรด ส่วนที่เหลือคือ cellulose กับ lignin นำมาคำนวณเป็นค่า ADF

2.3 Acid detergent lignin (ADL) ได้จากการนำส่วนที่เหลือจากการวิเคราะห์ ADF แช่ในกรดซัลฟิวริกเข้มข้น ส่วนที่เหลือจะเป็นลิกนิน

ตัวอย่างจะนำมาผ่านย่อยในสารชะล้างที่มีฤทธิ์เป็นกลาง (NDF) และสารชะล้างที่มีฤทธิ์เป็นกรด (ADF) จากนั้นจะถูกนำไปแช่ในกรดซัลฟิวริกเข้มข้น (ADL) คำนวณน้ำหนักที่เหลือสามารถคำนวณปริมาณของเฮมิเซลลูโลส (hemicellulose) ได้จากการนำค่า NDF-ADF และปริมาณ

เซลลูโลส (cellulose) ได้จากการนำค่า ADF-ADL การวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้ครอบคลุมใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำได้มากขึ้น ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน แต่ยังไม่ครอบคลุมใยอาหารกลุ่มที่ละลายน้ำได้ เช่น เพคติน กัม และเบต้ากลูแคน วิธีการนี้เป็นที่นิยมในการประเมินเยื่อใยของวัตถุดิบสำหรับสัตว์กระเพาะรวม เช่น พืชอาหารหยาบ นอกจากนี้ยังพบว่าแป้งและโปรตีนมีผลรบกวนกระบวนการวิเคราะห์ นี่จึงอาจทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของผลการวิเคราะห์ในกลุ่มวัตถุดิบที่มีปริมาณแป้งสูง เช่น ธัญพืช หรือ เมล็ดพืช เป็นต้น (Agyekum and Nyachoti, 2017) ภายหลังมีการพัฒนาประยุกต์ใช้เอ็นไซม์อะไมเลสและโซเดียมซัลไฟต์ เพื่อขจัดแป้งและโปรตีนออกไป แต่ขั้นตอนมีความยุ่งยากไม่เหมาะสมสำหรับขั้นตอนการทำงานประจำในห้องปฏิบัติการ

3. การวิเคราะห์ใยอาหาร (Total dietary fiber; DF) เป็นวิธีการหาปริมาณใยอาหารในอาหารและผลิตภัณฑ์ โดยมีหลักการคือกำจัดสารอาหารที่สามารถย่อยสลายในระบบทางเดินอาหาร โดยใช้เอ็นไซม์ สภาวะความเป็นกรดต่าง และอุณหภูมิที่ใกล้เคียงสภาวะการย่อยในร่างกาย ทำให้ปริมาณใยอาหารที่ได้มีความแม่นยำกว่าการวิเคราะห์แบบใช้สารชะล้าง (นัยนา บุญทวีวัฒน์, 2548) วิธีการในการวิเคราะห์ปริมาณใยอาหารสามารถแบ่งได้เป็น 2 วิธี คือ enzymatic-gravimetric method ซึ่งวิธีนี้จะใช้เอ็นไซม์ในการย่อยแป้งและโปรตีนออกจากตัวอย่างสิ่งที่เหลือนำมาหาค่าถ้ำและโปรตีน เพื่อใช้คำนวณหาปริมาณใยอาหาร และอีกวิธีหนึ่ง คือ enzymatic-chemical method เป็นวิธีการที่ใช้เอ็นไซม์ในการย่อยตัวอย่างและย่อยสิ่งที่เหลือ (โพลีแซคคาไรด์) ด้วยกรดอีกครั้งให้ได้เป็นน้ำตาลเชิงเดี่ยว จากนั้นวิเคราะห์น้ำตาลโดยใช้วิธี gas liquid chromatography (GLC) หรือ high-performance liquid chromatography (HPLC) ส่วนกรดยูรีไนควิเคราะห์โดยวิธีการวัดสี (colorimetric method)

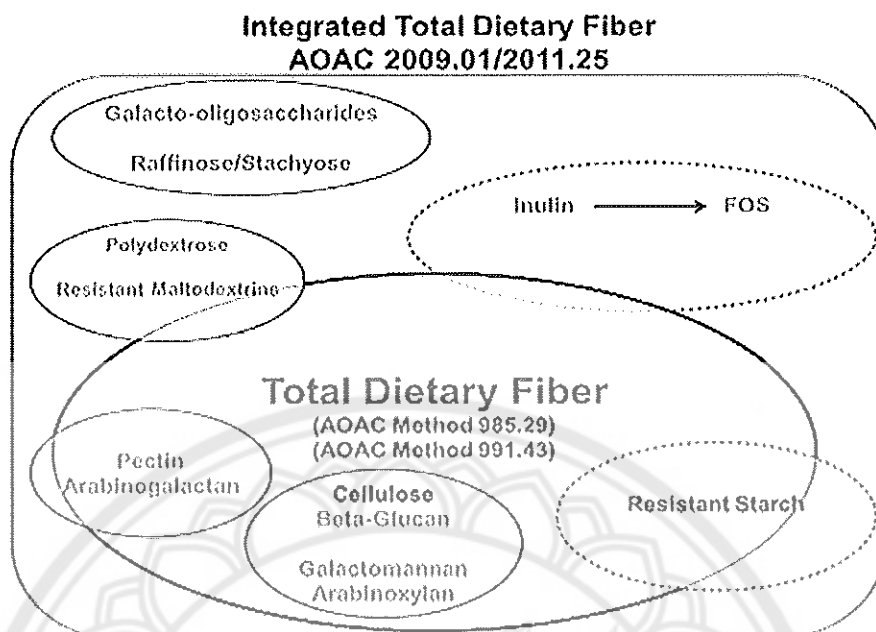
การพัฒนาวิธีการวิเคราะห์ใยอาหารแบบ total dietary fiber นั้น เริ่มจาก Prosky et al. (1985) พัฒนาการวิเคราะห์เป็นแบบ enzymatic-gravimetric method ที่มีความแม่นยำและเป็นวิธีแรกที่ Association of Official Analytical Chemists (AOAC) นำมาใช้เพื่อหาปริมาณใยอาหาร (AOAC 985.25) หลังจากนั้นวิธีการนี้ได้ถูกพัฒนาอีกโดย Lee et al. (1992) โดยวิธีการนี้มีการเปลี่ยนบัฟเฟอร์ที่ใช้ ลดสารเคมีและลดขั้นตอนบางอย่าง นอกจากจะวิเคราะห์ปริมาณใยอาหารทั้งหมดแล้ว ยังสามารถวิเคราะห์ปริมาณของใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำ (insoluble dietary fiber) และใยอาหารที่ละลายน้ำ (soluble dietary fiber) ได้อีกด้วย ทำให้วิธีการนี้จึงนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย (AOAC 991.43) ซึ่งทั้งสองวิธีการที่กล่าวมาต่างถือเป็นวิธีการแบบดั้งเดิม และหลังจากมีการปรับค่านิยามของใยอาหารของคณะกรรมการมาตรฐานอาหารระหว่างประเทศ (CODEX) ทำให้มีการดัดแปลงวิธีการวิเคราะห์โดย McCleary et al. (2012)

ที่สามารถวิเคราะห์คาร์โบไฮเดรตที่ไม่สามารถย่อยได้ที่มีโมโนเมอร์ 3 ถึง 9 โมเลกุล ตามคำจำกัดความใหม่ที่ให้สารกลุ่มนี้จัดเป็นใยอาหารชนิดหนึ่งด้วย (AOAC 2009.01 และ 2011.25) โดยขอบเขตการวิเคราะห์ของวิธีทั้งสามวิธีแสดงในภาพ 3



ภาพ 2 องค์ประกอบของใยอาหารที่ได้จากการวิเคราะห์แบบต่างๆ

ที่มา: Choct, 2015



ภาพ 3 ขอบเขตการวิเคราะห์ใยอาหารของวิธีแบบดั้งเดิม (AOAC 985.29 และ AOAC 991.43) และวิธีการดัดแปลง (AOAC 2001.09 /2011.25)

ที่มา: Mangan, 2014

การวิเคราะห์ใยอาหารร่วมนั้นจำเป็นอย่างยิ่งในการพัฒนาด้านโภชนศาสตร์ ทั้งในมนุษย์และสัตว์เลี้ยง ใยอาหารที่ละลายน้ำและใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำต่างมีผลต่อการทำงานของระบบทางเดินอาหารและเมตาบอลิซึมที่เกี่ยวข้อง โดยใยอาหารที่ละลายน้ำมีบทบาทเกี่ยวข้องกับการเกิดโรคในระบบทางเดินอาหาร โรคอ้วน โรคเบาหวาน และโรคที่เกิดจากความผิดปกติของเมตาบอลิซึมอื่น (metabolic disorders) ในขณะที่ใยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำมีบทบาทในการควบคุมการทำงานของลำไส้ การดูดซึมกลูโคสและเมตาบอลิซึมของไขมัน เป็นต้น

4. การวิเคราะห์สารโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้ง (non-starch polysaccharide; NSP) วิธีการวิเคราะห์นี้เป็นการรวมวิธีการวิเคราะห์ โดยการใช้เอ็นไซม์ร่วมกับการวิเคราะห์ปริมาณของน้ำตาล โดยใช้เทคนิคโครมาโตกราฟี โดยเมื่อตัวอย่างผ่านการย่อยด้วยเอ็นไซม์แล้ว กากที่ได้จะประกอบด้วยเซลลูโลส โพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่เซลลูโลส และลิกนิน จากนั้นนำกากไปผ่านกระบวนการย่อยด้วยกรด และวัดปริมาณน้ำตาลด้วยเครื่อง colorimeter (Southgate, 1969) จากนั้นก็มีพัฒนาวิธีการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรวมถึงโอลิโกแซคคาไรด์โดยใช้เทคนิค gas-liquid chromatography (Englyst, 1982) และ liquid chromatography (McCleary et al., 2012)

ระหว่างแต่ละวิธีการนั้นผลปริมาณใยอาหารที่ได้นั้นมีความแตกต่างกัน ดังการทดลองของ Wolters et al. (1992) ได้ทำการทดลองเปรียบเทียบวิธีการวิเคราะห์ใยอาหารแบบ van Soest system เปรียบเทียบกับการวิเคราะห์ใยอาหาร AOAC (Prosky et al., 1985) ซึ่งเป็นวิธีการวิเคราะห์แบบ enzymatic-gravimetric และการวิเคราะห์แบบ Englyst et al. (2007) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์แบบ enzymatic-chromatographic ในวัตถุดิบ 2 ชนิด คือ whole wheat และ toasted soy bean ดังแสดงใน Table 2 พบว่าการวิเคราะห์ van Soest system นั้นให้ค่าวิเคราะห์ต่ำที่สุด นอกจากนี้วิธีวิเคราะห์ใยอาหารตามวิธีการของ AOAC ให้ค่าวิเคราะห์สูงกว่าวิธีวิเคราะห์แบบ Englyst et al. (2007) เนื่องจากวิธีการของ AOAC มีการรวมปริมาณลิกนินและเถ้าไว้ด้วย

ตาราง 2 Dietary fiber content in whole wheat and toasted soy bean determined by different methods (mean $\pm$ standard deviation) in g/100 gDM

Methods	Whole wheat	Toasted soy bean
NDF	10.8 $\pm$ 0.2	44.1 $\pm$ 0.5
ADF	2.9 $\pm$ 0.2	31.5 $\pm$ 0.2
AOAC – total	12.0 $\pm$ 0.4	53.9 $\pm$ 2.3
AOAC – insoluble	10.1 $\pm$ 0.6	49.0 $\pm$ 0.8
AOAC – soluble	1.1 $\pm$ 0.4	6.4 $\pm$ 0.5
Englyst – total	8.9 $\pm$ 0.1	44.8 $\pm$ 0.2
Englyst – insoluble	7.2 $\pm$ 0.1	38.2 $\pm$ 0.5
Englyst –soluble	3.3 $\pm$ 0.1	7.6 $\pm$ 0.2

ที่มา: Wolters et al., 1992

คุณสมบัติทางกายภาพของใยอาหาร

คุณสมบัติทางกายภาพของใยอาหาร มีความสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงของใยอาหารเมื่ออยู่ในระบบทางเดินอาหาร ทั้งขนาดอนุภาค การละลาย คุณสมบัติการอุ้มน้ำ และความชื้นหนืดความสามารถในการละลายน้ำของใยอาหารขึ้นอยู่กับโครงสร้างทางเคมี และลักษณะทางกายภาพของใยอาหาร โดยใยอาหารที่มีโครงสร้างเป็นสายยาว ต่อกันด้วยพันธะเดี่ยว ไม่มีแขนงข้าง จะมีความสามารถละลายน้ำได้ต่ำ ในขณะที่ใยอาหารที่มีแขนงข้าง เช่น เฮมิเซลลูโลส แขนงข้างนั้น

มักจะละลายน้ำได้ดี นอกจากนี้ลักษณะทางกายภาพของวัตถุดิบมีความสำคัญต่ออนุภาคและความหนาแน่น การย่อยและการเปลี่ยนแปลงของจุลินทรีย์ในระบบทางเดินอาหาร (Jha, & Berrocoso, 2016)

1. ความหนาแน่นและอนุภาค

ความหนาแน่นของวัตถุดิบ สามารถประเมินได้จากน้ำหนักของวัตถุดิบเมื่อใส่ลงในภาชนะที่ทราบปริมาตรแน่ชัด ความหนาแน่นมีผลกระทบโดยตรงกับปริมาณการกินอาหารของสัตว์ และยังมีความสัมพันธ์เชิงลบกับปริมาณ NDF และใยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำในวัตถุดิบ ด้วยเหตุนี้การนำวัตถุดิบที่มีใยอาหารสูงมาใช้มาก ทำให้สัตว์ได้รับอาหารที่มีความหนาแน่นของอาหารต่ำ หรืออีกนัยหนึ่งคือมีปริมาณใยอาหารสูง สัตว์จะปรับตัวโดยเพิ่มปริมาณการกินอาหารขึ้น เพื่อให้ได้พลังงานอย่างเพียงพอต่อความต้องการของร่างกาย ก่อให้เกิดการขยายตัวของอวัยวะในระบบทางเดินอาหาร โดยเฉพาะกระเพาะอาหาร เป็นการเพิ่มความจุ (Gerritsen et al., 2012) สำหรับขนาดอนุภาคนั้นมีความสำคัญต่อการไหลผ่าน การหมักย่อย และการขับถ่าย โดยขนาดอนุภาคขึ้นอยู่กับชนิดของพืชที่เป็นแหล่งของใยอาหารและการผ่านกระบวนการของวัตถุดิบ จากการศึกษาของ Sangnark, & Nookhorm (2003) รายงานว่าอนุภาคมีความสัมพันธ์เชิงลบกับความหนาแน่น กล่าวคือ หากลดขนาดอนุภาคลง ความหนาแน่นของวัตถุดิบจะเพิ่มขึ้น

2. คุณสมบัติการจับน้ำ (hydration properties)

คุณสมบัติการจับน้ำ เป็นคุณสมบัติที่บ่งชี้ถึงปริมาตรของรูพรุน (pore volume) ของวัตถุดิบ และเกี่ยวข้องกับลักษณะของใยอาหารเมื่ออยู่ในระบบทางเดินอาหาร หรือระหว่างที่ไหลผ่านในทางเดินอาหาร เช่น การเกิดความชื้นหนืดและการหมักย่อย เป็นต้น ปัจจัยที่มีผลต่อปฏิกิริยาการรับน้ำของวัตถุดิบได้แก่ กระบวนการผลิตต่างๆ เช่น การบด การอบแห้ง การให้ความร้อนหรือการเอ็กซ์ทรูด และสภาพแวดล้อม เช่น ภาวะความเป็นกรด-ด่าง อุณหภูมิ ความแรงของประจุ ล้วนมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของใยอาหาร รวมถึงคุณสมบัติการจับน้ำด้วย (Dhingra et al., 2012) โดยค่าที่นิยมใช้ในการประเมินสมบัติการจับน้ำของวัตถุดิบคือ ค่าการพองตัว (swelling capacity) และความสามารถการจับน้ำ (water binding capacity)

2.1 การพองตัว (swelling capacity) เป็นการประเมินปริมาตรของใยอาหารเมื่อดูดซับน้ำเข้าไปในโครงสร้าง ซึ่งเป็นขั้นตอนแรกของการละลาย โดยโครงสร้างของใยอาหารจะขยายยืดออก (extended) และเกิดการกระจาย (dispersed) ทำให้มีความฟุ้งและง่ายต่อการเข้าย่อยสลายโดยเอนไซม์ ซึ่งคุณสมบัตินี้จะไม่พบในใยอาหารที่มีโครงสร้างที่เป็นสายยาวและเชื่อมด้วยพันธะเดี่ยวที่มีความแข็งแรง เช่น เซลลูโลส (Eastwood, & Morris, 1992)

2.2 ความสามารถในการจับน้ำ (water binding capacity) เป็นการประเมินปริมาณน้ำที่โยอาหารสามารถกักเก็บไว้ได้น้ำหนักแห้ง โดยธรรมชาติโยอาหารเป็นสารที่มีคุณสมบัติชอบน้ำทำให้สามารถเก็บกักน้ำภายในช่องว่างของโมเลกุลและช่องว่างของโครงสร้างของโยอาหารอีกด้วย โดยโยอาหารที่ละลายน้ำมักมีความสามารถในการจับน้ำดีกว่าโยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำอย่างเซลลูโลสหรือลิกนิน อย่างไรก็ตามนอกเหนือจากชนิดของโยอาหารแล้ว ยังมีอีกหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้องความสามารถในการจับน้ำ เช่นค่าความเป็นกรดต่าง การเกิดประจุ และการผ่านกระบวนการบางอย่าง เช่น การให้ความร้อน การบด การเอ็กซ์ทรูด ซึ่งมีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของโยอาหาร (Mudgil, 2017) ยกตัวอย่างผลการศึกษากการบดโยอาหารที่อนุภาคนาโนต่างๆ โดยการศึกษาจากกะพรวัวที่ได้จากการแยกกะทิ (coconut residue) ที่ขนาดอนุภาค 1,127-550 μm พบว่าเมื่อขนาดอนุภาคที่เล็กลง ทำให้วัตถุดิบมีความสามารถในการอุ้มน้ำสูงขึ้น (Raghavendra et al., 2004) ความสามารถในการอุ้มน้ำ (water holding capacity) จากการศึกษาของ Ngoc et al. (2012) พบว่าความสามารถในการอุ้มน้ำของวัตถุดิบมีความสัมพันธ์กับปริมาณของโพลีแซคคาไรด์ที่ไม่ใช่เซลลูโลสและละลายได้ในน้ำ (soluble non-cellulosic polysaccharides; S-NCP) ($R^2 = 0.82$, $P < 0.001$)

2.3 สมบัติการละลาย (Solubility) และการเกิดความข้นหนืด คุณสมบัติทั้งสองประการมีความสัมพันธ์เชิงบวกกัน ซึ่งส่งผลกระทบต่อการย่อยและดูดซึมสารอาหาร และการไหลผ่านของสิ่งย่อยภายในทางเดินอาหารของสัตว์ กล่าวคือโพลีแซคคาไรด์ที่มีโครงสร้างเป็นสายยาว เช่น เซลลูโลส มีความสามารถในการละลายต่ำ ส่วนโพลีแซคคาไรด์ที่มีแขนงข้าง เช่น อะราบิโนไซแลน มีความสามารถในการละลายสูงกว่า สมบัติการละลายมีความเกี่ยวข้องกับการเกิดความข้นหนืด (viscosity)

3. ความสามารถในการจับน้ำมัน (Oil binding capacity)

เป็นคุณสมบัติที่บ่งบอกค่าความสามารถในการจับกับน้ำมันไว้ในโครงสร้างของโยอาหาร คุณสมบัติการจับน้ำมันนี้ มีความสัมพันธ์ไปในแนวเดียวกับสมบัติการจับน้ำ โยอาหารที่ได้จากผักและผลไม้มักมีค่าความสามารถในการจับน้ำมันค่อนข้างต่ำ (<2%) เมื่อเปรียบเทียบกับโยอาหารจากโยอาหารจากธัญพืช (2-4%) ซึ่งสันนิษฐานว่าอาจเกี่ยวข้องกับปริมาณของลิกนิน (Gadhe et al., 2018)

คุณสมบัติทางกายภาพของโยอาหาร นอกจากจะขึ้นอยู่กับลักษณะโครงสร้างชนิดของโยอาหารที่เป็นองค์ประกอบ และกระบวนการเตรียมโยอาหารแล้ว ยังขึ้นอยู่กับขนาดของอนุภาคซึ่งมีผลทำให้ลักษณะทางกายภาพของโยอาหารเปลี่ยนแปลงไป ดังผลการวิจัยของ

Gadhe et al. (2018) ที่ได้ทำการศึกษาอิทธิพลของขนาดอนุภาคของใยอาหารต่อคุณสมบัติทางกายภาพของใยอาหารจากหัวชูการ์บีต (*Beta vulgaris*) ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่ายิ่งขนาดอนุภาคขนาดเล็ก ทำให้ความหนาแน่นของอนุภาคเพิ่มขึ้น ทำให้มีพื้นที่ภายในโครงสร้างลดลง ดังนั้นลักษณะทางกายภาพที่ต้องอาศัยลักษณะช่องว่างภายในโครงสร้างของใยอาหาร มีผลทำให้ความสามารถในการจับน้ำ ความสามารถในการจับน้ำมัน และความสามารถในการพองตัวจึงลดลง นอกจากนี้ยังมีผลงานวิจัยที่ให้ผลแนวเดียวกันในผักเขียว (ashgourd, *Benincasa hispida*) และหัวไชเท้า (radish, *Raphanus sativus*) อีกด้วย (Gupta, & Premavalli, 2010)

การหมักย่อยของใยอาหารในระบบทางเดินอาหาร

การย่อยใยอาหารในทางเดินอาหารของสุกร เริ่มจากการย่อยเชิงกลภายในปากด้วยการเคี้ยว ทำให้อาหารมีขนาดอนุภาคเล็กลง และทำให้ผนังเซลล์พืชแตก ทั้งนี้ขนาดอนุภาคมีความสัมพันธ์โดยตรงกับการใช้ประโยชน์ได้ของสารอาหาร อาหารจะได้คลุกเคล้ากับน้ำลาย ทำให้อาหารอ่อนนุ่มลง นอกจากนี้ น้ำลายยังมีเอนไซม์อะไมเลส ซึ่งถือเป็นการเริ่มการย่อยของแป้ง จากนั้นอาหารจะถูกลำเลียงผ่านหลอดอาหาร ไปยังกระเพาะอาหารที่มีการคลุกเคล้ากับกรดไฮโดรคลอริก และเอนไซม์เปปซิน ภายใต้สภาวะเป็นกรด โดยความเป็นกรด-ด่างของกระเพาะอาหารประมาณ 1-3 ยกเว้นในบางกรณีเช่นหลังกินอาหาร ค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ระหว่าง 5-7 ทั้งนี้ขึ้นกับความสามารถในการจับกรดของวัตถุดิบอาหาร เมื่อผ่านการย่อยภายในกระเพาะอาหารซึ่งใช้ระยะเวลาประมาณ 150-180 นาที (N' Goma et al., 2012) อาหารจะมีขนาดอนุภาคที่เล็กลง เรียกว่า ไคม์ (chymes) เมื่อไคม์เคลื่อนเข้าสู่ลำไส้เล็กที่ทำหน้าที่ย่อยและดูดซึมสารอาหาร จะถูกคลุกเคล้ากับเกลือไบคาร์บอเนต (bicarbonate salt) จากตับอ่อนเพื่อปรับค่าความเป็นกรดต่างให้อยู่ที่ 5-7 นอกจากนั้นสารคัดหลั่งจากตับอ่อนยังประกอบด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส ย่อยคาร์โบไฮเดรตให้กลายเป็นน้ำตาลหรือเดกซ์ตริน เอนไซม์สำหรับย่อยโปรตีน และไขมัน นอกจากเอนไซม์จากตับอ่อนแล้วยังมีการผลิตเอนไซม์จากลำไส้เล็ก เพื่อย่อยน้ำตาลโมเลกุลคู่และเดกซ์ตรินให้กลายเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว ไขมันถูกไฮโดรไลซ์โดยน้ำดีจากตับและเอนไซม์ไลเปสจากตับอ่อนได้ผลผลิตหลัก 2 ชนิด คือ กลีเซอรอล และกรดไขมันอิสระ นอกจากนี้ระหว่างที่ใยอาหารเคลื่อนผ่านกระเพาะอาหาร และลำไส้เล็กจะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้าง ตามคุณสมบัติทางกายภาพของใยอาหารแต่ละชนิด (Capuano, 2017)

การย่อยจะสิ้นสุดที่เมื่อไคม์เคลื่อนเข้าสู่ลำไส้ใหญ่ ซึ่งลำไส้ใหญ่ส่วนต้นเป็นส่วนที่มียังคงมีการดูดซึมสารอาหาร และเป็นที่อยู่ของจุลินทรีย์ซึ่งจะเกิดการหมักย่อยสารอาหารที่เหลือจากการย่อยด้วยเอนไซม์จากตัวสัตว์ ใยอาหารจะถูกหมักย่อยในลำไส้ใหญ่ส่วนท้าย (colon)

ได้ผลผลิตเป็นกรดไขมันระเหยง่าย (short chain fatty acids, SCFAs) ได้แก่ กรดอะซิติก (acetic acid) กรดโพรพิโอนิก (propionic acid) และกรดบิวทีริก (butyric acid) และแก๊สไฮโดรเจน คาร์บอนไดออกไซด์ และมีเทน (Zijlstra et al., 2012) ซึ่งกรดไขมันระเหยง่ายเป็นแหล่งพลังงาน สำคัญสำหรับผนังลำไส้ใหญ่ โดยสามารถผลิตและดูดซึมภายในเยื่อบุลำไส้ใหญ่ (colonocytes) ได้ประมาณ 90% และใช้เป็นแหล่งพลังงานให้กับเนื้อเยื่ออื่น ได้แก่ 1) เซลล์เยื่อบุลำไส้ใหญ่ใช้กรด บิวทีริกเป็นแหล่งพลังงาน 2) เซลล์ตับเปลี่ยนกรดบิวทีริกเหลือให้กลายเป็นสารประกอบคีโตน เปลี่ยนกรดโพรพิโอนิกเป็นกลูโคส โดยผ่านกระบวนการ gluconeogenesis และเปลี่ยน acetate ประมาณ 50-70% เป็นพลังงาน 3) เซลล์โครงร่างและเซลล์กล้ามเนื้อจะออกซิไดซ์ acetate ที่เหลือ ซึ่งกรดไขมันระเหยง่าย สามารถให้พลังงานกับสัตว์ โดยในสุกรรุ่นคิดเป็นประมาณ 15% ของ ความต้องการพลังงานเพื่อการดำรงชีพ (maintenance energy) และสุกรอ้วนต้อง ประมาณ 30% ของความต้องการพลังงานเพื่อการดำรงชีพ (Jha et al., 2019) กรดไขมันแต่ละชนิดมีหน้าที่ แตกต่างกัน ดังแสดงใน ตาราง 3

ตาราง 3 Roles of volatile fatty acids in digestive system

กรดอะซิติก	กรดโพรพิโอนิก	กรดบิวทีริก	บทบาทหน้าที่
✓	✓		เป็นแหล่งของพลังงาน (สมอง หัวใจ กล้ามเนื้อ)
		✓	เป็นแหล่งพลังงานของเยื่อบุผนังลำไส้ (colonocytes)
✓	✓	✓	ทำให้เกิดสภาวะความเป็นกรดในระบบทางเดินอาหาร
✓	✓	✓	ลดการดูดซึมแอมโมเนียผ่านเยื่อบุทางเดินอาหาร
✓	✓	✓	ลดการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ที่ก่อโรค
		✓	ยับยั้งการขยายตัว และเพิ่มอัตราการตายของเซลล์มะเร็ง
✓	✓		มีบทบาทเกี่ยวข้องกับเมตาบอลิซึมของไขมัน

ที่มา: ดัดแปลงจาก Williams et al., 2017

เนื่องจากใยอาหารไม่สามารถถูกย่อยสลายได้ด้วยเอนไซม์ในระบบทางเดินอาหารของสัตว์กระเพาะเดี่ยว ต้องอาศัยการหมักย่อยของจุลินทรีย์ที่อาศัยอยู่ในทางเดินอาหารส่วนท้าย ทำให้การย่อยได้ของใยอาหารมีความผันแปรมาก คือประมาณ 40-60% ซึ่งน้อยกว่าสารอาหารชนิดอื่นๆ ไม่ว่าจะเป็น แป้ง น้ำตาล ไขมัน หรือโปรตีน (Jha, & Berrocso, 2016) ถึงแม้ว่าใยอาหารจะเป็นสารที่ทนต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ในระบบทางเดินอาหารของสัตว์ แต่โครงสร้างและลักษณะทางกายภาพของใยอาหารระหว่างอยู่ในทางเดินอาหารก็มีการเปลี่ยนแปลง เริ่มจากการเคี้ยวในปากทำให้ผนังเซลล์ฉีกขาดและลดขนาดของใยอาหารลง จากนั้นเมื่อใยอาหารเคลื่อนเข้าสู่กระเพาะอาหารและลำไส้ จะดูดซับน้ำและเกิดการพองตัว ตามคุณสมบัติของใยอาหารแต่ละชนิด เมื่อใยอาหารเกิดการพองตัวขึ้น ส่วนที่สามารถละลายน้ำได้จะเกิดการละลายในช่องเหลว ภายในทางเดินอาหารและเกิดการไฮโดรไลซ์ภายใต้สภาวะความเป็นกรดภายในกระเพาะอาหาร ยกตัวอย่างเช่น เพคติน ซึ่งเป็นใยอาหารที่ละลายน้ำ สามารถไฮโดรไลซ์ได้ประมาณ 7-18% ภายใต้สภาวะความเป็นกรด (ค่าพีเอชเท่ากับ 1.9) เป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมง (Mikhaleva et al., 2011) ลักษณะทางกายภาพของใยอาหารยังส่งผลต่อการสูญเสียไนโตรเจนด้วย ยกตัวอย่างเช่นใยอาหารชนิดละลายน้ำ จะเพิ่มความชื้นหนืดในทางเดินอาหารและเพิ่มการสูญเสียไนโตรเจน ซึ่งความชื้นหนืดนี้สามารถกระตุ้นการเพิ่มจำนวนของเซลล์เยื่อบุลำไส้ และเกิดการหลุดลอกของเซลล์ผนังลำไส้ การเพิ่มระดับใยอาหารช่วยกระตุ้นการหลั่งสารเมือก ซึ่งเป็นผลเนื่องมาจากปฏิกิริยาระหว่างใยอาหารและผนังลำไส้เล็ก (Zijlstra et al., 2012) เมื่อใยอาหารเคลื่อนเข้าสู่ลำไส้ใหญ่ที่มีจุลินทรีย์อาศัยอยู่ จุลินทรีย์เหล่านั้นจะอาศัยสารกลุ่มคาร์โบไฮเดรตเป็นสารตั้งต้นในการหมักย่อย ได้เป็นกรดไขมันระเหยง่าย (Knudsen, 2001) โดยการผลิตกรดไขมันระเหยง่ายจะขึ้นอยู่กับความสามารถในการละลายของใยอาหาร กล่าวคือใยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำจะสามารถถูกย่อยได้น้อยกว่าใยอาหารชนิดละลายน้ำ (Jha et al., 2019)

นอกจากนี้กรดไขมันระเหยง่ายที่เกิดขึ้นจากการหมักย่อยใยอาหารโดยจุลินทรีย์ จะสร้างสภาวะที่เป็นกรดให้ระบบทางเดินอาหารส่วนท้าย ดังการทดลองของ Banino (2012) ซึ่งพบว่าใยอาหารชนิดละลายน้ำได้อย่างชิโครี (chicory) ในอาหารสุกรระยะเล็ก (น้ำหนักประมาณ 24.8 กิโลกรัม) จะทำให้ค่าพีเอชในมูลต่ำกว่าเมื่อเทียบกับแหล่งใยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำอย่างรำข้าวสาลี (wheat bran) หรือหญ้า (grass meal) ซึ่งเป็นการแสดงให้เห็นถึงกิจกรรมการหมักย่อยใยอาหารชนิดละลายน้ำจากชิโครีภายในทางเดินอาหารส่วนท้าย ในขณะที่ใยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำจะช่วยเพิ่มปริมาณวัตถุแห้งในมูล ทั้งนี้สามารถสรุปการเปลี่ยนแปลงของใยอาหารในระหว่างอยู่ภายในระบบทางเดินอาหารดังแสดงใน ตาราง 4

ตาราง 4 Physical changing of dietary fiber during transit digestive system (human model)

ขั้นตอนการย่อย	ผลต่อใยอาหาร	การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น
ปาก (<1 นาที)	การเปลี่ยนโครงสร้างของ	ปรับเปลี่ยนการใช้ประโยชน์ของ
▪ หลังเอ็นไซม์อะไมเลส และ ไลเปส	สารประกอบพอลิโนลิคในใยอาหาร	สารประกอบ ฟีนอล
▪ ค่าพีเอชประมาณ 7		
กระเพาะอาหาร (ระยะเวลาประมาณ 2-3 ชั่วโมง)	เพิ่มความข้นหนืดและการเกิดเจล	ช่วยชะลอระยะเวลาท้องว่าง อิ่มนานขึ้น
▪ หลังเอ็นไซม์เปปซิน	ยับยั้งการทำงานของเอ็นไซม์เปปซิน	การดูดซึมสารอาหารเป็นไปอย่างช้าๆ
▪ ค่าพีเอชประมาณ 1-3		การย่อยโปรตีนก็ลดลง
ในกระเพาะว่าง และ ระยะกินอาหาร ประมาณ 5-7.5		
ลำไส้เล็ก (ระยะเวลาประมาณ 3-5 ชั่วโมง)	โครงสร้างของผนังเซลล์ทนทานต่อการย่อย	การใช้ประโยชน์ได้ของสารอาหารภายในเซลล์ลดลง
▪ มีการหลั่งสารจากตับอ่อน ประกอบด้วย เอ็นไซม์ อะไมเลส ทริปซิน น้ำดี		
▪ กิจกรรมของจุลินทรีย์ในลำไส้เล็กส่วนท้าย (ค่าพีเอช 6-8)	เกิดความข้นหนืดและเจล	การดูดซึมสารอาหารเป็นไปอย่างช้าๆ ทำให้รู้สึกอิ่มนานขึ้น
	เกิดการแขวนลอยของไขมันในน้ำ	กระบวนการย่อยไขมัน
	การยับยั้งการทำงานของเอ็นไซม์	การไฮโดรไลซ์ของสารอาหารลดลง โดยเฉพาะสารประกอบที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่
	การแลกเปลี่ยนประจุกับแร่ธาตุ	การใช้ประโยชน์ได้ของแร่ธาตุลดลง ลดการเกิดปฏิกิริยาสบู่ (calcium soap) ของกรดไขมัน ทำให้การย่อยได้ของไขมันลดลง

ตาราง 4 (ต่อ)

ขั้นตอนการย่อย	ผลต่อใยอาหาร	การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้น
	การจับกับสารประกอบฟีนอล	อาจเกี่ยวข้องกับการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ และการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติการต้านอนุมูลอิสระของสารประกอบฟีนอลบางชนิด
	การแลกเปลี่ยนประจุกับกรดน้ำดี	ทำให้มีการขับน้ำดีในมูลมากขึ้น ลดคลอเรสเตอรอลในซีรัม ทำให้ประสิทธิภาพของการเกิดการแขวนลอยของไขมันน้อยลง ส่งผลเชิงลบต่อการย่อยไขมัน
ลำไส้ใหญ่ (ระยะเวลา 12-24 ชั่วโมง) ▪ มีกิจกรรมการหมักย่อย โดยจุลินทรีย์ (ค่าพีเอช 5-6)	เกิดกรดไขมันสายสั้น ส่งเสริมการเจริญของแบคทีเรีย	สร้างสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญให้กับจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ (prebiotic effect) ป้องกันการเจริญของจุลินทรีย์ก่อโรค ส่งผลกระทบต่อเมแทบอลิซึมของไขมันและกลูโคส เพิ่มการเจริญของเซลล์เยื่อบุผนังลำไส้ใหญ่ (colonocytes) และเร่งการตายของเซลล์มะเร็งในลำไส้ใหญ่ เพิ่มปริมาณมูล และลดความเข้มข้นของสารพิษต่างๆ
	กระตุ้นการเคลื่อนตัวของลำไส้ (peristalsis) และเพิ่มการหลั่งสารเมือก การปลดปล่อยสารประกอบฟีนอล	เพิ่มความเร็วการไหลผ่านในลำไส้ใหญ่ ลดระยะเวลาการสัมผัสของสารพิษและผนังลำไส้ใหญ่ เพิ่มการใช้ประโยชน์ได้ของใยอาหารภายในลำไส้ใหญ่

ที่มา: ดัดแปลงจาก Capuano, 2017

การเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมในทางเดินอาหารส่วนท้าย ส่งผลโดยตรงต่อปริมาณและชนิดของประชากรแบคทีเรียในระบบทางเดินอาหารของสุกร หลายงานวิจัยชี้ให้เห็นถึงการเพิ่มปริมาณแบคทีเรียที่เป็นประโยชน์อย่างแบคทีเรียในกลุ่มผลิตกรดแลคติก (Lactic acid bacteria) และลดจำนวนแบคทีเรียก่อโรคอย่าง *E. coli* และ *Salmonella* spp. (Gerritsen et al., 2012; Kim et al., 2012) โดยปกติจำนวนจุลินทรีย์ในกระเพาะอาหารของสุกรมีอยู่ประมาณ 10^3 - 10^5 โคโลนีต่อกรัมของสิ่งย่อย จะเพิ่มขึ้นเมื่อผ่านลำไส้เล็กเพิ่มเป็น 10^9 - 10^{10} โคโลนีต่อกรัมของสิ่งย่อย และเพิ่มขึ้นเป็น 10^{10} - 10^{11} โคโลนีต่อกรัมของสิ่งย่อยในลำไส้ใหญ่ อีกทั้งมีความหลากหลายของสายพันธุ์แบคทีเรียมากกว่า 500 สายพันธุ์ (Jensen, & Jorgensen, 1994) โดยแบ่งเป็นแบคทีเรียแกรมบวกประมาณ 90% ได้แก่ แบคทีเรียในกลุ่ม *Streptococcus*, *Lactobacillus*, *Eubacterium*, *Clostridium* และ *Peptostreptococcus* ส่วนอีก 10% เป็นแบคทีเรียแกรมลบเช่น แบคทีเรียในกลุ่ม *Bacteroides* และ *Prevotella* (Gaskins, 2001) การหมักย่อยใยอาหารภายในทางเดินอาหารส่วนท้าย ส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมและสมดุลของแบคทีเรียภายในทางเดินอาหาร การหมักย่อยที่เกิดขึ้นมีการความผันแปรมาก ซึ่งเกิดจากลักษณะทางกายภาพของเยื่อใยเอง เช่น ความฟาม ความชื้นหนืด การละลายได้ ความสามารถในการอุ้มน้ำ (water-holding capacity) และความสามารถในการหมักย่อย (fermentability) ยกตัวอย่างใยอาหารกลุ่ม β -glucan, arabinoxylans และ pectins จะถูกย่อยอย่างรวดเร็วในไส้ติ่งและลำไส้ใหญ่ ในขณะที่เยื่อใยชนิดไม่ละลายน้ำ เช่น cellulose และ arabinoxylans ชนิดไม่ละลายน้ำ ถูกย่อยอย่างช้าๆ ในส่วนท้ายของลำไส้ใหญ่ การย่อยได้ของเยื่อใยยังขึ้นอยู่กัอายุของสัตว์ เนื่องจากระยะเวลาการคงอยู่ในระบบทางเดินอาหารที่นานขึ้น จากการเพิ่มความจุของระบบทางเดินอาหารร่วมกับปริมาณการกินที่ลดลง เมื่อเทียบกับน้ำหนักตัว (feed intake per unit of live weight)

นอกจากนี้ยังพบอิทธิพลของใยอาหารต่อการย่อยได้ของสารอาหารอื่น ดังมีรายละเอียดดังนี้ (Dégen et al., 2007)

1. การย่อยได้ของโปรตีน

เนื่องจากใยอาหารมีการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพระหว่างที่อยู่ในทางเดินอาหาร ใยอาหารที่มีความสามารถในการอุ้มน้ำสูง ทำให้เกิดความชื้นหนืดระหว่างที่อยู่ในทางเดินอาหาร และส่งผลให้มีการขับไนโตรเจนออกทางมูลเพิ่มขึ้น (nitrogen loss) ซึ่งเป็นส่วนสารคัดหลั่งเยื่อเมือก และเอ็นไซม์ ส่งผลให้การย่อยได้ของโปรตีนและกรดอะมิโนลดลง โดยเฉพาะการย่อยได้แบบปรากฏ (apparent digestibility) และอีกนัยหนึ่งคืออาจเกิดการขัดขวางการดูดซึมกลับของสารประกอบไนโตรเจนในลำไส้เล็ก ทำให้ปริมาณไนโตรเจนในมูลเพิ่มขึ้น (Dégen et al., 2007)

ทั้งนี้จากบทวิจารณ์ของ Souffrant (2001) ถึงแม้ว่าการย่อยได้ทั้งหมดของโปรตีนจะลดลง แต่จากการศึกษาการย่อยได้ที่ปลายลำไส้เล็ก ปริมาณของใยอาหารกลับไม่มีผลต่อการย่อยได้ของโปรตีน และกรดอะมิโนที่ปลายลำไส้เล็ก

2. การย่อยได้ของไขมัน

การเพิ่มระดับใยอาหารในอาหารสัตว์นั้น ทำให้พลังงานของอาหารลดลง จึงมักต้องเพิ่มไขมันในสูตรอาหารให้สูงขึ้น เพื่อชดเชยพลังงานในอาหาร ซึ่งผลกระทบของใยอาหารต่อการย่อยได้ของไขมันนั้น ขึ้นอยู่กับชนิดของใยอาหาร กล่าวคือใยอาหารที่ละลายน้ำได้ จะก่อให้เกิดความข้นหนืดเมื่ออยู่ในระบบทางเดินอาหารและรบกวนกระบวนการอิมัลชันของไขมัน ในขณะที่ใยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำ จะทำให้การไหลผ่านของอาหารเร็วขึ้น และทำให้ระยะเวลาการทำปฏิกิริยาของเอนไซม์ในระบบทางเดินอาหารลดลง รวมถึงเอนไซม์ในการย่อยไขมันอย่างไลเปสด้วย แต่อย่างไรก็ตาม การเพิ่มระดับของใยอาหารส่วนใหญ่ส่งผลทำให้ค่าการย่อยได้ของไขมันลดลง (Knudsen, & Hansen, 1991; Noblet, & Perez, 1993; Freire et al., 1998; Noblet, & Goff, 2001) แต่มีบางการทดลองที่ใยอาหารไม่ได้ส่งผลต่อการย่อยได้ของไขมัน (Högberg, & Lindberg, 2004) นอกจากนี้ยังมีสมมติฐานที่สนับสนุนผลของใยอาหารที่มีต่อการย่อยและใช้ประโยชน์ได้ของไขมันคือการที่ไขมันถูกสร้างโดยแบคทีเรียเองในทางเดินอาหารส่วนท้าย โดยแนวคิดนี้เสนอโดย Dierick et al. (1990; Noblet, & Goff, 2001) ซึ่งได้ให้ข้อสังเกตถึงการย่อยได้ของไขมันที่เก็บจากมูลนั้นมีค่าเฉลี่ยลดลงอย่างเห็นได้ชัด แต่เมื่อเก็บตัวอย่างการย่อยได้ของไขมันจากปลายลำไส้เล็ก กลับไม่พบความแตกต่างที่ชัดเจน จึงกล่าวได้ว่าอาจเกิดการรบกวนจากกิจกรรมของจุลินทรีย์หรืออาจเกิดจากการจับกับน้ำดีในระบบทางเดินอาหาร โดยใยอาหารชนิดละลายน้ำสามารถจับกับน้ำดี และขับออกทางมูลมากกว่าใยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำ ซึ่งอาจอธิบายโดยสรุปว่าใยอาหารชนิดละลายน้ำจะส่งผลต่อการย่อยของไขมันมากกว่าใยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำ

สรีระและสัณฐานวิทยาของลำไส้เล็กของสุกร

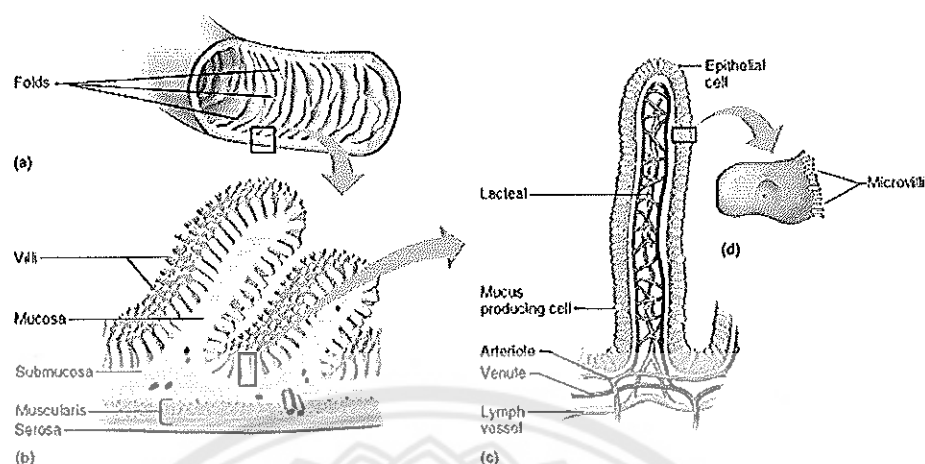
1. ลักษณะทางสัณฐานวิทยาทั่วไปของลำไส้เล็ก

ลำไส้เล็ก ทำหน้าที่ในการย่อย การหลั่งเอนไซม์และสารคัดหลั่ง และดูดซึมสารอาหาร ลำไส้เล็กของสุกรเมื่อแรกเกิดมีความยาวประมาณ 2 เมตร ความจุประมาณ 72 มิลลิลิตร หลังจากหย่านม ความยาวเพิ่มขึ้นประมาณ 3 เท่าคือ 6.5 เมตร และมีความจุเพิ่มประมาณ 9 เท่า เป็น 650 มิลลิลิตร สำหรับสุกรโตเต็มวัยยาวประมาณ 16-21 เมตร และความจุประมาณ 20 ลิตร เมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหนักตัวแล้ว สุกรระยะดูดนมมีน้ำหนักของลำไส้เล็กประมาณ 4-5% ของน้ำหนักตัว และลดลงเหลือประมาณ 1.5% ของน้ำหนักตัวของสุกรโตเต็มวัย

(Lærke, & Hedemann, 2012) ลำไส้เล็กแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ ลำไส้เล็กส่วนต้น (duodenum) ยาวประมาณ 4-4.5% ของความยาวทั้งหมด ลำไส้เล็กส่วนกลาง (jejunum) เป็นส่วนที่มีความยาวมากที่สุด คือ ประมาณ 88-91% ของความยาวทั้งหมด และลำไส้เล็กส่วนปลาย (ileum) ยาวประมาณ 4-5% ของความยาวทั้งหมด ทางเดินอาหารจะมีการพัฒนามากในช่วง 3 เดือนแรก หลังคลอด ทั้งเยื่อบุทางเดินอาหาร ระบบภูมิคุ้มกัน และระบบประสาทของผนังทางเดินอาหาร (enteric nervous system) ทั้งนี้ยังเกี่ยวข้องกับหลายปัจจัย ได้แก่ ลักษณะทางพันธุกรรม การเจริญของจุลินทรีย์ภายในระบบทางเดินอาหาร และปัจจัยเกี่ยวกับนมและนมแม่เหลือง เป็นต้น (Moeser et al., 2017, Wjitten et al., 2011)

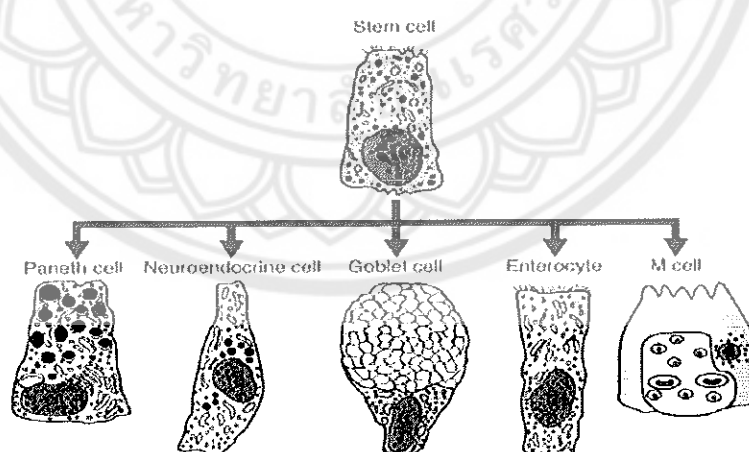
ลำไส้เล็กประกอบด้วยผนังทั้งหมด 4 ชั้น เรียงจากด้านนอกไปด้านใน คือ serosa layer, muscular layer, submucosa layer และ mucosa layer โดยชั้น serosa layer เป็นผนังชั้นนอกสุดของลำไส้ มีเนื้อเยื่อเกี่ยวพัน เส้นเลือดและเส้นประสาทมาหล่อเลี้ยง ถัดมาเป็นชั้น muscular layer ประกอบด้วยชั้นกล้ามเนื้อด้านนอกเป็นแนวตามยาว (longitudinal muscle) และชั้นในเป็นชั้นกล้ามเนื้อตามขวาง (circular muscle) ทำหน้าที่เกี่ยวกับการเคลื่อนตัวของลำไส้ ชั้นต่อมา คือ ชั้น submucosa layer เป็นชั้นที่ประกอบด้วยเนื้อเยื่อเกี่ยวพัน เส้นเลือด น้ำเหลือง และเส้นประสาท ส่วนผนังชั้นในสุดคือชั้น mucosa layer แบ่งเป็นชั้นย่อยๆ อีก 3 ชั้น ด้านนอกสุดคือชั้น muscularis mucosa ถัดมาเป็นชั้น lamina propria มีเส้นเลือด น้ำเหลือง เซลล์เม็ดเลือดขาว และต่อมน้ำเหลือง ส่วนชั้นในสุดคือชั้น epithelial layer เป็นชั้นที่มี enterocytes เรียงเป็นชั้นเดียว มีลักษณะคล้ายนิ้วมือยื่นออกไปภายในลำไส้ เรียกส่วนนี้ว่า วิลไล (villi) ที่ปลายของวิลไล มีลักษณะเป็นขนขนาดเล็ก เรียกว่าไมโครวิลไล (microvilli) ที่ฐานของวิลไลจะมีส่วนที่เว้าลึกลงไป เรียกว่า คริปต์ (crypt of lieberkuhn) ทำหน้าที่สร้างสารคัดหลั่งเช่น ฮอโมน และเอ็นไซม์ อีกทั้งยังเป็นที่อยู่ของเซลล์ต้นกำเนิด (stem cell) ดังแสดงในภาพ 4

รูปร่างและความลึกของคริปต์ รูปร่างและความสูงของวิลไล และจำนวนของ goblet cell เป็นดัชนีชี้วัดที่สำคัญซึ่งสามารถบ่งบอกถึงความสมบูรณ์ของลำไส้ รูปร่างของวิลไลแบ่งออกเป็น 5 แบบคือ รูปลิ้น (tongue-shaped) รูปนิ้วมือ (finger-shaped) รูปใบไม้ (leaf-shaped) ridged-shaped และ convoluted shape (Mouwen, 1971)



ภาพ 4 ลักษณะทางกายวิภาคของผนังลำไส้เล็ก โดย (a), (b) ลักษณะพื้นผิวของผนังลำไส้เล็ก (c) วิลไล และ (d) เซลล์เยื่อบูทางเดินอาหารและไมโครวิลไล

เซลล์เยื่อบูผนังลำไส้ (epithelial cell) เป็นเซลล์ที่พัฒนามาจากเซลล์ต้นกำเนิด (enterocyte หรือ stem cell) ที่อยู่บริเวณคริปต์ สักระยะดูดนมจะมีรอบการผลัดเซลล์เยื่อบูลำไส้ประมาณ 7 วัน แต่สำหรับสุกรโตเต็มวัยจะมีรอบการผลัดเซลล์ประมาณ 2-3 วัน โดย stem cell ที่อยู่ที่คริปต์จะเจริญขึ้นทดแทนเซลล์ที่หลุดลอกไป (Xiong et al., 2019)



ภาพ 5 ชนิดของเซลล์เยื่อบูผนังลำไส้เล็กชนิดต่างๆ ซึ่งพัฒนามาจากเซลล์ต้นกำเนิด (stem cells)

เซลล์ต้นกำเนิดสามารถพัฒนาเป็นเซลล์เยื่อบุทางเดินอาหารที่แตกต่างกัน 5 ชนิด คือ Enterocyte, Goblet cell, Neuroendocrine cell, Paneth cell และ M cell (ภาพ 5) ซึ่งแต่ละเซลล์ทำหน้าที่แตกต่างกัน ดังนี้ (Gelberg, 2014)

1.1 Enterocytes หรือ the absorptive cells หรือเซลล์ดูดซึม เป็นเซลล์ทรงสูง ด้านบนมี ไมโครวิลไล เรียงตัวขึ้นเดียว มีการสร้างเอ็นไซม์ที่ใช้ในการย่อยและดูดซึมสารอาหาร ยึดเกาะกันโดยอาศัย apical junction complex ที่ประกอบไปด้วย transmembrane protein และ โมเลกุลอื่นๆ อีกกว่า 40 โมเลกุล ในช่วงที่สุกรกินนม น้ำเหลือง สารที่มีโมเลกุลใหญ่สามารถดูดซึมผ่านเซลล์ชนิดนี้ได้ผ่านกระบวนการ pinocytosis เซลล์ชนิดนี้มีจำนวนประมาณ 90% ของเซลล์เยื่อบุลำไส้ทั้งหมด (Xiong et al., 2019)

1.2 Goblet cells พบได้ทั้งในส่วนของวิลไลและคริปต์ ทำหน้าที่สร้าง high molecular weight glycoproteins หรือที่เรียกว่าสารเมือก (mucins) ซึ่งมีหน้าปองกันการจับผนังลำไส้เล็กจากแบคทีเรีย และทำให้แบคทีเรียถูกขับออกมากับมูล

1.3 Paneth cells พบได้บริเวณส่วนลึกที่สุดของคริปต์ ทำหน้าที่ไม่แน่ชัด แต่เชื่อว่าจะเกี่ยวข้องกับการกลืนกิน (phagocyte) และการคัดหลั่งสาร (secretion) จำพวก cryptdins, lysins peptidases และ lysozymes ซึ่งเป็นพิษต่อแบคทีเรีย

1.4 Neuroendocrine cell ทำหน้าที่สร้างสารหลายชนิด เช่น serotonin, catecholamines, gastrin, somatostatin, cholecystokinin, secretin, bombesin, enteroglucagon, fibroblast growth factor 19 และฮอร์โมนอีกหลายชนิด

1.5 M (microfold, membranous) cells เซลล์ชนิดนี้ทำงานร่วมกับเซลล์ภูมิคุ้มกันในระบบทางเดินอาหาร Peyer's patches หรือ gut-associated lymphoid tissue (GALT) ทำหน้าที่กลืนกินแอนติเจน (antigen) รวมถึงสารพิษจากภายในลำไส้เล็ก ส่งต่อไปกับระบบน้ำเหลือง

2. การเปลี่ยนแปลงสัณฐานวิทยาของลำไส้เล็กในช่วงการหย่านม

การพัฒนาเยื่อบุทางเดินอาหารอย่างสมบูรณ์จะเกิดขึ้นเมื่อสุกรมีอายุประมาณ 10-12 สัปดาห์ แต่ในปัจจุบันมีการหย่านมที่เร็วขึ้น เพื่อเพิ่มรอบการผลิตให้กับแม่สุกร หลังหย่านมสุกรจะเผชิญกับความเครียดจากการรวมกลุ่มทางสังคม การเปลี่ยนสภาพแวดล้อม และการเปลี่ยนอาหาร (Xiong et al., 2019) โดยสามารถแบ่งการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นกับสุกรหลังจากหย่านมออกได้เป็น 2 ระยะคือ acute phase และ regenerate phase ช่วง acute phase เกิดในระยะสัปดาห์แรกหลังหย่านม เป็นระยะที่สุกรมีการกินอาหารลดลง และมีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างและการทำงานของระบบทางเดินอาหาร อันเนื่องมาจากการทำงานของเอ็นไซม์ และการ

เปลี่ยนแปลงอาหารในทันที ทำให้สุกรเกิดความเครียดและส่งผลกระทบต่อการบินของสุกร (Pluske, & Williams, 1996) จากรายงานของ Brooks et al. (2001) พบว่าประมาณ 10% ของสุกรที่หย่านมเมื่ออายุ 28 วัน จะกินอาหารน้อยมากในช่วง 48 ชั่วโมงหลังการหย่านม ส่งผลให้ความสูงของวิลโลลดลงประมาณ 75% เมื่อเทียบกับก่อนหย่านม การที่วิลโลหดสั้นหรือฝ่อนั้นเกิดจากการหลุดลอกของเซลล์เยื่อบุทางเดินอาหารในอัตราที่สูงกว่าการสร้างเซลล์ใหม่ขึ้นมาทดแทน การดูดซึมสารอาหารลดลง มีสารอาหารเหลือไปถึงทางเดินอาหารส่วนท้ายมากขึ้น เป็นแหล่งอาหารให้กับจุลินทรีย์ที่ก่อโรค และเพิ่มโอกาสของการเกิดอาการท้องเสียหลังหย่านม (post-weaning diarrhea) (Molist et al, 2014) ระยะที่สอง (regenerate phase) คือ ช่วง 7-15 วันหลังการหย่านม สุกรมีการปรับตัวต่ออาหารมากขึ้นเป็นลำดับ สามารถสังเกตได้จากการเพิ่มขึ้นของมวลของลำไส้เล็กส่วนกลาง น้ำหนักของตับอ่อนที่เพิ่มขึ้น ซึ่งให้เห็นถึงการฟื้นฟูการทำงานของเอ็นไซม์ที่เข้าสู่ภาวะปกติ (Montagne et al., 2007)

ช่วงหลังการหย่านมมักจะเกิดการหลุดลอกของเยื่อบุผนังลำไส้ ทำให้ความยาวของวิลโล ลดลงและเพิ่มความลึกของครีพท์ นอกจากนี้ยังพบการฝ่อตัวของวิลโล ซึ่งเกิดจากการเจริญทดแทนไม่ทันต่อการหลุดลอกของเยื่อบุทางเดินอาหาร (Pluske et al., 1997) การหย่านมเมื่อสุกรอายุ 21 วัน วิลโลจะลดลงประมาณ 75% (เมื่อเทียบกับความสูงวิลโลก่อนหย่านม) ภายในระยะเวลา 24 ชั่วโมงหลังการหย่านม และหลังจากนั้นประมาณ 5-8 วันหลังหย่านม วิลโลจะค่อยๆ เพิ่มความยาวขึ้น โดยวันที่ 5 หลังจากการหย่านมความสูงของวิลโลต่อความลึกของครีพท์ (VH:CD) ของลำไส้เล็กอยู่ที่ประมาณ 1.5-2.0:1 เท่านั้น (Hampson, 1986)

สุกรหลังการหย่านมมักพบการเข้าทำลายจากเชื้อแบคทีเรียก่อโรค จากการลดลงของเอ็นไซม์ alkaline phosphatase ซึ่งเป็นเอ็นไซม์ที่สร้างโดย brush border ในลำไส้เล็กทำหน้าที่ขจัดสารพิษที่สร้างโดยแบคทีเรียก่อโรค นอกจากนี้ยังพบความบกพร่องของสัณฐานวิทยาของลำไส้เล็ก เซลล์ผนังลำไส้ (enterocytes) ทำหน้าที่คัดเลือกโมเลกุลของสารอาหารที่จะผ่านเข้าสู่เซลล์และกระแสเลือด ในขณะที่เดียวกันก็ป้องกันไม่ให้เชื้อแบคทีเรียก่อโรคและแอนติเจนเข้าสู่เซลล์ได้ โดยด้านบนของเซลล์ผนังลำไส้จะมีชั้นเยื่อเมือก (mucus layer) ปกคลุมอยู่ ทำหน้าที่ป้องกันเอ็นไซม์โปรติเอสจากแบคทีเรียก่อโรค รวมถึงปกป้องเซลล์ผนังลำไส้จากการกดขี่หลังจากกระเพาะอาหารและลำไส้เล็กส่วนต้น (Kim et al., 2012) สารอาหารที่สัตว์ย่อยและดูดซึมไม่หมด ล้วนส่งผลให้แบคทีเรียก่อโรคสามารถเพิ่มจำนวนได้อย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดอาการที่เรียกรวมว่าอาการท้องเสียหลังหย่านม (post-weaning diarrhea)

จากบทวิจารณ์ของ Pluske et al. (1997) ได้แบ่งปัจจัยที่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลง สันฐานวิทยาและการทำงานของลำไส้เล็กหลังการหย่านมออกเป็น 5 ปัจจัย คือ 1) การบุกรุกของ แบคทีเรียก่อโรค 2) ความผิดปกติจากความเครียดหลังที่เกิดจากการหย่านม 3) การอดนมจากแม่ สุก 4) การเปลี่ยนแปลงด้านอาหาร และ 5) การหลั่งไซโตไคม์ที่มีผลควบคุมการเจริญของลำไส้ ซึ่งแต่ละปัจจัยนั้นมีรายละเอียดดังนี้

2.1 การบุกรุกของแบคทีเรียก่อโรค

เมื่อแรกเกิดนั้นสุกรมีระบบทางเดินอาหารที่ปราศจากเชื้อ (sterile) หลังจากนั้น ได้รับเชื้อจุลินทรีย์จากแม่และสภาพแวดล้อม ทำให้มีการพัฒนาของเชื้อจุลินทรีย์ในระบบทางเดิน อาหารทั้งด้านปริมาณและความหลากหลาย (Inoue et al., 2005) โดยปกติผนังของลำไส้เล็กทำหน้าที่ป้องกันการเข้ายึดเกาะของเชื้อแบคทีเรียที่ก่อโรค แต่หลังการหย่านมพบการหลุดลอกของ เซลล์ เยื่อผนังลำไส้เล็กอย่างรวดเร็ว และการสร้างขึ้นใหม่ต้องใช้เวลานาน จึงมีช่วงที่ผนังลำไส้ เล็กบางลง เป็นโอกาสให้เชื้อจุลินทรีย์ก่อโรคเข้ายึดเกาะและเจริญเพิ่มจำนวนได้ (Kelly et al., 1992) โดยเฉพาะแบคทีเรียในกลุ่ม β -haemolytic *Escherichia coli* (*E. coli*) ซึ่งเป็นแบคทีเรีย กลุ่มก่อโรคที่เป็นสาเหตุหลักในการเกิดกลุ่มอาการท้องเสียหลังหย่านมของสุกร (post-weaning diarrhea; PWD) มักพบทำให้เกิดการติดเชื้อในลำไส้เล็กส่วนต้น ทำให้การเจริญเติบโตของสุกร ลดลง หรือตายได้ (Luppi, 2017) จากการศึกษาการติดเชื้อของเหลว เช่น โซเดียม โพลแซสเซียม และคลอไรด์ในลำไส้เล็กของสุกรที่มีการติดเชื้อกลุ่ม β -haemolytic *E. coli* พบว่าในสุกรที่มีติดเชื้อ หลังการหย่านมมีความสัมพันธ์เชิงลบกับความสูงของวิลไล ($r = -0.95$, $P < 0.02$) และการติดเชื้อ แร่ธาตุในสุกรที่ติดเชื้อน้อยลงเมื่อเทียบกับสุกรที่ไม่มีการติดเชื้อ (Nabuurs et al., 1994) ซึ่งเกิด จากการกินอาหารลดลง ทำให้ลำไส้ปรับตัวโดยเพิ่มการดูดซึมสารอาหารหลังจากการหย่านม ทำให้โอกาสที่จะดูดซึมสารพิษที่สร้างโดย β -haemolytic *E. coli* มีมากขึ้น จนทำให้เกิดการติดเชื้อ (Cohen et al., 1986; Chu, & Walker, 1993)

2.2 ความผิดปกติจากความเครียดที่เกิดหลังการหย่านม

ความผิดปกติที่เกิดจากความเครียดจากการเคลื่อนย้ายและการจัดกลุ่มของ สุกรหลังหย่านม สุกรที่มีการชะงักการเจริญเติบโตหลังหย่านม มีการแบ่งเซลล์ของคริปต์ต่ำ ทำให้ ความสูงของวิลไลลดลง (Albinsson, & Andersson, 1990) ทั้งนี้ความผิดปกติที่เกิดขึ้นจาก การรวมกลุ่มนี้อาจเกี่ยวข้องกันจากหลากหลายปัจจัย เช่น ปัญหาปริมาณการกินอาหารลดลงหลัง หย่านม การเจ็บป่วยจากการต่อสู้กันหลังจากการรวมกลุ่มใหม่ หรือปัจจัยด้านอาหาร ซึ่งจะกล่าว รายละเอียดในหัวข้อที่ 4) (Pluske et al., 1997)

2.3 การหย่านมจากแม่สุกร

น้ำนมของแม่สุกร ไม่ว่าจะเป็นน้ำนมเหลือง (colostrum) หรือน้ำนมปกติ พบว่าองค์ประกอบของ milk-borne growth factors ฮอโมน และสารสำคัญอื่นๆ ที่มีผลต่อการพัฒนาของลำไส้ของสุกร ซึ่งการหย่านมทำให้สุกรไม่ได้รับสารเหล่านี้จากนมแม่และเปลี่ยนเป็นการรับสารอาหารจากอาหารแข็ง (solid feed) อย่างทันทีทันใด ส่งผลโดยตรงต่อการพัฒนาของเซลล์ของลำไส้ ซึ่งสารสำคัญในกลุ่มนี้ได้แก่ epidermal growth factor (EGF), polyamines, insulin และ insulin-like growth factors (IGF)

2.4 การเปลี่ยนแปลงด้านอาหาร

รูปแบบของอาหารมีผลต่อสัณฐานวิทยาของลำไส้เล็ก กล่าวคือ สุกรที่มีการให้อาหารในรูปแบบกึ่งแข็งกึ่งเหลว (slurry form) มีวิลไลสูงกว่าในวันที่ 8 และ 11 หลังการหย่านม เมื่อเปรียบเทียบกับอาหารแบบเม็ด เนื่องจากอาหารแบบเม็ดมีการกัดเซาะผนังลำไส้มากกว่าอาหารกึ่งแข็งกึ่งเหลว (Deprez et al., 1987) นอกจากนี้ยังมีรายงานว่าอาหารกึ่งแข็งกึ่งเหลวทำให้อัตราการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้น 11% และมีปริมาณการกินอาหารเพิ่มขึ้น 13% (Partridge et al., 1992) และสุกรที่กินอาหารเพิ่มขึ้น ทำให้ความสูงของวิลไลเพิ่มขึ้น (Beers-Schreurs et al., 1992) นอกจากนี้ยังพบว่าสารอาหารบางอย่างส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของลำไส้ เช่น การใช้โปรตีนจากถั่วเหลือง หรือสารต้านการใช้ประโยชน์ของโภชนาชนิดต่างๆ เช่น lectins, tannins และ α -amylase inhibitors (Huisman, & Jansman, 1991) และกรดไขมันระเหยง่าย เป็นต้น

2.5 การหลั่งไซโตไคน์ (Cytokines) ที่มีผลควบคุมการเจริญของลำไส้

ไซโตไคน์ มีความสำคัญในการเป็นสารที่ใช้ในการสื่อสารระหว่างเซลล์ข้างเคียง โดยสำหรับในลำไส้เล็ก ไซโตไคน์ทำหน้าที่ในการสื่อสารระหว่างเม็ดเลือดขาวของระบบภูมิคุ้มกันของเซลล์เยื่อบุผนังลำไส้ ได้แก่ Peyer's Patches, lamina propria lymphocytes และ intra-epithelial lymphocytes ซึ่งเซลล์เหล่านี้มีหน้าที่เกี่ยวข้องกับระบบภูมิคุ้มกันของลำไส้ (Elson, & Beagley, 1994) โดยพบว่าเมื่อเซลล์เม็ดเลือดขาวชนิด macrophage ถูกกระตุ้น จะทำให้เกิดการปล่อยของวิลไล ความลึกของครีพท์เพิ่มขึ้น หรือทำลายเยื่อบุทางเดินอาหาร (Lionetti et al., 1993) อย่างไรก็ตาม Pluske et al. (1997) ได้ให้ข้อเสนอว่าการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างการหลั่งไซโตไคน์กับการเปลี่ยนแปลงสัณฐานวิทยาของลำไส้ยังน้อยมาก อย่างไรก็ตามความสัมพันธ์ระหว่างไซโตไคน์กับสัณฐานวิทยาของลำไส้ยังไม่สามารถสรุปกลไกที่แน่ชัดได้

สมดุลของจุลินทรีย์ในระบบทางเดินอาหารของสุกรหย่านม

1. ระบบนิเวศน์ของจุลินทรีย์ช่วงก่อนและหลังหย่านมของสุกร

จุลินทรีย์ในระบบทางเดินอาหารของลูกสุกรแรกเกิดนั้นอยู่ในสภาวะปลอดเชื้อ (sterile) เมื่อแรกเกิดการฉีกขาดระหว่างการคลอด ทำให้สุกรได้รับเชื้อจุลินทรีย์จากหลายแหล่ง เช่น ช่องคลอดของแม่สุกร มูล และผิวหนังของแม่สุกร จากนั้นก็ได้รับจากสภาพแวดล้อมและน้ำนมของแม่ตามลำดับ (Konstantinov et al., 2004; Pleper et al., 2008) ทำให้ระบบทางเดินอาหารเริ่มมีการเจริญของจุลินทรีย์ โดยจากการศึกษาของ Katouli et al. (1997) พบว่าในช่วงแรกของชีวิตนั้น เชื้อจุลินทรีย์ในระบบทางเดินอาหารของลูกสุกร มีรูปแบบที่คล้ายคลึงกับรูปแบบจุลินทรีย์ของแม่สุกรเป็นอย่างมาก ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้ว่าลูกสุกรได้รับเชื้อจุลินทรีย์กลุ่มแรก (first colonize) มาจากตัวแม่สุกรเอง นอกจากนี้ยังพบว่ามูลของแม่นั้นเป็นปัจจัยสำคัญต่อระบบนิเวศน์ของจุลินทรีย์ในทางเดินอาหารของลูกสุกร โดยจากการทดลองให้ลูกสุกรกินมูลของแม่สุกร 85 กรัม ต่อวัน มีผลทำให้ระบบนิเวศน์ของจุลินทรีย์ในทางเดินอาหารของลูกสุกรเปลี่ยนแปลงไป และในเวลาต่อมาจะมีความเป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัวมากขึ้น (Sansom, & Gleed, 1981) จุลินทรีย์กลุ่มแรกนั้นเป็นจุลินทรีย์ในกลุ่มที่ใช้ออกซิเจน (aerobes) หลังจากนั้นเป็นกลุ่มไม่ใช้ออกซิเจนในการดำรงชีพ (anaerobes) หลังจากสุกรได้รับภูมิคุ้มกันจากน้ำนมเหลือง จนกระทั่ง 48 ชั่วโมงหลังคลอด ลูกสุกรจะมีปริมาณของแบคทีเรียที่ไม่ต้องการออกซิเจนในการดำรงชีพ (strict anaerobes) เพิ่มขึ้นเป็นประมาณ 90% ของแบคทีเรียทั้งหมด (Swords et al., 1993) อย่างไรก็ตาม เชื้อจุลินทรีย์ในระบบทางเดินอาหารของลูกสุกรนั้นค่อนข้างมีความหลากหลายของชนิด เชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งนอกจากจะมาจากปัจจัยของแม่สุกรแล้ว ยังมีความเกี่ยวข้องกับปัจจัยของสภาพแวดล้อมในการเลี้ยงและอาหารอีกด้วย (Ewing, & Cole, 1994)

หากแบ่งระบบนิเวศน์ของจุลินทรีย์ตามส่วนของระบบทางเดินอาหาร เชื้อจุลินทรีย์ในทางเดินอาหารส่วนต้น ได้แก่ภายในช่องปาก กระเพาะอาหารและลำไส้เล็กส่วนต้น ที่มีสภาวะความเป็นกรดสูงและมีการเคลื่อนไหวของอาหารค่อนข้างเร็ว ดังนั้นกระเพาะอาหารและลำไส้เล็กจึงพบจุลินทรีย์ในกลุ่มที่ทนต่อสภาวะที่เป็นกรด เช่นกลุ่ม *Lactobacilli* และกลุ่ม *Streptococci* เป็นต้น ส่วนเชื้อกลุ่ม *E. coli*, *Clostridia*, *Eubacterium*, *Bifidobacterium*, *Staphylococcus*, *Actinomyces* และ *Klepsiella* พบได้น้อยมากในกระเพาะอาหารและลำไส้เล็กส่วนต้น ในส่วนลำไส้เล็กส่วนปลาย ซึ่งมีสภาวะที่เป็นกลาง มีอัตราการไหลของสิ่งย่อยช้ากว่า ทำให้จุลินทรีย์มีจำนวนและมีความหลากหลายมากขึ้น ลำไส้ส่วนนี้จะพบจุลินทรีย์ในกลุ่ม *Lactobacilli*, *Streptococci*, *Clostridia* และ *Eubacterium* นอกจากนี้ยังสามารถพบจุลินทรีย์ในกลุ่ม *E. coli* และ *Bacteroides* ได้อีกด้วย ลำไส้ติ่งและลำไส้ใหญ่จะพบจุลินทรีย์ในกลุ่มที่ไม่ใช้ออกซิเจน (Strict

anaerobic bacteria) เนื่องจากการเคลื่อนผ่านของสิ่งย่อยช้า และการเคลื่อนตัวของลำไส้ส่วนนี้เป็นแบบ anti-peristaltic movement ซึ่งเป็นการเคลื่อนตัวแบบกลับทางทำให้อาหารมีการดูดซึมดีขึ้น ทำให้บริเวณลำไส้ใหญ่เป็นบริเวณที่เหมาะสมต่อการเจริญของแบคทีเรีย โดยแบคทีเรียที่พบได้ในลำไส้ใหญ่ได้แก่ *Bacteroides*, *Prevotella*, *Colostridia* และ *Eubacteria* เป็นต้น

สำหรับช่วงหย่านมมักพบปัญหาสุกรกินอาหารน้อย ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงการทำงานของระบบทางเดินอาหารมีการเปลี่ยนแปลง อัตราการไหลผ่านของอาหาร รวมถึงส่งผลต่อจุลินทรีย์ และแหล่งสารอาหารของจุลินทรีย์ ซึ่งในช่วงสัปดาห์แรกของการหย่านม ความหลากหลายทางชีวภาพของจุลินทรีย์ลดลงอย่างมาก และใช้เวลาประมาณ 2-3 สัปดาห์ปรับตัว จากรายงานของ Inoue et al. (2005) พบว่าความหลากหลายของจุลินทรีย์จะเริ่มเพิ่มขึ้นหลังจาก 24 วันหลังหย่านม นอกจากจำนวนของจุลินทรีย์จะลดลงแล้ว ชนิดของจุลินทรีย์ก็มีการเปลี่ยนแปลงด้วยเช่นกัน รวมถึงแบคทีเรียก่อโรคที่ทำให้เกิดอาการท้องเสียหลังหย่านม เช่นแบคทีเรียในกลุ่ม *E. coli* ในมูลของสุกรโตเต็มวัยนั้น ส่วนใหญ่เป็นแบคทีเรียแกรมบวก ประเภทไม่ใช้ออกซิเจนในการดำรงชีวิต (anaerobes) เช่น *Streptococcus*, *Lactobacillus*, *Fusobacterium*, *Eubacterium* และ *Peptostreptococcus* ส่วนแบคทีเรียแกรมลบได้แก่ *Bacteroides* และ *Prevotella* พบได้ประมาณ 10% ของแบคทีเรียที่ตรวจพบจากวิธีการเพาะเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อเท่านั้น (Konstantinov et al., 2004; Mathew et al., 1993; Jensen et al., 1998)

2. ปัจจัยที่มีผลต่อสมดุลของจุลินทรีย์ในทางเดินอาหารสุกร (Nowland et al., 2019)

2.1 การให้ยาต้านจุลชีพ

การให้ยาต้านจุลชีพในสุกรระยะก่อนหย่านมมีผลเชิงลบต่อความหลากหลายของจุลินทรีย์ และเพิ่มจำนวนของแบคทีเรียดื้อยา (resistant bacteria) ในระบบทางเดินอาหาร โดยการให้ยาต้านจุลชีพจะออกฤทธิ์ในวงกว้าง และออกฤทธิ์ทั้งกับแบคทีเรียที่เป็นประโยชน์และแบคทีเรียก่อโรค ทำให้แบคทีเรียที่เป็นประโยชน์ลดจำนวนลงไปด้วย และเปิดโอกาสให้แบคทีเรียก่อโรคเพิ่มจำนวนขึ้นมากกว่า ซึ่งจะส่งผลต่อสุขภาพของสัตว์ได้ ตามการศึกษาของ Looft et al. (2012) ที่ศึกษาการให้ยาต้านจุลชีพในอาหารสุกรก่อนหย่านม พบว่า ทั้งปริมาณและความหลากหลายของจุลินทรีย์ในทางเดินอาหารลดลงเมื่อให้ยาปฏิชีวนะ นอกจากนี้ยังทำให้ปริมาณเชื้อ *E. coli* ในลำไส้เล็กส่วนท้ายเพิ่มขึ้นอีกด้วย

2.2 ความเครียด

ในกระบวนการผลิตสุกรในระดับอุตสาหกรรม สุกรเผชิญกับความเครียดมากมายในช่วงของการหย่านม เช่น การเปลี่ยนแปลงทางสังคม สภาพแวดล้อม อาหาร และ

สรีรวิทยา ซึ่งทำให้สุกรหลังหย่านมเกิดปัญหาชะงักการเจริญเติบโต และยังคงผลต่อความสมบูรณ์ของลำไส้ เปิดโอกาสให้เชื้อแบคทีเรียก่อโรคเช่น *E. coli* เข้ายึดเกาะและเพิ่มจำนวนที่ผนังลำไส้ได้ จากการศึกษาของ Chase (2018); Santos et al. (2000) พบว่า ระดับของ cortisol ในกระแสเลือด มีความสัมพันธ์กับการเพิ่มการขนส่งสารที่เยื่อผนังลำไส้ (permeability) ทำให้เพิ่มโอกาสการรับสารพิษจากแบคทีเรีย (enterotoxin)

2.3 อายุของสัตว์และอาหาร

ในการศึกษาประชากรจุลินทรีย์ในทางเดินอาหารนั้น อายุของสัตว์ในการเก็บตัวอย่างมีผลต่อประชากรจุลินทรีย์ได้ เนื่องจากระบบนิเวศของจุลินทรีย์ในระบบทางเดินอาหาร มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา และตัวแปรสำคัญอีกประการหนึ่งคืออาหารที่สุกรได้รับ เช่น สุกรที่ได้รับอาหารที่เพิ่มใยอาหารทำให้ปริมาณของจุลินทรีย์ในทางเดินอาหารมีการเปลี่ยนแปลง นอกจากนี้การให้เยื่อใยรวมที่ระดับสูง (217 กรัมต่อกิโลกรัมอาหาร) ในอาหารสุกรหลังหย่านม โดยเริ่มให้อาหารหลังจากหย่านม 15 วัน จะมีปริมาณเชื้อแบคทีเรีย *Enterococcus* น้อยกว่าสุกรกลุ่มที่ให้เยื่อใยระดับต่ำ (146 กรัมต่อกิโลกรัมอาหาร) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (4.06 vs. 4.56 log cfu/g; $P = 0.05$) แต่การให้เยื่อใยในระดับสูงหลังจากหย่านมทันที (169 กรัมต่อกิโลกรัมอาหาร) มีแนวโน้มเพิ่มความเสี่ยงต่อการเกิดอาการท้องเสียในลูกสุกร ($P = 0.07$) เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม (เยื่อใยรวมเท่ากับ 121 กรัมต่อกิโลกรัมอาหาร) (Montagne et al., 2012) และจากการศึกษาของ Lee et al. (2016) แสดงให้เห็นว่าการใช้แหล่งเยื่อใยชนิดต่างๆ ในอาหารลูกสุกรหลังหย่านม ช่วยเพิ่มจุลินทรีย์จำพวกย่อยเยื่อใย (cellulolytic bacteria) ในลำไส้และมูล การเสริมเยื่อใยชนิดละลายน้ำจากกัวกัม (guar gum) ที่ระดับ 10% ของน้ำหนักแห้งในอาหาร และมีการให้เชื้อ enterotoxigenic *Escherichia coli* ใน 48 ชั่วโมงหลังจากหย่านม ผลการศึกษาพบว่า สุกรที่ให้อาหารที่ใช้กัวกัมในอาหาร พบการเจริญของ enterotoxigenic *E. coli* ภายในลำไส้เล็ก มากกว่ากลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งเชื้อชนิดนี้เป็นแบคทีเรียก่อโรคที่ก่อโรงในสุกร โดยเฉพาะสุกรหลังหย่านม (McDonald et al, 1999)

นอกจากกรณีของใยอาหาร ยังมีการศึกษาการลดระดับโปรตีนในอาหาร จะช่วยลดโอกาสการเกิดอาการท้องเสียหลังหย่านมของสุกรหลังหย่านมที่เหนียวไปด้วยเชื้อ *E. coli* ด้วยเหตุนี้ จะเห็นว่าทั้งอายุและอาหารที่สุกรได้รับต่างมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของระบบนิเวศของจุลินทรีย์ในระบบทางเดินอาหารได้ (Nowland et al., 2019)

การศึกษาการใช้ใยอาหารในอาหารสุกร

สุกรมีความต้องการเยื่อใยในระดับที่น้อย เพื่อรักษาระบบการทำงานของระบบทางเดินอาหารให้เป็นปกติ แต่ปริมาณที่มากเกินไปจะมีผลขัดขวางการใช้ประโยชน์ได้ของสารอาหารและพลังงาน ซึ่งผลทางลบของเยื่อใยก็มีความแตกต่างกันตามคุณสมบัติและแหล่งของเยื่อใยที่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามเยื่อใยยังมีส่วนช่วยกระตุ้นสุขภาพของระบบทางเดินอาหารให้อิ่ม และมีผลเชิงบวกกับสุขภาพระบบทางเดินอาหารของสัตว์ โดยเฉพาะในปัจจุบันที่มีการใช้ยาปฏิชีวนะในรูปแบบของสารเร่งการเจริญเติบโต และยับยั้งการเจริญของเชื้อโรคในระบบทางเดินอาหารในช่วงเวลาที่สำคัญ เช่น เพื่อควบคุมโรคท้องเสียหรือโรคบิดในสุกรหลังหย่านม (Lindberg, 2014)

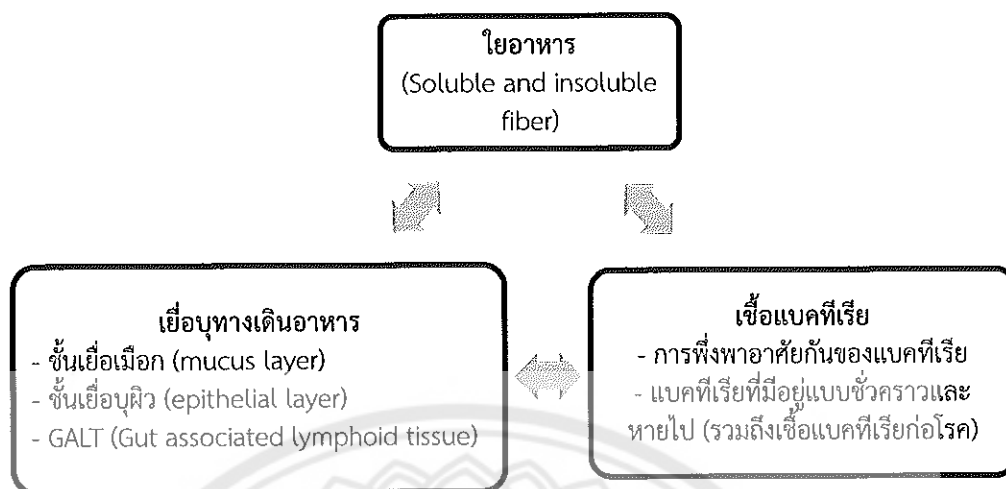
Hedemann et al. (2006) ศึกษาผลของเยื่อใยที่ต่างกันต่อสัณฐานวิทยาของลำไส้ และการหลั่งเอนไซม์ของลูกสุกรหย่านมอายุ 4 สัปดาห์ น้ำหนักประมาณ 8.6 ± 1.4 กิโลกรัม ให้อาหารที่มีระดับเยื่อใยต่างกัน คือ 73, 104 และ 145 กรัมต่อกิโลกรัมอาหาร อาหารทดลองประกอบด้วย เพคตินเป็นตัวแทนของเยื่อใยชนิดละลายน้ำ และแกลบข้าวบาร์เลย์เป็นตัวแทนของเยื่อใยชนิดไม่ละลายน้ำ พบว่า สุกรที่ได้รับอาหารที่มีเพคติน มีปริมาณการกินต่อวัน และอัตราการเจริญเติบโตต่อวัน สูงกว่ากลุ่มที่ได้รับอาหารที่ไม่มีเพคตินอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้ใยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำเพียงอย่างเดียวส่งผลเชิงลบต่อการย่อยได้ของสารอาหาร ดังเช่นการศึกษาของ Wang et al. (2016) ซึ่งได้ศึกษาระดับการใช้กากหัวชูการ์บีท (sugar beet pulp) เป็นแหล่งของใยอาหารชนิดละลายน้ำ ในอาหารสุกรหย่านม 1-14 วัน โดยใช้ที่ระดับ 60, 120, 180 และ 240 กรัมต่อกิโลกรัมอาหาร และมีปริมาณNDF เท่ากับ 12.3, 11.9, 13.3 และ 16.9% ตามลำดับ พบว่าการเพิ่มระดับของกากหัวชูการ์บีทที่ระดับสูงขึ้น มีความสัมพันธ์เชิงลบกับการย่อยได้แบบปรากฏของพลังงานและโปรตีนในช่วง 14 วันหลังหย่านม

ในขณะที่การให้ใยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำจะให้ผลทางด้านการส่งเสริมทำงานของระบบทางเดินอาหาร ดังเช่นการศึกษาของ Gerritsen et al. (2012) ทำการทดลองเปรียบเทียบอาหารทดลอง 3 ชนิดในระยะหลังหย่านม คือ 1) อาหารควบคุมเชิงบวก (positive control: PC) ซึ่งเป็นสูตรอาหารที่ประกอบด้วยโปรตีนคุณภาพดี 2) อาหารควบคุมเชิงลบ (negative control: NC) ซึ่งประกอบด้วยข้าวบาร์เลย์ 20% ข้าวสาลี 20% และข้าวโพด 20% 3) อาหารพื้นฐานที่ประกอบด้วย 15% ของเยื่อใยที่ไม่ละลายน้ำ (INSP) จากแกลบข้าวโอ๊ตและฟางข้าวสาลี โดยอาหารทดลองมีเยื่อใยหยาบ (crude fiber) เท่ากับ 2.7, 2.9 และ 7.4% ตามลำดับ ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าการเสริมเยื่อใยชนิดไม่ละลายน้ำจะช่วยเพิ่มปริมาณอาหารที่กินต่อวัน ในช่วง 0-14 วันหลังหย่านม และอัตราการเจริญเติบโตต่อวันของลูกสุกร ในช่วง 0-7 วันหลังหย่านม ลักษณะมูล

ของทั้งสามกลุ่มไม่แตกต่างกัน แต่มูลของสุกรกลุ่ม INSP ดีกว่ากลุ่มอื่นในช่วง 0-14 วัน นอกจากนั้นอาหารที่มีปริมาณเยื่อใยที่ไม่ละลายน้ำสูง มีแนวโน้มเพิ่มการทำงานของเอ็นไซม์อะไมเลส ($P = 0.060$) และมีน้ำหนักของกระเพาะอาหารมากกว่ากลุ่มอื่น เนื่องมาจากสุกรพยายามปรับตัวต่อปริมาณเยื่อใยชนิดไม่ละลายน้ำ โดยการเพิ่มปริมาตรของทางเดินอาหารให้ใหญ่ขึ้น นอกจากนี้จากการทดลองใช้ใยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำจากรำข้าวสาลีโดย Langlois et al. (1987) ซึ่งได้ทำการศึกษากการหลังเอ็นไซม์จากตับอ่อนในสุกรที่ใช้รำข้าวสาลีที่ระดับ 400 กรัมต่อกิโลกรัม เปรียบเทียบกับกลุ่มที่ไม่ใช้ ผลการศึกษาพบว่าการสุกรที่ใช้รำข้าวสาลี ส่งผลทำให้ขนาดของตับอ่อนใหญ่ขึ้น (+115%) และเพิ่มปริมาณการหลังโปรตีนจากตับอ่อน (+36%) แต่ความเข้มข้นของโปรตีนมีค่าลดลง อีกทั้งยังเพิ่มการทำงานของเอ็นไซม์โดยรวมอีกด้วย

การใช้ใยอาหารสองชนิดร่วมกัน คือใยอาหารชนิดละลายน้ำและชนิดไม่ละลายน้ำในสูตรอาหาร (3% กากหัวชูการ์บีท + 4% รำข้าวสาลี) ในสุกรหลังหย่านม 15 วัน ทำให้ประชากรเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรคในกลุ่ม *Enterobacteria* ในลำไส้ใหญ่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม (ส่วนประกอบหลักได้แก่ข้าวโพด 33.0% ข้าวบาร์เลย์ 23.8% หางนม 13.0% หางนมไขมันสูง 10.0% และโปรตีนเข้มข้นจากถั่วเหลือง 9.2%) นอกจากนี้การให้เยื่อใยชนิดที่ไม่ละลายน้ำในอาหารสุกรหลังหย่านม มีแนวโน้ม ($P = 0.069$) ในการลดเชื้อ hemolytic *E. coli* ในมูล (Molist et al., 2009) ซึ่งเชื่อดังกล่าวเป็นสายพันธุ์ที่ก่อให้เกิดการท้องเสียอย่างรุนแรงในสุกร สอดคล้องกับงานวิจัยของ Pluske et al. (2014) ที่ทดลองในสุกรหย่านมที่ได้รับเชื้อ *E. coli* สายพันธุ์ 0149:K91:F4 ซึ่งเป็นสายพันธุ์ที่สร้าง enterotoxin ทำให้สุกรแสดงอาการท้องเสีย หลังจากนั้นให้สุกรได้รับอาหารที่มีเซลลูโลสจากไม้เป็นตัวแทนของเยื่อใยชนิดไม่ละลายน้ำ โดยระดับการใช้คือ 0, 30, 60 และ 90 กรัมต่อกิโลกรัมอาหาร พบว่าการให้อาหารที่มีเยื่อใยชนิดไม่ละลายน้ำเพิ่มขึ้น มีความสัมพันธ์เชิงลบต่อปริมาณเชื้อ *E. coli* ที่ขับออกมากับมูล ($P = 0.010$)

ดังนั้นจากงานวิจัยที่ได้อบรมรวมมาสามารถสรุปได้ว่า ใยอาหารมีความสัมพันธ์กับการทำงานของระบบทางเดินอาหาร โดยช่วยส่งเสริมการฟื้นฟูเยื่อบุทางเดินอาหาร เพิ่มการหลังเอ็นไซม์ และออกฤทธิ์ในเชิงของการเป็นอาหารให้กับแบคทีเรียที่เป็นประโยชน์ หรือพรีไบโอติก ช่วยควบคุมเชื้อแบคทีเรียที่ก่อโรคในระบบทางเดินอาหารได้ ดังแสดงในภาพ 2.6 ทั้งนี้ยังมีหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้องซึ่งทำให้ผลที่ได้จากการใช้ใยอาหารแตกต่างกันไป เช่น ชนิดของใยอาหาร และแหล่งที่มาของใยอาหาร โดยหน้าที่และความสำคัญของใยอาหาร



ภาพ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่มีผลต่อสุขภาพของระบบทางเดินอาหาร

ที่มา: ดัดแปลงจาก Conway, 1994

วัตถุดิบที่มีใยอาหารสูงในประเทศไทย

ประเทศไทยมีศักยภาพในการผลิตและแปรรูปสินค้าทางการเกษตร วัตถุดิบหลักในการผลิตอาหารสัตว์แบ่งเป็นแหล่งของพลังงาน ได้แก่ ข้าว ข้าวโพด มันสำปะหลัง และข้าวสาลี คิดเป็นประมาณ 60% ส่วนแหล่งของโปรตีน คือ ถั่วเหลืองและกากถั่วเหลือง คิดเป็น 28% ปลาป่นประมาณ 3% และอื่นๆ อีก 9% (สมาคมผู้ผลิตอาหารสัตว์ไทย, 2561)

ข้าว เป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย เนื่องจากคนไทยบริโภคข้าวเป็นอาหารหลัก และยังเป็นสินค้าเกษตรส่งออกอันดับหนึ่งของไทย โดยในปี พ.ศ. 2562 ไทยมีพื้นที่เพาะปลูกข้าวรวมประมาณ 70.97 ล้านไร่ ครอบคลุมพื้นที่ปลูกประมาณ 45.2% ของพื้นที่การเกษตรทั้งหมดของประเทศ และมีผลผลิตรวม 33.56 ล้านตัน คิดเป็นผลผลิตประมาณ 4.2% ของผลผลิตข้าวทั่วโลก ซึ่งไทยถือกว่าเป็นผู้ผลิตข้าวมากเป็นอันดับ 6 ของโลก รองจากจีน อินเดีย อินโดนีเซีย บังกลาเทศ และเวียดนาม (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2562a)

ถั่วเหลือง จากข้อมูลปี พ.ศ. 2561 พื้นที่ปลูกถั่วเหลืองรวมทั้งประเทศประมาณ 152,106 ไร่ คิดเป็นผลผลิตประมาณ 42,829 ตัน โดยภาคเหนือมีพื้นที่เพาะปลูกมากที่สุด รองลงมา คือ ภาคตะวันออก เชียงใหม่ และภาคกลาง (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2562b) ทั้งนี้ ความต้องการใช้ถั่วเหลืองเพื่อเป็นวัตถุดิบอาหารสัตว์ในปี พ.ศ. 2562 มีความต้องการรวม 4.186-

5.448 ล้านตัน ซึ่งเกินกว่ากำลังการผลิตภายในประเทศ ต้องอาศัยการนำเข้าเพิ่มเติม ทั้งในรูปของเมล็ดถั่วเหลืองและกากถั่วเหลือง

มันสำปะหลัง จากสถิติของสำนักเศรษฐกิจการเกษตร (2562a) ได้รายงานข้อมูลการผลิตปี พ.ศ. 2561 มันสำปะหลังโรงงาน มีพื้นที่เพาะปลูกรวมประมาณ 8.6 ล้านไร่ ให้ผลผลิตประมาณ 29.4 ล้านตัน ทั้งนี้การปลูกมันสำปะหลังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตั้งแต่ปีเพาะปลูก 2561 เนื่องจากราคาหัวมันสำปะหลังราคาดีต่อเนื่อง ทำให้เกษตรกรมีแรงจูงใจในการการปลูก ประกอบกับสถานการณ์ภัยแล้งโรงงาน ที่มักจะใช้พื้นที่ปลูกทดแทนกัน มีราคาตกต่ำ และคาดการณ์ว่าปี พ.ศ. 2563 จะมีพื้นที่ปลูกเพิ่มขึ้น 1.23% เป็น 8,809,194 ไร่ และได้ผลผลิตเพิ่มขึ้น 1.83% เป็น 32,004,184 ตัน (สมาคมผู้ผลิตอาหารสัตว์ไทย, 2562) พื้นที่ปลูก 5 อันดับแรก คือ นครราชสีมา กำแพงเพชร ชัยภูมิ กาญจนบุรี และอุบลราชธานี ตามลำดับ

จากข้อมูลเบื้องต้นแสดงให้เห็นถึงความสำคัญทางเศรษฐกิจของข้าว ถั่วเหลือง และมันสำปะหลัง และจากกระบวนการแปรรูปวัตถุดิบทำให้มีผลพลอยได้จากกระบวนการแปรรูปผลพลอยได้เหล่านี้มีปริมาณเยื่อใยสูง สามารถใช้เป็นแหล่งใยอาหารสำหรับอาหารสัตว์ได้ ได้แก่ แกลบดิบ (ผลพลอยได้จากการสีข้าว) รำสกัดน้ำมัน (ผลพลอยได้จากการสกัดน้ำมันรำข้าว) กากมันสำปะหลัง (ผลพลอยได้จากการผลิตแป้งมันสำปะหลัง) และผิวถั่วเหลือง (ผลพลอยได้จากการสกัดน้ำมันถั่วเหลือง) โดยรายละเอียดของผลพลอยได้แต่ละชนิดดังนี้

1. แกลบข้าว

แกลบ เป็นผลพลอยได้จากการสีข้าวที่เกิดขึ้นประมาณ 20-30% ของกระบวนการผลิต (อรอนงค์ วินัยกุล, 2547; Feng et al., 2004) แกลบข้าวมีองค์ประกอบของธาตุโลหะเป็นส่วนใหญ่ 51.5% รองลงมาเป็นเฮมิเซลลูโลส 21% และลิกนิน 10% (Oliveira et al., 2017) ซึ่งกระบวนการสีข้าวประกอบด้วยขั้นตอนหลัก 4 ขั้นตอน (อรอนงค์ วินัยกุล, 2547) ได้แก่

1.1 การทำความสะอาด เพื่อกำจัดส่วนแปลกปลอมต่างๆ ที่อาจติดมากับข้าวเปลือก เช่น เมล็ดลีบ หิน กรวด หวาย เมล็ดวัชพืชและสิ่งสกปรกต่างๆ

1.2 การกะเทาะ เพื่อแยกเปลือกหุ้มเมล็ดและจมูกข้าว (คัพภะ) หลุดออกจากเมล็ด สิ่งที่ได้รับจากกระบวนการนี้คือ แกลบ เป็นส่วนผสมของเปลือกเมล็ด หาง กลีบเลี้ยง และข้าวเมล็ด และอีกส่วนคือข้าวกล้างที่มีเยื่อหุ้มเมล็ดชั้นนอกติดอยู่ด้วย

1.3 การขัดขาว เป็นการกำจัดเยื่อหุ้มเมล็ดหลุดออกจากเมล็ดข้าว และทำให้ข้าวขาว สิ่งที่ได้จากกระบวนการนี้คือ รำ มีประมาณ 8 – 10% ของข้าวเปลือก ซึ่งเป็นส่วนผสมของเยื่อหุ้มผลเยื่อหุ้มเมล็ด จมูกข้าว และผิวนอกของข้าวสาร และได้ข้าวสารประมาณ 68-70% ของข้าวเปลือก

1.4 การคัดแยก เพื่อแยกข้าวเต็มเมล็ด ต้นข้าว ข้าวหัก ซึ่งอาจมีปริมาณมากน้อยแตกต่างกันตามคุณภาพของข้าวเปลือกก่อนสี และขั้นตอนระหว่างการสีข้าว

แกลบดิบสามารถนำไปใช้ได้หลายอุตสาหกรรม สำหรับด้านปศุสัตว์ มักใช้สำหรับเชื้อเพลิง วัสดุรองพื้นคอกสำหรับสัตว์ปีก สื่อสำหรับผสมพรีมิกซ์ และเวชภัณฑ์ สำหรับการใช้ในอาหารสัตว์ จากงานวิจัยของ Tartrakoon et al. (2017) พบว่าสามารถใช้แกลบดิบบด เพื่อเป็นแหล่งของใยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำ สามารถใช้ได้ถึง 3% ในสูตรอาหารสุกรรุ่น-ขุน โดยไม่ส่งผลกระทบต่อค่าการย่อยได้แบบปรากฏของพลังงานและโปรตีน สำหรับองค์ประกอบของใยอาหารในแกลบดิบ ดังแสดง ตาราง 5

ตาราง 5 Total, soluble and insoluble dietary fiber composition of rice hull

แหล่ง	DF (%)	IDF (%)	sDF (%)	ที่มา
ไทย	67.80	59.85	7.96	Tartrakoon et al. (2017)
ไทย	59.50	-	-	กุลนิภา ธนรุ่งรังษี และคณะ (2557)
มาเลเซีย	59.01 ± 0.16	58.01 ± 0.13	1.00 ± 0.02	Kuan et al. (2012)
อิหร่าน	53.55	52.63	0.92	Rezaei et al. (2014)
สเปน	74.0	72.0	2.0	Jiménez-Moreno et al. (2016)

2. รำสกัดน้ำมัน

รำสกัดน้ำมันเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการสกัดน้ำมันรำข้าว มีองค์ประกอบของใยอาหาร 32.98% แบ่งเป็นใยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำ 93.84% และใยอาหารชนิดละลายน้ำ 6.16% ของปริมาณใยอาหารทั้งหมด (Daou, & Zhang, 2014) รำสกัดน้ำมันสามารถใช้ในอาหารสุกรหลังหย่านมได้ที่ระดับ 10-20% โดยไม่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของสุกร (Casas, & Stein, 2016) และสามารถใช้ในอาหารสุกรขุนได้ไม่เกิน 20% (Stein et al., 2015)

3. กากมันสำปะหลัง

กากมันสำปะหลังเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตแป้งมันสำปะหลัง โดยกากมันสำปะหลังที่ได้คิดเป็น 11.1% (พิพัฒน์ เหลืองวิลาวลัย, และวิศิษฐ์พร สุขสมบัติ, 2550) กากมันสำปะหลังมีปริมาณแป้งประมาณ 50-60% ใยใยประมาณ 4.6-16.1% (วริยา โกสุม,

2552) สำหรับองค์ประกอบของใยอาหารนั้น กากมันสำปะหลังมีปริมาณใยอาหารทั้งหมด 27.40% แบ่งเป็นใยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำ 25.25% และใยอาหารชนิดละลายน้ำ 2.15% (Pramana et al., 2018) ความแปรปรวนของกากมันสำปะหลังขึ้นอยู่กับกระบวนการและเทคโนโลยีการผลิตที่แตกต่างกัน กากมันสำปะหลังสามารถใช้เป็นอาหารสุกรระยะหลังหย่านมได้ถึง 10% ในรูปของอาหารเม็ด โดยไม่มีผลต่อคุณภาพเม็ดอาหาร และปริมาณการกินอาหารของสุกร (นุจิรา ทักษิณานันต์ และคณะ, 2553)

4. ผีวถั่วเหลือง

ผีวถั่วเหลือง เป็นผลพลอยได้จากการแปรรูปเมล็ดถั่วเหลือง โดยการแยกเอาเปลือกหุ้มเมล็ดออกจากเมล็ดถั่วเหลือง โดยผีวถั่วเหลืองนั้น ได้มาจาก 2 อุตสาหกรรม คือ โรงงานสกัดน้ำมันถั่วเหลือง ซึ่งเป็นแหล่งของผีวถั่วที่ใช้ในอาหารสัตว์มาก และผีวถั่วจากกระบวนการทำอาหาร เช่น นำนมถั่วเหลือง เต้าหู้ เต้าเจี้ยว ซีอิ๊ว เป็นต้น หากเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการสกัดน้ำมันถั่วเหลืองคิดเป็นประมาณของผีวถั่วเหลืองประมาณ 7-8% ของปริมาณการผลิต (สุกัญญา เกินกลาง, 2546; Liu, & Li, 2017) การกะเทาะผีวถั่วเหลืองทำให้กากถั่วเหลืองที่ได้มีโปรตีนเพิ่มขึ้น องค์ประกอบทางเคมีของผีวถั่วเหลืองมีความผันแปรอันเนื่องมาจากประสิทธิภาพของกระบวนการผลิต โดยผีวถั่วเหลืองมีวัตถุแห้ง 90.58% โปรตีน 12.06% สำหรับด้านองค์ประกอบตามชนิดคาร์โบไฮเดรต ประกอบด้วยเซลลูโลสประมาณ 29-51% เฮมิเซลลูโลส 10-25% ลิกนิน 1-4% และเพคติน 4-8% (Liu and Li, 2017) ผีวถั่วเหลืองสามารถใช้ในอาหารสุกรหลังหย่านมได้ไม่เกิน 20% โดยไม่ส่งต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโตของสุกร (Ani et al., 2013; Goebring et al., 2012) ปริมาณใยอาหารรวม ใยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำ และใยอาหารชนิดละลายน้ำ ดังแสดงใน ตาราง 6

ตาราง 6 Total, soluble and insoluble dietary fiber composition of soybean hull

Source	DF (%)	iDF (%)	sDF (%)	iDF:sDF
Pascoal et al. (2015)	76.4	70.7	5.7	12.4
Burkhalter et al. (2001) ¹	63.8 – 80.7	59.9 – 72.2	3.9 – 12.7	5.0-15.4
Cargill	77.3	70.0	7.3	9.6
Central soya	80.7	72.2	8.5	8.5
Jones-A	76.4	63.7	12.7	5.0
Jones-B	75.5	68.4	7.1	9.6
Quincy	63.8	59.9	3.9	15.4

ตาราง 6 (ต่อ)

Source	DF (%)	IDF (%)	sDF (%)	IDF:sDF
Cole et al. (1999) ²	63.8 – 81.2	59.9 – 72.2	3.9 – 12.7	5.0 -15.4
A	79.6	71.4	8.2	8.7
B	77.3	70.0	7.3	9.6
C	80.7	72.2	8.5	8.5
D	75.3	66.1	9.2	7.2
E	72.4	66.3	6.1	10.9
F	63.8	59.9	3.9	15.4
G1	76.4	63.7	12.7	5.0
G2	75.5	68.4	7.1	9.6
G3	81.2	68.8	12.4	5.5
Jaworski and Stein (2017) ³	67.46	62.15	5.31	11.7
Yang et al. (2014)	66.0 ± 0.2	54.5 ± 0.1	5.3 ± 0.1	-

หมายเหตุ: 1 = five samples from four U.S. processing plants

2 = nine samples from U.S. processing plants

3 = samples from Archer Daniels Midland Company, Illinois, U.S.

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษานี้แบ่งการวิจัยออกเป็น 3 การทดลอง คือ

การทดลองที่ 1 การศึกษาลักษณะทางกายภาพและเคมีของวัตถุดิบแหล่งใยอาหาร

การทดลองที่ 2 การทดลองเพื่อหาระดับการใช้ใยอาหารที่เหมาะสมสำหรับสุกรหลังหย่านม โดยใช้วัตถุดิบแหล่งใยอาหารที่ได้คัดเลือกจากการทดลองที่ 1 และศึกษามลของการใช้ต่อการพัฒนาของระบบทางเดินอาหาร ประสิทธิภาพการผลิต การย่อยได้ของสารอาหารแบบปรากฏ และปริมาณเชื้อแบคทีเรียในทางเดินอาหารส่วนท้าย

การทดลองที่ 3 การทดลองเพื่อหาสัดส่วนของที่เหมาะสมของเยื่อใยชนิดไม่ละลายน้ำต่อเยื่อใยชนิดละลายน้ำ (IDF:SDF) ในอาหารสุกรหลังหย่านม โดยใช้แหล่งใยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำจากการคัดเลือกวัตถุดิบจากการทดลองที่ 1 และศึกษามลต่อการพัฒนาของระบบทางเดินอาหาร สัตว์ของลูกวัวได้เล็ก ปริมาณเชื้อแบคทีเรียในทางเดินอาหารส่วนท้ายและสมรรถภาพการผลิต

โดยรายละเอียดของการทดลองมีดังนี้

การทดลองที่ 1 ศึกษาลักษณะทางกายภาพและองค์ประกอบทางเคมีของแหล่งใยอาหาร

1. ตัวอย่างและการเตรียมตัวอย่าง

ใช้ตัวอย่างที่เป็นแหล่งของเยื่อใย ได้แก่ กากมันสำปะหลัง รำสกัดน้ำมัน แกลบอบ และเปลือกถั่วเหลือง โดยเก็บตัวอย่างจากฟาร์มเกษตรกรและผู้ขายในท้องถิ่น จากนั้นบดวัตถุดิบด้วยเครื่องบดชนิด Hammer mill ยี่ห้อ Retsch รุ่น SM 100 ผ่านตะแกรงรูเปิดขนาด 0.5 มิลลิเมตร ณ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรญาณนา พิษณุโลก ก่อนทำการวิเคราะห์

2. การวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ

2.1 การพองตัว (Swelling capacity; SC)

วัดค่าการพองตัวของอาหารและแหล่งเยื่อใย วันเพ็ญ (2551) นำตัวอย่างแห้ง 0.5 กรัม ใส่ในกระบอกตวงขนาด 50 มิลลิลิตร เติมน้ำ 10 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ 18 ชั่วโมง ค่าการพองตัวคำนวณจากสมการ ดังนี้

$$SC \text{ (ml/g)} = \frac{\text{ปริมาตรของตัวอย่างที่พองตัว (ml)}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น (กรัม)}}$$

2.2 ความสามารถในการอุ้มน้ำ (Water holding capacity; WHC)

วิเคราะห์ความสามารถในการอุ้มน้ำของอาหารและแหล่งของเยื่อใย ตามวิธีการของ วันเพ็ญ แสงทองพานิช (2551) ใช้ตัวอย่างแห้ง 0.5 กรัม ใส่ในหลอดทดลอง เติมน้ำ 10 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ 18 ชั่วโมง นำไปกรอง และอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส นาน 2 ชั่วโมง นำมาชั่งน้ำหนักอีกครั้ง นำมาคำนวณโดยใช้สูตร

$$WHC \text{ (g/g)} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่าง (เปียก)} - \text{น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (แห้ง)}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างที่ใส่}}$$

2.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี

นำตัวอย่างที่ผ่านการบดแล้วมาวิเคราะห์หาปริมาณใยอาหาร (Total dietary fiber; DF) เยื่อใยชนิดไม่ละลายน้ำ (Insoluble dietary fiber; iDF) ด้วยชุดวิเคราะห์ปริมาณใยอาหารยี่ห้อ Megazyme total dietary fiber assay kit (K-TDFR-200A) (Megazyme International Ireland, Co. Wicklow, Ireland) ตามวิธีของ AOAC 991.43 (AOAC, 1995) และปริมาณใยอาหารชนิดละลายน้ำ (sDF) หาได้จากผลต่างระหว่าง DF และ iDF

2.4 การวิเคราะห์ทางสถิติ

นำข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์ทั้งทางกายภาพและทางเคมี นำมาหาค่าเฉลี่ย (mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation; SD)

การทดลองที่ 2 การศึกษาผลของระดับใยอาหาร (DFในอาหารสุกรหลังหย่านมต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโต สัตฐานวิทยาของลำไส้ และการย่อยได้ของสารอาหาร

การทดลองนี้แบ่งออกเป็น 2 การทดลองย่อย คือ

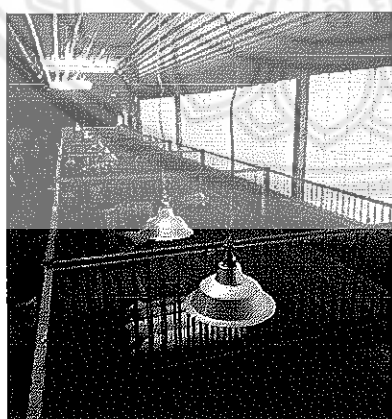
การทดลองที่ 2.1 การศึกษาเรื่องประสิทธิภาพการผลิต การพัฒนาน้ำหนักระบบทางเดินอาหาร สัตฐานวิทยาของลำไส้เล็ก และปริมาณเชื้อแบคทีเรียในระบบทางเดินอาหาร

การทดลองที่ 2.2 การศึกษาเรื่องการย่อยได้แบบปรากฏของสารอาหารของสุกร ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

การทดลองที่ 2.1: ศึกษาอิทธิพลของระดับใยอาหารในอาหารสุกรหลังหย่านมต่อประสิทธิภาพการผลิต การพัฒนาน้ำหนักระบบทางเดินอาหาร สัตฐานวิทยาของลำไส้เล็ก และปริมาณเชื้อแบคทีเรียในระบบทางเดินอาหาร

1. สัตว์ทดลอง

การทดลองนี้วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design; CRD) โดยใช้สุกรลูกผสมสามสายพันธุ์ ดูริค x (ลาร์จไวท์ x แลนด์เรซ) จำนวน 30 ตัว จากบางเลนฟาร์ม อ. บางเลน จ. นครปฐม หย่านมที่อายุ 21 ± 4 วัน มีน้ำหนักเริ่มต้นเฉลี่ย 5-6 กิโลกรัม แบ่งสุกรออกเป็น 3 กลุ่มๆ ละ 10 ตัว เลี้ยงสุกรในกรงขนาด 2×2 ตารางเมตร จำนวน 2 ตัวต่อกรง ($n = 5$) เพศผู้และเพศเมียเท่ากัน (ภาพ 6) สุกรได้รับอาหารและน้ำอย่างเต็มที่ตลอดการทดลอง เป็นระยะเวลา 28 วัน โรงเรือนเป็นระบบปิด ควบคุมอุณหภูมิเริ่มต้น 32°C และลดลงสัปดาห์ละ $1-2^{\circ}\text{C}$



ภาพ 7 ลักษณะคอกและโรงเรือนทดลอง

2. อาหารทดลอง

อาหารทดลองมีระดับใยอาหารต่างกัน 3 ระดับคือ 130 ± 5 (DF130), 140 ± 5 (DF140) และ 150 ± 5 (DF150) กรัมต่อกิโลกรัมอาหาร โดยอาหารทดลองควบคุมสัดส่วน IDF:sDF = 4.00 ± 0.5 เท่ากันทุกสูตร โดยใช้เกล็ดดิบ (คัดเลือกจากการทดลองที่ 1) และเพคตินผงเพื่อเป็นแหล่งวัตถุดิบในการปรับสัดส่วน IDF:sDF เกล็ดดิบเป็นแหล่งของใยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำ เตรียมเกล็ดดิบโดยล้างทำความสะอาด อบให้แห้ง และบดด้วยเครื่องบดชนิด Hammer mill ยี่ห้อ Retsch รุ่น SM 100 ผ่านตะแกรงรูเปิดขนาด 0.5 มิลลิเมตร ณ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรเวศน์ลำปาง พิษณุโลก ก่อนนำมาผสมอาหาร สำหรับเพคตินผงเป็นแหล่งของใยอาหารชนิดละลายน้ำ เป็นเพคตินทางการค้าสกัดจากแอปเปิ้ลเขียว อาหารทดลองทุกสูตรมีโภชนะไม่น้อยกว่าความต้องการของสุกร ตามคำแนะนำของ NRC (2012) สำหรับสุกรน้ำหนัก 7-11 กิโลกรัม ดังแสดงในตาราง 8 ให้กินอาหารในรูปแบบอาหารผง อาหารทดลองผสมไว้ไม่เกิน 7 วัน หากสุกรกินไม่หมดต้องทำการผสมใหม่

3. การเก็บข้อมูลและการเก็บตัวอย่าง

3.1 บันทึกน้ำหนักเมื่อเริ่มต้นการทดลอง น้ำหนักเป็นรายสัปดาห์ และน้ำหนักเมื่อสิ้นสุดการทดลอง เพื่อคำนวณหาสมรรถภาพการผลิต ได้แก่ น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (weight gain) อัตราการเจริญเติบโตต่อวัน (ADG) ปริมาณอาหารที่กินต่อวัน (ADFI) และประสิทธิภาพการใช้อาหาร (FCR) เป็นรายสัปดาห์ ทั้งเป็นรายสัปดาห์และตลอดการทดลอง (0-28 วัน)

3.2 บันทึกคะแนนมูลสุกร เป็นรายวันตลอดการทดลอง (28 วัน) โดยแบ่งเป็น 5 ระดับ (Li et al., 2018) คือ 1 = hard feces, 2 = slightly soft feces, 3 = soft, partially formed feces, 4 = loose และ 5 = watery ทำการประเมินเป็นรายคอก ในตอนเช้า สุกรที่มีคะแนนมูลระดับ 4 และ 5 จะถือว่ามีอาการท้องเสีย จากนั้นนำจำนวนคอกที่มีอาการท้องเสีย มาคำนวณอัตราการเกิดท้องเสีย (diarrhea incidence) เป็นรายกลุ่มทดลอง โดยใช้สูตรดังนี้ (Chen et al., 2013)

อัตราการเกิดท้องเสีย (diarrhea incidence, %)

$$= \frac{\text{จำนวนคอกที่ท้องเสียในกลุ่มการทดลอง (0-28 วัน)}}{\text{จำนวนคอกทั้งหมดในกลุ่มการทดลอง} \times 28 \text{ วัน}} \times 100$$

3.3 เก็บตัวอย่างเนื้อเยื่อในวันที่ 29 ของการทดลอง สุ่มสุกรโดยไม่อดอาหารก่อน จำนวน 1 ตัวต่อคอก จำนวน 4 คอกต่อกลุ่มการทดลอง ($n = 4$) จากจำนวนคอกทั้งหมด 5 คอกต่อ

กลุ่มการทดลอง ซึ่งน้ำหนักและทำการการุณยฆาต โดยการฉีด sodium pentobarbital ขนาด 200 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักตัว 1 กิโลกรัม (Chen et al., 2013) จากนั้นเก็บตัวอย่างชิ้นส่วนเนื้อเยื่อความยาวประมาณ 2 เซนติเมตร จากลำไส้ทั้ง 3 ส่วน ได้แก่ ลำไส้เล็กส่วนต้น (duodenum) ตำแหน่งประมาณ 10 เซนติเมตรจาก stomach sphincter ลำไส้เล็กส่วนกลาง (jejunum) ตำแหน่งประมาณ 40 เซนติเมตรจาก stomach sphincter และลำไส้เล็กส่วนปลาย (ileum) ตำแหน่งก่อนถึง ileo-caecal junction ประมาณ 10 เซนติเมตร แช่ตัวอย่างชิ้นส่วนเนื้อเยื่อใน formaldehyde-phosphate buffer 10% เพื่อนำไปศึกษาสัณฐานวิทยาของลำไส้

3.4 บันทึกน้ำหนักตับ กระเพาะอาหาร ลำไส้เล็ก และลำไส้ใหญ่ หลังจากทำความสะอาดเรียบร้อยแล้ว

3.5 ทำการ swab สิ่งย่อยจากลำไส้เล็กส่วนปลาย ไส้ติ่ง และลำไส้ใหญ่ หลังจากการสุ่มตัวอย่างเนื้อเยื่อแล้ว โดยใช้ก้านสำลีที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้ว swab สิ่งย่อยภายในส่วนที่จะเก็บตัวอย่าง จากนั้นนำก้านสำลีจุ่มลงในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ 0.85% ปริมาณ 9 มิลลิลิตร ในหลอดแก้วที่ผ่านการนึ่งฆ่าเชื้อแล้ว (Gerritsen et al., 2012) แช่ในน้ำแข็ง เพื่อนำไปวิเคราะห์หาปริมาณเชื้อแบคทีเรีย 3 กลุ่ม ได้แก่ *Salmonella* spp., *E. coli* และ lactic acid bacteria ต่อไป

3.6 วัดค่าความเป็นกรดต่างของสิ่งย่อยของลำไส้เล็กส่วนปลาย ไส้ติ่งและลำไส้ใหญ่ ด้วย pH meter ยี่ห้อ Eutech รุ่น pHTestr20

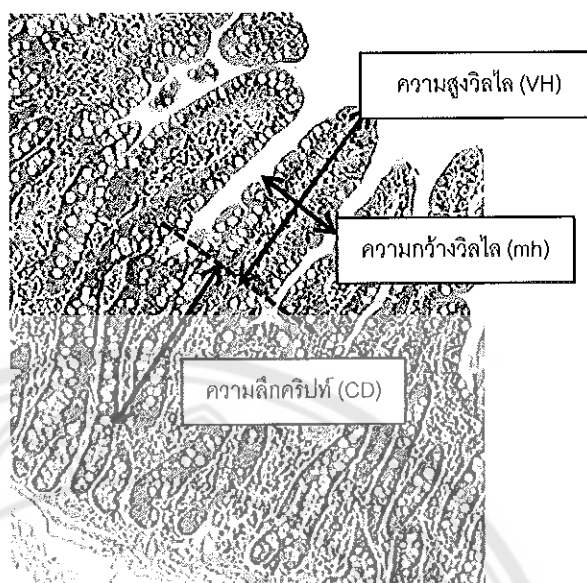
4. การวิเคราะห์ตัวอย่าง

4.1 ด้านการศึกษาสัณฐานวิทยาของลำไส้เล็กทั้ง 3 ส่วน นำตัวอย่างชิ้นส่วนเนื้อเยื่อมาผ่านกระบวนการดึ่งน้ำออกจากเซลล์ (dehydrate) และนำไปฝังในพาราฟิน จากนั้นนำไปตัดตามแนวขวาง ความหนา 5 μm และย้อมด้วยสี haematoxylin และ eosin. จากนั้นนำสไลด์ที่ได้ไปส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์ OPTIKA รุ่น B-383PLi (OPTIKA, Italy) ด้วยกำลังขยาย 40 เท่า วัดความสูงของวิลโล (Villus height; VH) และความลึกของคริปต์ (crypt depth: CD) จากนั้นนำมาคำนวณหาสัดส่วนความสูงของวิลโลต่อความลึกของคริปต์ (VH:CD) และพื้นที่ผิวของวิลโล (villus surface area, VSA) คำนวณโดยใช้สูตรของ Swiech et al (2016) ดังนี้

$$VSA = (\pi * mh * h) + \pi (1/2 * mh)^2$$

เมื่อ mh = ความกว้างของวิลโล (วัดที่กึ่งกลางของความสูง)

h = ความสูงของวิลโล



ภาพ 8 การวัดค่าความสูงของวิลไล (villus height; VH) ความกว้างของวิลไล (villus width) และความลึกของคริปต์ (crypt depth; CD)

4.2 ตัวอย่างมูลจากการ rectal swab ในหลอดทดลอง นำมาทำให้เจือจาง และ ถ่ายลงในอาหารเลี้ยงเชื้อแบบจำเพาะ (selective agar) ดังนี้ เชื้อ *Salmonella* spp. อาหาร Bismuth sulfite agar (BSA) เชื้อ *E.coli* ใช้อาหาร Eosin methylene blue agar (EMB) และเชื้อ แบคทีเรียกลุ่มผลิตกรดแลคติก (Lactic acid bacteria) ใช้อาหาร de man, rogosa and sharpe (MRS) จากนั้น บ่มที่อุณหภูมิ 38°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำมานับจำนวนโคโลนี ปริมาณของเชื้อแบคทีเรียที่ศึกษาแสดงในหน่วย log CFU/g

ตาราง 7 Ingredients and nutrient composition of experimental diets with different dietary fiber levels

Items	DF level (g/kg)		
	130	140	150
Extruded soybean	22.0	22.0	22.0
Broken rice	17.7	15.4	14.0
Grounded corn	25.0	25.0	25.0
Soybean meal	18.0	18.0	18.0
Palm oil	2.0	3.0	3.0
Milk replacer	6.0	6.0	6.0
Rice bran	5.0	5.0	5.0
Rice hull	-	1.2	2.5
Pectin ¹	0.5	0.6	0.7
Lysine	0.4	0.4	0.4
DL-Methionine	0.2	0.2	0.2
DCP	2.0	2.0	2.0
NaCl	0.5	0.5	0.5
CaCO ₃	0.2	0.2	0.2
Vitamin-mineral premix ²	0.5	0.5	0.5
Nutrient composition (as fed basis)			
CP, %	20.86	20.72	20.66
EE, %	9.76	10.40	10.39
CF, %	4.16	4.76	5.40
Total dietary fiber, %	13.10	14.02	15.00
Insoluble dietary fiber, %	10.50	11.21	11.99

ตาราง 7 (ต่อ)

Items	DF level (g/kg)		
	130	140	150
Soluble dietary fiber, %	2.60	2.81	3.01
iDF:sDF ratio	4.02	4.00	3.99
ME, kcal/kg	3,418	3,429	3,391

หมายเหตุ: ¹Commercial pectin (extract from green apple)

²Premix provided the following per kg of complete diets: Vitamin A 50,000 IU, Vitamin E 100 IU, Vitamin D3 10,000 IU, Vitamin K3 8.0 mg, Vitamin B1 6.0 mg, Vitamin B2 16.0 mg, Vitamin B6 10.0 mg, Vitamin B12 0.08 mg, Pantothenic acid 50 mg, Niacin 80.0 mg, Folic acid 2.0 mg, Biotin 0.30 mg, Vitamin C 0.3 mg, Selenium 0.5 mg, Ferrous 360.0 mg, Manganese 100.0 mg, Zinc 300.0 mg, Copper 320.0 mg, Cobalt 1.6 mg and Iodine 3.0 mg

5. การวิเคราะห์ทางสถิติ

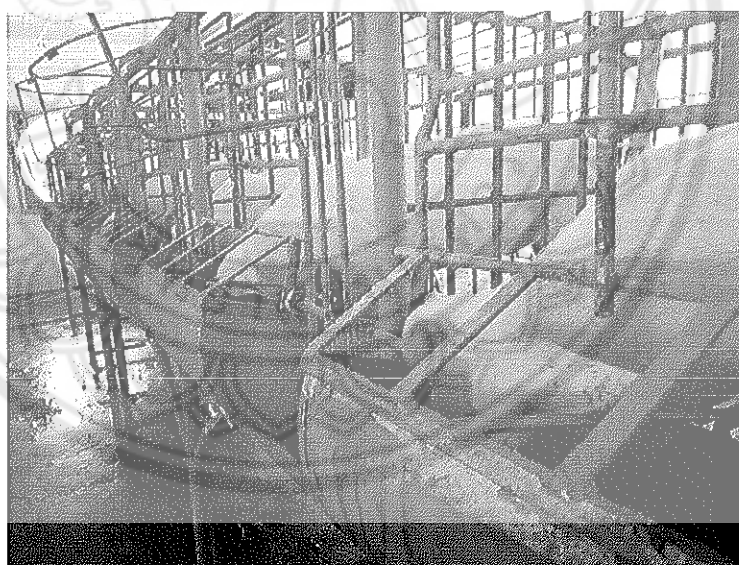
วิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลองโดยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance) ตามแผนการทดลอง และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์สถิติสำเร็จรูป SPSS (SPSS, 2010) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

การทดลองที่ 2.2 การศึกษาผลของระดับใยอาหารในอาหารสุกรหลังหย่านม ต่อการย่อยได้แบบปรากฏของโภชนะของสุกรด้วยวิธี indirect method

การทดลองนี้วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomize Design) โดยมีอาหารทดลอง 3 สูตร (ตามการทดลอง 2.1) สุกรลูกผสมสามสายพันธุ์ ดูริอค x (ลาร์จไวท์ x แลนด์เรซ) เพศผู้ จำนวน 12 ตัว จากแหล่งเดียวกับการทดลองที่ 2.1 แบ่งเป็น 3 กลุ่มๆ ละ 4 ตัว เลี้ยงสุกรในกรงเมตาบอลิคแบบขังเดี่ยว ขนาด 50 x 70 เซนติเมตร (ภาพ 8) เริ่มการทดลองหลังหย่านม 1 สัปดาห์ เพื่อให้สุกรปรับสภาพกับกรงเลี้ยงและสภาพแวดล้อมใหม่ จากนั้นเมื่อเริ่มการทดลอง สุกรแต่ละตัวจะได้รับอาหารทดลอง 4% ของน้ำหนักตัว ใช้ระยะเวลาทั้งสิ้น 7 วัน โดย 3 วันแรกเป็นช่วงปรับตัวของสุกรต่ออาหารทดลอง และ 4 วันหลังจากนั้น เป็นช่วงเก็บตัวอย่างมูล ใช้วิธี

หาค่าการย่อยได้แบบ indirect method โดยใช้โครมิกซ์ออกไซด์ที่ระดับ 0.5% เป็นสารบ่งชี้ผสมในอาหารทดลอง ให้สุกรกินอาหารที่ผสมโครมิกซ์ออกไซด์ในวันที่ 3-6 ของการทดลอง จากนั้นเปลี่ยนให้อาหารทดลองที่ไม่ผสมโครมิกซ์ออกไซด์ เริ่มเก็บตัวอย่างมูลเมื่อมูลมีสีเขียวของโครมิกซ์ออกไซด์ (ประมาณวันที่ 4 ของการทดลอง) และหยุดเก็บตัวอย่างเมื่อมูลสุกรกลับมาเป็นสีปกติ (ประมาณวันที่ 7 ของการทดลอง) โดยเลือกเก็บมูลที่ไม่มีการปนเปื้อน เป็นรายตัว นำเข้าแช่ที่อุณหภูมิ -20°C ทันที เพื่อป้องกันการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ จากนั้นนำมูลมาอบแห้งที่อุณหภูมิ 60°C แล้วบดให้ละเอียด จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาโภชนะและปริมาณความเข้มข้นของโครมิกซ์ออกไซด์ ทั้งในมูลและอาหารทดลองในห้องปฏิบัติการ ตามวิธีการของ Bolin et al. (1952) จากนั้นนำมาคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การย่อยได้ของโภชนะ ตามวิธีการของอังคณา หาญบรรจง และดวงสมร สีนเจิมศิริ (2532) ตามสูตรดังนี้

$$\text{การย่อยได้ของสารอาหาร (\%)} = 100 - 100 \times \frac{(\% \text{ สารบ่งชี้ในอาหาร} \times \% \text{ โภชนะในมูล})}{(\% \text{ สารบ่งชี้ในมูล} \times \% \text{ โภชนะในอาหาร})}$$



ภาพ 9 ลักษณะกรงทดลองการย่อยได้แบบปรากฏของสุกร

การทดลองที่ 3 การทดลองเพื่อหาสัดส่วนของที่เหมาะสมของเยื่อใยชนิดไม่ละลายน้ำต่อเยื่อใยชนิดละลายน้ำ (IDF:sDF) ในอาหารสุกรหลังหย่านม โดยใช้แหล่งใยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำ (จากการคัดเลือกวัตถุดิบจากการทดลองที่ 1) และผลต่อการพัฒนาของระบบทางเดินอาหาร สัตว์ฐานวิทยาของลำไส้เล็ก ปริมาณเชื้อแบคทีเรียในทางเดินอาหารส่วนท้ายและสมรรถภาพการผลิต

1. สัตว์ทดลอง

ศึกษาทดลองในสุกรลูกผสมสามสายเลือด ดุริอค x (ลาร์จไวท์ x แลนด์เรซ) จำนวน 64 ตัว หย่านมที่อายุ 21 ± 4 วัน จากฟาร์มเกษตรชัย ต.หนองกรด อ.เมือง จ. นครสวรรค์ มีน้ำหนักเริ่มต้นเฉลี่ย 5-6 กิโลกรัม วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design; CRD) โดยแบ่งสุกรออกเป็น 4 กลุ่มๆ ละ 16 ตัว (4 ตัวต่อคอก เพศผู้และเพศเมียเท่าๆ กัน) เลี้ยงสุกรแบบขังรวมในคอกยกพื้นขนาด 2×2 ตารางเมตร พื้นคอกเป็น สแลทพลาสติกให้อาหารและน้ำอย่างเต็มที่ตลอดการทดลอง เลี้ยงสัตว์ในโรงเรือนระบบปิด ควบคุมอุณหภูมิเริ่มต้น 32°C และลดลงสัปดาห์ละ $1-2^{\circ}\text{C}$ ระยะเวลาทดลองรวม 28 วัน (4 สัปดาห์) เปิดไฟกกให้สุกรในช่วงสัปดาห์แรกของการเลี้ยง

2. อาหารทดลอง

อาหารทดลองมี 4 สูตร คือสูตรควบคุม และอาหารที่มีสัดส่วน IDF:sDF แตกต่างกัน คือ 3 ± 0.5 (กลุ่มควบคุม), 4 ± 0.5 (R4), 5 ± 0.5 (R5) และ 6 ± 0.5 (R6) ตามลำดับ โดยอาหารทดลองทั้ง 4 สูตร มีระดับใยอาหารใกล้เคียงกันคือ 140 ± 0.5 กรัมต่อกิโลกรัมอาหาร ใช้เกลบดิบเป็นแหล่งของ IDF โดยเกลบดิบได้ซื้อจากผู้ขายในท้องถิ่น จ. พิษณุโลก นำมาล้างทำความสะอาดอบให้แห้งที่อุณหภูมิ $60-65^{\circ}\text{C}$ จนแห้ง จากนั้นนำมาด้วยเครื่องบดชนิด Hammer mill ยี่ห้อ Retsch รุ่น SM 100 ผ่านตะแกรงรูเปิดขนาด 0.5 มิลลิเมตร ณ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏวชิรสุคนธ์ พิษณุโลก ก่อนนำมาผสมอาหาร และใช้ข้อมูลองค์ประกอบทางโภชนาการจากการวิเคราะห์ในการทดลองที่ 1 ในการคำนวณสูตรอาหาร อาหารทดลองทุกสูตรมีโภชนาการไม่น้อยกว่าความต้องการของสุกร ตามคำแนะนำของ NRC (2012) สำหรับสุกรช่วงน้ำหนัก 7-11 กิโลกรัม ให้อาหารแบบอาหารผง โดยอาหารทดลองจะผสมไว้ไม่เกิน 7 วัน ถ้าสุกรกินไม่หมดต้องทำการผสมใหม่ อาหารที่มีการตกหล่นจะนำมาหักออกจากปริมาณการกิน ปริมาณวัตถุดิบและองค์ประกอบทางโภชนาการของอาหารทดลองแสดงใน Table 8

3. การบันทึกข้อมูลและการเก็บตัวอย่าง

3.1 บันทึกน้ำหนักเมื่อเริ่มต้นทดลอง น้ำหนักรายสัปดาห์ และน้ำหนักสุดท้ายของการทดลอง รวมทั้งปริมาณอาหารที่สุกรกินแต่ละวัน เพื่อทำการคำนวณหาสมรรถภาพการผลิต ได้แก่ น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น อัตราการเจริญเติบโตต่อวัน ปริมาณอาหารที่กินต่อวัน และประสิทธิภาพการเปลี่ยนอาหาร เป็นรายสัปดาห์และตลอดการทดลอง (0-28 วัน)

3.2 เมื่อสิ้นสุดการทดลอง (วันที่ 28 ของการทดลอง) เก็บตัวอย่างมูลสุกรโดยวิธีการ swab จากทวารหนักโดยใช้ก้านไม้พันสำลีที่ผ่านการนึ่งฆ่าเชื้อแล้ว หลังจาก swab แล้วจุ่มก้านสำลีลงในสารละลายไฮเดียมคลอไรด์ 0.85% ปริมาณ 9 มิลลิลิตร ซึ่งบรรจุในหลอดแก้วที่ผ่านการนึ่งฆ่าเชื้อแล้ว ตามวิธีการของ Gerritsen et al. (2012) เพื่อทำการวิเคราะห์หาปริมาณเชื้อแบคทีเรีย *E. coli*, *Salmonella* spp. และ lactic acid bacteria ต่อไป

3.3 เก็บตัวอย่างเนื้อเยื่อในวันที่ 29 ของการทดลอง สุ่มสุกร 1 ตัวในแต่ละคอก โดยสุ่มจำนวน 4 คอกต่อกลุ่มการทดลอง ($n = 4$) โดยไม่อดอาหาร นำมาชั่งน้ำหนัก และทำการ усыตายโดยการฉีด sodium pentobarbital ขนาด 200 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักตัว 1 กิโลกรัม (Chen et al., 2013) จากนั้นเก็บตัวอย่างชิ้นส่วนเนื้อเยื่อความยาวประมาณ 2 เซนติเมตร ของลำไส้ทั้ง 3 ส่วน ได้แก่ ลำไส้เล็กส่วนต้น (duodenum) ตำแหน่งประมาณ 10 เซนติเมตรจาก stomach sphincter ลำไส้เล็กส่วนกลาง (jejunum) ตำแหน่งประมาณ 40 เซนติเมตร จาก stomach sphincter และลำไส้เล็กส่วนปลาย (ileum) ตำแหน่งก่อนถึง ileo-caecal junction ประมาณ 10 เซนติเมตร จากนั้นแช่ตัวอย่างใน formaldehyde-phosphate buffer ความเข้มข้น 10% เพื่อใช้ในการศึกษาสัณฐานวิทยาของลำไส้เล็ก

3.4 บันทึกน้ำหนักตับ กระเพาะอาหาร ลำไส้เล็ก และลำไส้ใหญ่ และวัดความยาวของลำไส้เล็ก โดยล้างทำความสะอาดก่อนนำไปชั่งน้ำหนัก

4. การวิเคราะห์ตัวอย่าง

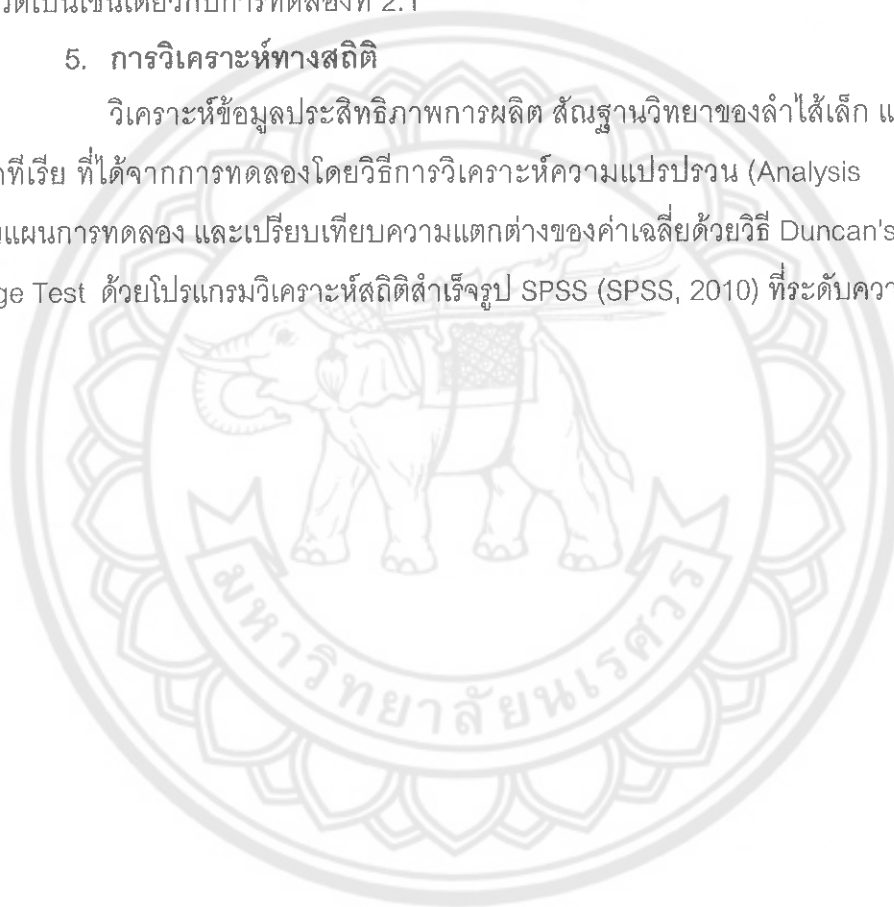
4.1 ตัวอย่างมูลจากการ rectal swab ที่เก็บในหลอดทดลอง นำมาทำให้เจือจางและถ่ายลงในอาหารเลี้ยงเชื้อแบบจำเพาะ (selective agar) ดังนี้ เชื้อ *Salmonella* spp. อาหาร Bismuth sulfite agar (BSA) เชื้อ *E. coli* ใช้อาหาร Eosin methylene blue agar (EMB) และเชื้อแบคทีเรียกลุ่มผลิตกรดแลคติก (Lactic acid bacteria) ใช้อาหาร de man, rogosa and sharpe (MRS) จากนั้น ปั่นที่อุณหภูมิ 38°C เป็นเวลา 48 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำมานับจำนวนโคโลนีปริมาณของเชื้อแบคทีเรียที่ศึกษาแสดงในหน่วย log CFU/g

4.2 การศึกษาสัณฐานวิทยาของลำไส้เล็ก นำตัวอย่างชิ้นส่วนเนื้อเยื่อที่แช่ในสารละลายมาผ่านกระบวนการดึงน้ำออกจากเซลล์ (dehydrate) และนำชิ้นเนื้อเยื่อไปฝังใน

พาราฟิน จากนั้นนำไปตัดตามแนวขวาง ความหนา 5 μm และย้อมด้วยสี haematoxilin และ eosin แล้วนำสไลด์ที่ได้ไปส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์ OPTIKA รุ่น B-383PLi (OPTIKA, Italy) ด้วยกำลังขยาย 40 เท่า (40X) วัดความสูงของวิลไล (Villus height; VH) ความกว้างวิลไล (villus width) และความลึกของคริปต์ (crypt depth: CD) ดังภาพ 3.2 จากนั้นนำมาคำนวณหาสัดส่วนความสูงของวิลไลต่อความลึกของคริปต์ (VH:CD) และพื้นที่ผิวของวิลไล (villus surface area, VSA) คำนวณโดยใช้สูตรของ Swiech et al (2016) โดยรายละเอียดในการวัดเป็นเช่นเดียวกับการทดลองที่ 2.1

5. การวิเคราะห์ทางสถิติ

วิเคราะห์ข้อมูลประสิทธิภาพการผลิต สัตว์ฐานวิทยาของลำไส้เล็ก และปริมาณเชื้อแบคทีเรีย ที่ได้จากการทดลองโดยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance) ตามแผนการทดลอง และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's New Multiple range Test ด้วยโปรแกรมวิเคราะห์สถิติสำเร็จรูป SPSS (SPSS, 2010) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%



ตาราง 8 Ingredients and nutrient composition of experimental diets with different ratio of iDF:sDF

Items	iDF:sDF ratio			
	Control	4	5	6
Extruded soybean	17.0	17.0	17.0	17.0
Broken rice	28.7	10.2	20.7	27.2
Grounded corn	18.5	35.5	23.5	15.5
Soybean meal	18.0	18.0	18.0	18.0
Palm oil	3.0	3.5	4.0	4.5
Milk replacer	5.0	5.0	5.0	5.0
Rice bran	5.0	5.0	5.0	5.0
Rice hull	-	1.0	2.0	3.0
Lysine	0.4	0.4	0.4	0.4
DL-Methionine	0.2	0.2	0.2	0.2
Threonine	0.2	0.2	0.2	0.2
DCP	2.0	2.0	2.0	2.0
NaCl	0.5	0.5	0.5	0.5
CaCO ₃	1.0	1.0	1.0	1.0
Vitamin-mineral premix ¹	0.5	0.5	0.5	0.5
Calculated Nutrient composition (as fed basis)				
CP, %	19.22	19.15	19.05	18.96
EE, %	7.78	8.65	8.85	9.97
CF, %	2.99	3.91	4.11	4.41
Total dietary fiber, %	10.88	13.69	14.15	13.82
Insoluble dietary fiber, %	9.17	11.01	11.85	11.93
Soluble dietary fiber, %	3.05	2.69	2.30	1.89
iDF:sDF ratio	3.00	4.10	5.15	6.31
ME, kcal/kg	3,352	3,346	3,360	3,365

หมายเหตุ: ¹ Premix provided the following per kg of complete diets: Vitamin A 50,000 IU, Vitamin E 100 IU, Vitamin D3 10,000 IU, Vitamin K3 8.0 mg, Vitamin B1 6.0 mg, Vitamin B2 16.0 mg, Vitamin B6 10.0 mg, Vitamin B12 0.08 mg, Pantpthenic acid 50 mg, Niacin 80.0 mg, Folic acid 2.0 mg, Biotin 0.30 mg, Vitamin C 0.3 mg, Selenium 0.5 mg, Ferrous 360.0 mg, Manganese 100.0 mg, Zinc 300.0 mg, Copper 320.0 mg, Cobalt 1.6 mg and Iodine 3.0 mg

สถานที่ทำการทดลอง/เก็บข้อมูล

1. ศึกษาทดลองในสุกร ณ หน่วยวิจัยและทดสอบอาหารสัตว์ สถานีวิจัยและฝึกอบรมปึงราชนก คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร ต. วังพิบูล อ. วังทอง จ. พิจิตรโลก
2. วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและกายภาพของอาหารทดลองและวัตถุดิบแหล่งเชื้อไข ณ ห้องปฏิบัติการอาหารสัตว์ คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร
3. เตรียมเกลบดิบสำหรับใช้ผสมอาหารทดลอง ณ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา เขตพื้นที่พิจิตรโลก



บทที่ 4

ผลการวิจัย

ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพและทางเคมีของแหล่งของใยอาหารชนิดต่างๆ

ตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองนี้ เป็นตัวอย่างที่ได้รวบรวมจากผู้ขายและฟาร์มของเกษตรกร ประกอบด้วย กากมันสำปะหลัง จำนวน 7 ตัวอย่าง แกลบดิบ จำนวน 5 ตัวอย่าง รำสกัดน้ำมัน จำนวน 10 ตัวอย่าง และผิวถั่วเหลือง จำนวน 3 ตัวอย่าง เพื่อป้องกันไม่ให้มีอิทธิพลของขนาดอนุภาคมีผลต่อคุณสมบัติทางกายภาพของวัตถุดิบ ดังนั้นก่อนการวิเคราะห์ห้นำวัตถุดิบทั้งหมดมา บดผ่านตะแกรงขนาด 0.5 มิลลิเมตร ก่อนการวิเคราะห์

ตาราง 9 Physical properties and chemical composition of various dietary fiber sources (mean $\pm$ SD)

Items	Cassava pulp	Rice hull	Extracted rice bran	Soybean hull
n	7	5	10	3
<u>Physical properties</u>				
Swelling capacity (mL/g)	4.48 $\pm$ 0.71	3.80 $\pm$ 0.88	5.17 $\pm$ 0.63	8.37 $\pm$ 0.71
Water holding capacity (g/g)	3.47 $\pm$ 0.49	2.34 $\pm$ 0.20	3.58 $\pm$ 1.07	5.36 $\pm$ 0.45
<u>Chemical composition</u>				
Dry matter, %	89.65 $\pm$ 0.71	94.26 $\pm$ 2.19	90.87 $\pm$ 2.52	89.96 $\pm$ 0.19
Total dietary fiber (DF), %	29.26 $\pm$ 0.11	68.01 $\pm$ 1.97	32.04 $\pm$ 0.96	65.74 $\pm$ 3.46
Insoluble dietary fiber (iDF), %	26.37 $\pm$ 2.33	62.52 $\pm$ 3.22	30.53 $\pm$ 0.38	58.24 $\pm$ 2.11
Soluble dietary fiber (sDF), %	2.89 $\pm$ 2.23	5.49 $\pm$ 4.24	1.51 $\pm$ 0.58	7.50 $\pm$ 1.34
%iDF (of DF)	90.12	91.93	95.29	88.59

จากการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของวัตถุดิบ ดังแสดงใน ตาราง 9 แบ่งเป็น คุณสมบัติการพองตัว ผิวถั่วเหลืองมีค่าสูงสุด คือ 8.37 มิลลิลิตรต่อกรัม รองลงมาคือรำสกัดน้ำมัน กากมันสำปะหลัง และแกลบดิบ เท่ากับ 5.17, 4.48, 3.80 มิลลิลิตรต่อกรัม ตามลำดับ สำหรับ

ความสามารถการอุ้มน้ำ ผิวน้ำเหลืองมีค่าสูงที่สุด คือ 5.36 กรัม/กรัม รองลงมาจำสัดน้ำมันกากมันสำปะหลัง และเกลบดิบ เท่ากับ 3.58, 3.47 และ 2.34 กรัม/กรัม ตามลำดับ

สำหรับการวิเคราะห์ค่าปริมาณใยอาหารพบว่า เกลบดิบ มีค่าเฉลี่ย DF, IDF และ sDF เท่ากับ 68.01, 62.52 และ 5.49% ตามลำดับ ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่มีค่า DF สูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุดิบอื่น รองลงมาคือผิวน้ำเหลืองมีค่าเฉลี่ย DF, IDF และ sDF เท่ากับ 65.74, 58.24 และ 7.50% ตามลำดับ จำสัดน้ำมันมีค่าเฉลี่ย DF, IDF และ sDF เท่ากับ 32.04, 30.53 และ 1.51% ตามลำดับ ส่วนกากมันสำปะหลังมีค่าเฉลี่ยของ DF ต่ำที่สุด คือ 29.26% และมีค่าเฉลี่ย IDF และ sDF เท่ากับ 26.37% และ 2.89% ตามลำดับ ซึ่งเมื่อพิจารณาสัดส่วนของ IDF เมื่อเทียบกับค่า DF แล้ว จะพบว่าวัตถุดิบที่มีสัดส่วนของ IDF มากที่สุดคือจำสัดน้ำมัน เท่ากับ 95.3% รองลงมาคือกากมันสำปะหลัง เกลบดิบ และผิวน้ำเหลือง คือ 90.1, 85.8 และ 84.3% ตามลำดับ

ดังนั้นเมื่อพิจารณาปริมาณ DF ในวัตถุดิบแล้วพบว่าเกลบดิบ มีปริมาณใยอาหารสูงที่สุด จึงคัดเลือกเป็นวัตถุดิบที่เป็นแหล่งของใยอาหาร เพื่อใช้ในการทดลองต่อไป

ผลการศึกษาผลของระดับใยอาหาร (DF) ที่แตกต่างกันในอาหารต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโต สัตว์ฐานวิทยาของลำไส้เล็ก และการย่อยได้ของสารอาหาร

1. ประสิทธิภาพการเจริญเติบโต

สุกรที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้มีน้ำหนักเริ่มต้นเฉลี่ยไม่แตกต่างกันทางสถิติ โดยมีน้ำหนักเฉลี่ยเท่ากับ 6.05 ± 0.46 กิโลกรัม ในช่วงสัปดาห์แรกของการทดลอง (0-7 วัน) สุกรทุกกลุ่มมีน้ำหนักที่เพิ่ม อัตราการเจริญเติบโตต่อวัน ปริมาณอาหารที่กินต่อวัน และประสิทธิภาพการผลิตไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P = 0.123, 0.121, 0.644$ และ 0.189 ตามลำดับ) โดยสุกรที่ได้รับใยอาหารที่ระดับ 140 กรัมต่อกิโลกรัม มีแนวโน้มมีอัตราการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพการผลิตดีกว่าสุกรกลุ่มอื่น ($P = 0.121$ และ 0.189 ตามลำดับ) สำหรับประสิทธิภาพการเจริญเติบโตในสัปดาห์ที่ 2 (8-14 วัน) สัปดาห์ที่ 3 (15-21 วัน) สัปดาห์ที่ 4 (22-28 วัน) และเมื่อคำนวณประสิทธิภาพการผลิตโดยรวมพบว่าสุกรทั้งสามกลุ่มการทดลองมีน้ำหนักเพิ่ม อัตราการเจริญเติบโตต่อวัน และปริมาณอาหารที่กินต่อวันไม่แตกต่างกันทางสถิติ แต่ทั้งนี้สุกรในกลุ่มที่ได้รับระดับใยอาหารที่ 140 กรัมต่อกิโลกรัม มีแนวโน้มว่าจะมีประสิทธิภาพการผลิตดีกว่ากลุ่มอื่น ($P = 0.308$) ดังแสดงใน ตาราง 10

ตาราง 10 Ingredients and nutrient composition of experimental diets with different ratio of IDF: sDF

Items	DF Level (g/kg diet)			SEM	P-value
	130	140	150		
Initial weight, kg	6.04	6.05	6.06	0.11	0.998
Final weight, kg	13.41	14.28	13.90	0.38	0.781
0-7 d;					
Weight gain, kg	0.77	1.23	1.17	0.17	0.123
ADG, g/d	110.00	183.57	152.15	26.49	0.121
ADFI, g/d	159.14	188.43	193.79	26.51	0.644
FCR	1.51	1.14	1.33	0.14	0.189
8-14 d;					
Weight gain, kg	2.08	1.89	1.73	0.27	0.215
ADG, g/d	297.86	270.00	228.57	11.79	0.216
ADFI, g/d	334.50	316.93	341.21	3.29	0.823
FCR	1.14	1.31	1.58	0.02	0.206
15-21 d;					
Weight gain, kg	2.24	2.30	2.45	0.30	0.739
ADG, g/d	292.14	346.43	350.00	48.49	0.739
ADFI, g/d	469.29	442.71	466.43	46.27	0.918
FCR	1.82	1.44	1.42	0.22	0.463
22-28 d;					
Weight gain, kg	2.45	2.81	3.15	0.15	0.674
ADG, g/d	350.00	395.00	407.14	21.08	0.674
ADFI, g/d	640.00	628.57	657.14	34.70	0.861
FCR	1.94	1.60	1.42	0.20	0.170
Overall (0-28 d);					
Weight gain, kg	7.54	8.23	8.50	0.67	0.730
ADG, g/d	263.54	294.00	299.96	25.25	0.730
ADFI, g/d	400.73	394.16	414.64	26.41	0.873
FCR	1.57	1.34	1.40	0.09	0.317
Diarrhea incidence (%)	0.28	0.11	0.06	0.04	0.308

2. การย่อยได้ของโภชนะ

จาก ตาราง 11 แสดงให้เห็นว่าสุกรที่ได้รับอาหารที่มีระดับใยอาหารแตกต่างกันทั้งสามกลุ่ม ไม่ส่งผลต่อค่าการย่อยได้แบบปรากฏของพลังงาน ($P = 0.167$) และโปรตีน ($P = 0.320$) แต่ทั้งนี้ก็มีแนวโน้มลดลงเมื่อได้รับอาหารที่มีระดับใยอาหารเพิ่มขึ้น สำหรับค่าการย่อยได้แบบปรากฏของไขมัน และเยื่อใยหยาบ นั้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ($P = 0.082$ และ 0.074) เมื่อสุกรได้รับอาหารที่มีระดับใยอาหารสูงขึ้น ($P = 0.082$ และ $P = 0.074$) โดยการย่อยได้ของไขมันของสุกรกลุ่มที่ได้รับอาหาร DF130, DF140 และ DF150 เท่ากับ 38.99, 48.71 และ 41.38% ส่วนค่าการย่อยได้ของเยื่อใยหยาบ เท่ากับ 44.92, 48.93 และ 56.26% ตามลำดับ

ตาราง 11 Nutrient digestibility (%) of weaning pigs fed the experimental diets with different level of dietary fiber

	DF Level (g/kg diet)			SEM	P-value
	130	140	150		
Gross energy	79.80	78.14	64.95	0.83	0.167
Crude protein	80.30	77.35	67.82	0.84	0.320
Ether extract	38.99	48.71	41.38	0.55	0.082
Crude fiber	44.92	48.93	56.26	0.58	0.074

3. สัณฐานวิทยาของลำไส้เล็ก

การเพิ่มระดับใยอาหารในสูตรอาหารสุกรหลังหย่านม ไม่ส่งผลต่อสัณฐานวิทยาของลำไส้เล็กส่วนต้น และส่วนกลาง โดยค่า VH:CD ของลำไส้เล็กส่วนต้นของสุกรที่ได้รับอาหาร DF130, DF140 และ DF150 เป็น 1.78, 1.88 และ 1.76 ตามลำดับ ส่วนค่า VH:CD ของลำไส้เล็กส่วนกลางเป็น 1.82, 2.03 และ 1.84 ตามลำดับ อย่างไรก็ตามการเพิ่มระดับของใยอาหารมีแนวโน้มส่งผลกระทบต่อความสูงของวิลไล และค่า VH:CD ของลำไส้เล็กส่วนท้าย ($P = 0.074$ และ $P = 0.062$) โดยความสูงของวิลไลในสุกรกลุ่มที่ได้รับอาหารกลุ่ม DF140 มีความสูงของวิลไลสูงที่สุดคือ 344.70 μm รองลงมาคือสุกรที่ได้รับอาหาร DF150 และ DF130 (335.04 μm และ 267.41 μm ตามลำดับ) ส่วนค่า VH:CD ของลำไส้เล็กส่วนท้ายที่สูงที่สุดคือสุกรที่ได้รับอาหาร DF150 มีค่า VH:CD สูงที่สุด รองลงมาคือกลุ่มที่ได้รับอาหาร DF140 และ DF130 (2.37, 2.12 และ 1.94 ตามลำดับ)

สำหรับพื้นที่ผิวของวิลไลของลำไส้ทั้งสามส่วน ไม่มีความแตกต่างทางสถิติระหว่างกลุ่มทดลอง ดังแสดงใน ตาราง 12

ตาราง 12 Intestinal morphology of weaning pigs fed the experimental diets with different levels of dietary fiber

Items	DF Level (g/kg diet)			SEM	P-value
	130	140	150		
Duodenum					
Villus width, μm	56.25	52.67	56.25	2.08	0.757
Villous height, μm	296.93	306.97	325.22	21.86	0.693
Crypt depth, μm	171.23	165.88	185.57	13.82	0.627
VH : CD	1.73	1.85	1.75	0.15	0.881
Villous area, mm^2	55.08	53.58	61.04	3.50	0.720
Jejunum					
Villus width, μm	50.52	54.45	51.06	0.98	0.219
Villous height, μm	293.25	355.22	298.65	26.51	0.195
Crypt depth, μm	159.85	179.15	161.68	13.01	0.557
VH : CD	1.83	1.98	1.85	0.12	0.422
Villous area, mm^2	49.01	62.31	49.21	3.04	0.144
Ileum					
Villus width, μm	47.95	53.02	57.66	1.76	0.413
Villous height, μm	267.41	344.70	335.04	27.11	0.074
Crypt depth, μm	137.94	164.08	142.52	12.18	0.293
VH : CD	1.94	2.10	2.49	0.12	0.062
Villous area, mm^2	42.50	60.85	52.75	3.84	0.178

4. น้ำหนักของอวัยวะของระบบทางเดินอาหาร

น้ำหนักเฉลี่ยของสุกรที่ทำการเก็บตัวอย่าง ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ โดยมี น้ำหนักเฉลี่ย 18.86 กิโลกรัม ($P = 0.545$) จาก ตาราง 13 แสดงให้เห็นว่าระดับของใยอาหารที่ เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลน้ำหนักของตับ กระเพาะอาหาร ลำไส้เล็กและลำไส้ใหญ่ ทั้งนี้ไม่พบความแตกต่างทางสถิติระหว่างกลุ่มทดลอง แต่ระดับของใยอาหารมีผลต่อน้ำหนักของลำไส้เล็กเมื่อเทียบน้ำหนัก

ตัว คือเมื่อเพิ่มระดับใยอาหารเป็น 150 กรัมต่อกิโลกรัมอาหาร ทำให้น้ำหนักของลำไส้เล็กเมื่อเทียบน้ำหนักตัวลดลง เมื่อเทียบกับสุกรที่ได้รับอาหารที่มีระดับใยอาหาร 130 และ 140 กรัมต่อกิโลกรัมอาหาร (3.64 VS 4.05 และ 4.34 เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักตัว ตามลำดับ)

ตาราง 13 Organ weight of weaning pigs fed experimental diets with different levels of dietary fiber

items	DF Level (g/kg diet)			SEM	P-value
	130	140	150		
Body weight, kg	17.27	19.34	19.89	0.954	0.545
Organ weight, g					
Liver	470.00	540.00	531.25	24.53	0.567
Stomach	128.75	147.50	137.50	7.08	0.657
Small intestine	707.50	840.00	722.50	35.98	0.399
Large intestine	358.00	370.00	362.75	30.70	0.990
Organ weight, %BW					
Liver	2.72	2.79	2.67	0.07	0.874
Stomach	0.75	0.76	0.69	0.02	0.477
Small intestine	4.10 ^a	4.34 ^a	3.63 ^b	0.06	0.012
Large intestine	2.07	1.91	1.82	0.15	0.836

หมายเหตุ: ^{a,b} means values with different superscript letters in the same row are significantly different ($P < 0.05$)

5. ค่าความเป็นกรดต่างและปริมาณเชื้อแบคทีเรียในทางเดินอาหาร

จากผลการศึกษาพบว่าระดับของใยอาหารที่เพิ่มขึ้น ไม่ส่งผลต่อค่าความเป็นกรดต่างภายในระบบทางเดินอาหารส่วนท้าย ทั้งลำไส้เล็กส่วนปลาย ไส้ติ่ง และลำไส้ใหญ่ ถึงแม้ว่าเมื่อพิจารณาเฉพาะค่าเฉลี่ยนั้นจะมีความเป็นกรดมากขึ้นเมื่อระดับใยอาหารเพิ่มขึ้น นอกจากนี้การเพิ่มระดับของใยอาหารในอาหารสุกรหลังหย่านม ไม่ส่งผลต่อปริมาณเชื้อแบคทีเรียในทางเดินอาหารที่สำคัญ ได้แก่ เชื้อแบคทีเรียในกลุ่มที่ก่อโรค คือ *E. coli*, *Salmonella* spp. และแบคทีเรีย

ที่เป็นประโยชน์คือ Lactic acid bacteria ทั้งในลำไส้เล็กส่วนท้าย ไส้ติ่ง และลำไส้ใหญ่ ดังแสดงในตาราง 14

ตาราง 14 Large intestinal pH and bacterial cell count of Ileum, caecum and colon of weaning pigs fed the experimental diets with different levels of dietary fiber

items	DF level (g/kg diet)			SEM	P-value
	130	140	150		
pH					
Ileum	7.14	6.99	6.86	0.11	0.696
Cecum	5.66	5.37	5.43	0.13	0.722
Colon	6.12	5.87	5.61	0.10	0.264
Ileum					
<i>Salmonella</i> spp.	7.90	7.62	7.72	0.04	0.235
<i>E. coli</i>	7.40	7.48	7.72	0.13	0.466
Lactic acid bacteria	7.55	7.30	7.16	0.21	0.495
Caecum					
<i>Salmonella</i> spp.	7.66	7.36	7.18	0.12	0.208
<i>E. coli</i>	7.65	7.43	7.22	0.08	0.161
Lactic acid bacteria	6.92	7.06	7.06	0.19	0.869
Colon					
<i>Salmonella</i> spp.	7.60	7.51	7.43	0.15	0.830
<i>E. coli</i>	7.55	7.34	7.63	0.09	0.403
Lactic acid bacteria	7.08	7.08	6.75	0.39	0.697

ผลการศึกษาลำไส้ส่วน iDF:sDF ที่เหมาะสมในสูตรอาหารสำหรับสุกรหลังหย่านม

1. ประสิทธิภาพการเจริญเติบโต

จาก Table 15 น้ำหนักเริ่มต้นเฉลี่ยของสุกรทดลองเท่ากับ 6.13 ± 0.23 กิโลกรัม ($P = 0.999$) ในสัปดาห์แรกหลังหย่านม สุกรกลุ่มควบคุมมีแนวโน้มกินอาหารสูงที่สุด รองลงมาคือสุกรที่ได้รับอาหารกลุ่ม R6, R5 และ R4 โดยมีปริมาณการกินอาหารต่อวันอยู่ที่ 254.78, 243.27,

236.52 และ 216.34 กรัมต่อวัน ตามลำดับ ($P = 0.070$) ในขณะที่อัตราการเจริญเติบโตวัน น้ำหนักที่เพิ่ม และประสิทธิภาพการผลิต ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P = 0.524, 0.150$ และ 0.290 ตามลำดับ) โดยประสิทธิภาพการผลิตในสัปดาห์แรกหลังหย่านมของสุกรกลุ่มควบคุม, R4, R5 และ R6 เท่ากับ 1.20, 1.13, 1.18 และ 1.36 ตามลำดับ

สำหรับผลการศึกษาในสัปดาห์ที่ 2, 3 และ 4 สัดส่วนของ IDF:sDF ไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการผลิตของสุกร ทั้งอัตราการเจริญเติบโตต่อวัน ปริมาณอาหารที่กินต่อวัน และน้ำหนักที่เพิ่ม อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการผลิตตลอดทั้งการทดลอง (0-28 วัน) พบว่า ประสิทธิภาพการผลิตของสุกรกลุ่มที่ได้รับอาหาร R4 มีประสิทธิภาพการผลิตที่ดีกว่ากลุ่มอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P = 0.035$) คือเท่ากับ 1.37 ในขณะที่สุกรกลุ่มควบคุม, R5 และ R6 มีประสิทธิภาพการผลิตเท่ากับ 1.57, 1.55 และ 1.51 ตามลำดับ อันเนื่องมาจากสุกรกลุ่มนี้มีแนวโน้มการกินอาหารที่น้อยกว่ากลุ่มอื่น ($P = 0.145$) คือเฉลี่ย 459.75 กรัมต่อวัน ในขณะที่สุกรกลุ่มควบคุม และสุกรกลุ่ม R5 และ R6 เท่ากับ 540.35, 471.37 และ 477.42 กรัมต่อวัน ตามลำดับ

ตาราง 15 Growth performance of weaning pigs fed experimental diets with difference IDF:sDF

Items	IDF:sDF ratio				SEM	P-value
	Control	4	5	6		
Initial weight, kg	6.14	6.13	6.13	6.12	0.11	0.999
Final weight, kg	15.74	15.54	14.65	14.96	0.29	0.355
0-7 d;						
Weight gain, kg	1.58	1.35	1.40	1.26	0.05	0.150
ADG, g/d	211.61	193.45	200.00	179.46	7.39	0.524
ADFI, g/d	254.78	216.34	236.52	243.27	5.49	0.070
FCR	1.20	1.13	1.18	1.36	0.04	0.290
8-14 d;						
Weight gain, kg	2.63	2.66	2.32	2.51	0.07	0.265
ADG, g/d	375.71	379.76	331.52	358.04	10.87	0.519
ADFI, g/d	458.93	402.68	432.14	420.54	12.34	0.472
FCR	1.22	1.06	1.30	1.17	0.05	0.335

ตาราง 15 (ต่อ)

Items	Control	IDF:sDF ratio			SEM	P-value
		4	5	6		
15-21 d;						
Weight gain, kg	2.39	2.34	2.11	2.18	0.10	0.762
ADG, g/d	341.43	334.28	301.43	311.43	14.90	0.901
ADFI, g/d	624.88	534.96	529.21	540.50	18.94	0.194
FCR	1.83	1.60	1.76	1.73	0.05	0.348
22-28 d;						
Weight gain, kg	3.04	3.06	2.70	2.90	0.11	0.662
ADG, g/d	434.28	437.14	385.71	414.29	15.53	0.662
ADFI, g/d	822.84	685.04	697.62	705.36	28.90	0.320
FCR	1.89	1.57	1.81	1.70	0.15	0.167
Overall (0-28 d);						
Weight gain, kg	9.64	9.41	8.53	8.85	0.22	0.314
ADG, g/d	344.28	336.07	304.64	316.07	8.02	0.314
ADFI, g/d	540.35	459.75	471.37	477.42	13.65	0.145
FCR	1.57 ^a	1.37 ^b	1.55 ^a	1.51 ^a	0.02	0.035

หมายเหตุ: ^{a,b} means values with different superscript letters in the same row are significantly different ($P < 0.05$)

2. น้ำหนักของอวัยวะในระบบทางเดินอาหารและสันฐานวิทยาของลำไส้เล็ก

จากการศึกษาน้ำหนักอวัยวะของระบบทางเดินอาหารของสุกรทดลอง พบว่า น้ำหนักมีชีวิตของสุกรที่เก็บตัวอย่างเฉลี่ยอยู่ที่ 18.74 ± 0.86 กิโลกรัม สุกรทุกกลุ่มการทดลองมีความยาวของลำไส้เล็ก น้ำหนักของกระเพาะอาหาร ลำไส้เล็ก และลำไส้ใหญ่ไม่แตกต่างกันทางสถิติ แต่สุกรที่ได้รับอาหารควบคุม และสุกรกลุ่มที่ได้รับอาหาร R6 มีน้ำหนักตับมากกว่ากลุ่ม R5 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P = 0.043$) กล่าวคือมีน้ำหนักตับเท่ากับ 517.5 และ 505.0 กรัม เทียบกับ 455.0 กรัม แต่ทั้งนี้ น้ำหนักตับระหว่างสุกรกลุ่มที่ได้รับอาหาร R4 และ R5 ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ในขณะที่เมื่อพิจารณาในรูปของเปอร์เซ็นต์ของน้ำหนักตัวแล้ว สุกรทุกกลุ่มทดลองน้ำหนัก

ตับ กระเพาะ ลำไส้เล็กและลำไส้ใหญ่ เมื่อเทียบน้ำหนักตัวไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P = 0.388$, 0.331 , 0.356 และ 0.607) ดังแสดงใน ตาราง 16

ตาราง 16 Organ weight and small intestine length of digestive system and in pigs fed the experimental diets with difference iDF:sDF ratio

items	Control	iDF:sDF ratio			SEM	P-value
		4	5	6		
Body weight, kg	19.22	18.50	18.32	18.92	0.21	0.477
Small intestine length, cm	1,440.0	1,502.8	1,395.3	1,443.0	45.93	0.899
Organ weight, g						
Liver	517.5 ^a	490.0 ^{ab}	455.0 ^b	505.0 ^a	8.72	0.043
Stomach	175.0	192.5	172.5	202.5	4.34	0.411
Small intestine	1,022.5	922.5	855.0	895.0	26.75	0.171
Large intestine	545.0	490.0	502.5	492.5	10.92	0.585
Organ weight, %BW						
Liver	2.69	2.65	2.48	2.67	0.06	0.388
Stomach	0.91	1.04	0.91	1.01	0.04	0.331
Small intestine	5.32	4.99	4.67	4.73	0.18	0.356
Large intestine	2.83	2.65	2.74	2.60	0.09	0.607

หมายเหตุ: ^{a,b} means values with different superscript letters in the same row are significantly different ($P < 0.05$)

ทางด้านสัณฐานวิทยาของลำไส้เล็กทั้ง 3 ส่วน (ตาราง 16) พบว่า ในลำไส้เล็กส่วนต้น (Duodenum) สุกรที่ได้รับสัดส่วน iDF:sDF ที่แตกต่างกัน ส่งผลต่อสัดส่วน VH:CD ($P = 0.016$) โดยเมื่อเพิ่มสัดส่วนของใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำ ทำให้ค่า VH:CD ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ กล่าวคือสุกรกลุ่มที่ได้รับอาหาร R4 มีค่า VH:CD สูงที่สุดคือ 2.57 ซึ่งสูงกว่ากลุ่มที่ได้รับอาหาร R5 และ R6 ที่มีสัดส่วน VH:CD เท่ากับ 1.90 และ 1.80 ตามลำดับ ทั้งนี้เกิดจากความสูงของวิลไลที่มีแนวโน้มลดลง ($P = 0.083$) และความลึกของครีพท์ของสุกรทุกกลุ่มการทดลองไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P = 0.292$)

สำหรับลำไส้เล็กส่วนกลาง (Jejunum) การเพิ่มสัดส่วนของใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำมากขึ้น ส่งผลต่อค่าทางสัณฐานวิทยาอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ กล่าวคือ ความกว้างของวิลไลของสุกรกลุ่มที่ได้รับอาหาร R5 มีค่าเท่ากับ 217.67 μm ซึ่งมีค่าสูงกว่ากลุ่มทดลองอื่นที่สูงกว่ากลุ่มควบคุม (81.98 μm) กลุ่มสุกรที่ได้รับอาหาร R4 (88.22 μm) และสุกรที่ได้รับอาหาร R6 (81.55 μm) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.01$) นอกจากนี้ยังพบว่าความสูงของวิลไลมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อ iDF:sDF เพิ่มขึ้น ($P = 0.092$) ในกลุ่มสุกรที่ได้รับอาหาร R4, R5 และ R6 แต่มีวิลไลสั้นกว่าเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม กล่าวคือ ความสูงของวิลไล ในกลุ่ม iDF:sDF เท่ากับ 4, 5 และ 6 เป็น 280.40, 285.98 และ 317.56 μm ในขณะที่กลุ่มควบคุมมีความสูงวิลไลเท่ากับ 359.13 μm และเมื่อพิจารณาสัดส่วน VH:CD แล้ว R6 มีค่า VH:CD สูงที่สุด คือ 3.02 รองลงมาคือกลุ่มควบคุม และกลุ่มที่ได้รับอาหาร R4 (2.48 และ 2.31) และกลุ่มที่ได้รับอาหาร R5 มีค่า VH:CD น้อยที่สุด คือ 1.92 ทางด้านพื้นที่ผิวของวิลไลของลำไส้เล็กส่วนกลาง มีแนวโน้มว่ากลุ่มที่ได้รับอาหาร R5 มีพื้นที่ผิวสูงกว่ากลุ่มอื่น ($P = 0.061$)

ทางด้านสัณฐานวิทยาของลำไส้เล็กส่วนส่วนปลาย (Ileum) พบว่าการเพิ่มสัดส่วน iDF:sDF ไม่ส่งผลต่อความกว้างของวิลไล ($P = 0.500$) ความสูงของวิลไล ($P = 0.817$) ความลึกของครีปท์ ($P = 0.675$) สัดส่วน VH:CD ($P = 0.196$) และพื้นที่ผิวของวิลไล ($P = 0.828$) ในสุกรทุกกลุ่มทดลอง

ตาราง 17 Gut morphology of weaning pigs fed experimental diets with different ration of IDF:sDF

items	Control	IDF:sDF ratio			SEM	P-value
		4	5	6		
Duodenum						
Villous width μm	88.69	78.64	78.34	88.27	2.66	0.339
Villous height, μm	326.89	293.99	255.13	256.26	10.21	0.083
Crypt depth, μm	146.52	114.17	134.34	142.46	6.09	0.292
VH:CD	2.23 ^{bc}	2.57 ^c	1.90 ^{ab}	1.80 ^a	0.08	0.016
Villous area, mm^2	181.51	142.79	115.95	126.27	10.11	0.113
Jejunum						
Villous width, μm	81.98 ^a	88.22 ^a	217.67 ^b	81.55 ^a	15.61	<0.01
Villous height, μm	359.13	280.40	285.98	317.56	10.99	0.092
Crypt depth, μm	141.78 ^{bc}	127.50 ^{ab}	149.41 ^c	110.57 ^a	3.13	0.004
VH:CD	2.48 ^b	2.31 ^{ab}	1.92 ^a	3.02 ^c	0.08	0.004
Villous area, mm^2	198.91	141.42	271.49	165.80	18.30	0.061
Ileum						
Villous width, μm	80.61	81.35	72.77	72.30	15.61	0.500
Villous height, μm	218.57	225.29	205.98	235.06	10.95	0.817
Crypt depth, μm	131.90	119.59	132.65	119.47	5.09	0.675
VH:CD	2.23	2.06	1.77	1.87	0.07	0.196
Villous area, mm^2	89.96	97.42	77.61	91.93	6.90	0.828

หมายเหตุ: ^{a,b,c} means values with different superscript letters in the same row are significantly different ($P < 0.05$)

3. ปริมาณเชื้อแบคทีเรียในระบบทางเดินอาหารส่วนท้าย

จากผลการศึกษาพบว่า ปริมาณเชื้อแบคทีเรียในระบบทางเดินอาหารส่วนท้ายของสุกร โดยวิธี rectal swab พบว่า สัดส่วน IDF:sDF ที่เพิ่มขึ้น ไม่ส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณเชื้อแบคทีเรียที่ศึกษา ได้แก่ *E. coli* ($P = 0.694$), *Salmonella* spp. ($P = 0.817$) และ Lactic acid bacteria ($P = 0.720$) ดังแสดงใน ตาราง 18

ตาราง 18 Bacterial count by rectal swab test of pigs fed the experimental diets with different ratio of iDF:sDF at 29 days after weaning (log CFU/g)

Items	Control	iDF:sDF ratio			SEM	P-value
		4	5	6		
<i>Salmonella</i> spp.	5.24	5.12	5.42	5.68	0.24	0.694
<i>E. coli</i>	5.60	5.64	5.71	6.02	0.24	0.817
Lactic acid bacteria	5.12	5.53	5.20	5.26	0.18	0.720



บทที่ 5

บทสรุป

อภิปรายผล

1. คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัตถุดิบที่ศึกษาเพื่อเป็นแหล่งของใยอาหาร

คุณสมบัติทางกายภาพของใยอาหาร เช่น การพองตัวและความสามารถในการอุ้มน้ำ มีความสำคัญกับการเปลี่ยนแปลงของใยอาหารระหว่างที่อยู่ในระบบทางเดินอาหาร ซึ่งจากผลการศึกษาครั้งนี้ พบว่าคุณสมบัติทางกายภาพทั้งการพองตัวและความสามารถในการอุ้มน้ำของผิวถั่วเหลืองมีค่าสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุดิบตัวอื่น ค่าความสามารถการอุ้มน้ำ (WHC) มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับปริมาณของคาร์โบไฮเดรตที่ไม่ใช่แป้งที่ละลายน้ำ (Soluble non-starch polysaccharides; S-NSP) โดยสมการความสัมพันธ์คือ $WHC = 3.50 + 0.0214S-NSP$ ($R^2 = 0.82$, $P < 0.001$) (Ngoc et al., 2012) ค่าความสามารถในการอุ้มน้ำนี้มีความสำคัญต่อการดูดซึมสารอาหาร การควบคุมการอิมของร่างกาย และการเคลื่อนตัวของลำไส้ (Caprita et al., 2010) ส่วนสมบัติทางกายภาพของแกลบดิบที่นำมาศึกษาในการทดลองในสัตว์ (การทดลองที่ 3.2 และ 3.3) มีคุณสมบัติการพองตัวและความสามารถในการอุ้มน้ำต่ำที่สุด ทั้งนี้ค่า WHC ของแกลบดิบที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้ มีค่าต่ำกว่ารายงานของ Jiménez-Moreno et al. (2016) ที่รายงานค่า WHC ของแกลบดิบไว้เท่ากับ 5.51 ± 0.43 g/g DM ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากขนาดอนุภาคที่ใช้ในการทดลองบดผ่านตะแกรงขนาดรูเปิด 2.0 มิลลิเมตร ในขณะที่การทดลองครั้งนี้ผู้วิจัยใช้ตะแกรงขนาดรูเปิด 0.5 มิลลิเมตรเท่านั้น ทำให้การอัดตัวของอนุภาคหนาแน่น แต่ก็ทำให้ความสามารถในการอุ้มน้ำของโครงสร้างใยอาหารต่ำลง (Gupta, & Premavalli, 2010; Ye et al., 2016) อ้างอิงจากการศึกษาของ Majzoobi et al. (2014) โดยได้เปรียบเทียบความสามารถในการอุ้มน้ำของรำข้าวสาลีที่มีขนาดอนุภาคแตกต่างกัน ตั้งแต่ 90 ถึง 1,200 ไมครอน พบว่าเมื่อบดรำข้าวสาลีให้มีขนาดอนุภาคเล็กลง ทำให้ค่าความสามารถในการอุ้มน้ำและการพองตัวของรำข้าวสาลีลดลงสอดคล้องกับ Noort et al. (2010) ที่ลดขนาดอนุภาคของรำข้าวสาลีจาก 1,000 ไมครอน เป็น 75 ไมครอน ทำให้ค่าความสามารถในการอุ้มน้ำลดลงจาก 500% เป็น 250% นอกจากนี้จากการศึกษาของ Sangnark, & Noomhorm (2003) พบว่าขนาดอนุภาคมีความสัมพันธ์เชิงลบกับความสามารถในการอุ้มน้ำ อันเนื่องจากโครงสร้างของใยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำ สูญเสียความสามารถในการกักเก็บน้ำไว้ในโครงสร้าง (Majzoobi et al., 2014) นอกจากนี้เมื่อพิจารณาองค์ประกอบ

ทางเคมีของใยอาหารแล้ว แกลบดิบยังมีปริมาณวัตถุแห้ง ปริมาณใยอาหาร และปริมาณใยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำสูงที่สุด นอกจากนี้ข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย เนื่องจากคนไทยบริโภคข้าวเป็นอาหารหลัก ประเทศไทยสามารถผลิตข้าวเปลือกทั้งข้าวนาปีและนาปรังได้ประมาณ 30-32 ล้านตันต่อปี คิดเป็นพื้นที่เพาะปลูกประมาณ 45% ของพื้นที่การเกษตรทั้งหมด (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2562a) ในกระบวนการสีข้าวนั้น มีผลพลอยหนึ่งคือ แกลบดิบซึ่งคิดเป็นประมาณ 20% ของปริมาณข้าวเปลือก ดังนั้นหากนำแกลบดิบมาใช้เป็นแหล่งของใยอาหารที่สามารถกระตุ้นการทำงานของระบบทางเดินอาหารของสุกรหลังหย่านมได้ จะเป็นการเพิ่มมูลค่าและเพิ่มการใช้ประโยชน์ของแกลบดิบได้ จึงได้นำมาเป็นแหล่งของใยอาหารในการทดลองที่ 2 และ 3 ต่อไป

2. ผลของใยอาหารต่อประสิทธิภาพการผลิตและอัตราการเกิดท้องเสีย

จากผลการศึกษาระดับของใยอาหารต่อประสิทธิภาพการผลิตของสุกรหลังหย่านม โดยให้สุกรหย่านมได้รับอาหารทดลองที่มีระดับใยอาหารที่ 130, 140 และ 150 กรัมต่อกิโลกรัมอาหาร เป็นระยะเวลา 28 วัน พบว่าระดับใยอาหารที่เพิ่มขึ้นทำให้ประสิทธิภาพการใช้อาหารดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P = 0.023$) ในช่วงระยะสัปดาห์แรกของการทดลอง แต่ทั้งนี้สุกรมีปริมาณอาหารที่กินและอัตราการเจริญเติบโตต่อวันเพิ่มขึ้น แต่ไม่มีนัยสำคัญระหว่างกลุ่มทดลอง อีกทั้งในระยะสัปดาห์ที่ 2, 3, 4 และตลอดระยะเวลาการทดลอง (0 ถึง 28 วันหลังหย่านม) ระดับของใยอาหารไม่มีผลต่อประสิทธิภาพการผลิตและอัตราการเกิดท้องเสียของสุกร การมีสัญญาณของการกินที่เพิ่มขึ้นในระยะสัปดาห์แรกหลังจากการหย่านมเป็นสิ่งที่ดี เนื่องจากสัปดาห์แรกหลังจากการหย่านม มักพบปัญหาการกินอาหารต่ำ โดยเฉพาะในช่วง 48 ชั่วโมงแรกที่ดีถือว่าเป็นช่วงเวลาวิกฤติ ทำให้เกิดผลกระทบเชิงลบกับสัณฐานวิทยาของลำไส้เล็ก ส่งผลต่อการติดเชื้อ การย่อยและการดูดซึมสารอาหาร และการเจริญเติบโตของสุกรชะงักหรือถดถอยตามมา (Dong, & Pluske, 2007) หลายงานทดลองการเพิ่มระดับใยอาหารสามารถส่งผลต่อปริมาณการกินอาหารของสัตว์ ทั้งนี้การเพิ่มของปริมาณอาหารที่กิน และอัตราการเจริญเติบโต เกี่ยวข้องกับปริมาณลิกนินมากกว่าปริมาณเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส (Adibmoradi et al., 2016) ยกตัวอย่างเช่น การทดลองของ Gerritsen et al. (2012) ที่พบว่าทำให้พอลิแซ็กคาไรด์ที่ไม่ใช่แป้งชนิดไม่ละลายน้ำ (insoluble non-starch polysaccharides) โดยการเสริมแกลบข้าวโอ๊ตผสมกับฟางข้าวสาลีระดับ 15% ส่งผลให้มีปริมาณการกินอาหารมากขึ้นในสัปดาห์แรกหลังหย่านม และจากการศึกษาของ Superchi et al. (2017) ได้ใช้เซลลูโลสบริสุทธิ์ 1% เป็นแหล่งของใยอาหาร พบว่าทำให้ปริมาณการกินอาหาร อัตราการเจริญเติบโตต่อวัน และประสิทธิภาพการใช้อาหารดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และจากการทดลองของ Hanczakowska et al. (2008) ศึกษาการเสริมเซลลูโลสที่ระดับ

0, 0.5, 1.5% และ 2.0% ในอาหารพื้นฐาน (Basal diet) พบว่า สุกรที่ได้รับเซลลูโลสในระดับ 0, 0.5, 1.5 และ 2.0% มีอัตราการเจริญเติบโตต่อวันสูงกว่ากลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ คือ 190, 187, 203 และ 210 กรัมต่อวัน ตามลำดับ อย่างไรก็ตามการทดลองนี้ระดับของใยอาหารไม่ส่งผลกระทบต่อสมรรถภาพการผลิตโดยรวมของสุกร ซึ่งให้ผลคล้ายกับงานทดลองหลายงาน เช่น การใช้เกลบข้าวโอ๊ตผ่านกระบวนการ 2 และ 4% (Mateos et al., 2006) เกลบข้าวโอ๊ต 2% (Kim et al., 2008) เกลบข้าวโอ๊ต 5% ร่วมกับฟางข้าวสาลี 10% (Gerritsen et al., 2012) หรือ Stabilized rice bran 10% (Herfel et al., 2013) ล้วนแต่ไม่ส่งผลต่ออัตราการเจริญเติบโตและสมรรถภาพการผลิตของสุกร

นอกจากนี้การทดลองครั้งนี้ยังพบว่า ระดับของใยอาหารไม่ส่งผลต่อการเกิดการท้องเสียของสุกรตลอดการทดลอง สอดคล้องกับการศึกษาของ Pluske et al. (2014) ที่ใช้ใยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำ โดยการใช้เซลลูโลสจากเปลือกไม้ที่ระดับ 0, 30, 60 และ 90 กรัมต่อกิโลกรัมอาหาร เป็นระยะเวลา 2 สัปดาห์หลังการหย่านม ไม่ส่งผลทำให้การเกิดท้องเสียและจำนวนสุกรที่ต้องใช้ยารักษาอาการท้องเสีย และการทดลองของ Yu et al. (2016) ที่มีการใช้แหล่งวัตถุดิบของใยอาหารแตกต่างกัน ได้แก่ รำข้าวสาลี ผีเสื้อเหือง เกลบข้าวโอ๊ต กากปาล์มเนื้อใน และเยื่อไผ่ (bamboo meal) วัตถุดิบทั้งหมดบดผ่านตะแกรงขนาดรูเปิด 1.0 มิลลิเมตร ก่อนนำมาผสมอาหารให้มีระดับ NDF ใกล้เคียงกัน คือ 14.2-15.2% เปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม (NDF = 11.9%) ผลการทดลองพบว่าอัตราการเกิดท้องเสียไม่มีความแตกต่างกัน นอกจากนี้อัตราการเกิดท้องเสียยังสอดคล้องกับผลการทดลองระดับใยอาหารต่อปริมาณเชื้อแบคทีเรียกลุ่ม *E. coli*, *Salmonella* spp. และ Lactic acid bacteria ในระบบทางเดินอาหารส่วนท้าย ด้วยใช้วิธี plate count ด้วย selected media agar ซึ่งก็ไม่พบความแตกต่างของปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ในระบบทางเดินอาหารของสุกรทั้งในลำไส้เล็กส่วนปลาย ลำไส้และลำไส้ใหญ่ของสุกร (Table 14) ซึ่งสภาพแวดล้อมของการเลี้ยงมีความสัมพันธ์ต่อปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ในทางเดินอาหาร โดยแนวคิดนี้สนับสนุนโดยการศึกษานี้ของ Montagne et al. (2012) โดยพบว่าภายใต้การเลี้ยงที่มีการสุขาภิบาลที่ดี การเพิ่มระดับของใยอาหารจาก 121 เป็น 169 กรัมต่อกิโลกรัม ไม่ส่งผลต่อการเกิดท้องเสียของสุกร แต่ถ้าหากเป็นสภาพแวดล้อมที่มีสุขาภิบาลไม่ดี (ไม่ทำความสะอาดและฆ่าเชื้อก่อนนำสุกรเข้าเลี้ยง) การให้ระดับใยอาหารที่ 169 กรัมต่อกิโลกรัม มีแนวโน้มช่วยลดการเกิดท้องเสียจากเชื้อกลุ่ม *Enterococcus* ของสุกรหลังหย่านม ($P = 0.07$) ซึ่งการทดลองของผู้วิจัยนี้มีการสุขาภิบาลที่ดี มีการฆ่าเชื้อด้วยน้ำยาฆ่าเชื้อก่อนการทดลอง และทำความสะอาดคอกเป็นประจำทุกวันในระหว่างการทดลอง อาจช่วยปริมาณเชื้อในสภาพการเลี้ยงในโรงเรือน ทำให้อิทธิพลของระดับใยอาหาร

ไม่ส่งผลต่อการลดอัตราการเกิดการท้องเสียของสุกร แต่ก็ยังมีหลายงานวิจัยที่พบว่าการใช้โยอาอาหารในระดับที่สูงทำให้ลดการท้องเสียในสุกรหลังหย่านม เช่น การศึกษาของ Hanczakowska et al. (2008) ที่มีการใช้เซลลูโลสบริสุทธิที่ระดับ 0, 0.5, 1.5 และ 2.0% ในอาหารพื้นฐาน พบว่าจำนวนสุกรที่เกิดการท้องเสียลดลง จาก 25 ตัว เหลือเพียง 8 ตัว และลดเปอร์เซ็นต์การคัดสุกรทิ้ง (ไม่มีรายงานการเปรียบเทียบทางสถิติ)

เมื่อได้ระดับการใช้โยอาอาหารที่เหมาะสมที่ระดับ 140 กรัมต่อกิโลกรัม ในอาหารสุกรหลังหย่านม และนำมาศึกษาอิทธิพลของสัดส่วน IDF:SDF ในอาหาร (การทดลองที่ 3) โดยทำการทดลองในสุกรหย่านมให้อาหารที่มีสัดส่วนของ IDF:SDF ที่ระดับ 3:1 (กลุ่มควบคุม), 4:1, 5:1 และ 6:1 เป็นระยะเวลา 28 วัน พบว่าสัดส่วน IDF:SDF มีแนวโน้มทำให้ปริมาณอาหารที่กินลดลงเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม ($P = 0.070$) แต่ถ้าพิจารณาระหว่างสุกรที่ได้รับอาหาร R4, R5 และ R6 จะเห็นว่าเมื่อเพิ่มสัดส่วน IDF:SDF เพิ่มขึ้น มีแนวโน้มทำให้ปริมาณอาหารที่กินต่อวันเพิ่มขึ้น และเมื่อคำนวณประสิทธิภาพการผลิตของสุกรตลอดระยะเวลาการทดลอง (0 ถึง 28 วันหลังการหย่านม) พบว่า สุกรที่ได้รับอาหารทดลอง R4 มีประสิทธิภาพการผลิตดีกว่ากลุ่มอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P = 0.035$) ซึ่งจากผลการทดลองดังกล่าวจะเห็นได้ว่าสัดส่วนของ IDF:SDF ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการผลิตของสุกรหลังหย่านมโดยรวม ซึ่งอาหารทดลองทุกสูตรได้คำนวณให้มีคุณค่าทางโภชนาใกล้เคียงกัน ดังนั้นอาจเกิดจากการประโยชน์ของสารอาหารที่มีความแตกต่างกัน โดยแนวคิดนี้สนับสนุนด้วยผลการศึกษาของ Pascoal et al. (2015) ที่พบว่าสุกรอายุ 21-35 วัน ที่ได้รับอาหารที่มีเซลลูโลสเป็นแหล่งของ IDF ที่ระดับ 1.5% ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการใช้อาหาร เมื่อเทียบกับกลุ่มที่ได้รับอาหารสูตรที่มีเศษเปลือกส้ม (citrus pulp) ซึ่งเป็นแหล่งของ SDF ที่ระดับ 9% โดยอาหารทดลองคำนวณให้มีระดับของ DF ใกล้เคียงกัน (ระหว่าง 21.73-23.94%) ทั้งนี้จากการวิจารณ์ผลได้ให้เหตุผลว่าการเพิ่มระดับของโยอาอาหารที่ไม่ละลายน้ำ ทำให้เพิ่มการย่อยได้ของโยอาอาหารชนิดละลายน้ำสูงขึ้น และทำให้มีประสิทธิภาพการใช้อาหารที่ดีขึ้น

3. ผลของโยอาอาหารต่อการย่อยได้แบบปรากฏของโภชนา

การศึกษาการย่อยได้ของโภชนาครั้งนี้ใช้วิธีการศึกษาแบบ indirect method โดยให้สุกรปรับตัวในกรงขังเดี่ยวสำหรับศึกษาค่าการย่อยได้ (metabolic cage) โดยระยะของการทดลอง ประกอบด้วยระยะปรับตัว ซึ่งสุกรจะได้รับอาหารทดลองที่มีระดับของโยอาอาหารแตกต่างกัน (DF = 130, 140 และ 150 กรัมต่อกิโลกรัมอาหาร) ให้สุกรกินอาหารปริมาณ 4% ของน้ำหนักตัว เป็นระยะเวลา 3 วัน และระยะเก็บตัวอย่าง 4 วัน โดยใช้โครมิกซ์ออกไซด์ ปริมาณ 0.5% เป็นสารบ่งชี้ในอาหาร และเก็บมูลสุกรที่มีสีเขียวของโครมิกซ์ออกไซด์ นำมูลสุกรมาอบแห้ง

และวิเคราะห์หาความเข้มข้นของโครมิกซ์ออกไซด์ และวิเคราะห์ปริมาณโภชนะเพื่อคำนวณหาค่าการย่อยได้ของโภชนะ (%) จากการศึกษาครั้งนี้พบว่าระดับของใยอาหารไม่ส่งผลต่อการย่อยได้ของพลังงานและโปรตีน แต่มีแนวโน้มส่งผลต่อการย่อยได้ของไขมัน ($P = 0.082$) และเยื่อใยหยาบ ($P = 0.074$)

จากรายงานการวิจัยที่ผ่านมาพบว่า การเพิ่มระดับของเยื่อใยในอาหาร ส่งผลทำให้การใช้ประโยชน์ได้ของสารอาหารอื่นลดลง (Raj et al., 2006; Stanogias, & Pearce, 1985; Sciellour et al., 2018; Zijlstra et al., 2012; Lindberg, 2014) สำหรับการย่อยได้ของโปรตีนและพลังงานก็เช่นเดียวกัน โดยจากการตรวจเอกสารพบว่าค่าการย่อยได้ของสุกรระยะหลังหย่านมสำหรับโปรตีนรวม อยู่ที่ประมาณ 37 ถึง 84% และพลังงานรวมอยู่ระหว่าง 47 ถึง 87% (นุจิรา ทักสินานันต์, 2553; Medel et al., 1999; Jung et al., 2003; Wang et al., 2016; Yu et al., 2016; Wu et al., 2018; Ao, & Kim, 2019; Ma et al., 2019) ถึงแม้ว่าผลการศึกษาครั้งนี้จะไม่พบความแตกต่างทางสถิติของการย่อยได้ของโปรตีนและพลังงาน แต่เมื่อเพิ่มระดับของใยอาหาร การย่อยได้ของโปรตีนและพลังงานรวมมีค่าเฉลี่ยลดลง สอดคล้องกับหลายงานวิจัยที่ให้ผลไปในแนวทางเดียวกัน ยกตัวอย่างงานทดลองของ Wu et al. (2018) ศึกษาการใช้เซลลูโลสบริสุทธิ์ 5.1% ทดแทนแป้งข้าวโพดในอาหารควบคุมที่เป็น semi-purified diet พบว่าการย่อยได้ของพลังงานลดลง 5.32% ($P < 0.00$) และโปรตีนลดลง 1.91% ($P = 0.493$) และการทดลองของ Schedle et al. (2008) รายงานว่าเมื่อใช้เซลลูโลสและลิกนินในอาหารสุกรหลังหย่านม ทำให้การย่อยได้ของโปรตีนลดลง -3.5% ซึ่งเมื่อพิจารณาองค์ประกอบใยอาหารของແລບข้าว พบว่าແລบข้าวมีเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบมากที่สุดประมาณ 32.67% และลิกนิน 18.81% (Ma'ruf et al., 2017) นอกจากนี้ Wang et al. (2016) พบว่าเมื่อใช้กากหัวชูการ์บีทในสูตรอาหารสุกรหลังหย่านมที่ระดับ 240 กรัมต่อกิโลกรัมอาหาร ทำให้การย่อยได้ของโปรตีนลดลง 9.11% ($P < 0.001$) เมื่อเทียบกับอาหารสูตรควบคุมที่ไม่มีการใช้กากหัวชูการ์บีท สาเหตุที่ทำให้ค่าการย่อยได้ของโปรตีนลดลง เนื่องมาจากระดับใยอาหารเพิ่มขึ้น ทำให้การหลังของสารคัดหลั่งและมีโปรตีนหลุดลอกจากลำไส้มากขึ้น โดยเฉพาะใยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำ ที่กระตุ้นการหลั่งเอนไซม์จากตับอ่อน (Langlois et al., 1987) นอกจากนี้ยังอาจเกิดจากการขัดขวางการดูดซึมของโปรตีนและกรดอะมิโนภายในลำไส้เล็ก (Mosenthin et al., 1994; Leterme et al., 1998) ด้วยปัจจัยเหล่านี้ทำให้มีการขับโปรตีนออกทางมูลมากขึ้น (endogenous protein loss) และส่งผลให้การย่อยได้แบบปรากฏของโปรตีนลดลง อีกปัจจัยหนึ่งคือการรบกวนโดยโปรตีนจากจุลินทรีย์ในระบบทางเดินอาหารส่วนท้าย โดยการเพิ่มระดับของใยอาหารส่งผลให้โปรตีนจากแบคทีเรีย (bacterial protein

mass) เพิ่มขึ้น ทำให้มีการขับออกของไนโตรเจนสูงขึ้น ส่งผลให้เมื่อคำนวณการย่อยได้จากการเก็บตัวอย่างมูล ค่าการย่อยได้ของโปรตีนจึงลดลง (Jha, & Berrocosa, 2016; Bindelle et al., 2008)

นอกจากนี้การเพิ่มระดับของใยอาหาร จาก 130 กรัมต่อกิโลกรัมเป็น 140 กรัมต่อกิโลกรัม ทำให้การย่อยได้ของไขมันเพิ่มขึ้น แต่เมื่อเพิ่มระดับ DF เป็น 150 กรัมต่อกิโลกรัม กลับมีแนวโน้มทำให้การย่อยได้ของไขมันลดลง ซึ่งจากการตรวจเอกสารพบว่าค่าการย่อยได้แบบปรากฏของไขมันอยู่ระหว่าง 63 ถึง 78% ในสูตรอาหารที่มีข้าวโพดและกากถั่วเหลืองเป็นวัตถุดิบหลัก (corn-soybean based diet) (Medel et al., 1999; Zijlstra et al., 2012; Wu et al., 2018) จากบทวิจารณ์ของ Dégen et al. (2007) ได้อธิบายว่าการเพิ่มระดับของใยอาหารในสูตรอาหารทำให้ความเข้มข้นของพลังงานต่ำลง ทำให้ต้องเพิ่มระดับการใช้แหล่งของไขมัน และจากการที่แนวโน้มที่การย่อยได้ของไขมันเพิ่มขึ้นนั้นอาจเนื่องมาจากการหลั่งเอนไซม์ กรดน้ำดี และกรดไฮโดรคลอริกมากขึ้น เมื่อมีปริมาณใยอาหารในสูตรเพิ่มขึ้น ส่งผลทำให้การย่อยของไขมันดีขึ้น (Hetland et al. 2003)

สำหรับการย่อยได้ของเยื่อไผ่นั้นมีความผันแปรมากกว่าสารอาหารชนิดอื่น ทั้งนี้เกี่ยวข้องกับหลายปัจจัย เช่น ชนิด ปริมาณ และองค์ประกอบและโครงสร้างทางกายภาพของใยอาหารชนิดนั้นๆ ทำให้คุณสมบัติทางกายภาพของใยอาหารแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน โดยเฉลี่ยการย่อยได้ของเยื่อไผ่ในสุกรโตเต็มวัยอยู่ที่ประมาณ 40 ถึง 60% (นุจิรา ทักษิณานันต์, 2553; Noblet, & Goff., 2001; Bindelle et al., 2008) จากผลการศึกษาพบว่าค่าการย่อยได้ของเยื่อไผ่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มระดับของใยอาหารขึ้น อาจเนื่องมาจากปริมาณเพคตินในสูตรอาหาร ซึ่งเป็นแหล่งของใยอาหารชนิดละลายน้ำในอาหารทดลองที่เพิ่มขึ้น ทำให้การย่อยได้ของเยื่อไผ่เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งใยอาหารชนิดละลายน้ำได้เช่น เพคติน สามารถหมักย่อยและใช้ประโยชน์โดยจุลินทรีย์ภายในทางเดินอาหารส่วนท้าย ทำให้การย่อยได้ของใยอาหารชนิดละลายน้ำมากกว่าใยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำ เช่น เซลลูโลส หรือเฮมิเซลลูโลส (Noblet, & Goff, 2001; Zijlstra et al., 2012) และการศึกษาของ Pascoal et al. (2012) ที่เมื่อเพิ่มระดับของใยอาหารชนิดละลายน้ำจากเศษเปลือกส้ม (citrus pulp) ที่ระดับ 9% ในสูตรอาหารสุกรหลังหย่านม (sDF = 4.26%) ทำให้การย่อยได้ของใยอาหารชนิดละลายน้ำ เพิ่มขึ้น 10.80% และการย่อยได้ของเยื่อไผ่เพิ่มสูงขึ้น 1.56% เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม (sDF = 1.60%)

4. ผลของการใช้ใยอาหารต่อการพัฒนาระบบทางเดินอาหารและสัณฐานวิทยาของลำไส้เล็กของสุกรหลังหย่านม

จากผลการศึกษาครั้งนี้พบว่า น้ำหนักของอวัยวะของระบบทางเดินอาหารและอวัยวะเกี่ยวข้องของสุกรที่ได้รับ IDF:sDF ที่ระดับ 4, 5 และ 6 เปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม (IDF:sDF = 3) พบว่าน้ำหนักของตับ กระเพาะอาหาร ลำไส้เล็กและลำไส้ใหญ่ เมื่อเทียบน้ำหนักตัวไม่ตอบสนองต่อสัดส่วน IDF:sDF ที่เพิ่มขึ้น (ควบคุมระดับ DF=140 กรัมต่อกิโลกรัมใกล้เคียงกันทุกสูตร แต่เมื่อให้อาหารทดลองที่มีใยอาหารระดับที่ระดับต่างกันคือ 130, 140 และ 150 กรัมต่อกิโลกรัม เป็นระยะเวลา 28 วัน (หลังหย่านม) พบว่า เมื่อเพิ่มระดับใยอาหารขึ้นเป็น 150 กรัมต่อกิโลกรัม ทำให้น้ำหนักของลำไส้เล็กเมื่อเทียบน้ำหนักตัวลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบน้ำหนักของอวัยวะกับงานทดลองก่อนหน้านี้ ดังแสดงใน ตาราง 19

จากผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า ระดับของใยอาหารมีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของขนาดอวัยวะที่เกี่ยวข้องกับการย่อยอาหาร สอดคล้องกับการศึกษาของ Nepomuceno et al. (2016) โดยศึกษาในสุกรที่ได้รับอาหารที่มีระดับของ NDF แตกต่างกัน คือ 8.5, 10.5, 12.5, 14.5 และ 16.5% ในสูตรอาหาร ที่อายุ 42 วัน พบว่าระดับของ NDF ทำให้น้ำหนักของลำไส้เล็กลดลง 8% ($P = 0.847$) และเพิ่มน้ำหนักของกระเพาะอาหาร 24% ($P = 0.0001$) และเพิ่มน้ำหนักของลำไส้ใหญ่ 18% ($P = 0.0283$) โดยสมการความสัมพันธ์ของปริมาณ NDF และน้ำหนักของกระเพาะอาหาร คือ $Y = 0.0091X + 0.7225$, $R^2 = 0.86$ และสมการความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณ NDF และน้ำหนักของลำไส้ใหญ่ คือ $Y = 0.0144X + 1.5135$, $R^2 = 0.84$ น้ำหนักของลำไส้เล็กที่ลดลงนั้น เคยรายงานไว้ในงานวิจัยของ Skiba et al. (2005) ที่ให้สุกรหลังหย่านมกินอาหารควบคุม (crude fiber = 3.79%) เปรียบเทียบกับอาหารที่มีหญ้าสด (grass meal) ที่ระดับ 10 และ 20% (crude fiber = 5.35 และ 7.66%) พบว่าน้ำหนักและความยาวของลำไส้เล็กลดลง โดยผู้เชี่ยวชาญเห็นว่า อาจจะเกี่ยวข้องกับการไหลผ่านของอาหารที่มีระดับใยอาหารสูงเร็วกว่าสูตรควบคุม ทำให้ชั้นกล้ามเนื้อของลำไส้พัฒนาได้น้อย (Goff et al., 2002) และจากรายงานของ Gerritsen et al. (2012) การให้สุกรหย่านมกินอาหารที่มีเกลบข้าวโอ๊ตผสมฟางข้าวสาลี เป็นแหล่งใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำ ที่ระดับ 15% (15% iNSP; crude fiber= 7.4%) ทำให้กระเพาะอาหารเมื่อเทียบน้ำหนักตัวใหญ่ขึ้น เมื่อเทียบกับอาหารควบคุมที่ประกอบด้วยธัญพืชเป็นหลัก (0.89% และ 0.76% ของน้ำหนักตัว; $P = 0.004$) และน้ำหนักของลำไส้เล็ก และลำไส้ใหญ่เมื่อเทียบน้ำหนักตัวลดลง เมื่อเทียบกับอาหารควบคุม (ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ) ส่วนการศึกษาของ Ma et al. (2002) พบว่าสุกรที่กินอาหารสูตรที่มีรำสาลี 5% และสูตรที่มีกากซูการ์บีท 5% มีน้ำหนักของตับลดลง (656.7 และ 634.0 กรัม) เมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุมที่ให้อาหาร

ที่มีวัตถุดิบหลักเป็นข้าวโพด-กากถั่วเหลือง (778.0 กรัม) ส่วนน้ำหนักของอวัยวะอื่นๆ เช่น กระเพาะอาหาร ลำไส้เล็ก และลำไส้ใหญ่ ไม่มีความแตกต่างกันระหว่างกลุ่มทดลอง

ตาราง 19 Comparison organ weight of this result with previous research in weaning pigs (% of body weight)

Sources	Liver	Stomach	Small intestine	Large intestine
<u>Experimental result</u>				
iDF:sDF	2.48-2.69	0.91-1.04	4.67-4.73	2.60-2.83
Dietary fiber level	2.67-2.79	0.69-0.76	3.63-4.34	1.82-2.07
<u>Previous research</u>				
Ma et al. (2002) ¹	2.9-3.2	0.8-0.9	4.5-5.7	2.0-2.5
Pluske et al. (2003) ²	-	0.8-0.9	5.4-6.5	1.4-2.3
Nepomuceno et al. (2016) ³	2.65-3.42	0.75-0.97	4.60-5.06	1.61-1.94

หมายเหตุ: ¹ studied in weaning pigs fed corn-soybean based diet (control diet), 5% wheat bran and 5% sugar beet pulp for 28 days after weaning

² studied in weaned pigs fed 6 different fiber sources (DF level ranging from 27 to 300 g/kg diet)

³ Studied in weaned pigs (42 days of age) fed corn-soybean based diet with NDF level at 8.5, 10.5, 12.5, 14.5 and 16.5%

นอกจากการทดลองในสุกรแล้ว ในสัตว์ทดลองชนิดอื่นก็ให้ผลใกล้เคียงกัน เช่น จากการศึกษาในหนูทดลองที่ได้รับอาหารที่มีระดับใยอาหารที่ 257 กรัมต่อ กิโลกรัม เปรียบเทียบกับอาหารที่มีระดับใยอาหารต่ำ คือ 56 กรัมต่อ กิโลกรัม พบว่าน้ำหนักต่อ น้ำหนักตัวของกระเพาะ ลำไส้เล็ก ไส้ติ่ง และลำไส้ใหญ่ของกลุ่มที่ได้รับอาหารระดับใยอาหารสูงมีค่าสูงกว่ากลุ่มที่ได้รับอาหารที่มีระดับใยอาหารต่ำ (Zhao et al., 1995)

การเพิ่มน้ำหนักของอวัยวะที่เกี่ยวข้องกับการย่อยและดูดซึมสารอาหาร โดยเฉพาะ กระเพาะอาหารและลำไส้ อาจเนื่องมาจากลักษณะทางกายภาพและชนิดของใยอาหารที่เป็น

องค์ประกอบของวัตถุดิบที่ใช้เป็นแหล่งใยอาหาร เป็นผลมาจากการปรับตัวต่อความฟามของอาหารของตัวสุกรเอง ทำให้สัตว์กินอาหารมากขึ้น (Raj et al., 2005; Skiba et al., 2005) หรือมีการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมของสุกรโดยใช้เวลาการกินอาหารนานขึ้น (ปิยะณัฐ เตี่ยมเพ็. และคณะ, 2561) ส่วนน้ำหนักของลำไส้ใหญ่ที่มากขึ้นเนื่องมาจากการเพิ่มการดูดซึมน้ำจากโครงสร้างของใยอาหาร ซึ่งเป็นหน้าที่หลักของลำไส้ใหญ่ และจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ ที่ทำการย่อยโภชนะที่เหลือมาจากทางเดินอาหารส่วนต้น (Skiba et al., 2005) ปัจจัยอีกประการหนึ่งคือการทำงานในการหลั่งสารคัดหลั่ง เมือก และเอ็นไซม์ที่มากขึ้นเมื่อสัตว์ได้รับอาหารที่มีใยอาหารเพิ่มขึ้น ทำให้อวัยวะที่เกี่ยวข้องกับการย่อยและการดูดซึมสารอาหารมีขนาดใหญ่ขึ้น (Raj et al., 2005)

สำหรับทางด้านสัณฐานวิทยาของลำไส้เล็กนั้น จากการศึกษาครั้งนี้สุกรหลังหย่านมที่ได้รับอาหารที่มีสัดส่วนของ IDF:SDF แตกต่างกันคือ 3 (กลุ่มควบคุม), 4, 5 และ 6 นั้น มีแนวโน้มทำให้สัดส่วนของ VH:CD และความสูงของวิลโลในลำไส้เล็กส่วนต้นลดลง ($P = 0.016$ และ 0.083) นอกจากนี้การให้สุกรหลังหย่านมกินอาหารที่มีระดับของใยอาหารแตกต่างกัน คือ 130, 140 และ 150 กรัมต่อกิโลกรัม ทำให้สัดส่วน VH:CD ของลำไส้เล็กส่วนปลายมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ($P = 0.062$) จะเห็นว่าประสิทธิภาพการผลิตของสุกรมีแนวโน้มดีกว่า เมื่อระดับใยอาหารเพิ่มขึ้น ($P = 0.317$) สอดคล้องกับบทวิจารณ์ของ Hanczakowska et al. (2008) การเพิ่มความสูงของวิลโลและสัดส่วน VH:CD ทำให้สุกรการย่อยและการดูดซึมสารอาหารได้ดีขึ้น และส่งผลดีต่อสมรรถภาพการผลิตของสัตว์ ซึ่งจากการรวบรวมข้อมูลสัดส่วน VH:CD ในช่วงอายุการเก็บตัวอย่างที่ใกล้เคียงกับการทดลองของผู้วิจัย (อายุสุกร 49 วัน) โดยลำไส้เล็กส่วนต้นมีค่า VH:CD อยู่ระหว่าง 1.1-1.8 ลำไส้เล็กส่วนกลางมีค่าอยู่ระหว่าง 1.79-2.77 และลำไส้เล็กส่วนท้ายมีค่าอยู่ระหว่าง 1.62-3.60 (Adam et al., 2019; Li et al., 2018; Lu et al., 2008)

โดยจากการศึกษาของ Vente-Spreewenbergh et al. (2003) ชี้ให้เห็นว่าความสูงของวิลโลลดลงในลำไส้เล็กส่วนต้นและส่วนกลาง หลังจากหย่านม 7 วัน ($P < 0.001$) ในขณะที่ความลึกของคริปต์เพิ่มขึ้นหลังจากหย่านมเช่นกัน ($P < 0.001$) ซึ่งความสูงของวิลโลมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับปริมาณอาหารที่กิน และการทำงานของเอ็นไซม์ที่สร้างจากบรัชเบอร์เดอร์ (brush-border enzymes) และจากการศึกษาของ Hanczakowska et al. (2008) พบว่า ความสูงของวิลโลในลำไส้เล็กส่วนท้าย ในกลุ่มสุกรที่ให้เซลลูโลสในอาหารพื้นฐานที่ระดับ 1.5 และ 2.0% (339 และ 348 μm) สูงกว่ากลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (308 μm) ซึ่งค่าสัดส่วน VH:CD ที่เพิ่มขึ้นนี้จะช่วยป้องกันทางเดินอาหารส่วนท้าย จากการเพิ่มจำนวนของแบคทีเรียก่อโรค

อีกทั้งความสูงของวิลโล มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับปริมาณการกินอาหารและมีความสัมพันธ์เชิงลบกับอัตราการเกิดท้องเสียหลังหย่านมอีกด้วย (Vente-Spreewenbergh et al., 2003)

5. ผลของการใช้ใยอาหารต่อการปริมาณเชื้อแบคทีเรียในระบบทางเดินอาหารส่วนท้าย

จากการศึกษาได้ศึกษาทั้งสองการทดลองคือ การทดลองที่สุกรได้รับอาหารที่มีสัดส่วนของ IDF:sDF แตกต่างกัน คือ 3 (กลุ่มควบคุม), 4, 5 และ 6 นั้น (การทดลองที่ 3.2) และการทดลองให้สุกรที่ได้รับอาหารที่มีระดับของใยอาหารแตกต่างกันคือ 130, 140 และ 150 กรัมต่อกิโลกรัม เป็นระยะเวลา 28 วัน (หลังหย่านม) ใช้เทคนิค plate count โดยใช้ selective media agar โดยศึกษาเชื้อแบคทีเรีย 2 กลุ่มคือ โดยแบคทีเรียที่เป็นประโยชน์กลุ่มผลิตกรดแลคติก (Lactic acid bacteria) แบคทีเรียกลุ่มที่เป็นสาเหตุของโรคท้องเสียในสุกรหย่านมคือ *Salmonella* spp. และ *E. coli* (Beers-Schreurs et al., 1992; Jha, & Berrocso, 2016; Lee et al., 2016; Sun, & Kim, 2017) และกลุ่มที่สองคือแบคทีเรียกลุ่ม Lactic acid bacteria เป็นแบคทีเรียที่มีหน้าที่รักษาสมดุลของระบบนิเวศน์ของแบคทีเรียในทางเดินอาหาร และเป็นปราการป้องกันลำไส้และเยื่อเมือกของเชื้อแบคทีเรียก่อโรค (Denev, 2006) จากการศึกษารังนี้พบว่าทั้งระดับของใยอาหารและสัดส่วน IDF:sDF ไม่ส่งผลต่อมีปริมาณแบคทีเรียทั้ง *E. coli*, *Salmonella* spp. และ Lactic acid bacteria (ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ) ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อจำนวนและสัดส่วนของแบคทีเรียในทางเดินอาหารมีหลายปัจจัยเช่น อายุ ช่วงระยะการเจริญเติบโต ตำแหน่งของทางเดินอาหารที่เก็บตัวอย่าง และโดยเฉพาะอย่างยิ่งชนิดและลักษณะโครงสร้างของใยอาหาร ซึ่งแบคทีเรียใช้เป็นสารตั้งต้นสำหรับการหมักย่อย (Montagne et al., 2003) ซึ่งก่อให้เกิดสภาวะที่เป็นกรดและช่วยควบคุมแบคทีเรียกลุ่มที่ก่อโรค โดยใยอาหารกลุ่ม IDF สามารถเกิดการหมักย่อยอย่างช้าๆ ในส่วนท้ายของทางเดินอาหาร ในขณะที่ใยอาหารกลุ่ม sDF จะเกิดการหมักย่อยอย่างรวดเร็วบริเวณลำไส้ส่วนต้น (Freire et al., 2000)

ใยอาหารมีคุณสมบัติเป็นโพรไบโอติก คือส่งเสริมการเจริญของแบคทีเรียกลุ่มที่มีประโยชน์ในระบบทางเดินอาหาร เช่นกลุ่ม *bifidobacterium* และ *lactobacilli* โดยกลุ่ม *lactobacilli* เป็นแบคทีเรียที่พบมากในลำไส้เล็ก ขณะที่แบคทีเรียกลุ่ม *bifidobacterium* เป็นแบคทีเรียที่พบมากในลำไส้ใหญ่ นอกจากนี้ใยอาหารยังมีผลด้านการเจริญของแบคทีเรียก่อโรค (Chen et al., 2013) จากการศึกษานี้ของ Molist et al. (2009) ได้ศึกษาปริมาณของแบคทีเรียจากมูลสุกรด้วยเทคนิค real-time PCR ของสุกรที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยใยอาหารกลุ่ม IDF (รำข้าวสาลี 8%), sDF (กากชูการ์บีท 6%) และใช้ IDF ร่วมกับ sDF คือใช้รำข้าวสาลี 4% กับกากชูการ์บีท 3% ที่ระยะ 15 วันหลังหย่านม ทำให้จำนวนของ Enterobacteria ลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่ม

ควบคุม ในขณะที่จำนวนของ *Lactobacilli* ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณของ กรดบิวทิริกที่เพิ่มขึ้นเมื่อมีการใช้ใยอาหารทั้งสามสูตร จึงอาจเกิดความเป็นกรดของกรดบิวทิริก ช่วยยับยั้งการเจริญของ *Enterobacteria* ได้ สอดคล้องกับการทดลองของ Chen et al. (2013) ที่ศึกษาปริมาณเชื้อแบคทีเรียด้วยเทคนิค real-time PCR พบว่าสูตรหลังหยานมที่ได้รับอาหารที่มี รำข้าวสาลีที่ระดับ 10% ในสูตรอาหาร ส่งผลทำให้ปริมาณเชื้อ *E. coli* ในลำไส้ใหญ่ลดลง และเพิ่ม ปริมาณเชื้อ *Bifidobacterium* เมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม ในขณะที่แบคทีเรียกลุ่ม *Lactobacillus* ไม่มีการเปลี่ยนแปลง และจากการศึกษาของ Pluske, & Kim (2014) พบว่าการให้ใยอาหารจาก wood cellulose ระดับ 0, 30, 60 และ 90 กรัมต่อกิโลกรัมอาหาร ในอาหารสูตรหลังหยานมที่ได้รับ การถ่ายเชื้อ Enterotoxigenic *E. coli* พบว่า สามารถการเพิ่มระดับการใช้ใยอาหารจาก wood cellulose สามารถลดปริมาณเชื้อ *E. coli* ที่ขับออกทางมูลในวันที่ 9 หลังหยานมได้ และการศึกษา การเพิ่มระดับของ NDF ในอาหารด้วยใยอาหารต่างชนิดกัน ได้แก่ รำข้าวสาลี ผัสดั่วเหลือง แกลบ ข้าวโอ๊ต กากปาล์มเนื้อในสกัดน้ำมัน และเยื่อไม้ไผ่ (bamboo meal) โดยระดับของสูตรควบคุม และสูตรที่เพิ่มแหล่งใยอาหารชนิดต่างๆ เป็น 11.9 และ 14.2-15.2% และศึกษาปริมาณแบคทีเรีย ด้วยเทคนิค real-time PCR ในมูลสูตรที่ 28 วันหลังหยานม พบว่าระดับของ NDF ที่เพิ่มขึ้นไม่ ส่งผลต่อปริมาณแบคทีเรียกลุ่ม *Lactobacillus* spp. และปริมาณแบคทีเรียทั้งหมด (total bacteria) ในมูล แต่ปริมาณของแบคทีเรียกลุ่ม *Bifidobacterium* spp. ในกลุ่มที่ใช้รำข้าวสาลีเป็น แหล่งใยอาหารมีปริมาณมากกว่ากลุ่มอื่น ซึ่งเป็นผลมาจากปริมาณของ arabinoxylan ที่พบมาก ในรำข้าวสาลี เป็นแหล่งอาหารของแบคทีเรียกลุ่ม *Bifidobacterium* spp. ทำให้มีปริมาณเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับกลุ่มอื่น (Yu et al., 2016)

จากรายงานให้เห็นว่าระดับของใยอาหาร และชนิดของใยอาหาร ไม่มีผลต่อปริมาณ เชื้อแบคทีเรียกลุ่ม *Lactobacilli* และส่วนใหญ่มีผลต่อการลดปริมาณเชื้อ *E. coli* ในทางเดินอาหาร ส่วนท้าย แต่จากผลการทดลองครั้งนี้ทั้งระดับของใยอาหาร และสัดส่วนของ IDF:SDF ไม่ส่งผลต่อ ปริมาณเชื้อแบคทีเรียทั้ง *E. coli*, *Salmonella* spp. และ Lactic acid bacteria ทั้งนี้อาจ เนื่องมาจาก 2 ปัจจัย ดังนี้ปัจจัยแรกสภาพแวดล้อมของการเลี้ยงที่มีการจัดการสุขาภิบาลที่ดี ทำ ความสะอาดและฆ่าเชื้อด้วยน้ำยาฆ่าเชื้อก่อนเริ่มการทดลอง และล้างคอกเป็นประจำทุกวัน อีกทั้ง คอกที่เลี้ยงเป็นแบบยกพื้นสูง ซึ่งการสุขาภิบาลคอกมีความสัมพันธ์ต่อปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ สนับสนุนแนวคิดนี้จากการทดลองของ Montagne et al. (2012) โดยพบว่าภายใต้การเลี้ยงที่มี การสุขาภิบาลที่ดี (ทำความสะอาด ฆ่าเชื้อก่อนการทดลอง และล้างทำความสะอาดคอก เก็บมูล เป็นประจำทุกวัน) ทำให้อิทธิพลของปริมาณใยอาหารที่เพิ่มขึ้น ไม่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของ

แบคทีเรียในทางเดินอาหารส่วนท้าย และปัจจัยที่สองคืออายุของสุกรเมื่อเก็บตัวอย่างยังมีผลต่อปริมาณเชื้อแบคทีเรียที่ศึกษา โดยจากการศึกษา Montagne et al. (2012) ทำให้การเพิ่มระดับของใยอาหารจาก 121 เป็น 169 กรัมต่อกิโลกรัม หลังจากหย่านม 5 วัน พบแนวโน้มว่าปริมาณเชื้อ *Lactobacillus* ลดลงจาก 7.48 เป็น 6.98 log CFU/g แต่เมื่อเก็บตัวอย่างมูลที่ 34 วันหลังจากหย่านม ไม่พบความแตกต่างของปริมาณเชื้อแบคทีเรียในมูลของสุกร โดยได้วิจารณ์ผลการศึกษาดังกล่าวไว้ว่าการให้ปริมาณใยอาหารอย่างต่อเนื่อง จะกระทบต่อการเปลี่ยนแปลงของแบคทีเรียในช่วงระยะเวลาหนึ่ง และปริมาณแบคทีเรียจะเข้าสู่ภาวะสมดุลอีกครั้งทำให้ไม่พบการเปลี่ยนแปลงเมื่อเก็บตัวอย่างในวันที่ 34 หลังจากหย่านม และจากที่กล่าวมาแล้วในช่วงต้น การศึกษาปริมาณแบคทีเรียในมูลสุกรมักทำอยู่ในช่วงไม่เกิน 15 วันหลังจากหย่านม เช่น Pluske, & Kim (2014) ศึกษาอายุ 9 วันและ Molist et al. (2009) ศึกษาที่อายุ 15 วันหลังหย่านม ซึ่งหากเก็บตัวอย่างที่ 28 วัน ก็ไม่พบความแตกต่างของแบคทีเรียกลุ่ม *Lactobacilli* และ total bacteria (Yu et al., 2016) หรือ Pascoal et al. (2015) เมื่อศึกษาที่เมื่อสุกร 14 และ 29 วันหลังหย่านม ไม่พบความแตกต่างของแบคทีเรีย *Lactobacillus* ทั้งในลำไส้เล็กและไส้ติ่ง ดังนั้นในการวิจัยครั้งนี้ เก็บตัวอย่างที่ 30 วันหลังหย่านม หรือเมื่อสุกรอายุ 49 ± 3 วัน จึงอาจเป็นเหตุผลที่ทำให้ไม่พบการเปลี่ยนแปลงของแบคทีเรียกลุ่มเป้าหมาย

สรุปผลการวิจัย

1. แกลบบด มีความสามารถในการอุ้มน้ำ และค่าการพองตัวต่ำกว่าวัตถุดิบชนิดอื่น และมีปริมาณใยอาหารสูงที่สุด จึงนำมาเลือกใช้เป็นแหล่งของใยอาหารในการทดลองต่อไป
2. การเพิ่มระดับของใยอาหารสุกรหลังหย่านม ใยอาหารที่ระดับ 140 กรัมต่อกิโลกรัม มีแนวโน้มเพิ่มความสูงของวิลโล และ VH:CD ในลำไส้เล็กส่วนปลาย แนวโน้มเพิ่มการกินอาหารในสัปดาห์แรกของการหย่านม และประสิทธิภาพการผลิตโดยรวมมีแนวโน้มดีกว่ากลุ่มอื่น นอกจากนี้ระดับใยอาหารไม่ส่งผลต่ออัตราการเกิดท้องเสีย การย่อยได้ของสารอาหาร และแบคทีเรียที่ทางเดินอาหารส่วนท้าย
3. สัดส่วน IDF:sDF ที่ระดับ 4 ให้ประสิทธิภาพการผลิตโดยรวมดีกว่ากลุ่มอื่น และปรับปรุงสัณฐานวิทยาของลำไส้เล็กส่วนต้นและส่วนกลาง โดยไม่มีผลต่อปริมาณเชื้อแบคทีเรียในทางเดินอาหารส่วนท้าย

ข้อเสนอแนะ

1. วัตถุประสงค์ที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้คือเกลบดิบ โดยไม่ผ่านกระบวนการใด นอกจากการลดขนาด ซึ่งการทดลองในอนาคตอาจศึกษาการปรับเปลี่ยนโครงสร้างของใยอาหารโดยกรรมวิธีต่างๆ ก่อนนำมาใช้ เพื่อเป็นการใช้ประโยชน์ได้สูงสุด

2. การศึกษาด้านจำนวนของแบคทีเรีย ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมโดยใช้เทคนิคการตรวจสอบที่มีความทันสมัยมากขึ้น โดยเฉพาะแบคทีเรียในกลุ่มที่ไม่ใช้ออกซิเจนในการเจริญเติบโต (anaerobic bacteria) ซึ่งถือเป็นประชากรแบคทีเรียกลุ่มใหญ่ในทางเดินอาหารส่วนปลาย อีกทั้งระยะเวลาของการเก็บตัวอย่างควรประมาณ 7-14 วันหลังหย่านม เพื่อให้สามารถแสดงการเปลี่ยนแปลงของแบคทีเรียกลุ่มที่ตอบสนองต่อใยอาหารได้ดียิ่งขึ้น





บรรณานุกรม

- กุลนิภา ธนรุ่งรังสี, ณัฏฐา เลหากุลจิตต์, และอรพิน เกิดชูชื่น. (2557). การสกัดเส้นใยอาหารจากเปลือกข้าว. *วารสารวิทยาศาสตร์การเกษตร*, 45(2), 1-4.
- นัยนา บุญทวีวัฒน์. (2548). *ชีวเคมีทางโภชนาการ (Nutritional Biochemistry)*. กรุงเทพฯ: ชิกม่า ดีไซน์กราฟฟิกส์.
- นุจิรา ทักษิณานันต์, เสกสม อาตมางกูร, ชูวเรศ เรืองพานิช, และณัฐชนก อมรเทวภัทร. (2553). ผลของกากมันสำปะหลังในสูตรอาหารต่อกระบวนการอัดเม็ด คุณภาพเม็ดอาหารและสมรรถภาพการผลิตของสุกรระยะอนุบาล. ใน *ประชุมวิชาการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 48 สาขาสัตว์* (น. 85-92). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- นุจิรา ทักษิณานันต์. (2553). ผลของกากมันสำปะหลังในสูตรอาหารต่อกระบวนการอัดเม็ด การใช้ประโยชน์ได้ของสารอาหาร และสมรรถภาพการผลิตของสุกรระยะอนุบาล (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). นครปฐม: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ปิยะณัฐ เอี่ยมมเพ็ง, นุจิรา ทักษิณานันต์, และวันดี ทาตะระกุล. (2561). ผลของอาหารเยื่อใยสูงต่อประสิทธิภาพการเจริญเติบโต และพฤติกรรมของสุกรหลังหย่านม. *วารสารวิจัยและส่งเสริมวิชาการเกษตร*, 35(2)(พิเศษ 2), 363-370.
- พิพัฒน์ เหลืองวิลาวุฒย์, และวิศิษฐ์พร สุขสมบัติ. (2550). กากมันสำปะหลังกับการใช้ประโยชน์ในอาหารโคนม. *วารสารเกษตรสุรนารี*, 50, 43-50. สืบค้น 24 มกราคม 2563, จาก <http://sutir.sut.ac.th:8080/sutir/handle/123456789/2085>
- วริยา โกศล. (2552). ผลของการใช้กากมันสำปะหลังในอาหารสุกรอนุบาลต่อสมรรถภาพการผลิต (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วันเพ็ญ แสงทองพินิจ. (2551). การผลิตและคุณสมบัติของใยอาหารจากเปลือกส้มโอเพื่อนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์อาหาร, ใน *งานประชุม The 1st NPRU Academic Conference* (น. 1-12). นครปฐม: มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม.

- สมาคมผู้ผลิตอาหารสัตว์ไทย. (2561). ตารางประมาณการประชากรสัตว์, ปริมาณอาหารสัตว์ และการใช้วัตถุดิบ ปี 2561. สืบค้น 24 มกราคม 2563, จาก [http://www.thaifeedmill.com/Portals/0/2016/%E0%B8%9B%E0%B8%A3%E0%B8%B0%E0%B8%A1%E0%B8%B2%E0%B8%93%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B8%9B%E0%B8%A3%E0%B8%B0%E0%B8%8A%E0%B8%B2%E0%B8%81%E0%B8%A3%E0%B8%AA%E0%B8%B1%E0%B8%95%E0%B8%A7%E0%B9%8C%20%E0%B8%97%E0%B8%9A%E0%B8%97%E0%B8%A7%E0%B8%99%20%E0%B8%9B%E0%B8%B561\(%E0%B9%84%E0%B8%97%E0%B8%A2\).pdf](http://www.thaifeedmill.com/Portals/0/2016/%E0%B8%9B%E0%B8%A3%E0%B8%B0%E0%B8%A1%E0%B8%B2%E0%B8%93%E0%B8%81%E0%B8%B2%E0%B8%A3%E0%B8%9B%E0%B8%A3%E0%B8%B0%E0%B8%8A%E0%B8%B2%E0%B8%81%E0%B8%A3%E0%B8%AA%E0%B8%B1%E0%B8%95%E0%B8%A7%E0%B9%8C%20%E0%B8%97%E0%B8%9A%E0%B8%97%E0%B8%A7%E0%B8%99%20%E0%B8%9B%E0%B8%B561(%E0%B9%84%E0%B8%97%E0%B8%A2).pdf)
- สมาคมผู้ผลิตอาหารสัตว์ไทย. (2562). มั่นสำปะหลังโรงงาน ปี 2563 (ปีเพาะปลูก 2562/63). วารสารธุรกิจอาหารสัตว์, 36(188), 31-33.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2562a). สถานการณ์และแนวโน้มสำคัญปี 2563. สืบค้น 29 มกราคม 2563, จาก http://www.oae.go.th/assets/portals/1/ebookcategory/24_trend2563-Final-Download/#page=14
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2562b). ถั่วเหลืองรวมรุ่น: เนื้อที่ปลูก เนื้อที่เก็บเกี่ยว ผลผลิต และผลผลิตต่อไร่ ปีเพาะปลูก 2560/61 (รายจังหวัด). สืบค้น 6 พฤศจิกายน 2562, จาก <http://www.oae.go.th/assets/portals/1/fileups/prcaidata/files/soybean%2060.pdf>
- สิริมา ชินสาร และกฤษณะ ชินสาร. (2558). รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ การสกัดและใช้ประโยชน์เส้นใยอาหารและเซลลูโลสจากกากมะพร้าวเพื่อสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรและสร้างตัวต้นแบบเพื่อการพยากรณ์การถ่ายเทมวลสารระหว่างการทอด. ชลบุรี: มหาวิทยาลัยบูรพา.
- สุกัญญา เกินกลาง. (2546). การใช้เปลือกเมล็ดถั่วเหลืองเป็นอาหารโคนม (วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ). เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.
- หยาดฝน ทะนงการกิจ. (2557). การใช้ประโยชน์จากเศษผักผลไม้เหลือทิ้งเพื่อผลิตเป็นอาหารหมู. วารสารเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยสยาม, 9(1), 31-38.
- อรอนงค์ วินัยกุล. (2547). ข้าว: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

อังคณา หาญบรรจง และดวงสมร สีนเจิมศิริ. (2532). *การวิเคราะห์และการประเมินคุณภาพอาหารสัตว์*. กรุงเทพฯ: ภาควิชาสัตวบาล คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

Adam, S., Kong, X., Che, D., Qin, G., & Jiang, H. (2019). Effects of dietary supplementation of Alfalfa (Medicago Sattva) fibre on the blood biochemistry, nitrogen metabolism, and intestinal morphometry in weaning piglets. *Applied Ecology and Environmental Research*, 17(2), 2275-2295

Adibmoradi, M., Navidshad, B., & Jahromi, M.F. (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.

Agyekum, A.K., & C.M. Nyachoti. (2017). Nutritional and metabolic consequences of feeding high fiber diets to swine: A review. *Engineering*, 3(5), 716-725.

Albinsson, A.R.M., & Andersson, G.K.A. (1990). Subclinical characteristics of the wasting pig syndrome. *Research in Veterinary Science*, 49(1), 71-76.

Ani, A.O., Ezemagu, I.E., & L.C. Ugwuowo. (2013). Growth performance of weaner pigs fed soybean hull based diets. *Journal of Animal and Feed Research*, 3(3), 137-142.

Ao, X., & I.H. Kim. (2019). Effects of dietary dried mealworm (*Ptecticus tenebrifer*) larvae on growth performance and nutrient digestibility in weaning pigs. *Livestock Science*, 230, 103815.

AOAC. (1995). *Official Methods of Analysis* (16th ed.) Arlington: AOAC International.

Banino, A. (2012). *Effect of fiber on physiochemical properties of digesta and fecal microbial composition in pigs* (Master's thesis). Sweden: Swedish University of Agricultural Sciences.

Beers-Schreurs, H.M.G., Vellenga, L., Wensing, Th., & Breukink, H.J. (1992). The pathogenesis of the post-weaning syndrome in weaned piglet: A review. *Veterinary Quarterly*, 14(1), 29-34.

- Bindelle, J., Leterme, P., & Buldgen, A. (2008). Nutritional and environmental consequences of dietary fibre in pig nutrition: A review. *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment*, 12(1), 69-80.
- Bolin, D.W., King, R.P., & Klosterman, E.W. (1952). A simplified method for the determination of chromic oxide (Cr_2O_3) when used as an index substance. *Science*, 116(3023), 634-635.
- Brooks, P.H., Moran, C.A., Beal, J.D., Demeckova, V., & Campbell, A. (2001). Liquid feeding for the young piglet. In Varley, M.A., & Wiseman, J. (Eds.). *The Weaner Pig: Nutrition and Management* (pp. 153-178). UK.: CAB International, Wallingford.
- Burkhalter, T.M., Merchen, N.R., Bauer, L.L., Murray, S.M., Patil, A.R., Brent J.L., & Fahey, G.C. (2001). The ratio of insoluble to soluble fiber components in soybean hulls affects ileal and total-tract nutrient digestibilities and fecal characteristics of dogs. *Journal of Nutrition*, 131(7), 1978-1985.
- Caprita, R., Caprita, A., & Julean, C. (2010). Biochemical aspects of non-starch polysaccharides. *Animal Science and Biotechnology*, 43(1), 368-375.
- Capuano, E. (2017). The behavior of dietary fiber in the gastrointestinal tract determinations its physiological effect. *Critical Review in Food Science Nutrition*, 57(16), 3553-3563.
- Casas, G.A., & Stein, H.H. (2016). Effects of full fat r defatted rice bran on growth performance and blood characteristics of weanling pigs. *Journal of Animal Science*, 94(10), 4179-4187.
- Chase, C.C.L. (2018). Enteric immunity happy gut, healthy animal. *Veterinary Clinics of North America: Food Animal Practice*, 34(1), 1-18.
- Chen, H., Mao, X., He, J., Yu, B., Huang, Z., Yu, J., Zheng, P., & Chen, D. (2013). Dietary fibre affects intestinal mucosal barrier function and regulates intestinal bacteria in weaning piglets. *British Journal of Nutrition*, 110(10), 1837-1848.

- Choct, M. (2015). *Fibre-Chemistry and functions in poultry nutrition. LII Simposio Científico de Avicultura, Málaga, 28 al 30 de octubre: 113-119*. Retrieved December 25, 2019, from https://www.wpsa-aeca.es/aeca_imgs_docs/16478_fibra_mingan.pdf
- Chu, S.H.W., & Walker, W.A. (1993). Bacterial toxin interaction with the developing intestine. *Gastroenterology*, 104(3), 916-925.
- Cohen, M.B., Moyer, M.S., Luttrell, M., & Gianella, R.A. (1986). The immature rat small intestine exhibits and increased sensitivity and response to *Escherichia coli* heat stable enterotoxin. *Pediatric Research*, 20(6), 555-560.
- Cole, J.T., Fahey, G.C., Merchen, N.R., Patil, A.R., Murray, S.M., Hussein, H.S., & Brent, J.L. (1999). Soybean hulls as a dietary fiber source for dogs. *Journal of Animal Science*, 77(4), 917-924.
- Conway, P.L. (1994). Function and regulation of the gastrointestinal microbiota of the pig. *EAAP publication*, 80, 231-240.
- Daou, C., & Zhang, H. (2014). Functional and physiological properties of total, soluble, and insoluble dietary fibres derived from defatted rice bran. *Journal of Food Science and Technology*, 51(12), 3878-3885.
- Dégen, L., Halas, V., & Babinszky, L. (2007). Effect of dietary fibre on protein and fat digestibility and its consequences on diet formulation for growing and fattening pigs: A review. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section A-Animal Science*, 57(1), 1-9.
- Denev, S.A. (2006). Role of Lactobacilli in gastrointestinal ecosystem. *Bulgarian Journal of Agricultural Science*, 12(2006), 63-114.
- Deprez, P., Deroose, P., Van de Hende, C., Muylle, E., & Oyaert, W. (1987). Liquid versus dry feeding in weaning piglets: The influence on small intestinal morphology. *Journal of Veterinary Medicine*, 34(1-10), 254-259.
- Dhingra, D, Michael, M., & Rajput, H. (2012). Dietary fibre in foods: A review. *Journal of Food Science and Technology*, 49(3), 255-266.

- Dierick, N., Vervaeke, I., Decuypere, J., & Henderickx, H. (1990). Bacterial protein synthesis in relation to organic matter digestion in the hindgut of growing pigs; contribution of hindgut fermentation to total energy supply and growth performances. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 63(1-5), 220-235.
- Dong, G.Z., & Pluske, J.R. (2007). The low feed intake in newly-weaned pigs: Problems and possible solution. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 20(3), 440-452.
- Drochner, W., Kerler, A., & Zacharias, B. (2004). Pectin in pig nutrition, a comparative review. *Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition*, 88(11-12), 367-380.
- Eastwood, M.A., & Morris, E.R. (1992). Physical properties of dietary fiber that influence physiological function: a model for polymers along the gastrointestinal tract. *The American Journal of Clinical Nutrition*, 55(2), 436-442.
- Elson, C.O., & Beagley, K.W. (1994). Cytokines and immune mediators. In Bock, H.D., Eggum, B.O., Low, A.G., Simon, O., & Zebrowska, T. (Eds.), *Protein Metabolism in Farm Animals: Evolution, Digestion, Absorption, and Metabolism*. Oxford: Oxford University Press.
- Englyst, H.N., Wiggins, H.S., & Cummings, J.H. (1982). Determination of the non-starch polysaccharides in plant foods by gas-liquid chromatography of constituent sugars as alditol acetates. *Analyst*, 107(1272), 307-318.
- Englyst, K.N., Liu, S., & Englyst, H.N. (2007). Nutritional characterization and measurement of dietary carbohydrates. *European Journal of Clinical Nutrition*, 61(suppl 1), S19-S39.
- Ewing, W.N., & Cole, D.J. (1994). *The living gut: an introduction to micro-organisms in nutrition*. Ireland: Context Publisher.

- Feng, Q., Yamamichi, H., Shoya, M., & Sugita, S. (2004). Study on the pozzolanic properties of rice husk ash by hydrochloric acid pretreatment. *Cement and Concrete Research*, 34(3), 521-526.
- Freire, J.P.B., Buerreiro, A.J.G., Cunha, L.F., & Aumaitre, A. (2000). Effect of dietary fibre source on total tract digestibility, caecum volatile fatty acid and digestive transit time in the weaned piglet. *Animal Feed Science and Technology*, 87(1-2), 71-83.
- Freire, J.P.B., Peiniau, J., Cunha, L.F., Almeida, J.A.A., & Aumaitre, A. (1998). Comparative effects of dietary fat and fibre in Alentejano and Large White piglets: Digestibility, digestive enzymes and metabolic data. *Livestock Production Science*, 53(1), 37-47.
- Fushai, F., Tekere, M., Masafu, M., Akinsola, C.M., Siebrits, F., Nherera-Chokuda, F.V. and Kanengoni, A.T. (2019). Co-products in maize-soybean growing-pigs diets altered in vitro enzymatic insoluble fibre hydrolysis and fermentation in relation to botanical origin. *South African Journal of Animal Science*, 49(2), 201-218.
- Gadhe, K.S., Thorat, P.P., Sawate, A.R., & Shere, D.M. (2018). Effect of particle size distribution on functional properties of dietary fiber extracted from sugar beet (*Beta vulgaris*). *International Journal of Chemical Studies*, 6(2), 328-331.
- Gaskins, H.R. (2001). Intestinal bacteria and their influence on swine growth in *Swine Nutrition* (2nd ed.). USA.: CRC Press.
- Gelberg, H.B. (2014). Comparative anatomy, physiology, and mechanisms of disease production of the esophagus, stomach, and small intestine. *Toxicologic Pathology*, 42(1), 54-66.
- Gerritsen, R., van der Aar, P., & Molist, F. (2012). Insoluble nonstarch polysaccharides in diets for weaned piglets. *Journal of Animal Science*, 90(suppl 4), 318-320.

- Goebring, D.L., Tokach, M.D., DeRoucher, J.M., Nelssen, J.L., Goodband, R.D., & Dritz, S.S. (2012). The effects of soybean hulls on nursery pig growth performance. *Kansas Agricultural Experiment Station Research Reports*, 0 (10), 127-136.
- Goering, H.K., & Van Soest, P.J. (1970). *Forage fiber analysis*. Retrieved January 29, 2020, from <https://naldc.nal.usda.gov/download/CAT87209099/PDF>
- Goff, G.L., van Milgen, J., & Noblet, J. (2002). Influence of dietary fibre on digestibility utilization and rate of passage in growing pigs, finishing pigs and adult sows. *Animal Science*, 74(3), 503-515.
- Gupta, P., & Premavalli, K.S. (2010). Effect of particle size reduction on physiochemical properties of ashgourd (*Benincasa hispida*) and radish (*Raphanus sativus*) fibres. *International Journal of Food Sciences and Nutrition*, 61(1), 18-28.
- Hampson, D.J. (1986). Alteration in piglet small intestinal structure at weaning. *Research in Veterinary Science*, 40(1), 32-40.
- Hanczakowska, E., Świątkiewicz, M., & BiaŁecka, A. (2008). Pure cellulose as a feed supplement for piglets. *Medycyna Wet*, 64(1), 45-48.
- Hedemann, M.S., Skildsen, E.M., Laerke, H.N., Pedersen, C., Lindberg, J.E., Laurinen, P., & Knusen, K.E. (2006). Intestinal morphology and enzymatic activity in newly weaned pigs fed contrasting fiber concentrations and fiber properties. *Journal of Animal Science*, 84(6), 1375-1386.
- Henneberg, W., & Stohmann, F. (1859). Über das Erhaltungsfutter volljährigen Rindviehs. *Journal fur Landwirtschaft*, 3, 485-551.
- Herfel, T., Jacobi, S., Lin, X., Van Heugten, E., Fellner, V., & Odle, J. (2013). Stabilized rice bran improves weaning pig performance via a prebiotic mechanism. *Journal of Animal Science*, 91(1), 907-913.

- Hermes, R. G., Molist, F., Ywazaki, M., Nofrarias, M., Gomez, G. S., Gasa, J., & Perez, J. F. (2009). Effect of dietary level of protein and fiber on the productive performance and health status of piglet. *Journal of Animal Science*, 87(11), 3569-3577.
- Hetland, H., Svihus, B., & Krongdahl, A. (2003). Effect of oat hulls and wood shaving on digestion in broiler and layers fed diets based on whole or ground wheat. *British Poultry Science*, 44(2), 275-282.
- Högberg, A., & Lindberg, J.E. (2004). Influence of cereal non-starch polysaccharides and enzyme supplementation on digestion site and gut environment in weaned piglets. *Animal Feed Science and Technology*, 116(1), 113-128.
- Huisman, J., & Jansman, J.M. (1991). Dietary effects and some analytical aspects of antinutritional factors in peas (*Pisum sativum*), common beans (*Phaseolus vulgaris*) and soybeans (*Glycine max* L.) in monogastric farm animals. A literature review. *Nutrition Abstracts and Reviews*, B61, 901-921.
- Inoue, R., Tsukahara, T., Nakanishi, N., & Ushida, K. (2005). Development of the intestinal microbiota in the piglet. *The journal of General and Applied Microbiology*, 51(4), 257-265.
- Jaworski, N.W., & Stein, H.H. (2017). Disappearance of nutrient and energy in the stomach and small intestine, cecum, and colon of pigs fed corn-soybean meal diets containing distillers dried grains with solubles, wheat middlings, or soybean hulls. *Journal of Animal Science*, 95(2), 727-739.
- Jensen, B.B., & Jorgensen, H. (1994). Effect of dietary fiber on microbial activity and microbial gas production in various regions of the gastrointestinal tract of pigs. *Applied and Environmental Microbiology*, 60(6), 1897-1904.
- Jensen, W.M., Melin, L., Lindberg, R., Johannisson, A., Petersson, L., & Wallgren, P. (1998). Dietary zinc oxide in weaned pigs-effects on performance, tissue concentrations, morphology, neutrophil functions and faecal microflora. *Research in Veterinary Science*, 64(3), 225-231.

- Jha, R., & Berrococo, J.F.D. (2016). Dietary fiber and protein fermentation in the intestine of swine and their interactive effects on gut health and on the environment: A Review. *Animal Feed Science and Technology*, 212(2006), 18-26.
- Jha, R., Fohse, 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., de Coca-Sinova, A., González-Alvarado, J.M., & Mateos, G.G. (2016). Inclusion of insoluble fiber sources in mash or pellet diets for young broilers 1. Effects on growth performance and water intake. *Poultry Science*, 95(1), 41-52.
- Jorgensen, B.B., & Jorgensen, H. (1994). Effect of dietary fiber on microbial activity and microbial gas production in various regions of the gastrointestinal tract of pigs. *Applied and Environmental Microbiology*, 60(6), 1897-1904.
- Jung, H.J., Kim, Y.Y., & Han, K. (2003). Effects of fat sources on growth performance, nutrient digestibility, serum traits and intestinal morphology in weaning pigs. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 16(7), 1035-1040.
- Katouli, M., Lund, A., Wallgren, P., Kühn, I., Söderlind, O., & Möllby, R. (1997). Metabolic fingerprint and fermentative capacity of the intestinal flora of pigs during pre- and post-weaning periods. *Journal of Applied Microbiology*, 83(2), 147-154.
- Kelly, D., Begbie, R., & King, T.P. (1992). Postnatal intestinal development. In Varley, M.A., Williams, P.E.V., Lawrence, T.L.J. (Eds.), *Neonatal survival and growth, occasional publications between bacteria and the small intestinal mucosa* (p. 63). Cambridge: Cambridge University Press.
- Kim, J.C., Christian, F., Mullan, B.P., & Pluske, J.R. (2012). Nutrition and pathology of weaner pigs: nutritional strategies to support barrier function in the gastrointestinal tract. *Animal Feed Science and Technology*, 173(1-2), 3-16.

- Kim, J.C., Mullan, B.P., Hampson, D.J., & Pluske, J.R. (2008). Addition of oat hull to an extruded rice-based diet for weaner pigs ameliorates the incidence of diarrhea and reduces indices of protein fermentation in the gastrointestinal tract. *British Journal of Nutrition*, 99(6), 1217-1225.
- Kitt, S.J., Miller, P.S., & Lewis, A. (2001). *Factors affecting small intestine development in weanling pigs*. Retrieved December 25, 2019, from https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1098&context=coopext_swine.
- Knudsen, K.E.B. (2001). The nutritional significance of "dietary fibre" analysis. *Animal Feed Science and Technology*, 90(1-2), 3-20.
- Knudsen, K.E.B., & Hansen, I. (1991). Gastrointestinal implications in pigs of wheat and oat fractions: 1. Digestibility and bulking properties of polysaccharides and other major constituents. *British Journal of Nutrition*, 65(2), 217-232.
- Konstantinov, S., Favier, C., Zhu, W., Williams, B., Klüß, J., Souffrant, W.B., De Vos, W., Akkermans, A., & Smidt, H. (2004). Microbial diversity studies of the porcine gastrointestinal ecosystem during weaning transition. *Animal Research*, 53(4), 317-324.
- Kuan, C.Y., Yuen, K.H., & Liong, M.T. (2012). Physical, chemical and physiochemical characterization of rice husk. *British Food Journal*, 114(6), 853-867.
- Lærke, H.N., & Hedemann, M.S. (2012). *The digestive system of the pig. Nutritional Physiology of Pigs-online publication*. Denmark: Videncentre for Swine production, Foulum.
- Lallès, J.P., Bosi, P., Smidt, H., & Stokes, C.R. (2007). Weaning-A challenge to gut physiologists. *Livestock Science*, 108(1-3), 82-93.
- Langlois, A., Corring, T., & Février, C. (1987). Effects of wheat bran on exocrine pancreas secretion in the pig. *Reproduction, Nutrition, Development*, 27(5), 929-939.
- Lee, I.K., Kye, Y.C., Kim, G., Kim, H.W., & Gu, M.J. (2016). Stress, nutrition, and intestinal immune responses in pigs-A Review. *Asian Australasian Journal of Animal Sciences*, 29(8), 1075-1082.

- Lee, S.C., Prosky, L., & de Vries, J.W. (1992). Determination of total, soluble, and insoluble dietary fiber in foods-enzymic-gravi-metric method, MES-TRIS buffer: collaborative study. *Journal of AOAC International*, 75(3), 395-416.
- Lee, S.J., Kim, J.Y., Park, N.H., Awji, E.G., Suh, J.W., & Park, S.C. (2016). Effect of dietary fiber source on the growth performance and intestinal microflora in piglets. *The International Journal of Applied Research in Veterinary Medicine*, 14(2), 135-142.
- Leterme, P., Froidmont, E., Rossi, F., & Théwis, A. (1998). The high water-holding capacity of pea inner fibers affects the ileal flow of endogenous amino acids in pigs. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 46(5), 1927-1934.
- Li, J. (2017). Current status and prospects for in feed antibiotics in the different stage of pork production – A review. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 30(12), 1667-1673.
- Li, S, Zheng, J., Demg, K., Chen, L., Zhao, X.L., Jiang, X., Fang, Z, ...Wu, D. (2018). Supplementation with organic acids showing different effects on growth performance, gut morphology, and microbiota of weaned pigs fed with highly or less digestible diets. *Journal of Animal Science*, 96(8), 3302-3318.
- Lindberg, J.E. (2014). Fiber effects in nutrition and gut health in pigs. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 5(1), 15.
- Lionetti, P., Breese, E., Braegger, C.P. Murch, S.H., Taylor, J., & McDonald, T.T. (1993). T-cell activation can induce either mucosal destruction or adaptation in cultured human fetal small intestine. *Gastroenterology*, 105(2), 373-381.
- Liu, H.M., & Li, H.Y. (2017). Application and conversion of soybean hulls. In Kasai, M. (Ed.), *Soybean – The basis of yield, biomass and productivity*. United Kingdom: IntechOpen Limited.
- Looft, T., Johnson, T.A., Allen, H.K., Bayles, D.O., Alt, D.P., Stedtfeld, R.D, Sul, W.J., ... Stanton, T.B. (2012). In-feed antibiotic effects on the swine intestinal microbiome. *Proceedings of The National Academy of Science of the United States of America*, 109(5), 1691-1696.

- Lu, J.J., Zou, X.T., & Wang, Y.M. (2008). Effects of sodium butyrate on the growth performance, intestinal microflora and morphology of weanling pigs. *Journal of Animal and Feed Sciences*, 17(4), 568-578.
- Luppi, A. (2017). Swine enteric colibacillosis: diagnosis, therapy and antimicrobial resistance. *Porcine Health Management*, 3, 16.
- Ma, X., Qinghui, S., Jiangxu, H., Hansuo, L., Brøkner, C., & Xiangshu, P. (2019). Effects of replacing soybean meal, soy protein concentrate, fermented soybean meal or fish meal with enzyme-treated soybean meal on growth performance, nutrient digestibility, antioxidant capacity, immunity and intestinal morphology in weaned pigs. *Livestock Science*, 225(2019), 39-46.
- Ma, Y., Li, D., Qiao, S.Y., Huang, C.H., & Han, I.K. (2002). The effects of fiber source on organ weight, digesta pH, specific activities of digestive enzymes and bacterial activity in the gastrointestinal tract of piglets. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 15(10), 1482-1488.
- Ma'ruf, A., Pramudono, B., & Aryanti, N. (2017). *Lignin isolation process from rice husk by alkaline hydrogen peroxide: Lignin and silica extracted*. Retrieved January 28, 2020, from <https://aip.scitation.org/doi/pdf/10.1063/1.4978086>
- Majzoobi, M., Pashangeh, S., Farahnaky, A., Eskandari, M.H., & Jamaljan, J. (2014). Effect of particle size reduction, hydrothermal and fermentation treatments on phytic acid content and some physiochemical properties of wheat bran. *Journal of Food Science and Technology*, 5(10), 2755-2761.
- Mangan, D. (2014). *Changing methods for the measurement of dietary fiber*. Retrieved January 22, 2020, from <https://wholefoodsmagazine.com/blog/changing-methods-measurement-dietary-fiber/>
- Mateos, G.G., Martin, F., Latorre, M.A., Vicente, B., & Lázaro, R. (2006). Inclusion of oat hulls in diets for young pigs based on cooked maize or cooked rice. *Animal Science*, 82(1), 57-63.

- Mathew, A.G., Sutton, A.L., Scheidt, A.B., Patterson, J.A., Kelly, D.T., & Meyerholtz, K.A. (1993). Effect of galactan on selected microbial populations and volatile fatty acids in the ileum of the weanling pig. *Journal of Animal Science*, 71(6), 1503-1509.
- McCleary, B.V. (2003). Dietary fibre analysis. *Proceedings of the Nutrition Society*, 62, 3-9.
- McCleary, B.V., De Vries, J.W., Rader, J.I. Cohen, G., Prosky, L., Mugford, D.C., Champ, M., & Okuma, K. (2012). Determination of insoluble, soluble, and total dietary fiber (CODEX definition) by enzymatic-gravimetric method and liquid chromatography: Collaborative study. *Journal of AOAC International*, 95(3), 824-844.
- McDonald, D.E., Pethick, D.W., Mullan, B.P., Pluske, J.R., & Hampson, D.J. (1999). Adverse effects of soluble non-starch polysaccharide (guar gum) on piglet growth and experimental colibacillosis immediately after weaning. *Research in Veterinary Science*, 67(3), 245-250.
- Medel, P., Salado, S., de Blas, J.C., & Mateos, G.G. (1999). Processed cereals in diets for early-weaned piglets. *Animal Feed Science and Technology*, 82(3-4), 145-156.
- Mikhaleva, N.Y., Borisenkov, M.F., Gyunter, E.A., Popelko, O.V., & Ovodov, Y.S. (2011). Effect of successive acid and enzymatic hydrolysis on the structure and antioxidant activity of pectins. *Russian Journal of Bioorganic Chemistry*, 37(7), 822-828.
- Moeser, A.J., Calvin, S.P., & Rejput, M. (2017). Weaning stress and gastrointestinal barrier development: Implications for lifelong gut health in pigs. *Animal Nutrition*, 3(4), 313-321.
- Molist, F., Gomes De Segura, A., Gasa, A., Hermes, R.G., Manzanilla, E.G., Anguita, M., & Perez, J.F. (2009). Effects of insoluble and soluble dietary fibre on the physiochemical properties of digesta and microbial activity in early weaned piglets. *Animal Feed Science and Technology*, 149(3-4), 346-353.

- Molist, F., van Oostrum, M., Pérez, J.F., & Mateos, G.G. (2014). Relevance of functional properties of dietary fibre in diets for weanling pigs. *Animal Feed Science and Technology*, 189(2014), 1-10.
- Montagne, L., Boudry, G., Favier, C., Le Huërou-Luron, I., Lallès, J.P., & Sève, B. (2007). Main intestinal markers associated with the changes in gut architecture and function in piglets after weaning. *British Journal of Nutrition*, 97(1), 45-57.
- Montagne, L., Le Floch, N., Arturo-Schaan, M., Foret, R., Urdaci, M.C., & Le Gall, M. (2012). Comparative effects of level of dietary fiber and sanitary conditions on the growth and health of weaning pigs. *Journal of Animal Science*, 90(8), 2556-2569.
- Montagne, L., Pluske, J.R., & Hampson, D.J. (2003). A review of interactions between dietary fibre and intestinal mucosa, and their consequences on digestive health in young non-ruminant animals. *Animal Feed Science and Technology*, 108(1-4), 95-117.
- Mosenthin, R., Sauer, W.C., & Ahrens, F. (1994). Dietary pectin's effect on ileal and fecal amino acid digestibility and exocrine pancreatic secretions in growing pigs. *Journal of Nutrition*, 124(8), 1222-1229.
- Mouwen, J.M.V.M., (1971). White scours in piglets. I. Stereomicroscopy of the mucosa of the small intestine. *Veterinary Pathology*, 8(4), 364-380.
- Mudgil, D. (2017). Dietary fiber for prevention of cardiovascular disease: Fiber's interaction between gut microflora, sugar metabolism, weight control and cardiovascular health. In Samaan, R.A. (Ed.), *The interaction between insoluble and soluble fiber* (p. 43). N.P.: Academic Press.
- N'Goma, J.C.B., Amara, S., Dridi, K., Jannin, V., & Carriere, F. (2012). Understanding the lipid digestion processes in the GI tract before designing lipid-based drug delivery system. *Therapeutic Delivery*, 3(1), 105-124.

- Nabuurs, M.J.A., Hoogendoorn, A., & van Zuder Veld, F.G. (1994). Effects of weaning and enterotoxigenic *Escherichia coli* on net absorption in the small intestine of pigs. *Research in Veterinary Science*, 56(3), 379-385.
- Nepomuceno, R.C., Watanabe, P.H., Freitas, E. R., Carvalha, L.E., Oliveira, E.L., & Veira, A.M. (2016). Neutral detergent fibre in piglet diet: performance and gastrointestinal implications. *Ciência e Agrotechology*, 40(2), 205-216.
- Ngoc, T.T.B., Len, N.T., & Lindberg, J.E. (2012). Chemical characterization and water holding capacity of fibre-rich feedstuffs used for pigs in Vietnam. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 25(6), 861-868.
- Noblet, J., & Le Goff, G. (2001). Effect of dietary fibre on the energy value of feeds for pigs. *Animal Feed Science and Technology*, 90(2001), 35-52.
- Noblet, J., & Perez, J.M. (1993). Prediction of digestibility of nutrients and energy values of pigs diets from chemical analysis. *Journal of Animal Science*, 71(12), 3389-3398.
- Noort, M.W.J., Haaster, D.V., Hemery, Y., Schols, H.A., & Hamer, R.J. (2010). The effect of particle size of wheat bran fractions on bread quality- evidence for fiber-protein interaction. *Journal of Cereal Science*, 52(1), 59-64.
- Nowland, T.L., Plush, K.J., Barton, M., & Kirkwood, R.N. (2019). Development and function of the intestinal microbiome and potential implication for pig production. *Animal*, 9(3), 76.
- NRC, National Research Council. (2012). *Nutrient Requirements of Swine*. Washington DC, USA.: National Academic Press.
- Oliveira, J.P., Bruni, G.P., Lima, K.O., Halal, S.L.M.E., Rosa, G.S, Dias, A.R.G., & Zavareze, E.R. (2017). Cellulose fibers extracted from rice and oat husks and their application in hydrogel. *Food Chemistry*, 221(2017), 153-160.
- Partridge, G.G., Fisher, J., Gregory, H., & Prior, S.G. (1992). Automated wet feeding of weaner pigs versus conventional dry diet feeding: effects on growth rate and food consumption. In *Proceedings of the British Society of Animal Production* (1972) (p. 136). Edinburgh: .British Society of Animal Production

- Pascoal, L.A.F., Thomaz, M.C., Watanabe, P.H., Ruiz, U.S., Amorim, A.B., Daniel, E., & Silva, S.Z. (2015). Purified cellulose, soybean hulls and citrus pulp as a source of fiber for weaned piglets. *Scientia Agricola*, 72(5), 400-410.
- Pascoal, L.A.F., Tomaz, M.C., Watanabe, P.H., dos Santos Ruiz, U., Ezaquiel, J.M.B., Amorim, A.B., Daniel, E., & Masson, G.C.I. (2012). Fiber sources in diets for newly weaned piglets. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 41, 636-642.
- Perry, J.R., & Ying, W. (2016). A review of physiological effects of soluble and insoluble dietary fibers. *Journal of Nutrition & Food Sciences*, 6(2), 476.
- Pieper, R., Jha, R., Rossnagel, B., Van Kessel, A., Souffrant, W.B., & Leterme, P. (2008). Effect of barley and oat cultivars with different carbohydrate compositions on the intestinal bacterial communities in weaned piglets. *FEMS Microbiology Ecology*, 66(3), 556-566.
- Pluske, J., Black, B., Pethick, D.W., Mullan B.P., & Hampson, D. J. (2003). Effects of different sources and levels of dietary fibre diets on performance, digesta characteristics and antibiotic treatment of pigs after weaning. *Animal Feed Science and Technology*, 107(1-4), 129-142.
- Pluske, J., Hampson, D.J., & Williams, I.H. (1997). Factors influencing the structure and function of the small intestine in the weaned pig: A review. *Livestock Production Science*, 51(1-3), 215-236.
- Pluske, J.R., & Williams, I.H. (1996). Reducing stress in piglet as a means of increasing production after weaning: administration of amperozide or co-mingling of piglets during lactation. *Animal Science*, 62(1), 121-130.
- Pluske, P.J., Kim, J.C., Hewitt, R., & van Bernevelde, R. (2014). *Reducing the risk of post-weaning E. coli diarrhea using different sources of fibre in diet*. Retrieved July 3, 2017 from <http://porkcrc.com.au/wp-content/uploads/2014/12/2A-105-Final-Report.pdf>.
- Pramana, Y.S., Sunarti, T.C., & Purwoko. (2018). Process optimization for dietary fiber production from cassava pulp using acid treatment. *Series E: Food Technology*, 22(2), 21-32.

- Prosky, L., Asp, N.G., Furda, I., De vies, J.W., Schweizer, T.F., & Harland, B.F. (1985). Determination of total dietary fiber in foods and food products: Interlaboratory study. *Journal Association of Official analytical Chemists*, 68(4), 677-679.
- Raghavendra, S.N., Rastogi, N.K., Raghavarao, K., & Tharanathan, R.N. (2004). Dietary fiber coconut residue: Effects of different treatments and particle size on the hydration properties. *European Food Research and Technology*, 218(6), 563-567.
- Raj, S., Skiba, G., Weremko, D., & Fandrejowski, H. (2005). Growth of the gastrointestinal tract of pigs during reallimentation following a high-fibre diet. *Journal of Animal and Feed Sciences*, 14(4), 675-684.
- Raj, S.T., Skiba, G., Weremko, D., & Fandrejowski, H. (2006). Digestibility of energy and nutrients in pigs previously fed a high-fibre diet. *Journal of Animal and Feed Sciences*, 15(4), 591-598.
- Rezaei, M., Karimi Torshizi, M.A., & Shariatmadari, F. (2014). Inclusion of processed rice hulls as insoluble fiber in the diet on performance and digestive traits of Japanese quails. *Journal of Animal Science Advances*, 4(7), 962-972.
- Sangnark, A., & Noomhorm, A. (2003). Effect of particle sizes on functional properties of dietary fibre prepared from sugarcane bagasse. *Food Chemistry*, 80(2), 221-229.
- Sansom, B.F., & Gleed, P.T. (1981). The ingestion of sow's faeces by suckling piglets. *British Journal of Nutrition*, 46(3), 451-456.
- Santos, J., Benjamin, M., & Yang, P.C. (2000). Chronic stress impairs rat growth and jejunal epithelial barrier function: role of mast cells. *American Journal of Physiology-Gastrointestinal and Liver Physiology*, 278(6), G847-G854.
- Schedle, K., Plitzner, C., Etle, T., Zhao, L. Doming, K.J., & Windisch, W. (2008). Effects of insoluble dietary fibre differing in lignin on performance, gut microbiology, and digestibility in weanling piglets. *Archives of Animal Nutrition*, 62(2), 141-151.

- Schenkel, H. (2017). Dietary fiber and analytics. In A. Bosse and M. Pietsch (Eds.), *Finer in animal nutrition* (1st ed. p. 9). N.P.: Agrimedia.
- Sciellour, M.L., Labussière, E., Zemb, O., & Renaudeau, D. (2018). Effect of dietary fiber content on nutrient digestibility and fecal microbiota composition in growing-finishing pigs. *PLoS ONE*, 13(10), e0206159.
- Skiba, G., Raj, S., Weremko, D., & Fandreyewski, H. (2005). Growth of the gastrointestinal tract in weaning pigs as affected by crude fibre content in the diet. *Journal of Animal and Feed Science*, 14(4), 665-674.
- Souffrant, W.B. (2001). Effect of dietary fibre on ileal digestibility and endogenous nitrogen losses in the pig. *Animal Feed Science and Technology*, 90(1-2), 93-102.
- Southgate, D.A.T. (1969). Determination of carbohydrates in foods. II Unavailable carbohydrates. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 20(6), 331-335.
- SPSS. (2010). *Statistical Package for Social Sciences*. Chicago, IL, USA.: SPSS Inc.
- Stanogias, G., & Pearce, G.R. (1985). The digestion of fibre by pigs: 1. The effects of amount and type of fibre on apparent digestibility, nitrogen balance and rate of passage. *British Journal of Nutrition*, 53(3), 513-530.
- Stein, H.H., Casas, G.A., Abelilla, J.J., Liu, Y., & Sulabo, R.C. (2015). Nutritional value of high fiber co-products from copra, palm kernel, and rice industries in diets fed to pigs. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 6(2015), 56.
- Sun, Y., & Kim, S.W. (2017). Intestinal challenge with enterotoxigenic *Escherichia coli* in pigs, and nutritional intervention to prevent postweaning diarrhea. *Animal Nutrition*, 3(4), 322-330.
- Superchi, P., Borghetti, P., Ferrarini, G., Cavalli, V., Sereni, M., & Zavattini, S. (2017). Effects of dietary crude fibre concentrate on growth on weaned piglets. *Animal*, 11(11), 1905-1912.

- Swiech, E., Barszcz, M., Tusnio, A., & Taciak, M. (2016). Gut morphology of young pigs fed diets differing in standardized ileal digestible threonine and wheat gluten used as a source of non-essential amino acids. *Journal of Animal and Feed Sciences*, 25(3), 226-234.
- Swords, W.E., Wu, C.C., Champlin, F.R., & Buddington, R.K. (1993). Postnatal changes in selected bacterial groups of the pig colonic microflora. *Biology of the Neonate*, 63(3), 191-200.
- Tartrakoon, W., Taksinananm N, Koedchuen, C., & Incharoen, T. (2017). Insoluble fiber prepared from rice hulls for the dietary supplementation of growing-finishing pigs. *International Journal of Agricultural Technology*, 13(7), 1155-1166.
- Van Soest, P.J., Robertson, J.B., & Lewis, B.A. (1991). Methods of dietary fiber, neutral detergent fiber and non starch polysaccharides in relation to animal nutrition. *Journal of Dairy Science*, 74(10), 3583-3597.
- Vente-Spreeuwenberg, M.A., Verdonk, J.M., Verstegen, M.V., & Beynen, A.C. (2003). Villus height and gut development in weaned piglets receiving diets containing either glucose, lactose or starch. *British Journal of Nutrition*, 90(5), 907-913.
- Wang, L.F., Beltranema, E., & Zijstra, R.T. (2016). Diet nutrition and growth performance of weaned pigs fed sugar beet pulp. *Animal Feed Science and Technology*, 211(2016), 145-152.
- Wijten, P.J., van der Meulen, J., & Verstegen, M.W. (2011). Intestinal barrier function and absorption in pigs after weaning: a review. *British Journal of Nutrition*, 105(7), 967-981.
- Williams, B.A., Grant, L., Gidley, M.J., & Mikkelsen, D. (2017). Gut fermentation of dietary fibres: Physico-Chemistry of plant cell walls and implication for health. *International of Molecular Science*. 18(10), 2203.
- Wolters, M.G.E. Verbeek, C., van Westerop, J.J.M., Hermus, R.J.J., & Voragen, A.G.J. (1992). Comparison of different methods for determination of dietary fiber. *Journal of AOAC International*, 75(4), 626-634.

- Wu, X., Chen, D., Yu, B., Lou, Y., Zheng, P., Mao, X., Yu, J., & He, J. (2018). Effect of different dietary non-starch fiber fractions on growth performance, nutrient digestibility, and intestinal development in weaned pigs. *Nutrition*, 51-52(2018), 20-28.
- Xiong, X., Tan, B., Song, M., Ji, P., Kim, K., Yin, Y., & Liu, Y. (2019). Nutritional intervention for the intestinal development and health of weaned pigs. *Frontiers in Veterinary Science*, 6(2019), 46.
- Yang, J., Xiao, A., & Wang, C. (2014). Novel development and characterization of dietary fiber from yellow soybean hulls. *Food Chemistry*, 161(2014), 367-375.
- Ye, F., Tao, B., Liu, J., Zou, Y., & Zhao, G. (2016). Effect of micronization on the physicochemical properties of insoluble dietary fiber from citrus (*Citrus junos* Sieb. Ex Tanaka) pomace. *Food Science and Technology International*, 22(3), 246-255.
- Yu, C., Zhang, S., Yang, Q., Peng, Q., Zhu, J., Zeng, X., & S. Qiao. (2016). Effect of high diets formulated with different fibrous ingredients on performance, nutrient digestibility and faecal microbiota of weaning piglets. *Archives of Animal Nutrition*, 70(4), 263-277.
- Zhao, X., Jørgensen, H., & Eggum, B.O. (1995). The influence of dietary fibre on body composition, visceral organ weight, digestibility and energy balance in rats housed in different thermal environments. *British Journal of Nutrition*, 73(5), 687-699.
- Ziggers, D. (2012). *Dietary fibre, the missing nutrient in pig production*. Retrieved July 3, 2017, from <http://www.allaboutfeed.net/Nutrition/Diet-Formulation/2011/11/Dietary-fibre-the-missing-nutrient-in-pig-production-AAF012606W/>
- Zijlstra, R.T., Jha, R., Woodward, A.D., Fohse, J., & van Kempen, T.A.T.G. (2012). Starch and fiber properties affect their kinetics of digestion and thereby digestive physiology in pigs. *Journal of Animal Science*, 90(4), 49-58.



การวิเคราะห์หาปริมาณใยอาหาร (Total dietary fiber) ตามวิธีการของ AOAC (1995)

1. อุปกรณ์

- 1.1 ปีกเกอร์ทรงสูง ขนาด 600 มิลลิลิตร
- 1.2 Filter crucible ขนาด 50 มิลลิลิตร โดยมีการเตรียม crucible ดังนี้
 - 1.2.1 เมาถ้วยเปล่า 525 °C ซ้ำมคีน เพื่อทำความสะอาดด้วยก่อนนำมาใช้
 - 1.2.2 เมื่อถ้วยเย็น นำมาแช่ cleaning solution 2% นาน 1 ชั่วโมง
 - 1.2.3 ล้างทำความสะอาดด้วย deionized water แล้วล้างด้วย acetone

ปริมาณ 15 มิลลิลิตร 1 ครั้ง

คงที่

- 1.2.4 เติม Celite® 1.0 กรัม จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 130 °C จนได้น้ำหนัก

- 1.2.5 ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น ประมาณ 1 ชั่วโมง บันทึกน้ำหนักถ้วย

- 1.3 Filer flask
- 1.4 ชุดปั๊มสุญญากาศ
- 1.5 อ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ
- 1.6 เครื่องชั่ง
- 1.7 ตู้อบลมร้อน
- 1.8 เตาเผา
- 1.9 เครื่องวัดความเป็นกรดต่าง (pH meter) พร้อมสารละลายมาตรฐาน pH 4.0, 7.0 และ 10.0

2. สารเคมี

- 2.1 ชุดเอนไซม์ Megazyme Total dietary fiber K-TDFR 100A (Megazyme International Ireland, Co. Wicklow, Ireland; cat.no. K-TDFR-100A) ประกอบด้วย
 - 2.1.1 Thermostable α -amylase (Megazyme cat no. E-BLAAM)
 - 2.1.2 Purified protease (Megazyme cat no. E-BSPRT)
 - 2.1.3 Purified amyloglucosidase (Megazyme cat no. E-AMGDF)



ภาพ 9 ชุดเอ็นไซม์ Megazyme Total dietary fiber K-TDFR 100A สำหรับวิเคราะห์ใยอาหาร

2.2 Ethanol, 95% v/v

2.3 Ethanol, 78% เตรียมโดยใช้ 95% Ethanol จำนวน 821 มิลลิลิตร เจือจางในน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 1 ลิตรใน volumetric flask

2.4 Acetone, reagent grade

2.5 Deionised water

2.6 Celite[®], analytical grade (Megazyme cat.no. G-CELITE)

2.7 Cleaning solution เตรียมให้อยู่ในรูปของสารละลายความเข้มข้น 2%

2.8 สารละลาย MES/TRIS buffer, 0.05M pH 8.2 เตรียมโดยละลาย 2(N-morpholino) ethanesulfonic 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 ให้ได้ 8 ด้วย 6.0N NaOH จากนั้นปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 2 ลิตร

2.9 สารละลาย HCl 0.561N เตรียมโดยละลาย 6N HCl 93.5 มิลลิลิตร ในน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 1 ลิตร

3. วิธีการหาค่า Total dietary fiber (DF)

3.1 ชั่งน้ำหนักตัวอย่างประมาณ 1.0 ± 0.1 กรัม ใส่ในบีกเกอร์ทรงสูง โดยทำ 2 ซ้ำ ต่อ 1 ตัวอย่าง และเตรียม blank เช่นเดียวกัน ไม่ต้องใส่ตัวอย่าง

3.2 ใส่สารละลาย MES/TRIS ปริมาณ 40 มิลลิลิตร

3.3 เติมน้ำเอนไซม์ Thermostable α -amylase ปริมาณ 50 ไมโครลิตร ปิดปีกเกอร์ ด้วยอะลูมิเนียมฟลอยด์ นำไปต้มใน water bath ที่อุณหภูมิ 98-100 °C เป็นเวลา 30 นาที

3.4 เมื่อครบเวลา นำปีกเกอร์ออกจาก water bath ปล่อยให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง ล้าง ตะกอนข้างปีกเกอร์ด้วย deionized water ปริมาณ 10 มิลลิลิตร

3.5 เติมน้ำเอนไซม์ protease ปริมาณ 100 ไมโครลิตร ปิดด้วยอะลูมิเนียมฟลอยด์ นำไปต้มใน water bath ที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 30 นาที (เริ่มจับเวลาเมื่ออุณหภูมิของ water bath อยู่ที่ 60 °C)

3.6 เมื่อครบเวลา นำออกจาก water bath เติมสารละลาย 0.561N HCl ปริมาณ 5 มิลลิลิตร ปรับ pH ให้อยู่ที่ 4.1-4.8 ด้วยสารละลาย 5% NaOH หรือสารละลาย 5% HCl

3.7 เติมน้ำเอนไซม์ amyloglucosidase ปริมาณ 200 ไมโครลิตร ปิดปีกเกอร์ด้วย อะลูมิเนียมฟลอยด์ นำไปต้มใน water bath ที่อุณหภูมิ 60 °C เป็นเวลา 30 นาที

3.8 นำออกจาก water bath เติม ethanol 95% ปริมาณ 225 มิลลิลิตร ปล่อยให้ ตกตะกอนที่อุณหภูมิห้องนาน 1 ชั่วโมง

3.9 เมื่อครบเวลา กรองตะกอนด้วย filter crucible และชุดกรองสุญญากาศ ก่อน ทำการกรอง เติม ethanol 78% ปริมาณ 15 มิลลิลิตร ใน filter crucible และดูดออก ด้วยเครื่องดูด สุญญากาศ เพื่อล้าง Celite®

3.10 ทำการล้างตะกอนด้วย

3.10.1 ethanol 78% ปริมาณ 20 มิลลิลิตร จำนวน 3 ครั้ง

3.10.2 ethanol 95% ปริมาณ 10 มิลลิลิตร จำนวน 2 ครั้ง

3.10.3 acetone ปริมาณ 10 มิลลิลิตร จำนวน 2 ครั้ง

3.11 นำกากตะกอนใน filter crucible ไปอบ 1 คืน ที่อุณหภูมิ 103 °C ทิ้งให้เย็นใน โถดูดความชื้น บันทึกรน้ำหนัก

3.12 นำ filter crucible ซ้ำแรกทั้งของตัวอย่าง และ blank ไปหาปริมาณเถ้า โดยเผา ที่อุณหภูมิ 525 °C นาน 5 ชั่วโมง จากนั้นคำนวณหาปริมาณเถ้า (B_{ash} , mg_{ash}) จากนั้นนำ filter crucible ซ้ำที่สอง ไปหาปริมาณโปรตีน ด้วยวิธี Kjeldahl method ($Crude\ protein = \%N * 6.25$) ($B_{protein}$, $mg_{protein}$)

3.13 คำนวณหาค่าใยอาหารรวม (Total dietary fiber; DF)

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

$R1/R2$ = Residue weight (mg) of each replicate of sample

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

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

$B1 / B2$ = 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)

4. วิธีการวิเคราะห์ใยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำ (insoluble dietary fiber; iDF)

4.1 ทำการวิเคราะห์เหมือนกับการวิเคราะห์ DF จนถึงข้อ [7] หลังจากย่อยด้วย amyloglucosidase จนครบเวลาแล้ว นำมากรอง และล้างด้วยน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 70 °C ปริมาณ 10 มิลลิลิตร จำนวน 2 ครั้ง

4.2 ล้างกากตะกอนด้วย

4.2.1 ethanol 78% ปริมาณ 20 มิลลิลิตร จำนวน 3 ครั้ง

4.2.2 ethanol 95% ปริมาณ 10 มิลลิลิตร จำนวน 2 ครั้ง

4.2.3 acetone ปริมาณ 10 มิลลิลิตร จำนวน 2 ครั้ง

4.3 นำตัวอย่างอบที่อุณหภูมิ 103°C ซ้ำมคีน ทิ้งให้เย็นในโถดูดความชื้น บันทีก น้ำหนัก

4.4 นำตัวอย่าง 1 ซ้ำ ไปหาปริมาณเถ้า โดยการเผาที่อุณหภูมิ 525 °C เวลา 5 ชั่วโมง และนำตัวอย่างอีก 1 ซ้ำไปวิเคราะห์หาปริมาณโปรตีนด้วยวิธี Kjeldahl method (Crude protein = %N *6.25)

4.5 คำนวณหาปริมาณ iDF โดยใช้สูตรเดียวกับการวิเคราะห์ปริมาณ DF

5. คำนวณปริมาณของ (soluble dietary fiber; sDF) = DF-iDF