

บทที่ 2

ตรวจสอบเอกสาร

2.1 ความสำคัญของฟอสฟอรัส

ฟอสฟอรัสนอกจากเป็นส่วนประกอบหลักของกระดูกแล้ว ฟอสฟอรัสยังเป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์ที่มีความสำคัญต่อกระบวนการเมตาบอลิซึม เช่น เมตาบอลิซึมของพลังงาน คาร์โบไฮเดรต กรดอะมิโน ไนโตรในกล้ามเนื้อ เมตาบอลิซึมของเนื้อเยื่อและประสาท การขนส่งกรดไขมัน การเจริญเติบโตของกระดูกไขสันหลัง และฟอสเฟต(ฟอสฟอรัส) ยังเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของกรดนิวคลีอิก เช่น DNA และ RNA รวมทั้งตัวกระตุ้นเอนไซม์ (Coenzyme) อีกหลายตัว และยังมีความสำคัญในกระบวนการ phosphorylation ของ น้ำตาลกลูโคสและสารอนุพันธ์ของกลูโคส (Scott et al., 1976, 1982) ในเลือดปกติ จะมีระดับของฟอสฟอรัส 35-45 มิลลิกรัม/100 มิลลิลิตร ในจำนวนนี้อยู่ในรูปฟอสฟอรัส อินทรีย์เพียง 10 เปอร์เซ็นต์

Hughes และคณะ (อ้างโดย Scott et al., 1976) ซึ่งทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงระดับของความเข้มข้นของวิตามินดี 3 ($1\alpha, 25-(OH)_2D_3$) ในซีรัมของหนูที่ได้รับแคลเซียมและฟอสฟอรัสระดับต่ำในอาหาร พบว่าระดับของวิตามินดี 3 เพิ่มขึ้นเป็น 5 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับหนูที่ได้รับแคลเซียมและฟอสฟอรัสปกติ ซึ่งเป็นผลมาจากการควบคุมของพาราไธรอน (Parathormone) จากต่อมพาราไธรอยด์ (parathyroid) และไธรอนแคลซิโทนิน (calcitonin) จากต่อมไธรอยด์ (thyroid) และพบว่าระดับของฟอสฟอรัสในซีรัมจะต่ำลงถ้าการทำงานของต่อมพาราไธรอยด์และต่อมไธรอยด์ถูกยับยั้ง แสดงว่าฟอสฟอรัสระดับต่ำในซีรัมจะเป็นตัวกระตุ้นการสังเคราะห์พาราไธรอน และพาราไธรอนจะไปกระตุ้นการสังเคราะห์วิตามินดี 3 ที่ไต โดยที่วิตามินดี 3 จะไปดึงแคลเซียมและฟอสฟอรัสจากกระดูกมาทดแทน รวมทั้งการเพิ่มการดูดซึมกลับ (reabsorption) ของฟอสฟอรัสที่ไต โดยการทำงานของไธรอนแคลซิโทนินจากต่อมไธรอยด์ และการเพิ่ม

การดูดซึมของฟอสฟอรัสที่ลำไส้ด้วย เช่นเดียวกับ Riis (1983) กล่าวว่า การดูดซึมของฟอสฟอรัสที่ลำไส้ถูกกระตุ้นโดยวิตามินดี ในขณะที่การดูดซึมของแคลเซียมจะผันแปรตามขีดความสามารถในการสร้าง calcium binding protein (CaBP) ในชั้นเยื่อเมือกที่ผนังลำไส้(mucosa) รวมทั้งระดับน้ำตาลกลูโคสที่สูงในลำไส้ก็จะมีผลทำให้อัตราการดูดซึมของแคลเซียมเร็วขึ้น

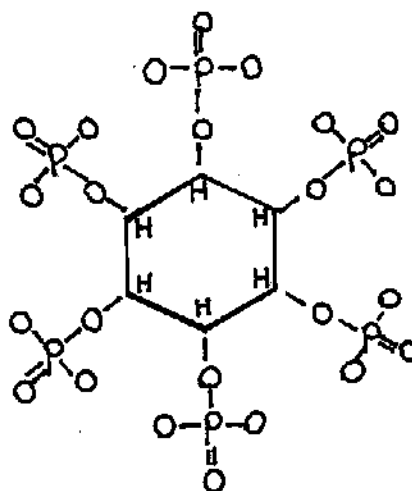
ผลที่เกิดขึ้นจากการขาดฟอสฟอรัส

การขาดฟอสฟอรัสหรือการที่สัดส่วนระหว่างแคลเซียมและฟอสฟอรัสกว้างเกินไปในอาหาร จะมีผลทำให้เกิดโรคกระดูกอ่อน(rickets)ในสัตว์เล็ก ส่วนในสัตว์โตเต็มวัยจะเกิดความผิดปกติของกระดูก(osteomalacia) เนื่องจากฟอสฟอรัสและแคลเซียมขัดขวางการดูดซึมของกันและกัน ทำให้ระดับของแคลเซียมและฟอสฟอรัสในเลือดต่ำ และมีการดึงแคลเซียมและฟอสฟอรัสจากกระดูกมาใช้จนเกินระดับที่ร่างกายจะสามารถทดแทนทดแทนได้ อย่างไรก็ตามการให้วิตามินดีสามารถป้องกันอาการผิดปกตินี้ได้ถ้าการขาดแคลเซียมหรือฟอสฟอรัสไม่รุนแรง (Scott et al., 1976) หรือเกิดขึ้นในระยะสั้นๆ ซึ่งมักจะพบได้ในระยะแรกๆ โดยถ้าการใช้ประโยชน์ได้ของฟอสฟอรัสในอาหารต่ำ หรือมีการขาดฟอสฟอรัส สัตว์จะเบื่ออาหาร อ่อนแอ และอาจตายใน 10-12 วัน แต่ถ้าการขาดไม่รุนแรงสัตว์จะแสดงอาการกระดูกอ่อน การเจริญเติบโตผิดปกติ แต่ไม่พบว่ามีผลต่อการสร้าง DNA, RNA และเอนไซม์ แม้ว่าสัตว์จะอดอาหารเป็นระยะเวลาสั้นก็ตาม เนื่องจากการดึงฟอสฟอรัสจากกระดูกมาใช้ทดแทน จึงทำให้ระดับของฟอสเฟตในเลือดและฟอสเฟตที่ขับออกทางปัสสาวะอยู่ในระดับปกติ (Riis, 1983)

การใช้ประโยชน์ได้ของฟอสฟอรัสในอาหารสัตว์นั้นมีความแตกต่างกัน ซึ่งขึ้นอยู่กับแหล่งของวัตถุดิบ โดยพบว่าแหล่งของฟอสฟอรัสที่มาจากสัตว์ เช่น กระดูกป่น ปลาป่น มีการใช้ประโยชน์ได้ 100 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่แหล่งของฟอสฟอรัสที่ได้จากหินมีการใช้ประโยชน์ได้โดยเฉลี่ยประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น ซึ่งค่านี้จะผันแปรตามชนิดของวัตถุดิบและความสามารถในการใช้ประโยชน์ของสัตว์เอง เนื่องจากฟอสฟอรัสจากหินส่วนใหญ่อยู่ในรูปของการค้ำไคต์ ซึ่งจะถูกละลายได้ด้วยเอนไซม์ฟอสเฟสเท่านั้น ซึ่งในระดับย่อยอาหารของสัตว์เองสามารถผลิตฟอสเฟสได้เพียงเล็กน้อย (Scott et al., 1976)

2.2 แหล่งของกรดอินทรีย์ ไขมัน หรือโพแทสเซียมฟอสเฟต

กรดอินทรีย์ (myoinositol-1,2,3,4,5,6-hexakis-phosphate) มีโครงสร้างของโมเลกุลที่ประกอบด้วยกลุ่มของฟอสเฟต (phosphate group) ซึ่งเกิดจากการยึดจับกันระหว่างไอออนของฟอสฟอรัส 1 อะตอม กับไอออนของออกซิเจน 4 อะตอม โดยมีออกซิเจน 1 อะตอมจับเป็นพันธะคู่ (double bond) กับฟอสฟอรัส และไอออนของออกซิเจนที่อยู่ตรงข้ามจะจับกับไอออนของคาร์บอนซึ่งเป็นโมเลกุลของวงแหวนโครงสร้างของอินโนซิทอล (inositol) ทำให้ไอออนของออกซิเจนที่อยู่อีก 2 ด้านจับกับฟอสฟอรัสเป็นพันธะเดี่ยว (single bond) และอยู่ในสภาพที่จะรับไอออนจากธาตุอื่น (reducing ion) ดังแสดงอยู่ในภาพที่ 1 ซึ่งถ้าไอออนของออกซิเจนจับกับไอออนของธาตุใดจะทำให้เกิดเป็นพันธะ โคออดิเนต (co-ordinate bond) ที่แข็งแรงการใช้ประโยชน์ของแร่ธาตุนั้นลดลงตามไปด้วย (Scott, 1982)



ภาพที่ 1 แสดงโครงสร้างโมเลกุลของกรดอินทรีย์

ที่มา : Scott และคณะ (1982)

การโคพิดาพบอยู่ในพืช โดยเฉพาะในส่วนที่อยู่เหนือดิน (aerial parts) อันได้แก่ ส่วนของลำต้น ใบ และเมล็ด เช่น พืชอาหารสัตว์ (forage crop) เมล็ดถั่วเหลือง เมล็ดถั่วเขียว ข้าวโพด ข้าวฟ่าง ข้าวสาลี ข้าวไรย์ และอื่นๆ นอกจากนี้ยังพบมากในเมล็ดที่ขึ้นมัน (oil seed) เช่น เมล็ดค้าย เมล็ดถั่ว เมล็ดงา เมล็ดปาล์ม เป็นต้น ซึ่งส่วนต่างๆ ของพืชเหล่านี้มักจะเป็นวัตถุหลักที่ใช้ในการเลี้ยงสัตว์ เพราะไม่เป็นแค่แหล่งของพลังงาน และโปรตีนที่สำคัญเท่านั้น แต่ยังเป็นแหล่งของแร่ธาตุที่สำคัญและวิตามินบางชนิดอีกด้วย จึงจะเห็นได้จากแหล่งข้อมูลทางด้านอาหารสัตว์ที่ใช้กันเป็นมาตรฐาน เช่น NRC (1988) ซึ่งแสดงไว้ในตารางที่ 1

รูปของโคพิดาที่พบในธรรมชาติส่วนใหญ่พบในรูปเกลือผสมของแคลเซียมและแมกนีเซียมจับอยู่ โดยพันธุโคออดิเนต (Cosgrove, 1980; Asada et al. อ้างโดย Abernethy et al., 1973 และ Erdman, 1979) นอกจากแคลเซียมและแมกนีเซียมแล้ว การโคพิดเป็นสารที่สามารถจับตัวกับไอออนของโลหะอื่นในรูปของสารคีเลตที่จับกับโลหะ (chelated metal) ทำให้สัตว์ไม่สามารถใช้อิออนเหล่านั้นให้เป็นประโยชน์ได้ ที่เป็นดังนี้เพราะว่าโครงสร้างวงแหวนของการโคพิดอันเกิดจากการจับยึดระหว่างกลุ่มฟอสเฟตกับอะตอมของคาร์บอนในโมเลกุลของอินโนซิโตนคัย พันธะโควาเลนต์ (covalent bond) ทำให้เกิดโครงสร้างที่แข็งแรง เมื่อโครงสร้างวงแหวนนี้ถูกเสริมด้วยการจับยึดแมกนีเซียมโคออดิเนตระหว่างไอออนของโลหะกับฟอสเฟตอีกชั้นหนึ่ง จึงทำให้เป็นโครงสร้างของแร่ธาตุที่ถูก chelated ที่แข็งแรงยิ่งขึ้น อันเป็นผลทำให้ทั้งโลหะและฟอสเฟตถูกปลดปล่อยได้น้อยมาก (Scott et al., 1982)

สารคีเลต (organic chelate) หมายถึง กลุ่มของสารอินทรีย์ที่มีคุณสมบัติในการจับกับไอออนบวกของโลหะ (metal polyvalent cation) โดยพันธุโคออดิเนต ซึ่งจะมีอิทธิพลต่อการดูดซึม และ/หรือการใช้ประโยชน์ได้ของแร่ธาตุที่จับกับสารคีเลตนั้น ในระบบร่างกายของสัตว์ ซึ่ง Scott และคณะ (1982) อธิบายว่า สารคีเลตที่ขัดขวางการใช้ประโยชน์ของแร่ธาตุในระบบร่างกายสัตว์เป็นสารคีเลตที่สร้างขึ้นโดยอุบัติเหตุ และไม่มีประโยชน์ต่อระบบขนถ่ายแร่ธาตุในร่างกาย และอาจจะขัดขวางไม่ให้สัตว์ใช้ประโยชน์จากแร่ธาตุที่จับอยู่ ตัวอย่างสารคีเลตเหล่านี้เช่น กรดออกซาลิก (oxalic acid) จับกับแคลเซียม การโคพิดจับกับสังกะสีและธาตุอื่นๆ โดยเฉพาะการโคพิดคัยว่ามีความ

ตารางที่ 1 แสดงส่วนประกอบทางโภชนาของวัตถุดิบอาหารสัตว์จากพืชที่สำคัญบางชนิด และการใช้ประโยชน์ได้ในสุก

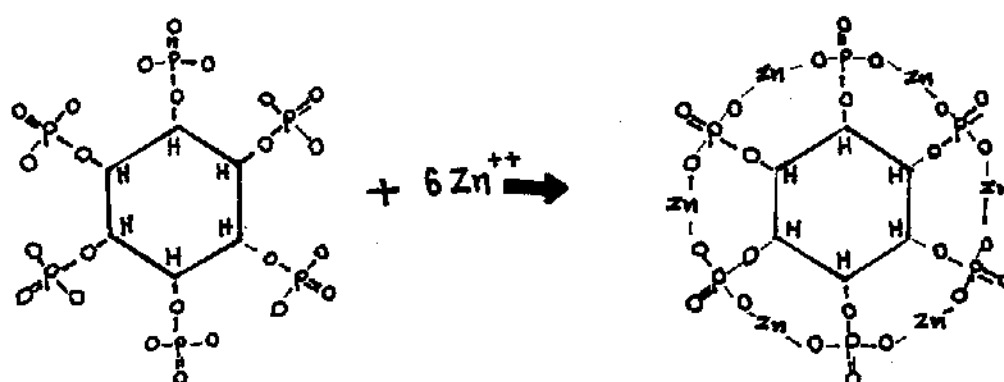
วัตถุดิบ	พลังงาน (ME) kcal/kg	โปรตีน (% CP)	ไขมัน (%)	แคลเซียม (%)	ฟอสฟอรัส ² / (%)	ฟอสฟอรัสที่ใช้ประโยชน์ได้ (%)
เมล็ดข้าวมาร์เลย์ (Barley grain)	3,040	11.5	1.7	0.05	0.34	31.0
กากเบียร์ (Brewer's grain)	1,900	27.3	6.6	0.29	0.51	n.a.
ข้าวโพด (Corn dent yellow grain)	3,420	8.5	3.6	0.03	0.28	15.0
ปลายข้าว (Rice grain; broken)	3,290	7.8	0.6	0.03	0.13	n.a.
เมล็ดข้าวไรน์ (Rye grain)	3,005	12.0	1.5	0.06	0.32	n.a.
รำข้าว (Rice bran)	2,865	14.0	1.5	0.11	1.37	25.0
รำอ่อน (Rice polishing)	3,428	11.9	12.6	0.05	1.34	n.a.
รำข้าวสาลี (Wheat bran)	2,115	15.5	4.0	0.13	1.16	35.0
กากเมล็ดถั่วลิสง (Peanut meal)	3,710	49.2	5.6	0.20	0.56	12.0
กากถั่วเหลือง (Soybean meal)	3,220	44.0	1.1	0.30	0.65	38.0
ถั่วเหลืองไขมันเต็ม (Soybean full-fat)	3,625	36.7	18.8	0.26	0.61	n.a.
กากเมล็ดทานตะวัน (Sunflower meal)	2,640	45.5	2.9	0.42	0.94	n.a.
กากเมล็ดฝ้าย (Cotton seed meal)	2,730	36.8	5.1	0.20	0.71	21.0
กากน้ำตาลอ้อย (Molasses cane)	2,005	4.4	0.1	0.77	0.08	n.a.

1/ คัดแปลงจาก NRC (1988) ตารางที่ 6-2 และ 6-7

2/ ฟอสฟอรัสทั้งหมดที่มีในวัตถุดิบ (ฟอสเฟตอินทรีย์ + กรดฟอสฟอริก)

n.a. = ไม่มีข้อมูลรายงาน (not available)

สำคัญอย่างยิ่ง ซึ่งเมื่อจับกับแร่ธาตุแล้วจะทำให้แร่ธาตุนั้นอยู่ในรูปที่ไม่ละลายและใช้ประโยชน์ไม่ได้ เนื่องจากสารโพแทสเซียมจะไม่ปลดปล่อยแร่ธาตุที่จับอยู่เข้าสู่ระบบร่างกายของสัตว์ ดังแสดงโครงสร้างในภาพที่ 2



phytic acid

insoluble zinc phytate

ภาพที่ 2 แสดงการจับตัวของกรดไฟติกกับแร่สังกะสีเกิดเป็นสารคีเลตที่ไม่ละลาย (insoluble chelate)

ที่มา : Scott และคณะ (1982)

2.3 ความสำคัญของกรดไขมันในทางโภชนาการอาหารสัตว์

เนื่องจากกรดไขมันส่วนใหญ่อยู่ในเมล็ดพืช และทำหน้าที่เหมือนเป็นแหล่งเก็บสำรองของพอลิฟอสฟอรัส (Lin *et al.*, 1987) ทำหน้าที่เป็นตัวป้องกันกำการเกิดออกซิเดชัน (antioxidant) เพื่อช่วยยืดระยะเวลาในการเก็บรักษาเมล็ดพันธุ์ (Scott, 1991) โดยทั่วไปกรดไขมันมีอยู่ประมาณ 50-80 เปอร์เซ็นต์ของพอลิฟอสฟอรัสทั้งหมดในเมล็ดพืช (Raboy and Dickinson, 1987) และยังพบกรดไขมันในส่วนหางและหัวของพืช (Macance and Widdowson, อ้างโดย Lin *et al.*, 1987) รวมถึงสารอินทรีย์ในดิน (Caldwell and Black, อ้างโดย Lin *et al.*, 1987) กรดไขมันไม่เพียงแต่เป็นแหล่งสะสมของพอลิฟอสฟอรัสในเมล็ดที่ใช้ประโยชน์ได้อีกทางอาหารสัตว์เท่านั้น โครงสร้างการจับตัวของกรดไขมันยังมีผลกระทบต่อการใช้ประโยชน์ได้ของโปรตีนและคาร์โบไฮเดรต เนื่องจากมีการจับยึดของโมเลกุลของกรดไขมันกับคาร์โบไฮเดรตและโปรตีนที่เกิดตามธรรมชาติ (Cosgrove, 1980 และ Yoon *et al.*, 1983) ซึ่งรวมทั้งการใช้ประโยชน์ได้ของแร่ธาตุ เช่น สังกะสี (Zn) ทองแดง (Cu) แมกนีเซียม (Mg) เหล็ก (Fe) และแคลเซียม (Ca) (de Boland *et al.*, 1975; Ballam *et al.*, 1984; Yoon *et al.*, 1983 และ Turnlund *et al.*, 1984) ดังนั้นความสามารถในการย่อยสลายกรดไขมันในอาหารสัตว์ จึงนับว่ามีผลกระทบต่อสมรรถนะในการผลิตของสัตว์ที่สำคัญปัจจัยหนึ่งเช่นกัน

2.4 ปริมาณกรดไขมันในวัตถุดิบอาหารสัตว์ที่สำคัญ และการใช้ประโยชน์ในสัตว์

จากการสำรวจวัตถุดิบอาหารสัตว์ 609 ชนิด ในประเทศจีน (Anonymous, 1984 และ Nelson *et al.*, 1968a) พบว่า เมล็ดพืชมีปริมาณกรดไขมันประมาณ 48-73 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณพอลิฟอสฟอรัสทั้งหมด เมล็ดพืชตระกูลถั่วยังไม่ผ่านการแปรรูปมีประมาณ 27-41 เปอร์เซ็นต์ หากเมล็ดพืชนั้นผ่านการแปรรูปประมาณ 40-65 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งข้อมูลการใช้ประโยชน์ได้ของพอลิฟอสฟอรัสของพืชแต่ละชนิดนั้น ได้มีการศึกษารวบรวมไว้ทั้งที่จีน เขตตอนใต้ (National Research Council, 1988) และประเทศไทย (เขามาเลย์ และ สาโรช, 2530 และ อุทัย, 2529) ดังแสดงเปรียบเทียบไว้ในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าการใช้สารอินทรีย์ในอาหารผสมสัตว์น้ำในน้ำจืด

อาหาร	ส่วนผสม				ส่วนผสมที่ใช้สารอินทรีย์		
	โปรตีน ^{1/}	พลังงาน ^{2/}	กรดไขมัน ^{3/}	ไขมัน			
	(CP, %)	ME (Kcal/kg)	%		1/	2/	3/
				(%)	(%)	(%)	(%)
กากถั่วเหลือง	44	2,450	0.25	0.65	0.27	0.54	0.20
กากถั่วลิสง	42	2,450	0.17	0.63	0.36	0.20	0.20
กากงา	36	2,450	2.00	1.37	0.26	0.40	0.40
กากเมล็ดพืชมะพร้าว	32	2,400	0.03	0.93	0.14	0.30	0.30
กากเมล็ดคาถา	42	2,200	0.68	1.29	0.40	0.40	0.40
กากเมล็ดพืชมะพร้าว	23	2,450	0.13	-	-	0.20	0.20
กากเมล็ดข้าว	32	2,200	0.45	0.97	0.29	0.45	0.33
กากเมล็ดข้าว	32	2,500	0.40	-	-	0.42	0.42
กากมะพร้าว	18	2,800	0.60	-	-	0.13	0.20
กากข้าวเหนียว	13	2,200	0.26	-	-	0.16	0.20
กากข้าว	1.6	2,000	0.61	-	-	0.01	0.03
ข้าวเปลือก	6.2	-	0.04	-	-	0.18	0.10
ข้าวแดง	8.5	3,150	0.01	-	-	0.05	0.05
ข้าวโพด	8.7	3,200	0.01	0.8	0.10	0.11	0.10
ข้าวเจ้า	10.8	3,150	0.01	0.30	-	0.15	0.10
ข้าวสาลี	11.5	3,100	0.06	0.37	0.11	0.13	0.13
เมล็ดถั่วเหลืองในน้ำ	3.8	3,300	0.25	0.50	-	0.20	0.20
เมล็ดข้าวในน้ำ	20	3,250	0.17	-	-	0.10	0.10
ขี้เถ้า	8	3,150	0.01	-	-	0.04	0.04
ขี้เถ้า	2.2	3,100	0.14	-	-	0.06	0.06
ขี้เถ้า	1.87	3,150	0.12	-	-	0.05	0.05
รำละเอียด	12.5	2,800	0.02	-	-	0.47	0.47
รำหยาบ	8.2	1,400	0.09	1.50	0.21	0.06	0.10
สับปะรด	30	2,100	0.46	0.52	-	0.27	0.17

1/ ที่มา MRC (1984)

2/ ที่มา เบลูมเบิร์ก และ สามี (2530)

3/ ที่มา สุทธิ (2529)

ฟอสฟอรัสที่อยู่ในพืชส่วนใหญ่อยู่ในรูปกรดไฟติก ซึ่งสัตว์แต่ละชนิดใช้ประโยชน์ได้ต่างกัน โดยสัตว์กระเพาะเคี้ยวใช้ประโยชน์ได้ต่ำกว่า 35 เปอร์เซ็นต์ สัตว์กระเพาะรวมซึ่งมีจุลินทรีย์ในกระเพาะหมักช่วยย่อยสลายสามารถใช้ประโยชน์ได้มากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ (Anonymous, 1984) อย่างไรก็ตามจากผลการทดลองในสุกร พบว่าการใช้ประโยชน์ได้ของกรดไฟติกอยู่ในช่วงประมาณ 30-35 เปอร์เซ็นต์ (Anonymous, 1984; Peeler อ้างถึงใน Calvert et al., 1978) ขึ้นอยู่กับช่วงอายุของสุกร สภาพความเหมาะสมภายในระบบย่อยอาหาร สภาพการจัดการ และส่วนประกอบของอาหาร (Jongbloed et al., 1992) โดยเฉพาะอย่างยิ่งคุณสมบัติเฉพาะของวัตถุดิบแต่ละชนิด ซึ่งผลการทดลองของ Cromwell และ Stahly (1988) พบว่า การใช้ประโยชน์ได้ของกรดไฟติกในวัตถุดิบแต่ละชนิดมีค่าต่างกันเมื่อลูกสุกร (น้ำหนัก 13.8 กิโลกรัม) ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยกากถั่วเหลือง กากเมล็ดค้าย กากเมล็ดคาโนล่า กากเมล็ดทานตะวัน และเนื้อและกระดูกไก่ ในแต่ละสูตร เป็นแหล่งของฟอสฟอรัส โดยคิดค่าฟอสฟอรัสที่ใช้ประโยชน์จากวัตถุดิบแต่ละตัวเฉลี่ย 30 เปอร์เซ็นต์ เสริมด้วยฟอสฟอรัสอินทรีย์จนครบตามความต้องการ ผลการทดสอบกระดูก พบว่าความแข็งแรงของกระดูกในสุกรแต่ละกลุ่มให้ค่าแตกต่างกัน ($P < .01$) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการใช้ประโยชน์ได้ของฟอสฟอรัสจากอาหารแต่ละชนิดไม่เท่ากัน โดยเมื่อเปรียบเทียบค่าการใช้ประโยชน์ได้ของฟอสฟอรัสแล้ว พบว่าเนื้อและกระดูกมีค่าเท่ากับ 72 เปอร์เซ็นต์ กากถั่วเหลือง 28 เปอร์เซ็นต์ กากเมล็ดคาโนล่า 21 เปอร์เซ็นต์ กากเมล็ดทานตะวัน 3 เปอร์เซ็นต์ และกากเมล็ดค้าย 2 เปอร์เซ็นต์ (ตารางที่ 3) เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของวัตถุดิบปริมาณเยื่อใยที่ประกอบอยู่ในวัตถุดิบแต่ละชนิด น่าจะมีผลทำให้การใช้ประโยชน์ได้ของกรดไฟติกแตกต่างกัน อย่างไรก็ตามจากการทดลองของ Ballam และคณะ (1984) พบว่าการย่อยสลายของกรดไฟติกในไก่กระต่ายไม่ได้รับผลกระทบจากปริมาณของเยื่อใยในวัตถุดิบมากเท่ากับแหล่งของกรดไฟติก และระดับแคลเซียมและฟอสฟอรัสในสูตรอาหาร ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 2 ผลค่าการให้ธาตุโพแทสเซียมของพืชที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของพืชในดิน 10-30 กิโลกรัม โดยมีค่าการให้ธาตุ

ปัจจัยทดสอบ	ระดับการให้ธาตุ										
	ความสูง	C + MSP/	C + SSP/	C + CSP/	C + CH/	C + SSP/	C + MSP/	ความสูง	C + MSP/	C + SSP/	C + MSP/
(C) 1/	0.14P	0.24P	0.14P	0.24P	0.14P	0.24P	0.14P	0.24P	0.14P	0.24P	0.24P
ปริมาณ P (%)	0.2	0.3	0.4	0.3	0.4	0.3	0.4	0.3	0.4	0.3	0.4
ความแข็งแรงของกระดูก (Bone strength, kg)											
- Femurs	51.5	114	196	69	94	56	75	69	67	43	60
- 3rd, 4th Meta- tarsals and Metacarpals	21	45.5	67	26	33	19	23	24.5	33.5	20	26
การให้ธาตุโพแทสเซียม P (P-availability, %) ของดินในไร่		100	28	28	n.a.	21	3	72			

ที่มา : ดัดแปลงจาก Crowell and Stably (1986)

1/ C คือ ค่าการให้ธาตุโพแทสเซียมจาก ปุ๋ยคอกเพียงอย่างเดียว

และจากปุ๋ยคอกที่ใช้ร่วมกับปุ๋ยเคมี

2/ MSP คือ ปุ๋ยโพแทสเซียม

3/ SSP คือ ปุ๋ยโพแทสเซียม

4/ CSP คือ ปุ๋ยโพแทสเซียม

5/ CH คือ ปุ๋ยโพแทสเซียม

6/ SSP คือ ปุ๋ยโพแทสเซียม

7/ MSP คือ ปุ๋ยโพแทสเซียม

* ระดับผลให้ธาตุโพแทสเซียมในดิน 0.65%

n.a. = ไม่พบผล

ตารางที่ 4 แสดงค่าการย่อยสลายกรดโฟลิกในไก่กระหงในสูตรอาหารที่มีส่วนประกอบของเยื่อใย (ADF) แหล่งของกรดโฟลิก และสัดส่วนของแคลเซียม/ฟอสฟอรัสต่างกันในสูตรอาหารแต่ละสูตร

สูตรอาหาร	ส่วนประกอบในอาหาร (%)		การย่อยสลายกรดโฟลิก (%)		
	-----		กลุ่ม 1	กลุ่ม 2	เฉลี่ย
	ADF	กรดโฟลิก	1.0% Ca, 0.56% P	0.85% Ca, 0.42% P	
สูตรควบคุม	7.1	0.82	9.5	22.6	16.1
สูตรควบคุม + 15% รำข้าว	7.7	1.21	10.7	15.3	13.0
สูตรควบคุม + 15% รำข้าวสาลี	8.6	1.10	9.1	24.1	16.6
สูตรควบคุม + 15% ถั่วอัลฟัลฟา	11.8	0.67	14.2	36.4	25.3
สูตรควบคุม + 10% เซลลูโลส	15.5	0.67	20.8	42.4	31.6
สูตรควบคุม + 10% เปลือกเมล็ดฝ้าย	16.3	0.78	2.9	10.5	6.7
เฉลี่ย	-	-	11.2	25.2	

ที่มา : Ballam และคณะ (1984)

2.5 ผลของการคัพภที่ต่อการให้ประโยชน์ได้ของโภชนาอื่นในอาหาร

2.5.1 คาร์โบไฮเดรตและโปรตีน

เนื่องจากกรดไขมันเป็นส่วนสำคัญของสารเคมีที่มีโครงสร้างในการจับกับไขมันของแร่ธาตุโดยพันธะที่แข็งแรง และไม่ถูกย่อยสลายได้ง่ายในระบบย่อยอาหารสัตว์ และตำแหน่งโมเลกุลของกรดไขมันยังอยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกับโมเลกุลของแป้งและโปรตีน ทำให้มีการจับกันของโมเลกุล (Yoon *et al.*, 1983) โดยจะพบกรดไขมันสะสมอยู่ในชั้นเนื้อเยื่อหุ้มเปลือก (aleurone layer) และชั้นอาหารสะสม(endosperm) และในส่วนที่เป็นโปรตีนโครงสร้างของเนื้อเยื่อ (protein body) (Gabard and Jones; Yamagata *et al.* และ Baldi *et al.* อ้างโดย Scott, 1991) ทำให้การย่อยได้ของคาร์โบไฮเดรตและโปรตีนต่ำลงด้วย

2.5.1.1 คาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate)

สุกรสามารถใช้เยื่อใยในอาหารได้ในปริมาณจำกัด เนื่องจากสุกรไม่สามารถย่อยสลายเซลลูโลสและกรดไขมันที่มีอยู่ในอาหารได้ ระดับเยื่อใยจึงเป็นตัวจำกัดระดับพลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้ในอาหารทำให้ไปจำกัดการเจริญเติบโต และยังมีผลทำให้การย่อยได้ของวัตถุดิบทั้งและโปรตีนลดลง (Teague and Hudson; Keys *et al.*; Farrell และ Johnson; Kass *et al.* อ้างโดย Moser *et al.*, 1982) ในส่วนของกรดไขมัน Hall และ Hodges (อ้างโดย Abernethy *et al.*, 1973) และ Abernethy และคณะ (1973) แสดงให้เห็นว่ากรดไขมันมีส่วนเกี่ยวข้องกับการย่อยได้ของแป้งและโปรตีน และเป็นตัวกระตุ้นการงอกของเมล็ดพืชโดยการทำงานของเอนไซม์ไฟเตส การทำงานของเอนไซม์จะเกิดขึ้นเฉพาะจุด โดยเฉพาะที่ใต้ชั้นของเซลล์ที่เป็นโปรตีนโครงสร้าง และในส่วนของการสะสม(endosperm) ในเมล็ดพืชที่มีการคัพภสะสมอยู่ จะนับจึงทำให้การให้ประโยชน์ได้ของโปรตีนและแป้งกับแบรไปตามความ

สามารถในการถูกย่อยสลายของกรดไขมันส่วนหนึ่งด้วย และทั้งนี้ยังขึ้นกับปริมาณกรดไขมันที่มีอยู่ในเนื้อเยื่อด้วย

จากการศึกษาผลของกรดไขมันต่ออัตราการย่อยสลายแป้ง และการเปลี่ยนแปลงระดับของกลูโคสในเลือด Yoon และคณะ (1983) พบว่า เมื่อให้โซเดียมไฟเทต (sodium phytate) ซึ่งมีปริมาณของกรดไขมัน 2 เปอร์เซ็นต์ลงในอาหารคน ทำให้อัตราการย่อยสลายแป้งข้าวสาลีติดลดลง 50 เปอร์เซ็นต์ ระดับของกลูโคสในเลือดลดลงต่ำกว่ากลุ่มไม่เสริมกรดไขมัน สอดคล้องกับการศึกษาในคน โดย Thompson และคณะ (1987) พบว่า เมื่อให้อาหารที่ประกอบด้วยถั่ว navy bean เสริมกรดไขมัน 0.9 เปอร์เซ็นต์ อัตราการย่อยสลายแป้งของถั่ว navy bean และระดับกลูโคสในเลือดของคนที่ได้รับอาหารเสริมกรดไขมันลดลง แต่เมื่อให้แคลเซียมอัตราการย่อยสลายของแป้งและระดับกลูโคสในเลือดกลับเพิ่มสูงขึ้น เนื่องจากแคลเซียมจะเข้าไปจับกรดไขมันแทน และปลดปล่อยแป้งออกมา

อย่างไรก็ตามการศึกษาส่วนใหญ่เป็นการศึกษาในคน จุดประสงค์เพื่อหาวิธีการควบคุมระดับน้ำตาลในเลือดในคนป่วยเป็นโรคเบาหวาน การศึกษาในสัตว์ โดยเฉพาะสุกร ยังมีอยู่น้อย

2.5.1.2 โปรตีน (Protein)

จากการทดลองของ O'Dell และ Savage (1984) พบว่า การใช้ประโยชน์ได้ของโปรตีนจากถั่วเหลืองต่ำกว่าโปรตีนจากสัตว์ และเมื่อให้ความร้อนแก่ถั่วเหลือง การใช้ประโยชน์ได้ของโปรตีนเพิ่มขึ้น ผลการทดลองในไก่พบว่า เมื่อเติมกรดไขมันลงในถั่วเหลืองและโปรตีนนม(casein) เปรียบเทียบกับโปรตีนนมที่ไม่เติมกรดไขมัน พบว่า การใช้ประโยชน์ได้ของโปรตีนนมที่เสริมกรดไขมันลดลง เนื่องจากกรดไขมันสร้างสารประกอบเชิงซ้อน(complex) กับโปรตีน โดยเฉพาะในถั่วเหลือง สารประกอบนี้จะหนาท่อการถูกย่อยด้วยเอนไซม์ย่อยโปรตีน เช่น เปปซิน(pepsin) จากการศึกษาในห้องปฏิบัติการ (in vitro) ของ Afronsky (อ้างโดย Yoon et al., 1983) พบว่า กรดไขมันสามารถสร้างสารประกอบเชิงซ้อนกับโปรตีนและแป้ง(starch) รวมทั้งแป้ง

เนื่องจากค่าแห่งของโมเลกุลอยู่ในตำแหน่งใกล้เคียงกัน โดยเฉพาะกับโปรตีนนมกรด ไขมันสามารถเข้าไปจับกับโมเลกุลของโปรตีนและเอ็นไซม์ในระบบย่อยอาหาร ทำให้การ ใช้ประโยชน์ได้ของโปรตีนลดลง

จากการศึกษาในห้องปฏิบัติการของ Champagne และคณะ (1985a, 1985b) พบว่า เมื่อใช้รำข้าวซึ่งมีกรดไขมันระดับสูง มีผลทำให้การใช้ประโยชน์ได้ของแร่ธาตุลดลง การย่อยและดูดซึมของโปรตีนลดลง สอดคล้องกับการศึกษาในห้องปฏิบัติการของ Cosgrove (1980) ซึ่งศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างรำข้าว โปรตีน และกรดไขมันในรำข้าว พบว่า โปรตีนสามารถจับตัวกับกรดไขมันเป็นสารประกอบที่ไม่สามารถละลายได้เมื่ออยู่ในสภาพอุณหภูมิ กระตุ้น เช่น การเพิ่มสังกะสีจะทำให้เกิดสารประกอบของอัลบูมิน-สังกะสี (insoluble Zn-albumin complex) การเพิ่มธาตุเหล็กจะทำให้เกิดสารประกอบของโปรตีน-กรด ไขมัน (insoluble phytate-protein complex)

การทดลองของ Davies และ Nightingale (อ้างโดย Turnlund *et al.*, 1984) พบว่า เมื่อหนูได้รับอาหารประเภทเมล็ดธัญพืชหรือพืชตระกูลถั่ว เช่น ถั่วเหลือง หลังจากนำไปผ่านความร้อน ทำให้แห้งและบดละเอียด พบว่ากรดไขมันจะจับกับโปรตีนเป็น พันธะที่แข็งแรง การใช้ประโยชน์ได้ของโปรตีนจะลดลง

2.5.2 แร่ธาตุ

2.5.2.1 ฟอสฟอรัส (Phosphorus)

การใช้ประโยชน์ได้ของฟอสฟอรัสในรูปกรดไขมันสัตว์กระเพาะเคี้ยวมีความ แตกต่างกัน Anonymous (1992) รายงานว่า สุกรสามารถใช้ประโยชน์ได้ 37 เปอร์เซ็นต์ หนู 44 เปอร์เซ็นต์ และไก่ 7 เปอร์เซ็นต์ Moser และคณะ (1982) รายงานว่า การใช้ประโยชน์ได้ของฟอสฟอรัสในพืชของสุกรโดยทั่วไปจะต่ำกว่า 30 เปอร์เซ็นต์ และ Anonymous (1984) พบว่า สัตว์เคี้ยวเอื้องสามารถใช้ประโยชน์ได้ มากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ สุกร 33 เปอร์เซ็นต์ สัตว์ปีกต่ำกว่า 30 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ ผลการศึกษาของ Peeler (อ้างโดย Calvert *et al.*, 1978) พบว่า การใช้

ประโยชน์ได้ในสุกรรุ่นในช่วง 25-45 เปอร์เซ็นต์ และสัตว์ปีกเกือบจะไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้เลย

จากข้อมูลพอสรุปได้ว่า ผลกระทบที่เกิดจากการคิดค่าการใช้ประโยชน์ได้ของธาตุฟอสฟอรัสนั้นแตกต่างกันในสัตว์แต่ละชนิด โดยเปรียบเทียบจากความสามารถในการย่อยสลายกรดฟอสฟอติกในระบบย่อยอาหาร สัตว์เคี้ยวเอื้องจะได้รับผลกระทบค่าที่สุก และเพิ่มมากขึ้นในหมู สุกร และสัตว์ปีก ตามลำดับ

2.5.2.2 แคลเซียม (Calcium)

กรดฟอสฟอริกเป็นตัวขัดขวางการใช้ประโยชน์ของแคลเซียม และปกติจะอยู่ในรูปสารประกอบเชิงซ้อนของแคลเซียมกับฟอสเฟต (Ca-phytate complex) คือ $\text{Ca}_1\text{-phytate}$ และ $\text{Ca}_2\text{-phytate}$ เมื่อความเข้มข้นของแคลเซียมในสารละลายอยู่ในระดับต่ำ (Graf, อ้างโดย Scott, 1991) ประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ของฟอสฟอรัสทั้งหมดที่พบในพืช อยู่ในรูปเกลือผสม ซึ่งเกิดจากการจับตัวระหว่างเกลือของแคลเซียม แอมโมเนียม กับฟอสเฟต Wang และคณะ (1980) และ de Boland และคณะ (1975) รายงานว่า อีออนของกรดฟอสฟอริกสามารถจับกับอีออนของธาตุอื่น เช่น ทองแดง สังกะสี โคบอลต์ และเหล็ก เพื่อสร้างเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ไม่สามารถละลายได้ (insoluble phytate-mineral complex และ protein-phytate-mineral complex) ทำให้การดูดซึมแร่ธาตุลดลง

จากการศึกษาในสุกรเต็มวัย Saha และคณะ (1988) พบว่า การใช้ประโยชน์ของกรดฟอสฟอริกขึ้นอยู่กับระดับของแคลเซียมและฟอสฟอรัสมากกว่าที่จะขึ้นอยู่กับสัดส่วนของแคลเซียม:ฟอสฟอรัส ที่ระดับแคลเซียมและฟอสฟอรัสค่าการใช้ประโยชน์ได้ของกรดฟอสฟอริกเพิ่มขึ้น รวมทั้งการใช้ประโยชน์ของแคลเซียมและฟอสฟอรัสเองด้วย Sandberg และ Anderson (อ้างใน Anonymous, 1989) พบในห่านเองเดียวกันว่า ถ้ามีปริมาณแคลเซียมสูง การจับตัวระหว่างแคลเซียมและกรดฟอสฟอริกจะเกิดขึ้นมาก ทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ จึงมีผลไปลดปริมาณการดูดซึมของแคลเซียม Calvert และคณะ (1978) รายงานว่า สัดส่วนระหว่างแคลเซียม:ฟอสฟอรัสที่แคบ จะ

ลดปริมาณการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนของแคลเซียมและกรดฟอสฟอริก ทำให้การดูดซึมแคลเซียมเพิ่มขึ้น และผลกระทบอีกด้านหนึ่งต่อสัตว์เมื่อแคลเซียมถูกดูดซึมได้ต่ำก็คือ การทำงานของเอนไซม์อะไมเลส(amylase) จะลดต่ำลง เนื่องจากขาดแคลเซียมกระตุ้น (Afronsky, อ้างโดย Yoon *et al.*, 1983)

Heaney และคณะ (1991) ทำการศึกษาในคนและหนู โดยให้ตัวเหลืองเสริมด้วยกรดฟอสฟอริก พบว่าการดูดซึมของแคลเซียมลดลง การเก็บกักของแคลเซียมในร่างกาย (calcium retention) ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มที่ไม่เสริมกรดฟอสฟอริก และ Ballam และคณะ (1984) ทำการทดลองในลูกไก่และไก่รุ่น พบว่าเมื่อให้แคลเซียมระดับต่ำ การใช้ประโยชน์ได้ของกรดฟอสฟอริกเพิ่มขึ้น เนื่องจากการย่อยสลายของกรดฟอสฟอริกได้รับอิทธิพลจากแคลเซียมและแหล่งของวัตถุดิบมากกว่าปริมาณเยื่อใยหรือปริมาณกรดฟอสฟอริกที่มีในอาหาร

2.5.2.3 สังกะสี (Zinc)

แม้ว่าผลการศึกษาของ O'Dell (อ้างโดย de Boland, 1975) พบว่า กรดฟอสฟอริกสามารถรวมตัวกับสังกะสีเพื่อสร้างสารประกอบเชิงซ้อนที่ไม่สามารถละลายได้ ดังโครงสร้างที่แสดงในรูปที่ 2 ซึ่งจะทำให้การย่อยและการดูดซึมของสังกะสีลดลงก็ตาม การศึกษาต่อมาก็ยังมุ่งศึกษาถึงความสำคัญในจุดนี้ ดังเช่นการทดลองของ Oberleas; Erdman และ Forbes (อ้างโดย Wang *et al.*, 1980) ซึ่งพบว่ากรดฟอสฟอริกจะสร้างพันธะที่แข็งแรงกับสังกะสีและธาตุอื่น รวมทั้งโปรตีน มีผลทำให้การดูดซึมของแร่ธาตุ และการใช้ประโยชน์ของโปรตีนลดลง และแม้ว่า Rackis และ Anderson; Smith และ Rackis; Ford และคณะ และ Omasaiye และ Cheryan (อ้างโดย Wang *et al.*, 1980) จะสามารถแยกโพแทสเซียมออกจากโปรตีนในผลิตภัณฑ์ตัวเหลืองได้ และสามารถทำลายพันธะที่จับยึดตัวของกรดฟอสฟอริกกับโปรตีนได้ก็ตาม ก็เพียงมีผลทำให้โปรตีนย่อยสลายได้เพิ่มขึ้นเท่านั้น ในขณะที่การใช้ประโยชน์ได้ของสังกะสีและธาตุอื่นยังไม่เพิ่มสูงขึ้น

ผลกระทบต่อนอกจากการใช้ประโยชน์ของธาตุสังกะสีที่มีต่อธาตุอื่นนั้น Davies และ Flett (อ้างโดย Cooper and Gowing, 1983) รายงานว่ากรดฟอสฟอริกมีผลต่อ

การใช้ประโยชน์ได้ของสังกะสี Lee และคณะ (1988) ได้ศึกษาวิธีเพิ่มการใช้ประโยชน์ของทองแดงในหญ้าโดยการเสริมกรดฟอสฟอริก พบว่ากรดฟอสฟอริกจะจับกับสังกะสีทำให้อัตราปริมาณสังกะสีที่จะไปแข่งขันกับทองแดงในการดูดซึมที่บริเวณลำไส้เล็ก ทำให้ทองแดงถูกดูดซึมได้มากขึ้น จนมีอัตราปริมาณฟอสฟอริกในอาหารมีอยู่สูง ย่อมมีผลไปลดการใช้ประโยชน์ของสังกะสี ซึ่งสอดคล้องกับ Scott และคณะ (1982) และ Anonymous (1989) ที่ได้รายงานว่าฟอสฟอริกสามารถสร้างพันธะที่แข็งแรงกับสังกะสี ทำให้สังกะสีไม่สามารถถูกย่อยสลายและดูดซึมเข้าสู่ผนังลำไส้ได้

2.5.2.4 เหล็ก (Iron)

ความเกี่ยวข้องระหว่างกรดฟอสฟอริกกับแร่เหล็ก จากการศึกษาของ Sharpe และคณะ (อ้างโดย de Boland et al., 1975) พบว่า กรดฟอสฟอริกมีผลไปลดการใช้ประโยชน์ของแร่เหล็ก แต่ขึ้นกับสภาพของเหล็กและกรดฟอสฟอริกที่เหมาะสมด้วย (Morris, อ้างโดย de Boland et al., 1975) McCance และ Widdowson (อ้างใน Anonymous, 1989) พบว่ากรดฟอสฟอริกมีผลทำให้การดูดซึมของแร่เหล็กในคนลดลง เช่นเดียวกับ Oberleas (1973) ซึ่งพบว่ากรดฟอสฟอริกไม่เพียงแต่จะมีผลต่อการได้ประโยชน์ของแร่ธาตุที่สำคัญ ยังมีผลลดการดูดซึมธาตุเหล็ก โคบอลต์ แมกนีเซียม และสังกะสี

2.6 วิธีการเพิ่มการใช้ประโยชน์จากกรดฟอสฟอริกในอาหารสัตว์

เนื่องจากผลเสียที่เกิดจากกรดฟอสฟอริกในทางอาหารสัตว์มีหลายประการ ทั้งการใช้ประโยชน์ของแร่ธาตุ การย่อยสลายแป้งและโปรตีน นักวิจัยทั้งด้านพืชและทางด้านอาหารสัตว์จึงพยายามคิดค้นวิธีการในการกำจัดหรือลดปริมาณที่สะสมของกรดฟอสฟอริกในพืชลง หรือแม้กระทั่งพยายามหาวิธีการใช้ประโยชน์จากกรดฟอสฟอริกโดยตรง

นักวิจัยทางด้านพืชศาสตร์จำนวนมากได้พยายามคิดค้นหาพันธุ์พืชที่มีระดับกรดฟอสฟอริกสะสมในเมล็ดต่ำ โดยเฉพาะในถั่วเหลือง ซึ่งเป็นวัตถุดิบที่สำคัญที่ใช้เลี้ยงสัตว์ จากการศึกษาเบื้องต้น Raboy และ Dickinson (1987) พบว่าปริมาณกรดฟอสฟอริกในเมล็ดพืชมีอยู่

เฉลี่ยประมาณ 1.4-2.3 เปอร์เซ็นต์ การลดปริมาณกรดฟอสฟอริกให้อยู่ในระดับ 0.5 เปอร์เซ็นต์นั้นไม่ทำให้อัตราการงอกของเมล็ด อัตราการเจริญเติบโต และการให้ผลผลิตได้รับผลกระทบ อย่างไรก็ตามผู้ที่ศึกษากล่าวปัจจุบันยังอยู่ในช่วงศึกษาวิจัยอยู่

นักโภชนาการสัตว์ในอดีตได้พยายามศึกษาวิธีการหลายชนิด ในการเพิ่มการใช้ประโยชน์จากกรดฟอสฟอริก เช่น วิธี Anion-exchange resin (Smith and Rackis อ้างโดย Wang et al., 1980), วิธี Acid and salt-disruption of phytate-protein bond (Ford et al. และ Rham and Jost อ้างโดย Wang et al., 1980) และวิธี Ultrafiltration (Omosaiye and Cheryan, อ้างโดย Wang et al., 1980) ในการแยกโปรตีนออกจากกรดฟอสฟอริก และแร่ธาตุที่จับอยู่ วิธีการเหล่านี้ถึงแม้ว่าจะให้ผลดี แต่ก็ไม่เป็นที่ยอมรับกันในปัจจุบัน ซึ่งอาจจะเนื่องจากวิธีการยุ่งยาก ไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้จริง จึงมีการศึกษาหาวิธีการสลายกรดฟอสฟอริกโดยใช้เอ็นไซม์ โดยเฉพาะไฟเตส จากการศึกษาค้นคว้า Shieh และ Ware (อ้างโดย Nelson et al., 1971) ได้ทำการเก็บตัวอย่างเชื้อจุลินทรีย์จากดินมาตรวจสอบพบว่า เชื้อราในกลุ่ม *Rhizopus* spp. กลุ่ม *Aspergillus* spp. 28 ชนิด และกลุ่ม *Mucor* sp. 1 ชนิดเท่านั้น สามารถสร้างเอ็นไซม์ไฟเตสได้ ผลการตรวจสอบสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Yamada และคณะ (อ้างโดย Wang et al., 1980) ซึ่งพบว่า เชื้อรา *Aspergillus terreus* เป็นเชื้อราที่สามารถผลิตเอ็นไซม์ไฟเตสได้ดี

เอ็นไซม์ไฟเตสที่พบในพืชบางชนิด เช่น ในข้าวสาลี และข้าวไรย์ (Pointillart et al., 1987, McCance and Widdowson และ Mollgaard, อ้างโดย Nelson, 1976) สามารถย่อยสลายกรดฟอสฟอริกได้ แต่ในสภาพภายในระบบย่อยอาหารสัตว์ เอ็นไซม์จากพืชเหล่านี้จะทำงานได้ไม่ดี (Nelson, 1976) ส่วนในพืชอื่นๆ เช่น ข้าวบาร์เลย์ ข้าวโพด และข้าวโอ๊ต นั้น พบว่ามีปริมาณเอ็นไซม์เพียงเล็กน้อย (William and Taylor, 1985) เช่นเดียวกับปริมาณเอ็นไซม์ไฟเตสที่พบในระบบย่อยอาหารของสัตว์ซึ่งมีอยู่ในระดับต่ำเช่นเดียวกัน (Jongbloed et al., 1992)

การใช้เอ็นไซม์สังเคราะห์ไฟเตสในอาหารสุกรในปัจจุบันที่พบอยู่ก็คือ ใช้เอ็นไซม์ที่ได้จากเชื้อ *Aspergillus niger* ผลการศึกษาเท่าที่ค้นคว้าพบว่าไฟเตสสามารถเพิ่มการใช้ประโยชน์ได้ของฟอสฟอรัสในอาหาร (Anonymous, 1991a, Jongbloed

et al., 1992; Mroz *et al.*, 1992 และ Beer and Jongbloed, 1992) และ ช่วยลดปัญหาการปนเปื้อนฟอสฟอรัสในดิน(phosphorus-contamination) ซึ่งก่อให้เกิด ปัญหาภัยดินและน้ำ (Mroz *et al.*, 1992; Simons and Versteegh, 1990) แต่ผลที่เกิดต่อสมรรถนะในการผลิตนั้นยังมีข้อมูลอยู่น้อย (Lei *et al.*, 1992a, 1992b)

2.7 แหล่งของเอนไซม์ฟอสเฟสในระบบย่อยอาหารสุกรและประสิทธิภาพในการย่อย

เอนไซม์ฟอสเฟสในระบบย่อยอาหารสุกรมาจาก 3 แหล่ง (Nelson *et al.*, 1971) คือ จากอาหาร เยื่อพุงลำไส้เล็ก และแบคทีเรียในลำไส้

2.7.1 เอนไซม์จากอาหาร

เอนไซม์ฟอสเฟสพบมากในวัตถุดิบอาหารสัตว์บางชนิด เช่น ข้าวสาลี ข้าวไรย์ แต่ พบอยู่ในปริมาณน้อยในข้าว ข้าวบาร์เลย์ ข้าวโพด ข้าวโอ๊ต ผลจากการศึกษาพบว่า เอนไซม์จากข้าวสาลีสามารถทำงานได้ดีในระบบย่อยอาหาร (Nelson *et al.*, 1968a, McCance and Widdowson อ้างโดย Nelson, 1976) เนื่องจากมีคุณสมบัติคล้าย เอนไซม์ alkaline phosphatase สามารถทำงานได้ดีที่อุณหภูมิ 55°ซ ในสภาพที่เป็น กรด (pH 5.15) เช่นเดียวกับผลการทดลองของ Pointillart และ Fontaine (1986) ซึ่งพบว่า การย่อยสลายของกรดไขมันเพิ่มขึ้นเมื่อสุกรได้รับข้าวสาลีและข้าวไรย์ แต่เมื่อให้เมล็ดธัญพืชอื่นสุกรจะแสดงอาการขาดฟอสฟอรัส อย่างไรก็ตาม Schneiman และ Gallaber (1980) พบว่า แหล่งของเมล็ดพืชที่ใช้เลี้ยงสุกรไม่มีผลต่อระดับของ เอนไซม์ฟอสเฟสในระบบย่อยอาหาร

2.7.2 เอนไซม์จากเยื่อพุงลำไส้เล็ก

เอนไซม์ฟอสเฟสที่ผลิตขึ้นจากพุงลำไส้เป็นแหล่งของเอนไซม์ที่ทำงานได้ดีที่สุดกับ สภาพภายในระบบย่อยอาหาร (Cooper and Gowing, 1983) แต่พบอยู่ในปริมาณต่ำ

(Pointillart and Fontaine, 1986 และ Davies *et al.*, 1976) โดยทั่วไปไฟเตสจากเปื้อนหนังงาไล่เล็กของสัตว์กระเพาะเคี้ยวมีปริมาณน้อยสามารถย่อยสลายกรดไฟติกได้ต่ำกว่า 1 ใน 3 ของฟอสฟอรัสที่มีในพืชทั้งหมดเท่านั้น หนูและสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมหลายชนิดสามารถสร้างเอ็นไซม์ได้แต่มีปริมาณต่ำ Ballam และคณะ (1984) และ Bitar และ Reinhold (1972) พบว่าบริเวณที่สร้างไฟเตสมากที่สุดอยู่ที่ส่วน brush border ของลำไส้เล็กส่วนต้น(Duodenum) Wang และคณะ (1980); Moser และคณะ (1982) และ Pointillart และ Fontaine (1986) พบปริมาณของเอ็นไซม์ในสุกรอยู่ที่ระดับ $50 \mu\text{mol}/\text{min}^{-1}/\text{kg diet}^{-1}$ (PU*) ในกระต่าย 0.03 PU และในหนู 0.12 PU ซึ่งนับว่าค่ามากเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณของกรดไฟติกที่มีอยู่ในสูตรอาหาร ตัวอย่างเช่น ในสูตรอาหารสุกรจะมีระดับฟอสฟอรัสทั้งหมด 0.4-0.7 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ของจำนวนนี้สามารถถูกย่อยโดยเอ็นไซม์ที่มีในพืชและที่สัตว์ผลิตขึ้น ส่วนกรดไฟติกอีกประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ไม่สามารถใช้ประโยชน์ได้ ดังนั้นหากไม่มีการเสริมฟอสเฟตอินทรีย์ลงในอาหาร สุกรจะแสดงอาการขาดฟอสฟอรัสมาตรฐานการให้อาหารของ NRC (1988) จึงแนะนำให้เสริมฟอสเฟตอินทรีย์ในอาหารสุกรให้พอเพียง

2.7.3 เอ็นไซม์จากจุลินทรีย์ผลิตขึ้นในระบบย่อยอาหาร

เมื่อเปรียบเทียบการใช้ประโยชน์ได้ของกรดไฟติกในอาหารแล้ว สัตว์เคี้ยวเอื้องมีความสามารถในการย่อยสลายและใช้ประโยชน์จากอาหารได้ดีที่สุด เนื่องจากมีจุลินทรีย์ช่วยย่อยสลาย โดยเฉพาะจุลินทรีย์ในกระเพาะหมัก(rumen) ซึ่ง Akin *et al.* (อ้างโดย เมธา, 2533) พบว่า เชื้อราในรูเมนจะช่วยลดการจับยึดแน่นของอนุภาคอาหาร ทำให้อาหารถูกย่อยสลายได้ง่ายขึ้น โดยเอ็นไซม์ที่ผลิตจากเชื้อราและแบคทีเรีย

* 1 PU เท่ากับปริมาณของเอ็นไซม์ที่เข้าไปปลดปล่อยฟอสเฟต 1 นาโนโมล (n mol) จากโซเดียมไฟเตท ในเวลา 1 นาที ที่อุณหภูมิ 37°C pH = 5

อย่างไรก็ตามในลำไส้ใหญ่ของสุกรซึ่งมีสภาพไม่เป็นกรดมาก จุลินทรีย์สามารถเจริญอยู่ได้ และมีส่วนช่วยย่อยอาหารที่ผ่านลงมาจากลำไส้เล็กได้เพิ่มขึ้น ซึ่งรวมถึงการย่อยสลายกรดไขมันโดยเอนไซม์ฟอสเฟตที่จุลินทรีย์ผลิตขึ้น (Nelson *et al.*, 1971) แต่ปริมาณการย่อยเกิดขึ้นในระดับต่ำ และไม่ก่อให้เกิดประโยชน์ต่อสัตว์มากนัก ทั้งนี้เนื่องจากการย่อยเกิดขึ้นในลำไส้เล็กส่วนหลังซึ่งอยู่เลยบริเวณที่จะดูดซึมแร่ธาตุได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.8 สภาพที่เหมาะสมและความคงทนต่อสภาพแวดล้อมของเอนไซม์ฟอสเฟต

แม้ว่าประสิทธิภาพของเอนไซม์ฟอสเฟตทั้งในพืชและที่จุลินทรีย์ผลิตขึ้น จะมีกลไกในการเข้าย่อยสลายกรดไขมันเช่นเดียวกัน แต่คุณสมบัติในการปรับตัวและความคงทนต่อสภาพภายในระบบย่อยอาหารสัตว์ และสภาพแวดล้อมภายนอก เช่น การทนความร้อน ความเป็นกรดเป็นด่าง นับว่ามีความสำคัญมาก ซึ่งจะเป็นตัวกำหนดว่าเอนไซม์จากแหล่งใดจะมีประสิทธิภาพที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้

2.8.1 เอนไซม์ฟอสเฟตจากพืช (plant phytase)

จากการทดสอบการตอบสนองของเอนไซม์ในพืชตระกูลถั่วต่อสภาพความเป็นกรดต่างหลายระดับ พบว่าเอนไซม์จะทำงานได้ดีที่ระดับ pH เท่ากับ 8 โดยมีประสิทธิภาพสูงเป็น 2 เท่า เมื่อเทียบกับที่ pH 5 (Scott, 1991) ในขณะที่เอนไซม์จากข้าวสาลีทำงานได้ดีที่ pH 5.5 และอุณหภูมิ 55°C (Peers, อ้างโดย Abernethy *et al.*, 1973) แม้กับผลการทดลองของ Williams และ Taylor (1985) พบว่าในสภาพสารละลายเป็นกลาง ปริมาณกรดไขมันทั้งหมดในข้าวโพดถูกย่อย 44 เปอร์เซ็นต์ ข้าวสาลี 88 เปอร์เซ็นต์ จากเอนไซม์ฟอสเฟตในข้าวโพดและข้าวสาลี และเมื่อปรับสภาพสารละลายให้เป็นกรดใกล้เคียงกับระบบย่อยอาหาร (pH 4) จะทำให้การทำงานของเอนไซม์ลดลง 11 เปอร์เซ็นต์ในข้าวโพด และ 19 เปอร์เซ็นต์ในข้าวสาลี แสดงให้เห็นว่าระดับ pH 7 เหมาะสมต่อการทำงานของเอนไซม์ฟอสเฟตที่ได้จากข้าวโพดและข้าวสาลี

2.8.2 เอนไซม์ไฟเตสจากจุลินทรีย์ (microbial phytase)

จากการศึกษาสภาพที่เหมาะสมต่อการทำงานของเอนไซม์สังเคราะห์ Wang และคณะ (1980) พบว่า ไฟเตสจากเชื้อรา *Aspergillus oryzae* ทำงานได้ดีที่อุณหภูมิ 45-50°ซ และจะถูกทำลายที่อุณหภูมิ 55°ซ ในเวลา 10 นาที นอกจากนี้ไฟเตสจาก *Aspergillus oryzae* ยังสามารถรับตัวได้ดีในช่วง pH 2.6-7.8 ที่อุณหภูมิ 25°ซ ในขณะที่ Yamada (อ้างโดย Wang et al., 1980) รายงานว่า ไฟเตสจาก *Aspergillus terreus* ทำงานได้ดีและมีอุณหภูมิเหมาะสมที่ 70°ซ

ผลการศึกษาของ Zyla และคณะ (1989) พบว่า ไฟเตสจาก *Aspergillus niger* มีสภาพการทำงานเหมาะสมที่อุณหภูมิ 40-65°ซ และ pH 1.8-2.6 โดยสภาพที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่อุณหภูมิ 60°ซ และในสภาพ pH 4.5 ประสิทธิภาพของเอนไซม์ยังคงเหลืออยู่ 85 เปอร์เซ็นต์

จากการทดลองเดียวกันพบว่า ปฏิกริยาการย่อยกรดไฟติกเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์หลังสัตว์ได้รับอาหาร 4 ชั่วโมง แสดงให้เห็นว่าเอนไซม์สามารถคงอยู่ในระบบย่อยอาหารและทำงานได้ดี ทำให้การย่อยค่าเอนไปอย่างต่อเนื่องจนสิ้นสุดสมบูรณ์ จากการทดลองของ Simons และ Versteegh (1990) พบว่าระดับ pH ที่เหมาะสมของ *Aspergillus ficuum* คือ 2.5 และ 5.5 ระดับอุณหภูมิที่เหมาะสมเท่ากับ 35-40°ซ และสามารถทนความร้อนที่ใช้ในกระบวนการแปรรูปอาหารได้สูงถึง 84°ซ

Pointillart และ Fontaine (1986) รายงานว่า ปฏิกริยาการย่อยสลายกรดไฟติกจะเกิดขึ้นประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์หลังสัตว์ได้รับอาหาร 4 ชั่วโมง และเมื่ออยู่ในสภาพเป็นกลาง (pH = 7) เอนไซม์ไม่สามารถทำงานได้ เนื่องจากจะถูกยับยั้งด้วยอิออนของธาตุบางชนิด เช่น แคลเซียม แมกนีเซียม เหล็ก และสังกะสี และแนะนำว่าการเสริมเอนไซม์ลงในอาหารโดยตรงจะให้ผลดีกว่าการเสริมลงในอาหารก่อนเข้ากระบวนการอัดเม็ด



๓๖๔๗๙๘
หอสมุดกลาง

มหาวิทยาลัยขอนแก่น

๑๖/

๙๕

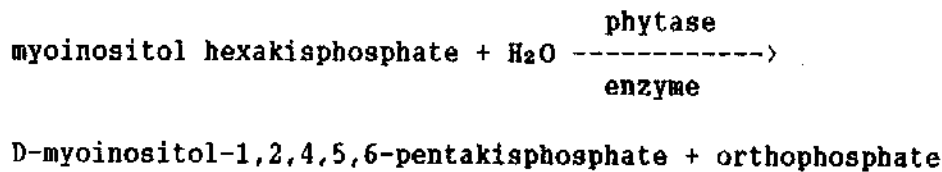
๙๒๓๗

25

2.9 กลไกการทำงานของเอนไซม์ไฟเตส (mode of action)

ห้ามยืมออก

เอนไซม์ไฟเตสที่ได้จากเชื้อราในกลุ่ม *Aspergillus* spp. จะผลิตเอนไซม์ 3-phytase ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่เข้าย่อยสลายกรดฟอสฟอริกไม่จำเพาะ (non specific phosphomonoesterase) โดยมีขั้นตอนการเข้าทำปฏิกิริยาคังสมการ (Cosgrove, 1980)



โดยปฏิกิริยาเริ่มต้นจาก 3-phytase เข้าทำการแยกกลุ่มของฟอสเฟตตรงตำแหน่งที่ 3 ของโครงสร้างโมเลกุลของกรดฟอสฟอริก เพื่อทำลายโครงสร้างวงแหวน โดยมีน้ำเข้าทำปฏิกิริยาร่วม ทำให้ได้ผลผลิต คือ D-myoinositol-1,2,4,5,6-pentakisphosphate ประกอบด้วยฟอสเฟต 5 โมเลกุล และฟอสเฟตโมเลกุลเดียวในรูปเกลือของกรดฟอสฟอริก (orthophosphate) ซึ่งเป็นรูปที่สามารถดูดซึมผ่านผนังลำไส้เล็กได้ หลังจากนั้นเอนไซม์จะเข้าตัดพันธะของ D-myoinositol-1,2,4,5,6 pentakisphosphate ต่อไป จนได้ฟอสเฟตโมเลกุลเดียวทั้งหมดปฏิกิริยาจึงสมบูรณ์ (Maga, 1982 และ Frolich et al., 1986)

อย่างไรก็ตามผลที่เกิดขึ้นจริงภายในระบบย่อยอาหารของสุกรนั้น ยังไม่สามารถอธิบายได้ชัดเจน (Wilfred; Han; และ Bos อ้างโดย Jongbloed et al., 1992) เนื่องจากมีปัจจัยเข้ามาเกี่ยวข้องหลายประการ เช่น การเคลื่อนย้ายอาหารออกจากกระเพาะ (gastric emptying) ระยะเวลาในการคงอยู่ของอาหารในระบบย่อยอาหาร (retention time) ความผันแปรของ pH (variation of pH) ส่วนประกอบของอาหารที่ถูกย่อย (digesta composition) และความสัมพันธ์ระหว่างแร่ธาตุกับโภชนาภัณฑ์อื่น นอกจากนี้การฟอสฟอริกยังมีความสามารถในการจับยึดเพื่อสร้างเป็นสารประกอบที่ไม่ละลายกับแร่ธาตุอื่น ซึ่งขึ้นกับความเข้มข้นของแร่ธาตุต่างๆที่มีอยู่ในอาหาร

ในขณะปฏิบัติการหมักยีสต์สายดำเป็นอยู่ (Oberleas and Moody และ Suttle, อ้าง
โดย Jongbloed *et al.*, 1992)

2.10 ผลการศึกษาวิจัยการใช้เอนไซม์ไฟเตส (microbial phytase) ในสัตว์ปีกและ สุกร

2.10.1 ผลการศึกษาในสัตว์ปีก

Zyla และคณะ (1989) รายงานว่า ผลจากการทดลองเสริมเส้นใยของเชื้อรา *Aspergillus niger* ที่ได้จากขบวนการผลิตกรดซิตริกซึ่งให้เอนไซม์ acid phosphatase 10 g kg^{-1} (1 กรัมมี phytase activity เท่ากับ 500 PU) ลงในอาหารไก่กระพวงที่มีฟอสฟอรัสที่ใช้ประโยชน์ได้ต่ำกว่าความต้องการ (2.6 g kg^{-1}) เปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม (4.5 g kg^{-1}) เมื่อสิ้นสุดการทดลองกลุ่มที่เสริมมีน้ำหนักตัวเฉลี่ย 1,814 กรัม สูงกว่ากลุ่มควบคุมซึ่งมีน้ำหนักตัวเฉลี่ย 1,754 กรัม ($P < 0.05$) และมีอัตราการแลกเนื้อ (2.56 กับ 2.54) ปริมาณเถ้าในกระดูกแข้ง (tibia ash) (539.1 กับ 546 mg/g) ไม่แตกต่างกัน

ผลการทดลองของ Nelson และคณะ (1971) ทำการทดลองในลูกไก่ 3 กลุ่ม กลุ่มที่ 1 ได้รับความฟอสฟอรัสที่ใช้ประโยชน์ได้ 40 เปอร์เซ็นต์ของความต้องการ กลุ่มที่ 2 เสริมเอนไซม์ไฟเตส (*Aspergillus ficuum*) 1, 2, 4 และ 8 กรัม/อาหาร 1 กิโลกรัม (1 กรัม phytase สามารถปลดปล่อย inorganic phosphate จาก calcium phytate 950 mg ในเวลา 1 ชั่วโมง) กลุ่มที่ 3 เสริมฟอสเฟตอินทรีย์เท่ากับความต้องการ ปรากฏว่าอัตราการเจริญเติบโตที่ 3 สัปดาห์ กลุ่ม 1 ให้ค่าต่ำกว่ากลุ่ม 2 และกลุ่ม 3 (285, 380 และ 364 กรัม) ($P < 0.01$) เช่นเดียวกับเปอร์เซ็นต์เถ้าในกระดูก (bone ash) กลุ่ม 1 ให้ค่าต่ำกว่ากลุ่ม 2 และกลุ่ม 3 คือ 37.71, 45.77 และ 46.49 เปอร์เซ็นต์ ($P < 0.01$) ตามลำดับ

Simons และ Versteegh (1990) ศึกษาการเสริมเอนไซม์ไฟเตสจากเชื้อรา *Aspergillus ficuum* (NRRL 3135) ในไก่กระพวงและสุกร พบว่าเมื่อเสริม

เอ็นไซม์ในอาหารไก่กระหงที่ได้รับฟอสฟอรัสที่ใช้ประโยชน์ได้ต่ำกว่าความต้องการ 1,000 PU/กรัม ถึงอายุ 24 วัน การใช้ประโยชน์ได้ของฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้น 60 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณฟอสฟอรัสที่ขับถ่ายทางมูลลดลง 50 เปอร์เซ็นต์ อัตราการเจริญเติบโตและอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อมีแนวโน้มสูง (690 กรัม และ 1.34) กว่ากลุ่มที่ได้รับอาหารควบคุม (683 กรัม และ 1.38)

2.10.2 ผลการทดลองในสุกร

Jongbloed และคณะ (1992) ได้ศึกษาการเสริมเอ็นไซม์ไฟเตสในสุกรรุ่น (น้ำหนักตัวเฉลี่ย 37 กก.) เพศผู้ เจาะลำไส้ (duodenum และ ileum) โดยใช้ตัวชี้บ่ง(indicator) เพื่อหาปริมาณของฟอสฟอรัสที่ดูดซึมและขับถ่ายทางมูลในสุกรกลุ่มควบคุม และกลุ่มที่ได้รับเอ็นไซม์ไฟเตส (*Aspergillus niger*) ระดับ 1,500 PU/กิโลกรัมในอาหารที่ประกอบด้วยข้าวโพด-กากถั่วเหลือง และมันสำปะหลัง-ข้าวโพดคั่วทั้งฝัก-กากเมล็ดทานตะวัน-กากถั่วเหลือง เป็นหลัก พบว่าความเข้มข้นของฟอสฟอรัสที่บริเวณลำไส้เล็กส่วนล่าง(Ileum) และความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในมูลสุกรที่เสริมเอ็นไซม์ไฟเตสต่ำกว่ากลุ่มสุกรที่ไม่ได้รับการเสริม ($P<0.001$) ความสามารถในการย่อยสลายฟอสฟอรัสที่ลำไส้เล็กส่วนล่างเพิ่มขึ้น 50 เปอร์เซ็นต์ในสุกรที่ได้รับข้าวโพด-กากถั่วเหลือง และ 75.4 เปอร์เซ็นต์ในสุกรที่ได้รับมันสำปะหลัง-ข้าวโพดคั่วทั้งฝัก-กากเมล็ดทานตะวัน-กากถั่วเหลือง ($P<0.001$) และทำให้ความสามารถในการย่อยโคของกรดไขมันทั้งระบบในสุกรกลุ่มเสริมไฟเตสเพิ่มขึ้น 29.7 เปอร์เซ็นต์ ($P<0.01$)

Simons และ Versteegh (1990) พบว่า เมื่อสุกรรุ่น (น้ำหนักตัว 35 กิโลกรัม) ได้รับการเสริมเอ็นไซม์ไฟเตส (*Aspergillus ficuum*) ที่ระดับ 1,000 PU/กิโลกรัม ในอาหารที่ประกอบด้วยข้าวโพด-กากถั่วเหลืองเป็นหลัก มีผลทำให้การดูดซึมฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้น 24 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณฟอสฟอรัสที่ขับถ่ายทางมูลลดลง 35 เปอร์เซ็นต์

Lei และคณะ (1992a) รายงานว่า ลูกสุกรหลังหย่านม อายุ 4 สัปดาห์ ที่ได้รับการเสริมเอ็นไซม์ไฟเตส (microbial phytase) ที่ระดับ 1,350 PU/กรัมของอาหารที่ประกอบด้วยข้าวโพด-กากถั่วเหลืองเป็นหลัก เป็นระยะเวลา 4 สัปดาห์ พบว่า

ระดับความเข้มข้นของสังกะสี ฟอสฟอรัส และธาตุเหล็กในปลาเพิ่มสูงขึ้น ($P < 0.05$) รวมทั้งการเพิ่มน้ำหนักตัวต่อวัน ($P < 0.0006$) ปริมาณการกินได้ ($P < 0.0001$) และเพิ่มประสิทธิภาพการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ ($P < 0.05$) ด้วย

Mroz และคณะ (1992) ทดลองหาความเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของอาหารที่ถูกย่อย (digesta) และอัตราการไหลผ่านในลำไส้เล็ก ในสุกรเพศผู้เจาะลำไส้เล็กส่วนล่าง (ileum) ให้อาหารที่ประกอบด้วยข้าวโพด-มันสำปะหลัง-กากถั่วเหลืองเป็นหลัก และไม่เสริมฟอสเฟตอินทรีย์ โดยแบ่งสุกรออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มที่ 1 เสริมด้วยเอ็นไซม์ไฟเตส (*Aspergillus niger*) 800 PU/กิโลกรัม กลุ่ม 2 ไม่เสริมเอ็นไซม์ พบว่ากลุ่มที่เสริมมีการย่อยสลายกรดไขมันทั้งรวมสูงกว่ากลุ่มไม่เสริม 43-55 เปอร์เซ็นต์ ($P < 0.01$) ปริมาณฟอสฟอรัสในอาหารที่ถูกย่อยลดลง 0.2-0.4 กรัม/กิโลกรัม ($P < 0.05$) และมีผลทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสที่ขับถ่ายออกทางมูลและปัสสาวะลดลง 1.5-1.8 กรัม/ตัว/วัน

ผลการทดลองของ Beers และ Jongbloed (1992) ที่ใช้ระดับการเสริมเอ็นไซม์ไฟเตส (*Aspergillus niger*) ที่ระดับ 0, 200, 400, 700, 1,000 และ 2,000 PU/กิโลกรัมอาหารที่ประกอบด้วยข้าวโพด-กากถั่วเหลือง และข้าวโพดคั่วหัก-กากเมล็ดทานตะวัน-กากเรปซิดเป็นหลัก ในสุกรรุ่น (น้ำหนักตัว 20-55 กิโลกรัม) โดยให้สัดส่วนระหว่างแคลเซียม:ฟอสฟอรัส เท่ากับ 3:1 พบว่าการย่อยสลายกรดไขมันเพิ่มขึ้น 29 เปอร์เซ็นต์ในสุกรที่ได้รับข้าวโพด-กากถั่วเหลือง และ 32.2 เปอร์เซ็นต์ในสุกรที่ได้รับข้าวโพดคั่วหัก-กากเมล็ดทานตะวัน-กากเรปซิดเป็นหลัก เมื่อเสริมเอ็นไซม์ และเมื่อระดับการเสริมเพิ่มขึ้นเปอร์เซ็นต์การย่อยสลายก็เพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย (exponential curve) โดยจุดที่ขึ้นที่สุดของเส้นกราฟอยู่ที่ระดับการเสริม 400 PU/กิโลกรัม โดยให้ค่าสมการดังนี้

$$dp = 1.86 - 0.9963^{dose} \text{ กรัม dp/kg, } R^2 = 96.78$$

$$dp = \text{ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดที่ถูกย่อยสลายในระบบย่อยอาหาร}$$

$$dose = \text{ระดับการเสริมเอ็นไซม์ (PU/กิโลกรัมอาหาร)}$$

Lei และคณะ (1992b) พบว่า เมื่อเสริมเอ็นไซม์ (*Aspergillus niger* phytase) ระดับ 750, 1,050 และ 1,350 PU/กรัม เปรียบเทียบกับการเสริม

ฟอสเฟตอินทรีย์ 0.33 เปอร์เซ็นต์ ในอาหารที่ประกอบด้วยข้าวโพด-กากถั่วเหลืองเป็นหลัก ในลูกสุกรหลังหย่านม อายุ 4 สัปดาห์ พบว่าการเพิ่มน้ำหนักร่างกายเฉลี่ยต่อวัน ปริมาณอาหารที่กินได้ต่อวัน อัตราการสร้างเนื้อ ไม่เปลี่ยนแปลง ($P>0.05$) เมื่อเสริมที่ระดับ 750 และ 1,050 PU/กรัม แต่ที่ระดับการเสริม 1,084-1,186 PU/กรัม อัตราการแลกเนื้อและอัตราการเจริญเติบโตเฉลี่ยต่อวันเพิ่มสูงขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มที่เสริมเอ็นไซม์ ($P<0.05$) และพบว่าการเสริมเอ็นไซม์ไม่มีผลต่อความเข้มข้นของแมกนีเซียม สังกะสี ทองแดง และเหล็กในพลาสมา ระดับการเสริมที่แนะนำ คือ 1,200 PU/กรัม จะทำให้ลูกสุกรมีสมรรถนะในการผลิตไม่แตกต่างจากกลุ่มควบคุม

Cromwell และคณะ (1993) ทำการศึกษาในสุกรรุ่น-ขุน น้ำหนักตัว 50-110 กิโลกรัม แบ่งสุกรออกเป็น 5 กลุ่ม โดยให้สูตรอาหารที่มีระดับฟอสฟอรัสควบคุมตามความต้องการ (0.5 เปอร์เซ็นต์) เปรียบเทียบกับกลุ่มที่ได้รับฟอสฟอรัสระดับต่ำ 2 กลุ่ม (0.4 และ 0.3 เปอร์เซ็นต์) โดยแบ่งเป็นกลุ่มเสริมและไม่เสริมเอ็นไซม์ (*Aspergillus niger phytase*^{1/}) ระดับ 500 PU/กรัม พบว่ากลุ่มที่ไม่เสริมเอ็นไซม์มีอัตราการเจริญเติบโตและความแข็งแรงของกระดูกต่ำกว่าทุกกลุ่ม โดยกลุ่มที่เสริมเอ็นไซม์สามารถรักษาอัตราการเจริญเติบโตและความแข็งแรงของกระดูกให้อยู่ในระดับเดียวกับกลุ่มควบคุมได้ ผลการทดลองที่ 2 ศึกษาผลการเสริมเอ็นไซม์ที่ระดับ 250, 500 และ 1,000 PU/กรัม พบว่าอัตราการเจริญเติบโตและความแข็งแรงของกระดูกจะเพิ่มขึ้นสัมพันธ์กับระดับการเสริมเอ็นไซม์ที่เพิ่มขึ้น ($P<0.01$) โดยค่าการใช้ประโยชน์ได้ของฟอสฟอรัสเพิ่มสูงขึ้น 57 เปอร์เซ็นต์ในอาหารที่มีกากถั่วเหลืองเป็นหลัก และเพิ่มขึ้น 43 เปอร์เซ็นต์ในอาหารที่มีกากถั่วเหลืองและข้าวโพดเป็นหลัก

Young และคณะ (1993) พบว่า การเสริมเอ็นไซม์ไฟเตส (*Aspergillus niger phytase*) ที่ระดับ 500, 1,000 PU/กรัม และการให้ฟอสฟอรัส 60 เปอร์เซ็นต์ ของความต้องการ ในลูกสุกรอายุ 4 สัปดาห์ 3 กลุ่ม เปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุมที่ได้รับฟอสฟอรัสเพียงพอกับความต้องการ ใช้เวลาทดลอง 3 สัปดาห์ พบว่าอัตราการเจริญ

1/ Finase-FP 500 Alko Ltd. Biotechnology, Rajamaki, Finland)

เคปไตน์กลุ่มได้รับฟอสฟอรัส 60 เปอร์เซ็นต์ กลุ่มเสริมเอ็นไซม์ระดับ 500 และ 1,000 PU/กรัม เปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุมค่า 450, 520, 540 และ 530 กรัม/วัน อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นน้ำหนักตัวเท่ากับ 1.80, 1.64, 1.65 และ 1.62 ตามลำดับ ซึ่งค่าเปรียบเทียบระหว่างกลุ่มเสริม (500, 1,000 PU) และกลุ่มควบคุมว่าไม่มีความแตกต่างกัน ($P > 0.05$) แต่ให้ค่าสูงกว่ากลุ่มที่ให้ฟอสฟอรัส 60 เปอร์เซ็นต์ ($P < 0.05$) เช่นเดียวกับความสามารถในการย่อยสลายของฟอสฟอรัส (63, 71.1, 74 และ 71.2 เปอร์เซ็นต์) และเปอร์เซ็นต์ได้ไขมันกระดูกซึ่งให้ค่าเท่ากับ 50.54, 53.12, 53.65 และ 54 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ