บทที่ 2
ตรวจเอกสาร

2.1 ความสำคัญของฟอสฟอรัส

ฟอสฟอรัสเป็นแร่ธาตุหลักที่จำเป็นและมีความสัมพันธ์กับแคลเซียม โดยจะพบฟอสฟอรัสในทุกเซลล์ของร่างกาย 80 เปอร์เซ็นต์ของฟอสฟอรัสในร่างกายจะอยู่รวมกับแคลเซียมในกระดูกและฟัน ส่วนที่เหลือจะรวมกับสารประกอบอนินทรีย์ต่าง ๆ เช่น ฟอสโฟไลปิด (phospholipid), ฟอสโฟโปรตีน (phosphoprotein), กรดนิวคลีอิก (nucleic acid) และนิวคลีโอไทด์ (nucleotide) เป็นต้น (Scott et al., 1976; Maynard, 1979) หน้าที่สำคัญของฟอสฟอรัสโดยสรุป คือ (Mcdowell et al., 1992; Scott et al., 1976; Maynard et al., 1979)

- เป็นส่วนประกอบของกระดูกและฟัน โดยมีความสัมพันธ์กับแคลเซียม และมีความสำคัญในการเคลื่อนย้ายแคลเซียมและฟอสฟอรัสเข้า-ออกในกระดูก
- เป็นสารตั้งต้นในการสังเคราะห์ฟอสโฟไลปิด ซึ่งเป็นสารที่มีความสำคัญในการสร้างเยื่อหุ้มเซลล์
- เป็นส่วนประกอบของระบบบัฟเฟอร์ในเลือดและของเหลวอื่น ๆ ในร่างกาย
- เป็นธาตุที่สำคัญในเมตาบอลิซึมของคาร์โบไฮเดรต ไขมันและโภชนะอื่น ๆ ในร่างกาย
- เป็นส่วนประกอบที่สำคัญของสารประกอบพลังงานสูง (high-energy compound) เช่น ATP (adenosine triphosphate), ADP (adenosine diphosphate) ซึ่งเป็นสารประกอบที่ช่วยในการส่งผ่านพลังงานในเมตาบอลิซึมต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในร่างกาย
- เป็นแร่ธาตุที่ช่วยในการทำงานของวิตามินและเอนไซม์ในร่างกาย
- เป็นแร่ธาตุที่จำเป็นในเมตาบอลิซึมโปรตีนในส่วนของนิวคลีโอโปรตีน (nucleoprotein) และฟอสโฟโปรตีน (phosphoprotein) เนื่องจากฟอสฟอรัสเป็นส่วนประกอบของกรดนิวคลีอิก (DNA และ RNA) ซึ่งจำเป็นสำหรับขบวนการถ่ายทอดทางพันธุกรรม (genetic transmission)
- เป็นแร่ธาตุที่ช่วยควบคุมการทำงานของระบบประสาท

2.1.1 การดูดซึมและการขับถ่ายฟอสฟอรัส

ฟอสฟอรัสที่มีในอาหารเป็นจำพวกฟอสโฟโปรตีนและนิวคลีโอไทด์ถูกไฮโดรไลส์ด้วยเอนไซม์ฟอสฟาเตสเพื่อให้ฟอสเฟตแยกตัวก่อนและถูกดูดซึมบริเวณส่วนต้นของลำไส้เล็ก อย่างไรก็ตามการดูดซึมฟอสฟอรัสยังขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น อัตราส่วนของแคลเซียมและฟอสฟอรัสที่เหมาะสม คือ 1:1 - 2:1 (เยาวมาลย์และสาโรช, 2530) ปริมาณวิตามินดีซึ่งสามารถเพิ่มการดูดซึมฟอสฟอรัสที่ลำไส้ อาหารที่มีแร่ธาตุแมกนีเซียม เหล็ก อะลูมิเนียมและเบริลเลียมสูง จะขัดขวางการดูดซึมฟอสฟอรัส เนื่องจากเกิดการรวมตัวของฟอสฟอรัสกับแร่ธาตุทำให้เกิดฟอสเฟตที่ไม่ละลายและดูดซึมไม่ได้ และนอกจากนี้ยังขึ้นอยู่กับระดับของฟอสฟอรัสในเลือดและปริมาณของพาราไธรอยด์ฮอร์โมน และแคลซิโตนิน (Scott et al., 1976)

การขับถ่ายฟอสฟอรัสขึ้นอยู่กับระดับฟอสฟอรัสในเลือด ระดับของพาราไธรอยฮอร์โมนและแคลซิโตนิน เมื่อพาราไธรอยด์ฮอร์โมนสูงขึ้นจะทำให้ลดการดูดซึมฟอสฟอรัสทำให้มีการขับถ่ายฟอสฟอรัสมากขึ้นแต่ถ้าระดับแคลซิโตนินสูงขึ้นจะทำให้การดูดซึมฟอสฟอรัสมากขึ้น ส่งผลให้การขับถ่ายฟอสฟอรัสออกนอกร่างกายน้อยลง (สุกิจ, 2538 อ้างโดย โฆษิต, 2540)

2.1.2 ผลที่เกิดขึ้นจากการขาดฟอสฟอรัส

สัตว์ที่ขาดฟอสฟอรัสจะมีผลทำให้สัตว์เกิดโรคกระดูกอ่อน (rickets) ในสัตว์เล็กและเกิดความผิดปกติของกระดูก (osteomalacia) ในสัตว์โต เนื่องจากการขาดฟอสฟอรัสหรืออัตราส่วนของแคลเซียมและฟอสฟอรัสที่กว้างเกินไปในอาหาร ทำให้ระดับแคลเซียมและฟอสฟอรัสในเลือดต่ำลง ร่างกายจะดึงแคลเซียมและฟอสฟอรัสจากกระดูกมาใช้จนเกินระดับที่ร่างกายสามารถทดแทนได้ แต่ในกรณีที่ร่างกายขาดแคลเซียมและฟอสฟอรัสในระดับไม่รุนแรงวิตามินดีสามารถป้องกันอาการผิดปกตินี้ได้ (Maynard et al., 1979; Rao et al, 1999) สัตว์ที่ขาดฟอสฟอรัสในระยะแรกจะมีอาการเบื่ออาหาร อ่อนแอและอาจจะตายใน 10-12 วัน แต่ถ้าขาดไม่รุนแรงสัตว์จะแสดงอาการกระดูกอ่อน การเจริญเติบโตผิดปกติ แต่ไม่พบว่ามีผลต่อการสร้าง DNA, RNA และเอนไซม์ แม้ว่าสัตว์จะอดอาหารเป็นระยะเวลานานก็ตาม เนื่องจากมีการดึงฟอสฟอรัสจากกระดูกมาใช้แทนจึงทำให้ระดับของฟอสเฟตในเลือดและฟอสเฟตที่ขับออกมทางปัสสาวะอยู่ในระดับปกติ (Scott et al., 1976)

2.1.3 แหล่งของฟอสฟอรัส

แหล่งของแร่ธาตุฟอสฟอรัสในธรรมชาติจะพบได้ในเมล็ดธัญพืช นม นมผงและวัตถุดิบอาหารที่ได้จากสัตว์ เช่น เนื้อและกระดูกป่น ปลาป่น และในวัตถุดิบประเภทเมล็ดพืชและผลพลอยได้จากเมล็ดพืช เช่น รำ และกากถั่วเหลือง แต่แหล่งของฟอสฟอรัสที่ได้จากพืชนั้นค่าการใช้ประโยชน์ได้จะแปรผันมาก (ตารางที่ 2-1) เนื่องจากฟอสฟอรัสจะอยู่ในรูปที่ไม่ละลายน้ำที่เรียกว่าไฟเตท (phytate) ซึ่งสัตว์ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างเต็มที่โดยเฉพาะในสัตว์กระเพาะเดี่ยวเนื่องจากขาดเอนไซม์ที่สามารถย่อยไฟเตทได้ในร่างกาย (บุญล้อมและสุชน, 2540ก)

ตารางที่ 2-1 แสดงปริมาณฟอสฟอรัสรวมและฟอสฟอรัสใช้ประโยชน์ได้ในวัตถุดิบอาหารสัตว์

วัตถุดิบ	ฟอสฟอรัสทั้งหมด%		ฟอสฟอรัส	ฟอสฟอรัส
	สูงสุด	ต่ำสุด	เฉลี่ย(%)	ใช้ประโยชน์ได้(%)
เมล็ดธัญพืช				
ข้าวบาร์เลย์	0.22	0.44	0.31(0.36)[1/]	0.10 (0.17)
ข้าวฟ่าง	0.18	0.41	0.31(0.30)	0.06
ข้าวสาลี	0.19	0.55	0.33(0.37)	0.17(0.13)
ข้าวไพด	0.16	0.36	0.28(0.28)	0.04(0.08)
Triticale	0.21	0.45	0.40(0.30)	0.18(0.10)
รำละเอียด	-	-	(1.50)	(0.22)
กากเมล็ดในปาล์ม	-	-	(0.60)	(0.09)
โปรตีน				
เลือดป่น	0.08	0.42	0.15(0.30)	0.14(0.21)
เมล็ดฝ้าย	0.98	1.42	1.20(1.05)	0.18
เนื้อและกระดูกป่น(45% CP)	-	-	5.24	4.87
เนื้อและกระดูกป่น(50% CP)	-	-	4.77(4.10)	4.44
เนื้อและกระดูกป่น(55% CP)	2.82	5.58	4.29	3.99
ปลาป่น (tuna) (50%CP)	3.81	9.11	5.22	5.22
ปลาป่น(anchovy) (65%CP)	1.78	2.99	2.48(2.43)	2.48
กากถั่วลิสง(Peanut meal)	0.57	0.66	0.61(0.56)	0.07
กากถั่วเหลือง	0.52	0.68	0.64(0.65)	0.22(0.27)
กากถั่วเหลืองไขมันเต็ม	-	-	0.66	0.23
กากเมล็ดทานตะวัน	0.58	1.31	1.01(0.93)	0.03(0.14)
ฟอสฟอรัสอนินทรีย์				
กระดูกป่น	6.97	7.76	11.95	9.8
ไดแคลเซียมฟอสเฟต	-	-	17.5	17.5
ดีฟลูออริเนตฟอสเฟต	-	-	18.0	15.7

ที่มา: Kopinski(2001)

[1/]ค่าในวงเล็บเป็นค่าที่ได้จาก NRC (1994)

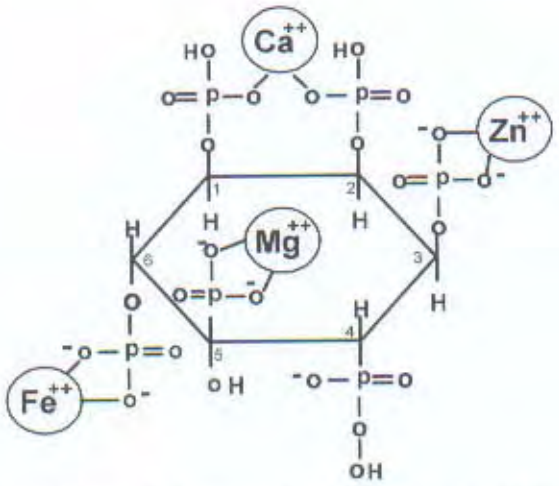
2.2 กรดไฟติค (phytic), ไฟติน (phytin) หรือ ไฟเตทฟอสฟอรัส (phytatephosphorus)

กรดไฟติค, ไฟเตท หรือไฟเตทฟอสฟอรัส หรือ myo – inositol 1, 2, 3, 4, 5, 6 hexakisphosphate เป็นรูปหนึ่งของฟอสฟอรัสอินทรีย์ ซึ่งเป็นแหล่งสะสมของฟอสฟอรัสและแร่ธาตุต่างๆ พบอยู่ในเมล็ดประมาณ 50-80 เปอร์เซ็นต์ของฟอสฟอรัสทั้งหมด และพบมากในเมล็ดพืชตระกูลถั่ว ธัญพืช และเมล็ดพืชน้ำมัน (จุรีพร, 2536) โครงสร้างทางเคมีของกรดไฟติคประกอบไปด้วยกลุ่มของฟอสเฟต 6 กลุ่มที่เกิดจากอิออนของฟอสฟอรัส 1 อะตอมจับกับอิออนของออกซิเจน 4 อะตอม โดยมีออกซิเจน 1 อะตอมจับเป็นพันธะคู่กับฟอสฟอรัสและอีก 1 อะตอมจับวงแหวนตรงกลางเป็นโครงสร้างของอินโนซิทอล (inositol) ด้วยพันธะเอสเตอร์

(ester bond) ทำให้ออกซิเจนที่เหลืออยู่อีก 2 ด้าน จับกับฟอสฟอรัสเป็นพันธะเดี่ยว และอยู่ในสภาพพร้อมที่จะรับอิออนจากธาตุอื่นได้ (Beers and Jongbloed, 1992; โฆษิต, 2540; สมชาติ, 2538) ทำให้ไฟเตทสามารถจับได้ดีกับแร่ธาตุที่มีประจุบวกสอง โดยเฉพาะแคลเซียม (Ca^{2+}), เหล็ก (Fe^{2+}), สังกะสี (Zn^{2+}) ฯลฯ เป็นสารประกอบเชิงซ้อนซึ่งมีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำ สูตรโครงสร้างของกรดไฟติคแสดงอยู่ในภาพที่ 2-1 (Scott et al., 1976) นอกจากจะจับกับแร่ธาตุแล้วไฟเตทยังจับเป็นรูปสารประกอบเชิงซ้อนกับโปรตีนและเอนไซม์บางชนิดในระบบย่อยอาหารจึงมีผลทำให้เกิดการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ในระบบย่อยอาหาร เช่น เอนไซม์แอลฟาอะมัยเลส (∝-amylases), ทริปซิน (trypsin), ไทโรซิเนส (tyrosinase), เปปซิน (pepsin) (Nair et al., 1991; Caldwell, 1992 อ้างโดย Mroz et al., 1994)

ภาพที่ 2-1 โครงสร้างของกรดไฟติค
ที่มา: Scott et al.(1976)

รูปของกรดไฟติคที่พบในธรรมชาติส่วนใหญ่อยู่ในรูปเกลือผสมของแคลเซียมและแมกนีเซียมจับอยู่โดยพันธะโคออดิเนต (Erdman, 1979) นอกจากแคลเซียมและแมกนีเซียมแล้ว กรดไฟติคเป็นสารที่สามารถจับตัวกับอิออนของโลหะอื่น ๆ ในรูปของสารคีเลท (chelated metal) ทำให้สัตว์ไม่สามารถใช้อิออนเหล่านั้นให้เป็นประโยชน์ได้ที่เป็นดังนี้เพราะว่าโครงสร้างวงแหวนของกรดไฟติคอันเกิดจากการจับยึดระหว่างกลุ่มฟอสเฟตกับอะตอมของคาร์บอนในโมเลกุลของอินโนซิทอลด้วยพันธะโควาเลนท์ทำให้เกิดโครงสร้างที่แข็งแรงเมื่อโครงสร้างวงแหวนนี้ถูกเสริมด้วยการยึดจับแบบพันธะโคออดิเนตระหว่างอิออนของโลหะกับฟอสเฟตอีกชั้นหนึ่ง จึงทำให้เป็นโครงสร้างมีความแข็งแรงยิ่งขึ้น (ภาพที่ 2-2) อันเป็นผลทำให้โลหะและฟอสเฟตถูกปลดปล่อยออกมาได้น้อยมาก (Scott et al., 1982) กรดไฟติคที่พบในพืชโดยเฉพาะส่วนที่อยู่เหนือดินได้แก่ ส่วนของลำต้น ใบ และเมล็ด เช่น พืชอาหารสัตว์ เมล็ดถั่วเหลือง เมล็ดถั่วเขียว ข้าวโพด ข้าวฟ่าง ข้าวสาลี ข้าวไรย์ และอื่นๆ นอกจากนั้นยังพบในเมล็ดพืชน้ำมัน เช่น เมล็ดฝ้าย เมล็ดนุ่น เมล็ดงา เมล็ดปาล์ม เป็นต้น ซึ่งส่วนใหญ่เป็นวัตถุดิบหลักที่นำมาใช้เป็นแหล่งของพลังงานและโปรตีนในอาหารสัตว์ ปริมาณกรดไฟติคมีความแปรผันมากเพราะมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องหลายปัจจัย เช่น ปริมาณปุ๋ยฟอสฟอรัสที่เกษตรกรใส่ลงไปในดิน, อายุการเก็บเกี่ยว, ความสุกแก่ของพืชและเมล็ดเมื่อทำการเก็บเกี่ยวเป็นอาหารสัตว์ (ตารางที่ 2-2)



ภาพที่ 2-2 แสดงโครงสร้างโมเลกุลกรดไฟติคที่สามารถเกิดปฏิกริยากับแร่ธาตุที่มีไดวาเลนซ์
ที่มา: Erdman(1979)

ตารางที่ 2-2 แสดงปริมาณฟอสฟอรัสรวมและปริมาณกรดไฟติคในวัตถุดิบอาหารสัตว์ที่สำคัญ

วัตถุดิบ	ฟอสฟอรัสรวม(%)						กรดไฟติค (%)					
อาหารสัตว์	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
ข้าวโพด	0.28	0.33	0.26	0.28	0.26	0.28	86	72	66	86	65	71
ข้าวฟ่าง	0.32	0.36	-	0.31	-	0.30	84	66	-	81	-	-
ข้าวสาลี	0.37	-	0.30	0.33	0.30	0.37	73	-	67	49	67	89
รำข้าวสาลี	1.15	-	-	-	1.37	1.37	45	-	-	-	70	86
ข้าวโอต	-	-	0.34	0.33	0.34	0.27	-	-	56	70	56	81
ข้าวบาร์เลย์	-	0.42	0.34	0.31	0.34	0.36	-	64	56	68	56	53
ปลายข้าว	-	-	0.35	-	-	1.31	-	-	77	-	-	66
รำข้าว	-	-	-	-	-	1.50	-	-	-	-	-	85
กากถั่วเหลือง	0.65	0.65	0.61	0.64	0.61	0.65	60	60	61	66	62	59
เนื้อและ กระดูกป่น	4.98	-	-	5.24	-	4.10	-	-	-	7	-	-
เลือดป่น	0.21	-	-	0.15	-	0.3	-	-	-	7	-	-

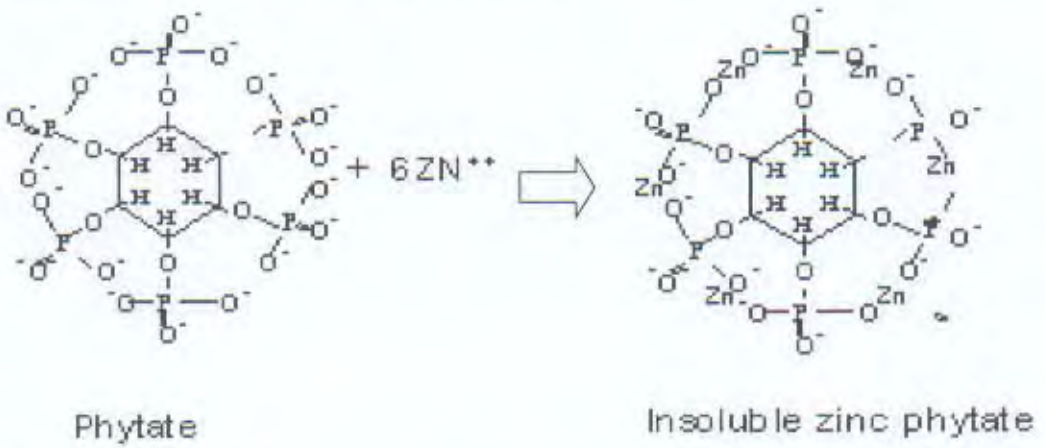
ที่มา: 1 Eeckhout and de Paepe (1994)
2 Sheehan et al. (2001)
3 CVB (1999)
4 Kopinski (2001)
5 Miller (2000)
6 NRC (1994)

2.3 ผลของไฟเตทฟอสฟอรัสต่อการใช้ประโยชน์ได้ของโภชนะ

ไฟเตทฟอสฟอรัสที่มีอยู่ในวัตถุดิบอาหารสัตว์มีผลในการขัดขวางการใช้ประโยชน์ได้ของโภชนะหลายโภชนะ เช่น แร่ธาตุ, โปรตีน และคาร์โบไฮเดรต ซึ่งมีผลต่อการสมรรถนะการผลิตของสัตว์

2.3.1 ขัดขวางการใช้ประโยชน์จากแร่ธาตุ

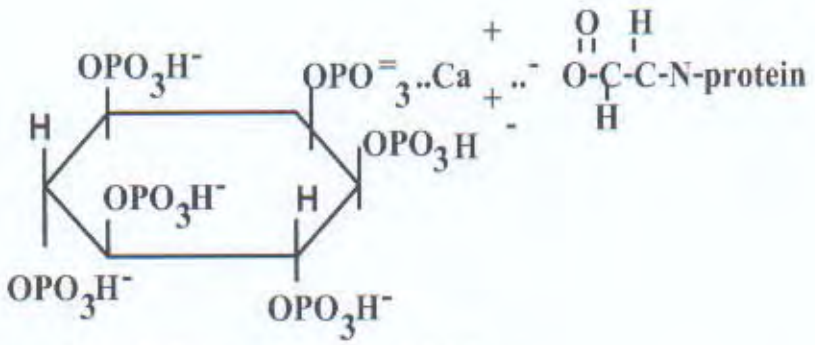
จากโครงสร้างของกรดไฟติคมีอิออนของออกซิเจนเหลืออยู่สามารถจับกับอิออนบวกของแร่ธาตุอื่นโดยเฉพาะแร่ธาตุที่มีประจุสองบวกได้อีก การจับกันดังกล่าวทำให้เกิดคุณสมบัติไม่ละลายน้ำและมีคุณสมบัติเป็นสารคีเลท ทำให้สัตว์ที่ได้รับไฟเตทไม่สามารถที่จะสลายพันธะและย่อยโภชนะดังกล่าวได้ในช่วง pH ของลำไส้ ส่งผลให้ไม่สามารถดูดซึมแร่ธาตุเข้าสู่ระบบร่างกายได้ (Scott et al., 1976; Khan, 1995) การขัดขวางการใช้ประโยชน์ได้ของแร่ธาตุโดยเฉพาะแคลเซียมและฟอสฟอรัสในอาหารที่มีความเข้มข้นของแคลเซียมสูงมีผลทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างแคลเซียมและไฟเตท (Ca–phytate complex) ซึ่งไม่ละลายน้ำ โดยอัตราส่วนของ Ca : P ที่น้อยกว่าทำให้เกิดสารประกอบเชิงซ้อนที่ลดลง การดูดซึมแคลเซียมจะสูงขึ้น (Scott et al., 1976) กรดไฟติคจึงเป็นปัญหาหนึ่งที่ทำให้สัตว์ขาดแคลเซียมและฟอสฟอรัส ทำให้ต้องเสริมแหล่งแร่ธาตุอนินทรีย์ลงไปส่งผลให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้นและเกิดปัญหามลภาวะเนื่องจากการใช้ประโยชน์ได้ของฟอสฟอรัสในสูตรอาหารต่ำลง ฟอสเฟตที่สัตว์ขับถ่ายออกมาในปริมาณมากจึงส่งผลต่อสิ่งแวดล้อม (Scott et al., 1976; Simon et al., 1990) นอกจากไฟเตทจะไปขัดขวางการใช้ประโยชน์จาก Ca และ P แล้วยังไปขัดขวางแร่ธาตุตัวอื่นด้วย เช่น Zn , Fe , Cu , Mn , Mo และ Co โดยกรดไฟติคสร้างพันธะที่แข็งแรงและสามารถรวมตัวกับสารเหล่านี้เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ไม่สามารถละลายได้ดังเช่น กรณีของแร่ธาตุ Zn เกิดเป็นสารประกอบไฟเตท-สังกะสีที่ไม่ละลาย (insoluble zinc phytate) ทำให้ Zn ไม่สามารถถูกย่อยสลายและถูกดูดซึมเข้าสู่ผนังลำไส้เล็กได้ (ภาพที่ 2-3) นอกจากนี้แล้วการมีแคลเซียมและทองแดงสูงกว่าปกติก็จะไปมีผลให้สัตว์ต้องการสังกะสีเพิ่มมากขึ้นด้วย (Scott et al., 1976)



ตารางที่ 2-3 แสดงปริมาณฟอสฟอรัสรวมและปริมาณกรดไฟติคในวัตถุดิบอาหารสัตว์ที่สำคัญ
ที่มา: Scott et al. (1976)

2.3.2 ขัดขวางการใช้ประโยชน์ของโปรตีน

พบว่าในสภาวะที่ pH ต่ำ โปรตีนซึ่งมีประจุบวกจะจับกับประจุลบของกรดไฟติค ทำให้เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ละลายไม่ได้ และเมื่อ pH สูงขึ้น โปรตีนจะกลายเป็นประจุลบ ดังนั้นจึงมีแร่ธาตุซึ่งมีประจุบวก เช่น Ca , Mg หรือ Zn เข้ามาเป็นตัวเชื่อมประจุลบของโปรตีนและกรดไฟติคเข้าด้วยกัน (ภาพที่ 2-4) ทำให้โปรตีนเกิดการเปลี่ยนรูป การละลายและการย่อยได้ลดลง (Yi and Kornegay, 1996) การจับตัวของไฟเตทกับโปรตีนนี้เริ่มเมื่อเมล็ดพืชแก่ ในพืชใบเลี้ยงเดี่ยว เช่น ข้าวโพด กรดไฟติคจะสะสมในชั้นเปลือกหุ้มเมล็ดซึ่งมีโปรตีนสูง ส่วนในพืชใบเลี้ยงคู่ เช่น ถั่วต่าง ๆ ไฟเตทจะสะสมในเนื้อเมล็ด



ภาพที่ 2-4 สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างกรดไฟติคกับโปรตีน
ที่มา: บุญล้อมและสุชน (2540ก)

นอกจากจากกรดไฟติคแล้ว myo-inositiol ที่จับอยู่กับกลุ่มฟอสเฟตจำนวนต่าง ๆ กันก็มีผลในการขัดขวางการใช้ประโยชน์ของโปรตีนเช่นเดียวกัน Knuckles et al. (1989) ทดสอบผลในการขัดขวางการย่อยโปรตีนของสารประกอบกลุ่มนี้โดยเติม myo-inositol ที่มีกลุ่มฟอสเฟต จำนวนต่าง ๆ เทียบกับกลุ่มควบคุมที่ไม่มีการเติมฟอสเฟตและที่เสริมโซเดียมฟอสฟเฟตลงไปในหลอดทดสอบการย่อย (in vitro) casein หรือ bovine serum albumin (BSA) ด้วยเอนไซม์ทริปซิน (trypsin) ที่มี pH 8 หรือเปปซิน (pepsin) ที่ pH 1.2 พบว่า เมื่อจำนวนโมเลกุลฟอสเฟตที่จับกับ myo-inositol มากขึ้น ก็จะยิ่งทำให้การย่อยได้ของโปรตีนลดลง และจะเห็นผลได้ชัดเจนเมื่อโปรตีนถูกย่อยด้วยเอนไซม์เปปซินที่ pH 1.2 การเสริมโซเดียมฟอสเฟตก็ให้ผลเช่นเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม นอกจากสามารถที่จะจับกับโปรตีนและลดการย่อยได้ของโปรตีนแล้วคีเลทที่เกิดจากฟอสฟอรัสที่ทำปฏิกริยากับโครงสร้างอินโนซิทอลด้วยพันธะเอสเทอร์ ยังสามารถจับกับเอนไซม์บางชนิด ได้แก่ แอลฟา-อะมัยเลส (α-amylase), ทริปซิน, ไทโรซินเนส (tryrosinase), เปปซิน และไลเปส (lipase) การจับตัวของไฟเตทกับเอนไซม์โปรตีนเหล่านี้จึงมีผลทำให้การใช้ประโยชน์ได้ของโปรตีนหรือกรดอะมิโนลดลง (Scott et al., 1976)

2.3.3 ขัดขวางการใช้ประโยชน์จากคาร์โบไฮเดรต

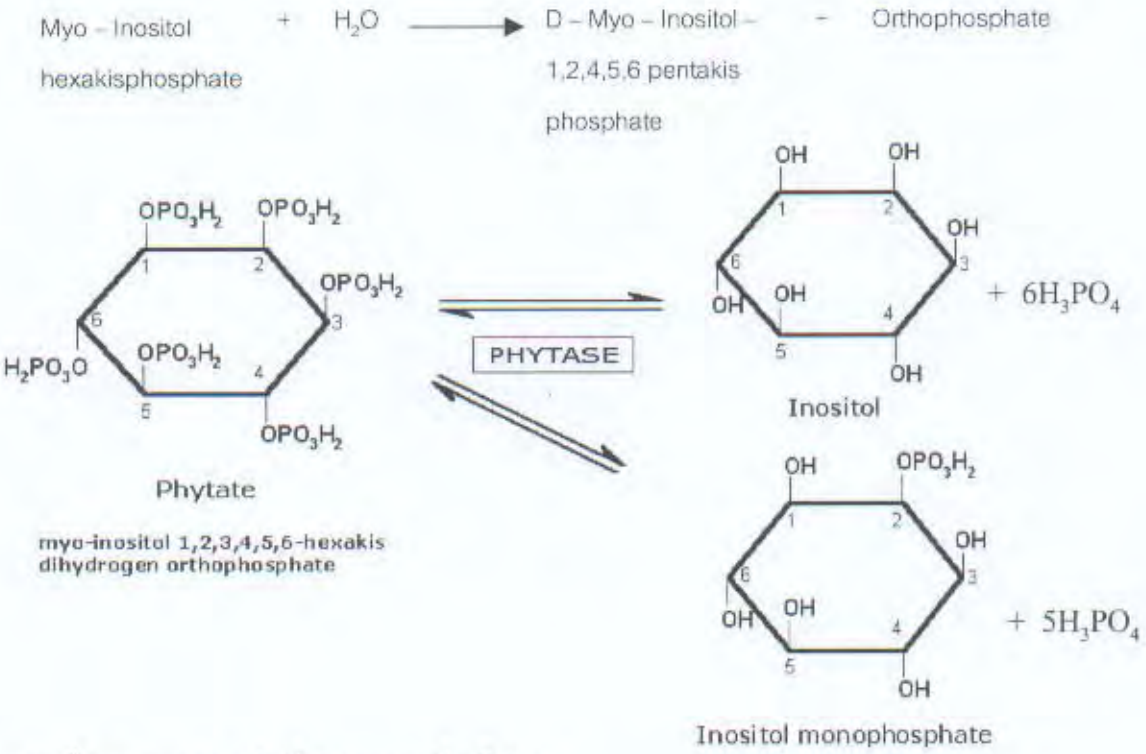
กรดไฟติคมีอิทธิพลการย่อยได้ของแป้ง ซึ่งพบว่าเมื่อระดับของกรดไฟติคสูง และในสภาวะที่ pH ต่ำการย่อยได้ของแป้งจะลดลง ดังนั้นเมื่อสัตว์ได้รับอาหารที่มีระดับของกรดไฟติคสูงผ่านเข้าสู่ระบบทางเดินอาหารซึ่งปกติจะมี pH ต่ำจะทำให้การย่อยได้ของแป้งในสัตว์ลดลง กรดไฟติคขัดขวางการใช้ประโยชน์จากคาร์โบไฮเดรตโดยยับยั้งการทำงานของเอนไซม์แอลฟ่า-อะมัยเลส Knuckles and Betschart (1987) ได้ศึกษาถึงผลการเสริมไฟเตทและmyo-inositol-2-monophosphate (IP-1) ที่มีผลขัดขวางการย่อยได้ของแป้งโดยใช้เอนไซม์ a-amylase จากน้ำลายและเอนไซม์ที่ได้จากการผลิตของเชื้อ *Basillus subtilis* พบว่ากรดไฟติคทำให้การย่อยแป้งโดยเอนไซม์แอลฟ่า-อะมัยเลสลดลงทั้งที่ pH 4.15 และที่ 6.9 แต่ IP-1 ทำให้การย่อยของแป้งลดลงที่ pH 4.15 เท่านั้น Yoon et al. (1983) อ้างโดย โฆษิต (2540) รายงานว่ากรดไฟติคมีผลลดการย่อยได้ของแป้งสาลีในคน เนื่องจากกรดไฟติคสามารถทำปฏิกิริยาจับกับแคลเซียมซึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาเอนไซม์อะไมเลส เป็นผลให้การทำงานของเอนไซม์อะไมเลสลดลง ทำการใช้ประโยชน์ได้ของแป้งลดลง

2.4 เอนไซม์ไฟเตส

เอนไซม์ไฟเตส มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า myo – inositol hexaphosphate phosphohydrolase เป็นเอนไซม์ในตระกูล phosphohydrolase ซึ่งมี phosphatase (orthophospharic – monoester phosphohydrolase) เป็น sub – family ใหญ่เป็นกลุ่มของเอนไซม์ที่สามารถย่อยกรดไฟติคได้ โดยทำการตัดกลุ่มฟอสเฟตออกจากโมเลกุลของกรดไฟติคทีละโมเลกุลเกิดเป็นผลิตภัณฑ์ตัวกลาง (intermediary product) ที่มีชื่อว่า inositol pentaphosphate (IP5) คือมี inositol จับอยู่กับฟอสเฟต 5 กลุ่มจากนั้นจะถูกย่อยต่อไปได้เป็น inositol tetraphosphate (IP4)-tri- (IP3) -di- (IP2) และ- mono- (IP1) ตามลำดับ จนในที่สุดได้เป็น inositol+ฟอสเฟตอนินทรีย์ที่ถูกย่อยสลายออกมาทั้ง 6 โมเลกุล เอนไซม์ไฟเตสที่รู้จักกันดีคือ 3 – phytase และ 6- phytase ซึ่งทำการย่อยพันธะเอสเตอร์ของฟอสเฟตโดยเริ่มจากคาร์บอนในโมเลกุลของ inositol ตำแหน่งที่ 3 และ 6 ตามลำดับและสามารถย่อยฟอสฟอรัสออกได้จนหมด ในธัญพืชและเชื้อราส่วนมากจะมี 6-phytase เอนไซม์ไฟเตสที่ใช้ในปัจจุบันเป็นเอนไซม์ที่ได้จากการสังเคราะห์จากเชื้อรา *Aspergillus spp.* เช่น *A. terreus*, *A. oryzae*, *A. ficuum* (Wang et al., 1980)

2.5 กลไกการทำงานของเอนไซม์ไฟเตส

Cosgrove (1980) อ้างโดย Jongblode et al. (1992) กล่าวว่า สำหรับเอนไซม์ไฟเตสจากเชื้อราในกลุ่ม *Aspergillus spp.* จะผลิตเอนไซม์ 3 – phytase เข้าทำการแยกกลุ่มของฟอสเฟตตรงตำแหน่งที่ 3 ของโครงสร้างโมเลกุลกรดไฟติค เพื่อทำลายโครงสร้างวงแหวน โดยมีน้ำเข้าทำปฏิกิริยาร่วม ทำให้ได้ผลผลิต คือ D-myoinositol-1-2-4-5-6-pentakis-phosphate หรือ inositol pentaphosphate (IP5) คือมี อินโนซิทอล (inositol) จับอยู่กับ PO_4 5 กลุ่มและฟอสเฟตโมเลกุลเดี่ยวในรูปเกลือของกรดฟอสฟอริค (orthophosphate) ซึ่งเป็นรูปที่สามารถดูดซึมผ่านผนังลำไส้เล็กได้โดยวิธีการแพร่ผ่านและการขนถ่ายเข้าสู่ผนังลำไส้เล็กโดยขบวนการ active absorption หลังจากนั้นเอนไซม์จะตัดพันธะของอินโนซิทอลต่อไปจนได้โมเลกุลเดี่ยวทั้งหมด จนในที่สุดได้เป็นอินโนซิทอลกับฟอสเฟตที่ถูกย่อยสลายออกมาทั้ง 6 โมเลกุล (ภาพที่ 2-5) เอนไซม์ไฟเตสชนิดที่รู้จักกันดีคือ 3 – phytase และ 6- phytase ซึ่งทำการย่อยพันธะเอสเทอร์ (ester bond) ของฟอสฟอรัส โดยเริ่มจากคาร์บอน ตำแหน่งที่ 3 และ 6 ตามลำดับ และสามารถย่อยฟอสฟอรัสออกได้จนหมด ในธัญพืชและเชื้อราส่วนมากจะมี 6- phytase



ภาพที่ 2-5 แสดงการย่อยไฟเตทของเอนไซม์ไฟเตส
ที่มา: ดัดแปลงจาก Sheehan (2001); Jongbloed (1992); Khan (1996)

กัมมันตภาพของเอนไซม์ไฟเตสสามารถวัดได้โดยวิธี Colorimetric assay มีหน่วยเป็น FTU, U, IU หรือ PU โดยไฟเตส 1 FTU, U หรือ IU มีค่าเท่ากับจำนวนของไฟเตสที่ปลดปล่อยฟอสฟอรัสอนินทรีย์จากสารละลายโซเดียมไฟเตท (sodium phytate) ที่ความเข้มข้น 5.5 มิลลิโมลาร์ ในอัตรา 1 ไมโครโมล/นาที ภายใต้สภาวะมาตรฐานที่ pH 5.5 และอุณหภูมิ 37 °ซ ส่วน 1 PU เท่ากับ จำนวนของเอนไซม์ไฟเตสที่ปลดปล่อยฟอสฟอรัสอนินทรีย์ในอัตรา 1 นาโนโมล/นาที ภายใต้สภาวะมาตรฐาน pH 5.5 และอุณหภูมิ 37 °ซ (BASF, nd[a]; Lei et al., 1994; Yi et al., 1996; Eeckhout and DePaepe, 1994)

2.6 แหล่งของเอนไซม์ไฟเตส

เอนไซม์ไฟเตสในทางเดินอาหารสัตว์มีแหล่งที่มาหลัก 3 แหล่ง คือในพืชหรือวัตถุดิบอาหารสัตว์, สังเคราะห์ในทางเดินอาหารสัตว์และจากการสังเคราะห์ของจุลินทรีย์กลุ่มเชื้อรา

2.6.1 เอนไซม์ไฟเตสจากระบบทางเดินอาหารสัตว์

การย่อยไฟเตทในทางเดินอาหารของสัตว์กระเพาะเดี่ยวอาจเกิดขึ้นได้เนื่องจากเอนไซม์ไฟเตสจากแหล่งต่าง ๆ คือ เอนไซม์ไฟเตสที่สังเคราะห์และขับออกจากลำไส้เล็กของสัตว์ซึ่งยังไม่แน่ชัดว่าสัตว์ผลิตได้มากน้อยเพียงใด กรดไฟติคที่ถูกย่อยในทางเดินอาหารอาจเป็นผลเนื่องมาจากเอนไซม์อัลคาไลน์ฟอสฟาเตส (alkaline phosphatase) แต่อย่างไรก็ตามการทำงานของเอนไซม์ไฟเตสในลำไส้เล็กนั้นมีน้อยมากโดยเฉพาะในไก่เล็ก เอนไซม์ไฟเตสจากจุลินทรีย์ที่ผลิตจากบริเวณลำไส้ใหญ่มีส่วนช่วยย่อยฟอสฟอรัสที่ส่งจากลำไส้เล็กเพิ่มขึ้นบ้าง แต่เนื่องจากได้เลยลำไส้ส่วนที่ดูดซึมฟอสฟอรัสไปแล้วสัตว์จึงไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ (บุญล้อมและสุชน, 2540ก)

2.6.2 เอนไซม์ไฟเตสจากพืช

เอนไซม์ไฟเตสที่มีอยู่ในเมล็ดพืชที่เป็นวัตถุดิบอาหารสัตว์ประเภทข้าวสาลีและข้าวบาร์เลย์จะมีเอนไซม์ไฟเตสในปริมาณมาก กากที่เหลือจากการกลั่นเหล้า (distillers grain) ก็มีเอนไซม์ไฟเตสสูงพอควร แต่ในข้าวโพด ข้าวโอ๊ต รำข้าวเจ้า ข้าวฟ่าง กากเมล็ดพืชอื่น และวัตถุดิบประเภทพืชหัว มีเอนไซม์ไฟเตสน้อยมากหรือไม่พบเลย (ตารางที่ 2-3) (Pointillart, 1991; บุญล้อมและสุชน, 2540ข) และเนื่องจากความสามารถในการย่อยของเอนไซม์ไฟเตสจากพืชนั้นแปรผันมาก โดยมีปัจจัยหลายอย่างเข้ามาเกี่ยวข้อง เช่น สายพันธุ์ อายุ อายุการเก็บเกี่ยว การทำแห้ง และการเก็บรักษา เป็นต้น รวมทั้งยังมีข้อจำกัดในช่วง pH ของการทำงานจึงไม่สะดวกในการนำมาใช้ในทางปฏิบัติกล่าวคือ เอนไซม์ไฟเตสในพืชไม่สามารถทำงานได้ในสภาพระบบการย่อยอาหารของสัตว์ เนื่องจากเอนไซม์ไฟเตสจากพืชมี pH ที่เหมาะสมในช่วง 4-6 แต่การย่อยไฟเตทจะเกิดขึ้นมากในกระเพาะอาหารซึ่งมี pH ประมาณ 2.5 (บุญล้อมและสุชน, 2540ก)

ตารางที่ 2-3 ปริมาณเอนไซม์ไฟเตสในวัตถุดิบจากพืชบางชนิด

วัตถุดิบ	ปริมาณเอนไซม์ไฟเตส (ยูนิต/กิโลกรัม)		
	1	2	3
ข้าวสาลี	1,193	1,193	1,200
ข้าวบาเลย์	583	582	500
ข้าวโพด	15	15	-
รำข้าวสาลี	2,987	2,957	3,000-5,000
รำข้าวเจ้า	122	-	-
กากถั่วเหลือง	8	40	-
กากถั่วลิสง	3	-	-
กากเรปซีด	16	16	-
หัวมันสำปะหลัง	6	-	-
หัวมันเทศ	25	-	-
กากเหล้า	385	-	-
ข้าวไรย์	-	5,130	2,500
ถั่วลิสง	-	116	-

ที่มา: 1 Eeckhout and DePaepe (1994); Eeckhout and DePaepe (1998)

2 Anonymous (2000)

3 BASF (nd*)

2.6.3 เอนไซม์ไฟเตสจากจุลินทรีย์

เอนไซม์ไฟเตสที่ได้จากจุลินทรีย์ จากการศึกษาของ Nelson et al. (1968,1971) รายงานว่าในธรรมชาติสามารถพบเอนไซม์ไฟเตสได้ในสิ่งมีชีวิตจำพวกเห็ด รา ยีสต์ และจุลินทรีย์บางชนิด และพบว่าเชื้อราในกลุ่ม *Rhizopus spp.*, *Aspergillus spp.* 28 ชนิด และกลุ่ม *Mucor spp.* 1 ชนิด สามารถสร้างเอนไซม์ไฟเตสได้ ซึ่งต่อมาพบว่าเชื้อรา *Aspergillus niger* และ *Aspergillus ficuum* สามารถผลิตเอนไซม์ได้เป็นอย่างดี เช่นเดียวกับ Jongbloed, (1992) รายงานว่าเชื้อรา *Aspergillus spp.* โดยเฉพาะอย่างยิ่ง *Aspergillus niger*

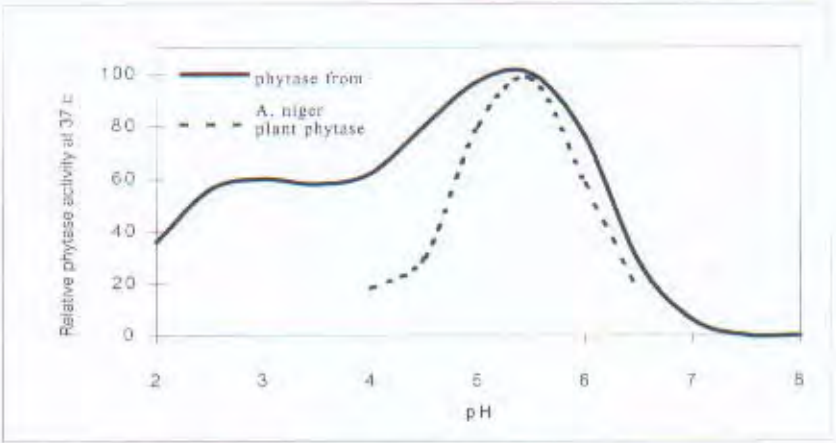
สามารถผลิตเอนไซม์ไฟเตสได้ดี และมีข้อได้เปรียบเอนไซม์ไฟเตสที่ได้จากพืชคือ สามารถทำงานได้ในช่วง pH กว้างกว่าเอนไซม์ไฟเตสที่ได้จากพืช กล่าวคือเอนไซม์ไฟเตสจากเชื้อราสามารถทำงานได้ดีในช่วง pH 2.5 – 6.5 ส่วนเอนไซม์ไฟเตสที่ได้จากพืชจะมีช่วงการทำงานอยู่ที่ pH ระหว่าง 4.5 – 6.5 โดยเอนไซม์ไฟเตสที่เสริมลงในอาหารสัตว์ทำงานได้ดีที่สุดที่ pH 5.5 อุณหภูมิ 37.5 °ซ และความชื้น 25 เปอร์เซ็นต์ขึ้นไป นอกจากนี้เชื้อรา *Aspergillus terreus*, *Aspergillus oryzae* ก็สามารถผลิตเอนไซม์ไฟเตสได้เช่นเดียวกัน (Yamada et al., 1968 อ้างโดย Wang et al., 1980) นอกจากเชื้อราในตะกูล *Aspergillus spp.* ที่สามารถผลิตเอนไซม์ไฟเตสได้แล้ว Nahashon et al., (1994) และ Matsui et al., (2000) ยังสามารถแยกเอนไซม์ไฟเตสได้จากสิ่งมีชีวิตจำพวกยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae*, *Schwanniomyces occidentalis* และจุลินทรีย์จำพวก *Psurdomonas spp.*, *Bacillus subtilis* อีกด้วย

2.7 สภาพที่เหมาะสมต่อการทำงานของเอนไซม์ไฟเตส

แม้ว่ากลไกการทำงานของเอนไซม์ไฟเตสที่พบในพืชและที่จุลินทรีย์ผลิตขึ้นนั้นจะมีกลไกการเข้าย่อยสลายกรดไฟติคเช่นเดียวกัน แต่คุณสมบัติการปรับตัวและความคงทนต่อสภาพภายในระบบย่อยอาหารสัตว์และสภาพแวดล้อมภายนอกนั้นแตกต่างกัน ซึ่งมีความสำคัญต่อประสิทธิภาพการทำงานของเอนไซม์ที่จะนำไปใช้ต่อไป โดยปกติแล้วสภาพที่เหมาะสมกับการทำงานของเอนไซม์นั้นมีหลายปัจจัยเข้ามาเกี่ยวข้องเช่นเดียวกับเอนไซม์ไฟเตสปัจจัยเหล่านั้นได้แก่

2.7.1 ความเป็นกรด-ด่าง (pH)

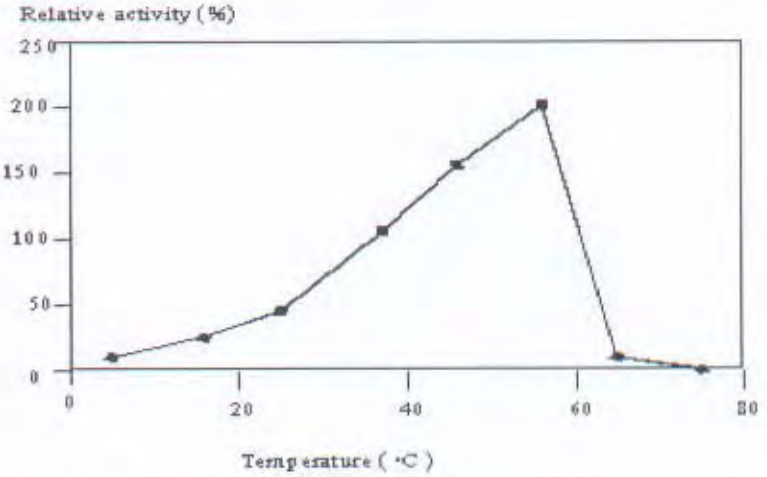
สภาพ pH ที่เหมาะสมกับการทำงานของเอนไซม์ไฟเตสที่ผลิตจากจุลินทรีย์เปรียบเทียบกับเอนไซม์ที่ผลิตได้จากพืชแล้ว พบว่าที่ผลิตได้จากจุลินทรีย์นั้นมีข้อได้เปรียบคือ สามารถทำงานได้ในช่วง pH ที่กว้างกว่า โดยจากการทดสอบที่อุณหภูมิ 37 °ซ พบว่า pH ที่เหมาะสมกับการทำงานของเอนไซม์ทั้งสองแหล่งคือที่ pH 5.5 เอนไซม์ที่ได้จากพืชการทำงานจะลดลงเมื่อ pH ต่ำกว่า 4 แต่เอนไซม์จากจุลินทรีย์ยังคงทำงานได้ดีที่ pH 2.5 และเป็น pH ของกระเพาะ และเมื่อ pH สูงเกิน 6.5 เอนไซม์ไฟเตสจากทั้งสองแหล่งจะไม่ทำงาน อย่างไรก็ตาม Scheuermann et al., (1988) อ้างโดย BASF (nd*); Hoppe (1992); Khan (1996) รายงานว่าที่ pH 7.2 และ 9 ไฟเตสจากพืชยังสามารถทำงานได้ (ภาพที่ 2-6)



ภาพที่ 2-6 แสดงการทำงานเอนไซม์ไฟเตสจากพืชและที่ได้จากจุลินทรีย์ที่ pH ต่าง ๆ ที่อุณหภูมิ 37 °ซ
ที่มา: Hoppe(1992)

2.7.2 อุณหภูมิ

BASF (nd*) รายงานถึงอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการทำงานของเอนไซม์ไฟเตสซึ่งผลิตได้จากจุลินทรีย์ *Aspergillus niger* ว่าจะทำงานดีเมื่ออุณหภูมิเพิ่มจาก 25 เป็น 55 °ซ แสดงดังภาพที่ 2-7 โดยที่อุณหภูมิ 65 °ซ ประสิทธิภาพการทำงานของเอนไซม์จะลดลง 10-20 เปอร์เซ็นต์ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้นถึง 70 °ซ จะลดลง 15-35 เปอร์เซ็นต์ และจะไม่ทำงานเมื่ออุณหภูมิสูงถึง 80 °ซ ซึ่งกระบวนการผลิตอาหารสัตว์ที่ใช้อุณหภูมิสูง (มากกว่า 75 °ซ) หรือใช้ความร้อนชื้น ควรใช้เอนไซม์ไฟเตสคลุกให้สัตว์กินโดยตรงหรือใช้ฉีดพ่นในอาหารหลังการแปรรูป



ภาพที่ 2-7 อุณหภูมิที่เหมาะสมกับการทำงานของเอนไซม์ไฟเตส
ที่มา : Hoppe(1992)

2.7.3 ความชื้น

จากการศึกษาของ Hoppe (1992) พบว่าเอนไซม์จะทำงานได้ดีที่ความชื้นอย่างน้อย 25 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งในระบบทางเดินอาหารนั้นมีความชื้นสูงกว่านี้อยู่แล้วจึงไม่น่าที่จะเป็นปัญหาสำหรับการทำงานของเอนไซม์

2.8 การย่อยสลายไฟเตทในวัตถุดิบอาหารสัตว์โดยเอนไซม์ไฟเตสภายนอกร่างกายสัตว์ (in vitro)

กลไกการทำงานของเอนไซม์ไฟเตสที่พบในพืชและที่จุลินทรีย์ผลิตขึ้นนั้นมีปัจจัยหลักที่ควบคุมการทำงาน ได้แก่ ความเป็นกรด-ด่าง, อุณหภูมิ และความชื้นดังได้กล่าวมาแล้วข้างต้น แต่การย่อยสลายกรดไฟติคในวัตถุดิบอาหารสัตว์แต่ละชนิดนั้นมีความแตกต่างกัน เนื่องจากมีปัจจัยอื่นที่เกี่ยวข้อง เช่น ระยะเวลาที่ใช้ในการย่อยสลาย และความละเอียดของวัตถุดิบ

จากรายงาน Anderson (1915) ทดลองทำการย่อยฟอสฟอรัสอินทรีย์โดยเอนไซม์ไฟเตสในรำข้าวสาลีโดยใช้รำข้าวสาลี 10 กรัม เติมน้ำ 100 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้อง 16 °ซ เป็นระยะเวลา 1/2, 1, 4, 20 และ 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปกรองและนำน้ำที่ได้จากการกรองไปวัดปริมาณฟอสฟอรัสรวมและฟอสฟอรัสอนินทรีย์ จากการทดลองพบว่าเอนไซม์ไฟเตสในรำข้าวสาลีสามารถย่อยไฟเตทและปลดปล่อยฟอสฟอรัสออกมาในรูปฟอสฟอรัสอนินทรีย์ กล่าวคือปริมาณฟอสฟอรัสรวมและฟอสฟอรัสอนินทรีย์เพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาเพิ่มขึ้นและ

ภายหลังจากการบ่มด้วยน้ำ 24 ชั่วโมง (ปริมาณฟอสฟอรัสที่ปลดปล่อย 88.43 เปอร์เซ็นต์ของฟอสฟอรัสรวม) และเมื่อเติมกรดไฮโดรคลอริคหรือกรดอะซิติคที่ความเข้มข้นระดับต่างๆ พบว่าเอนไซม์ไฟเตสในรำข้าวสาลีจะทำงานได้ดีที่สุดเมื่อเติมกรดไฮโดรคลอริค 0.1 เปอร์เซ็นต์ ระยะเวลา 48 ชั่วโมง หรือกรดอะซิติค 0.2 เปอร์เซ็นต์ ระยะเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง โดยมีปริมาณการปลดปล่อยฟอสฟอรัสอนินทรีย์เท่ากับ 92.37 และ 85.54 เปอร์เซ็นต์ของฟอสฟอรัสรวม ตามลำดับ เอนไซม์ไฟเตสในรำข้าวสาลีจะทำงานได้น้อยลงเมื่อความเข้มข้นของกรดไฮโดรคลอริคเพิ่มขึ้นเป็น 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 1.0 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์ โดยจะมีปริมาณการปลดปล่อยฟอสฟอรัสอนินทรีย์เท่ากับ 76.87, 20.22, 15.61, 13.44, 9.13 และ 10.83 เปอร์เซ็นต์ของฟอสฟอรัสรวม ตามลำดับ เมื่อใช้สารละลายเกลือแอมโมเนีย (NH_4) 0.25 เปอร์เซ็นต์ พบว่าจะมีเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยฟอสฟอรัสอนินทรีย์เท่ากับ 9.51 เปอร์เซ็นต์ของฟอสฟอรัสรวม และเปอร์เซ็นต์การปลดปล่อยฟอสฟอรัสเท่ากับ 12.66 และ 9.22 เปอร์เซ็นต์ของฟอสฟอรัสรวม เมื่อเติมน้ำเดือดหรือกรดไฮโดรคลอริคเดือด ปริมาณการปลดปล่อยฟอสฟอรัสในรำข้าวสาลีแสดงดังตารางที่ 2-4

ตารางที่ 2-4 แสดงปริมาณฟอสฟอรัสอนินทรีย์ที่ปลดปล่อยออกมาภายหลังการบ่มรำข้าวสาลีด้วยสารละลายชนิดต่างๆ ที่อุณหภูมิห้องในระยะเวลาที่กำหนด

สารละลายที่ใช้	ระยะเวลา (ชั่วโมง)	ฟอสฟอรัสรวม[1/] (%)	ฟอสฟอรัสอนินทรีย์[1/] (%)	คิดเป็นเปอร์เซ็นต์[2/]
น้ำกลั่น	24	0.747	0.660	88.43
HCl 0.1%	48	1.24	1.14	92.37
HCl 0.2%	24	1.20	0.925	76.87
HCl 0.3%	24	0.999	0.230	20.22
HCl 0.4%	24	0.939	0.146	15.61
HCl 0.5%	24	0.922	0.124	13.44
HCl 1.0%	5	0.894	0.081	9.13
HCl 2.0%	30	1.08	0.117	10.83
กรดอะซิติค 0.2%	3	1.21	0.695	57.03
กรดอะซิติค 0.2%	24	1.23	1.05	85.54
NH_4 0.25%	24	0.922	0.087	9.51
น้ำกลั่นร้อน	24	0.886	0.108	12.66
HCl 0.2% ร้อน	24	1.140	0.105	9.22

ที่มา: Anderson (1915)

[1/] วัดปริมาณในน้ำได้จากการกรองภายหลักการบ่ม

[2/] คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของฟอสฟอรัสรวมทั้งหมดในน้ำที่ได้จากการกรอง

Mellanby (1950) อ้างโดย Reddy et al. (1989) รายงานว่าอัตราการสลายไฟเตทขึ้นอยู่กับความละเอียดของวัตถุดิบซึ่งเมื่อบดละเอียดจะมีผลให้การสลายไฟเตทในวัตถุดิบดีขึ้นกว่าการบดหยาบหรือวัตถุดิบทั้งเมล็ด โดยศึกษาการย่อยสลายไฟเตทในข้าวสาลี, ข้าวไรย์, ข้าวบาร์เลย์, ข้าวโอ๊ต, ข้าวโพดเหลือง และข้าวโพดขาว เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 45 °ซ และ pH 4.5 ในสารละลายโซเดียมอะซิเตท-กรดอะติคบัฟเฟอร์ (sodium acetate-acetic acid buffer) จากการทดลองพบว่าการย่อยสลายไฟเตทในข้าวสาลีเกิดขึ้นช้ากว่าในข้าวสาลีบด กล่าวคือเมื่อเวลาผ่านไป 12 ชั่วโมง ไฟเตทในข้าวสาลีเหลืออยู่ 17 เปอร์เซ็นต์ของไฟเตททั้งหมด แต่ในไฟเตทในข้าวสาลีบดจะถูกย่อยสลายหมดภายใน 1 ชั่วโมง เมื่อเปรียบเทียบการสลายไฟเตทในวัตถุดิบ ได้แก่ ข้าวสาลี, ข้าวไรย์, ข้าวบาร์เลย์ พบว่ามีไฟเตทฟอสฟอรัส 232, 168 และ 198 มิลลิลิตร/100 กรัม ไฟเตทจะถูกสลายหมดที่อุณหภูมิ 45 °ซ pH 4.5 ในเวลา 60, 45 นาที และ 2 ชั่วโมง ตามลำดับ ส่วนในข้าวโอ๊ต, ข้าวโพดเหลือง และข้าวโพดขาว มีปริมาณไฟเตทเท่ากับ 194, 212 และ 180 มิลลิลิตร/100 กรัม ตามลำดับ ปริมาณไฟเตทจะสลายช้า ๆ และเมื่อเวลาผ่านไปหลัง 12 ชั่วโมง พบว่าไฟเตทส่วนใหญ่ยังคงอยู่ในเมล็ด และจากการศึกษาของ Nelson et al. (1968a) ทดลองบ่มถั่วเหลืองด้วยจุลินทรีย์จำพวกราที่สังเคราะห์ไฟเตสเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในอาหารสัตว์ปีก ทำการบ่ม 2 วิธีคือ วิธีแรกนำถั่วเหลือง 1,000 กรัม บ่มกับสารละลายที่ประกอบด้วยจุลินทรีย์ไฟเตส 50 มิลลิลิตร และเติมน้ำอุ่น 450 มิลลิลิตร ส่วนวิธีที่สอง ทำเช่นเดียวกันแต่เติมน้ำอุ่น 200 มิลลิลิตร ร่วมกับกรดไฮโดรคลอริค 1.2 N 250 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 50 °ซ จากการทดลองพบว่าการบ่มวิธีที่สองจะทำให้ไฟเตทถูกย่อยได้มากกว่าวิธีแรก แต่เมื่อนำไปอบก่อนทำการบ่มจะทำให้ไฟเตทถูกย่อยได้น้อยลงและไฟเตสเชื้อราจาก *Aspergillus ficuum* ทำงานได้ดีที่สุด

Han and Wilfred (1988) ทำศึกษาการย่อยไฟเตทในถั่วเหลืองและกากเมล็ดฝ้ายโดยการบ่มด้วย *Aspergillus ficuum* โดยนำตัวอย่างถั่วเหลืองและกากเมล็ดฝ้าย 2 กรัม เติมสารละลาย 30 มิลลิลิตรที่ประกอบด้วยเอนไซม์ไฟเตส 2 ยูนิต ปรับ pH ให้เท่ากับ 5.4 ด้วยกรดอะซิติค บ่มไว้ที่อุณหภูมิ 37 °ซ 1 ชั่วโมง จากนั้นทำการกรองและนำน้ำที่กรองได้ไปหาค่าไฟเตท ส่วนตะกอนที่เหลืออยู่เติมไฮโดรคลอริค 0.65 N 30 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง (25 °ซ) จากนั้นนำน้ำที่กรองได้ไปหาค่าไฟเตทที่เหลืออยู่อีกครั้ง จากการทดลองพบว่าไฟเตทในถั่วเหลืองและกากเมล็ดฝ้ายถูกย่อยเพิ่มขึ้น 44.8 และ 28.2 เปอร์เซ็นต์ของกลุ่มควบคุม (ไม่เติมไฟเตส) ตามลำดับ และเมื่อทดลองที่อุณหภูมิ 28, 37 และ 50 °ซ เวลา 1 ชั่วโมง พบว่าที่อุณหภูมิ 50 °ซ ไฟเตทในถั่วเหลืองและกากเมล็ดฝ้ายจะถูกย่อยได้สูงสุด คือ 55.1 และ 39.3 เปอร์เซ็นต์ของกลุ่มควบคุม ตามลำดับ เมื่อเพิ่มระยะเวลา 1-24 ชั่วโมง ที่ 37 °ซ พบว่าที่ 24 ชั่วโมง ไฟเตทในถั่วเหลืองและกากเมล็ดฝ้ายถูกย่อยถึง 85 และ 70 เปอร์เซ็นต์ของกลุ่มควบคุม ตามลำดับ (ตารางที่ 2-5 และ 2-6)

ตารางที่ 2-5 แสดงการสลายไฟเตทในกากถั่วเหลืองและกากเมล็ดฝ้ายร่วมกับเอนไซม์ไฟเตสจากเชื้อรา *Aspergillus ficuum*

ทรีทเมนต์[1/]	กากถั่วเหลือง		กากเมล็ดฝ้าย	
	ไฟเตทเป็น % ของวัตถุแห้ง	% ไฟเตทที่ถูกสลาย[2/]	ไฟเตทเป็น % ของวัตถุแห้ง	% ไฟเตทที่ถูกสลาย[2/]
กลุ่มควบคุม	2.23	0	4.43	0
บ่มเอนไซม์ไฟเตส	1.23	44.8	3.18	28.2

ที่มา: Han and Wilfred(1988)

[1/] กากถั่วเหลืองหรือกากเมล็ดฝ้าย 2 กรัม ผสมกับน้ำกลั่น 30 มิลลิลิตร(กลุ่มควบคุม) หรือสารละลายที่ประกอบด้วยเอนไซม์ไฟเตส 2 ยูนิต ที่อุณหภูมิ 37 °ซ pH 4.5 และระยะเวลา 1 ชั่วโมง

[2/] คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของไฟเตทในวัตถุแห้งของกลุ่มควบคุม(ไม่เสริมเอนไซม์ไฟเตส)

ตารางที่ 2-6 ผลของอุณหภูมิต่อการสลายไฟเตทในกากถั่วเหลืองและกากเมล็ดฝ้ายร่วมกับเอนไซม์ไฟเตสจากเชื้อรา *Aspergillus ficuum* ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิ[1/] (°ซ)	กากถั่วเหลือง		กากเมล็ดฝ้าย	
	ไฟเตทเป็น % ของวัตถุแห้ง	% ไฟเตทที่ถูกสลาย[2/]	ไฟเตทเป็น % ของวัตถุแห้ง	% ไฟเตทที่ถูกสลาย[2/]
กลุ่มควบคุม(ปกติ)	2.05 + 0.28	0	4.27 + 0.22	0
28 °ซ	1.13 + 0.09	34.1	2.91 + 0.12	31.8
37 °ซ	1.13 + 0.04	43.4	2.92 + 0.22	31.6
50 °ซ	0.92 + 0.16	55.1	2.59 + 0.10	39.3

ที่มา: Han and Wilfred, 1988

[1/] กากถั่วเหลืองหรือกากเมล็ดฝ้าย 2 กรัม ผสมกับน้ำกลั่น 30 มิลลิลิตร(กลุ่มควบคุม) หรือสารละลายที่ประกอบด้วยเอนไซม์ไฟเตส 2 ยูนิต pH 4.5 ระยะเวลา 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

[2/] คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของไฟเตทในวัตถุแห้งของกลุ่มควบคุม(ไม่เสริมเอนไซม์ไฟเตส)

และจากการทดลองของ Han and Wilfred (1988) เมื่อให้ความร้อนที่ 121 °ซ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ก่อนการบ่มที่อุณหภูมิ 37 °ซ pH 4.5 ระยะเวลา 1 ชั่วโมง พบว่าการให้ความร้อนก่อนการบ่มมีผลในการเพิ่มการย่อยสลายไฟเตทประมาณ 11 เปอร์เซ็นต์เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุมคือเพิ่มขึ้นจาก 33.2 เป็น 44.6 เปอร์เซ็นต์ในกากถั่วเหลือง และ 35.6 เป็น 46.7 เปอร์เซ็นต์ในกากเมล็ดฝ้าย แสดงตารางที่ 2-7

ตารางที่ 2-7 ผลของความร้อนและเอนไซม์ไฟเตสต่อการสลายไฟเตทในกากถั่วเหลือง และกากเมล็ดฝ้าย

ทรีทเมนต์		กากถั่วเหลือง		กากเมล็ดฝ้าย	
ความร้อน[1/]	ไฟเตส	ไฟเตทเป็น % ของวัตถุแห้ง	% ไฟเตทที่ถูกสลาย	ไฟเตทเป็น % ของวัตถุแห้ง	% ไฟเตทที่ถูกสลาย[2/]
-	-	1.99	-	4.41	-
-	+	1.33	33.2	2.84	35.6
+	-	1.86	-	2.42	-
+	+	1.03	44.6	1.29	46.7

ที่มา: Han and Wilfred (1988)

[1/] ให้ความร้อน 121 °ซ เวลา 1 ชั่วโมง ก่อนการบ่มที่อุณหภูมิ 37 °ซ, pH 4.5 เป็นเวลา 1 ชม.

[2/] คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของไฟเตทในวัตถุแห้งของกลุ่มควบคุม

Kon et al. (1973) ศึกษาถึงการเพิ่มปริมาณฟอสฟอรัสอนินทรีย์และอินโนซิทอล (inosital) ในถั่วขาวเล็กแคลิฟอร์เนีย (California small white bean) โดยการแช่น้ำแล้วเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 55 °ซ เวลา 20 ชั่วโมง พบว่าสามารถสลายไฟเตทได้ถึง 65 เปอร์เซ็นต์ เช่นเดียวกับ Becker et al. (1974) รายงานว่าเมื่อนำถั่วขาวเล็กแคลิฟอร์เนียแช่น้ำแล้วบ่มไว้ที่อุณหภูมิ 55 °ซ เวลา 48 ชั่วโมง สามารถเพิ่มปริมาณฟอสฟอรัสอนินทรีย์และอินโนซิทอลได้ 88 และ 77 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และรายงานว่า pH ที่เหมาะสมในการเพิ่มอินโนซิทอลเท่ากับ 5.2 จึงสามารถสรุปได้จากข้อมูลในตารางที่ 2-4, 2-5 และ 2-6 ว่าสภาพที่เหมาะสมสำหรับการย่อยไฟเตทโดยเอนไซม์จากเชื้อราคือ pH 4-5.5 และอุณหภูมิ 50 °ซ

ต่อมา Chang et al. (1977) ทำการศึกษาผลของระยะเวลา, อุณหภูมิ, pH, การแช่น้ำ และการให้ความร้อนต่อการเพิ่มการสลายไฟเตทในถั่วขาวเล็กแคลิฟอร์เนีย โดยใช้ถั่วขาวเล็กแคลิฟอร์เนีย 5 กรัม แช่ในน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร (หรือใช้อะซิเตทบัฟเฟอร์ 0.2 โมลาร์ 40 มิลลิลิตร) ที่อุณหภูมิ 23-90 °ซ ระยะเวลา 3 ชั่วโมง พบว่าการเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 50 และ 60 °ซ ปริมาณไฟเตทถูกสลายเท่ากับ 31 และ 49 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แต่เมื่อเพิ่มอุณหภูมิมากกว่า 60 °ซ หรือลดอุณหภูมิต่ำกว่า 50 °ซ จะมีผลให้การสลายไฟเตทเกิดขึ้นเพียงเล็กน้อย และเมื่อทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ 60 °ซ เป็นเวลา 10 ชั่วโมง พบว่าไฟเตทถูกสลาย 75 เปอร์เซ็นต์ และไฟเตทอีก 25 เปอร์เซ็นต์ แพร่ออกมาอยู่ในน้ำที่ใช้บ่มจากทดลองสรุปได้ว่าเอนไซม์ไฟเตสสามารถทำงานได้ดีที่อุณหภูมิ 60 °ซ และทำงานลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 70 °ซ (ตารางที่ 2-8)

ตารางที่ 2-8 ผลของอุณหภูมิต่อการสลายไฟเตทในถั่วขาวเล็กแคลิฟอร์เนีย

อุณหภูมิ (°ซ)	ปริมาณไฟเตทหลังให้ความร้อน		ไฟเตทรวมหลังการบ่ม (มก./ก)	เปอร์เซ็นต์การสลายไฟเตท (%)
	ในถั่ว(มก./ก)	ในน้ำบ่ม		
23	2.88	0.00	2.88	0
40	2.55	0.00	2.55	11
50	1.98	น้อยมาก	1.98	31
60	1.04	0.42	1.46	49
70	0.13	1.21	2.34	19
80	1.14	1.23	2.47	14
90	1.11	1.44	2.55	11

ที่มา: Chang et al. (1977)

[1/] สภาพที่ใช้ในการทดลอง: ใช้ถั่วขาวเล็กแคลิฟอร์เนีย 5 กรัม บ่มโดยใช้น้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิตามที่กำหนดเป็นระยะเวลา 3 ชั่วโมง

Chang et al. (1977) ทดลองการบ่มถั่วขาวเล็กแคลิฟอร์เนียในน้ำกลั่นที่ 60°ซ เป็นเวลา 4 ชั่วโมง พบว่าไฟเตทถูกสลายได้มากกว่าการแช่ในน้ำกลั่น 16 ชั่วโมง แล้วทำให้แห้งที่ 60°ซ 6 ชั่วโมง หรือมากกว่าการแช่ในน้ำ 60°ซ 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบ่มที่อุณหภูมิ 50°ซ เป็นเวลา 3 ชั่วโมง หรือมากกว่าการแช่น้ำกลั่น ที่อุณหภูมิห้อง 16 ชั่วโมง แล้วแช่แข็ง 12 ชั่วโมง จากนั้นละลายน้ำแข็งที่อุณหภูมิห้องแล้วทำให้แห้งที่ 60°ซ 6 ชั่วโมง ค่าเฉลี่ยแสดงดังตารางที่ 2-9

ตารางที่ 2-9 การสลายไฟเตทในถั่วขาวเล็กแคลิฟอร์เนียโดยการบ่มที่อุณหภูมิ 60°ซ ในสภาพที่ควบคุม

สภาพที่ควบคุม	ไฟเตท (มก./ก.)	ไฟเตทที่ถูกย่อยสลาย%[1/]
แช่ในน้ำ ที่อุณหภูมิห้อง 12 ชม.	2.88	0.00
แช่ในน้ำกลั่นที่ 60°ซ 4 ชม.	1.16	60.00
แช่น้ำกลั่น ที่อุณหภูมิห้อง 16 ชม. แล้วทำให้แห้งที่ 60°ซ 6 ชม.	1.97	31.00
แช่ในน้ำกลั่นที่ 60°ซ 1 ชม. จากนั้นแช่น้ำกลั่นที่ 50°ซ 3 ชม.	1.63	43.00
แช่น้ำกลั่น ที่อุณหภูมิห้อง 16 ชม. แล้วแช่แข็ง 12 ชม. ละลายน้ำแข็งที่อุณหภูมิห้องแล้วทำให้แห้งที่ 60°ซ 6 ชม.	1.45	50.00

ที่มา: Chang et al. (1977)

[1/] คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของไฟเตททั้งหมดในถั่วขาวเล็กแคลิฟอร์เนียคือ 2.88 มิลลิกรัม/กรัมของน้ำหนักแห้ง

และเมื่อทำการศึกษาค่าความเป็นกรดด่างที่เหมาะสมกับการทำงานของเอนไซม์ไฟเตส โดยนำถั่วขาวเล็กแคลิฟอร์เนีย 5 กรัม บ่มในอะซิเตทบัฟเฟอร์ 0.2 โมลาร์ 40 มิลลิลิตร ปรับ pH ในช่วงต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าเอนไซม์ไฟเตสในถั่วขาวเล็กแคลิฟอร์เนียทำงานได้ในช่วง pH 4.0-5.8 และทำงานได้ดีที่สุดในช่วง pH 5.0-5.5 โดยที่ pH ในช่วงนี้ไฟเตทจะถูกสลายได้มากที่สุดคือ 56-61 เปอร์เซ็นต์ (ตารางที่ 2-10)

ตารางที่ 2-10 ผลของ pH ต่อการสลายไฟเตทในถั่วขาวเล็กแคลิฟอร์เนีย[1/]

pH	ไฟเตท (มก./ก.ของน้ำหนักแห้ง)			เปอร์เซ็นต์การสลายไฟเตท[2/]
	ในถั่ว	ในน้ำบ่ม	รวม	
4.0	1.20	0.41	1.61	44
4.5	0.77	0.88	1.65	43
5.0	0.27	0.99	1.26	56
5.5	0.27	0.84	1.11	61
5.8	1.39	0.55	1.94	33

ที่มา: Chang et al. (1977)

[1/]สภาพที่ใช้ในการทดลอง: ใช้ถั่วขาวเล็กแคลิฟอร์เนีย 5 กรัม บ่มโดยใช้น้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร ปรับ pH ตามที่กำหนดโดยใช้กรดอะซิติค ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ 50 °ซ เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง

[2/]คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของไฟเตททั้งหมดในถั่วขาวเล็กแคลิฟอร์เนียคือ 2.88 มิลลิกรัม/กรัมของนน.แห้ง

นอกจากนี้ Chang et al. (1977) ยังทดลองบ่มวัตถุดิบได้แก่ ถั่วขาวเล็กแคลิฟอร์เนีย, ถั่วเขียวผิวดำ, ถั่วเหลือง, ถั่วลิม่า และข้าวสาลี โดยใช้วัตถุดิบ 5 กรัม(ยกเว้นถั่วลิม่าใช้ 10 กรัม) แช่ในน้ำกลั่น 10 มิลลิลิตร แล้วทำการบ่มที่สภาพต่าง ๆ ผลการทดลองพบว่าการแช่น้ำทั้งเมล็ด บ่มที่อุณหภูมิห้อง 12 ชั่วโมง มีผลให้ไฟเตทในถั่วเหลืองถูกย่อยสลายสูงสุด 36.9 เปอร์เซ็นต์ของไฟเตทในถั่วเหลืองบดละเอียด แต่ไฟเตทในถั่วขาวเล็กแคลิฟอร์เนีย, ถั่วเขียวผิวดำ, ถั่วลิม่า และข้าวสาลี ถูกย่อยสลายได้สูงที่สุดเมื่อทำการบ่มโดยแช่น้ำทั้งเมล็ดที่อุณหภูมิห้อง 12 ชั่วโมง แล้วเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 60 °ซ 12 ชั่วโมง (ไฟเตทถูกย่อยสลายเท่ากับ 74.00, 43.00, 80.50 และ 64.00 เปอร์เซ็นต์ของไฟเตทในวัตถุดิบหลังแช่น้ำทั้งเมล็ดที่อุณหภูมิห้อง 12 ชั่วโมง) ค่าเฉลี่ยแสดงดังตารางที่ 2-11

ตารางที่ 2-11 แสดงสภาพที่ควบคุมต่อการสลายไฟเตทในวัตถุดิบชนิดต่าง ๆ

สภาพที่ควบคุม	ปริมาณไฟเตท[1/]				
	ถั่วขาวเล็กแคลิฟอร์เนีย	ถั่วเขียวผิวดำ	ถั่วเหลือง	ถั่วลิมา	ข้าวสาลี
วัตถุดิบบดละเอียด	2.58	2.21	3.06	2.30	2.36
แช่น้ำทั้งเมล็ด ที่อุณหภูมิห้อง 12 ชม.	2.88	2.16	1.93	2.46	2.24
	0.0%	2.3%	36.9%	0.0%	4.2%
แช่น้ำทั้งเมล็ดที่อุณหภูมิห้อง 12 ชม.	1.08	-	-	1.36	1.81
แล้วเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 60 °ซ 5 ชม.	62.5%	-	-	44.7%	23.3%
แช่น้ำทั้งเมล็ดที่อุณหภูมิห้อง 12 ชม.	0.75	1.26	3.03	0.48	0.85
แล้วเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 60 °ซ 12 ชม.	74.0%	43.0%	1.0%	80.5%	64.0%
แช่น้ำทั้งเมล็ดที่อุณหภูมิห้อง 12 ชม. ทำให้แห้งแล้วแช่ในน้ำกลั่นที่อุณหภูมิ	1.76	1.38	2.59	0.84	1.72
60 °ซ 12 ชม.	38.6%	37.6%	18.0%	65.9%	27.1%

ที่มา: Chang et al. (1977)

[1/] ปริมาณไฟเตทที่มีอยู่ในวัตถุดิบหลังการบ่มเป็น มิลลิลิตร/กรัมของน้ำหนักแห้ง และปริมาณไฟเตทที่ถูกสลายคิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของไฟเตทที่มีอยู่ในวัตถุดิบภายหลังแช่น้ำทั้งเมล็ดที่อุณหภูมิห้อง 12 ชม.

Nelson(1976)ศึกษาการทำงานของเอนไซม์ไฟเตสในข้าวโพดและข้าวสาลีโดยวิธีการเติมน้ำกลั่นหรือกรดไฮโดรคลอริค 0.6 N 60 มิลลิลิตร ในวัตถุดิบ 60 กรัม ทิ้งไว้ที่อุณหภูมิ 40 °ซ นาน 24 ชั่วโมง แล้วนำมาวิเคราะห์ปริมาณไฟเตทที่เหลืออยู่ จากการทดลองพบว่าการใช้น้ำกลั่นในการบ่มข้าวโพดและข้าวสาลีจะมีผลทำให้ไฟเตทลดลงมากกว่าการใช้กรดไฮโดรคลอริคเจือจาง โดยปริมาณไฟเตทในข้าวโพดและข้าวสาลีลดลงเท่ากับ 44.24 และ 88.51 เปอร์เซ็นต์ และ 8.29 และ 19.25 เปอร์เซ็นต์ของไฟเตททั้งหมดในการบ่มด้วยน้ำกลั่นและกรดไฮโดรคลอริค 0.6 N ตามลำดับ (ตารางที่ 2-12)

ตารางที่ 2-12 แสดงผลของการบ่มข้าวโพดและข้าวสาลีด้วยน้ำกลั่นและกรดไฮโดรคลอริคต่อปริมาณการสลายไฟเตท

ทรีทเมนต์	ไฟเตทฟอสฟอรัส (มิลลิลิตร/กรัม)	
	ข้าวโพด	ข้าวสาลี
วัตถุดิบปกติ	2.17	3.22
40 °ซ + น้ำกลั่น	1.21 (44.24%)[1/]	0.37 (88.51%)
40 °ซ + 0.6 N HCl	1.99 (8.29%)	2.60 (19.25%)

ที่มา: Nelson (1976)

[1/] คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของปริมาณไฟเตททั้งหมดที่มีอยู่ในวัตถุดิบปกติ

Ferrel (1978) ศึกษาการสลายไฟเตทในข้าวสาลีพบว่าไฟเตทมากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ จะสลายที่อุณหภูมิ 35-55 °ซ ในสารละลายอะซิเตทบัฟเฟอร์ 0.1 โมลาร์ pH 5.2 และ Tabekhia and Luh(1980) ศึกษาการสลายไฟเตทในถั่วชนิดต่าง ๆ คือ Black-eyed, Red Kiddey, Mung และ Pink พบว่าเปอร์เซ็นต์การสลายไฟเตทในถั่วพันธุ์ต่าง ๆ มีค่าเท่ากับ 7.7, 8.1, 13.2 และ 19.1 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อแช่ในน้ำประปา เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 24 °ซ ระยะเวลา 12 ชั่วโมง และ Iyer et al. (1980) พบว่าเมื่อนำถั่ว Great Northern, Kidney และ Pinto มาแช่น้ำกลั่น 18 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง ไฟเตทจะถูกสลายเท่ากับ 52.7, 69.6 และ 51.7 เปอร์เซ็นต์ของไฟเตททั้งหมด ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตาม Iyer (1979) พบว่าเมื่อแช่ในสารละลายเกลือซึ่งมีส่วนประกอบคือ โซเดียมคลอไรด์ 2.5 เปอร์เซ็นต์, โซเดียมไบคาร์บอเนต 1.5 เปอร์เซ็นต์, โซเดียมคาร์บอเนต 9.5 เปอร์เซ็นต์ และโซเดียมไตรโพลีฟอสเฟต 1.0 เปอร์เซ็นต์ pH 7.0 และเก็บไว้ที่อุณหภูมิห้อง (22 °ซ) 18 ชั่วโมง เปอร์เซ็นต์ไฟเตทที่ถูกสลายน้อยกว่าการแช่ในน้ำกลั่น (ตารางที่ 2-13)

ตารางที่ 2-13 แสดงผลของการแช่น้ำกลั่นและสารละลายเกลือต่อการสลายไฟเตทในถั่วชนิดต่าง ๆ ที่อุณหภูมิห้อง (22 °ซ) pH 7.0 ระยะเวลา 18 ชั่วโมง

สภาพควบคุม	Great Northern ไฟเตท (มก./ก.)	Kidney ไฟเตท (มก./ก.)	Pinto ไฟเตท (มก./ก.)
กลุ่มควบคุม	4.6	5.8	5.5
แช่น้ำกลั่น	1.4 (69.6%)[2/]	2.8 (51.7%)	2.6 (52.7%)
แช่ในสารละลายเกลือ[1/]	4.2 (8.7%)	4.5 (22.4%)	4.4 (18.2%)

ที่มา: Iyer (1979)

[1/] โซเดียมคลอไรด์ 2.5%,โซเดียมไบคาร์บอเนต 1.5%,โซเดียมคาร์บอเนต 9.5%และโซเดียมไตรโพลีฟอสเฟต 1.0 %

[2/] คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ของปริมาณไฟเตททั้งหมดที่มีอยู่ในวัตถุดิบปกติ

Wang et al. (1980) ศึกษาสภาพที่เหมาะสมต่อการทำงานของเอนไซม์ไฟเตสที่ได้จากการสังเคราะห์ พบว่าไฟเตสจากเชื้อรา *Aspergillus oryzae* ทำงานได้ดีที่อุณหภูมิ 45-50 °ซ และจะถูกทำลายที่อุณหภูมิ 55 °ซ ในเวลา 10 นาที นอกจากนี้ยังพบว่าเอนไซม์จาก *Aspergillus oryzae* ยังสามารถทำงานได้ดีที่อุณหภูมิ 25 °ซ และ pH 2.5-7.8 ต่อมา Zyla et al.(1989) พบว่าไฟเตสจาก *Aspergillus niger* มีสภาพการทำงานที่เหมาะสมอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 40-65 °ซ และ pH 1.8-2.6 โดยสภาพที่เหมาะสมที่สุดอยู่ที่อุณหภูมิ 60 °ซ และ ที่ pH 4.5 เอนไซม์ยังคงประสิทธิภาพการทำงานอยู่ที่ 85 เปอร์เซ็นต์ และ Zyla and Koreleski(1993) ศึกษาการย่อยไฟเตทในกากเมล็ดเรปซีด โดยใช้จุลินทรีย์ *Aspergillus niger* โดยนำกากเมล็ดเรปซีดผสมกับน้ำกลั่นในอัตรา 1:3 ปรับ pH ให้อยู่ที่ระดับ 3.0, 4.5, 5.5 โดยใช้กรดไฮโดรคลอริค 5 โมลาร์ บ่มไว้ที่อุณหภูมิ 40 °ซ เวลา 4 ชั่วโมง พบว่าที่ระดับ pH 3.0 จะมีการปลดปล่อยฟอสฟอรัสอนินทรีย์มากที่สุด สอดคล้องกับรายงานของ Bos (1990) ซึ่งศึกษาการบ่มวัตถุดิบชนิดต่าง ๆด้วยเอนไซม์ไฟเตส 400 ยูนิต/กิโลกรัมอาหาร ที่อุณหภูมิ 40 °ซ pH 5.5 ความชื้น 80 เปอร์เซ็นต์ พบว่าการบ่มรำข้าวสาลีและเปลือกข้าวโพดเป็นระยะเวลา 2 ชั่วโมง ทำให้ไฟเตทถูกย่อยสลายออกมา 71 และ 98 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และพบว่าไฟเตทที่อยู่ในวัตถุดิบจะถูกย่อยสลายออกมามากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับปริมาณซับสเตทและความละเอียดของวัตถุดิบชนิดนั้น ๆ

Williums and Taylor (1985) พบว่าในสภาพสารละลายที่เป็นกลางไฟเตทในข้าวโพดจะถูกย่อย 44 เปอร์เซ็นต์ และในข้าวสาลี 88 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งการย่อยนี้จะเกิดจากเอนไซม์ไฟเตสซึ่งอยู่ในพืช แต่เมื่อปรับสภาพสารละลายให้มี pH 4 พบว่าการทำงานของไฟเตสในข้าวโพดจะลดลง 11 เปอร์เซ็นต์ และในข้าวสาลีลดลง 19 เปอร์เซ็นต์ Ilyas et al. (1995) ศึกษาการลดปริมาณไฟเตทในกากถั่วเหลืองโดยใช้เอนไซม์จากเชื้อรา *Aspergillus usamii* โดยการนำกากถั่วเหลืองที่ผ่านการอบไอน้ำ 100 กรัม มาเติมเชื้อราที่เตรียมไว้ (2×10^{6} สปอร์) บ่มที่อุณหภูมิห้อง 48 ชั่วโมง หลังจากนั้นเติมน้ำ 50 เปอร์เซ็นต์และนำไปบ่มอีก 12 ชั่วโมง แล้วนำกากถั่วเหลืองที่ได้ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 45 °ซ นาน 20 ชั่วโมง จากนั้นนำไปวิเคราะห์ปริมาณไฟเตทและส่วนประกอบทางเคมีอื่นๆ จากวิธีดังกล่าวพบว่าปริมาณโปรตีนหยาบ, เยื่อใยหยาบ, ไขมันและเถ้าหยาบในกากถั่วเหลืองบ่มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับกากถั่วเหลืองปกติ และปริมาณไนโตรเจนฟรีแอคแทรกซ์ลดลง (ตารางที่ 2-14) แสดงว่าคาร์โบไฮเดรตในถั่วเหลืองถูกใช้ในการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ ทำให้ไนโตรเจนฟรีแอคแทรกซ์ลดลงส่วนประกอบทางเคมีอื่นๆ จึงมีปริมาณเพิ่มขึ้น และปริมาณกรดอะมิโนไม่แตกต่างกัน การบ่มกากถั่วเหลืองมีผลทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสที่ใช้ประโยชน์ได้สูงขึ้นมากกว่ากากถั่วเหลืองปกติ ซึ่งต่อมา Hirabayashi et al. (1998) ได้นำกากถั่วเหลืองที่ได้จากการบ่มโดยวิธีของ Ilyas et al. (1995) มาประกอบสูตรอาหารไก่เนื้อ โดยแบ่งไก่ทดลองออกเป็น 3 กลุ่มคือ กลุ่มควบคุมที่ได้รับกากถั่วเหลืองปกติ (ฟอสฟอรัสรวม 0.52 เปอร์เซ็นต์ในอาหาร, ฟอสฟอรัสใช้ประโยชน์ได้ 0.23 เปอร์เซ็นต์ในอาหาร), กลุ่มที่ได้รับกากถั่วเหลืองเสริมฟอสฟอรัสอนินทรีย์ (ฟอสฟอรัสรวม 0.71 เปอร์เซ็นต์ในอาหาร, ฟอสฟอรัสใช้ประโยชน์ได้ 0.40 เปอร์เซ็นต์ในอาหาร) และกลุ่มที่ได้รับกากถั่วเหลืองที่ผ่านการบ่มด้วย *Aspergillus usamii* (ฟอสฟอรัสรวม 0.58 เปอร์เซ็นต์ในอาหาร, ฟอสฟอรัสใช้ประโยชน์ได้ 0.39 เปอร์เซ็นต์ในอาหาร) จากการทดลองพบว่ากลุ่มที่ได้รับกากถั่วเหลืองบ่มจะมีการขับฟอสฟอรัสออกมาในมูลน้อยกว่ากลุ่มที่ได้รับกากถั่วเหลืองเสริมฟอสฟอรัสอนินทรีย์แต่ไม่แตกต่างจากกลุ่มควบคุม

ตารางที่ 2-14 แสดงส่วนประกอบทางเคมีของกากถั่วเหลืองและกากถั่วเหลืองที่ได้จากการบ่มด้วยจุลินทรีย์ไฟเตส *Aspergillus usamii*

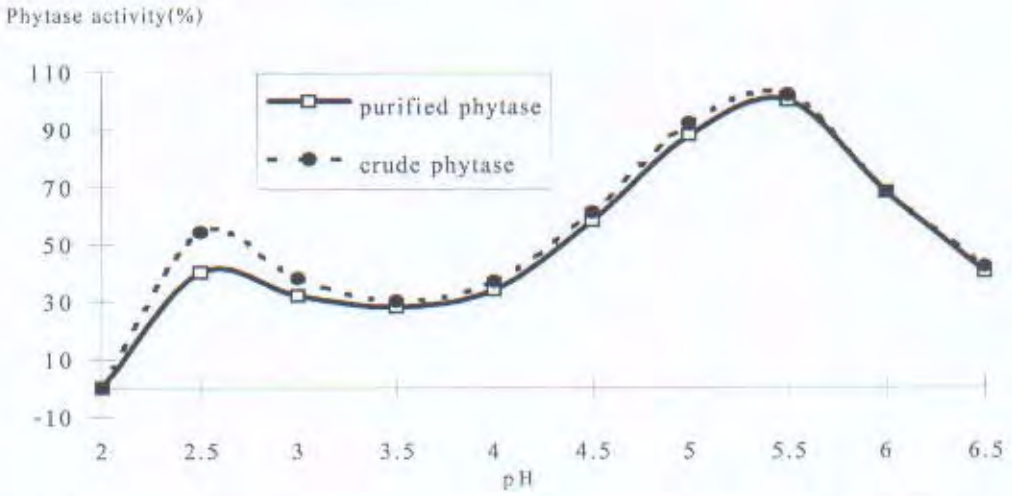
ส่วนประกอบทางเคมี (%)	กากถั่วเหลือง	กากถั่วเหลืองบ่ม
โปรตีนรวม	47.00	53.20
เยื่อใยรวม	4.00	4.70
ไขมัน	2.00	2.60
เถ้า	6.90	7.40
ไนโตรเจนฟรีแอคแทรกซ์	40.10	32.10
แคลเซียม	0.27	0.30
ฟอสฟอรัสรวม	0.72	0.79

ที่มา: Iyer et al. (1995)

วพ
SF
ส174

หอสมุดกลาง มหาวิทยาลัยขอนแก่น

Newkirk and Classen (1997) ศึกษาการบ่มกากเมล็ดคาโนลา (canola meal) ด้วยเอนไซม์ไฟเตสหยาบ (crude phytase Natuphos®) ที่ระดับ 10,000, 100,000 และ 340,000 ยูนิต/กิโลกรัม และเอนไซม์ไฟเตสบริสุทธิ์ (ซึ่งแยกได้โดยวิธี gel filtration) ที่ระดับ 10,000, 100,000 ยูนิต/กิโลกรัม โดยใช้ตัวอย่างกากคาโนลามาเติมน้ำในอัตราส่วนเท่ากับ 2:1 ซึ่งมี pH เท่ากับ 5.8 มาปรับค่า pH ด้วยกรดไฮโดรคลอริคความเข้มข้นต่าง ๆ จนมี pH อยู่ระหว่าง 2-5.8 บ่มไว้ที่อุณหภูมิ 50 °ซ เป็นเวลา 30 และ 60 นาที และผลการบ่มพบว่าไฟเตสหยาบจะทำงานได้ดีกว่าไฟเตสบริสุทธิ์ แสดงว่าการย่อยไฟเตทที่เกิดขึ้นนั้นมีผลมาจากเอนไซม์ย่อยเยื่อไยชนิดอื่น ๆ ด้วย (ได้แก่ acid phosphatase, protease, endo-xylanase) ไฟเตสจะทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ pH ระหว่าง 3-5 นอกจากนั้นนักวิจัยกลุ่มนี้ได้ทำการศึกษาสภาพที่เหมาะสมในการย่อยไฟเตทในกากเมล็ดคาโนลาโดยใช้ตัวอย่างปริมาณ 250 กรัม ใส่ในถุงพลาสติก ปรับ pH เท่ากับ 5.0 โดยเติมกรดไฮโดรคลอริค 0.26 M 250 มิลลิลิตร เติมสารละลาย 250 มิลลิลิตร ที่ประกอบด้วยไฟเตส 5,000 ยูนิต/ลิตร บ่มไว้ที่อุณหภูมิ 50 °ซ พบว่าระยะเวลา 30 นาทีแรกปริมาณไฟเตทจะถูกย่อยอย่างรวดเร็วหลังจากนั้นจะค่อย ๆ ลดลง ที่ระยะเวลา 23 ชั่วโมง ปริมาณไฟเตทในกากเมล็ดคาโนลาจะถูกย่อย 70-80 เปอร์เซ็นต์ (ภาพที่ 2-8)



ภาพที่ 2-8 แสดงการทำงานของเอนไซม์ไฟเตสบริสุทธิ์และเอนไซม์ไฟเตสหยาบที่ระดับ pH ต่าง ๆ
ที่มา: Newkirk and Classen (1997)

2.9 การใช้เอนไซม์ไฟเตสในไก่เนื้อ

การเสริมเอนไซม์ไฟเตสในอาหารสัตว์มีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นการเพิ่มการย่อยได้ของโภชนะทั้งโปรตีน คาร์โบไฮเดรต และแร่ธาตุต่าง ๆ โดยเฉพาะฟอสฟอรัส (สาโรช, 2542) การเพิ่มการใช้ประโยชน์ได้ของไฟติคฟอสฟอรัสยังมีผลทำให้เพิ่มสมรรถนะการผลิตสัตว์ Broz et al. (1993) ทดลองเสริมไฟเตสในสูตรอาหารที่ระดับ 0, 125, 250 และ 500 PU/กิโลกรัมอาหาร ในไก่เนื้อ 8-22 วัน จากการทดลองพบว่าการเสริมเอนไซม์ไฟเตสมีผลทำให้น้ำหนักตัวที่ 22 วัน เพิ่มขึ้น 4.6-8.5 เปอร์เซ็นต์, ปริมาณอาหารที่กินเพิ่มขึ้น แต่ไม่ทำให้ประสิทธิภาพการใช้อาหารดีขึ้น ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสอนินทรีย์ในเลือดเพิ่มขึ้น 30.5 เปอร์เซ็นต์ ในกลุ่มที่ได้รับไฟเตส 500 PU/กิโลกรัมอาหาร ซึ่งเป็นผลมาจากการใช้ประโยชน์ได้ของฟอสฟอรัสที่เพิ่มขึ้น ปริมาณความเข้มข้นของแคลเซียมในเลือดไม่แตกต่างกัน ปริมาณเถ้ากระดูกของกระดูกแข้งในกลุ่มที่ได้รับเอนไซม์ไฟเตสสูงกว่ากลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญ คือ เพิ่มขึ้น 5.3 เปอร์เซ็นต์ ในกลุ่มที่ได้รับเอนไซม์ไฟเตส 500 PU/กิโลกรัมอาหาร แต่ไม่พบความแตกต่างในปริมาณแคลเซียมและฟอสฟอรัสในกระดูกแข้ง นอกจากนี้การเสริมเอนไซม์ไฟเตสยังมีผลต่อการลดปริมาณฟอสฟอรัสที่ขับถ่ายออกมาโดยสามารถลดปริมาณการฟอสฟอรัสในมูล 8.7-10.1 เปอร์เซ็นต์

Kornegay et al. (1994) เสริมเอนไซม์ไฟเตสในอาหารไก่เนื้ออายุ 1-21 วันในระดับ 250, 500, 750 และ 1,000 FTU/กิโลกรัมอาหาร และพบว่าเอนไซม์ไฟเตสที่เสริมช่วยให้การใช้ประโยชน์ได้ของฟอสฟอรัสจากไฟเตทเพิ่มขึ้นร้อยละ 17, 29, 38 และ 48 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และในทำนองเดียวกัน Broz et al. (1994) ทำการทดลองเสริมเอนไซม์ไฟเตสที่ได้จากเชื้อรา *Aspergillus niger* ในสูตรอาหารไก่เนื้อที่ระดับ 0, 125, 250 และ 500 PU/กิโลกรัมอาหาร พบว่ากลุ่มที่ได้รับการเสริมเอนไซม์ไฟเตสมีอัตราการเจริญเติบโตและปริมาณอาหารที่กินเพิ่มขึ้นแต่ประสิทธิภาพการเปลี่ยนอาหารไม่แตกต่างกันเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม นอกจากนี้ยังมีผลทำให้ฟอสฟอรัสที่ขับออกในมูลลดลง ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสในพลาสมาและเปอร์เซ็นต์เถ้าในกระดูกเพิ่มขึ้นอีกด้วย

เช่นเดียวกับ Denbow et al. (1995) รายงานผลการเสริมเอนไซม์ไฟเตสที่ระดับ 200-1200 PU/กิโลกรัมอาหาร ในไก่เนื้ออายุ 1-21 วัน ในสูตรอาหารประกอบด้วย ฟอสฟอรัสใช้ประโยชน์ได้ 0.20, 0.27 และ 0.34 เปอร์เซ็นต์ของอาหาร พบว่าการเสริมเอนไซม์มีผลในการเพิ่มปริมาณอาหารที่กิน 38-75, 26-41 และ 7-16 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และพบว่าการเสริมเอนไซม์ไฟเตสในสูตรอาหารที่มีฟอสฟอรัสใช้ประโยชน์ได้สูงขึ้นมีผลในการเพิ่มปริมาณอาหารที่กินต่ำกว่าสูตรอาหารที่มีฟอสฟอรัสใช้ประโยชน์ได้ต่ำกว่า แต่ประสิทธิภาพการเปลี่ยนอาหารไม่แตกต่างกัน นอกจากนี้ยังพบว่าการเสริมเอนไซม์ไฟเตสในสูตรอาหารที่มีฟอสฟอรัสใช้ประโยชน์ได้ต่ำ (0.20 เปอร์เซ็นต์) มีผลให้เถ้าในกระดูกแข้ง (tibia bone ash) และกระดูกนิ้วเท้า (toe bone ash) เพิ่มขึ้น 9-37 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อเสริมในสูตรอาหารที่มีฟอสฟอรัสใช้ประโยชน์ได้สูงขึ้น (0.27-0.34 เปอร์เซ็นต์) พบว่าเปอร์เซ็นต์เถ้ากระดูกแข้งและกระดูกนิ้วเท้าที่เพิ่มขึ้นลดลง 2-21 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรอาหารที่มีฟอสฟอรัสใช้ประโยชน์ได้ต่ำกว่า

Ravidran et al. (1995) รายงานการเสริมเอนไซม์ไฟเตสที่ระดับ 200-1200 PU/กิโลกรัมอาหารในอาหารไก่งวงอายุ 1-21 วัน โดยใช้สูตรอาหารที่มีฟอสฟอรัสใช้ประโยชน์ได้ 0.27 เปอร์เซ็นต์ พบว่าการเสริมเอนไซม์ไฟเตสมีผลในการเพิ่มปริมาณการกินอาหาร 4.02-11.83 เปอร์เซ็นต์ และมีผลให้ประสิทธิภาพการใช้อาหารดีกว่ากลุ่มที่ไม่ได้รับการเสริม และพบว่าเปอร์เซ็นต์เถ้าในกระดูกแข้งและกระดูกนิ้วเท้าเพิ่มขึ้นแต่เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มที่ได้รับเอนไซม์ไฟเตสในระดับเดียวกันแต่มีฟอสฟอรัสใช้ประโยชน์ได้ต่ำกว่าพบว่าเปอร์เซ็นต์เถ้าในกระดูกแข้งและกระดูกนิ้วเท้าเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลง

เช่นเดียวกับ Schutte and Kies (1995) ศึกษาการใช้เอนไซม์ไฟเตสในสูตรอาหารไก่เนื้อ โดยใช้สูตรอาหารที่ประกอบด้วย ฟอสฟอรัสรวมและฟอสฟอรัสที่ใช้ประโยชน์ได้เท่ากับ 0.67 และ 0.45 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เปรียบเทียบกับสูตรอาหารเสริมเอนไซม์ไฟเตส 500 FTU/กิโลกรัมอาหาร ที่มีฟอสฟอรัสรวม 0.56 เปอร์เซ็นต์ และฟอสฟอรัสที่ใช้ประโยชน์ได้ 0.45 เปอร์เซ็นต์ ผลการทดลองพบว่าการเสริมเอนไซม์ไฟเตสไม่มีผลต่อน้ำหนักมีชีวิต แต่พบว่าประสิทธิภาพการเปลี่ยนอาหารดีกว่ากลุ่มปกติ จากการทดลองของ Sebastian et al. (1996) พบว่าเมื่อเสริมเอนไซม์ไฟเตสที่ระดับ 600 FTU/กิโลกรัมอาหาร ในสูตรอาหารที่มีการใช้ประโยชน์ได้ของฟอสฟอรัสต่ำ พบว่าเอนไซม์ไฟเตสช่วยให้สัตว์สามารถใช้ฟอสฟอรัสได้อย่างเพียงพอโดยประสิทธิภาพการผลิตไม่แตกต่างกับกลุ่มควบคุม และยังทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสในเลือดและปริมาณเถ้าในกระดูกเพิ่มขึ้น

Qian et al. (1996) รายงานผลการเสริมเอนไซม์ไฟเตสที่ระดับ 400-800 FTU/กิโลกรัมอาหาร ในสูตรอาหารที่มีฟอสฟอรัสใช้ประโยชน์ได้ในระดับต่าง ๆ จากการทดลองพบว่าความกว้างและความยาวกระดูกแข้งเพิ่มขึ้นตามระดับฟอสฟอรัสใช้ประโยชน์ได้ที่สูงขึ้น โดยพบว่าความยาวกระดูกแข้งที่ยาวที่สุดอยู่ที่ระดับของการเสริมเอนไซม์ไฟเตส 800 FTU/กิโลกรัมอาหารในอาหารที่มีฟอสฟอรัสใช้ประโยชน์ได้ 0.20 เปอร์เซ็นต์ และความกว้างที่สุดของกระดูกแข้งเพิ่มขึ้นสูงสุดที่ระดับของการเสริมเอนไซม์ไฟเตส 600 FTU/กิโลกรัมอาหาร ในอาหารที่มีฟอสฟอรัสใช้ประโยชน์ได้ 0.27 เปอร์เซ็นต์ เปอร์เซ็นต์เถ้ากระดูกแข้งเพิ่มขึ้นตามระดับฟอสฟอรัสใช้ประโยชน์ได้ที่สูงขึ้น การเสริมเอนไซม์ไฟเตสช่วยทำให้ค่าแรงเฉือนกระดูก หรือ shere force ($P<0.05$) และเปอร์เซ็นต์เถ้าเพิ่มขึ้น($P<0.01$) และเช่นเดียวกับสมชาติ(2538) การเสริมเอนไซม์ไฟเตสที่ระดับ 1,000 FTU/กิโลกรัมอาหาร ในอาหารที่มีระดับฟอสฟอรัสใช้ประโยชน์ได้ 0.27 เปอร์เซ็นต์ มีผลให้ฟอสฟอรัสในกระดูกแข้งไม่มีความแตกต่างทางสถิติเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุมที่ได้รับอาหารที่มีฟอสฟอรัสใช้ประโยชน์ได้ 0.45 เปอร์เซ็นต์

ต่อมา Kies and Schutte (1997) ศึกษาการเสริมเอนไซม์ไฟเตสที่ระดับ 0, 250, 500 และ 1,000 FTU/กิโลกรัมอาหาร ในไก่เนื้ออายุ 0-38 วัน พบว่าการเสริมเอนไซม์ไฟเตส 500 หรือ 1,000 FTU/กิโลกรัมอาหาร มีผลในการเพิ่มอัตราการเจริญเติบโต 2.2 และ 1.8 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และประสิทธิภาพการเปลี่ยนอาหารดีขึ้น 0.7 และ 1.4 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม Yi et al. (1996) ใช้เอนไซม์ไฟเตสระดับ 0-1,200 ยูนิตของไฟเตส/กิโลกรัมอาหาร ในสูตรอาหารที่ประกอบด้วยข้าวโพด-กากถั่วเหลืองซึ่งมีฟอสฟอรัสที่ใช้ประโยชน์ได้เท่ากับ 0.27, 0.36, 0.45 และ 0.54 เปอร์เซ็นต์ จากการทดลองพบว่าการเสริมไฟเตสทำให้ไก่ใช้ประโยชน์จากฟอสฟอรัสได้เพิ่มขึ้น ลดการขับถ่ายฟอสฟอรัสลง 42-51 เปอร์เซ็นต์ และพบว่าการเสริมเอนไซม์ไฟเตส 785-939 PU/กิโลกรัมอาหาร สามารถทดแทนฟอสฟอรัสจากการเสริมดีฟลูออริเนตฟอสเฟต (defluorinated phosphate) ได้ 1 กรัมในอาหารที่มีฟอสฟอรัสรวม 0.45 เปอร์เซ็นต์ (โดยการคำนวณรีเกรสชั่น) แต่ประสิทธิภาพการปลดปล่อยฟอสฟอรัสจาก ไฟเตทจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณฟอสฟอรัสรวมในอาหาร

Huff et al. (1998) ศึกษาผลของการเสริมเอนไซม์ไฟเตส 500 FTU/กิโลกรัมอาหาร ในสูตรอาหารที่ประกอบด้วยข้าวโพดปกติ (ฟอสฟอรัสรวม 0.23%, ฟอสฟอรัสใช้ประโยชน์ได้ 0.03%) เปรียบเทียบกับข้าวโพดที่มีปริมาณฟอสฟอรัสที่ใช้ประโยชน์ได้สูง (high available phosphorus : HAP,ฟอสฟอรัสรวม 0.27%, ฟอสฟอรัสใช้ประโยชน์ได้ 0.17%) ในไก่เนื้อ 0-49 วัน จากการทดลองพบว่าการเสริมเอนไซม์ไฟเตสมีผลต่อน้ำหนักตัวที่อายุ 49 วัน โดยกลุ่มที่ได้รับข้าวโพดเสริมเอนไซม์ไฟเตสมีน้ำหนักตัวเพิ่มขึ้น 4 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุมแต่ไม่แตกต่างกับกลุ่มที่ได้รับข้าวโพด HAP และกลุ่มที่ได้รับข้าวโพด HAP เสริมเอนไซม์ไฟเตส โดยมีประสิทธิภาพการใช้อาหารไม่แตกต่างกัน และพบว่าเอนไซม์อัลคาไลน์ฟอสฟาเตสลดลง

ในกลุ่มที่ได้รับการเสริมเอนไซม์ไฟเตส ซึ่งน่าจะมีผลจากการทำงานของเอนไซม์อัลคาไลน์ฟอสฟาเตสมีหน้าที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มการใช้ประโยชน์ได้ของฟอสฟอรัสในร่างกาย ส่วนระดับคอเลสเตอร์รอลในเลือดลดลงในกลุ่มที่ได้รับข้าวโพด HAP, กลุ่มที่ได้รับการเสริมเอนไซม์ไฟเตสและกลุ่มที่ได้รับข้าวโพด HAP เสริมเอนไซม์ไฟเตส ยังไม่เป็นที่เข้าใจแต่น่าจะมีผลมาจากปริมาณไฟเตทในอาหารที่ลดลงเป็นผลให้แร่ธาตุประจุบวกสองสามารถใช้ประโยชน์ได้มาก เช่น โซเดียม, สังกะสี, ทองแดง เป็นต้น ซึ่งอัตราส่วนระหว่างแร่ธาตุประจุสองบวกบางชนิดอาจมีผลต่อการดูดซึมคอเลสเตอร์รอลหรือในระดับเมตาบอลิซึม (ตารางที่ 2-15)

ตารางที่ 2-15 แสดงผลของการเสริมเอนไซม์ไฟเตสในสูตรอาหารที่ประกอบด้วยข้าวโพดที่มีฟอสฟอรัสใช้ประโยชน์ได้สูงในไก่เนื้ออายุ 49 วัน

ทรีทเมนต์	น้ำหนักตัว (กรัม/ตัว)	ประสิทธิภาพการใช้อาหาร	อัลคาไลน์ฟอสฟาเตส (ยูนิต/ลิตร)	คลอเลสเตอร์รอล (มิลลิกรัม/เดซิลิตร)
กลุ่มควบคุม	2,876 + 59^{b}	1.77 ± 0.02	3,974 ± 323^{a}	158 ± 4^{a}
HAP[1/]	2,951 + 42^{ab}	1.75 ± 0.01	3,339 + 311^{ab}	145 ± 3^{b}
เอนไซม์ไฟเตส	2,986 + 60^{a}	1.73 + 0.02	3,033 + 245^{b}	148 ± 3^{ab}
HAP+เอนไซม์ไฟเตส	2,935 + 62^{ab}	1.72 + 0.03	3,178 ± 282^{ab}	154 ± 4^{ab}

ที่มา: Huff et al. (1998)

[1/] ข้าวโพดที่มีปริมาณฟอสฟอรัสที่ใช้ประโยชน์ได้สูง

Sohail and Roland (1999) รายงานว่าการเสริมเอนไซม์ไฟเตส 300-600 FTU/กิโลกรัมอาหารในสูตรอาหารที่มีปริมาณฟอสฟอรัสหรือแคลเซียมหรือทั้งสองชนิดไม่เพียงพอกับความต้องการของสัตว์จะสามารถป้องกันการแสดงอาการขาดได้ โดยทำการศึกษาในไก่เนื้ออายุ 4-6 สัปดาห์ ใช้ระดับไฟเตส 0, 300 และ 600 FTU/กิโลกรัมอาหาร ในสูตรอาหารข้าวโพด-กากถั่วเหลืองที่มีปริมาณฟอสฟอรัสใช้ประโยชน์ได้ 2 ระดับ คือ 0.225 และ 0.325 เปอร์เซ็นต์ แคลเซียม 0.75 เปอร์เซ็นต์ เปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุมซึ่งมีปริมาณฟอสฟอรัสใช้ประโยชน์ได้และแคลเซียมเท่ากับ 0.425 และ 0.85 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากการทดลองพบว่ากลุ่มที่ได้รับฟอสฟอรัสใช้ประโยชน์ได้และแคลเซียม 0.325 และ 0.75 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ มีความกว้าง-ยาวของกระดูกและสมรรถนะการผลิตไม่แตกต่างจากกลุ่มควบคุม แต่เมื่อปริมาณฟอสฟอรัสใช้ประโยชน์ได้ลดลงเหลือ 0.225 เปอร์เซ็นต์ พบว่ามีผลให้น้ำหนักตัว, อาหารที่กินและประสิทธิภาพการเปลี่ยนอาหารเลวลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) การเสริมเอนไซม์ไฟเตสในกลุ่มที่ได้รับฟอสฟอรัสระดับสูง (0.325 เปอร์เซ็นต์) จะมีผลให้ส่วนประกอบทางเคมีและความหนาแน่นของกระดูกแข้งลดลงมากกว่ากลุ่มที่ได้รับฟอสฟอรัสระดับต่ำ (0.225 เปอร์เซ็นต์ในสูตรอาหาร) แต่การเพิ่มปริมาณไฟเตสจาก 300 เป็น 600 FTU/กิโลกรัมอาหาร ไม่ทำให้สมรรถนะการผลิตและลักษณะกระดูกแตกต่างกันทางสถิติ

Namkung and Leeson (1999) ศึกษาผลของการเสริมเอนไซม์ไฟเตส 1,200 FTU/กิโลกรัมอาหารที่มีฟอสฟอรัสใช้ประโยชน์ได้และแคลเซียมเท่ากับ 0.45 และ 0.9 เปอร์เซ็นต์ ในกลุ่มควบคุม และ 0.35 และ 0.79 เปอร์เซ็นต์ในกลุ่มที่ได้รับเอนไซม์ไฟเตส พลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้ (Apparent N-corrected Metabolizable Energy : AMEn) และการย่อยได้ของกรดอะมิโนในไก่เนื้ออายุ 15 วัน ผลการทดลองพบว่าไก่ที่ได้รับการเสริมเอนไซม์ไฟเตสมีค่า AMEn สูงกว่ากลุ่มควบคุม (2,906 และ 2,840 กิโลแคลอรี/กิโลกรัม)

อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ($P<0.01$) แต่มีน้ำหนักเพิ่ม, ปริมาณอาหารที่กินและประสิทธิภาพการใช้อาหารไม่แตกต่างกัน การย่อยได้ของกรดอะมิโนวาลีน,ไอโซลิวซีน และค่าเฉลี่ยการย่อยได้ของกรดอะมิโนที่ไม่จำเป็นในกลุ่มที่เสริมเอนไซม์ไฟเตสสูงกว่ากลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) และค่าเฉลี่ยการย่อยได้ของกรดอะมิโนทั้งหมดในกลุ่มที่ได้รับเอนไซม์ไฟเตสสูงกว่ากลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ($P<0.01$)

Leske and Coon (1999) ศึกษาผลของการใช้ประโยชน์ได้ของฟอสฟอรัสในไก่เนื้อเพศผู้อายุ 22 วัน โดยการเสริมเอนไซม์ไฟเตส 600 FTU/กิโลกรัมอาหาร ในสูตรอาหารที่ประกอบด้วยข้าวโพด กากถั่วเหลือง ข้าวสาลี รำข้าวสาลี ข้าวบาร์เลย์ รำสกัดน้ำมันหรือกากเมล็ดคาโนล่าเป็นหลักซึ่งในแต่ละสูตรมีปริมาณฟอสฟอสรัสรวมเท่ากับ 0.215, 0.177, 0.222, 0.396, 0.222, 0.596 และ 0.351 เปอร์เซ็นต์ และปริมาณไฟเตทฟอสฟอรัสเท่ากับ 0.112, 0.143, 0.198, 0.350, 0.168, 0.480 และ 0.241 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ จากการทดลองพบว่าไก่เนื้อกลุ่มที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์ไฟเตสในสูตรอาหารมีปริมาณการสลายไฟเตทฟอสฟอรัสในสูตรอาหารข้าวโพด กากถั่วเหลือง ข้าวสาลี รำข้าวสาลี ข้าวบาร์เลย์ รำสกัดน้ำมัน หรือ กากเมล็ดคาโนล่าเป็นหลักเท่ากับ 30.8, 34.9, 30.7, 29.1, 32.2, 33.2 และ 36.7 เปอร์เซ็นต์ ส่วนกลุ่มที่ได้รับการเสริมเอนไซม์ไฟเตสมีปริมาณการสลายไฟเตทในอาหารเท่ากับ 59.0, 72.4, 46.8, 52.2, 71.3, 48.0 และ 55.8 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และการเสริมเอนไซม์ไฟเตสมีผลต่อเพิ่มการเก็บกักฟอสฟอรัสรวมจาก 34.8, 27.0, 16.0, 31.9, 40.3, 15.5, และ 39.4 เปอร์เซ็นต์เป็น 40.9, 58.0, 33.8, 43.4, 55.5, 26.5 และ 45.7 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ตารางที่ 2-16) จากการทดลองพบว่าการใช้ประโยชน์ได้ของไฟเตทฟอสฟอรัสและการกักเก็บฟอสฟอรัสขึ้นอยู่กับส่วนประกอบของวัตถุดิบอาหารแต่ละชนิด ปริมาณการเสริมฟอสฟอรัสและแคลเซียมจากไดแคลเซียมฟอสเฟตซึ่งจะมีผลให้การกักเก็บฟอสฟอรัสและการสลายไฟเตทในอาหารลดลง

ตารางที่ 2-16 แสดงผลของเอนไซม์ไฟเตสต่ออัตราการย่อยได้และการเก็บกักฟอสฟอรัสในไก่เนื้ออายุ 22 วัน ซึ่งกินอาหารที่ประกอบด้วยวัตถุดิบอาหารสัตว์หลักชนิดต่าง ๆ

ส่วนประกอบ	วัตถุดิบอาหารสัตว์หลัก						
	กาก ถั่วเหลือง	ข้าวโพด	ข้าวสาลี	รำ ข้าวสาลี	ข้าว บาร์เลย์	รำสกัด น้ำมัน	กาก คาโนล่า
ส่วนประกอบในอาหาร							
พลังงาน(kcal/kg)	3,200	3,200	2,900	2,950	2,955	3,200	2,900
โปรตีน(%)	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0	19.0
ฟอสฟอรัสรวม(%)	0.215	0.177	0.222	0.369	0.222	0.596	0.351
ไฟเตทฟอสฟอรัส(%)	0.112	0.143	0.198	0.350	0.168	0.480	0.241
การย่อยได้ของไฟเตท(%)							
ไม่เสริมเอนไซม์	34.9	30.8	33.2	36.7	32.2	30.7	27.1
เสริมเอนไซม์[1/]	72.4	59.0	48.0	55.8	71.3	46.8	52.2
การกักเก็บฟอสฟอรัส(%)							
ไม่เสริมเอนไซม์	27.0	34.8	15.5	34.9	40.3	16.0	31.9
เสริมเอนไซม์[1/]	58.0	40.9	26.5	45.7	55.5	33.8	43.4

ที่มา: Leske and Coon (1999)

[1/]เสริมเอนไซม์ไฟเตส 600 FTU/กิโลกรัมอาหาร

Ravindran et al. (1999) ศึกษาการเสริมเอนไซม์ไฟเตส 1,200 FTU/กิโลกรัมอาหารต่อการย่อยได้ของกรดอะมิโนและโปรตีนในวัตถุดิบอาหารสัตว์ ได้แก่ ข้าวโพด ข้าวฟ่าง ข้าวสาลี กากถั่วเหลือง กากเมล็ดคาโนล่า กากเมล็ดฝ้าย กากเมล็ดทานตะวัน รำข้าวสาลี และปลายข้าวในไก่เนื้ออายุ 42 วัน ค่าเฉลี่ยการย่อยได้โปรตีนในกลุ่มที่ไม่ได้รับไฟเตสและได้รับการเสริมไฟเตสในแต่ละวัตถุดิบได้แก่ ข้าวโพด 78.0 และ 80.4 เปอร์เซ็นต์, ข้าวฟ่าง 74.7 และ 79.4 เปอร์เซ็นต์, ข้าวสาลี 77.7 และ 84.6 เปอร์เซ็นต์, กากถั่วเหลือง 82.2 และ 85.5 เปอร์เซ็นต์, กากเมล็ดคาโนล่า 78.7 และ 80.7 เปอร์เซ็นต์, กากเมล็ดฝ้าย 70.8 และ 74.2 เปอร์เซ็นต์, กากเมล็ดทานตะวัน 76.7 และ 80.2 เปอร์เซ็นต์, รำข้าวสาลี 70.8 และ 80.2 เปอร์เซ็นต์, ปลายข้าว 62.1 และ 66.9 เปอร์เซ็นต์ ค่าการย่อยได้ของกรดอะมิโนทรีโอนีนและวาลีนสูงขึ้นในวัตถุดิบทุกชนิด โดยค่าการย่อยได้ของกรดอะมิโนในแต่ละวัตถุดิบขึ้นอยู่กับการย่อยได้ของโปรตีนรวมแต่ไม่ขึ้นกับความเข้มข้นของกรดไฟติคในสูตรอาหาร และพบว่าการละลายของเกลือไฟเตทและโปรตีนรวมยังขึ้นอยู่กับการรวมตัวกรดไฟติคกับโปรตีนได้เป็นสารประกอบเชิงซ้อน(phytate-protein complex) ในแต่ละสูตรอาหารมากกว่าระดับความเข้มข้นของกรดไฟติคในแต่ละสูตรอาหาร

Rao et al. (1999) ศึกษาการเสริมเอนไซม์ไฟเตส 250-500 FTU/กิโลกรัมอาหารในสูตรอาหารไก่เนื้ออายุ 3-30 วัน อาหารทดลองมีระดับแคลเซียมและฟอสฟอรัสรวม 1.0 และ 0.45 เปอร์เซ็นต์ (อัตราส่วน 2.22:1), 1.0 และ 0.3 เปอร์เซ็นต์ (อัตราส่วน 3.33:1) และ 0.7 และ 0.3 เปอร์เซ็นต์ (อัตราส่วน 2.33:1) เปรียบเทียบกับการเสริมวิตามินดี 100-200 มิลลิลิตร/กิโลกรัม จากการทดลองพบว่าการลดอัตราส่วนของแคลเซียมและฟอสฟอรัสจาก 2.22 : 1 เป็น 3.33 : 1 (โดยการลดปริมาณฟอสฟอรัสใช้ประโยชน์ได้จาก 0.45 เป็น 0.30 เปอร์เซ็นต์) มีผลในการลดอัตราการเจริญเติบโต 17.3 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อลดปริมาณแคลเซียมในอาหารลงด้วย (จาก 1.0 เป็น 0.7 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนของแคลเซียมและฟอสฟอรัสเท่ากับ 2.33 : 1) พบว่าอัตราการเจริญเติบโตลดลงเพียง 6.8 เปอร์เซ็นต์ การเสริมวิตามินดีในอาหารที่มีอัตราส่วนของแคลเซียมและฟอสฟอรัสเท่ากับ 3.33 : 1 ไม่มีผลในการเพิ่มอัตราการเจริญเติบโต แต่มีผลในการเพิ่มน้ำหนักตัวเมื่อสูตรอาหารมีอัตราส่วนของแคลเซียมและฟอสฟอรัสเท่ากับ 2.33 : 1 การเสริมเอนไซม์ไฟเตสที่ระดับ 250 และ 500 FTU/กิโลกรัม มีผลในการเพิ่มอัตราการเจริญเติบโต, ปริมาณอาหารที่กินแต่ประสิทธิภาพการใช้อาหารไม่เปลี่ยนแปลง นอกจากนี้การเสริมเอนไซม์ไฟเตสในระดับ 250 และ 500 FTU/กิโลกรัมอาหาร ยังมีผลในการเพิ่มการกักเก็บฟอสฟอรัสจาก 0.22 กรัม เป็น 0.537 กรัม และ จาก 0.41 กรัม เป็น 0.652 กรัม ตามลำดับ เปอร์เซ็นต์เถ้ากระดูกเพิ่มขึ้นในกลุ่มที่ได้รับเอนไซม์ไฟเตส และกลุ่มที่ได้รับวิตามินดี

2.10 คุณลักษณะของกากเมล็ดในปาล์ม

ปาล์มน้ำมัน (oil palm) มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า Elaeis spp. สามารถแบ่งได้ 3 ชนิด คือ Elaeis guinensis (หรือปาล์มน้ำมันแอฟริกัน), Elaeis oleifesa (หรือปาล์มน้ำมันอเมริกัน) และ Elaeis odora ปาล์มน้ำมันที่นิยมปลูกในประเทศไทยคือปาล์มน้ำมันแอฟริกัน ซึ่งสามารถจำแนกได้เป็น 3 พันธุ์ ตามลักษณะความหนาของกะลา คือ พันธุ์ดูร่า (Dura) เป็นพันธุ์ที่มีกะลาหนามีเปลือกนอกบาง, พันธุ์ฟิสิเฟอร์ร่า (Pisifera) เป็นพันธุ์ที่มีกะลาบางมากและมีเปลือกนอกหนากว่าพันธุ์ดูร่าและพันธุ์เทเนอร่า (Tenera) เป็นพันธุ์ลูกผสมระหว่างพันธุ์ดูร่าและฟิสิเฟอร์ร่า ซึ่งนิยมปลูกทางการค้าในประเทศไทย(ศิริชัย, 2532; Morad and Mustafa, 1997)

ผลปาล์มน้ำมันประกอบด้วยชั้นนอกสุดคือชั้น exocarp มีลักษณะบางและมีสีแตกต่างตามพันธุ์ ชั้นถัดมาคือชั้น mesocarp เป็นชั้นเปลือกที่นำมาสกัดน้ำมันที่เรียกว่า palm oil ถัดมาคือชั้นกะลา (shell) และชั้นในสุดคือชั้น endocarp หรือที่เรียกว่าเมล็ดใน (kernel) ที่นำมาสกัดน้ำมันที่เรียกว่า palm kernel oil และผลพลอยได้จากกระบวนการสกัดน้ำมันจากส่วนนี้คือ กากเนื้อเมล็ดในปาล์มน้ำมันซึ่งมีปริมาณ 45- 56 เปอร์เซ็นต์ของ

เนื้อเมล็ดในปาล์มภาพที่ 2-9 (Devendra, 1977) ซึ่งใกล้เคียงกับที่ Ahmad (1988a) รายงานว่ามีกากเมล็ดในปาล์มน้ำมัน 2-2.2 เปอร์เซ็นต์ของผลปาล์มน้ำมันทั้งทลายหรือประมาณ 50-55 เปอร์เซ็นต์

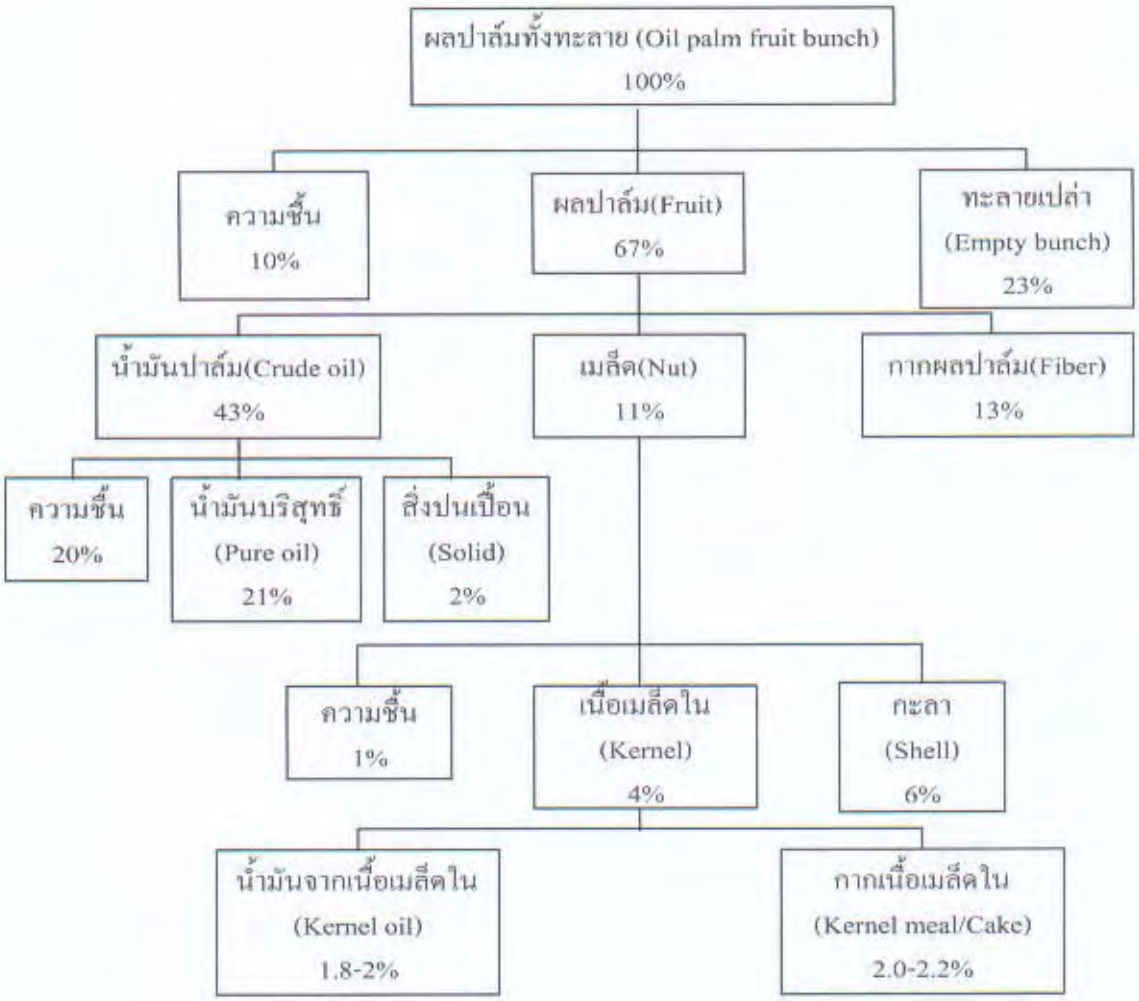
2.10.1 กระบวนการผลิตน้ำมันปาล์ม

การสกัดน้ำมันซึ่งมีอยู่ 2 แบบคือ การหีบทั้งผลวิธีนี้กากที่ได้จะมีเยื่อใยสูงมากมีคุณค่าทางอาหารต่ำไม่เหมาะที่จะนำไปใช้เลี้ยงสัตว์กระเพาะเดี่ยว ส่วนแบบที่สองเป็นการหีบโดยแยกเอาส่วนเปลือกไปหีบเอาน้ำมันส่วนหนึ่งในขณะเดียวกันส่วนเนื้อในก็นำมาหีบได้อีกส่วนหนึ่ง ซึ่งกากปาล์มน้ำมันที่ได้จากการหีบน้ำมันจากส่วนเนื้อในรวมกะลาหรือเนื้อล้วนๆ นี้ เราสามารถนำมาใช้เป็นอาหารสัตว์กระเพาะเดี่ยวได้ดี (วินัย และคณะ, 2526) ขั้นตอนในการผลิตน้ำมันและกากที่ได้จากอุตสาหกรรมสกัดน้ำมันปาล์มดังภาพที่ 2-10

ภาพที่ 2-9 ปริมาณของผลผลิตและผลพลอยได้จากการสกัดผลปาล์มน้ำมัน
ที่มา: Devendra (1977)

2.10.2 คุณค่าทางโภชนะของกากเมล็ดในปาล์ม

จากการศึกษาคุณค่าทางโภชนาการของกากเนื้อเมล็ดในปาล์มน้ำมันพบว่ามีความสมดุลย์ของแคลเซียมและฟอสฟอรัสโดยมีอัตราส่วนที่เหมาะสมกว่าผลพลอยได้จากเมล็ดพืชน้ำมันอื่นๆ มีโปรตีนรวมอยู่ต่ำ และมีกรดอะมิโนเมทไธโอนีนและกรดไขมันลิโนเลอิคอยู่ในปริมาณจำกัด และเนื่องจากมีปัญหาเกี่ยวกับความน่ากินเพราะมีลักษณะแห้งและอาจมีสิ่งเจือปนต่าง ๆ เช่น กะลา ตลอดจนมีปริมาณเยื่อใยอยู่ในปริมาณสูงประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์ ทำให้การย่อยได้ของสัตว์ลดลง จึงไม่นิยมใช้เป็นอาหารสัตว์กระเพาะเดี่ยว (อุทัย, 2529; สุธา และวินัย, 2539; Ahmad, 1985; McDonald et al., 1988; Yusoff et al., 1985)



ภาพที่ 2-10 แสดงผลผลิตของโรงงานอุตสาหกรรมน้ำมันปาล์ม
ที่มา: Babjee (1988)

Hutagalung (1978) อ้างโดย เสาวนิตและคณะ (2541) รายงานว่ากากเมล็ดในปาล์มน้ำมันมีโปรตีนสูงกว่าข้าวโพด คือประมาณ 12-13 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ข้าวโพดมี 9.7 เปอร์เซ็นต์ แต่มีเยื่อใยค่อนข้างสูงมาก คือมีปริมาณ 14-16 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ข้าวโพดมีเพียง 2 เปอร์เซ็นต์ และวัตถุดิบสองชนิดนี้มีปริมาณกรดอะมิโนที่ใกล้เคียงกันแต่กากเนื้อเมล็ดในปาล์มมีกรดอะมิโนบางชนิดในปริมาณที่สูงกว่า ได้แก่ อาร์จินีน ไลซีน เมทไทโอนีน ซึ่งมีค่าเท่ากับ 2.40, 0.34 และ 0.84 เปอร์เซ็นต์ของวัตถุแห้ง ตามลำดับ ส่วนข้าวโพดมีกรดอะมิโนเหล่านี้ในปริมาณ 0.51, 0.10 และ 0.50 เปอร์เซ็นต์ของวัตถุแห้งตามลำดับ เช่นเดียวกับ Yeong (1982) รายงานว่ากากเมล็ดในปาล์มมีคุณภาพโปรตีนปานกลางมีอาร์จินีนสูง แต่มีเมทไธโอนีน ทริปโทเฟน และไลซีนต่ำ กากปาล์มที่ได้จากการสกัดน้ำมันในประเทศไทยแบ่งออกเป็น 2 ชนิด คือ กากผลปาล์ม และกากเมล็ดในปาล์ม กากผลปาล์มเป็นผลพลอยได้จากการนำปาล์มทั้งผลมาสกัดน้ำมันส่วนกากเมล็ดปาล์มเป็นผลพลอยได้จากการนำเมล็ดปาล์มซึ่งแยกเอาส่วนของเปลือกนอกออกแล้วมาสกัดน้ำมัน ตารางที่ 2-17 แสดงคุณค่าทางโภชนะของกากผลปาล์มและกากเมล็ดในปาล์ม

ตารางที่ 2-17 แสดงส่วนประกอบทางโภชนะของกากผลปาล์มและกากเมล็ดในปาล์ม

ส่วนประกอบ (%)	กากผลปาล์ม	กากเมล็ดในปาล์ม
ความชื้น	12.82	9.67
โปรตีน	7.08	10.18
ไขมัน	6.91	10.22
เยื่อใย	30.51	21.14
เถ้า	4.55	4.25
แคลเซียม	-	0.25
ฟอสฟอรัสใช้ประโยชน์ได้	-	0.58

ที่มา: กรมปศุสัตว์ (2544)

เมื่อทำการศึกษาเปรียบเทียบส่วนประกอบทางโภชนะของกากในเมล็ดในปาล์มน้ำมันที่ได้จากขบวนการสกัดน้ำมันโดยวิธีกลและวิธีสกัดโดยตัวทำละลายอินทรีย์แสดงดังตารางที่ 2-18 พบว่ากากเนื้อเมล็ดในปาล์มที่ได้จากขบวนการสกัดน้ำมันโดยวิธีกลและวิธีสกัดโดยตัวทำละลายอินทรีย์จะมีผลต่อคุณค่าทางโภชนะของกากเมล็ดในปาล์ม โดยพบว่ากากเมล็ดในปาล์มที่ได้จากการสกัดน้ำมันโดยใช้ตัวทำละลายอินทรีย์จะมีปริมาณโปรตีนสูงกว่าและมีไขมันต่ำกว่าการสกัดน้ำมันโดยวิธีกล ปริมาณน้ำมันที่เหลืออยู่จะมีผลต่อคุณภาพของกากเมล็ดในปาล์มในการเก็บรักษา

ตารางที่ 2-18 แสดงส่วนประกอบทางโภชนาการของกากเมล็ดในปาล์มตามกรรมวิธีการสกัดน้ำมัน

วิธีสกัดน้ำมัน	ปริมาณโภชนะ(%)								ที่มา
	ความชื้น	โปรตีน	ไขมัน	เยื่อใย	เถ้า	Ca	P	พลังงาน(kcal/g)	
วิธีกล	5.5	13.3	22.5	15.3	3.0	0.20	0.53	5.16 (GE)	ทวีศักดิ์ (2529)
	7.1	12.7	10.8	15.2	3.3	0.24	0.58	4.83 (GE)	นิวัต(2530)
	8.1	14.4	10.2	14.8	3.3	0.24	0.58	4.42 (GE)	นิวัต(2531)
	6.1	12.9	15.7	14.1	2.9	0.18	0.65	5.15 (GE)	วินัยและคณะ(2528)
	10	18.5	14.3	14.2	3.6	0.26	0.20	2.11(ME)	อุทัย(2529)
	8.69	17.6	10.1	14.2	2.8	0.26	0.63	-	Panigrahi and Powell(1991)
	-	13.4	22.6	15.4		0.26	0.18	3.9 (ME)	กรมปศุสัตว์(2544)
	10.9	16.0	10.6	16.8	4.1	-	-	12.18(ME)[4/]	UPM[1/]
	7.0	14.8	9.8	15.7	4.2	0.20	0.32	11.66(ME)[4/]	MARDI[2/]
	7.3	14.6	9.09	12.1	4.3	0.21	0.52	12.53(ME)[4/]	DVS[3/]
	9.4	18.3	7.98	16.3	4.5	-	-	-	Onifade and Babatunde(1998)
วิธีสกัด	-	18.5	1.5	14.2	-	0.26	0.2	2.62(ME)	กรมปศุสัตว์(2544)
โดย	-	20	8.0	15.0	5	0.3	0.5	1.9(ME)	Ravidran and Blair(1992)
ตัวทำ	11.2	6.8	2.5	20.5	5.8	0.2	0.3	-	Ahmad(1985)
ละลาย	10.6	20	2	16.5	6.8	-	-	2.15(ME)	Nwokolo(1977)
อินทรีย์	-	18.7	6.4	12.9	4.8	0.18	0.74	4.46(GE)	Oluyemi et al.(1976)
	8.7	19.2	7.9	11.2	5.1	-	-	2.64(ME)	Onwudike(1986a)
	10.2	14.5	0.7	14.2	3.6	0.26	0.71	3.72(GE)	Yeong(1982)
	9.0	15.0	0.9	15.6	3.5			13.05(ME)[4/]	UPM[1/]
	8.0	15.2	1.8	16.0	3.8	0.26	0.52	12.18(ME)[4/]	MARDI[2/]
	11.0	15.3	2.9	14.3	4.1	0.2	0.54	13.05(ME)[4/]	DVS[3/]

ที่มา: [1/] University Pertanian Malysia, Serdang, Selangor cited in Babjee,1988

[2/] Malaysia Agriculture Research and Development Institute, Serdang, Selangor cited in Babjee,1988

[3/] Department of Veterinaty Services, Ministry of Agriculture, Kualalumpur cited in Babjee,1988

[4/] MJ/kg

2.11 การใช้กากเมล็ดในปาล์มในอาหารไก่เนื้อ

การศึกษาการนำกากเมล็ดในปาล์มน้ำมันมาใช้เป็นวัตถุดิบอาหารสัตว์นั้น Nwokolo et al. (1977) รายงานว่าสามารถใช้กากเมล็ดในปาล์มในสูตรอาหารไก่เนื้อได้สูงถึง 30 เปอร์เซ็นต์ โดยไม่ทำให้อัตราการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพการเปลี่ยนอาหารแตกต่างจากกลุ่มควบคุม

Yeong and Mukherjee (1983)ใช้กากเมล็ดในปาล์มทดแทนข้าวโพดและกากถั่วเหลือง 20 เปอร์เซ็นต์ในสูตรอาหารไก่เนื้อ พบว่ากลุ่มที่ได้รับกากเมล็ดในปาล์มจะมีน้ำหนักตัวเพิ่มลดลงและประสิทธิภาพการเปลี่ยนอาหารเลวลงกว่ากลุ่มที่ได้รับอาหารปกติ แต่ปริมาณอาหารที่กินไม่แตกต่างกัน และแนะนำให้ใช้ได้สูงสุดในอาหารอาหารไก่เนื้อไม่เกิน 15 เปอร์เซ็นต์

Onwudike (1986abc) รายงานว่าการใช้กากเมล็ดในปาล์มในอาหารลูกไก่ต้องผสมกับวัตถุดิบอาหารโปรตีนจากแหล่งอื่นๆ เพื่อที่จะเพิ่มระดับกรดอะมิโนและสามารถใช้ทดแทนกากถั่วลิสงได้ถึง 60 เปอร์เซ็นต์ ในไก่ไข่ระยะเล็กนั้นสามารถทดแทนได้ถึง 34 เปอร์เซ็นต์ในสูตรอาหาร โดยไม่มีผลต่อน้ำหนักตัวที่เพิ่มขึ้น ประสิทธิภาพการเปลี่ยนอาหาร และปริมาณอาหารที่กิน ส่วนในไก่สาวสามารถใช้ทดแทนกากถั่วลิสงได้เต็มที่ โดยไม่มีผลต่อสมรรถนะการผลิตและปริมาณอาหารที่กิน ระดับการใช้ที่เหมาะสมที่สุดคือ 38 เปอร์เซ็นต์ในสูตรอาหารโดยไม่มีผลต่อผลผลิตไข่และน้ำหนักไข่ ส่วนในไก่เนื้อแบ่งออกเป็น 2 ระยะ คือในระยะเล็ก (อายุ 1-6 สัปดาห์) และระยะสุดขุน (6-12 สัปดาห์) สามารถใช้กากเมล็ดในปาล์มได้ในระดับ 28 และ 35 เปอร์เซ็นต์ในสูตรอาหาร ตามลำดับ โดยไม่มีผลเสียต่อสมรรถนะการผลิต แต่ถ้าใช้ในระดับสูงกว่านี้จะมีผลให้น้ำหนักเพิ่มลดลง และประสิทธิภาพการเปลี่ยนอาหารเลวลง Osei and Amo (1987) ใช้กากเมล็ดในปาล์มทดแทนข้าวฟ่างในระดับ 0, 5, 7.5, 10, 12.5 และ 15 เปอร์เซ็นต์ ในไก่ 0-8 สัปดาห์ จากผลการทดลองพบว่า ปริมาณอาหารที่กินและน้ำหนักตัวไม่แตกต่างกัน แต่ประสิทธิภาพการเปลี่ยนอาหารเลวลงเมื่อเพิ่มกากเมล็ดในปาล์มถึง 12.5 เปอร์เซ็นต์ (ประสิทธิภาพการเปลี่ยนอาหารเท่ากับ 2.74, 2.85, 2.85, 2.89, 3.14 และ 3.21 ในไก่เนื้อที่ได้รับกากเมล็ดในปาล์ม 0, 5, 7.5, 10, 12.5 และ 15 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ) การเพิ่มกากเมล็ดในปาล์มมีผลในการลดต้นทุนค่าอาหารลงโดยประสิทธิภาพการผลิตไม่แตกต่างกัน (ตารางที่ 2-19)

ตารางที่ 2-19 แสดงผลการใช้กากเมล็ดในปาล์มที่ระดับต่างๆ ต่อสมรรถนะการเจริญเติบโตในไก่เนื้อ 0-8 สัปดาห์

ลักษณะที่ศึกษา	เปอร์เซ็นต์กากเมล็ดในปาล์ม(%)					
	0	5	7.5	10	12.5	15
ปริมาณอาหารที่กิน(กก./ตัว)	4.41	4.79	4.42	4.65	4.74	4.76
ประสิทธิภาพการใช้อาหาร	2.74[a]	2.85[a]	2.85[a]	2.89[a]	3.14[b]	3.21[b]
นน.ตัว 8 สัปดาห์(กก./ตัว)	1.61	1.66	1.53	1.56	1.54	1.44

ที่มา: Osei and Amo (1987)

[ab] อักษรที่ต่างกันตามแนวนอนแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$)

Panigrahi and Powell (1991) ศึกษาการใช้กากเมล็ดในปาล์มในสูตรอาหารไก่เนื้อที่ระดับ 30, 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์ในอาหาร โดยใช้กากเมล็ดในปาล์มที่ได้จาก Sierra Leone และจากประเทศมาเลเซีย กากเมล็ดในปาล์มทั้งสองชนิดนี้มีข้อแตกต่างคือ ชนิดที่ได้จาก Sierra Leone มีปริมาณโปรตีนสูงกว่าและเยื่อใยต่ำกว่าชนิดที่ได้จากประเทศมาเลเซีย (โปรตีน 17.65 และ 14.07 เปอร์เซ็นต์, เยื่อใยรวม 14.20 และ 21.07

เปอร์เซ็นต์ในกากเมล็ดในปาล์มจาก Sierra Leone และจากมาเลเซีย ตามลำดับ) จากการทดลองพบว่าในสูตรอาหารที่ใช้กากเมล็ดในปาล์ม 50 เปอร์เซ็นต์ จำเป็นต้องเสริมไขมันเพิ่มขึ้นเพื่อปรับระดับพลังงานให้เหมาะสมเพียงพอต่อความต้องการของสัตว์ ไก่เนื้อกลุ่มที่ได้รับกากเมล็ดในปาล์มที่ระดับสูงขึ้นจะมีปริมาณอาหารที่กิน, น้ำหนักตัวต่ำกว่ากลุ่มควบคุม และมีประสิทธิภาพการใช้อาหารเลวลง สัตว์จะมีสัดส่วนการกักเก็บของวัตถุแห้งต่ำ, กินน้ำมากขึ้นแต่มีปริมาณน้ำในมูลต่ำกว่ากลุ่มควบคุม

Ahmad (1988)รายงานว่าการใช้กากเมล็ดในปาล์มในอาหารไก่เนื้อที่ระดับ 10 เปอร์เซ็นต์ ทำให้การเจริญเติบโตและประสิทธิภาพการเปลี่ยนอาหารดีที่สุดและแนะนำให้ใช้ได้สูงสุดในอาหารอาหารไก่เนื้อไม่เกิน 15 เปอร์เซ็นต์ สอดคล้องกับ McDonald et al.(1988) ซึ่งรายงานว่ากากเมล็ดในปาล์มเป็นอาหารที่มีโปรตีนค่อนข้างต่ำแต่ก็มีคุณภาพสูง มีอัตราส่วนของแคลเซียมและฟอสฟอรัสดีกว่ากากของเมล็ดพืชน้ำมันชนิดอื่น ๆ แต่ยังไม่ใช้เป็นอาหารสุกรและสัตว์ปีกอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีลักษณะไม่น่ากินและมีเยื่อใยสูงอยู่ประมาณ 15 เปอร์เซ็นต์ และระดับสูงสุดที่แนะนำให้ใช้นั้นประมาณ 20 เปอร์เซ็นต์ และ Panigrahi and Powell (1991) รายงานว่าการใช้กากเมล็ดในปาล์มที่ระดับ 30, 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์ จำเป็นต้องเสริมไขมันลงในสูตรอาหารให้สูงขึ้นตามระดับของกากเมล็ดในปาล์มที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพื่อปรับระดับพลังงานในอาหารให้เหมาะสมเพื่อไม่ให้มีผลต่อสมรรถนะการผลิตและปริมาณอาหารที่กิน

วินัยและคณะ (2526)ได้ทำการทดลองใช้กากเมล็ดในปาล์มในสูตรอาหารเนื้อโดยใช้ระดับโปรตีนในสูตรอาหารเป็นตัวกำหนดในการประกอบสูตร พบว่าสามารถใช้ได้ 20 เปอร์เซ็นต์ในไก่เล็ก (0-4 สัปดาห์) และ 40 เปอร์เซ็นต์ในไก่ใหญ่ (4-8 สัปดาห์) โดยไม่ทำให้ประสิทธิภาพในการใช้อาหารด้วยกว่ากลุ่มที่ได้รับอาหารควบคุม เช่นเดียวกับ สุธาและคณะ (2535) รายงานว่าระดับกากเมล็ดในปาล์มที่เหมาะสมในไก่เล็กระยะ 0-4 สัปดาห์ คือ 20 เปอร์เซ็นต์ในสูตรอาหาร และ 40 เปอร์เซ็นต์ในไก่ใหญ่ระยะ 4-6 สัปดาห์ โดยที่อัตราการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพในการใช้อาหารไม่แตกต่างจากไก่ที่ได้รับอาหารสูตรควบคุม

และจากการศึกษาของสุธาและวินัย (2539) ซึ่งได้ทำการทดลองเสริมเมทไธโอนีนในสูตรอาหารที่มีกากเนื้อเมล็ดในปาล์ม โดยแบ่งกลุ่มทดลองในช่วงอายุ 0-3 สัปดาห์ ออกเป็นกลุ่มที่ได้รับกากเมล็ดในปาล์ม 0 (กลุ่มควบคุม), 20, 30, 20 (เสริมเมทไธโอนีน) และ 30 เปอร์เซ็นต์ (เสริมเมทไธโอนีน) และในช่วงอายุ 4-6สัปดาห์จะแบ่งออกเป็นกลุ่มที่ได้รับกากเมล็ดในปาล์ม 0 (กลุ่มควบคุม), 30, 40, 30 (เสริมเมทไธโอนีน) และ 40 เปอร์เซ็นต์ (เสริมเมทไธโอนีน) โดยปรับระดับของเมทไธโอนีนตามคำแนะนำของ NRC (1994) คือ ในระยะ 0-3 สัปดาห์และ 4-6 สัปดาห์ มีค่าเท่ากับ 0.50 และ 0.38 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ผลการทดลองพบว่าในระยะ 0-3 สัปดาห์ ปริมาณอาหารที่กินไม่แตกต่างจากกลุ่มควบคุมแต่อัตราการเจริญเติบโตของกลุ่มที่ได้รับกากเมล็ดในปาล์ม 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ (ไม่เสริมเมทไธโอนีน) ต่ำกว่ากลุ่มควบคุม อย่างไรก็ตามเมื่อเสริมเมทไธโอนีนในสูตรอาหารที่ประกอบด้วยกากเมล็ดในปาล์ม 20 เปอร์เซ็นต์จะทำให้อัตราการเจริญเติบโตไม่แตกต่างจากกลุ่มควบคุม ส่วนในระยะ 4-6 สัปดาห์ พบว่าอัตราการเจริญเติบโต และประสิทธิภาพการใช้อาหารของกลุ่มควบคุมดีกว่ากลุ่มอื่น ๆ กลุ่มที่ได้รับอาหารที่มีกากเมล็ดในปาล์มเสริมและไม่เสริมเมทไธโอนีนมีอัตราการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพการใช้อาหารไม่แตกต่างกัน

Onifade and Babatunde (1998) ศึกษาการใช้ผลพลอยได้ทางอุตสาหกรรมมาเป็นอาหารไก่เนื้อ 0-35 วัน โดยใช้วัตถุดิบ ได้แก่ กากเมล็ดในปาล์มจากการสกัดน้ำมันโดยวิธีไฮโดรลิค, กากเบียร์ ซึ่งได้จากการหมักข้าวบาร์เลย์และข้าวฟ่างจากนั้นนำกากที่เหลือมาตากแห้ง และเศษเหลือจากการบดข้าวโพดเพื่อใช้ในการทำแป้งข้าวโพด การประกอบสูตรอาหารใช้วัตถุดิบเหล่านี้ในปริมาณ 10, 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์ในสูตรอาหาร จากการศึกษาพบว่าในกลุ่มที่ได้รับกากเมล็ดในปาล์ม, กากเบียร์ และเศษข้าวโพดบด 10 เปอร์เซ็นต์ในอาหารมีผลต่อน้ำหนักตัวที่ 35 วัน โดยกลุ่มที่ได้รับกากเมล็ดในปาล์มมีน้ำหนักตัวต่ำกว่ากลุ่มที่ได้รับกากเบียร์ และ

เศษข้าวโพด แต่ในการใช้ที่ระดับ 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์ในสูตรอาหารพบว่าในกลุ่มที่ได้รับกากเบียร์มีน้ำหนักตัวต่ำกว่ากลุ่มที่ได้รับกากเมล็ดในปาล์มอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ประสิทธิภาพการใช้ประโยชน์อาหาร (น้ำหนักเพิ่ม/ปริมาณอาหารที่กิน, gain/food) เลวลงเมื่อใช้กากเมล็ดในปาล์ม, กากเบียร์ และเศษข้าวโพดบดในสูตรอาหารเพิ่มขึ้นแต่การใช้กากเมล็ดในปาล์มในปริมาณที่สูงขึ้นมีผลต่อการลดประสิทธิภาพการใช้ประโยชน์อาหารน้อยกว่าการใช้กากเบียร์และเศษข้าวโพดบด นอกจากนี้การใช้กากเมล็ดในปาล์ม, กากเบียร์ และเศษข้าวโพดบดในอาหารมีผลทำให้มูลเหลวเมื่อใช้ในปริมาณที่สูงขึ้น ปริมาณวัตถุแห้งในมูลไม่แตกต่างกัน แต่มีอัตราการไหลผ่านของอาหาร (rate of passage) แต่ละชนิดแตกต่างกันโดยกลุ่มที่ได้รับกากเมล็ดในปาล์มมีอัตราการไหลผ่านอาหารเร็วกว่ากลุ่มที่ได้รับกากเบียร์และเศษข้าวโพดบด การใช้กากเมล็ดในปาล์ม, กากเบียร์ และเศษข้าวโพดบดในสูตรอาหารไก่เนื้อ 0-35 วัน ต่อลักษณะต่าง ๆ แสดงดังตารางที่ 2-20

ตารางที่ 2-20 การใช้กากเมล็ดในปาล์ม, กากเบียร์ และเศษข้าวโพดบดในสูตรอาหารไก่เนื้ออายุ 35 วัน ต่อลักษณะต่าง ๆ

ลักษณะที่ศึกษา	กากเมล็ดในปาล์ม			กากเบียร์			เศษข้าวโพดบด		
	10%	15%	20%	10%	15%	20%	10%	15%	20%
น้ำหนักตัว(ก./ตัว)	892^{b}	863^{bc}	875^{b}	913^{a}	889^{b}	875^{b}	919^{a}	871^{bc}	875^{b}
อาหารที่กิน(ก./ตัว)	48.5^{d}	49.1^{d}	50.5^{c}	50.8^{bc}	51.2^{b}	54.2^{a}	47.8^{de}	49.5^{cd}	49.5^{cd}
ประสิทธิภาพการใช้ประโยชน์อาหาร(G/F)	0.50^{a}	0.48^{ab}	0.48^{ab}	0.50^{a}	0.48^{ab}	0.44^{e}	0.53^{a}	0.48^{ab}	0.45^{e}
ส่วนประกอบในมูล									
วัตถุแห้ง(%)	71.7^{a}	69.5^{b}	68.2^{bc}	72.1^{a}	69.4^{b}	66.3^{c}	70.3^{a}	69.7^{ab}	65.9^{c}
ปริมาณน้ำ(%)	69.5^{ab}	70.2^{a}	74.3^{a}	67.6^{bc}	66.0^{bc}	67.8^{bc}	71.3^{a}	71.4^{a}	72.2^{b}
อัตราการไหลผ่าน (%)	2.30^{cd}	2.31^{cd}	2.20^{de}	2.42^{a}	2.39^{ab}	2.30^{cd}	2.36^{abc}	2.34^{bc}	2.30^{cd}

ที่มา: Onifade and Babatunde (1998)

^{abcde} อักษรที่ต่างกันตามแนวนอนแสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ($P<0.05$)