บทที่ 2

การตรวจเอกสาร

ธาตุ P หรือสารฟอสเฟตในร่างกาย ส่วนใหญ่เก็บอยู่ที่กระดูก ที่เหลืออยู่ในรูปอินทรีย์ฟอสเฟต (organic phosphate) โดยเป็นองค์ประกอบของฟอสฟอลิพิด (phospholipid) ฟอสฟอโปรตีน (phosphoprotein) กรดนิวคลิอิก (nucleic acid) นิวคลีโอไทด์ (nucleotide) และสารอื่นๆ ที่ละลายอยู่ในเซลล์ อินทรีย์ฟอสเฟตในอาหารโดยเฉพาะผลิตภัณฑ์จากนมและเนื้อสัตว์จะถูกย่อยให้เป็น P_i ก่อนที่จะถูกดูดซึมโดยใช้พลังงานและไม่ใช้พลังงาน ปริมาณ P_i ที่ดูดซึมจะเพิ่มตามปริมาณฟอสเฟตในอาหาร ในคนปกติความเข้มข้นของ P_i ในพลาสมามีค่าประมาณ 2.5-4.5 มก./เดซิลิตร (ตารางที่ 1) โดย 10-15% อยู่ในรูปของฟอสเฟตจับกับโปรตีนในพลาสมา ที่เหลือเป็นไอออนประจุลบจับกับ Ca หรือไอออนประจุบวกอื่นๆ แต่สามารถแตกตัวได้ง่ายในพลาสมา จึงเรียกว่าฟอสเฟตอิสระ ระดับของฟอสเฟตในพลาสมาไม่ได้ถูกควบคุมมาก พบว่า จะเปลี่ยนแปลงตามชนิดของอาหาร อายุ (ในช่วงอายุน้อยๆ จะมีค่าสูง) และเพศ ฟอสเฟตอิสระและฟอสเฟตที่จับกับไอออนอื่นๆ สามารถกรองผ่านเยื่อโกลเมอรูลัส (glumeruli) ในไตได้ และถูกดูดกลับโดยการขนส่งแบบใช้พลังงานและการขนส่งร่วมกับโซเดียม (cotransport) ในท่อไตส่วนต้น (นทีทิพย์, 2538)

ตารางที่ 1 รูปแบบของ P ในพลาสมาของคนปกติ

รูปแบบของฟอสเฟต	ความเข้มข้นของฟอสเฟต	
	มิลลิโมล/ลิตร	มิลลิกรัม/เดซิลิตร
ฟอสเฟตอิสระ	0.7 - 1.2	2.1 – 3.8
85% ในรูปของ HPO^{2-}_4 + $NaHPO^-_4$		
15% ในรูปของ $H_2PO^-_4$		
จับกับโปรตีน	0.1 – 0.2	0.4 – 0.7
ความเข้มข้นของฟอสเฟตทั้งหมดในพลาสมา	0.8 – 1.4	2.5 – 4.5

ที่มา : นทีทิพย์ (2538)

P ที่สะสมในกระดูกอยู่ในรูปของไฮดรอกซีอพาไทท์ (hydroxyapatite, $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$) แต่มีปริมาณไม่สูงเท่า Ca กล่าวคือ มีประมาณ 78% ในขณะที่ Ca มีประมาณ 99% ของปริมาณ

ที่มีในร่างกาย P อีก 1-2% อยู่ในของเหลวภายนอกเซลล์ (external cellular fluid) และประมาณ 20% อยู่ในเซลล์ โดยเฉพาะในรูปของอินทรีย์ฟอสเฟตจับอยู่กับกรดนิวคลิอิกและโมเลกุลของน้ำตาล

หน้าที่ของ P

P ในร่างกายมีหน้าที่สำคัญ คือ เป็นองค์ประกอบของกระดูกและฟัน โดยอยู่ในรูปของ P_i เกาะเป็นเกลือแคลเซียมไฮดรอกซีอพาไทท์ นอกจากนี้ยังมีบทบาทในการสร้างเนื้อกระดูก (bone formation) และรักษาสมดุลของกระดูก (bone maintenance) รวมทั้งยังเป็นส่วนประกอบของกล้ามเนื้อและไข่ P มีความสำคัญต่อกระบวนการในเซลล์ต่างจาก Ca คือ เป็นส่วนประกอบของน้ำตาลฟอสเฟต ซึ่งเป็นส่วนประกอบสำคัญของกรดนิวคลิอิก ในรูปของ DNA และ RNA ที่มีบทบาทสำคัญในการถ่ายทอดลักษณะทางพันธุกรรมและควบคุมกระบวนการเมตาบอลิซึมของเซลล์ พลังงานในร่างกายที่เซลล์สร้างหรือใช้จะอยู่ในรูปของพันธะฟอสเฟต (phosphate bond) เช่น อะดิโนซีนไตรฟอสเฟต (adenosine triphosphate; ATP) อะดิโนซีนไดฟอสเฟต (adenosine diphosphate; ADP) และ ครีเอตีนฟอสเฟต (creatine phosphate) เป็นต้น นอกจากนี้ P ยังเป็นส่วนประกอบของสื่อสัญญาณที่ 2 คือ cAMP และอินอซิทอล 1,4,5 ทริสฟอสเฟต (IP_3) ในปฏิกิริยาฟอสฟอริเลชัน (phosphorylation) ของกระบวนการเมตาบอลิซึมของคาร์โบไฮเดรต และหน้าที่ที่สำคัญอีกประการหนึ่ง คือ เป็นโคเอนไซม์ (coenzyme) และบัฟเฟอร์ในร่างกาย เช่น NADP, NADPH, $(TPP)HPO^{2-}_4$ และ $H_2PO^-_4$ (Waldroup, 1996)

การดูดซึมและการควบคุมสมดุลของ P ในร่างกาย

P จะถูกดูดซึมเข้าสู่ร่างกายในรูปของ P_i บริเวณลำไส้เล็กส่วนต้น (duodenum) ด้วยกระบวนการ active และ passive diffusion โดยแปรผันตามปริมาณ P ที่กิน (อุดม, 2526) นอกจากนี้ยังมีฟอสเฟตอีกส่วนหนึ่งได้จากการกรองที่โกลเมอรูลัสของไต โดย 85-90% ของจำนวนฟอสเฟตที่กรองออกมาจากพลาสมาจะถูกดูดซึมกลับที่ proximal tubules ด้วยกระบวนการ active transport ปัจจัยที่ใช้ในการควบคุมปริมาณการดูดซึมและควบคุมสมดุลของ Ca และ P คือ อัตราส่วนของ Ca และ P ที่เหมาะสม รวมทั้งการทำงานของฮอร์โมน 3 ชนิด คือ พาราไทรอยด์ (parathyroid hormone; PTH) แคลซิโทนิน (calcitonin; CT) และ 1,25 ไดไฮดรอกซิคอลิแคลซิเฟอรอล (1,25 dihydroxycholecalciferol หรือ 1,25 $(OH)_2D_3$)

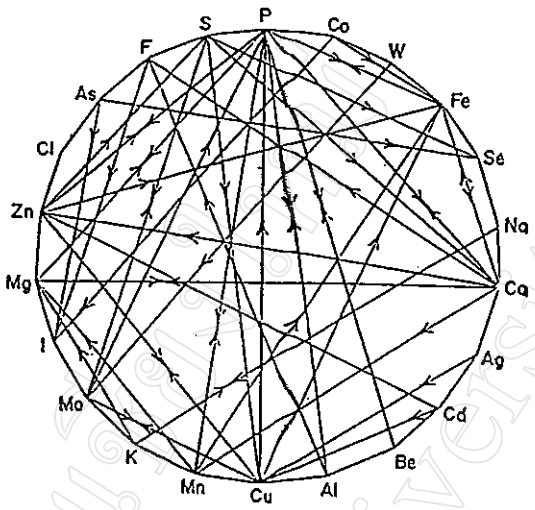
อัตราส่วนของ Ca และ P ที่เหมาะสมสำหรับสัตว์ต่างๆ ควรอยู่ในช่วง 1:1 ถึง 2:1 ยกเว้นในกรณีของไก่ไข่ที่มีความต้องการ Ca ในปริมาณสูง สำหรับใช้ในการสร้างเปลือกไข่ จึงต้องการ

Ca สูงกว่า P 3.8 หรือ 4.5 เท่า ดังแสดงในตารางที่ 2 (Phillips, 1988 และ Leopold, 1991) Ashmed and Zunino (1993) แนะนำไว้ว่า ในอาหารสัตว์ทั่วไปควรมี Ca ระดับสูงกว่า P เสมอ เนื่องจากความสัมพันธ์ระหว่าง Ca และ P เป็นไปในลักษณะที่มีการแก่งแย่งกันในการดูดซึม โดย P สามารถแก่งแย่งการดูดซึมได้ดีกว่า Ca ดังจะสังเกตุเห็นได้จากความยาวของลูกศรในภาพที่ 1 ซึ่งหัวลูกศรออกจาก P ชี้ไปยัง Ca เป็นระยะทางที่ยาวกว่าหัวลูกศรที่ออกจาก Ca ชี้ไปยัง P ถ้าในอาหารมี Ca ระดับต่ำหรือมี P มากเกินไป จะทำให้เกิดการขาด Ca ได้

ตารางที่ 2 อัตราส่วนที่เหมาะสมระหว่าง Ca และ P ในสัตว์ชนิดต่างๆ

ชนิดสัตว์	อัตราส่วนของ Ca ต่อ P		
	Phillips (1988)	Leopold (1991)	Mc Dowell (1992)
โค			
- ระยะเจริญเติบโต	1.26	1.2 – 1.8	1.2 – 1.6
- โคเนื้อให้นม	1.20	-	-
- โคนม	1.34	1.25 – 1.5	1.5 – 1.6
แกะ			
- ระยะเจริญเติบโต	1.11	1.0 – 1.4	1.25 – 2.16
- ระยะให้นม	1.35	1.2 – 1.6	1.25 – 2.16
สุกร			
- ระยะเจริญเติบโต	1.30	1.25	2.14
- ระยะเลี้ยงลูก	1.50	1.2 - 1.8	2.14
ไก่			
- ระยะเจริญเติบโต	1.43	1.4	2.0
- ไก่ไข่	4.58	3.8	10.62
- ไก่เนื้อ	-	1.5	2.2

ฮอร์โมนที่ทำหน้าที่ควบคุมสมดุลของ Ca และ P ในร่างกาย มีกลไกการทำงานดังนี้ คือ เมื่อเกิดสภาวะ Ca ภายในพลาสมาต่ำ (hypocalcemia) สัตว์จะหลั่ง PTH เพิ่มมากขึ้น ส่งผลให้ระดับ Ca เพิ่มขึ้น แต่จะลดการดูดซึมฟอสเฟต ทำให้ระดับฟอสเฟตในเลือดลดลง เนื่องจาก PTH



ภาพที่ 1 ปฏิกิริยาร่วมระหว่างแร่ธาตุแต่ละชนิด หัวลูกศรและความยาวก้านลูกศร เป็นตัวบ่งถึงความสัมพันธ์และการแก่งแย่งการดูดซึมระหว่างแร่ธาตุด้วยกัน
ที่มา: Ashmed and Zunino (1993)

มีฤทธิ์ไปเสริมการทำงานของเอนไซม์ 1 แอลฟา-ไฮดรอกซีเรส (1α -hydroxylase) ซึ่งมีผลต่อการสร้างวิตามินดี 3 (D_3–1,25–dihydroxy) และกระตุ้นการดูดซึม Ca แบบ passive diffusion ผ่านท่อไตส่วน distal tubules เพิ่มมากขึ้น เป็นผลให้มีการขับ Ca ออกทางปัสสาวะลดลง ขณะที่มีการดูดกลับของฟอสเฟตที่ท่อไตส่วน proximal tubules ลดน้อยลง ฟอสเฟตจึงถูกขับออกทางปัสสาวะมากขึ้น นอกจากนี้ PTH ยังมีผลไปกระตุ้นการทำงานของเซลล์กระดูก ทำให้มีการสลายกระดูก (resorption) ปลดปล่อย Ca ออกสู่พลาสมามากขึ้น

ในทางตรงกันข้าม เมื่อร่างกายมีสภาวะ Ca ในเลือดสูง (hypercalcemia) ร่างกายจะมีการกระตุ้นให้หลั่ง CT มากขึ้น เป็นผลให้ Ca ในเลือดถูกนำไปสะสมในกระดูกมากขึ้น นอกจากนี้ยังลดการเปลี่ยนรูปจาก 25–dihydroxy cholecalciferol เป็น 1,25–dihydroxy cholecalciferol ทำให้กระบวนการสลายตัว เพื่อปลดปล่อย Ca ของเซลล์กระดูกที่ถูกกระตุ้นด้วย PTH ถูกยับยั้ง ทำให้ Ca ในเลือดลดลง และพบว่าปริมาณสารประกอบ Ca และฟอสเฟตมีความเกี่ยวพันกับการสะสม Ca ในกระดูกด้วย โดยถ้าเพิ่มปริมาณฟอสเฟตจะเพิ่มการสะสม Ca ในกระดูก ทำให้ Ca ในพลาสมาลดลง แต่ถ้าลดระดับของฟอสเฟตลงจะทำให้การสะสม Ca ในกระดูกลดลง ส่งผลให้ Ca ในพลาสมาสูงขึ้น (นทีทิพย์, 2538)

ความต้องการและผลของการขาด P

ปริมาณความต้องการ P ของสัตว์ที่กำลังเจริญเติบโต จะมีสัดส่วนที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับปริมาณความต้องการ Ca อัตราส่วนของ Ca และ P ที่เหมาะสม คือ 2.2:1 (NRC, 1994) ขณะที่สัตว์วัยเจริญเติบโตเต็มที่ มีอัตราการเจริญของกระดูกลดลง ทำให้ความต้องการ P ในอาหารลดลงตามไปด้วย อย่างไรก็ดี ในการผสมอาหารสัตว์จำเป็นจะต้องมีการเสริม P สังเคราะห์อื่นๆ เช่น ไดแคลเซียมฟอสเฟต (dicalcium phosphate; DCP) โซเดียมฟอสเฟต (sodium phosphate) ซึ่งมี P เป็นองค์ประกอบ 18-23 และ 21-25 % ตามลำดับ (ตารางที่ 3) ทั้งนี้เพราะเมล็ดธัญพืชที่เป็นส่วนประกอบหลักของสูตรอาหารมี P ส่วนใหญ่อยู่ในรูปของไฟเตท ซึ่งสัตว์กระเพาะเดี่ยว เช่น สัตว์ปีก สุกร นำไปใช้ประโยชน์ได้น้อยหรือไม่ได้เลย ส่วนวัตถุดิบที่มาจากสัตว์ เช่น ปลาป่น เนื้อและกระดูกป่น ก็มี P เป็นองค์ประกอบเพียง 2-7 และ 2-10% เท่านั้น และมีการใช้ในอาหารสัตว์เป็นปริมาณน้อย จึงทำให้สูตรอาหารมี P ไม่เพียงพอแก่ความต้องการของสัตว์

การขาด P ในสัตว์ที่กำลังเจริญเติบโตมีผลทำให้การสร้างกระดูก (bone mineralization) น้อยลง ขัดขวางกระบวนการเมตาบอลิซึมของ Ca (Soares, 1995) สัตว์จะมีอาการของโรคกระดูกอ่อน (rickets) ข้อเจ็บ เดินไม่สะดวก อัตราการเจริญเติบโตและปริมาณอาหารที่กินได้ลดลง Perney *et al.* (1993) ศึกษาการเลี้ยงไก่เนื้ออายุ 1-7 วัน ด้วยอาหารที่มีระดับของ P ใช้ประโยชน์ได้ (available phosphorus; aP) เท่ากับ 0.45, 0.34, 0.27 และ 0.20% พบว่า ไก่กลุ่มที่ได้รับ aP ระดับต่ำมีปริมาณการกินอาหารลดลง 6.7, 12.9 และ 34.8% ส่วนอัตราการเจริญเติบโตลดลง 7.5, 15.7 และ 47.8% ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุมที่ได้รับ aP 0.45% (หรือเทียบเท่ากับ 100% NRC, 1984) ในขณะที่ประสิทธิภาพการใช้อาหารไม่มีความแตกต่างกัน ยกเว้นในกลุ่มที่ได้รับ aP ระดับต่ำสุด (0.20% aP) สำหรับสัตว์ที่เจริญเติบโตเต็มที่การขาด P เป็นระยะเวลานานๆ จะทำให้เกิดโรคกระดูกเปราะ (osteomalacia)

นอกจากนี้ การได้รับ P มากเกินความต้องการของสัตว์ กระบวนการควบคุมสมดุลของ P ในเลือด (blood homeostasis) จะกระตุ้นให้ต่อมพาราไทรอยด์หลั่ง PTH ออกมาในปริมาณมาก เกิดภาวะ hyperparathyroidism ส่งผลให้มีการสลายกระดูก (bone resorption) มากขึ้น สัตว์จะแสดงอาการขาเสีย (lameness) กระดูกเจริญผิดรูปลีบยาวออก เดินไม่สะดวก Soares (1995) พบว่า สุกรระยะเจริญเติบโตที่ได้รับอาหารที่มี Ca ระดับต่ำ และ P ระดับสูง มีการสลายตัวของกระดูกมาก นอกจากนี้ยังมีอาการหายใจไม่ออก (suffocate) เนื่องจากกระดูกซี่โครงยุบอ่อนตัวเข้าหากัน ทำให้ขัดขวางระบบทางเดินหายใจ และมีผลต่อการดูดซึมของ Ca

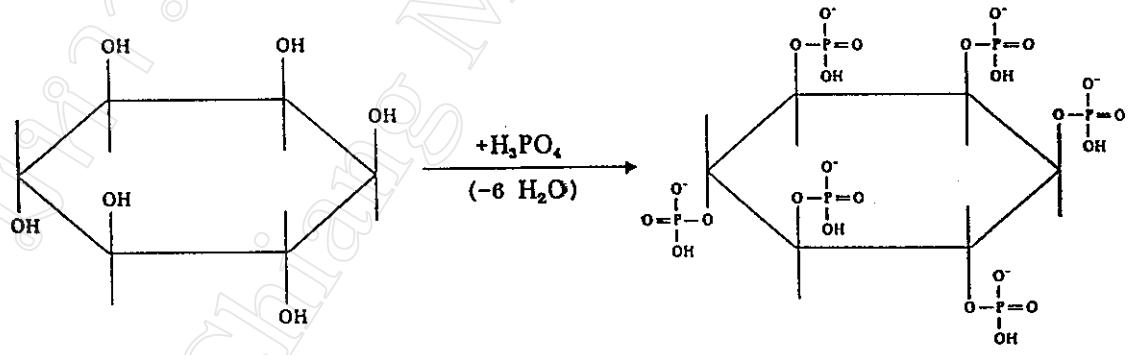
ตารางที่ 3 วัตถุดิบแหล่ง Ca และ P

แหล่งวัตถุดิบ	Ca (%)	P (%)
หินปูน	38	-
เปลือกหอย	38	-
แคลเซียมฟอสเฟต		
แหล่งธรรมชาติ ไม่ผ่านกระบวนการสังเคราะห์		
Low fluorine rock phosphate	32-35	12-15
Curacao phosphate (guano)	36	13-15
Colloidal phosphate (soft phosphate)	18-20	9-10
Bone meal, steamed	23-26	8-18
ผ่านกระบวนการทางเคมี		
1. Dicalcium phosphates		
Dicalcium-monocalcium phosphates	15-23	18-23
Monocalcium-dicalcium phosphates	15-18	20-21
Precipitated phosphates	24-26	18-22
2. Defluorinated phosphates	30-36	14-18
โซเดียมฟอสเฟต		
Monosodium phosphate	-	25
Disodium phosphate	-	21
Sodium tripolyphosphate	-	25
แอมโมเนียมฟอสเฟต		
Monoammonium phosphate	-	24
Diammonium phosphate	-	20
กรดฟอสฟอริค	-	23-24
ปลาป่น	2-14	2-7
เนื้อและกระดูกป่น	4-14	2-10
ผลพลอยได้จากสัตว์ปีกป่น	2-10	2-8

ที่มา: Waldroup (1996)

โครงสร้างทางเคมีและแหล่งของไฟเตท

ไฟเตท หรือไมโออินอซิทอล เฮกซาคิสไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (myo-inositol hexakisdihydrogen phosphate; $C_6H_{18}O_{24}P_6$ หรือ $C_6H_6O_6[PO(OH)_2]_6$) คือ เกลือของกรดไฟติก (phytic acid) หรือกรดอินอซิทอลเฮกซาฟอสฟอริค (inositol hexaphosphoric acid; IP-6) ที่เกิดจากปฏิกิริยาเอสเทอริฟิเคชันของไมโออินอซิทอล (myoinositol) กับกลุ่มฟอสฟอริค (H_3PO_4) 6 กลุ่ม โดยเปลี่ยนหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) เป็นหมู่ฟอสฟอริล ($-HPO_4^{2-}$) ด้วยพันธะเอสเทอร์ (ภาพที่ 2) Anderson (1912; อ้างโดย Reddy *et al.*,1989) พบว่า ไอออนของ P 1 อะตอมจับกับไอออนของออกซิเจน (oxygen; O) 4 อะตอม ซึ่ง O 1 อะตอมจะจับเป็นพันธะคู่ (double bond) กับ P และวงแหวนหกเหลี่ยม (inositol) Sebastian *et al.* (1998) กล่าวว่าไอออนของ O ที่เหลืออยู่อีก 2 ด้านจะอยู่ในสภาพที่พร้อมรับไอออนจากธาตุอื่นๆ (reducing ion) ทั้งที่เป็นไอออนบวกสอง (divalent ion) หรือไอออนบวกสาม (trivalent ion) เช่น Ca^{2+}, Mg^{2+}, Zn^{2+}, Cu^{2+},และ Fe^{2+} ทำให้เกิดลักษณะของสารประกอบคีเลท (chelate) ที่มีคุณสมบัติไม่ละลายน้ำ และมีอิทธิพลต่อการดูดซึมหรือขัดขวางการใช้ประโยชน์ของแร่ธาตุ เรียกกันโดยทั่วไปว่า ไฟติน ปริมาณของ P ในรูปของไฟเตทคิดเป็น 28.2% ของน้ำหนักโมเลกุล



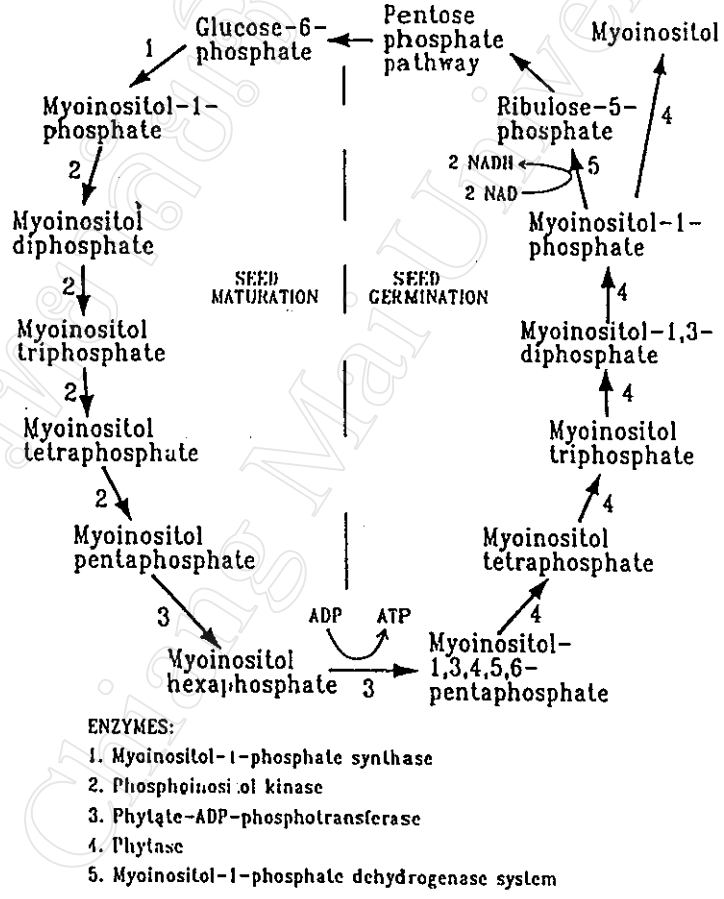
ไมโออินอซิทอล กรดไฟติก

ภาพที่ 2 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์กรดไฟติกจากไมโออินอซิทอล

ที่มา: ยงยุทธ (2543)

ไฟเตทเป็นสารประกอบฟอสเฟตที่สำคัญในเมล็ดพืช โดยอยู่ในรูป deprotonate ของ Ca Mg-ไฟเตท กล่าวคือ ไฟเตทในเมล็ดมีบทบาทในการควบคุมการสังเคราะห์แป้งในขณะที่เมล็ดอยู่ในช่วงสะสมแป้งหรือหัวกำลังเจริญเติบโต และในช่วงสุดท้ายของการพัฒนาเมล็ด (seed maturation)

ขณะที่ความชื้นในเมล็ดจะเริ่มลดลงตามลำดับ นอกจากนี้ ไฟเตทยังมีบทบาทสำคัญในการงอกของเมล็ดพืช (ภาพที่ 3) คือ เมื่อเมล็ดเริ่มงอกต้นอ่อน หรือเอมบริโอ (embryo) จำเป็นต้องใช้ธาตุอาหารมาก เช่น ใช้ Mg เพื่อการฟอสฟอริเลชันและการสังเคราะห์โปรตีน ใช้ K เพื่อขยายขนาดเซลล์ และใช้ P เพื่อสังเคราะห์ลิพิดและกรดนิวคลีอิก ดังนั้นเมื่อเมล็ดเริ่มงอกจึงต้องมีการสลายไฟเตทซึ่งจับกับโปรตีนภายในใบเลี้ยง (cotyledon) เพื่อปลดปล่อย P ออกมา (Reddy *et al.*, 1989 และยงยุทธ, 2543) ก่อน เอนไซม์ที่กระตุ้นการสลายตัว คือ ไฟเตส (phytase) ทำให้ปริมาณไฟเตทในเมล็ดลดลง



ภาพที่ 3 ปฏิกิริยาการสังเคราะห์กรดไฟติกจากไมโออินอซิทอลในเมล็ดพันธุ์พืช

ที่มา: Reddy *et al.* (1989)

Mukerji *et al.* (1971; อ้างโดย ยงยุทธ, 2543) ศึกษาผลการเปลี่ยนแปลงของ P ในส่วนต่างๆ ในเมล็ดข้าวเมื่องอก (ตารางที่ 4) พบว่า ภายใน 24 ชั่วโมง หลังจากเพาะเมล็ด ไฟเตทเริ่มสลายตัวปลดปล่อยฟอสเฟตออกมาสร้างเป็นฟอสฟอลิพิด นอกจากนี้ยังมีการเพิ่มขึ้นของ P_i และ

ฟอสเฟตเอสเทอร์ แสดงว่าเริ่มมีอัตราการหายใจ มีกระบวนการฟอสฟอริเลชันและกระบวนการอื่นๆ ที่เกี่ยวข้องสูงขึ้น การสลายของไฟเตทยังเกิดต่อเนื่องตลอดเวลา โดยในช่วงท้ายจะพบ P อยู่ในรูป DNA และ RNA มากขึ้น แสดงว่ามีการแบ่งเซลล์และสังเคราะห์โปรตีนรวดเร็วขึ้น สำหรับอัตราการสลายของไฟเตทถูกควบคุมโดย P_i กล่าวคือ หากมี P_i ออกมามาก การสังเคราะห์เอนไซม์ไฟเตสจะลดลง เพื่อให้อัตราการสลายของไฟเตทสอดคล้องกับความต้องการใช้ P, K และ Mg ในกระบวนการเมตาบอลิซึมส่วนอื่นๆ ของการงอก

ตารางที่ 4 การเปลี่ยนแปลงของ P ในรูปต่างๆ ในเมล็ดข้าวเมื่องอก

เวลาในการงอก	P ในรูปต่างๆ (มก.P/ก.น้ำหนักแห้ง)				
(ชั่วโมง)	ไฟเตท	ลิพิด	P_i	เอสเทอร์	DNA+RNA
0	2.67	0.43	0.24	0.078	0.058
24	1.48	1.19	0.64	0.102	0.048
48	1.06	1.54	0.89	0.110	0.077
72	0.80	1.71	0.86	0.124	0.116

ที่มา: Mukherji *et al.* (1971; อ้างโดย ยงยุทธ, 2543)

การสะสมไฟเตทในส่วนต่างๆ ของเมล็ดพืชแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน ขึ้นกับลักษณะทางกายภาพ (morphological) ของเมล็ดพืช กล่าวคือ ในเมล็ดธัญพืช จำพวกข้าวและข้าวสาลีจะพบสะสมมากที่บริเวณเยื่อหุ้มเมล็ด (pericarp และ aleurone layers, ตามลำดับ) ซึ่งจะถูกสีออกมาเป็นรำ (bran) ในลำดับต่อไป (ตารางที่ 5) ส่วนในเมล็ดข้าวโพดจะแตกต่างจากเมล็ดธัญพืชอื่นที่มีการสะสมมากที่ส่วนของต้นอ่อน (germ) สูงถึง 88% ของไฟเตททั้งหมด ขณะที่เมล็ดข้าวและเมล็ดข้าวสาลีจะพบในส่วนของต้นอ่อนเพียง 7.6 และ 12.9% ของไฟเตททั้งหมด สำหรับเมล็ดถั่ว (legumes) และเมล็ดพืชน้ำมัน (oilseeds) ซึ่งเป็นพืชใบเลี้ยงคู่จะสะสมมากในส่วนของใบเลี้ยง (cotyledon) ทั้งนี้ความเข้มข้นของไฟเตทในพืช ยังขึ้นอยู่กับระยะเวลาการพัฒนาของเมล็ด (maturity) กระบวนการผลิต (processing) การเพาะปลูก (cultivar) สภาพดินฟ้าอากาศ (climate) การให้น้ำ (water availability) สภาพดิน สภาพภูมิประเทศ (geographical location) และระยะเวลาการเจริญเติบโต ซึ่ง Reddy *et al.* (1989) รายงานว่า ข้าวสาลีที่เพาะปลูกนอกเขตชลประทาน น้ำไม่ค่อยดี จะมีปริมาณไฟเตทน้อยกว่าข้าวสาลีที่เพาะปลูกในเขตชลประทาน นอก

ตารางที่ 5 ปริมาณไฟเตทในส่วนต่างๆ ของเมล็ดพืช

ชนิดเมล็ดพืช	ส่วนประกอบของเมล็ด	ปริมาณไฟเตทฟอสฟอรัส (%)	ปริมาณไฟเตท[1/] (%)	การกระจาย[2/] (%)
ข้าวโพดพันธุ์การค้า	เมล็ด	0.25	0.89	-
	เอนโดสเปิร์ม	0.01	0.04	3.20
	ต้นอ่อน	1.80	6.39	88.00
	เปลือก	0.02	0.07	0.04
ข้าวโพดพันธุ์ไลซีนสูง	เมล็ด	0.27	0.96	-
	เอนโดสเปิร์ม	0.01	0.04	3.00
	ต้นอ่อน	1.61	5.72	88.90
	เปลือก	0.07	0.25	1.50
ข้าวสาลี	เมล็ด	0.32	1.14	-
	เอนโดสเปิร์ม	0.001	0.004	2.20
	ต้นอ่อน	1.10	3.91	12.90
	เปลือก	1.16	4.12	87.10
ข้าว	เมล็ด	0.25	0.89	-
	เอนโดสเปิร์ม	0.004	0.01	1.20
	ต้นอ่อน	0.98	3.48	7.60
	เปลือก	0.95	3.37	80.00
ข้าวฟ่าง	เมล็ด	0.25	0.89	-
	เอนโดสเปิร์ม	0.09	0.32	-
	ต้นอ่อน	0.75	2.66	
	เปลือก	0.28	0.99	-
ถั่ว (peas)	เมล็ด	0.22	0.79	-
	ใบเลี้ยง	0.22	0.78	88.70
	ต้นอ่อน	0.35	1.23	2.50
	เปลือก	0.002	0.01	0.10

[1/] ไฟเตทมีปริมาณ P คิดเป็น 28.2% ของน้ำหนักโมเลกุล

[2/] เปอร์เซนต์ของไฟเตทในส่วนประกอบของพืช

ที่มา: ดัดแปลงจาก Reddy *et al.* (1989)

จากนี้ Ravindran *et al.* (1995) ยังรายงานว่า เมล็ดข้าวและข้าวสาลีจะมีปริมาณไฟเตทเพิ่มมากขึ้น เมื่อเมล็ดมีการพัฒนาเต็มที่และได้รับปุ๋ยฟอสเฟตในระหว่างการเพาะปลูก

ในอาหารสัตว์ทั่วไปที่ใช้ข้าวโพดและกากถั่วเหลืองเป็นส่วนประกอบหลัก จะมีปริมาณไฟเตท 0.22-0.25% หรือคิดเป็นปริมาณ 60-80% ของ tP การใช้รำข้าวในสูตรอาหารสูงกว่าปกติจะยิ่งเพิ่มปริมาณไฟเตทในสูตรอาหาร เนื่องจากรำข้าวมีปริมาณไฟเตทสูง ถ้าอาหารมีรำ 10% จะทำให้มีไฟเตทเพิ่มขึ้นเป็น 0.35-0.40% (Ravindran *et al.*, 1995) ในตารางที่ 6 แสดงปริมาณไฟเตทและการใช้ประโยชน์ได้ของ P ในวัตถุบางชนิด ปรากฏว่า วัตถุดิบจากพืชที่มีไฟเตทปริมาณสูงเป็นพิเศษ ได้แก่ รำข้าวเจ้า รำข้าวสาลี กากงา กากคาโนลา (เรปซีด) กากทานตะวัน เป็นต้น Pointillart (1994) รายงานว่า โดยทั่วไปในเมล็ดธัญพืชมีปริมาณไฟเตท 0.17-0.26% ผลพลอยได้จากธัญพืชมีประมาณ 0.5-1.0% และกากพืชน้ำมันมีปริมาณ 0.32-0.92% ของวัตถุแห้ง Eeckhout and De Paepe (1994) ศึกษาในวัตถุดิบอาหารสัตว์จากพืช 51 ชนิด รวม 285 ตัวอย่าง จากโรงงานอาหารสัตว์ในประเทศเบลเยี่ยม พบว่า 2 ใน 3 ส่วนของปริมาณ tP ในพืชสะสมอยู่ในรูปของไฟเตท โดยมีความสัมพันธ์แบบเส้นตรง (linear regression) กับปริมาณ tP มีค่าสหสัมพันธ์ (R^2) เท่ากับ 0.953 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเฉลี่ยเท่ากับ 0.060

การย่อยและการใช้ประโยชน์ได้ของไฟเตท

P ที่สะสมในรูปของไฟเตทนั้นจะจับตัวกับไอออนประจุบวกเป็นสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำในระบบทางเดินอาหารของสัตว์ เช่น แคลเซียมไฟเตท เป็นต้น สารประกอบที่เกิดขึ้นนี้มีผลทำให้สัตว์ไม่สามารถนำ P ที่เป็นองค์ประกอบอยู่มาใช้ประโยชน์ได้ นอกจากจะมีเอนไซม์ไฟเตสมาย่อยสลาย แต่ไฟเตทก็มิใช่ปัจจัยเดียวที่มีผลต่อการใช้ประโยชน์ได้ของ P จากพืช ชนิดและอายุของสัตว์ก็เป็นอีกปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อปริมาณและ/หรือประสิทธิภาพของเอนไซม์ไฟเตสในลำไส้เล็กของสัตว์ Sebastian *et al.* (1998) รายงานว่า แหล่งของเอนไซม์ไฟเตสได้แก่ 1) จากลำไส้เล็กของสัตว์ 2) จากจุลินทรีย์ที่อาศัยในลำไส้ของสัตว์ 3) เอนไซม์ไฟเตสในพืช หรือ 4) ผลิตจากจุลินทรีย์ภายนอกตัวสัตว์

ในสัตว์กระเพาะเดี่ยว เดิมมีความเข้าใจว่า ไม่สามารถใช้ประโยชน์จากไฟเตทได้ เนื่องจากสัตว์มีปริมาณเอนไซม์ไฟเตสน้อยมาก หรือไม่มีเลยในลำไส้ ซึ่งต่างจากสัตว์เคี้ยวเอื้องที่จุลินทรีย์ในกระเพาะหมัก (rumen microflora) สามารถผลิตเอนไซม์ไฟเตสได้ จึงสามารถใช้ P จากพืชให้เป็นประโยชน์ได้มากกว่า 50% (Reddy *et al.*, 1989) Nelson *et al.* (1976) ศึกษาการใช้ประโยชน์ได้ของไฟเตทในลูกโคและโคขุน ที่ได้รับอาหารผสมข้าวโพดหรือข้าวฟ่างและกากถั่วเหลือง ปรากฏว่า

โคขุนอายุ 9 เดือน น้ำหนักเฉลี่ย 200 กก. ได้รับไฟเตท ฟอสฟอรัสจากอาหาร 71 ก. ไม่พบ P ถูกขับออกมาในมูล แต่ลูกโคอายุ 56 วัน เมื่อได้รับไฟเตทฟอสฟอรัส 20 ก. จะมี P ถูกขับออกมากับมูล 0.06 ก. โดยไม่พบไฟเตทสะสมในกระเพาะหมัก กระเพาะแท้ ลำไส้เล็กและลำไส้ใหญ่ของลูกโค แสดงว่าลูกโคอาจมีจุลินทรีย์ที่สร้างไฟเตสอยู่น้อยกว่าโคที่โตแล้ว

ตารางที่ 6 ปริมาณไฟเตท และการใช้ประโยชน์ได้ของ P ในวัตถุดิบอาหารสัตว์บางชนิดในไก่

ชนิดวัตถุดิบ	Phytate P		การใช้ประโยชน์
	(% ของวัตถุแห้ง)	(% ของ tP)	ได้ของ P (%)[3/]
ธัญพืช			
ข้าวโพด	0.24 (0.17-0.29)[1/]	72 (66-85)	28
ข้าวสาลี	0.27 (0.17-0.38)	69 (60-80)	29
ข้าวฟ่าง	0.24 (0.21-0.28)	66 (64-69)	18
ข้าวบาร์เลย์	0.27 (0.19-0.33)	64 (56-70)	n.a.
เมล็ดข้าวเจ้า (ไม่ได้ขัด)	0.27 (0.25-0.28)	77 (74-81)	n.a.
รำข้าวเจ้า	1.31 (1.02-1.79)	80 (72-86)	2
รำข้าวสาลี	0.92 (0.88-0.96)	71 (70-72)	36
กากเมล็ดพืชน้ำมัน			
กากถั่วเหลือง	0.39 (0.37-0.42)	59 (57-61)	35-42
กากคาโนลา (เรปซีด)	0.70 (0.54-0.78)	59 (43-70)	45
กากมะพร้าว	0.29 (0.26-0.33)	49 (43-56)	n.a.
กากงา	1.18 (1.03-1.46)	81 (71-84)	n.a.
กากทานตะวัน[2/]	0.88	85	n.a.
อื่น ๆ			
ถั่ว (Peas)	0.24	50	28
หัวมันสำปะหลัง	0.04 (0.03-0.04)	28 (25-33)	n.a.
หัวมันเทศ	0.05	24	n.a.
ใบกระถิน	0.02	9	n.a.

[1/] ค่าในวงเล็บรวบรวมจากรายงานต่าง ๆ

[2/] NRC (1994)

[3/] ข้อมูลเทียบกับ monocalcium phosphate (Coffey and Cormwell, 1995)

n.a. = No data available

ที่มา: บุญล้อม และสุชน (2540, ก)

Reddy *et al.* (1989) ได้รวบรวมข้อมูลการใช้ประโยชน์ได้ของ P จากไฟเตทในสุกรจากหลายการทดลอง พบว่า มีค่าผันแปรตั้งแต่ 20-60% (ตารางที่ 7) สำหรับการศึกษาในไก่ มีหลายรายงานยืนยันว่า ไก่สามารถใช้ประโยชน์จากไฟเตทฟอสฟอรัสได้บ้าง โดยผันแปรตั้งแต่ 0-50% Nelson (1976) ศึกษาการย่อยได้ของไฟเตทในไก่เนื้ออายุ 4 และ 9 สัปดาห์ และในไก่ไข่ ที่ใช้ข้าวโพดและกากถั่วเหลืองเป็นวัตถุดิบหลักในสูตรอาหาร พบว่า ไก่มีการย่อยได้เท่ากับ 0, 3 และ 8% ตามลำดับ ส่วนอาหารที่ใช้ข้าวสาลีทดแทนข้าวโพดในสูตรอาหารระดับ 50% (หรือเทียบเท่ากับใช้ข้าวสาลี 27% ของสูตรอาหาร) มีผลทำให้ไก่ใช้ประโยชน์จากไฟเตทได้ดีขึ้น คือ มีการย่อยได้เท่ากับ 8, 13 และ 13% ตามลำดับ

ตารางที่ 7 ความสามารถในการย่อยไฟเตทของสุกร

น้ำหนักสุกร (ปอนด์)	ความสามารถในการย่อยไฟเตท (%)	เอกสารอ้างอิง
60	20 – 30	Bayley and Thompson (1969)
50 - 90	30 – 40	Woodman and Evans (1948)
50	18 - 24	Besecker *et al.* (1967)
ระยะเจริญเติบโต	30 - 60	Noland *et al.* (1968)

ที่มา: Reddy *et al.* (1989)

นอกจากนี้ Edwards (1983) และ Ballam *et al.* (1984) รายงานว่า ไก่สามารถย่อยไฟเตทได้ 37-56% และ 3-42% ตามลำดับ โดยผันแปรตามระดับของ Ca และแหล่งของเยื่อใยในสูตรอาหาร Ballam *et al.* (1985) ศึกษาระดับ Ca และ P ในรูปอื่นที่ไม่ใช่ไฟเตท (non-phytate phosphorus; NPP) ต่อการใช้ประโยชน์ได้ของไฟเตทในไก่เนื้ออายุ 3 สัปดาห์ ที่ใช้ข้าวโพดและกากถั่วเหลืองเป็นหลัก โดยมี Ca ระดับ 0.09 หรือ 1.0% และ NPP 0.12 หรือ 0.45% ปรากฏว่า การเพิ่มระดับ Ca เป็น 1.0% ทำให้การย่อยได้ของไฟเตทฟอสฟอรัสลดลง ไม่ว่าจะมี NPP ระดับใด แต่เมื่อเพิ่มระดับ NPP เป็น 0.45% ทำให้การย่อยได้ของไฟเตทดีขึ้น (ตารางที่ 8) ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Mohammed *et al.* (1991) ที่อ้างว่าการใช้ประโยชน์ของ P จะเพิ่มขึ้น 15% ถ้าลดระดับ Ca ลงจาก 1% เป็น 0.5% และพบว่าเมื่อไก่ได้รับอาหารที่มีไฟเตทสูง หรือมี P_i ต่ำ มีผลเสียต่อสมรรถภาพการผลิต ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการลดระดับ Ca และ/หรือเพิ่มวิตามินดี 3 ลงในอาหาร

ตารางที่ 8 การย่อยได้ของไฟเตทในอาหารไก่เนื้อที่มีระดับ Ca และ NPP ต่างกัน

ระดับของ NPP (%)	ระดับ Ca (%)	การย่อยได้ของไฟเตท (%)
0.12	0.09	42.1
0.12	1.00	8.3
0.45	0.09	56.8
0.45	1.00	5.9

ที่มา: Ballam *et al.* (1985)

ผลของไฟเตทต่อการใช้ประโยชน์ได้ของโภชนะอื่น

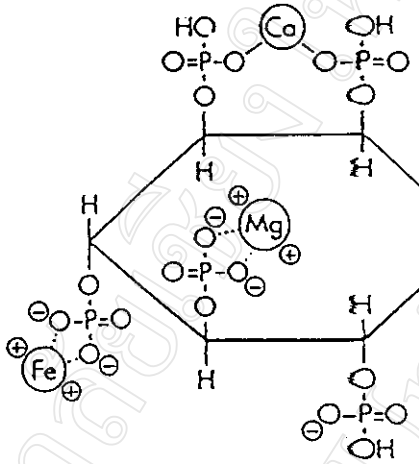
กรดไฟติกเป็นสารประกอบในรูปที่ไม่เสถียร เมื่อสลายตัวจะได้เป็นกรดออร์โทฟอสฟอริค (orthophosphoric acid) แต่จะสามารถคงสภาพเมื่อมีไฮโดรเจน (hydrogen; H) 12 อะตอม เข้าจับตัวแทนในกรดไฟติกเป็นสารประกอบเกลือ ที่เรียกว่า ไฟติน ในสารละลายที่มีค่าคงที่ของการแตกตัวของกรด (pK_a) เท่ากับ 1.84 กรดไฟติกจะแตกตัวออก 6 โปรตอน แต่ที่ pK_a 6.30 จะแตกตัวอย่างช้าๆ 2 โปรตอน และที่ pK_a 9.70 แตกตัวอีก 4 โปรตอน Costello *et al.* (1976) ใช้อนุภาคนิวเคลียร์ ^{31}P nuclear magnetic resonance ($^{31}PNMR$) ศึกษาการแตกตัวของไฟเตทด้วยวิธี pH titration พบว่า ที่ค่า pK_a เท่ากับ 1.1-2.1 แตกตัว 6 โปรตอน, pK_a 5.7 แตกตัว 1 โปรตอน, pK_a 6.8-7.6 และ pK_a 10.0-12.0 แตกตัวได้ 2 และ 3 โปรตอน ตามลำดับ ต่อมา Evans *et al.* (1982) ได้ทำการไตเตรทกรดไฟติก หรือโพแทสเซียมไฟเตทความเข้มข้น 0.2 M KCl พบว่า ที่ pK_a 2.18, 5.73 และ 9.21 กรดไฟติกสามารถแตกตัวได้ 6, 2 และ 4 โปรตอน ตามลำดับ จากผลการทดลองข้างต้นสรุปได้ว่า ความสามารถในการแตกตัวของกรดไฟติกจะขึ้นอยู่กับค่า pK_a โดยกรดไฟติกจะแตกตัวอยู่ในรูปของโมเลกุลประจุลบ ทำให้สามารถจับกับโปรตีนประจุบวก และ/หรือไอออนประจุบวก หรือแร่ธาตุในอาหารได้เป็นสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไฟเตท โปรตีนและแร่ธาตุ ส่งผลให้โภชนะต่างๆ ใช้ประโยชน์ได้ลดลง

กลไกการขัดขวางของไฟเตทต่อการใช้ประโยชน์ได้ของโภชนะอื่น สามารถสรุปได้โดยย่อดังนี้

1. แร่ธาตุ

เนื่องจากโครงสร้างของไฟเตทประกอบด้วยฟอสเฟตจำนวนมาก มีคุณสมบัติเป็น chelate ทำให้สามารถจับกับสารและ/หรือแร่ธาตุที่มีประจุบวก 2 และ 3 (di– and trivalent cation) เช่น Ca, Mg, Fe และ Zn ได้ดี (ภาพที่ 4) เกิดเป็นเกลือที่ไม่ละลาย (insoluble salt) เป็นเหตุให้ไม่

สามารถใช้ประโยชน์จากแร่ธาตุเหล่านี้ได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง Ca พบว่า 1 โมเลกุลของกรดไฟติก สามารถจับกับ Ca ได้ 3-6 โมเลกุล ที่ pH ของลำไส้



ภาพที่ 4 โครงสร้างของไฟเตทเมื่อจับกับแร่ธาตุประจุบวก 2

ที่มา: Ravindran *et al.* (1995)

Vohra *et al.* (1965) ศึกษาการเกิดสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไฟเตทและแร่ธาตุประจุบวกแต่ละตัว ด้วยกราฟการไตเตรทของไฟเตทอิสระ ปรากฏว่า ไฟเตทสามารถจับกับทองแดง (Cu^{2+}) ได้ดีที่สุด รองลงมาได้แก่ $Zn^{2+} > Ni^{2+} > Co^{2+} > Mn^{2+} > Fe^{3+} > Ca^{2+}$ ที่สภาพ pH 7.4 ซึ่งสอดคล้องกับ Maddaiah *et al.* (1964) ที่รายงานว่า สังกะสี (Zn^{2+}) มีความสามารถจับกับไฟเตทได้ดีกว่า $Cu^{2+} > Co^{2+} > Mn^{2+} > Ca^{2+}$ ทั้งนี้จากความสามารถของไฟเตทในการจับกับแร่ธาตุได้ดี ทำให้แร่ธาตุใช้ประโยชน์ได้ต่ำ จึงต้องมีการเสริมแร่ธาตุนั้นๆ เพื่อไปชดเชยส่วนที่ถูกจับไว้กับไฟเตท Nelson *et al.* (1968) รายงานว่า เมื่อเลี้ยงไก่เล็กฮอร์นด้วยอาหารบริสุทธิ์ (purified diet) ที่ไม่มีไฟเตท ความต้องการ Ca ของไก่มีเพียง 0.5% แต่เมื่อเลี้ยงด้วยอาหารทั่วไปที่มีไฟเตท 1.25% ความต้องการ Ca ของไก่เพิ่มเป็น 0.95% เนื่องจากต้องใช้ชดเชยส่วนของแคลเซียมไฟเตท Ravindran *et al.* (1995) และ Waldroup (1996) ได้เสนอสมการในการคำนวณความต้องการ Ca ของไก่เนื้อ ที่เลี้ยงด้วยอาหารที่มีไฟเตท ดังนี้

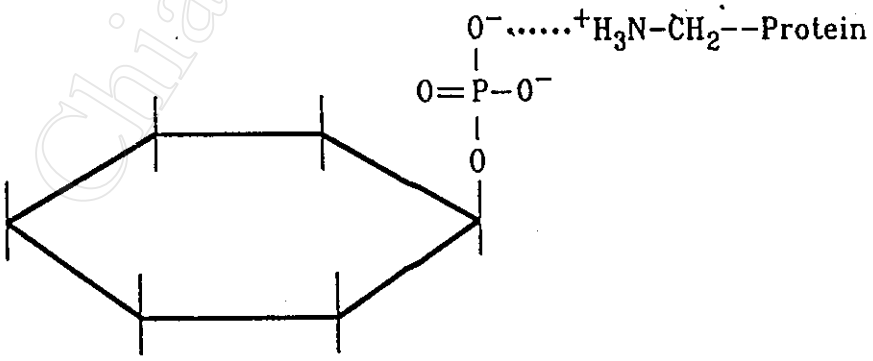
$$\%\ Ca\ ในอาหาร = 0.6 + (\%\ ไฟเตทฟอสฟอรัส \times 1.1)$$

การขาด Zn อาจเกิดกับสัตว์ที่ได้รับอาหารที่มีไฟเตทสูง เนื่องจากไฟเตทสามารถจับกับ Zn ในรูปสารประกอบเกลือที่ไม่ละลายในสภาพ pH 6 ซึ่งเป็นสภาพ pH ของลำไส้เล็กส่วนต้น O' Dell *et al.* (1964) รายงานว่า ไก่ที่เลี้ยงด้วยอาหารที่มีไฟเตท มีการเจริญเติบโตลดลง แต่เมื่อเสริม Zn ลงในอาหาร ไก่มีการเจริญเติบโตดีขึ้น สอดคล้องกับรายงานของ Lease (1967) ที่พบว่า Zn ในกากงาใช้ประโยชน์ได้น้อย เพราะอยู่ในรูปของ Ca – Mg – Zn – phytate ที่ไม่ละลาย

2. โปรตีน

นอกจากไฟเตทจะขัดขวางการใช้ประโยชน์ได้ของแร่ธาตุประจุบวกแล้ว ไฟเตทยังสามารถจับกับโปรตีนได้ เกิดเป็นสารประกอบเชิงซ้อนที่ไม่ละลาย โดยแบ่งได้เป็น 3 กลุ่ม ตามสภาพ pH คือ 1) ที่ pH ต่ำ 2) ที่ pH เป็นกลาง และ 3) ที่ pH สูง

1) ที่ pH ต่ำ (pH เท่ากับหรือน้อยกว่า 3.5) กรดไฟติกจะมีสภาพเป็นประจุลบ ขณะที่โปรตีนจากพืชหลายชนิดจะมีสภาพเป็นบวก แม้ pH จะเข้าใกล้ 4.0-5.0 (Reddy *et al.*, 1989) โดยปลายอะมิโน ($-NH_3^+$; amino group) ของโปรตีนจะเข้าจับกับกลุ่มฟอสเฟต ($-PO_4^-$; phosphate group) ของกรดไฟติก (ภาพที่ 5) ปลายอะมิโนของโปรตีน ได้แก่ ε-amino group ของไลซีน, imidazole group ของฮีสติดีน และ guanidyl group ของอาร์จินีน นอกจากนี้ธาตุประจุบวก 2 เช่น Ca^{2+} ก็สามารถจับกับกรดไฟติกภายใต้สภาพ pH เป็นกรด ซึ่งจะจับกับกลุ่มฟอสเฟตของกรดไฟติก 2 กลุ่ม



ภาพที่ 5 สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างกรดไฟติกกับโปรตีนในสภาพ pH ต่ำ

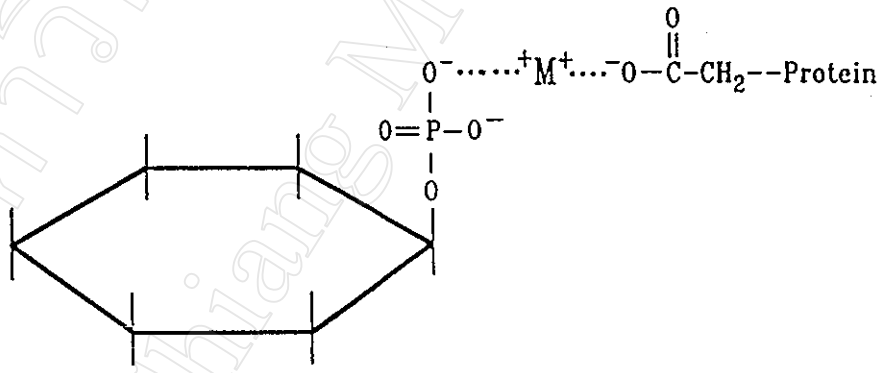
ที่มา: Cheryan (1980; อ้างโดย Reddy *et al.*, 1989)

2) ที่ pH เป็นกลาง ทั้งกรดไฟติกและโปรตีนจะมีประจุเป็นลบ การจับตัวเป็นสารประกอบเชิงซ้อนสามารถเกิดได้ 2 แบบ คือ การจับตัวกันระหว่างกรดไฟติกกับปลายอะมิโนของไลซีนโดยตรง (α-NH_2 terminal group และ ε-NH_2 group) เพราะปลายกรดอะมิโนยังคงสภาพประจุบวก (protonated) และการจับตัวโดยอาศัยตัวกลาง ซึ่งได้แก่ แร่ธาตุประจุบวกต่าง ๆ (ภาพที่ 6)

ประจุบวก + กรดไฟติก «----» (ประจุบวก – กรดไฟติก)

โปรตีน + ประจุบวก + กรดไฟติก «----» (โปรตีน - ประจุบวก – กรดไฟติก)

ประจุบวกที่เข้ามาจับกับโมเลกุลโปรตีนสามารถจับกับกลุ่มคาร์บอกซิล หรือฮีสติดิลได้ (carboxyl or histidyl group) และในกรณีของ lysyl และ arginyl side chains ของโปรตีน ไม่ต้องมีประจุบวกเป็นตัวกลางในการจับกับกรดไฟติก



ภาพที่ 6 สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างกรดไฟติกกับโปรตีนในสภาพ pH เป็นกลาง

ที่มา: Cheryan (1980; อ้างอิงโดย Reddy *et al.*, 1989)

3) ที่ pH สูง (pH มากกว่า 9.0) ปฏิกิริยาการจับตัวกันระหว่างกรดไฟติกและโปรตีนจะเกิดได้ลดลง

การจับตัวกันระหว่างกรดไฟติกและโปรตีน จะเกิดขึ้นในเมล็ดพืชที่ระยะสุกแก่เพราะในระยะดังกล่าวเมล็ดธัญพืช (พืชใบเลี้ยงเดี่ยว) เช่น เมล็ดข้าว ข้าวโพด ข้าวฟ่าง จะมีไฟเตทเข้าไปสะสมในชั้นของเปลือกหุ้มเมล็ด เพราะเป็นส่วนที่มีโปรตีนสูง ส่วนในเมล็ดพืชตระกูลถั่ว (พืชใบเลี้ยงคู่) ไฟเตทจะเข้าไปสะสมในเนื้อของเมล็ด Ravindran *et al.* (1995) ศึกษาการย่อยได้ของสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไฟเตทกับโปรตีน ในสภาวะหลอดทดลอง (*in vitro*) พบว่า สารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไฟเตทกับโปรตีนจะละลาย และถูกย่อยได้น้อยกว่าโปรตีนชนิดเดียวกันที่อยู่ในสภาพปกติ

นอกจากนี้ยังพบว่า ไฟเตทสามารถขัดขวางการทำงานของเอนไซม์บางชนิด เช่น โปรติเอส (protease) อะไมเลส (amylase; Caldwell, 1992) และไลเปส (lipase; Knuckles, 1988) ซึ่งสอดคล้องกับ Knuckles *et al.* (1989) ที่ได้ศึกษาการย่อยได้ของเคซีน (casein) และโบไวซีรั่มอัลบูมิน (bovine serum albumin; BSA) ในสภาพหลอดทดลองที่เสริมไมโออินอซิทอลที่มีกลุ่มฟอสเฟตจำนวนต่างกัน (IP 1-6) แล้วทำการย่อยด้วยเอนไซม์ทริปซิน (trypsin) ที่มี pH 8.0 และ/หรือ เอนไซม์เปปซิน (pepsin) ที่ pH 1.2 เปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุมและกลุ่มที่เสริมโซเดียมไฟเตท (Na-phytate) พบว่า เมื่อเพิ่มจำนวนโมเลกุลของฟอสเฟตที่จับกับไมโออินอซิทอล การย่อยได้ของโปรตีนจะลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกลุ่มที่ถูกย่อยด้วยเอนไซม์เปปซินที่ pH 1.2 การเสริมโซเดียมไฟเตทก็ให้ผลเช่นเดียวกับไมโออินอซิทอลที่มีฟอสเฟตจับอยู่ 6 กลุ่ม (IP-6) ดังแสดงไว้ในตารางที่ 9

3. แป้ง

จากการศึกษาถึงผลของการเสริมไฟเตท และไมโออินอซิทอล-2-โมโนฟอสเฟต (IP-1) ที่มีฟอสเฟตถูกจับอยู่เพียงกลุ่มเดียว ต่อการทำงานของเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (α-amylase) Knuckles and Betschart (1987) พบว่า ไฟเตททำให้การย่อยแป้งโดยแอลฟา-อะไมเลสลดลงทั้งที่ pH 4.15 และ 6.9 แต่ไมโออินอซิทอลฟอสเฟตทำให้การย่อยแป้งลดลงเฉพาะที่ pH 4.15 (ตารางที่ 10) อย่างไรก็ดี เมื่อความเข้มข้นของไฟเตทหรือ IP-1 สูงขึ้น คือเพิ่มจาก 2 เป็น 5 mM จะทำให้การย่อยได้ของแป้งยิ่งลดลง ผลการยับยั้งการย่อยได้ของแป้งนี้จะเห็นได้ชัดที่ pH 4.15 มากกว่าที่ pH 6.9 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากที่ pH 4.15 มีความเข้มข้นของเอนไซม์มากกว่า (100 เทียบกับ 0.5 หน่วย ตามลำดับ) และยังพบว่าการย่อยด้วยน้ำลายมีแนวโน้มว่าถูกขัดขวางมากกว่าการย่อยด้วยจุลินทรีย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ pH 4.15

ตารางที่ 9 ผลของไมโออินอซิทอลที่มีกลุ่มฟอสเฟตต่างกัน (IP) และผลของโซเดียมไฟเตท ต่อการย่อยเคซีน และ BSA ในหลอดทดลองด้วยทริปซิน และเปปซิน

	ทริปซิน (pH 8.0)		เปปซิน (pH 1.2)	
	เคซีน	BSA	เคซีน	BSA
	(% การย่อยได้)[1/]			
กลุ่มควบคุม	100.0[ก]	100.0[กข]	100.0[กข]	100.0[กข]
IP-1	95.4[ก]	104.7[ก]	103.7[ก]	102.4[ก]
IP-2	95.1[ก]	98.3[กข]	100.9[กข]	101.2[กข]
IP-3	95.8[ก]	104.2[ก]	96.3[ขค]	95.0[ขค]
IP-4	94.9[ก]	97.1[กข]	91.7[คง]	96.2[กขค]
IP-5	94.5[ก]	98.4[กข]	89.9[ง]	94.7[ขค]
IP-6	90.4[ก]	93.4[ข]	88.6[ง]	92.0[ค]
โซเดียมไฟเตท	92.5[ก]	100.7[กข]	86.1[ง]	90.5[ค]

[1/] % การย่อยได้เทียบกับกลุ่มควบคุม (เท่ากับ 100%)

[ก-ง] ตัวเลขในแถวตั้งเดียวกันที่มีอักษรกำกับต่างกัน ต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$)

ที่มา: Knuckles *et al.* (1989)

4. ไขมัน

สำหรับบทบาทของไฟเตท และไมโออินอซิทอล-2-โมโนฟอสเฟต ที่มีต่อการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ไลเปส Knuckles (1988) พบว่า เมื่อความเข้มข้นของไฟเตทและไมโออินอซิทอล-2-โมโนฟอสเฟตสูงขึ้น ความสามารถในการทำงานของไลเปสจะยิ่งลดลง การย่อยไขมันที่ pH 8.0 จะมีประสิทธิภาพดีกว่าที่ pH 6.5 (ตารางที่ 11)

ไฟเตทฟอสฟอรัส และสารประกอบเชิงซ้อนระหว่างไฟเตทกับโภชนะอื่น ที่สัตว์กระเพาะเดี่ยวไม่สามารถย่อยสลายและนำไปใช้ประโยชน์ได้จะถูกขับออกมากับมูล Edwards (1992) ศึกษาการขับถ่าย P ของไก่เนื้อที่ใช้อาหารที่มี P 0.75% และ 0.65% ในช่วงอายุ 1-3 และ 4-6 สัปดาห์ พบว่า ตลอดการทดลอง 6 สัปดาห์ ไก่ขับ P ออกมากับมูลถึง 81.2% ของปริมาณ P ที่กินเข้าไป โดยในช่วงอายุ 1-3 และ 4-6 สัปดาห์ ไก่ขับ P ออกมากับมูล 79.2% และ 82.1% ของปริมาณ P ที่กินเข้าไป นับว่าเป็นการสูญเสียอย่างสูง และยังก่อให้เกิดปัญหามลภาวะกับสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

ตารางที่ 10 ผลของไฟเตทและไมโออินอซิทอล-2-โมโนฟอสเฟต (IP-1) ที่มีต่อการย่อยได้ของแป้งโดย α-amylase จากน้ำลายและจากจุลินทรีย์ที่ pH 4.15 และ 6.9

แหล่งของ α-amylase	สัดส่วนการย่อยได้[1/] (%)			
	น้ำลาย		*B. subtilis*	
PH	4.15	6.90	4.15	6.90
กลุ่มควบคุม	100	100	100	100
ไฟเตท				
2 mM	8.5	96.8	25.8	90.8
5 mM	4.3	85.9	16.6	76.3
ไมโออินอซิทอล-2-โมโนฟอสเฟต				
2 mM	78.3	99.8	91.2	99.2
5 mM	46.1	100.1	79.9	99.2

[1/] % การย่อยได้เทียบกับกลุ่มควบคุม (เท่ากับ 100%)

ที่มา: Knuckles and Betschart (1987)

ผลของไฟเตทต่อสภาพแวดล้อม

ในปัจจุบันปัญหามลภาวะกำลังทวีความรุนแรงมากขึ้นในหลายภูมิภาคของโลก Yano and Nakajima (1996) รายงานว่า ในประเทศญี่ปุ่นมีการขับ N (NO_2^- / NO_3^- / NH_3) และ P (P_2O_5) ออกมากับมูลสัตว์สูงถึง 740 x 10^3 และ 315 x 10^3 ตันต่อปี ตามลำดับ Lenis and Jongbloed (1999) รายงานว่า ในปี 1995 ประเทศเนเธอร์แลนด์ มีปริมาณ P ที่ถูกขับออกมากับมูลสัตว์สูงถึง 107 กก.ต่อเฮกแตร์ ซึ่งสูงกว่าในปี 1970 ถึง 37% (78 กก.ต่อเฮกแตร์) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีสัตว์ปีก (ไก่และไก่งวง) มีการขับ N และ P ออกสูงกว่าสัตว์ชนิดอื่นๆ เมื่อเทียบเป็นร้อยละของน้ำหนักตัวสัตว์ (ตารางที่ 12) หลายประเทศในเขตยุโรปจึงตื่นตัวในปัญหานี้มาก โดยออกกฎหมายควบคุมปริมาณ N และ P ที่เกิดจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์ ตลอดจนการเกษตรกรรมต่างๆ (Lenis and Jongbloed,1999) เช่น ในประเทศฝรั่งเศส มีกฎหมายควบคุมให้มูลสัตว์ที่ขับออกมามีปริมาณ N และ P ได้ไม่เกิน 170 และ 43.8 กก.ต่อเฮกแตร์ ตามลำดับ ยกเว้นในพื้นที่เขต Vendeè ไม่เกิน 100 กก. P_2O_5 ต่อเฮกแตร์ สำหรับประเทศเดนมาร์ก กำหนดความหนาแน่นของการเลี้ยงสัตว์ต่อพื้นที่ 1 เฮกแตร์ ไม่เกิน 1.7 หน่วย โดย 1 หน่วยเท่ากับ การเลี้ยงสุกรขุน (น้ำหนัก 25-95 กก.) 30 ตัว หรือแม่สุกร 3 ตัว (แม่สุกรที่ให้ลูกมากกว่า 25 ตัวต่อปี)

ตารางที่ 11 ผลของไฟเตทและไมโออินอซิทอล-2-โมโนฟอสเฟตที่มีต่อการทำงานของไลเปส

ความเข้มข้น (mM)	ประสิทธิภาพของไลเปส[1/] (μM FA/min)
ไมโออินอซิทอล-2-โมโนฟอสเฟต (pH 8.0)	
0	5.14[n]
1	5.00[n]
6	4.83[n]
12	4.70[n]
ไฟเตท (pH 8.0)	
0	4.69[n]
1	4.36[n]
2	4.25[n]
4	4.01[n]
ไฟเตท (pH 6.5)	
1	3.82[n]
4	3.36[n]

[1/] ประสิทธิภาพการทำงานของไลเปส วัดจากปริมาณกรดไขมัน (FA) ที่ถูกย่อยต่อนาที

[n-n] ตัวเลขในแถวตั้งเดียวกันที่มีอักษรกำกับต่างกัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.05$).

ที่มา: Knuckles (1988)

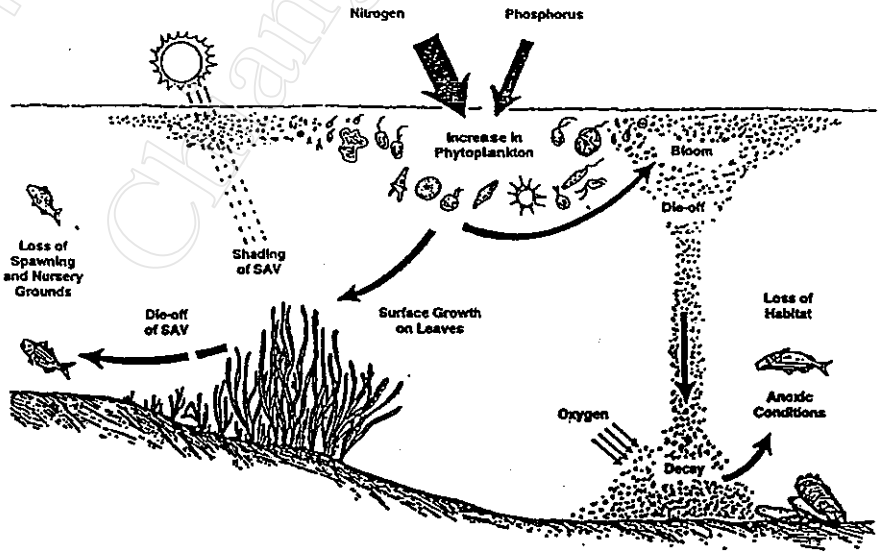
ตารางที่ 12 องค์ประกอบทางเคมีของมูลสัตว์ (ร้อยละของน้ำหนักตัว/วัน)

	น้ำหนักมูลทั้งหมด	N	P
โคเนื้อ	5.91	0.031	0.011
โคนม	8.00	0.045	0.007
สุกร	6.31	0.042	0.016
ไก่ไข่	6.05	0.083	0.031
ไก่เนื้อ	8.00	0.110	0.034
ไก่งวง	4.36	0.074	0.028

ที่มา: ดัดแปลงจาก NRCS (1995)

ปัญหามลภาวะที่สำคัญ คือ ปัญหาต่อความสมดุลของธาตุอาหารและสิ่งมีชีวิตที่อาศัยในดิน ปัญหาการกัดเซาะและชะล้างของหน้าดิน (erosion) และปัญหามลภาวะในแหล่งน้ำ ทั้งน้ำเหนือดินและน้ำใต้ดิน ที่เรียกว่าภาวะ Eutrophication

ภาวะ Eutrophication คือ ภาวะที่มีสารอาหารอุดมสมบูรณ์มากๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งฟอสเฟตและไนเตรต ซึ่งเป็นอาหารของแพลงค์ตอนพืช (สาหร่ายชนิดต่างๆ) ทำให้แพลงค์ตอนเจริญเติบโตได้รวดเร็วและมีปริมาณมาก เรียกว่า Plankton blooms หรือ Algae blooms (ภาพที่ 7) ในธรรมชาติแพลงค์ตอนจะทำหน้าที่เป็นผู้ผลิตอันดับต้นของสายโซ่อาหารในระบบนิเวศน้ำ โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ในการเปลี่ยนสารอาหารพวกอนินทรีย์ให้เป็นสารอินทรีย์ที่สลับซับซ้อนขึ้น สารอินทรีย์ทั้งที่ขับออกมาจากแพลงค์ตอน และที่เกิดจากการย่อยสลายแพลงค์ตอนที่ตายแล้วจะเป็นอาหารให้แก่สิ่งมีชีวิตชั้นสูง เช่น สัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังขนาดใหญ่ และปลา เป็นต้น ในการย่อยสลายแพลงค์ตอนที่ตายแล้ว จุลินทรีย์จำเป็นต้องใช้ O ในกระบวนการย่อยสลายด้วย ดังนั้นในภาวะที่แพลงค์ตอนเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วและมีปริมาณมากนั้น จะทำให้ปริมาณ O ที่ละลายน้ำ (dissolved oxygen) เกิดการแปรเปลี่ยนอย่างมาก จนเกิดภาวะ O ในแหล่งน้ำไม่เพียงพอ (hypoxic) และ/หรือภาวะขาด O (anoxic) ส่งผลให้น้ำเกิดสีและกลิ่น ทำให้สิ่งมีชีวิตอื่นในน้ำตายได้ เหตุการณ์เช่นนี้เรียกว่า Summer kill เนื่องจากมักเกิดในช่วงฤดูร้อนที่มีแสงอาทิตย์และมีปริมาณสารอาหารมาก (นันทนา, 2536 และ Correll,1998)



ภาพที่ 7 กลไกการเกิดภาวะ Eutrophication

ที่มา: U.S.EPA (1983; อ้างโดย Sharpley, 1998)

บทบาทของเอนไซม์ไฟเตส

เอนไซม์ไฟเตส (phytase) มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า ไมโออินอซิทอล เฮกซาฟอสเฟต ฟอสฟอไฮโดรเลส (myo-inositol hexaphosphate phosphohydrolase) เป็นกลุ่มของเอนไซม์เอสเทอร์เรสที่สามารถย่อยพันธะเอสเทอร์ของไฟเตท ให้ปลดปล่อย P ออกจากโมเลกุลของไฟเตททีละอะตอมเกิดเป็นโมเลกุลตัวกลาง (intermediary product) ชื่อว่า อินอซิทอล เพนตะฟอสเฟต (inositol pentaphosphate; IP-5) ที่มีกลุ่มฟอสเฟต 5 กลุ่มจับอยู่กับอินอซิทอล และจะถูกย่อยเป็นลำดับต่อไปได้เป็นอินอซิทอลเตตระฟอสเฟต (inositol tetraphosphate; IP-4) → IP-3 → IP-2 → IP-1 และลำดับสุดท้ายได้เป็น อินอซิทอลอิสระ (free inositol) 1 โมเลกุล พร้อมกับ P_i จำพวกออร์โทฟอสเฟต (orthophosphate) สลายตัวออกมา 6 โมเลกุล เอนไซม์ไฟเตสที่พบมี 2 รูป คือ 3-ไฟเตส และ 6-ไฟเตส โดยจะเข้าสลายพันธะเอสเทอร์ของ P ที่ C ตำแหน่งที่ 3 และ 6 ตามลำดับ สมการเร่งปฏิกิริยาของไฟเตสทั้ง 2 รูป (Reddy *et al.*,1989) แสดงดังนี้

$$\text{myoinositol 1,2,3,4,5,6 hexakisphosphate} + H_2 \xrightarrow{\text{3 – ไฟเตส}} \text{myoinositol 1,2,4,5,6 pentakisphosphate} + \text{orthophosphate}$$

$$\text{myoinositol 1,2,3,4,5,6 hexakisphosphate} + H_2O \xrightarrow{\text{6 – ไฟเตส}} \text{myoinositol 1,2,3,4,5 pentakisphosphate} + \text{orthophosphate}$$

ในเมล็ดธัญพืช และผลพลอยได้จากการแปรรูปเมล็ดพืช จำพวกรำ มักมี 6-ไฟเตส ส่วนในจุลินทรีย์ทั้งเชื้อรา และยีสต์ที่พบในกระเพาะรูเมนและในดิน สามารถผลิต 3-ไฟเตสได้ดี

เอนไซม์ไฟเตสจากพืช

โดยปกติทั่วไปในพืชหลายชนิดจะมีเอนไซม์ไฟเตสตามธรรมชาติอยู่แล้ว ซึ่งจะพบในรูป 6-ไฟเตส (EC 3.1.3.26) ที่ทำการย่อยพันธะเอสเทอร์ของไฟเตทที่ C ตำแหน่งที่ 6 ปริมาณไฟเตสในพืชและผลพลอยได้จากการแปรรูป (by product) แต่ละชนิดจะแตกต่างกัน เช่น ข้าวสาลี พบว่ามีปริมาณไฟเตสค่อนข้างสูง (1193 หน่วย/กก.) โดยในส่วนของรำจะยิ่งมีปริมาณสูงขึ้นถึง 2987 หน่วย/กก. ผลพลอยได้ที่เหลือจากการกลั่นเหล้า (distrillers grain) และการหมักเบียร์ (malt sprouts) จะมีไฟเตสสูงปานกลาง สำหรับวัตถุดิบอื่นๆ บางชนิดมีน้อยมาก หรือไม่มีเลย เช่น ข้าว

โพด ข้าวฟ่าง พืชหัว และกากเมล็ดพืชสกัดน้ำมันจำพวกกากถั่วเหลือง กากถั่วลิสงและกากเรปซีด ดังแสดงในตารางที่ 13 (Eeckhout and De Paepe, 1994)

ตารางที่ 13 ปริมาณเอนไซม์ไฟเตส (phytase) ที่มีในวัตถุดิบอาหารสัตว์บางชนิด

ชนิดวัตถุดิบ	Phytase (unit /กก.)[1/]
ธัญพืช	
ข้าวสาลี	1193 (915-1581)
ข้าวบาร์เลย์	582 (408-882)
ข้าวโพด	15 (0-46)
ข้าวฟ่าง	24 (0-76)
รำข้าวสาลี	2957 (1180-5208)
รำข้าวเจ้า	122 (108-135)
กากเมล็ดพืชสกัดน้ำมัน	
กากถั่วเหลือง	8 (0-20)
กากถั่วลิสง	3 (0-3)
กากเรปซีด	16 (0-36)
กากทานตะวัน	62 (0-185)
อื่นๆ	
หัวมันสำปะหลัง	6 (0-40)
หัวมันเทศ	26 (0-73)
เยื่อหุ้มเมล็ดถั่วเหลือง	99 (0-150)
กากเหล้า	385 (141-850)
กากเบียร์	877 (605-1174)

[1/] 1 unit = ปริมาณ phytase ที่สามารถย่อย 0.0015 M Na-phytate ได้ในอัตรา 1 µM /นาที ที่ pH 5.5 และ 37°ซ

ที่มา: ดัดแปลงจาก Eeckhout and De Paepe (1994)

Temperton *et al.* (1965; a,b) รายงานว่า การใช้ข้าวสาลี 32-36% และข้าวบาร์เลย์ 10% ผสมในอาหาร ทำให้ไก่สามารถใช้ประโยชน์จากไฟเตทฟอสฟอรัสได้ดีขึ้น โดยไม่ต้องมีการเสริม P_i จากแหล่งอื่น ซึ่งขัดแย้งกับรายงานของ Nelson (1976) ที่พบว่า ไก่เนื้ออายุ 9 สัปดาห์ และไก่ไข่ที่ใช้ข้าวสาลีทดแทนข้าวโพดในสูตรอาหาร 50% (27% ของสูตรอาหาร) มีการใช้

ประโยชน์จากไฟเตทได้เพียง 13% เท่านั้น ทั้งนี้อาจเนื่องจากประสิทธิภาพในการทำงานของเอนไซม์ไฟเตสมีความผันแปรมาก โดยขึ้นอยู่กับสายพันธุ์ อายุ และวิธีการเก็บรักษาพืชนั้น ๆ จึงไม่สะดวกในการนำไปประยุกต์ใช้จริงในทางปฏิบัติ

นอกจากนี้ เอนไซม์ไฟเตสจากพืชยังมีข้อจำกัดหลายประการ คือ สามารถทำงานได้ในช่วง pH ประมาณ 4.5-6.5 (ตารางที่ 14) ซึ่งแคบกว่าไฟเตสจากจุลินทรีย์ที่สามารถทำงานได้ในช่วง pH ประมาณ 2-6.5 การที่ไฟเตสจากพืชไม่สามารถทำงานได้ในช่วง pH ต่ำๆ ทำให้การย่อยได้ไม่ค่อยมีประสิทธิภาพ เพราะตำแหน่งการย่อย P ส่วนใหญ่เกิดในกระเพาะอาหาร ซึ่งมี pH ต่ำ (ประมาณ 2.5) อุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการทำงานของไฟเตส คือ ประมาณ 45-60°ซ ถ้าอุณหภูมิสูงกว่า 60°ซ ประสิทธิภาพการย่อยของไฟเตสจะลดลงอย่างรวดเร็ว และจะไม่สามารถทำงานได้เลยเมื่ออุณหภูมิสูงเท่ากับและ/หรือสูงกว่า 90°ซ (Sutardi and Buckle, 1986, Sigh and Sedeh, 1979 และ Nagai and Funahashi, 1962; อ้างโดย Reddy *et al.*, 1989)

ตารางที่ 14 อุณหภูมิและสภาพความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่เหมาะสมของเอนไซม์ไฟเตสจากพืช

แหล่งของไฟเตส	อุณหภูมิ ที่เหมาะสม (°ซ)	สภาพ pH ที่เหมาะสม
ลูกผสมข้าวสาลี x ข้าวไรย์ (triticale)	45	5.4
ข้าวโพด (maize)	50	5.6
แป้งข้าวสาลี (wheat flour)	55	5.15
รำข้าวสาลี (wheat bran)	-	5.0
เยื่อหุ้มเมล็ดข้าว (rice aleurone particles)	45	4.0-5.0
ถั่วเนวี (navy bean)	50	5.3
ถั่วแคลิฟอร์เนีย (california small white bean)	60	5.2
ถั่วแคระฝรั่งเศส (dwarf french bean)	40	5.2
ถั่วเขียวงอก (mung bean germination)	57	7.5
ถั่วฟาบางอก (faba bean germination)	50	5.0
ถั่วเหลือง (soybean)	60	4.8

ที่มา: ดัดแปลงจาก Reddy *et al.* (1989)

สารที่เร่งและยังยั้งการทำงานของเอนไซม์ไฟเตสในพืช แสดงในตารางที่ 15 ธาตุอาหารประจุบวกสอง เช่น Ca^{2+} , Mg^{2+}, Co^{2+} และ Fe^{2+} ทำหน้าที่เป็นตัวเร่งการทำงานของไฟเตส ขณะที่ฟลูโอไรด์ (F^-) เป็นตัวยับยั้งการทำงานของไฟเตสจากพืช (Reddy *et al.*, 1989) เช่นเดียวกับ Scheuermann *et al.* (1988) และ Dvoř and Volfová (1996) ที่รายงานว่า เอนไซม์ไฟเตสจะถูกเร่งการทำงานได้ด้วยธาตุ Ca^{2+} , Mg^{2+} และ Mn^{2+} และสามารถถูกยับยั้งการทำงานได้ด้วย F^-, HCN^-, Cu^{2+}, Zn^{2+}, Hg^{2+}, Sn^{2+}, Fe^{2+} และ Cd^{2+}

ตารางที่ 15 สารตัวเร่งและยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ไฟเตสจากพืช

แหล่งของไฟเตส	ตัวเร่ง	ตัวยับยั้ง
ถั่วเนวี (navy bean)	Co^{2+}	
ลูกผสมข้าวสาลี x ข้าวไรย์ (triticale)		Fe^{2+}, Fe^{3+}, Cu^{2+}, *p*-chloromercuri benzoate, Ni^{2+}, Co^{2+}, Ag^+
เนื้อเยื่อสะสมอาหารของข้าวโพด (corn endosperm scutellar tissue)	Ca^{2+}	F^-
ข้าวสาลีบด (wheat meal)	Mg^{2+}, Ca^{2+}, NaN_3	F^-,CN^-d, Zn^{2+}, Mn^{2+}, yeast extract
รำข้าวสาลี (wheat bran)	Mg^{2+}, Ca^{2-}	F^-, Hg^+, Ag^+
รำข้าวสาลี ส่วนที่ 1 (wheat bran fraction F1)	Lysolecithin	
ถั่วแคระฝรั่งเศส (dwarf french bean)		F, *p*-chloromercuribenzoate
ถั่วเหลือง (soybean)	Fe^{2+}	Zn^{2+}, Cu^{2+}, Hg^+, *N*–ethylmalei mide, iodoacetamide, L-cyseine ,L-ascorbic acid, 2-mercatoetha nal, citrate, oxalate,EDTA, tartrate
ถั่วฟาบา (faba bean)		Zn^{2+}, Cu^{2+}, Fe^{2+}, Mg^{2+}, Co^{2+}, Ca^{2+}

ที่มา: ดัดแปลงจาก Reddy *et al.* (1989)

เอนไซม์ไฟเตสจากจุลินทรีย์

เอนไซม์ไฟเตสที่ผลิตจากจุลินทรีย์ จะพบอยู่ในรูปของเอนไซม์ 3-ไฟเตส (EC 3.1.3.8) มีชื่อทางเคมีว่า myo-inositol hexakisphosphate 3 – phosphohydrolase โดยจะเริ่มย่อยพันธะเอสเทอร์ระหว่างกรดฟอสฟอริคกับอินอซิทอล จาก C ตำแหน่งที่ 3 จุลินทรีย์ที่สามารถผลิตไฟเตส ได้แก่ เชื้อรา (*Saccharomyces cerevisiae* และบางชนิดในสกุล *Aspergillus*) เชื้อแบคทีเรีย (*Pseudomonas* และ *Bacillus subtilus*) ยีสต์และจุลินทรีย์ในกระเพาะรูเมนและในดิน โดยเฉพาะอย่างยิ่งเชื้อราที่เคลื่อนที่ด้วยฟิลาเมนท์ (filamentous fungi) สกุล *Aspergillus* (*A. ficuum* และ *A. niger*) สามารถผลิตไฟเตสได้ดี Sebastian *et al.* (1998) พบว่า เอนไซม์ไฟเตสที่ผลิตจาก *A. niger* มีประสิทธิภาพการทำงานได้ดีกว่าเชื้อราชนิดอื่นๆ ขณะที่ไฟเตสที่ผลิตจาก *A. ficuum* มีความเข้มข้นของไฟเตสสูงมาก Matsui *et al.* (1996) ใช้ *A. usami* หมักกากถั่วเหลืองเป็นเวลา 48 ชั่วโมง พบว่า ไก่มีการเจริญเติบโตได้ดีเทียบเท่ากับกลุ่มควบคุม และมีการใช้ประโยชน์ได้ของ P ดีขึ้น โดยไม่ต้องมีการเสริม P จากแหล่งอื่น อย่างไรก็ดี ไฟเตสที่ผลิตจาก *A. ficuum* สามารถทนต่ออุณหภูมิสูงได้ดี แม้จะผ่านกระบวนการผลิตที่ความร้อน 68°ซ เป็นเวลา 10 นาที เอนไซม์ก็ยังคงมีประสิทธิภาพการทำงาน 40% (Sebastian *et al.*,1998)

ในเชิงการค้า มีการใช้เทคนิค recombinant DNA ช่วยในการผลิตเอนไซม์ไฟเตสในระบบอุตสาหกรรม โดยอาศัยกระบวนการหมักของเชื้อรา *A. niger* เช่น ผลิตภัณฑ์ Natuphos® ของบริษัท BASF ที่ผลิตโดยการตัดต่อยีนจาก *A.ficuum* ไปใส่ใน *A. niger* (Zhang *et al.*, 2000) หรือ Finase® และ Allzyme phytase® ที่ผลิตจากการหมัก *A. niger* ล่าสุดมีการตัดต่อยีนของ *A. niger* หรือ *A. ficuum* ไปใส่ในยีนของพืช เช่น เมล็ดถั่วเหลือง หรือ เมล็ดคาโนลา มีชื่อว่า transformed soybean seeds หรือ Phytaseed® Zhang *et al.* (2000) พบว่า การปรับปรุงยีนของพืชด้วยยีนของจุลินทรีย์ที่สร้างไฟเตส มีข้อดี คือ 1) การตัดต่อยีนจากจุลินทรีย์ไปปลูกถ่ายในพืชสามารถทำได้ง่ายและให้ผลดี พืชที่รับการถ่ายยีนได้แก่ คาโนลา และยาสูบ เป็นต้น 2) พืชสามารถใช้พลังงานจากแสงอาทิตย์สร้างและสะสมไฟเตสได้ปริมาณมาก และ 3) ไฟเตสที่ได้ในพืชจะไม่ปนเปื้อนด้วยเชื้อโรคต่างๆ ของสัตว์ จากการทดลองใช้ Phytaseed® ในอาหารไก่เนื้อที่มี tP 0.46%, NPP 0.21% และ Ca 0.92% เปรียบเทียบกับ Natuphos® ที่ระดับการเสริม 250, 500 และ 2,500 หน่วย/กก.อาหาร พบว่า การเสริมไฟเตสจากทั้งสองแหล่ง มีผลให้สมรรถภาพการผลิตดีขึ้นใกล้เคียงกัน ($P>0.05$) การขับออกของ P จะลดลงตามระดับของไฟเตสที่เพิ่มขึ้น สอดคล้องกับรายงานของ Ledoux *et al.* (1998) และ Zhang *et al.* (1998) ที่ศึกษาการใช้ Phytaseed® เปรียบเทียบกับ Natuphos® ในอาหารไก่งวง และสุกร ตามลำดับ

การผลิตเอนไซม์ไฟเตสจากยีสต์ Cromwell and Stahly (1978) และ Chapple *et al.* (1979) รายงานว่า เอนไซม์ไฟเตสที่ผลิตจากยีสต์ไม่สามารถช่วยให้สุกรใช้ประโยชน์จากไฟเตทฟอสฟอรัสได้ Lei *et al.* (1993) พบว่า การเพาะเลี้ยงยีสต์เพื่อสกัดไฟเตส ให้ปริมาณของไฟเตสไม่มากพอที่สุกรจะนำไปใช้ประโยชน์ได้ แม้ว่าไฟเตสจากยีสต์จะมีการทำงานได้ดีที่ pH 4-4.5 ซึ่งใกล้เคียงกับ pH ในกระเพาะอาหารของสุกร (ประมาณ 3.8-4.0) Matsui *et al.* (2000) ได้ใช้เทคนิคชีวภาพ (recombinant) ผลิตไฟเตสจากยีสต์ *Schwanniomyces occidentallis* และทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของไฟเตสทั้งจากยีสต์ หรือ *A.niger* ในสารละลายเปปซิน พบว่า แหล่งของไฟเตส ระยะเวลาการทำงาน และ pH ของสารละลายมีผลต่อการทำงานของไฟเตส ($P<0.001$) โดยไฟเตสจากยีสต์มีการทำงานได้ต่ำกว่า ($P<0.05$) ไฟเตสจาก *A. niger* ในทุกช่วงเวลาที่ pH 3 หรือ 4 (ตารางที่ 16) ส่วนที่ pH 2 ไม่พบการทำงานของเอนไซม์ไฟเตสทั้งสองแหล่งหลังระยะเวลา 30 นาที

ตารางที่ 16 ประสิทธิภาพการทำงานของไฟเตสจากยีสต์และ *A. niger* ในสารละลายเปปซิน

pH	ระยะเวลา (นาที)				
	0	30	60	90	120
	ไฟเตสจากยีสต์ (PU)[1/]				
3	0.400	0.234[ก]	0.163[ก]	0.132[ก]	0.099[ง]
4	0.400	0.360[ข]	0.327[ข]	0.310[ข]	0.255[ก]
	ไฟเตสจาก *A. niger* (PU)				
3	0.400	0.372[กข]	0.358[ก]	0.337[ข]	0.290[ข]
4	0.400	0.400[ก]	0.388[ก]	0.379[ก]	0.357[ก]

[ก-ง] ตัวเลขในแถวตั้งเดียวกันที่ตัวอักษรกำกับต่างกัน แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.05$)

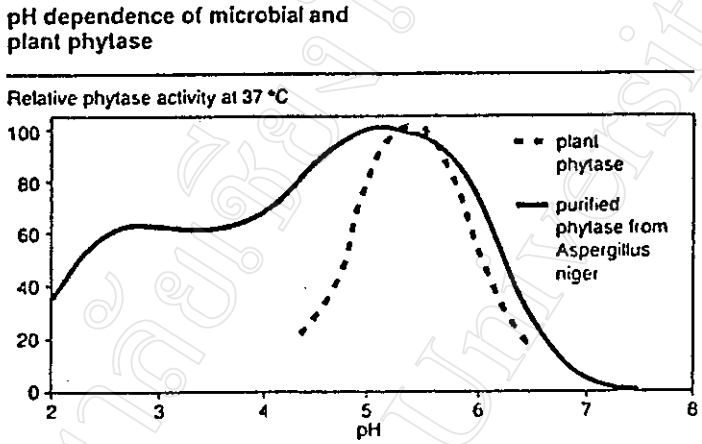
[1/] ประสิทธิภาพการทำงานของไฟเตสวัดที่ pH 5

ที่มา: Matsui *et al.* (2000)

สภาพที่เหมาะสมกับการทำงานของไฟเตส

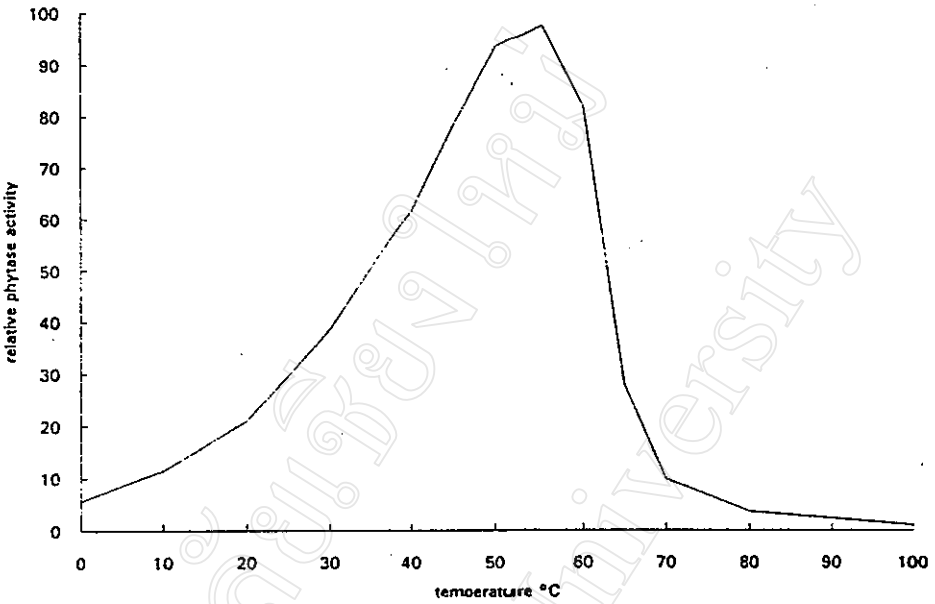
1. pH ไฟเตสที่ผลิตจากจุลินทรีย์มีข้อได้เปรียบ คือ สามารถทำงานได้ในช่วง pH ที่กว้างกว่าไฟเตสจากพืช จากการทดสอบที่อุณหภูมิ 37°ซ ซึ่งใกล้เคียงกับอุณหภูมิของร่างกาย พบว่า pH ที่เหมาะสมสำหรับไฟเตสทั้งสองแหล่ง คือ 5.5 แต่การทำงานของไฟเตสจากพืชจะลดลงมากเมื่อ pH ต่ำกว่า 4 ส่วนไฟเตสจากจุลินทรีย์สามารถทำงานได้ดีที่ pH 2.5 ซึ่งเป็น pH ของกระเพาะ

อาหาร อย่างไรก็ดี พบว่า เมื่อ pH สูงเกิน 6.5 ไฟเตสทั้งสองแหล่งจะไม่ทำงาน (ภาพที่ 8) แต่มีรายงานว่า ที่ pH 7.2 และ 9 ไฟเตสจากพืชสามารถทำงานได้ (Scheuermann *et al.*, 1988) นอกจากนี้ Matsui *et al.* (2000) รายงานว่า ที่ pH 4.2 ไฟเตสจากเชื้อรา *A. niger* มีการทำงานได้ลดลง 55% ของประสิทธิภาพการทำงานเต็มที่ (ที่ pH 5.5)



ภาพที่ 8 การทำงานของไฟเตสจากพืชและจากจุลินทรีย์ที่ pH ต่างๆ กันที่อุณหภูมิ 37°ซ
ที่มา: บุญล้อม และสุชน (2540, ข)

2. อุณหภูมิ Sebastian *et al.* (1998) รายงานว่า ประสิทธิภาพการทำงานของไฟเตสจากพืชจะลดลงเมื่ออุณหภูมิสูงกว่า 60°ซ เช่น ในกระบวนการอัดเม็ด เป็นต้น สอดคล้องกับรายงานของ Reddy *et al.* (1989) ที่พบว่า ไฟเตสจากพืชจะทำงานได้ดีที่อุณหภูมิ 40-60°ซ แต่ที่อุณหภูมิสูงขึ้น (ประมาณ 70-80°ซ) ประสิทธิภาพการทำงานจะลดลง หรือไม่สามารถทำงานได้เลย บุญล้อมและสุชน (2540, ข) รายงานว่า ไฟเตสจากเชื้อรา *A. niger* จะมีการทำงานดีขึ้นเรื่อยๆ เมื่ออุณหภูมิเพิ่มจาก 25 เป็น 55°ซ หลังจากนั้นจะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ (ภาพที่ 9) BASF (2542) รายงานว่า ในกระบวนการอัดเม็ดอาหาร อุณหภูมิและระยะเวลาที่ใช้มีผลต่อการสูญเสียประสิทธิภาพของเอนไซม์ไฟเตส คือ อุณหภูมิที่ใช้อัดเม็ด 65, 70 และ 75°ซ มีเปอร์เซนต์การสูญเสียของไฟเตส 0-10, 10-20 และ 15-35% ตามลำดับ ดังนั้น การใช้เอนไซม์ไฟเตสผสมลงในอาหาร จึงควรคำนึงถึงเรื่องของอุณหภูมิด้วย ถ้าอาหารต้องผ่านกระบวนการแปรรูปที่ใช้ความร้อนเกิน 75°ซ เช่น การอัดเม็ด เอกซ์แพนชั่น (expansion) หรือเอกซ์ทรูชัน (extrusion) ควรเสริมเอนไซม์ไฟเตสในรูปของเหลวฉีดพ่นไปบนอาหารหลังจากแปรรูปแล้ว ทั้งนี้เพื่อป้องกันไม่ให้ไฟเตสถูกทำลายด้วยความร้อน



ภาพที่ 9 การทำงานของไฟเตสจาก *A. niger* ที่อุณหภูมิต่าง ๆ กัน
ที่มา: Engelen *et al.* (1994)

3. ความชื้น จากการศึกษาของ Hoppe (1992) พบว่า เอนไซม์ไฟเตสสามารถทำงานได้ เมื่อมีความชื้นอย่างน้อย 25% ซึ่งการย่อยในทางเดินอาหารมีความชื้นสูงกว่านี้ Simons *et al.* (1990) ศึกษาการทำงานของเอนไซม์ไฟเตสในสภาพที่มีอุณหภูมิ 40°ซ pH 5.5 และมีน้ำ 80-97% พบว่า ไฟเตทฟอสฟอรัสถูกย่อยได้เกือบหมด (71-98%) ภายในเวลา 1-2 ชั่วโมง การบดเมล็ดพืชให้ละเอียด (0.5 มม.) จะทำให้เอนไซม์สามารถย่อยได้ดีกว่าการบดหยาบ (1-2 มม.)

ปัจจัยอื่นที่มีผลต่อการทำงานของไฟเตส ได้แก่ ระยะเวลาที่เอนไซม์สัมผัสกับอาหาร สารยับยั้งหรือสารกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ ตลอดจนระดับของ Ca ในอาหารด้วย Scheuermann *et al.* (1988) พบว่า Ca ทำหน้าที่เป็นทั้งตัวเร่งและตัวยับยั้งการทำงานของไฟเตส การมี Ca ระดับสูงกว่า 7 ก./กก.อาหาร ที่ pH 6 จะเกิดการจับตัวเป็นแคลเซียมไฟเตท ซึ่งจะตกตะกอนทำให้ย่อยไม่ได้ Kornegay and Yi (1996) แนะนำว่า อาหารไก่เนื้อและไก่งวงไม่ควรมีอัตราส่วนของ Ca : P เกิน 1.4 : 1 มิฉะนั้นจะทำให้การทำงานของไฟเตสมีประสิทธิภาพลดลง ดังนั้นจึงต้องคำนึงถึงระดับของ Ca และ P ตลอดจนสัดส่วนของ Ca : P ที่เสริมลงในอาหาร

นอกจากนี้ ตำแหน่งของทางเดินอาหารที่ย่อยและดูดซึม P ก็มีผลต่อการทำงานของไฟเตสด้วย Schulz and Oslage (1972; อ้างโดย บุญล้อมและสุชน, 2540 ข) รายงานว่า การย่อยไฟเตทส่วนใหญ่เกิดที่กระเพาะอาหาร และอาหารจะอยู่ในกระเพาะอาหารนาน โดยมีครึ่งชีวิต (half-life) ประมาณ 1 ชั่วโมง และไปถูกดูดซึม P ที่ลำไส้เล็ก ส่วนในลำไส้ใหญ่จะมีการย่อยไฟเตทด้วยน้ำย่อยของจุลินทรีย์ แต่สัตว์นำ P ที่ถูกย่อยไปใช้ประโยชน์ไม่ได้ เพราะเลยตำแหน่งของการดูดซึมไปแล้ว ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Yi and Kornegay (1996) ที่พบว่า เอนไซม์ไฟเตส (1,050 หน่วย/กก.) สามารถทำงานได้ 40-50% ที่กระเพาะอาหารของสุกรขุน ทั้งที่มีการเสริมและไม่เสริมกรดอินทรีย์ (citric acid) และทำงานได้ 16-30% ที่ลำไส้เล็กส่วนต้น ส่วนในลำไส้เล็กตอนปลายมีการทำงานของไฟเตสน้อยมาก Liebert *et al.* (1993; อ้างโดย Yi and Kornegay, 1996) ศึกษาตำแหน่งการทำงานของไฟเตสในทางเดินอาหารของไก่อายุ 3-5 สัปดาห์ พบว่า 25-50% ของไฟเตสจะทำงานในกระเพาะพัก (crop) และ 10-25% จะทำงานในกระเพาะแท้ (proventriculus) โดยไม่พบการทำงานของไฟเตสในลำไส้เล็กเลย Liu *et al.* (2000) ศึกษาการเสริมไฟเตส 500 หน่วย/กก. ในอาหารสุกรที่มีอัตราส่วน Ca : tP 1.5:1, 1.3:1 และ 1.0:1 ปรากฏว่า การเสริมไฟเตสในอาหารที่มีสัดส่วนของ Ca : P ต่ำ (1.0:1) มีการดูดซึม P และ Ca ในลำไส้เล็กเพิ่มขึ้นใกล้เคียงกับกลุ่มที่มีอัตราส่วนของ Ca : P เท่ากับ 1.5:1 โดยเฉลี่ยมีการดูดซึม P มากที่สุดที่ไส้ติ่ง (cecum) ส่วน Ca มีการดูดซึมมากที่สุดที่ลำไส้ใหญ่ (colon)

การใช้เอนไซม์ไฟเตสเสริมในอาหารไก่เนื้อ

สัตว์กระเพาะเดี่ยวใช้ประโยชน์จากไฟเตทได้น้อยมาก หรือใช้ไม่ได้เลย Nelson (1976) ศึกษาการย่อยได้ของไฟเตทในไก่เนื้อที่อายุ 4 และ 9 สัปดาห์ และในไก่ไข่ ที่ใช้ข้าวโพด และกากถั่วเหลืองเป็นวัตถุดิบหลักในสูตรอาหาร พบว่าไก่มีการย่อยได้เท่ากับ 0, 3 และ 8% ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากไก่ไม่มีเอนไซม์ไฟเตสที่จะย่อยสลายพันธะเอสเทอร์ หรืออาจมีน้อยมาก โดยเฉพาะในไก่อายุน้อย ไฟเตทฟอสฟอรัสที่ย่อยไม่ได้จึงถูกขับออกทางมูลเป็นผลให้เกิดมลภาวะกับสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ดีเมื่อใช้ข้าวสาลีซึ่งมีเอนไซม์ไฟเตสตามธรรมชาติอยู่ปริมาณมาก เมื่อใช้ทดแทนข้าวโพดในสูตรอาหารระดับ 50% (หรือเทียบเท่ากับใช้ข้าวสาลี 27% ของสูตรอาหาร) มีผลทำให้ไก่ใช้ประโยชน์ไฟเตทได้ดีขึ้น กล่าวคือ มีการย่อยได้เท่ากับ 8, 13 และ 13% ตามลำดับ

Simons *et al.* (1990) ให้อาหารที่มี tP ระดับต่ำ (0.45%) ปรากฏว่าไก่จะมีการเจริญเติบโตลดลง (ตารางที่ 17) การเพิ่ม tP จากระดับ 0.45 เป็น 0.60 และ 0.75% แม้ว่าจะทำให้การเจริญเติบโตของไก่ดีขึ้น แต่ก็มีการขับ P ออกมาในมูลเพิ่มขึ้นด้วย แสดงว่ามีการใช้ประโยชน์ได้

ของ P ลดลง เมื่อเสริมไฟเตสที่ระดับ 375, 750, 1,500 และ 2,000 U/กก. ในอาหารที่มี tP ระดับต่ำ (0.45%) ไก่มีอัตราการเจริญเติบโต และใช้ P ได้ดีขึ้น โดยจะลดการขับออกของ P ในมูลได้ 20-60%

Edwards (1992) ศึกษาเรื่องการขับถ่าย P ของไก่เนื้อในอาหารที่มี P ระดับ 0.75% ในระยะ 3 สัปดาห์แรก และ 0.65% ในระยะ 3 สัปดาห์ท้ายของการทดลอง พบว่า ไก่อายุ 1-3 และ 4-6 สัปดาห์ มีการขับ P ออกมาในมูล 79.2 และ 82.1% ของปริมาณ P ที่กินเข้าไป ตามลำดับ โดยเฉลี่ยตลอดการทดลอง (6 สัปดาห์) ไก่สามารถขับ P ได้ 81.2%

ตารางที่ 17 ผลการเสริมไฟเตสต่อสมรรถภาพการผลิต การใช้ประโยชน์ได้และการขับออกของ P

ปริมาณในอาหาร		การใช้ประโยชน์ของ P	การขับออก P (g/kg DM diet)	น้ำหนักตัวเพิ่ม (g)	อัตราแลกน้ำหนัก
tP (%)	Phytase (unit/kg)				
4.5	-	51.6	2.5	788	1.59
6.0	-	46.2	3.8	1066	1.58
7.5	-	41.4	5.0	1081	1.59
4.5	375	60.0	2.1	1101	1.57
4.5	750	61.7	2.0	1087	1.58
4.5	1,500	62.3	2.0	1139	1.54
4.5	2,000	62.6	2.0	1125	1.56

ที่มา: Simons *et al.* (1990)

Schoner and Hoppe (1992) ศึกษาผลการเสริมไฟเตสระดับ 500 หน่วย/กก.อาหาร ที่มีการลดระดับของ Ca ในอาหารจาก 0.9 เหลือ 0.6% และลดระดับ P จาก 0.65 เหลือ 0.55 และ 0.50% ตามลำดับ ปรากฏว่า การลดระดับ P จาก 0.65 เป็น 0.55% และเสริมเอนไซม์ไฟเตส ไก่มีการใช้ประโยชน์ได้ของ P ดีขึ้นจาก 47 เป็น 55-58% ขณะที่การลดระดับ P ลงเหลือ 0.50% และเสริมด้วยไฟเตส ไก่มีน้ำหนักตัวลดลง แต่กลับมีการใช้ประโยชน์ได้ของ P สูงถึง 62% ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับกลุ่มที่มี P ระดับสูง ในขณะที่การลดระดับ Ca จาก 0.9 เหลือ 0.6% ไม่มีผลเสียต่อน้ำหนักตัวและการใช้ประโยชน์ได้ของ P

Perney *et al.* (1993) ศึกษาผลการเสริมไฟเตสในอาหารที่มี aP ระดับต่างๆ โดยใช้ P ในรูปของไดแคลเซียมฟอสเฟต (dicalcium phosphate : DCP) การทดลองที่ 1 ให้ aP ระดับ 0.21,

0.29, 0.37 และ 0.44% โดยที่ระดับ 0.21% ทำการเสริมไฟเตส 0.05, 0.10 และ 0.30% (หรือเทียบเท่ากับ 25, 50 และ 150 หน่วย/กก.อาหาร ตามลำดับ) และที่ aP ระดับ 0.29% ทำการเสริมไฟเตสระดับ 0.10% พบว่า การเพิ่มระดับ aP โดยไม่เสริมไฟเตสจะทำให้ปริมาณอาหารที่กิน น้ำหนักตัว อัตราแลกน้ำหนัก ปริมาณ P ในพลาสมา เถ้ากระดูกแข้งและนิ้วเท้า และความยาวกระดูกแข้งเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับ aP ระดับต่ำ ขณะที่การเสริมไฟเตสทำให้มีปริมาณ P ในพลาสมาเพิ่มขึ้น ส่วนการทดลองที่ 2 กำหนดให้สูตรอาหารมี aP ระดับ 0.32, 0.38 และ 0.44% และเสริมไฟเตสที่ 0.5, 1.0 และ 1.5% (หรือเทียบเท่ากับ 250, 500 และ 750 หน่วย/กก.อาหาร ตามลำดับ) ผลปรากฏว่า ไก่มีน้ำหนักตัว และปริมาณอาหารที่กินเพิ่มขึ้นตามระดับ aP ที่เพิ่มขึ้นในสูตรอาหาร ขณะที่การเพิ่มระดับ aP และเสริมไฟเตส ทำให้ปริมาณเถ้ากระดูกและ P ในพลาสมา เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ การเสริมไฟเตสมีผลให้ความยาวกระดูกแข้งเพิ่มขึ้น แต่ทำให้การขับออกของ P มีปริมาณลดลง

Broz *et al.* (1994) ได้ศึกษาถึงผลการเสริมไฟเตสที่ระดับ 0, 125, 250 และ 500 PU/กก. ในสูตรอาหารไก่ที่มี CP 21%, ME 12.7 MJ/kg, Ca 0.93% และ tP 0.52% พบว่า การเสริมไฟเตสทำให้ไก่มีน้ำหนักตัว ปริมาณอาหารที่กิน ปริมาณ P ในพลาสมาและเถ้ากระดูกแข้งเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญตามระดับของการเสริมไฟเตส ส่วนอัตราแลกน้ำหนักมีแนวโน้มที่ดีขึ้น ขณะที่การสะสม Ca และ P ในเถ้ากระดูกไม่แตกต่างกัน

Denbow *et al.* (1995) ใช้ไก่เนื้อเพศผู้แรกเกิด 840 ตัว ศึกษาผลการเสริมไฟเตสที่มีต่อความสามารถในการใช้ประโยชน์ได้ของ P ในสูตรอาหารที่ใช้กากถั่วเหลืองเป็นวัตถุดิบหลัก เป็นเวลา 21 วัน โดยกำหนดให้มี aP ระดับ 0.20, 0.27 และ 0.34% และเสริมไฟเตส 0, 200, 400, 600, 800, 1,000 และ 1,200 หน่วย/กก.อาหาร ในทุกระดับของ aP พบว่า การเสริมไฟเตสมีผลทำให้น้ำหนักตัว ปริมาณอาหารที่กิน เปอร์เซนต์เถ้าและความยาวกระดูกแข้งเพิ่มขึ้น แต่ที่ aP ระดับต่ำมีการตอบสนองได้ดีกว่า ส่วนอัตราแลกน้ำหนักไม่มีความแตกต่างกัน

Kornegay and Yi (1996) รายงานว่าระดับไฟเตสที่เสริมในอาหารไก่เนื้อที่เพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการเจริญเติบโต และเปอร์เซนต์เถ้ากระดูกแข้งสูงขึ้น ในขณะที่การขับออกของ P ลดลง โดยเฉพาะที่ระดับการเสริม 500-700 FTU/กก.อาหาร ซึ่งเป็นระดับที่ให้ผลดีที่สุด นอกจากนี้ยังมีรายงานของ Sebastian *et al.* (1996) ศึกษาในไก่เนื้ออายุ 1-21 วัน โดยใช้อาหารที่มี tP 2 ระดับ คือ 0.7 และ 0.5% โดยที่ระดับ 0.5% tP มีการเสริมเอนไซม์ไฟเตส 600 FTU/กก.อาหาร Qian *et al.* (1996) ใช้อาหารที่มี aP ระดับ 0.2-0.34% และเสริมไฟเตสที่ระดับ 400-800 FTU/กก.อาหาร และ Jan and Lee (1996) เสริมไฟเตสระดับ 800 IU/กก.อาหาร ในอาหารที่มี aP ระดับต่ำ

(0.33%) จากรายงานทั้งสามแหล่งพบว่า การเสริมไฟเตสในอาหารที่มี aP ระดับต่ำ มีผลช่วยให้ไก่มีการเจริญเติบโต และการใช้ประโยชน์ได้ของ P ดีขึ้น เช่นเดียวกับรายงานของ Kwon *et al.* (1995) ที่เสริมไฟเตส 500 FTU/กก.อาหาร ในอาหารที่มี aP ระดับ 60 และ 80% ของ NRC (1994) เทียบกับ P ระดับปกติ (100% NRC) พบว่าไก่กลุ่มที่ได้รับ P ระดับต่ำ (60% NRC) และเสริมไฟเตสมีน้ำหนักตัว และปริมาณอาหารที่กินได้เพิ่มขึ้น ใกล้เคียงกับกลุ่มที่ได้รับ P ระดับปกติ รวมทั้งมีการขับถ่าย P ลดลงถึง 25%

การเสริมเอนไซม์ไฟเตสในไก่ไข่

ในสูตรอาหารไก่ไข่จะมีส่วนของปริมาณ Ca ที่ค่อนข้างสูง สำหรับการใช้ในการสร้างเปลือกไข่ Singen *et al.* (1962) ได้ศึกษาระดับของ P ต่อผลผลิตไข่ โดยการเพิ่มระดับ P ทีละ 0.1% จากระดับ 0.2 ถึง 0.7% พบว่า ที่ระดับ tP 0.5% (0.48% aP) ไก่สามารถให้ผลผลิตไข่ได้สูงที่สุด ส่วนที่ระดับ 0.4, 0.5 และ 0.6% ไม่มีความแตกต่างกัน แต่ผลผลิตไข่จะลดต่ำลงอย่างมีนัยสำคัญที่ tP ระดับ 0.65% El Boushy (1979) ทดลองเลี้ยงไก่ไข่ด้วยอาหารที่มีระดับ aP 0.16, 0.20, 0.40, 0.60, 0.80 และ 1.00% ส่วนระดับ Ca เท่ากับ 3.7% เท่ากันทุกกลุ่ม พบว่า ในกลุ่มควบคุมที่มี aP ระดับต่ำ 0.16% (0.36% tP) มีอัตราการไข่ต่ำที่สุด แต่ที่ระดับ 0.20 และ 0.40% มีอัตราการไข่สูงที่สุด (66.50 และ 66.55% ตามลำดับ) น้ำหนักไข่จะเพิ่มขึ้นตามระดับของ aP ที่เพิ่มสูงขึ้น ขณะที่เปลือกไข่กลับมีคุณภาพเลวลง (พิจารณาจากเปอร์เซนต์เปลือกไข่, ความหนาและค่าดัชนีของเปลือกไข่) โดยที่ระดับ aP 0.16% ไข่ที่ได้มีคุณภาพของเปลือกดีที่สุด ส่วนปริมาณอาหารที่กิน ค่าดัชนีของไข่ขาว (albumin) และไข่แดงไม่แตกต่างกัน ผลขัดแย้งกับ Roland (1986) และ Hossain and Bertechini (1998) ที่รายงานว่าความต้องการ P ของไก่ไข่ที่ให้ผลผลิตสูงเท่ากับ 0.3-0.4% tP และ 0.25% aP ตามลำดับ

Gordon and Roland (1997) ใช้ไก่สาวอายุ 21 สัปดาห์ พันธุ์ Hy-Line® W-36 จำนวน 1,600 ตัว ศึกษาผลการเสริมไฟเตส 300 U/กก.อาหาร ในสูตรอาหารที่มี NPP 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 และ 0.5% เป็นเวลา 17 สัปดาห์ ปรากฏว่า ไก่ไข่ได้รับ NPP 0.1% และไม่เสริมไฟเตส มีอัตราการไข่และปริมาณอาหารที่กินตลอดการทดลอง (17 สัปดาห์) ลดลง 8.1 และ 5.8% โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสัปดาห์ที่ 14 ลดลงถึง 29.6 และ 13.0% ตามลำดับ และเมื่อเสริมไฟเตสระดับ 300 U/กก. อาหาร ไก่มีผลผลิตไข่และปริมาณอาหารที่กินดีขึ้น (82.1% และ 82.4 ก.) ใกล้เคียงกับไก่ไข่ที่ได้รับ NPP 0.2-0.5% ทั้งที่เสริมและไม่เสริมไฟเตส

Keshavarz (1998, a b) ทดลองการลดระดับ CP จาก 16% เป็น 13 และ 10% ระดับ Ca จาก 3.8 เป็น 3.08 และ 2.5% และลดระดับ aP จาก 0.40% เหลือ 0.25, 0.20 และ 0.175% พบว่า การลดระดับของ CP และ Ca ต่ำกว่าปกติ ทำให้ผลผลิตไข่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.05$) คือเท่ากับ 93.4, 82.8, 52.8 และ 88.3, 84.5, 75.1% ตามลำดับ ส่วนการลดระดับ aP ไม่มีผลแตกต่างกันทั้งในด้านของผลผลิตไข่ น้ำหนักไข่ และประสิทธิภาพการใช้อาหาร (กก./น้ำหนักไข่ 1 โหล) แต่มีผลต่อการลดลงของน้ำหนักตัวอย่างมีนัยสำคัญ เช่นเดียวกับการลดระดับ CP และ Ca

Carlos and Edwards (1998) ศึกษาผลการเสริมไฟเตสที่ระดับ 600 FTU/กก.อาหาร ที่มีระดับของ Ca และ tP เท่ากับ 3.0 และ 0.33% เลี้ยงไก่ไข่สาว (อายุ 24 สัปดาห์) เปรียบเทียบกับไก่ไข่อายุ 56 สัปดาห์ พบว่า การเสริมไฟเตสในอาหารไก่ไข่ทั้ง 2 ช่วงอายุ ทำให้น้ำหนักตัวเพิ่ม ปริมาณ P ในพลาสมา ปริมาณเถ้าของกระดูกแข้งไก่ และการสะสมของไฟเตทฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นจากกลุ่มที่ไม่เสริมอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนน้ำหนักและค่าความถ่วงจำเพาะของไข่ไม่พบความแตกต่าง

Rao *et al.* (1999, a) รายงานว่าการลดระดับ NPP จาก 0.2 เป็น 0.15 และ 0.1% ทำให้ผลผลิตไข่ของไก่ไข่ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ (90.8, 87.3 และ 62.8%) การเสริมเอนไซม์ไฟเตสที่ระดับ 250 U/กก.อาหาร ทำให้ไก่มีอัตราการไข่ดีขึ้น โดยเฉพาะการเสริมในกลุ่มที่มีระดับ NPP ต่ำ (0.1%) ไก่มีเปอร์เซนต์การไข่ดีขึ้นใกล้เคียงกับกลุ่มที่ได้รับ NPP ระดับสูง (90.8, 94.4 และ 91.0% ตามลำดับ)

Boling *et al.* (2000, a) ศึกษาในไก่ไข่อายุ 20-70 สัปดาห์ ด้วยอาหารที่มี aP 0.1, 0.15, 0.2, 0.25 และ 0.45% โดยที่ aP ระดับต่ำ (0.1-0.2%) มีการเสริมไฟเตสระดับ 300 U/กก.อาหาร และศึกษาในไก่ไข่อายุ 70-76 สัปดาห์ ด้วยอาหารที่มี aP 0.45 และ 0.1% เสริมด้วยไฟเตส 300 U/กก.อาหาร ในอีกการทดลองหนึ่ง Boling *et al.* (2000, b) ใช้ข้าวโพดและกากถั่วเหลืองเป็นวัตถุดิบหลักในอาหาร ที่มีระดับของ aP, Ca และ CP 0.1, 3.8 และ 17% ตามลำดับ เสริมด้วยไฟเตส 5 ระดับ (0-300 U/กก.อาหาร) เลี้ยงไก่ไข่อายุ 20-70 สัปดาห์ เปรียบเทียบกับกลุ่มที่มี aP ระดับต่ำ (0.1%) เสริมด้วย MCP 0.05% และกลุ่มที่มี aP ระดับสูง (0.15 และ 0.45%) จากรายงานทั้งสองแหล่งพบว่า aP ระดับต่ำ (0.1%) ที่ไม่เสริมไฟเตส ทำให้ไก่ตั้งแต่อายุ 28 สัปดาห์ขึ้นไปมีสมรรถภาพการผลิตไข่และน้ำหนักตัวต่ำกว่ากลุ่มที่ได้รับ aP ระดับสูง ทั้งที่เสริมและไม่เสริมไฟเตสและ/หรือ MCP อย่างมีนัยสำคัญ ($P<0.05$) โดยการเสริมไฟเตสทำให้ไก่ไข่กลุ่มที่ได้รับ aP

ระดับต่ำ มีสมรรถภาพการผลิตดีขึ้นเทียบเท่ากับกลุ่มที่ได้รับ aP ระดับสูง ทั้งที่เสริมและไม่เสริมไฟเตส

นอกจากนี้ Scott *et al.* (1999), Um *et al.* (1999) และ Rao *et al.* (1999, b) รายงานว่า การลดระดับ NPP ลงเหลือ 0.15-0.25% ทั้งเสริมและไม่เสริมไฟเตสระดับ 0-500 U/กก.อาหาร ไม่มีผลต่อสมรรถภาพการผลิตของไก่ไข่ แต่ในทางตรงกันข้ามการเพิ่มระดับ NPP ให้สูงกว่า 0.35% มีผลทำให้ผลผลิตและคุณภาพไข่เลวลง แม้ว่าจะเสริมด้วยเอนไซม์ไฟเตสแล้วก็ตาม ทั้งนี้ ระดับของ NPP ที่เหมาะสมต่อการให้ผลผลิตและคุณภาพไข่ยังแปรผันตามอายุของไก่ไข่ด้วย Keshavarz (2000, a b) ศึกษาผลการเสริมไฟเตส 0 และ 300 U/กก.อาหาร ในอาหารไก่ไข่ที่มี NPP 6 ระดับ จาก 0.15-0.40% ในช่วงอายุ 30-42 และลดลงจากเดิม 0.05 หรือ 0.10 ในช่วงอายุ 42-54 และ 54-66 สัปดาห์ ตามลำดับ พบว่า ในไก่ไข่อายุ 30-42 สัปดาห์ การลดระดับ NPP ไม่มีผลต่อการให้ผลผลิตไข่ ส่วนในช่วงอายุ 42-54 และ 54-66 สัปดาห์ มีการเปลี่ยนแปลงของผลผลิต โดยระดับ NPP ที่ให้ผลผลิตไข่สูงคือ 0.2-0.3 และ 0.25-0.30% ตามลำดับ การเสริมเอนไซม์ไฟเตสในทุกระดับ NPP ทำให้ไก่มีผลผลิตไข่ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มที่ไม่เสริมเอนไซม์ โดยระดับ NPP ที่เหมาะสมต่อการให้ผลผลิตไข่เฉลี่ยตลอดการทดลอง (36 สัปดาห์) คือ 0.35, 0.30 และ 0.25% ในช่วงอายุ 30-42, 42-54 และ 54-66 สัปดาห์ ตามลำดับ ผลสอดคล้องกับ Roland (1986) ที่รายงานว่า ความต้องการ Ca ของไก่ไข่พันธุ์เล็กฮอร์น (Leghorns) จะเพิ่มขึ้นเมื่ออายุการให้ผลผลิตของไก่สูงขึ้น ตรงข้ามกับความต้องการของ P ที่มีลดลง (ตารางที่ 18) ไก่ไข่มักจะประสบปัญหาเปลือกไข่บาง นิ่ม ไม่แข็งตัวเมื่อมีอายุมาก หรือให้ผลผลิตสูง ซึ่งสามารถป้องกันได้โดยการเพิ่มระดับ Ca ในอาหารให้สูงถึง 4.75% ในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนท ($CaCO_3$) ตั้งแต่เป็นไก่สาว

ตารางที่ 18 ระดับความต้องการของ Ca และ P สำหรับไก่ไข่พันธุ์เล็กฮอร์นที่อายุต่างๆ

Ca	P (%)		อายุของการให้
(%)	tP	aP [1/]	ผลผลิต (สัปดาห์)
3.75	0.7	0.5	19 - 28
3.75	0.7	0.5	29 - 36
4.00	0.6	0.4	37 - 52
4.25	0.5	0.3	53 - .....

[1/] ระดับของ aP คำนวณจาก 1 ใน 3 ของ tP ในธัญพืช

ที่มา: Roland (1986)