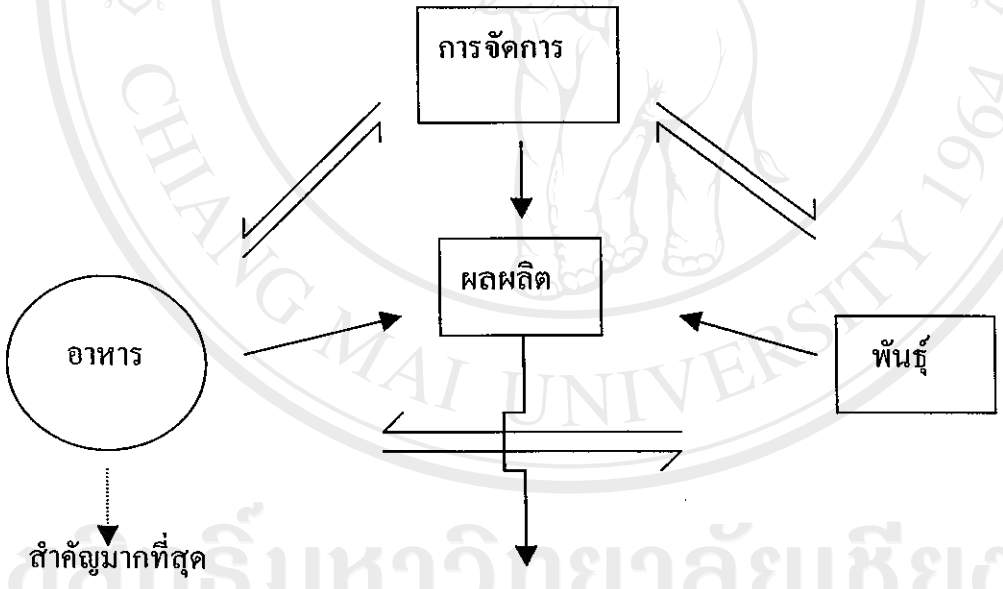
บทที่ 2

การตรวจเอกสาร

2.1 รูปแบบและโครงสร้างการผลิตสัตว์

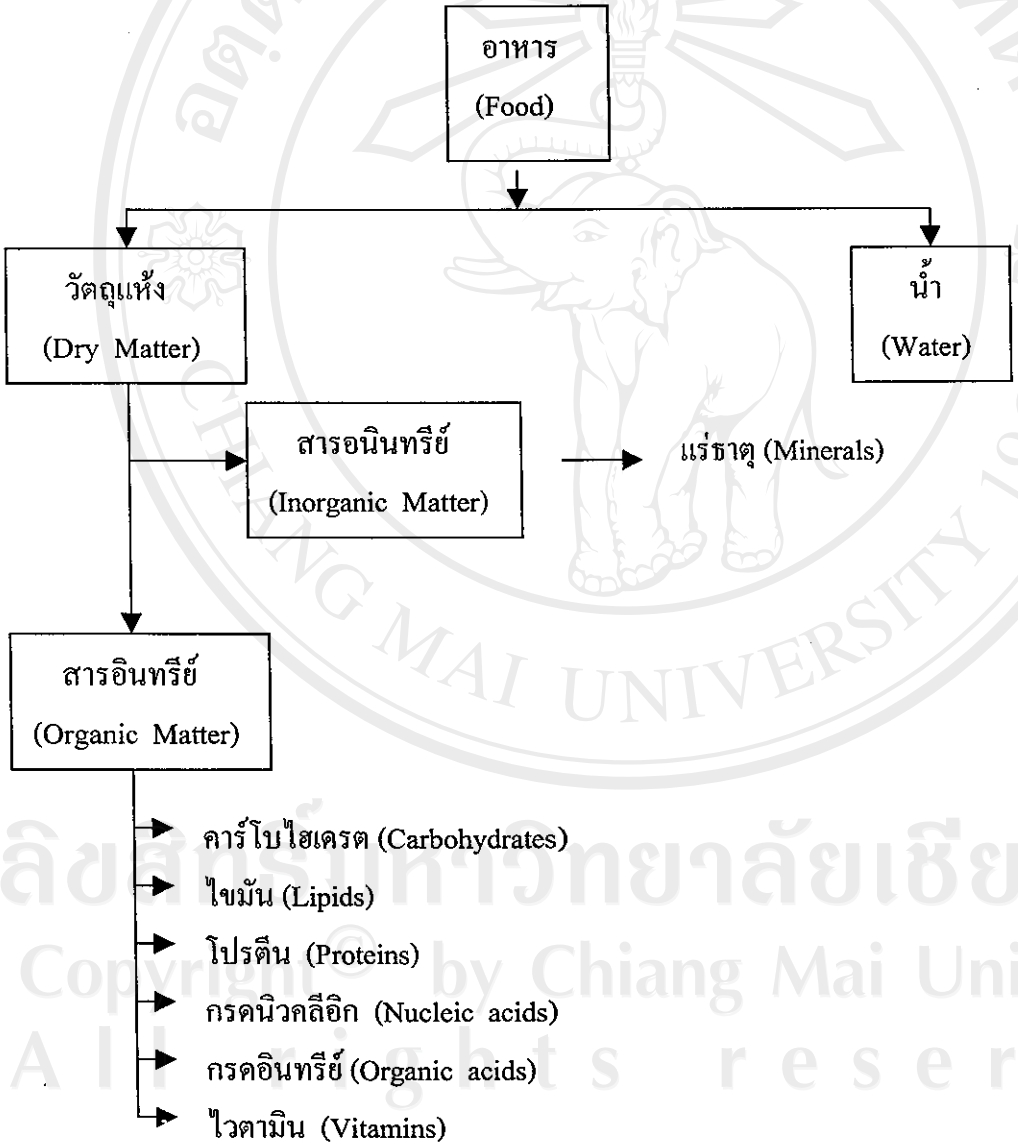
ในการผลิตสัตว์นั้นจะขึ้นอยู่กับปัจจัย 3 ปัจจัยร่วมกันคือ ด้านอาหาร การจัดการ และพันธุ์สัตว์ ซึ่งพบว่าปัจจัยด้านอาหารค่อนข้างจะสำคัญมากเพราะครอบคลุมต้นทุนถึง 50-70% ของทั้งหมด การขยายตัวของธุรกิจการผลิตสัตว์เพิ่มสูงขึ้นพื้นที่ซึ่งเป็นสถานที่ตั้งฟาร์มก็มีความเป็นชุมชนมากขึ้น ผลกระทบทางสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นอาจจะเป็นเป้าหมายใหม่ที่เราต้องเอาใจใส่แก้ไขมาก ดังแสดงในภาพที่ 1



ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ภาพที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ของปัจจัยการผลิตสัตว์

อาหารที่ใช้เลี้ยงสัตว์โดยทั่วไป มีองค์ประกอบหลักของอาหารสามารถแบ่งได้ 2 ส่วนใหญ่ คือ น้ำ และวัตถุแห้ง ซึ่งในส่วนของวัตถุแห้งจะสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มย่อย ได้แก่สารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ สารอินทรีย์สามารถแยกย่อยได้เป็น คาร์โบไฮเดรต (Carbohydrates) ไขมัน (Lipids) โปรตีน (Proteins) กรดนิวคลีอิก (Nucleic acids) กรดอินทรีย์ (Organic acids) และ ไวตามิน (Vitamins) สำหรับสารอนินทรีย์ก็จะได้แก่ แร่ธาตุ (Minerals) เป็นต้น ดังแสดงในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แสดงการจำแนกองค์ประกอบหลักในอาหาร

(ที่มา : ดัดแปลงจาก McDonald *et al.*, 1978 และ Church and Pond, 1992)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

2.2 วัตถุดิบอาหารสัตว์ที่ใช้เป็นแหล่งพลังงานและโปรตีนในอาหารทดลอง

2.2.1 มันสำปะหลัง (Cassava)

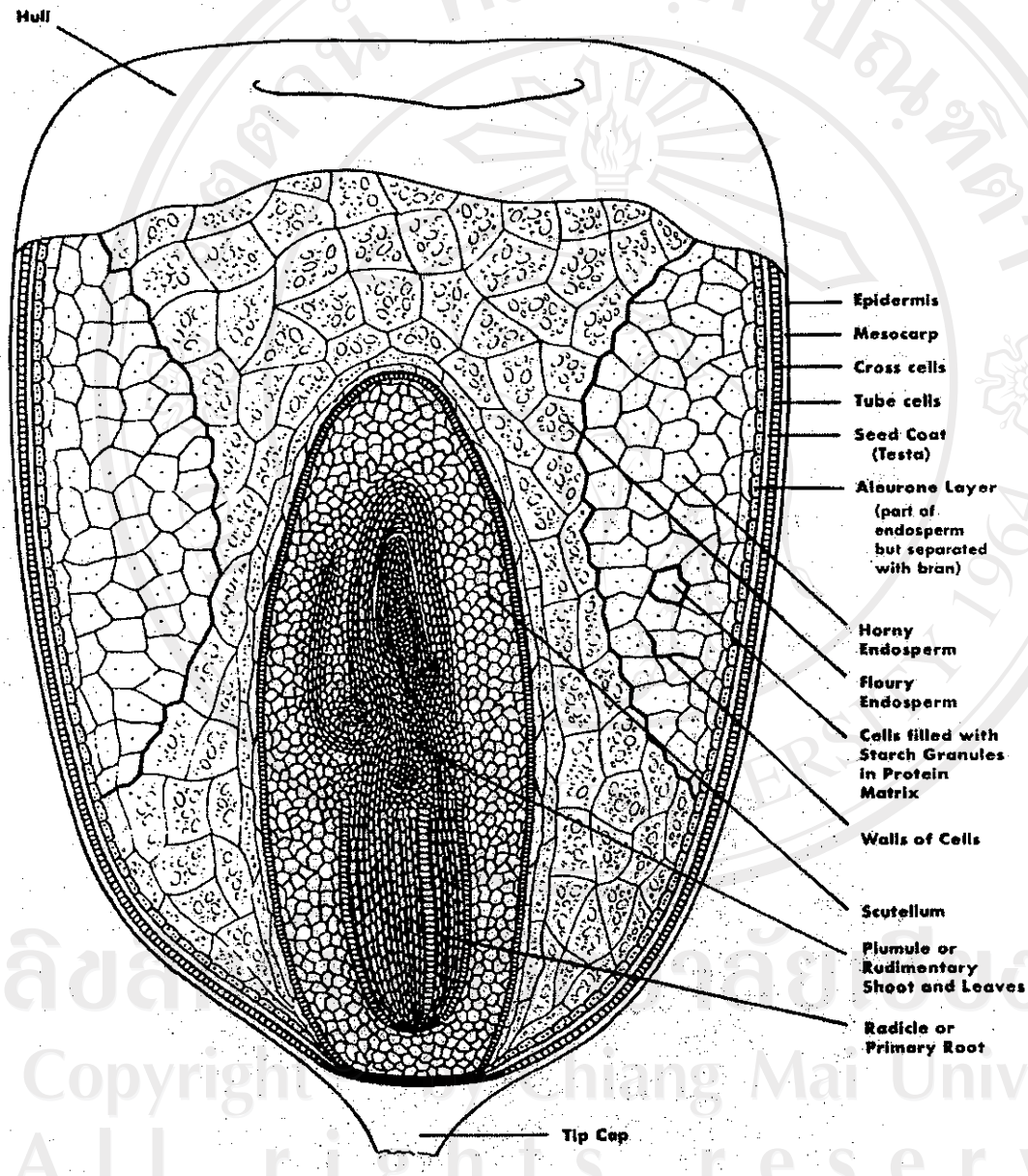
มันสำปะหลังเป็นพืชหัวชนิดหนึ่งที่ใช้เป็นอาหาร มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Manihot esculenta* ใช้เป็นแหล่งของคาร์โบไฮเดรต บริเวณที่ปลูกมากคือ เขตร้อนของทวีปอเมริกา อัฟริกา และเอเชีย ซึ่งส่วนใหญ่ปลูกเพื่อใช้บริโภคภายในประเทศ สำหรับประเทศไทยปลูกเพื่อการส่งออก เป็นส่วนใหญ่ในรูปของมันเส้น มันอัดเม็ด และแป้งมันสำปะหลัง มันสำปะหลังมีถิ่นกำเนิดอยู่ในแถบทวีปอเมริกา (รังสฤษฎ์และคณะ, 2541) การนำไปใช้เลี้ยงสัตว์มักพบได้ 4 ลักษณะ คือ มันเส้น (cassava chip) มันอัดเม็ด (cassava pellet) มันป่น (cassava meal) และมันหัก (cassava broken root) มันสำปะหลังมีคุณค่าทางโภชนะคือ ค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้(ME)ในสุกร 3,330 กิโลแคลอรี่ต่อกิโลกรัม โปรตีนรวม 3.3 เปอร์เซ็นต์ แคลเซี่ยม 0.22 เปอร์เซ็นต์ และฟอสฟอรัส 0.13 เปอร์เซ็นต์ (NRC,1998) ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยมันเส้นจะมีลักษณะเป็นชิ้นเล็กๆ ยาว 4-5 ซม. ผ่านการตากแดดเพื่อลดปริมาณสารพิษ Hydrocyanide (HCN) จะปอกหรือไม่ปอกเปลือกก็ได้ มันอัดเม็ดเป็นมันที่ได้จากการป่นมันเส้นแล้วจึงอัดเป็นเม็ด ซึ่งตลาดประเทศกลุ่มยุโรปมีความต้องการมันประเภทนี้มาก อีกทั้งการอัดเม็ดจะเพิ่มการใช้ประโยชน์ได้ของสารอาหารภายในมันอัดเม็ดให้สูงขึ้น ส่วนมันป่นจะเป็นหัวมันที่ผ่านการหั่นบางๆแล้วอบให้แห้ง จากนั้นจึงนำมาบดให้ละเอียดซึ่งจะมีสิ่งเจือปนมาก แต่ยังมีแป้งอยู่ 55-65 เปอร์เซ็นต์ และมันหักเป็นเศษมันที่หักออกจากหัวมันเนื่องจากการเก็บเกี่ยวลักษณะคล้ายกับมันเส้น แต่มีความหนาและขนาดใหญ่ ยาวประมาณ 12-15 ซม. (พันทิพา, 2539) ในการศึกษาการย่อยได้เนื่องจากวัตถุดิบชนิดต่างๆ ใช้แป้งมันสำปะหลังเป็นแหล่งพลังงานทดแทนแป้งข้าวโพดซึ่งมีราคาแพงกว่า (ปริญญา, 2535)

2.2.2 ข้าวโพด (Indian Corn หรือ Maize)

ข้าวโพดเป็นธัญพืชที่สำคัญชนิดหนึ่งของโลก มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Zea may* เป็นแหล่งของคาร์โบไฮเดรตและโปรตีนสำหรับมนุษย์และสัตว์ มีถิ่นกำเนิดอยู่ประเทศเม็กซิโกและในแถบอเมริกากลาง (รังสฤษฎ์และคณะ, 2541) ข้าวโพดมีโปรตีน 8.3 เปอร์เซ็นต์ มีความน่ากินสูงเมื่อบดป่นสัตว์สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้สูง มีฟอสฟอรัส 0.28 เปอร์เซ็นต์ แต่สามารถใช้ประโยชน์ได้จริงเพียง 14 เปอร์เซ็นต์ ของฟอสฟอรัสทั้งหมด (NRC, 1998) ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ หรือ ข้าวโพดไร่ (field corn) เป็นพันธุ์ที่ใช้แพร่หลายในประเทศสหรัฐอเมริกา พบทั่วไป 2 ชนิด คือ ข้าวโพดหัวบุ๋ม (dent corn) ข้าวโพดหัวแข็ง (flint corn) ซึ่งข้าวโพดหัวบุ๋มจะปลูกมากในแถบ corn belt ในอเมริกา มีโปรตีนต่ำกว่าข้าวโพดหัวแข็ง ข้าวโพดหัวแข็งจะมีลักษณะสีเหลืองจัดและเมื่อแห้งจะแข็งมาก พบว่ามีสารสีที่ชื่อ Cryptokanthin ซึ่งจะสามารถเปลี่ยนไปเป็นไวตามินเอ สารนี้จะช่วยให้ ไข่ ปาก

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

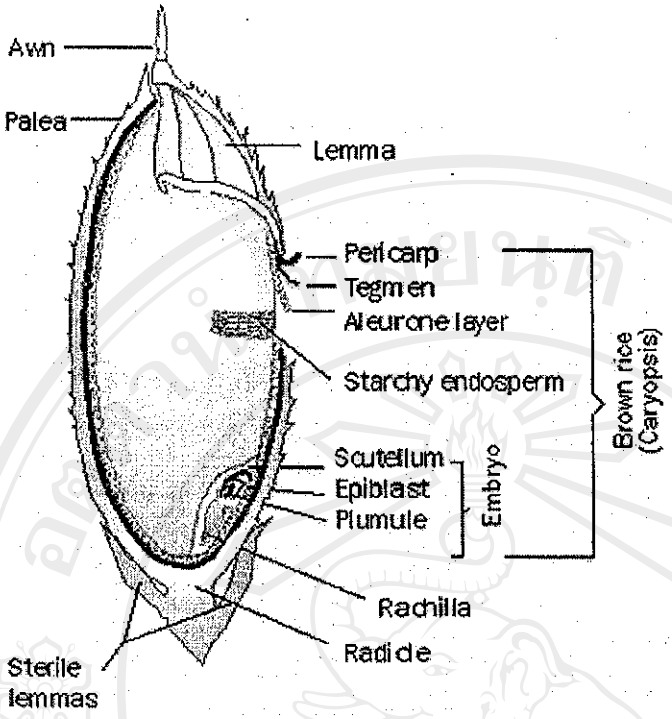
เนื้อ และแข้งของไก่ มีสีเหลืองเข้มขึ้น การนำข้าวโพดมาใช้ในอาหารสัตว์จะให้ในรูปของข้าวโพดบด (ground corn) ข้าวโพดบดที่ใช้มักพบปัญหาสารพิษจากเชื้อราเมื่อมีความชื้นสูง อีกทั้งยังขาดกรดอะมิโนที่จำเป็น (essential amino acid, EAA) 2 ตัว คือ lysine และ tryptophan และมีปริมาณของไฟเตทประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะพบอยู่ในส่วนของ aleurone layer ดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 แสดงภาพตัดตามยาวและตัดตามขวางของข้าวโพด

(ที่มา : Hoseney, 1994)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



ภาพที่ 4 แสดงภาพตัดตามยาวของข้าว

(ที่มา: www.riceweb.org/plant.htm)

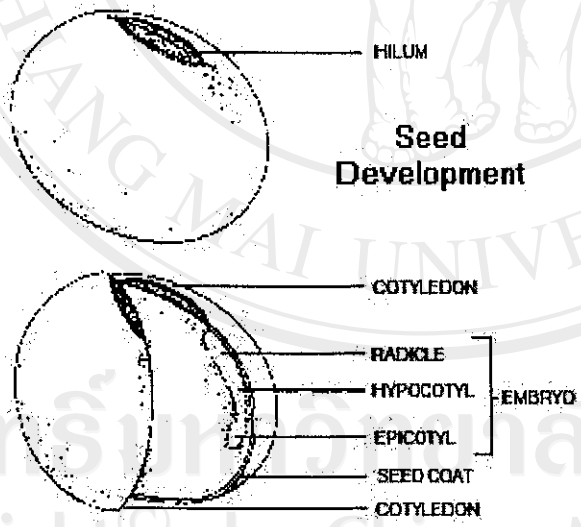
2.2.3 ข้าว (Rice)

ข้าวธัญพืชที่เป็นแหล่งอาหารประเภทคาร์โบไฮเดรต มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Oryza sativa* แหล่งผลิตใหญ่พบในแถบประเทศเอเชียและหมู่เกาะในมหาสมุทรแปซิฟิก ซึ่งสามารถเพาะปลูกได้ทั้งในเขตร้อนและเขตอบอุ่น (รังสฤษฎ์และคณะ, 2541) ส่วนประกอบที่สามารถนำมาใช้เป็นอาหารสัตว์พบได้ 2 ส่วน คือ ส่วนปลายข้าว และ รำข้าว โดยส่วนปลายข้าวเป็นผลพลอยได้จากการสีเมล็ดข้าวซึ่งเป็นส่วนเมล็ดที่หักและจมูกข้าว มีสัดส่วนประมาณ 15-16 เปอร์เซ็นต์ และรำข้าวจะเป็นส่วนเปลือกชั้นในที่ติดกับเมล็ดมีสัดส่วนประมาณ 8-9 เปอร์เซ็นต์ เมื่อสีเมล็ดข้าวเสร็จ (พันทิพา, 2539) รำข้าวมีโปรตีน 13.3 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสูงกว่าข้าวโพดที่มีเพียง 8.3 เปอร์เซ็นต์ และมีค่าพลังงานใช้ประโยชน์ได้ (Metabolized Energy, ME) ในสุกร 2,850 กิโลแคลอรี่ต่อกิโลกรัม (NRC, 1998) มีปริมาณฟอสฟอรัส ไนอะซีน ไวตามิน บี1 และ ไวตามิน บี2 ในระดับที่สูงกว่าข้าวทั้งเมล็ด (พันทิพา, 2538) ปัญหาที่พบในการใช้รำข้าวในอาหารสุกร คือ เมื่อเก็บไว้นานจะมีกลิ่นหืนซึ่งจะลดความน่ากิน อีกทั้งประมาณเยื่อใยที่มีสูงถึง 13 เปอร์เซ็นต์ อาหารมีความฟ่ามสูง ทำให้สุกรกินอาหารได้น้อยลง (วันดี, 2544) จากภาพที่ 4 แสดงชั้นของ aleurone layer ของเมล็ดข้าวที่สะสมไฟเตทไว้ มักพบมากในรำข้าว

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright © by Chiang Mai University
All rights reserved

2.2.4 กากถั่วเหลือง (Soybean meal)

ถั่วเหลืองเป็นพืชตระกูลถั่วที่มีแหล่งกำเนิดอยู่ในประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Glycine max* จัดเป็นพืชอาหารที่สำคัญทั้งมนุษย์และสัตว์ โดยใช้เมล็ดเพื่อเป็นแหล่งโปรตีนและสกัดน้ำมัน (รังสฤษฎ์และคณะ, 2541) การใช้ประโยชน์ในทางอาหารสัตว์ ใช้กากที่ได้จากการสกัดไขมันอาจเป็นวิธีกลคือ แรงดันในการอัดเกลียว หรือวิธีทางเคมีโดยใช้สารสกัดที่มีคุณสมบัติละลายไขมันได้ โดยส่วนมากกากถั่วเหลืองจะเป็นแหล่งโปรตีนที่มีคุณภาพสูงคือ มีกรดอะมิโนที่จำเป็นหลายตัว แต่จะขาด cystine และ methionine โดยเฉพาะ methionine ถูกจัดเป็นกรดอะมิโนจำเป็นที่ขาดเป็นอันดับแรก (first limiting amino acid) ในทางการค้าสามารถแบ่งได้ 2 เกรด คือ กากถั่วเหลือง 44 เปอร์เซ็นต์ และกากถั่วเหลือง 48 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งจะแตกต่างกันคือ กากถั่วเหลือง 48 เปอร์เซ็นต์ จะมีการกระเทาะเปลือกออก สิ่งที่ต้องคำนึงถึงการใช้กากถั่วเหลืองอีกอย่างหนึ่งคือ การตรวจสอบความสุก-ดิบของกากถั่วเหลือง เนื่องจากการตกค้างของสารยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ทริบซิน (trypsin inhibitor) ในกากถั่วเหลืองดิบ (พันทิพา, 2539) ไฟเตทจะพบอยู่ที่ aleurone layer และ embryo ของเมล็ดถั่วเหลือง ดังแสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 แสดงภาพเมล็ดถั่วเหลือง

(ที่มา: www. msue.msu.edu/msue/imp/mods1/00000005.html)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.2.5 กากทานตะวัน (Sunflower meal)

ทานตะวันมีถิ่นกำเนิดอยู่ในทวีปอเมริกา มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Helianthus annuus* สายพันธุ์ที่ใช้เพาะปลูกแบ่งตามลักษณะการใช้ประโยชน์ได้ 2 ชนิดคือ ใช้สกัดน้ำมัน (oil type) และใช้ประโยชน์ด้านอื่นๆ (non-oil type) เช่นปลูกเป็นไม้ประดับ พันธุ์ที่ปลูกเพื่อสกัดน้ำมันโดยเมล็ดทานตะวันมีน้ำมันประมาณ 45 เปอร์เซ็นต์ และมีกรดไขมันที่จำเป็นคือกรดลิโนเลนิก (linolenic acid) แหล่งผลิตที่สำคัญ คือ รัสเซีย อาร์เจนตินา สหรัฐอเมริกา และประเทศสาธารณรัฐประชาชนจีน โดยเฉพาะรัสเซียและประเทศในแถบยุโรปมีผลผลิตประมาณ 55 เปอร์เซ็นต์ (รังสฤษฎ์และคณะ, 2541) กากทานตะวันที่ได้จากการสกัดน้ำมันนิยมนำมาใช้เป็นอาหารสัตว์เนื่องจากเปอร์เซ็นต์โปรตีนสูงถึง 45- 55 เปอร์เซ็นต์ กากทานตะวันที่กระเทาะเปลือกมีเยื่อใย 12-13 เปอร์เซ็นต์ สำหรับกากทานตะวันที่ไม่กระเทาะเปลือกจะมีเยื่อใยสูง 3-4 เท่า ซึ่งจะทำให้มีเปอร์เซ็นต์โปรตีนต่ำลง คุณภาพของโปรตีนจากกากทานตะวันจะต่ำกว่ากากถั่วเหลือง โดยมี lysine ถูกจัดเป็นกรดอะมิโนจำเป็นที่ขาดเป็นอันดับแรกมีเพียง 65 เปอร์เซ็นต์ของกากถั่วเหลือง ซึ่งสามารถใช้ประโยชน์ได้เพียง 70.6 เปอร์เซ็นต์ (พันทิพา, 2539) คุณค่าทางโภชนะของวัตถุดิบอาหารสัตว์ดังที่ได้กล่าวมาแล้วทั้งหมด สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1. คุณค่าทางโภชนะในวัตถุดิบอาหารสัตว์ชนิดต่างๆ

วัตถุดิบอาหารสัตว์	องค์ประกอบทางเคมี			
	พลังงานที่สามารถใช้ประโยชน์ได้ (กิโลแคลอรี่/กก.)	โปรตีนหยาบ (%)	แคลเซี่ยม (%)	ฟอสฟอรัส (%)
แป้งมันสำปะหลัง	3330	3.3	0.22	0.13
ข้าวโพด	3420	8.3	0.10	0.40
รำข้าว	2850	13.3	0.07	1.61
กากถั่วเหลือง	3380	47.5	0.34	0.69
กากทานตะวัน	2735	42.2	0.37	1.01

(ที่มา : NRC, 1998)

2.3 หน้าที่ ความสำคัญ และแหล่งแร่ธาตุฟอสฟอรัส

แร่ธาตุเป็นองค์ประกอบที่พบในอาหารซึ่งมีอยู่น้อยแต่มีความสำคัญต่อร่างกายของสิ่งมีชีวิตเป็นอย่างมาก โดยพบว่าสัตว์ที่ได้รับแร่ธาตุไม่เพียงพอต่อความต้องการจะแสดงอาการผิดปกติออกมาให้เห็น เช่น พฤติกรรมการกัดแทะรางอาหาร หรือแสดงอาการป่วย เป็นต้น แร่ธาตุมีหน้าที่ต่างๆ ในร่างกายสัตว์โดยสรุป ดังนี้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

1. เป็นส่วนของโครงสร้างหรือส่วนของโครงกระดูกของร่างกาย
2. ช่วยรักษาสภาพของของเหลวในร่างกายให้อยู่ในสภาพสารแขวนลอยอยู่เสมอ (Colloidal)
3. ช่วยรักษาสภาพความเป็นกรดและด่างในร่างกายให้คงที่ (ประมาณ 7-7.8)
4. เป็นส่วนประกอบและเป็นตัวเร่งหรือตัวกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ต่าง ๆในร่างกาย

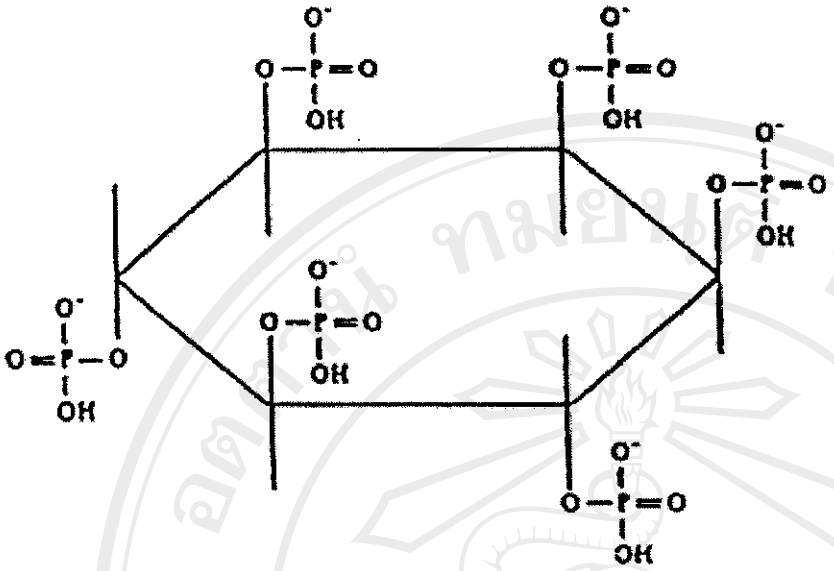
ในการประกอบสูตรอาหารนั้นสามารถใช้ฟอสฟอรัสได้จากหลายแหล่งซึ่งจะแยกออกเป็นกลุ่มใหญ่ 2 กลุ่ม คือ ธาตุฟอสฟอรัสที่มีอยู่ในพืชอาหารสัตว์ และที่พบได้จากแหล่งแร่ธาตุโดยตรง ในส่วนของแหล่งแร่ธาตุก็สามารถแบ่งได้อีกว่ามาจากสภาพธรรมชาติหรือได้มาจากการสังเคราะห์จากสารเคมี

ในส่วนของวัตถุดิบอาหารสัตว์ที่เรามักจะใช้เป็นพืชอาหารสัตว์ต่าง ๆ เช่น วัตถุดิบพวกข้าวโพด รำข้าว กากถั่วเหลือง ปลายข้าว หรือธัญพืชอื่น ๆ เมื่อวิเคราะห์หาปริมาณฟอสเฟตตามวิธีของ AOAC (1998) แล้ว พบว่ามีปริมาณที่เพียงพอต่อการเจริญเติบโต แต่กลับพบว่าสัตว์แสดงอาการขาดธาตุฟอสฟอรัสจึงต้องเสริมฟอสฟอรัสในอาหารจากแหล่งอื่นๆ เช่น DCP (Dicalciumphosphate) MCP (Monocalciumphosphate) หรือ กระดูกป่น Nelson *et.al.* (1968) ได้รายงานว่าในวัตถุดิบอาหารสัตว์จำพวกเมล็ดธัญพืช เศษเหลือจากเมล็ดและกากเมล็ดพืชน้ำมัน พบฟอสฟอรัสอยู่ในรูปของไฟเตท (Phytate) ประมาณ 60-75 % ซึ่ง Lolas *et al.* (1975) ก็รายงานในทำนองเดียวกันกับ NRC (1998) สำหรับ Bewley and Black (1983) รายงานว่าฟอสฟอรัสที่พบอยู่ในรูปที่ใช้ประโยชน์ได้ต่ำ พบอยู่ 3 รูป คือ กรดไฟติก (Phytic acid) และไฟเตท ดังแสดงในภาพที่ 6 และ 7

2.4 กรดไฟติก (Phytic acid)

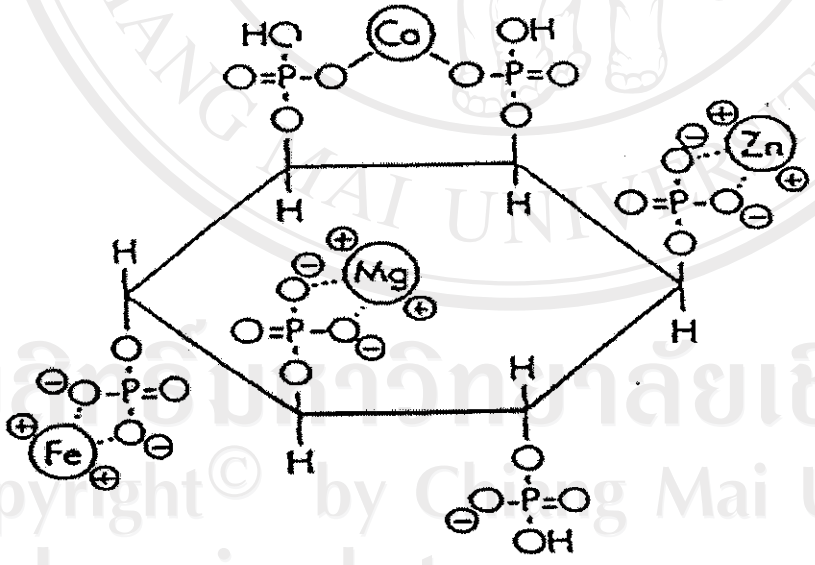
กรดไฟติก มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า Myo-inositol hexakisphosphate เป็นโครงสร้างที่เกิดการรวมตัวระหว่าง Inositol ที่มีไอโซเมอร์ชื่อ Myo กับกรดฟอสฟอริกจำนวน 6 กลุ่ม ซึ่งพืชจะทำการสังเคราะห์ฟอสฟอรัสให้อยู่ในรูปของไฟเตทดังแสดงในภาพที่ 6 สำหรับไฟเตทจะเป็นรูปเกลือของกรดไฟติกซึ่งสามารถรวมตัวกับสารประกอบที่มีประจุ เช่น แร่ธาตุ ประจุ 1+, 2+ หรือ พวกโปรตีนได้ ส่วนไฟตินเป็นสารประกอบฟอสฟอรัสที่เกิดการรวมตัวระหว่างเกลือของ Myo-inositol hexaphosphoric acid กับ แร่ธาตุโปแตสเซี่ยม แมกนีเซียม และแคลเซี่ยม ซึ่งเป็นแหล่งสะสมฟอสเฟต (Phosphate) และ สารอาหารส่วนใหญ่ในเมล็ดจะปรากฏอยู่ใน globoid ใน protein body ในเมล็ดธัญพืชไฟเตทจะพบอยู่ใน aleurone grain ดังที่แสดงในภาพที่ 8 ไม่ค่อยพบใน protein body ของเอนโดสเปิร์ม

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



ภาพที่ 6 แสดงโครงสร้างของกรดไฟติก (Phytic acid)

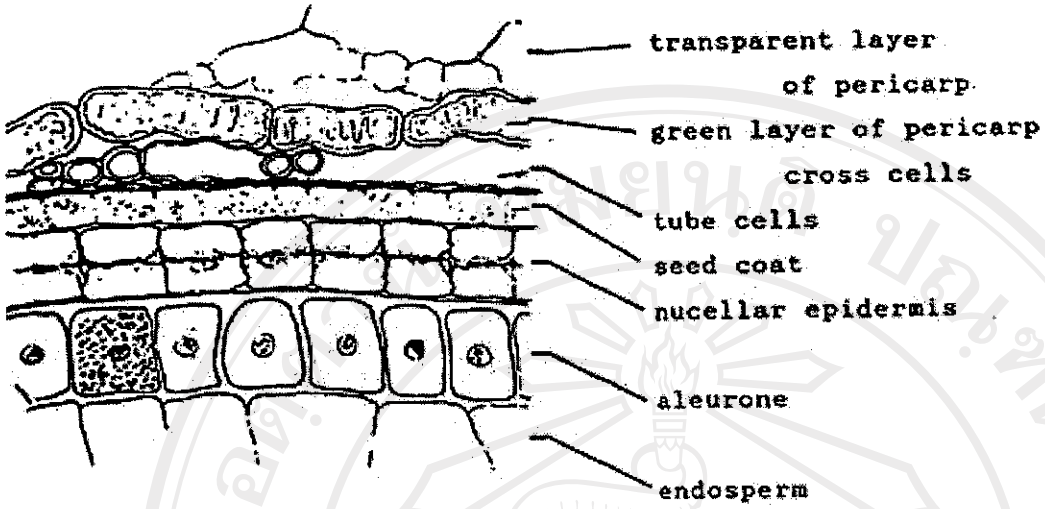
(ที่มา : Reddy *et al.*, 1989)



ภาพที่ 7 แสดงโครงสร้างของไฟเตท

(ที่มา : Ravindran *et al.* 1995)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

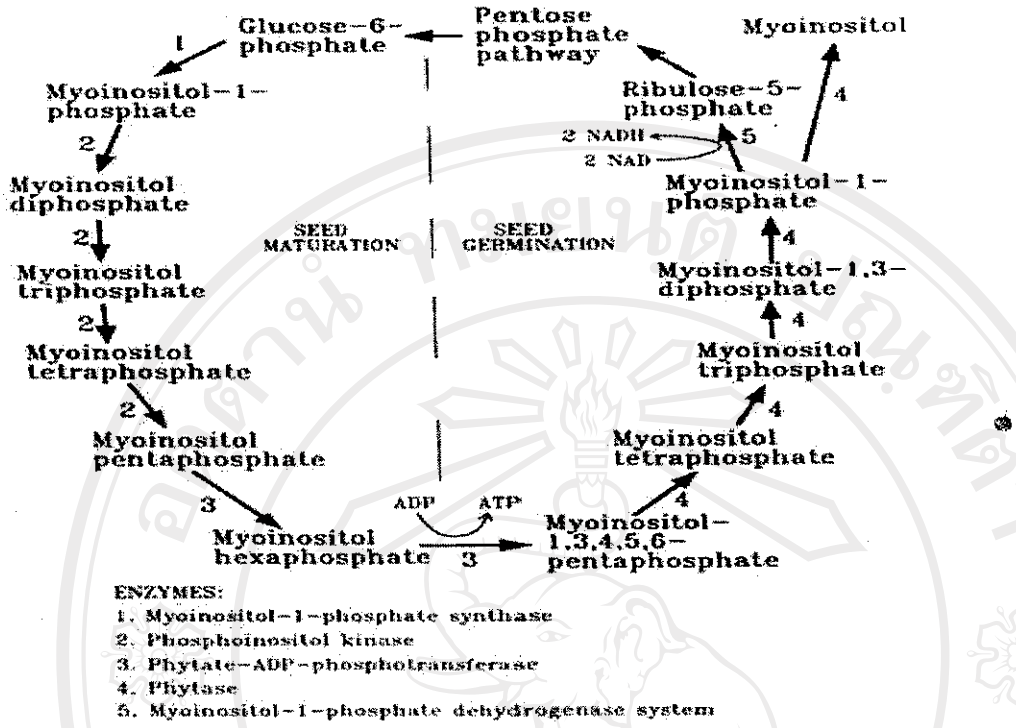


ภาพที่ 8 รูปตัดตามขวางแสดงชั้นเซลล์ของเปลือกเมล็ดข้าวสาลี
(ที่มา : วันชัย, 2538)

2.4.1 การสังเคราะห์ไฟเตทในเมล็ดธัญพืช

เมล็ดธัญพืชส่วนใหญ่จะมีกระบวนการสังเคราะห์ไฟเตทเกิดขึ้นภายในเพื่อสะสมฟอสฟอรัสไว้ใช้ในกระบวนการงอกของเมล็ด โดยพบว่า การสังเคราะห์และการสะสมไฟเตทเกิดขึ้นในโปรโตปลาสซึมจนกว่าจะสร้างโกลบอยด์ (globoid) เสร็จ (Greenwood and Bewley, 1984) ซึ่งพบได้จำนวนมากในชั้นแอลิวโรน (aleurone layer) ในช่วงที่เมล็ดมีการเจริญเติบโตจะสะสมฟอสฟอรัสอยู่ในรูปของไฟเตทอย่างรวดเร็ว กลไกการสังเคราะห์ไฟเตทมี glucose-6-phosphate เป็นตัวกลางที่สำคัญ ซึ่งจะถูกเปลี่ยนโครงสร้างไปเป็น Myo-inositol โดยเอนไซม์ Myo-inositol-1-phosphate synthase ต่อจากนั้นเอนไซม์ phosphoinositol kinase จะเป็นตัวช่วยเติมหมู่ PO_3^- จนครบ 5 กลุ่ม ซึ่งเอนไซม์ phytate-ADP-phosphotransferase ทำหน้าที่เติมหมู่ PO_3^- ในกลุ่มที่ 6 และเมื่อเมล็ดธัญพืชเกิดกระบวนการงอกก็จะมีเอนไซม์ตัวเดิมนี้เป็นตัวกระตุ้นเริ่มการย่อยสลายไฟเตท โดยจะมีเอนไซม์ไฟเตสมาทำหน้าที่ย่อยสลายหมู่ PO_3^- ออกจนหมด ดังแสดงในภาพที่ 9 กระบวนการนี้เกิดขึ้นภายใน 24 ชั่วโมงหลังการเพาะเมล็ดไฟเตทเริ่มสลายตัวปลดปล่อยฟอสเฟตออกเพื่อสร้างฟอสโฟลิปิด ซึ่งเป็นองค์ประกอบของเนื้อเยื่อส่วนที่จำเป็นต่อการแบ่งเซลล์และสัดส่วนภายในเซลล์ และปริมาณของอนินทรียฟอสเฟตและฟอสเฟตเอสเทอร์ที่เพิ่มมากขึ้นแสดงถึงการหายใจ ฟอสฟอรีเลชัน และกระบวนการอื่นๆ ที่เกิดขึ้นภายในเมล็ด โดยอนินทรีย์ฟอสเฟตที่มีมากใน DNA และ RNA เป็นตัวควบคุมกลไกการสังเคราะห์เอนไซม์ไฟเตสลดลง (ยงยุทธ, 2543)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



ภาพที่ 9 แสดงกลไกการสังเคราะห์และย่อยสลายไฟเตทภายในเซลล์เมล็ดธัญพืช

(ที่มา : Reddy *et al.*, 1989)

2.4.2 หน้าที่ทางสรีระวิทยาของไฟเตทในเมล็ดธัญพืช

ไฟเตทมีความสำคัญต่อเมทาบอลิซึมภายในเมล็ดธัญพืชเป็นอย่างมาก โดยมีหน้าที่หลัก 5 อย่างคือ

1. เป็นแหล่งสะสมฟอสฟอรัสภายในเมล็ดธัญพืชขณะที่เมล็ดกำลังเจริญเติบโต (Hall and Hodges, 1966)
2. เป็นแหล่งสะสมพลังงานภายในเมล็ดธัญพืชขณะที่เมล็ดกำลังเจริญเติบโต เพื่อใช้สร้างสารพลังงานสูง (Atkinson and Morton, 1960)
3. เป็นแหล่งสะสมตัวให้ประจุบวกภายในเมล็ดธัญพืชขณะที่เมล็ดกำลังเจริญเติบโต เช่น แร่ธาตุ Zn^{2+} Mg^{2+} และ Ca^{2+} (Williams, 1970)
4. เป็นตัวถูกกระตุ้นเมื่อเริ่มเกิดการงอกของเมล็ดธัญพืช (Sobolev and Rodionova, 1966)
5. เป็นแหล่งของ Myo-inositol ซึ่งเป็นสาร polysaccharide ตั้งต้นในการสังเคราะห์ผนังเซลล์พืช (Scott and Loewus, 1986)

บทบาทที่สำคัญอีกอย่างหนึ่งคือ ไฟเตทมีผลยับยั้งการผลิตสารพิษอะฟลาท็อกซินในเมล็ดธัญพืช โดย *Aspergillus parasiticus* ซึ่งมีสมมติฐานว่า สังกะสี (Zinc) มีความจำเป็นต่อการผลิตสาร

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

พิษอะฟลาท็อกซิน (Gupta and Venkatasubramanian, 1975) และ Ehrlich and Ciegler (1984) ได้อธิบายว่า การยับยั้งการผลิตสารพิษอะฟลาท็อกซิน ซึ่งสารตั้งต้นที่มีมวลโมเลกุลที่ต่ำจะสามารถละลายตัวในตัวทำละลายที่มีประจุบวกได้มาก และระดับ pH ที่สูงทำให้ไฟเตทจับกับสังกะสี (Zinc) แน่นมาก ทำให้เชื้อราไม่สามารถนำเอาสังกะสีไปใช้ผลิตสารพิษอะฟลาท็อกซินได้

Ravindran (1995) ได้ทำการรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับองค์ประกอบของฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปของไฟเตทในวัตถุดิบอาหารสัตว์ ดังแสดงในตารางที่ 2 พบว่า ในวัตถุดิบอาหารสัตว์เช่น ข้าวโพด รำข้าว กากถั่วเหลือง และ กากทานตะวันจะมีปริมาณฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปของไฟเตทมีค่า 0.24, 1.31, 0.39 และ 0.89 กรัมต่อตัวอย่างวัตถุดิบ 100 กรัม ตามลำดับ

ตารางที่ 2. แสดงองค์ประกอบของฟอสฟอรัสในรูปของไฟเตทในวัตถุดิบอาหารสัตว์

Ingredient	Phytate phosphorus g /100 g	Phytatephosphorus as % of total P
Cereals		
Corn (*Zea mays*)	0.24 (0.17-0.29)	72 (66-85)
Barley (*Hordeum vulgare*)	0.27 (0.19-0.33)	64 (56-70)
Wheat (*Triticum aestivum*)	0.27 (0.17-0.38)	69 (60-80)
Oats (*Avena sativa*)	0.29 (0.22-0.35)	65 (64-69)
Cereal by-products		
Rice bran	1.31 (1.02-1.79)	80 (72-86)
Wheat bran	0.92 (0.88-0.96)	70 (70-72)
Oilseed meals		
Soybean (*Glycine max*) meal	0.39 (0.37-0.42)	60 (57-61)
Cotton seed (*Gossypium* spp.)meal	0.84 (0.75-0.90)	71 (70-71)
Rape seed (*Brassica napus*)meal	0.70 (0.54-0.78)	59 (43-55)
Sunflower (*Helianthus annus*) meal	0.89	77

(ที่มา : ดัดแปลงจาก Ravindran, 1995)

Michel (2000) ได้ทำการรวบรวมและเปรียบเทียบปริมาณของไฟเตทจากแหล่งข้อมูลต่างๆ พบว่า ในข้าวโพดและกากถั่วเหลืองมีปริมาณไฟเตทที่ใกล้เคียงกับข้อมูลของ Ravindran (1995) ดังแสดงในตารางที่ 3

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตารางที่ 3. แสดงการเปรียบเทียบองค์ประกอบของฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปของไฟเตทในวัตถุดิบอาหารสัตว์ชนิดต่างๆ

Feedstuffs	Mathaus (1997)	Mcknight (1997)	Lantzsch (1992)	NRC (1994)
Corn	0.265	0.196	-	0.20
Wheat	0.235	0.255	-	0.24
Barley	0.223	0.230	-	0.19
Soybean seed	-	-	1.20 ± 0.03	-
Canola seed (rape seed)	-	-	1.35 ± 0.10	-
Soybean meal	-	0.372	-	0.40
Canola meal	-	0.870	-	0.87

(ที่มา: Michel, 2000.)

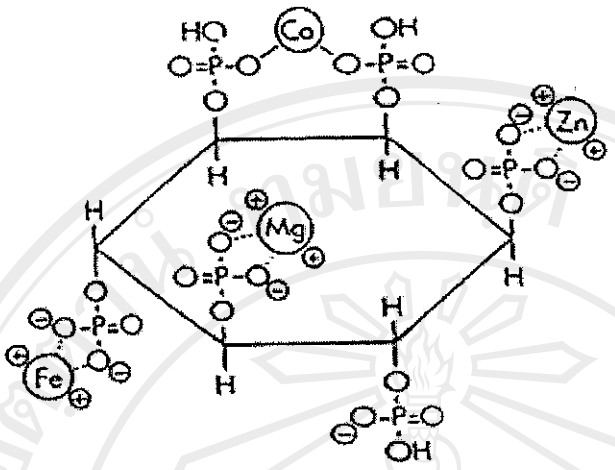
2.5 อิทธิพลของไฟเตทต่อการยับยั้งการใช้ประโยชน์ของโภชนะอื่นๆ

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้วว่าไฟเตท (Phytate) มีความสามารถดึงดูดแร่ธาตุหรือสารประกอบที่มีประจุ ดังนั้นไฟเตทอาจถือได้ว่าเป็นสารยับยั้งการใช้ประโยชน์ของสารโภชนะตัวอื่นๆ สารโภชนะที่ถูกยับยั้งการใช้ประโยชน์ได้แก่ แร่ธาตุ โปรตีน และไขมัน

2.5.1 แร่ธาตุ (Minerals)

แร่ธาตุที่มีประจุ +2 หรือ +3 จะถูกดึงดูดให้ไปรวมตัวกับไฟเตทเกิดเป็นเกลือของสารประกอบที่มีสมบัติการละลายตัวต่ำ แร่ธาตุเหล่านี้ได้แก่ Cu^{2+}, Zn^{2+}, Co^{2+}, Mn^{2+}, Fe^{3+} และ Ca^{2+} ทำให้แสดงอาการขาดแร่ธาตุเหล่านี้ได้ถ้าในอาหารมีไฟเตทอยู่สูง โดยเฉพาะ Ca^{2+} และ Zn^{2+} จะแสดงอาการขาดได้ง่าย และมักจะใช้ Zn^{2+} เป็นตัวบ่งชี้ปริมาณไฟเตท เนื่องจากพบว่าไฟเตทมีอิทธิพลต่อการใช้ประโยชน์ได้ของสังกะสี (Zn) สูง ทำให้อัตราการเจริญลดต่ำลง ดังแสดงในภาพที่ 7 และ 10

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



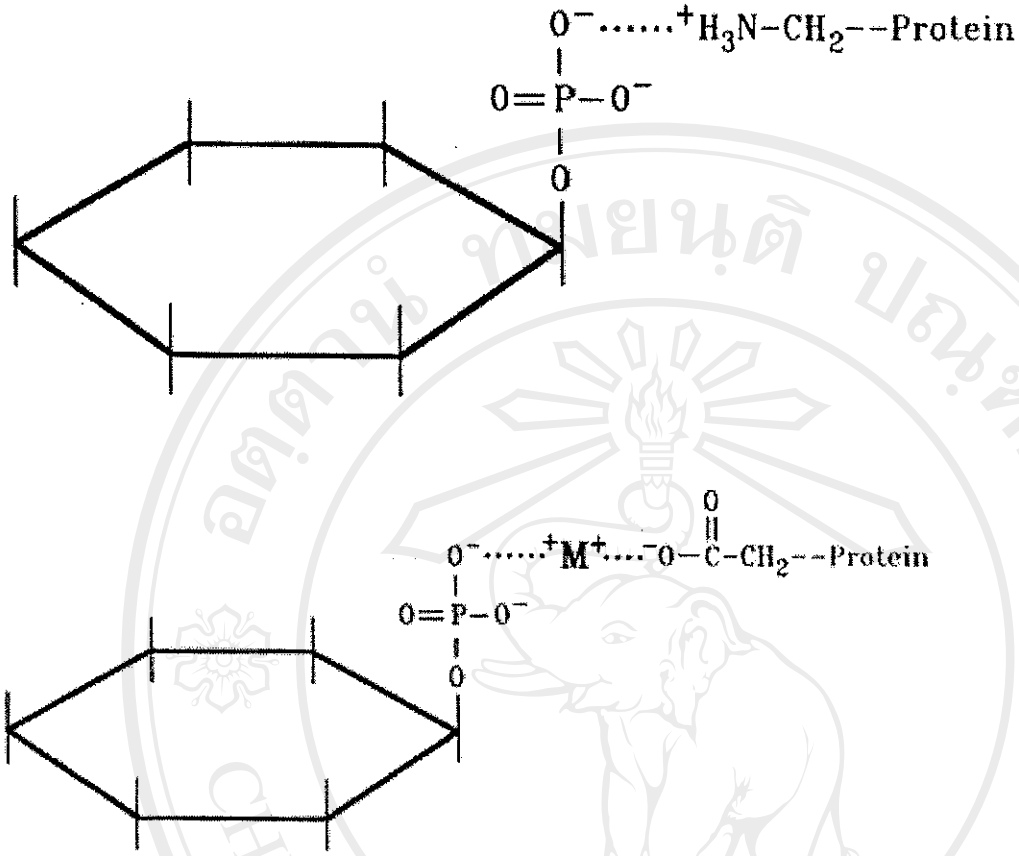
ภาพที่ 10 แสดงการจับตัวของแร่ธาตุกับไฟเตท

(ที่มา : Rarindran, 1995)

2.5.2 โปรตีน (Protein)

โปรตีน เป็นสารประกอบที่มีคุณสมบัติเป็น Zwitterion คือ มีทั้งประจุบวก และประจุลบอยู่ในตัว จึงทำให้สามารถถูกดึงดูดได้ด้วยไฟเตท การจับตัวกันระหว่างโปรตีนกับไฟเตทสามารถเกิดขึ้นได้ 2 แบบ โดยในแบบที่ 1 จะเป็นการจับกันโดยตรงระหว่างโปรตีนกับไฟเตท ซึ่งจะเกิดได้ในสภาพ pH อยู่ในระดับต่ำ โปรตีนจะใช้แขนทางด้านประจุบวก (N-terminal) เข้าจับโดยตรง ส่วนแบบที่ 2 จะเป็นการจับกันระหว่างโปรตีนกับไฟเตทโดยมีแร่ธาตุที่มีประจุบวกมากกว่า 2 (Multivalent cation) เป็นตัวเชื่อมระหว่างกลาง เกิดได้ในสภาพ pH อยู่ในระดับสูง ตัวโปรตีนใช้ด้านปลายประจุลบ (C-terminal) เข้าจับกับแร่ธาตุประจุตัวกลางอาจได้แก่ Cu^{2+}, Zn^{2+}, Co^{2+}, Mn^{2+} และ Ca^{2+} เป็นต้น ดังแสดง ในภาพที่ 11

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



M = multivalent cation

ภาพที่ 11 แสดงการจับตัวของโปรตีนกับไฟเตทในแบบต่าง ๆ

(ที่มา : Ravindran, 1995)

2.5.3 ลิปิด (Lipids)

ลิปิด (Lipids) เป็นโภชนะตัวหนึ่งที่ถูกยับยั้งการใช้ประโยชน์โดยไฟเตท ซึ่งเกิดแนวคิดเป็นสองทางเกี่ยวกับการยับยั้งการใช้ประโยชน์ของลิปิดได้อย่างไร แนวคิดแรกเชื่อว่าไฟเตทไปจับตัวกับ Lipase ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่เป็นโปรตีน ทำให้ลิปิดไม่สามารถถูกย่อยให้เป็นโมเลกุลเล็กที่ดูดซึมได้ง่าย แนวคิดที่สองเชื่อว่าไฟเตทจะรวมตัวกับลิปิดในลักษณะของการจับตัวระหว่างไฟเตทกับโปรตีนที่สภาพ pH อยู่ในระดับสูง ซึ่งแนวคิดนี้ยังไม่อาจสรุปได้

ในวัตถุดิบอาหารจำนวนมากทั้งเมล็ดธัญพืชและพืชตระกูลถั่ว ซึ่งอุดมไปด้วยแหล่งโปรตีนและแหล่งลิปิด แต่ก็ยังถูกจำกัดการใช้ประโยชน์ได้โดยตัวของกรดไฟติกหรือไฟเตท ที่อาจมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพการผลิต ซึ่งในทางอุตสาหกรรมเพื่อผลิตสัตว์ปีกและสุกรได้มีแนวความคิดในการใช้เอนไซม์ไฟเตสมาแก้ปัญหาต่างๆ ที่เกิดจากตัวของไฟเตท เพื่อเพิ่มการใช้ประโยชน์ได้ของสารโภชนะในกลุ่มของโปรตีน แร่ธาตุ หรือไขมัน เอนไซม์ไฟเตสเป็นเอนไซม์ที่มีความจำเพาะต่อพันธะเอสเทอร์ จึงสามารถย่อย

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สลายพันธะเอสเทอร์ของ Myo-inositol hexakisphosphateให้ผลิตภัณฑ์เป็น สารอนินทรียฟอสเฟตที่ใช้ประโยชน์ได้ง่าย โดย myo-inositol ที่เหลือจากการย่อยสลายอาจจะเกิดพันธะเอสเทอร์กับกลุ่มของฟอสเฟตที่จำนวนน้อยที่สุดได้ คือ 1-3 กลุ่ม และบางครั้งอาจจะเกิด myo-inositol อิสระ

2.6 อิทธิพลของไฟเตทต่อสิ่งแวดล้อม

"สิ่งแวดล้อม (Environment)" หมายถึงสิ่งต่าง ๆ ที่มีลักษณ์ทางกายภาพและชีวภาพที่อยู่รอบตัวมนุษย์ ซึ่งเกิดขึ้นโดยธรรมชาติ และสิ่งที่มนุษย์ได้ทำขึ้น(ทวีวงศ์, 2541) ในประเทศที่เจริญแล้วในแถบยุโรปหรืออเมริกา มีการตื่นตัวทางด้านสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก ซึ่งต่อไปปัญหาทางสิ่งแวดล้อมอาจจะถูกนำมาใช้กีดกันทางการค้าได้ ปัญหาทางสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ จะก่อให้เกิดภาวะมลพิษ "ภาวะมลพิษ (Pollution)" นี้ หมายถึง สภาวะที่สิ่งแวดล้อมเปลี่ยนแปลงหรือปนเปื้อนโดยมลพิษซึ่งทำให้คุณภาพของสิ่งแวดล้อมเสื่อมโทรมลง เช่น มลพิษทางน้ำ มลพิษทางอากาศ มลพิษในดิน (ทวีวงศ์, 2541) โดย "มลพิษ (Pollutants)" หมายความถึง ของเสีย วัตถุอันตราย และผลสารอื่น ๆ รวมทั้งกากตะกอนหรือสิ่งตกค้างจากสิ่งเหล่านั้น ที่ถูกปล่อยทิ้งจากแหล่งกำเนิดมลพิษ หรือที่มีอยู่ในสิ่งแวดล้อมตามธรรมชาติ ซึ่งก่อให้เกิดหรืออาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อคุณภาพสิ่งแวดล้อมหรือภาวะที่เป็นพิษภัยอันตรายต่อสุขภาพอนามัยของประชาชนได้ และให้หมายความรวมถึง รังสี ความร้อน แสง เสียง กลิ่น ความสั่นสะเทือน หรือเหตุรำคาญอื่น ๆ ที่เกิดหรือถูกปล่อยออกจากแหล่งกำเนิดมลพิษด้วย (ทวีวงศ์, 2541) ในระบบการผลิตสัตว์จำเป็นต้องจัดการต่อของเสียต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นมูลหรือปัสสาวะ ทั้งสองสิ่งนี้ถ้ามีปริมาณที่สูงมากส่วนหนึ่งอาจถูกย่อยสลายกลายเป็นปุ๋ยให้แก่พืช แต่ถ้าสะสมมากๆจะสามารถก่อให้เกิดมลพิษได้ เพราะในมูลหรือปัสสาวะอาจมีการหลงเหลือของธาตุไนโตรเจน ที่มาจากโปรตีนและฟอสฟอรัส การหลงเหลือของธาตุอาหารทั้งสองนี้จะมีมากหรือน้อยจะขึ้นอยู่กับสัตว์สามารถใช้ประโยชน์จากอาหารได้ดีเพียงใด

ธาตุไนโตรเจนและธาตุฟอสฟอรัสสามารถสร้างภาวะมลพิษในน้ำได้ พบว่าธาตุไนโตรเจนที่สะสมในสิ่งแวดล้อมนั้นมีการเปลี่ยนแปลงได้ดังนี้ สารอาหารพวกโปรตีนจะถูกย่อยสลายจากเอนไซม์ที่ผลิตโดยจุลินทรีย์ในดินให้กลายเป็นสารประกอบพวกเอมีนหรือกรดอะมิโน และสารประกอบที่เป็น C-chain จะถูกทำปฏิกิริยากับหมู่ OH เกิดเป็นสารประกอบพวกแอลกอฮอล์ (R-OH) แอมโมเนีย (NH_3) และพลังงานดังสมการที่ 1 และมีการเกิดกระบวนการต่อเนื่องไปจนได้แอมโมเนียไอออนดังสมการที่ 2 จากนั้นไนโตรเจนจะถูกตรึงโดยจุลินทรีย์พวก Nitrifying bacteria ในดินด้วยกระบวนการไนตริฟิเคชั่น (Nitrification) ซึ่งต้องมีออกซิเจน (O_2) เพียงพอ ดังสมการที่ 3 โดยพบว่าไนไตรต์ (NO_2^-) จะถูกเปลี่ยนไปเป็นไนเตรต (NO_3^-)อย่างรวดเร็ว เมื่อในดินมีการสะสมไนโตรเจนสูง ช่วงฤดูฝนหรือการให้น้ำแก่ดินมาก ทำให้ทั้งไนเตรต (NO_3^-) และไนไตรต์ (NO_2^-) ถูกชะล้างละลายไปกับน้ำได้ ถ้าหากไนโตรเจนเหล่านี้ซึมลงไปในดินไม่ลึกต้นพืชจะดูดกลับมาใช้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ใหม่โดยราก แต่ถ้าซึมลงไปลึกมากจนไปถึงแหล่งน้ำใต้ดินหรือสูญเสียไปกับหน้าดินลงไปตามแม่น้ำก็จะเกิดการสะสมในแหล่งน้ำนั้น ซึ่งจะทำให้เกิดมลพิษในแหล่งน้ำและคุณภาพน้ำจะลดต่ำลง อันเนื่องจากกระบวนการย่อยสลายไนโตรเจนโดยจุลินทรีย์ ดังแสดงในภาพที่ 12

ส่วนฟอสฟอรัสในดินสามารถพบได้ 2 กลุ่ม ได้แก่ อินทรียฟอสเฟตและอนินทรียฟอสเฟต พบว่าในดินจะมีปฏิกริยาการรวมตัวระหว่างพวกธาตุประจุบวกเช่น เหล็ก (Fe^{+2}, Fe^{+3}) และอะลูมิเนียม (Al^{+3}) กับกรดฟอสฟอริก ($H_2PO^-_4$) เกิดเป็นสารประกอบที่ละลายน้ำได้ยากและมีผลทำให้ความเป็นประโยชน์ของฟอสเฟตในดินลดต่ำลง ในสภาพดินที่เป็นกรดจัดจะทำให้พวก Fe^{+2}, Fe^{+3} และ Al^{+3} ละลายตัวได้มากขึ้น จะเกิดการตรึงฟอสเฟตสูงขึ้นตามไปด้วยดังสมการที่ 4 ดังแสดงในภาพที่ 13

$$\text{Protein} \xrightarrow[\text{digestion}]{\text{Enzymatic}} \text{R- } NH_2 + CO_2 + \text{energy} + \text{other products (amines or amino acids)} \quad (1)$$

สมการที่ 1 กระบวนการอะมิไนเซชั่น (Aminization)

$$R\text{-}NH_2 + \xrightarrow[\text{hydrolysis}]{\text{Enzymatic}} R\text{-}OH + NH_3 + \text{energy}$$

$$2NH_3 + H_2CO_3 \longrightarrow (NH_4)_2CO_3 \rightleftharpoons 2NH_4^+ + CO_3^{=} \quad (2)$$

สมการที่ 2 กระบวนการแอมโมนิฟิเคชั่น (Amonification)

$$2NH_4^+ + 3O_2 \xrightarrow[\text{Oxidation}]{\text{Enzymatic}} 2NO_2^- + 2H_2O + 4H^+ + \text{energy}$$

$$2NO_2^- + O_2 \xrightarrow[\text{Oxidation}]{\text{Enzymatic}} 2NO_3^- + \text{energy} \quad (3)$$

สมการที่ 3 กระบวนการไนทริฟิเคชั่น (Nitrification)

ภาพที่ 12 แสดงกระบวนการย่อยสลายโปรตีนโดยจุลินทรีย์
(ที่มา :คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2541)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

$$Al(H_2PO_4)^3 + 3\ OH^- \rightleftharpoons Al(OH)_3 + 3H_2PO^-_4 \qquad (4)$$

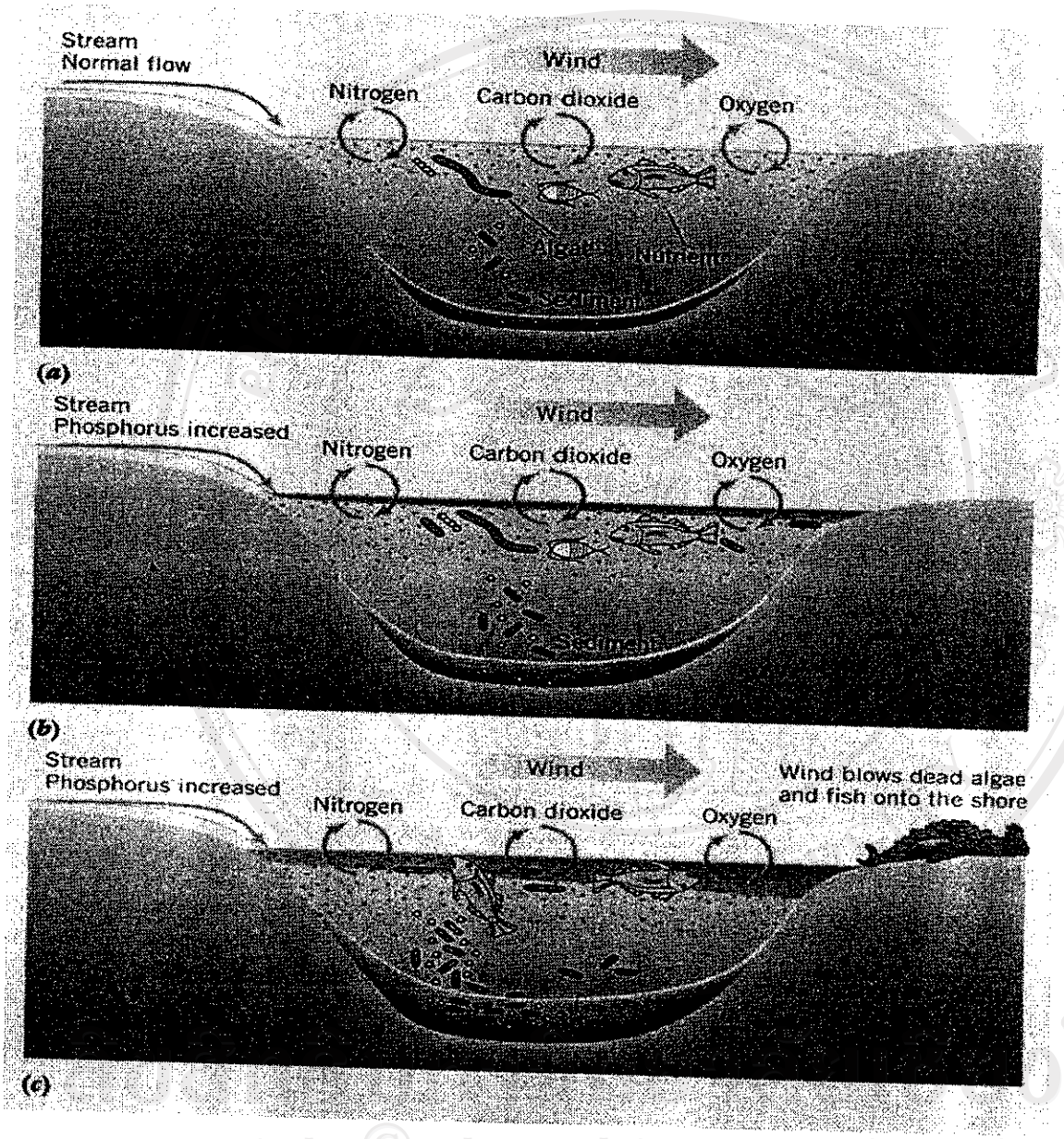
สมการที่ 4 กระบวนการรวมตัวและสลายตัวของ Al^{+3} กับ $H_2PO^-_4$

ภาพที่ 13 แสดงการรวมตัวและสลายตัวของ Al^{+3} กับ $H_2PO^-_4$
(ที่มา : คณาจารย์ภาควิชาปฐพีวิทยา, 2541)

จากปฏิกิริยาข้างต้นที่กล่าวมาแล้วนี้พบว่า อะลูมิเนียมฟอสเฟตจะมีสมดุลไปทางซ้ายมาก ถ้าดินเป็นกรดจัด แต่เมื่อถึงช่วงฤดูฝนหรือพื้นดินได้รับน้ำมากขึ้น จะทำให้สภาพความเป็นกรดของดินลดลง (pH สูงขึ้น) ทำให้เกิดการปลดปล่อยฟอสเฟตออกมามาก ถ้ามีการชะล้างตะกอนไปในแหล่งน้ำสูงขึ้น จนเกิดการสะสมเป็นแหล่งอาหารของพืชในน้ำเช่นเดียวกับไนโตรเจน การที่แหล่งน้ำมีสารประกอบพวกไนโตรเจนและฟอสฟอรัสสูงอาจจะก่อให้เกิดสภาวะที่เรียกว่า "ยูโทรฟิเคชั่น (Eutrophication)" สภาวะนี้เป็นสภาวะที่แหล่งน้ำอุดมสมบูรณ์ขึ้นด้วยสารอาหารทั้งสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์เกิดขึ้นได้ทั้งแหล่งน้ำจืดและทะเล (Sharpley, 1998) เมื่อแหล่งน้ำต่างๆ เต็มไปด้วยสารอาหารพวกไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ซึ่งสารอาหารเหล่านี้เป็นแหล่งอาหารอย่างดีสำหรับพวกแพลงค์ตอน (Plankton) และสาหร่าย (Algae) โดยจะเป็นปัจจัยช่วยเร่งการขยายจำนวนของพืชน้ำเหล่านี้ให้เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว การเพิ่มจำนวนมากของแพลงค์ตอนและสาหร่ายจะทำให้เกิดเงาทึบบริเวณผิวน้ำซึ่งจะเรียกปรากฏการณ์นี้ว่า "Bloom" ลักษณะที่เกิดขึ้นนี้จะก่อผลเสียต่อกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชใต้น้ำ เนื่องจากเงาทึบจะบดบังการส่องผ่านของแสง จะทำให้เกิดความไม่สมดุลของพืชใต้น้ำจะขาดความหลากหลายของแหล่งอาหารของสัตว์น้ำก็จะมีน้อยลงตาม กลุ่มแพลงค์ตอนพืช (Photoplankton) ที่มีมากนี้มักจะเป็นพืชที่มีอายุค่อนข้างสั้น เมื่อสิ่งมีชีวิตเหล่านี้ตายลงก็มีจะมีการทับถมตกเป็นตะกอนอยู่ใต้ท้องน้ำเป็นอินทรียวัตถุที่พวกจุลินทรีย์ใช้เป็นอาหารอีกต่อหนึ่ง ในขั้นตอนการย่อยสลายสารอินทรีย์เหล่านี้โดยจุลินทรีย์ (Decomposition) จำเป็นต้องใช้ออกซิเจน (O_2) ในช่วงเวลากลางวันอาจจะไม่เกิดผลการขาดออกซิเจนมากนัก เพราะในเวลากลางวันพืชน้ำยังคงมีการสังเคราะห์และออกซิเจนออกมาได้ แต่ในช่วงเวลากลางคืนพืชน้ำและจุลินทรีย์ต่างก็ต้องการออกซิเจนมาใช้ในกระบวนการเมทาบอลิซึม จึงทำให้ในแหล่งน้ำนั้นเกิดการขาดออกซิเจนส่งผลให้แหล่งนั้นมีค่า BOD (Biological Oxygen Demand) COD (Chemical Oxygen Demand) มีค่าสูง และค่าออกซิเจนที่ละลายน้ำได้ (Dissolve Oxygen ; DO) มีค่าต่ำลง ทำให้สัตว์น้ำ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

เกิดอาการช็อคเพราะขาดออกซิเจนด้วยได้ ทำให้ความหลากหลายทางชีวภาพลดลง ดังแสดงใน ภาพที่ 14



ภาพที่ 14 แสดงการกิด "ยูโทรฟิเคชั่น" ภายในทะเลสาป

a. ปริมาณสารอาหารที่พบในทะเลสาปมีอยู่น้อย ทำให้สาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินมีการเจริญเติบโตในอัตราที่ต่ำ น้ำจึงยังสะอาดอยู่

b. เมื่อฟอสฟอรัสถูกชะล้างเข้าสู่ทะเลสาป จะกระตุ้นการเจริญเติบโตสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินอย่างสูง ทำให้เกิดเงาทึบบางๆอยู่เหนือผิวน้ำ

c. เมื่อสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินที่มีมากนี้ได้ตาย และตกตะกอนอยู่ก้นทะเลสาปจะถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ด้วยกระบวนการหายใจแบบใช้ออกซิเจน ทำให้แหล่งน้ำขาดออกซิเจน

(ที่มา: Daniel and Edward., 1995)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.7 เอนไซม์ไฟเตส

เอนไซม์ไฟเตส มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า "Myo-inositol-hexakisphosphate phosphohydrorase" โดยทาง The International Union of Pure and Applied Chemistry และ The Union of Biochemistry อ้างโดย Reddy (1989) ได้บันทึกว่า เอนไซม์ไฟเตส พบทั้งหมดอยู่ 2 กลุ่ม คือ 3-Phytase (EC 3.1.3.8) มักพบในจุลินทรีย์ และ 6-Phytase (EC 3.1.3.26) มักพบในพืชเป็นส่วนใหญ่ ดังแสดงในภาพที่ 15

2.7.1. แหล่งของเอนไซม์ไฟเตส

การศึกษาจำแนกแหล่งของเอนไซม์ไฟเตส เพื่อคัดเลือกเอนไซม์ที่มีคุณสมบัติที่เหมาะสมในการทำงานต่อสภาพทางเดินอาหารของสัตว์ จากการศึกษาและรวบรวมข้อมูลพบว่า สามารถจำแนกแหล่งของเอนไซม์ไฟเตสได้ 5 แหล่ง (Liu *et al.*,1998) คือ เอนไซม์ไฟเตสที่ผลิตจากพืช พบในเมล็ดธัญพืชต่างๆช่วยย่อยไฟเตทในขณะที่เมล็ดเกิดกระบวนการงอก และอีก 3 แหล่งพบได้ในกลุ่มของจุลินทรีย์ต่างๆได้แก่ แบคทีเรีย ยีสต์ และเชื้อรา ซึ่งในกลุ่มของจุลินทรีย์จะผลิตเอนไซม์ไฟเตสเพื่อย่อยไฟเตทมาใช้ในการเจริญเติบโต เช่น การสร้างโคโลนี การแบ่งตัว และการสร้างอาหาร และในกลุ่มสุดท้ายพบได้ในเนื้อเยื่อของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยน้ำนมและไก่ (ในชั้นมิวโคซาของลำไส้) โดยได้แสดงคุณสมบัติของเอนไซม์ไฟเตสจากแหล่งต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4

A. 3-Phytase แสดงปฏิกิริยาการคะตะไลซ์ดังนี้

myo-inositol 1,2,3,4,5,6 hexakisphosphate + H_2

↓ 3- Phytase

myo-inositol 1,2,4,5,6 pentakisphosphate + orthophosphate

B. 6- Phytate แสดงปฏิกิริยาการคะตะไลซ์ดังนี้

myo- inositol 1,2,3,4,5,6 hexakisphosphate + H_2O

↓ 6- Phytase

myo-inositol 1,2,3,4,5 pentakisphosphate + orthophosphate

ภาพที่ 15 แสดงปฏิกิริยาการคะตะไลซ์โดยเอนไซม์ไฟเตส

(A) 3-Phytase **(B)** 6-Phytase

(ที่มา : Reddy, 1989)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ตารางที่ 4 คุณสมบัติทั่วไปของเอนไซม์ไฟเตสที่มาจากแหล่งต่างๆ

Classification	Source	Molecular weight (kDa)	Optimal temperature (^{0}C)	Optimal pH (p)
Bacteria	*B. subtillis*	36-38	60	6.0-6.5{6.25
	E. coli	42	55	4.5
	Enterobacter	-	50	7.0-7.5
	K. aerogenes	10-13,700	60-70	4.5,5.2{3.7}
	Pseudomonas	-	-	5.5
Fungi	*A. ficuum*	85-100	55-60	4-6{4.5}
	A. niger	200	53	5.5
	A. terreus	214	70	4.5
	A. oryza	120-140	50	5.5{4.5}
	R. oligosporus	-	55	4.5
Yeast	*S. castellis*	490	77	4.4
	Bakers' yeast	-	45	4.6
Plant	Canola seed	-	50	5.2
	Cucurbita maxima	66.5	48	4.8
	Lillum longiflorum	88	55	8.0
	Maize	76	55	4.8
	Mung beans	160	57	7.5
	Soybean	60	55	4.5-4.8{5.5}
	Spelt	68	45	6.0
	Wheat bran	47	55	5.0-5.6,7.0
Animal tissue (Intestinal mucosa)	Human	-	-	7.4
	Chicken	-	-	8.2
	Calf	-	-	8.7
	Rat	70-90	-	7.0,7.5-7.8

(ที่มา : Liu *et al.*, 1998)

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

2.7.2. คุณสมบัติทางกายภาพของเอนไซม์ไฟเตส

เอนไซม์ไฟเตส (Phytase enzyme) มีมวลโมเลกุลประมาณ 35-700 kDa ซึ่งจะขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของเอนไซม์ (Liu et al., 1998) เอนไซม์ไฟเตสสามารถทำงานได้ดีที่ pH ประมาณ

4.5-6.0 และอุณหภูมิประมาณ 45-60 ° C การนำเอนไซม์ไฟเตสมาใช้จำเป็นต้องคำนึงถึงสภาพที่แท้จริงของระบบทางเดินอาหารของสัตว์ด้วย เอนไซม์ไฟเตสที่เสริมในอาหารต้องสามารถทนทานต่อสภาวะที่เป็นกรดมี pH ประมาณ 1-2.5 และที่อุณหภูมิประมาณ 37-39 ° C ซึ่งพบว่าเอนไซม์ไฟเตสที่ผลิตได้จาก จุลินทรีย์สามารถทำงานได้ดีกว่าเอนไซม์ไฟเตสที่ได้มาจากพืช ดังแสดงในตารางที่ 5 สายพันธุ์จุลินทรีย์ที่นิยมนำผลิตเอนไซม์ไฟเตสในทางการค้าได้แก่ *Aspergillus ficuum* (Liu *et al.*, 1999) และ *Aspergillus niger* (Dvorakova *et al.*, 1997) ซึ่งสามารถตอบสนองต่อการกระตุ้นการสร้างเอนไซม์สามารถทำงานได้ดีที่ pH ประมาณ 5.0 และอุณหภูมิประมาณ 45-60 ° C

ตารางที่ 5 แสดงคุณลักษณะทั่วๆไปของเอนไซม์ไฟเตสจากหลายๆแหล่ง

Micro-organism	Forms	PH		Opt.temperature	MW	Reference
		Range	Optima	(°C)	(kDa)	
Bacillus subtilis	1	-	7.0	55	-	Kerovuo *et al.* (1998)
B.subtilis.(natto)	1	-	6.0-6.5	60	36-38	Shimizu (1992)
Enterobacter sp.	1	6.0-8.0	7.0-7.5	50	-	Yoon *et al.* (1996)
Escherichia coli	2	2.0-10.0	4.5	60	44.7	Golovun *et al.* (2000)
Klebsi.ella acrogenus	2	-	-	-	10-13	Tambe *et al.* (1994)
K. oxytoca	1	4.0-6.0	5.0-6.0	55	-	Jareonkilmongkol *et al.* (1997)
K.terrigena	1	-	5.0	58	40	Grelner *et al.* (1997)
Arxula adeninivorans	1	-	4.5	75	-	Sano *et al.* (1999)
Pichia patoris	1	-	2.5, 5.5	60	95	Han and Lei (1999)
S. cerevisiae	1	-	2.0-5.5	55-60	120	Han *et al.* (1999)
Schwanniomyces Castellii	1	-	4.4	77	490	Segueilha *et al.* (1992)
A.ficuum	1	-	5.0	60	-	Nair *et al.* (1991)
A.ficuum	1	-	5.0	50	-	Liu *et al.* (1999)
A.niger	1	-	5.0	55	100	Dvorakova *et al.* (1997)

(ที่มา : Ashok *et al.*, 2001)

2.8 ผลของเอนไซม์ไฟเตสในอาหารสัตว์

Simons *et al.* (1990) ได้ทำการศึกษาถึงผลของการเสริมเอนไซม์ไฟเตสในอาหารข้าวโพดผสมกากถั่วเหลือง โดยทำการศึกษาการย่อยได้ของตัวอย่างอาหารนี้ในสุกรจำนวน 12 ตัว แบ่งสุกร

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ออกเป็น 2 กลุ่ม ๆละ 6 ตัว ทั้งเสริมและไม่เสริมเอนไซม์ไฟเตส พบว่าในกลุ่มที่เสริมเอนไซม์ไฟเตสสามารถเพิ่มการย่อยได้ของฟอสฟอรัส ลดปริมาณของแคลเซียมและฟอสฟอรัสในมูล อย่างมีนัยสำคัญที่ ($P<0.01$), ($P<0.05$) และ ($P<0.01$) ตามลำดับ ดังได้แสดงในตารางที่ 6

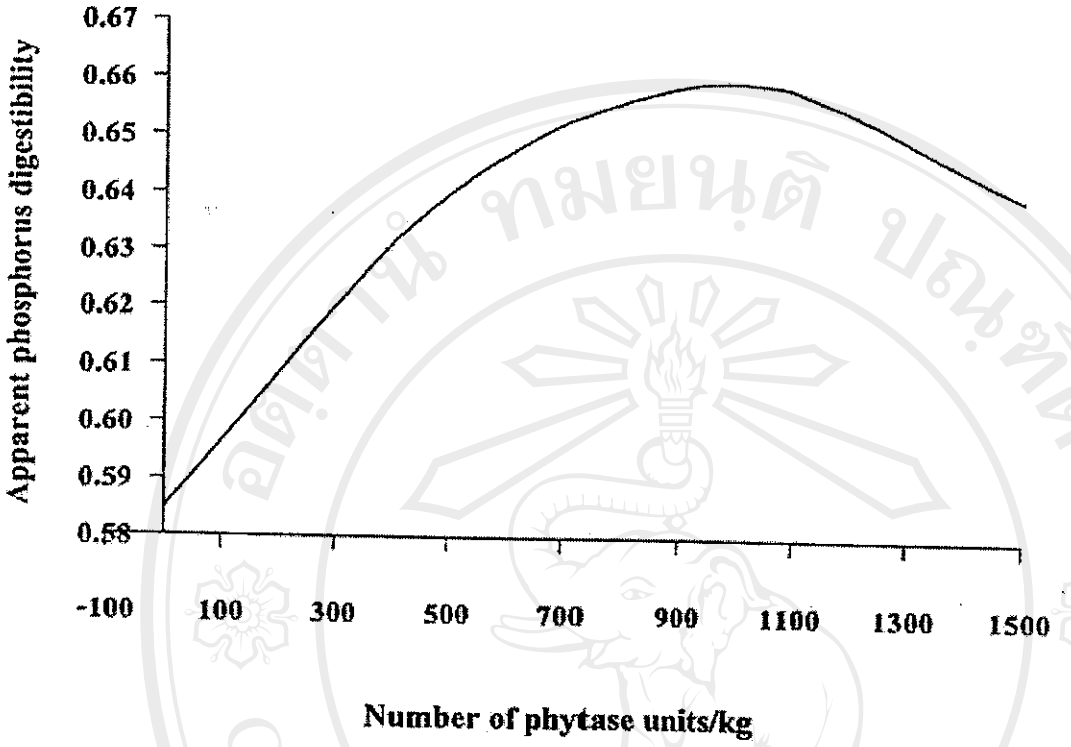
ตารางที่ 6 แสดงผลการย่อยได้ของอาหารข้าวโพดผสมกากถั่วเหลืองในสุกร

Microbial phytase	Corn-soybean meal mixed diets			
	-	+	SED	Statistical significial of difference
n	6	6		
Digestibility (%)				
DM	85.2	85.0	1.6	NS
P	20	46	4.0	**
Ca	44	50	5.2	NS
P in faeces (g/kg DM)	21.0	13.6	1.3	**
Ca in faeces (g/kg DM)	22.8	19.2	1.3	**

(ที่มา : Simons *et al.*, 1990)

Beer and Jongbloed (1992) ได้ทำการศึกษาผลของการเสริมเอนไซม์ไฟเตสจาก *A.niger* ในอาหารลูกสุกรต่อการย่อยได้ของฟอสฟอรัส โดยใช้ลูกสุกรจำนวน 384 ตัวน้ำหนักตัวเฉลี่ย 11-25 กก. ใช้สถานีทดลองทั้งหมด 12 สถานี และใช้อาหารทั้งหมด 4 สูตร คือ อาหารฐาน อาหารฐาน +1.0 กรัมของอนินทรียฟอสเฟตจาก DCP ต่อกก.อาหาร อาหารฐาน+1.9กรัมของอนินทรียฟอสเฟตจาก DCP ต่อกก.อาหาร และ อาหารฐาน+เอนไซม์ไฟเตส 1,450 หน่วยต่อกก.อาหาร พบว่า การเสริม ไฟเตส 1,450 หน่วยต่อกก.อาหาร สามารถเพิ่มการย่อยได้แบบปรากฏของฟอสฟอรัส โดยคิดเป็น 0.216 เท่า เมื่อเทียบกับอาหารฐาน Khan and Cole (1995) ได้ทำการศึกษาถึงอิทธิพลของระดับเอนไซม์ไฟเตสที่เสริมในอาหารต่อการย่อยได้ของฟอสฟอรัสในสุกร พบว่า การเสริมเอนไซม์ไฟเตสที่ระดับ 1,000 หน่วยต่อกก. อาหาร ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การย่อยได้ของฟอสฟอรัสมีค่าสูงที่สุดคือ 0.66 และจะมีแนวโน้มลดลงเมื่อเสริมที่ระดับ 1,500 หน่วยต่อกก. อาหาร ดังแสดงในภาพที่ 16

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved



ภาพที่ 16 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณเอนไซม์ไฟเตสและค่าการย่อยได้ของฟอสฟอรัส
(ที่มา : Khan and Cole, 1995)

Kornegay and Qian (1996) ศึกษาการนำเอนไซม์ไฟเตสมาใช้แทนที่การเสริมฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปอนินทรียสารโดยศึกษาในสุกรลูกผสมจำนวน 96 ตัว (น้ำหนักตัวอยู่ในช่วง 7-8 กก.) ได้ทำการเสริมเอนไซม์ไฟเตสที่ได้จากจุลินทรีย์ (EC3.1.3.26) เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้ฟอสฟอรัสและสารโภชนะอื่นๆในอาหารสูตรข้าวโพด-กากถั่วเหลืองโดยจัดแผนการทดลองแบบ 2x5 factorial แบ่งให้ได้รับฟอสฟอรัสที่ใช้ประโยชน์ได้ 2 ระดับคือ 0.7 และ 1.6 กรัมต่อกก. ในอาหารเป็นสูตรหลัก ซึ่งแต่ละสูตรหลักเสริมเอนไซม์ไฟเตสที่ระดับต่างๆ 5 ระดับ คือ 0, 350, 700, 1,050 และ 1,400 หน่วยต่อกก.ในอาหาร และศึกษาอีก 2 สูตร คือ อาหารสูตรข้าวโพดผสมกากถั่วเหลืองที่มีฟอสฟอรัสที่ใช้ประโยชน์ได้ 3.2 กรัมต่อกก. ในอาหาร ซึ่งไม่เสริมและเสริมเอนไซม์ไฟเตสที่ระดับ 1,400 หน่วยต่อกก. ในอาหาร พบว่าการเสริมเอนไซม์ไฟเตสช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยได้แบบปรากฏของฟอสฟอรัสและแคลเซียมมีความสัมพันธ์กันอย่างเป็นเส้นตรง ($P<0.01$) เช่นเดียวกับปริมาณของฟอสฟอรัสที่ขับออกทางมูลลดลงอย่างเป็นเส้นตรงเช่นกัน ($P<0.01$) และจุดที่ตอบสนองดีที่สุดคือระดับ 1,050 หน่วยต่อกก. ในอาหารของสูตรที่มีฟอสฟอรัสที่สามารถใช้

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

ประโยชน์ได้ 0.7 กรัมต่อกก. ในอาหาร และระดับ 700 หน่วยต่อกก. ในอาหารของสูตรที่มีฟอสฟอรัสที่สามารถใช้ประโยชน์ได้ 1.6 กรัมต่อกก. ในอาหาร จากการทดลองของ Robert and David (1996) ศึกษาในสุกรอายุ 5 สัปดาห์ น้ำหนักตัวประมาณ 8 กิโลกรัม โดยต้องการทดสอบประสิทธิภาพของ 1 alpha-hydroxycholecalciferol (1-alpha-OHD_3) และเอนไซม์ไฟเตสจากจุลินทรีย์เพื่อปรับปรุงการใช้ประโยชน์จากฟอสฟอรัสในรูปของไฟเตทและกรดอะมิโนในอาหารทดลองข้าวโพด-กากถั่วเหลืองที่มีฟอสฟอรัสต่ำกว่าระดับความต้องการ โดยเสริมเอนไซม์ไฟเตสที่ระดับ 1,200 หน่วยต่อกก. และ Vitamin D_3-adequate พบว่าการตอบสนองในส่วนของน้ำหนักตัวที่เพิ่ม องค์ประกอบของเถ้าในกระดูก fibula, scapula และ metatarsal bone($P<0.05$) สำหรับ Bourke (1999) ศึกษาผลของการเสริมเอนไซม์ไฟเตสในอาหารสุกรน้ำหนักตัว 30-40 กิโลกรัม ที่มีฟอสฟอรัสรวม 2 ระดับ คือ 0.43 และ 0.50 เปอร์เซ็นต์ ในอาหาร ทั้งเสริมเอนไซม์ไฟเตส 500 หน่วยต่อกก. ในอาหาร และไม่เสริม พบว่า การเสริมเอนไซม์ไฟเตสปรับปรุงค่าการย่อยได้ของฟอสฟอรัส และการสะสมฟอสฟอรัสในร่างกาย ($P<0.01$) และลดปริมาณฟอสฟอรัสที่ขับออกมาในปัสสาวะ 1-2 เปอร์เซ็นต์ ของฟอสฟอรัสในอาหารเมื่อให้ฟอสฟอรัสในอาหารต่ำกว่าความต้องการของสัตว์ ดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 แสดงอิทธิพลของไฟเตสที่มีต่อระดับฟอสฟอรัสในอาหาร

Total P (%)	0.43		0.50	
Phytase	NO	YES	NO	YES
Digestibility of P (%)	51.1	56.2	50.6	61.9
Faecal P as % of total P	48.9	43.8	49.2	38.1
Retained P as % of feed P	50.4	55.7	49.5	60.1

(ที่มา: Bourke, 1999)

Rodehutscord *et al.* (1999) ได้ศึกษาถึงผลของน้ำหนักตัวต่อการย่อยได้ของฟอสฟอรัส และประสิทธิภาพของเอนไซม์ไฟเตสจากจุลินทรีย์ในสุกรเล็ก โดยการทดลองใช้ลูกสุกรทั้งหมด 17 ตัว มีสุกรที่มีน้ำหนักตัวต่างกัน 2 กลุ่ม คือ ชุดที่หนึ่งลูกสุกร 9 ตัว (11.9 ± 0.8 กก.) และชุดที่สองลูกสุกร 8 ตัว (33.2 ± 2.9 กก.) ซึ่งทั้งสองกลุ่มทำการเสริมและไม่เสริมเอนไซม์ไฟเตสที่ระดับ 400 หน่วย/กก.อาหาร พบว่าน้ำหนักตัวและการเสริมเอนไซม์ไฟเตสที่ระดับ 400 หน่วยต่อกก.อาหาร มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญต่อการขับฟอสฟอรัสออกทางไต ที่ ($P<0.001$) และ ($P<0.032$) ตามลำดับ Mutsui *et al.* (2000) ได้ศึกษาประ

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved

สิทธิภาพของเอนไซม์ไฟเตสจากยีสต์ในการปรับปรุงการใช้ประโยชน์ได้ของฟอสฟอรัสในอาหารที่ใช้อาหารสูตรข้าวโพด-กากถั่วเหลืองสำหรับสุกรระยะรุ่น โดยใช้สุกรลูกผสมเพศผู้ตอนจำนวน 66 ตัว มีอายุประมาณ 6 สัปดาห์ เลี้ยงด้วยอาหารที่มีฟอสฟอรัสอย่างเพียงพอซึ่งมีฟอสฟอรัสที่ไม่ได้อยู่ในรูปไฟเตท 0.34 เปอร์เซ็นต์ หรืออาหารที่มีฟอสฟอรัสในระดับต่ำซึ่งมีฟอสฟอรัสที่ไม่ได้อยู่ในรูปไฟเตท 0.2 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างเอนไซม์ไฟเตสที่ได้จากยีสต์ที่ระดับ 0, 1,000, 2,000 และ 4,000 หน่วยต่อกก.อาหาร และเอนไซม์ไฟเตสที่ได้จาก *A. niger* ที่ระดับ 1,000 หน่วยต่อกก.อาหาร พบว่า การใช้เอนไซม์ไฟเตสจากยีสต์ที่ระดับ 4,000 หน่วยต่อกก.อาหาร สามารถปรับปรุงประสิทธิภาพการใช้ประโยชน์ได้ของฟอสฟอรัสในอาหารสุกรระยะรุ่น ให้ผลดีพอๆกับการใช้เอนไซม์ไฟเตสจาก *A. niger* ที่ระดับ 1,000 หน่วยต่อกก.อาหาร

ลิขสิทธิ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Copyright© by Chiang Mai University
All rights reserved