บทที่ 1

บทนำ

1. บทนำต้นเรื่อง

อาหารเป็นต้นทุนหลักที่สำคัญต่อการเลี้ยงปลาในระบบการเลี้ยงแบบกึ่งพัฒนาและแบบพัฒนาโดยคิดเป็น 40-60 เปอร์เซ็นต์ ของต้นทุนทั้งหมด (FAO, 1983; Dey *et al.*, 2002) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการพัฒนาสูตรอาหารเพื่อให้มีความเหมาะสมกับชนิดของปลาที่เลี้ยง ซึ่งต้องประกอบด้วยสารอาหารที่ปลาต้องการอย่างครบถ้วนจึงจะทำให้ปลามีอัตราการเจริญเติบโต และอัตราการแลกเนื้อที่ดี โดยอาหารที่ดีต้องมีราคาต่ำ ดังนั้นการประยุกต์ใช้วัตถุดิบจากพืชชนิดต่างๆที่มีในท้องถิ่น เพื่อนำมาใช้ทำอาหารสำหรับปลาจึงเป็นสิ่งจำเป็น จากการทดลองของ วุฒิพร พรหมขุนทอง และคณะ (2547) พบว่าสามารถใช้กากเนื้อเมล็ดในปาล์มน้ำมันแทนที่ปลาป่น ได้ 20 เปอร์เซ็นต์ ในอาหารสำหรับเลี้ยงปลานิลแดงแปลงเพศโดยไม่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของปลา และทำให้ต้นทุนค่าอาหารลดลง 20 เปอร์เซ็นต์ แม้วัตถุดิบพืชจะมีราคาถูก แต่มีข้อจำกัดในการใช้หลายอย่าง โดยเฉพาะองค์ประกอบที่เป็นสารต้านโภชนาการซึ่งพบในวัตถุดิบเหล่านั้น และมีความแตกต่างกันตามชนิดของวัตถุดิบพืช เช่น สารยับยั้งการทำงานของเอนไซม์โปรติเอส (protease inhibitors) กลูโคไซโนเลส (glucosinolase) ซาโปนิน (saponins) แทนนิน(tannins) เลกติน (lectins) โอลิโกแซคคาร์ไรด์ (oligosaccharides) โพลีแซคคาร์ไรด์ที่ไม่ใช่แป้ง(non-starch polysaccharides) สารต้านวิตามิน (antivitamins) และไฟเตท (phytates) เป็นต้น ผลของสารต้านโภชนาการเหล่านี้จะมีผลกระทบต่อปลาในลักษณะที่แตกต่างกัน(Liener, 1994; Francis *et al.*, 2001) กรดไฟติก (phytic acid) เป็นสารต้านโภชนาการที่เป็นองค์ประกอบหนึ่งในวัตถุดิบพืชที่มีฟอสฟอรัสอยู่ในโครงสร้างเป็นจำนวนมาก ซึ่งจะประกอบด้วยกรดฟอสฟอริก 6 กลุ่มจับอยู่กับไมโออินโนซิทอล (myoinositol) มีสมบัติเป็นคีเลต (chelate) จะยึดจับกับโมเลกุลของแร่ธาตุที่มีประจุบวกสองขึ้นไป เช่น แคลเซียม (Ca^{2+}) แมกนีเซียม (Mg^{2+}) สังกะสี (Zn^{2+}) ทองแดง (Cu^{2+}) และเหล็ก (Fe^{3+}) ทำให้ความสามารถในการนำสารอาหาร และแร่ธาตุ ซึ่งถูกเก็บสะสมอยู่ในโครงสร้างส่วนนี้ของวัตถุดิบพืชไปใช้ประโยชน์ได้ลดลง ส่วนไฟเตทเป็นเกลืออนุพันธ์ของกรดไฟติกมีโครงสร้างที่ประกอบด้วยกรดไฟติก ที่ไปรวมตัวกับแร่ธาตุต่างๆที่มีประจุบวกสอง หรือกรดอะมิโนบางชนิด กลายเป็นสารประกอบที่มีโครงสร้างซับซ้อนไม่สามารถที่จะถูกย่อยสลายและดูดซึมไปใช้ประโยชน์ได้ แต่การย่อยสลายจะเกิดขึ้นเมื่อมีเอนไซม์ไฟเตส (phytase) เท่านั้น จึงทำให้ไฟเตทมี

คุณสมบัติเป็นสารต้านการดูดซึมแร่ธาตุในองค์ประกอบของวัตถุดิบพืชที่สำคัญ และทำให้การใช้ประโยชน์จากแร่ธาตุดังกล่าวในอาหารลดลง (Francis *et al.*, 2001) วัตถุดิบพืชส่วนใหญ่มีฟอสฟอรัสอยู่ในรูปของ ไฟเตท และกรดไฟติก ประมาณ 50-80 เปอร์เซ็นต์ ของปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมดที่มีอยู่ (Chung, 2002) ซึ่งเป็นรูปที่สัตว์น้ำไม่สามารถย่อยและดูดซึมได้ เนื่องจากในระบบทางเดินอาหารของสัตว์น้ำมีเอนไซม์ไฟเตสในปริมาณที่น้อย และไฟเตสที่มีอยู่ในวัตถุดิบก็มีปริมาณน้อยมากจนไม่สามารถที่จะทำการย่อยไฟเตทได้ (Ellestad *et al.*, 2003)

โดยทั่วไปการสร้างสูตรอาหารสำหรับปลาจะมีการเสริมอนินทรีย์ฟอสเฟตเพื่อเพิ่มปริมาณของฟอสฟอรัสในอาหารให้สูงขึ้น (Eya and Lovell, 1997a) ทำให้ในอาหารมีปริมาณฟอสฟอรัสที่พอเพียงต่อความต้องการของปลา ส่งผลให้ฟอสฟอรัสซึ่งมีอยู่ในวัตถุดิบอาหารจำพวกพืชไม่ถูกใช้ประโยชน์ และถูกขับทิ้งสู่สภาพแวดล้อม ผลของฟอสฟอรัสที่ถูกขับทิ้งสู่แหล่งน้ำ จัดเป็นสารมลภาวะที่มีความสำคัญยิ่ง เพราะสามารถทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่ร้ายแรงต่อแหล่งน้ำนั้น โดยเป็นสาเหตุหนึ่งที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (eutrophication) (Baden *et al.*, 1990; Laws, 2000; Hardy and Gatlin, 2002; Tacon and Forster, 2003) ซึ่งจะส่งผลให้สิ่งมีชีวิตในบริเวณนั้นตาย หรือเปลี่ยนแปลงจำนวน และโครงสร้างประชากรสิ่งมีชีวิตในระบบนิเวศบริเวณนั้น

ปัญหาสิ่งแวดล้อมในปัจจุบันเป็นประเด็นที่ได้รับความสนใจอย่างมากในเรื่องของการผลิตสินค้า เพราะในระบบการค้าระหว่างประเทศมีการป้องกันการผลิตสินค้าที่ทำให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม โดยมีการกีดกันสินค้าที่ไม่ผ่านมาตรฐานทางด้านสิ่งแวดล้อม ทำให้ไม่สามารถขายสินค้าและผลิตภัณฑ์ให้แก่กลุ่มประเทศเหล่านั้นได้ โดยเฉพาะประเทศในแถบยุโรปและสหรัฐอเมริกา (สำนักงานคณะกรรมการพัฒนาการเศรษฐกิจและสังคมแห่งชาติ, 2544) ดังนั้นจึงจำเป็นต้องระมัดระวังในกรณีดังกล่าวให้มาก

ไฟเตสเป็นเอนไซม์ในกลุ่มของฟอสฟาเตส (phosphatase) ที่สามารถไฮโดรไลซ์ (hydrolyze) แยกสารอนินทรีย์ฟอสเฟตออกจากสารอินทรีย์ฟอสเฟตที่ พันธะระหว่าง P-O เอนไซม์นี้สามารถทำให้โมเลกุลของฟอสเฟตหลุดจากโครงสร้างของกรดไฟติก และไฟเตท โดยกิจกรรมของเอนไซม์ไฟเตสจะเกิดได้ในสภาวะที่ค่อนข้างเป็นกรด ความเป็นกรดด่างประมาณ 5.0-5.5 และที่ประมาณ 2 (Konietzny and Greiner, 2002; Baruah *et al.*, 2005) ได้แก่บริเวณกระเพาะ และลำไส้เล็กโดยเกิดขึ้นในบริเวณของเยื่อบุผนังลำไส้เล็ก (small intestinal brush border membrane: La Vorgna, 1998 อ้างโดย Ellestad *et al.*, 2003) ซึ่งจากการศึกษาในห้องปฏิบัติการได้ผลยืนยันว่า ในปลานิลจะมีกิจกรรมของเอนไซม์ไฟเตสที่บริเวณเยื่อบุผนังลำไส้เล็ก

จริง (Ellestad, 2002 อ้างโดย Ellestad *et al.*, 2003) แต่มีปริมาณไม่มาก และถ้าทำการเสริมเอนไซม์ไฟเตสลงในอาหารจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยฟอสฟอรัส รวมถึงแร่ธาตุอื่นๆ ที่มีอยู่ในวัตถุดิบพืชให้สูงขึ้นได้ (Sugiura *et al.*, 2001; Cheng and Hardy, 2003)

ดังนั้นจะเห็นได้ว่าการเสริมเอนไซม์ไฟเตสลงในอาหารปลาจะทำให้เพิ่มการใช้ประโยชน์ของฟอสฟอรัสจากวัตถุดิบพืชได้มากขึ้น และการศึกษาผลของเอนไซม์ไฟเตสต่อประสิทธิภาพการย่อยวัตถุดิบพืชแต่ละชนิดทำให้ทราบถึงปริมาณชีวภาพพร้อมใช้ (bioavailability) ของวัตถุดิบพืชชนิดนั้น เพื่อใช้ในการสร้างสูตรอาหารที่มีฟอสฟอรัสซึ่งสามารถใช้ประโยชน์ได้ (availability phosphorus) จากวัตถุดิบพืช ใกล้เคียงกับความต้องการของปลา เพื่อที่จะช่วยลดการใช้อนินทรีย์ฟอสเฟตในสูตรอาหารลงได้ การศึกษานี้แบ่งการทดลองเป็น 2 การทดลอง การทดลองที่ 1 ทำการศึกษาผลของเอนไซม์ไฟเตสต่อประสิทธิภาพการย่อยวัตถุดิบพืช 5 ชนิด คือ กากถั่วเหลือง กากเนื้อเมล็ดในปาล์มน้ำมัน รำละเอียด ข้าวโพด และมันสำปะหลังเส้น ผลจากการทดลองนี้ทำให้ทราบค่าสัมประสิทธิ์การย่อยฟอสฟอรัสจากวัตถุดิบพืชแต่ละชนิดที่เป็นผลเนื่องจากการเสริมเอนไซม์ไฟเตส และไม่เสริมเอนไซม์ไฟเตสในปลานิลแดงแปลงเพศ การทดลองที่ 2 เป็นการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้เอนไซม์ไฟเตสในการเพิ่มการใช้ประโยชน์จากฟอสฟอรัสในวัตถุดิบพืชทดแทนการเสริมอนินทรีย์ฟอสเฟตลงในอาหาร โดยจะสร้างสูตรอาหารจากข้อมูลจากการทดลองที่ 1 มาประยุกต์ และปรับปริมาณฟอสฟอรัสให้ได้ตามความต้องการของปลานิล ทั้งนี้โดยเปรียบเทียบระหว่างสูตรอาหารที่เสริมเอนไซม์ไฟเตสกับเสริม อนินทรีย์ฟอสเฟต การทดลองนี้จะทำให้ทราบถึงผลของเอนไซม์ไฟเตสและอนินทรีย์ฟอสเฟตต่อการเจริญเติบโต ประสิทธิภาพการใช้อาหาร ประสิทธิภาพการย่อยฟอสฟอรัส การเก็บสะสมฟอสฟอรัสในร่างกาย และฟอสฟอรัสที่ถูกขับทิ้งของปลานิลแดงแปลงเพศ

2. ตรวจเอกสาร

2.1 ความสำคัญของฟอสฟอรัส

ฟอสฟอรัสเป็นแร่ธาตุชนิดหนึ่งที่ปลามีความต้องการในปริมาณที่มาก และมีความสำคัญ โดยฟอสฟอรัสที่อยู่ในรูปอินทรีย์ฟอสเฟตจะทำหน้าที่เป็นองค์ประกอบต่างๆ ซึ่งมีบทบาทที่เกี่ยวข้องกับการเจริญเติบโต กระบวนการเมแทบอลิซึมต่าง ๆ ทั้ง คาร์โบไฮเดรต ไขมัน และกรดอะมิโน เกี่ยวข้องกับโครงสร้างของสารพันธุกรรมต่างๆ เป็นโครงสร้างของเยื่อหุ้มเซลล์ และเกี่ยวข้องกับกระบวนการปรับสมดุลแร่ธาตุภายในร่างกาย (Lall, 2002) โดยอนินทรีย์ฟอสเฟตจะ

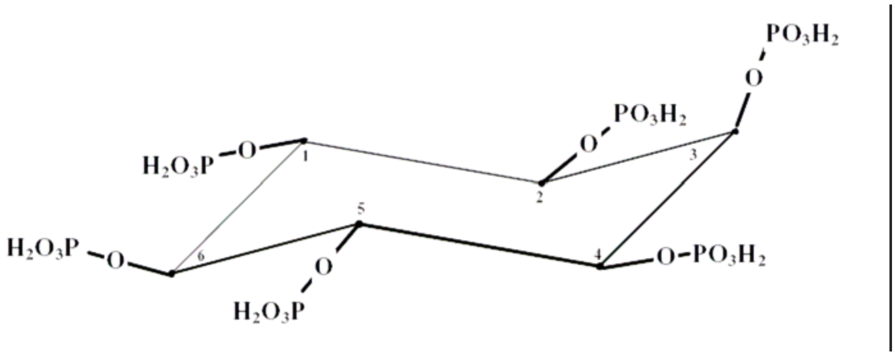
ทำหน้าที่สำคัญในการเป็นบัฟเฟอร์ เพื่อรักษาระดับความเป็นกรดด่างของของเหลวในร่างกายของปลา (Lovell, 1989; Davis and Gatlin, 1991; NRC, 1993) ปลาน้ำจืดจะมีระดับความต้องการฟอสฟอรัสสูงกว่าปลาน้ำเค็ม เนื่องจากจะต้องนำไปใช้ในระบบที่เกี่ยวข้องกับการปรับสมดุลเกลือแร่ในร่างกายเนื่องจากปลามีการขับฟอสฟอรัสในรูปของฟอสเฟต ที่อยู่ในยูรินารี (urinary) มีมากกว่าปลาน้ำเค็ม (Chester Jones *et al*., 1969 อ้างโดย Lall 2002) ปลาที่ได้รับฟอสฟอรัสไม่เพียงพอหรือขาดฟอสฟอรัสจะเจริญเติบโตช้า และมีความผิดปกติทางร่างกาย เช่น ปลากดอเมริกัน (channel catfish, *Ictalurus punctatus*) ปลากะพงขาว (seabass, *Lates calcarifer*) และปลานิล (Nile tilapia, *Oreochromis niloticus*) ที่ขาดฟอสฟอรัส พบว่าจะมีการเจริญเติบโตช้า ประสิทธิภาพการใช้อาหารต่ำ ปริมาณแคลเซียม ฟอสฟอรัส และเถ้าของร่างกายลดลง ปริมาณฮีมาโตคริต และฟอสเฟตในเลือดลดลง (Andrews *et al*., 1973; Wilson *et al*., 1982) แหล่งของฟอสฟอรัสที่ปลาได้รับมาจาก 2 แหล่งคือ ฟอสฟอรัสที่ละลายอยู่ในน้ำ เป็นฟอสฟอรัสในน้ำในรูปที่สัตว์น้ำนำไปใช้ประโยชน์ได้จำกัด โดยมีในปริมาณต่ำกว่า 0.1 มิลลิกรัมต่อน้ำ 1 ลิตร (ppm) ทำให้สัตว์น้ำได้รับฟอสฟอรัสจากน้ำน้อยคือต่ำกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ของฟอสฟอรัสที่ได้รับจากอาหาร (NRC, 1993) และฟอสฟอรัสที่อยู่ในอาหารซึ่งเป็นแหล่งฟอสฟอรัสที่สำคัญสำหรับปลา ฟอสฟอรัสในอาหารส่วนใหญ่ได้มาจากวัตถุดิบสัตว์ และพืช แม้ว่าแหล่งของวัตถุดิบเหล่านี้จะมีฟอสฟอรัสอยู่ในปริมาณสูง แต่อยู่ในรูปที่ปลาสามารถย่อยและดูดซึมได้น้อย เช่น ปลาป่นมีฟอสฟอรัสบางส่วนในรูปสารประกอบไฮดร็อกซีอะพาไทต์ (hydroxyapatite) หรือ ไตรแคลเซียมฟอสเฟต (tricalcium phosphate) ซึ่งเป็นโครงสร้างของกระดูกและเกล็ดปลาที่ใช้ทำปลาป่น ฟอสฟอรัสรูปแบบนี้ปลาสามารถดูดซึมมาใช้ได้น้อย (Jobling, 1994) และวัตถุดิบพืชโดยส่วนใหญ่มีฟอสฟอรัสอยู่ในรูปของกรดไฟติก (myo-inositol hexakis dihydrogen phosphate) และไฟเตท (Chung, 2002) ซึ่งฟอสฟอรัสในรูปเหล่านี้สัตว์กระเพาะเดี่ยว เช่นปลาสามารถย่อยและดูดซึมไปใช้ประโยชน์ได้น้อยมาก เนื่องจากมีปริมาณและประสิทธิภาพการทำงานของน้ำย่อยที่ต่ำ (Wang *et al*., 1980) ทำให้ต้องมีการเสริมอนินทรีย์ฟอสเฟตลงในอาหารเพื่อให้มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เพียงพอกับความต้องการของปลา โดยทั่วไปปลามีความต้องการฟอสฟอรัสแตกต่างกันออกไปตามชนิด ขนาดหรืออายุ และเพศ โดยปลาเรนโบว์เทร้ามีความต้องการฟอสฟอรัสในอาหารเพื่อการเจริญเติบโตและสร้างกระดูกประมาณ 0.7 ถึง 0.8 เปอร์เซ็นต์ของอาหารทั้งหมด (Ogino and Takeda, 1978) จากการศึกษาของ Wilson และคณะ (1982) รายงานว่า ปลากดอเมริกันต้องการฟอสฟอรัสที่ใช้ประโยชน์ได้ 0.4 เปอร์เซ็นต์ สำหรับปลานิล (blue tilapia, *O. aureus*) ต้องการฟอสฟอรัสที่ใช้ประโยชน์ได้ในระดับ 0.50 เปอร์เซ็นต์ *O. niloticus* 0.46

เปอร์เซ็นต์ (Haylor *et al.*, 1988) และปลานิลแดงแปลงเพศมีความต้องการฟอสฟอรัสที่ใช้ประโยชน์ได้ 0.76 เปอร์เซ็นต์ (Phromkunthong and Udom, 2006) ซึ่งตัวอย่างความต้องการฟอสฟอรัสของปลาชนิดต่างๆแสดงไว้ในตารางที่ 1

2.2 แหล่งของฟอสฟอรัส จะได้มาจาก 3 แหล่งที่สำคัญคือ

2.2.1 วัตถุดิบจากพืช

ฟอสฟอรัสจากวัตถุดิบพืช เป็นแหล่งฟอสฟอรัสที่มีราคาถูก ซึ่งสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อลดต้นทุนของอาหารที่ใช้เลี้ยงสัตว์น้ำ แต่วัตถุดิบพืชมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น เรื่องกลิ่น รสชาติของอาหาร และเรื่องของการใช้ประโยชน์จากสารอาหารได้ไม่เต็มที่ เช่น กากถั่วเหลืองหรือรำละเอียด ปลาสามารถย่อยฟอสฟอรัสได้น้อยมากประมาณ 8-20 เปอร์เซ็นต์ (วีรพงศ์ วุฒิพันธุ์ชัย, 2536) โดยฟอสฟอรัสจากพืชประมาณ 2 ใน 3 ส่วนของฟอสฟอรัสทั้งหมดจะอยู่ในรูปของกรดไฟติก ซึ่งมักรวมอยู่กับเกลือของแคลเซียม แมกนีเซียม โพแตสเซียม (Dey and Harborne, 1990) เรียกว่า ไฟติน (phytin) ดังรูปที่ 1 ส่วนเกลือของกรดไฟติกที่ประกอบด้วยอินโนซิทอลกับฟอสเฟต จะเรียกว่า ไฟเตท (Uhlig, 1998) แหล่งฟอสฟอรัสจากวัตถุดิบจากพืชมีหลายชนิดได้แก่ รำละเอียด รำข้าวสาลี คาร์โนลา เป็นต้น (Chung, 2002)



รูปที่ 1 โครงสร้างทางเคมีของ กรดไฟติก (myo-inositol 1,2,3,4,5,6-hexakis phosphate) (Adeola and Sands, 2003)

2.2.2 วัตถุดิบจากสัตว์

วัตถุดิบจากสัตว์เป็นแหล่งของฟอสฟอรัสที่ดี มีฟอสฟอรัสอยู่ในปริมาณสูง และสัตว์น้ำสามารถย่อย และนำฟอสฟอรัสไปใช้ได้สูงกว่าวัตถุดิบจากพืช โดยเฉพาะฟอสฟอรัสจากปลาป่น ปลาทั่วไปสามารถย่อยปลาป่นได้ประมาณ 60-80 เปอร์เซ็นต์ แต่ก็ขึ้นอยู่กับชนิดของปลาด้วย โดยพบว่าการใช้ประโยชน์ของฟอสฟอรัสจากปลาป่นในปลานิล จะมีค่าต่ำ

กว่าเมื่อเปรียบเทียบกับปลาเรนโบว์เทร้า (rainbow trout) และปลาชัม แซลมอน (chum salmon) โดยปลาชัม แซลมอน นำไปใช้ได้ 71 เปอร์เซ็นต์ และในปลานิล นำไปใช้ได้ 65 เปอร์เซ็นต์ (Watanabe *et al*., 1980a, b) สำหรับปลากดอเมริกัน (channel catfish) สามารถใช้ฟอสฟอรัสจากปลาป่นที่ทำจากปลาแอนโชวี (anchovy) และปลาเมนฮาเดน (menhaden) ได้ถึง 60 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในกลุ่มแซลมอนอื่น ย่อยได้ประมาณ 40-60 เปอร์เซ็นต์ (Riche and Brown, 1996) และในปลาไนก็ใช้ประโยชน์จากฟอสฟอรัสจากปลาป่นได้ต่ำกว่าปลาเรนโบว์เทร้า (Ogino *et al*., 1979) ซึ่งความแตกต่างของการใช้ฟอสฟอรัสจากปลาป่นของ ปลาแซลมอน, ปลาไน และปลานิลอาจเกิดจากข้อจำกัดของน้ำย่อยในกระเพาะที่ย่อยฟอสฟอรัส (Watanabe *et al*., 1988; NRC, 1993) และเนื่องจากฟอสฟอรัสในปลาป่นส่วนใหญ่อยู่ในรูปที่เรียกว่า insoluble hydroxyapatite ซึ่งมาจากส่วนของเนื้อเยื่อส่วนแข็งได้แก่ กระดูก และเกล็ด ความสามารถในการนำฟอสฟอรัสจากปลาป่นไปใช้ประโยชน์ในปลาไนจึงค่อนข้างต่ำโดยนำไปใช้ได้เพียง 10-33 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในปลาแบล็คซีบรีม (black sea bream) นำไปใช้ได้ประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ (Yone and Toshima. 1979 อ้างโดย NRC, 1993)

2.2.3 อนินทรีย์ฟอสเฟต

สำหรับฟอสฟอรัสในรูปสารอนินทรีย์นิยมใช้สมทบในอาหารปลา เนื่องจากปลาสามารถย่อยและดูดซึมไปใช้ประโยชน์ได้มากกว่าแหล่งอื่นๆ โดยรูปแบบของ อนินทรีย์ฟอสเฟตที่นิยมเสริมในอาหารปลามี 3 รูปแบบ คือ โมโนเบสิค (monobasic) ไดเบสิค (dibasic) และ ไตรเบสิค (tribasic) โดยปลาจะสามารถใช้ฟอสฟอรัสในรูป โมโนเบสิค และไดเบสิค เนื่องจากอยู่ในรูปที่แตกตัวได้ง่าย และละลายน้ำได้ดีกว่าในรูปไตรเบสิค และปลาที่กระเพาะมีกรดเกลือสามารถย่อยฟอสฟอรัสให้แตกตัวออกมาได้ โดยเฉพาะไตรแคลเซียมฟอสเฟต ซึ่งจะละลายได้ดีในสารละลายที่เป็นกรดแก่เท่านั้น จึงทำให้ปลาเรนโบว์เทร้าดูดซึมนำไปใช้ประโยชน์ได้มาก แต่ปลาไนไม่มีกระเพาะอาหารจึงไม่มีกรดเกลือมาช่วยในการย่อยฟอสฟอรัส (Watanabe *et al*., 1988; NRC, 1993) โดยในปลาเรนโบว์เทร้า สามารถนำฟอสฟอรัสจากโมโนแคลเซียมฟอสเฟตมาใช้ประโยชน์ได้ 94 เปอร์เซ็นต์ และฟอสฟอรัสจากไตรแคลเซียมฟอสเฟตได้ 64 เปอร์เซ็นต์ และปลาไนสามารถนำฟอสฟอรัสจากโมโนแคลเซียมฟอสเฟตมาใช้ประโยชน์ได้ 94 เปอร์เซ็นต์ และฟอสฟอรัสจากไตรแคลเซียมฟอสเฟตได้ 13 เปอร์เซ็นต์ (Clark, 1989)

ตารางที่ 1 ความต้องการฟอสฟอรัสในอาหารของปลาชนิดต่างๆ

ชนิดของปลา	ความต้องการฟอสฟอรัสในอาหาร (เปอร์เซ็นต์)	เอกสารอ้างอิง
แฮดดอก (*Melanogrammus aeglefinus* L.)	0.72 (ฟอสฟอรัสที่ใช้ประโยชน์ได้)	Roy and Lall (2003)
ปลานิล *(O. aureus*)	0.5	Robinson *et al*. (1987)
ปลานิล (*O. niloticus*)	0.46	Haylor *et al*. (1988)
	0.9	Watanabe *et al*. (1980a)
	0.45-0.6	Viola and Ariele (1983)
	0.4	Lovell (1998)
ปลานิลแดงแปลงเพศ (ไม่ระบุชนิด)	0.76 (ฟอสฟอรัสที่ใช้ประโยชน์ได้)	Phromkunthong and Udom (2006)
ปลาเรนโบว์เทร้า *(Oncorhynchus mykiss)*	0.37	Rodehutscord and Pfeffer (1995)
	0.7	Lall, 1991 อ้างโดย De Silva and Anderson (1995)
ปลาแอตแลนติกแซลมอน *(Salmo salar*)	0.5-0.7	Ketola (1975); Lovell (1998)
ปลากดอเมริกัน (*Ictalurus punctatus*)	0.8	Andrews *et al*. (1973)
	0.4	NRC (1993)
	0.36	Eya and Lovell (1997b)
	0.3-0.4	Lovell (1998)
ปลาไน *(Cyprinus carpio*)	0.6-0.7	Ogino and Takeda (1978)
ปลากะพงขาว (*Lates calcarifer* (Bloch))	0.55	มะลิ บุณยรัตผลิน และ จูอะดี พงศ์มณีรัตน์ (2533)

2.3 การดูดซึมฟอสฟอรัส

ฟอสฟอรัสจากอาหารจัดเป็นแหล่งที่สำคัญที่สุดสำหรับปลา โดยปริมาณของฟอสฟอรัสที่ดูดซึมเข้าสู่ร่างกายจะส่งผลโดยตรงต่อปริมาณฟอสเฟตในเลือด (Kudriavetz and Pora, 1958; Phillips, 1962 อ้างตาม Lall, 2002) ฟอสฟอรัสที่ดูดซึมได้จะถูกเก็บสะสมไว้ในเนื้อเยื่ออ่อนนุ่ม (soft tissues) เช่น หัวใจ ตับ ไต กล้ามเนื้อ และเลือด เป็นต้น แต่ในโครงร่างแข็ง (skeletal tissues) มีปริมาณการเก็บสะสมเอาไว้ค่อนข้างต่ำ ซึ่งฟอสฟอรัสที่สะสมในเนื้อเยื่ออ่อนนุ่มสามารถสูญเสีย หรือถูกขับออกจากร่างกายได้อย่างรวดเร็ว แต่ที่อยู่ในโครงร่างแข็งจะไม่พบการสูญเสีย (Tomiyama *et al*., 1956; Asno and Ito, 1957 อ้างตาม Lall, 2002) กลไกการดูดซึมและเคลื่อนย้ายฟอสฟอรัสในปลายังมีรายงานการศึกษาที่ไม่ชัดเจน แต่ในสัตว์มีกระดูกสันหลังชั้นสูงเกิดขึ้นโดยอาศัยกระบวนการแอคทีพทรานสปอร์ต (active transport) ที่บริเวณลำไส้ (Lall, 2002) จากการศึกษาการดูดซึมอนินทรีย์ฟอสเฟต (PO_4^{3-}) ในลำไส้ของปลาไน พบว่าการดูดซึมจะเกิดขึ้นบริเวณส่วนกลางของลำไส้มากกว่าบริเวณส่วนหน้าและส่วนท้าย (Nakamura, 1985)

ความสามารถของปลาในการย่อย และดูดซึมฟอสฟอรัสจากอาหารมาใช้ประโยชน์มีความแตกต่างกันขึ้นอยู่กับหลายปัจจัยได้แก่ ปริมาณของแร่ธาตุในอาหาร โครงสร้างทางเคมี ขนาดของอาหาร ปฏิสัมพันธ์ระหว่างสารอาหาร ชนิดและปริมาณของสารคีเลตในอาหาร สารต้านโภชนาการที่มีอยู่ สรีระวิทยาและพยาธิสภาพของปลาในแต่ละช่วงอายุ คุณสมบัติทางเคมีของน้ำ แหล่งของฟอสฟอรัสในอาหารเช่นจากส่วนประกอบของวัตถุดิบ ซึ่งจะมีองค์ประกอบของโมเลกุลชนิดต่างๆเชื่อมต่อกับฟอสฟอรัสก็ยังส่งผลให้รูปแบบการดูดซึมแตกต่างกันด้วย (Lall, 2002) และความเป็นกรดด่างของกระเพาะอาหารของปลายังส่งผลต่อความสามารถในการใช้ประโยชน์จากแร่ธาตุในอาหาร (Vielma and Lall, 1998; Sugiura *et al*., 1999) นอกจากนี้ปลาที่มีกระเพาะอาหาร เช่น ปลาดุก ปลากะพงขาว ปลาแซลมอน และปลาเรนโบว์เทร้า มีความสามารถในการย่อยและดูดซึมฟอสฟอรัสได้ดีกว่าปลาที่ไม่มีกระเพาะอาหาร เช่น ปลาไนเนื่องจากภายในกระเพาะอาหารมีสภาพเป็นกรดจึงทำให้ฟอสฟอรัสแตกตัวอยู่ในรูปอิสระ (อิออน) ได้ดีขึ้น จากการศึกษาของ Watanabe และคณะ (1988) พบว่า ปลาเรนโบว์เทร้าสามารถย่อยและดูดซึมไดแคลเซียมฟอสเฟต และไตรแคลเซียมฟอสเฟตได้ 71 และ 64 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ปลาไนย่อยและดูดซึมมาใช้ประโยชน์ได้เพียง 46 และ 13 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับเท่านั้น เนื่องจากปลาที่มีกระเพาะมีกรดเกลือสามารถย่อยฟอสฟอรัสให้แตกตัวออกมาได้ โดยเฉพาะไตรแคลเซียมฟอสเฟต ซึ่งจะละลายได้ดีในสารละลายที่เป็นกรดแก่เท่านั้น จึงทำให้ปลาเรนโบว์เทร้าดูดซึมนำไปใช้ประโยชน์ได้มาก แต่ปลาไนไม่มีกระเพาะอาหารจึงไม่มีกรดเกลือมาช่วยในการละลายฟอสฟอรัส

ปลาเรนโบว์เทร้าที่ได้รับอาหารที่มีฟอสฟอรัสในรูปไดแคลเซียมฟอสเฟตหรือไตรแคลเซียมฟอสเฟต จึงมีอัตราการเจริญเติบโตใกล้เคียงกัน (Watanabe *et al*., 1988)

ฟอสฟอรัสในรูปสารอนินทรีย์ ส่วนมากจะมีคุณสมบัติแตกตัวได้ง่ายและอยู่ในรูปอิสระ จึงถูกดูดซึมผ่านผนังกระเพาะอาหารหรือลำไส้ได้ง่าย (วีรพงศ์ วุฒิพันธุ์ชัย, 2536) สำหรับการใช้ประโยชน์จากอนินทรีย์ฟอสเฟตขึ้นอยู่กับชนิดของสาร และปริมาณที่ผสมในลงอาหาร Eya และ Lovell (1997b) พบว่า ปลากดอเมริกันสามารถดูดซึมโมโนโซเดียมฟอสเฟตได้ดีที่สุด คือ 88.6เปอร์เซ็นต์ รองลงมา ได้แก่ โมโนแอมโมเนียมฟอสเฟต 85.4 เปอร์เซ็นต์ โมโนแคลเซียม-ฟอสเฟต 81.2 เปอร์เซ็นต์ ไดแคลเซียมฟอสเฟต 74.8 เปอร์เซ็นต์ และไตรแคลเซียมฟอสเฟตได้ 54.8 เปอร์เซ็นต์

อย่างไรก็ตามการเสริมด้วยอนินทรีย์ฟอสเฟตแม้ว่าจะทำให้อาหารมีปริมาณของฟอสฟอรัสตามต้องการ แต่มีผลเสียคือ ส่งผลให้มีปริมาณฟอสฟอรัสถูกขับออกจากมูลมากขึ้น (Kim *et al*., 1998)

2.4 เอนไซม์ไฟเตส

ไฟเตส (phytase: myo-inositol hexaphosphate phosphohydrolase) เป็นเอนไซม์ในกลุ่มฟอสฟาเตส (phosphatase) (Cosgrove, 1980) เอนไซม์กลุ่มนี้ทำหน้าที่ในการเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (hydrolysis) แยกสารอนินทรีย์ฟอสเฟตออกจากสารอินทรีย์ฟอสเฟตที่ตำแหน่งพันธะ P-O บอนด์ (Nys *et al*., 1996) และทำหน้าที่ในการเร่งปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสกรด ไฟติก หรือไฟเตท โดยทำให้ฟอสเฟตหลุดออกจากโมเลกุลของไฟเตททีละตัว เกิดเป็นผลิตภัณฑ์ตัวกลางที่มีชื่อว่า อินโนซิทอล เพนตะฟอสเฟต (inositol pentaphosphate) คือมี อินโนซิทอลจับอยู่กับฟอสเฟต 5 กลุ่ม จากนั้นถูกย่อยต่อไปได้เป็นอินโนซิทอลเตทตราฟอสเฟต (inositol tetraphosphate) อินโนซิทอล ไตรฟอสเฟต (inositol triphosphate) อินโนซิทอลไดฟอสเฟต (inositol diphosphate) และอินโนซิทอลโมโนฟอสเฟต (inositol monophosphate) ตามลำดับ จนกระทั่งหมู่ฟอสเฟตที่จับอยู่กับอินโนซิทอลถูกย่อยสลายออกมาทั้งหมด 6 โมเลกุล (Jongbloed *et al*., 1993) เอนไซม์ไฟเตสที่รู้จักกันดี คือ 3-phytase และ 6-phytase โดย 3-phytase จะเริ่มสลายพันธะของกลุ่มออโธฟอสเฟตออกจากโมเลกุลของกรดไฟติกหรือไฟเตทที่ตำแหน่งที่ 3 และ 6-phytase เริ่มที่ตำแหน่งที่ 6

โดยทั่วไปเอนไซม์ไฟเตสสามารถพบได้ในเนื้อเยื่อพืช สัตว์ และจุลินทรีย์ เช่น ยีสต์ รา แบคทีเรีย (Gifford and Clydesdale, 1990) ส่วนที่พบในเนื้อเยื่อพืชพบในผัก ผลไม้ โดย

เฉพาะในเมล็ดธัญพืช เช่น ข้าวสาลี ข้าวไรน์ ข้าวโพด รำข้าว และถั่วต่างๆ เช่นเมล็ดถั่วเหลือง ถั่วเขียว ถั่วแขก เมล็ดพืชตระกูลผักกาด ในสัตว์สามารถพบได้ในเลือดของนก สัตว์เลื้อยคลาน ปลา เต่าทะเล หมู หนู ไก่ มนุษย์ และจะพบมากในกระเพาะของสัตว์สี่กระเพาะ ซึ่งภายในจะมี จุลินทรีย์ที่ทำหน้าที่เป็นตัวสร้างเอนไซม์ออกมา และในจุลินทรีย์ต่างๆ ทั้งจากแบคทีเรีย *(Bacillus subtilis, Lactobacillus amylovorus* และ*Enterobacter* sp. เป็นต้น) เชื้อรา (ในกลุ่ม*ของ Aspergillus*, *Penicillium*, *Mucor* และ*Rhizopus*)(Konietzny and Greiner, 2002; Vohara and Satyanarayana, 2003) เอนไซม์ไฟเตสที่นิยมใช้เสริมในอาหารได้มาจากการสกัดจากจุลินทรีย์ ซึ่งปัจจุบันมีการผลิตเอนไซม์ออกมาจำหน่ายเป็นจำนวนมาก และเอนไซม์เหล่านั้นก็มีคุณสมบัติแตกต่างกัน ทั้งประสิทธิภาพการทำงาน ความคงทนต่อความเป็นกรดด่าง และอุณหภูมิ โดยวัตถุประสงค์ของการใช้เอนไซม์ไฟเตสในอาหารก็เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ฟอสฟอรัสจากอาหารที่เป็นวัตถุดิบจากพืชทั้งในสัตว์บกเช่น ไก่ และสุกร และสัตว์น้ำจำพวกปลา และเพิ่มการใช้ประโยชน์จากสารอาหารอื่นๆในวัตถุดิบพืช ทั้งนี้เนื่องจากในอาหารสัตว์น้ำจะมีแนวโน้มของการนำเอาวัตถุดิบพืชชนิดต่างๆ เข้ามาเป็นส่วนผสมมากขึ้น ทั้งการนำมาใช้เป็นแหล่งของโปรตีน พลังงาน และสารอาหารอื่นๆ ดังนั้นการเสริมเอนไซม์ไฟเตสจะเป็นการช่วยทำให้เกิดการใช้ประโยชน์จากวัตถุดิบพืชเหล่านั้นมากขึ้น (Vielma *et al* ., 1998; Riche *et al* ., 2001; Sugiura *et al*., 2001)

จากเหตุผลที่เอนไซม์ไฟเตสเป็นเอนไซม์ที่มีความสามารถในการ ไฮโดรไลส์ กรดไฟติก และไฟเตทได้ดี และพบว่ามีเอนไซม์ชนิดนี้ในอาหาร และทางเดินอาหารของปลาหรือสัตว์กระเพาะเดี่ยวในปริมาณที่ไม่เพียงพอที่จะทำให้สามารถย่อยกรดไฟติก และไฟเตทในอาหาร ซึ่งมีส่วนประกอบเป็นวัตถุดิบจากพืชได้ (Ellestad, 2003) เป็นผลให้มีการนำเอนไซม์ ไฟเตสเสริมลงในอาหารปลาเพื่อเพิ่มการใช้ประโยชน์จากฟอสฟอรัส โปรตีน และแร่ธาตุต่างๆ ในสารอาหาร (Storebakken *et al*., 1998; Forster, 1999; Cheng and Hardy, 2003; Debnath *et al*., 2005a; Debnath *et al*., 2005b) ในปลาชนิดต่างๆ

Sugiura และคณะ (2001) พบว่าการเสริมเอนไซม์ไฟเตสในอาหารปลาเรนโบเทร้า ที่มีวัตถุดิบพื้นฐานเป็นกากถั่วเหลืองทำให้การดูดซึมฟอสฟอรัส โปรตีน แคลเซียม แมงกานีส ทองแดง เหล็ก แมกนีเซียม สตรอมเซียม และสังกะสีเพิ่มขึ้นโดยการเสริมเอนไซม์ไฟเตส 4,000 ยูนิต/ อาหาร 1 กิโลกรัม จะเพิ่มการดูดซึมฟอสฟอรัสได้ถึง 90 เปอร์เซ็นต์ และลดระดับของฟอสฟอรัสที่ถูกขับทิ้งออกมาในมูลของปลาที่ได้รับอาหารที่มีกากถั่วเหลืองเป็นองค์ประกอบพื้นฐาน เมื่อเปรียบเทียบกับอาหารที่ใช้เลี้ยงปลาในเชิงการค้า 95-98 เปอร์เซ็นต์ ทำให้มีปริมาณของของเสียที่ถูกขับทิ้งในรูปของสารอินทรีย์ และฟอสฟอรัสลดลง จากการศึกษาของ Saijjadi และ

Carter (2004) พบว่าการเสริมเอนไซม์ไฟเตสลงในอาหารที่มีวัตถุดิบพื้นฐานเป็นกากเมล็ดคาโนลา (canola meal) ทำให้ปลาแอตแลนติกแซลมอนมีการสะสมของฟอสฟอรัสในกระดูกในเนื้อเยื่อมากกว่าปลาที่ได้รับอาหารที่มีการเสริมอนินทรีย์ฟอสเฟต และยังทำให้ค่าการสะสมของฟอสฟอรัสในตัวปลาสูงขึ้น มีปริมาณการขับทิ้งของฟอสฟอรัสลดลงกว่าการได้รับอาหารเสริมอนินทรีย์ฟอสเฟต

Furuya และคณะ (2001) ทำการทดลองเสริมเอนไซม์ไฟเตสลงในอาหารสำหรับปลานิล(Nile tilapia) โดยใช้สูตรอาหารที่มีส่วนผสมของกากถั่วเหลือง และปลาป่น ที่ระดับเอนไซม์ 0, 500, 1500 และ 3000 FTU/ อาหาร 1 กิโลกรัม พบว่าที่การเสริมเอนไซม์ที่ระดับ 500-1500 FTU/ อาหาร 1 กิโลกรัม จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการย่อย แคลเซียม ฟอสฟอรัส และโปรตีนในอาหาร

Portz และ Liebert (2004) พบว่าการเสริมเอนไซม์ไฟเตสลงในอาหารสำหรับปลานิล ที่มีวัตถุดิบพืชเป็นหลัก ที่ระดับ 1,000-2,000 FTU/อาหาร 1 กิโลกรัม สามารถเพิ่มอัตราการเจริญเติบโต และอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ และยังเพิ่มการใช้ประโยชน์จากฟอสฟอรัสได้สูงที่สุดที่ระดับเอนไซม์ 4000 FTU/ อาหาร 1 กิโลกรัม ผลการเสริมเอนไซม์ไฟเตสที่ระดับ 500, 1,000, 2,000 และ 4,000 FTU/ อาหาร 1 กิโลกรัม ทำให้มีค่าประสิทธิภาพการย่อยฟอสฟอรัสของปลานิลเป็น 60.1, 71.7, 71.1 และ73.9 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ

Phromkunthong และ Gabaudan (2006) ได้ทำการศึกษาระดับที่เหมาะสมของการเสริมเอนไซม์ไฟเตสลงในอาหารสำหรับปลานิลแดงแปลงเพศที่เลี้ยงด้วยอาหารที่มีส่วนประกอบทั้งหมดเป็นวัตถุดิบจากพืช โดยพบว่าปลาที่ได้รับอาหารเสริมเอนไซม์ไฟเตสที่ระดับมากกว่า 1,000 ยูนิต/ อาหาร 1 กิโลกรัม จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การย่อยฟอสฟอรัสสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ และการเสริมเอนไซม์ไฟเตสที่ระดับ 500 ยูนิต/ อาหาร 1 กิโลกรัม จะทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสในซีรัมสูงขึ้นในขณะที่ฟอสฟอรัส ในมูลจะลดลงเมื่อได้รับอาหารเสริมเอนไซม์ไฟเตสตั้งแต่ 500 ยูนิต/ อาหาร 1 กิโลกรัม และที่ระดับ 4,000 ยูนิต/ อาหาร 1 กิโลกรัม จะทำให้ปลามีอัตราการเจริญเติบโตสูงกว่าระดับอื่นๆ

Debnath และคณะ (2005a) พบว่าเมื่อเสริมเอนไซม์ไฟเตสลงในอาหารปลากลุ่มปลาสวาย (*Pangasius pangasius*) ที่ระดับ 500 FTU/ อาหาร 1 กิโลกรัม สามารถเพิ่มระดับของกิจกรรมเอนไซม์อัลคาไลฟอสฟาเตสได้สูงสุด และ Debnath และคณะ (2005b) ยังพบว่าการเสริมเอนไซม์ไฟเตสในอาหารที่มีวัตถุดิบส่วนใหญ่เป็นวัตถุดิบจากพืชสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการ

ย่อยแร่ธาตุ ได้แก่ แคลเซียม ฟอสฟอรัส แมกนีเซียม แมงกานีส สังกะสี เหล็ก โปแตสเซียม ทองแดง และโคบอลท์ รวมถึงเพิ่มปริมาณแร่ธาตุในกระดูก

Liebert และ Portz (2005) ศึกษาผลการเสริมเอนไซม์ไฟเตสในอาหารปลานิล *(O. niloticus*) โดยใช้อาหารทดลองเป็นวัตถุดิบจากพืชทั้งหมด และเปรียบเทียบความเข้มข้นของเอนไซม์ไฟเตส และชนิดของเอนไซม์ไฟเตสที่ต่างกัน ผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าการเสริมเอนไซม์ไฟเตสลงในอาหารสามารถเพิ่มการใช้ประโยชน์จากพลังงาน โปรตีน และฟอสฟอรัส และพบว่าเอนไซม์ไฟเตสมีผลทำให้ปริมาณของแร่ธาตุในเกล็ดปลา และกระดูกสันหลังเพิ่มขึ้น ซึ่งพบว่าชนิดของเอนไซม์ไฟเตสที่ต่างกันจะมีประสิทธิภาพต่างกัน โดยที่การเสริมเอนไซม์ไฟเตสในระดับที่เหมาะสมจะให้ผลต่อการใช้ประโยชน์จากอาหารไม่แตกต่างกับการเสริมอนินทรีย์ฟอสเฟต โดยผู้วิจัยให้ข้อเสนอว่าการเสริมเอนไซม์ไฟเตสที่ 750 FTU/อาหาร 1 กิโลกรัม เป็นระดับที่เหมาะสม

หน่วยของการวัดกิจกรรมของเอนไซม์ไฟเตสในปัจจุบันสามารถพบได้หลายหน่วย ได้แก่ FTU (*fytase* Units), FYT (Feed Grade Yield Treatment Unit), PPU (Phytate Phosphorus Utilization) และ U (Unit) ทั้งสี่หน่วยนี้จะมีคำจำกัดความเดียวกันคือ 1 หน่วยของเอนไซม์ไฟเตสที่ทำให้ 1 ไมโครโมลของสารอนินทรีย์ฟอสเฟตถูกปลดปล่อยจากสับเตรท (substrate) ที่เป็นโซเดียมไฟเตทในระยะเวลา 1 นาที ณ ที่ความเป็นกรดด่าง 5.5 และอุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส (Cole, 2002)

ตารางที่ 2 คุณสมบัติการย่อยสลายไฟเตทของเอนไซม์ไฟเตส

ที่มาของเอนไซม์ไฟเตส	ความเป็นกรดด่างที่เหมาะสม	อุณหภูมิที่เหมาะสม (องศาเซลเซียส)	กิจกรรมจำเพาะเจาะจงที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส (ยูนิต/มิลลิกรัม)
Aspergillus niger	2.2, 5.0-5.5	55-58	50-103
A. terreus	5.0-5.5	70	142-196
A. fumigatus	5.0-6.0	60	23
A. oryzae	5.5	50	11
Escherichia nidulans	6.5		29-33
Thermomyces lanuginosus	6.0	65	110
Penicllium dimpliciddimum	4.0	55	3
Schwanniomyces castellii	4.4	77	418 (ที่ 70องศาเซลเซียส)
E. coli	4.5	55-60	811-1800
Klebsiella terrigena	5.0	58	205
K. aerogenes	4.5, 5.2	68	-
Bacillus subtilis	6.0-7.5	55-60	9-15
B. amyloliquefaciens	7.0-8.0	70	20
ข้าวสาลี	6.0	45	127
ข้าวไรน์	6.0	45	517
เบอร์รี	5.0	45	117
รากข้าวโพด	5.0-5.1	35-40	5.7
เมล็ดข้าวโพด	4.8	55	2.3
ถั่วเหลือง	4.5-4.8	55	2.4
ถั่วเขียว	7.5	58	0.5
ใบต้นหอม	5.5	57	500
ถั่วฟาบ้า *(Vicia faba)*	5.0	51	636
ลูบิน	5.0	50	539
มันฝรั่ง	4.3	50	205
ลำไส้หนู	7.0, 7.5-8.0	45	-

ที่มา Konietzny and Greiner (2002)

2.5 การศึกษาสัมประสิทธิ์การย่อยอาหารในปลา

ค่าสัมประสิทธิ์การย่อยสารอาหารของวัตถุดิบเป็นค่าที่มีบทบาทสำคัญ และมีความจำเป็นต่อการสร้างสูตรอาหารสัตว์น้ำเป็นอย่างมากในปัจจุบัน เพราะเป็นตัวบ่งบอกถึงคุณภาพ และชีวภาพพร้อมใช้ของวัตถุดิบแต่ละชนิดได้แม่นยำมากขึ้นเมื่อเทียบกับการวิเคราะห์ทางเคมีอย่างเดียว ในการผลิตอาหารสัตว์น้ำต้องทำให้เกิดของเสีย และมลพิษน้อยที่สุด ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การย่อยสามารถแสดงให้เห็นถึงปริมาณของเสียที่จะเกิดขึ้นโดยประมาณได้ (Cho *et al.*, 1994) ค่าสัมประสิทธิ์การย่อยสารอาหารของวัตถุดิบมีทั้งที่เป็นสารอาหารปริมาณมาก เช่น โปรตีน และไขมัน เป็นต้น หรือสารอาหารจำนวนน้อย เช่น ฟอสฟอรัส และเหล็ก เป็นต้น ค่าสัมประสิทธิ์การย่อยสารอาหารของวัตถุดิบแต่ละชนิดเป็นตัวบ่งชี้ถึงคุณภาพ และปริมาณของสารอาหารที่นำไปใช้ได้ ปริมาณของของเสียที่เกิดขึ้น ซึ่งวัตถุดิบแต่ละชนิดก็จะมีค่าแตกต่างกันออกไปโดยขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่างเช่น ชนิดของปลา ชนิดของวัตถุดิบ ปริมาณคาร์โบไฮเดรต ชนิดและลักษณะของสารต้านโภชนาการเป็นต้น (Grisdale and Helland, 1998)

วิธีการในการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การย่อยสารอาหารเป็นประเด็นที่มีความสำคัญเพิ่มมากขึ้นในปัจจุบัน ซึ่งวิธีการศึกษาที่เหมาะสมเท่านั้นที่จะทำให้ได้ค่าสัมประสิทธิ์การย่อยที่มีความถูกต้อง และใกล้เคียงกับความเป็นจริงมากที่สุด การศึกษาประสิทธิภาพการย่อยโดยอ้อม เป็นการศึกษาที่อาศัยตัวบ่งชี้ (indicator) ในอาหารกับปริมาณตัวบ่งชี้ที่เก็บรวบรวมจากมูลปลามาทำการเปรียบเทียบสัดส่วนระหว่างกัน และต้องวิเคราะห์สารอาหารในอาหารกับสารอาหารที่เหลือในมูล วิธีการศึกษาแบบนี้เป็นวิธีที่ได้รับความนิยมสำหรับการศึกษาค่าประสิทธิภาพการย่อยในปลาชนิดต่างๆ (Forster, 1999; Morales *et al.*, 1999) ตัวบ่งชี้ที่สามารถใช้ในการศึกษาค่าสัมประสิทธิ์การย่อยสารอาหาร แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทคือ ตัวบ่งชี้ภายใน (internal marker) ได้แก่ เถ้าที่ทนกรด (acid- insoluble ash) เซลล์ลูโลส (cellulose) ตัวบ่งชี้ภายนอก (external marker) ได้แก่ โครมิกออกไซด์ (Cr_2O_3) Yttrium oxide (Y_2O_3) โคลลีเทน (Cholestane) (Austreng *et al.*, 2000; Goddard and Mclean, 2001)

หลักการเลือกใช้ตัวบ่งชี้ที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาประสิทธิภาพการย่อย (Austreng *et al.*, 2000) มีข้อสังเกตดังนี้

1. ต้องมีความเป็นเนื้อเดียวกันกับอาหารมากที่สุดและสามารถทำการวิเคราะห์หาปริมาณได้ง่ายและเที่ยงตรงโดยที่สามารถทำได้โดยใช้ตัวอย่างสำหรับการวิเคราะห์เพียงเล็กน้อย

2. ไม่ถูกย่อยและดูดซึมภายในระบบทางเดินอาหารของปลา และไม่ส่งผลกระทบใดๆต่อการทำงานของร่างกาย และพฤติกรรมของปลา

3. เคลื่อนผ่านภายในทางเดินอาหารของปลาด้วยอัตราเดียวกับการเคลื่อนที่ของสารอาหาร

โครมิกออกไซด์ จัดเป็นตัวบ่งชี้ที่มีบทบาทและได้รับความนิยมมาก จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการศึกษาหาค่าประสิทธิภาพการย่อยอาหารในสัตว์น้ำและสัตว์บก รวมทั้งในปลานิล (Tacon and Rodrigues, 1984) และปัจจุบันยังคงมีการใช้กันอย่างกว้างขวางในสัตว์น้ำหลายชนิด เพราะมีคุณสมบัติเหมาะที่จะใช้เป็นตัวบ่งชี้ได้ดี

วิธีเก็บรวบรวมมูลปลาเป็นอีกประเด็นสำคัญที่มีผลต่อการศึกษาประสิทธิภาพการย่อยอาหารโดยมูลปลาที่เก็บได้ต้องไม่มีเศษอาหารหลงเหลือ และปะปนโดยเด็ดขาด ซึ่งโดยทั่วไปมีวิธีการเก็บมูลที่นิยมอยู่หลายวิธี เช่นการรีด การตัดลำไส้ตอนปลาย และการรวบรวมมูลในน้ำ การรีดสามารถทำได้โดยการใช้มือรีดมูลออกจากทางเดินอาหารตอนปลาย นิยมใช้กับปลาที่มีขนาดใหญ่ การตัดลำไส้ตอนปลายเป็นวิธีการที่ต้องฆ่าปลาก่อนการผ่าตัดเอาลำไส้ตอนปลายออกมาเพื่อเก็บมูลที่อยู่ภายใน ซึ่งทั้งสองวิธีนี้มีโอกาสที่จะเกิดความผิดพลาดจากการปนเปื้อนของเมือก และสารคัดหลั่ง (endogenous material) ของปลา ซึ่งจะเป็นสารจำพวกโปรตีน ทำให้ไม่เหมาะสำหรับการศึกษาประสิทธิภาพการย่อยโปรตีน รวมถึงอาจจะได้มูลที่ถูกดูดซึมสารอาหารไม่สมบูรณ์ทำให้มีโอกาสที่ค่าที่ได้จะต่ำกว่าความเป็นจริง (Cho *et al*., 1982; Hajen *et al*., 1993) ส่วนวิธีการเก็บรวบรวมมูลจากมวลน้ำทำได้หลายแบบทั้งการใช้กาลักน้ำ การตกตะกอน (รวบรวมมูลทั้งหมดโดยเก็บตะกอนที่ตกลงมาบริเวณพื้นภาชนะทดลองด้วยการกรอง) ซึ่งวิธีการนี้ต้องมีตู้ทดลองและอุปกรณ์การเก็บมูลปลาเฉพาะ โดยออกแบบให้มีความเหมาะสมกับชนิดของปลาตัวอย่างเช่น Guelph system ออกแบบโดย Cho และคณะ (1985)

ข้อบกพร่องของวิธีการเก็บรวบรวมมูลจากมวลน้ำอยู่ที่การสูญเสียสารอาหารและตัวบ่งชี้เนื่องจากการละลาย เพราะว่ามูลจะต้องแช่อยู่ในน้ำเป็นระยะเวลานานจนกว่าจะถูกเก็บรวบรวม ซึ่งมีผลทำให้การประมาณค่าสัมประสิทธิ์การย่อยคลาดเคลื่อนจากความเป็นจริง แต่วิธีการนี้ก็เป็นที่ยอมรับว่าเหมาะสมสำหรับใช้ทำการศึกษา แต่จะต้องมีการปรับวิธีการ กระบวนการเก็บมูลให้เหมาะสมกับปลา ซึ่งมีความแตกต่างกันตามชนิดของปลา ทั้งนี้ก็เนื่องมาจากว่าปลาแต่ละชนิดมีลักษณะทางชีววิทยาที่แตกต่างกัน ทำให้ลักษณะการกินอาหาร และมูลมีความแตกต่างกัน ดังนั้นการปรับเปลี่ยนวิธีการ ช่วงระยะเวลา อุปกรณ์ในการเก็บมูลให้เหมาะสมมีผลทำให้การศึกษาสัมประสิทธิ์การย่อยมีความถูกต้องมากที่สุด

ตารางที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์การย่อยโปรตีนของวัตถุดิบชนิดต่างๆ ในปลานิล (เปอร์เซ็นต์)

วัตถุดิบอาหาร	เอกสารอ้างอิง							
	1[a]	2[a]	3[a]	4[a]	5[a]	6[a]	7[b]	8[c]
ปลาป่น	92	72	86	92	94	-	85	-
กระดูกและเนื้อป่น (Meat and bone meal)	92	-	-	-	-	-	68-78	-
ขนไก่ป่น (Poultry offal meal)	-	-	74	-	-	-	-	-
กุ้งป่น (Shrimp meal)	-	-	-	87	-	-	-	74
ดักแด้ตัวไหมป่น (Silkworm pupa meal)	91	-	-	-	-	-	-	-
Brewers grains	-	62	63	-	-	-	-	63
แหนแดง (Azolla)	-	-	-	75	-	-	-	-
เคซีน (Casein)	-	-	-	97.2	-	-	-	-
กากมะพร้าว (Copra meal)	-	-	-	56	81	-	-	-
คอนกลูเต้น (Corn gluten meal)	90.7	-	-	97	-	-	-	-
กากเมล็ดฝ้าย (Cotton seed meal)	-	31		-	-	-	-	90
Cotton seed cake	-	-	-	-	90	-	-	-
กากถั่วลิสง(Groundnut meal)	-	79	-	-	-	-	-	-
กากถั่วเหลือง (Soybean meal)	91		91	93	93	94.4	94	91

1 Watanabe *et al*. (1996), 2 Luquet (1989) , 3 Hanley (1987), 4 Lorico-Querijero and Chiu (1989), 5 Moreau (1996), 6 Fontainhas-Fernandes *et al*. (1999), 7 Popma (1982) and 8 Degani *et al*. (1997)

[a] = Nile tilapia, [b] = *O. aureus* และ [c] = *O. aureus* x *O. niloticus*.

(-) = ไม่ได้ทำการทดลอง

2.6 การประมาณค่าการใช้ประโยชน์จากอาหารในปลา

อาหารและการให้อาหารจัดว่ามีบทบาทที่สำคัญอย่างมากกับการเกิดผลกระทบสิ่งแวดล้อม เพราะเป็นสาเหตุสำคัญอย่างยิ่งของของเสียที่ถูกขับทิ้งสู่สิ่งแวดล้อม โดยของเสียที่เกิดขึ้นมีทั้งที่ละลายน้ำได้ และ/หรือไม่ละลายน้ำ เป็นทั้งสารอินทรีย์ และ/หรือสารอนินทรีย์ ซึ่งเป็นผลผลิตที่มาจากกระบวนการเพาะเลี้ยงปลา และจากตัวปลาที่ปล่อยออกมา (Tacon and Forster, 2003) วิธีการสำคัญที่จะสามารถควบคุมปริมาณของเสียที่ถูกขับทิ้ง วิธีหนึ่งก็คือ การศึกษาถึงชีวภาพพร้อมใช้ของวัตถุดิบอาหารแต่ละชนิดในปลาชนิดนั้นๆ ทำให้สามารถนำข้อมูลมาสร้างเป็นสูตรอาหารที่มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับปลา และมีปริมาณของเสียน้อยที่สุด (Cho *et al*., 1994; Bureau and Cho, 1999; Cho and Bureau, 2001; Tacon and Forter, 2003)

การขับถ่ายของเสีย เช่นฟอสฟอรัสในปลาหรือสัตว์โดยทั่วไปจะมีรูปแบบที่คล้ายกัน 3 ประการคือ ประการแรกฟอสฟอรัสที่เป็นของเสียที่เกิดขึ้นเนื่องมาจากกระบวนการทำงานทางสรีระวิทยาของตัวปลา แม้ว่าจะไม่ได้รับฟอสฟอรัสจากอาหารเลยก็ตาม ประการที่สองฟอสฟอรัสในอาหารหรือวัตถุดิบอาหารส่วนที่ไม่ถูกย่อย และดูดซึมเอาไปใช้หรือเก็บสะสมในร่างกาย ซึ่งปริมาณฟอสฟอรัสของเสียในส่วนนี้จะขึ้นอยู่กับลักษณะทางธรรมชาติของอาหารและวัตถุดิบ ประการที่สามฟอสฟอรัสของเสียที่เหลือจากกระบวนการปรับสมดุลของร่างกายปลาให้ดำรงอยู่ในสภาวะปกติ ซึ่งปริมาณของฟอสฟอรัสที่เกิดจากกระบวนการนี้จะขึ้นกับปริมาณของฟอสฟอรัสที่ใช้ประโยชน์ได้ได้ (available phosphorus) ที่มีมากเกินความต้องการของปลา (Rodehutscord *et al*., 2000) วิธีการประมาณปริมาณของเสียที่ปลาขับถ่ายแยกได้เป็น 2 อย่าง คือ

2.6.1 วิธีการประมาณปริมาณของเสียทางชีวภาพ (biological approaches) การประมาณของเสียที่ถูกขับทิ้งจากการเพาะเลี้ยงปลาจะตั้งอยู่บนพื้นฐานของปริมาณสารอาหารที่ให้แก่ปลานั้นๆ ค่าสัมประสิทธิ์การย่อย และการเก็บสะสมสารอาหารในร่างกาย ซึ่งการประมาณด้วยหลักการนี้เป็นการประมาณที่ง่ายและค่อนข้างจะแน่นอน วิธีการนี้ถูกปรับปรุงมาจากหลักการทำนาย โดยอาศัยหลักสมดุลของสารอาหารในระบบซึ่งปลาได้รับเข้าไป และเก็บสะสม จากนั้นจึงทำนายปริมาณของของเสียที่ถูกขับทิ้งทางอ้อมแทนการวัดปริมาณของเสียโดยตรงจากแหล่งน้ำ (Cho *et al*., 1994; Cho and Bureau, 2001)

อาหารและวัตถุดิบอาหารจะถูกย่อยและดูดซึมโดยปลา สารอาหารเช่น โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต และอื่นๆ ถูกดูดซึมนำไปใช้เพื่อการเจริญเติบโต การดำรงชีวิต การสืบพันธุ์

ส่วนที่ไม่ถูกย่อยและดูดซึมก็จะถูกขับทิ้งในรูปของแข็ง (solid waste; SW) ส่วนของเสียที่เกิดขึ้นจากกระบวนการเมแทบอลิซึมของปลา เช่น แอมโมเนีย ยูเรีย ฟอสเฟต (phosphate) ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นต้น จะถูกขับทิ้งในรูปของสารละลายที่ถูกขับทิ้ง (dissolved waste; DW) ซึ่งของเสียเหล่านี้อาจถูกขับออกมาทางเหงือก และไต ส่วนของเสียที่ถูกขับทิ้งทั้งหมด(total waste; TW) ก็จะเป็นผลรวมของของแข็งที่ถูกขับทิ้งกับสารละลายที่ถูกขับทิ้ง (Cho and Bureau, 2001) การประมาณค่าของเสียที่เกิดขึ้นจากอาหาร (apparent feed waste; FW) โดยอาศัยหลักการนี้สามารถทำได้ตามแบบจำลองทางชีวภาพ (bioenergetics model; TW=FW+SW+DW) โดยที่ FWจะหมายความถึง ปริมาณอาหารที่ไม่ถูกกินหรือสารอาหารที่ละลายสู่มวลน้ำทั้งหมด ซึ่งมีสมการในการคำนวณดังนี้

ของแข็งที่ขับทิ้งทั้งหมด = [สารอาหารที่ปลาได้รับทั้งหมด x (1- ค่าสัมประสิทธิ์การย่อยสารอาหาร)] + อาหารที่สูญเสีย (ไม่ถูกกิน)

สารละลายที่ขับทิ้งทั้งหมด = [(สารอาหารที่ปลาได้รับทั้งหมด x ค่าสัมประสิทธิ์การย่อยสารอาหาร) – สารอาหารที่สะสมในตัวปลา]

การสะสมสารอาหารในตัวปลา (apparent retention, เปอร์เซ็นต์) คำนวณจากสมการ

= 100 x [(สารอาหารในตัวปลาเมื่อสิ้นสุดการเลี้ยง – สารอาหารในตัวปลาเริ่มต้น) / สารอาหารที่ปลาได้รับทั้งหมด]

วิธีการประมาณปริมาณของเสียทางชีวภาพของฟอสฟอรัสค่อนข้างจะยุ่งยากในส่วนของค่าสัมประสิทธิ์การย่อยอาหารและวัตถุดิบ เนื่องจากมีค่าที่หลากหลาย และแตกต่างไป ฟอสฟอรัสที่มีอยู่ในวัตถุดิบแต่ละชนิดมีรูปแบบที่แตกต่างกัน ทั้งในเรื่องของปริมาณ และสัดส่วนของชนิดโครงสร้างทางเคมีที่มีในสูตรอาหารและวัตถุดิบ ซึ่งอาหารสูตรหนึ่งจะประกอบไปด้วยฟอสฟอรัสในรูปของกระดูก ไฟเตท และอนินทรีย์ฟอสเฟต และสารอื่นๆ รวมถึงลักษณะทางกายภาพ (ขนาดของอนุภาพอาหาร) กระบวนการผลิต ซึ่งเหล่านี้จะมีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การย่อยฟอสฟอรัสในสูตรอาหารแตกต่างกัน (Lall, 1991) ซึ่งพบว่าในบางครั้งสูตรอาหารที่มีปริมาณของฟอสฟอรัสเพิ่มขึ้นจะมีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การย่อยฟอสฟอรัสของอาหารนั้นลดลง (Vielma and Lall, 1998; Rodehutscord *et al*., 2000; Sugiura *et al*., 2000) แต่บางรายงานกลับพบว่าปริมาณของฟอสฟอรัสที่เพิ่มขึ้นไม่ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์การย่อยฟอสฟอรัสลดลง (Satoh *et al*., 1996; Nakamura, 1982 อ้างโดย Hua and Bureau, 2006) แสดงให้เห็นว่าฟอสฟอรัสจากวัตถุดิบต่างๆที่มีคุณสมบัติทางเคมีที่แตกต่างกันมีผลต่อกระบวนการการย่อย และดูดซึมฟอสฟอรัสภายในทางเดินอาหาร(gastrointestinal tract) ของปลา (Hua and Bureau, 2006)

2.6.2 การประมาณค่าของเสียที่เกิดจากกระบวนการเมแทบอลิซึมของเสียจากกระบวนการเมแทบอลิซึมจะอยู่ในรูปของไนโตรเจน และฟอสฟอรัส สามารถทำการประมาณโดยอาศัยหลักการต่างๆ เช่นทางชีวภาพที่เกิดขึ้นภายในร่างกาย และปัจจัยจากภายนอกอันได้แก่อาหารที่ได้รับ และสภาพแวดล้อมที่อาศัย ซึ่งสารอาหารและกระบวนการใช้อาหารถูกจัดว่าเป็นตัวแปรที่สำคัญที่มีบทบาทอย่างมากต่อปริมาณของเสียที่เกิดจากกระบวนการเมแทบอลิซึม โดยปริมาณที่ขับทิ้งจะแตกต่างกันไปตามชนิดของปลา ขนาดหรืออายุ เป็นต้น (Bureau, 2004) ปริมาณไนโตรเจนที่ถูกขับทิ้งจากกระบวนการนี้มีประมาณ 80-90 เปอร์เซ็นต์ ของไนโตรเจนที่ถูกขับทิ้งทั้งหมด โดยจะอยู่ในรูปของแอมโมเนีย ซึ่งเป็นผลมาจากกระบวนการแคแทบอลิซึม (catabolism) และ การสะสม (deposition) ของกรดอะมิโน กรดอะมิโนที่มีอยู่ในอาหารมีอิทธิพลอย่างมากต่อปริมาณของแอมโมเนียที่เกิดขึ้น โดยกรดอะมิโนในอาหารส่วนเกินที่ปลาได้รับนั้นจะถูกขับทิ้งในรูปแอมโมเนีย จากการศึกษาวิจัยหลายเรื่องสนับสนุนว่ากระบวนการ แคแทบอลิซึม ของกรดอะมิโนมีการตอบสนองโดยตรงต่อปัจจัยทางชีวภาพต่างๆ ซึ่งแสดงออกมาในลักษณะของสัดส่วนการเก็บสะสม กับประสิทธิภาพการย่อย โดยที่ขนาดของปลาจะมีผลอย่างมากต่อการใช้ประโยชน์จากกรดอะมิโนในอาหารปลา (Azevedo *et al.*, 2004) ส่วนค่าฟอสฟอรัสที่ถูกขับทิ้งจากกระบวนการแมแทบอลิซึมอยู่ในรูปของฟอสเฟต ซึ่งถูกขับออกมาพร้อมกับยูรีน ปริมาณของฟอสเฟตที่ขับทิ้งก็สามารถประมาณได้ด้วยการเปรียบเทียบสัดส่วนโดยตรงกับปริมาณของความเข้มข้นของฟอสเฟตในพลาสมา (Bureau and Cho, 1999)

2.7 ปลานิลแดงแปลงเพศ

ปลาในตระกูลปลานิล (Nile tilapia) เป็นปลาที่มีต้นกำเนิดจากทวีปแอฟริกา มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Oreochromis niloticus* (Linn.) มีริมฝีปากบนและล่างเสมอกัน บริเวณแก้มมีเกล็ด 4 แถว ลำตัวมีสีเขียวปนน้ำตาลและมีลายพาดขวาง 9-10 แถว ครีบหลังมีอันเดียว ประกอบด้วยก้านครีบอ่อน 9-10 อันมีเกล็ด 33 เกล็ดบนแกนเส้นข้างลำตัว ด้านข้างมีเกล็ดตามแนวเฉียงจากตอนต้นของครีบหลังลงมาจนถึงเส้นข้างลำตัว 5 เกล็ด และจากเส้นข้างลำตัวลงมาถึงแนวส่วนหน้าของครีบก้น 13 เกล็ด ครีบหางมีจุดสีขาวและดำตัดขวางอยู่ทั่วไป (มานพ ตั้งตรงไพโรจน์ และคณะ, 2536) ความแตกต่างระหว่างปลานิลเพศผู้และเพศเมียเห็นได้ชัดเจนจากติ่งเพศ โดยเพศเมียจะมีติ่งเพศปลายมน ช่องเปิดบนติ่งเพศมี 2 ช่องคือ ช่องเปิดที่ปลายติ่งเป็นทางออกของปัสสาวะ ส่วนปลาเพศผู้จะมีติ่งเพศยาวเรียว ปลายแหลม ช่องเพศมีเพียงช่องเดียวที่ปลายติ่ง สำหรับสีสันนั้นปลาตัวผู้ส่วนใหญ่บริเวณใต้คางจะมีสีคล้ำเป็นสีแดงอมม่วง ส่วนตัวเมียจะเป็นสี

เหลือง แต่มีบ้างเช่นกันที่เพศผู้จะมีสีใต้คางเป็นสีเหลือง จึงไม่ควรใช้สีใต้คางเป็นตัวแบ่งแยกเพศ (อุทัยรัตน์ ณ นคร, 2539) ปลานิลเป็นปลาที่เจริญเติบโตเร็ว แข็งแรง และอดทนต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมได้ดี สามารถทนอยู่ได้ในช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่กว้างมาก ตั้งแต่ 11-42 องศาเซลเซียส ทนต่อความเป็นกรด ด่างได้ดีในช่วง 6.5-8.3 และทนต่อความเค็มของน้ำสูงถึง 20 พีพีที (ppt) ได้อย่างปลอดภัย ชอบอาศัยอยู่รวมกันเป็นฝูงตามแม่น้ำ ลำคลอง หนองบึง ทะเลสาบ (กรมประมง, 2541) ปลาในตระกูลปลานิลเป็นปลาที่กินอาหารได้ทุกชนิด จัดเป็นปลาที่กินทั้งพืชและสัตว์ (omnivorous) ชอบหากินในเวลากลางวันและหยุดหากินในเวลากลางคืน แต่การย่อยอาหารยังคงดำเนินการไปอย่างต่อเนื่องและช้าๆ จะย่อยเสร็จสมบูรณ์ในเวลา 18-24 ชั่วโมง ปลานิลมีทางเดินอาหาร 5-7เท่าของลำตัว แต่ไม่มีกระเพาะแท้เหมือนปลากินเนื้อทั่วๆ ไป แต่มีเนื้อเยื่อที่มีโครงสร้างคล้ายกระเพาะที่สามารถหลั่งน้ำย่อย เพื่อลดความเป็นกรดเป็นด่างระหว่างการย่อยอาหารได้ (วีรพงศ์ วุฒิพันธุ์ชัย, 2536)

จากการศึกษาประวัติความเป็นมาของปลาในตระกูลปลานิลที่เลี้ยงอยู่ในประเทศไทยกับการศึกษาถึงลักษณะภายนอกของปลานิลสีแดงสายพันธุ์ไทยในปัจจุบัน และจากการตรวจสอบโดยวิธีอีเลคโตรโฟรีซีส (electrophoresis)โดยมหาวิทยาลัยสเตอร์ลิงประเทศอังกฤษและมหาวิทยาลัยฟิลิปปินส์ประเทศฟิลิปปินส์ สรุปได้ว่าปลานิลสีแดงสายพันธุ์ไทยในปัจจุบัน เป็นลูกผสมระหว่างปลานิล(*Oreochromis niloticus*) และปลาหมอเทศ(*Oreochromis mossambicus*) โดยมีความถี่ของยีนส์ปลานิล 78 เปอร์เซ็นต์ และปลาหมอเทศ 22 เปอร์เซ็นต์ จะเห็นได้ว่าปลานิลสีแดงสายพันธุ์ไทยมีลักษณะของปลานิลและปลาหมอเทศรวมกัน กล่าวคือ ปากเฉียงขึ้นคล้ายปลาหมอเทศและลักษณะลำตัวคล้ายปลานิล (พรรณศรี จิริโมภาส, 2531) จำนวนก้านครีบแข็งและก้านครีบอ่อน และสัดส่วนบนลำตัวของปลาทั้งสองชนิดมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ปลานิลสีแดงมีลำตัวสีแดง ส้ม แดงส้ม ชมพู หรือขาว บางตัวมีเกล็ดสีแดงและสีเงินเป็นหย่อมๆ ปลานิลสีแดงเป็นปลาที่มีนิสัยก้าวร้าว เป็นทั้งปลากินทั้งพืชและสัตว์ เช่นเดียวกับปลานิลธรรมดา แต่ค่อนข้างจะชอบกินสัตว์มากกว่า คือ ปลานิลสีแดงจะกินปลาอื่นที่มีขนาดเล็กกว่า พ่อแม่ปลาบางครั้งก็จะกินลูกปลา ซึ่งพฤติกรรมเช่นนี้ไม่ปรากฏในปลานิลธรรมดา มีการผสมพันธุ์วางไข่เหมือนกับปลานิลธรรมดา ตัวเมียจะเริ่มวางไข่เมื่อมีความยาวเฉลี่ย 6.5 เซนติเมตร น้ำหนักเฉลี่ย 200-250 กรัม จะให้ลูกรุ่นละ 500-1,000 ตัว (มานพ ตั้งตรงไพโรจน์ และคณะ, 2536; พรรณศรี จิริโมภาส, 2531)

เนื่องจากปลานิลเป็นปลาที่สามารถวางไข่ได้ตั้งแต่อายุ 2 เดือนเป็นต้นไป ทำให้เพศเมียเจริญเติบโตช้าเพราะต้องสูญเสียพลังงานในการสร้างไข่และแม่ปลายังต้องอนุบาลลูกปลา

โดยการอมไข่ไว้ในปากเป็นเวลาประมาณ 10 วัน แม่ปลาไม่สามารถกินอาหารได้ ทำให้น้ำหนักลด และเป็นการเพิ่มอัตราความหนาแน่นของประชากรปลาในบ่อเลี้ยง แนวทางหนึ่งที่จะช่วยในการเพิ่มผลผลิตการเลี้ยงเพื่อให้ได้ปลาที่มีขนาดใหญ่และใกล้เคียงกันเมื่อจับขายคือ การเลี้ยงปลานิลเพศผู้ทั้งหมด ซึ่งสามารถดำเนินการได้หลายวิธี ทั้งการคัดลูกปลาเฉพาะตัวผู้มาเลี้ยง การแปลงเพศลูกปลาด้วยฮอร์โมน การผลิตปลานิลเพศผู้ทางอ้อม (indirect monosex production) ด้วยการใช้ปลานิลเพศผู้ซุปเปอร์เมล (YY-male) ผสมกับแม่ปลาปกติจะได้ลูกปลาเพศผู้ทั้งหมด หรือเรียกว่าปลานิลเพศผู้ GMT (genetically male tilapia) และการผสมข้ามสายพันธุ์ (hybridization) ด้วยการผสมข้ามสายพันธุ์ต่าง ทั้งต่างสกุล (genus) และชนิด (species) เช่น การผสมข้ามระหว่าง *O. niloticus* × *O. aureus* จะได้ลูกเป็นเพศผู้ 100 เปอร์เซ็นต์

ปลานิลจัดว่าเป็นปลาที่เลี้ยงง่าย โตเร็ว มีความทนทาน และมีผู้นิยมบริโภคกันมาก โดยเฉพาะปลานิลสีแดงมีผู้ชอบมากกว่าปลานิล 85.71 เปอร์เซ็นต์ เพราะปลานิลสีแดงมีเนื้อนุ่มหวานมันกว่าและมีเนื้อละเอียดมากกว่าปลานิล และปลานิลสีแดงมีไขมันสูงกว่าปลานิล ปลานิลสีแดงมีไขมัน 1.39 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ปลานิลมีไขมันเพียง 0.80 เปอร์เซ็นต์ (พรรณศรี จริโมภาส, 2531) จากการสำรวจในปี 2540 การบริโภคปลาของคนไทยเฉลี่ย 27 กิโลกรัมต่อคนต่อปี รองลงมาได้แก่ การบริโภคเนื้อวัว ควาย ไก่ และหมู เฉลี่ยต่อคนต่อปีเท่ากับ 11.5, 8.5 และ 2.1 กิโลกรัม ตามลำดับ (กรมประมง, 2545) และในช่วงปี 2541-2542 พบว่าคนไทยบริโภคปลาโดยเฉลี่ยต่อคนเพิ่มขึ้นเป็นปีละ 28.8 กิโลกรัมต่อคน ชนิดปลาสายพันธุ์ที่มีการบริโภคสูงสุดได้แก่ ปลานิล เฉลี่ย 8.52 กิโลกรัมต่อคนต่อปี รองลงมาได้แก่ ปลาดุกบิ๊กอุย และปลาไน บริโภคเฉลี่ยต่อคนต่อปีเท่ากับ 3.0 และ 0.48 กิโลกรัม ตามลำดับ (Piumsombun, 2003) ซึ่ง Lovell (1998) รายงานว่าปลามีเปอร์เซ็นต์ของเนื้อสูงกว่าเนื้อวัว เนื้อหมู หรือในสัตว์ปีก เช่น ปลากดอเมริกัน(channel catfish) มีเนื้อมากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ และ 13.7 เปอร์เซ็นต์ เป็นกระดูก เอ็นและไขมัน(Lovell, 1993) ในขณะเดียวกัน จากการศึกษาดังกล่าวได้ทำการสำรวจความนิยมของผู้บริโภค (ยกเว้นภาคใต้) จากปลา 5 ชนิด ได้แก่ ปลานิล, ปลาตะเพียน, ปลาดุกบิ๊กอุย, ปลาช่อนและปลาทู ผลปรากฏว่าผู้บริโภคนิยมบริโภคปลานิลมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 23.77 รองลงมาได้แก่ ปลาช่อน ร้อยละ 20.19 ที่เหลือนิยมบริโภคปลาดุกบิ๊กอุย ปลาตะเพียน และปลาทู คิดเป็นร้อยละ 11.69, 11.21 และ 9.95 ตามลำดับ เหตุผลที่นิยมบริโภคดังกล่าวรสชาติดีและหาซื้อง่าย (กรมประมง, 2545)

ปลานิลแดงแปลงเพศจัดเป็นปลาน้ำจืดชนิดที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจ ปัจจุบันมีปัญหาการระบาดโรคที่ร้ายแรงในสัตว์ปีก ทำให้เกิดความต้องการแหล่งอาหารโปรตีน

จากสัตว์น้ำมากขึ้น ส่งผลให้มีการเพาะเลี้ยงปลานิลเพิ่มสูงขึ้นตามไปด้วย ซึ่งปลานิลจัดเป็นปลาน้ำจืดที่เพาะเลี้ยงได้ง่ายสามารถทำการเพาะเลี้ยงได้หลายแบบ ทั้งการเลี้ยงในบ่อดิน บ่อคอนกรีต และในกระชัง โดยทั่วไปรูปแบบการเลี้ยงในปัจจุบันมักเป็นแบบหนาแน่น มีการใช้อาหารสำเร็จรูปมากขึ้น และมีการปรับปรุงพัฒนาสายพันธุ์กันอย่างกว้างขวาง ทำให้ได้ปลานิลที่มีอัตราการเจริญเติบโตดี มีคุณภาพของเนื้อสูงขึ้น ส่งผลให้ปลานิลเป็นที่ต้องการของผู้เพาะเลี้ยงและผู้บริโภคมากขึ้น จากสถิติการประมงแห่งประเทศไทย รายงานว่าผลผลิตจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืดทั้งหมดในปี พ.ศ.2546 ปลานิลมีผลผลิต 98,300 ตัน เป็นดำลับที่ 2 รองจากปลาดุกมีปริมาณผลผลิต 101,600 ตัน ดังนั้นจึงมีแนวโน้มว่าในอนาคตปลานิลอาจเป็นปลาที่มีการเพิ่มการผลิตสูงต่อไป และมีบทบาทต่อเศรษฐกิจของประเทศเพิ่มสูงขึ้น (กรมประมง, 2548)

2.7.1 ความต้องการสารอาหารของปลานิล

อาหารสำหรับปลานิลในระบบการเลี้ยงแบบหนาแน่นส่วนใหญ่มีส่วนผสมของวัตถุดิบโปรตีน จากพืชในอัตราส่วนที่สูง ผู้เลี้ยงปลานิลที่เลี้ยงในระบบหนาแน่นต้องการให้ปลามีอัตราการเจริญเติบโตสูง ปลาจึงต้องได้รับโปรตีนสูง โดยเป็นโปรตีนที่มาจากสัตว์ และจากพืช แต่อย่างไรก็ตามมีความพยายามที่จะลดต้นทุนการผลิต โดยการใช้โปรตีนจากวัตถุดิบพืชเพิ่มขึ้นเพื่อทดแทนโปรตีนจากปลาป่นที่มีราคาแพง ซึ่งสูตรอาหารที่สร้างขึ้นต้องทำให้ปลามีการเจริญเติบโตที่ดี ต้นทุนต่ำ และต้องมีความสมดุลของสารอาหารต่างๆ ที่พอเหมาะกับความต้องการของปลานิล ปลานิลต้องการสารอาหารเช่นเดียวกับปลาชนิดอื่นๆ โดยแบ่งเป็นประเภทดังนี้

2.7.1.1 ความต้องการโปรตีนของปลาโดยทั่วไปจะมีความแตกต่างกันไปตามชนิดของปลา ขนาดหรือช่วงอายุ และรูปแบบการเลี้ยง การจัดการการให้อาหาร (NRC,1993) โดยปลานิลขนาดเล็ก มีความต้องการโปรตีน สูงกว่าปลาที่มีขนาดใหญ่ (Fitzsimmons, 2005) ส่วนปลาที่มีอายุเพิ่มขึ้นและน้ำหนักเพิ่มขึ้น จะมีความต้องการโปรตีนจากอาหารลดลง มีรายงานการศึกษาความต้องการโปรตีนในปลานิลหลายชนิด และหลายขนาด ซึ่งวิธีการศึกษาแตกต่างกันไป โดยสามารถสรุปได้ว่าอยู่ระหว่าง 28-50 เปอร์เซ็นต์ดังตารางที่ 4

Twibell และ Brown (1998) รายงานว่าปลานิลขนาด 21 กรัมที่เลี้ยงในบ่อทดลองด้วยอาหารที่มีส่วนประกอบของวัตถุดิบพืชทั้งหมด เจริญเติบโตได้ดีเมื่อได้รับอาหารที่มีโปรตีนอย่างน้อย 28 เปอร์เซ็นต์

ความต้องการโปรตีนยังขึ้นอยู่กับปริมาณของพลังงานในอาหาร อัตราการให้อาหาร ปริมาณและชนิดของอาหารธรรมชาติในบ่อเลี้ยง (Alceste, 2004; El-Sayed *et al*., 2004) NRC (1993) ระบุว่าอัตราส่วนของโปรตีนที่ย่อยได้ต่อพลังงานที่ต้องการ ที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของปลาอยู่ระหว่าง 81 -117 มิลลิกรัม/ กิโลแคลลอรี El-Sayed และคณะ (2004) ทำการทดลองในปลานิล (O. *mossambicus* x O. *homorum*) ขนาด 0.8 กรัม โดยให้อาหารที่มีระดับโปรตีน 25, 30, 35 และ 40 เปอร์เซ็นต์ แต่ระดับโปรตีนมีพลังงานรวมในอาหาร 350 – 450 กิโลแคลลอรี/อาหาร 100 กรัม พบว่าปลามีอัตราการเจริญเติบโต และประสิทธิภาพการใช้อาหารดีทุกระดับโปรตีน

2.7.1.2 ความต้องการกรดอะมิโนของปลานิล

ปลานิลมีความต้องการกรดอะมิโนที่จำเป็น ทั้ง10 ชนิด ได้แก่ อาร์จีนีน (arginine) ฮีสติดีน (histidine) ไอโซลิวซีน (isoleucine) ลิวซีน (leucine) ไลซีน (lysine) เมทไทโอนีน (methionine) ฟีนิลอะลานีน (phenylalanine) ทรีโอนีน (threonine) ทริปโตเฟน (tryptophan) และเวลีน (valine) เช่นเดียวกับปลาอื่นๆ แต่มีความแตกต่างกันไปตามชนิดของปลา และแหล่งของ กรดอะมิโน (NRC, 1993) โดยมีการรายงานไว้หลายเอกสารดังตารางที่ 5

2.7.1.3 ความต้องการไขมัน โดยทั่วไปปลานิลขนาดน้ำหนักต่ำกว่า 2 กรัมมีความต้องการไขมันประมาณ 10 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อปลามีน้ำหนักมากกว่า 2 กรัมขึ้นไป ความต้องการไขมันจะลดลงมาอยู่ที่ประมาณ 6-8 เปอร์เซ็นต์ (Fitzsimmons, 2005) Chou และ Shiau (1996) ทำการศึกษาระดับความต้องการไขมันต่อการเจริญเติบโตของปลานิลลูกผสม (*O. niloticus x O. aureus*) พบว่าปลาที่ได้รับอาหารที่มีไขมัน 0 เปอร์เซ็นต์ ในช่วง 2 สัปดาห์แรกของการทดลองมีอัตราการเจริญเติบโตลดลง ซึ่งเป็นผลมาจากการขาดกรดไขมันที่จำเป็น และพบว่าระดับของไขมันในอาหารตั้งแต่ 5 ถึง 12 เปอร์เซ็นต์ เพียงพอกับความต้องกาของปลานิลลูกผสม อย่างไรก็ตามกรดไขมันที่จำเป็นที่สำคัญเช่น โอเมกา 6 และโอเมกา 3 ควรจะอยู่ที่ประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ และมีบางรายงานว่าเมื่อสัดส่วนของโอเมกา 6 ต่อโอเมกา 3 สูงขึ้นทำให้ปลานิลมีอัตราการเจริญเติบโตดีขึ้น (Fitzsimmons *et al*., 1997)

ตารางที่ 4 ความต้องการโปรตีนของปลานิล (เปอร์เซ็นต์)

ชนิด	ขนาด (กรัม)	ความต้องการโปรตีน	เอกสารอ้างอิง
ปลานิล (ไม่ระบุชนิด)	ปลาเริ่มกินอาหาร	45-50	Fitzsimmons (2005)

	0.02-2.0	40	
	2.0-35	35	
	35-200	30-33	
	>200	28-32	
ปลานิล (ไม่ระบุชนิด)	1-10	34-36	กรมประมง (2541)
	10-100	28-30	
ปลานิล (*O. niloticus*)	0.51	40	Hafedh (1999)
	45-96	40	
	96-264	30	
ปลานิล (*O. niloticus*)	0.012	45	El-Sayed and Teshima (1991)
	6.1-16.5	30	De Silva and Radampola (1990)
ปลานิล (*O. niloticus* x *O. aureus*)	0.6-1.1	32	Shiau and Peng (1993)
ปลานิล (*O. niloticus* x *O. aureus*)	21	ไม่น้อยกว่า 28	Twibell and Brown (1998)

ตารางที่ 5 ความต้องการกรดอะมิโนของปลานิล (เปอร์เซ็นต์ต่อปริมาณโปรตีนในอาหาร)

กรดอะมิโน	ปลานิล	*O. niloticus*	*O.*	*O.*	ปลาหมอเทศ

	(ไม่ระบุชนิด)	(ขนาด 4.3g)	*niloticus*	*niloticus*	(*Sarotherodon mossambicus*
Arginine	7.5	1.68	1.18	4.2	2.8
Lysine	5.0	1.98	1.43	5.12	3.8
Histidine	2.3	0.7	0.48	1.27	1.1
Phenylalanine	4.5	1.13	1.05	3.75	2.5
Tyrosine	-	-	-	1.79	-
Leucine	7.0	2.15	0.95	3.39	3.4
Isoleucine	4.3	1.15	-	3.11	2
Methionine	1.7	0.1	0.75	2.68	-
Valine	5.8	1.34	0.78	2.8	2.2
Threonine	3.6	1.11	1.05	3.75	2.9
Tryptophan	1.0	0.84	-	1	-
Cystine	-	-	-	0.54	-
เอกสารอ้างอิง	Fitzsimmons (2005)	Ogunji and Wirth (2002)	NRC(1993)	Santiago and Lovell (1988)	Sales and Janssen (2003)

2.7.1.4 เยื่อใย ในปลาขนาดเล็ก (น้ำหนักต่ำกว่า 35 กรัม) ควรมีเยื่อใยในอาหาร 6-8 เปอร์เซ็นต์และเพิ่มขึ้นเป็น 10 เปอร์เซ็นต์ เมื่อปลามีขนาดใหญ่ขึ้น (มากกว่า 35 กรัม) (Fitzsimmons, 2005) Amirkolaie และคณะ (2005) ทำการทดลองผลของชนิดของเยื่อใย คือ เซลลูโลส (cellulose) และกัว กัม (guar gum) ในปลานิล (*O. niloticus*) ขนาด 129 กรัม โดยใช้อาหารที่มีโปรตีน 43.9 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีปลาป่นเป็นแหล่งโปรตีนหลัก (45เปอร์เซ็นต์) ในสูตรอาหาร สูตรควบคุมมีโพลีแซกคาร์ไรด์ที่ไม่ใช่แป้ง (non-starch polysaccharide) 6.76 เปอร์เซ็นต์ สูตรเสริมเซลลูโลสมีโพลีแซกคาร์ไรด์ที่ไม่ใช่แป้ง 11.84 เปอร์เซ็นต์ สูตรเสริมกัว กัม มีโพลีแซกคาร์ไรด์ที่ไม่ใช่แป้ง 12.30เปอร์เซ็นต์ พบว่าการเสริมเซลลูโลสไม่มีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การย่อยโปรตีนและเถ้าลดลง แต่มีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การย่อยวัตถุแห้ง และไขมันลดลง ส่วนการเสริมกัว กัม มีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การย่อยวัตถุแห้ง โปรตีน ไขมัน และเถ้าลดลง

2.7.1.5 คาร์โบไฮเดรต ข้อมูลเกี่ยวกับการใช้คาร์โบไฮเดรตของปลานิลค่อนข้างจะมีความแตกต่างกันอย่างมาก ปลานิลสามารถย่อยสารอาหารจำพวกแป้งที่ไม่ผ่านความร้อนได้มากถึง 70 เปอร์เซ็นต์ (Popma, 1982; Wilson and Poe, 1985 อ้างโดย Borgeson, 2006) ในการศึกษาผลของน้ำตาลมอลโตส(maltose) ซูโครส (sucrose) แลกโตส (lactose) กลูโคส (glucose) และแป้ง ในปลานิล *(O. niloticus x O. aureus)* วัยรุ่น ปลาที่ได้รับแป้งมีน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นสูงสุด รองลงมาคือปลาที่ได้รับ มอลโตส แลกโตส และซูโครส ตามลำดับ และปลาที่ได้รับแป้งมีการสะสมของไขมันในตัวมากที่สุด(Shiau and Liang, 1995) Shiau และ Peng (1993) ทดสอบสูตรอาหาร 9 สูตรที่มีความแตกต่างของระดับโปรตีน 3 ระดับ คือ 24, 28 และ32 เปอร์เซ็นต์ กับระดับคาร์โบไฮเดรต 3 ระดับคือ 33, 37 และ 41 เปอร์เซ็นต์ และคาร์โบไฮเดรต 3 ชนิด คือ กลูโคส เด็กตริน และแป้ง ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าสามารถใช้คาร์โบไฮเดรตเป็นแหล่งพลังงานแทนโปรตีนในอาหารได้ โดยสามารถลดระดับโปรตีนในอาหารลงแล้วเพิ่มคาร์โบไฮเดรต ที่เป็นแป้งหรือเด็กตริน แต่ต้องไม่เกิน 41 เปอร์เซ็นต์

2.7.1.6 ความต้องการวิตามิน ข้อมูลความต้องการวิตามินของปลานิลมีรายงานการศึกษาไม่มาก โดยปริมาณความต้องการมักจะได้จากการประมาณไม่ได้ทำการศึกษาโดยตรงยกเว้นบางตัว ซึ่งส่วนใหญ่อ้างอิงจากปลาชนิดอื่นในเขตร้อน แต่โดยทั่วไปแล้วระบบการเลี้ยงจะมีผลโดยตรงต่อความต้องการวิตามินในอาหารของปลา ปลานิลที่เลี้ยงในระบบหนาแน่นมีความต้องการวิตามินมาก ส่วนระบบการเลี้ยงในบ่อที่ความหนาแน่นต่ำอาจไม่จำเป็นต้องเพิ่มวิตามินในอาหารเนื่องจากปลาจะได้รับวิตามินจากอาหารธรรมชาติ (Lovell, 2002) ความต้องการวิตามินในปลานิลที่รายงานโดย Fitzsimmons (2005) ดังตารางที่ 6 วิตามินซี เป็นวิตามินที่มีความต้องการอย่างมากในอาหารสำหรับเลี้ยงปลาในระบบที่ไม่มีอาหารธรรมชาติ Lovell และ Limsuwan (1982) พบว่าปลานิล (*O. niloticus*) ไม่มีความจำเป็นต้องได้รับวิตามินบีสิบสอง จากอาหาร เนื่องจากภายในลำไส้ของปลามีแบคทีเรียที่สามารถสังเคราะห์วิตามินชนิดนี้ขึ้นมาได้ อย่างไรก็ตามในปลานิลขนาดเล็กยังคงมีความต้องการวิตามินบีสิบสองจากอาหาร

ตารางที่ 6 ปริมาณของวิตามินที่ใส่ลงในอาหารของปลานิล

วิตามิน	ปริมาณที่ใช้ในอาหาร(มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม)	
	O. niloticus x O. aureus	ปลานิล (ไม่ระบุชนิด)

Thiamine (B_1)	-	11
Riboflavin (B_2)	-	20
Pyridoxine (B_6)	1.7-9.5 (28เปอร์เซ็นต์ CP*)	11
Cobalamin (B_{12})	ไม่จำเป็น	0.01
Retinal (A)	-	4,400 IU
Cholecaciferol (D_3)	0.00937(374.8 IU)	2,200 IU
Vitamin K	-	4.4
Folic acid	-	5
Panthothenic acid	-	35
Inositol	-	-
Nicotinic	-	88
Tocopherol (E)	42-44 (ไขมัน 5 เปอร์เซ็นต์) 60-66 (ไขมัน12เปอร์เซ็นต์)	66 IU
Ascorbic acid (C)	37-42 (C_2MP-Mg)	375
Choline	1000	275
เอกสารอ้างอิง	Shiau (2002)	Fitzsimmons (2005)

* เปอร์เซ็นต์ โปรตีนในอาหาร

2.7.1.7 ความต้องการแร่ธาตุ สัตว์น้ำโดยทั่วไปมีความต้องการแร่ธาตุในรูปของสารอนินทรีย์เพื่อการดำรงชีวิต และสำหรับกระบวนการต่างๆ ภายในร่างกาย ซึ่งบางส่วนสัตว์น้ำสามารถดูดซึมจากแหล่งน้ำทั้งที่อยู่ในน้ำจืด และน้ำเค็ม แร่ธาตุหลายชนิดปลามีความต้องการน้อย แต่ก็มีความสำคัญมากต่อการดำรงชีวิต และมีความสำคัญต่อกระบวนการจัดการสิ่งแวดล้อม ปลามีความต้องการแร่ธาตุแต่ละชนิดแตกต่างกันโดยสามารถแบ่งแร่ธาตุได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ (Lall, 2002) คือ

กลุ่มที่ 1 แร่ธาตุที่สัตว์น้ำต้องการปริมาณมากหรือแร่ธาตุหลัก (macro minerals) เป็นแร่ธาตุที่ร่างกายต้องการในปริมาณมาก ทำให้จำเป็นต้องใส่ลงในอาหารในปริมาณมากมีหน่วยเป็นกรัมต่ออาหาร 1 กิโลกรัม แร่ธาตุหลักที่จำเป็นต่อสัตว์น้ำมี 7 ชนิด คือ แคลเซียม (Ca) คลอไรด์ (Cl) แมกนีเซียม (Mg) ฟอสฟอรัส (P) โพแตสเซียม (K) โซเดียม (Na) และซัลเฟอร์ (S)

กลุ่มที่ 2 แร่ธาตุที่สัตว์น้ำต้องการในปริมาณน้อยหรือแร่ธาตุรอง (trace elements) เป็นแร่ธาตุที่สัตว์น้ำต้องการในปริมาณน้อยมาก แร่ธาตุรองที่สัตว์น้ำต้องการมีทั้งหมด 7 ชนิด คือทองแดง (Cu) เหล็ก (Fe) แมงกานีส (Mn) ซีลีเนียม (Se) สังกะสี (Zn) ไอโอดีน (I) และโคบอลต์ (Co) โดยปลานิลก็มีความต้องการแร่ธาตุคล้ายคลึงกับปลาชนิดอื่นๆ ดังตัวอย่างที่นำมาแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 ปริมาณแร่ธาตุที่เสริมลงในอาหารปลานิล

แร่ธาตุ	ปริมาณที่เสริมในอาหาร (กรัมต่อกิโลกรัม)		
	ปลานิล (ไม่ระบุชนิด)	ปลานิล(ไม่ระบุชนิด)	ปลานิล(*O. niloticus*)
Phosphorus	-	-	9.0
Calcium (Ca)	3.0	7.0	-
Magnesium (Mg)	0.5	0.5	-
Potassium (K)	-	2.1-3.3	-
Iron (Fe)	0.15	-	-
Zinc (Zn)	0.20	0.02	-
Copper (Cu)	0.003	-	-
Manganese (Mn)	0.013	-	
Selenium (Se)	0.0004	-	
Iodine (I)	0.001	-	
เอกสารอ้างอิง	Fitzsimmons, 2005	Shiau, 2002	Watanabe, 1980a

(-) = ไม่ได้ทำการศึกษา

2.8 วัตถุดิบพืช

วัตถุดิบพืชถูกนำมาใช้เป็นส่วนผสมของอาหารสัตว์เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีคุณสมบัติของการเป็นแหล่งวัตถุดิบที่ให้โปรตีนที่มีความยั่งยืนมากกว่าปลาป่นคือ วัตถุดิบจากพืชสามารถที่จะผลิต หรือทำการเพาะปลูกขึ้นมาได้ตามความต้องการ และมีปริมาณผลผลิตที่ไม่ขึ้นกับการเปลี่ยนแปลงของสภาพธรรมชาติมากนัก และเป็นแหล่งโปรตีนที่มีราคาต่ำกว่าวัตถุดิบอื่นๆ (Hardy, 2000) แต่การใช้วัตถุดิบพืชก็ยังมีข้อจำกัดในการใช้หลายประการ ได้แก่ ส่วนประกอบที่

เป็นสารต้านโภชนาการ และยังมีส่วนประกอบที่ย่อยยากต่างๆอีก โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 4 กลุ่ม (ตารางที่ 8) (Francis *et al*., 2001) คือ

กลุ่มที่ 1 สารต้านโภชนาการที่มีผลต่อการย่อยและการนำโปรตีนไปใช้ประโยชน์ ได้แก่ สารยับยั้งเอนไซม์โปรติเอส (protease inhibitors) แทนนิน (tannins) และเลกติน (lectins)

กลุ่มที่ 2 สารต้านโภชนาการที่มีผลต่อการนำแร่ธาตุไปใช้ เช่น ไฟเตท (phytate) รงควัตถุกอสซิพอล (gossypols pigments) ออกซาเลต (oxalates) และกลูโคซิโนเลต (glucosinolates)

กลุ่มที่ 3 สารต้านวิตามิน

กลุ่มที่ 4 miscellaneous substances เช่นไมโคทอกซิน (mycotoxins) มิโมซีน (mimosine) ไซยาโนเจน (cyanogens) ไนเตรต (nitrate) อัลคาลอยด์ (alkaloids) โฟโตเซนซิไต-ซิง (photosensitizing agents) ไฟโตเอสโทรเจน (phytoestrogens) และซาโปนิน (saponins)

โดยเฉพาะอย่างยิ่งแหล่งของฟอสฟอรัสในวัตถุดิบพืชประมาณ 50-80 เปอร์เซ็นต์ ของฟอสฟอรัสทั้งหมดจะอยู่ในรูปของกรดไฟติกและไฟเตท กรดไฟติกทำหน้าที่เปรียบเสมือนที่เก็บสะสมฟอสฟอรัสที่สำคัญในเมล็ดพืช และธัญพืชต่างๆ และประกอบไปด้วยสารอาหารอื่นๆอีก ปริมาณของกรดไฟติกจะมีมากน้อยแตกต่างกันตามชนิดของพืช เช่น ในพืชใบเลี้ยงเดี่ยว พวกข้าวสาลี ข้าวบาเลย์ จะพบกรดไฟติกในชั้นของ aleuroneในข้าวจะพบกรดไฟติก ประมาณ 0.32 เปอร์เซ็นต์ พืชใบเลี้ยงคู่ จำพวกถั่ว จะพบอยู่ในส่วนของ globoids ซึ่งถั่วเหลืองพบประมาณ 1.38 เปอร์เซ็นต์ (Chung, 2002) ในวัตถุดิบพืชแต่ละชนิดมีปริมาณของกรดไฟติก และไฟเตทในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน เช่น กากถั่วเหลือง ข้าวโพด รำละเอียด กากเนื้อในเมล็ดปาล์มน้ำมัน จะมีกรดไฟติก 1.38, 0.85, 4.65 และ 1.31 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และมีไฟเตทฟอสฟอรัส 0.37, 0.17, 1.02 และ0.33 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับดังแสดงในตารางที่ 9 (Chung, 2002) จากการศึกษาความสามารถในการย่อยไฟเตทของปลานิลลูกผสม (*O. niloticus* × *O. aureus*) พบว่าปลานิลสามารถย่อยฟอสฟอรัสจากโครงสร้างของไฟเตทในอาหารได้ประมาณ 50เปอร์เซ็นต์ (Ellestad, 2002 อ้างโดย Debnath *et al*., 2005b; Ellestad *et al*., 2003)

ตารางที่ 8 ชนิดของสารต้านโภชนาการที่สำคัญที่พบในวัตถุดิบพืช

วัตถุดิบพืช	ชนิดของสารต้านโภชนาการ
กากถั่วเหลือง	สารยับยั้งเอนไซม์โปรติเอส, แลตติก, กรดไฟติก, ซาโปนิน, ไฟโตเอสโทรเจน, สารต้านวิตามิน และอัลเลอเจน (allergens)
กากเรพซีด (rapeseed meal)	สารยับยั้งเอนไซม์โปรติเอส, กลูโคไซด์โนเลต, กรดไฟติก และแทนนิน
กากเมล็ดลูบิน (lupin seed meal)	สารยับยั้งเอนไซม์โปรติเอส, ซาโปนิน, ไฟโตเอสโทรเจน และไอลคาร์ลอด
กากเมล็ดทานตะวัน	สารยับยั้งเอนไซม์โปรติเอส, ซาโปนิน, สารยับยั้งอาร์จิเนต
กากเมล็ดฝ้าย	กรดไฟติก, ไฟโตเอสโทรเจน, คอไซด์พอส, สารต้านวิตามิน, กรดไซโลโปรเพนโน-อิก (cyclopropenoic acid)
ใบกระถิน	มิโมซิน (mimosine)

ที่มา Francis และคณะ (2001)

วิธีการลดปริมาณสารต้านโภชนาการและเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสารอาหารของวัตถุดิบพืชสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การใช้ความร้อนทั้งแบบแห้ง และแบบเปียกจะเป็นวิธีการทำลายสารยับยั้งกิจกรรมของเอนไซม์ในกากถั่วเหลือง การสกัดสารต้านโภชนาการด้วยตัวทำละลายต่างๆ การใช้เอนไซม์ชนิดต่างๆ เพื่อปรับปรุงคุณภาพวัตถุดิบ เป็นต้น (Francis *et al.*, 2001)

ตารางที่ 9 ปริมาณของ กรดไฟติก ฟอสฟอรัสทั้งหมด ไฟเตทฟอสฟอรัสทั้งหมด และเปอร์เซ็นต์

ไฟเตทฟอสฟอรัสในฟอสฟอรัสทั้งหมด ในวัตถุดิบพืชชนิดต่างๆ

วัตถุดิบพืช	กรดไฟติก (เปอร์เซ็นต์)	ฟอสฟอรัสทั้งหมด(เปอร์เซ็นต์)	ไฟเตทฟอสฟอรัส (เปอร์เซ็นต์)	เปอร์เซ็นต์ไฟเตทฟอสฟอรัสในฟอสฟอรัสทั้งหมด
ข้าวโพด	0.6-1.03	0.26-0.34	0.17-0.29	66-85
รำข้าว	3.62-6.53	1.42-2.08	1.02-1.79	72-86
กากปาล์ม	1.17-1.45	0.55-0.58	0.33-0.41	60-71
กากถั่วเหลือง	1.31-1.49	0.65-0.69	0.37-0.42	57-61
กากเมล็ดทานตะวัน	1.13-3.16	0.91-1.10	0.32-0.89	35-81
ลูปิน	0.82-1.06	0.50-0.55	0.23-0.30	46-54
ข้าวสาลี(wheat)	0.60-1.35	0.28-0.47	0.17-0.38	60-80
รำข้าวสาลี	3.12-3.40	1.26-1.33	0.88-0.96	70-72
ข้าวโอ๊ต	0.57-1.24	0.33-0.45	0.16-0.35	48-78
กากคาโนลา	1.91-2.77	1.11-1.26	0.54-0.78	43-70
กากมะพร้าว	0.92-1.17	0.59-0.60	0.26-0.33	43-56
กากเมล็ดฝ้าย	2.66-3.19	1.07-1.08	0.75-0.90	70-83
ถั่วลิสง	1.06-1.70	0.60-0.65	0.30-0.48	46-80
กากเรพซีด	2.13-2.59	0.98-1.12	0.60-0.73	61-65
คอนกลูเต้น	1.03-2.23	0.63-0.97	0.29-0.63	46-65

ดัดแปลงจาก Chung (2002)

2.9 การศึกษาการใช้วัตถุดิบพืชในอาหารของปลานิล

อาหารปลาจัดว่าเป็นต้นทุนการผลิตที่มีราคาสูง โดยคิดแล้วมากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ในการเลี้ยงปลานิลแบบหนาแน่น (Alcest, 2004) ซึ่งด้วยสาเหตุนี้จึงมีความพยายามที่จะใช้วัตถุดิบราคาถูกชนิดต่างๆมาใช้ในการผลิตอาหาร วัตถุดิบที่เลือกใช้ส่วนใหญ่มีจุดประสงค์เพื่อที่จะแทนที่การใช้ปลาป่นในอาหาร และช่วยลดต้นทุนราคาของอาหาร โดยการแทนที่นี้จะต้องไม่ทำให้สูตรอาหารมีคุณภาพลดลงมากเกินไป หรือจะต้องมีคุณภาพไม่ต่างจากสูตรเดิม และยังคงมีสารอาหารต่าง ๆ สมดุลและพอเพียงกับความต้องการของปลา

แหล่งของวัตถุดิบโปรตีนจากพืชสำหรับอาหารปลา ที่สำคัญได้แก่ กากถั่วเหลือง peanut meal กากเมล็ดฝ้าย กากเมล็ดทานตะวัน เรพซีด แหนแดง (azolla) กากถั่วเหลือง ลูปิน (lupins) กากเมล็ดฝ้าย เป็นต้น การเลือกใช้วัตถุดิบพืชเพื่อใช้เป็นแหล่งโปรตีนทดแทนนั้นจะมีความแตกต่างกันไปตามท้องถิ่น โดยมักจะเลือกเอาวัตถุดิบที่มีในท้องถิ่นมาใช้เพราะมีต้นทุนต่ำกว่าการนำวัตถุจากต่างถิ่น มีเสถียรภาพมากกว่าการพึ่งพิงวัตถุดิบจากต่างถิ่น

อย่างไรก็ตามข้อจำกัดของการใช้วัตถุดิบจากพืชเป็นแหล่งทดแทนโปรตีนจากปลาป่นมีอยู่มากมาย มีสาเหตุเนื่องจากคุณสมบัติ และองค์ประกอบของวัตถุดิบพืชแต่ละชนิด รวมถึงปริมาณและชนิดของสารต้านโภชนาการ ที่มีมากและหลากหลายแตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 8 ทำให้เกิดข้อจำกัดของปริมาณที่จะใช้ (Francis *et al*., 2001; Bureau *et al*, 1998)

วิธีการในการแก้ปัญหาอันเกิดจากการแทนที่สามารถทำได้หลายวิธี ตัวอย่าง เช่น การใช้วัตถุดิบหลายๆ ชนิดของโปรตีนจากพืชก็เป็นวิธีหนึ่งในการทำให้ปริมาณของสารต้านโภชนาการที่มีอยู่ในวัตถุดิบพืชแต่ละชนิดลดลง โดยอาศัยความแตกต่างของชนิดของสารต้านโภชนาการในวัตถุดิบพืชซึ่งมีระดับความเป็นพิษไม่เท่ากัน มีการศึกษาพบว่าการใช้ส่วนผสมระหว่างกากถั่วเหลือง ร่วมกับ เพน (pen) หรือร่วมกับ คาร์โนล่า เป็นแหล่งวัตถุดิบโปรตีนสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนและพลังงานในสูตรอาหารของปลาได้ดีกว่า เมื่อทำการเปรียบเทียบกับการใช้กากถั่วเหลือง pea หรือ คาร์โนล่า เพียงอย่างเดียว (Mwachireya *et al*., 1999; Thiessen *et al*., 2003; Borgeson *et al*., 2006) El-Sayed และคณะ (2003) รายงานว่าปลานิลสามารถใช้วัตถุดิบโปรตีนจากพืชผสมระหว่าง กากถั่วเหลือง (25 เปอร์เซ็นต์) กากเมล็ดฝ้าย (25 เปอร์เซ็นต์) กากเมล็ดทานตะวัน (25 เปอร์เซ็นต์) linseed meal (25 เปอร์เซ็นต์) และ เมตไทโอนีนกับไลซีน 0.5 เปอร์เซ็นต์ แทนที่ปลาป่นในสูตรอาหารได้ 75 เปอร์เซ็นต์ โดยไม่ทำให้การเจริญเติบโตลดลง และประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนลดลง

3. วัตถุประสงค์การศึกษา

3.1 เพื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์การย่อยวัตถุแห้ง ฟอสฟอรัส โปรตีน และพลังงานระหว่างวัตถุดิบพืช 5 ชนิด (กากถั่วเหลือง กากเนื้อในเมล็ดในปาล์มน้ำมัน รำ ข้าวโพด และมันสำปะหลัง) ที่เสริมและไม่เสริมเอนไซม์ไฟเตส

3.2 เพื่อสร้างสูตรอาหารโดยลดการใช้อนินทรีย์ฟอสเฟตแต่ใช้เอนไซม์ไฟเตสทดแทน

3.3 เพื่อศึกษาผลของเอนไซม์ไฟเตส และอนินทรีย์ฟอสเฟตต่อการเจริญเติบโต ประสิทธิภาพการใช้อาหาร และประสิทธิภาพการย่อยฟอสฟอรัส