บทที่ 4

วิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 การทดลองที่ 1

จากการศึกษาครั้งนี้ พบว่า การเจริญเติบโตของปลาดุกพันธุ์ผสมที่ได้รับอาหารซึ่งมีปลาป่นเป็นส่วนผสม (สูตรที่ 1) มีน้ำหนักเฉลี่ยต่อตัว น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ และอัตราการกินอาหารสูงกว่าชุดการทดลองอื่นๆ ที่มีวัตถุดิบพืชเป็นแหล่งโปรตีนทั้งหมด (สูตรที่ 2-9) ($p<0.05$) แสดงว่าปลาดุกพันธุ์ผสมมีความสามารถในการใช้วัตถุดิบจากสัตว์ได้ดีกว่าวัตถุดิบจากพืช สอดคล้องกับการทดลองอื่นๆ อีกหลายการทดลองที่ใช้วัตถุดิบอาหารจากพืชเป็นส่วนใหญ่หรือทั้งหมด เช่น การทดลองของ Wee และ Shu (1989); Viola และคณะ (1994); Dato-Cajegas และ Yakupitiyage (1996) และจากการทดลองของวุฒิพร และคณะ (2547) ซึ่งทำการศึกษาผลของเอนไซม์ไฟเตสในปลานิลแปลงเพศ พบว่า ปลานิลแปลงเพศที่ได้รับอาหารไม่มีปลาป่นเป็นส่วนประกอบในอาหารมีการเจริญเติบโตต่ำ การที่ปลาในชุดการทดลองที่ 1 มีการเจริญเติบโตดีที่สุด เนื่องจากมีปลาป่นเป็นส่วนผสมอาหารซึ่งถือเป็นแหล่งโปรตีนที่สำคัญของสัตว์กินเนื้อ (carnivorous) (NRC, 1993) และอาหารสูตรอื่นๆ (สูตรที่ 2-9) มีวัตถุดิบพืชเป็นส่วนผสมสูงมีผลทำให้ปลาลดความอยากกินอาหาร (palatability) และยอมรับอาหารได้น้อยลง (acceptability) ส่งผลให้ปลามีการเจริญเติบโตต่ำ (Watanabe *et al.*, 1993) ซึ่งในการทดลองนี้มีส่วนผสมของกากถั่วเหลืองสูงถึง 60 เปอร์เซ็นต์ (เพื่อต้องการทดสอบประสิทธิภาพของเอนไซม์ไฟเตส) ปลาทดลองจึงอาจขาดกรดอะมิโนจำเป็นบางชนิด เนื่องจากถั่วเหลืองมีกรดอะมิโนไม่สมดุล เช่น ไลซีน (lysine) เมทไธโอนีน (methionine) ทรีโอนีน (threonine) เป็นต้น (Tacon, 1990) นอกจากนี้ยังมีสารบางชนิดที่ทำลายคุณค่าของสารอาหารบางตัว เช่น สารยับยั้งเอนไซม์โปรตีเอส (protease inhibitor) โดยเฉพาะสารยับยั้งเอนไซม์ทริปซิน (trypsin) ไฟโตฮีมาแอกกลูตินิน (phytohaemagglutinin) และสารที่ทำลายวิตามิน (anti-vitamins) ในการใช้ถั่วเหลืองให้มีประสิทธิภาพจึงต้องจำกัดปริมาณของการใช้ (Shiau *et al.*, 1989; Sadiku and Jauncey, 1995a,b)

ปลาป่นเป็นวัตถุดิบอาหารที่มีราคาแพงเมื่อเทียบกับวัตถุดิบพืช เช่น กากถั่วเหลือง กากปาล์ม ข้าวโพดป่น จึงมีการนำวัตถุดิบพืชเหล่านี้มาใช้ทดแทนปลาป่น แต่เนื่องจากฟอสฟอรัสที่อยู่ในวัตถุดิบพืชมักอยู่ในรูปไฟเตท หรือไฟติน ทำให้ปลาดูดซึมฟอสฟอรัสไปใช้ได้น้อย และส่วน

ที่ไม่ถูกดูดซึมจะถูกขับทิ้งเป็นของเสีย (Luzier *et al.*, 1995) Wise (1983); Lall (1991); Sugiura และคณะ (1998) รายงานว่า ฟอสฟอรัสในรูปไฟตินสามารถจับรวมตัวกับแร่ธาตุที่มีประจุบวก 2 ได้ เช่น แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) เหล็ก (Fe) และสังกะสี (Zn) เกิดเป็นสารประกอบที่ไม่ละลายน้ำเป็นเหตุให้ปลาไม่สามารถดูดซึม แร่ธาตุเหล่านี้ไปใช้ประโยชน์ได้ ในอาหารสัตว์ทั่วไปที่มีข้าวโพดและกากถั่วเหลืองเป็นส่วนประกอบหลัก จะมีฟอสฟอรัสในรูปไฟเตทประมาณ 0.22-0.25 เปอร์เซ็นต์ หรือคิดเป็นปริมาณ 60-80 เปอร์เซ็นต์ของฟอสฟอรัสทั้งหมดในอาหาร จากการทดลองนี้พบว่าปลาดุกพันธุ์ผสมที่ได้รับอาหารเสริมเอนไซม์ไฟเตส (สูตรที่ 4-6) และฟอสฟอรัสในรูปไดแคลเซียมฟอสเฟต (สูตรที่ 7-9) มีการเจริญเติบโต และประสิทธิภาพการใช้อาหารสูงกว่าปลาที่ได้รับอาหารสูตรที่ 2 (ไม่เสริมเอนไซม์ไฟเตส) สอดคล้องกับรายงานของ Spinelli และคณะ (1998) ปลาเรนโบว์เทราท์ (*Oncorhynchus mykiss*) ที่กินอาหารที่มีฟอสฟอรัสในรูปไฟเตทจะทำให้การเจริญเติบโต และอัตราการกินอาหารลดลง 10 เปอร์เซ็นต์ NRC (1993) รายงานว่า ปลานิลที่ได้รับอาหารที่มีกากถั่วเหลืองป่นเพียงอย่างเดียวมีการเจริญเติบโตช้ากว่าปกติถึง 20 เปอร์เซ็นต์ แต่การใช้วัตถุดิบพืชและเสริมด้วยสารอาหารบางชนิด เช่น ฟอสฟอรัส ไขมัน หรือกรดอะมิโนสามารถทดแทนการใช้วัตถุดิบจากสัตว์ได้ เช่นการทดลองของ Viola และคณะ (1988) พบว่าการใช้กากถั่วเหลืองป่นเสริมด้วยไดแคลเซียมฟอสเฟตและไขมัน 2 เปอร์เซ็นต์ และการทดลองของ Li และ Robinson (1997) ซึ่งทำการศึกษาในปลากดอเมริกัน (*Ictalurus punctatus*) พบว่า ปลาที่ได้รับอาหารเสริมเอนไซม์ไฟเตสที่ระดับ 250, 500 และ 750 ยูนิตต่ออาหาร 1 กิโลกรัม และปลาที่ได้รับอาหารเสริมฟอสฟอรัสในรูปไดแคลเซียมฟอสเฟต 1 เปอร์เซ็นต์ มีน้ำหนักที่เพิ่มขึ้น และอัตราการกินอาหารไม่แตกต่างกัน ($p<0.05$) แต่มีค่าสูงกว่าปลาที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์ไฟเตส ($p<0.05$) สำหรับอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ พบว่าปลากดอเมริกันที่ได้รับอาหารเสริมเอนไซม์ไฟเตสที่ 500 ยูนิตต่ออาหาร 1 กิโลกรัม มีค่าไม่แตกต่างกับที่ระดับ 250 และ 750 ยูนิตต่ออาหาร 1 กิโลกรัม ($p<0.05$) แต่มีค่าดีกว่าปลาที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์ และปลาที่ได้รับอาหารเสริมฟอสฟอรัสในรูปไดแคลเซียมฟอสเฟต 1 เปอร์เซ็นต์ ($p<0.05$) จึงสรุปได้ว่าระดับเอนไซม์ไฟเตส 500 ยูนิตต่ออาหาร 1 กิโลกรัม เป็นระดับที่เหมาะสมที่สุดสำหรับอาหารปลากดอเมริกัน เช่นเดียวกับการทดลองครั้งนี้ ซึ่งพบว่าการเสริมเอนไซม์ไฟเตสที่ระดับ 500 ยูนิตต่ออาหาร 1 กิโลกรัม ในอาหารปลาดุกพันธุ์ผสม ทำให้ปลามีการเจริญเติบโต น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ และประสิทธิภาพการใช้โปรตีนดีกว่าปลาที่ได้การเสริมเอนไซม์ไฟเตสในระดับอื่น ($p<0.05$) สอดคล้องกับการศึกษาของ Jackson และคณะ (1996) ซึ่งทำการทดลองในปลากดอเมริกัน พบว่า ปลาที่ได้รับอาหารเสริมเอนไซม์ไฟเตสที่ระดับ

500 ยูนิตต่ออาหาร 1 กิโลกรัม ทำให้ปลามีการเจริญเติบโตและการสะสมฟอสฟอรัสในกระดูกดีที่สุด และอีกหลายการทดลองรายงานว่า การเสริมเอนไซม์ไฟเตสในระดับ 500-1,000 ยูนิตต่ออาหาร 1 กิโลกรัม เป็นระดับที่เหมาะสมที่สุดในการเสริมในอาหารปลาชนิดต่างๆ (Simons *et al.*, 1990; Crowell *et al.*, 1993; Cain and Graling, 1995; Rodehutscord and Pfeffer, 1995; Schafer *et al.*, 1995) ส่วนการเสริมฟอสฟอรัสในรูปไดแคลเซียมฟอสเฟต พบว่า ที่ระดับ 0.3 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ปลามีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ ประสิทธิภาพการใช้โปรตีน และการใช้ประโยชน์จากโปรตีนสุทธิ ดีกว่าปลาที่ได้รับอาหารไม่เสริมเอนไซม์ไฟเตส (สูตรที่ 2) และเมื่อเปรียบเทียบระหว่างชุดทดลองที่เสริมฟอสฟอรัสในรูปไดแคลเซียมระดับอื่น พบว่า ที่ระดับ 0.3 เปอร์เซ็นต์ ปลามีน้ำหนักเฉลี่ย น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น อัตราการกิน และอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ ไม่แตกต่างจากที่ระดับ 0.1 และ 0.2 เปอร์เซ็นต์ สำหรับอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ พบว่าที่ระดับ 0.3 เปอร์เซ็นต์ มีค่าดีกว่าที่ 0.1 เปอร์เซ็นต์ แต่ไม่แตกต่างกับที่ 0.2 เปอร์เซ็นต์ ส่วนประสิทธิภาพการใช้โปรตีน และการใช้ประโยชน์จากโปรตีนสุทธิ พบว่าที่ระดับ 0.3 เปอร์เซ็นต์ ดีกว่าที่ระดับอื่นๆ แสดงให้เห็นว่าการเสริมฟอสฟอรัสในรูปไดแคลเซียมฟอสเฟตตั้งแต่ระดับ 0.1-0.3 เปอร์เซ็นต์ สามารถช่วยให้ปลาไม่ขาดฟอสฟอรัสและมีการเจริญเติบโตปกติ สอดคล้องกับรายงานที่ว่า ปลากดอเมริกันที่ได้รับอาหารเสริมไดแคลเซียมฟอสเฟต 1 เปอร์เซ็นต์ (มีเนื้อฟอสฟอรัส 0.39 เปอร์เซ็นต์) มีน้ำหนักเพิ่มขึ้น และอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อดีกว่าปลาที่ได้รับอาหารไม่เสริมไดแคลเซียมฟอสเฟต (Li and Robinson, 1997) แต่ถึงอย่างไรการเสริมเอนไซม์ไฟเตสก็ทำให้ปลามีการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพการใช้อาหารดีกว่าการเสริมด้วยฟอสฟอรัสในรูปไดแคลเซียมฟอสเฟต สอดคล้องกับ Li และ Robinson (1997) ซึ่งศึกษาพบว่าปลากดอเมริกันที่ได้รับอาหารเสริมด้วยไดแคลเซียมฟอสเฟต 1 เปอร์เซ็นต์ มีน้ำหนักเพิ่มขึ้น 55.2 กรัมต่อตัว และอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ 2.35 ในขณะที่ปลาที่ได้รับอาหารเสริมด้วยไฟเตสในระดับ 500 ยูนิตต่ออาหาร 1 กิโลกรัม มีน้ำหนักเพิ่มขึ้น 65.6 กรัมต่อตัว และอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ 2.01 การที่ปลาซึ่งได้รับเอนไซม์ไฟเตสมีการเจริญเติบโตและการใช้อาหารดีกว่าการเสริมอนินทรีย์ฟอสเฟต อาจเนื่องจากชนิดของอนินทรีย์ฟอสเฟตและปริมาณที่เสริมให้ปลายังไม่เหมาะสม ซึ่งมีรายงานว่า การใช้ประโยชน์เกลือฟอสเฟตขึ้นอยู่กับชนิดและปริมาณของเกลือและประเภทของสัตว์น้ำ เช่น ปลาเทราท์สามารถใช้ประโยชน์เกลือฟอสเฟตได้ดีกว่าปลาไน และปลาทั้งสองชนิดใช้ประโยชน์โซเดียมหรือโพแทสเซียมฟอสเฟตได้ดีกว่าแคลเซียมฟอสเฟต (Sakamoto and Yone, 1979; Nakamura and Yamada, 1980)

สำหรับองค์ประกอบทางเคมีของตัวปลา พบว่า เปอร์เซ็นต์โปรตีน และไขมันของปลาในกลุ่มที่ได้รับอาหารเสริมเอนไซม์ไฟเตสและฟอสฟอรัสในรูปไดแคลเซียมฟอสเฟตมีค่าสูงกว่าปลาที่ไม่ได้รับการเสริมเอนไซม์ไฟเตส ทั้งนี้เนื่องจากไฟเตทมักจับรวมตัวอยู่กับโปรตีนและกรดอะมิโน ส่งผลให้โปรตีนเกิดการเปลี่ยนรูป (Singh and Krikorian, 1982; Spinelli *et al.*, 1983; Robaina *et al.*, 1998; Forster *et al.*, 1999) อีกทั้งไฟเตทยังขัดขวางการทำงานของเอนไซม์โพติเอสอะไมเลส และไลเพส (Kornegay and Yi, 1996 อ้างโดย บุญล้อมและสุชน, 2540; Liener, 1994) จึงทำให้ปลานำโปรตีนและไขมันไปใช้ประโยชน์ได้ลดลง ดังนั้นการเสริมไฟเตสเพื่อย่อยสลายไฟเตท ทำให้โปรตีนที่จับตัวอยู่หลุดออกมา และเอนไซม์ต่างๆ สามารถทำงานได้ดีขึ้น ปลาที่ได้รับการเสริมเอนไซม์ไฟเตสจึงมีโปรตีนและไขมันสะสมในร่างกายสูงกว่าปลาที่ได้รับอาหารไม่เสริมเอนไซม์ ปริมาณฟอสฟอรัสและแคลเซียมในตัวปลาที่กินอาหารเสริมไฟเตสที่ระดับ 750 ยูนิตต่ออาหาร 1 กิโลกรัม (สูตรที่ 4 และ 5) มีค่าสูงเท่ากับปลากลุ่มที่ได้รับปลาป่น (สูตรที่ 1) และฟอสฟอรัสในรูปไดแคลเซียมฟอสเฟตเป็นส่วนผสมในอาหาร (สูตรที่ 7 และ 8) แสดงว่าเอนไซม์ไฟเตสช่วยเพิ่มความสามารถในการใช้โปรตีน ไขมัน ฟอสฟอรัส และแคลเซียมในปลาดุกพันธุ์ผสมได้ และสามารถใช้เอนไซม์ไฟเตสเสริมในอาหารแทนไดแคลเซียมฟอสเฟตได้ (Lei *et al.*, 1993; Kornegay and Yi, 1996; Knuckles *et al.*, 1989 อ้างโดย บุญล้อมและสุชน, 2540)

สำหรับองค์ประกอบของเลือดปลา ได้แก่ ค่าฮีมาโตคริต ฮีโมโกลบิน โปรตีนในพลาสมา พบว่ามีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของปลาปกติและมีค่าใกล้เคียงกับผลการศึกษาของ กิจการและวัชรินทร์ (2530); นิรุทธิ์ (2544); Li และ Robinson (1997); Boonyaratpalin และ Phromkhunthong (2000) โดยผลการศึกษาครั้งนี้พบว่าค่าฮีมาโตคริต ฮีโมโกลบิน และโปรตีนในพลาสมาของปลาที่ได้รับอาหารเสริมเอนไซม์ไฟเตสและฟอสฟอรัสในรูปไดแคลเซียมฟอสเฟตไม่มีความแตกต่างกันระหว่างชุดการทดลอง ส่วนปริมาณฟอสฟอรัสและแคลเซียมในซีรัม พบว่าอยู่ในเกณฑ์ปกติทั้งกลุ่มที่ได้รับอาหารเสริมเอนไซม์ ไฟเตสและฟอสฟอรัสในรูปไดแคลเซียมฟอสเฟต แสดงว่าสูตรอาหารที่มีการเสริมเอนไซม์ไฟเตสทำให้มีความสมดุลของสารอาหาร และสามารถช่วยให้ปลาใช้ประโยชน์จากแร่ธาตุ ได้แก่ เหล็กและทองแดง ซึ่งเป็นองค์ประกอบของเลือดได้ดีขึ้น สอดคล้องกับรายงานของ Andrews และคณะ (1973) รายงานว่าการขาดฟอสฟอรัสในปลากดอเมริกันจะมีผลให้ค่าฮีมาโตคริตลดลง Spinelli และคณะ (1983) รายงานว่าปลาเรนโบว์เทราท์ที่กินอาหารบริสุทธิ์ (purified diets) ที่มีกรดไฟติก 0.5 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ระดับทองแดงในเลือดและตับลดต่ำลง จะเห็นได้ว่าการเสริมไฟเตสทำให้ได้สูตรอาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการครบถ้วนเมื่อ

นำมาทดลองเลี้ยงปลาทำให้ปลาสามารถดำรงชีวิตได้อย่างปกติ และส่งผลให้กลไกการทำงานของระบบเลือดเป็นปกติ

จากการทดลองครั้งนี้ พบว่า ค่าดัชนีตับต่อตัวของปลาดุกพันธุ์ผสมที่ได้รับวัตถุดิบพืชเป็นแหล่งโปรตีนโดยมีการเสริมเอนไซม์ไฟเตส ไม่มีความแตกต่างจากปลาสูตรที่ 1 ที่ใช้ปลาป่นเป็นแหล่งโปรตีน($p>0.05$) สอดคล้องกับ Robaina และคณะ (1998) ซึ่งทำการศึกษาในปลา gilthead seabream (*Sparus aurata*) โดยดัชนีตับต่อตัวของปลาดุกพันธุ์ผสมมีค่าอยู่ในช่วง 0.73-1.00 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งต่ำกว่าการทดลองของนิรุทธิ์ (2544); วุฒิพร และคณะ (2547) จากการรายงานของ De Silva และคณะ (1991) พบว่า ค่าดัชนีตับต่อตัวมีความเกี่ยวข้องกับระดับพลังงาน (ไขมัน) ในอาหาร โดยปลาที่ได้รับอาหารที่มีระดับพลังงานสูงจะส่งผลให้ค่าดัชนีตับต่อตัวเพิ่มขึ้น สำหรับผลการศึกษาเนื้อเยื่อวิทยาของตับและไตของปลาดุกพันธุ์ผสมไม่พบความผิดปกติทางเนื้อเยื่อทั้งปลาที่เลี้ยงโดยให้อาหารเสริมเอนไซม์ไฟเตสและฟอสฟอรัสในรูปไดแคลเซียมฟอสเฟต เช่นเดียวกับการทดลองของ วุฒิพร และคณะ (2547) ซึ่งทำการทดลองในปลานิลแปลงเพศ

สำหรับปริมาณฟอสฟอรัสและแคลเซียมในกระดูกของปลาดุกพันธุ์ผสมในการทดลองนี้ พบว่า ปลาที่ได้รับอาหารเสริมเอนไซม์ไฟเตสที่ระดับ 1,000 ยูนิตต่ออาหาร 1 กิโลกรัม (สูตรที่ 6) ทำให้ปลามีฟอสฟอรัสสะสมในกระดูกสูงกว่ากลุ่มที่ไม่เสริมเอนไซม์ไฟเตส และสูงกว่าปลาที่รับอาหารเสริมฟอสฟอรัสในรูปไดแคลเซียมฟอสเฟต 0.1 และ 0.2 เปอร์เซ็นต์ สอดคล้องกับ Li และ Robinson (1997) ซึ่งรายงานว่า การเสริมด้วยไฟเตสในอาหารปลากดอเมริกันช่วยให้ปลามีฟอสฟอรัสสะสมในกระดูกเพิ่มขึ้น และปลาที่มีแคลเซียมสะสมในกระดูกสูงที่สุด คือ ปลาที่ได้รับอาหารเสริมฟอสฟอรัสในรูปไดแคลเซียมฟอสเฟต 0.3 เปอร์เซ็นต์ (สูตรที่ 9) รองลงมาคือ ปลาที่ได้รับอาหารเสริมไฟเตสที่ระดับ 750 ยูนิตต่ออาหาร 1 กิโลกรัม (สูตรที่ 5) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองของวุฒิพร และคณะ (2547) Simons และคณะ (1990); Crowell และคณะ (1993); Cain และ Garling (1995); Jackson และคณะ (1996) พบว่า ระดับไฟเตสที่เสริมในอาหารที่เหมาะสมสำหรับการสร้างกระดูกในสัตว์ทั่วไปอยู่ในช่วง 500-1,000 ยูนิตต่ออาหาร 1 กิโลกรัม จะเห็นได้ว่าการเสริมเอนไซม์ไฟเตสช่วยให้ปลาสามารถใช้ฟอสฟอรัสและแร่ธาตุอื่นๆ เช่น แคลเซียม เหล็ก ทองแดง และสังกะสีได้เพิ่มขึ้น (Rodehutscord and Pfeffer, 1995; Schaefer *et al.*, 1995; Lanari *et al.*, 1998; Oliva *et al.*, 1998; Storebakken *et al.*, 1998; Forster *et al.*, 1999; Papatryphon *et al.*, 1999; Masumoto *et al.*, 2001; Sugiura *et al.*, 2001; Cheng and Hardy, 2003)

4.2 การทดลองที่ 2

จากผลการศึกษาครั้งนี้จะเห็นได้ว่าปลานิลแดงแปลงเพศที่ได้รับอาหารที่มีสัดส่วนโปรตีนสัตว์ต่อโปรตีนพืชที่ระดับ 1:1, 1:2 และ 1:3 (สูตรที่ 1-6) มีผลให้การเจริญเติบโต (น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นและอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ) และประสิทธิภาพการใช้อาหาร (อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ ประสิทธิภาพการใช้โปรตีน และการใช้ประโยชน์จากโปรตีนสุทธิ) มีค่าไม่แตกต่างกัน และมีค่าดีกว่าปลาที่ได้รับอาหารที่มีสัดส่วนโปรตีนสัตว์ต่อโปรตีนพืชที่ระดับ 1:4 (สูตรที่ 7-8) และ 1:5 (สูตรที่ 9-10) โดยพบว่า หากมีการเพิ่มปริมาณของวัตถุดิบพืชในอาหารให้สูงขึ้น จะทำให้การเจริญเติบโต และประสิทธิภาพของอาหารลดต่ำลง สอดคล้องกับการทดลองของ Rumsey และคณะ (1993; 1994); Stickney และคณะ (1996); Kim และคณะ (1998) แสดงว่าปลานิลสามารถใช้วัตถุดิบพืชแทนที่ปลาป่นได้ในปริมาณจำกัด ทั้งนี้พบว่าสัตว์น้ำแต่ละชนิดมีความสามารถในการใช้ประโยชน์โปรตีนจากวัตถุดิบพืชได้แตกต่างกัน ขึ้นกับคุณค่าทางอาหาร และสารต้านโภชนาการ (antinutritional factor) ที่มีในวัตถุดิบพืชแต่ละชนิด (NRC, 1993) ในการผลิตอาหารสัตว์น้ำ วัตถุดิบพืชที่มักนำมาใช้เป็นส่วนผสมอาหารทดแทนปลาป่น คือ กากถั่วเหลือง เนื่องจากเป็นแหล่งโปรตีนพืชที่มีคุณภาพสูง ซึ่งหากนำมาใช้ในปริมาณที่เหมาะสมจะส่งผลให้ปลามีการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพการใช้อาหารดี เช่นเดียวกับปลาที่ได้รับอาหารที่มีปลาป่นเป็นแหล่งโปรตีนหลัก โดยปลากินพืช (herbivore) เช่น ปลานิล (*Oreochromis niloticus*) สามารถใช้ถั่วเหลืองแทนที่ปลาป่นได้ 30 เปอร์เซ็นต์ (Shiau *et al.*, 1990; Webster *et al.*, 1992) และหากนำถั่วเหลืองทั้งเมล็ดต้มที่ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จะสามารถใช้แทนที่ปลาป่นได้สูงถึง 83 เปอร์เซ็นต์ (Wee and Shu, 1989) แต่หากใช้ในปริมาณที่สูงหรือทดแทนปลาป่นในสัดส่วนที่สูงเกินไป จะทำให้ปลามีการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพการใช้อาหารลดลง เนื่องจากถั่วเหลืองมีปัจจัยจำกัด ได้แก่ ความไม่สมดุลขององค์ประกอบกรดอะมิโน เช่น เมทไธโอนิน ไลซีน ทรีโอนีน (Tacon, 1990) สารต้านโภชนาการ เช่น สารยับยั้งเอนไซม์ทริปซิน (trypsin inhibitor) ไฟโตฮีมาแอกกลูตินิน (phytohaemagglutinin) และสารที่ทำลายวิตามิน (anti-vitamins) (จารุรัตน์, 2528; Tacon, 1992; Tacon, 1993; Wee and Shu, 1987) นอกจากนี้วัตถุดิบพืชมักมีเยื่อใยที่ปลาไม่สามารถย่อยได้อยู่สูง ปลาจึงต้องใช้พลังงานในกระบวนการย่อยสูงตามไปด้วย ดังเช่นการทดลองของ Omoregie และ Ogbemudia (1993) ที่ใช้กากเนื้อเมล็ดในปาล์มทดลองเลี้ยงปลานิล (*O. niloticus*) ขนาด 2.57 กรัม พบว่า สามารถใช้กากปาล์มในอาหารปลานิลได้เพียง 15 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าค่อนข้างต่ำ เนื่องจากในอาหารมีเยื่อใยสูง ซึ่งเป็นส่วนที่ปลานำไปใช้ประโยชน์ไม่ได้ ในขณะที่นิรุทธ์ (2544) สามารถใช้อาหารที่มีกากปาล์ม 30 เปอร์เซ็นต์ โดยใน

อาหารมีระดับพลังงาน 3,600 กิโลคาลอรีต่อกิโลกรัม เลี้ยงปลานิลขนาด 2.25 กรัม แล้วได้ผลดี สาเหตุที่ปลาส่วนใหญ่ใช้ประโยชน์จากเยื่อใยได้ต่ำมากหรือไม่ได้เลย เนื่องจากปลาส่วนใหญ่ไม่มีเอนไซม์ช่วยในการย่อยเซลลูโลสหรือเฮมิเซลลูโลส (วีรพงค์, 2536; Anderson *et al.*, 1985) ดังนั้นปลานิลแดงแปลงเพศที่ได้รับอาหารที่มีสัดส่วนโปรตีนสัตว์ต่อโปรตีนพืชที่ระดับ 1:4 (สูตรที่ 7-8) และ 1:5 (สูตรที่ 9-10) จึงมีการเจริญเติบโตต่ำ

เมื่อพิจารณาจากค่าประสิทธิภาพการย่อย พบว่า ประสิทธิภาพการย่อยของปลานิลที่ได้รับอาหารที่มีสัดส่วนโปรตีนสัตว์ต่อโปรตีนพืช 1:4 มีประสิทธิภาพการย่อยวัตถุแห้ง โปรตีน และฟอสฟอรัสดีที่สุด ในขณะที่ปลาที่ได้รับอาหารที่มีสัดส่วนโปรตีนสัตว์ต่อโปรตีนพืช 1:3 มีประสิทธิภาพการย่อยไขมันดีที่สุด แสดงให้เห็นว่าวัตถุดิบพืชที่ใช้ในการทดลองนี้มีส่วนที่ปลานิลสามารถย่อยได้สูง คือ กากถั่วเหลือง สอดคล้องกับหลายการทดลองที่พบว่า ปลานิลสามารถย่อยกากถั่วเหลืองได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Popma, 1982; Begani *et al.*, 1997) แต่อย่างไรก็ตาม พบว่าสัดส่วนของโปรตีนสัตว์ต่อโปรตีนพืชที่ 1:3 มีผลทำให้การเจริญเติบโตและประสิทธิภาพการใช้อาหารของปลานิลดีที่สุด ทั้งนี้อาจเป็นไปได้ว่า แม้ว่าปลาจะสามารถย่อยสารอาหารต่างๆ จากวัตถุดิบพืชบางชนิดได้ดี แต่ไม่สามารถดูดซึมและเปลี่ยนเป็นพลังงานได้ทั้งหมด

เมื่อพิจารณาถึงผลของการเสริมเอนไซม์ไฟเตสในอาหารปลาที่มีสัดส่วนโปรตีนสัตว์ต่อโปรตีนพืชระดับต่างๆ พบว่า การเสริมเอนไซม์ไฟเตสในอาหาร (1,000 ยูนิตต่ออาหาร 1 กิโลกรัม) ทำให้การเจริญเติบโต ประสิทธิภาพการใช้อาหาร และประสิทธิภาพการย่อยอาหารของปลานิลแดงแปลงเพศมีผลไปในทางบวก สอดคล้องกับการทดลองที่ 1 ที่ทำการศึกษาในปลาดุกพันธุ์ผสม ซึ่งพบว่าเอนไซม์ไฟเตสส่งเสริมการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพการใช้อาหารของปลา และสอดคล้องกับการทดลองของ Li และ Robinson (1997) ที่ทดลองในปลากดอเมริกัน พบว่า การเสริมเอนไซม์ไฟเตสในอาหารช่วยให้ปลาสามารถใช้โปรตีน ฟอสฟอรัส และแร่ธาตุอื่นๆ จากวัตถุดิบพืชได้เพิ่มขึ้น โดยไม่ต้องเสริมฟอสเฟตลงในอาหาร ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนในการผลิตอาหาร โดยสามารถทดแทนวัตถุดิบจากพืชในอาหารปลาได้เพิ่มขึ้น ซึ่งจากการทดลองครั้งนี้พบว่าการเสริมเอนไซม์ไฟเตสที่ 1,000 ยูนิตต่ออาหาร 1 กิโลกรัม เพียงพอต่อการเจริญเติบโตและการใช้อาหารของปลานิลแดงแปลงเพศ เช่นเดียวกับการทดลองของ Rodehutscord และ Pfeffer (1995) รายงานว่าการเสริมเอนไซม์ไฟเตส 1,000 ยูนิตต่ออาหาร 1 กิโลกรัม ทำให้ปลาเรนโบว์เทราท์เพิ่มประสิทธิภาพการย่อยฟอสฟอรัสในอาหารได้ถึง 75 เปอร์เซ็นต์ นอกจากนี้การเสริมไฟเตสยังช่วยในการลดมลภาวะจากการเพาะเลี้ยงปลาอันมีสาเหตุจากการขับถ่ายฟอสฟอรัสที่ย่อยไม่ได้อีกด้วย โดยจากการทดลองนี้พบว่าปลาที่มีฟอสฟอรัสในมูลสูงที่สุด คือ ปลาที่ได้รับอาหารที่มี

โปรตีนสัตว์ต่อโปรตีนพืช 1:1 มีปริมาณฟอสฟอรัสในมูล 1.72 (สูตรที่ 1 ไม่เสริมไฟเตส) และ 1.66 (สูตรที่ 2 เสริมไฟเตส) และปลาที่ได้รับอาหารที่มีโปรตีนสัตว์ต่อโปรตีนพืช 1:5 มีฟอสฟอรัสในมูลต่ำสุด โดยมีค่าเท่ากับ 1.02 (สูตรที่ 9 ไม่เสริมไฟเตส) และ 0.97 (สูตรที่ 10 เสริมไฟเตส) จะเห็นได้ว่าการเพิ่มวัตถุดิบพืชสูงขึ้นและการเสริมเอนไซม์ไฟเตสมีผลทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสในมูลลดลง เนื่องจากไฟเตสสามารถย่อยฟอสฟอรัสในรูปไฟเทตได้ ปลาจึงนำฟอสฟอรัสจากวัตถุดิบพืชไปใช้ได้มากขึ้น และฟอสฟอรัสในปลาป่นซึ่งอยู่ในรูปไตรแคลเซียมฟอสเฟตปลานำมาใช้ประโยชน์ได้น้อย (Ogino *et al.*, 1979; Watanabe *et al.*, 1980; NRC, 1993; Viola *et al.*, 1994; Lall, 1991) ส่วนที่ปลานำไปใช้ไม่ได้จึงถูกขับถ่ายออกมา สอดคล้องกับ Jackson และคณะ (1996) ที่ทำการทดลองในปลากดอเมริกัน โดยให้อาหารที่เสริมเอนไซม์ 0, 500, 1,000, 2,000 และ 4,000 ยูนิตต่ออาหาร 1 กิโลกรัม พบว่า การเสริมเอนไซม์ตั้งแต่ระดับ 1,000 ยูนิตต่ออาหาร 1 กิโลกรัม สามารถลดปริมาณฟอสฟอรัสในมูลได้จาก 1.4 เปอร์เซ็นต์ เหลือเพียง 0.9 เปอร์เซ็นต์ ที่ระดับการเสริมเอนไซม์ 1,000 และ 2,000 ยูนิตต่ออาหาร 1 กิโลกรัม และเหลือเพียง 0.5 เปอร์เซ็นต์ ที่ระดับการเสริมเอนไซม์ 4,000 ยูนิตต่ออาหาร 1 กิโลกรัม

สำหรับส่วนประกอบทางโภชนาการของปลานิลแดงแปลงเพศทั้งตัว พบว่า เปอร์เซ็นต์โปรตีน ไขมัน และเถ้าของปลาทั้งตัว มีปฏิสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยทั้ง 2 คือ สัดส่วนโปรตีนสัตว์ต่อโปรตีนพืช และการเสริมเอนไซม์ไฟเตส โดยปลาที่ได้รับอาหารสูตรที่ 6 (สัดส่วนโปรตีนสัตว์ต่อโปรตีนพืช 1:3 และเสริมเอนไซม์ไฟเตส) มีเปอร์เซ็นต์โปรตีนสะสมในร่างกายสูงสุด สอดคล้องกับค่าการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพการใช้อาหาร การที่ปลาสามารถใช้โปรตีนในอาหารและมีโปรตีนสะสมในร่างกายสูงขึ้นเนื่องจากสัดส่วนโปรตีนสัตว์ต่อโปรตีนพืช 1:3 เป็นระดับที่มีความเหมาะสมสำหรับเตรียมอาหารสัตว์ (NRC, 1993) และการเสริมเอนไซม์ไฟเตสในอาหารช่วยส่งเสริมให้ปลานำโปรตีนไปใช้ได้มากขึ้น อาหารที่ใช้วัตถุดิบพืชเป็นส่วนผสม พบว่าไฟเตทในพืชมักจับรวมตัวกับโปรตีน ทำให้โปรตีนเกิดการเปลี่ยนรูปและใช้ประโยชน์ได้ลดลง และไฟเตทขัดขวางการทำงานของเอนไซม์ทริปซิน ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่ผลิตจากตับอ่อนทำหน้าที่ย่อยโปรตีน (Singh and Krikorian, 1982; Spinelli *et al.*, 1983; Robaina *et al.*, 1998; Forster *et al.*, 1999) อีกทั้งไฟเตทยังขัดขวางการทำงานของเอนไซม์โพเตส อะไมเลส และไลเพส (Kornegay and Yi, 1996 อ้างโดย บุญล้อมและสุชน, 2540) ดังนั้นการเสริมเอนไซม์ไฟเตสเพื่อย่อยไฟเตทในวัตถุดิบพืช จึงช่วยให้โปรตีนที่จับกับไฟเตทหลุดออกมาและนำมาใช้ประโยชน์ได้ แต่เมื่อพิจารณาผลขององค์ประกอบทางโภชนาการทุกๆ ค่าของปลาทั้งตัว พบว่า ไม่สามารถนำมาใช้เปรียบเทียบ

กับผลการทดลองในด้านอื่นได้ (Oliva *et al.*, 1998; Weerd *et al.*, 1999; Forster *et al.*, 1999; Vielma *et al.*, 2000)

จากการทดลองครั้งนี้ พบว่า องค์ประกอบเลือดปลา ได้แก่ ค่าฮีมาโตคริต ฮีโมโกลบิน โปรตีนในพลาสมา ปริมาณเม็ดเลือดแดงและเม็ดเลือดขาว และปริมาณฟอสฟอรัสและแคลเซียมในซีรัมมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของปลาปกติ และมีค่าใกล้เคียงกับการทดลองของนิรุทธ์ (2544); วุฒิพร และคณะ (2547); Li และ Robinson (1997) แสดงว่าสัดส่วนของโปรตีนสัตว์ต่อโปรตีนพืช ในการทดลองนี้ไม่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบเลือด อย่างไรก็ตามปลานิลแดงแปลงเพศที่ได้รับอาหารที่มีสัดส่วนโปรตีนสัตว์ต่อโปรตีนพืช 1:5 (สูตรที่ 9-10) ทำให้ค่าโปรตีนในพลาสมาต่ำกว่าที่ระดับอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ส่วนค่าดัชนีตับต่อตัวของปลานิลแดงแปลงเพศ พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับการทดลองของวุฒิพร และคณะ (2547); Robaina (1998); Fagbenro (1994); Boonyaratpalin และ Phromkunthong (2000) โดยมีค่าอยู่ในช่วง 1-2 เปอร์เซ็นต์ และปลาที่ได้รับอาหารเสริมเอนไซม์ไฟเตสมีค่าดัชนีตับต่อตัวสูงกว่าที่ไม่เสริม อาจเป็นไปได้ว่าการเสริมเอนไซม์ไฟเตสช่วยให้ปลาสามารถใช้ไขมันในอาหารได้มากขึ้น เนื่องจากไฟเตทที่อยู่ในอาหารจะไปขัดขวางการทำงานของเอนไซม์ไลเปสซึ่งทำหน้าที่ย่อยไขมันปลาจึงนำไขมันไปใช้ได้น้อย แต่เมื่อเสริมเอนไซม์ไฟเตสลงในอาหาร ไฟเตสจะไปย่อยโมเลกุลของไฟเตททำให้เอนไซม์ไลเปสทำงานได้ดีขึ้น ปลาจึงสามารถนำไขมันในอาหารมาใช้ได้มากขึ้น ซึ่งจากรายงานของ De Silva และคณะ (1991) พบว่าค่าดัชนีตับต่อตัวของปลานิลจะมีความเกี่ยวข้องกับปริมาณไขมันในอาหาร โดยปลาที่ได้รับอาหารที่มีไขมันสูงจะส่งผลให้ค่าดัชนีตับต่อตัวเพิ่มขึ้น

สำหรับผลการศึกษาเนื้อเยื่อวิทยาของตับและไต ไม่พบความผิดปกติในปลาทุกชุดการทดลอง เนื่องมาจากไฟเตสสามารถย่อยกรดไฟติกได้ในอาหารจึงมีปริมาณกรดไฟติกต่ำ จากการศึกษาของ Richardson และคณะ (1985) รายงานว่า ปลาซัลมอน (*Oncorhynchus tshawytscha*) ที่ให้อาหารที่มีกรดไฟติก 2.58 เปอร์เซ็นต์ ทำให้เกิดการเสื่อมสลายของท่อไต