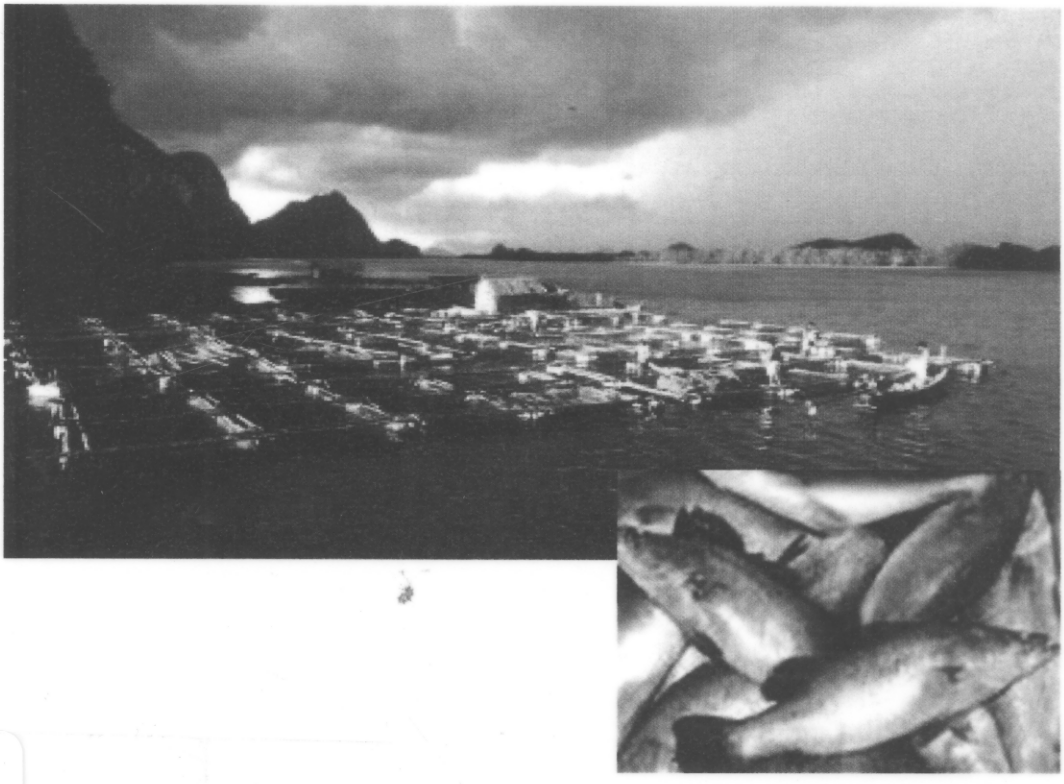
รายงานวิจัย

แหล่งของคาร์โบไฮเดรตที่เหมาะสมในอาหารสำหรับปลากะพงขาว (*Lates calcarifer* Bloch)



ตันติกิตติ

ศาสตร์

รธรรมชาติ

สงขลานครินทร์

16 มกราคม 2555

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่สนับสนุนงบประมาณในการทำวิจัย ขอขอบคุณ ภาควิชาวาริชศาสตร์ คณะทรัพยากรธรรมชาติ ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์ และสถานที่ทำวิจัย บริษัท โชติวัฒน์อุตสาหกรรมการผลิตจำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องในปลาทูน่า บริษัท เจริญโภคภัณฑ์อาหารจำกัด (มหาชน) ที่ให้ความอนุเคราะห์วัตถุดิบบางชนิดในการทำวิจัยครั้งนี้

สารบัญ

	หน้า
กิจติกรรมประกาศ	I
สารบัญ	II
สารบัญภาพ	IV
สารบัญตาราง	V
1.บทคัดย่อ	VI
2. Abstract	VII
3. บทนำ	1
4. วัตถุประสงค์	2
5. การตรวจเอกสาร	
5.1 คาร์โบไฮเดรตและแหล่งของวัตถุดิบในอาหาร	3
5.2 การย่อยคาร์โบไฮเดรต	6
5.3 การใช้ประโยชน์จากคาร์โบไฮเดรตในปลา	7
5.4 ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ประโยชน์จากคาร์โบไฮเดรตในอาหาร	10
5.5 กระบวนการเมแทบอลิซึมในการใช้คาร์โบไฮเดรตในปลา	12
6. วิธีการศึกษา	
6.1 การวางแผนการทดลอง	18
6.2 การเตรียมปลาสำหรับการทดลอง	18
6.3 การเตรียมอาหาร	18
6.4 การศึกษาการเจริญเติบโต และการให้อาหาร	19
6.5 การเก็บตัวอย่างเพื่อศึกษาการใช้คาร์โบไฮเดรต และกิจกรรมของเอนไซม์เกี่ยวกับการใช้คาร์โบไฮเดรต	21
6.6. การศึกษาประสิทธิภาพการย่อยอาหาร	22
6.7 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ	22
7. ผลการศึกษา	
7.1 อัตราการเจริญเติบโต และอัตราการตาย	25
7.2 ปริมาณการกินอาหาร อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ ประสิทธิภาพการใช้อาหาร และประสิทธิภาพการใช้โปรตีน	29
7.3 องค์ประกอบทางเคมีในตัวปลา	31
7.4 การใช้ประโยชน์จากโปรตีนสุทธิ ประสิทธิภาพการสะสมโปรตีน ประสิทธิภาพการสะสมไขมัน และประสิทธิภาพการสะสมพลังงาน	32

7.5 ระดับน้ำตาลในเลือด ดัชนีไขมันในตัว ดัชนีตับ การสะสมไกลโคเจนในตับ และกิจกรรมเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับเมแทบอลิซึมขั้นกลาง 34
7.6 การศึกษาประสิทธิภาพการย่อยอาหาร 38
8. วิจารณ์ผลการศึกษา 40
9. สรุปผลการศึกษา 50
10. เอกสารอ้างอิง 51

สารบัญภาพ

หน้า

1. น้ำหนักเฉลี่ย (ตัว/กรัม) ของปลากะพงขาวที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตแตกต่างกัน 7 ชนิด ทุก 2 สัปดาห์ เป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์ 26

สารบัญตาราง

หน้า

1. การย่อยคาร์โบไฮเดรตโดยเอนไซม์จากแหล่งต่าง ๆ 7
2. องค์ประกอบทางโภชนาการของวัตถุดิบอาหาร 23
3. ส่วนประกอบของอาหารทดลอง 24
4. น้ำหนักเฉลี่ยเริ่มต้น น้ำหนักเฉลี่ยสุดท้าย เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เพิ่ม อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ การเติบโตเฉลี่ยต่อวัน และอัตราการรอดตายของปลากะพงขาวที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตแตกต่างกัน 7 ชนิด 28
5. น้ำหนักอาหารที่ปลากิน การเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ ประสิทธิภาพการใช้อาหาร และประสิทธิภาพการใช้โปรตีนของปลากะพงขาวที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตแตกต่างกัน 7 ชนิด เป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์ 30
6. องค์ประกอบทางเคมีในตัวปลาสิ้นสุดการทดลองของปลากะพงขาวที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตแตกต่างกัน 7 ชนิด เป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์ 32
7. การใช้ประโยชน์จากโปรตีนสุทธิ (PPV) ประสิทธิภาพการสะสมโปรตีน (PRE, %) ประสิทธิภาพการสะสมไขมัน (LRE, %) และประสิทธิภาพการสะสมพลังงาน (ERE, %) ของปลากะพงขาวที่ได้รับอาหารที่มีคาร์โบไฮเดรตแตกต่างกัน 7 ชนิด 34
8. ระดับน้ำตาลในเลือด (Plasma glucose) ดัชนีไขมันในช่องท้อง (IPF,%) ดัชนีตับ(HSI,%) และการสะสมไกลโคเจนในตับ หลังจากปลาได้รับอาหารที่ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตแตกต่างกัน 7 ชนิด เป็นเวลา 6 ชั่วโมง 37
9. ผลของอาหารที่ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตแตกต่างกัน 7 ชนิด ต่อกิจกรรมเอนไซม์ไพรูเวทไคเนส (Pyruvate kinase; EC 2.7.1.40) กลูโคส 6 ฟอสฟาเตส (Glucose-6-phosphatase: G6Pase; EC 3.1.3.9) และกลูโคส 6 ฟอสเฟต ดีไฮโดรจีเนส (Glucose-6-phosphate dehydrogenase: G6PDH; EC 1.1.1.49) หลังจากปลากินอาหาร 6 ชั่วโมง 38
10. ประสิทธิภาพการย่อยวัตถุแห้ง (ADMD) โปรตีน (APD) และไขมัน (ALD) ของปลากะพงขาวที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตแตกต่างกัน 7 ชนิด 39

แหล่งของคาร์โบไฮเดรตที่เหมาะสมในอาหารสำหรับปลากะพงขาว

(*Lates calcarifer* Bloch)

บทคัดย่อ

ศึกษาชนิดของคาร์โบไฮเดรตที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต ประสิทธิภาพการใช้อาหาร การสะสมสารอาหาร และกิจกรรมเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเมแทบอลิซึมขั้นกลางในปลากะพงขาว โดยการเลี้ยงปลากะพงขาวด้วยอาหารที่มีคาร์โบไฮเดรตแตกต่างกัน 7 ชนิด คือ กลูโคส เด็กซ์ตริน แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด แป้งข้าวจ้าว แป้งสาลี และรำข้าวชนิดไม่สกัดน้ำมัน ที่ระดับ 17 เปอร์เซ็นต์ และอาหารมีโปรตีน 45 เปอร์เซ็นต์ และไขมัน 12 เปอร์เซ็นต์ ทดลองในปลากะพงขาวน้ำหนักเริ่มต้น 5.84±0.10 กรัม/ตัว ในน้ำจืด เป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์ พบว่า ปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยแป้งมันสำปะหลังมีอัตราการเจริญเติบโตดีที่สุดแต่ไม่แตกต่างจากอาหารที่ประกอบด้วยแป้งสาลี ($P>0.05$) รองลงมา คือปลาที่ได้รับแป้งข้าวจ้าว แป้งข้าวโพด รำข้าว เด็กซ์ตริน และกลูโคส ตามลำดับ ($P<0.05$) โดยปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยแป้งสาลี และปลาที่ได้รับแป้งมันสำปะหลังมีประสิทธิภาพการใช้อาหารดีที่สุด มีประสิทธิภาพการใช้โปรตีน การใช้ประโยชน์จากโปรตีนสุทธิ ประสิทธิภาพการสะสมโปรตีน การสะสมไขมัน และการสะสมพลังงานดีที่สุด ($P<0.05$) ขณะที่ปลาที่ได้รับอาหารที่มีกลูโคสเป็นแหล่งของคาร์โบไฮเดรต มีอัตราการเจริญเติบโต ปริมาณการกินอาหาร อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ ประสิทธิภาพการใช้อาหาร ประสิทธิภาพการใช้โปรตีน รวมถึงการใช้ประโยชน์จากโปรตีนสุทธิและการสะสมสารอาหารต่างๆ ต่ำที่สุด ($P<0.05$) หลังการกินอาหาร 6 ชั่วโมง ระดับน้ำตาลในเลือดของปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยกลูโคสมีค่าต่ำที่สุดแต่มีการสะสมไกลโคเจนในตับสูงสุด ($P<0.05$) ดัชนีไขมันสะสมในช่องท้องมีค่าสูงสุดในปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยเด็กซ์ตริน ส่วนกิจกรรมเอนไซม์ PK, G6Pase และ G6PDH มีระดับสูงในปลาที่ได้รับคาร์โบไฮเดรตที่มีโครงสร้างอย่างง่าย ได้แก่ กลูโคส และเด็กซ์ตริน และปลาที่ได้รับกลูโคสมีองค์ประกอบโปรตีนในตัวต่ำสุด ($P<0.05$) จากการศึกษาครั้งนี้ สามารถสรุปได้ว่า คาร์โบไฮเดรตที่มีโครงสร้างซับซ้อน คือ แป้งมันสำปะหลังและแป้งสาลี เป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตที่ดีสำหรับปลากะพงขาว ซึ่งทำให้ปลามีอัตราการเจริญเติบโต และประสิทธิภาพการใช้อาหาร รวมถึงประสิทธิภาพการสำรองโปรตีนได้ดีที่สุด

Suitable sources of carbohydrates in diets for Asian seabass

(*Lates calcarifer* Bloch)

Abstract

The present study evaluated different sources of carbohydrate, including locally available sources, on growth performance, feed utilization and key intermediary enzymes in Asian seabass, an economically important species in Thailand. A series of isonitrogenous (45%) and isolipidic (12%) diets was produced incorporating 17% glucose, dextrin, tapioca starch, corn flour, rice flour, wheat flour and rice bran. Diets were fed to apparent satiation to triplicate groups of juvenile seabass (initial weight 5.84±0.05 g) cultured in freshwater aquaria for 8 weeks. Fish fed the diet with tapioca starch had the highest growth performance but not significantly different from those fed diets containing wheat flour ($P>0.05$) followed by those fed rice flour, corn flour, rice bran and dextrin ($P<0.05$), respectively. Furthermore, feed intake, feed conversion efficiency, protein efficiency ratio, productive protein value and nutrient deposition efficiency were the highest ($P<0.05$) in fish fed tapioca starch and wheat flour. The fish fed the glucose containing diet had the poorest growth and feed utilization ($P<0.05$). Dietary carbohydrate source affected blood glucose levels such that fish fed diets glucose containing diet had the lowest glucose levels but highest liver glycogen content ($P<0.05$). Fish fed diets with dextrin and wheat flour deposited higher intraperitoneal fat than other groups ($P<0.05$) and those fed the glucose containing diet deposited the least ($P<0.05$). Pyruvate kinase (PK, glycolysis), glucose-6-phosphatase (G6Pase, gluconeogenesis) and glucose-6-phosphatedehydrogenase (G6PDH, lipogenic enzyme) were affected by dietary carbohydrate structure that activity levels of these enzymes were elevated in fish fed the less complex carbohydrate (dextrin and glucose). Moreover, fish fed glucose containing diet had the lowest carcass protein content ($P<0.05$). This study indicates that tapioca starch and wheat flour are good carbohydrate sources for Asian seabass that resulted in good growth and feed utilization efficiency as well as sparing action for protein.

Keywords: Diet carbohydrate sources; Feed utilization; Intermediary enzymes; Asian seabass

บทนำ

โปรตีนเป็นสารอาหารหลักที่มีความจำเป็นและมีราคาแพง ใช้เพื่อการเจริญเติบโตและซ่อมแซมส่วนที่สึกหรอ เป็นส่วนประกอบหลักในอาหารและถือเป็นต้นทุนหลักในการสร้างสูตรอาหารสำหรับสัตว์น้ำ (Mohapatra *et al.*, 2003; Stone, 2003; Fu, 2005; Borba *et al.*, 2006; Kumar *et al.*, 2006a; Tan *et al.*, 2007) ในสัตว์น้ำโดยเฉพาะสัตว์กินเนื้อมีแนวโน้มในการนำโปรตีนไปใช้เป็นแหล่งพลังงานในสภาวะที่มีการขาดแคลนหรือในอาหารมีแหล่งพลังงานที่ไม่เหมาะสม การใช้ประโยชน์จากโปรตีนได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงควรคำนึงถึงแหล่งพลังงานที่ไม่ใช่โปรตีน (non-protein energy) ที่สัตว์น้ำสามารถนำไปใช้ได้ดีที่สุด คือ ไขมันหรือคาร์โบไฮเดรต (El-sayed and Garling, 1988; Chou and Shiau, 1996; Nankervis *et al.*, 2000; Watanabe *et al.*, 2001 อ้างโดย Borba *et al.*, 2006) เพื่อให้เกิดการใช้ประโยชน์จากโปรตีนได้สูงสุด (protein-sparing effect) (Tan *et al.*, 2007; Stone *et al.*, 2003b) ซึ่งไม่เพียงทำให้ต้นทุนอาหารลดลงแต่ยังรวมไปถึงการลดของเสียไนโตรเจนที่ปลดปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม เป็นผลให้ปลาที่ผลิตได้มีคุณภาพและมาตรฐานการผลิตของฟาร์มที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากขึ้น (Kaushik and Médale, 1994; Borba *et al.*, 2006) แม้ว่า ไขมันเป็นแหล่งพลังงานที่ไม่ใช่โปรตีนที่มีประสิทธิภาพและมีความสำคัญสำหรับปลา แต่เมื่อเปรียบเทียบกับคาร์โบไฮเดรตแล้วไขมันถือว่าเป็นแหล่งพลังงานที่มีราคาแพง (Stone *et al.*, 2003a; 2003b; Kumar *et al.*, 2006a) นอกจากนี้ ไขมันในระดับที่สูงเกินไปจะมีผลต่อคุณภาพของเม็ดอาหาร (Jauncey, 1982) และมีผลลบต่อผลผลิตและคุณภาพของปลา คือ การเพิ่มของไขมันในตัวและเครื่องในอันส่งผลต่อการยอมรับของผู้บริโภค (Helland and Grisdale-Helland, 1998; Company *et al.*, 1999; Cyrino *et al.*, 1999; Portz *et al.*, 2001 อ้างโดย Martino *et al.*, 2005; Tan *et al.*, 2006; Tan *et al.*, 2007)

ดังนั้น คาร์โบไฮเดรตจึงเหมาะสมในการนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงานในอาหารสัตว์น้ำ เนื่องจากเป็นวัตถุดิบอาหารที่มีราคาถูก และสามารถหาได้ง่าย มีผลทำให้ต้นทุนอาหารต่ำลงได้ (Fynn-Aikins *et al.*, 1992; Wilson, 1994) ซึ่งการจัดเตรียมให้อาหารมีแหล่งพลังงานที่มาจากคาร์โบไฮเดรตในระดับที่เพียงพอและเหมาะสม จะทำให้เกิดการใช้ประโยชน์จากสารอาหารได้อย่างสูงสุด โดยเป็นการลดการนำโปรตีนมาคะตะบอลิซึมเพื่อเป็นแหล่งพลังงานหรือการสังเคราะห์กลูโคสขึ้นมาใช้ใหม่ (Wu *et al.*, 2007a) ปลาจึงนำโปรตีนไปใช้เพื่อการเจริญเติบโตได้อย่างเต็มที่และใช้พลังงานที่ได้จากคาร์โบไฮเดรต ทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของการสำรองโปรตีน (protein retention) และสำรองพลังงาน (energy retention) ภายในตัวปลา แม้ว่าคาร์โบไฮเดรตจะเป็นแหล่งของพลังงานในอาหารสำหรับปลาที่มีราคาถูก แต่ความสามารถในการใช้ประโยชน์จากคาร์โบไฮเดรตในปลาแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน (NRC, 1993; Wilson, 1994; Shiau, 1997; Hutchins *et al.*, 1998; Lee and Lee, 2003; Tan *et al.*, 2006) โดยการใช้ประโยชน์จากคาร์โบไฮเดรตในปลาสัมพันธ์กับลักษณะทางกายวิภาคและหน้าที่การทำงานของระบบทางเดิน

อาหาร และเกี่ยวเนื่องไปถึงอวัยวะต่าง ๆ (Krogdahl *et al.*, 2005; Wu *et al.*, 2007c) รวมไปถึงกระบวนการเมแทบอลิซึมที่สัตว์น้ำปรับตัวเพื่อให้เข้ากับสิ่งแวดล้อมที่อยู่อาศัยที่แตกต่างกัน (Walton and Cowey, 1982; Lee and Lee, 2004)และการใช้ประโยชน์จากคาร์โบไฮเดรตยังขึ้นกับชนิด ระดับ ความซับซ้อนของโครงสร้างโมเลกุลและความสุกดิบของคาร์โบไฮเดรตในอาหารของปลา (Bergot, 1979; Hutchins *et al.*, 1998; Lee *et al.*, 2003)

วัตถุประสงค์

เพื่อศึกษาชนิดของคาร์โบไฮเดรตที่มีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโต ประสิทธิภาพการย่อยอาหาร ประสิทธิภาพการใช้อาหาร และกิจกรรมของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการใช้คาร์โบไฮเดรต

การตรวจเอกสาร

1. คาร์โบไฮเดรตและแหล่งของวัตถุดิบในอาหารปลา

คาร์โบไฮเดรต (carbohydrate) เป็นองค์ประกอบที่สำคัญของสิ่งมีชีวิตทุกชนิดและเป็นชีวโมเลกุลที่มีปริมาณมากที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพืชมีมากถึง 70% ของวัตถุแห้งในต้นพืช และอาจถึง 85% ในเมล็ดธัญพืช ตัวอย่างของสารจำพวกนี้ได้แก่ น้ำตาล แป้ง เซลลูโลส (cellulose) และยางไม้ (gums) พืชสามารถสังเคราะห์คาร์โบไฮเดรตได้เองจากคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และน้ำ (H_2O) โดยอาศัยพลังงาน (energy) จากแสงอาทิตย์ในกระบวนการสังเคราะห์แสง (photosynthesis) ซึ่งมีปฏิกิริยาโดยสรุปคือ

$$6CO_2 + 6H_2O + \text{Energy from the sun} \xrightarrow{\text{photosynthesis}} C_6H_{12}O_6 + 6O_2$$

จะเห็นได้ว่า จากปฏิกิริยาดังกล่าว เกิดคาร์โบไฮเดรตและออกซิเจนซึ่งจำเป็นต่อการหายใจของสิ่งมีชีวิต ซึ่งเป็นกระบวนการที่สำคัญที่ทำให้ชีวิตดำรงอยู่ได้ บุญล้อม (2541)

1.1 ประเภทของคาร์โบไฮเดรต

คาร์โบไฮเดรตสามารถแบ่งตามลักษณะทางเคมี ได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้

1.1.1 น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว หรือน้ำตาลชั้นเดียว (Monosaccharide) เป็นโมเลกุลที่มีขนาดเล็กที่สุด มีโครงสร้างพื้นฐานที่ประกอบด้วยสายคาร์บอนที่มีการเรียงตัวออกซิเจนและไฮโดรเจนที่แตกต่างกัน ซึ่งมีจำนวนคาร์บอนระหว่าง 3-7 ตัว ในจำนวนทั้งหมดพบว่ากลุ่มที่มีคาร์บอน 6 อะตอม คือ เฮกโซส (hexose) เป็นกลุ่มที่พบมากที่สุดในธรรมชาติโดยเฉพาะกลูโคสและโมโนแซคคาไรด์ที่พบเป็นโมเลกุลเดี่ยวนั้นจะพบในพืชเท่านั้น ยกเว้นกลูโคสที่พบอยู่ในสัตว์ชนิดของโมโนแซคคาไรด์ที่มีความสำคัญ ได้แก่

1. กลูโคส (glucose) อาจเรียกว่า dextrose หรือน้ำตาลองุ่น (grape sugar) มีความหวานน้อยกว่าน้ำตาลผลไม้ (fructose) และน้ำตาลอ้อย (sucrose) มักพบในเลือด เพราะเป็นน้ำตาลที่ไม่ต้องผ่านกระบวนการย่อยและดูดซึมจึงเข้าสู่เส้นเลือดและสามารถนำไปใช้เป็นพลังงานได้ทันที เป็นน้ำตาลที่มีมากที่สุดในเลือด กลูโคสเป็นโมเลกุลพื้นฐานที่สำคัญที่สุดทางโภชนาการ เพราะเป็นส่วนประกอบของน้ำตาลสองชั้นที่สำคัญแทบทุกชนิด

2. ฟรุกโตส (fructose) หรือน้ำตาลผลไม้ (Fruit sugar) มีมากในน้ำผึ้ง เป็นน้ำตาลชั้นเดียวที่ไม่ตกผลึก (น้ำตาลชั้นเดียวโดยทั่วไปตกผลึกได้ง่าย) มีรสหวานมาก มักอยู่รวมกับกลูโคสได้เป็นน้ำตาล disaccharide ที่มีชื่อว่า sucrose ซึ่งเป็นองค์ประกอบของน้ำตาลอ้อย

3. กาแลคโตส (galactose) มีโครงสร้างทางเคมีที่คล้ายคลึงกับกลูโคส ผิดกันเฉพาะทิศทางของกลุ่ม OH ที่ C ตำแหน่งที่ 4 ดังนั้นจึงเรียกว่าเป็น epimer กับน้ำตาลกลูโคส การแลคโตสเป็นองค์ประกอบที่สำคัญกับน้ำตาลแลคโตสในนม และมักรวมตัวกับไขมันเป็นส่วนประกอบของเซลล์ประสาท

4. แมนโนส (mannose) เป็นน้ำตาล aldohexose ที่มีโครงสร้างคล้ายคลึงกับกลูโคส แตกต่างกันเฉพาะทิศทางของกลุ่ม OH ที่ C ตำแหน่งที่ 2 ดังนั้น จึงเรียกว่าเป็น epimer กับกลูโคส แมนโนสเป็นองค์ประกอบของคาร์โบไฮเดรตหรืออาจจับกับโปรตีนก็ได้

5. ไรโบส (ribose) หรือ (deoxyribose) เป็นองค์ประกอบของกรดนิวคลีอิก (nucleic acid) คือ ดีเอ็นเอ (DNA) และอาร์เอ็นเอ (RNA) ตามลำดับ ซึ่งเป็นสารพันธุกรรมในเซลล์ของสิ่งมีชีวิต นอกจากนี้น้ำตาลไรโบสยังเป็นองค์ประกอบของวิตามินบี 2 ซึ่งมีชื่อว่า riboflavin และเป็นองค์ประกอบของสารพลังงานสูง เช่น ATP (adenosine triphosphate) ซึ่งมีบทบาทอย่างมากเกี่ยวกับเมตาบอลิซึมในร่างกาย น้ำตาล pentose บางตัว เช่น ไซโลส (xylose) อาจเป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์พืช เช่น เฮมิเซลลูโลส และ ลิกนิน เป็นต้น

1.1.2 ไดแซคคาไรด์และโอลิโกแซคคาไรด์ (disaccharide and oligosaccharide) ไดแซคคาไรด์เป็นโมโนแซคคาไรด์ 2 ตัวมาต่อกัน สำหรับโอลิโกแซคคาไรด์มีมากกว่า 2 ตัว แต่ไม่เกิน 15 ตัว ในธรรมชาติพบไดแซคคาไรด์มากที่สุด เป็นน้ำตาลที่มีรสหวานและละลายน้ำได้ ตกผลึกได้ง่าย น้ำตาลไดแซคคาไรด์ที่พบมาก ได้แก่

1. มอลโตส (maltose) ประกอบด้วย glucose จับกับ glucose ด้วยพันธะ (bond) แบบ α 1,4 เป็นน้ำตาลที่เกิดจากการย่อยแป้งด้วยเอนไซม์ แอลฟาอะไมเลส (α-amylase) ไม่ค่อยพบเป็นอิสระในธรรมชาติ

2. ซูโครส (sucrose) ประกอบด้วย glucose จับกับ fructose ด้วยพันธะ α-1,2 น้ำตาลซูโครสพบได้มากในธรรมชาติ มีในอ้อยและหัวบีทที่ใช้ทำน้ำตาล (sugar beet) เป็นต้น เป็นน้ำตาลที่ใช้รับประทานอยู่ทั่วไป

3. แลกโตส (lactose) ประกอบด้วย glucose จับกับ galactose ด้วยพันธะ β- 1,4 พบในน้ำนม

4. เซลโลไบโอส (cellobiose) ประกอบด้วย glucose จับกับ glucose ด้วยพันธะแบบ β- 1,4 เป็นองค์ประกอบของเซลลูโลส

1.1.3 โพลีแซคคาไรด์ (polysaccharide) เป็นโมเลกุลใหญ่ ประกอบด้วยโมโนแซคคาไรด์จำนวนมาก ตั้งแต่ 10-1,000 โมเลกุล เชื่อมกันด้วย glycosidic linkage ซึ่งโพลีแซคคาไรด์ที่พบในธรรมชาติ เช่น แป้ง ไกลโคเจน เซลลูโลส และไคติน

1. แป้ง (starch) อยู่ในเซลล์พืช โดยอยู่ในรูปของ "granule" แต่ละ granule ประกอบด้วย อะไมโลส (amylose) ประมาณ 25% และ อะไมโลเปคติน (amylopectin) ประมาณ 75% ซึ่งทั้งสองชนิดมีหน่วยย่อย คือ α- glucose

- อะไมโลส (amylose) ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 100-200 โมเลกุล จับกันเป็นเส้นตรงด้วยพันธะแบบ α 1, 4 – glycosidic linkage มีโครงสร้างขดกันเป็นเกลียว helix structure และสามารถละลายได้ในน้ำร้อน

- อะไมโลเปคติน (amylopectin) ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 250-5,000 โมเลกุล ต่อกันเป็นเส้นตรงและเป็นแขนง ส่วนที่ต่อกันเป็นเส้นตรงเป็น α-1,4 linkage และส่วนที่เป็นแขนงเป็น α-1,6 linkage

เม็ดแป้งไม่ละลายในน้ำเย็น แต่จะมีลักษณะเป็นสารแขวนลอย (suspension) เมื่อได้รับความร้อนจะเกิดการพองตัว (swelling) ในที่สุดจะแตกออก และละลายน้ำได้ ทำให้เอนไซม์ย่อยแป้ง (amylolytic enzyme) สามารถเข้าไปย่อยเม็ดแป้งได้ กระบวนการนี้เรียกว่า gelatinization มีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมอาหารสัตว์ เมื่อแป้งถูกย่อยด้วยเอนไซม์อะไมเลส (amylase) จะได้เป็นสารที่เรียกว่า ลิมิเตด เด็กซ์ตริน (limited dextrin) เพราะเอนไซม์นี้ย่อยได้เฉพาะแบบพันธะ α-1,4 linkage ไม่สามารถย่อยพันธะแบบ α-1,6 linkage ได้ พันธะแบบนี้ต้องถูกย่อยได้ด้วยเอนไซม์ α-1,6 glucosidase ซึ่งจะช่วยย่อยอะไมโลเปคตินให้สมบูรณ์ กลายเป็น มอลโตสและกลูโคส ตามลำดับ

2. เด็กซ์ตริน (dextrin) เป็นผลผลิตขั้นแรกที่เกิดจากการสลายตัวของแป้งโดยความร้อน (dry heat) และละลายน้ำได้ ซึ่งเป็นการสลายแป้งโดยความร้อน จะให้ผลผลิตดังนี้

แป้ง ⟶ เด็กซ์ตริน ⟶ มอลโตส ⟶ กลูโคส

3. ไกลโคเจน (glycogen) ประกอบด้วยกลูโคสประมาณ 5,000-25,000 โมเลกุล เป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตที่สะสมอาหารในสัตว์ และเป็นแหล่งสำคัญในเมตาบอลิซึมของพลังงาน พบมากในตับของปลา มีโครงสร้างเหมือนอะไมโลเปคติน (amylopectin) คือ ประกอบด้วยกลูโคสจำนวนมาก จับกันด้วยพันธะแบบ พันธะ α-1,4 linkage และ α-1,6 linkage แต่จะมีการแตกแขนงมากกว่า อาจเรียกไกลโคเจนได้ว่า แป้งสัตว์ (animal starch) สามารถละลายน้ำได้ ถูกย่อยด้วยเอนไซม์ phosphorylase จะได้เป็น glucose-1-phosphate ซึ่งจะถูกเมตาบอไลซ์ต่อไป

4. เซลลูโลส (cellulose) เป็นโพลีแซคคาไรด์ที่มีมากที่สุดในธรรมชาติ เป็นองค์ประกอบของผนังเซลล์พืชที่ถือว่าเป็นเยื่อใย ทนต่อการย่อยด้วยกรดและด่าง ประกอบด้วย

กลูโคสเป็นจำนวนมาก เชื่อมกันเป็นเส้นตรงด้วยพันธะแบบ β- 1,4 linkage ประมาณ 2,000-8,000 โมเลกุล ซึ่งพันธะนี้ไม่สามารถถูกย่อยด้วยเอนไซม์ของสัตว์ชั้นสูง

5. ไคติน (chitin) เป็นโครงสร้างหลักของเปลือกสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังกลุ่มครัสเตเชีย และยังเป็นส่วนประกอบของผนังเซลล์เชื้อราและสาหร่ายหลายชนิด มีส่วนประกอบที่สำคัญ คือ N- acetyl glucosamine (amino sugar) มาต่อกันเป็นสายยาวด้วย β- 1,4 linkage ซึ่งเป็นโครงสร้างที่คล้ายกับโครงสร้างของเซลลูโลส แตกต่างจากเซลลูโลสที่คาร์บอนในตำแหน่งที่ 2 ที่มีหมู่ acetamido group ($NHCOCH_3$) แทนที่หมู่ OH เนื่องจากไคตินเป็นโครงสร้างที่สำคัญของครัสเตเชีย จึงเป็นส่วนประกอบที่สำคัญในอาหารปลาและสัตว์น้ำชนิดอื่นที่กินเนื้อโดยเฉพาะในระยะวัยอ่อน และพบเอนไซม์ไคติเนสที่ย่อยสลายไคตินในปลาหลายชนิด

2. การย่อยคาร์โบไฮเดรต

คาร์โบไฮเดรตในอาหารสัตว์น้ำอาจแบ่งเป็นกลุ่มใหญ่ ๆ ได้ 3 กลุ่มคือ น้ำตาล แป้ง และกากอาหาร แป้งจะต้องถูกย่อยให้มีขนาดเล็กลงก่อนที่จะถูกดูดซึมได้ น้ำตาลซึ่งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่มีขนาดของโมเลกุลเล็กอยู่แล้วและมักพบในอาหารสัตว์น้ำในปริมาณไม่มากนัก ร่างกายสัตว์น้ำจะดูดซึมไปใช้ได้โดยไม่ถูกย่อยอีก ส่วนกากอาหารเอนไซม์ของสัตว์ไม่สามารถย่อยได้ แต่ก็มีส่วนช่วยให้อาหารถูกย่อยได้มากขึ้นหากมีในอาหารไม่มากจนเกินไป

การย่อยคาร์โบไฮเดรตในสัตว์น้ำเกิดขึ้นในลำไส้เมื่ออาหารเหลว (chyme) ซึ่งเกิดจากการคลุกเคล้าระหว่างอาหารกับเมือกและเอนไซม์ในกระเพาะถูกส่งผ่านเข้าลำไส้ตอนต้น อาหารเหลวนี้กระตุ้นให้ต่อมในผนังเยื่อเมือกของลำไส้ผลิตฮอร์โมนหลายชนิดเพื่อกระตุ้นต่อให้ต่อมในตับอ่อนและลำไส้ผลิตเอนไซม์ (ตารางที่ 1) โดยเอนไซม์แอลฟาอะไมเลส (α-amylase) จากตับอ่อนมีหน้าที่ย่อยคาร์โบไฮเดรตในลำไส้ เป็นเอนไซม์ที่สำคัญในการย่อยแป้งและไกลโคเจนได้เป็นโมโนแซคคาไรด์ มอลโตไตรโอส และมอลโตส โดยจะย่อยแป้งที่ตำแหน่ง α-1,4 glucosidic สำหรับการย่อยไดแซคคาไรด์เป็นโมโนแซคคาไรด์เกิดขึ้นที่บริเวณผิวของเยื่อเมือกลำไส้ซึ่งเป็นบริเวณที่มีเอนไซม์พวกไดแซคคาริเดส (disaccaridase) คือซูเครส (sucrase) แลกเตส (lactase) มอลเตส (maltase) และไอโซมอลเตส (isomaltase) เอนไซม์เหล่านี้ทำหน้าที่ย่อยไดแซคคาไรด์เป็นโมโนแซคคาไรด์ ซึ่งส่วนใหญ่เป็นกลูโคส ฟรุกโตส และกาแลกโตส (เวียง, 2542) นอกจากนี้ก็ยังมีเอนไซม์เซลลูเลส (cellulase) มีหน้าที่ย่อยเซลลูโลส ซึ่งปลาส่วนมากไม่สามารถหลั่งเซลลูเลสได้ด้วยตัวเองเช่นปลาเฉา ปลานิล ปลาหมอเทศ ปลาไน ปลานวลจันทร์ เป็นต้น แต่ปลาเหล่านี้ซึ่งเป็นปลากินพืชที่มีส่วนประกอบของเซลลูโลสสามารถย่อยเซลลูโลสได้ เนื่องจากจุลินทรีย์ในลำไส้ของปลาจะหลั่งเซลลูเลสออกมา จุลินทรีย์ดังกล่าวมักจะเป็นพวกที่เจริญได้ดีในที่มีออกซิเจน

(aerobic bacteria) หรือ พวกที่เจริญได้ในที่มีและไม่มีออกซิเจน (facultative anaerobes) ซึ่งเป็นชนิดเดียวกับที่พบในแหล่งน้ำทั่วไป เช่น *Vibrio* และ *Aeromonas* เป็นต้น (วีรพงศ์, 2536)

ตารางที่ 1 การย่อยคาร์โบไฮเดรตโดยเอนไซม์จากแหล่งต่าง ๆ

แหล่งผลิตเอนไซม์	สิ่งกระตุ้น	ชนิดของเอนไซม์ที่ผลิต	คาร์โบไฮเดรตที่ถูกย่อย	ผลผลิตจากการย่อย
ตับอ่อน	ฮอร์โมนซีครีตินและแพนครีโอไซมินจากผนังเยื่อเมือกในลำไส้	อะไมเลส	แป้ง ไกลโคเจน	โอลิโกแซคคาไรด์ มอลโตไตรโอส มอลโตส
ลำไส้	ฮอร์โมนเอนเตอโรคริไนน จากผนังเยื่อเมือกในลำไส้	ซูเครส แลกเตส มอลเตส ไอโซมอลเตส	ซูโครส แลกโตส มอลโตส ไอโซมอลโตส โอลิโกแซคคาไรด์	กลูโคสและฟรุกโตส กลูโคสและกาแลกโตส กลูโคส กลูโคส

ที่มา : เวียง (2542)

3. การใช้ประโยชน์จากคาร์โบไฮเดรตในปลา

คาร์โบไฮเดรตถือเป็น 1 ใน 3 สารอาหารหลักที่เป็นองค์ประกอบในอาหารปลา ใช้เป็นแหล่งพลังงานเพื่อส่งเสริมการเจริญเติบโตของปลาซึ่งเป็นแหล่งพลังงานที่ไม่ใช่โปรตีนที่มีราคาถูก การขาดแคลนพลังงานคาร์โบไฮเดรตในอาหารจะนำไปสู่การเพิ่มการใช้ประโยชน์จากโปรตีนและไขมันเพื่อนำมาใช้เป็นแหล่งพลังงาน (Kumar *et al.*, 2006a) Prather และ Lovell (1973) อ้างโดย Kumar และคณะ (2006b) รายงานว่า การขาดแคลนแหล่งพลังงานที่ไม่ใช่โปรตีน คือ คาร์โบไฮเดรตและไขมัน ปลาจะนำโปรตีนไปใช้เพื่อเป็นแหล่งพลังงานมากกว่าการนำไปใช้เพื่อการเจริญเติบโต ดังนั้น หากมีการใช้คาร์โบไฮเดรตเพื่อเป็นแหล่งพลังงานในอาหาร สามารถลดการใช้โปรตีนในอาหาร โดยใช้โปรตีนเพียงเพื่อให้เท่ากับความต้องการของปลาที่จะนำไปใช้เพื่อการเจริญเติบโตเท่านั้น จึงมีผลลดการปลดปล่อยของเสียจำพวกไนโตรเจนสู่สิ่งแวดล้อม และยังสามารถลดต้นทุนการผลิตอาหารปลาลงได้ (NRC, 1993; Wilson, 1994; Lee and Lee, 2004; Wu *et al.*, 2007c)

แม้ว่าคาร์โบไฮเดรตจะเป็นแหล่งของพลังงานในอาหารสำหรับปลาที่มีราคาถูก แต่ความสามารถในการใช้ประโยชน์จากคาร์โบไฮเดรตในปลาแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน (NRC, 1993; Wilson, 1994; Shiau, 1997; Hutchins *et al.*, 1998; Lee and Lee, 2004; Tan *et*

al., 2006) โดยการใช้ประโยชน์จากคาร์โบไฮเดรตในปลาสัมพันธ์กับลักษณะทางกายวิภาคและหน้าที่การทำงานของระบบทางเดินอาหาร และเกี่ยวเนื่องไปถึงอวัยวะต่าง ๆ (Krogdahl *et al.*, 2005; Wu *et al.*, 2007c) รวมไปถึงกระบวนการเมแทบอลิซึมที่สัตว์น้ำปรับตัวเพื่อให้เข้ากับสิ่งแวดล้อมที่อยู่อาศัยที่แตกต่างกัน (Walton and Cowey, 1982; Lee and Lee, 2004) โดยทั่วไปแล้ว ปลากินพืช ปลาที่กินทั้งพืชและเนื้อ และปลาในเขตอบอุ่น สามารถใช้ประโยชน์จากคาร์โบไฮเดรตได้ในระดับที่สูงถึง 40% ในอาหาร ในขณะที่ปลากินเนื้อ ปลาทะเล และปลาในเขตหนาว เช่น Salmonids สามารถใช้ประโยชน์จากคาร์โบไฮเดรตในอาหารที่สามารถย่อยได้ในระดับต่ำกว่า 20% ในอาหาร (Wilson, 1994; Stone, 2003) การศึกษาของ Tan และคณะ (2006) ชี้ให้เห็นว่า ปลาที่มีนิสัยการกินอาหารที่แตกต่างกัน สามารถใช้ประโยชน์จากแหล่งของคาร์โบไฮเดรตได้แตกต่างกัน โดยปลากิเบลคาร์ป (*Carrassius auratu gibelio*) มีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะและประสิทธิภาพการใช้อาหารที่ดีในปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วย soluble starch และเซลลูโลส ในระดับ 20% ในขณะที่ปลาไชนีสลองสเนาท์แคทฟิช (*Leiocassis longirostris* Günther) มีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะและประสิทธิภาพการใช้อาหารที่ดี ในปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วย เด็กซ์ตรินและซูโครส ที่ระดับ 6%

นอกจากนี้ยังมีผลการศึกษาถึงการใช้ประโยชน์จากคาร์โบไฮเดรตในปลาชนิดต่าง ๆ ดังนี้

ปลาที่กินทั้งพืชและเนื้อ เช่น ปลาซิลเวอร์เพิร์ช (Silver pearch, *Bidyanus bidyanus*) ระยะวัยรุ่น สามารถใช้แป้งที่ผ่านกระบวนการ เช่น แป้งสุก (gelatinized starch) หรือเด็กซ์ตรินได้ดีกว่าการใช้ข้าวสาลีหรือแป้งสาลีดิบ ที่ระดับ 30% และสามารถสำรองโปรตีนเพื่อการเจริญเติบโต (Stone *et al.*, 2003b) ส่วนปลานิลลูกผสม (*Oreochromis niloticus* × *O. aureus*) สามารถใช้ประโยชน์จากแป้งได้สูงถึงระดับ 46% โดยไม่ทำให้การเจริญเติบโตลดลง แต่แป้งข้าวโพดที่ระดับ 22% โปรตีน 29% ไขมัน 10% และอัตราส่วนของ E/P เท่ากับ 37.9 KJ g^{-1} เป็นระดับที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้เพื่อการเจริญเติบโต เนื่องจาก มีน้ำหนักที่เพิ่ม อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ ประสิทธิภาพการใช้อาหาร และประสิทธิภพการใช้โปรตีน มีค่าดีที่สุด (Wang *et al.*, 2005)

ปลากินเนื้อ เช่น ปลาสไตรปแบส (*Morone saxatilis*) และปลาซันไชน์แบส (*M. chrpsops* Female × *M. saxatilis* Male) พบว่า ปลาสไตรปแบสและปลาซันไชน์แบส สามารถใช้ประโยชน์จากคาร์โบไฮเดรตชนิดโพลีแซคคาไรด์ได้สูงสุดที่ระดับ 25% โดยปลาซันไชน์แบส มีน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นและประสิทธิภาพการใช้อาหารสูงขึ้นเมื่อโมเลกุลของคาร์โบไฮเดรตลดลง (กลูโคส > มอลโตส > เด็กซ์ตริน ในขณะที่ปลาสไตปแบส มีน้ำหนักที่เพิ่มขึ้นและประสิทธิภาพการใช้อาหารสูงขึ้น ตากการเพิ่มขึ้นของน้ำหนักโมเลกุลของคาร์โบไฮเดรต เด็กซ์ตริน > มอลโตส > กลูโคส (Rawles and Gatlin III, 1998) ปลาสตาร์รีฟลาวเดอร์ (starry flounder, *Platichthys stellatus*)

สามารถใช้ประโยชน์จากเด็กซ์ตรินและแป้ง α-potato ได้มีประสิทธิภาพมากกว่าการใช้กลูโคส และการใช้แป้ง α-potato ที่ระดับ 25% ซึ่งเป็นระดับที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต (Lee and Lee, 2004) ปลาเชาท์เทิร์นแคทฟิช (southern catfish, *Silurus meridionalis* Chen) สามารถใช้ทั้งแป้งและกลูโคสเพื่อเป็นแหล่งพลังงานในอาหารและสามารถสำรองโปรตีนเพื่อการเจริญเติบโต โดยการใช้ประโยชน์จากแป้งข้าวโพดดิบ แป้งข้าวโพดสุก หรือกลูโคสที่ระดับ 15% ปลาสามารถใช้ประโยชน์จากอาหารได้ไม่แตกต่างกัน แต่กลูโคสในระดับสูง คือ 30% เป็นระดับที่เป็นอันตรายต่อการเจริญเติบโตของปลา (Fu, 2005) ปลาฟลาวเดอร์ (*P. olivaceus*) ในระยะวัยรุ่น สามารถใช้ประโยชน์จากเด็กซ์ตรินได้ดีกว่าการใช้กลูโคส นอกจากนี้ เด็กซ์ตรินยังสามารถใช้เป็นแหล่งพลังงานได้ดีกว่าการใช้ไขมัน โดยอัตราการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพการใช้อาหารมีค่าสูงสุดในปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยเด็กซ์ตริน 25% และไขมัน 6% (Lee *et al.*, 2003)

การที่ปลาน้ำจืด หรือปลาในเขตร้อนสามารถใช้คาร์โบไฮเดรตได้ในระดับที่สูงกว่าปลาทะเลหรือปลาในเขตหนาว เนื่องจากสิ่งแวดล้อมที่อยู่อาศัย ทางเดินอาหารที่ยาวกว่า และมีกิจกรรมเอนไซม์ที่ใช้ย่อยคาร์โบไฮเดรตในทางเดินอาหารและในตับที่สูงกว่า (Wu *et al.*, 2007b) Hidalgo และคณะ (1999) รายงานว่า ปลาที่กินทั้งพืชและเนื้อสามารถใช้ประโยชน์จากคาร์โบไฮเดรตได้ในระดับที่สูงกว่าปลากินเนื้อ เนื่องจากมีกิจกรรมเอนไซม์อะไมเลส (amylase) ในทางเดินอาหารที่สูงกว่า นอกจากนี้ยังมีจำนวนและความจำเพาะเจาะจงของ insulin receptor ที่สูงกว่า (Parrizas *et al.*, 1994; Banos *et al.*, 1998 อ้างโดย Kumar *et al.*, 2008)

แม้ว่าปลาไม่มีความต้องการคาร์โบไฮเดรตแบบจำเพาะเจาะจง แต่การขาดแคลนสารอาหารชนิดนี้มีผลทำให้ปลาเจริญเติบโตได้ไม่ดี (NRC, 1993; Wilson, 1994) ในขณะที่คาร์โบไฮเดรตในระดับสูงเกินความต้องการมีผลลบทางกายภาพและโครงสร้างของตับ เนื่องจากระดับของน้ำตาลในเลือด (blood glucose) ที่สูงตลอดเวลา ทำให้ปลาเกิดความเครียด และมีผลทำให้การทำงานของตับเสียหาย เนื่องจาก การเพิ่มการสะสมไกลโคเจนที่เพิ่มสูงขึ้น (Hemre *et al.*, 2002 อ้างโดย Borba *et al.*, 2006) นอกจากนี้ Hemre และคณะ (2002) อ้างโดย Kumar และคณะ (2008) รายงานว่า ส่วนประกอบของคาร์โบไฮเดรตในอาหารปลาที่สูงเกินความต้องการ ทำให้ปลาเครียดจากกระบวนการเผาผลาญอาหารและมีผลทำให้อัตราการเจริญเติบโตลดลง เนื่องจากความสามารถในการเผาผลาญกลูโคสของปลามีจำกัด ซึ่งการได้รับกลูโคสในระดับสูง มีผลทำให้มีระดับน้ำตาลในเลือดสูงหลังจากได้รับอาหารและยังคงมีระดับสูงคงที่ติดต่อกันนานหลายชั่วโมง (Kaushik and Oliva-Teles, 1985; Brauge *et al.*, 1994; Hutchins *et al.*, 1998; small and Soares, 1999 อ้างโดย Kumar *et al.*, 2008) โดยเฉพาะในปลากินเนื้อที่ได้รับอาหารที่มีส่วนประกอบของแป้งในระดับสูง ดูเหมือนไม่สามารถจัดการกับกลูโคสส่วนเกินนี้ได้ (Moon, 2001) สันนิษฐานได้ว่า ปลาอยู่ภายใต้สภาวะความเครียดจากการเผาผลาญพลังงาน นำไปสู่การยับยั้งการทำหน้าที่ของอิมมูนในการต่อต้านเชื้อโรค (Ellis, 1981; Maule *et al.*, 1989 อ้างโดย Kumar *et al.*,

2008) นอกจากนี้ ระดับน้ำตาลในเลือดที่สูงขึ้น ในปลาบางชนิด เช่น ปลาเรนโบว์เทร้าท์ที่ได้รับอาหารที่มีระดับแป้งสูง แสดงถึงกระบวนการเมแทบอลิซึมในตับที่ไม่สามารถทำงานได้ ทำให้มีการสะสมไกลโคเจนในตับในระดับที่สูง (Baeverfjord, 1992) และยังส่งผลไปถึงการสะสมเป็นไขมันในตัวปลา (Fu, 2005) ดังนั้นควรเตรียมให้อาหารมีระดับคาร์โบไฮเดรตที่เพียงพอเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานในอาหาร ส่งผลให้ลดการนำเอาโปรตีนมาเผาผลาญเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานหรือสังเคราะห์กลูโคสขึ้นมาใช้ใหม่ ทำให้เกิดการสำรองโปรตีนเพื่อนำไปใช้ในการเจริญเติบโต (Wang *et al.*, 2005; Sá *et al.*, 2008) นอกจากนี้ การมีส่วนประกอบของคาร์โบไฮเดรตในอาหาร ยังมีส่วนช่วยในด้านการปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของการอัดเม็ดอาหาร ซึ่งส่งผลดีต่อคุณภาพของเม็ดอาหาร รวมไปถึงการเจริญเติบโตที่ดีของปลา (NRC, 1993; Wilson, 1994; Lee and Lee, 2004; Tan *et al.*, 2007)

4. ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการใช้ประโยชน์จากคาร์โบไฮเดรตในอาหาร

คาร์โบไฮเดรต แม้จะเป็นแหล่งพลังงานที่มีราคาถูก แต่อย่างไรก็ตาม การใช้ประโยชน์ได้ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ เช่น ชนิดของปลา ระดับของคาร์โบไฮเดรตในอาหาร ความซับซ้อนของโครงสร้างโมเลกุล (molecular complexity) (Catacutan and Coloso, 1998; Hutchins *et al.*, 1998; Peres and Oliva-Teles, 2002; Kumar *et al.*, 2006a) ลักษณะทางกายภาพ เช่น ความสุก-ดิบของแป้ง (Couto *et al.*, 2008) เทคโนโลยีที่นำมาประยุกต์ใช้ เช่น แป้งสุก เด็กซ์ตริน แป้งแบบแว็กซี่ (waxy starch) และแป้งแบบนอร์มอล (normal starch) (Wilson, 1994; Hemre *et al.*, 2002; stone *et al.*, 2003a) อุณหภูมิที่ใช้ในการทดลอง (Couto *et al.*, 2008)

4.1 ความสุก-ดิบของแป้ง

แป้งในเมล็ดธัญพืชเป็นแหล่งพลังงานหลักสำหรับสัตว์บก แต่ในปลาพบว่าย่อยได้ไม่ดีเท่ากับสัตว์บก (Stone, 2003; Stone *et al.*, 2003a; 2003b; Krogdahl *et al.*, 2005; Sá *et al.*, 2008) โดยแป้งมีส่วนประกอบหลัก คือ กลูโคส ซึ่งถือเป็นแหล่งพลังงานที่มีความสำคัญและมีศักยภาพ (Stone *et al.*, 2003a; 2003b) การปรับปรุงคาร์โบไฮเดรตหรือแป้ง มีผลทำให้ปลาสามารถใช้ประโยชน์จากอาหารได้มากขึ้น โดยการนำเทคโนโลยีต่าง ๆ มาประยุกต์ใช้ เช่น การนำแป้งไปผ่านกระบวนการให้ความร้อน กลายเป็นแป้งสุก (Bergot and Breque, 1983; Podoskina *et al.*, 1997; Mohapatra *et al.*, 2003; Kumar *et al.*, 2006b) หรือการใช้ความชื้นร่วมกับความร้อนช่วยทำให้แป้งสุก (Krogdahl *et al.*, 2005) โดยกระบวนการทำให้แป้งสุกเป็นการทำลายเม็ดแป้ง (starch granules) และเป็นการเพิ่มพื้นที่ผิวทำให้แป้งสัมผัสกับเอนไซม์ได้มากขึ้น (Stone, 2003; Couto *et al.*, 2008) เป็นการเพิ่มความสามารถในการย่อยและเพิ่มการใช้ประโยชน์จากแป้งในการใช้แป้งสุกเป็นแหล่งพลังงานหลัก (Bergot and Breque, 1983; Peres and Oliva-Teles,

ต่ำสุด นอกจากนี้ ปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วย แป้งดิบ 200: แป้งสุก 0 g kg^{-1} และแป้งดิบ 150: แป้งสุก 50 g kg^{-1} มีค่าประสิทธิภาพการใช้อาหาร ประสิทธิภาพการใช้โปรตีน (protein product value) สรุปได้ว่า ปลาเยลโลฟิน ซีบรีม สามารถใช้แป้งดิบได้ดีกว่าการใช้แป้งสุก และในปลายี่สกเทศ ได้ทำการศึกษาอัตราส่วนของแป้งสุกต่อแป้งดิบ พบว่า การย่อยอาหารและอัตราการเจริญเติบโตมีค่าสูง ในอาหารที่มีระดับแป้งสุกต่ำ (20% G starch) และอาหารที่มีระดับแป้งสุกสูง (100% G starch) แต่ปลากลุ่มที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยแป้งสุกสูง แสดงค่า ไกลโคเจนในตับและน้ำตาลในเลือดสูง ซึ่งนำไปสู่ความเครียด เนื่องจากผลของสารอาหารในระยะยาว ดังนั้น อัตราส่วนของแป้งสุกในระดับ 20% และแป้งดิบในระดับ 80% เป็นระดับที่เหมาะสมต่อการย่อยสารอาหารและอัตราการเจริญเติบโตของปลายี่สกเทศระยะวัยรุ่น (Kumar *et al.*, 2007)

การที่ปลาไม่สามารถใช้ประโยชน์จากแป้งสุกได้ดี เนื่องจาก กระบวนการเมแทบอลิซึมขั้นกลางปรากฏผลการดูดซึมกลูโคสในระดับสูงเพื่อนำเข้าไปใช้ประโยชน์ในร่างกายได้ไม่ดี (Deng *et al.*, 2001; Panserat *et al.*, 2001; Saurez *et al.*, 2002 อ้างโดย Fu, 2005) และเมื่อพิจารณาถึงความสัมพันธ์ระหว่างรูปแบบของแป้ง (แป้งดิบและแป้งสุก) ในอาหารและภูมิคุ้มกันในปลายี่สกเทศ Kumar และคณะ (2008) ให้ข้อสังเกตว่า ปลากลุ่มที่ได้รับแป้งดิบมี immunoprotection สูงกว่าปลาที่ได้รับแป้งสุก เช่นเดียวกับการศึกษาของ Misra และคณะ (2006)

5. กระบวนการเมแทบอลิซึมในการใช้คาร์โบไฮเดรตในปลา

ปลาทั่วไปมีเอนไซม์และกระบวนการเกี่ยวกับการเผาผลาญ (metabolic pathway) ที่ใช้ในการควบคุมกระบวนการเมแทบอลิซึมของคาร์โบไฮเดรต เพื่อดูดซึมสารอาหารเข้าไปใช้ในร่างกาย (Cowey and Walton, 1989 อ้างโดย Peres and Oliva-Teles, 2002) แต่ในธรรมชาติของปลามักขาดแคลนแหล่งของคาร์โบไฮเดรต ดังนั้น ระบบการย่อยและกระบวนการเมแทบอลิซึมจึงปรับสำหรับการใช้โปรตีนหรือไขมันเพื่อเป็นแหล่งพลังงาน (Walton and Cowey, 1982; Peres and Oliva-Teles, 2002) โดยระหว่างการอดอาหาร ปลามักใช้ไขมันภายในตัวเพื่อเป็นแหล่งพลังงานแทนการใช้ไกลโคเจนที่สะสมไว้ (Cowey and Walton, 1989 อ้างโดย Peres and Oliva-Teles, 2002) โดยในปลากินทั้งพืชและเนื้อมีทางเดินอาหารที่ยาวกว่าและมีกิจกรรมเอนไซม์อะไมเลสในทางเดินอาหารสูงกว่าปลากินเนื้อ (Hidalgo *et at.*, 1999) และมีความจำเพาะต่ออินซูลินรีเซปเตอร์ (insulin receptor) ที่สูงกว่าปลากินเนื้อ ซึ่งอินซูลิน เป็นฮอร์โมนที่หลั่งมาจากตับอ่อนทำหน้าที่ในการสังเคราะห์การสังเคราะห์ไกลโคเจนในตับและในกล้ามเนื้อ (ชุติมา, 2549)

การใช้ประโยชน์จากกลูโคสได้ต่ำในปลาอาจมาจากสาเหตุการทำงานที่ผิดปกติของกระบวนการเมแทบอลิซึมของคาร์โบไฮเดรตภายในตับในการควบคุมสารอาหาร (Panserat *et al.*, 2001; Tan *et al.*, 2009) ในปลาเรนโบว์เทร้าท์ ทั้งการได้รับคาร์โบไฮเดรตในระดับสูงหรือการ

จัดการกลูโคสที่ได้รับเข้าไป พบว่า ปลาสามารถใช้ประโยชน์จากกลูโคสได้ต่ำ นอกจากนี้ ระดับน้ำตาลในเลือดมีค่าสูง ติดต่อกันเป็นเวลานาน (prolonged hyperglycermia) (Bergot, 1979; Brauge *et al.*,1995 อ้างโดย Lee *et al.*, 2003)

5.1 ผลของคาร์โบไฮเดรตต่อการเจริญเติบโตและเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเมแทบอลิซึมของคาร์โบไฮเดรตในตับปลา

การศึกษาการใช้ประโยชน์จากคาร์โบไฮเดรตในปลาชนิดต่าง ๆ ต่อการเจริญเติบโต และกิจกรรมเอนไซม์ที่เกี่ยวมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องดังต่อไปนี้

1) **รูปแบบของคาร์โบไฮเดรต**

Lin และ Shiau (1994) ได้ทำการศึกษาผลของคาร์โบไฮเดรต 2 ชนิด คือ กลูโคส และแป้งข้าวโพด ต่อการพัฒนากิจกรรมของเอนไซม์ในตับในปลานิลในระยะวัยรุ่น (*O. niloticus* × *O. aureus*) โดยอาหารมีระดับคาร์โบไฮเดรต 40% แบ่งปลาออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มแรก มี 2 สูตร เลี้ยงตลอดการทดลองเป็นเวลา 12 สัปดาห์ กลุ่มสอง มี 2 สูตร คือ สูตรที่ 1 เลี้ยงด้วยกลูโคสในสัปดาห์ที่ 1-6 แล้วเปลี่ยนเป็นแป้งในสัปดาห์ที่ 7-12 และสูตรที่ 2 เลี้ยงด้วยแป้งในสัปดาห์ที่ 1-6 แล้วเปลี่ยนเป็นกลูโคสในสัปดาห์ที่ 7-12 จากการทดลอง พบว่า ปลานิลที่ได้รับอาหารที่เป็นแป้งข้าวโพดตลอด 12 สัปดาห์ มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ การสะสมโปรตีน และการสะสมพลังงาน สูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) รองลงมา คือ ปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยแป้งข้าวโพดแล้วเปลี่ยนเป็นกลูโคส ปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยกลูโคสแล้วเปลี่ยนเป็นแป้งข้าวโพด และปลาที่ได้รับกลูโคสตลอดการทดลอง ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาถึงกิจกรรมของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้อง พบว่า กิจกรรมของเอนไซม์เฮกโซไคเนส (Hexokinase: HK) ฟอสโฟฟรุกโตไคเนส (Phosphofructokinase: PFK) และกลูโคส-6-ฟอสฟาเตส (glucose-6-phosphatase: G-6-Pase) ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) แต่กิจกรรมของมาลิกเอนไซม์ (Malic enzyme) กลูโคส-6-ฟอสเฟต ดีไฮโดรจีเนส (Glucose-6-phasphate dehydrogenase: G-6-PD) และฟอสโฟฟรุกโตไคเนส ดีไฮโดรจีเนส (Phosphofrutokinase dehydrogenase: PGD) มีกิจกรรมที่สูงขึ้นในปลาที่ได้รับอาหารที่เป็นแป้งข้าวโพด รองลงมา คือ ปลาที่มีการสลับเปลี่ยนแหล่งของคาร์โบไฮเดรตในอาหาร และปลาที่ได้รับอาหารเป็นกลูโคส ตามลำดับ การที่ปลาได้รับอาหารที่เป็นแป้งข้าวโพด มีการเจริญเติบโตที่ดี และมีกิจกรรมของ malic enzyme, G-6-PD และ PGD ในระดับสูง เนื่องมาจาก แหล่งของคาร์โบไฮเดรตที่ปลาได้รับปลาสามารถนำไปใช้ประโยชน์เพื่อการเจริญเติบโตได้ดี และเอนไซม์ทั้งทั้ง 3 ชนิด เป็นเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการลิโปจีนิก (lipogenic enzme) คือ กระบวนการสังเคราะห์ไขมัน

จากแหล่งอาหารที่เป็นคาร์โบไฮเดรต ซึ่งสอดคล้องกับการสะสมไขมันในตัวปลา โดยการสะสมของไขมันในตัวปลามีค่าสูงในปลาที่ได้รับอาหารที่เป็นแป้งข้าวโพดตลอดการทดลอง

Shiau และ Lin (2002) ได้ศึกษาการใช้ประโยชน์จากแป้งและกลูโคสในปลาเก๋า (*Epinephelus malabaricus*) ที่อุณหภูมิ 23°C ประกอบด้วยอาหาร 2 สูตร คือ อาหารที่ประกอบด้วยกลูโคส และแป้งข้าวโพดในระดับ 14.3% จากการศึกษา พบว่า ปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยแป้งข้าวโพดมีอัตราการเจริญเติบโต ประสิทธิภาพการใช้อาหาร และประสิทธิภาพการใช้โปรตีนที่ดีกว่าปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยกลูโคส และเมื่อพิจารณาถึงกิจกรรมเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเมแทบอลิซึมของคาร์โบไฮเดรตในตับ พบว่า ปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยแป้งข้าวโพดมีกิจกรรมของเอนไซม์ HK และ G-6-PD ในระดับที่สูงกว่าปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยกลูโคส แต่ปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยกลูโคสมีกิจกรรมของเอนไซม์ G-6-Pase ในระดับที่สูงกว่าอาหารที่ประกอบด้วยแป้งข้าวโพด ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ปลาเก๋าสามารถใช้ประโยชน์จากแป้งข้าวโพดได้ดีกว่าการใช้ประโยชน์จากกลูโคส การที่ปลาไม่สามารถใช้ประโยชน์จากกลูโคสเพื่อการเจริญเติบโตที่ดี เนื่องจาก กลูโคสเป็นพวกน้ำตาลโมโนแซคคาไรด์หรือน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว โดยกลูโคสมีการดูดซึมที่เร็วมากเกินไป เมื่อเปรียบเทียบกับพวกโพลีแซคคาไรด์หรือน้ำตาลที่มีโครงสร้างซับซ้อนจำพวกแป้งต่างๆ ซึ่งในกระบวนการย่อย กลูโคสเข้าไปในระบบทางเดินอาหารในปริมาณที่สูงมากเกินไปก่อนที่จะมีเอนไซม์มากเพียงพอที่จะเข้าทำปฏิกิริยา ทำให้ปลาสามารถใช้ประโยชน์จากกลูโคสเพื่อการเจริญเติบโตได้ต่ำ เมื่อพิจารณาถึงกิจกรรมของเอนไซม์ในปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยแป้ง ที่มีกิจกรรมเอนไซม์ HK สูง แต่ G-6-Pase ต่ำ เนื่องจากในปลาเกิดกระบวนการไกลโคไลซีสที่สูงแต่เกิดกระบวนการกลูโคนีโอเจเนซีสที่ต่ำ คือ เกิดการย่อยแป้งให้เป็นกลูโคส แล้วสามารถนำกลูโคสไปใช้เพื่อเป็นแหล่งพลังงานในร่างกายได้ดี โดยไม่ต้องมีการสังเคราะห์กลูโคสขึ้นมาใช้ แต่ปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยกลูโคสมีกิจกรรม HK ต่ำ แต่ G-6-Pase สูง เนื่องจาก มีกลูโคสเข้าสู่กระบวนการไกลโคไลซีสที่ต่ำ จึงต้องมีการสังเคราะห์กลูโคสขึ้นมาใช้ใหม่จากแหล่งอาหารอื่นที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต เช่น จากกรดแอมิโน หรือ กลีเซอรอล เมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบในตัวปลา พบว่า ปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยแป้งมีองค์ประกอบไขมันในตัวสูงกว่าปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยกลูโคส ซึ่งเป็นผลมาจากกิจกรรมเอนไซม์ G-6-PD ในปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยแป้งสูงกว่าปลาที่ได้รับกลูโคส เพราะ G-6-PD เป็นเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการลิโปไลซีส คือ กระบวนการที่สังเคราะห์ไขมันจากกลูโคสและมีการสะสมเป็นไขมันในตัวปลา

การศึกษารูปแบบของคาร์โบไฮเดรตในรูปแบบอื่นๆ ที่มีการศึกษา คือ คาร์โบไฮเดรตในรูปแบบของ normal maize starch และ waxy maize starch ซึ่ง normal maize starch ประกอบด้วย อะไมโลส (amylase) 25-28% ส่วน waxy maize starch ประกอบด้วย อะไมโลสเพียง 1 % ซึ่งรูปแบบของแป้งจะมีผลต่อสารอาหารที่สามารถใช้ประโยชน์ได้ของแป้งสำหรับปลา โดยจากการทดลองของ Bergot (1993) อ้างโดย Enes และคณะ (2006) พบว่า

ปลาเรนโบว์เทร้าท์สามารถใช้แป้งในรูป waxy maize starch ได้ดีกว่าแป้งในรูปแบบ normal maize starch และในการศึกษาของ Enes และคณะ (2006) โดยได้ศึกษาทั้งรูปแบบของแป้ง 2 ชนิด คือ normal maize starch (NS) และ waxy maize starch (WS)และศึกษาทั้ง 2 ระดับ คือ 10% และ 20% โดยให้อาหารมีระดับโปรตีน 48% และไขมัน 14% เปรียบเทียบกับอาหารที่ไม่มีส่วนประกอบของคาร์โบไฮเดรต(control) และอาหารที่มีระดับโปรตีนสูง คือ โปรตีน 68% และไขมัน 14% (diet HP) ซึ่งทดลองในปลากะพงยุโรป (*D. labrax*) จากผลการศึกษา พบว่า ปลากะพงขาวยุโรปสามารถใช้แป้งในรูปแบบ waxy maize starch ที่ระดับ 20% ได้ดี รองลงมา คือ normal maize starch ที่ระดับ 20% โดยพิจารณาจากผลการเจริญเติบโต ประสิทธิภาพการใช้โปรตีน และกิจกรรมของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเมแทบอลึซึมของคาร์โบไฮเดรตในตับ โดยปลาที่ได้รับอาหารในสูตร WS20 และ NS20 มีกิจกรรมของกลูโคไคเนส (Glucokinase: GK) และ ไพรูเวทไคเนส (Pyruvate Kinase: PK) ที่สูงซึ่งเป็นเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการไกลโคไลซีส สลายกลูโคสเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานในร่างกาย ส่วนปลาที่ได้รับอาหารในสูตร HP รองลงมา คือ Control และ NS10 มีกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการกลูโคนีโอเจเนซีส คือ ฟรุกโตส-1,6-บิสฟอสเฟต (Fructose-1,6-bisphosphate: FBPase)ที่สูง เนื่องจาก ในอาหารมีแหล่งของคาร์โบไฮเดรตที่สามารถใช้ประโยชน์เพื่อเป็นแหล่งพลังงานได้ต่ำ จึงต้องมีการสังเคราะห์กลูโคสจากแหล่งอื่นที่ไม่ใช่คาร์โบไฮเดรต เช่น สังเคราะห์จากโปรตีน และไขมันในอาหาร และเมื่อพิจารณาไปถึงการสลายกรดแอมิโน (amino acid catabolism) พบว่า มีกิจกรรมของ กลูตาเมทดีไฮโดรจีเนส (Glutamate dehydrogenase: GDH) ในระดับสูง ซึ่งมีความสอดคล้องกับกระบวนการกลูโคนีโอเจเนซีส คือ ปลาที่ได้รับอาหารในสูตร control และ HP มีการสลายกรดแอมิโนที่สูงตามไปด้วย

จากการศึกษารูปแบบของคาร์โบไฮเดรตทีมีผลต่อการเจริญเติบโตและกิจกรรมของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับเมแทบอลิซึมของคาร์โบไฮเดรตในตับปลา พบว่า ปลาสามารถใช้คาร์โบไฮเดรตในรูปแบบที่เป็นโครงสร้างซับซ้อน จำพวก แป้งข้าวโพด หรือ แป้งในรูปแบบ waxy maize starch ที่มีอะไมโลสเป็นส่วนประกอบเพียง 1% ได้ดีกว่าการใช้คาร์โบไฮเดรตที่มีรูปร่างเชิงเดี่ยว เช่น กลูโคส การที่ปลาสามารถใช้คาร์โบไฮเดรตได้ต่ำ เนื่องมาจาก การทำงานและการควบคุมสารอาหารที่ไม่เป็นปกติ เนื่องมาจากกระบวนการเมตาบอลิซึมของคาร์โบไฮเดรตในตับ (Panserat *et al.*, 2001) และเมื่อพิจารณาถึงกิจกรรมของเอนไซม์ พบว่า ปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยแหล่งคาร์โบไฮเดรตที่สามารถใช้ประโยชน์ได้เช่นแป้ง (starch) มีกิจกรรมเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนไกลโคไลซีส และลิโปเจเนซีสที่สูง เนื่องจาก ปลาสามารถใช้ประโยชน์จากแหล่งคาร์โบไฮเดรตในอาหารได้เพื่อนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานได้ดี นอกจากนี้ กลูโคสที่ได้จากการย่อยที่มีอยู่มากเกินไปจะถูกสังเคราะห์เป็นไกลโคเจนและส่งผลไปถึงกระบวนการลิโปเจเนซีสเพื่อสังเคราะห์เป็นไขมันสะสมในตัว (Enes *et al.*, 2006) ส่วนปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยกลูโคสจะมีกระบวนการไกลโคไลซีสที่ต่ำ แต่มีกระบวนการกลูโคนีโอเจเนซีสที่สูง เนื่องจาก ปลาสามารถใช้

กลูโคสที่มีอยู่ในอาหารเพื่อใช้สลายเป็นแหล่งพลังงานได้ต่ำ จึงต้องมีการสังเคราะห์กลูโคสขึ้นมาใช้ใหม่ จากแหล่งของกรดแอมิโนหรือกลีเซอรอลในอาหาร นอกจากนี้ เมื่อวัดถึงกิจกรรมของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการสลายกรดแอมิโน พบว่า ถ้ามีกิจกรรมของกลูโคนีโอเจเนซีสสูงจะส่งผลให้มีกิจกรรมของเอนไซม์ในกระบวนการสลายกรดแอมิโนสูงตามไปด้วย เนื่องจากต้องสลายกรดแอมิโนที่มีอยู่ในอาหารเพื่อนำมาสังเคราะห์กลูโคสขึ้นมาใหม่

2) **อัตราส่วนของโปรตีนต่อคาร์โบไฮเดรตในอาหาร**

Fernández และคณะ (2007) ได้ศึกษาการแทนที่โปรตีนด้วยแป้งข้าวโพดสุก (GSC) ในปลากิลเฮดซีบรีม (gilthead sea bream, *Sparus aurata*, L.) ขนาดปลานิ้ว โดยอาหารทดลองประกอบด้วย โปรตีน 63% GCS 5% (LC diet), โปรตีน 54% GSC 18% (MC diet) และ โปรตีน 47% GSC 26% (HC diet) โดยอาหารทั้ง 3 สูตร มีระดับพลังงานในอาหารที่ใกล้เคียงกัน จากการทดลอง พบว่า ปลาที่ได้รับอาหารสูตร MC มีน้ำหนักตัวสุดท้ายสูงกว่าปลาที่ได้รับอาหารในสูตร LC และ HC และมีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงกว่าปลาที่ได้รับอาหารในสูตร HC ประสิทธิภาพการใช้โปรตีนและการสะสมโปรตีนในตัวปลา มีค่าสูงในปลาที่ได้รับอาหารในสูตร HC มากกว่า MC และ LC ตามลำดับ เมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบในตัวปลา พบว่า ปลาที่ได้รับอาหารในสูตร HC มีองค์ประกอบไขมันในตัวปลาสูงกว่าปลาที่ได้รับอาหารในสูตร MC และ LC ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาถึงกิจกรรมของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเมแทบอลิซึม ชี้ให้เห็นว่า มีการปรับเมแทบอลิซึมตามระดับของคาร์โบไฮเดรตในอาหาร ดังนี้ คือ กิจกรรมเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการกลูโคไลซีส คือ กิจกรรม PK มีค่าสูงตามการเพิ่มขึ้นของระดับคาร์โบไฮเดรตในอาหาร กิจกรรมเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการกลูโคนีโอเจเนซีส คือ กิจกรรมของเอนไซม์ FBPase-1 ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) กิจกรรมเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการลิโปจีเนซีส คือ กิจกรรมของ G6P-DH และ 6PG-DH มีค่าเพิ่มขึ้นตามระดับคาร์โบไฮเดรตที่สูงขึ้น ส่วนกิจกรรมเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสลายกรดแอมิโน คือ กิจกรรมของอะลานีน แอมิโนทรานส์เฟอร์เรส (Alanine aminotransferase: ALAT) ในระดับสูงเมื่อมีการแทนที่โปรตีนด้วยคาร์โบไฮเดรตในระดับที่ต่ำ คือ ปลาที่ได้รับอาหารในสูตร LC

จากการศึกษาผลของอัตราส่วนของโปรตีนต่อคาร์โบไฮเดรตในอาหาร พบว่า เมื่อมีการเพิ่มการแทนที่โปรตีนด้วยแป้งข้าวโพดสุกในระดับที่เหมาะสม คือ แทนที่ลงไปประมาณไม่น้อยกว่า 18% แต่ไม่มากเกิน 26% จะเห็นได้ว่า ปลาที่ได้รับอาหารที่มีการแทนที่โปรตีนด้วยแป้งสุกในระดับ 18% ปลามีน้ำหนักสุดท้าย และอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะที่ดีกว่าปลาที่มีการแทนที่โปรตีนด้วยแป้งข้าวโพด 26% และ 5% ตามลำดับ เมื่อศึกษาถึงกิจกรรมของเอนไซม์ พบว่า มีการปรับเมแทบอลิซึมตามระดับของคาร์โบไฮเดรตในอาหาร โดยเมื่อมีการทดแทนโปรตีนด้วยแป้งข้าวโพดสุกในระดับที่สูงขึ้น จะมีกิจกรรมของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการไกลโคไลซีสที่สูงขึ้น

และยังส่งผลต่อกระบวนการลิโปไลซีสให้สูงตามไปด้วย คือ ในตัวปลาเกิดกระบวนการสายกลูโคสเพื่อเป็นแหล่งพลังงานได้ดี นอกจากนี้ ยังสามารถนำไปสะสมโดยสามารถสังเคราะห์ไขมันจากกลูโคสที่มีอยู่มากเพียงพอในอาหาร และยังสามารถลดกิจกรรมของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการสลายกรดแอมิโนลงได้ และชี้ให้เห็นว่า ในปลาปลากิลเฮดซีบรีม (*S. aurata*) สามารถใช้ประโยชน์จากคาร์โบไฮเดรตได้ดี เมื่ออาหารประกอบด้วยแป้งข้าวโพดสุกในระดับ 18% และโปรตีน 54% โดยในอาหารมีอัตราส่วนของโปรตีนต่อคาร์โบไฮเดรตในระดับที่เหมาะสม ในตัวปลาจะเกิดการสำรองโปรตีน (protein sparing effect)

3) **อุณหภูมิ**

Moreira และคณะ (2008) และ Couto และคณะ (2008) ได้ทำการศึกษาการใช้ประโยชน์จากคาร์โบไฮเดรตในอุณหภูมิที่แตกต่างกัน คือ 18°C และ 25° โดย Moreira และคณะ (2008) ศึกษาในปลากะพงยุโรป (*D. labrax*) และ Couto และคณะ (2008) ศึกษาในปลากิลท์เฮดซีบรีม (*S. aurata*) จากการศึกษา พบว่า อุณหภูมิที่มีผลต่อการใช้คาร์โบไฮเดรต คือ การเจริญเติบโต ประสิทธิภาพการใช้อาหาร และประสิทธิภาพการใช้โปรตีน มีค่าสูงในการเลี้ยงที่อุณหภูมิ 25°C มากกว่าที่ 18°C ในปลากะพงยุโรป พบว่า องค์ประกอบของไขมันในตัวปลาและพลังงานในตัวปลามีค่าสูงในการเลี้ยงที่อุณหภูมิ 25°C มากกว่าที่ 18°C และเพิ่มขึ้นตามระดับของแป้งที่เพิ่มขึ้น แต่ดัชนีตับ (Hepatosomatic index: HSI) และดัชนีเครื่องใน (Viscera index: VI) มีค่าสูงในการเลี้ยงที่อุณหภูมิ 18°C มากกว่าที่ 25°C ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาในปลากิลท์เฮดซีบรีม เมื่อพิจารณาถึงกิจกรรมของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องในกระบวนการเมแทบอลิซึมของตับ พบว่า อุณหภูมิมีผลต่อกิจกรรมของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการไกลโคไลซีสเพียงกระบวนการเดียวเท่านั้น โดยในปลากะพงยุโรป พบว่า ปลาที่เลี้ยงที่อุณหภูมิ 25°C มีกิจกรรมของเอนไซม์เฮกโซไคเนส (HK) ที่สูงกว่าการเลี้ยงที่อุณหภูมิ 18°C แต่ไม่มีผลต่อกระบวนการของเอนไซม์กลูโคไคเนส (GK) ในขณะที่ปลากิลท์เฮดซีบรีม มีกิจกรรมของเอนไซม์ไพรูเวทไคเนส (PK) ที่สูงกว่าการเลี้ยงที่อุณหภูมิ 18°C แต่ไม่มีผลต่อกระบวนการ GK เช่นเดียวกัน

จากผลการศึกษาเห็นได้ว่า การเลี้ยงปลาในอุณหภูมิที่สูงประมาณ 25°C ทำให้ปลามีการเจริญเติบโต ประสิทธิภาพการใช้อาหาร และประสิทธิภาพการใช้โปรตีนที่ดี นอกจากนี้ยังส่งผลต่อกระบวนการไกลโคไลซีสหรือกระบวนการสลายคาร์โบไฮเดรตเพื่อนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานในร่างกายที่สูงกว่าการเลี้ยงที่อุณหภูมิ 18°C

วิธีการศึกษา

1 การวางแผนการทดลอง

วางแผนการทดลองแบบสุ่มตลอด (Completely Randomize Design; CRD) โดยใช้อาหารที่มีส่วนประกอบพื้นฐานใกล้เคียงกัน แต่มีแหล่งคาร์โบไฮเดรตแตกต่างกัน 7 ชนิด ทั้งหมด 7 สูตร สูตรละ 4 ซ้ำ ใช้ตู้ทดลองขนาด 40×60×50 เซนติเมตร จำนวน 28 ตู้ ปลาจำนวน 15 ตัวต่อตู้ ทำการทดลองเลี้ยงเป็นเวลา 8 สัปดาห์

2. การเตรียมปลาสำหรับการทดลอง

นำปลากะพงขาวที่มีความยาวประมาณ 2 เซนติเมตร น้ำหนักเฉลี่ยประมาณ 0.5 กรัม/ตัว จำนวน 2,000 ตัว อนุบาลในถังไฟเบอร์กลาสทรงกลมขนาดความจุ 1 ตัน จำนวน 3 ถัง โดยปล่อยปลาถังละประมาณ 700 ตัว เลี้ยงในน้ำจืดให้ออกซิเจนตลอดเวลา โดยให้อาหารสำเร็จรูปสำหรับอนุบาล เพื่อฝึกให้ปลาเคยชินกับอาหารสำเร็จรูป จากนั้นจึงคัดปลาให้มีขนาดใกล้เคียงกัน 20 ตัว ใส่ตู้ทดลองที่มีความจุน้ำประมาณ 100 ลิตร จำนวน 32 ตู้ แล้วเริ่มฝึกให้ปลาคุ้นเคยกับสภาพแวดล้อมและอาหารทดลอง โดยให้อาหารวันละ 2 มื้อ จนปลาอิ่ม เป็นเวลา 1 สัปดาห์ จากนั้น จึงคัดปลาขนาดใกล้เคียงกันที่มีน้ำหนักประมาณ 4-5 กรัม/ตัว จำนวน 15 ตัว/ตู้ ปรับสภาพปลาจนกระทั่งปลายอมรับอาหารทดลองทุกชุดการทดลอง ซึ่งใช้เวลาประมาณ 3 วัน ชั่งน้ำหนักรวม บันทึกข้อมูลน้ำหนักเริ่มต้น และหาน้ำหนักเฉลี่ยเริ่มต้นของปลากะพงขาวที่ทดลอง โดยก่อนชั่งปลาสลบปลาด้วยน้ำมันกานพลู ความเข้มข้น 0.5 มิลลิลิตร/ น้ำ 1 ลิตร

3. การเตรียมอาหาร

1) การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของวัตถุดิบอาหารที่นำมาใช้เป็นองค์ประกอบในอาหารทดลอง โดยวิธีการของ (AOAC, 1999)

2) อาหารทดลองและการเตรียมอาหารทดลอง

2.1) อาหารทดลอง 7 สูตร มีระดับโปรตีนและไขมันในอาหารใกล้เคียงกันเท่ากับ 45 % และ 12% (Catacutan and Coloso, 1998) ตามลำดับ ในส่วนของโปรตีนใช้แหล่งโปรตีนจาก 3 แหล่ง คือ ปลาป่น เครื่องในปลาทูน่าป่น และกากถั่วเหลืองชนิดสกัดน้ำมัน สำหรับสัดส่วนที่เหมาะสมในอาหารสำหรับปลากะพงขาว โดยระดับเครื่องในปลาทูน่าป่นใช้ระดับที่สามารถทดแทนโปรตีนจากปลาป่นในผลการศึกษาของสุภาพร (2549) และระดับกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมันที่สามารถทดแทนโปรตีนจากปลาป่นของ Tantikitti และคณะ (2005) ซึ่งกำหนดให้ใช้เครื่องในปลาทูน่าป่นทดแทนโปรตีนจากปลาป่น 25 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับการใช้กากถั่วเหลืองสกัดน้ำมันทดแทนโปรตีนจากปลาป่น 10 เปอร์เซ็นต์ โดยในสูตรอาหารแต่ละสูตรใช้ปลาป่น 67.5 เปอร์เซ็นต์ เครื่องในปลาทูน่าป่น 22.5 เปอร์เซ็นต์ และกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมัน 10 เปอร์เซ็นต์

อาหารทดลองสูตรที่ 1-7 มีระดับของคาร์โบไฮเดรตที่เท่ากัน คือ 17% ของอาหาร แต่มีแหล่งของคาร์โบไฮเดรตแตกต่างกันคือ กลูโคส เด็กซ์ตริน แป้งข้าวโพด แป้งข้าวจ้าว แป้งมันสำปะหลัง รำข้าว และแป้งสาลี ตามลำดับ ปรับระดับพลังงานในอาหารให้ใกล้เคียงกันทุกสูตร อาหารที่ใช้ทดลองเป็นอาหารเม็ดแห้งแบบจม

2.2) การเตรียมอาหารทดลอง โดยชั่งวัตถุดิบอาหารแต่ละชนิดตามส่วนประกอบของอาหารแต่ละสูตรที่คำนวณไว้ ซึ่งเป็นอาหารแบบ practical diet มีปลาป่น เครื่องในปลาทูน่าป่น และกากถั่วเหลืองสกัดน้ำมันเป็นแหล่งของโปรตีน ผสมส่วนประกอบวัตถุดิบที่มีลักษณะแห้งให้เข้ากันด้วยเครื่องผสมอาหาร แล้วจึงเติมน้ำประมาณ 25-20% ของอาหาร จากนั้นทำการผสมต่ออีกประมาณ 10 นาที จึงนำไปอัดเม็ด ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร นำอาหารที่ผ่านการอัดเม็ดแล้วไปอบในตู้อบอุณหภูมิ 60°C นาน 18 ชั่วโมง นำไปร่อนด้วยตะแกรงตาถี่เพื่อเอาอาหารส่วนที่เป็นผงออก บรรจุถุงพลาสติก แล้วเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -20°C และนำตัวอย่างอาหารของทุกสูตรวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ตามวิธีการ (AOAC, 1999)

4 การศึกษาการเจริญเติบโต และการใช้อาหาร

ศึกษาโดยให้อาหารทดลองตามชุดการทดลอง และซ้ำที่ได้สุ่มไว้ โดยให้กินจนอิ่ม 2 มื้อต่อวัน ในช่วงเช้าประมาณ 8.00 น. และเย็นประมาณ 16.00 น. ให้อาหารเป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์ ก่อนให้อาหารมื้อเช้าดูดสิ่งขับถ่ายในตู้ออกให้หมด เปลี่ยนน้ำใหม่ทุกวันก่อนให้อาหารมื้อเย็น โดยถ่ายน้ำเก่าออกประมาณ 70% บันทึกน้ำหนักอาหารที่ปลากินทุกวันเพื่อทราบปริมาณอาหารที่ปลากินแต่ละวัน วัดอุณหภูมิและลักษณะผิดปกติภายนอก ได้แก่ สีของลำตัว การตกเลือดและการเกิดบาดแผล รวมทั้งสังเกตพฤติกรรมที่ผิดปกติในปลาแต่ละกลุ่มและใช้ยาและสารเคมีเพื่อป้องกันโรคตามสภาพของปลา ระหว่างการเลี้ยงทำการชั่งวัดน้ำหนักปลาทุก 2 สัปดาห์ โดยไม่มีการให้อาหารก่อนการชั่งน้ำหนัก 24 ชั่วโมง สลบปลาก่อนชั่งโดยใช้น้ำมันกานพลู ความเข้มข้น 0.5 มิลลิลิตรต่อน้ำ 1 ลิตร โดยชั่งน้ำหนักปลาทุกตัวในตู้ทดลองด้วยเครื่องชั่งทศนิยม 2 ตำแหน่ง และเมื่อสิ้นสุดการทดลอง ชั่งน้ำหนักปลาทุกตัวในตู้ในแต่ละชุดการทดลอง นับตัวอย่างปลาที่เหลือและเก็บตัวอย่างปลาหลังการทดลองไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวปลา และนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณค่าต่าง ๆ ได้แก่

1) อัตราการรอดตาย = (จำนวนปลาเริ่มต้น/จำนวนปลาที่เหลือ) x 100

2) น้ำหนักที่เพิ่ม (Weight gain, %)

$$= \frac{[\text{น้ำหนักปลาสุดท้ายเฉลี่ย (กรัม/ตัว)} - \text{น้ำหนักปลาเริ่มต้นเฉลี่ย (กรัม/ตัว)}]}{\text{น้ำหนักปลาเริ่มต้นเฉลี่ย (กรัม/ตัว)}} \times 100$$

3) อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ (Feed conversion ratio: FCR)

= น้ำหนักอาหารที่ปลากินทั้งหมด (กรัม/ตัว) / น้ำหนักปลาที่เพิ่มขึ้น (กรัม/ตัว)

4) **ประสิทธิภาพการใช้อาหาร** (Feed efficiency ratio: FE)

= **น้ำหนักปลาที่เพิ่มขึ้น (กรัม/ตัว) / น้ำหนักอาหารที่ปลากินทั้งหมด (กรัม/ตัว)**

5) **อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ** (Specific growth rate: SGR, %**ต่อวัน**)

$= [(\ln W_2 - \ln W_1) / (t_2 - t_1)] \times 100$

W_1 = **น้ำหนักเฉลี่ยเริ่มต้น (กรัม/ตัว)**

W_2 = **น้ำหนักเฉลี่ยสุดท้าย (กรัม/ตัว)**

t_1 = **วันเริ่มต้นการทดลอง**

t_2 = **วันที่สิ้นสุดการทดลอง**

6) **ประสิทธิภาพการใช้โปรตีน** (Protein efficiency ratio: PER)

= **น้ำหนักปลาที่เพิ่มขึ้นเฉลี่ย (กรัม/ตัว) / น้ำหนักโปรตีนที่ปลากิน (กรัม/ตัว)**

7) **ประสิทธิภาพการใช้ประโยชน์จากโปรตีนสุทธิ** (Protein Productive Value) (Adamidou *et al.*, 2009)

$= (P_1W_1 - P_0W_0)/ (P_F \times \text{Cumulative FI})$

FI **คือ ปริมาณอาหารที่ปลากินตลอดการทดลอง (กรัม/ตัว)**

W_0 **และ** W_1 **คือ น้ำหนักตัวปลาเริ่มต้น และน้ำหนักตัวปลาหลังสิ้นสุดการทดลอง (กรัม/ตัว)**

P_0 **และ** P_1 **คือ องค์ประกอบโปรตีนในตัวปลาเริ่มต้น และสิ้นสุดการทดลอง**

P_F **คือ องค์ประกอบโปรตีนในอาหรทดลอง (กรัม/ตัว, น้ำหนักฐานวัตถุแห้ง)**

Cumulative FI **คือ น้ำหนักอาหารที่ปลาได้รับตลอดการทดลอง (กรัม/ตัว, น้ำหนักฐานวัตถุแห้ง)**

8) **ประสิทธิภาพการสะสมโปรตีน** (Protein retention efficiency: PRE, %) (Martino *et al.*, 2005)

$$= \frac{[(\text{final body weight} \times \text{final body protein}) - (\text{initial body weight} \times \text{initial body protein})]}{\text{total protein intake (g)}} \times 100$$

9) **ประสิทธิภาพการสะสมไขมัน** (Lipid retention efficiency: LRE, %) (Martino *et al.*, 2005)

$$= \frac{[(\text{final body weight} \times \text{final body lipid}) - (\text{initial body weight} \times \text{initial body lipid})]}{\text{total lipid intake (g)}} \times 100$$

10) **ประสิทธิภาพการสะสมพลังงาน** (Energy retention efficiency: ERE, %) (Martino *et al.*, 2005)

$$= \frac{[(\text{final body weight} \times \text{final body energy}) - (\text{initial body weight} \times \text{initial body energy})]}{\text{total energy intake (g)}} \times 100$$

5. **การเก็บตัวอย่างเพื่อศึกษาการใช้คาร์โบไฮเดรต และกิจกรรมของเอนไซม์ เกี่ยวกับการใช้คาร์โบไฮเดรต**

เมื่อสิ้นสุดการทดลอง เก็บตัวอย่างปลาเพื่อศึกษาพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับการใช้คาร์โบไฮเดรต

1) **ระดับของกลูโคสในเลือด**

หลังสิ้นสุดการทดลอง ปลายังคงได้รับอาหารติดต่อกันอย่างน้อย 3 **วัน เก็บตัวอย่างปลา** 3 **ตัวต่อตู้ หลังจากปลาได้รับอาหารเช้า** 6 **ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักปลา จากนั้นเก็บตัวอย่างเลือดปลา บริเวณ** caudal vasculature **โดยใช้สารป้องกันการแข็งตัวของเลือด** (Sodium Fluoride; NaF+EDTA) **นำเลือดไปปั่นเหวี่ยงที่ความเร็วรอบ** 4,000 rpm **เก็บส่วนของพลาสมา เพื่อนำไปหาปริมาณกลูโคสในเลือดด้วย** glucose oxidase method **โดยใช้ชุดทดลองของ** Stanbio Glucose LiquiColor® Procedure No. 1070

2) **ดัชนีไขมันในตัว ดัชนีตับ และการสะสมไกลโคเจนในตับ**

เก็บตัวอย่างปลา 3 **ตัว/ตู้ หลังจากดูดเลือด (ใช้ตัวอย่างจากการวิเคราะห์กลูโคสในเลือด) เรียบร้อยแล้ว ชั่งน้ำหนักปลา จากนั้นผ่าส่วนท้อง ตัดส่วนของไขมันในช่องท้อง นำมาชั่งน้ำหนัก เพื่อนำมาคำนวณค่าดัชนีไขมันในช่องท้อง** (Intraperitoneal fat ratio: IPF) (Rawles and Gatlin, 1998) **จากนั้น ตัดส่วนของตับมาชั่งน้ำหนัก เพื่อหาดัชนีของตับ** (Hepatosomatic index: HSI)

IPF% = [**น้ำหนักไขมันในช่องท้อง (กรัม, น้ำหนักสด)** /**น้ำหนักตัวปลา (กรัม, น้ำหนักสด)**] ×100

HSI% = [**น้ำหนักตับ (กรัม, น้ำหนักสด)** /**น้ำหนักตัวปลา (กรัม, น้ำหนักสด)**] × 100

นำตัวอย่างตับใส่ในไนโตรเจนเหลวทันที และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -80°C **เพื่อรอการวิเคราะห์หาปริมาณไกลโคเจนในตับของ** Hassid **และ** Abraham (1957)

3) การศึกษากิจกรรมของเอนไซม์ที่เกี่ยวกับการใช้คาร์โบไฮเดรต

3.1) กิจกรรมของเอนไซม์ amylase

3.2) กิจกรรมของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับเมแทบอลิซึมขั้นกลางของการใช้คาร์โบไฮเดรตการวิเคราะห์ กิจกรรมของเอนไซม์ Pyruvate kinase (EC 2.7.1.40), Glucose-6-phosphatase (EC 3.1.3.9) และ Glucose-6-phosphate dehydrogenase (EC 1.1.1.49)

เก็บตัวอย่างปลา 3 ตัวต่อตู้ หลังจากปลาได้รับอาหารเย็น 6 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักปลา จากนั้นเก็บตัวอย่างเลือดปลา บริเวณ caudal vein ใส่ในหลอด microtube เพื่อเก็บตัวอย่างซีรัมใช้สำหรับการวิเคราะห์ Pyruvate kinase จากนั้น เก็บตัวอย่างตับ ชั่งน้ำหนัก ใส่ในไนโตรเจนเหลวทันที และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ - 80°C เพื่อนำมาสกัดเอนไซม์และหากิจกรรมของเอนไซม์ Glucose-6-phosphatase และ Glucose-6-phosphate dehydrogenase ตามวิธีการของ Bergmeyer (1974)

6. การศึกษาประสิทธิภาพการย่อยอาหาร

หลังจากสิ้นสุดการศึกษาการเจริญเติบโต ให้อาหารที่มีโครมิกซ์ออกไซด์เป็นมาร์กเกอร์ในอาหารที่ระดับ 0.5% โดยปฏิบัติเช่นเดียวกับการศึกษาการเจริญเติบโต เก็บตัวอย่างมูลปลาเมื่อให้อาหารเป็นระยะเวลานาน 1 เดือน ทำให้แห้งโดยวิธี Lyophilization บดมูลของปลาที่แห้งและเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ -20°C เพื่อรอการวิเคราะห์ปริมาณโครมิกออกไซด์ตามวิธีการของ Furukawa และ Tsukahara (1966) โปรตีน และพลังงาน ตามวิธีการของ AOAC (1999) และคำนวณประสิทธิภาพการย่อยอาหารตามสมการของ Cho and Slinger (1979) อ้างโดย Terrazas-Fierro และคณะ (2010)

ประสิทธิภาพการย่อยวัตถุแห้ง = 100 – [100 x (โครเมียมในอาหาร/ โครเมียมในมูลปลา)]

$$\text{ประสิทธิภาพการย่อยโปรตีน} = 100 - \left\{ 100 \times \left[\frac{\text{โครเมียมในอาหาร}}{\text{โครเมียมในมูล}} \times \frac{\text{โปรตีนในมูลปลา}}{\text{โปรตีนในอาหาร}} \right] \right\}$$

$$\text{ประสิทธิภาพการย่อยไขมัน} = 100 - \left\{ 100 \times \left[\frac{\text{โครเมียมในอาหาร}}{\text{โครเมียมในมูล}} \times \frac{\text{ไขมันในมูลปลา}}{\text{ไขมันในอาหาร}} \right] \right\}$$

7 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ข้อมูลการเจริญเติบโต ประสิทธิภาพการย่อยอาหาร ประสิทธิภาพการใช้สารอาหาร และกิจกรรมของเอนไซม์ นำมาหาค่าเฉลี่ย และวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูล (Analysis of Variance) เปรียบเทียบหาความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วย Tukey's HSD Test

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางโภชนาการของวัตถุดิบอาหาร

วัตถุดิบ	องค์ประกอบทางโภชนาการ (เปอร์เซ็นต์)					
	โปรตีน	ไขมัน	เถ้า	ความชื้น	เยื่อใย	NFE
ปลาป่น	70.62±1.37	6.81±0.41	19.70±0.08	8.38±0.21	0.21±0.01	-5.72
เครื่องในปลาทูน่าป่น	64.06±0.77	11.64±0.33	6.62±0.06	19.85±0.55	0.07±0.01	-2.24
กากถั่วเหลือง	48.86±1.35	2.66±0.20	6.60±0.13	9.09±0.10	3.28±0.19	29.51
กลูโคส	-	-	-	-	-	-
เด็กซ์ตริน	0.56±0.03	0.76±0.02	0.13±0.01	8.93±0.36	0.07±0.01	89.55
แป้งมันสำปะหลัง	0.07±0.01	0.46±0.11	0.10±0.02	9.75±0.34	0.09±0.01	89.53
แป้งข้าวโพด	0.12±0.00	0.39±0.01	0.14±0.01	10.93±0.49	0.03±0.00	88.39
แป้งข้าวจ้าว	7.08±0.07	0.59±0.01	0.31±0.02	10.59±0.15	0.14±0.01	81.29
แป้งสาลี	15.73±0.07	1.16±0.03	0.53±0.03	9.39±0.60	0.18±0.04	73.01
รำข้าว	12.25±0.70	17.58±0.47	9.59±0.03	13.44±0.15	8.41±0.14	38.73

ตารางที่ 3 ส่วนประกอบของอาหารทดลอง

วัตถุดิบ	สูตรอาหาร						
	1 (กลูโคส)	2 (เด็กซ์ตริน)	3 (แป้งมันสำปะหลัง)	4 (แป้งข้าวโพด)	5 (แป้งข้าวจ้าว)	6 (แป้งสาลี)	7 (รำข้าว)
ปลาป่น	43.00	43.00	43.00	43.00	42.20	41.10	42.30
เครื่องในปลาทูน่าป่น	15.80	15.80	15.80	15.80	15.50	15.10	15.50
กากถั่วเหลือง	9.30	9.30	9.30	9.30	9.00	8.80	9.10
CMC	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50	2.50
วิตามินรวม[1]	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60
แร่ธาตุรวม[2]	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
น้ำมันปลา	7.30	7.30	7.30	7.30	7.40	7.50	5.00
แกลบ	0.30	0.30	0.30	0.30	1.60	3.20	3.80
กลูโคส	17.00	-	-	-	-	-	-
เด็กซ์ตริน	-	17.00	-	-	-	-	-
แป้งมันสำปะหลัง	-	-	17.00	-	-	-	-
แป้งข้าวโพด	-	-	-	17.00	-	-	-
แป้งข้าวจ้าว	-	-	-	-	17.00	-	-
แป้งสาลี	-	-	-	-	-	17.00	-
รำข้าว	-	-	-	-	-	-	17.00
NaCl	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
รวม	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
องค์ประกอบทางเคมี (เปอร์เซ็นต์)							
โปรตีน	42.59	44.11	43.70	44.53	45.34	45.32	46.82
ไขมัน	12.78	13.90	10.31	12.93	14.62	13.94	15.09
เยื่อใย	0.67	0.39	0.42	0.45	0.87	1.47	2.94
NFE	16.18	22.02	23.85	21.78	19.59	20.46	13.45
เถ้า	13.62	13.17	13.41	13.67	13.59	13.66	15.26
ความชื้น	14.16	6.41	8.31	6.64	5.99	5.15	6.44
พลังงานรวม (KJ/g)	19.68	19.77	19.41	19.79	19.71	19.96	18.71
P/E	21.64	22.31	22.51	22.50	23.00	22.71	25.02
(มิลลิกรัมโปรตีน/ กิโลจูล)							

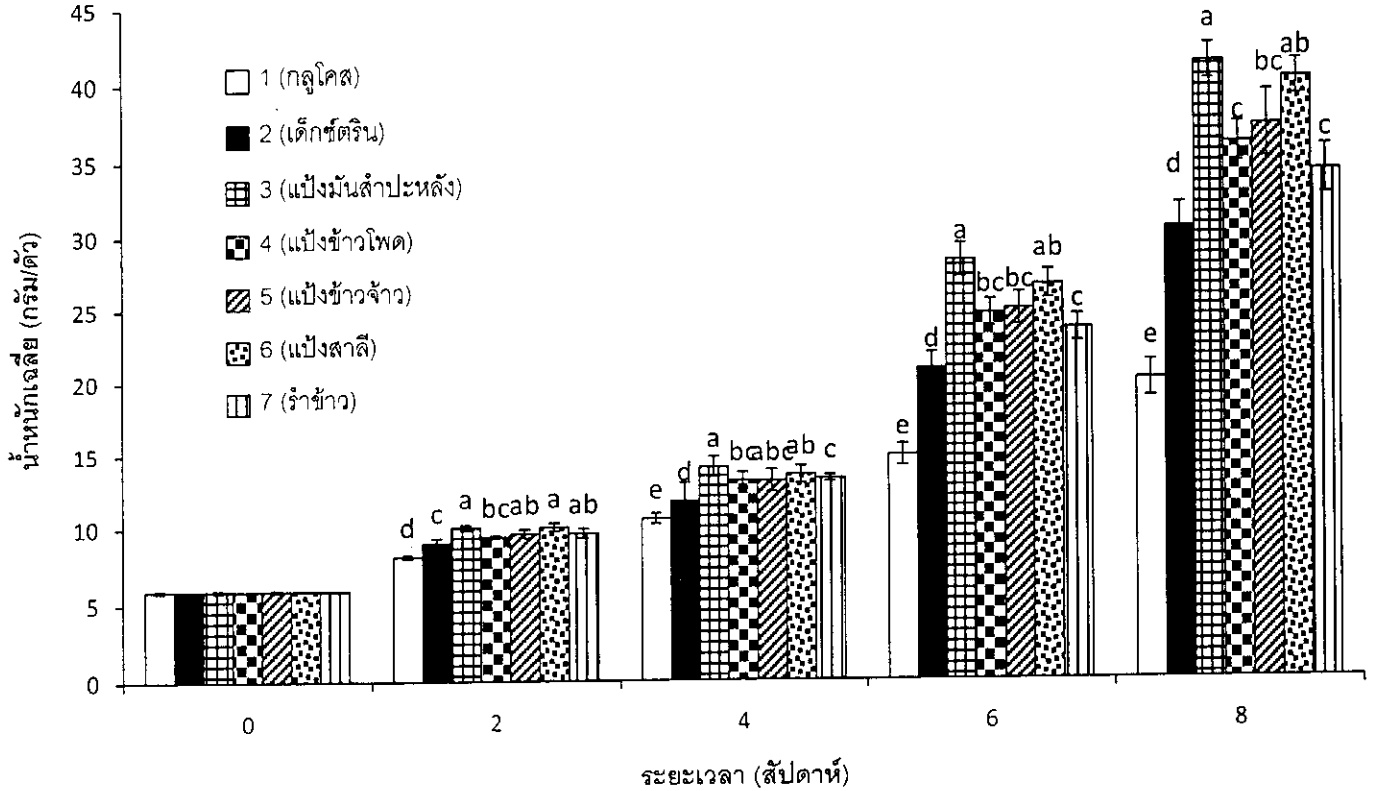
[1] วิตามินรวม ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท DSM

[2] แร่ธาตรวม (กรัม/ อาหาร1 กิโลกรัม): $NaH_2PO_4.2H_2O$ 15; $CaHPO_4$ 8; KCl 5; KH_2PO_4 10: แป้งข้าวจ้าว

ผลการศึกษา

1. *อัตราการเจริญเติบโตและอัตราการรอดตาย*

ปลาที่เลี้ยงด้วยอาหารที่มีชนิดของคาร์โบไฮเดรตแตกต่างกัน 7 ชนิด มีน้ำหนักเฉลี่ยเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น โดยน้ำหนักเฉลี่ยเริ่มมีความแตกต่างกันตั้งแต่สัปดาห์ที่ 2 ของการเลี้ยง หลังสิ้นสุดการทดลอง 8 สัปดาห์ ปลาที่ได้รับอาหารที่มีส่วนประกอบของแป้งมันสำปะหลังมีน้ำหนักเฉลี่ยสุดท้ายสูงที่สุด เท่ากับ 41.24±1.16 กรัม/ตัว รองลงมา คือ ปลาที่ได้รับอาหารที่มีส่วนประกอบของแป้งสาลี แป้งข้าวจ้าว แป้งข้าวโพด รำข้าว และเด็กซ์ตริน มีน้ำหนักเฉลี่ยสุดท้ายเท่ากับ 40.20±1.41, 37.19±2.16, 36.05±1.27, 34.24±1.58 และ 30.47±1.63 กรัม/ตัว ตามลำดับ ส่วนปลาที่ได้รับอาหารที่มีส่วนประกอบของกลูโคส มีน้ำหนักเฉลี่ยสุดท้ายต่ำที่สุด เท่ากับ 20.12±1.25 กรัม/ตัว ซึ่งปลาที่ได้รับอาหารที่มีส่วนประกอบของแป้งมันสำปะหลังมีน้ำหนักเฉลี่ยสุดท้ายไม่แตกต่างจากปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยแป้งสาลีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) แต่มีความแตกต่างจากปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วย แป้งข้าวจ้าว แป้งข้าวโพด รำข้าว เด็กซ์ตรินและกลูโคส อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$)



ภาพที่ 1 น้ำหนักเฉลี่ย (ตัว/กรัม) ของปลากะพงขาวที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตแตกต่างกัน 7 ชนิด ทุก 2 สัปดาห์ เป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์

เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เพิ่ม มีแนวโน้มเช่นเดียวกับน้ำหนักเฉลี่ยสุดท้าย โดยเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เพิ่มมีค่าสูงที่สุดในปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยแป้งมันสำปะหลัง เท่ากับ 605.84±23.46 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งไม่มีความแตกต่างจากปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยแป้งสาลี ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นเท่ากับ 588.92±24.12 เปอร์เซ็นต์ ($P>0.05$) รองลงมา คือ ปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วย แป้งข้าวจ้าว แป้งข้าวโพด รำข้าว และเด็กซ์ตริน ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น เท่ากับ 537.18±44.84, 518.28±21.02, 486.72±22.79 และ 420.95±27.19 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ส่วนปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยกลูโคส มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เพิ่มต่ำที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถติ ($P<0.05$) เท่ากับ 244.92±25.15 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตทั้ง 5 ชนิด คือ กลูโคส เด็กซ์ตริน แป้งข้าวจ้าว แป้งข้าวโพด และรำข้าว มีเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นแตกต่างจากปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยแป้งมันสำปะหลังอย่างมีนัยสำคัญทางสถติ ($P<0.05$)

อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ มีแนวโน้มเช่นเดียวกับน้ำหนักเฉลี่ยสุดท้ายและเปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น โดยอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ มีค่าสูงที่สุดในปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยแป้งมันสำปะหลัง เท่ากับ 3.49±0.06 เปอร์เซ็นต์/วัน ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) จากปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยแป้งสาลีและแป้งข้าวจ้าวที่มีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะเท่ากับ 3.45±0.06 และ 3.30±0.13 เปอร์เซ็นต์/วัน ตามลำดับ แต่แตกต่างจากปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วย แป้งข้าวโพด รำข้าว เด็กซ์ตริน และกลูโคส อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) โดยเฉพาะปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยกลูโคส มีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะต่ำสุด เท่ากับ2.21±0.13 เปอร์เซ็นต์/วัน

อัตราการรอดตาย ของปลาที่ได้รับอาหารที่มีคาร์โบไฮเดรตแตกต่างกัน 7 ชนิด มีอัตราการรอดตายใกล้เคียงกัน ($P>0.05$) แต่ปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยแป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด แป้งข้าวจ้าว และแป้งสาลี มีอัตราการรอดตาย 100 เปอร์เซ็นต์ รองลงมา คือ ปลาที่ได้รับเด็กซ์ตรินและรำข้าว มีอัตราการรอดตาย 98.33 เปอร์เซ็นต์ ส่วนปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยกลูโคสมีอัตราการรอดตายต่ำสุด เท่ากับ 96.67 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4 น้ำหนักเฉลี่ยเริ่มต้น น้ำหนักเฉลี่ยสุดท้าย เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เพิ่ม อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ การเติบโตเฉลี่ยต่อวัน และอัตราการรอดตาย ของปลากะพงขาวที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตแตกต่างกัน 7 ชนิด เป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์ [1]

สูตรอาหาร	น้ำหนักเฉลี่ย (กรัม/ตัว)		เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เพิ่ม[2]	อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ[3]	อัตราการรอดตาย[4]
	เริ่มต้น	สุดท้าย		(เปอร์เซ็นต์/วัน)	(เปอร์เซ็นต์)
1 (กลูโคส)	5.84±0.07	20.12±1.25^{e}	244.92±25.15^{e}	2.21±0.13^{e}	96.67±3.85
2 (เด็กซ์ตริน)	5.85±0.03	30.47±1.63^{d}	420.95±27.19^{d}	2.95±0.09^{d}	98.33±3.33
3 (แป้งมันสำปะหลัง)	5.84±0.07	41.24±1.16^{a}	605.84±23.46^{a}	3.49±0.06^{a}	100.00±0.00
4 (แป้งข้าวโพด)	5.83±0.01	36.05±1.27^{c}	518.28±21.02^{c}	3.25±0.06^{bc}	100.00±0.00
5 (แป้งข้าวจ้าว)	5.84±0.08	37.19±2.16^{bc}	537.18±44.84^{bc}	3.30±0.13^{abc}	100.00±0.00
6 (แป้งสาลี)	5.84±0.04	40.20±1.41^{ab}	588.92±24.12^{ab}	3.45±0.06^{ab}	100.00±0.00
7 (รำข้าว)	5.83±0.05	34.24±1.58^{c}	486.72±22.79^{c}	3.16±0.07^{c}	98.33±3.33

[1] ตัวเลขที่นำเสนอเป็นค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=4) ค่าเฉลี่ยในสดมภ์ที่มีตัวอักษรเหมือนกันกำกับ ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ($P>0.05$)

[2] เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เพิ่ม = {[(น้ำหนักสุดท้ายเฉลี่ย (ตัว/ กรัม) – (น้ำหนักตัวเริ่มต้นเฉลี่ย (กรัม/ ตัว))]/ (น้ำหนักตัวเริ่มต้นเฉลี่ย (กรัม/ตัว))} x 100

[3] อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ =[(ln W_2- Ln W_1)/(t_2-t_1)] x 100

[4] อัตราการรอดตาย =[จำนวนปลาที่เหลือ (ตัว) / จำนวนปลาเริ่มต้น (ตัว)] x 100

2. *ปริมาณการกินอาหาร อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ ประสิทธิภาพการใช้อาหาร และประสิทธิภาพการใช้โปรตีน*

พบว่า ปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยแป้งมันสำปะหลังมีปริมาณการกินอาหารสูงสุด เท่ากับ 42.87±2.16 กรัม/ตัว ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) จากปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยแป้งสาลี ซึ่งมีปริมาณการกินอาหาร เท่ากับ 40.13±1.57 กรัม/ตัว และมีปริมาณอาหารที่กินสูงกว่าปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วย แป้งข้าวจ้าว แป้งข้าวโพด รำข้าว เด็กซ์ตริน และกลูโคส ซึ่งมีปริมาณการกินอาหารเท่ากับ 37.77±3.18, 37.11±1.91, 36.34±1.18, 31.76±2.85 และ 27.77±1.14 กรัม/ตัว ตามลำดับ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$)

อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ พบว่า ปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยกลูโคสมีอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อสูงสุด คือ 1.95±0.10 และแตกต่างจากปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตชนิดอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) โดยปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยแป้งสาลีมีอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อดีที่สุด เท่ากับ 1.17±0.05 รองลงมา คือ ปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วย แป้งข้าวจ้าว แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด รำข้าว และเด็กซ์ตริน ซึ่งมีอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ เท่ากับ 1.20±0.02, 1.21±0.04, 1.23±0.03, 1.28±0.06 และ 1.29±0.05 ตามลำดับ

ประสิทธิภาพการใช้อาหาร พบว่า ปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยแป้งสาลี มีประสิทธิภาพการใช้อาหารมีค่าสูงที่สุดใน เท่ากับ 0.86±0.03 ใกล้เคียงกับปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วย แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวจ้าว และแป้งข้าวโพด ซึ่งมีค่าประสิทธิภาพการใช้อาหารเท่ากับ 0.83±0.03, 0.83±0.02, 0.81±0.02 ตามลำดับ ($P>0.05$) และมีประสิทธิภาพการใช้อาหารสูงกว่าปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วย รำข้าว เด็กซ์ตริน และกลูโคส อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) โดยปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยกลูโคสมีประสิทธิภาพใช้อาหารต่ำที่สุด ($P<0.05$) เท่ากับ 0.51±0.03

ตารางที่ 5 น้ำหนักอาหารที่ปลากิน การเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ ประสิทธิภาพการใช้อาหาร และประสิทธิภาพการใช้โปรตีนของปลากะพงขาวที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตแตกต่างกัน 7 ชนิด เป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์ [1]

สูตรอาหาร	น้ำหนักอาหารที่กิน (กรัม/ตัว)	อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ[2]	ประสิทธิภาพการใช้อาหาร[3]	ประสิทธิภาพการใช้โปรตีน[4]
1 (กลูโคส)	27.77±1.14^{d}	1.95±0.10^{b}	0.51±0.03^{c}	1.21±0.06^{c}
2 (เด็กซ์ตริน)	31.76±2.85^{cd}	1.29±0.05^{a}	0.78±0.03^{b}	1.76±0.06^{ab}
3 (แป้งมันสำปะหลัง)	42.87±2.16^{a}	1.21±0.04^{a}	0.83±0.03^{ab}	1.89±0.06^{a}
4 (แป้งข้าวโพด)	37.11±1.91^{b}	1.23±0.03^{a}	0.81±0.02^{ab}	1.83±0.04^{a}
5 (แป้งข้าวจ้าว)	37.77±3.18^{b}	1.20±0.02^{a}	0.83±0.02^{ab}	1.83±0.04^{a}
6 (แป้งสาลี)	40.13±1.57^{ab}	1.17±0.05^{a}	0.86±0.03^{a}	1.89±0.08^{a}
7 (รำข้าว)	36.34±1.18^{bc}	1.28±0.06^{a}	0.78±0.047^{b}	1.67±0.08^{b}

[1] ตัวเลขที่นำเสนอเป็นค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=4) ค่าเฉลี่ยในสดมภ์ที่มีตัวอักษรเหมือนกันกำกับไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (P>0.05)

[2] อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ = น้ำหนักอาหารที่ปลากิน (กรัม/ ตัว) / น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (กรัม/ ตัว)

[3] ประสิทธิภาพการใช้อาหาร = น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (กรัม/ ตัว) / น้ำหนักอาหารที่ปลากิน (กรัม/ ตัว)

[4] ประสิทธิภาพการใช้โปรตีน = น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น (กรัม/ ตัว) / น้ำหนักโปรตีนที่ปลากิน (กรัม/ ตัว)

สำหรับประสิทธิภาพการใช้โปรตีน พบว่า ปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยแป้งมันสำปะหลัง แป้งสาลี แป้งข้าวจ้าว และแป้งข้าวโพด มีประสิทธิภาพการใช้โปรตีนดีที่สุด อยู่ในช่วง 1.83-1.89 ส่วนปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยเด็กซ์ตรินมีประสิทธิภาพการใช้โปรตีนเท่ากับ 1.76±0.06 แต่ไม่แตกต่างจากปลาใน 4 กลุ่มแรก ($P>0.05$) ปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยรำข้าว และกลูโคสมีประสิทธิภาพการใช้โปรตีนต่ำกว่าแป้งชนิดอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) โดยเฉพาะอย่างยิ่งในปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยกลูโคส มีประสิทธิภาพการใช้โปรตีนต่ำที่สุด เท่ากับ 1.21±0.06

3. *องค์ประกอบทางเคมีในตัวปลา*

ปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตแตกต่างกัน 7 ชนิด เป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์ ,มีโปรตีน ไขมัน เถ้า และพลังงานสูงกว่าปลาเริ่มต้นการทดลอง โดยองค์ประกอบของความชื้นในปลาเริ่มต้นการทดลองมีค่ามากกว่าในตัวปลาสิ้นสุดการทดลอง (ตารางที่) โปรตีนในปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยกลูโคสมีระดับต่ำที่สุด เท่ากับ 16.08±0.29 เปอร์เซ็นต์ และมีความแตกต่างจากปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตชนิดอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ส่วนปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยเด็กซ์ตริน แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด แป้งข้าวจ้าว แป้งสาลี และรำข้าว มีองค์ประกอบของโปรตีนสิ้นสุดการทดลองอยู่ในช่วง 17.14-17.77 เปอร์เซ็นต์ และไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) สำหรับองค์ประกอบของไขมันมีค่าอยู่ในช่วง4.62-6.16 เปอร์เซ็นต์ และไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) ในทุกชุดการทดลอง แต่ปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยกลูโคส มีองค์ประกอบของไขมันสิ้นสุดการทดลองสูงสุด เท่ากับ 6.16±0.87 เปอร์เซ็นต์ เช่นเดียวกับไขมัน ปริมาณพลังงานในปลาที่ได้รับอาหารที่มีชนิดคาร์โบไฮเดรตแตกต่างกันมีองค์ประกอบของพลังงานไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) มีค่าอยู่ในช่วง 6.42-6.60 กิโลจูล/ กรัม สำหรับปริมาณเถ้า พบว่า ปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วย กลูโคสและแป้งข้าวโพด มีองค์ประกอบของเถ้าในตัวสิ้นสุดการทดลองสูงที่สุด เท่ากับ 4.37±0.23 และ 4.36±0.23 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แต่ไม่มีความแตกต่างจากปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วย แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวจ้าว แป้งสาลี และรำข้าว ซึ่งมีองค์ประกอบของเถ้าอยู่ในช่วง 3.88-4.18 เปอร์เซ็นต์ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) แต่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยเด็กซ์ตริน ซึ่งมีองค์ประกอบของเถ้าในตัวต่ำที่สุด เท่ากับ 3.76±0.24 เปอร์เซ็นต์ ($P<0.05$)

ตารางที่ 6 องค์ประกอบทางเคมีในตัวปลาสิ้นสุดการทดลองของปลากะพงขาวที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตแตกต่างกัน 7 ชนิด เป็นระยะเวลา 8 สัปดาห์ (ฐานน้ำหนักสด)[2]

ชุดการทดลอง	องค์ประกอบทางเคมี (เปอร์เซ็นต์)				พลังงาน
	ความชื้น	โปรตีน	ไขมัน	เถ้า	(กิโลจูล/ กรัม)
ปลาเริ่มทดลอง[1]	65.77±0.92	16.19±0.11	3.93±0.34	3.83±0.20	4.83±0.10
1 (กลูโคส)	54.38±1.82^{b}	16.08±0.29^{b}	6.16±0.87	4.37±0.23^{a}	6.60±0.27
2 (เด็กซ์ตริน)	59.40±2.37^{a}	17.14±0.38^{a}	5.34±1.05	3.76±0.24^{b}	6.43±0.17
3 (แป้งมันสำปะหลัง)	59.90±1.57^{a}	17.52±0.34^{a}	5.49±0.13	4.15±0.24^{ab}	6.58±0.21
4 (แป้งข้าวโพด)	61.31±1.69^{a}	17.66±0.59^{a}	4.62±0.77	4.36±0.23^{a}	6.45±0.29
5 (แป้งข้าวจ้าว)	60.78±0.89^{a}	17.66±0.18^{a}	5.53±0.39	3.88±0.13^{ab}	6.42±0.13
6 (แป้งสาลี)	59.17±1.72^{a}	17.59±0.23^{a}	5.82±0.75	4.18±0.16^{ab}	6.49±0.24
7 (รำข้าว)	60.57±1.79^{a}	17.77±0.55^{a}	6.04±0.76	4.15±0.32^{ab}	6.48±0.26

[1]ตัวเลขที่นำเสนอเป็นค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=3) ที่มีตัวอักษรเหมือนกันกำกับ ไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (P>0.05)

[2] ตัวเลขที่นำเสนอเป็นค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=4) ที่มีตัวอักษรเหมือนกันกำกับ ไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (P>0.05)

4. การใช้ประโยชน์จากโปรตีนสุทธิ ประสิทธิภาพการสะสมโปรตีน ประสิทธิภาพการสะสมไขมัน และประสิทธิภาพการสะสมพลังงาน

การใช้ประโยชน์จากโปรตีนสุทธิ พบว่า ปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยแป้งมันสำปะหลังมีการใช้ประโยชน์จากโปรตีนสุทธิสูงสุด เท่ากับ 0.159±0.007 รองลงมา คือ ปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วย แป้งสาลี และแป้งข้าวจ้าว ที่มีค่าประสิทธิภาพการใช้โปรตีน เท่ากับ 0.156±0.011 และ 0.144±0.006 ตามลำดับ โดยปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยแป้งมันสำปะหลัง ไม่มีความแตกต่างจากปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยแป้งข้าวจ้าว และแป้งสาลี อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P>0.05) แต่แตกต่างจากปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยแป้งข้าวโพด รำข้าว เด็กซ์ตริน และกลูโคส อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05) ส่วนปลาที่มีการใช้ประโยชน์จากโปรตีนสุทธิได้ต่ำสุด คือปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วย กลูโคส โดยมีการใช้ประโยชน์จากโปรตีนสุทธิเพียง 0.052±0.005

ประสิทธิภาพการสะสมโปรตีน (PRE; Protein Retention Efficiency) ปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วย กลูโคส มีประสิทธิภาพการสะสมโปรตีนต่ำสุด เท่ากับ 19.72±1.30 เปอร์เซ็นต์ และมีความแตกต่างจากปลาที่ได้รับคาร์โบไฮเดรตชนิดอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

($P<0.05$) ส่วนปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วย เด็กซ์ตริน แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด แป้งข้าวจ้าว แป้งสาลี และรำข้าว มีประสิทธิภาพการสะสมโปรตีนไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) โดยอาหารที่มีประสิทธิภาพการสะสมโปรตีนสูงสุด คือ แป้งสาลี โดยมีค่าเท่ากับ 34.21±1.39 เปอร์เซ็นต์ รองลงมา คือ ปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยแป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวจ้าว แป้งข้าวโพด เด็กซ์ตริน และรำข้าว ตามลำดับ ซึ่งมีประสิทธิภาพการสะสมโปรตีนอยู่ในช่วง 31.32-34.01 เปอร์เซ็นต์

ประสิทธิภาพการสะสมไขมัน (LRE; Lipid Retention Efficiency) ปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยแป้งมันสำปะหลัง มีประสิทธิภาพการสะสมไขมันสูงสุด เท่ากับ 46.77±2.13 เปอร์เซ็นต์ รองลงมา คือ ปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยแป้งสาลี มีประสิทธิภาพการสะสมไขมันเท่ากับ 38.50±7.05 เปอร์เซ็นต์ โดยปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยแป้งมันสำปะหลัง ไม่มีความแตกต่างจากปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยแป้งสาลีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) แต่มีความแตกต่างจากปลาที่ได้รับอาหารชนิดอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ส่วนปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วย กลูโคส เด็กซ์ตริน แป้งข้าวโพด แป้งข้าวจ้าว และรำข้าว ไม่มีความแตกต่างของประสิทธิภาพการสะสมไขมันจากปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยแป้งสาลีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) โดยปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยกลูโคส มีประสิทธิภาพการสะสมไขมันต่ำสุด คือ 29.04±4.65 เปอร์เซ็นต์

ประสิทธิภาพการสะสมพลังงาน (ERE; Energy Retention Efficiency) ปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยแป้งสาลี มีประสิทธิภาพการสะสมพลังงานสูงสุด เท่ากับ 32.24±2.50 เปอร์เซ็นต์ ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จากปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยแป้งข้าวจ้าว แป้งมันสำปะหลัง และเด็กซ์ตริน มีประสิทธิภาพการสะสมพลังงานอยู่ในช่วง 29.33-30.68 เปอร์เซ็นต์ ($P>0.05$) แต่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วย แป้งข้าวโพด รำข้าว และกลูโคส ($P<0.05$) โดยปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยกลูโคส มีประสิทธิภาพการสะสมพลังงานต่ำที่สุด เท่ากับ 20.23±1.29 เปอร์เซ็นต์ และแตกต่างจากปลาที่ได้รับคาร์โบไฮเดรตชนิดอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$)

ตารางที่ 7 การใช้ประโยชน์จากโปรตีนสุทธิ (Protein Productive Value: PPV) ประสิทธิภาพการสะสมโปรตีน (Protein Retention Efficiency: PRE, %) ประสิทธิภาพการสะสมไขมัน (Lipid Retention Efficiency: LRE, %) และประสิทธิภาพการสะสมพลังงาน (Energy Retention Efficiency: ERE, %) ของปลากะพงขาวที่ได้รับอาหารที่มีคาร์โบไฮเดรตแตกต่างกัน 7 ชนิดเป็นเวลา 8 สัปดาห์[1]

สูตรอาหาร	PPV[2]	(เปอร์เซ็นต์)		
		PRE[3]	LRE[4]	ERE[5]
1 (กลูโคส)	0.052±0.005^{e}	19.72±1.30^{b}	29.04±4.65^{b}	20.23±1.29^{c}
2 (เด็กซ์ตริน)	0.114±0.008^{d}	31.69±1.90^{a}	32.65±6.46^{b}	29.33±0.98^{ab}
3 (แป้งมันสำปะหลัง)	0.159±0.007^{a}	34.01±1.05^{a}	46.77±2.13^{a}	29.49±0.51^{ab}
4 (แป้งข้าวโพด)	0.139±0.009^{bc}	33.47±2.00^{a}	30.46±5.74^{b}	28.85±0.90^{b}
5 (แป้งข้าวจ้าว)	0.144±0.006^{ab}	33.88±0.96^{a}	34.17±2.73^{b}	30.68±0.86^{ab}
6 (แป้งสาลี)	0.156±0.011^{ab}	34.21±1.39^{a}	38.50±7.05^{ab}	32.24±2.50^{a}
7 (รำข้าว)	0.124±0.013^{cd}	31.32±2.33^{a}	34.74±4.47^{b}	28.63±1.37^{b}

[1] ตัวเลขที่นำเสนอเป็นค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=4) ที่มีตัวอักษรเหมือนกันกำกับ ไม่มีความแตกต่างทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (P>0.05)

[2] PPV = $(P_1W_1 \times P_0W_0)/(P_F \times \text{Cumulative FI})$ (FI คือ ปริมาณอาหารที่ปลากินตลอดการทดลอง (กรัม), W_0 และ W_1 คือ น้ำหนักปลาเริ่มต้น และน้ำหนักปลาหลังสิ้นสุดการทดลอง (กรัม), P_0 และ P_1 คือ องค์ประกอบในตัวปลาเริ่มต้นการทดลอง และสิ้นสุดการทดลอง (%), P_F คือ องค์ประกอบโปรตีนในอาหารทดลอง (%), Cumulative FI คือ น้ำหนักอาหารปลาที่ได้รับตลอดการทดลอง (กรัม, น้ำหนักฐานวัตถุแห้ง))

[3] PRE (%) = {[(น้ำหนักตัวสุดท้าย x โปรตีนในตัวสิ้นสุดการทดลอง) – (น้ำหนักตัวเริ่มต้น x โปรตีนในตัวเริ่มต้นการทดลอง)]/ โปรตีนรวมที่ได้รับ (กรัม)} x100

[4] LRE (%) = {[(น้ำหนักตัวสุดท้าย x ไขมันในตัวสิ้นสุดการทดลอง) – (น้ำหนักตัวเริ่มต้น x ไขมันในตัวเริ่มต้นการทดลอง)]/ ไขมันรวมที่ได้รับ (กรัม)} x100

[5] ERE (%) = {[(น้ำหนักตัวสุดท้าย x พลังงานในตัวสิ้นสุดการทดลอง) – (น้ำหนักตัวเริ่มต้น x พลังงานในตัวเริ่มต้นการทดลอง)]/ พลังงานรวมที่ได้รับ (กรัม)} x100

5. ระดับน้ำตาลในเลือด ดัชนีไขมันในตัว ดัชนีตับ การสะสมไกลโคเจนในตับ และกิจกรรมเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับเมแทบอลิซึมขั้นกลาง (Metabolism Intermediary Key Enzyme)

ระดับน้ำตาลในเลือด หลังจากปลากินอาหาร 6 ชั่วโมง พบว่า ปลาที่ได้รับอาหารที่มีแป้งข้าวโพดเป็นส่วนปะกอบ มีปริมาณน้ำตาลในเลือดสูงสุด เท่ากับ 6.83±1.43 มิลลิโมลกลูโคส/ ลิตร รองลงมา คือ ปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วย แป้งข้าวจ้าว แป้งสาลี แป้งมันสำปะหลัง รำข้าว เด็กซ์ตริน มีค่าเท่ากับ 6.44±1.47, 6.36± 1.58, 5.94±2.21, 5.51±1.13 และ 4.60±0.92 มิลลิโมลกลูโคส/ ลิตร ตามลำดับ ส่วนปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยกลูโคส มีระดับน้ำตาลในเลือดต่ำสุด เท่ากับ 2.82±0.91 มิลลิโมลกลูโคส/ ลิตร โดยปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยแป้งข้าวโพด แป้งข้าวจ้าว แป้งสาลี แป้งมันสำปะหลัง และรำข้าว มีระดับน้ำตาลในเลือดไม่แตกต่างอย่าง

มีนัยสำคัญทางสถิติ (P>0.05) แต่สูงกว่าปลาที่ได้รับ เด็กซ์ตริน และกลูโคส อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05)

ดัชนีไขมันในช่องท้องหลังการทดลอง 8 สัปดาห์ พบว่า ปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยเด็กซ์ตรินมีค่าดัชนีไขมันในช่องท้องสูงที่สุด เท่ากับ 4.62±0.81 ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยแป้งสาลี และรำข้าว ซึ่งมีค่าดัชนีไขมันในช่องท้อง เท่ากับ 4.20±0.87 และ 3.55±1.08 ตามลำดับ (P>0.05) แต่มีค่าสูงกว่าปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วย แป้งข้าวโพด แป้งมันสำปะหลัง กลูโคส และแป้งข้าวจ้าว อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05) โดยปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยแป้งข้าวจ้าว มีค่าดัชนีไขมันในช่องท้องต่ำสุด เท่ากับ 3.26±0.64

ดัชนีตับ พบว่า มีค่าอยู่ในช่วง 2.15-2.40 และไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P>0.05)

ไกลโคเจนในตับ พบว่า ปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยกลูโคส มีปริมาณไกลโคเจนในตับสูงที่สุด เท่ากับ 195.27±54.48 มิลลิกรัม/ กรัมน้ำหนักตับ แต่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P>0.05) จากปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยแป้งข้าวจ้าว ซึ่งมีค่าไกลโคเจนในตับ เท่ากับ 172.17±31.93 มิลลิกรัม/ กรัมน้ำหนักตับ รองลงมา คือ ปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วย เด็กซ์ตริน แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด และรำข้าว ซึ่งปลาที่ได้รับคาร์โบไฮเดรตทั้ง 5 ชนิดนี้ ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P>0.05) แต่แตกต่างจากปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วย กลูโคส (P<0.05) ส่วนปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยแป้งสาลี มีไกลโคเจนในตับต่ำที่สุด (P<0.05) เท่ากับ116.85±25.19 มิลลิกรัม/กรัมน้ำหนักตับ

กิจกรรมเอนไซม์ไพรูเวทไคเนส (Pyruvate kinase; Unit/mg protein) ปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยเด็กซ์ตริน มีกิจกรรมเอนไซม์ไพรูเวทไคเนสสูงที่สุด เท่ากับ 42.11±14.39 Unit/mg protein และมีความแตกต่างจากปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตชนิดอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญ (P<0.05) รองลงมา คือ ปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยรำข้าว ซึ่งมีค่ากิจกรรมไพรูเวทไคเนส 26.66±8.83 Unit/ mg protein ซึ่งไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วย แป้งสาลี แป้งข้าวจ้าว และแป้งข้าวโพด ซึ่งมีกิจกรรมไพรูเวทไคเนส เท่ากับ 20.28±4.56, 14.71±8.71 และ 13.59±3.41 Unit/ mg protein ตามลำดับ (P>0.05) ส่วนปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วย กลูโคส และแป้งมันสำปะหลัง มีค่ากิจกรรมไพรูเวทต่ำที่สุด เท่ากับ 9.86±2.76 และ 8.28±1.90 Unit/ mg protein ตามลำดับ แต่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วย แป้งสาลี แป้งข้าวจ้าว และแป้งข้าวโพด (P>0.05)

กิจกรรมเอนไซม์กลูโคส-6-ฟอสฟาเตส (mUnit/ mg protein) พบว่า ปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วย กลูโคส มีกิจกรรมกลูโคส-6-ฟอสฟาเตส สูงที่สุด เท่ากับ 1.49±0.40

mUnit/ mg protein และมีความแตกต่างจากปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตชนิดอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) รองลงมา คือ ปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วย แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด แป้งข้าวจ้าว รำข้าว แป้งสาลี และเด็กซ์ตริน ตามลำดับ ซึ่งมีค่ากิจกรรมกลูโคส-6-ฟอสฟาเตส อยู่ในช่วง 0.92-0.45 mUnit/ mg protein

กิจกรรมกลูโคส-6-ฟอสเฟต ดีไฮโดรจีเนส (Unit/ mg protein) ปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วย เด็กซ์ตริน และกลูโคส มีกิจกรรมกลูโคส-6-ฟอสเฟต ดีไฮโดรจีเนสสูงสุด เท่ากับ 1.56±0.30 และ 1.50±0.42 Unit/ mg protein ตามลำดับ แต่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วย แป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด แป้งสาลี และแป้งข้าวจ้าว ที่มีกิจกรรมกลูโคส-6-ฟอสเฟต ดีไฮโดรจีเนส อยู่ในช่วง 1.23 – 1.06 Unit/ mg protein ($P>0.05$) ส่วนปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยรำข้าว มีกิจกรรมกลูโคส-6-ฟอสเฟต ดีไฮโดรจีเนส ต่ำที่สุด เท่ากับ 0.79±0.23 Unit/ mg protein และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติจากปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยเด็กซ์ตริน และกลูโคส ($P<0.05$)

ตารางที่ 8 **ระดับน้ำตาลในเลือด** (Plasma glucose) **ดัชนีไขมันในช่องท้อง** (Intraperitoneal fat ratio: IPF, %) **ดัชนีตับ** (Hepatosomatic index: HSI, %) **และการสะสมไกลโคเจนในตับ หลังจากปลาได้รับอาหารที่ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตแตกต่างกัน** 7 **ชนิด เป็นเวลา** 6 **ชั่วโมง**[1]

ชุดการทดลอง	น้ำตาลในเลือด[2] (มิลลิโมลกลูโคส/ ลิตร)	IPF (%)[3]	HSI (%)[4]	ไกลโคเจนในตับ (มิลลิกรัม/ น้ำหนักตับสด (กรัม))
1 (กลูโคส)	2.82±0.91^{c}	3.33±0.48^{b}	2.40±0.47^{a}	195.27±54.48^{a}
2 (เด็กซ์ตริน)	4.60±0.92^{bc}	4.62±0.81^{a}	2.28±0.47^{a}	158.79±33.12^{bc}
3 (แป้งมันสำปะหลัง)	5.94±2.21^{ab}	3.37±0.62^{b}	2.23±0.40^{a}	150.45±19.70^{bcd}
4 (แป้งข้าวโพด)	6.83±1.43^{a}	3.53±0.72^{b}	2.22±0.33^{a}	127.37±13.44^{cd}
5 (แป้งข้าวจ้าว)	6.44±1.47^{ab}	3.26±0.64^{b}	2.15±0.37^{a}	172.17±31.93^{ab}
6 (แป้งสาลี)	6.36±1.58^{ab}	4.20±0.87^{ab}	2.23±0.38^{a}	116.85±25.19^{d}
7 (รำข้าว)	5.51±1.13^{ab}	3.55±1.05^{ab}	2.29±0.38^{a}	126.50±21.70^{cd}

[1] **ตัวเลขที่นำเสนอเป็นค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน** (n=9) **ค่าเฉลี่ยในสดมภ์ที่มีตัวอักษรเหมือนกันกำกับไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น** 95 **เปอร์เซ็นต์** (P>0.05)

[2] **น้ำตาลในเลือด (มิลลิโมลกลูโคส/ ลิตร)** = [(**ค่าดูดกลืนแสงของตัวอย่าง** 500 นาโนเมตร/ **ค่าการดูดกลืนแสงของกลูโคสมาตรฐาน** (100 **มิลลิกรัม/ เดซิลิตร**)) x 100] x 0.0056

[3] **ดัชนีไขมันในช่องท้อง** (IPF, %) = [**ไขมันในช่องท้อง (กรัม)/ น้ำหนักปลา (กรัม)**] x 100

[4] **ดัชนีตับ** (HSI, %) = [**น้ำหนักตับ (กรัม) / น้ำหนักปลา (กรัม)**] x 100

ตารางที่ 9 **ผลของอาหารที่ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตแตกต่างกัน** 7 **ชนิด ต่อกิจกรรมเอนไซม์ไพรูเวทไคเนส** (Pyruvate kinase; EC 2.7.1.40) **กลูโคส 6 ฟอสฟาเตส** (Glucose-6-phosphatase: G6Pase; EC 3.1.3.9) **และกลูโคส 6 ฟอสเฟต ดีไฮโดรจีเนส** (Glucose-6-phosphate dehydrogenase: G6PDH; EC 1.1.1.49) **หลังจากปลากินอาหาร 6 ชั่วโมง**

ชุดการทดลอง	Pyruvate Kinase (Unit/mg protein)	G6Pase (mUnit/mg protein)	G6PDH (Unit/mg protein)
1 (กลูโคส)	9.86±2.76^{c}	1.48±0.40^{a}	1.50±0.42^{a}
2 (เด็กซ์ตริน)	42.11±14.39^{a}	0.45±0.26^{b}	1.56±0.30^{a}
3 (แป้งมันสำปะหลัง)	8.28±1.90^{c}	0.92±0.25^{b}	1.23±0.24^{ab}
4 (แป้งข้าวโพด)	13.59±3.41^{bc}	0.85±0.36^{b}	1.14±0.34^{ab}
5 (แป้งข้าวจ้าว)	14.71±8.71^{bc}	0.76±0.26^{b}	1.06±0.29^{ab}
6 (แป้งสาลี)	20.28±4.56^{bc}	0.60±0.27^{b}	1.08±0.14^{ab}
7 (รำข้าว)	26.66±8.83^{b}	0.71±0.29^{b}	0.79±0.23^{b}

[1] **ตัวเลขที่นำเสนอเป็นค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน** (n=9) **ค่าเฉลี่ยในสดมภ์ที่มีตัวอักษรเหมือนกันกำกับไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น** 95 **เปอร์เซ็นต์** (P>0.05)

6. *ประสิทธิภาพการย่อยได้ของอาหารที่มีคาร์โบไฮเดรตแตกต่างกัน*

ประสิทธิภาพการย่อยได้ของวัตถุแห้ง (ADMD) **พบว่า ปลาที่ได้รับคาร์โบไฮเดรตแตกต่างกัน 7 ชนิด มีประสิทธิภาพการย่อยได้ของน้ำหนักแห้ง มีค่าอยู่ในช่วง 72.63-78.93 เปอร์เซ็นต์ โดยอาหารที่ประกอบด้วย กลูโคส มีค่าประสิทธิภาพการย่อยได้ของน้ำหนักแห้งสูงสุด เท่ากับ 78.93±0.72 เปอร์เซ็นต์ และมีความแตกต่างจากปลาที่ได้รับคาร์โบไฮเดรตชนิดอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ** (P<0.05)

ประสิทธิภาพการย่อยได้ของโปรตีน (APD) **ปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยรำข้าว มีค่าประสิทธิภาพการย่อยได้ของโปรตีนสูงสุด เท่ากับ 89.05±0.38 เปอร์เซ็นต์ และมีความแตกต่างจากปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตชนิดอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ** (P<0.05) **รองลงมาคือ อาหารที่ประกอบด้วยแป้งมันสำปะหลัง แป้งข้าวโพด แป้งข้าวจ้าว และแป้งสาลี ซึ่งปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยแป้งต่าง ๆ มีค่าประสิทธิภาพการย่อยได้ของโปรตีนไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ** (P>0.05) **ส่วนอาหารที่ประกอบด้วยกลูโคสและเด็กซ์ตริน มีค่าประสิทธิภาพการย่อยได้ต่ำที่สุด และมีความแตกต่างจากอาหารที่ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตชนิดอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ** (P<0.05) **โดยมีค่าประสิทธิภาพการย่อยได้ของโปรตีน เท่ากับ 83.31±0.68 และ 82.85±0.98 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ**

ประสิทธิภาพการย่อยได้ของไขมัน (ALD) มีค่าอยู่ในช่วง 82.04-89.87 เปอร์เซ็นต์ และไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P>0.05) แม้ว่าประสิทธิภาพการย่อยได้ของไขมันไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่อาหารที่ประกอบด้วยกลูโคส มีประสิทธิภาพการย่อยได้ของไขมันต่ำสุด เท่ากับ 82.01±4.12 เปอร์เซ็นต์ ส่วนอาหารที่ประกอบด้วยแป้งมันสำปะหลังมีประสิทธิภาพการย่อยได้ของไขมันสูงสุด เท่ากับ 89.87±2.47 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 10 ประสิทธิภาพการย่อยวัตถุแห้ง (ADMD) โปรตีน (APD) และไขมัน (ALD) ของปลากะพงขาวที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตแตกต่างกัน 7 ชนิด

สูตรอาหาร	ADMD	APD	ALD
1 (กลูโคส)	78.93±0.72[a]	83.31±0.68[c]	82.04±4.12[a]
2 (เด็กซ์ตริน)	74.71±1.67[b]	82.85±0.98[c]	83.98±2.61[a]
3 (แป้งมันสำปะหลัง)	74.12±0.22[b]	86.68±0.22[b]	89.87±2.47[a]
4 (แป้งข้าวโพด)	72.63±1.57[b]	86.50±0.78[b]	87.60±1.99[a]
5 (แป้งข้าวจ้าว)	72.72±0.91[b]	85.12±0.71[b]	88.91±2.40[a]
6 (แป้งสาลี)	74.63±0.09[b]	86.09±0.45[b]	86.02±2.85[a]
7 (รำข้าว)	72.94±1.70[b]	89.05±0.38[a]	83.70±4.20[a]

[1] ตัวเลขที่นำเสนอเป็นค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (n=4) ค่าเฉลี่ยในสดมภ์ที่มีตัวอักษรเหมือนกันกำกับไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ (P>0.05)

วิจารณ์ผลการศึกษา

การศึกษาชนิดของคาร์โบไฮเดรต 7 ชนิด คือ กลูโคส (glucose) เด็กซ์ตริน (dextrin) แป้งมันสำปะหลัง (tapioca starch) แป้งข้าวโพด (corn starch) แป้งข้าวจ้าว (rice flour) แป้งสาลี (wheat flour) รำข้าว (rice bran) ต่ออัตราการเจริญเติบโต และประสิทธิภาพการใช้อาหารในปลากะพงขาว ระยะเวลา 8 สัปดาห์ พบว่า ปลากลุ่มที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยแป้ง ซึ่งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่มีโครงสร้างซับซ้อน (complexity carbohydrate) เกิดจากพอลิเมอร์ของกลูโคส 2 ชนิด คือ พอลิเมอร์เชิงเส้น (อะมิโลส: amylose) และพอลิเมอร์เชิงกิ่ง (อะมิโลเพคติน: amylopectin) ทั้ง 4 ชนิด คือ แป้งมันสำปะหลัง แป้งสาลี แป้งข้าวจ้าว และแป้งข้าวโพด มีการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพการใช้อาหารดีที่สุด รองลงมา คือ ปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยรำข้าว ซึ่งนอกจากเป็นคาร์โบไฮเดรตที่มีโครงสร้างซับซ้อนแล้ว ยังมีส่วนประกอบของเยื่อใยในส่วนประกอบของวัตถุดิบที่สูง เด็กซ์ตริน เป็นโพลีแซคคาไรด์ที่ผ่านความร้อน และทำให้เกิดการย่อยมาแล้วบางส่วน และกลูโคส ซึ่งเป็นน้ำตาลที่มีโครงสร้างเล็กที่สุด ตามลำดับ โดยปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยกลูโคส มีอัตราการกินอาหาร ประสิทธิภาพการใช้อาหาร และการเจริญเติบโตต่ำที่สุด ซึ่งจากการศึกษาครั้งนี้ พบว่า ปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยแป้งมันสำปะหลัง ปลามีน้ำหนักเฉลี่ยสุดท้าย เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เพิ่ม อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงที่สุด รองลงมา คือ ปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยแป้งสาลี โดยปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาลี มีอัตราการเจริญเติบโตไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) เมื่อพิจารณาถึงการใช้ประโยชน์จากสารอาหาร พบว่า อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ ประสิทธิภาพการใช้อาหาร ประสิทธิภาพการใช้โปรตีนของปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยแป้งสาลี มีค่าการใช้ประโยชน์จากสารอาหารที่ดีกว่าปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยแป้งมันสำปะหลัง เมื่อพิจารณาถึงองค์ประกอบทางเคมีของแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาลี พบว่า แป้งมันสำปะหลัง (tapioca starch) มีองค์ประกอบของโปรตีน 0.7เปอร์เซ็นต์ ไขมัน 0.46 เปอร์เซ็นต์ และส่วนที่เหลือเป็นคาร์โบไฮเดรตประมาณ 89.53 เปอร์เซ็นต์ แต่แป้งสาลีมีองค์ประกอบของโปรตีน 15.73 เปอร์เซ็นต์ เมื่อนำแป้งสาลีไปเป็นส่วนประกอบในสูตรอาหารจะช่วยลดการใช้วัตถุดิบโปรตีนในอาหารลงได้ 1-2 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถือเป็นการลดต้นทุนค่าอาหารลงได้ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาอัตราการกินอาหาร พบว่า แม้ปริมาณการกินอาหารไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) แต่ปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยแป้งมันสำปะหลังมีปริมาณการกินอาหารสูงกว่าปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยแป้งสาลี ประมาณ 2.5 กรัม/ ตัว แต่มีอัตราการเจริญเติบโตที่ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($P>0.05$) เมื่อคำนวณการใช้ประโยชน์จากอาหาร ปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยแป้งสาลีจึงมีประสิทธิภาพการใช้อาหารที่ดีกว่าปลาที่ได้รับแป้งชนิดอื่น ๆ ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อความสามารถการใช้แป้งของปลา คือ อัตราส่วนของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินในแป้งที่มีความแตกต่างกัน ซึ่งส่งผลต่อการย่อยได้ของสารอาหาร (Hemre *et al.*, 2002; Rawles and Lochman, 2003; Svihus *et al.*,

2005; Sá *et al.*, 2008) ซึ่งการมีองค์ประกอบของอะไมโลสที่สูง มีความเกี่ยวข้องกับการลดการย่อยได้ (Svihus *et al.*, 2005 อ้างโดย Sá *et al.*, 2008) ในปลาชนิดต่างๆ การใช้ประโยชน์จากแป้งอย่างมีประสิทธิภาพ ขึ้นอยู่กับอัตราส่วนของอะไมโลสต่ออะไมโลเพคติน (Sá *et al.*, 2008) โดยแป้งที่มีองค์ประกอบของอะไมโลสสูง ทำให้ปลาย่อยได้น้อย (Svihus *et al.*, 2005) โดย Cui และคณะ (2010) ได้ศึกษาเปรียบเทียบระหว่างการใช้แป้งข้าวโพด (corn starch) และแป้งสาลี (wheat starch) ในปลาช่อนทะเล (*Rachycentron canadum*) พบว่า ปลาช่อนทะเล สามารถใช้ประโยชน์จากแป้งสาลีเพื่อการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพการใช้อาหารได้ดีกว่าแป้งข้าวโพด เนื่องจากมีอัตราส่วนของอะไมโลสต่ออะไมโลเพคตินในโครงสร้างแป้งที่ต่ำกว่า โดยแป้งข้าวโพด (normal maize starch) โดยทั่วไปประกอบด้วย อะไมโลส 18-33 เปอร์เซ็นต์ และอะไมโลเพคติน 67-82 เปอร์เซ็นต์ (Buléon *et al.*, 1998 อ้างโดย Sá *et al.*, 2008) และแป้งสาลี (wheat bread and wheat flour) มีอะไมโลส 28.4 เปอร์เซ็นต์ อะไมโลเพคติน 71.6 เปอร์เซ็นต์ (Fredrikssan *et al.*, 1998) นอกจากนี้ โครงสร้างภายในเม็ดแป้ง (granule) ของแป้งสาลี ง่ายต่อการทำลายด้วยกระบวนการผลิตภายในโรงงานอุตสาหกรรม และส่งผลทำให้เอนไซม์อะไมเลสเข้าไปย่อยได้ง่ายขึ้น (Bergot, 1993 อ้างโดย Cui *et al.*, 2010) นอกจากนี้ ปริมาณการกินอาหารของปลาเป็นปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการได้รับสารอาหารและการเจริญเติบโต ซึ่งปลาที่ได้รับทั้งแป้งข้าวโพดและแป้งข้าวจ้าว มีการปริมาณการกินอาหารที่ต่ำกว่าปลาที่ได้รับแป้งมันสำปะหลังอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) จึงส่งผลทำให้ปลามีอัตราการเจริญเติบโตที่ต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) จากปลาที่ได้รับแป้งมันสำปะหลัง

สำหรับปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยรำข้าวชนิดไม่สกัดน้ำมัน (rice bran) แม้จะมีอัตราการเจริญเติบโตรองลงมาจากที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยแป้ง แต่น้ำหนักเฉลี่ยสุดท้าย เปอร์เซ็นต์น้ำหนักที่เพิ่ม อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ และประสิทธิภาพการใช้อาหาร ไม่มีความแตกต่างจากปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยแป้งข้าวโพด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) แต่มีประสิทธิภาพการใช้โปรตีนต่ำกว่าปลากลุ่มที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยแป้งชนิดต่างๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) เนื่องมาจากโครงสร้างและองค์ประกอบของวัตถุดิบ ที่มีองค์ประกอบของเยื่อใย (fiber) สูงกว่าวัตถุดิบชนิดอื่นๆ ซึ่งอาจส่งผลทางลบต่อประสิทธิภาพการย่อย การดูดซึม และประสิทธิภาพการใช้อาหาร โดย Shiau (1997) ได้ศึกษาในปลานิล (hybrid tilapia) (*Oreochromis niloticus x O. aureas*) พบว่า การดูดซึมคาร์โบไฮเดรตในลำไส้มีค่าต่ำ เมื่ออาหารมีส่วนประกอบของเยื่อใย (fiber) และ Valente และคณะ (2010) ศึกษาในปลาแบล็คสปอตซีบรีม (blackspot seabream , *Pagellus bogaraveo*) พบว่า ข้าวสาลี (wheat meal) และรำข้าวสาลี (wheat bran) มีความแตกต่างกันในส่วนขององค์ประกอบในตัววัตถุดิบ คือ เยื่อใย (fiber) และแป้ง (starch) ที่มักมีผลต่อการย่อยและลดการใช้ประโยชน์ได้ของสารอาหารชนิดอื่น (Hilton *et al.*, 1983; Anderson *et al.*, 1984; Fynn-aikins *et al.*, 1992; NRC, 1993; Lee *et al.*, 2003) แต่

อย่างไรก็ตาม ปลากิเบลคาร์ป (gibel carp) (*Carrassius auratus* gibelio) ซึ่งเป็นปลาที่กินทั้งพืชและเนื้อ (omnivorous) ที่ได้รับอาหารที่มีเซลลูโลส (cellulose) เป็นองค์ประกอบ 20 เปอร์เซ็นต์ มีอัตราการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพการใช้อาหารที่ดี (Tan *et al.*, 2006) เพราะระดับของเยื่อใยที่เหมาะสมในอาหาร สามารถทำให้อาหารในลำไส้เดินทางช้าลง จึงช่วยเพิ่มการดูดซึมสารอาหารเข้าไปใช้ในร่างกาย และปลาที่กินทั้งพืชและเนื้อสามารถใช้ประโยชน์จากคาร์โบไฮเดรตได้ในระดับสูงกว่าปลากินเนื้อ เนื่องจากมีกิจกรรมเอนไซม์อะไมเลสในทางเดินอาหารที่สูง (Hidalgo *et al.*, 1993; Kumar *et al.*, 2008) และมีจำนวนและความจำเพาะของ Insulin receptor ที่สูงกว่า (Parrizas *et al.*, 1994; Banos *et al.*, 1998 อ้างโดย Kumar *et al.*, 2008) แต่ในการศึกษาครั้งนี้ในปลากะพงขาวซึ่งเป็นปลากินเนื้อ การใช้รำข้าวชนิดไม่สกัดน้ำมันในระดับ 17 เปอร์เซ็นต์ อาจจะเป็นระดับที่สูงเกินไป เพราะลักษณะทางกายภาพของปลากะพงขาว คือ มีลำไส้สั้นและอาจจะมีกิจกรรมเอนไซม์อะไมเลสที่ต่ำ จึงทำให้ไม่สามารถใช้รำข้าวเพื่อเป็นแหล่งของคาร์โบไฮเดรตได้ดี สอดคล้องกับผลการศึกษาในส่วนของการใช้ประโยชน์จากโปรตีนที่มีระดับต่ำในอาหารที่ประกอบด้วยรำข้าวชนิดไม่สกัดน้ำมัน เนื่องจากปลาไม่สามารถใช้แหล่งพลังงานจากรำข้าวได้ดี จึงมีการนำพลังงานจากส่วนของโปรตีนมาใช้เป็นพลังงาน ทำให้ปลาไม่สามารถนำโปรตีนไปใช้เพื่อการเจริญเติบโตได้อย่างเต็มที่ จึงส่งผลต่อการเจริญเติบโตที่ต่ำไปด้วย

ปลากะพงขาวที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยเด็กซ์ตรินที่มีอัตราการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพการใช้อาหาร และประสิทธิภาพการใช้โปรตีนต่ำกว่าปลาที่ได้รับแป้งและรำข้าว แสดงให้เห็นว่าปลากะพงขาวไม่สามารถใช้เด็กซ์ตรินเพื่อเป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตในอาหารได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเมื่อพิจารณาประสิทธิภาพการย่อยโปรตีนและไขมัน พบว่ามีระดับต่ำกว่าปลากลุ่มอื่นอย่างมีนัยสำคัญ อาจเกิดจากเนื่องจากโครงสร้างคาร์โบไฮเดรตของเด็กซ์ตรินเป็นวัตถุดิบที่ผ่านกระบวนการย่อยด้วยความร้อนมาแล้วบางส่วน มีผลทำให้พันธะหรือสายคาร์โบไฮเดรตคลายเกลียว ทำให้เอนไซม์เข้าไปย่อยและทำปฏิกิริยาได้ง่ายขึ้น ส่งผลต่อการย่อยและการดูดซึมที่เร็วขึ้น ซึ่งสัมพันธ์กับการเคลื่อนที่ของอาหารในทางเดินที่เร็วขึ้น ทำให้มีการย่อยที่มีประสิทธิภาพต่ำลง แต่เมื่อเปรียบเทียบกับปลาที่ได้รับอาหารที่มีกลูโคสเป็นส่วนประกอบที่มีอัตราการเจริญเติบโต ประสิทธิภาพการใช้อาหาร และประสิทธิภาพการใช้โปรตีนต่ำที่สุด พบว่า ปลากะพงสามารถใช้เด็กซ์ตรินได้ดีกว่ากลูโคส ซึ่งคล้ายกับผลการศึกษาในปลาหลายชนิด เช่น ปลาไชนีสลองเสนาท์ แคทฟิช (Chinese longsnout catfish, *Leiocassis longirostris* Günter) ที่ได้รับเด็กซ์ตรินและซูโครสมีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะและประสิทธิภาพการใช้อาหารที่ดีกว่าปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยเซลลูโล (cellulose) โซลูเบิลสตาร์ช (soluble starch) และกลูโคส ในระดับ 6 เปอร์เซ็นต์ในอาหาร ตามลำดับ (Tan *et al.*, 2006) ปลาสไตร์ปแบส (striped bass, *Morone saxatilis*) ที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยเด็กซ์ตริน มีอัตราการเจริญเติบโตที่ดีกว่าปลาที่ได้รับ กลูโคส เซลลูโลส และมอลโตส ตามลำดับ (Rawles and Gatlin III, 1998) ปลาซันไชน์แบส (sunshine bass, *Morone chrysops* Female x *M. saxatilis* Male) ระยะวัยรุ่น ที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยเด็กซ์ตรินในระดับ 20 เปอร์เซ็นต์ และไขมัน 11 เปอร์เซ็นต์ มีอัตราการเจริญเติบโต และ

ประสิทธิภาพการใช้อาหารที่ดีกว่าปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยเด็กซ์ตรินในระดับ 40 เปอร์เซ็นต์ และไขมัน 2 เปอร์เซ็นต์ และปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยเด็กซ์ตรินมีอัตราการเจริญเติบโตที่ดีกว่าปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยกลูโคส (Hutchins *et al.*, 1998) และปลาฟลาวเดอร์ (flounder, *Paralichthys olivaceus*) ระยะวัยรุ่น ที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยเด็กซ์ตริน 25 เปอร์เซ็นต์ มีอัตราการเจริญเติบโตดีที่สุด รองลงมา คือ เด็กซ์ตริน 15 เปอร์เซ็นต์ และมีประสิทธิภาพการใช้อาหาร ประสิทธิภาพการสำรองโปรตีน และประสิทธิภาพการสำรองพลังงานดีที่สุด ตามลำดับ ส่วนปลาที่ได้รับกลูโคสในระดับ 15 เปอร์เซ็นต์ มีอัตราการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพการใช้อาหารต่ำที่สุด (Lee *et al.*, 2003).

ในการศึกษาครั้งนี้ ปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยกลูโคส มีปริมาณการกินอาหารต่ำที่สุด ($p<0.05$) เมื่อปลากินอาหารได้น้อยย่อมส่งผลต่ออัตราการเจริญเติบโต ซึ่งคล้ายกับผลการศึกษาของ Deng และคณะ (2005) ซึ่งศึกษาในปลาสเตอร์เจี้ยน (sturgeon, *Acipenser transmontanus*) จากการศึกษาในปลากะพงขาวครั้งนี้ ปลามีอัตราการกินอาหารที่ต่ำอาจเนื่องมาจากความไม่น่ากินของอาหาร เพราะเมื่อผสมกลูโคสลงในอาหาร ทำให้อาหารมีลักษณะเหนียว เยิ้ม ความชื้นสูง และอาหารมีกลิ่นไม่ชวนกินเท่ากับอาหารที่ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตชนิดอื่น ๆ เมื่อปลามีอัตราการกินอาหารที่ต่ำ ย่อมส่งผลต่อการได้รับโปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต วิตามินและแร่ธาตุไม่เพียงพอในการนำไปใช้เพื่อการเจริญเติบโต (Ellis and Reigh, 1991; Silverstein *et al.*, 1999; Watanabe *et al.*, 2001; Borba *et al.*, 2006) และมีผลต่ออัตราการรอดตายที่ต่ำกว่าปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตชนิดอื่น ๆ ถึงแม้จะไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) ซึ่งคล้ายกับผลการศึกษาของ Cui และคณะ (2010) ที่ศึกษาในปลาช่อนทะเล (*R. canadum*) ที่ได้รับอาหารประกอบด้วยกลูโคส มีอัตราการรอดตายต่ำอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) เนื่องจากปลากินเนื้อที่ได้รับอาหารที่มีระดับกลูโคสสูง นอกจากมีปริมาณการกินอาหารที่ต่ำแล้ว ยังไม่สามารถใช้ประโยชน์จากอาหารที่ได้รับได้อย่างเต็มที่ เนื่องจากปลาไม่สามารถจัดการกับกลูโคสส่วนเกินได้ และมีผลทำให้ปลาอยู่ภายใต้สภาวะเครียดจากการเผาผลาญ (metabolic stress) ตลอดเวลา (Pieper and Pfeffer, 1980) และมีผลไปกดทับระบบภูมิคุ้มกันที่ส่งผลต่ออัตราการรอดตายของปลา (Maule *et al.*, 1989; Wiik *et al.*, 1989; Cui *et al.*, 2010) ผลการศึกษาครั้งนี้สอดคล้องกับการศึกษาในปลาชนิดต่าง ๆ ที่ได้รับอาหารที่กลูโคส แล้วปลามีอัตราการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพการใช้อาหารที่ต่ำสุด (Furuichi and Yone, 1982 อ้างโดย Cui *et al.*, 2010; Anderson *et al.*, 1984; Wilson, 1994; Shiau and Peng, 1997; Hutchins *et al.*, 1998; Wu *et al.*, 2007d) เนื่องจากคาร์โบไฮเดรตที่มีโครงสร้างอย่างง่ายเป็นโมโนแซคคาไรด์ (monosaccharide) เช่น กลูโคส ซึ่งการย่อยได้ของกลูโคสมีค่าสูง (ADC > 90 เปอร์เซ็นต์) ไม่ต้องการการย่อยด้วยเอนไซม์ในทางเดินอาหารก่อนจะมีการดูดซึม จึงอยู่ในรูปพร้อมใช้ที่สามารถลำเลียงกลูโคสเข้าสู่ร่างกายได้โดยตรง และรวดเร็ว (Buddington, 1987 อ้างโดย Stone *et al.*, 2003a) แต่มีผลทำให้ปลามีอัตราการเจริญเติบโตที่ต่ำ เนื่องจาก " negative physiological effect"

จากกลูโคสที่อิ่มตัวมากเกินไป (Pieper and Pfeffer, 1980) ต่างจากคาร์โบไฮเดรตที่มีโครงสร้างซับซ้อน (complex carbohydrate) กลุ่มโพลีแซคคาไรด์ เช่น แป้งหรือเด็กซ์ตริน จำเป็นต้องผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์ภายในทางเดินอาหารก่อนที่จะมีการดูดซึม เช่น การศึกษาในปลาเรนโบว์เทร้าท์ ถ้าใส่เด็กซ์ตรินในอาหาร 20 เปอร์เซ็นต์ มีค่า ADC เท่ากับ 77.2 เปอร์เซ็นต์ (Singh and Nose, 1967 อ้างโดย Wilson, 1994) ส่วนแป้งข้าวโพด (corn starch) ถ้าใส่ในอาหาร 12.5 เปอร์เซ็นต์ ค่าการย่อยได้ เท่ากับ 72.8 เปอร์เซ็นต์ แต่ถ้าใช้เป็นส่วนประกอบในอาหาร 25 เปอร์เซ็นต์ ค่าการย่อยได้ของอาหารจะลดลงเหลือ 60.9 เปอร์เซ็นต์ (Saad, 1989 อ้างโดย Wilson, 1994) ดังนั้นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวที่ถูกดูดซึมเข้าไปในระบบทางเดินอาหารจะเร็วกว่ากลูโคสที่มาจากคาร์โบไฮเดรตที่มีโครงสร้างซับซ้อน ซึ่งการดูดซึมกลูโคสที่เร็วมากเกินไป มีผลทำให้กลูโคสปริมาณมากเข้าสู่ร่างกายก่อนที่จะมีการยกระดับของกิจกรรมเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการใช้คาร์โบไฮเดรตในกระบวนการเมแทบอลิซึมให้เพียงพอต่อการนำกลูโคสไปใช้ ซึ่งทำให้มีข้อจำกัดในการใช้แหล่งคาร์โบไฮเดรตที่ย่อยได้สูง และมีผลทำให้การใช้น้ำตาลจากโมเลกุลอิสระมีค่าต่ำในปลา นอกจากนี้กลูโคสปริมาณมาก อาจหายไปจากระบบหมุนเวียนเลือดก่อนที่เซลล์ในร่างกายนำสารอาหารไปใช้ประโยชน์ (Hilton and Atkinson, 1982; Lin and Shiau, 1995; Lin *et al.*, 1997 อ้างโดย Cui *et al.*, 2010) ซึ่งเห็นได้จากข้อมูลการตอบสนองในเลือด (glycemic response) ที่มีระดับน้ำตาลในเลือดลดลงอย่างรวดเร็วหลังการกินอาหาร ดังที่พบในการศึกษาครั้งนี้ ปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยกลูโคส มีระดับน้ำตาลในเลือดต่ำที่สุดเพียง 2.82 มิลลิโมลกลูโคส/ ลิตร หลังการกินอาหารแล้ว 6 ชั่วโมง ในขณะที่ปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตที่มีโครงสร้างซับซ้อนจำพวกแป้งชนิดต่าง ๆ มีระดับน้ำตาลในเลือด 5.94-6.83 มิลลิโมลกลูโคส/ ลิตร สูงกว่าปลาที่ได้รับกลูโคสอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับการทดลองในปลาช่อนทะเล โดยปลาได้รับอาหารที่ประกอบด้วย กลูโคส ซูโครส มอลโตส เด็กซ์ตริน แป้งข้าวโพด และแป้งสาลีในระดับ 20 เปอร์เซ็นต์ พบว่า ปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยกลูโคส มีระดับน้ำตาลในเลือดต่ำสุด เท่ากับ 18.73 มิลลิโมลกลูโคส/ ลิตร แตกต่างจากปลาที่ได้รับคาร์โบไฮเดรตชนิดอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ซึ่งมีระดับน้ำตาลในเลือดอยู่ในช่วง 23.90-32.05 มิลลิโมลกลูโคส/ ลิตร (Cui *et al.*, 2010) โดย Pieper และ Pfeffer (1980) ชี้ให้เห็นว่า การดูดซึมกลูโคสเข้าไปจำนวนมาก อาจขับถ่ายออกมาก่อนที่จะมีอินซูลิน (insulin) ในระดับที่เพียงพอที่จะนำกลูโคสไปใช้ประโยชน์เพื่อเป็นแหล่งพลังงานในอาหาร (Furuichi and Yone, 1981; Hilton and Atkinson, 1982 อ้างโดย Cui *et al.*, 2010)

ระดับน้ำตาลในเลือดของของปลากะพงขาวที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยเด็กซ์ตรินมีระดับที่ใกล้เคียงกับปลาที่ได้รับแป้งชนิดต่าง ๆ และรำข้าว ($P>0.05$) ซึ่งคล้ายกับผลการศึกษาของ Cui และคณะ (2010) ที่ศึกษาในปลาช่อนทะเล โดยปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยกลูโคส มีค่าน้ำตาลในเลือดและพลาสมาไตรกลีเซอไรด์ (plasma triglyceride) ต่ำกว่าปลาที่ได้รับ มอลโตส ซูโครส เด็กซ์ตริน แป้งข้าวโพด และแป้งสาลี อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) แต่ปลาที่ได้รับ

อาหารที่ประกอบด้วยเด็กซ์ตริน แป้งข้าวโพด และแป้งสาลีไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) น้ำตาลในเลือดในการศึกษาครั้งนี้ มีค่าอยู่ในช่วง 2.82- 6.83 มิลลิโมลกลูโคส/ลิตร ซึ่งช่วงปกติของน้ำตาลในเลือด ไม่มีการกำหนดอย่างชัดเจนในปลาสายพันธุ์ต่าง ๆ (Hemre *et al.*, 2002 อ้างโดย Cui *et al.*, 2010) ซึ่งระดับน้ำตาลในเลือดในการศึกษาครั้งนี้คล้ายกับการศึกษาในปลาคอด (Cod) ซึ่งมีค่าระหว่าง 2 และ 7 มิลลิโมลกลูโคส/ ลิตร (Hemre *et al.*, 1993 อ้างโดย Cui *et al.*, 2010) ปลาแซลมอน มีค่าระหว่าง 3 ถึง 10 มิลลิโมลกลูโคส/ ลิตร (Arnesen *et al.*, 1995; Hemre *et al.*, 14995; Hemre and Hansen, 1998 อ้างโดย Cui *et al.*, 2010) แต่มีค่าต่ำกว่าในปลานิล ซึ่งมีค่าน้ำตาลในเลือดประมาณ 11 มิลลิโมลกลูโคส/ ลิตร (Hemre *et al.*, 2002 อ้างโดย Cui *et al.*, 2010) และปลาช่อนทะเล มีระดับน้ำตาลในเลือด 18.73 ถึง 32.05 มิลลิโมลกลูโคส/ ลิตร (Cui *et al.*, 2010) จากการศึกษาระดับน้ำตาลในเลือดทำให้เห็นภาพที่ชัดเจนขึ้นของการใช้ประโยชน์ได้ของคาร์โบไฮเดรตชนิดต่าง ๆ ในอาหาร โดยอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ และประสิทธิภาพการใช้อาหารที่มีค่าต่ำ ในปลากะพงขาวที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยกลูโคสเป็นเพราะส่วนกลูโคสที่ดูดซึมไว้เป็นปริมาณมาก เข้าไปสู่ระบบเลือด จากนั้นเข้าไปสู่เซลล์เพื่อใช้กลูโคสให้เกิดประโยชน์แต่อาจมีปริมาณอินซูลินที่ไม่เพียงพอ อาจมีการขับทิ้งออกก่อนที่จะมีการนำกลูโคสไปใช้ให้เกิดประโยชน์ (Pieper and Pfeffer, 1980; Hilton and Atkinson, 1982 อ้างโดย Tan *et al.*, 2006) ส่วนปลาที่ได้รับอาหารที่คาร์โบไฮเดรตมีโครงสร้างซับซ้อน หลังการกินอาหาร 6 ชั่วโมง พบว่า มีระดับน้ำตาลในเลือดสูงกว่ากลุ่มที่ได้รับน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว เนื่องจากคาร์โบไฮเดรตที่มีโครงสร้างซับซ้อนจะค่อย ๆ ย่อยและดูดซึม จึงน่าจะมีอินซูลินที่เพียงพอที่จะนำกลูโคสจากโครงสร้างของแป้งไปใช้ประโยชน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ปลาที่ได้รับแป้งชนิดต่าง ๆ มีการเจริญเติบโตที่ดี ยกเว้นปลาที่ได้รับแป้งข้าวโพด โดยเมื่อเปรียบเทียบระหว่างปลาที่ได้รับแป้งข้าวโพดและปลาที่ได้รับแป้งชนิดอื่น ๆ พบว่า ปลาที่ได้รับแป้งข้าวโพด มีระดับน้ำตาลในเลือดสูงกว่าปลาที่ได้รับแป้งชนิดอื่น ๆ หลังอาหารมื้อสุดท้าย 6 ชั่วโมง อาจเป็นเหตุมาจากโครงสร้างของคาร์โบไฮเดรตที่ย่อยได้ยากกว่าแป้งชนิดอื่น ๆ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับอัตราการเจริญเติบโต เพราะเมื่อเปรียบเทียบกับปลาที่ได้รับแป้งด้วยกันแล้ว ปลาที่ได้รับแป้งข้าวโพดมีอัตราการเจริญเติบโตต่ำที่สุด Wilson (1994) กล่าวว่า โดยทั่วไป ปลาไม่มีอาการป่วยเป็นเบาหวาน แต่ปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยกลูโคส มีอัตราการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพการใช้อาหารได้ต่ำสุด โดยปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยกลูโคสหรือแป้งที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนเพื่อให้โครงสร้างของแป้งย่อยได้ง่ายขึ้น เช่น แป้งสุก (gelatinized starch)หรือเด็กซ์ตริน มักจะมีอาการน้ำตาลในเลือดสูงเป็นระยะเวลายาวนาน (prolonged hyperglycemia) และนำไปสู่การทดสอบความต้านทานกลูโคส (glucose tolerance test) ซึ่งเป็นการทดสอบหน้าที่ของตับอ่อนชนิดหนึ่งโดยใช้คืมกลูโคสช่วยในการวินิจฉัยโรคเบาหวาน และพบว่าความต้านทานกลูโคสมีความสัมพันธ์กับความไม่สามารถใช้น้ำตาลที่มีโครงสร้างอย่างง่าย เช่น กลูโคสได้ในระดับสูง ซึ่งสัมพันธ์กับปัจจัยดังนี้ 1. มีกิจกรรมเอนไซม์ Hexokinase ที่ต่ำและขาดการเหนี่ยวนำด้วยเอนไซม์ glucokinase 2. กลูโคสมีความสำคัญน้อยกว่ากรดอะมิโนในการ

กระตุ้นการหลั่งอินซูลิน 3. ปลามีปริมาณหรือจำนวนของ insulin receptors น้อยกว่าสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม 4. ความสามารถในการยับยั้งการหลั่ง insulin โดย somatostatin ในระหว่างที่มีน้ำตาลในเลือดสูง ดังนั้น การขาดแคลนการเหนี่ยวนำ glucokinase และการมีกิจกรรมเอนไซม์ Hexokinase ที่ต่ำ (low km) สามารถอธิบายว่า ปลาสามารถใช้คาร์โบไฮเดรตที่มีโครงสร้างซับซ้อนได้ดี เนื่องจากมีการย่อยและการดูดซึมเข้าไปในร่างกายอย่างช้า ๆ ในขณะที่ น้ำตาลที่มีโครงสร้างอย่างง่าย ซึ่งเป็นน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวดูดซึมอย่างรวดเร็ว มีผลทำให้น้ำตาลในเลือดสูง บางทีระดับน้ำตาลในเลือดที่สูงอาจทำให้อิ่มไปด้วยเอนไซม์ Hexokinase (Tung and Shiau, 1991) และมีผลลดกิจกรรมเอนไซม์ Hexokinase เนื่องจากมีปฏิกิริยาการยับยั้งโดย glucose-6-phosphate และมีผลทำให้ปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยกลูโคสมีอัตราการเจริญเติบโตได้ต่ำสุด ส่วนความแตกต่างของค่าน้ำตาลในเลือด ที่มีค่าอยู่ในช่วงกว้างระหว่างสายพันธ์ปลา เนื่องมาจากความแตกต่างของสายพันธุ์ปลา เช่น ปลากินเนื้อ (carnivorous) หรือปลาที่กินทั้งพืชทั้งเนื้อ (omnivorous) ความแตกต่างของช่วงอายุปลา วิธีการศึกษา เช่น อุณหภูมิขณะทดลองหรืออุณหภูมิขณะเก็บเลือด ระยะเวลาในการให้อาหารหรือวิธีการให้อาหารก่อนมีการเก็บเลือด (Hemre *et al.*, 2002)

ดัชนีไขมันในช่องท้อง (IPF) ดัชนีตับ (HSI) และไกลโคเจนในตับ แสดงให้เห็นว่าแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาลีเป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตที่ดี ทำให้ปลามีอัตราการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพการใช้อาหารที่ดี โดยมีการสะสมเป็นไขมันในช่องท้อง ดัชนีตับ และไกลโคเจนสะสมในตับในระดับต่ำ เนื่องจากการดูดซึมคาร์โบไฮเดรต หากไม่ได้มีการใช้เป็นแหล่งพลังงานจะทำให้มีการสะสมในตับ อาจเป็นไขมันหรือไกลโคเจน นอกจากนี้ อาจนำไปสะสมเป็นไขมันในตัว หลังจากที่มีการเปลี่ยนรูปแล้ว (Brauge et al., 1994; Fu, 2005) สำหรับปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยเด็กซ์ตรินและกลูโคส พบว่าปลาไม่สามารถใช้เด็กซ์ตรินเพื่อการเจริญเติบโตได้ดี โดยมีการสะสมไขมันในช่องท้องสูงที่สุด ส่วนปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยกลูโคส มีอัตราการเจริญเติบโตที่ต่ำสุด แต่มีค่าดัชนีตับและไกลโคเจนในตับสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ส่งผลให้น้ำหนักแห้งในตัวสูง แต่มีปริมาณโปรตีนในตัวต่ำกว่าปลาที่ได้รับคาร์โบไฮเดรตชนิดอื่น ๆ คล้ายกับการศึกษาในปลาฟลาวเดอร์ ที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยกลูโคส มีอัตราการเจริญเติบโตต่ำสุด และมีค่าไกลโคเจนในตับสูงกว่าปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตจากแหล่งอื่น ๆ อาจเพราะการดูดซึมกลูโคสที่มากเกินไป ไม่สามารถนำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานได้ดี จึงเกิดการสะสมเป็นไกลโคเจนในตับ (Lee *et al.*, 2003) เช่นเดียวกับการศึกษาในปลากิเบลคาร์ปและปลาไชนีสลองเสนาท์แคทฟิช ที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยกลูโคสและเด็กซ์ตริน มีค่าไกลโคเจนในตับสูงกว่าซูโครสหรือแป้งโซลูเบิล (Tan *et al.*, 2006) และในปลาช่อนทะเล Cui และคณะ (2010) พบว่าปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยกลูโคส มีค่า HSI และ VSI สูงกว่าปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตชนิดอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งการเพิ่มขึ้นของค่าดัชนีตับมีความสัมพันธ์กับการสะสมเป็นไกลโคเจนในตับ โดยในปลาฟลาวเดอร์ พบว่า ค่าดัชนีตับมีสหสัมพันธ์ทางบวกกับไกลโคเจนในตับ ($r = 0.88$; $P<0.05$) ซึ่งคล้ายกับผลการศึกษาในปลาหลาย

ชนิด (Hung *et al.*, 1990; Fynn-Aikins *et al.*, 1992; Hutchins *et al.*, 1998; Lee *et al.*, 2003) ในการศึกษาครั้งนี้พบสหสัมพันธ์ทางบวกระหว่างดัชนีตับและไกลโคเจนในตับในปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยกลูโคส ในปลากะพงขาวการปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยรำข้าว (rice bran) นอกจากมีดัชนีตับที่สูงแล้ว ยังมีองค์ประกอบของไขมันในตัวสูงกว่าปลาที่ ๆได้รับอาหารที่ประกอบด้วยแป้งชนิดอื่น ๆ แสดงให้เห็นว่าคาร์โบไฮเดรตที่ดูดซึมได้นอกจากใช้เป็นแหล่งพลังงานยังสามารถเปลี่ยนรูปด้วยกระบวนการลิโปจีนีซิส (lipogenesis) เป็นไขมันสะสมในตัวหรือในตับ (Mokoginta *et al.*, 2004) เช่นเดียวกับผลการศึกษาในปลาปลาแบล็คสปอตซีบรีม (Blackspot seabream, *P. bogavaveo*) ที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยรำสาลี (wheat bran) เหนี่ยวนำให้มีการเพิ่มไขมันในตับอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเทียบกับปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยแป้งสาลี (Valente *et al.*, 2010)

การศึกษาครั้งนี้ศึกษากิจกรรมเอนไซม์ 3 ชนิด ซึ่งเป็นตัวแทนของกิจกรรมหลัก 3 กระบวนการ คือ กิจกรรมเอนไซม์ Pyruvate kinase (PK) (เอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการนำกลูโคสไปใช้เป็นแหล่งพลังงาน, glycolysis) กิจกรรมเอนไซม์ glucose-6-phosphatase (G6Pase) (เอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์กลูโคสขึ้นมาใช้ใหม่, gluconeogenesis) และกิจกรรมเอนไซม์ glucose-6-phosphate dehydrogenase: G6PDH (เอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการนำสารอาหารไปสังเคราะห์เป็นไขมัน, lipogenesis) โดยการเพิ่มกิจกรรมของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ glycolysis และ pentose phosphate pathway (หรือกระบวนการ lipogenesis) สามารถใช้ในการอธิบายความสัมพันธ์ทางบวก ระหว่างความซับซ้อนของโครงสร้างคาร์โบไฮเดรต อัตราการเจริญเติบโตรวมถึงประสิทธิภาพการใช้อาหาร คือ น้ำหนักที่เพิ่ม ประสิทธิภาพการใช้อาหาร ประสิทธิภาพการใช้โปรตีน และการสำรองหรือสะสมพลังงาน คือ ดัชนีของไขมันในช่องท้องและองค์ประกอบของไขมันในตัว (Hutchins *et al.*, 1998) โดยปลาที่ได้รับคาร์โบไฮเดรตที่มีผลทำให้ปลามีอัตราการเจริฐเติบโตที่ดี จะมีการเหนี่ยวนำกิจกรรมเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ glycolysis และ lipogenesis ที่สูง และลดกิจกรรมเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ gluconeogenesis ส่วนคาร์โบไฮเดรตชนิดที่ทำให้ปลาที่มีอัตราการเจริญเติบโตที่ต่ำจะทำให้กิจกรรมเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ gluconeogenesis สูงขึ้น คือ ต้องมีการสังเคราะห์กลูโคสขึ้นมาใช้ใหม่ (Panserat *et al.*, 2000; Caseras *et al.*, 2002 อ้างโดย Cui *et al.*, 2010) การศึกษาในปลากะพงขาวครั้งนี้ กิจกรรมเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการเมแทบลิซึมภายในตับ แสดงผลที่ชัดเจนในคาร์โบไฮเดรตที่มีโครงสร้างย่อยง่าย เช่น กลูโคสและเด็กซ์ตริน ซึ่งมีอัตราการเจริญเติบโตต่ำสุด พบว่า เด็กซ์ตรินสามารถเหนี่ยวนำกิจกรรมเอนไซม์ PK ซึ่งเกี่ยวข้องกับกระบวนการ glycolysis ได้สูงสุด และมีเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ gluconeogenesis คือ G6Pase ที่ต่ำ ส่วนเด็กซ์ตรินและกลูโคส ยังเหนี่ยวนำกิจกรรมเอนไซม์ G6PDH ซึ่งเกี่ยวข้องกับกระบวนการ lipogenesis ได้สูงกว่าปลาที่ได้รับแป้งชนิดต่าง ๆ และจากการศึกษาครั้งนี้ พบว่า

กลูโคสและเด็กซ์ตรินมีผลการเหนี่ยวนำกิจกรรมเอนไซม์ G6PDH ได้สูงไม่แตกต่างกัน เป็นการเหนี่ยวนำสารอาหารให้เกิดการสังเคราะห์ไขมันในตัว แต่อาจจะมีกลไกการสะสมไขมันที่แตกต่างกัน โดยปลาที่ได้รับกลูโคสมีผลทำให้เกิดการสะสมไขมันในองค์ประกอบตัวที่สูงแต่มีผลไม่ชัดเจนในการสะสมเป็นไขมันในช่องท้อง ในขณะที่ปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยเด็กซ์ตรินมีการสะสมไขมันในช่องท้องที่สูงแต่มีผลการสะสมไขมันในตัวไม่สูง สอดคล้องกับผลการศึกษาในปลาซ่อนทะเลที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยกลูโคสมีกิจกรรมเอนไซม์ G6PDH ที่สูงและมีความสัมพันธ์เชิงบวกกับองค์ประกอบของไขมันในตัว (Cui *et al.*, 2010) และในปลากิลเฮด ซีบรีม เมื่อได้รับอาหารที่มีระดับคาร์โบไฮเดรตเพิ่มขึ้น มีกิจกรรมของ G6PDH สูงขึ้นเป็นสัดส่วนกับองค์ประกอบของไขมันในตัวที่เพิ่มขึ้น (Metón *et al.*, 1999 อ้างโดย Couto *et al.*, 2008; Fernández *et al.*, 2007; Enes *et al.*, 2008) และสอดคล้องกับปลาหลายสายพันธุ์ (Hung *et al.*, 1989; Hung and Strorebakken, 1994 อ้างโดย Cui *et al.*, 2010; Enes *et al.*, 2006) ซึ่งกลูโคสที่ดูดซึมเข้าสู่ร่างกาย นอกจากใช้เป็นแหล่งพลังงานยังสามารถเปลี่ยนรูปเป็นไขมันสะสมในตัวหรือตับโดยกระบวนการ lipogenesis (Mokoginta *et al.*, 2004) และบางการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการดูดซึมกลูโคสอาจไม่ได้นำไปใช้เป็นแหล่งพลังงานทั้งหมด แต่อาจนำไปสะสมเป็นไขมันหรือไกลโคเจนหลังการเปลี่ยนรูปแล้ว (Brauge *et al.*, 1994; Lanari *et al.*, 1999; Cui *et al.*, 2010) ในการศึกษาครั้งนี้ กลูโคสมีผลทำให้ปลามีอัตราการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพการใช้อาหารต่ำสุด มีกิจกรรม G6Pase ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ gluconeogenesis สูงที่สุด และแตกต่างจากปลาที่ได้รับคาร์โบไฮเดรตชนิดอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P<0.05$) ทำให้ทราบว่าปลากะพงขาวไม่สามารถใช้กลูโคสเป็นแหล่งพลังงานในอาหารได้ดี ทำให้ต้องมีการสังเคราะห์กลูโคสขึ้นมาใช้ใหม่จากสารตัวกลางที่ได้จากการสลายกรดอะมิโน เช่นเดียวกับการศึกษาในปลาเก๋าโดย Shiau และ Lin (2002) ซึ่งพบว่า ปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยแป้งมีอัตราการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพการใช้อาหารสูงกว่าปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยกลูโคส เมื่อวัดกิจกรรมเอนไซม์ภายในตับ พบว่า กิจกรรมเอนไซม์ hexokinase (glycolysis) และ G6PDH ในปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยแป้งมีค่าสูงกว่าปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยกลูโคส ส่วนปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยกลูโคส มีกิจกรรมเอนไซม์ G6Pase สูงกว่าปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยแป้ง ซึ่งกิจกรรมเอนไซม์ hexokinase และ G6Pase เป็นเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการ glycolysis และ gluconeogenesis ตามลำดับ ซึ่งกิจกรรมเอนไซม์ hexokinase ภายในตับที่สูง และกิจกรรกมเอนไซม์ G6Pase ที่ต่ำ ในปลาที่ได้รับแป้งมากกว่าปลาที่ได้รับกลูโคส แสดงว่าปลาเก๋าสามารถใช้แป้งเพื่อการเจริญเติบโตได้ดีกว่าการใช้กลูโคส ดังนั้น การเตรียมอาหารให้มีระดับพลังงานหรือมีคาร์โบไฮเดรตจากแหล่งคาร์โบไฮเดตที่เหมาะสม จึงเป็นการเตรียมกระบวนการ glycolysis ขั้นกลางสำหรับกระบวนการสังเคราะห์ที่สำคัญ (Greiner *et al.*, 1994 อ้างโดย Hutchins *et al.*, 1998) จะช่วยลดกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับ

กระบวนการ gluconeogenesis (Hemre *et al.*, 2002) ที่ส่งเสริมการเจริญเติบโตและการสำรองโปรตีน

จากการศึกษาการใช้ประโยชน์จากโปรตีนสุทธิ ประสิทธิภาพการสะสมโปรตีน ประสิทธิภาพการสะสมไขมัน และประสิทธิภาพการสะสมพลังงานในปลากะพงขาวครั้งนี้ พบว่า ปลาที่ได้รับอาหารที่มีแป้งมันสำปะหลังและแป้งสาลีเป็นส่วนประกอบในอาหาร มีประสิทธิภาพการใช้โปรตีน (PER) การใช้ประโยชน์จากโปรตีนสุทธิ (PPV) ประสิทธิภาพการสะสมโปรตีน (PRE) ประสิทธิภาพการสะสมไขมัน (LRE) และประสิทธิภาพการสะสมพลังงาน (ERE) สูงกว่าปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยคาร์โบไฮเดรตชนิดอื่น แสดงให้เห็นว่าปลา 2 กลุ่มนี้สามารถใช้แหล่งพลังงานจากคาร์โบไฮเดรตได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสำรองโปรตีน (protein sparing effect) เพื่อใช้ในการเจริญเติบโตได้สูงสุด Hemre และคณะ (2002) ได้รายงานว่าการเกิดการสำรองโปรตีน วัดจากการเพิ่มขึ้นของการสะสมโปรตีน (protein retention) ประสิทธิภาพการใช้โปรตีน (PER) และประสิทธิภาพการใช้โปรตีนสุทธิ (ANPU) ของปลาที่ได้รับแป้งข้าวโพดที่ไม่ผ่านความร้อน (non-gelatinize corn starch) มีค่าสูงกว่าแป้งข้าวโพดสุก (gelatinize corn starch) ($P<0.05$) แสดงถึง การสำรองโปรตีนในอาหาร (Kumar *et al.*, 2006) ซึ่งสัตว์น้ำสามารถใช้ประโยชน์จากโปรตีนให้มีประสิทธิภาพสูงสุดได้ ถ้าพัฒนาอาหารโดยการแทนที่โปรตีนบางส่วนด้วยคาร์โบไฮเดรตและไขมันที่เหมาะสมในอาหาร เพื่อให้เกิดการสำรองโปรตีน ซึ่งคาร์โบไฮเดรตที่ถูกดูดซึมอาจใช้เป็นแหล่งพลังงานทันที หรือเก็บไว้ในรูปของไกลโคเจนในตับหรือในกล้ามเนื้อ รวมทั้งสังเคราะห์เป็นสารประกอบอื่น ๆ เช่น ไตรกลีเซอไรด์ (triglyceride) กรดอะมิโนที่ไม่จำเป็น และบางส่วนอาจมีการขับทิ้ง (Furuichi, 1983; Lovell, 1988 อ้างโดย Stone *et al.*, 2003b) ในทางตรงกันข้าม ปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยกลูโคส นอกจากมีอัตราการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพการใช้อาหารที่ต่ำสุด ยังมีค่าประสิทธิภาพการใช้โปรตีน การใช้ประโยชน์จากโปรตีนสุทธิ ประสิทธิภาพการสะสมโปรตีน ไขมัน และพลังงานต่ำที่สุด ซึ่งเป็นข้อยืนยันว่าปลากะพงขาวไม่สามารถใช้คาร์โบไฮเดรตที่มีโครงสร้างอย่างง่าย เช่น กลูโคสเพื่อเป็นแหล่งพลังงานในอาหารได้ดี ซึ่งคล้ายคลึงกับการศึกษาในปลาส่วนใหญ่ เมื่อได้รับกลูโคสในระดับสูง มีผลทำให้ปลามีอัตราการเจริญเติบโตต่ำ เมื่อเทียบกับปลาที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยแป้ง แม้ว่าการย่อยได้ของกลูโคสมีค่าสูง (Lee and Lee, 2004; Fu, 2005,2007) ที่เป็นเช่นนี้ เนื่องจาก ปลาหลายสายพันธุ์มีความสามารถในการดูดซึมกลูโคสได้ต่ำ (Panserat *et al.*, 2001, Hemre *et al.*, 2002; Fu, 2007) เนื่องจาก การดูดซึมกลูโคสในอาหารที่เร็วเกินไป มีผลให้ระดับน้ำตาลในเลือดสูงขึ้นและลดลงอย่างรวดเร็วทุกครั้งที่ได้รับอาหารที่ประกอบด้วยกลูโคส ซึ่งส่งผลอันตรายจากการเจริญเติบโตและสุขภาพของปลา (Stone, 2003b)

สรุปผลการศึกษา

ปลากะพงขาวสามารถใช้คาร์โบไฮเดรตที่มีโครงสร้างซับซ้อน คือ แป้งมันสำปะหลัง และแป้งสาลีได้ดีที่สุด โดยทำให้ปลามีอัตราการเจริญเติบโต ประสิทธิภาพการใช้อาหารรวมถึงประสิทธิภาพการใช้โปรตีน และยังเกิดผลการสำรองโปรตีนได้ดีที่สุด โดยอาหารมีโปรตีน 45 เปอร์เซ็นต์ ไขมัน 12 เปอร์เซ็นต์ และแป้งที่ระดับ 17 เปอร์เซ็นต์ของอาหาร แต่แป้งสาลีมีความเหมาะสมสำหรับการใช้เป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตในอาหารสำหรับปลากะพงขาว เนื่องจากองค์ประกอบของแป้งสาลีที่มีโปรตีนค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับแป้งชนิดอื่น ๆ คือ มีโปรตีนเป็นองค์ประกอบประมาณ 14 เปอร์เซ็นต์ ถ้ามีการนำไปใช้ในการสร้างสูตรอาหาร จะสามารถลดแหล่งโปรตีนหลักในอาหารลงได้ประมาณ 2-3 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลทำให้ต้นทุนอาหารสัตว์น้ำลดลงได้

เอกสารอ้างอิง

ชุติมา ตันติกิตติ. 2549. หลักโภชนศาสตร์และการวิจัยด้านอาหารสัตว์น้ำ. สงขลา: ภาควิชาวาริชศาสตร์ คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

บุญล้อม ชีวะอิสระกุล. 2541. ชีวเคมีทางสัตวศาสตร์. เชียงใหม่: มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

วีรพงศ์ วุฒิพันธุ์ชัย. 2536. อาหารปลา. ชลบุรี: ภาควิชาวาริชศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา.

เวียง เชื้อโพธิ์หัก. 2542. โภชนศาสตร์สัตว์น้ำและการให้อาหารสัตว์น้ำ. กรุงเทพฯ: ภาควิชาเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

สุภาพร มหันต์กิจ. 2549. การใช้วัสดุเศษเหลือจากโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปสัตว์น้ำเป็นแหล่งโปรตีนทดแทนปลาป่นในอาหารปลากะพงขาว (*Lates calcarifer* Bloch). วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวาริชศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.

Adamidou, S., Nengas, I., Henry, M., Grigorakis, K., Gogos, G., Nikolopoulou, D., Kotzamanis, Y., Bell, G. J. and Jauncey, K. 2009. Growth, feed utilization, health and organoleptic characteristics of European seabass (*Dicentrachus labrax*) fed extruded diets including low and high levels of three different legumes. Aquaculture 293: 263-271.

Anderson, J. S., Jackson, A. J., Matty, A. J., and Capper, B. S. 1984. Effects of dietary carbohydrate and fiber on the tilapia, *Oreochromis niloticus* (Linn.). Aquaculture 37: 303-314.

AOAC. (Association of Official Analytical Chemists). 1999. Official Methods of Analysis. 16th Ed. Washington, DC.: Association of Official Analytical Chemists.

Baeverfjord, G. 1992. Digestible and indigestible carbohydrates in rainbow trout diets. PhD. Thesis. Norwegian College of Veterinary Medicine, Norway.

Bergmeyer, H.U., Brent, E., Schmidt, E. and Stork, H. 1974. D-Glucose. Determination with hexokinase and glucose-6-phosphate dehydrogenase. *In*: Methods of Enzymatic Analysis, vol. III (eds. H.U. Bergmeyer, J. Bergmeyer and M. Graßl). New York: Academic Press.

Bergot, F. 1979. Carbohydrate in rainbow trout diets: Effects of the level and source of carbohydrate and the number of meals on growth and body composition. Aquaculture 18: 157-167.

Bergot, F. and Breque, J. 1983. Digestibility of starch by rainbow trout. Effects of the physical state of starch and of the intake level. Aquaculture 34: 543-547.

Borba, M. R., Fracalossi, D. M. and Pezzato, L. E. 2006. Dietary energy requirement of piracanjuba fingerlings, *Brycon orbignyanus*, and relative utilization of dietary carbohydrate and lipid. Aquaculture Nutrition 12: 183–191.

Brauge, C., Medale, F. and Corraze, G. 1994. Effect of dietary carbohydrate levels on growth, body composition and glycaemia in rainbow trout, *Oncorhynchus mykiss*, reared in seawater. Aquaculture 123: 109-120.

Catacutan, M.R. and Coloso, R.M. 1998. Growth of juvenile Asian seabass, *Lates calcarifer*, fed varying carbohydrate and lipid levels. Aquaculture 149: 137–144.

Couto, A., Enes, P., Peres, H. and Oliva-Teles, A. 2008. Effect of water temperature and dietary starch on growth and metabolic utilization of diets in gilthead sea bream (*Sparus aurata*) juveniles. Comparative Biochemistry and Physiology, Part A 151: 45–50.

Cui, X. J., Zhou, Q. C., Liang, H. O., Yang, J. and Zhao, L. M. Effects of dietary carbohydrate sources on the growth performance and hepatic carbohydrate metabolic enzyme activities of juvenile cobia (*Rachycentron canadum* Linnaeus.). Aquaculture Research 42: 99-107.

Deng, D. F., Hemre, G. I., Storebakken, T., Shiau, S. Y. and Hung, S. S. O. 2005. Utilization of diets with hydrolyzed potato starch, or glucose by juvenile white sturgeon (*Acipenser transmontanus*), as affected by Maillard reaction during feed processing. Aquaculture 248: 103-109.

Ellis, S. C. and Reigh, R. C. 1991. Effect of dietary lipid and carbohydrate levels on growth and body composition of juvenile red drum, *Sciaenops ocellatus*. Aquaculture 97: 387-394.

Enes, P., Panserat, S., Kaushik, S. and Oliva-Teles, A. 2006. Effect of normal and waxy maize starch on growth, food utilization and hepatic glucose metabolism in European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) juveniles. Comparative Biochemistry and Physiology, Part A 143: 89–96.

Enes, P., Panserat, S. Kaushik, S. and Oliva-Teles, A. 2008. Growth performance and metabolic utilization of diets with native and waxy maize starch by gilthead seabream (*Sparus aurata*) juveniles. Aquaculture 274: 101-108.

Fernández, F., Miquel, A. G., Córdoba, M., Varas, M., Metón, I., Caseras, A. and Baanante, I. V. 2007. Effects of diets with distinct protein-to-carbohydrate ratios on nutrient digestibility, growth performance, body composition and liver intermediary enzyme activities in gilthead sea bream (*Sparus aurata*, L.) fingerlings. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology 343: 1–10.

Fredrikssan, H., Silverio, J., Anderson, R., Eliasson, A. C. and Åman, P. 1998. The influence of amylase and amylopectin characteristics on gelatinization and retragodation properties of different starch. Carbohydrate Polymers 35: 119-143.

Furukawa, A. and Tsukahara, H. 1966. On the acid digestion method for the determination of chromic oxide as an index substance in the study of digestibility of fish feed. Bulletin of Japanese Society of Scientific Fisheries 32: 502– 506.

Fynn-Aikins, K., Hung, S. S. O., Liu, W. and Li, H. 1992. Growth, lipogenesis and liver composition of juvenile white sturgeon fed different level of D-glucose. Aquaculture 105: 61-72.

Fu, S. J. 2005. The growth performance of southern catfish fed diets with raw, precooked cornstarch and glucose at two levels. Aquaculture Nutrition 11: 257–261.

Fu, S. J. 2007. The specific dynamic action of southern catfish, *Silurus meridonalis* Chen, fed diets containing either raw or precooked corn starch or glucose. Fish Physiology and Biochemistry 33: 135-141.

Hassid, W.Z. and Abraham, S. 1957. Chemical procedures for analysis of polysaccharides. Methods in Enzymology 3: 34-50.

Hemre, G. I., Mommsen, T. P. and Krogdahl, Å. 2002. Carbohydrates in fish nutrition: Effect on growth, glucose metabolism and hepatic enzyme. Aquaculture Nutrition 8: 175-194.

Hidalgo, M. C., Urea, E. and Sanz, A. 1999. Comparative study of digestive enzymes in fish with different nutritional habits. Proteolytic and amylase activities. Aquaculture 170: 267–283.

Hilton, J. W., Atkinson, J. I. and Slinger, S. J. 1983. Effect of increased dietary fiber on the growth of rainbow trout (*Salmo gairdneri*). Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 40: 81-85.

Hung, S. S. O., Groff, J. M. Lutes, P.B., Fynn-Aikins, K. F. 1990. Hepatic and Intestinal histology of juvenile white sturgeon fed different carbohydrates. Aquaculture 87: 149-160.

Hutchins, C. G., Rawles, S. D. and Gatlin III, D. M. 1998. Effects of dietary carbohydrate kind and level on growth, body composition and glycemic response of juvenile sunshine bass (*Morone chrysops* × *M. saxatilish*). Aquaculture 161: 187–199.

Jauncey, K. 1982. The effects of varying dietary protein level on the growth, feed conversion, protein utilization and body composition of juvenile tilapia, *Sarotherodon mossambicus.* Aquaculture 27: 43-54.

Kaushik, S. J. and Médale, F. 1994. Energy requirements, utilization and dietary supply to salmonids. Aquaculture 124: 81-79.

Krogdahl, Å., Hemre, G. I. and Mommsen, T. P. 2005. Carbohydrates in fish nutrition: Digestion and absorption in postlarval stages. Aquaculture Nutrition 11: 103-122.

Kumar, S., Sahu, N. P., Pal, A. K., Choudhury, D. and Mukherjee, S. C. 2006a. Non-gelatinized corn supplemented with α-amylase at sub-optimum protein level enhances the growth of *Labeo rohita* (Hamilton) fingerlings. Aquaculture Research 37: 284-292.

Kumar, V., Sahu, N.P., Pal, A.K. and Kumar, S. 2007. Immunomodulation of *Labeo rohita* juveniles due to dietary gelatinized and non-gelatinized starch. Fish and Shellfish Immunology 23: 341-353.

Kumar, V., Sahu, N. P., Pal, A.K., Kumar, S. and Gupta, S.K. 2008. Gelatinized to non-gelatinized starch ratio in the diet of *Labeo rohita*: Effect on digestive and metabolic response and on growth. Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition 92: 492–501.

Lanari, D., Poli, B. M., Ballestrazzi, R., Lupi, P., D'Agaro, E. and Mecatti, M. 1999. The effects of dietary fat and NFE levels on growing European sea bass

(*Dicentrachus labrax* L.) growth rate, body and fillet composition, carcass traits and nutrient retention efficiency. Aquaculture 179: 1-4.

Lee, S.M., Kim, K.D. and Lall, S.P. 2003. Utilization of glucose, maltose, dextrin and cellulose by juvenile flounder (*Paralichthys olivaceus*). Aquaculture 221: 427–438.

Lee, S. M. and Lee, J. H. 2004. Effect of dietary glucose, dextrin and starch on growth and body composition of juvenile starry flounder *Platichthys stellatus*. Fisheries Science 70: 53-58.

Lin, J.H. and Shiau, S.H. 1994. Hepatic enzyme adaptation to different dietary carbohydrates in juvenile tilapia *Oreochromis niloticus* x O.*aureus*. Fish Physiology and Biochemistry 14: 165-170.

Martino, R. C., Cyrino, J. E. P., Portz, L. and Trugo, L. C. 2005. Performance, carcass composition and nutrient utilization of surubim *Pseudoplatystoma coruscans* (Agassiz) fed diets with varying carbohydrate and lipid levels. Aquaculture Nutrition 11: 131–137.

Maule, A. G., Tripp, R. A., Kaattari, S. L. and Schreck, C. B. 1989. Stress alters immune function and disease resistance in Chinook salmon (*Oncorhychus tshawytscha*). Journal of Endocrinology 120: 135-142.

Misra, S., Sahu, N.P., Pal, A.K., Xavier, B., Kumar, S. and Mukherjee, S.C. 2006. Pre- and post-challenge immuno-haematological changes in *Labeo rohita* juveniles fed gelatinised or non-gelatinised carbohydrate with n-3 PUFA. Fish and Shellfish Immunology 21: 346–356.

Mohapatra, M., Sahu, N. P. and Chaudhari, A. 2003. Utilization of gelatinized carbohydrate in diets of *Labeo rohita* fry. Aquaculture Nutrition 9: 189-196.

Mokoginta, I., Takeuchi, T., Hadadi, A. and Dedi, J. 2004. Different capabilities in utilizing dietary carbohydrate by fingerling and subadult giant gouramy *Osphronemus gouramy*. Fisheries Science 70: 996–1002.

Moon, T.W. 2001. Glucose tolerance in fish: Fact or fiction?. Comparative Biochemistry and Physiology, Part B 129: 243-244.

Moreira, I.S., Peres, H., Couto, A., Enes, P. And Oliva-Teles, A. 2008. Temperature and dietary carbohydrate level effects on performance and metabolic utilisation of

diets in European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) juveniles. Aquaculture 274: 153–160.

NRC (National Research Council), 1993. Nutrient Requirements of Fish. Washington, D.C.: National Academic Press.

Panserat, S., Capilla, E., Gutierrez, J., Frappart, P. O., Vachot, C., Plagnes-Juan, E., Aguirre, P., Brèque, J. and Kaushik, S.J. 2001. Glucokinase is highly induced and glucose-6-phosphatase poorly regressed in liver of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) by a single meal wih glucose. Comparative Biochemistry and Physiology, Part B 128: 275-283.

Peres, H. and Oliva-Teles, A. 2002. Utilization of raw and gelatinized starch by European sea bass (*Dicentrarchus labrax*) juveniles. Aquaculture 205: 287– 299.

Pieper, A. and Pfeffer, E. 1980. Studies on the effect of increasing proportions of sucrose or gelatinized maize starch in diets for rainbow trout (*Salmo gairdneri*, R.) on the utilization of dietary energy and protein. Aquaculture 20: 333-342.

Podoskina, T. A., Podoskin, A. G. and Bekina, E. N. 1997. Efficiency of utilization of some potato starch modifications by rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*). Aquaculture 152: 235-248.

Rawles, S. D. and Gatlin III, D. M. 1998.Carbohydrate utilization in striped bass (*Morone saxatilis*) and sunshine bass (*M. chrysops* female x *M. saxatilis* male). Aquaculture 161: 201-212.

Rawles, S. D. and Lochmann, R. 2003. Effects of amylopectin/ amylase starch ratio on growth, body composition and glycemic response of sunshine bass (*Morone chrypsops* female x *M. saxtilis* male). Journal of the world Aquaculture Society 34: 278-288.

Sá, R., Pousáo-Ferreira, P. and Oliva-Teles, A. 2008. Effect of dietary starch source (normal versus waxy) and protein levels on the performance of white sea bream *Diplodus sargus* (Linnaeus) juveniles. Aquaculture Research 39: 1069-1076.

Shiau, S. Y. 1997. Utilization of carbohydrates in warmwater fish with particular reference to tilapia, *Oreochromis niloticus* X *O. aureus*. Aquaculture 151: 79-96.

Shiau, S. Y. and Peng, J. C. 1997. Protein sparing effect by carbohydrate in diets for tilapia, *Oreochromis niloticus x O. aureus*. Aquaculture 133; 249-256.

Shiau, S. Y. and Lin, Y. H. 2002. Utilization of glucose and starch by the grouper *Epinephelus malabaricus* at 23°C. Fisheries Science 68: 991–995.

Silverstein, J. T., Shearer, K. S., Dickhoff, W. W. and Plisetskaya, E. M. 1999. Regulation and nutrient intake and energy balance in salmon. Aquaculture 177: 161-169.

Spannhof, L. and Plantikow, H. 1983. Studies on carbohydrate digestion in rainbow trout. Aquaculture 30: 95-108.

Stone, D. A. J. 2003. Dietary carbohydrate utilization by fish. Reviews in Fisheries Science 11: 337-369.

Stone, D. A. J., Allan, G. L. and Anderson, A. J. 2003a. Carbohydrate utilization by juvenile silver perch, *Bidyanus bidyanus* (Mitchell). II. Digestibility and utilization of starch and its breakdown products. Aquaculture Research 34: 109-121.

Stone, D.A.J., Allan, G.L. and Anderson, A.J. 2003b. Carbohydrate utilization by juvenile silver perch, *Bidyanus bidyanus* (Mitchell). III. The protein-sparing effect of wheat starch-based carbohydrates. Aquaculture Research 34: 123-134.

Svihus, B. Uhlen, A. K. and Harstad, O. M. 2005. Effect of starch granule structure, associated components and processing on nutritive value of cereal starch: review. Animal Feed Science and Technology 122: 303-320.

Tan, Q., Xie, S., Zhu, X., Lei, W. and Yang, Y. 2006. Effect of dietary carbohydrate sources on growth performance and utilization for gibel carp (*Carassius auratus gibelio*) and Chinese longsnout catfish (*Leiocassis longirostris* Günther). Aquaculture Nutrition 12: 61–70.

Tan, Q., Xie, S., Zhu, X., Lei, W. and Yang, Y. 2007. Effect of dietary carbohydrate-to-lipid ratios on growth and feed utilization in Chinese longsnout catfish (*Leiocassis longirostris* Günther). Journal of Applied Ichthyology 23: 605–610.

Tan, Q., Wang, F., Xie, S., Zhu, X., Lei, W. and Shen, J. 2009. Effect of high dietary starch levels on the growth performance, blood chemistry and body composition of gibel carp (*Carassius auratus* var. gibelio). Aquaculture Research 40: 1-8.

Tantikitti, C., Sangpong, W. and Chiavareesajja, S. 2005. Effects of defatted soybean protein levels on growth performance and nitrogen and phosphorus excretion in Asian seabass (*Lates calcarifer*). Aquaculture 248: 41– 50.

Terrazas-Fierro, M., Civera-Cerecedo, R., Ibarra-Martínez, L., Goytortúa-Bores, E., Herrera-Andrade, M. And Reyes-Becerra, A. 2010. Apparent digestibility of dry matter, protein, and essential amino acid in marine feedstuffs for juvenile whiteleg shrimp *Litopenaeus vannamei*. Aquaculture: 166-173.

Tung, P. H. and Shiau, S. Y. 1991. Effects of meal frequency on growth performance of hybrid tilapia, *Oreochromis niloticus* x *O. aureus*, fed different carbohydrate diets. Aquaculture 92: 343-350.

Valente, L. M. P., Olmedo, M., Borges, P., Soares, S., Gomes, E. F. S., Álvarez-Blázquez, B., Pazos, G. and Linares, F. 2010. Effects of carbohydrate sources on growth, body composition and tissue lipid deposition of blackspot seabream, *Pagellus bogaraveo* (Brunnich). Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition 94: 212-219.

Walton, M. J. and Cowey, C. B. 1982. Aspects of intermediary metabolism in fish. Comparative Biochemistry and Physiology, Part B 73: 59– 79.

Wang, Y., Liu, Y. J., Tian, L. X., Du, Z. Y., Wang, J. T., Wang, S. and Xiao, W. P. 2005. Effects of dietary carbohydrate level on growth and body composition of juvenile tilapia, *Oreochromis niloticus* x *O. aureus*. Aquaculture Research 36: 1408-1413.

Watanabe, W. O., Ellis, S. C. and Chaves, J. 2001. Effects of dietary lipid and energy to protein ratio on growth and feed utilization of juvenile mutton snapper *Lutjanus analis* fed isonitrogenous diets at two temperature. Journal of the World Aquaculture Society 32: 30-40.

Wiik, R., Andersen, K., Ulgenes, I. and Egidius, E. 1989. Cortisol induced increase in susceptibility of Atlantic salmon. *Salmo salar,* together with effects on the blood cell pattern. Aquaculture 83; 201-215.

Wilson, R.P. 1994. Utilization of dietary carbohydrate by fish. Aquaculture 124: 67– 80.

Wu, X. Y., Liu, Y. J., Tian, L. X., Mai, K. S. and Yang, H. J. 2007a. Utilization of different raw and pre-gelatinized starch sources by juvenile yellowfin seabream *Sparus latus*. Aquaculture Nutrition 13: 389–396.

Wu, X.Y., Liu, Y.J., Tian, L.X., Mai, K.S., Guo, R. and Jin, S.J. 2007b. Effect of different dietary raw to pre-gelatinized starch ratios on growth performance, feed utilization and body composition of juvenile yellowfin seabream (*Sparus latus*). Aquaculture International 15: 467-477.

Wu, X.Y., Liu, Y.J., Tian, L.X., Mai, K.S., Yang, H.J. and Liang, G.Y. 2007c. Effects of raw corn starch levels on growth, feed utilization, plasma chemical indices and enzyme activities in juvenile yellowfin seabream *Sparus latus* Houttuyn. Aquaculture Research 38: 1330-1338.

Wu, X. Y., Liu, Y. T., Tian, L. X., Mai, K. S. and Yang, H. J. 2007d. Utilization of several different carbohydrate sources by juvenile yellowfin seabraem (*Sparus latus*). Journal of Fisheries of China 31: 463-471.