ผลและวิจารณ์

การทดลองที่ 1 การศึกษาผลการใช้มันสำปะหลังในสูตรอาหารต่อสมรรถภาพการผลิตของปลาดุกลูกผสม

คุณภาพอาหาร

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางโภชนะของอาหารปลาดุกลูกผสม (ตารางที่ 10) ทั้งอาหารสูตรข้าวโพดและอาหารสูตรมันสำปะหลัง 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์ พบว่ามีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากการคำนวณ ยกเว้นปริมาณโปรตีนที่มีผลการวิเคราะห์มากกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณเล็กน้อย ซึ่งอาจเนื่องมาจากความผันแปรของแหล่งวัตถุดิบโปรตีนคือ กากถั่วเหลืองและปลาป่นที่นำมาใช้ในการทดลอง

จากผลวิเคราะห์กรดอะมิโนจำเป็นในอาหารปลาดุกลูกผสม (ตารางที่ 10) พบว่าอาหารสูตรข้าวโพดและสูตรมันสำปะหลัง 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์มีปริมาณกรดอะมิโนจำเป็นโดยเฉพาะไลซีน เมทไธโอนีน ซีสตีน ทรีโอนีน และทริปโตเฟน มีค่าต่ำกว่าค่าที่ได้จากการคำนวณเล็กน้อย แต่พบว่าปริมาณกรดอะมิโนจำเป็นทุกตัวในอาหารสูตรข้าวโพดและสูตรมันสำปะหลังมีค่าสูงกว่าอาหารสำเร็จรูปลอยน้ำมากถึงแม้ปริมาณโปรตีนจะมีค่าใกล้เคียงกันก็ตาม แสดงให้เห็นถึงคุณภาพของโปรตีนในอาหารที่แตกต่างกัน กล่าวคือในอาหารสำเร็จรูปลอยน้ำของอาหารสำเร็จรูปลอยน้ำน่าจะมีคุณภาพของโปรตีนที่ต่ำกว่าอาหารสูตรข้าวโพดและอาหารสูตรมันสำปะหลังเมื่อพิจารณาถึงปริมาณกรดอะมิโนจำเป็นที่มีค่าต่ำกว่าอย่างชัดเจน

เมื่อพิจารณาอาหารสูตรใช้มันสำปะหลังทดแทนข้าวโพดทั้ง 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์เปรียบเทียบกับอาหารสูตรข้าวโพดจะเห็นว่าเมื่อมีการใช้มันสำปะหลังทดแทนข้าวโพดและปรับสูตรอาหารให้มีโภชนะต่าง ๆ เพียงพอต่อความต้องการ เช่นการใช้กากถั่วเหลืองเพื่อเสริมโปรตีนและการเสริมกรดอะมิโนเมทไธโอนีน จะทำให้คุณภาพของอาหาร โดยเฉพาะปริมาณโปรตีน และคุณภาพของโปรตีนคือปริมาณกรดอะมิโนจำเป็นในอาหารใกล้เคียงกับอาหารสูตรข้าวโพดและมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่คำนวณได้

ตารางที่ 10 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางโภชนะและกรดอะมิโนจำเป็นของอาหารปลาดุกลูกผสม

องค์ประกอบทางโภชนะ	ข้าวโพด 100%	มันเส้น 50%	มันเส้น 100%	อาหารสำเร็จรูป
ความชื้น (%)	8.07	7.87	7.16	6.91
โปรตีน (%)	33.05	33.04	32.84	33.93
ไขมัน (%)	3.50	3.38	3.41	4.06
เยื่อใย (%)	2.59	2.78	3.16	3.85
เถ้า (%)	7.93	8.67	8.49	13.33
แคลเซียม (%)	1.259	1.226	1.352	2.647
ฟอสฟอรัส (%)	0.625	0.634	0.596	1.347
พลังงานรวม (kcal/kg)	4950	5180	5060	4720
Gelatinization[1] (%)	100	100	99	100
กรดอะมิโนจำเป็น[1]				
อาร์จีนีน (%)	2.35	2.09	2.29	2.15
ไลซีน (%)	1.77	1.73	1.66	1.35
เมทไธโอนีน (%)	0.69	0.69	0.70	0.53
ซีสตีน (%)	0.56	0.54	0.56	0.48
ทรีโอนีน (%)	1.34	1.23	1.34	1.14
ทริปโตเฟน (%)	0.50	0.46	0.49	0.37
ไอโซลิวซีน (%)	1.43	1.36	1.32	1.08
ลิวซีน (%)	2.57	2.35	2.40	2.12
ฟีนิลอะลานีน (%)	1.36	1.31	1.43	1.40
วาลีน (%)	1.44	1.52	1.51	1.38

หมายเหตุ [1] วิเคราะห์โดยห้องปฏิบัติการวิเคราะห์เคมี บมจ.เจริญโภคภัณฑ์อาหาร

การเจริญเติบโต สมรรถภาพการผลิต และ ต้นทุนการผลิต

ผลการศึกษาสมรรถภาพการผลิตของปลาดุกลูกผสม พบว่าปลาที่กินอาหารสำเร็จรูปลอยน้ำมีน้ำหนักเฉลี่ยเมื่อสิ้นสุดงานทดลอง น้ำหนักที่เพิ่มขึ้น น้ำหนักเพิ่มเฉลี่ยต่อวัน อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ ประสิทธิภาพการใช้โปรตีน ปริมาณอาหารที่กินอาหารที่กินเฉลี่ยต่อวัน และการใช้ประโยชน์โปรตีนสุทธิต่ำกว่าปลาที่กินอาหารสูตรข้าวโพดและสูตรมันสำปะหลังอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) (ตารางที่ 11 และ 12) ส่วนต้นทุนการเลี้ยงปลาด้วยสูตรอาหารทดลองต่างๆได้แสดงในตารางที่ 12 พบว่าอาหารที่ใช้มันสำปะหลังทดแทนข้าวโพดทั้งหมดมีต้นทุนค่าอาหารต่อการผลิตปลา 1 กิโลกรัม ต่ำกว่าปลาที่กินอาหารสูตรข้าวโพด 0.48 บาท ทั้งนี้เนื่องจากมันสำปะหลังมีราคาต่ำกว่าข้าวโพด ทำให้ต้นทุนค่าวัตถุดิบมีราคาถูก เมื่อเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตระหว่างอาหารผลิตใช้เองกับอาหารเม็ดสำเร็จรูป พบว่าการทำอาหารใช้เองในฟาร์มมีต้นทุนผลิตอาหารต่ำกว่าอาหารเม็ดสำเร็จรูปอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$)

ตารางที่ 11 การเจริญเติบโตของปลาดุกลูกผสมที่กินอาหารสูตรข้าวโพด มันสำปะหลัง และอาหารสำเร็จรูปลอยน้ำ (ค่าเฉลี่ย ± SE)

สูตรอาหาร	น้ำหนักเฉลี่ยเมื่อเริ่มต้น (กรัม/ตัว)	น้ำหนักเฉลี่ยเมื่อสิ้นสุด (กรัม/ตัว)	น้ำหนักเพิ่มเฉลี่ย (กรัม/ตัว)	น้ำหนักเพิ่มเฉลี่ยต่อวัน (กรัม/ตัว/วัน)	อัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (ร้อยละ/วัน)	อัตรารอด (ร้อยละ)
ข้าวโพด 100%	17.98 ± 1.65	107.04 ± 6.66[ก]	89.06 ± 6.45[ก]	1.06 ± 0.08[ก]	2.12 ± 0.08[ก]	94.00 ± 1.41
มันเส้น 50%	18.12 ± 1.24	111.26 ± 6.19[ก]	93.40 ± 6.53[ก]	1.11 ± 0.08[ก]	2.17 ± 0.10[ก]	95.00 ± 0.58
มันเส้น 100%	17.85 ± 1.20	105.36 ± 5.82[ก]	87.51 ± 5.95[ก]	1.04 ± 0.07[ก]	2.11 ± 0.08[ก]	95.50 ± 0.56
อาหารสำเร็จรูป	18.01 ± 1.60	66.37 ± 4.91[ข]	48.36 ± 5.12[ข]	0.58 ± 0.06[ข]	1.55 ± 0.11[ข]	95.50 ± 0.50
P- value	0.9982	0.0005	0.0006	0.0006	0.0014	0.6445

หมายเหตุ [ก ข] อักษรที่ต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$)

ตารางที่ 12 ประสิทธิภาพของอาหาร และต้นทุนการผลิตปลาดุกลูกผสมที่กินอาหารสูตรข้าวโพด มันสำปะหลัง และอาหารสำเร็จรูปลอยน้ำ (ค่าเฉลี่ย ± SE)

สูตรอาหาร	อาหารที่กินเฉลี่ย (กรัม/ตัว)	อาหารที่กินเฉลี่ยต่อวัน (กรัม/ตัว/วัน)	อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ	ประสิทธิภาพการใช้โปรตีน	การใช้ประโยชน์โปรตีนสุทธิ (%)	ต้นทุนการผลิต (บาท/ ปลา 1 กิโลกรัม)
ข้าวโพด 100%	115.45 ± 6.11[ก]	1.37 ± 0.07[ก]	1.30 ± 0.03[ก]	2.33 ± 0.05[ก]	87.12 ± 1.13[ก]	20.29 ± 0.48[ก]
มันเส้น 50%	128.45 ± 5.18[ก]	1.53 ± 0.06[ก]	1.39 ± 0.05[ก]	2.19 ± 0.07[ก]	86.38 ± 5.04[ก]	21.20 ± 0.71[ก]
มันเส้น 100%	114.56 ± 3.43[ก]	1.36 ± 0.04[ก]	1.32 ± 0.06[ก]	2.32 ± 0.10[ก]	85.95 ± 4.12[ก]	19.81 ± 0.93[ก]
อาหารสำเร็จรูป	82.97 ± 2.96[ข]	0.99 ± 0.04[ข]	1.76 ± 0.13[ข]	1.55 ± 0.12[ข]	54.84 ± 7.31[ข]	32.49 ± 2.38[ข]
P- value	0.0001	0.0001	0.0039	0.0013	0.0012	<0.0001

หมายเหตุ [ก ข] อักษรที่ต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$)

ผลจากงานทดลองการใช้มันสำปะหลังเป็นแหล่งพลังงานทดแทนข้าวโพด พบว่าการทดแทนในระดับ 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์ ไม่มีผลต่อการเจริญเติบโตและสมรรถภาพการผลิตแต่อย่างใด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปลาดุกลูกผสมสามารถใช้ประโยชน์แหล่งของแป้งทั้งจากข้าวโพด (แป้งชนิดแข็ง) และมันสำปะหลัง (แป้งชนิดอ่อน) ได้ไกล้เคียงกัน ทั้งนี้อาจเกิดจากกระบวนการผลิตอาหารอัดเม็ดพองที่ทำให้แป้งทั้งสองชนิดมีเปอร์เซนต์ความสุกของแป้ง (gelatinization) ที่ดี (ตารางที่ 10) ทำให้ปลาที่กินอาหารที่ใช้ข้าวโพดและมันสำปะหลังสามารถใช้ประโยชน์จากแป้งได้ดีจึงมีการเจริญเติบโตที่ดีไม่แตกต่างกัน

การทำให้สุกหรือการอัดเม็ดอาหารแบบเม็ดพองจะช่วยทำให้การย่อยได้ของแป้งดีขึ้น ตัวอย่างเช่น ในการอัดเม็ดอาหารปลานิลโดยกระบวนการเอ็กทรูดจะช่วยเพิ่มการย่อยของแป้งจาก 64 เปอร์เซ็นต์ เป็น 85 เปอร์เซ็นต์ (Wee and Ng, 1986) แป้งที่ผ่านกระบวนการทำให้สุก (gelatinized starch) จะมีส่วนช่วยให้การย่อยแป้ง (starch digestibility) ของปลาดีขึ้นและสามารถดูดซึมไปใช้ได้ดี เนื่องจากแป้งดิบจะจับตัวกับเอ็นไซม์ย่อยแป้งบางส่วนทำให้เอ็นไซม์ย่อยแป้ง

ทำงานไม่เต็มที่ แป้งสุกจะมีโครงสร้างทางเคมีและกายภาพแตกต่างจากแป้งดิบ โดยแป้งสุกจะถูกความร้อนทำให้โมเลกุลของแป้งบางส่วนคลายตัว และถูกสลายจากโครงสร้างปกติ ทำให้การย่อยด้วยเอ็นไซม์ง่ายขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการย่อยแป้งของปลามีค่าสูงขึ้น (วีรพงศ์, 2536)

ผลจากการศึกษาแสดงให้เห็นว่ามันสำปะหลังสามารถใช้เป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตทดแทนข้าวโพดในระดับ 50 เปอร์เซ็นต์ และ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยไม่มีผลต่อการเจริญเติบโตของปลาดุกลูกผสมและไม่แตกต่างจากสูตรอาหารข้าวโพดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติแต่อย่างใด ผลของการใช้มันสำปะหลังในอาหารปลาดุกลูกผสม มีผลสอดคล้องกับสัตว์เศรษฐกิจอื่น ๆ เช่น สามารถใช้มันสำปะหลังทดแทนข้าวโพดได้ทั้งหมดในอาหารสุกรระยะรุ่นและระยะขุน โดยมีสมรรถภาพการผลิตที่ไม่ต่างจากสูตรข้าวโพดแต่อย่างใด (พาพร และ คณะ, 2546) หรือในไก่เนื้อที่สามารถใช้มันสำปะหลังทดแทนการใช้ข้าวโพดที่ระดับ 50 เปอร์เซ็นต์ (สุวรรณี และคณะ, 2543) และ 100 เปอร์เซ็นต์ (สรัสนันท์, 2549) โดยไม่มีผลต่อสมรรถภาพการผลิตแต่อย่างใด

ในสัตว์น้ำพบว่าการใช้มันสำปะหลังเป็นแหล่งวัตถุดิบให้พลังงานได้ดีเช่นกัน อรพินท์ และคณะ (2545) ได้ทดลองใช้มันสำปะหลังในอาหารพ่อแม่พันธุ์ปลาดุกอุย พบว่าการใช้มันสำปะหลังทดแทนข้าวโพดทั้งหมดในสูตรอาหาร หรือที่ระดับการใช้มันสำปะหลัง 30 เปอร์เซ็นต์ในสูตรอาหารไม่มีผลต่ออัตราการเจริญเติบโต และอัตราการเปลี่ยนอาหารของพ่อแม่พันธุ์ปลาดุกอุยแต่ประการใด ปลา *P. bocourti* สามารถใช้มันสำปะหลังที่ระดับ 30 เปอร์เซ็นต์ในสูตรอาหารโดยไม่ส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโต (Hung *et al*., 2003) การศึกษาใช้มันสำปะหลังในอาหารปลานิลพบว่าสามารถใช้มันสำปะหลังได้ที่ระดับ 30 เปอร์เซ็นต์ในอาหารโปรตีน 30 เปอร์เซ็นต์ โดยไม่มีผลต่อการเจริญเติบโตของปลานิล (Vuthiphandchai, 1986) ในปลาดุกยักษ์แอฟริกัน (*Clarias gariepinus*) สามารถใช้มันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบพลังงานร่วมกับวัตถุดิบชนิดอื่นๆได้โดยไม่มีผลต่อสมรรถภาพการผลิต (Nwanna, 2003)

การใช้มันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบพลังงานทดแทนข้าวโพดจำเป็นต้องเสริมกรดอะมิโนเมท-ไธโอนีนเพื่อปรับระดับกรดอะมิโนจำเป็นให้มีความสมดุลและตามความต้องการของปลา และจากผลการวิเคราะห์กรดอะมิโนจำเป็นในอาหาร (ตารางที่ 10) พบว่าปริมาณกรดอะมิโนจำเป็นในอาหารที่ใช้มันสำปะหลังทดแทนข้าวโพดและเสริมกรดอะมิโนเมทไธโอนีนในอาหารมีปริมาณใกล้เคียงกับอาหารที่ใช้ข้าวโพดเป็นแหล่งพลังงาน ซึ่งจากผลการทดลองพบว่าการใช้มันสำปะหลังทดแทนข้าวโพดและเสริมกรดอะมิโนเมทไธโอนีนสังเคราะห์ให้ได้ตามความต้องการจะทำให้ปลามีการเจริญเติบโตและมีสมรรถภาพการผลิตไม่แตกต่างจากปลาที่กินอาหารข้าวโพดแต่อย่างใด

เวียง (2542) กล่าวว่า ปริมาณกรดอะมิโนชนิดจำเป็นในอาหารจะต้องมีเพียงพอต่อความต้องการ สัตว์น้ำจึงจะสามารถสังเคราะห์โปรตีนในร่างกายได้ตามต้องการแล้วก่อให้เกิดการเจริญเติบโตดีเป็นปกติ

ข้อสังเกตจากงานทดลองอีกประการคือปลาดุกลูกผสมที่กินอาหารสำเร็จรูปลอยน้ำจะมีการเจริญเติบโตและสมรรถภาพการผลิตต่ำกว่าปลาที่กินอาหารที่ผลิตเองอย่างชัดเจน ทั้งนี้อาจเป็นเพราะชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ผลิตอาหารที่แตกต่างกัน ทำให้คุณภาพของอาหารแตกต่างกัน โดยเฉพาะคุณภาพของโปรตีน เมื่อพิจารณาจากค่าวิเคราะห์องค์ประกอบในอาหารถึงแม้ว่าจะมีเปอร์เซ็นต์โปรตีนที่ไม่ต่างกัน แต่อาหารสำเร็จรูปจะมีปริมาณเถ้าสูงถึง 13.33 เปอร์เซนต์ ซึ่งสูงกว่าอาหารสูตรอื่น ๆ มาก (ตารางที่ 10) และยังมีค่าแคลเซียมและฟอสฟอรัสรวมสูงมากด้วย (2.647 และ 1.347 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ) ซึ่งอาจสันนิษฐานได้ว่าอาจมีการใช้เนื้อป่นเป็นวัตถุดิบโปรตีนในการผลิตอาหารสำเร็จรูป เปรียบเทียบกับอาหารที่ผลิตเองจะใช้ปลาป่นเป็นแหล่งโปรตีน

เมื่อพิจารณาถึงค่าการย่อยได้ของปลาป่น ปลาจะมีค่าการย่อยได้ปรากฏ (apparent digestibility) อยู่ระหว่าง 85.5–90.8 เปอร์เซ็นต์ แต่การในเนื้อป่น ปลาจะมีค่าการย่อยได้ปรากฏเฉลี่ยในปลาทุกชนิด 72.4 เปอร์เซ็นต์ (Hertrampf and Piedad-Pascual, 2000) ซึ่งจะเห็นว่าการย่อยได้ของเนื้อป่นมีค่าต่ำกว่าปลาป่นมากทำให้ปลานำโปรตีนไปใช้ประโยชน์ได้น้อย เมื่อพิจารณาร่วมกับค่าประสิทธิภาพการใช้โปรตีน (PER) และการใช้ประโยชน์โปรตีนสุทธิ (NPU) ที่มีค่าต่ำเช่นกัน ซึ่งเป็นข้อบ่งชี้ว่าคุณภาพของโปรตีนในอาหารสำเร็จรูปต่ำกว่าอาหารผลิตเอง จึงส่งผลให้ปลาที่กินอาหารสำเร็จรูปมีการเจริญเติบโตที่ต่ำกว่าอย่างชัดเจน นอกจากนั้นปริมาณของแคลเซียมและฟอสฟอรัสที่มากเกินไปจะทำให้เกิดการขัดขวางการใช้ประโยชน์ได้ของแร่ธาตุชนิดอื่นๆ และทำให้วิตามินเสื่อมสภาพจากการเกิดออกซิเดชันได้ ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อการเจริญเติบโตของปลาอีกด้วย

สิ่งที่สามารถบ่งชี้ได้ว่าอาหารสำเร็จรูปลอยน้ำมีคุณภาพของโปรตีนที่ต่ำกว่าอาหารสูตรมันสำปะหลังและสูตรข้าวโพดซึ่งเป็นอาหารที่ผลิตเองคือปริมาณกรดอะมิโนจำเป็นในอาหารที่พบว่ามีค่าน้อยกว่าอาหารสูตรมันสำปะหลังและสูตรข้าวโพดอย่างชัดเจน (ตารางที่ 10) ถึงแม้ว่าอาหารทดลองทั้งหมดจะมีปริมาณโปรตีนที่ใกล้เคียงกันก็ตาม ทำให้ปลาได้รับกรดอะมิโนจำเป็นไม่เพียงพอส่งผลต่อการเจริญเติบโตของปลา วีรพงศ์ (2536) กล่าวว่าปลาที่ได้รับอาหารที่ขาดกรดอะมิโนจำเป็นแก่ร่างกายจะทำให้ปลามีการเจริญเติบโตลดลงอย่างมาก และมีผลทำให้อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อมีค่าสูงขึ้น ซึ่งผลจากการศึกษาก็พบว่าปลาที่กินอาหารสำเร็จรูปลอยน้ำซึ่งมีปริมาณกรดอะมิโนจำเป็นน้อย จะมีอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อต่ำ (1.76) เมื่อเปรียบเทียบกับอาหารสูตรข้าวโพดและสูตรมันสำปะหลัง 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์ อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) (1.30, 1.39 และ 1.32 ตามลำดับ)

เมื่อปลาอยู่ในสภาวะขาดกรดอะมิโนจำเป็นในอาหาร จะมีผลทำให้การใช้ประโยชน์ได้ของโปรตีนในอาหารลดลง โปรตีนในอาหารจะต้องถูกขับถ่ายออกมาในรูปแอมโมเนียมากขึ้น ทำให้ปลาต้องลดปริมาณการกินอาหารลงเพื่อไม่ให้เกิดสภาวะมีปริมาณแอมโมเนียในกระแสเลือดมากเกินไป เป็นผลให้ปลาที่กินอาหารสำเร็จรูปลอยน้ำมีปริมาณการกินอาหารลดลง (82.97 กรัม/ตัว) ต่ำกว่าปลาที่กินอาหารกลุ่มอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) (115.45, 128.45 และ 114.56 กรัม/ตัว ตามลำดับ) เมื่อสัตว์ได้รับกรดอะมิโนที่ไม่เพียงพอต่อนำไปใช้ในการสังเคราะห์โปรตีนในร่างกาย ทำให้ต้องสลายกรดอะมิโนที่ไม่สามารถนำไปใช้สังเคราะห์โปรตีนเพื่อนำไปเป็นพลังงาน โดยการเกิดกระบวนการกำจัดหมู่อะมิโน (oxidative deamination) ซึ่งจะเกิดขึ้นในตับ แอมโมเนียที่เกิดขึ้นจะเป็นพิษต่อร่างกายจึงจำเป็นต้องมีการกำจัดออกโดยอาศัยวัฏจักรยูเรีย (บุญล้อม, 2546)

ปลาที่กินอาหารสำเร็จรูปลอยน้ำมีปริมาณการกินอาหารลดลงส่งผลทำให้ปลาได้รับพลังงานไม่เพียงพอ ประกอบกับการขาดกรดอะมิโนจำเป็นด้วย ทำให้น้ำหนักที่เพิ่มขึ้นเฉลี่ย (48.36 กรัม/ตัว) มีค่าต่ำกว่าปลาที่กินอาหารสูตรอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) (89.06, 93.40 และ 87.51 กรัม/ตัว ตามลำดับ) และมีน้ำหนักเพิ่มขึ้นเฉลี่ยต่อวัน (0.58 กรัม/ตัว/วัน) มีค่าต่ำกว่าปลาที่กินอาหารสูตรอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$) (1.06, 1.11 และ 1.04 กรัม/ตัว ตามลำดับ) วีรพงศ์ (2536) และ Shiau and Lin (2001) กล่าวว่าปลาที่ได้รับพลังงานไม่เพียงพอจะมีการเจริญเติบโตลดลงเนื่องจากเมื่อขาดพลังงานมีผลทำให้ปลาต้องนำเอาโปรตีนหรือไขมันที่สะสมในร่างกายมาเผาผลาญให้ได้เป็นพลังงานแทนที่จะใช้เพื่อการเจริญเติบโตเพียงอย่างเดียว

สัดส่วนของโปรตีนต่อพลังงานในอาหารปลาสำเร็จรูปลอยน้ำมีสัดส่วนต่ำกว่าอาหารสูตรอื่น ๆ คือ มีพลังงาน 13.91 กิโลแคลอรี/กิโลกรัม ต่อโปรตีน 1 กรัม ในขณะที่อาหารสูตรข้าวโพดสูตรมันสำปะหลัง 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์มีสัดส่วนเป็น 14.97, 15.67 และ 15.41 กิโลแคลอรี/กิโลกรัม ต่อโปรตีน 1 กรัม ตามลำดับ สัดส่วนระหว่างระดับพลังงานจากคาร์โบไฮเดรตและไขมันกับระดับโปรตีนในอาหารมีผลต่อการเจริญเติบโต อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ และอัตราการรอดตายของปลาดุก วิมลและคณะ (2536) ได้ทำการทดลองหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของคาร์โบไฮเดรตจากปลายข้าวดิบต่อไขมันในอาหารปลาดุกอุยเทศและได้ข้อสรุปว่าอาหารที่มีโปรตีน 33 เปอร์เซ็นต์ พลังงานรวม 4,280 – 4,390 กิโลกรัม/กิโลกรัม (พลังงาน 12.9 – 13.3 กิโลแคลอรี/กิโลกรัม ต่อโปรตีน 1 กรัม) ควรมีคาร์โบไฮเดรตจากปลายข้าวดิบ 50 เปอร์เซ็นต์ และไขมัน 4.4 เปอร์เซ็นต์ คิดเป็นสัดส่วนได้เท่ากับ 11.2: 1 โดยอาหารชนิดนี้จะทำให้ปลามีการเจริญเติบโตดี ตับมีน้ำหนักและปริมาณไขมันปกติ

องค์ประกอบทางเคมีในตัวปลา

องค์ประกอบทางเคมีในตัวปลาของปลาดุกลูกผสมที่กินอาหารใช้มันสำปะหลังเป็นแหล่งพลังงานในระดับต่างๆ เปรียบเทียบกับข้าวโพดและอาหารสำเร็จรูปลอยน้ำ ดังตารางที่ 13 พบว่า องค์ประกอบทางเคมีในตัวปลามีค่าใกล้เคียงกันในทุกกลุ่มการทดลอง โดยปลาที่กินอาหารมันสำปะหลังทดแทนข้าวโพด 50 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณโปรตีนสูงกว่ากลุ่มอื่นอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ปลาที่กินอาหารมันสำปะหลังทดแทนข้าวโพด 100 เปอร์เซ็นต์มีปริมาณไขมันสูงกว่ากลุ่มอื่นๆ อย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) และปลาที่กินอาหารสำเร็จรูปลอยน้ำมีปริมาณเถ้าสูงกว่ากลุ่มอื่นอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิต ($p>0.05$)

ตารางที่ 13 องค์ประกอบทางเคมีในตัวปลาดุกลูกผสมที่กินสูตรข้าวโพด มันสำปะหลัง และอาหารสำเร็จรูปลอยน้ำ (ค่าเฉลี่ย ± SE)

สูตรอาหาร	องค์ประกอบทางเคมีในตัวปลาโดยน้ำหนักแห้ง (เปอร์เซ็นต์)			
	โปรตีน	ไขมัน	เถ้า	เยื่อไย
ข้าวโพด 100%	55.96 ± 0.66	29.12 ± 1.09	11.71 ± 0.61	0.34 ± 0.02
มันเส้น 50%	56.14 ± 1.16	29.60 ± 1.31	11.05 ± 0.46	0.39 ± 0.03
มันเส้น 100%	54.33 ± 0.91	31.50 ± 0.72	10.96 ± 0.44	0.45 ± 0.04
อาหารสำเร็จรูป	55.23 ± 1.46	28.05 ± 0.57	13.50 ± 1.20	0.38 ± 0.02
ตัวปลาเริ่มต้น	66.29	16.93	13.68	0.25
P- value	0.6449	0.1397	0.1085	0.0616

คุณภาพซาก

จากผลการศึกษาคุณภาพซากปลาดุกลูกผสมที่ใช้มันสำปะหลังเป็นแหล่งพลังงานในระดับ 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์เปรียบเทียบกับข้าวโพดและอาหารสำเร็จรูปลอยน้ำ ดังแสดงในตารางที่ 14 พบว่า ส่วนของเนื้อส่วนที่กินได้ หัวและกระดูก และตับมีเปอร์เซ็นต์ซากที่แตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) แต่เมื่อพิจารณาค่าไขมันในช่องท้อง พบว่าปลาที่กินอาหารใช้มันสำปะหลังทดแทนข้าวโพด 100 เปอร์เซ็นต์ และกินอาหารสำเร็จรูปลอยน้ำมีค่าไขมันในช่องท้องที่ต่ำกว่าปลาที่กินอาหารกลุ่มอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) อย่างไรก็ตามการสะสมไขมันในช่องท้องที่เกิดขึ้นนั้นอาจมีสาเหตุที่แตกต่างกัน

ตารางที่ 14 เปอร์เซ็นต์คุณภาพซากของปลาดุกลูกผสมที่กินสูตรข้าวโพด มันสำปะหลัง และอาหารสำเร็จรูปลอยน้ำ ตลอดระยะเวลาการทดลอง 12 สัปดาห์ (ค่าเฉลี่ย ± SE)

สูตรอาหาร	เปอร์เซ็นต์ซาก (เปอร์เซ็นต์)				
	เนื้อส่วนที่กินได้	หัวและกระดูก	ตับ	อวัยวะภายใน	ไขมันช่องท้อง
ข้าวโพด100%	53.25 ± 1.30	40.52 ± 1.38	1.30 ± 0.14	2.66 ± 0.16^{ก}	2.27 ± 0.25^{ก}
มันเส้น50%	52.46 ± 0.95	41.84 ± 0.86	1.31 ± 0.09	2.14 ± 0.03^{ข}	2.25 ± 0.14^{ก}
มันเส้น100%	55.14 ± 1.39	39.42 ± 1.52	1.24 ± 0.07	2.67 ± 0.13^{ก}	1.53 ± 0.23^{ข}
อาหารสำเร็จรูป	52.01 ± 1.00	43.02 ± 1.00	0.99 ± 0.16	2.66 ± 0.08^{ก}	1.32 ± 0.16^{ข}
P- value	0.2947	0.2314	0.2621	0.0151	0.0107

หมายเหตุ $^{ก ข}$ อักษรที่ต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ในกรณีไขมันในช่องท้องของปลาที่กินอาหารมันสำปะหลังทดแทนข้าวโพด 100 เปอร์เซ็นต์ มีปริมาณต่ำกว่าปลาที่กินอาหารกลุ่มอื่น ๆ นั้นเมื่อพิจารณาร่วมกับปริมาณเนื้อส่วนที่กินได้จะพบว่ามีปริมาณเนื้อส่วนที่กินได้สูงกว่าปลาที่กินอาหารกลุ่มอื่น ๆ ถ้าพิจารณาถึงคุณภาพของโปรตีนในอาหารจากปริมาณกรดอะมิโนจำเป็นที่มีค่าใกล้เคียงกับค่าจากการคำนวณ (ตารางที่ 10) ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลให้ปลามีการสร้างเนื้อส่วนที่กินได้มากกว่าปลาที่กินอาหารสูตรอื่น ๆ เพราะได้รับกรดอะมิโนจำเป็นที่เพียงพอ ทำให้ปลาต้องการพลังงานมาใช้ในการสังเคราะห์โปรตีนมากกว่าปลาที่กินอาหารสูตรอื่น ๆ ทำให้มีพลังงานเหลือที่จะสะสมเป็นไขมันในช่องท้องได้น้อยลง

ทิพย์พาพร (2549) ได้ศึกษาการใช้มันสำปะหลังในอาหารสุกรระยะขุน พบว่าการให้อาหารเม็ดที่ใช้มันสำปะหลังระดับ 25 เปอร์เซ็นต์ จะมีเปอร์เซ็นต์เนื้อแดง 55.04 เปอร์เซ็นต์ และมีความหนาไขมันสันหลัง เพียง 1.30 เซนติเมตรเท่านั้นเมื่อเปรียบเทียบกับสุกรที่กินอาหารที่ใช้มันสำปะหลังที่ระดับ 15 เปอร์เซ็นต์ มีเปอร์เซ็นต์เนื้อแดง 52.38 เปอร์เซ็นต์ และมีความหนาไขมันสันหลัง 1.41 เซนติเมตร ทัศนีย์ (2546) ได้ศึกษาการใช้ดักแด้ไหมบ้านทดแทนกากถั่วเหลืองในอาหารปลาดุกลูกผสมพบว่าปลาดุกที่กินอาหารดักแด้ไหมบ้านทดแทนกากถั่วเหลืองที่ระดับ 25 เปอร์เซ็นต์ จะมีเปอร์เซ็นต์เนื้อส่วนที่กินได้ 53.43 เปอร์เซ็นต์ และมีไขมันช่องท้อง 4.32 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับปลาดุกที่กินอาหารดักแด้ไหมบ้านทดแทนกากถั่วเหลืองที่ระดับ 75 เปอร์เซ็นต์ จะมีเปอร์เซ็นต์เนื้อส่วนที่กินได้ 51.59 เปอร์เซ็นต์ และมีไขมันช่องท้อง 4.70 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเมื่อสัตว์มีการสร้างเนื้อแดงมากขึ้น

การสะสมไขมันก็จะลดลงตามไปด้วย เนื่องจากต้องการพลังงงานไปใช้ในกระบวนการสังเคราะห์โปรตีนนั่นเอง

เมื่อพิจารณาถึงเปอร์เซ็นต์ตับของปลาที่กินอาหารสูตรมันสำปะหลัง 100 เปอร์เซ็นต์ พบว่ามีค่าต่ำกว่าปลาที่กินอาหารสูตรข้าวโพดและสูตรมันสำปะหลัง 50 เปอร์เซ็นต์ซึ่งเป็นแนวทางเดียวกับปริมาณไขมันในช่องท้อง แสดงให้เห็นว่าปลาต้องนำพลังงานไปใช้ในการสังเคราะห์โปรตีนจนไม่เหลือสะสมเป็นพลังงานสำรองในรูปของไกลโคเจนในตับ โดย Tennant *et al*. (1997) กล่าวว่าตับทำหน้าที่เป็นแหล่งสำรองคาร์โบไฮเดรต เพื่อนำออกมาใช้เป็นพลังงานได้อย่างรวดเร็วเมื่อร่างกายต้องการ ลักษณะของเซลล์ตับจะมีการเปลี่ยนแปลงตามโภชนะที่ร่างกายได้รับ การศึกษาระดับค่าดัชนีน้ำหนักตับจะบอกถึงสภาวะของตับ โภชนะที่ปลาได้รับ และสุขภาพของปลาได้

ส่วนกรณีไขมันในช่องท้องของปลาที่กินอาหารสำเร็จรูปลอยน้ำมีปริมาณต่ำกว่าปลาที่กินอาหารกลุ่มอื่น ๆนั้น มีความเป็นไปได้ว่าปลาได้รับพลังงานไม่เพียงพอ เมื่อพิจารณาจากพลังงานรวมในอาหารสำเร็จรูปลอยน้ำ (4,720 กิโลแคลอรี/กิโลกรัม) และมีสัดส่วนพลังงานต่อโปรตีน (13.91 กิโลแคลอลี/กิโลกรัม ต่อ 1 กรัมโปรตีน) มีค่าต่ำกว่าอาหารสูตรอื่น ๆ รวมทั้งปริมาณอาหารที่กินต่อวัน (feed intake) ยังต่ำกว่าปลาที่กินอาหารสูตรอื่นๆอีกด้วย (ตารางที่12) ทำให้ปลาได้รับพลังงานไม่เพียงพอ จึงไม่มีส่วนที่เหลือของพลังงานที่จะสะสมเป็นไขมันในช่องท้องซึ่งเมื่อประกอบกับเปอร์เซ็นต์ตับที่ต่ำกว่าปลาที่กินอาหารสูตรอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ซึ่งเกิดจากปลาไม่มีการสะสมไกลโคเจนในตับเนื่องจากอยู่ในสภาวะขาดพลังงานนั่นเอง Tennant *et al*. (1997) กล่าวว่า ถ้าปลาอยู่ในสภาวะที่ขาดแคลนโภชนะ ซึ่งอาจเนื่องมาจากได้รับอาหารที่ไม่เพียงพอต่อความต้องการ หรือมีสัดส่วนของโภชนะไม่เหมาะสม หรือปลามีอาการป่วยทำให้มีความต้องการโภชนะที่มากกว่าปกติ เซลล์ตับจะมีไกลโคเจนและโปรตีนสะสมอยู่น้อยหรือไม่มีการสะสมไกลโคเจนในตับเลย

เมื่อปลาได้รับกรดอะมิโนจำเป็นไม่เพียงพอ ทำให้ปลาที่กินอาหารสำเร็จรูปลอยน้ำได้รับโปรตีนที่ด้อยคุณภาพกว่าปลาที่กินอาหารสูตรข้าวโพดและสูตรมันสำปะหลัง และจากสาเหตุนี้ปลาจึงมีการสังเคราะห์โปรตีนในร่างกายได้ต่ำและอาจมีการนำโปรตีนมาเป็นแหล่งพลังงงานด้วย ทำให้มีปริมาณเนื้อส่วนที่กินได้ต่ำกว่าปลาที่กินอาหารกลุ่มอื่น ๆ ทำให้ปลาต้องลดปริมาณการกินอาหารลงเพื่อไม่ให้เกิดสภาวะมีปริมาณแอมโมเนียในกระแสเลือดมากเกินไปซึ่งเกิดจากการสลายโปรตีนไปใช้เป็นพลังงาน ซึ่งจะส่งผลทำให้เลือดมีสภาวะเป็นด่างปลาจึงปรับตัวด้วยการลดปริมาณ

การกินลงเพื่อลดปริมาณโปรตีนลงเพื่อลดการสลายโปรตีนเนื่องจากไม่สามารถนำไปสร้างเป็นโปรตีนใหม่ได้จึงทำให้มีปริมาณการกินอาหารลดลงทำให้ได้รับพลังงานที่ไม่เพียงพอ

ส่วนเปอร์เซ็นต์ของอวัยวะภายในของปลาที่กินอาหารมันสำปะหลังทดแทนข้าวโพด 50 เปอร์เซ็นต์ (2.14 เปอร์เซ็นต์) มีค่าต่ำกว่าปลาที่กินอาหารสูตรอื่น ๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติทางสถิติ ($p<0.05$) (2.66, 2.67 และ 2.66 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ) นั้น สาเหตุอาจมาจากอาหารสูตรมันสำปะหลัง 50 เปอร์เซ็นต์ มีพลังงานรวมสูงกว่าอาหารกลุ่มอื่น ๆ (5,180 กิโลแคลอรี/กิโลกรัม) ทำให้ปลาต้องลดปริมาณการกินอาหารลง ทั้งนี้เพื่อสามารถควบคุมการกินอาหารให้ได้พลังงานในแต่ละวันได้ครบตามความต้องการ (ตารางที่ 12) ซึ่งส่งผลให้อวัยวะภายในคือกระเพาะอาหารและลำไส้ส่วนต่าง ๆ มีขนาดลดลงด้วย

คุณภาพน้ำ

จากการตรวจสอบคุณภาพน้ำตลอดระยะเวลาการทดลองแสดงดังตารางที่ 15 พบว่าปริมาณออกซิเจนละลายน้ำของน้ำในบ่อเลี้ยงปลาดุกที่กินอาหารทุกกลุ่มการทดลองอยู่ในช่วงใกล้เคียงกับมาตรฐาน คือปริมาณออกซิเจนละลายน้ำควรมีค่าตั้งแต่ 5 มิลลิกรัมต่อลิตรขึ้นไป ปริมาณออกซิเจนที่ต่ำลงมาในช่วง 1 ถึง 4 มิลลิกรัมต่อลิตร สัตว์น้ำบางชนิดอาจจะพออาศัยอยู่ได้ แต่อาจจะไม่เจริญเติบโตหรือวางไข่ และถ้าปริมาณออกซิเจนต่ำลง เช่น ต่ำกว่า 1 มิลลิกรัมต่อลิตร ส่วนใหญ่จะเป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำ (โชคชัย, 2548)

ตารางที่ 15 ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (D.O.) ปริมาณแอมโมเนีย ปริมาณไนไตรท์ และค่าความเป็นกรดเป็นเบสของน้ำตลอดระยะเวลาการเลี้ยง 12 สัปดาห์ (ค่าเฉลี่ย ± SE)

สูตรอาหาร	คุณภาพน้ำ (มิลลิกรัมต่อลิตร)			
	D.O.	แอมโมเนีย	ไนไตรท์	pH
ข้าวโพด100%	5.17 ± 0.19	1.30 ± 0.17	0.13 ± 0.03	7.26 ± 0.02
มันเส้น50%	4.94 ± 0.21	1.51 ± 0.15	0.07 ± 0.001	7.14 ± 0.01
มันเส้น100%	5.48 ± 0.13	1.53 ± 0.10	0.11 ± 0.02	7.27 ± 0.01
อาหารสำเร็จรูป	5.63 ± 0.08	1.09 ± 0.04	0.36 ± 0.01	7.16 ± 0.02

ปริมาณแอมโมเนียในน้ำเลี้ยงปลาทุกกลุ่มการทดลองอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ ธำรง (2528) และถาวร (2530) รายงานว่าปริมาณแอมโมเนียที่พบในระหว่างการเลี้ยงปลาดุกแบบหนาแน่นในบ่อคอนกรีตมีค่าอยู่ในช่วง 0.685-19.45 มิลลิกรัมต่อลิตร

ปริมาณไนไตรท์ในน้ำในบ่อเลี้ยงปลาดุกทุกกลุ่มการทดลองมีค่าค่อนข้างต่ำ ส่วนใหญ่ไนไตรท์จะตรวจพบในปริมาณต่ำ เพราะในธรรมชาติไนไตรท์จะไม่คงที่แต่จะถูกย่อยสลายต่อไปโดยพวกแบคทีเรียได้เป็นไนเตรต (โชคชัย, 2548) นอกจากนี้ธำรง (2528) และถาวร (2530) รายงานว่าปริมาณไนไตรท์ที่พบในระหว่างการเลี้ยงปลาดุกแบบหนาแน่นในบ่อคอนกรีตมีค่าอยู่ในช่วง 0.005-0.300 มิลลิกรัมต่อลิตร

ค่าความเป็นกรดเป็นด่างในน้ำในบ่อเลี้ยงปลาดุกทุกกลุ่มการทดลองอยู่ในช่วงที่ยอมรับได้ โดยค่าความเป็นกรดเป็นเบสที่เหมาะสมสำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจะอยู่ในช่วง 6.5-9.0 (โชคชัย, 2548) และสัตว์น้ำจะตายเมื่อกรดเป็นด่างต่ำกว่า 4 และสูงกว่า 11 (ไมตรีและจารุวรรณ, 2528 และมั่นสินและไพพรรณ, 2536)

โดยสรุปคุณภาพของน้ำในบ่อเลี้ยงปลาดุกระหว่างการทดลอง คือ ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ ปริมาณแอมโมเนีย ปริมาณไนไตรท์ และค่าความเป็นกรดเป็นเบส มีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานทั้งสิ้น

การทดลองที่ 2 การศึกษาผลการใช้มันสำปะหลังในสูตรอาหารต่อการตอบสนองของระบบภูมิคุ้มกันในปลาดุกลูกผสม

1. การเจริญพัฒนาของเซลล์ลิมโฟซัยท์ชนิดที (T-lymphocyte)

จากผลการศึกษาการทำงานของเซลล์ลิมโฟซัยท์ ชนิด ที ที่ตอบสนองต่อ concanavalin A พบว่าในวันที่ 3 หลังจากกระตุ้นด้วยเชื้อ *Aeromonas hydrophila* ปลาที่กินอาหารใช้มันสำปะหลังทดแทนข้าวโพดทั้งหมดในสูตรอาหาร มีแนวโน้มว่าการเจริญของเซลล์ลิมโฟซัยท์ ชนิด ที สูงกว่ากลุ่มอื่น (P=0.06) (ตารางที่ 16)

ตารางที่ 16 การเจริญของเซลล์ลิมโฟซัยท์ ชนิด ที ในเลือดปลาดุกลูกผสมที่ตอบสนองต่อการให้ concanavalin A ในวันที่ 0, 3 และ 6 หลังจากกระตุ้นด้วยเชื้อ *Aeromonas hydrophila* (ค่าเฉลี่ย ± SE)

สูตรอาหาร	การเจริญของเซลล์ลิมโฟซัยท์ ชนิด ที (ΔOD^{1})		
	วันที่ 0	วันที่ 3	วันที่ 6
ข้าวโพด 100%	0.042 ± 0.002	0.173 ± 0.005	0.178 ± 0.002
มันเส้น 50%	0.045 ± 0.001	0.178 ± 0.001	0.180 ± 0.003
มันเส้น 100%	0.049 ± 0.006	0.183 ± 0.002	0.182 ± 0.002
อาหารสำเร็จรูป	0.046 ± 0.002	0.172 ± 0.001	0.177 ± 0.001
P- value	0.8613	0.0611	0.2459

หมายเหตุ [1] คือค่าความแตกต่างของค่าการดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่น 450 นาโนเมตร ระหว่างตัวอย่างที่ถูกกระตุ้นด้วยไมโตเจนกับตัวอย่างปกติที่ไม่ถูกกระตุ้น

การเจริญของลิมโฟซัยท์ ชนิด ที ที่เพิ่มขึ้น อาจเนื่องมาจากระดับ GSH ที่เพิ่มมากขึ้นเช่นกัน โดย Dröge *et al*. (1994) และ Dröge and Breitkreutz (2000) กล่าวว่า GSH ที่เพิ่มขึ้นสามารถกระตุ้นการทำงานของ CD3 (บ่งบอกว่าเป็นลิมโฟซัยท์ ชนิด ที), $CD4^{+}$ (บ่งบอกว่าเป็น helper T cell), $CD8^{+}$ (บ่งบอกว่าเป็น cytotoxic T cell) และ IL 2 receptor ที่ β-chain บนเซลล์ลิมโฟซัยท์ซึ่ง CD3 นั้นทำหน้าที่ในการกระตุ้น intracellular $Ca2^{+}$ mobilization ทำให้การเจริญพัฒนาของ T-lymphocyte เพิ่มขึ้น

Chen *et al*. (1994) ได้รายงานการศึกษาผลของกลูตาไธโอนต่อการผลิต IL-2 ในมนุษย์ พบว่าเมื่อระดับ กลูตาไธโอนเพิ่มมากขึ้นจะส่งผลให้มีการผลิต IL-2 เพิ่มมากขึ้นด้วย ซึ่งชี้ให้เห็นว่ากลูตาไธ-โอนที่เพิ่มขึ้นมีผลให้ระดับของ IL-2 เพิ่มขึ้นด้วย แสดงว่ากลูตาไธโอนมีผลต่อระบบภูมิคุ้มกัน โดยผ่านการควบคุมการสังเคราะห์ IL-2 นอกจากนี้ยังพบว่าการเพิ่มจำนวน (proliferation) และการเปลี่ยนแปลงของรูปร่าง (differentiation) ของเซลล์ภูมิคุ้มกันมีความเกี่ยวเนื่องกับกลูตาไธโอน โดยเซลล์ลิมโฟซัยท์ชนิดที และเซลล์ลิมโฟซัยท์ชนิดบีมีความต้องการระดับกลูตาไธโอนภายในเซลล์ที่เพียงพอสำหรับการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเซลล์ รวมทั้งการกระตุ้น (activation) ของ cytotoxic T killer cell และ การทำหน้าที่พิเศษของเซลล์ลิมโฟซัยท์ชนิดที (specific T-cell function) ซึ่งประกอบด้วยการสังเคราะห์ ดีเอ็นเอสำหรับ cell replication และเมแทบอลิซึมของ interleukin 2 (IL-2) ซึ่งมีความสำคัญสำหรับการเพิ่มจำนวนเซลล์ (Kidd, 1997)

จากการศึกษาของ Multhoff *et al*. (1995) พบว่าระดับ กลูตาไธโอนมีผลต่อระดับการเกิด lymphocyte activation โดยปริมาณกลูตาไธโอนในระดับต่ำ มีผลต่อศักยภาพในการเพิ่มจำนวนเซลล์ (proliferation capacity) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) และยังมีรายงานว่า กลูตาไธโอนมีความเกี่ยวข้องกับการทำงานและการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของลิมโฟซัยท์ โดยปริมาณกลูตาไธโอนในเซลล์ที่เพิ่มขึ้นจะช่วยเพิ่มการทำงานของลิมโฟซัยท์ เมื่อมีการเหนี่ยวนำด้วยไมโตเจน รวมทั้งมีผลทำให้เกิดการเพิ่มจำนวนของเซลล์มากขึ้น ขณะที่ปริมาณของกลูตาไธโอนในเซลล์ลดลงจะส่งผลให้การเพิ่มจำนวนของเซลล์ลดลง แต่ไม่มีผลต่อการทำงานของเซลล์ (Fidelus *et al*., 1987)

2. ปริมาณกลูตาไธโอนรวม (total glutathione)

จากผลการศึกษาปริมาณกลูตาไธโอน (glutathione: GSH) ในเม็ดเลือดแดงพบว่าปลาที่กินอาหารใช้มันสำปะหลังทดแทนข้าวโพดทั้งหมดในสูตรอาหารมีปริมาณ GSH ในเลือดสูงกว่าปลาที่กินอาหารสูตรอื่นอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($P<0.01$) ทั้งในช่วงอายุ 8, 10 และ 12 สัปดาห์ (ตารางที่ 17)

ตารางที่ 17 ปริมาณกลูตาไธโอนในเม็ดเลือดแดงของปลาดุกลูกผสมอายุ 8, 10 และ 12 สัปดาห์ (ค่าเฉลี่ย ± SE)

สูตรอาหาร	ปริมาณกลูตาไธโอนในเม็ดเลือดแดง (μM)		
	8 สัปดาห์	10 สัปดาห์	12 สัปดาห์
ข้าวโพด 100%	101.71 ± 0.51^{ก}	109.76 ± 0.97^{ค}	102.10 ± 1.76^{ข}
มันเส้น 50%	108.55 ± 1.02^{ข}	115.91 ± 1.46^{ข}	103.19 ± 0.90^{ข}
มันเส้น 100%	114.90 ± 0.70^{ก}	118.91 ± 1.20^{ก}	109.85 ± 0.69^{ก}
อาหารสำเร็จรูป	103.06 ± 0.42^{ค}	107.63 ± 1.12^{ค}	100.75 ± 1.20^{ข}
P- value	0.0001	0.0001	0.0009

หมายเหตุ ^{ก,ข,ค} อักษรที่ต่างกันในแนวตั้งเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ ($p<0.01$)

ปริมาณ GSH ในเม็ดเลือดแดงที่เพิ่มขึ้นเมื่อสัตว์ได้กินอาหารที่ใช้มันสำปะหลังอาจเนื่องมาจากกรดไฮโดรไซยานิค (hydrocyanic acid: HCN) ที่เหลืออยู่ในปริมาณเล็กน้อย ในมันสำปะหลังแห้ง HCN เมื่อเข้าไปในร่างกาย จะทำปฏิกิริยากับไธโอซัลเฟตถูกเปลี่ยนไปเป็นสารไธโอไซยาเนต (thiocyanate) เพื่อลดความเป็นพิษของ HCN แต่ในขณะเดียวกันก็เป็นสารที่ช่วยกำจัดอนุมูลอิสระต่างๆ โดยไธโอไซยาเนตจะช่วยกำจัดไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ซึ่งเกิดจากกระบวนการเมแทบอลิซึมในร่างกายให้เปลี่ยนเป็นน้ำและสารไฮโปไธโอไซยาเนต ในขณะเดียวกันร่างกายจะกระตุ้นการสังเคราะห์กลูตาไธโอนเพิ่มขึ้นเพื่อช่วยเปลี่ยนสารไฮโปไธโอไซยาเนตกลับไปเป็น substrate เพื่อยับยั้งไม่ให้ทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์อีกครั้ง (Murry *et al.*, 1996 และ Mary *et al.*, 2001)

ดังนั้นการมีปริมาณไธโอไซยาเนตเพิ่มมากขึ้น จึงเป็นการกระตุ้นการสังเคราะห์ GSH ให้มากขึ้นด้วย สอดคล้องกับงานวิจัยการใช้มันสำปะหลังในอาหารสุกร อรอนงค์และคณะ (2548) พบว่าสุกรที่กินข้าวโพดเป็นแหล่งพลังงานมีปริมาณ GSH ในเม็ดเลือดแดงต่ำกว่าสุกรที่กินมันสำปะหลังเป็นแหล่งพลังงานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) และการใช้มันสำปะหลังในอาหารไก่กระทง พบว่าไก่กระทงอายุ 21 วัน ที่กินอาหารที่ใช้มันสำปะหลัง มีปริมาณ GSH ในเม็ดเลือดแดงสูงกว่าไก่กระทงที่กินอาหารที่ใช้ข้าวโพดเป็นแหล่งพลังงานอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) (สรัสนันท์, 2549)

3. ศึกษาการจับกินสิ่งแปลกปลอมของเซลล์เม็ดเลือดขาว (Phagocytotic activity)

จากการศึกษาการจับกินสิ่งแปลกปลอมของเซลล์เม็ดเลือดขาวของปลาดุกลูกผสม (ตารางที่ 18) พบว่าทั้งในวันที่ 0 และวันที่ 6 หลังการกระตุ้นด้วย *Aeromonas hydrophila* การจับกินสิ่งแปลกปลอมของเซลล์เม็ดเลือดขาวของปลาดุกลูกผสมในอาหารทุกกลุ่มไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติแต่อย่างใด ($p>0.05$) แต่เมื่อเปรียบเทียบระหว่างวันที่ 0 หลังการกระตุ้นกับวันที่ 6 หลังการกระตุ้น พบว่าปลาที่กินอาหารสูตรมันสำปะหลังทดแทนข้าวโพด 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์ มีการจับกินสิ่งแปลกปลอมของเซลล์เม็ดเลือดขาวดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

ตารางที่ 18 การจับกินสิ่งแปลกปลอมของเซลล์เม็ดเลือดขาวหลังจากการกระตุ้นด้วย *Aeromonas hydrophila* (ค่าเฉลี่ย ± SE)

สูตรอาหาร	Phagocytotic activity (%)		เปรียบเทียบวันที่ 0 และวันที่ 6
	วันที่ 0	วันที่ 6	P- value
ข้าวโพด 100%	45.15 ± 2.15	46.30 ± 2.78	0.5330
มันเส้น 50%	44.56 ± 1.54[ก]	49.49 ± 3.00[ข]	0.0264
มันเส้น 100%	45.14 ± 1.32[ก]	48.91 ± 0.73[ข]	0.0058
อาหารบริษัท	44.52 ± 1.90[ก]	47.01 ± 1.82[ข]	0.0218

หมายเหตุ [ก,ข,] อักษรที่ต่างกันในแนวนอนเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

การจับกินสิ่งแปลกปลอมของเซลล์เม็ดเลือดขาวหลังได้รับการกระตุ้นทันที (วันที่ 0) ไม่แสดงความแตกต่างกันในอาหารทุกสูตรเป็นไปได้ว่าการทำงานของเซลล์เม็ดเลือดขาวในปลายังไม่ได้รับการกระตุ้นจึงทำให้การทำงานของเซลล์เม็ดเลือดขาวยังไม่แสดงความแตกต่างกัน แต่เมื่อในวันที่ 6 หลังการกระตุ้น *Aeromonas hydrophila* พบว่าในปลาที่กินอาหารสูตรมันสำปะหลังทั้ง 50 และ 100 เปอร์เซ็นต์มีการจับกินสิ่งแปลกปลอมที่ดีขึ้น เนื่องจากเซลล์ลิมโฟซัยท์ได้รับการกระตุ้นให้มีการเจริญที่มากขึ้น เมื่อพิจาราณาจากการศึกษาการเจริญของลิมโฟซัยท์ชนิดที ในวันที่ 3 หลังการกระตุ้นจะเห็นว่าปลาที่กินอาหารมันสำปะหลัง 100 เปอร์เซ็นต์ จะมีแนวโน้มของการเจริญของลิมโฟซัยท์ที่ดีกว่าปลาที่กินอาหารสูตรอื่น ๆ ดังนั้นเมื่อเซลล์ลิมโฟซัยท์มีการเจริญที่ดีขึ้นก็ส่งผลให้เกิดกิจกรรมการป้องกันการบุกรุกของสิ่งแปลกปลอมได้ดีขึ้นเช่นกัน

กรณีการจับกินสิ่งแปลกปลอมของเซลล์เม็ดเลือดขาวที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถติในอาหารสำเร็จรูปเมื่อเปรียบเทียบระหว่างวันที่ 0 และ วันที่ 6 ไม่สามารถบอกได้ว่าเกิดจากสาเหตุใดเนื่องจากไม่มีข้อมูลว่าอาหารนั้นประกอบขึ้นจากวัตถุดิบอะไรบ้าง ส่วนการจับกินสิ่งแปลกปลอมของเซลล์เม็ดเลือดขาวปลาที่กินอาหารสูตรข้าวโพดนั้นเมื่อพิจารณาร่วมกับปริมาณกูลตาไธโอนที่มีการเพิ่มขึ้นน้อยกว่าปลาที่กินอาหารมันสำปะหลังและมีการเจริญของลิมโฟซัยท์ที่ต่ำกว่า ส่งผลให้เมื่อปลาได้รับเชื้อโรคเข้าสู่ร่างกายแล้วทำให้การกระตุ้นการทำงานของกระบวนการจับกินสิ่งแปลกปลอมด้วยเซลล์เม็ดเลือดขาวต่ำลงไปด้วย

กระบวนการกำจัดสิ่งแปลกปลอมด้วยวิธีการจับกิน (phagocytosis) ถือว่าเป็นระบบภูมิคุ้มกันด่านแรกของร่างกายที่จะทำงานทันทีเมื่อพบกับแอนติเจนหรือสิ่งแปลกปลอมที่เข้าสู่ร่างกาย เซลล์เม็ดเลือดขาวที่ทำหน้าที่ดังกล่าวเรียกว่า ฟาโกซัยติก เซลล์ (phagocytic cell) เซลล์กลุ่มนี้ที่สำคัญคือ นิวโทรฟิล (neutrophill) โดยทั่วไปนิวโทรฟิลจะวิ่งไปมาอยู่ในกระแสเลือดไม่เข้าไปในเนื้อเยื่อแต่จะวิ่งเข้าสู่บริเวณที่มีการติดเชื้อหรืออักเสบอย่างรวดเร็วเมื่อได้รับสัญญาณเรียกจากเซลล์กลุ่มอื่นๆ ในบริเวณที่มีความผิดปกติเหล่านั้น (สันนิภา, 2549)

จากการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อปลาได้รับปริมาณของกรดไฮโดรไซยานิคที่มีอยู่อาหารสูตรมันสำปะหลังในระดับต่ำเป็นระยะเวลาหนึ่งจะส่งผลให้มีการตอบสนองของระบบภูมิคุ้มกันที่ดีขึ้น ทำให้สัตว์มีความต้านทานโรคและมีสุขภาพที่ดี เมื่อสัตว์มีสุขภาพที่ดีขึ้นส่งผลให้การเจริญเติบโตดีขึ้นด้วย และยังสามารถลดการใช้ยาปฏิชีวนะในการเลี้ยงปลาได้อีกด้วย