บทที่ 4

วิจารณ์ผลการทดลอง

4.1 วิจารณ์ผลการทดลองที่ 1

จากการทดลองครั้งนี้พบว่ากุ้งขาวที่ได้รับอาหารผสมสารสีจากแหล่งวัตถุดิบธรรมชาติคือสารสกัดจากสาหร่ายสไปรูไลนา 100 พีพีเอ็ม และสารสกัดพริกหวาน 100 พีพีเอ็ม นาน 8 สัปดาห์ มีการเจริญเติบโต และอัตรารอดตายไม่แตกต่างจากกุ้งที่ได้รับอาหารผสมเบตาแคโรทีนสังเคราะห์ 100 พีพีเอ็ม และอาหารสูตรควบคุมที่ไม่ผสมสารสี แสดงให้เห็นว่าแหล่งของสารสีที่นำมาใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ทั้งแหล่งที่ได้จากวัตถุดิบธรรมชาติ หรือการสังเคราะห์ไม่มีผลในการเร่งการเจริญเติบโตของกุ้งขาวได้ ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่พบว่ากุ้งขาวที่ได้รับอาหารทดลอง 4 สูตรแตกต่างกันข้างต้นมีอัตราการกินอาหาร การเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ และประสิทธิภาพโปรตีนได้ไม่แตกต่างกัน แสดงว่าสารสีจากแหล่งต่างๆ ข้างต้นไม่มีประสิทธิภาพในการเร่งการเจริญเติบโตของกุ้งขาว เช่นเดียวกับรายงานการศึกษาของ Pan และคณะ (2001) ที่ไม่พบความแตกต่างของอัตราการเจริญเติบโตของกุ้งขาวกลุ่มที่ได้รับอาหารสูตรควบคุมและอาหารที่ผสมแอสตาแซนทีน และการศึกษาของ Boonyaratpalin และคณะ (2001) ที่พบว่าการผสมเบตาแคโรทีนที่เป็นรงควัตถุหลักของสาหร่ายดูนาเรลลา (*Dunaliella salina*) เข้มข้น 125 และ 175 พีพีเอ็ม ในอาหารให้กุ้งกุลาดำกินติดต่อกันนาน 10 สัปดาห์ ไม่มีผลไปเร่งการเจริญเติบโตเมื่อเทียบกับอาหารชุดควบคุม เช่นเดียวกับผลการศึกษาผสมสารสีสังเคราะห์คือแคนทาแซนทีนเข้มข้น 50 และ 100 พีพีเอ็ม หรือแอสตาแซนทีนเข้มข้น 25, 50 และ 100 พีพีเอ็ม ในอาหารให้กุ้งกุลาดำขนาด 3.7-4 กรัม นาน 8 สัปดาห์ พบว่าไม่ทำให้กุ้งมีการเจริญเติบโตหรือมีประสิทธิภาพในการใช้อาหารได้มากกว่ากุ้งที่ได้รับอาหารไม่ผสมสารสี (Boonyaratpalin *et al*., 1994) เช่นเดียวกับกุ้งกุลาดำขนาดเฉลี่ย 2.5 กรัม ที่ได้รับอาหารผสมแอสตาแซนทีนที่สกัดจากยีสต์ (*Phaffia rhodozyma*) เข้มข้น 39, 78.65 และ 161.60 พีพีเอ็ม ติดต่อกัน 3 เดือน มีอัตรารอด การเจริญเติบโต และประสิทธิภาพการใช้อาหารไม่แตกต่างจากกุ้งที่ได้รับอาหารสูตรควบคุม (Kittipreechakul, 2002) จากรายละเอียดข้างต้นแสดงให้เห็นว่าสารสีจากแหล่งต่างๆ ไม่มีผลส่งเสริมการเจริญเติบโตของกุ้งขาวหรือกุ้งกุลาดำ ซึ่งแตกต่างจากรายงานของ Petit และคณะ (1997 อ้างโดย Pan *et al*., 2001) ที่ทำการทดลองในกุ้งคูรูมา (*P. japonicus*) พบว่ากุ้งระยะโพสต์ลาร์วาที่ได้รับอาหารผสมแอสตาแซนทีนมีอัตราการเจริญเติบโต และมีวงจรการลอกคราบสั้นลง โดยที่กุ้งคูรูมาระยะโพสต์ลาร์วาที่ได้รับอาหารผสมแอสตาแซนทีนเข้มข้น 5, 15, 60 และ 300 พีพีเอ็ม เป็นเวลา 30 วัน มีการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้น โดยอัตราการเจริญเติบโตของกุ้งเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของแอสตาแซนทีนในอาหารมีระดับสูง

ขึ้น และพบว่ากุ้งลอปสเตอร์ (*Homarus americanus*) ระยะจูเวนไนล์ที่ได้รับอาหารผสมแอสตาแซนทีนที่สกัดจากเปลือกกุ้งเครย์ฟิชมีการเจริญเติบโตสูงกว่ากุ้งชุดควบคุม (Bordner *et al.*, 1986 อ้างโดย Boonyaratpalin *et al.*, 2001) ส่วน Chien และ Jeng (1992) พบว่ากุ้งชนิดเดียวกันที่ได้รับอาหารผสมแอสตาแซนทีนมีอัตรารอดตายสูงกว่ากุ้งที่ได้รับอาหารผสมเบตาแคโรทีน และสาหร่ายดูนาเรลลา ส่วน Yamada และคณะ (1990) พบว่ากุ้งระยะจูเวนไนล์ที่ได้รับอาหารผสมแอสตาแซนทีน 50, 100, 200 และ 400 พีพีเอ็ม เป็นเวลา 8 สัปดาห์ มีอัตรารอดตายสูงกว่ากุ้งที่ได้รับอาหารไม่ผสมแอสตาแซนทีนทุกความเข้มข้น จากข้อมูลดังกล่าวชี้ให้เห็นว่าสารสีอาจมีผลในการเร่งการเจริญเติบโต หรือเพิ่มประสิทธิภาพการใช้อาหารในสัตว์น้ำบางชนิดเท่านั้น โดย Yanar และคณะ (2004) รายงานว่ากุ้งที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำกร่อย 4 ชนิดได้แก่ *Metapenaeus affinis*, *M. dopsoni*, *P. indicus*, *Parapenaeopsis stylifera* มีปริมาณแคโรทีนอยด์รวมในตัวเฉลี่ย 13.3 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ในขณะที่กุ้ง *M. monoceros* มีปริมาณแคโรทีนอยด์รวมในตัวเฉลี่ย 4.2 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ส่วน Negre-Sadargues และคณะ (2000) ทำการเปรียบเทียบปริมาณแคโรทีนอยด์ในกุ้งที่อาศัยอยู่ในทะเลลึกพบว่ากุ้ง *Rimicaris exculata* มีปริมาณของแคโรทีนอยด์สะสมมากกว่ากุ้ง *Chorocaris chacei* และกุ้ง *Alvinocaris markensis*

สำหรับผลการทดลองพบว่ากุ้งที่ได้รับอาหารผสมสารสีที่สกัดจากปาล์มน้ำมันเข้มข้น 100 พีพีเอ็ม มีอัตราการเจริญเติบโตต่ำกว่ากุ้งขาวที่ได้รับอาหารทดลองที่มีการผสมสารสีจากแหล่งอื่นๆ นั้น อาจเกิดขึ้นเนื่องจากสารสกัดที่ได้จากปาล์มน้ำมันมีองค์ประกอบไขมันสูง ทำให้เมื่อนำสารสกัดจากปาล์มน้ำมันผสมในอาหารกุ้งขาวเข้มข้น 100 พีพีเอ็ม ส่งผลให้องค์ประกอบของไขมันในอาหารสูงถึง 17.26 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่องค์ประกอบดังกล่าวในอาหารสูตรที่ใช้แหล่งสารสีอื่นในปริมาณเท่ากันมีปริมาณไขมันระหว่าง 11.97-13.79 เปอร์เซ็นต์ โดยทั่วไปแล้วปริมาณไขมันเหมาะสมในอาหารสัตว์น้ำควรอยู่ในช่วง 5-9 เปอร์เซ็นต์ (Reigh and Stickney, 1989; Wu *et al.*, 2000) ปริมาณไขมันที่สูงเกินระดับความต้องการในอาหารจะส่งผลให้สัตว์น้ำรวมทั้งกุ้งใช้ประโยชน์สารอาหารชนิดอื่นๆ ได้น้อยลง โดยวุฒิพรและคณะ (2541) กล่าวว่าการเพิ่มระดับพลังงานในอาหารปลาโดยเพิ่มปริมาณไขมันจนมากจนเกินไปจะทำให้สัดส่วนของโปรตีนและระดับของพลังงานไม่สมดุล จึงทำให้ความสามารถในการนำเอาไขมันและสารอาหารอื่นๆ ไปใช้ประโยชน์ได้น้อยลงส่งผลทำให้การเจริญเติบโตของปลาลดลง ส่วน Barbosa และคณะ (1999) รายงานว่าระดับไขมันในอาหารมีส่วนเกี่ยวข้องอย่างมากกับการดูดซึมแอสตาแซนทีนของปลาเรนโบว์เทร้าท์ ทั้งนี้ในอาหารที่มีไขมันสูงปลาจะสามารถดูดซึมและนำเอาแอสตาแซนทีนเอสเทอร์ไปใช้ได้มีประสิทธิภาพไม่แตกต่างจากแอสตาแซนทีนอิสระ แต่ในกรณีที่อาหารมีไขมันน้อยปลาเรนโบว์เทร้าท์จะนำแอสตาแซนทีนอิสระไปใช้ประโยชน์ได้มากกว่า ในขณะที่ Reigh และ Stickney (1989) และ Wu และคณะ (2000) รายงานว่ากุ้งก้ามกรามที่ได้รับอาหารที่มีระดับของไขมัน 6 เปอร์เซ็นต์ จะมีการเจริญเติบโตดี

ที่สุด ในขณะที่กุ้งกลับมีอัตราการเจริญเติบโตลดลงเมื่อได้รับอาหารที่มีระดับไขมันเกิน 10 เปอร์เซ็นต์ เช่นเดียวกับ สุพิศ (2535) พบว่าการเพิ่มปริมาณไขมันในอาหารกุ้งเกิน 10 เปอร์เซ็นต์ ทำให้กุ้งมีการเจริญเติบโตช้า พบตับและตับอ่อนมีลักษณะผิดปกติเนื่องมาจากมีไขมันสะสมอยู่มาก ซึ่งการสะสมไขมันไว้จำนวนมากในตับจะนำไปสู่กระบวนการเกิดไลปิดเปอร์ออกซิเดชั่นมากขึ้น ส่งผลให้อนุมูลอิสระถูกผลิตออกมามากซึ่งมีผลยับยั้งกระบวนการต่างๆ ในระบบภูมิคุ้มกัน มีผลทำลายผนังเซลล์ต่างๆ (Yu, 1994) รวมทั้งเซลล์ตับทำให้ตับที่ทำหน้าที่หลักในการผลิตน้ำย่อย ดูดซึม และจัดเก็บสารอาหารมีประสิทธิภาพการทำงานลดลงด้วย สอดคล้องกับผลการทดลองนี้ที่พบกุ้งที่ได้รับอาหารผสมสารสกัดจากปาล์มน้ำมันมีอัตราการกินอาหารต่ำ และมีอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อสูงกว่ากุ้งชุดการทดลองอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เช่นเดียวกับประสิทธิภาพการใช้โปรตีนที่พบว่ามีแนวโน้มลดลงต่ำกว่าทุกชุดการทดลองอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ

การเสริมแคโรทีนอยด์จากแหล่งต่างๆ ในอาหารกุ้งขาวจากข้อมูลข้างต้นแม้ไม่พบว่ามีผลเสริมการเจริญเติบโต อย่างไรก็ตามจากการเทียบค่าสีด้วยพัดสีพบว่าแคโรทีนอยด์ที่เสริมในอาหารทั้ง 4 แหล่งมีผลให้สีตัวของกุ้งเข้มขึ้นเมื่อเทียบกับกุ้งที่ได้รับอาหารไม่ผสมสารสี ในขณะที่การวัดค่าสีจากเปลือกกุ้งพบว่ากุ้งขาวที่กินอาหารผสมเบตาแคโรทีนสังเคราะห์และสารสกัดสาหร่ายสไปรูไลนามีค่าความสว่างของสีตัวต่ำในขณะที่สีแดงและสีเหลืองมีค่าสูงกว่ากุ้งที่กินอาหารผสมสารสกัดปาล์มน้ำมัน สารสกัดพริกหวาน และสูตรควบคุม หรืออีกนัยหนึ่งอาจกล่าวได้ว่ากุ้งทั้ง 2 ชุดการทดลองข้างต้นสามารถนำแคโรทีนอยด์ไปใช้และสะสมได้มากกว่า ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์แคโรทีนอยด์ที่สะสมอยู่ในเนื้อกุ้งพบว่าปริมาณในกุ้งชุดที่ได้รับอาหารผสมสารสกัดสาหร่ายสไปรูไลนา และเบตาแคโรทีนสังเคราะห์มีค่าสูงกว่ากุ้งในชุดการทดลองอื่นๆ จากข้อมูลดังกล่าวให้เห็นว่าสารสีจากการสังเคราะห์และที่สกัดจากสาหร่ายสไปรูไลนามีประสิทธิภาพในการเร่งสีในกุ้งขาวได้ดีกว่าแหล่งอื่นๆ ซึ่งการที่แคโรทีนอยด์แหล่งต่างกันมีผลให้สีตัวของกุ้งขาวเข้มขึ้นมากน้อยต่างกันนั้น อาจเป็นเพราะชนิดของสารสีต่างๆ ที่มีอยู่ในแหล่งของวัตถุดิบต่างกัน รวมทั้งอาจอยู่ในรูปแบบที่ต่างกัน และกุ้งขาวมีความสามารถในการใช้สารสีชนิดต่างๆ ได้ไม่เท่ากัน เช่นเดียวกับการศึกษาทดลองในกุ้งคุรูมาที่พบว่ากุ้งสามารถนำแอสตาแซนทีนไปใช้เป็นแหล่งของแคโรทีนอยด์ได้ดีกว่าเบตาแคโรทีน (Yamada *et al*., 1990; Chein and Jeng, 1992) ส่วน Liao และคณะ (1993) พบว่ากุ้งกุลาดำสามารถนำเบตาแคโรทีนและเซียแซนทีนจากสาหร่ายสไปรูไลนาไปใช้ได้ดีกว่าเบตาแคโรทีนสังเคราะห์ยีสต์ และน้ำมันจากกุ้งเคย (krill oil) ซึ่งมีแอสตาแซนทีนอยู่มากในขณะที่ปลาเรนโบว์เทร้าท์และแซลมอนสามารถนำแอสตาแซนทีนไปใช้ได้ดีกว่าแคนทาแซนทีน (Storebakken *et al*., 1987; Baker *et al*., 2002) อย่างไรก็ตามแม้ว่าแคโรทีนอยด์แหล่งต่างๆ ที่นำมาใช้ในการทดลองนี้มีรูปแบบที่ต่างกัน แต่หากปริมาณของชนิดสารสีที่กุ้งขาวสามารถนำไปใช้ได้ดีมีไม่เท่ากันก็ทำให้กุ้งมีสีที่แตกต่างกันได้ ซึ่ง Boonyaratpalin และคณะ (2001) พบว่ากุ้งกุลาดำที่ได้รับอาหาร

ผสมเบตาแคโรทีน 125 หรือ 175 พีพีเอ็ม มีปริมาณแคโรทีนอยด์สะสมในเนื้อกุ้งมากกว่ากุ้งที่ได้รับแอสตาแซนทีน 50 พีพีเอ็ม อย่างไรก็ตามปริมาณแคโรทีนอยด์ในระดับที่สูงเกินไปก็อาจมีผลให้สัตว์น้ำ นำไปใช้และสะสมได้น้อยลงได้ ดังรายงานของ Storebakken and Goswami (1996) พบว่าปลาแอตแลนติกแซลมอน (*Salmo salar*) ที่กินอาหารผสมแอสตาแซนทีน 5 มิลลิกรัม/กิโลกรัม จะมีความเข้มข้นของแอสตาแซนทีนในพลาสมา 1 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร ในขณะที่ปลาที่กินอาหารผสมแอสตาแซนทีน 60 มิลลิกรัม/กิโลกรัม จะมีความเข้มข้นของแอสตาแซนทีนในพลาสมาเพิ่มขึ้นถึง 3 เท่า ดังนั้นถ้าจะให้สัตว์น้ำได้รับแคโรทีนอยด์ติดต่อกันเป็นเวลานานควรให้ที่ความเข้มข้นต่ำจะมีประสิทธิภาพมากกว่าที่ความเข้มข้นสูง

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางโภชนะของกุ้งขาวในแต่ละชุดการทดลองหลังได้รับอาหารที่ผสมสารสีจากแหล่งต่างๆ นาน 8 สัปดาห์ พบว่าการที่กุ้งขาวได้รับอาหารผสมสารสีแหล่งต่างๆ ทั้งเบตาแคโรทีนสังเคราะห์ สารสกัดสาหร่ายสไปรูไลนา พริกหวาน และปาล์มน้ำมัน 100 พีพีเอ็ม นั้นไม่มีผลต่อการสะสมปริมาณโปรตีนในซากกุ้งเมื่อเทียบกับกุ้งในชุดควบคุมที่ได้รับอาหารไม่ผสมสารสี ซึ่งสอดคล้องกับผลที่พบว่ากุ้งที่ได้รับสารสีต่างแหล่งกันมีประสิทธิภาพการใช้โปรตีนในอาหารได้ไม่ต่างกัน แสดงว่าสารสีไม่ได้เป็นปัจจัยเสริมที่ทำให้กุ้งขาวมีประสิทธิภาพในการใช้หรือเก็บสะสมโปรตีนไว้ในตัวได้มากขึ้น เช่นเดียวกับองค์ประกอบของไขมันที่มีปริมาณไม่แตกต่างกันในแต่ละชุดการทดลอง สำหรับค่าความชื้นในกุ้งที่ได้รับอาหารผสมเบตาแคโรทีนสังเคราะห์ 100 พีพีเอ็ม มีปริมาณความชื้นสูงกว่ากุ้งที่ได้รับอาหารผสมสารสกัดพริกหวาน 100 พีพีเอ็ม ในขณะที่กุ้งที่ได้รับอาหารผสมสารสีจากสารสกัดพริกหวาน ปาล์มน้ำมัน รวมทั้งเบตาแคโรทีนสังเคราะห์ มีปริมาณเถ้าในตัวสูงกว่ากุ้งขาวที่ได้รับอาหารสูตรควบคุมที่ไม่ผสมและผสมสารสีจากสาหร่ายสไปรูไลนา ซึ่งเป็นได้ว่าปริมาณเถ้าที่สูงในกุ้งทดลองข้างต้นเป็นเพราะกุ้งขาวจำเป็นต้องใช้พลังงานมากในกระบวนการเปลี่ยนแคโรทีนอยด์จากแหล่งวัตถุดิบต่างๆ ข้างต้นให้อยู่ในรูปแอสตาแซนทีนที่ใช้ประโยชน์และเก็บสะสมได้ จึงเหลือพลังน้อยลงสำหรับการสร้างกล้ามเนื้อ ลอกคราบหรือสังเคราะห์องค์ประกอบอื่นๆ ของร่างกายในขณะที่ใช้พลังงานในการเปลี่ยนสารสีที่ได้จากสารสกัดจากสาหร่ายสไปรูไลนาน้อยกว่า อย่างไรก็ตาม Nandeesha และคณะ (1998) กล่าวว่าหากใช้เซลล์สาหร่ายสไปรูไลนาทั้งเซลล์ผสมอาหารในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นปริมาณเถ้าในตัวสัตว์น้ำก็เพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากสัตว์น้ำต้องใช้พลังงานในกระบวนการย่อยและเผาผลาญกรดอะมิโนไม่จำเป็นที่มีอยู่เป็นปริมาณมากในสาหร่ายสไปรูไลนาหรือในกรณีของกุ้งที่ได้รับอาหารผสมสารสีจากปาล์มน้ำมัน พบว่าปริมาณเถ้าในตัวสูงขณะที่การเจริญเติบโตต่ำกว่ากุ้งชุดอื่นๆ อาจอธิบายได้ว่าระดับของไขมันที่สูงเกินไปในอาหารทำให้กุ้งกินอาหารน้อยลงและได้รับสารอาหารอื่นๆ ในการเจริญเติบโตน้อยลง ขณะเดียวกันปฏิกิริยาไลปิดเปอร์ออกซิเดชั่นที่เกิดขึ้นทำให้ร่างกายอ่อนแอลง การย่อยและดูดซึมสารอาหารอื่นๆ ก็ลดลงด้วย มีผลต่อการสร้างกล้ามเนื้อ การขนถ่ายแร่ธาตุจากเปลือกเก่า รวมทั้งการสะสมแร่ธาตุเพื่อสร้างเปลือกใหม่ที่สมบูรณ์เกิดขึ้นช้า

จึงไม่สามารถลอกคราบได้ตามปกติ และการที่คราบใหม่อาจสร้างขึ้นมาในขณะที่คราบเดิมที่ไม่สามารถลอกหลุดไปก็นำมาซึ่งปริมาณเถ้าที่สูงขึ้น สอดคล้องกับผลการเจริญเติบโตที่ต่ำกว่าชุดการทดลองอื่น เพราะจากการเจริญเติบโตของกุ้งจะเกิดขึ้นต่อเมื่อมีการลอกคราบเท่านั้น

ผลการศึกษาแหล่งของแคโรทีนอยด์ต่อการเปลี่ยนองค์ประกอบเลือดของกุ้งขาว พบว่ากุ้งชุดการทดลองที่ได้รับอาหารผสมสารสีทั้ง 4 แหล่ง มีปริมาณเม็ดเลือดรวมในระบบไหลเวียนไม่แตกต่างกับกุ้งชุดควบคุมที่ได้รับอาหารไม่ผสมแคโรทีนอยด์ แต่เมื่อพิจารณาจากค่าของกิจกรรมเอนไซม์ฟีนอลออกซิเดสในเม็ดเลือดพบว่ากุ้งชุดที่ได้รับอาหารผสมแคโรทีนอยด์จากสารสกัดสาหร่ายสไปรูไลนามีค่ากิจกรรมของเอนไซม์ดีที่สุด ซึ่ง Lee (1999) กล่าวว่าสาหร่ายสไปรูไลนามีสารประกอบหลายชนิด เช่น แคโรทีนอยด์ ไฟโคไซยานิน รวมทั้งรงควัตถุอื่นๆ ที่สามารถกระตุ้นภูมิคุ้มกันของสัตว์น้ำได้ ดังนั้นเมื่อนำสาหร่ายสไปรูไลนาผงมาเสริมในอาหารกุ้งกุลาดำ 0.1 เปอร์เซ็นต์ ทำให้กุ้งมีระบบภูมิคุ้มกันดีขึ้นโดยพบว่าเม็ดเลือดกุ้งมีประสิทธิภาพในการจับกินสิ่งแปลกปลอมโดยวิธีการโอบล้อม (phagocytotic activity) สูงกว่าเม็ดเลือดกุ้งที่ได้รับอาหารชุดควบคุม เช่นเดียวกับเม็ดเลือดกุ้งแชบ๊วย (*Penaeus merguiensis*) ที่ได้รับอาหารเสริมด้วยสาหร่ายสไปรูไลนามีปฏิกิริยาการโอบล้อมสิ่งแปลกปลอมได้ดีกว่ากุ้งชุดควบคุม รวมทั้งทำให้กุ้งมีความสามารถในการต้านทานโรคติดเชื้อแบคทีเรีย *Vibrio harveyii* ได้ดีกว่ากุ้งชุดควบคุมถึง 90 เปอร์เซ็นต์ (Lee *et al*., 2003) ส่วน Estrada และคณะ (2001) กล่าวว่าในสารสกัดสาหร่ายสไปรูไลนามีองค์ประกอบของไฟโคไบลิโปรตีน (phycobiliprotein) ซึ่งประกอบด้วย ไฟโคไซยานิน (phycocyanin) และแอลโลไฟโคไซยานิน (allophycocyanin) ที่มีคุณสมบัติในการกำจัดอนุมูลอิสระที่ประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล รวมทั้งยับยั้งกระบวนการไมโครโซมอลไลปิดเปอร์ออกซิเดชั่น (microsomal lipid peroxidation) ได้ สำหรับกุ้งขาวชุดที่ได้รับอาหารผสมแคโรทีนอยด์สังเคราะห์หรือเบตาแคโรทีนพบเม็ดเลือดมีกิจกรรมของเอนไซม์ฟีนอลออกซิเดสต่ำกว่ากุ้งชุดที่ได้รับอาหารผสมสารสกัดจากสาหร่ายสไปรูไลนา ซึ่ง Lastcha (1991) และ Hunter (2000) กล่าวว่าแคโรทีนอยด์เป็นสารที่จำเป็นสำหรับสัตว์เนื่องจากเป็นสารตั้งต้นของวิตามินเอและเรทินอล (retinal) ซึ่งมีผลต่อระบบภูมิคุ้มกันของสัตว์น้ำ ส่วนกุ้งชุดที่ได้รับอาหารผสมสารสกัดจากพริกหวานมีค่ากิจกรรมของเอนไซม์ในเม็ดเลือดไม่แตกต่างกับชุดควบคุม แสดงว่ากุ้งขาวมีข้อจำกัดในการนำแคโรทีนอยด์จากสารสกัดพริกหวานไปใช้ ซึ่ง Arredondo-Figueroa และคณะ (2003) กล่าวว่ากุ้งขาวที่ได้รับอาหารผสมแคโรทีนอยด์จากสารสกัดพริกหวานที่ผ่านและไม่ผ่านการสปอนนิฟิเคชั่นเข้มข้น 200 พีพีเอ็ม เท่ากันมีการสะสมแคโรทีนอยด์ในตัวต่ำกว่ากุ้งชุดที่ได้รับอาหารผสมเบตาแคโรทีน 100 พีพีเอ็ม อย่างไรก็ตามหากใช้ปริมาณแคโรทีนอยด์จากสารสกัดที่ไม่ผ่านการสปอนนิฟิเคชั่นเข้มข้น 250 พีพีเอ็ม การสะสมสารสีในตัวเพิ่มสูงขึ้นกว่าการใช้ผสมเบตาแคโรทีน 100 พีพีเอ็มผสมในอาหาร แสดงให้เห็นว่าแม้ว่าแคโรทีนอยด์มีความจำเป็นในการเพิ่มสีหรือกระตุ้นภูมิคุ้มกันในสัตว์น้ำ แต่ชนิดและปริมาณของแคโรทีนอยด์ก็มีข้อจำกัดในการที่สัตว์น้ำจะนำไปใช้

ประโยชน์ได้เช่นกัน สำหรับกุ้งชุดที่ได้รับอาหารผสมสารสกัดจากปาล์มน้ำมันมีกิจกรรมของเอนไซม์ฟีนอลออกซิเดสต่ำกว่าทุกชุดการทดลอง ซึ่งน่าจะสอดคล้องกับการที่กุ้งชุดดังกล่าวได้รับอาหารที่มีระดับของไขมันที่สูงเกินไปทำให้ระดับของโปรตีนและพลังงานไม่สมดุลส่งผลให้ประสิทธิภาพการใช้สารอาหารอื่นๆ ลดลงส่งผลให้การเจริญเติบโต รวมทั้งระบบภูมิคุ้มกันลดลงในที่สุด

4.2 วิจารณ์ผลการทดลองที่ 2

การศึกษาผลของความเค็มต่อประสิทธิภาพการใช้ประโยชน์จากแคโรทีนอยด์ในอาหารของกุ้งขาว พบว่าที่ระดับความเค็มเดียวกันกุ้งชุดที่ได้รับอาหารผสมและไม่ผสมสารสีมีการเจริญเติบโตไม่แตกต่างกัน แสดงให้เห็นว่าแคโรทีนอยด์ในอาหารไม่มีผลต่อการเจริญเติบโตของกุ้งขาว ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่ 1 ที่พบว่าแคโรทีนอยด์จากแหล่งต่างๆ ทั้งจากการสังเคราะห์และที่สกัดจากวัตถุดิบธรรมชาติไม่สามารถส่งเสริมการเจริญเติบโตของกุ้งขาวได้ อีกทั้งยังสอดคล้องกับหลายๆ รายงานก่อนหน้าที่พบว่าสารสีจากแหล่งต่างๆ ทั้งแอสตาแซนทีน เบตาแคโรทีน สารสกัดจากสาหร่ายสไปรูไลนา ดูนาเรลลา ยีสต์ และ พืช ที่ระดับความเข้มข้นต่างกันในอาหารไม่มีผลต่อการเจริญเติบโตของกุ้งกุลาดำและกุ้งขาว (Arredondo-Figueroa *et al*., 2003; Boonyaratpalin *et al*., 1994; Boonyaratpalin *et al*., 2001; Kittipreechakul, 2002; Pan *et al*., 2001) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาการเจริญเติบโตของกุ้งชุดที่เลี้ยงในน้ำทะเลความเค็มที่แตกต่างกัน พบว่ากุ้งขาวที่เลี้ยงในน้ำทะเลที่มีความเค็ม 30 พีพีที ทั้งชุดได้รับอาหารผสมและไม่ผสมเบตาแคโรทีน มีอัตราการเจริญเติบโตดีกว่ากุ้งขาวที่ได้รับอาหารทดลองเดียวกันแต่เลี้ยงในน้ำทะเลที่มีความเค็ม 10 พีพีที อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงให้เห็นว่าระดับความเข้มข้นของเกลือในน้ำมีผลต่อการเจริญเติบโตต่อกุ้งขาวอย่างชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองที่พบว่ากุ้งขาวที่เลี้ยงในน้ำที่มีระดับความเค็ม 30 พีพีที มีประสิทธิภาพการใช้โปรตีนในอาหารและมีอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อได้ดีกว่า ขณะที่มีอัตราการกินอาหารน้อยกว่ากุ้งที่เลี้ยงในระดับความเค็ม 10 พีพีที ซึ่งการที่กุ้งขาวที่เลี้ยงในน้ำที่มีระดับความเค็มสูงมีการเจริญเติบโตและมีประสิทธิภาพการใช้ประโยชน์จากอาหารได้ดีนั้น เป็นเพราะว่าโดยลักษณะทางสรีรวิทยาของกุ้งขาวเป็นสัตว์ที่ชอบอาศัยในสภาพแวดล้อมที่เป็นทะเลเปิดซึ่งมีระดับความเค็มของน้ำค่อนข้างสูง และมีอัตราการเจริญเติบโตดีที่สุดเมื่อเลี้ยงที่ความเค็ม 30-40 พีพีที (Yano *et al*., 1998) ประจวบ (2536) กล่าวว่าปริมาณแร่ธาตุในน้ำ เช่นโพแทสเซียม (K^+) แมกนีเซียม (Mg^{++}) โซเดียม (Na^+) คลอไรด์ (Cl^-) และแคลเซียม (Ca^{++}) มีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตและการปรับสมดุลเกลือและน้ำ (Osmoregulation) ในตัวกุ้ง หากปริมาณโซเดียมหรือเกลือต่างๆ ไม่เพียงพอหรือน้อยเกินไปทำให้กุ้งเบื่ออาหาร การใช้ประโยชน์จากโปรตีนลดลงส่งผลให้การเจริญเติบโตลดลง การทำหน้าที่ควบคุมประจุต่างๆ ในร่างกายควบคู่กับคลอไรด์บกพร่อง และมีผลให้เกิดปัญหาเกี่ยวกับการผสมพันธุ์หรือทำให้กุ้งเข้าสู่วัยเจริญพันธุ์ช้าลง

ดังนั้นจึงมีความเป็นไปได้ว่าการนำกุ้งขาวมาเลี้ยงในสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงจากสภาพเดิมมาก กุ้งต้องใช้พลังงานในการปรับตัวให้เข้าสภาพแวดล้อมใหม่มากกว่านำพลังงานมาใช้สำหรับการเจริญเติบโต สอดคล้องกับ Gomez-Jimenez และคณะ (2004) กล่าวว่าความเค็มมีผลต่ออัตราการเผาผลาญอาหารให้เป็นพลังงาน (metabolic rate) ของกุ้งขาว โดยเมื่ออยู่ในน้ำที่ความเค็มต่ำจะมีความต้องการออกซิเจนและมีเมตาบอลิซึมมากกว่าที่ความเค็มสูง ในขณะที่ Diaz และคณะ (2001 อ้างโดย Gomez-Jimenez *et al*., 2004) พบว่ากุ้งลอปสเตอร์และกุ้งขาวระยะวัยรุ่นที่อาศัยในน้ำที่มีความเค็มต่ำจะมีอัตราการสลายโปรตีนและขับถ่ายแอมโมเนียสูงขึ้นเพื่อนำพลังงานมาใช้ในกระบวนการปรับความดันออสโมติกในตัวให้เหมาะสม เช่นเดียวกับในสัตว์น้ำอื่นๆ เช่น ปลากะพงซึ่งสามารถนำมาเลี้ยงได้ทั้งในสภาพน้ำจืดและน้ำกร่อย แต่ประดิษฐ์และคณะ (2532) พบว่าปลากะพงขาวที่เลี้ยงที่ความเค็มต่ำมีความเครียดสูง และต้องใช้พลังงานในการปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมมาก ปลาจึงมีการเจริญเติบโตช้ากว่าชุดที่เลี้ยงในน้ำเค็ม เช่นเดียวกับ Dhert และคณะ (1992) กล่าวว่าปลากะพงขาวจะสูญเสียพลังงานน้อยที่สุดเมื่ออยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีความเข้มข้นของเกลือเท่ากับความเข้มข้นของเกลือในตัวปลา พลังงานที่เหลือจึงสามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโตได้ดีกว่าชุดที่อยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงความเค็มมากกว่าหรือน้อยกว่าในตัวปลา

เมื่อพิจารณาผลของการเสริมหรือไม่เสริมแคโรทีนอยด์ในอาหารต่ออัตรารอดตายของกุ้งขาว พบว่ากุ้งที่เลี้ยงในน้ำที่ระดับความเค็ม 30 พีพีที มีอัตรารอดที่ไม่แตกต่างกัน แต่ในสภาพที่กุ้งอาศัยอยู่ในน้ำที่มีความเค็ม 10 พีพีที ซึ่งต่ำกว่าระดับในสภาพแวดล้อมธรรมชาตินั้น พบว่าการได้รับอาหารที่มีการเสริมแคโรทีนอยด์ช่วยให้กุ้งมีอัตรารอดตายที่สูงกว่าอย่างชัดเจน สอดคล้องกับคำกล่าวของ Darachai (1998) ที่ได้รายงานว่าแอสตาแซนทีนที่เสริมในอาหารจะช่วยยืดระยะเวลาให้กุ้งกุลาดำระยะโพสต์ลาร์วาเผชิญกับสภาวะความเครียดที่มีการเปลี่ยนแปลงความเค็มอย่างฉับพลันได้มากขึ้น ยิ่งไปกว่านั้นการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าการเสริมแคโรทีนอยด์ในอาหารสำหรับกุ้งขาวแม้ไม่มีผลในการเพิ่มอัตราการเจริญเติบโตของกุ้งขาว แต่การเสริมแคโรทีนอยด์ในอาหารช่วยเพิ่มสีตัวกุ้งขาวได้อย่างชัดเจน โดยเมื่อทำการเปรียบเทียบสีตัวกุ้งหลังต้มกับพัดสี พบกุ้งขาวที่ได้รับอาหารเสริมเบตาแคโรทีนทั้งชุดที่เลี้ยงด้วยน้ำความเค็ม 10 และ 30 พีพีที นาน 4 และ 8 สัปดาห์มีสีตัวเข้มกว่ากุ้งที่ได้รับอาหารชุดควบคุมถึง 2-3 ระดับ ในขณะที่ผลการวัดสีตัวกุ้ง พบว่ากุ้งขาวที่ได้รับอาหารผสมเบตาแคโรทีนและเลี้ยงในความเค็มต่างกัน 2 ระดับมีค่าสีแดงในตัวสูงกว่ากุ้งที่ได้รับอาหารชุดควบคุม เช่นเดียวกับผลการวิเคราะห์ปริมาณแคโรทีนอยด์รวมในตัวกุ้งที่พบว่ากุ้งชุดที่ได้รับอาหารผสมสารสีมีการสะสมแคโรทีนอยด์ในปริมาณที่สูงกว่ากุ้งที่ได้รับอาหารสูตรควบคุม ทั้งที่เลี้ยงในน้ำที่มีระดับความเค็ม 10 และ 30 พีพีที สอดคล้องกับผลการศึกษาในกุ้งกุลาดำที่พบว่าการเสริมแอสตาแซนทีนทุกระดับความเข้มข้นตั้งแต่ 25–150 พีพีเอ็ม ในอาหารสามารถเสริมให้สีตัวกุ้งเข้มกว่ากุ้งชุดที่ได้รับอาหารชุดควบคุม (มะลิ และคณะ, 2543) หรือผลศึกษาของ Yamada และ

คณะ (1990) ที่พบว่าการเสริมแอสตาแซนทีน และเบตาแคโรทีนเพื่อเป็นแหล่งของแคโรทีนอยด์ในอาหารสามารถเพิ่มสารสีของกุ้งคุรูมาได้ รวมทั้งการศึกษาอื่นๆ ทั้งในกุ้งทะเล ปลา พบว่า แคโรทีนอยด์จากพืช จุลินทรีย์ สาหร่าย หรือการสังเคราะห์ สามารถเพิ่มสีเปลือกและเนื้อของสัตว์น้ำได้ (Storebakken *et al*., 1987; Liao *et al*., 1993; Baker *et al*., 2002; Arredondo-Figueroa *et al*., 2003; Chien *et al*., 2003) เมื่อทำการเปรียบเทียบสีของกุ้งขาวทั้งจากค่าที่วัดด้วยเครื่องคัลเลอร์มิเตอร์ และค่าที่วิเคราะห์ปริมาณแคโรทีนอยด์รวม พบว่ากุ้งขาวชุดที่เลี้ยงในน้ำที่มีความเค็มสูงมีการสะสมสารสีได้ดีกว่าชุดที่เลี้ยงในน้ำที่มีความเค็มต่ำ แสดงให้เห็นว่าความเค็มของน้ำนอกจากจะมีผลต่อการเจริญเติบโตของกุ้งขาวแล้วยังเป็นปัจจัยที่ควบคุมการใช้ประโยชน์และสะสมสารสีในตัวด้วย นอกจากนั้นผลการทดลองยังบ่งชี้ว่าเมื่อเลี้ยงกุ้งขาวในตู้ทดลองนานขึ้นปริมาณสารสีที่สะสมในตัวกุ้งทุกชุดการทดลองลดลงทั้งปริมาณค่าสีแดงและเหลืองที่วัดเครื่องคัลเลอร์มิเตอร์ และปริมาณแคโรทีนอยด์รวม ซึ่งสอดคล้องรายงานของ Arredondo-Figueroa และคณะ (2003) ที่ว่ากุ้งขาวที่ได้รับอาหารเสริมสารสีที่สกัดจาพริกหวานนาน 28 วัน มีปริมาณแคโรทีนอยด์รวมในเนื้อต่ำกว่ากุ้งที่ได้รับอาหารสูตรเดียวกันนาน 14 วัน ในขณะการสะสมสารสีในเปลือกมีปริมาณสูงขึ้น แสดงว่าระยะเวลาน่าจะเป็นปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการสะสมสารสีในกุ้งขาว โดยเป็นไปได้ว่าเมื่อกุ้งได้ใช้และสะสมสารสีในกล้ามเนื้อจนถึงระดับที่อิ่มตัวแล้ว กลไกของร่างกายจะแสดงออกโดยหยุดการสะสมสารสีในเนื้อลง และกุ้งมีการนำสารสีที่สะสมถูกใช้ประโยชน์ในกระบวนการที่เกี่ยวข้องอย่างต่อเนื่องต่อไป ในขณะที่การสะสมสารสีที่เปลือกจากการเทียบค่าจากพัดสียังคงมีปริมาณไม่แตกต่างกัน จากข้อมูลดังกล่าวจึงชี้ให้เห็นว่าแม้สีเปลือกจะเป็นปัจจัยหลักที่สามารถดึงดูดผู้บริโภคและเพิ่มมูลค่าของผลผลิตกุ้งขาวได้ แต่หากมีการศึกษาวิจัยเพิ่มเติมเกี่ยวกับปริมาณ และระยะเวลาที่เหมาะสมในการให้สารสีในกุ้งชนิดนี้ก็น่าจะเป็นประโยชน์มากยิ่งขึ้นทั้งในส่วนของผู้ผลิตที่สามารถลดต้นทุนลงจากการใช้ปริมาณสารสีในอาหารน้อยลง รวมทั้งผู้บริโภคที่ได้รับประโยชน์จากการบริโภคเนื้อกุ้งที่มีคุณภาพอย่างแท้จริงต่อไป

แคโรทีนอยด์ที่เสริมในอาหารกุ้งขาวนอกจากช่วยเพิ่มสีตัวของกุ้งแล้วพบว่ายังมีประสิทธิภาพในการเพิ่มระบบภูมิคุ้มกันในกุ้งขาวได้อีกด้วย โดยเฉพาะในสภาวะที่มีความเครียดอย่างต่อเนื่อง ในการทดลองนี้คือสภาวะที่ทดลองเลี้ยงในน้ำทะเลที่มีความเค็มต่ำนาน 8 สัปดาห์ Picking (1981) กล่าวว่าการเปลี่ยนแปลงความเค็มของน้ำเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลกระทบต่อสรีระของสัตว์น้ำเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความเค็มทำให้ปริมาณเกลือแร่ในน้ำเกิดการเปลี่ยนแปลงส่งผลให้สัตว์น้ำต้องปรับปริมาณเกลือแร่ในร่างกายเพื่อรักษาสภาวะสมดุลตามไปด้วย สัตว์น้ำจึงอาจเกิดความเครียดและเกิดโรคแทรกซ้อนได้ง่าย การที่กุ้งขาวที่ได้รับอาหารผสมเบตาแคโรทีนอยด์มีปริมาณเม็ดเลือดในระบบไหลเวียนสูงกว่ากุ้งที่ได้รับอาหารสูตรควบคุมอย่างชัดเจน เช่นเดียวกับกิจกรรมของเอนไซม์ฟีนอลออกซิเดสในเม็ดเลือดที่มีค่าสูงขึ้นอย่างไม่มีความแตกต่างทางสถิติ อีกทั้งค่าองค์ประกอบเลือดทั้ง 2 พารามิเตอร์ที่เพิ่มขึ้น

ยังสัมพันธ์กับอัตรารอดตายของกุ้งชุดดังกล่าวที่มีค่าสูงกว่ากุ้งที่ได้รับอาหารชุดควบคุมเช่นกัน ในขณะที่ผลการศึกษาคราวเดียวกันนี้พบว่าการเสริมแคโรทีนอยด์ในอาหารหรือระยะเวลาที่กุ้งขาวได้รับอาหารไม่มีผลให้ค่าองค์ประกอบเลือดทั้ง 2 พารามิเตอร์ หรืออัตรารอดเพิ่มสูงขึ้นกว่ากุ้งชุดควบคุม ถ้ากุ้งขาวอาศัยอยู่ใสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมหรือในน้ำทะเลความเค็ม 30 พีพีที จากข้อมูลดังกล่าวจึงมีความเป็นไปได้ว่าแคโรทีนอยด์ในอาหารเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งที่ช่วยให้กุ้งมีการปรับสมดุลเกลือในตัวเพื่อให้สามารถดำรงชีวิตอยู่ใสภาพแวดล้อมใหม่ได้ดีขึ้น

นอกจากนั้นอาจอธิบายได้ว่าเมื่อกุ้งเกิดความเครียดกระบวนการต่าง ๆ ในระบบการป้องกันตัวเองก็จะทำงานมากขึ้นกว่าปกติ ส่งผลให้อนุมูลอิสระชนิดต่าง ๆ ถูกปลดปล่อยออกมานอกเซลล์มากด้วยเช่นกัน อนุมูลอิสระที่มีความเข้มสูง ๆ ก็จะมีผลไปทำให้เซลล์ต่าง ๆ อ่อนแอลง แต่ในกรณีที่กุ้งได้รับอาหารที่มีแคโรทีนอยด์ซึ่งมีโครงสร้างโมเลกุลที่ประกอบด้วยพันธะคู่คอนจูเกตเป็นจำนวนมาก โครงสร้างดังกล่าวมีจำนวนอิเลคตรอนในโมเลกุลแบบไม่เสถียรจึงสามารถจับกับอนุมูลอิสระต่าง ๆ ไว้ หรืออีกนัยหนึ่งอาจกล่าวได้ว่าอนุมูลอิสระถูกทำลายและลดปริมาณลงนั่นเองจึงทำให้กุ้งมีความแข็งแรงมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองนี้ที่พบว่าเมื่อนำกุ้งแต่ละชุดการทดลองมาทดสอบความสามารถในการต้านทานต่อความเครียดโดยการเปลี่ยนแปลงความเค็มจากระดับที่เลี้ยงในขณะนั้นร่วมกับการลดปริมาณออกซิเจนของน้ำที่ใช้เลี้ยงลงครั้งละ 5 ชั่วโมง พบว่ากุ้งขาวที่ได้รับอาหารผสมเบตาแคโรทีนทั้งชุดที่เลี้ยงในน้ำที่มีความเค็มสูงและต่ำมีอัตราการรอดตายมากกว่ากุ้งขาวที่ได้รับอาหารควบคุม Chien และคณะ (1999) รายงานว่ากุ้งกุลาดำที่ได้รับอาหารเสริมแอสตาแซนทีน 360 พีพีเอ็ม มีความต้านทานต่อความเครียดเพิ่มขึ้นโดยมีอัตราการรอดตายและทนทานจากภาวะขาดออกซิเจนสูงกว่าชุดควบคุม เช่นเดียวกับลูกกุ้งกุลาดำระยะโพสต์ลาร์วาที่ได้รับอาหารผสมแอสตาแซนทีนจะมีความต้านทานต่อการเปลี่ยนแปลงความเค็มได้ดีกว่ากุ้งที่ได้รับอาหารชุดควบคุม โดยระดับความต้านทานเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณแอสตาแซนทีนได้รับสูงขึ้น (Merchie *et al*., 1998; Darachai *et al*., 1998) ในขณะที่ Chien และคณะ (2003) กล่าวว่าลูกกุ้งกุลาดำระยะโพสต์ลาร์วาที่ได้รับอาหารผสมแอสตาแซนทีน 80 พีพีเอ็ม มีความต้านทานต่อความเครียดโดยการเปลี่ยนแปลงความเค็มจาก 32 เป็น 0 พีพีที และการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจาก 27 เป็น 5 องศาเซลเซียส ได้ดีกว่ากุ้งที่ได้รับอาหารไม่ผสมสารสีชนิดดังกล่าว และ Pan และคณะ (2003) พบว่ากุ้งกุลาดำระยะโพสต์ลาร์วาที่ได้รับอาหารผสมแอสตาแซนทีน 71.5 พีพีเอ็ม นาน 8 สัปดาห์ มีความต้านทานต่อความเครียดจากการอยู่ในน้ำที่มีปริมาณแอมโมเนียเข้มข้น 0.01, 0.2 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร ได้ดีกว่ากุ้งที่ได้รับอาหารชุดควบคุม อีกทั้งยังพบว่ากุ้งทดลองชุดดังกล่าวมีระดับ total antioxidant status (TAS) ในเลือดสูงกว่ากลุ่มควบคุมที่ระดับแอมโมเนียมากกว่า 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร ในขณะที่ค่า superoxide dismutase (SOD) ในเลือดต่ำทุกระดับความเข้มข้นของแอมโมเนีย แสดงว่าแอสตาแซนทีนในอาหารมีผลในการช่วยกำจัดอนุมูลอิสระในเลือดได้ เช่นเดียวกับการที่ค่า aspartate aminotransferase (AST) และ

alanine aminotransferase (ALT) ในตับกุ้งที่ได้รับอาหารที่ผสมแอสตาแซนทีนมีค่าต่ำกว่ากลุ่มควบคุมในทุกระดับความเข้มข้นของแอมโมเนีย แสดงว่าแอสตาแซนทีนทำให้ตับกุ้งทำหน้าที่ได้ดีและสามารถต้านทานความเครียดที่เกิดจากแอมโมเนียได้ดีขึ้น ซึ่งเหมือนกับรายงานของ Chien และคณะ (2003) ที่รายงานว่ากุ้งกุลาดำที่ได้รับอาหารผสมแอสตาแซนทีนมีค่า TAS เพิ่มขึ้นและค่า SOD ลดลง ทำให้กุ้งสามารถกำจัดอนุมูลอิสระและต้านทานต่อความเครียดที่เกิดจากอุณหภูมิและความเค็มที่เปลี่ยนแปลงได้มากขึ้น ซึ่ง Balon (1979) รายงานว่าแคโรทีนอยด์อาจมีหน้าที่บางประการในระบบสรีรวิทยาที่จะช่วยเก็บรักษาออกซิเจนไว้ภายในเซลล์ในภาวะที่ออกซิเจนน้อยกว่าปกติ ซึ่งสอดคล้องกับกรณีของกุ้งคุรูมาซึ่งมีพฤติกรรมฝังตัวในทรายซึ่งมีออกซิเจนต่ำ กุ้งชนิดดังกล่าวจึงมีความต้องการแอสตาแซนทีนในระดับสูงกว่ากุ้งกุลาดำ (Chein and Jeng, 1992) จึงมีความเป็นไปได้มากที่แคโรทีนอยด์ในอาหารจะช่วยให้สัตว์น้ำมีความต้านทานต่อภาวะขาดออกซิเจนได้มากขึ้น

เมื่อพิจารณาผลของสีตัวที่จางลงแม้ว่ากุ้งจะได้รับอาหารผสมแคโรทีนอยด์นานขึ้น โดยเฉพาะในกุ้งชุดที่เลี้ยงในน้ำความเค็มต่ำ หรือความสามารถต้านทานความเครียดกับปริมาณแคโรทีนอยด์รวมที่สะสมในตัวลดลง โดยเฉพาะกุ้งที่ได้รับอาหารผสมแคโรทีนอยด์ทั้งชุดที่เลี้ยงในน้ำทะเลความเค็มต่ำและความเค็มสูงหลังการเผชิญกับการทดสอบความเครียดจากสภาพที่เลี้ยงอยู่เดิมนาน 7 วัน มีปริมาณแคโรทีนอยด์สะสมในตัวลดลงชัดเจนกว่ากุ้งที่ได้รับอาหารชุดควบคุม บ่งชี้ให้เห็นว่าในสภาวะที่กุ้งต้องเผชิญกับความเครียดนั้นแคโรทีนอยด์ที่สะสมไว้ในเนื้อเยื่อส่วนต่างๆ ทั้งตับ เลือด กล้ามเนื้อ หรือเปลือก จะถูกนำมาใช้ในการกำจัดอนุมูลอิสระป้องกันเซลล์ไม่ให้อ่อนแอเพื่อที่กระบวนการปรับสมดุลของร่างกายเกิดขึ้นได้เร็วที่สุดจนสามารถปรับตัวเข้ากับสภาพแวดล้อมใหม่ได้ ซึ่ง Arredondo-Figueroa และคณะ (2003) กล่าวว่าเมื่อกุ้งได้รับสารสีจากอาหารและสะสมสารสีไว้ในกล้ามเนื้อจนถึงระดับที่อิ่มตัวแล้ว แม้ว่ากุ้งขาวจะได้รับอาหารที่ผสมแคโรทีนอยด์อย่างต่อเนื่องก็ตามกลไกของร่างกายจะแสดงออกโดยหยุดการสะสมสารสีในเนื้อ จากนั้นกุ้งมีการนำสารที่สีสะสมไว้ใช้ประโยชน์ในกระบวนการที่เกี่ยวข้องอย่างต่อเนื่องต่อไป จึงเป็นเหตุให้ปริมาณสารสีที่สะสมไว้ในเนื้อเยื่อลดลงตามระยะเวลาที่เพิ่มขึ้น ซึ่งแม้ไม่มีการศึกษาทดลองก่อนหน้านี้ที่สามารถนำมาอ้างอิงหรืออธิบายผลที่เกิดขึ้นจากการทดลองครั้งนี้ได้ แต่อาจเป็นไปได้ว่าสภาพการทดลองของ Arredondo-Figueroa และคณะ (2003) ที่เลี้ยงกุ้งในสภาพแวดล้อมปกติเมื่อกุ้งขาวสะสมสารสีไว้จนอิ่มตัวแล้วจึงหยุดสะสมแต่มีการดึงแคโรทีนอยด์ในกล้ามเนื้อมาใช้ในกระบวนการต่างๆ อย่างต่อเนื่อง และการที่กุ้งเผชิญกับสภาวะที่มีความเครียดในการทดลองนี้ยิ่งทำให้กุ้งมีความต้องการใช้แคโรทีนอยด์จะสูงขึ้น จึงมีการดึงแคโรทีนอยด์ที่สะสมไว้ในกล้ามเนื้อ รวมทั้งดึงมาจากที่สะสมไว้ที่เปลือกมากกว่าปกติ ในขณะที่กระบวนเปลี่ยนแคโรทีนอยด์ให้อยู่ในรูปแบบที่สะสมไว้ในเปลือกหรือส่วนต่างๆ ของร่างกายอาจเท่าเดิมหรือช้าลง จึงทำให้พบว่ากุ้งขาวในการ

ทดลองนี้มีสีซีดลง หรือมีปริมาณแคโรทีนอยด์ในตัวลดลงหลังได้รับความเครียดนานขึ้น หรือต้องอยู่ในสภาวะที่มีความเครียดนานๆ

4.3 วิจารณ์ผลการทดลองที่ 3

จากการศึกษาผลของเบตาแคโรทีนที่มีเข้มข้นแตกต่างกันในอาหารและผลของความเครียดต่อการเจริญเติบโตในกุ้งขาว พบว่าระดับของเบตาแคโรทีนที่ผสมในอาหารมากขึ้นไม่มีผลต่อการเจริญเติบโต ประสิทธิภาพการใช้โปรตีน อัตรารอดตายของกุ้งขาว เช่นเดียวกับผลการทดลองในกุ้งขาวที่ได้รับอาหารผสมสารสีสกัดจากพริกหวานที่ไม่ผ่านการสปอนด์นิไฟด์เข้มข้น 200 และ 250 พีพีเอ็ม และผ่านการสปอนด์นิไฟด์เข้มข้น 200 พีพีเอ็ม (Arredondo-Figueroa *et al*., 2003) ในกุ้งกุลาดำที่ได้รับอาหารผสมแคนทาแซนทีนสังเคราะห์เข้มข้น 50 และ 100 พีพีเอ็ม แอสตาแซนทีนสังเคราะห์เข้มข้น 25, 50 และ 100 พีพีเอ็ม (Boonyaratpalin *et al*., 1994) หรือชุดที่ได้รับอาหารผสมเบตาแคโรทีนจากสาหร่ายดูนาเรลลา เข้มข้น 125 และ 175 พีพีเอ็ม (Boonyaratpalin *et al*., 2001) รวมทั้งกุ้งกุลาดำที่ได้รับอาหารผสมแอสตาแซนทีนที่สกัดจากยีสต์ (*Phaffia rhodozyma*) เข้มข้น 39, 78.65 และ 161.60 พีพีเอ็ม (Duangjai, 2002) ยิ่งไปกว่านั้นแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มปริมาณเบตาแคโรทีนในอาหารมากยิ่งขึ้นในการทดลองนี้ก็ไม่ทำให้กุ้งขาวมีอัตราการเจริญเติบโตต่างกับกุ้งที่ได้รับอาหารไม่ผสมสารสี จากผลการทดลองสามารถบ่งชี้ได้ว่าสารสีในอาหารไม่มีบทบาทในกระบวนการย่อย ดูดซึมสารอาหารเพื่อการเจริญเติบโตของกุ้งขาว ซึ่งต่างจากกุ้งคุรูมาระยะโพสต์ลาร์วาที่ได้รับอาหารผสมแอสตาแซนทีนเข้มข้น 5, 15, 60 และ 300 พีพีเอ็ม เป็นเวลา 30 วัน มีการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นโดยอัตราการเจริญเติบโตของกุ้งเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของแอสตาแซนทีนในอาหารมีระดับสูงขึ้น และกุ้งระยะจูเวนไนล์ที่ได้รับอาหารผสมแอสตาแซนทีน 50, 100, 200 และ 400 พีพีเอ็ม เป็นเวลา 8 สัปดาห์ มีอัตรารอดตายสูงกว่ากุ้งที่ได้รับอาหารไม่ผสมแอสตาแซนทีนทุกความเข้มข้น (Yamada *et al*., 1990) หรือว่ากุ้งลอปสเตอร์ (*Homarus americanus*) ระยะจูเวนไนล์ที่ได้รับอาหารผสมแอสตาแซนทีนที่สกัดจากเปลือกกุ้งเครย์ฟิชมีการเจริญเติบโตสูงกว่ากุ้งชุดควบคุม (Bordner *et al*.,1986 อ้างโดย Boonyaratpalin *et al*., 2001)

จากการศึกษาอัตราการกินอาหาร อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ และประสิทธิภาพการใช้โปรตีนของกุ้งขาว พบว่าความเครียดเพียงปัจจัยเดียวและความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มข้นของเบตาแคโรทีนและความเครียด ไม่ทำให้อัตราการกินอาหาร อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ และประสิทธิภาพการใช้โปรตีนเปลี่ยนแปลง เนื่องจากกุ้งขาวเป็นสัตว์น้ำที่อาศัยอยู่ในน้ำที่มีความเค็มในช่วงกว้าง (euryhaline) สอดคล้องกับการทดลองของพิพัฒน์ (2541) ที่เลี้ยงกุ้งกุลาดำที่ความเค็ม 3 ระดับ (10, 20 และ 30 พีพีที) และให้อาหารสำเร็จรูปชนิดเม็ดผสมโปรตีน 3 ระดับ (25, 35 และ 45 เปอร์เซ็นต์) พบว่าความเค็มไม่มีผล

ต่ออัตรารอด ตลอดจนพลังงานจากการบริโภค พลังงานที่ใช้ในการเติบโต พลังงานที่ใช้ในการหายใจ พลังงานที่สูญเสียไปในรูปของแอมโมเนีย และพลังงานที่สูญเสียไปในรูปของอุจจาระ

ปริมาณไขมันสะสมในกุ้งที่ได้รับอาหารสูตรควบคุม มีปริมาณสะสมในตัวต่ำสุด โดยกุ้งที่ได้รับความเครียดจะมีปริมาณไขมันลดลงมากขึ้น สอดคล้องกับการทดลองของ Usher และคณะ (1991) พบว่าหลังจากเคลื่อนย้ายปลาแอตแลนติกแซลมอนไปสู่น้ำทะเลเป็นเวลา 3 เดือน ปลามีการปรับตัวโดยมีปริมาณน้ำในตัวสูงขึ้น ปริมาณไขมันลดลงอย่างชัดเจนเมื่อเปรียบเทียบกับปลาที่เลี้ยงในน้ำจืด แสดงให้เห็นถึงลักษณะของปลาเนื่องจากเกิดความเครียด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มข้นของเบตาแคโรทีนสังเคราะห์และความเครียดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความเค็มทำให้ปริมาณไขมันที่สะสมในตัวกุ้งเปลี่ยนแปลง

จากการวัดสีและวิเคราะห์ปริมาณแคโรทีนอยด์ พบว่ากุ้งขาวที่ได้รับอาหารผสมเบตาแคโรทีนสังเคราะห์ 500 พีพีเอ็ม มีค่าความสว่างของสีตัวกุ้งไม่แตกต่างกับทุกชุดการทดลอง แสดงให้เห็นว่าปัจจัยจากระดับความเข้มข้นของเบตาแคโรทีนสังเคราะห์และความเครียดเพียงอย่างเดียวไม่มีผลต่อค่าความสว่างของสีตัว แต่ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความเข้มข้นของเบตาแคโรทีนสังเคราะห์และความเครียดเนื่องจากการเปลี่ยนแปลงความเค็มทำให้ค่าความสว่างของสีตัวเพิ่มขึ้นในกุ้งที่ได้รับความเครียด ส่วนค่าสีแดงในกุ้งขาวที่ได้รับอาหารผสมเบตาแคโรทีนสังเคราะห์ 500 พีพีเอ็ม มีค่าสูงสุด เช่นเดียวกันกับปริมาณแคโรทีนอยด์ที่สะสมในตัวกุ้งขาว ซึ่งพบว่ากุ้งขาวที่ได้รับอาหารผสมเบตาแคโรทีนสังเคราะห์ 500 พีพีเอ็ม มีปริมาณแคโรทีนอยด์สะสมในตัวสูงสุด รองลงมาได้แก่กุ้งที่ได้รับอาหารผสมเบตาแคโรทีน 1,000 พีพีเอ็ม 50 พีพีเอ็ม และสูตรควบคุม ตามลำดับ อย่างไรก็ตามยังมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องอีกหลายประการในด้านการนำแคโรทีนอยด์ไปใช้ประโยชน์ Babosa และคณะ (1999) รายงานว่าระดับไขมันในอาหารมีส่วนเกี่ยวข้องอย่างมากกับการดูดซึมแอสตาแซนทีน ของปลาเรนโบว์เทร้าท์ ทั้งนี้ในอาหารที่มีไขมันสูงปลาจะสามารถดูดซึมและนำเอาแอสตาแซนทีนเอสเทอร์ไปใช้ได้มีประสิทธิภาพไม่แตกต่างจากแอสตาแซนทีนอิสระ แต่ในกรณีที่อาหารมีไขมันน้อย ปลาเรนโบว์เทร้าท์จะนำแอสตาแซนทีนอิสระไปใช้ประโยชน์ได้มากกว่า นอกจากนี้ยังพบว่าประสิทธิภาพการนำแคโรทีนอยด์ไปใช้สะสมในตัวสัตว์น้ำยังขึ้นกับประสิทธิภาพการย่อยและการดูดซึมของตัวสัตว์ด้วย โดยเฉพาะแคโรทีนอยด์ที่ได้จากเซลล์จุลินทรีย์กลุ่มแบคทีเรียและยีสต์ ซึ่งต้องผ่านการย่อยทำลายผนังเซลล์ก่อนจึงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้มากขึ้น (Sanderson and Jolly, 1994)