บทที่ 1

บทนำ

บทนำ

สภาวการณ์ทางเศรษฐกิจของประเทศไทยในปัจจุบัน รัฐบาลได้ให้ความสำคัญต่อการพัฒนา และแสวงหาตลาดส่งออกสินค้าเกษตรและสินค้าอุตสาหกรรม เพื่อนำรายได้มาพัฒนาประเทศและกระตุ้นการเจริญทางเศรษฐกิจ รวมทั้งการเพิ่มการจ้างงานภายในประเทศ สินค้าประมงและผลิตภัณฑ์ประมง โดยเฉพาะกุ้งทะเลเป็นสินค้าที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของไทยมากชนิดหนึ่ง จากข้อมูลปี พ.ศ. 2547 ไทยมีการส่งออกกุ้งทะเลจากการเพาะเลี้ยง 240,945 ตัน คิดเป็นมูลค่ากว่า 67,311 ล้านบาท (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2547) ในหลายปีที่ผ่านมาพบว่ากุ้งที่เลี้ยงส่วนใหญ่เป็นกุ้งกุลาดำ แต่ปัจจุบันพบว่าผลผลิตกุ้งทะเลจากการเพาะเลี้ยงในประเทศไทยมีสัดส่วนของกุ้งขาวเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากการเลี้ยงกุ้งกุลาดำประสบกับอุปสรรคต่างๆ ทั้งโรคระบาด ราคาตกต่ำ กุ้งโตช้า ในขณะที่กุ้งขาวสามารถเลี้ยง และจัดการระบบการเลี้ยงได้ไม่ยุ่งยาก เลี้ยงได้ในน้ำความเค็มต่ำ สามารถเลี้ยงในอัตราที่หนาแน่นสูงได้โดยมีอัตรารอดสูง การเจริญเติบโตดี มีความต้านทานต่อเชื้อโรค รวมทั้งสภาพแวดล้อมได้ดีกว่ากุ้งกุลาดำ ยิ่งไปกว่านั้นในสภาพการปัจจุบัน พบว่าผู้บริโภคทั้งในประเทศและต่างประเทศได้หันมาบริโภคสัตว์น้ำในปริมาณสูงขึ้น และโดยทั่วไปความต้องการเบื้องต้นในการเลือกซื้อสัตว์น้ำเพื่อบริโภคนั้น พบว่ามักนิยมเลือกชนิดที่มีความสดและมีสีสันสดใส และหลักการเดียวกันก็มักถูกนำมาใช้ในการเลือกบริโภคกุ้งขาวโดยเชื่อว่ากุ้งขาวที่มีสีสันสดใส จะเป็นกุ้งที่มีสุขภาพแข็งแรง และมีคุณภาพดี

อย่างไรก็ตามในปัจจุบันเกษตรกรผู้เลี้ยงกุ้งขาวได้ประสบปัญหาเกี่ยวกับกุ้งมีสีตัวซีดจางส่งผลให้ผลผลิตมีราคาต่ำลง ดังนั้นวิธีการแก้ปัญหาที่มีประสิทธิผลที่สุด คือ การเพิ่มรงควัตถุสังเคราะห์ลงในอาหารกุ้งเพื่อเพิ่มสีให้แก่ตัวกุ้งมากขึ้น และรงควัตถุที่มีประสิทธิภาพในการเพิ่มสีตัวในสัตว์น้ำ คือแคโรทีนอยด์ (carotenoid) โดยแคโรทีนอยด์มีคุณสมบัติเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดไม่อิ่มตัว โมเลกุลมีเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 ไมโครเมตร ไม่ละลายน้ำแต่จะละลายได้ดีในไขมัน และตัวทำละลายไม่มีขั้วต่างๆ เช่น อะซิโตน ปิโตรเลียมอีเทอร์ เอทธานอล และเมทธานอล ทนต่อการเปลี่ยนแปลงความเป็นกรด-ด่าง ไวต่อแสงและความร้อน (Fox and Vevers, 1960) สัตว์ชนิดต่างๆ รวมทั้งกุ้งไม่สามารถสังเคราะห์แคโรทีนอยด์ขึ้นมาเองได้ จึงจำเป็นต้องได้รับจากอาหารที่กินเข้าไป แคโรทีนอยด์เป็นรงควัตถุที่พบมากในธรรมชาติ เป็นรงควัตถุที่ให้สีเหลือง และสีส้ม มีทั้งในพืชและสัตว์ เช่น ปาล์มน้ำมัน พริก

สาหร่ายสไปรูไลนา ส้ม มะเขือเทศ แครอท ไข่แดง ฯลฯ ทั้งนี้แคโรทีนอยด์สร้างขึ้นจากวิถีเทอร์พีนอยด์ (terpenoid pathway) ในเซลล์ของพืช สาหร่าย ตลอดจนแบคทีเรีย แคโรทีนอยด์ทำหน้าที่เป็นสารตั้งต้นของวิตามินเอ (provitamin A) ซึ่งจะไปมีผลในระบบการมองเห็นและช่วยในการพัฒนาการสร้างตัวของเนื้อเยื่อบุผิว (epidermal tissue) ซึ่งมีผลต่อเนื่องในกระบวนการป้องกันการติดเชื้อของร่างกาย (Lastcha, 1991) นอกจากนี้แคโรทีนอยด์ยังมีคุณสมบัติในการทำลายอนุมูลอิสระของออกซิเจนที่เป็นพิษ ซึ่งเกิดในกระบวนการหายใจ (respiratory burst) ของเซลล์ต่างๆ และยังช่วยให้เซลล์เม็ดเลือดทำลายสิ่งแปลกปลอมได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น และที่สำคัญแคโรทีนอยด์ยังทำหน้าที่เป็นสารป้องกันแสง (photo protection) และเป็นสารป้องกันการหืน (biological antioxidant) ซึ่งจะทำหน้าที่ในการป้องกันเนื้อเยื่อและเซลล์ไม่ให้ถูกทำลายจากปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นในร่างกาย (Simpson *et al*., 1981) นอกจากนี้แคโรทีนอยด์ที่สะสมอยู่ในตัวของสัตว์กลุ่มกุ้ง ปู รวมทั้งแมลงสามารถทำปฏิกิริยารวมกับโปรตีนกลายเป็นแคโรทีโนโปรตีน (carotenoprotein) ทำให้กลายเป็นโปรตีนที่คงสภาพมากขึ้น ยิ่งกว่านั้นเมื่อนำสัตว์กลุ่มดังกล่าวมาผ่านการปรุงด้วยความร้อนทำให้แคโรทีโนโปรตีนที่สะสมไว้เสียสภาพ จึงทำให้กุ้ง ปู มากมีสีสันสดใส ดึงดูดใจผู้บริโภคได้มากขึ้น

ด้วยเหตุผลดังกล่าวการศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของแคโรทีนอยด์ จากแหล่งต่างๆ ทั้งเบตาแคโรทีนจากการสังเคราะห์ และสารสกัดแคโรทีนอยด์จากธรรมชาติ ต่อการเจริญเติบโต อัตรารอดตาย การเพิ่มและสะสมสารสี และการตอบสนองภูมิคุ้มกันในกุ้งขาว รวมทั้งศึกษาประสิทธิภาพของแคโรทีนอยด์ในอาหารต่อการต้านทานต่อความเครียดที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงความเค็ม เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการเลี้ยงและปรับปรุงคุณภาพของผลผลิตให้ตรงตามความต้องการของตลาด

การตรวจเอกสาร

1. กุ้งขาว (*Penaeus vannamei*)

1.1 ชีววิทยาของกุ้งขาว

กุ้งขาว หรือกุ้งขาวแปซิฟิก (Pacific white shrimp, *Penaeus vannamei*) เป็นครัสเตเชียในกลุ่มเดคาปอด (decapoda) ที่มีกำเนิดบริเวณเขตชายฝั่งมหาสมุทรแปซิฟิกของประเทศเม็กซิโก ทางตอนกลางและตอนใต้ของสหรัฐอเมริกา กุ้งขาวเป็นสายพันธุ์กุ้งทะเลที่มีการเพาะเลี้ยงกันอย่างแพร่หลายในหลายประเทศ ได้แก่ สหรัฐอเมริกา เม็กซิโก กัวเตมาลา นิคารากัว เอกัวดอร์ ปานามา โคลัมเบีย และเปรู โดยเอกัวดอร์เป็นประเทศผู้ผลิตกุ้งขาวที่ใหญ่ที่สุดในโลก เหตุผลสำคัญที่ทำให้มีการเพาะเลี้ยงกุ้งขาวกันอย่างกว้างขวาง เนื่องจากกุ้งขาวเป็น

กุ้งทะเลที่เจริญเติบโตเร็วในสภาพของการเพาะเลี้ยง สามารถทนต่อสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลงได้ดี ในช่วงปี ค.ศ.1995 กุ้งขาวได้ถูกนำเข้ามาเพาะเลี้ยงในเอเชียครั้งแรกในประเทศจีน เพื่อเป็นการหาพันธุ์กุ้งทะเลที่ทนทานต่อโรคไวรัสตัวแดงดวงขาว (white spot syndrome virus) ทดแทนกุ้งกุลาดำ และเป็นการชดเชยผลผลิตกุ้งขาวที่ลดลงจากการเพาะเลี้ยงในประเทศแถบละตินอเมริกา จนปัจจุบันได้มีการนำกุ้งขาวเข้ามาเพาะเลี้ยงมากขึ้นในเขตเอเชียตะวันออก เอเชียตะวันออกเฉียงใต้ และเอเชียใต้ ทำให้กุ้งขาวได้กลายเป็นสัตว์น้ำที่กำลังมีบทบาทสำคัญในอุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำของหลายๆ ประเทศในเขตเอเชีย (Tu *et al*., 1999)

1.2 อนุกรมวิธานของกุ้งขาว

กุ้งขาวเป็นสัตว์ที่ถูกจัดให้อยู่ในครอบครัวพีเนียดี (penaeidae) เนื่องจากส่วนของกรี (rostrum) ด้านบนจะมีฟัน 8-9 ซี่ และด้านล่างมี 1-2 ซี่ และถูกจัดให้อยู่ในสกุลย่อยลิโทพีเนียส (subgenus *Litopenaeus*) เนื่องจากตัวเมียจะมีอวัยวะสืบพันธุ์ (thelycum) เป็นแบบเปิด และไม่มีแผ่นกั้นและถุงเก็บน้ำเชื้อ (seminal receptacle) Pere-Farfante และ Kensley (1997) ได้จัดลำดับทางอนุกรมวิธานของกุ้งขาวไว้ดังนี้

Plylum Arthropoda

Class Crustacea

Subclass Malacostraca

Order Decapoda

Suborder Natantia

Family Penaeidae Rafinesque, 1815

Genus *Penaeus* Fabricius, 1798

Subgenus *Litopenaeus*

Species *vannamei*

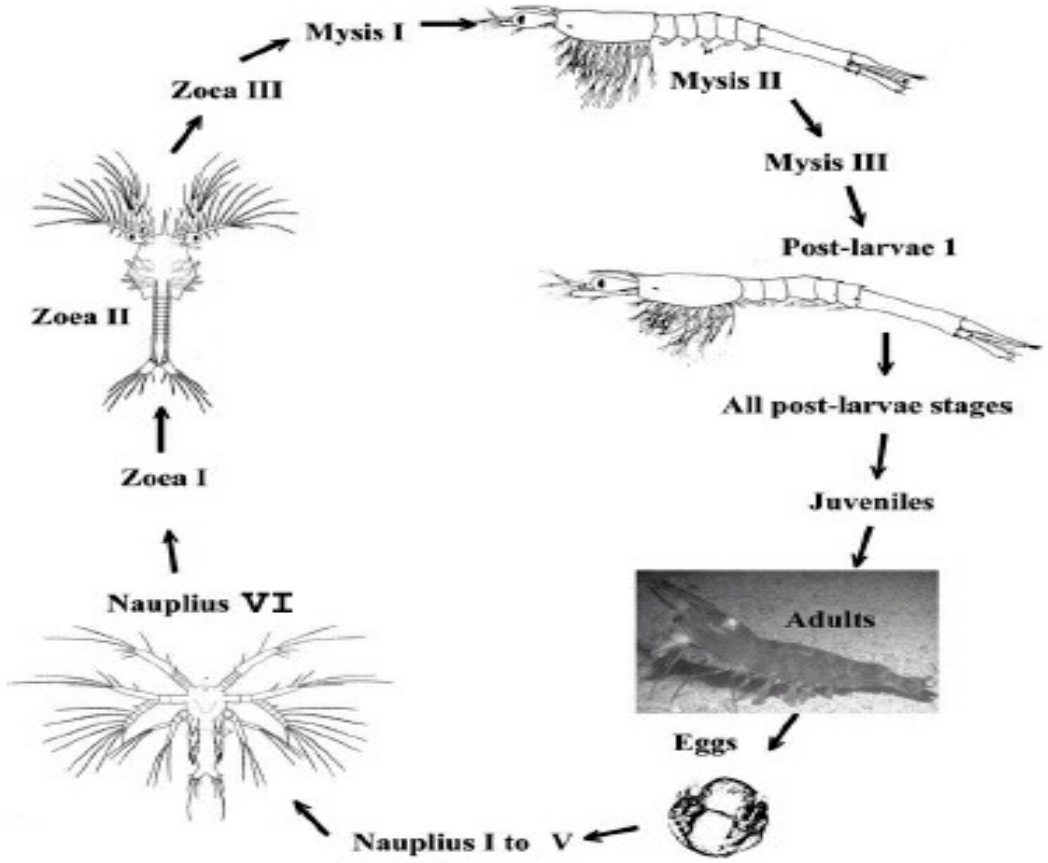
1.3 ลักษณะทั่วไปของกุ้งขาว

ลักษณะทั่วไปของกุ้งขาว เป็นกุ้งที่ลำตัวมีสีขาว โปร่งแสง (translucent white) ซึ่งเป็นที่มาของชื่อ หรืออาจจะมีสีฟ้าซึ่งเกิดจากเม็ดสีที่กระจายอยู่อย่างหนาแน่นโดยเฉพาะบริเวณโคนหาง เป็นกุ้งที่มีขนาดค่อนข้างใหญ่เมื่อเทียบกับกุ้งทะเลชนิดอื่นๆ แต่ขนาดเล็กกว่ากุ้งกุลาดำ เมื่อโตเต็มที่มีความยาวประมาณ 9 นิ้ว ลำตัวมี 8 ปล้อง เปลือกบาง ส่วนของหัวและอก (cephalothorax) มีขนาดใหญ่ ส่วนปลายของหัวจะมีกรีสีน้ำตาลแดงยาวประมาณ 0.8 เท่าของความยาวของส่วนหัวและอก กรีจะมีส่วนปลายแคบ ด้านบนมีฟัน 8 ซี่ ด้านล่างมี 2 ซี่ มี

หนวด 2 คู่ คู่สั้น (antennules) จะสั้นกว่าส่วนของ carapace มาก ส่วนหนวดคู่ยาว (antenna) มีสีแดง ปลายหางจะมีสีแดงเข้ม (Perez Farfante and Kensley, 1997) กุ้งขาวจะชอบอาศัยอยู่บริเวณพื้นน้ำที่มีลักษณะเป็นโคลน (muddy bottom) ในเขตชายฝั่งไปจนถึงบริเวณที่มีความลึกประมาณ 72 เมตร ในธรรมชาติกุ้งขาวจะมีอายุขัยประมาณ 3 ปี (Dore and Frimodt, 1987)

1.4 วงจรชีวิตและการสืบพันธุ์

กุ้งขาวเพศเมียที่พร้อมจะสืบพันธุ์จะมีการเจริญของรังไข่ สามารถมองเห็นได้ชัดเจนผ่านแผ่นปิดส่วนหัวและอก (carapace) ซึ่งมีลักษณะเป็นแผ่นบาง ช่วงแรกของการเจริญรังไข่จะมีสีขาว และค่อยๆ เปลี่ยนเป็นสีน้ำตาลเข้มขึ้นเมื่อไข่เริ่มแก่ ในแม่กุ้งที่มีไข่แก่พร้อมจะวางไข่จะสังเกตเห็นรังไข่เป็นลำทึบมีสีเขียวเกือบดำอยู่บริเวณหลังไปจรดหาง และบริเวณด้านข้างของลำตัวตรงปล้องที่ 1-2 ส่วนกุ้งขาวเพศผู้จะมีการสร้างสเปิร์มบรรจุอยู่ภายในถุงเก็บน้ำเชื้อ (spermatophore) กุ้งขาวมีพฤติกรรมการเกี้ยวพาราสีก่อนการผสมพันธุ์ และมักจะผสมพันธุ์กันในช่วงบ่ายหรือเวลากลางคืนขึ้นอยู่กับความเข้มของแสง ในสภาพธรรมชาติกุ้งจะวางไข่ที่ระดับความลึกประมาณ 30-60 เมตร ปริมาณไข่จะขึ้นอยู่กับขนาดของแม่กุ้ง แม่กุ้งขนาด 30-45 กรัม วางไข่ครั้งละประมาณ 100,000 ถึง 250,000 ฟอง ไข่มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.22 มิลลิเมตร ไข่ที่ได้รับการปฏิสนธิแล้วมีการแบ่งเซลล์และพัฒนาไปเป็นตัวอ่อนระยะนอเพลียส (nauplius) ภายในเวลา 14 ชั่วโมง ตัวอ่อนของกุ้งขาวจะแบ่งออกเป็นระยะต่างๆ คือ ระยะนอเพลียส 6 ระยะ ระยะซูเอีย (zoea) 3 ระยะ ระยะไมซีส (mysis) 3 ระยะ และระยะโพสต์ลาร์วา (post larvae) ซึ่งมีขนาดประมาณ 0.88-3 มิลลิเมตร (Munoz *et al*., 2003) (ภาพที่ 1)



ภาพที่ 1 วงชีวิตของกุ้งขาว (ดัดแปลงจาก Munoz *et al*., 2003)

1.5 การเพาะเลี้ยงกุ้งขาว

เนื่องจากกุ้งขาวสามารถปรับตัวให้เข้ากับสิ่งแวดล้อมได้ในช่วงกว้าง เช่น สามารถทำการเพาะเลี้ยงได้ทั้งในน้ำที่มีระดับความเค็มที่ 5-35 ส่วนในพันส่วน และระดับความเค็มต่ำ 0-5 ส่วน แต่ระดับความเค็มที่สามารถเจริญเติบโตได้ดีคือ 10-22 ส่วนในพันส่วน ส่วนอุณหภูมิที่สามารถเจริญเติบโตได้ดีคือ 26-29 องศาเซลเซียส แต่สามารถทำการเพาะเลี้ยงได้ที่อุณหภูมิ 25-35 องศาเซลเซียส ระดับออกซิเจนที่ละลายน้ำควรมีค่า 4-9 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่าความเป็นกรดด่างควรอยู่ระหว่าง 7.2-8.6 กุ้งชนิดนี้ชอบน้ำค่อนข้างกระด้างเฉลี่ย 120 มิลลิกรัมต่อลิตร และน้ำที่มีค่าความเป็นด่างอยู่ในช่วง 80-150 มิลลิกรัมต่อลิตร จากข้อมูลดังกล่าวจึงพบว่าสามารถทำการเพาะเลี้ยงได้ทั้งในบริเวณพื้นที่ชายฝั่งหรือบริเวณพื้นที่ที่มีความเค็มต่ำ โดยใช้ระบบการเลี้ยงได้หลายระบบทั้งระบบธรรมชาติ ระบบกึ่งหนาแน่น และการเลี้ยงแบบหนาแน่น โดยการเลี้ยงในระบบธรรมชาติและระบบกึ่งหนาแน่น มีการเลี้ยงในบ่อดินขนาดใหญ่ 6-18 ไร่ อัตราการปล่อย 28,000-50,000 ตัวต่อไร่ ให้อาหาร 25 เปอร์เซ็นต์ ในระยะ

เริ่มปล่อย และลดปริมาณลงเหลือ 2-4 เปอร์เซ็นต์ในระยะก่อนจับ มีการใช้เทคโนโลยีในการเลี้ยงน้อย ปัจจุบันระบบการเลี้ยงนี้ยังมีการดำเนินอยู่ในแถบอเมริกาใต้ เช่น เอกัวดอร์ ปานามา เป็นต้น ส่วนระบบหนาแน่นซึ่งเลี้ยงทั้งในบ่อดิน บ่อซีเมนต์กลม และระบบทางน้ำไหล (raceway) ระบบการเลี้ยงกุ้งขาวในบ่อดินเป็นการประยุกต์ระหว่างระบบกึ่งพัฒนากับระบบพัฒนา การเลี้ยงระบบนี้มีการดำเนินการในประเทศแถบเอเชีย รวมทั้งประเทศไทย บ่อดินมีขนาดเล็กลง และมีการจัดการในระหว่างการเตรียมบ่อเพิ่มขึ้น ในช่วงวันที่ 1 ถึง 40 ของการเลี้ยงให้อาหารโปรตีนสูง 40 เปอร์เซ็นต์ และเริ่มเปลี่ยนมาใช้อาหารที่มีโปรตีนต่ำ 30 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นข้อดีประการหนึ่งของกุ้งขาวที่สามารถใช้อาหารโปรตีนต่ำ ทำให้ต้นทุนการผลิตถูกลง นอกจากนี้ยังสามารถใช้อาหารธรรมชาติจากบ่อได้อย่างมีประสิทธิภาพ และให้เปอร์เซ็นต์เนื้อสูงถึง 66–68 เปอร์เซ็นต์ (Iversen and Hale, 1992)

สำหรับระบบการเลี้ยงกุ้งขาวในบ่อกลมมีการดำเนินการในอเมริกา และญี่ปุ่น โดยจัดเตรียมบ่อซีเมนต์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 20-30 เมตร พื้นมีความลาดเอียง 2 องศา เข้าสู่ศูนย์กลางซึ่งเป็นท่อระบายน้ำออก ความลึกน้ำ 95 เซนติเมตร เลี้ยงในระดับความหนาแน่น 160,000-320,000 ตัวต่อไร่ ทั้งนี้ผลผลิตสูงสุดที่ 75 ตัวต่อตารางเมตร ได้ผลผลิต 1.71 กิโลกรัมต่อตารางเมตร กุ้งขาวมีการกินอาหารและมีการเจริญเติบโตดีขึ้นเมื่อน้ำในบ่อเลี้ยงมีไดอะตอมบางชนิด ได้แก่ *Navicula, Nitzchia, Thalassiosira* และ *Chaetoceros* ในปริมาณที่เหมาะสม ดังนั้นในระบบจึงต้องมีการเปลี่ยนถ่ายน้ำทุกวันเพื่อควบคุมปริมาณแพลงก์ตอนพืช และลดปริมาณของเสียไนโตรเจน อีกทั้งช่วยให้กุ้งมีการกินอาหารดีขึ้น ในระยะแรกของการเลี้ยงมีการเปลี่ยนถ่ายน้ำ 20 เปอร์เซ็นต์ และเพิ่มขึ้นเป็น 100 เปอร์เซ็นต์ หลังการเลี้ยงนาน 50 วัน ส่วนระบบการเลี้ยงกุ้งขาวในทางน้ำไหล ได้พัฒนาขึ้นในเม็กซิโก และฮาวาย ระบบดังกล่าวให้ผลผลิตสูงขึ้นถึง 6.4-7.8 ตันต่อไร่ ทางน้ำไหลมีขนาด 200–500 ตารางเมตร ความลึก 60 เซนติเมตร ระบบจะใช้ปั๊มน้ำหมุนเวียนน้ำในระบบไหลต่อเนื่อง (flow through system) และมีการเปลี่ยนถ่ายน้ำ 280–400 เปอร์เซ็นต์ต่อวัน ด้านบนคลุมด้วยแผ่นพีวีซี (PVC) เพื่อช่วยปรับอุณหภูมิของระบบให้สูงขึ้น เลี้ยงเป็นเวลา 15 สัปดาห์ ได้กุ้งขนาด 88-110 ตัวต่อกิโลกรัม ระบบดังกล่าวมีการจัดการและการเลี้ยงคล้ายกับบ่อกลม ทั้งนี้การใช้ปั๊มสูบน้ำผ่านระบบกรองช่วยให้เกิดการไหลเวียนอย่างต่อเนื่อง พร้อมๆ กับการให้อากาศในระบบน้ำไหลช่วยให้สามารถปล่อยกุ้งลงเลี้ยงในระบบได้มากขึ้น (Ponce-Palafox *et al*., 1997)

2. แคโรทีนอยด์

แคโรทีนอยด์เป็นกลุ่มรงควัตถุที่ให้สีเหลือง สีส้ม และสีชมพูถึงแดง เป็นสารที่ละลายได้ดีในไขมัน (fat soluble pigment) และไม่เกิดสปอนนิไฟด์ (non-saponificable lipids) แคโรทีนอยด์สร้างขึ้นจากวิถีเทอร์พีนอยด์ (terpenoid pathway) ของสิ่งมีชีวิตหลายชนิด เช่น

เซลล์พืช สาหร่าย แบคทีเรีย และรา ขณะที่สัตว์ไม่สามารถสังเคราะห์สารดังกล่าวได้ แคโรทีนอยด์เป็นสารที่จำเป็นต่อการดำรงชีวิตและการเจริญเติบโตของสัตว์ จึงจำเป็นต้องกินอาหารที่มีส่วนผสมของแคโรทีนอยด์แล้วเก็บสะสมไว้ในส่วนต่างๆ ของร่างกาย เช่น เกล็ด ผิวหนัง กล้ามเนื้อ เปลือก และไข่ เป็นต้น (Britton, 1983)

2.1 แหล่งของแคโรทีนอยด์

2.1.1 แคโรทีนอยด์จากพืช

แคโรทีนอยด์พบได้ใน พืชชั้นสูงกว่า 600 ชนิด พืชสังเคราะห์แคโรทีนอยด์ผ่านวิถีไอโซพรีนอยด์ (isoprenoids pathway) พืชสีเขียวจะมีการสังเคราะห์แคโรทีนอยด์และเก็บไว้ในคลอโรพลาสต์แคโรทีนอยด์กลุ่มหลักที่พบในพืชจะเป็นเบตาแคโรทีน (β-carotene) ลูทีอีน (lutein) ไวโอลาแซนทีน (violaxanthin) และนีโอแซนทีน (neoxanthin) สำหรับเนื้อเยื่อพืชที่ไม่ได้ทำหน้าที่ในการสังเคราะห์แสงหรือไม่มีส่วนของคลอโรพลาสต์ เช่น ส่วนดอกหรือผลสีเหลือง แดง หรือ ส้ม แคโรทีนอยด์ที่สังเคราะห์จะถูกเก็บไว้ในส่วนที่เรียกว่าโครโมพลาสต์ (chromoplast) แคโรทีนอยด์หลักๆ ที่พบในเนื้อเยื่อสีเหลืองเป็นกลุ่มไวโอลาแซนทีน โดย Belitz และ Grosch (1999) รายงานว่าพบคริปโตแซนทีน (cryptoxanthin) เป็นรงควัตถุที่สำคัญในข้าวโพด มะละกอ และส้มแมนดาริน ขณะที่ Rauscher (1998) กล่าวว่าเบตาแคโรทีนและลูทีอีนเป็นแคโรทีนอยด์กลุ่มหลักในเนื้อเยื่อพืชที่มีสีส้มหรือแดง รายงานของ Olatunde และ Britton (1999) พบว่าแคปแซนทีน (capxanthin) แคปโซรูบิน (capsorubin) มีมากในพริกหวาน ส่วนลูทีอีนและเซียแซนทีน พบว่าเป็นแคโรทีนอยด์หลักในปาล์มน้ำมัน

2.1.2 แคโรทีนอยด์จากสัตว์

แคโรทีนอยด์สามารถพบได้ในสัตว์หลายชนิดทั้ง นก ไก่ แมลง ปลา ปู และกุ้ง เป็นต้น โดยสัตว์จะสะสมสารกลุ่มนี้ไว้ในส่วนต่างๆ ของร่างกายและมีปริมาณที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับปัจจัยภายในของตัวสัตว์เองเช่น ชนิด เพศ ขนาด และอายุ วงจรการลอกคราบ ระดับของฮอร์โมน สีเดิมของสัตว์ หรือปัจจัยภายนอกเช่นความเข้มแสง อุณหภูมิ สิ่งแวดล้อมที่สัตว์อาศัยอยู่ รวมทั้งชนิดและปริมาณของแคโรทีนอยด์ที่สัตว์ได้รับจากอาหาร (Chien and Jeng, 1992; Dall, 1995; Goodwin, 1960; Yamada *et al*., 1990) ในสัตว์แต่ละชนิดจะมีกลไกการเปลี่ยนแปลงแคโรทีนอยด์ในอาหารให้อยู่ในรูปที่สัตว์สามารถนำไปใช้ได้ เช่น ในกุ้ง ปู และลอปสเตอร์ สามารถเปลี่ยนเบตาแคโรทีนให้เป็นแอสตาแซนทีนแล้วสะสมไว้ที่เปลือก เนื้อ ตับ และตับอ่อน (Tanaka *et al*., 1976) Velu และคณะ (2003) ทำการแยกชนิดของแคโรทีนอยด์ในกุ้งครัสเตเชียน 2 ชนิดได้แก่ *Streptocephalus dichotomus* และ *Moina micrura* พบแคโรทีโน-โปรตีนหลายชนิดได้แก่ แอสตาแซนทีน (astaxanthine) แคนทาแซนทีน (canthaxanthine)

แอนเทอราแซนทีน (antheraxanthin) ลูทีอีน เบตาคริปโตแซนทีน และ ไวโอราแซนทีน ส่วนในกุ้งคุรูมา (*Penaeus japonicus*) พบแอสตาแซนทีนสะสมในเปลือก และอวัยวะภายใน 90 และ 70 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ Tsushima และคณะ (2002) ศึกษาปริมาณแคโรทีนอยด์ในปลาแคทฟิชที่อยู่ในครอบครัวชิมูริดี (simuridae) 4 ชนิด ได้แก่ *Silurus asotus*, S. *microdorsalis*, *S. lithophilus* และ *S. biwaensis* พบว่ากลุ่มปลาดังกล่าวมีแคโรทีนอยด์ 3 ชนิดหลักเป็นองค์ประกอบในเซลล์ คือ ลูทีอีน 34 เปอร์เซ็นต์ แอลโลแซนทีน (alloxanthin) 47 เปอร์เซ็นต์ และเซียแซนทีน (zeaxanthins) 24 เปอร์เซ็นต์

2.1.3 แคโรทีนอยด์จากจุลินทรีย์และสาหร่ายขนาดเล็ก

แคโรทีนอยด์สามารถพบได้ในจุลินทรีย์หลายชนิดทั้งแบคทีเรีย ยีสต์ และรา บางชนิด ในแบคทีเรียหลายชนิดโดยเฉพาะกลุ่มแบคทีเรียสังเคราะห์แสง (photosynthetic bacteria) Imhoff (1995) กล่าวว่าแบคทีเรียจะสังเคราะห์แคโรทีนอยด์ชนิดต่างๆ เก็บไว้ในเซลล์ โดยผ่านวิถีการสังเคราะห์ต่างๆ เช่น ใน *Rhodocyclus* และ *Rhodopseudomona acidophila* สังเคราะห์ผ่านวิถีแคโรทีนอล (carotenal pathway) ใน *Rhodomicrobium vanielii* สังเคราะห์ผ่านวิถีเบตาแคโรทีน ส่วนในแบคทีเรียกลุ่มคลอโรเบียเซีย (Chlorobiacea) ทุกชนิด พบสามารถสังเคราะห์แคโรทีนอยด์ผ่านวิถีไอโซรีนิอีราทีน (isorenieratene pathway) เป็นต้น เช่นเดียวกับยีสต์หลายชนิดโดยเฉพาะ *Phaffia rhodozyma* สามารถสังเคราะห์แคโรทีนอยด์และสะสมไว้ในเซลล์ปริมาณในค่อนข้างสูง (Gentles and Haard, 1991; Linden, 1999; Sanderson and Jolly, 1994) ในรา *Laetiporus sulphureus* Mishyn และ Zalashko (2000) พบว่าในระหว่างการเจริญบนอาหารเลี้ยงเชื้อราจะสังเคราะห์และสะสมแคโรทีนอยด์ไว้ในไมซีเลียม (mycelium) เช่นเดียวกับ *Blakeslea trispora* ที่มีการผลิตแอสตาแซนทีนเก็บไว้ในส่วนของเส้นใยในปริมาณที่มีศักยภาพในการนำมาผลิตเป็นแหล่งสารสีสำหรับใช้ในอุตสาหกรรมได้ (Britton, 1983) ปัจจุบันมีการนำแคโรทีนอยด์จากจุลินทรีย์มาใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอาหารอย่างกว้างขวางเพื่อการแต่งสี และกลิ่น อย่างไรก็ตามการนำจุลินทรีย์มาใช้เป็นแหล่งแคโรทีนอยด์ในสัตว์น้ำปัจจุบันพบว่ายังคงมีอุปสรรคบางประการ เช่นการใช้จุลินทรีย์ทั้งเซลล์ในอาหาร สัตว์น้ำอาจได้รับผลกระทบจากสารพิษที่จุลินทรีย์สร้างขึ้นทั้งภายในหรือปล่อยออกมานอกเซลล์ มีผลให้สัตว์น้ำมีการเจริญเติบโต และมีระบบภูมิคุ้มกันลดลง (Kiriratnikom, 2006) อีกทั้งจาก จุลินทรีย์บางชนิด เช่น ยีสต์มีผนังเซลล์ที่หนา สัตว์น้ำส่วนใหญ่ไม่มีเอนไซม์ที่ทำหน้าที่ย่อยผนังเซลล์ของจุลินทรีย์ จึงทำให้สัตว์น้ำนำแคโรทีนอยด์จากจุลินทรีย์ไปใช้ได้น้อยลง (Tangeras and Slinde, 1994)

นอกจากจุลินทรีย์แล้วสาหร่ายขนาดเล็ก (microalgae) จัดเป็นแหล่งที่สำคัญของแคโรทีนอยด์ในธรรมชาติ สาหร่ายขนาดเล็กจะสังเคราะห์แคโรทีนอยด์ผ่านวิถีแคโรทีโนจีนีซีส (carotenogenesis pathway) (Gouveia *et al*., 1996) และเก็บไว้ในคลอโรพลาสต์ แคโรทีนอยด์

หลักหรือที่เรียกว่าไพรมารี (primary) แคโรทีนอยด์ในสาหร่ายประกอบด้วยกลุ่มแอลฟา แคโรทีนอยด์ เบตาแคโรทีนอยด์ นีโอแซนทีน ลูทีอีน ไวโอลาแซนทีน แอนทีราแซนทีน และเซียแซนทีน (Young, 1993) ในขณะที่กลุ่มรองหรือ secondary แคโรทีนอยด์ประกอบด้วย กลุ่มแอสตาแซนทีน (astaxanthin) อิควินโนน (equinenone) ไฮดรอกซิวินโนน (hydroxyequinenone) แคนทาแซนทีน (canthaxanthin) แคโรทีนอยด์ที่ถูกสังเคราะห์ในสาหร่ายจะเป็นกลุ่มหลักหรือกลุ่มรองนั้นพบว่าขึ้นอยู่กับชนิดของสาหร่าย โดย Harpaz และคณะ(1998) รายงานว่าเบตาแคโรทีนเป็นแคโรทีนอยด์หลักที่พบในเซลล์ของดูนาลิเอลล่า (*Dunaliella salina*) Liao และคณะ (1993) กล่าวว่าเซียแซนทีน เป็นแคโรทีนอยด์ชนิดหลักในเซลล์สไปรูไลนา (*Spirulina* spp.) ในขณะที่ Gouveia และคณะ (2002) กล่าวว่าในเซลล์สาหร่ายคลอเรลลา (*Chlorella vulgaris*) มีแคโรทีนอยด์เป็นองค์ประกอบอยู่ด้วยประมาณ 0.4 เปอร์เซ็นต์ แยกเป็นลูทีอีน 0.3 เปอร์เซ็นต์ เบตาแคโรทีนวี 1.2 เปอร์เซ็นต์ แคนทาแซนทีน 36.2 เปอร์เซ็นต์ แอสตาแซนทีน 55 เปอร์เซ็นต์ และสารสีอื่นๆ รวม 7.3 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในฮีมาโตคอกคัส (*Haematococcus pluvialis*) แคโรทีนอยด์ที่พบเป็นหลักคือ แอสตาแซนทีน และแอสตาแซนทีนเอสเตอร์ (Harker *et al*., 1996) ซึ่งสาหร่ายชนิดนี้จัดเป็นแหล่งผลิตสารสีจากธรรมชาติในปัจจุบัน โดยพบว่าการเลี้ยงสาหร่ายชนิดนี้ในสภาวะที่ส่งเสริมให้สาหร่ายเกิดความเครียดโดยปรับระดับความเค็มสูงๆ ปริมาณแอสตาแซนทีนที่ผลิตในเซลล์จะสูงขึ้นอย่างชัดเจน (Tripathi *et al*., 2001) นอกจากนั้นสาหร่ายอื่นๆ อีกหลายชนิดที่มีการศึกษาทดลองนำเซลล์สาหร่ายทั้งเซลล์สด เซลล์แห้ง เซลล์ที่ผ่านการทำให้แตกหัก หรือย่อยด้วยเอนไซม์มาทดลองเป็นแหล่งแคโรทีนอยด์ในอาหารสัตว์น้ำ พบว่าสามารถเพิ่มสีในตัวของสัตว์น้ำได้ (วุฒิพรและสมบัติ, 2529; สุกิจ และพูนสิน, 2538; Boonyaratpalin *et al*., 2001)

2.1.4 แคโรทีนอยด์สังเคราะห์

ปัจจุบันมีการสังเคราะห์แคโรทีนอยด์เพื่อทดแทนสารสกัดจากธรรมชาติ แต่ในกระบวนการผลิตแคโรทีนอยด์สังเคราะห์ค่อนข้างมีความซับซ้อน ทำให้รงควัตถุที่ได้มีราคาแพง ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตในอุตสาหกรรมต่างๆ ที่จำเป็นต้องใช้สารกลุ่มนี้มีราคาแพงขึ้นด้วย แคโรทีนอยด์สังเคราะห์หลายชนิดถูกนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร เช่น การใช้เบตาแคโรทีน ซึ่งเป็นแคโรทีนอยด์ที่ให้สีเหลืองในอุตสาหกรรมผลิต เนย มาการีน ไอศครีม มักกะโรนี น้ำมันพืช น้ำสลัด ผลิตภัณฑ์ขนมอบ แป้งเค้กสำเร็จรูป ซุป และเครื่องดื่มต่างๆ โดยมีจำหน่ายในท้องตลาดหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับปริมาณของแคโรทีนอยด์ เช่น เบตาแคโรทีนชนิดเหลว (liquid suspension) เบตาแคโรทีนชนิดข้นหนืด (semi-solid suspension) เบตาแคโรทีนชนิดเม็ดละลายน้ำได้ (beadlet-solid suspension) และเบตาแคโรทีนชนิดอีมัลชั่น (emulsion beverage type) นอกจากนั้นยังมี เบตาอะโปแคโรทีนอล หรือ อะโปแคโรทีนอล (β-apo-8-carotenols หรือ apocaroenol) ที่ให้สีส้มถึงแดง นิยมใช้ในอาหารประเภททอปปิ้ง หรือ

ฟรอสติ้ง ขนมหวาน หน้าขนมพาย ไอศครีม ซุป น้ำสลัด และเนยแข็ง ส่วนแคนทาแซนทีนที่ให้สีส้มแดง มักนิยมใช้ในน้ำสลัด เครื่องดื่ม ซุป วุ้น สปาเก็ตตี้ และใช้สำหรับแต่งสีผลิตภัณฑ์ขนมให้มีสีสตรอเบอรี ราสเบอรี และเชอรี เป็นต้น (ศิวาพร, 2529) ในส่วนอุตสาหกรรมการผลิตสัตว์น้ำพบว่ามีการนำแคโรทีนอยด์สังเคราะห์หลายชนิด เช่น เบตาแคโรทีน แอสตาแซนทีน และแคนทาแซนทีน มาใช้เพื่อเพิ่มคุณภาพและมูลค่าของผลิตภัณฑ์ โดยวิธีการใช้มักจะเป็นการนำมาผสมในอาหารสัตว์น้ำ และให้กินช่วงระยะเวลาหนึ่ง หรือให้กินตลอดระยะเวลาการเลี้ยง (Baker *et al*., 2002; Barbosa *et al*., 1999; Barclay *et al*., 2006; Boonyaratpalin *et al*., 1994; Boonyaratpalin *et al*., 2001; Chien *et al*., 2003; Wyban *et al*., 1997)

2.2 โครงสร้างของแคโรทีนอยด์

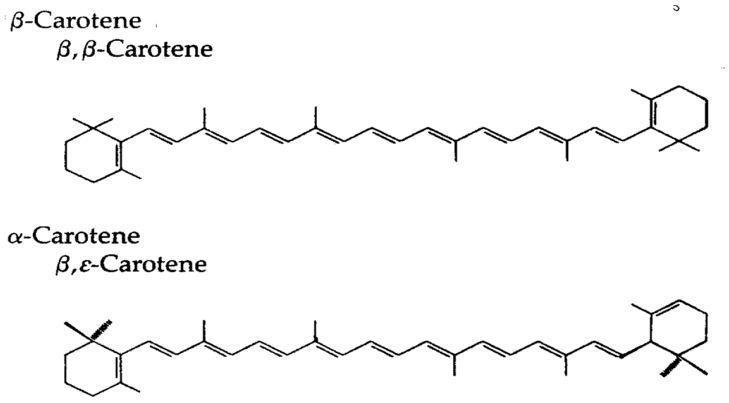
แคโรทีนอยด์เป็นโพลีอีนไฮโดรคาร์บอน (polyene hydrocarbons) ที่มีหมู่ไอโซพรีน (isoprene unites) เป็นองค์ประกอบ โดยมากแคโรทีนอยด์จะประกอบด้วย คาร์บอนอะตอม 40 ตัว หรือมีหมู่ไอโซพรีน 8 หมู่ ต่อกันเป็นสายยาวด้วยพันธะคู่คอนจูเกต (conjugated double bonds) หากพิจารณาจากโครงสร้างทางเคมี สามารถแบ่งแคโรทีนอยด์ได้เป็น 2 กลุ่มหลัก คือ

2.2.1 แคโรทีน (carotene)

แคโรทีนเป็นกลุ่มที่โครงสร้างประกอบด้วยคาร์บอนและไฮโดรเจนเท่านั้น และที่ปลายข้างใดข้างหนึ่งหรือทั้งสองข้างมีวงแหวนไอโอโนน (ionone ring) สูตรโครงสร้างคือ $C_{40}H_{56}$ (รูปที่ 2) เป็นรงควัตถุที่ให้สีส้มแดง เช่น แอลฟาแคโรทีนและเบตาแคโรทีน พบได้ในแครอท และไลโคปีน พบได้ในมะเขือเทศ (Belitz and Grosch, 1999; Olatunde and Britton, 1999)

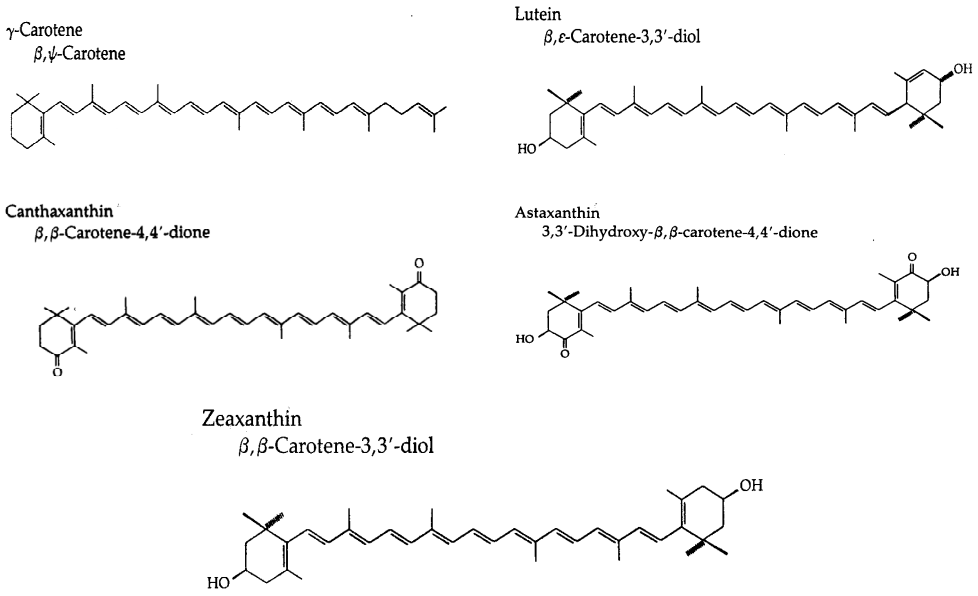
2.2.2 แซนโทฟิลล์ (xanthophyll)

แซนโทฟิลล์เป็นอนุพันธ์ของแคโรทีนที่จับอยู่กับออกซิเจนหรือเรียกว่าออกซิแคโรทีนอยด์ (oxycarotenoids) โครงสร้างแคโรทีนอยด์ชนิดนี้ประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน (รูปที่ 3) เป็นรงควัตถุที่ให้สีเหลืองเข้ม หรือสีเหลืองแกมน้ำตาลพบในพืชและสาหร่ายทุกชนิด เช่น แคปแซนทีน (capxanthin) แคปโซรูบิน (capsorubin) ที่พบในพริก หรือ คริปโตแซนทีน (cryptoxanthin) ซึ่งเป็นรงควัตถุที่สำคัญในข้าวโพด มะละกอ และส้มแมนดาริน (Belitz and Grosch, 1999) ลูทีอีน และเซียแซนทีนที่พบเป็นหลักในปาล์มน้ำมัน (Olatunde and Britton, 1999) เป็นต้น



ภาพที่ 2 โครงสร้างของแคโรทีนอยด์ในกลุ่มแคโรทีน

ที่มา : Schmidt และคณะ (1994)



ภาพที่ 3 โครงสร้างของแคโรทีนอยด์ในกลุ่มแซนโทฟิลล์

ที่มา : Schmidt และคณะ (1994)

2.3 คุณสมบัติของแคโรทีนอยด์

2.3.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

2.3.1.1 การละลาย

แคโรทีนอยด์ไม่ละลายน้ำแต่ละลายได้ดีในตัวทำละลายอินทรีย์ที่ไม่มีขั้ว เช่น อะซีโตน เบนซิน คลอโรฟอร์ม ปิโตรเลียมอีเทอร์ และเฮกเซนรวมทั้งไขมันและน้ำมัน ดังนั้นจึงเรียกแคโรทีนอยด์ว่าไลโปโครม (lipochrome pigments) (Belitz and Grosch, 1999; Ronsholdt and Mclean, 2001)

2.3.1.2 ความเป็นขั้ว

ความเป็นขั้วของแคโรทีนอยด์จะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับจำนวนพันธะคู่ในสูตรโครงสร้าง เช่น แซนโทฟิลล์มีหมู่ที่มีขั้วเรียงจากมากไปหาน้อยได้แก่ ไฮดรอกซี (hydroxy) และโมโนอีพ็อกซี (monoepoxy) ตามลำดับ แคโรทีนอยด์กลุ่มแซนโทฟิลล์จะมีความเป็นขั้วมากกว่าในกลุ่มแคโรทีน (Olatunde and Britton, 1999) ส่วนแคโรทีนอยด์ที่พบในพืชตระกูลส้มมักเป็นพวกที่มีความเป็นขั้วมากเช่น โทรลลิแซนทีน (trollixanthin) และโทรลลิโครม (trollichrom) (Belitz and Grosch, 1999)

2.3.1.3 การดูดกลืนแสง (spectroscopy)

แคโรทีนอยด์มีคุณสมบัติในการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่นตั้งแต่ 400-700 นาโนเมตร โดยแคโรทีนอยด์แต่ละชนิดจะให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{max}) แตกต่างกันขึ้นอยู่กับจำนวนพันธะคู่คอนจูเกตในโครงสร้าง และชนิดของตัวทำละลายที่ใช้ในการสกัด (Belitz and Grosch, 1999; Ronsholdt and Mclean, 2001)

2.3.2 คุณสมบัติทางเคมี

แคโรทีนอยด์มีสูตรโครงสร้างทางเคมีที่มีพันธะคู่คอนจูเกตเป็นจำนวนมาก โครงสร้างจึงไม่เสถียรและถูกออกซิไดซ์ได้ง่าย จากคุณสมบัติดังกล่าวจึงทำให้การแยกหรือสกัดแคโรทีนอยด์จากวัตถุดิบต่างๆ มีปริมาณลดลงจากปริมาณที่มีอยู่จริงเนื่องจากกระบวนการแยกสารสกัดจะเกิดการสูญเสียความสามารถในการให้สี หรือเกิดการเปลี่ยนแปลงสภาพของรงควัตถุไป โดยปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการถูกออกซิไดซ์ของรงควัตถุกลุ่มดังกล่าวได้แก่ แสง ความร้อน ความเป็นกรด และการมีโปรออกซิแดนท์ (pro-oxidants) เช่น แคโรทีนอยด์ในธรรมชาติมีไอโซเมอร์แบบทรานส์ทั้งหมด แต่เมื่อถูกเหนี่ยวนำด้วยความร้อน ตัวทำละลายอินทรีย์ และกรดโครงสร้างจะถูกเปลี่ยนเป็นไอโซเมอร์แบบซิส ทำให้การดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นสูงสุดเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย และทำให้เกิดการสูญเสียแคโรทีนอยด์ (Belitz and Grosch, 1999)

2.3.3 คุณสมบัติทางชีววิทยา

แคโรทีนอยด์นับว่ามีความสำคัญในระบบสรีรวิทยาของสิ่งมีชีวิตอย่างมากและถือว่าเป็นสารอาหารที่มีความสำคัญ เนื่องจากทำหน้าที่เป็นสารตั้งต้นของวิตามินเอ (provitamin A) มีผลในระบบการมองเห็น และช่วยในการพัฒนาการสร้างตัวของเนื้อเยื่อบุผิว (epidermal tissue) จะเป็นการช่วยป้องกันการติดเชื้อ (Lastcha, 1991) นอกจากนี้แคโรทีนอยด์ยังเกิดปฏิกิริยารวมกับโปรตีนกลายเป็นแคโรทีโนโปรตีน (carotenoproteins) ในสัตว์กลุ่มกุ้งและปู มีผลให้โปรตีนมีความคงสภาพมากขึ้น (Birkeland and Bjerkeng, 2004) แคโรทีนอยด์มีผลต่อความสามารถในการนำสารเข้าหรือออก (permeability) จากเซลล์ของเมมเบรน นอกจากนั้นแคโรทีนอยด์ในเนื้อเยื่อโดยเฉพาะกลุ่มคีโตแคโรทีนอยด์ แอสตาแซนทีน ยังมีบทบาทเป็นสารต้านอนุมูลอิสระป้องกันเนื้อเยื่อและเซลล์ไม่ให้ถูกทำลายจากปฏิกิริยาออกซิเดชั่นโดยแสงที่เกิดขึ้นในร่างกาย (photo-protective antioxidant) แคโรทีนอยด์จึงเป็นสารที่มีผลโดยตรงต่อระบบการทำงานต่างๆ ของร่างกาย เช่น ระบบสืบพันธุ์ ระบบการมองเห็น และระบบภูมิคุ้มกัน เป็นต้น (Kobayashi and Sakamoto, 1999; Lastcha, 1991; Simpson *et al*., 1981; Wänstrand, 2004)

2.4 บทบาทของแคโรทีนอยด์ในสัตว์น้ำ

2.4.1 เพิ่มสีตัวของสัตว์น้ำ

สัตว์น้ำได้รับแคโรทีนอยด์จากอาหารที่กินเข้าไป แล้วสะสมในส่วนต่างๆ ของร่างกาย เช่น ผิวหนัง เปลือก ครีบ ตา เนื้อ ตับ ลำไส้ และอวัยวะสืบพันธุ์ (Bjerkeng *et al*., 2000; Cejas *et al*., 2003; Hata and Hata, 1976; Metusalach *et al*., 1996) การที่สัตว์น้ำมีสีตัวทำให้สามารถพลางตัวเองให้ปลอดภัยจากศัตรูได้ อีกทั้งในอุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำบางชนิดจำเป็นต้องมีการปรับปรุงสีของผลผลิตให้ตรงกับความต้องการของตลาด เช่น เนื้อปลาในกลุ่มซัลมอน (*Salmo* spp., *Oncorhynchus* spp., *Salvelinus* spp.) ควรจะมีสีชมพูถึงสีแดงคล้ายกับปลาที่จับจากธรรมชาติ (Sommer *et al*., 1991) กุ้งและปูทะเลควรมีสีเปลือกส้มถึงแดงหลังการต้ม (Lastcha, 1991) เช่นเดียวกับ Barclay และคณะ (2006) กล่าวว่าแม้แอสตาแซนทีนไม่มีผลให้กุ้งลอปสเตอร์เจริญเติบโต หรือมีอัตรารอดมากขึ้น แต่การได้รับอาหารที่ผสมแอสตาแซนทีนทำให้กุ้งชนิดนี้มีสีตัวที่เข้มขึ้นตรงกับความต้องการของตลาด เช่นเดียวกับ Yamada และคณะ (1990) ที่พบว่าการเสริมแอสตาแซนทีน และเบตาแคโรทีน เพื่อเป็นแหล่งของแคโรทีนอยด์ในอาหารสามารถเพิ่มสารสีของกุ้งคุรูมาได้ รวมทั้งการศึกษาอื่นๆ ทั้งในกุ้งทะเล ปลา พบว่าแคโรทีนอยด์จากพืช จุลินทรีย์ สาหร่าย หรือจากการสังเคราะห์ สามารถเพิ่มสีเปลือกและเนื้อของสัตว์น้ำได้ (Arredondo-Figueroa *et al*., 2003; Baker *et al*., 2002; Chien *et al*., 2003; Liao *et al*., 1993; Storebakken *et al*., 1987)

2.4.2 จำแนกชนิดสัตว์น้ำ

จากหลายรายงานการศึกษาพบว่าปริมาณแคโรทีนอยด์ที่สะสมในสัตว์น้ำแต่ละชนิดแตกต่างกันทั้งรูปแบบ ชนิด และปริมาณ ดังนั้นจึงสามารถใช้ในรูปแบบดังกล่าวเพื่อจำแนกกลุ่มหรือชนิดของสัตว์น้ำได้ เช่น จากการศึกษาองค์ประกอบของแคโรทีนอยด์ในกุ้งทะเล 4 ชนิด คือกุ้งกุลาดำ กุ้ง *P. indicus* กุ้ง *Metapenaeus dobsonii* และกุ้ง *Parapenaeopsis stylifera* พบแอสตาแซนทีนเป็นแคโรทีนอยด์ชนิดหลักอยู่ถึง 63.5-92.2 เปอร์เซ็นต์ แต่พบเบตาแคโรทีนและเซียแซนทีนได้ในปริมาณน้อย (Sachindra *et al*., 2004) Goodwin (1984 อ้างโดย Matsuno, 2001) พบว่าคีโตแคโรทีนอยด์ เช่น อิคินีโนน (echinenone) แคนทาแซนทีน 4-คีโตเซียแซนทีน (4-keto-zeaxanthin) ฟริทเชียลลาแซนทีน (fritschiellaxanthin) ปาปิไลโออิริทริโนน (papilioerythrinone) สเตียรอยด์ไอโซเมอร์ของโฟนิโคแซนทีน 2 ชนิด (steriodisomer of phoenicoxanthin) และแอสตาแซนทีนทั้งแอสตาแซนทีนอิสระ แอสตาแซนทีนเอสเตอร์ แอสตาแซนทีนที่รวมกับโปรตีนเป็นกลุ่มแคโรทีนอยด์หลักที่พบในสัตว์น้ำกลุ่มครัสเตเชีย ทั้งกุ้งลอปสเตอร์ ปู เครย์ฟิช เคย (krill) เพรียงหิน (barnacle) และอื่นๆ ในขณะที่สัตว์น้ำกลุ่มบราคิโอปอด (brachiopoda) พบแคนทาแซนทีนเป็นแคโรทีนอยด์ชนิดหลัก แต่พบแอสตาแซนทีนได้น้อยหรือไม่พบเลย ส่วนในไอโซปอด (isopod) 3 ชนิด คือ *Idotea resecta*, *I*. granulosa และ *I. monterayensis* พบว่า 2-ไฮดรอกซิเบตาแคโรทีน (2-hydroxy β-carotene) เป็นแคโรทีนอยด์ชนิดหลัก Tsushima และคณะ (2002) ได้ทำการศึกษาชนิดของแคโรทีนอยด์ในปลาแคทฟิชครอบครัวชิมูริดี พบว่าแคโรทีนกลุ่มเซียแซนทีน คือ ลูทีอินเอ พบได้มากในปลา *Ictalutus punctatus*, *Clarias fuscus*, *Corydoras melanistius*, *Pelteobagrus mudiceps* และ *Pseudobagrus aurantiacus* พบเบตาคริปโตแซนทีนเป็นรงควัตถุหลักในปลา *Liobagrus reini*, *Plotosus lineatus*, *Corydoras melanistius* และ *Malapteruridae electricus* ส่วนแอลโลแซนทีน (alloxanthin) ไดอะโตแซนทีน (diatoxanthin) และแอลฟาคริปโตแซนทีนสามารถพบได้ทั่วไปในปลา *Corydoras melanistius*, *Ictalutus punctatus* และ *Clarias fuscus* เป็นต้น

2.4.3 พัฒนาระบบสืบพันธุ์สัตว์น้ำ

Bjerkeng และคณะ (1992) พบว่าแคโรทีนอยด์สามารถช่วยพัฒนาระบบสืบพันธุ์ของปลาเรนโบว์เทร้าท์ โดยช่วยป้องกันไม่ให้เซลล์ไข่ในรังไข่ถูกทำลายจากอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาออกซิเดชั่นในร่างกาย จึงทำให้รังไข่ของสัตว์พัฒนาได้เร็วขึ้นเมื่อเทียบกับกลุ่มที่ไม่ได้รับอาหารเสริมแคโรทีนอยด์ Linan-Cabello และคณะ (2003) กล่าวว่ากุ้งขาวในธรรมชาติจะเข้าสู่วัยเจริญพันธุ์เร็วกว่ากุ้งขาวขนาดเดียวกันที่ทำการเพาะเลี้ยงเมื่อทำการศึกษาถึงระดับของแคโรทีนอยด์ และเรตินอล (retinal) ในตัวกุ้งทั้ง 2 กลุ่ม พบว่ากุ้งเลี้ยงมีระดับแคโรทีนอยด์และเรตินอลต่ำกว่า จึงเป็นเหตุผลที่บ่งชี้ว่าแคโรทีนอยด์ในตัวสัตว์น้ำมีบทบาทใน

ระบบสืบพันธุ์ของกุ้งขาว เช่นเดียวกับ Wyban และคณะ (1997) กล่าวว่าการเสริมปาปริคา (paprika) ซึ่งเป็นแหล่งของแคโรทีนอยด์หลายชนิดทั้งแอลฟาแคโรทีน แอลฟาคริปโตแซนทีน แคปแซนทีน และแคปโซรูบิน (capsorubin) ลงในอาหารพ่อแม่พันธุ์กุ้งขาวมีผลให้กุ้งขาวผลิตนอเพลียสที่มีคุณภาพและมีความสม่ำเสมอมากยิ่งขึ้น Britton (1983) พบว่าเมื่อสัตว์น้ำเข้าสู่วัยเจริญพันธุ์ปริมาณแคโรทีนอยด์จะถูกสะสมไว้ในอวัยวะสืบพันธุ์และไข่มากขึ้น โดย Fisher และ Kon (1958 อ้างโดย Linan-Cabello *et al*., 2002) กล่าวว่าครัสเตเชียมีความต้องการใช้แอสตาแซนทีน และสารตั้งต้นของวิตามินเออื่นๆ มากขึ้นในช่วงวัยเจริญพันธุ์เพื่อสัตว์กลุ่มนี้จะสามารถสังเคราะห์วิตามินเอเก็บไว้สำหรับไข่ที่ได้รับการผสมแล้ว (oocytes) เพื่อทำให้ตัวอ่อนมีพัฒนาการได้สมบูรณ์มากขึ้น ในขณะที่ Castillo และคณะ (1991) กล่าวว่าแอสตาแซนทีนมีบทบาทสำคัญที่ช่วยให้รังไข่ และต่อมสร้างน้ำเชื้อ (gonad) พัฒนาเพื่อเข้าสู่วัยเจริญพันธุ์รวมทั้งช่วยส่งเสริมพัฒนาการตัวอ่อนระยะแรกๆ ของสัตว์ทะเลโดยเฉพาะสัตว์น้ำกลุ่มครัสเตเชีย

2.4.4 กระตุ้นระบบภูมิคุ้มกันและเพิ่มความต้านทานความเครียดในสัตว์น้ำ

ด้วยลักษณะทางโครงสร้างของแคโรทีนอยด์เป็นโมเลกุลที่ประกอบด้วยพันธะคู่คอนจูเกตเป็นจำนวนมาก สามารถรวมตัวกับโปรตีนกลายเป็นแคทีโรโปรตีน จะส่งผลให้โปรตีนมีโครงสร้างคงสภาพและแข็งแรงขึ้น ซึ่งการสะสมของสารประกอบต่างๆ ไว้มากในเปลือกและเนื้อเยื่อใต้เปลือกก็จะช่วยให้สัตว์น้ำโดยเฉพาะสัตว์น้ำกลุ่มครัสเตเชีย การที่เปลือกและเนื้อเยื่อใต้เปลือกแข็งแรงขึ้น สามารถที่จะป้องกันเชื้อโรคที่เข้าสู่ร่างกาย และลดความเครียดของสัตว์น้ำจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำได้มากขึ้น Chien และคณะ (2003) รายงานว่ากุ้งกุลาดำที่ได้รับอาหารผสมแอสตาแซนทีนมีค่า TAS (total antioxidant status) เพิ่มขึ้นและค่า SOD (superoxide dismutase) ลดลง ทำให้ความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระและต้านทานต่อความเครียดที่เกิดจากอุณหภูมิและความเค็มที่เปลี่ยนแปลงได้ ในขณะที่ Chien และคณะ (1999) กล่าวว่ากุ้งกุลาดำที่ได้รับอาหารเสริมแอสตาแซนทีน 360 พีพีเอ็ม มีความต้านทานต่อความเครียดเพิ่มขึ้น มีอัตราการรอดตายและทนทานจากภาวะขาดออกซิเจนสูงกว่าชุดควบคุม และ Pan และคณะ (2003) พบว่ากุ้งกุลาดำระยะโพสต์ลาร์วา (post larva) ที่ได้รับอาหารผสมแอสตาแซนทีน 0 และ 71.5 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม นาน 8 สัปดาห์ หลังจากนั้นให้กุ้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมที่มีแอมโมเนียเข้มข้น 0.01, 0.2 และ 20 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่ากุ้งที่ได้รับอาหารผสมแอสตาแซนทีนมีอัตรารอดสูงกว่ากลุ่มควบคุม รวมทั้งพบว่าค่า TAS สูงกว่ากลุ่มควบคุมที่ระดับแอมโมเนียมากกว่า 0.02 มิลลิกรัมต่อลิตร และค่า SOD ต่ำทุกระดับความเข้มข้นของแอมโมเนีย แสดงว่าประสิทธิภาพในการกำจัดอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้น และการที่กุ้งที่ได้รับแอสตาแซนทีนมีค่า AST (aspartate aminotransferase) และ ALT (alanine amino-transferase) ต่ำกว่ากลุ่มควบคุมทุกระดับความเข้มข้นของแอมโมเนีย แสดงว่าแอสตาแซนทีน

ทำให้เซลล์และตับอ่อนกุ้งทำหน้าที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้สามารถต้านทานความเครียดที่เกิดจากแอมโมเนียได้ดีขึ้น Song และ Hsieh (1994); Holmblad และ Soderhall (1999) กล่าวว่าการที่สัตว์น้ำได้รับความเครียดจากการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อม หรือจากเชื้อโรค ทำให้กระบวนการต่างๆในระบบภูมิคุ้มกันโดยเซลล์ เช่น ฟาโกซัยโทซิส (phagocytosis) เอนแคปซูเลชั่น (encapsulation) โนดูลฟอร์เมชั่น (nodul formation) จะทำงานมากขึ้น และในกระบวนการต่างๆ เหล่านี้นำมาซึ่งการผลิตและปล่อยอนุมูลอิสระของออกซิเจนที่เรียกว่า reactive oxygen intermediates (ROIs) เช่น ซุปเปอร์ออกไซด์แอนอิออน (O_2^-) ไฮดรอกซิลอิออน (OH^-) และไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ซึ่งมีคุณสมบัติเป็นสารต้านจุลินทรีย์ออกมา แต่การที่อนุมูลอิสระเหล่านี้ถูกปล่อยออกมามากเกินไปก็มีผลให้เซลล์อ่อนแอและตายได้ แต่ด้วยลักษณะของโครงสร้างของแคโรทีนอยด์ที่ประกอบด้วยพันธะคู่คอนจูเกตเป็นจำนวนมาก ทำให้โมเลกุลมีจำนวนอิเลคตรอนแบบไม่เสถียรจึงสามารถที่จะจับกับอนุมูลอิสระส่วนเกินไว้ (Stainer *et al*., 1971 อ้างโดย Chien *et al*., 2003) จึงเท่ากับว่าป้องกันมิให้เซลล์ถูกทำลายจึงเป็นเหตุผลที่อธิบายได้ว่าทำไมสัตว์น้ำที่ได้รับอาหารผสมแคโรทีนอยด์จึงสามารถต้านทานโรคและความเครียดได้มากขึ้น นอกจากนั้นแคโรทีนอยด์ยังเป็นสารตั้งต้นของวิตามินเอซึ่งเป็นที่รู้กันว่าวิตามินเอเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่มีประสิทธิภาพในสัตว์น้ำ และมีผลต่อระบบภูมิคุ้มกันของสัตว์น้ำอย่างชัดเจน (Hunter, 2000; Lastcha, 1991) ในขณะที่ Lorenz และ Cysewski (2000) ได้สรุปว่าหน้าที่ของแคโรทีนอยด์ในอาหารคือเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ เป็นสารตั้งต้นของการสังเคราะห์ฮอร์โมน และวิตามิน ช่วยเพิ่มระบบภูมิคุ้มกัน การเจริญเติบโต การเจริญพันธุ์ และเพิ่มประสิทธิภาพการต้านทานต่อแสงในสัตว์น้ำ

2.4.5 เร่งการเจริญเติบโต พัฒนาการ และเพิ่มอัตรารอดของสัตว์น้ำ

แม้หลายการศึกษาพบว่าแคโรทีนอยด์ในอาหารไม่มีผลต่อการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำโดยเฉพาะสัตว์น้ำระยะวัยรุ่นหรือตัวเต็มวัย (มะลิ และคณะ, 2543; Boonyaratpalin *et al*., 1994; Kittipreechakul, 2002; Pan *et al*., 2001) อย่างไรก็ตามผลการศึกษาสัตว์น้ำบางชนิดพบว่าแคโรทีนอยด์มีผลต่ออัตรารอดของสัตว์น้ำวัยอ่อน เช่น Yamada และคณะ (1990) รายงานว่าลูกกุ้งคุรูมาที่ได้รับอาหารผสมแอสตาแซนทีน 100 พีพีเอ็ม มีอัตรารอด 91.4 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่กลุ่มที่ไม่ได้รับอาหารผสมแคโรทีนอยด์มีอัตรารอด 75-85 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น เช่นเดียวกับ Petit และคณะ (1997 อ้างโดย Pan *et al*., 2001) ที่ทำการทดลองในกุ้งคุรูมา พบว่ากุ้งระยะโพสต์ลาร์วาที่ได้รับอาหารผสมแอสตาแซนทีน มีอัตราการเจริญเติบโตและมีวงจรการลอกคราบสั้นลง ในขณะที่ Thongrod และคณะ (1995 อ้างโดย Pan *et al*., 2001) พบว่ากุ้งคุรูมาระยะโพสต์ลาร์วาที่ได้รับอาหารผสมแอสตาแซนทีนเข้มข้น 5, 15, 60 และ 300 พีพีเอ็ม เป็นเวลา 30 วัน มีการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้น อัตราการเจริญเติบโตของกุ้งเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นของแอสตาแซนทีนในอาหารมีระดับสูงขึ้น ขณะที่ Bordner และคณะ (1986

อ้างโดย Boonyaratpalin *et al*., 2001) พบว่ากุ้งลอปสเตอร์ (*Homarus americanus*) ระยะจูเวนไนล์ (juvenile) ที่ได้รับอาหารผสมแอสตาแซนทีนที่สกัดจากเปลือกกุ้งเครย์ฟิชมีการเจริญเติบโตสูงกว่ากุ้งชุดควบคุม Chien และ Jeng (1992) พบว่ากุ้งชนิดเดียวกันที่ได้รับอาหารผสมแอสตาแซนทีนมีอัตรารอดตายสูงกว่ากุ้งที่ได้รับอาหารผสมเบตาแคโรทีน และสาหร่ายดูนาลิเอลล่า ส่วน Yamada และคณะ (1990) พบว่ากุ้งระยะจูเวนไนล์ที่ได้รับอาหารผสมแอสตาแซนทีน 50, 100, 200 และ 400 พีพีเอ็ม เป็นเวลา 8 สัปดาห์ มีอัตรารอดตายสูงกว่ากุ้งที่ไม่ได้รับอาหารผสมแอสตาแซนทีนทุกความเข้มข้น

2.5 ปัจจัยที่มีผลต่อการนำแคโรทีนอยด์ไปใช้ในสัตว์น้ำ

การที่สัตว์น้ำจะสามารถนำแคโรทีนอยด์ที่ได้รับจากอาหารไปใช้ในกระบวนการต่างๆ ของร่างกายทั้งเพื่อการเจริญเติบโต เพิ่มระบบภูมิคุ้มกันตัวเอง เตรียมความพร้อมเพื่อเข้าสู่วัยเจริญพันธุ์สะสมในส่วนต่างๆ ของร่างกายได้มากหรือน้อยเพียงไรนั้น พบว่ามีปัจจัยหลายประการเข้ามาเกี่ยวข้องทั้งปัจจัยภายในและภายนอก โดยปัจจัยภายในที่มีผลต่อความสามารถที่จะนำแคโรทีนอยด์ไปใช้ได้แก่ ชนิด เพศ ขนาด การลอกคราบ เนื้อเยื่อและอวัยวะ รวมทั้งการควบคุมฮอร์โมนของสัตว์น้ำ ส่วนปัจจัยภายนอกได้แก่ สีเดิมของสัตว์ ความเข้มแสง อุณหภูมิ สิ่งแวดล้อมที่สัตว์น้ำอาศัยอยู่ ชนิดและปริมาณรวมทั้งแหล่งของแคโรทีนอยด์ที่สัตว์น้ำได้รับจากอาหาร เป็นต้น (Chien and Jeng, 1992; Dall, 1995; Goodwin, 1960; Yamada *et al*., 1990)

2.5.1 ชนิดหรือลักษณะทางพันธุกรรม

ลักษณะทางพันธุกรรมหรือชนิดพันธุ์ที่แตกต่างกันของสัตว์น้ำมีผลต่อประสิทธิภาพในการนำแคโรทีนอยด์ไปใช้ หรือการสะสมไว้ในกล้ามเนื้อ เช่นจากรายงานของ Gopakumar และ Nair (1975 อ้างโดย Yanar *et al*., 2004) พบว่ากุ้งที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำกร่อย 4 ชนิดได้แก่กุ้ง*Metapenaeus affinis* กุ้ง *M. dopsoni* กุ้ง *P. indicus* กุ้ง *Parapenaeopsis stylifera* มีปริมาณแคโรทีนอยด์รวมในตัวเฉลี่ย 13.3 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ในขณะที่กุ้ง *M. monoceros* มีปริมาณแคโรทีนอยด์รวมในตัวเฉลี่ย 4.2 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ส่วน Negre-Sadargues และคณะ (2000) ทำการเปรียบเทียบปริมาณ แคโรทีนอยด์ในกุ้งที่อาศัยอยู่ในทะเลลึกพบว่ากุ้ง *Rimicaris exculata* มีแคโรทีนอยด์สะสมในตัวมากกว่ากุ้ง *Chorocaris chacei* และกุ้ง *Alvinocaris markensis* เช่นเดียวกับ Torrissen และ Naevdal (1984) พบว่าปริมาณแอสตาแซนทีน และแคนทาแซนทีนมีความแตกต่างกันใน full-sib และ half-sib ของปลาเรนโบว์เทร้าท์

2.5.2 เพศ อายุ และขนาด

ปริมาณของแคโรทีนอยด์ที่สะสมในร่างกายสัตว์น้ำจะแตกต่างกันในแต่ละช่วงอายุ ขนาด และเพศ สำหรับความแตกต่างของเพศพบว่าสัตว์น้ำบางชนิดเมื่อเข้าสู่ช่วงเจริญพันธุ์จะมีการขนถ่ายแคโรทีนอยด์ไปยังอวัยวะสืบพันธุ์ ทำให้ปริมาณของแคโรทีนอยด์ที่สะสมในเนื้อลดลง เช่น การศึกษาของ Bjerkeng และคณะ (1992) พบว่าปลาเรนโบว์เทร้าท์ตัวเมียที่โตเต็มวัยมีการสะสมแคโรทีนอยด์ไว้ในตัว 73-79 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณสารสีทั้งหมด โดยแคโรทีนอยด์ที่สะสมไว้จะถูกถ่ายไปที่อวัยวะสืบพันธุ์มากขึ้นเมื่อเข้าสู่วัยเจริญพันธุ์ ส่วนตัวผู้วัยเดียวกันมีการสะสมแคโรทีนอยด์รวมไว้ในตัวเพียง 18-19 เปอร์เซ็นต์เท่านั้น โดยจะสะสมไว้มากที่ผิวหนัง อย่างไรก็ตามปริมาณแคโรทีนอยด์ที่สะสมไว้ในตัวผู้หรือตัวเมียในสัตว์น้ำบางชนิดอาจไม่แตกต่างกันในแต่ละเพศ เช่น ในปลาอาร์คติกชาร์ (arctic charr; *Salvelinus alpinus* L.) และเรนโบว์เทร้าท์ (Bjerkeng *et al*., 2000; Torrissen and Naevdal, 1984) ส่วนความแตกต่างของขนาด Pan และคณะ (2001) พบว่ากุ้งกุลาดำระยะวัยอ่อนช่วงต้น (early larvae) ระยะวัยอ่อนช่วงปลาย (post larvae) จนถึงระยะจูเวนไนล์ มีการสะสมแคโรทีนอยด์ในตัวได้ในปริมาณที่แตกต่างกัน โดยพบว่าเมื่อขนาดโตขึ้นปริมาณแคโรทีนอยด์ที่ถูกสะสมไว้ในตัวมีปริมาณลดลงเป็น 4, 1.27 และ 0.63 พีพีเอ็ม ตามลำดับ เช่นเดียวกับรายงานของ Negre-Sadargues และคณะ (2000) พบว่ากุ้ง *Rimicaris exculata* ระยะจูเวนไนล์มีการสะสมแคโรทีนอยด์ไว้ในตัวในปริมาณที่มากกว่ากุ้งระยะตัวเต็มวัย ขณะที่เมื่อเข้าสู่วัยเจริญพันธุ์สัตว์น้ำมีการสะสมแคโรทีนอยด์เพิ่มมากขึ้น Britton (1983) กล่าวว่าสัตว์น้ำที่เข้าสู่วัยเจริญพันธุ์จะมีการสะสมแคโรทีนอยด์ในอวัยวะสืบพันธุ์มากขึ้น ซึ่ง Castillo และคณะ (1991) กล่าวว่าแอสตาแซนทีนมีความจำเป็นมากสำหรับสัตว์ทะเลโดยเฉพาะครัสเตเชีย ที่เข้าสู่วัยเจริญพันธุ์เนื่องจากสารดังกล่าวมีบทบาทสำคัญที่ช่วยให้รังไข่ และต่อมสร้างน้ำเชื้อพัฒนาเต็มที่ รวมทั้งมีผลต่อพัฒนาการที่สมบูรณ์ของตัวอ่อน

2.5.3 สภาพแวดล้อมของที่อยู่อาศัย

สภาพแวดล้อมและที่อยู่อาศัยของสัตว์น้ำเป็นปัจจัยสำคัญอย่างหนึ่งที่มีผลต่อระดับของแคโรทีนอยด์ในสัตว์น้ำ เนื่องจากสัตว์น้ำเป็นสิ่งมีชีวิตที่ไม่สามารถสังเคราะห์แคโรทีนอยด์ด้วยตัวเองได้ แต่แคโรที่นอยด์ที่ได้รับและใช้ประโยชน์ในกระบวนการต่าง ๆ นั้นได้รับมาจากอาหาร ซึ่งในสภาพแวดล้อมหรือแหล่งน้ำที่อยู่อาศัยที่แตกต่างกันก็ทำให้สัตว์น้ำได้รับอาหารที่มีปริมาณแคโรทีนอยด์ต่างกันได้ เช่น Linan-Cabello และคณะ (2003) กล่าวว่ากุ้งขาวในธรรมชาติจะมีระดับแคโรทีนอยด์ที่สะสมไว้ในตัวสูงกว่ากุ้งขาววัยเดียวกันจากระบบการเพาะเลี้ยง ส่วน Gosse และ Wroblewski (2004) พบว่าปลาคอด *Gadus morhua* วัยอ่อนที่อาศัยอยู่ในแหล่งน้ำแถบตะวันตกเฉียงเหนือของมหาสมุทรแอตแลนติกมีสีดำ ส่วนที่พบในอ่าวกิลเบิร์ท (Gilbert Bay) มีสีน้ำตาลทองเนื่องจากบริเวณดังกล่าวมีปริมาณของสัตว์น้ำไม่มี

กระดูกสันหลังวัยอ่อนที่เป็นแหล่งของแคโรทีนอยด์เป็นอาหารของปลาคอดวัยอ่อนเป็นจำนวนมาก ในสภาพแวดล้อมเดียวกันแต่ต่างฤดูกาลกันพบว่าปัจจัยของอุณหภูมิทำให้สัตว์น้ำได้รับแคโรทีนอยด์แตกต่างกัน โดย Yanar และคณะ (2004) กล่าวว่ากุ้งทะเล *Penaeus semisulcatus* และ *Metapenaeus monoceros* ได้รับแคโรทีนอยด์จากสาหร่ายเป็นหลัก และเนื่องจากชนิดและปริมาณของสาหร่ายจะเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลทำให้ปริมาณแคโรทีนอยด์รวมในสัตว์น้ำที่กินสาหร่ายเป็นอาหารเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลเช่นกัน พบว่ากุ้งทะเลทั้ง 2 ชนิด ข้างต้นมีปริมาณแคโรทีนอยด์รวมในฤดูใบไม้ผลิและฤดูร้อนสูงกว่าฤดูใบไม้ร่วงและฤดูหนาว เช่นเดียวกับ Lundstrom และคณะ (1999), Pattersson และ Lignell (1999) กล่าวว่าอาการของโรคที่เรียกว่า M74 ซึ่งเป็นอาการที่ส่งผลกระทบต่อการสืบพันธุ์ของปลาแอตแลนติกแซลมอน (*Salmo salar*) ในทะเลบอลติก (Baltic Sea) เป็นอาการที่สัมพันธ์กับระดับปริมาณแคโรทีนอยด์ในห่วงโซ่อาหารที่ปลาได้รับ โดยพบว่าอาการดังกล่าวรุนแรงมากขึ้นเมื่อแหล่งน้ำบริเวณดังกล่าวเกิดปรากฏการณ์ขี้ปลาวาพจากสาหร่ายกลุ่มไดอะตอม Hansson และคณะ (2001) กล่าวว่าปรากฏการณ์ขี้ปลาวาพส่งผลให้โคพิปอด (copepod) ในแหล่งน้ำมีปริมาณน้อยลง รวมทั้งโคพิปอดที่มีในช่วงเวลาดังกล่าวมีปริมาณแคโรทีนอยด์ในตัวอยู่น้อยมากเมื่อเทียบกับช่วงอื่นๆ เนื่องจากไดอะตอมที่โคพิปอดกินเป็นอาหารมีปริมาณของแคโรทีนอยด์อยู่น้อยมาก นอกจากอุณหภูมิ ฤดูกาล และแหล่งที่อยู่อาศัยแล้ว พบว่าคุณภาพน้ำก็มีผลต่อการสะสมแคโรทีนอยด์ในสัตว์น้ำด้วย Perez-Rostro และคณะ (2004) พบว่าปริมาณแคโรทีนอยด์ในตับและตับอ่อนของกุ้งขาวลดลงเมื่อกุ้งอาศัยอยู่ในน้ำที่มีออกซิเจนละลายน้ำต่ำกว่าค่าปกติลงอย่างเฉียบพลัน (acute hypoxia) แสดงว่าในสภาวะที่มีความเครียดแคโรทีนอยด์ที่สะสมไว้ในตัวถูกนำไปใช้มากขึ้น ปริมาณที่เหลือในเนื้อเยื่อต่างๆ จึงลดลง

2.5.4 ชนิด ปริมาณ และแหล่งของแคโรทีนอยด์ที่สัตว์น้ำได้รับจากอาหาร

สัตว์น้ำมีประสิทธิภาพในการนำแคโรทีนอยด์แต่ละชนิดไปใช้ได้แตกต่างกัน จากการศึกษาของ Boonyaratpalin และคณะ (2001) พบว่ากุ้งกุลาดำสามารถนำเบตาแคโรทีนซึ่งสกัดจากสาหร่ายดูนาลิเอลล่าเป็นแหล่งของรงควัตถุได้อย่างมีประสิทธิภาพ รวมทั้งการศึกษาของ Liao และคณะ (1993) พบว่ากุ้งกุลาดำสามารถนำเบตาแคโรทีน และเซียแซนทีนจากสาหร่ายสไปรูไลนาไปใช้ได้ดีกว่าเบตาแคโรทีนสังเคราะห์ ยีสต์ (*Phaffia*) และน้ำมันกุ้งเคย (krill oil) ซึ่งมีแอสตาแซนทีนอยู่มาก Chien และ Jeng (1992), Yamada และคณะ (1990) พบว่ากุ้งคุรุมาสามารถนำแอสตาแซนทีนไปใช้เป็นแหล่งของแคโรทีนอยด์ได้ดีกว่าเบตาแคโรทีน ส่วนปลาเรนโบว์เทร้าท์และแซลมอน สามารถใช้และสะสมแอสตาแซนทีนได้ดีกว่าแคนทาแซนทีน (Baker *et al*., 2002; Storebakken *et al*., 1987) นอกจากนั้นยังพบว่าปริมาณของแคโรทีนอยด์ในอาหารเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการสะสมแคโรทีนอยด์ในตัวสัตว์น้ำ เช่น

Boonyaratpalin และคณะ (2001) พบว่ากุ้งกุลาดำที่ได้รับอาหารผสมเบตาแคโรทีน 125 หรือ 175 พีพีเอ็ม มีปริมาณแคโรทีนอยด์สะสมในเนื้อกุ้งมากกว่ากุ้งที่ได้รับแอสตาแซนทีน 50 พีพีเอ็ม Storebakken และ Goswami (1996) พบว่าปลาแอตแลนติกแซลมอนที่กินอาหารผสมแอสตาแซนทีน 5 พีพีเอ็ม จะมีความเข้มข้นของแอสตาแซนทีนในพลาสมา 1 พีพีเอ็มในขณะที่ปลาที่กินอาหารผสมแอสตาแซนทีน 60 พีพีเอ็ม จะมีความเข้มข้นของแอสตาแซนทีนในพลาสมาเพิ่มขึ้นถึง 3 เท่า แคโรทีนอยด์จากแหล่งวัตถุดิบบางชนิดเมื่อเสริมในอาหารสัตว์น้ำมากขึ้นอาจมีผลกระทบต่อการกินอาหารของสัตว์น้ำได้ เช่น Liao และคณะ (1993) พบว่าการใช้สาหร่ายสไปรูไลนาเสริมในอาหารกุ้งปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ มีผลให้การกินอาหารและการเจริญเติบโตลดลงเมื่อเทียบกับกลุ่มที่ได้รับอาหารเสริมสไปรูไลนา 1-3 เปอร์เซ็นต์ หรือแม้แต่แคโรทีนอยด์ที่แยกมาจากแหล่งวัตถุดิบเดียวกันแต่ขั้นตอนการเตรียมทำให้แคโรทีนอยด์มีคุณสมบัติต่างออกไป ก็มีผลต่อการนำไปใช้หรือสะสมในสัตว์น้ำด้วย เช่น Arredondo-Figueroa และคณะ (2003) กล่าวว่ากุ้งขาวที่ได้รับอาหารผสมแคโรทีนอยด์จากสารสกัดพริกหวานที่ผ่านและไม่ผ่านการสปอนนิฟิเคชั่นเข้มข้น 200 พีพีเอ็ม เท่ากันมีการสะสมแคโรทีนอยด์ในตัวต่ำกว่ากุ้งชุดที่ได้รับอาหารผสมเบตาแคโรทีน 100 พีพีเอ็ม อย่างไรก็ตามหากใช้ปริมาณแคโรทีนอยด์จากสารสกัดพริกหวานที่ไม่ผ่านการสปอนนิฟิเคชั่นเข้มข้น 250 พีพีเอ็ม ผสมในอาหารจะทำให้การสะสมสารสีในตัวกุ้งขาวเพิ่มสูงขึ้นกว่าการใช้เบตาแคโรทีน 100 พีพีเอ็ม และ Hieber และคณะ (2000) กล่าวว่า ไอโซเมอร์ที่แตกต่างกันของเบตาแคโรทีนมีผลต่อประสิทธิภาพการนำไปใช้ประโยชน์ของเซลล์ โดยสัตว์น้ำจะใช้ 9-cis-β-carotene ซึ่งพบเป็นหลักในสาหร่าย *Dunaliella* ได้ต่ำกว่าเบตาแคโรทีนในรูป all trans β-carotene เนื่องจาก 9-cis-β-carotene มีผลกระทบต่อเซลล์ในแง่ของการลดการเพิ่มจำนวนของเซลล์ (cell proliferation) และลดการแสดงออกของยีนคอนนีซิน 43 (connexin 43) ในเซลล์ 10T/2

2.5.5 ชนิดและปริมาณไขมันในตัวสัตว์น้ำ

จากคุณสมบัติของแคโรทีนอยด์ที่จัดเป็นรงควัตถุที่ละลายได้ดีในไขมัน ดังนั้นชนิดและปริมาณไขมันในตัวสัตว์น้ำ จึงมีผลต่อการดูดซึมและสะสมแคโรทีนอยด์ในตัวของสัตว์ด้วย Barbosa และคณะ (1999) พบว่าปลาเรนโบว์เทร้าท์มีการสะสมแอสตาแซนทีนอิสระในน้ำเลือดเพิ่มสูงขึ้นเมื่อได้รับอาหารที่มีเปอร์เซ็นต์ไขมันจากแหล่งวัตถุดิบเดียวกันสูงกว่า แต่ในกรณีที่ปลาได้รับอาหารเสริมแอสตาแซนทีนรูปแบบต่างกัน พบว่าหากอาหารมีปริมาณไขมันต่ำปลาเรนโบว์เทร้าท์สามารถนำแอสตาแซนทีนอิสระไปใช้ประโยชน์ได้มากกว่ารูปแบบอื่น แต่ในกรณีที่อาหารมีระดับไขมันสูงปลาจะสามารถดูดซึมและนำเอาแอสตาแซนทีนเอสเทอร์ไปใช้ได้มีประสิทธิภาพไม่แตกต่างจากแอสตาแซนทีนอิสระ Bjerkeng และคณะ (1999) กล่าวว่าปลาแซลมอนที่ได้รับอาหารที่มีส่วนประกอบของน้ำมันจากเคปลิน (capelin oil) และเปรูเวียน

(peruvian oil) ซึ่งมีกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูง จะสามารถสะสมแอสตาแซนทีนไว้ในตัวได้มากกว่ากลุ่มที่ได้รับอาหารผสมน้ำมันจากปลาเฮอร์ริ่ง (herring oil) และปลาแซนเอล (sandeel oil)

2.5.6 ความสามารถของสัตว์น้ำในการนำแคโรทีนอยด์ไปใช้

นอกจากปัจจัยต่างๆ ที่กล่าวมาข้างต้นแล้วพบว่าประสิทธิภาพการนำแคโรทีนอยด์ไปใช้สะสมในตัวสัตว์น้ำยังขึ้นกับความสามารถในการย่อยและการดูดซึมแคโรทีนอยด์จากแหล่งวัตถุดิบที่แตกต่างกันของตัวสัตว์ด้วย Sanderson และ Jolly (1994) พบว่าในลำไส้ของกุ้งไม่มีเอนไซม์ที่ช่วยย่อยผนังเซลล์ยีสต์ทำให้กุ้งไม่สามารถย่อยและดูดซึมแอสตาแซนทีนในเซลล์ยีสต์ไปใช้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งที่เซลล์ของยีสต์ปัฟเฟีย (*Phaffia rhodozyma*) มีความเข้มข้นของแอสตาแซนทีนสูงมาก สอดคล้องกับ Liao และคณะ (1993) พบว่าการใช้สาหร่ายสไปรูไลนาอบแห้ง 3 เปอร์เซ็นต์ ในอาหารส่งผลให้กุ้งมีการเจริญเติบโตและการสะสมแคโรทีนอยด์ในเนื้อเยื่อใต้เปลือกได้ดีกว่าการได้รับอาหารผสมเซลล์ยีสต์ปัฟเฟียในระดับที่มีแคโรทีนอยด์รวมเท่ากันแคโรทีนอยด์ที่อยู่ในอาหารจะสามารถอยู่ในตัวปลาได้ไม่นาน และแคโรทีนอยด์ที่ปลาได้รับจากอาหารเกือบ 90 เปอร์เซ็นต์ จะถูกขับออกมาพร้อมกับสิ่งขับถ่าย (Choubert and Luquet, 1983; Page and Davies, 2003) ดังนั้นการให้แคโรทีนอยด์ในรูปแบบที่ไม่ซับซ้อน สัตว์ชนิดนั้นๆ สามารถนำไปใช้ได้ง่ายจึงเป็นปัจจัยหลักที่เสริมให้สัตว์น้ำนำแคโรทีนอยด์ไปใช้ในกระบวนการต่างๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

2.6 กลไกการนำแคโรทีนอยด์ไปใช้ในสัตว์น้ำ

การนำแคโรทีนอยด์ไปใช้ในสัตว์น้ำแต่ละชนิดมีกลไกที่แตกต่างกัน Tanaka และคณะ (1976) ศึกษาถึงเมตาบอลิซึมของแคโรทีนอยด์ในกุ้งคุรูมา พบว่ากุ้งจะมีการใช้แคโรทีนอยด์ที่เริ่มต้นจากเบตาแคโรทีนแล้วมีกลไกเปลี่ยนให้กลายเป็นแอสตาแซนทีน โดยมีไอโซคริปโตแซนทีน อีไคนีโนน แคนทาแซนทีน โฟนิโคแซนทีน (phoenicoxanthin) เซียแซนทีน และ4- คีโตเซียแซนทีนเป็นแคโรทีนอยด์ตัวกลาง และพบว่ากุ้งจะเปลี่ยนเบตาแคโรทีนเป็นแอสตาแซนทีนน้อยกว่าการเปลี่ยนเซียแซนทีนเป็นแอสตาแซนทีนถึง 40 เปอร์เซ็นต์ เนื่องจากกลไกการเปลี่ยนเซียแซนทีนเป็นแอสตาแซนทีนมีความซับซ้อนน้อยกว่า ส่วนกลไกการสะสมแคโรทีนอยด์พบว่าโดยมากกุ้งจะสะสมแอสตาแซนทีนในรูปแอสตาแซนทีนอิสระโดยจับตัวกับโปรตีนในรูปของแคโรทีโนโปรตีน แต่กุ้งยังสามารถสะสมแคโรทีนอยด์ในรูปเอสเทอร์ ทั้งโมโนเอสเทอร์ (mono ester) และไดเอสเทอร์ (di ester) กับกรดไขมันสายยาว (long chain fatty acids) ได้ด้วย (Foss *et al.*, 1987; Yamada *et al.*, 1990) Ohkubo และคณะ (1999) พบว่าปลาทอง (*Carassius auratus*) สามารถเมตาบอไลท์ลูทีอินเอให้เป็นลูทีอินบี 4-ไฮดรอกซิลลูทีอิน (4-hydroxy-lutein) และแอลฟาโดราดีแซนทีน (α-doradexanthin)

ตามลำดับ และสามารถเปลี่ยนเซียแซนทีนเป็นแอสตาแซนทีนโดยใช้ 4-ไฮดรอกซิลเซียแซนทีน (4-hydroxyzeaxanthin) เบตาโดราดีแซนทีน (β-doradexanthin) เป็นตัวกลาง

Lee (1966 อ้างโดย (Tanaka, 1976) ศึกษาเมตาโบลิซึมของแคโรทีนอยด์ในไอโซปอด 2 ชนิดคือ *Idotea montereycnsis* และ *I. granulosa* พบว่าไอโซปอดจะเปลี่ยนเบตาแคโรทีนเป็นอิคินีโนน (echinenone) 4-ไฮดรอกซี-4' เบตาแคโรทีน (4-hydroxy-4'-β-carotene) และแคนทาแซนทีน ตามลำดับ Gilchrist และ Lee (1967 อ้างโดย Tanaka, 1976) ศึกษาเมตาโบลิซึมของแคโรทีนอยด์ใน *Carcinus maenas* พบว่าเบตาแคโรทีนจะถูกเปลี่ยนเป็นไอโซคริปโตแซนทีนอิคินีโนน แคนทาแซนทีน และแอสตาแซนทีน ตามลำดับ ส่วนในอาร์ทีเมีย (*Artemia salina*) สามารถเปลี่ยนเบตาแคโรทีนเป็นอิคินีโนน และแคนทาแซนทีน ตามลำดับ โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลาง

3. สาหร่ายสไปรูไลนา (*Spirulina* sp.)

3.1 อนุกรมวิธานของสาหร่ายสไปรูไลนา (Venkataraman, 1983)

Division Cyanophyta
Class Cyanophytceae
Order Oscillatoriales
Family Oscillatorialceae
Genus *Spirulina*

สาหร่ายสไปรูไลนาเป็นสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน มีหลายเซลล์เรียงต่อกัน (multicellular) เป็นเส้นสายเรียกว่า ไทรโครม (trichome) ลักษณะโครงสร้างของเซลล์เป็นโปรคาริโอต (procaryote) ไม่มีนิวเคลียส พบสารสีกระจายในไทลาคอยด์ (thylacoid) ซึ่งอยู่ในไซโตพลาสซึมมีความกว้างของเซลล์ 3-80 ไมครอน มีความยาว 50-500 ไมครอน ผนังเซลล์มีหลายชั้นประกอบด้วยมิวโคโปรตีน (mucoprotein) และเพ็คติน (pectin) สืบพันธุ์โดยวิธีขาดท่อน (fragmentation) และการแบ่งเซลล์ ทำให้ไทรโครมยืดยาวออก พบสาหร่ายสไปรูไลนาแพร่กระจายทั้งในน้ำจืด น้ำเค็ม และน้ำกร่อย อุณหภูมิที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตและแพร่กระจายอยู่ระหว่าง 29-32 องศาเซลเซียส ความเป็นกรดด่าง 8.5-10 และความเข้มแสง 2,500-5,000 ลักซ์ (Miranda *et al*., 1998; Rafiqul *et al*., 2005)

3.2 แคโรทีนอยด์ในสาหร่ายสไปรูไลนา

สาหร่ายสไปรูไลนามีองค์ประกอบของแคโรทีนอยด์หลายชนิด โดยมีไฟโคบิไลโปรตีน (phycobiliprotein) เป็นแคโรทีนอยด์กลุ่มหลัก 80-90 เปอร์เซ็นต์ และมีไฟโคไซยานิน (phycocyanin) และแอลโลไฟโคไซยานิน (allophycocyanin) เป็นองค์ประกอบอยู่ในปริมาณไม่สูงมากสูตรโครงสร้างของแคโรทีนอยด์ในสาหร่ายสไปรูไลนาประกอบด้วยกลุ่มโครโมโฟริค (chromophoric group) และการที่สาหร่ายสังเคราะห์ไฟโคบิไลโปรตีนเก็บไว้ในเซลล์เพิ่มขึ้น ส่งผลให้สัตว์น้ำที่ได้รับอาหารที่มีแหล่งแคโรทีนอยด์จากสาหร่ายสไปรูไลนามีความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระและยับยั้งการเกิดไลปิดเปอร์ออกซิเดชั่น (microsomal lipid peroxidation) ในตัวเพิ่มสูงขึ้น (Estrada *et al*., 2001) จากการศึกษาถึงรายละเอียดชนิดของแคโรทีนอยด์ในสาหร่ายสไปรูไลนา Choubert (1979) ว่าพบสาหร่ายสไปรูไลนาแห้ง 1 กรัม สามารถสกัดแคโรทีนอยด์รวมได้ 1.7 มิลลิกรัม โดยมีสัดส่วนของแคโรทีนอยด์ชนิดต่างๆ คือ ไมโซแซนโทฟิลล์ (myxoxanthophyll) 27 เปอร์เซ็นต์ เบตาแคโรทีน 26 เปอร์เซ็นต์ คริปโตแซนทีน 23 เปอร์เซ็นต์ เซียแซนทีน 9 เปอร์เซ็นต์ อิคินีโนน 7 เปอร์เซ็นต์ และเบตาแคโรทีน-5,6-อีพ๊อกไซด์ (β-carotene-5,6-epoxide) 5 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ

3.3 การใช้ประโยชน์จากสาหร่ายสไปรูไลนา

สาหร่ายสไปรูไลนาเป็นพืชเซลล์เดียวที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง และสามารถผลิตได้ในปริมาณมาก Hill (1980) พบว่าสาหร่ายสไปรูไลนาช่วยควบคุมระดับน้ำตาลในเลือดของผู้ป่วยที่เป็นโรคเบาหวาน และในผู้ป่วยที่เป็นโรคตับอักเสบ (epidemic hepatitis) ตับของผู้ป่วยที่ได้รับสาหร่ายสไปรูไลนาเสริมมีการทำงานดีขึ้น ปริมาณโคเรสเตอรอลอยู่ในระดับปกติ และมีปริมาณโปรตีนในน้ำเหลืองเพิ่มขึ้น สำหรับในอุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำปัจจุบันมีการศึกษาประสิทธิภาพและการนำสาหร่ายสไปรูไลนามาใช้เพื่อเพิ่มผลผลิต การเจริญเติบโต อัตราการรอด การเพิ่มภูมิต้านทาน และการเร่งสีเพื่อให้เป็นที่ต้องการของตลาดมากขึ้น Nakamura (1982) ใช้สาหร่ายสไปรูไลนาชนิดแช่แข็งและชนิดแห้งในการอนุบาลลูกปลาวัยอ่อน พบว่าทำให้ปลามีอัตราการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้น 10-25 เปอร์เซ็นต์ ปลาเข้าสู่ระยะเจริญพันธุ์เร็วขึ้น และมีสีเข้มขึ้น ในกุ้งคุรูมาพบว่าเมื่อกุ้งได้รับอาหารผสมสาหร่ายสไปรูไลนา 8 เปอร์เซ็นต์ จะมีอัตราการเจริญเติบโต อัตรารอด และมีสีตัวเข้มขึ้นกว่ากุ้งที่ไม่ได้รับอาหารผสมสาหร่ายสไปรูไลนา (Cuzon *et al*., 1985) Liao และคณะ (1993) ทดลองใช้แหล่งสารสีจาก 3 แหล่ง คือสาหร่ายสไปรูไลนา ยีสต์ (*Phaffia rhodozyma)* และน้ำมันจากกุ้งเคย เพื่อเร่งสีในกุ้งกุลาดำ พบว่าการเสริมสาหร่ายสไปรูไลนา 3 เปอร์เซ็นต์ ก่อนการจับ 1 เดือน ทำให้กุ้งกุลาดำมีสีเข้มขึ้น และ มะลิ และวุฒิพร (2527) ทดลองใช้รงควัตถุแคโรทีนอยด์ที่ได้จากแหล่งต่างๆ เร่งสี

ปลาแฟนซีคาร์ฟ จากผลการทดลองพบว่าแคโรทีนอยด์จากสาหร่ายสไปรูไลนามีผลต่อความเข้มของสีตัวปลามากที่สุด

4. พริกหวาน (*Capsicum annuum* L.var *grossum*)

4.1 อนุกรมวิธานของพริกหวาน (Smith *et al*., 1987)

Division Magnoliophyta

Class Magnoliopsida

Order Asteridae

Family Solanaceae

Genus *Capsicum*

Species *annuum* L.var *grossum*

พริกหวานเป็นพืชใบเดี่ยว ที่มีรากเจริญในแนวดิ่งลึก 90-120 เซนติเมตร รากแขนงจะแผ่กว้างออกด้านข้างประมาณ 90 เซนติเมตร รากส่วนใหญ่จะอยู่อย่างหนาแน่นในระดับความลึก 50-60 เซนติเมตร พริกหวานมีดอกเดี่ยวสมบูรณ์โดยดอกแรกจะเจริญเมื่อต้นใหม่มีใบขึ้น 9-11 ใบ ดอกประกอบด้วยกลีบดอก 5 กลีบ ส่วนใหญ่จะมีสีขาว แต่บางพันธุ์จะมีสีม่วง เกสรตัวผู้มีจำนวน 5 อัน อับละอองเกสรจะมีสีม่วง ดอกสามารถเจริญได้ทั้งช่วงแสงสั้นและยาว อุณหภูมิที่เหมาะสำหรับการผสมเกสรอยู่ระหว่าง 20-25 องศาเซลเซียส ผลมีขนาดความยาว 1-30 เซนติเมตร และกว้าง 1-1.5 เซนติเมตร พริกสีเขียวประกอบด้วยคลอโรฟิลล์ส่วนพริกสีแดงหรือเหลืองมีการสังเคราะห์แคโรทีนอยด์สะสมไว้ในปริมาณที่สูงมาก

4.2 แคโรทีนอยด์ในพริกหวาน

แคโรทีนอยด์ประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ ในพริกหวานจะพบอยู่ในชั้นที่เรียกว่ามีโซคาร์ป (mesocarp) ในรูปเอสเทอร์ (esterified form) ซึ่งมีความเสถียรมากกว่าในรูปอิสระ (free form) ชนิดของแคโรทีนอยด์ที่พบได้แก่ แคปโซรูบิน แคปแซนทีน (capsanthin) ไวโอลาแซนทีน เบตาแคโรทีน เบตาคริปโตแซนทีน และเซียแซนทีน ในพริกหวานแห้ง 100 กรัม พบว่าสามารถแยกแคโรทีนอยด์รวมได้ 6.76-7.52 มิลลิกรัม (Collera-Zuniga *et al*., 2004; Zorn *et al*., 2003) พริกหวานชนิดเดียวกันสามารถนำมาแยกแคโรทีนอยด์ได้ปริมาณต่างกันนั้น ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ หลายปัจจัย เช่น Jaren-Galan และคณะ (1999) แยกแคโรทีนอยด์จากพริกหวานโดยใช้ระดับความดัน 137.8 บาร์ พบรงควัตถุที่แยกได้มีเฉพาะเบตาแคโรทีน แต่เมื่อใช้ความดัน 413.4 บาร์ พบรงควัตถุที่แยกได้มากคือแคปโซรูบิน และแคปแซนทีน เช่นเดียวกับรายงานอื่นๆ ที่พบว่าขั้นตอนการผลิต ระยะเวลา และวิธีการเก็บรักษา ปัจจัยทาง

กายภาพต่างๆ เช่น ความเข้มแสง ปริมาณออกซิเจน อุณหภูมิ และความดัน รวมทั้งปัจจัยทางเคมี และเอนไซม์ อาจทำให้แซนโทฟิลล์ในพริกหวานเสียสภาพ และมีสีเปลี่ยนไป (Morais *et al.*, 2001; Uquiche *et al.*, 2004)

4.3 การใช้ประโยชน์ของพริกหวาน

มนุษย์มีการใช้ประโยชน์จากพริกหวานมายาวนานโดยเชื่อกันว่าผลของพริกหวานมีรสเผ็ดร้อนทำให้เลือดไหลเวียนดี เจริญอาหาร ขับลม ละลาย และขับเสมหะ (mucokinetic) ขับเหงื่อ แก้ปวดท้อง อาเจียน บิด ท้องเสีย กลาก และหิด ส่วนรากของพริกหวานแก้แขนขาอ่อนเปลี้ย ไม่มีกำลัง แก้โรคไต และอัณฑะบวม ยับยั้งไม่ให้มดลูกมีเลือดออก ส่วนประกอบทั้งต้นของพริกหวานสามารถแก้เหน็บชาที่เกิดจากอากาศเย็นจัด เลือดคั่ง ปวดข้อ และแผลที่เกิดจากการถูกความเย็นจัด (โครงการศึกษาวิจัยสมุนไพร, 2524) แซนโทฟิลล์ในรูปเอสเทอร์เป็นสารตั้งต้นของวิตามินเอ ป้องกันหรือต่อต้านอนุมูลอิสระ และยับยั้งการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่นของวิตามินต่างๆ ทั้งวิตามินอี วิตามินซี รวมทั้งเบตาแคโรทีน ดังนั้นในทางเภสัชกรรมจึงนำมาทำยาเพื่อยับยั้งการเปื่อยของแผล (anti-ulcer) ลดการเกิดมะเร็ง และบรรเทาอาการโรคเส้นเลือดหัวใจตีบ (coronary heart diseases) (Weissenberg *et al.*, 1997)

5. ปาล์มน้ำมัน (*Elaeis guineensis* Jacp.)

5.1 อนุกรมวิธานของปาล์มน้ำมัน (Dahlgren *et al.,* 1985)

Division Spermatophyta
Class Monocotyledoneae
Order Arecales
Family Arecaceae
Genus *Elaeis*
Species *guineensis* Jacp.

ปาล์มน้ำมันเป็นพืชที่มีลักษณะใบแตกเป็นเกลียว มีรากใกล้ผิวดินจำนวนมาก ซึ่งอาจใช้ประโยชน์สำหรับการหายใจช่วงที่น้ำท่วม แต่รากบางส่วนอาจหยั่งลึกถึง 3 เมตร ปาล์มน้ำมันมีช่อดอกตัวผู้และตัวเมียในต้นเดียวกัน แต่แยกกันอยู่คนละซอกใบ การถ่ายละอองเกสรเกิดขึ้นโดยลมหรือแมลงช่วย ละอองเกสรมีกลิ่นแรง ผลปาล์มเกิดจากช่อดอกตัวเมียโดยหลังการผสมพันธุ์ประมาณ 5-6 เดือน ผลปาล์มจะสุกน้ำมันในผลจะมีมากเมื่อผลมีสีแดงจัดหรือ

สีส้ม ผลที่อยู่ภายในของทะลายมักมีลักษณะแบน แต่ละผลมีขนาดเล็ก มีน้ำหนักประมาณ 3-30 กรัม ยาว 2-5 เซนติเมตร ปาล์มทะลายหนึ่งๆ อาจมีน้ำหนักตั้งแต่ 10-90 กิโลกรัม โดยเป็นน้ำหนักผลประมาณ 60-65 เปอร์เซ็นต์ จำนวนทะลายปาล์มต่อปีขึ้นอยู่กับจำนวนช่อดอกตัวเมีย อัตราการเกิดใบใหม่ และอายุของปาล์ม

5.2 แคโรทีนอยด์ในปาล์มน้ำมัน

ในน้ำมันปาล์มพบว่าองค์ประกอบหลักที่สำคัญคือไตรกลีเซอไรด์ (triglycerides) ส่วนสารที่พบในปริมาณน้อยประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ คือแคโรทีนอยด์ โทโคฟีรอล (tocopherols) สเตอรอล (sterols) ไตรเทอพีนแอลกอฮอล์ (triterpene alcohols) ฟอสฟอลิปิด (phospholipids) ไกลโคลิปิด (glycolipids) เทอพีนิก (terpenic) อะลิฟาติก-ไฮโดรคาร์บอน (aliphatic hydrocarbons) และวิตามินอี (Ng *et al*., 2003; Kritchevsky *et al*., 2000; Umerie *et al*., 2004) ผลปาล์ม 1 กิโลกรัม จะสามารถนำมาสกัดแยกแคโรทีนอยด์รวมได้ในปริมาณไม่เท่ากันตั้งแต่ 500-3,000 มิลลิกรัม ขึ้นอยู่กับชนิดของปาล์ม และวิธีการสกัด (Batistella and Maciel, 1998) ชนิดของแคโรทีนอยด์ที่พบมากในปาล์มน้ำมันได้แก่ เบตาแคโรทีนคิดเป็นสัดส่วนโดยประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ และแอลฟาแคโรทีน ประมาณ 30 เปอร์เซ็นต์ ของแคโรทีนอยด์รวม ส่วนแกมมาแคโรทีน แอลฟาโทโคฟีรอล (α-tocopherol) ไลโคปีน ลูทีอีน เซียแซนทีน และไฟโตน (phytone) พบได้ในปริมาณน้อย (Cooper *et al*., 2002; Lietz and Henry, 1997; Olatunde and Britton, 1999)

5.3 การใช้ประโยชน์จากปาล์มน้ำมัน

มนุษย์มีการใช้ประโยชน์จากปาล์มน้ำมันมาเป็นระยะเวลานาน เนื่องจากผลของปาล์มน้ำมันสามารถนำมาสกัดน้ำมันได้ น้ำมันจากผลปาล์มมีคุณสมบัติทางเคมีและฟิสิกส์ที่เหมาะสมในการนำไปทำผลิตภัณฑ์อาหาร อุตสาหกรรมอาหารที่ใช้น้ำมันปาล์มได้แก่ บะหมี่กึ่งสำเร็จรูป นมข้นหวาน มาการีน รวมทั้งการใช้น้ำมันปาล์มในการปรุงอาหารประเภททอดและผัด นอกจากนี้ยังมีการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมสบู่และเทียนไขอีกด้วย (สวนิตย์, 2535) Hamilton (1980 อ้างโดย จินต์จิรา, 2544) กล่าวว่า ข้อดีของน้ำมันปาล์มมีอยู่ด้วยกันหลายประการ เช่น เป็นสารให้สีตามธรรมชาติของเนยเทียม มีปริมาณกลีเซอไรด์ในรูปของแข็ง (solid glyceride) สูงทำให้มีความคงตัวดีโดยไม่ต้องทำปฏิกิริยาไฮโดรจิเนชั่น มีกรดไลโนเลนิคและลิโนเลอิคในปริมาณต่ำทำให้มีความคงตัวต่อความร้อนได้ดี มีโอเลอีนเป็นองค์ประกอบหลักซึ่งมีสมบัติเป็นไขมันอิ่มตัว มีจุดหลอมเหลวปานกลางและมีความสามารถในการต้านการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชั่น มีไตรกลีเซอไรด์ที่มีองค์ประกอบเป็นกรดไขมันสายสั้นอยู่ในปริมาณเพียงเล็กน้อย ซึ่งไตรกลีเซอไรด์พวกนี้จะเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิสได้ง่าย และน้ำมันปาล์มมี

ไตรกลีเซอไรด์ที่มีจุดหลอมเหลวสูงอยู่ด้วย ซึ่งก็คือ สเตียริน ทำให้สามารถผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีลักษณะเป็นพลาสติกได้ และปัจจุบันทั่วโลกมีการใช้น้ำมันปาล์มเป็นแหล่งพลังงานสำหรับเครื่องจักรและรถยนต์ต่างๆ

ในทางการแพทย์มีการใช้ประโยชน์จากองค์ประกอบของน้ำมันปาล์มเพื่อการรักษาโรค โดยนักวิจัยทางการแพทย์พบว่าแคโรทีนอยด์ที่อยู่ในรูปกรดรีทินาอิค (retinaic acid) สามารถยับยั้งการเกิดเซลล์มะเร็ง ทั้งชนิดที่เกี่ยวกับฮอร์โมนและไม่เกี่ยวกับฮอร์โมนได้ ส่วนเบตาแคโรทีนสามารถลดอัตราการเกิดมะเร็งปอดและมะเร็งในลำไส้โดยไม่มีผลข้างเคียงเกิดขึ้น ซึ่งต่างจากการใช้ยาทาโมซิเฟน (tamoxifen) ที่ใช้ในการรักษาโรคมะเร็งอยู่ในปัจจุบัน (Nesaretnam *et al.*, 2000) นอกจากนั้นนักวิจัยยังพบว่าสารประกอบบางชนิดในปาล์มน้ำมันสามารถต้านทานโรคมาลาเรียได้ (Cooper *et al*., 2002)

สำหรับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำนิยมนำน้ำมันปาล์มมาใช้เป็นแหล่งพลังงานและสารอาหารเนื่องจากน้ำมันปาล์มเป็นแหล่งพลังงานจากน้ำมันที่มีราคาถูกกว่าแหล่งพลังงานชนิดอื่น จากการศึกษาวิจัยทดลองใช้น้ำมันปาล์มในอาหารปลาดุกแอฟริกัน (*Clarias gariepinus*) รวมทั้งปลาตระกูลแคทฟิชชนิดอื่นๆ ปลาแอตแลนติกแซลมอน ปลาเรนโบว์เทร้าท์ และปลาหมอพบว่าไม่มีผลต่อการเจริญเติบโตและประสิทธิภาพการใช้สารอาหารเมื่อเทียบกับแหล่งน้ำมันอื่นๆ ที่ราคาแพงกว่า (Ng *et al*., 2003; Tocher *et al*., 2004) และแม้ว่าปาล์มน้ำมันจะมีปริมาณของสารสีอยู่น้อยเมื่อเทียบกับสารอื่นๆ แต่หากเปรียบเทียบปริมาณเบตาแคโรทีนในปาล์มน้ำมันกับพืชชนิดอื่นพบว่าปาล์มน้ำมันมีเบตาแคโรทีนมากกว่าแครอท 15 เท่า และมากกว่ามะเขือเทศถึง 300 เท่า (Choo, 2000) ดังนั้นปาล์มน้ำมันจึงเป็นแหล่งที่สำคัญของสารสีจากธรรมชาติแหล่งหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในสัตว์น้ำได้

วัตถุประสงค์

1. เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของแคโรทีนอยด์จากแหล่งธรรมชาติ คือสารสกัดจากสาหร่ายสไปรูไลนา พริกหวาน ปาล์มน้ำมัน และเบตาแคโรทีนสังเคราะห์ ในอาหารต่อการเจริญเติบโต อัตรารอด การเพิ่มสีตัว และภูมิคุ้มกันของกุ้งขาว

2. ศึกษาผลของเบตาแคโรทีนในอาหารต่อการเจริญเติบโต อัตรารอดตาย การเพิ่มสีตัว ภูมิคุ้มกัน และความต้านทานความเครียด ในกุ้งขาวที่เลี้ยงในสภาพแวดล้อมต่างกัน

3. เพื่อศึกษาระดับของเบตาแคโรทีนในอาหารต่อการเจริญเติบโต อัตรารอดตาย การเพิ่มสีตัว ภูมิคุ้มกัน และความต้านทานความเครียดในกุ้งขาว