บทที่ 1

บทนำ

บทนำต้นเรื่อง

สัตว์น้ำเป็นอาหารที่เป็นแหล่งโปรตีนที่ดีที่สุดของมนุษย์ และเป็นแหล่งของไขมันที่ไม่อิ่มตัว เช่น กรดไขมันลิโนลีนิค (γ-(gamma)-linolenic acid, 18:3 ω3) และกรดไขมันลิโนลีอิค (linoleic acid, 18:6 ω6) (Lovell, 1998) ซึ่งมีความสำคัญต่อการเจริญเติบโต เป็นองค์ประกอบของโครงสร้างเนื้อเยื่อเซลล์และเป็นสารต้นกำเนิดของฮอร์โมนที่สำคัญหลายชนิด (Alava and Kanazawa, 1996) ส่งผลให้มีการพัฒนาอุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำขึ้นแบบครบวงจร โดยมีการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบพัฒนา (intensive culture) ตามด้วยอุตสาหกรรมการแปรรูปสัตว์น้ำ และอุตสาหกรรมการส่งออกสัตว์น้ำเยือกแข็ง ตามลำดับ นอกจากนี้การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำยังมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องตลอดเวลา เพื่อให้ได้ผลผลิตที่สูงสุด โดยมีปัจจัยที่ต้องพิจารณาอย่างรอบคอบ ได้แก่ การจัดการในด้านอาหาร การป้องกันรักษาโรค และการจัดการคุณภาพน้ำ ซึ่งหากปัจจัยทั้งสามประการอยู่ในสภาวะที่เหมาะสมต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำ จะส่งผลให้สัตว์น้ำมีการเจริญเติบโตดีและอัตราการรอดสูง (Halver *et al*., 2002)

สไปรูไลนา (*Spirulina* sp.) เป็นสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (blue green algae) ที่ไม่มีผนังเซลล์ สัตว์สามารถย่อยได้ง่าย (Hill, 1980) และมีความสำคัญทางเศรษฐกิจ มีคุณค่าทางโภชนาการสูง มีโปรตีน 60-70 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักแห้ง (Pelizer *et al.,* 2003; Jimenez *et al.,* 2003) มีไขมัน 6-8 เปอร์เซ็นต์ (Vonshak, 1997 อ้างโดย Varga *et al.,* 2002) โดยเฉพาะอย่างยิ่งกรดลิโนลินิค มีอยู่ถึง 35 เปอร์เซ็นต์ ของไขมันทั้งหมด (Venkataraman, 1983) มีวิตามินและแร่ธาตุที่สำคัญที่ร่างกายต้องการอีกหลายชนิด เช่น วิตามินเอ อินโนซิทอล (inositol) วิตามินบี โดยเฉพาะวิตามินบี12 (Richmond, 1987) และภายในเซลล์ยังประกอบด้วยเม็ดสีต่างๆ ที่สำคัญและมีประโยชน์ เช่น คลอโรฟิลล์ (chlorophyll) ไฟโคไซยานิน (phycocyanin) และคาโรทีนอยด์ (carotenoids) (Richmond, 1987) โดยคาโรทีนอยด์เป็นกลุ่มรงควัตถุที่ให้สีเหลือง ส้ม และชมพูถึงแดง พบมากในธรรมชาติโดยมีมากกว่า 600 ชนิด สร้างขึ้นจากวิถีเทอร์พีนอยด์ (terpenoid pathway) ในเซลล์พืช สาหร่าย แบคทีเรีย และรา สัตว์น้ำไม่สามารถสังเคราะห์ได้ แต่คาโรทีนอยด์เป็นสารเสริมที่จำเป็นต่อร่างกาย ดังนั้นสัตว์น้ำจึงต้องกินอาหารที่มีคาโรทีนอยด์และยังพบว่าสารสีเหล่านี้

สามารถนำมาใช้ในทางการแพทย์ได้ เช่น ไฟโคไซยานินสามารถนำมาใช้เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ และสามารถเหนี่ยวนำการผลิตไซโตไคน์ (cytokines) ที่มีผลต่อการลดการอักเสบของเซลล์สมอง (Gemma *et al.,* 2002) ส่วนคาโรทีนอยด์ จำพวกเบตา-แคโรทีน (β-carotene) ซีแซนทิน (zeaxanthin) และ เบตา-คริปโตแซนทิน (β-cryptoxanthin) เป็นคาโรทีนอยด์ชนิดเด่นที่มีอยู่ในสไปรูไลนา มีการรายงานว่าคาโรทีนอยด์เป็นสารเสริมที่สำคัญในอาหารของมนุษย์เพราะมีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระและต้านมะเร็ง (Careri *et al.,* 2001) สามารถเพิ่มภูมิต้านทานให้กับมนุษย์ (Hughes, 2001) ปลาเรนโบว์เทราท์ (rainbow trout; *Oncorhychus mykiss*) ซึ่งช่วยทำให้ระบบภูมิคุ้มกันสูงขึ้น โดยทำให้ค่าปฏิกิริยาไลโซไซม์ในซีรัม (serum lysozyme activity) และค่าอัตราการกินแบบฟาโกไซติก (phagocytic activity) และดัชนีฟาโกไซติก (phagocytic index) สูงขึ้น (Amar *et al.,* 2004) คาโรทีนอยด์มีผลกับสีในเรื่องการแบ่งเพศของปลาหางนกยูง (guppies; *Poecilia reticulate*) (Grether *et al.,* 2004) และจากการศึกษา พบว่าสีสันของปลาเกิดจากการสะสมของรงควัตถุ (pigments) พวกคาโรทีนอยด์ โดยคาโรทีนอยด์เหล่านี้จะสะสมอยู่ในร่างกายปลา เป็นผลให้เกิดสีขึ้นในส่วนต่างๆ และปลาสามารถเก็บเม็ดสีเหล่านี้ไว้ในตัว หรืออาจเปลี่ยนคาโรทีนอยด์เป็นสารสีรูปอื่นได้ (Fox, 1957) ซึ่งคาโรทีนอยด์จะทำให้ปลามีสีสันสดใสไม่ว่าจะเป็นปลาสวยงามหรือปลาที่ใช้เพื่อบริโภคเป็นอาหาร ทำให้ได้รับความนิยมและมีโอกาสจำหน่ายได้ในราคาที่สูงขึ้น จึงมีผู้คิดหาวิธีที่จะทำให้ปลามีสีเข้มขึ้น เช่น การใช้สารเคมีให้ปลากิน การย้อมสี การให้อาหารพิเศษ (วุฒิพร, 2527) การเสริมคาโรทีนอยด์ลงในอาหาร (Latscha, 1991) ดังนั้นจึงมีการผลิตอาหารที่มีส่วนผสมของคาโรทีนอยด์ เพื่อเร่งสีของปลาให้เข้มขึ้น ในการผลิตปลาสวยงามผู้เลี้ยงนิยมใช้คาโรทีนอยด์สังเคราะห์ผสมในอาหารปลาซึ่งจะทำให้ปลามีสีเข้มขึ้น สามารถจำหน่ายได้ในราคาสูง เช่น ปลาทอง, ปลาคาร์ป, ปลาหมอสี และ ปลากระดี่ เป็นต้น (วันเพ็ญ และกาญจนา, 2547) ส่วนปลาที่นิยมบริโภคเป็นอาหารนิยมเร่งสีเนื้อ ได้แก่ ปลาแซลมอน (salmon) และปลาเรนโบว์เทราท์ เนื่องจากความต้องการลักษณะทางกายภาพของผลิตภัณฑ์อาหารจากสัตว์น้ำนั้นในตลาดโลก ผลิตภัณฑ์เนื้อปลาในกลุ่มปลาแซลมอน (*Salmon* sp., *Oncorhynchus* sp., *Salvelinus* sp.) ควรจะมีสีชมพูถึงแดง เช่นเดียวกับปลาเรดซีบรีม (red sea bream; *Chrysophrys major*) ที่ได้จากการเพาะเลี้ยงควรมีสีชมพูแดงซึ่งจะคล้ายกับปลาที่จับมาจากธรรมชาติ เพื่อให้สีสันน่ารับประทานมากขึ้น (Sommer *et al.,* 1991b) นอกจากนี้ในผลผลิตกุ้งจากการเพาะเลี้ยง มักพบว่ากุ้งที่ได้รับอาหารที่มีคา-โรทีนอยด์ไม่เพียงพอจะมีสีซีด (สีฟ้า) และเมื่อนำไปผ่านกระบวนการแปรรูปจะได้ผลิตภัณฑ์กุ้งต้มที่มีสีเหลืองส้ม ซึ่งไม่เป็นที่ต้องการของตลาด การเสริมคาโรทีนอยด์ลงไปในอาหารกุ้งถือเป็นแนวทางในการแก้ไขปัญหาดังกล่าวได้ เนื่องจากคาโรทีนอยด์มีส่วนเกี่ยวข้องโดยตรงกับการสะสมแอสตา

แซนทินในกุ้งซึ่งจะทำให้กุ้งมีสีเข้มขึ้น และเมื่อผ่านการต้มในกระบวนการแปรรูป จะให้ผลิตภัณฑ์ที่มีสีแดงส้มที่ตรงกับความต้องการของผู้บริโภค (Latscha, 1991)

จากประโยชน์ของสไปรูไลนาที่ได้กล่าวมาจึงสามารถนำไปใช้พัฒนาคุณภาพอาหารของสัตว์น้ำได้ โดยเฉพาะการเลี้ยงที่เป็นแบบหนาแน่น ซึ่งทำให้สัตว์น้ำเกิดความเครียด อ่อนแอไม่ทนต่อโรค และการเจริญเติบโตลดลง ส่งผลให้ผลผลิตที่ได้ลดลงและไม่มีคุณภาพ ดังนั้นได้มีการศึกษาโดยการนำสารสกัดหลายชนิดมาทดสอบและประยุกต์ใช้กระตุ้นภูมิคุ้มกันทดแทนยาปฏิชีวนะ ซึ่งพบว่าสไปรูไลนาเป็นแหล่งโปรตีนและสารกระตุ้นภูมิคุ้มกันจากธรรมชาติที่สามารถนำมาใช้ได้เพื่อทดแทนสารกระตุ้นภูมิคุ้มกันที่เป็นสารเคมีซึ่งมีราคาแพง (Roberts, 1989) และมีข้อควรระวังในการใช้ เช่น ในกรณีของสารกระตุ้นภูมิคุ้มกันประเภทยาปฏิชีวนะหากมีการใช้ติดต่อเป็นเวลานาน จะมีผลทำให้เชื้อโรคในตัวสัตว์น้ำดื้อยา และมีการตกค้างของยาในตัวสัตว์น้ำ (Roberts, 1989) ดังนั้นการใช้สไปรูไลนาเสริมในอาหารสัตว์น้ำจะช่วยเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการของอาหาร เพิ่มภูมิคุ้มกัน และยังมีรงควัตถุที่สามารถทำให้สัตว์น้ำมีสีตัวที่เข้มขึ้นได้ (Duncan and Klesius, 1996; Lee, 1999; Lee *et al*., 2003)

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของคาโรทีนอยด์ที่ได้จากการเสริมสไป-รูไลนาแห้ง (*Spirulina* sp.) เปรียบเทียบกับคาโรทีนอยด์สังเคราะห์ เพื่อใช้เป็นแหล่งของคาโรทีน-อยด์ในการเร่งสีและเพิ่มภูมิคุ้มกัน ทั้งนี้เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดในการปรับปรุงคุณภาพและเพิ่มมูลค่าของผลผลิตให้เป็นที่ต้องการของตลาด สำหรับสัตว์น้ำที่เลือกใช้เป็นตัวทดลอง คือ ปลานิลแดงแปลงเพศ ซึ่งเป็นปลาน้ำจืดที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจที่เป็นที่นิยมบริโภคทั้งภายในและต่างประเทศ และเป็นปลาที่เลี้ยงง่าย โตเร็ว มีความทนทาน นอกจากนี้ยังมีรสชาติดีอีกด้วย เมื่อสิ้นสุดการทดลองนี้ทำให้ทราบถึงชนิดของคาโรทีนอยด์สังเคราะห์ที่ปลานิลแดงแปลงเพศสามารถนำไปใช้ได้และระดับของคาโรทีนอยด์ที่ได้จากการเสริมสไปรูไลนาแห้งที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต ประสิทธิภาพการใช้อาหาร การสะสมคาโรทีนอยด์ของตัวปลา และผลต่อภูมิคุ้มกัน อันจะเป็นประโยชน์ ทั้งในแง่ใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานเพื่อศึกษาเรื่องคาโรทีนอยด์ในปลานิลแดงแปลงเพศและสัตว์น้ำชนิดอื่น และประยุกต์ใช้กับการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำได้

ตรวจเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. สาหร่ายสไปรูไลนา (*Spirulina* sp.)

1.1 อนุกรมวิธานของสาหร่ายสไปรูไลนา

สาหร่ายสกุลนี้พบมากกว่า 30 ชนิด การจัดอนุกรมวิธานของสไปรูไลนาตามวิธีของ Venkataraman (1983) ดังนี้

Division Cyanophyta

Class Cyanophyceae

Order Oscillatoriales

Family Oscillatoriaceae

Genus *Spirulina*

1.2 ลักษณะทางชีววิทยา

สไปรูไลนาจัดเป็นสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (blue-green algae) มีลักษณะสำคัญ คือ เป็นเส้นสาย (filamentous) ซึ่งประกอบด้วย เซลล์หลายเซลล์เรียงต่อกัน (multicellular) สายบิดเป็นเกลียวคล้ายเกลียวของลวดสปริงเรียกสายเกลียวนี้ว่า ไทรโคม (trichome) โดยในแต่ละสายประกอบด้วย ไทรโคมแถวเดียวที่มีขนาดสม่ำเสมอกัน ไม่มีกิ่งก้าน และเซลล์สืบพันธุ์ (heterocyst) เจริญเติบโตโดยการขาดท่อน (fragmentation) และแบ่งเซลล์ ทำให้ไทรโคมยืดยาวออก (Fog *et al*., 1973) โครงสร้างของเซลล์มีรูปร่างไม่แน่นอน จัดเป็นพวกโพรคาริโอต (procaryote) (Richmond, 1987) ไม่มีนิวเคลียส พบแต่นิวเคลียซับสแตนท์ (nuclear substance) เช่น กรดนิวคลีอิก และไม่มีคลอโรพลาส (chloroplast) มีรงควัตถุกระจายอยู่บริเวณไทลาคอยด์ (thylacoid) ในไซโตพลาสซึม (cytoplasm) ในสไปรูไลนาบางชนิดเซลล์มีเม็ดอากาศเล็กๆ เรียกว่า ก๊าซแวคคูโอล (gas vacuole) ทำให้สาหร่ายมีการลอยตัวได้ดี (สุมนทิพย์, 2529) สาหร่ายสไปรูไลนามีขนาดใหญ่กว่าคลอเรลลา (*Chlorella* sp.) ประมาณ 100 เท่า และผนังเซลล์จะมีหลายชั้น ประกอบด้วยสารมิวโคโปรตีน (mucoprotein) และ เพ็คติน (pectin) ผนังชั้นนอกเป็นสารโพลีแซคคาไรด์ (polysaccharides) ไม่พบสารประกอบพวกเซลล์ลูโลส (cellulose) (Venkataraman, 1983) มีความกว้างของเซลล์แต่ละเซลล์ประมาณ 3-80 ไมโครมิเตอร์ มีความยาว 50-500 ไมโครมิเตอร์ (เจียมจิตต์, 2530) ระยะห่างระหว่าง

แต่ละเกลียว (pitch) 60 ไมโครมิเตอร์ สาหร่ายสไปรูไลนาพบมีการแพร่กระจายทั่วไปในน้ำจืดเป็นส่วนใหญ่ แต่สามารถที่จะแพร่กระจายได้ในน้ำเค็มและน้ำกร่อย (Richmond, 1986) และบริเวณที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต คือ บริเวณเขตร้อนที่มีแสงมากพอสมควร และมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิในรอบวันไม่มากนัก (Faucher *et al.,* 1979) โดยอยู่บริเวณละติจูดที่ 35 องศาเหนือ และใต้ ประเทศไทยถือได้ว่าเป็นบริเวณที่มีความเหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายชนิดนี้ เนื่องจากมีแสงมากเพียงพอ และอุณหภูมิไม่แตกต่างกันมากนักโดยสามารถพบการแพร่กระจายมากในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (เจียมจิตต์, 2530)

1.3 องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมีหรือคุณค่าทางอาหารของสาหร่ายสไปรูไลนา เป็นปัจจัยสำคัญในการนำไปใช้ประโยชน์ เช่น เป็นอาหารมนุษย์ อาหารสัตว์ และการใช้ประโยชน์ด้านอื่นๆ สาหร่ายชนิดนี้ประกอบด้วย

1) โปรตีน 60-70 เปอร์เซ็นต์ (Pelizer *et al.,* 2003; Jimenez *et al.,* 2003) โดยคุณภาพของโปรตีนขึ้นอยู่กับความสมดุลของปริมาณของกรดอะมิโนที่จำเป็น (essential amino acid) และความยากง่ายในการย่อย ซึ่งองค์ประกอบของกรดอะมิโนในสไปรูไลนาอยู่ในเกณฑ์ที่สมดุลทั้งในแง่ปริมาณและคุณภาพ (Richmond, 1987)

2) วิตามินและแร่ธาตุ 7-10 เปอร์เซ็นต์ เช่น วิตามินเอ, อินโนซิทอล (inositol) วิตามินบี1, บี2, บี6 และ บี12 โดยเฉพาะวิตามินบี12 ที่มีปริมาณมากกว่าในสาหร่ายสีเขียวชนิดอื่น (Richmond, 1987) และแร่ธาตุต่างๆ เช่น แคลเซียม, ฟอสฟอรัส, แมกนีเซียม, เหล็ก และสังกะสี เป็นต้น (Hill, 1980; Ventakaraman, 1983)

3) ไขมัน 6-8 เปอร์เซ็นต์ (Belay, 1997; Cohen, 1997; Vonshak, 1997 อ้างโดย Varga *et al.,* 2002) ซึ่งส่วนใหญ่เป็นกรดไขมันที่ไม่อิ่มตัว ซึ่งคิดเป็น 80 เปอร์เซ็นต์ ของไขมันทั้งหมดโดยเฉพาะอย่างยิ่งกรดลิโนลินิก มีอยู่ถึง 35 เปอร์เซ็นต์ ของไขมันทั้งหมด (Venkataraman, 1983)

4) รงควัตถุประกอบด้วย

4.1) คลอโรฟิลล์ เอ 1-1.5 เปอร์เซ็นต์ (Varga *et al.,* 2002)

4.2) ไฟโคบิลิโปรตีน (phycobiliprotein) เป็นสารสีในกลุ่มที่สามารถละลายได้ในน้ำ มี 2 ชนิดคือ อัลโลไฟโคไซยานิน (allophycocyanin) และซี-ไฟโคไซยานิน (c-phycocyanin) (Richmond, 1987)

4.3) แซนโทฟิลล์และคาโรทีนอยด์ 0.5 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักแห้ง โดยคาโรทีนอยด์แบ่งออกเป็นชนิดต่างๆ ดังนี้ เบตา-แคโรทีน, ซีแซนทิน, เบตา-คริปโตแซนทิน, เบตา-แคโรทีน-5, 6- อีพอกไซด์ (β-carotene-5,6-epoxide), อิชินิโนน (echininone) และ มิกโซแซนโทฟิลล์ (myxoxanthophyll) (Richmond, 1987) ปริมาณคาโรทีนอยด์จะแตกต่างกันตามชนิดของสไปรูไลนา สารอาหารและสภาพแวดล้อม Careri และคณะ (2001) พบว่า *Spirulina pacifica* ซึ่งเป็นสายพันธุ์ที่ปรับปรุงมาจาก *Spirulina platensis* มีปริมาณเบตา-แคโรทีน 0.1 เปอร์เซ็นต์ ซีแซนทิน 0.04 เปอร์เซ็นต์ ส่วน Miki และคณะ (1986) วิเคราะห์ปริมาณคาโรทีนอยด์ใน *Spirulina maxima* โดยใช้โครมาโตกราฟี พบว่ามีปริมาณซีแซนทิน 25 เปอร์เซ็นต์ และเบตา-แคโรทีน 15 เปอร์เซ็นต์ ของคาโรทีนอยด์ที่มีอยู่ทั้งหมด

1.4 ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของสไปรูไลนา

การเจริญเติบโตของสาหร่ายชนิดนี้ขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง ได้แก่

1) สารอาหาร สารอาหารที่สำคัญในการเพาะเลี้ยงสไปรูไลนา ได้แก่ คาร์บอน ไนโตรเจน และฟอสฟอรัส โดยคาร์บอนเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเจริญเติบโต สไปรูไลนาสามารถใช้คาร์บอนได้ทั้งในรูปอนินทรีย์สาร (คาร์บอนไดออกไซด์, คาร์บอเนต และไบคาร์บอเนต) และอินทรีย์สาร (กลูโคส, เอทธานอล, กาแลกโตส, ไพรูเวท และฟรุกโตส) (Becker and Venkataraman, 1984) สำหรับไนโตรเจนเป็นตัวที่มีบทบาทเกี่ยวข้องกับเมแทบอลิซึมภายในเซลล์ โดยในเซลล์ของสาหร่ายประกอบด้วยไนโตรเจน 1-10 เปอร์เซ็นต์ ของน้ำหนักแห้ง (Becker and Venkataraman, 1984) ฟอสฟอรัสมีบทบาทต่อกระบวนการเคลื่อนย้ายพลังงาน การสังเคราะห์กรดนิวคลีอิก รวมทั้งเป็นบัฟเฟอร์ โดยปกติสาหร่ายจะใช้ฟอสฟอรัสในรูปอนินทรีย์ ได้แก่ ไดไฮโดรเจนฟอสเฟต และไฮโดรเจนฟอสเฟต การขาดฟอสฟอรัสทำให้ปริมาณโปรตีนและคลอโรฟิลล์ลดลง แต่คาร์โบไฮเดรตเพิ่มขึ้น (Richmond, 1987)

2) ความเป็นกรด-ด่าง ควรจะอยู่ในช่วง 9 - 11 เนื่องจากสไปรูไลนาสามารถเจริญได้ดีในน้ำที่มีความเป็นด่างสูง ทะเลสาบหลายแห่งในแอฟริกามีการพบ *Spirulina platensis* และทะเลสาบเทกซ์โคโค (Texcoco) ในประเทศเม็กซิโกพบ *Spirulina maxima* จากการทดลองของไปรมา และคณะ (2531) พบว่าความเข้มข้นของโซเดียมไบคาร์บอเนต 5 กรัมต่อลิตร ก็เพียงพอต่อการเจริญของสไปรูไลนา

3) อุณหภูมิ สไปรูไลนาสามารถอยู่ได้ในช่วงอุณหภูมิ 15 - 50 องศาเซลเซียส แต่จะเจริญได้ดีที่สุดที่ 32 - 42 องศาเซลเซียส และการเจริญเติบโตจะลดลงเมื่ออุณหภูมิต่ำกว่า 20 องศา-

เซลเซียส หรือสูงกว่า 44 องศาเซลเซียส และตายเมื่ออุณหภูมิสูงถึง 50 องศาเซลเซียส (Nakamura, 1982)

4) ความเข้มแสง ความเข้มแสงที่เหมาะสมต่อการเจริญของสไปรูไลนา คือ 4,000 - 5,000 ลักซ์ (Nakamura, 1982) แต่รายงานของ Ventakaraman (1983) พบว่า ความเข้มของแสงที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโต คือ 3,000 – 3,500 ลักซ์ ส่วนพิมพรรณ และอารักษ์ (2531) รายงานว่า ความเข้มแสงที่เหมาะสม คือ 3,500 ลักซ์ ช่วงแสง 16 ชั่วโมงต่อวัน และความยาวคลื่นที่สไปรูไลนาสามารถนำไปสังเคราะห์แสงได้นั้นเป็นความยาวคลื่นเดียวกับความยาวคลื่นที่พืชทั่วไปใช้ในการสังเคราะห์แสง คือ มีความยาวคลื่น 400 - 700 นาโนเมตร

2. ปลานิล

ปลานิลได้ถูกนำเข้ามาในประเทศไทยเป็นครั้งแรกเมื่อปี พ.ศ. 2508 โดยเจ้าฟ้าชายอากิฮิโตมงกุฎราชกุมารแห่งประเทศญี่ปุ่น โดยทรงนำปลานิลจำนวน 50 ตัว ความยาวเฉลี่ยตัวละประมาณ 9 เซนติเมตร น้ำหนักประมาณ 14 กรัม มาทูลเกล้าฯ ถวายแด่พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัว ระยะแรกได้ทรงพระกรุณาโปรดเกล้าฯ ให้เลี้ยงไว้ในบ่อดินขนาด 10 ตารางเมตร ในบริเวณสวนจิตรลดา พระราชวังดุสิต และโปรดเกล้าฯ พระราชทานชื่อปลาชนิดนี้ว่า “ปลานิล” อีก 1 ปีต่อมา ได้ทรงพระราชทานลูกปลาขนาดเล็กที่เกิดจากพ่อ-แม่ที่เลี้ยงไว้ จำนวน 10,000 ตัว แก่กรมประมงเพื่อนำไปเลี้ยงและขยายพันธุ์แจกจ่ายให้แก่ราษฎรต่อไป (มานพ และคณะ, 2530)

2.1 อนุกรมวิธานของปลานิล จัดจำแนกโดย Trewavas (1982)

Phylum Vertebrata

Class Osteichthyes

Order Perciformes

Family Cichlidae

Genus *Oreochromis*

Species *niloticus*

2.2 ชีววิทยาปลานิล

ปลาในตระกูลปลานิล (Nile tilapia) เป็นปลาที่มีต้นกำเนิดจากทวีปแอฟริกา มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Oreochromis niloticus* (Linn.) มีริมฝีปากบนและล่างเสมอกัน บริเวณแก้มมีเกล็ด 4 แถว ลำตัวมีสีเขียวปนน้ำตาลและมีลายพาดขวาง 9-10 แถว ครีบหลังมีอันเดียว ประกอบด้วยก้านครีบอ่อน 9-10 อันมีเกล็ด 33 เกล็ดบนแกนเส้นข้างลำตัว ด้านข้างมีเกล็ดตามแนวเฉียงจากตอนต้นของครีบหลังลงมาจนถึงเส้นข้างลำตัว 5 เกล็ด และจากเส้นข้างลำตัวลงมาถึงแนวส่วนหน้าของครีบก้น 13 เกล็ด ครีบหางมีจุดสีขาวและดำตัดขวางอยู่ทั่วไป (มานพ และคณะ, 2536) ความแตกต่างระหว่างปลานิลเพศผู้และเพศเมียเห็นได้ชัดเจนจากติ่งเพศ โดยเพศเมียจะมีติ่งเพศปลายมน ช่องเปิดบนติ่งเพศมี 2 ช่องคือ ช่องเปิดที่ปลายติ่งเป็นทางออกของปัสสาวะ ส่วนช่องเปิดตามขวางบริเวณกึ่งกลางของติ่งเพศเป็นทางออกของไข่ ส่วนปลาเพศผู้ จะมีติ่งเพศยาวเรียว ปลายแหลม ช่องเพศมีเพียงช่องเดียวที่ปลายติ่ง สำหรับสีสันนั้นปลาตัวผู้ส่วนใหญ่บริเวณใต้คางจะมีสีคล้ำเป็นสีแดงอมม่วง ส่วนตัวเมียจะเป็นสีเหลือง แต่มีบ้างเช่นกันที่เพศผู้จะมีสีใต้คางเป็นสีเหลือง จึงไม่ควรใช้สีใต้คางเป็นตัวแบ่งแยกเพศ (อุทัยรัตน์, 2538) ปลานิลเป็นปลาที่เจริญเติบโตเร็ว แข็งแรง อดทนต่อการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมได้ดี สามารถทนอยู่ได้ในช่วงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่กว้างมาก ตั้งแต่ 11- 42 องศาเซลเซียส ทนต่อความเป็นกรด - ด่างได้ดีในช่วง 6.5-8.3 และทนต่อความเค็มของน้ำสูงถึง 20 พีพีที (ppt) ได้อย่างปลอดภัย ชอบอาศัยอยู่รวมกันเป็นฝูงตามแม่น้ำ, ลำคลอง, หนองบึง และ ทะเลสาบ (กรมประมง, 2541) ปลาในตระกูลปลานิลเป็นปลาที่กินอาหารได้ทุกชนิด จัดเป็นปลาที่กินทั้งพืชและสัตว์ (omnivorus) ชอบหากินในเวลากลางวันและหยุดหากินในเวลากลางคืน แต่การย่อยอาหารยังคงดำเนินการไปอย่างต่อเนื่องและช้า ๆ จะย่อยเสร็จสมบูรณ์ในเวลา 18-24 ชั่วโมง ปลานิลมีทางเดินอาหารยาวเป็น 5-7 เท่าของความยาวลำตัว แต่ไม่มีกระเพาะแท้เหมือนปลากินเนื้อทั่วๆ ไป แต่มีเนื้อเยื่อที่มีโครงสร้างคล้ายกระเพาะที่สามารถหลั่งน้ำย่อย เพื่อลดความเป็นกรดเป็นด่างระหว่างการย่อยอาหารได้ (วีรพงศ์, 2536)

3. ปลานิลสีแดง (Red Tilapia)

ปลานิลเป็นที่ทราบกันดีว่าจะมีสีของลำตัวเป็นสีเขียวอมน้ำตาล แต่หลังจากที่นำเข้ามาเลี้ยงในประเทศไทยในปี พ.ศ. 2508 และกรมประมงได้ส่งเสริมให้เกษตรกรมีการเลี้ยงกันอย่างแพร่หลาย โดยการเพาะพันธุ์ปลานิลจำหน่ายให้แก่เกษตรกรและแจกพันธุ์ปลาให้แก่เกษตรกรจากการเพาะพันธุ์ในระยะหลัง ปรากฏว่าลูกปลานิลจำนวนหนึ่งมีสีสันผิดไปจากเดิมอย่างเด่นชัด

กล่าวคือ สีของลำตัวเปลี่ยนเป็นสีขาวอมชมพู, เหลือง, ส้ม หรือแดง ซึ่งถือว่าเป็นการผ่าเหล่า (mutant) ซึ่งพบครั้งแรกที่สถานีประมงจังหวัดอุบลราชธานี เมื่อปี พ. ศ. 2511 โดยพบปะปนอยู่ในบ่อเลี้ยงปลานิล มีลักษณะคล้ายคลึงกับปลานิลมาก ต่างกันตรงที่สีของลำตัว กล่าวคือปลานิลธรรมดามีเม็ดสีดำ (melanin pigments) แต่ปลานิลที่พบใหม่นี้มีเม็ดสีหลายชนิด เช่น สีแดง, สีส้ม, สีส้มเหลือง และสีส้มแดง แต่บางตัวมีเม็ดสีดำปนอยู่บ้างซึ่งกระจายอยู่ทั่วลำตัว มีจุดสีแดงและสีส้มเรียงกันเป็นแถวจึงทำให้เห็นเป็นแถบสีส้มอยู่กระจาย ซึ่งจะมีความต่างกับปลานิลที่มีลำตัวสีเขียวหรือเขียวเทาปนน้ำเงิน ลักษณะที่มีความแตกต่างที่เห็นได้ชัดเจนคือ ในช่องท้องของปลานิลสีแดงจะมีไขมันต่างกับปลานิล และสีของผนังช่องท้องของปลานิลสีแดงจะมีสีขาว เนื่องจากไม่มีเม็ดสีดำส่วนในปลานิลผนังช่องท้องจะมีสีดำเนื่องจากมีเม็ดสีดังกล่าวปะปนอยู่ และในปี พ.ศ.2527 สมเด็จ-พระเทพรัตนราชสุดา สยามบรมราชกุมารี ได้ทรงพระราชทานชื่อปลาชนิดนี้ว่า “ปลานิลสีแดง” แต่มักจะเรียกกันทั่วๆ ไปว่า “ปลานิลแดง” (พรรณศรี, 2531)

จากการศึกษาประวัติความเป็นมาของปลาในตระกูลปลานิลที่เลี้ยงอยู่ในประเทศไทยกับการศึกษาถึงลักษณะภายนอกของปลานิลสีแดงสายพันธุ์ไทยในปัจจุบัน และจากการตรวจสอบโดยวิธีอีเลคโตรโฟรีซีส (electrophoresis) โดยมหาวิทยาลัยสเตอร์ลิงประเทศอังกฤษและมหาวิทยาลัยฟิลิปปินส์ประเทศฟิลิปปินส์ สรุปได้ว่าปลานิลสีแดงสายพันธุ์ไทยในปัจจุบันเป็นลูกผสมระหว่างปลานิล (*Oreochromis niloticus*) และปลาหมอเทศ (*Oreochromis mossambicus*) โดยมีความถี่ของยีนส์ปลานิล 78 เปอร์เซ็นต์ และปลาหมอเทศ 22 เปอร์เซ็นต์ (พรรณศรี, 2531) ปลานิลแดง มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า (*Oreochromis niloticus* × *Oreochromis mossambicus*) ซึ่งเป็นปลาลูกผสมระหว่างปลานิลกับปลาหมอเทศ และมีชื่อสามัญว่า red tilapia (พรรณศรี, 2531) ปลานิลแดงที่เกิดขึ้นนี้อาจสอดคล้องกับ Galman และ Avtalion (1983) ที่รายงานว่า ปลานิลแดงเป็นปลาลูกผสมที่เกิดจากปลาในสกุล *Tilapia* ตั้งแต่ 2 ชนิดขึ้นไป คือ *T. niloticus, T. mossambicus, T. aureus* และ *T. hornorum*

3.1 ลักษณะและชีววิทยาของปลานิลสีแดง

จะเห็นได้ว่าปลานิลสีแดงสายพันธุ์ไทยมีลักษณะของปลานิลและปลาหมอเทศรวมกัน กล่าวคือ ปากเฉียงขึ้นคล้ายปลาหมอเทศและลักษณะลำตัวคล้ายปลานิล จำนวนก้านครีบแข็งและก้านครีบอ่อน และสัดส่วนบนลำตัวของปลาทั้งสองชนิดมีความแตกต่างกันเพียงเล็กน้อย ปลานิลสีแดงมีลำตัวสีแดง, ส้ม, แดงส้ม, ชมพู หรือขาว บางตัวมีเกล็ดสีแดงและสีเงินเป็นหย่อมๆปลานิลสีแดงมีเกล็ด 3 แถวที่บริเวณแก้ม ครีบหลังมีอันเดียว ประกอบด้วยก้านครีบอ่อน 12-13 อัน ก้าน

ครีบแข็ง 15-17 อัน ครีบอกมีเฉพาะก้านครีบอ่อน 13 อัน ครีบท้องมีก้านครีบอ่อน 5 อัน ก้านครีบแข็ง 1 อัน ครีบก้นมีก้านครีบอ่อน 9-11 อัน ก้านครีบแข็ง 3 อัน และครีบหางมีก้านครีบอ่อน 16-18 อันและไม่มีลายเส้นตามขวาง จำนวนเกล็ดบนเส้นข้างลำตัว 28-33 เกล็ด และเกล็ดรอบคอดหาง 18-19 เกล็ด นัยน์ตาปลานิลแดงมีหลายแบบ คือ นัยน์ตาสีแดง วงรอบตาสีเหลือง หรือนัยน์ตาสีดำ วงรอบตาสีแดง ปลานิลสีแดงเป็นปลาที่มีนิสัยก้าวร้าว เป็นทั้งปลากินทั้งพืชและสัตว์ เช่นเดียวกับปลานิลธรรมดา แต่ค่อนข้างจะชอบกินสัตว์มากกว่า คือ ปลานิลสีแดงจะกินปลาอื่นที่มีขนาดเล็กกว่า พ่อแม่ปลาบางครั้งก็จะกินลูกปลา ซึ่งพฤติกรรมเช่นนี้ไม่ปรากฏในปลานิลธรรมดา มีการผสมพันธุ์วางไข่เหมือนกับปลานิลธรรมดา คือสามารถผสมพันธุ์และวางไข่ได้ปีละประมาณ 3-4 ครั้ง ตัวเมียจะเริ่มวางไข่เมื่อมีความยาวเฉลี่ย 6.5 เซนติเมตร น้ำหนักเฉลี่ย 200-250 กรัม จะให้ลูกรุ่นละ 500-1,000 ตัว (ปกรณ์, 2527 ; มานพ และคณะ, 2530; พรรณศรี, 2531) เป็นต้น ดังตารางที่ 1 เปรียบเทียบความแตกต่างของปลานิลแดงกับปลานิลธรรมดาดังนี้

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างปลานิลแดงกับปลานิลธรรมดา

องค์ประกอบทางสรีระวิทยา	**ปลานิลแดง**	**ปลานิลธรรมดา**
1. สีของลำตัว	ส้ม, ส้มแดง, แดง ส้มเหลือง และชมพู	น้ำตาล, เขียวปนน้ำตาลเทา
2. สีของตา	แดง, ส้ม และเหลือง	ดำ
2. ความยาวลำตัว / ความยาวหัว	3.64-4.15	3.52-3.76
3. ความกว้างลำตัว / ความยาวหัว	1.05-1.23	0.97-1.14
4. จำนวนครีบหลัง	XVI–XVII, 12-14	XVI-XVII, 12-13
5. จำนวนครีบก้น	III, 9-11	III, 9-10
6. จำนวนครีบท้อง	I, 5	I, 5
7. จำนวนเกล็ดเส้นข้างลำตัว	33-38	33-39
8. จำนวนเกล็ดเหนือเส้นข้างลำตัว	4-5	4-5
9. จำนวนเกล็ดใต้เส้นข้างลำตัว	10-11	11-12
10. สีของไข่	เหลืองอ่อน	เหลืองอ่อน
11. สีผนังช่องท้อง	ขาว	ดำ
12. นิสัยการกินอาหาร	ชอบกินเนื้อมากกว่ากินพืช (omnivorous)	กินพืชและเนื้อ (omnivorous)

ที่มา : กรมประมง (2526)

เนื่องจากปลานิลเป็นปลาที่สามารถวางไข่ได้ตั้งแต่อายุ 2 เดือนเป็นต้นไป ทำให้เพศเมียเจริญเติบโตช้าเพราะต้องสูญเสียพลังงานในการสร้างไข่และแม่ปลายังต้องอนุบาลลูกปลาโดยการอมไข่ไว้ในปากเป็นเวลาประมาณ 10 วัน แม่ปลาไม่สามารถกินอาหารได้ ทำให้น้ำหนักลดและเป็นการเพิ่มอัตราความหนาแน่นของประชากรปลาในบ่อเลี้ยง แนวทางหนึ่งที่จะช่วยในการเพิ่มผลผลิตการเลี้ยงเพื่อให้ได้ปลาที่มีขนาดใหญ่และใกล้เคียงกันเมื่อจับขาย คือ การเลี้ยงปลานิลเพศผู้ทั้งหมด ซึ่งสามารถดำเนินการได้หลายวิธี

3.2 วิธีการผลิตปลานิลเพศผู้

3.2.1. การคัดลูกปลาเฉพาะตัวผู้โดยการดูลักษณะเพศภายนอก แต่ไม่เป็นที่นิยม เนื่องจากขนาดปลาที่สามารถแยกเพศได้ต้องมีขนาดความยาวตั้งแต่ 12 เซนติเมตร และมีน้ำหนัก 50 กรัมขึ้นไป (กรมประมง, 2541)

3.2.2. การให้ปลากินฮอร์โมน โดยจะให้ลูกปลากินฮอร์โมน 17 α-เมลธิลเทส-โทสเตอร์โรน (17 α - methyltestosterone หรือ17-MT) ความเข้มข้น 40-60 มิลลิกรัมต่ออาหาร 1 กิโลกรัม เป็นระยะเวลา 28-30 วัน แต่การผลิตลูกปลาโดยวิธีการนี้ค่อนข้างยุ่งยาก ต้องมีความรู้ความชำนาญเพียงพอ นอกจากนั้นฮอร์โมน 17 - MT ต้องนำเข้ามาจากต่างประเทศซึ่งมีราคาแพงและเสื่อมคุณภาพได้ง่ายโดยเฉพาะภูมิอากาศร้อนอย่างประเทศไทย ทำให้ต้นทุนในการผลิตปลาเพศผู้โดยวิธีนี้ค่อนข้างสูง และประสิทธิภาพในการผลิตก็ไม่สม่ำเสมอ หากลูกปลากินอาหารผสมฮอร์โมนไม่ครบ ก็จะให้ผลผลิตเพศผู้ไม่ได้ 100 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามแม้ว่าฮอร์โมนเหล่านี้ได้รับการยืนยันว่า ไม่มีผลตกค้างในเนื้อปลาที่มีขนาดจับขายได้ แต่ก็มีผู้บริโภคบางส่วนที่ไม่ยอมบริโภคปลานิลที่ถูกเปลี่ยนเพศด้วยฮอร์โมนเหล่านี้

3.2.3. การผสมข้ามสายพันธุ์ (hybridization) การใช้วิธีการผสมข้ามสายพันธุ์ ทั้งข้ามสกุล (genus) และ ชนิด (species) ในปลาบางชนิด สามารถเกิดลูกทั้งหมดเป็นเพศเดียวกันได้ สำหรับปลานิลการผสมข้ามสายพันธุ์ระหว่าง *O. niloticus* × *O. aureus* จะได้ลูกที่มีเพศผู้ 100 เปอร์เซ็นต์

3.2.4. การผลิตปลานิลเพศผู้โดยทางอ้อม (indirect monosex production) เป็นอีกแนวทางหนึ่งที่จะผลิตปลานิลเพศผู้ทั้งหมด สามารถหลีกเลี่ยงปัญหาฮอร์โมนอาจตกค้างในเนื้อและ

ปัญหาประสิทธิภาพการผลิตปลาเพศผู้ที่ไม่สม่ำเสมอ การผลิตปลานิลเพศผู้โดยทางอ้อม ทำได้โดยผลิตพ่อพันธุ์ปลานิลซูเปอร์เมล (supermale หรือ YY-male) ซึ่งมีโครโมโซมเพศเป็น YY นำพ่อพันธุ์ปลานิลซูเปอร์เมลเหล่านี้ไปผสมกับแม่พันธุ์ปลานิลปกติจะได้ลูกปลาที่เป็นเพศผู้ทั้งหมด เนื่องจากลูกปลาเพศผู้เหล่านี้เป็นปลาเพศผู้โดยพันธุกรรม (genetically male tilapia) มีโครโมโซมเพศเป็น XY จึงนิยมเรียกปลาเพศผู้เหล่านี้ว่า ปลานิลเพศผู้ GMT สามารถอธิบายได้ดังนี้ และมีขั้นตอนแสดงดังภาพที่ 1

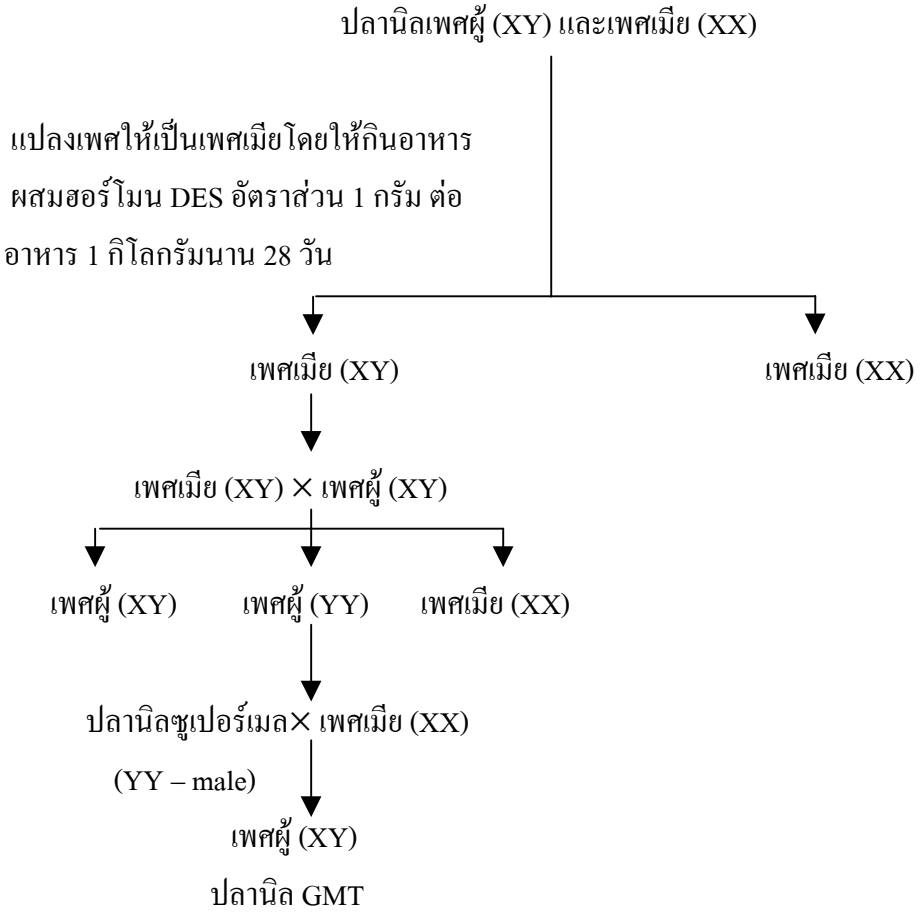
1) รวบรวมลูกปลาจากปากแม่ปลามาอนุบาลจนถุงไข่แดงยุบ และเริ่มกินอาหาร

2) เตรียมอาหารผสมฮอร์โมนไดเอทธิลสทิลเบสทรอล (diethylstilbestrol, DES) อัตราส่วน 1 กรัมต่ออาหาร 1 กิโลกรัม ละลายฮอร์โมนในสารละลายเอทธิลแอลกอฮอล์ และคลุกกับอาหารให้ทั่ว ให้ลูกปลากินนาน 28 วัน จะได้ลูกปลาเพศเมียที่มีโครโมโซม 2 แบบคือ XX และ XY

3) ตรวจสอบว่าปลาเพศเมียตัวใดเป็นเพศเมียที่มีโครโมโซม XY โดยเลี้ยงปลาเหล่านั้นจนเป็นแม่พันธุ์ แล้วนำมาผสมกับปลาเพศผู้ปกติที่มีโครโมโซมเพศเป็น XY ถ้าแม่ปลาตัวใดผลิตลูกปลาที่มีอัตราส่วนเพศผู้ต่อเพศเมีย เท่ากับ 3 ต่อ 1 แสดงว่ามีโครโมโซมเพศเป็น XY

4) นำปลาเพศเมียที่มีโครโมโซม XY ดังกล่าวมาผสมกับปลาเพศผู้ปกติ จะได้ลูกปลาเพศเมียต่อเพศผู้ เท่ากับ 1 ต่อ 3 โดยในลูกปลาเพศผู้เหล่านี้จะมี 1 ส่วนที่มีโครโมโซมเพศเป็น YY

5) ตรวจสอบปลาเพศผู้ที่มีโครโมโซม YY โดยนำไปผสมกับปลาเพศเมียปกติ ถ้าลูกปลาเป็นเพศผู้ทั้งหมด แสดงว่ามีโครโมโซมเพศเป็น YY เป็นปลานิลซูเปอร์เมล เมื่อนำมาผสมกับปลาเพศเมียปกติ จะได้ปลาเพศผู้ GMT หรือที่เรียกว่าเป็นปลานิลสายพันธุ์จิตรลดา 2 การเลี้ยงปลานิลเพศผู้ GMT จากการทดลองเลี้ยงปลานิลเพศผู้ GMT อายุ 1 เดือน ในบ่อดินนาน 8 เดือน พบว่าปลานิลเพศผู้ GMT เจริญเติบโตได้เร็วกว่าการเลี้ยงปลานิลรวมเพศ โดยการเลี้ยงปลานิลรวมเพศให้ผลผลิตรวมต่อบ่อ 217.43 กิโลกรัม ส่วนการเลี้ยงปลานิลเพศผู้ GMT ให้ผลผลิตรวมต่อบ่อ 303.02 กิโลกรัม ซึ่งให้ผลผลิตสูงกว่าการเลี้ยงปลานิลรวมเพศ 28.28 เปอร์เซ็นต์ (นวลมณี และพุทธรัตน์, 2538)



ภาพที่ 1 แผนผังการผลิตปลานิลซูเปอร์เมลและปลานิล GMT

ที่มา: นวลมณี และพุทธรัตน์ (2538)

3.3 สกุลของปลานิลที่มีในประเทศไทย

ลักษณะทั่วไปในการจัดจำแนกปลา Genus Tilapia ดังนี้ (เพ็ญพรรณ, 2543)

3.3.1 Genera *Tilapia*

ปลาสกุลนี้มีลักษณะการวางไข่เกาะติดกับวัตถุและมีการเฝ้าดูแลไข่ตลอดเวลา บริเวณกระดูกเหงือก พบว่ามีซี่กรอง 6-12 อัน มีฟันหยาบอยู่บริเวณขากรรไกรและส่วนล่างของคอหอย

3.3.2 Genera *Sarotherodon*

ปลาสกุลนี้เพศผู้และเมียอมไข่ไว้ในปาก เหงือกมีซี่กรอง 12-27 อัน ฟันบนขากรรไกรและบริเวณคอหอยเป็นฟันละเอียด

3.3.3 Genera *Oreochromis*

ปลาสกุลนี้เป็นปลานิลเพศเมียเท่านั้นที่ดูแลลูกด้วยวิธีการอมไข่และมีการสร้างรัง เหงือกมีซี่กรอง 15-27 อัน ฟันบริเวณขากรรไกรและคอหอยมีหลายขนาด ตั้งแต่ค่อนข้างหยาบจนถึงฟันละเอียด

3.4 ชนิดปลานิล

ปลานิลจัดเป็นปลาที่อยู่ในสกุลปลาหมอเทศ ซึ่งปลานิลที่นำเข้าสู่ประเทศไทยในระหว่างปี พ.ศ. 2492 ถึง พ.ศ. 2523 มีทั้งหมด 4 ชนิด คือ

3.4.1 *Oreochromis mossambicus* (Mozambique mouth breeder)

มีชื่อสามัญภาษาไทยว่า ปลาหมอเทศ เป็นปลาชนิดแรกที่ถูกนำเข้าจากปีนังประเทศมาเลเซีย สู่ประเทศไทย ในปี พ.ศ. 2492 (สันทนา และทัศนีย์, 2525) ซึ่งสามารถอยู่ในน้ำที่มีระดับความเค็มที่แตกต่างกันมาก คือ ตั้งแต่น้ำจืดจนกระทั่งถึงน้ำกร่อย มีบทบาทสำคัญในการควบคุมพรรณไม้น้ำในบ่อ (บรรลือ, 2542)

3.4.2 *Sarotherodon melanotheron*

มีชื่อสามัญภาษาไทยว่า ปลาหมอเทศข้างลาย เป็นปลาที่นำมาจากประเทศเบลเยี่ยมเข้าสู่ประเทศไทย ในปี พ.ศ. 2498 เป็นปลาที่ชอบกินพืชเป็นอาหาร เจริญเติบโตช้า จึงไม่เป็นที่นิยม

3.4.3 *Oreochromis niloticus* (Nile tilapia Egyptian strain)

มีชื่อสามัญภาษาไทยว่า ปลานิล เป็นปลาที่สมเด็จพระจักรพรรดิอากิฮิโต เมื่อครั้งดำรงพระอิสริยยศเป็นมกุฎราชกุมารแห่งญี่ปุ่น ทูลเกล้าถวายแด่พระบาทสมเด็จพระเจ้าอยู่หัวภูมิพลอดุลยเดช ในปี พ.ศ. 2508 ทรงพระราชทานนามว่า “ปลานิล” เป็นปลาที่เจริญเติบโตเร็ว กินทั้งพืชและสัตว์ เป็นปลาที่สามารถทนอยู่ในสภาวะความเค็มกว้าง ซึ่งสามารถอยู่ในน้ำที่มีความเค็มสูงถึง 20 พีพีที

3.4.4 *Oreochromis aureus* (blue tilapia)

มีชื่อเรียกในภาษาไทยว่า ปลานิลอิสราเอล ซึ่งเป็นปลาที่นำมาจากประเทศอิสราเอล เข้าสู่ประเทศไทย ในปี พ.ศ. 2523 เป็นปลาที่กินอาหารทุกชนิด หากินที่พื้นก้นบ่อ ปลาชนิดนี้นำเข้ามาเพื่อใช้ผลิตปลานิลลูกผสม โดยนำไปผสมกับแม่ปลานิล (*O. niloticus*) (เพ็ญพรรณ, 2543)

3.5 สายพันธุ์ปลานิลในประเทศไทย

ปลาในตระกูลปลานิลมี 6 ชนิด ซึ่งเป็นปลาที่มีบทบาทในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจืดของไทย โดยเฉพาะปลานิลได้รับการพัฒนาและปรับปรุงพันธุ์ จากสถาบันพัฒนาพันธุกรรมสัตว์น้ำ กรมประมงและหน่วยงานเอกชนอื่น ๆ ทำให้เกิดสายพันธุ์ใหม่เกิดขึ้น

3.5.1 ปลานิลแดงสายพันธุ์ไทย

เป็นลูกผสมระหว่างปลานิลกับปลาหมอเทศ ที่เกิดขึ้นครั้งแรกในปี พ.ศ. 2511 ที่สถานีประมง จ. อุบลราชธานี มีลักษณะของปลานิลและปลาหมอเทศรวมกัน คือปากเฉียงขึ้นคล้ายปลาหมอเทศลักษณะทั่วไปคล้ายปลานิลเป็นปลาที่มีนิสัยก้าวร้าวที่กินทั้งพืชและสัตว์ (omnivorous) โดยจะกินปลาที่มีขนาดเล็กกว่าและลูกปลาที่เริ่มแตกฝูง เป็นปลาที่สามารถเลี้ยงได้ทั้งในน้ำจืด น้ำกร่อย และน้ำทะเล มีความทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมได้ดีระหว่างความเค็ม 11-25 พีพีที มีสีสันสวยงาม คุณค่าทางอาหารและรสชาติดีกว่าปลานิลธรรมดา (พรรณศรี, 2531)

3.5.2 สายพันธุ์จิตรลดา 1

เป็นสายพันธุ์ที่ปรับปรุงพันธุ์และพัฒนาจากการเลี้ยงมาจากปลานิลสายพันธุ์แบบคัดเลือกภายในครอบครัว (within family selection) ดำเนินการปรับปรุงพันธุ์ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2528 จนถึงปัจจุบันเป็นระยะเวลาถึง 7 ชั่วอายุ เป็นปลาสายพันธุ์ใหม่ที่มีอัตราการเจริญเติบโตเร็วกว่าปลาสายพันธุ์เดิม ถึง 22 เปอร์เซ็นต์ (เพ็ญพรรณ, 2543; ยุพินท์ และพันธ์ศักดิ์, 2543)

3.5.3 สายพันธุ์จิตรลดา 2 (genetical male tilapia : GMT)

เป็นปลานิลที่พัฒนาพันธุ์มาจากปลานิลสายพันธุ์จิตรลดา โดยการปรับเปลี่ยนพันธุกรรมในพ่อพันธุ์ให้มีโครโมโซมเพศเป็น “YY” ที่เรียกว่า “YY-Male” หรือ ปลานิลซูเปอร์เมล (super male) เมื่อนำพ่อพันธุ์ดังกล่าวผสมพันธุ์กับแม่พันธุ์ปลานิลทั่วไป จะได้ลูกปลานิลเพศผู้ที่เรียกว่า “ปลานิลสายพันธุ์จิตรลดา 2” ซึ่งมีลักษณะเด่นคือ เป็นเพศผู้ที่มีโครโมโซมเพศ “XY” ได้ลูก

ปลาเฉลี่ย 95.6 เปอร์เซ็นต์ ส่วนหัวเล็ก ลำตัวกว้าง เนื้อมีสีขาวนวล เนื้อหนาและแน่น รสชาติดี ให้ผลผลิตต่อไร่สูงกว่าปลานิลสายพันธุ์เดิม 45 เปอร์เซ็นต์

3.5.4 สายพันธุ์จิตรลดา 3 (genetically improved farmed tilapia line; GIFT)

เป็นปลานิลที่ปรับปรุงพันธุ์มาจากการนำปลานิลที่เกิดจากการผสมพันธุ์ระหว่างปลานิลสายพันธุ์จิตรลดาและปลานิลสายพันธุ์อื่น ๆ อีก 7 สายพันธุ์ ประกอบด้วยสายพันธุ์อียิปต์, กานา, เคนยา, เซเนกัล สิงคโปร์, อิสราเอล และไต้หวัน ซึ่งมีการเจริญเติบโตเร็วและมีอัตรารอดสูงในสภาพแวดล้อมการเลี้ยงต่าง ๆ ซึ่งดำเนินการปรับปรุงพันธุ์โดยหน่วยงาน International Center for Living Aquatic Resources Management (ICLARM) ของประเทศฟิลิปปินส์ จากนั้นจึงนำลูกปลาชั่วอายุที่ 5 เข้ามาในประเทศไทย ในปี พ.ศ. 2538 สถาบันวิจัยและพัฒนาพันธุกรรมสัตว์น้ำจืดดำเนินการปรับปรุงพันธุ์ปลาดังกล่าวต่ออีก 2 ชั่วอายุ และเรียกว่า “ปลานิลสายพันธุ์จิตรลดา 3” ลักษณะเด่นของปลาสายพันธุ์นี้ คือ ส่วนหัวเล็ก ลำตัวกว้าง สีเหลืองนวล เนื้อหนาและแน่น รสชาติดี เจริญเติบโตได้ขนาด 3-4 ตัวต่อกิโลกรัม ภายใน 6-8 เดือน ผลผลิตสูงกว่าปลานิลทั่วไปถึง 40 เปอร์เซ็นต์ (เพ็ญพรรณ, 2543; ยุพินท์ และพันธ์ศักดิ์, 2543)

3.5.5 สายพันธุ์ซีพี

เป็นปลานิลแดงที่บริษัทเจริญโภคภัณฑ์ (ซีพี) ทำการปรับปรุงพันธุ์ โดยได้ปลาที่มีลำตัวกว้างและหนา สามารถทนความเค็มได้ตั้งแต่น้ำจืดไปจนถึงน้ำทะเล ปลาที่เลี้ยงในน้ำเค็มจึงเป็นเนื้อคุณภาพสูง เนื้อไม่มีกลิ่นสาบโคลน เนื้อขาวรสชาติใกล้เคียงกับปลาทะเล ทำให้ขายได้ราคาดี (ยุพินท์, 2543)

3.5.6 สายพันธุ์ทับทิม

เป็นปลานิลแดงที่บริษัทซีพี ทำการปรับปรุงพันธุ์ขึ้นมาให้มีความสามารถในการกินอาหาร จึงมีการเจริญเติบโตเร็วและสามารถทนความเค็มได้ถึง 30 พีพีที โดยที่ความเค็มที่เหมาะสมกับการเจริญเติบโต คือ 15-20 พีพีที จึงสามารถทำการเลี้ยงในน้ำทะเลได้ ปลาทับทิมมีโครงกระดูกเล็ก กล้ามเนื้อขาว และผิวหนังสีขาว เจริญเติบโตดีในสภาพการเลี้ยงที่ความหนาแน่นสูง จึงเหมาะกับการเลี้ยงในกระชัง ซึ่งจะให้ผลผลิตสูงถึง 25 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ภายในระยะเวลาการเลี้ยงเพียง 3 เดือน (ยุพินท์, 2543; Ritmontri, 2001)

3.6 สภาวะการผลิตและการบริโภคปลานิล

ปลานิลเป็นปลาที่เลี้ยงง่าย โตเร็ว มีความทนทาน และมีผู้นิยมบริโภคกันมาก โดยปลานิลสีแดงเป็นปลาน้ำจืดที่มีรสชาติดี มีสีสันสวยงามเป็นที่นิยมบริโภคในตลาดต่างประเทศ อาทิ เช่น ตลาดในเอเชียอาคเนย์, มาเลเซีย, สิงคโปร์, อินโดนีเซีย และบรูไน นอกจากนี้ยังเป็นที่ต้องการในตลาดประเทศแถบตะวันออกกลาง, ฮ่องกง, ญี่ปุ่น, ไต้หวัน และสหรัฐอเมริกา (มานพ, 2530; พรรณศรี และคณะ, 2538) โดยปลานิลสีแดงมีผู้บริโภคนิยมบริโภคมากกว่าปลานิล 85.71 เปอร์เซ็นต์ เพราะปลานิลสีแดงมีเนื้อนุ่มหวานมันกว่าและมีเนื้อละเอียดมากกว่าปลานิล และปลานิลสีแดงมีไขมันสูงกว่าปลานิล ปลานิลสีแดงมีไขมัน 1.39 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่ปลานิลมีไขมันเพียง 0.80 เปอร์เซ็นต์ (พรรณศรี, 2531) จากการสำรวจในปี พ.ศ. 2540 การบริโภคปลาของคนไทยเฉลี่ย 27 กิโลกรัมต่อคนต่อปี รองลงมาได้แก่ การบริโภคเนื้อวัว-ควาย, ไก่ และ หมู เฉลี่ยต่อคนต่อปีเท่ากับ 11.5, 8.5 และ 2.1 กิโลกรัม ตามลำดับ (กรมประมง, 2545) และในช่วงปี พ.ศ. 2541-2542 พบว่าคนไทยบริโภคปลาโดยเฉลี่ยต่อคนเพิ่มขึ้นเป็นปีละ 28.8 กิโลกรัมต่อคน ชนิดปลาสายพันธุ์ที่มีการบริโภคสูงสุดได้แก่ ปลานิล เฉลี่ย 8.52 กิโลกรัมต่อคนต่อปี รองลงมาได้แก่ ปลาดุกบิ๊กอุย และปลาไน บริโภคเฉลี่ยต่อคนต่อปีเท่ากับ 3.0 และ 0.48 กิโลกรัม ตามลำดับ (Piumsombun *et al*., 2001) ซึ่ง Lovell (1998) รายงานว่าปลามีเปอร์เซ็นต์ของเนื้อสูงกว่าเนื้อวัว เนื้อหมู หรือในสัตว์ปีก เช่น ปลา channel catfish มีเนื้อมากกว่า 80 เปอร์เซ็นต์ และ 13.7 เปอร์เซ็นต์ เป็นกระดูก เอ็น และไขมัน (Lovell, 1993) ในขณะเดียวกัน จากการศึกษาดังกล่าวได้ทำการสำรวจความนิยมของผู้บริโภค (ยกเว้นภาคใต้) ปลา 5 ชนิด ได้แก่ ปลานิล, ปลาตะเพียน, ปลาดุกบิ๊กอุย, ปลาช่อน และปลาทู ผลปรากฏว่าผู้บริโภคนิยมบริโภคปลานิลมากที่สุดคิดเป็นร้อยละ 23.77 รองลงมาได้แก่ ปลาช่อน ร้อยละ 20.19 ที่เหลือนิยมบริโภคปลาดุกบิ๊กอุย ปลาตะเพียน และ ปลาทู คิดเป็นร้อยละ 11.69, 11.21 และ 9.95 ตามลำดับ เหตุผลที่นิยมบริโภคปลานิลเนื่องจาก รสชาติดีและหาซื้อง่าย (กรม-ประมง, 2545) โดยผลผลิตสัตว์น้ำจืดของไทยจากการเพาะเลี้ยงในปี พ.ศ. 2544 รวมทั้งหมด 279,700 ตันปลานิล 84,500 ตัน รองลงมาได้แก่ ปลาดุกบิ๊กอุย 77,900 ตัน ผลผลิตส่วนใหญ่ใช้เพื่อการบริโภคภายในประเทศ บางชนิดพัฒนาการเลี้ยงได้ในเชิงพาณิชย์ยึดเป็นอาชีพหลัก อย่างไรก็ตาม ในปัจจุบันมีการปรับวิธีการเลี้ยงและปรับปรุงสายพันธุ์จนสามารถผลิตปลาคุณภาพ เพื่อการส่งออก เช่น ปลานิล เป็นต้น (กรมประมง, 2545) และในปี พ.ศ. 2546 ผลผลิตปลานิลเพิ่มขึ้นเป็น 106,000 ตัน (กรมประมง, 2546 ก) จากสถิติการส่งออกปลานิล พบว่า ในปี พ.ศ. 2546 (ม.ค.-ก.ย.) มีปริมาณ 3,399.5 ตัน คิดเป็นมูลค่า 205,226,957 บาท (กรมประมง, 2546 ข) และในปี พ.ศ. 2548 การส่งออกปลานิลเพิ่มขึ้นเป็น 11,023 ตัน คิดเป็นมูลค่า 626,555,256 บาท (กรมประมง, 2548) ดังนั้นการผลิตและพัฒนาการเพาะเลี้ยง อาหารสัตว์น้ำเป็นปัจจัยที่เข้ามามีบทบาทสำคัญ เพราะสารอาหารที่เหมาะสม

และเพียงพอกับความต้องการของสัตว์น้ำ ซึ่งจะช่วยให้สัตว์น้ำมีการเจริญเติบโตที่รวดเร็ว เพิ่มปริมาณสัตว์น้ำได้มากขึ้น และช่วยลดต้นทุนในการผลิต

3.7 ความต้องการสารอาหารของปลานิล

ปลาต้องการโปรตีนจากสารอาหารเพื่อการเจริญเติบโตและสร้างเนื้อเยื่อรวมทั้งเป็นแหล่งให้พลังงานที่สำคัญด้วย นอกจากนี้ก็ยังมีสารอาหารพวก ไขมัน คาร์โบไฮเดรต ตลอดจนพวกวิตามินและแร่ธาตุ ความต้องการโปรตีนของปลานิลพบว่าปลาจะนำเอาโปรตีนไปใช้เพื่อการเจริญเติบโตมากกว่าการดำรงชีวิตหรือการสืบพันธุ์ เนื่องจากสามารถนำไปใช้ได้โดยตรง (วีรพงศ์, 2536) อย่างไรก็ตามกรดอะมิโนซึ่งเป็นองค์ประกอบที่สำคัญของโปรตีนมีผลต่อการเจริญเติบโตมากที่สุด (Kevin, 1997) จากการทดลองของ Santiago และ Lovell (1988) กล่าวว่าปลานิล *Oreochromis niloticus* ต้องการกรดอะมิโนอาร์จีนีน, ไอโซลูซีน, ไลซีน, ฟินิลอะลานีน, วาลีน, ฮีสติดีน, ลูซีน, เมทไทโอนีน, ทริฟโตเฟน และทรีโอนีนในระดับ 1.18, 0.87, 1.34, 1.05, 0.78, 0.48, 0.95, 0.75, 0.28 และ 1.05 เปอร์เซ็นต์ต่ออาหารแห้ง ตามลำดับ

ปลานิลต้องการโปรตีนจากสารอาหารเพื่อการเจริญเติบโตและสร้างเนื้อเยื่อ ในตัวปลานิลจึงมีโปรตีนเป็นองค์ประกอบถึง 60 เปอร์เซ็นต์ (น้ำหนักแห้ง) (วิมล และคณะ, 2536) ความต้องการโปรตีนของปลามีมากน้อยเพียงใดขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ขนาดและอายุของปลา คุณภาพของโปรตีนในอาหาร และระดับพลังงานในอาหาร เวียง (2542) กล่าวว่า ปลาขนาดเล็กมีความต้องการโปรตีนในอาหารสูงกว่าปลาขนาดใหญ่เนื่องจากอยู่ในวัยที่กำลังเจริญเติบโต วิมล และคณะ (2536) กล่าวว่า ปลานิลขนาด 1-10 กรัม ต้องการโปรตีนในอาหารอย่างน้อย 30-36 เปอร์เซ็นต์เพื่อการเจริญเติบโต ส่วน Santiago และ Lovell (1988) รายงานว่าในปลานิลวัยอ่อนมีความต้องการโปรตีนที่ระดับ 35 เปอร์เซ็นต์ ก็เพียงพอกับความต้องการ

ความต้องการคาร์โบไฮเดรตของปลานิล พบว่าปลานิลสามารถใช้คาร์โบไฮเดรตเป็นแหล่งพลังงานได้ดี นอกจากนี้คาร์โบไฮเดรตยังเป็นแหล่งพลังงานที่ช่วยสำรองโปรตีน (protein-sparing effect) ที่ใช้สำหรับการเจริญเติบโตและทำหน้าที่อื่นๆ ปลานิลสามารถใช้วัตถุดิบอาหารที่มีคาร์โบไฮเดรตสูง เช่น รำข้าว, ปลายข้าว และมันสำปะหลัง เป็นแหล่งให้พลังงานที่ดีโดยผสมในอาหารได้ 30-60 เปอร์เซ็นต์ จากรายงานการทดลองพบว่า การทดแทนโปรตีนด้วยคาร์โบไฮเดรตในอาหารปลานิล ปลาสามารถใช้ประโยชน์จากอาหารในการเจริญเติบโตได้อย่างมีประสิทธิภาพ รายงานของกรมประมง (2541) พบว่าปลานิลขนาด 10-100 กรัม ต้องการโปรตีนในอาหาร 28-30 เปอร์เซ็นต์ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณคาร์โบไฮเดรตและลดปริมาณโปรตีนในอาหารลง ปลา

ก็สามารถเจริญเติบโตได้ดี Shiau และ Peng (1993) ทดลองใช้กลูโคส, แป้ง และ เด็กซ์ตริน (dextrin) ซึ่งเป็นแหล่งคาร์โบไฮเดรตในอาหารสำหรับเลี้ยงปลานิลลูกผสมวัยรุ่น พบว่าสามารถลดระดับโปรตีนในอาหารลงจาก 28 เปอร์เซ็นต์ เป็น 24 เปอร์เซ็นต์ โดยเพิ่มแป้งหรือเด็กซ์ตรินจาก 37 เป็น 41 เปอร์เซ็นต์ ได้โดยไม่มีผลต่ออัตราการเจริญเติบโต ประสิทธิภาพการใช้อาหาร และคุณภาพซากของปลา Kevin (1997) กล่าวว่า อาหารที่ใช้เลี้ยงปลานิลขนาดต่ำกว่า 1 กรัม ไม่ควรมีคาร์โบไฮเดรตเป็นส่วนประกอบอยู่เกิน 25 เปอร์เซ็นต์ แต่ในปลาที่มีขนาด 1 กรัม ขึ้นไป สามารถมีคาร์โบไฮเดรตในอาหารได้ประมาณ 20-30 เปอร์เซ็นต์

ความต้องการไขมันในปลานิล ปลานิลเป็นปลาที่ต้องการกรดไขมันในกลุ่มโอ-เมก้า-6 Kanazawa และคณะ (1980) พบว่าปลานิล *Tilapia zillii* ต้องการกรดไขมันในอาหารที่มีกรดลิโนลิอิค (linoleic) (18:2n-6) 1 เปอร์เซ็นต์ หรือกรดอะราชิโดนิค (arachidonic) (20:4n-6) 1 เปอร์เซ็นต์ ทำให้เจริญเติบโตดีกว่าเมื่อปลาได้รับอาหารที่มีกรดลิโนลินิค (linolenic) (18:3n-3) และ 20:5n-3 (EPA : eicosapentaenoic) ส่วน Takeuchi และคณะ (1983a) รายงานว่าปลานิล *O. niloticus* ต้องการกรดลิโนลิอิค 0.5 เปอร์เซ็นต์ สำหรับความต้องการกรดไขมันในกลุ่มโอเมก้า-3 ปลานิลต้องการน้อยหรือไม่มีเลย เช่น การศึกษาของ Viola และคณะ (1988) ที่พบว่าการให้อาหารที่มีน้ำมันปลาเป็นองค์ประกอบของกรดไขมันชนิดไม่อิ่มตัว (n-3) สูงไม่มีผลต่อการเจริญเติบโตของปลานิลเลย นอกจากนั้น Takeuchi และคณะ (1983b) ได้ทดลองใช้ไขมันหลายๆ ชนิดต่อการเจริญเติบโตของปลานิล *O. niloticus* และพบว่าน้ำมันตับปลาพอลล็อก (Pollock liver oil) ไม่มีผลต่อการเจริญเติบโตของปลานิล ส่วนแหล่งของไขมันที่ดีที่สุดที่ได้จากการทดลองคือ น้ำมันข้าวโพด และน้ำมันถั่วเหลือง เนื่องจากทั้งสองชนิดนี้มีกรดไขมันในกลุ่มลิโนลิอิคสูง El-Sayed (1998) ได้ทดลองใช้กากเนื้อเมล็ดในปาล์มน้ำมัน (ที่มีกรดไขมันจำเป็นในกลุ่มของกรดลิโนเลอิค) เป็นวัตถุดิบ ในการผลิตอาหารปลานิล พบว่า ปลานิลมีการเจริญเติบโตได้ดี ไม่แตกต่างจากอาหารที่ใช้น้ำมันถั่วเหลืองเป็นแหล่งไขมัน

4. รงควัตถุที่พบในปลา

สืบสิน (2523) กล่าวว่า เม็ดสีในผิวหนังปลาสามารถแบ่งได้เป็น 4 ประเภทคือ

4.1 เมลานิน (melanin)

เป็นเม็ดสีน้ำตาลหรือดำที่พบในปลา เมลานินเกิดจากไทโรซีน (tyrosine) โดยไท-โรซีนถูกออกซิไดซ์ (oxidize) ด้วยเอ็นไซม์ไทโรซิเนส (tyrosinase) เปลี่ยนเป็น 3,4-ไดไฮดร็อกซีฟี-นิลอะลานิน (3,4-dihydroxyphenylalanine) หรือโดปา (dopa) จากนั้นจึงเปลี่ยนเป็น โดปา ควิโนน (dopa quinone) หลังจากที่ได้โดปา ควิโนนแล้วจึงมีการรวมตัวทางเคมีทำให้เกิดเมลานินขึ้น เม-ลานินมักเกาะติดอยู่กับโปรตีน ขบวนการสังเคราะห์เมลานินจะเกิดขึ้นในเซลล์ที่เรียกว่าเมลาโน-ไซส์ (melanocytes) และเมลาโนฟอร์ (Hoar and Randall, 1969)

4.2 เทอริดีน (Pteridine)

เป็นสารประกอบที่สามารถละลายได้ในน้ำมีทั้งชนิดมีสีหรือไม่มีสี เทอริดีนที่มีสีได้แก่ โดรซอพ์เทอริน (drosopterin), ไอโซ-โดรซอพ์เทอริน (isodrosopterin), นีโอโดรซอพ์เทอริน (neodrospterin) ซึ่งทั้งสามพวกนี้มีสีแดง ซีเพียพ์เทอริน (sepiapterin) และไอโซซีพัยพ์เทอริน (isosepiapterin) มีสีเหลือง ส่วนลิวคอพ์เทอริน (leucopterin) ซึ่งไม่มีสีนั้นแบ่งได้เป็นสองพวกคือ บลู (blue) และไวโอเลต ฟลูออเรสเซนท์ (violetfiuorescent)

4.3 เพียวริน (purine)

เป็นเม็ดสีให้สีขาวหรือผิวเงินบนผิวหนังบนตัวปลา เพียวรินที่พบมากคือกัวริน มักพบอยู่ในไซโตพลาสซึมของเซลล์ลิวโคฟอร์ (leucophore) หรือเออริโดฟอร์ (Irridophore) กัวริน (guanine) จะอยู่ในสภาพที่เป็นผลึกขนาดเล็ก เป็นเม็ดหรือเป็นแผ่นบางๆ จึงอาจเรียกเซลล์ทั้ง 2 แบบนี้ว่า กัวโนฟอร์ (guanophore) เพียวรินอีกชนิดหนึ่งคือ ไฮโปแซนทิน (hypoxanthin) ซึ่งพบบนผิวหนังปลาตะเพียนและตัวอ่อนระยะต่างๆ ของปลาโคโฮ แซลมอน (coho salmon; *Oncorhynchus kisutch*)

4.4 คาโรทีนอยด์ (carotenoid)

พบได้ทั่วไปทั้งในพืชและสัตว์ ในพืชดอกที่ทำให้เกิดสีเหลือง ส้ม และแดง โดยเม็ดสีเหล่านี้อยู่ในพลาสติด (plastids) ภายในไซโตพลาสซึมของเซลล์ ส่วนในปลาพบว่าปลาไม่สามารถสังเคราะห์คาโรทีนอยด์ได้เอง ดังนั้นจึงต้องได้รับมาจากพืชหรือสัตว์ที่เป็นอาหารโดยตรง และปลาสามารถเก็บเม็ดสีเหล่านี้เอาไว้ในตัวของมัน หรืออาจเปลี่ยนชนิดคาโรทีนอยด์จากอาหารเป็นคาโรทีนอยด์ในรูปที่สามารถสะสมในตัวได้ (Ohkubo *et al*., 1999)

5. คาโรทีนอยด์

คาโรทีนอยด์เป็นกลุ่มรงควัตถุที่ให้สีเหลือง สีส้ม และสีชมพูถึงแดง อาจรู้จักในชื่อของไลโปโครม (lipochromes) ในปัจจุบันมีการแยกรงควัตถุนี้จากธรรมชาติได้ประมาณ 600 ชนิด คาโรทีนอยด์ละลายได้ดีในไขมัน (fat soluble pigment) และเป็นสารที่ไม่เกิดสปอนนิไฟด์ (non-saponificable lipids) สร้างขึ้นจาก วิถีเทอร์พีนอยด์ (terpenoid pathway) ในเซลล์พืช, สาหร่าย, แบคทีเรีย, ยีสต์ และรา สัตว์ไม่สามารถสังเคราะห์ได้ แต่คาโรทีนอยด์เป็นรงควัตถุที่จำเป็นต่อร่างกาย ดังนั้นสัตว์จึงต้องกินอาหารที่มีคาโรทีนอยด์ และมีการเก็บสะสมไว้ในส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย เช่น กล้ามเนื้อ, ไข่, ผิวหนัง, เปลือก, ตา, ตับ, ลำไส้ และอวัยวะสืบพันธุ์ (Hata and Hata, 1976; Metusalach *et al*., 1996; Bjerkeng *et al*., 2000; Cejas *et al*., 2003) เป็นต้น คาโรทีนอยด์สามารถเปลี่ยนแปลงไปเป็นเรตินอล (retinol) และเป็นสารตั้งต้นของวิตามินเอ สีของคาโรทีนอยด์แต่ละชนิดขึ้นอยู่กับพันธะคู่ที่อยู่บนสายของโพลีอีน (polyene) ซึ่งรู้จักกันในชื่อ โครโมฟอร์ (chromophore) และชนิดที่ให้สีคือ ออกซีคาโรทีนอยด์ (oxycarotenoids) หรือแซนโทฟิลล์ (xanthophylls) คาโรทีนอยด์ในปลาและกุ้ง มีคาร์บอน 40 อะตอม (C-40) แซนโทฟิลล์ มีความสำคัญที่สุด ได้แก่ แคนตาแซนทิน (canthaxanthin) และแอสตาแซนทิน (astaxanthin) 2 ชนิดนี้เป็นคาโรทีนอยด์ธรรมชาติที่รู้จักกันดีและพบมากในสัตว์น้ำ (Goodwin, 1984; Davis, 1985) คาโร-ทีนอยด์สามารถเปลี่ยนแปลงโครงสร้างระหว่างซิสและทรานส์ (cis and trans - isomers) โดยการกระตุ้นของแสง, พลังงานความร้อน หรือปฏิกริยาทางเคมี เช่น การต้มผักจะเปลี่ยนคาโรทีนอยด์จากทรานส์เป็นซิสฟอร์มได้ (Rock, 1997)

5.1 โครงสร้างของคาโรทีนอยด์

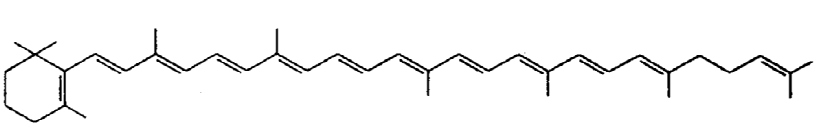
คาโรทีนอยด์เป็นโพลีอีนไฮโดรคาร์บอน (polyene hydrocarbons) มีหมู่ไอโซพรีน (isoprene unites) ส่วนมากคาโรทีนอยด์จะประกอบด้วย คาร์บอน 40 อะตอม หรือมีหมู่ไอโซพรีน 8 หมู่ ต่อกันเป็นสายยาวด้วยพันธะคู่ (conjugated double bonds) คาโรทีนอยด์แบ่งตามโครงสร้างทางเคมีได้เป็น 2 กลุ่ม คือ

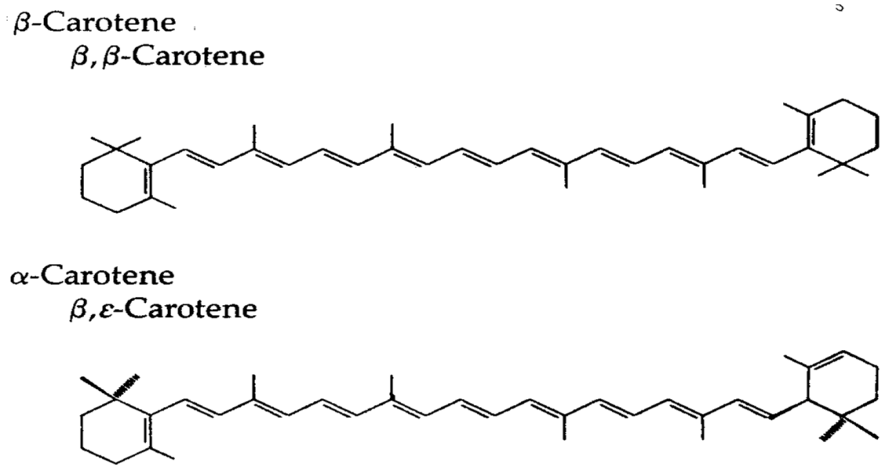
5.1.1 แคโรทีน (carotene)

แคโรทีนเป็นกลุ่มที่โครงสร้างประกอบด้วยไฮโดรเจนคาร์บอน ซึ่งประกอบด้วยอะตอมของคาร์บอนเชื่อมต่อกันเป็นสายยาวด้วยพันธะเดี่ยว (single bond) สลับกับพันธะคู่ (double bond) และที่ปลายข้างใดข้างหนึ่ง หรือทั้งสองข้างมีวงแหวนไอโอโนน (ionone ring) สูตรโครงสร้างคือ $C_{40}H_{56}$ แคโรทีนแยกออกได้เป็น แอลฟา-แคโรทีน (α - carotene), เบตา-แคโรทีน, แกมมา-แคโรทีน (γ - carotene) (Fox and Vevers, 1960) และไลโคปีน (lycopene) (Britton, 1983) แคโรทีนทั้ง 3 แบบแรก แตกต่างกันเฉพาะที่ตำแหน่งของพันธะคู่เท่านั้น แอลฟา-แคโรทีนและเบ-ตา-แคโรทีนพบได้ในแครอท และไลโคปีนพบได้ในมะเขือเทศ (Belitz and Grosch, 1999; Olatunde and Britton, 1999) แคโรทีนที่มีบทบาทมากที่สุดในปลา คือ เบตา-แคโรทีน เพราะสามารถเปลี่ยนเป็นวิตามินเอได้ (Greenberg, 1968) โครงสร้างในกลุ่มแคโรทีนแสดงไว้ดังภาพที่ 2

γ-Carotene

β,ψ-Carotene



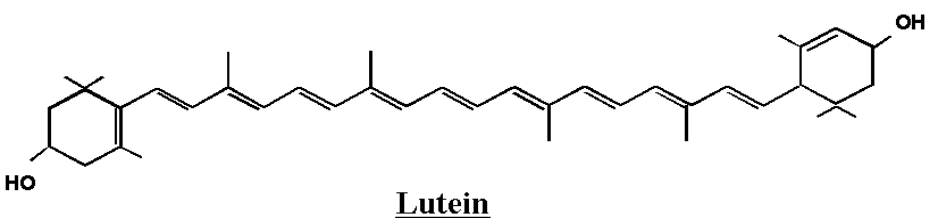


ภาพที่ 2 โครงสร้างคาโรทีนอยด์ในกลุ่มแคโรทีน

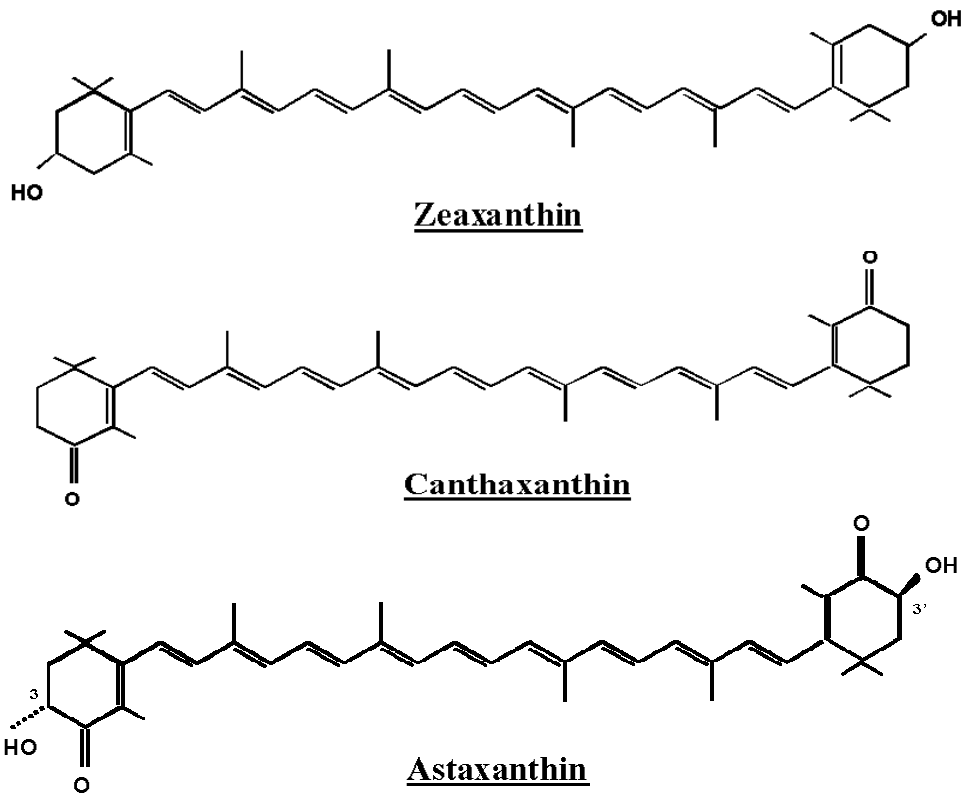
ที่มา : Schmidt และคณะ (1994)

5.1.2 แซนโทฟิลล์ (xanthophyll)

แซนโทฟิลล์เป็นอนุพันธ์ออกซิเจนของแคโรทีน มีโครงสร้างประกอบด้วยคาร์บอน ไฮโดรเจน และออกซิเจน เป็นรงควัตถุที่ให้สีเหลืองเข้ม หรือสีเหลืองแกมน้ำตาลพบในพืช และสาหร่ายทุกชนิด เช่น แคปแซนทิน (capxanthin) และแคปโซรูบิน (capsorubin) ในพริก และคริปโตแซนทิน (cryptoxanthin) ซึ่งเป็นรงควัตถุที่สำคัญในข้าวโพด มะละกอ และส้มแมนดาริน (Belitz and Grosch, 1999) โดยแซนโทฟิลล์ที่พบในปลาส่วนมากได้แก่ ทาราแซนทิน (taraxanthin), ลูทีน(lutein), ซีแซนทิน และแอสตาแซนทิน ในน้ำมันปาล์มจะมีลูทีนและซีแซนทิน (Olatunde and Britton, 1999) โครงสร้างในกลุ่มแซนโทฟิลล์ แสดงไว้ดังภาพที่ 3



Lutein



ภาพที่ 3 โครงสร้างคาโรทีนอยด์ในกลุ่มแซนโทฟิลล์

ที่มา : Miki (1991)

5.2 คุณสมบัติของคาโรทีนอยด์

5.2.1 คุณสมบัติทางกายภาพ

1) การละลาย

คาโรทีนอยด์ไม่ละลายน้ำ แต่ละลายได้ในตัวทำละลายอินทรีย์ที่ไม่มีขั้ว เช่น อะซีโตน, เบนซิน, คลอโรฟอร์ม, ปิโตรเลียมอีเทอร์ และเฮกเซนรวมทั้งไขมันและน้ำมัน จึงเรียกคาโรทีนอยด์ว่าไลโปโครม (lipochrome pigments)(Belitz and Grosch, 1999; Ronsholdt and Mclean, 2001)

2) ความเป็นขั้ว

ความเป็นขั้วของคาโรทีนอยด์จะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับจำนวนพันธะคู่ในสูตรโครงสร้าง เช่น แซนโทฟิลล์มีหมู่ที่มีขั้วเรียงจากมากไปหาน้อยได้แก่ ไฮดรอกซี (hydroxy) และ โมโนอีพ็อกซี (monoepoxy) ตามลำดับ คาโรทีนอยด์กลุ่มแซนโทฟิลล์จะมีความเป็นขั้วมากกว่าในกลุ่มแคโรทีน (Olatunde and Britton, 1999) ในพืชตระกูลส้มพบคาโรทีนอยด์ที่มีความเป็นขั้วมาก เช่น โทลลิแซนทิน (trollixanthin) และโทลลิโครม (trollichrome) (Belitz and Grosch, 1999)

3) การดูดกลืนแสง (spectroscopy)

คาโรทีนอยด์มีคุณสมบัติในการดูดกลืนแสงในช่วงความยาวคลื่น 400-700 นาโนเมตร โดยจะให้ค่าการดูดกลืนแสงสูงสุด (λ_{max}) แตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับจำนวนพันธะคู่ในโครงสร้างและชนิดของตัวทำละลาย (Belitz and Grosch, 1999; Ronsholdt and Mclean, 2001)

5.2.2 คุณสมบัติทางเคมี

คาโรทีนอยด์มีสูตรโครงสร้างทางเคมีที่มีพันธะคู่เป็นจำนวนมาก ทำให้ถูกออกซิไดซ์ได้ง่าย เกิดการสูญเสียความสามารถในการให้สี และเปลี่ยนแปลงสภาพของรงควัตถุ โดยปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ แสง, ความร้อน, ความเป็นกรด และการมีโปรออกซิแดนซ์ (pro-oxidants) เช่น คาโรทีนอยด์ในธรรมชาติมีไอโซเมอร์แบบทรานส์ทั้งหมด แต่เมื่อถูกเหนี่ยวนำด้วยความร้อน ตัวทำละลายอินทรีย์และกรดจะเปลี่ยนเป็นไอโซเมอร์แบบซิส ทำให้ความยาวคลื่นที่ดูดกลืนแสงได้สูงสุดเปลี่ยนแปลงไปเล็กน้อย และทำให้เกิดการสูญเสียคาโรทีนอยด์ (Belitz and Grosch, 1999)

5.2.3 คุณสมบัติทางชีววิทยา

คาโรทีนอยด์เป็นสารตั้งต้นของวิตามินเอ (provitamin A) ซึ่งมีผลในระบบการมองเห็น และที่สำคัญคาโรทีนอยด์ยังสามารถป้องกันการหืน (biological antioxidant) โดยการกำจัดอนุมูลอิสระ (free radical) และทำลายอนุมูลอิสระของออกซิเจนที่เป็นพิษ (singlet oxygen) ซึ่งจะทำหน้าที่ป้องกันเนื้อเยื่อและเซลล์มิให้ถูกทำลายจากปฏิกิริยาออกซิเดชันที่เกิดขึ้นในร่างกาย และ นอกจากนี้ คาโรทีนอยด์ยังเกิดปฏิกิริยารวมกับโปรตีน เป็นแคโรทีโนโปรตีน (carotenoproteins) ในสัตว์กลุ่มกุ้งและปูทำให้โปรตีนมีความคงสภาพมากขึ้น (Birkeland and Bjerkeng, 2004) โดยพบว่าไลโคปีน สามารถกำจัดอนุมูลอิสระได้ดีกว่า แอลฟา-แคโรทีน, เบตา-แคโรทีน และ ลูทีน ตามลำดับ (Narisawa *et al*., 1996; Olatunde and Britton, 1999)

5.3 แหล่งของคาโรทีนอยด์

5.3.1 คาโรทีนอยด์จากธรรมชาติ

คาโรทีนอยด์ในพืชชั้นสูงสังเคราะห์ในพลาสติด (plastid) (Young, 1993) Rauscher และคณะ (1998) สกัดคาโรทีนอยด์จากแครอท มันฝรั่ง และส้มโดยใช้เฮกเซน พบคาโรทีนอยด์ในกลุ่มแคโรทีนได้แก่ แอลฟา-แคโรทีน (α-carotene), เบตา-แคโรทีน (β-carotene) และไลโคปีน (lycopene) ในกลุ่มแซนโทฟิลล์ได้แก่ เบตา-คริปโตแซนทิน และลูทีน นอกจากนั้นในส้มยังพบแคโรทีนอลเอสเทอร์ (carotenolesters) และ Nakayama (1962) รายงานว่าคาโรทีนอยด์ที่ได้จากสาหร่ายจะตรวจพบเบตา-แคโรทีนมากที่สุด ส่วนในสัตว์พบได้ในสัตว์หลายชนิดทั้ง นก, ไก่, แมลง ปลา, ปู และกุ้ง เป็นต้น โดยมีการสะสมในส่วนต่าง ๆ ของร่างกายและมีปริมาณที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับชนิด, เพศ, ขนาดและอายุ, การลอกคราบ, การควบคุมฮอร์โมนของสัตว์, สีเดิมของสัตว์, ความเข้มแสง, อุณหภูมิ, สิ่งแวดล้อมที่สัตว์อาศัยอยู่, ชนิดและปริมาณของคาโรทีนอยด์ที่สัตว์ได้รับจากอาหาร (Goodwin, 1960; Yamada *et al.,* 1990; Chien and Jeng, 1992; Dall, 1995) โดยในสัตว์แต่ละชนิดจะมีกลไกการเปลี่ยนแปลงคาโรทีนอยด์ในอาหารให้อยู่ในรูปที่สัตว์นำไปใช้ได้ เช่นในกุ้ง ปู และลอปสเตอร์ สามารถเปลี่ยนเบตา-แคโรทีนให้เป็นแอสตาแซนทินแล้วสะสมไว้ที่เปลือก, เนื้อ และตับ (Tanaka *et al*., 1976) Velu และคณะ (2003) ทำการแยกชนิดของคาโรทีนอยด์ใน fairy shrimp น้ำจืด 2 ชนิดได้แก่ *Streptocephalus dichotomus* และ *Moina micrura* พบแคโรทีโนโปรตีนหลายชนิดได้แก่ แอสตาแซนทิน, แคนตาแซนทิน, แอนเทอราแซนทิน (antheraxanthin), ลูทีน, เบตา-คริปโตแซนทีน และ ไวโอราแซนทิน (violaxanthin) ส่วนในกุ้ง *Penaeus japonicus* พบแอสตาแซนทินสะสมในเปลือก 90 เปอร์เซ็นต์ และอวัยวะภายใน 70 เปอร์เซ็นต์ Tsushima และคณะ (2002) ศึกษาปริมาณคาโรทีนอยด์ในปลาแคทฟิชที่อยู่ในครอบครัว Siluridae พบลูทีนเอ 34 เปอร์เซ็นต์ แอลโลแซนทิน (alloxanthin) 47 เปอร์เซ็นต์ และ ซีแซนทิน 24 เปอร์เซ็นต์ ในปลาแคทฟิช 4 ชนิดได้แก่ *Silurus asotus*, *S. microdorsalis*, *S. lithophilus* และ *S .biwaensis* และยังพบว่าในรังไหม (*Bombyx mori*) มีสารประกอบลูทีนซึ่งเป็นคาโรทีนอยด์ชนิดหนึ่ง และยังพบว่าน้ำมันสีแดงจากปลาบางชนิดเป็นแหล่งของแอสตาแซนทิน ได้แก่ น้ำมันจากปลาคาพิลิน (Capilin), แมกเคอะเร็ล (Mackerel) และปลาค็อด (Cod) (Bauernfeind, 1981) และยังสามารถพบคาโรทีนอยด์ได้ในแบคทีเรีย, ยีสต์ และราบางชนิด เช่นรา *Laetiporus sulphureus* พบสะสมในไมซีเลียม (mycelium) ในระหว่างการเจริญเติบโตในอาหารเลี้ยงเชื้อ (Mishyn and Zalashko, 2000) คาโรทีนอยด์จากยีสต์ฟาฟเฟีย (*Phaffia rhodozyma*), สาหร่ายฮีมาโตคอกคัส (*Haematococcus pluvialis*), สาหร่ายสไป-รูไลนา, สาหร่ายดูนาลิเลลลา (*Dunaliella salina*) และสาหร่ายชนิดอื่นๆ (Gentles and Haard, 1991; Sommer *et al.,* 1991a; Sommer *et al.,* 1992; Sanderson and Jolly, 1994; Linden, 1999) อย่างไรก็ตามการนำจุลินทรีย์มาใช้เป็นแหล่งคาโรทีนอยด์ อาจได้รับผลกระทบจากสารพิษที่เกิดจากเซลล์ของแบคทีเรีย และประสิทธิภาพการนำคาโรทีนอยด์ไปใช้อาจลดต่ำลง เนื่องจากจุลินทรีย์บางชนิด

มีผนังเซลล์ที่หนา สัตว์น้ำส่วนใหญ่ไม่มีเอนไซม์ที่ทำหน้าที่ย่อยผนังเซลล์ของจุลินทรีย์ (Tangeras and Slinde, 1994) เชื้อราคลาส Basidiomycets และ Deuteromycetes ประมาณ 200 สายพันธุ์มีความสามารถสังเคราะห์สารแคโรทีน สารสีในกลุ่มนี้ที่พบมาก คือ เบตา-แคโรทีนรองมาก็คือ แซน-โทฟิลล์ นอกนั้นก็มี aleuriaxanthin ใน *Aleuria aurantia* และ xanthophyllic acid torularhodin ใน Rhodotorulae เนื่องจากมีความแตกต่างในชนิดของแคโรทีนดังกล่าว Veladon (1976) ได้เสนอให้ใช้โครงสร้างสารสีเหล่านี้ในการจำแนกเชื้อราด้วย

จุลินทรีย์ที่มีความสามารถสร้างสีคาโรทีนอยด์ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 2 การสังเคราะห์คาโรทีนอยด์ จะเกิดในเซลล์หรือในเส้นใยเท่านั้น เช่นเดียวกับสารเทอร์ปีนอยด์ทั้งหลาย โดยคาโรทีนอยด์จะถูกสังเคราะห์มาจากกรดมีวาโลนิก (mevalonic acid, MVA) ต่อมามีการรวมตัว (condensation) หัวท้ายของไอโซปรีน ไอโซเมอร์ 2 ไอโซเมอร์ของไอโซเพนทีนิลไพโรฟอสเฟต (farnesylpyrophosphate, FPP) และ C_{20} เทอร์ปีนอยด์ เจอรานีลไพโรฟอสเฟต (C_{20} terpenoid geranylpyrophosphate, GGPP) ตามลำดับ หลังจากนั้นมีการรวมตัวด้านท้ายของ 2 โมเลกุลของ GGPP ก็จะเกิดเป็น prephytoenepyrophosphate (PPPP) และเปลี่ยนต่อไปเป็นไฟโทอีน (phytoene) หลังจากนั้นเกิดปฏิกิริยาการกำจัดไฮโดรเจน (dehydrogenation) 4 ขั้นตอนก็จะได้ไลโคปีน

ตารางที่ 2 จุลินทรีย์ที่สร้างคาโรทีนอยด์

สายพันธุ์จุลินทรีย์	ชนิดคาโรทีนอยด์ที่สร้างได้
I. จุลินทรีย์จำเพาะที่เป็นแหล่งสารสี	
1. แหล่งแคโรทีน	
ก. เชื้อรา : *Blakeslea trispora*	Lycopene, β-carotene
: *Phycomyces blakesleeanus*	β-carotene
ข. Non-photosynthetic bacteria	
: *Streptomyces chrestomyceticus*, subsp. *rubescens*	Lycopene
2. แหล่ง xanthophylls	
ก. สาหร่ายเขียว : *Spongiococcum excentricum*	Lutein
: *Chlorella pyrenoidosa*	Lutein
ข. เชื้อรา : *Dacrymyces deliquescens*	Lutein
ค. Non-photosynthetic bacteria	
: *Flavobacterium* sp.	Zeaxanthin
: *Streptomyces chrestomyceticus* var. aurantioideus	Unidentified xanthophylls
: *Mycobacterium phlei*	Unidentified xanthophylls
3. แหล่ง monocyclic ketocarotenoids	
ก. Non-photosynthetic bacteria	
: *Deinococcus radiophilus-radiodurans-radiopugnans*	Derivatives of 4-keto-γ-carotene
: *Mycobacterium smegmatis*	Derivatives of 4-keto-γ-carotene
4. แหล่ง bicyclic ketocarotenoids	
ก. Cyanobacteria : *Anabaena variabilis*	Canthaxanthin
: *Aphanizomenon flos-aquae*	Canthaxanthin
: *Nostoc commune*	Canthaxanthin
ข. สาหร่ายเขียว (N-deficiency)	
: *Dictyococcus cinnabarinus*	Canthaxanthin
: *Haematococcus pluvialis*	Astaxanthin
ค. เชื้อรา/ยีสต์ : *Phaffia rhodozyma*	Astaxanthin
ง. Non-photosynthetic bacteria	
: *Brevibacterium* KY-4313	Canthaxanthin
: *Rhodococcus maris*/*Mycobacterium brevicale* 32-MCT	Canthaxanthin
: *Mycobacterium lacticola*	Astaxanthin
II. จุลินทรีย์ที่มีการนำไปใช้ประโยชน์อื่น ๆ นอกเหนือจากการสร้างสารสี	
ก. เชื้อรา/ยีสต์ : *Rhodotorula* sp., *Rhodosporidium* sp.	Torulene, torularhodin
ข. Non-photosynthetic bacteria	
: Methylotrophs	Miscellaneous
ค. Photosynthetic bacteria : *Rhodobacter capsulatus*	Spheroidene, Spheroidenone

ที่มา : บุษบา (2542)

5.3.2 คาโรทีนอยด์สังเคราะห์

ปัจจุบันมีการสังเคราะห์คาโรทีนอยด์เพื่อทดแทนสารสกัดจากธรรมชาติ แต่มีราคาค่อนข้างแพงทำให้ต้นทุนในการผลิตในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เพิ่มสูงขึ้นในอุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมีการนำคาโรทีนอยด์สังเคราะห์มาใช้หลายชนิด ได้แก่ เบตา-แคโรทีน แอสตา-แซนทิน และ แคนตาแซนทิน โดยคาโรทีนอยด์สังเคราะห์ผ่านขบวนการสกัดจากพืชและสัตว์เพื่อทำให้บริสุทธิ์ ซึ่งวุฒิพร (2527) รายงานว่า เอโปคาโรทิอิค-เอสเทอร์ (apocarotenoic ester) และ แคนตาแซนทิน เป็นคาโรทีนอยด์ที่สะสมอยู่ในไข่แดงในปริมาณมากกว่าสารตัวอื่นๆ และสารทั้ง 2 ยังให้สีที่น่าพอใจ จึงได้มีการสังเคราะห์รงควัตถุทั้ง 2 ชนิดนี้ขึ้น โดยในปัจจุบันได้มีการตั้งชื่อในเชิงการค้าของคาโรทีนอยด์สังเคราะห์ ซึ่งมีอยู่ด้วยกันหลายชนิดคือ (DSM Nutritional Products, 2006)

1) แคโรฟิล - เยลโล (carophyll yellow®) ประกอบด้วยเอโปคาโรทิอิค - เอสเทอร์ 10 เปอร์เซ็นต์ สารตัวนี้สกัดได้จากหญ้าขน (alfalfa) และผลไม้บางชนิดที่มีรสเปรี้ยว (citrus fruits)

2) แคโรฟิล - เรด (carophyll red®) ประกอบด้วยเอโปคาโรทิอิค - เอสเทอร์ 5 เปอร์เซ็นต์ และแคนตาแซนทิน 5 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสามารถสกัดแคนตาแซนทินได้จากเห็ดชันเทอเรล-ลี (chanterelle) กุ้ง และขนนกฟลามิงโก

3) แคโรฟิล-ออเรนจ์ (carophyll orange®) ประกอบด้วยแคนตาแซนทิน 10 เปอร์เซ็นต์

4) แคโรฟิล-พิงค์ (carophyll pink®) ประกอบด้วยแอสตาแซนทิน 10 เปอร์เซ็นต์

5) redivivo® ประกอบด้วยไลโคพีน

6) optishart® ประกอบด้วยซีแซนทิน

5.4 การเก็บรักษาคาโรทีนอยด์

ในขบวนการสกัด ทำให้บริสุทธิ์ และเก็บรักษา จำเป็นต้องรู้ถึงวิธีป้องกัน มิให้คา-โรทีนอยด์สูญหายไปจากขบวนการต่างๆ (Schiedt and Liaaen-Jensen, 1995) กล่าวถึงวิธีเก็บรักษาคาโรทีนอยด์ไว้ดังนี้

1) ป้องกันคาโรทีนอยด์จากแสงสว่าง แสงสว่างมีผลต่อคาโรทีนอยด์ 2 ประการ คือ ประการแรกเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงของซีส-ทรานส์ของพันธะคู่ (photoisomerisation) ทำให้เปลี่ยนช่วงการดูดกลืนแสง จากนั้นการให้สีของคาโรทีนอยด์จะเสียไป ประการที่สองเกี่ยวกับการออกซิไดซ์ของสายคาร์บอนอะตอม ซึ่งจะส่งผลถึงการรบกวนการทำงานของโครมาโตฟอร์ ทำให้

ไม่ผลิตคาโรทีนอยด์ สภาพดังกล่าวนี้สามารถแก้ไขได้โดยการเติมสารพวกบิวทีเลทเทด ไฮดร็อกซี-เอนิโซล (butylated hydroxyanisole) บิวทีเลทเทด ไฮดร็อกซีโทลูอีน (butylated hydroxytoluene)

2) ป้องกันคาโรทีนอยด์จากความร้อน เนื่องจากการใช้อุณหภูมิสูงในการผลิต และระหว่างเก็บรักษาเป็นสาเหตุให้เกิดการสูญเสียได้ ดังนั้นควรเก็บคาโรทีนอยด์ในที่เย็น ในการทำปฏิบัติการทางด้านคาโรทีนอยด์ ควรจะทำที่อุณหภูมิ 20-22 องศาเซลเซียส

3) ป้องกันคาโรทีนอยด์จากออกซิเจน เนื่องจากการให้คาโรทีนอยด์สัมผัสกับออกซิเจน หรืออะซิโตนก็ทำให้คาโรทีนอยด์เสื่อมสภาพเร็วยิ่งขึ้น โดยถือเป็นปัจจัยที่อันตรายที่สุด เพราะคาโรทีนอยด์ทุกชนิดง่ายต่อการถูกออกซิไดซ์ และจะถูกทำลายโดยใช้เวลาน้อยมาก การแก้ปัญหามีการศึกษาโดยเติมสารป้องกันการออกซิไดซ์ คืออิโทคซีควิน (ethoxyquin) และเก็บรักษาภายใต้สภาวะสูญญากาศ จะทำให้ลดการสูญเสียคาโรทีนอยด์ได้มากขึ้น แคนตาแซนทินที่ทำให้แห้งสามารถเก็บรักษาสภาพให้เหมือนเดิมได้ถึง 96 เปอร์เซ็นต์ หลังจากเก็บไว้นาน 12 สัปดาห์ ที่ 45 องศาเซลเซียส และเมื่อนำไปผสมในอาหารเม็ด และเก็บไว้ที่ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 สัปดาห์ จะคงเหลือแคนตาแซนทิน 81-88 เปอร์เซ็นต์

4) ป้องกันคาโรทีนอยด์จากกรดและด่าง ในสภาพที่เป็นกรดทำให้เกิดการสูญเสียความคงทนของพันธะระหว่างคาร์บอนอะตอม เป็นสาเหตุให้สูญเสียคาโรทีนอยด์ทั้งในแง่ปริมาณและคุณภาพ เมื่อคาโรทีนอยด์ถูกกับด่างทำให้เกิดการเปลี่ยนสภาพ เช่น หากใส่ด่างลงในคาโรทีนอยด์ที่มีสีแดง มันจะเปลี่ยนเป็นสีน้ำเงิน และให้สารอีกตัวหนึ่งคือ ไวออลอีริทริน (violerythrin) นอกจากนี้ยังพบว่า ฟูโคแซนทินจะไม่เสถียรในสภาพที่เป็นด่าง

5) ป้องกันคาโรทีนอยด์จากเอนไซม์ Bauernfeind (1981) รายงานว่าสีแดงในปลาบางชนิดหายไปขณะเก็บไว้ในตู้เย็นและในที่มืด ทั้งนี้เกิดจากการที่เอนไซม์บางชนิดในตัวปลาถูกปล่อยออกมาและไปมีผลต่อคาโรทีนอยด์ ทำให้ปริมาณแอสตาแซนทิน ทูน่าแซนทิน และเบตา-แคโรทีน ลดลงจนทำให้สีปลาหายไป โดยการแยกสารชนิดหนึ่งที่มีลักษณะคล้ายเอนไซม์ไลโพซิเดส (lipoxidase-like enzyme) ซึ่งแยกได้จากผิวหนังของ *Sebastes thompsoni* และ *Chelidonichthys kumu* เขาพบว่า สารชนิดนี้ทำให้เกิดการจางของทูน่าแซนทินในสภาพที่มีกรดลิโนลีอิค (linoleic) และลิโนลินิค (linolenic)

5.5 บทบาทของคาโรทีนอยด์ในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ

5.5.1 สีตัวของสัตว์น้ำ

สัตว์น้ำได้รับคาโรทีนอยด์จากอาหารที่กินเข้าไป แล้วสะสมในส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย เช่น ผิวหนัง, เปลือก, ครีบ, ตา, เนื้อ, ตับ, ลำไส้ และอวัยวะสืบพันธุ์ (Hata and Hata, 1976; Metusalach *et al*., 1996; Cejas *et al*., 2003; Bjerkeng *et al*., 2000) การที่สัตว์น้ำมีสีตัวทำให้สามารถพรางตัวเองให้ปลอดภัยจากศัตรูได้ และในอุตสาหกรรมการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจำเป็นต้องมีการปรับปรุงสีของผลผลิตให้ตรงกับความต้องการของตลาด เช่น ในเนื้อปลากลุ่มซัลมอน ควรจะมีสีชมพูถึงสีแดงคล้ายกับปลาที่จับจากธรรมชาติ (Sommer *et al.,* 1991b)

5.5.2 จำแนกชนิด

ปริมาณคาโรทีนอยด์ที่สะสมในสัตว์น้ำแต่ละชนิดแตกต่างกัน จึงสามารถใช้ในการจำแนกชนิดได้ Tsushima และคณะ (2002) ศึกษาปริมาณคาโรทีนอยด์ในปลาแคทฟิชที่อยู่ในครอบครัว Siluridae พบซีแซนทินเป็นชนิดเด่น ลูทีนเอพบในปลาแคทฟิช 5 ชนิดได้แก่ *Ictalurus punctatus*, *Clarias fuscus*, *Corydoras melanistius*, *Pelteobagrus mudiceps* และ *Pseudobagrus aurantiacus* เบตา-คริปโตแซนทีนเป็นรงควัตถุที่พบมากในปลาแคทฟิช 4 ชนิดได้แก่ *Liobagrus reini*, *Plotosus lineatus*, *Corydoras melanistius* และ *Malapteruridae electricus* ส่วนแอลโลแซน-ทิน (alloxanthin) ไดอะโทแซนทิน (diatoxanthin) และแอลฟา-คริปโตแซนทีน สามารถพบได้ทั่วไปใน *Corydoras melanistius*, *Ictalurus punctatus* และ *Clarias fuscus*

5.5.3 พัฒนาระบบสืบพันธุ์

Bjerkeng และคณะ (1992) พบว่าคาโรทีนอยด์สามารถช่วยพัฒนาระบบสืบพันธุ์โดยช่วยป้องกันไม่ให้เซลล์ไข่ในรังไข่ถูกทำลายจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของอนุมูลอิสระที่เกิดขึ้นในร่างกาย และทำให้รังไข่ของสัตว์พัฒนาได้เร็วขึ้นเมื่อเทียบกับกลุ่มที่ได้รับอาหารไม่เสริมคาโรที-นอยด์ และช่วยในการลอยตัวของไข่ในปลาเรดซีบรีม ช่วยเพิ่มอัตราการฟัก และอัตราการรอดของไข่ในปลาแซลมอน (Torrissen and Christiansen, 1995) ในปลาเรนโบว์เทราท์ (Sommer *et al*. 1991b) และ หอยเม่น (sea urchin; *Pseudocentrotus depressus*) (Kawakami *et al*. 1998) เช่นเดียวกับ Katsuyama และ Matsuno (1988) กล่าวว่าคาโรทีนอยด์มีผลต่อระบบคัดหลั่งสารในการพัฒนาการของ gonad การสืบพันธุ์ อัตราการผสมของไข่ การฟักตัวและการเจริญเติบโตในสัตว์น้ำ Craik (1985) รายงานว่าในไข่ปลาแซลมอนที่มีคาโรทีนอยด์อยู่ 1-3 มิลลิกรัม/กรัม มีความสัมพันธ์

กับการฟักตัว โดยจะมีเปอร์เซ็นต์การฟักตัวมากกว่า 60 เปอร์เซ็นต์ ส่วนในไข่ที่มีระดับคาโรทีนอยด์น้อยจะมีอัตราการฟักตัวต่ำกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ และคาดการว่าคาโรทีนอยด์มีบทบาทสำคัญในการพัฒนาการสร้างไข่ปลาหรือการพัฒนาการของไข่ โดยพบว่ามีการส่งผ่านแอสตาแซนทินไปยังไข่ คาดการว่าคล้ายกับสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมที่มีการเพิ่มขึ้นของเบตา-แคโรทีนในต่อมไร้ท่อในรังไข่ (Bird and Savage, 1990)

5.5.4 กระตุ้นการเจริญเติบโต และระบบภูมิคุ้มกัน

คาโรทีนอยด์มีคุณสมบัติในการทำลายอนุมูลอิสระของออกซิเจนที่เป็นพิษ ซึ่งเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการหายใจ (respiratory burst) ของฟาโกไซต์ (phagocytes) และช่วยให้เซลล์เม็ดเลือดทำลายสิ่งแปลกปลอมได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งคาโรทีนอยด์ยังเป็นสารตั้งต้นของวิตามินเอ ซึ่งมีผลต่อระบบภูมิคุ้มกันของสัตว์น้ำ (Latscha, 1991; Hunter, 2000) โดย Amar และคณะ (2004) รายงานว่าปลาเรนโบว์เทราท์ ที่ได้รับอาหารเสริมแอสตาแซนทิน และแคนตาแซนทิน ทำให้ระบบภูมิคุ้มกันสูงขึ้น โดยทำให้ค่าปฏิกิริยาไลโซไซม์ในซีรัมและค่าอัตราการกินแบบฟาโก-ไซติกและดัชนีฟาโกไซติก ความว่องไวของซีรัมแอนติโปรติเอส และซีรัมคอมพลีเม้นต์เพิ่มมากขึ้น (Thomson *et al*., 1995) ชลธิชา (2541) รายงานว่าปลานิลสีแดงที่ได้รับแอสตาแซนทินปลาจะมีความต้านทานต่อโรคสูงขึ้น โดยจะไปเพิ่มปริมาณของ แมคโครฟาจ (Macrophage), T และ B lymphocyte ให้มากขึ้นก็จะส่งผลให้ระบบภูมิคุ้มกันมีประสิทธิภาพในการตอบสนองต่อสิ่งแปลกปลอมสูงขึ้น

5.6 ปัจจัยที่มีผลต่อการนำคาโรทีนอยด์ไปใช้ในสัตว์น้ำ

คาโรทีนอยด์สามารถอยู่ในตัวปลาได้ไม่นานและเกือบ 90% ของคาโรทีนอยด์ที่ปลาได้รับจากอาหารจะถูกขับออกมาพร้อมกับมูลปลา (Choubert and Luquet, 1983; Page and Davies, 2003) ซึ่งเป็นอุปสรรคสำคัญที่ทำให้คาโรทีนอยด์ไม่สามารถคงอยู่ในระบบทางเดินอาหารได้นาน ปัจจัยที่มีผลต่อการนำคาโรทีนอยด์ไปใช้ในสัตว์น้ำขึ้นอยู่กับปัจจัยทั้งภายในและภายนอก ปัจจัยภายในได้แก่ ชนิด, เพศ, ขนาด, การลอกคราบ, เนื้อเยื่อ และอวัยวะ รวมทั้งการควบคุมฮอร์โมนของสัตว์น้ำ ส่วนปัจจัยภายนอกได้แก่ สีเดิมของสัตว์, ความเข้มแสง, อุณหภูมิ, สิ่งแวดล้อมที่สัตว์น้ำอาศัยอยู่, ชนิดและปริมาณรวมทั้งแหล่งของคาโรทีนอยด์ที่สัตว์น้ำได้รับจากอาหาร (Goodwin, 1960; Dall, 1995; Chien and Jeng, 1992 and Yamada *et al*., 1990) ปัจจัยที่มีผลต่อการนำคาโรทีนอยด์ไปใช้ในสัตว์น้ำมีดังนี้

5.6.1 ลักษณะทางพันธุ์กรรม

ลักษณะทางพันธุ์กรรมมีผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซึมคาโรทีนอยด์ในลำไส้หรือการสะสมคาโรทีนอยด์ในกล้ามเนื้อ จากการศึกษาของ Torrissen และ Naevdal (1984) พบว่าปริมาณแอสตาแซนทินและแคนตาแซนทินมีความแตกต่างกันใน ปลาคัดพันธุ์ (full-sib) และปลาไม่คัดพันธุ์ (half-sib) ของปลาเรนโบว์เทราท์

5.6.2 เพศ

สัตว์น้ำบางชนิดเมื่อเข้าสู่ช่วงเจริญพันธุ์จะมีการขนถ่ายคาโรทีนอยด์ไปยังอวัยวะสืบพันธุ์ ทำให้ปริมาณของคาโรทีนอยด์ที่สะสมในเนื้อลดลงเช่นในการศึกษาของ Bjerkeng และคณะ (1992) พบว่า ปริมาณคาโรทีนอยด์รวมในปลาเรนโบว์เทราท์ตัวเมียที่โตเต็มที่ จะมีการสะสมคาโรทีนอยด์ในอวัยวะสืบพันธุ์เพิ่มขึ้น 73-79 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ตัวผู้พบเพียง 18-19 เปอร์เซ็นต์ เท่านั้น และสะสมในผิวหนังเพิ่มมากขึ้นอย่างชัดเจน อย่างไรก็ตามปริมาณคาโรทีนอยด์ในสัตว์น้ำบางชนิดอาจไม่มีความแตกต่างกันในแต่ละเพศ เช่น ในปลา Arctic charr (*Salvelinus alpinus* L.) (Torrissen and Naevdal, 1984; Bjerkeng *et al*., 2000) ในปลาแซลมอน พบว่า จะมีการขนส่งคาโรทีนอยด์ไปสะสมบริเวณ กล้ามเนื้อ ผิวหนัง หรือ ไข่ ในช่วงที่มีการสืบพันธุ์ ซึ่งกระบวนการนี้เริ่มต้นขึ้นในปลาเพศผู้จะเร็วกว่าเพศเมีย (Tacon, 1981) ในปลาหางนกยูง พบว่าคาโรทีนอยด์มีผลกับสีในเรื่องการแบ่งเพศของปลา โดยในปลาหางนกยูงเพศผู้จะมีสีสันสวยงามกว่าเพศเมีย และมีการสะสมคาโรทีนอยด์มากกว่าเพศเมีย (Grether *et al.,* 2004)

5.6.3 อายุและขนาด

ปริมาณของคาโรทีนอยด์ที่สะสมในร่างกายสัตว์น้ำจะแตกต่างกันในแต่ละช่วงอายุและขนาด โดย Abdul-Malak และคณะ (1975) พบว่าปลาเรนโบว์เทราท์ที่มีน้ำหนักน้อยกว่า 150 กรัม จะมีการสะสมแคนตาแซนทินในเนื้อน้อยมาก Spinelli และ Mahnken (1978) รายงานว่าปลาโคโฮ แซลมอนขนาดใหญ่ (250-400 กรัม) จะมีระดับของคาโรทีนอยด์สูงกว่าในปลาขนาดเล็ก นอกจากนี้ Arai และคณะ (1987) รายงานว่าปลา โคโฮ แซลมอน ขนาด 80 กรัมที่เลี้ยงในน้ำจืดไม่สามารถที่จะดูดซึมแอสตาแซนทินจากอาหารไปสะสมในเนื้อได้ แต่ในปลาขนาด 180 กรัม สามารถใช้แอสตาแซนทินในอาหารได้ ส่วน Schiedt และคณะ (1989) พบว่าในปลาแอตแลนติกแซลมอน (Atlantic salmon; *Salmon salar*, L.) ขนาดเล็ก (20 กรัม) จะพบการสะสมของ ไอโดแซนทิน (idoxanthin) มาก แต่ไม่พบ ไอโดแซนทินในปลาแอตแลนติกแซลมอนขนาดใหญ่ (4 กิโลกรัม)

5.6.4 อุณหภูมิและสิ่งแวดล้อมที่อาศัยอยู่

อุณหภูมิที่สัตว์น้ำอาศัยอยู่มีผลต่อปริมาณคาโรทีนอยด์ เช่นจากการศึกษาของ No และ Storebakken (1991) ในปลาเรนโบว์เทราท์ที่กินอาหารผสมแอสตาแซนทิน 57 มิลลิกรัม/กิโลกรัม พบว่า อัตราการเจริญเติบโต เปอร์เซ็นต์ของเนื้อในตัว และปริมาณไขมันในเนื้อของปลาที่เลี้ยงอุณหภูมิ 15 องศาเซลเซียส สูงกว่าที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส แต่พบว่าอุณหภูมิไม่มีผลต่อการสะสมคาโรทีนอยด์ สิ่งแวดล้อมที่สัตว์อาศัยอยู่ก็เป็นปัจจัยที่สำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาปริมาณ คาโรทีนอยด์ในห่วงโซ่อาหารของ Yanar และคณะ (2004) ที่รายงานว่าสาหร่ายเป็นแหล่งของคาโรทีนอยด์ที่สำคัญ โดยชนิดและปริมาณจะเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลทำให้ปริมาณคาโรทีนอยด์รวมของสัตว์น้ำที่กินสาหร่ายเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาลเช่นกัน ใน *Penaeus semisulcatus* และ *Metapenaeus monoceros* มีปริมาณคาโรทีนอยด์รวมในฤดูใบไม้ผลิและฤดูร้อนสูงกว่าฤดูใบไม้ร่วงและฤดูหนาว โดยมีค่า 14.1± 0.45 และ 16.9 ±0.26 มิลลิกรัม/กิโลกรัม ตามลำดับ Gosse และ Wroblewski (2004) พบว่าปลาคอดวัยอ่อน (*Gadus morhua*) ที่อาศัยอยู่ทิศตะวันตกเฉียงเหนือของมหาสมุทรแอตแลนติกมีสีดำ ส่วนที่พบในอ่าวกิลเบท (Gilbert bay) มีสีน้ำตาลทอง เนื่องจากบริเวณดังกล่าวมีปริมาณของสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังที่เป็นแหล่งของคาโรทีนอยด์และเป็นอาหารของปลาคอดวัยอ่อนเป็นจำนวนมาก

5.6.5 ชนิด ปริมาณ และแหล่งของคาโรทีนอยด์ที่สัตว์น้ำได้รับจากอาหาร

สัตว์น้ำมีประสิทธิภาพในการนำคาโรทีนอยด์แต่ละชนิดไปใช้ได้แตกต่างกัน จากการศึกษาในปลาเรนโบว์เทราท์และปลาแซลมอลสามารถนำแอสตาแซนทินไปใช้ได้ดีกว่าแคนทาแซนทิน (Storebakken *et al*., 1987; Baker *et al*., 2002) และในปลาแซลมอนใช้แอสตาแซนทินเอสเธอร์ได้ต่ำกว่าแอสตาแซนทินอิสระ (Storebakken , *et al*., 1987) Schiedt และคณะ(1985) และ Foss *และคณะ (*1987) ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้ แอสตาแซนทิน และแอสตาแซนทินไดปาลมิเตท ในปลาเรนโบว์เทราท์ พบว่าปลาสามารถใช้แอสตาแซนทินได้ดีกว่า แอสตาแซนทินไดปาลมิเตท Storebakken และ Goswami (1996) พบว่าปลาแอตแลนติกแซลมอล ที่กินอาหารผสมแอสตาแซนทิน 5 มิลลิกรัม/กิโลกรัม จะมีความเข้มข้นของแอสตาแซนทินในพลาสมา 1 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร ในขณะที่ปลาที่กินอาหารผสมแอสตาแซนทิน 60 มิลลิกรัม/กิโลกรัม จะมีความเข้มข้นของแอสตาแซนทินในพลาสมาลดลงถึง 3 เท่า อย่างไรก็ตามถ้าจะให้สัตว์น้ำได้รับคาโรทีนอยด์ติดต่อกันเป็นเวลานานควรให้ที่ความเข้มข้นต่ำจะมีประสิทธิภาพมากกว่าที่ความเข้มข้นสูง

แหล่งของคาโรทีนอยด์บางชนิดเมื่อเสริมในอาหารสัตว์น้ำอาจมีผลกระทบต่อการกินอาหารของสัตว์น้ำได้ โดย สุภฎา และคณะ (2548) ทดลองเลี้ยงปลาทองด้วยอาหาร 4 สูตร คือ อาหารที่ไม่เสริมสไปรูไลนา และอาหารที่เสริมสไปรูไลนาแห้ง 1, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 6 สัปดาห์ พบว่าการใช้สไปรูไลนาแห้งเสริมในอาหารปลาทองปริมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ มีผลให้การกินอาหารและการเจริญเติบโตลดลงเมื่อเทียบกับกลุ่มที่ได้รับอาหารเสริมสาหร่ายสไปรูไลนาแห้ง 1-3 เปอร์เซ็นต์ เนื่องมาจากระดับความเข้มข้นของสไปรูไลนาแห้งในอาหารที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อสมดุลของกรดอะมิโนรวมในอาหาร การได้รับอาหารที่มีกรดอะมิโนไม่สมดุลมีผลทำให้การเจริญเติบโตของปลาทองลดลง (Halver *et al*., 2002)

5.6.6 ชนิดและปริมาณไขมันในตัวสัตว์น้ำ

คาโรทีนอยด์ ซึ่งเป็นกลุ่มรงควัตถุที่ละลายได้ดีในไขมัน ดังนั้นชนิดและปริมาณไขมันในตัวสัตว์น้ำจึงอาจมีผลต่อการดูดซึมและสะสมคาโรทีนอยด์ในร่างกาย โดยจะช่วยในการละลายของคาโรทีนอยด์ Babosa และคณะ (1999) พบว่าปริมาณแอสตาแซนทินอิสระในน้ำเลือดปลาเรนโบว์เทราท์มีค่าเพิ่มสูงขึ้นในปลากลุ่มที่ได้รับอาหารที่มีไขมันสูง เช่นเดียวกับ Bjerkeng และคณะ (1999) พบว่าปลาแซลมอลที่ได้รับ capelin oil และ peruvian oil ที่ประกอบไปด้วยกรดไขมันไม่อิ่มตัวสูง สามารถสะสมแอสตาแซนทินในตัวปลาได้มากกว่ากลุ่มที่ได้รับ herring oil และ sandeel oil Chan *และคณะ* (2002) รายงานว่าปลา โคโฮ แซลมอน ที่ได้รับอาหารที่มีระดับไขมันสูง (23 และ 30 เปอร์เซ็นต์) มีปริมาณแอสตาแซนทินในเนื้อสูงตามไปด้วย จากการศึกษาพบว่าการขาดไขมันในอาหารจะส่งผลกระทบต่อการสังเคราะห์หรือการสะสมคาโรทีนอยด์ (Meyers and Latscha, 1997) อย่างไรก็ตาม Torrissen (1985) พบว่าคุณภาพของไขมันไม่มีผลต่อการสะสมแอสตาแซนทินในปลาเรนโบว์เทราท์

5.7 กลไกการนำคาโรทีนอยด์ไปใช้ในสัตว์น้ำ

การนำคาโรทีนอยด์ไปใช้ในสัตว์น้ำแต่ละชนิดมีกลไกที่แตกต่างกัน เมื่อปลาได้รับคาโรทีนอยด์ ปลาจะมีการสะสมสีต่างๆที่บริเวณใต้ผิวหนังในชั้น เดอร์มิส (dermis) และเนื้อเยื่อบริเวณกล้ามเนื้อ (Latscha, 1991) ซึ่งอยู่ในรูปต่างๆ เมื่อสัตว์น้ำกินสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน ก็จะได้รับรงควัตถุชนิดต่างๆ เช่น ลูทีน เบตา-แคโรทีน ซีแซนทินหลังจากนั้นสัตว์น้ำก็จะเปลี่ยนรูปโครงสร้างของรงควัตถุ จนในที่สุดจะเก็บสะสมอยู่ในรูปแอสตาแซนทิน ดังภาพที่ 4 Simpson (1982) ศึกษาถึงเมแทโบลิซึมของคาโรทีนอยด์ ในปลาคาร์ปสีแดง (red carp) ซึ่งสามารถเปลี่ยนลู

ทีน ซีแซนทิน หรือตัวกลางไปเป็นแอสตาแซนทิน แต่ไม่สามารถใช้เบตา-แคโรทีน เป็นสารตั้งต้นของแอสตาแซนทิน และสามารถสะสมแอสตาแซนทินได้โดยตรง

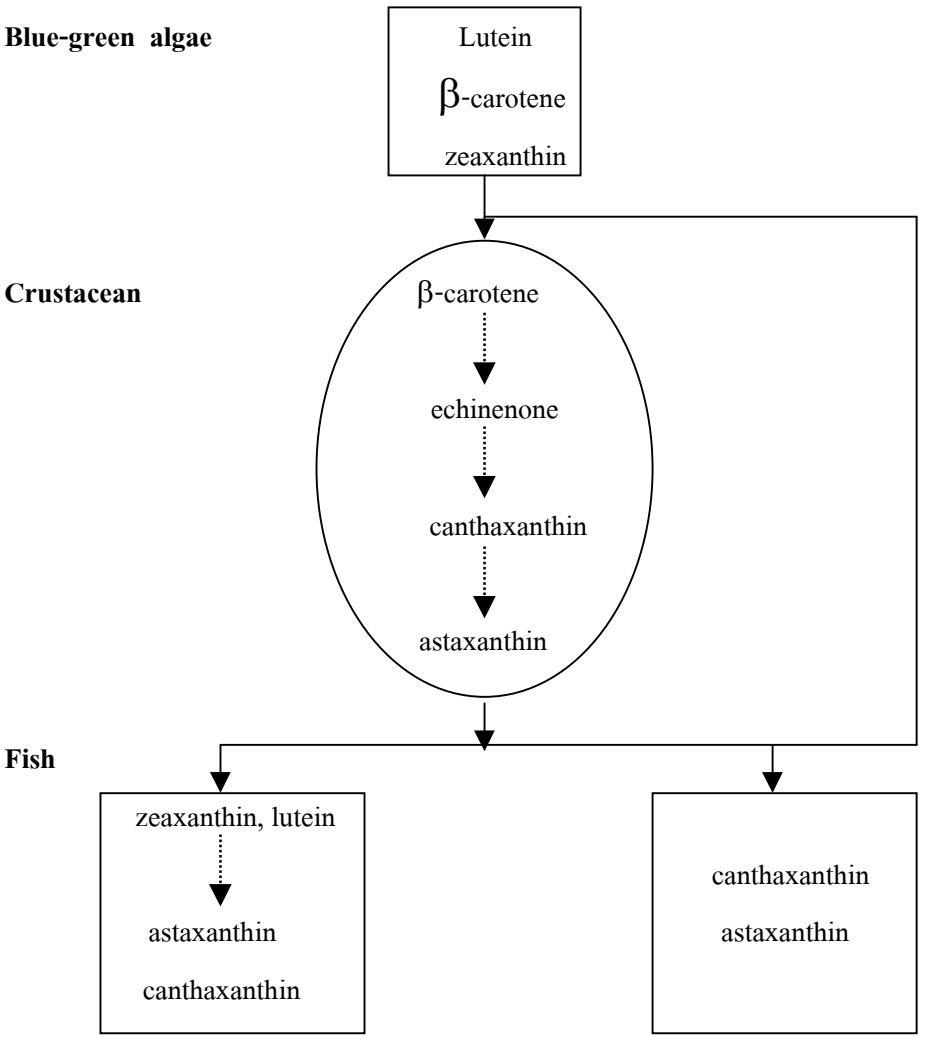
Ohkubo และคณะ (1999) พบว่าปลาทอง (*Carassius auratus*) สามารถเมแทบอไลท์ลูทีนเอให้เป็นลูทีนบี 4-ไฮดรอกซิล-ลูทีน (4-hydroxy-lutein) และแอลฟา-โดราดีแซนทิน (α-doradexanthin) ตามลำดับ และซีแซนทินสามารถเปลี่ยนเป็นแอสตาแซนทินโดยมี 4-ไฮดรอกซิล-ซีแซนทิน (4-hydroxy-zeaxanthin) เบตา-โดราดีแซนทิน (β-doradexanthin) เป็นตัวกลาง

Lee (1966) อ้างโดย Tanaka และคณะ (1976) ศึกษาเมแทโบลิซึมของคาโรทีนอยด์ในไอโซพอด (Isopod) ที่อาศัยในทะเล 2 ชนิดคือ *Idotea montereycnsis* และ *I. granulosa* พบว่าเบตา-แคโรทีนจะถูกเปลี่ยนเป็นอีไคนีโนน (echinenone) 4-hydroxy-4′-β-carotene และแคนตาแซนทิน ตามลำดับ

Gilchrist และ Lee (1967) อ้างโดย Tanaka และคณะ (1976) ศึกษาเมแทโบลิซึมของคาโรทีนอยด์ใน *Carcinus maeans* พบว่าเบตา-แคโรทีนจะถูกเปลี่ยนเป็นไอโซคริปโตแซนทิน อีไคนีโนน แคนตาแซนทิน และแอสตาแซนทิน ตามลำดับ ส่วนในอาร์ทีเมีย (*Artemia salina*) สามารถเปลี่ยนเบตา-แคโรทีนเป็นอีไคนีโนน และแคนตาแซนทิน ตามลำดับ โดยไม่ต้องอาศัยตัวกลาง

Latscha (1990) พบว่าพวกปลากินพืช เช่นปลาตระกูลปลาไนสามารถเปลี่ยนซีแซนทินและลูทีนให้อยู่ในรูปแอสตาแซนทินได้ และปลากินเนื้อในครอบครัว salmonidae ไม่สามารถออกซิไดซ์วงแหวนไอโอโนน จึงสะสมแคโรทีนและแซนโทฟิลล์ เช่น ลูทีน, ซีแซนทิน และแคนตาแซนทินโดยไม่เปลี่ยนรูป สำหรับแอสตาแซนทิน เมื่อรับเข้ามาแล้วสามารถเปลี่ยนให้อยู่ในรูปลูทีน และ ซีแซนทินได้โดยขบวนการย่อย

Schiedt *และคณะ* (1985) รายงานถึงกระบวนการเปลี่ยนคีโต-คาโรทีนอยด์ในปลาเรนโบว์เทราท์ โดย (1) เปลี่ยน แคนตาแซนทิน เป็น อีไคนีโนน เป็น เบตา-แคโรทีน (2) เปลี่ยน อะโดนิรูบิน(adonirubin) (3-hydroxycanthaxanthin) เป็น เอสเทอรอยดิโนนasteroidenone (3’-hydroxy-echinenone) เป็นคริปโตแซนทิน และ (3) เปลี่ยน แอสตาแซนทิน เป็น อะโดนิแซนทิน (adonixanthin) (4-ketozeaxanthin) เป็น ซีแซนทิน เป็น แอนเทอราแซนทิน (antheraxanthin) เป็น ดีพ๊อกซีนีโอแซนทิน (deepoxyneoxanthin)



ภาพที่ 4 กลไกการนำคาโรทีนอยด์ไปใช้ในสัตว์น้ำ

ที่มา : Latscha (1991)

6. ระบบภูมิคุ้มกันของปลา

ปลามีการพัฒนาระบบภูมิคุ้มกัน โดยมีการสร้างลิมโฟไซท์ (lymphocyte) ที่ตับ ในระยะตัวอ่อน ซึ่งลิมโฟไซท์เหล่านี้แพร่กระจายไปยังส่วนต่างๆของร่างกาย โดยเฉพาะที่ม้ามและต่อมน้ำเหลือง แต่เมื่อปลาโตขึ้นอวัยวะที่กำเนิดลิมโฟไซท์ คือ กระดูกสันหลัง (bone marrow) ระบบภูมิคุ้มกันของปลามีลักษณะทั่วไปคล้ายกับของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนม (Sakai, 1999; Vadstein, 1997) แต่ยังไม่ดีเท่าเนื่องจากปลามีวิวัฒนาการที่ต่ำกว่า โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 แบบคือ แบบไม่จำเพาะเจาะจง (non-specific immunity) และแบบจำเพาะเจาะจง (specific immunity) โดยระบบภูมิคุ้มกันปลาส่วนใหญ่เป็นแบบไม่จำเพาะเจาะจง ซึ่งระบบภูมิคุ้มกันลักษณะนี้ถูกสร้างขึ้นมาโดยธรรมชาติไม่ต้องอาศัยการกระตุ้นจากแอนติเจนหรือเชื้อโรค (Roberts, 1989; Vadstein, 1997)

6.1 ระบบภูมิคุ้มกันแบบไม่จำเพาะเจาะจง

ระบบภูมิคุ้มกันแบบไม่จำเพาะเจาะจง เป็นกลไกของร่างกายสร้างขึ้นเอง เป็นภูมิคุ้มกันที่สามารถต่อต้านสิ่งแปลกปลอมได้หลายชนิด มีในร่างกายตั้งแต่กำเนิด หรืออาจเรียกว่าภูมิคุ้มกันตามธรรมชาติ (natural immunity หรือ innate immunity) โดยถือเป็นด่านแรกในการป้องกันการเข้าทำลายของเชื้อโรคต่างๆ และมีการตอบสนองอย่างรวดเร็ว Ellis (1988) และ Vadstein (1997) กล่าวว่า ภูมิคุ้มกันแบบนี้เป็นภูมิคุ้มกันหลักในการป้องกันการระบาดของโรคที่เกิดจากเชื้อจุลินทรีย์ในปลาวัยอ่อน โดยประกอบด้วย เยื่อเมือก, เกล็ด, ผิวหนัง และสิ่งกีดขวางในเนื้อเยื่อเกี่ยวพัน ซึ่งมีทั้งชนิดที่เกี่ยวกับเซลล์ (cell mediated immunity) และสารน้ำ (humoral immunity) (Ellis, 1988) โดยภูมิคุ้มกันที่เกี่ยวข้องกับเซลล์ จะประกอบด้วย เซลล์ที่ทำหน้าที่ในการจับกินสิ่งแปลกปลอม (phagocytotic cell) เช่น แมคโครฟาจ, นิวโทรฟิล (neutrophyll), อีโอซิโนฟิล (eosinophils) และแบโซฟิลล์ (basophil) เป็นต้น (Roberts, 1989) Evans และ Jaso-Friedmann (1992) กล่าวว่าปลาสามารถผลิตเซลล์ที่เรียกว่า natural cytotoxic cell (NCC) ซึ่งทำหน้าที่คล้ายกับเซลล์เม็ดเลือดขาวของสัตว์เลี้ยงลูกด้วยนมที่มีความสามารถในการทำลายเชื้อไวรัสและเซลล์มะเร็ง สำหรับภูมิคุ้มกันที่เป็นของเหลวในน้ำเลือดหรือสารน้ำ มีหลายชนิดเช่น (1) คอมพลีเมนต์ (complement) มีหน้าที่ช่วยในการทำให้เชื้อแบคทีเรียหรือเชื้อไวรัสง่ายต่อการทำลาย โดยกระตุ้นให้เกิดการแตกสลายของเซลล์ (cytosis) โดยจะช่วยเสริมการทำงานของการกลืนกินของเซลล์ (phagocytotic) โดยสิ่งแปลกปลอมที่เข้ามาในร่างกาย ตัวรับบนผิวเซลล์จะถูกคอมพลีเมนต์จับ ทำให้เม็ดเลือดขาวสามารถเข้ามาทำลายเซลล์เชื้อโรคได้ (Roberts, 1989) เรียกว่าขบวนการออฟโซไน-เซชัน

(opsonization) (2) ไลโซไซม์ (lysozyme) ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่ทำหน้าที่ในการทำลายผนังเซลล์แบคทีเรีย (Dalmo *et al*., 1997) (3) สารที่ยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ จำพวก ทรานสเฟอร์ริน (transferrin) และ อินเตอร์ฟีรอน (interferon) (4) สารต่อต้านเอนไซม์ของเชื้อโรค ได้แก่ แมคโคร-กลูบูลิน (macroglobulin) (Alexander, 1985)

6.2 ระบบภูมิคุ้มกันแบบจำเพาะเจาะจง

ระบบภูมิคุ้มกันแบบจำเพาะเจาะจง สามารถตอบสนองได้ 3 ทาง คือ cell mediated immunity (CMI), humoral immunity (HI) และ memory humoral immunity โดยมีลิมโฟไซท์เป็นตัวหลักมีบทบาทสำคัญในระบบภูมิคุ้มกัน โดยสามารถพบได้ในระบบหมุนเวียนของร่างกาย ลิม-ฟอยด์ ออร์แกน (lymphoid organ) และเนื้อเยื่ออื่นๆ ลิมโฟไซท์มีความสามารถในการจำ (memory) คือ เมื่อเซลล์ได้รับสิ่งแปลกปลอมที่ก่อให้เกิดโรค (antigen) ชนิดเดิมเป็นครั้งที่ 2 มีการตอบสนองต่อแอนติเจนเร็วขึ้น (Roberts, 1989) ลิมโฟไซท์ มี 2 กลุ่มคือ ที-ลิมโฟไซท์ (thymus-derived, T-lympocytes) และ บี-ลิมโฟไซท์ (bone marrow-derived, B-lympocytes) ทั้ง 2 ชนิดนี้จะมีบทบาทในการจดจำ (memory cell) อิมมูโนกลูบูลิน (immunoglobulin, Ig) มีบทบาทสำคัญในการกระตุ้นภูมิคุ้มกันแบบจำเพาะเจาะจง เช่น การกำจัดไวรัส และแบคทีเรีย การกระตุ้นคอมพลีเมนต์ โดยอิมมู-โนกลูบูลิน ที่พบปลาชั้นสูงมีเพียงชนิดเดียว คือ ไอจีเอ็ม (IgM) พบได้ในสารคัดหลั่ง เมือกบริเวณผิวหนัง ทางเดินอาหาร และในท่อน้ำดี (บุญเยี่ยม, 2527 อ้างโดย กิจการ และคณะ, 2539)

6.3. สารกระตุ้นภูมิคุ้มกัน (Immunostimulant)

สารกระตุ้นภูมิคุ้มกัน เป็นสารที่ทำให้สิ่งมีชีวิตมีความต้านทานโรคได้สูงขึ้น แต่จะมีผลต่อระบบภูมิคุ้มกันแบบจำเพาะเจาะจง (Sakai, 1999) สารกระตุ้นภูมิคุ้มกันที่นิยมใช้ในกุ้งและปลา ได้แก่ กลูแคน (จากยีสต์), ไลโปโพลีแซคคาไรด์ (จากแบคทีเรียแกรมลบ), ไคติน (chitin), วิตามิน และ สารสี (คาโรทีนอยด์) นอกจากนี้ยังมีสารสังเคราะห์ เช่น ลีวามิโซล (levamisol) (Dalmo and Seljelid, 1995), FK565 และ MDP (Sakai, 1999) วิธีการให้สารกระตุ้นภูมิคุ้มกันแก่สัตว์น้ำสามารถทำได้หลายวิธี เช่น การแช่ การฉีด และการกิน (Sakai, 1999)

ในกระบวนการออกซิเดชันภายในร่างกายทำให้เกิดอนุมูลอิสระ เช่น ออกซิเจนโมเลกุลเดี่ยว (singlet oxygen), ซุปเปอร์ออกไซด์ (superoxide), เปอรอกซิล (peroxyl) และไฮดรอก-ซิล (hydroxyl) ซึ่งจะมีผลทำลายเซลล์ต่างๆ ในร่างกาย รวมทั้งเซลล์ในระบบภูมิคุ้มกัน เนื่องจาก

กระบวนการกำจัดสิ่งแปลกปลอมในร่างกายทำให้เกิดอนุมูลอิสระขึ้น เซลล์สิ่งแปลกปลอมรวมทั้งเซลล์ร่างกายจะถูกทำลายด้วย แต่ร่างกายจะมีกลไกการป้องกันโดยใช้สารต้านอนุมูลอิสระไปจับกับอนุมูลดังกล่าวเพื่อลดความเป็นพิษ โดยคาโรทีนอยด์เกิดการรวมตัวกับโปรตีนเรียกว่า แคโรทีโน-โปรตีน ทำให้โครงสร้างของโปรตีนแข็งแรงและมีคุณสมบัติในการทำลายอนุมูลอิสระของออกซิเจนที่เป็นพิษ ซึ่งเกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการหายใจ (respiratory burst) ของฟาโกไซต์ (phagocytes) และช่วยให้เซลล์เม็ดเลือดทำลายสิ่งแปลกปลอมได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งคาโรทีน-อยด์ยังเป็นสารตั้งต้นของวิตามินเอ ซึ่งมีผลต่อระบบภูมิคุ้มกันของสัตว์ (Latscha, 1991; Hunter, 2000) สารต้านอนุมูลอิสระจะได้จากอาหารที่กินเข้าไป ซึ่งอยู่ในรูปของสารอาหารที่ร่างกายต้องการในปริมาณน้อย (micronutrients) และพวกที่ไม่ใช่สารอาหาร (non-nutrients) (Hughes, 2001) เช่น วิตามินเอ, วิตามินอี, วิตามินซี และ คาโรทีนอยด์ เป็นต้น สารเหล่านี้สามารถกระตุ้นระบบภูมิคุ้มกันได้ (Gemma *et al.,* 2002) โดยพบว่าปลาที่ได้รับคาโรทีนอยด์ในปริมาณสูงจะมีความต้านทานต่อเชื้อแบคทีเรีย และโรคที่เกิดจากเชื้อราได้ (Thompson *et al.,* 1995) Segner และคณะ (1989) รายงานว่าเนื้อเยื่อตับปลาที่ได้รับอาหารเสริมแอสตาแซนทินในปริมาณสูงมีลักษณะปกติดี

จากการทดลองของ Peto และคณะ (1981) อ้างโดย Hughes (2001) พบว่าคาโรทีน-อยด์สามารถป้องกันการเกิดมะเร็ง และเบตา-แคโรทีนรวมทั้งคาโรทีนอยด์ตัวอื่นๆ สามารถเหนี่ยวนำให้เซลล์ในระบบภูมิคุ้มกันป้องกันและกำจัดเซลล์มะเร็งได้ดีขึ้น

สำหรับการทดลองในสัตว์น้ำพบว่าคาโรทีนอยด์สามารถกระตุ้นภูมิคุ้มกันได้ จากการทดลองของ Amar และคณะ (2004) ซึ่งทำการทดลองในปลาเรนโบว์เทราท์ โดยให้กินอาหารที่มีส่วนผสมของคาโรทีนอยด์ คือเบตา-แคโรทีนจากสาหร่ายดูนาลิเลลลา และแอสตาแซนทินจากยีสต์ฟาฟเฟีย (*Phaffia rhodozyma*) ในปริมาณ 100 และ 200 มิลลิกรัมต่ออาหาร 1 กิโลกรัม พบว่าอัตราการเจริญเติบโตไม่แตกต่างจากชุดควบคุมซึ่งไม่ได้รับอาหารที่มีคาโรทีนอยด์ ส่วนฮูโมรอลเฟกเตอร์ (humoral factors) และซีรัมอัลเตอร์เนทีพคอมพลีเมนต์เอกติวิตี (serum alternative complement activity) ของปลากลุ่มที่ได้รับอาหารผสมคาโรทีนอยด์มีค่าสูงกว่าปลากลุ่มที่ไม่ได้รับอาหารผสมคาโรทีนอยด์อย่างมีนัยสำคัญ

นอกจากนี้ยังมีการทดลองในกุ้งกุลาดำโดย Boonyaratpalin และคณะ (2001) ซึ่งใช้สาหร่ายดูนาลิเลลลาผสมในอาหารเป็นแหล่งของเบตา-แคโรทีนที่ระดับ 125 และ 175 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมอาหาร และใช้แอสตาแซนทิน 50 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมอาหาร พบว่าค่าของปฏิกิริยาเอนไซม์ฟีนอลออกซิเดส (phenoloxidase) ความสามารถในการกำจัดเชื้อ และความต้านทานโรคสูงกว่าชุดควบคุมที่ไม่ได้รับอาหารที่ผสมดูนาลิเลลลาและแอสตาแซนทิน แสดงว่าแอสตาแซนทินและเบตา-แคโรทีนสามารถทำให้ระบบภูมิคุ้มกันของกุ้งทำงานได้ดีขึ้น

Lee และคณะ (2003) ศึกษาระบบภูมิคุ้มกันในกุ้งแชบ๊วย โดยเสริมสาหร่ายสไป-รูไลนาในอาหาร พบว่า การเสริมสาหร่ายสไปรูไลนาที่ 0.3 เปอร์เซ็นต์ สามารถเพิ่มการเหนี่ยวนำเม็ดเลือดให้มาโอบล้อมเชื้อโรคได้ดีขึ้นและเพิ่มค่า ฟาโกไซติก แอกติวิตี้ (phagocytic activity) สูงขึ้น

วุฒิพร และอัญชลี (2548) รายงานว่าการเสริมสไปรูไลนาในอาหารปลาดุกพันธุ์ผสม มีผลต่อการเพิ่มระดับแอนติบอดี โดยให้ปลากินอาหารที่เสริมสไปรูไลนา 8 สัปดาห์ และฉีดวัคซีนหรือเชื้อตายของ *Aeromonas hydrophila* ทำให้ค่าไตเตอร์ แอคติวิตี (titer activity) สูงกว่าปลาที่ได้รับอาหารชุดควบคุม เช่นเดียวกับการทดลองของ Direkbusarakom และ Danayadol (1999) ศึกษาการเสริมสไปรูไลนาในอาหารปลากะพงขาว (*Lates calcarifer*) ขนาด 200 กรัม พบว่าเมื่อเสริมสไปรูไลนา 0.5 เปอร์เซ็นต์ ทำให้เกิดการตกตะกอนของแอนติบอดีและแอนติเจนต่อเชื้อ *Streptococcus* sp.ดีที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม

Duncan และ Klesius (1996) พบว่าเม็ดเลือดขาวชนิดลิมโฟไซท์ เพิ่มขึ้นเมื่อปลากดอเมริกัน (*Ictalurus punctatus*) ได้รับอาหารเสริมสไปรูไลนา 2.7 เปอร์เซ็นต์

7. วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. เพื่อศึกษาผลของคาโรทีนอยด์สังเคราะห์ และคาโรทีนอยด์จากการเสริมสไป-รูไลนาในอาหารระดับต่างๆ ต่อการเร่งสีและการสะสมคาโรทีนอยด์ของปลานิลแดงแปลงเพศ

2. เพื่อศึกษาผลของคาโรทีนอยด์สังเคราะห์ และคาโรทีนอยด์จากการเสริมสไป-รูไลนาในอาหารระดับต่างๆ ต่อระบบภูมิคุ้มกันของปลานิลแดงแปลงเพศ

3. เพื่อศึกษาผลของคาโรทีนอยด์สังเคราะห์ และคาโรทีนอยด์จากการเสริมสไป-รูไลนาในอาหารระดับต่างๆ ต่อการเจริญเติบโต อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ อัตราการรอดตาย และประสิทธิภาพของอาหาร