

บทที่ 2

ตารางเอกสาร

2.1 ลักษณะทางชีววิทยาของสาหร่ายสไปรูลินา

สาหร่ายสไปรูลินา (Spirulina platensis) หรือสาหร่ายเกลียวทองเป็น
สาหร่ายสีน้ำเงินแกมเขียว ซึ่ง Venkataraman (1983) จัดอยู่ในอนุกรมวิธานดังนี้

Phylum Cyanophyta

Class Cyanophyceae

Order Oscillatoriales

Family Oscillatoriaceae

Genus Spirulina

Species platensis

ลักษณะเซลล์ของสาหร่ายสไปรูลินาเป็นทรงกระบอกหลายเซลล์เรียงติดต่อกัน เรียกว่าไตรโคม (trichome) มีลักษณะบิดเป็นเกลียว (รูปที่ 1) ภายในเซลล์ไม่มีเยื่อหุ้มนิวเคลียสทำให้กรดนิวคลีอิก (nucleic acid) กระจายอยู่ทั่วไปภายในเซลล์ผนังเซลล์ประกอบด้วยสารมิวโคโปรตีน (mucoprotein) และสารประกอบเพคติน (pectin) ผนังเซลล์ด้านนอกเป็นสารประกอบพอลิแซ็กคาไรด์ (polysaccharide) และไม่มีเซลลูโลส (cellulose) (Venkataraman, 1983) ภายในเซลล์มีสารสี (pigments) จำพวกไฟโคอีริทริน (phycoerythrin) ไฟโคไซยานิน (phycocyanin) และคลอโรฟิลล์เอ (carophyll a) กระจุกกระจายอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้มีอัตราการสังเคราะห์แสงสูง (Cifere1, 1983) การสืบพันธุ์ของสาหร่ายสไปรูลินาโดยวิธีขาดตอน (fragmentation) การเจริญเติบโตของเซลล์สาหร่ายสไปรูลินาอาศัยการแบ่งเซลล์ โดยทำให้เกิดสายของไตรโคมยาวออกไป และเมื่อมีขนาดยาวออกไปถึงระดับหนึ่ง ไตรโคมจะขาดออก และมีการเจริญเติบโตแบ่งตัวออกเป็นไตรโคมใหม่ต่อไป (กาตุจนภาชน์, 2527; สยามเอลจี, 2530) ขนาดของเซลล์มีความกว้าง 3-80 ไมครอน ยาวประมาณ 50-500

ไมตรอน (สุชาติ, 2529; สยามแอลจี, 2530)



รูปที่ 1 ลักษณะรูปร่างของสาหร่าย Spirulina platensis

สาหร่ายสไปรูไลนาเท่าที่พบในปัจจุบันมีมากกว่า 30 ชนิด มีการแพร่กระจายมากที่ทะเลสาบ Texcoco ประเทศเม็กซิโก (สุชาติ, 2529) ประเทศอิสราเอล และประเทศอินเดีย (Venkatraman, 1983) ในประเทศไทย สถาบันประมงน้ำจืด (2530) รายงานว่าสาหร่ายสไปรูไลนาพบมากตามแหล่งน้ำจืด โดยเฉพาะภาคตะวันออกเฉียงเหนือ สาหร่ายสไปรูไลนาเจริญเติบโตได้ดีทั้งในน้ำจืด น้ำกร่อย บ่อเลี้ยงปลาและบ่อน้ำเสียบางประเภท ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ที่เหมาะต่อการเจริญเติบโตของสาหร่ายสไปรูไลนาอยู่ระหว่าง 9-11 และ อุณหภูมิระหว่าง 32-42 องศาเซลเซียส สำหรับน้ำเค็ม สุนันทิพย์ และปิยะดา (2533) รายงานว่าระดับความเข้มข้นของเกลือสูงสุดที่สาหร่ายสไปรูไลนาทนได้เท่ากับ 16 ส่วนในพัน

Hill (1980) รายงานว่าองค์ประกอบของการดอมิโนของสาหร่ายสไปรูลินาอยู่ในเกณฑ์สมดุลทั้งในแง่ปริมาณและคุณภาพ คือสมบูรณ์ด้วยการดอมิโนที่จำเป็น (essential amino acid) 8 ชนิด และการดอมิโนที่ไม่จำเป็น (non-essential amino acid) 9 ชนิดยกเว้นการดอมิโนที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบซึ่งมีอยู่ในปริมาณต่ำ (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 2 การดอมิโนที่จำเป็นและไม่จำเป็นของสาหร่ายสไปรูลินา

การดอมิโนที่จำเป็น	ปริมาณ (เปอร์เซ็นต์ของโปรตีน)
ไอโซลิวซีน (Isoleucine)	4.13
ลูซีน (Leucine)	5.80
ไลซีน (Lysine)	4.00
เมทไทโอนีน (Methionine)	2.71
ฟีนิลอลานีน (Phenylalanine)	3.95
ทรีโอนีน (Threonine)	4.17
ทริฟโตเฟน (Tryptophan)	1.13
วาเลีน (Valine)	6.00
การดอมิโนที่ไม่จำเป็น	
อลานีน (Alanine)	5.82
อาร์จินีน (Arginine)	5.98
ซิสทีน (Cystine)	0.67
กรดกลูตามิก (Glutamic acid)	8.94
ไกลซีน (Glycine)	3.46
ฮิสติดีน (Histidine)	1.08
โพรลีน (Proline)	2.97
เซอรีน (Serine)	4.00
ไทโรซีน (Tyrosine)	4.60

ที่มา: Hill (1980)

Hill (1980) และ Venkataraman (1983) รายงานว่า สหราชอาณาจักรมีปริมาณประกอบด้วยวิตามิน และแร่ธาตุที่สำคัญต่อร่างกายของสัตว์หลายชนิด เช่น เบตาแคโรทีน (β -carotene), โทอามีน (Thiamine), ไรโบฟลาวิน (Riboflavin), ไพริดอกซีน (Pyridoxine), วิตามิน บี 12 (Vitamin B₁₂), แคลเซียม (Calcium) และฟอสฟอรัส (Phosphorous) เป็นต้น (ตารางที่ 3)

ตารางที่ 3 วิตามินและเกลือแร่ในสหราชอาณาจักร

วิตามินและเกลือแร่ (มก./100 กรัมเนื้อสัตว์แห้ง)	แหล่งข้อมูล			
	สุชาติ (2529)	Venkataraman (1983)	Hill (1980)	สุนทิพย์ และปิยะดา (2532)
วิตามินบี 1 (Thiamine)	3.00-4.00	2.78	5.50	n.a
วิตามินบี 2 (Riboflavin)	2.50-3.50	3.34	2.00	n.a
วิตามินบี 6 (Pyridoxine)	0.50-0.70	0.13	0.30	n.a
วิตามินบี 12 (Cyanocobalamin)	0.12-0.25	n.a	n.a	n.a
วิตามินอี (α -tocopherols)	5.00-7.00	n.a	19.00	n.a
เบตาแคโรทีน (β -carotene)	n.a	50.00	180.00	n.a
โพแทสเซียม (Potassium)	1,000.00-1,400.00	1,420.00	1,540.00	976.79
แคลเซียม (Calcium)	100.00- 400.00	750.00	131.00	190.52
ฟอสฟอรัส (Phosphorus)	300.00- 700.00	1,420.00	894.20	846.03
แมกนีเซียม (Magnesium)	150.00- 200.00	900.00	191.50	360.46
เหล็ก (Iron)	30.00- 50.00	120.00	58.00	90.17
โซเดียม (Sodium)	450.00- 500.00	450.00	412.00	195.68
สังกะสี (Zinc)	1.10	n.a	3.90	8.07

หมายเหตุ: n.a = ไม่มีรายงาน

2.3 ปริมาณเซนโทฟิลล์ในสาหร่ายสไปรูลินา

Paolletti และคณะ (1971) รายงานว่าสาหร่ายสไปรูลินามีเซนโทฟิลล์ 1,690 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง Choubert (1979) รายงานว่ามีปริมาณสาร เซนโทฟิลล์ 1,700 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง Hill (1980) รายงานว่าปริมาณของสารเซนโทฟิลล์ในสาหร่ายสไปรูลินามี 1,800 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมของน้ำหนักแห้ง ขณะที่ Anderson และ Ross (1990) และ Anderson และคณะ (1991) รายงานว่าสารเซนโทฟิลล์ในสาหร่ายสไปรูลินามี 5,800 และ 5,787 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมของ น้ำหนักแห้งตามลำดับ (ตารางที่ 4) Nells และ De Leenheer (1983) รายงานว่าปริมาณของสารเซนโทฟิลล์ในสาหร่ายสไปรูลินาแตกต่างกัน เนื่องจากวิธีการวัด โดยการวัดหาเซนโทฟิลล์ด้วย Thin Layer Chromatography (TLC) ให้ค่าน้อยกว่าการวัดด้วย High Pressure Liquid Chromatography (HPLC) เนื่องจากมีความแม่นยำในการจำแนกสารน้อยกว่า

ตารางที่ 4 ปริมาณสารเซนโทฟิลล์รวมในสาหร่ายสไปรูลินา

แหล่งข้อมูล	ปริมาณ(มก./กก.น้ำหนักแห้ง)
Paolletti และคณะ (1971)	1,690 ^{2/}
Matsuno และคณะ (1974) ^{1/}	2,380 ^{2/}
Choubert (1979)	1,700 ^{2/}
Hill (1980)	1,800 ^{2/}
UNIDO (1980) ^{1/}	1,600 ^{2/}
Anderson และ Ross (1990)	5,800 ^{3/}
Anderson และคณะ (1991)	5,787 ^{3/}

หมายเหตุ: 1/ อ้างโดย Anderson และคณะ (1991)

2/ วัดด้วย TLC

3/ วัดด้วย HPLC

Anderson และคณะ (1991) รายงานว่าชนิดของสารแซนโทฟิลล์ในสาหร่ายสไปรูลินา มี ไมโซแซนโทฟิลล์ (Myxoxanthophyll), ลูทีน (Lutein), ซีแซนทีน (Zeaxanthin), อีชีนิโนน (Echinenone) และ เบตาคริפטแซนทีน (β -Cryptoxanthin) จำนวน 2,512, 21, 588, 147 และ 63 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมน้ำหนักแห้ง ตามลำดับ (ตารางที่ 5)

ตารางที่ 5 แสดงส่วนประกอบแคโรทีนอยด์ของสาหร่ายสไปรูลินา

ชนิดสารสี	(มก./กก.น้ำหนักแห้ง)
-----------	----------------------

แซนโทฟิลล์รวม (Total xanthophylls)	5,787
ไมโซแซนโทฟิลล์ (Myxoxanthophyll)	2,512
ลูทีน (Lutein)	21
ซีแซนทีน (Zeaxanthin)	588
อีชีนิโนน (Echinenone)	147
เบตาคริפטแซนทีน (β -cryptoxanthin)	63
สารแซนโทฟิลล์ที่ไม่ทราบชื่อ	2,456
แคโรทีน (Carotene)	1,141
เบตาแคโรทีน (β -carotene)	742
สารแคโรทีนที่ไม่ทราบชื่อ	399
แคโรทีนอยด์รวม (Total carotenoids)	6,928

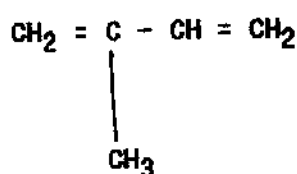
ที่มา: Anderson และคณะ (1991)

2.4 ชนิดและโครงสร้างของแคโรทีนอยด์

แคโรทีนอยด์เป็นรงควัตถุหรือสารสี (pigment) ที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติ พบได้ทั่วไปในพืช เช่น ข้าวโพด กลีบดอกดาวเรือง และสาหร่ายสีน้ำตาลเงินแกมเขียว (Tanaka et al., 1974) หัวขุ่น มันฝรั่ง แครอท และพริก (ขรรค์ชัย, 2524) สำหรับสัตว์พบในกุ้ง หอยเม่น ปลิงทะเล และปลาฉลาม (Brauernefeind, 1981) และพบในธรรมชาติประมาณ 600 ชนิด (Gerspcher et al., 1987)

แคโรทีนอยด์ แบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ตามสูตรโครงสร้างทางเคมีคือแคโรทีน (carotene) ซึ่งมีสูตรโครงสร้างเป็นไฮโดรคาร์บอน เช่น แอลฟา, เบตา และ แกมมาแคโรทีน และแคโรทีนที่มีออกซิเจนมาเกาะ (oxygenated hydrocarbon) ซึ่งเรียกว่าแซนโทฟิลล์ (xanthophylls) (Simpson et al., 1989)

แคโรทีนอยด์ ประกอบด้วยธาตุไฮโดรเจน (H) และ คาร์บอน (C) ประกอบขึ้นเป็นหน่วยโครงสร้างเรียกว่า ไอโซพรีน (isoprene) (C_5H_8) โดยอะตอมคาร์บอนเชื่อมต่อกันเป็นสายยาวด้วยพันธะคู่ (double bond) สลับพันธะเดี่ยว (single bond) และที่ปลายด้านหนึ่งหรือทั้งสองข้างมีคาร์บอนต่อกันเป็นวงแหวน (Fox และ Ververs, 1960) (รูปที่ 2)

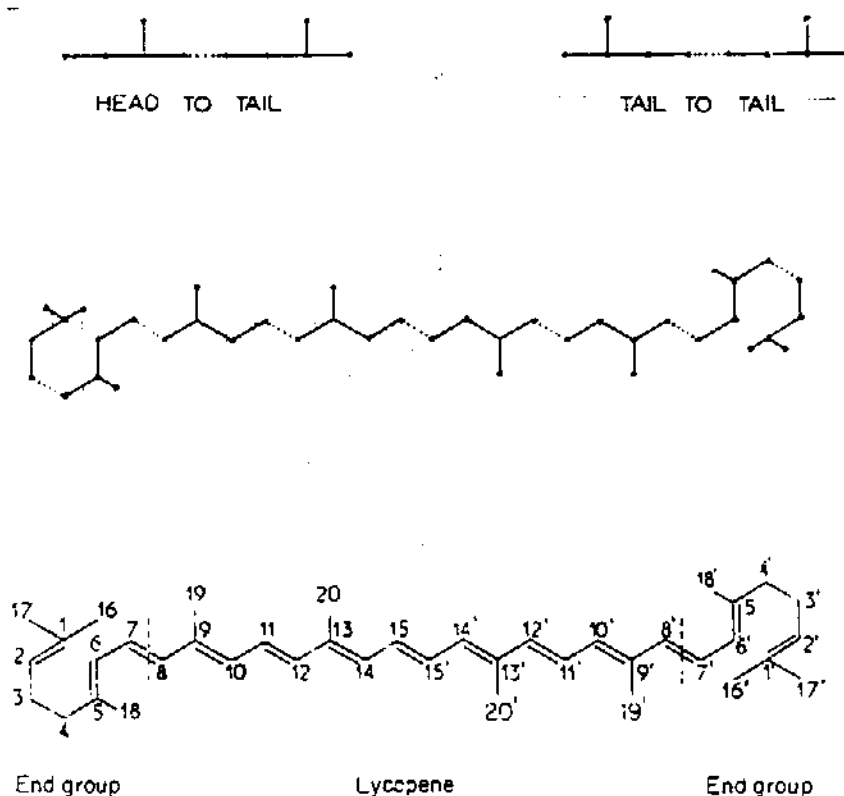


รูปที่ 2 โครงสร้างหน่วยไอโซพรีนของสารแคโรทีนอยด์

ที่มา: Fox และ Ververs (1960)

แคโรทีนอยด์ เกิดจากการเชื่อมต่อของหน่วยโครงสร้างของ ไอโซพรีน ในลักษณะหัวต่อหาง (head-to-tail) ที่ปลายทั้งสองด้านของโมเลกุล และที่ตรงกลางของโมเลกุลมีลักษณะการเชื่อมต่อแบบหางต่อหาง (tail-to-tail) จึงทำให้โมเลกุลมีลักษณะแบบสมมาตร (symmetrical molecule) โดยที่ตรงกลางของสายไอโซพรีน (isoprene chain) มีหมู่เมทิล

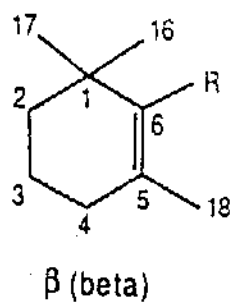
(methyl group) มาเกาะที่ตำแหน่ง C₁₉ และ C₂₀ จากตำแหน่งคาร์บอนทั้งซ้ายและขวา โดยแบ่งออกด้วยคาร์บอน 5 อะตอม (Palozza และ Krinsky, 1992) (รูปที่ 3)



รูปที่ 3 การเชื่อมต่อของหน่วยโครงสร้างไอโซพรีนในแคโรทีนอยล์

ที่มา: Palozza และ Krinsky (1992)

แคโรทีนอยล์ชนิดที่เป็นเบตาแคโรทีนประกอบขึ้นด้วยโครงสร้างของไอโซพรีน 8 หน่วยมาเชื่อมต่อกันทำให้เกิดโครงสร้างเป็นสายอะไซคลิกแคโรทีน (acyclic carotene) โดย end-group ที่ปลายทั้งสองของสายอะไซคลิกแคโรทีน จะเกิดการเปลี่ยนแปลงเป็นโครงสร้างที่เรียกว่า เบตา(β) ดังรูปที่ 4

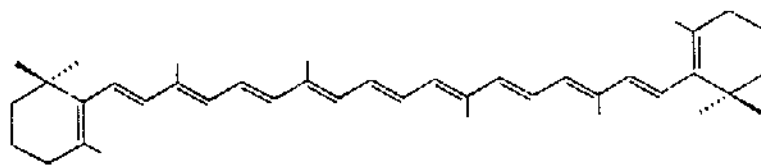


รูปที่ 4 โครงสร้างของหน่วยเบตา (β)

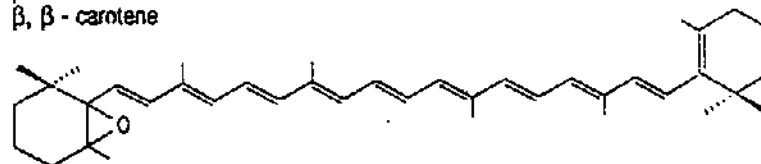
ที่มา: Palozza และ Krinsky (1992)

แซนโทฟิลล์ เป็นโครงสร้างของแคโรทีนที่มีหมู่ออกซิเจนมาเกาะ ซึ่งหมู่ออกซิเจนที่มาเกาะจำแนกออกได้ดังนี้

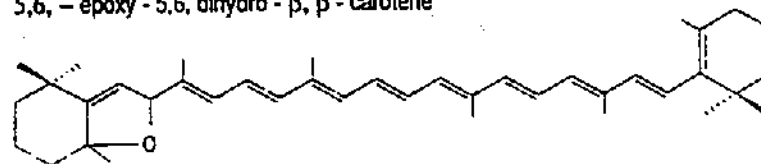
1. ไฮดรอกซี (hydroxy) ได้แก่ monoIs, diols และ polyols
2. อีพอกซี (epoxy) ได้แก่ 5,6-epoxy และ 5,8-epoxy
3. คีโต (keto) ได้แก่ monoketo, diketo และ polyketo ซึ่งแสดงดังรูปที่ 5



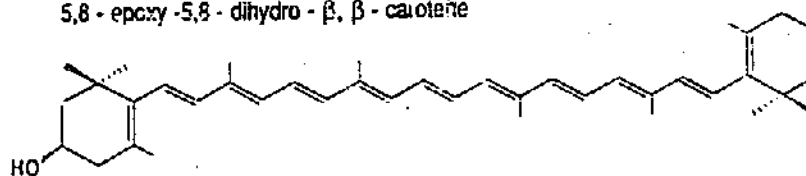
β - carotene
 β, β - carotene



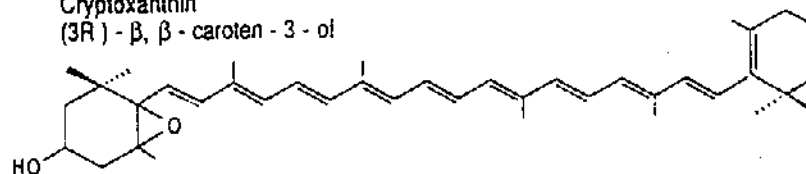
β - carotene 5,6, - epoxide
 5,6, - epoxy - 5,6, dihydro - β, β - carotene



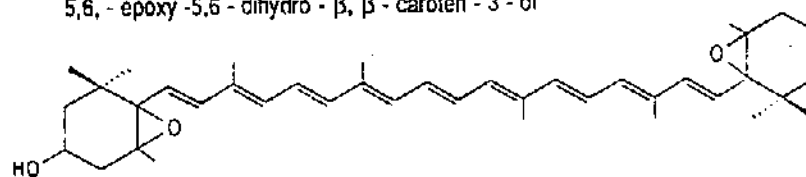
Mutauchrome
 5,8 - epoxy - 5,8 - dihydro - β, β - carotene



Cryptoxanthin
 (3R) - β, β - caroten - 3 - ol



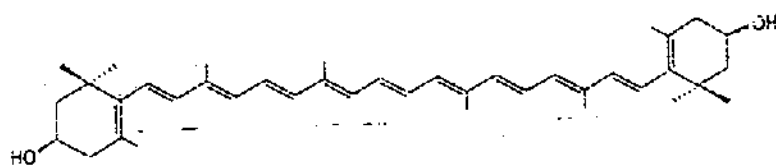
Cryptoxanthin 5,6, - epoxide
 5,6, - epoxy - 5,6 - dihydro - β, β - caroten - 3 - ol



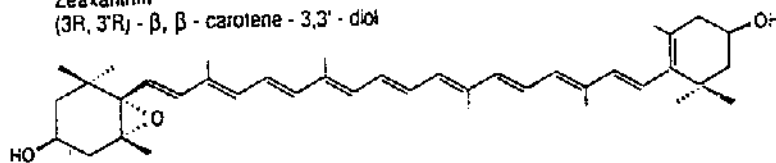
Cryptoxanthin diepoxida
 5,6,5',6' - diepoxy - 5,6,5',6' - tetrahydro - β, β - caroten - 3 - ol

รูปที่ 5 สูตรโครงสร้างสารแคโรทีนอยส์ชนิดต่างๆ

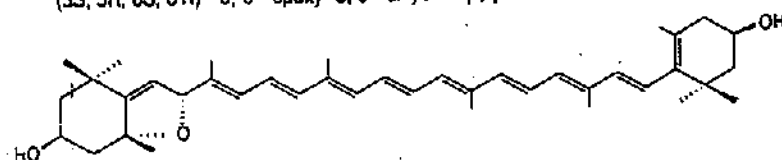
ที่มา: Polozza และ Krinsky (1992)



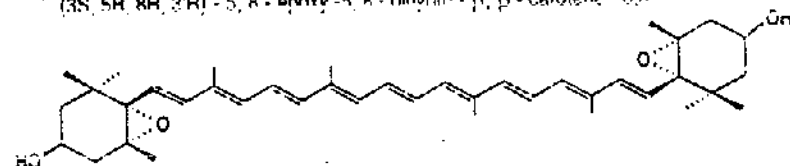
Zeaxanthin
(3R, 3'R) - β , β - carotene - 3,3' - diol



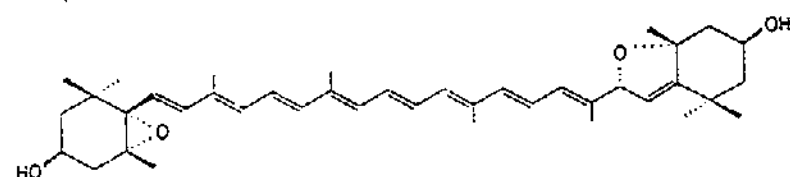
Antheraxanthin
(3S, 5R, 6S, 3'R) - 5,6 - epoxy - 5,6 - dihydro - β , β - carotene - 3,3' - diol



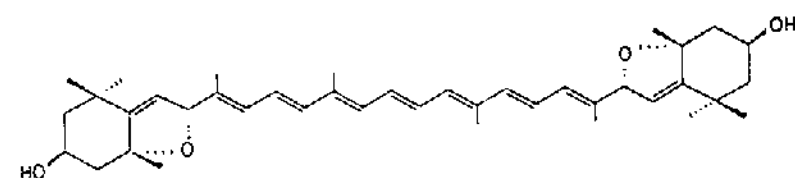
Mutaloxanthin
(3S, 5R, 8R, 3'R) - 5,8 - epoxy - 5,8 - dihydro - β , β - carotene - 3,3' - diol



Violaxanthin
(3S, 5R, 6S, 3'S, 5'R, 6'S) - 5,6,5',6' - diepoxy - 5,6,5',6' - tetrahydro - β , β - carotene - 3,3' - diol



Luteoxanthin
(3S, 5R, 6S, 3'S, 5'R, 8'R) - 5,6,5',8' - diepoxy - 5,6,5',8' - tetrahydro - β , β - carotene - diol



Auroxanthin
(3S, 5R, 8S, 3'S, 5'R, 8'R) - 5,8,5',8' - diepoxy - 5,8,5',8' - tetrahydro - β , β - carotene - diol

รูปที่ 5 สูตรโครงสร้างของสารแคโรทีนอยด์ชนิดต่างๆ (ต่อ)

ที่มา: Palozza และ Krinsky (1992)

2.5 คุณสมบัติของแคโรทีนอยล์

แคโรทีนอยล์เป็นอนุพันธ์ (derivative) ของไขมันจึงไม่ละลายน้ำ แต่ละลายได้ในตัวทำละลายไขมัน เช่น อะซิโตน (acetone), แอลกอฮอล์ (alcohol), ไดเอทิล อีเธอร์ (diethyl ether) และ คลอโรฟอร์ม (chloroform) เป็นต้น (Fox และ Ververs, 1960) แคโรทีนอยล์ชนิดที่เป็นแคโรทีนละลายได้ดีในตัวทำละลายที่ไม่มีขั้ว (nonpolar) เช่น ปิโตรเลียมอีเธอร์ (petroleum ether) และเฮกเซน (hexane) ขณะที่ แคโรทีนอยล์ชนิดที่เป็นแซนโทฟิลล์ละลายได้ดีในตัวทำละลายที่มีขั้ว (polar) เช่น แอลกอฮอล์ (Simpson et al., 1989) แคโรทีนอยล์คงทนต่อการเปลี่ยนแปลงกรด-ด่าง (pH) แต่มีความไวต่อแสงสว่างและความร้อน โดยแสงและความร้อนจะเร่งให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) โดยเฉพาะสภาวะที่มีโลหะและเปอร์ออกไซด์ (peroxide) เจือปนอยู่ (อุดม และ ชีระวรรณ, 2524)

2.6 เมตาบอลิซึมของแคโรทีนอยล์

แคโรทีนอยล์ในอาหารผ่านลงมาถึงลำไส้เล็กตรงส่วนดูโอดินัม (duodenum) จะถูกผสมให้เข้ากัน (emulsification) กับเกลือของกรดน้ำดี (bile salt) แล้วถูกดูดซึมโดยรวมตัวกับไลโปโพรตีนชนิดที่มีความหนาแน่นต่ำ (low density lipoprotein) ผ่านผนังลำไส้เข้าสู่กระแสเลือดไปยังกล้ามเนื้อและตับ (Khachik et al., 1986) สารแคโรทีนอยล์เมื่อถูกสลายที่ผนังลำไส้จะได้เบตาแคโรทีนและแคโรทีนอยล์กลุ่มอื่นๆ ซึ่งเบตาแคโรทีน จะถูกเปลี่ยนเป็นวิตามินเอที่เซลล์ผนังลำไส้ด้วยเอนไซม์ไดออกซิเจเนส (dioxygenase) ซึ่งเอนไซม์ออกซิเจเนสสามารถแยกเบตาแคโรทีน 1 โมเลกุล เป็น เรตินัล (retinal) 2 โมเลกุล ซึ่งต่อมาจะถูกออกซิไดซ์ (oxidize) ไปเป็น กรดเรติโนอิก (retinoic acid) และสามารถ ถูกรีดิวซ์ (reduce) เป็นเรติโนล (retinol) ซึ่งเป็นสารตั้งต้นของวิตามินเอ (provitamin A) (Olson, 1989) แคโรทีนอยล์ตัวอื่นนอกเหนือจากเบตาแคโรทีน จะมีความสามารถในการเปลี่ยนเป็นวิตามินเอได้น้อยกว่าเบตาแคโรทีน โดยแคโรทีนอยล์ 1 โมเลกุล สามารถเปลี่ยนเป็นเรติโนลได้เพียง 1 โมเลกุล (Bauernfeind et al., 1981) (ตารางที่ 6)

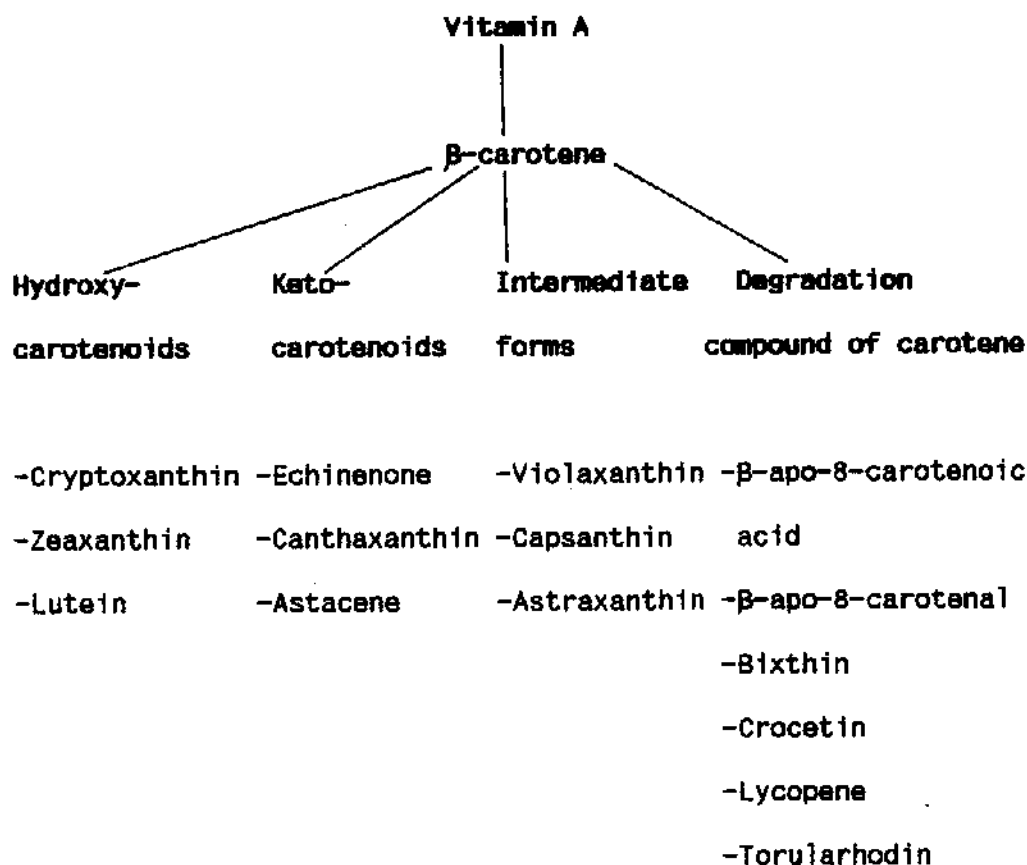
ตารางที่ 6 แสดงค่าความสามารถของแคโรทีนอยส์ในการเปลี่ยนเป็นสารตั้งต้นของวิตามิน เอ

ชนิดของแคโรทีนอยส์	ค่าความสามารถในการเปลี่ยนเป็น สารตั้งต้นของวิตามิน เอ
--------------------	--

เบตาแคโรทีน (β -carotene)	1.00
ไลโคปีน (Lycopene)	0.00
แอลฟาแคโรทีน (α -carotene)	0.50-0.54
เบตาคริปโตแซนทิน (β -cryptoxanthin)	0.50-0.60
แคนตาแซนทิน (Canthaxanthin)	0.00
ลูทีน (Lutein)	0.00
4-คีโต-เบตาแคโรทีน (4-keto- β -carotene)	0.44-0.50
เบตา-เอโป-8-แคโรทีนอล (β -apo-8-carotenol)	0.72
9-ซิส-เบตาแคโรทีน (9-cis- β -carotene)	0.50
15-ซิส-เบตาแคโรทีน (15-cis- β -carotene)	0.50

ที่มา: Bauernfeind และคณะ (1981)

เบตาแคโรทีน สามารถเปลี่ยนเป็นวิตามินเอได้ในร่างกายของสัตว์ แต่ไม่มีผลต่อการให้สี และ มีสารแคโรทีนอยส์บางตัวสามารถเปลี่ยนเป็นวิตามินเอได้ แต่ประสิทธิภาพจะต่ำกว่า เบตาแคโรทีน และมีแคโรทีนอยส์บางตัวไม่มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนเป็นวิตามินเอ แต่มีความสามารถในการให้สีโดยเข้าไปสะสมที่ผิวหนังและไข่แดง โดยไม่มีการเปลี่ยนรูป แคโรทีนอยส์ เหล่านี้เกิดจากการออกซิเดชัน (oxidation) ของเบตาแคโรทีน (Braunlich, 1974) ซึ่ง เขียนเป็นความสัมพันธ์ได้ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 การเปลี่ยนแปลงสารเบตาแคโรทีนในร่างกายสัตว์

ที่มา: Braunlich (1974)

Littlefield และคณะ (1972) รายงานว่าแคโรทีนอยล์ที่สัตว์ได้รับจากอาหารเมื่อมาถึงตับจะรวมกับไลโปโปรตีนที่มีความหนาแน่นต่ำแล้วถูกเคลื่อนย้าย (transport) เข้าไปสะสมที่ผิวหนังแข็ง จงอยปาก และไข่แดง แคโรทีนอยล์ที่มีออกซิเจนในสูตรโครงสร้างซึ่งอยู่ในรูปของไฮดรอกซี (hydroxy) จำพวก dihydroxy-carotenoids และ diketo-carotenoids ใช้ประโยชน์ในการให้สีไข่แดงได้ดีกว่าพวก monohydroxycarotenoids, monoketocarotenoids, polyoxy-carotenoids และ epoxy-carotenoids ส่วนเบตาแคโรทีน ที่ไม่มีอะตอมของ ออกซิเจน ในโมเลกุลไม่สามารถให้สีในผิวหนังไก่และไข่แดง และแคโรทีนอยล์ที่อยู่ในรูปอิสระใช้ประโยชน์ได้ดีกว่ารูปอื่นๆ

Hencken (1974) รายงานว่าสารแคโรทีนอยล์ ที่เป็นแหล่งสีในอาหารไก่ส่วนใหญ่ไม่สามารถเปลี่ยนเป็นวิตามินเอ และถูกส่งผ่านไปยังสัตว์ปีกและไข่แดงโดยไม่มีการเปลี่ยนรูป แต่มีสารแคโรทีนอยล์บางตัวซึ่งได้แก่ echinenone, cryptoxanthin, β -apo-8-carotenal, β -apo-8-carotenoic acid ethyl ester และ citraxanthin สามารถเปลี่ยนเป็นวิตามินเอและยังเป็นแหล่งให้สีในไข่แดงด้วย การย่อยได้ของสารแคโรทีนอยล์ส่วนใหญ่ขึ้นกับความสามารถในการละลาย (solubility) การเสริม emulsifiers จะทำให้การดูดซึมแคโรทีนอยล์ บางตัวดีขึ้น Braunlich (1974) รายงานว่าประสิทธิภาพการให้สีของแคโรทีนอยล์ขึ้นกับอัตราการย่อยได้ อัตราเมตาบอลิซึม (metabolic rate) ความสามารถในการสะสมเนื้อเยื่อไขมันและผิวหนัง และคุณสมบัติเฉพาะของสารสี ซึ่งคุณสมบัติเหล่านี้ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย อาทิโครงสร้างทางเคมี และการละลายได้ของสารสี

2.7 เมตาบอลิซึมของแคโรทีนอยล์ในสัตว์ปีก

Ganguly และคณะ (1953) รายงานว่าเมื่อเสริม ซีแซนทีน, คริปโตแซนทีน (cryptoxanthin) และ เบตาแคโรทีน 20.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมอาหาร พบว่า สารแคโรทีนอยล์ทั้ง 3 ชนิดจะไปปรากฏอยู่ในเลือด ตับ ไข่ และไข่แดง แต่เบตาแคโรทีนพบเพียงเล็กน้อย โดยในเลือดพบ 0.60 ไมโครกรัมต่อเลือด 100 มิลลิลิตร และเมื่อนำ คริปโตแซนทีน และ ซีแซนทีน ผสมในอาหารไก่ไข่ 20.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมอาหาร ไปเลี้ยงไก่ที่เคยได้รับอาหารที่ไม่มีแหล่งให้สารสีมาเป็นเวลา 2 สัปดาห์ พบว่าสารแคโรทีนอยล์ทั้งสองชนิด ส่วนใหญ่ปรากฏในเลือด ตับ และไข่แดง โดยที่ในเลือดมีสารซีแซนทีน 526 ไมโครกรัมต่อพลาสมา 100 มิลลิลิตร ส่วน คริปโตแซนทีน มีอยู่เพียง 213 ไมโครกรัมต่อพลาสมา 100 มิลลิลิตร และเมื่อเสริม แอลฟา และ เบตาแคโรทีน ในอาหารไก่จำนวน 20.0 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมอาหารในอาหารไก่ที่ได้รับอาหารที่ไม่มีแหล่งให้สารสีมาเป็นเวลา 2 สัปดาห์ จะพบสารทั้งสองชนิดน้อยมากโดยพบในเลือด 0.52 ไมโครกรัมต่อเลือด 100 มิลลิลิตร และที่ไข่แดงพบ 20.14 นาโนกรัมต่อกรัมของเนื้อเยื่อ นอกจากนี้ได้ทำการทดลองฉีด ซีแซนทีน, แอลฟาแคโรทีน, เบตาแคโรทีน ในรูปของสารละลาย (colloid solution) อย่างละ 5 มิลลิลิตร เข้าเส้นเลือดดำของไก่ไข่ หลังจากนั้น 24 ชั่วโมงทำการตรวจวัดสารแคโรทีนอยล์ทั้ง

สามชนิดที่ฉีด เข้าไปในพลาสมา บรากว่าไม่พบสารแคโรทีนอยล์ทั้งสามชนิด ส่วนผิวหนังไก่จะไม่พบสารแอลฟาแคโรทีน และเบตาแคโรทีน จะพบเฉพาะสารซีแซนทีน

Williams และคณะ (1962) ทำการทดลองโดยเสริมแคโรทีนอยล์ 3 ชนิดคือ ลูทีน, ซีแซนทีน และ บิกทิน (bixthin) ในอาหารลูกไก่และไก่ไข่ ที่ระดับ 18.92 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมอาหารในอาหารลูกไก่ และ 22.00 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมอาหารไก่ไข่ ซึ่งพบว่าการเสริมซีแซนทีนในอาหาร จะให้สีไข่แดงเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกลุ่มที่เสริมบิกทิน และ ลูทีน และพบว่า บิกทิน จะสะสมในไข่แดงมากกว่าลูทีน และ ซีแซนทีน แต่อย่างไรก็ตามบิกทินสะสมในซีรัม (serum), เนื้อเยื่อไขมัน (adipose tissue) และตับของลูกไก่และไก่ไข่ แต่ ลูทีน และ ซีแซนทีน สามารถสะสมได้เฉพาะในไข่แดงและผิวหนังลูกไก่ ส่วนเบตาแคโรทีนพบเพียง 10.24 นาโนกรัมต่อกกรัมของเนื้อเยื่อของตับ ส่วนเนื้อเยื่อผิวหนังไม่พบ

Norman และคณะ (1973) รายงานการใช้แคโรทีนอยล์ชนิด β -apo-8-carotenoid acid ethyl ester โดยการฉีดเข้าเส้นเลือดดำ 4 มิลลิลิตร ทำให้ระดับของ β -apo-8-carotenoid acid ethyl ester ในมูล เลือด และตับ เพิ่มขึ้นเป็น 10.25 20.00 และ 22.12 เปอร์เซ็นต์ จากระดับเดิม ตามลำดับ ขณะที่เนื้อเยื่อไขมันพบว่าเพิ่มขึ้นเพียง 5 เปอร์เซ็นต์ จากระดับเดิม และในปัสสาวะไม่มีการเพิ่มขึ้นแต่อย่างใด และเมื่อเปลี่ยนมาให้กินสารสี β -apo-8-carotenoid acid ethyl ester 20 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมอาหาร ทำให้สารสีดังกล่าวในพลาสมาเพิ่มขึ้นภายใน 2 ชั่วโมง เมื่อเปลี่ยนมาฉีดสารสีดังกล่าว 4 มิลลิลิตรเข้าเส้นเลือดดำติดต่อกันเป็นเวลา 5 วัน บรากว่าสารสี β -apo-8-carotenoid acid ethyl ester จะสะสมในไข่แดงสูงสุดคือ 17.54 นาโนกรัมต่อกกรัมของเนื้อเยื่อในวันที่ 4 หลังจากที่ได้รับครั้งแรก และในวันที่ 20 หลังจากที่ได้รับครั้งแรกจะพบสาร β -apo-8-carotenoid acid ethyl ester เพียง 25 เปอร์เซ็นต์ และเมื่อได้ทดลองให้ไก่กินสารแซนโทฟิลล์ชนิดซีแซนทีน (zeaxanthin) ในรูปน้ำมันข้าวโพด 18 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมอาหารจะเพิ่มความเข้มข้นของสารซีแซนทีนในพลาสมาสูงสุด ภายใน 6 ชั่วโมงหลังจากกินคือ 415 ไมโครกรัมต่อพลาสมา 100 มิลลิลิตร แต่ทำให้ไก่ได้รับสารซีแซนทีนในรูปผลึก พบว่าสารสีในพลาสมาจะเพิ่มขึ้นทันทีจากการศึกษาครั้งนี้พบว่า การกระจายของสารแซนโทฟิลล์ไปอยู่ตามเนื้อเยื่อส่วนต่างๆ จะเกี่ยวข้องกับการทำงานของเมตาบอลิซึมของไขมัน (lipid metabolism) การสะสมสารสีในร่างกาย หรือการกำจัดสารสีผ่านทางไข่แดงหลังจากการดูดซึมไม่ได้ถูกควบคุมโดยตัวสัตว์ แต่ถูกควบคุมโดยปริมาณสารแซนโทฟิลล์ที่กินหรือฉีดเข้าไป Duot และคณะ (1967) รายงานว่าสัตว์

การดูดซึมสารแซนโทฟิลล์ลดลงถ้าเพิ่มระดับสารแซนโทฟิลล์ในอาหารมากกว่า 83 มิลลิกรัมต่อ กิโลกรัมอาหาร ทั้งนี้เนื่องจากปริมาณสารแซนโทฟิลล์ ในอาหารมากเกินไปจนความสามารถ ของลำไส้ที่จะดูดซึมได้ และพบว่าปริมาณสารแซนโทฟิลล์ในอาหารมีสัมพันธ์เป็นบวกกับปริมาณ สารแซนโทฟิลล์ในผิวหนัง และในซีรัม แต่มีค่าสหสัมพันธ์เป็นลบกับการดูดซึมแซนโทฟิลล์ Marusich และ Bauerfiend (1970) รายงานว่าเมื่อใช้สารแซนโทฟิลล์ชนิดซีแซนทีนจำนวน 1 มิลลิกรัมในอาหารไก่ไข่ต่อแม่ไก่ 1 ตัวต่อวัน พบว่าค่าคะแนนสีไข่แดงเพิ่มขึ้น 35-40 เบอร์เซนต์เมื่อเทียบกับไก่ไข่ที่ไม่ใช้สารแซนโทฟิลล์ชนิดซีแซนทีน แต่เมื่อเพิ่มสารแซนโทฟิลล์ชนิด ซีแซนทีนในอาหารเป็น 5 มิลลิกรัมต่อตัวต่อวันหรือมากกว่า พบว่าจะเพิ่มสีไข่แดงเป็น 15-20 เบอร์เซนต์ จากพวกที่ไม่ใช้สารแซนโทฟิลล์ในอาหาร ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มสาร แซนโทฟิลล์ในอาหารมากเกินไปทำให้การสะสมเม็ดสีลดลง เนื่องจากปริมาณสารแซนโทฟิลล์ มากเกินไปกว่าที่ลำไส้จะสามารถดูดซึมได้

Marusich และคณะ (1960) Farr และคณะ (1961) รายงานว่าการให้อาหาร เสริม canthaxanthin ในระดับ 1.0 และ 2.0 มิลลิกรัมต่อตัวต่อวัน เป็นเวลานาน 8 วัน ทำให้การสะสมแคโรทีนอยส์ ในไข่สูงสุดในวันที่ 9 และสีไข่แดงคงที่ต่อไปจนถึงวันที่ 11 หลังจากให้อาหาร แต่จากนั้นก็ลดลง Sullivan และ Holman (1962) ให้สารสี isoeaxanthin dimethyl ether ในรูปสารละลายไขมันที่ระดับ 0.25, 0.5 และ 1.0 มิลลิกรัมต่อตัวต่อวัน เป็นเวลานาน 16 วัน การสะสมแคโรทีนอยส์ สูงสุดในวันที่ 10 และคงที่ตลอดไปจนถึงวันที่ 19 หลังจากได้รับแหล่งสี ส่วน Treat (1964) รายงานว่า การสะสมสีไข่แดงจะสูงสุดในวันที่ 15 หลังจากไก่ไข่ได้รับอาหารที่เสริมด้วยสารแซนโทฟิลล์ 1.5 มิลลิกรัมต่อตัวต่อวัน

2.8 ปัจจัยที่มีผลต่อการใช้ประโยชน์ของแคโรทีนอยส์ในสัตว์ปีก

1. วิตามิน เอ

แคโรทีนอยส์ มีสูตรโครงสร้างที่สัมพันธ์กับวิตามินเอ และแคโรทีนอยส์ชนิดที่เรียกว่า เบตาแคโรทีน สามารถเปลี่ยนแปลงเป็นวิตามินเอในร่างกายของสัตว์ได้ (Braunlich, 1974)

การดูดซึมสารแคโรทีนอยล์ผ่านเยื่อที่ผนังลำไส้จะเกิดขึ้นได้น้อย เมื่อมีระดับของวิตามินเอในอาหารมากกว่า 79,200 หน่วยสากลต่อกิโลกรัมของอาหาร เนื่องจากเกิดการแย่งกันในการถูกดูดซึม (Farr et al., 1962) การแก่งแย่งในการถูกดูดซึมผ่านผนังลำไส้จะเกิดมากขึ้น เมื่อมีระดับของไขมันในอาหารน้อยกว่า 3 เปอร์เซ็นต์ (Madiedo และ Sunde, 1964)

Dua และ Day (1964) รายงานว่าการเสริมวิตามินเอในระดับ 17,600, 26,400 และ 198,000 หน่วยสากลต่อกิโลกรัมของอาหารไก่เนื้อที่ได้รับลูทีน 24 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมอาหารจะทำให้การสะสมลูทีนในพังผืดนิ้วเท้า (toe web) ลดลงจาก 69 เป็น 37 ไมโครกรัมต่อพื้นที่พังผืดนิ้วเท้า 100 ตารางเซนติเมตร และ พลาสมาของไก่ลดลงจาก 107 เป็น 71 ไมโครกรัมต่อ 100 มิลลิลิตร นอกจากนี้ยังพบว่ามีสหสัมพันธ์ระหว่างสีของพังผืดนิ้วเท้ากับปริมาณสารลูทีนในพลาสมาของไก่เนื้อ คือค่า $r^2=0.743$ ที่อายุ 4 สัปดาห์ และ $r^2=0.884$ ที่อายุ 8 สัปดาห์ ตามลำดับ ซึ่งหมายความว่าสีของพังผืดนิ้วเท้าและสารลูทีนในพลาสมาของไก่เนื้อเพิ่มขึ้นและลดลงในอัตราที่ใกล้เคียงกัน

Dua และคณะ (1966) รายงานว่าการเสริมวิตามินเอในระดับ 4,400, 26,400 158,400 และ 475,200 หน่วยสากลต่อกิโลกรัมของอาหารที่มีสารซีแซนทีน อยู่ 21 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม ไม่ทำให้หนักตัวเพิ่มขึ้นของไก่เนื้อ และประสิทธิภาพการใช้อาหารก็ลดลง แต่จะทำให้การดูดซึมสารซีแซนทีนลดลงตามลำดับคือ 66.5, 49.3 และ 39.3 เปอร์เซ็นต์ เมื่อไก่ได้รับแคโรทีนอยล์ ทั้งหมด 360,373 และ 380 มิลลิกรัมต่อตัวต่อวัน ตามลำดับ

Hayes (1966) รายงานว่าการใช้วิตามินเอเกินระดับ 52,800 หน่วยสากลต่อกิโลกรัมของอาหารไก่ไข่ จะทำให้สีของไข่แดงจางลง ทานองเดียวกัน Madiedo และ Sunde (1964) และ Farr และคณะ (1962) รายงานว่าการเสริมวิตามินเอในระดับ 68,800 หน่วยสากลต่อกิโลกรัมอาหารจะทำให้สีของไข่แดงจางลง อย่างไรก็ตามการเสริมโซลูต์ในระดับ 3 เปอร์เซ็นต์ ในอาหารจะทำให้สามารถเพิ่มวิตามินเอจนถึง 79,200 หน่วยสากลต่อกิโลกรัมของอาหารโดยไม่มีผลต่อการเพิ่มหรือลดการสะสมเม็ดสีในไข่แดง ซึ่งชี้ให้เห็นว่า มีการแก่งแย่งกันระหว่างวิตามินเอและแคโรทีนอยล์ในการดูดซึมเมื่ออยู่ในสภาวะที่มีไขมันต่ำ แต่ถ้าในอาหารนั้นมีไขมันในอาหารอย่างเพียงพอก็จะไม่เกิดการแก่งแย่งกันขึ้น

Deuel และคณะ (1943) (อ้างโดย สุวรรณ, 2522) ได้ทำการทดลองในไก่พันธุ์ เล็กฮอร์นโดยให้อาหารพื้นฐานที่มีแคโรทีนอยล์ อยู่ในระดับ 22 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมอาหาร แต่ไม่มีวิตามินเออยู่เลยในช่วงเวลาหนึ่ง จากนั้นจึงเสริมวิตามินเอในรูปไขมันปลาฉลาม (วิตามินเอ)

20,000 หน่วยสากลต่อกรัม) ในระดับ 2,200, 4,400, 33,000, 66,000, 132,000, 220,000 และ 440,000 หน่วยสากลต่อกิโลกรัมอาหารและ ได้ป้องกันการสูญเสียวิตามินเอ โดยผสมอาหารแต่ละน้อยแต่บ่อยครั้ง พบว่าปริมาณสารแคโรทีนอยส์ในไข่แดงไม่ถูกรบกวน เมื่อ เสริมวิตามินเอในระดับ 2,200 และ 4,400 หน่วยสากล แต่จะลดลงทุกระดับวิตามินเอใน อาหารที่สูงเกิน 33,000 หน่วยสากลต่อกิโลกรัมอาหาร และปริมาณแคโรทีนอยส์ในไข่แดง ลดลงไปถึง 25 เปอร์เซ็นต์ในกลุ่มที่ได้รับวิตามินเอในระดับสูงสุด ปริมาณของแคโรทีนอยส์ ในซีรัมของเลือด คับ และไขมันในร่างกายจะลดลงเมื่อระดับของวิตามินเอเพิ่มขึ้น ทางด้าน วิตามินเอ พบว่าในซีรัมมีวิตามินเอค่อนข้างคงที่ ส่วนในตับและไขมันในร่างกายจะมีเพิ่มขึ้น เมื่อระดับของวิตามินเอในอาหารเพิ่มขึ้น ในทำนองเดียววิตามินเอในไข่จะสูงขึ้นถ้าระดับวิตามิน เอในอาหารสูงเกิน 33,000 หน่วยสากลต่อกิโลกรัมอาหาร

2. พันธุ์และสายพันธุ์

ปริมาณของสีผิวหนังและหน้าแข็งของไก่พันธุ์แปรไปตามพันธุ์ สายพันธุ์ เพศของ สัตว์ และสภาวะแวดล้อมต่างๆ

Scott และคณะ (1967) รายงานว่าไก่ที่อยู่สายพันธุ์เดียวกันความสามารถในการ ดูดซึมและการสะสมแซนโทฟิลล์แตกต่างกัน และไก่เพศผู้จะให้สีเข้มเข้มกว่าไก่ตัวเมีย ขณะที่ ไก่เพศเมียให้สีผิวหนังเข้มกว่าไก่ตัวผู้ Collin และคณะ (1955) (อ้างโดย Herrick et al., 1970) ได้ศึกษาถึงอิทธิพลของพันธุ์และสายพันธุ์ต่อสีแข็งของไก่ที่กำบังเจริญเติบโตพบว่า สีหน้าแข็งไก่พันธุ์ New Hampshires ให้สีเข้มกว่าพันธุ์ White Plymouth Rock

Fletcher และคณะ (1977) รายงานจากการศึกษาไก่ทางการค้า 12 สายพันธุ์ พบว่าไก่แต่ละสายพันธุ์มีความสามารถในการสะสมเม็ดสีในไข่แดงแตกต่างกัน ทั้งนี้เนื่องจากพันธุ์ และสายพันธุ์ของสัตว์สามารถควบคุมเมตาบอลิซึมที่มีผลต่อการสะสมเม็ดสีในไข่แดงและสีใน ร่างกายได้

3. อายุสัตว์

Day และ Williams (1958) รายงานว่าไก่เนื้อในระยะการเจริญเติบโตมีความ

สามารถใช้ประโยชน์ของสารแซนโทฟิลล์สูง ดังนั้นการให้อาหารที่มีระดับ แซนโทฟิลล์ต่ำในช่วง อายุ 4-5 สัปดาห์ จะให้สีหน้าแข็งและสีผิวหนังจางกว่าเลี้ยงในช่วง 8-9 สัปดาห์เมื่อ อาหารนั้นมีระดับแซนโทฟิลล์เท่ากัน อย่างไรก็ตามการให้อาหารที่มีแซนโทฟิลล์ ในช่วง 3 สัปดาห์สุดท้าย จะให้สีไม่เพียงพอกับความต้องการ Bartov และ Bornstein (1969) รายงานว่า ไก่เนื้อที่ได้รับอาหารที่มีสารแซนโทฟิลล์ในระดับต่ำในระยะแรก (starter) มี ประสิทธิภาพในการใช้ประโยชน์จากสารแซนโทฟิลล์ สูงกว่าในระยะหลังของการเจริญเติบโต (finisher) ไก่เนื้อที่เลี้ยงจาก 0-7 สัปดาห์ด้วยอาหารที่มีแซนโทฟิลล์ระดับต่ำคือ 1.7 ไมโครกรัมต่อกรัมอาหาร จากนั้นเลี้ยงด้วยอาหารที่มีระดับแซนโทฟิลล์สูงคือ 24.6 ไมโครกรัม ต่อกรัมอาหารเป็นเวลา 4 สัปดาห์ พบว่าสีของหน้าแข้งที่ได้ยังต่ำกว่าพวกที่ได้รับอาหารอาหาร ที่ได้รับอาหารระดับสูงตลอดระยะเวลาการทดลอง Marusich และ Bauernfeind (1970) พบว่าการใช้แซนโทฟิลล์ในช่วง 3-5 สัปดาห์สุดท้ายก่อนฆ่าจะให้สีผิวหนังและหน้าแข้งดีกว่า พวกที่ให้เพียง 1 สัปดาห์ก่อนฆ่าถึง 50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อให้ระดับแซนโทฟิลล์ ที่เท่ากัน ซึ่งชี้ให้เห็นว่าถึงแม้การใช้ประโยชน์จากสาร แซนโทฟิลล์จะดีในช่วงหลังของการเจริญเติบโต แต่ก้ ให้นานช่วงเวลาที่ดีนั้นก็ทำให้การสะสมเม็ดสีในไก่ไม่เพียงพอความต้องการ ส่วนในไก่ไข่ไม่มี อิทธิพลในด้านอายุต่อการสะสมสารสีในไข่แดง

4. ไขมัน

Heath และ Shaffner (1972) รายงานว่าเมื่อทดลองเลี้ยงไก่เนื้ออายุ 1 วันให้ ได้รับอาหารที่เสริมสารแซนโทฟิลล์ชนิดซีแซนทีน 22 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมอาหาร และเสริมไขมัน กัวเหลียงในระดับ 4, 7 และ 10 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งให้พลังงานที่ใช้ประโยชน์ได้เป็น 2.17, 2.35 และ 2.53 แคลอรีต่อมิลลิกรัมของแซนโทฟิลล์ ตามลำดับ โดยให้อาหารแบบไม่จำกัด ตั้งแต่อายุ 1 วันถึง 8 สัปดาห์ แล้วทำการฆ่าเพื่อวัดปริมาณแซนโทฟิลล์ที่สะสมในซากที่อายุ 8 สัปดาห์ พบว่าการเพิ่มระดับไขมันกัวเหลียงในอาหารไก่ ทำให้ปริมาณแซนโทฟิลล์ในผิวหนังและ เนื้อเยื่อของไก่เนื้อสูงขึ้นจาก 12.30 เป็น 17.11 นาโนกรัมต่อกรัมเนื้อเยื่อผิวหนัง และ 16.00 เป็น 20.03 นาโนกรัมต่อกรัมของเนื้อเยื่อตับนอกจากนี้ยังมีผลทำให้มีไขมันในซาก และ ปริมาณไขมันในซากเพิ่มขึ้นด้วย

Quackenbush และคณะ (1965) และ Day และ Williams (1958) รายงานว่า



การเสริมโซลุ่มและโซวัวในระดับ 2, 5 และ 10 เปอร์เซนต์ ในอาหารจะเพิ่มการใช้ประโยชน์จากสารแซนโทฟิลล์อย่างมีนัยสำคัญ และ Mackay และคณะ (1963) พบว่าการเสริมโซลุ่มที่มีกรดไขมันอิ่มตัว (saturated fatty acid) สูงๆ จะเพิ่มการสะสมเม็ดสีแคโรทีนอยล์ในไข่แดง ทั้งนี้เนื่องจากไขมันไปช่วยเพิ่มการสะสมสารสีในไข่แดง อย่างไรก็ตาม Sullivan และ Holeman (1962) รายงานว่าการเสริมโซวัวในระดับ 4 เปอร์เซนต์ ในอาหารไม่มีผลการสะสมเม็ดสีในไข่ Madico และ Sunde (1964) รายงานว่าการใช้กรดไขมันไม่อิ่มตัว (unsaturated fatty acid) ที่ได้จากเมล็ดดอกคำฝอย ในระดับ 5 เปอร์เซนต์ ไม่ทำให้ค่าคะแนนสีไข่แดงเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับกลุ่มที่ได้รับไขมันไม่อิ่มตัวที่ได้จากเมล็ดดอกคำฝอยที่ระดับ 2 เปอร์เซนต์ และ Herrick (1970) พบว่าการเสริมโซลุ่มระดับ 5 เปอร์เซนต์ ไม่ทำให้การสะสมเม็ดสีในไข่เนื้อช่วงอายุ 4-8 สัปดาห์เพิ่มขึ้น

5. อุณหภูมิ

Dua และ Day (1964) รายงานว่าในระหว่างฤดูร้อนสารสีที่มีอยู่ในอาหารถูกทำลายโดยขบวนการออกซิเดชันจึงทำให้ไก่ได้รับสารแคโรทีนอยล์น้อยกว่าฤดูหนาวในปีเดียวกัน Treat (1964) รายงานว่าความต้องการสารแซนโทฟิลล์ในฤดูใบไม้ร่วงและฤดูใบไม้ผลิสูงกว่าในฤดูหนาว 10 เปอร์เซนต์ เนื่องจากฤดูดังกล่าวสัตว์มีปริมาณการกินอาหารน้อย ทำให้สัตว์ได้รับสารแซนโทฟิลล์ไม่เพียงพอ Merck Serviceman's Memo (1964) (อ้างโดย สุวรรณ, 2522) รายงานว่าในฤดูร้อนควรเพิ่มระดับของแซนโทฟิลล์ ในอาหารให้สูงกว่าฤดูหนาว ทั้งนี้เพราะว่าในฤดูร้อนสัตว์กินอาหารได้น้อยกว่าฤดูหนาว เป็นเหตุให้สัตว์ได้รับแซนโทฟิลล์น้อยลง และในฤดูร้อนแซนโทฟิลล์ ยังถูกทำลายสูงโดยขบวนการออกซิเดชัน

6. โรค

Ruff และ Fuller (1975) รายงานว่าระดับของสารแคโรทีนอยล์ในพลาสมาของไก่เนื้อลดลงเมื่อได้รับเชื้อ Eimeria acervulina และ เชื้อ E. tenella โดยที่เชื้อสองตัวนี้มีกลไกการทำงานที่แตกต่างกันคือเชื้อ E. acervulina จะไปรบกวนการดูดซึมสารแคโรทีนอยล์ในลำไส้เล็ก ส่วน E. tenella จะไปทำลายผนังของลำไส้ใหญ่ สำหรับ

ลูกไก่ที่ไม่ได้รับเชื้อทั้งสองชนิดข้างต้นแต่ได้รับอาหารที่มีสารแคโรทีนอยส์สูงคือ 24 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมอาหาร และต่ำคือ 12 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมอาหาร โดยให้สลับกัน พบว่าแคโรทีนอยส์ในพลาสมามีการเปลี่ยนแปลงอย่างรวดเร็วมากกว่าการเปลี่ยนแปลงของสีผิวหนังไม่ว่าวัดโดยใช้ฟอสฟอโรเซนหรือจากการวิเคราะห์หาปริมาณแคโรทีนอยส์ในผิวหนังแข็ง Ruff และคณะ (1974) ได้ทำการทดลองให้เชื้อ *E. acervulina*, *E. mivati*, *E. maxima*, *E. necatrix*, *E. brunetti* และ *E. tenella* ในอาหารลูกไก่อายุ 1 วัน ซึ่งเสริมเบตาแคโรทีนและซีแซนทีนในระดับ 3.20 และ 12.94 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมอาหาร ปรากฏว่าซีแซนทีนในพลาสมาของลูกไก่เนื้อที่ได้รับเชื้อต่ำกว่าพวกที่ไม่ได้รับเชื้อดังกล่าว (120 กับ 231 ไมโครกรัมต่อพลาสมา 100 มิลลิลิตร) โดยพบว่าการลดลงในวันที่ 4 และมีการลดลงมากที่สุดในวันที่ 8 โดยที่ *E. tenella* ลดลง 49.8 เปอร์เซ็นต์ และมีการตายเกิดขึ้น ส่วนพวกที่เหลือลดลง 62.74 เปอร์เซ็นต์

7. แคลเซียม

โกเมศ (2523) รายงานว่าอาหารไก่ไข่ที่มีแคลเซียมสูง จะมีผลทำให้การสะสมเม็ดสีของไข่แดงลดลง โดยพบว่าอาหารที่มีสารสี ซิตราแซนทีน (citraxanthene) มีปริมาณ 1 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม หากเพิ่มแคลเซียมจาก 2.5 เป็น 3.5 เปอร์เซ็นต์ จะต้องเพิ่มสารสีซิตราแซนทีนเป็น 1.7 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมอาหาร จึงจะทำให้สีไข่แดงของไก่ไข่มีความเข้มสีคงเดิม

2.9 ผลของสารช่วยสลายไขมันต่อการเติบโตและสีของไข่แดง

Ross และ Dominy (1990) รายงานว่า เมื่อไก่เนื้อได้รับอาหารที่เสริมสารช่วยสลายไขมันที่ระดับ 10, 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์ ของอาหารตั้งแต่แรกเกิด พบว่าไก่ที่อายุ 7 วัน ไก่มีการเจริญเติบโตลดลงเป็น 167, 165 และ 146 กรัม ตามลำดับ ในทำนองเดียวกัน Becker และ Venkataraman (1982) (อ้างโดย Ross และ Dominy, 1990) รายงานว่าการเสริมสารช่วยสลายไขมันที่ระดับ 5 และ 10 เปอร์เซ็นต์ ในอาหารไก่เนื้อทำให้ไก่มีอัตราการเจริญเติบโตลดลง ส่วน Blum และ Calot (1976) (อ้างโดย Ross

และ Dominy, 1990) พบว่าการเสริมสาหร่ายสไปรูลินาที่ระดับ 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ของอาหาร ไม่ทำให้อัตราการเจริญเติบโตลดลง แต่เมื่อเสริมสาหร่ายที่ระดับ 10 และ 20 เปอร์เซ็นต์ ทำให้อัตราการเจริญเติบโตลดลง อย่างไรก็ตาม Yoshida และ Hoshii (1980) รายงานว่าการเสริมสาหร่ายที่ระดับ 20 เปอร์เซ็นต์ ไม่ทำให้การเจริญเติบโตลดลง และอธิบายว่าคุณภาพสาหร่ายสไปรูลินาอาจเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของไก่เนื้อ เนื่องจากสาหร่ายสไปรูลินาจะขาดกรดอะมิโนที่มีซัลเฟอร์เป็นองค์ประกอบ และมีปริมาณของกรดอะมิโนไลซีนน้อย ดังนั้นการใช้สาหร่ายสไปรูลินาเสริมในอาหารที่ระดับสูง 10 ถึง 20 เปอร์เซ็นต์ การเสริมกรดอะมิโนเหล่านี้ให้สัตว์ได้รับอย่างพอเพียง

Tanaka และคณะ (1974) (อ้างโดย Bauernfeind, 1981) รายงานว่าการใช้สารแคโรทีนอยล์ที่สกัดจากข้าวโพด หัวยาง และสาหร่ายสไปรูลินา เสริมในอาหารเลี้ยงกุ้งกุลาดำ (*Penaeus japonicus*) พบว่า มีการสะสมสารสีแคโรทีนในตัวกุ้งเพิ่มขึ้น มะลิ และ วุฒิพร (2529) ซึ่งใช้แกลบกุ้ง หอย แมลงงู กลีบดอกดาวเรือง ฟักทอง และสาหร่ายสไปรูลินา เป็นแหล่งแคโรทีนอยล์ ในการเลี้ยงปลาแพนซีคาร์ฟ พบว่ากลุ่มที่ได้รับสาหร่ายสไปรูลินาที่ระดับ 15 เปอร์เซ็นต์ มีความเข้มสีปลาสูงกว่าปลาที่ได้รับอาหารทดลองอื่น สอดคล้องกับรายงานของ ประวิทย์ และสุชุม (2530) ทดลองเลี้ยงปลาแพนซีคาร์ฟด้วยสาหร่ายสไปรูลินา ที่ระดับ 0, 5, 10, 15 และ 20 เปอร์เซ็นต์ พบว่าสมรรถภาพการผลิตของปลาไม่แตกต่างกัน แต่ปลาที่ได้รับอาหารผสมสาหร่ายสไปรูลินาระดับ 0 เปอร์เซ็นต์ ให้สีจางกว่าปลาชุดทดลองอื่น และที่เสริมสาหร่ายสไปรูลินาระดับ 20 เปอร์เซ็นต์ จะให้ความเข้มสีผิวหนังของปลาแพนซีคาร์ฟ มากที่สุด

× Avila และ Cuca (1974) (อ้างโดย Anderson และคณะ, 1991) รายงานว่าอาหารที่เสริมด้วยสาหร่ายสไปรูลินาให้มีแคโรทีนอยล์ 30 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัมอาหารเมื่อเลี้ยงไก่พันธุ์ เล็กฮอร์นขาว จะให้สีไข่แดงเข้มกว่าอาหารที่เสริมด้วยดอกดาวเรือง เมื่อมีปริมาณแคโรทีนอยล์เท่ากัน Venkataraman (1983) รายงานการใช้สาหร่ายสไปรูลินาเป็นแหล่งโปรตีนทดแทนกากถั่วเหลือง กากถั่วลิสง และปลาป่น พบว่าการใช้สาหร่ายสไปรูลินาแทนกากถั่ว 12 เปอร์เซ็นต์ ให้ผลดีกว่าทดแทนปลาป่น และมีผลทำให้สีไข่แดงเข้มขึ้นจากคะแนน 9.0 เป็น 12.1 เมื่อวัดด้วยพิคส์โรซ

Ross และ Dominy (1990) รายงานว่าเสริมสาหร่ายสไปรูลินาที่ระดับ 1.5, 3.0, 6.0 และ 12.0 เปอร์เซ็นต์ของอาหารนกกระทาไข่ ไม่มีผลต่อผลผลิตไข่ และคุณภาพไข่ ยกเว้นสีของไข่แดง เพิ่มขึ้นตามระดับของการเสริมสาหร่ายสไปรูลินา และแตกต่างจากกลุ่ม

เปรียบเทียบ โดยสีโซ่แดงที่ไม่เสริมสาหร่ายสไปรูลินามีค่า 4.9 คะแนน และการเสริม 12 เปอร์เซ็นต์ มีค่า 12.2 คะแนนเมื่อวัดด้วยดัชนีของโรซ Vichutripop และ Peerapornpisal (1990) รายงานว่าเมื่อเสริมสาหร่ายสไปรูลินาระดับ 5, 10 และ 15 เปอร์เซ็นต์ในอาหารนกกระทาไข่ พบว่าผลผลิตไข่ น้ำหนักไข่ และความหนาของเปลือกไข่ไม่แตกต่างกัน ยกเว้นสีโซ่แดงของนกกระทาเพิ่มขึ้นเมื่อระดับสาหร่ายเพิ่มขึ้น Anderson และคณะ (1991) รายงานว่าสาหร่ายเมื่อเสริมที่ระดับ 0.25, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 และ 4.0 เปอร์เซ็นต์ในอาหารนกกระทาไข่ ทุกระดับของการเสริมสาหร่ายสไปรูลินาให้สีโซ่แดงเพิ่มขึ้นมากกว่ากลุ่มควบคุม และระดับการเสริม 1 เปอร์เซ็นต์ ในอาหารจะให้สีโซ่แดงที่เหมาะสม (8.3 คะแนน) และคุ่มค่าทางเศรษฐกิจ (ตารางที่ 7) และ Anderson และ Ross (1990) รายงานว่าการเสริมสาหร่ายสไปรูลินา 0.5 และ 1.0 เปอร์เซ็นต์ในอาหารนกกระทาไข่ ให้ความเหมาะสมของสีโซ่แดงตามความต้องการของตลาด

ตารางที่ 7 ค่าคะแนนสีโซ่แดงเทียบกับสีฟัดโรซ*เมื่อเสริมสาหร่ายสไปรูลินา

สาหร่ายสไปรูลินา ในอาหาร (เปอร์เซ็นต์)	แหล่งข้อมูล		
	Anderson และคณะ (1991)	Vichutripop และ Peerapornpisal (1990)	Ross และ Dominy (1990)
	ค่าคะแนนสีฟัดโรซ		
0.00	1.6	4.0	4.9
0.25	3.5	n.a	n.a
0.50	6.1	n.a	n.a
1.00	8.3	n.a	n.a
1.50	n.a	n.a	8.2
2.00	10.5	n.a	n.a

ตารางที่ 7 ค่าคะแนนลิโซ่แดงเทียบกับสีหัตโรช*เมื่อเสริมสาหร่ายสไปรูไลนา (ต่อ)

สาหร่ายสไปรูไลนา		แหล่งข้อมูล	
ในอาหาร (เปอร์เซ็นต์)			
	Anderson และคณะ (1991)	Vichutripop และ Peerapornpisal (1990)	Ross และ Dominy (1990)
ค่าคะแนนสีหัตโรช			
3.00	n.a	n.a	9.9
4.00	12.8	n.a	n.a
5.00	n.a	12	n.a
6.00	n.a	n.a	11.5
10.00	n.a	13	n.a
12.00	n.a	n.a	12.2
15.00	n.a	14	n.a

หมายเหตุ: * สีหัตโรชมีค่าคะแนนสี 1-15 คะแนน

n.a = ไม่มีข้อมูล