# บทที่ 2
# แนวคิด ทฤษฎี เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

## สาหร่ายสไปรูลิน่า

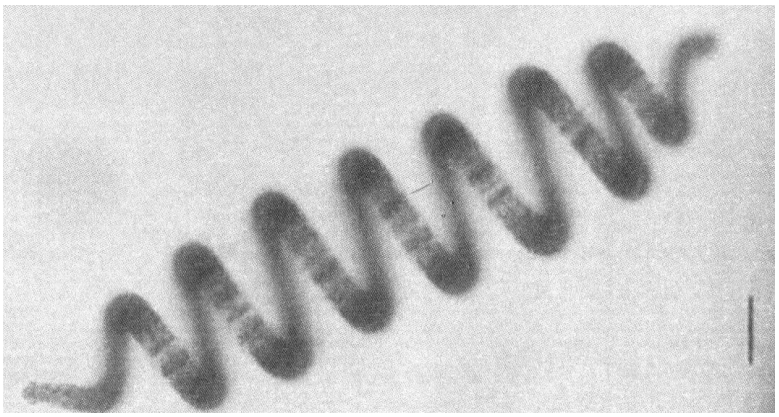
### 1. ลักษณะทางชีววิทยาของสาหร่ายสไปรูลิน่า

สาหร่ายสไปรูลิน่า (*Spirulina* sp.) หรือ หรือสาหร่ายเกลียวทอง จัดเป็นสาหร่ายขนาดเล็ก (Microalgae) ที่มองไม่เห็นด้วยตาเปล่า นิยมนำมาบริโภคเป็นอาหารโปรตีนมาหลายศตวรรษ ถูกค้นพบครั้งแรกโดยแยกได้จากตัวอย่างน้ำจืด (Ciferri, 1983, pp. 551–578) Bergey's Manual of Systematic Bacteriology ได้บรรยายลักษณะของสาหร่ายชนิดนี้ไว้ว่า “ไตรโคมมีลักษณะเป็นเกลียวหลวม ๆ มีความกว้าง 3–12 ไมโครเมตร มีความยาวประมาณ 500 ไมโครเมตร และพบมากในเขตร้อน (Tropic) และใกล้เขตร้อน (Subtropic)” (Castenholz, 1989) ซึ่งในสารบบการจำแนกสายพันธุ์นั้น สาหร่ายสไปรูลิน่าถูกจัดไว้ดังนี้

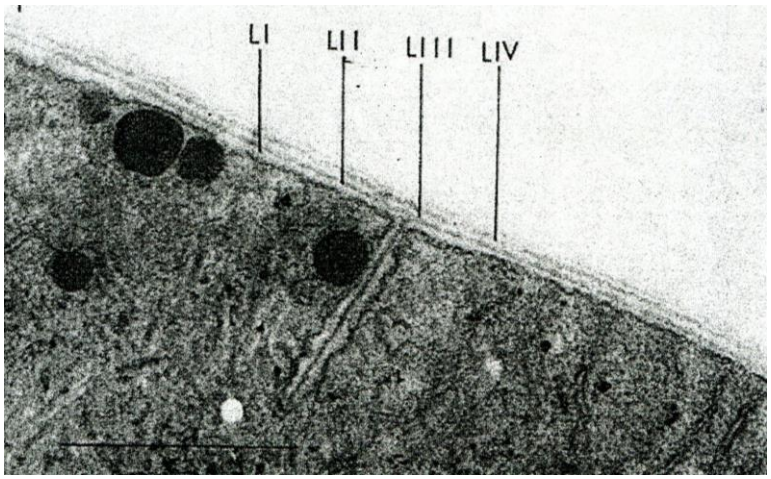
Division: *Cyanophyta*
Class: *Cyanophyceae*
Order: *Oscillatoriale*
Family: *Oscillatoriaceae*
Genus: *Spirulina*

สาหร่ายสไปรูลิน่ามีลักษณะเป็นเส้นสายที่ขดวนไปมาเหมือนสปริง (Trichome) เซลล์ลักษณะทรงกระบอกเรียงต่อกันไม่มีกิ่งก้านและบิดตัวเป็นเกลียว โดยจะเคลื่อนที่ไปตามแนวแกน (ภาพที่ 2.1) โดยสายพันธุ์ที่มีความสำคัญมากที่สุดคือ *S. platensis* และ *S. maxima* (สมบูรณ์ ผู้พัฒน์, 2538) เส้นใยที่มีลักษณะบิดตัวเป็นเกลียวประกอบด้วยเซลล์หนึ่งเซลล์หรือหลายเซลล์มาเรียงต่อกันเป็นเส้นตรงและหรือขดเป็นเกลียว โดยจะมีความยาวของเส้นใยแตกต่างกันไป (ปกติ 100–200 ไมโครเมตร) สาหร่ายสไปรูลิน่ามีคลอโรฟิลล์ ไม่มีนิวเคลียส ไม่มีราก ไม่มีลำต้นและไม่มีใบที่แท้จริง (สมบูรณ์ ผู้พัฒน์, 2538) ผนังเซลล์ของสาหร่ายสไปรูลิน่าจะเป็นแบบเดียวกับแบคทีเรียแกรมลบ แบ่งออกเป็น 4 ชั้น ประกอบไปด้วย Layers I, II, III และ IV (ภาพที่ 2.2) โดยชั้นนอกสุด (Layer IV) ประกอบด้วยสารลิโพพอลิแซ็กคาไรด์ (Lipopolysaccharides; LPS) ซึ่งแต่ละโมเลกุลของ LPS จะเชื่อมต่อกันด้วยแคลเซียมและแมกนีเซียม ชั้น Layer III มีเส้นใยโปรตีน

เป็นองค์ประกอบหลัก ชั้น Layer II เป็นชั้นที่แข็งแรงที่สุดประกอบไปด้วยโมเลกุลของเพพติโดไกลแคน (Peptidoglycan) ส่วนชั้นในสุด Layer I จะมี $\beta$-1,2-glucan เป็นองค์ประกอบ (Van Eykelenburg, 1978, pp. 321–327)



**ภาพที่ 2.1** ลักษณะของ *Arthrospira maxima* (เส้นตรงมีขนาดเท่ากับ 20 ไมโครเมตร) (Vonshak, 2002)




**ภาพที่ 2.2** ผนังเซลล์ของ *S. platensis* (Van Eykelenburg, 1977)

สาหร่ายสไปรูลิน่าต้องการแสงในการเจริญเติบโตส่วนใหญ่เป็นพวกโฟโตออโตทรอฟที่ไม่สามารถใช้น้ำตาลจากแหล่งภายนอกได้ เจริญเติบโตได้อย่างรวดเร็วในบริเวณน้ำตื้นโดยเฉพาะน้ำกร่อยหรือน้ำที่มีความเป็นด่าง พบในธรรมชาติทั่วไปทั้งในดิน หนองน้ำ น้ำพุร้อน ทะเล และน้ำจืด (สินีนาฏ อักโขสุวรรณ, 2550) ปัจจุบันมีการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลิน่าเพื่อผลิตเป็นอาหารเสริม

สำหรับมนุษย์และอาหารสัตว์อย่างแพร่หลาย นอกจากนี้มีการสกัดสารสีซี-ไฟโคไซยานิน ซึ่งเป็นรงควัตถุที่พบมากในสาหร่ายสไปรูลิน่ามาใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารและเครื่องสำอาง การเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลิน่าทางการค้าจะเพาะเลี้ยงในบ่อเปิดรางคู่ที่ไม่มีการควบคุมสภาวะแวดล้อมใด ๆ และอาศัยแสงแดดเป็นแหล่งให้พลังงานโดยผ่านกระบวนการสังเคราะห์แสง มีการเติมแร่ธาตุอาหาร และมีการให้คาร์บอนไดออกไซด์เพื่อเป็นการลดต้นทุนการผลิต โดยพบว่าผลผลิตของสาหร่ายสไปรูลิน่าทั่วโลกมีประมาณ 3,000 ตันต่อปี ปัจจุบันองค์การอาหารและยา ประเทศสหรัฐอเมริกา ได้จัดให้สาหร่ายสไปรูลิน่าเป็นอาหารที่ปลอดภัยต่อการบริโภค โดยบริษัทที่ผลิตผลิตภัณฑ์สาหร่ายสไปรูลิน่าจำหน่ายที่สำคัญ ได้แก่ Spirulina-Mexicana (เม็กซิโก) Nippon-Spirulina (ญี่ปุ่น) Koor-Foods (อิสราเอล) Cyanotech-Corporation (สหรัฐอเมริกา) Far-East-Microalgae (ไต้หวัน) Parry-Agro-Industries (อินเดีย) และ Yunnan-Spirin (จีน) โดยผลิตภัณฑ์สาหร่ายสไปรูลิน่าส่วนใหญ่ใช้บริโภคเป็นอาหารเสริมสำหรับมนุษย์ นอกนั้นใช้เป็นแหล่งโปรตีนอาหารสัตว์

## 2. คุณค่าทางโภชนาการของสาหร่ายสไปรูลิน่า

### 2.1 โปรตีนและกรดอะมิโน

สาหร่ายสไปรูลิน่า มีโปรตีนเป็นองค์ประกอบประมาณ 60–70 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักแห้ง ซึ่งมีมากกว่าเนื้อสัตว์และเนื้อปลา (15–25 เปอร์เซ็นต์) นมผง (35 เปอร์เซ็นต์) ไข่ (12 เปอร์เซ็นต์) ถั่วเหลือง (35 เปอร์เซ็นต์) และธัญพืช (8–14 เปอร์เซ็นต์) เมื่อเปรียบเทียบกับยีสต์ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่ใช้เป็นแหล่งโปรตีนเช่นกัน พบว่าผนังเซลล์ของสาหร่ายสไปรูลิน่าไม่มีเซลลูโลสจึงทำให้ย่อยได้ง่ายกว่ายีสต์ อีกทั้งยังมีโปรตีนมากกว่าสาหร่ายชนิดอื่นด้วย และพบว่าสาหร่ายสไปรูลิน่ามีกรดอะมิโนมากถึง 18 ชนิด ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับไข่ที่จัดเป็นอาหารที่มีกรดอะมิโนจำเป็นทุกชนิดในปริมาณสูง (ตารางที่ 2.1)

**ภาพที่ 2.3** ผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพและความงามจากสาหร่ายสไปรูลิน่าจากทั่วทุกมุมโลก (Henrikson, 2009)

**ตารางที่ 2.1** กรดอะมิโนที่พบในสาหร่ายสไปรูลิน่า

| ชนิดกรดอะมิโน | เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักแห้ง |
|---|---|
| กรดอะมิโนจำเป็น (essential amino acid) | |
| ไอโซลูซีน (Ile) | 4.13 |
| ลูซีน (Leu) | 5.80 |
| ไลซีน (Lys) | 4.00 |
| เมไธโอนีน (Met) | 2.17 |
| เฟนิลอะลานีน (Phe) | 3.95 |
| ธรีโอนีน (Thr) | 4.17 |
| ทริปโตเฟน (Try) | 1.13 |
| วาลีน (Val) | 6.00 |
| กรดอะมิโนไม่จำเป็น (non-essential amino acid) | |
| อะลานีน (Ala) | 5.82 |
| อาร์จินีน (Arg) | 5.98 |
| กรดแอสปาร์ติก (Asp) | 6.43 |
| ซีสเตอีน (Cys) | 0.67 |
| กรดกลูตามิก (Glu) | 8.94 |
| ไกลซีน (Gly) | 3.46 |
| ฮีสติดีน (His) | 1.08 |
| โปรลีน (Pro) | 2.97 |
| เซรีน (Ser) | 4.00 |
| ไทโรซีน (Tyr) | 4.60 |

**ที่มา** : (Biomass Richmond, 1986)

2.2 ไขมันและกรดไขมัน

สาหร่ายสไปรูลิน่ามีไขมัน 4–7 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักแห้ง และมีกรดไขมันจำเป็นซึ่งส่วนมากเป็นโอเมก้า-6 มีรายงานว่าสาหร่าย *S. maxima* มีแกมมา-ลิโนเลนิกแอซิด (γ-linolenic acid: GLA) 10–20 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่สาหร่าย *S. platensis* มีปริมาณมากกว่า

โดยมีประมาณ 49 เปอร์เซ็นต์ โดยแกมมา-ลิโนเลนิกแอซิดในสาหร่ายสไปรูลิน่าสามารถใช้เป็นสารตั้งต้นของการสังเคราะห์ฮอร์โมนโพรสตาแกลนดิน (Prostaglandin) ในการรักษาอาการอักเสบ การเกิดลิ่มในเลือด และโรคมะเร็ง

2.3 คาร์โบไฮเดรต

สาหร่ายสไปรูลิน่ามีคาร์โบไฮเดรต 15–25 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักแห้ง ซึ่งประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคส แรมโนส แมนโนส ไซโลส และกาแล็กโทส และพบว่ามีซัลเฟตพอลิแซ็กคาไรด์ (Sulfated polysaccharide) เป็นองค์ประกอบ 0.5–2.0 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักแห้ง ซึ่งพอลิแซ็กคาไรด์ดังกล่าวประกอบด้วยน้ำตาลแรมโนส แมนโนส ฟรักโทส กาแลกโทส ไซโลส กลูโคส กรดกลูคูโรนิก และกรดกาแลกทูโรนิก ซัลเฟตพอลิแซ็กคาไรด์สามารถละลายน้ำได้ดีและมีคุณสมบัติช่วยกระตุ้นระบบภูมิคุ้มกันให้แก่ร่างกาย

2.4 วิตามิน

สาหร่ายสไปรูลิน่ามีบีตา-แคโรทีนมากกว่าแครอท ประมาณ 10 เท่า และยังอุดมด้วยวิตามินบี 12 ซึ่งมีมากกว่าตับดิบประมาณ 4 เท่า ด้วยเหตุนี้จึงถือว่าสาหร่ายสไปรูลิน่าเป็นแหล่งของวิตามินบี 12 ที่ดี นอกจากนี้ยังประกอบด้วยวิตามินที่สำคัญอีกหลายชนิด เช่น ไนอาซีน ไบโอติน กรดโฟลิก อินซิทอล วิตามินอี ในปริมาณน้อย เป็นต้น

2.5 แร่ธาตุ

สาหร่ายสไปรูลิน่าสามารถดูดซับแร่ธาตุต่าง ๆ ไว้ภายในเซลล์ในระหว่างการเจริญ ซึ่งจะมีปริมาณแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับสภาวะการเจริญและชนิดของแร่ธาตุที่มีอยู่ในแหล่งน้ำ แร่ธาตุสำคัญคือ ธาตุเหล็ก (0.58–1.8 กรัมต่อกิโลกรัม) แคลเซียม (1.3–14 กรัมต่อกิโลกรัม) ฟอสฟอรัส (6.7–9.0 กรัมต่อกิโลกรัม) และโพแทสเซียม (6.4–15.4 กรัมต่อกิโลกรัม) โดยเป็นที่ยอมรับกันว่าสาหร่ายสไปรูลิน่าเป็นแหล่งอาหารที่มีธาตุเหล็กในปริมาณสูง ซึ่งมีปริมาณมากกว่าอาหารทั่ว ๆ ไปประมาณ 10 เท่า

2.6 รงควัตถุ

สีเขียวแกมน้ำเงินเข้มของสาหร่ายสไปรูลิน่าเกิดจากรงควัตถุหลายชนิดที่เป็นองค์ประกอบ ที่สำคัญคือ แคโรทีนอยด์ (Carotenoid) ให้สีเหลืองส้ม พบประมาณ 0.4 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักแห้ง คลอโรฟิลล์ (Chlorophyll) ให้สีเขียว พบประมาณ 1 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักแห้ง และไฟโคบิลิโปรตีน (Phycobiliprotein) ซึ่งเป็นรงควัตถุที่พบมากที่สุดและเป็นองค์ประกอบหนึ่งของไฟโคบิลิโซม (Phycobilisome) พบประมาณ 14–16 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักแห้ง ชนิดที่สำคัญ คือ ซี-ไฟโคไซยานิน (C-phycocyanin; C-PC) ให้สีน้ำเงินและดูดกลืนแสงได้ดีที่ช่วงความยาวคลื่น 615–620 นาโนเมตร และอัลโลไฟโคไซยานิน (Allophycocyanin; APC) ให้สีฟ้าและดูดกลืนแสงได้ดีที่ความยาวคลื่น 652 นาโนเมตร โดยพบว่าประมาณ 50 เปอร์เซ็นต์ ของโปรตีนที่มีอยู่ในสาหร่ายสไปรูลิน่าคือไฟโคบิลิโปรตีน และมักพบซี-ไฟโคไซยานินมีปริมาณมากกว่าอัลโลไฟโคไซยานินเสมอ

จากรายงานทางวิทยาศาสตร์การแพทย์พบว่าสาหร่ายสไปรูลิน่ามีศักยภาพเป็นแหล่งของสารโภชนเภสัช (Nutraceuticals) เนื่องจากแสดงคุณสมบัติทางชีวภาพที่ดีหลายประการ เช่น คุณสมบัติการต้านอนุมูลอิสระ กระตุ้นระบบภูมิคุ้มกันของร่างกาย ต้านไวรัส ต้านมะเร็ง เป็นต้น ซึ่งเป็นผลมาจากสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีอยู่ในสาหร่ายสไปรูลิน่า จากคุณประโยชน์ของสาหร่ายสไปรูลิน่าอันมหาศาลนี้ส่งผลให้มีการศึกษาและพัฒนากระบวนการเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลิน่า เพื่อผลิตสารชีวภัณฑ์ที่มีศักยภาพเชิงพาณิชย์อย่างแพร่หลาย ทั้งนี้เพื่อนำสารชีวภัณฑ์ดังกล่าวไปใช้เป็นส่วนประกอบของอาหารเพื่อสุขภาพ เครื่องสำอาง และยารักษาโรค โดยตารางที่ 2.2 แสดงถึงองค์ประกอบทางชีวเคมีของผลิตภัณฑ์สาหร่ายสไปรูลิน่าอบแห้งที่มีจำหน่ายทางการค้า

**ตารางที่ 2.2** องค์ประกอบทางชีวเคมีของผลิตภัณฑ์สาหร่ายสไปรูลิน่าอบแห้งของบริษัท Siam Algae Company (SAC)

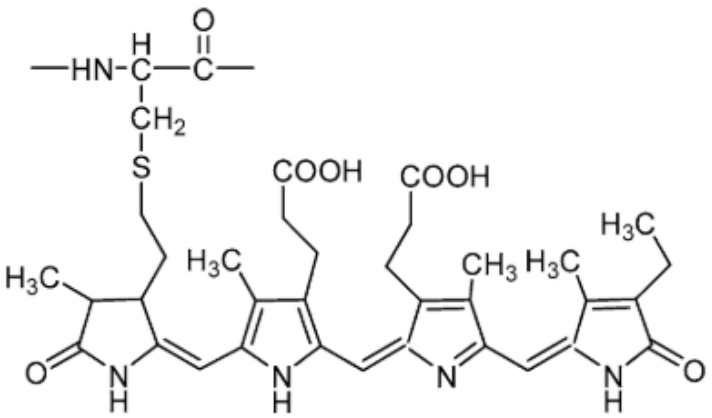
| องค์ประกอบ | ปริมาณต่อน้ำหนักแห้ง 100 กรัม |
|---|---|
| องค์ประกอบทั่วไป | |
| ความชื้น | 3.00 กรัม |
| โปรตีน | 61.40 กรัม |
| ไขมัน | 8.50 กรัม |
| ไฟเบอร์ | 3 .00 กรัม |
| เถ้า | 7.70 กรัม |
| ไนโตรเจนอิสระ | 6.40 กรัม |
| สารสี | |
| ซี-ไฟโคไซยานิน | 16.20 กรัม |
| แคโรทีนอยด์ | 477.00 มิลลิกรัม |
| คลอโรฟิลล์ เอ | 1.20 กรัม |
| วิตามิน | |
| โปรวิตามิน เอ | 214.00 มิลลิกรัม |
| ไธอะมิน (V.B1) | 1.98 มิลลิกรัม |
| ไรโบฟลาวิน (V.B2) | 3.63 มิลลิกรัม |
| วิตามินบี 6 | 0.59 มิลลิกรัม |
| วิตามินบี 12 | 0.11 มิลลิกรัม |
| วิตามินอี | 11.80 มิลลิกรัม |
| ไนอะซิน | 13.20 มิลลิกรัม |
| กรดโฟลิก | 42.00 ไมโครกรัม |
| กรดแพนโทธินิก | 0.88 มิลลิกรัม |
| อินโนซิทอล | 74.00 มิลลิกรัม |
| แร่ธาตุ | |
| ฟอสฟอรัส | 914.00 มิลลิกรัม |
| เหล็ก | 57.40 มิลลิกรัม |
| แคลเซียม | 171.00 มิลลิกรัม |
| โพแทสเซียม | 1.77 กรัม |
| โซเดียม | 1.05 กรัม |
| แมกนีเซียม | 257.00 มิลลิกรัม |

**ที่มา** : (Hydrobiologia Shimamatsu, 2004)

## ซี-ไฟโคไซยานิน (C-Phycocyanin)

### 1. โครงสร้างของซี-ไฟโคไซยานิน

ซี-ไฟโคไซยานิน (C-phycocyanin; C-PC) เป็นสารประกอบโปรตีนที่เรียกว่าไฟโคบิลิโปรตีน ประกอบด้วยส่วนที่เป็นอะโพโปรตีน (Apoprotein) และบิลิน (Bilin) โดยที่บิลินเป็นส่วนของสารประกอบเชิงซ้อนที่มีลักษณะเป็นวงแหวนไพร์รอล (Pyrrole ring) สี่วงเชื่อมต่อกันเป็นเส้นตรง (Tetrapyrrole) โดยส่วนที่เป็นอะโพโปรตีนและบิลินจะเชื่อมต่อกันด้วยพันธะไทโออีเทอร์ (Thioether bond) ระหว่างวงแหวนเอของบิลินกับกรดอะมิโนซีสเตอีน (Cysteine) ของอะโพโปรตีน (ภาพที่ 2.4) (Wu et al., 2016, pp. 1817–1840) โมเลกุลของซี-ไฟโคไซยานินประกอบด้วยหน่วยย่อยแอลฟา ($\alpha$-subunits) และหน่อยย่อยบีตา ($\beta$-subunits) โดยแต่ละหน่วยย่อยแอลฟาและบีตาจะมีบิลินเกาะอยู่กับกรดอะมิโนซีสเตอีนบนอะโพโปรตีนของหน่วยย่อย 1 และ 2 และพบว่าหน่วยย่อยอัลฟามีขนาด 19.5 กิโลดาลตัน ส่วนหน่วยย่อยบีตามีขนาด 21.5 กิโลดาลตัน ซึ่งโดยปกติแล้วจะพบหน่วยย่อยทั้งสองในปริมาณที่เท่ากัน (Mishra, Shrivastav, & Mishra, 2008, pp. 339–345)




**ภาพที่ 2.4** โครงสร้างทางเคมีของซี-ไฟโคไซยานิน (Wu et al., 2016)

## 2. คุณสมบัติของซี-ไฟโคไซยานิน

### 2.1 คุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ

ซี-ไฟโคไซยานินเป็นสารประกอบที่มีสีน้ำเงิน เรืองแสงได้ ละลายน้ำได้ และมีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ คุณสมบัติเหล่านี้แตกต่างกันไปขึ้นกับสายพันธุ์ วิธีการเพาะเลี้ยง วิธีการสกัด และกระบวนการหลังการสกัด ดูดกลืนแสงได้ดีที่ความยาวคลื่นระหว่าง 615–620 นาโนเมตร และสามารถปลดปล่อยแสงที่ความยาวคลื่นประมาณ 650 นาโนเมตร โดยพบว่าน้ำหนักโมเลกุล ความสามารถในการดูดกลืนแสงขึ้นอยู่กับค่าพีเอชของสารละลาย ระดับอุณหภูมิ ความเข้มข้นของโปรตีน และแหล่งที่มาของสาหร่าย และจากการที่ซี-ไฟโคไซยานินแสดงคุณสมบัติในการให้สี การเรืองแสง และการต้านอนุมูลอิสระ ดังนั้นจึงสามารถประยุกต์ใช้ในงานด้านต่าง ๆ ได้หลากหลาย เช่น ใช้เติมแต่งสีในผลิตภัณฑ์อาหาร ใช้เป็นองค์ประกอบของอาหารเสริมสุขภาพ ใช้ในผลิตภัณฑ์เครื่องสำอาง ใช้เป็นตัวติดตามทางคลินิก เป็นต้น

### 2.2 คุณสมบัติทางชีวภาพ

#### 2.2.1 คุณสมบัติการต้านอนุมูลอิสระ (Antioxidant capacity)

2.2.1.1 สมบัติในการต้านอนุมูลอิสระเพอออกซิล (Peroxyl) Hirata, Tanaka, Ooike, Tsunomura, and Sakaguchi (2000, pp. 435–439) ศึกษาสมบัติการต้านอนุมูลอิสระของไฟโคไซยาโนบิลินจากสาหร่าย *S. platensis* โดยวัดการต้านอนุมูลอิสระของเมทิลลิโนเลเอต (Methyl linoleate) ในระบบไฮโดรโฟบิก (Hydrophobic) ความเข้มข้นของซี-ไฟโคไซยานินและไฟโคไซยาโนบิลินในปฏิกิริยาเท่ากัน และปรับความเข้มข้นโดยใช้ไฟโคไซยาโนบิลินเป็นหลักประเมินสมบัติในการต้านอนุมูลอิสระหลังจากการเติม AAPH พบว่าคุณสมบัติการต้านอนุมูลอิสระของซี-ไฟโคไซยานินเหมือนกับไฟโคไซยาโนบิลิน

2.2.1.2 สมบัติในการต้านอนุมูลอิสระอัลคอกซิล (Alkoxyl) Romay et al. (1998, pp. 36–41) วัดคุณสมบัติการต้านอนุมูลอิสระของซี-ไฟโคไซยานินต่ออนุมูลอิสระอัลคอกซิลและไฮดรอกซิลโดยวิธี Chemiluminescence assay ซึ่งผลการทดลองที่ได้แสดงให้เห็นว่าซี-ไฟโคไซยานินสามารยับยั้ง Chemiluminescence ในระบบ ซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของซี-ไฟโคไซยานิน โดยมีคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระอัลคอกซิลใกล้เคียงกับทรอล็อกซ์ (Trolox)

2.2.1.3 สมบัติการยับยั้งปฏิกิริยาลิพิดเพอร์ออกซิเดชัน (Lipid peroxidation) ปฏิกิริยาลิพิด เพอร์ออกซิเดชัน (Lipid peroxidation) จะส่งผลเสียต่อเยื่อหุ้มเซลล์ เนื่องจากทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของกรดไขมันจำนวนมากที่ Side chain เป็นลิพิดเพอร์ออกไซด์ (Lipid peroxides) ทำให้โครงสร้างและคุณสมบัติทางชีวเคมีของเยื่อหุ้มเซลล์เปลี่ยนแปลงไป Manoj, Venkataraman, and Srinivas (1992) รายงานว่าส่วนสกัดแอลกอฮอล์จากสาหร่ายสไปรูลิน่า มีประสิทธิภาพการยับยั้งปฏิกิริยาลิพิด เพอร์ออกซิเดชัน สูงสุด 65 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีประสิทธิภาพมากกว่าแอลฟา-โทโคฟีรอล (35 เปอร์เซ็นต์) บีตา-แคโรทีน (45 เปอร์เซ็นต์) และบิวทีเรตไฮดรอกซีอะนิโซล (48 เปอร์เซ็นต์)

2.2.2 สมบัติการป้องกันการอักเสบ (Anti-inflammatory capacity)

Romay et al. (1998, pp. 36–41) รายงานว่าซี-ไฟโคไซยานินสามารถต้านทานอนุมูลอิสระไฮดรอกซิล (IC50 = 0.91 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) และอนุมูลอิสระอัลคอกซิล ($IC_{50}$= 76 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) ซึ่งเป็นตัวการสำคัญทำให้เกิดความเสียหายของเนื้อเยื่อและทำให้เกิดการอักเสบในอุ้งเท้าหนู และมีรายงานการรักษาอาการอักเสบบวมในหนูที่ถูกกระตุ้นให้ลำไส้ใหญ่อักเสบ ซึ่งพบว่าซี-ไฟโคไซยานินสามารถลดกิจกรรมของเอนไซม์ไมอีโลเพอร์ออกซิเดส (Myeloperoxidase; MPO) และสามารถควบคุมการอักเสบของลำไส้ได้

2.2.3 คุณสมบัติยับยั้งเซลล์มะเร็ง (Anticancer capacity)

Hanaa and El-Baky (2003, pp. 314–324) ศึกษาสมบัติของซี-ไฟโคไซยานินในการยับยั้งเซลล์มะเร็ง โดยวัดการรอดชีวิตของเซลล์ชนิด Ehrlich Ascites Carcinoma Cells (EACC) พบว่าเซลล์ที่ให้ซี-ไฟโคไซยานินมีการรอดชีวิตลดลงเมื่อใช้ความเข้มข้นของสารสกัดจากสาหร่ายสไปรูลิน่าเพิ่มขึ้น การศึกษาในเซลล์ไลน์ (Cell line) พบว่าซี-ไฟโคไซยานินสามารถลดการเจริญและการเพิ่มจำนวนของเซลล์มะเร็งเม็ดเลือดขาวขนาดใหญ่ของหนู (Macrophage cell line; RAW264.7) โดยซี-ไฟโคไซยานินสามารถยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ cyclooxygenase-2 (COX-2) ที่เป็นสาเหตุหลักของการอักเสบและบาดเจ็บของเซลล์

2.2.4 คุณสมบัติต้านแบคทีเรียดื้อยา (Agent against drug resistant bacteria)

Sarada, Kumar, and Rengasamy (2011, pp. 779–783) รายงานว่าซี-ไฟโคไซยานินที่สกัดได้จากสาหร่าย *S. platensis* (Nordstedt) Geitler และผ่านการทำบริสุทธิ์โดยใช้คอลัมน์ชนิด DE-52 anion exchange สามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียบางชนิด ได้แก่ *Escherichia coli, Klebsiella pneumoniae, Pseudomonas aeruginosa* และ *Staphylococcus aureus* สายพันธุ์ที่ดื้อยาปฏิชีวนะได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีค่า MIC (minimum inhibition concentration) อยู่ในช่วง 50–125 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร

**3. การสกัดซี-ไฟโคไซยานิน**

ซี-ไฟโคไซยานินเป็นสารที่อยู่ภายในเซลล์ของสาหร่ายสไปรูลิน่า การสกัดหรือแยกออกมาจำเป็นต้องทำให้ผนังเซลล์แตกก่อนแล้วจึงสกัดซี-ไฟโคไซยานินออกมา ทั้งนี้การสกัดสามารถใช้ได้ทั้งเซลล์สดและเซลล์แห้งแต่เซลล์สดจะให้ผลผลิตของซี-ไฟโคไซยานินมากกว่าการใช้เซลล์แห้ง โดยทั่วไปแล้วการทำให้เซลล์จุลินทรีย์แตกมีด้วยกัน 3 วิธี คือ การใช้เอนไซม์ วิธีทางเคมี และวิธีทางฟิสิกส์ (Alkinson, Michael, & Hammond, 1987) ได้แบ่งวิธีการทำให้เซลล์แตกเพื่อสกัดสารสำคัญที่อยู่ภายในเซลล์ของจุลินทรีย์ออกเป็น 3 วิธี ซึ่งโดยทั่วไปแล้วการทำให้ผนังเซลล์แตกเพื่อสกัดซี-ไฟโคไซยานินจากเซลล์สาหร่ายสไปรูลิน่าสามารถทำได้โดยวิธีการทางกายภาพและการย่อยผนังเซลล์ด้วยสารเคมีและเอนไซม์ หรืออาจใช้วิธีการเหล่านี้ร่วมกัน โดยวิธีที่นิยมใช้และให้ผลดีในการปฏิบัติมี 3 วิธี คือการแช่เยือกแข็งสลับกับการละลาย การใช้คลื่นอัตราโซนิกและการใช้ไลโซไซม์ ซึ่งแต่ละวิธีมีกลไกในการทำลายผนังเซลล์ ดังนี้

3.1 การแช่เยือกแข็งสลับกับการละลาย (Repeatedly freezing and thawing, RFT)

การทำให้ผนังเซลล์ของสาหร่ายสไปรูลิน่า แตกโดยการแช่เยือกแข็งสลับกับการละลาย เกิดจากผลึกน้ำแข็งและการขยายขนาดของผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นในระหว่างการแช่เยือกแข็งไปบาดผนังเซลล์แล้วทำให้ผนังเซลล์เกิดรูรั่วเป็นผลทำให้เอนไซม์และโปรตีนต่าง ๆ ภายในเซลล์แพร่ออกสู่ภายนอกเซลล์ โดยอัตราการแพร่จะขึ้นอยู่กับอัตราการละลายน้ำแข็งและความคงตัวของรูรั่วภายในเซลล์ โดยที่บริเวณผิวนอกจะมีอัตราการละลายน้ำแข็งสูงกว่าบริเวณด้านใน การละลายน้ำแข็งที่อุณหภูมิต่ำจะทำให้รูรั่วภายในเซลล์คงตัวได้นานกว่าการละลายโดยใช้อุณหภูมิสูง

3.2 การใช้คลื่นอัตราโซนิก

การใช้คลื่นอัตราโซนิกที่มีความยาวคลื่นเสียงสูงกว่า 20 กิโลเฮิร์ต จะทำให้เกิดแรงสั่นสะเทือนและเกิดเป็นฟองอากาศขนาดเล็กขึ้นในสารแขวนลอยของสาหร่ายและภายในเซลล์สาหร่าย เรียกปรากฏการณ์ดังกล่าวว่า “ Cavitation” เมื่อฟองอากาศถูกสร้างขึ้นและมีขนาดใหญ่ขึ้นจนแตกสลาย ผลที่ตามมาคือจะเกิดคลื่นสะท้านอย่างรุนแรง ณ จุดต่าง ๆ ทั้งภายในเซลล์และนอกเซลล์ของสาหร่าย เป็นผลทำให้เกิดความแตกต่างของแรงเฉือน ณ จุดต่าง ๆ ซึ่งกระทำต่อเซลล์จึงทำให้ผนังเซลล์ฉีกขาดในที่สุด โดยประสิทธิภาพในการทำให้ผนังเซลล์แตกขึ้นอยู่กับความถี่ของคลื่นเสียงที่ใช้ อย่างไรก็ตามพบว่าการใช้คลื่นอัตราโซนิกร่วมกับการใช้เม็ดทรายละเอียดจะให้ประสิทธิภาพในการทำลายผนังเซลล์ดีกว่าการใช้คลื่นอัตราโซนิกเพียงอย่างเดียว (Viskari & Colyer, 2003, pp. 263–271)

3.3 การใช้ไลโซไซม์

ไลโซไซม์จะย่อยสลายผนังเซลล์ชั้น LII ซึ่งเป็นชั้นที่มีความแข็งแรงมากที่สุดของผนังเซลล์สาหร่ายสไปรูลิน่า โดยไลโซไซม์จะตัดพันธะ $\beta$-1,4-glucosidic ในโมเลกุลของเพพติโดไกลแคน (Hatti-Kaul & Mattiasson, 2003) อย่างไรก็ตามการจะทำลายผนังเซลล์ชั้นดังกล่าวได้นั้นจะต้องทำลายผนังเซลล์ชั้นนอกก่อนเพื่อเปิดทางให้ไลโซไซม์สามารถเข้าถึงชั้นของเพพติโดไกลแคนได้ เช่น การใช้สารลดแรงตึงผิว หรือสารกำจัดไอออน เป็นต้น

Sarada, Kumar, and Rengasamy (1999, pp. 779–783) รายงานว่าการทำแห้งสาหร่ายสไปรูลิน่าจะทำให้ซี-ไฟโคไซยานินสูญเสียไปประมาณ 45–50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับการใช้เซลล์สด Eriksen (2008, pp. 1–14) กล่าวว่าการสกัดซี-ไฟโคไซยานินโดยใช้สาหร่ายแห้งจะสกัดโดยใช้สารละลายบัฟเฟอร์ฟอสเฟตความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ค่าพีเอช 7 หรือสารละลายแอมโมเนียมซัลเฟตความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ Doke (2005, pp. 1–11) รายงานว่าการสกัดซี-ไฟโคไซยานินที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส จะให้ผลผลิตของซี-ไฟโคไซยานินมากกว่าการสกัดที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ประมาณ 4.8 เท่าตัว Soundarapanadian and Vasanthi (2008, pp. 1–11) ศึกษาวิธีการสกัดซี-ไฟโคไซยานิน 4 วิธี คือ การใช้ไนโตรเจนเหลว การแช่แข็งสลับกับการละลาย (Freezing and thawing) การใช้คลื่นอัลตราโซนิก และการใช้ไลโซไซม์ พบว่าการสกัดโดยใช้ไนโตรเจนเหลวจะให้ปริมาณซี-ไฟโคไซยานินสูงที่สุด โดยที่การใช้คลื่นอัลตราโซนิกจะให้

ซี-ไฟโคไซยานินน้อยที่สุด และพบว่าสาหร่ายที่มีอายุมากจะมีการสะสมซี-ไฟโคไซยานินมากกว่าสาหร่ายที่มีอายุน้อย

**ผลิตภัณฑ์อาหารประเภทพองกรอบ (Expanded product)**

ผลิตภัณฑ์อาหารประเภทพองกรอบ เป็นผลิตภัณฑ์อาหารที่แป้งถูกทำให้เกิดการขยายตัวด้วยกรรมวิธีต่าง ๆ กัน ได้แก่ การใช้ความร้อน (Baking) การใช้แรงดันภายใต้อุณหภูมิสูง (Extrusion) การพองตัวที่เกิดจากแผ่นความร้อน (Puffing machine) และการพองตัวที่เกิดจากการอบที่ความร้อนสูงหรือทอดในน้ำมันร้อน (Oven or deep fry puffing)

**1. ผลิตภัณฑ์ธัญชาติชนิดพอง**

ผลิตภัณฑ์ธัญชาติชนิดพองเป็นผลิตภัณฑ์ที่เกิดการพองตัวจากการขยายตัวอย่างรวดเร็วของความชื้นที่แทรกอยู่ตรงกลางระหว่างเม็ดสตาร์ช ในขณะที่เกิดแรงดันไอน้ำ นิยมนำมาผลิตเป็นอาหารขบเคี้ยวและผลิตภัณฑ์อาหารเช้าจากธัญชาติ (Breakfast cereals) กรรมวิธีที่ทำให้เกิดการพองของผลิตภัณฑ์ธัญชาติชนิดพองสามารถทำได้โดยการทำให้เกิดการพองตัวโดยมีการเปลี่ยนแปลงความดัน โดยอาศัยอุปกรณ์หรือเครื่องมือที่สามารถปรับระดับของความดันได้ และการทำให้เกิดการพองโดยการให้ความร้อนอย่างทันทีทันใด ณ ความดันบรรยากาศปกติ (Atmospheric pressure)

**2. ผลิตภัณฑ์ธัญชาติชนิดแท่ง**

ผลิตภัณฑ์ธัญชาติชนิดแท่งเป็นรูปแบบหนึ่งของผลิตภัณฑ์ธัญชาติชนิดพอง โดยการผสมส่วนผสมที่เป็นชิ้นเล็ก ๆ เข้าด้วยกันแล้วใช้สารยึดเกาะที่มีความข้นหนืดเป็นตัวผสาน แล้วนำมาขึ้นรูปให้เป็นแท่ง เช่น กระยาสารท ข้าวแตน ขนมนางเล็ด ถั่วตัด และถั่วกระจก เป็นต้น

2.1 สารยึดเกาะ (Binder)

สารยึดเกาะมีหน้าที่ในการยึดส่วนประกอบต่าง ๆ เข้าด้วยกันและให้รสชาติกับผลิตภัณฑ์ โดยมีสัดส่วนประมาณร้อยละ 30 ของน้ำหนักผลิตภัณฑ์ องค์ประกอบหลักของสารยึดเกาะคือ น้ำมันพืช และน้ำตาล โดยน้ำมันพืชจะช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีเนื้อสัมผัสที่ดีและมันเงา ในขณะที่

น้ำตาลจะช่วยให้ส่วนผสมแห้งเกาะกัน นิยมใช้น้ำตาลซูโครส ซึ่งนอกจากจะให้ความหวานแก่ผลิตภัณฑ์แล้วยังช่วยเรื่องเนื้อสัมผัส และมีคุณสมบัติในการเกิดปฏิกิริยาคาราเมล (Caramelization) ซึ่งจะให้สีน้ำตาลกับผลิตภัณฑ์ นอกจากนี้อาจใช้น้ำตาลฟรักโทส น้ำตาลกลูโคส น้ำตาลอินเวิร์ท กลูโคสไซรัป น้ำเชื่อมข้าวโพด และเดกซ์โทรส

2.2 การขึ้นรูปผลิตภัณฑ์ธัญชาติชนิดแท่ง

สามารถทำได้หลายรูปแบบ เช่น การอัดลงในแม่พิมพ์เป็นชิ้นขนาดบริโภค หรือการอัดลงในแม่พิมพ์ขนาดใหญ่แล้วจึงตัดเป็นชิ้นย่อย

**ผลิตภัณฑ์ไอศกรีม (Ice-cream)**

ไอศกรีมจัดเป็นระบบคอลลอยด์ซับซ้อน (Complex-colloidal system) ประกอบด้วยส่วนที่แข็งตัว ได้แก่ ผลึกน้ำแข็ง ฟองอากาศ เม็ดไขมัน และส่วนที่ไม่แข็งตัว ได้แก่ น้ำตาล โปรตีน เกลือ พอลิแซ็กคาร์ไรด์ และน้ำ โดยองค์ประกอบรวมตัวอยู่ในระบบที่มี 3 เฟส คือ ของเหลว อากาศ และของแข็ง

**1. องค์ประกอบของไอศกรีม**

1.1 ไขมัน (Milk fat)

ไอศกรีมจะมีไขมันเป็นส่วนผสมหลัก 8–20 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ซึ่งอยู่ในรูปของน้ำนม ครีมสด ครีมแช่แข็ง มันเนย หรือน้ำมันพืช (ไอศกรีมดัดแปลงไขมัน) ไขมันที่เติมลงไปมีบทบาทสำคัญในการเพิ่มรสชาติ กลิ่นรส เนื้อสัมผัส ลักษณะเนื้อ (Body) ให้แก่ไอศกรีม ข้อเสียของไขมันคือราคาแพงและให้พลังงานสูง

1.2 เนื้อนมไม่รวมมันเนย (Milk solid-not-fat)

เนื้อนมไม่รวมมันเนย หมายถึง องค์ประกอบต่าง ๆ ในน้ำนมซึ่งไม่รวมไขมันและความชื้น ได้แก่ โปรตีน แร่ธาตุ และน้ำตาลแลกโทส นิยมใช้ในรูปของนมผงขาดมันเนย (Skim milk powder) ในปริมาณ 8–15 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ซึ่งจะประกอบด้วยโปรตีน

37 เปอร์เซ็นต์ น้ำตาลแลกโทส 55 เปอร์เซ็นต์ และเกลือแร่ 8 เปอร์เซ็นต์ บทบาทสำคัญของโปรตีนในเนื้อนมไม่รวมมันเนย คือช่วยให้เนื้อสัมผัสแน่นและเรียบเนียน

1.3 สารให้ความหวาน (Sweetener)

สารให้ความหวานจะทำให้ปริมาณของแข็งทั้งหมดเพิ่มขึ้น ช่วยปรับปรุงลักษณะเนื้อ เพิ่มความหนืดให้แก่ไอศกรีมมิกซ์ ลดจุดเยือกแข็งในไอศกรีมทำให้ยืดระยะเวลาแช่แข็งไอศกรีม และยังช่วยลดอัตราการขึ้นฟู สารให้ความหวานที่นิยมใช้ในไอศกรีมแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ 1) สารให้ความหวานที่ให้พลังงาน เช่น ฟรักโทส มอลทิทอล ซอร์บิทอล และไซลิทอล เป็นต้น และ 2) สารให้ความหวานที่ไม่ให้พลังงานหรือให้พลังงานต่ำ เช่น ซูคราโลส สตีเวีย แอสปาแตม และแซคคารีน เป็นต้น

1.4 สารให้สีและกลิ่นรส (Coloring and Flavoring agents)

สารให้สีและกลิ่นรสจะช่วยให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะปรากฏที่ดี ช่วยดึงดูดความสนใจต่อผลิตภัณฑ์ และสร้างความนิยมในกลุ่มผู้บริโภค

1.5 สารให้ความคงตัว (Stabilizer)

สารให้ความคงตัวจะช่วยเพิ่มความเนียน ความหนืดให้กับไอศกรีม ทำให้อนุภาคต่าง ๆ ที่เติมลงไปสม่ำเสมอ ทำให้เกิดโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นเจล ช่วยให้ของผสมที่ได้เป็นเนื้อเดียวกัน ที่นิยมใช้ คือ เจลาติน คาราจีแนน กัวร์กัม อัลจีเนต และอนุพันธ์ของเซลลูโลส

1.6 อิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifier)

อิมัลซิไฟเออร์จะช่วยให้เกิดอิมัลชันที่คงตัว ช่วยให้เนื้อไอศกรีมเนียน มีเนื้อสัมผัสที่ไม่เย็นเกินไปขณะรับประทาน สร้างกลิ่นรส ช่วยลดระยะเวลาการตีขึ้นฟู ทำให้ผลึกน้ำแข็งมีขนาดเล็กลง ช่วยให้ไอศกรีมมีลักษณะแห้ง คงรูปและขึ้นฟูได้ดี และช่วยลดอัตราการละลาย

1.7 อากาศ (Air)

อากาศมีผลต่อความยากง่ายในการตักไอศกรีม ถ้าไอศกรีมเก็บอากาศได้มากจะมีการขึ้นฟูสูง ซึ่งจะทำให้ปริมาตรของไอศกรีมที่ผลิตเพิ่มขึ้น

1.8 น้ำ (Water)

น้ำเป็นตัวทำละลายส่วนผสมแห้งต่าง ๆ เป็นองค์ประกอบที่มีมากที่สุด ปริมาณ 55–80 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก น้ำที่ใช้ควรสะอาดปราศจากสิ่งสกปรกและจุลินทรีย์

**2. กระบวนการผลิตไอศกรีม**

2.1 การผสมส่วนผสมทั้งหมด (Blending of the mix ingredients)

โดยคำนวณปริมาณส่วนผสมทั้งหมดที่ใช้ตามให้ถูกต้องตามสูตร จากนั้นนำส่วนผสมที่เป็นของเหลวเทลงในถังผสมแล้วให้ความร้อนพร้อมคนผสม จากนั้นเติมส่วนผสมที่เป็นของแห้งลงไปเมื่ออุณหภูมิเท่ากับ 50 องศาเซลเซียส

2.2 การพาสเจอไรซ์ (Pasteurization)

เพื่อทำลายจุลินทรีย์ก่อโรคและลดจำนวนจุลินทรีย์ที่อาจทำให้ไอศกรีมเสื่อมเสีย และช่วยให้ส่วนผสมที่เป็นของแข็งละลายน้ำได้ดีขึ้น

2.3 การโฮโมจิไนซ์และทำให้เย็น (Homogenization and cooling)

การโฮโมจิไนซ์จะช่วยรักษาความคงตัวและลดขนาดเม็ดไขมันให้ต่ำกว่า 2 ไมครอน ทำให้มีลักษณะสัมผัสที่ดีเมื่ออยู่ในปาก การลดขนาดเม็ดไขมันจะทำให้เกิดโครงสร้างอิมัลชันช่วยให้ไอศกรีมมีเนื้อสัมผัสเนียนมากขึ้นและละลายช้าลง หลังจากโฮโมจิไนซ์ทำให้เย็นลงที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส

2.4 การบ่ม (Aging)

การบ่มอย่างน้อย 4 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิต่ำกว่า 5 องศาเซลเซียส แต่ไม่ถึงระดับแช่แข็ง จะช่วยทำให้ความหนืดของไอศกรีมมิกซ์เพิ่มขึ้นเล็กน้อย และช่วยทำให้การหุ้มอากาศเกิดได้ดีขณะปั่นไอศกรีม นอกจากนี้การทำให้เย็นที่อุณหภูมิ 0–2 องศาเซลเซียส จะช่วยเพิ่มอัตราการเกิดผลึกไขมัน เพิ่มความสามารถในการแช่เยือกแข็ง และช่วยกำจัดจุลินทรีย์ที่ปนเปื้อน

2.5 การปั่นแข็งไอศกรีม (Freezing)

การปั่นแข็งจะช่วยให้อนุภาคต่าง ๆ กระจายตัวได้ดีขึ้น องค์ประกอบต่าง ๆ จะเข้มข้นขึ้น และมีการปั่นอากาศเข้าไปในไอศกรีมมิกซ์ เกิดเซลล์อากาศ เม็ดไขมันเป็นผลึกมากขึ้น เกิดเป็นโครงสร้างแบบโฟม ซึ่งจะทำให้ไอศกรีมมีปริมาตรมากขึ้น

2.6 การบรรจุ ขึ้นรูปและแช่แข็ง (Filling, Shape forming and hardening)

โดยนำไอศกรีมที่มีลักษณะกึ่งของแข็งไปแช่แข็งที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส หรือต่ำกว่า การทำให้แข็งอย่างรวดเร็วจะทำให้ผลึกน้ำแข็งขนาดเล็ก ไอศกรีมจะมีเนื้อสัมผัสดีขึ้น

2.7 การเก็บรักษา (Storage)

โดยทั่วไปแล้วนิยมเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ไอศกรีมที่อุณหภูมิต่ำกว่า -25 องศาเซสเซียส เพื่อป้องกันการเกิดผลึกน้ำแข็ง

**ผลิตภัณฑ์โยกิร์ต (Yoghurt)**

โยเกิร์ต เป็นผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหมักนม โดยการเติมแบคทีเรียกรดแลคติก (Lactic acid bacteria) ลงไปในนม แบคทีเรียดังกล่าวจะเปลี่ยนน้ำตาลแลกโตสเป็นกรดแลกติก ทำให้มีสภาวะเป็นกรดและมีรสชาติเปรี้ยว โดยมีค่าพีเอชหว่าง 3.8–4.6 โยเกิร์ตมีลักษณะกึ่งแข็งกึ่งเหลว เหมาะสมกับผู้ที่ไม่สามารถย่อยน้ำตาลแลกโทส (lactose intolerance) หรือดื่มนมไม่ได้

**1. ชนิดของโยเกิร์ต**

โยเกิร์ตมีด้วยกันหลายชนิดขึ้นอยู่กับเกณฑ์ที่ใช้ในการแบ่ง หากแบ่งตามกรรมวิธีการผลิตแบ่งได้ 2 ชนิดคือ (วราวุฒิ ครูส่ง และรุ่งนภา พงษ์สวัสดิ์มานิต, 2532)

1.1 เซทโยเกิร์ต (Set yoghurt) บรรจุทันทีหลังจากเติมจุลินทรีย์ โดยให้จุลินทรีย์หมักในภาชนะบรรจุ เมื่อหมักได้ที่แล้วทำให้เย็นพร้อมที่จะจำหน่าย

1.2 สเตอโยเกิร์ต (Stirred yoghurt) เติมจุลินทรีย์ลงในน้ำนมแล้วปล่อยให้เกิดปฏิกิริยาการหมักในถังใหญ่ เมื่อหมักได้ที่ทำให้เย็นและบรรจุในภาชนะเพื่อจำหน่าย

**2. จุลินทรีย์ในโยเกิร์ต**

แบคทีเรีย *Streptococcus thermophilus* และ *Lactobacillus bulgaricus* เป็นจุลินทรีย์ที่เกี่ยวข้องกับการหมักโยเกิร์ต โดยในระยะแรกของการหมักโยเกิร์ต *S. thermophilus* จะเจริญอย่างรวดเร็วที่อุณหภูมิเหมาะสม 40 องศาเซลเซียส จากนั้นจะสร้างกรดแลกติกและสร้างไดอะซิติล (Diacetyl) และสารประกอบที่คล้ายคลึงกันซึ่งมีผลต่อกลิ่นรสของโยเกิร์ต เมื่อออกซิเจนถูกใช้ไปจนหมด และค่าพีเอชลดลงเท่ากับ 5.5 แบคทีเรีย *Lactobacillus bulgaricus* จะเจริญเด่นที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส แบคทีเรียชนิดนี้จะสร้างกรดแลกติกปริมาณมากพอที่จะก่อให้เกิดการสร้างอะซิตัลดีไฮด์ (Acetaldehyde) ซึ่งจะเป็นสารสำคัญที่ให้กลิ่นรสเฉพาะแก่โยเกิร์ต *L. bulgaricus* ยังมีบทบาทในการสร้างกรดอะมิโนที่มีผลต่อการเจริญของเชื้อ *Streptococci* อีกด้วย โดยอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญของแบคทีเรียทั้งสองชนิดในระหว่างการหมักโยเกิร์ตคือ 40–42 องศาเซลเซียส

**3. การผลิตโยเกิร์ตในระดับอุตสาหกรรม**

3.1 การปรับปริมาณไขมันในน้ำนม

ในการปรับปริมาณไขมันในน้ำนมที่ใช้ ในการเตรียมโยเกิร์ตนี้ จะใช้หลักการของเพียสันส์สแควร์ (Peasons square)

3.2 การปรับปริมาณของแข็งที่ไม่ใช่ไขมัน (SNF) ในน้ำนม

ปริมาณของแข็งที่ไม่ใช่ไขมันในน้ำนม ได้แก่ น้ำตาลแลกโทสและเกลือแร่ จะมีผลโดยตรงต่อคุณสมบัติทางกายภาพ และกลิ่นรสของโยเกิร์ต เช่น ความเรียบของผิวหน้า ความหนืด และความสม่ำเสมอของ Coagulum โดยโยเกิร์ตที่มีคุณภาพดีและเป็นที่ยอมรับควรมีปริมาณของแข็ง 14–15 เปอร์เซ็นต์ ถ้าของแข็งทั้งหมดมากกว่า 25 เปอร์เซ็นต์ จะทำให้ความชื้นของโยเกิร์ตลดลง โดยการปรับปริมาณของแข็งสามารถทำได้โดยการเติมหางนมผง นมพร่องมันเนยเวย์โปรตีนหรือโปรตีนเคซีน เป็นต้น

3.3 การเติมสารคงตัว (Stabilizers)

การเติมสารคงตัวจะช่วยเพิ่มลักษณะเนื้อสัมผัส ความหนืดมีความคงตัวดีขึ้น และช่วยลดปัญหาการแยกชั้นของน้ำหางนม (whey) หรือที่เรียกว่า Syneresis เป็นต้น สารคงตัวที่นิยมใช้ ได้แก่ Carboxymethyl cellulose (CMC) เจลาติน อัลจิเนต และคาร์ราจีแนน เป็นต้น

3.4 การเติมสารให้ความหวาน

การเติมสารให้ความหวานในผลิตภัณฑ์โยเกิร์ตจะช่วยลดความเปรี้ยวในโยเกิร์ตและช่วยเพิ่มการยอมรับของผู้บริโภคมากขึ้น โดยสารให้ความหวานที่นิยม คือน้ำตาลทรายหรือซูโครส และฟรักโทสไซรัป

3.5 การทำให้เป็นเนื้อเดียวกัน (Homogenization)

การโอโมจิไนซ์จะช่วยทำให้ไขมันในน้ำนมมีขนาดเล็กลงและมีขนาดเดียวกันทั้งหมด จึงทำให้ผลิตภัณฑ์มีความอยู่ตัวสูงขึ้น

3.6 การให้ความร้อน (Heat treatment)

การให้ความร้อนจะช่วยทำลายจุลินทรีย์เกิดโรคและจุลินทรีย์อื่น ๆ ที่ไม่ต้องการ และช่วยทำให้น้ำนมมีสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญของหัวเชื้อโยเกิร์ตด้วย นอกจากนี้ยังช่วยกำจัดอากาศที่มีในนมทำให้เหมาะสมต่อการเจริญของแบคทีเรียกรดแลกติก และยังทำให้โปรตีน

ในน้ำนมมีขนาดโมเลกุลเล็กลง ซึ่งอาจช่วยเร่งกิจกรรมของแบคทีเรียกรดแลกติกได้ และยังทำให้น้ำนมเกิดการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ ซึ่งจะส่งผลดีต่อความหนืดของโยเกิร์ต

3.7 กระบวนการหมัก

ในระหว่างการหมักน้ำตาลแลกโทสจะเปลี่ยนเป็นกรดแลกติกโดยแบคทีเรียกรดแลกติก ซึ่งจะทำให้โยเกิร์ตมีค่าพีเอชลดลง และเป็นผลให้โปรตีนรวมตัวเป็นก้อนนิ่ม ๆ ซึ่งเป็นลักษณะเฉพาะของโยเกิร์ต ในระหว่างนี้โปรตีนนมถูกย่อยเป็นเพพไทด์และกรดอะมิโนอิสระ แบคทีเรียกรดแลกติกจะเพิ่มจำนวนขึ้นจาก 100–1,000 เท่า จนมีปริมาณ 1,000 ล้านเซลล์ต่อกรัม นอกจากนี้แบคทีเรียแลกติกบางชนิดยังผลิตวิตามิน พอลิแซ็กคาไรด์ จึงช่วยปรับปรุงลักษณะเนื้อสัมผัสของโยเกิร์ต ในขณะเดียวจะเกิดกลิ่นและรสเฉพาะของโยเกิร์ตจากการจำพวกอัลดีไฮด์โดยกิจกรรมของแบคทีเรียกรดแลกติกที่เติมลงไปด้วย

3.8 การทำความเย็น (Cooling)

การทำให้เย็นจะช่วยควบคุมกิจกรรมของหัวเชื้อโยเกิร์ตและเอนไซม์ การให้ความเย็นจะทำเมื่อโยเกิร์ตมีค่าพีเอชตามต้องการ

3.9 การเติมองค์ประกอบที่ให้กลิ่นรสและสี

ได้แก่ ผลไม้ สารให้กลิ่นรส สี และองค์ประกอบอื่น ๆ เช่น น้ำผึ้ง กาแฟ และถั่วต่าง ๆ เป็นต้น

3.10 การเก็บรักษาผลิตภัณฑ์โยเกิร์ต

ปกติโยเกิร์ตมีอายุการเก็บรักษาประมาณ 10 วัน เมื่อเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นโยเกิร์ตจะมีการเปลี่ยนแปลงโดยมีปริมาณกรดเพิ่มขึ้น ส่งผลให้กลิ่นรสของโยเกิร์ตเปลี่ยนแปลงไปและไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคได้ ดังนั้นการผลิตจึงควรระมัดระวังการปนเปื้อนของเชื้อยีสต์และรา รวมทั้งในระหว่างการบรรจุด้วย

**4. ประโยชน์ของโยเกิร์ตต่อสุขภาพ**

4.1 เหมาะสำหรับผู้ที่ไม่สามารถดื่มนมได้ หรือผู้ที่ขาดน้ำย่อยแลกโทส

4.2 ช่วยรักษาอาการท้องเสีย เมื่อทานโยเกิร์ตจุลินทรีย์ในโยเกิร์ตจะช่วยปรับสมดุลอย่างรวดเร็ว และสามารถป้องกันอาการท้องเดินได้

4.3 ช่วยยกระดับภูมิคุ้มกันโรคในร่างกายให้สูงขึ้นและกระตุ้นการสร้างแอนติบอดี้และเพิ่มปริมาณอินเตอร์เฟอรอนขึ้นเป็น 3 เท่า

4.4 ลดความเสี่ยงจากการเกิดมะเร็งบริเวณเนื้อเยื่อกระดูก

4.5 โยเกิร์ตมีสารพรอสตาแกลนดิน อี 2 (Prostaglandin E2) ทำหน้าที่ปกป้องผนังกระเพาะจากสารกระตุ้น และช่วยรักษาแผลในกระเพาะ

4.6 ลดระดับโคเลสเตอรอลในเลือด

4.7 การนำโยเกิร์ตมาพอกหน้าหรือผสมตัวยาหรือสมุนไพรชนิดอื่นร่วมด้วยจะช่วยบำรุงผิวพรรณ

**กรอบแนวคิดในการวิจัย**

กากชีวมวลเหลือทิ้งของการสกัดรงควัตถุซี-ไฟโคไซยานินจากสาหร่ายสไปรูลิน่าประกอบด้วยกรดอะมิโนจำเป็นที่เป็นประโยชน์ต่อร่างกาย รวมถึงคาร์โบไฮเดรต ไขมัน วิตามิน และแร่ธาตุอื่น ๆ อีกหลายชนิด ซึ่งสามารถนำมาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์อาหารฟังก์ชันต่าง ๆ ที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง เหมาะสมต่อผู้บริโภคที่รักสุขภาพ