

## บทที่ 2

### แนวคิด ทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

#### สไปรูลิน่า

สไปรูลิน่า (*Spirulina*) เป็นสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (blue-green algae) จัดอยู่ในดิวิชัน Cyanophyta มีรูปร่างลักษณะเป็นทริยโคมขดเป็นเกลียว เกลียวอาจแน่นหรือห่างแล้วแต่ชนิด เดิมเชื่อกันว่า *Spirulina* มีลักษณะเป็นเส้นสาย สายเดี่ยวที่ไม่มีผนังกั้น แต่ Holmgren, Hostetter & Scholes (1971) ได้ศึกษาสกุลนี้โดยละเอียดด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน จึงได้พบว่า *Spirulina* มีผนังบาง ๆ กั้นเซลล์เหมือนลักษณะของ *Arthrospira* จึงรวม *Spirulina* และ *Arthrospira* ไว้ในสกุลเดียวกัน สไปรูลิน่า เป็นสาหร่ายที่มีโปรตีนสูงถึง 50-70 % ของน้ำหนักแห้ง และมีอัตราการสังเคราะห์แสงค่อนข้างสูง ปัจจุบันมีการเพาะเลี้ยงในชั้นอุตสาหกรรม โดยผลิตเป็นอาหารเสริมสุขภาพ ชนิดที่นิยมเลี้ยงคือ *S. platensis* (ลัดดา วงศ์รัตน์, 2542)



ภาพที่ 2.1 รูปร่างลักษณะของสไปรูลิน่า (*Spirulina platensis*)

ที่มา : Rybner (2016)

สำหรับสาหร่ายสไปรูลินามีคุณค่าทางโภชนาการสูง โดยมีปริมาณโปรตีนสูงถึง 50-70 % ของน้ำหนักแห้ง ซึ่งพบสูงกว่าโปรตีนจากอาหารทั่วไป เช่น เนื้อวัว ข้าวสาลี ถั่วเหลือง และไข่ เป็นต้น และที่สำคัญมีกรดอะมิโนที่จำเป็นและบางชนิดมีมากกว่าปริมาณมาตรฐานของ FAO อีกทั้งมีกรดไขมันไม่อิ่มตัวโดยเฉพาะกรดไลโนลินิก (linoleic acid) แร่ธาตุ รวมถึงวิตามิน (โดยเฉพาะวิตามินบี 12 มีมากกว่าระดับถึง 4 เท่า) และรงควัตถุต่าง ๆ อาทิ แคโรทีนอยด์ (carotenoids) และไฟโคไซยานิน (phycocyanin) จากการที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูงนอกจากจะถูกนำมาใช้เป็นอาหารในมนุษย์และสัตว์เพื่อการเจริญเติบโตและช่วยเพิ่มภูมิคุ้มกันแล้ว สไปรูลินายังถูกนำมาใช้เพื่อเพิ่มสีส้มในเนื้อสัตว์ให้มีความน่ารับประทาน ใช้เพิ่มสีส้มในสัตว์น้ำสวยงาม ใช้เป็นสีผสมอาหารและเครื่องสำอางที่มีความปลอดภัยสูง ปัจจุบันยังมีการศึกษาและพัฒนากระบวนการเลี้ยงเพื่อผลิตสารออกฤทธิ์ชีวภาพที่มีความสำคัญทางการแพทย์อีกด้วย (มณชัย เดชสังกรานนท์ และคนอื่น ๆ, 2557)

### ปัจจัยที่มีผลต่อการเจริญเติบโต

การเจริญเติบโตของสไปรูลินาขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ ดังต่อไปนี้

1. แสง มีผลต่อปริมาณองค์ประกอบ อัตราการเจริญ และผลผลิตของสไปรูลินา รวมทั้งการสะสมของรงควัตถุต่าง ๆ เนื่องจากรงควัตถุแต่ละชนิดสามารถรับพลังงานแสงได้ที่ความยาวคลื่นต่าง ๆ ความยาวคลื่นที่สไปรูลินาสามารถนำไปสังเคราะห์แสงได้เป็นความคลื่นเดียวกับความยาวคลื่นที่พืชทั่วไปใช้ในการสังเคราะห์แสง คือ 400-700 นาโนเมตร (Trissl, 1993) และความเข้มแสง 4,000-5,000 ลักซ์ (lux) (Nakamura, 1982) ซึ่งความเข้มแสงที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิตจำพวกโฟโตออโทรอฟ พบว่าในสภาวะที่มีความเข้มแสงน้อยมาก ๆ เซลล์จะไม่มี การเจริญเติบโต แต่เซลล์จะมีการเจริญเติบโตเพิ่มมากขึ้นเมื่อความเข้มแสงเพิ่มขึ้น และจะหยุดการเจริญเติบโตเมื่อความเข้มแสงมากถึงในระดับหนึ่ง (light saturation) ณ สภาวะที่ความเข้มแสงเพิ่มขึ้นแล้วอัตราการเจริญเติบโตของเซลล์ลดลงคือจุดที่เกิดการยับยั้งการสังเคราะห์แสง (light inhibition) (Ogbonna & Tanaka, 2000) อย่างไรก็ตามพบว่า *S. platensis* ที่เลี้ยงในช่วงความเข้มแสง 2,000-4,000 ลักซ์ จะมีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงที่สุด และเมื่อความเข้มแสงมากกว่า 4,000 ลักซ์ เซลล์จะหยุดการเจริญเติบโต (Feng, Zhang, & Guo, 1996)

2. อุณหภูมิ มีความสำคัญต่ออัตราการเกิดปฏิกิริยาต่าง ๆ ภายในเซลล์ ความสามารถในการแพร่ผ่านของสารต่าง ๆ การทำงานของเอนไซม์ ซึ่งส่งผลต่อการเจริญเติบโตและการสืบพันธุ์ ทั้งนี้สาหร่ายไม่สามารถปรับตัวได้เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิประมาณ 10-15 องศาเซลเซียส หรือมากกว่าอย่างรวดเร็ว สำหรับอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญของสไปรูลินามีค่าอยู่ในช่วง 28-34 องศาเซลเซียส หากอุณหภูมิต่ำกว่า 20 องศาเซลเซียส และสูงกว่า 37 องศาเซลเซียส ไม่เหมาะสมต่อ

การเจริญของสไปรูลิना สำหรับอุณหภูมิที่เป็นอันตรายต่อเซลล์ของสไปรูลิना มีค่ากว่า 15 องศาเซลเซียส และสูงกว่า 40 องศาเซลเซียส (Richmond & Soeder, 1986)

3. ความเป็นกรด-เป็นด่าง (pH) มีผลต่อกระบวนการเมตาโบลิซึมของเซลล์สาหร่าย พบว่าสไปรูลินาสามารถเจริญได้อย่างหนาแน่นในแหล่งน้ำที่มีความเป็นกรดเป็นด่าง 8.5-11 (Venkataraman, 1983) และจะเจริญลดลงเมื่อมีค่าสูงกว่า 11 (Nakamura, 1982)

4. ความหนาแน่นเริ่มต้น ปริมาณความหนาแน่นเซลล์เริ่มต้นของสไปรูลินาที่เหมาะสมเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการเพาะเลี้ยงและมีความสัมพันธ์กับความเข้มของแสงที่เพิ่มขึ้น ความหนาแน่นเริ่มต้นที่เหมาะสมของสไปรูลินาควรมีค่า (OD, 560nm) 0.6 หรือปริมาณสไปรูลินาเริ่มต้น 2 กรัม (น้ำหนักเปียก) ต่อน้ำ 1 ลิตร หรือ 3 ลิตร (พิมพ์พรรณ ต้นสกุล และอารักษ์ จันทศิลป์, 2531) หากความหนาแน่นเริ่มต้นสูงเกินไป จะทำให้เกิดการบังกันเองทำให้การได้รับแสงและประสิทธิภาพในการหายใจลดลง และถ้าความหนาแน่นเริ่มต้นของสไปรูลินาต่ำ ความเข้มแสงสูงจะทำให้เกิดการตายซึ่งมีสาเหตุมาจาก photo-oxidation (Venkataraman, 1983)

5. ผลของการกวน การกวนผสมด้วยความเร็วที่เหมาะสมจะช่วยป้องกันสาหร่ายนอนกัน ทำให้ไม่เกิดการสะสมของสารอินทรีย์และการย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน ซึ่งอาจปลดปล่อยเมแทบอลิท์ที่ไม่ต้องการสู่อาหารเพาะเลี้ยง การกวนผสมจะช่วยเพิ่มอัตราการถ่ายเทมวลระหว่างเซลล์กับอาหารที่ใช้เพาะเลี้ยง รวมทั้งการใช้สารอาหารและการปลดปล่อยสารเมแทบอลิท์ต่าง ๆ สู่ของเหลว นอกจากนี้ยังช่วยกระจายเซลล์และส่งผลให้เซลล์ได้รับพลังงานจากแสงอย่างทั่วถึง ดังนั้นการออกแบบการกวนให้มีประสิทธิภาพจึงมีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตจากสาหร่าย การกวนในอัตราที่เร็วเกินไปจะทำให้เกิดฟองก๊าซทำให้การเผาผลาญอาหารมีประสิทธิภาพน้อยลง ในสภาวะที่ความหนาแน่นของเซลล์สูงหรือการเพาะเลี้ยงในบ่อขนาดใหญ่ช่วงกลางวัน ซึ่งเป็นสภาวะที่มีการสังเคราะห์แสงค่อนข้างมาก จึงส่งผลให้ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำสูงขึ้น ดังนั้นการกวนในอัตราเร็วที่สูงมากสามารถลดปริมาณออกซิเจนละลายน้ำลงได้ นอกจากนี้ยังมีรายงานว่า การออกแบบการกวนแบบปั่นป่วนจะช่วยลดปัญหาเซลล์บังกันเองภายในบ่อ เป็นผลให้แต่ละเซลล์ได้รับแสงอย่างเพียงพอและเกิดการสังเคราะห์แสงได้อย่างทั่วถึง (Tamiya, 1957)

6. ธาตุอาหาร โดยทั่วไปอาหารสูตรที่ใช้เลี้ยงสาหร่ายจะประกอบด้วยธาตุอาหาร 2 ประเภท โดยอาศัยปริมาณที่พืชต้องการใช้เพื่อการเจริญเติบโต ดังนี้ (ลัดดา วงศ์รัตน์, 2542)

6.1 ธาตุอาหารหลัก เป็นธาตุอาหารที่สาหร่ายจำเป็นต้องใช้ในปริมาณค่อนข้างมาก เนื่องจากเป็นองค์ประกอบของโครงสร้างเซลล์ ประกอบด้วย คาร์บอน ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส ซัลเฟอร์ แคลเซียม โปแตสเซียม แมกนีเซียม และแคลเซียม

6.2 ธาตุอาหารรอง ประกอบด้วยธาตุอาหารที่พืชต้องการใช้ปริมาณค่อนข้างน้อย ซึ่งเมื่อเติมลงในอาหารจะช่วยให้สาหร่ายเจริญเติบโตดีขึ้น ถ้าไม่ใช้การเติบโตจะช้าลงกว่าเล็กน้อย โดย

แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มย่อย คือ ธาตุอาหารรองอินทรีย์ ซึ่งประกอบด้วย เหล็ก แมงกานีส แคลเซียม สังกะสี ทองแดง โคบอลต์ โบรอน โซเดียม (เฉพาะสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน) และซิลิกา (เฉพาะไดอะตอม) เป็นต้น และธาตุอาหารรองอินทรีย์ ประกอบด้วย คาร์โบไฮเดรต เกลืออินทรีย์ วิตามิน และปัจจัยที่ควบคุมการเจริญเติบโต (growth factor)

สำหรับอาหารสูตรที่นิยมใช้ในการเลี้ยง *Spirulina* ในห้องปฏิบัติการ คือ อาหารสูตรซาร์รูก (Zarrouk medium) ซึ่งประกอบด้วยธาตุอาหารทั้งหมด 20 ชนิด และมีวิธีการเตรียมค่อนข้างยุ่งยาก ซึ่งในการเพาะเลี้ยงปริมาณมากนิยมใช้สูตรดัดแปลงซึ่งใช้ธาตุอาหารหลัก 9 ชนิด โดยไม่ใส่สารละลาย A5 (ประกอบด้วยธาตุอาหารรอง 5 ชนิด) สารละลาย B6 (ประกอบด้วยธาตุอาหารรอง 6 ชนิด) อย่างไรก็ตามอาหารสูตรดังกล่าวยังมีการใช้สารเคมีค่อนข้างมาก และมีสารตกค้างสู่สิ่งแวดล้อมเป็นปริมาณมาก จึงมีผู้วิจัยจำนวนมากทำการศึกษาสารอินทรีย์จากน้ำหมักต่าง ๆ เพื่อลดต้นทุนและการตกค้างของสารเคมี แต่พบว่าผลผลิตยังน้อยเมื่อเทียบกับอาหารสูตรซาร์รูก

## ไฟโคไซยานิน

Phycocyanin เป็นสารประกอบสีน้ำเงิน เรืองแสงได้ ละลายน้ำได้ และมีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ คุณสมบัติเหล่านี้แตกต่างกันไปขึ้นกับสายพันธุ์ วิธีการเพาะเลี้ยงสาหร่าย วิธีการสกัด Phycocyanin ออกจากเซลล์และกระบวนการหลังการสกัด Phycocyanin สามารถดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่นระหว่าง 615-620 นาโนเมตร และมีการปลดปล่อยแสงที่มีความยาวคลื่นประมาณ 650 นาโนเมตร อย่างไรก็ตามน้ำหนักโมเลกุล ความสามารถในการดูดกลืนแสงของ Phycocyanin จะขึ้นอยู่กับค่าความเป็นกรด-เป็นด่าง (pH) ของสารละลาย อุณหภูมิ ความเข้มข้นของโปรตีน และแหล่งที่มาของสาหร่าย (Sanjiv, Anupama & Sandhya, 2008) ไฟโคไซยานิน มีสมบัติด้านการต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant capacity) ยับยั้งปฏิกิริยา lipid peroxidation ป้องกันการอักเสบ (anti-inflammatory capacity) ยับยั้งเซลล์มะเร็ง (anticancer capacity) สมบัติการต้านแบคทีเรีย ราคาของ Phycocyanin ขึ้นอยู่กับความบริสุทธิ์ พบว่า Phycocyanin เกรดอาหารมีความบริสุทธิ์เท่ากับ 0.7 จะมีราคาประมาณ 0.13 ดอลลาร์สหรัฐต่อมิลลิกรัม ในขณะที่เกรดวิเคราะห์มีค่าความบริสุทธิ์เท่ากับ 3.9 และมากกว่า 4.0 จะมีราคาประมาณ 15 ดอลลาร์สหรัฐต่อมิลลิกรัม (Rybner, 2016)

## ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการสะสมไฟโคไซยานินของสไปรูลิน่า

การสะสมของ Phycocyanin จะขึ้นอยู่กับปัจจัยสิ่งแวดล้อมทั้งทางด้านกายภาพและเคมีหลายประการ เช่น ความเข้มแสง อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรด-เป็นด่าง และปริมาณไนโตรเจน เป็นต้น Feng, Zhang & Guo (1996) พบว่าความเข้มแสง พบว่า *S. platensis* ที่เลี้ยงในช่วงความเข้มแสง 2,000-4,000 ลักซ์ จะมีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงที่สุด และเมื่อความเข้มแสงมากกว่า 4,000

ล็กซ์ เซลล์จะหยุดการเจริญเติบโต เมื่อพิจารณาปริมาณ Phycocyanin พบว่า Phycocyanin จะลดลงเมื่อเลี้ยงในสภาวะที่มีความเข้มแสงน้อย ๆ และพบว่ามีความเข้มแสงเท่ากับ 4,000 ล็กซ์ และแสงสีขาวจะส่งผลต่อการสะสมคลอโรฟิลล์มากที่สุด (5.5 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร) แต่มีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของรงควัตถุอื่น ๆ (Phycocyanin, Carotenoids, และ Phycoerythrin) น้อยมาก แสงสีฟ้าจะกระตุ้นให้เกิดการสะสม Chlorophyll และ Phycocyanin เพิ่มขึ้นเท่ากับ 7 และ 2 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร ตามลำดับ แสงสีเขียวจะส่งผลเสียต่อการสะสมรงควัตถุทุกชนิด ยกเว้น Phycocyanin ส่วนการใช้แสงสีแดงพบว่าไม่ส่งผลต่อค่าเฉลี่ยของอัตราการผลิตรงควัตถุทุกชนิด ยกเว้น Phycocyanin ที่มีแนวโน้มการผลิตเพิ่มมากขึ้น (Madhyastha & Vatsala, 2007) Chaiklahan et al. (2007) พบว่าเมื่อเพาะเลี้ยง *S. platensis* ที่ความเข้มแสง 100 ไมโครโปรตอน/ตารางเมตร/วินาที อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส จะมีอัตราการเจริญเติบโต 0.0247 ต่อชั่วโมง และพบว่าหากเพิ่มอุณหภูมิเป็น 43 องศาเซลเซียส อัตราการเจริญเติบโตจะลดลงเหลือ 0.008 ต่อชั่วโมง

### กรรมวิธีการผลิตผงสีไฟโคไซยานิน

มณฑลย์ เศษสังกรานนท์ และคนอื่น ๆ (2557) ได้ศึกษากระบวนการเพาะเลี้ยงสไปรูลิน่าเพื่อการผลิต Phycocyanin โดยนำอาหารที่เหลือจากการเพาะเลี้ยงกลับมาเพาะเลี้ยงใหม่ พบว่าสามารถนำอาหารที่เหลือจากการเพาะเลี้ยงมาใช้ในการเพาะเลี้ยงได้อีก 1 ครั้งเท่านั้น สำหรับการพัฒนกรรมวิธีการผลิตผงสี Phycocyanin เกรดอาหารจากสาหร่ายสไปรูลิน่า โดยนำชีวมวลสาหร่ายไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส นาน 6 ชั่วโมง (ความชื้นน้อยกว่า 10%) และบดให้มีขนาดเล็กกว่า 0.25 มิลลิเมตร แล้วนำไปสกัด Phycocyanin โดยผสมกับน้ำในอัตราส่วน 1 : 4 (น้ำหนัก/น้ำหนัก) จากนั้นนำของผสมที่ได้ทำให้เป็นเนื้อเดียวกันด้วยโฮโมจิไนซ์เซอร์ (3,200 รอบ/นาที นาน 10 นาที) ที่อุณหภูมิห้อง แล้วนำไปบดด้วยเครื่องบดสี (dynamill) เป็นจำนวน 4-5 รอบ เพื่อทำลายผนังเซลล์ จากนั้นปรับค่าความเป็นกรดเป็นด่างให้ได้เท่ากับ 5 ด้วยสารละลายกรดซิตริกความเข้มข้น 50 % เพื่อตกตะกอนโปรตีนปนเปื้อน แล้วนำไปปั่นเหวี่ยงที่ 590 กรัม นาน 1 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง นำส่วนใสที่มี Phycocyanin ละลายอยู่ไปทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่อุณหภูมิ -40 องศาเซลเซียส จนมีค่าวอเตอร์แอกติวิตี้น้อยกว่า 0.4 แล้วนำไปบดให้ละเอียดจนได้เป็นผงสี Phycocyanin เกรดอาหาร โดยผงสีที่พัฒนาได้มีค่าความบริสุทธิ์เท่ากับ 0.71 มีความเข้มข้นของ Phycocyanin เท่ากับ 130 มิลลิกรัม/กรัม

## เคย

เคย (Krill) เป็นแพลงก์ตอนสัตว์กลุ่มครัสเตเชีย (Crustacea) Phylum Arthropoda ที่มีลักษณะคล้ายกุ้ง แพร่กระจายอยู่ทั่วไปในทะเลและมหาสมุทร เป็นสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังที่มีความสำคัญมากในระบบนิเวศ เนื่องจากเป็นอาหารของสัตว์หลายชนิด เคยที่พบมีประมาณ 85 ชนิด (species) พบมากในแถบขั้วโลกใต้ อาร์กติก แอนตาร์กติก และอเมริกาเหนือ รวมทั้งที่พบในมหาสมุทรแปซิฟิก ส่วนใหญ่เป็นเคยในสกุล *Euphausia* ซึ่งมีคุณค่าทางอาหารสูงโดยเฉพาะอย่างยิ่งมีกรดอะมิโนที่จำเป็นต่อร่างกายอยู่ครบถ้วน การวิเคราะห์คุณค่าทางอาหารพบว่า มีโปรตีนมากกว่า 50% โดยน้ำหนัก เคยสกุล *Euphausia* ที่มักนำมาใช้ทำกะป็นั้น มีปริมาณโปรตีน 70%, ไขมัน 10.7%, เกล็ด 12.6%, คาร์โบไฮเดรต 8.5%, ความชื้น 1.3% กรดไขมันไม่อิ่มตัว (HUFA : highly unsaturated fatty acids) ประมาณ 40% ของกรดไขมัน มีฟอสฟอรัส 13% นอกจากกรดอะมิโนและกรดไขมันที่จำเป็นหลายชนิดแล้ว เคยยังมีแร่ธาตุหลายชนิด ได้แก่ ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม นิเกิล โครเมียม แมงกานีส โคบอลต์ อลูมิเนียม คอปเปอร์ เหล็ก สังกะสี และซิลิเนียม (วันที สว่างอารมณ์ และคนอื่น ๆ, 2549)

สำหรับประเทศไทยส่วนใหญ่พบเคยในสกุล *Mesopodopsis* และ *Acetes* ซึ่งถูกนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการทำผลิตภัณฑ์อาหารหมักโดยเฉพาะกะปิ และพบว่าเคยสดในสกุล *Mesopodopsis* มีปริมาณโปรตีน 12.09%, ไขมัน 1.26%, เกล็ด 2.27%, ความชื้น 86.25%, เกล็ด 1.16%, แคลเซียม 589.73 มิลลิกรัม/100 กรัม และฟอสฟอรัส 654.26 มิลลิกรัม/100 กรัม เคยสกุล *Acetes* มีปริมาณโปรตีน 8.88%, ไขมัน 1.25%, เกล็ด 2.59%, ความชื้น 86.74%, เกล็ด 1.26%, แคลเซียม 844.47 มิลลิกรัม/100 กรัม และฟอสฟอรัส 466.83 มิลลิกรัม/100 กรัม ตามลำดับ (อรวรรณ คงพันธุ์ และวัชร กระจรัตน์, 2556) และพบว่ากะปิจากเคยมีสารอาหารครบ 5 หมู่ ในปริมาณที่แตกต่างกันตามคุณภาพของกะปิ นอกจากนี้แล้วยังพบธาตุเหล็ก วิตามินเอ วิตามินบี 2 และไนอาซิน อีกด้วย

เคยนอกจากนำมาใช้เป็นวัตถุดิบสำหรับทำกะปิที่เป็นที่นิยมบริโภคกันมากในประเทศเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ เนื่องจากมีรสชาติเฉพาะและมีสารอาหารสูง มีกลิ่นรสที่ช่วยให้เจริญอาหารแล้ว ในกระบวนการทำกะปียังมีส่วนที่เป็นของเหลวที่เป็นผลพลอยได้จากการหมักเคยกับเกลือ หรือที่เรียกกันว่าน้ำหมักเคยก็สามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ โดยนำมาใช้ผลิตเป็นซอสปรุงรส สำหรับปรุงอาหารชนิดต่าง ๆ และยังพบว่าน้ำหมักเคยมีปริมาณโปรตีนอยู่ประมาณ 2.50% (สุพรรณพันธ์ โลหะลักษณะเดช และชุตินุช สุจริต, 2557)

## งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

อภิขญา ใจดวง และรัฐภูมิ พรหมณะ (2562) ศึกษาปริมาณ Phycocyanin, Allophycocyanin และ Phycoerythrin ใน *S. platensis* เพาะเลี้ยงด้วยอาหารสูตร 4 ชนิด ได้แก่ อาหารสูตร Z (ประกอบด้วย  $\text{NaHCO}_3$  เท่ากับ 16.8 กรัม/ลิตร,  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  เท่ากับ 0.5 กรัม/ลิตร,  $\text{NaNO}_3$  เท่ากับ 2.5 กรัม/ลิตร,  $\text{K}_2\text{SO}_4$  เท่ากับ 1.0 กรัม/ลิตร,  $\text{NaCl}$  เท่ากับ 1.0 กรัม/ลิตร,  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  เท่ากับ 0.2 กรัม/ลิตร,  $\text{CaCl}_2$  เท่ากับ 0.04 กรัม/ลิตร,  $\text{FeSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  เท่ากับ 0.01 กรัม/ลิตร, EDTA เท่ากับ 0.1 กรัม/ลิตร, A5 solution เท่ากับ 1.0 มิลลิลิตร) อาหารสูตร N (ประกอบด้วย  $\text{NaHCO}_3$  เท่ากับ 8.5 กรัม/ลิตร,  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  เท่ากับ 0.5 กรัม/ลิตร,  $\text{NaNO}_3$  เท่ากับ 1.5 กรัม/ลิตร) อาหารสูตร CH1 (ประกอบด้วย  $\text{NaHCO}_3$  เท่ากับ 8.5 กรัม/ลิตร,  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  เท่ากับ 0.5 กรัม/ลิตร,  $\text{NaNO}_3$  เท่ากับ 1.5 กรัม/ลิตร,  $\text{NPK}_{16}\text{-H}$  เท่ากับ 0.6 กรัม/ลิตร) และสูตร อาหารสูตร CL1 (ประกอบด้วย  $\text{NaHCO}_3$  เท่ากับ 8.5 กรัม/ลิตร,  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  เท่ากับ 0.5 กรัม/ลิตร,  $\text{NaNO}_3$  เท่ากับ 1.5 กรัม/ลิตร,  $\text{NPK}_{16}\text{-L}$  เท่ากับ 0.6 กรัม/ลิตร) อาหารสูตร CH1 และ CL1 ให้ผลผลิตสาหร่ายสไปรูลิน่าที่มีน้ำหนักแห้ง 1.81 และ 1.73 กรัม/ลิตร ตามลำดับ สูงกว่าที่เลี้ยงด้วย Z และ N คือ 0.70 และ 0.95 กรัม/ลิตร ตามลำดับ แต่พบว่าสาหร่ายแห้ง 1 กรัม มีปริมาณ Phycocyanin ในสาหร่ายที่เพาะเลี้ยงด้วยอาหารสูตร Z สูงสุด 100.14 มิลลิกรัม เนื่องจากมีองค์ประกอบของไนโตรเจนมากที่สุด เมื่อเทียบกับอาหารสูตรอื่น จากผลการศึกษานี้สามารถสรุปได้ว่าองค์ประกอบสารเคมีที่เติมลงในอาหารเพาะเลี้ยงมีผลต่อ Phycocyanin และปริมาณ Phycocyanin อาจลดลง หากเพาะเลี้ยงด้วยสารอาหารที่มีปริมาณไนโตรเจนไม่เพียงพอต่อการเจริญเติบโต เนื่องจากสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินสามารถดึงไนโตรเจนจากโครงสร้างส่วนประกอบของ Phycocyanin ใช้เพื่อการเจริญเติบโตทดแทน ดังนั้นการเพิ่มปริมาณ Phycocyanin ในสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินสามารถทำได้ด้วยการเพิ่มปริมาณไนโตรเจนในอาหารเลี้ยง แต่ควรพิจารณาปัจจัยอื่นประกอบด้วย

รชนิมุข หิรัญสังจาเลิศ และคนอื่น ๆ (2558) ศึกษาผลของความเข้มแสงต่อปริมาณ Phycocyanin ในสาหร่าย *Arthrospira* sp. โดยทำการเลี้ยงภายใต้สภาวะความเข้มแสงปกติ (1 กิโลลักซ์) และสูง (4 กิโลลักซ์) เป็นเวลา 25 และ 40 วัน ตามลำดับ พบว่าภายใต้สภาวะความเข้มแสงสูง *Arthrospira* sp. มีการเจริญเติบโตเร็วกว่าความเข้มแสงปกติ แต่จะมีปริมาณ Phycocyanin ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ ) เมื่อเทียบกับการเลี้ยงที่ภายใต้สภาวะความเข้มแสงปกติ

อรพรรณ พรหมธนพันธ์, คมศักดิ์ พิณระ และรัฐภูมิ พรหมณะ (2558) ศึกษาผลของสารอาหารต่อฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของ *S. platensis* โดยใช้อาหารสูตร 8 สูตร ประกอบด้วยอาหารสูตรเคมีและอาหารสูตรเคมีร่วมกับน้ำเสียปลาหมัก พบว่าสาหร่ายสไปรูลิน่าที่เลี้ยงด้วยอาหารสูตรเคมีร่วมกับน้ำเสียปลาหมักให้ชีวมวลอันมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงกว่าสไปรูลิน่าที่เลี้ยงด้วยอาหารสูตรที่ไม่มีน้ำเสียปลาหมักอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ( $p < 0.05$ )

สุวรรณิ ไทยอุดมทรัพย์ (2553) ศึกษาการเพาะเลี้ยงสไปรูลิน่าโดยใช้อาหารอินทรีย์ที่ได้จากวัสดุที่มีในท้องถิ่นประกอบด้วยน้ำหมักเศษเหลือจากปลาทุ ปลา กาด และพืช ได้แก่ ย่านยา มะละกอ กระจิน และผักโขม ที่หมักด้วยกระบวนการหมักแบบไม่มีอากาศที่ใช้วัสดุหมัก : น้ำ : น้ำตาลทราแดง = 1 : 1 : 0.1 (w/v/w) กลางแจ้งนาน 30 วัน สำหรับเลี้ยงสไปรูลิน่า ความเข้มข้น 0.1% และ 0.3% เปรียบเทียบกับอาหารสูตร Zarrouk และ สูตร Zarrouk ดัดแปลง (อาหารทดลองที่ใช้ส่วนประกอบหลัก 9 ชนิด ไม่มีสารละลาย A5 และ B6) และอาหารอย่างง่าย (ส่วนประกอบหลัก 3 ชนิดจากอาหารสูตร Zarrouk ได้แก่ โซเดียมโบคาร์บอเนต, โซเดียมไนเตรท และไดโพแทสเซียมไฮโดรเจนฟอสเฟต) และการเพาะเลี้ยงในน้ำหมักอินทรีย์ผสมสูตรเคมี ทำการเพาะเลี้ยงสไปรูลิน่า ความหนาแน่นเริ่มต้น 0.5 (OD, 560 nm) ปริมาตร 10 ลิตร ในสภาวะกึ่งธรรมชาติที่ได้รับความเข้มแสง 2,500 - >50,000 ลักซ์ อุณหภูมิ 37-40 องศาเซลเซียส ความเป็นกรดเป็นด่าง 8.35-11.16 เพาะเลี้ยงจนกระทั่งความหนาแน่นสูงที่สุดจึงยุติการทดลอง พบว่าสไปรูลิน่าที่เลี้ยงด้วยสูตร Zarrouk เต็มสูตร มีการเจริญและผลผลิตดีที่สุด ดีกว่าเมื่อลดปริมาณสารอาหารลงเหลือ 50% และดีกว่าเมื่อใช้อาหารสูตรดัดแปลงทุกความเข้มข้น และอาหารอินทรีย์อย่างมีนัยสำคัญ การใช้อาหารสูตร Zarrouk ปกติที่มีสารอาหารเพียง 50% สไปรูลิน่าเจริญได้ 87.2% มีน้ำหนักแห้ง 82% ของ สไปรูลิน่าที่เพาะเลี้ยงด้วยอาหารสูตรปกติเต็มสูตร เนื่องจากสูตร Zarrouk มีปริมาณไนเตรทตั้งต้นสูงกว่าอาหารอินทรีย์มาก น้ำหมักจากปลาทุทำให้สไปรูลิน่าเจริญได้ดีกว่าน้ำหมักจากพืช และการผสมน้ำหมักปลาทุ 0.1% ในสูตร Zarrouk ดัดแปลง ทำให้ สไปรูลิน่าเจริญได้ดีกว่าเมื่อไม่เติมน้ำหมักอย่างมีนัยสำคัญยิ่ง ( $p < 0.01$ ) แต่ยังคงต่ำกว่าเมื่อใช้ Zarrouk ปกติ โดยพบว่าการเติมน้ำหมักปลาทุ 0.1% ในสูตรดัดแปลงทำให้สไปรูลิน่าเจริญได้ความหนาแน่นและน้ำหนักแห้งใกล้เคียงกับการเลี้ยงด้วยสูตร Zarrouk ปกติ คือ 83-84% และ 87.8% ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากสไปรูลิน่าสามารถใช้ไนเตรทได้เพิ่มมากขึ้นเป็นหลัก ผลในส่วนนี้เกิดเนื่องจากการที่ในอาหารมีน้ำหมักที่มี growth promoting factors หลายชนิดที่เป็น trace elements ที่มีบทบาทสำคัญช่วยให้สไปรูลิน่าเจริญได้ดีขึ้น ในที่นี้ทำให้เห็นว่าน้ำหมักอินทรีย์ต้องให้ trace elements ที่ดีมากแก่สไปรูลิน่า แต่ยังไม่สามารถทดแทนสารอาหาร A5 และ B6 ในสูตร Zarrouk ปกติได้ทั้งหมด และการเติม 0.1% น้ำหมักปลาทุใน สูตร Zarrouk ดัดแปลง 25% และ 50% มีโปรตีนสูงกว่าสไปรูลิน่าที่เลี้ยงด้วยสูตร Zarrouk ปกติอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีโปรตีนถึง 70.32-71.07% น้ำหนักแห้ง ในขณะที่สไปรูลิน่าที่เลี้ยงด้วยสูตร Zarrouk ปกติ มีเปอร์เซ็นต์โปรตีน 63.54-64.10% น้ำหนักแห้ง และพบว่าการเพาะเลี้ยงสไปรูลิน่าในอาหารอินทรีย์ ถึงแม้จะให้ผลผลิตในปริมาณที่ต่ำกว่าการเพาะเลี้ยงในอาหารเคมีแต่เมื่อผสมอาหารอินทรีย์ในอาหารเคมีที่มีการลดปริมาณลง ทำให้สไปรูลิน่ามี Chlorophyll รวม Carotenoids และ Phycocyanin สูงกว่าการเพาะเลี้ยงในอาหารเคมีอย่างเดียว และปริมาณสารอาหารที่เหลือหลังจากการเก็บเกี่ยวผลผลิตในชุดการทดลองที่ใช้อาหารอินทรีย์มีปริมาณน้อยกว่าปริมาณที่มีในอาหารเคมี

มาก อย่างไรก็ตามปริมาณ Phycocyanin ของสไปรูลิน่าขึ้นอยู่กับปริมาณสารอาหารที่ได้รับจากการทดลอง โดยสไปรูลิน่าที่เพาะเลี้ยงในอาหารอินทรีย์มีปริมาณ Phycocyanin ต่ำกว่าการเพาะเลี้ยงในอาหารเคมีที่ผสมอาหารอินทรีย์ สไปรูลิน่าที่เพาะเลี้ยงในอาหารเคมีผสมอาหารอินทรีย์ในการศึกษานี้ยังมี Phycocyanin 20.50-22.66 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งสูงกว่าการเพาะเลี้ยงในอาหารอินทรีย์ (15.20-18.46 มิลลิกรัม/ลิตร) และอาหารเคมี (15.53-19.83 มิลลิกรัม/ลิตร) ไม่มากนัก อาจเนื่องมาจากการมีอาหารอินทรีย์ในปริมาณน้อยเกินไป อย่างไรก็ตามการเพาะเลี้ยงสไปรูลิน่าด้วยอาหารอินทรีย์ผสมอาหารเคมี ทำให้ได้สไปรูลิน่าที่มีคุณภาพที่ดียิ่งขึ้น หากสามารถจัดการการใช้น้ำหมักได้ดีขึ้น น่าจะสามารถทำให้คุณภาพส่วนนี้ของสไปรูลิน่าดีขึ้นได้เช่นกัน

เนื่องจากการใช้สารอินทรีย์ เช่น น้ำหมักจากปลาชนิดต่าง ๆ น้ำหมักจากพืช หรือมูลสัตว์ มีปริมาณธาตุอาหารน้อย เมื่อเทียบกับสูตรปุ๋ยเคมีที่ใช้ในการเลี้ยงสไปรูลิน่า แต่น้ำหมักเหล่านี้มี growth factor ส่งผลให้สามารถใช้ในการเสริมการเจริญเติบโตของปุ๋ยเคมีได้ดัดแปลงและทำให้สไปรูลิน่าเจริญเติบโตใกล้เคียงกับสูตรปุ๋ยเต็มสูตร แต่มีความยุ่งยากในการเตรียมน้อยกว่า และยังส่งผลให้มีปริมาณของ Phycocyanin สะสมในปริมาณที่สูงกว่า

Khazi, Demirei & Dalay (2018) ศึกษาการเพิ่มมวลชีวภาพและปริมาณ Phycocyanin ใน *S. platensis* พบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการเลี้ยงสไปรูลิน่าเพื่อให้ได้มวลชีวภาพและ Phycocyanin ดีที่สุด คือ ควรเลี้ยงที่อุณหภูมิ  $33 \pm 2$  องศาเซลเซียส, ความเข้มแสง 44 ไมโครโวลต์ โปตอน/ตารางเมตร/วินาที และการกวน 120 รอบ/นาที จะทำให้ได้มวลชีวภาพ 1.32 กรัม/ลิตร และ Phycocyanin 127 มิลลิกรัม/ลิตร ในระยะเวลา 10 วัน เมื่อเลี้ยงในพลาสติก แต่ถ้าเลี้ยงในระบบโฟโตไบโอรีแอคเตอร์ ในเวลา 15 วัน ภายใต้สภาวะที่เหมาะสมในการเลี้ยง ( $33 \pm 2$  องศาเซลเซียส, ความเข้มแสง 44 ไมโครโวลต์ โปตอน/ตารางเมตร/วินาที) โดยมีอัตราการไหล 2.5 ลิตร/นาที จะได้มวลชีวภาพ 2.42 กรัม/ลิตร และ Phycocyanin 228 มิลลิกรัม/ลิตร

Rajeswari & Deepika (2017) ศึกษาอาหารสูตรอินทรีย์จากของเสียทางการเกษตรและเศษผัก (ปีทูท, ใบองุ่น, รากสน, รำละเอียด, แกลบ) มาใช้ในการเลี้ยงสไปรูลิน่าเปรียบเทียบกับอาหารสูตร Zarrouk ทำการเพาะเลี้ยงเป็นเวลา 21 วัน พบว่าการใช้อาหารสูตรอินทรีย์มีน้ำหนักแห้ง ปริมาณ Chlorophyll a, Carotenoids และ Phycocyanin เท่ากับ 320 มิลลิกรัม/ลิตร, 0.68 มิลลิกรัม/ลิตร,  $25.21 \times 10^{-5}$  ไมโครกรัม/มิลลิลิตร และ 0.563 มิลลิกรัม/ลิตร ตามลำดับ ซึ่งมีค่าสูงกว่าสไปรูลิน่าที่เลี้ยงด้วยอาหารสูตร Zarrouk ซึ่งพบว่ามีค่าเท่ากับ 189 มิลลิกรัม/ลิตร, 0.050 มิลลิกรัม/ลิตร,  $14.10 \times 10^{-5}$  มิลลิกรัม/มิลลิลิตร และ 0.38 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร ตามลำดับ จึงสามารถสรุปสไปรูลิน่าที่เลี้ยงด้วยอาหารสูตรอินทรีย์มีการเจริญเติบโตและปริมาณรงควัตถุสูงกว่าที่เลี้ยงด้วยอาหารสูตร Zarrouk ทั้งยังเป็นการลดต้นทุนการเลี้ยง จึงสามารถเลี้ยงในระดับครัวเรือนและเลี้ยงเป็นการค้าได้

Ajayan, Selvaraju & Thirugnanamoorthy (2012) ศึกษาการเพิ่มของ Chlorophyll และ Phycobiliprotein ใน *S. platensis* โดยใช้แผ่นสะท้อนแสงเปรียบเทียบกับที่ไม่ได้ใช้ และใช้ โปแตสเซียมไนเตรท ( $\text{KNO}_3$ ) และยูเรีย เป็นแหล่งไนโตรเจน พบว่าการใช้แผ่นสะท้อนแสงทำให้มีความเข้มแสง (4,000-6,000 ลักซ์) สูงกว่าที่ไม่ได้มีแผ่นสะท้อนแสง (2,000-3,000 ลักซ์) พบว่าที่ความเข้มแสง 4,000-6,000 ลักซ์ ให้ผลผลิตและไฟโคไซยานินสูงกว่าความเข้มแสงต่ำ และการใช้ ยูเรียเป็นแหล่งไนโตรเจน จะให้ผลผลิตและไฟโคไซยานินสูงกว่าการใช้โปแตสเซียมไนเตรทเป็นแหล่งไนโตรเจน โดยพบว่าที่ความเข้มแสง 4,000-6,000 ลักซ์ และใช้ยูเรียเป็นแหล่งไนโตรเจนให้ผลผลิตสูงที่สุด 6.9 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร รองลงมา ได้แก่ ที่เลี้ยงโดยใช้โปแตสเซียมไนเตรท 6.1 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร

Feng, Zhang & Guo (1996) พบว่า *S. platensis* จะมีอัตราการเจริญเติบโตจำเพาะสูงสุดเท่ากับ 0.62 ต่อวัน เมื่อเลี้ยงในอาหารที่มีกลูโคส 2.5 กรัม/ลิตร และควบคุมอุณหภูมิเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี