จุลสารสำนักวิทยาศาสตร์ ราชบัณฑิตยสภา
ปีที่ ๕ ฉบับที่ ๑ พ.ศ. ๒๕๖๙ (หน้าที่ ๕-๙)

สาหร่ายจุลภาคในฐานะแหล่งสารชีวภัณฑ์ที่มีคุณค่า
(Microalgae as a Source of Valuable Bioproducts)

ปาลญา วุฒิเทียน[๑] และ อรัญ อินเจริญศักดิ์[๑,๒]

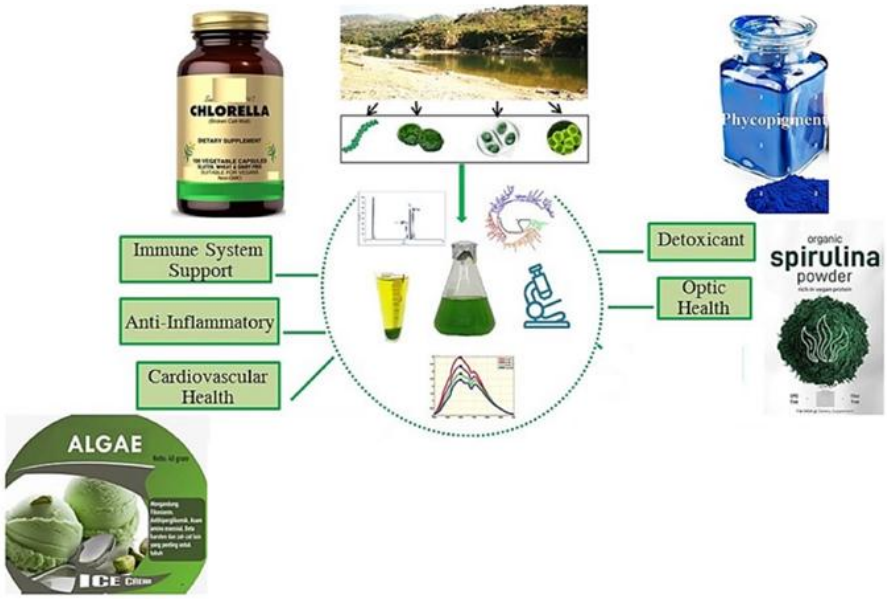
[๑]ภาควิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
[๒]ภาคีสมาชิก สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ชีวภาพ (ชีวเคมี) ประเภทวิชาวิทยาศาสตร์ธรรมชาติ สำนักวิทยาศาสตร์ราชบัณฑิตยสภา, aran.i@chula.ac.th

บทนำ

ปัจจุบัน การแสวงหาวัตถุดิบและแหล่งอาหารทางเลือกเพื่อพัฒนาระบบการผลิตอาหารอย่างยั่งยืนตลอดจนการสร้างผลิตภัณฑ์มูลค่าสูงในกลุ่มส่งเสริมสุขภาพ มีความสำคัญอย่างต่อเนื่อง สาหร่ายจุลภาค (microalgae) และไซยาโนแบคทีเรีย (cyanobacteria) ที่แต่เดิมเรียกว่าสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (blue-green algae) เป็นทางเลือกธรรมชาติที่ได้รับความสนใจอย่างกว้างขวางในฐานะแหล่งโภชนาการศักยภาพสูงสำหรับการบริโภคของมนุษย์ เนื่องจากอุดมไปด้วยสารอาหารที่จำเป็น สารต้านอนุมูลอิสระ และสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ เช่น กรดไขมันจำเป็น วิตามิน กรดแอมิโน พอลิฟีนอล พอลิแซ็กคาไรด์ รวมถึงรงควัตถุกลุ่มแคโรทีนอยด์ เช่น บีตาแคโรทีน แอสทาแซนทิน ซึ่งนำมาใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมอาหาร อุตสาหกรรมด้านสุขภาพและการแพทย์

สาหร่ายจุลภาคและไซยาโนแบคทีเรียมีบทบาทสำคัญต่อระบบนิเวศ โดยเป็นแหล่งผลิตออกซิเจนในบรรยากาศ พบได้ทั้งในแหล่งน้ำจืดและน้ำเค็มในทะเล เพิ่มจำนวนได้อย่างรวดเร็วและสามารถสังเคราะห์ด้วยแสงอย่างมีประสิทธิภาพ สามารถดักจับแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ นำไปสู่การผลิตชีวมวลจำนวนมาก โดยมีรายงานว่า อาจมีปริมาณสูงถึงประมาณ ๗,๐๐๐ ตันต่อปี คิดเป็นมูลค่าตลาดราว ๓,๘๐๐–๕,๕๐๐ ล้านดอลลาร์สหรัฐต่อปี (Brasil et al., 2017) ชีวมวลดังกล่าวนำมาใช้ในการพัฒนายา ผลิตภัณฑ์เสริมสุขภาพและผลิตภัณฑ์อาหารได้ สาหร่ายจุลภาคยังได้รับความสนใจอย่างต่อเนื่องเพราะมีผู้ค้นพบว่าประกอบด้วยสารประกอบที่มีคุณค่าและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพมากกว่า ๑๕,๐๐๐ ชนิด สะท้อนถึงความหลากหลายของสายพันธุ์สาหร่ายจุลภาคที่คาดว่ามีอยู่ประมาณ ๒๐๐,๐๐๐–๘๐๐,๐๐๐ ชนิด (Jacob-Lopes et al., 2019) สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพดังกล่าวแบ่งออกเป็นเมแทบอไลต์ขั้นต้น (primary metabolite) ซึ่งเป็นองค์ประกอบพื้นฐานของเซลล์ และเมแทบอไลต์ขั้นทุติยภูมิ (secondary metabolite) ซึ่งเป็นสารมูลค่าสูง ส่งผลให้สาหร่ายจุลภาคไม่เพียงใช้เป็นส่วนผสมหลักเพื่อเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการพื้นฐานเท่านั้น แต่ยังประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารได้หลายรูปแบบ เช่น ใช้เป็นสารปรุงแต่งรสชาติ สารเพิ่มเนื้อสัมผัส ซึ่งพบได้ในผลิตภัณฑ์ที่วางจำหน่ายทั่วไป เช่น ขนมปัง ขนมอบกรอบ เส้นพาสตา ซึ่งมีส่วนผสมของสาหร่ายจุลภาคที่ช่วยเพิ่มปริมาณโปรตีนและใยอาหาร เครื่องดื่มน้ำผลไม้ที่เสริมด้วยสาหร่ายจุลภาคเพื่อเพิ่มวิตามินและแร่ธาตุ รวมถึงผลิตภัณฑ์อาหารเสริมจากสาหร่ายจุลภาคในรูปแบบผง แคปซูล หรือผลิตภัณฑ์อัดเม็ด ซึ่งช่วยขับล้างสารพิษออกจากร่างกาย มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ และช่วยลดการอักเสบ (ภาพที่ ๑)

การประยุกต์ใช้สาหร่ายจุลภาคในอาหารและผลิตภัณฑ์อาหารเสริมสะท้อนถึงศักยภาพด้านคุณค่าทางโภชนาการ อย่างไรก็ตาม การผลิตต้องดำเนินการตามกรอบการกำกับดูแลด้านความปลอดภัยอาหารอย่างเคร่งครัด งานวิจัยในปัจจุบันยังมุ่งเน้นการค้นหาและคัดเลือกสาหร่ายจุลภาคสายพันธุ์ใหม่ที่มีเมแทบอไลต์ขั้นทุติยภูมิที่มีคุณค่าสูง เพื่อรองรับการพัฒนาและการประยุกต์ใช้เชิงอุตสาหกรรมในอนาคต



ภาพที่ ๑ การประยุกต์ใช้สาหร่ายจุลภาคเป็นผลิตภัณฑ์ด้านอาหารและด้านสุขภาพ
(ที่มา : Sivaramakrishnan et al., 2025)

ความหลากหลายของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากสาหร่ายจุลภาค

สารในกลุ่มที่จำเป็นแก่กระบวนการเมแทบอลิซึมและการทำงานพื้นฐานของร่างกาย โดยมีบทบาทในการให้พลังงาน การเป็นองค์ประกอบเชิงโครงสร้างของเซลล์ ได้แก่ โปรตีน กรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อน (polyunsaturated fatty acids; PUFAs) เช่น กรดโดโคซาเฮกซาอีโนอิก (docosahexaenoic acid; DHA) และกรดไอโคซาเพนทาอีโนอิก (eicosapentaenoic acid; EPA) ทั้งนี้ กลุ่มที่สามารถผลิตโปรตีนคุณภาพสูงและมีองค์ประกอบกรดแอมิโนที่เป็นไปตามแนวทางขององค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติและองค์การอนามัยโลกนั้น พบได้ทั้งในไซยาโนแบคทีเรีย เช่น *Arthrospira platensis* (spirulina) ซึ่งเป็นที่รู้จักกันในชื่อสาหร่ายเกลียวทอง และสาหร่ายสีเขียวขนาดเล็ก เช่น *Chlorella vulgaris* โดยให้โปรตีนสูงถึงประมาณร้อยละ ๕๐–๗๐ ของน้ำหนักแห้ง อีกทั้งยังเป็นแหล่งสำคัญของวิตามินบี ๑๒ แร่ธาตุต่าง ๆ และกรดแอมิโนจำเป็น เช่น ไอโซลิวซีน ลิวซีน และแวลีน จึงเหมาะสำหรับเป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์อาหารหลากหลายชนิด เช่น นมจากพืช โยเกิร์ต ของขบเคี้ยว และผลิตภัณฑ์เบเกอรี (Prochazka et al., 2023; Prates, 2025) ในด้านการแพทย์ มีผู้พัฒนาการผลิตโปรตีนรีคอมบิแนนต์จากสาหร่าย *Chlamydomonas reinhardtii* และ *Chlamydomonas ellipsoidea* โปรตีนที่ผลิตได้มีตัวอย่างเช่น vascular endothelial growth factor และ erythropoietin ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการรักษาภาวะโลหิตจางและการส่งเสริมกระบวนการสมานแผล (Hempel และ Maier, 2016) สำหรับการผลิตกรดไขมันโอเมกา-๓ ซึ่งพบได้อย่างแพร่หลายในผลิตภัณฑ์

อาหารเสริมเพื่อส่งเสริมสุขภาพหัวใจ มีรายงานว่า *Schizochytrium* sp. และ *Scenedesmus* sp. GW63 สามารถสะสมกรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อนปริมาณสูงถึงร้อยละ ๒๐-๓๐ ของกรดไขมันทั้งหมด (Udayan et al., 2023; Prochazka et al., 2023) ในกรณีของไดอะตอม พบว่า *Porosira glacialis* โดดเด่นในการสะสมกรดไขมันชนิด DHA และ EPA คิดเป็นร้อยละ ๕.๗๕ และ ๒๓.๖๖ ของไขมันทั้งหมด ตามลำดับ อีกทั้งยังทนต่อความเข้มข้นของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ระดับสูงได้ดี ดังนั้น การเติมแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในกระบวนการเพาะเลี้ยงจึงมีส่วนช่วยกระตุ้นการสะสม DHA อย่างมีประสิทธิภาพ และยังเอื้อต่อการลดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในบรรยากาศอย่างยั่งยืน (Artamonova et al., 2017)

สารภายในเซลล์สาหร่ายจุลภาคที่ไม่ได้เน้นการให้พลังงาน แต่มีบทบาทเด่นด้านการฟื้นฟูการทำงานของเซลล์ การขจัดสารพิษ การต้านอนุมูลอิสระ การต้านการอักเสบ และการเสริมสร้างภูมิคุ้มกัน ได้แก่ พอลิแซ็กคาไรด์ รงควัตถุชีวภาพ เช่น คลอโรฟิลล์ และไฟโคบิลิโปรตีน (phycobiliproteins) นอกจากนี้ สาหร่ายจุลภาคยังเป็นแหล่งของวิตามินที่มีความสำคัญแก่การทำงานของเซลล์และระบบต่าง ๆ ของร่างกาย เช่น วิตามินเอในรูปของบีตาแคโรทีน วิตามินซี วิตามินอี และวิตามินบีหลายชนิด ในกลุ่มสาหร่ายสีเขียว พบว่า *Tetraselmis verrucosa* มีปริมาณพอลิแซ็กคาไรด์สูงถึงร้อยละ ๔๐.๙ ของน้ำหนักแห้ง และยังอุดมด้วยบีตากลูแคน ซึ่งมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ช่วยส่งเสริมการสมานแผล และมีสมบัติต้านไวรัส (Vasilakis et al., 2025) ขณะเดียวกัน *Haematococcus pluvialis* ก็โดดเด่นในการเป็นแหล่งแคโรทีนอยด์ โดยเฉพาะแอสทาแซนทิน ซึ่งเป็นโพรวิตามินเอ ในปริมาณสูงกว่าสาหร่ายชนิดอื่นประมาณ ๑๐ เท่า สามารถนำไปใช้ประโยชน์อย่างกว้างขวางในอุตสาหกรรมโภชนเภสัช (nutraceutical industry) ตลอดจนใช้เป็นสารให้สีจากธรรมชาติ (Sandgruber et al., 2021)

ปัจจัยที่มีผลต่อการสะสมสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในสาหร่ายจุลภาค

การสะสมสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในสาหร่ายจุลภาคได้รับอิทธิพลจากปัจจัยหลายด้าน ทั้งด้านการเจริญ ความพร้อมของสารอาหาร ระบบและกลยุทธ์การเพาะเลี้ยง รวมถึงสภาวะแวดล้อมต่าง ๆ การเพาะเลี้ยงภายใต้สภาวะสารอาหารอุดมสมบูรณ์ช่วยเพิ่มชีวมวล ขณะที่การจำกัดสารอาหารและการกระตุ้นให้เกิดความเครียด เนื่องจากความเข้มแสง อุณหภูมิ ความเค็ม ค่าความเป็นกรด-ด่าง รังสีอัลตราไวโอเลต มีบทบาทสำคัญในการกระตุ้นการสังเคราะห์และการสะสมสารออกฤทธิ์ เช่น ไขมัน แคโรทีนอยด์ และพอลิแซ็กคาไรด์ นอกจากนี้ แหล่งคาร์บอนทางเลือก เช่น การใช้น้ำเสียเป็นแหล่งคาร์บอนในการเพาะเลี้ยง มีผลต่อการสนับสนุนการเจริญของเซลล์และเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตสารโมเลกุลชีวภาพมูลค่าสูงได้อย่างมีนัยสำคัญ

การเพิ่มการสะสมสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในสาหร่ายจุลภาค

การปรับหรือจำกัดสภาวะแวดล้อมบางประการร่วมกับการจำกัดสารอาหารสามารถกระตุ้นการสะสมสารในกลุ่มแคโรทีนอยด์ เช่น แอสทาแซนทิน แคนทาแซนทิน ลูทีน และบีตาแคโรทีน ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ขณะเดียวกัน การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีวิศวกรรมชีวภาพ โดยเฉพาะการปรับแต่งยีนและวิถีเมแทบอลิซึม ก็มีบทบาทสำคัญในการเพิ่มการผลิตเมแทบอไลต์มูลค่าสูงจากสาหร่ายจุลภาค เช่น การกำหนดเป้าหมายไปที่เอนไซม์สำคัญในกระบวนการสังเคราะห์กรดไขมันที่มีคุณค่า โดยเน้นที่เอนไซม์กลีเซอรอล-๓-ฟอสเฟตแอซิลแทรนส์เฟอเรส (glycerol-3-phosphate acyltransferase) ซึ่งเป็นเอนไซม์หลักในการเร่งการสร้างไทรแอซิล

กลีเซอรอล นอกจากนี้ การใช้เทคโนโลยีคริสเพอร์/แคสไนน์ (CRISPR/Cas9) เพื่อควบคุมการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์กรดไขมันก็สามารถเพิ่มการผลิตกรดไขมันโอเมกา-๓ ได้อย่างมีนัยสำคัญ

ในทำนองเดียวกัน เราอาจประยุกต์ใช้กลยุทธ์การดัดแปลงพันธุกรรมเพื่อเพิ่มการผลิตกาบา (GABA; gamma amino butyric acid) ภายในเซลล์ *Synechocystis* PCC 6803 โดยกระตุ้นการแสดงออกของยีนกลูทาเมตดีคาร์บ็อกซิเลส (glutamate decarboxylase) ควบคู่กับการกำจัดยีนที่เกี่ยวข้องกับวิถีการใช้คาร์บอน ซึ่งมีการแข่งขันกันภายในวัฏจักรกรดไทรคาร์บอกซิลิก (TCA cycle) ด้วยเทคนิคน็อกเอาต์ยีน (gene knockout) ผลการศึกษาชี้ว่า เราสามารถเพิ่มปริมาณกาบาในเซลล์ได้สูงถึงประมาณ ๒๔๐ เท่า เมื่อเทียบกับเซลล์ปรกติ พร้อมกับการเพิ่มขึ้นของระดับกรดกลูทามิกและกรดแอมิโนเลวูลินิก (aminolevulinic acid) (Kanwal และIncharoensakdi, 2019)

สาหร่ายสีเขียว *Chlorella* มีคุณค่าทางโภชนาการสูง มีโปรตีนในสัดส่วนสูงมากเมื่อพิจารณาตามน้ำหนักแห้ง มีปริมาณโปรตีนมากกว่าอาหารจากแหล่งอื่น เช่น นมและเนื้อสัตว์ ขณะเดียวกัน สาหร่ายในกลุ่ม Stramenopiles เช่น *Schizochytrium* sp. ซึ่งพบในระบบนิเวศทางทะเล ก็มีศักยภาพสูงในการสะสมไขมันและกรดไขมันชนิด DHA ซึ่งมีปริมาณมากกว่า DHA ในน้ำมันปลาและแทบไม่พบในน้ำมันพืชทั่วไป ดังนั้น สาหร่ายจุลภาคจึงเป็นแหล่งสารอาหารคุณภาพสูงที่มีศักยภาพในการพัฒนาเป็นวัตถุดิบทางเลือกสำหรับอาหารและผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพในอนาคต

บทสรุป

สาหร่ายจุลภาคและไซยาโนแบคทีเรียมีศักยภาพโดดเด่นในฐานะทรัพยากรชีวภาพแห่งอนาคต ทั้งในมิติของความมั่นคงทางอาหาร สุขภาพมนุษย์ และความยั่งยืนสิ่งแวดล้อม เมื่อเปรียบเทียบเชิงปริมาณกับแหล่งอาหารดั้งเดิม สาหร่ายจุลภาคให้โปรตีนและไขมันคุณภาพสูง อย่างไรก็ตาม การนำไปใช้ประโยชน์ในระดับอุตสาหกรรมอย่างเต็มรูปแบบยังคงเผชิญความท้าทายหลายประการ เช่น ต้นทุนการผลิต ความสม่ำเสมอของคุณภาพชีวมวล ความเสถียรของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ตลอดจนกรอบการกำกับดูแลด้านความปลอดภัยอาหารและการยอมรับของผู้บริโภค ดังนั้น แนวทางการพัฒนาในอนาคตจึงควรมุ่งเน้นการออกแบบระบบเพาะเลี้ยงที่เหมาะกับสายพันธุ์เป้าหมาย การเลือกใช้แหล่งคาร์บอนทางเลือกเพื่อลดต้นทุนการผลิต รวมถึงการปรับแต่งวิถีเมแทบอลิซึมและการดัดแปลงพันธุกรรม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการสะสมสารชีวโมเลกุลเฉพาะด้าน เช่น กรดไขมันโอเมกา-๓ แคโรทีนอยด์ และกรดแอมิโน การพัฒนาเทคโนโลยีดังกล่าวต้องดำเนินการควบคู่กับการประเมินด้านความปลอดภัยและความเสถียรทางพันธุกรรม เพื่อเสริมสร้างความเชื่อมั่นและการยอมรับในระดับสังคมและเชิงพาณิชย์ แนวทางดังกล่าวจะช่วยผลักดันให้สาหร่ายจุลภาคก้าวจากแหล่งวัตถุดิบทางเลือกไปสู่การเป็นฐานทรัพยากรชีวภาพเชิงกลยุทธ์ที่สามารถสร้างนวัตกรรมอาหารและโภชนเภสัชที่มีคุณภาพสูง ปลอดภัย และยั่งยืน ในระยะยาว

เอกสารอ้างอิง

Artamonova, E.Y., Vasskog, T., & Eilertsen, H.C. (2017). Lipid content and fatty acid composition of *Porosira glacialis* and *Attheya longicornis* in response to carbon dioxide (CO_2) aeration. *PLoS One*, 12(5), e177703.

Brasil, B.S.A.F., de Siqueira, F.G., Salum, T.F.C., Zanette, C.M., & Spier, M.R. (2017). Microalgae and cyanobacteria as enzyme biofactories. *Algal Research*, 25(2), 76-89.

Hempel, F. & Maier, U.G. 2016. Microalgae as solar-powered protein factories. In: Vega, M.C. (Ed.), *Advanced Technologies for Protein Complex Production and Characterization*. Springer, Cham, pp. 241-262.

Jacob-Lopes, E., Maroneze, M.M., Depra, M.C., Sartori, R.B., Dias, R.R., & Zepka, L.Q. (2019). Bioactive food compounds from microalgae: An innovative framework on industrial biorefineries. *Current Opinion in Food Science*, 25, 1-7.

Kanwal, S., & Incharoensakdi, A. (2019). The role of GAD pathway for regulation of GABA accumulation and C/N balance in *Synechocystis* sp. PCC 6803. *Journal of Applied Phycology*, 31(6), 3503-3514.

Prates, J.A. (2025). Unlocking the functional and nutritional potential of microalgae proteins in food systems: A narrative review. *Foods*, 14(9), 1524.

Prochazka, P., Abrham, J., Cerveny, J., Soukupova, J., Ouma, C.N., Mullen, K.J., & Smutka, L. (2023). Algae as a source of protein in the sustainable food and gastronomy industry. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 7, 1256473.

Sandgruber, F., Gielsdorf, A., Baur, A. C., Schenz, B., Müller, S. M., Schwerdtle, T., Stangl, G. I., Griehl, C., Lorkowski, S., & Dawczynski, C. (2021). Variability in macro- and micronutrients of 15 commercially available microalgae powders. *Marine Drugs*, 19(6), 310.

Sivaramakrishnan, R., Kanwal, S., Incharoensakdi, A., Nirmal, N., & Srimongkol, P. (2025). Exploring the nutraceutical and functional food potential of microalgae: Implications for health and sustainability. *Journal of Agriculture and Food Research*, 22, 102148.

Vasilakis, G., Marka, S., Ntzouvaras, A., Zografaki, M.-E., Kyriakopoulou, E., Kalliampakou, K. I., Bekiaris, G., Korakidis, E., Papageorgiou, N., Christofi, S., Vassilaki, N., Moschopoulou, G., Tzovenis, I., Economou-Amilli, A., Papanikolaou, S. & Flemetakis, E. (2025). Wound healing, antioxidant, and antiviral properties of bioactive polysaccharides of microalgae strains isolated from Greek coastal lagoons. *Marine Drugs*, 23(2), 77.