

Synthetic Biology: A Frontier Science Driving Net-Zero Carbon Solutions

ชีววิทยาสังเคราะห์: วิทยาการขั้นแนวหน้าขับเคลื่อนสู่เป้าหมายคาร์บอนสุทธิเป็นศูนย์

Synthetic biology is an innovative discipline focused on designing and constructing new-to-nature biological components and systems by harnessing engineering principles. It is a powerful tool that enables the design and engineering of biological systems for novel applications in energy, health, and the environment.

ชีววิทยาสังเคราะห์ (Synthetic Biology) เป็นศาสตร์ที่มุ่งเน้นการออกแบบและสร้างองค์ประกอบและระบบทางชีวภาพใหม่ที่ไม่เคยปรากฏในธรรมชาติ ด้วยการผสานองค์ความรู้ด้านชีววิทยาเข้ากับหลักการทางวิศวกรรม ถือเป็นเครื่องมือสำคัญที่ช่วยออกแบบและพัฒนากระบวนการชีวภาพสำหรับการประยุกต์ใช้ด้านพลังงาน สุขภาพ และสิ่งแวดล้อม

Synthetic Biology Strategies for Microalgae-Based Carbon Sequestration

Recent breakthroughs in synthetic biology are unlocking the potential of microalgae as a promising nature-based solution for carbon sequestration. Current research efforts focus on several key areas:

กลยุทธ์ชีววิทยาสังเคราะห์เพื่อการกักเก็บคาร์บอนด้วยสาหร่ายขนาดเล็ก

ความก้าวหน้าของชีววิทยาสังเคราะห์ในปัจจุบันกำลังปลดปล่อยศักยภาพของสาหร่ายขนาดเล็ก ในฐานะโซลูชันทางธรรมชาติในการกักเก็บคาร์บอน งานวิจัยในปัจจุบันให้ความสำคัญกับประเด็นหลักๆ ดังต่อไปนี้:

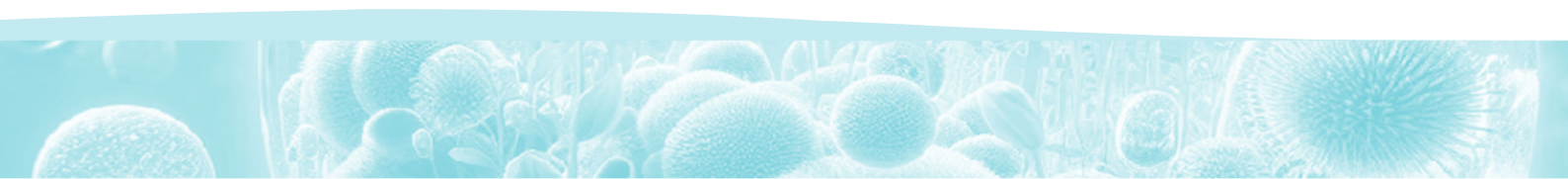


1. Enhancing RuBisCO Performance

RuBisCO is the primary enzyme responsible for carbon fixation via the Calvin–Benson–Bassham (CBB) cycle, but naturally suffers from low efficiency and competition with oxygen. Researchers are applying CRISPR/Cas9 gene editing and directed evolution to modify specific amino acids, improving the enzyme's CO_2/O_2 specificity. For example, increasing RuBisCO activase expression in *Nannochloropsis oceanica* boosted CO_2 fixation by 28% and biomass production by 32%.

1. การเพิ่มประสิทธิภาพของเอนไซม์ RuBisCO

RuBisCO เป็นเอนไซม์หลักในการตรึงคาร์บอนผ่านวัฏจักร Calvin–Benson–Bassham (CBB) แต่โดยธรรมชาติยังมีประสิทธิภาพต่ำและอาจจับกับออกซิเจนแทนคาร์บอนไดออกไซด์ นักวิจัยจึงนำเทคนิค CRISPR/Cas9 และการกำกับวิวัฒนาการ (Directed Evolution) มาใช้ปรับตำแหน่งกรดอะมิโนเฉพาะ ให้มี ค่าสัมพัทธ์ต่อ CO_2 (CO_2/O_2 specificity) สูงขึ้น ตัวอย่างเช่น การเพิ่มการแสดงออกของเอนไซม์ RuBisCO activase ในสาหร่าย *Nannochloropsis oceanica* ทำให้ประสิทธิภาพการตรึง CO_2 เพิ่มขึ้น 28% และชีวมวลเพิ่มขึ้น 32%





V. 005-2568

2. Strengthening Carbon Concentrating Mechanisms (CCMs)

Some algal species naturally possess CCMs that concentrate CO_2 around Ru-BisCO to minimize its losses. This can be enhanced by overexpressing genes encoding bicarbonate transporters, which help import inorganic carbon into chloroplasts. In *Phaeodactylum tricornutum*, inserting bicarbonate transporter and antiporter genes enabled growth even under highly acidic conditions (pH 5).

2. การเสริมประสิทธิภาพ Carbon Concentrating Mechanisms (CCMs)

สาหร่ายบางชนิดมีระบบ CCMs ในตัว ซึ่งช่วยกักเก็บ CO_2 รอบๆ RuBisCO เพื่อป้องกันการสูญเสีย CO_2 การเสริมกลไกนี้สามารถทำได้โดยการเพิ่มการแสดงออกของยีนตัวขนส่งไบคาร์บอเนต (bicarbonate transporters) เพื่อนำคาร์บอนเข้าสู่คลอโรพลาสต์ ตัวอย่างเช่น สาหร่าย *Phaeodactylum tricornutum* ที่ใส่ยีน bicarbonate transporter และ antiporter ยังสามารถเติบโตได้แม้ในสภาวะความเป็นกรดสูง (pH 5)

3. Expanding Light Harvesting Capacity

Increasing pigment content and diversity enhances light absorption and broadens the light spectrum available for photosynthesis. Introducing genes from cyanobacteria enables production of phycobiliproteins, pigments effective at capturing green and yellow light. Disabling the genes for zeaxanthin epoxidase (ZEP) and the chloroplast signal recognition particle (CpSRP) receptor (CpFTSY) in *Chlamydomonas reinhardtii* increased the production of zeaxanthin pigment fourfold and enhanced photosynthetic efficiency.

3. การเพิ่มความสามารถในการรับแสง

การเพิ่มปริมาณและชนิดของรงควัตถุ (pigment) จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการดูดซับแสงและขยายช่วงคลื่นแสงที่ใช้ในการสังเคราะห์แสง เช่น การใส่ยีนจากไซยาโนแบคทีเรียเพื่อผลิตรงควัตถุ phycobiliproteins ซึ่งดูดซับแสงสีเขียวและเหลืองได้ดี และการยับยั้งการแสดงออกของยีน zeaxanthin epoxidase (ZEP) และ chloroplast signal recognition particle (CpSRP) receptor (CpFTSY) ใน *Chlamydomonas reinhardtii* ทำให้ปริมาณรงควัตถุ zeaxanthin เพิ่มขึ้น 4 เท่า และเพิ่มประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสง

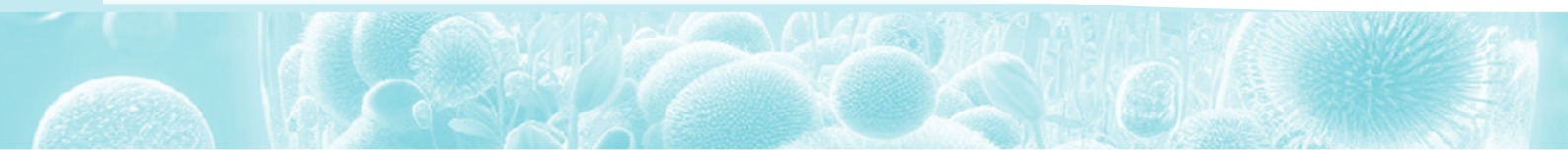


4. Optimizing Metabolic Flux

Under natural conditions, energy is often diverted to stress responses or storage compound synthesis, limiting carbon fixation. Redirecting glycolytic intermediates into the pentose phosphate pathway boosts production of nicotinamide adenine dinucleotide phosphate (NADPH) and ribulose-5-phosphate (Ru5P), two key molecules in photosynthesis. In *Nannochloropsis gaditana*, inserting the fructose-1,6-bisphosphatase gene optimized metabolite flow, increasing both carbon fixation and algal growth.

4. การจัดการ Metabolic Flux

ในสภาพแวดล้อมธรรมชาติ พลังงานในสาหร่ายอาจถูกใช้ในทางอื่น เช่น การสร้างสารสะสมหรือการตอบสนองต่อความเครียด (stress) ทำให้ประสิทธิภาพการตรึงคาร์บอนต่ำ การปรับให้ไกลโคไลติกอินเตอร์มีเดียตบางส่วนเข้าสู่เส้นทาง pentose phosphate pathway ซึ่งผลิต NADPH และ ribulose-5-phosphate (Ru5P) ซึ่งสำคัญต่อการสังเคราะห์แสง ตัวอย่างเช่นการใส่ยีน fructose-1,6-bisphosphatase เข้าไปในสาหร่าย *Nannochloropsis gaditana* ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเมตาบอลิซึมที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการตรึงคาร์บอนและการเจริญเติบโต





V. 005-2568

5. Boosting Environmental Stress Tolerance

Fluctuating environmental conditions like temperature, light intensity, and pH can impair carbon capture efficiency. Introducing genes encoding heat shock proteins (HSPs) and antioxidant enzymes such as superoxide dismutase (SOD), catalase, and glutathione peroxidase improves resilience. For example, overexpressing the trehalose phosphate phosphatase gene in *Parachlorella kessleri* mitigated high-light stress and increased biomass by 35%.

5. การเพิ่มความทนทานต่อสภาวะแวดล้อม

ความผันผวนของอุณหภูมิ ความเข้มแสง และ pH อาจส่งผลให้ประสิทธิภาพการตรึงคาร์บอนลดลง จึงมีการใส่ยีนที่สร้างโปรตีน Heat Shock (HSPs) และเอนไซม์ต้านอนุมูลอิสระ เช่น superoxide dismutase (SOD), catalase และ glutathione peroxidase เพื่อเสริมความทนทาน ตัวอย่างเช่น การเพิ่มการแสดงออกของยีน trehalose phosphate phosphatase ในสาหร่าย *Parachlorella kessleri* ช่วยให้สาหร่ายทนแสงสูงได้ดีขึ้น และเพิ่มชีวมวลได้ถึง 35%

6. Chassis Engineering: Designing Synthetic Strains

Synthetic biology enables combining multiple enhanced traits — such as improved photosynthesis, stress tolerance, and lipid productivity — into a single algal strain. This is achieved through CRISPR/Cas9, gene stacking, and knock-in/knock-out techniques, combined with transcriptomic and metabolomic analyses. In dense cultures, excessive pigment content reduces productivity by causing shading and inefficient light use. To overcome this limitation, genetically edited strains of *Picochlorum celeri* with reduced chlorophyll content have been developed, achieving productivity rates as high as 50 g/m²/day.

6. การออกแบบสายพันธุ์สังเคราะห์ (Chassis Engineering)

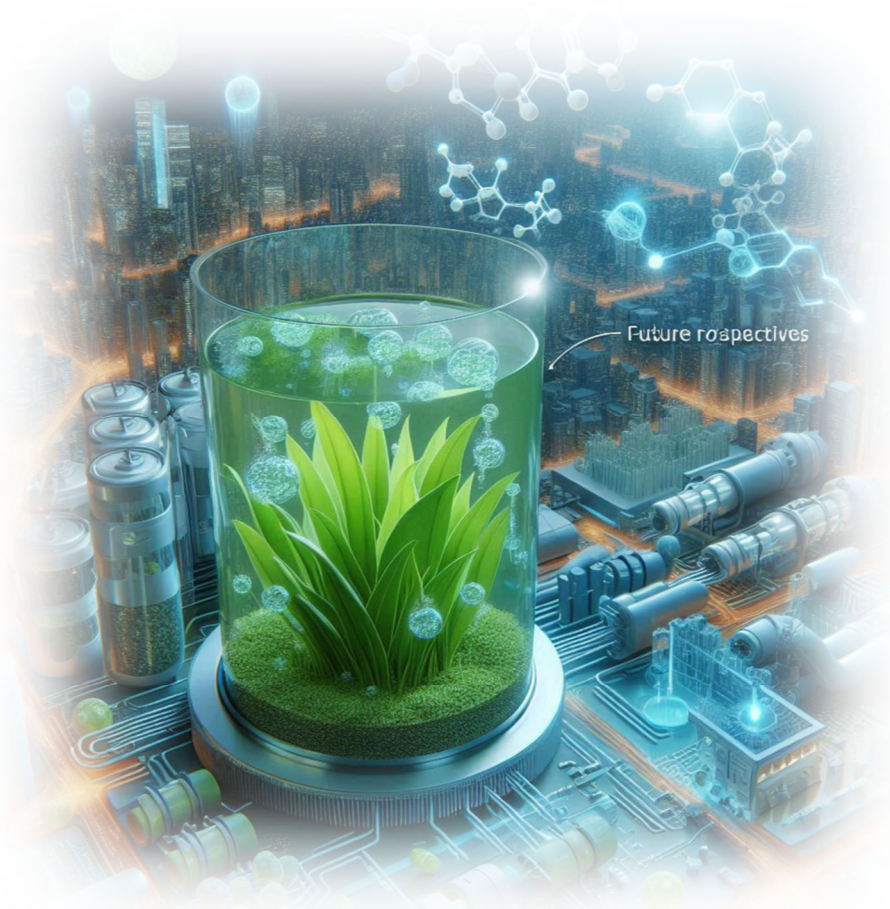
ชีววิทยาสังเคราะห์เปิดโอกาสให้นำคุณสมบัติที่หลากหลาย — ทั้งการสังเคราะห์แสงที่เร็วขึ้น ความทนทานต่อสภาวะแวดล้อม และการผลิตกรดไขมัน — มารวมไว้ในสายพันธุ์เดียวกัน ผ่านการใช้เทคนิค CRISPR/Cas9, Gene Stacking และ Knock-in/Knock-out ร่วมกับการวิเคราะห์ transcriptome และ metabolome ในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายความหนาแน่นสูง มักเกิดปัญหามาจากปริมาณรงควัตถุที่มากเกินไปและขนาดเสอาอากาศรับแสงที่ใหญ่ ส่งผลให้ประสิทธิภาพการใช้แสงลดลงและเกิดการบดบังกันเอง เพื่อแก้ปัญหานี้จึงมีการแก้ไขยีนในสาหร่าย *Picochlorum celeri* ทำให้คลอโรฟิลล์ลดลงส่งผลให้อัตราการผลิตมวลชีวภาพสูงถึง 50 กรัม/ตร.ม./วัน



Future Perspectives and Opportunities

Synthetic biology offers transformative opportunities to accelerate microalgae's role in achieving net-zero carbon goals. However, challenges remain, including scaling laboratory successes to commercial cultivation systems and ensuring ecological safety and regulatory compliance for engineered strains. Collaborative efforts among academia, industry, and policymakers will be essential to translate these innovations into real-world solutions that support the global transition to a low-carbon economy.

Continued investment and interdisciplinary research in synthetic biology and microalgae promise to drive breakthroughs in carbon sequestration technologies, biofuel generation, and bioproducts manufacturing—paving the way for a sustainable, net-zero carbon future.



ทิศทางและโอกาสในอนาคต

ชีววิทยาสังเคราะห์กำลังเปิดโอกาสใหม่ในการเร่งบทบาทของสาหร่ายขนาดเล็ก เพื่อสนับสนุนการบรรลุเป้าหมายคาร์บอนสุทธิเป็นศูนย์ อย่างไรก็ตาม แนวทางนี้ยังมีความท้าทายสำคัญ ทั้งการขยายผลจากระดับห้องปฏิบัติการสู่ระดับการเพาะเลี้ยงเชิงพาณิชย์ ตลอดจนการสร้างระบบดูแลความปลอดภัยทางนิเวศวิทยาและกฎระเบียบในการกำกับการใช้สายพันธุ์ที่ถูกดัดแปลงทางพันธุกรรม การบูรณาการความร่วมมือระหว่างภาควิชาการ ภาคอุตสาหกรรม และภาครัฐ จะมีบทบาทสำคัญในการผลักดันนวัตกรรมเหล่านี้ไปสู่การใช้งานจริงที่ช่วยขับเคลื่อนการเปลี่ยนผ่านสู่เศรษฐกิจคาร์บอนต่ำอย่างยั่งยืน

การลงทุนอย่างต่อเนื่องและการวิจัยแบบสหวิทยาการด้านชีววิทยาสังเคราะห์และสาหร่ายขนาดเล็กจะช่วยผลักดันความก้าวหน้าในเทคโนโลยีการกักเก็บคาร์บอน การผลิตพลังงานชีวภาพ และผลิตภัณฑ์ชีวภาพอื่นๆ ปูทางสู่อนาคตคาร์บอนสุทธิเป็นศูนย์ได้อย่างเป็นรูปธรรม

