

Harnessing Artificial Intelligence to Optimize Microbial Cell Factories in Microalgae and Cyanobacteria Part 2: Challenges and Future Directions for Machine Learning

การใช้ปัญญาประดิษฐ์เพื่อเสริมศักยภาพโรงงานชีวภาพในสาหร่ายขนาดเล็กและไซยาโนแบคทีเรีย ตอนที่ 2 : ความท้าทายและอนาคตของ Machine Learning

While machine learning (ML) holds immense promise for advancing synthetic biology, particularly in optimizing cyanobacteria and microalgae as efficient microbial cell factories, several challenges remain.

แม้ว่า Machine Learning (ML) จะมีศักยภาพในการช่วยพัฒนาเครื่องมือชีววิทยาสังเคราะห์ (Synthetic Biology) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ไซยาโนแบคทีเรียและสาหร่ายขนาดเล็กเป็นโรงงานชีวภาพ แต่ ML ยังคงมีความท้าทายดังนี้:

1. Data Limitations

One of the foremost obstacles is the lack of high-quality, standardized datasets for training machine learning models. Available data on cyanobacteria and microalgae is often fragmented. High dimensionality — involving thousands of variables but few samples — further complicates the efforts.

Potential solutions include:

- Using automated tools for high-throughput experimentation
- Integrating traditional methods for data dimensionality reduction
- Establishing data collection standards
- Generating synthetic datasets using tools like Generative Adversarial Networks (GANs)

1. ขีดจำกัดด้านข้อมูล

หนึ่งในความท้าทายสำคัญคือการขาดข้อมูลคุณภาพสูงและได้มาตรฐาน สำหรับการฝึกโมเดล ML ข้อมูลเกี่ยวกับไซยาโนแบคทีเรียและสาหร่ายขนาดเล็กที่มีอยู่มักไม่สมบูรณ์และไม่ครอบคลุม นอกจากนี้ ปัญหา "มิติสูง" (high dimensionality) คือการมีตัวแปรจำนวนมากแต่มีตัวอย่างน้อยก็เป็นอีกหนึ่งอุปสรรค

แนวทางแก้ไขปัญหานี้ได้แก่

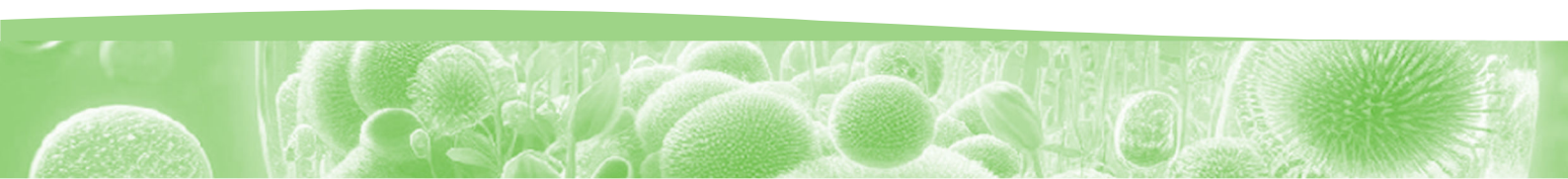
- การใช้เครื่องมืออัตโนมัติเพื่อทำการทดลองแบบ high-throughput
- การบูรณาการวิธีการแบบดั้งเดิมเพื่อลดมิติของข้อมูล
- การสร้างมาตรฐานสำหรับการเก็บข้อมูล
- การใช้อัลกอริทึมเพื่อสร้างข้อมูลเทียม เช่น Generative Adversarial Networks (GANs)

2. Expanding Genetic Engineering Tools

In cyanobacteria, there remains a need for developing tools to identify and design gene expression control elements, such as enhancers and terminators, which remain underexplored. In microalgae, genetic engineering is even more challenging. ML could improve the efficiency of homologous recombination, a key mechanism for gene editing in algae.

2. การพัฒนาเครื่องมือพันธุวิศวกรรมเพิ่มเติม

สำหรับไซยาโนแบคทีเรีย ควรต้องมีการพัฒนาเครื่องมือเพื่อระบุและออกแบบองค์ประกอบควบคุมการแสดงออกของยีน เช่น enhancers และ terminators ซึ่งยังไม่ได้รับการศึกษาอย่างเพียงพอ สำหรับสาหร่ายขนาดเล็ก การตัดต่อพันธุกรรมยังทำได้ยากกว่าในไซยาโนแบคทีเรีย ML อาจช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพของกระบวนการ homologous recombination ซึ่งเป็นกลไกสำคัญในการตัดต่อยีนในสาหร่าย





V. 003-2568

3. Discovering New Genes for Metabolic Control

Researchers are increasingly interested in using ML to uncover small proteins that play pivotal roles in metabolism but often escape detection in traditional genome analyses. In microalgae, transcription factors are critical regulators of multiple genes. ML techniques can predict new transcription factors and their corresponding DNA binding sites.

3. การค้นหายีนใหม่เพื่อควบคุมเมแทบอลิซึม

นักวิจัยสนใจที่จะใช้ ML เพื่อค้นหาโปรตีนขนาดเล็ก (Small Proteins) ซึ่งมีบทบาทสำคัญในการควบคุมเมแทบอลิซึม แต่มักถูกมองข้ามในการวิเคราะห์จีโนมแบบดั้งเดิม ในสาหร่ายขนาดเล็ก ปัจจัยการถอดรหัส (Transcription Factors) มีบทบาทสำคัญในการควบคุมการแสดงออกของยีนหลายๆ ตัวพร้อมกัน ML สามารถช่วยในการทำนายปัจจัยการถอดรหัสและตำแหน่งที่จับกับ DNA

4. Optimizing Proteins for Host Cellular Environments

Cyanobacteria and microalgae possess unique intracellular environments, including continuous oxygen production and high oxidative stress. ML can help design enzymes that perform well under these conditions. Additionally, ML can improve enzyme specificity toward particular substrates — for instance, enabling the development of enzymes with high specificity for DHA (docosahexaenoic acid) while minimizing activity toward DPA (docosapentaenoic acid).

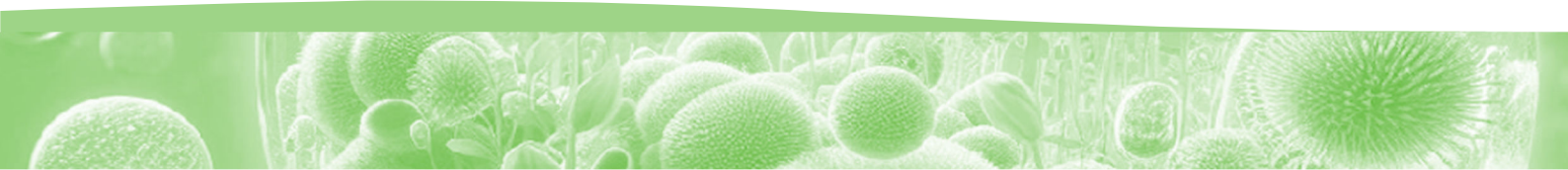


4. การปรับปรุงโปรตีนให้เหมาะกับสภาพแวดล้อมของโฮสต์

ไซยาโนแบคทีเรียและสาหร่ายขนาดเล็กมีสภาพแวดล้อมภายในเซลล์ที่มีลักษณะเฉพาะ เช่น มีการผลิตออกซิเจนอย่างต่อเนื่องและมีแรงดันจากอนุมูลอิสระสูง ML สามารถช่วยออกแบบเอนไซม์ให้ทำงานได้ดีในสภาพแวดล้อมเหล่านี้ นอกจากนี้ ในสาหร่ายขนาดเล็ก ML ยังช่วยปรับปรุงความจำเพาะของเอนไซม์ต่อสารตั้งต้น ตัวอย่างเช่น การพัฒนาเอนไซม์ที่มีความจำเพาะสูงต่อ DHA (docosahexaenoic acid) แต่ต่ำต่อ DPA (docosapentaenoic acid)

5. Improving Co-culture Systems and Heterotrophic Fermentation

Cultivating cyanobacteria and microalgae alongside other microorganisms – co-culture systems – is a promising strategy for efficiently converting carbon dioxide into valuable products. ML can help monitor different species in mixed cultures. In addition, heterotrophic fermentation — a process where organisms utilize organic carbon sources instead of photosynthesis for growth and energy production — faces challenges from raw material variability and complexity. ML can assist in optimizing fermentation parameters to maximize yields.





V. 003-2568

5. การเพิ่มประสิทธิภาพของการเพาะเลี้ยงร่วมและการหมักแบบเฮเทอโรโทรฟิก

การเพาะเลี้ยงไซยาโนแบคทีเรียหรือสาหร่ายขนาดเล็กร่วมกับจุลินทรีย์อื่นๆเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนคาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์ที่ต้องการ ML สามารถช่วยในการติดตามการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์แต่ละชนิดในการเพาะเลี้ยงร่วม นอกจากนี้ การหมักแบบเฮเทอโรโทรฟิก (ใช้แหล่งคาร์บอนอินทรีย์แทนการสังเคราะห์แสง) มีความท้าทายในเรื่องความซับซ้อนและความผันแปรของวัตถุดิบ ML สามารถช่วยในการปรับสภาวะการหมักให้เหมาะสม

Conclusion

Integrating ML with synthetic biology to enhance microbial cell factories in cyanobacteria and microalgae represents a powerful pathway toward both scientific breakthroughs and environmental sustainability. As AI capabilities continue to evolve, the prospects for transforming these photosynthetic microorganisms into efficient, scalable producers of high-value compounds — while mitigating carbon emissions — are becoming increasingly tangible.

บทสรุป

การผสานเทคโนโลยี ML กับชีววิทยาสังเคราะห์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ไซยาโนแบคทีเรียและสาหร่ายขนาดเล็กเป็นโรงงานชีวภาพไม่เพียงแต่สร้างความก้าวหน้าทางวิทยาศาสตร์เท่านั้น แต่ยังมีศักยภาพในการแก้ไขปัญหาสิ่งแวดล้อมและพลังงานที่โลกของเรากำลังเผชิญอยู่ ด้วยศักยภาพของปัญญาประดิษฐ์ที่มีพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โอกาสในการใช้จุลินทรีย์สังเคราะห์แสงเหล่านี้ให้เป็นผู้ผลิตสารมูลค่าสูงที่มีประสิทธิภาพและขยายกำลังการผลิตได้ พร้อมทั้งช่วยลดการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ไปในเวลาเดียวกัน กำลังกลายเป็นจริงได้มากขึ้น

