พลังงานไฮโดรเจน: พลังงานสะอาดผลิตโดยสาหร่ายจุลภาค

อรัญ อินเจริญศักดิ์

ภาคีสมาชิก สาขาวิชาชีวเคมี ประเภทวิชาวิทยาศาสตร์ธรรมชาติ สำนักวิทยาศาสตร์ ราชบัณฑิตยสภา
ภาควิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, aran.i@chula.ac.th

บทนำ

การใช้พลังงานจากฟอสซิลก่อให้เกิดปัญหาเนื่องจากเป็นพลังงานที่ไม่ยั่งยืนและก่อผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อม ในปัจจุบันหลายประเทศกำลังสนใจที่จะพัฒนาเทคโนโลยีด้านพลังงานทดแทนเพื่อลดการใช้พลังงานที่ได้จากปิโตรเลียมและลดความรุนแรงของภาวะโลกร้อน พลังงานทดแทนรูปแบบหนึ่งคือพลังงานไฮโดรเจน ซึ่งมีข้อดีหลายประการ เช่น เป็นพลังงานสะอาด ใช้งานได้เทียบเท่าพลังงานจากน้ำมัน ใช้งานร่วมกับเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้าได้ การผลิตไฮโดรเจนสามารถทำได้โดยใช้กระบวนการทางกายภาพ ซึ่งแบ่งได้เป็น ๒ ประเภท คือ การให้พลังงานความร้อนแก่แหล่งพลังงานต้นตอเพื่อผลิตไฮโดรเจน (thermal process) และการใช้กระแสไฟฟ้าเพื่อแยกไฮโดรเจนออกจากน้ำ (electrolytic process) การผลิตในลักษณะเช่นนี้มีข้อเสีย คือ ต้องใช้พลังงานมาก อีกทั้งกระบวนการผลิตก็ปล่อยก๊าซเรือนกระจก เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นสาเหตุของภาวะโลกร้อนในอีกด้านหนึ่ง การผลิตไฮโดรเจนสามารถใช้กระบวนการทางชีวภาพ ซึ่งเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่าการผลิตด้วยกระบวนการทางกายภาพ สิ่งมีชีวิตที่สามารถผลิตไฮโดรเจนก็คือจุลินทรีย์ รวมถึงสาหร่ายจุลภาคที่สังเคราะห์ด้วยแสงได้ การผลิตด้วยวิธีนี้ใช้พลังงานแสงไปทำให้โมเลกุลของน้ำแตกตัว (photolytic process) เป็นออกซิเจน โปรตอน และอิเล็กตรอน ก่อนที่โปรตอนจะเปลี่ยนเป็นโมเลกุลของไฮโดรเจนโดยใช้เอนไซม์ไฮโดรจีเนส (hydrogenase) ภายในเซลล์เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา

ไฮโดรเจนที่ผลิตขึ้นโดยสาหร่ายจุลภาคเป็นพลังงานทางเลือกที่น่าสนใจและมีประโยชน์อย่างมาก เช่น ลดการเผาไหม้จากการผลิต ไม่แย่งพื้นที่ในการเพาะปลูกพืชไร่ มีอัตราการผลิตที่ดี อีกทั้งพลังงานที่ได้มีคุณภาพสูง ดังนั้น การพัฒนาเทคโนโลยีในการใช้สาหร่ายจุลภาคเป็นแหล่งผลิตพลังงานทดแทนจึงเป็นสิ่งจำเป็น เพราะสามารถพัฒนาได้ทั้งเทคโนโลยีทางด้านชีวเคมี ด้านพันธุวิศวกรรม และด้านเทคโนโลยีชีวภาพ ทำให้สามารถใช้ทดแทนแหล่งผลิตอื่น ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

สาหร่ายจุลภาคคืออะไร

สาหร่ายจุลภาค (microalgae) เป็นสาหร่ายขนาดเล็กที่ไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า จัดอยู่ในสิ่งมีชีวิตประเภทยูคาริโอต (eukaryote) เช่นเดียวกับพืชชั้นสูงในบางบริบท สาหร่ายจุลภาคหมายรวมถึงสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (blue-green algae) ซึ่งปัจจุบันใช้ชื่อใหม่ว่า ไซยาโนแบคทีเรีย (cyanobacteria) ตัวอย่างของสาหร่ายชนิดนี้คือ สาหร่ายเกลียว-ทองหรือสาหร่ายสไปรูลินา จัดอยู่ในสิ่งมีชีวิตประเภทโพรคาริโอต (prokaryote) เช่นเดียวกับแบคทีเรีย สิ่งมีชีวิตชนิดนี้สามารถสังเคราะห์ด้วยแสงและผลิตออกซิเจนได้เชื่อกันว่า ไซยาโนแบคทีเรียเป็นสิ่งมีชีวิตชนิดแรกที่ปรากฏบนโลกประมาณกว่า ๓ พันล้านปีมาแล้ว (Fischer, 2008) และช่วยทำให้เกิดออกซิเจนใน

บรรยากาศของโลก สาหร่ายจุลภาคมีบทบาทสำคัญในการแลกเปลี่ยนพลังงานของระบบนิเวศ อีกทั้งยังเป็นแหล่งสารชีวภัณฑ์มูลค่าสูงอีกด้วย โดยเฉพาะคือเป็นแหล่งสำคัญของเชื้อเพลิงชีวภาพทดแทน เช่น ไฮโดรเจน ทั้งนี้ประสิทธิภาพในการผลิตไฮโดรเจนโดยสาหร่ายจุลภาคนั้นขึ้นอยู่กับเอนไซม์ของสายพันธุ์ที่ใช้มีความสามารถในการผลิตไฮโดรเจนของแตกต่างกันไป และขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมด้วยว่าเหมาะสมหรือไม่ อีกทั้งการทำพันธุวิศวกรรมในสาหร่ายจุลภาคยังเป็นทางเลือกอีกทางหนึ่งที่สามารถปรับปรุงเอนไซม์ เช่น hydrogenase และ nitrogenase หรือเอนไซม์ที่เกี่ยวข้อง ทำให้ผลิตไฮโดรเจนได้มากขึ้น ดังนั้น การผลิตพลังงานไฮโดรเจนโดยใช้สาหร่ายจุลภาคจึงเป็นเทคโนโลยีที่กำลังได้รับความสนใจ เพราะเป็นพลังงานสะอาดและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

กระบวนการผลิตเป็นอย่างไร

๑.๑ ระบบการผลิตไฮโดรเจนในสาหร่ายสีเขียว การผลิตไฮโดรเจนในสาหร่ายสีเขียวจัดอยู่ในประเภทที่ใช้พลังงานแสงเพื่อทำให้โมเลกุลของน้ำแตกตัวโดยตรง (direct biophotolysis) ซึ่งปกติแล้วจะเกิดขึ้นในการเพาะเลี้ยงสาหร่ายด้วยแสง อัตราการผลิตไฮโดรเจนนั้นขึ้นอยู่กับสายพันธุ์และความเข้มของแสง ตัวอย่างเช่น สาหร่าย *Chlorella* ซึ่งมีขนาดเล็ก ผลิตไฮโดรเจนได้ดีกว่าสาหร่าย *Chlamydomonas* ที่มีขนาดใหญ่กว่า อัตราการผลิตไฮโดรเจนที่เพิ่มขึ้นสามารถพบได้ในภาวะที่เลี้ยงเซลล์ด้วยแสงในระยะสั้นเอนไซม์ hydrogenase จะเร่งปฏิกิริยารีดักชันของโปรตอนเพื่อเปลี่ยนเป็นไฮโดรเจน เอนไซม์นี้จะทำงานได้ไม่ดีในภาวะที่มีออกซิเจน ดังนั้นภาวะที่เลี้ยงด้วยแสงในระยะสั้นจึงเป็นเงื่อนไขที่จำเป็นเพื่อจำกัดปริมาณออกซิเจนที่เกิดขึ้นในช่วงสังเคราะห์ด้วยแสง ทำให้การผลิตไฮโดรเจนดำเนินไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ

๑.๒ ระบบการผลิตไฮโดรเจนในไซยาโนแบคทีเรีย ไซยาโนแบคทีเรียมีลักษณะที่แตกต่างกัน เช่น แบบเซลล์เดี่ยว (unicellular) และแบบเส้นใย (filamentous) ในแบบแรก เซลล์ใช้เอนไซม์ hydrogenase ในการผลิตไฮโดรเจน ส่วนในแบบที่สองเซลล์ใช้เอนไซม์ hydrogenase และ nitrogenase (เฉพาะกรณีที่เซลล์สามารถตรึงไนโตรเจนได้) ในการผลิตไฮโดรเจน การผลิตไฮโดรเจนสามารถเกิดขึ้นผ่านกระบวนการทั้งแบบ direct และแบบ indirect biophotolysis โดยที่กระบวนการแรกใช้พลังงานแสงเพื่อทำให้โมเลกุลของน้ำภายในเซลล์แตกตัว ได้โปรตอนและอิเล็กตรอน ในกรณี indirect biophotolysis นั้น โปรตอนและอิเล็กตรอนที่ใช้ผลิตไฮโดรเจนนั้นได้มาจากการย่อยสลายของสารคาร์บอนชนิดต่าง ๆ เช่น สารประเภทคาร์โบไฮเดรตภายในเซลล์ กระบวนการผลิตไฮโดรเจนขึ้นอยู่กับการทำงานของเอนไซม์ ๒ ชนิดที่กล่าวข้างต้น ในภาวะที่ไม่มีสารไนโตรเจนในอาหารเลี้ยง ไซยาโนแบคทีเรียแบบเส้นใยบางชนิดสามารถตรึงไนโตรเจนจากอากาศแล้วเปลี่ยนเป็นผลผลิตแอมโมเนียและไฮโดรเจนโดยอาศัยการทำงานของเอนไซม์ nitrogenase เอนไซม์ nitrogenase นี้พบในเซลล์ heterocysts ของไซยาโนแบคทีเรียแบบเส้นใย ตัวอย่างเช่น พบว่า เมื่อเลี้ยง *Anabaena siamensis* TISTR 8012 ในภาวะที่ขาดไนโตรเจนจะทำให้เซลล์สามารถสร้างเอนไซม์ได้มากขึ้น และทำให้ผลิตไฮโดรเจนได้มากขึ้น (Khetkorn et al., 2010)

เทคโนโลยีการเพิ่มการผลิตทำได้อย่างไร

การเพิ่มการผลิตสามารถทำได้โดยใช้เทคโนโลยีทางชีวเคมี ทางพันธุวิศวกรรม และทางเทคโนโลยีชีวภาพ การผลิตไฮโดรเจนต้องใช้อิเล็กตรอนในการเปลี่ยนโปรตอนให้เป็นไฮโดรเจน ดังนั้น กระบวนการลดหรือยับยั้งการใช้อิเล็กตรอนในปฏิกิริยาอื่น ๆ ภายในเซลล์จะช่วยเพิ่มปริมาณการผลิตไฮโดรเจน การทำพันธุวิศวกรรมเพื่อเปลี่ยนวิถีการไหลของอิเล็กตรอนจากกระบวนการอื่นที่เป็นคู่แข่งไปยังกระบวนการผลิตไฮโดรเจน จึงเป็นทางเลือกอีกทาง

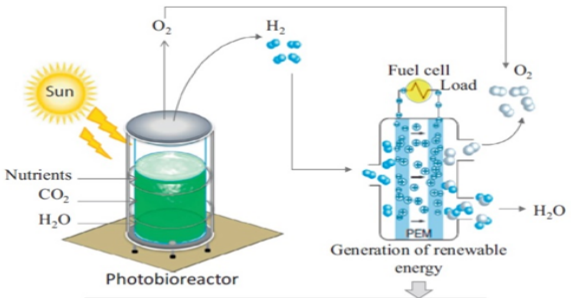
หนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจ ตัวอย่างเช่น การรบกวนการทำงานของกระบวนการดูดซึมไนเทรต (nitrate assimilation) ซึ่งจำเป็นต้องใช้อิเล็กตรอนในไซยา-โนแบคทีเรีย *Synechocystis* PCC 6803 โดยทำให้เอนไซม์ nitrate reductase และ nitrite reductase เสียสภาพ ทำให้ผลิตไฮโดรเจนได้มากขึ้น (Baebprasert et al., 2010)

เนื่องจากเอนไซม์ hydrogenase ทำงานได้น้อยลงในภาวะที่มีออกซิเจน การลดปริมาณออกซิเจนในระบบการผลิตไฮโดรเจนทำได้โดยการเลี้ยงสาหร่ายจุลภาคและแบคทีเรียร่วมกัน (co-cultivation) ออกซิเจนที่เกิดขึ้นจากสาหร่ายในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงจะถูกใช้ในกระบวนการหายใจของแบคทีเรีย ซึ่งส่งผลให้ผลิตไฮโดรเจนได้มากขึ้น (Fakhimi et al., 2020) นอกจากนั้น การทำให้สาหร่ายจุลภาครวมถึงไซยาโนแบคทีเรียลดการสัมผัสกับออกซิเจนในระหว่างการผลิตไฮโดรเจน สามารถใช้เทคโนโลยีการตรึงเซลล์ (cell immobilization) ด้วยตัวค้ำจุนที่เหมาะสม ซึ่งทำให้เซลล์ผลิตไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก (Sukrachan et al., 2020)

การขยายปริมาตรการเลี้ยงสาหร่ายเพื่อผลิตไฮโดรเจน

การขยายขนาดและปริมาตรในการเลี้ยงจุลสาหร่ายนั้น เป็นสิ่งจำเป็นแก่การผลิตไฮโดรเจน เพราะปริมาณที่ผลิตได้ในระดับห้องปฏิบัติการยังน้อยเกินไป ไม่สามารถนำมาประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมได้จริง การเพิ่มปริมาตรการเลี้ยงให้เหมาะแก่การเจริญเติบโตและการผลิตไฮโดรเจนนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายอย่าง เช่น สายพันธุ์ของสาหร่ายจุลภาค การที่แสงส่องถึงได้ การให้อากาศ และสารอาหารเลี้ยงสาหร่าย

ในการเลี้ยงสาหร่ายจุลภาคในระดับถังปฏิกรณ์ชีวภาพเพื่อศึกษาการผลิตไฮโดรเจนนั้นได้มีการศึกษาในสาหร่ายจุลภาคบางสายพันธุ์ เช่น *Chlamydomonas reinhardtii* และ *Anabaena* sp. โดยที่ภาวะของอาหารในการผลิตไฮโดรเจนนั้นจะถูกปรับให้เหมาะสมหลังจากเพาะเลี้ยงให้ได้เซลล์ตั้งต้นจำนวนมากแล้ว ในการผลิตไฮโดรเจนโดยสาหร่ายสีเขียว *C. reinhardtii* ภาวะการผลิตมักจะจำกัดปริมาณของซัลเฟอร์ ในขณะที่การผลิตโดยไซยาโนแบคทีเรียแบบเส้นใย *Anabaena* sp. นั้นจะจำกัดปริมาณของไนโตรเจน ส่วนในการที่แสงส่องถึงได้ รวมถึง ระบบการให้อากาศและการเก็บเกี่ยวมักจะเกี่ยวข้องโดยตรงกับการออกแบบถังปฏิกรณ์ชีวภาพ โดยมีรูปแบบต่าง ๆ กัน ภาพที่ ๑ แสดงการการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้ถังปฏิกรณ์ชีวภาพ (Khetkorn et al., 2010) เพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงผลิตกระแสไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิง (fuel cell)

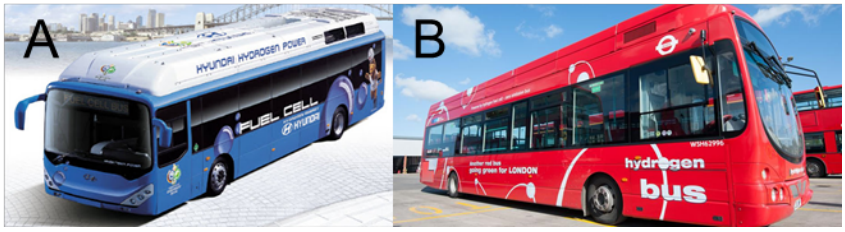


ภาพที่ ๑ : การใช้ถังปฏิกรณ์ชีวภาพเพื่อผลิตไฮโดรเจนเพื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า (แหล่งที่มา : Khetkorn W et al., 2017)

บทสรุป

พลังงานที่ใช้กันทั่วโลกอยู่ในรูปแบบพลังงานไฟฟ้าประมาณร้อยละ ๒๐ ส่วนอีกร้อยละ ๘๐ นั้นอยู่ในรูปพลังงานเชื้อเพลิง ไฮโดรเจนเป็นหนึ่งในพลังงานสะอาดที่มีศักยภาพสูงสามารถใช้เป็นพลังงานทดแทนได้เป็นอย่างดี

เหมาะแก่การใช้ในอนาคต สาหร่ายจุลภาคเป็นตัวผลิตไฮโดรเจนที่ดีและน่าสนใจในเชิงเทคโนโลยีชีวภาพ มีบทบาทสำคัญในการช่วยลดปริมาณก๊าซเรือนกระจก สถานภาพปัจจุบันยังมีข้อจำกัดที่สำคัญในการผลิตไฮโดรเจนเชิงเศรษฐกิจ เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายสูงและเทคโนโลยีการกักเก็บไฮโดรเจนที่ยังไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพัฒนาส่วนนี้เป็นหลัก งานวิจัยส่วนใหญ่ในปัจจุบันมักเน้นการศึกษาในด้านการพัฒนาสายพันธุ์โดยการดัดแปรระบบเมแทบอลิซึม (metabolism) หาภาวะที่เหมาะสมในการผลิต และใช้หลัก System Biology เพื่อเป็นเครื่องมือศึกษาจีโนมอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น ในอนาคตคาดว่า การผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการทางชีวภาพสามารถนำไปประยุกต์ใช้เชิงพาณิชย์ได้ เช่น มีต้นทุนการผลิตเทียบเท่ากับเชื้อเพลิงฟอสซิล เป็นที่ยอมรับและสามารถใช้ได้จริงในสังคม ปัจจุบันนี้บางประเทศเริ่มใช้รถบัสสาธารณะพลังงานไฮโดรเจนแล้ว เช่น เกาหลีใต้ สหราชอาณาจักร (ภาพที่ ๒)



ภาพที่ ๒ : รถบัสที่ใช้พลังงานไฮโดรเจนในประเทศเกาหลีใต้ (A) และสหราชอาณาจักร (B) (แหล่งที่มา : http://energy.korea.com/archives/34399 และ https://www.london.gov.uk/what-we-do/environment/pollution-and-air-quality/cleaner-buses)

เอกสารอ้างอิง

Baebprasert W, Lindblad P, Incharoensakdi A. Response of H2 production and Hox-hydrogenase activity to external factors in the unicellular cyanobacterium *Synechocystis* sp. PCC 6803. Int. J. Hydrogen Energy 2010; 35: 6611-6616.

Fakhimi N, Gonzalez-Ballester D, Fernández E, Galván A, Dubini A. Algae-bacteria consortia as a strategy to enhance H_2 production. Cells 2020; 9: 1353.

Fischer WF. Life before the rise of oxygen. Nature 2008; 455: 1051-1052.

Khetkorn W, Lindblad P, Incharoensakdi A. Enhanced biohydrogen production by the N2-fixing cyanobacterium *Anabaena siamensis* strain TISTR 8012. Int. J. Hydrogen Energy 2010; 35: 12767-12776.

Khetkorn W, Rastogi RP, Incharoensakdi A, Lindblad P, Madamwar D, Pandey A, Larroche C. Microalgal hydrogen production: A review. Bioresour. Technol. 2017; 243: 1194-1206.

Sukrachan T, Incharoensakdi A. Enhanced hydrogen production by *Nostoc* sp. CU2561 immobilized in a novel agar bead. J. Appl. Phycol. 2020; 32: 1103-1115.