

กระบวนการผลิตแก๊สไฮโดรเจนโดยจุลสาหร่าย

Biophotolysis-based Hydrogen Production by Microalgae

วิวัฒน์ แจ่มเยี่ยม^{1*}

Witawat Jangiam^{1*}

บทคัดย่อ

ไฮโดรเจนถือว่าเป็นพลังงานที่สะอาดและเหมาะที่จะใช้ในอนาคต เนื่องจากการเผาไหม้ที่มีประสิทธิภาพสูง และไม่ปลดปล่อยแก๊สที่เป็นมลพิษ กระบวนการผลิตแก๊สไฮโดรเจนโดยจุลสาหร่ายได้รับความสนใจเป็นอย่างมาก เนื่องจากจุลสาหร่ายมีกระบวนการสังเคราะห์แสงที่สามารถใช้พลังงานจากธรรมชาติที่มีอยู่เช่น แสงอาทิตย์ และน้ำ ในบทความนี้จะกล่าวถึงกระบวนการสังเคราะห์แสงของจุลสาหร่ายทั้งสองชนิด ได้แก่ สาหร่ายไฟโตออคโตโรฟิค และสาหร่ายไฟโตเฮเทอโรโทรฟิค โดยสาหร่ายทั้งสองชนิดมีความแตกต่างกันหลายประการในแง่ของการผลิตแก๊สไฮโดรเจน เช่น เอนไซม์ที่ใช้ในการผลิตแก๊สไฮโดรเจน ความต้องการพลังงาน ปริมาณแก๊สออกซิเจนที่จะเป็นตัวยับยั้งสารตั้งต้นที่ใช้ และผลิตภัณฑ์ที่ได้

คำสำคัญ: ไฮโดรเจน จุลสาหร่าย การสังเคราะห์แสง

Abstract

Hydrogen is considered as an ideal and clean energy for the future because of its high conversion and non-polluting nature. Photobiological production of biohydrogen by microalgae is of great interest since it promises a renewable energy carrier from nature's most plentiful resources, solar energy and water. This review examines the mechanisms of algal photosynthesis, photoautotrophic and photoheterotrophic. The different between 2 mechanisms in term of hydrogen production are enzymes, requirement of energy, oxygen inhibition, substrates and products.

Keywords: Hydrogen, Microalgae, Photosynthesis

¹ อาจารย์ ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ต.แสนสุข อ.เมือง จ.ชลบุรี 20131

* Corresponding author : โทรศัพท์/โทรสาร: 0-3810-2222 # 3351 อีเมลล์: witawat@buu.ac.th

บทนำ

ประเทศไทยได้มีการพัฒนาจากระบบเศรษฐกิจที่ต้องพึ่งพาผลผลิตจากภาคเกษตรกรรมเป็นหลัก กลายมาเป็นการพึ่งพาผลผลิตซึ่งมาจากภาคอุตสาหกรรมเป็นส่วนใหญ่ จากการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรมและการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากร ทำให้ความต้องการทางด้านพลังงานในด้านเศรษฐกิจสังคมรวมถึงการใช้พลังงานในชีวิตประจำวันเพิ่มสูงขึ้นอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ประเทศไทยต้องพึ่งพาน้ำมันปิโตรเลียมมากขึ้นเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงาน ซึ่งนับวันราคาน้ำมันดิบในตลาดโลกก็ยิ่งเพิ่มสูงขึ้น โดยในปี 2551 ประเทศไทยต้องนำเข้าพลังงานถึง 890,700 ล้านบาทและมีแนวโน้มจะเพิ่มขึ้นทุกปี [1] ดังนั้นประเทศไทยจึงจำเป็นต้องหาแหล่งพลังงานภายในประเทศมาทดแทน ซึ่งกระทรวงพลังงานนั้นมีเป้าหมายในการลดการใช้พลังงานดั้งเดิม และหันมาสนับสนุนการใช้พลังงานทดแทนในทุกๆรูปแบบ ไม่ว่าจะเป็นพลังงานจาก มวลชีวภาพ พลังงานแสงอาทิตย์ พลังงานลม พลังงานขยะ พลังงานแก๊สไฮโดรเจน อีกทั้งในปัจจุบันคนทั่วโลกก็ตระหนักและให้ความสำคัญกับสิ่งแวดล้อมเป็นอย่างมาก ดังนั้นพลังงานทดแทนที่นำมาใช้จึงควรเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมด้วยเช่นกัน

พลังงานไฮโดรเจน (Hydrogen, H_2) ได้รับการคาดหมายและยอมรับว่าจะเป็นแหล่งพลังงานทดแทนที่สำคัญอย่างมากในอนาคต [2] เนื่องจากเป็นพลังงานสะอาดเมื่อใช้กับเซลล์เชื้อเพลิง(Fuel cell) แล้ว จะไม่ปลดปล่อยแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ออกมา [3,4,5] ดังนั้นจึงไม่ส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์เรือนกระจก [6] อีกทั้งการเผาไหม้ยังมีประสิทธิภาพสูง [7] ไม่ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ [8] โดยจะมีเพียงไอน้ำเป็นผลพลอยได้เท่านั้น ซึ่งแตกต่างจากเชื้อเพลิงอื่น ๆ ที่ให้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลพลอยได้ จึงสามารถช่วยลดการเกิดสภาวะโลกร้อนหรือ ปรากฏการณ์เรือนกระจก (Greenhouse Effect) นอกจากนี้ค่าพลังงานเชื้อเพลิงที่ได้จากแก๊สไฮโดรเจนจะมากกว่าค่าพลังงานเชื้อเพลิงจากไฮโดรคาร์บอน และจากแอลกอฮอล์ เช่น เมทานอลและ

เอทานอล ถึง 2.5 และ 5 เท่า ตามลำดับ [2] พลังงานไฮโดรเจนสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับพลังงานดั้งเดิมได้ เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์ เครื่องยนต์สันดาปภายใน เครื่องกังหัน และเครื่องไอพ่น และยังสามารถนำแก๊สไฮโดรเจนไปผลิตกระแสไฟฟ้า [9] โดยป้อนเข้าเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งขณะนี้นักวิจัยทั่วโลกให้ความสนใจเป็นอย่างมากในการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงมาประยุกต์ใช้ในด้านต่างๆ เนื่องจากประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงมีค่าสูงกว่าอุปกรณ์ผลิตไฟฟ้าแบบอื่นๆมาก การใช้มีเทนซึ่งให้ประสิทธิภาพสูงถึงราว 80% [10] ดังนั้นพลังงานไฮโดรเจนจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ทดแทนพลังงานดั้งเดิมได้ และอาจกล่าวได้ว่าพลังงานไฮโดรเจนเป็นพลังงานในอนาคตอย่างแท้จริง

บทความนี้เกิดจากการเรียบเรียงและสรุปความรู้พื้นฐานของกระบวนการผลิตแก๊สไฮโดรเจนโดยจุลสาหร่าย ซึ่งมีประเด็นความสนใจเกี่ยวกับระบบการสังเคราะห์แสงของจุลสาหร่าย รวมทั้งแสดงถึงความแตกต่างของการผลิตแก๊สไฮโดรเจนโดยจุลสาหร่ายสองชนิด

สาหร่าย

สาหร่ายเป็นสิ่งมีชีวิตชนิดหนึ่งที่มีโครงสร้างอย่างง่าย การจัดเรียงตัวของเซลล์ไม่ซับซ้อน ประกอบด้วยเซลล์เพียงเซลล์เดียวหรือหลายเซลล์ ไม่มีเนื้อเยื่อที่ทำหน้าที่เฉพาะ ไม่มีท่อลำเลียงราก ลำต้น และใบที่แท้จริง [11] สาหร่ายเซลล์เดียวจัดเป็นแพลงก์ตอนพืชกลุ่มใหญ่ที่สุดในบรรดาแพลงก์ตอนพืชทั้งหมด [12] สาหร่ายเป็นสิ่งมีชีวิตที่สามารถสร้างอาหารได้เองโดยการสังเคราะห์ด้วยแสงเช่นเดียวกับพืชชั้นสูง ในบรรดาสสิ่งมีชีวิตที่สังเคราะห์ด้วยแสงได้ พบว่าเป็นพวกสาหร่ายประมาณ 50 – 60 เปอร์เซ็นต์ [13]

การจัดจำแนกสาหร่ายเป็นดิวิชันและชั้นต่าง ๆ มีการใช้ชื่อของสาหร่ายเป็นเกณฑ์ในการอ้างอิง ดังนี้

1. ไซยาโนไฟตา (Cyanophyta) หรือ ไซยาโนแบคทีเรีย (Cyanobacteria) เป็นสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน

เป็นสิ่งมีชีวิตพวกโปรคาริโอท ซึ่งเป็นพวกเดียวกับแบคทีเรีย จัดอยู่ในกลุ่มแบคทีเรียที่สังเคราะห์ด้วยแสงได้ มีโครงสร้างที่แน่นอน มีไฟโคไซยานินเป็นองค์ประกอบหลักของรงควัตถุ ทำให้มีสีเขียวแกมน้ำเงิน[14]

2. โปรคลอโรไฟตา (Prochlorophyta) เป็นสาหร่ายโปรคาริโอทที่มีลักษณะคล้ายไซยาโนแบคทีเรียหลายอย่าง เช่น มีแคโรทีนอยด์คล้ายกัน ผงสังเคราะห์แสงเป็นสารพวกกรดมิวเรมิก ไม่มีเยื่อหุ้มนิวเคลียส เป็นต้น และยังมีคลอโรฟิลล์เอและบี แต่ไม่มีไฟโคบิลิโซม [14]

3. โรโดไฟตา (Rhodophyta) เป็นสาหร่ายสีแดงหลายชนิดมีขนาดใหญ่ บางชนิดเป็นสาย มีการจัดเรียงตัวของเซลล์คล้ายเนื้อเยื่อพาราคีมา [15]

4. คลอโรไฟตา (Chlorophyta) เป็นสาหร่ายสีเขียว มีโครงสร้างแตกต่างกันหลายแบบ มีลักษณะทางชีวเคมีเช่นเดียวกับพืชชั้นสูง เชื่อกันว่าเป็นต้นกำเนิดของพืชสีเขียวในปัจจุบันนี้ [15]

5. แครโรไฟตา (Charophyta) ประกอบด้วยสาหร่ายแครโรไฟต์หรือสาหร่ายไฟ (Stoneworts or Brittleworts) ซึ่งเป็นสาหร่ายสีเขียวที่ประกอบด้วยเซลล์หลายเซลล์เป็นแบบชนิดพาราคีมา [14]

6. ยูกลีโนไฟตา (Euglenophyta) ประกอบด้วยสิ่งมีชีวิตพวกยูกลีโนอยด์ (Euglenoids) หลายชนิดไม่มีสารสี นักสัตววิทยาจึงจัดไว้ในไฟลัมโปรโตซัว ส่วนชนิดที่มีสารสีที่ใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสง จะมีสารสีคล้ายสาหร่ายสีเขียว และเป็นพวกที่มีต้นกำเนิดมาไม่น้อยกว่า 200 ล้านปีมาแล้ว [15]

7. ไพร์โรไฟตา (Pyrrophyta) ไดโนแฟลเจลเลต (Dinoflagellates) ไครโมโซมไม่มีโปรตีนฮิสโตน (Histone) ขณะมีการแบ่งของเซลล์แบบไมโทซิส ไครโมโซมคงหนาแน่นตลอดเวลา จะเห็นไม่ชัดเจนในอินเตอร์เฟส และเป็นพวกที่มีต้นกำเนิดที่แยกสายวิวัฒนาการเกิดขึ้นในช่วงแรกของการวิวัฒนาการของยูแคริโอต [15]

8. คริสโซไฟตา (Chrysophyta) เป็นสาหร่ายสีเขียวแกมทองและสาหร่ายสีเขียวแกมเหลือง นักวิทยาศาสตร์หลายท่านจัดแยกได้หลายดิวิชัน บางครั้ง

นำไปจัดรวมไว้ในสาหร่ายสีน้ำตาลเพราะมีลักษณะทางชีวเคมีคล้ายสาหร่ายสีน้ำตาล โดยเฉพาะสารสีในกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงเหมือนกัน [15]

9. ฟิโอฟิตา (Pheophyta) เป็นสาหร่ายสีน้ำตาล มีโครงสร้างเชิงซ้อนขนาดใหญ่ บางชนิดมีเนื้อเยื่อที่เจริญแล้ว เช่น เนื้อเยื่อคล้ายโพลีเอม เพื่อการลำเลียงอาหารในต้นไม้ที่มีขนาดใหญ่ [15]

โดยการจัดจำแนกสาหร่ายอีกระบบหนึ่งจะจำแนกสาหร่ายเป็น 2 ประเภทตามขนาดได้แก่ จุลสาหร่าย (Microalgae) และ มหาสาหร่าย (Macroalgae) โดยจุลสาหร่ายจะเป็นสาหร่ายที่ไม่มีระบบท่อลำเลียงอาหาร และมองเห็นด้วยตาเปล่าไม่ชัดเจน ต้องมองด้วยกล้องจุลทรรศน์ ส่วนมหาสาหร่ายจะเป็นสาหร่ายที่มองเห็นเป็นลำต้นได้ด้วยตาเปล่า โดยในบทความนี้จะมุ่งเน้นที่จะอธิบายถึงจุลสาหร่ายเนื่องจากสามารถนำมาเพาะเลี้ยงเพิ่มปริมาณเป็นจำนวนมากได้อย่างรวดเร็วตามความต้องการ และใช้พื้นที่ในการเพาะเลี้ยงไม่มากนัก

การใช้จุลสาหร่ายในการผลิตแก๊สไฮโดรเจน

เนื่องจากจุลสาหร่ายมีความพิเศษที่แตกต่างจากพืชเชื้อเพลิงทั่วไป คือ ความรวดเร็วในระบบสังเคราะห์ด้วยแสง [16] สาหร่ายสามารถนำเอาพลังงานจากแสงอาทิตย์มาใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสงได้อย่างรวดเร็วกว่าพืชทดแทนอื่นๆ [16] จึงไม่ต้องใช้ค่าใช้จ่ายในการให้อาหารและการเลี้ยงดูมาก มีศักยภาพในการเพิ่มจำนวนสูง [17] สามารถเพาะเลี้ยงได้เป็นจำนวนมากโดยไม่ยุ่งยาก [16] ใช้พื้นที่ในการเพาะเลี้ยงไม่เปลืองและไม่มีผลกระทบต่อการใช้พื้นที่ปลูกพืชการเกษตรอื่นๆโดยสามารถนำพื้นที่ที่เสื่อมโทรมมาดัดแปลงเป็นแหล่งเพาะพันธุ์ได้ [16] อีกทั้งยังให้ผลพลอยได้มูลค่าสูง เช่น ผลพลอยได้ที่ใช้เป็นปุ๋ย อาหารสัตว์ สารปฏิชีวนะ เครื่องสำอาง หรือแม้แต่ใช้เป็นยารักษาโรค [17] จึงกล่าวได้ว่าจุลสาหร่ายเป็นพืชที่ใช้ผลิตแก๊สไฮโดรเจนประสิทธิภาพสูง

ในปี ค.ศ.1939 และ 1944 นาย ฮานส์ แกฟฟ์รอน [18,19] ได้ทำการสังเคราะห์แก๊สไฮโดรเจน

ในสาหร่ายสีเขียวเป็นคนแรก และมีการปรับปรุงเซลล์เพื่อตรวจหาแก๊สไฮโดรเจนในสภาวะที่ไม่มีแก๊สออกซิเจน รวมไปถึงการสังเกตคุณสมบัติของไฮโดรเจนร่วมกับการลดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในที่มีดไปด้วยจากการทดลองพบว่าเมื่อสาหร่ายอยู่ในสภาวะที่ไม่มีแก๊สออกซิเจน จะมีการสร้างแก๊สไฮโดรเจนขึ้นและพบว่าการผลิตแก๊สไฮโดรเจนของสาหร่าย *Scenedesmus obliquus* ในที่มีแสงสว่าง อัตราการเปลี่ยนแปลงไฮโดรเจนจะสูงในระยะเวลาสั้นๆ ในที่มีแสง [20]

แก๊สไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นจากจุลสาหร่ายจะได้อมาจากการสังเคราะห์ด้วยแสงของจุลสาหร่าย โดยกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของจุลสาหร่ายแบ่งออกเป็น 2 แบบ คือ โฟโตออโตโทรฟิค (Photoautotrophic) และโฟโตเฮเทอโรโทรฟิค (Photoheterotrophic) [21]

โฟโตออโตโทรฟิค เป็นพวกที่สามารถสร้างอาหารเองได้โดยการสังเคราะห์ด้วยแสง และใช้แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ เป็นแหล่งคาร์บอนในการสร้างอาหาร เช่น ไซยาโนแบคทีเรียที่มีการสังเคราะห์ด้วยแสงคล้ายพืชชั้นสูง สาหร่ายสีเขียว สาหร่ายสีแดง สาหร่ายสีน้ำตาล เป็นต้น [22]

โฟโตเฮเทอโรโทรฟิค เป็นพวกที่สร้างอาหารเองจากสารอินทรีย์ไม่ได้ จึงต้องมีการบริโภคสารอินทรีย์เข้าสู่เซลล์ โดยใช้คาร์บอนจากสารประกอบคาร์บอนเป็นสารประกอบอินทรีย์ ตัวอย่างเช่น แบคทีเรียสีม่วง (purple bacteria), green sulfur bacteria และ Helio bacteria [23] เป็นต้น

กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของจุลสาหร่าย

การสังเคราะห์ด้วยแสงของจุลสาหร่ายจะใช้พลังงานจากแสงในช่วงคลื่นที่เรียกว่า Photosynthetically Active Radiation (PAR) ซึ่งมีความยาวคลื่นแสงระหว่าง 400-700 นาโนเมตร สารสีแต่ละชนิดมีการดูดกลืนความยาวคลื่นแสง PAR ที่แน่นอน ซึ่งในการสังเคราะห์ด้วยแสงสารสีจะทำงานร่วมกับโปรตีนในเยื่อหุ้มไทลาคอยด์ของคลอโรพลาสต์ เพื่อสร้างสารประกอบเชิง

ซ้อนในการเก็บพลังงานแสงหรือระบบแสง ระบบแสงมี 2 ชนิด คือ ระบบแสง 1 (PS I) และ ระบบแสง 2 (PS II) โดยการทำงานของระบบแสง 1 จะดูดกลืนคลื่นความยาวคลื่นแสงที่ 700 นาโนเมตร เรียกระบบแสงนี้ว่า P700 ส่วนการทำงานของระบบแสง 2 จะดูดกลืนคลื่นความยาวคลื่นแสงที่ 680 นาโนเมตร จึงเรียกว่าระบบแสงนี้ว่า P680 นั้นหมายความว่าพลังงานจะถูกกระตุ้นทุกๆ โฟตอนที่มีความยาวคลื่นแสงมากกว่า 680 นาโนเมตร ระบบแสง 1 และ ระบบแสง 2 จะทำงานร่วมกันเพื่อรีดิวซ์ NADP และ ADP ไปเป็น NADPH และ ATP ตามลำดับ พลังงานที่ได้จากแสงจะนำไปใช้ในการตรึงแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ในวัฏจักรเคลวิน (Calvin cycle) เพื่อสังเคราะห์น้ำตาลกลูโคสที่นำมาใช้ในการออกซิไดซ์ในกระบวนการหายใจ และเก็บสะสมไว้เป็นอาหาร [24]

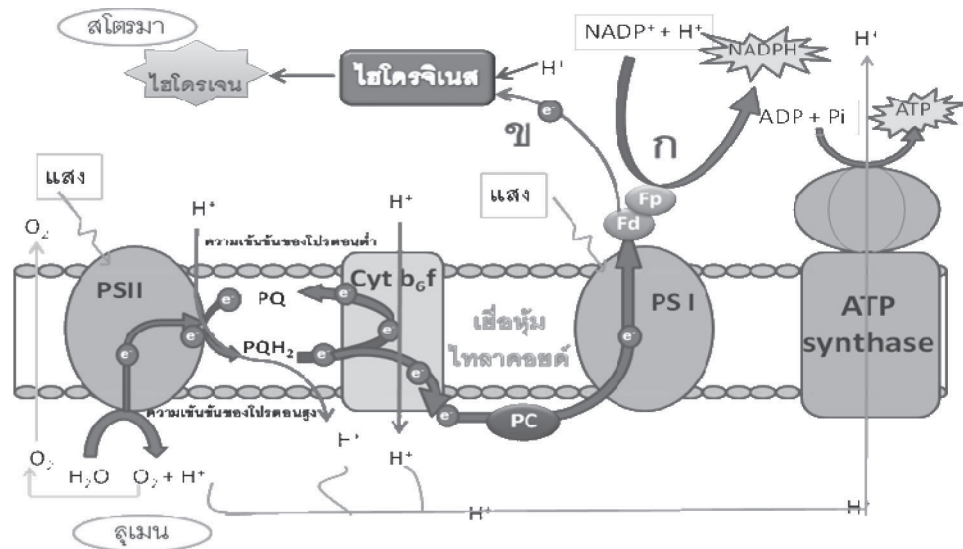
การผลิตแก๊สไฮโดรเจนของสาหร่าย

โฟโตออโตโทรฟิค

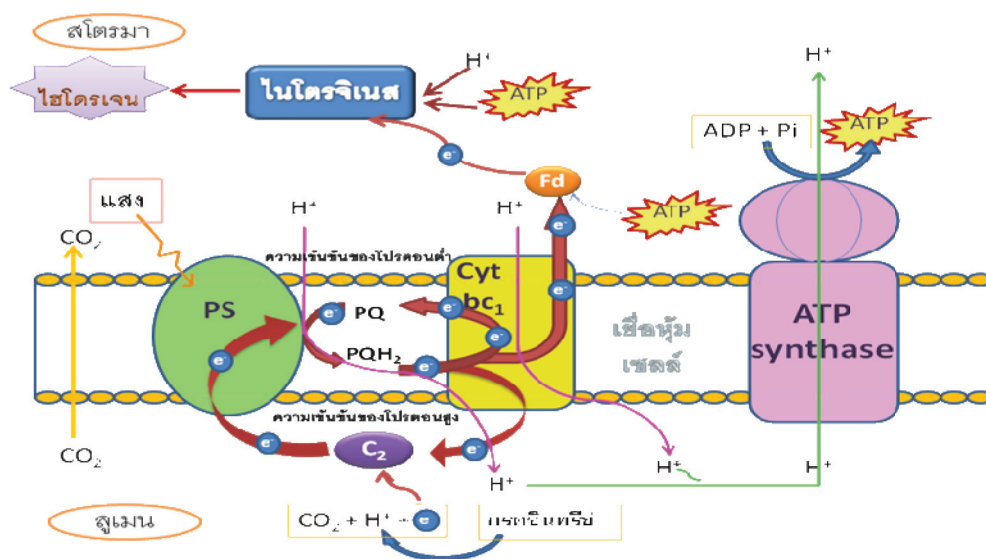
การสังเคราะห์ด้วยแสงของสาหร่ายจะเริ่มการสังเคราะห์ด้วยแสงที่ระบบแสง 2 (PS II) (รูปที่ 1) [25] โดยจะได้รับพลังงานแสง เพื่อกระตุ้นให้อิเล็กตรอนในศูนย์กลางการเกิดปฏิกิริยาของระบบแสง 2 หลุดออกไป และยังทำให้น้ำเกิดการแตกตัวได้เป็น ออกซิเจน อิเล็กตรอน และโปรตอน อิเล็กตรอนที่ได้จากน้ำจะเข้าไปแทนที่อิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจากระบบแสง 2 และจะทำการส่งผ่านอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาไปยัง พลาสโตควิโนน (Plastoquinone : PQH₂) ส่งต่อไปยังไซโตโครม b₆f (Cyt b₆f) และไหลวนกลับมาที่พลาสโตควิโนน (Plastoquinone : PQ) ในขณะเดียวกันโปรตอนก็จะวิ่งลงมาผ่านพลาสโตควิโนน (Plastoquinone : PQH₂) พร้อมกับอิเล็กตรอน โปรตอนจะวิ่งจากสโตรมาซึ่งมีความเข้มข้นของโปรตอนต่ำ (Low H⁺) ไปยังลูเมนที่ความเข้มข้นของโปรตอนสูงกว่า (High H⁺) ส่วนอิเล็กตรอนก็กลับมาในไซโตโครม b₆f และเคลื่อนตัวต่อไปโดยมีพลาสโตไซยานิน (plastocyanin : PC) มารับไปยังระบบแสง 1 (PS I) ในการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนนี้ได้

สูญเสียพลังงานเป็นอย่างมาก เพื่อใช้ในการปั๊มโปรตอนจากสโตรมาเข้าสู่ลูเมน จึงต้องมีการกระตุ้นพลังงานด้วยแสงใหม่อีกครั้งในระบบแสง 1 การทำงานของระบบแสง 1 จะคล้ายกับระบบแสง 2 คือเมื่อได้รับพลังงานจากแสงแล้วก็จะทำให้อิเล็กตรอนในศูนย์กลางการเกิดปฏิกิริยาของระบบแสง 1 หลุดออกมาไปยังสโตรมา และอิเล็กตรอนที่วิ่งมาจากระบบแสง 2 ก็จะมาแทนที่

อิเล็กตรอนที่หลุดไป หลังจากนั้นอิเล็กตรอนที่หลุดออกมาจะเคลื่อนที่ไปยังเฟอร์ดอกซิน (ferredoxin : Fd) แล้วรีดิวซ์ NADP^+ ให้กลายเป็น NADPH โดยเอ็นไซม์เฟอร์ดอกซินเอ็นเอคิพีรีดักเตส (ferredoxin-NADP reductase : Fp) โปรตอนที่อยู่ในลูเมนจะค่อย ๆ เคลื่อนขึ้นไปใน ATP synthase และได้ ATP ออกมา



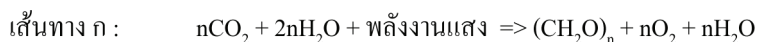
รูปที่ 1 การสังเคราะห์แสงของสาหร่ายไฟไดโอดโตรอฟิก



รูปที่ 2 การสังเคราะห์แสงของโฟโตเฮเทอโรโทรฟิค

ซึ่งเส้นทาง ก ของการสังเคราะห์แสงจะเกิดขึ้นตามสภาวะปกติ โดยได้ออกซิเจนจากการสังเคราะห์ด้วยแสง เฟอร์รีดอกซิน (ferredoxin : Fd) จะทำการขนส่งอิเล็กตรอนไปยังส่วนประกอบเคมี NADP^+ จะได้ NADPH ออกมา NADPH ที่ได้จะทำปฏิกิริยากับ ATP และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ได้เป็นคาร์โบไฮเดรต ซึ่งจะนำไปใช้เป็นอาหารและเก็บสะสมต่อไป ส่วนเส้นทาง ข จะเกิดขึ้นภายใต้สภาวะพิเศษ เช่น สภาวะที่ไม่มีแก๊สออกซิเจน,

ความดันของแก๊สไฮโดรเจนต่ำมาก ๆ เป็นต้น อิเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านเฟอร์รีดอกซิน (Fd) และเข้าทำปฏิกิริยากับโปรตอน โดยมีเอนไซม์ไฮโดรจิเนสเป็นตัวเร่งปฏิกิริยา และไม่ต้องใช้ ATP ในการทำปฏิกิริยา จะได้แก๊สไฮโดรเจนออกมา กลไกนี้ต้องคำนึงถึงเอนไซม์ไฮโดรจิเนส ซึ่งมีความไวมากต่อแก๊สออกซิเจน จากที่กล่าวมานี้จะได้สมการดังนี้



การผลิตแก๊สไฮโดรเจนของสาหร่าย ไฟโตเฮเทอโรโทรฟิค

กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของไฟโตเฮเทอโรโทรฟิค (รูปที่ 2) [25] จะประกอบด้วยระบบแสง 1 (photo-system one (PS)) เพียงอย่างเดียว ซึ่งกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงจะอยู่บริเวณเยื่อหุ้มเซลล์ โดยที่ระบบแสง 1 (PS) จะได้รับพลังงานจากแสงอาทิตย์และพลังงานจากกรดอินทรีย์ (ตัวอย่าง คือ อะซิเตต) หรือไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ในการแยกน้ำ ซึ่งจะเกิดขึ้นภายใต้สภาวะที่ไม่มีแก๊สออกซิเจน จะได้ อิเล็กตรอน โปรตอน และแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ อิเล็กตรอนที่ได้ออกมานี้จะถูกปั๊มให้เคลื่อนที่ผ่าน C_2 ไปยังระบบแสง 1 พลังงานจากแสงจะทำให้อิเล็กตรอนในศูนย์กลางการเกิดของระบบแสง 1 หลุดออกมาและเคลื่อนที่ไปยังพลาสโตควิโนน (Plastoquinone : PQH_2) ต่อไปยังไซโตโครม bc_1 (Cyt bc_1) และไหลวนกลับมาที่พลาสโตควิโนน (Plastoquinone : PQ) ไปยังพลาสโตควิโนน (PQH_2) และเข้าสู่ไซโตโครม bc_1 เหมือนเดิม ในขณะเดียวกันโปรตอนที่เคลื่อนที่ผ่าน พลาสโตควิโนน (PQH_2) เช่นกัน โดยที่โปรตอนจะวิ่งลงมาจากสโตรมา ซึ่งมีความเข้มข้นของโปรตอนต่ำ (Low H^+) ไปยังลูเมนที่มีความเข้มข้นของโปรตอนสูงกว่า (High H^+) และโปรตอนที่อยู่ในลูเมนจะเข้าสู่ ATP synthase โดยการปั๊มโปรตอนจากลูเมน (ความเข้มข้นของโปรตอนสูง (High H^+)) ไปยังสโตรมา (ความเข้มข้นของโปรตอนต่ำ (Low H^+)) และสร้าง ATP ขึ้นมา ส่วนอิเล็กตรอนที่อยู่ในไซโตโครม bc_1 จะถูกแยกออกเป็น 2 สาย มีหนึ่งสายที่วิ่งกลับเข้าไปใน C_2 และดำเนินการเหมือนขั้นตอนที่กล่าวมาในช่วงแรก ส่วนอีกหนึ่งสายจะวิ่งขึ้นไปยังเฟอร์ริดอกซิน (Fd) โดยใช้ ATP ที่ได้จากการทำงานของ ATP synthase มาเป็นพลังงานในการขับเคลื่อนอิเล็กตรอนไปยังเฟอร์ริดอกซิน (Fd) ซึ่งเป็นตัวรับอิเล็กตรอน และโปรตอนจะถูกเปลี่ยนไปเป็นแก๊สไฮโดรเจน โดยอาศัยเอนไซม์ไนโตรจิเนส พลังงาน ATP และอิเล็กตรอนที่ได้รับมาจากเฟอร์ริดอกซิน (Fd) ซึ่งขั้นตอนนี้จะเกิดขึ้นเมื่อไม่มีโมเลกุลของไนโตรเจน โดย

ปกติแล้วเอนไซม์ไนโตรจิเนสมีความไวต่อแก๊สออกซิเจน แต่ในกระบวนการนี้ไม่มีปัญหาเพราะกระบวนการนี้เกิดขึ้นในสภาวะที่ไม่มีออกซิเจน (anoxygenic photosynthesis) ซึ่งจะไม่ผลิตออกซิเจนออกมา [23]

การเปรียบเทียบการผลิตแก๊สไฮโดรเจน จากสาหร่ายไฟโตอโอโตโทรฟิค และสาหร่ายไฟโตเฮเทอโรโทรฟิค

กระบวนการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากสาหร่ายไฟโตอโอโตโทรฟิคเป็นกระบวนการที่น่าสนใจเพราะแหล่งพลังงานที่ใช้ในการผลิตแก๊สไฮโดรเจน เป็นพลังงานที่มีแหล่งกำเนิดที่ถูกและหาได้ง่าย ซึ่งก็คือ น้ำและแสงอาทิตย์ และไม่มีผลิตภัณฑ์ของคาร์บอนไดออกไซด์ แต่กระบวนการนี้มีปัญหาคือ เอนไซม์ที่ใช้ในการผลิตไฮโดรเจนซึ่งคือไฮโดรจิเนส มีออกซิเจนเป็นตัวยับยั้ง ซึ่งในขณะที่เกิดกระบวนการผลิตไฮโดรเจนจะมีออกซิเจนเกิดขึ้นในเวลาเดียวกัน ถ้าจะเลือกใช้สาหร่ายไฟโตอโอโตโทรฟิคมาใช้ในการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจะต้องทำการกำจัดออกซิเจนอยู่ตลอดเวลาด้วยความเร็วสูงซึ่งไม่เหมาะสมในเชิงปฏิบัติ ซึ่งในอนาคตความรู้ทางด้านพันธุวิศวกรรมจะนำมาช่วยในการปรับปรุงสายพันธุ์ให้มีความต้านทานออกซิเจนมากขึ้น

ส่วนกระบวนการไฟโตเฮเทอโรโทรฟิค เป็นกระบวนการที่มีเพียงระบบแสง 1 เท่านั้นในการแยกน้ำ และปฏิกิริยาการปลดปล่อยไฮโดรเจน ในกระบวนการนี้ออกซิเจนที่เป็นตัวยับยั้งไม่ทำให้เกิดปัญหาเพราะไม่มีออกซิเจนเกิดขึ้น ส่วนข้อดีอื่นๆ คือ การผลิตไฮโดรเจนเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่วนข้อเสียของกระบวนการนี้คือ เอนไซม์ไนโตรจิเนสต้องการพลังงานในรูปของ ATP, การผลิตไฮโดรเจนจากสารอินทรีย์ต้องการพลังงานในการเกิดปฏิกิริยา (bioenergetically) มาใช้ประโยชน์มากกว่าการผลิตไฮโดรเจนจากน้ำ และผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการสังเคราะห์แสงคือ แก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากสารอินทรีย์ ซึ่งลักษณะเฉพาะของสาหร่ายไฟโตอโอโตโทรฟิค และสาหร่ายไฟโตเฮเทอโรโทรฟิคในกระบวนการผลิตไฮโดรเจน สรุปดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ลักษณะเฉพาะของสาหร่ายไฟโตออคโตโรฟิค และสาหร่ายไฟโตเฮเทอโรโทรฟิค ในกระบวนการผลิตไฮโดรเจน

ปฏิกิริยา	สาหร่ายไฟโตออคโตโรฟิค	สาหร่ายไฟโตเฮเทอโรโทรฟิค
1. เอนไซม์	ไฮโดรจิเนส	ไนโตรจิเนส
2. ความต้องการ ATP ของเอนไซม์	ไม่ใช่	ใช่
3. ออกซิเจนเป็นตัวยับยั้ง	ใช่	ใช่
4. ออกซิเจนเกิดขึ้นตลอดระยะเวลาการผลิต	ใช่	ไม่ใช่
5. สารตั้งต้น	น้ำ	สารอินทรีย์, กรดอินทรีย์ เช่น อะซิเตด
6. มีคาร์บอนไดออกไซด์เป็นผลิตภัณฑ์	ไม่ใช่	ใช่ (จากสารอินทรีย์)
7. ผลิตภัณฑ์ที่เป็นแก๊ส	ไฮโดรเจน และออกซิเจน	ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์

บทสรุป

พลังงานไฮโดรเจนถือเป็นพลังงานแห่งอนาคตอย่างแท้จริงเนื่องจากเป็นพลังงานที่สะอาดที่สุด จากการศึกษาระบวนการเกิดแก๊สไฮโดรเจนจากจุลสาหร่ายพบว่ามีความเป็นไปได้ในการที่จะนำจุลสาหร่ายมาผลิตแก๊สไฮโดรเจน โดยจุลสาหร่ายทั้งสองชนิดคือ ชนิดไฟโตออคโตโรฟิค และชนิดไฟโตเฮเทอโรโทรฟิคสามารถที่จะผลิตแก๊สไฮโดรเจนได้โดยมีลักษณะเฉพาะที่แตกต่างกัน โดยที่จุลสาหร่ายชนิดไฟโตออคโตโรฟิคจะพบว่าการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจะใช้น้ำและแสงเป็นวัตถุดิบ และผลผลิตที่ได้จะเป็นแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สออกซิเจน แต่ในขณะเดียวกันจุลสาหร่ายชนิดไฟโตเฮเทอโรโทรฟิคใช้สารอินทรีย์เป็นวัตถุดิบเนื่องจากกระบวนการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจะต้องใช้พลังงานเข้ามาเกี่ยวข้อง และผลผลิตที่ได้จะเป็นแก๊สไฮโดรเจนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แต่ในปัจจุบันการผลิตแก๊สไฮโดรเจนจากจุลสาหร่ายยังไม่เป็นที่นิยมนักเนื่องจากยังขาดองค์ความรู้หลายๆประการ เช่น การเลี้ยงสาหร่ายระบบใหญ่ที่จะให้ประสิทธิภาพที่ดี กระบวนการกำจัดออกซิเจนของจุลสาหร่ายชนิดไฟโตออคโตโรฟิค และปริมาณแก๊สไฮโดรเจนที่ผลิตได้ยังไม่คุ้มทุน เป็นต้น ซึ่งในประเทศไทย

ก็ได้เริ่มมีนักวิจัยหันมาสนใจที่จะศึกษางานในด้านนี้เพิ่มขึ้นบ้างแล้ว โดยการศึกษาการสะสมของแป้งในจุลสาหร่าย โดยจะถูกสลายโดยแบคทีเรียที่ผลิตกรดแลกติกกลายเป็นกรดอินทรีย์ในการที่จะกลายเป็นแก๊สไฮโดรเจนโดยกระบวนการสังเคราะห์แสงของสาหร่าย [26] การศึกษาวิจัยในด้านนี้ที่เพิ่มขึ้นจะช่วยให้พัฒนาองค์ความรู้ที่จะสามารถนำมาใช้ได้จริงในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

- [1] สำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน. (2552). สถานการณ์พลังงานในปี 2551 และแนวโน้มปี 2552 สืบค้นเมื่อ 16 กันยายน 2552 จาก: http://www.eppo.go.th/Thaienergynews/Energy_Policy/Watching_ShowDetail.aspx?watching_OID=50.
- [2] ธรรมนูญ ศรีทะวงศ์. (2550). พลังงานไฮโดรเจน สืบค้นเมื่อ 16 กันยายน 2552 จาก: <http://www.kmitnboxmie8.com/index.php?lay=show&ac=article&Id=568260&Ntype=3>.

- [3] Dutta, D., De, D., Chaudhuri, S. and Bhattacharya, S.K. (2005). Hydrogen production by Cyanobacteria. **Microbial Cell Factories**. **4**: 36
- [4] Tian, X., Liao, Q., Liu, W., Wang, Y.Z., Zhu, X., Li, J. and Wang, H. (2009). Photo-hydrogen production rate of a PVA-boric acid gel granule containing immobilized photosynthetic bacteria cells. **International Journal of Hydrogen Energy**. **34**: 4708–4717.
- [5] Zhang, H., Brunsb, M.A. and Logana, B.E. (2006). Biological hydrogen production by Clostridium acetobutylicum in an unsaturated flow reactor. **Water Research**. **40**: 728 – 734.
- [6] Ginkel, S. V. and Sung, S. (2001). Biohydrogen Production as a Function of pH and Substrate Concentration. **Environ. Sci. Technol.** **35**: 4726-4730.
- [7] Wang, X., Monis, P.T., Saint, C.P. and Jina, B. (2009). Biochemical kinetics of fermentative hydrogen production by Clostridium butyricum W5. **International Journal of Hydrogen Energy**. **34**: 791–798.
- [8] Madamwar, D., Garg, N. and Shah, V. (2000). Cyanobacterial hydrogen production, **World Journal of Microbiology & Biotechnology**. **16**: 757-767.
- [9] สมนึก บุญพาไสว. (2549). **เซลล์เชื้อเพลิง** สืบค้นเมื่อ 16 กันยายน 2552 จาก: http://www.ipst.ac.th/design/document/Fuel_cell.pdf.
- [10] วิกีพีเดีย สารานุกรมเสรี. (2552). **เซลล์เชื้อเพลิง** สืบค้นเมื่อ 16 กันยายน 2552 จาก: <http://th.wikipedia.org/wiki/เซลล์เชื้อเพลิง>.
- [11] Chapman, V.J. and Chapman, D.J. (1980). **The Algae**. 2nd ed. London: Macmillan.
- [12] บัญญัติ มนทีชราสน์. (2533). **แพลงค์ตอนวิทยาเบื้องต้น**. เชียงใหม่: ภาควิชาเทคโนโลยีการประมง คณะผลิตกรรมการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีการเกษตรแม่โจ้.
- [13] Purves, William K., Orians, Gordon H. and Heller, H. Craig. (1992). **Life: The Science of Biology**. 3rd ed. Massachusetts: Sinaure associates.
- [14] วันเพ็ญ ภูติจันทร์. (2549). **วิทยาศาสตร์ (Phycology)**. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: โอเคียนสโตร์.
- [15] Mauseth, James D. (1991). **Botany: A Introduction to Plant Biology**. Philadelphia: Sauders College Publishing Co., Inc.
- [16] กระทรวงพลังงาน. (2550). **ไบโอดีเซล...สาหร่าย จะกลายเป็นทอง** สืบค้นเมื่อ 16 กันยายน 2552 จาก: <http://www.energyfantasia.com/ef4/pedia/pediashow.php?show=399>.
- [17] อภารัตน์ มหาจันทร์. (2551). **พลังงานสาหร่าย พลังอนาคต** สืบค้นเมื่อ 16 กันยายน 2552 จาก: http://www.adeq.or.th/web/news/news_env_detail.php?id=18.
- [18] Gaffron, H. (1939). Reduction of CO₂ with H₂ in green plants. **Nature**. **143**: 204–205.
- [19] Gaffron, H. (1944). Photosynthesis, photoreduction and dark reduction of carbon dioxide in certain algae. **Biol Rev Cambridge Philos Soc**. **19**: 1–20.
- [20] Gaffron, H, Rubin, J. (1942). Fermentative and photochemical production of hydrogen in algae. **J Gen Physiol**. **26**: 219–240.
- [21] Asimov, Isaac .(1968). **Photosynthesis**. New York, London: Basic Books.
- [22] Bryant , D.A. and Frigaard , N.U. (2006). Prokaryotic photosynthesis and phototrophy illuminated. **Trends Microbiol**. **14** (11): 488.

- [23] Madigan, M T.and Ormerod, J G. (1995). **Anoxygenic Photosynthetic Bacteria**. In Blankenship et al. pp 17-30., New York: Kluwer Academic Publishers.
- [24] Hall, D.O. and Rao, K.K. (1994). **Photosynthesis**. 5th ed. Cambridge University Press.
- [25] Akkerman, Ida. Janssen, Marcel. Rocha, Jorge and Wijffels , Rene H. (2002). Photobiological hydrogen production:photochemical efficiency and bioreactor design. **International Journal of Hydrogen Energy**. **12**: 1195-1208.
- [26] Rodjaroen,S., Juntawong, N., Mahakhant, A. and Miyamoto, K. (2007). High Biomass Production and Starch Accumulation in Native Green Algal Strains and Cyanobacterial Strains of Thailand. **Kasetsart Journal Natural Science**, **41**: 570-575.