

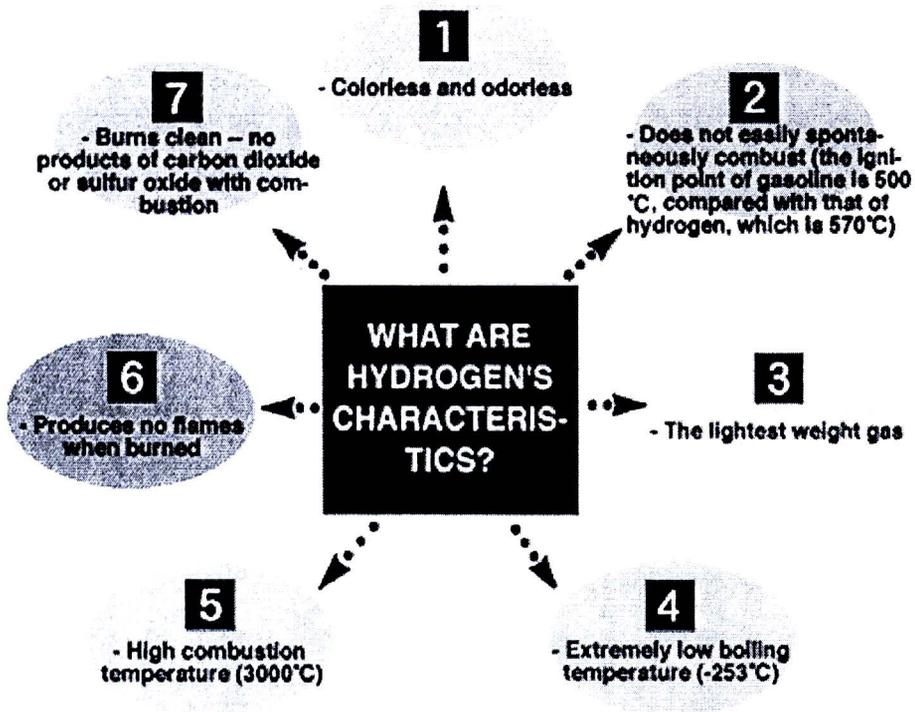
บทที่ 2

ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความสำคัญของพลังงานไฮโดรเจน

พลังงานมีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของมนุษย์เป็นอย่างมาก นอกจากจะใช้เพื่อให้เกิดความสะดวกสบายในชีวิตประจำวันแล้ว พลังงานส่วนใหญ่ยังถูกนำมาใช้ในโรงงานอุตสาหกรรม การคมนาคมและการผลิตกระแสไฟฟ้า ไม่ว่าจะเป็นพลังงานจากน้ำมัน ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ ซึ่งพลังงานเหล่านี้เป็นพลังงานที่มีอยู่อย่างจำกัด และคาดว่ากำลังจะหมดไปในไม่ช้า นอกจากนี้ การเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของพลังงานเหล่านี้ยังก่อให้เกิดมลพิษ เช่น ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ที่ก่อให้เกิดภาวะเรือนกระจก ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ฝุ่นและฝุ่นละออง เป็นต้น สำหรับประเทศไทยมีปริมาณพลังงานสำรองทรัพยากรเชื้อเพลิงภายในประเทศ โดยแบ่งเป็นปริมาณน้ำมัน 0.714 พันล้านบาร์เรลซึ่งสามารถใช้ได้อีกประมาณ 20 ปี ปริมาณก๊าซธรรมชาติ 33 ล้านล้านลูกบาศก์ฟุตซึ่งสามารถใช้ได้อีกประมาณ 30 ปี และปริมาณถ่านหิน 0.984 พันล้านตันซึ่งใช้ได้อีกประมาณ 60 ปี ประเทศไทยมีการนำเข้าพลังงานคิดเป็น 12 เปอร์เซ็นต์ของมูลค่าการนำเข้าสินค้าทั้งหมด โดยพลังงานที่นำเข้าส่วนใหญ่คือน้ำมันเชื้อเพลิง ดังนั้น จึงต้องมีการศึกษาค้นคว้าพลังงานทดแทนในรูปแบบต่างๆ เนื่องจากพลังงานที่มีอยู่กำลังจะหมดไปและจะต้องเป็นพลังงานที่ไม่ก่อให้เกิดปัญหามลพิษต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย พลังงานทดแทนในปัจจุบัน ได้แก่ พลังงานลม พลังงานความร้อนใต้พิภพ น้ำพุร้อน พลังงานในมหาสมุทร พลังงานคลื่นทะเล รวมถึงพลังงานจากก๊าซไฮโดรเจนซึ่งเป็นพลังงานที่ได้รับความสนใจอย่างมากในปัจจุบัน (ชัยชาญ, 2547)

ไฮโดรเจนเป็นก๊าซที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่นและไม่มีรส ให้พลังงาน 52,000 บีทียูต่อปอนด์ มีคุณสมบัติดังอธิบายในรูปที่ 2.1 เมื่อทำการเผาผลาญด้วยออกซิเจนจะได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำและความร้อน และเมื่อทำการเผาผลาญในอากาศจะผลิตออกไซด์ของไนโตรเจนซึ่งก่อให้เกิดมลพิษน้อยกว่าเมื่อใช้พลังงานอื่นๆ และที่สำคัญที่สุด ไฮโดรเจนให้พลังงานต่อหน่วยสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับบรรดาเชื้อเพลิงชนิดต่าง ๆ



รูปที่ 2.1 คุณสมบัติของก๊าซไฮโดรเจน

ที่มา : http://www.ena.or.jp/WE-NET/suiso/suiso1_e.html

2.2 การผลิตก๊าซไฮโดรเจน

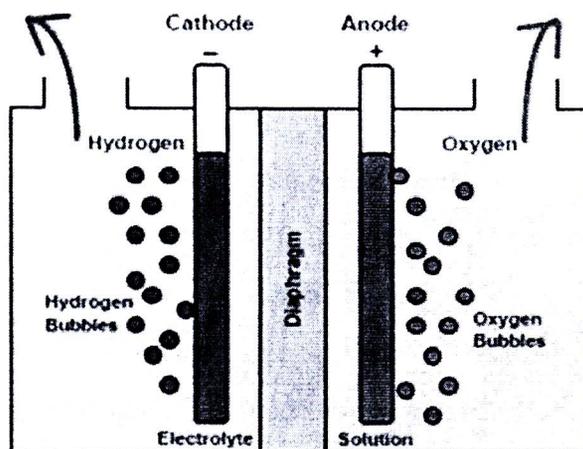
กระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนมีได้หลายวิธี ทั้งการผลิตด้วยกระบวนการทางเคมีและกระบวนการทางชีวภาพ ดังต่อไปนี้

2.2.1 การผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากเชื้อเพลิงฟอสซิล

การผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากเชื้อเพลิงฟอสซิล เป็นกระบวนการผลิตไฮโดรเจนจากก๊าซธรรมชาติ เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมเคมี และอุตสาหกรรมปิโตรเลียม โดยกระบวนการสตีมรีฟอร์มมิง (steam reforming) ซึ่งเป็นปฏิกิริยาระหว่างสารประกอบไฮโดรคาร์บอนกับน้ำในรูปของไอน้ำ โดยอาศัยพลังงานความร้อนทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซไฮโดรเจน กระบวนการทางอุตสาหกรรมที่นิยมใช้ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนนี้ถูกเรียกว่า coal gasification ข้อเสียของกระบวนการนี้ คือ ก่อให้เกิดมลพิษเนื่องจากสารตกค้างของสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่ไม่เผาไหม้ คาร์บอนไดออกไซด์ และซัลเฟอร์ไดออกไซด์ เป็นต้น

2.2.2 การผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยวิธีการแยกโมเลกุลของน้ำด้วยกระแสไฟฟ้า

การผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยวิธีการแยกโมเลกุลของน้ำด้วยไฟฟ้า เป็นวิธีการที่ใช้กระแสไฟฟ้าแยกโมเลกุลของน้ำโดยตรง (water electrolysis) ทำให้ได้ไฮโดรเจนอะตอมและออกซิเจนอะตอม โดยอาศัยอิเล็กโทรด (electrode) 2 ขั้วที่ตรงข้ามกัน คือ อิเล็กโทรดขั้วบวก (anode) และอิเล็กโทรดขั้วลบ (cathode) วิธีการเตรียม คือ จุ่มอิเล็กโทรดลงในน้ำที่ทำให้มีความเป็นด่างมากขึ้น โดยการเติมสารพวกอิเล็กโทรไลต์ (electrolyte) เช่น กรดซัลฟูริก (H_2SO_4) หรือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ลงไป ไฮโดรเจนอะตอมจะไปเกาะที่อิเล็กโทรดขั้วลบและออกซิเจนอะตอมจะไปเกาะอิเล็กโทรดขั้วบวก (รูปที่ 2.2) วิธีนี้ต้องใช้กระแสไฟฟ้าสูงถึง 90 กิโลวัตต์ สามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ถึง 1,000 ลูกบาศก์ฟุต การผลิตไฮโดรเจนด้วยวิธีนี้จะให้ก๊าซไฮโดรเจนที่มีความบริสุทธิ์สูง ข้อเสียของวิธีการนี้ คือ ต้องการกระแสไฟฟ้าจำนวนมากและมีการสูญเสียพลังงานไฟฟ้าไปในแต่ละขั้นตอนของการแยกสลายด้วยน้ำ และจะต้องทำในสภาวะอุณหภูมิที่สูงกว่า 2,500 องศาเซลเซียส เพื่อแยกโมเลกุลของน้ำให้ได้เป็นไฮโดรเจนและออกซิเจนอะตอม



รูปที่ 2.2 การผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยวิธีการแยกโมเลกุลของน้ำด้วยกระแสไฟฟ้า

ที่มา : <http://www.rmi.org/sitepages/pid557.php>

2.2.3 การผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยวิธีเทอร์โมเคมีสทรี (thermochemistry)

การผลิตไฮโดรเจนด้วยวิธีเทอร์โมเคมีสทรี เป็นกระบวนการที่พัฒนาการผลิตไฮโดรเจนโดยใช้สารประกอบปรอทโบรมไนด์และแคลเซียมในกระบวนการผลิต ซึ่งเป็นวิธีที่สามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้โดยอาศัยความร้อนสูงที่อุณหภูมิประมาณ 200-780 องศาเซลเซียส ข้อดีของกระบวนการนี้ คือ สามารถนำความร้อนของถังปฏิกรณ์นิวเคลียร์มาผลิตไฮโดรเจนได้ โดยพลังงาน



ทั้งหมดจึงจะถูกนำไปใช้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด และผลผลิตที่ได้สามารถแยกออกได้ง่าย แต่ข้อเสีย คือ ปัญหามลพิษจากการใช้สารประกอบโลหะหนัก อันได้แก่ โปรท และ โบรไมด์

2.2.4 การผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากสิ่งมีชีวิต (biohydrogen)

การผลิตไฮโดรเจนจากสิ่งมีชีวิตหรือที่เรียกว่าไบโอไฮโดรเจน เป็นกระบวนการทางชีวภาพที่อาศัยความสามารถของจุลินทรีย์ จุลินทรีย์ที่สามารถผลิตไฮโดรเจนได้มีหลายชนิด ยกตัวอย่าง เช่น แบคทีเรียสังเคราะห์แสงสามารถผลิตไฮโดรเจนได้โดยกระบวนการสังเคราะห์แสง แบคทีเรียบางชนิดผลิตไฮโดรเจนจากกระบวนการหมัก สำหรับยีสี่เชื้อใช้แสงและน้ำเป็นวัตถุดิบ ในการผลิตไฮโดรเจน และไซยาโนแบคทีเรียบางชนิดผลิตไฮโดรเจนได้จากกระบวนการตรึงไนโตรเจน (Kosaric and Lyng, 1988)

2.3 จุลินทรีย์ที่มีความสามารถในการผลิตก๊าซไฮโดรเจน

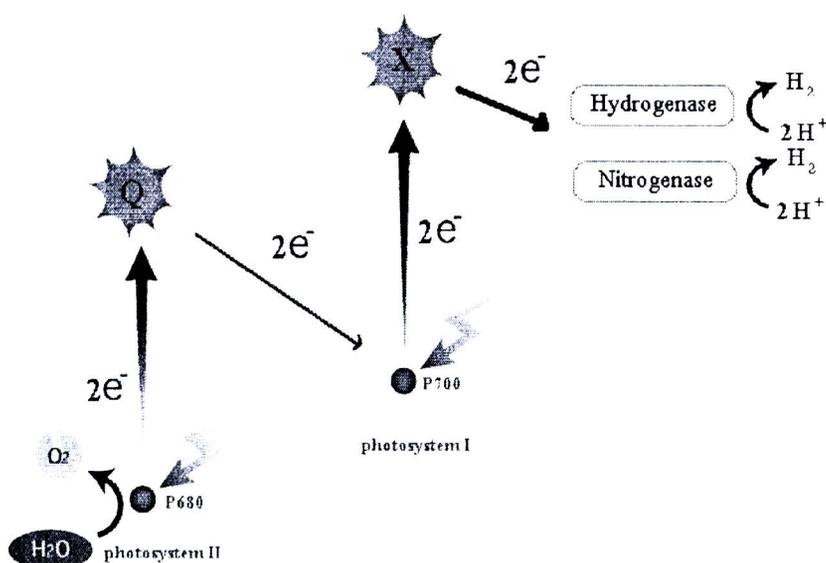
จุลินทรีย์หลายชนิดมีความสามารถในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มใหญ่ๆ ดังนี้

2.3.1 กลุ่มโฟโตโทรฟิคยูคาริโอต (Phototrophic eukaryote)

จุลินทรีย์ในกลุ่มนี้ ได้แก่ สาหร่าย (Algae) สาหร่ายบางชนิดมีความสามารถในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ โดยการผลิตก๊าซไฮโดรเจนของสาหร่ายเกิดขึ้นเมื่อมีการปรับตัวภายใต้สภาวะที่ไม่มีออกซิเจน ซึ่งระยะเวลาในการปรับตัวนั้นจะแตกต่างกันไปตั้งแต่ 30 นาทีจนถึง 4 ชั่วโมง ในระหว่างกระบวนการปรับตัวนั้น เซลล์จะมีการกระตุ้นการสังเคราะห์เอนไซม์ไฮโดรจีเนส (Hydrogenase) ให้ผลิตไฮโดรเจนจากอิเล็กตรอนที่ถูกส่งผ่านมาจากเฟอร์รีดอกซิน (Ferredoxin) และโปรตอนจาก NADPH หรือ NADH

ภายใต้สภาวะที่มีความเข้มแสงต่ำ เซลล์จะมีการกระตุ้นการผลิตก๊าซไฮโดรเจน แต่เมื่อความเข้มแสงเพิ่มสูงขึ้น กระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจะถูกยับยั้งด้วยกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงที่ได้ออกซิเจนเป็นผลิตภัณฑ์ โดยออกซิเจนจะไปยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ไฮโดรจีเนส ทำให้ไม่เกิดการผลิตก๊าซไฮโดรเจน สำหรับกระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนของสาหร่ายและไซยาโนแบคทีเรีย อิเล็กตรอนจะถูกส่งผ่านระบบแสง (Photosystem) 2 ระบบ คือ ระบบแสงที่ 1 (Photosystem I : PS I) ที่ดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่น 700 นาโนเมตร (P700) และระบบแสงที่ 2 (Photosystem II : PSII) ที่ดูดกลืนแสงที่มีความยาวคลื่น 680 นาโนเมตร (P680) ไปยังตัวพาอิเล็กตรอน (Electron carrier) ตัวพาอิเล็กตรอนจะถ่ายทอดอิเล็กตรอนให้กับเฟอร์รีดอกซิน

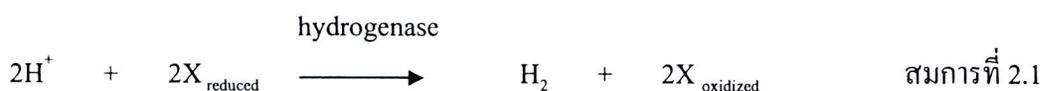
จากนั้นจะถ่ายทอดอิเล็กตรอนให้แก่เอนไซม์เฟอร์รีดอกซินออกซิโดรีดักเทส (ferredoxin oxidoreductase) (รูปที่ 2.3) อิเล็กตรอนที่ถูกใช้ในกระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนนั้นได้มาจากกระบวนการแตกตัวของโมเลกุลน้ำในระบบแสงที่ 2 และการย่อยสลายสารคาร์โบไฮเดรตที่สะสมภายในเซลล์โดยอิเล็กตรอนที่ได้จะเข้าสู่ระบบแสงที่ 1 (รูปที่ 2.3)



รูปที่ 2.3 วิธีการสังเคราะห์ด้วยแสงและการผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยสาหร่ายและไซยาโนแบคทีเรีย (ไซยาโนแบคทีเรียบางชนิดเท่านั้นที่มีเอนไซม์ไนโตรจีเนส)

ที่มา : <http://www.rmi.org/sitepages/pid557.php>

จากรายงานของ Gaffron และ Rubin (1942) พบว่าสาหร่ายสีเขียว *Scenedesmus* sp. ไม่เพียงแต่สามารถผลิตโมเลกุลของไฮโดรเจนได้ในสภาวะที่มีแสงเท่านั้น แต่ยังสามารถผลิตโมเลกุลไฮโดรเจนได้ในสภาวะที่ไม่มีแสงและไม่มีออกซิเจนด้วย เอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการผลิตโมเลกุลไฮโดรเจนของสาหร่ายคือเอนไซม์ไฮโดรจีเนส ซึ่งเร่งปฏิกิริยาการผลิตโมเลกุลไฮโดรเจนดังแสดงในสมการที่ 2.1



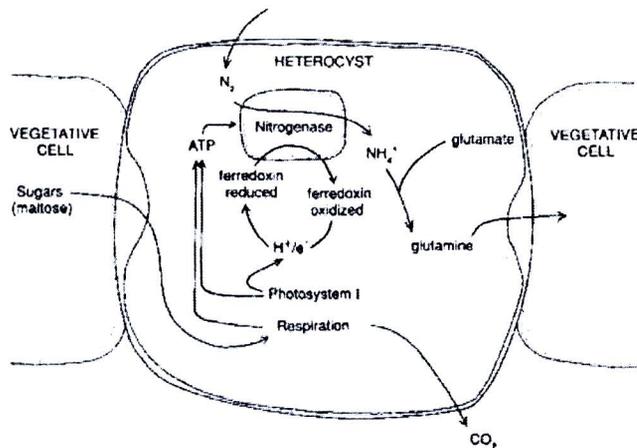
ตัวให้อิเล็กตรอนสำหรับเอนไซม์ไฮโดรจีเนสไม่เพียงได้มาจากอิเล็กตรอนที่ได้จากการแตกตัวของโมเลกุลของน้ำเท่านั้น แต่ยังสามารถได้มาจากการย่อยสลายสารประกอบอินทรีย์ที่สะสมในเซลล์ เช่น แป้งที่ผลิตขึ้นจากกระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสง

2.3.2 กลุ่มโฟโตโทรฟิคโพรคาริโอต (phototrophic prokaryote)

2.3.2.1 แบคทีเรียที่สามารถสังเคราะห์ด้วยแสงแบบมีออกซิเจน

จุลินทรีย์ในกลุ่มนี้ ได้แก่ ไชยาโนแบคทีเรีย หรือแบคทีเรียสีเขียวแกมน้ำเงิน (Blue green bacteria) ไชยาโนแบคทีเรียจัดอยู่ในกลุ่มโพรคาริโอต สามารถสังเคราะห์แสงและได้ออกซิเจนเป็นผลิตภัณฑ์ (Oxygenic phototrophic prokaryote) ระบบการสังเคราะห์แสงประกอบด้วยระบบแสง 2 ระบบและมีชนิดของคลอโรฟิลล์เหมือนสาหร่ายสีเขียวและพืช

ไชยาโนแบคทีเรียหลายสายพันธุ์มีความสามารถในการผลิตก๊าซไฮโดรเจน โดยกระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนของไชยาโนแบคทีเรียคล้ายกับในสาหร่าย แต่ไชยาโนแบคทีเรียส่วนใหญ่ผลิตก๊าซไฮโดรเจนผ่านทางกระบวนการตรึงก๊าซไนโตรเจน (Nitrogen fixation) ไชยาโนแบคทีเรียชนิดที่มีเซลล์เฮเทอโรซิสต์ (Heterocyst cell) นั้น ไม่มีระบบแสงสองและสามารถตรึงไนโตรเจนผ่านทางเอนไซม์ไนโตรจีเนสและผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน แต่เมื่ออยู่ภายใต้สภาวะที่มีไนโตรเจนจำกัด จะมีการตรึงโมเลกุลไนโตรเจนพร้อมกับการผลิตก๊าซไฮโดรเจนและการผลิตกลูตามีน โดยกลูตามีนที่ผลิตได้จะถูกนำไปใช้เป็นแหล่งไนโตรเจนสำหรับเซลล์ปกติ (Vegetative cells) (รูปที่ 2.4) เนื่องจากเฮเทอโรซิสต์นั้นไม่มีระบบแสงสอง จึงไม่มีกระบวนการแตกตัวของโมเลกุลน้ำ ดังนั้น จึงไม่มีการสร้างก๊าซออกซิเจนไปยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ไนโตรจีเนส เซลล์เฮเทอโรซิสต์จะมีการสังเคราะห์เอนไซม์อะพแทคไฮโดรจีเนสหรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่า Membrane-Bound hydrogenase ซึ่งเป็นเอนไซม์ที่พบในไซโตพลาสซึมเมมเบรน (Cytoplasmic membrane) หรือไทลาคอยด์เมมเบรน (Thylakoid membrane) ของเฮเทอโรซิสต์ซึ่งจะช่วยรีดิวซ์โมเลกุลของไฮโดรเจนที่มากเกินไปให้เป็นโปรตอนและอิเล็กตรอน



รูปที่ 2.4 การผลิตก๊าซไฮโดรเจนและการตรึงไนโตรเจนในเซลล์ปกติและเซลล์เฮเทอโรซิสต์ในไชยาโนแบคทีเรีย

ที่มา : <http://www.fao.org/.../w7241e0g.htm#chapter%20hydrogenproduction>

นอกจากนี้ กลุ่มของไซยาโนแบคทีเรียที่ไม่มีเซลล์เฮเทอโรซิสต์ยังสามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ทั้งภายใต้สภาวะที่มีแสงและไม่มีแสง โดยภายใต้สภาวะที่มีแสงจะมีการผลิตก๊าซออกซิเจนและมีการสะสมพอลิแซคคาไรด์ แต่ภายใต้สภาวะที่ไม่มีแสงและไม่มีก๊าซออกซิเจน เอนไซม์ในโตรจินเนสจะถูกสร้างขึ้นและกระตุ้นให้ทำงาน และมีการย่อยสลายพอลิแซคคาไรด์ เพื่อให้ได้อิเล็กตรอนสำหรับกระบวนการตรึงไนโตรเจนและกระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจน

ไซยาโนแบคทีเรียแต่ละชนิดจะมีความสามารถในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนที่แตกต่างกันดังแสดงในตารางที่ 2.1

ตารางที่ 2.1 การผลิตก๊าซไฮโดรเจนของไซยาโนแบคทีเรีย

สายพันธุ์ไซยาโนแบคทีเรีย	ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้
Heterocystous nitrogen fixing	
<i>Nostoc linkia</i>	22 ml / mg dry weight / h
<i>Anabaena cylindrica</i>	1.91 ml / mg dry weight / h
Non-heterocystous nitrogen fixing	
<i>Oscillatoria</i> sp.	260 μ mol / mg dry weight / h
<i>Oscillatoria</i> sp.	5-6 μ mol / mg dry weight / h
Non-nitrogen fixing	
<i>Synechococcus</i> sp.	0.05-1.38 μ mol / mg dry weight / h
<i>Microcystis</i> sp.	11.3 nmol μ mol / mg dry weight / h
<i>Gloeobacter</i> sp.	1.38 μ mol / mg dry weight / h
<i>Synechocystis</i> sp.	0.07 μ mol / mg dry weight / h
<i>Aphanocapsa</i> sp.	0.40 μ mol / mg dry weight / h

ที่มา : Fernando *et. al.* (2002)

2.3.2.2 แบคทีเรียที่สามารถสังเคราะห์ด้วยแสงแบบไม่มีออกซิเจน

แบคทีเรียที่สามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจน สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มย่อย คือ 1) Non-sulfur purple bacteria ได้แก่ *Athiorhodaceae* sp. และ *Rhodospirillaceae* sp. 2) Sulfur purple bacteria ได้แก่ *Chromatiaceae* sp. และ *Thiorhodaceae* sp. และ 3) Green sulfur bacteria ได้แก่ *Chlorobiaceae* sp. กระบวนการสังเคราะห์ด้วยแสงของแบคทีเรียสังเคราะห์แสงเหล่านี้มีรงควัตถุที่ต่างไปจากไซยาโนแบคทีเรีย สาหร่าย และพืชสีเขียว คือมีรงควัตถุเป็นแบคเทอริโอ

คลอโรฟิลล์ (Bacteriochlorophyll) และแคโรทีนอยด์ (Carotenoid) กระบวนการสังเคราะห์แสงของแบคทีเรียกลุ่มนี้ไม่ได้ใช้ออกซิเจนเป็นผลิตภัณฑ์ และสามารถใช้น้ำสารประกอบซัลไฟด์ (Sulfide) ซัลเฟอร์ (Sulfur) ไทโอซัลเฟต (Thiosulfate) สารประกอบอินทรีย์ (Organic compound) หรือโมเลกุลไฮโดรเจนเป็นสารให้อิเล็กตรอนได้

2.4 ไซยาโนแบคทีเรีย (ลัดดา, 2542)

ไซยาโนแบคทีเรียจัดเป็นโพรคาริโอต (Prokaryote) เช่นเดียวกับแบคทีเรีย คุณสมบัติที่สำคัญของไซยาโนแบคทีเรียคือ มีรงควัตถุที่สามารถนำไปใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสงแล้วได้ผลิตภัณฑ์เป็นออกซิเจน ซึ่งคุณสมบัตินี้ไม่พบในแบคทีเรียทั่วไป

ไซยาโนแบคทีเรียมีลักษณะที่สำคัญ 5 ประการ คือ

1. มีสารสีสำหรับการสังเคราะห์ด้วยแสง (Photosynthetic pigment) ได้แก่ คลอโรฟิลล์ แคโรทีนอยด์ และไฟโคบิลิน
2. ผนังเซลล์ของไซยาโนแบคทีเรียแบ่งออกเป็น 2 ชั้น มีองค์ประกอบสำคัญคล้ายกับผนังเซลล์ของแบคทีเรียชนิดแกรมลบ (Gram negative) ที่เรียกว่ามิวโคเปปไทด์ (Mucopolysaccharide) ส่วนรอบนอกผนังเซลล์มักจะเป็นเมือกใสๆ ที่เรียกว่าชีท (Sheath) หุ้มอยู่ ซึ่งชีทนี้มีความหนาบางต่างกัน อาจมีสีหรือไม่มีสีหรือแบ่งออกเป็นชั้นๆ
3. ไซยาโนแบคทีเรียทุกชนิดทั้งเซลล์ปกติและเซลล์สืบพันธุ์ไม่มีแฟลกเจลลา ไซยาโนแบคทีเรียทั่วไปมีลักษณะการเคลื่อนที่แบบเลื่อนไหล (Gliding movement)
4. ผลผลิตจากการสังเคราะห์ด้วยแสงเป็นสารประเภทแป้งชนิดหนึ่งคือ แป้งไซยาโนไฟเซอิน (Cyanophycin starch) มีลักษณะเป็นเม็ดเล็กๆ กระจายอยู่ทั่วไปเรียกว่าไซยาโนไฟซินแกรนูล (Cyanophycin granule) แป้งไซยาโนไฟเซอินนี้แตกต่างจากแป้งชนิดอื่นคือ เมื่อทำปฏิกิริยากับไอโอดีนจะได้สีน้ำตาลปนแดงแทนที่จะได้สีน้ำเงิน
5. จัดเป็นโพรคาริโอต ซึ่งแตกต่างจากพืชชั้นสูงจำพวกยูคาริโอต คือสารสีไม่ได้อยู่ในพลาสติดแต่กระจายอยู่ทั่วไปในไซโตพลาสซึม มีการสืบพันธุ์แบบไม่อาศัยเพศ

2.5 น้ำทะเลและการใช้ประโยชน์จากน้ำทะเล

โดยทั่วไปแล้ว น้ำทะเลในมหาสมุทรมีค่าความเค็ม (Salinity) ประมาณ 3.5 เปอร์เซ็นต์ โดยเฉลี่ยแล้ว ทุกๆ 1 กิโลกรัมจะมีเกลือละลายอยู่ประมาณ 35 กิโลกรัม (โดยส่วนมากเป็นไอออนของโซเดียมคลอไรด์ : Na^+ , Cl^-) นอกจากนี้ ยังพบว่าค่าความถ่วงจำเพาะของน้ำทะเลที่บริเวณผิวหน้ามหาสมุทรมีค่าเท่ากับ 1.025 กรัมต่อมิลลิลิตร ซึ่งน้ำทะเลมีค่าความถ่วงจำเพาะสูงกว่าน้ำจืด (น้ำจืด

มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.00 กรัมต่อมิลลิลิตรที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส) เนื่องจากมีมวลของเกลือผสมอยู่และยังพบว่าจุดเยือกแข็งของน้ำทะเลจะลดลงเมื่อมีค่าความเค็มสูงขึ้น โดยมี

ค่าประมาณ -2 องศาเซลเซียส (28.4 ฟาเรนไฮต์) ที่ 35 กรัมต่อลิตร (U.S Office of Naval Research)

น้ำทะเลมีไอออนที่ละลายอยู่มากซึ่งไม่เหมือนกับน้ำจืด (Thomson, 2006) แต่อย่างไรก็ตาม อัตราส่วนของสารละลายก็ยังคงมีความแตกต่างกัน ยกตัวอย่างเช่น น้ำทะเลมีค่าของไบคาร์บอเนตมากกว่าน้ำจืดถึง 2.8 เท่าในหน่วยความเข้มข้นที่เป็นโมลาริตี แต่เปอร์เซ็นต์ของไบคาร์บอเนตในน้ำทะเลต่อไอออนที่ละลายอยู่ทั้งหมดจะมีค่าน้อยกว่าเมื่อเทียบกับในน้ำจืด ซึ่งพบว่าไอออนของไบคาร์บอเนตมี 48 เปอร์เซ็นต์ของตัวทำละลายในน้ำจืด แต่ในน้ำทะเลมีเพียง 0.41 เปอร์เซ็นต์ของไอออนทั้งหมดในน้ำทะเล (Pinet, 1996; Thomson, 2006) องค์ประกอบของทางเคมีของน้ำทะเลแสดงดังตารางที่ 2.2

ตารางที่ 2.2 ส่วนประกอบทางเคมีของน้ำทะเล

ส่วนประกอบ	ความเข้มข้น (โมลต่อกิโลกรัม)
H ₂ O	53.6
Cl ⁻	0.546
Na ⁺	0.469
Mg ²⁺	0.0528
SO ₄ ²⁻	0.0282
Ca ²⁺	0.0103
K ⁺	0.0102
Cr ⁻	0.0206
Br ⁻	0.000844
B _T	0.000416
Sr ²⁺	0.000091
F ⁻	0.000068

ที่มา: DOE, 1994

ในปี ค.ศ. 1910 Allen และ Nelson ได้คิดค้นสูตรอาหารที่ใช้ น้ำทะเลและเติมสารประกอบต่างๆ ที่เป็นส่วนประกอบของแร่ธาตุที่พืชต้องใช้เป็นอาหารลงในน้ำทะเลเพื่อเพาะเลี้ยงสาหร่าย และในปี ค.ศ. 1914 Allen ได้ทำการเพาะเลี้ยงไดอะตอม *Thalassiosira gravida* เป็นผลสำเร็จโดย

สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ
 ห้องสมุดกาญจนาภิเษก
 วันที่ 28 ก.ย. 2555
 เลขทะเบียน 246468

ใช้ artificial seawater และต่อมาในปี ค.ศ. 1949 Ketchum และ Redfield ได้ปรับปรุงส่วนผสมอีก โดยเพิ่มแมกนีเซียมซัลเฟตเข้าไปในส่วนผสมของ Allen และ Nelson ซึ่งก็ได้ผลดีเช่นเดียวกัน ต่อมาในปีเดียวกัน ได้มีการศึกษาการเติมสารคีเลเตอร์ลงในน้ำทะเลธรรมชาติเพื่อเพาะเลี้ยงสาหร่ายทะเลโดย Mary Parke ในอาหาร Erdschreiber พบว่าการเติมน้ำสกัดจากดินในน้ำทะเลทำให้สาหร่ายเจริญเติบโตดีขึ้น แต่มีข้อเสีย คือ น้ำที่เตรียมได้มีคุณภาพไม่สม่ำเสมอเนื่องจากน้ำทะเลและดินที่ใช้มีส่วนประกอบไม่เหมือนกันทุกครั้ง ต่อมาในปี ค.ศ. 1954 Sweeney ได้เพิ่มสารคีเลเตอร์อีดีทีเอ (EDTA : Ethylene Diamine Tetraacetic Acid) และใช้วิตามินบี 12 แทนสารสกัดจากดิน หลังจากนั้น ในปี ค.ศ. 1961 Iwasaki ได้ใช้สูตรอาหาร SWII ซึ่งคล้ายกับสูตร Sweeney แต่ใช้ฟอสฟอรัสและคาร์บอนในรูปของกลีเซอโรฟอสเฟต ซึ่งมีข้อดีคือทำให้สารละลายที่เตรียมได้ไม่มีตะกอน จากการค้นคว้าและพัฒนาส่วนผสมที่เติมลงในน้ำทะเลพบว่า มีสารหรือแร่ธาตุบางอย่างที่ส่งเสริมการเจริญเติบโตของสาหร่าย และการสังเคราะห์แสงของสาหร่าย สารที่เติมลงไป ได้แก่ สารประกอบของธาตุ Mn, Cu, Zn, Co และ Mo สูตรที่นิยมใช้ได้แก่สูตรของ Ryther และ Kramer (1961)

นอกจากนี้ในปี ค.ศ. 1979 Faucher และคณะได้ทำการศึกษากการใช้น้ำทะเลเป็นอาหารเลี้ยงเชื้อสำหรับไซยาโนแบคทีเรีย *Spirulina maxima* โดยพบว่าน้ำทะเลประกอบไปด้วยยูเรียจำนวนมาก และในการทดลองต้องมีการใช้ NaHCO_3 หรือ Na_2CO_3 ในการตกตะกอน Ca^+ และ Mg^{2+} ออกจากน้ำทะเลก่อนที่จะใช้เพาะเลี้ยง *Spirulina maxima* โดยพบว่าน้ำทะเลดังกล่าวสามารถเพาะเลี้ยง *Spirulina maxima* ได้ดีเท่ากับอาหารสังเคราะห์ที่ได้มีในรายงาน

จากการทดลองที่ผ่านมาจะเห็นได้ว่าการนำน้ำทะเลมาใช้ในการเลี้ยงสาหร่ายได้จริง ซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการนำสิ่งมีชีวิตดังกล่าวมาปรับประยุกต์ใช้ได้ในอนาคต เช่น นำสาหร่ายมาผลิตเป็นแหล่งพลังงานทดแทนได้ โดยได้มีการรายงานการผลิตไฮโดรเจนในสาหร่ายทะเลสีเขียวโดย Guan และคณะในปี 2004 ในสาหร่ายทะเลสีเขียว *Platymonas subcordiformis* ที่เพาะเลี้ยงในน้ำทะเลธรรมชาติที่เสริมด้วยด้วยธาตุอาหารต่างๆ เช่น FeCl_3 , MnCl_2 , H_3BO_3 , EDTA, NaH_2PO_4 , NaNO_3 , ZnCl_2 , CoCl_2 , $(\text{NH}_4)_4\text{Mo}_7\text{O}_{24}$, CuSO_4 , VitB12 และ VitB1 เปรียบเทียบกับน้ำทะเลที่ปราศจากซัลเฟตพบว่า การผลิตไฮโดรเจนจากสาหร่ายทะเลสีเขียว *Platymonas subcordiformis* ที่เพาะเลี้ยงในอาหารที่เป็นน้ำทะเลที่ปราศจากซัลเฟตจะให้ค่าการผลิตสูงกว่าการเพาะเลี้ยงในอาหารที่เป็นน้ำทะเลเติมซัลเฟตถึง 13 เท่า

นอกจากสาหร่ายสีเขียวจะสามารถผลิตไฮโดรเจนได้แล้ว ไซยาโนแบคทีเรียก็สามารถผลิตไฮโดรเจนได้สูงเช่นกัน ข้อได้เปรียบของไซยาโนแบคทีเรียคือไซยาโนแบคทีเรียจัดเป็นโพรคาริโอตเช่นเดียวกับแบคทีเรีย ดังนั้นการดัดแปลงตัดแต่งพันธุกรรมก็ทำได้ง่ายกว่า โอกาสในการ

นำไปใช้งานจึงเปิดกว้างกว่า และในปัจจุบันนี้การศึกษาการผลิตไฮโดรเจนจากไซยาโนแบคทีเรีย โดยการเพาะเลี้ยงในน้ำทะเลมีอยู่ปริมาณน้อย เพราะฉะนั้นการศึกษาถึงการเจริญเติบโตและการผลิตไฮโดรเจนในไซยาโนแบคทีเรียโดยการเพาะเลี้ยงในน้ำทะเลจึงเป็นสิ่งที่น่าสนใจอย่างยิ่ง เนื่องจากในน้ำทะเลมีแร่ธาตุที่สำคัญที่ไซยาโนแบคทีเรียทะเลหรือไซยาโนแบคทีเรียทนเค็มและ/หรือไซยาโนแบคทีเรียชอบเค็มสามารถนำแร่ธาตุดังกล่าวไปใช้ในการเจริญเติบโตและการผลิตไฮโดรเจนต่อไปได้ ซึ่งถือว่าเป็นการนำทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่อย่างไม่จำกัดมาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดต่อไปในอนาคตได้