

---

ก๊าซไฮโดรเจน : ความคาดหวังเพื่อเป็นแหล่งพลังงานที่ยั่งยืน  
Hydrogen Gas: The Expectation to Be a Promising Sustainable Energy Source

รัชณีกร วันจันทิก\*

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

Ratchaneekorn Wanchanthuek\*

Department of Chemistry, Faculty of Science, Mahasarakham University.

---

### บทคัดย่อ

เชื้อเพลิงมีบทบาทกับชีวิตประจำวันของมนุษย์ เช่น น้ำมัน ก๊าซธรรมชาติ ไฟฟ้า เป็นต้น แต่ด้วยข้อจำกัดทางด้านปริมาณ ทำให้เชื้อเพลิงเหล่านี้มีราคาเพิ่มสูงขึ้น การแก้ไขปัญหาจากการรณรงค์ให้ใช้เชื้อเพลิงอย่างประหยัดและให้เกิดประโยชน์สูงสุดแล้ว ในขณะเดียวกันนักวิจัยก็พยายามคิดค้นหาแหล่งพลังงานอื่นมาทดแทนแหล่งพลังงานสิ้นเปลืองนี้ ลักษณะของแหล่งพลังงานใหม่นี้ ต้องเป็นแหล่งพลังงานอย่างยั่งยืน เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ให้พลังงานสูงและราคาไม่แพง ก๊าซไฮโดรเจนเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่กำลังได้รับความสนใจ บทความนี้ได้รวบรวมข้อดีและข้อเสียของการใช้ก๊าซไฮโดรเจนเพื่อเป็นแหล่งพลังงานในอนาคตและกระบวนการผลิตที่กำลังศึกษาและพัฒนาในปัจจุบัน

**คำสำคัญ :** ก๊าซไฮโดรเจน การผลิตก๊าซไฮโดรเจน แหล่งพลังงานอย่างยั่งยืน แหล่งพลังงานที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม

### Abstract

Nowadays, it is a fact that energy is one of the important factors to people's daily life such as fossil oil, natural gas, electricity, etc. According to the limitation of reservoir, the cost of these energy sources is increased. The solution would be not only reducing the demand and utilizing energy most efficiently. At the same time, the scientists should seek and develop an alternative energy system which is sustainable, clean, high energy capacity and economical. Using H<sub>2</sub> gas as an alternative has been promoted as a future energy resource. This article discusses advantages and disadvantages of H<sub>2</sub> gas system and the H<sub>2</sub> gas production which currently under development.

**Keywords :** Hydrogen gas, Hydrogen gas production, sustainable energy source, clean energy source

---

\*Corresponding author. E-mail: ratchaneekorn.p@msu.ac.th

ปัจจุบันสังคมได้หันมาใส่ใจและให้ความสำคัญกับสิ่งแวดล้อมมากยิ่งขึ้น ทำให้เราตระหนักได้ว่ามีความจำเป็นที่ต้องลดปริมาณการใช้น้ำมันปิโตรเลียมหรือหาแหล่งพลังงานใหม่มาทดแทน เนื่องจากน้ำมันปิโตรเลียมเป็นตัวแปรสำคัญในการก่อมลภาวะ นอกจากนั้นการเกิดวิกฤติน้ำมันเมื่อปี ค.ศ. 1973 แสดงให้เห็นว่ายุคของราคาน้ำมันที่มีราคาถูกได้สิ้นสุดลงแล้ว ทำให้ราคาน้ำมันในท้องตลาดโลกเพิ่มสูงขึ้น สาเหตุหลักที่ทำให้เกิดวิกฤตินี้คือ ปริมาณน้ำมันดิบใต้เปลือกโลกได้ลดลงอย่างรวดเร็วแต่ตรงกันข้ามกับปริมาณการใช้ที่เพิ่มสูงขึ้น แหล่งพลังงานใหม่ที่เหมาะสมจึงต้องมีราคาไม่แพง การเกิดมาทดแทนใช้เวลาไม่มาก กระบวนการผลิตเพื่อให้ได้พลังงานต้องใช้เวลาไม่นาน และมาจากแหล่งที่พบได้ทั่วไป ซึ่งแหล่งให้พลังงานดังกล่าวมีความจำเป็นกับตลาดพลังงานอย่างมาก มิเช่นนั้นแล้วเมื่อราคาน้ำมันพุ่งขึ้นสูงสุดประเทศที่กำลังพัฒนาหรือประเทศที่ยังไม่พัฒนาอาจจะหันมาใช้แหล่งพลังงานที่มีคุณภาพต่ำเนื่องจากข้อจำกัดด้านการเงิน เช่น น้ำมันที่ไม่มีคุณภาพ (เช่น มีปริมาณซัลเฟอร์ปะปนมาก) ถ่านหิน เป็นต้น ซึ่งจะเป็นการเพิ่มมลภาวะที่เป็นปัญหาหนักอยู่แล้วในปัจจุบันให้เลวร้ายมากขึ้น Quakernaat (Quakernaat, 1995) ได้เสนอคุณสมบัติที่ดีของแหล่งพลังงานทดแทนว่าควรจะเป็นแหล่งพลังงานที่สร้างหรือผลิตขึ้นมาใหม่ได้ง่าย (renewable) เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมและมีราคาไม่สูง

ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO<sub>2</sub>) เป็นก๊าซหลักที่เป็นสาเหตุของการเกิดภาวะโลกร้อน การเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบนั้น จะทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ขึ้นด้วยเสมอ เช่น การเผาไหม้น้ำมันเบนซิน ดีเซล ถ่านหิน และก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น ถ้ามีการนำก๊าซไฮโดรเจน (H<sub>2</sub>) มาใช้เป็นเชื้อเพลิงแทนจะสามารถลดการปลดปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เข้าสู่สิ่งแวดล้อมได้ ข้อดีที่หลากหลายของการใช้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นแหล่งพลังงานทดแทนได้กล่าวไว้ในเอกสารอ้างอิงหลายแห่ง (Johnston *et al.*, 2005) (Conte *et al.*, 2001) (Maclean *et al.*, 2003) (Simbeck, 2004) (Goltsov *et al.*, 2001) (Adamson, 2004) (Elan *et al.*, 2003) (Scott, 2004) (Cherry, 2004) โดยข้อดีสามารถแบ่งออกเป็น 3 ด้านหลัก คือ

### 1) ด้านสิ่งแวดล้อม

ข้อดีของการใช้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นแหล่งพลังงานในด้านสิ่งแวดล้อม แยกออกเป็นข้อดีในระยะสั้นและข้อดีในระยะยาว ในระยะสั้นนั้นจะเห็นได้อย่างชัดเจนว่าเมื่อมีการเปลี่ยน

เครื่องยนต์ของยานพาหนะจากระบบการเผาไหม้น้ำมันธรรมดา มาเป็นการเผาไหม้ก๊าซไฮโดรเจนนั้น จะสามารถลดการสร้างก๊าซพิษ เช่น CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, VOCs, SO<sub>x</sub>, ก๊าซไฮโดรคาร์บอนชนิดอื่นๆ และเขม่าควันเข้าสู่แหล่งชุมชนได้ (Johnston *et al.*, 2005) (Adamson, 2004) (Scott, 2004)

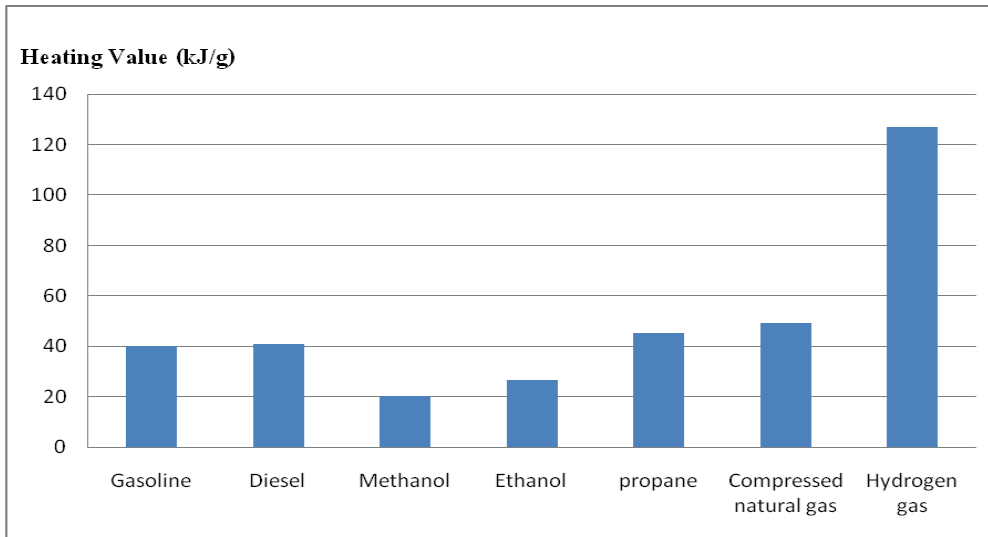
สำหรับผลในระยะยาวนั้น จะกล่าวถึงการลดสถานะเรือนกระจกของโลกและลดการบางลงของชั้นโอโซน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์นี้จัดว่าเป็นก๊าซสำคัญที่ทำให้เกิดเหตุการณ์ดังกล่าวถึง 50% (และอีก 50% คือ ก๊าซมีเทน (CH<sub>4</sub>) ก๊าซไนตรัสออกไซด์ (N<sub>2</sub>O) ไฮโดรฟลูออโรคาร์บอน (HFCs) และเขม่าควันที่เหลือจากการเผาไหม้เชื้อเพลิง) ทำให้การใช้และผลิตก๊าซไฮโดรเจนนี้ไม่เพิ่มภาวะการเกิดก๊าซเรือนกระจก (เมื่อมีการเลือกแหล่งให้ก๊าซไฮโดรเจนที่เหมาะสม เช่น น้ำ เป็นต้น) (Goltsov *et al.*, 2001) (Adamson, 2004) (Elan *et al.*, 2003) (Scott, 2004) (Cherry, 2004) (Bockris, 2002)

### 2) ด้านสุขภาพ

มลภาวะทางอากาศที่เราเผชิญหน้าอยู่ในปัจจุบันนี้เกิดจากการพัฒนาเทคโนโลยีต่างๆ อย่างรวดเร็วโดยไม่ได้คำนึงถึงของเสียที่ปล่อยสู่สิ่งแวดล้อม เช่น ก๊าซพิษต่างๆ ล้วนแต่ส่งผลกระทบต่อสุขภาพหรือเป็นสาเหตุของมะเร็งได้ หน่วยงานของประเทศสหรัฐอเมริกา The American Environmental Protection Agency (EPA) กล่าวว่า แหล่งที่สร้างสารพิษหลักออกมา คือ การเผาไหม้ของเครื่องยนต์ที่ใช้ผลิตภัณฑ์ของปิโตรเลียมเป็นเชื้อเพลิง (U.S. Environmental Protection Agency, 2001) ทำให้เกิดก๊าซที่ก่อมลภาวะ เช่น benzene, formaldehyde, acetaldehyde, 1,3-butadiene และอนุภาคเขม่าอื่นๆ ขณะที่เมื่อใช้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงแล้วจะไม่มีก๊าซพิษและไม่มีสารก่อมะเร็งที่กล่าวมาข้างต้น (Maclean *et al.*, 2003) (Goltsov *et al.*, 2001)

### 3) ด้านความแข็งแกร่งทางเศรษฐกิจ

หลังจากมีการรวมกลุ่มกันของประเทศผู้ผลิตน้ำมันเพื่อการส่งออกหรือกลุ่ม OPEC ในปี ค.ศ. 1973 แสดงให้เห็นอย่างชัดเจนถึงอำนาจการต่อรองขององค์กรนี้ต่อสาธารณะประเทศ หลังจากเกิดวิกฤติน้ำมันขึ้น ประเทศผู้นำด้านอุตสาหกรรมได้เริ่มหาทางออกโดยการใช้แหล่งพลังงานอื่น เพื่อไม่ให้เศรษฐกิจของประเทศต้องขึ้นกับราคาน้ำมันเพียงอย่างเดียว แต่ก็ยังไม่สัมฤทธิ์ผล เช่น ประเทศในกลุ่ม EU ได้นำเข่าน้ำมันดิบสูงถึง 50% ของความต้องการพลังงานทั้งหมด (Fernandes *et al.*, 2004) ดังนั้นจึงทำให้เศรษฐกิจของประเทศต้องขึ้นกับประเทศ



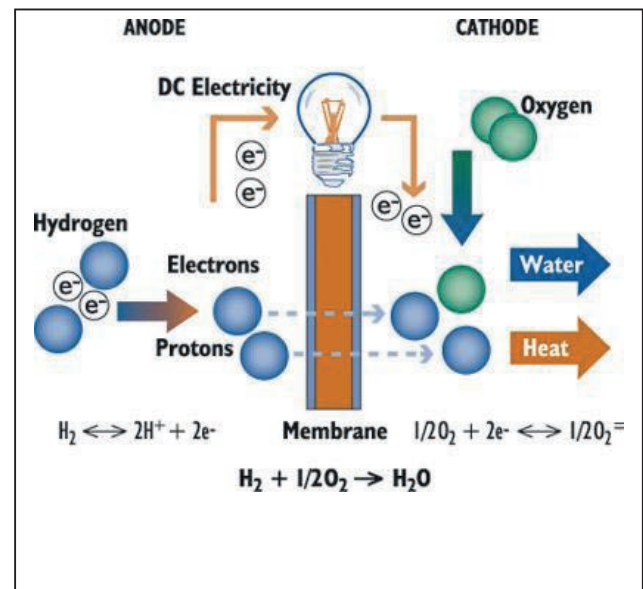
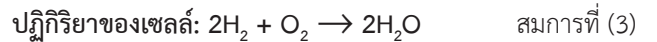
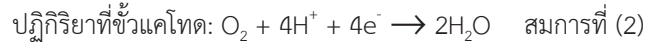
ภาพที่ 1 ปริมาณพลังงานความร้อนจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงชนิดต่างๆ (ดัดแปลงจาก [http://sgth2.com/hydrogen\\_faqs](http://sgth2.com/hydrogen_faqs))

ผู้ผลิตและส่งออกน้ำมัน การใช้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นพลังงานจึงเป็นหนึ่งทางออกเพื่อลดการขึ้นตรงของเศรษฐกิจกับราคาน้ำมัน เพราะในทุกประเทศจะมีแหล่งพลังงานเบื้องต้นเพื่อใช้ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนอยู่แล้ว (Conte *et al.*, 2001) (Elan *et al.*, 2003)

นอกจากเหตุผลที่กล่าวมาเบื้องต้น ยังพบว่าก๊าซไฮโดรเจนมีความจุพลังงานหรือมีความสามารถในการให้พลังงานได้สูงเมื่อเทียบกับการเผาไหม้เชื้อเพลิงชนิดอื่น ดังแสดงในภาพที่ 1 และการนำก๊าซไฮโดรเจนไปใช้เป็นเชื้อเพลิงสามารถใช้ได้หลายรูปแบบ เช่น ใช้เป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้ให้พลังงานโดยตรง ใช้เป็นวัตถุดิบในการเปลี่ยนรูปเป็นพลังงานไฟฟ้าได้ (ผ่านเซลล์เชื้อเพลิงหรือ Fuel cell) หรือใช้เป็นสารตั้งต้นในปฏิกิริยาต่างๆ (ในปฏิกิริยา hydrogenation processes) (Quakernaat, 1995)

เมื่อก้าวถึงเซลล์เชื้อเพลิง ขณะนี้การพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อเปลี่ยนพลังงานเคมีในก๊าซไฮโดรเจนเป็นพลังงานไฟฟ้าซึ่งกำลังได้รับความสนใจมากเช่นกัน เป็นการนำเซลล์ไฟฟ้าเคมีชนิดกัลวานิกส์มาเป็นอุปกรณ์ในการทำให้เกิดปฏิกิริยากันระหว่างก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซออกซิเจน (O<sub>2</sub>) ซึ่งก๊าซออกซิเจนได้มาจากการผ่านอากาศเข้าไปในเซลล์ ก๊าซไฮโดรเจนจะทำปฏิกิริยาที่ขั้วแอโนดเพื่อให้ไอเล็กตรอนและไฮโดรเจนไอออน (H<sup>+</sup>) ไอเล็กตรอนจะเคลื่อนที่ผ่านวงจรภายนอกและให้ไฟฟ้ากระแสตรงออกมา ขณะเดียวกันไฮโดรเจนไอออนจะแพร่ผ่านสารอิเล็กโทรไลต์ เพื่อไปทำปฏิกิริยากับก๊าซออกซิเจนและไอเล็กตรอนจากวงจรภายนอกที่ขั้วแคโทด แล้วได้สารผลิตภัณฑ์เป็นน้ำและมี

ความร้อนเกิดขึ้น สมการการเกิดปฏิกิริยาเคมีแสดงดังสมการที่ (1), (2) และ (3)



ภาพที่ 2 แสดงเซลล์เชื้อเพลิงชนิด PEMFC และปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นภายในขั้วแคโทดและแอโนด (<http://www.tps.ac.th/~panya/class/electro-magnetic1/electric-current/electric-current.htm>)

ภาพที่ 2 แสดงลักษณะการทำงานและส่วนประกอบต่างๆ ภายใน เซลล์เชื้อเพลิงชนิด Proton exchange membrane fuel cell (PEMFC) ซึ่งเซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้กำลังได้รับการวิจัยและพัฒนา เพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นเครื่องยนต์ในรถยนต์ การเปลี่ยนพลังงานของก๊าซไฮโดรเจนลักษณะนี้โดยไม่ผ่านการเผาไหม้ นอกจากจะไม่ก่อให้เกิดมลภาวะแล้ว ยังทำให้เครื่องยนต์มีประสิทธิภาพให้พลังงานสูงกว่าเครื่องยนต์ที่เผาไหม้ถึง 1-3 เท่า อย่างไรก็ตามขึ้นอยู่กับชนิดของเซลล์เชื้อเพลิงและวัสดุในการสังเคราะห์ให้ก๊าซไฮโดรเจนด้วย (<http://www.charninenenergy.com/pdf/fuelcells.pdf>)

การนำก๊าซไฮโดรเจนมาใช้เป็นเชื้อเพลิง ยังมีข้อจำกัดหรือข้อเสียเช่นกัน โดยข้อจำกัดหลักคือ

### 1. ก๊าซไฮโดรเจนที่สังเคราะห์ได้มีราคาสูง

เนื่องมาจากขั้นตอนที่ใช้ในการผลิตและการทำให้ก๊าซไฮโดรเจนบริสุทธิ์ ยังมีขั้นตอนที่ซับซ้อน ทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง จึงจำเป็นต้องมีระบบหล่อเย็นซึ่งการเพิ่มระบบนี้เมื่อนำไปใช้ในเชิงพาณิชย์จะเป็นขั้นตอนที่เสียค่าใช้จ่ายมาก และสิ่งเจือปนในก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้ยังมีมาก ทำให้ต้องเพิ่มปฏิกิริยาที่ทำให้ก๊าซไฮโดรเจนบริสุทธิ์ ส่งผลให้ต้นทุนการผลิตสูงขึ้นตามไปด้วย

### 2. การกักเก็บก๊าซไฮโดรเจนและบรรจุภัณฑ์มีต้นทุนสูง

ก๊าซไฮโดรเจนเป็นก๊าซที่มีความหนาแน่นต่ำมาก เมื่อต้องการกักเก็บก๊าซไฮโดรเจนลักษณะเช่นเดียวกันกับก๊าซหุงต้มและก๊าซธรรมชาติที่อยู่ในสถานะของเหลวในบรรจุภัณฑ์ ภาชนะนั้นต้องมีความแข็งแรง ทนต่อแรงดันสูง เพื่อให้บรรจุภัณฑ์สามารถบรรจุก๊าซได้ที่มีความดันสูงๆ ทำให้ก๊าซไฮโดรเจนอยู่ในสถานะของเหลวและสามารถบรรจุก๊าซได้ปริมาณมากขึ้น แต่ผลข้างเคียงของการบรรจุก๊าซไฮโดรเจนลักษณะนี้คือ เสี่ยงต่อการระเบิดและเกิดการลุกไหม้ได้ง่าย การแก้ไขปัญหาเรื่องบรรจุภัณฑ์สามารถทำได้โดยการบรรจุก๊าซไฮโดรเจนในบรรจุภัณฑ์ที่เป็นวัสดุชนิดโลหะไฮโดรไรด์ ที่สามารถดูดซับก๊าซไฮโดรเจนได้ดีที่อุณหภูมิและความดันปกติ แต่อย่างไรก็ตามค่าใช้จ่ายก็เพิ่มสูงตามไปด้วย

จากข้อจำกัดข้างต้น ทำให้มีนักวิจัยพยายามค้นคิดการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากสารตั้งต้นแล้วไปใช้ทันทีโดยไม่ต้องมีระบบกักเก็บก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งเรียกว่า Hydrogen on-board production ตัวอย่างเช่น การใช้ระบบนี้ในรถยนต์ และวัสดุในการสังเคราะห์ก๊าซไฮโดรเจนอาจจะเป็น น้ำหรือเอทานอล ในรถยนต์จะมีถังกักเก็บน้ำหรือเอทานอลเท่านั้น แล้วสารตั้งต้นนี้จะเข้าสู่ขั้นตอนการสังเคราะห์ก๊าซไฮโดรเจน และก๊าซไฮโดรเจนที่ได้จะนำไปใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อผลิตไฟฟ้าทันที ซึ่งวิธีการนี้

จะไม่มีกักเก็บก๊าซไฮโดรเจน แต่กระบวนการดังกล่าวยังอยู่ในขั้นการทดลองและวิจัยเพื่อพัฒนาเพื่อนำไปใช้จริง

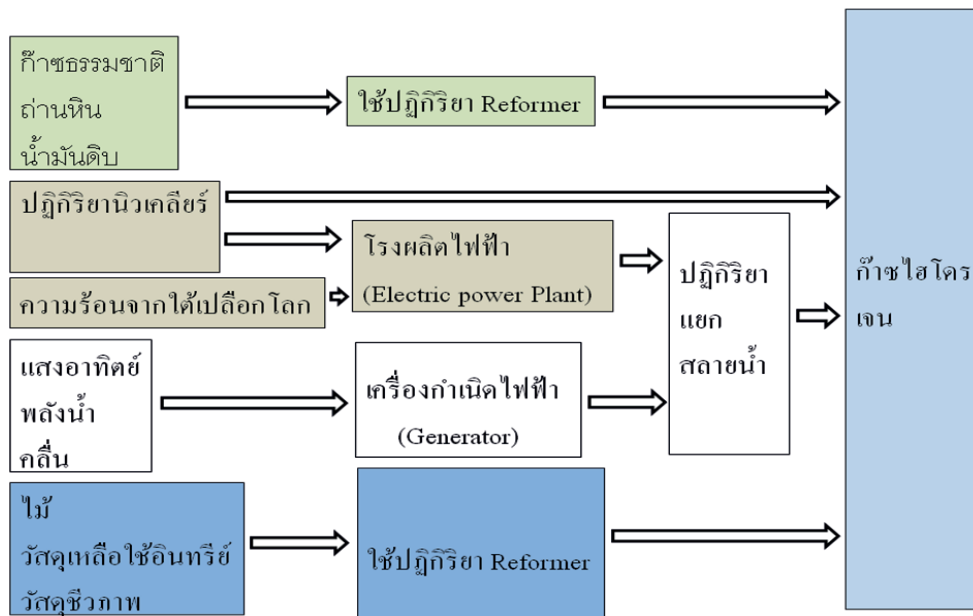
### 3. การใช้แหล่งวัตถุดิบเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน

การเลือกแหล่งให้ก๊าซไฮโดรเจนเบื้องต้นเป็นสารประกอบพวกไฮโดรคาร์บอนนี้ จะไม่สามารถลดการผลิตก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกสู่สิ่งแวดล้อมได้ เพราะสารตั้งต้นดังกล่าวจะให้สารผลิตภัณฑ์หลักสุดท้ายเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ทำให้แม้มีการนำก๊าซไฮโดรเจนที่ได้มาเป็นแหล่งให้พลังงานภาวะโลกร้อนก็ยังไม่สามารถแก้ไขได้ และการลดก๊าซนี้สามารถทำได้เพียงอาศัยการสังเคราะห์แสงของพืชเป็นหลัก ซึ่งพืชและต้นไม้ก็มีปริมาณจำกัด ยังต้องอาศัยเวลา การปลูกและการดูแลเพิ่มอย่างจริงจัง แต่การใช้แหล่งตั้งต้นนี้สามารถลดปัญหาการขาดแคลนปิโตรเลียมและน้ำมันได้

### กระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจน

คำถามแรกที่ต้องนึกถึงเมื่อใช้ก๊าซไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงคือ กระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนนี้ใช้สารตั้งต้นที่มาจากแหล่งที่เกิดใหม่มาทดแทนได้เร็วหรือไม่ โดยทั่วไปก๊าซไฮโดรเจนไม่พบอิสระในธรรมชาติ ปัจจุบันนี้มีการนำก๊าซธรรมชาติมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซไฮโดรเจน เนื่องจากส่วนประกอบหลักของก๊าซธรรมชาติคือ ก๊าซมีเทน ( $CH_4$ ) ซึ่งสามารถให้ก๊าซไฮโดรเจนได้สูง นอกจากนั้นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนในธรรมชาติ เช่น ถ่านหิน วัสดุเหลือใช้จากการเกษตร แอลกอฮอล์ที่ได้จากการหมักเศษวัสดุทางชีวภาพ ล้วนแล้วแต่มีไฮโดรเจนอะตอมเป็นองค์ประกอบชีวมวลและแหล่งให้พลังงานอื่นๆ ที่มาจากธรรมชาติ เช่น แรงแลม แรงแดด น้ำ พลังงานนิวเคลียร์ เป็นต้น ก็สามารถใช้เป็นแหล่งที่ให้พลังงานเพื่อใช้ในกระบวนการสังเคราะห์ก๊าซไฮโดรเจนได้เช่นกัน จากภาพที่ 3 จะเห็นว่าวัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนนั้นหลากหลาย ถ้ามีการเลือกใช้วัตถุดิบเป็นน้ำมันปิโตรเลียม ปัญหาการขาดแคลนปิโตรเลียมก็คงจะไม่สามารถแก้ไขได้ ([http://sgth2.com/hydrogen\\_faqs](http://sgth2.com/hydrogen_faqs))

รูปของพลังงานที่มีใช้โดยทั่วไปคือ พลังงานไฟฟ้า น้ำมันเบนซิน น้ำมันดีเซลและก๊าซธรรมชาติ พลังงานดังกล่าวล้วนได้มาจากแหล่งพลังงานเบื้องต้นชนิดอื่น เช่น ถ่านหิน ปิโตรเลียม ก๊าซมีเทนได้พิภพ หรือพลังงานนิวเคลียร์ อย่างไรก็ตามก็คิดไม่อาจปฏิเสธได้ว่าพลังงานในรูปไฟฟ้านั้นเป็นพลังงานที่มีการประยุกต์ใช้ในด้านอื่นๆ อย่างแพร่หลาย เนื่องจากง่ายต่อการขนส่งและแปรรูป เช่น ในโรงงานอุตสาหกรรม ในธุรกิจแทบทุกประเภท กิจกรรมในครัวเรือนและการขนส่ง เป็นต้น ดังนั้นถ้ามีการผลิตกระแสไฟฟ้า



ภาพที่ 3 กระบวนการสังเคราะห์ก๊าซไฮโดรเจนโดยใช้สารตั้งต้นและแหล่งให้พลังงานจากธรรมชาติ (ดัดแปลงจาก [http://sgth2.com/hydrogen\\_faq](http://sgth2.com/hydrogen_faq))

โดยใช้ก๊าซไฮโดรเจนที่ได้จากแหล่งพลังงานที่ยั่งยืนเป็นวัตถุดิบ ย่อมเป็นการผลิตกระแสไฟฟ้าที่ยั่งยืนด้วย

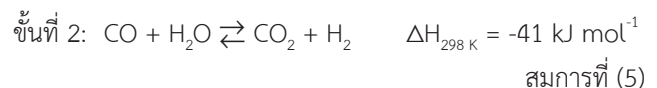
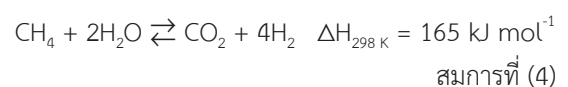
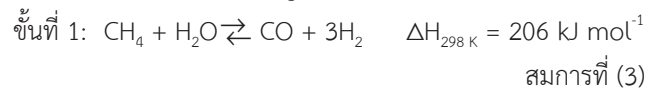
แนวคิดหลักที่ใช้ในกระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจน คือการ แยกไฮโดรเจนอะตอมออกจากสารตั้งต้นและแหล่งให้ก๊าซ ไฮโดรเจนจะเป็นตัวกำหนดกระบวนการที่ใช้ในการผลิต ใน ปัจจุบันกระบวนการผลิตได้แยกออกเป็น 2 กระบวนการหลัก คือ กระบวนการทางเคมีและกระบวนการเชิงความร้อน โดย กระบวนการที่ต้นนั้นต้องให้ผลคุ้มค่ากับการลงทุนและไม่ยุ่งยาก ซับซ้อนจนเกินไป เพื่อลดต้นทุนการผลิต ส่วนการผลิตก๊าซ ไฮโดรเจนเชิงชีวภาพโดยจุลินทรีย์นั้นยังอยู่ในขั้นตอนการทดลอง และวิจัย การเปรียบเทียบกระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนต่างๆ ได้แสดงไว้ในตารางที่ 1

กระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนที่มีใช้แล้วในเชิงพาณิชย์ มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 1. Steam Reforming

กระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนในเชิงพาณิชย์ที่นิยม คือ Steam reforming โดยมีสารตั้งต้นเป็นก๊าซธรรมชาติ เอทานอลหมักจากวัสดุธรรมชาติ เป็นต้น ปัจจุบัน 95% ของ ก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตหรือ 9,000,000 ตัน ผลิตในประเทศ สหรัฐอเมริกาและใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นวัตถุดิบ หรือเรียก กระบวนการนี้เรียกว่า Steam Methane Reformation (SMR)

เนื่องจากมีเทนเป็นส่วนประกอบหลักของก๊าซธรรมชาติ ประกอบ ด้วย 2 ขั้นตอนที่สำคัญคือ 1) นำก๊าซธรรมชาติทำปฏิกิริยา reforming กับไอน้ำที่มีอุณหภูมิสูงๆ (อาจจะมีการใช้ตัวเร่ง ปฏิกิริยาที่เป็นของแข็งร่วมด้วย) เพื่อให้ได้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO) และก๊าซไฮโดรเจน (ดังสมการที่ 3 และ 4 ในขั้นที่ 1) จาก ขั้นตอนที่ 1 จะเห็นว่ามี CO เกิดขึ้นร่วมด้วย ดังนั้นจะมีการนำ ไอน้ำเข้ามาทำปฏิกิริยากับ CO อีกครั้งเพื่อให้ได้ก๊าซไฮโดรเจน เพิ่มขึ้น ดังแสดงในขั้นที่ 2 ปฏิกิริยานี้เรียกว่า Water-Gas Shift reaction (WGS) (Steinberg, 1999)



ก๊าซไฮโดรเจนที่ใช้ในปัจจุบันนี้ทั่วโลกได้มาจากการผลิตโดยวิธีดังกล่าวเป็นหลัก ปฏิกิริยาทั้งหมดเป็นปฏิกิริยาที่ ย้อนกลับได้และจำเป็นอย่างยั้งที่ต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาร่วมด้วย จากสมการเคมีแสดงให้เห็นว่าปฏิกิริยาในขั้นตอนที่ 1 เป็น ปฏิกิริยาแบบดูดความร้อน (endothermic) และความสามารถ ในการเกิดปฏิกิริยาถูกควบคุมด้วยอทธิพลทางเทอร์โมไดนามิกส์

ตารางที่ 1 กระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนที่สำคัญ (ดัดแปลงจาก Quakernaat, 1995)

กระบวนการ	ชนิดของกระบวนการ	สารตั้งต้น	พลังงานที่ใช้	ผลิตภัณฑ์ที่ก่อกมลภาวะ
ทางความร้อน	Steam reforming	ก๊าซธรรมชาติ	ไอน้ำอุณหภูมิสูง	มีการให้ CO หรือ CO <sub>2</sub> ออกมา
	การแยกน้ำด้วยความร้อน (Thermochemical water splitting)	น้ำ	ความร้อนอุณหภูมิสูงจากเตาปฏิกรณ์นิวเคลียร์ที่ทำให้ก๊าซเย็นลง	ไม่มี
	การแยกก๊าซ (gasification)	ถ่านหิน วัสดุชีวภาพต่างๆ	น้ำและ O <sub>2</sub> ที่มีความดันและอุณหภูมิสูง	มีการให้ CO หรือ CO <sub>2</sub> ออกมา
	การเผา (pyrolysis)	วัสดุชีวภาพต่างๆ	ไอน้ำอุณหภูมิไม่สูงมาก	มีการให้ CO หรือ CO <sub>2</sub> ออกมา
ทางเคมีไฟฟ้า	การแยกน้ำด้วยไฟฟ้า	น้ำ	พลังงานจากแหล่งหมุนเวียนกลับ เช่น ลม แสงแดด เป็นต้น	ไม่มี
	การแยกน้ำด้วยไฟฟ้า	น้ำ	พลังงานจากแหล่งสิ้นเปลือง เช่น ถ่านหิน ก๊าซธรรมชาติ เป็นต้น	มีการปลดปล่อยสารก่อกมลภาวะขึ้นกับแหล่งให้พลังงานไฟฟ้า
	การแยกน้ำด้วยเซลล์ไฟฟ้าเคมีและแสง	น้ำ	แสงแดด	ไม่มี
ทางชีวภาพ	กระบวนการทางชีวภาพที่ใช้แสง	น้ำและสาหร่ายบางชนิด	แสงแดด	ไม่มี
	การย่อยสลายของแบคทีเรียที่ไม่ใช้ O <sub>2</sub>	วัสดุชีวภาพต่างๆ	ความร้อนที่อุณหภูมิสูง	อาจจะมีบ้าง
	การบ่ม หมักของจุลินทรีย์ต่างๆ	วัสดุชีวภาพต่างๆ	ความร้อนที่อุณหภูมิสูง	อาจจะมีบ้าง

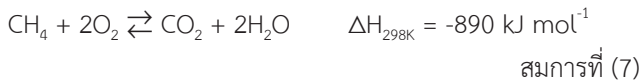
เพื่อให้ได้ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนสูงๆ ซึ่งจำเป็นต้องทำปฏิกิริยาที่อุณหภูมิสูง จากเหตุผลข้อนี้ทำให้ต้นทุนในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงตามไปด้วย และเพื่อเป็นการเพิ่มปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่สังเคราะห์ได้ สามารถทำได้โดย 1) คัดแยกก๊าซไฮโดรเจนหรือก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกระหว่างปฏิกิริยาดำเนินไป เพื่อเป็นการรบกวนสมดุลของปฏิกิริยา และ 2) ใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสม อิทธิพลของชนิดของตัวเร่งปฏิกิริยาก็เป็นอีกตัวแปรที่สามารถเพิ่มอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ ดังนั้นงานวิจัยด้านการศึกษาและพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับกระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนแบบ Steam reforming reaction จึงกำลังได้รับความสนใจอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน

กรณีใช้สารตั้งต้นเป็นแอลกอฮอล์ชนิดอื่น เช่น เอทานอล เมทานอล เป็นต้น ก็ได้รับความสนใจจากนักวิจัยเนื่องจากได้จากการหมักวัสดุจากธรรมชาติหรือวัสดุเหลือใช้จากเกษตรกรรม อย่างไรก็ตามดีแอลกอฮอล์มีข้อดีน้อยกว่าก๊าซมีเทน (เช่น จากก๊าซธรรมชาติ) คือ เกิดสารผลิตภัณฑ์ชนิดอื่นปะปนออกมากับก๊าซไฮโดรเจนที่สังเคราะห์ได้ ทำให้ต้องเพิ่มขั้นตอนการทำให้ก๊าซไฮโดรเจนบริสุทธิ์ ค่าใช้จ่ายก็สูงตามมาด้วย และตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้นักเกิดการเสื่อมสภาพ (deactivation) ในระหว่างปฏิกิริยาได้ง่าย ดังนั้นการใช้สารตั้งต้นเป็นเอทานอลหรือแหล่งให้ก๊าซไฮโดรเจนที่เป็นแอลกอฮอล์ชนิดอื่นๆ จึงอยู่ในขั้นตอนการวิจัย (Mattos *et al.*, 2005)

## 2. Partial Oxidation

ปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบบางส่วน หรือ Partial Oxidation เป็นเทคนิคที่เกิดขึ้นโดยจำเป็นต้องใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา บางครั้งเรียกว่า gasification ซึ่งกล่าวง่ายๆ ก็คือ เป็นปฏิกิริยาที่ใช้ความร้อนในการผลิตก๊าซไฮโดรเจน โดยทั่วไปแล้วสารตั้งต้นที่นิยมใช้มักเป็นสารประกอบทางอินทรีย์ เช่น ก๊าซมีเทน หรือ เอทานอล เป็นต้น โดยทั่วไปปฏิกิริยานี้มักทำที่อุณหภูมิสูงกว่า 700 °C ปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบบางส่วนของก๊าซมีเทน ทำให้ได้ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ (CO) ซึ่งปฏิกิริยานี้เป็นปฏิกิริยาแบบคายความร้อนปานกลาง และให้  $H_2/CO \approx 2$  ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมต่อปฏิกิริยา Fischer-Tropsch synthesis หรือกระบวนการ Syn gas แต่เมื่อพิจารณาในกรณีการให้ก๊าซไฮโดรเจนนั้นยังไม่มีประสิทธิภาพเท่ากับปฏิกิริยา Steam Reforming reaction (Mateos-Pedrero *et al.*, 2007)

สมการแสดงการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแบบบางส่วนทำให้ได้ CO และ H<sub>2</sub> ดังสมการที่ (6) และสมการแสดงปฏิกิริยาออกซิเดชันสมบูรณ์หรือ full combustion ทำให้ได้ CO<sub>2</sub> และ H<sub>2</sub>O ดังสมการที่ (7) ตัวแปรที่ควบคุมว่าปฏิกิริยาจะเกิดขึ้นแบบออกซิเดชันบางส่วนหรือออกซิเดชันสมบูรณ์คือปริมาณของก๊าซออกซิเจนที่เข้าทำปฏิกิริยานั้นเอง



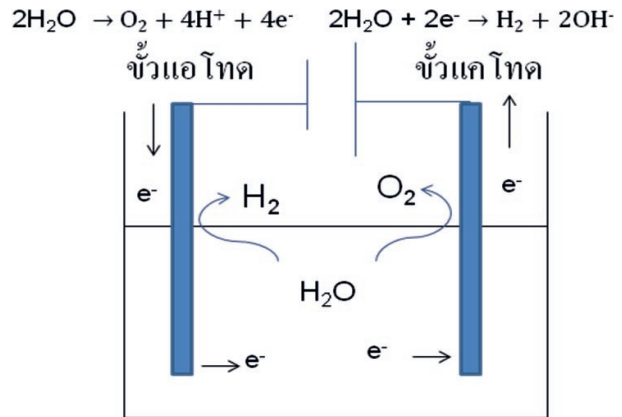
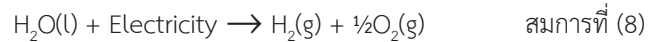
ชีวมวล (Biomass) เป็นวัตถุดิบที่กำลังนิยมนำมาใช้ในการผลิตพลังงาน ในสหรัฐอเมริกาการนำชีวมวล เช่น วัสดุเหลือใช้จากเกษตรกรรม มูลสัตว์ ขี้เถ้าจากการเผาไหม้ กระจาดที่ใช้แล้ว เป็นต้น มาใช้ในการผลิตเป็นพลังงานมากขึ้นเป็นอันดับสองรองจากพลังงานน้ำ ในกรณีใช้ชีวมวลเหล่านี้เป็นวัตถุดิบในการสังเคราะห์ก๊าซไฮโดรเจน ปฏิกิริยาที่นิยมใช้คือ Gasification, Pyrolysis, Hydrolysis เป็นต้น ในบางกรณีอาจจะทำปฏิกิริยาต่อกันด้วย Steam reforming และ WGS เพื่อเพิ่มปริมาณก๊าซไฮโดรเจน

เทคโนโลยีของปฏิกิริยา Gasification ที่มีสารตั้งต้นเป็นชีวมวลได้รับการพัฒนาจนขณะนี้สามารถนำไปใช้ได้แล้วในเชิงพาณิชย์ โดยมีหลักการเหมือนดังปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วน สารผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้นคือ ก๊าซไฮโดรเจน ก๊าซมีเทน ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และก๊าซที่มีไนโตรเจนเป็นองค์ประกอบ (NOx) อย่างไรก็ตามปฏิกิริยานี้ ยังให้สารผลิตภัณฑ์ที่

เป็นน้ำมันดินหรือ Tar และเขม่าเกิดขึ้นในปริมาณที่มากกว่าปฏิกิริยา Steam reforming ส่วนปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่สังเคราะห์ได้ก็ยังไม่ค่อยดีด้วย ดังนั้นจึงมีการประยุกต์ปฏิกิริยานี้โดยการนำตัวเร่งปฏิกิริยาที่เหมาะสมมาใช้ร่วมด้วย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการสังเคราะห์ก๊าซไฮโดรเจนที่ได้

## 3. Electrolysis of water

เป็นกระบวนการทางไฟฟ้าเคมีโดยผ่านกระแสไฟฟ้าลงไปบนน้ำ ซึ่งรู้จักกันดีในชื่อ ปฏิกิริยาการแยกสลายน้ำด้วยไฟฟ้า (Electrolysis reaction) กระแสไฟฟ้านี้จะทำให้เกิดการแตกตัวของไฮโดรเจนอะตอมและออกซิเจนอะตอมออกจากกัน แล้วอะตอมชนิดที่เหมือนกันจะเกิดการรวมตัวกันให้ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซออกซิเจน ดังแสดงในสมการที่ (8) และภาพที่ 4



ภาพที่ 4 กระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้า (Electrolysis)

เมื่อพิจารณาการได้มาซึ่งก๊าซไฮโดรเจนโดยวิธีนี้ กระแสไฟฟ้าที่ใช้ในปฏิกิริยาได้มาจากแหล่งพลังงานตั้งต้นอื่น ถ้าจะนำก๊าซไฮโดรเจนนี้มาเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้เซลล์เชื้อเพลิง พบว่า ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ได้นั้นยังไม่คุ้มค่ากับต้นทุนในการแยกสลายน้ำด้วยไฟฟ้าดังกล่าว เพราะราคาต้นทุนเกือบทั้งหมดของกระบวนการนี้ขึ้นกับมูลค่าของพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการแยกสลายน้ำ ถึงแม้ว่าแหล่งให้ก๊าซไฮโดรเจนนี้จะใช้เพียงน้ำซึ่งมีมากในโลกก็ตาม กระบวนการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากน้ำนี้จึงจำเป็นต้องได้รับการวิจัยและพัฒนาต่อไป เพื่อลดมูลค่าและต้นทุนในระหว่างการผลิต นอกจากนั้นต้องพิจารณาถึงแหล่งให้พลังงานไฟฟ้าเบื้องต้นด้วย ถ้ามาจากแหล่งที่ใช้แล้วหมดไป เช่น ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน หรือน้ำมันปิโตรเลียม ย่อมไม่เหมาะสม ควรจะเป็นแหล่งที่สามารถเกิดมาทดแทนใหม่ได้เร็ว

เช่น พลังงานไฟฟ้าจาก ลม แสงอาทิตย์ หรือพลังน้ำ เป็นต้น จึงจะทำให้กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

#### 4. Photoprocesses

กระบวนการแยกสลายน้ำโดยใช้แสงเป็นกระบวนการที่มีนักวิจัยจำนวนมากให้ความสนใจ โดยผู้เริ่มต้นงานวิจัยด้านนี้คือ Fujishima และ Honda ในปี ค.ศ. 1972 (Fujishima *et al.*, 1972) เทคโนโลยีของกระบวนการทางแสงที่ใช้ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนสามารถแยกออกเป็น 4 ชนิด ตามวัตถุประสงค์การใช้ประสิทธิภาพ การพัฒนาต่อยอดและการใช้ประโยชน์ในระยะยาว ซึ่งระบบการผลิตทั้ง 4 ชนิด คือ (<http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/776257-ROzXVw/webviewable/776257.PDF>)

1. เซลล์ไฟฟ้าแสงอาทิตย์ (Photovoltaic cells) ที่ต่อกับเครื่องแยกน้ำด้วยไฟฟ้า (electrolyzer)
2. เซลล์ไฟฟ้าเคมีแสงอาทิตย์ (Photoelectrochemical cells) พร้อมอิเล็กโทรดกึ่งตัวนำ 1-2 ชั้น
3. กระบวนการเชิงชีวภาพของจุลินทรีย์โดยใช้แสง (Photobiological systems)

#### 4. ระบบการย่อยสลายโดยใช้แสง (Photodegradation systems)

กระบวนการที่ใช้ในการเปลี่ยนพลังงานแสงมาอยู่ในรูปที่ใช้ประโยชน์ได้ง่าย แยกออกเป็น 2 กระบวนการหลัก คือ กระบวนการทางความร้อนของแสง (solar thermal process) และกระบวนการทางโฟตอนของแสง (solar photonic process) ในกระบวนการแรกนั้นพลังงานแสงจะถูกเปลี่ยนให้อยู่ในรูปพลังงานความร้อน ซึ่งอาจจะนำไปใช้ประโยชน์โดยตรงโดยการสะสมพลังงานความร้อนในตัวกลางต่างๆ เช่น น้ำ หินที่ปราศจากน้ำ เป็นต้น หรือพลังงานความร้อนนี้อาจจะเปลี่ยนให้อยู่ในรูปพลังงานกลหรือพลังงานไฟฟ้าโดยใช้อุปกรณ์ที่จำเพาะ เช่น หม้อต้มน้ำ (steam turbine) เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ส่วนกระบวนการทางโฟตอนของแสง คือการใช้วัสดุที่จำเพาะในการดูดซับแสงโฟตอนและวัสดุนี้จะไม่เปลี่ยนพลังงานของโฟตอนเป็นพลังงานความร้อนทั้งหมด แล้ววัสดุนี้จะเปลี่ยนพลังงานของโฟตอนเป็นพลังงานไฟฟ้า (เช่น เซลล์โฟโตโวลตาอิก : photovoltaic cell) หรืออาจจะสะสมพลังงานของโฟตอนไว้ในรูปพลังงานเคมี เช่น ในปฏิกิริยา Endergonic reaction ซึ่ง

**ตารางที่ 2** เปรียบเทียบเทคโนโลยีการผลิตก๊าซไฮโดรเจนด้วยวิธีต่างๆ และการพัฒนาเพื่อไปสู่เชิงพาณิชย์ (ดัดแปลงจาก Holladay *et al.*, 2009)

เทคโนโลยี	สารตั้งต้น	ประสิทธิภาพ	ระดับการพัฒนา
Steam reforming	สารประกอบไฮโดรคาร์บอน	70-85%	เชิงพาณิชย์
Partial oxidation	สารประกอบไฮโดรคาร์บอน	60-75%	เชิงพาณิชย์
Biomass gasification	มวลชีวภาพ	35-50%	เชิงพาณิชย์
Photolysis	แสงอาทิตย์และน้ำ	0.5%	อยู่ในขั้นวิจัย
Dark fermentation	มวลชีวภาพ	60-80%	อยู่ในขั้นวิจัย
Photo fermentation	มวลชีวภาพและแสงอาทิตย์	0.1%	อยู่ในขั้นวิจัย
Microbial Electrolysis cell	มวลชีวภาพและไฟฟ้า	78%	อยู่ในขั้นวิจัย
Alkaline Electrolyzer	น้ำและไฟฟ้า	50-60%	เชิงพาณิชย์
PEM Electrolyzer	น้ำและไฟฟ้า	55-70%	ใกล้สำเร็จจากการวิจัย
Thermochemical Electrolysis splitting	น้ำและพลังงานความร้อน	ไม่มีข้อมูล	อยู่ในขั้นวิจัย
Photoelectrochemical water splitting	น้ำและแสงอาทิตย์	12.4%	อยู่ในขั้นวิจัย



เป็นปฏิกิริยาเคมีที่สามารถเกิดขึ้นได้เมื่อมีการดูดกลืนพลังงานแสงเข้าไป (พลังงานจะสะสมไว้ในพันธะเคมีของสารที่เกิดขึ้น) ตัวอย่างที่ชัดเจนคือ การสังเคราะห์แสงของพืชที่เปลี่ยนพลังงานแสงมาอยู่ในรูปพลังงานเคมีหรือพลังงานพันธะในน้ำตาลหรือแป้งที่พืชสังเคราะห์ได้ เช่นเดียวกันกับการเปลี่ยนน้ำไปเป็นก๊าซออกซิเจนและก๊าซไฮโดรเจนโดยใช้แสง เป็นต้น อย่างไรก็ตาม วัฏจักรการนี้ยังเป็นกระบวนการที่มีราคาสูง ซึ่งปัจจุบันนิยมนำพลังงานที่ได้จากกระบวนการทางแสงมาใช้เป็นพลังงานไฟฟ้าโดยตรงมากกว่า

จากที่กล่าวมาจะเห็นว่าเทคโนโลยีการสังเคราะห์ก๊าซไฮโดรเจนที่หลากหลาย เพื่อให้เห็นพัฒนาการของแต่ละเทคโนโลยีสู่ระดับพาณิชย์ที่ชัดเจน ตารางที่ 2 แสดงผลเปรียบเทียบความก้าวหน้า ประสิทธิภาพ และระดับการนำไปใช้ของแต่ละกระบวนการผลิต (Holladay *et al.*, 2009)

## สรุป

บทความนี้ได้กล่าวถึงความสำคัญ ข้อดี ข้อเสียของการใช้ก๊าซไฮโดรเจนและกระบวนการที่ใช้ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งเป็นอีกหนึ่งทางเลือกของพลังงานในอนาคต เนื่องจากแหล่งให้ก๊าซไฮโดรเจนพบมากและหลากหลายในธรรมชาติ นอกจากนี้ ก๊าซไฮโดรเจนยังมีความจุพลังงานที่สูง สังเคราะห์ได้จากทรัพยากรที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติได้ในระยะเวลาสั้น เป็นพลังงานที่สะอาด เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม อย่างไรก็ตาม วัฏจักรการสังเคราะห์ก๊าซไฮโดรเจนจำเป็นต้องได้รับการพัฒนา เพื่อลดต้นทุนการผลิตและมีความบริสุทธิ์เพียงพอ เมื่อมีการนำก๊าซไฮโดรเจนมาใช้ประโยชน์ได้มากขึ้นจะสามารถลดสถานะโลกร้อนที่กำลังส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมในปัจจุบันได้

## กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าผู้เขียนบทความนี้ขอขอบคุณ Prof. Robbie Burch, Prof. Chris Hardacre, Dr. John Breen และ รศ.ดร. สุนันทา เสงวีรัมย์ ผู้ซึ่งให้โอกาสข้าพเจ้าในการศึกษาด้านพลังงานทดแทนและปฏิกิริยาด้านตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงวิวิธพันธ์

## เอกสารอ้างอิง

Quakernaat, J. (1995). From hydrogen economy to hydrogen civilization. *International Journal of Hydrogen Energy*. 20, 485-492.

Johnston, B., Mayo, M. C. & Khare, A. (2005). *Technovation; Hydrogen: the energy source for the 21st century*: Elsevier press.

Conte, M., Lacobazzi, A., Ronchetti, M. & Vellone, R. (2001). Hydrogen economy for a sustainable development: state-of-the-art and technological perspectives. *Journal of Power Sources*. 100, 171-187.

Maclean, H. L. & Lave, L. B. (2003). Evaluating automobile fuel/propulsion system technologies. *Progress in Energy and Combustion Science*. 29, 1-69.

Simbeck, D. R. (2004). CO<sub>2</sub> capture and storage-the essential bridge to the hydrogen economy. *Energy*. 29, 1633-1641.

Goltsov, V. A. & Veziroglu, T. N. (2001). From hydrogen economy to hydrogen civilization. *International Journal of Hydrogen Energy*. 26, 909-915.

Adamson, K. A. (2004). Hydrogen from renewable resources-the hundred year commitment. *Energy Policy*. 32, 1231-1242.

Elam, C. C., Padro, C. E. G., Sandrock, G., Luzzi, A., Lindblad, P. & Hagen, E. F. (2003). Realizing the hydrogen future: the International Energy Agency's efforts to advance hydrogen energy technologies. *International Journal of Hydrogen Energy*. 28, 601-607.

Scott, D. S. (2004). For Better Or Worse?. *International Journal of Hydrogen Energy*. 29, 449-452.

Cherry, R. S. (2004). A hydrogen utopia?. *International Journal of Hydrogen Energy*. 29, 125-129.

Bockris, J. O. M. (2002). The origin of ideas on a Hydrogen Economy and its solution to the decay of the environment. *International Journal of Hydrogen Energy*. 27, 731-740.

U. S. Environmental Protection Agency, <http://www.epa.gov>, 2001.

- Fernandes, T. R. C., Chen, F. & da Graca Carvalho, M. (2004). "HySociety" in support of European hydrogen projects and EC policy. *International Journal of Hydrogen Energy*. 30, 239-245.  
[http://sgth2.com/hydrogen\\_faq](http://sgth2.com/hydrogen_faq).  
<http://www.tps.ac.th/~panya/class/electro-magnetic1/electric-current/electric-current.htm>  
<http://www.charninenenergy.com/pdf/fuelcells.pdf>
- Steinberg, M. (1999). Fossil fuel decarbonization technology for mitigating global warming. *International Journal of Hydrogen Energy*. 24, 771-777.
- Mattos, L. V. & Noronha, F. B. (2005). Hydrogen production for fuel cell applications by ethanol partial oxidation on Pt/CeO<sub>2</sub> catalysts: the effect of the reaction conditions and reaction mechanism. *Journal of Catalysis* 233, 453-463.
- Mateos-Pedrero, C., Cellier, C., Eloy, P. & Ruiz, P. (2007). Partial oxidation of methane towards hydrogen production over a promising class of catalysts: Rh supported on Ti-modified MgO. *Catalysis Today*. 128, 216-222.
- Fujishima, A. & K. Honda. (1972). Electrochemical Photolysis of Water at a Semiconductor Electrode *Nature*. 238, 37-38.
- DOE Scientific and Technical Information, (<http://www.osti.gov/bridge/servlets/purl/776257-ROzXVw/webviewable/776257.PDF>).
- Holladay, J. D., Hu, J., King, D. L. & Wang. Y. (2009). An overview of hydrogen production technologies. *Catalysis Today*. s139, 244-260.