

ไฮโดรเจน – การผลิตและการประยุกต์ใช้

อุณาโลม เวทย์วัฒนะ ฮาร์ทลี*

บทคัดย่อ

สภาวะขาดแคลนน้ำมันในปัจจุบันเป็นที่มาของการค้นคว้าวิจัยในเรื่องของพลังงานทดแทน พลังงานจากไฮโดรเจนเป็นพลังงานทดแทนประเภทหนึ่งซึ่งมีความน่าสนใจ เนื่องจากเป็นพลังงานสะอาด สามารถช่วยลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก ซึ่งจะส่งผลดีในการช่วยลดภาวะโลกร้อนในที่สุด งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับก๊าซไฮโดรเจนจึงมีความหมายมากขึ้นในปัจจุบัน ก๊าซไฮโดรเจนสามารถผลิตได้จากเทคโนโลยีหลากหลายประเภท และสามารถประยุกต์ใช้เป็นสารตั้งต้นเพื่อผลิตสารเคมีได้หลายชนิด รวมทั้งสามารถนำไปป้อนเซลล์เชื้อเพลิง บทความทางวิชาการนี้รวบรวมข้อมูลจากการทบทวนวรรณกรรมในปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการดังกล่าว โดยบทความนี้ประกอบด้วยเนื้อหา 3 ส่วนหลัก คือ ความสำคัญของไฮโดรเจน การผลิตก๊าซไฮโดรเจน และการประยุกต์ใช้ก๊าซไฮโดรเจน

คำสำคัญ : ก๊าซไฮโดรเจน, เซลล์เชื้อเพลิง, การผลิตไฮโดรเจน, การประยุกต์ใช้ไฮโดรเจน

วิศวกรรมเคมีและกระบวนการ, บัณฑิตวิทยาลัยวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสิรินธร ไทย-เยอรมัน, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี

พระจอมเกล้าพระนครเหนือ

* ผู้ติดต่อ, อีเมล: unalome.w.cpe@tggs-bangkok.org รับเมื่อ 27 กรกฎาคม 2555 ตอบรับเมื่อ 26 ตุลาคม 2555

Hydrogen – Production and Application

Unalome Wetwatana Hartley*

Abstract

The petroleum based-energy crisis leads to intensive research of alternative energy. Hydrogen energy is one of the most interesting alternatives due to its cleanliness. Hydrogen energy helps reducing green house gases emissions which causes global warming. Hydrogen energy researches then become more meaningful recently. Hydrogen can be produced via several technologies and as well used as feedstock for production of a wide range of chemicals. It can also be fed as a reactant for fuel cells. This review article summarized some relevant research articles regarding the process. This paper consists of three main parts which are the importance of the hydrogen, the production of the hydrogen and the application of hydrogen.

Keywords : Hydrogen, Fuel Cell, Production of Hydrogen, Application of Hydrogen

1. บทนำ

เพื่อตอบสนองการแก้ปัญหาการเพิ่มขึ้นของการบริโภคเชื้อเพลิงปิโตรเลียมและปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการเผาไหม้เชื้อเพลิงปิโตรเลียม การคิดค้นและการศึกษาเทคโนโลยีใหม่จึงเป็นสิ่งจำเป็น โดยเฉพาะเทคโนโลยีการผลิตเชื้อเพลิงจากแหล่งพลังงานทางเลือกซึ่งเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และเมื่อพิจารณาจากแหล่งพลังงานทางเลือกอื่นๆ พบว่า ก๊าซไฮโดรเจนเป็นหนึ่งในแหล่งพลังงานทางเลือกที่มีศักยภาพและคุณภาพที่สามารถใช้ทดแทนพลังงานเชื้อเพลิงปิโตรเลียมได้ดี โดยส่วนใหญ่ก๊าซไฮโดรเจนถูกใช้เพื่อเป็นสารตั้งต้นในการผลิตแอมโมเนีย อีกทั้งยังเป็นสารตั้งต้นในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิง ก๊าซไฮโดรเจนเป็นแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงที่มีประสิทธิภาพสูงและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม [1] อันเนื่องมาจากผลิตภัณฑ์อย่างเดียวกันที่เกิดจากการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงคือน้ำ ก๊าซไฮโดรเจนสามารถผลิตได้จากหลากหลายเทคโนโลยี ได้แก่ การแปรรูปถ่านหินให้เป็นก๊าซเชื้อเพลิง (Coal gasification) การรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (Steam reforming) การพลาสมารีฟอร์มมิง (Plasma reforming) การออกซิเดชันบางส่วน (Partial oxidation) การแยกน้ำด้วยกระแสไฟฟ้า (Electrolysis of water) การแตกสลายตัวด้วยความร้อนของน้ำ (Thermal decomposition of water) และกระบวนการหมัก (Fermentation process)

ปัจจุบันเทคโนโลยีที่มีประสิทธิภาพสูงในการผลิตก๊าซไฮโดรเจน คือ กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ อันเป็นเทคโนโลยีที่มีความเหมาะสมในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนเพื่อส่งต่อสู่กระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC) แต่อย่างไรก็ตามปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำเป็นปฏิกิริยาคูดความร้อน นั้นหมายถึงต้องใช้พลังงานความร้อนและต้นทุนทางพลังงานจำนวนมากในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ [2] ดังนั้นจึงได้มีการนำกระบวนการออกซิเดชัน

บางส่วน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาคายความร้อนมาใช้ร่วมกับกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ รวมเรียกชื่อกระบวนการว่า ออโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิง (Autothermal reforming) โดยการป้อนทั้งก๊าซออกซิเจนและไอน้ำ เพื่อทำปฏิกิริยากับสารไฮโดรคาร์บอน ความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาของกระบวนการออกซิเดชันบางส่วนจะให้แก่กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ ส่งผลให้เกิดการใช้พลังงานร่วมเพื่อผลิตก๊าซไฮโดรเจนเป็นการลดต้นทุนทางพลังงาน อีกทั้งยังสามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ในอัตราส่วนที่มากขึ้นด้วย [3]

วัตถุดิบในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนด้วยเทคโนโลยีต่างๆ สามารถแบ่งออกเป็น 2 แหล่ง แหล่งแรก คือ ฟอสซิล ได้แก่ ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน และแหล่งที่สอง คือ สารชีวมวล ได้แก่ น้ำ เมทานอล [4] เอทานอล [5] กลีเซอรอล [6] ไคเมทิลเอเทอร์ [7] และบิวทานอล [8] ซึ่งบิวทานอลมีศักยภาพในการใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตก๊าซไฮโดรเจน โดยกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ สำหรับข้อมูลทางด้านอุณหพลศาสตร์ของกระบวนการออโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิงของบิวทานอลเพื่อผลิตก๊าซไฮโดรเจนยังไม่มากนัก ทั้งนี้กระบวนการออโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิงของบิวทานอลเพื่อผลิตก๊าซไฮโดรเจนจะมีปฏิกิริยาเกิดขึ้นหลายปฏิกิริยาอย่างซับซ้อน ซึ่งปฏิกิริยาข้างเคียงจะมีความบริสุทธิ์ของก๊าซไฮโดรเจน ดังนั้นเพื่อการควบคุมกระบวนการภายใต้สภาวะของปฏิกิริยาที่เหมาะสมที่สุด จึงต้องมีการศึกษาถึงผลกระทบของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่อองค์ประกอบของผลิตก๊าซไฮโดรเจน โดยการศึกษาและวิเคราะห์อุณหพลศาสตร์ของกระบวนการออโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิงของบิวทานอลเพื่อผลิตก๊าซไฮโดรเจน

2. การผลิตไฮโดรเจน

ไฮโดรเจนสามารถผลิตได้จากหลายเทคโนโลยี เช่น การแปรรูปถ่านหินให้เป็นก๊าซเชื้อเพลิง (Coal gasification) การรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (Steam reforming) การพลาสมา

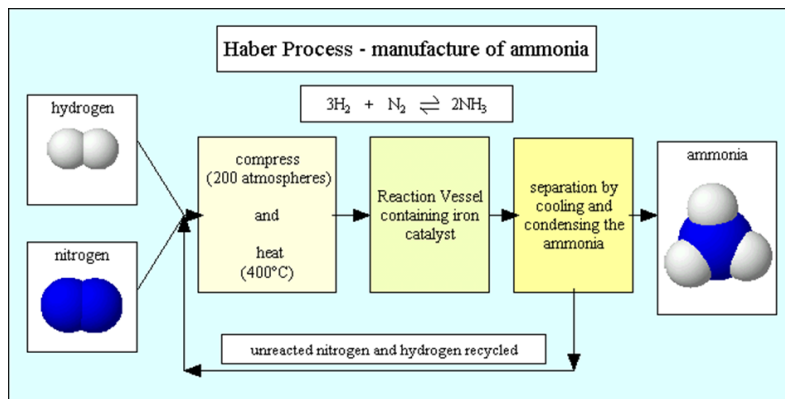
รีฟอร์มมิง (Plasma reforming) การออกซิเดชันบางส่วน (Partial oxidation) การแยกน้ำด้วยกระแสไฟฟ้า (Electrolysis of water) การแตกสลายตัวด้วยความร้อนของน้ำ (Thermal decomposition of water) และกระบวนการหมัก (Fermentation process)

2.1 การแปรสภาพเป็นก๊าซ (Gasification)

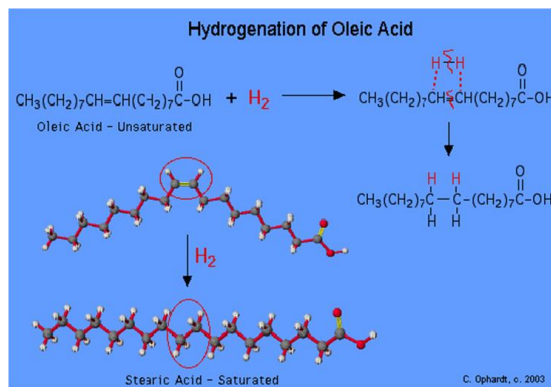
การแปรสภาพเป็นก๊าซ คือ กระบวนการเปลี่ยนสารประกอบคาร์บอน เช่น ถ่านหิน ปิโตรเลียม น้ำมันเหลว ชีวภาพ ชีวมวล เป็นก๊าซไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และมีเทน โดยการทำปฏิกิริยาระหว่างสารตั้งต้นกับออกซิเจน (Air gasification) หรือไอน้ำ (Steam gasification) ปฏิกิริยาดังกล่าวจะเกิดที่อุณหภูมิสูง

(มากกว่า 700 องศาเซลเซียส) ซึ่งจากการศึกษาการผลิตไฮโดรเจนจากสารชีวมวลโดยกระบวนการก๊าซซิฟิเคชันด้วยฟลูอิดไคซ์เบด (fluidized bed) ได้ปริมาณผลผลิตก๊าซไฮโดรเจนมากที่สุดที่อุณหภูมิ 850 องศาเซลเซียสและอัตราส่วนระหว่างไอน้ำและสารชีวมวลเท่ากับ 1.7 โดยได้ก๊าซไฮโดรเจน 128 กรัมไฮโดรเจนต่อกิโลกรัมสารชีวมวล [9].

กระบวนการแปรสภาพเป็นก๊าซแบบใช้อากาศเป็นกระบวนการดั้งเดิมโดยใช้หลักการจำกัดอากาศเพื่อควบคุมอัตราการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วนเพื่อให้เกิดการผลิตความร้อนในอัตราที่พอเหมาะ ซึ่งแตกต่างจากโดยกระบวนการแปรสภาพเป็นก๊าซแบบใช้อิน้ำ ซึ่งจำเป็นต้องใช้ความร้อนจากภายนอกในปริมาณที่มากกว่า



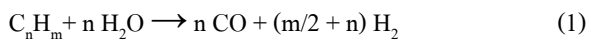
รูปที่ 1 กระบวนการผลิตสารประกอบแอมโมเนีย [10]



รูปที่ 2 การเติมไฮโดรเจนสำหรับกรดไขมันโอเลอิก [11]

2.2 การรีฟอร์มมิง (Reforming)

การรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ (Steam reforming) การรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำเป็นกระบวนการผลิตก๊าซสังเคราะห์ (Synthesis gas, syngas) ซึ่งเป็นส่วนผสมระหว่างก๊าซไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ จากก๊าซธรรมชาติ (มีเทน อีเทน โพรเพนและบิวเทน) [3] เมทานอล [4] เอทานอล [5] โพรพานอล [6] ก๊าซหุงต้ม หรือสารกลุ่มแนฟทา (ก๊าซโซลีน ดีเซล และน้ำมันก๊าด) [7] ซึ่งกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำประกอบด้วย 2 ขั้นตอน คือ การทำปฏิกิริยาระหว่างสารตั้งต้นกับไอน้ำที่อุณหภูมิ 750-800 องศาเซลเซียส ดังสมการที่ 1 ซึ่งผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ ก๊าซสังเคราะห์ และจะเกิดปฏิกิริยาต่อเนื่องระหว่างคาร์บอนมอนอกไซด์กับน้ำโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา หรือที่เรียกว่าปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำเป็นก๊าซ (Water gas shift reaction, WGS) ดังสมการที่ 2 ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ และก๊าซไฮโดรเจน ซึ่งในปัจจุบันวิธีการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำเป็นวิธีที่นิยมในการผลิตไฮโดรเจนจากก๊าซธรรมชาติที่ได้จากโรงกลั่นน้ำมันปิโตรเลียมดิบ



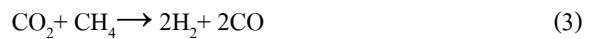
Bimbela และคณะ [12] ศึกษากระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของน้ำมันชีวภาพที่ได้จากกระบวนการไพโรไลซิสสารชีวมวลบนตัวเร่งปฏิกิริยา Ni-Al ที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส ที่มีอะซิโตนและ บิวทานอลเป็นตัวแทนน้ำมันชีวภาพ พบว่า สามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ร้อยละ 89 และ 99 ตามลำดับที่ปริมาณ Ni ร้อยละ 23

Troy และ Rodney [7] ทำการวิเคราะห์ทางอุณหพลศาสตร์ของการผลิตไฮโดรเจนจากการรวมของสองกระบวนการคือ การออกซิเดชันบางส่วนและการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำของไดเมทิลอีเทอร์ (Dimethyl ether, DME) ซึ่ง

พบว่า ปริมาณก๊าซไฮโดรเจนที่ได้จากการรวมสองกระบวนการมีปริมาณน้อยกว่าที่ผลิตได้จากกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำเพียงกระบวนการเดียว อีกทั้งยังพบว่าการเปลี่ยน DME เป็นก๊าซไฮโดรเจน คาร์บอนมอนอกไซด์ และคาร์บอนไดออกไซด์ เกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ที่อุณหภูมิสูงกว่า 200 องศาเซลเซียส โดยที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส สามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ร้อยละ 52

กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (Carbon dioxide reforming หรือ Dry reforming)

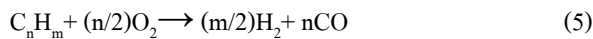
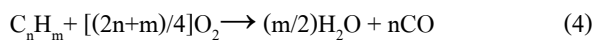
กระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นกระบวนการที่ได้ก๊าซผลิตภัณฑ์เป็นก๊าซสังเคราะห์ เช่นเดียวกับกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ ต่างกันตรงที่ใช้ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เป็นสารตั้งต้นในการทำปฏิกิริยากับประกอบไฮโดรคาร์บอน เช่น ก๊าซมีเทน ดังสมการที่ 3 ซึ่งกระบวนการดังกล่าวได้มีการศึกษาบนตัวเร่งปฏิกิริยาที่แตกต่างกัน คือ Ni/γ-Al₂O₃, Ni/MgO-γ-Al₂O₃ และ Ni/MgAl₂O₄ ผลการทดลองพบว่า ตัวเร่งทั้ง 3 ชนิดสามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนในอัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ 0.52, 0.95 และ 0.98 ตามลำดับที่อุณหภูมิ 750 องศาเซลเซียส สำหรับข้อดีของกระบวนการนี้คือ ช่วยลดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ซึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจกในบรรยากาศ อีกทั้งยังควบคุมระบบการทำงานได้ง่ายกว่ากระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ แต่ข้อเสียคือ ปริมาณของก๊าซไฮโดรเจน ที่ได้จากกระบวนการนี้จะต่ำกว่ากระบวนการการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ [13]



การออกซิเดชันบางส่วน (Partial oxidation)

กระบวนการออกซิเดชันบางส่วน เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาเผาไหม้ระหว่างสารไฮโดรคาร์บอนกับก๊าซออกซิเจน ซึ่งเป็นปฏิกิริยาการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ได้ผลิตภัณฑ์เป็นก๊าซ

ไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ อีกทั้งปฏิกิริยาดังกล่าวเป็นปฏิกิริยาคายความร้อน ส่งผลให้ไม่ต้องป้อนพลังงานจากภายนอก แต่อย่างไรก็ตามการจำกัดปริมาณก๊าซออกซิเจนให้เหมาะสมมีความจำเป็นอย่างมาก ทั้งนี้เนื่องจากก๊าซออกซิเจนที่เหลือจากปฏิกิริยาจะทำปฏิกิริยากับก๊าซไฮโดรเจนกลายเป็นน้ำ กระบวนการออกซิเดชันบางส่วนแบ่งออกเป็น 2 วิธีคือ การออกซิเดชันบางส่วนด้วยความร้อน (Thermal partial oxidation, TPOX) และการออกซิเดชันบางส่วนด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalytic partial oxidation, CPOX) ซึ่งรูปแบบการเกิดปฏิกิริยาทั่วไปทั้งสองวิธีดังสมการที่ 4 และ 5 ตามลำดับ



ซึ่งข้อดีของการออกซิเดชันบางส่วนคือ การเริ่มต้นการเกิดปฏิกิริยาหรือกระบวนการเกิดขึ้นได้อย่างรวดเร็วตอบสนองอย่างรวดเร็วในการเปลี่ยนแปลงปริมาณสาร แต่ประสิทธิภาพการเปลี่ยนแปลงเป็นก๊าซไฮโดรเจนต่ำ [14]

ออโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิง (Autothermal reforming)

ออโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิง คือ กระบวนการร่วมกันระหว่างกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำหรือคาร์บอนไดออกไซด์กับกระบวนการออกซิเดชันบางส่วน ซึ่งเป็นกระบวนการที่นำข้อดีของกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำและกระบวนการออกซิเดชันบางส่วนมารวมกัน โดยการป้อนทั้งน้ำและออกซิเจนเพื่อทำปฏิกิริยากับสารประกอบไฮโดรคาร์บอน ข้อดีของกระบวนการนี้ คือ สามารถผลิตไฮโดรเจนได้ในอัตราส่วนที่มากกว่ากระบวนการออกซิเดชันบางส่วน และใช้พลังงานน้อยกว่ากระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำ สารตั้งต้นที่ใช้ในกระบวนการนี้ได้แก่ มีเทน เมทานอล [4] เอทานอล [5] และ โพรพานอล [6]

สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในกระบวนการนี้คือ Rh/Al₂O₃ [15] และ Pt/Ce_{0.75}Zr_{0.25} [16]

สำหรับกระบวนการออโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิงของมีเทน โดยใช้ก๊าซออกซิเจน เพื่อเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันบางส่วนและถ้าใช้คาร์บอนไดออกไซด์ จะได้อัตราส่วนระหว่างก๊าซไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์คือ 1 ต่อ 1 หรือไอน้ำเพื่อการรีฟอร์มมิง อัตราส่วนระหว่างก๊าซไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์คือ 2.5 ต่อ 1 ซึ่งมากกว่ากระบวนการที่ใช้คาร์บอนไดออกไซด์ ดังสมการที่ 6 และ 7 ตามลำดับ ซึ่งก๊าซสังเคราะห์ที่ผลิตได้จะส่งผลให้อุณหภูมิและความดันออกจากรังปฏิกรณ์ คือ 950-1100 องศาเซลเซียส และ 100 บาร์ ความแตกต่างระหว่างกระบวนการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำกับออโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิง Eq. 2-4 ในการรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำมีการป้อนก๊าซออกซิเจน



Cavallaro และคณะ [15] ศึกษากระบวนการออโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิงของเอทานอลชีวภาพโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยา 5% Rh/Al₂O₃ เพื่อผลิตก๊าซสังเคราะห์ ซึ่งจะใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตกระแสไฟฟ้าด้วยเซลล์เชื้อเพลิง ผลจากการทดลองพบว่า สามารถผลิตก๊าซสังเคราะห์ได้ร้อยละ 100 ที่อัตราส่วนก๊าซออกซิเจนและเอทานอลเท่ากับ 0.45 ซึ่งผลิตผลก๊าซไฮโดรเจนจะลดลงเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างก๊าซไฮโดรเจนกับออกซิเจนกลายเป็นน้ำ

Hao และคณะ [16] ศึกษาสภาวะสมดุลของอุณหภูมิศาสตร์ด้วยวิธีพลังงานอิสระกิบส์รวมน้อยสุดของกระบวนการออโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิงของกลีเซอรอลพบว่า ผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้ดีที่สุด ที่อุณหภูมิ 900-1000 องศาเซลเซียส อัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อกลีเซอรอลอยู่ในช่วง

9-12 และอัตราส่วนระหว่างก๊าซออกซิเจนต่อกลีเซอรอลอยู่ในช่วง 0-0.4 [21]

Chen และคณะ [17] ศึกษาภาวะสมดุลของอุณหภูมิศาสตร์ของการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากปฏิกิริยาหนึ่งและสองขั้นตอน ซึ่งปฏิกิริยาหนึ่งขั้นตอนคือการเกิดปฏิกิริยาออกโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิงของมีเทน และปฏิกิริยาสองขั้นตอนประกอบด้วย การเกิดปฏิกิริยาแบบออกซิเจนบางส่วนของมีเทนแล้วตามด้วยปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำเป็นก๊าซ ซึ่งการควบคุมอุณหภูมิของทั้งสองขั้นตอนถูกแยกออกจากกัน จากผลการทดลองพบว่า การเพิ่มขึ้นของอัตราส่วนระหว่างไอน้ำต่อมีเทน อุณหภูมิ และ อัตราส่วนที่ต่ำของก๊าซออกซิเจนต่อมีเทน ส่งผลให้ผลิตผลก๊าซไฮโดรเจนเพิ่มขึ้นในกระบวนการการออกโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิง แต่ที่อัตราส่วนระหว่างก๊าซออกซิเจนและมีเทนมีค่าเท่ากับ 0.125 ทำให้เกิดโค้ก (Coke) ขึ้น ซึ่งจะขัดขวางการเกิดปฏิกิริยาของกระบวนการ อีกทั้งในกระบวนการออกโตเทอร์มอลรีฟอร์มมิงด้วยไอน้ำผลิตผลก๊าซไฮโดรเจนสูงสุดเท่ากับ 2.25 เมื่ออัตราส่วนระหว่างมีเทน ก๊าซออกซิเจน และไอน้ำเท่ากับ 1 ต่อ 5 ต่อ 1 และเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำเป็นก๊าซที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส แต่ในทางตรงกันข้าม ปฏิกิริยาสองขั้นตอนสามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนสูงสุดเท่ากับ 2.89 และเกิดปฏิกิริยาเปลี่ยนน้ำเป็นก๊าซที่อุณหภูมิ 200 องศาเซลเซียส ซึ่งสรุปได้ว่าปฏิกิริยาแบบสองขั้นตอนเหมาะแก่การผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้สูงสุดและยังเป็นกระบวนการที่สามารถควบคุมได้ง่ายอีกด้วย

2.3 การแยกน้ำด้วยกระแสไฟฟ้า (Electrolysis of water) และการแตกสลายน้ำด้วยความร้อน (Thermal decomposition of water)

การแยกสารด้วยกระแสไฟฟ้า เป็นกระบวนการแยกพันธะระหว่างธาตุหรือโมเลกุลของสาร โดยการผ่านกระแสไฟฟ้าเข้าไปยังสารดังกล่าว ดังนั้นการแยกน้ำด้วยกระแสไฟฟ้าจึงเป็นการสลายโมเลกุลของน้ำให้กลายเป็น

ก๊าซออกซิเจนและก๊าซไฮโดรเจน แต่กระบวนการนี้ยังไม่เป็นที่นิยมใช้ในระดับอุตสาหกรรมเนื่องจากยังมีความเป็นไปได้ที่จะผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากแหล่งปิโตรเลียมในปัจจุบัน บริเวณขั้วแอโนดมีค่าเป็นกรดเนื่องจากไอออนบวกไฮโดรเนียม (H_3O^+) โดยบริเวณขั้วแคโทดมีค่าความเป็นเบสเนื่องจากไอออนลบไฮดรอกซี (OH^-) ซึ่ง OH^- นี้จะเดินทางไปยังแอโนดและรวมตัวกับไอออนบวกไฮโดรเนียม (H_3O^+) เกิดเป็นน้ำ (H_2O) แต่ในทางกลับกัน H_3O^+ จะเดินทางไปยังขั้วแคโทดซึ่งเป็นลบและรวมตัวกับ OH^- เกิดเป็นน้ำขึ้นปรากฏการณ์นี้จะส่งผลให้เกิดความต่างศักย์เกิน (overpotential) ที่ทั้งสองขั้ว [18]

การแตกสลายโมเลกุลของสารเกิดจากการให้ความร้อนแก่สารนั้น โดยทั่วไปจะเป็นปฏิกิริยาการดูดความร้อน เพื่อนำความร้อนไปสลายพันธะของโมเลกุลทำให้เกิดการแตกสลายของสาร สำหรับอุณหภูมิที่ทำให้เกิดการแตกสลายโมเลกุลมีค่าเท่ากับ 2000 องศาเซลเซียส

2.4 กระบวนการหมัก (Fermentation process)

การผลิตก๊าซไฮโดรเจนโดยอาศัยการหมักเป็นกระบวนการเปลี่ยนสารอินทรีย์ให้เป็นก๊าซไฮโดรเจนชีวภาพโดยอาศัยหลักการย่อยด้วยเอนไซม์ของกลุ่มแบคทีเรีย ประกอบด้วย 3 ขั้นตอนซึ่งคล้ายคลึงกับระบบการย่อยแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic process) ดังนี้ ขั้นตอนที่ 1 การไฮโดรไลซิสของแบคทีเรีย (Hydrolysis bacteria) โดยแบคทีเรียจะย่อยสลายโมเลกุลใหญ่ที่ไม่ละลายน้ำ เช่น คาร์โบไฮเดรต และ/หรือ โปรตีนให้เป็นโมเลกุลที่เล็กกว่าเช่น น้ำตาล และ/หรือ กรดอะมิโน เพื่อให้สามารถถูกย่อยต่อไปได้ด้วยแบคทีเรียอีกชนิดหนึ่ง ขั้นตอนที่ 2 แบคทีเรียชนิดแอซิดโคจีนิก (Acidogenic bacteria) หรือแบคทีเรียที่ใช้ย่อยกรด จะทำการย่อยกลูโคส และ/หรือ กรดอะมิโน เป็นคาร์บอนไดออกไซด์ ไฮโดรเจน แอมโมเนีย กรดอะซิติก และกรดอินทรีย์ต่างๆ และ

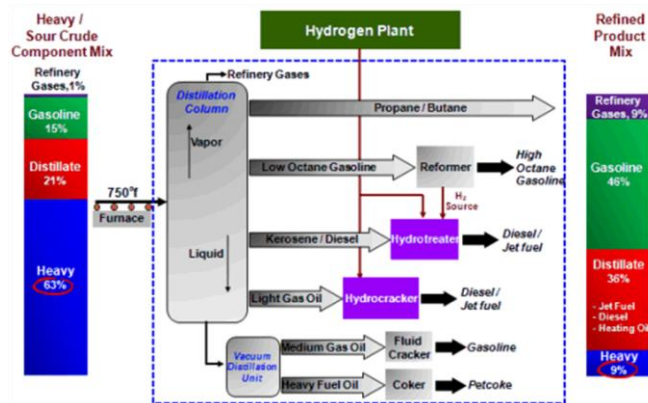
แบคทีเรียชนิดอะซิโทเจนิก (Acetogenic bacteria) จะเปลี่ยนกรดอินทรีย์ต่างๆเหล่านี้ไปเป็นกรดอะซิติก แอมโมเนีย ไฮโดรเจน และคาร์บอนไดออกไซด์ ส่วนขั้นตอนที่ 3 ซึ่งเป็นขั้นตอนสุดท้าย แบคทีเรียชนิดเมทาโนจีน (Methanogens bacteria) จะเปลี่ยนผลิตภัณฑ์ในขั้นตอนที่ 2 ให้กลายเป็นก๊าซมีเทนและคาร์บอนไดออกไซด์ [19] อย่างไรก็ตาม ในกระบวนการผลิตไฮโดรเจนจะสิ้นสุดที่ขั้นตอนที่ 2 เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ต้องการคือไฮโดรเจนได้ถูกผลิตในขั้นตอนนี้ ในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนจากกระบวนการหมักนี้ จะแบ่งออกเป็นสองส่วนที่ไม่ใช้แสง (Dark-fermentation) และส่วนที่ใช้แสง (Photo-fermentation) โดยส่วนแรกจะสามารถผลิตก๊าซไฮโดรเจนได้อย่างต่อเนื่อง เนื่องจากไม่มีความจำเป็นต้องใช้แสง และส่วนหลังเป็นส่วนที่แตกต่างจากส่วนแรกตรงที่ต้องการแสงเป็นส่วนหนึ่งของกระบวนการผลิต [20]

3. การประยุกต์ใช้ไฮโดรเจน

ไฮโดรเจนสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้หลากหลายอุตสาหกรรม เช่น การกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม เซลล์เชื้อเพลิง อาหาร กระบวนการเคมี การผลิตโลหะ การผลิตยา การบิน อิเล็กทรอนิกส์และไฟฟ้า

3.1 การกลั่นน้ำมันปิโตรเลียม

มีความต้องการใช้ไฮโดรเจนจำนวนมากในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมและเคมีภัณฑ์ ซึ่งไฮโดรเจนถูกใช้มากสุดในกระบวนการผลิตน้ำมันเชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์และสารประกอบแอมโมเนีย โดยธรรมชาติของน้ำมันเชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์ มีองค์ประกอบของสารซัลเฟอร์ ซึ่งเป็นสารที่ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศเช่น ฝนกรด ดังนั้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของน้ำมันเชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์ ไฮโดรเจนจึงความดันสูงพร้อมกับตัวเร่งปฏิกิริยา ผลิตภัณฑ์ที่ได้คือ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S) ซึ่งเป็นสารตั้งต้นในการผลิตแก๊สที่ถูกนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นเพื่อกำจัดสารซัลเฟอร์ในน้ำมันเชื้อเพลิงซากดึกดำบรรพ์หรือที่เรียกว่ากระบวนการไฮโดรดีซัลฟิไรเซชัน (Hydrodesulfurization) ภายใต้อุณหภูมิและอื่นๆ อีกมากมาย เช่น ปฏิกิริยากรดซัลไฟเวริก เป็นต้นนอกจากนั้นไฮโดรเจนยังถูกใช้เป็นตัวตั้งต้นในการผลิตผลิตภัณฑ์ต่างๆ ในอุตสาหกรรมโรงกลั่นน้ำมันดิบ เช่น ในกระบวนการไฮโดรดีอัลคิเลชัน (Hydrodealkylation) โดยเปลี่ยนโทลูอีนเป็นเบนซีนและมีเทน เป็นต้น [10] ซึ่งจะเห็นได้ชัดถึงประโยชน์ของไฮโดรเจนในการเปลี่ยนหรือปรับปรุงคุณภาพน้ำมันดิบเพื่อผลิตเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับการขนส่งในอุตสาหกรรมโรงกลั่นน้ำมันดิบ ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 การเปลี่ยนหรือปรับปรุงคุณภาพน้ำมันดิบด้วยไฮโดรเจนเพื่อผลิตเป็นน้ำมันเชื้อเพลิงสำหรับการขนส่งในอุตสาหกรรมโรงกลั่นน้ำมันดิบ [21]

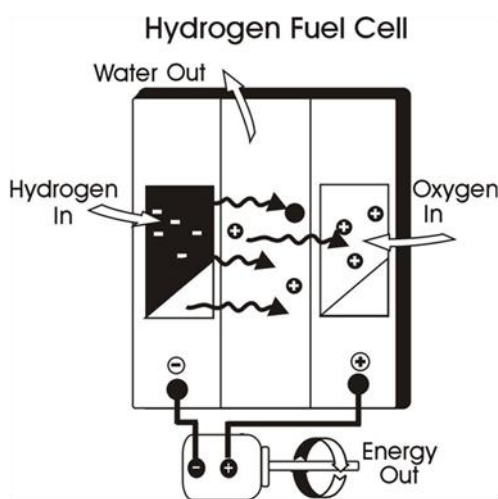
3.2 เซลล์เชื้อเพลิง

ในปัจจุบันไฮโดรเจนไม่ได้ถูกใช้เป็นเพียงสารตั้งต้นในการผลิตสารเคมีต่างๆ เท่านั้น แต่ยังถูกใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตกระแสไฟฟ้าในเซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งภายในเซลล์เชื้อเพลิงประกอบด้วย ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซออกซิเจนที่ถูกป้อนเข้าสู่ช่องแอโนดและแคโทดตามลำดับ ดังรูปที่ 4

จากนั้นจึงเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ภายในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าขึ้น พลังงานไฟฟ้าที่เกิดขึ้นจัดเป็นพลังงานสะอาด เนื่องจากผลิตภัณฑ์ที่ได้จากปฏิกิริยาดังกล่าว คือ น้ำ ดังนั้นไฮโดรเจนจึงจัดเป็นแหล่งพลังงานทางเลือกที่มีศักยภาพสูงเพื่อทดแทนการแหล่งพลังงานปิโตรเลียม [11, 21]

3.3 อาหาร

สำหรับในอุตสาหกรรมอาหาร ไฮโดรเจนถูกใช้เป็นสารเติมแต่ง (Hydrogenating agent) เพื่อเปลี่ยนโครงสร้างของกรดไขมันไม่อิ่มตัวเป็นกรดไขมันอิ่มตัวสำหรับไขมันสัตว์และน้ำมันพืช ดังรูปที่ 2 เพื่อใช้สำหรับการผลิต เนยขาว เนยเทียม และเนยถั่ว เป็นต้น



รูปที่ 4 การผลิตกระแสไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงโดยใช้ไฮโดรเจนเป็นสารตั้งต้น [11, 21]

3.4 กระบวนการทางเคมี

ไฮโดรเจนเป็นสารตั้งต้นในผลิตสารประกอบแอมโมเนีย และเมทานอล เป็นสารเติมแต่งในกรดไขมันเพื่อการผลิตสบู่ ผนววน พลาสติก จีพีซี และสารเคมีอื่นๆ [22, 23] ซึ่งรูปที่ 4 แสดงกระบวนการผลิตสารประกอบแอมโมเนียโดยการทำปฏิกิริยาระหว่างก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซไนโตรเจน

3.5 กรรมวิธีการผลิตโลหะ

นอกเหนือจากการนำไฮโดรเจนไปใช้เป็นสารตั้งต้นมีการใช้งานอย่างกว้างขวางในทางวิศวกรรม ยังถูกใช้เป็นก๊าซป้องกันในการเชื่อม เช่น ในการผลิตสแตนเลส โดยปกติไฮโดรเจนจะถูกผสมกับอาร์กอนสำหรับการเชื่อมสแตนเลสเตน นอกจากนี้ยังใช้เพื่อเป็นตัวสนับสนุนการเชื่อมพลาสมา และกระบวนการตัดโลหะต่างๆ

3.6 เกษษภัณฑ์

ในอุตสาหกรรมเกษตรภัณฑ์ ใช้ไฮโดรเจนเป็นสารตั้งต้นเพื่อผลิต ซอร์บิทอล (Sorbitol) ซึ่งเป็นน้ำตาลแอลกอฮอล์หรือสารให้ความหวานที่ใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตเครื่องสำอาง วัสดุประสาน สารตั้งผิว และ วิตามิน เอ และซี [24]

3.7 การบินและอวกาศ

ไฮโดรเจนเป็นหนึ่งในพลังงานทางเลือกที่น่าสนใจสำหรับอุตสาหกรรมการบินและอวกาศ เนื่องจากคุณสมบัติเฉพาะของก๊าซไฮโดรเจน คือ น้ำหนักเบา และเป็นแหล่งพลังงานสะอาด ซึ่งเซลล์เชื้อเพลิง 2 ชนิดที่เป็นที่นิยมใช้ในอุตสาหกรรมการบินและอวกาศ คือ เซลล์เชื้อเพลิงการแลกเปลี่ยนโปรตอนบนเยื่อหุ้ม (Proton exchange membrane fuel cell, PEMFC) และเซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง (Solid oxide fuel cell, SOFC) ซึ่งไฮโดรเจนจะอยู่ในรูปก๊าซไฮโดรเจน (GH_2) และไฮโดรเจนเหลว (LH_2) ในถึงความดันสูง

4. สรุปผล

ไฮโดรเจนเป็นทางเลือกหนึ่งของพลังงานสะอาดซึ่งมีหลากหลายวิธีการผลิตและวิธีการประยุกต์ใช้ อย่างไรก็ตามการผลิตและการประยุกต์ใช้พลังงานไฮโดรเจนยังอยู่ในระดับค้นคว้าวิจัย เนื่องจากยังมีข้อจำกัดในด้านกรักเก็บ นอกจากนี้การประยุกต์ใช้ในชีวิตประจำวันยังมีขีดจำกัดและกระบวนการผลิตไฮโดรเจนส่วนมากจะให้ก๊าซไฮโดรเจนออกมาในรูปของก๊าซผสม เช่น ก๊าซสังเคราะห์ เป็นต้น ซึ่งก๊าซสังเคราะห์นี้เป็นส่วนผสมระหว่างไฮโดรเจนและคาร์บอนมอนอกไซด์ ดังนั้นเทคโนโลยีด้านการแยกก๊าซจึงเป็นศาสตร์อีกแขนงหนึ่งซึ่งต้องทำการศึกษาวิจัยเพื่อนำผลผลิตที่มาพัฒนาพลังงานไฮโดรเจนในท้ายที่สุด

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Larminie and A. Dicks, "Fuel Cell Systems Explained", Wiley and Sons, 2000.
- [2] Y.S. Seo, A. Shirley and S.T. Kolaczkowski, "Evaluation of thermodynamically favourable operating conditions for production of hydrogen in three different reforming technologies", Power Sources 108, 2000, pp. 213-225.
- [3] A.F. Ghenciu, "Review of fuel processing catalysts for hydrogen production in PEM fuel cell systems", Current Opinion in Solid State and Materials Science 6, 2000, pp. 389-399.
- [4] H.S. Liu, C.J. Song, J.J. Zhang, H.J. Wang and D.P. Wilkinson, "A review of anode catalysis in the direct methanol fuel cell", Power Sources 155, 2006, pp. 95-110.
- [5] E. Antolini, "Catalysts for direct ethanol fuel cell", Power Sources 170, 2007, pp. 1-12.
- [6] W. Hao, W. Xiaodong, L. Maoshuai, L. Shuirong, W. Shengping and M. Xinbin, "Thermodynamic analysis hydrogen production from glycerol autothermal reforming", International Journal of Hydrogen Energy 34, 2009, pp. 5683-5690.
- [7] T.A. Semelsberger and R.L. Borup, "Thermodynamic equilibrium calculations of hydrogen production from the combined processes of dimethyl ether steam reforming and partial oxidation". Power Sources 155, 2006, pp. 340-352.
- [8] G.A. Nahar and S.S. Madhani, "Thermodynamics of hydrogen production by the steam reforming of butanol: Analysis of inorganic gases and light hydrocarbons". International Journal of Hydrogen Energy 35, 2010, pp. 98-109.
- [9] S. Turn, C. Kinoshita, Z. Zhang, D. Ishimura and J. Zhou, "An experimental investigation of hydrogen production from biomass gasification", International Journal of Hydrogen Energy, 23, 1998, pp. 641-648.
- [10] S. Samuel, "Technology and manufacture of ammonia", Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 1981.
- [11] A. Max, "Ammonia: principles and industrial practice", Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 1999.
- [12] F. Bimbela, M. Oliva, L. Garcia and J. Arauzo, "Catalytic steam reforming of model compounds of biomass pyrolysis liquids in fixed bed: acetol and n-butanol", Journal of Analytical and Applied Pyrolysis 85, 2009, pp. 204-213.

- [13] G. Jianjun, L. Hui, Z. Hong, C. Dingfeng and Z. Xiaoming, “Dry reforming of methane over nickel catalysts supported on magnesium aluminate spinels”, *Applied Catalysis A: General* 273, 2004, pp. 75-82.
- [14] D.O. Christensen, P.L. Silveston, E. Croiset, and R.R. Hudgin, “Production of Hydrogen from the Noncatalytic Partial Oxidation of Ethanol”, *Industrial & Engineering Chemistry Research* 43, 2004, pp. 2636–2642
- [15] R. Abdul, “Simulation and optimization of methanol autothermal reformer for fuel cell applications”, *Universiti Teknologi Malaysia, Chemical Engineering Department*, 2006.
- [16] H. Wang, “Thermodynamic analysis of the autothermal reforming of glycerol using supercritical water”, *International Journal of Hydrogen Energy* 36, 2011, pp. 12186-12199.
- [17] C. Wei-Hsin, “Thermodynamic analysis of hydrogen production from methanol via autothermal reforming and partial oxidation followed by water gas shift reaction”, *International Journal of Hydrogen Energy* 35, 2010, pp. 11787-11799.
- [18] A. Hauch, S.D. Ebbesen, S.H. Jensen and M. Mogensen, “Highly Efficient High Temperature Electrolysis” *Journal of Materials Chemistry* 18, 2008, pp. 2331-2340.
- [19] I. Mellan, “Industrial Solvents”, *Environmental Health Criteria*, 1950, pp. 482–88.
- [20] C. Jun, S. Huibo, Z. Junhu, S. Wenlu and C. Kefa, “Hydrogen production by mixed bacteria through dark and photo fermentation, *International Journal of Hydrogen Energy* 36, 2011, pp. 450-457
- [21] J.G. Speight and B. Özüim, “Petroleum Refining Processes”, New York: Marcel Dekker Inc., 2009.
- [22] D. Stolten, “Hydrogen and Fuel Cells: Fundamentals, Technologies and Applications”, Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2010.
- [23] J.S. Smith and Y.H. Hui, “Food processing: principles and applications”. Iowa: Blackwell Publishing Ltd, 2004.
- [24] F. Stuart, “Nucleating Agents”, Shropshire: Lapra Technology Limited, 2006.