

# พลังงานไฮโดรเจน



กรมพัฒนาพลังงานทดแทน  
และอนุรักษ์พลังงาน  
กระทรวงพลังงาน



# สารบัญ

หน้า

<b>1. ไฮโดรเจน</b>	<b>3</b>
<b>2. เทคโนโลยีการผลิตไฮโดรเจน</b>	<b>3</b>
2.1 กระบวนการความร้อนเคมี (Thermo Chemical Process)	3
- กระบวนการรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำ (Steam Reforming Process)	4
- กระบวนการก๊าซซิฟิเคชัน (Gasification Process)	4
2.2 กระบวนการไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Process)	5
2.3 กระบวนการชีวเคมี (Biochemical Process)	6
2.4 การเปรียบเทียบไฮโดรเจนจากกระบวนการต่างๆ	6
<b>3. เทคโนโลยีการจัดเก็บไฮโดรเจน</b>	<b>8</b>
- การจัดเก็บปริมาณมาก	8
- การจัดเก็บไฮโดรเจนแบบติดตั้งอยู่กับที่ในปริมาณปานกลางถึงขนาดเล็ก	8
<b>4. การขนส่งไฮโดรเจน</b>	<b>8</b>
<b>5. แนวทางการประยุกต์ใช้พลังงานไฮโดรเจน</b>	<b>8</b>
<b>6. เทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิง</b>	<b>9</b>
6.1 เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC)	10
6.2 เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)	11
6.3 เซลล์เชื้อเพลิงแบบอัลคาไลน์ (Alkaline Fuel Cell, AFC)	12
6.4 เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมทานอล (Direct Methanol Fuel Cell: DMFC)	13
6.5 เซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริก (Phosphoric Acid Fuel Cells: PAFC)	13
6.6 เซลล์เชื้อเพลิงแบบคาร์บอเนตหลอม (Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC)	14
<b>7. แนวทางการนำไฮโดรเจนไปใช้งานในอนาคต</b>	<b>15</b>

# คำนำ

“พลังงานไฮโดรเจน” เป็นพลังงานทดแทนประเภทหนึ่งที่ได้รับการพัฒนาอย่างจริงจังในหลายประเทศ ทั้งในภาคคมนาคมขนส่ง และภาคการผลิตไฟฟ้า โดยกำหนดพลังงานไฮโดรเจนเป็นเป้าหมายการพัฒนาพลังงานที่สามารถตอบสนองการลดภาวะโลกร้อน และมุ่งพัฒนาการใช้พลังงานสู่สังคมเศรษฐกิจไฮโดรเจน (Hydrogen Economy)

ประเทศไทย จำเป็นต้องเตรียมพร้อมรับการเปลี่ยนการใช้พลังงานบนความสมดุล “พลังงาน กับ ภาวะโลกร้อน” และยังคงคำนึงถึงการลดการนำเข้าพลังงาน พร้อมกับการพึ่งพาเทคโนโลยีในประเทศ เป็นเป้าหมายหลัก จึงต้องเร่งพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานไฮโดรเจนขึ้นในประเทศในเวลาที่เหมาะสมสอดคล้องกับการพัฒนาใช้พลังงานไฮโดรเจน เพื่อลดการนำเข้าเทคโนโลยีและขยายฐานองค์ความรู้พลังงานไฮโดรเจนสู่ประชาชน

กลุ่มพลังงานสะอาดใหม่ สำนักวิจัย คำนวณพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน (พพ.) ได้ตระหนักถึงความจำเป็นดังกล่าว จึงได้รวบรวม เรียบเรียง จัดทำ หนังสือ “พลังงานไฮโดรเจน” ขึ้น เพื่อใช้เผยแพร่ข้อมูลความรู้ให้กับผู้สนใจ โดยมุ่งหวังที่จะขยายความรู้ ความเข้าใจ ในพลังงานไฮโดรเจนและเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้อง หากสามารถนำประโยชน์ที่ได้รับนี้ไปต่อยอดความรู้ให้เกิดการพัฒนาเทคโนโลยีขึ้นในประเทศ จะเป็นการร่วมกันพัฒนาเทคโนโลยีและพัฒนาพลังงานของประเทศไทยได้อย่างแท้จริง

การพัฒนาใช้พลังงานไฮโดรเจนเกี่ยวข้องกับมิติการพัฒนาประเทศหลายด้าน การวางแผนแนวทางการผลิต การจัดเก็บ การขนส่ง และการนำพลังงานไฮโดรเจนไปใช้ประโยชน์ แต่เนื่องจากมีข้อจำกัดด้านงบประมาณในการจัดทำ หนังสือนี้ กลุ่มพลังงานสะอาดใหม่ได้พยายามใช้ช่องทางสื่ออิเล็กทรอนิกส์ในการเผยแพร่ข้อมูล ความรู้ ให้กับประชาชน ผู้สนใจ ที่ [www.dede.go.th](http://www.dede.go.th) ด้วย

กลุ่มพลังงานสะอาดใหม่  
สำนักวิจัย คำนวณพลังงาน

# 1. ไฮโดรเจน

ไฮโดรเจนเป็นธาตุตัวที่หนึ่งในตารางธาตุ ที่มีอะตอมเล็กที่สุด เบาที่สุด มีความหนาแน่น 0.08988 กรัมต่อลิตร ที่ความดันมาตรฐาน และเป็นธาตุที่พบได้มากที่สุดในธรรมชาติ (ร้อยละ 90) และเป็นหนึ่งในธาตุพื้นฐานของสิ่งมีชีวิตทั้งหลาย ในสภาวะปกติไฮโดรเจนจะอยู่ในสถานะก๊าซ ( $H_2$ ) ซึ่งเป็นก๊าซที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่เป็นโลหะและไม่เป็นพิษ ในบรรยากาศของโลกมีก๊าซไฮโดรเจนอยู่เพียงเล็กน้อย (ประมาณร้อยละ 3) แต่ไฮโดรเจนมีอยู่มากในรูปของน้ำ ( $H_2O$ ) และสารอินทรีย์รวมทั้งในแร่ธาตุหลายชนิด ไฮโดรเจนเป็นโมเลกุลที่มีความเสถียรมาก มีความแข็งแรงของพันธะเท่ากับ 436 กิโลจูลต่อโมล (104 กิโลแคลอรีต่อโมล) ไม่วิธีในการทำปฏิกิริยาที่สภาวะปกติ อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้นและมีตัวเร่งปฏิกิริยาจะช่วยให้ไฮโดรเจนสามารถเกิดปฏิกิริยาได้

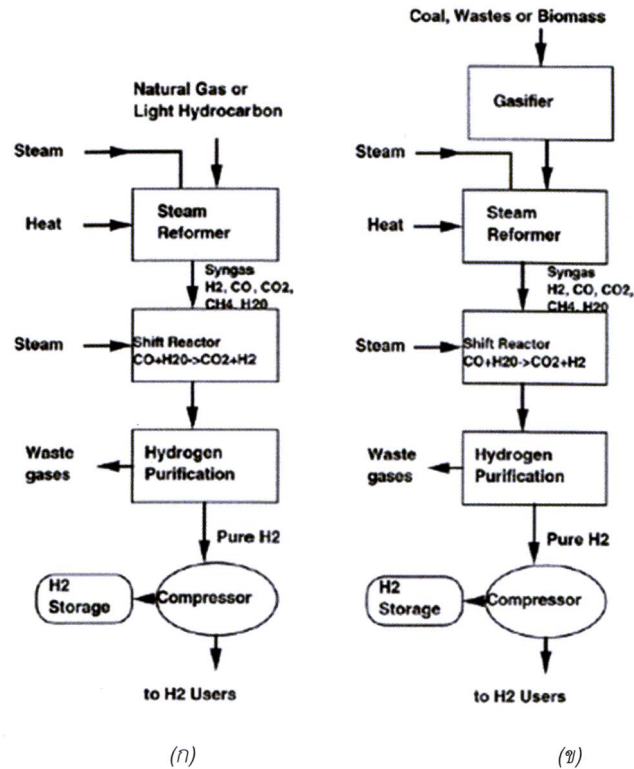
ไฮโดรเจนไม่มีองค์ประกอบของคาร์บอน ดังนั้นเมื่อเผาไหม้จะไม่ทำให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจก การพัฒนาไฮโดรเจนเป็นแหล่งพลังงานสามารถใช้ได้ทั้งในรูปแบบการเผา และใช้ในอุปกรณ์เซลล์เชื้อเพลิงซึ่งเป็นการผลิตไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสูง และไม่ก่อให้เกิดมลภาวะเนื่องจากไม่มีการเผาไหม้ โดยในปัจจุบันได้มีการวิจัยและพัฒนาการใช้เชื้อเพลิงไฮโดรเจนทั้งสองรูปแบบ และเริ่มมีการผลิตในเชิงพาณิชย์ทั้งที่ใช้กับรถยนต์และการผลิตไฟฟ้า ตลอดจนการพัฒนาใช้แทนแบตเตอรี่ในอุปกรณ์เล็กๆ เช่น คอมพิวเตอร์ และกล้องถ่ายภาพ

## 2. เทคโนโลยีการผลิตไฮโดรเจน

ในปี ค.ศ. 2002 มีการผลิตไฮโดรเจนทั่วโลกประมาณ 45 ล้านตัน โดยใช้เชื้อเพลิงฟอสซิลเป็นวัตถุดิบ เทคโนโลยีการผลิตไฮโดรเจนในปัจจุบันมีอยู่หลายวิธี โดยถ้าแบ่งตามลักษณะของกระบวนการแล้วสามารถแบ่งออกเป็น 3 กระบวนการ ได้แก่ กระบวนการความร้อนเคมี (Thermo Chemical Process) กระบวนการไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Process) และ กระบวนการชีวเคมี (Biochemical Process) ในปัจจุบันมีการผลิตไฮโดรเจนขนาดใหญ่เพื่อใช้ในอุตสาหกรรมเคมี เช่น โรงกลั่นน้ำมันและการผลิตแอมโมเนีย โดยส่วนใหญ่ใช้ก๊าซธรรมชาติเป็นวัตถุดิบ ด้วยกระบวนการความร้อนเคมี ประเภทกระบวนการรีฟอร์มมิ่งก๊าซมีเทนด้วยไอน้ำ (Steam Methane Reforming) เทคโนโลยีการผลิตไฮโดรเจนมีหลักการและรายละเอียดดังต่อไปนี้

### 2.1 กระบวนการความร้อนเคมี (Thermo Chemical Process)

ไฮโดรเจนสามารถผลิตโดยวิธีทางเคมีโดยอาศัยความร้อน โดยมีวัตถุดิบที่เป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน เช่น ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน ชีวมวล และสิ่งปฏิกูล โดยใช้เครื่องปฏิกรณ์เคมีอุณหภูมิสูง ผลลัพธ์ที่ได้คือก๊าซสังเคราะห์ ซึ่งมีไฮโดรเจน ( $H_2$ ) คาร์บอนมอนอกไซด์ ( $CO$ ) คาร์บอนไดออกไซด์ ( $CO_2$ ) น้ำ ( $H_2O$ ) และมีเทน ( $CH_4$ ) เป็นองค์ประกอบ จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการทำให้ไฮโดรเจนบริสุทธิ์ กระบวนการความร้อนเคมี สามารถแยกประเภทเป็นกระบวนการย่อยๆ เช่น กระบวนการรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำ (Steam Reforming) กระบวนการก๊าซซิฟิเคชัน (Gasification) เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 รายละเอียดกระบวนการบนเคมีความร้อน

(n) การรีฟอร์มมิ่งก๊าซมีเทนด้วยไอน้ำ

(ข) กระบวนการก๊าซซิฟิเคชัน

## - กระบวนการรีฟอร์มมิ่งด้วยไอน้ำ (Steam Reforming Process)

วิธีนี้เป็นการผลิตไฮโดรเจนจากก๊าซธรรมชาติ ซึ่งเป็นวิธีที่เป็นที่รู้จักกันมานาน และใช้การผลิตเชิงพาณิชย์ หลักการที่ใช้ในการผลิตไฮโดรเจนจากก๊าซธรรมชาติ จะใช้ ไอน้ำ (Steam Reforming) ออกซิเจน (Partial Oxidation) หรือทั้งสองอย่าง (Auto-thermal Reforming) ในรูป (n) ในทางปฏิบัติไฮโดรเจนที่ได้ (ซึ่งจะมีสัดส่วนประมาณ 70-80%) จะมีส่วนผสมของ คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และมีเทน ซึ่งต้องผ่านกระบวนการกำจัดสารประกอบเหล่านี้เพื่อให้ได้ไฮโดรเจนที่บริสุทธิ์พอที่จะนำไปใช้งานได้ด้วยกระบวนการ Water-gas Shift โดยการทำให้คาร์บอนมอนอกไซด์ทำปฏิกิริยากับไอน้ำด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา ซึ่งในขั้นตอนนี้จะได้คาร์บอนไดออกไซด์เพิ่มเข้ามาด้วยโดยส่วนใหญ่คาร์บอนไดออกไซด์ที่ได้จากกระบวนการผลิตไฮโดรเจนด้วยวิธีนี้จะถูกปล่อยออกสู่ชั้นบรรยากาศ อย่างไรก็ตามในปัจจุบันได้มีการดำเนินกระบวนการจับและกักเก็บคาร์บอนไดออกไซด์ที่เรียกว่า Sequestration ยังมีกระบวนการทางเคมีความร้อนอีก 2 วิธี คือ กระบวนการเผาไหม้บางส่วน (Partial Oxidation) และกระบวนการออโตเทอร์มัลรีฟอร์มมิ่ง (Auto-Thermal Reforming) ซึ่งทั้งสองวิธีนี้ได้มีการใช้เชิงพาณิชย์แล้วด้วยเช่นกัน อย่างไรก็ตามก็ยังมี การวิจัยและปรับปรุงประสิทธิภาพให้ดียิ่งขึ้น กระบวนการเผาไหม้บางส่วนเป็นการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของมีเทนโดยตรงขณะที่กระบวนการออโตเทอร์มัลรีฟอร์มมิ่งเป็นการทำงานร่วมกันของกระบวนการรีฟอร์มมิ่งและกระบวนการเผาไหม้บางส่วนโดยมีการทำปฏิกิริยาของมีเทน ออกซิเจน และไอน้ำ

## - กระบวนการก๊าซซิฟิเคชัน (Gasification Process)

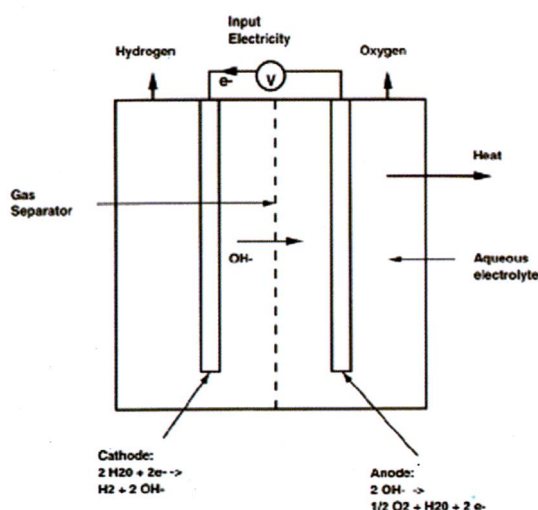
ในกระบวนการเหล่านี้ใช้สารประกอบไฮโดรคาร์บอนรูปของแข็ง เช่น ชีวมวล (ของเหลือจากการเกษตร จากกระบวนการแปรรูปไม้ หรือพืชพลังงาน) ถ่านหิน จะถูกทำให้เป็นไอที่อุณหภูมิสูง โดยจะได้ก๊าซสังเคราะห์ (Syngas)

ออกมาจากนั้นจะมีขั้นตอนใกล้เคียงกับกระบวนการรีฟอร์มมิ่งที่กล่าวมาข้างต้น นั่นคือการสกัดสารเจือปน เพื่อให้ได้ไฮโดรเจนที่บริสุทธิ์ขึ้น ก่อนที่ราคาของก๊าซธรรมชาติจะมีราคาถูกลงในประเทศสหรัฐอเมริกานิยมใช้กระบวนการก๊าซซิฟิเคชันโดยใช้ถ่านหินดังแสดงในรูป (ข) ซึ่งยังเป็นที่ยอมรับอยู่ในประเทศจีนและประเทศในทวีปยุโรป สำหรับกระบวนการก๊าซซิฟิเคชันด้วยชีวมวลนั้นจะเหมือนกับของถ่านหิน หากแต่ใช้อุณหภูมิที่ต่ำกว่าและมีกระบวนการกำจัดสารเจือปนที่แตกต่างกันเนื่องจากไฮโดรเจนที่ได้จากกระบวนการนี้จะปนเปื้อนซัลเฟอร์ สำหรับกระบวนการก๊าซซิฟิเคชันด้วยสิ่งปฏิกูลของแข็งที่ได้จากชุมชนนั้นได้มีการดำเนินการเพื่อใช้ผลิตไฟฟ้าซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการผลิตไฮโดรเจนได้

ยังมีกระบวนการเคมีอีกกระบวนการหนึ่งที่ใช้ในการผลิตไฮโดรเจนที่เรียกว่า วัฏจักรซัลเฟอร์-ไอโอดีน ซึ่งจะใช้ความร้อนในการทำให้เกิดปฏิกิริยากันของสารประกอบซัลเฟอร์และไอโอดีนโดยมีน้ำเป็นสารตั้งต้นหลัก กระบวนการนี้เป็นกระบวนการที่สะอาด หากแต่ยังมีประสิทธิภาพที่ต่ำคือประมาณ 38 เปอร์เซ็นต์ และยังอยู่ในขั้นตอนการวิจัย

## 2.2 กระบวนการไฟฟ้าเคมี (Electrochemical Process)

กระบวนการไฟฟ้าเคมีเป็นกระบวนการที่ใช้ในการผลิตไฮโดรเจนโดยการใช้กระแสไฟฟ้าในการแยกพันธะของน้ำ ออกเป็นไฮโดรเจนและออกซิเจนดังแสดงในรูปที่ 2 ไฟฟ้าที่มาจากแหล่งกำเนิดไฟฟ้าทุกชนิดสามารถใช้ได้ กับกระบวนการนี้ ยกตัวอย่างเช่น ไฟฟ้าจากระบบไฟฟ้าโดยทั่วไปหรือจากพลังงานทดแทน เช่น ลมหรือแสงอาทิตย์ เป็นต้น อุปกรณ์สำคัญที่ใช้ในการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าเรียกว่า อิเล็กโทรไลเซอร์ (Electrolyzer) สำหรับอิเล็กโทรไลเซอร์ที่มีจำหน่ายในปัจจุบันใช้เทคโนโลยีของอัลคาไลน์ รวมถึงการใช้เมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตรอน (Proton Exchange Membrane (PEM)) ซึ่งมีคุณสมบัติในการเริ่มและหยุดการทำงานได้รวดเร็วและสามารถตอบสนองต่ออัตราการผลิตได้ดี นอกจากนี้ยังได้มีการพัฒนาอิเล็กโทรไลเซอร์ที่ใช้อิเล็กโทรไลต์แบบออกไซด์ของแข็งทำงานที่อุณหภูมิ 700-900 องศาเซลเซียส ทำให้มีประสิทธิภาพการผลิตไฮโดรเจนสูงขึ้นเนื่องจากการแยกตัวของน้ำเกิดเนื่องจากความร้อนในระบบทำให้ประสิทธิภาพโดยประมาณของอิเล็กโทรไลเซอร์อยู่ที่ร้อยละ 70-85 อย่างไรก็ตาม ราคาในการผลิตไฮโดรเจนด้วยวิธีนี้จะขึ้นอยู่กับราคาพลังงานไฟฟ้าเป็นสำคัญ วิธีนี้สามารถแข่งขันได้กับ กระบวนการรีฟอร์มมิ่งก๊าซธรรมชาติได้ก็ต่อเมื่อราคาไฟฟ้ามีราคาถูก ในปัจจุบันได้มีการศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้พลังงานไฟฟ้าจากแหล่งพลังงานทดแทนโดยเฉพาะลมและการใช้พลังงานนิวเคลียร์มาใช้ ในกระบวนการแทน พลังงานไฟฟ้าโดยทั่วไป



รูปที่ 2 การผลิตไฮโดรเจนด้วยกระบวนการไฟฟ้าเคมี

## 2.3 กระบวนการชีวเคมี (Biochemical Process)

กระบวนการนี้ เป็นการผลิตไฮโดรเจนโดยอาศัยกระบวนการสังเคราะห์แสงของสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กหรือจุลินทรีย์ และสำหรับสีเขียวแกมน้ำเงิน ซึ่งสิ่งมีชีวิตขนาดเล็กเหล่านี้จะเปลี่ยนสารตั้งต้นให้เป็นไฮโดรเจน นอกจากนี้ยังสามารถใช้ชีวมวลซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์คาร์บอนในการผลิตไฮโดรเจนได้อีกด้วย เช่น ของเหลือทิ้งจากการเกษตรหรือจากโรงงานอุตสาหกรรม วิธีการนี้ถือได้ว่าเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม กล่าวคือใช้พลังงานน้อยกว่าวิธีการอื่น ๆ รวมทั้งยังช่วยลดปริมาณของเสียลงได้ด้วย อย่างไรก็ตามวิธีนี้ยังอยู่ในขั้นตอนวิจัยและพัฒนา แต่ยังมีประสิทธิภาพต่ำความสามารถในการผลิตถูกจำกัดด้วยความเข้มของแสงที่ได้รับต้นทุนของเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพยังมีราคาสูง กระบวนการผลิตไฮโดรเจนด้วยวิธีนี้แบ่งออกได้อีกหลายวิธี เช่น การแตกตัวด้วยแสงโดยตรงและโดยอ้อม การหมักในที่มืดและในที่มืด และการหมักในที่มืดต่อด้วยที่มีแสง เป็นต้น

## 2.4 การเปรียบเทียบไฮโดรเจนจากกระบวนการต่างๆ

การเปรียบเทียบกระบวนการผลิตไฮโดรเจนตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบกระบวนการผลิตไฮโดรเจนแบบต่างๆ โดยพิจารณาในประเด็นประสิทธิภาพสูงสุด ชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ ราคาไฮโดรเจนโดยประมาณต่อกิโลกรัม ขนาดและสถานภาพปัจจุบัน รวมถึงข้อได้เปรียบและข้อจำกัด

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบรายละเอียดกระบวนการผลิตไฮโดรเจนแบบต่างๆ

กระบวนการ	ประสิทธิภาพสูงสุด	วัตถุดิบ	ราคาไฮโดรเจนโดยประมาณต่อกิโลกรัม	ขนาด/สถานภาพปัจจุบัน	ข้อได้เปรียบ	ข้อจำกัด
รีฟอร์มมิ่งมีเทนด้วยไอน้ำ	83%	ก๊าซธรรมชาติ	\$0.75	ขนาดใหญ่/ ใช้ในปัจจุบัน	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เป็นเทคโนโลยีที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลาย</li> <li>- ประสิทธิภาพสูง</li> <li>- มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์</li> <li>- เหมาะสมกับกระบวนการขนาดใหญ่สำหรับระบบการผลิตแบบรวมศูนย์กลาง (Centralized Production)</li> <li>- มีระบบท่อสำหรับก๊าซธรรมชาติรองรับอยู่แล้ว</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มี CO<sub>2</sub> เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้</li> <li>- ข้อจำกัดด้านปริมาณสารของมีเทนในระยะยาว</li> <li>- ไม่เหมาะสมสำหรับกระบวนการขนาดเล็กหรือสำหรับการผลิตแบบกระจาย (Distributed Production)</li> </ul>
ออกซิเดชันบางส่วนของมีเทน	80%	ก๊าซธรรมชาติ	\$0.98 (Coker Off-gas) \$1.39 (Residual Oil)	ขนาดใหญ่/ - ใช้ในปัจจุบันสำหรับสารประกอบไฮโดรคาร์บอนชนิดอื่น - ตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในขั้นตอนการวิจัยขนาดใหญ่/ ใช้ในปัจจุบัน	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เป็นเทคโนโลยีที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลาย</li> <li>- มีความเป็นไปได้ทางเศรษฐศาสตร์</li> <li>- สามารถลดขนาดลงสำหรับระบบการผลิตแบบกระจาย</li> <li>- มีระบบท่อสำหรับก๊าซธรรมชาติรองรับอยู่แล้ว</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มี CO<sub>2</sub> เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้</li> <li>- ข้อจำกัดด้านปริมาณสารของมีเทนในระยะยาว</li> <li>- ต้องคำนึงถึงการผันผวนของราคามีเทน</li> <li>- ประสิทธิภาพต่ำกว่ากระบวนการรีฟอร์มมิ่งมีเทนด้วยไอน้ำ</li> <li>- ตัวเร่งปฏิกิริยาอยู่ในขั้นตอนการวิจัย</li> </ul>
ออโตเทอร์มัลรีฟอร์มมิ่งมีเทน	74%	ก๊าซธรรมชาติ	\$1.93 (สำหรับกระบวนการแบบครบวงจร)		<ul style="list-style-type: none"> <li>- เป็นเทคโนโลยีที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลาย</li> <li>- เครื่องปฏิกรณ์มีราคาถูกและไม่ซับซ้อนเมื่อเทียบกับกระบวนการรีฟอร์มมิ่งมีเทนด้วยไอน้ำ</li> <li>- มีระบบท่อสำหรับก๊าซธรรมชาติรองรับอยู่แล้ว</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มี CO<sub>2</sub> เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้</li> <li>- ข้อจำกัดด้านปริมาณสารของมีเทนในระยะยาว</li> <li>- ต้องคำนึงถึงการผันผวนของราคามีเทน</li> <li>- ประสิทธิภาพต่ำกว่ากระบวนการรีฟอร์มมิ่งมีเทนด้วยไอน้ำ</li> </ul>



## พลังงานไฮโดรเจน

กระบวนการ	ประสิทธิภาพสูงสุด	วัตถุดิบ	ราคาไฮโดรเจนโดยประมาณต่อ กิโลกรัม	ขนาด/สถานภาพปัจจุบัน	ข้อได้เปรียบ	ข้อจำกัด
ก๊าซซิฟิเคชันของถ่านหิน	63%	ถ่านหิน	\$0.92	ขนาดใหญ่/ ใช้อยู่ในปัจจุบัน	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เป็นเทคโนโลยีที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลาย</li> <li>- มีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์</li> <li>- เหมาะสมกับกระบวนการขนาดใหญ่ สำหรับระบบการผลิตแบบรวมศูนย์กลาง (Centralized Production)</li> <li>- มีปริมาณสำรองของถ่านหินมาก</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- มี CO<sub>2</sub> เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้</li> <li>- ข้อจำกัดด้านปริมาณสำรองของมีเทนในระยะยาว</li> <li>- ต้องคำนึงถึงการผันผวนของราคาถ่านหิน</li> <li>- มีองค์ประกอบของไฮโดรเจนน้อยกว่ามีเทน ทำให้มีประสิทธิภาพในการผลิตไฮโดรเจนต่ำกว่า</li> </ul>
ก๊าซซิฟิเคชันของชีวมวล	50% (ยังไม่มีข้อมูลสำหรับกระบวนการขนาดใหญ่)	ชีวมวล	\$1.21-2.42	ขนาดกลาง/ ใช้อยู่ในปัจจุบัน	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เป็นระบบสำหรับพลังงานหมุนเวียน</li> <li>- ไม่ขึ้นกับการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล</li> <li>- ไม่เพิ่ม CO<sub>2</sub> โดยรวมเนื่องจากการนำกลับมาใช้ในวงจรชีวิตของชีวมวล</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ราคาและสัดส่วนผลลัพธ์ที่ได้ผันผวนมากเนื่องจากองค์ประกอบไฮโดรเจนในชีวมวลมีความหลากหลาย</li> <li>- กำลังการผลิตขึ้นกับปริมาณชีวมวลที่มี</li> <li>- ความยุ่งยากในการขนส่งชีวมวล ทำให้ระบบมีข้อจำกัดด้านสถานที่ตั้งและขนาด</li> </ul>
ไพโรไลซิสของชีวมวล	56% (ยังไม่มีข้อมูลสำหรับระบบขนาดใหญ่)	ชีวมวล	\$1.26-2.19	ขนาดกลาง/ ใช้อยู่ในปัจจุบัน	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เป็นระบบสำหรับพลังงานหมุนเวียน</li> <li>- ไม่ขึ้นกับการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล</li> <li>- ไม่เพิ่ม CO<sub>2</sub> โดยรวมเนื่องจากการนำกลับมาใช้ในวงจรชีวิตของชีวมวล</li> <li>- เชื้อเพลิงเหลว bio-oilขนส่งได้สะดวกกว่าชีวมวลที่เป็นของแข็ง</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ราคาและสัดส่วนผลลัพธ์ที่ได้ผันผวนมากเนื่องจากองค์ประกอบไฮโดรเจนในชีวมวลมีความหลากหลาย</li> <li>- กำลังการผลิตขึ้นกับปริมาณชีวมวลที่มี</li> </ul>
การแยกด้วยไฟฟ้าหรือไฟฟ้าเคมี	25% ใช้ไฟฟ้าปกติ 55% ต่อกับระบบความร้อนจากนิวเคลียร์	น้ำ	\$2.56-2.97 (ราคาไฟฟ้า 4 cent/kWh)	ขนาด/สถานภาพปัจจุบัน ขนาดเล็ก/ ใช้อยู่ในปัจจุบัน	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เป็นเทคโนโลยีที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลาย</li> <li>- ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะใดๆ เมื่อใช้กับแหล่งพลังงานหมุนเวียนต่างๆ</li> <li>- เป็นกระบวนการขนาดเล็กเหมาะสำหรับระบบการผลิตแบบกระจาย</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ประสิทธิภาพโดยรวมต่ำ</li> <li>- มีการปลดปล่อย CO<sub>2</sub> ทางอ้อมในกรณีที่ใช้ไฟฟ้าปกติ</li> <li>- ขึ้นกับราคาไฟฟ้า</li> <li>- กำลังการผลิตในปัจจุบันไม่เพียงพอสำหรับระบบการผลิตแบบรวมศูนย์</li> </ul>
วัฏจักร Sulfur-Iodine	52% ที่ 950°C	น้ำ	\$1.87	อยู่ในขั้นการวิจัยและพัฒนา	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ไม่ก่อให้เกิดมลภาวะใดๆ</li> <li>- ไม่ขึ้นกับการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล</li> <li>- สามารถพัฒนาเป็นกระบวนการผลิตแบบรวมศูนย์ได้</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ความยุ่งยากของกระบวนการแยกกับข้อมูลทางทฤษฎีที่ไม่เพียงพอ</li> <li>- ระบบมีภาวะการกักความร้อนสูงทำให้ต้องการการพัฒนาวัสดุใหม่ๆ ที่เหมาะสมและมีคุณภาพ</li> <li>- มีต้นทุนของกระบวนการสูง</li> <li>- ต้องการระบบความปลอดภัยในระดับเดียวกับกับระบบความร้อนนิวเคลียร์</li> </ul>
สังเคราะห์ทางชีวภาพหรือชีวเคมี	24%	สารประกอบชีวภาพ	\$5.52	อยู่ในขั้นการวิจัยและพัฒนา	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เป็นระบบสำหรับพลังงานหมุนเวียน</li> <li>- CO<sub>2</sub> ถูกใช้เป็นแหล่งของคาร์บอนสำหรับแบคทีเรีย</li> <li>- ไม่ขึ้นกับการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ประสิทธิภาพต่ำ</li> <li>- ความสามารถในการผลิตถูกจำกัดด้วยความเข้มของแสงที่ได้รับ</li> <li>- เครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพมีต้นทุนสูง</li> </ul>
การสลายตัวของน้ำด้วยแสงเชิงเร่งปฏิกิริยา	10-14%	น้ำ	\$4.98	อยู่ในขั้นการวิจัยและพัฒนา	<ul style="list-style-type: none"> <li>- เป็นระบบสำหรับพลังงานหมุนเวียน</li> <li>- ไม่ขึ้นกับการใช้เชื้อเพลิงฟอสซิล</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- ความยุ่งยาก และค่าใช้จ่ายที่สูงในการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยา</li> <li>- ประสิทธิภาพต่ำ</li> <li>- อัตราการผลิตต่ำ</li> </ul>

### 3. เทคโนโลยีการจัดเก็บไฮโดรเจน

หากในอนาคตมีการใช้ไฮโดรเจนกันอย่างแพร่หลาย วิธีการจัดเก็บไฮโดรเจนถือได้ว่าเป็นสิ่งที่ท้าทายและมีความจำเป็นอย่างยิ่งเพื่อรองรับการเปลี่ยนแปลงความต้องการใช้ไฮโดรเจนได้ตลอดเวลา เช่นเดียวกับกรณีของก๊าซธรรมชาติและน้ำมันเชื้อเพลิงที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน เทคโนโลยีการจัดเก็บไฮโดรเจนเมื่อพิจารณาจากปริมาณการจัดเก็บสามารถแบ่งออกได้เป็น

- **การจัดเก็บปริมาณมาก :** การจัดเก็บใต้ดิน การจัดเก็บก๊าซไฮโดรเจนในปริมาณมากๆ นั้นสามารถทำได้โดยการเก็บใต้ดินที่ความดันหลายร้อย psi ในบ่อน้ำมันหรือบ่อก๊าซธรรมชาติ ในชั้นหินที่มีความพรุนตัวสูง (Aquifers) ในถ้ำหินหรือเหมือง รวมทั้งในถ้ำเกลือ (Solution-mined salt caverns) การจัดเก็บไฮโดรเจนใต้ดินยังรวมถึงการฝังถังไฮโดรเจนอัดและถังไฮโดรเจนเหลวโดยปกติวางไว้ที่ระดับพื้นดิน ทั้งนี้ทำการฝังดินก็เพื่อประหยัดพื้นที่
- **การจัดเก็บไฮโดรเจนแบบติดตัวอยู่กับที่ในปริมาณปานกลางถึงขนาดเล็ก :** ในปัจจุบันการจัดเก็บปริมาณปานกลางถึงขนาดเล็กแบบอยู่กับที่ในภาคอุตสาหกรรมจะอาศัยการเก็บไฮโดรเจนในรูปของเหลวและก๊าซความดันสูงด้วยถังเก็บ ในกรณีที่พื้นที่ไม่ใช่ข้อจำกัด ถังก๊าซไฮโดรเจนอัดและถังไฮโดรเจนเหลวสามารถติดตั้งในระดับพื้นดินได้ถึงเก็บไฮโดรเจนที่ใหญ่ที่สุดเป็นองค์การนาซา (NASA) ซึ่งตั้งอยู่ที่ Cape Canaveral ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ถังเก็บไฮโดรเจนที่ใหญ่ที่สุดขององค์การนาซา (NASA) ซึ่งตั้งอยู่ที่ Cape Canaveral

### 4. การขนส่งไฮโดรเจน

ในปัจจุบันได้มีการใช้ประโยชน์จากไฮโดรเจนกันอย่างแพร่หลายในวงการอุตสาหกรรมเคมี ยกตัวอย่างเช่น การกลั่นน้ำมัน การผลิตแอมโมเนียและเอทานอล เป็นต้น ถึงแม้ว่าไฮโดรเจนที่สามารถผลิตได้ในปัจจุบันจะอยู่ในบริเวณพื้นที่ที่มีความต้องการใช้ไฮโดรเจนก็ตาม ก็ยังมีสัดส่วนประมาณร้อยละ 5 ของปริมาณการผลิตทั้งหมดจัดส่งให้กับผู้ใช้ในที่ห่างไกล โดยจัดส่งในรูปของไฮโดรเจนเหลวและก๊าซไฮโดรเจนกับรถบรรทุก หรือการส่งโดยท่อส่ง

### 5. แนวทางการประยุกต์ใช้พลังงานไฮโดรเจน

การนำไฮโดรเจนมาประยุกต์ใช้สามารถแบ่งออกได้เป็นหลายรูปแบบ เช่น นำมาใช้เพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า หรือนำมาใช้เป็นแหล่งเชื้อเพลิงในภาคคมนาคมขนส่ง

ในกระบวนการผลิตกระแสไฟฟ้า เทคโนโลยีการผลิตกระแสไฟฟ้าจากไฮโดรเจนเป็นกระบวนการแปรรูปพลังงานจากรูปพลังงานเคมีไปเป็นพลังงานไฟฟ้า ซึ่งโดยทั่วไปมีอยู่ 2 รูปแบบ ได้แก่

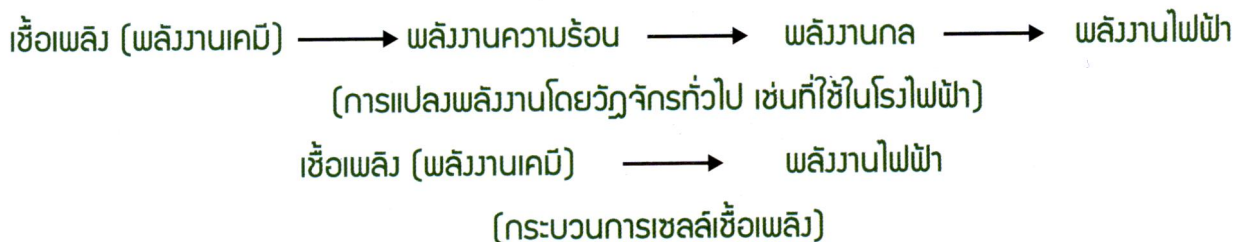
- **การแปรรูปโดยอ้อม** เป็นกระบวนการที่แปรรูปพลังงานเคมีเป็นพลังงานความร้อน ผ่านการเผาไหม้ จากนั้นนำพลังงานความร้อนไปผลิตพลังงานกลเพื่อผลิตเป็นไฟฟ้าต่อไป เช่น Gas Turbine เป็นต้น ปัจจุบันมีความพยายามปรับปรุงประสิทธิภาพให้สูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง

- **การแปรรูปโดยตรง** เป็นกระบวนการแปรรูปพลังงานเคมีเป็นพลังงานไฟฟ้า (โดยไม่ผ่านการเผาไหม้) ได้แก่ เซลล์เชื้อเพลิง ซึ่งปัจจุบันนับว่าเป็นกระบวนการผลิตไฟฟ้า จากไฮโดรเจนที่ได้รับความสนใจอย่างมากเนื่องจากมี ประสิทธิภาพสูงกว่าการแปรรูปโดยอ้อม

ส่วนการนำไฮโดรเจนไปใช้ในภาคคมนาคมขนส่ง ปัจจุบันอาจแบ่งได้เป็น 2 รูปแบบหลัก ได้แก่ การใช้ไฮโดรเจนเป็นเชื้อเพลิงสำหรับเครื่องยนต์สันดาปภายในซึ่งอาจใช้ผสมกับเชื้อเพลิงประเภทอื่น เช่น นำไฮโดรเจนผสมกับก๊าซธรรมชาติ (HCNG) และการใช้ไฮโดรเจนเป็นแหล่งพลังงานผ่านเซลล์เชื้อเพลิงโดยอาศัยกระบวนการไฟฟ้าเคมี เพื่อผลิตไฟฟ้าและใช้ขับเคลื่อนในรถยนต์ซึ่งจะไม่เกิดมลพิษทางอากาศ

## 6. เทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิง

เซลล์เชื้อเพลิงเป็นกระบวนการเปลี่ยนพลังงานเคมีของเซลล์เชื้อเพลิงไปเป็นพลังงานไฟฟ้า โดยกลไกทางเคมีไฟฟ้า กระบวนการแปรรูปพลังงานดังกล่าวแตกต่างจากกระบวนการแปรรูปพลังงานทั่วไปที่ใช้ในปัจจุบันตรงที่กระบวนการที่ใช้ในปัจจุบันส่วนใหญ่ทำการเปลี่ยนพลังงานเคมีไปเป็นพลังงานความร้อนก่อน จากนั้นจึงทำการเปลี่ยนความร้อนไปเป็นพลังงานกลก่อนจะเปลี่ยนพลังงานกลไปเป็นพลังงานไฟฟ้า ขั้นตอนการผลิตพลังงานไฟฟ้าโดยวิธีการดังกล่าวจะ มีการสูญเสียค่อนข้างมาก เนื่องจากมีขั้นตอนในการแปรรูปแบบพลังงานหลายขั้นตอน โดยธรรมชาติการเปลี่ยนแปลง ในทุกขั้นตอนมีการสูญเสียโดยเฉพาะอย่างยิ่งขั้นตอนการเปลี่ยนแปลงจากพลังงานเคมีมาเป็นพลังงานความร้อนมีการ สูญเสียศักยภาพเชิงพลังงานค่อนข้างมาก ดังนั้นกระบวนการดังกล่าว โดยทั่วไปจึงมีประสิทธิภาพต่ำกว่ากระบวนการของ เซลล์เชื้อเพลิง ปัจจุบันกระบวนการผลิตไฟฟ้าจากเครื่องยนต์ความร้อน เมื่อไม่มีการนำความร้อนที่เหลือมาใช้ประโยชน์ ในเชิงความร้อนจะมีประสิทธิภาพเพียงร้อยละ 30 - 35 ในขณะที่ประสิทธิภาพของกระบวนการเซลล์เชื้อเพลิงอยู่ที่ ประมาณร้อยละ 40 - 50 นอกจากนี้กระบวนการผลิตพลังงานเหล่านี้มักใช้เชื้อเพลิงจากปิโตรเลียมเป็นหลัก ซึ่งผลจากการแปรรูปพลังงานเคมีในกระบวนการนี้คือ ความร้อน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์และน้ำ ในขณะที่กระบวนการเซลล์ เชื้อเพลิงสามารถใช้เชื้อเพลิงได้จากหลายแหล่ง และผลที่ได้จากการแปรรูปพลังงานเคมี ในกรณีของเซลล์เชื้อเพลิงคือ ความร้อนและน้ำเท่านั้น ซึ่งหมายความว่ากระบวนการเซลล์เชื้อเพลิงมีความเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากกว่ากระบวนการ ผลิตพลังงานแบบเครื่องยนต์ความร้อน



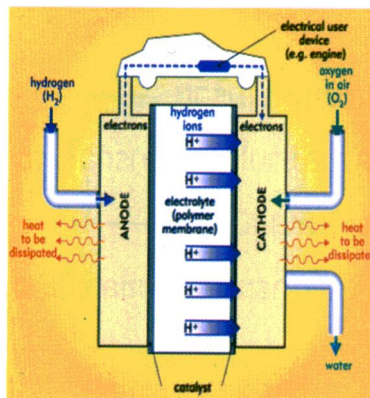
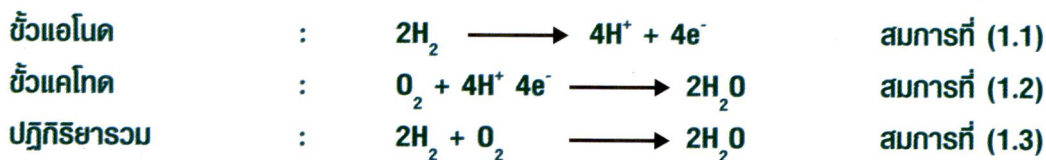
## ชนิดของเซลล์เชื้อเพลิงจำแนกได้ตามลักษณะของสารอิเล็กโทรไลต์ แบ่งออกเป็น 6 ประเภท ดังนี้

### 6.1 เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC)

เซลล์เชื้อเพลิงแบบแผ่นเยื่อแลกเปลี่ยนโปรตอน (Proton Exchange Membrane Fuel Cell, PEMFC) เซลล์เชื้อเพลิงชนิดนี้ใช้เมมเบรนแลกเปลี่ยนไอออนเป็นอิเล็กโทรไลต์วางอยู่ระหว่างขั้วไฟฟ้าแบบพรุนที่มีแพลทินัมเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาทั้งสองขั้ว ในระยะแรกของการพัฒนา เมมเบรนที่ใช้ในกระบวนการทำมาจากพอลิสไตรีน ปัจจุบันเมมเบรนที่ใช้เป็นวัสดุจากผลิตภัณฑ์ประเภทเทฟลอน (Teflon) ที่มีชื่อทางการค้าว่า Nafion เมมเบรนนี้มีเสถียรภาพมาก สามารถละลายออกซิเจนได้ดีและมีค่าความแข็งแรงเชิงกลสูง สภาพการทำงานของกระบวนการอยู่ที่อุณหภูมิต่ำคือประมาณ 80 - 90°C ความดันที่ใช้อู่ระหว่าง 1 - 8 บรรยากาศ เซลล์เชื้อเพลิงไฮโดรเจนและออกซิเจนต้องมีความชื้นที่เหมาะสมความดันทั้งสองด้านของเมมเบรนถูกรักษาให้มีค่าเท่ากัน เซลล์เชื้อเพลิงจะสามารถผลิตกำลังไฟฟ้าได้สูงเมื่อเดินกระบวนการที่ความดันสูง ข้อได้เปรียบของเซลล์เชื้อเพลิงประเภทนี้เหนือเซลล์เชื้อเพลิงประเภทอื่นคือ ไม่มีการรั่วของอิเล็กโทรไลต์ เพราะอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้อยู่ในวัฏภาคของแข็ง เซลล์ทำงานที่อุณหภูมิของภาวะแวดล้อม การเพิ่มจำนวนเซลล์สามารถทำได้ง่ายโดยการต่อเซลล์เข้าแบบอนุกรม ความหนาแน่นของกำลังไฟฟ้าสูงและมีอายุในการใช้งานยาว จุดอ่อนของกระบวนการที่ต้องทำการแก้ไขและปรับปรุงประกอบด้วย การควบคุมปริมาณน้ำในกระบวนการให้มีความเหมาะสมเนื่องจากสภาพการนำไฟฟ้าของเมมเบรนจะลดลงถ้าความชื้นไม่เหมาะสม ก๊าซคาร์บอนมอนอกไซด์ที่ปนเปื้อนในก๊าซเชื้อเพลิงจะทำให้ตัวเร่งปฏิกิริยาแพลทินัมเสื่อมสภาพ และราคาของเมมเบรนยังแพงมาก

#### หลักการทํางาน

ปฏิกิริยาหลักที่เกิดขึ้นภายในเซลล์เชื้อเพลิงเมื่อมีการป้อนก๊าซเชื้อเพลิงเข้าไปสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (1.1) - (1.3) ก๊าซเชื้อเพลิงได้แก่  $H_2$  จะถูกป้อนเข้าที่ขั้วแอโนดซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วลบ เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ผลิตภัณฑ์เป็น  $H^+$  และอิเล็กตรอน โปรตอนที่เกิดขึ้นจะถูกส่งผ่านไปขั้วแคโทดโดยส่งผ่านทางเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน ส่วนอิเล็กตรอนจะวิ่งผ่านเครื่องใช้ไฟฟ้าภายนอกมาที่ขั้วแคโทด ที่ขั้วแคโทดจะมีการป้อนก๊าซเชื้อเพลิงซึ่งได้แก่ ออกซิเจนบริสุทธิ์หรืออากาศ เข้าไปเกิดปฏิกิริยารีดักชันร่วมกับโปรตอนและอิเล็กตรอนที่มาจากขั้วแอโนดได้ผลิตภัณฑ์เป็นน้ำ



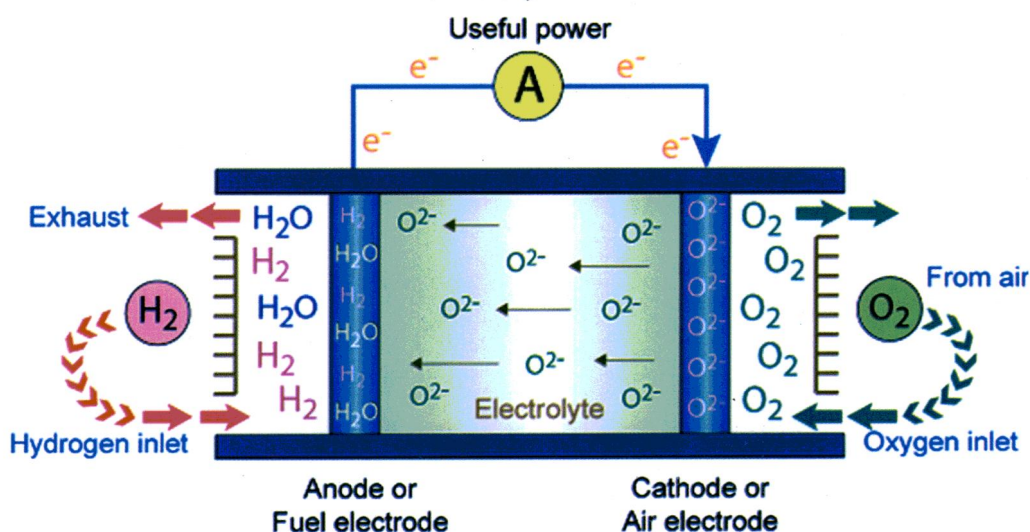
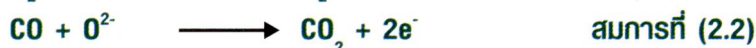
รูปที่ 4 การทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงชนิดเมมเบรนแลกเปลี่ยนโปรตอน

## 6.2 เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)

เซลล์เชื้อเพลิงแบบออกไซด์แข็ง (Solid Oxide Fuel Cell, SOFC) เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่พัฒนาบนสภาวะ Solid-state โดยใช้ Yttria-Stabilized Zirconia (YSZ) เป็นอิเล็กโทรไลต์ สภาวะการทำงานคือที่อุณหภูมิ 1,000°C ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นทางขั้วแอโนดคือ  $2H_2 + 2O^{2-} \rightarrow 2H_2O + 4e^-$  และปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นทางขั้วแคโทดคือ  $O_2 + 4e^- \rightarrow 2O^{2-}$  โดยออกซิเจนไอออนเดินทางจากขั้วแคโทดมายังขั้วแอโนดและได้ผลผลิตเป็นน้ำ กระบวนการนี้สามารถผลิตได้ทั้งกระแสไฟฟ้าและความร้อนเหลือใช้คุณภาพสูงได้และสามารถใช้ร่วมกับกระบวนการผลิตไฟฟ้าร่วม (Cogeneration) ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานไฟฟ้าสูงกว่าร้อยละ 50 เทคโนโลยีนี้ยังอยู่ระหว่างการพัฒนาโดยมีเป้าหมายในการนำไปใช้งานด้านโรงงานผลิตไฟฟ้าและการใช้งานในภาคอุตสาหกรรม

### หลักการก้าวม

หลักการทำงานจะเหมือนกับเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ คือ ปฏิกิริยาโดยรวมจะเป็นปฏิกิริยาการเผาไหม้ของเชื้อเพลิง (ไฮโดรเจน) และออกซิเจนหรืออากาศ ซึ่งจะแยกออกเป็น 2 ปฏิกิริยาย่อยได้แก่ ปฏิกิริยาออกซิเดชัน (oxidation) และ ปฏิกิริยารีดักชัน (reduction) ซึ่งจะเกิดขึ้นแยกกันที่แต่ละขั้วของเซลล์ทำให้เกิดการไหลของไอออนและอิเล็กตรอน ซึ่งสิ่งนี้แตกต่างจากเซลล์เชื้อเพลิงชนิดอื่นคือ ชนิดของอิเล็กโทรไลต์ที่เป็นของแข็ง และไอออนเป็นออกซิเจนไอออน ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นในแต่ละขั้วคือ



รูปที่ 5 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิง (Stambouli, 2002)

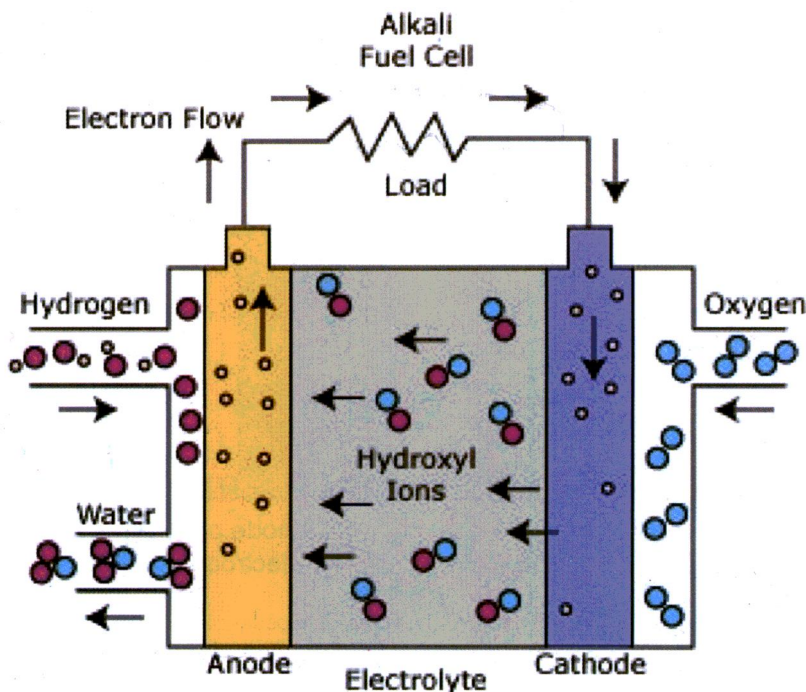
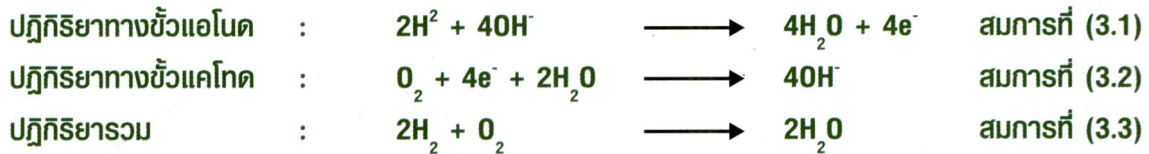
เซลล์ไฟฟ้าแบบออกไซด์แข็งโดยปกติจะทำงานในช่วงอุณหภูมิ 600 - 1000°C ขึ้นอยู่กับวัสดุประสงค์ของการนำไปใช้งาน

### 6.3 เซลล์เชื้อเพลิงแบบอัลคาไลน์ (Alkaline Fuel Cell, AFC)

เซลล์เชื้อเพลิงแบบอัลคาไลน์ (Alkaline Fuel Cell, AFC) เป็นเซลล์เชื้อเพลิงที่เก่าแก่ที่สุด มีการสาธิตครั้งแรกเมื่อปี ค.ศ.1902 แต่ผลจากการสาธิตไม่เป็นที่น่าพอใจ การพัฒนาดำเนินต่อมาจนกระทั่งช่วงทศวรรษ 1940 และ 1950 ที่ผลการพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงประเภทนี้เริ่มแสดงถึงศักยภาพที่เป็นรูปธรรม และเซลล์เชื้อเพลิงประเภทนี้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในโครงการอวกาศของสหรัฐอเมริกา กระบวนการดังกล่าวใช้โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์เป็นอิเล็กโทรไลต์และไฮดรอกซิลเป็นไอออนนำไฟฟ้า ดำเนินการที่อุณหภูมิ 60 - 80°C ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นทางขั้วแอโนดคือ  $2H_2 + 4OH^- \rightarrow 4H_2O + 4e^-$  และปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นทางขั้วแคโทดคือ  $O_2 + 4e^- + 2H_2O \rightarrow 4OH^-$  ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานไฟฟ้าประมาณร้อยละ 40 เซลล์เชื้อเพลิงประเภทนี้เหมาะสำหรับใช้เป็นหน่วยผลิตไฟฟ้าหน่วยเล็ก ๆ

#### หลักการทํางาน

หลักการทํางานของ Alkaline Fuel Cell จะเห็นว่า AFC ใช้สารละลายโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ที่บรรจุในเมตริกเสถียรที่มีความพรุน ความเข้มข้นของสารละลายโปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของ AFC ขณะทํางานซึ่งมักอยู่ในช่วง 65 องศาเซลเซียส ถึง 220 องศาเซลเซียส โดยพบว่า ไฮดรอกซิลไอออนจะเคลื่อนที่จากแคโทดสู่อโนด ดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งจะทำปฏิกิริยากับไฮโดรเจนได้น้ำและอิเล็กตรอน น้ำที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนดจะเคลื่อนที่กลับสู่ขั้วแคโทดเพื่อผลิตไฮดรอกซิลไอออนต่อไป จะเห็นได้ว่ามีเพียงกระแสไฟฟ้าและความร้อนเท่านั้นที่ถูกผลิตขึ้น ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นแสดงได้ดังนี้



รูปที่ 6 หลักการทํางานของ Alkaline Fuel Cell

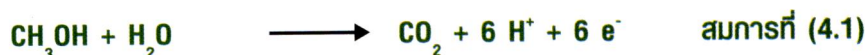
## 6.4 เซลล์เชื้อเพลิงแบบเมทานอล (Direct Methanol Fuel Cell: DMFC)

DMFC มีหลักการทำงานคล้ายคลึงกับ PEMFC นั่นคือ ใช้เยื่อเลือกผ่านโปรตอน (proton-exchange membrane) เป็นพอลิเมอร์อิเล็กโทรไลต์ และมีไฮโดรเจนไอออน หรือ โปรตอน เป็นตัวนำประจุ (charge carrier) แต่สิ่งที่แตกต่างกันอย่างชัดเจนคือ เชื้อเพลิงที่ใช้ DMFC จะใช้สารละลายของเมทานอลในน้ำซึ่งเป็นของเหลว ในขณะที่เชื้อเพลิงของ PEMFC คือ ก๊าซไฮโดรเจน

### หลักการทํางาน

สารละลายเมทานอลจะถูกส่งจากแหล่งเก็บมายังขั้วแอโนด ซึ่งที่ผิวของขั้วแอโนดนี้จะเคลือบด้วยโลหะแพลทินัม เมทานอลจะถูกออกซิไดซ์บนแพลทินัม เกิดเป็นก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โปรตอนและอิเล็กตรอน ก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ จะถูกกำจัดออกไปจากเซลล์ ส่วนอิเล็กตรอนที่ได้คือกระแสไฟฟ้า จะวิ่งผ่านวงจรภายนอกซึ่งต่อเข้ากับอุปกรณ์ไฟฟ้าหรือ อิเล็กทรอนิกส์ ในขณะที่โปรตอนจะแพร่ผ่านเยื่อเลือกผ่านไปยังขั้วแคโทดซึ่งสัมผัสกับอากาศอยู่ ออกซิเจนจากอากาศจะทำปฏิกิริยากับโปรตอนและอิเล็กตรอนที่ไหลกลับจากวงจรภายนอก เกิดเป็นน้ำที่ขั้วแคโทดนี้ ปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนด และขั้วแคโทด สามารถเขียนแทนด้วยสมการเคมีดังนี้

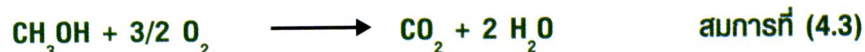
#### ปฏิกิริยาทางขั้วแอโนด



#### ปฏิกิริยาทางขั้วแคโทด



#### ปฏิกิริยารวม



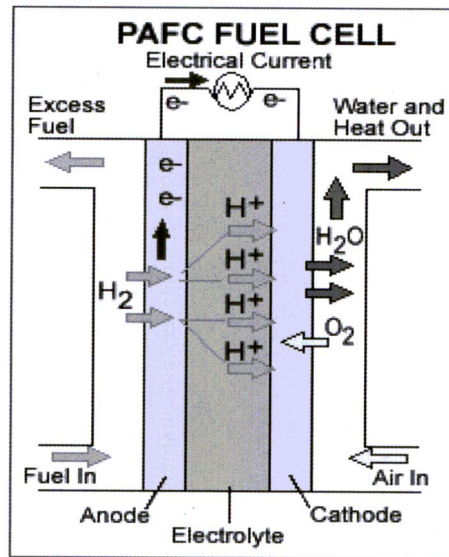
## 6.5 เซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริก (Phosphoric Acid Fuel Cells: PAFC)

เซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริก เป็นเซลล์เชื้อเพลิงรุ่นแรกซึ่งมีการวิจัยและพัฒนามายาวนานกว่าเซลล์เชื้อเพลิงแบบอื่นๆ ปัจจุบันมีการพัฒนาใช้แล้วทางการค้า โดยใช้เป็นสถานีจ่ายไฟฟ้าขนาดเล็กในแหล่งชุมชน ห้างสรรพสินค้า โรงพยาบาล ให้กำลังไฟฟ้าในช่วง 5 - 20 MW นอกจากได้กระแสไฟฟ้าแล้ว เซลล์ยังสามารถให้ความร้อนและน้ำร้อน ในขณะเดียวกัน ความร้อนที่เหลือจากกระบวนการสามารถนำมาใช้ในกระบวนการผลิตไฟฟ้าร่วมได้ (Cogeneration) ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานไฟฟ้าอยู่ระหว่างร้อยละ 35 - 45 เซลล์เชื้อเพลิงประเภทนี้เป็นระบบที่ก้าวหน้าที่สุดสำหรับการใช้งานในอาคารที่อยู่อาศัย

สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ คือ กรดฟอสฟอริกเข้มข้น Phosphoric acid ซึ่งมีความเสถียรทางความร้อน เคมี และไฟฟ้าเคมีสูง ทนต่อก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ โดยกรดฟอสฟอริกจะบรรจุอยู่ในรูพรุนของโครงร่างของอนุภาคซิลิกอน คาร์ไบด์ความหนาประมาณ 1 ไมครอนที่ยึดติดด้วยสาร PTFE (เทฟลอน) เพื่อป้องกันการซึมผ่านของสารตั้งต้นปฏิกิริยา

### หลักการทํางาน

หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงประเภทนี้ จะทำงานที่อุณหภูมิอยู่ในช่วง 150 ถึง 200 องศาเซลเซียส ที่สภาวะนี้สารละลายอิเล็กโทรไลต์จะมีความเสถียรปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นเป็นปฏิกิริยาเดียวกันกับเซลล์เชื้อเพลิงแบบเมมเบรน แลกเปลี่ยนโปรตอน กล่าวคือ ปฏิกิริยาออกซิเดชันของก๊าซไฮโดรเจนเกิดที่บริเวณขั้วแอโนด และปฏิกิริยารีดักชันของ ก๊าซออกซิเจนเกิดที่บริเวณขั้วแคโทด ได้ผลิตภัณฑ์รวมเป็นน้ำ



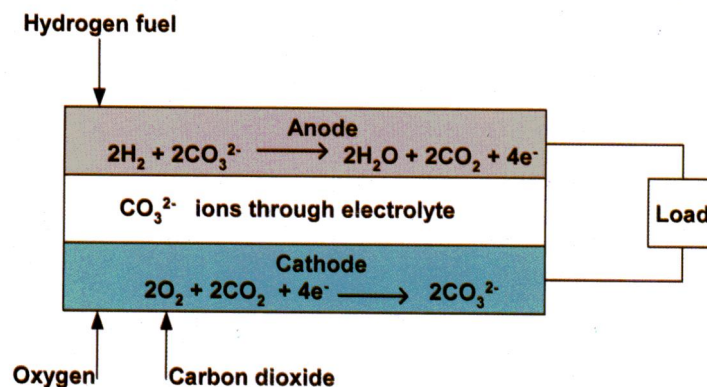
รูปที่ 7 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบกรดฟอสฟอริก

## 6.6 เซลล์เชื้อเพลิงแบบคาร์บอเนตหลอม (Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC)

เซลล์เชื้อเพลิงแบบคาร์บอเนตหลอม (Molten Carbonate Fuel Cell, MCFC) เป็นกระบวนการที่ใช้ของผสมของอัลคาไลน์คาร์บอเนตหลอมเป็นอิเล็กโทรไลต์ อาทิเช่น ลิเทียมและโปแตสเซียม หรือลิเทียมและโซเดียมคาร์บอเนต พัฒนาขึ้นเพื่อใช้สำหรับกระบวนการผลิตไฟฟ้าขนาดใหญ่ สภาวะการทำงานที่อุณหภูมิสูง (อุณหภูมิสูงกว่า  $450^{\circ}\text{C}$ ) ปกติทำงานที่อุณหภูมิ  $650^{\circ}\text{C}$  ที่อุณหภูมิดังกล่าวอัลคาไลน์คาร์บอเนตจะหลอมและมีความสามารถในการนำไฟฟ้าได้ดีโดยมีคาร์บอเนตไอออน ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) เป็นตัวเคลื่อนผ่านอิเล็กโทรไลต์ ความร้อนที่เหลือสามารถนำมาใช้กับกระบวนการสังเคราะห์เชื้อเพลิงและใช้ในกระบวนการผลิตไฟฟ้าร่วม ประสิทธิภาพในการแปลงพลังงานไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 50 - 70% เทคโนโลยีนี้อยู่ระหว่างการพัฒนา ลักษณะการนำไปใช้งานคือโรงงานผลิตไฟฟ้า

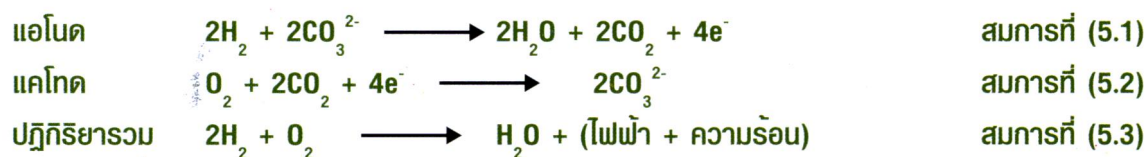
### หลักการทำงาน

การทำงานขั้นพื้นฐานของ MCFC ประกอบไปด้วยปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่เกิดขึ้นที่ขั้วแอโนดและแคโทด ซึ่งคาร์บอเนตไอออน ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) เป็นตัวนำไฟฟ้าในอิเล็กโทรไลต์ ระหว่างแอโนดและแคโทด ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 หลักการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงแบบคาร์บอเนตหลอมเหลว





## ตารางสรุปเปรียบเทียบการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงประเภทต่างๆ

ประเภทเซลล์เชื้อเพลิง	ไอออนเคลื่อนที่	อิเล็กโทรไลต์	Sensitivities to Hydrogen purity	อุณหภูมิที่ใช้งาน	การนำไปใช้ประโยชน์
PAFC	H <sup>+</sup>	Liquid phosphoric acid soaked in a matrix	Sensitivity to CO	≈ 220°C	หน่วยผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วมขนาด 200 kW
MCFC	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	Liquid solution of lithium, sodium and/or potassium carbonates, soaked in a matrix	Low sensitivity to CO, Hydrogen/ carbon monoxide mixtures can be used. CO <sub>2</sub> is required	≈ 650°C	กระบวนการผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วมขนาดกลางถึงขนาดใหญ่ - หลาย MW
SOFC	O <sup>2-</sup>	Solid zirconium oxide to which a small amount of yttria is added	Low sensitivity to CO, Hydrogen/ carbon dioxide/methane mixtures can be used	500 - 1,000°C	กระบวนการผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วมทุกขนาดตั้งแต่ 2 kW - หลาย MW
AFC	OH <sup>-</sup>	Aqueous solution of potassium hydroxide soaked in a matrix	High sensitivity to carbondioxide	50 - 200°C	ยานอวกาศและกระสวยอวกาศ
PEMFC	H <sup>+</sup>	Solid organic polymer polyperfluorosulfonic acid	High sensitivity to impurities, must have < 10 ppm CO	50 - 100°C	ยานพาหนะหรืออุปกรณ์ที่เคลื่อนที่ได้ และกระบวนการผลิตไฟฟ้าและความร้อนร่วมแบบกำลังต่ำ
DMFC	H <sup>+</sup>	Proton exchange membrane	-	50 - 120°C	อุปกรณ์ไฟฟ้า หรืออุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ขนาดเล็กและขนาดกลาง

## 7. แนวทางการนำไฮโดรเจนไปใช้งานในอนาคต

การนำไฮโดรเจนจากแหล่งผลิตไปสู่ผู้ใช้จำเป็นต้องผ่านหลายขบวนการ ตั้งแต่การผลิต การจัดเก็บ การจัดส่ง และการจัดจำหน่าย จากข้อมูลที่ได้นำเสนอไปแล้วก่อนหน้านี้ จะเห็นได้ว่าในแต่ละขั้นตอนนั้นมีวิธีการให้เลือกด้วยกันหลายวิธี การเลือกเส้นทางที่เหมาะสมยอมทำให้การใช้ประโยชน์จากไฮโดรเจนได้ประสิทธิภาพเต็มที่แนวทางการนำไฮโดรเจนไปใช้งานที่ได้ศึกษาไว้มี 2 แบบด้วยกัน ตามลักษณะการผลิตไฮโดรเจน นั่นคือ แบบที่ 1 แนวทางการนำไฮโดรเจนไปใช้งานในกรณีที่เป็นการผลิตแบบรวมศูนย์ และแบบที่ 2 แนวทางการนำไฮโดรเจนไปใช้งานในกรณีที่เป็นการผลิตแบบกระจาย โดยยึดหลักที่ว่า การผลิตแบบกระจายนั้นจะไม่มีขั้นตอนการขนส่งเข้ามาเกี่ยวข้อง

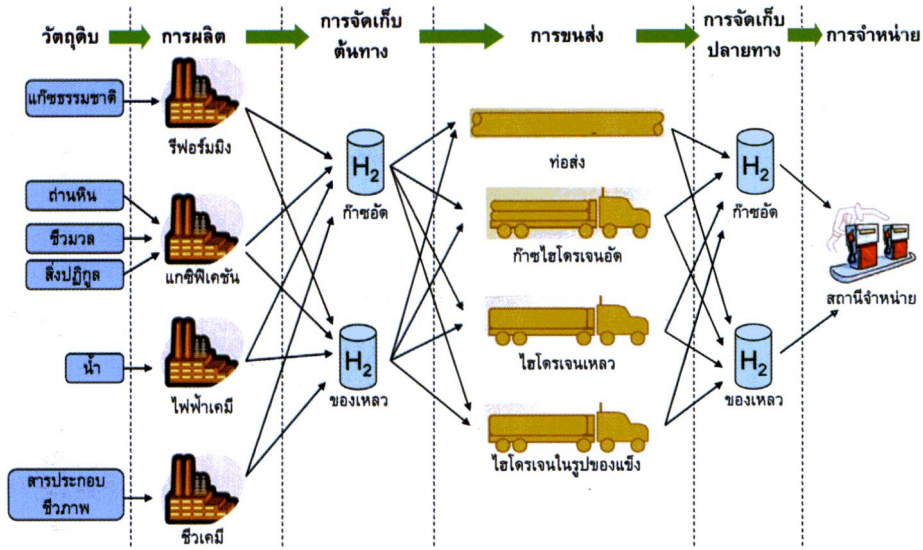
### 1. แนวทางการนำไฮโดรเจนไปใช้งานในกรณีที่เป็นการผลิตแบบรวมศูนย์

#### มีองค์ประกอบ 5 ขั้นตอนดังนี้

1. การผลิต ซึ่งประกอบด้วย 4 วิธีการคือ รีฟอร์มมิ่ง ก๊าซซิฟเคชัน ไฟฟ้าเคมี ชีวเคมี
2. การจัดเก็บต้นทาง ซึ่งประกอบด้วย 2 วิธีการคือ การจัดเก็บแบบก๊าซอัด การจัดเก็บในรูปของเหลว
3. การขนส่ง ซึ่งประกอบด้วย 3 วิธีการคือ ส่งผ่านท่อส่ง ส่งด้วยยานพาหนะในรูปก๊าซอัด ส่งด้วยยานพาหนะในรูปของเหลว ส่งด้วยยานพาหนะในรูปของแข็ง (เมทัลไฮไดรด์)

พลังงานไฮโดรเจน

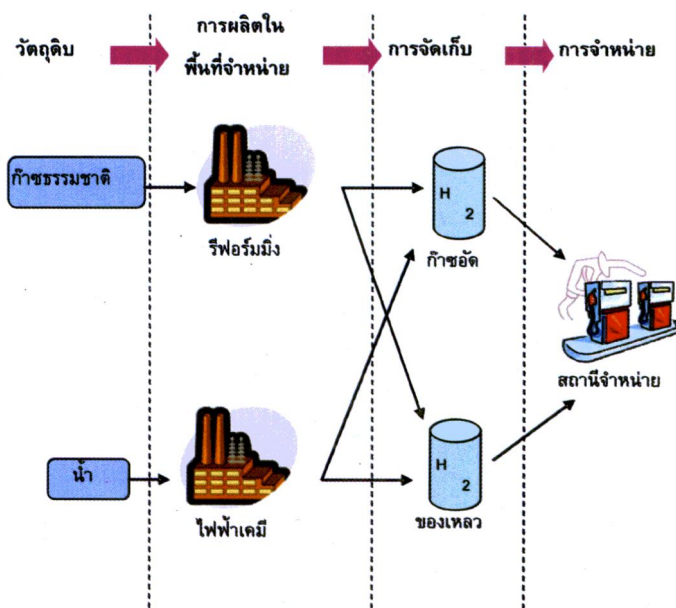
4. การจัดเก็บปลายทาง ซึ่งประกอบด้วย 2 วิธีก็คือ การจัดเก็บแบบก๊าซอัด การจัดเก็บในรูปของเหลว
5. การจัดจำหน่ายโดยมีวัตถุดิบด้วยกัน 6 ชนิดคือ ก๊าซธรรมชาติ ถ่านหิน ชีวมวล ลิงปฎิภูด น้ำ และสารประกอบชีวภาพ



รูปที่ 9 แนวทางการนำไฮโดรเจนไปใช้งานในกรณีที่เป็นการผลิตแบบรวมศูนย์

## 2. แนวทางการนำไฮโดรเจนไปใช้งานในกรณีที่เป็นการผลิตแบบกระจาย มีองค์ประกอบ 3 ขั้นตอนดังนี้

1. การผลิตในพื้นที่จำหน่าย ซึ่งประกอบด้วย 2 วิธีก็คือ รีฟอร์มมิง ไฟฟ้าเคมี
2. การจัดเก็บ ซึ่งประกอบด้วย 2 วิธีก็คือ การจัดเก็บแบบก๊าซอัด การจัดเก็บในรูปของเหลว
3. การจัดจำหน่าย โดยมีวัตถุดิบด้วยกันทั้งสิ้น 2 ชนิดคือ ก๊าซธรรมชาติ และน้ำ



รูปที่ 10 แนวทางการนำไฮโดรเจนไปใช้งานในกรณีที่เป็นการผลิตแบบกระจาย



สายตรงพลังงาน

บริการฉับไว ไขปัญหาตรงจุด

ศูนย์บริการวิชาการด้านพลังงานทดแทน

โทร. 0 2223 0021 ถึง 9 ต่อ 1656, 1657

17 เชียงสะพานกษัตริย์ศึก ถนนพระราม 1

เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

<http://www.dede.go.th>



กรมพัฒนาพลังงานทดแทน  
และอนุรักษ์พลังงาน  
กระทรวงพลังงาน