



คู่มือ

ระบบผลิตไฮโดรเจนจากน้ำในรถยนต์ ที่มีประสิทธิภาพและความปลอดภัย

ภายใต้โครงการพัฒนาคู่มีระบบผลิตไฮโดรเจนจากน้ำในรถยนต์
ที่มีประสิทธิภาพและความปลอดภัย

คู่มือระบบผลิตไฮโดรเจนจากน้ำในรถยนต์ที่มีประสิทธิภาพและความปลอดภัย

ภายใต้โครงการพัฒนาคู่มือระบบผลิตไฮโดรเจนจากน้ำในรถยนต์ที่มีประสิทธิภาพและความปลอดภัย

จัดทำโดย : กลุ่มพลังงานสะอาดใหม่ สำนักวิจัย คำนวณพลังงาน
กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน
อาคาร 7 ชั้น 7 เซิงสะพานกษัตริย์ศึก กรุงเทพฯ 10330
โทรศัพท์ 02-2230021-9 ต่อ 1350 โทรสาร 02-2253524

การผลิตและการลอกเลียนคู่มือเล่มนี้ไม่ว่ารูปแบบใดทั้งสิ้นต้องได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากสำนักวิจัย
คำนวณพลังงาน

พิมพ์เมื่อ : ธันวาคม พ.ศ. 2554 จำนวน xx เล่ม

คำนำ

คู่มือระบบผลิตไฮโดรเจนจากน้ำในรถยนต์ที่มีประสิทธิภาพและความปลอดภัยจัดทำขึ้นภายใต้โครงการพัฒนาคู่มือระบบผลิตไฮโดรเจนจากน้ำในรถยนต์ที่มีประสิทธิภาพและความปลอดภัย ของสำนักวิจัยและค้นคว้าพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน โดยมีวัตถุประสงค์ เพื่อเผยแพร่องค์ความรู้เกี่ยวกับการผลิตไฮโดรเจนจากน้ำด้วยวิธีการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าหรือ “อิเล็กโทรไลซิส” ให้แก่ผู้ที่เกี่ยวข้องและผู้สนใจ เนื่องจากพบว่าในปัจจุบันได้มีผู้ผลิตจำนวนหนึ่งได้นำเทคนิคการผลิตไฮโดรเจนจากน้ำมาใช้ติดตั้งในรถยนต์โดยใช้แหล่งพลังงานจากแบตเตอรี่ที่ติดตั้งอยู่แล้วมาใช้ในการแยกน้ำได้ไฮโดรเจนและออกซิเจนออกมาและนำก๊าซที่เกิดขึ้นทั้ง 2 ชนิดไปใช้ผสมกับเชื้อเพลิงหลักในเครื่องยนต์เผาไหม้ภายในเช่นเครื่องยนต์เบนซินและเครื่องยนต์ดีเซลดัดแปลงที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบัน

การนำไฮโดรเจนมาใช้เป็นเชื้อเพลิงผสมสำหรับเครื่องยนต์สันดาปภายในมี 2 แนวทางขึ้นอยู่กับลักษณะของวิธีการผลิตไฮโดรเจน กล่าวคือการผลิตไฮโดรเจนจากแหล่งอื่นแล้วบรรจุใส่ถังนำมาติดตั้งบนรถยนต์ วิธีนี้ได้มีการวิจัยและทดสอบโดยเฉพาะในต่างประเทศแต่ยังไม่ได้มีการใช้ในเชิงพาณิชย์สำหรับประเทศไทยก็เช่นเดียวกันยังอยู่ในขั้นตอนการวิจัยโดยใช้เผาไหม้ร่วมกับก๊าซเอ็นจีวีกับอีกวิธีหนึ่งคือการติดตั้งอุปกรณ์อิเล็กโทรไลเซอร์บนรถยนต์ โดยใช้ไฟฟ้าจากแบตเตอรี่มาแยกน้ำด้วยไฟฟ้าแล้วป้อนเข้าไปยังห้องเผาไหม้โดยตรงผสมกับเชื้อเพลิงหลักและไม่มีการจัดเก็บไฮโดรเจนที่ผลิตขึ้น

อย่างไรก็ตามวิธีการติดตั้งอุปกรณ์อิเล็กโทรไลเซอร์บนรถยนต์โดยใช้พลังงานจากแบตเตอรี่นั้นยังมีประเด็นที่ยังไม่เกิดความชัดเจนในเรื่องผลประหยัดและการลดลงของมลพิษ ดังนั้นการจัดทำคู่มือฉบับนี้จึงเป็นการให้ความรู้ของระบบการผลิตไฮโดรเจนและแนวทางการพิจารณาประสิทธิภาพของระบบนี้เท่านั้น ส่วนการประยุกต์ใช้นั้น**ยังไม่มีรับรองผลประหยัด**ที่ได้จากการติดตั้งอุปกรณ์ ดังนั้นผู้สนใจที่จะใช้อุปกรณ์อิเล็กโทรไลเซอร์ติดตั้งบนรถยนต์จำเป็นต้องศึกษาข้อมูลของผู้ผลิตให้ละเอียดก่อน

คณะผู้จัดทำ

สารบัญ

หน้า

คำนำ

วัตถุประสงค์ กลุ่มเป้าหมาย และการใช้งานของคู่มือ.....	4
1. ความหมายของคำที่ใช้ในคู่มือที่สำคัญ.....	5
2. พลังงานไฮโดรเจน.....	7
3. การใช้พลังงานไฮโดรเจนกับรถยนต์และอื่นๆ ในภาคคมนาคมขนส่ง.....	8
4. หลักการและประสิทธิภาพของการแยกก๊าซด้วยไฟฟ้า.....	12
5. คุณสมบัติของไฮโดรเจนและความปลอดภัย.....	25
6. การทดสอบอิเล็กทรอนิกส์ของโครงการพัฒนาคู่มือระบบผลิตไฮโดรเจนจากน้ำ.....	45
7. กรณีตัวอย่างการใช้ไฮโดรเจนของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในรถยนต์.....	47
8. กรณีศึกษาการใช้ไฮโดรเจนจากอิเล็กทรอนิกส์ติดตั้งในรถยนต์ในประเทศไทย.....	52

วัตถุประสงค์ กลุ่มเป้าหมาย และการใช้งานของคู่มือ

วัตถุประสงค์ คู่มือระบบผลิตไฮโดรเจนจากน้ำในรถยนต์ที่มีประสิทธิภาพและความปลอดภัย จัดทำขึ้นเพื่อเป็นการเผยแพร่ความรู้เกี่ยวกับระบบผลิตไฮโดรเจนจากน้ำหรือที่เรียกว่า อิเล็กโทรไลเซอร์ โดยเนื้อหาจะประกอบไปด้วย

- คุณสมบัติของไฮโดรเจนและความปลอดภัย
- ระบบผลิตไฮโดรเจนจากน้ำและประสิทธิภาพการใช้พลังงาน
- รายละเอียดและเกณฑ์ขั้นต่ำของวัสดุที่มีประสิทธิภาพและปลอดภัยจากผลการทดสอบ
- การประยุกต์ใช้งานไฮโดรเจนจากระบบผลิตไฮโดรเจนจากน้ำในรถยนต์

กลุ่มเป้าหมาย คู่มือระบบผลิตไฮโดรเจนจากน้ำในรถยนต์ที่มีประสิทธิภาพและความปลอดภัย เหมาะสำหรับผู้ที่สนใจเกี่ยวกับระบบผลิตไฮโดรเจนจากน้ำหรือผู้ผลิตอุปกรณ์

การใช้งานของคู่มือ คู่มือระบบผลิตไฮโดรเจนจากน้ำในรถยนต์ที่มีประสิทธิภาพและความปลอดภัยมีวัตถุประสงค์หลักคือ **ต้องการเผยแพร่ความรู้ทางด้านกระบวนการผลิตไฮโดรเจนจากน้ำและแนวทางของการนำไปประยุกต์ใช้งาน** เท่านั้น ทั้งนี้เพื่อไม่ก่อให้เกิดความเข้าใจผิดของการใช้คู่มือว่า การใช้ระบบผลิตไฮโดรเจนจากน้ำในรถยนต์จะก่อให้เกิดผลประหยัดจากการใช้เชื้อเพลิงเนื่องจากยังมีปัจจัยอื่นๆ อีกมากและยังมีข้อจำกัดอยู่

การอ้างอิงของคู่มือ คู่มือฉบับนี้มีการอ้างอิงตัวอย่างของกรณีศึกษาของการใช้อุปกรณ์ผลิตไฮโดรเจนจากน้ำในต่างประเทศ และผลของการศึกษาที่ได้จาก “โครงการวิจัย ทดสอบ ระบบผลิตไฮโดรเจนจากน้ำใช้ในรถยนต์และกำหนดแนวทางพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานไฮโดรเจนรองรับแผนพัฒนาพลังงานทดแทน 15 ปี” ของกระทรวงพลังงานที่ได้ดำเนินการทดสอบผลประหยัดเชื้อเพลิงและการปล่อยมลพิษจากการติดตั้งอุปกรณ์ผลิตไฮโดรเจนจากน้ำในรถยนต์ทดสอบจำนวน 5 ตัวอย่างที่คัดเลือกจากผู้ผลิตและจำหน่ายในประเทศและต่างประเทศ เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบเพื่อให้ผู้สนใจ ได้รับเห็นถึงตัวอย่างของการนำไปใช้ในปัจจุบัน

1

ความหมายของคำที่ใช้ในคู่มือที่สำคัญ

- ก๊าซไฮดรอกซี (Hydroxy)** เป็นก๊าซผสมระหว่างก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซออกซิเจน ที่ได้จากการแยกน้ำด้วยไฟฟ้า บางครั้งอาจเรียกเป็นชื่ออื่นๆ เช่น Brown's Gas หรือ HHO ซึ่งมีความหมายเหมือนกัน
- กำลังไฟฟ้า (Electrical Power)** พลังงานไฟฟ้าที่นำไปใช้งาน ในเวลา 1 วินาที มีหน่วยเป็นวัตต์ (W) หรือ กิโลวัตต์ (kW)
- ความเร็วของเปลวไฟ (Flame Speed)** ความเร็วของเปลวไฟเมื่อเกิดการเผาไหม้
- ค่าความร้อน (Heating Value)** เป็นค่าปริมาณความร้อนที่มีอยู่ในเชื้อเพลิงเมื่อเกิดการเผาไหม้ ค่าความร้อนนี้จะไปทำให้เกิดงานและกำลังกลในการขับเคลื่อนเครื่องยนต์
- จุดติดไฟ (Flash Point)** อุณหภูมิที่เชื้อเพลิงเหลวเกิดไอเชื้อเพลิงในปริมาณมากเพียงพอจะทำให้เกิดเปลวไฟวาบขึ้นที่ผิวของของเหลวเมื่อมีแหล่งความร้อนที่ทำให้เกิดการลุกติดไฟภายนอกเข้าไปที่ผิวของของเหลวนั้น และเมื่อนำแหล่งความร้อนที่ทำให้เกิดการลุกติดไฟออกจากบริเวณนั้น เปลวไฟก็จะดับลงเนื่องจากอุณหภูมิดังกล่าวนี้ยังไม่สูงเพียงพอจะทำให้กระบวนการเผาไหม้เกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง
- ช่วงของการติดไฟในอากาศ (Flammability limit)** สัดส่วนขั้นต่ำของไอเชื้อเพลิงในอากาศที่จะลุกไหม้เมื่อมีประกายไฟหรือความร้อนสูงถึงอุณหภูมิติดไฟ
- เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell)** เป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมีอย่างหนึ่งคล้ายกับแบตเตอรี่ แต่แตกต่างกันที่เซลล์เชื้อเพลิงนั้นออกแบบมาให้มีการเติมไฮโดรเจน และออกซิเจนตลอดเวลา เมื่อเซลล์เชื้อเพลิงทำงานจะได้พลังงานไฟฟ้าออกมา
- ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของอิเล็กโทรไลเซอร์ (Specific Energy Consumption)** ปริมาณการใช้พลังงานไฟฟ้าที่ใช้ (กิโลวัตต์ชั่วโมง) ต่อการผลิตไฮโดรเจน 1 หน่วย (อาจจะเป็น ลิตร หรือ กิโลกรัม)
- พลังงานไฟฟ้า (Electrical Energy)** มีหน่วยเป็นกิโลวัตต์ชั่วโมง (kWh)
- อิเล็กโทรไลซิส (Electrolysis)** เป็นกระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าโดยการป้อนกระแสไฟฟ้าจากแหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้ากระแสตรงเช่นจากแบตเตอรี่ เป็นต้น ไปยังขั้วบวกและขั้วลบของแท่งโลหะที่จุ่มอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ เมื่อแยกน้ำแล้วจะได้เป็นก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซออกซิเจนออกมา

อิเล็กโทรไลเซอร์ (Electrolyser)

เป็นอุปกรณ์ที่ใช้หลักการของอิเล็กโทรไลซิสโดยจะทำหน้าที่แยกไฮโดรเจนและออกซิเจนจากน้ำโดยการป้อนกระแสไฟฟ้าไปยังขั้วอิเล็กโทรดซึ่งมีทั้งขั้วบวกและขั้วลบ และมีสารละลายอิเล็กโทรไลต์ช่วยทำหน้าที่นำไฟฟ้า

อิเล็กโทรด (Electrode)

เป็นโลหะหรือวัสดุที่สามารถนำไฟฟ้าได้เช่น เหล็ก อลูมิเนียม ทองแดง ทองคำขาว (แพลทินัม) หรือ คาร์บอน เป็นต้น โดยประกอบไปด้วยขั้วบวกและขั้วลบ ซึ่งแต่ละขั้วจะต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสตรง

อิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte)

เป็นสารละลายที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบหลักผสมกับสารประกอบจำพวกเกลือ เช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) เป็นต้น ทำหน้าที่ช่วยนำกระแสไฟฟ้าให้ดียิ่งขึ้น ทำให้การแยกน้ำได้ดีขึ้น

อุณหภูมิติดไฟด้วยตัวเอง (Auto-ignition Temperature)

อุณหภูมิที่เชื้อเพลิงสามารถลุกไหม้ได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่จำเป็นต้องใช้แหล่งความร้อนจากภายนอก

2

พลังงานไฮโดรเจน (Hydrogen Energy)

ไฮโดรเจน (H) นั้นจัดว่าเป็นธาตุที่มีอะตอมเล็กที่สุด เบาที่สุด และมีปริมาณในรูปของสารประกอบต่างๆ บนโลกมากมาย โดยปกติไฮโดรเจนจะมีสถานะเป็นก๊าซ แต่ถ้ายัดอุณหภูมิลงเหลือ -217°C ไฮโดรเจนจะอยู่ในสถานะของเหลว เช่นเดียวกับเอ็นจีวี (NGV) ที่ใช้กันอยู่ในประเทศไทยในปัจจุบัน หากลดอุณหภูมิลงเหลือ -160°C จะอยู่ในสถานะของเหลวเรียกว่า แอลเอ็นจี (LNG) พลังงานไฮโดรเจนกำลังถูกนำมาใช้เป็นพลังงานทดแทนเนื่องจากมีคุณสมบัติที่ดีหลายอย่างทั้งทางกายภาพและทางเคมีเช่น เผาไหม้ง่าย ไม่มีมลพิษเพราะเมื่อเกิดการเผาไหม้แล้วกลายเป็นน้ำ (H_2O) ออกมา

ไฮโดรเจนสามารถจัดหาง่ายเพราะเป็นธาตุพื้นฐานที่มีอยู่ในธรรมชาติ โดยในปัจจุบันมีเทคโนโลยีที่สามารถนำธาตุไฮโดรเจนที่มีอยู่ในรูปแบบต่างๆ มาเป็นก๊าซไฮโดรเจนเพื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงอยู่หลายเทคโนโลยี เช่นการแปลงก๊าซธรรมชาติมาเป็นก๊าซไฮโดรเจนด้วยกระบวนการทางความร้อน หรือการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าที่เรียกว่ากระบวนการอิเล็กโทรไลซิส และกรรมวิธีอื่นๆ อีกหลายวิธี เป็นต้น นอกจากนี้ไฮโดรเจนยังมีค่าพลังงานต่อน้ำหนักสูงเมื่อเปรียบเทียบกับเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ ดังแสดงไว้ในตารางที่ 1 และตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ค่าพลังงานของเชื้อเพลิงแต่ละประเภท

เชื้อเพลิง	สถานะที่อุณหภูมิ 25°C	ค่าความร้อน (เมกะจูล/กิโลกรัม)
ไฮโดรเจน (H_2)	ก๊าซ	121.0
ก๊าซธรรมชาติ (Natural Gas)	ก๊าซ	47.1
ก๊าซโซลีน (Gasoline)	ของเหลว	44.4
น้ำมันดีเซล (Diesel)	ของเหลว	39.6

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของเชื้อเพลิงแต่ละประเภท [1]

คุณสมบัติ	หน่วย	ไฮโดรเจน	ก๊าซธรรมชาติ (Natural Gas)	ก๊าซโซลีน (เบนซิน)	น้ำมันดีเซล
น้ำหนักโมเลกุล		2.02	16.04	100 - 105	~200
ความหนาแน่นที่สภาวะมาตรฐาน	kg/m^3	0.0838	128	718-778	848
จุดเดือด (Boiling Point)	$^{\circ}\text{C}$	-253	-162 ถึง -88	27 - 225	160-360
จุดติดไฟ (Flash Point)	$^{\circ}\text{C}$	<-253	-184	-43	60-80
ช่วงของการติดไฟในอากาศ (Flammability limit)	% โดยปริมาตร	4.0 - 75.0	5.3 - 15.0	1.4 - 7.6	1.0-6.0

คุณสมบัติ	หน่วย	ไฮโดรเจน	ก๊าซธรรมชาติ (Natural Gas)	ก๊าซโซลีน (เบนซิน)	น้ำมันดีเซล
อุณหภูมิติดไฟด้วยตัวเอง (Auto-ignition Temperature)	°C	500	482-632	257	315
ความเร็วของเปลวไฟ (Flame Speed)	m/s	2.83	0.45	N/A	

หมายเหตุ: สภาวะมาตรฐานเป็นสภาวะอ้างอิงของก๊าซเพื่อความสะดวกในการเปรียบเทียบ ซึ่งในที่นี้จะหมายถึงสภาวะของก๊าซที่มีอุณหภูมิ 15 °C ความดัน 1 บรรยากาศ

จากตารางจะเห็นว่าไฮโดรเจนมีคุณสมบัติดีหลายอย่าง เช่น ความเร็วของเปลวไฟสูงกว่า ช่วงของการติดไฟในอากาศกว้างกว่าเชื้อเพลิงชนิดอื่นๆ ดังนั้นด้วยคุณสมบัติข้อนี้ทำให้เมื่อใช้ไฮโดรเจนผสมกับเชื้อเพลิงอื่นๆ ในอัตราส่วนที่เหมาะสมจะทำให้การเผาไหม้ดีขึ้น ซึ่งจะทำให้การปล่อยมลพิษลดลง

3

การใช้พลังงานไฮโดรเจนกับรถยนต์และอื่นๆ ในภาคคมนาคมขนส่ง

ไฮโดรเจนมีบทบาทสำคัญในการนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงมากขึ้นในปัจจุบันโดยเฉพาะการนำไฮโดรเจนมาใช้เป็นเชื้อเพลิงในรถยนต์ ทั้งนี้สาเหตุที่พลังงานไฮโดรเจนได้รับความสนใจเป็นอย่างมากก็เนื่องจากราคาน้ำมันเชื้อเพลิงที่มีแนวโน้มสูงขึ้นเรื่อยๆ ปัญหามลพิษและภาวะโลกร้อนซึ่งสาเหตุหนึ่งเกิดจากการเผาไหม้ของน้ำมันเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ ทำให้ต้องหันมาใช้พลังงานทดแทนอื่นๆ รวมทั้งการใช้ไฮโดรเจนด้วย สำหรับแนวทางการนำไฮโดรเจนมาใช้งานในรถยนต์และพาหนะอื่นๆ ในภาคคมนาคมขนส่งนั้น เทคโนโลยีที่มีการพัฒนาอยู่ในปัจจุบันจะมีการนำไฮโดรเจนไปใช้ประโยชน์ 2 แนวทางคือ

1. การใช้ไฮโดรเจนในเครื่องยนต์เผาไหม้ภายใน (Internal Combustion Engine, ICE) วิธีการนี้จะอาศัยเทคโนโลยีการเผาไหม้เชื้อเพลิงในเครื่องยนต์ดังที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน แต่ปรับเปลี่ยนชนิดเชื้อเพลิงมาใช้ไฮโดรเจนโดยจ่ายก๊าซไฮโดรเจนเข้าไปผสมกับเชื้อเพลิงหลักเช่นน้ำมันดีเซล ก๊าซโซลีน (เบนซิน) หรือก๊าซธรรมชาติอัด (CNG) ในอัตราส่วนของไฮโดรเจนที่เหมาะสมเช่นการเติมไฮโดรเจนเข้าไปในสัดส่วน 10-30% ผสมกับก๊าซธรรมชาติอัด (CNG) หรือในประเทศไทยเรียกว่า เอ็นจีวี (NGV) นั่นเอง เป็นต้น ดังนั้นจำเป็นต้องมีการติดตั้งถังเก็บไฮโดรเจนไว้บนรถยนต์เช่นเดียวกับการติดตั้งถังก๊าซเอ็นจีวี โดยไฮโดรเจนที่เติมเข้าไปจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ของเครื่องยนต์เนื่องจากก๊าซไฮโดรเจนมีความสามารถในการแพร่กระจายของก๊าซดี และความเร็วของเปลวไฟของการเผาไหม้สูง ทำให้การเผาไหม้ในเครื่องยนต์ดีขึ้น นอกจากนี้ยังมีการใช้ไฮโดรเจนอย่างเดียวเป็นเชื้อเพลิงในเครื่องยนต์สันดาปภายในแต่ส่วนใหญ่ยังคงอยู่ในขั้นตอนการทดลองและทดสอบ

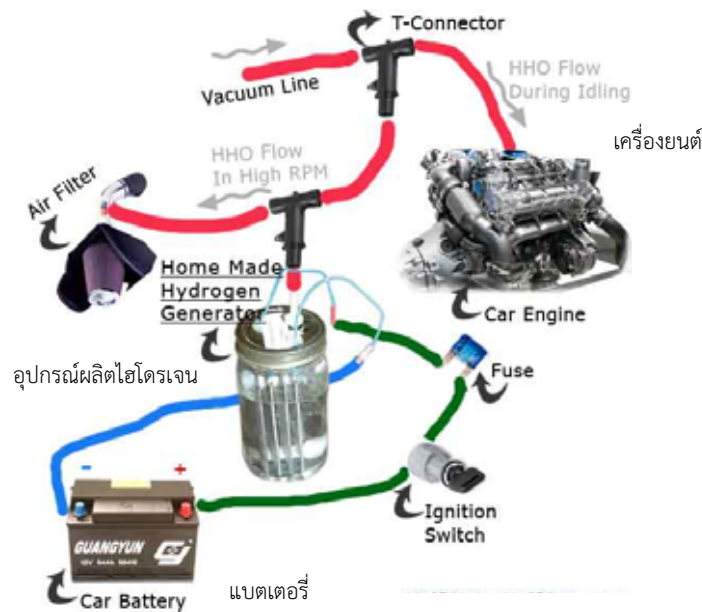


รูปที่ 1 การใช้ก๊าซเอ็นจีวี ในประเทศไทย

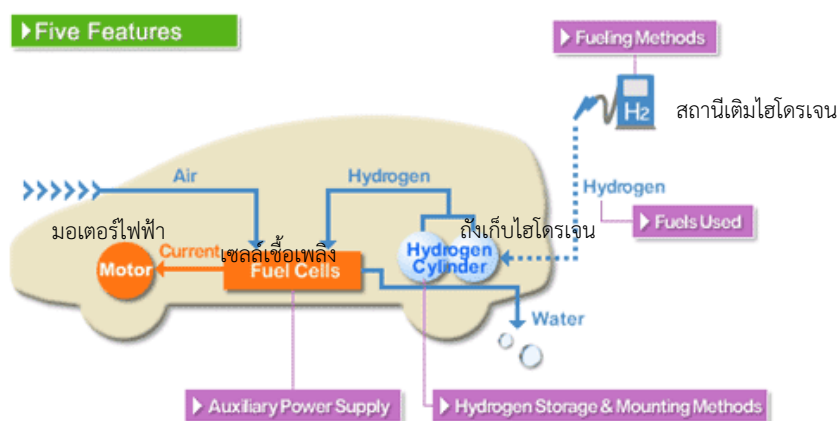
ในต่างประเทศนั้นได้มีการทดสอบการเติมไฮโดรเจนเข้าไปในเครื่องยนต์สันดาปภายในร่วมกับเชื้อเพลิงหลักหลายชนิดเช่นผสมกับก๊าซโซลีน (เบนซิน) ผสมกับน้ำมันดีเซล หรือผสมกับก๊าซธรรมชาติอัด (CNG) ทั้งนี้การทดสอบทำทั้งในห้องปฏิบัติการและทดสอบภาคสนามเพื่อวัดผลของการเติมไฮโดรเจนต่อการประหยัดเชื้อเพลิงและค่ามลพิษที่เกิดขึ้น อย่างไรก็ตามการทดสอบโดยส่วนใหญ่จะเป็นการเติมไฮโดรเจนเข้าไปผสมโดยมีการติดตั้งถังเก็บไฮโดรเจนไว้บนรถยนต์แล้วจ่ายไฮโดรเจนเข้าไปยังท่อร่วมไอดีก่อนเผาไหม้ในห้องเผาไหม้ สำหรับอีกวิธีหนึ่งของการใช้ไฮโดรเจนที่ผลิตโดยการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าจากอุปกรณ์ที่เรียกว่า “อิเล็กโทรไลเซอร์” ที่ติดตั้งในรถยนต์โดยอาศัยไฟฟ้าจากแบตเตอรี่มาแยกน้ำแล้วได้ไฮโดรเจนออกมาก่อนส่งไปยังเครื่องยนต์โดยไม่จำเป็นต้องมีถังเก็บไฮโดรเจน ดังแสดงในรูปที่ 2 นั้น ยังมีข้อถกเถียงในเรื่องของผลประหยัดน้ำมันและปริมาณการปล่อยมลพิษ ระหว่างนักวิจัย วิศวกร และผู้ผลิตอุปกรณ์อิเล็กโทรไลเซอร์ ที่เห็นแตกต่างโดยกลุ่มที่ไม่เชื่อว่าอิเล็กโทรไลเซอร์ที่ติดตั้งในรถยนต์โดยอาศัยไฟฟ้าจากแบตเตอรี่จะทำให้ประหยัดเชื้อเพลิงมากขึ้นเนื่องจากโดยทางทฤษฎีแล้วประสิทธิภาพโดยรวมของการแปลงพลังงานจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ไปเป็นไฟฟ้าเพื่อผลิตไฮโดรเจนของอิเล็กโทรไลเซอร์จะลดลงและไม่สามารถทำให้เกิดผลประหยัดได้ ยกเว้นกรณีที่ใช้ไฮโดรเจนที่ผลิตจากภายนอก บรรจุใส่ถังเก็บแล้วนำไปติดตั้งเป็นเชื้อเพลิงร่วมซึ่งมีรายงานวิจัยหลายชิ้นที่แสดงให้เห็นถึงผลประหยัดเชื้อเพลิงหลักได้ถึง 20-30% และค่ามลพิษที่ลดลงได้ถึง

30-60% ขึ้นอยู่กับสภาพการทดสอบและสัดส่วนของไฮโดรเจนที่ผสมเข้าไป ในขณะที่กลุ่มผู้ผลิตอุปกรณ์อิเล็กโทรไลเซอร์เชื่อว่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ของการเติมไฮโดรเจนจะสูงขึ้นมากกว่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ไปจากเครื่องยนต์ ทั้งนี้อาศัยข้อมูลจากการทดสอบวิ่งบนท้องถนนเท่านั้น

2. การใช้ไฮโดรเจนในเซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell, FC) วิธีการนี้จะไม่มีการเผาไหม้แต่จะใช้วิธีการแยกอิเล็กตรอน ออกจากไฮโดรเจนที่ป้อนจากถังเก็บไฮโดรเจนติดตั้งบนรถเซลล์เชื้อเพลิง ทำให้เกิดกระแสไฟฟ้าไปขับมอเตอร์ที่ต่อกับชุดขับเคลื่อนรถยนต์ โดยเซลล์เชื้อเพลิงมีส่วนประกอบและการทำงานดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 2 แสดงโครงสร้างการทำงานของระบบผลิตไฮโดรเจนจากน้ำในรถยนต์



รูปที่ 3 แสดงโครงสร้างการทำงานของระบบเซลล์เชื้อเพลิงในรถยนต์

เซลล์เชื้อเพลิง (Fuel Cell) จัดว่าเป็นเซลล์ไฟฟ้าเคมีอย่างหนึ่งคล้ายกับแบตเตอรี่ แต่แตกต่างกันที่เซลล์เชื้อเพลิงนั้นออกแบบมาให้มีการเติมไฮโดรเจน และออกซิเจนตลอดเวลา ซึ่งช่วยขจัดปัญหาความจุที่จำกัดของแบตเตอรี่ออกไป นอกจากนี้ที่ขั้วไฟฟ้าของแบตเตอรี่จะเข้าทำปฏิกิริยาเมื่อมันถูกอัดประจุหรือคายประจุ ในขณะที่ขั้วไฟฟ้าของเซลล์เชื้อเพลิงเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาและค่อนข้างเสถียร เซลล์เชื้อเพลิงทุกชนิดจะให้กระแสไฟฟ้าที่ 1.16 โวลต์ต่อเซลล์ ประกอบด้วยอิเล็กโทรด 2 ขั้ว คือขั้วแคโทด (Cathode) หรือขั้วบวก ขั้วแอโนด (Anode) หรือขั้วลบ แต่ละขั้วประกอบด้วยแท่งคาร์บอนที่มีรูพรุน 2 แท่งทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้า ที่ผิวของแท่งคาร์บอนมีผงแพลททินัมหรือแพลเลเดียมผสมอยู่เพื่อทำหน้าที่เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ขั้วไฟฟ้าทั้งสองจมอยู่ในอิเล็กโทรไลต์ (Electrolyte) ซึ่งอาจเป็นสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) หรือ โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) ที่จะนำกระแสไฟจากขั้วหนึ่งไปอีกขั้วหนึ่ง และยังประกอบด้วยตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst) ทำหน้าที่เร่งปฏิกิริยาของอิเล็กโทรไลต์ ให้เกิดกระแสไฟฟ้ามากขึ้น

เซลล์เชื้อเพลิงทำงานโดยการเปลี่ยนเชื้อเพลิงเป็นกระแสไฟฟ้าโดยตรงซึ่งจะทำให้ประสิทธิภาพสูงกว่าการเปลี่ยนรูปพลังงานเป็นพลังงานกลก่อน แล้วจึงเปลี่ยนมาเป็นไฟฟ้าอีกทีหนึ่ง เครื่องยนต์ที่ใช้เปลี่ยนรูปพลังงานชนิดนี้มีประสิทธิภาพโดยรวมอยู่ในระดับ 20% เท่านั้น ส่วนเซลล์เชื้อเพลิงในบางรูปแบบเปลี่ยนพลังงานของเชื้อเพลิงไปเป็นไฟฟ้าได้ถึง 60% เพราะเป็นการเปลี่ยนพลังงานทางเคมีโดยตรง นั่นหมายถึงประสิทธิภาพของรถเซลล์เชื้อเพลิงสูงกว่ารถยนต์ที่เผาไหม้ภายใน 2-3 เท่า

การพัฒนาพลังงานไฮโดรเจนสำหรับรถเซลล์เชื้อเพลิงนั้นยังต้องผ่านช่วงเวลาของการเปลี่ยนถ่ายทางเทคโนโลยีจากรถยนต์ที่ใช้เครื่องยนต์สันดาปภายในไปเป็นรถเซลล์เชื้อเพลิงต้องใช้ระยะเวลานานและค่าใช้จ่ายในการลงทุนยังสูงอยู่ ดังนั้นรูปแบบการนำไฮโดรเจนไปผสมกับเชื้อเพลิงประเภทอื่นๆ เช่น ก๊าซธรรมชาติอัด (CNG) ก๊าซแอลพีจี (LPG) และน้ำมันเบนซินเพื่อใช้ในเครื่องยนต์สันดาปภายใน ยังคงได้รับการพัฒนามากกว่าเทคโนโลยีเซลล์เชื้อเพลิงมีความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์มากขึ้น อย่างไรก็ตามเนื่องจากข้อดีของการใช้ไฮโดรเจนในเซลล์เชื้อเพลิงหลายประการทำให้มีผู้ผลิตรถยนต์หลายรายได้ทุ่มเทงานวิจัยและพัฒนาเซลล์เชื้อเพลิงประเภท PEMFC เพื่อทดแทนรถยนต์ประเภทเครื่องยนต์สันดาปภายในเดิมที่มีประสิทธิภาพต่ำกว่า ดังจะเห็นได้จากรถเซลล์เชื้อเพลิงต้นแบบที่ได้ผลิตและนำมาทดลองใช้ในท้องตลาด ซึ่งมีทั้งรถยนต์นั่งส่วนบุคคล และรถสาธารณะ ดังรูปที่ 4 (ก) และ (ข)



(ก)



(ข)

รูปที่ 4 (ก) รถเซลล์เชื้อเพลิงประเภทรถนั่งส่วนบุคคล ขนาด 80-100 kW

(ข) รถเซลล์เชื้อเพลิงประเภทรถสาธารณะ ขนาด 300 kW

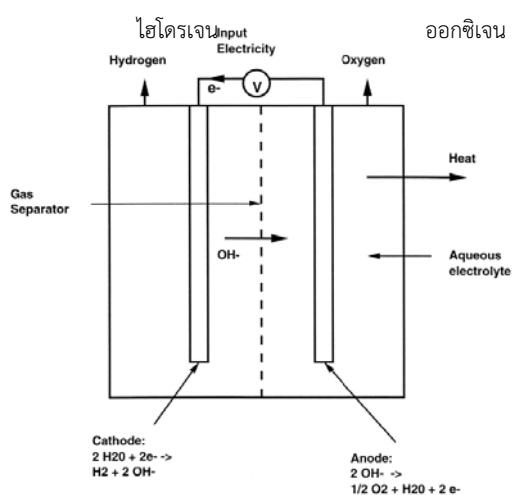
4

หลักการและประสิทธิภาพของการแยกน้ำด้วยไฟฟ้า

กระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าเป็นกระบวนการทางไฟฟ้าเคมี ที่ต้องมีส่วนประกอบดังนี้ คือ

- ขั้วอิเล็กโทรด ซึ่งประกอบด้วยขั้วแอโนด และขั้วแคโทด
- แหล่งจ่ายกระแสไฟฟ้าตรง
- สารละลายอิเล็กโทรไลต์

เมื่อเกิดปฏิกิริยาขึ้นแล้ว ก๊าซไฮโดรเจนจะเกิดขึ้นที่ขั้วแคโทด และก๊าซออกซิเจนจะเกิดขึ้นที่ขั้วแอโนด

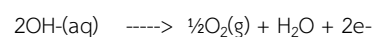


ปฏิกิริยาของกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส

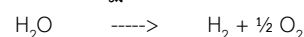
ที่ขั้วแคโทด



ที่ขั้วแอโนด



ปฏิกิริยารวม



ขั้วแคโทด Overall Reaction: $\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2 + \frac{1}{2}\text{O}_2$ ขั้วแอโนด

รูปที่ 5 ปฏิกิริยาของกระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้า

ประสิทธิภาพของอิเล็กโทรไลเซอร์

เพื่อให้เกิดความเข้าใจถึงประสิทธิภาพการใช้พลังงานของกระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าหรืออิเล็กโทรไลซิสว่าการผลิตไฮโดรเจนนั้นต้องใช้พลังงานจำนวนหนึ่งป้อนเข้าไปจึงจะได้ไฮโดรเจนออกมา ดังนั้นประสิทธิภาพการใช้พลังงานหมายถึงค่าความร้อนสูง (High Heating Value) ของไฮโดรเจนที่ผลิตได้มาเทียบกับพลังงานไฟฟ้าที่ป้อนให้กับกระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าหรืออิเล็กโทรไลซิสตามสูตร

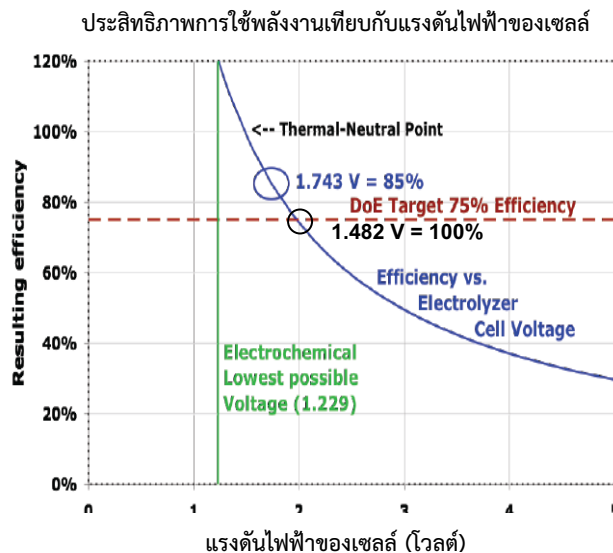
$$\text{ประสิทธิภาพการใช้พลังงาน} = \frac{\text{ค่าความร้อนของไฮโดรเจนที่ผลิตได้}}{\text{ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตไฮโดรเจน}}$$

โดยที่ ค่าความร้อนสูงของไฮโดรเจนที่มีอยู่ในก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้ มีหน่วยเป็น เมกะจูล
ค่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตไฮโดรเจน มีหน่วยเป็น เมกะจูล

หรือหากเขียนเป็นความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการใช้พลังงานกับแรงดันไฟฟ้าได้ดังนี้

$$\text{ประสิทธิภาพการใช้พลังงาน} = \frac{1.482}{\text{แรงดันไฟฟ้าที่เซลล์ 1 เซลล์}}$$

ดังนั้นหากประสิทธิภาพการใช้พลังงานสูงแสดงว่าไฮโดรเจนผลิตได้มากโดยใช้พลังงานไม่มากนัก



รูปที่ 6 ประสิทธิภาพของการผลิตไฮโดรเจนโดยการแยกน้ำด้วยไฟฟ้า กับขนาดของแรงดันไฟฟ้าที่ป้อน

จากรูปที่ 6 ประสิทธิภาพพลังงานของการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าจะแปรผกผันกับแรงดันที่ป้อนให้กับ 1 เซลล์ (คู่อิเล็กโทรด) ของระบบผลิตไฮโดรเจนจากน้ำด้วยไฟฟ้า จะเห็นว่า ทางทฤษฎีแล้ว หากต้องการเพิ่มประสิทธิภาพอิเล็กโทรไลเซอร์ให้สูงขึ้น จะต้องใช้แรงดันไฟฟ้าให้มีค่าใกล้เคียง 1.482 โวลต์ (ประสิทธิภาพ 100%) แต่ในทางปฏิบัติเนื่องจากระบบมีการสูญเสียทางไฟฟ้าและความร้อน ทำให้ประสิทธิภาพของอิเล็กโทรไลเซอร์ต่ำกว่า 100% เนื่องจากต้องใช้แรงดันไฟฟ้าที่สูงขึ้น

ดังนั้น หากต้องการอิเล็กโทรไลเซอร์ที่มีประสิทธิภาพสูงควรต้องออกแบบให้แรงดันไฟฟ้าต่อ 1 เซลล์ใกล้เคียงกับค่าแรงดันไฟฟ้า 1.482 โวลต์มากที่สุด

อัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจน

ก๊าซไฮโดรเจนจะเกิดขึ้นที่ขั้วแคโทดหรือขั้วลบของอุปกรณ์แยกไฮโดรเจนจากน้ำหรืออิเล็กโทรไลเซอร์ และอิเล็กโทรไลเซอร์ที่ดีควรต้องผลิตปริมาณก๊าซไฮโดรเจนได้มากในขณะที่ใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยที่สุด โดยทั่วไป การผลิตไฮโดรเจนต่อเซลล์ขึ้นอยู่กับระยะเวลากับกระแสไฟฟ้างดังนี้

$$\text{ปริมาตรไฮโดรเจน (ที่ผลิตได้)} = \text{กระแสไฟฟ้า} * 0.41815$$

$$\text{โดยที่ ปริมาตรไฮโดรเจนที่ผลิตได้} \quad \text{มีหน่วยเป็น ลิตรต่อชั่วโมง}$$

$$\text{กระแสไฟฟ้า} \quad \text{มีหน่วยเป็น แอมแปร์}$$

หรือ

$$\text{น้ำหนักไฮโดรเจน (ที่ผลิตได้)} = \text{กระแสไฟฟ้า} * \text{ชั่วโมง} * 0.0376$$

$$\text{โดยที่ น้ำหนักไฮโดรเจนที่ผลิตได้} \quad \text{มีหน่วยเป็น กรัม}$$

$$\text{กระแสไฟฟ้า} \quad \text{มีหน่วยเป็น แอมแปร์}$$

$$\text{ระยะเวลาการป้อนกระแสไฟฟ้า} \quad \text{มีหน่วยเป็น ชั่วโมง}$$

ดังนั้นในการผลิตไฮโดรเจนน้ำหนัก 1 กิโลกรัมต้องใช้พลังงานไฟฟ้าทั้งสิ้น

$$\text{พลังงานไฟฟ้า} = \frac{1000}{0.0376} * 1.482 = 39.4 \text{ กิโลวัตต์-ชั่วโมง (หน่วย)}$$

หรือต้องใช้ 8.94 ลิตรในการผลิตไฮโดรเจน 1 กิโลกรัม ดังสรุปดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การผลิตไฮโดรเจนหนัก 1 กิโลกรัมใน 1 ชั่วโมง (ที่ประสิทธิภาพ 100 เปอร์เซ็นต์)

ก๊าซไฮโดรเจน	น้ำ	พลังงานไฟฟ้า	แรงดันไฟฟ้า	กระแส
1 กิโลกรัม	≈ 9 ลิตร	≈ 39 กิโลวัตต์-ชั่วโมง	1.482 โวลต์	26,595 แอมป์

สำหรับกระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าที่ใช้กันในระดับอุตสาหกรรม จะมีประสิทธิภาพในการผลิตจะอยู่ที่ประมาณ 60 ถึง 75 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของการผลิตไฮโดรเจนจากน้ำที่ใช้สำหรับรถยนต์นั้นมีดังต่อไปนี้

- ชนิดของเซลล์อิเล็กโทรไลเซอร์
- ชนิดของโลหะและรูปร่างของขั้วอิเล็กโทรด
- ชนิดและความเข้มข้นของสารละลายที่นำมาใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์
- ปริมาณของแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ใช้เหมาะสม

สำหรับอิเล็กโทรไลเซอร์ที่ใช้ในรถยนต์จะให้ก๊าซไฮดรอกซี (Hydroxy) ที่ประกอบด้วย ไฮโดรเจนและออกซิเจน เนื่องจากในกระบวนการอิเล็กโทรไลซิส ทุกๆ 1 โมลของไฮโดรเจนจะได้ 0.5 โมลของออกซิเจน ทำให้ปริมาณของก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจนรวมเป็น 1.5 เท่าของปริมาณก๊าซไฮโดรเจนเพียงอย่างเดียว ดังนั้นสมการข้างต้นสามารถปรับให้ใช้กับอิเล็กโทรไลเซอร์ที่ใช้ในรถยนต์ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \text{ปริมาตรก๊าซไฮดรอกซี (ที่ผลิตได้)} &= 1.5 * \text{กระแสไฟฟ้า} * 0.41815 \\ &= \text{กระแสไฟฟ้า} * 0.627225 \end{aligned}$$

โดยที่ ปริมาตรก๊าซไฮดรอกซีที่ผลิตได้ มีหน่วยเป็น ลิตรต่อชั่วโมง
กระแสไฟฟ้า มีหน่วยเป็น แอมแปร์

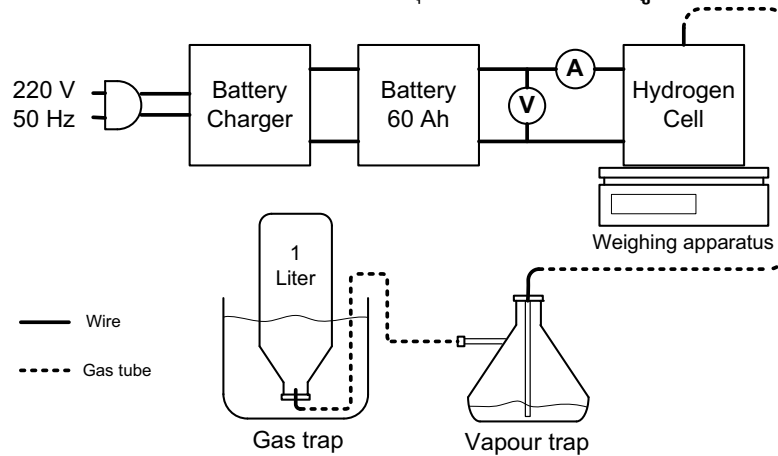
และเนื่องจากการเพิ่มอัตราการผลิตก๊าซไฮดรอกซีสามารถดำเนินการได้โดยการเพิ่มจำนวนคู่อิเล็กโทรดได้ด้วยเช่นกัน ดังนั้นสมการความสัมพันธ์ข้างต้นจึงสามารถปรับให้เหมาะสมเพื่อใช้ในการคำนวณหากระแสที่อิเล็กโทรไลต์ต้องการได้ดังนี้

$$\text{กระแส} = \frac{\text{ปริมาตรก๊าซไฮดรอกซีที่ผลิตได้} * 60}{0.627225 * \text{จำนวนเซลล์}}$$

โดยที่ ปริมาตรก๊าซไฮดรอกซีที่ผลิตได้ มีหน่วยเป็น ลิตรต่อนาที
จำนวนเซลล์ มีหน่วยเป็น จำนวนคู่อิเล็กโทรด

การทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ในรถยนต์

หากต้องการทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ สามารถทำได้โดยการวัดพลังงานของไฮโดรเจนที่ผลิตได้เทียบกับพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ โดยการต่ออุปกรณ์ดังแสดงไว้ในรูปที่ 7



รูปที่ 7 การทดสอบวัดประสิทธิภาพของอิเล็กทรอนิกส์

เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพของอิเล็กทรอนิกส์

เครื่องมือและอุปกรณ์ต่างๆ สำหรับใช้ในการทดสอบอุปกรณ์ผลิตไฮโดรเจนจากน้ำในห้องทดลอง แบ่งออกเป็น 2 ส่วน

- ## 1. ชุดจ่ายกำลังไฟฟ้า ประกอบด้วย

- แบตเตอรี่แบบตะกั่วกรด ขนาด 60 Ah จำนวน 1 ตัว
- เครื่องชาร์จประจุแบตเตอรี่ (Battery Charger) จำนวน 1 เครื่อง

- ## 2. เครื่องมือวัด ประกอบด้วย

- เครื่องชั่งน้ำหนักที่มีความละเอียดอ่านได้ในหน่วยกรัม
จำนวน 1 เครื่อง

- เครื่องวัดแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง
จำนวน 1 เครื่อง

- เครื่องวัดกระแสไฟฟ้ากระแสตรง
จำนวน 1 เครื่อง

- ### 3. เครื่องเก็บก๊าซ

- ตัวดักไอน้ำ (Vapor Trap)
- ถ้วยเก็บก๊าซ (Gas Trap)

4. เครื่องซึ่ง มีความละเอียดอ่านได้ถึงกรัมหรือมิลลิกรัม

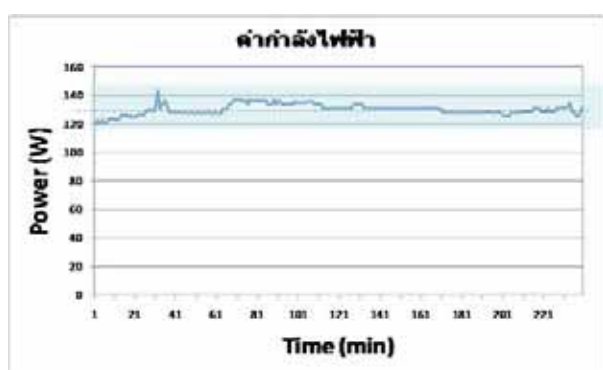


วิธีการทดสอบประสิทธิภาพของอิเล็กโทรไลเซอร์

เมื่อทำการต่อเครื่องมือวัดและอิเล็กโทรไลเซอร์ ซึ่งจะมีขั้วบวกสำหรับต่อขั้วบวกของแบตเตอรี่และขั้วลบสำหรับต่อกับขั้วลบของแบตเตอรี่แล้ว ทำการอ่านค่าและบันทึกค่าต่างๆ ทุก 1 นาทีเป็นระยะเวลา 4 ชั่วโมงดังนี้

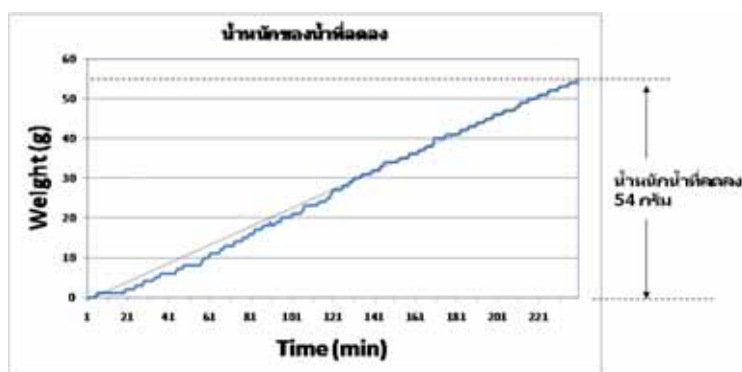
- ค่าแรงดันไฟฟ้า มีหน่วยเป็นโวลต์
- กระแสไฟฟ้า มีหน่วยเป็นแอมป์
- อ่านค่าน้ำหนักของของน้ำที่หายไป (ในกรณีที่ทดสอบโดยการชั่งน้ำหนักอิเล็กโทรไลเซอร์ทั้งตัวให้ชั่งน้ำหนักของอิเล็กโทรไลเซอร์ที่บรรจุน้ำและสารละลายก่อนเริ่มทำการทดสอบและบันทึกค่าไว้)

ค่าการใช้กำลังไฟฟ้าที่ใช้ในการผลิตไฮโดรเจนจากอุปกรณ์อิเล็กโทรไลเซอร์ซึ่งเท่ากับผลคูณของแรงดันไฟฟ้าและกระแสไฟฟ้าที่อ่านได้ และปริมาณน้ำหนักที่หายไปเทียบกับระยะเวลา นำมาบันทึก โดยได้แสดงไว้เป็นตัวอย่างในรูปที่ 8 (ก) และ (ข)



$$\begin{aligned}\text{ค่ากำลังไฟฟ้า} &= \text{แรงดันไฟฟ้า} * \text{กระแสไฟฟ้า} \\ \text{ค่าพลังงานไฟฟ้า} &= \text{ค่ากำลังไฟฟ้า} * \text{ชั่วโมง}\end{aligned}$$

รูปที่ 8 (ก) กำลังไฟฟ้าที่อุปกรณ์ผลิตไฮโดรเจน



รูปที่ 8 (ข) น้ำหนักน้ำที่ลดลงของเซลล์ผลิตไฮโดรเจน

$$\text{ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของอิเล็กโทรไลเซอร์} = \frac{\text{พลังงานไฟฟ้าเฉลี่ยที่ใช้ (กิโลวัตต์ชั่วโมง)}}{\text{ปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้ (กิโลกรัม)}}$$

เนื่องจากน้ำ 1 กรัมประกอบด้วยไฮโดรเจนหนัก 1/9 กรัม ในกรณีตัวอย่างนี้น้ำหนักน้ำที่หายไป 54 กรัม ซึ่งจะกลายเป็นไฮโดรเจน 54/9 กรัม ดังนั้น

$$\text{ประสิทธิภาพของอิเล็กโทรไลเซอร์} = \frac{130.31/1000 * 4}{54/9/1000} = 86.87 \text{ กิโลวัตต์ชั่วโมง/กิโลกรัม (kWh/kgH}_2\text{)}$$

ดังนั้นหากทำการทดสอบประสิทธิภาพของอิเล็กโทรไลเซอร์ได้แล้ว สามารถนำไปเปรียบเทียบประสิทธิภาพทางทฤษฎีดังที่ได้กล่าวไว้ในหัวข้อ “ประสิทธิภาพของอิเล็กโทรไลเซอร์” จะสามารถบอกได้ว่าอิเล็กโทรไลเซอร์ที่ทำการทดสอบมีประสิทธิภาพสูงหรือต่ำเพียงใด

ตามทฤษฎี	ประสิทธิภาพของการผลิตไฮโดรเจน (100%)	=	39.0 kWh/kgH ₂
			(ตามตารางที่ 3)

จากตัวอย่าง	ประสิทธิภาพของการผลิตไฮโดรเจน	=	86.87 kWh/kgH ₂
-------------	-------------------------------	---	----------------------------

ประสิทธิภาพเปรียบเทียบ	=	39.0/86.87	=	44.9%
------------------------	---	------------	---	-------

ส่วนประกอบของอุปกรณ์อิเล็กโทรไลเซอร์และเกณฑ์การเลือกใช้วัสดุ

อุปกรณ์อิเล็กโทรไลเซอร์สำหรับใช้ในรถยนต์นั้นมักจะไม่นับชิ้นส่วนมากนัก เนื่องจากปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้มีปริมาณที่ไม่มาก ซึ่งจะแตกต่างจากอิเล็กโทรไลเซอร์ที่ผลิตในระดับอุตสาหกรรมจะมีความซับซ้อนมากกว่า ทั้งโครงสร้างของตัวเซลล์เองและระบบควบคุมการจ่ายไฟฟ้า และการควบคุมปฏิกิริยาเคมี ดังแสดงในรูปที่ 9



รูปที่ 9 ระบบแยกน้ำด้วยไฟฟ้า (อิเล็กโทรไลเซอร์) ในรถยนต์

ส่วนประกอบของอิเล็กโทรไลเซอร์ใช้ในรถยนต์ประกอบด้วย

1. ภาชนะบรรจุสารละลายอิเล็กโทรไลต์
2. แผ่นอิเล็กโทรด
3. ท่อนำก๊าซไฮโดรเจนและออกซิเจน
4. ตัวตัดความชื้น
5. ข้อต่อ
6. วาล์ว
7. ปัมหมวนเวียนสารละลายอิเล็กโทรไลต์
8. อุปกรณ์ป้องกันการติดไฟย้อนกลับ
9. อื่นๆ

ส่วนประกอบต่างๆ ของอุปกรณ์อิเล็กโทรไลเซอร์ ทำจากวัสดุประเภทต่างๆ เช่น โลหะ พลาสติก ยาง และ วัสดุอื่นๆ ซึ่งการเลือกใช้วัสดุที่ใช้เป็นส่วนประกอบนี้ต้องคำนึงถึงคุณสมบัติในด้านต่างๆ เช่น การทนการกัดกร่อน ทั้งจากไฮโดรเจนและสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่วัสดุสัมผัสอยู่ ความแข็งแรงต่อความดัน สำหรับอุปกรณ์อิเล็กโทรไลเซอร์ที่ผลิตไฮโดรเจนโดยไม่มีการจัดเก็บเช่นใช้ในรถยนต์ อาจไม่ต้องคำนึงถึงการออกแบบเพื่อรับแรงดันมากนัก

ในการเลือกวัสดุที่เหมาะสมควรอ้างอิงมาตรฐานความปลอดภัยในการใช้วัสดุที่เกี่ยวข้องกับการใช้ไฮโดรเจนซึ่งในคู่มือเล่มนี้ ได้อ้างอิงบางส่วนจาก SAFETY STANDARD FOR HYDROGEN AND HYDROGEN SYSTEMS - Guidelines for Hydrogen System Design, Materials Selection, Operations, Storage, and Transportation ขององค์การนาซ่า (NASA) ประเทศสหรัฐอเมริกา ซึ่งได้ระบุชนิดของวัสดุที่สามารถใช้ในงานไฮโดรเจนได้ดังแสดงไว้ในตารางที่ 4 และตารางที่ 5

ตารางที่ 4 ตารางแสดงชนิดวัสดุที่เหมาะสมกับการนำไปใช้กับไฮโดรเจนทั้ง 3 สถานะได้แก่ก๊าซไฮโดรเจน ไฮโดรเจนเหลว และไฮโดรเจนที่เก็บในรูปสารประกอบของโลหะ [2]

วัสดุ	การใช้งานกับ ก๊าซไฮโดรเจน	หมายเหตุ
อลูมิเนียมและอัลลอยด์	✓	
เหล็กกล้าไร้สนิมโครงสร้างแบบออสเทนติกที่ผสมนิกเกิล > 7% (เช่น 304, 304L, 308, 316, 321, 347)	✓	อาจใช้เหล็กกล้าไร้สนิมโครงสร้างแบบมาเทนซิติคได้หากค่าความเค้นสูงกว่าความเค้นที่ยอมรับได้ที่อุณหภูมิต่ำ
เหล็กกล้าคาร์บอน	✓	มีความเปราะมากเกินไปหากใช้กับไฮโดรเจนเหลว
ทองแดงและอัลลอยด์ (เช่น ทองเหลือง, เงิน, ทองแดง-นิกเกิล)	✓	
เหล็กหล่อเทา, เหล็กเหนียว, เหล็กหล่อ	✗	ห้ามใช้กับไฮโดรเจน
เหล็กกล้าผสมคาร์บอนต่ำ	✓	มีความเปราะมากเกินไปหากใช้กับไฮโดรเจนเหลว
นิกเกิลและอัลลอยด์ (เช่น Inconel [®] และ Monel [®])	✗	มีโอกาสเกิดความเปราะ
โลหะผสมนิกเกิล (เช่น 2.25, 3.5, 5, และ 9 % Ni)	✗	สูญเสียความเหนียวของโลหะที่อุณหภูมิต่ำ
ไทเทเนียมและอัลลอยด์	✓	
Asbestos impregnated with Teflon [®]	✓	หลีกเลี่ยงการใช้เนื่องจากความเป็นพิษของแอสเบสตอส
Chloroprene rubber (Neoprene [®])	✓	มีความเปราะมากเกินไปหากใช้กับไฮโดรเจนเหลว
Dacron [®]	✓	มีความเปราะมากเกินไปหากใช้กับไฮโดรเจนเหลว
Fluorocarbon rubber (Viton [®])	✓	มีความเปราะมากเกินไปหากใช้กับไฮโดรเจนเหลว
Mylar [®]	✓	มีความเปราะมากเกินไปหากใช้กับไฮโดรเจนเหลว
Nitrile (Buna-N [®])	✓	มีความเปราะมากเกินไปหากใช้กับไฮโดรเจนเหลว
Polyamides (Nylon [®])	✓	มีความเปราะมากเกินไปหากใช้กับไฮโดรเจนเหลว
Polychlorotrifluoroethylene (Kel-F [®])	✓	
Polytetrafluoroethylene (Teflon [®])	✓	

หมายเหตุ ✓ สามารถนำไปใช้ได้ ✗ ไม่สามารถนำไปใช้ได้

ตารางที่ 5 ตารางแสดงชนิดวัสดุที่เหมาะสมของอุปกรณ์ต่างๆ กับการนำไปใช้กับไฮโดรเจนทั้ง 3 สถานะได้แก่ก๊าซไฮโดรเจน ไฮโดรเจนเหลว และไฮโดรเจนที่เก็บในรูปแบบสารประกอบของโลหะ

การประยุกต์ใช้งาน	ก๊าซไฮโดรเจน
วาล์ว (Valve)	วัสดุที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในอุตสาหกรรม
ข้อต่อ (Fittings)	วัสดุที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในอุตสาหกรรม
ซีล (O-rings)	วัสดุที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในอุตสาหกรรม
ปะเก็น (Gaskets)	วัสดุที่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในอุตสาหกรรม
ท่ออ่อน (Flexible hoses)	เหล็กกล้าไร้สนิมถักเคลือบด้วยเทฟลอน (Stainless steel braided with Teflon-lining)
แผ่นป้องกันเมื่อความดันเกิน (Rupture disk assembly)	เหล็กกล้าไร้สนิมชนิด 304, 304L, 316, หรือ 316L
ท่อแข็ง (Piping)	เหล็กกล้าไร้สนิมอนุกรม 300 (แนะนำให้ใช้ชนิด 316, เหล็กกล้าคาร์บอน)
ภาชนะบรรจุ (Dewars)	ไม่มีการใช้งาน

การเลือกใช้วัสดุที่ระบุใน**ตารางที่ 5** และ**ตารางที่ 6** นั้นเป็นมาตรฐานสำหรับการใช้งานกับก๊าซไฮโดรเจนในระดับอุตสาหกรรม สำหรับการเลือกวัสดุใช้งานกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์อาจมีข้อกำหนดน้อยกว่า

ชนิดของวัสดุสำหรับภาชนะบรรจุสารละลายอิเล็กโทรไลต์

เนื่องจากอิเล็กโทรดจำเป็นต้องจุ่มอยู่สารละลายอิเล็กโทรไลต์ ดังนั้นภาชนะที่ใช้บรรจุสารละลายอิเล็กโทรไลต์ต้องทำจากวัสดุที่เหมาะสม ปัจจุบันในการผลิตอิเล็กโทรไลเซอร์ นิยมนำพลาสติกมาทำเป็นภาชนะบรรจุตัวเซลล์ เนื่องจาก สามารถออกแบบให้มีรูปร่างและขนาดที่เหมาะสมกับการใช้งาน หาได้ง่าย มีความสามารถในการต้านการกัดกร่อนในระดับที่น่าพอใจ สำหรับชนิดของพลาสติกที่มีการพิจารณาและเลือกใช้งานดังแสดงไว้ในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ตารางแสดงคุณสมบัติของวัสดุที่ใช้ทำภาชนะบรรจุสารละลายอิเล็กโทรไลต์

ชนิดพลาสติก	โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) (ความเข้มข้น > 50%)		โพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) (เข้มข้นสูง)		อุณหภูมิใช้งานสูงสุด (°C)	ความสามารถในการซึมผ่าน (Permeability)*			การดูดซึมน้ำ (Water Absorption) (%)
	20 °C	50 °C	20 °C	50 °C		N ₂	O ₂	CO ₂	
โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE)	ดี	ดี	ดีมาก	ดีมาก	80	20	60	280	<0.01
โพลีเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE)	ดีมาก	ดีมาก	ดีมาก	ดีมาก	120	3	10	45	<0.01
โพลีโพรพิลีน (PP)	ดีมาก	ดีมาก	ดีมาก	ดีมาก	135	4	25	90	<0.02
โพลีคาร์บอเนต (PC)	ดีมาก	ดีมาก	ไม่ดี	ไม่ดี	135	3	20	85	0.35
โพลีไวนิลคลอไรด์ (PVC)	ไม่ดี	ไม่ดี	ดีมาก	ดี	70	.5-2	1-6	10-35	0.06
โพลีซัลโฟน (PSF)	ดีมาก	ดี	ดีมาก	ดีมาก	165	3	15	60	0.30
โพลีเมทิลเพนทีน (PMP)	ดีมาก	ดีมาก	ดีมาก	ดีมาก	175	65	270	--	<0.01
เทฟลอน FEP (Teflon-FEP)	ดีมาก	ดีมาก	ดีมาก	ดีมาก	205	20	60	135	<0.01
เทฟลอน PFA (Teflon-PFA)	ดีมาก	ดีมาก	ดีมาก	ดีมาก	250	-	-	-	<0.03

หมายเหตุ

ดีมาก หมายถึง	ไม่พบความเสียหายหลังจากการสัมผัสกับสารละลายนาน	30	วัน มีแนวโน้มจะใช้ได้นาน
ดี หมายถึง	มีความเสียหายเล็กน้อยหลังจากการสัมผัสกับสารละลายนาน	30	วัน
พอใช้ หมายถึง	เกิดความเสียหายบ้างหลังจากการสัมผัสกับสารละลายนาน	7	วัน
ไม่ดี หมายถึง	ไม่แนะนำให้ใช้งาน		

วัสดุที่ใช้ในการผลิตอิเล็กโทรด

ในการออกแบบหรือเลือกอิเล็กโทรดที่ใช้ในระบบอิเล็กโทรไลเซอร์ จะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติของอิเล็กโทรดที่ต้องการ ซึ่งอิเล็กโทรดที่ดีต้องมีลักษณะดังต่อไปนี้

- สามารถนำกระแสไฟฟ้าได้ดี
- มีพื้นผิวที่มีความสามารถในการเร่งปฏิกิริยาในการคายประจุของไฮโดรเจนหรือออกซิเจน
- มีพื้นผิวนขนาดใหญ่ที่เป็นส่วนที่ตัวเร่งปฏิกิริยาสัมผัสกับสารละลายอิเล็กโทรไลต์
- มีพื้นที่พอเพียงในการเกิดฟองก๊าซ

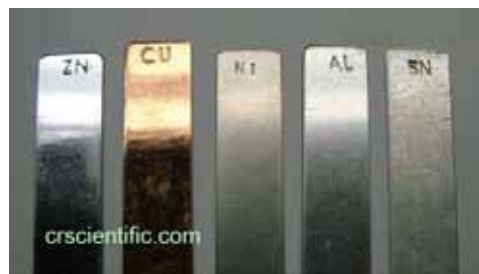
- เป็นตัวกลางที่ดีในการแยกก๊าซไฮดรอกซิลออกจากอิเล็กโทรไลต์ได้ที่แรงดันไฟฟ้าที่กำหนด โดยที่ไม่ทำให้อุณหภูมิของอิเล็กโทรไลต์สูงเกินไป

อิเล็กโทรไลเซอร์แบบอัลคาไลน์ประกอบด้วย อิเล็กโทรด 2 ขั้ว อิเล็กโทรดที่ต่อกับขั้วบวกเรียกว่า “แอโนด (Anode)” และอิเล็กโทรดที่ต่อกับขั้วลบเรียกว่า “แคโทด (Cathode)” เมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านอิเล็กโทรไลต์ โมเลกุลของน้ำจะรับอิเล็กตรอนจากขั้วแคโทด (ขั้วลบ) ซึ่งจะได้ผลิตภัณฑ์เป็น ก๊าซไฮโดรเจน ในขณะที่โมเลกุลของน้ำจะมีการปล่อยอิเล็กตรอนที่ขั้วแอโนด ที่เกิดก๊าซออกซิเจนขึ้น และผลลัพธ์คือ การแยกน้ำให้เป็น ก๊าซไฮโดรเจนและก๊าซออกซิเจน โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของไฮดรอกไซด์ไอออน OH^- และไฮโดรเจนไอออน H^+

ในกระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้านั้น โมเลกุลของไฮโดรเจนที่สะสมอยู่บริเวณพื้นผิวของขั้วแคโทด จะรวมตัวเป็นฟองก๊าซขนาดใหญ่พอที่จะหนีแรงตึงผิวและแรงโน้มถ่วงของโลก และจะหลุดจากพื้นผิวของอิเล็กโทรด ฟุ้งขึ้นสู่ผิวของอิเล็กโทรไลต์ ในเดียวกันที่ขั้วแอโนด ก็เกิดกระบวนการแบบเดียวกันขึ้น โดยไฮดรอกซิล (Hydroxyl) คายอิเล็กตรอนให้กับอิเล็กโทรดและทำปฏิกิริยากลายเป็นน้ำและก๊าซออกซิเจน ฟองก๊าซออกซิเจนที่ขนาดใหญ่พอ ก็จะหลุดจากพื้นผิวและฟุ้งขึ้นสู่ผิวของอิเล็กโทรไลต์เช่นเดียวกัน โดยปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นที่อิเล็กโทรดทั้งสองต้องการกระบวนการเชิงเร่งปฏิกิริยากับผิวของโลหะที่ใช้ทำอิเล็กโทรด โดยที่ไฮดรอกไซด์ไอออนจะคายประจุที่พื้นผิวโลหะเพื่อก่อให้เกิดฟิล์มดูดซับไฮโดรเจนบางๆขึ้น จากนั้นก็จะเกิดกระบวนการรวมตัวกันเพื่อทำให้เกิดโมเลกุลของไฮโดรเจนขึ้น ซึ่งกระบวนการดังกล่าวแปรตามลักษณะรูปร่างและธรรมชาติทางเคมีของพื้นผิวของขั้วอิเล็กโทรด ส่งผลให้ขั้วอิเล็กโทรดเป็นส่วนที่สำคัญที่มีผลต่อปริมาณก๊าซไฮดรอกซิลที่ได้จากกระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าในรถยนต์

วัสดุที่มีการนำมาใช้เป็นอิเล็กโทรดในระบบผลิตไฟฟ้าจากน้ำสำหรับรถยนต์ มีดังนี้

- นิกเกิล (Nickel)
- ทองคำขาวหรือแพลทินัม (Platinum)
- ไทเทเนียม (Titanium)
- แกรไฟต์ (Graphite)
- เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel)



นิกเกิลถือได้ว่าเป็นโลหะที่เหมาะสมสำหรับการนำมาทำขั้วอิเล็กโทรดสำหรับระบบอิเล็กโทรไลเซอร์แบบอัลคาไลน์เชิงอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตาม แทนที่จะใช้นิกเกิลทำเป็นอิเล็กโทรดทั้งชิ้น ซึ่งจะทำให้มีราคาที่สูงเกินไป ดังนั้นโดยปกติแล้วจะใช้แผ่นเหล็กแล้วทำการเคลือบผิวด้วยฟิล์มบางๆของนิกเกิล สำหรับโลหะที่ถือได้ว่ามีคุณสมบัติที่ดีที่สุดสำหรับการนำมาใช้เป็นอิเล็กโทรดคือ แพลทินัม ซึ่งสามารถทำให้เกิดปฏิกิริยาไฟฟ้าเคมีที่ได้ปริมาณก๊าซไฮดรอกซิลในปริมาณที่มากกว่าและมีอัตราการผลิตที่สูงกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ นิกเกิล รวมถึงไม่มีการทำปฏิกิริยากับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ทำให้ขั้วอิเล็กโทรดไม่เกิดการกัดกร่อน มีอายุการใช้งานที่ยาวนาน อย่างไรก็ตาม การนำแพลทินัม บริสุทธิ์มาทำขั้วอิเล็กโทรดนั้นจะไม่คุ้มค่าในเชิงเศรษฐศาสตร์เนื่องจาก มีราคาที่สูงเกินไป ดังนั้น ในทางปฏิบัติจะใช้โลหะที่มีราคาถูกกว่าเช่น ไทเทเนียม นำมาเคลือบผิวด้วยชั้นแพลทินัม สำหรับตัวเลือกที่มีราคาถูกลงคือ แกรไฟต์ หากแต่ มีอัตราการย่อยสลายสูง ทำให้มีข้อด้อยด้านความทนทานและเหมาะสมที่จะใช้สำหรับการทดลองกระบวนการอิเล็กโทรไลซิสในห้องปฏิบัติการมากกว่า

สำหรับอิเล็กโทรดที่ผลิตขึ้นมาใช้กับอิเล็กโทรไลเซอร์ในรถยนต์นั้น จะเน้นไปที่โลหะที่สามารถหาได้ โดยทั่วไปและมีราคาถูก ซึ่งได้มีผู้ทำการทดลองกับโลหะหลายชนิด อาทิเช่น ทองเหลือง อลูมิเนียมและ เหล็กกล้าไร้สนิม (สแตนเลส) เป็นต้น รวมถึง ไทเทเนียม แต่ปัจจุบันโลหะที่นิยมนำมาทำเป็นขั้วอิเล็กโทรดคือ เหล็กกล้าไร้สนิม โลหะเคลือบนิเกิล และโลหะเคลือบไทเทเนียม

เนื่องจากปริมาณก๊าซไฮโดรเจนจากอิเล็กโทรไลเซอร์ไม่สูงมากนัก ขนาดของอิเล็กโทรไลเซอร์ไม่ต้องใหญ่มาก ปรากฏว่าวัสดุที่ใช้ทำอิเล็กโทรดที่ผู้ผลิตนิยมนำมาใช้และราคาไม่แพงมากคือ เหล็กกล้าไร้สนิม ดังนั้น คู่มือจึงให้ความสำคัญต่อวัสดุชนิดนี้โดยให้ข้อมูลรายละเอียด ดังต่อไปนี้

เหล็กกล้าไร้สนิม (Stainless Steel)



เหล็กกล้าไร้สนิมเบอร์ 304 สามารถนำมาใช้เป็นอิเล็กโทรดและให้ประสิทธิภาพของการผลิตไฮโดรเจน (และออกซิเจน) ดีพอสมควรแต่อย่างไรก็ตาม ผู้ผลิตอิเล็กโทรไลเซอร์ส่วนใหญ่เลือกใช้เหล็กกล้าไร้สนิมเบอร์ 316L ซึ่งมีคุณสมบัติที่ดีกว่าเหล็กกล้าไร้สนิมเบอร์ 304 โดยมีส่วนผสมของ โครเมียม นิเกิลและ โมลิบดีนัม (Molybdenum) โดยส่วนผสมเหล่านี้ทำให้เหล็กกล้าไร้สนิมเบอร์ 316L มีความต้านทานการกัดกร่อนที่ดีขึ้นและมีความแข็งแรงมากขึ้นที่อุณหภูมิสูง อีกทั้งยังได้มีการพัฒนาให้เหล็กกล้าไร้สนิมเบอร์ 316L มีความทนต่อสารละลายกรดและเบสได้ดีขึ้นด้วย สำหรับเหล็กกล้าไร้สนิมเบอร์ 316L นั้นมีคุณสมบัติเหมือนกับเหล็กกล้าไร้สนิมเบอร์ 316 จะต่างกันตรงที่เบอร์ 316L นั้นมีปริมาณคาร์บอนที่ 0.03 เปอร์เซนต์ ในขณะที่เบอร์ 316 มีปริมาณคาร์บอนที่ 0.08 เปอร์เซนต์ ซึ่งปริมาณคาร์บอนที่น้อยลงนี้ทำให้สามารถลดสารคาร์ไบด์ที่เป็นพิษที่เกิดขึ้นจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นจากการเชื่อมได้

โดยปกติแล้วเหล็กกล้าไร้สนิมเบอร์ 316L นี้จะใช้ในงานประเภท ท่อไอเสีย ชิ้นส่วนของเตาหลอม อุปกรณ์แลกเปลี่ยนความร้อน ชิ้นส่วนเครื่องยนต์ไอพ่น อุปกรณ์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมยา ชิ้นส่วนที่สัมผัสกับน้ำเค็ม เป็นต้น ทำให้สามารถหาเหล็กกล้าไร้สนิมเบอร์ 316L ได้โดยทั่วไปภายในประเทศ สำหรับคุณสมบัติในการทนการกัดกร่อนเป็นอีกปัจจัยที่สำคัญเพราะอิเล็กโทรดต้องจมอยู่ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ตลอดเวลา สำหรับคุณสมบัติที่มีต่อการกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมเบอร์ 316L แสดงไว้ในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 การกัดกร่อนของเหล็กกล้าไร้สนิมตระกูล 316 ที่ความเข้มข้นสารละลายต่างๆ (ที่มา brownsgas.com)

อุณหภูมิ (°C)	20 °C						80 °C					
ความเข้มข้น (% โดยน้ำหนัก)	10	20	40	60	80	100	10	20	40	60	80	100
กรดซัลฟูริก (H ₂ SO ₄)	0	1	2	2	1	0	2	2	2	2	2	2
กรดไนตริก (HNO ₃)	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1	2
กรดฟอสฟอริก (H ₃ PO ₄)	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	1	2
กรดฟอร์มิก (CH ₂ O ₂)	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	1	0

หมายเหตุ 0 = มีความทนทานต่อการกัดได้ดี มีการสึกกร่อนน้อยกว่า 100 ไมครอน/ปี

1 = มีความทนทานต่อการกัดปานกลาง มีการสึกกร่อนระหว่าง 100 ไมครอน ถึง 1000 ไมครอน/ปี

2 = ไม่มีความทนทานต่อการกัด มีการสึกกร่อนมากกว่า 1000 ไมครอน/ปี

ประเภทและความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์

สารละลายอิเล็กโทรไลต์คือ สารละลายที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบหลักผสมกับสารประกอบจำพวกเกลือ การเลือกประเภทของอิเล็กโทรไลต์มีความสำคัญเนื่องด้วยจะต้องมีลักษณะดังต่อไปนี้คือ

- สามารถนำไฟฟ้าได้เป็นอย่างดี
- ไม่แยกสลายทางเคมีโดยแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับตัวอิเล็กโทรไลเซอร์ (นั่นคือ น้ำเท่านั้นที่เกิดการสลายตัว)
- มีเสถียรภาพมากพอที่จะไม่ถูกกำจัดไปพร้อมกับก๊าซไฮโดรอกซี
- เป็นสารละลายประเภท บัฟเฟอร์ (Buffer Solution) ที่ไม่ทำให้ค่าความเป็นกรด/ด่างเกิดการเปลี่ยนแปลงที่บริเวณอิเล็กโทรดมากเกินไป
- จัดหาได้ในท้องตลาด

สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่จะเป็นไปตามลักษณะเฉพาะข้างต้นได้ โดยปกติจะเป็นสารละลายที่มีความเป็นกรดสูงเช่น กรดซัลฟูริกหรือ สารละลายที่มีความเป็นด่างสูงเช่น โซเดียมไฮดรอกไซด์ อย่างไรก็ตาม เนื่องจากสารละลายกรดเข้มข้นจะมีฤทธิ์กัดกร่อนทำลายโลหะส่วนใหญ่ที่ใช้ทำอิเล็กโทรดจึงไม่เป็นที่นิยมใช้ ดังนั้นอิเล็กโทรไลเซอร์โดยส่วนใหญ่จะใช้สารละลายที่มีฤทธิ์เป็นด่างหรือเบส สำหรับระบบผลิตไฮโดรเจนจากน้ำด้วยไฟฟ้าสำหรับรถยนต์ นิยมใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เป็นสารละลายอิเล็กโทรไลต์ โดยเฉพาะที่ความเข้มข้นในช่วง 20-30 เปอร์เซ็นต์ เพราะความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะไม่ส่งผลต่อปริมาณก๊าซไฮโดรอกซีอย่างมีนัยสำคัญ ทรายไคที่กระแสปะไฟฟ้ายังคงสามารถไหลผ่านได้ จากสมการปฏิกิริยาเคมีของกระบวนการอิเล็กโทรไลเซอร์ที่ใช้สารละลายที่มีน้ำเป็นองค์ประกอบหลัก ประจุบวก H^+ จะสะสมที่ขั้วแอโนดและประจุลบ OH^- จะสะสมที่ขั้วแคโทด สามารถยืนยันได้โดยการใช้ตัวชี้ความเป็นกรด/ด่าง (pH Indicator) โดยที่อิเล็กโทรไลต์บริเวณขั้วแอโนดและแคโทดจะมีฤทธิ์เป็นกรดและด่างตามลำดับ อีออนไฮดรอกซิลลบที่เข้าใกล้ขั้วแอโนด (บวก) ส่วนใหญ่จะรวมตัวกับอีออนไฮโดรเจนบวก (H_3O^+) กลายเป็นน้ำ สำหรับอีออนไฮดรอกซิลลบที่เข้าใกล้ขั้วแคโทด (ลบ) ส่วนใหญ่จะรวมตัวกับอีออนไฮดรอกซิล (ลบ) กลายเป็นน้ำ นอกจากนั้นจะมีอีออนไฮโดรเจนส่วนน้อยที่เข้าใกล้แคโทด (อีออนไฮดรอกซิลส่วนน้อยที่เข้าใกล้แอโนด) ปรากฏการณ์นี้เป็นสาเหตุให้เกิดศักดาไฟฟ้าสูงเกินที่ขั้วอิเล็กโทรดทั้งสอง ในกระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้า สารละลายอิเล็กโทรไลต์จะเกิดการแยกตัวเป็นอีออนบวกและลบ โดยที่อีออนลบจะวิ่งเข้าหาขั้วแอโนดและทำให้เป็นกลางจากการสะสมของประจุบวก H^+ ในขณะที่อีออนบวกจะเข้าวิ่งเข้าหาขั้วแคโทดและเป็นกลางจากการสะสมของประจุลบ OH^- ซึ่งกระบวนการดังกล่าวทำให้เกิดการไหลของกระแสไฟฟ้าขึ้น จากกระบวนการข้างต้นทำให้ได้ข้อสังเกตในการเลือกอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมดังนี้

- ประจุบวกของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีค่าความต่างศักย์อิเล็กโทรดมาตรฐานที่สูงกว่าอีออนไฮโดรเจนจะทำให้ไม่เกิดก๊าซไฮโดรเจน
- ประจุลบของสารละลายอิเล็กโทรไลต์จะเกิดการแข่งขันกับอีออนไฮดรอกไซด์ในการคายอิเล็กตรอน ดังนั้นประจุบวกของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีค่าความต่างศักย์อิเล็กโทรดมาตรฐานที่ต่ำกว่าอีออนไฮดรอกไซด์จะทำให้เกิดการออกซิเดชันแทนการเกิดไฮดรอกไซด์ ซึ่งจะทำให้ไม่เกิดก๊าซออกซิเจน

ประจุบวกดังนี้คือ Li^+ , Rb^+ , K^+ , Cs^+ , Ba^{2+} , Sr^{2+} , Ca^{2+} , Na^+ และ Mg^{2+} มีความต่างศักย์ที่ต่ำกว่าประจุ H^+ ซึ่งเหมาะสมในการนำมาใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์ หากพิจารณาที่ราคา โปแตสเซียม โซเดียมและ ลิเทียมจะมีความเหมาะสมกว่าสารชนิดอื่นๆ หากใช้อิเล็กโทรไลต์ที่มีฤทธิ์เป็นกรด ประจุบวก H^+ ซึ่งไม่มีคู่แข่งในกระบวนการแยกน้ำ ประจุลบที่ใช้โดยทั่วไปจะเป็นเกลือซัลเฟต (SO_4^{2-}) เนื่องจากเกิดกระบวนการออกซิไดซ์ได้ยาก

จากการศึกษาพบว่า สารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่มีการใช้งานมีดังนี้

- ในกรณีมีฤทธิ์เป็นกรดคือ กรดซัลฟูริก (H_2SO_4)
- ในกรณีมีฤทธิ์เป็นเบสคือ โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ (KOH) และ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH)

สำหรับสารละลายอิเล็กโทรไลต์ชนิดที่มีความเหมาะสมในการนำมาใช้งานในอิเล็กโทรไลเซอร์สำหรับรถยนต์ มีดังนี้

โซเดียมไฮดรอกไซด์ มีสูตรเคมีคือ NaOH	โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ มีสูตรเคมีคือ KOH
<u>ข้อดี</u> • อิเล็กโทรดสะอาด • ราคาถูกและหาได้ง่าย • ก๊าซมีปริมาณมาก • ปลอดภัย <u>ข้อเสีย</u> • อันตรายกว่าสารอื่นๆ	<u>ข้อดี</u> • อิเล็กโทรดสะอาด • ราคาถูกและหาได้ง่าย • มีความเสถียรสูง <u>ข้อเสีย</u> • ไม่สามารถหาได้โดยทั่วไป

5

คุณสมบัติของไฮโดรเจนและความปลอดภัย

- คุณสมบัติของไฮโดรเจนมีดังนี้
 - เป็นก๊าซที่อุณหภูมิห้อง
 - น้ำหนักของโมเลกุลเบาที่สุด
 - มีน้ำหนักเบากว่าอากาศ 14 เท่า ทำให้ลอยตัวขึ้นด้วยความเร็ว 20 เมตรต่อวินาที การลอยตัวขึ้นนี้ถือได้ว่าเป็นข้อดีในเรื่องความปลอดภัยของก๊าซไฮโดรเจนที่มีการใช้งานในที่เปิดโล่ง
 - เป็นก๊าซที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่มีรสและ มนุษย์ไม่สามารถรับรู้ได้โดยไม่ใช้อุปกรณ์อื่นๆ
 - เป็นก๊าซที่ไม่มีพิษ (Toxic) และไม่เป็นพิษ (Poisonous) อย่างไรก็ตาม สามารถทำให้หมดสติจากการขาดอากาศหายใจได้ (Asphyxia)

- ติดไฟและสามารถระเบิดได้ที่ระดับความเข้มข้นในช่วงกว้าง ดังนั้นจำเป็นที่จะต้องเก็บและใช้ก๊าซไฮโดรเจนในพื้นที่ที่ไม่มีความร้อน เปลวและประกายไฟ
- ไม่มีฤทธิ์กัดกร่อน แต่สามารถเปลี่ยนคุณสมบัติทางกลของโลหะบางประเภทเช่น นิเกิลและไทเทเนียม เป็นต้น โดยทำให้เกิดรอยแยกและแตกหักง่าย (Brittle)

อันตรายจากไฮโดรเจน

อันตรายที่อาจเกิดขึ้นจากไฮโดรเจนอาจแบ่งออกเป็น 3 สถานการณ์ดังนี้ 1) การรั่ว (Leak) 2) การติดไฟ (Flame) และ 3) การระเบิด (Explosion)

การรั่ว (Leaks)

- ลักษณะทั่วไป

เนื่องจากไฮโดรเจนมีขนาดของโมเลกุลที่เล็กมาก ดังนั้นการรั่วของไฮโดรเจนจากภาชนะบรรจุหรือท่อส่งก๊าซจึงเป็นเรื่องปกติ

- เราจะไม่ทราบได้เลยว่ามีการรั่วของไฮโดรเจนเกิดขึ้นเนื่องจาก ไฮโดรเจนไม่มีสี ไม่มีกลิ่นและไม่มีรส
- หากมีการสะสมตัวของไฮโดรเจนในพื้นที่จำกัดและความเข้มข้นมากพอ ก็จะทำให้เกิดการขาดอากาศหายใจได้เหมือนกับก๊าซประเภทอื่นๆ (ยกเว้น ออกซิเจน)
- ไฮโดรเจนเหลวหากมีการรั่วออกสู่บรรยากาศจะทำให้บริเวณที่ใกล้กับจุดที่เกิดการรั่วเกิดลักษณะของเกล็ดน้ำแข็งขึ้น รวมทั้งเกิดกลุ่มควันขาวจากการกลั่นตัวของความชื้นจากอากาศโดยรอบ
- หากเกิดการหกของไฮโดรเจนเหลว จะต้องทำการออกจากพื้นที่และแจ้งหน่วยงานรักษาความปลอดภัยที่เกี่ยวข้องโดยด่วน
- การตรวจสอบการรั่วของไฮโดรเจน
 - ฟังและสังเกต เสียงที่เหมือนกับการรั่วของก๊าซที่ความดันสูง
 - ใช้เครื่องตรวจจับไฮโดรเจนแบบพกพา (Hydrogen Leak Detector)
 - ระบบเตือนก๊าซรั่วจะแจ้งสัญญาณเตือนหากตรวจพบการรั่วของก๊าซไฮโดรเจน



การติดไฟ (Flammables)

- ลักษณะทั่วไป
 - ไฮโดรเจนสามารถติดไฟได้หากมีความเข้มข้นในช่วง 4 ถึง 75 เปอร์เซ็นต์ของบรรยากาศ ซึ่งถือว่าเป็นช่วงที่กว้างเมื่อเทียบกับเชื้อเพลิงประเภทอื่นๆ
 - ความเข้มข้นของไฮโดรเจนขั้นต่ำในการติดไฟ (ที่ 4 เปอร์เซ็นต์) จะเกิดได้ง่ายหากมีการรั่วของไฮโดรเจนในพื้นที่ปิดที่ไม่มีการหมุนเวียนของอากาศ อย่างไรก็ตามสำหรับพื้นที่โล่ง กรณีนี้จะเกิดขึ้นได้ยากเนื่องจากไฮโดรเจนสามารถลอยขึ้นและสลายไปในบรรยากาศได้อย่างรวดเร็ว

- เมื่อไฮโดรเจนเกิดการเผาไหม้จะให้เปลวไฟสีน้ำเงิน ซึ่งยากแก่การมองเห็นในเวลากลางวัน
- ไฮโดรเจนที่ติดไฟจะมีการแผ่รังสีความร้อนที่ต่ำ ดังนั้นเราจะไม่สามารถรู้ถึงการมีอยู่ของเปลวไฟได้ จนกว่าจะเข้าใกล้มากๆ
- การเผาไหม้ไม่สามารถเกิดขึ้นได้ด้วยไฮโดรเจนเพียงอย่างเดียว จำเป็นที่จะต้องใช้ออกซิเจน (ออกซิเจน) และมีแหล่งกำเนิดประกายไฟ

- แหล่งกำเนิดประกายไฟที่มีศักยภาพที่ทำให้เกิดการติดไฟของไฮโดรเจน แสดงไว้ในตารางที่ 8

ตารางที่ 8 แหล่งกำเนิดประกายไฟ

แหล่งที่มีโอกาสเกิดจุดติดไฮโดรเจน	
การจุดประกายจากความร้อน (Thermal Ignition)	การจุดประกายจากไฟฟ้า (Electrical Ignition)
การสูบบุหรี่ (Personnel smoking)	ไฟฟ้าลัดวงจร, ประกายไฟ และการอาร์ค (Electrical short circuits, sparks, and arcs)
เปลวไฟ (Open flames)	การแตกหักของโลหะ (Metal fracture)
คลื่นกระแทกจากการระเบิดของถังไฮโดรเจน (Shock waves from tank rupture)	ไฟฟ้าสถิตย์ (Static electricity)
เศษวัสดุจากการระเบิด (Fragments from bursting vessels)	ฟ้าผ่า (Lightning)
ความร้อนจากเปลวไฟความเร็วสูง (Heating of high-velocity jets)	ประจุไฟฟ้าจากอุปกรณ์ที่กำลังทำงาน (Generation of electrical charge by equipment operations)
การเชื่อม (Welding)	
ประจุระเบิด (Explosive charges)	
ความเสียดทาน (Friction and galling)	
การเกิดการจุดติดไฟซ้ำจากคลื่นกระแทก (Resonance ignition (repeated shock waves in a flow system))	
การกระทบทางกล (Mechanical impact)	
การแตกหัก (Tensile rupture)	
ความสั่นสะเทือน (Mechanical vibration)	
ความร้อนที่ปล่อยออกมาจากเครื่องยนต์สันดาปภายใน (Exhaust from thermal combustion engine)	

- การตรวจจับเปลวไฟที่เกิดจากการเผาไหม้ของไฮโดรเจน
 - เปลวไฟสีน้ำเงินที่ได้จากการเผาไหม้ของไฮโดรเจนมองเห็นได้ยากในเวลากลางวัน เปลวไฟอาจเปลี่ยนเป็นสีเหลืองหากมีสิ่งเจือปนในอากาศเช่น ผุ่น หรือ โซเดียม เป็นต้น
 - เปลวไฟของไฮโดรเจนที่บริสุทธิ์ของไฮโดรเจนจะไม่มีควันไฟ
 - ไฮโดรเจนที่ติดไฟจะมีการแผ่รังสีความร้อนที่ต่ำ ซึ่งต่างจากเปลวไฟของเชื้อเพลิงไฮโดรคาร์บอน ดังนั้นเราจึงไม่สามารถรู้ถึงการมีอยู่ของเปลวไฟได้จนกว่าจะเข้าใกล้มากๆ
 - การตรวจจับเปลวไฟจากการเผาไหม้ของไฮโดรเจนสามารถดำเนินการโดยใช้ เครื่องตรวจจับเปลวไฟแบบพกพา เช่น กล้องจับภาพความร้อน (Thermal Imaging Camera)

การระเบิด (Explosions)

- ลักษณะทั่วไป

ความเข้มข้นของไฮโดรเจนในบรรยากาศต่ำที่สุดและสูงที่สุดที่จะทำให้เกิดการระเบิดได้คือ 14 และ 59 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่งช่วงนี้อยู่ในช่วงที่ทำให้เกิดการติดไฟของไฮโดรเจนได้ด้วย

- สาเหตุที่ทำให้เกิดการระเบิด

- การทำงานผิดพลาดของอุปกรณ์ทางกลของท่อเก็บไฮโดรเจนเหลวความดันสูง
- ปฏิกิริยาเคมีที่เกิดขึ้นอย่างรวดเร็วส่งผลให้เกิดก๊าซความร้อนในปริมาณมาก

- ความเกิดความดันสูงเกิน

หากไฮโดรเจนเหลวมีอุณหภูมิสูงขึ้นและเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอ จะขยายปริมาตรขึ้น 848 เท่าของปริมาตรของเหลว ดังนั้นท่อเก็บหรือท่อส่งไฮโดรเจนอาจเกิดความดันสูงเกินได้ตลอดเวลา อุปกรณ์ลดความดัน (Pressure-relief Devices (PRDs)) เช่น วาล์วลดความดัน ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่จำเป็นในการป้องกันการเกิดความดันเกิน โดยบริเวณที่ระบายก๊าซไฮโดรเจนทั้งจะต้องเป็นพื้นที่ที่ปลอดภัยด้วย

มาตรฐานเกี่ยวกับไฮโดรเจน

ข้อกำหนดและมาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับไฮโดรเจน

มาตรฐานส่วนใหญ่ถูกกำหนดขึ้นเพื่อรองรับการใช้ไฮโดรเจนในการกระบวนการผลิตทางอุตสาหกรรม รวมถึงการนำไฮโดรเจนไปใช้กับเซลล์เชื้อเพลิงในการผลิตกระแสไฟฟ้าและเซลล์เชื้อเพลิงในรถยนต์ ส่วนมาตรฐานของการใช้ไฮโดรเจนที่เกี่ยวข้องโดยตรงกับอิเล็กทรอนิกส์จะอ้างอิงและประยุกต์จากมาตรฐานต่างๆ ที่ได้จัดทำไว้แล้ว ซึ่งในการจัดทำมาตรฐานต่างๆ ได้มีองค์กรที่มีความร่วมมือร่วมกันในการจัดทำระเบียบและมาตรฐานต่างๆ ครอบคลุมการผลิต การจัดเก็บ การขนส่ง และการใช้งานไฮโดรเจนเพื่อให้เกิดความปลอดภัย เช่น

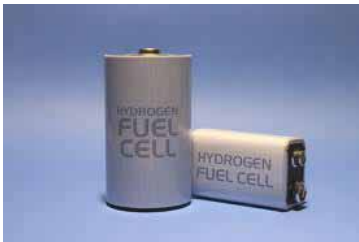
- American Gas Association (AGA)
- American Petroleum Institute (API)
- American Society for Testing and Materials (ASTM)
- American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE)
- American Society of Mechanical Engineers (ASME)
- Canadian Standards Association (CSA)
- สมาคมก๊าซอัด หรือ Compressed Gas Association (CGA)
- Consumer Product Safety Commission (CPSC)
- Environmental Protection Agency (EPA)
- Gas Technology Institute (GTI)
- Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)
- International Code Council (ICC)
- สมาคมด้านการป้องกันอัคคีภัยแห่งชาติ หรือ National Fire Protection Association (NFPA)

- National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) [U.S. Department of Transportation (DOT)]
- National Institute of Standards and Technology (NIST) [U.S. Department of Commerce]
- Occupational Safety and Health Administration (OSHA) [U.S. Department of Labor]
- Pipeline and Hazardous Materials Safety Administration (PHMSA) [U.S. Department of Transportation (DOT)]
- Society of Automotive Engineers (SAE)
- Underwriters Laboratory (UL)

มาตรฐานที่เกี่ยวข้องกับไฮโดรเจนที่มีการใช้งานในปัจจุบันตั้งแต่ การผลิต การขนส่ง การเก็บ สถานีเติม ก๊าซ/รถยนต์ไฮโดรเจนไปจนถึง เซลล์เชื้อเพลิงทั้งชนิดติดตั้ง (ขนาดใหญ่) และชนิดพกพา (ขนาดเล็ก) ได้สรุปไว้ใน ตารางที่ 10

ตารางที่ 10 มาตรฐานปัจจุบันที่เกี่ยวข้องกับไฮโดรเจนตั้งแต่การผลิต การจัดเก็บและขนส่ง การใช้งาน

เทคโนโลยี	มาตรฐาน
การผลิต 	ASME Boiler-Pressure Vessel Sec.VIII NFPA 70/NEC/CEC CGA G-5 H2 Commercial Production CGA G-5.3 Commercial Specification
การขนส่ง 	DOT 49CFR ASME B31.8 Gas Transmission ASME Boiler-Pressure Vessel Sec.VIII NFPA 58 Transport of LPG
การเก็บ 	NFPA 50 A: Gaseous Hydrogen NFPA 50 B: Liquid Hydrogen ASME Boiler-Pressure Vessel Sec.VIII

เทคโนโลยี	มาตรฐาน
สถานีเติมก๊าซ/รถยนต์ไฮโดรเจน 	HV-3 Hydrogen Vehicle Fuel NFPA 52: CNG Vehicle Fuel HV-1 Hydrogen Vehicle Connector NGV1: NGV Connector NGV2: CNG Storage Tank SAE 2578 System Safety SAE 2579 Hazardous Fluid Systems
เซลล์เชื้อเพลิง (ติดตั้ง/พกพา) 	CSA FC1 FC Power Plants CSA US Req 1.01 FC Supplemental CSA FC 3 Portable FC Systems ASME PTC 50 Performance Test

นอกจากนี้ ในแต่ละองค์กรยังสามารถจำแนกหรือแบ่งแยกรายละเอียดของมาตรฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้อง ได้ดังนี้

1. สมาคมด้านการป้องกันอัคคีภัยแห่งชาติ หรือ National Fire Protection Association (NFPA) ได้แบ่งหรือจำแนกรายละเอียดเกี่ยวกับมาตรฐานด้านความปลอดภัยสำหรับระบบไฮโดรเจนไว้ดังตารางที่ 11

ตารางที่ 11 มาตรฐานด้านความปลอดภัยของ NFPA

มาตรฐาน	รายละเอียด
NFPA 70	ว่าด้วยเรื่องมาตรฐานของระบบไฟฟ้าที่เกี่ยวข้องกับระบบผลิตไฮโดรเจน (National Electrical Code : NEC) มาตรา 500 ถึง 505
NFPA 55	ว่าด้วยเรื่องการจัดเก็บ (Storage) การใช้ (Use) และ การขนย้าย (Handling) ถังบรรจุก๊าซความดันสูงแบบเคลื่อนที่ (Portable) และแบบอยู่กับที่ (Stationary) และข้อกำหนดบางประการสำหรับการใช้อุปกรณ์ระบบผลิตไฮโดรเจน (Hydrogen Generating Devices)
NFPA 496	ว่าด้วยเรื่องข้อกำหนดในการออกแบบ และระเบียบวิธีปฏิบัติในการถ่าย ล้าง (Purged) และการอัดความดัน (Pressurized) สำหรับอุปกรณ์ที่ใช้ในระบบผลิตไฮโดรเจน
NFPA 853	มาตรฐานการติดตั้งโรงไฟฟ้าเซลล์เชื้อเพลิงแบบอยู่กับที่ และรายละเอียดบางประการสำหรับการติดตั้งระบบเซลล์เชื้อเพลิง (มาตรา 692)
NFPA 45	มาตรฐานการป้องกันอัคคีภัย (ไฟไหม้) และข้อกำหนดเกี่ยวกับปริมาณก๊าซที่ใช้ และระบบระบายอากาศสำหรับห้องปฏิบัติการ
NFPA 497	การจำแนกชนิดหรือประเภทของก๊าซติดไฟ (Flammable Gas) และพื้นที่อันตราย (Hazardous Locations) สำหรับการติดตั้งอุปกรณ์ไฟฟ้า
NFPA 54	มาตรฐานก๊าซเชื้อเพลิงแห่งชาติ (The National Fuel Gas Code)



2. สมาคมก๊าซอัด หรือ Compressed Gas Association (CGA) ได้กำหนดมาตรฐานที่เกี่ยวข้องไว้ดังตารางที่ 12

ตารางที่ 12 มาตรฐานด้านความปลอดภัยของ CGA

มาตรฐาน	รายละเอียด
G-5	ไฮโดรเจน
G-5,3	รายละเอียดของสินค้าหรืออุปกรณ์สำหรับระบบผลิตไฮโดรเจน (Commodity Specification for Hydrogen)
G-5,4	ระเบียบและข้อบังคับสำหรับระบบท่อไฮโดรเจนในบริเวณที่ใช้งาน (Consumer Locations)
H-1 และ H-2	ระเบียบและข้อบังคับสำหรับการจัดเก็บไฮโดรเจนด้วยวิธีเมทัลไฮไดรด์
ISO/TR-15916	ข้อกำหนดพื้นฐานด้านความปลอดภัยสำหรับระบบไฮโดรเจน



3. กลุ่มวิศวกรเครื่องกลอเมริกาหรือ American Society of Mechanical Engineers (ASME)

มาตรฐาน ASME (ASME Boiler and Pressure Vessel Code) เป็นมาตรฐานที่ครอบคลุมเกี่ยวกับภาชนะรับแรงดัน (Pressure Vessel) ท่อ (Piping) ข้อต่อ (Fittings) และวาล์วต่างๆ สำหรับระบบไฮโดรเจนความดันต่ำ อย่างไรก็ตามหากระบบที่ใช้งานมีความดันในระบบน้อยกว่า 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psig) ก็ไม่จำเป็นต้องปฏิบัติตามข้อบังคับตามมาตรฐานดังกล่าวทั้งหมด แม้ว่าข้อแนะนำเหล่านั้นจะให้ประโยชน์ในทางปฏิบัติก็ตาม ซึ่งจะเห็นว่ากรณีการใช้งานอิเล็กทรอนิกส์ในรถยนต์นั้นจะเป็นการผลิตและใช้งานโดยตรง จึงไม่มีความดันเกิดขึ้นในระบบ ดังนั้นข้อกำหนดเรื่องภาชนะรับแรงดันจึงเป็นการออกแบบที่ไม่ต้องการตัวประกอบของความปลอดภัยในการออกแบบ (Safety Factor) สูงมากนักและอาจจะไม่จำเป็นต้องทำการทดสอบการทนแรงดันตามมาตรฐาน อย่างไรก็ตามควรทดสอบในเรื่องของการรั่วซึมแบบสายตาเป็นอย่างน้อย (Visual Check)

4. นอกจากนี้ยังมีหน่วยงานอื่นๆ อีกหลายหน่วยงานที่รับผิดชอบหรือเข้ามามีส่วนเกี่ยวข้องในเรื่อง กฎ ระเบียบ หรือมาตรฐานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับไฮโดรเจนเช่น ISO (International Organization for Standardization), NREL (National Renewable Energy Laboratory), ANSI (American National Standard Institute), ECS (Electrochemical Society Inc.), IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) และ IEC (International Electrotechnical Commission) เป็นต้น ซึ่งกล่าวถึงรายละเอียดต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับระบบไฮโดรเจน โดยสามารถแบ่งออกเป็นกลุ่มได้ดังนี้

- มาตรฐาน กฎ ระเบียบ ด้านความปลอดภัยในการผลิตไฮโดรเจน
- มาตรฐาน กฎ ระเบียบ ด้านความปลอดภัยในการจัดเก็บไฮโดรเจน

- มาตรฐาน กฎ ระเบียบ ด้านความปลอดภัยในการจัดเก็บไฮโดรเจนเหลว โดยการจัดเก็บไฮโดรเจนเหลวจะอ้างอิงตามมาตรฐาน NFPA 50B ซึ่งเป็นมาตรฐานสำหรับการจัดเก็บไฮโดรเจนเหลวภายในอาคาร (Building)
- มาตรฐาน กฎ ระเบียบ ด้านความปลอดภัยในการจัดเก็บก๊าซไฮโดรเจนความดันสูง โดยการจัดเก็บก๊าซไฮโดรเจนความดันสูงในท่อบรรจุ (Cylinder) จะอ้างอิงตามมาตรฐาน NFPA 50A ซึ่งเป็นมาตรฐานสำหรับการจัดเก็บก๊าซไฮโดรเจนความดันสูงภายในอาคาร
- มาตรฐาน กฎ ระเบียบ ด้านความปลอดภัยในการขนส่งไฮโดรเจน
การขนส่งไฮโดรเจนที่จัดเก็บในท่อบรรจุจะอ้างอิงตามมาตรฐานของ Federal DOT (49 CFR 1995) หรือหน่วยงานด้านการขนส่งของสหรัฐอเมริกา (US Department of Transportation) โดยมีมาตรฐาน กฎ ระเบียบ หรือข้อบังคับต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการติดตั้งถังขนส่งก๊าซบนยานพาหนะขนส่งก๊าซทางบก
- มาตรฐาน กฎ ระเบียบ ด้านความปลอดภัยสำหรับถังเชื้อเพลิง
มาตรฐาน กฎ ระเบียบ ด้านความปลอดภัยสำหรับถังเชื้อเพลิงที่มีการจัดทำขึ้นโดยองค์กรต่างๆ ยกตัวอย่างเช่น กลุ่มวิศวกรยานยนต์ (Society of Automobile Engineers), ISO และ CSA Standards มีดังนี้
 - ISO 13985 Liquid Hydrogen - Land Vehicle Fuel Tanks (นานาชาติ)
 - ISO TC197 Working Group 6 / ISO/TS 15869 Gaseous Hydrogen Blends & Hydrogen Fuels: Land Vehicle Fuel Tanks (นานาชาติ)
 - CSA America HPRD1 Basic Requirements for Pressure Relief Devices for Compressed Hydrogen Vehicle Fuel Containers (สหรัฐอเมริกา)
 - CGA Publication C6.4 Methods for External Visual Inspection of Natural Gas Vehicle (NGV) and Hydrogen Vehicle (HV) Fuel Containers and Their Installation (สหรัฐอเมริกา)
 - EC No.79/2009 Type-Approval of Hydrogen-Powered Motor Vehicles (สหภาพยุโรป)
 - KS B ISO 13985 Liquid Hydrogen - Land Vehicle Fuel Tanks (เกาหลี)
- มาตรฐาน กฎ ระเบียบ ด้านความปลอดภัยสำหรับการเชื่อมต่อการเติมและจำหน่าย (Refueling / Dispensing Connections) ไฮโดรเจน
มาตรฐาน กฎ ระเบียบ ด้านความปลอดภัยสำหรับสำหรับการเชื่อมต่อการเติมและจำหน่ายไฮโดรเจน ที่มีการจัดทำขึ้นโดยองค์กรต่างๆ ยกตัวอย่างเช่น วิศวกรยานยนต์ (Society of Automobile Engineers), ISO และ CSA Standards มีดังนี้
 - SAE J2600 Compressed Hydrogen Vehicle Fueling Connection Devices (สหรัฐอเมริกาและประเทศไต้หวัน)
 - SAE J2601 - TIR Fueling Protocols for Light Duty Gaseous Hydrogen Surface Vehicles (สหรัฐอเมริกาและประเทศไต้หวัน)
 - ISO 17268 Compressed Hydrogen Surface Vehicle Refueling Connection Devices (นานาชาติ)
 - SAE J2799 - TIR 70 MPa Compressed Hydrogen Surface Vehicle Refueling Connection Device & Optional



หัวจ่ายก๊าซไฮโดรเจน

Vehicle to Station Communication (สหรัฐอเมริกาและประเทศใกล้เคียง)

- EC No.79/2009 Type-Approval of Hydrogen-Powered Motor Vehicles (สหภาพยุโรป)
- KS B ISO 13984 Liquid Hydrogen - Land Vehicle Fueling System Interface (เกาหลี)
- KS B ISO 17268 Compressed Hydrogen Surface Vehicle Refueling Connection Devices (เกาหลีใต้)

มาตรฐานความปลอดภัยเกี่ยวกับการจัดเก็บและขนส่งไฮโดรเจนในประเทศไทย



มาตรฐาน กฎ ระเบียบ ด้านความปลอดภัยในการจัดเก็บก๊าซไฮโดรเจนความดันสูง (Compressed Hydrogen)

การจัดเก็บก๊าซไฮโดรเจนความดันสูงในถังทรงกระบอก (Cylinder) จะอ้างอิงตามมาตรฐาน NFPA 50A ซึ่งเป็นมาตรฐานสำหรับการจัดเก็บก๊าซไฮโดรเจนความดันสูงภายในอาคาร โดยมีกฎ ระเบียบ หรือข้อบังคับต่างๆ ดังนี้

1. บริเวณพื้นที่จัดเก็บควรมีการระบายอากาศอย่างเพียงพอ แห้ง และอุณหภูมิต้องไม่เกิน 52 °C
2. ห่างจากเปลวไฟ หรือประกายไฟอย่างน้อย 7.5 เมตร
3. ควรเก็บแยกจาก ออกซิเจน หรือสารออกซิไดซ์ อย่างน้อย 6.0 เมตร หรือมีผนังที่ทำจากวัสดุไม่ติดไฟสูง 1.5 เมตร และสามารถทนความร้อนได้ 30 นาที
4. ควรเก็บถังทรงกระบอก (Cylinder) ในลักษณะตั้งขึ้น มีฝาครอบบวาล์ว และต้องมีที่ยึดป้องกันการล้ม
5. ติดป้าย “ห้ามสูบบุหรี่” และ “ห้ามทำให้เกิดประกายไฟ” ในบริเวณสถานที่จัดเก็บไฮโดรเจน
6. ควรใช้อุปกรณ์ไฟฟ้าที่สามารถป้องกันการเกิดประกายไฟได้ (Explosion Proof)
7. ต้องเก็บถังทรงกระบอก (Cylinder) ในพื้นที่หรือบริเวณที่ออกแบบไว้โดยเฉพาะหรือตามวัตถุประสงค์ของการนำไปใช้งาน
8. ควรแยกกันเก็บระหว่างถังที่บรรจุไฮโดรเจนเต็มกับถังเปล่าหรือถังที่ว่าง
9. ห้ามวางถังทรงกระบอก (Cylinder) ใกล้วัสดุที่มีฤทธิ์กัดกร่อน (Corrosive Materials) เช่น น้ำ (ซึ่งทำให้เกิดสนิม ในกรณีที่ถังเก็บทำด้วยเหล็ก)



มาตรฐาน กฎ ระเบียบ ด้านความปลอดภัยในการขนส่งไฮโดรเจน

การขนส่งไฮโดรเจนที่จัดเก็บในถังเก็บ หรือถังทรงกระบอก (Cylinder) จะอ้างอิงตามมาตรฐานของ Federal DOT (49 CFR 1995) หรือหน่วยงานด้านการขนส่งของสหรัฐอเมริกา (US Department of Transportation) โดยมีมาตรฐานกฎ ระเบียบ หรือข้อบังคับต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการขนส่งก๊าซไฮโดรเจน ดังนี้

1. ห้ามเปิดวาล์วของถังทรงกระบอก (Cylinder) ก่อนต่อเข้ากับหัวต่อใช้งาน



- ห้ามลาก กลิ้ง หรือทิ้งจากที่สูง ควรใช้อุปกรณ์ที่เหมาะสมในการขนย้าย เช่น รถเข็นสำหรับถัง cylinder โดยเฉพาะ
- ตรวจสอบระบบก่อนใช้งานว่ารั่วหรือไม่ หากมีต้องทำการแก้ไขก่อน การเคลื่อนย้ายหรือขนส่ง



- ใช้หัวต่อตามมาตรฐาน CGA (Cylinder Valve Connections) และห้ามดัดแปลงแก้ไขใดๆ ทั้งสิ้น

- ต้องติดป้าย “ก๊าซไวไฟ (Flammable Gas)” สีแดงที่ถังเก็บหรือภาชนะบรรจุก๊าซไฮโดรเจน ที่เห็นได้ชัดเจนขนาดไม่น้อยกว่า 10 x 10 เซนติเมตร



สำหรับประเทศไทย ได้มีประกาศกรมธุรกิจพลังงาน เรื่อง “หลักเกณฑ์และวิธีการติดตั้งถังขนส่งก๊าซ และลักษณะและส่วนประกอบภายในถังขนส่งก๊าซ” ซึ่งออกเป็นพระราชกฤษฎีกาเบกษาที่เกี่ยวข้องกับมาตรฐานหลักเกณฑ์ หรือข้อบังคับ ในการขนส่งก๊าซ ไว้ดังนี้

การติดตั้งถังขนส่งก๊าซบนยานพาหนะขนส่งก๊าซทางบกต้องปฏิบัติ ดังนี้

- กรณีถังขนส่งก๊าซที่ออกแบบและสร้างให้ตั้งอยู่บนฐานรองรับต้องยึดถังขนส่งก๊าซและถังรองรับให้ติดแน่นกับโครงรถ โดยใช้เหล็กยึดตรงบริเวณฐานรองรับถังขนส่งก๊าซและให้มีอุปกรณ์ในการยึดแน่นระหว่างถังส่งก๊าซกับโครงรถ เช่น สายรัดที่มีเกลียวแรง (Turnbuckle) สมอยึด (Anchor) หรือตัวค้ำยัน (stop) และวัสดุที่ใช้ทำอุปกรณ์ประกอบของฐานรองรับ สายรัดที่มีเกลียวแรง สมอยึด หรือ ตัวค้ำยัน ต้องออกแบบให้มีความเค้นไม่เกิน 0.25 เท่าของความต้านประลัย (Ultimate Tensile Strength) ของวัสดุที่ใช้ทำฐานรองรับถังขนส่งก๊าซ

ถังขนส่งก๊าซที่ไม่ได้สร้างฐานรองรับติดแน่นมาพร้อมกับตัวถังขนส่งก๊าซจากโรงงาน การยึดแน่นฐานรองรับเข้ากับถังก๊าซ ห้ามเชื่อมโดยตรงกับผนังถังขนส่งก๊าซ ต้องกระทำโดยเชื่อมเข้ากับแผ่นเหล็กรองรับ (Pad) ซึ่งสร้างพร้อมถังขนส่งก๊าซจากโรงงาน แผ่นเหล็กรองรับดังกล่าวต้องมีคุณสมบัติและการประกอบดังนี้

- ต้องเป็นวัสดุชนิดเดียวกับวัสดุที่ใช้ทำถังขนส่งก๊าซ
- ต้องมีความหนาไม่เกินความหนาของผนังถังขนส่งก๊าซและต้องมีความหนาไม่น้อยกว่า 6 มิลลิเมตร
- ต้องยื่นจากขอบของฐานรองรับออกไปทุกด้านไม่น้อยกว่า 4 เท่า ของความหนาของแผ่นเหล็กรองรับดังกล่าว
- ต้องลบมุมของแผ่นรองรับให้กลมและมีรัศมีเท่ากับ 0.25 ถึง 0.5 เท่าของความกว้างของแผ่นเหล็กรองรับ
- ต้องเจาะรูแผ่นเหล็กรองรับ เพื่อระบายอากาศและความชื้นก่อนเชื่อมเข้ากับผนังถังขนส่งก๊าซ และหลังจากเชื่อมเสร็จเรียบร้อยแล้วให้อุดรูดังกล่าวเพื่อป้องกันความชื้น
- ต้องเชื่อมแผ่นเหล็กรองรับเข้ากับผนังของตัวถังขนส่งก๊าซ โดยการเชื่อมต่อเนื่องแบบฟิลเลต (Continuous Fillet Welding)

- (ข) ตำแหน่งของแผ่นเหล็กรองรับต้องไม่ทับกับแนวเชื่อมของผนังถังขนส่งก๊าซ
2. กรณีถังขนส่งก๊าซที่ออกแบบและสร้างโดยไม่มีฐานรองรับ ให้ยึดถังขนส่งก๊าซแน่นกับโครงรถโดยมีฐานรองรับตามความยาวของตัวถังขนส่งก๊าซ ซึ่งสร้างพร้อมถังขนส่งก๊าซจากโรงงาน ฐานรองรับตามยาวต้องมีคุณสมบัติ ลักษณะ และการประกอบ ดังนี้
- (ก) ต้องเป็นวัสดุชนิดเดียวกันกับวัสดุที่ใช้ทำถังขนส่งก๊าซ
- (ข) ต้องรับน้ำหนักของถังขนส่งก๊าซและอุปกรณ์ รวมทั้งก๊าซที่บรรจุและแรงภายนอกต่างๆ ที่กระทำต่อถังขนส่งก๊าซได้ ทั้งนี้ต้องมีความหนาไม่น้อยกว่า 6 มิลลิเมตร
- (ค) ต้องเชื่อมฐานรองรับตามยาวเข้ากับผนังของถังขนส่งก๊าซ โดยการเชื่อมต่อเนื่องแบบฟิลเลต ยกเว้นที่ผ่านแนวเชื่อมตามขวางของถังขนส่งก๊าซ และตำแหน่งของแนวเชื่อมต้องไม่ทับกับแนวเชื่อมของถังขนส่งก๊าซ
- การยึดแน่นถังขนส่งก๊าซกับโครงของรถ ต้องใช้เหล็กประกับเชื่อมติดกับฐานรองรับตามยาวของถังขนส่งก๊าซ และอีกเหล็กประกับติดกับโครงรถโดยใช้สลักเกลียว (Bolt) หรือสลักเกลียวสองขา (Stud) ห้ามเชื่อมเหล็กประกับเข้ากับถังขนส่งก๊าซโดยตรง วัสดุที่ใช้ทำเหล็กประกับต้องออกแบบให้มีความเค้นไม่เกิน 0.25 เท่าของความเค้นประลัยของวัสดุที่ใช้ทำฐานรองรับตามยาวของถังขนส่งก๊าซ
- ถังขนส่งก๊าซที่จะนำมาติดตั้งตาม (1) และ (2) ต้องผ่านกรรมวิธีทางความร้อน (heat treatment) ภายหลังการเชื่อม หรือวิธีอื่นที่อธิบดีกรมธุรกิจพลังงานเห็นชอบ ยกเว้นถังขนส่งก๊าซที่สร้างจากเหล็กกล้าเจือสูง (High Alloy Steel) หรือวัสดุที่ไม่ใช่เหล็ก (Non-Ferrous Material) ทั้งนี้ถังขนส่งก๊าซที่ได้ผ่านกรรมวิธีทางความร้อน (Heat Treatment) ภายหลังการเชื่อม ต้องมีเอกสารรับรองจากโรงงานประกอบ
3. ถังขนส่งก๊าซที่ติดตั้งไว้บนยานพาหนะขนส่งก๊าซทางบกต้องทำด้วยสีขาว และต้องมีข้อความแสดง เครื่องหมายการค้า และหมายเลขโทรศัพท์ของผู้ค้า วันเดือนปี ที่ได้รับอนุญาตและเลขที่ใบอนุญาตประกอบกิจการบรรจุก๊าซ จากกรมธุรกิจพลังงาน ไว้ที่ด้านนอกของตัวถังขนส่งก๊าซทั้งสองด้านด้วยตัวอักษรสีแดงมีขนาดที่มองเห็นได้ชัดเจนและอ่านง่ายในระยะ 25 เมตร สำหรับเครื่องหมายการค้าของผู้ค้าต้องมีขนาดส่วนสูงไม่น้อยกว่า 1/4 ของเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของถังขนส่งก๊าซ ทั้งนี้ชื่อและหมายเลขโทรศัพท์ของผู้ได้รับอนุญาต หรือชื่อผู้ประกอบการขนส่ง ให้แสดงข้อความไว้ที่ด้านนอกของประตูยานพาหนะขนส่งก๊าซทางบกทั้งสองด้าน
4. ห้ามติดตั้งถังขนส่งก๊าซบนยานพาหนะขนส่งก๊าซทางบก ประเภทรถพ่วง ตามกฎหมายว่าด้วยการขนส่งทางบกและถังขนส่งก๊าซที่มีปริมาตรความจุเกินกว่า 35,000 ลิตร สำหรับถังขนส่งก๊าซที่ติดตั้งบนรถกึ่งพ่วง และถังขนส่งก๊าซนั้นมีก๊าซอยู่ด้วย รถคันที่ลากจูงจะต้องประกอบติดกันตลอดเวลา
5. อุปกรณ์ยึดแน่นถังขนส่งก๊าซเข้ากับโครงรถ ต้องออกแบบคำนวณให้สามารถรับความเค้นที่เกิดขึ้น เนื่องจากยานพาหนะขนส่งก๊าซเริ่มเคลื่อนที่ หยุดหรือเปลี่ยนทิศทาง
6. ส่วนประกอบของถังขนส่งก๊าซและอุปกรณ์ของถังขนส่งก๊าซ ต้องติดตั้งสูงจากระดับพื้นดินไม่น้อยกว่า 40 มิลลิเมตร ต่อทุกๆ 1 เมตร ของระยะห่างระหว่างเพลาล้อที่ประชิดกันซึ่งรองรับตัวถังขนส่งก๊าซ แต่ทั้งนี้จะต้องสูงจากระดับพื้นดินไม่น้อยกว่า 300 มิลลิเมตร
7. ต้องมีกล่องโลหะที่มีความแข็งแรงยึดแน่นติดกับโครงรถในตำแหน่งที่ปลอดภัยเพื่อป้องกันหัวท่อรับก๊าซ หัวท่อจ่ายก๊าซ และหัวท่อไอก๊าซ

สำหรับแบตเตอรี่ของยานพาหนะขนส่งก๊าซ จะต้องติดตั้งในด้านตรงข้ามกับด้านที่มีกล่องโลหะ ป้องกันหัวรับก๊าซ หัวท่อจ่ายก๊าซ และหัวท่อไอก๊าซและแบตเตอรี่ต้องอยู่ในกล่องโลหะที่ปิดมิดชิด

8. ต้องมีแผงเหล็กที่มีความแข็งแรงยึดแน่นติดกับด้านข้างของโครงรถทั้งสองข้างเพื่อป้องกันอุบัติเหตุ ขอบล่างของแผงเหล็กต้องอยู่สูงจากระดับพื้นดินไม่สูงกว่าอุปกรณ์ แต่ทั้งนี้ต้องไม่เกิน 550 มิลลิเมตร และขอบบนของแผงเหล็ก ต้องอยู่สูงจากระดับพื้นดินไม่น้อยกว่า 650 มิลลิเมตร และอยู่ระหว่างช่วงเพลาล้อที่ประชิดกันซึ่งรองรับตัวถังขนส่งก๊าซ ทั้งนี้ต้องห่างจากขอบข้างไม่เกินข้างละ 400 มิลลิเมตร
กล่องโลหะตามข้อ 7 ให้ถือเป็นส่วนหนึ่งของแผงเหล็กได้
9. ห้ามติดตั้งหัวท่อรับก๊าซ หัวท่อจ่ายก๊าซ และหัวท่อไอก๊าซในตำแหน่งที่มีระดับต่ำกว่าจุดศูนย์กลางของเพลาล้อ
10. ระยะห่างตามแนวราบ ระหว่างผนังด้านหลังห้องคนขับกับผนังถังขนส่งก๊าซส่วนที่ใกล้ที่สุดต้องไม่น้อยกว่า 75 มิลลิเมตร
11. ระยะห่างตามแนวราบ ระหว่างด้านในของกันชนท้ายกับผนังถังขนส่งก๊าซส่วนที่ใกล้ที่สุดต้องไม่น้อยกว่า 75 มิลลิเมตร
12. เส้นผ่านศูนย์กลางภายนอกของถังขนส่งก๊าซ ต้องไม่ยาวกว่าความยาวของกันชนท้าย
13. ช่องว่างระหว่างผนังขนส่งก๊าซและอุปกรณ์ประกอบถึงกับท่อไอเสียต้องไม่น้อยกว่า 75 มิลลิเมตร
14. ถังขนส่งก๊าซที่มีความจุเกิน 5,000 ลิตร ต้องมีท่อ (Manhole) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่น้อยกว่า 400 มิลลิเมตร
15. การติดตั้งอุปกรณ์นิรภัยแบบระบายบนถังขนส่งก๊าซต้องปฏิบัติ ดังนี้
 - (ก) ทิศทางที่ก๊าซระบายออกต้องอยู่ในแนวตั้ง
 - (ข) อุปกรณ์นิรภัยแบบระบายต้องติดตั้งไม่ให้มีส่วนหนึ่งส่วนใดโผล่พ้นเหนือผิวถัง หรือถ้ามีส่วนหนึ่งส่วนใดพ้นเหนือผิวถัง ต้องมีฝาครอบหรือโครงกำบัง
16. การติดตั้งลิ้นปิดเปิดที่ควบคุมได้ระยะไกลสำหรับถังขนส่งก๊าซ ให้มีที่ปิดลิ้นควบคุมได้ในระยะไกลไว้อย่างน้อย 2 จุด โดยให้จุดหนึ่งอยู่ที่ท้ายรถ และอีกจุดหนึ่งอยู่ภายในกล่องโลหะตามข้อ 7 และให้ส่วนที่ทำหน้าที่ปิดลิ้นปิดเปิด สามารถทำงานได้ทันทีเมื่อปิดฝากล่องโลหะ และกรณีที่ลิ้นปิดเปิดที่ควบคุมได้ระยะไกลเป็นแบบสายดึงจะต้องมีส่วนผสมโลหะที่หลอมละลายต่ำ (Fuse Metal) ด้วย และท่อทางจ่ายก๊าซให้ติดตั้งข้อต่อ (Coupling) เป็นชนิดยึดตรึงแน่นในตัว และปิดได้ด้วยตัวเองเมื่อสายหลุด (Check Lock) หรือชนิดเกลียวไว้ที่ปลายหัวท่อก๊าซจ่าย
17. สายยางที่ใช้สำหรับถ่ายเทก๊าซต้องเป็นชนิดที่ใช้กับก๊าซโดยเฉพาะและทนแรงดันได้ไม่น้อยกว่า 1.959 เมกะปาสกาล (20 กิโลกรัมต่อตารางเมตร) และที่ปลายข้างหนึ่งต้องติดตั้งข้อต่อ (Coupling) เป็นชนิดที่ใช้กับก๊าซโดยเฉพาะและชนิดยึดตรึงแน่นในตัว (Double Lock) หรือชนิดเกลียว และต้องได้รับการทดสอบทุกปีในวาระที่ต่ออายุใบอนุญาต พร้อมทั้งจะต้องมีที่เก็บสายที่ยานพาหนะขนส่งก๊าซให้เรียบร้อยโดยเฉพาะตัวข้อต่อ (Coupling) จะต้องยึดให้มั่นคงแข็งแรงเพื่อป้องกันการกระแทกกับถังขนส่งก๊าซ
18. ถังขนส่งก๊าซที่มีปริมาตรเกินกว่า 20,000 ลิตร ต้องติดตั้งอุปกรณ์นิรภัยแบบระบายไว้บนหลังถังไม่น้อยกว่า 2 ตัว โดยแต่ละตัวจะต้องมีสมรรถนะเพียงพอกับขนาดถังขนส่งก๊าซนั้น
19. ลักษณะภายในของถังขนส่งก๊าซที่มีขนาดความจุเกิน 15,000 ลิตร ต้องติดแผ่นเหล็กกันกระฉอก (Baffle) ไว้อย่างน้อย 1 แผ่น และทุกๆ ความจุ 15,000 ลิตร ต้องติดแผ่นเหล็กกันกระฉอกเพิ่ม

อีก 1 แผ่น และแผ่นเหล็กกันกระชกดังกล่าวต้องมีขนาดพื้นที่ไม่น้อยกว่าครึ่งหนึ่งของพื้นที่หน้าตัดตามขวางของตัวถังขนส่งก๊าซ และติดตั้งให้ศูนย์กลางของแผ่นเหล็กกันกระชกอยู่ในแนวเดียวกันกับศูนย์กลางของถังขนส่งก๊าซ

แนวทางและข้อกำหนดด้านความปลอดภัยของไฮโดรเจน [3]

- แนวทางและข้อกำหนดด้านความปลอดภัยในการผลิตไฮโดรเจน

พนักงาน (Personnel)

- พนักงานหรือบุคคลที่เกี่ยวข้อง และ/หรือ อยู่ใกล้ระบบผลิตไฮโดรเจน ต้องได้รับการอบรม (Training) เพื่อให้ทราบถึงธรรมชาติและคุณสมบัติในด้านต่างๆ ของไฮโดรเจนก่อนการปฏิบัติงาน
- ใช้หรือสวมใส่เครื่องมือหรืออุปกรณ์ป้องกันที่เหมาะสมในระหว่างการทำงาน เช่น



- หน้ากาก เมื่อมีการผลิตไฮโดรเจนภายใต้ความดันสูง หรือในกรณีที่มีการเชื่อมต่อ (Connected) หรือถอดออก (Disconnected) ระบบท่อ หรือองค์ประกอบอื่นๆ ของระบบผลิตไฮโดรเจน
- ถุงมือ ในกรณีที่มีการขนย้ายหรือหยิบจับอุปกรณ์ ชิ้นส่วนต่างๆ ที่สัมผัสกับของเหลวหรือไอก๊าซไฮโดรเจน (Cryogenic Liquids or Vapour Hydrogen)

- หลีกเลี่ยงการสวมใส่เสื้อผ้าที่ทำด้วยไนลอน (Nylon) หรือโพลีเมอร์สังเคราะห์ชนิดอื่นๆ , ไหม (Silk), ขนแกะ (Wool) เนื่องจากก่อให้เกิดไฟฟ้าสถิต และการลุกไหม้ติดไฟ ควรสวมใส่เสื้อผ้าที่ทำมาจากผ้าฝ้ายธรรมดา (Ordinary Cotton)
- หมั่นทำความสะอาดร่างกาย และเสื้อผ้าที่สวมใส่อยู่เสมอในระหว่างการทำงานหรือมีการผลิตไฮโดรเจน เพื่อหลีกเลี่ยงการปนเปื้อน (Contaminate) เข้าสู่ระบบผลิต

มาตรฐานการปฏิบัติงาน (Standard Operating Procedures)

- พื้นที่ (Area) ในบริเวณที่มีการผลิตไฮโดรเจนหรือปฏิบัติงานต้องไม่มีบุคคลอื่นที่ไม่เกี่ยวข้องกับการกระบวนการผลิต (Nonessential Personnel) ปะปนอยู่
- หมั่นเฝ้าระวัง ดูแล และป้องกันการรั่วไหล (Leak) ของไฮโดรเจนอยู่เสมอ โดยติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดหรือตรวจจับการรั่วไหลของไฮโดรเจน
- เฝ้าระวัง และป้องกันการรวมตัวหรือสะสมของ (ไอ) ไฮโดรเจน โดยการติดตั้งระบบระบายอากาศอย่างสมบูรณ์เพียงพอ
- ทำการสูมตัวอย่างในบริเวณที่มีการปฏิบัติงานหรือมีการผลิตไฮโดรเจน เพื่อป้องกันการติดไฟ และการระเบิดของไฮโดรเจนอยู่เสมอในขณะที่ปฏิบัติงาน

- ลดหรือกำจัดแหล่งที่อาจจะก่อให้เกิดการติดไฟได้ (Ignition Sources) ในระบบผลิตไฮโดรเจน หรือ ต้องไม่มีอุปกรณ์หรือแหล่งที่ก่อให้เกิดการติดไฟ (No Flame-Producing Devices)
- ใช้บัญชีตรวจสอบขั้นตอนปฏิบัติงาน (Operational Procedural Checklists) เพื่อความปลอดภัย และควบคุมมาตรฐานการผลิตในระหว่างการปฏิบัติงาน

- **แนวทางและข้อกำหนดด้านความปลอดภัยในการจัดเก็บไฮโดรเจน**

- สถานที่เก็บ**

- ตัวอาคารของสถานที่เก็บต้องต่อสายดิน เพื่อป้องกันไฟฟ้าสถิต มีป้ายบอกสถานที่เก็บก๊าซไฮโดรเจน อย่างชัดเจนและเป็นที่ยอมรับร่วมกัน
 - สถานที่เก็บต้องเป็นที่แห้ง, เย็น ระบายอากาศได้ดี, สร้างด้วยวัสดุทนไฟ, อยู่ห่างจากแหล่งความร้อน สารไวไฟ, กรด และสารกัดกร่อน
 - ใช้ระบบระบายอากาศ และอุปกรณ์ไฟฟ้าที่ไม่ก่อให้เกิดประกายไฟ ซึ่งไม่ทำให้เป็นแหล่งจุดติดไฟ โดยระบบไฟฟ้าในสถานที่จัดเก็บต้องเป็นชนิดกันระเบิด (Explosion Proof)
 - ภายในสถานที่จัดเก็บก๊าซไฮโดรเจนต้องมีเครื่องหมายทางออกบอกไว้ชัดเจนอย่างน้อย 2 ทางหรือมากกว่านั้น
 - ดูแลและปิดล็อกอย่างปลอดภัยในเวลาไม่ใช้ และการเข้าออกให้กระทำเฉพาะผู้ที่มีหน้าที่เกี่ยวข้อง เท่านั้น
 - ห้ามสูบบุหรี่, ทำให้เกิดเปลวไฟ ความร้อน และประกายไฟ ภายในสถานที่เก็บก๊าซไฮโดรเจน
 - สถานที่เก็บควรแบ่งพื้นที่ให้เป็นสัดส่วนสำหรับแยกเก็บถังหรือท่อที่ยังไม่ได้ใช้งานกับท่อที่ใช้งานแล้ว โดยทำเครื่องหมายไว้เพื่อป้องกันการสับสน และไม่เก็บรวมกันไว้กับท่อบรรจุก๊าซชนิดอื่น
 - ภายในสถานที่จัดเก็บต้องมีการติดตั้งสัญญาณเตือนภัย เครื่องดับเพลิง ชุดและอุปกรณ์ผจญเพลิง

- การเคลื่อนย้ายและการขนส่ง**

- พาหนะที่ใช้ในการขนส่ง ต้องระบายอากาศได้สะดวก
 - ตรวจสอบระบบก่อนการใช้งานว่ารั่วหรือไม่ หากมีต้องทำการแก้ไขก่อนการเคลื่อนย้าย หรือขนส่ง
 - ห้ามเคลื่อนย้ายถังหรือท่อเก็บไฮโดรเจนในแนวนอน ต้องเคลื่อนย้ายในแนวตั้งและจัดเรียงท่อในแนวตั้ง มีสายรัดหรือยึดท่อไว้เพื่อป้องกันไม่ให้ท้อล้ม
 - ห้ามเปิดวาล์วของถังหรือท่อเก็บไฮโดรเจนก่อนต่อเข้ากับหัวต่อใช้งาน
 - ใช้หัวต่อมาตรฐาน CGA (Cylinder Valve Connections) และห้ามดัดแปลงหรือแก้ไขใดๆ ทั้งสิ้น
 - เมื่อยังไม่ได้ใช้ก๊าซหรือขณะเคลื่อนย้ายต้องสวมฝาครอบ (cap) ทุกครั้ง เพื่อป้องกันวาล์วและท่อชำรุดซึ่งเป็นสาเหตุทำให้ก๊าซรั่วไหลได้
 - ห้ามลาก กลิ้ง หรือทิ้งถังจากที่สูง ควรใช้อุปกรณ์ที่เหมาะสมในการขนย้าย เช่น รถเข็นสำหรับถังทรงกระบอก (Cylinder) โดยเฉพาะ
 - ต้องระมัดระวังไม่ให้ท่อบรรจุก๊าซล้มกระแทกพื้นหรือได้รับแรงกระแทกอย่างรุนแรง
 - ติดป้าย “ก๊าซไวไฟ” (Flammable Gas) สีแดงที่ถังเก็บหรือภาชนะบรรจุก๊าซไฮโดรเจนที่เห็นได้ชัดเจนขนาดไม่น้อยกว่า 10 x 10 เซนติเมตร

การใช้ถังบรรจุก๊าซไฮโดรเจน

- ผู้ใช้หรือผู้เกี่ยวข้องควรได้รับการอบรมเกี่ยวกับท่อบรรจุก๊าซไฮโดรเจน โดยต้องอ่านฉลาก (tag) ข้างถังอย่างละเอียดก่อนใช้งาน และห้ามทำการลบ ฉีกหรือทำลายสัญลักษณ์แสดงข้อมูลต่างๆ ที่ติดมากับถังบรรจุ
- เมื่อเปิดหรือปิดวาล์วด้วยมือไม่ได้ให้ใช้ประแจที่ทำขึ้นเฉพาะเท่านั้น โดยห้ามใช้แรงกระแทกหรือต่อประแจให้ยาวขึ้น
- ห้ามทำการซ่อมวาล์ว (valve) ด้วยตนเอง
- หากพบถังหรือท่อบรรจุก๊าซไฮโดรเจนรั่วให้นำออกนอกตัวอาคาร และวางให้ห่างจากสิ่งต่างๆ ที่ก่อให้เกิดการเผาไหม้หรือติดไฟ เปิดวาล์วท่อก๊าซเล็กน้อยให้แก๊สระบายออกอย่างช้าๆ ติด tag หรือฉลากให้เห็นชัดเจน เตือนไม่ให้ผู้สูบบุหรี่ หรือสิ่งที่มีโอกาสทำให้เกิดเปลวไฟเข้ามาใกล้ แล้วจึงแจ้งให้ผู้ผลิตมารับคืน
- ในกรณีที่มีปัญหาใดๆ เกี่ยวกับการใช้ท่อหรือถังบรรจุก๊าซให้ติดต่อขอคำปรึกษาจากผู้จำหน่ายทันที



การผจญเพลิง

- หากเกิดก๊าซไฮโดรเจนรั่วออกจากท่อบรรจุแล้วเกิดการลุกไหม้หรือติดไฟ ให้รีบปิดวาล์วโดยทันที อย่าพยายามดับเพลิงโดยวิธีอื่นใดทั้งสิ้นเว้นแต่จะปลอดภัยถ้าทำเช่นนั้น เช่น ใช้น้ำมากๆ ฉีดพ่นเป็นฝอยที่ท่อเพื่อให้ท่อบรรจุก๊าซเย็นอยู่ตลอดเวลา ผู้ที่ทำงานที่ฉีดจะต้องอยู่ในตำแหน่งที่ปลอดภัยเท่านั้น

หากท่อเกิดระเบิด อย่างไรก็ตามถ้าเปลวไฟลุกลามไปยังท่ออื่นๆ ให้รีบหนีออกจากบริเวณนั้นทันที อย่าพยายามเข้าไปดับเพลิงโดยเด็ดขาด

- ท่อบรรจุก๊าซไฮโดรเจนที่ไม่โดนความร้อนจากเปลวไฟให้รีบเคลื่อนย้ายออกไปไว้ที่ปลอดภัยโดยเร็วที่สุด และอย่าลืมปิดวาล์วให้เรียบร้อยเสียก่อน แต่ถ้าไม่สามารถเคลื่อนย้ายได้ ให้ทำการฉีดพ่นน้ำหล่อเย็นเอาไว้ โดยทำการฉีดอยู่ในตำแหน่งที่ปลอดภัยเท่านั้น
- ห้ามถ่ายรูปบริเวณที่ติดไฟ หรือบริเวณใกล้เคียง
- อพยพทุกคนออกจากพื้นที่อันตรายในระยะ 50-100 เมตรโดยรอบ
- เมื่อมีเพลิงไหม้เกิดขึ้นควรแจ้งหน่วยดับเพลิงทันที โดยบอกเจ้าหน้าที่ดับเพลิงถึงตำแหน่งที่ตั้งวางท่อก๊าซทั้งหมด รวมทั้งท่อบรรจุก๊าซที่ไม่ได้อยู่ในบริเวณที่เกิดเพลิงไหม้โดยตรงด้วย
- ระบายอากาศในที่เกิดเหตุ โดยห้ามใช้อุปกรณ์ที่ทำให้เกิดประกายไฟ
- คลังที่เก็บท่อไฮโดรเจนจำนวนมากควรติดตั้งระบบดับเพลิงแบบพ่นน้ำเป็นฝอยเอาไว้ เพื่อเป็นการป้องกันเพลิงไหม้

ข้อแนะนำด้านความปลอดภัยในการทำงานกับอิเล็กโทรไลเซอร์

อุปกรณ์อิเล็กโทรไลเซอร์ที่ติดตั้งในรถยนต์จะมีการผลิตก๊าซไฮโดรเจนในปริมาณที่ไม่มากและไม่มีการจัดเก็บ หากละเลยไม่ปฏิบัติตามข้อกำหนดด้านความปลอดภัยที่เกี่ยวข้องกับไฮโดรเจน ก็อาจจะก่อให้เกิดอันตรายขึ้นได้ ซึ่งครอบคลุมในส่วนของ การติดตั้งและการใช้งาน

- การปฏิบัติงานกับอิเล็กโทรไลเซอร์
 - ควรทำงานในที่อากาศถ่ายเทสะดวก
 - ใช้อุปกรณ์ตรวจจับก๊าซไฮโดรเจน
 - ห้ามสูบบุหรี่หรือทำงานใกล้กับแหล่งกำเนิดประกายไฟ
 - สวมอุปกรณ์ป้องกันเช่น แว่นตาและถุงมือ เป็นต้น
 - ปฏิบัติตามกฎหมายพื้นฐานด้านความปลอดภัยสำหรับการติดตั้งและซ่อมบำรุงเครื่องยนต์
 - สอบถามหรือปรึกษาผู้เชี่ยวชาญ
- การติดตั้งอิเล็กโทรไลเซอร์



การติดตั้งในห้องเครื่องยนต์ ซึ่งเป็นวิธีที่นิยมใช้

- ควรจะยึดตัวอิเล็กโทรไลเซอร์ให้อยู่แนวที่ได้ระดับและไม่เกิดการกระทบกับสิ่งของรอบข้างเมื่อรถยนต์เคลื่อนที่
- ติดตั้งในตำแหน่งที่เข้าถึงได้ง่ายเพื่อความสะดวกในการซ่อมบำรุง
- ติดตั้งในตำแหน่งที่มีอุณหภูมิต่ำที่สุด โดยหลีกเลี่ยงแหล่งความร้อนเช่น ความร้อนจากเครื่องยนต์ และความร้อนจากตัวอิเล็กโทรไลเซอร์ที่ทำงานผิดปกติ หากไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ ให้แผ่นกันความร้อน

ติดตั้งในตำแหน่งด้านหน้าของหม้อน้ำ มีผู้ประกอบการบางรายที่ออกแบบตัวอิเล็กโทรไลเซอร์ให้มีรูปร่างที่เหมาะสมกับการติดตั้งในลักษณะดังกล่าว

- ควรจะยึดตัวอิเล็กโทรไลเซอร์กับตัวถังรถหรือส่วนที่ไม่การเคลื่อนที่และไม่เกิดการกระทบกับสิ่งของรอบข้างเมื่อรถยนต์เคลื่อนที่
- ต้องติดตั้งโดยไม่สัมผัสกับหม้อน้ำ

โดยทั้งสองกรณี ท่อส่งก๊าซจากอิเล็กโทรไลเซอร์ไปที่ท่อไอเสียของเครื่องยนต์จะต้องไม่สั้นเกินไป โดยปกติจะไม่สั้นกว่า 1.2 เมตร (โดยประมาณ) เพื่อป้องกันโอกาสของการติดไฟย้อนกลับ

การติดตั้งวงจรไฟฟ้า

- ควรจะมีอุปกรณ์ป้องกันกระแสเกินเช่น ฟิวส์ (Fuse) หรือเซอร์กิตเบรกเกอร์ (Circuit Breaker)
- ไฟฟ้าจะครบวงจร (อิเล็กโทรไลเซอร์ทำงาน) ก็ต่อเมื่อเครื่องยนต์ทำงานเท่านั้น

- อันตรายของสารเคมีที่ใช้เป็นอิเล็กโทรไลต์ เนื่องจากสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ใช้ในอิเล็กโทรไลเซอร์ส่วนใหญ่เป็นชนิดต่างได้แก่ โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมไฮดรอกไซด์ ดังนั้นอาจมีอันตรายหากมีการสัมผัสกับสารเคมีในปริมาณมากดังนี้
 - ต่อสุขภาพอนามัย (Health Effect)
 - การหายใจเข้าไป เป็นอันตรายต่อเยื่อเมือกและทางเดินหายใจส่วนบน ทำให้คลื่นไส้ อาเจียน มึนงง ปวดศีรษะ หายใจติดขัด โรคปอดอักเสบ
 - การสัมผัสผิวหนังจะก่อให้เกิดการระคายเคือง และดูดซึมผ่านผิวหนัง
 - การกลืนเข้าไปจะเป็นอันตราย ทำให้ไอ มึนงง ปวดศีรษะ คลื่นไส้ อาเจียน คอหอยอักเสบ หลอดอาหารอักเสบ
 - การสัมผัสดวงตาจะก่อให้เกิดการระคายเคือง
 - หากมีการสัมผัสกับสารอิเล็กโทรไลต์เหล่านั้น ควรปฏิบัติดังนี้
 - ถ้าหายใจเข้าไป ให้เคลื่อนย้ายผู้ป่วยไปที่อากาศบริสุทธิ์ ถ้าผู้ป่วยหยุดหายใจให้เครื่องช่วยหายใจ ถ้าหายใจติดขัดให้ออกซิเจน นำส่งไปพบแพทย์
 - ถ้ากลืนหรือกินเข้าไป ให้นำส่งไปพบแพทย์ทันที
 - ถ้าสัมผัสผิวหนัง ให้ล้างด้วยน้ำปริมาณมากๆ ทันทีอย่างน้อย 15 นาที ถอดเสื้อผ้าและรองเท้าที่ปนเปื้อนสารเคมีออก นำส่งไปพบแพทย์
 - ถ้าสัมผัสดวงตา ให้ล้างด้วยน้ำปริมาณมากๆ ทันที อย่างน้อย 15 นาที พร้อมกระพริบตาถี่ๆ นำส่งไปพบแพทย์

อุบัติเหตุจากการใช้ไฮโดรเจน

ไฮโดรเจนมีทั้งคุณและโทษเช่นเดียวกับการใช้เชื้อเพลิงอื่นๆ แต่ไฮโดรเจนอาจมีความรุนแรงมากกว่าและต้องมีข้อควรระมัดระวังมากกว่า อุบัติเหตุจากการใช้ไฮโดรเจนที่มีการรวบรวมสถิติไว้นั้น ส่วนใหญ่มาจากการผลิต การจัดเก็บ การขนส่งและการใช้งาน ซึ่งอาจนำไปสู่การเกิดไฟไหม้ และการระเบิดอย่างรุนแรง

สถิติของอุบัติเหตุจากไฮโดรเจนได้มีการรวบรวมไว้ อย่างเช่น เว็บไซต์ <http://www.h2incidents.org/list.asp> ได้จัดทำเป็นฐานข้อมูลเรียงตามลำดับอักษรภาษาอังกฤษ จากกรณีต่างๆ ที่เกิดขึ้นในทุกภาคอุตสาหกรรม การขนส่งก๊าซไฮโดรเจนในประเทศไทย

ลักษณะการขนส่งก๊าซไฮโดรเจนในประเทศไทยอาศัยข้อกำหนดของกรมขนส่งทางบกตามประกาศกรมการขนส่งทางบกเรื่องกำหนดประเภทหรือชนิดของวัตถุอันตรายซึ่งประกาศใช้เมื่อ วันที่ 29 มีนาคม 2543 ได้นิยามว่า “วัตถุอันตราย” หมายถึง สารสิ่งของวัตถุหรือวัสดุใดๆ ที่อาจเกิดอันตรายต่อสุขภาพและความปลอดภัยของคน สัตว์ ทรัพย์สินหรือสิ่งแวดล้อมระหว่างทำการขนส่ง ซึ่งแยกเป็น 9 ประเภท โดยก๊าซจัดอยู่ในประเภทที่ 2 ดังนี้

ประเภทที่ 2 ก๊าซ (Gases) หมายถึง สารที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส มีความดันไอมากกว่า 300 กิโลปาสกาล หรือมีสภาพเป็นก๊าซอย่างสมบูรณ์ที่ อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส และมีความดัน 101.3 กิโล

ปาสกาล ซึ่งได้แก่ ก๊าซอัด ก๊าซพิษ ก๊าซอยู่ในสภาพของเหลว ก๊าซในสภาพของเหลวอุณหภูมิต่ำและให้รวมถึงก๊าซที่ละลายในสารละลายภายใต้ความดันด้วย แยกเป็น 3 ประเภทย่อย คือ

2.1 ก๊าซไวไฟ (Flammable gases) หมายถึง ก๊าซที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียสและความดัน 101.3 กิโลปาสกาล สามารถติดไฟได้เมื่อผสมกับอากาศ 13 เปอร์เซ็นต์ หรือต่ำกว่าโดยปริมาตรหรือมีช่วงกว้างที่สามารถติดไฟได้ 12 เปอร์เซ็นต์ ขึ้นไป เมื่อผสมกับอากาศ โดยไม่คำนึงถึงความเข้มข้นต่ำสุดของการผสม

2.2 ก๊าซไม่ไวไฟและไม่เป็นพิษ (Non-flammable, Non-toxic gases) หมายถึง ก๊าซที่ขณะขนส่งมีความดันไม่น้อยกว่า 280 กิโลปาสกาล ที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส หรืออยู่ในสภาพของเหลวอุณหภูมิต่ำ

2.3 ก๊าซพิษ (Toxic gases) หมายถึง ก๊าซที่มีคุณสมบัติเป็นที่ทราบกันทั่วไปหรือได้มีการสรุปว่าเป็นพิษหรือกัดกร่อนหรือเป็นอันตรายต่อสุขภาพ

ในประเทศไทยมีจำนวนรถบรรทุกวัตถุอันตรายซึ่งระบุประเภทวัตถุอันตรายที่บรรทุก จำนวน 2,623 คันดังแสดงไว้ดังนี้

1.	รถบรรทุกน้ำมันดีเซล	มีจำนวน 1,188 คัน	คิดเป็นร้อยละ 45.29
2.	รถบรรทุกปิโตรเลียมเหลว (LPG)	มีจำนวน 275 คัน	คิดเป็นร้อยละ 10.48
3.	รถบรรทุกเบนซิน ซี6 เอช6	มีจำนวน 247 คัน	คิดเป็นร้อยละ 9.42
4.	รถบรรทุกยางมะตอยเหลว	มีจำนวน 219 คัน	คิดเป็นร้อยละ 8.35
5.	รถบรรทุกเฮกเซน	มีจำนวน 141 คัน	คิดเป็นร้อยละ 5.38
6.	รถบรรทุกกรดเกลือ	มีจำนวน 58 คัน	คิดเป็นร้อยละ 2.21
7.	รถบรรทุกน้ำมันเตาและน้ำมันหล่อลื่น	มีจำนวน 57 คัน	คิดเป็นร้อยละ 2.17
8.	รถบรรทุก NGV	มีจำนวน 52 คัน	คิดเป็นร้อยละ 1.98
9.	รถบรรทุกกรดกำมะถัน	มีจำนวน 41 คัน	คิดเป็นร้อยละ 1.56
10.	รถบรรทุกเมทานอล	มีจำนวน 38 คัน	คิดเป็นร้อยละ 1.45

สำหรับสถิติการเกิดอุบัติเหตุจากการใช้ไฮโดรเจนในประเทศไทยยังไม่มีข้อมูลที่ได้เก็บรวบรวมไว้ อาจจะเนื่องจากการใช้ไฮโดรเจนยังจำกัดอยู่ในเฉพาะโรงงานอุตสาหกรรม แต่สำหรับสถิติการเกิดอุบัติเหตุจากการใช้ก๊าซชนิดอื่นๆ มีรายงานการเกิดอุบัติเหตุ ความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สิน ซึ่งสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 13

ตารางที่ 13 สถิติการเกิดอุบัติเหตุท่อบรรจุก๊าซ (Compressed Gas Cylinders) ระเบิด

ลำดับ	วันที่เกิดเหตุ	การเกิดอุบัติเหตุสถานที่เกิดเหตุ	เสียชีวิต (คน)	บาดเจ็บ (คน)	ค่าเสียหาย (บาท)	ข้อสันนิษฐาน / สาเหตุการ เกิดอุบัติเหตุ
1	16 ส.ค. 2526	- ถังเก็บออกซิเจนเหลวระเบิด	4	9	10.0 ล้าน	-
2	2527	- ท่อบรรจุ O2 ระเบิด	1	2	2.5 แสน	- ท่อหมดสภาพ - ปลอยให้ท่อตกกระแทกพื้นขณะขนส่ง
3	2528	- ท่อบรรจุ O2 ระเบิด	2	1	2.5 แสน	- ท่อหมดสภาพ - ปลอยให้ท่อตกกระแทกพื้นขณะขนส่ง
4	5 ต.ค. 2529	- ท่อบรรจุ O2 ระเบิด	3	-	1.0 ล้าน	- เกิดความผิดปกติจากการสร้างท่อ - เป็นการระเบิดในโรงพยาบาล ขณะนำท่อ O2 มาให้ O2 แก่คนไข้
5	25 พ.ย. 2542	- ท่อบรรจุ O2 ระเบิด	1	2	5.0 แสน	- ท่อหมดสภาพ - ปลอยให้ท่อตกกระแทกพื้นขณะขนส่ง
6	6 ก.ย. 2543	- ท่อบรรจุ O2 ระเบิด	1	-	3.0 ล้าน	- เกิดรอยร้าวที่ท่อมาเป็นระยะเวลานาน - เป็นการระเบิดขณะบรรจุ O2 ในโรงงานบรรจุ
7	27 ก.พ. 2544	- ท่อบรรจุ O2 ระเบิด	2	2	5.0 แสน	- ท่อหมดสภาพ - เกิดรอยแยกเป็นร่องลึกที่ไหลท่อด้านในมาเป็นระยะเวลานาน
8	3 ม.ค. 2545	- ถังสะสมความดัน (Accumulators) ของระบบไฮดรอลิกระเบิด	1	15	40.0 ล้าน	- เติมน้ำฉีดโดยใช้ O2 เติมน้ำเข้าไปใน Accumulator ของระบบไฮดรอลิก แทนที่จะใช้ N2 ซึ่งเป็นก๊าซเฉื่อย
9	25 มิ.ย. 2545	- ท่อบรรจุ O2 ระเบิด	1	-	2 แสน	- ท่อไม่สามารถรับความดันขณะทำการบรรจุ O2 ได้
10	25 ธ.ค. 2545	- ท่อบรรจุ O2 ระเบิด	-	4	2 แสน	- เป็นท่อเก่าและหมด สภาพการใช้งาน
11	21 ก.ค. 2546	- ระบบปรับอากาศระเบิดขณะทดสอบความดันด้วย O2	-	3	1 แสน	- นำ O2 จากท่อบรรจุทำการทดสอบแรงดันในระบบปรับอากาศแทนที่จะใช้ N2 ซึ่งเป็นก๊าซเฉื่อย
12	31 ต.ค. 2546	- Accumulators ของระบบไฮดรอลิกระเบิด	3	-	10.0 ล้าน	- เติมน้ำฉีดโดยใช้ O2 เติมน้ำเข้าไปใน Accumulator ของระบบไฮดรอลิก แทนที่จะใช้ N2 ซึ่งเป็นก๊าซเฉื่อย
13	2 มี.ค. 2547	- ท่อบรรจุ O2 ระเบิด	1	-	2.5 แสน	- ท่อบรรจุก๊าซหมดสภาพเกิดระเบิดขณะทำการบรรจุก๊าซในโรงงานบรรจุ
14	11 พ.ค. 2547	- ท่อบรรจุ O2 ระเบิด	1	1	2.5 แสน	- ท่อบรรจุก๊าซหมดสภาพเกิดระเบิดขณะทำการบรรจุก๊าซในโรงงานบรรจุ

ลำดับ	วันที่เกิดเหตุ	การเกิดอุบัติเหตุสถานที่เกิดเหตุ	เสียชีวิต (คน)	บาดเจ็บ (คน)	ค่าเสียหาย (บาท)	ข้อสันนิษฐาน / สาเหตุการ เกิดอุบัติเหตุ
15	7 ส.ค. 2547	- ท่อบรรจุ O2 ระเบิด	1	1	5 แสน	- ท่อหมดสภาพ - ปลอยให้ท่อตกระแทกพื้นขณะคนงานกำลังเคลื่อนย้ายท่อ
16	7 ก.ย. 2547	- ภาชนะบรรจุ LPG ระเบิด	1	3	5 แสน	- ใช้ก๊าซผิด โดยใช้ O2 ตัวเพิ่มแรงดันให้กับภาชนะบรรจุ LPG ขนาด 48 กก. เพื่อถ่ายเทก๊าซ LPG ลงถังเล็กแทนที่จะใช้ N2 ซึ่งเป็นก๊าซเฉื่อย
17	21 ก.พ. 2548	- ถังพัก LPG ของสถานีจ่ายก๊าซของโรงแรมระเบิดและเกิดเพลิงลุกไหม้เสียหาย	-	1	2 ล้าน	- ใช้ O2 จากท่อบรรจุก๊าซทำการทดสอบเพื่อหารอยรั่วของระบบท่อ (Pipeline) ของ LPG แทนที่จะใช้ไนโตรเจนซึ่งเป็นก๊าซเฉื่อย
18	18 ก.ค. 2548	- ท่อบรรจุ O2 ระเบิด	1	1	2.0 แสน	- ท่อบรรจุ O2 หมดสภาพการใช้งาน - คนงานใช้เท้าถีบให้ท่อกลิ้งลงทางด้านท้ายรถบรรทุก 6 ล้อ ตกระแทกพื้น
19	*	- ให้ N2 แก่คนไข้แทนที่จะใช้ O2	2	-	-	- ใช้ก๊าซผิดโดยให้ N2 แก่คนไข้ในโรงพยาบาล แทนที่จะใช้ O2 - ไม่มีการทำสีและสัญลักษณ์ที่ท่อบรรจุก๊าซ N2 และ O2 - วาล์วท่อบรรจุก๊าซ (Cylinder Valves) ของท่อ N2 และ O2 เป็นตัวเดียวกัน จึงทำให้เกิดความสับสนในการใช้

* เป็นกรณีที่เกิดขึ้นจริงในอดีตแต่ไม่เป็นข่าว และไม่มีรายงาน

หมายเหตุ - เป็นสถิติเท่าที่กรมโรงงานอุตสาหกรรมได้รับการประสานงานและตรวจที่เกิดเหตุ

- O2 หมายถึง ก๊าซออกซิเจน
- N2 หมายถึง ก๊าซไนโตรเจน
- LPG หมายถึง ก๊าซปิโตรเลียมเหลว

กรณีของการใช้ไฮโดรเจนที่ผลิตจากอิเล็กโทรไลเซอร์ นั้นยังนับว่ามีอันตรายน้อยกว่า เนื่องจากปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้น้อยและไม่ต้องการจัดเก็บทำให้ไม่มีไฮโดรเจนเหลืออยู่หากไม่ต้องการใช้ อย่างไรก็ตามแม้ว่าปริมาณไฮโดรเจนที่ใช้มีน้อย แต่หากกละเลยถึงเรื่องความปลอดภัยก็อาจทำให้เกิดอุบัติเหตุ ทำให้เกิดความเสียหายต่อร่างกายหรือทรัพย์สินได้เช่น เกิดรอยไหม้ หรือบาดเจ็บจากสะเก็ดชิ้นส่วนของอุปกรณ์ (หากระเบิด)

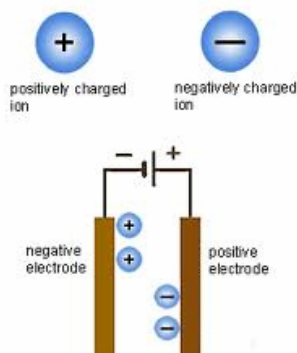
สำหรับอุบัติเหตุในประเทศไทยจากการใช้อุปกรณ์ผลิตไฮโดรเจนจากน้ำนั้น ยังไม่มีการรายงานถึงจำนวนอุบัติเหตุและความเสียหาย แต่จากการสอบถามผู้ผลิตบางส่วน พบว่า สาเหตุส่วนใหญ่มาจากความประมาทหรือใช้งานไม่ถูกต้อง แต่ไม่ได้ส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยรุนแรง ตัวอย่างของอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นเช่น

- เปิดสวิตช์อุปกรณ์ผลิตก๊าซไฮโดรเจนทิ้งไว้เป็นเวลานานมาก โดยไม่สตาร์ทรถยนต์ อาจทำให้เกิดเปลวไฟย้อนกลับ (Back fire) มาที่ท่อร่วมไอดีได้
- เนื่องจากสารเคมีแรงปฏิกิริยา KOH มีฤทธิ์กัดกร่อน หากสัมผัสผิวหนังโดยตรง หรือหกเปื้อนรถยนต์ ต้องล้างตามด้วยน้ำสะอาดทุกครั้ง

6

การทดสอบอิเล็กโทรไลเซอร์ของโครงการพัฒนาคู่มือระบบผลิตไฮโดรเจนจากน้ำ [4]

เนื่องจากปัจจัยที่มีผลต่อการผลิตก๊าซไฮโดรเจนของอุปกรณ์อิเล็กโทรไลเซอร์สำหรับรถยนต์สามารถสรุปเป็นตัวแปรสำคัญที่เกี่ยวข้องได้ดังนี้



1. ขนาดของพื้นที่ผิวของอิเล็กโทรดที่สัมผัสกับอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งแปรผันตรงกับขนาดและจำนวนของคู่อิเล็กโทรด
2. ชนิดของโลหะที่ใช้ทำอิเล็กโทรด
3. ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด (แอโนดและแคโทด)
4. ความสามารถในการนำกระแสของอิเล็กโทรไลต์ ซึ่งแปรตามความเข้มข้น
5. การไหลเวียนของสารอิเล็กโทรไลต์ที่เข้าไปสัมผัสกับพื้นที่ผิวของอิเล็กโทรด
6. ปริมาณของแรงดันและกระแสไฟฟ้าที่ใช้

การทดสอบหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมของอุปกรณ์อิเล็กโทรไลเซอร์

จากโครงการพัฒนาคู่มือระบบผลิตไฮโดรเจนจากน้ำในรถยนต์ที่มีประสิทธิภาพและความปลอดภัย ได้มีการออกแบบเซลล์ 1 คู่และนำมาทดสอบประสิทธิภาพของอิเล็กโทรไลเซอร์โดยได้เลือกใช้วัสดุ 3 ชนิดที่ใช้ทำอิเล็กโทรดมาทำการศึกษาได้แก่ สแตนเลส 304, อลูมิเนียม 6063, และทองแดง โดยในการทดสอบได้ทำการปรับขนาดของพื้นที่ของอิเล็กโทรด ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่แตกต่างกันไป ปรากฏว่าผลของตัวแปรดังกล่าวทำให้สามารถสรุปเป็นเกณฑ์ต่างๆ ไป เพื่อเป็นแนวทางในการพิจารณาเลือกอุปกรณ์อิเล็กโทรไลเซอร์ที่เหมาะสมได้

■ ระยะห่างระหว่างขั้วแอโนดและแคโทด

การทดสอบในส่วนนี้จะเป็นการปรับระยะห่างระหว่างขั้วแอโนดและแคโทดที่ทำจากโลหะชนิดหนึ่งๆ ไว้ที่ 3, 5, 10 และ 15 มิลลิเมตร

- **การปรับปริมาณกระแสที่ไหลผ่านขั้วอิเล็กโทรด**
โดยจะควบคุมให้กระแสที่ไหลระหว่างขั้วอิเล็กโทรดทั้งสองมีค่าคงที่ไว้ 5 ระดับคือ 1, 2, 3, 4, และ 5 แอมป์แล้ววัดปริมาณของพลังงานไฟฟ้า (จูล) ที่ใช้ต่อปริมาตรก๊าซ 500 มิลลิลิตร ที่ระดับกระแสต่างๆ
- **พื้นที่ของขั้วแอโนดและแคโทด**
กำหนดให้อิเล็กโทรดมีขนาดพื้นที่โดยมีความกว้าง 5 เซนติเมตรและความยาว 3 ระดับคือ 5, 10 และ 15 เซนติเมตร ซึ่งจะได้พื้นที่ของขั้วแอโนด และแคโทด 3 ขนาดคือ 25, 50, และ 75 ตารางเซนติเมตร
- **การปรับเปลี่ยนความเข้มข้นสารละลายอิเล็กโทรไลต์**
สำหรับสารอิเล็กโทรไลต์ที่เลือกใช้กับระบบต้นแบบคือ โปแตสเซียมไฮดรอกไซด์ เนื่องจากหาได้ง่ายและเป็นที่ยอมรับจากผู้ผลิตรบบอิเล็กโทรไลเซอร์เชิงพาณิชย์ โดยจะทำการปรับเปลี่ยนความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ที่ 1% - 40%
- **การปรับเปลี่ยนชนิดโลหะที่ใช้ทำอิเล็กโทรด**
เหล็กสแตนเลส 304, อลูมิเนียม 6063 และทองแดง

ผลการทดสอบ

ผลการทดสอบโดยปรับเปลี่ยนตัวแปรต่างๆ พบว่าตัวแปรที่มีผลต่อการใช้พลังงานในการผลิตก๊าซไฮโดรเจนมีดังนี้

- ระยะห่างระหว่างขั้วอิเล็กโทรด จะต้องให้ค่าน้อยที่สุดเพื่อให้แผ่นอิเล็กโทรดใกล้กันมากที่สุด แต่ต้องไม่แคบจนทำให้การไหลของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ที่ไหลไม่สะดวก อันมีผลทำให้เกิดความต้านทานไฟฟ้ามากขึ้น ในการทดสอบของโครงการพบว่าระยะห่างที่เหมาะสมอยู่ที่ 5 มิลลิเมตร ที่ทำให้การใช้พลังงานในการผลิตไฮโดรเจนต่ำที่สุด
- ระดับความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ จะต้องให้ความเข้มข้นสูงเพื่อให้ความนำไฟฟ้าสูงขึ้นส่งผลให้การใช้พลังงานในการผลิตไฮโดรเจนต่ำที่สุด ในการทดสอบของโครงการพบว่าระดับความเข้มข้น 20-30% ที่ทำให้การใช้พลังงานในการผลิตไฮโดรเจนต่ำที่สุด
- พื้นที่ของขั้วอิเล็กโทรดจะต้องมีค่ามาก ซึ่งจะช่วยในเรื่องของการระบายความร้อนและการแลกเปลี่ยนอิเล็กตรอน แต่หากพื้นที่มากเกินไปอาจทำให้ต้นทุนในการผลิตอิเล็กโทรไลเซอร์สูงขึ้นโดยไม่จำเป็น

ดังนั้น จึงพอสรุปเป็นแนวทางเบื้องต้นในการพิจารณาเกณฑ์ขั้นต่ำที่เหมาะสมของอุปกรณ์อิเล็กโทรไลเซอร์สำหรับที่สนใจหรือผู้ผลิต ถึงตัวแปรที่มีผลต่อการใช้พลังงานไฟฟ้าในการผลิตไฮโดรเจนดังนี้

- เหล็กกล้าไร้สนิม (สแตนเลส) เบอร์ 304 ขึ้นไปเหมาะสมในการนำมาใช้เป็นแผ่นอิเล็กโทรดสำหรับอิเล็กโทรไลเซอร์ในรถยนต์
- ความเข้มข้นของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ ที่เหมาะสมจากการทดสอบอยู่ที่ 200-300 กรัมต่อลิตร หรือ 20-30%
- ระยะห่างระหว่างแผ่นอิเล็กโทรด 1 คู่อยู่ระหว่าง 5 มิลลิเมตร

อย่างไรก็ตาม ผลของการทดสอบเป็นข้อมูลสำหรับใช้เป็นเกณฑ์ตัวแปรบางอย่างที่จะทำให้ประสิทธิภาพการใช้พลังงานของอุปกรณ์อิเล็กโทรไลเซอร์ไม่ต่ำจนเกินไปและเหมาะสมที่จะนำมาใช้งาน

อิเล็กโทรไลเซอร์ที่ติดตั้งในรถยนต์โดยอาศัยไฟฟ้าจากแบตเตอรี่ ยังมีข้อถกเถียงในเรื่องของผลประหยัดน้ำมัน และปริมาณการปล่อยมลพิษ ระหว่างนักวิจัย วิศวกร และผู้ผลิตอุปกรณ์อิเล็กโทรไลเซอร์ ที่เห็นแตกต่างโดยกลุ่มที่ไม่เชื่อว่าอิเล็กโทรไลเซอร์ที่ติดตั้งในรถยนต์โดยอาศัยไฟฟ้าจากแบตเตอรี่จะทำให้ประหยัดเชื้อเพลิงมากขึ้น เนื่องจากโดยทางทฤษฎีแล้วประสิทธิภาพโดยรวมของการแปลงพลังงานจากการเผาไหม้ของเครื่องยนต์ไปเป็นไฟฟ้าเพื่อผลิตไฮโดรเจนของอิเล็กโทรไลเซอร์จะลดลงและไม่สามารถทำให้เกิดผลประหยัดได้ ยกเว้นกรณีที่ใช้ไฮโดรเจนที่ผลิตจากภายนอก บรรจุใส่ถังเก็บแล้วนำไปติดตั้งเป็นเชื้อเพลิงร่วมซึ่งมีรายงานวิจัยหลายชิ้นที่แสดงให้เห็นถึงผลประหยัดเชื้อเพลิงหลักได้ถึง 20-30% และค่ามลพิษที่ลดลงได้ถึง 30-60% ขึ้นอยู่กับสภาพการทดสอบ ในขณะที่กลุ่มผู้ผลิตอุปกรณ์อิเล็กโทรไลเซอร์เชื่อว่าประสิทธิภาพการเผาไหม้ของการเติมไฮโดรเจนจะสูงขึ้นไปมากกว่าพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ไปจากเครื่องยนต์ ดังนั้นกรณีตัวอย่างนี้ให้ข้อมูลโดยอ้างอิงทฤษฎีบางส่วนไม่ได้แสดงถึงผลลัพธ์ของการใช้อิเล็กโทรไลเซอร์ในรถยนต์ว่าให้ผลประหยัดอย่างไร การนำข้อมูลไปใช้ถือเป็นความรับผิดชอบของผู้ใช้ข้อมูลโดยตรง

เนื่องจากผู้ประกอบการผลิตอิเล็กโทรไลเซอร์ในรถยนต์ ส่วนใหญ่อ้างอิงสูตรการคำนวณอัตราการผลิตที่เหมาะสมกับระบบผลิตไฮโดรเจนด้วยน้ำที่ใช้ในรถยนต์ โดยมีการอ้างอิงมาจากการทดลองจริง ด้วยเงื่อนไขที่ว่า “ทุกๆ 1 ลิตรของปริมาตรเครื่องยนต์ต้องการ ¼ ลิตรของก๊าซไฮดรอกซี (ไฮโดรเจนและออกซิเจน) ต่อนาที”

ดังนั้นจะได้ความสัมพันธ์ของปริมาณไฮโดรเจนที่ต้องการกับขนาดของเครื่องยนต์ดังตารางที่ 14

ตารางที่ 14 ตารางแสดงความสัมพันธ์ของปริมาณไฮโดรเจนที่ต้องการกับขนาดของเครื่องยนต์

ขนาดเครื่องยนต์ (ซีซี.)	อัตราการผลิตก๊าซไฮดรอกซี (ลิตรต่อนาที)
1,000	0.250
1,300	0.325
1,500	0.375
1,600	0.400
1,800	0.450
2,000	0.500
2,200	0.550
3,000	0.750

หมายเหตุ ค่าในตารางอ้างอิงจากผู้ทำการทดลองเท่านั้น

หากพิจารณาตามตารางที่ 14 ที่กล่าวถึงอัตราการผลิตก๊าซไฮดรอกซี (ลิตรต่อนาที) ที่แปรตามขนาดของเครื่องยนต์ และสมการความสัมพันธ์ด้านล่างที่กล่าวถึง ปริมาณกระแสและระยะเวลาที่ใช้ในการผลิตไฮโดรเจน

$$\text{ปริมาตรไฮโดรเจน (ที่ผลิตได้)} = \text{กระแสไฟฟ้า} * 0.41815$$

โดยที่ ปริมาตรไฮโดรเจนที่ผลิตได้ มีหน่วยเป็น ลิตรต่อชั่วโมง
กระแสไฟฟ้า มีหน่วยเป็น แอมแปร์

จะพบว่า ปริมาตรของก๊าซไฮโดรเจนที่ได้จากกระบวนการแยกน้ำด้วยไฟฟ้าแปรผันตรงกับกระแสไฟฟ้า และระยะเวลาที่ใช้ และเนื่องจากการเพิ่มอัตราการผลิตก๊าซไฮดรอกซิลสามารถดำเนินการได้โดยการเพิ่มจำนวนคู่อิเล็กโทรดได้ด้วยเช่นกัน รวมทั้งก๊าซไฮดรอกซิลมีส่วนปริมาณของไฮโดรเจนเป็น 2 ใน 3 ดังนั้นสมการความสัมพันธ์ข้างต้นจึงสามารถปรับให้เหมาะสมเพื่อใช้ในการคำนวณหากระแสที่อิเล็กโทรไลเซอร์ต้องการได้ดังนี้

$$\text{กระแส} = \frac{\text{ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้} \times 60}{0.627225 \times \text{จำนวนเซลล์} \times 1.5}$$

โดยที่ ปริมาตรก๊าซไฮโดรเจนที่ผลิตได้ มีหน่วยเป็น ลิตรต่อนาที่
จำนวนเซลล์ มีหน่วยเป็น จำนวนคู่อิเล็กโทรด

จากอัตราการผลิตก๊าซไฮโดรเจนตามตารางที่ 14 นั้น เราสามารถคำนวณหาปริมาณกระแสที่อิเล็กโทรไลเซอร์ต้องการได้ตามตารางที่ 15

ตารางที่ 15 ปริมาณกระแสที่อิเล็กโทรไลเซอร์ต้องการในการผลิตไฮโดรเจนแปรตามขนาดเครื่องยนต์

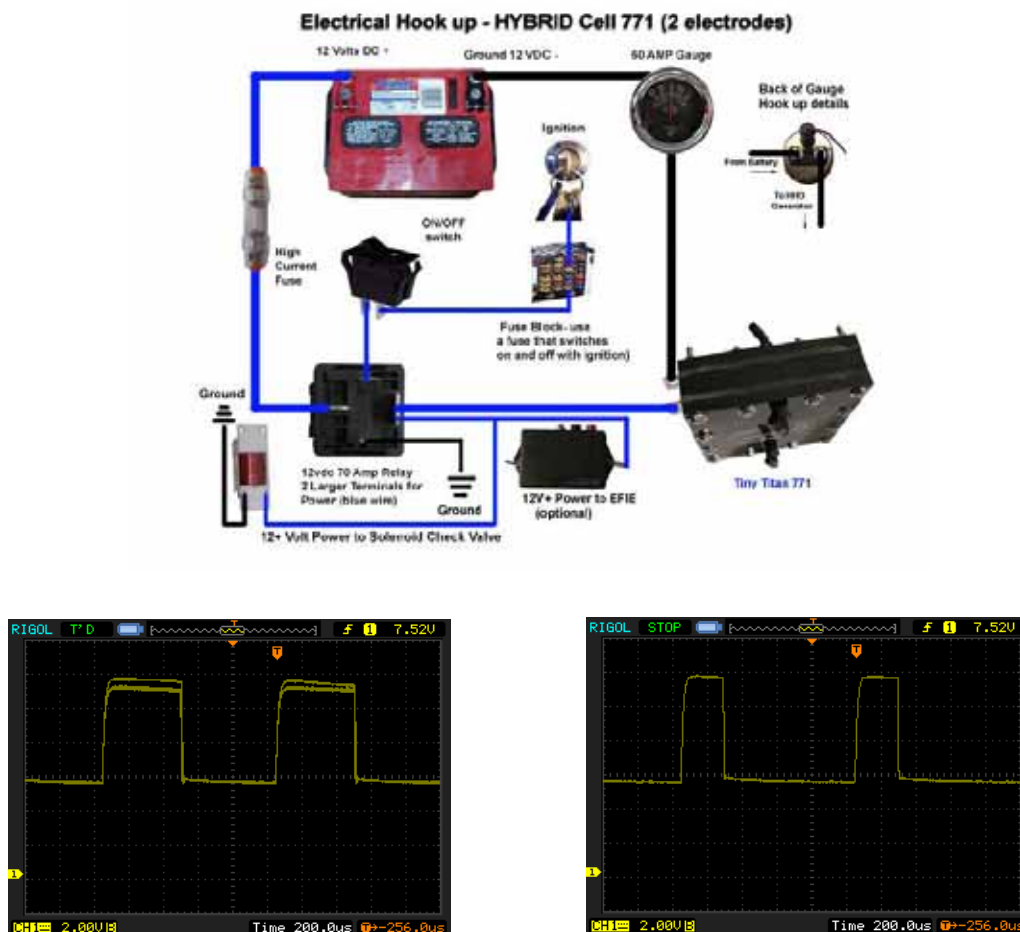
ขนาดเครื่องยนต์ (ซีซี.)	อัตราการผลิตก๊าซไฮดรอกซิล (ลิตรต่อนาที่)	ปริมาณกระแสที่ต้องใช้ (แอมแปร์)			
		1 คู่อิเล็กโทรด	2 คู่อิเล็กโทรด	3 คู่อิเล็กโทรด	4 คู่อิเล็กโทรด
1,000	0.250	23.9	12.0	8.0	6.0
1,300	0.325	31.1	15.5	10.4	7.8
1,500	0.375	35.9	17.9	12.0	9.0
1,600	0.400	38.3	19.1	12.8	9.6
1,800	0.450	43.0	21.5	14.3	10.8
2,000	0.500	47.8	23.9	15.9	12.0
2,200	0.550	52.6	26.3	17.5	13.2
3,000	0.750	71.7	35.9	23.9	17.9

ดังที่ได้อธิบายไว้แล้วว่าแรงดันไฟฟ้าสำหรับอิเล็กโทรด 1 คู่ ในทางทฤษฎีจะอยู่ที่ประมาณ 1.482 โวลต์ แต่เนื่องจากแหล่งจ่ายไฟของอิเล็กโทรไลเซอร์มาจากแบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ (สำหรับรถยนต์ขนาดเล็ก) ดังนั้นจำนวนอิเล็กโทรดที่เหมาะสม ควรจะอยู่ที่ ประมาณ $12/1.482 = 8.1$ คู่ ในทางปฏิบัติ อาจใช้จำนวนอิเล็กโทรด 6 คู่ต่ออนุกรมกันซึ่งจะได้แรงดันไฟฟ้าที่อิเล็กโทรดแต่ละคู่เท่ากับ 2 โวลต์

วงจรควบคุมการผลิตไฮโดรเจนในรถยนต์สันดาปภายใน

วงจรควบคุมกระแส

อัตราการผลิตไฮโดรเจนของอิเล็กโทรไลเซอร์จะขึ้นอยู่กับปริมาณพลังงานไฟฟ้าที่ใช้ ซึ่งสามารถกำหนดให้อยู่ในรูปของกระแสไฟฟ้าที่ใช้ได้ โดยกระแสไฟฟ้า (I) ที่จ่ายจาก แบตเตอรี่ในรถยนต์จะแปรผันตามค่าแรงดันไฟฟ้าของแบตเตอรี่ (V) และแปรผกผันกับค่าความต้านทานทางไฟฟ้า (R) ของอิเล็กโทรไลเซอร์ วิธีการที่นิยมใช้คือ การควบคุมขนาดของแรงดันที่จ่ายให้กับอิเล็กโทรไลเซอร์ โดยอาศัยวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ทำงานโดยหลักการโมดูเลตความกว้างพัลส์ (Pulse Width Modulation) ซึ่งเรียกวางจรนี้ว่า โมดูเลเตอร์ (Modulator) โดยมีหลักการทำงานคือ แรงดันที่ออกจากโมดูเลเตอร์นั้นจะอยู่ในรูปของคลื่นสี่เหลี่ยม กล่าวคือ จะมีการจ่ายแรงดันออกมาเป็นช่วงๆ โดยมีคาบเท่ากับ T_s และมีความกว้างพัลส์เท่ากับ $D \cdot T_s$ โดยหลักการแล้วหากต้องการแรงดันเฉลี่ยที่สูงขึ้น โมดูเลเตอร์จะสร้างแรงดันที่มีความกว้างพัลส์มากขึ้น และในทางตรงกันข้าม โมดูเลเตอร์จะสร้างแรงดันที่มีความกว้างพัลส์แคบลง หากต้องการแรงดันเฉลี่ยที่ต่ำลง ดังแสดงในรูปที่ 23



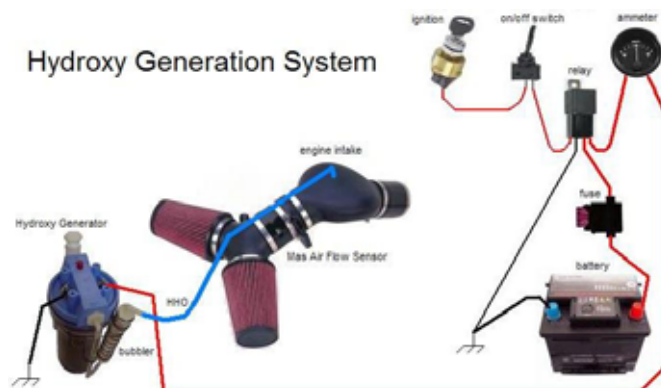
รูปที่ 23 แสดงลักษณะการทำงานของโมดูเลตความกว้างพัลส์ (Pulse Width Modulation)

วงจรควบคุมการจ่ายไฮโดรเจนในรถยนต์สันดาปภายใน

ระบบการควบคุมการจ่ายไฮโดรเจนที่ผลิตได้จากอิเล็กโทรไลเซอร์โดยส่วนใหญ่ยังไม่มี การควบคุมโดยตรง ไฮโดรเจนที่ผลิตได้จะถูกส่งไปยังห้องเผาไหม้ทางท่อไอดี (Intake Manifold) โดยอาศัยแรงดูดจากห้องเครื่องยนต์

ในจังหวะดูดของลูกสูบ (Intake Stroke) ซึ่งทำให้เกิดสุญญากาศดูดอากาศเข้าไปใช้ในการเผาไหม้ (รูปที่ 24) ซึ่งวิธีนี้ปริมาณไฮโดรเจนที่ผลิตได้ทั้งหมดจะถูกส่งไปเผาไหม้ในห้องเผาไหม้เนื่องจากปริมาณที่ผลิตได้มีไม่มากนัก

อย่างไรก็ตามยังมีระบบการควบคุมการจ่ายไฮโดรเจนอีกวิธีหนึ่งคือการใช้อุปกรณ์ลดการจ่ายเชื้อเพลิงโดยตรง โดยอาศัยหลักการที่ว่าเมื่อมีการผลิตไฮโดรเจนจากอิเล็กโทรไลเซอร์แล้ว ระบบการควบคุมการจ่ายเชื้อเพลิงนั้นจะใช้วิธีการป้อนคำสั่งลดการจ่ายเชื้อเพลิงไปยัง ECU โดยชุดอุปกรณ์ที่ออกแบบมาเรียกว่า MAP Sensor ซึ่งต้องอาศัยการทำงานของเซ็นเซอร์ในขณะนั้นว่าจะปรับเชื้อเพลิงการจ่ายให้ลดลงเท่าไร โดยมีโหมดให้เลือกกว่าขับเคลื่อนในเมืองหรือขับเคลื่อนนอกเมือง อย่างไรก็ตาม MAP Sensor จะติดตั้งได้เฉพาะรถยนต์รุ่นที่มีกล่อง ECU เท่านั้น



รูปที่ 24 แสดงระบบผลิตและจ่ายไฮโดรเจนโดยตรงไปยังห้องเผาไหม้โดยไม่มีการควบคุม

ผลกระทบของอิเล็กโทรไลเซอร์ในรถยนต์ต่อแบตเตอรี่

ความสามารถในการจัดเก็บพลังงาน

โดยทั่วไปแบตเตอรี่ที่ติดตั้งในรถยนต์จะเป็นแบตเตอรี่แบบเปียก ชนิดตะกั่วกรด (Lead Acid Battery) ซึ่งมีแรงดันไฟฟ้า 12 โวลต์ นิยมใช้กันเป็นส่วนใหญ่ แบ่งย่อยออกได้อีกเป็น 2 แบบ คือ แบบที่ต้องเติม และ ดูแล น้ำกลั่นบ่อยๆ อย่างน้อยสัปดาห์ละครั้ง กับแบบไม่ต้องดูแลบ่อย (Maintenance Free) ซึ่งจะกินน้ำกลั่นน้อยมาก โดยทั้ง 2 แบบนี้จะมีฝาปิด-เปิดสำหรับเติมน้ำกลั่น ในแบบแรกนี้จะมีอายุการใช้งานโดยประมาณ 1.5-2 ปี แต่ไม่ควรเกิน 3 ปี ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับสภาพการใช้งาน และการดูแลรักษา ถ้ามีการดูแลรักษาอยู่เสมอก็จะทำให้แบตเตอรี่รถยนต์มีอายุการใช้งานที่ยาวนานขึ้น

แบตเตอรี่เป็นตัวที่ทำหน้าที่ในการเก็บพลังงาน ความจุของแบตเตอรี่ในการเก็บพลังงานมีหน่วยเป็น แอมแปร์-ชั่วโมง (Ampere-Hour, Ah) พลังงานในแบตเตอรี่ขนาด 12 โวลต์ 100 แอมแปร์-ชั่วโมง เท่ากับ 12 โวลต์ * 100 แอมแปร์-ชั่วโมง หรือ 12 โวลต์ * 100 แอมแปร์-ชั่วโมง * 3600 วินาที จะได้เท่ากับ 4.32 เมกะจูล (MJ) ดังนั้นหากแบตเตอรี่ที่มีขนาด 100 Ah เท่ากับว่าแบตเตอรี่สามารถจ่ายกระแส 1 แอมแปร์อย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 100 ชั่วโมง หรือแบตเตอรี่จ่ายกระแส 10 แอมแปร์อย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 10 ชั่วโมง เช่นเดียวกับแบตเตอรี่จ่ายกระแส 5 แอมแปร์อย่างต่อเนื่องเป็นเวลา 20 ชั่วโมง ซึ่งทั้งหมดนี้จ่ายกระแสเท่ากับ 100 Ah ทั้งสิ้น จะเห็นได้ว่า แบตเตอรี่ที่มีความจุเท่ากันอาจมีความเร็วในการจ่ายกระแสต่างกัน ดังนั้นการจะทราบความจุของแบตเตอรี่ต้องทราบถึงอัตราการจ่ายกระแสด้วย มักกำหนดเป็นจำนวนชั่วโมงของการจ่ายกระแสเต็มที่ การกำหนดขนาดของแบตเตอรี่สำหรับระบบเซลล์แสงอาทิตย์นั้นขึ้นอยู่กับความจุของแบตเตอรี่ใน

การจัดเก็บพลังงาน อัตราการจ่ายประจุสูงสุด อัตราการประจุสูงสุดและอุณหภูมิต่ำสุดที่จะนำแบตเตอรี่ไปใช้งาน (อุณหภูมิที่ได้ผลดีที่สุดของแบตเตอรี่ตะกั่ว-กรด คือ 25 °C หรือประมาณ 15-27 °C)

การใช้งานแบตเตอรี่กับอิเล็กทรอนิกส์

การใช้อิเล็กทรอนิกส์เพื่อผลิตก๊าซไฮโดรเจนในรถยนต์จำเป็นต้องมีแหล่งจ่ายพลังงานไฟฟ้า โดยทั่วไปมาจากแบตเตอรี่ในรถยนต์ ดังนั้นอิเล็กทรอนิกส์จึงจัดว่าเป็นภาระทางไฟฟ้า (โหลด) ชนิดหนึ่งเช่นเดียวกับภาระทางไฟฟ้าอื่นๆ เช่นระบบปรับอากาศในรถยนต์ ระบบไฟแสงสว่าง ระบบสตาร์ทเครื่องยนต์ เครื่องเสียง และอื่นๆ ดังแสดงในตารางที่ 16

ตารางที่ 16 ตารางแสดงปริมาณการใช้กระแสไฟฟ้าของอุปกรณ์ไฟฟ้าทั่วไปในรถยนต์ [5]

ชนิดอุปกรณ์ไฟฟ้า	กระแสไฟฟ้าที่ใช้ (แอมป์)	ชนิดอุปกรณ์ไฟฟ้า	กระแสไฟฟ้าที่ใช้ (แอมป์)
1. ช่วงการสตาร์ทเครื่องยนต์	200-300	16. ไฟเบรก	5-8
2. ปิดน้ำฝน	5.0-6.5	17. ไฟท้าย	0.4-0.6
3. แตร	8-12	18. ไฟตัดหมอกท้าย	2.0-4.0
4. ไฟจุดบุหรี่	7-8	19. ไฟจอดรถ	0.6-1.5
5. เส้นความร้อน	5-8	20. ไฟส่องทางหน้า	6-10
6. วิทยู	1.0-2.0	21. ไฟเลี้ยว	1.9-2.1
7. วิทยูเทป	1.0-2.0	22. โทรทซ์คันติตรถ	1.5-1.6
8. แอร์เย็น	10-15	23. ชันรูป	15-20
9. แอร์ร้อน	10-12	24. กระจกข้างไฟฟ้า	10-12
10. กระจกอัตโนมัติ	15-20	25. เบาะไฟฟ้า	13-20
11. เครื่องฟอกอากาศ	1.7-2.0	26. เสาอากาศไฟฟ้า	10-12
12. เครื่องสื่อสาร	0.1-0.3	27. ไฟสูง	4-5
13. นาฬิกา	0.1-0.2	28. ไฟประตูรถ	10-20
14. ไฟส่องสว่างภายใน	0.8-1.0	29. กลอนล็อกอัตโนมัติ	20-40
15. ไฟหน้า	10-15	30. เครื่องฉีดน้ำล้างกระจก	10-12

ดังนั้นการเลือกใช้อิเล็กทรอนิกส์จึงขึ้นอยู่กับขนาดของอิเล็กทรอนิกส์ซึ่งสัมพันธ์กับกระแสที่ต้องการจากแบตเตอรี่ ซึ่งปริมาณกระแสไฟฟ้าที่ต้องสำหรับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ จะอยู่ประมาณ 10-20 แอมป์ สำหรับการปริมาณการผลิตก๊าซไฮโดรอกซี (ไฮโดรเจนและออกซิเจน) ประมาณ 0.5-1 ลิตร/นาทีก (ข้อมูลจากผู้ผลิต) หากแบตเตอรี่มีขนาดเล็กก็อาจทำให้การทำงานของแบตเตอรี่ ทำงานหนักขึ้นก็ต้องมีการชาร์จไฟจากไดชาร์จหรืออัลเตอร์เนเตอร์ของเครื่องยนต์บ่อยๆ ดังนั้นเมื่อแบตเตอรี่ทำงานมากขึ้น อายุการใช้งานอาจจะสั้นลง ซึ่งยังไม่มีผลการทดสอบหรือรายงานว่าอายุแบตเตอรี่จะสั้นลงเท่าไรหากมีการติดตั้งอิเล็กทรอนิกส์เข้าไปในระบบ

8

กรณีศึกษาการใช้ไฮโดรเจนจากอิเล็กโทรไลเซอร์ในรถยนต์ในประเทศไทย

กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงานได้มีการดำเนินโครงการวิจัยและทดสอบระบบผลิตไฮโดรเจนจากน้ำใช้ในรถยนต์และกำหนดแนวทางพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานไฮโดรเจนรองรับแผนพัฒนาพลังงานทดแทน 15 ปี ในปี 2553 [6]

ในโครงการดังกล่าวได้ทำการศึกษาโดยการทดสอบตัวอย่างอุปกรณ์อิเล็กโทรไลเซอร์จากผู้ผลิตในประเทศและต่างประเทศจำนวน 5 ตัวอย่างนำมาติดตั้งในรถยนต์ทดสอบ กระบะ 4 ประตู เครื่องยนต์ดีเซล 2000 ซีซี โดยวิธีทดสอบจะทำการทดสอบอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันในห้องปฏิบัติการที่ได้มาตรฐานของกรมควบคุมมลพิษ และการทดสอบจากการวิ่งในถนน ซึ่งผลการทดสอบได้ผลดังแสดงไว้ในตารางที่ 17 (ก) และ (ข)

ตารางที่ 17 (ก) ตารางแสดงอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงก่อนและหลังติดตั้งอุปกรณ์อิเล็กโทรไลเซอร์ในรถยนต์

อุปกรณ์ผลิตไฮโดรเจนจากน้ำ (อิเล็กโทรไลเซอร์)	อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (km/L) เมื่อทดสอบในห้องปฏิบัติการ***		
	น้ำมันดีเซล*	น้ำมันดีเซล+ไฮโดรเจน**	เปลี่ยนแปลง เพิ่มขึ้น/ลดลง (+/-)
ตัวอย่างที่ 1	10.33	10.13	-1.94%
ตัวอย่างที่ 2	10.09	9.89	-1.98%
ตัวอย่างที่ 3	10.02	9.73	-2.89%
ตัวอย่างที่ 4	9.71	9.63	-0.82%
ตัวอย่างที่ 5	9.80	9.70	-1.02%

หมายเหตุ * ก่อนติดตั้งอุปกรณ์อิเล็กโทรไลเซอร์ในรถยนต์ ** หลังติดตั้งอุปกรณ์อิเล็กโทรไลเซอร์ในรถยนต์

*** การขับใช้มาตรการทดสอบ Euro 2

ตารางที่ 17 (ข) ตารางแสดงอัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงก่อนและหลังติดตั้งอุปกรณ์อิเล็กโทรไลเซอร์ในรถยนต์

อุปกรณ์ผลิตไฮโดรเจนจากน้ำ (อิเล็กโทรไลเซอร์)	อัตราการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิง (km/L) เมื่อทดสอบวิ่งบนถนน***		
	น้ำมันดีเซล*	น้ำมันดีเซล+ไฮโดรเจน**	เปลี่ยนแปลง เพิ่มขึ้น/ลดลง (+/-)
ตัวอย่างที่ 1	11.88	11.14	-6.23%
ตัวอย่างที่ 2	11.06	11.09	0.27%
ตัวอย่างที่ 3	11.47	11.33	-1.22%
ตัวอย่างที่ 4	11.79	11.20	-5.00%
ตัวอย่างที่ 5	11.28	11.26	-0.18%

หมายเหตุ * ก่อนติดตั้งอุปกรณ์อิเล็กโทรไลเซอร์ในรถยนต์ ** หลังติดตั้งอุปกรณ์อิเล็กโทรไลเซอร์ในรถยนต์

*** การขับใช้เส้นทางกรุงเทพ-ชุมพร สำหรับการทดสอบทุกตัวอย่าง โดยความเร็วเฉลี่ยอยู่ที่ 90-100 km/h

จากตารางที่ 17 จะเห็นว่าแนวโน้มของการประหยัดการใช้้ำมันของรถยนต์ทดสอบนั้นไม่เห็นผลประหยัดอย่างใดก็ตาม ยังมีปัจจัยอย่างอื่นๆ ที่จะต้องนำมาพิจารณาเพิ่มเติม เช่น ลักษณะการขับ (โดยเฉพาะการทดสอบวิ่งบนถนนซึ่งมีการเปลี่ยนแปลงค่อนข้างมาก) ผิวถนน ความเร็วในการขับ

ดังนั้นเป็นการสรุปได้ยากว่าการติดอุปกรณ์อิเล็กโทรไลเซอร์ในรถยนต์ช่วยให้เกิดผลประหยัด แต่อย่างไรก็ตาม เนื่องจากการทดสอบเป็นการทดสอบกับรถยนต์ทดสอบเพียงคันเดียว ดังนั้นหากต้องการผลการทดสอบที่แน่ชัดขึ้นควรจะต้องมีการทดสอบเพิ่มขึ้น เช่น การทดสอบกับเครื่องยนต์ชนิดอื่น (เบนซิน) การทดสอบรถรุ่นใหม่ (ระบบ ECU) การทดสอบกับรถขนาดซีซีอื่น เป็นต้น

อ้างอิง

- [1] <http://www.afdc.energy.gov/afdc/pdfs/fueltable.pdf>
- [2] รายงาน Safety Standard for Hydrogen and Hydrogen Systems - Guidelines for Hydrogen System Design, Materials Selection, Operations, Storage, and Transportation ขององค์การนาซ่า (NASA) ประเทศสหรัฐอเมริกา
- [3] รายงานฉบับสมบูรณ์ “โครงการพัฒนาสาธิตการผลิตและจัดเก็บไฮโดรเจน” กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ปี พ.ศ. 2550
- [4] รายงาน “โครงการพัฒนาคู่มือระบบผลิตไฮโดรเจนจากน้ำในรถยนต์ที่มีประสิทธิภาพและความปลอดภัย” กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน
- [5] http://www.klangbattery.com/how_to.html; ความรู้เกี่ยวกับแบตเตอรี่รถยนต์
- [6] รายงานฉบับสมบูรณ์ “โครงการวิจัย ทดสอบ ระบบผลิตไฮโดรเจนจากน้ำใช้ในรถยนต์และกำหนดแนวทางพัฒนาเทคโนโลยีพลังงานไฮโดรเจนรองรับแผนพัฒนาพลังงานทดแทน 15 ปี” กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน ปี พ.ศ. 2553

เจ้าของลิขสิทธิ์
จัดทำโดย

: สำนักวิจัยและค้นคว้าพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน
: กลุ่มพลังงานสะอาดใหม่ สำนักวิจัย ค้นคว้าพลังงาน กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน
อาคาร 7 ชั้น 7 เลขที่ 17 ถนนพระรามที่ 1 แขวงสะพานกษัตริย์ศึก เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330
โทรศัพท์ 02-2230021-9 ต่อ 1350 โทรสาร 02-2253524
www.dede.go.th

การผลิตและการลอกเลียนคู่มือเล่มนี้ไม่ว่ารูปแบบใดทั้งสิ้น ต้องได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากสำนักวิจัยและค้นคว้าพลังงาน