الفصل الثامن

الهيدروجين كحامل للطاقة
HYDROGEN AS AN ENERGY CARRIER

(٨,٠) خلفية تاريخية
Historical Perspective

الهيدروجين هو أول عنصر كيميائي في الجدول الدوري (العدد الذري ١). وهو أكثر العناصر وفرة في الكون (حيث إن وجوده النسبي يزيد على ٨٠٪) وهو ثالث أكثر العناصر الذرية وفرة على الأرض. تم التعرف على الهيدروجين كمادة كيميائية عام ١٧٧٦م من قبل هنري كافندش وسماه أنتوان لافوازييه (هيدرو = "الماء"، جين = "مولد") عام ١٧٨٥م لأن أكسدته (احتراقه) بكمية قياسية (stoichiometric) من الأوكسجين تنتج الماء:

$$2H_2 + O_2 \Rightarrow 2H_2O \qquad (٨,١)$$

وأصبح الهيدروجين مادة صناعية مهمة، حيث تم تحديد خواصه الفيزيائية والكيميائية على مدى القرنين الماضيين. وصل إنتاج الهيدروجين في الولايات المتحدة إلى ما يزيد على ثلاثة مليارات قدم مكعب في السنة (حوالي سبعة ملايين كيلوجرام). وقد جعلته كثافته القليلة مقارنة بالهواء غازاً مثالياً (إلى حد كبير) إبان عصر مناطيد

الهواء البالونية، كما أن قابليته للتفاعل الكيميائي جعلته مادة أولية في عمليات صناعية مختلفة. أصبح الهيدروجين في القرن العشرين وقوداً للصواريخ لدفعها نحو الفضاء. إن إمكانية أن يصبح الهيدروجين هو الوقود العالمي القادم (بعد الوقود الأحفوري) لإنتاج الكهرباء وكوقود للنقل في القرن الحادي والعشرين هو موضوع الفصول الثلاثة الأخيرة في هذه الدراسة التي تُعنى ببحث الإنسان عن الطاقة الوفيرة.

(٨,٠,١) الطبيعة الفيزيائية للهيدروجين Physical Nature of Hydrogen

لا يوجد عنصر الهيدروجين في الطبيعة على شكل ذرات مستقلة بل يكون على شكل غاز جزيئي ثنائي الذرة ذي رابطة تكافئية، H_2، كما يأتي:

$$H+H \Rightarrow H_2+Q \text{ (طاقة الترابط)} \qquad (٨,٢)$$

الهيدروجين غاز عديم اللون والرائحة والطعم، وهو أخف المواد الكيميائية، فكثافته عند ظروف درجة الحرارة والضغط القياسية (STP) ٠,٠٨٩٩ جم/لتر مقارنة بكثافة الهواء البالغة ١,٢٩٣ جم/لتر. قابلية الهيدروجين للذوبان في الماء عند ٢٠ درجة مئوية أقل من ٢٠ ملل/لتر. ومن الصعب إنتاج الهيدروجين السائل إذ أنه يغلي عند -٢٥٢,٨ درجة مئوية ويتجمد عن -٢٥٩,٣ درجة مئوية.

وللهيدروجين صفة مميزة غير معتادة وهي أن الهيدروجين الغازي يوجد على شكل خليط من حالتين جزيئيتين: الأورثو هيدروجين، والبارا هيدروجين، وتختلف هاتان الحالتان في كيفية دوران الإلكترونين والنواتين. يتكون الهيدروجين الطبيعي، عند درجة حرارة الغرفة، من ٢٥٪ من شكل البارا هيدروجين و٧٥٪ من شكل الأورثو هيدروجين. لكل شكل من الشكلين خواص تختلف اختلافاً طفيفاً عن الشكل الآخر مثل محتوى الطاقة ونقطة الانصهار والغليان. وتظهر أهمية هذه الاختلافات عند درجات الحرارة التي يكون فيها الهيدروجين سائلاً.

ومن الصفات الأخرى المميزة للهيدروجين الفرق الطبيعي الكبير في تركيب نظائره الثلاثة. يتكون الهيدروجين من بروتون واحد (وهو الذي يميز نواة الذرة كيميائياً على أنها هيدروجين) ويوجد في الطبيعة إما بدون نيوترونات أو بنيوترون واحد أو بنيوترونين اثنين (مما يؤدي إلى أن تكون أرقام الكتلة للأشكال الثلاثة ١ و٢ و٣). وعليه فإن نظائر الهيدروجين هي:

A = ١ هيدروجين (بروتيوم)	1H	f = ٪٩٩,٩٨٥
A = ٢ ديوتريوم	2H	f = ٪٠,٠١٥
A = ٣ تريتوم	3H	f = ١×١٠$^{-١٥}$ ٪

الديوتريوم هو الشكل "الثقيل" من الهيدروجين، وعندما يتأكسد يُكَوّن الماء الثقيل (HDO وD_2O)، حيث يكون عدد الكتلة ١٩ و٢٠ بدلاً من ١٨ للماء. يستخدم الماء الثقيل كوسيط للنيوترونات في بعض المفاعلات النووية (على سبيل المثال مفاعل الديوتريوم-يورانيوم الكندي CANDU). وبما أن نسبة الوزن الذري للهيدروجين (بروتيوم) والديوتريوم هي ١ : ٢ فإنه من السهل نسبياً فصل الديوتريوم عن الهيدروجين الطبيعي مقارنة بفصل ^{235}U من اليورانيوم الطبيعي (وهو غالباً ^{238}U). ويستخدم الديوتريوم المخصب (f > ٠,٠١٥ ٪) والذي يرمز له بالرمز HD (أو HDO) كمُقْتَفٍ (tracer) للهيدروجين في العديد من الدراسات البحثية. ومن الناحية البيولوجية فإن الضغط الأسموزي للماء الثقيل المخصب في الأنسجة يختلف عن الضغط الأسموزي للماء الطبيعي، وإذا صار تركيز الماء الثقيل عالياً فإنه يكون ساماً للإنسان.

التريتيوم هو نظير مشع طبيعي للهيدروجين وهو يتشكل باستمرار من جراء تفاعل الإشعاع الكوني عالي الطاقة مع ذرات النيتروجين والأوكسجين الموجودة في الغلاف الجوي. يصل التركيب النظائري للتريتيوم (f = ١٠$^{-١٥}$ ٪) إلى حالة ثبات على مدى مئات السنوات حيث يتوازن معدل إنتاجه في الغلاف الجوي مع معدل تحلله

الذي يبلغ عمر النصف له $T_{½}$ = ١٢,٢٦ سنة بفعل انبعاث جسيمات بيتا ليستقر بعدها على شكل هيليوم-٣. ومع تأكسد التريتيوم في الغلاف الجوي وتحوله إلى ماء فإنه يتوزع على الدورة المائية بأكملها.

(٨,٠,٢) الطبيعة الكيميائية للهيدروجين Chemical Nature of Hydrogen

يتفاعل الهيدروجين كيميائياً بشكل كبير للغاية، يحول دون وجوده في الطبيعة كعنصر حر. ولكون الهيدروجين يعطي إلكترونه بسهولة للعناصر الأخرى فإن حالته الطبيعية على الأرض تكون على شكل مركب. يندمج الهيدروجين بسهولة مع الأوكسجين ليكوّن ماء (طبقاً للمعادلة ٨,١)، كما يندمج مع النيتروجين ليكوّن النشادر (NH_3) ويندمج مع الكربون ليكوّن مركبات كربونية عضوية مثل الألكانات C_nH_{2n+2} (كالأوكتان C_8H_{18}) والكربوهيدرات ($C_nH_{2n}O_n$) (كالجلوكوز $C_6H_{12}O_6$). ونتيجة لعدم وجود مورد طبيعي للهيدروجين الجزيئي، فإن إنتاج الهيدروجين بكميات تجارية يتضمن تحليل مركبات تحتوي على الهيدروجين ومتوفرة بكثرة مثل الماء والميثان.

الطبيعية الكيميائية للهيدروجين معقدة، إذ تحصل له عدة أنواع من التفاعلات الكيميائية التي يمكن توضيحها تبعاً لاستخدامه كما يأتي :

١- عامل مختزل نشط (active reducing agent)، حيث تفقد ذرة الهيدروجين إلكترونها ($H \rightarrow H^+ + e^-$) في محلول حمضي بسبب تفاعل أكسدة واختزال ويعطى الإلكترون لفلز أكثر نشاطاً كالحديد مثلاً في التفاعل الآتي :

$$Fe_2O_3 + 3H_2 \Rightarrow 2Fe + 3H_2O \qquad (٨,٣)$$

٢- عامل هدرجة (hydrogenation agent)، حيث يضاف جزئ الهيدروجين إلى جزئ عضوي غير مشبع فيه ذرتا كربون مرتبطتان بروابط ثنائية فينتج عن ذلك أن تفتح هاتان الرابطتان لذرتي الهيدروجين من خلال تفاعل مثل التفاعل الآتي :

$$C_xH_yCOOH + H_2 \Rightarrow C_xH_{y+2}COOH \quad (٨,٤)$$

٣- عامل ترابط (bonding agent)، حيث تكوّن ذرات الهيدروجين روابط كيميائية مع عناصر أخرى لتكوّن هيدريدات. ويمكن حدوث ذلك بطريقتين: كهيدريد مكافئ مثل الماء والنشادر بالتفاعلات الآتية:

$$3H_2 + N_2 \Rightarrow 2NH_3 \quad \text{أو} \quad 2H_2 + O_2 \Rightarrow 2H_2O \quad (٨,٥)$$

أو كهيدريد أيوني تستقبل فيه ذرة الهيدروجين إلكتروناً من ذرة موجودة في بناء شبكي لفلز أو سبيكة (alloy) ليتكون هيدريد الفلز الذي يتصرف فيه الهيدروجين كأنيون $[H \Rightarrow H^- + p(hole)]$. فعلى سبيل المثال، يتفاعل الهيدروجين مع الصوديوم ليكون الهيدريد الأيوني (NaH) كما يأتي:

$$2Na + H_2 \Rightarrow 2Na_2H \quad (٨,٦)$$

حيث إن الصوديوم هو الكاتيون (Na^+) والهيدروجين هو الأنيون (H^-). إن الشكل الهيدريدي من الهيدروجين مع سبائك المعادن مثل الحديد-التيتانيوم وبعض العناصر الأرضية النادرة هو الأقرب لتمثيل الترابط التكافؤي. يُعد استخدام هيدريدات سبائك المعادن واعداً كصهاريج للتخزين في المركبات، حيث إن عملية تكونها منتجة للحرارة (تطلق الحرارة) بحيث يمكن أن تزود المركبة بوقود الهيدروجين عن طريق تسخين السبيكة الفلزية لفصل الهيدريد منها ومن ثم إمداد المركبة بوقود الهيدروجين حسب الحاجة.

(٨,٠,٣) خواص الطاقة للهيدروجين Energetics of Hydrogen

ينبني المستقبل الواعد للهيدروجين كوقود للنقل على خواصه الحرارية. تم في الشكل رقم (١,٥) المقارنة بين طاقة الاحتراق النوعية التي يطلقها الهيدروجين مع

أنواع أخرى من وقود الاحتراق وعلاقة ذلك مع الطاقة النوعية التي تطلقها أنواع الوقود النووي. ولدراسة مدى إمكانية استخدام الهيدروجين كوقود للنقل فإنه من المناسب أكثر أن تتم مقارنته مع أنواع وقود الاحتراق السائدة حالياً وهي البنزين والغاز الطبيعي. يوضح الجدول رقم (٨,١) خواص الطاقة لهذه الأنواع الثلاثة من الوقود.

الجدول رقم (٨,١). خواص الطاقة للأنواع المختلفة من وقود النقل.

	الهيدروجين	البنزين	الغاز الطبيعي
الطاقة النوعية			
كيلوجول/كجم	$١٢,٥ \times ١٠^{٤}$	$٤,٤٥ \times ١٠^{٤}$	$٤,٨ \times ١٠^{٤}$
وحدة حرارية بريطانية/رطل	٥٢×١٠^{٣}	١٩×١٠^{٣}	٢٠×١٠^{٣}
الطاقة الحجمية (كيلوجول/م^{٣})			
الحالة الحرة	$١٠,٤ \times ١٠^{٣}$	$٣٢,٠ \times ١٠^{٦}$	$٣٧,٣ \times ١٠^{٣}$
الغاز، ٢٤٠٠ رطل/بوصة^{٢}	$١,٥١ \times ١٠^{٦}$	–	$٦,٢٩ \times ١٠^{٦}$
السائل	$٨,٥٢ \times ١٠^{٦}$	$٣٢,٠ \times ١٠^{٦}$	$٢١,١ \times ١٠^{٦}$

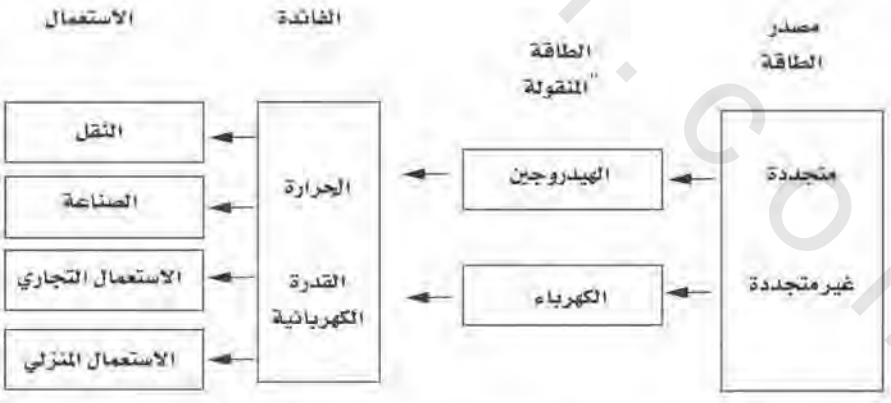
ومن السهل التعرف على المزايا والعيوب النسبية للهيدروجين مقارنة بنوعي الوقود الآخرين من خلال هذه البيانات. إن الميزة الحرارية الأساسية للهيدروجين مقارنة بالبنزين والغاز الطبيعي هي الطاقة النوعية، حيث إنها تزيد عن طاقة الاحتراق للوقودين الآخرين بثلاثة أضعاف تقريباً. إلا أن العيب الأساسي للهيدروجين هو أنه أخف الغازات على الأرض مما يجعل طاقته الحجمية عند الضغط الجوي القياسي أقل من الطاقة الحجمية للغاز الطبيعي في حالته الغازية بثلاث مرات ونصف، كما أن الطاقة الحجمية للهيدروجين السائل أقل من الطاقة الحجمية للغاز الطبيعي المسال (LNG) بمرتين ونصف، وأقل من الطاقة الحجمية للبنزين بما يزيد على ثلاث مرات ونصف. وعليه فإذا أردنا استخدام الهيدروجين ووضعه في خزانات وقود بحجم خزانات وقود المركبات فلا

بد من أن يضغط إلى ضغوط عالية جداً – أعلى من ٥٠٠٠ رطل لكل بوصة مربعة (٣٥٠ بار) – لكي يكفي لقيادة المسافة نفسها قبل أن تعاد تعبئة الخزان.

(٨,١) الهيدروجين والكهرباء كحاملين متوازيين للطاقة

Hydrogen and Electricity as Parallel Energy Carriers

ينبغي أن يكون واضحاً من هذه المناقشة عن الطبيعة الكيميائية للهيدروجين أنه ليس مصدراً أولياً للطاقة، إلا أن الأمر نفسه ينطبق على الكهرباء وهي التي أصبحت الاختيار المفضل للطاقة بناءً على المسلمة الثانية [انظر الفصل الأول] (الرغبة في العيش في بيئة مبهجة وفي *حياة من الراحة واليسر*). ويمكننا أن نقول إن الهيدروجين قد يصبح الاختيار المفضل كوقود للنقل بناءً على المسلمة نفسها. يوضح الشكل رقم (٨,١) مفهوم تشابه الهيدروجين والكهرباء كحاملين للطاقة بناءً على السهولة النسبية في تحويل أي منهما إلى الآخر عند الحاجة، حيث تتحول الكهرباء إلى هيدروجين بالتحليل الكهربائي (electrolysis) والهيدروجين إلى كهرباء من خلال خلايا الوقود (fuel cells).



الشكل رقم (٨,١). الهيدروجين والكهرباء كحاملين متوازيين للطاقة.

(٨,١,١) لماذا الهيدروجين؟ Why Hydrogen?

بالرجوع إلى المسلمة الثانية، يمكن تقديم أسباب كثيرة لضرورة الانتقال إلى عصر وقود الهيدروجين في أسرع وقت ممكن. قد يختلف ترتيب أهمية هذه الأسباب بين الجهات العديدة ذات الصلة، كل حسب أولوياته، إلا أن هذه الجهات تشكل مجتمعة كتلة كبيرة بما يكفي لإقناع الجماهير، ناهيك عن الحكومات، بضرورة القيام بهذه النقلة.

وأما بالنسبة للجهات المعنية بإمدادات الطاقة والجهات المعنية بحماية البيئة فإن أسباب استخدام الهيدروجين ينبغي أن تتضمن الآتي:

١- التحول إلى وقود (هيدروجين) يمكن أن يحل محل الوقود الأحفوري الذي ستزيد تكلفته كلما تضاءلت الإمدادات المحدودة الباقية منه، بينما ستقل تكلفة الهيدروجين مع التطورات التقنية.

٢- التحول إلى وقود (هيدروجين) يزيد من إمكانية الوصول إلى توزيع عالمي أوسع لإمدادات الطاقة المستدامة للاقتصاد الوطني، لا سيما في الدول الأقل تطوراً، كما يساعد على تقليل التفاوت في الميزان التجاري بين الدول، فمن المعلوم جيداً أن استيراد النفط يسبب نزيفاً للاقتصاد الأمريكي بمقدار مليار دولار في الأسبوع.

٣- التحول إلى وقود (هيدروجين) له أعلى طاقة نوعية بين جميع أنواع الوقود الكيميائية (كما يوضح الشكل رقم ١,٥).

٤- التحول إلى وقود (هيدروجين) يُحَضَّر من مورد أولي ذي إمدادات غير محدودة تقريباً (الماء) عندما يتم التوصل إلى تقنية تتفادى موارد الطاقة التي تحتوي على الكربون.

٥- التحول إلى وقود (هيدروجين) يسمح باستخدام *تقنيات مناسبة* بحيث يتم التركيز على استخدام الموارد ذات الطاقة النوعية المنخفضة (الطاقة المتجددة) في تطبيقات يكون الاحتياج فيها للطاقة منخفضاً، بينما تستخدم الموارد ذات الطاقة النوعية العالية (الطاقة النووية) في تطبيقات يكون الاحتياج فيها للطاقة عالياً.

٦- التحول إلى وقود (هيدروجين) يعكس مسار تزايد انبعاث الغازات المسببة لظاهرة الاحتباس الحراري على مستوى البيئة العالمية ويعكس مسار تزايد تلوث الهواء في أجواء المدن الكبرى.

٧- التحول إلى وقود (هيدروجين) يوفر نمواً اقتصادياً في صناعة جديدة لمدة جيلين قادمين.

إن التقنية التي سيتم شرحها في هذه الفصول الثلاثة ينبغي أن تجعل من هذه الاحتمالات تبدو جديرة بالسعي وراءها وتحقيقها.

(٨,١,٢) الاستخدامات التنافسية للهيدروجين Competitive Uses for Hydrogen

تم في القسم (٤,٢) مناقشة إمكانية تلبية الطلب المتسارع على الغاز الطبيعي، ولا بد من تطبيق ذلك بالطريقة نفسها على المستقبل المحتمل للطلب المتسارع على وقود الهيدروجين. لقد تمت الإشارة إلى أن إنتاج الهيدروجين في الولايات المتحدة قد وصل إلى ثلاثة مليارات قدم مكعب في السنة. إلا أن أسس المناقشة ليست واحدة، فالهيدروجين ليس وقوداً أحفورياً. وإذا أصبح الماء المصدر الأساسي للهيدروجين بأي من الطرق التي سيتم تناولها بعد قليل، فإن مفهوم الاحتياطيات القصوى ومعاملات R/P يصبح لا معنى له. لكن سعر استخدام الهيدروجين في تطبيقاته النافعة يشكل عاملاً مهماً في اختيار كيفية توزيع معدل الإنتاج عندما يزداد الطلب على الهيدروجين خلال مرحلة تنامي استخدامه في الجيلين القادمين.

كما هو الحال بالنسبة للغاز الطبيعي، فإن للهيدروجين استخدامات تنافسية كلقيم كيميائي في العمليات الصناعية وكوقود للطاقة الحرارية. وكما تمت الإشارة في القسم (٨,٠,٢) فالهيدروجين يستخدم كيميائياً كعامل اختزالي في صناعة المعادن وكعامل هدرجة في صناعة النفط وكعامل ترابط في الصناعات الكيميائية. ويستخدم الهيدروجين حالياً كوقود للحام عند درجات حرارة مرتفعة وفي استكشاف الفضاء. وهناك استخدامات واسعة وواردة في المستقبل مثل استخدام الهيدروجين كوقود

لمحطات القدرة التي تستخدم خلايا الوقود لإنتاج الكهرباء أو كمادة تبريد في تقنية الموصلات الفائقة أو كوقود في مجال النقل مثل المركبات التي تعمل بمحرك ومحركات الاحتراق الداخلي والمركبات ذات المحرك الكهربائي الذي يعمل بخلايا الوقود والسفن البحرية ومحركات الطيران النفاثة والسفر في الفضاء.

وبالمثل للجدول رقم (٤,١) فإن الجدول رقم (٨,٢) يعرض بعضاً من القضايا التي تثير شكاً حول استدامة التنمية الاقتصادية مع الاستخدامات المستقبلية للهيدروجين.

الجدول رقم (٨,٢). العوامل التي تثير تساؤلات حول استدامة الطلب على الهيدروجين.

الاستخدامات التي تتبارى على الاستئثار بالهيدروجين
الاستغلال الكيميائي مقابل الاستغلال على شكل طاقة
مدى احتمالية النمو السريع في استغلال الهيدروجين
هل سيتحدد الاستهلاك بالإمدادات أم بالطلب؟
تقديرات موارد الهيدروجين واحتياطياته
هل هذا السؤال ضروري؟
استخدام الهيدروجين في إنتاج القدرة الكهربائية
هل سيتمكن أحفادنا من تدفئة منازلهم بأي نوع من أنواع الوقود؟
الهيدروجين كحامل للطاقة موازٍ للكهرباء
هل سيظهر مفهوم "الهيدروكهرباء" hydricity؟

(٨,٢) دورة الوقود لطاقة الهيدروجين
The Hydrogen Energy Fuel Cycle

دورة وقود الهيدروجين بسيطة ويمكن وضعها في نموذج مكون من أربع مراحل:

١ – *الإنتاج*: هناك أربع طرق عامة على الأقل لإنتاج الهيدروجين.

٢ – *التخزين*: هناك ثلاث طرق على الأقل لتخزين الهيدروجين.

٣ – *التوزيع*: هناك ثلاث طرق على الأقل لتوزيع الهيدروجين.

٤ – *الاستخدام النهائي*: هناك طريقتان أساسيتان على الأقل لاستخدام الهيدروجين.

(٨,٢,١) إنتاج الهيدروجين Hydrogen Production

هناك أربع طرق عامة على الأقل لإنتاج الهيدروجين بكميات كبيرة، وستكون لازمة في عصر وقود الهيدروجين. وهي: الطرق الكيميائية، والتحليل الكهربائي، والطرق الحرارية، وعمليات التحويل البيولوجي. وتتفاوت هذه الطرق في تعقيدها وتكلفتها وأثرها البيئي، ولم يتم إلى الآن تحديد أي منها بشكل كامل فيما يخص الإنتاج بكميات كبيرة.

الطرق الكيميائية: تضمنت الطرق الأولى في إنتاج الهيدروجين تفاعلات أكسدة واختزال استخدمت فيها فلزات أكثر تفاعلية من الهيدروجين، وذلك في محلول حمضي بحيث يحل الفلز محل الهيدروجين بكميات قياسية (stoichiometrically)، أي بعكس المعادلة رقم (٨,٣) وإحلال حمض الكبريتيك (H_2SO_4) مكان الماء. وهناك فلزات أكثر تفاعلية وأعلى تكلفة مثل الزنك، والقصدير، والألومينيوم، والصوديوم، والبوتاسيوم. أما في الوقت الحالي، فإن أكثر الطرق الصناعية استخداماً هي إنتاج الهيدروجين بطريقة تحوير بخار الماء (steam reforming) التي تتضمن نزع الأوكسجين من الماء باستخدام الكربون. وقد كانت الطريقة السابقة هي عملية إحداث تفاعل بين بخار الماء والكربون الساخن (فحم الكوك) كما يأتي:

$$C + H_2O \Rightarrow H_2 + CO \qquad (٨,٧)$$

وكان الخليط الناتج يسمى "غاز الماء"، وكان يستخدم في التدفئة والإضاءة. أما العملية الحالية فهي تحوير بخار الماء والميثان بالغاز الطبيعي طبقاً للتفاعل الآتي:

$$CH_4 + H_2O \Rightarrow 3H_2 + CO \qquad (٨,٨)$$

تتم عملية فصل الهيدروجين تجارياً عن أول أكسيد الكربون (CO) بتفاعل *التحويل* الذي يتأكسد فيه ليصبح ثاني أكسيد الكربون (CO_2) كما يأتي:

$$CO + H_2O \Rightarrow H_2 + CO_2 \qquad (٨,٩)$$

وبهذه الطريقة لا تكون عملية فصل الهيدروجين أسهل فحسب بل إن كمية الهيدروجين تكون قد زادت إذا نظرنا إلى العملية ككل:

$$CH_4 + 2H_2O \Rightarrow 4H_2 + CO_2 \qquad (٨,١٠)$$

يبين الشكل رقم (٨,٢) هذه العملية، مع ملاحظة أن وقود الهيدروجين يمكن أن ينتج في منشآت مركزية بكميات كبيرة أو في وحدات تنتج كميات صغيرة (في مرآب المنزل مثلاً).

الشكل رقم (٨,٢). رسم توضيحي لعملية تحوير بخار الماء – الميثان.

(٨,٢,١أ) مقدمة بسيطة في الكيمياء الكهربائية A Wee-Bit of Electrochemistry

قد يكون من المناسب في هذه المرحلة طرح جانبين مهمين من جوانب الكيمياء الكهربائية التي تؤثر على كفاءة الأجهزة الكيميائية الكهربائية مثل أجهزة التحليل الكهربائي (لإنتاج الهيدروجين) التي ستشرح بعد قليل أو خلايا الوقود (استعداداً لمناقشة تقنية خلايا الوقود واستخدامها كمحركات للمركبات في الفصل التاسع). يدخل

في مجال الكيمياء الكهربائية الخاصة بالتحليل الكهربائي للماء (والخاصة بخلايا الوقود) عوامل تتضمن إيصالية الإلكتروليتات (conductance of electrolytes) واعتماد القوة الدافعة الكهربائية (سواء كانت تقاس بوحدة emf أو بالفولت) على درجة الحرارة.

يُعد الماء النقي موصلاً رديئاً للغاية للكهرباء. لذا فإنه من اللازم إضافة مواد أيونية (إلكتروليتات) إلى خلايا التحليل الكهربائي لزيادة قابلية المحاليل للتوصيل في الخلايا إلى مستويات تمكننا من الاستفادة منها. يعتمد التوصيل الكهربائي الناتج للمحلول الإلكتروليتي على تركيز الأيونات المضافة وعلى صفاتها المميزة (مثل الشحنة وقدرتها على الحركة mobility).

وبما أن المحاليل الإلكتروليتية تتبع قانون أوم (Ohm's law) فإن التيار (I، ويقاس بوحدة الأمبير) الذي يمر من خلال الإلكتروليت يتناسب مع فرق الجهد بين الإلكترودات (E، ويقاس بوحدة الفولت):

$$E = I\,R \qquad (٨,١١)$$

حيث إن R هي المقاومة الكهربائية للمحلول (بوحدة الأوم). أما الإيصالية عبر الإلكتروليت [L، بوحدة سيمنز (S) التي تساوي ١ أوم$^{-١}$] فهي مقلوب المقاومة الكهربائية:

$$L = 1/R \qquad (٨,١٢)$$

في الخلايا الإلكتروليتية، تكون الإيصالية النوعية (κ، بوحدة سيمنز لكل متر) للمحلول الإلكتروليتي كما في المعادلة الآتية:

$$\kappa = \frac{L\,l}{A} = \frac{1/R\,l}{A} = 1/kR \qquad (٨,١٣)$$

حيث إن:

κ = الإيصالية النوعية للمحلول الإلكتروليتي (سيمنز لكل متر)

A = المساحة المقطعية لسطح الإلكترود (متر مربع)

l = المسافة بين الإلكترودين (متر)

k = ثابت الخلية، وهو القيمة الفعالة للنسبة A/l التي تخص شكل الخلية (متر)

بشكل عام يتم التعامل مع الإيصالية النوعية على أساس مولي، حيث يعبر عن قابلية التوصيل المولية (Λ) لمحلول إلكتروليتي ذي تركيز مولي مقداره C كما يأتي:

$$\Lambda = \frac{\kappa}{C} \qquad (٨,١٤)$$

الإيصالية النوعية هي دالة في التركيزات المولية وقدرة التنقل للأصناف الأيونية في الخلية. إذا كان هناك إلكتروليت واحد (مثل كلوريد البوتاسيوم (KCl) الذي تم قياس الإيصالية النوعية له بشكل جيد كدالة في التركيز) فإن قابلية التوصيل المولية يعبر عنها بالمعادلة الآتية:

$$\Lambda = \alpha F (U_+ + U_-) \qquad (٨,١٥)$$

حيث إن:

α = التركيز الجزئي للإلكتروليت

F = ثابت فاراداي (٩٦٤٨٥ كولوم/مول)

U_+, U_- = قدرة التنقل الأيونية للكاتيون والأنيون على التوالي كما توضح المعادلة الآتية:

$$U_i = \frac{l}{t\,(dE/dl)} \left(m^2/Vs\right) \qquad (٨,١٦)$$

ويمكن إيجاد علاقة تعبر عن اعتماد القوة الدافعة الكهربائية على درجة الحرارة في خلية إلكتروليتية من خلال المعادلة رقم (٨,٢١). في هذه المعادلة تكون طاقة جيب الحرة (Gibb's free energy) هي ذاتها الشغل الكهربائي الذي يعبر عنه كما يأتي:

$$\Delta G = -nEF \qquad (٨,١٧)$$

حيث إن:

n = عدد المولات في الإلكتروليت

E = القوة الدافعة الكهربائية (فولت)

F = ثابت فاراداي

في حالة ثبات الإنثالبي (enthalpy) خلال التفاعل في الخلية (أي أن ΔH = صفراً)، فإن التغير في طاقة جيبز الحرة يساوي التغير في الشغل الميكانيكي، $T\Delta S$:

$$\Delta G = -T\Delta S = -nEF \qquad (٨,١٨)$$

وعليه فإن اعتماد E على T (عند ثبات الضغط) يعبر عنه كما يأتي:

$$\left(\frac{\partial E}{\partial T}\right)_p = \frac{\Delta S}{nF} \qquad (٨,١٩)$$

وبقياس فرق الجهد على الخلية كدالة في درجة الحرارة وبحساب التغير في الإنتروبي (entropy) (ΔS) من المعادلة رقم (٨,١٩) وبمعلومية قيمة ΔG من المعادلة رقم (٨,١٧) فإن التغير الإجمالي في الطاقة كدالة في درجة الحرارة يمكن تقديره من خلال المعادلة رقم (٨,٢١) أدناه.

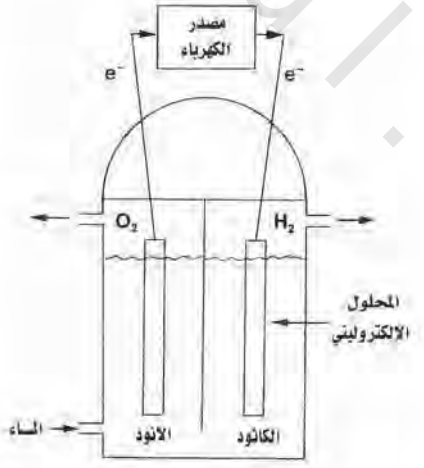
التحليل الكهربائي: إن بحثاً سريعاً على الإنترنت عن عبارة "التحليل الكهربائي للماء" يعطي عدداً كبيراً من النتائج، الكثير منها عن تجارب كيميائية في المدارس الثانوية تبدأ بالصياغة التقريبية الآتية: "عندما يمر تيار كهربائي مستمر من خلال ماء يحتوي على كمية قليلة من كبيريتات الصوديوم، فستنتج غازات عند الإلكترودين: الهيدروجين الجزيئي عند أحد الإلكترودين والأوكسجين الجزيئي عند الإلكترود الآخر." أما الكتب الجامعية المقررة فإنها تشير إلى أن الماء النقي موصل رديء للغاية للكهرباء ولكن إضافة

إلكتروليت، وهي مواد تؤدي إلى محلول موصل للكهرباء مثل حمض الكبريتيك (H_2SO_4) وهيدروكسيد البوتاسيوم (KOH)، تقلل المقاومة الكهربائية مما يؤدي إلى تحلل الماء بالمعادلة الآتية :

$$2H_2O \Rightarrow 2H_2 + O_2 \qquad (٨,٢٠)$$

وقد أعد دوتا [2] عرضاً لعدة طرق متقدمة (إلى عام ١٩٩٠م) لإنتاج الهيدروجين بالتحليل الكهربائي. ومن ضمن الطرق التي تم استعراضها (١) التحليل الكهربائي للماء القلوي و(٢) التحليل الكهربائي للبوليمرات الجامدة و(٣) التحليل الكهربائي للبخار مرتفع الحرارة.

التحليل الكهربائي للماء القلوي (alkaline water electrolysis): إن أكثر تقنيات التحليل الكهربائي شيوعاً على نطاق تجاري هي التحليل الكهربائي للماء القلوي (AWE)، كما يوضح الشكل رقم (٨,٣). تشبه هذه الطريقة إلى حد كبير التجارب المدرسية التي ذكرت آنفاً.



الشكل رقم (٨,٣). رسم توضيحي لخلية تحليل كهربائي قاعدية للماء.

في خلية مستخدمة تجارياً، يكون الإلكتروليت محلولاً يحتوي على هيدروكسيد البوتاسيوم (KOH) بنسبة ٢٥ - ٣٥٪ ويعمل عند درجة حرارة تبلغ حوالي ٨٠ درجة مئوية. التفاعلات عند الإلكترودين هي:

عند الكاثود $H_2O + 2e^- \Rightarrow H_2 + 2OH^-$

عند الأنود $2OH^- \Rightarrow \frac{1}{2} O_2 + 2OH^- + 2e^-$

الأمر الذي يؤدي إلى تفاعل كلي يبلغ نصف التفاعل المذكور في المعادلة رقم (٨,٢٠).

ويبلغ متوسط استهلاك الطاقة الكهربائية في التحليل الكهربائي للماء حوالي ٥٠ كيلووات-ساعة/كجم من الهيدروجين. هذه التكلفة تجعل إنتاج الهيدروجين بالتحليل الكهربائي على نطاق واسع غير اقتصادي مقارنة بطريقة تحوير بخار الماء والميثان. ويجري العمل حالياً على تحسين تقنية AWE باستخدام جهاز تحليل كهربائي قلوي متقدم يمكنه زيادة كفاءة الخلية إلى حد ما ويقلل استهلاك الكهرباء إلى حوالي ٤٣ كيلووات-ساعة/كجم. ولعل أحد التطورات الأخرى في هذه التقنية هو استخدام غشاء غير عضوي (inorganic membrane) في الخلية يمكنه زيادة الكفاءة بعض الشيء (إلى حوالي ٩٠٪) ويقلل استهلاك الكهرباء إلى حوالي ٤٢ كيلووات-ساعة/كجم.

التحليل الكهربائي للبوليمرات الجامدة: يحدث تغيير هام في المعدات المستخدمة لإنتاج الهيدروجين من الماء عند استخدام أجهزة تحليل كهربائي تعمل بإلكتروليت بوليمري جامد (SPE). إذ يتضمن ذلك استبدال الإلكتروليت هيدروكسيد البوتاسيوم (KOH) المسبب للتآكل بغشاء جامد بين الإلكترودين يكون منفذاً لذرات الهيدروجين المؤينة (بروتونات) وغير منفذ لإلكترونات تلك الذرات. تمت دراسة عدة مواد لصنع الغشاء بغرض استخدامها المحتمل في تقنية خلايا الوقود، وستكون المواد ذاتها مفيدة كذلك

في أجهزة التحليل الكهربائي. ومن ضمن هذه المواد مادة النافيون (Nafion) (الحمض الكبريتي البيرفلوري perfluorsulfonic acid) والتي تم الحصول على براءة اختراع لها منذ زمن، وكذلك ورق ألياف الكربون ومواد أخرى غير معلنة التركيب تستخدم كأغشية لتبادل البروتونات (PEMs). التفاعلات عند الإلكترودين في هذا النوع هي :

عند الكاثود $2H_2O \Rightarrow 2H^+ + \frac{1}{2} O_2 + 2e^-$

ومع نفاذ بروتونات من خلال الغشاء،

عند الأنود $2H^+ + 2e^- \Rightarrow H_2$

لم يتم تصنع أجهزة التحليل الكهربائي التي تستخدم البوليمرات الجامدة بشكل تجاري حتى الآن بسبب تكلفة الأغشية العالية وكمية البلاتين المحملة فيها والتي تستخدم كمحفز.

التحليل الكهربائي للبخار عالي الحرارة : يصنع نوع ثانٍ من الإلكتروليت الجامد من مواد خزفية مثل الإيتريوم وأكاسيد الزيركون (Y_2O_3, ZrO_2) التي يمكن أن تعمل عند درجات حرارة أعلى من ١٠٠٠ درجة مئوية في منظومات تستطيع تحليل بخار الماء بدلاً من الماء السائل. ولقد سميت هذه الطريقة "عملية هوت إيلي Hot Elly" [3] وقد وصفت هذه الطريقة في معرض الحديث عن استخدام بخار الماء منخفض الحرارة (حوالي ٢٠٠ درجة مئوية) المستخرج من المخزونات الجيوحرارية. تكمن ميزة استخدام بخار الماء عالي الحرارة في العلاقة الثيرموديناميكية بين الإنثالبي ودرجة الحرارة (والتي استخدمت في القسم ٨,٢,١أ) الخاصة بتحلل الماء بفعل التحليل الكهربائي :

$$\Delta H = \Delta G + T\Delta S \qquad (٨,٢١)$$

حيث إن:

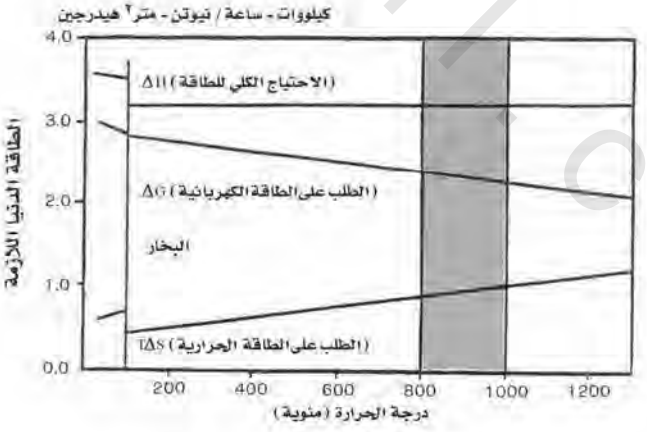
ΔH = التغير في الإنثالبي (الاحتياج الكلي للطاقة)

ΔG = التغير في طاقة جيبز الحرة (الحد الأدني اللازم من الشغل لتسيير التفاعل)

T = درجة الحرارة المطلقة (درجة كيلفن)

ΔS = التغير في الإنتروبي (وهي خاصية ثرموديناميكية للمنظومة وحدتها جول/درجة كيلفن).

ويوجد مصدران للطاقة الكلية اللازمة لتحليل الماء كهربائياً، ΔH: ΔG، وهي الطاقة الكهربائية التي تُزوَّد المنظومة بها وTΔS وهي الطاقة الحرارية. يبين الشكل رقم (٨,٤) العلاقة بين الجزئين كدالة في درجة الحرارة. توضح البيانات الانخفاض في الحاجة إلى الطاقة الكهربائية عندما تزداد الطاقة الحرارية المدخلة إلى المنظومة. وتعتبر المساحة المظللة الواقعة بين ٨٠٠ و١٠٠٠ درجة مئوية منطقة درجة حرارة "هوت إيلي" التي تؤدي إلى الكفاءة المثلى.



الشكل رقم (٨,٤). الطاقة الدنيا اللازمة للتحليل الكهربائي للماء عند درجات حرارة عالية.

الأساليب الحرارية : قد تصبح الأساليب الحرارية لإنتاج الهيدروجين الطريقة الرئيسة لتخفيض تكلفة الهيدروجين حتى يصبح منافساً للوقود الأحفوري. ولعل أسرع هذه الطرق هي تحليل الماء عن طريق تسخينه. ولكن من المؤسف أن تحليل الماء بكميات كبيرة يتطلب درجات حرارة تزيد على ٢٠٠٠ درجة مئوية مما يجعل العملية غير اقتصادية باستخدام تقنيات اليوم. إلا أن الهيدروجين يمكن أن ينتج من خلال عدة دورات كيميائية حرارية عند درجات حرارة أقل من ١٠٠٠ درجة مئوية وهي درجات حرارة يمكن الوصول إليها في محطات القدرة الكهربائية الحديثة.

تستخدم الدورة الكيميائية الحرارية سلسلة من التفاعلات الكيميائية التي تحرر الهيدروجين، بينما يعاد تدوير الكيماويات المستخدمة في دورة مغلقة. ويستعرض تقرير أعده براون وزملاؤه [4] حوالي ٢٥ دورة كيميائية حرارية مقترحة تم اختيار اثنتين منها على أنهما واعدتان أكثر من غيرهما: الأولى هي دورة الكبريت واليود (S-I) (والتي وصفها بيسينبروك [5] وشولتز [6])، أما الثانية فهي دورة UT-3 الأديباتية (والتي وصفها يوشيدا وزملاؤه [7]).

ترتكز دورة الكبريت واليود على تحلل الحمض الكبريتي عند درجات حرارة مرتفعة (من ٨٠٠ – ١٠٠٠ درجة مئوية) بالتفاعل الآتي:

$$H_2SO_4 \Rightarrow \tfrac{1}{2}O_2 + SO_2 + H_2O \qquad (٨,٢٢)$$

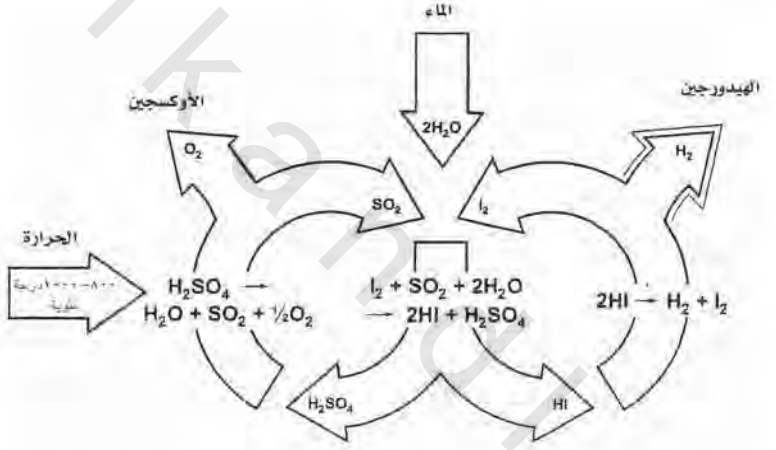
يتفاعل في الخطوة التالية ثاني أكسيد الكبريت مع اليود والماء في تفاعل طارد للحرارة عند درجة حرارة تبلغ ١٢٠ درجة مئوية ليتكون يوديد الهيدروجين ويعاد تكون حمض الكبريت كما يأتي:

$$SO_2 + I_2 + 2H_2O \Rightarrow 2HI + H_2SO_4 \qquad (٨,٢٣)$$

وفي خطوة إعادة التدوير الثانية يتحلل يوديد الهيدروجين عند درجة حرارة تبلغ ٣٢٠ درجة مئوية لينتج الهيدروجين الجزيئي ويعاد تكون اليود كما يأتي:

$$2HI \Rightarrow H_2 + I_2 \qquad (٨,٢٤)$$

ويضم الشكل رقم (٨,٥) رسماً توضيحياً لعملية الكبريت واليود (مع درجات حرارة التفاعل).



الشكل رقم (٨,٥). رسم توضيحي لدورة الكبريت واليود الكيميائية الحرارية.

أما دورة UT-3 (والتي تم تطويرها في جامعة طوكيو في سبعينيات القرن العشرين) فهي دورة تتألف من أربعة تفاعلات. ترتكز هذه الدورة على تفاعلات تحدث عند درجات حرارة متوسطة (من ٣٠٠ - ٧٥٠ درجة مئوية) ويتفاعل فيها البروم الغازي الساخن [$Br_2(g)$] وبخار الماء [$H_2O(v)$] اللذان يتدفقان من خلال طبقات ثابتة من أكسيد الكالسيوم وأكسيد الحديد في عمليات تدفق عكسي نتيجتها الصافية هي تحلل الماء إلى

هيدروجين وأوكسجين. تبدأ الدورة بتحرير الأوكسجين من طبقة أكسيد الكالسيوم باستخدام البروم الغازي عند درجة حرارة تبلغ ٦٠٠ درجة مئوية بالتفاعل الآتي :

$$Br_2(g)+CaO(s)\Rightarrow CaBr_2(s)+\tfrac{1}{2}O_2 \qquad (٨,٢٥)$$

يبقى بروميد الكالسيوم على الطبقة كجامد يقوم بفصل الماء إلى مركبات منفصلة، معيداً تكوين أكسيد الكالسيوم عند درجة حرارة تبلغ ٧٥٠ درجة مئوية ومكوناً بروميد الهيدروجين بالتفاعل الآتي :

$$CaBr_2(s)+H_2O(g)\Rightarrow CaO(s)+2HBr(g) \qquad (٨,٢٦)$$

أما في طبقة أكسيد الحديد الثابتة المستقلة فإن البروم يعاد تكونه من خلال تكوين بروميد الحديد على الطبقة عند درجة حرارة تبلغ ٣٠٠ درجة مئوية بالتفاعل الآتي :

$$Fe_3O_4(s)+8HBr(g)\Rightarrow 3FeBr_2(s)+4H_2O(g)+Br_2(g) \qquad (٨,٢٧)$$

يتحرر خلال التدفق العكسي غاز الهيدروجين فيعيد تكوين أكسيد الحديد عند درجة حرارة تبلغ ٦٠٠ درجة مئوية بالتفاعل الآتي :

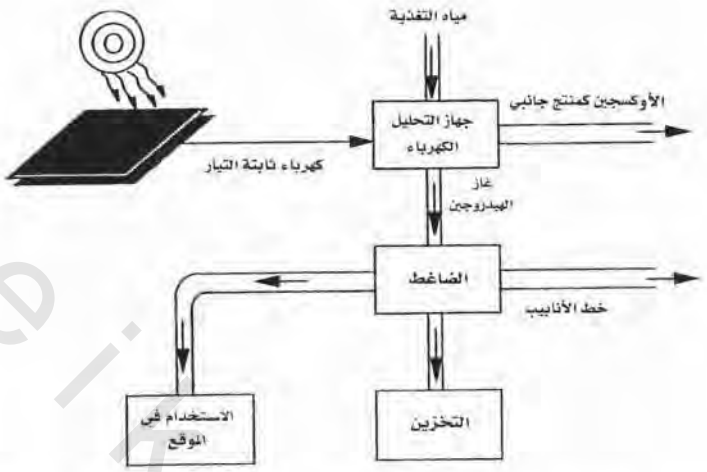
$$3FeBr_2(s)+4H_2O(g)\Rightarrow Fe_3O_4(s)+6HBr(g)+H_2(g) \qquad (٨,٢٨)$$

لا تزال هذه الدورات قيد الدراسة للتوصل إلى الأنواع المثلى من المفاعلات النووية التي تتوافق مع الصفات المميزة لهذه الدورات. فعلى سبيل المثال، فإن المفاعل النووي المختار لدورة الكبريت واليود هو المفاعل المعياري الذي يبرد بالهيليوم (modular helium-cooled reactor) الذي وصفه شولتز [6] والمفاعل عالي الحرارة المتقدم الذي وصفه فورسبرج [8]. أما درجات الحرارة المعتدلة الدنيا اللازمة لتشغيل دورة UT-3 فيمكن تحقيقها مع أي نوع من المفاعلات النووية تقريباً.

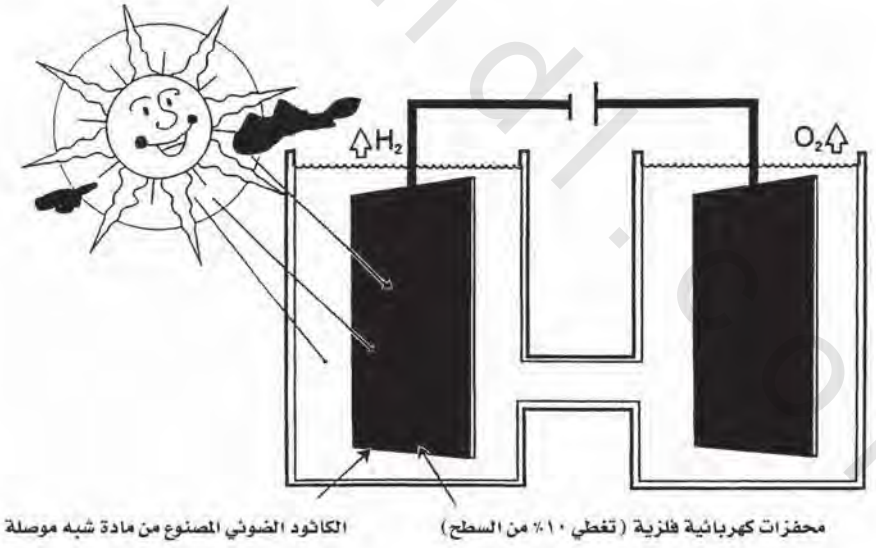
عمليات التحويل البيولوجية: لقد أصبح تحويل الكتلة الحيوية لإنتاج الهيدروجين جانباً مهماً في البحث عن موارد الطاقة المتجددة. وكانت إحدى الحجج القوية التي استخدمت لزيادة التأييد الشعبي لإحلال الهيدروجين مكان الوقود الأحفوري قد نشأت من الأمل في إثارة اهتمام الجمهور بعملية ربط إنتاج الهيدروجين بموارد الطاقة المتجددة (الخضراء). لقد كانت هذه هي الفكرة الرئيسة في الكتب الأولى عن طاقة الهيدروجين (مثل [9]). من المناسب تصنيف الموارد المتجددة المستخدمة في إنتاج الهيدروجين إلى ثلاث مجموعات: (١) الطاقة الشمسية التي تنتج القدرة الكهربائية مباشرة و(٢) الطاقة الشمسية المستغلة بعمليات غير مباشرة و(٣) الموارد الأرضية التي تنتج القدرة الكهربائية مباشرة.

الطاقة الشمسية التي تنتج القدرة الكهربائية مباشرة: هناك عدد من الطرق التي تستخدم الطاقة الشمسية للإنتاج المباشر للقدرة الكهربائية والتي تنتج بدورها الهيدروجين لتحليل الماء كهربائياً. من ضمن هذه الطرق السدود الكهرومائية ومزارع الرياح والخلايا الكهروضوئية. سبق استعراض استخدام هذه الطرق في الفصل السابع، وهي طرق يمكن إضافة القدرة الكهربائية المنتجة من أي منها بشكل مباشر إلى شبكة الكهرباء. لقد كان أحد الاعتبارات في تطوير المنظومات الكهروضوئية الأولى (كما في [10]) هو إنتاج الهيدروجين بالتحليل الكهربائي، وذلك من خلال الكهرباء ذات التيار المستمر (DC)، كما يوضح الشكل رقم (٨,٦).

وتمت ملاحظة فكرتين أخريتين لإنتاج الهيدروجين بالطاقة الشمسية. الفكرة الأولى هي الإنتاج المباشر بفصل الماء عن طريق التحفيز الكهربائي الضوئي (photoelectrocatalysis) [11]، حيث يسمح تكتل جسيمات فلزية صغيرة على مساحة من سطح أشباه الموصلات لا تزيد على ٢٠٪ بزيادة كفاءة تحويل الضوء إلى هيدروجين بمقدار ٢٠ ضعفاً تقريباً. يوضح الشكل رقم (٨,٧) هذه الفكرة.

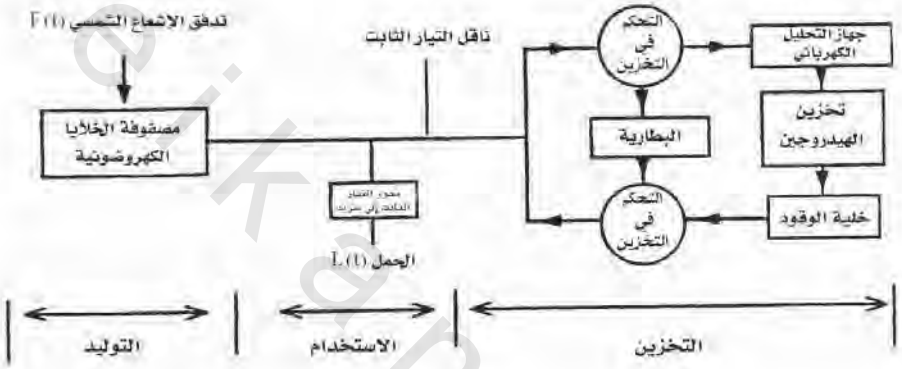


الشكل رقم (٨,٦). رسم توضيحي لمنظومة شمسية تنتج الهيدروجين بالخلايا الضوئية.



الشكل رقم (٨,٧). رسم توضيحي لمنظومة كهروضوئية للفصل المباشر للماء.

أمـا الفكـرة الأخـرى فهـي منظومـة تجمـع الطاقـة الشمـسية والهيـدروجين والبطاريات لإنتاج الكهرباء واستخدامها والتحكم في تخزينها من خلال تخزين كيميائي للكهربـاء في بطاريـات أو مـن خـلال إنتـاج الهيـدروجين كوقـود. يوضـح الـشكل رقـم (٨,٨) هذه الفكرة.



الشكل رقم (٨,٨). رسم توضيحي لمنظومة شبكة كهربائية تستخدم بطارية هيدروجين شمسية.

الطاقة الشمسية المستغلة بطرق غير مباشرة: الطريقة البديلة لاستخدام الطاقة الشمسية لإنتاج الهيدروجين هي تحويل الكتلة الحيوية إلى وقود حيوي. تمت تغطية موضوع تكوين الوقود الحيوي في القسم (٧,٤). من الميزات المهمة لاستخدام الكتلة الحيوية لإنتاج الهيدروجين أن الهيدروجين يشكل جزءاً كبيراً من التركيب الكيميائي للكتلة الحيوية ($C_nH_{2n}O_n$) مما يسمح بالتحويل المباشر دون الحاجة لخطوة إنتاج الكهرباء في عملية التحويل. على سبيل المثال ففي محطة غاز حيوي يمكن معالجة الغاز الحيوي الخام ليصبح ميثاناً مضغوطاً يستخدم مباشرة كوقود للنقل. وفي مسار تحويل السكر الموضح في الشكل رقم (٧,١٥) يمكن إنتاج الإيثانول للاستخدام المباشر كمادة مضافة

(additive) للوقود التقليدي وللاستفادة من قيمته الحرارية لإنتاج القدرة الكهربائية ولاستخدامه كمادة خام في إنتاج الهيدروجين عن طريق تحوير بخار الماء والإيثانول.

ومن المميزات الأخرى للوقود الحيوي سهولة استخدامه في التجهيزات الصغيرة كمصدر طاقة قابل للتوزيع. ويمكن عملياً أن تستخدم الكتلة الحيوية كلقيم في منشآت إنتاج الهيدروجين لجعل الهيدروجين مورد طاقة شبه متجدد ولجعله حاملاً للطاقة. ومن بعض المشاكل التي أشير إليها فيما يتعلق بتطوير تقنية الوقود الحيوي بشكل تجاري تكلفة استدامة مورد الكتلة الحيوية وتكلفة منشآت معالجة الكتلة الحيوية وملاءمة تلك المنشآت للمنطقة الموجودة فيها وكذلك القيمة النهائية للوقود الحيوي مقارنة بتكلفة شراء وتوريد أنواع أخرى مستوردة من وقود الطاقة من أماكن أخرى. إذا أصبحت عملية تحوير بخار الماء والميثان الطريقة المؤقتة الرئيسة لإنتاج وقود الهيدروجين فإن إضافة الوقود الحيوي إلى المصادر الأخرى سيكون أمراً مرحباً به.

الموارد الأرضية : الموارد الأرضية الملائمة لإنتاج الهيدروجين هي مخزونات بخار الماء الجيوحرارية بالإضافة إلى اليورانيوم والثوريوم الخام اللذين يتم استخلاصهما للحصول على الوقود الانشطاري اللازم لمفاعلات القدرة النووية. وتنتشر الموارد الجيوحرارية على نطاق واسع كمخزونات بخار ماء جيوحرارية مما يجعلها جزءاً من موارد الطاقة في عدة دول. يمكن أن تلعب الطاقة الجيوحرارية، والتي تسهم بشكل ملحوظ في إمدادات الطاقة في الولايات المتحدة، دوراً في إنتاج الهيدروجين [13] كما تشير دراسة عن مدى إمكانية إنتاج الهيدروجين في حقول الطاقة الجيوحرارية في المكسيك. وقد قدمت عدة طرق تكمل بعضها بعضاً للقيام بذلك من ضمنها (١) الاستخدام الأكثر كفاءة للموارد من خلال إيجاد توازن أمثل بين تحويل الطاقة الجيوحرارية إلى كهرباء تستخدم في الشبكة المحلية وبين إنتاج الهيدروجين ليتم توزيعه من خلال شبكة أنابيب كوقود و(٢) توزيع الاستثمارات في حقول الطاقة الجيوحرارية على كميات أكبر من الإنتاج مما يقلل تكلفة التوليد و(٣) تحفيز عملية تنمية الموارد

الجيوحرارية، و(٤) زيادة عمر الاحتياطيات من خلال تفادي إغلاق الآبار الجيوحرارية حتى يمكن الاستجابة للطلب الدوري على الطاقة بالإضافة إلى الأسباب التقليدية وهي التقليل من استخدام الوقود الأحفوري. إن التوسع البطئ في الوقت الراهن في استغلال مخزونات بخار الماء الجيوحرارية تقصر دور هذا المورد في كونه خياراً طويل المدى كمصدر بديل للطاقة في المستقبل.

والمورد الأرضي الرئيس لإنتاج الهيدروجين هو النظائر المشعة لليورانيوم والثوريوم المنتشرة في خامات معدنية في قشرة الأرض. تقدمت مناقشة تقنيات هذه العناصر ومواردها واحتياطياتها في الفصل السادس، وذلك للدورة المفتوحة (حيث تستخدم قضبان الوقود مرة واحدة ثم يتم التخلص منها كنفايات)، والدورة المغلقة (حيث تعاد معالجة الوقود غير المستهلك في قضبان الوقود والنظائر المشعة الناتجة المفيدة كمصدر طبي وصناعي للطاقة النوعية العالية، كما تعاد معالجة المنتجات الجانبية للعناصر المشعة الناتجة ذات العدد الذري العالي).

سيجعل بحث الإنسان عن الطاقة الوفيرة موارد الطاقة ذات النوعية العالية هذه ذات أهمية في المستقبل، وذلك عندما تتغلب حاجة الناس على خوفهم. وسوف تكون هناك نتيجة (أو نتيجتان) في المستقبل: (١) إعادة استخلاص الوقود غير المعالج من مخازن النفايات النووية أو أماكن التخلص منها أو (٢) تطوير استخدامات مدنية للطاقة النووية الحرارية (طاقة الشمس على الأرض) تكمل (أو تحل محل) الطاقة النووية الانشطارية.

(٨,٢,٢) تخزين الهيدروجين Hydrogen Storage

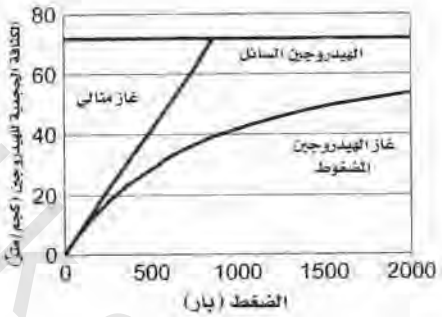
الكهرباء هي الطاقة الحركية للإلكترونات المتحركة ولا يمكن تخزينها على هذا الشكل. إلا أنه يمكن تغييرها إلى طاقة كامنة على شكل مركبات كيميائية (كما في حالة البطارية) تطلق الإلكترونات (حسب الحاجة) عند فرق جهد البطارية في دائرة مغلقة حتى تنقضي الطاقة الكيميائية المخزنة. وعلى عكس الكهرباء فإن الهيدروجين هو

شكل مادي للطاقة الكامنة التي يمكن تخزينها إلى وقت الحاجة إليها. إلا أن الكثافة المنخفضة جداً للهيدروجين عند ظروف درجة الحرارة والضغط القياسية (STP) (والبالغة ٠,٠٨٩٩ كجم/م^٣) تمنع استخدامه بشكل واسع النطاق ما عدا (ربما) في إنتاج القدرة في المحطات الثابتة. يبلغ الحجم النوعي للهيدروجين عند الظروف القياسية ١١,١ م^٣/كجم. بما أن الكيلوجرام الواحد من الهيدروجين يساوي تقريباً جالوناً من البنزين من ناحية الطاقة التي يعطيها للسيارات فإن خزان الوقود في سيارة (والذي تبلغ سعته ١٥ جالوناً) سيتطلب خزاناً لغاز الهيدروجين سعته المكافئة هي ١٦٧ جالوناً عند الظروف القياسية، وهو أمر غير عملي بالطبع في السيارات. هناك ثلاث طرق أساسية لتخزين الهيدروجين: غاز الهيدروجين المضغوط (CHG)، والهيدروجين السائل (LH_2)، والربط الكيميائي، كما في حالة هيدريدات الفلزات.

غاز الهيدروجين المضغوط: غاز الهيدروجين المضغوط منتج تجاري، إذ إن أكثر من خمسة مليارات متر مكعب منه تستخدم سنوياً في الولايات المتحدة وفي الغالب لتركيب الأمونيا وهدرجة الكبريت وتكرير النفط. يباع الغاز عادة في أسطوانات من الفولاذ سعتها ٥٠ لتراً ومضغوطة إلى ٢٠٠ بار (حوالي ٢٩٠٠ رطل/بوصة^٢). لن يكون هذا الضغط مقبولاً للاستخدام في مركبات تعمل على خلايا وقود الهيدروجين. وسنحتاج إلى أربع أسطوانات من النوع سالف الذكر تزن كل منها ٢٧٠ كجم (حوالي ٦٠٠ رطل) لتوفير ٣ كجم من الهيدروجين، وهي كمية تستطيع تحريك مركبة صغيرة لمسافة ٤٠٠ كيلومتر (٢٥٠ ميلاً).

إن التحدي الذي يواجه مصنعي أسطوانات الغاز هو تطوير مواد خفيفة الوزن لخزانات غاز تتسع لخمسة كيلوجرامات من الهيدروجين وتتحمل بشكل آمن ضغطاً يصل إلى ١٠٠٠٠ رطل/بوصة^٢ (حوالي ٦٨٠ بار) مما يسمح للمركبة بقطع مسافة قدرها ٤٠٠ ميل بمتوسط استهلاك للوقود مقداره ٨٠ ميل/كجم. لقد تم تطوير أسطوانات جديدة خفيفة الوزن ومصنوعة من مواد مركبة (composite) تستطيع تحمل

ضغط يصل إلى ٨٠٠ بار [14]. ويبين الشكل رقم (٨,٩) الكثافة الحجمية للهيدروجين داخل الأسطوانة. وكما يظهر في الشكل فإن كثافة غاز الهيدروجين المعرض للضغط تختلف بشكل ملحوظ عن كثافة غاز مثالي.



الشكل رقم (٨,٩). الكثافة الحجمية للهيدروجين المضغوط كدالة في ضغط الغاز، وتشمل كثافة الغاز المثالي وكثافة الهيدروجين السائل. المصدر: مستقاة من المرجع [14].

ينتج الهيدروجين الإلكتروليتي عند ضغط فوق الضغط الجوي (P_0) وتعطي المعادلة الآتية الشغل النظري اللازم لضغط الهيدروجين في حالة ثبات درجة الحرارة (isothermal compression):

$$\Delta G = R\,T\ln(P/P_0) \qquad (٨,٢٩)$$

حيث إن:

R = ثابت الغاز (٨,٣١٤ جول/كيلفن-مول)

T = درجة الحرارة المطلقة (كيلفن)

P = الضغط النهائي في الأسطوانة (بار)

P_0 = الضغط الابتدائي بعد إنتاج الهيدروجين (بار)

تستهلك عملية ضغط الهيدروجين من ١ بار إلى ٨٠٠ بار (مع ثبات درجة الحرارة) ٢,٢١ كيلووات-ساعة/كجم، لكن الطاقة المستهلكة فعلياً أكبر من ذلك لأن درجة الحرارة لا تكون ثابتة خلال عملية الضغط [14]، مما يؤدي إلى إضافة نسبة صغيرة (< ٥٪) إلى استهلاك طاقة التحليل الكهربائي البالغة ٥٠ كيلووات-ساعة/كجم تقريباً وهي الطاقة اللازمة لإنتاج وقود الهيدروجين.

الهيدروجين السائل : الهيدروجين السائل (LH_2) هو كذلك منتج تجاري، فهو يستخدم كوقود للصواريخ مع الأوكسجين السائل (LO_2) في برامج استكشاف الفضاء. وكما يتضح من الشكل رقم (٨,٩) فإن كثافة الهيدروجين السائل هي ٧٠,٨ كجم/م^3 (عند درجة حرارة ٢٠ كيلفن).

ينتج الهيدروجين السائل بشكل عام في عملية متعددة الأطوار باستخدام النيتروجين السائل ومن خلال سلسلة متتابعة من الضواغط ويخزن في صهاريج شديدة البرودة (cryogenic tanks) عند ضغط جوي. لا يمكن تخزين الهيدروجين السائل إلا في منظومات مفتوحة بسبب مشكلة الغليان. ومما يزيد من تعقيد مسألة التخزين وجود عمليتين طبيعيتين تؤديان إلى التبخير في المنظومات المغلقة (مع زيادة كبيرة في الضغط تزيد على ١٠٠ بار). إحدى العمليتين هي تسرب الحرارة إلى داخل الصهريج والناتج من حجم صهريج التخزين وشكله وعزله الحراري. يتناسب الفاقد من جراء الغليان بسبب تسرب الحرارة إلى داخل الصهريج مع نسبة مساحة السطح إلى الحجم، إذ يضمحل معدل التبخير عندما يزداد حجم صهريج التخزين. في حالة الصهاريج كروية الشكل ذات الجدار المزدوج والمعزولة بوجود فراغ (vacuum insulated) تبلغ كمية الفاقد اليومي من جراء التبخير عادة ٠,٤٪، وذلك لحجم تخزيني مقداره ٥٠م^3 وتبلغ الكمية ٠,٢٪ لحجم تخزيني مقداره ١٠٠م^3، كما تبلغ الكمية ٠,٠٦٪ لحجم تخزيني مقداره ٢٠٠٠٠م^3. أما العملية الثانية التي تؤدي إلى الغليان فهي تنتج من نسبة الأورثو هيدروجين إلى البارا هيدروجين (انظر القسم ٨,٠,١). ففي صهريج تخزين تبلغ درجة

حرارته ٢٠ كيلفن يتحول الأورثو هيدروجين ببطء وبشكل تلقائي إلى بارا هيدروجين خلال فترة تمتد من أيام إلى أسابيع، مما يؤدي إلى انبعاث حرارة انتقالية تكفي لتبخير كثير من الهيدروجين السائل.

وبالرغم من أن الطاقة النظرية اللازمة لإسالة الهيدروجين هي حوالي ٣,٢ كيلووات-ساعة/كجم، فإن الطاقة اللازمة فعلياً هي حوالي ١٣ إلى ١٤ كيلووات-ساعة/كجم. وعليه فإن تكلفة الطاقة اللازمة لتخزين الهيدروجين المنتج من التحليل الكهربائي تبلغ حوالي ٥٣ كيلووات-ساعة/كجم في حالة غاز الهيدروجين المضغوط إلى ٨٠٠ بار وتبلغ حوالي ٦٤ كيلووات-ساعة/كجم في حالة الهيدروجين السائل. وإذا قلنا مثلاً إن تكلفة الكهرباء هي ٥ سنت/كيلووات-ساعة فإن تكلفة وقود الهيدروجين ستكون حوالي ٢,٦٥ دولاراً/كجم في حالة غاز الهيدروجين المضغوط وحوالي ٣,٢٠ دولاراً/كجم في حالة الهيدروجين السائل. ومع إضافة تكلفة الطاقة اللازمة لتعويض الهيدروجين المفقود بفعل الغليان، فإنه يبدو أن الاستخدامات الأولى للهيدروجين السائل ستكون محصورة في مجال الطيران والفضاء حيث لا تشكل التكلفة معياراً مهماً، كما أن استهلاك الهيدروجين في هذا المجال يحدث في فترات قصيرة. ومع ذلك فإن استخدام الهيدروجين السائل قيد التقييم من قبل عدة شركات مصنعة للسيارات.

الربط الكيميائي: الربط الكيميائي هو طريقة لتخزين الهيدروجين بشكل صلب في صهاريج تخزين، حيث تقوم منظومة *تبطين* (filling system) بوضع ذرات الهيدروجين في مصفوفة الربط الكيميائية عند درجة حرارة منخفضة ويطلق *المشغل* (operator) غاز الهيدروجين *كوقود عند الطلب* عند درجات الحرارة المرتفعة. تعتبر الفلزات (مثل المجنيزيوم والنيكل والتيتانيوم وخلائطها) كيماويات ربط واعدة، حيث إنها تشكل روابط مكافئة مع الهيدروجين فتتكون هيدرات الفلزات من خلال التفاعل الآتي:

$$2M+H_2 \Rightarrow 2MH+\Delta H \text{ (حرارة التفاعل)} \qquad (٨,٣٠)$$

ينعكس هذا التفاعل عند درجات الحرارة المرتفعة. بعض هيدرات الفلزات (وهيدرات الخلائط) التي يتم تطويرها حالياً لتخزين الهيدروجين (مثل MgH_2 وMg_2NiH_4 و$FeTiH_2$ و$LaNi_5H_6$) لها كثافة حجمية أكبر من الهيدروجين النقي. بالرغم من أن النسبة الوزنية للهيدروجين في هيدرات الفلزات منخفضة (١ إلى ٨٪) مقارنة بالهيدروجين النقي (١٠٠٪) إلا أن الكثافة الذرية الحجمية (أي عدد الذرات في المتر المكعب) أعلى (٥ إلى ٧ مقارنة بـ ١ في حالة غاز الهيدروجين المضغوط عند ٢٠٠ بار).

من ضمن المواد الأخرى التي تتم دراستها لتخزين الهيدروجين بالربط الكيميائي الكربون النقي الموجود في قوالب مثل الكربون المُنَشَّط (activated carbon) وجزيئات الكربون الكبيرة (مثل بكمنسترفوليرينز buckminsterfullerenes وهو قالب من ٦٠ ذرة كربون في هيكل كروي الشكل يسمى بكيبولز BuckyBalls). وعلى مقياس أصغر فإن أنابيب الكربون النانوية carbon nanotubes وكريات الزجاج الدقيقة glass microspheres تتم دراستها كطرق لربط الهيدروجين.

(٨,٢,٣) توزيع الهيدروجين Distribution of Hydrogen

لم يتم تطوير البنية التحتية لتوزيع وقود الهيدروجين على نطاق واسع حتى الآن، كما أن النمو المحتمل في مجال صناعة مَركبات خلايا وقود الهيدروجين ليس أمراً مؤكداً بعد. لقد أقرت الكثير من شركات صناعة السيارات مفهوم إحلال خلايا الوقود محل محركات الاحتراق الداخلي وتمتلك الكثير من شركات النفط شركات فرعية لوقود الهيدروجين. إلا أنه لم تطور بعد البنية التحتية اللازمة لحل معضلة "البيضة والدجاجة" المتمثلة في تحديد الوقت الذي يصبح فيه عدد المركبات التي تعمل بخلايا الوقود كافياً لتبرير بناء محطات تزويد المركبات بالهيدروجين بشكل واسع النطاق والمتمثلة كذلك في تحديد الوقت الذي يكون قد وصل فيه توزيع الهيدروجين إلى درجة تبرر إنتاجه بكميات كبيرة. من المؤمل أن تحل هذه المعضلة في آن واحد. يعتبر "مشروع مخطط كاليفورنيا للهيدروجين California Hydrogen Blueprint Plan" [15] الخاص بشبكة طرق

الهيدروجين Hydrogen Highway Network" أحد المحاولات لحل هذه المعضلة وهدفه إقامة شبكة محطات تزويد بالهيدروجين لعشرين ألف مركبة تعمل بوقود الهيدروجين بحلول عام ٢٠١٠م للإسهام في تذليل الطريق أمام الإنتاج التجاري بشكل كامل. يمكن متابعة وضع هذا المشروع في الموقع الإلكتروني: www.hydrogenhighway.ca.gov/.

وهناك عدة أساليب لإنتاج الهيدروجين في الموقع الذي نحتاجه فيه مثل إنتاج الهيدروجين على متن المركبات والإنتاج المحلي لمجموعات المركبات التي تعبأ بشكل مركزي ووحدات التحليل الكهربائي الصغيرة للمباني وللبيوت ومرائبها. أما في المنشآت الكبيرة المركزية فستستخدم منظومة إقليمية أو وطنية من محطات الوقود التقليدية التي تبيع البنزين والديزل ووقود الهيدروجين. ويمكن توصيل وقود الهيدروجين إلى المنشآت الموزعة باستخدام خطوط الأنابيب وسفن النقل العملاقة والسكك الحديدية والشاحنات.

وبالنسبة لإنتاج وقود الهيدروجين على متن المركبات نفسها فإن التوزيع الواسع للغاز الطبيعي السائل (LNG) والميثانول (CH_3OH) والسوائل العضوية الأخرى خفيفة الوزن قد جعل من فكرة تركيب مفاعل كيميائي على كل مركبة وكذلك تركيب خلية وقود تجعل المركبة تنتج وقودها ذاتياً بعملية تحوير بخار الماء تبدو خيارات جذابة. اعتبرت هذه الفكرة طريقة مؤقتة جيدة لتزويد مركبات خلايا الوقود بوقود الهيدروجين إلى حين توفر محطات كبيرة لتزويد المركبات بالهيدروجين بشكل واسع خلال المرحلة الانتقالية المؤدية إلى الإنتاج واسع النطاق لمركبات خلايا الوقود. لقد درست شركات صناعة السيارات ما إذا كانت هذه الفكرة عملية، وقد خلصت دراساتها حتى الآن إلى أنها تقنية غير عملية.

وبالمقابل فإن إنتاج وقود الهيدروجين محلياً لمحطات القدرة التي تعمل على خلايا الوقود ولأساطيل مركبات خلايا الوقود التي يمكن تعبئتها محلياً في محطات شحن مركزية يجعل من وجود شبكة توزيع أمراً غير ضروري. إذ ستصبح المنشأة التي ينتج

فيها وقود الهيدروجين محطة تحوير أو منشأة للتحليل الكهربائي وستكون كبيرة بما يكفي للتزويد بالوقود عند الحاجة بمعدل يتماشى مع نمو المنشأة.

سيتطلب الاستخدام واسع النطاق لمحطات القدرة التي تعمل بخلايا الوقود واستخدام سيارات خلايا الوقود وضع منظومة توزيع لوقود الهيدروجين توازي شبكة محطات التزود بالبنزين (والصيانة) الحالية. وستستلزم البنية التحتية اللازمة لتحقيق ذلك استخدام شبكة خطوط أنابيب الغاز الطبيعي الحالية أو الإضافة إليها، كما ستستلزم إيجاد أسطول من الشاحنات والسفن المصممة للشحنات ذات الضغط العالي أو الشحنات شديدة البرودة. وستتطلب البنية التحتية أيضاً مراجعة المعايير والأنظمة الحالية لضمان سلامة وأمن الشبكات الواسعة من خطوط الأنابيب وخطوط الشحن.

(٨,٢,٤) استخدامات وقود الهيدروجين النهائية End Uses of Hydrogen Fuel

سبقت الإشارة في القسم (٨,١,٢) إلى أن للهيدروجين عدة استخدامات تنافس بعضها بعضاً. والمقصود بمفهوم منافسة الاستخدامات لبعضها بعضاً أنه لا توجد إمدادات كافية لتلبية الطلب الكلي. إلا أن ذلك ليس صحيحاً (حتى الآن) بالنسبة للهيدروجين، إذ إن إنتاج الهيدروجين الصناعي يكفي لتلبية الطلب الحالي. إلا أن الطلب على الهيدروجين كوقود لم يكد يبدأ حتى الآن إلا فيما يخص استخدامه كوقود حراري في أجهزة اللحام ذي درجة الحرارة العالية وكوقود لسيارات خلايا الوقود البحثية وفي الحافلات التي تهدف إلى عرض الفكرة والتي تسير في بضع مدن لأغراض اختبارية. يقيم الفصل العاشر المنافسة على الهيدروجين بالتزامن مع طرح قضية استدامة إمدادات الكهرباء على مدى السنوات الخمسين القادمة، بينما تتطور صناعة خلايا الوقود وغيرها من الصناعات التي تحتاج إلى الطاقة بشكل كبير.

سيكون هناك في المستقبل استخدامات عديدة لخلايا الوقود بدءاً من الألعاب الصغيرة وانتهاءً إلى منظومات القدرة الكبيرة. أما الاستخدامان الأكثر أهمية

للهيدروجين فسيكونان في إنتاج القدرة الكهربائية وكوقود للنقل. يناقش الفصل التاسع أساسيات خلايا الوقود واستخدامها في النقل. هناك عدة استخدامات لوقود الهيدروجين في محطات القدرة الكهربائية الكبير منها والصغير. وتحتوي قائمة الاستخدامات على ما يلي:

- موازنة الحمل.
- الإمداد المؤقت للقدرة في حالات الطوارئ.
- الإمداد بالقدرة على نطاق ضيق وللمناطق النائية وبشكل موزع.
- المنظومات المنزلية.

يشتمل مفهوم موازنة الحمل على استخدام الطاقة الاستيعابية الفائضة خلال فترات الطلب المنخفض لإنتاج الهيدروجين وتخزينه بحيث يستخدم في أوقات الذروة. من ضمن مزايا موازنة الحمل تشغيل محطة القدرة على طريقة الحمل الأساسي (base load mode) والتي تنتج قدرة ثابتة. وتتفادى طريقة التشغيل هذه الحاجة لبناء محطات قدرة مكلفة مخصصة للعمل بشكل مؤقت وقت الذروة والتي عادة ما تعمل بالغاز الطبيعي. أما العيوب فتشمل تكلفة الطاقة الكهربائية المستخدمة خلال فترة الطلب المنخفض لإنتاج الهيدروجين. وستتم مناقشة هذا الاستخدام في معرض الحديث عن محطات القدرة ثنائية الغرض في الفصل العاشر.

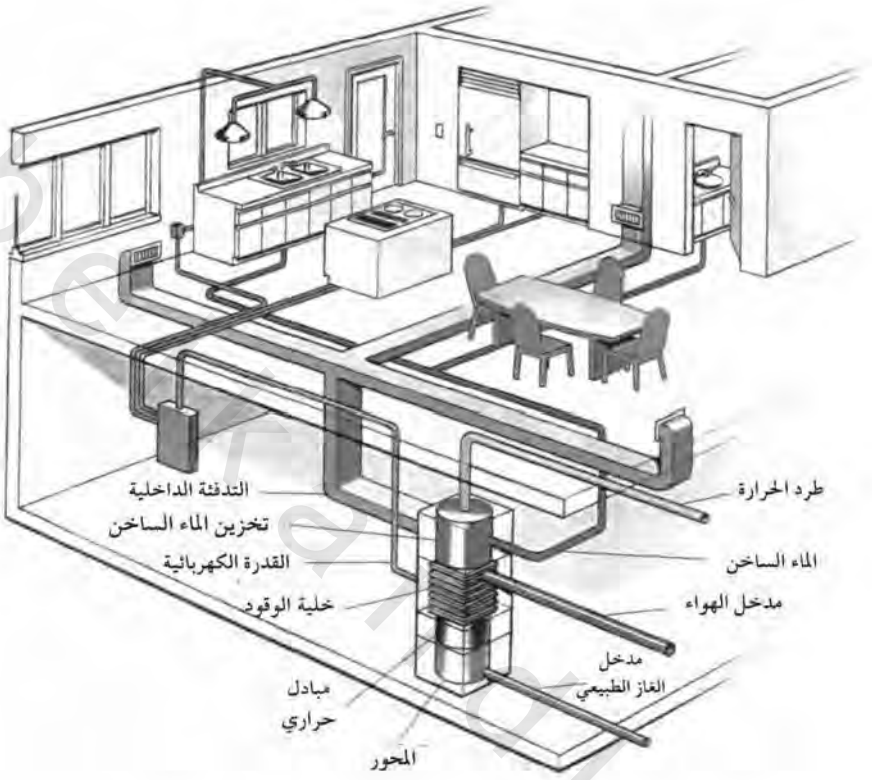
هناك حاجة إلى الإمداد المؤقت للقدرة في الحالات الطارئة مثل ظروف الطوارئ التي يحدث فيها انقطاع للكهرباء عن أماكن خطرة كالمستشفيات، ومنشآت الطوارئ البلدية. يتم توفير إمدادات القدرة في مثل هذه الحالات من خلال وحدات احتراق توربينية احتياطية تعمل بالديزل. تتوفر الآن بشكل تجاري منظومات خلايا وقود للاستخدام المؤقت تصل قدرتها إلى مئات الكيلووات. تزود هذه المنظومات عموماً بالغاز الطبيعي باستخدام عملية تحوير بخار الماء والميثان.

أما بالنسبة لإمداد القدرة على نطاق ضيق وللمناطق النائية وبشكل موزع فهنالك تقنية متوفرة لإنتاج وقود الهيدروجين محلياً في محطات قدرة كهربائية تعمل بخلايا الوقود. وتُعد هذه التقنية مفيدة للتجمعات السكانية الصغيرة والمحطات التي تعمل في مناطق نائية، حيث إنها لا تحتاج إلى فنيي صيانة. إلا أن المنظومة تحتاج إلى تخفيض كبير في التكلفة الإجمالية للاستثمار وفي الصيانة التشغيلية وفي تكلفة الوقود لكي يكون سعرها مناسباً للتجمعات السكانية الصغيرة. هناك تقنية حديثة قيد التطوير يتم من خلالها إحلال خلايا الوقود الصغيرة محل البطاريات القابلة للشحن في الأجهزة المنزلية المتنقلة والأجهزة الإلكترونية الشخصية مثل الهواتف الخلوية، والحاسبات الآلية المحمولة، وأجهزة التلفاز الصغيرة. وسيكون الوقود في هذه الحالة الميثانول السائل الذي يتدفق بكميات صغيرة من حاويات صغيرة تستطيع أن تتخطى مدة تشغيل البطاريات المتوفرة حالياً بمراحل.

أما التقنية اللازمة لمنظومات المنازل فهي متوفرة حالياً، حيث بدأ تركيب منظومات لتعبئة المركبات وهي في مرآبها داخل المنزل، وتستخدم هذه المنظومات أجهزة تحليل كهربائي. ويظهر في الشكل رقم (٨,١٠) نموذج أولي لمنظومة تعبئة صغيرة باستخدام التحليل الكهربائي كانت تعمل عام ٢٠٠١م [16]. وهناك أيضاً منظومات أصبحت متوفرة لتزويد منزل كامل بالكهرباء [17] مثل خلية الوقود التي تستخدم غشاء تبادل البروتونات (PEMFC) الموضحة في الشكل رقم (٨,١١) والتي تبلغ قدرتها ٧ كيلووات ويبلغ حجمها حجم الثلاجة. يظهر في الشكل رقم (٨,١٢) رسم للشكل الذي قد تكون عليه منظومة قدرة منزلية (وقد وضع التصور عام ١٩٩٩م)، وذلك للأغراض الكهربائية والحرارية معاً.

الشكل رقم (٨,١٠). جهاز تجاري صغير الحجم لتزويد المركبات بالهيدروجين المنتج بالتحليل الكهربائي [16].
المصدر: شركة هيدروجينيكس Hydrogenics Corp. في مدينة ميسيسوجا بمقاطعة أونتاريو في كندا.

الشكل رقم (٨,١١). جهاز خلايا وقود منزلي [17]. طبعت هذه الصورة بإذن من إي.سي. لويد.



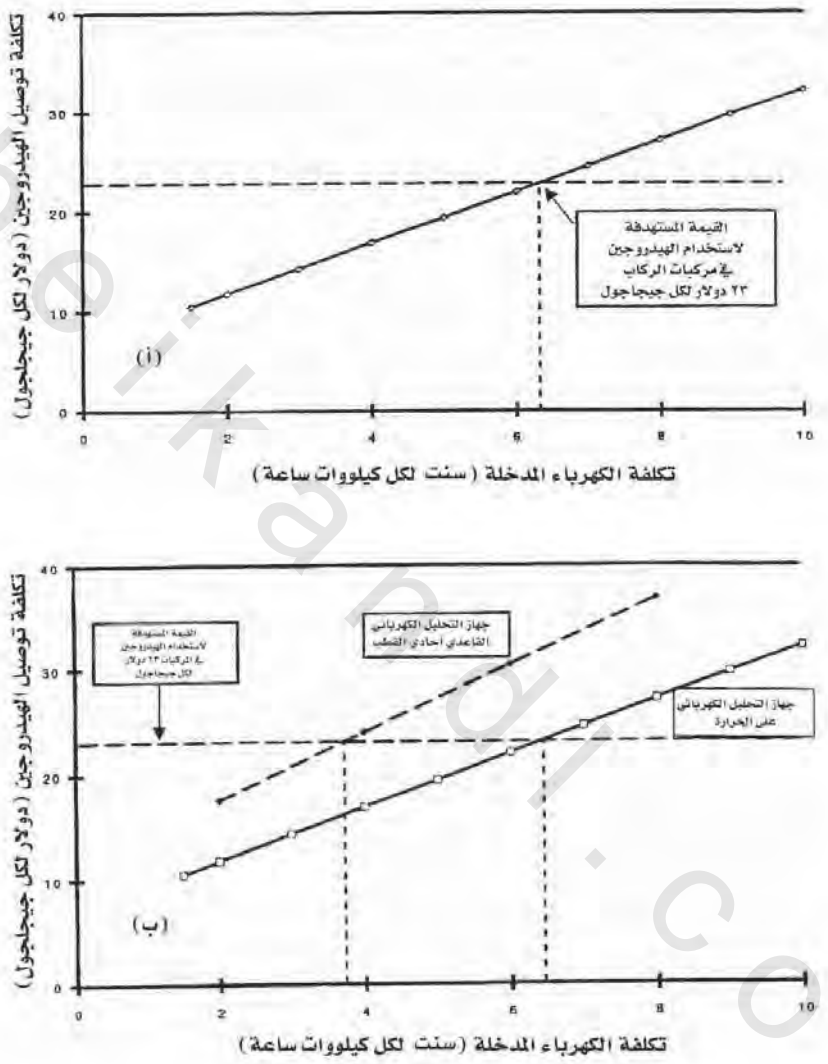
الشكل رقم (٨,١٢). رسم لخطة قدرة منزلية [17].طبع بإذن من إي.سي. لويد.

(٨,٢,٥) عوامل تكلفة وقود الهيدروجين Cost Factors of Hydrogen Fuel

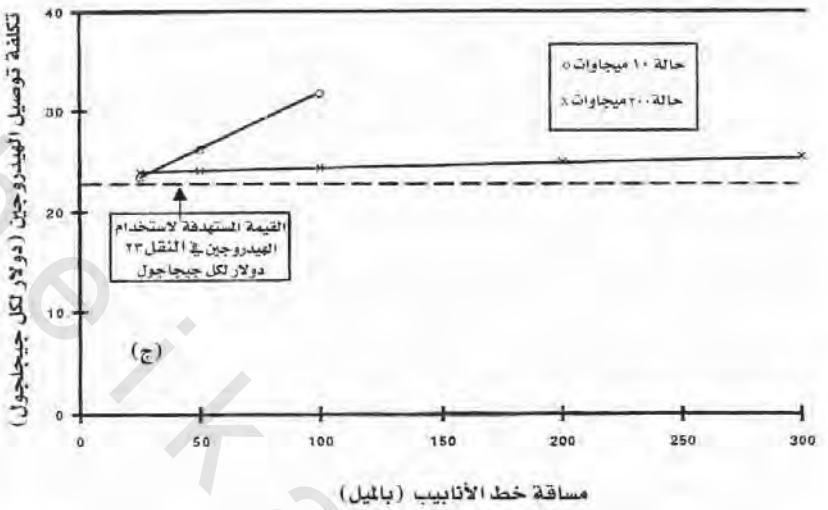
يعتمد النجاح التجاري لجميع الاستخدامات التي أشير إليها سابقًا على تكلفة وقود الهيدروجين الأولية (الإنتاج المبدئي) وعلى تكلفته بعد نضج التقنية (الإنتاج الواسع). وبالرغم من أن هذه التكاليف لن تعرف إلا بعد البدء في الإنتاج إلا أنه يمكن وضع نموذج لتكلفة الهيدروجين الإلكتروليتي بناءً على قيمته النسبية مقارنة بالبنزين.

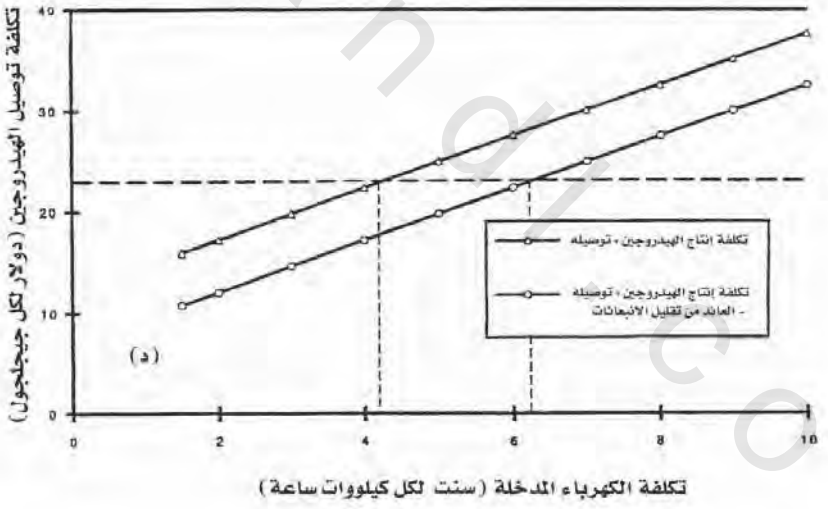
فعلى سبيل المثال، في دراسة عن التكلفة المحتملة للهيدروجين من موارد البخار الجيوحرارية، قام فيورافانتي [18] بدراسة تكلفة إنتاج الهيدروجين كدالة في أربعة عوامل بالنسبة لتكلفة الطاقة المكافئة البالغة ٢٣ دولاراً/جيجاجول بناءً على التقديرات المنشورة. كانت العوامل التي درسها هي تكلفة الكهرباء، ونوع تقنية التحليل الكهربائي، وطول خطوط الأنابيب اللازمة للتوصيل، والقيمة المحتملة للعائد المادي الذي يدفع للمستخدم لإسهامه في تقليل الانبعاثات (وذلك للتشديد على أهمية تخفيض تلوث الهواء). ويوضح الشكل رقم (٨,١٣) نتائج هذه الدراسة.

من الواضح أن الجزء الأكبر من تكلفة الهيدروجين الإلكتروليتي هي في تكلفة الكهرباء التي تتطلبها تقنية التحليل الكهربائي الحالية. بالنسبة للكهرباء المستخلصة من الطاقة الجيوحرارية فإن هذه التكلفة تبلغ حوالي ٦ سنت/كيلووات-ساعة. وقد يؤدي احتمال استخدام التحليل الكهربائي ذي درجة الحرارة المرتفعة إلى تخفيض التكلفة إلى حوالي ٤ سنت/كيلووات-ساعة. تعتمد تكلفة توصيل الهيدروجين عبر خطوط الأنابيب إلى المستخدمين على المسافة وعلى حجم الإنتاج، إلا أن المنشآت الكبيرة لا تضيف كثيراً إلى تكلفة توصيل الهيدروجين. وأحد أهم العوامل التي قد تدفع إلى إدخال وقود الهيدروجين في مجال النقل هو الميزة الصحية المتمثلة في تخفيض الانبعاثات. وبناءً على تقديرات مجلس كاليفورنيا لموارد الهواء [19] لتكلفة قوانين تلوث الهواء الخاصة بأكاسيد النيتروجين (NOx) والغازات العضوية التفاعلية (ROG) والمستخدمة في تقديم مصطلح المركبات التي لا تصدر انبعاثات (zero-emission vehicles)، فإن التغير في التكلفة القصوى للكهرباء المستخدمة في إيصال الهيدروجين للمستخدمين والتي تبلغ ٢٣ دولاراً لكل جيجاجول سيرتفع من قيمة تزيد قليلاً على ٤ سنت/كيلووات-ساعة إلى قيمة تزيد قليلاً على ٦ سنت/كيلووات-ساعة، مما يجعل التكلفة مناسبة أكثر.



الشكل رقم (٨,١٣). تكلفة إنتاج الهيدروجين كدالة في: (أ) تكلفة الكهرباء و(ب) نوع تقنية التحليل الكهربائي المستخدمة و(ج) طول الأنابيب اللازمة للتوصيل و(د) قيمة تخفيض التكلفة الناتجة عن أنظمة تلوث البيئة [18].





تابع الشكل رقم (٨,١٣).

(٨,٣) الخلاصة

Summary

تناول هذا الفصل إمكانية استخدام الهيدروجين كحامل للطاقة يوازي الكهرباء، وذلك في مجال إنتاج القدرة في المحطات الثابتة وفي استخدامات وقود النقل. وتمت تغطية جوانب دورة الوقود من الإنتاج والتخزين والتوزيع إلى الاستخدامات النهائية. كما استُعرضت مبادئ الكهروكيمياء للنظر في عملية التحليل الكهربائي واسع النطاق للماء وفي مدى إمكانية تخفيض تكلفة الهيدروجين باستخدام التحليل الكهربائي عند درجات حرارة مرتفعة وإمكانية الفصل الكيميائي الحراري للماء عن طريق عدة دورات كيميائية. وقد نوقشت مسألة التخزين من حيث إن الهيدروجين يمتلك طاقة احتراق نوعية عالية ولكن حجمه النوعي في حالته الغازية صغير جداً، مما يتطلب استخدام خزانات غاز ذات ضغط عالٍ أو إسالة الهيدروجين أو الربط الكيميائي. وأبرزت مسألة التوزيع مشكلة جدوى الإنتاج المحلي مقابل الإنتاج المركزي. وفي معرض الحديث عن الاستخدامات النهائية تم استعراض مفاهيم محطات القدرة المركزية الكبيرة والوحدات المنزلية التي تستخدم كمنظومات منزلية لتزويد المركبات بالوقود أو كمنظومات لتزويد المنازل بالطاقة. واختتم الفصل بنظرة مقتضبة إلى أكثر عوامل التكلفة أهمية في التوصل إلى البدء في استخدام الهيدروجين بطريقة اقتصادية كوقود للنقل.

المراجع References

[1] D. S. Scott, "What Will We Gain?" *International Journal of Hydrogen Energy* 28:1031-37, 2003

[2] S. Dutta, "Technology Assessment of Advanced Electrolytic Hydrogen Production." *International Journal of Hydrogen Energy* 15:379-385, 1990.

[3] V. K. Jonsson, R. Gunnarson, B. Amason, and T. J. Sigfusson, "The Feasibility of Using Geothermal Energy in Hydrogen Production." *Geothermics* 21:673-681, 1992.

[4] L. C. Brown, J. F. Funk, and S. K. Showalter, *Initial Screening of Thermochemical Water-Splitting Cycles for High-Efficiency Generation of Hydrogen Fuels Using Nuclear Power*. Report No. GA-A23373 of General Atomics Project No. 30047, San Diego, CA, April 2000.

[5] G. E. Besenbruch, "General Atomics Sulfur-Iodine Thermochemical Water-Splitting Process." *American Chemical Society*, Division of Petroleum Chemistry, Preprint No. 271:48-53, 1982.
[6] K. R. Schultz, "Use of Modular Helium Reactor for Hydrogen Production." Proceedings of the World Nuclear Association, Annual Meeting, London, September 2003.
[7] H. Yoshida et al., "A Simulation Study of the UT-3 Thermochemical Hydrogen Production Process." *International Journal of Hydrogen Energy* 15:171-178, 1990.
[8] C. W. Forsberg, "Hydrogen, Nuclear Energy, and the Advanced High-Temperature Reactor." *International Journal of Hydrogen Energy* 28:1073-1081, 2003.
[9] J. O. Bockris and T. N. Veziroglu, *Solar Hydrogen Energy: The Power to Save the Earth*. London: Macdonald & Co., 1991.
[10] J. M. Ogden and R. H. Williams, "Electrolytic Hydrogen from Thin-Film Solar Cells." *International Journal of Hydrogen Energy* 15:161-170, 1990.
[11] J. O. Bockris, "Hydrogen Economy in the Future." *International Journal of Hydrogen Energy* 24:1-15, 1999.
[12] S. R. Vosen and J. O. Keller, "Hybrid Energy Storage Systems for Stand-Alone Electric Power Systems." *International Journal of Hydrogen Energy* 24:1139-1156, 1999.
[13] M. D. Fioravanti and P. Kruger, "The Potential for Excess Geothermal Energy Capacity to Manufacture Hydrogen as a Transportation Fuel." Proceedings of the Tenth World Hydrogen Energy Conference, Cocoa Beach, FL, June 1994 (International Association for Hydrogen Energy, Coral Gables, FL, 1994), pp. 567-576.
[14] A. Zuttel, "Materials for Hydrogen Storage." *Materials Today*, 6:24-33, 2003.
[15] California Environmental Protection Agency, California Hydrogen Blueprint Plan: California Hydrogen Highway Network. Sacramento, CA: CEPA, May 2005.
[16] Hydrogenics Corporation, *Personal Fuel Appliance*, Stuart Energy Co., brochure, Mississauga, Ontario, Canada, 2002.
[17] A. C. Lloyd, "The Power Plant in Your Basement." *Scientific American* 281:80-86, 1999.
[18] M. D. Fioravanti, "An Analysis of Geothermal Hydrogen Energy Pathways." Goldman Interschool Honors Program in Environmental Science, Technology, and Policy, Stanford University: Stanford, CA May 1994.
[19] California Air Resources Board, *Mobile Source Emission Reduction Credits*, concept paper, Sacramento CA: California Environmental Protection Agency, July 1992.