الجمهورية العربية السورية

وزارة التربية

المركز الوطني للمتميزين

2015/2014

الهيدروجين.... وقود المستقبل

تقديم الطلاب:

كرم شبيب يزن زيدان محمد عابد شنن

مجد بليدي جعفر اسكاف حسن الشيحاوي

إشراف:

الأستاذ لؤي حمرة

مخطط المشروع العلمي الصفحة

*المقدمة.....2

*الباب الأول: الطاقات.....3

-الفصل الأول: أشكال الطاقات المتجددة.....3

-الفصل الثاني: أشكال الطاقات الغير متجددة.....5

*الباب الثاني: التعريف بالهيدروجين.....7

-الفصل الأول: الهيدروجين.... ما هو ؟؟؟؟.....7

-الفصل الثاني: التشابه والاختلاف بين الهيدروجين وغيره من العناصر.....8

*الباب الثالث: طرق إنتاج الهيدروجين.....11

-الفصل الأول: طريقة الاحلال.....11

-الفصل الثاني: طريقة التفكك.....14

-الفصل الثالث: إنتاج الهيدروجين صناعيا.....29

*الباب الرابع: تطبيقات الهيدروجين واستعمالاته.....34

الفصل الأول: تطبيقات الهيدروجين.....34

الفصل الثاني: خلايا الوقود الهيدروجيني.....35

الفصل الثالث: تطبيقات خلايا الوقود الهيدروجيني.....37

الفصل الرابع: القنابل الهيدروجينية.....43

الخلاصة.....47

المقدمة:

لقد بات واضحاً للجميع أن البحث عن بدائل للوقود الأحفوري أصبح أمراً حتمياً وبالأخص بعد ارتفاع أسعار وأشكال الوقود التقليدية والمعروفة وهذا ما أثار موجة من الإضرابات عند المستهلكين والمنتجين وسائقي الشاحنات وغيرهم الكثير تبعاً لارتفاع أسعار المواصلات.

ولكن العلماء كانوا أبعد نظراً فقد عكفوا على الدراسات والتجارب للبحث عن مصادر أخرى للطاقة وبمساعدة حكومات الدول المتقدمة والمتطورة وإمدادها لهم بكافة أشكال الدعم فكانت النتائج مرضية جداً فقد تم تطوير استخدام الطاقة الشمسية لتوليد الكهرباء وتسخين المياه واستخدام طاقات المد والجزر وأمواج البحار كطاقات حركية يمكن تحويلها إلى طاقة كهربائية وقد لاح في الأفق فكرة لفتت الأنظار إليها وعلقت الآمال عليها بشكل غير مسبوق ألا وهي استخدام الهيدروجين كمصدر للطاقة انطلاقاً من كونه أكثر العناصر تواجداً بالكون ونظافة وأماناً.

ولكن يبقى السؤال: إذا كان هناك كل هذه الأشكال للطاقات النظيفة والمتجددة فلماذا إذاً الاعتماد على الوقود الأحفوري

والنفط مستمراً حتى الآن؟؟؟

إن الجواب يكمن في كون هذه التكنولوجيات الجديدة ما زالت عالية التكلفة ولا تصلح كبديل عن الوقود التقليدي فكما نلاحظ أن معظمها يحتاج الطاقة الكهربائية وعلى الرغم من أن الكهرباء تستخدم على نطاق واسع فإنها لا تحتوي حتى الآن على الوقود الأحفوري وبالأخص الحيوي منها كإدارة وسائل النقل بالكهرباء وإن معظم مصادر الطاقة الجيدة تعتمد على ظروف مناخية مثل سطوع الشمس بالنسبة للطاقة الشمسية والتواجد قرب السواحل بالنسبة لطاقة المد والجزر وتوافر الرياح بكثرة في مزارع لاستخدام الرياح عبر عنفات خاصة فيها...

ولكن يا ترى من بين كل هذه التقنيات من هو الذي سينال لقب وقود المستقبل ومن هو الذي سيحل كبديل فعلي عن مصادر الطاقة الشائعة ؟؟؟

وبعد عدة تجارب والمقارنة فيما بينها ارتأى العلماء إلى اختيار الهيدروجين كأكثر مصادر الطاقة ملاءمةً ليكون بديلاً عن مصادر الوقود الأخرى ولكن ما الذي دفع العلماء لاتخاذ مثل هذا القرار وما هي خواصه الذي ميزته عن باقي الوسائل البديلة؟؟؟!!!

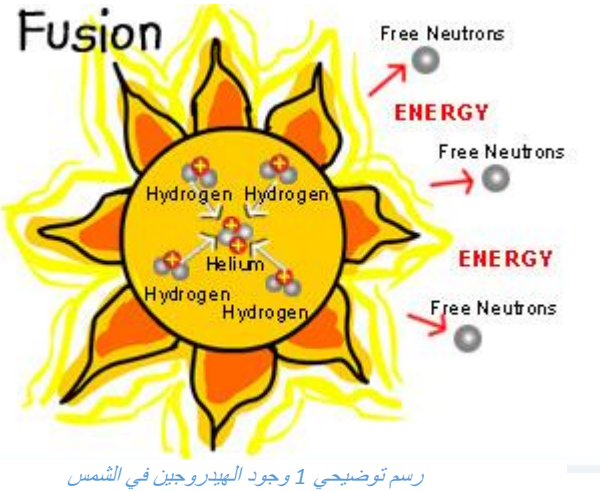
الباب الأول: الطاقات

الفصل الأول: أشكال الطاقات المتجددة[1]

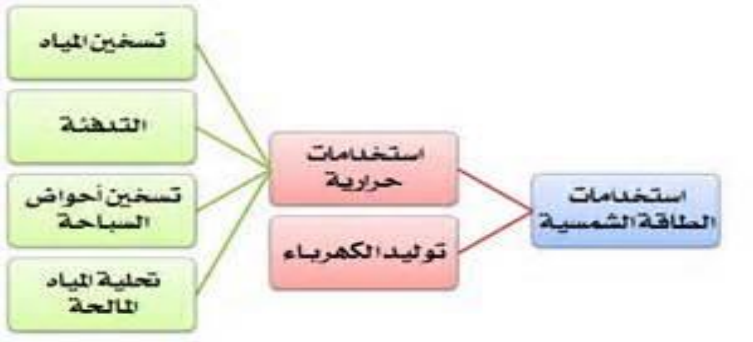
تنوعت أشكال الطاقات واستخداماتها ولا سيما الطاقات المتجددة فهي الطاقات الموجودة في الطبيعة التي تتجدد باستمرار ولا تنفذ مهما استهلك منها فلذلك تعد أفضل مورد للطاقة من حيث نظافتها وتأثيرها على البيئة إلا أنه من الصعب الحصول على الطاقة من هذه الموارد بسبب غلاء المواد اللازمة لتحويل هذه الموارد إلى طاقة كهربائية.....

ومن أشكال هذه الطاقات نذكر:

1-الطاقة الشمسية: وفيه يتم الاعتماد على طاقة الشمس في توليد الكهرباء عن طريق استقبال الأشعة الشمسية بواسطة خلايا تقوم بتحويل هذه الأشعة إلى طاقة كهربائية وتخزينها في خلايا رصاصية فهذه الخلايا يتم وضعها في أماكن واسعة تصلها الشمس بشكل مستمر كالمناطق الواقعة بجوار خط الاستواء لإعادة استخدامها لاحقاً في مجالات واسعة نجدها في هذا الجدول:



رسم توضيحي 1 وجود الهيدروجين في الشمس



رسم توضيحي 2 استخدامات الطاقة الشمسية

2-طاقة الرياح: وفي هذا النوع من الطاقة يتم استخدام الرياح كمصدر لإنتاج الطاقة عن طريق تحويلها إلى كهرباء بواسطة عنفات وتخزن في مدخرة رصاصية يتم وضع هذه العنفات في أماكن واسعة معرضة للرياح وتحدث فيها تقلبات جوية بشكل دائم وقد تم الاستخدام الأمثل لهذه الطاقات في ألمانيا فالمزرعة الريحية الواحدة في هذه المنطقة تقدم طاقة تكفي لخمسين ألف شخص

[1] www.nu.edu.sa>miscellaneous
Faculty.ksu.edu.sa>lib-teacher

رسم توضيحي 3 طاقة الرياح

3-طاقة المد والجزر: هي الطاقة التي تنتج بتأثير جاذبية القمر والشمس على البحر حيث يؤدي إلى اتجاه مياه نحو الشاطئ وانحسارها نحو البحر مما يؤدي إلى توليد الكهرباء عن طريق عنفات وعي من الطاقات الضائعة من أغلب دول العالم حيث يستطيع الإنسان استغلال هذه الطاقات عبر مولدات تنتج الطاقة وتخزنها في بطاريات رصاصية.

رسم توضيحي 4 طاقة المد والجور

الفصل الثاني: الطاقات الغير متجددة[2]

الطافات الغبر متجددة: هي الطاقات التي يحتاج تشكلها إلى ملايين السنين وهي غير موجودة بكثرة إلا أننا نعتمد عليها في معظم مجالات حياتنا وهي تضم النفط والغاز والفحم الحجري وغيرها أيضاً من الموارد الأخرى وهذه المواد هي:

1- النفط: هو مورد غير متجدد لونه أسود مخضر يستعمله الإنسان في مجالات متعددة وأهمها وقود للسيارات ووسائل النقل وعلى الرغم من صعوبة تشكله فهو ناتج عن تحلل النباتات الميتة عبر الملايين من السنين وغيرها من العوامل كغلاء أسعاره فإن الإنسان يعمد إلى استخدامه بكثرة تلبيةً لحاجاته المتزايدة واسعاره المنخفضة مقارنة بوسائل الطاقة البديلة والباهظة الثمن...

رسم توضيحي 5 إنتاج النفط

2- غاز الطبيعي: ويوجد الغاز الطبيعي في شكلين أولهما غاز رطب حيث يوجد هذا الغاز مع النفط في حقول خاصة وثانيهما حيث يوجد الغاز منفرداً في حقوله وتوجد هذه الحقول بكثرة في الجزائر ودول المغرب العربي ويعتمد الإنسان على الغاز الطبيعي كثيراً في حياته اليومية من تدفئة وطهو وغيرها من الحاجيات المنزلية....

رسم توضيحي 6 الغاز الطبيعي

[2] Cms.education.gov.il>rdonlyres>energia
Faculty.ksu.edu.sa>documants

3- الفحم الحجري: وهو نوع من أنواع الطاقات الغير متجددة فهي ناتجة عن تكدس المواد العضوية فوق بعضها البعض عبر ملايين السنين في ظل ظروف شديدة من الحرارة العالية والضغط المرتفع وهذا النوع من الطاقات ذات استخدامات قليلة نسبة بباقي الأنواع من الطاقة فتتجلى معظم استخداماتها في التدفئة وأغراض شخصية....

رسم توضيحي 7 الفحم الحجري

*الباب الثاني: الهيدروجين [3]

-الفصل الأول: الهيدروجين ...ما هو؟؟؟

في الوقت نفسه الذي تنحسر معه شمس الوقود الحفري ويقل استخدام البترول كوقود أساسي، يشهد العالم ولادة مصدر آخر للطاقة سيكون له القدرة على إعادة صياغة شكل الحضارة الإنسانية على وجه الأرض، إنها حضارة الهيدروجين، هذا العنصر الذي يمثل أحد المكونات الأساسية للمادة، أجل، سيكون الهيدروجين بحق الوقود الأبدي الذي لا ينفد مع مر العصور، كما أنه العنصر الوحيد الذي لا ينتج عند احتراقه أي انبعاثات ضارة للبيئة، بل إن الانبعاثات الصادرة عنه هي كل ما نسعى إليه مثل الكهرباء أو الحرارة أو الماء النقي!

رسم توضيحي 8 الهيدروجين

إننا على أعتاب انقلاب اقتصادي وسياسي جديد قوامه الهيدروجين، انقلاب سيحدث تغييرا جذريا في طبيعة الأسواق المالية والظروف السياسية والاجتماعية، تماما مثلما فعل الفحم والبخار عند بداية عصر الصناعة فهل هذا السيط الذي اكتسبه الهيدروجين سيجعل منه مصدراً طبيعياً نظيفاً وبديلاً عن مصادر الوقود الأخرى!!!!

*تعريف الهيدروجين[4]: يتميز الهيدروجين بوضع خاص في الجدول الدوري، فهو أخف العناصر، ويمتلك أبسط تركيب الكتروني، فذرته تتألف من بروتون واحد ويتحرك الكترونه الوحيد في المدار S 1 وهو في سويته الطبيعية. يشبه المعادن القلوية (عناصر الفصيلة IA) باحتوائه على الكترون واحد في المدار S وكذلك يشبه الهالوجينات (عناصر الفصيلة VIIB) بكونه يحتاج إلى الكترون واحد ليصل إلى تركيب الغاز النادر، وهو الهليوم، ويشكل بذلك شاردة الهيدريد

رسم توضيحي 9 موقع الهيدروجين بالجدول الدوري

[3] الموسوعة العربية (بحث عن الهيدروجين)
http://www.marefa.org/index.php?title
[4] الموسوعة العربية

السالبة. فيزيائياً يتواجد بالحالة الغازية في درجة الحرارة والضغط الطبيعيين يتميع تحت ضغوط عالية ودرجات حرارة متدنية جداً، وهو عنصر خفيف نفوذ ذو قيمة حرارية مرتفعة.

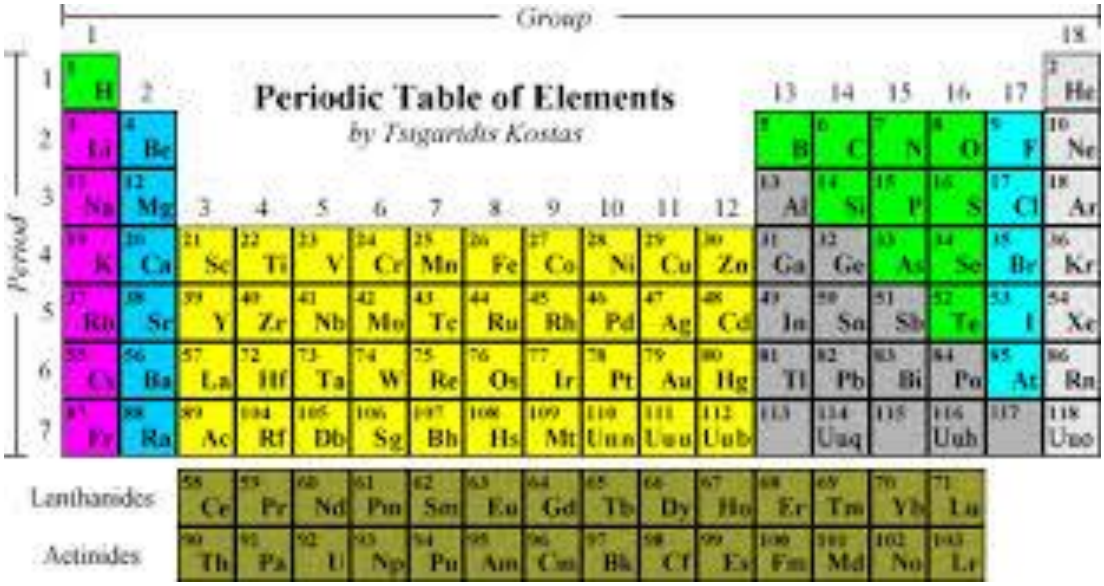
وجوده في الطبيعة: الهيدروجين الحر موجود في الجو الشمسي وفي الغازات البركانية وفي الجو الأرضي بمقدار جزء من مليون (نسبة حجمية) سرعته الجزيئية عند درجات الحرارة العادية عالية جداً مما يسمح له بالخروج من مجال الجاذبية الأرضية، وهو يدخل في تركيب الماء والمواد العضوية كالخشب والزيوت، وهو يوجد بمقدار 59% تقريباً من القشرة الأرضية.

الفصل الثاني: أوجه التشابه والاختلاف بين الهيدروجين وغيره من العناصر

إن التركيب الالكتروني للهيدروجين جعل منه عنصراً فريداً يتميز عن باقي العناصر الأخرى من حيث الخصائص المتعلقة به .... فنجد أنه يملك أكثر من موقع صالح لوجوده وهذه النتيجة تم التوصل لها بعد دراسة مطولة لخصائصه المتنوعة ومقارنتها بعناصر المجموعة الأولى والسابعة ...

رسم توضيحي 10 قوة الهيدروجين

وسنقوم بالمقارنة بين أوجه التشابه والاختلاف ما بين الهيدروجين وعناصر المجموعة الأولى والسابعة وفق الآتي:



رسم توضيحي 11 الجدول الدوري

*أوجه الشبه للمعادن القلوية:

1-من حيث التكافؤ: نجد أن عناصر المجموعة الأولى تمتلك التكافؤ الأحادي ذاته كالصوديوم والبوتاسيوم والليثيوم .... إلخ

2-من حيث الكهرجابية: فالهيدروجين هو عنصر ذو كهربية موجبة وله قابلية الاتحاد باللافلزات كالآتي:

$H_2 + Cl_2 \rightarrow 2HCl$

$H_2 + Br_2 \rightarrow 2HBr$

والمشابه له من حيث التكوين مركبات أملاح الصوديوم مثل NaOH أو مركبات أملاح البوتاسيوم مثل KBr.

*أوجه الاختلاف عن المعادن القلوية:

1-من حيث تكوين المركبات الأيونية: ليس للهيدروجين قدرة بسيطة لفقد الكترونه الخارجي في الاتحادات الكيميائية وبالتالي فالقدرة على تكوين مركبات أيونية صعبة نسبياً مقارنةً بباقي عناصر المعادن القلوية

2-من حيث تكوين مركبات تساهمية: للهيدروجين قدرة كبيرة لتكوين مركبات تساهمية مع كثير من العناصر وذلك تبعاً للروابط المشتركة التي تقوم بها ذرة الهيدروجين مع غيرها من العناصر

أوجه التشابه مع الهالوجينات:

1-كل من الهيدروجين والهالوجينات يحتاجون إلى إلكترون واحد ليصلوا إلى حالة الاستقرار كما في العناصر الخاملة التي تليها في الجدول الدوري.

2-يكون الهيدروجين مركبات أيونية مع عناصر المجموعة الأولى حيث يكون تكافؤه -1 ويشابه في ذلك الهالوجينات حيث أن تكافؤ الهالوجينات في المركبات التي تشكلها هو -1.

أوجه الاختلاف عن الهالوجينات:

1- من حيث الكهرسلبية:

إن كهرسلبية الهيدروجين أقل بكثير من كهرسلبية الهالوجينات حيث أن ذرة الهيدروجين لا تقبل أن تضم إلكترون إلى طبقتها السطحية بسهولة حيث يجب أن يكون المعدن الذي يعطي الإلكترون ذو كهرجابية أكبر من الهيدروجين حتى يقبل الهيدروجين هذا الإلكترون وهذه المعادن هي عناصر المجموعة الأولى من الجدول الدوري.

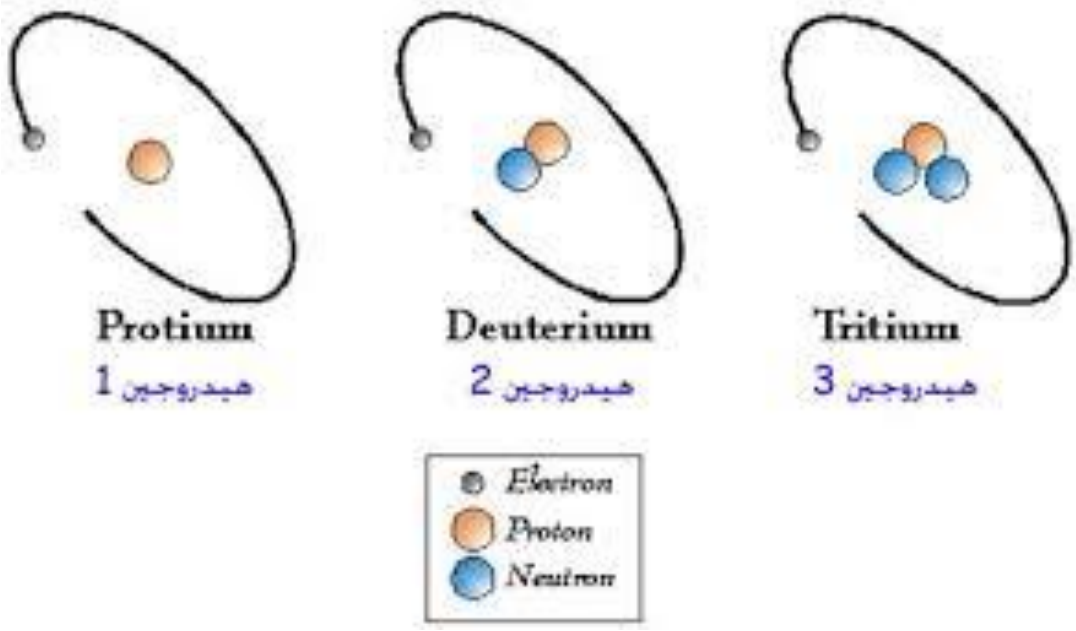
النظائر:

هي ذرات للعنصر نفسه لها نفس الخواص الكيميائية لامتلاكها العدد الذري نفسه وتختلف بالخواص الفيزيائية لاختلافها بالعدد الكتلي بسبب الاختلاف بعدد النيترونات وليس لجميع العناصر في الجدول الدوري نظائر وإنما تنحصر في عناصر معينة وسنتكلم الأن عن نظائر الهيدروجين الوحيدة المختلفة في اسمها من حيث نظائر باقي العناصر والتي تتضمن:

I. الديتريوم (H^2) رمزه D
II. التيريتيوم (H^3) رمزه T

كما نذكر أن للهيدروجين نظائر أخرى مشعة غير موجودة في الطبيعة بل يتم تحضيرها صناعياً وهي:

III. الهيدروجين(H^4)
IV. الهيدروجين($H^{4.1}$)
V. الهيدروجين(H^5)
VI. الهيكساهيدرو (H^6)



رسم توضيحي 12 نظائر الهيدروجين

الباب الثالث: طرائق إنتاج الهيدروجين[5]

مقدمة:

لقد عرفنا أن للهيدروجين فوائد على البشرية لا تعد ولا تحصى ولهذا فالعلماء في بحثٍ مستمر لإيجاد الطرق المثلى لإنتاجه من حيث المواد الداخلة في التفاعل والتكلفة الملائمة والمعقولة ...

وكما أسلفنا سابقا فإن الخاصية التي يتميز بها الهيدروجين هي استحالة وجوده حراً في الطبيعة بل يتم استخراجه من مواد أخرى مثل الماء والمركبات الهيدروكربونية أو الكربون المهدرج والغاز الطبيعي.

ولقد وجدنا أن نضع طرق إنتاج الهيدروجين في أصناف عدة لسهولة دراسته وسهولة مقارنة الطرق فيما بينها من ناحية تكلفتها ووفرة موادها ونظافتها .... ومن هذه الطرق كانت:

الفصل الأول: طرق الإزاحة

وهي طريقة تعتمد على إزاحة الهيدروجين من مركباته بعناصر تسبقه في السلسة الكهروكيميائية وتندرج تحت طرائق الإزاحة عدّة بنود وهي:

- إزاحة فلز لهيدروجين الحمض ولا يتم ذلك إلى باستخدام عناصر أقوى منه في السلسة الكهروكيميائية ...فمثلاً عند إضافة معدن الزنك إلى حمض كلور الماء فإن الزنك سوف يزيح الهيدروجين لينتج لدينا ملح كلوريد الزنك بالإضافة إلى غاز الهيدروجين .... وهذه الطريقة مكلفة نوعاً ما من ناحية الحمض المركز ومن ناحية المعدن أيضاً ولكنها غير مؤذية للبيئة ويمكننا استبدال الزنك بالألمنيوم أو حتى ببرادة الحديد ....

والمعادلة الدّالة على التفاعل:

$$Zn_{(s)} + 2HCl_{(l)} \rightarrow ZnCl_{2\ (l)} + H_{2\ (g)}$$

[5] www.cesa.org>hydroggen-and-fuel-cells
www.fuelcelleduation.org>themes>pdf
www.altenergy.org>rewenable

رسم توضيحي 13 تفاعل إنتاج الهيدروجين

- إزاحة فلز لهيدروجين الأساس حيث يتم تفاعل فلز كالألمنيوم أو الزنك على سبيل المثال مع محلول قلوي وأكثر هذه المحاليل شيوعاً وكفاءةً هي هيدروكسيد الصوديوم (Na OH) وهيدروكسيد البوتاسيوم (KOH) حيث يتم التفاعل على مراحل ففي البداية يتم إذابة الهيدروكسيد في الماء مع التحريك لفترة قليلة فنلاحظ الارتفاع الملحوظ لدرجة حرارة الماء ثم نضيف الألمنيوم ويجب أن تكون على شكل رقائق للتسهيل من التفاعل وخلال ثوانٍ قليلة نلاحظ تغير لون المحلول إلى الرمادي وذلك نتيجة لذوبان الألمنيوم في الماء حيث يتشكل معقد في المحلول هو ألومينات الصوديوم .....ويتم ذلك وفق المعادلة الغير موزونة :

$$AL + NaOH \rightarrow NaAl(OH)_4 + H_2$$

أما بالنسبة لمعادلة تفاعل الزنك مع الهيدروكسيد فهي:

$$Zn + 2NaOH \rightarrow Na_2ZnO_2 + H_2$$

كما نذكر أننا قمنا بتنفيذ هذه التجربة في مخبر الكيمياء داخل المركز الوطني للمتميزين وتأكدنا من أن الغاز الناتج هو غاز الهيدروجين حيث قمنا بتقريب منبع حراري من فوهة وعاء التفاعل ولاحظنا احتراق الغاز وبشدة ....

- إزاحة فلز لهيدروجين الماء فهذه الطريقة تشبه إلى حدٍ ما تفاعل الإزاحة حيث يتم تفاعل فلز مع المركب لإزاحة أحد عناصره أما بالنسبة للماء فيتم تفاعل أحد الفلزات كالصوديوم مثلاً أو المغنزيوم مع الماء وهو تفاعل طارد للحرارة وينتج من هذا التفاعل هيدروكسيد الفلز بالإضافة إلى الهيدروجين .....وهذه الطريقة مكلفة نوعاً ما فهذه الفلزات تعتبر من الطاقات غير المتجددة والاستخدام الزائد لهذه الفلزات سيولد مشكلة جديدة نحن في غنى عنها ....

التفاعل بين الصوديوم والماء هو كالتالي:

* $2Na + 2H_2O \rightarrow 2NaOH + H_2$

أما بالنسبة للتفاعل بين المغنيزيوم والماء فهو على الشكل التالي:

* $Mg + 2H2O \rightarrow Mg(OH)_2 + H_2$

رسم توضيحي 14 احتراق الصوديوم

تنويه:

وبالنسبة للتفاعل السابق فإن المعادن الثقيلة الغير نشطة كيميائياً مثل الحديد لا تتفاعل مع الماء في درجة الحرارة العادية لكنه يتفاعل مع بخار الماء الفوق الساخن (Super-heated steam) .

ومثال على هذا التفاعل:

$$3Fe + 4H_2O \rightarrow Fe_3O_4 + 4H_2$$

وسيتم ذكر هذه الطريقة بالتفصيل في الطرق القادمة.....

من الطرق الأخرى لإنتاج الهيدروجين هي الطرق التي تعتمد على التفكك:

الفصل الثاني: طريقة التفكك الحراري (thermal decomposition)

فهذه الطريقة تعتمد على تكسير الروابط بين الذرات في المركب ومثالها تكسير الهيدروكربونات أو الفحوم الهيدروجينية فعند توجيه منبع حراري على إحدى مركباتها بدءاً من أصغرها (الميثان، الإيثان، البروبان، البوتان، البنتان، الهكسان.... الخ) فسيتم تفكيك الروابط فيما بينها إلى كربون وهيدروجين

- إن ما يقارب من نصف الهيدروجين المنتج بالعالم يتم استخراجه من الغاز الطبيعي وذلك من خلال إجراء تفاعلات كيميائية بين الغاز الطبيعي وبخار الماء وتعريضه لعوامل أخرى محفزة حيث يتم في النهاية فصل ذرات الهيدروجين عن ثاني أكسيد الكربون الذي يلعب دوراً أساسياً في ارتفاع درجة حرارة الأرض أو ما يسمى بظاهرة الاحتباس الحراري.

بعد معالجة الغاز الطبيعي يتكون غاز الميثان وكما نعلم أن غاز الميثان هو أخف الهيدروكربونات وأقصرها حيث هو عبارة عن ذرة كربون وحيدة مرتبطة بأربع ذرات هيدروجين كما ينتج هيدروكربونات أخرى وهي هيدروكربونات غازية أثقل كالإيتان C2H6 والبروبان C3H8 ومركبات ذات كتل جزئية أثقل ومن ثم تتجمع كل تلك المركبات كمنتج ثانوي ويطلق عليها اسم الغاز الطبيعي المسال وهنا يمكن تطبيق عملية الإصلاح البخاري على الهيدروكربونات باختلاف أنواعها وخاصة على أبسطها غاز الميتان.

والمعادلات التي تمثل هذا التفاعل:

تفكيك روابط الميثان بالحرارة:

$$CH_4 \rightarrow C + 2H_2$$

تفكيك روابط الإيثان بالحرارة:

$$C_2H_6 \rightarrow 2C + 3H_2$$

ج–تفكيك روابط البروبان بالحرارة:

$$C_3H_8 \rightarrow 3C + 4H_2$$

وهكذا تتم نفس العملية مع المركبات الهيدروكربونية الأخرى ومن مساوئ هذه الطريقة أنها تحتاج إلى درجات حرارة عالية وبالتالي فالطريقة غير مجدية كليّاً....

وفي طريقة أخرى لتوليد الهيدروجين بالاعتماد على التفكك هي طريقة

التحليل الكهربائي Electrolysis

التحليل الكهربائي: هو عملية يتم فيها تسليط تيار كهربائي لإحداث تفاعل كيميائي فيها لا يتم تلقائياً وتسمى الخلية في هذه الحالة "الخلية الالكتروليتية (تحويل الطاقة الكهربائية إلى طاقة كيميائية)

تتألف خلايا التحليل الكهربائي من أقطاب على اتصال من وسط موصل(conducting medium) ودائرة خارجية (external medium)

وإن القطب الذي تحدث عنده عملية الأكسدة يسمى مصعد (anode)

وإن القطب الذي تحدث عنده عملية الاختزال يسمى مهبط (cathode)

الأقطاب في خلايا التحليل الكهربائي غالباً خاملة (inert) ووظيفتها التزويد (furnish) بمسار للإلكترونات لتدخل وتغادر الخلية

وتجبر البطارية في خلايا التحليل الكهربائي للإلكترونات لتدخل في أحد الأقطاب (والذي يصبح سالباً) وتسحب الإلكترونات من القطب الأخر (والذي يصبح موجباً)

حيث يتم إنتاج الهيدروجين من خلال التحليل الكهربائي للماء التي تعد الطريقة الأكثر شيوعاً لإنتاج الهيدروجين من حيث التكلفة القليلة نسبياً كما أنها لا تنتج ملوثات للبيئة أثناء القيام بهذه العملية كما يبين لنا هذا التفاعل طريقة إنتاج الهيدروجين عن طريق التحليل الكهربائي للماء:

$$H_2O + \text{electricity} \rightarrow H_2 + 1/2\ O_2$$

- المعادلات الحاصلة في حوض التحليل الكهربائي:

1-التحليل الكهربائي للماء:

$$4H_2O \rightarrow 4H^+ + 4OH^-$$

2 -ما يحدث عد الآنود:

$$4OH^- \rightarrow O_2 + 2H_2O + 4e^-$$

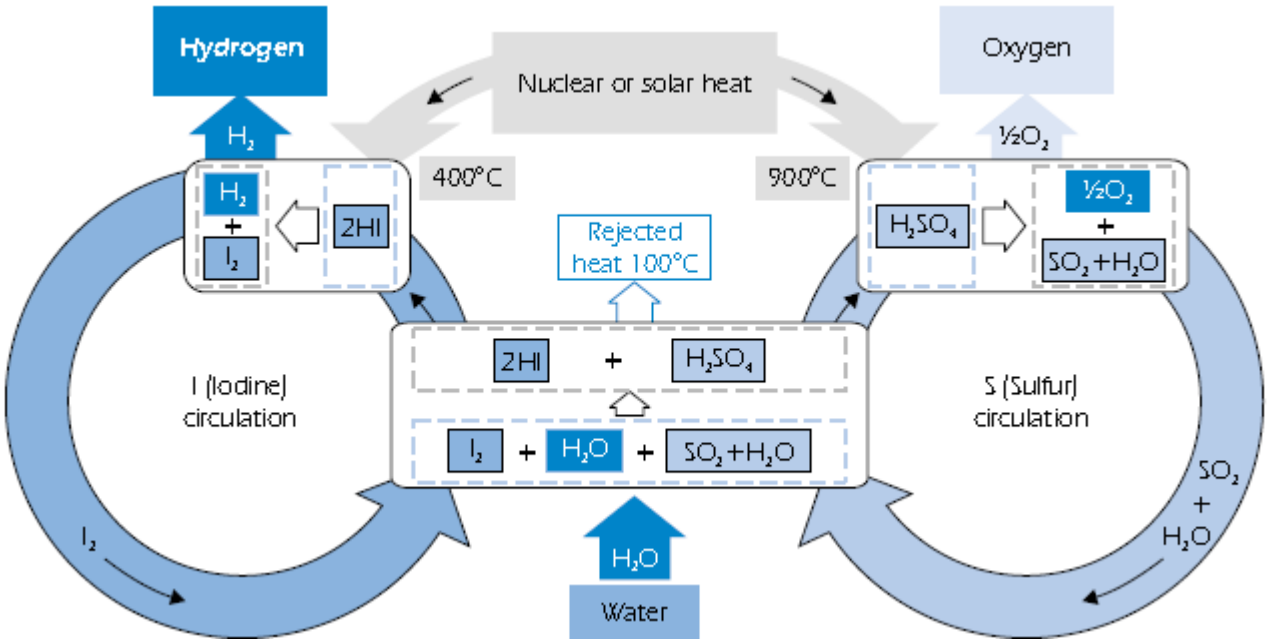
3 – ما يحدث عند الكاثود:

$$4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2$$

4 – مجموع عمليتي الآنود والكاثود:

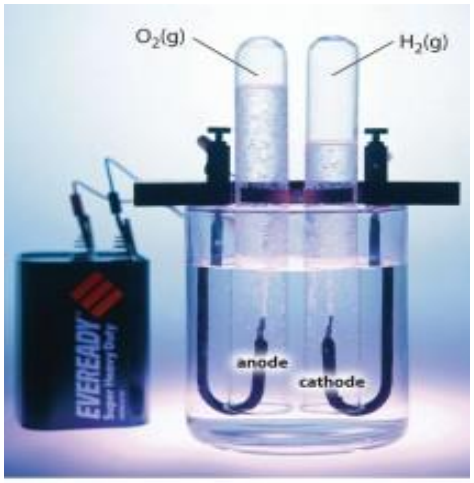
$$2H_2O \rightarrow O_2 + 2H_2$$

الشكل التالي يوضح عملية التحليل الكهربائي للماء:



رسم توضيحي 22 دورة التحليل الكهربائي للماء

ومن أهم استخدامات التحليل الكهربائي في مجال انتاج الهيدروجين:



رسم توضيحي 15 التحليل الكهربائي للماء

إنتاج الهيدروجين بواسطة الخلايا الشمسية

المحلل (The Electrolyzer)

الهدف تحليل الماء الى هيدروجين و أوكسجين

المحلل هو جهاز يقوم بتحليل الماء إلى عناصره الأولية وهو عنصر أساسي في أنظمة خلايا الوقود المتصلة مع الخلايا الشمسية أو ما يسمى أنظمة ("هيدروجين – شمس")، تقوم هذه الأجهزة بتحويل الطاقة الكهربائية من الخلايا الشمسية إلى غاز الهيدروجين. ولها عدة أنواع: محللات ذات الضغط العالي، ذات الحرارة العالية، ذات الحرارة المنخفضة، ذات الضغط المنخفض، ذات الوسيط الصلب وذات الوسيط السائل.

يفضل غالباً في أنظمة التوليد الهيدوشمسية الضغط المنخفض إلى المتوسط والحرارة المنخفضة والوسيط السائل، مقارنة التكلفة بالمحللات ذات الضغط المرتفع أو درجة الحرارة المرتفعة أو ذات الوسيط الصلب فهي غير مكلفه ومتوفرة ويسهل التعامل معها.

وكمقارنه سريعة بين الوسيط Electrolyte الصلب PEM والوسيط السائل نجد أن المحلل ذو الوسيط الصلب PEM (Proton Exchange Membrane) يمكن استخدامه في الأنظمة الهيدروشمسية لتجنب استخدام الأوساط الكاوية، ومن مزاياه انه لا يحتاج إلى مراقبه مستمرة كما في الإلكترو ليت السائل أما مساوئ المحللات PEM فهي غلاء سعرها ولا يمكن أن تعطي أي معلومات عن مرحله التحليل مثل المحللات السائلة التي يمكن أن نراقب مستوى السائل فيها. عامة التعامل مع محلل PEM يعتبر تقريباً خالي من أي مخاطر أو أخطاء وتبقى مشكلتها الأكبر هي استبدال أجزائها عند انتهاء فترة صلاحيتها.

مثلا منها انفجار الغشاء (Membrane plow-out) أو انحلال الوسيط (Catalyst degeneration) كلا المشكلتين مكلفه لأننا نحتاج إلى استبدال هذه الأجزاء.

مبادئ المحلل (the Electroyzer):

المحلل ذو الوسيط القلوي (الأساسي) كالمستخدم في أنظمة الهيدروجين شمس هو عنصر بسيط جدا يحلل الماء إلى عناصره الأساسية المكونة له الأكسجين والهيدروجين. يمكن تنفيذ هذا عبر إمرار تيار ذو توتر منخفض وتيار مستمر عالي نسبيا في وسيط قاعدي مثل محلول هيدروكسيد البوتاسيوم (KOH) وماء مقطر.

يستخدم في عملية التحليل تيار كهربائي مستمر يتحرك باتجاه واحد فقط وهذا مهم لمبدأ عمل المحلل أما التيار المتناوب (Alternating Current (AC)) فلا يمكن استخدامه في عمليه التحليل الكهروكيمياوي إلا في حال قمنا

بتقويمه. يمكن استجرار التيار المستمر الذي يغذي المحلل من عده مصادر متجددة مثل الرياح أو الخلايا الشمسية أو من مولدات صغيره تعتمد على طاقة جوف الأرض ويمكن توليدها أيضا من مصادر غير متجددة مثل البطاريات الجافة أو من خلال تقويم التيار المتناوب العادي.

يتكون المحلل من قطبين (الكترودين tow Electrodes) غالبا مصنوعين من نيكل نقي أو من سبيكة خليط (نيكل – حديد) (Nickel Iron alloy)، ستانليس ستيل 316 (Monel) أو نيكل راني (Nickel Raney).

أحد القطبين يوصل إلى القطب السالب من التغذية الكهربائية المستمرة والثاني يوصل إلى القطب الموجب. كلا القطبين مغمورين بمحلول هيدروكسيد البوتاسيوم في وعاء مغلق يحتوي أيضا على أنبوبي تجميع لتجميع الغاز الناتج، **حيث يتكون غاز الهيدروجين عند القطب السالب أما غاز الأكسجين فيتكون عند القطب الموجب.**

هناك عدة طرق لنحدد كمية الهيدروجين أو الأكسجين المتولد في المحلل أهمها:

1–نسبة هيدروكسيد البوتاسيوم (KOH) إلى الماء في الوسيط داخل المحلل.

2–مساحة سطح القطبين.

3–المسافة بين القطبين.

4–كمية التيار المستمر من منبع التغذية.

النسبة العالية لهيدروكسيد البوتاسيوم إلى الماء تزيد النتاج لكن لحدود (29.4%)أي لو زادت النسبة عن هذا فان كمية الغاز الناتجة ثابتة تقريبا لأن تركيز الهيدروكسيد سيشكل ممانعة تمنع تشكل الغاز. أيضا كلما زادت مساحة القطب الفعالة زاد توليد الغاز لكن بالمقابل المساحة الأكبر تحتاج إلى تيار اعلى للاستفادة من المساحة المضافة، يمكن استنتاج علاقة تقريبية بين توليد الهيدروجين و كثافة التيار حيث إن كمية غاز الهيدروجين المتولد تتناسب مع التيار المغذي على مساحة القطبين وتعطى بوحدة [أمبير على وحدة المساحة] وهو بارامتر مميز للمحل يعطى عادة مع المحللات المتوفرة بالسوق في حالة عملها المثلى (most efficient operation

أقطاب المحلل

1-الأقطاب ذات البنية المسامية:

غالبا ما تستخدم في المحللات الأقطاب المصنوعة من سبيكة ذات بنية مسامية مثل نيكل راني (Raney Nickel). حيث تصنع هذه السبيكة عبر خلط 50% ألمنيوم (Aluminum) و50% نيكل (Nickel) ثم يعالج الخليط بهيدروكسيد البوتاسيوم (Potassium Hydroxide) الذي يؤدي إلى تآكل الألمنيوم ويترك النيكل ببنية مسامية إسفنجية أو ما يسمى بنيكل راني (Raney Nickel) نسبة إلى العالم (Murray Raney) الذي اخترع هذه الطريقة. الأقطاب المصنوعة من هذه المادة تتمتع بمساحة كبيرة نظرا لبنيتها الإسفنجية كثيرة المسام وتنتج كمية أكبر من الغاز بقطب أصغر نسبة إلى قطب لا يتمتع بالبنية ذاتها كالأقطاب المصمتة أو الشبكية.

يعتبر نيكل راني ذو خصائص جيدة جدا لكنه أغلى من النيكل العادي وشبكة النيكل ذات البنية المسامية تعمل أيضا كمرشح للجزيئات الصغيرة. لكن الراسب المتكون مع الزمن يقلل من المساحة الفعالة للقطب وبالتالي من الغاز الناتج أي أن كفاءتها تنخفض مع الزمن.

2-الأقطاب ذات البنية الصفيحية:

يمكن زيادة المساحة للصفيحة عبر جعل سطحها أكثر خشونة (Sanding it)، وبالتالي يمكن زيادة الغاز الناتج. القطب الخشن العادي له سطح اقل من سطح القطب المصنوع من نيكل راني (Raney Nickel) لكن أكبر من مساحة القطب المصمت ويتميز أيضا بأنه رخيص ويمكن إعادة تشكيله بسهولة (Resanding) وبالتالي يمكن استخدامه لفترة أطول. يمكن جعل سطح القطب خشن عبر صقله باستخدام ورق زجاج (sand paper) خشن ونحركه بكل الاتجاهات لنحصل على أكبر سطح ممكن.

يستخدم أحيانا صفيحة (حديد-نيكل) (Iron-Nickel) تحتوي على 80% نيكل فهي تعتبر قطب جيد وغير مكلفة.

3-القطب ذو البنية الشبكية:

خيار أخر لأقطاب المحلل هو الأقطاب الشبكية فهي تؤمن مساحة أكبر من المساحة التي يؤمنها القطب المسطح (الصفيحة المصمتة) وهي ليست سهلة الانسداد كإسفنجة النيكل (Raney Nickel). يمكن استخدام إما الستانلس

ستيل (Stainless steel 316)، ستانليس ستيل 316 (Monel) أو رقاقة نيكل (Nickel Screen). رقاقة النيكل غالية لذا فان الستانليس ستيل 316 أو الستانليس ستيل هو الخيار الاقتصادي الأمثل حيث أن الستانليس ستيل 316 هو خليط (65% نيكل(Nickel) و33% نحاس(Copper) و2% حديد(Iron)) هذه السبيكة مقاومة للتآكل في الوسط القلوي وتعيش فيه لفترة طويلة.

***مواد أخرى لجهاز التحليل:**

من السهل بناء محلل ولكن من الصعب تصميم وبناء واحد من مواد جديدة لأن تلك العملية تحتاج إلى وقت طويل واعتبارات عديدة كنوع المادة المستخدمة للمساري. فبعض المعادن المستخدمة في صناعة المسرى الموجب هي النيكل المطلي بالمنغنيز، التنغستين أو أوكسيد الروثينيوم، هذه المعادن لها سرعة أكبر في التفاعلات القائمة عند المسرى الموجب. البلاتنيوم المطلي بالنيكل يمكن أن يستعمل كقطب سالب وذلك لزيادة إنتاج الهيدروجين. يمكن استخدام النيكل المطلي بالذهب أو بالبلاتنيوم للمسريين معاً أو أكسيد النيكل أيضاً. ويمكن أيضاً استخدام المعادن كالستانليس ستيل 316 (خليط أساسه النيكل) وذلك لسطحها المسامي الكبير وثمنها الرخيص.

على مدى التاريخ تم اختراع العديد من أشكال أجهزة التحليل ولكنها ليست ملائمة للاستخدام مع مصادر الطاقات المتجددة، تجدر الإشارة إلى أن المحلل ذو الأداء الأفضل ليس من الضرورة أن يكون المحلل الأمثل لكافة التطبيقات. أجهزة التحليل ذات الأداء الممتاز تحتاج إلى تكاليف بناء وصيانة عالية والمواد التي تبنى منها قليلة التوفر، الاختيار الأفضل هو الاختيار الوسط.

***المسافة بين القطبين:**

كلما صغرت المسافة بين القطبين كلما زادت غزارة توليد الغاز أكثر بالمقابل كلما صغرت المسافة بين القطبين زادت احتمالية مزج الغازين مع بعضهما حتى في وجود غشاء فاصل. بعض المحللات التجارية تستغني عن نقاء الغاز الناتج مقابل كفاءة أكبر للاستهلاك الكهربائي عند وضع القطبين قريبين من بعضهما، لكن في نهاية عملية التحليل وقبل استهلاك الغاز لابد من تنقيته بأجهزة تنقية خاصة غالباً ما تكون غالية وتلغي أي كفاءة اقتصادية للنظام. الحل الأكثر اقتصادية هو أن نزيد المسافة بين القطبين قليلاً ونضحي بالكفاءة الكهربائية قليلا.

كلمت زدنا التيار كلما ازداد إنتاج الغاز لكن لكل نظام كهربائي قيم تيار وتوتر محددين فإذا زادت التغذية عن هذه القيمة سيؤدي إلى تدهور الإنتاج أو تخريب الآلة. أقل توتر دخل لازم هو ما بين (1.29 إلى 1.49) فولت حيث أن هذه القيمة لازمة لعملية تحليل جزيء الماء إلى هيدروجين وأكسجين.

المحلول الإلكتروليتي (الوسيط) (The Electrolyte)

هيدروكسيد البوتاسيوم يعتبر وسيط قوي هذا يعني أنه كمحلول متأين (مشرد) بشكل كامل 100% لذا فهو موصل جيد للكهرباء فعند توصيل القطب الموجب والسالب إلى مصدر كهرباء مستمر يرتبط أيون الهيدروجين مع إلكترون عند القطب السالب لينتج غاز الهيدروجين وأيون الهيدروكسيد يتخلى عن إلكترون عند القطب الموجب ويتكون غاز الأوكسجين وتكون كمية الهيدروجين الناتجة ضعف كمية الأوكسجين نظرا لكون جزيء الماء مكون من ذرتي هيدروجين لكل ذرة أكسجين.

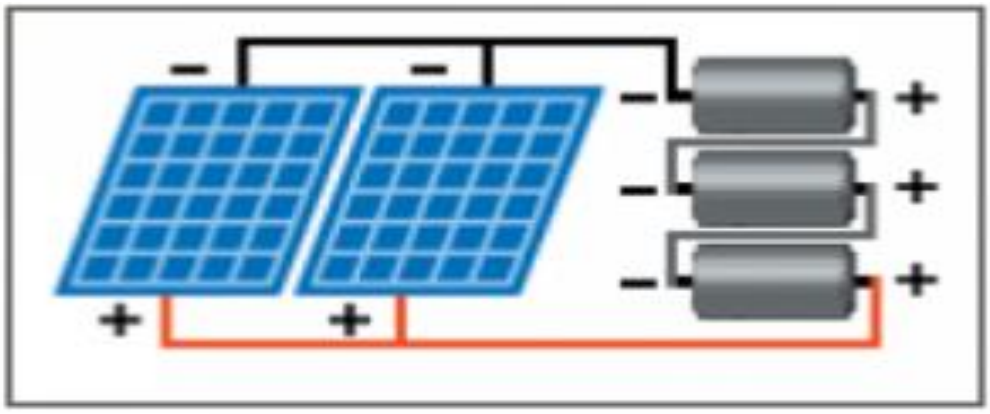
يمكن استخدام أوساط أخرى مثل هيدروكسيد الصوديوم (Hydroxide Sodium) لكنها ليست ناقلة بكفاءة هيدروكسيد البوتاسيوم (KOH). يمكن أيضا استخدام الأحماض مثل حمض السلفوريك (Sulpharic-acid) لكنها ستؤثر بشكل أكبر على الأقطاب ويفتتها كما يؤثر سلبا على الأسلاك والعناصر التي يلامسها لذا لا يستخدم غالبا.

إذا هيدروكسيد البوتاسيوم هو أفضل اختيار للمحلل كوسيط قلوي. يمكن الحصول على (KOH) أو يمكن صناعته من رماد الخشب وبعض المواد المنزلية.

يمكن قياس نسبة هيدروكسيد البوتاسيوم بالمحلول في وعاء التحليل بواسطة مقياس Hydrometer. ويمكن غلي المحلول لزيادة تركيزه أو إضافة مياه مقطرة للحصول على محلول أخف.

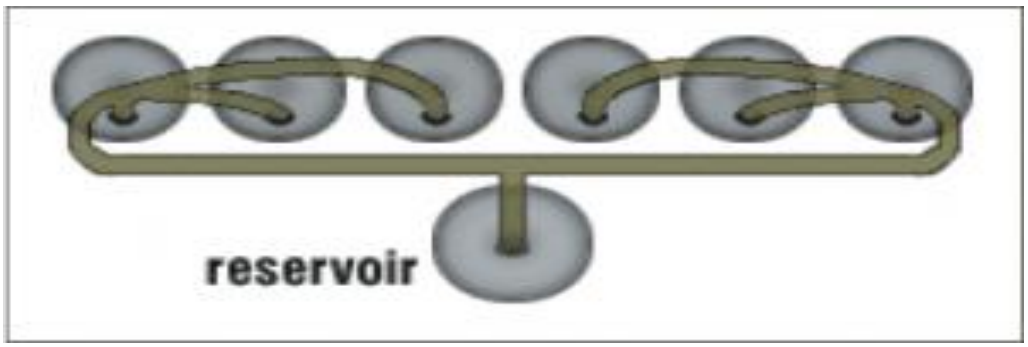
ربط الأنظمة الكهروشمسية مع المدخرات والمحلات:

النظم الكهروشمسية الموصلة مع نظام المدخرات تعطي كموناً أعلى من التيار حيث تطلق الألواح الشمسية تياراً يتراوح بين 2 إلى 10 أمبير وهو تيار القصر وتوتراً يتراوح بين 16 إلى 18 فولتاً وهو توتر الدارة المفتوحة. إن الأنظمة الكهروشمسية الموصولة مع مدخرات تصمم عادة بخرج قيمته 12 فولت وذلك من أجل شحن مدخرات الـ 12 فولت وهي مناسبة لتشغيل مجموعة من أجهزة التحليل الموصولة على التسلسل. أي في حال لدينا مجموعة من اللواقط الشمسية كل منها له توتراً قيمته 15 فولتاً وذلك عند تيار 10 أمبير، فيمكننا بواسطة لاقطين شمسين موصلين على التسلسل تشغيل 3 محللات عند توتر 4 فولت لكل محلل وتيار 20 أمبير كما في الشكل:



رسم توضيحي 16 الخلايا الشمسية

*أجهزة التحليل الموصولة على التسلسل:



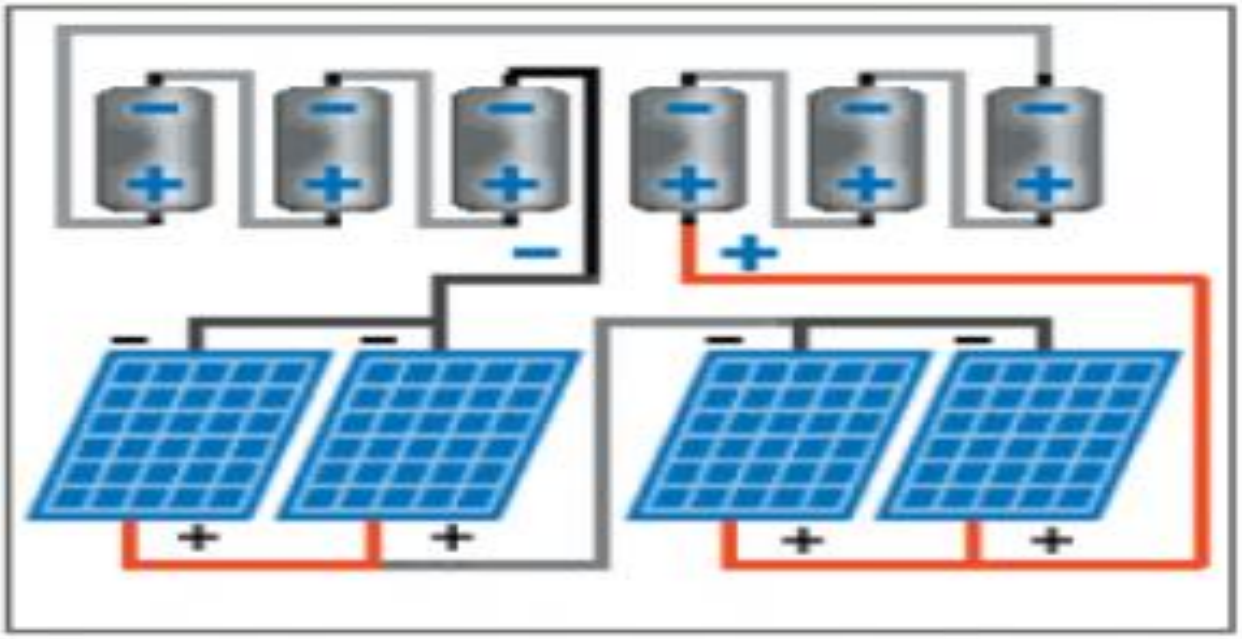
رسم توضيحي 17 خزانات الهيدروجين

في حالة مجموعة من أجهزة التحليل الموصولة على التسلسل وللحصول على قيمة توتر الخرج المطلوبة من اللواقط الشمسية يجب جمع قيمة التوتر اللازم لكل محلل مضاف إلى المجموعة وفي حالة الرغبة في تشغيل المجموعة عند تيار أعلى يجب وصل لواقط على التفرع. الميزة من وصل المجموعة بشكل تسلسلي هي استخدام خزان واحد من هيدروكسيد البوتاسيوم وتوافر لوحات بقيم خرج مماثلة. سيئة التركيبة السابقة للمحللات أنه في حال خروج أحد أجهزة التحليل من العمل تخرج باقي أجهزة التحليل أي في حال الرغبة في إجراء عملية الصيانة على أحدها سوف نضطر إلى إيقاف عمل المجموعة كاملةً وفي حال انخفاض أداء أحد أجهزة التحليل يؤثر ذلك على أداء المجموعة وأيضاً تحتاج المجموعة إلى كمية كبيرة من هيدروكسيد البوتاسيوم وبشكل عام أجهزة التحليل الموصلة على التسلسل أقل فعالية من أجهزة التحليل الموصلة على التفرع.

إعداد مجموعة أجهزة التحليل:

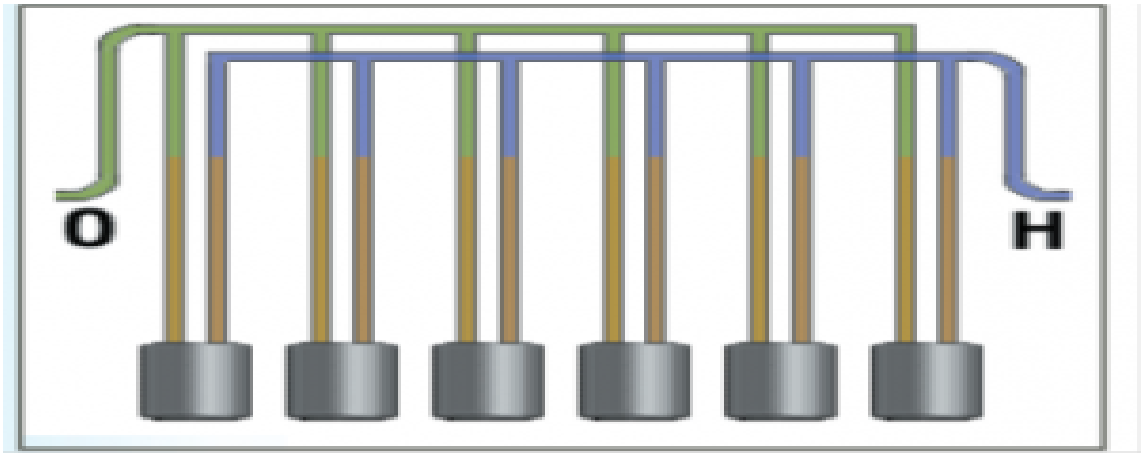
في حال استخدام نظام كهروشمسي مع حوض هيدروكسيد بوتاسيوم مشترك بحيث يخرج التيار ومحلول هيدروكسيد البوتاسيوم من أحد أجهزة التحليل ويدخل الأخر كمثال على ذلك وفي حال لدينا نظام كهروشمسي بخرج 12 فولت

و10 أمبير موصول على التفرع–التسلسل (أي زوج من الخلايا موصولين مع بعضهما على التفرع موصول مع زوج أخر على التسلسل) وذلك للحصول على توتر 4 فولت وتيار 20 أمبير لكل محلل نقوم بالتشكيلة كما في الشكل:



رسم توضيحي 18 استخدام الطاقة الشمسية في التحليل الكهربائي

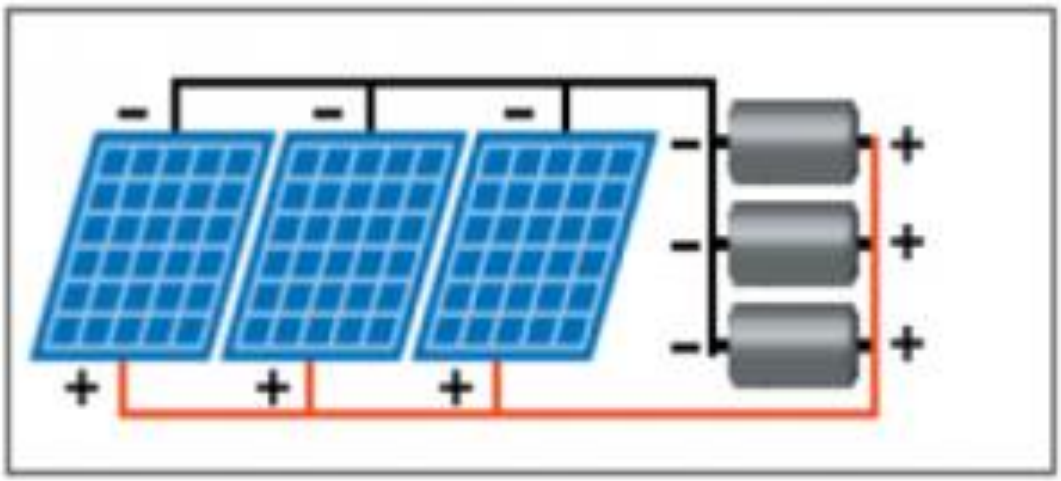
ويجب توصيل أنابيب خروج الغاز مع مراعاة عدم نفاذ هيدروكسيد البوتاسيوم من أحد الأنابيب إلى الأخر عن طريق استخدام أنابيب ذات ارتفاع مناسب كما هو مبين بالشكل:



رسم توضيحي 19 استخدام التحليل الكهربائي في إنتاج الغازات

أجهزة التحليل الموصلة على التفرع:

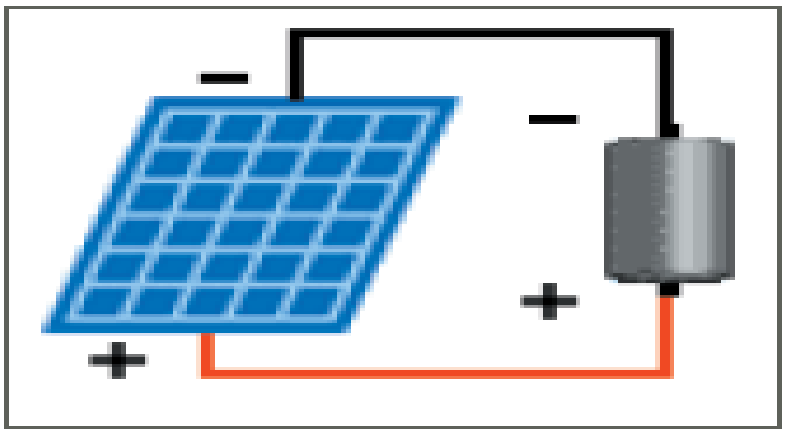
أجهزة التحليل الموصلة على التفرع (والتي تدعى أيضاً بأجهزة التحليل الأحادية القطبية) توصل بالشكل التالي:



رسم توضيحي 20 الخلايا الشمسية

هذا النوع من التوصيل لا يستخدم في الأنظمة الكهروشمسية المخصصة للاستخدام مع المدخرات وذلك لأنه يقدم لكل محلل توتراً كبيراً ولكن ميزة هذه الطريقة في الوصل هي فعاليتها العالية فعند وصل أجهزة التحليل تفرّعياً لا تتأثر أحد أجهزة التحليل بعمل باقي المجموعة ويمكن تبديل أحد أجهزة التحليل أثناء عمل النظام دون أن يؤثر ذلك على عمل النظام والميزة الأخرى لطريقة التوصيل هذه هي أن لكل محلل وعاء هيدروكسيد البوتاسيوم الخاص به.

إن الوصل التفرعي يحتاج إلى مجموعة كهروشمسية بتوتر أقل ولكن تيار أعلى على سبيل المثال فعند الرغبة في تغذية ثلاثة محللات بتوتر 4 فولت وتيار 20 أمبير يجب أن يكون لدينا نظام بخرج 4 فولت وتيار 60 أمبير لتغذيتها أي نحتاج إلى ثلاثة ألواح لكل منها خرج 4 فولت وتيار 20 أمبير موصولة على التفرع.



رسم توضيحي 21 انتاج الطاقة من الخلايا الشمسية

العمل بالوضع الافرادي:

الوضع الافرادي هو أن يكون لكل محلل منبع تغذية وتوصيلاته الخاصة به بالإضافة لحوض هيدروكسيد البوتاسيوم وأنابيب الغاز الخاصة به وتنتهي فقط وصلات أنابيب الغاز الناتج إلى خزان واحد. يحتاج كل محلل في حالة العمل الافرادي إلى منبع شمسي وحيد بخرج 4 فولت و 20 أمبير.

مقارنة بين جهاز تحليل واحد كبير وعدة أجهزة تحليل صغيرة:

عند تصميم نظام هيدروجين شمسي (نظام هجين) يجب أن نحدد أيهما أكثر فعالية إذا استخدمنا مجموعة من أجهزة التحليل الصغيرة أو استخدام محلل واحد كبير أو محللين. غالباً ما يكون استخدام محللات كبيرة أكثر فعالية واقتصادية من استخدام مجموعة محللات صغيرة ولكنها ليست قاعدة عامة. فعند بناء محلل أكبر كل ما نقوم بفعله هو بناء محلل مماثل للمحلل الصغير ولكن بأبعاد أكبر ولكن بتكبير أبعاد المحلل يجب أن نأخذ بعين الاعتبار زيادة التيار وبالتالي نحتاج لأسلاك كهربائية مناسبة مع هذا التيار (ذات مقطع أكبر) كي لا تتبدد الاستطاعة على شكل حرارة في الوصلات أيضاً عند تمرير تيارات أكبر ترتفع لدينا درجة الحرارة في الوصلات وهو أمر مهم عند التعامل مع الهيدروجين. لذا دائماً يفضل في الأنظمة المخبرية بناء محلل صغير مناسب لإجراء التجارب.

التطبيق العملي:

اختبار أداء المحلل:

المحلل القلوي غالباً ما يعمل عند توترات بين 1.6 و2.3 فولت وبقيمة وسطية 1.8 فولت وتيار حوالي 20 أمبير ويعطي مردود كهربائياً بين 54% إلى 78%أجهزة التحليل التي تعمل عند درجة حرارة وضغط مرتفعتين تعني تكاليف صيانة وإنشاء أكبر ولكنها تعمل عند توترات بين 1.3 و1.7 فولت وبمردود كهربائي بين 73% إلى 95%. التوتر الأقل يعني تيار دخل أقل ويعني إنتاج غاز أقل من حالة جهاز التحليل القلوي عند الضغط والحرارة المنخفضتين وذلك مع أنه في الحالة الثانية كان المردود الكهربائي أعلى. هناك علاقة بين التوتر وكثافة التيار حيث أنه كلما احتجنا إلى كثافة تيار أكبر احتجنا إلى منبع بتوتر أكبر. ولقياس المردود الكهربائي للمحلل نقوم بقياس التيار الذي يستجرّه المحلل وهو في حالة العمل ونقيس التوتر بين قطبي المحلل ونضرب الناتج فنحصل على الاستطاعة المتسجرّة من المنبع ولقياس المردود الكهربائي نقوم بتقسيم 1.24 على قيمة التوتر المقاسة في لحظة القياس. على سبيل المثال في حال حصولنا على قراءة 1.8 فولت عند تيار 16 أمبير عندها يعمل المحلل عند استطاعة 28.8 واط وبتقسيم 1.24 على 1.8 نجد أن المردود الكهربائي للمحلل حوالي 69%.

جمع معلومات الأداء عند العمل مع مصادر الطاقات المتجددة:

في معظم أنظمة الطاقات المتجددة يتغير التوتر والتيار بشكل مستمر تبعاً للظروف الجوية لذلك نقوم بقياس التغير في الدخل (الإشعاع الشمسي مثلاً) تبعاً للفصل ونقيس أداء المحلل وبالتالي نحصل على منحني للأداء تبعاً للفصل.

تجريب التجهيزات:

يمكن تخزين نتائج التجارب الميدانية على حاسب وذلك عن طريق وصل المقاييس المناسبة مع التجهيزات ويجب مراعاة إعدادات أجهزة القياس كي تتلاءم مع القيمة المراد قياسها للحصول على قراءات تيار دقيقة. ويمكن أيضاً الاختبار كمقاربة بين قيم الدخل (تيار وتوتر) وقيم الخرج (كحجم غاز).

قياس الغاز الناتج:

يمكن قياس حجم وتدفق وضغط الغاز بعدة طرق حيث يمكن استخدام مقاييس الضغط والغزارة للحصول على القيم المطلوبة أو يمكن أيضاً وضع دلو (ثلاثة غالونات) في دلو من الماء (خمسة غالونات) للحصول على خزان غاز طافي وعلى الرغم من عدم دقة هذه الطريقة إلا أنها تعطي فكرة عن كمية الغاز الناتج في أوقات محددة وذلك عند قيم تيار وتوتر محددة.

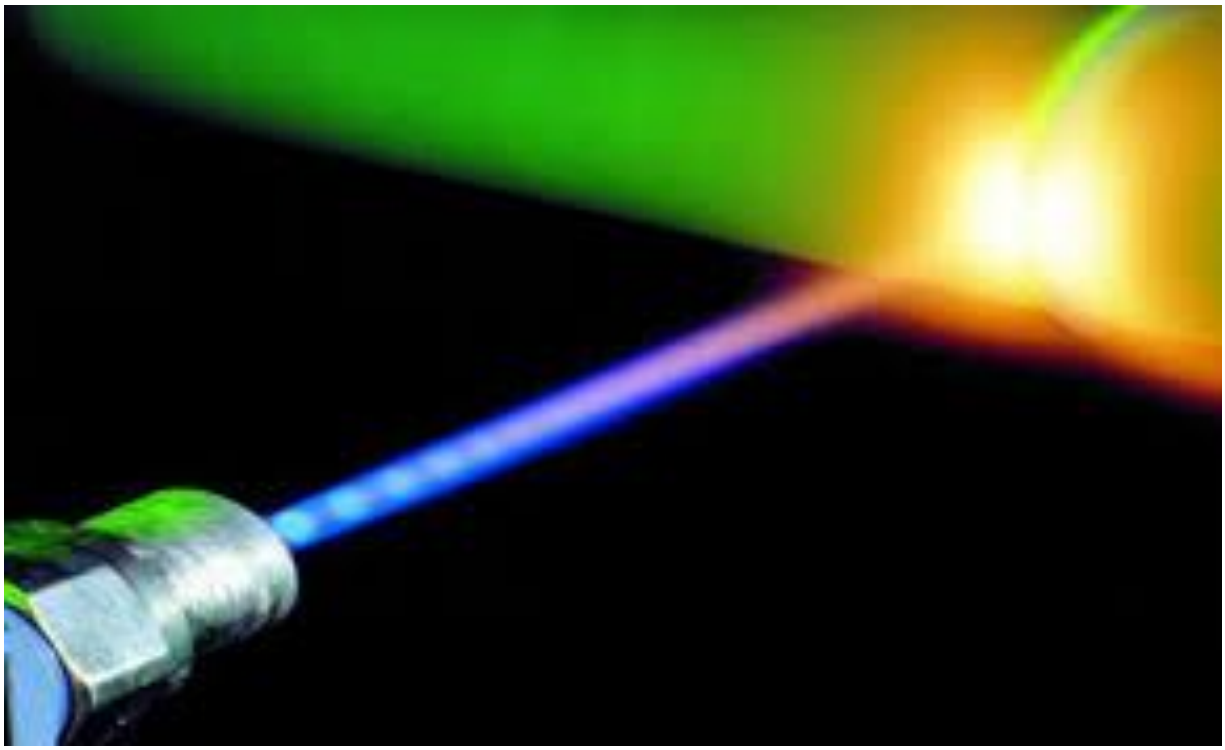
معادلات حساب كميات الغاز:

هناك معادلات خاصة لحساب كميات الغاز الناتج عند الشروط المثالية (درجة حرارة 25 C أو 298 K وضغط واحد جو أول 101.3 kPa) وهي عملية للتحقق من القيم المقاسة بأجهزة القياس. على سبيل المثال لقياس قيمة الهيدروجين أو الأكسجين الناتج خلال ساعة نقوم أولاً بقياس التوتر على مرابط المحلل أثناء العملية وبعدها نقوم بقياس قيمة التيار وبعدها نقوم بضرب القيمتين السابقتين مع بعضهما لنحصل على استطاعة الدخل عند توتر 2 فولت وتيار 20 أمبير تكون قيمة الاستطاعة المسحوبة من قبل المحلل 40 واط ,وبعدها نقوم بتحويل القيمة المقاسة من وات إلى جول (حيث أن الجول هو واط لكل ثانية) أي في حالة الاستعمال لساعة يستجر المحلل 40*3600 جول في الساعة أي ما يعادل 144 كيلو جول بالساعة.

إن ليتر واحد من الماء ينتج 1358.3 ليتر من الهيدروجين و679.15 ليتر من الأوكسجين ونحتاج إلى 13170.9 كيلو جول من أجل تحليل ليتر واحد من الماء ولذا نقوم بتقسيم 13170.9 كيلو جول على 144 كيلو جول فنحصل على الوقت اللازم للحصول على نتائج تحليل ليتر واحد من الماء أي 91.46 ساعة ولمعرفة كمية الهيدروجين المنتجة خلال ساعة واحد نقوم بتقسيم كمية الهيدروجين المنتجة من تحليل ليتر واحد من الماء

(1358.3) على عدد الساعات اللازمة لتحليل ليتر واحد من الماء (91.46) ساعة. النتيجة تعبر عن عدد الليترات المنتجة خلال ساعة واحدة وفي نظامنا هذا تكون 14.85 ليتر من الهيدروجين في الساعة. وبطريقة مماثلة نقوم بعملية الحساب نفسها من أجل حساب كمية الأوكسجين الناتجة في الساعة. وللحصول على القيم بالقدم المكعبة نقوم بتقسيم عدد الليترات على 28.317 وبالنسبة لنظام أجهزة تحليل موصل مع نظام كهروشمسي يمكن معرفة قيمة الدخل عن طريق الخرائط الشمسية والتي تحدد قيمة الإشعاع الشمسي للمكان المركبة فيه من العالم.

- لقد تحدثنا عن طرق عدّة لإنتاج الهيدروجين وجميعها كانت مرتفعة التكلفة نسبياً ولذلك فقد أشار العالم أيكوكو أكيموتو وزملاؤه نتيجة اطلاعهم على أبحاثٍ سابقة وسعيهم الدءوب لإنتاج الهيدروجين بأخفض التكاليف إلى استخدام الوقود الاحفوري كمحفز لتفاعل التفكك بين روابط الذرات في الماء باعتباره محفزاً ذو تكلفة ضئيلة اذا ما قورن ببقية المحفزات الأخرى ويقصد بالمحفزات أنها تلك المواد التي تسرع التفاعل ولولاها لما سار التفاعل على نحو فعال ولذلك فقد قرر العلماء التحقق من قدرة مسحوق الفحم في المساعدة على انفصال الهيدروجين عن الأوكسجين في الماء وذلك عن طريق إضافة هذا المسحوق إلى الماء ثم وجّهوا إليها الليزر في نبضات نانوثانوية وبالفعل تولد الهيدروجين في درجة حرارة الغرفة دون الحاجة إلى محفزات مكلفة أو الأقطاب. وهي طريقة غير مكلفة لإنتاج كميات صغيرة من الهيدروجين من الماء.



رسم توضيحي 23 تسليط الليزر على أحد الأوساط

وهناك بعض الطرق لإنتاج الهيدروجين من الوقود الأحفوري ولكنها نادرة الاستخدام

أكسدة جزئية: حيث يمكن إجراء عملية اكسدة جزئية للهيدروكربونات بإدخال مزيج من الوقود والهواء في وحدة الإصلاح مما يولد غاز الاصطناع السابق والغني بالأكسجين.

ويمكن التمييز بين نوعين من الاكسدة الجزئية وهما الأكسدة الجزئية الحرارية (TPOX) أو الأكسدة الجزئية الحفزية (CPOX) ويجري التفاعل الكيميائي في الأكسدة وفق ما يلي:

$$C_nH_m + n/2\ O2 \longrightarrow NCO + m/2\ H2$$

إصلاح بلازمي: وهو من الطرق الحديثة لإنتاج الهيدروجين حيث يستخدم حراق بلازما لحرق الهيدروكربونات لتحويلها لأسود الكربون وغاز الهيدروجين دون تشكل غاز تنائي أوكسيد الكربون وتدعى هذه العملية بكفيرنر نسبة إلى الشركة النرويجية التي ابتدعتها في ثمانينيات القرن العشرين.

الفصل الثالث: الطرق الصناعية

طريقة بوش (bosch):

هذه الطريقة تعتمد على تحويل الفحم الحجري إلى الحالة الغازية (طريقة بوش) حيث تتم على عدة خطوات

1-إدخال البخار على فحم الكوك المسخن حتى 1200 C ويتم التفاعل الماص للحرارة وفق المعادلة التالية:

$$C+H2O \longrightarrow CO+H2$$

ومن ثم تنخفض درجة الحرارة إلى حوالي 800 C يدخل في الخطوة التالية الهواء (4N2+O2) الذي يتفاعل مع الكربون ويؤدي إلى ارتفاع درجة الحرارة ثانية إلى حوالي 1200C ذلك لأنه تفاعل ناشر للحرارة وفق المعادلة:

$$CO+4N2+O2 \longrightarrow 2CO+4N2$$

في الخطوة الأخيرة يعالج غاز الماء مع بخار الماء في الدرجة 450C بوجود وسيط من أكسيد الحديد كمل يلي:

$$CO+H2+H2O \rightleftharpoons CO2+2\ H2$$

ونلاحظ أن التفاعل عكوسي لذا يُتخلص منCO_2 بمعالجته بمحلول ساخن أو بواسطة الماء تحت ضغط مرتفع يصل إلى 50bar وبهذا ينتج لدينا الهيدروجين.

ولكن لكل من الطرق التي ذكرناها عيوب والتي تشترك مع بعضها بالتكلفة الباهظة وزيادة انبعاث غاز ثنائي أكسيد الكربون الذي نعمل من خلال الهيدروجين على تقليل انبعاثه وليس العكس.

ومع ذلك ركزت بعض التطبيقات الصناعية على طريقة بوش وفيما يلي إحدى التطبيقات الصناعية العملية لهذه الطريقة (محطة توليد الهيدروجين) التي تتكون من الأجزاء الرئيسية التالية التي سنتعرف على دور كل منها فيما بعد:

- ✓ وحدة فصل الهواء
- ✓ وحدة تحويل الكربون إلى الحالة الغازية
- ✓ مفاعل WGSمنخفض درجة الحرارة
- ✓ وحدة فصل الهيدروجين HSMR
- ✓ وحدات امتصاص تأرجحات الضغط PSA
- ✓ دارة عنفة غازية لتوليد الكهرباء GTCC
- ✓ ضواغط الهيدروجين وثاني أكسد الكربون
- ✓ مبادلات حرارية

الخطوة التالية هي إنتاج غاز السيان أو ما يعرف Syngas:

لإنتاج هذا الغاز يتم استخدام فحم كولورادو القاري السريع التبخر والذي يتكون من المواد الاساسية التالية:

- 4. 73%من الكربون
- 0.6% من الكبريت
- 1.3%من النتروجين
- 6.5%من الاكسجين
- 5.1%من الهيدروجين

ويتميز هذا الفحم بنسبة رطوبة تصل إلى 11.4%ونسبة الرماد فيه هي11.7%.

يتم تحويل هذا الفحم إلى الحالة الغازية وفق تيار مسحوب من الاكسجين يتم تدويره بشكل إعصاري وتتم عملية تحويل الطين الخبثي إلى غاز تحت ضغط 70Barوالعملية بأكملها تعتمد على التوازن الكيميائي وهنا يأتي دور وحدة فصل الهواء حيث يتم الحصول على الأكسجين ذو النقاوة 95%من تلك الوحدة.

يمر بعدها غاز Syngas الذي درجته 1330C خلال المبرد حيث يتم تنقيته من الجزيئات والمياه المنحلة ويبرد إلى ال درجة250 C ثم يتم إشباعه بالبخار حيث تكون نسبة البخار إلى الكربون 2.1 وذلك لتفادي تشكل أي مركبات كربونية في مفاعل WGS باتجاه الجريان ثم يمر الغاز السابق على درجة حرارة عالية تصل إلى450C في عملية أديباتية في وحدة WGS والتي تحول 87% من مركبات غاز السيان إلى H2 و CO2 وذلك وفق النسب التالية:

- ✓ CO من 3.0%
- ✓ H2 من 34.2%
- ✓ CO2 من 23.3%

ويجب الإشارة إلى أن جميع مفاعلات WGS الكبريتيد والأملاح الحامضية للكوبالت كمادة محفزة على شكل حاجز فاصل حيث يجتاز H2S هذا الحاجز دون أن يتأثر بينما يتم تحويل CO2 إلى H2S.

الخطوة التالية: قاعدة فصل الغاز

تتم هذه العملية باستخدام غشاء فصل هيدروجيني وهو ما يرمز له بال رمز HSMR وهو اختصار ل H_2 séparation membrane reactor

والذي يقوم بمهمة تغير التركيب الكيميائي ل غاز Syngas إضافة لعملية فصل الهيدروجين.

إن درجة الحرارة القصوى التي تتم تحتها العملية والتي كما ذكرنا تصل إلى 450C تضمن حصول حركة كيميائية سريعة وأداء متوازن دائم من خلال تيار الهيدروجين المستمر الذي يتم انتزاعه في نفس الوحدة.

وهناك ثلاثة تصنيفات رئيسية للأغشية النفوذة للهيدروجين:

- الخزف النفوذ
- الخزف الكثيف الناقل للأيونات الموجبة والمعدن الكثيف

وتركيزنا سيكون على النوع الثالث والذي يكون على شكل أنابيب والتي تتم فيها العملية بشكل أديباتي وبجريان منتظم للجسم العامل.

يتكون الغشاء من الكبريتيد وفيلم رقيق من عنصر البلاديوم Pd سماكته 10µmمخلوط بنسبة 40%بالنحاس Cuتحيط به قناة معدنية مسامية داعمة له ومع وجود طبقة من الأكسيد لمنع الامتزاج بين الفيلم الرقيق والركيزة.

ويتم اختبار هذه الأغلفة بظروف التالية:

درجة الحرارة بين 300-600سيلسيوس

ضغط 35Bar تركيز لغاز H2Sأعلى ب 10%من تركيز الهيدروجين.

وهنا يمكن استخدام وحدات فصل HSMRبسيطة التصميم وذات كلفة غير عالية نسبياً.

إن القسم الأكبر من العملية يتم بسرعة في حدود 20% الأولى من طول المفاعل ويتم فيها نفاذ القسم الأكبر من الهيدروجين ومن ثم يمرر الهيدروجين بعدها على مبادل حراري ليخرج منه بدرجة حرارة 30Cإلى ضاغط الهيدروجين ليرفع ضغطه إلى 60Bar ومنه إلى أنابيب الهيدروجين.

وهنا لا ننسى ان دارة العنفة الغازية تقوم بتوليد الكهرباء كناتج أخر عن هذه المحطة.

طريقة لين (LANE PROCESS):

أما في هذه الطريقة فيمرر بخار الماء الساخن على فلز الحديد الساخن لدرجة الاحمرار فيتأكسد الحديد مكوناً أكسيد الحديد المغناطيسي (Fe_3O_4) وهو عبارة عن خليط من أكسيد الحديدوز وأكسيد الحديديك ($FeO + Fe_2O_3$)

والتفاعل الدال على ذلك :

$$Fe + 4H_2O \rightarrow Fe_3O_4 + 4H_2$$

وبما أن التفاعل عكسي فيجب إمرار تيار بخار الماء باستمرار لإزاحة الاتزان باتجاه تكوين غاز الهيدروجين أما أكسيد الحديد المغناطيسي فيمكن اختزاله إلى حديد بإمرار غاز الماء على الأكسيد الساخن.

رسم توضيحي 24 طاقة الهيدروجين

الباب الرابع:

تطبيقات الهيدروجين واستعمالاته

الفصل الأول: تطبيقات الهيدروجين[6]

لعل أبرز تطبيقات الهيدروجين في عصرنا هذا هي خلايا الوقود الهيدروجيني كونها تشتمل على الكثير من التطبيقات التي تعوض عن الوقود الأحفوري (النفط والغاز الطبيعي) وتحمي العالم من التلوث الذي يزداد يوماً بعد يوم بالإضافة إلى المجال العسكري الذي لطالما يستثمر أغلب الاكتشافات الحديثة وقد تجلت استخدامات الهيدروجين في المجال العسكري بشكلٍ خاص على القنابل الهيدروجينية التي تزيد في قوتها التدميرية على القنبلة الذرية فهي لتفجيرها فقط تحتاج إلى تفجير قنبلة نووية بالقرب منها، وبالإضافة لذلك يوجد بعض الاستخدامات الفرعية للهيدروجين:

رسم توضيحي 25 الهيدروجين

1-يتم استخدام كميات كبيرة من الهيدروجين في الصناعة وخاصة في إنتاج الأمونيا بطريقة هابر وكذلك في هدرجة الزيوت والدهون وإنتاج الميثانول. كما يستخدم الهيدروجين في الألكلة الهيدروجينية والسلفرة الهيدروجينية والتكسير الهيدروجيني.

2-تصنيع حمض الهيدروليك واللحام وتقليل ركاز الفلزات.

3-يستخدم في وقود الصواريخ .

4-له قدرة على التوصيل الحراري أعلى من أي غاز آخر, ولذا فإنه يستخدم إبريد المواتير في المولدات الكهربية في محطات الطاقة.

5-يساعد الهيدروجين السائل في أبحاث الحراريات المنخفضة, متضمنة دراسات الموصلات الكهربية الفائقة .

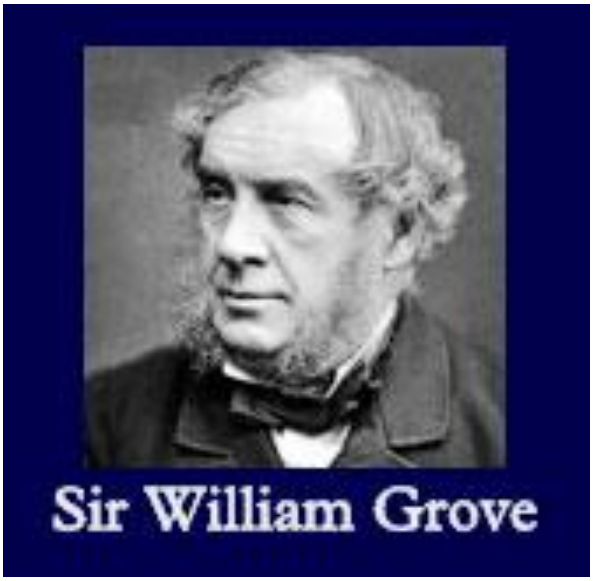
[6] www.hnei.hawaii.edu>sites>files
Xlink.rsc.org>journals>GreenChemistry
www.hydrogen.energy.gov>enduse

6-نظرا لأنه أخف من الهواء بأربعة عشر مرة, فقد تم استخدامه بتوسع كعامل رفع في البالونات والمنطاد. وقد كان ذلك حتى وقوع كارثة هايدنبيرج والتي أقنعت العامة بخطورة استخدام الهيدروجين لهذا الغرض.

7-يستخدم نظير الهيدروجين الديتريوم (هيدروجين-2) في تطبيقات الانشطار النووي كمهدئ للنيوترونات لتقليل سرعتها, وأيضا يستخدم في الاندماجات النووية وتستخدم مركبات الديتريوم في الكيمياء والأحياء في دراسات تفاعلات تأثير النظائر .

8-يستخدم التريتيوم (هيدروجين-3) والذي يتم الحصول عليه في المفاعلات النووية في عمل القنابل الهيدروجينية. كما يستخدم أيضا لتعيين النظائر في علوم الأحياء ومصدر إشعاع في الدهانات الضوئية .

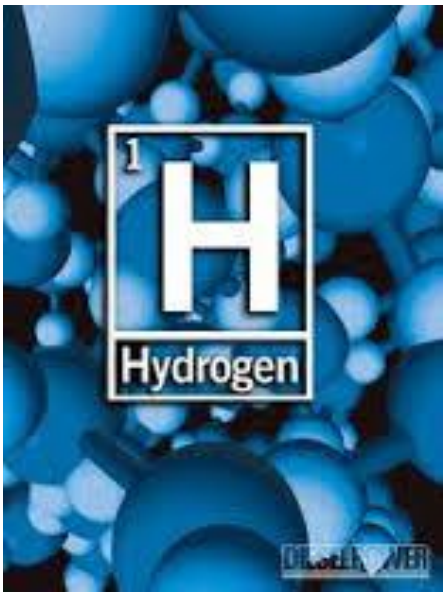
ولا تزال الأبحاث جارية ليكون الهيدروجين وقود المستقبل. ويمكن أن يكون هذا حلقة الربط بين اختلاف أنواع الطاقة وكيفية نقلها وتخزينها فمثلا يمكن أن يتم تحويلها إلى كهرباء (لحل مشكلة تخزين الكهرباء ونقلها) كما يمكن أن تكون بديلا للوقود الحيوي أو بديل للغاز الطبيعي ولوقود الديزل. وكل هذا ممكن نظريا بدون أي انبعاثات CO_2 أو أي ملوثات غازية سامة .



رسم توضيحي 26 وليام جروف

الفصل الثاني: خلايا الوقود الهيدروجيني

كنا قد ذكرنا أن البحث عن مصادر بديلة للوقود الأحفوري قد أصبح مشكلة العصر الحديث التي جذبت اهتمام الكثير من العلماء والباحثين ودفعتهم إلى إبداعاتٍ كثيرةٍ في مجالاتٍ شتى وعلى الرغم من أن العالم لم يجد بعد حلاً حقيقياً يعوض عن النفط ومشتقاتهِ إلى أن خلايا الوقود قد عُدت بديلاً مستقبلياً ممكناً للنفط على الرغم من بعض المشكلات التي اعترضت العلماء لتطويرها بشكلٍ يتيح استخدامها بدلاً من الوقود الأحفوري فقد طورت ولاسيما في الفترة الأخيرة بشكلٍ كبير وقد استخدمت في الكثير من تطبيقات الحياة حيث تمتلك الكثير من المزايا فهي تعد من أهم تطبيقات الهيدروجين المستخدمة في عصرنا هذا.



رسم توضيحي 27 ذرة الهيدروجين

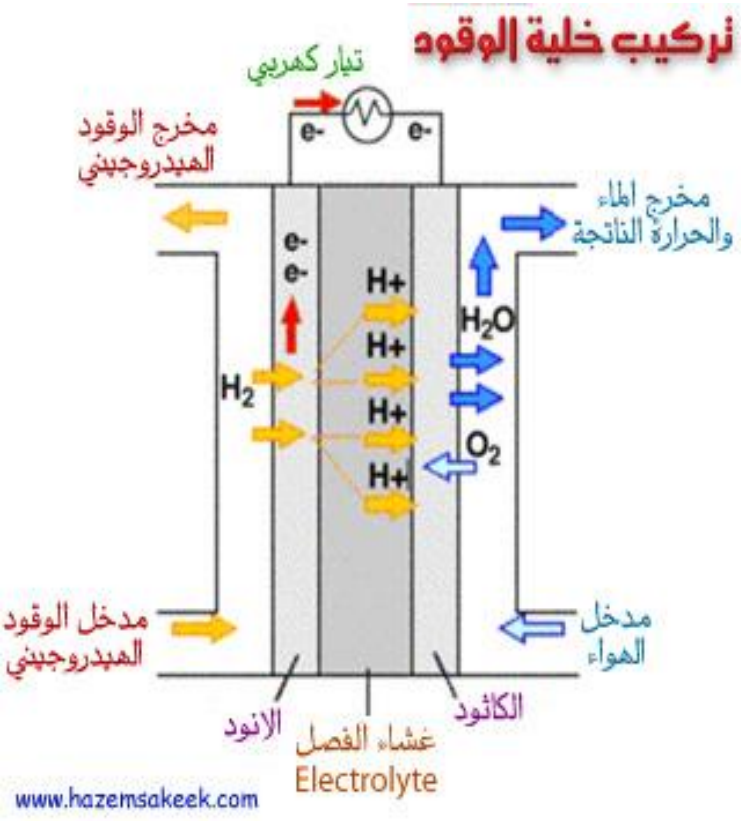
تاريخ ابتكار خلايا الوقود الهيدروجين وفكرتها

قد شهد منتصف القرن التاسع عشر الميلادي اختراع تقنية خلايا وقود الهيدروجين وذلك في انجلترا على يد السير وليام روبرت جروف ونظرا لعدم جدوى استخدام خلايا وقود الهيدروجين في تلك الفترة ظل هذا الاختراع حبيس

الادراج لأكثر من 130 سنة تقريبا ولكن خلايا وقود الهيدروجين عادت مرة اخرى للحياة في عقد الستينيات وذلك عندما طورت شركة جنرال اليكتريك خلايا تعمل على توليد الطاقة الكهربائية اللازمة من اجل استخدامها في سفينتي الفضاء الشهيرتين جيمني و ابولو بالإضافة الى توفير مياه نقية صالحة للشرب لرواد الفضاء لقد كانت خلايا وقود الهيدروجين في تلك المركبتين كبيرة الحجم

وباهظة التكلفة لكنها قامت بمهامها دون وقوع اي اخطاء واستطاعت ان توفر تيارا كهربائيا وكذلك مصدرا للمياه النقية الصالحة للشرب في مركبات الفضاء.

مبدأ عمل الخلايا



رسم توضيحي 28 خلية وقود هيدروجيني

1-ينساب الوقود الهيدروجيني على صفيحة المصعد، في الوقت الذي ينساب فيه الأوكسجين على الصفيحة المقابلة وهي المهبط

2-يسبب غشاء الفصل catalyst(الذي يوجد منها عدة أنواع منها قد تصنع من البلاتين) انشقاق جزيء الهيدروجين إلى ذرتين تنشق كل منهما إلى أيون موجب والكترون سالب.

3-تسمح صفيحة المحلل (electrolyte) فقط بمرور الأيونات (البروتونات) حاملة الشحنات الموجبة عبرها في حين تمنع مرور الإلكترونات، فتقوم هذه الأخيرة بالحركة عبر دارة وصل خارجية موصولة مع المهبط فتتحرك الالكترونات نحو المهبط فينشأ تيار كهربائي

4-على المهبط تتحد الأيونات الهيدروجينية الموجبة مع الكتروناتها السالبة ومع الأوكسجين ليتشكل الماء الذي يتدفق خارج الخلية.

رسم توضيحي 29 تفاعلات خلية الوقود

مميزات خلايا الوقود:

1-كفاءتها الكهربائية عالية.

2-لا تنبعث منها أي ملوثات ضارة بالبيئية وتكون نسبة الغازات عند الاحتراق ضئيلة مقارنة بعملية الاحتراق التقليدية.

3-قليلة الضوضاء عند تشغيلها (عديمة الاهتزاز، هادئة).

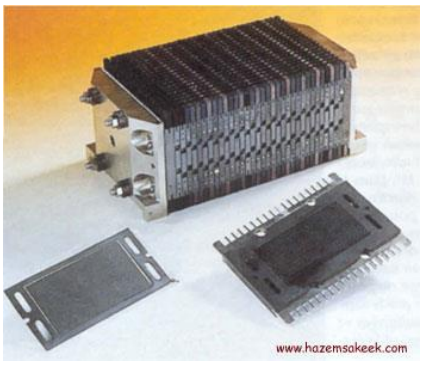
4-لا تحتاج إلى صيانة كثيرا، وتعيش لفترة طويلة.

5-ذات طاقة إمداد قوية وخاصة في التكييف والتسخين.

6-بساطة ميكانيكية التشغيل في الخلية، (الأجزاء ثابتة غير متحركة وبساطة صندوق تروس السرعة).

7-قدرتها في الأداء جيدة (ضبط التيار الكهربائي).

شكل خلايا الوقود:



رسم توضيحي 30 أجزاء خلايا الوقود

إن النماذج البسيطة التي تصنع منها الخلية الهيدروجينية والمستخدمة في وسائط النقل بشكل خاص تنتج حوالي 1.16 Voltلذلك يتم وصل عدد كبير من الخلايا لتوليد الطاقة الكهربائية المطلوبة، كما في الشكل:

الفصل الثالث: تطبيقات خلايا الوقود

استخدمت خلايا الوقود بداية في التطبيقات الفضائية ثم بدأت تتطور وتنتشر أكثر في الاوساط العسكرية حيث ثم تم الاعتماد على خلايا الوقود كمصدر احتياطي بسبب وثوقيتها العالية. حالياً تسوق جميع شركات السيارات منتجاتها الجديدة الهجينة التي تستخدم خلايا وقود بالإضافة الى استخدام خلايا الوقود الذي بدأ ينتشر في الحافلات والقطارات والطائرات والدراجات الصغيرة.

انتشرت خلايا الوقود أيضاً في تطبيقات الصغيرة كالهواتف الخلوية cellular phones والحواسيب النقالة laptop computers وغيرها. ويتم حالياً دراسة امكانية استخدام خلايا الوقود لتغذية المستشفيات والبنوك وأجهزة الصراف الآلي.

تطبيقات خلايا الوقود متعددة ولا تنتهي ومع تطور التقنية تزداد مجالات استخدامها.

التطبيقات الثابتة:

تم حالياً تركيب 2500 نظام خلايا وقود حول العالم في المستشفيات والفنادق والمكاتب والمدارس بالإضافة الى استخدام خلايا الوقود كمحطات كهربائية موصولة مع شبكة الكهرباء العامة لتأمين دعم للشبكة أو محطات كهربائية مستقلة في المناطق التي يصعب ربطها مع الشبكة.

تعمل أنظمة خلايا الوقود بكفاءة 40% بدون ضجيج وبدون تلويث الهواء pollution air. عند استخدام خلايا الوقود في نظام توليد مشترك حيث يستفاد من الطاقة الحرارية الناتجة يمكن رفع الكفاءة الى 85%.

الاتصالات Telecommunications:

مع زيادة استخدام الحواسيب والانترنت وشبكات الاتصالات ظهرت الحاجة لمصدر أكثر وثوقيه كمصدر تغذية وقد أثبتت خلايا الوقود أن وثوقيتها 99.99% يمكن الاستعاضة عن المدخرات بخلايا وقود لتزويد استطاعة تصل إلى kW5 فهي صامتة وصديقة للبيئة ويمكن تصميمها لتكون متينة أي تتحمل الظروف الجوية المحيطة. فهي تستخدم حالياً كمصدر طاقة رئيسي او كمصدر دعم في أبراج الاتصالات towers cell ونقاط التحويل telecom switch nodes.

رسم توضيحي 31 تطبيقات الهيدروجين

مصانع معالجة النفايات ومعالجة المياه ومصانع البيرة Landfills/Wastewater Treatment Plants/Breweries

تم تركيب خلايا الوقود حالياً في مصانع معالجة النفايات والمياه في كافة أنحاء العالم وقد أثبتت هذه التقنية قدرتها على تخفيض الانبعاثات حيث تستخدم غاز الميثان الناتج من هذه المواقع كوقود. كما تم تركيبها بعدة مصانع لإنتاج البيرة

حيث يتم تمرير الخمور الغير معالجة بهواضم تكسر المركبات العضوية وتولد ميثان الذي يعتبر وقود غني بالهيدروجين rich fuel hydrogen.

في مجال المواصلات Transportation:

رسم توضيحي 32 سيارة تستخدم الوقود الهيدروجيني

السيارات: ليس من الغريب أن نجد السيارات في مقدمة تطبيقات الخلايا الهيدروجينية فهي التي تعد من أكثر الجوانب استخداماً للوقود الأحفوري فقد رأينا في السنوات العشر الماضية أن جميع مصانع السيارات تعمل على تطوير مركبات جديدة تعمل بشكل هجين غالبا حيث يتم تغذيتها عن طريق خلايا الوقود الهيدروجيني ولا ينتج عنها من عادم سوى الماء النقي بالإضافة إلى ان بعضها قد طرح في الأسوق التجارية حالياً سيارات تغذى كلياً من خلايا الوقود.

لابد من التنويه أن جنرال موتورز (General motors) وتويوتا (Toyota) وديملر كريسلر (Daimler–Chrysler) والتي تشكل حوالي 40% من مجموع الاستثمارات في مجال السيارات في العالم تقوم بدعم أبحاث تطوير خلايا الوقود (fuel cell) حتى تكون الاختيار الصديق للبيئة بدلاً من محركات الاحتراق الداخلي.

رسم توضيحي33 سيارة من شركة مرسيدس تستخدم الهيدروجين

رسم توضيحي 33 سيارة تعمل بالهيدروجين

هناك نوعان من محركات السيارات الهيدروجينية

الاول: يستخدم الهيدروجين كبديل للنفط في محركات الاحتراق الداخلي .

الثاني: يستخدم الهيدروجين في خلية الوقود لإنتاج تيار كهربي لتشغيل محركات كهربائية .

ولقد تم تطوير نماذج سيارات مختلطة بمعنى أنها تسير إما بالنفط أو الهيدروجين.

ومن نتائج البحث أن طرحت شركة (دايملر) سيارات من فئة A-class المزودة بخلايا الوقود، وكذلك قدمت شركة تويوتا سيارتين صغيرتين تعملان أيضاً بخلايا الوقود بالإضافة إلى إنتاج شركة سيمنز (Siemens) لناقلة صغيرة (Truck) تستخدم التكنولوجيا نفسها هذا الذي شجع شركة فولكس فاجن(VW) لدعم الأبحاث في مجال خلايا الوقود أيضاً. بالإضافة إلى طرح شركة هيونداي سيارة هيونداي ix35 كما أن الصناعة الألمانية قد عملت في مجال خلايا الوقود الهيدروجيني بشكلٍ حثيثٍ وقد تجلى ذلك بسيارات BMW وسيارات مرسيدس فئة B التي تعمل بالوقود الهيدروجيني.

بعض المشاكل التي تعيق انتشار السيارات الهيدروجينية:

1-ثمنها الباهظ لكونها تقنية جديدة فتتوزع تكلفة الابحاث على القطع المنتجة.

2- صعوبة تخزين الهيدروجين بشكل آمن سواء في محطات التزود به أو في السيارات.

3- محطات التزود بالهيدروجين محدودة وكذلك مصادر تزويد تلك المحطات أي أن البنية التحتية لمحطات التزود بالوقود لم تكتمل بعد.

4- بالإضافة إلى ذلك المسافة الممكن قطعها بعبوة واحدة من الهيدروجين هي أقل من تلك التي يمكن الحصول عليها بتعبئة خزان الوقود بالنفط.

5- كما أن مشاكل توزيع الهيدروجين تزيد من تكلفته كوقود مقارنة بالنفط.

6-وهناك صعوبات ناتجة عن إجراءات سلامة يجب أن تضمنها الشركات المصنعة لتلك السيارات.

الحافلات:

تم خلال السنوات الأربع الماضية استخدام أكثر من 50 حافلة تعمل على خلايا الوقود في أوربا وأمريكا الشمالية والجنوبية وشرق أسيا واستراليا. فالكفاءة العالية لخلايا الوقود بالإضافة الى الملوثات المنخفضة جداً لأن الهيدروجين ينتج من مصادر متجددة قد حسن من نوعيه الهواء كثيراً خاصة في المناطق التي تعتبر من أكثر المناطق تلوثاً بالعالم مثل الصين.

الدراجات:

بالرغم من حجمها الصغير العديد من الدراجات تعتبر ملوثاً للهواء، فغازات العادم لها ملوثة جداً إذا ما قورنت بحجمها الصغير. فهي تنتج أول أكسيد الكربون carbon monoxide وهيدروكربون hydrocarbons بكميات مشابهة لما تنتجه شاحنة ديزل. لذا تعتبر الدراجات التي تعمل على خلايا الوقود حلاً مناسباً لبلدان مثل الهند وآسيا حيث يستعمل العديد من السكان الدراجات كوسائل نقل.

الرافعات وآليات النقل في المصانع Forklifts/Materials Handling:

إضافة الى ميزة التقليل من الغازات الضارة المنبعثة تتميز الرافعات التي تعمل على خلايا الوقود بأنها تحتاج الى صيانة اقل بكثير من الأليات العاملة على الكهرباء حيث تحتاج الى شحن بطارياتها بشكل دوري واستبدال متكرر لأنها تتلف بسرعة حيث أن العمل في هذا المجال يحتاج إلى توقف واعادة تشغيل سريع ومتكرر، لذا تعتبر خلايا الوقود ذات أداء ممتاز وخرج كهربائي ثابت وبالإضافة إلى انها لا تعاني من انخفاض الجهد الذي يحدث عند تفريغ المدخرات الكهربائية.

القطارات:

يتم تطوير خلايا الوقود لاستخدامها بالقطارات للتخلص من الغازات الضارة التي تنتجها حيث يقوم مشروع بتطوير أكبر وسيلة مواصلات تعمل على خلايا الوقود بالعالم وهي قاطرة MW1 للاستخدامات العسكرية والتجارية.

الطائرات:

يتم الاهتمام بتقنية خلايا الوقود التي تغذي الطائرات عسكرياً بسبب الضوضاء المنخفض لها والحجم الصغير وامكانية استخدامها في الجو. من أكبر الشركات التي تطور هذه التقنية هي شركة بوينغ Boeing.

والشكل يظهر طائرة ألمانية تعتمد على خلايا الوقود تحلق فوق مدينة هامبورغ.

رسم توضيحي 34 طائرة تعمل بالهيدروجين

المراكب البحرية Boats: تعهدت آيسلاندا بتحويل أسطول صيدها الواسع لاستعمال خلايا الوقود كمصدر تغذية مساعد في نهاية عام 2015 للتمهيد لتحول جميع الأسطول لتعمل على الخلايا الوقودية كمصدر أساسي. فمحركات خلايا الوقود ذات كفاءة أعلى من محركات الاحتراق بالإضافة الى مميزاتها الأخرى من تخفيف التلوث.

وحدات الكهرباء المساعدة Auxiliary Power Units (APUs): الشاحنات المتطورة تحمل على متنها العديد من الأجهزة الكهربائية مثل المدافئ والمكيفات والحاسبات والتلفونات والثلاجات والمايكروويف. لتشغيل هذه التجهيزات عندما تكون الشاحنة متوقفة لابد من تشغيل المحرك. قامت وزارة الطاقة الأمريكية The Department of Energy (DOE)

بقياس الوقود السنوي وتكاليف الصيانة لشاحنة ثقيلة بحدود $1800 وعند استعمال خلية وقود كوحدة كهرباء مساعدة fuel cell APUs يوفر 670 مليون غالون من وقود الديزل بالسنة ومليون طن من ثاني أكسيد الكربون سنوياً.

التجهيزات المحمولة Portable Power: يمكن أن تزودنا خلايا الوقود بالطاقة حيث لا تكون الشبكة الكهربائية متوفرة حيث تستخدم في حالات الطوارئ وفي التطبيقات العسكرية فهي أكثر كفاءة من البطاريات وتعمل لفترة أطول وأخف وزناً.

رسم توضيحي35 شاحن هيدروجيني متنقل

التجهيزات الصغيرة Micro Power:

خلايا الوقود من أنسب مصادر الطاقة بالنسبة للأجهزة الإلكترونية الصغيرة نظراً لصغر حجمها، وقدرتها على توليد كمية كبيرة من الطاقة الكهربائية بالنسبة إلى الحجم الصغير. حيث تستخدم خلايا الوقود حالياً في الهواتف الخلوية والحواسيب النقالة والساعات وغيرها من التطبيقات الصغيرة. فأجهزة الشحن المعروضة في السوق الآن يمكن ان تشحن الحاسب عشرين ساعة تقريباً والهاتف الخلوي لثلاثين يوم. أيضاً تم استخدامها في أجهزة كشف الدخان وأجهزة الإنذار وكاميرات المراقبة. العديد من هذه التجهيزات تعرض سنوياً في معرض خلايا الوقود FC EXPO المقام في طوكيو سنوياً. حيث طرحت شركة سوني العام الماضي شاحن متنقل هو عبارة عن جهاز هجين بين خلية وقود ومدخرة ليثيوم.

رسم توضيحي36خلية وقود تولد الكهرباء

وقد طرحت شركة توشيبا(TOSHIBA) من خلال معرض "هانوفر" للتجارة (trade fair Industrial) جهاز الكومبيوتر المتنقل(Notebook) المزود بخلية الوقود المصغرة، وهي تسمح للجهاز بالعمل لمدة أسبوع كامل دون توقف من غير مساعدة أو توصيلات بأي مصدر طاقة اخر.

في مجال التوربينات الغازية:

التوربينات الغازية هي التي تنتج الحركة الدورانية اللازمة لدوران المولد (Generator) وبالتالي توليد الكهرباء، وقد تم اكتشاف أنه بتزويد التوربينات الغازية بمجموعة مضغوطة من خلايا الوقود، فإن ذلك يساعد على توليد كهرباء بجهد مرتفع نسبياً، وبالتالي تحسين كفاءة الكهرباء المولدة.

وفي دراسة نشرها مركز تسويق التكنولوجيا التابع لهيئة الإذاعة البريطانية (BBC marketing/ technology) أكدت أن مبيعات خلايا الوقود في عام 2003 قد وصلت إلى 1.3 بليون دولار، في حين أنها حققت 355 مليون دولار عام 1998 وذلك بزيادة 30% وهذا الذي يثبت الاتجاه العالمي لاستخدام خلايا الوقود في التطبيقات المختلفة.

ولهذا فإن الأبحاث تتجه في الحصول على مواد جديدة يمكن استخدامها في هذه الخلايا بدلاً من المواد عالية التكلفة ومازال العمل قائماً على تطوير الخلايا، وتقليل سعرها ووزنها وحجمها وزيادة كفاءتها وطاقتها مما يجعلها مناسبة للعديد من التطبيقات العملية الأخرى.

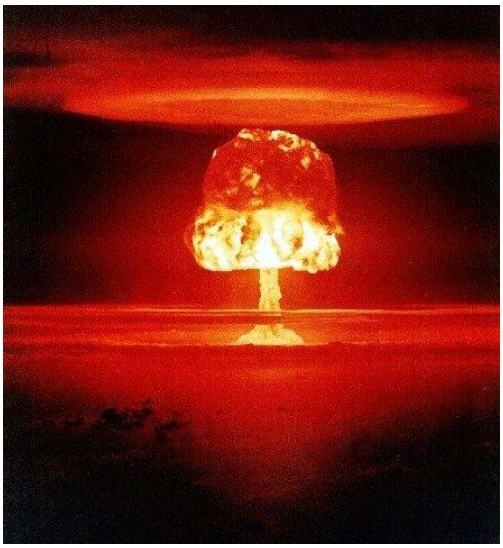
مشاكل تواجه الخلايا الهيدروجينية

بعد أن تعرفنا على مزايا خلايا الوقود لابد وأننا تسألنا عن عدم استخدامها بشكل واسع النطاق السبب يكمن في العديد من المشاكل التي اعترضت انتشار هذا المصدر من الطاقة.

كما علمنا أن خلايا الوقود تستخدم الأكسجين والهيدروجين لإنتاج الكهرباء، وبتأمين هذين الغازين يمكننا الحصول على مصدرٍ مستمر للطاقة وبالنسبة لغاز الأكسجين فيتم الحصول عليه من الهواء حيث يتم سحب الهواء إلى الكاثود للحصول على الأكسجين مباشرةً ولكن المشكلة الحقيقة تكمن في غاز الهيدروجين بسبب صعوبة تخزينهِ وندرة وجوده حراً في الطبيعة فتكلفة الحصول على غاز الهيدروجين خاماً باهظة مما يجعل النفط يتفوق على الخلايا الهيدروجينية في التكلفة

حيث أن المطلوب حتى تصبح خلية الوقود اقتصادية أن تكون تكلفتها أقل ب 200 مرة عما هي عليه الآن ولذلك الكثير من الأبحاث حالياً تتوجه إلى البحث عن مصدر أمن ورخيص لغاز الهيدروجين يتيح نشر هذه الخلايا واستخدامها على نطاقٍ أوسعٍ.

الفصل الرابع: القنابل الهيدروجينية[7]



رسم توضيحي37 القنبلة الهيدروجينية

مع كثرة الحروب والنزاعات في العالم كانت سباقات التسلح كثيرةً وكانت معظم التقنيات التي تبتكر تستغل في المجال العسكري ولا سيما بعد الحربين العالميتين الأولى والثانية فقد شهد العالم الحرب الباردة بين الولايات المتحدة الأمريكية والاتحاد السوفيتي سابقاً وقد كانت هذه الحرب دافعاً للتسابق في الاختراعات والاكتشافات وكان من أبرز تلك الاكتشافات الطاقة النووية التي لم يستغلها العالم أنزاك في المجال السلمي

[7] www.ccnr.org>howard-morland

بشكلٍ كبير بل كان السباق في تطوير الأسلحة النووية و كذلك كان الأمر بالنسبة للطاقة الهيدروجينية التي تأخر استغلالها كثيراً في المجال السلمي في حين كان استخدامها في المجالات العسكرية بارزاً جداً وقد تجلت هذه الاستخدامات في اختراع القنبلة الهيدروجينية.

ماهي القنبلة الهيدروجينية

القنبلة الهيدروجينية، أكثر الاسلحة التدميرية التي اخترعها البشر لحد الآن، وهي أقوى من القنبلة النووية التقليدية، حيث تزيد طاقتها التدميرية بـ (25000) مرة عن القنبلة النووية التي ألقيت على اليابان، وخلافاً للقنابل النووية التقليدية، التي تنتج الطاقة المدمرة عن طريق انشطار (تفكك) النوى لذرات ثقيلة مثل اليورانيوم، فإن القنبلة الهيدروجينية (H-bomb) تنتج الطاقة المدمرة من خلال اندماج بعض النظائر الكيميائية مثل نظيري الهيدروجين التريتيوم (Tritium) والديتيريوم (Deuterium) حيث ينتج من اتحاد هذين النظيرين للهيدروجين ذرة هيليوم مع نيوترون إضافي ويكون الهيليوم الناتج من هذه العملية أثقل كتلة من الهيليوم الطبيعي.

كيف تعمل القنبلة الهيدروجينية؟؟

يتطلب تفاعل الالتحام أو الاندماج النووي الهيدروجيني، مقدراً كبيراً من الطاقة لبدئه ويحتاج هذه الطاقة على شكل حرارة عالية جداً تقارب درجة حرارة قلب الشمس، وقد تم حل هذه المعضلة من خلال قنبلة نووية (انشطارية) تنفجر قبل انفجار القنبلة الهيدروجينية لتوفير هذه الحرارة العالية .

وتقاس القنبلة الهيدروجينية الميجا طن: كمية الطاقة التي يطلقها 907 ألاف طن متري من مادة الـ TNT المتفجرة.

مخترعي القنبلة الهيدروجينية

لا يزال هناك جدل حول من توصل أول مرة إلى اختراع هذا النوع من القنابل .حيث أنه في فترة زمنية متقاربة جدا في عام 1955 م زعم أندريه ساخروف من الاتحاد السوفيتي وإدوارد تيلر من الولايات المتحدة باختراعهم لأول قنبلة هيدروجينية.

هل استخدمت القنبلة الهيدروجينية ؟؟

رسم توضيحي 38 القنبلة التي سقطت على جزيرة أنيوتوك

إن القنبلة الهيدروجينية سلاح رهيب، ولكنه لحسن الحظ لم يستخدم قط في الحرب لحد الآن، رغم أن كلاً من الولايات المتحدة الأمريكية والاتحاد السوفيتي، خاضا سبّاقاً في تفجير قنابل هيدروجينية تجريبية. ولقد فجر الأمريكيون أول قنبلة هيدروجينية على جزيرة أنيوتوك أتول في المحيط الهادي في مطلع خمسينيات القرن العشرين وقد أدت الحرارة العالية في هذه القنبلة إلى تبخر هذه الجزيرة بشكل كامل، وتلتها تفجير روسيا لقنبلة هيدروجينية أخرى فوق القطب الشمالي.

القنبلة الروسية

قنبلة ايفان الكبير كما اسمها الروس و المعروفة بقنبلة القيصر في الغرب , هي قنبلة هيدروجينية ذات ثلاث مراحل , يتم تفجير قنبلة نووية عادية في المرحلة الأولى لتوليد الحرارة العالية (ملايين الدرجات) التي تتطلبها عملية تحفيز الاندماج النووي لنظائر الهيدروجين في المرحلتين التاليتين و التي تؤدي الى توليد قوة تدميرية هائلة تقاس بالميغا طن و كذلك الى انبعاث كميات كبيرة جدا من الغبار الذري الذي تكون له تأثيرات ضارة على البيئة و الصحة العامة , لذلك و لغرض التخفيف من هذه الانبعاثات الضارة فقد قام العلماء السوفييت بتخفيض قوة القنبلة من 100 ميغا طن الى 50 ميغا طن ,

رسم توضيحي 39 القنبلة التي سقطت على القطب الشمالي

كما قاموا بوضع نظائر الرصاص بدل اليورانيوم 235 في المرحلة الثانية و ذلك من اجل تقليل كميات الغبار الذري المنبعث عن الانفجار و قد نجحوا في مسعاهم ذلك بنسبة 97% حيث ان قنبلة القيصر رغم قوتها التدميرية الهائلة توصف بأنها واحدة من أنظف القنابل النووية.

قنبلة القيصر كانت الأضخم من بين كل القنابل التي تم صنعها سابقا بلغ وزنها 27 طنا وكانت بطول 8 أمتار وقطر مترين وقد تقرر ان تقوم بحملها القاصفة الروسية العملاقة نوع توبولوف Tu-95V وقد تم إلقائها في صباح يوم 30 تشرين الأول / أكتوبر عام 1961.

1. **بالشكل المضغوط 2. بالشكل السائل 3. بواسطة الرابطة الكيميائية**[8]

الهيدروجين المضغوط (Compressed hydrogen) :أن **عملية ضغط الهيدروجين مشابهة لعملية ضغط الغاز، ولكن بما أن الهيدروجين أقل كثافة فإن الضواغط يجب أن تزود بموانع تسرب أكثر إحكاماً. يضغط الهيدروجين عادة إلى قيم تتراوح بين 200-25 bar-وذلك في حال تخزينه في خزانات اسطوانية الشكل ذات سعات صغيرة بحدود 50 liters، هذه الخزانات التي تصنع عادة من الألمنيوم أو من مركبات الكربون-الغرافيت ويمكن استخدامها في مجالي المشاريع الصناعية الصغيرة والنقل على حد سواء. أما في حال كان استخدام الهيدروجين سيتم على نطاق أوسع فإن ضغوطاً بقيم تتراوح بين 500-600 barيمكن أن تستعمل لهذه الغاية، وعلى الرغم من ذلك فإننا نلاحظ أن بعض أكبر خزانات الهيدروجين المضغوط في العالم تستعمل ضغوطاً تتراوح فقط 12-16 bar.**

الهيدروجين السائلLiquid Hydrogen :

تستعمل عملية تمييع الهيدروجين من أجل تقليل الحجم اللازم لتخزين كمية مفيدة من الهيدروجين (خصوصاً في حالة المركبات) ، و بما أن الهيدروجين لا يتميع حتى يصل إلى الدرجة -253 Cأي أعلى من الصفر المطلق بـ 20 C فقط فإن هذه العملية تتصف بأنها طويلة و مركزة ، و قد تصل نسبة المفاقيد في الطاقة المختزنة في الهيدروجين إلى 40% ، و لكن مع ذلك فإن أفضلية الهيدروجين السائل تنبع من ارتفاع نسبة الطاقة الناتجة عن الكتلة فيه لتصل إلى ثلاثة أضعاف ما هي عليه في البنزين ، إنه أكثر أنواع الوقود كثافة) تركيزاً) طاقياً بعد الوقود النووي و هذا ما دفع إلى استخدامه في كل برامج الفضاء ، و في حال تخزين الهيدروجين السائل فإننا بحاجة إلى خزانات بعازلية أكبر.

الهيدروجين ذو الترابط الكيميائي:Bonded hydrogen

استخدام الهيدريدات المعدنية (الصلبة) والسائلة ومركبات الكربون الماصة هي الطرق الرئيسية المتبعة في عملية ربط الهيدروجين كيميائياً، إنها أكثر الطرق أماناً حيث أنه لن يتحرر أي هيدروجين في حال حدوث طارئ، ولكنها

[8] sciarab.org

كبيرة الحجم وثقيلة. الهيدريدات الصلبة (المعدنية) مثل مركبات FeTi، Mg2Ni، LaNi5 تستخدم لتخزين الهيدروجين عن طريق ربطه كيميائياً بسطح المادة ، و لضمان إمكانية تخزين حجوم كبيرة من الهيدروجين ، يتم استخدام حبيبات من المادة الأساس لزيادة سطوح الارتباط ، ثم يتم تشحين المادة (تزويدها بالهيدروجين) عن طريق حقن الهيدروجين بضغوط عالية داخل الخزان المملوء بالجزيئات الدقيقة من المادة ، إن عملية ارتباط الهيدروجين مع المادة تترافق مع إطلاقه لكميات من الحرارة ، و هذه الحرارة يجب أن نعيد تقديمها لفصل الهيدروجين عن المادة من جديد .

الخلاصة

ومما تبين لنا فيما سبق فقد وجدنا بأن الهيدروجين لا يزال قيد التجارب وذلك لأسباب عديدة مادية وصناعية ولكن هذه المعوقات تدرس دوريا من قبل مئات العلماء وفي أكثر المخابر تقنيةَ وتطوراَ وقد اتضح ذلك من خلال التباين الكبير في استخدام الهيدروجين بين العقد السابق والعقد الحالي فقد شهد القرن العشرين تقدماً كبيراً في هذا المجال لان الضغوط المرماة على عاتق الحكومات والدول بلغت أشدها وذلك مع تضخم الثورة الصناعية واتساع المد البشري بالإضافة إلى أسباب طبيعية عدة كما ذكرنا في بداية بحثنا ولا يجب أن ننسى أن العديد من شركات النقل كانت سباقة في هذا السياق لمواكبة الاحتجاجات التي طالت العديد من المؤسسات وذلك لارتفاع أسعار النقل والغلاء الغير مقبول في أسعار السلع والمنتجات ولكن للأسف ما زالت هذا التقنية بعيدة كل البعد عن بلادنا العربية لأنها من المصادر الرئيسية للوقود الأحفوري الذي يعد من المعوقات التي تقف في وجه انتشار هذا المشروع وغير ذلك فالبلاد العربية لا تملك المقومات الرئيسية لمثل هذه التجارب ويعود السبب إلى ضعف تمويل مثل هذه المشاريع على الرغم من أهميته البالغة في الحياة المعاصرة ولا نأمل إلا أن تجد هذه التقنية طريقاً لدخول الحدود العربية كما هي أخذه بالانتشار في الدول الأوربية والغربية.

والجدول التالي هو مقارنة بين طرق إنتاج الهيدروجين التي توصلنا إليها

الطريقة	منافعها	مضارها
التحليل الكهربائي	منتشرة بشكل واسع حيث يمكن شرائها من أي مكان سهلة الاستخدام كما تنتج الهيدروجين النقي	تحتاج إلى تيار متواصل كما أنها مكلفة من حيث الكهرباء
تفاعل الصوديوم مع الماء	موادها متوافرة بكثرة سهلة التطبيق	الهيدروجين المنتج غير نقي كمية الهيدروجين الناتج قليلة
تفاعل الفلزات مع الحمض القوي	كمية الهيدروجين الناتج كبيرة	المواد غالية جداً قليلة الانتشار صعبة التعامل معها والفلزات محتاجة في صناعات أهم
تفاعل أساس قوي مع الألمنيوم	كمية الهيدروجين الناتجة كبيرة كما أنها طريقة سهلة جداً	موادها غالية كما أن إنتاج الألمنيوم يتطلب كمية كهرباء عالية جداً

القسم العملي

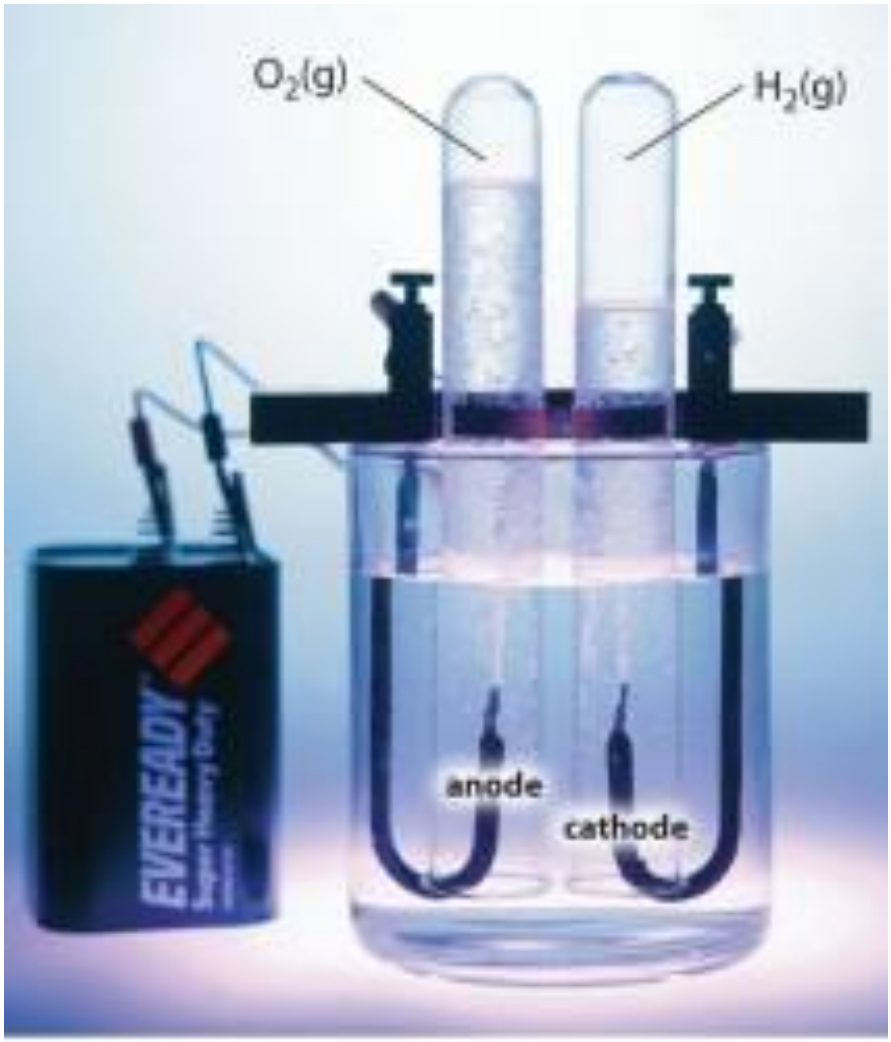
التجربة الأولى:

التحليل الكهربائي للماء

المواد اللازمة: وعاء تحليل كهربائي، جهاز يقوم بإيصال التيار الكهربائي المتواصل.

طريقة العمل:

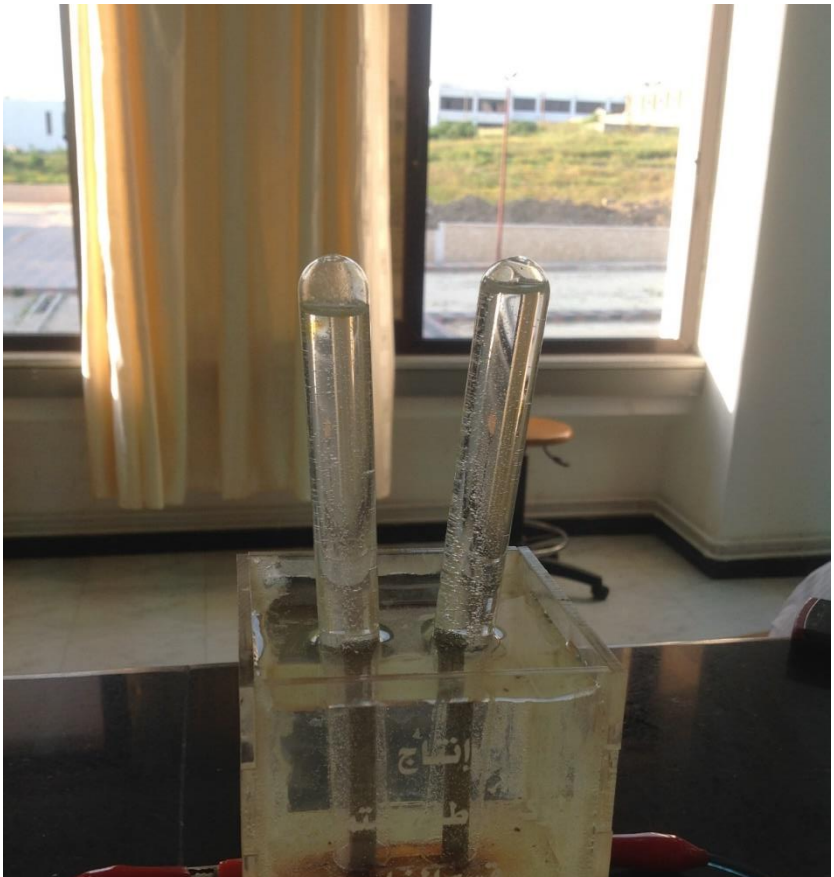
نملأ وعاء التحليل بالماء ثم نضع أنبوبي اختبار مملوئين بالماء كل أنبوب فوق مسرى ونصله بالكهرباء فنجد أن كمية المياه قلت وتشكل لدينا غازا الهيدروجين والأكسجين وكان حجم الهيدروجين ضعفي حجم الأكسجين.



anode: $2H_2O(l) \rightarrow O_2(g) + 4H^+(aq) + 4e^-$

cathode: $2H^+(aq) + 2e^- \rightarrow H_2(g)$

overall: $2H_2O(l) \rightarrow O_2(g) + 2H_2(g)$



التجربة الثانية:

تفاعل الهيدروكسيدات مع المعادن

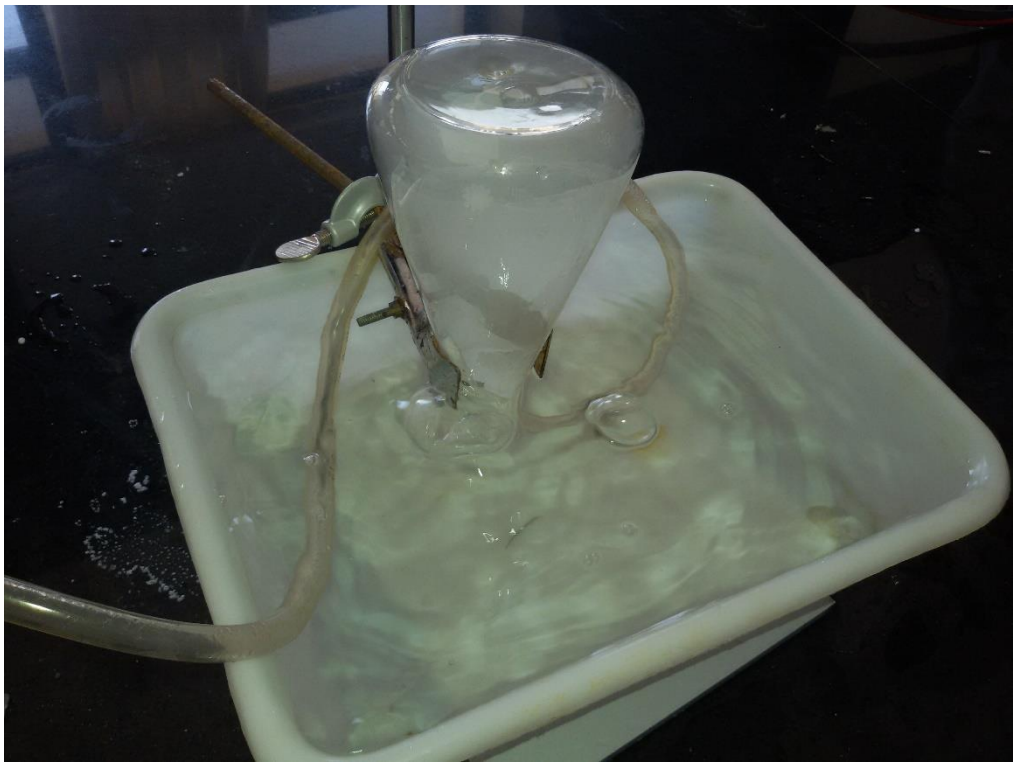
المواد اللازمة

هيدروكسيد قوي، معدن من المجموعة الخامسة A، وعاء للتفاعل.

طريقة العمل:

نقوم في البداية بحل هيدروكسيد الصوديوم في الماء فنلاحظ ازدياد الحرارة ومن ثم نضعه فوق الألمنيوم فنلاحظ ارتفاع درجة الحرارة كثيراً وتشكل معقد ألومينات الصوديوم وفق المعادلة التالية:

$$NaOH+Al+H_2O \rightarrow NaAl(OH)_4$$



التجربة الثالثة:

تفاعل الحمض مع المعدن

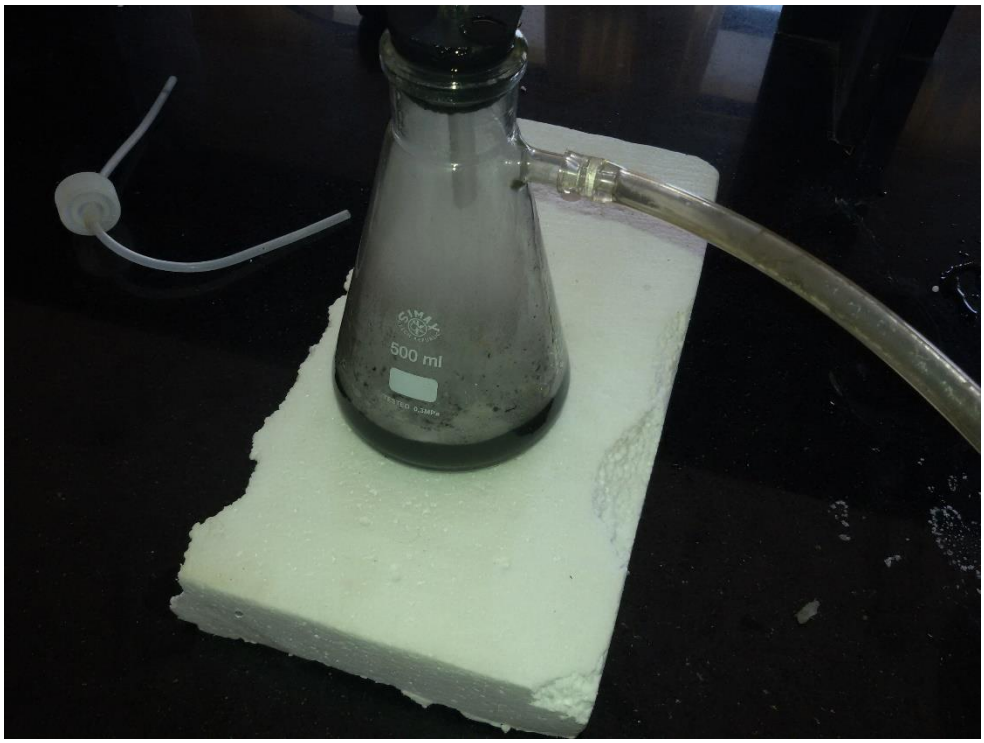
المواد اللازمة

حمض قوي، معدن من المجموعة السادسةA، وعاء تفاعل.

طريقة العمل:

نضع الزنك في الوعاء ثم نسكب الحمض فوقه فنلاحظ ازدياد الحرارة قليلاً وحدوث فقاعات ناتجة عن لتفاعل ةي غاز اليدروجين وتشكل لدينا كلوريد الزنك وفق المعادلة التالية:

$Zn+HCl \rightarrow ZnCl_2+H_2$



التجربة الرابعة:

تفاعل المعادن القلوية مع الماء

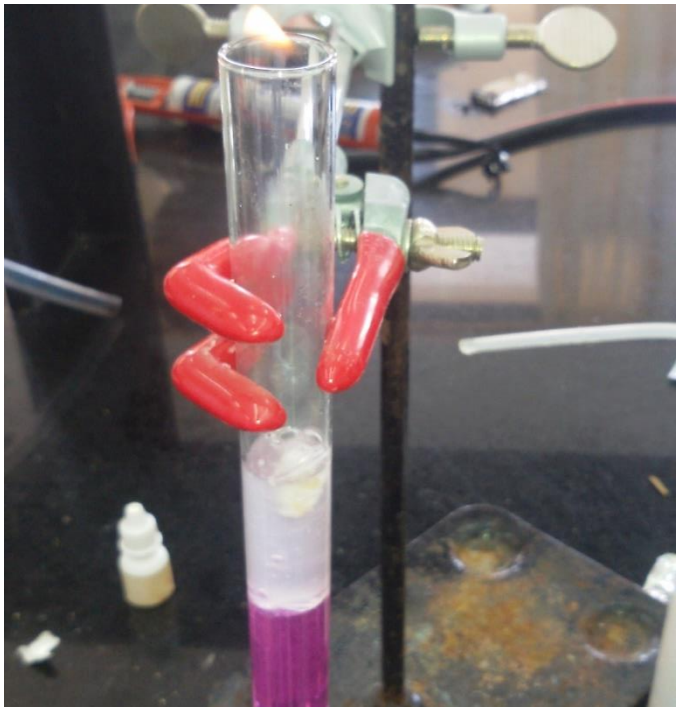
المواد اللازمة

ماء، معدن من المجموعة الأولى، أنبوب اختبار، مذيب عضوي.

طريقة العمل:

في البداية نملأ نصف أنبوب الاخبار بالماء ثم نضيف المواد العضوية فوقها فنلاحظ بأن المواد لم تختلط ثم نضع الصوديوم فنرى أن الصوديوم يقفز وذلك لأنه عندما يجتاز المواد العضوية ويلامس الماء فإنه يطلق غاز الهيدروجين ويشكل هيدروكسيد الصوديوم وفق المعادلة التالية:

$Na+H_2O \rightarrow NaOH+H_2$



المصادر والمراجع

المصدر: producing hydrogen from water with charcor powder 28 أغسطس 2013

Four Different Ways to Make Hydrogen Gas _ Scienceray.org

الكيمياء العامة واللاعضوية (منشورات جامعة دمشق) الطبعة الثانية ص319 إلى 327

الكيمياء العامة 2 (منشورات جامعة البعث) الطبعة الأولى ص225 إلى ص 250

الموسوعة العربية

Hydrogen production and storage

altenergy.org/renewables/hydroelectric.html

keepbanderabeautiful.org/hydrogen.html

www.nu.edu.sa>miscellaneous [1]

Faculty.ksu.edu.sa>lib-teacher

Cms.education.gov.il>rdonlyres>energia [1]

Faculty.ksu.edu.sa>documants

الموسوعة العربية (بحث عن الهيدروجين) [1]

http://www.marefa.org/index.php?title

www.cesa.org>hydroggen-and-fuel-cells

www.fuelcelleduation.org>themes>pdf

www.altenergy.org>rewenable

www.hnei.hawaii.edu>sites>files [1]

Xlink.rsc.org>journals>GreenChemistry

www.hydrogen.energy.gov>enduse

فهرس الصور

رقم الصورة	الوصف	رقم الصفحة
الرسم التوضيحي 1	وجود الهيدروجين في الشمس	3
الرسم التوضيحي 2	استخدامات الطاقة الشمسية	3
الرسم التوضيحي 3	طاقة الرياح	4
الرسم التوضيحي 4	طاقة المد والجزر	4
الرسم التوضيحي 5	طاقات غير متجددة	5
الرسم التوضيحي 6	الغاز الطبيعي	5
الرسم التوضيحي 7	الفحم الحجري	6
الرسم التوضيحي 8	الهيدروجين	6
الرسم التوضيحي 9	موقع الهيدروجين في الجدول الدوري	7
الرسم التوضيحي 10	قوة الهيدروجين	7
الرسم التوضيحي 11	الجدول الدوري	8
الرسم التوضيحي 12	نظائر الهيدروجين	10
الرسم التوضيحي 13	تفاعل إنتاج الهيدروجين	11
الرسم التوضيحي 14	احتراق الصوديوم	13
الرسم التوضيحي 15	التحليل الكهربائي للماء	15
الرسم التوضيحي 16	الخلايا الشمسية	21
الرسم التوضيحي 17	خزانات الهيدروجين	21
الرسم التوضيحي 18	استخدام الطاقة الشمسية في التحليل الكهربائي	22
الرسم التوضيحي 19	استخدام التحليل الكهربائي في إنتاج الغازات	22
الرسم التوضيحي 20	الخلايا الشمسية	23
الرسم التوضيحي 21	إنتاج الطاقة من الخلايا الشمسية	24
الرسم التوضيحي 22	دورة التحليل الكهربائي	27
الرسم التوضيحي 23	تسليط الليزر على أحد الأوساط	28
الرسم التوضيحي 24	طاقة الهيدروجين	32
الرسم التوضيحي 25	الهيدروجين	33
الرسم التوضيحي 26	وليم غروف	34
الرسم التوضيحي 27	ذرة الهيدروجين	34
الرسم التوضيحي 28	تفاعلات خلية الوقود	35
الرسم التوضيحي 29	خلية الوقود	35
الرسم التوضيحي 30	أجزاء خلايا الوقود	36
الرسم التوضيحي 31	تطبيقات الهيدروجين	37
الرسم التوضيحي 32	سيارة تستخدم الهيدروجين كوقود	38
الرسم التوضيحي 33	سيارة شركة مرسيدس تستخدم الهيدروجين	38
الرسم التوضيحي 34	طائرة تعمل بالهيدروجين	40
الرسم التوضيحي 35	خلية وقود تنتج الهيدروجين	41
الرسم التوضيحي 36	شاحن هيدروجيني متنقل	41
الرسم التوضيحي 37	قنبلة الهيدروجين	42
الرسم التوضيحي 38	القنبلة التي سقطت على جزيرة أنيوتوك	44
الرسم التوضيحي 39	القنبلة التي سقطت على القطب الشمالي	44