



جامعة الشهيد حمه لخضر الوادي

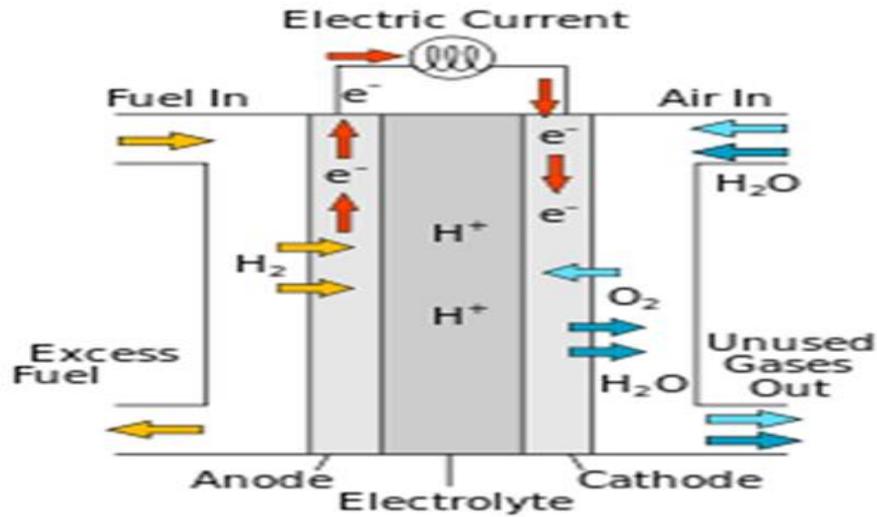
كلية التكنولوجيا

قسم الهندسة الميكانيكية

تخصص- الطاقات المتجددة -

## مطبوعة في مقياس: خلايا الوقود وإنتاج الهيدروجين

موجهة لطلبة السنة الثانية ماستر طاقات متجددة في الميكانيك



من اعداد: الدكتور عطية محمد الهادي

أستاذ محاضر-أ-

تحتوي هذه المطبوعة على خبرة عدة سنوات من تدريس مقياس خلايا الوقود وإنتاج الهيدروجين وفق البرنامج والمقررات الرسمية لطلبة السنة الثانية ماستر في الهندسة الميكانيكية تخصص طاقات متجددة... في النظام الجديد.

ولقلة وندرة وجود مراجع باللغة العربية في مجال تخصص الهندسة الميكانيكية بصفة عامة وفي هذا المقياس بصفة خاصة فقد رأيت أنه من المناسب جمع هذه الدروس كمطبوعة ليستفيد منها الاستاذ الجامعي و الطلبة الجامعيين.

تحتوي هذه المطبوعة على دروس تعتمد على تفصيل الحسابات عند الضرورة وعلى الاختصار غير المخل أحيانا أخرى، التي أجدها مهمة في تقوية فهم الطالب لمحتويات هذه المقياس. وتتضمن هذه المطبوعة جزئين الجزء الاول يهتم بخلايا الوقود و الجزء الثاني يهتم بإنتاج الهيدروجين، وبذلك تحتوي المطبوعة على ثمانية فصول سنذكرها بالترتيب وباختصار كما يلي:

- الفصل الاول : لمحة عامة عن خلايا الوقود.
- الفصل الثاني: خلية الغشاء التبادل البروتوني PEMFC.
- الفصل الثالث : خلايا وقود الأكسيد الصلب (SOFC).
- الفصل الرابع : خصائص الهيدروجين.
- الفصل الخامس : طرق إنتاج الهيدروجين.
- الفصل السادس: نقل وتخزين الهيدروجين.
- الفصل السابع: تطبيقات استعمال الهيدروجين في وسائل النقل.
- الفصل الثامن: المشاكل الأمنية للهيدروجين.

## المحتويات

2		مقدمة المؤلف
4		مقدمة عامة
الجزء الأول: خلايا الوقود		
7	لمحة عامة عن خلايا الوقود	الفصل الأول
18	خلية الغشاء التبادل ألبروتوني (PEMFC)	الفصل الثاني
25	خلايا وقود الأكسيد الصلب (SOFC)	الفصل الثالث
الجزء الثاني: إنتاج الهيدروجين		
36	خصائص الهيدروجين.	الفصل الرابع
41	طرق إنتاج الهيدروجين	الفصل الخامس
57	نقل وتخزين الهيدروجين	الفصل السادس
62	تطبيقات استعمال الهيدروجين في وسائل النقل	الفصل السابع
70	المشاكل الأمنية للهيدروجين	الفصل الثامن
76		المراجع

أرجوا أن أكون قد وفقت في كتابة هذا المطبوعة وأن يستفيد منها الطلبة

أصبح البحث عن بدائل للوقود التقليدي "النفط" أمراً ضرورياً بالنسبة للدول الصناعية المتقدمة ولا سيما بعد الارتفاع الملحوظ لأسعار الوقود على مستوى العالم وترصد هذه الدول المبالغ المالية الطائلة لتمويل أبحاث البحث عن مصادر للطاقة البديلة والمقصود هنا بديلة عن النفط، وهذا ما أثار موجة من الإضرابات عند المستهلكين والمنتجين وسائقي الشاحنات وغيرهم الكثير تبعاً لارتفاع أسعار المواصلاات.

ولكن العلماء كانوا أبعد نظراً فقد عكفوا على إجراء الدراسات والأبحاث للحصول على مصادر بديلة للطاقة، وبمساعدة حكومات الدول المتقدمة والمتطورة و إمدادها لهم بكافة أشكال الدعم فكانت النتائج مرضية جداً فقد تم تطوير استخدام الطاقة الشمسية لتوليد الطاقة الكهربائية، واستخدام طاقات المد والجزر وأمواج البحر كطاقات حركية يمكن تحويلها لطاقة كهربائية، أو استخدام المياه الساقطة من الشلالات لتزويد الطاقة الكهربائية والاستعاضة بالعديد من مصادر الطاقة البديلة عن الوقود التقليدي ولكن هذه المصادر البديلة تعتمد على تقنيات معقدة عالية التكلفة، وكذلك فإن معظم هذه المصادر تعتمد على الظروف مناخية و جغرافية معينة مثل سطوع الشمس لفترات طويلة بالنسبة للطاقة الشمسية وبالتالي في الدول التي تكثُر فيها السحب أثناء العام تكون مشكلة كبيرة بالنسبة لاعتمادهم على الطاقة الشمسية لتوليد الكهرباء، وكذلك الاستفادة من ظاهرة المد والجزر وحركة الأمواج يتطلب الوجود بالقرب من البحر وهذا أيضا ليس متوفر في كل مكان بالطبع ولكن بالرغم من كل هذه الصعوبات فان خلايا الوقود وبعد جهود العلماء المستمرة قد تخطتها لتكون خلايا الوقود هي المستقبل وبديلا عن النفط.

في الأفق لاحت 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. حيث توصل العلماء إلي صنع خلايا الوقود التي ظهرت كنتيجة لتطور البطاريات العادية حيث استطاعت أن تحل محلها وان تعوض الطاقات الأخرى المتجددة وغير المتجددة حيث أطلق عليها العلماء طاقة القرن الواحد والعشرين.

# الجزء الاول: خلايا الوقود

## الفصل الاول: لمحة عامة عن خلايا الوقود

## 1.1- مقدمة

إن المصادر البديلة للوقود الأحفوري (البترول، الغاز و الفحم) قد أصبح مشكلة العصر الحديث التي جذبت اهتمام الكثير من العلماء والباحثين ودفعتهم إلى إبداعات كثيرة في مجالات شتى وعلى الرغم من أن العالم لم يجد بعد حلاً حقيقياً يعوضنا عن النفط ومشتقاته إلا 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.

## 2.1 لمحة تاريخية:

تم اختراع تقنية خلايا الوقود في إنجلترا في منتصف القرن التاسع عشر الميلادي على يد السيد وليام روبرت جروف William grove، منذ أكثر من 160 عاماً حيث لم يكن يعلم أن اختراعه الذي وضعه في العام 1839م سيحل مشكلة تواجه العالم في القرن الواحد والعشرين لاكتشاف خلايا الوقود التي يمكن عن طريقها الحصول على الكهرباء من الهيدروجين أو الكحول دون أي عملية احتراق؛ وبذلك يكون قد حل المعادلة الصعبة، وهي الحصول على طاقة نظيفة من غير أن نلوث البيئة وبأقل الأسعار، حيث إن المشكلة ثلاثية الجوانب: الطاقة، والبيئة، والتكلفة، وهي الاتجاهات الثلاثة التي يصبو العلماء لحلها.

والحل يكمن في هذه الخلية الصغيرة التي تدعى خلية الوقود، ولكن نظراً لعدم جدوى استخدامه في تلك الفترة، ظل هذا الاختراع حبيس الأدراج لأكثر من 130 سنة، ولكن عادت خلايا الوقود مرة أخرى للحياة

في عقد الستينيات، وذلك عندما طورت شركة «جنرال إلكتريك» خلايا تعمل على توليد الطاقة الكهربائية اللازمة لإطلاق سفيني الفضاء الشهيرتين «أبوللو» و«جيمني» وكان ذلك في سنة م1968، بالإضافة إلى توفير مياه نقية صالحة للشرب، كانت الخلايا في تلك المركبتين كبيرة الحجم وباهظة التكلفة، لكنها أدت مهامها دون وقوع أي أخطاء، واستطاعت أن توفر تياراً كهربائياً وكذلك مصدراً للمياه النقية الصالحة للشرب .

### 3.1- تعريف خلية الوقود:

خلية الوقود هي عبارة عن خلية كهروكيميائية تحول الطاقة الكيميائية في الوقود (سواء كان هيدروجين hydrogen، غاز طبيعي، ميثانول methanol، غازولين gasoline ... ) وفي المؤكسد (هواء air، أكسجين oxygen) إلى طاقة كهربائية ومن حيث المبدأ تعمل خلية الوقود كالمخزنة Battery، لكن على عكس المخزنة خلية الوقود لا تفرغ ولا تحتاج شحن وتولد طاقة كهربائية وحرارية طالما هي مغذاة بالوقود والمادة المؤكسدة .

تدمج خلايا الوقود بين جزيئات الوقود والمؤكسد بدون حرق أو توليد تلوث كما في نظم التوليد غير الكفوءة والملوثة التي تستخدم تقنية الحرق التقليدي  
الوقود المستخدم في خلية الوقود :

الهيدروجين هو الوقود المستخدم حالياً في خلايا الوقود وهناك بعض الغازات الأخرى مثل:

- النيتروجين Nitrogen من الهواء له تأثير طفيف على أداء خلية الوقود .
- أول أكسيد الكربون CO والميثان CH<sub>4</sub> لهما تأثير مختلف على خلايا الوقود حسب نوع الخلية. مثلاً أول أكسيد الكربون CO يعتبر ضار وملوث لخلايا الوقود ذات درجة الحرارة المنخفضة نسبياً مثل خلية الوقود ذات غشاء التبادل البروتوني PEMFC.

من جهة أخرى أول أكسيد الكربون يمكن أن يستخدم كوقود مباشر لخلايا الوقود ذات درجة الحرارة العالية مثل خلية الوقود ذات الوسيط الصلب SOFC.

كل خلية وقود بوسطها الخاص ومحفزها تستقبل غازات معينة لتكون كوقود لها أو ملوثات تؤثر سلبا على أداء الخلية، لذا نظام تغذية الغاز لابد أن يكون مناسب وخاص لنوع خلية الوقود .  
.وتتكون الخلية الوقود من الأجزاء التالية:

#### ❖ المصدر:

وهو القطب السالب لخلية الوقود وله عدة مهام، فهو يقود الالكترونات المحررة من جزيئات الهيدروجين. ليتم استعمالها في تغذية دارة كهربائية خارجية. كما انه يحتوي علي قنوات وظيفتها تشتيت غاز الهيدروجين على سطح المحفز.

#### ❖ المهبط:

وهو القطب الموجب لخلية الوقود، ويحتوي على قنوات لتوزيع الأكسجين على سطح المحفز، كما انه يقود الالكترونات بالاتجاه الخلفي من الدارة الكهربائية الخارجية للمحفز حيث يمكن أن تتوحد مع الأكسجين و ايونات الهيدروجين لتشكيل الماء.

#### ❖ الإلكتروليت:

وهو المادة التي تنقل الايونات المشحونة وتمررها من القطب إلى قطب آخر باتجاه واحد وتمنع مرور الالكترونات من خلاله.

#### ❖ المحفزات:

وهي مؤلفة من مواد خاصة تعمل فيها معادن نادرة كالبلاتين و النيكل، وان استخدام هذه المحفزات في النظام تسهل تفاعل الأكسجين مع الهيدروجين. تصنع عادة من مسحوق البلاتين الذي يكسو ورق الكربون أو القماش بطبقة رقيقة جدا.

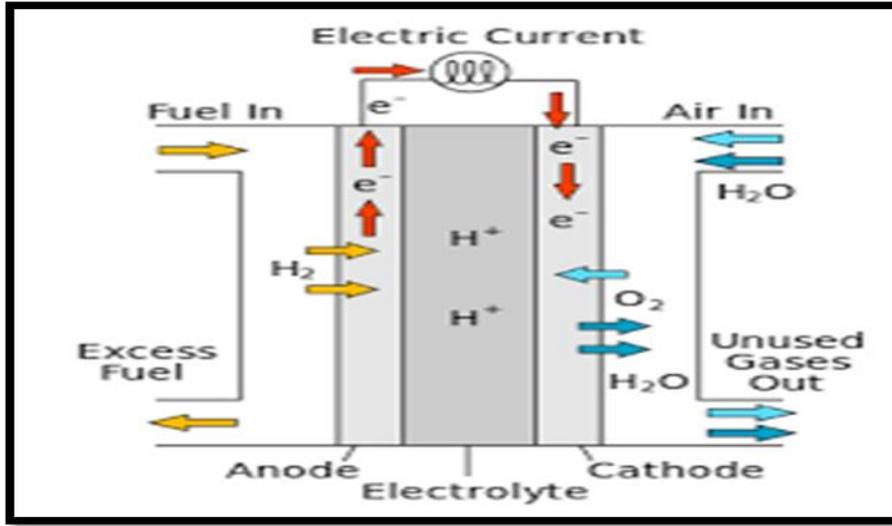
## ❖ مجمع التيار ثنائي القطبية:

يعمل على تجميع الإلكترونات من الأقطاب وتوزيع الوقود عليها، ويصنع من معادن موصلة أو مطلية

بالذهب ذات صلابة ميكانيكية جيدة ويكون على طرفي الخلية.

### 4-1- مبدأ عملها:

يمثل الشكل التالي مبدأ عمل الخلايا الوقود:



الشكل (1.1): مخطط لمبدأ عمل خلية وقود.

ونصف ماذا يحدث في كل أجزاء الخلية كالتالي:

- ينساب الوقود الهيدروجيني على صفيحة المصعد، في الوقت الذي ينساب فيه الأوكسجين على الصفيحة المقابلة وهي المهبط.
- يسبب غشاء الفصل catalyst (الذي يوجد منها عدة أنواع منها قد تصنع من البلاتين) انشقاق الهيدروجين إلى ذرتين كل منهما إلى ايون موجب و إلكترون سالب.
- 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 الإلكترونات نحو المهبط فينشأ تيار كهربائي.

• على المهبط تتحد الأيونات الهيدروجينية الموجبة مع الكترولونات السالبة ومع الأوكسجين ليتشكل

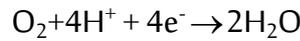
الماء الذي يتدفق خارج الخلية.

والتفاعلات الكيميائية في خلية الوقود هي:

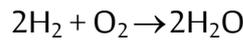
عند الأنود



عند الكاتود



التفاعل الكلي



## 5.1 أنواع خلايا الوقود

إن التصنيف الحالي لخلايا الوقود يعتمد بصورة أولية على نوع الإلكتروليت المستعمل وان الإلكتروليت يحدد نوع و مسار التفاعل الكهروكيميائي الذي يأخذ مجراه داخل الخلية, كما يحدد نوع العامل المساعد المطلوب ودرجات الحرارة التي تعمل بها الخلية و نوع الوقود المستخدم وكذلك نوع الايونات التي تضمن النقل الأيوني إن جميع هذه الأمور تنعكس إمكانات استخدام الخلية ومكان استخدامها. إن الخلايا المطورة حالياً أو قيد التطوير والتحسين عديدة ولكل منها ميزتها ومحدداتها لقد حظيت الخلايا الوقودية في لأونة الأخيرة باهتمام كبير من قبل المؤسسات والهيئات المعنية بصناعة الطاقة الكهربائية وتقنيات توليدها وتخزينها ، فقد تم حتى الآن تطوير أكثر من تسعة أنواع نذكر منها فيما يلي الأنواع الأكثر استخداماً وانتشاراً على المستويين العملي والتجاري و تعود تسمية هذه الأنواع حسب عاملين الأول إلى طبيعة الوسيط (الالكتروليت) الذي تحتويه والثاني حسب درجة حرارة عملها.

فهناك خلايا الوقود ذات درجات الحرارة المرتفعة (أعلى من 600 °C) مثل:

- خلايا الوقود ذات الكربونات المصهورة MCFC
  - خلايا الوقود ذات الأكسيد الصلب SOFC
  - وخلايا درجات الحرارة المنخفضة (حتى 200 °C) مثل:
  - خلايا الوقودية القلوية AFC
  - خلايا الوقود ذات الحمض الفسفوري PAFC
  - خلايا الوقود ذات الغشاء البوليميري PEMFC
- والجدول التالي يلخص أهم أنواعها:

الجدول (1.1): الأنواع الرئيسية لخلايا الوقود.

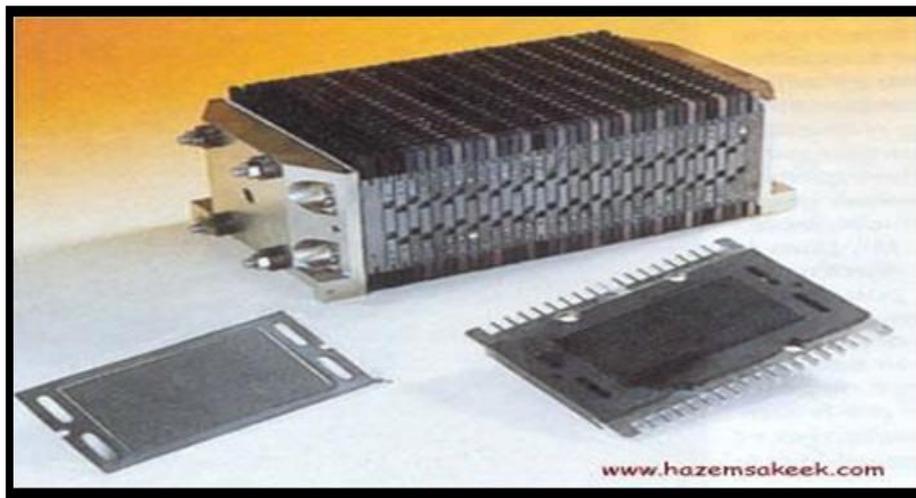
الجيل	الأول			الثاني	الثالث
النوع	خلايا الوقود الحامضية الفسفورية	خلايا الوقود القلوية	خلايا وقود غشاء التبادل ألبروتوني	خلايا الوقود الكربون المذاب	خلايا الوقود ذات الأكسيد الصلب
الرمز	PAFC	AFC	PEMFC	MCFC	SOFC
الإلكتروليت	حمض الفوسفوريك (سائل)	البوتاس (سائل)	بوليمار (صلب)	أملاح ذائبة (سائل)	سيراميك (صلب)
الايونات النشطة	H <sup>+</sup>	OH <sup>-</sup>	H <sup>+</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>-2</sup>	O <sup>-2</sup>
درجة الحرارة	180-210	80-90	80-110	600-700	500-1000

					(°c)
H <sub>2</sub> /CO/CH <sub>4</sub> مشكل	H <sub>2</sub> /CO مشكل	مشكل H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub>	مشكل H <sub>2</sub>	الوقود الرئيسي
الثابتة المواصلات	الثابتة	المحمولة المواصلات الثابتة	الفضاء المواصلات	الثابتة	التطبيقات

إن مبدأ عمل هذه الأنواع الخمسة لخلايا الوقود واحد إلا أنها تختلف عن بعضها في العديد من المميزات والخواص نذكر على سبيل المثال، درجة حرارة تشغيلها والمردود....الخ.

#### 6-1- شكل خلايا الوقود:

إن النماذج البسيطة التي تصنع منها الخلية الهيدروجينية والمستخدمه في وسائط النقل بشكل خاص تنتج حوالي 1.13 Volt لذلك يتم وصل عدد كبير من الخلايا لتوليد الطاقة الكهربائية المطلوبة كما في الشكل:



الشكل (2.1): يمثل شكل خلايا الوقود

## 7-1- مميزات خلايا الوقود والمشاكل التي تعاني منها.

تتميز خلايا الوقود الهيدروجينية :

1- كفاءتها الكهربائية عالية

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

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

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

5- ذات طاقة إمداد قوية وخاصة في التكييف والتسخين.

6- بساطة ميكانيكية التشغيل في الخلية، الأجزاء ثابتة غير متحركة وبساطة في صندوق.

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

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

بعد أن تعرفنا علي مزايا خلايا الوقود لابد وأنا 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 و الهيدروجين لإنتاج الكهرباء، وبتامين هذين الغازين يمكننا الحصول علي مصدر مستمر للطاقة وبالنسبة لغاز الأكسجين فيتم الحصول عليه من الهواء حيث يتم سحب الهواء إلى الكاتود للحصول على الأكسجين مباشرة و لكن المشكلة الحقيقية تكمن في غاز الهيدروجين بسبب صعوبة تخزينه و ندرة وجوده حرا في الطبيعة فتكلفة الحصول على غاز الهيدروجين خاما باهظة مما يجعل النفط يتفوق على الخلايا الهيدروجينية في التكلفة حيث أن المطلوب حتى تصبح خلية الوقود اقتصادية أن تكون تكلفتها اقل ب200 مرة عما هي عليه الآن و لذلك الكثير من الأبحاث

حاليا تتوجه إلى البحث عن مصدر امن ورخيص لغاز الهيدروجين يتيح نشر هذه الخلايا و استخدامها على نطاق واسع.

### 8-1- أبرز تطبيقاتها:

استخدمت خلايا الوقود بداية في التطبيقات الفضائية ثم بدأت تتطور وتنتشر أكثر في الأوساط العسكرية حيث تم الاعتماد على خلايا الوقود كمصدر احتياطي بسبب وثوقيتها العالية. حالياً تسوق جميع شركات السيارات منتجاتها الجديدة الهجينة التي تستخدم خلايا وقود بالإضافة إلى استخدام خلايا الوقود الذي بدأ ينتشر في الحافلات والقطارات الدراجات الصغيرة. انتشرت خلايا الوقود أيضاً في تطبيقات الصغيرة كالهواتف الخلية والحواسيب النقالة وغيرها. ويتم حالياً دراسة إمكانية استخدام خلايا الوقود لتغذية المستشفيات والبنوك وأجهزة الصرف الآلي.

تطبيقات خلايا الوقود متعددة ومع تطور هذه التقنية تزداد مجالات استخدامها من أهمها:

#### • الاتصالات

مع زيادة استخدام الحواسيب والانترنت وشبكات الاتصالات ظهرت الحاجة لمصدر أكثر وثوقية كمصدر تغذية, وقد أثبتت خلايا الوقود أن وثوقيتها 99.99% يمكن الاستعاضة عن المدخرات بخلايا وقود لتزويد استطاعة تصل إلى 5 kW فهي صامتة وصديقة للبيئة ويمكن تصميمها لتكون متينة أي تتحمل الظروف الجوية المحيطة. فهي تستخدم حالياً كمصدر طاقة رئيسي أو كمصدر دعم في أبراج الاتصالات ونقاط التحويل.

#### • في مجال المواصلات

ليس من الغريب أن نجد السيارات في مقدمة تطبيقات الخلايا الهيدروجينية فهي التي تعد من أكثر الجوانب استخداماً للوقود الغاز والبتترول فقد رأينا في السنوات العشر الماضية أن جميع مصانع السيارات تعمل على تطوير مركبات جديدة تعمل بشكل هجين غالباً حيث يتم تغذيتها عن طريق خلايا

الوقود الهيدروجيني ولا ينتج عنها سوى الماء النقي بالإضافة إلى طرح في الأسواق التجارية الحالية سيارات تغذى كلياً من خلايا الوقود.

في هذا السياق قامت شركة تويوتا (Toyota) و موتورز (motors General) والتي تشكل حوالي 40 % من مجموع الاستثمارات في مجال السيارات في العالم بدعم أبحاث تطوير خلايا الوقود حتى تكون الاختيار الصديق للبيئة بدلاً من محركات الاحتراق الداخلي. وهناك نوعان من محركات السيارات الهيدروجينية هما:

الأول: يستخدم الهيدروجين كبديل للنفط في محركات الاحتراق الداخلي .

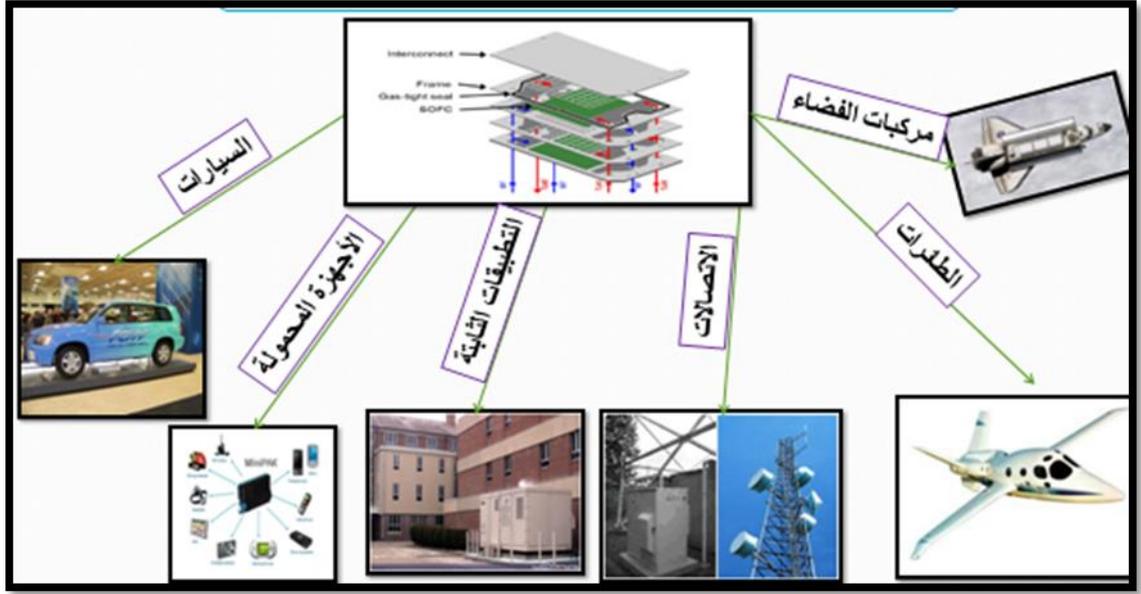
الثاني: يستخدم الهيدروجين في خلية الوقود لإنتاج تيار كهربائي لتشغيل محركات كهربائية .

ومن نتائج البحث أن طرحت شركة (دايمر) سيارات من فئة A-class المزودة بخلايا الوقود، وكذلك قدمت شركة تويوتا بصنع سيارتين صغيرتين تعملان أيضاً بخلايا الوقود بالإضافة إلى إنتاج شركة سيمز (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 تجلّى ذلك بسيارات BMW وسيارات مرسيدس فئة B التي تعمل بالوقود الهيدروجيني.

### • الطائرات :

يتم الاهتمام بتقنية خلايا الوقود التي تغذي الطائرات العسكرية بسبب الضوضاء المنخفض لها و الحجم الصغير وإمكانية استخدامها في الجو. من اكبر الشركات التي تطور هذه التقنية هي شركة بوينغ Boeing.

وشكل (3.1) يلخص أهم مجالات استخدامها :



الشكل (3.1): يمثل مجالات استخدام خلايا الوقود.

## 9-1- الخاتمة:

تعتبر خلايا الوقود عبارة عن نظام كهروكيميائي، تقوم بتحويل الوقود (الهيدروجين، الميثان... الخ) إلى طاقة كهربائية عن طريق تفاعلات كيميائية بسيطة، وتعتبر هذه الخلايا أيضا مصدرا لطاقة وتتميز أنها غير مضرّة للبيئة. وتتملك خلايا الوقود أنواع كثيرة وتصنف حسب المواد المكونة لها، وتعتبر خلايا وقود الأكسيد الصلب من أهم أنواع هذه الخلايا وأكثر تطور فهذا ما سنرى في الفصل التالي.

## الفصل الثاني: خلية الغشاء التبادل البروتوني PEMFC

### Pile à combustible à membrane Échange de protons

### Proton exchange membrane Fuel cells

#### 1.2 مقدمة

في هذا الفصل سنقوم بدراسة نظرية حول خلية الغشاء التبادل البروتوني ومكوناتها ومبدأ عملها وأهم مميزات ومجالات تطبيقاتها.

#### 2.2- لمحة تعريفية لخلية الغشاء التبادل البروتوني PEMFC:

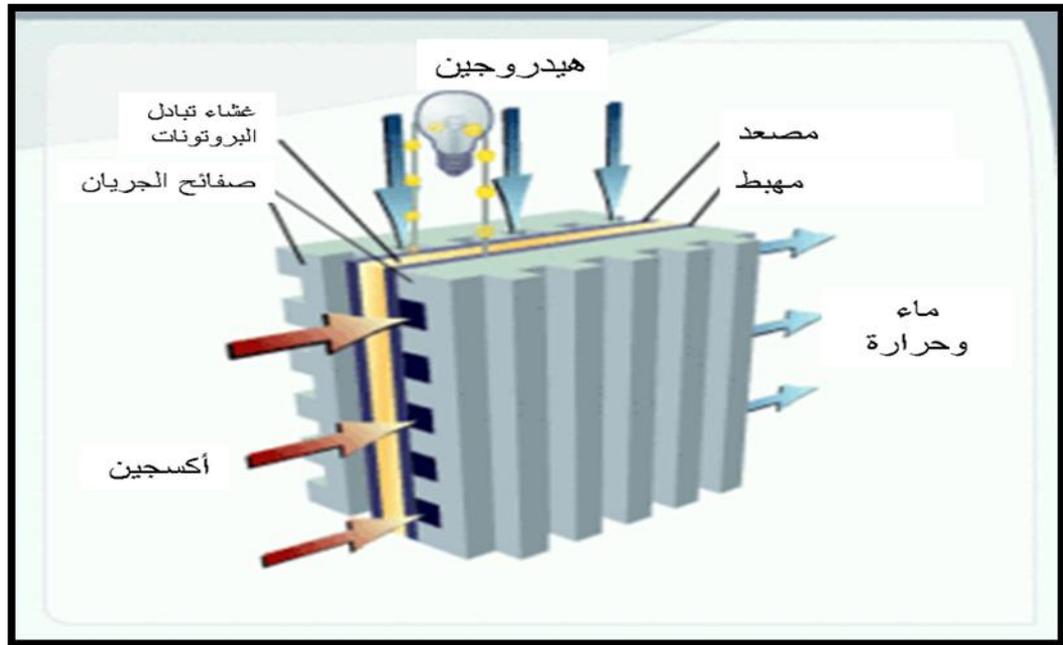
قبل إختراع خلايا وقود PEM كان يوجد عدة أنواع من خلايا الوقود مثل خلايا وقود الأكسيد الصلبة solid-oxide fuel cells والتي كانت تستخدم فقط في الظروف الصعبة وكانت هذه الأنواع من الخلايا تتطلب مواد غالية جداً كما أن إستخدامها إنحصر في الإستخدامات الثابتة بسبب حجمها الكبير حيث كانت خلية وقود PEM الحل لهذه المشاكل، فتم إختراع هذه الخلية في أوائل الستينات على يد ويلارد توماس غروب Willard Thomas Grubb ولي نيدراتش Lee Niedrach من شركة جنرال إلكتريك، في البداية تم استخدام غشاء من البولسترين المكبرت كمحل كهربائي، ولكن تم استبداله لاحقاً في عام 1966م بغشاء نافيون الذي أثبت تفوقه وطول عمره، حيث تم استخدام خلايا وقود PEM في سلسلة مركبات الفضاء جيميني Gemini التابعة لناسا، لكن تم استبدالها لاحقاً بخلايا وقود القلوية في برنامج أبولو وفي مكوك الفضاء.

وهي تعد من أفضل أنواع خلايا الوقود وأصغرها حجماً بالنسبة للطاقة الناتجة منها، هذا النوع من خلايا الوقود هو الأكثر انتشاراً في العالم كما أنه هو المستخدم في مجالات متعددة نظراً إلى صغر حجمه وانخفاض درجة حرارة العمل فيه' يستخدم في هذا النوع غشاء من مادة البوليمير تسمى نافيون ( التي

تؤدي دور الوسيط الكهروكيميائية في الخلية ) وهي مادة ذات شكل صلب 'وهذا يقلل من درجة حرارة التفاعل ويزيد من الكفاءة (سرعة التفاعل في بدء التشغيل والاستجابة عند التحميل)، يوضع غشاء الفصل البوليميري بين قطبين من البلاتين المثقب، وليس هناك أي خطر من نشوء تلوث منه نظرا إلى طبيعته الصلبة ويتم التفاعل فيها تحت درجة حرارة 80 °C، وعند تعرض الغشاء للماء يصبح مادة موصلة للأيونات، تصنع الأقطاب من البلاتين وفي بعض الخلايا تطلى بالذهب مما يسبب ارتفاع سعرها 'يصل المردود فيها من (40 إلى 60)% كثافة الاستطاعة فيها عالية مقارنة بمثيلاتها من الخلايا إذا تصل إلى  $(350 - 600) \frac{mw}{cm^2}$ .

### 3.2- مكونات خلية الوقود :

خلية الوقود بصفة عامة بسيطة في تكوينها تحتوي على خمسة أجزاء رئيسية' ولا تختلف المكونات الأساسية لخلية الوقود عن المكونات الأساسية لأي خلية كهروكيميائية أخرى ومنه تتكون خلية الوقود من الأجزاء الآتية كما يوضحه الشكل (1-2):



الشكل (1-2): يمثل مكونات خلية الوقود.

### 1-3.2- المصعد (Anode):

هو القطب السالب لخلية الوقود ويمكن ان يكون له عدة مهام ,فهو يقود الالكترونات المحررة من جزيئات الهيدروجين ليتم استعمالها في تغذية دائرة كهربائية خارجية ,كما انه يحتوي على مجار وظيفتها تشتيت غاز الهيدروجين على سطح المحفز.

### 2-3.2- المهبط (Cathode):

هو القطب الموجب لخلية الوقود ويحتوي على مجار لتوزيع الاوكسجين على سطح المحفز ,كما انه يقود الالكترونات بالاتجاه الخلفي من الدائرة الكهربائية الخارجية للمحفز,حيث تتوحد جزيئات الاوكسجين وايونات الهيدروجين لتشكيل الماء.

### 3-3.2- الالكتروليت أو الغشاء (Electrolyte):

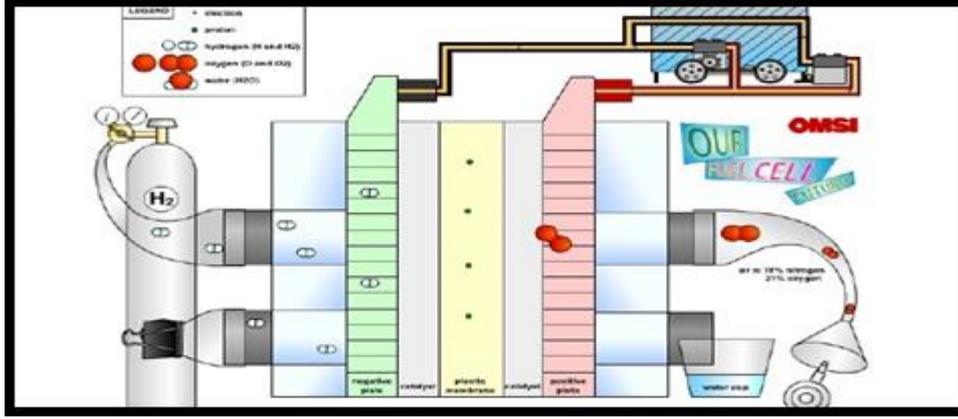
هذه المادة تقود فقط الايونات المشحونة ايجابيا القادمة من الهيدروجين وتمررها من قطب الى قطب اخر وباتجاه واحد وتمنع مرور الالكترونات من خلالها.

### 4-3.2- المحفزات (Catalysts):

وهي مؤلفة من مواد خاصة تستعمل فيها معادن نادرة مثل البلاتين والنيكل وان استخدام هذه المحفزات في النظام يسهل تفاعل الأوكسجين مع الهيدروجين.

### 5-3.2- مجمع التيار ثنائي الأقطاب (Bipolar Plates):

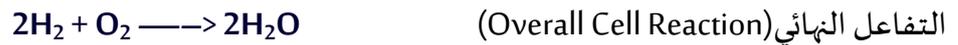
يعمل على تجميع الالكترونات من الأقطاب وتوزيع الوقود عليها, ويصنع من معادن موصلة او مطلية بالذهب ذات متانة ميكانيكية جيدة ويكون على طرفي الخلية .

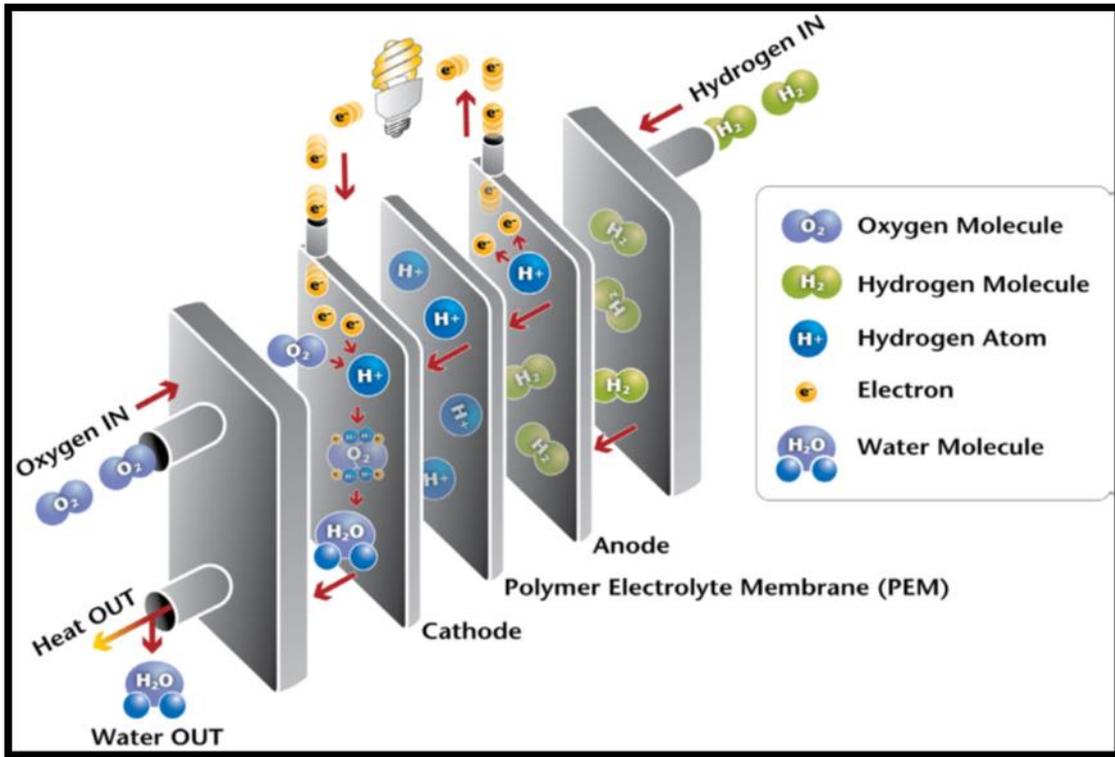


الشكل (2-2): يمثل رسم تخطيطي لخلية الوقود.

#### 4.2- مبدأ عمل الخلية:

يعتمد مبدأ العمل في هذه الخلية على وجود غشاء فاصل أي الالكتروليت والمحفز الذي يصنع عادة من مسحوق البلاتين الذي يكسو ورق الكربون، ويوضع الجانب المطلي بالبلاتين جهة غشاء تبادل البروتونات من البلاتين، لدى دخول الهيدروجين ( $H_2$ ) إلى الخلية يعمل البلاتين على فصله إلى بروتون وإلكترون ويسمح الغشاء الفاصل بمرور البروتونات ولا يسمح بمرور الالكتروليت التي لا تجد وسيلة للعبور إلا من خلال مجمعات التيار، والحصول على تيار كهربائي مستمر (DC)، وفي الناحية المقابلة من الغشاء عند القطب الثاني (المهبط) يتحد الإلكترون مع البروتون بوجود المحفز مرة أخرى ومع وجود الأوكسجين يتكون الماء ( $H_2O$ ) وتنتشر الحرارة وتتم التفاعلات فيها على الشكل الآتي:





الشك

ل(3-2): خلية PEM.

خلايا الوقود الفردية يمكن أن تتجمع لتكون مكبس "stack"، عدد خلايا الوقود في هذا المكبس هو الذي يحدد التوتر الناتج، ومساحة كل خلية هي التي تحدد التيار الكلي الناتج .

جدا التيار بالتوتر الناتج يعطي كمية الطاقة الكهربائية المولدة حسب العلاقة :

$$\text{Power (Watts)} = \text{Voltage (Volts)} \times \text{Current (Amps)}$$

5.2- مزايا وعيوب خلية الوقود :

5.2-1- مزاياها:

تعد خلايا الوقود ذات الغشاء التبادل البروتوني (PEMFC) هي من أفضل أنواع خلايا الوقود للإستخدام كمصدر كهربائي يغذي وسائل النقل الذي قد يستخدم في المستقبل كبديل لمحركات الإحتراق الداخلي internal combustion engines التي تستخدم الديزل أو الغازولين كوقود يتم حاليا تطوير خلايا وقود غشاء التبادل البروتوني وتعمل في أنظمة بإستطاعة من 1W إلى 2 kW.

ونذكر أيضا:

- الإلكتروليت الصلب يجنبنا مشكلات التسرب والتآكل وإعادة التزويد المرتبطة بالإلكتروليت السائل .
- حرارة عملها المنخفضة تسمح بعملية إقلاع في البرد تكون سريعة.
- عمرها العملي طويل نسبيا بفضل الإلكتروليت الصلب .
- الإستطاعة الكتلية عالية الكثافة إذا ما قارناها بالأنواع الأخرى أي تولد طاقة أكبر من وزن و حجم الخلية معطى خاصية الكثافة الكهربائية العالية هذه تجعلها خلايا وقود ذات مصداقية عالية ووزن خفيف يمكن أن تصل إلى KW1/Kg.
- الإلكتروليت الصلب مقارنة بالإلكتروليت السائل يكون فيه بناء الخلايا أسهل من حيث وصل القطبين الموجب والسالب بالإلكتروليت لذا فإن تكلفة تصنيعه أقل.
- تنتج ماء مقطر صالح للشرب.
- لا تحتاج فيه إلى إعادة شحن.

## 2-5.2- عيوبها:

تعتبر المشكلة الأساسية في هذا النوع والتي عاقت دون دخوله في مجال السيارات لفترة طويلة هي أنه نحتاج إلى الأكسجين و هيدروجين لتوليد الطاقة منه، بالنسبة للأكسجين فمن السهل الحصول عليه من الهواء الجوي ومتوفر ولكن المشكلة الحقيقية تكمن في الهيدروجين حيث أنه لا يتواجد إلا في طبقات الهواء العليا واستخلائه نوعا ما يكون صعبا ففي هذه الحالة يجب إستعمال جهاز لتشكيل الهيدروجين من الميثانول و الإيثانول أو الغاز الطبيعي والمسال إضافة إلى ذلك ستنبعث الغازات المسببة للإحتباس الحراري (CO<sub>2</sub>) ولو بصورة أقل من إستعمال البنزين ولذلك ظل العلماء يبحثون عن وسيلة أخرى لتوليد الطاقة غير الهيدروجين نذكر أيضا:

- المجال الضيق لحرارة التشغيل يجعل من عملية التحكم الحراري صعبة عند الكثافات العالية للإستطاعة.

- تحتاج إلى آلية تحكم دقيقة بكمية الماء، حيث يلزم تحقيق ترطيب كاف للكهرليت البروتوني دون أن يتسرب كمية كبيرة من الماء.
- وقودها يقتصر على الهيدروجين، لذا فإنها تحتاج إلى معالج خارجي للوقود (external reformer) في حال الوحدات الكبيرة، أما الوحدات الصغيرة فتتغذى من عبوات الهيدروجين الجاهزة.
- تحتاج لمواد حافزة عالية الثمن كالبلاتين.
- تتأثر بشكل كبير بأحادي أكسيد الكربون CO الذي يؤدي إلى خفض مستوى أدائها وهذا يتطلب أن تتم عملية معالجة الوقود بشكل كامل خارج الخلية.

## 6.2 الخاتمة:

خلايا الوقود ذات الغشاء التبادل البروتوني (PEMFC) هي من أفضل أنواع خلايا الوقود للإستخدام كمصدر كهربائي يغذي وسائل النقل الذي قد يستخدم في المستقبل كبديل لمحركات الإحتراق الداخلي internal combustion engines التي تستخدم الديزل أو الغازولين كوقود يتم حاليا تطوير خلايا وقود غشاء التبادل البروتوني وتعمل في أنظمة بإستطاعة من W1 إلى kW2. وتستعمل هذه الخلايا في التطبيقات المتعددة (الاتصالات,الموصلات, الأجهزة المحمولة, الفضاء).

## الفصل الثالث: خلايا وقود الأكسيد الصلب (SOFC)

## Piles à combustible à oxyde solide

## Solid Oxide Fuel Cells

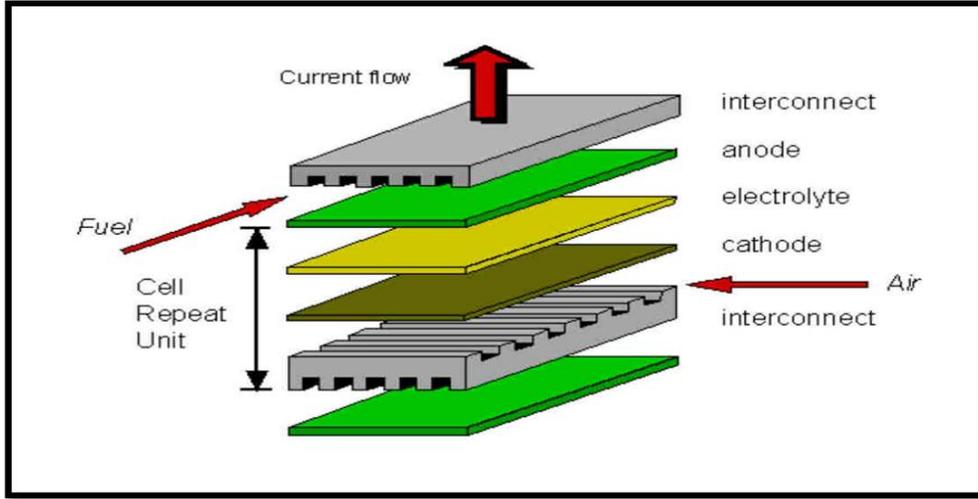
## 1-3- مقدمة

تعتبر خلية وقود الأكسيد الصلب (Solid Oxide Fuel Cells) ويختصر لها ب (SOFC) حاليا هي خلية الوقود التي أخذت مجالا كبيرا لتطورها، وتستخدم أنواع وقود مختلفة، وقد طورت خلايا الوقود هذه في نهاية الخمسينيات القرن الماضي.

تتألف خلية وقود الأكسيد الصلب من أربع طبقات، يكون ثلاث منها من مواد السيراميكية، حيث لا يتعدى سمك الخلية الواحدة المؤلفة من الطبقات الأربعة بضعة مليمترات. يتم ربط المئات من الخلايا على التسلسل لتشكيل ما يطلق عليه مجموعة خلايا وقود الأكسيد الصلب (SOFC stack). ولا يتم تنشيط السيراميك المستخدم في تصنيع أيونيا أو كهربائيا حتى تصل درجة حرارة مرتفعة جدا، يحصل إرجاع جزيئات الأكسجين إلى ايونات الأكسجين عند المهبط، ثم تنحل هذه الايونات في الإلكتروليت الأكسيد الصلب لتتنقل إلى المصعد حيث تؤكسد الوقود. في هذه العملية يحرر الماء بالإضافة إلى الكترولونات تسري في الدارة الخارجية للخلية حيث تقوم بعملها. تعيد الكرة نفسها عند دخول الالكترولونات إلى المهبط مرة أخرى. وهذه الطبقات هي مهبط، المصعد، طبقة الوصل، الإلكتروليت.

## 2-3- طبقات خلايا الوقود الأكسيد الصلب (SOFC) مع مبدئها :

تتكون خلية وقود الأكسيد الصلب من ثلاث طبقات رئيسية موضحة في الشكل (1.3):



الشكل (1.3): مخطط يوضح الطبقات المكونة لخلية الوقود الأكسيد الصلب.

#### ❖ الإلكتروليت:

يكون الإلكتروليت علي شكل طبقة كثيفة من السيراميك الصلب القوي غير المسامي الناقل لايونات الأكسجين. يجب الحفاظ علي ناقليتها الكهربائية أكبر ما يمكن لتجنب الضعف في التيار. تسمح حرارة التشغيل العالية للخلية بحركة الأكسجين بشكل جيد من أجل رفع الكفاءة، إلا انه مع انخفاض درجة الحرارة التشغيل واقترابها من الحد الأدنى (500 درجة مئوية) يبدأ الإلكتروليت بإبداء ممانعة لممرور أيونات الأكسجين مما يؤثر على الكفاءة. من أشهر الإلكتروليتات المستخدمة هو الزركونيوم المطعم بأكسيد اليتريوم ( $ZrO_2+Y_2O_3$ ).

#### ❖ المهبط:

يكون المهبط أو قطب الهواء عبارة عن طبقة رقيقة متوضعة على الإلكتروليت حيث يحدث تفاعل إرجاع للأكسجين. يشترط في مواد المهبط أن تكون على الأقل ناقلة للكهرباء. حيث نستخدم مادة (lanthanum strontium manganite).  $(La_{1-x}Sr_x MnO_{3,\delta})$  بشكل شائع تجاريا لتصنيع الخلايا.

#### ❖ المصدر:

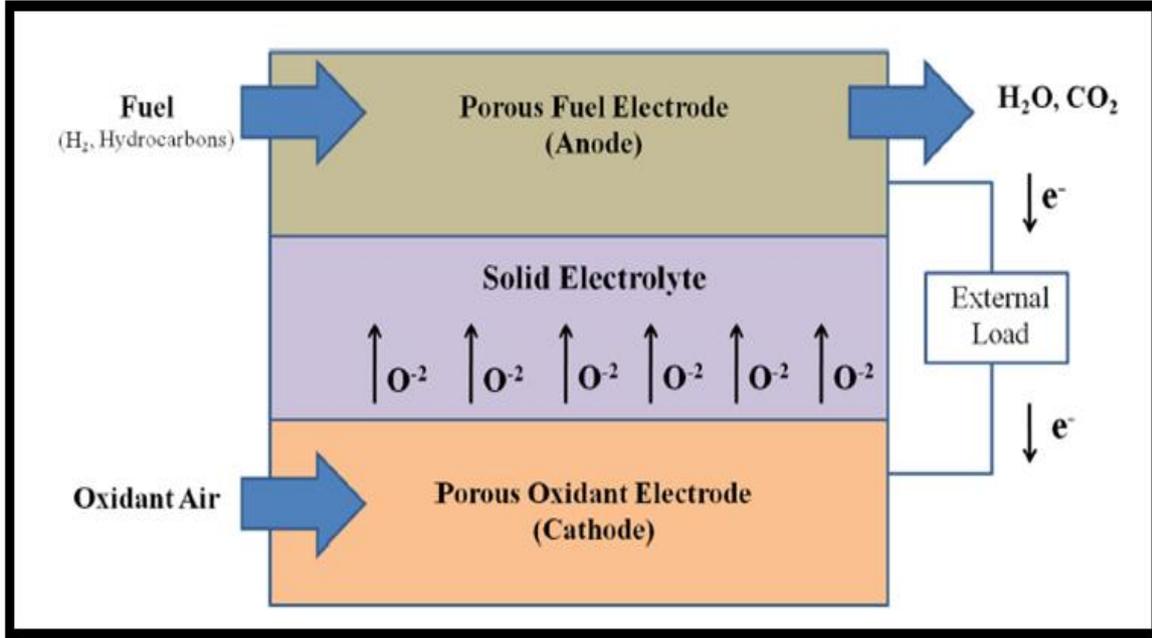
يجب أن تكون طبقة المصعد السيراميكية تحوى الكثير من المسام لكي تسمح للوقود بالجريان نحو الإلكتروليت. وبشكل مشابه للمهبط، يجب علي المصعد أن ينقل الإلكتروليت مع وجود ناقلية للأيونات.

أكثر المواد المستخدمة شيوعا هي مادة السيرميت (cermet) التي تصنع من النيكل الذي يخلط مع المادة السيراميكية التي تستخدم في الإلكتروليت الخلية. يكون المصعد هو الطبقة الأسخن و الأقوى في الخلية، لأنه القطب الذي يحصل فيه أقل فقد كما أنه الطبقة التي تزود الدعم الهيكلي للخلية. وبشكل كهروكيميائي فإن وظيفة المصعد هي إستخدام أيونات الأكسجين التي تنحل في الإلكتروليت لأكسدة الهيدروجين الوقود، حيث إن التفاعل الأكسدة بين أيونات الأكسجين و الهيدروجين ينتج الماء و الكهرباء.

### ❖ طبقة الوصل:

من الممكن أن تكون طبقات الوصل معدنية أو سيرميكية وتكون بين الخلايا، حيث مهمتها هي وصل الخلايا علي التسلسل بحيث يتم تكامل الكهرباء المولد في كل خلية لتوليد التيار الكلي. بسبب أن الطبقة الوصل تكون معرضة لكلا تفاعلي الأكسدة و الإرجاع على طرفيها فيجب أن تكون خاملة كيميائيا لدرجة كبيرة. ولهذا يفضل استخدام السيراميك بشكل كبير في هذا المجال علي المعادن. نظرا لدرجة حرارة التشغيل المرتفعة للخلية، فإنه لا حاجة لاستخدام محفز غالي كما في حال خلايا وقود تبادل البروتونات (التي تستخدم البلاتين) ومعظم الأنواع الأخرى من خلايا الوقود العاملة عند درجة حرارة منخفضة وبسبب درجة الحرارة المرتفعة هذه فان الوقود سوف يتحول داخليا عند المهبط على خلاف ما يحدث في خلايا وقود غشاء تبادل البروتونات

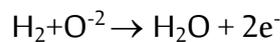
حيث يحدث تسمم المحفز بأحادي أكسيد الكربون هذا يسمح لخلايا الأكسيد الصلب بالعمل على طيف أوسع من أنواع الوقود مثل الميثان و البروبان و البوتان و الغاز الطبيعي غازات التخمر و غازات الكتلة الحيوية.



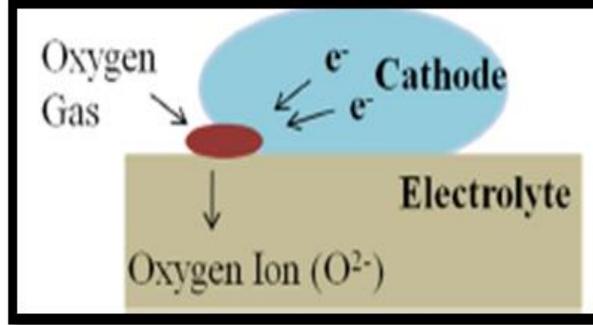
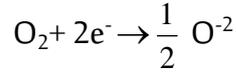
الشكل (2.3): مخطط يوضح مبدأ خلية وقود الأكسيد الصلب.

بما أن الإلكتروليت في هذا النوع صلب فهو لا يسمح بمرور الغاز من قطب كهربائي إلى الآخر لذا فإن المادة تحتوي على مسامات فيها لتسمح بمرور الايونات. إن حاملات الشحنة في خلايا وقود الأكسيد الصلب هي أيونات الأكسجين (O<sup>2-</sup>) كما هو موضح في الشكل (2.3) حيث تعبر الإلكتروليت وتتحد مع الهيدروجين في المصعد وتحرر الإلكترونات ثم تسري هذه الإلكترونات بدارة الكهربائية الخارجية فنحصل على تيار كهربائي وحرارة. والتفاعلات الممكنة في المصعد و المهبط.

- عند المصعد:



- عند المهبط:



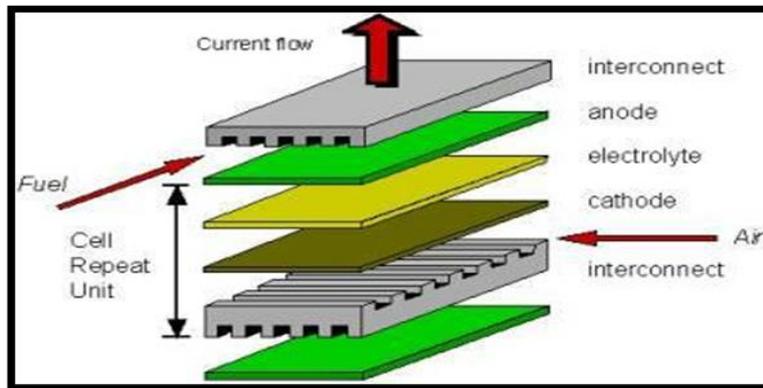
الشكل (3.3): يوضح مرحلة تأين ثنائي الأكسجين ( $O_2$ )

### 3-3- درجة الحرارة الوظيفية :

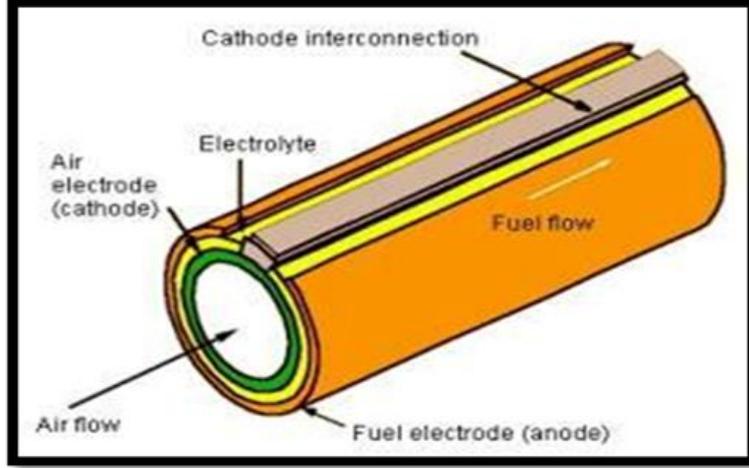
إن درجة الحرارة الوظيفية تتراوح بين 500 - 1000 درجة مئوية حيث يملك السيراميك ناقلية أيونية جيدة. إن مؤسسة الفضاء الأمريكية مع التعاون مع مركز تكسس للمواد المتقدمة والفائقة التوصيل (TCSAM) للعمل علي تطوير هذه الخلية لتشغيلها بنصف درجات الحرارة (أي محاولة العمل بحدود 500) وبنفس الكفاءة

### 4-3- أشكال خلايا وقود الأكسيد الصلب (SOFC):

هناك نوعين من خلايا وقود الأكسيد الصلب شكل أنبوبي و شكل مستوي كما في الشكل التالي:



الشكل (4.3): الشكل المستوي لخلايا وقود الأكسيد الصلب.



الشكل (5.3): الشكل الأنبوبي لخلايا الأكسيد الصلب.

وعلى خلاف الكثير من الخلايا الوقود فإن خلية الأكسيد الصلب قد تأخذ أشكال مختلفة. من أشهر الأشكال هي الشكل المستوي حيث تأخذ الخلية شكل الشطيرة كما في الشكل (4.3)، حيث يحشر الإلكتروليت بين أقطاب الخلية. من الممكن أن تأخذ الخلية أيضا شكلا أنبوبيا (اسطوانيا) كما موضح في الشكل (5.3).

حيث يمر الهواء أو الوقود داخل الأنبوب ويمر الغاز الأخر على السطح الخارجي للأنبوب. للتصميم الأنبوبي ميزة سهولة إحكام فصل الهواء عن الوقود (الهيدروجين مثلا) كما في الشكل. أما الكفاءة فإن التصميم المستوي يكون أعلى كفاءة من التصميم الأنبوبي بسبب انخفاض الممانعة النسبية للتصميم الأول. والجدول التالي يمثل مقارنة بين الشكل الأنبوبي والشكل المستوي:

الجدول (1.3): يمثل مقارنة بين الشكل الأنبوبي والشكل المستوي لخلايا وقود الأكسيد الصلب.

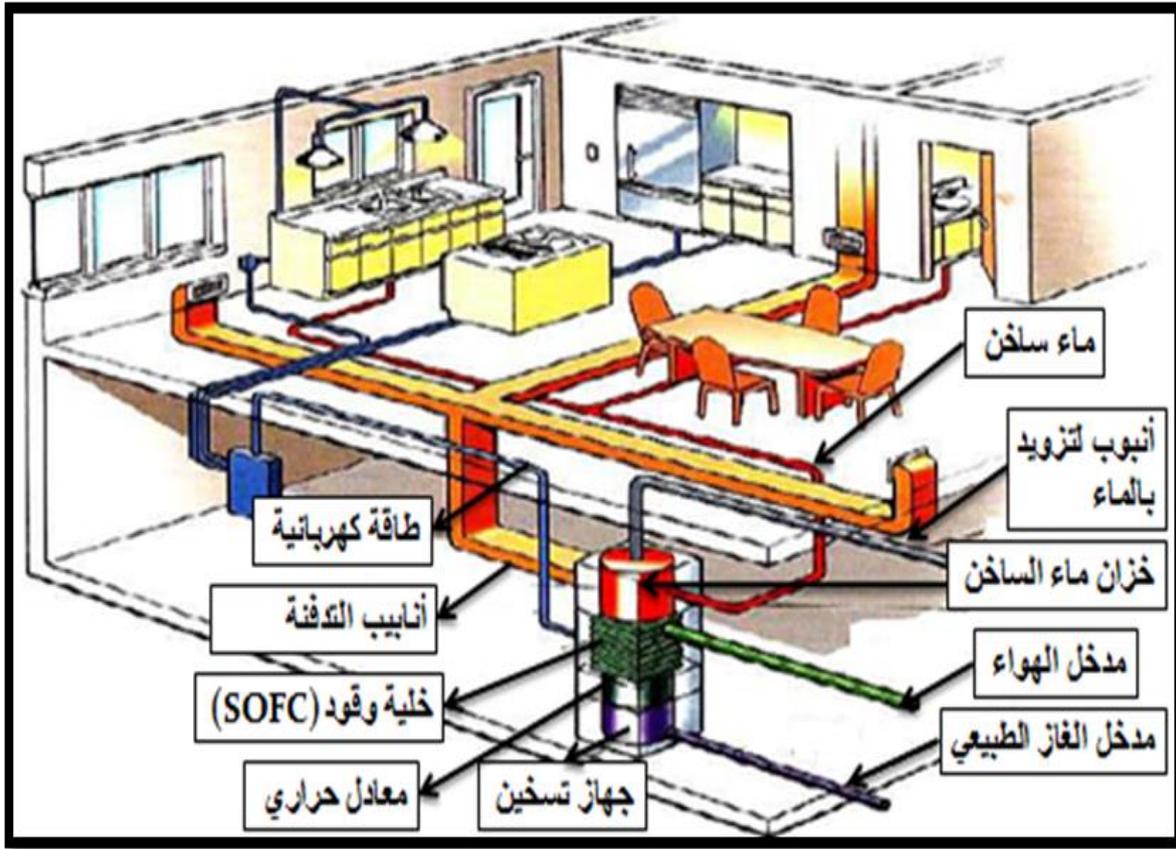
النوع	الشكل المستوي	الشكل الأنبوبي

قوة الصلابة في كل وحدة	عالية	ضعيفة
سهولة الصنع	سهلة	صعبة
التكلفة	عالية	منخفضة
طول مدة الإستقرار	متوسطة	طويلة
الكفاءة	عالية	منخفضة

### 3-5- التطبيقات الأساسية ومجال الاستطاعة :

تتنوع التطبيقات خلايا الوقود الأكسيد الصلب بدءاً من استخدامها كوحدة تزويد مساعد للطاقة في السيارات إلى محطات توليد الطاقة الثابتة التي تتراوح إنتاجها 1000W إلى 10 MW. تعمل هذه الخلايا على درجة حرارة عالية، مقارنة مع خلايا الوقود الأخرى، ويعتبر مردود خلية الوقود الأكسيد الصلب هو أفضل مردود وتكون الكفاءة لخلية واحدة حوالي 60%. إلا أن الغازات الناتجة من الممكن استخدامها ليتم حرقها مرة أخرى و تشغيل عنفة غازية من أجل تحسين الكفاءة الكهربائية، مما يرفع الكفاءة إلى قيم قد تصل إلى 85% في مثل هذه الأنظمة الهجينة التي يطلق عليها اسم جهاز الطاقة والحرارة المدمجة في هذه الأنواع من الخلايا، تمتزج ايونات الأكسجين عادة ضمن مادة الأكسيد الإلكتروني عند درجة حرارة مرتفعة للتفاعل مع الهيدروجين على طرف المصعد. بالإضافة إلى أن درجة حرارة التشغيل عالية تسمح باستخدام هذه الخلايا كنظام مشترك حيث يمكن أن تولد بخار ذو درجة حرارة مرتفعة وضغط عالي يمكن أن يستخدم في العديد من التطبيقات.

والشكل (3.6) يمثل كيفية استخدام خلايا وقود الأكسيد الصلب في المنازل.



الشكل (6.3): يوضح استخدام خلايا (SOFC) في المنازل.

### 6-3- الإيجابيات والسلبيات :

من محاسن هذا النوع من الخلايا الوقود هو كفاءتها العالية، واستقرارها لفترة طويلة، استقرار الوقود، قلة الإنبعاث و انخفاض الكلفة. كما أن درجة الحرارة العالية لخلايا الوقود ذات الأكسيد الصلب لها مزاياها وسيئاتها فالحرارة العالية تسمح لخلايا الوقود بتحمل الوقود الملوث نسبيا (غير نقي). ومن اكبر مساوئها هو درجة الحرارة التشغيل المرتفعة والتي تؤدي إلي طول (بطء) فترة الإقلاع، حيث يتطلب التمدد الحراري تسخيننا بطيئا في البداية (عادة يتوقع لفترة 8 ساعات أو أكثر). و تملك التصاميم الميكروية الأنبوبية الحديثة سرعات تسخين ابتدائية اكبر، من الممكن أن تصل إلي مرتبة الدقائق. و يكون أيضا رد فعل الخلية لتغيرات الطلب علي الكهرباء بطيء جدا، ويجب عزلها جيدا لحماية المحيطين بها. كما أنها سريعة التآكل لذا يجب استعمال معادن خاصة مقاومة لدرجة الحرارة المرتفعة.

### 7-3- مقارنة بين أنواع خلايا الوقود :

تختلف أنواع خلايا الوقود من حيث درجة الحرارة التشغيل وكذا نوع الإلكتروليت المستخدم من ما أدى

إلى أن هناك تباين في الكفاءة و الاستطاعة المنتجة, والجدول التالي يمثل مقارنة بين هذه الأنواع:

الجدول (2.3): يمثل مقارنة بين أنواع خلايا الوقود.

التطبيقات	الكفاءة (%)	الإستطاعة (kw)	درجة حرارة التشغيل (°c)	نوع الخلية الوقود
الهاتف النقال. لتوليد استطاعة ضعيفة....	40%–55%	0.01–250	60–110	PEM (Polymer Electrolyte Membrane)
الفضاء. الأدوات المحمولة. العسكري.	50%–70%	0.1–50	70–130	AFC (Alkaline Fuel Cell)
لتوليد مشترك للحرارة و الإستطاعة CHP	40%–45%	50–1000	175–210	PAFC (Phosphoric Acid Fuel Cell)
لتوليد مستوى كبير من الإستطاعة	50%–60%	200–100,000	550–650	MCFC (Molten Carbonate Fuel Cell)
المركبات الفضائية. الإعلام الآلي. السيارات...	40%–72%	0.5–2000	500–1000	SOFC (Solid Oxide Fuel Cell)
الهاتف النقال. الأدوات المحمولة....	40%	0.001–100	70–130	DMFC (Direct Methanol Fuel Cell)

### 8-3- الخاتمة:

تتكون الخلايا (SOFC) من ثلاث طبقات رئيسة (الأنود, الكاثود و الإلكتروليت), حيث يكون الإلكتروليت مصنوع من مادة السيراميك الصلب الذي يسمح بمرور ايونات الأكسجين فقط, وتبين أنها الأفضل من بين الأنواع الخلايا الوقود الأخرى بنظر إلى كفاءتها ومدة حياتها فضلا على أنها تستخدم أنواع وقود مختلفة. وتستعمل هذه الخلايا في التطبيقات المتعددة (الاتصالات, الموصلات, الأجهزة المحمولة, الفضاء).

# الجزء الثاني: انتاج الهيدروجين

## الفصل الرابع: خصائص الهيدروجين

### 1.4 مقدمة

في الوقت الذي بدأ فيه ظهور تغيرات كثيرة في المناخ، بدأت موارد النفط تنفذ، فإن العالم يشهد ولادة مصدر آخر للطاقة سيكون له القدرة على إعادة صياغة شكل الحضارة الإنسانية على وجه الأرض، وهي حضارة الهيدروجين، هذا العنصر الذي يمثل أحد المكونات الأساسية للمادة، أجل، سيكون الهيدروجين هو الوقود الأبدي الذي لا ينفذ مع العصور، كما إنه العنصر الوحيد الذي لا ينتج عند احتراقه أي انبعاثات ضارة للبيئة، ولكن الانبعاثات الناتجة عنه هي كل ما نسعى إليه كالكهرباء، الحرارة أو الماء النقي.

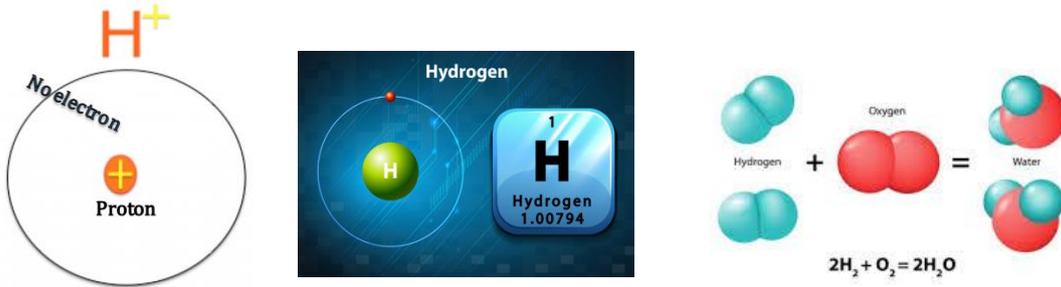
### 2.4 تعريف الهيدروجين واكتشافه:

الهيدروجين، هو ناقل نشط وليس مصدراً للطاقة لأنه لا يوجد عملياً في الحالة الطبيعية. حيث يتم العثور عليه بشكل أساسي مع الأكسجين (في الماء) أو مع سلاسل الكربون الطويلة (في الهيدروكربونات). ولذلك فمن الضروري أولاً أن تنفق الطاقة لإنتاج الهيدروجين من الماء أو الهيدروكربونات قبل استعادة الطاقة من خلال احتراقها في خلية وقود أو في محرك على سبيل المثال. الفائدة الكبيرة من ناقل الطاقة هذا هو أنه يمكن تخزينه بسهولة أكبر من الكهرباء.

يعود اكتشاف الهيدروجين في العالم إلى هنري كافنديش في عام 1766، وفي عام 1783، أعطى العالم أنطوان لافوازييه العنصر المكتشف باسم الهيدروجين.

يتميز الهيدروجين بموضع معين في الجدول الدوري، فهو أخف عنصر ولديه أبسط التركيب الإلكتروني، وجزيئه يتكون من بروتون واحد وإلكترون واحد يتحرك في المدار في الحالة الطبيعية. كما أن الهيدروجين هو مركب جزيئي في الحالة الغازية في الظروف العادية للضغط ودرجة الحرارة. تحتوي الجزيئات على

ذرتين هيدروجين، وصيغتها الكيميائية هي H<sub>2</sub>. وهي موجودة كأثار في الهواء. إنه غاز خفيف لا تستطيع جاذبية الأرض حمله.



### الوفرة في الطبيعة

- في الكون:

يعدّ الهيدروجين بالشكل الذري H أكثر العناصر الكيميائية وفرة في الكون حيث يشكّل 75% من الكتلة بالنسبة لباقي العناصر، وفي نفس الوقت أكثر من 90% بالنسبة لعدد ذرات العناصر في الكون.

- على الأرض:

ضمن الشروط الطبيعية على الكرة الأرضية فإنّ عنصر الهيدروجين يوجد بالشكل الحرّ على نمط غاز ثنائي الذرة H<sub>2</sub> ولكن بشكل نادر جداً، حيث يشكّل جزء واحد من المليون بالنسبة للحجم في الغلاف الجوي. ينتج غاز الهيدروجين طبيعياً من بعض البكتريا والطحالب. بالمقابل، فإنّ عنصر الهيدروجين يوجد بوفرة كبيرة على سطح الأرض وذلك عندما يرتبط على شكل مركبات كيميائية مثل الهيدروكربونات والماء، حيث يعدّ بذلك ثالث أكثر العناصر وفرةً على سطح الأرض وذلك بعد الاكسجين والسيليكون.

### 3.4 مميزات الهيدروجين:

للهدروجين صفات فيزيائية وكيميائية استثنائية وفريدة في حد ذاتها ويرجع ذلك إلى الترتيب الإلكتروني لحالته المستقرة أولاً وكونه أخف العناصر المعروفة ثانياً. وحسب مفهوم لويس يمكن الحصول من تركيب

الحالة المستقرة ( $1S^1$ ) على ترتيبات الكترونية مستقرة أخرى أما عن طريق المشاركة أو اكتساب إلكترون آخر. وبالإضافة إلى ذلك فإن البروتون  $H^+$  المشتق من إزالة إلكترون ذرة الهيدروجين التكافؤي هو مثال آخر للعينات المدروسة جيداً.

أن أبسط الاعتبارات التكافؤية تدل على إمكانية ذرة الهيدروجين على تكون مركبات تحتوي على رابطة تساهمية أحادية ومركبات أخرى تحتوي على الهيدروجين بصورته الأيونية ومن هنا يتعامل الهيدروجين بصورة مستقلة وفضل تصنيفه في مكان مستقل في الجدول الدوري.

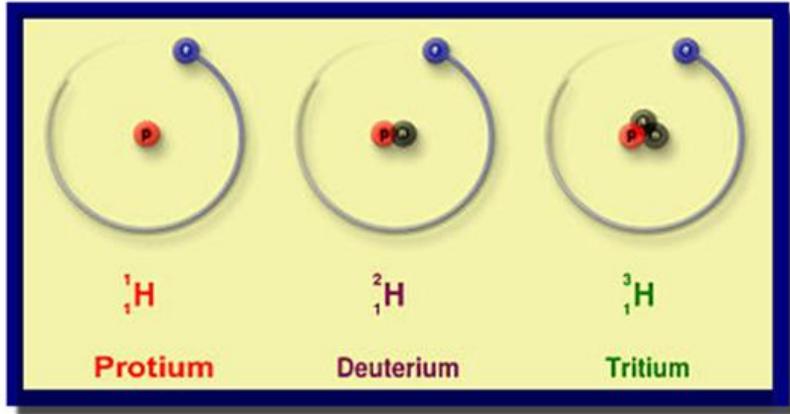
### أولاً: الخواص الفيزيائية للهيدروجين

الهيدروجين: غاز قليل الكثافة، عديم اللون والطعم والرائحة، لا يساعد على التنفس أو الاحتراق ولكن يشتعل في الهواء بلهب أزرق غير مضيء مكوناً الماء، وهو عديم الذوبان فيه. وأهم صفاته هي:

- الهيدروجين أخفّ العناصر الكيميائية على الإطلاق وأقلّها كثافةً حيث يتكوّن من بروتون وإلكترون واحد.
- في درجة الحرارة والضغط القياسيين يكون الهيدروجين على شكل غاز ثنائي الذرة.
- يعدّ غاز الهيدروجين  $H_2$  أخفّ من الهواء بحوالي 14 مرة.
- درجة غليان مقدارها 21.15 كلفن (-252 °م).
- درجة انصهار 14.02 كلفن (-259 °م).
- تبلغ انحلالية (ذوبانية) الهيدروجين في الماء حوالي 1.6 مغ/ل.
- يتميز الهيدروجين عن باقي الغازات أنّ له أكبر قدرة على الانتشار.
- يتميز الهيدروجين أنّ له أعلى ناقلية حرارية وأنّ له أكبر قدرة على التدفق، كما أنّ له لزوجة منخفضة نسبياً.

### نظائر الهيدروجين Hydrogène Isotopes

يوجد للهيدروجين خمسة نظائر وتعد النظائر الثلاثة الأولى بالنسبة للكيميائيين أهم النظائر الخمسة.  
\* لنظير التريتيوم  $^3_1\text{H}$  نشاط إشعاعي تبلغ فترة عمر النصف ( $t_{1/2}$ ) 12.4 سنة والديوتريوم  $^2_1\text{H}$  والهيدروجين ويسى البروتنيوم  $^1_1\text{H}$ .



\* بينما النظيرين  $^4_1\text{H}$ ،  $^5_1\text{H}$  فإنهما نظائر مصنعة (أي مخلقة) اكتشفت حديثاً , فترة عمر النصف لهما قصيرة جداً.

نظائر الهيدروجين			
النظير	اسم النظير	الكتلة	النسبة المئوية لانتشار الطبيعي
$^1_1\text{H}$	الهيدروجين الاعتيادي أو الخفيف	1.008	99.98
$^2_1\text{H}$	الديوتريوم أو الهيدروجين الثقيل	2.015	0.02
$^3_1\text{H}$	التريتيوم	3.017	$10^{-17}$
$^4_1\text{H}$	-	-	-
$^5_1\text{H}$	-	-	-

### ثانياً: الخواص الكيميائية للهيدروجين

إنّ غاز الهيدروجين سريع الاشتعال ويحترق في الهواء ضمن مجال كبير من التركيز يتراوح بين 4% و 75% تركيز حرجي.

- إنّ المحتوى الحراري القياسي للاحتراق بالنسبة لغاز الهيدروجين يبلغ -286 كيلوجول/مول.

- يمكن أن يتشكّل مزيج انفجاري مع الهواء بتركيز منخفضة من الهيدروجين وذلك بوجود مصدر حراري أو نتيجة تماس كهربائي.
- إن درجة حرارة الاشتعال الذاتي للهيدروجين تبلغ 500°م.
- يصدر الهيدروجين بتفاعله مع كمّيات كبيرة من الأكسجين عند الاحتراق لهباً لا يرى بالعين المجردة، لأنّ له إصدار في منطقة الأشعة فوق البنفسجية.
- في الشروط العادية يحترق الهيدروجين بلهب أزرق يشبه لهب احتراق الغاز الطبيعي.

#### 4.4. الخاتمة

نتيجة الاضمحلال التدريجي لمصادر الطاقة المعتمدة على الوقود الأحفوري ظهرت اقتراحات بالانجاء نحو مصادر طاقة بديلة تعتمد على الهيدروجين، فظهرت دراسات حول التوجّه نحو اقتصاد الهيدروجين من أجل استخدام الهيدروجين كحامل مستقبلي للطاقة . مع العلم أن تكاليف هذا التوجّه بنية تحتية هيدروجينية مرتفعة جداً. تجدر الإشارة إلى أنّ الهيدروجين نفسه لا يعدّ عملياً ضمن ضوء التطبيقات الحالية مصدراً للطاقة، إنّما هو عبارة عن حامل للطاقة , وذلك أنّ اعتباره مصدر للطاقة يكون في مفاعلات الاندماج النووي، والتي لا تطبّق عملياً في شكل واسع.

## الفصل الخامس: طرق إنتاج الهيدروجين

## 1.5 إنتاج الهيدروجين بالتحليل الكهربائي للماء:

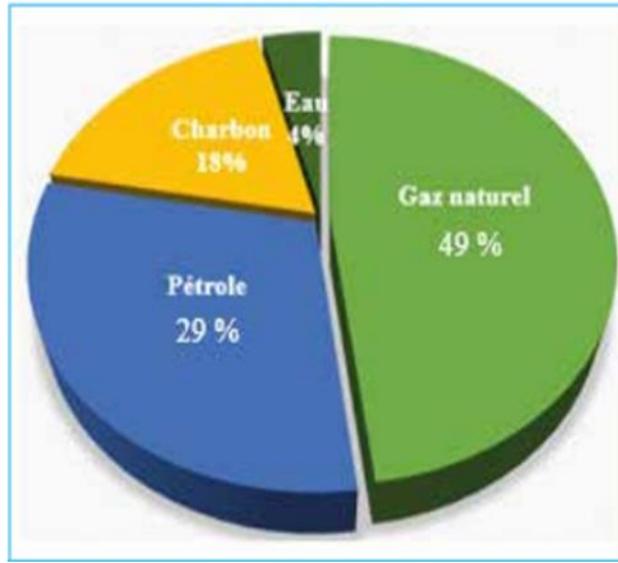
## المقدمة:

يواجه قطاع الطاقة الآن تحديًا مزدوجًا، وهو تسارع ظاهرة الاحتباس الحراري، والتي تساهم فيها انبعاثات غازات الاحتباس الحراري (GHG) من قبل قطاع الطاقة والنقل بشكل كبير، وزيادة في من الطلب على الطاقة. من أجل تلبية هذا الطلب، سيكون من الضروري زيادة الإنتاج بشكل كبير مع ضمان الإنتاج بدون انبعاثات غازات الدفيئة. تعزز القيود البيئية أيضًا فكرة تطوير طرق إنتاج جديدة تعتمد على موارد متجددة غير ملوثة (طاقة الرياح، الطاقة الشمسية، إلخ). نظرًا للطبيعة الموزعة لهذه الرواسب، فمن المشروع تخيل إنتاج يعتمد على تخزين الطاقة. في الواقع، يعد استخدام الهيدروجين كناقل للطاقة أحد الحلول المتصورة لمستقبل الطاقة. بالنسبة للاستخدامات الصناعية، بدأ الهيدروجين حياة جديدة في قطاع الطاقة، فهو يجد بالفعل أغراضًا مختلفة، سواء كناقل لتخزين أو ترقية الطاقة المتجددة، أو كمكمل للغاز الطبيعي، حتى كوقود، وكذلك لمجموعة متنوعة من التطبيقات المتعلقة بخلية الوقود في الحقول الثابتة أو المتنقلة.

## إنتاج الهيدروجين:

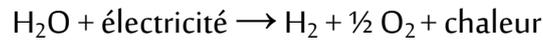
يبلغ إنتاج الهيدروجين العالمي حوالي 55 مليون طن سنويًا، ويتم إنتاجه عادةً من أنواع مختلفة من الوقود الأحفوري، مثل الغاز الطبيعي (49٪)، البترول (29٪)، الفحم (18٪)، و 4٪ فقط من إنتاج الهيدروجين يأتي من تحلل الماء عن طريق التحليل الكهربائي. يأتي كل الهيدروجين المنتج اليوم تقريبًا من تحلل الهيدروكربونات، في المقام الأول من خلال إعادة تشكيل أبخرة الغاز الطبيعي، والأكسدة الجزئية للهيدروكربونات، وتغويز الفحم. ومع ذلك، فإن هذه العمليات لن تساعد في تقليل اعتمادنا على الوقود

الأحفوري، ولكنها أيضاً تعزز إطلاق غازات الدفيئة (غازات الدفيئة) في الغلاف الجوي. في مواجهة العمليات الأحفورية، من المحتمل أيضاً أن يوفر تحلل الماء كميات كبيرة من الهيدروجين عن طريق تقليل انبعاثات غازات الدفيئة (غازات الاحتباس الحراري). هذه التقنية، التي تعد أحد الأهداف التي حددها قسم الطاقة الهيدروجينية المتجددة في CDER، مطلوب استخدامها أكثر فأكثر في سياق التنمية المستدامة.



### التحليل الكهربائي للماء:

تم إجراء التحليل الكهربائي للماء لأول مرة في القرن التاسع عشر بواسطة نيكلسون وكارلايل، وتتطلب هذه التقنية الكهرباء لفصل جزيء الماء إلى هيدروجين وأكسجين:



لها متغيرات مختلفة بدرجات حرارة مختلفة وهي:

• درجة حرارة منخفضة (>200 درجة مئوية) التحليل الكهربائي للمياه القلوية باستخدام محلول مائي من حامض الكبريتيك ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) أو هيدروكسيد البوتاسيوم (KOH).

• التحليل الكهربائي للماء عند درجة حرارة منخفضة (أقل من 200 درجة مئوية) باستخدام إلكتروليات

صلب: غشاء بوليمر يوصل بروتونات. PEM.

• التحليل الكهربائي للماء عند درجة حرارة عالية (> 400 درجة مئوية) باستخدام غشاء سيراميك موصل

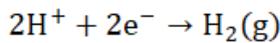
بأكسيد أو أيونات بروتون، والتي يجب أن تقترن بنظام شمسي مركّز، أو بمفاعل نووي عالي الحرارة للاستفادة من مصدر بخار منخفض التكلفة.

**التحليل الكهربائي للماء في وسط قلوي:**

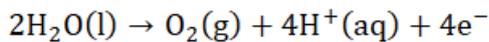
التحليل الكهربائي للماء هو عملية إلكتروليزية تحلل الماء إلى أكسجين وغاز الهيدروجين بمساعدة تيار كهربائي. تتكون الخلية الإلكتروليتية من قطبين كهربائيين - عادةً في معدن خامل (في المنطقة المحتملة ودرجة الحموضة المعتبرة) مثل البلاتين- مغمورة في إلكتروليات (هنا الماء نفسه) ومتصلة بالقطبين المعاكسين لمصدر التيار المباشر.

**مبدأ ووصف العملية:**

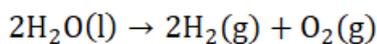
يفصل التيار الكهربائي جزيء الماء (H<sub>2</sub>O) إلى أيونات الهيدروكسيد (HO<sup>-</sup>) والهيدروجين: H<sup>+</sup> في الخلية الإلكتروليتية، تقبل أيونات الهيدروجين الإلكتروليت عند الكاثود في تفاعل الأكسدة والاختزال، مكونة الهيدروجين الغازي (H<sub>2</sub>) ، اعتمادًا على تفاعل الاختزال:

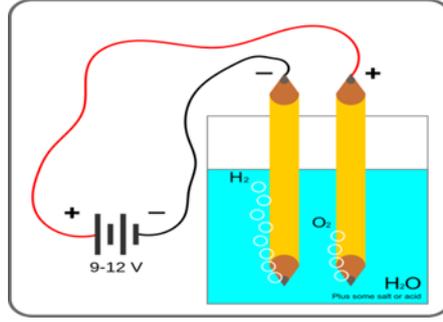


في حين أن أكسدة أيونات الهيدروكسيد - التي تفقد الإلكتروليتات - تحدث عند الأنود من أجل "إغلاق" الدائرة الكهربائية (توازن التفاعل الكيميائي في الشحنات):



والتي تعطي معادلة التحلل التالية بالتحليل الكهربائي:





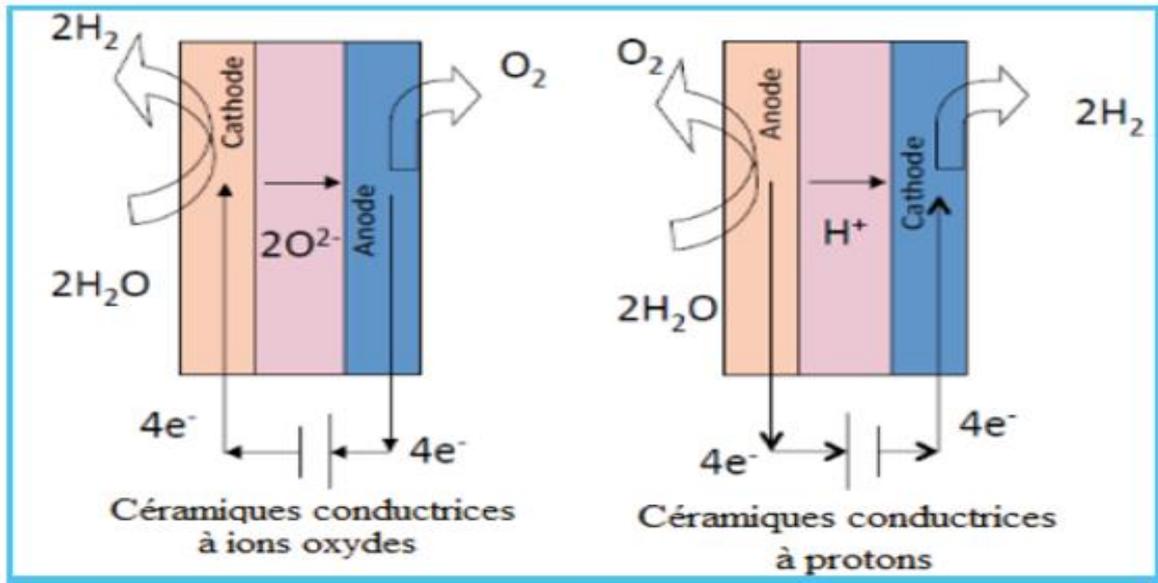
## 2- التحليل الكهربائي للماء عند درجات حرارة عالية

التحليل الكهربائي للماء ذو درجة الحرارة العالية أو EHT (بين 700 و 1000 درجة مئوية) هو تقنية مشابهة للتحليل الكهربائي القلوي ، ولكنها تستخدم بخار الماء بدلاً من الماء السائل. ينفصل بخار الماء عند الكاثود أو عند الأنود اعتمادًا على طبيعة المنحل بالكهرباء (الشكل 2)، التفاعلات المتضمنة في الأقطاب الكهربائية موصوفة في الجدول التالي:

الجدول: ردود الفعل المتضمنة لـ HTE

	Electrolyte	
Réaction	à conduction d'ions oxydes	à conduction protonique
Cathode	$\text{H}_2\text{O (g)} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 \text{(g)} + \text{O}^{2-}$	$2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 \text{(g)}$
Anode	$\text{O}^{2-} \rightarrow 1/2\text{O}_2 \text{(g)} + 2\text{e}^-$	$\text{H}_2\text{O (g)} \rightarrow 2\text{H}^+ + 1/2\text{O}_2 \text{(g)} + 4\text{e}^-$
Globale	$\text{H}_2\text{O (g)} \rightarrow \text{H}_2 \text{(g)} + 1/2\text{O}_2 \text{(g)}$	

في الحالة الأولى ، يتم إنشاء انخفاض في بخار الماء ، وتشكيل  $\text{H}_2$  و  $\text{O}_2$  ، من خلال فرق الجهد بين الأقطاب الكهربائية، وسيتم تفريغ بخار الماء الزائد والهيدروجين. تحت تأثير المجال الكهربائي، سوف تتأكسد الأنيونات  $\text{O}_2$  التي تمر من الكاثود إلى القطب الموجب إلى  $\text{O}_2$  وتفريغها. لتسهيل إزالة الأكسجين، يُستخدم أحيانًا غاز الكسح (الهواء أو النيتروجين أو بخار الماء).

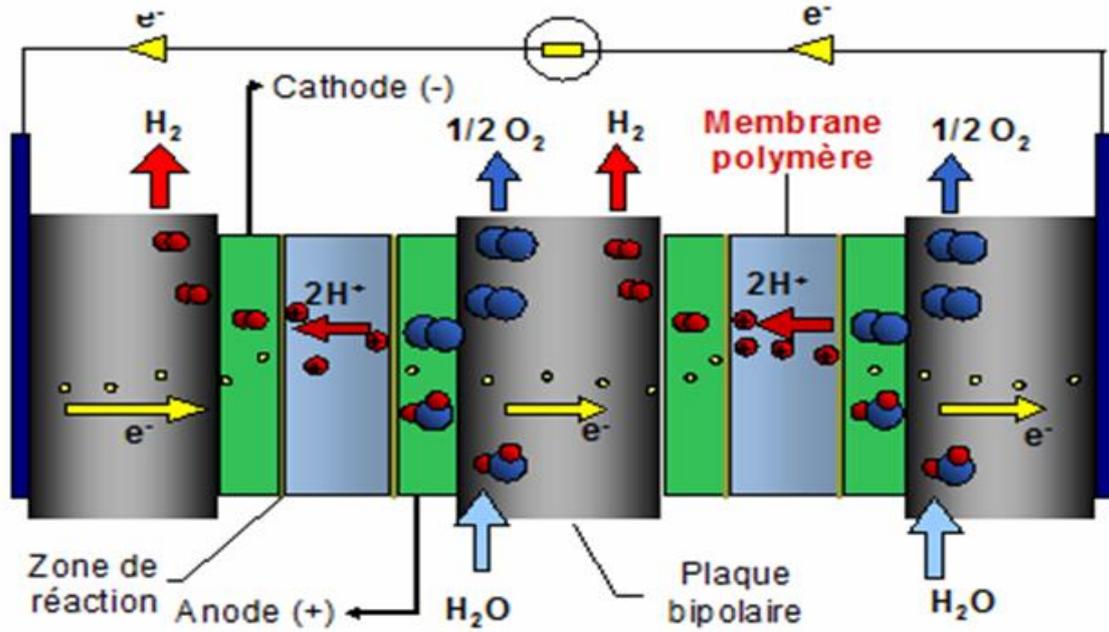


يقدم EHT ميزة في الطاقة لأنه من وجهة نظر الديناميكا الحرارية، يتم توفير الطاقة اللازمة لتحلل الماء بواسطة الكهرباء والحرارة، أرخص من الكهرباء وحدها، ومن وجهة نظر حركية، الخسائر الأومية، وهي ترتبط بشكل أساسي بظاهرة الجهد الزائد، وتنخفض عندما ترتفع درجة الحرارة.

### 3- التحليل الكهربائي لحمض PEM (غشاء تبادل البروتون):

يتميز التحليل الكهربائي الحمضي عن السابق بواسطة إلكتروليت صلب مع غشاء بوليمر PEM موصل بالبروتون (الشكل). تتمثل مزايا هذه التقنية في عدم وجود إلكتروليت سائل، والاكتناز، وبساطة التصميم والتشغيل، والحد من مشاكل التآكل، والأداء العالي بشكل ملحوظ، وتأثير أقل على ظروف الإدخال المتغيرة (مثيرة للاهتمام للمصادر المتجددة المتقطعة). ومع ذلك، فإن تكلفة غشاء البوليمر واستخدام المحفزات الكهروكيميائية القائمة على المعادن النبيلة، تؤدي إلى معدات أكثر تكلفة من المحلل الكهربائي القلوي من نفس السعة. ومع ذلك، فإن التحليل الكهربائي لغشاء البوليمر يعتبر من قبل الكثيرين تقنية المستقبل لأنه يستفيد من التطورات في خلايا الوقود ذات التكنولوجيا المماثلة (PEM)، وتقليل التكلفة المصاحب. التحليل الكهربائي لغشاء البوليمر ذو السعة الصغيرة هو بالفعل تقنية ناضجة، تُستخدم لعدة عقود تحت الماء (محطات الأكسجين على متن الغواصات النووية الأمريكية

والبريطانية) والفضاء (لتوليد الأكسجين في حجرات المعيشة). يمكن أن تعمل هذه الوحدات من الضغط الجوي إلى عدة عشرات من القضبان، أو حتى بضع مئات من الأشرطة. في الوقت الحالي، لا توجد معايير أو رموز حتى الآن بشأن تصميم أو تركيب جهاز تحليل كهربائي ذو سعة صغيرة، ولكنها قيد التطوير، لا سيما ضمن ISO TC 197، المخصص لهيدروجين.



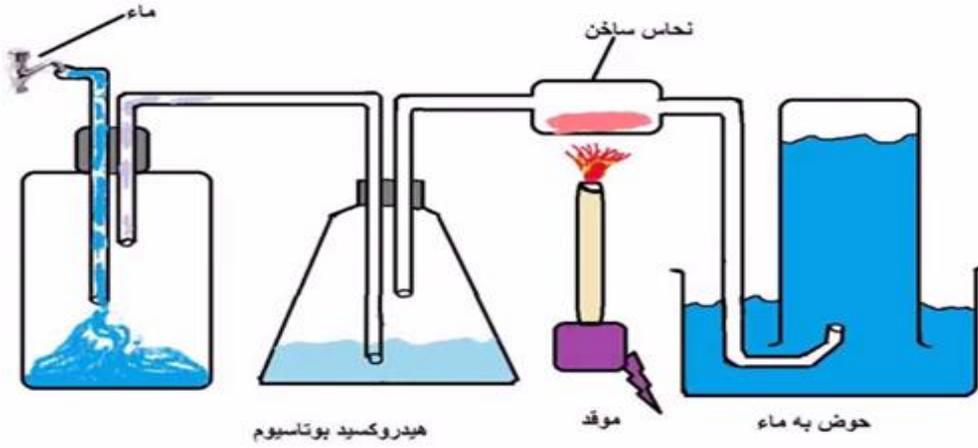
الشكل (1.5): التحليل الكهربائي PEM

## 2.5 إنتاج الهيدروجين من الغاز الطبيعي:

يوجد الغاز الطبيعي في شكلين أولهما غاز رطب حيث يوجد هذا الغاز مع النفط في حقول خاصة وثانيتها 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... الخ.

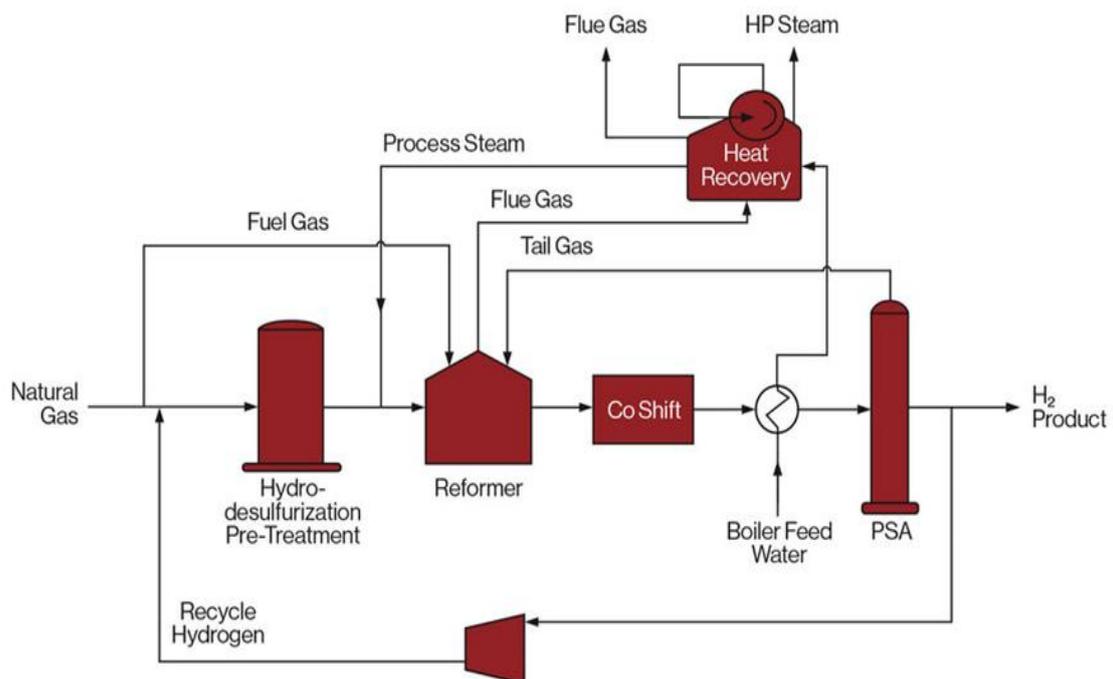
لقد عرفنا أن للهيدروجين فوائد على البشرية لا تعد ولا تحصى ولهذا فالعلماء في بحثٍ مستمر لإيجاد الطرق المثلى لإنتاجه من حيث المواد الداخلة في التفاعل والتكلفة الملائمة والمعقولة... يتميز

الهيدروجين باستحالة وجوده حرأ في الطبيعة بل يتم استخراجه من مواد أخرى مثل الماء والمركبات الهيدروكربونية أو الكربون المهدرج والغاز الطبيعي.



### 1.2.5-الإصلاح البخاري للميثان:

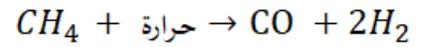
إن ما يقارب من نصف الهيدروجين المنتج بالعالم يتم استخراجه من الغاز الطبيعي، حيث يتم انتاج الهيدروجين بطريقة الاصلاح البخاري للميثان بعملية تسمى عملية التفكيك الحراري حيث تعتمد هذه الطريقة على تكسير الروابط بين الذرات في المركب.



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 كالإتيان  $C_2H_6$  والبروبان  $C_3H_8$  ومركبات ذات كتل جزيئية 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 الميثان.

حيث يتم استخدام بخار الماء على درجة الحرارة (700 درجة مئوية – 1000 درجة مئوية) لإنتاج الهيدروجين من الميثان حيث يتفاعل الميثان مع البخار تحت ضغط 3-25 بار في وجود محفز لإنتاج الهيدروجين وأول أكسيد الكربون، وكمية صغيرة نسبياً من ثاني أكسيد الكربون، تكون عملية الإصلاح بالبخار ماصة للحرارة أي يجب توفير الحرارة لعملية التفاعل.

معادلة إنتاج الهيدروجين من الميثان:

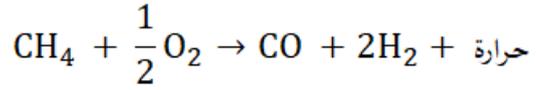


يتم عرض الناتج المتحصل عليه الى عملية تدعى عملية pressure-swing adsorption (امتصاص الضغط البديل)، حيث يتم ازالة ثاني أكسيد الكربون والشوائب الأخرى من تيار الغاز، تاركاً الهيدروجين النقي.

## 2.2.5-أكسدة جزيئية

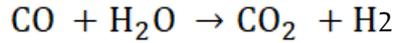
في الأكسدة الجزيئية، يتفاعل الميثان والهيدروكربونات الأخرى في الغاز الطبيعي مع كمية محدودة من الأكسجين (عادة من الهواء)، تحتوي منتجات التفاعل في المقام الأول على الهيدروجين وأول أكسيد الكربون والنيتروجين إذا تم التفاعل مع الهواء بدلاً من الأكسجين النقي وكمية صغيرة نسبياً من ثاني أكسيد الكربون والمركبات الأخرى .

معادلة تفاعل الميثان مع الاكسجين:

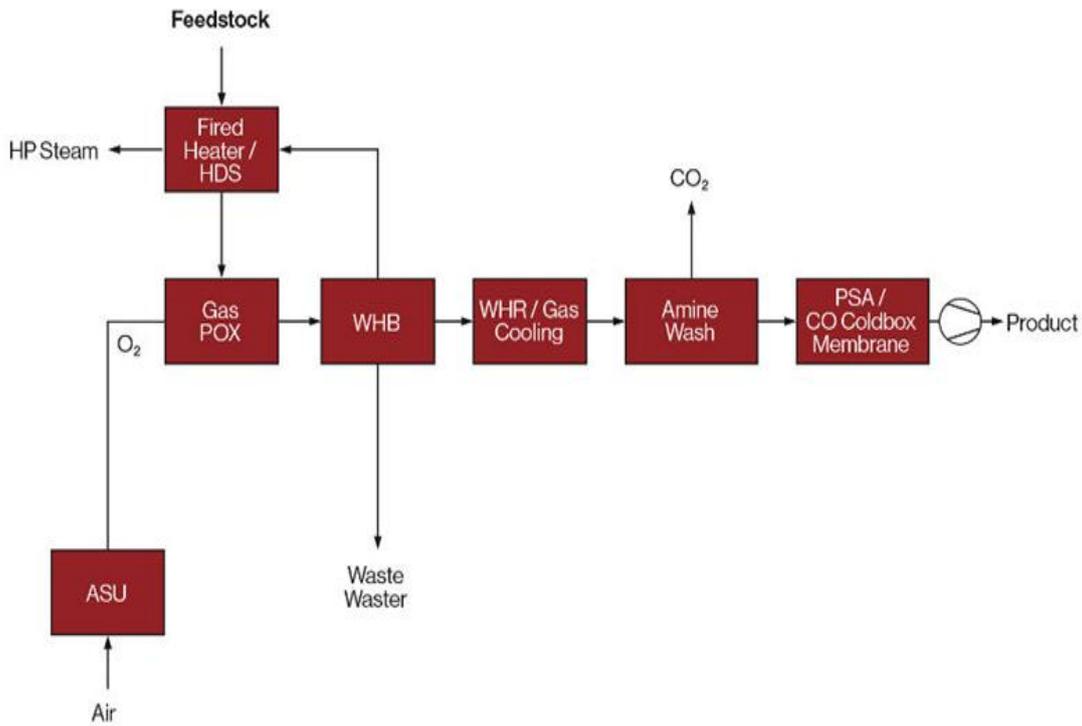


نستطيع الزيادة في انتاج الهيدروجين عن طريق تفاعل يعرف بتفاعل الغاز المائي حيث يتفاعل أول أكسيد الكربون مع الماء لتكوين ثاني أكسيد الكربون والمزيد من الهيدروجين.

حسب المعادلة التالية:



الأكسدة الجزئية هي عملية طاردة للحرارة لأنها تعطي حرارة وتعتبر أسرع بكثير من عملية الإصلاح الإصلاحي البخاري البخاري لكنها تعطي كمية اقل مقارنة من الوقود (الهيدروجين) مقارنة بعملية .



وفي الاخير الزيادة الكبيرة في استخدام الطاقة الاحفورية في اغلب القطاعات مثل القطاع الصناعي وقطاع النقل ساهمت بشكل كبير في الزيادة في تلوث البيئة والمحيط السكاني للبشر وفي تراجع كبير في كميات هذا النوع من الطاقة التي تعتبر طاقة غير متجددة.

في ظل التراجع الكبير في كميات الطاقة الاحفورية بدأ الانسان يبحث عن مصادر أخرى للطاقة تكون متجددة وأكثر نظافة من الطاقة الاحفورية حيث تسع الأبحاث اليوم الى تطوير عدة أنواع من الطاقات المتجددة مثل (الطاقة الشمسية، طاقة الرياح، طاقة الكتلة الحيوية، استغلال الهيدروجين....)

يعد الهيدروجين من المصادر المميزة للطاقة كوقود أو كناقل للطاقة في خلايا الوقود، حيث يمكن استخدامه سواء بشكل مباشر أو عند خلطه بالغاز الطبيعي بنسب محددة، ويمكن استعمال الهيدروجين لإنتاج الطاقة بعدة طرق، منها استعماله لتشغيل محركات الاحتراق الداخلي للسيارات والمركبات، أو في خلايا الوقود لإنتاج التيار الكهربائي، كما يستعمل الهيدروجين كوقود في المركبات الفضائية وصواريخ الدفع.

يمكن الحصول على الهيدروجين من عدد كبير من المصادر وبطرق مختلفة كالتحليل الكهربائي للماء، إلا أن هذه الطريقة مكلفة ماديا بسبب استهلاكها كميات كبيرة من الطاقة الكهربائية، ومن الطرق التي تستخدم أيضا في إنتاج الهيدروجين طريقة الاصلاح البخاري للميثان وطريقة أكسدة الجزيئات عن طريق استغلال الغاز الطبيعي.

### 3.5 إنتاج الهيدروجين عن طريق التغوير

إن إنتاج غاز قابل للاحتراق من مواد تحتوي في تركيبها على عنصر الكربون هي تقنية قديمة ومعروفة سابقا ومسماة بالتقطير الجاف dry distillation أو التحلل الحراري pyrolysis (وهي رفع درجة حرارة المواد الخام في غياب الأكسجين لتسبب التفكك الحراري للوقود إلى غازات طيارة وكربون صلب) وهذه التقنية جربت لأول مرة على مستوى تجاري عام 1812 بواسطة شركة غاز في لندن. إن أول مولدة غاز (مغوز) gasifier تجارية (من نوع السحب العلوي updraft gasifier) لتحويل الوقود الصلب إلى غاز قد انشأت عام 1839 منتجة بذلك ما يسمى حاليا بـغاز المولدات producer gas . تطورت بعد ذلك مولدات الغاز

(المغوزات) لتلائم أنواع مختلفة من الوقود والاحتياجات الصناعية والتطبيقات الحرارية حتى العشرينيات من القرن العشرين، حيث أن الأنظمة المغذاة بالبتترول أخذت تدريجيا مكان الأنظمة المغذاة بغاز المولدات (producer gas). ولكن ومع الشكوك حول وثوقية إمدادات البترول طورت أنظمة المغوزات المتكاملة (من نوع السحب السفلي downdraft الأكثر تطورا) في أوروبا بين عامي 1920 و1940 وخلال الحرب العالمية الثانية كان يستخدم عدة آلاف من مولدات الغاز (المغوزات) في أوروبا وفي أماكن أخرى من العالم ثم سحبت من الخدمة تدريجيا بشكل واسع بعد انتهاء الحرب عند توفر الوقود الأحفوري السائل والرخيص بشكل واسع مرة أخرى. أزمة الطاقة في السبعينيات جاءت باهتمام متجدد بتقنية التحويل إلى غاز وهذه التقنية اعتبرت كمصدر طبيعي ورخيص نسبيا للصناعات الصغيرة وتوليد الطاقة للشبكة العامة في البلدان النامية والتي عانت من أسعار النفط المرتفعة في السوق العالمية ويتوفر لدى هذه البلدان مصادر كتلة حيوية متجددة كافية. في بداية الثمانينيات من القرن العشرين قدمت عشر مصانع على الأقل (معظمها أوروبية) محطات لتوليد الطاقة باستخدام الفحم والخشب كمواد أولية في التوليد (حتى 250 kw) وعلى الأقل أربع دول نامية (الفيليبين-البرازيل-اندونيسيا-الهند) بدأت بتنفيذ برامج لتحويل الغاز قائمة على تقنيات مطورة محليا، تسمى هته الطريقة من توليد الطاقه بالتغويز (تغويز الفحم).

فما هوالتغويز وكيف يتم انتاج الهيدروجين منه؟

### 1.3.5- التغويز

هو عملية تحويل المواد التي تحوي في تركيبها على الكربون مثل الفحم والكتلة الحيوية إلى أول أكسيد الكربون والهيدروجين وذلك بتفاعل المواد الخام عند درجات حرارة عالية مع

كميات من الأكسجين متحكم بها ينتج عن هذه العملية مزيج غازي يدعى غاز الاصطناع، وتعتبر عملية التغويز من العمليات الفعالة لاستخراج الطاقة من المواد العضوية.

### 1.1.3.5 تغويز الفحم

هو عملية كيميائية الهدف منها تحويل الكربون (C) في الفحم إلى مركبات غازية قابلة للاشتعال. كانت العملية تتم في السابق من أجل الحصول على غاز الفحم من أجل استخدامه في إنارة المدن، ولكن حالياً تستخدم العملية بشكل واسع من أجل الحصول على غاز الاصطناع المهم في الصناعات الكيميائية.

### 2.1.3.5 الغاز الاصطناع

إن غاز الاصطناع هو مزيج من غازات تستخدم في الصناعة الكيميائية لتحضير مركبات أولية، والتي تخضع لعمليات صناعية متتالية للحصول على منتجات نهائية. تشمل هذه الغازات بشكل أساسي الميثان (CH<sub>4</sub>) وأحادي أكسيد الكربون (CO) والهيدروجين (H<sub>2</sub>) وثنائي أكسيد الكربون (CO<sub>2</sub>) وبخار الماء (H<sub>2</sub>O)، والتي يحصل عليها من الفحم والماء والهواء.

يحصل على الهيدروجين من تغويز الفحم، وهو تفاعل ماص للحرارة، حسب المعادلة:

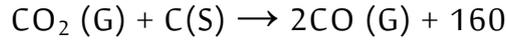


### 2.3.5- مبدأ عمل مولدات الغاز

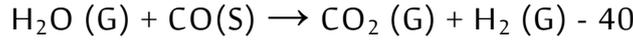
إن وقود الكتلة الحيوية عبارة عن خليط من مركبات الكربون والهيدروجين والأكسجين التي تمر بتفاعلات مصحوبة بانطلاق أو امتصاص حرارة خلال الاحتراق الجزئي في الهواء فيتفاعل الهواء القادم مع الكربون الساخن وتنطلق حرارة لتكون ثاني أكسيد الكربون



والذي يختزل فوراً إلى أول أكسيد الكربون مع امتصاص حرارة حسب المعادلة:



وبخار الماء بعدة تفاعلات مع الكربون وأول أكسيد الكربون معادلات



منتجاً الهيدروجين وينتج خليط غازي من أول أكسيد الكربون وثاني أكسيد الكربون والهيدروجين ويعمل النتروجين كمخفف حامل ويسمى هذا الخليط بغاز المولدات وقيمته الحرارية تكون منخفضة تتراوح بين 4 - 8 ميغا جول لكل متر مكعب وذلك لارتفاع تركيز غاز النتروجين.

### 3.3.5- مراحل التغويز

الخطوة الأولى: تجفيف المواد لإنتاج بخار الماء

هذه الخطوة تحدث في درجات حرارة تتراوح بين 100 درجة مئوية و 160 درجة مئوية. تحت تأثير الحرارة، يتبخر الماء الموجود في المادة العضوية. يكون وقود الكربون الناتج جافاً وذات طبيعة مختلفة (الفحم، الكتلة الحيوية، إلخ). في حالة المنتجات غير المتجانسة، تكون المرحلة الأولية (الفرز، الطحن) ضرورية قبل إدخال هذا الإدخال في التغويز.

الخطوة 2: الانحلال الحراري للمدخلات للحصول على فحم الكوك (بقايا الكربون) وغازات الانحلال الحراري.

هذه الخطوة الخالية من الأكسجين (اللاهوائية) تحدث في درجات حرارة تتراوح بين 120 درجة مئوية و 600 درجة مئوية. يطلق عليه "autothermic" لأنه لا ينتج أو يستهلك الطاقة. من خلال زيادة درجة

الحرارة تدريجياً في غياب الأكسجين، تتحلل المواد المجففة وترتبط ذرات الكربون ببعضها البعض. ثم يتم تشكيلها:

تقريباً كربون مختلط (فحم الكوك أو مخلفات الكربون)؛

مزيج من غازات الأكسدة غير القابلة للتكثيف التي تتكون أساساً من أول أكسيد الكربون (CO) والهيدروكربونات (CH<sub>4</sub>) وتسمى "غاز الانحلال الحراري"؛

**الخطوة 3: أكسدة غازات الانحلال الحراري لتوليد حرارة كافية للتغويز**

يتم تنفيذ هذه الخطوة في وجود الأكسجين في درجات حرارة تتراوح بين 1200 درجة مئوية و 1500 درجة مئوية. تتطاير المواد المتطايرة الناتجة عن الانحلال الحراري. يطلق هذا الاحتراق الحرارة اللازمة للخطوتين السابقتين والمرحلة التالية من التحويل إلى غاز. يتطلب إمداد أوكسجين عالي.

**الخطوة 4: الحد من الكربون أو "تغويز" لإنتاج syngas**

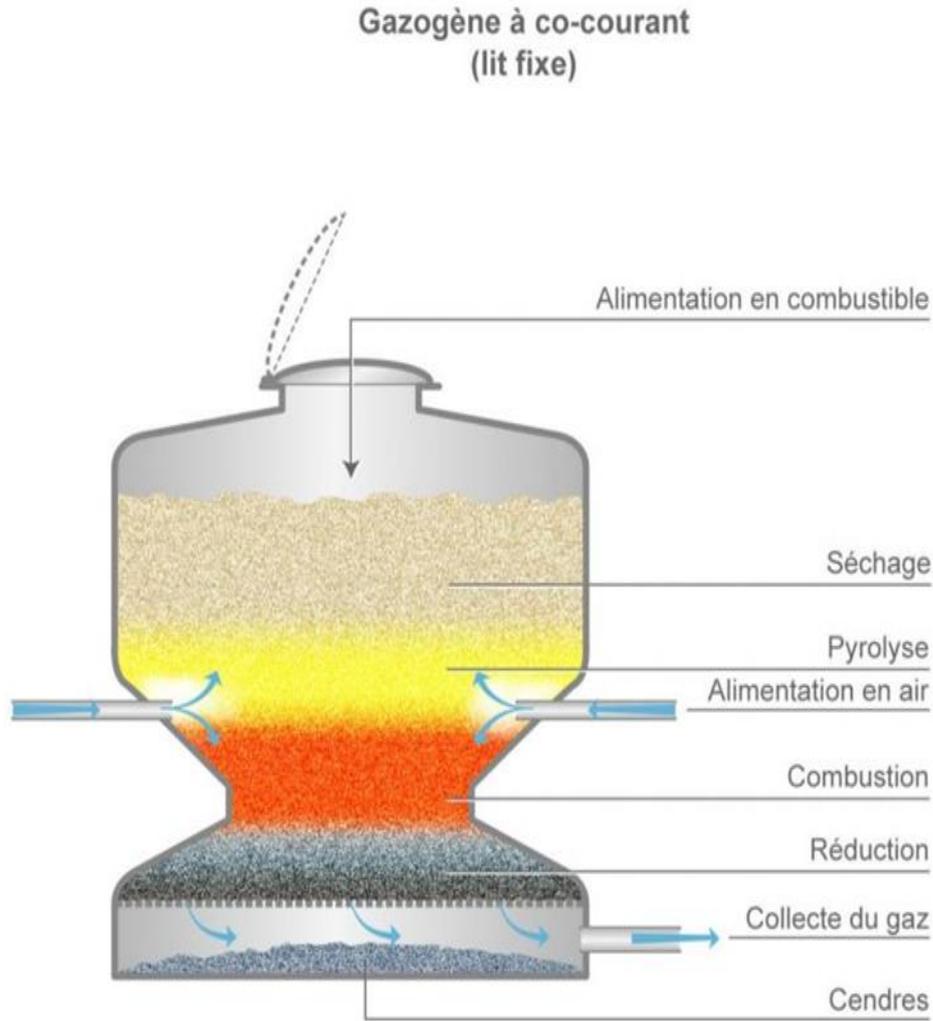
تحدث هذه الخطوة في درجات حرارة تتراوح بين 800 درجة مئوية و 1200 درجة مئوية. في غياب الأكسجين ، يقلل فحم الكوك الناتج خلال مرحلة الانحلال الحراري من بخار الماء وثاني أكسيد الكربون الناتج في الخطوة السابقة. الهيدروجين وأول أكسيد الكربون على التوالي لتشكيل غاز CO و H<sub>2</sub>.

**4.3.5- عمليات التغويز (عملية السرير الثابت)**

**1.4.3.5 التيار المشترك**

يتم تنفيذ المراحل المختلفة من تفاعل التغويز بشكل متتابع لأعلى ولأسفل في المفاعل. يتم تقديم المادة العضوية لأول مرة في الأعلى. يتم حقن الهواء في منتصف الارتفاع لبدء الاحتراق وتوفير الحرارة للمفاعل

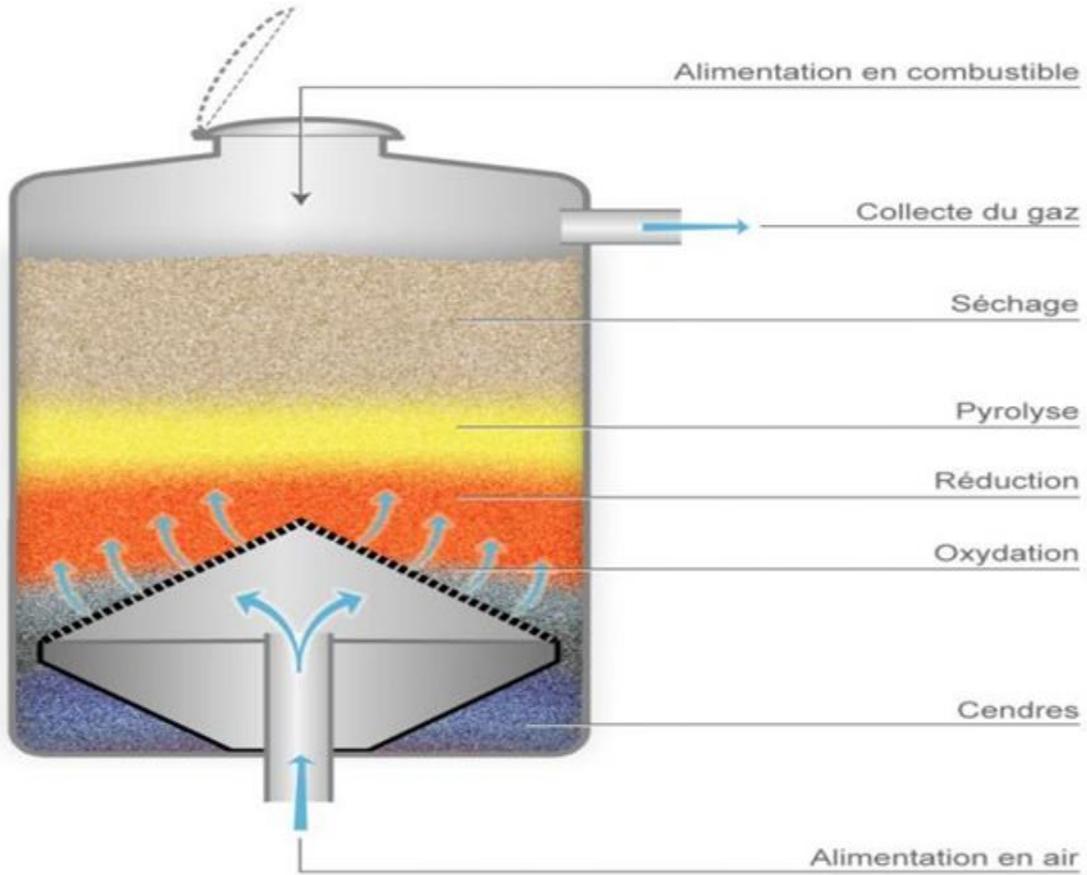
بأكمله. الزيادة التدريجية في درجة الحرارة تجعل من الممكن الحصول على التفاعلات المختلفة التي تسبب وصول الغازات المنتجة إلى أكثر المناطق حرارة في المفاعل. يتم استرداد syngas في قاعدة التغيويز.



#### 2.4.3.5 التيار المضاد

يتم حقن الهواء عند قاعدة المفاعل ويتم استرداد الغاز التخليقي تحت الجزء العلوي منه ، أعلى منطقة الانحلال الحراري. من غير المرجح أن يفلت القطران من المفاعل ، وبالتالي فإن انسداد القنوات محدود.

### Gazogène à contre-courant (lit fixe)



وفي الاخير تعتبر عملية تغويز الفحم عبارة عن تفاعلات كيميائية للانتاج غاز الهيدروجين وأول اكسيد الكربون CO للاستخدامه في خلايا الوقود للانتاج تيار كهربائي وتعتبر عملية التغويز مصدر لطاقة وتمتلك انواع كثيره تصنف حسب التغذيه.

#### 4.5 الخاتمة:

يمكن الحصول على الهيدروجين من عدد كبير من المصادر وبطرق مختلفة كالتحليل الكهربائي للماء، وعن طريقة الاصلاح البخاري للميثان وطريقة أكسدة الجزينات عن طريق استغلال الغاز الطبيعي. كما يمكننا انتاج الهيدروجين يتغويز الفحم بطريقة التفاعلات كيميائية.

## الفصل السادس: نقل وتخزين الهيدروجين

### 1.6 مقدمة

منذ نحو قرن من الزمن، أصبحت فكرة الاعتماد على الهيدروجين كمصدر للطاقة تداعب خيال العلماء. ولكن بعد سلسلة طويلة من الخيبات كادت أن تطيح بهذه الفكرة جملة وتفصيلاً، تحققت في الآونة الأخيرة اختراقات علمية تجعل هذه الفكرة أقرب إلى الواقع منها إلى الخيال العلمي .

يعد عنصر الهيدروجين من أكثر العناصر انتشاراً في الطبيعة، حيث يشكل نسبة 75% من حجم الكون وهو أخف العناصر الكيميائية، ويوجد في الطبيعة بشكل جزيئي على شكل رابطة تساهمية في بنية الماء والمركبات العضوية.

يتميز الهيدروجين بسهولة استخراجة من المركبات التي يدخل بتركيبها بالإضافة إلى كمية الطاقة التي ينتجها من عملية الانفصال حيث تقدر الطاقة الموجودة في 1 كيلوغرام من الهيدروجين بـ 40000 واط ساعي، بينما تقدر الطاقة الموجودة في 1 كيلوغرام من بطارية ليثيوم ايون بحدود 278 واط ساعي، ولكن هل يمكن في الحقيقة تسخير كل هذه الطاقة لتحويلها لطاقة مفيدة؟ هل يمكن تخزينها؟ وكيف نستطيع نقلها .

### 2.6 استخدامات غاز الهيدروجين

يُستخدم غاز الهيدروجين في العديد من الاستعمالات أهمها

- يُستخدم الهيدروجين كمصدرٍ نظيفٍ للوقود؛
- يتم استعماله في صناعة الزجاج، حيث يعد بمثابة غلافٍ حامٍ عند صنع رقائق الزجاج المسطحة؛

- يستخدم في صنع الأسمدة الزراعية، إذ يدخل في تركيب الأمونيا التي تعد أساساً لأغلب أنواع الأسمدة عن طريق عملية تدعى هابر؛
- يستخدم في ملء البالونات والمناطيد الجوية نظراً لقلّة كثافته؛
- يُستخدم في صنع الزبدة، حيث يتم استخدام غاز الهيدروجين في هدرجة الزيوت وتحويلها إلى دهون؛
- يتم استخدامه كغاز متوهّج في صنع رقائق السليكون المستخدمة في صناعة الإلكترونيات؛
- يُستخدم كوقود للصواريخ؛

### 3.6 تخزين الهيدروجين

يعد الهيدروجين أحد الحلول المتوقعة لحل مشكلة تخزين الطاقة المتجددة والتحكم بمواعيد تغذية الشبكة من الطاقة الشمسية وطاقة الرياح. ان أبرز طرق تخزين الهيدروجين هي:

#### 1- الهيدروجين السائل

يمكن تخزين الهيدروجين بشكل سائل ضمن مستوعبات وخزانات بحيث تتحمل ضغط عالي ولكن لتحويل الهيدروجين من غاز إلى سائل فإن ذلك يتطلب ضياعات كبيرة في الطاقة وذلك بسبب درجة غليانه المرتفعة 20.271 كلفن (-252.879 درجة مئوية).

#### 2- الهيدروجين بشكل غاز

من مساوئ الهيدروجين أن نسبة الطاقة إلى الحجم منخفضة بالمقارنة مع الغازات الهيدروكربونية أي أنه للحصول على طاقة من الهيدروجين ممتثلة لطاقة من غاز هيدروكربوني فإن ذلك يتطلب خزانا بحجم أكبر بكثير. لتخزين الهيدروجين بشكل غاز، يجب ضغطه إلى قيم ضغط (550 بار – 700 بار) وهذه الخزانات مستخدمة في السيارات.

### 3- التخزين بالعناصر

يمكن تخزين الهيدروجين عن طريق ربطه بعناصر مختلفة يمكن استخراجه منها لاحقاً ومن الأمثلة عن هذه الطرق:

- الامتزاز وهو يعني تراكم جزيئات مادة ما (الهيدروجين في حالتنا هنا) على سطح مادة صلبة وتسمى الماز وبهذه العملية يتم تشكيل طبقة من الجزيئات والتي تكون تراكمت بكثافة على سطح الماز.
- الهيدريد الفراغي Interstitial hydrides – يطلق مصطلح هيدريد على المركبات الحاوية على ذرات هيدروجين في روابطها ويتميز الهيدريد الفراغي برابطة معدنية ومن أشهر هذه الهيدريدات الفراغية هو البلاديوم. Palladium
- الهيدريد المعقد مثل  $NaAlH_4$

### 4.6 نقل الهيدروجين

ان اهم مشكل نواجهه في عملية تخزين الغاز او نقله من ناحية السلامة هي ارتفاع الضغط او الحرارة لذا يتم تخزينه في حاويات كروية لامتصاص الضغط إذا كان النقل عن طريق السفن البحرية كما تطلی الحاويات بطلاء ابيض لعكس الحرارة و تجهز بمرشات للتبريد بالماء قبل انفتاح صمامات الامان لتفادي خسارة فبمجرد انخفاض الحرارة ينخفض الضغط كما هو معلوم كما ان نقله في السفن الخاصة يتطلب تبريده الى درجة 253 درجة تحت صفر لنقله على صفته السائلة بضغط 1 بار أو أكثر مما يتطلب تجهيز السفن بحلقة تبريد كاملة مع خزانات كروية كما ان زيادة مفرطة في التبريد والضغط قد تتطلب الكثير من الطاقة ويمكن أيضا نقل الهيدروجين عن طريق خزانات او أسطوانات فولاذية يمكن حملها وتكون هذه الخزانات مصنوعة بحيث يمكنها تحمل الضغوطات العالية ومانعة ضد التسرب وأيضا يمكننا نقله عبر

أنابيب مجهزة بشكل خاص ومبردة ولكن يجب التعامل معه بحذر وحيطة شديدة لان الهيدروجين يمكنه التسرب من ابسط الشقوق وهو سريع الالتهاب .



## 5.6 مخاطر التعامل مع الهيدروجين

يعتبر الهيدروجين عنصراً خطيراً جداً منذ الحادث الشهير الذي حدث في العام 1937 في ولاية نيوجرسي الأمريكية و هو احتراق المنطاد Hindenburg و الذي كان يعتمد على الهيدروجين كعنصر ملء نظراً لخفة وزنه و أدى الحادث إلى مقتل 35 شخصاً في مشهد حريق هائل . و تعتبر تعليمات الأمان التي تعطيها وكالة NASA و هي أكثر هيئة تستخدم الهيدروجين في العالم أساساً في الوقاية من أخطاره:

1. إن الهيدروجين يشتعل بلهب غير مرئي ذو درجة حرارة عالية لذلك يجب الحذر الشديد من أن يمس الجلد، و أبسط طرق الكشف عنه عند الشك بوجوده هو استخدام مكنسة من القش ذات ذراع طويلة لتفحص بها مكان التسرب.
2. إن الهيدروجين السائل و بسبب الحرارة المنخفضة جداً له يؤدي إلى حدوث ما يسمى بالحرق البارد و هو أشد تأثيراً من الحرق المعروف و يؤدي إلى حدوث وذمة تتضخم بشكل كبير و سريع، و علاجها سهل من الطيب و لكن شريطة أن لا يمسها المصاب بتاتاً.
3. إن الهيدروجين من أكثر العناصر نفوذاً على الإطلاق لذلك يجب ارتداء الملابس الواقية و القفازات و واقيات الوجه عند عمليات التعبئة و التفريغ أو عند صيانة الشبكة و الصمامات و عند فك كل ما يمر به الهيدروجين.
4. تنشق الهيدروجين خطير و يسبب حروقاً في الجهاز التنفسي. و بالتالي نجد ضرورة الحذر عند التعامل مع الهيدروجين مع العلم أن الالتزام التام بتعليمات الأمان يضمن بشكل كامل سلامة الشخص فالهيدروجين عنصر أمين بمدى إدراكنا لكيفية التعامل معه .

## 6.6 الخاتمة

يتوقع بأن يزود الهيدروجين 5% تقريباً من متطلبات الطاقة في عام 2050، كما سيلعب الهيدروجين دوراً حاسماً في حل مشكلة الموسمية لمصادر الطاقة المتجددة وتحديات استقرار الشبكة المرافقة لازدياد نسبة التوليد من محطات الطاقة المتجددة فيها. ولكن أمام الهيدروجين اليوم تحديان أساسيان: أولاً، اقتصادية الحلول المقترنة بالهيدروجين وخفض تكاليف الإنتاج. ثانياً، زيادة كفاءة حلول نقله و تخزينه. إن اقتصادية الحلول المقترنة بالهيدروجين تتحسن بشكل سريع، ولهذا فمن المحتمل أن نرى في القريب العاجل ثمرة ذلك.

## الفصل السابع: تطبيقات استعمال الهيدروجين في وسائل النقل

### 1.7 مقدمة:

لقد عرف الإنسان مصادر الطاقة لا سيما الاحفورية (بتروول، غاز، فحم) منذ القدم فاستخدمها في النقل و الزراعة و الصناعة و كانت العصب المحرك للكثير من القطاعات الأخرى، وظلت الطاقة الاحفورية لوقت طويل محرك رئيسي في معادلة الاقتصاد و التنمية وإذا كانت هذه الطاقة قد أدت إلى حدوث ثورة صناعية فإنها في الوقت الحالي تواجه الكثير من التحديات خاصة البيئية، حيث أن هذه الطاقة ملوثة للبيئة كما أنها المتسبب الرئيسي في انبعاثات غازات الاحتباس الحراري التي تؤدي إلى تغير المناخ العالمي، ناهيك عن قرب استنزاف الاحتياطي العالمي من هذه الطاقة حيث أن كل مصادر الطاقة الاحفورية ناضبة و غير متجددة، و من ثم كان لزاما البحث عن مصادر أخرى للطاقة صديقة للبيئة كما أنها تساعد على تلبية الطلب العالمي المتزايد على الطاقة.

### 2.7 خزن الهيدروجين ونقله:

هناك ثلاث طرق سائدة لخزن الهيدروجين:

- كغاز هيدروجين في خزانات ذات ضغط عال وهذه الطريقة لها الأفضلية؛
- كسائل مبرد جدا؛
- كمزيج من سائل بارد و هيدروجين صلب؛
- إمكانية خزن الهيدروجين من خلال امتصاصه في مادة سائلة أو صلبة؛



ورغم أن الطريقتين الأولىين هما قيد الاستخدام الآن إلا أنهما تحتاجان إلى ظروف محكمة، فضغط الخزان يكون عادة بين 34.5 إلى 69 ضغط جوي.

لكي تتمكن من الاستعمال الفعال للهيدروجين كحامل للطاقة في المستقبل، فلا بد من اعتماد نظام موثوق به قادر على تخزين الهيدروجين دونما خطر تسربه وقادر على الاستجابة للمتطلبات الطاقوية سواء من ناحية الجودة أو التكاليف وتنكب حاليا مجموعات من فرق البحث على هذه المسألة التي رصد لها ميزانيات هامة ضمن برامج البحث والتطوير في هذا الميدان. فخزن الهيدروجين على العموم لا يطرح أي مشكل تقني أكثر من الغاز الطبيعي. إلا أن ضعف الكثافة الطاقوية الحجمية لديه تعوق استعماله في حالته الغازية في وسائل النقل نظرا لكبر حجمه. واستعمال الهيدروجين سائل ينهي مشكلة الحجم، إلا أن التكلفة الطاقوية لتسييل نفس الكمية من الهيدروجين هي أكبر أربعة أضعاف منها عند ضغط الهيدروجين إلى 700 بار. فضغط الهيدروجين إلى 700 بار يستوجب 10% من الكمية الطاقوية المتوفرة عليها الغاز قبل ضغطه في حين يستوجب تسييل الغاز 40% من الطاقة الأصلية للغاز قبل تسييله. يعتبر

الخزن الكيماوي للهيدروجين في مواد هيدريدية عن طريق الامتصاص أو الخزن الفيزيائي عن طريق الامتزاز في كريات دقيقة أو في مواد كربونية ذات بنىات مكونة من أوعية دقيقة، من التقنيات الواعدة والمرشحة لأن تلعب دورا هاما في مجال تخزين الهيدروجين وخاصة في ما يخص استعماله في النقل.

لا يتعدى حاليا إنتاج الهيدروجين حاجيات محدودة، سواء كان إنتاجه في نفس مكان الاستعمال والخاص ببعض الصناعات التي تستهلك كميات كبيرة منه. ينقل كذلك على شكل سائل في حاويات خاصة أو في شاحنات خزانة لمسافات قصيرة أو في باخرات خاصة لنقل الهيدروجين سائل لمسافات طويلة، ويظل نقل الهيدروجين مضغوط في حاويات للغاز مقتصر بالخصوص على تغطية حاجيات المختبرات. ومن المنتظر أن تستعمل القنوات الخاصة بنقل الغاز عبر الدول والقارات بشكل واسع، وأن تقوم بنقل الكميات الكبيرة من الهيدروجين غاز الذي ستنتجها المركبات الشمسية في المستقبل. يوجد حاليا العديد من القنوات المستعملة لنقل غاز الأكسجين وغاز الأزوت وكذلك غاز الهيدروجين لمئات الكيلومترات، 1500 كيلومتر من هذه القنوات توجد بأوروبا و 700 كيلومتر توجد بالولايات المتحدة.

### 3.7 الهيدروجين والقضايا البيئية:

إن المشاكل البيئية تحتل اليوم مكانة مهمة في قطاع الطاقة، وبصورة عامة فإن استعمال الطاقة الاحفورية وإنتاجها سوف يؤدي إلى انبعاث الكثير من الغازات الملوثة ومنها غازات الاحتباس الحراري التي تؤدي إلى تغير المناخ العالمي.

حاليا الهدف من جميع الأبحاث الطاقوية في العالم هو محاولة إحلال مصادر الطاقة الاحفورية غير المتجددة بمصادر أخرى للطاقة المتجددة (طاقة شمسية، طاقة الرياح، الطاقة المائية...) و المتوفرة بشكل كبير و غير مكلفة كما أنها اقل تلويثا للبيئة، وقد تنبه العلماء إلى أهمية استخدام الهيدروجين كمصدر هائل للطاقة النظيفة، نظرا لتوافره بكميات كبيرة، بالإضافة إلى التطور التقني والتكنولوجي والذي يؤدي إلى تحسين فعاليته وتنافسيته.

إن اقتصادا يعتمد على الهيدروجين ويستند إلى هيدروجين غير ملوث هو هدف بيئي ذو جاذبية هائلة، فمصادر الهيدروجين واستخداماته يجب أن لا تكون ملوثة.

إن مفاعلة البخار مع الميثان (الغاز) لإنتاج الهيدروجين ليس الخيار الأمثل لأن الطلب على الغاز الطبيعي في بعض دول العالم بدأ يتجاوز الكمية المتوافرة كون الغاز الطبيعي من المصادر الطاقوية الناضبة.

أما إنتاج الهيدروجين من الفحم فهو من الناحية الأخرى أمر ناجح الآن في الصين، وسيكون ناجحا بيئيا إذا ما تم خزن ثاني أكسيد الكربون تحت سطح الأرض بصورة دائمة أو باستخدامه في عمليات الاستخراج الصناعي للنفط، وهي الطريقة الأفضل. ومما يزيد في الإشكال أن بعض أحواض الفحم تحتوي على بعض المواد السامة مثل الزئبق أو الزرنيخ، لذا يتوجب على طريقة استخراج الهيدروجين من الفحم تجنب إطلاق هذه المواد إلى البيئة السطحية. وإذا ما تم تجاوز هذه المشاكل فقد يبدو هناك جانب مشرق فلاحتياطيات العالمية من الفحم تكفي لبضع مئات من السنين.

أما بالنسبة لطريقة التحليل الكهربائي فإن تقييم الأثر البيئي لا يبدأ من شراء القوة من الشبكة الكهربائية. ولكي يكون الهيدروجين المستخرج من التحليل الكهربائي ناجح بيئيا، فيجب أن يكون توسيع منظومة التوليد الكهربائي اللازمة لإنتاجه ناجحا بيئيا هو الآخر، إذ لابد من توليد الكهرباء من مصادر غير ملوثة كالطاقات المتجددة والطاقة النووية.

#### 4.7 تطبيقات استعمال الهيدروجين في وسائل النقل

أ. خلايا الوقود:

تعتبر خلية الوقود أداة لتحويل الطاقة الكيميائية إلى طاقة كهربائية تقوم من خلال تفاعلات كيميائية بتحويل الهيدروجين والأكسجين إلى ماء وينتج عن هذه العملية طاقة كهربائية. وبالمقارنة مع البطاريات التقليدية المعروفة فإن الاختلاف يكمن في أن المواد الكيميائية الداخلة في التفاعل لتوليد الكهرباء هي

جزء من تركيب البطارية وتوجد بداخلها و بانتهاء المواد الكيميائية هذه فان البطارية تصبح عديمة الفائدة ويتم استبدالها أو إعادة شحنها مرة أخرى في حين أن خلايا الوقود لا يمكن أن تنتهي فهي تعمل باستمرار لان مصدر المواد الكيميائية هي من الهواء.

إن لخلايا الوقود عدة مزايا منها:

- لا يوجد تلوث أو استهلاك لمصادر الوقود حيث أن الهيدروجين ينتج من الماء وبالأكسدة يعود مرة أخرى ولا توجد أي عوادم جانبية ضارة بالإنسان و البيئة؛

- أمانة للغاية حيث أن تكنولوجيا الهيدروجين لا تحتوي على أية عناصر تسبب أية أخطار ممكنة؛

- كفاءة التشغيل عالية جداً لأنها تحول الطاقة الكيميائية إلى طاقة كهربائية بشكل مباشر مما لا يسبب أي فقد في الطاقة في أي صورة من الصور؛

- هادئة في التشغيل لا يسمع لها أي صوت أثناء عملها؛

- عمرها أطول وصيانتها اقل؛

- يمكن التحكم في حجمها حسب الطاقة الكهربائية التي تحتاجها للتشغيل؛

في عام 2009 طورت شركات يابانية خلية وقود بطاقة 3 كيلو واط تنتج الكهرباء بعائد 56% خلال آلاف الساعات وحدها الأقصى 59%.

ما زالت التكنولوجيا الخاصة بخلايا الوقود غير مستخدمة بشكل واسع في الأسواق العالمية كما أنها مكلفة جداً وتتطلب القيام بإحلال محطات البنزين الحالية بأخرى قادرة على تموين السيارات بالهيدروجين.

ب. محركات الاحتراق الداخلي:

في محركات الاحتراق الداخلي التقليدية يمكن استعمال الهيدروجين كوقود بدل النفط. إن وجوده جنبا إلى جنب مع الأكسجين يؤدي إلى حدوث احتراق وتدوير المكبس الذي يؤدي إلى تشغيل المحرك، ومن ثم فإن الطاقة الناتجة هنا هي طاقة ميكانيكية. يعتبر قطاع النقل هو المعني بهذا التطبيق.

يمكن أن يتجاوز عائد هذه المحركات نسبة 40%، وتعتبر هذه المحركات مفيدة من الناحية البيئية حيث إن احتراق الهيدروجين في محرك الاحتراق الداخلي يؤدي إلى توليد الحرارة في شكل بخار ماء ونسبة ضئيلة من أكاسيد النيتروجين أقل بكثير من تلك الناتجة عن المحركات المغذاة بالمشتقات النفطية.

### ج- السيارة الهيدروجينية



خزان الهيدروجين السائل من شركة لينده، متحف أوتوفيجين، آلتلوس هايم، ألمانيا.

شرح للصورة:

خزان الوقود يستوعب 8 كيلوجرامات من الهيدروجين السائل # خزان البنزين بسعة تبلغ 74 لتر #

صمام الضغط- محرك الاحتراق الداخلي - الذي يشتغل بالبنزين أو الهيدروجين السائل

### 5.7 التحديات التي تواجه اقتصاديات الهيدروجين:

هناك الكثير من التحديات التي يواجهها استعمال الهيدروجين:

- مشاكل التخزين: من الصعب الاحتفاظ بكميات كبيرة من الهيدروجين في أحجام صغيرة نظرا لانخفاض كثافته، فلضمان تحرك السيارة لمسافة 500 كم يكفي لذلك من 5 إلى 6 كغ من الهيدروجين، وفي درجة الحرارة المحيطة فان 1 كغ يشغل حجم 12 م<sup>3</sup>، ومن ثم لابد من ضغطه أو تسويله أو امتصاصه من بعض المواد كما لابد من إنشاء خزانات خفيفة وقادرة على تحمل الضغط وتحافظ على الهيدروجين.

- إنتاجه بكميات كبيرة لقطاع الطاقة: حيث أن هذا يستدعي اللجوء إلى استعمال الطاقات المتجددة لعدم إلغاء الأثر الايجابي لإنتاجه في الولايات المتحدة الأمريكية مثلا لإنتاج هيدروجين كاف لقطاع النقل لابد من إنشاء 800 محطة للإنتاج ولكن لتشغيل هذه المحطات لابد من استعمال الغاز الطبيعي لان طاقة الكتلة الحيوية (طاقة متجددة) غير كافية لتلبية هذا الطلب الكبير على الطاقة، ومن ثم فانه لابد من الاستثمار أكثر في مجال الطاقات المتجددة و تقليص تكاليف الاستثمار في هذه الطاقات.

- صغر حجم جزيئاته: يمكن للهيدروجين اختراق بعض المواد وإضعافها نظرا للحجم الصغير جدا لجزيئاته، وبذلك يتطلب استخدامه الصناعي استخدام مواد خاصة، نادرة وباهضة الثمن كالبلاتين في بعض خلايا الوقود.

## 6.7 الخاتمة:

إن الهيدروجين كطاقة نظيفة سوف يسمح بالتأكيد بتخفيض كبير للمشاكل المرتبطة بالتلوث ومن ثم حماية البيئة. وبذلك فان اقتصاد يعتمد على الهيدروجين و يستند إلى هيدروجين قابل للتجديد و غير ملوث هو هدف بيئي ذو جاذبية هائلة. فحسب الكثير من الخبراء فان الهيدروجين هو مصدر لطاقة المستقبل لأنه يمثل احد أشكال الطاقة الأقل إضرارا بالبيئة و يستعمل في الكثير من المجالات كإنتاج الكهرباء، التسخين، التزويد بوقود للنقل...الخ.

لقد بان حقيقتة مجتمع الهيدروجين في الأفق، أما معرفة متى سيصبح واقعا نهائيا فهذا يتعلق بإرادة الدول في التخلص من الوقود المستخرج من النفط أو بالحفاظ عليه بما أنه مورد ناضب. وبينما يبدو

المأمول عظيماً، إلا أن هناك تحديات ما تزال في الطريق، ذلك أن عملية تحويل البيئة التحتية للطاقة في العالم، من تلك المعتمدة على الوقود الأحفوري إلى أخرى تعتمد على الهيدروجين ستستغرق سنوات وربما عقود من الزمن، بيد أن بشائر عصر الهيدروجين بدأت تلوح في الأفق.

## الفصل الثامن: المشاكل الأمنية للهيدروجين

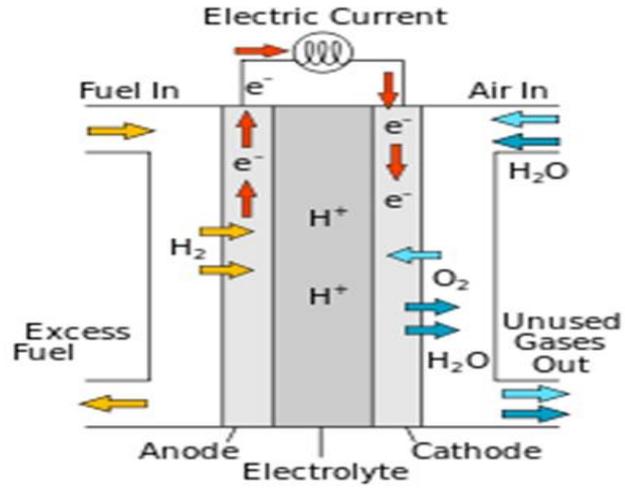
### 1.8 مقدمة

تولى الطاقة البديلة اهتماما واسعا خاصة من قبل الدول الصناعية الكبرى لكونها صديقة للبيئة و مصدر غير نافذ بعكس طاقة الوقود الأحفوري التقليدية (البتروول و الغاز...) التي تعتبر كمصدر غير متجدد و ملوث للبيئة.

من بين اهم مصادر الطاقة البديلة الهيدروجين حيث يتميز بعدد من الخصائص الهامة التي تؤهله لأن يكون وقود المستقبل لتوليد الطاقة لكونه أكثر العناصر وفرة و نظافة بالكون، ولكنه يشكل بعض المخاطر ما لم يستخدم بطريقة آمنة وهو ما سنتطرق إليه في هذا العمل .

### 2.8 تطبيقات الهيدروجين:

- تطبيقات في العمليات الكيميائية: يدخل في عدد كبير من الصناعات الكيميائية والنفطية، مثل صناعة الأمونيا، وعمليات تصنيع الوقود الأحفوري، وعمليات الهدرجة كما يستخدم كعامل اختزال للعناصر المعدنية من خاماته
- تطبيقات فيزيائية وهندسية: يستخدم كغاز واقٍ أثناء عملية اللحام، ويُستخدم أيضا في تبريد المولدات التوربينية وذلك بسبب لزوجته المنخفضة.
- تطبيقات في الطاقة البديلة: يستخدم في إنتاج الطاقة الكهربائية وذلك عن طريق خلايا وقود من خلال تفاعله مع الأوكسجين، كما يستخدم أيضا كوقود في الدفع الصاروخي لمركبات الفضاء.



### المخاطر الناجمة عن غازا لهيدروجين:

رغم ان غاز الهيدروجين غير سام وغير مضرّ بالبيئة، وهذا ما يفسر عدم حصوله على قيمة عددية تعرف حد التعرض للأخطار المهنية، إلا انه يشكل في بعض الحالات خطراً على السلامة البشرية وذلك إمّا على شكل انفجارات أو حرائق عند امتزاجه مع الهواء أو لكونه مسبباً للاختناق في جوّ خال من الأوكسجين، و تنقسم مخاطر الهيدروجين الى قسمين:

### 1.3.8 المخاطر الظاهرة:

رغم ان غاز الهيدروجين غير سام وغير مضرّ بالبيئة، وهذا ما يفسر عدم حصوله على قيمة عددية تعرف حد التعرض للأخطار المهنية، الا انه يشكل في بعض الحالات خطراً على السلامة البشرية وذلك إمّا على شكل انفجارات أو حرائق عند امتزاجه مع الهواء (مخاطر خارجية) أو لكونه مسبباً للاختناق في جوّ خالٍ من الأوكسجين (مخاطر باطنية).

### أ- مخاطره الخارجية:

- إنّ الهيدروجين غاز له قابلية كبيرة للاشتعال حتى في التراكيز الضعيفة 4%؛

- ينفجر عند الاشتعال في وجود الأوكسجين؛

- له خاصيّة الاشتعال بلهب غير مرئي ذو درجة حرارة عالية مما يزيد من خطورته عند الاحتراق وذلك لعدم إمكانية ملاحظة شعلته؛

- بالإضافة إلى ان الهيدروجين السائل في درجات الحرارة المنخفضة يمكن أن يسبب ما يسمى عضّة برد(الحرق البارد) والتي يمكن ان تحدث عند التعامل مع السوائل المبرّدة بشدّة؛



عضّة برد (الحرق البارد)

#### ب مخاطره الباطنية:

- عند تراكيز عالية منه تفوق 30% تبدأ عوارض عدم انتظام حركات الجسم وفقدان الوعي، والتي يمكن ان تنتهي بالموت في حال عدم توقّر الأكسجين؛

- يتفاعل بشدّة مع الكلور والفلور لينتج أحماض أكالة مضرّة للجهاز التنفسي عند استنشاقها كما أنّها مخرّبة للأنسجة الحيوية؛



### 2.3.8 المخاطر الباطنية (الغير ظاهرة):

عند تراكيز عالية منه تفوق 30% تبدأ عوارض عدم انتظام حركات الجسم وفقدان الوعي، والتي يمكن ان تنتهي بالموت في حال عدم توقّر الأوكسجين.

يتفاعل بشدّة مع الكلور والفلور لينتج أحماض أكالة مضرّة للجهاز التنفسي عند استنشاقها كما أنّها مخرّبة للأنسجة الحيوية.

### 4.8 أشهر حوادث الهيدروجين:

#### أ- التجربة الأمريكية للقنبلة الهيدروجينية:

من أضرار القنبلة الهيدروجينية ما يأتي: الإصابة بالعمى المؤقت، أو الدائم. تدمير المنطقة المعرضة للانفجار. اقتلاع الأشجار من أماكنها، وتدمير الزجاج، وتحطيم المباني المبنية من الطوب والموجودة على بعد عدة كيلومترات من مركز الانفجار؛ حيث إنّ قوة الانفجار تكون هائلة. إطلاق الجزيئات المشعة في الهواء، وتكوين الدخان، وهذا يؤثر في حياة النباتات التي تعتمد في حياتها على ضوء الشمس، بالإضافة إلى ذلك فإنّ الجزيئات المشعة يُمكن أن تنتشر، وتنتقل مع الرياح إلى مئات الكيلومترات، وهذا يؤدي إلى تلوث المياه، والهواء، واليابسة بمواد قادرة على تدمير الخلايا في النباتات، والحيوانات، والبشر، والأسماك. استمرار التلوث النووي الناجم عن القنابل الهيدروجينية، والذي يؤثر سلباً في السكان لمدة تزيد عن 40

عاماً، حيث إنّه بعد مرور 60 عاماً على التجربة النووية التي أجرتها الولايات المتحدة الأمريكية على جزيرة بيكيني، لم يكن باستطاعة سكان الجزيرة العيش مرة أخرى فيها خوفاً من الأمراض، والتربة المشعة.

ب حادث تحطم منطاد هيندنبورغ الخاص بنقل الركاب:

التي كان سببها احتراق الهيدروجين، هي حادثة. -سنة الحادثة: 1937م.

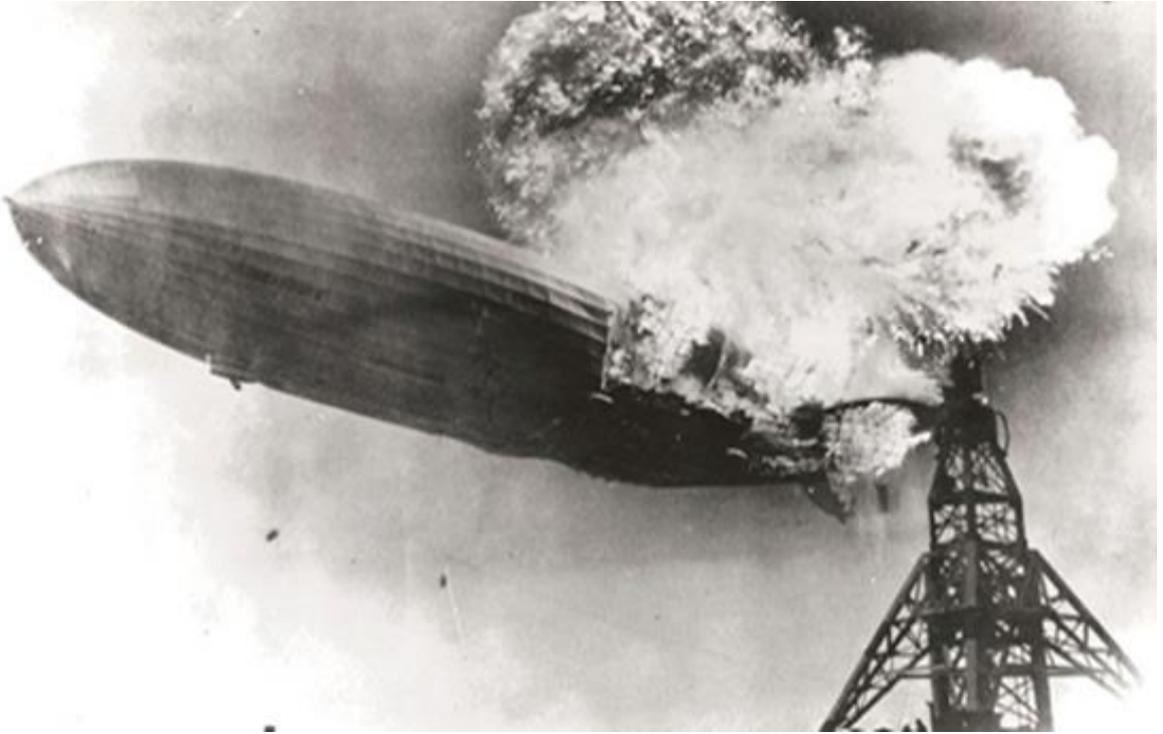
-الرحلة الأخيرة: من فرانكفورت إلى نيوجيرسي.

-سبب الانفجار: اشتعال الهيدروجين بسبب شرارة كهربائية.

-عدد الضحايا: مقتل 36 من بين 96 كانوا على متنه.

وضعت هذه الكارثة الحد لاستخدام المناطيد في خدمات نقل الركاب و أدت أيضا للاستغناء عن

استخدام الهيدروجين القابل للاشتعال في المناطيد و استبداله بغاز الهليوم الغير قابل للاشتعال.



5.8 احتياطات السلامة والأمان:

تعتبر تعليمات الأمان التي تعطيها وكالة ناسا (وهي أكثر هيئة تستخدم الهيدروجين في العالم) أساساً في الوقاية من أخطاره :

\_ الالتزام بإجراءات و تعليمات السلامة و الأمان الموضوعة من قبل المؤسسات العاملة في هذا المجال (ضرورة التقيد بالإشارات و الإرشادات في حيز العمل)؛

- وجوب الحذر الشديد من ملامسته للجلد عند اشتعاله (لهب غير مرئي ذو درجة حرارة عالية)؛

- وجوب الحذر الشديد من ملامسة الهيدروجين السائل (المبرد) للجلد لتجنب حدوث ما يسمى بالحرق البارد، حيث انه أشد تأثيراً من الحرق المعروف ويؤدي إلى حدوث وذمة تتضخم بشكل كبير وسريع، وعلاجها سهل من الطبيب ولكن شريطة ألا يمسه المصاب بتاتا؛

- يعتبر من أكثر العناصر نفوذاً على الإطلاق لذلك يجب ارتداء الملابس الواقية والقفازات وواقيات الوجه عند عمليات التعبئة والتفريغ أو عند صيانة الشبكة والصمامات؛

- الحذر من استنشاق الهيدروجين لخطورته الشديدة على الجهاز التنفسي.

## 6.8 الخاتمة

نستخلص من هذا الفصل أن الهيدروجين طاقة بديلة ونظيفة ولكنها تتطلب ضرورة الحذر واليقظة عند التعامل معه وذلك من خلال الالتزام التام بتعليمات الأمان لضمان سلامة الأشخاص و المعدات و البيئة بشكل عام ، فالهيدروجين عنصر آمن بمدى تحكمننا في كيفية التعامل معه .

### \*كتب باللغة العربية

- [1] حازم فلاح سكيك، مجلة الفيزياء العصرية، كيف تعمل خلايا الوقود، 7 فبراير 2007.
- [2] المهندس سيد محمد حسين موسوي، الأستاذ الدكتور هاشم ورقوزق، الدكتور المهندس محمد الأحمد، دراسة تأثير الضغط في أداء خلايا الوقود من النوع PEM عند تشغيل أحمال متغيرة، مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية، 2010.
- [3] محمد هاشم ابو الخير وياسر دياب، تخزين الطاقة الكهربائية، منشورات جامعة دمشق للهندسة الميكانيكية والكهربائية 2015\2014م.
- [4] فؤاد قاسم الأمير، حل مشكلة الطاقة هو الحل الأكبر للبشرية في القرن الحادي والعشرين، مؤسسة الغد للدراسات والنشر، العراق، (2005).
- [5] المهندس سيد محمد حسين موسوي، الأستاذ الدكتور هاشم ورقوزق، الدكتور المهندس محمد الأحمد دراسة خواص خلايا الوقود من نوع PEM وديناميكية تشغيلها، مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية المجلد الخامس والعشرون العدد الثاني، 2009.
- [6] ك.شبيب، و.ي.زيدان. الهيدروجين ووقود المستقبل. المركز الوطني للمتميزين سوريا 2015.
- [7] ن. بن علي، و.ر.شويرفات، خلايا الوقود: طاقة المستقبل، مذكرة ماجستير، جامعة الوادي (2011).

### \*كتب باللغة الأجنبية

- [8] F. Bouras, F. Khaldi, M. E.H. Attia, S. Abbes, and M. Zouari Ferhat. Computational Parametric Analysis of Fuel Cells: Application to PEMFC and SOFC. Russian Journal of Applied Chemistry. vol. 89, No. 6, pp. 980–987, 2016.
- [9] Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies: Rev 0, December 2001.
- [10] S. Abbes, Study of operating conditions of the polymer electrolyte membrane fuel cell (PEMFC), Thesis of Master, University of El Oued, (2012).
- [11] G. Sarlos & P.A. Haldi, Synthèse énergétiques : offre et demande d'énergies : méthodes d'analyse, suisse, vol 21, (2003).
- [12] L. Favan, LA PILE A COMBUSTIBLE, Laurent DE SCHOULEPNIKOFF, (2008).

- [13] N. Lymberopoulos, FUEL CELLS AND THEIR APPLICATION IN BIO-ENERO C.R.E.S, (2005).
- [14] B. BLUNIR & A. MIRAOUI. Pile a combustible, Principes, modélisation, applications avec exercices et problèmes corrigés. Ellipses, France, p.5-27,2007.
- [15] Badwal, S.P.S.; Giddey, S.; Munnings, C.; Kulkarni, A. Review of progress in high temperature solid oxide fuel cells. J. Aust. Ceram. Soc. 2014, 50, 23–37.
- [16] Sun, C.; Hui, R.; Roller, J. Cathode materials for solid oxide fuel cells: A review. J. Solid State Electrochem. 2010, 14, 1125–1144.
- [17] Minh NQ, Takahashi T (1995) Science and technology of ceramic fuel cells. Elsevier, Amsterdam.
- [18] Edwards, P.P.; Kuznetsov, V.L.; David, W.I.F.; Brandon, N.P. Hydrogen and fuel cells: Towards a sustainable energy future. Energy Policy 2008, 36, 4356–4362.
- [19] <http://Kawngroup.com/ar/fuel-cel-technology/article/78-solide-oxide-fuel-cells>. Mai 2011.