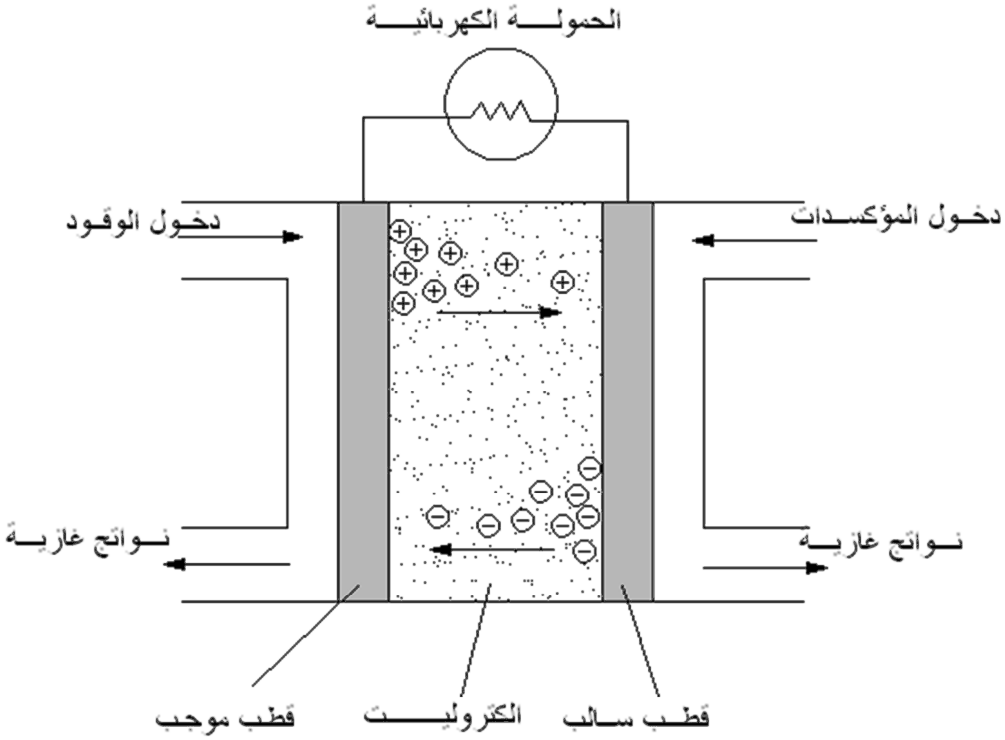
خلايا الوقود Fuel Cell

تكمن أهمية دراسة خلايا الوقود في الدور الكبير المتوقع لها في المستقبل كمصدر للكهرباء بنسب منخفضة من التلوث البيئي ، حيث تتم الدراسات والأبحاث لاستخدامها في مشاريع توليد الطاقة الكهربائية وتطوير صناعة وسائط النقل ولا سيما السيارة الكهربائية التي ستخدم فيها الهيدروجين أو الميثانول أو الغازولين.

ماهي خلية الوقود ؟؟

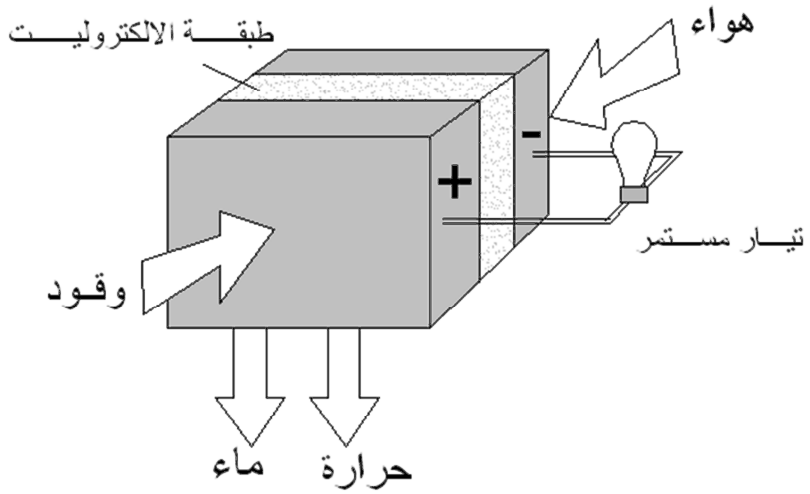
هي جهاز كهروكيماوي يحول الطاقة الكيميائية مباشرة إلى طاقة كهربائية ، تتكون خلية الوقود من محلول كهرليتي (الكتروليت) على تماس مع قطبين كهربائيين هما المصعد والمهبط على كل جانب الشكل (46) يوضح مكونات خلية الوقود والمواد الداخلة بالتفاعل و حركة الشوارد الكيميائية .



الشكل (46)

في خلية الوقود النظامية يتم حقن الوقود الغازي إلى حجرة الالكترود السالب كما يتم حقن مادة مؤكسدة إلى حجرة الالكترود الموجب،التفاعل الكهروكيماوي الحاصل عند سطوح الالكترودات ينتج عنه التيار الكهربائي، إن مبدأ عمل خلية الوقود يشبه لحد ما مبدأ عمل البطاريات مع وجود فارق فالبطارية هي جهاز لاختزان الطاقة بشكل كيماوي طالما أن هناك تفاعلاً كيماوياً يحدث داخل البطارية فإن هناك تياراً كهربائياً على مخارج البطارية و عندما يضعف التفاعل الكيميائي (ضعف التيار الكهربائي المقدم من البطارية) يتم إعادة شحن البطارية أي أن هناك مصدر خارجي لتزويد البطارية بالطاقة اللازمة ،

بالنسبة لخلية الوقود لا يتم اختزان الطاقة بل تحويلها من شكلها الكيميائي إلى الشكل الكهربائي طالما أنه يتم حقن الوقود والمؤكسدإلى الالكترودات أي لا نحتاج لمصدر كهربائي كما هو الحال في البطارية القابلة للشحن .



الشكل(46 ب)

إن مهمة طبقة الكهرليت electrolyte هي تأمين وسط الانتقال للشوارد أي نقل التيار الكهربائي عبرها بالإضافة لضمان عدم حدوث تماس بين الوقود و المادة المؤكسدة .
أما وظيفة الالكترودات فهي تأمين سطح لحدوث تفاعلات التأين أو توليد الشواردionization كذلك تأمين نقل الشوارد المتولدة عبر الوسط ذو الأطوار الثلاثة لذلك يجب تصنيع الالكترود من مادة ذات ناقلية كهربائية عالية و نشيطة كيميائياً لضمان حدوث التفاعل الكيماوي و لا سيما في بيئة تنخفض فيها درجة الحرارة .
يتم استخدام الهيدروجين كوقود في معظم أنواع خلايا الوقود بسبب قدرته العالية على إحداث التفاعل الكيماوي و سهولة الحصول عليه من المواد الهيدروكربونية بالإضافة لكثافة الطاقة القابلة للاختزان عندما يتطلب الأمر اختزان الطاقة مثل مشاريع رحلات الفضاء .
المادة المؤكسدة المستعملة هي الأوكسجين الغازي المتوفر في الجو والذي من السهل اختزانه في حاويات خاصة ، هناك توازن في عمل مكونات خلية الوقود الالكترودات و الطبقة الكهرليتية و الغازات المتدفقة عبر طبقة الكهرليت فإذا كان الكهرليت ضمن حجرة الالكترود زائداً فاضت هذه المادة و أعاقت أو أوقفت عمل الخلية .
خلايا الوقود الحديثة تمتاز بصغر حجم المكونات الداخلية و بمردود عالي للتفاعل الكهركيماوي و بتكلفة إنتاج منخفضة نسبياً.

5-4 -1تصنيف خلايا الوقود :

هناك عدة عوامل تؤخذ بالحسبان عند تصنيف خلية الوقود منها طريقة معالجة الوقود داخل الخلية أم خارجها (تنقية داخلية أو تنقية خارجية) ،نوع الالكتروليت أو الكهرليت ، درجة حرارة التشغيل.
الطريقة الأكثر اتباعاً لتصنيف خلايا الوقود هي بالاعتماد على نوع الالكترود المستخدم لذلك نصنفها حسب الفئات التالية :
1- خلايا الوقود البوليميرية polymer electrolyte fuel cell (PEFC), .
2- خلايا الوقود القلوية alkaline fuel cell (AFC), .

3- خلايا وقود حمض الفوسفور ,phosphoric acid fuel cell (PAFC) .
4- خلايا وقود الكربون المصهور ,molten carbonate fuel cell (MCFC) .
5- خلايا وقود الأكاسيد الصلبة ,solid oxide fuel cell (ITSOFC) .
6- خلايا وقود أوكسيدية أنبوبية . tubular solid oxide fuel cell (TSOFC) .

الأنواع السابقة من خلايا الوقود لها درجات حرارة تشغيل مختلفة .
درجات حرارة التشغيل للأنواع الستة السابقة هي بالترتيب : (1) 80 ،(2)100، (3)200، (4)650 ،(5) 800 ، (6) 1000 درجة مئوية .
بالنسبة لخلايا الوقود التي تعمل عند درجات حرارة منخفضة يكون الهيدروجين هو الوقود الحصري المستخدم أما الأنواع التي تعمل بدرجات حرارة عالية فيمكن استخدام غاز أول أوكسيد الكربون أو غاز الميتان كوقود.

2-5-4 وصف موجز لبعض خلايا الوقود :

1- خلايا الوقود البوليميرية :
الالكتروليت في هذا النوع هو حاجز مسامي membrane لتبادل الشوارد و هو على الغالب من بوليميرات حمض فلورالكبريت أو مادة شبيهة بها ذات ناقلية عالية للبروتونات ، السائل الوحيد في هذه الخلية هو الماء فقط لذلك فإن عامل التآكل يكون ذو تأثير ضعيف ، يجب أن تعمل الخلية بظروف تشغيل لا تسمح بتبخر الماء بسرعة و بحيث يبقى الحاجز المسامي رطباً ، تكونة درجة حرارة التشغيل أقل من 120 درجة مئوية ، بسبب صعوبة الحفاظ على كمية الماء يستخدم غاز غني بالهيدروجين وخال من غاز الكربون والمواد السامة .

2- خلايا الوقود القلوية :
الالكتروليت في هذا النوع هو ماءات البوتاسيوم المركز و تعمل الخلية عند درجات حرارة عالية نسبياً 250 درجة مئوية و ذلك عندما يكون تركيز ماءات البوتاسيوم بحدود 85% وعند تركيز أقل 35-50% تكون درجة حرارة التشغيل أقل من 120 درجة مئوية ،يتم استخدام صفائح من الاسبيستوس ضمن الالكتروليت كما يمكن استخدام العديد من العناصر الكيميائية كمنشط تفاعل ضمن الالكتروليت مثل النيكل ،الفضة ، أكاسيد المعادن ،المعادن الثمينة وغيرها ،الوقود المستخدم غالباً هو الهيدروجين ، لا يسمح باستخدام أحادي أوكسيد الكربون بسبب سميته و لا ثنائي أوكسيد الكربون لأنه يتفاعل مع ماءات البوتاسيوم وينتج وسطاً كيماوياً جديداً لا يناسب مواصفات عمل الخلية .

3- خلايا حمض الفوسفور:
يتم استخدام حمض الفوسفور بكامل التركيز في هذا النوع من الخلايا،درجة حرارة التشغيل تتراوح بين 150 إلى 220 درجة مئوية ،عندر درجة حرارة أقل يصبح الحمض ضعيفاً في نقل الشوارد الكيماوية ،استخدام الحمض عالي التركيز يخفف من ضغط بخار الماء الناتج لذلك لا يوجد صعوبات فنية فيما يخص الماء المستخدم في الخلية .

4- خلايا وقود الكربون المصهور :
الالكتروليت المستخدم هنا هو من مركبات الكربون القلوية والذي يتوضع ضمن مصفوفة من السيراميك من مادة $LiAlO_2$ ، الخلية تعمل بدرجة حرارة تشغيل تتراوح بين 600 و 700 درجة مئوية ،حيث تسمح أملاح الكربون المتشكلة بناقلية عالية للشوارد ،القطب الموجب للخلية يصنع غالباً من معدن النيكل و القطب السالب من أوكسيد النيكل و لا داعي لاستخدام المعادن النفيسة .

منشآت خلايا الوقود لتوليد الطاقة الكهربائية :

تقوم خلية الوقود بتركيب الهيدروجين المأخوذ من الوقود مع الأوكسجين المأخوذ من الهواء لإنتاج تيار كهربائي مستمر بالإضافة للماء والحرارة ،في حال استخدام غاز الميتان في التفاعل لتوليد الهيدروجين اللازم يكون من النواتج الغازية غاز ثاني أوكسيد الكربون، يجب أن يتم التفاعل الكيماوي عند ضغط ودرجة حرارة مناسبين ،يتم بناء المنشأة حول مجمع خلايا الوقود لتزويدها بالهواء والوقود النقي ، الطاقة الكهربائية الناتجة على شكل تيار مستمر يتم معالجتها بحيث تصبح مناسبة للاستخدام في الشبكة الكهربائية ،الحرارة الناتجة عن التفاعل الكيماوي يتم سحبها و الاستفادة منها .

تبدأ مراحل العمل بمعالجة الوقود الداخل (غاز طبيعي ،ميثانول ،فحم حجري ،غازات كربوهيدرية) حيث يتم تنقية الوقود وتصفيته بعدها يتم تحويله لغاز يحتوي على الهيدروجين، يتولد التيار الكهربائي المستمر من مجموعة الخلايا المصطفة والمتراصة في كتلة واحدة تشبه الخلايا المكونة لبطارية السيارة حيث تصطف صفائح الرصاص لجانب بعضها البعض ، مجموعة الخلايا المتراصة في كتلة واحدة تسمى stack (رفوف التجميع) عدد هذه الرفوف يحدده قيمة التيار الكهربائي المطلوب الحصول عليه ،المرحلة الأخيرة تكون بمعالجة التيار المستمر وتحويله لتيار متناوب بتردد مناسب يمكن حقنه للشبكة العامة .

3-5-4 دراسة تفصيلية لبعض أنواع خلايا الوقود :

1- خلية الوقود البوليميرية PEFC :

تمتاز هذه الخلية بالقدرة على تقديم كثافة تيار كهربائي عالية ، صغر الحجم والوزن ،تكلفة منخفضة نسبياً .الحاجز المسامي غير القابل للتحريك الموجود ضمنها والذي يشكل طبقة الالكتروليت يسهل من تشكيل تصميم كتيم ضد التسرب أثناء عملية التصنيع كذلك يخفض من عوامل التآكل الداخلي ويعطي عمراً أطول للخلية . تمتاز هذه الخلية أيضاً بالإقلاع السريع و تجاوب متوسط للتغير في الطلب على الطاقة على مخرجها المغذي للأحمال الكهربائية ،تستخدم هذه الخلية في وسائط النقل الصغيرة . لاحظ الشكل (47) .

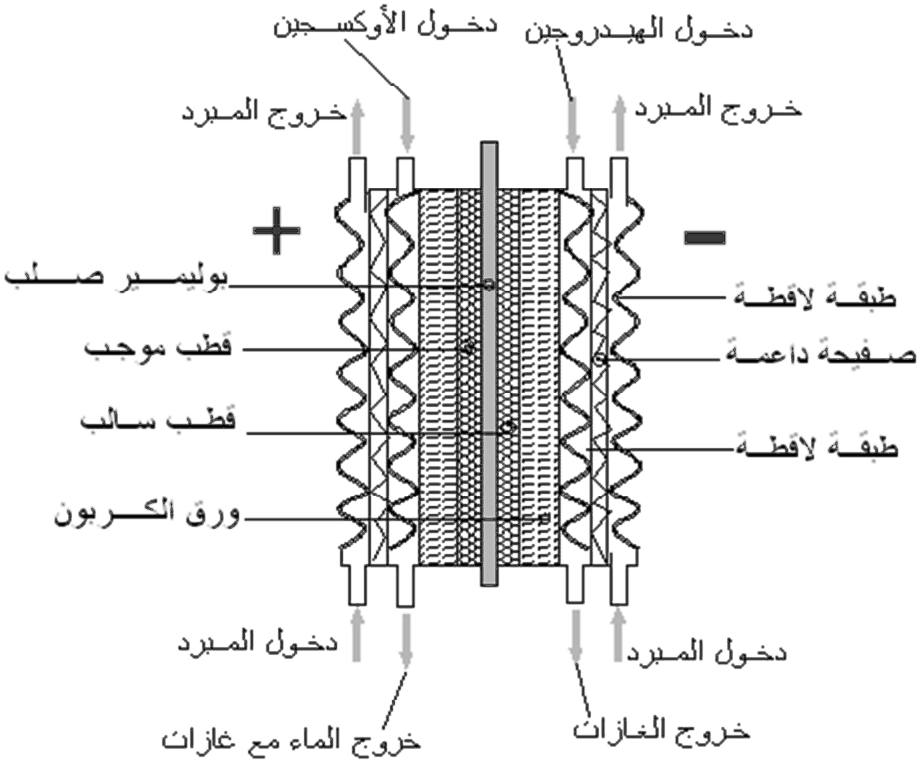
الحاجز المسامي ضمن الخلية يلعب دوراً هاماً في تأمين حركة الشوارد وحجز الغازات الناجمة عن التفاعل ، يستخدم حمض قوي لتأمين الاحتكاك والتفاعل بين جانبي الحاجز المسامي و سطوح عناصر التنشيط الكيماوي ، الدراسات الحديثة أثبتت أن الخلية تعمل وبشكل جيد حتى بدون إضافة الحمض ولا تحتاج سوى لحاجز مسامي رطب ، طبقة الالكتروليت (الحاجز المسامي) متوضعة كشريحة (تشبه في توضعها السندويش) بين شريحتين مساميتين هما القطبان الكهربائيان الموجب والسالب مصنوعان من البلاتينيوم ،أحد سطوح القطب تطلى بمادة التفلون لتسهيل انتشار الغاز .

التفاعل الكهروكيماوي في الخلية يسير بالشكل التالي : غاز الهيدروجين عند المصعد (القطب الموجب) يولد البروتونات المتجهة عبر الالكتروليت نحو القطب السالب (المهبط) و تتفاعل مع الأوكسجين و ينتج عن ذلك الماء وبشكل متعاقب عند المهبط .

لدى استخدام هذا النوع من الخلايا في وسائط النقل فإن الوقود المستخدم على الأغلب هو الميثانول يمكن استخدام الهيدروجين المضغوط ضمن حاويات خاصة قابلة للنقل ،كذلك يستخدم الغازولين المؤكسد جزئياً كوقود ،يمكن استخدام هذه الخلية لمشاريع توليد الطاقة الكهربائية ويستخدم كوقود الغاز الطبيعي أو أي غاز غني بالهيدروجين .

العمل بدرجة تشغيل منخفضة نسبياً يعتبر صفة إيجابية وسلبية بنفس الوقت ،فهو ميزة إيجابية حيث تستطيع الخلية العمل بظروف المحيط و تقلع للعمل بسرعة حتى بظروف عمل بوقود فقير بالهيدروجين ،وبنفس الوقت صفة سلبية حيث من الضروري توفر عنصر البلاتينيوم لتحقيق التفاعل الكهروكيماوي ، غاز أحادي الكربون يرتبط بقوة إلى موقع البلاتينيوم عند درجات حرارة أقل من 150 درجة مئوية و يأخذ موقع غاز الهيدروجين على القطب ،لذلك لا بد من آلية لإنقاص نسبة أحادي الكربون في الوقود الغازي المستخدم .

كذلك درجة حرارة التشغيل المنخفضة تعني الحصول على كمية صئيلة من الحرارة الممكن الاستفادة منها بمراحل التنقية .



الشكل(47)

وظيفة الماء في الخلية :

يتم إنتاج الماء في الخلية ليس كبخار فقط إنما كسائل من النقاط المهمة الاحتفاظ بنسبة معينة من الماء ضمن طبقة الالكتروليت لـتأمين الناقلية الجيدة للشوارد ، الناقلية للشوارد تكون أعلى عندما يكون الحاجز المسامي مشبعاً بالماء و هذا يعني مقاومة كهربائية صغيرة في وجه حركة التيار الكهربائي وبالتالي زيادة مردود الخلية .

يجب المحافظة ضمن الخلية على التوازن بين الماء المتشكل والماء المتبخر، فإذا كان الماء المستهلك كبخار وغيره أكثر من الماء المتشكل عندها يجب تعريض الغاز الداخل للمصعد للرطوبة، أيضاً إذا كانت نسبة الرطوبة عالية عندها ستفيض الأقطاب مما يمنع حركة الغاز عند الأقطاب .

عندما تكون كمية الماء دون الحد المطلوب ينتج : تياركهربائي أقل ،حركة جريان أكبرللعناصر المتفاعلة ، رطوبة أقل ،درجة حرارة أعلى ، ضغط أقل .

عندما تكون كمية الماء زائدة عن الحد المطلوب ينتج : تيار كهربائي أعلى ،حركة جريان أقل للعناصر المتفاعلة ، رطوبة أعلى ،درجة حرارة أقل ، ضغط أعلى .

معظم الخلايا من هذا النوع مزودة بصفائح لاقطة من الغرافيت لالتقاط التيار الكهربائي وتوزيعه و توزيع الغازات و التحكم بالحرارة ، التبريد يتم باستخدام سائل تبريد (المبرد) و عل الأغلب يستخدم الماء لهذا الغرض .

إن وجود نسبة من أحادي أوكسيد الكربون ولو 1% ضمن الوقود الهيدروكربوني المستخدم ستنعكس سلباً على عمل الخلية حيث سيمنع حركة الهيدروجين لمواقع عناصر التفاعل ،لذلك يجب تعريض الوقود لعملية معالجة خاصة لتخفيض كمية أول أوكسيد الكربون ،إن استخدام أنظمة معالجة سيزيد من

تكلفة الخلية ، الأبحاث جارية لاستخدام عناصر تفاعل من البلاتينيوم و الريثينيوم التي تمتلك خاصة التفاعل الضعيف مع الهيدروجين .
هناك عدة أنواع لعملية تنقية الوقود أشهرها : التنقية بتغيير الضغط ، التنقية باستخدام الميثان ، الأكسدة الانتقائية .
تعتبر طريقة الأكسدة الانتقائية الطريقة الأقل استهلاكاً للطاقة مقارنة بالطرق الأخرى ، هنا يتم مزج الوقود بالهواء أو الأوكسجين قبل دخوله للخلية أو يمكن وضع عناصر مؤكسدة بين مدخل مجرى الوقود وبين عناصر التفاعل على المصعد .
الحاجز المسامي المستخدم في هذا النوع من الخلايا مرتفع الثمن و يتوفر بسماكات محدودة مع ناقلية محدودة للشوارد ،هناك أيضاً مشكلة تشكل طبقة من النتروجين عند مدخل الغاز للمهبط والتي تضعف من حركة الشوارد لذلك لابد من تطوير المواد المشكلة للمهبط .

2- خلية الوقود القلوية AFC :

هذا النوع من الخلايا بدأ تطويره منذ عام 1960 حيث ظهرت الحاجة لمصدر طاقة متحرك محمول لاستخدامه في سفينة الفضاء أبولو ،تمتاز هذه الخلية بالقدرة الجيدة على العمل مع غاز الهيدروجين أو الأوكسجين .
المصعد يتكون من طبقة مضاعفة (قطب مزدوج) من النيكل والمهبط مكون من أوكسيد النيكل .
الشكل (48) يوضح تركيبة هذه الخلية .

عند المهبط ينحل الأوكسجين في الماء وتتشكل شوارد الهيدروكسيد

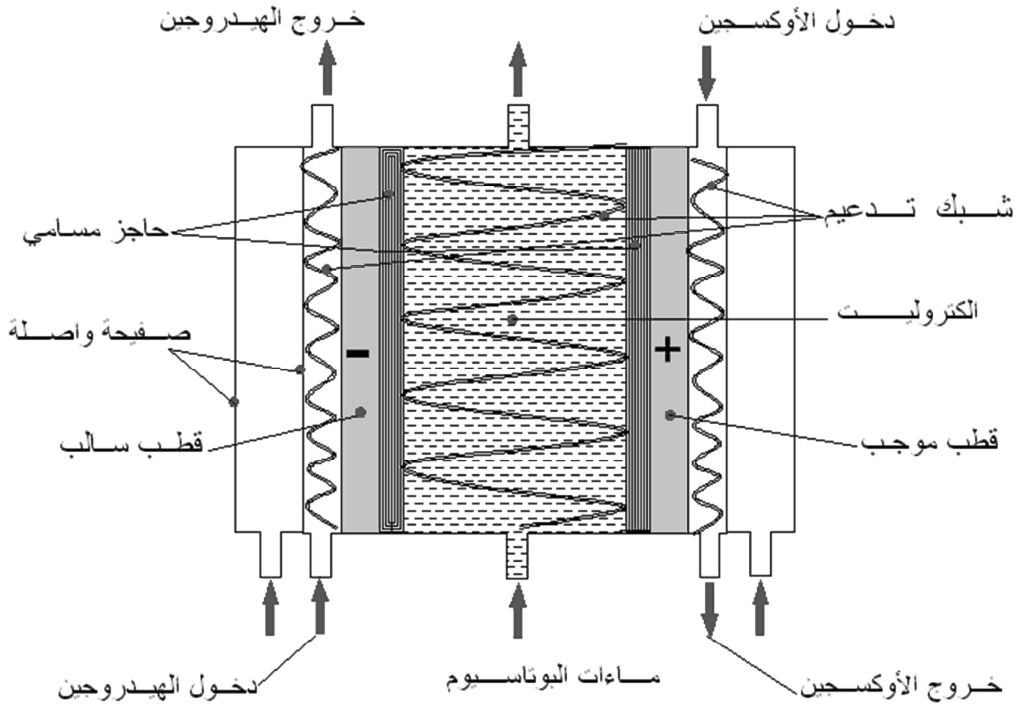
$$O_2 + {}_2H_2O + 4e^{--} \longrightarrow 4OH^{--}$$

عند المصعد يتفاعل الهيدروجين مع شوارد الهيدروكسيد ويتشكل الماء وتتحرر الكترونات

$$H_2 + 2OH^{--} \longrightarrow 2H_2O + 2e^{--}$$

+

في معظم الخلايا القلوية الالكتروليت يكون قابلاً للتدوير (مثل عملية تدوير الماء في نظم التبريد والتدفئة) للاستفادة من الحرارة أو التخلص منها ، بتدوير الالكتروليت السائل يمكن التخلص من الحرارة غير المرغوبة وتبخير الماء الزائد .
خلية الوقود القلوية التي استخدمت في مكوك الفضاء Orbiter كانت مستطيلة الشكل بعرض 38 سم وطول 101 سم و ارتفاع 35 سم ووزن 91 كغ باستطاعة كهربائية قصوى 12 ك واط بجهد كهربائي 27,5 فولت وتعمل باستطاعة وسطى قدرها 7 ك واط ، تعمل بمجال حراري بي 80 إلى 90 درجة مئوية و كثافة تيار كهربائي قدرها 470 ميللي أمبير لكل سم مربع .
عندما يتم استخدام الخلية القلوية لأغراض الفضاء أو أعماق البحار أو لأغراض عسكرية فإن التكلفة المادية لا تكون بالأمر المهم ، لكنها تكون العامل الأهم عند الاستخدام لأغراض صناعية ، استخدام الكربون المسامي في تصنيع الأقطاب ساهم في تخفيض تكلفة الخلية .



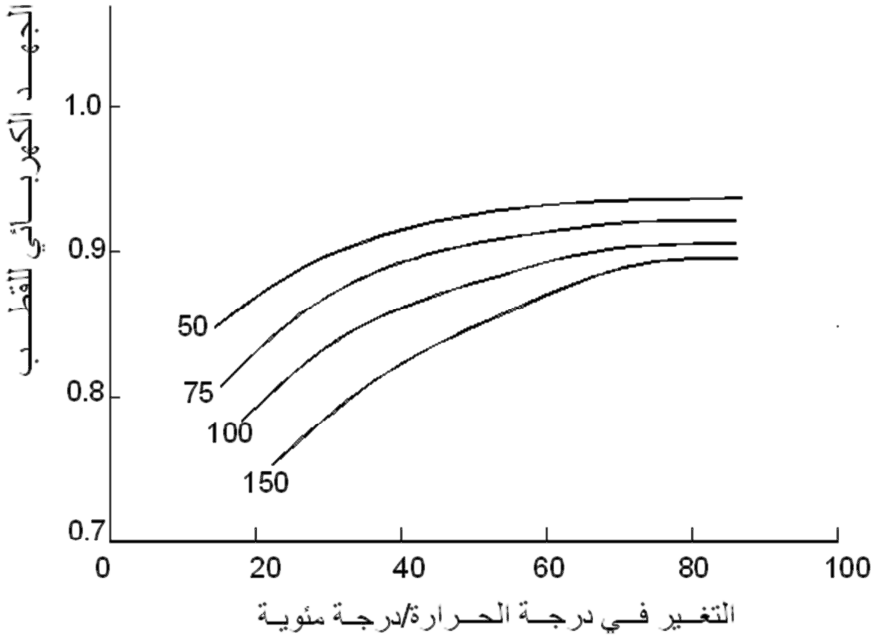
الشكل(48)

تأثير درجة الحرارة في عمل الخلية :
إن الزيادة في درجة الحرارة يحسن أداء الخلية حيث يقل الاستقطاب و تقل المقاومة الكهربائية إن التحسن في أداء عمل المهبط المسامي باختلاف درجات الحرارة موضح بالشكل (49) عند قيم لكثافة التيار الكهربائي هي 50 ، 75 ،100، 150 ميللي أمبير لكل سم مربع ،الطاقة الكهربائية الكامنة للالكترود تتناقص عند كثافة تيار كهربائي محددة و حدة التناقص تزداد كلما زادت كثافة التيار.

تأثير وجود الشوائب :
ينخفض أداء الخلية في حال وجود نسبة من غاز ثاني أوكسيد الكربون في الوقود المستخدم أو في الهواء المحيط ، الأثر السلبي لوجود غاز ثاني أوكسيد الكربون يكون بتفاعله مع شوارد OH^- حسب التفاعل التالي :

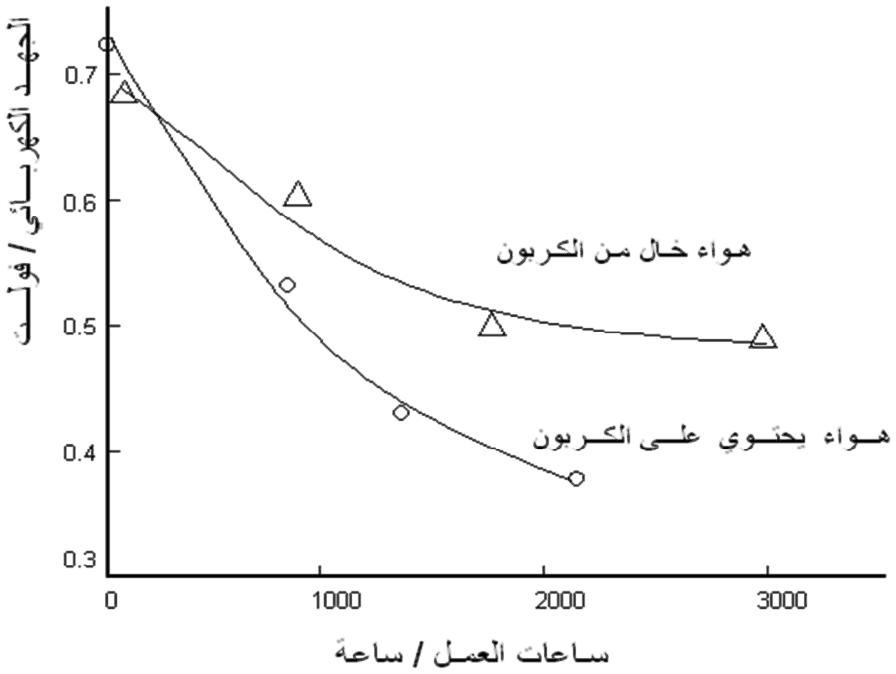
$$CO_2 + 2OH^- \longrightarrow CO_3^{--} + H_2O$$

يترتب على ماسبق النتائج التالية :
1- انخفاض كمية الشوارد OH^- يؤثر على قيمة الطاقة الحركية للشوارد .
2- ازدياد قيمة لزوجة الالكتروليت مما يخفض من معدل الانتشار لحركة العناصر و انخفاض معدل الحد من التيار .
3- ترسيب أملاح الكربون عند الالكترودات المسامية .
4- انخفاض معدل انحلال الأوكسجين .
5- انخفاض ناقلية الالكتروليت .



الشكل(49)

لمعرفة تأثير وجود غاز ثاني أوكسيد الكربون على أداء الخلية تم تشغيل الالكترودات الهوائية في حالتين : مع هواء يحتوي غاز ثاني أوكسيد الكربون وهواء خال من غاز ثاني أوكسيد الكربون حيث لوحظ أن قيمة الجهد الكهربائي يبقى محافظاً على قيمته في حال العمل مع هواء خال أو قليل الاحتواء على غاز ثاني أوكسيد الكربون كما يوضح ذلك الشكل (50).



الشكل(50)

خلايا الوقود ذات الأكاسيد الصلبة SOFC :

يمتاز هذا النوع من الخلايا بالعمل بدرجات حرارة عالية نسبياً وهو لا يحتوي الكتروليت سائل بل طبقة صلبة و لا مشاكل ناجمة عن التآكل داخل الالكتروليت .العمل بدرجات حرارة أعلى من 800 درجة مئوية يسمح بحصول نوع من التنقية الداخلية دون الحاجة لاستخدام مواد ثمينة و ينتج كمية كبيرة من الحرارة يمكن الاستفادة منها ،إن تصميم خلايا من هذا النوع ذات هيكل من السيراميك المنخفض الكلفة هو مفتاح التطور لهذا النوع من الخلايا .

بنية هذه الخلية تتكون من مواد صلبة و هذا يعني مجال واسع من إمكانية التعديلات في التصميم حيث يمكن التحكم بشكل الخلية وحجمها بحسب التطبيق الذي ستستخدم من أجله ،يتم تطوير الخلية على نوعين : الأول هو الخلية الأنبوبية Tubular Cell حيث تقوم شركتين بالأبحاث هما Siemens و Westinghouse حيث قامتا بتطوير خلايا باستطاعة 100 كيلو واط .

انظر الشكل (51) في.

الشكل (51 ب) يوضح طريقة توضع مجموعة من الخلايا الأنبوبية (Stack) ضمن حاوية صندوقية .

عند المصعد يحدث تشكل للماء مع تحرير الكترونات حسب التفاعل التالي :

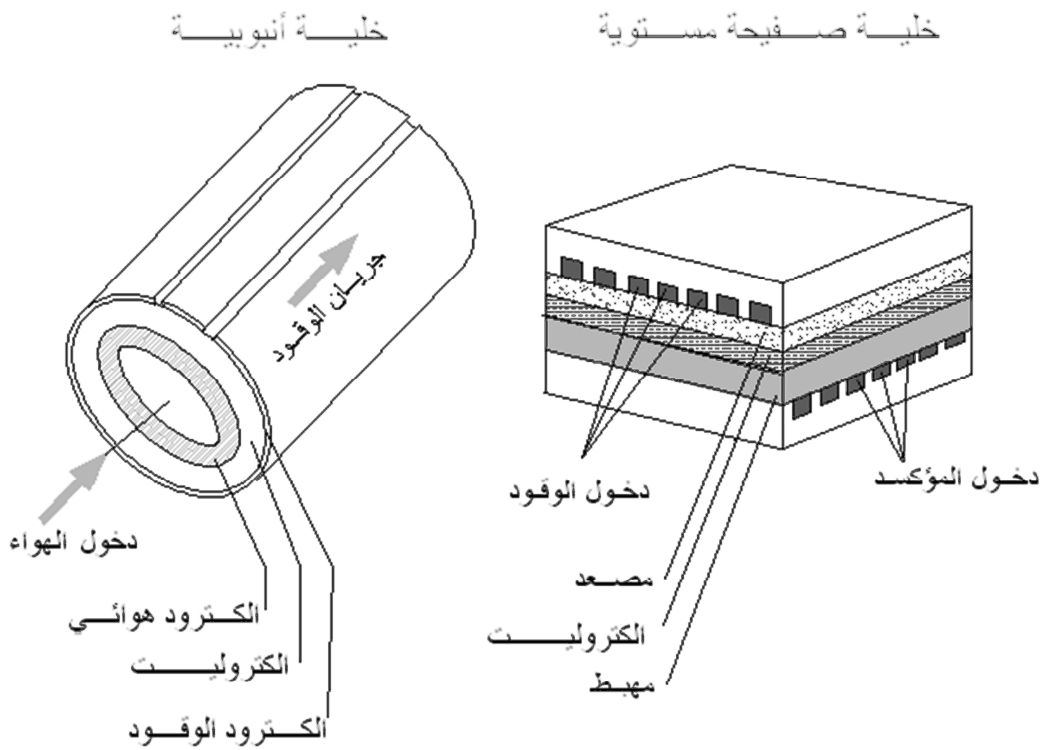
$$H_2 + O^{--} \longrightarrow H_2O + 2e^-$$

عند المهبط يتحلل الأوكسجين إلى شوارد حسب التفاعل التالي :

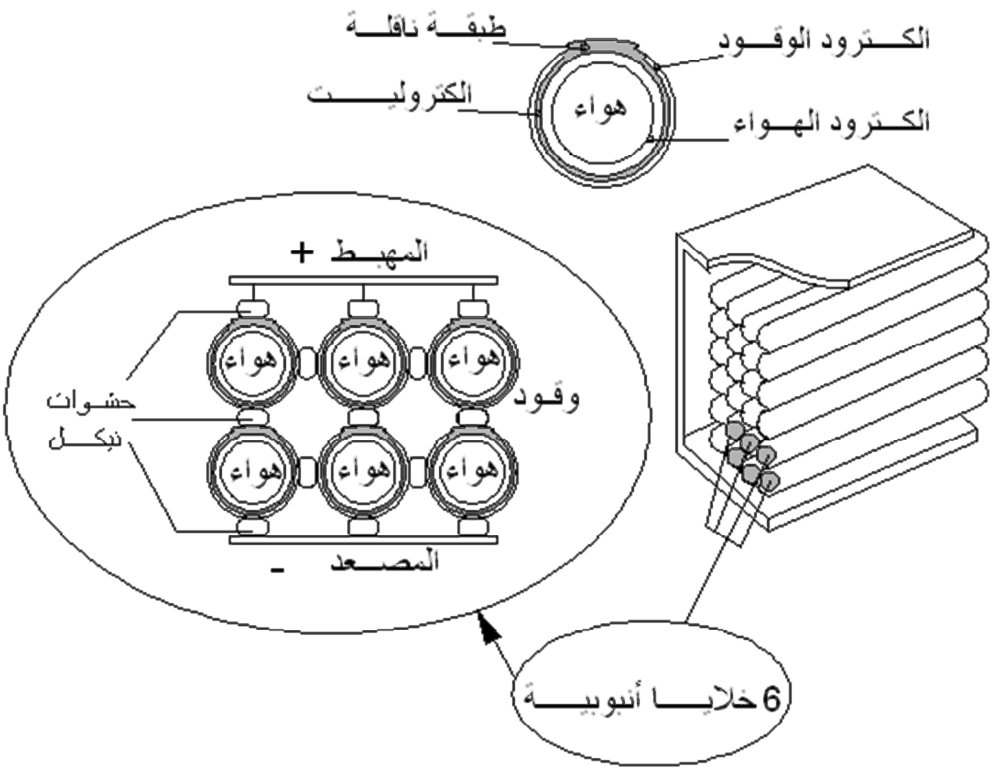
$$1/2O_2 + 2\,e^- \longrightarrow O^{--}$$

التفاعل الإجمالي ضمن الخلية هو :

$$H_2 + 1/2O_2 \longrightarrow H_2O$$



الشكل (51)



الشكل (51 ب)

يمكن استخدام غاز أحادي الكربون أو غاز الميتان في هذا النوع من الخلايا ،إن درجة الحرارة المرتفعة تسهل من توليد غاز الهيدروجين الذي يتأكسد بسهولة عند المصعد .
التصاميم الحديثة لخلايا الوقود ذات الأكاسيد الصلبة تستخدم طبقات رقيقة film كأقطاب كهربائية ووسط الكتروليت ،يجب أن تكون طبقة الأوكسيد الصلبة (الالكتروليت) خالية من المسامات بحيث لايمكن للغاز أن يتغلغل من أحد جانب الطبقة إلى الجانب الآخر، كذلك عدم سماكة طبقة الالكتروليت عامل مهم لخفض قيمة المقاومة الأومية .
المواد التي تصنع منها الخلية يجب أن تكون مستقرة عند العمل بدرجات حرارة عالية و يجب الأخذ بالحسبان عامل التمدد نتيجة الحرارة فعند التصميم هناك عامل التمدد الحراري بحيث لا تنشأ إجهادات ميكانيكية داخل الخلية أثناء التشغيل .
تمتاز الخلايا الأنبوبية عن الخلايا المسطحة بالمتانة ضد تسرب الغازات كم تمتاز بطبقات رقيقة جداً تصل إلى 10 ميكرو مترأي عشرة بالمليون من المتر $10\mu m$.

تأثير الضغط على عمل الخلية SOFC :
زيادة الضغط يحسن من قيمة الجهد الكهربائي المتولد ضمن الخلية حسب العلاقة التالية :

$$\Delta V = 59 \log(P_2/P_1)$$

الزيادة في الجهد الكهربائي للعلاقة السابقة مقدرة ب ميللي فولت mv .

الشكل (52) يوضح أداء أحد الخلايا عند ضغوط جوية مختلفة حتى قيمة 15 وحدة ضغط جوي (15 atm) ، الوقود المستخدم 89 % هيدروجين و 11% ماء ، و المؤكسد المستخدم هو الهواء العادي المحور العامودي هو الجهد الكهربائي للخلية مقدراً بالفولت(cell voltage / volt) والمحور الأفقي هو كثافة التيار الكهربائي ميللي أمبير لكل سم مربع (current density m A/cm^2) .

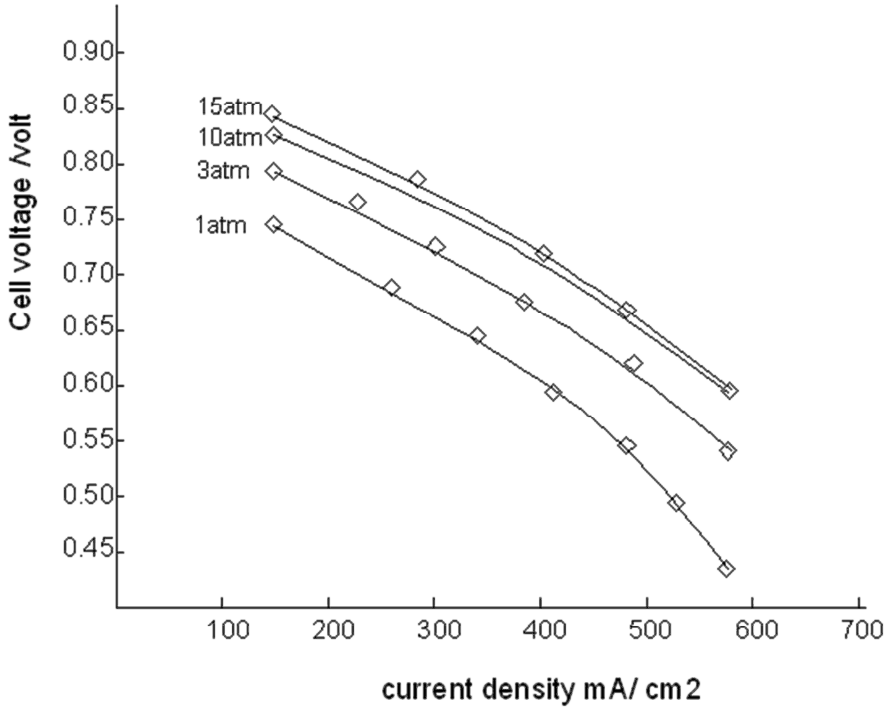
تأثير درجة الحرارة على عمل الخلية SOFC :

الشكل (53) يوضح العلاقة بين الزيادة في الجهد الكهربائي للخلية volt مع كثافة التيار الكهربائي mA /cm^2 وذلك ضمن تجارب بدرجات حرارة مختلفة تتراوح بين 800 حتى 1050 درجة مئوية التجارب أجريت على ستاك stack مكون من خليتين ، وقود الخلية مكون من الهيدروجين بنسبة 67% و غاز أحادي الكربون بنسبة 22% والماء بنسبة 11% و الهواء كمؤكسد. الانخفاض الشديد في جهد الخلية عند درجة حرارة 800 يفسر بضعف الناقلية للشوارد أو زيادة معدل الاستقطاب ضمن الالكتروليت .

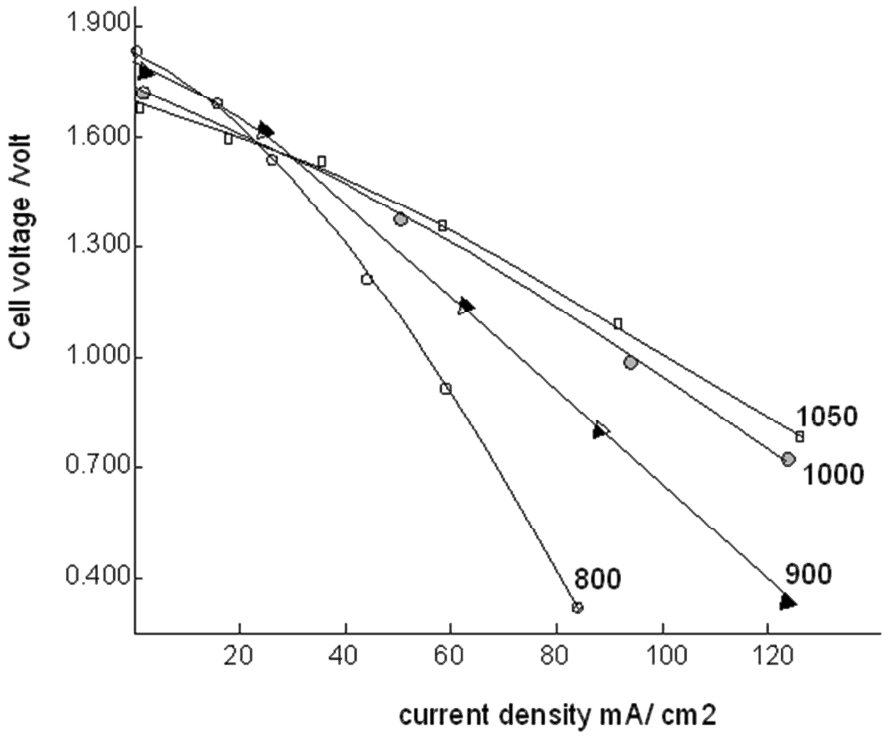
عندما يكون المجال الحراري بين 900 و1050 درجة مئوية الزيادة في الجهد الكهربائي للخلية مقدراً ب ميللي فولت يحسب وفق القانون التالي :

$$\Delta V = 0.008\ (T_2 - T_1) x\ J$$

حيث المقدار J هوقيمة كثافة التيار الكهربائي mA /cm^2



الشكل (52)



الشكل (53)

4-5-4 أنظمة الطاقة العاملة على خلايا الوقود :

تحتاج نظم الطاقة العاملة على خلايا الوقود إلى مجموعة من العناصر المتكاملة في وظيفتها إضافة لخلايا الوقود حيث أن خلية الوقود تعطي تياراً مستمراً ولا يمكن استخدامه بشكل مباشر في الشبكة الكهربائية .

بشكل عام يتألف نظام الطاقة العامل على خلية الوقود من : وحدة معالجة الوقود ، قسم خلايا الوقود، وحدة تعديل التيار الكهربائي و وحدة التدوير الحراري للاستفادة من الحرارة الناتجة .

معالجة الوقود :

تعرف عملية معالجة الوقود بأنها تحويل الغاز السائل أو الوقود الصلب الخام إلى وقود غازي منقى يمكن حقنه في خلية الوقود وكأمثلة على عمليات المعالجة :

- تنظيف الوقود الخام وإزالة شوائب الكبريت والأمونيا لمنع عوامل التسمم في الخلية .
- تحويل الوقود الخام : تحويل الوقود الهيدروكربوني إلى غاز منقى غني بالهيدروجين .
-تحويل أول أوكسيد الكربون والماء الموجودين في الوقود الغازي المنقى إلى هيدروجين وغاز ثاني أوكسيد الكربون من خلال تفاعلات الإزاحة حيث يتم انتقاء الأوكسجين للتقليل من نسبة أحادي أوكسيد الكربون للحدود الدنيا أو إزالة الماء بطريقة التكثيف لزيادة تركيز الهيدروجين .

هناك عدة عوامل تتحكم بوحدات معالجة الوقود نذكر منها :

الوقود المتوفر في السوق والمناسب لاستخدامات خاصة ، مواصفات الوقود الغازي المنقى اللازم لخلايا الوقود ، حجم خلية الوقود ، عملية التبخير للمواد الهيدروكربونية الثقيلة .

المواد الهيدروكربونية الثقيلة مثل الديزل تحتاج لدرجة حرارة بحدود 350 إلى 400 درجة مئوية ليتم تحليل مكونات هذه المواد .

الدراسات المتعلقة بمعالجة الوقود تركز على الوقود المستخدم من أجل وسائط النقل الصغيرة، التركيز على معالجة وقود الميثانول كخطوة أولى والخطوة الثانية هي معالجة الغازولين.

من المنظور البيئي يعتبر الهيدروجين هو الوقود الأنسب فيما يخص وسائط النقل لكن هناك مسألة تخزين ونقل هذا الغاز ضمن حاويات خاصة حيث المساحة والحجم عنصر مهم لذلك سمح باستخدام الهيروجين في وسائط النقل الكبيرة كالحافلات والقطارات ومنع في السيارات السياحية.
يعتبر الميثانول هو أنسب وقود ممكن تحويله لهيدروجين ليتم استخدامه في وسائط النقل ،وهو لا يتفاعل مع أحادي الكربون في درجات حرارة أقل من 400 درجة مئوية لكن من حيث المردود يأتي الميثانول بعد الغازولين من حيث الاستخدام في وسائط النقل .
الغازولين يمتلك عدة ميزات تفضلع عن الميثانول لكن المشكلة تكمن في عملية تحويله لهيدروجين حيث يتطلب درجات حرارة تتجاوز 650 درجة مئوية .

5-4 -5 عملية تحويل الوقود :

تتم عملية تحويل الوقود الغازي أو السائل المكون من مواد هيرروكربونية خفيفة إلى هيدروجين و أحادي الكربون بمرحلة تسمى التصفية أو التنقية reforming وهناك ثلاث طرق شائعة لتنقية الوقود وهي :
1- التنقية بالبخار .
2- التنقية بالأكسدة الجزئية .
3- التنقية الحرارية التلقائية .

1-التنقية بالبخار :Steam reforming

هذه الطريقة قديمة الاستخدام والأكثر شيوعاً في تحويل الكربوهيدرات الخفيفة إلى أوكسجين ،يتم هنا تسخين الوقود وتبخيره ثم يتم حقنه مع بخار شديد الحرارة إلى حجرة التفاعل ،الوقود الهيدروكربوني الثقيل يحتاج لدرجات حرارة أعلى مع البخار ،التنقية بالبخار تتم باستخدام عنصر النيكل كعنصر تفاعل كما يمكن استخدام الكوبالت والمعادن الثمينة لكن هذا فيه تكلفة عالية كل الهيدروكربونات الثقيلة يتم تحويلها لخليط غازي يحتوي الهيدروجين والميثان وغازأوكسيد الكربون ،كذلك لعنصر التفاعل دور في حصول تفاعلات الإزاحة shift reaction من نوع ماء –غاز .
هذا النوع من التنقية هو عملية بطيئة وتتطلب بنفس الوقت حجرة تفاعل بحجم كبير ويتم استخدام أفران تسخين بدرجات حرارة عالية ، يزداد مردود وحدة المعالجة إذا تم الاستفادة من الحرارة الناجمة عن التسخين .
التنقية بالبخار مناسبة للهيروكربونات الثقيلة حيث ينتج عنها عنصرالميثان المناسب لعمليات التنقية الداخلية لخلايا الوقود عند درجات حرارة عالية .

2- التنقية بالأكسدة الجزئية Partial Oxidation Reforming :

هذا النوع من التنقية هو احتراق داخلي ناقص وغبر كامل للوقود حيث يتم استخدام الهواء في هذه العملية لرفع درجة حرارة المفاعل لقيمة عالية ،يتم تمرير بخار مرتفع الحرارة لضمان حصول تفاعل إزاحة ماء –غاز و تفاعل التنقية بالبخار، عند درجات حرارة أقل يمكن استخدام عنصر التنشيط الكيماوي لتسريع التفاعل .
إن عملية المعالجة للغازولين بدون منشط كيماوي يتطلب درجة حرارة 1000 درجة مئوية ، استخدام درجات حرارة منخفضة في عملية التحويل تعطي مقادير أقل من أول أوكسيد الكربون وهذه نقطة مهمة للخلايا التي تعمل بدرجات حرارة منخفضة كذلك العمل بدرجات حرارة منخفضة يزيد من مردود المفاعل .
بالنسبة لوقود الديزل الحاوي على عنصر الكبريت يحتاج المفاعل لدرجة حرارة مقدارها 925 درجة مئوية و بالنسبة لوقود الديزل العادي تستخدم حرارة 1175 درجة مئوية .
على الرغم من أن الدراسات أثبتت أن المردود في عملية التنقية بالأكسدة الجزئية هو أعلى منه في عملية التنقية بالبخار إلا أن كمية الهيدروجين في الأخيرة هي أكبر .

3- التنقية الحرارية التلقائية Autothermal Reforming :

هي مزج بين الطريقتين السابقتين وتتم باستخدام عنصر تنشيط التفاعل يتحكم بمجرى التفاعل وبالتالي يحدد نسبة التفاعل لكل من التنقية بالبخار والتنقية بالأكسدة الجزئية ،أن تفاعل التنقية بالبخار يمتص قسماً من الحرارة الناجمة عن التفاعل بالأكسدة الجزئية و هذا يعني الحد من قيمة درجة الحرارة ضمن المفاعل .

هذا النوع من التنقية أفضل من الأكسدة الجزئية من حيث الحاجة لدرجة حرارة أقل وصغر حجم المفاعل و مقارنة مع التنقية بالبخار له ميزة الإقلاع السريع والتجاوب السريع مع التغيرات لظروف وعناصر التشغيل مما يعني تركيز أفضل للهيدروجين ومردود أعلى .

يجب استخدام عنصر التنشيط الكيماوي لإنقاص درجة حرارة التفاعل للأكسدة الجزئية بحيث تتوافق هذه الحرارة مع متطلبات التشغيل لعملية التنقية بالبخار.

معالجة الغاز الطبيعي :

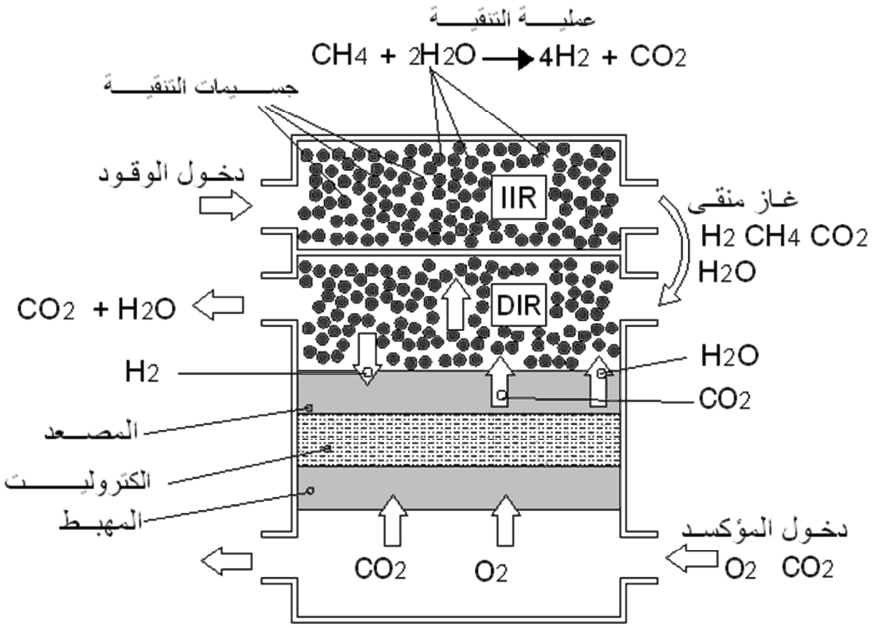
المكونات الرئيسية للغاز المنقول ضمن أنابيب نقل الغاز هي : الميثان ،الإيتان ،البروبان ، ثاني أوكسيد الكربون وفي بعض الحالات النتروجين والكبريت الحاوي على مركبات كيميائية (ملونات) للكشف عن حالات التسريب للغاز ، حيث أن كافة أنواع الوقود المستخدمة للخلايا لا تتقبل وجود عنصر الكبريت كان من الضروري التخلص من هذا العنصر ،وهذا يتم باستخدام مادة طلاء مكونة من أوكسيد التوتياء الذي يمكن استخدامه ضمن مجال حراري واسع لكن عند درجة حرارة 350 درجة مئوية يمكن الحصول على طبقة صغيرة الحجم من الطلاء .

غاز الميتان الموجود في الغاز الطبيعي يمكن تحويله لهيدروجين وأول أوكسيد الكربون ضمن مفاعل التنقية بالبخار، نفاعل الأكسدة الجزئية يمكنه أيضاً تحويل غاز الميتان إلى غاز الهيدروجين لكنه سيعطي فقط 75% من كمية الهيدروجين التي سينتجها مفاعل التنقية بالبخار لهذا السبب فإن مفاعلات الأكسدة الجزئية تستخدم فقط للوقود السائل .

التنقية الداخلية لخلايا الكربون المسبوك MCFC Internal Reforming

في نظام خلية الوقود التقليدي يتم حقن الوقود إلى وحدة معالجة وتنقية مستقلة حيث تتم المعالجة بوجود البخار للحصول على الهيدروجين الضروري ومن ثم يتم تحويل الوقود المعالج إلى خلية الوقود حيث يتفاعل مع المؤكسد (أوكسجين الهواء)،بالنسب لخلية الوقود نوع الكربون المسبوك لا حاجة لوجود وحدة معالجة مستقلة لمعالجة الوقود الحاوي على الكربون حيث يتم الاستفادة من درجة الحرارة العالية لإنجاز تفاعل التنقية بالبخار ضمن جسيمات التنقية أو عناصر تنشيط التفاعل الكيماوي .

تتم عملية التنقية الداخلية بدمج تفاعل التنقية بالبخار مع تفاعل الأكسدة ضمن الخلية دون الحاجة لوجود مفاعل وقود خارجي ،هذا النوع من التنقية يزيد من كفاءة عمل الخلية و لا داعي لوضع تصاميم معقدة ذات تكلفة عالية بالإضافة للوثوقية العالية (التغذية الكهربائية من الخلية دون انقطاعات بسبب أعطال أو غيرها).الشكل(54) يوضح عملية التنقية الداخلية للخلية MCFC



الشكل(54)

هناك نوعان رئيسان للتنقية الداخلية داخل خلية الكربون المسبوك :
التنقية الداخلية غير المباشرة Indirect Internal Reforming IIR
التنقية الداخلية المباشرة Direct Internal Reforming DIR

في النوع الأول قسم المعالجة يكون منفصلاً لكنه مجاور لمصعد الخلية وهنا يستفاد من الحرارة داخل الخلية في تنشيط تفاعل التنقية ،وهناك ميزة إيجابية أخرى لهذا النوع وهي أن قسم المعالجة وباقي تركيبة الخلية ليس لهما تأثيرات فيزيائية على بعضهما البعض ، لكن من سلبيات هذا النوع من التنقية أن عملية تحويل الميثان إلى هيدروجين لا تتم بشكل فوري .
في عملية التنقية المباشرة استهلاك الهيدروجين يساعد في تنشيط تفاعل التنقية للميثان.
الميثان هو وقود شائع الاستعمال في التنقية الداخلية لخلايا الكربون المسبوك حيث يتم تفاعل التنقية ببخار الماء وفق المعادلة الكيميائية التالية :

$$CH_4 + H_2O \longrightarrow CO + 3H_2$$

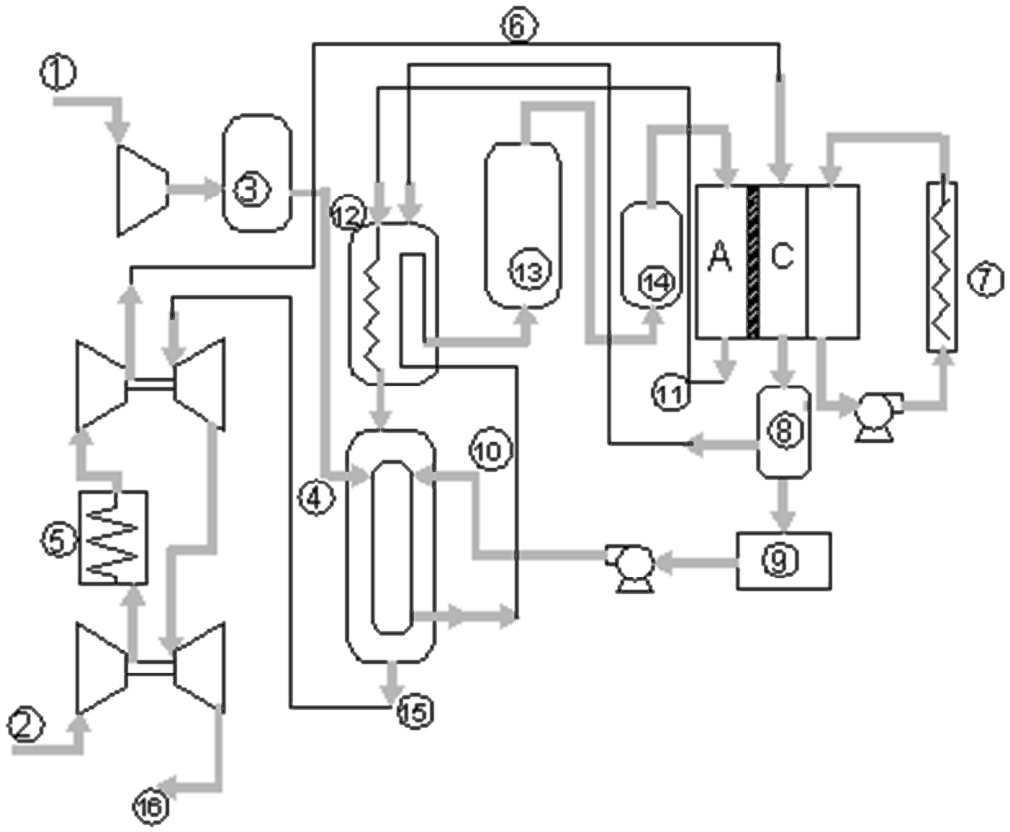
تتم عملية تنقية الميثان بالبخار عند درجة حرارة بحدود 750 إلى 900 مئوية
يمكن استخدام النيكل الموجود ضمن المصعد (Ni based anode) كعنصر تنشيط لتفاعل التنقية بالبخار عند درجة حرارة 650 مئوية لإنتاج كمية جيدة من غاز الهيدروجين بما يلبي حاجة الخلية

6-5-4 نظام الطاقة PEFC العامل على الغاز الطبيعي :

الشكل (55) يوضح مكونات هذا النوع من أنظمة الطاقة لخلايا الوقود، حيث أن الخلايا نوع PEFC تتمتع بحساسية منخفضة تجاه غاز الكربون والميثان، الوقود المكون من الغاز الطبيعي يدخل إلى ضاغط ثم حجرة التنقية والتنظيف من الشوائب (التخلص من الكبريت) ثم يتم مزج الغاز المنقى مع الماء ضمن حجرة التبخير الذي يحول الماء السائل إلى بخار الماء مستفيداً من الحرارة الضائعة في وحدة المعالجة ،هذا الوقود الذي تم ترطيبه ينقل إلى وحدة المعالجة بالبخار ،حيث أن الغاز المعالج الناتج غني بغاز أول أوكسيد الكربون يتم إرساله محول إزاحة shift convertor و جهاز أكسدة

انتقائيselective oxidizer لتخفيض نسبة أول أوكسيد الكربون للحدود المقبولة ، الوقود المعالج الغني بالهيدروجين يتم حقنه لمجمع خلايا الوقود PEFC stack حيث يتفاعل كهروميكانيكياً مع الهواء المضغوط .

الهواء المحيط يتم ضغطه ضمن حاقن توربيني Turbocharger وهذا الأخير يعمل بفعل تمدد الغازات المضغوطة الساخنة الناتجة عن المفاعل، بعد هذه المرحلة من مراحل ضغط الغاز تأتي المرحلة الثانية حيث يتم تبريد الهواء بوسطة مبرد (مروحة) ومن ثم يتم حقنه لحاقن توربيني ثان الهواء المضغوط يحقن مباشرة لمجمع خلايا الوقود،الماء الناتج عن خلايا الوقود يتم إطلاقه لتيار الغاز المؤكسد بواسطة جهازفصل الماء Water separator الذي يعطي الماء اللازم لمرحلة ترطيب الوقود قبل دخوله وحدة المعالجة ،المؤكسد والوقود يتم حرقهم ضمن حراق وحدة المعالجة لتوفير الحرارة اللازمة للتفاعل ،العوادم الناتجة من المعالج يستفاد منها لجهاز التبخيرVaporizer أخيراً الحرارة والضغط المتبقيان يتم الاستفادة منهما في الحاقن التوربيني لتدوير ضاغط الهواء.



1 وقود غازي
2 دخول الهواء
3 إزالة الشوائب
4 وقود غازي
5 مبرد
6 هواء
7 مبرد
8 حجرة فصل الماء
9 خزان ماء
10 ماء
11 وقود غازي
12 حجرة معالجة وتنقية
13 محول الإزاحة
14 حجرة الأكسدة الانتقائية
15 جهاز التبخير
16 خروج النفايات

الشكل(55)

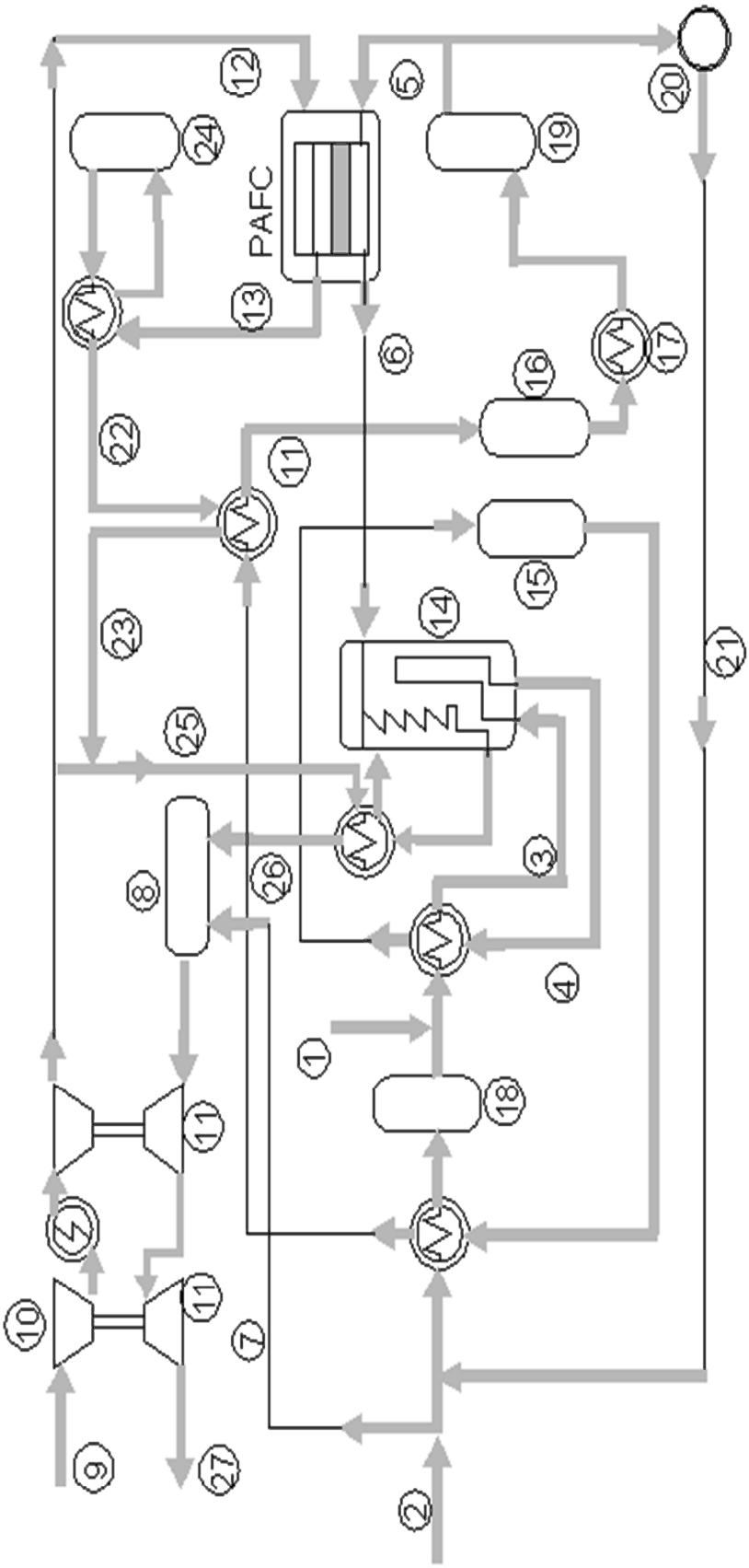
7-5-4 نظام الطاقة PAFC العامل على الغاز الطبيعي :

الشكل(56) يشرح مكونات وعناصر وسسير التفاعل لهذا التظام الخاص بالخلايا نوع PAFC
مكونات النظام و العمل بالأرقام هي :
(1) البخار اللازم للتنقية والمعالجة ،(2) دخول الغاز الطبيعي ،(3) تغذية وحدة المعالجة والتنقية ، (4) فضلات بشكل سائل ،(5) دخول التغذية للمصعد ،(6) خروج النواتج من المصعد ،(7) دخول الغاز الطبيعي للحراق المساعد،(8) حراق مساعد(إضافي) ،(9) دخول الهواء ،(10) ضاغط هواء (11) جهاز توربو للتمدد،(12) دخول التغذية للمهبط ،(13) نواتج المهبط ،(14) حجرة التنقية والمعالجة ،(15) محول إزاحة حرارة عالية HTSC، (16) محول إزاحة حرارة منخفضة LTSC (17) سخان البخار، (18) حجرة إزالة الكبريت ،(19) مبرد الوقود الغازي،(20) نافث هواء (21)إعادة تدوير الوقود الغازي،(22) دخول غاز المهبط إلى المبادل الحراري،(23)دخول غاز المهبط إلى الحراق الرئيسي ،(24) مبرد نواتج المهبط ،(25)دخول غاز المهبط المبادل الحراري (26)مخلفات عملية التنقية ،(27) طرد المخلفات والعوادم .

يتم دخول الغاز الطبيعي عند ضغط معين وهو يحتوي ملونات كبريتية للكشف عن حصول التسرب يتم مزج الغاز الداخل مع وقود معاد التدوير غني بالهيدروجين وذلك لهدرجة الكبريت الموجود بهدف إزالته ،الوقود يتم تسخينه حتى الدرجة 300 مئوية قبل دخوله وحدة إزالة الكبريت ، البخار المسخن تحت الضغط يتم مزجه مع الوقود المسخن وذلك لتأمين نسبة الرطوبة اللازمة لعملية الإزاحة ماء-غاز المزيج يتم تسخينه لدرجة حرارة 700 مئوية قبل دخوله وحدة المعالجة والتنقية .
الوقود السائل الناتج يغادر وحدة المعالجة بدرجة حرارة 760مئوية ويتم تبريده ضمن مبادل حراري بعدها يدخل تيار الوقود محول الإزاحة بحرارة عالية HTSC بدرجة حرارة 360 مئوية نواتج محول الإزاحة يتم تبريدها ضمن مبادلين حراريين قبل دخولها لمحول الإزاحة منخفض الحرارة وهذا الأخير يساعد في زيادة تركيز الهيدروجين .

نواتج محول الإزاحة LTSC يستفاد منها لتسخين البخار اللازم لوحدة المعالجة وتفاعل إزاحة الماء،الغاز ،البخار الذي يتم تسخينه يأتي من دارة تبريد خلية الوقود بالماء ،تيار الوقود المبرد يخضع لعملية تبريد ثانية لتخفيض نسبة الرطوبة وهذه العملية ترفع الضغط الجزئي للهيدرجين ضمن الوقود قبل الدخول لخلية الوقود،يتم إعادة تدوير جزء من الوقود الغني بالهيدروجين
حيث يتجه لمدخل الغاز الطبيعي ومعظم نسبة الوقود تحقن لمصعد خلية الوقود، بحدود 86% من الهيدروجين الموجود في الوقود يتفاعل ضمن خلية الوقود وينتج عن التفاعل حركة للالكترونات بين المصعد والمهبط كما يتفاعل مع الأوكسجين في الهواء لينتج الماء .

الهواء المحيط يتم ضغطه ضمن ضاغط بمرحلتين ثم يخضع لعملية تبريد ضمن مبرد خاص عند درجة حرارة 193 مئوية وضغط جوي 8,3 atm ،القسم الأكبر من هذا الهواء المضغوط يتجه لمهبط خلية الوقود، قسم من الهواء يتجه لحراق وحدة المعالجة والتنقية، المؤكسد يذهب لمبادل حراري قبل دخوله وحدة التبريد الخاصة بالمهبط ،التيار الناتج غير الرطب يتم تسخينه من جديد ويمزج مع الهواء ويرسل إلى حراق وحدة المعالجة، نواتج حراق وحدة المعالجة تقوم بعملية تسخين أولية للمؤكسد القادم وترسله للحراق المساعد حيث يصل هناك نسبة صغيرة من الغاز الطبيعة
الفضلات والعوادم الكلية لكل دورة النظام يتم طردها بدرجة حرارة 177 مئوية .

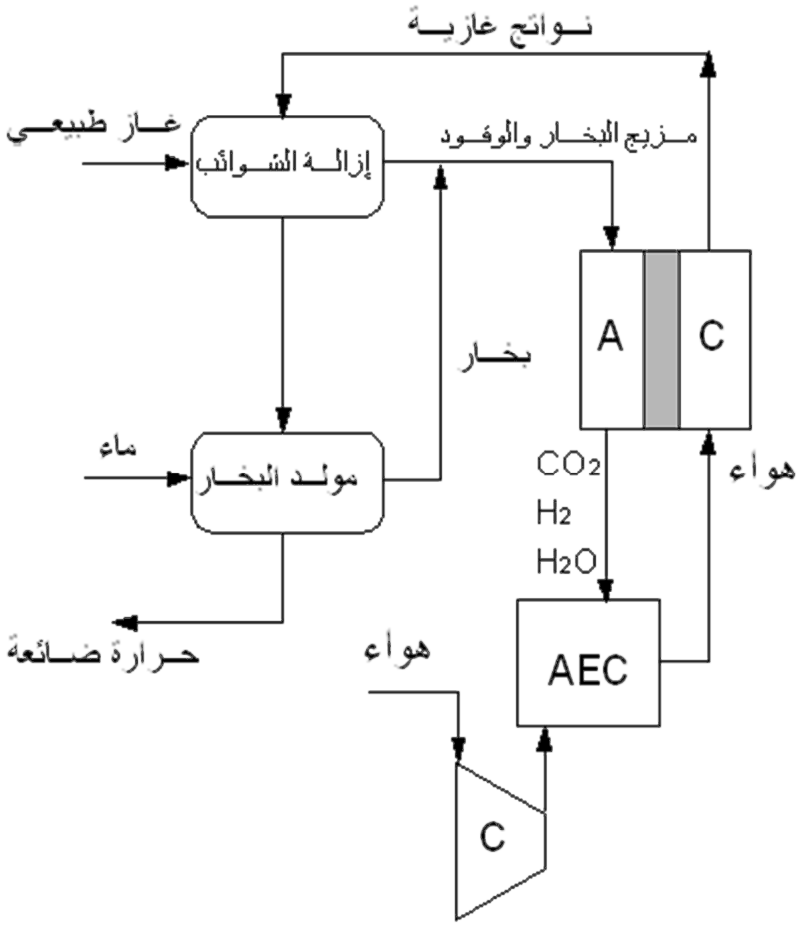


الشكل(56)

نظام الطاقة لخلايا الوقودMCFC العامل على الغاز الطبيعي :

الشكل (57) يوضح مخطط نظام الطاقة استطاعة 3 ميغاواط لخلايا وقود نوع الكربون المسبوك في البداية تتم إزالة الشوائب من الغازالطبيعي (إزالة الكبريت) ضمن وحدة التصفية، الوقود المصفى وهوغاز طبيعي يتم مزجه مع البخار ثم يحقن لخلايا الوقود التي تمتلك خاصية التنقية الداخلية حيث يتفاعل الوقود ضمن الخلية مع المؤكسد لينتج تياراً كهربائياً مستمراً باستطاعة 3 ميغاوات .

الوقود الناتج و الفائض من الخلية يتم حرقه ضمن محول نواتج أو مخلفات المصعد AEC Anode Exhaust Convertor النواتج من وحدة AEC يتم حقنها للمهبط C ، الحرارة المتولدة في المهبط تستخدم في وحدة إزالة الشوائب توليد البخار، الحرارة المتبقية يمكن الاستفادة منها لتطبيقات حرارية كالتدفئة وغيرها .



الشكل(57)

8-5-4 نظام الطاقة متعدد المراحل العامل على الغاز الطبيعي :

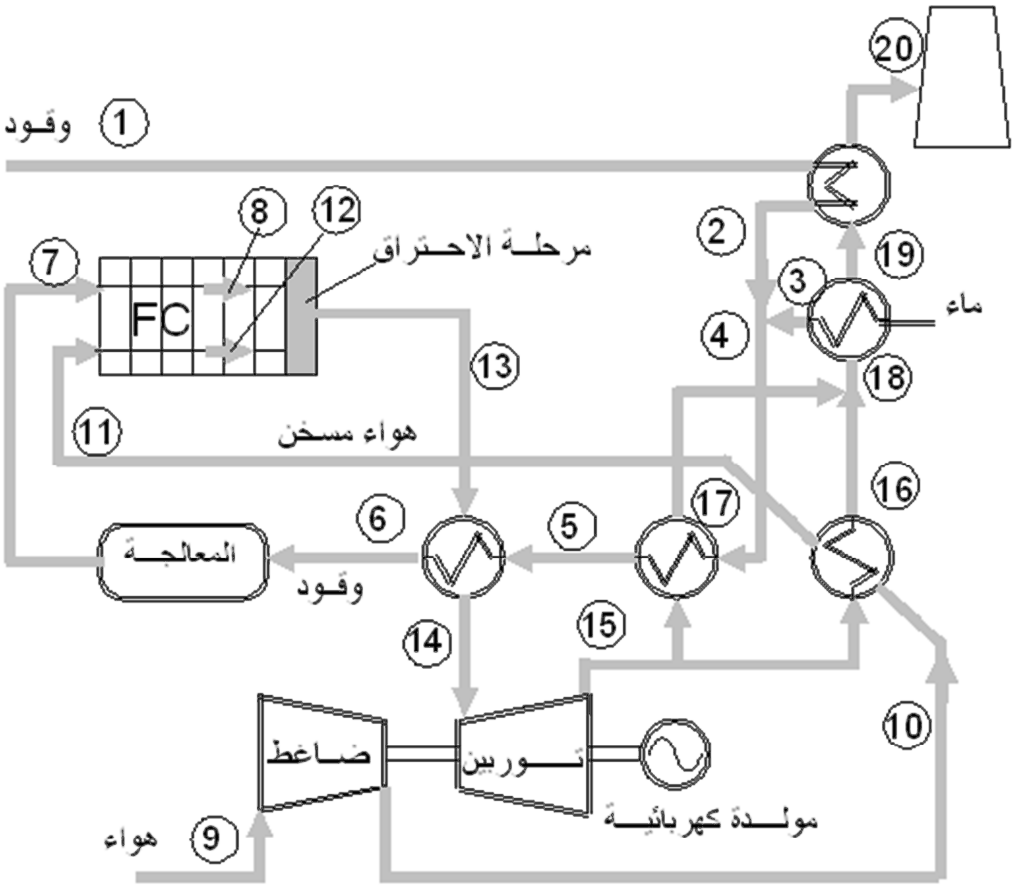
في هذا النوع من الأنظمة تم تصميم عدة مراحل بحيث كل مرحلة تعمل بدرجة حرارة خاصة بها مما يعني عدم الحاجة لوجود مبادل حراري لتبريد الغازات الناتجة بين المرحلة والمرحلة التي تليها إن عدد المراحل وكمية استهلاك الوقود هي مسألة اختيارية تخضع لطبيعة التصميم.

الشكل(58) يمثل نظام طاقة باستطاعة 4 ميغا واط لخلايا وقود من 6 مراحل.

تم وضع عدة نقاط مرقمة من 1 إلى 20 على الشكل(57) ضمن دوائر لتسهيل شرح العملية

من النقطة (1)يتم دخول الغاز الطبيعي المطابق من حيث الجودة للغاز المنقول ضمن الأنابيب والذي يحتوي الملونات الكبريتية والهيدروكربونات الثقيلة إلى وحدة إزالة الكبريت قبل دخوله الخلية حيث أن وجوده سيتسبب بنقصان عمر التشغيل للخلية، الهيدروكربونات الثقيلة يفترض أن تعالج مسبقاً بحيث تتحول لهيدروجين و أول أوكسيد الكربون،وحيث أن عمليتي إزالة الكبريت ومعالجة الهيدروكربونيات تتطلب حرارة معينة لذلك يتم حقن الوقود عبر سلسلة من المبادلات الحرارية والتي تمتص الحرارة الناجمة من مخرج خلية الوقود (النقاط 13 إلى 20)، يتم إضافة البخار المرطب للوقود للحصول على نسبة الرطوبة اللازمة لحصول تفاعلات الإزاحة ماء - غاز (النقطة 3)
الوقود المسخن والمرطب يخضع لعملية إزالة الكبريت ضمن معالج متوسط ،الوقود الممنقى من الكبريت والمعالج جزئياً يدخل إلى مصعد الخلية عند النقطة (7)

درجة حرارة الوقود عند دخوله مصعد الخلية هي بحدود 500 درجة مئوية ،الهواء يدخل للضاغط من النقطة (9) حيث يتم ضغطه لقيمة 3,5 ضغط جوي (3.5 atm) وعند درجة حرارة 175 مئوية النقطة (10) لاحقاً يتم تسخينه لدرجة 500 مئوية قبل دخوله إلى مهبط خلية الوقود النقطة(11)
الوقود المعالج والهواء المضغوط يتحدان مع بعض ضمن تجمع خلايا الوقود من خلال تفاعل كهركيماوي و ترتفع درجة حرارة الوقود والمؤكسد إلى 1000 درجة مئوية النقاط (8)،(12)
خلية الوقود قادرة على استغلال الهيدروجين وأول أوكسيد الكربون كوقود بنسبة 94% .



الشكل(58)

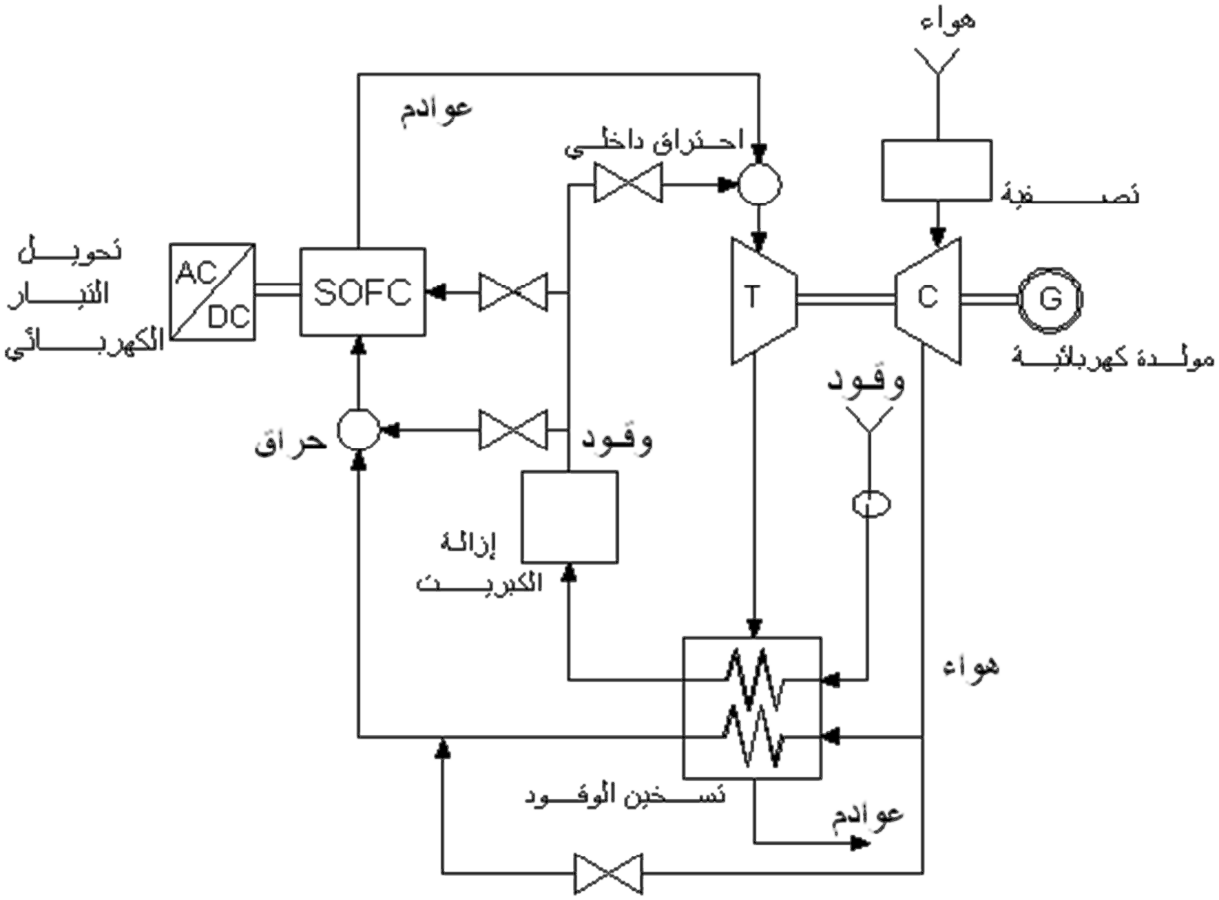
الوقود المستهلك والناتج عن تجمع الخلايا عند النقطة(8) والمؤكسد النقطة(12) يتم حرقهم لدى خروجهم تجمع الخلايا ذات المراحل المتعددة عند النقطة (13) وتكون درجة حرارة المزيج بحدود 1120درجة مئوية ، ثم يتم تبريد المزيج وتمديد حجمه عند ضغط جوي 1.04 atm النقطة(15) يمر بعدها عبر عدة مبادلات حرارية قبل أن يغادر دارة النظام بدرجة حرارة 147 مئوية .

من المزايا الإيجابية لهذا النوع من الأنظمة هو عدم الحاجة لمبادلات حرارية بين خلايا الوقود المرحلة والأخرى وهذا يعني التقليل من تعقيدات التصميم وتخفيض التكلفة وتخفيض الضياعات
من المزايا أيضاً هو تقليل نسبة الوقود غير المتفاعل والمغادر لخلية الوقود حيث توجد عدة مراحل كل مرحلة لها جهد كهربائي وكثافة تيارخاصين بها وهذا معناه استغلال الوقود لمستوى عالي دون أن يؤثر ذلك سلباً على أداء تجمع الخلايا .
الصعوبة في هذا النظام هو عدم اختباره عملياً مع عدد كبير من المراحل حيث لم تجرى تجارب على نظم بعدد كبير من المراحل .

9-5-4 نظم الطاقة المختلطة Hybrid Power Plant :

يقصد بالكلمة (Hybrid) الهجين أو المكون من شيئين رئيسين ومن الممكن تسميتها بالنظم المركبة لكن حتى لايكون هناك التباس مع الدارة المركبة والتي تستخدم بنظم الطاقة التقليدية سنسميها النظم المختلطة .
يتم استخدام خلايا الوقود في مشاريع الطاقة ضمن الأنظمة المختلطة (خلية وقود – توربين) Hybrid FuelCell/ Turbine PowerPlant ،حيث يتم استخدام العنفات مع خلايا الوقود ضمن نفس النظام ، والخلايا الأكثر استخداماً هنا هي من النوعين : MCFC , SOFC
هذه الأنظمة ذات نسبة انبعاثات غازية قليلة مقارنة مع نظم الطاقة التي لا تحتوي خلايا وقود وبالتالي فهي تساهم في تخفيض نسبة التلوث البيئي .
هناك نقطة مهمة أخرى هي قيمة المردود ففي نظام توليد الطاقة العادي العامل على الفحم الحجري هو بحدود 35% ونظام توليد الطاقة العامل على الغاز الطبيعي يتراوح بين 40 إلى 50% ، نظام توليد الطاقة المختلط له مردود بحدود 70 % وأكثر أحياناً .
الشكل (59) يوضح مبدأعمل هذا النوع من الأنظمة .
يتم تدوير التوربين (العنفة الغازية) بواسطة الحرارة والوقود المتبقيان من خلية الوقود،الغازات الناتجة عن خلية الوقود يتم مزجها و حرقها رافعة بذلك درجة الحرارة عند مدخل التوربين و هي تأخذ دور الحراق الداخلي في الأنظمة التقليدية ،بواسطة مبادل حراري نوع غاز--غاز يتم نقل الحرارة من مخرج التوربين إلى الوقود والهواء المستخدمين في خلية الوقود .

خلية الوقود تلعب دور الحراق الداخلي في النظام التقليدي .
النظام المختلط سيخفض تعرفة استهلاك الطاقة الكهربائية بحدود 10 إلى 20% من تعرفة النظم التقليدية وكما يمكن التحكم بهذا النظم بالكامل بشكل آلي مع إمكانية قيادة عدة أنظمة من مكان واحد .
من التقنيات الجيدة هنا استخدام خلية نوع SOFC مع خلية خاصة تسمى خلية ذات غشاء تبادل البروتونات proton exchange membrane fuel cell (PEM FC)
الخلية SOFC سوف تنتج الطاقة الكهربائية والهيدروجين ،هذا الهيدروجين سيستخدم من قبل الخلية PEM FC لتوليد الطاقة الكهربائية .



الشكل(59)

10- 5-4 مشاريع حول العالم :

1- أنظمة PEFC :

في كندا وفي مدينة فانكوفير قامت شركة Ballard لتوليد الطاقة الكهربائية ببناء نظام توليد خلايا وقود PEFC باستطاعة قدرها 250 KW كما قامت نفس الشركة بتسليم نظام توليد خلايا PEM لشركة Cinergy Technology و هو منشأة تجريبية تعتمد وقود الغاز الطبيعي.

قامت الشركة ببناء منشأة ثالثة في ألمانيا Bewag Treptow Heating Plant حيث بدأ تشغيل المنشأة مع نهاية 1999.

تم بناء منشأة في النمسا في مدينة بازل(Basel) يتم تشغيلها من قبل شركة EBM وواحدة أخرى في مدينة طوكيو اليابانية لصالح مخبر NNT لبحوث الطاقة .

في اليابان أيضاً تم بناء منشأتين باستطاعة 30 KW , 2 KW و ذلك ضمن برنامج الطاقات المتجددة The New Sunshine المنشأة 2KW تم تطويرها من قبل شركة Sanyo Electric .

في الولايات المتحدة قامت شركة Plug Power ببناء منشأة باستطاعة 7KW تعتمد وقود الهيدروجين وهناك نماذج مستقبلية تعتمد وقود الغاز الطبيعي والبروبان .

2- أنظمة PAFC :

في مدينة ميلان الإيطالية تم بناء منشأة باستطاعة 1.3 MW بواسطة عدة شركات، مردود التشغيل كان 38% حيث تم اختباره لمدة 5000 ساعة .

في اليابان قامت شركة Fuji Electric باختبار نظام طاقة باستطاعة 100KW و بمردود 40% ، كما قامت شركة Mitsubishi Electric ببناء وتطوير نظام طاقة باستطاعة 200KW استفيد منه لتغذية منشأة صناعية وتم اختباره لمدة 2000 ساعة تشغيل .

3- أنظمة AFC :

في بريطانيا قامت شركة ZeTek Power بتطوير نوع من خلايا الوقود القلوية واستخدمتها في الحافلات و القوارب و هذه الخلايا تتمتع بمردود يتجاوز 50% .

4- انظمة MCFC :

في اليابان وضمن برنامج The New Sunshine تم بناء واختبار منشأتين باستطاعات 200 KW 1000 KWحيث شاركت في هذه المشاريع 10 شركات عالمية متخصصة في الطاقة :ثلاثة منها شركات غاز وسبع شركات مصنعة بالإضافة لمشاركة مختبرين للأبحاث.

المنشأة 200KW في مدينة أماغازاكي و الأخرى في مدين كاواغو .

هناك تعاون مشترك بين إيطاليا وإسبانيا ضمن برنامج يسمى MOLCARE وهو ممول بنسبة 65% من قبل إيطاليا و35% من قبل إسبانيا حيث سوف يتم اختبار منشأة باستطاعة 100KW لمدة 1000 ساعة تشغيل .

في الولايات المتحدة الأميركية تقوم هيئة FCE (Fuel Cell Energy) بتطوير نظام خلايا نوع MCFC مع نافث عوادم (manifold) خارجي ونظام معالجة وتنقية داخلي حيث تم اختبار نظام مكون من 16 stack باستطاعة 2MW في مدينة سانتا كلارا بولاية كاليفورنيا لفترة تشغيل استمرت 4000 ساعة .

5- أنظمة SOFC :

في اليابان اختبرت شركة Kansai Electric نظام من نوع أربعة خلايا لفترة تشغيل 10529 ساعة عند كثافة تيار كهربائي عالية و أكملت 101 دورة حرارة .

شركة Tokyo Gas قامت بتطوير خلايا مسطحة و في عام 1993 اختبرت بنجاح وحدة خلايا باستطاعة 1.7 KW مع أداء مستقر وجيد .

في كندا قامت شركة Ontario Hydro قامت باختبار خلية أحادية من صنع شركتي Siemens Westinghouse لمدة 1725 ساعة منها 1425 ساعة تشغيل عند ضغط 5 atm .

في الولايات المتحدة أقامت شركة Siemens Westinghouse مشروعاً لنظام خلايا SOFC أنبوبية باستطاعة 250 KW عند موقع جامعة إيرفين في كاليفورنيا و تم تشغيله من قبل شركة Edison عند ضغط 3.5 bar يعمل مع الخلايا ميكروتوربين ويعطي استطاعة إضافية 50 KW

تشكلت مجموعات تجارية مختصة بتصنيع وتشغيل نظم الطاقة العاملة على خلايا الوقود بمختلف أنواعها.

ومن أشهرهذه المجموعات :

The North American FuelCell Owner Group……. PAFC ,IFC

MCFC ,FCE……...The Fuel Cell Commercialization Group
SOFS,Siemens Westinghouse……..SOFC Commercialization Association

تم وضع عدة معايير عالمية فيما يخص خلايا الوقود ونظم الطاقة الهجينة نذكر منها :

معايير التصميم والتصنيع .....ANSI Z21.83/CGA12.10
اختبارات الأداء .....ASME PT C50
معايير المولدة الكهربائية الاحتياطية.....NFPA 70.110
معايير الإنشاء والتركيب .....NFPA TC 850

المنظمة الدولية	المعيار	توصيف
ASME American Society of Mechanical Engineering	PTC50	تحديد طرق الاختبار لأداء نظم خلايا الوقود
IEEE Institute of Electrical & Electronics Engineers	IEEE SCC21	معايير خاصة بخلايا الوقود واللوحات الكهرضوئية وتخزين الطاقة
IEEE	IEEE P1547	المتطلبات للربط مع الشبكة الكهربائية العامة
ANSI American National Standrs Institute	ANSI Z21.83 1998	الاختبارات اللازمة لنظم الطاقة ذات خلايا الوقود
NFPA The National Fire Protection Association	NFPA 853	معايير التركيب والإنشاء لنظم الطاقة ذات خلايا الوقود
NFPA	NFPA 691	معايير خاصة بخلايا الوقود
IEEE	IEEE SCC 36	معايير بخصوص تبادل المعلومات والاتصالات
UL Underwriters Laboratories Inc	UL 1741	معايير الاختبار والسلامة المهنية الخاصة بالانفيرتر
SAE Society of Automotive Engineers	SAE Forum	اختبارات لوسائط النقل الأداء ، السلامة الشخصية
IEC	IEC TC 105	تكميلية للمعيار ANSI Z21.83

ترشيد استهلاك الطاقة الكهربائية

1-التدفئة و التبريد للأبنية :
يتم زيادة المردود في استخدام الطاقة الكهربائية لأغراض التدفئة و التبريد باستخدام التقنيات الحديثة لا سيما نظام أتمتة التبريد و التكييف و هو جزء من نظام التحكم بالمباني BMS .
Building Mangement System ،كذلك استخدام مجاري التهوية عالية العزل الحراري و وضع مادة العزل الحراري للجدران .

2- تسخين الماء :
استخدام سخانات الماء ذات المردود العالي (المعزولة حرارياً بشكل جيد) مما يعني توفير الكهرباء والماء و المال .

3- الإنارة :
استخدام أجهزة الإنارة ذات التوفير ولاسيما مصابيح التوفير الكهربائية compact fluorescent
أيضاً استخدام نظام التحكم بالمباني السابق الذي يتحكم بعمل أجهزة الإنارة حسب قوة السطوع الشمسي .

4- التجهيزات المنزلية الكهربائية :
عند شراء أي جهاز كهربائي منزلي يجب معرفة مدى استهلاكه للطاقة الكهربائية و يوجد شركات و مخابر عالمية مختصة تقوم بحساب المردود الكهربائي للجهاز و على أساسه يتم منح المصنع شهادة جودة خاصة .

5- الأعمال الصناعية :
حتى اليوم لا تزال معظم الصناعات تعتمد على مصادر الطاقة التقليدية و التي كما مرمعنا ترتبط ارتباط و ثيق بالتلوث البيئي ، الصناعات التي تتطلب صهر المعادن تستهلك كمية كبيرة من الطاقة الكهربائية لذلك تركز الأبحاث الحالية على دراسة تحسين المردود لهذه المنشآت .
من الإجراءات المتبعة للمصانع استخدام محطات تحسين عامل الاستطاعة power factor
و هي عبارة عن مجموعة من اللوحات الكهربائية تحوي بداخلها مكثفات (على الأغلب اسطوانية و مصنوعة من الألمنيوم) هذه المكثفات متصلة مع بعضها بشكل مجموعات ،يتم إدخال المكثفات و إخراجها من الشبكة بواسطة كونتاكتورات خاصة ، الكونتاكتورات تتلقى إشارات التشغيل من وحدة تحكم خاصة تثبت على اللوحة الكهربائية و تقرأ الاستطاعة الكهربائية الردية (var meter)
و تعمل على إنقاصها للحد الأدنى بإدخال مجموعات المكثفات ضمن الدارة الكهربائية المغذية للمنشأة الصناعية .

6- المحركات الكهربائية :
تستهلك المحركات الكهربائية بحدود 65% من إجمالي الطاقة الكهربائية المستهلكة في الوسط الصناعي ،المحركات الحديثة Energy-efficient motors يمكن أن تخفض من قيمة الاستهلاك بنسبة 12% .

7- أنظمة البخار :
أكثر من 45% من الوقود المستهلك بالمصانع هو لتوليد البخار. أية منشأة صناعية تعتمد على البخار بصناعتها يمكنها تخفيض الاستهلاك بنسبة 20% تحسين جودة عمل نظام البخار لديها من التطبيقات البسيطة عزل خطوط البخار و التكثيف الراجعة لمنع حدوث أي تسريب للبخار وتحقيق عملية الخنق أو الحصر للبخار، البخار المتكاثف العائد لمرجل الغليان هو عنصر مهم في عملية رفع مردود الطاقة الكهربائية المستهلكة .

8- أنظمة الهواء المضغوط :PNUMATIC :
من الممكن رفع المردود لاستهلاك الطاقة الكهربائية بحدود 20 -50% بتحسين جودة عمل أنظمة الهواء المضغوط للصناعات التي تعتمد هذا النوع من الأنظمة (نظام البنيوماتيك لتشغيل الآلات مثل صناعات المنتجات الورقية الصحية) ، الضواغط الهوائية التي يتم تنظيم سرعتها بواسطة متحكمات السرعة variable-speed driver أو soft driver تستطيع توفير الطاقة بشكل جيد ، تبقى الصيانة الدورية الوقائية مثل تفقد أماكن تسرب الهواء ضرورية .

9- استخدام مادة فايبر- سيراميك (CFCC):
Continuous Fibre Ceramic Composites هذه المركبات من السيراميك تمتاز بخفة الوزن والصلابة و مقاومة عوامل الحت الجوي كما يمكنها أن تعمل تحت درجة حرارة عالية جداً و ليست هشة مقارنة بالسيراميك العادي .

10- الناقلية الفائقة :Superconductivity
المواد ذات الناقلية الفائقة هي المواد التي تنقل التيار الكهربائي بدون وجود مقاومة كهربائية لحركة الالكترونات (مقاومة كهربائيةصغيرة جداً) و بالتالي ضياعات كهربائية معدومة.
هذه المواد تستخدم في التجهيزات التي تحمل تيارات كهربائية كبيرة و لا سيما مشاريع نقل و توزيع القدرة الكهربائية.

11- الطاقة المختزنة :
في أوقات الذروة للاستهلاك في الطاقة الكهربائية تعمل الشبكة الكهربائية بأقصى طاقتها لتأمين الطلب على الطاقة الكهربائية أي كل محطات التوليد تدخل بالخدمة باستثناء المولدات الاحتياطية .
إن اختزان كميات جيدة من الطاقة الكهربائية بوسائل متعددة ثم حقنها في الشبكة الكهربائية أوقات ذروة الاستهلاك من شأنه أن يخفف من وتيرة عمل المولدات الكهربائية أي توفير في الوقود المستهلك لتدويرها ، من وسائل اختزان الطاقة: البطاريات ذات السعات الكبيرة ، المغناطيس ذو الناقلية الفائقة ، خزانات الهواء المضغوط ، تروس الدوران الميكانيكية ، الطاقة الهيدروليكية للماء المضخوخ ، ، المكثفات الكهربائية عالية التخزين .
إن فكرة اختزان الطاقة يشجع على استخدام الطاقات المتجددة بشكل أوسع و يمنح استقراراً أفضل للشبكة الكهربائية .

12- وسائط النقل :

وسائط النقل الحديثة يتم تصميمها بحيث تخفض الانبعاثات الغازية الناجمة منها و هي تعمل على وقود مدعم بالوقود الحيوي ليكون الاحتراق داخا المحرك بأفضل طريقة .

كذلك يجب العمل على حث و توعية الناس لاستخدام وسائط النقل الجماعي بدلاً من الوسائط الفردية .

استخدام الديزل المطور Improved diesel fuel سوف يحسن من أداء وسائل النقل ويقلل من الانبعاثات الغازية الضارة .

استخدام التقنيات الحديثة لوسائط النقل مثل وسائط النقل الكهربائية المختلطة hybrid electric vehicles ووحدات الوقود يمكن أن يضاعف المردود لتلك الوسائط .

يمكن استخدام الإيثانول كوقود لبعض وسائط النقل .