الفصل الثاني عشر

خزن الطاقة المتجددة

1-12 مقدمـــــــــــــة

2-12 الخزن الحراري

- الخزن بالحرارة المحسوسة
- وسائط الخزن السائلة
- وسائط الخزن الصلبة
- الخزن بالحرارة المحسوسة في درجات الحرارة العالية
- الخزن بالحرارة الكامنة
- الخزن بحرارة الانصهار والتجمد
- الخزن بحرارة التبخر والتكثيف
- الخزن بالطاقة الكامنة في درجات الحرارة العالية
- الخزن الموسمي

3-12 الخزن الميكانيكي

- الخزن بالهواء المضغوط
- الخزن بالطاقة الكامنة
- الخزن بالعجلة الحدافة

4-12 الخزن الكهربائي

5-12 الخزن الكيميائي

- الخزن الوقودي
- خزن الهيدروجين

6-12 الخزن المغناطيسي

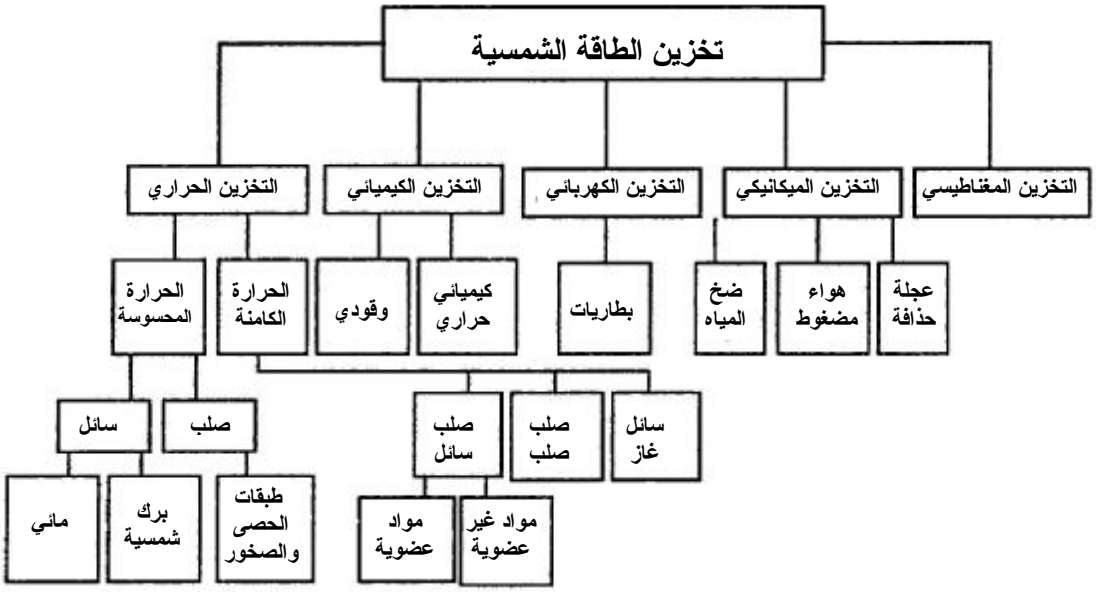
1-12 مقدمـــــة

نظراً لوجود فائض من بعض مصادر الطاقة في فترات زمنية معينه ونقصان في فترات اخرى وان استهلاك الطاقة يتبع عادة تغييراً زمنياً لايكون بالضرورة مماثلاً لتوفر الطاقة فأن الضرورة تستوجب خزن الطاقة الفائضة لأستخدامها في الاوقات التي تدعو الحاجة أليها.

تكتسب تقنية الخزن أهمية كبيرة في تحسين كفاءة وأداء منظومات الطاقة المتجددة، وتعتبر المفتاح الرئيسي لاستغلال هذه المصادر بصورة واسعة وعلى النطاق التجاري حيث ستزيد من مشاركتها في توفير المتطلبات وتقليل نفقات الطاقة المصروفة.

يمكن خزن الطاقة المتجددة لفترات قصيرة أو طويلة حسب المتطلبات ، ويرافق ذلك آليتان رئيسيتان هما الشحن والتفريغ ، وعلى هذا الأساس يعتمد تصميم نظام الخزن على عدة متغيرات وعوامل أهمها ، أوقات توفر ، الطاقة ونوع وسط الخزن المستخدم، ومقدار الخسائر من الطاقة اثناء عملية الخزن ، وكلفة منظومات الخزن والحمل الحراري أو الكهربائي المطلوب .

الأنظمة الرئيسية لخزن الطاقة ، والتي يمكن استخدامها في منظومات الطاقة المتجددة ، هي الخزن الحراري ، والخزن الميكانيكي ، والخزن الكهربائي ، والخزن الكيميائي ، والخزن المغناطيسي . فالطاقة الحرارية يمكن خزنها بواسطة الحرارة المحسوسة والحرارة الكامنة ، والطاقة الكهربائية تخزن عادةً في بطاريات ، والطاقة الميكانيكية تخزن كطاقة حركية أو كطاقة كامنة في خزانات الهواء المضغوط أو خزانات المياه العالية أو في العجلات الحدافة والطاقة الكيميائية تخزن عادة من خلال التفاعلات الكيميائية العكسية أو خزن الوقود الناتج عن التفاعلات الكيموضوئيه ، والخزن المغناطيسي يتم بأستخدام ملفات مغناطيسية فائقة التوصيل مصنوعة من مواد ذات مقاومة صغيرة جداً عند درجات حرارة منخفضة . ويبين الشكل (12-1) مخططاً مبسطاً لأهم الطرق والنماذج لتخزين الطاقة .



شكل (12-1): مخطط لأهم الطرق والنماذج لخزين الطاقة

2-12 الخزن الحراري Thermal Storage

يمكن خزن الطاقة الحرارية كحرارة محسوسة أو خزنها كحرارة كامنة أو بواسطة الدمج بين الطريقتين . ويتم الخزن بالحرارة المحسوسة بزيادة درجة حرارة وسط الخزن عند الشحن وسحب الحرارة منه عند التفريغ . أما الخزن بالطاقة الكامنة فيتم بتغيير طور المادة من حالة إلى أخرى تحت درجة حرارة ثابتة. وإن أهم الصفات المميزة للخزن الحراري هي :

- السعة الحرارية بالنسبة للوزن والحجم .
- مستويات درجة الحرارة التي يعمل بها ، وهي درجات الحرارة التي يتم فيها اضافة وسحب الحرارة في النظام .
- الطرق التي يتم بها إضافة الحرارة وسحبها.
- القدر المطلوب إضافة الحرارة وسحبها.
- مقدار التدرج في درجة الحرارة داخل وحدة الخزن .
- مواصفات حاويات الخزن .
- الطرق المناسبة لتقليل الخسائر الحرارية في منظومة الخزن .
- الكلفة .

يتكـون نظـام الخـزن مـن : وسـيط الخـزن (Medium) ، وحاويـة لوسـيط الخـزن (Container) ، وعـازل حـراري (Insulation) لتقليل الخسائر، ومبـادل حـراري (Heat Exchanger) ، ومائع التبادل الحراري (Fluid) ، ومضخات أو دافعات هواء (Pumps) وأجهزة سيطرة (Controlling) .

1-2-12 الخزن بالحرارة المحسوسة Sensible Heat Storage

تتبدل درجة الحرارة المحسوسة المكتسبة أو المفقودة بواسطة مادة من درجة حرارة مقدارها T_1 إلى درجة حرارة أخرى مقدارها T_2 ، ويمكن التعبير عنها بالمعادلة التالية :

$$V\int_{T_1}^{T_2}\rho\ C_\rho dT = m\int_{T_1}^{T_2}C_\rho dT = Q$$

حيث أن :

m = كتلة المادة المستخدمة (kg)

C_p = الحرارة النوعية للمادة $\left(\frac{KJ}{Kg.C^0}\right)$

r = كثافة المادة $\left(\frac{Kg}{m^3}\right)$

T_1 = درجة الحرارة الابتدائية C^o

T_2 = درجة الحرارة النهائية C^o

2-2-12 وسائط الخزن السائلة Liquid Heat Mediums

إن الماء هو المادة الشائعة الاستخدام في خزن الحرارة المحسوسة ، وهنالك سوائل أخرى تستخدم على نطاق ضيق لهذا الغرض ويبين الجدول رقم (12-1) أهم السوائل المستخدمة كوسائط للخزن ومواصفاتها .

جدول رقم (12-1) : الوسائط السائلة المحسوسة

وسط الخزن	درجة الحرارة C^o		كلفة المادة $/Kg	الكثافة عند درجة حرارة الغليان Kg/m^3	الحرارة النوعية $J/Kg.C^o$	الموصلية الحرارية $W/M.C^o$
	الذوبان	التبخر				
الماء	0.0	100.0	0.0	960.0	420.0	0.63
الثرمينول 66 (Therminol/66)	27.0	343.0	2.0	750.0	2740.0	0.106
دويثرم A (Dowtherm A)	12.0	260.0	0.22	867.0	2200.0	0.112
هتيك (Hitec) 4NaNo ,7NaNO, 53KNO	142.0	540.0	0.44	1680.0	1560.0	0.57
ملح ذائب 46NaNO ,54KNO	220.0	540.0	0.25	1733.0	1560.0	0.57
الصوديوم	98.0	760.0	0.57	960.0	1260.0	67.5

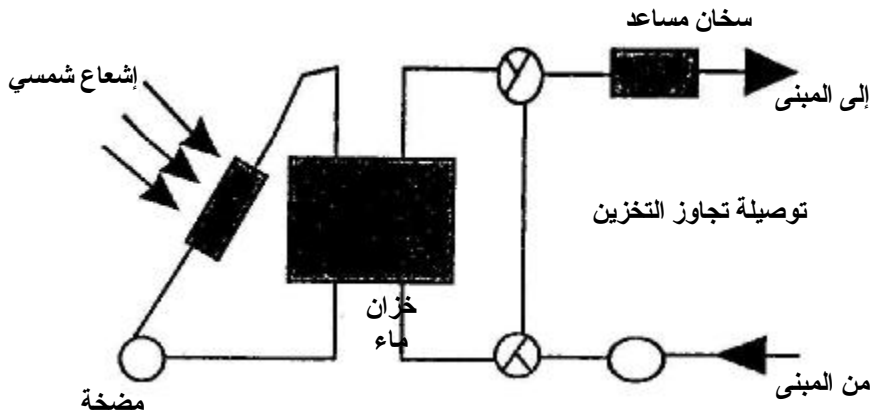
يستخدم الماء عادة في درجات الحرارة المنخفضة (اقل من $100C^0$) وهي الدرجات الملائمة لأغراض التدفئة والتبريد. ويبين الجدول رقم (12-2) أهم إيجابيات وسلبيات استخدامه .

جدول رقم (12-2) : إيجابيات وسلبيات الماء كوسيط خزن

الإيجابيات	السلبيات
1- متوفر ورخيص التكاليف.	1- يسبب صدأ لبعض المعادن عند ملامسته لها.
2- حرارته النوعية عالية مقارنة بالسوائل الأخرى.	2- يتجمد ويتبخر في ظروف خاصة.
3- يمكن استخدامه دون الحاجة الى مبادل حراري.	

يتبين من الجدولين (12-1 , 12-2) أن الماء هو أفضل الوسائط السائلة في درجات الحرارة الواطئة وذلك لكون حرارته النوعية وسعة خزنه أعلى من السوائل الأخرى بالاضافة الى ان سعره يكاد يكون منعدماً .

ويوضح الشكل (12-2) منظومة تكيف هواء تستخدم الماء كوسيط لخزن الحرارة المحسوسة .



شكل (12-2): منظومة تكيف هواء تستخدم الماء كوسيط لخزن الحرارة

3-2-12 وسائط الخزن الصلبة Solid Heat Mediums

تتميز المواد اللاعضوية الصلبة بضغطها الواطئ في درجات الحرارة العالية ، وخمولها الكيميائي ، ورخص سعرها. ولكن لمعظم هذه المواد حرارة نوعيه وموصلية حرارية واطئة، ولذا فأنها تتطلب حجوم خزن كبيرة ، ومنظومات تبادل حراري معقدة . ويبين الجدول (12-3) أن الصخور ، و مادة الرمل Soil أفضل المواد المستخدمة وذلك لسعتهما الحرارية المقبولة ورخص سعرهما .

جدول رقم (12-3) : الوسائط الصلبة لخزن الحرارة المحسوسة

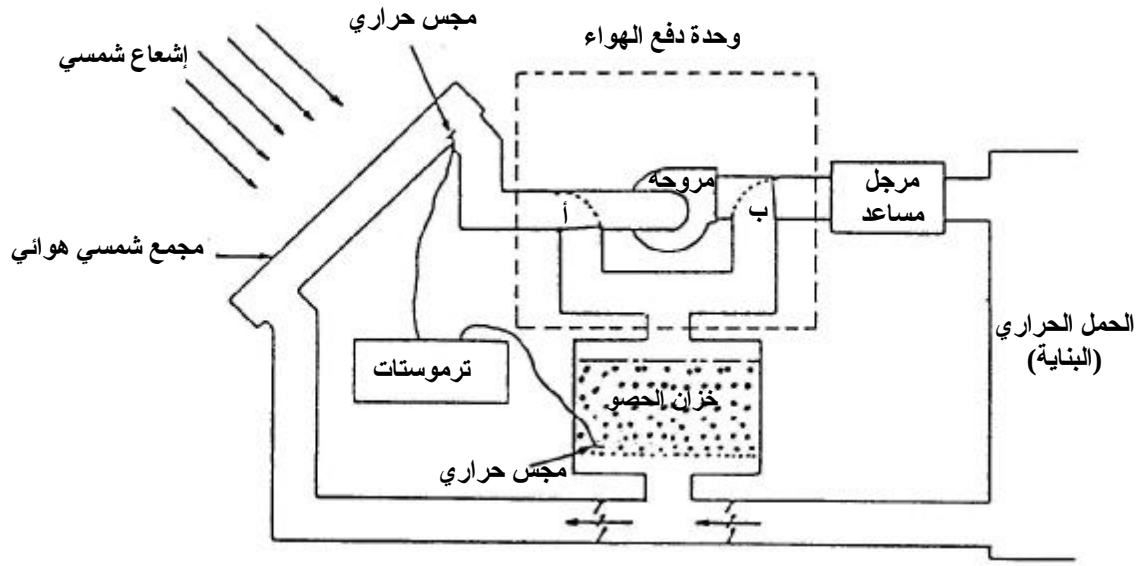
وسيط الخزن	الكثافة Kg/m^3	السعه الحرارية $J/Kg.C^o$	درجة الذوبان C^o	السعر $/Kg
الصخور	2640.0	880.0	1200.0	0.01
الرمل (Sio)	2650.0	910.0	1728.0	0.01
مقاطع حديد الصب Fe	7900.0	837.0	1535.0	0.66
أوكسيد المنغنيز MgO	3580.0	1130.0	2700.0	0.32
أوكسيد الالمنيوم (AI_2O_3)	3970.0	1010.0	2015	0.43

ومن التطبيقات المستخدمة للخزن بالمواد الصلبة في درجات الحرارة الواطئة خزان الحصى (Rockbed Storage) الذي يستخدم الهواء كمائع تدوير ، وحائط ترومب (Tromb wall) . ويتكون خزان الحصى (الصخور) من حاوية وهيكل مسامي لاحتواء الحصى وموزع لدفع الهواء بالاتجاهين أثناء الشحن والتفريغ. وللحصول على كفاءة

خزن جيدة يجب أن يكون الحصى متجانساً بقطر يتراوح بين 3 و5 سم كما يجب أن تكون صفاته الميكانيكية ومقاومته للتأثيرات الحرارية عالية. ويبين الجدول رقم (12-4) إيجابيات وسلبيات استخدام هذا النظام. ويبين الشكل رقم (12-3) مخططاً لمنظومة خزن من هذا النوع .

جدول رقم (12-4) : إيجابيات وسلبيات خزان الحصى

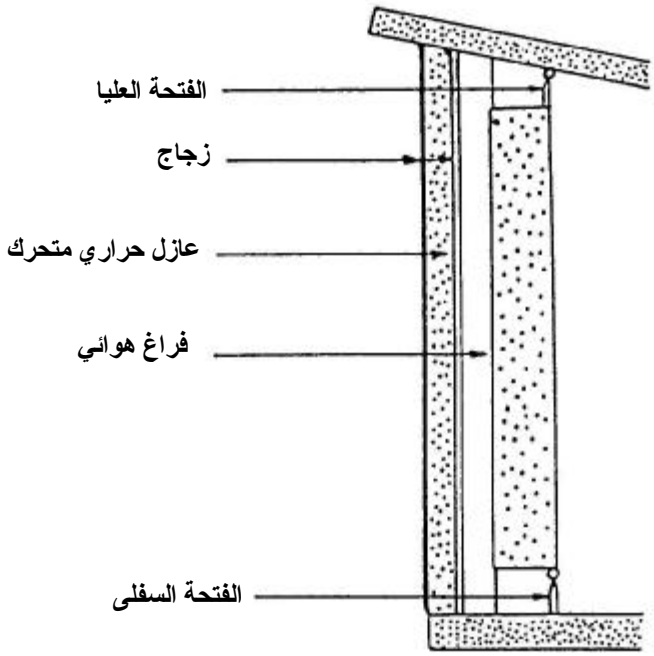
الإيجابيات	السلبيات
1- المادة متوفرة وسعرها زهيد	1- الحرارة النوعية للهواء والصخور قليلة ولهذا فأن حجم الخزان كبير
2- يمكن خزن الحرارة بدرجات حرارة عالية جداً	2- لا يمكن الشحن و التفريغ في آن واحد في مثل هذا النظام
3- حاوية الخزن غير معرضة للصدأ	
4- لا توجد حاجة الى مبادل حراري	



شكل (12-3): منظومة تكيف هواء تستخدم المواد الصلبة كوسيط لخزن الحرارة

والوسيلة الأخرى من وسائل الخزن الصلبة المستخدمة بصورة واسعة هو حائط ترومب الذي يتكون من طبقة واحدة أو طبقتين من الزجاج (أو البلاستك) الشفاف المنصوب على بعد عدة سنتيمترات من حائط سميك معتم من مادة الكونكريت أو الطين أو الحصى أو خليط من قطع الطابوق والرمل ، ويتم تسخين هذا الحائط بواسطة الاشعة الشمسية المارة من خلال الزجاج . ويوضح الشكل رقم (12-4) مكونات هذا النظام أذ يتم خزن الحرارة فيه خلال اوقات النهار ليتم طرحها الى الحيز المراد تدفئته خلال

الليل ، ويحتوي قسم من انواع هذا الحائط على فتحتين من الأسفل والأعلى تسمحان بمرور الهواء البارد من الحيز المراد تدفئته من الفتحة السفلى ليتم تسخينه في الفراغ بين الحائط والزجاج واندفاعه إلى الحيز خلال اوقات النهار أيضا .



شكل (12-4): حائط ترومب الذي يستخدم لخزن الحرارة

4-2-12 الخزن بالحرارة المحسوسة في درجات الحرارة العالية

في أنظمة الخزن بالحرارة المحسوسة في درجات الحرارة العالية من الممكن استخدام ثلاثة أنواع من مواد الخزن هي :

أ - الموائع كالماء والزيت.
ب - الأملاح المذابة ومحاليلها.
جـ - المواد الصلبة.

ومن الواضح أن الماء هو أفضل مواد الخزن في درجات الحرارة الواطئة وذلك لكون حرارته النوعية أعلى بكثير من بقية المواد. ولكن الماء يفقد إيجابياته في درجات الحرارة العالية لكونه يحتاج الى حجوم خزن كبيرة وخزانات تتحمل ضغطاً عالياً عند تحوله إلى بخار ، ولهذا فأن الزيت وبعض المواد الاخرى كالصوديوم والثرمينول هي الاكثر استخداماً في مثل هذه الدرجات. ومن المواد المستخدمة أيضا خليط من الاملاح اللاعضوية المذابة وتعتبر مادة الهيتك مثالاً جيداً لهذه المواد. اما بالنسبة إلى المواد

الصلبة فالمواد الاكثر استخداماً هو الرمل (Soil) والصخور لان سعة خزن هذه المواد مناسبة وسعرها قليل جداً مقارنة بالمواد الصلبة الأخرى .

5-2-12 وسائط الخزن الصلبة والسائلة في درجات الحرارة العالية

يمكن جمع المواد الصلبة والسائلة الخازنة للحرارة المحسوسة بعدة طرق مختلفة ، فالصخور والماء تستخدم لمنظومات خزن خاصة بالتدفئة والتبريد الشمسي. والصخور والزيت تستخدم أحياناً في حاوية واحدة لأجهزة الخزن الخاصة بمنظومات توليد الطاقة الكهربائية التي تعمل بدرجات حرارة عالية .

6-2-12 الخزن بالحرارة الكامنة

إن الحرارة الكامنة هي كسب وفقد الحرارة لمادة بواسطة تغير صفاتها الفيزيائية ، أي طورها ، من حالة إلى أخرى تحت درجة ثابتة . وهنالك ثلاث حالات يمكن استخدامها لخزن وتفريغ الطاقة هي :

أ - التغير من الحالة السائلة الى الحالة الصلبة وبالعكس ، والذي ينتج بدوره حرارة الانصهار والتجمد خلال عمليتي الشحن والتفريغ .

ب - التغير من الحالة السائلة إلى الحالة الغازية وبالعكس ، والذي ينتج بدوره حرارة التبخر والتكثيف خلال عمليتي الشحن والتفريغ .

جـ- التغير من الحالة الصلبة إلى حالة صلبة أخرى وبالعكس ، والذي ينتج بدوره حرارة خلال عمليتي الشحن والتفريغ .

إن المواد التي يتغير طورها من الحالة السائلة إلى الحالة الصلبة ، وبالعكس ، هي المستخدمة في معظم التطبيقات وذلك لكون التغيير من الحالة السائلة أو الغازية يحتاج إلى حجوم كبيرة ، وبالتالي ستكون كلفة المنظومة عالية . وكذلك فإن التغير من حالة صلبة إلى حالة صلبة أخرى ينتج كمية حرارة قليلة مقارنة ببقية الطرق. ومن الصفات المطلوبة للمواد المستخدمة في هذه الطريقة من الخزن هي :

أ - كمية الحرارة أثناء تبدل الطور يجب أن تكون عالية ، وذلك لخزن أكبر كمية من الحرارة .

ب - درجة حرارة التحول من حالة إلى أخرى يجب أن تكون ملائمة لمعظم التطبيقات الحرارية .

جـ - يجب أن يكون تغير حجم المادة قليلاً عند تحولها من حالة إلى أخرى ، وذلك لتقليل حجم الخزن الحراري .

د - يجب أن تكون المادة غير سامة أو قابلة للاشتعال أو الصدأ .

هـ - يجب أن تكون تكاليف المادة قليلة .

7-1-11 الخزن بحرارة الانصهار والتجمد

إن المواد التي يتغير طورها في درجات حرارة مناسبة مع كمية حرارة انصهار عالية مع بقاء مواصفاتها ثابتة بعد دورات عديدة من الانصهار والتجمد هي المواد المناسبة في هذا النوع من الخزن ، وذلك لكونها ستساهم في تقليل حجمه وكلفته . ومن المواد المستخدمة في هذا المجال قسم من الاملاح وشمع البرافين . ويبين الجدول (12-5) مواصفات بعض المواد التي تتميز بدرجة حرارة انصهار واطئة تكون مناسبة لأغراض التدفئة والتبريد .

ومن الأملاح المستخدمة هيدرات كلوريد الكالسيوم ($CaCL.6H_2O$) والذي من صفاته بأنه يذوب بانتظام ، ولا تبقى فيه كمية من المواد الصلبة عالقة في الأسفل ، كما يمكن كبسه في قناني أو ألواح بلاستيكية أو معدنية . ومن سلبياته أن درجة حرارة انصهاره قليلة نوعاً ما ، ولكنه يمكن أن يستخدم لأغراض التدفئة. ومن المواد التي درست بكثرة لهذا الاستخدام هو ملح جلبرت ($Na_2SO_4.10H_2O$) وذلك لكونه رخيصاً جداً ، وكمية حرارة انصهاره عاليه مقارنة ببعض المواد كما هو مبين بالجدول أعلاه . عملية تحول ملح جلبرت تجري حسب المعادلة التالية :

$$NaSO_4 + 10H_2O + energy \rightarrow Na_2SO_4 + 10H_2O$$

وتتم عملية الخزن بواسطة التفاعل الذي يتم من اليسار إلى اليمين بعد اضافة الحرارة . وتعتمد الطاقة المضافة على مستويات درجة الحرارة المضافة إلى المادة . والحرارة المضافة تتضمن حرارة محسوسة لرفع درجة حرارة الملح إلى درجة الذوبان ثم إلى حرارة كامنة وذلك لتغير طور المادة ومن ثم إلى حرارة محسوسة أخرى لرفع درجة حرارة المحلول إلى درجة الحرارة النهائية . وعند تفريغ الحرارة من الخزان تجري عملية عكسية ويتم التفاعل من اليمين إلى اليسار والتأثير الحراري السابق يكون معكوساً . ومشكلة هذا الملح الرئيسية هي عدم انتظام ذوبانه وبهذا فأنه سيفقد قسماً

كبيراً من حرارة انصهاره بعد عدة دورات من عمله بسبب الأجزاء الصلبة المتبقية التي لا تذوب . وتستخدم أنواع مختلفة من شمع البرافين لأغراض الخزن الحراري حيث أذ تذوب بانتظام ويمكن وضعها في حاويات معدنية أو بلاستيكية. وهذه الشموع تذوب بدرجات حرارة مختلفة مناسبة لأغراض التدفئة والتبريد، ولكن هذه الميزات قليلة الشأن لكون كمية حرارة انصهار هذه الانواع قليلة وموصليتها الحرارية ضعيفة . وأكثر أنواع الشمع استخدماً هو شمع البرافين (Sunco P-116) الذي ادرجت مواصفاته في الجدول أعلاه . كما تستخدم أيضاً أنواع عديدة من البوليمرات العضوية والتي لها كمية حرارة انصهار عالية وتنصهر بدرجات حرارة تتراوح من 130.0إلى 110 درجة مئوية، وهذا يؤهلها للعمل في مكائن التبريد الامتصاصية .

8-2-12 الخزن بحرارة التبخر والتكثيف

إن الخزن بواسطة الطاقة الكامنة بتبخير السوائل ينتج حرارة عالية بالنسبة لوحدة خزن معينة ، ولكن احتياجها إلى خزانات كبيرة بسبب حجم البخار الكبير يجعلها غير عملية من الناحية الاقتصادية .

جدول رقم (12-5) : بعض المواد المستخدمة في الخزن بالحرارة الكامنة بدرجة حرارة انصهار واطئة لأغراض التدفئة والتبريد

وسط الخزن	حرارة الانصهار KJ/Kg	الكثافة Kg/m^3		الحرارة النوعية $J/Kg.C^o$		الموصليه الحرارية $W/m.C^o$		الكلفة $/Kg	درجة حرارة الانصهار C^o
		سائل	صلب	سائل	صلب	سائل	صلب		
$CaCl_2.6H_2O$	190.0	1560.0	1800.0	2130.0	1460.0	0.54	1.09	0.07	27.0
$Na_2SO_4.10H_2O$ (ملح جلبرت)	225.0	1330.0	1460.0	3300.0	1760.0	--	2.25	0.04	32.0
شمع البرافين Sunco P-116	209.0	770.0	820.0	2510.0	2890.0	--	0.14	0.15	47.0
$Na_2So_3.5H_2O$	209.0	--	1650.0	2380.0	1460.0	--	0.57	0.18	48.0
$MgCl_2.6H_2O$	169.0	--	1560.0	2240.0	1590.0	--	--	0.15	120.0

12-2-9 الخزن بحرارة التحول من حالة صلبة إلى حالة صلبة أخرى

بعض المواد تكتسب وتطرح الحرارة خلال تغير حالتها الصلبة من حالة إلى حالة أخرى تحت درجة حرارة ثابتة. ولكّن هذا النوع من طرق الخزن غير مستخدم حالياً وذلك لكون كمية الحرارة المنبعثة نتيجة هذا التحول قليلة .

11-1-10 الخزن بالطاقة الكامنة في درجات الحرارة العالية

تتوفر عدة مواد لها حرارة انصهار مناسبة لأغراض الخزن في درجات الحرارة العالية منها بعض الاملاح اللاعضوية والسبائك المعدنية . ويبين الجدول(12-6) مواصفات بعض هذه المواد . وتلعب الخواص الكيميائية للمواد في درجات الحرارة العالية دورا مهما في بيان فائدة وعمر الاملاح المذابة والسبائك المعدنية . ومن أهم هذه الاعتبارات مكونات الخليط ووجود الشوائب ، واستقرارية الوسيط ، ومشاكل صدأ حاويات الخزن.

جدول رقم (12-6) : الخواص الفيزيائية الحرارية لبعض مواد الخزن الكامنة في درجات الحرارة العالية

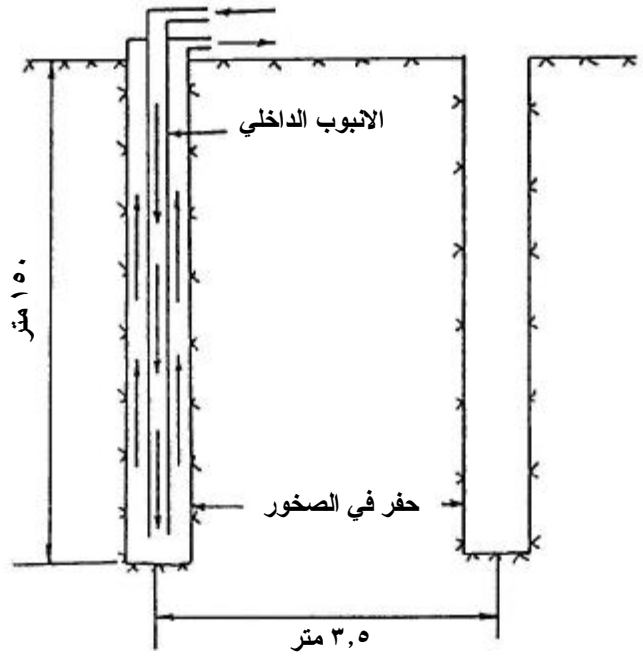
اسم المادة	درجة حرارة الانصهار C	حرارة الانصهار (Cal/g)	الحرارة النوعية (سائل) Cal/g.C
- املاح فلوريد البوتاسيوم وفلوريد الصوديوم وفلوريد المغنيسيوم KF-NaF-MgF	685.0	138.0	0.38
- كلوريد الصوديوم وكلوريد الكالسيوم $NaCl-CaCl_2$	500.0	67.0	0.25
- هيدروكسيد الصوديوم NaOH	318.0	76.0	0.25
- كربونات الصوديوم وكلوريد البوتاسيوم Na_2CO_3- KCl	588.0	64.0	0.33
- نترات الصوديوم $NaNO_3$	307.0	41.0	0.44
- الرصاص (Pb)	327.0	5.5	0.04
- الالمنيوم (Al)	658.0	94.0	0.25
- المغنيسيوم (Mg)	651.0	48.0	0.28

12-2-11 الخزن الموسمي

الخـزن الموسـمي للطاقـة الحراريـة يحتـاج الـى حجـوم كبيـرة ، ولـهـذا فـان الخزانـات المسـتخدمة يجـب أن تكـون تحـت سـطح الأرض وقريبـة مـن مصـدر الطاقـة وموقـع الاستعمال . وهنالك أنواع من طرق الخزن أهمها :

أ - الخزن بالحفر المثقوبة

الخزن الموسمي للطاقة الحرارية يمكن إنجازه بكلفة مناسبة في حفر مثقوبة في الصخور أو الطين . ففي البداية تخزن الطاقة في الصخور الصلبة أو الطين وتنقل من وإلى الخزان بواسطة تدوير الماء في دائرة مغلقة في حفر صخرية أو طينية بقطر 150 إلى 100 ملمُ تبعد الواحدة عن الأخرى من 4 إلى 3 متر وبعمق يصل إلى 150 ملم . ويبين الشكل (12-5) مخططا لمبدأ عمل نظام الخزن بهذه الطريقة .



شكل (12-5): مبدأ عمل نظام الخزن بالحفر المثقوبة

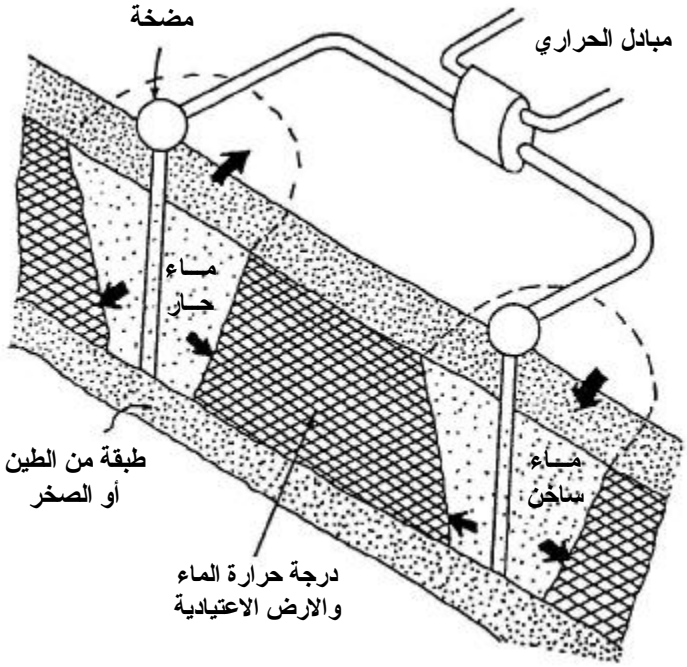
ب - الخزانات الفولاذية أو الكونكريتية

وهي خزانات موسمية كبيرة الحجم من الفولاذ أو الكونكريت تستخدم منذ عدة عقود لخزن الطاقة الفائضة عن الحاجة في الأوقات التي لا تكون هنالك حاجة لها ، كما يمكن خزن كمية كبيرة من الحرارة في الخزانات وبالدرجات الحرارية

المطلوبة . ويمكن السيطرة على الخسائر الحرارية بإضافة كمية من العازل الحراري .

جـ - الخزن بالطبقات الصخرية المائية

إن الطبقات الصخرية المائية هي تكونات جيولوجية تحتوي على ماء ، وهي موجودة في مناطق مختلفة من العالم على اعماق تتراوح بين عدة امتار وبضعة كيلومترات ، وتحتوي على ماء نقي أو ماء مالح تبعاً لعمق الطبقة ومكانها. وتستخدم هذه الطبقات لخزن الماء الحار أو البارد موسميا . ويبين الشكل (12-6) مخططا لمنظومة خزن للماء الحار المسخن بواسطة الاشعة الشمسية خلال الصيف أو من الحرارة الفائضة من المرافق الصناعية ليتم استخدامها خلال فصل الشتاء وحسب الحاجة .



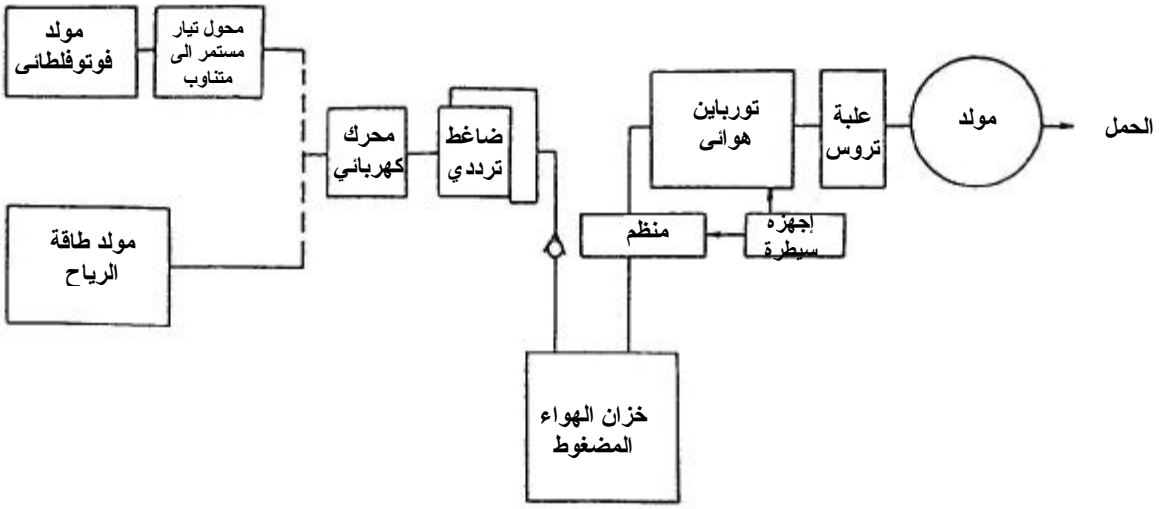
شكل (12-6): مخطط لمنظومة خزن الماء الحار بالطبقات الصخرية المائية

3-12 الخزن الميكانيكي

يمكن خزن الطاقة كطاقة كامنة في الهواء المضغوط أو بواسطة خزن السوائل في المناطق المرتفعة أو بواسطة العجلة الحدافة .

1-3-12 الخزن بالهواء المضغوط

يتم خزن الطاقة في هذا النوع من الأنظمة بواسطة هواء مضغوط في خزانات خاصة تتحمل ضغطاً عالياً أو في كهوف تحت الأرض. ومن السلبيات الرئيسية لهذا النوع من الخزن هي الكلفة العالية، وقلة الكفاءة ، بالإضافة إلى ضوضاء الضاغطة علاوة على المخاطر الناجمة عن ارتفاع الضغط . وفي جميع تطبيقات الطاقة الشمسية المستخدمة في هذا النوع من الخزن تكون الطاقة الداخلة والخارجة هي طاقة كهربائية . ويبين الشكل (12-7) منظومة تجريبية منصوبة في كندا تستخدم الخلايا الفوتوفلطائية وطاقة الرياح لتوليد الطاقة الكهربائية اللازمة لتشغيل الضاغطة . وتتراوح كفاءة المنظومة بين ٢0% و٥0% والكلفة التقريبية للطاقة المخزونة هي 240$/KWhr. والسعات المستخدمة حاليا تتراوح بين عدة كيلو وات إذا كان الخزن في خزان حديدي لتجهيز بيت واحد بالطاقة ، و عدة مئات من الميغاوات إذا كان الخزن في الكهوف أو في المناطق الجوفية .

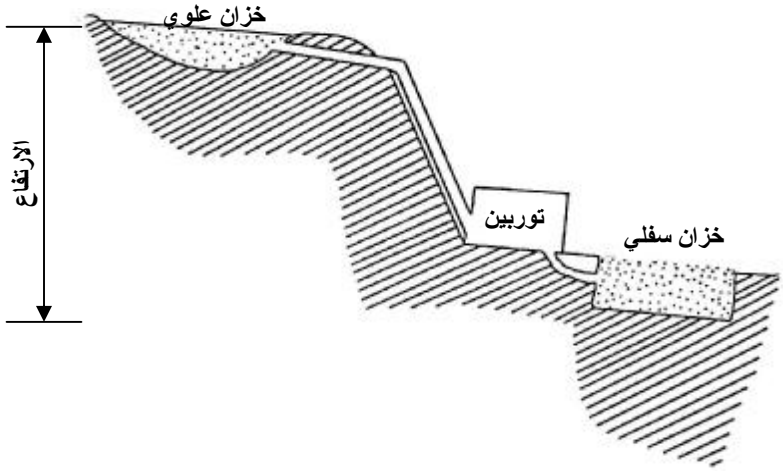


شكل (12-7): مخطط لمنظومة خزن بالهواء المضغوط تستخدم الخلايا الشمسية وطاقة الرياح

2-3-12 الخزن بالطاقة الكامنة

وهي طريقة تقليدية لخزن الطاقة الفائضة من منظومات طاقة الرياح والخلايا الفوتوفلطائية، والتي تتضمن دفع الماء بواسطة المراوح او المضخات التي تعمل بطاقة الرياح أو بالطاقة الشمسية إلى خزان عالٍ يمكن الاستفادة من الماء للأغراض المختلفة عند عدم وجود سرع عالية للهواء أو عدم وجود الاشعاع الشمسي. وقد استخدمت هذه المنظومات من قبل بعض شركات توليد الطاقة الكهربائية لتزويد المنظومات بالطاقة المخزونة في حالات حمل الذروة ، كما هو موضح في الشكل (12-8) . والكلفة الحالية

التقريبية لهذه المنظومات والتي تتضمن محطة التوليد الكهربائية ومحطة التوزيع الثانوية وبقية المنظومة تتراوح بين 95 و 100 $\KWhr دولار (لكل كيلووات – ساعة) بينما تتراوح كلفة منظومة الخزن بين 2 و 10 $\KWhr دولار (لكل كيلو وات – ساعة) . وتتراوح كفاءة المنظومة بين -70 و 75% .



شكل (12-8): مخطط لمنظومة خزن الطاقة الكامنة لتوليد الطاقة الكهربائية

12-3-3 الخزن بالعجلة الحدافة

يمكن خزن الطاقة الكهربائية المولدة من مصادر الطاقة التقليدية بصورة ميكانيكية عن طريق استخدام عجلة حدافة تتكون من قرص دوار ذي اقطاب مغناطيسية مثبتة على محور الدوران لإنتاج الكهرباء عن طريق مولد تقليدي . وتوضع جميع مكونات العجلة الحدافة في وسط مفرغ من الهواء لتقيل الاحتكاك . ويرتبط زمن شحن العجلة بمقدار الجهد الكهربائي المطبق عليها . وتدل الدارسات والبحوث أن مستقبل هذه الطريقة سيكون منافسا بالمقارنة مع البطاريات خاصة أنه لا توجد آثار ضاره بالبيئة . كما أن عمرها الاستهلاكي يتراوح بين 15 و 25 سنة ولها تطبيقات صناعية وسكنية .

12-4 الخزن الكهربائي

الخزن الكهربائي هو أحد المواضيع الرئيسية المرتبطة بتوسيع انتشار منظومات الخلايا الفوتوفلطائيه . والمشاكل المتعلقة بخزن الطاقة الكهربائية هي ارتفاع اسعار البطاريات، واحتياجها إلى صيانة مستديمة، وعمرها المحدود . والتقنية الحالية في هذا المجال تتمثل بشيوع استخدام البطارية التقليدية ، وهي بطارية الرصاص الحامضية

(Pb/PbO_2) وبطارية النيكل كادميوم (Ni/cd) ، ومن المحتمل أن يستمرا كخازنين للطاقة الكهربائية لعدة سنوات قادمة .

تتميز بطارية الرصاص الحامضية ، بالإضافة إلى توفرها في الاسواق ، بأنها يمكن الاعتماد عليها ، ولها وقت خزن جيد وكفاءة عالية . ومن سلبياتها أن عمرها محدود ويعتمد على التشغيل اليومي كما أنها تتفرغ تلقائيا مع الزمن .

والتفاعل الأساسي لبطارية الرصاص الحامضية هو:

عند القطب الموجب $PbO_2 + 3H^+ + H_2So_4^- + 2e^- \longrightarrow PbSO_4 + 2H_2O$

عند القطب السالب $Pb + HSO^-_4 \longrightarrow PbSO_4 + H^+ + 2e^-$

وعليه يكون ملخص التفاعل هو :

$$Pb + PbO_2 + 2H_2SO_4 \longrightarrow 2PbSO_4 + 2H_2O$$

وعند شحن البطارية يتكون القطب الموجب من PbO_2 والقطب السالب يكون رصاصاً صافياً (Pb) . وخلال التفريغ يتحول كلا القطبين إلى $PbSO_4$.

أما التفاعل الأساسي لبطارية النيكل كادميوم Ni/Cd فهو:

عند القطب الموجب $2NiO(OH) + 2H_2O + 2e^- \longrightarrow 2Ni(OH)_2 + 2OH^-$

عند القطب السالب $Cd + 2OH^- \longrightarrow Cd(OH)_2 + 2e^-$

وعليه يكون ملخص التفاعل هو :

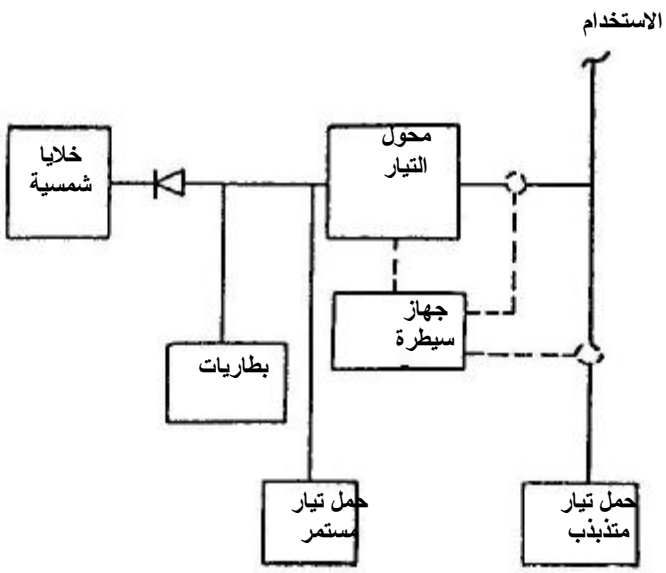
$$2Ni(OH)_2 + Cd(OH)_2 \longrightarrow 2NiO(OH) + Cd + 2H_2O$$

هناك جهود مستمرة لصنع بطاريات متطورة تتميز بتحسين كثافة الخزن وتقليل السعر مع ضمان بقاء الخواص الاخرى بالبطارية ، خاصة عدد ساعات التشغيل . والتقنية الحديثة تتجه حاليا نحو منظومات بدرجات حرارة عالية أو منظومات تحتوي على مفاعلات سائلة أو غازية. ومن أكثر البطاريات المتطورة ذات الدرجات الحرارة العالية والمستخدمة حالياً هي بطاريات الكبريت والصوديوم Na/S . والتفاعل الأساسي لها هو :

$$2Na + 5S \longrightarrow Na_2S_5\ (300C)$$

فالألكتروليت الخاص بالبطارية هو صلب (BAl_2O_3) وهو موصل جيد لايونات الصوديوم . وهذه البطاريات يمكن تشغيلها فقط عند درجة 300 مئوية ، لان عند هذه الدرجة تتوفر للالكتروليت الموصلية الجيدة إذ عندها تكون المفاعلات بحالتها السائلة. ومن إيجابيات هذا النوع من البطاريات أن كثافة طاقتها عالية جداً. وهذه البطاريات مصنعة حالياً على نطاق ضيق وشيوعها في الاسواق يتطلب عدة سنوات .

كما أن هناك أنواعاً أخرى من البطاريات منها بطارية الزنك كلورين Zn/Cl_2 التي من مواصفاتها أن تفاعل Zn/Cl_2 يجهز كثافة طاقة عالية جداً ، ولكن مشكلتها هي أن الكلورين (Cl_2) يكون بحالة غازية ومن الصعب خزنه ولكنه يتحول إلى مادة $Cl_2.6H_2O$ وهي صلبة وبدرجة أقل من 10 مئوية ، لذلك فان البطارية يجب أن تزود بثلاجة لضمان بقاء الكلورين بدرجة أقل من 10 مئوية . وهنالك بطارية أخرى يمكن أن تعمل بدرجات حرارة عادية ، وهي بطارية الريدوكس (redox). ومن إيجابياتها الرئيسية رخص كلفتها إذ يمكن استخدامها في منظومات توليد الطاقة الكهربائية بواسطة الخلايا الفوتوفلطائية . ويبين الشكل (12-9) مخططا لمنظومة خزن مع مصدر كهربائي مولد من خلايا فوتوفلطائية .



شكل (12-9): مخطط لمنظومة خزن مع مصدر كهربائي مولد من خلايا فوتوفلطائيه

5-12 الخزن الكيميائي

يمكن خزن الطاقة كيميائياً إما بواسطة خزن الوقود الناتج عن التفاعلات الكيموضوئيه، أو التخزين الناتج عن التفاعلات الكيميائية العكسية .

1-5-12 الخزن الوقودي

ويتم ذلك بخزن الطاقة على شكل وقود يمكن انتاجه بواسطة التفاعلات الكيموضوئية، وفي هذه الحالة يمكن استخدام بطاريات خزن خاصة يحدث منها تفاعلات كيميائية عن طريق تأثير الضوء عند الشحن ثم تفريغها .

وأحد هذه التطبيقات هو تحلل مركب النيتروسكلورايد إلى مركباته بوجود الأشعة الشمسية كما يلي :

$$2NOCL \longrightarrow 2NO + CL_2$$

عند استهلاك الطاقة فإن اتجاه التفاعل ينعكس إذ يتفاعل الكلور مع أكسيد النيتروجين ليكونا المركب NOCL بالإضافة إلى حرارة يمكن استغلالها للأغراض المختلفة .
ومن طرق خزن الطاقة الحرارية الأخرى هو تحلل مركب الأمونيوم بايوسلفيت

$$NH_4HSO_4 \longrightarrow NH_3 + H_2O + SO_3$$

فالماء وثالث أكسيد الكبريت يتكثفان إلى سائل في درجة حرارة مقاربة لدرجة حرارة المحيط، والامونيا يمكن جمعها عكسيا مع ملح مناسب في درجة مقاربة لحرارة المحيط، ولكن الحرارة الناتجة عند التكثيف يصبح استغلالها صعبا وذلك لان قسماً كبيراً من هذه الطاقة يجب أن يصرف لفصل الغازات الثلاثة ولهذا فإن الكفاءة الحرارية لتحلل مركب الامونيوم بايوسلفيت تكون أقل بكثير من 100% . ومن الطرق الأخرى للخزن هو تحلل مادة هيدروكسيد المغنيسيوم الصلبة $Mg(OH)_2$ بدرجة حرارة مقدارها 540 كلفن تحت الضغط الجوي الإعتيادي لإنتاج صلب أكسيد المغنيسيوم وبخار الماء ، وإن كمية الحرارة الناتجة من التفاعل تساوي 19 كيلو كالوري لكل جول . والمشكلة الرئيسية في هذه الطريقة ، كما هو موضح في المخطط أدناه هي أن حوالي نصف الحرارة المخزونة يتم فقدها عندما يتكثف بخار الماء الناتج عند درجة حرارة 540 كلفن.

$$Mg(OH)_2\ (540K^o) \xrightarrow[-4.57]{18.72} MgO + H_2O\ (540K^o)$$

$$Mg\ (OH)_2\ (300k^o) \longrightarrow MgO + H_2O\ (g)\ (300K^o)$$
$$\uparrow -8.99$$
$$MgO + H_2O + H_2O\ (L)\ (300K)$$

هنالك أنظمة كثيرة أخرى يمكن استخدامها لخزن الطاقة الحرارية. ولكن المشكلة الرئيسية التي تحد من استخدامها هي أن كفاءتها قليلة وكثافة خزنها واطئة إذا لم تكن نتائج تفاعلها بطور غازي .

2-2-12 خزن الهيدروجين

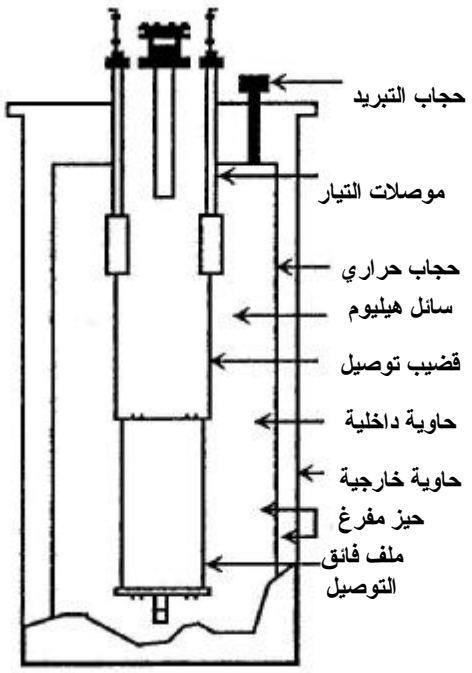
إن مميزات الهيدروجين كوسيط كيمياوي لخزن الطاقة كثيرة ، أهمها كونه يتولد بكفاءة وله مواصفات جيدة للخزن الحراري لفترة طويلة وبكثافة خزن عالية وبدرجات حرارة مقاربة لدرجة الحرارة الخارجية ، ويمكن خزنه ونقله كغاز أو كسائل إلى مناطق بعيدة، كما يمكن استخدامه لتوليد الطاقة الكهربائية في خلايا الوقود أو من حرقه الذي ينتج درجة حرارة لهب أعلى من 2000 كلفن .

ويمكن إنتاج الهيدروجين من الماء والشمس من خلال عدة عمليات متعاقبة يتم فيها تحلل الماء بدرجة حرارة عالية تصل إلى 1100 كلفن أو من تحلل حامض الكبريتيك .

ويخزّن الهيدروجين عادة إما بشكل سائل أو غاز مضغوط في أوعية فولاذية ذات غلاف خارجي مزدوج مفصولة بطبقة من الهواء بدرجة 250 درجة مئوية عند ضغط 10 ضغط جوي (atm) . وسعر الخزان المتكون من مادة الفولاذ المرن أو سبيكة الألمنيوم تتراوح بين 2.3 $\KWhr$ دولار (لكل كيلو وات ـ ساعة) لسعة مقدارها 10Mwh ميجاوات ـ ساعة إلى 0.3 $/KWhr لسعة مقدارها 1000Mwhr ميغاوات – ساعة . وخزن الهيدروجين كغاز يتطلب وعاءً يتحمل ضغطاً عالياً وضاغط ، وتكون ضاغطات الهيدروجين عادة من النوع الترددي وبدون تزييت لمرحلة واحدة أو عدة مراحل ، وهذه تعتمد على نسبة الانضغاط . وتتراوح كفاءة دورة الانضغاط بين 93% و 98% معتمدة على كمية الغاز المار والضغط الداخل والضغط النهائي للخزان . وتدرس حاليا طرق اخرى لخزن الهيدروجين منها استخدام الكهوف الصخرية تحت الأرض .

6-12 الخزن المغناطيسي

تم مؤخراً خزن الطاقة الكهربائية المتولدة من مصادر الطاقة المتجددة مباشرة عن طريق تحويلها إلى طاقة مغناطيسية بأستخدام ملفات مغناطيسية فائقة التوصيل مصنوعة من مواد ذات مقاومة صغيرة جداً عند درجات حرارة منخفضة جداً . وتعد هذه الطريقة ذات كفاءة عالية أذ إنه لا يلزم فيها تحويل الطاقة إلى أشكال أخرى مثل التحويل الميكانيكي وغيره ، ثم تحويلها مره أخرى إلى طاقة كهربائية وبالتالي فقدان جزء منها اثناء التحويل . وفي هذه الطريقة يمرر تيار كهربائي مرتفع على ملف فائق التوصيل يعمل على حفظ الطاقة بشكل مغناطيسي ثم يحولها عند اللزوم إلى طاقة كهربائية . وقد لجأت بعض المصانع الالكترونية إلى هذه التقنية لتأمين الكهرباء عند حدوث انقطاع مفاجئ للتيار الكهربائي نظراً لصغر حجمها وطول عمر استهلاكها. ويوضح الشكل (12-10) مخططاً مبسطاً لوحدة تخزين نموذجية تستخدم ملفاً مغناطيسياً فائق التوصيل.



شكل (12-10): مخطط لوحدة تخزين تستخدم ملفاً مغناطيسياً فائق التوصيل

أسئلة تقويمية

١. ما هي أنواع الخزن الحراري ؟ وما هي الوسائط المستخدمة فيه ؟
٢. ما هي أهم المواد المتغيرة الطور المستخدمة في منظومات الخزن الحراري ؟
٣. كيف يتم استخدام الخزن بالطاقة الكامنة في توليد الطاقة الكهربائية ؟
٤. كيف يتم خزن الهيدروجين ؟