الأنابيب الحرارية في نظم الطاقة الشمسية

د. سيد محمود حسنين
م. حمد الفارس

يعد الأنبوب الحراري ابتكاراً هندسياً متميزاً لمقدرته على نقل كمية كبيرة من الطاقة الحرارية خلال مقاطع صغيرة وبفارق قليل جداً في درجة الحرارة بين طرف الأنبوب ذو الطاقة العالية والطرف الثاني ذو الطاقة المنخفضة ، وهو في أبسط صوره عبارة عن أنبوب معدني مغلق الطرفين مفرغ من الهواء ومبطن من الداخل بشبكة معدنية مشبعة بمائع خاص قابل للتحول من الحالة الغازية إلى الحالة السائلة عند درجة حرارة التشغيل .

يستفاد من تقنية الأنابيب الحرارية في عدة استخدامات من استخدامات الطاقة الشمسية مثل السخانات الشمسية المسطحة والسخانات ذات الأنابيب المفرغة ، وكوسائط لنقل الحرارة من بؤرة المجمعات الشمسية ذات التركيز البؤري ، وكذلك في نقل الحرارة من المجمعات الشمسية إلى الأنظمة الشمسية المختلفة .

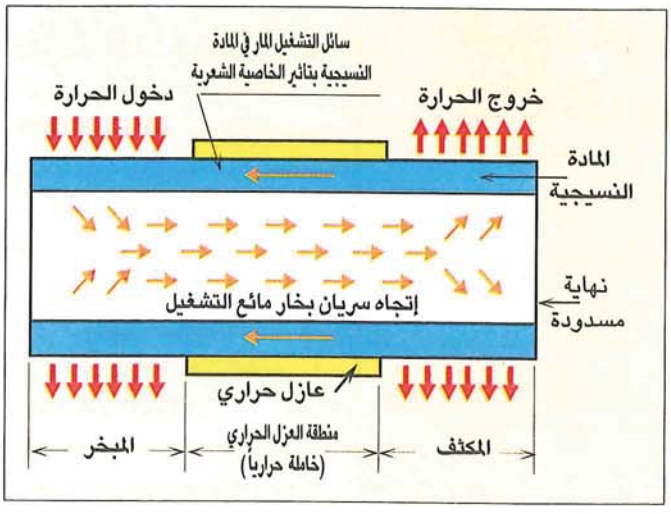
قبل الخوض في استخدام الأنابيب الحرارية في الأنظمة الشمسية سيتم التطرق للمعلومات المتعلقة بتركيبها وطريقة عملها وتطبيقاتها العامة وذلك لتكوين فكرة عامة عن هذه التقنية .

المبدأ الأساس للتشغيل

يتكون الأنبوب الحراري ، شكل (١) ، من أنبوب ذو مقطع دائري مبطن بشبكة معدنية ذات شكل هندسي محدد تغطي الجدار الداخلي للأنبوب ، وباستثناء هذه الشبكة يعد الأنبوب فارغاً من الداخل وذلك للسماح بانتقال مائع التشغيل بحرية بين النهاية التي يتم سحب الحرارة منها إلى النهاية الأخرى التي يتم دفع الحرارة إليها . تسمى النهاية التي يتم سحب الحرارة منها بالمبخر والنهاية الأخرى بالمكثف ، وهاتان النهايتان موصولتان بجزء من الأنبوب معزول حرارياً لمنع انتقال الحرارة من هذا الجزء من الأنبوب إلى الوسط المحيط به .

عندما يسخن المبخر تنتقل الحرارة عبر جدار الأنبوب إلى الشبكة المعدنية حيث يتم تبخير السائل الموجود فيها ومن ثم ينتقل البخار عبر الفراغ الداخلي إلى النهاية الأخرى (المكثف) ليتم تكثيفه ، وخلال عملية التكثيف يتم طرد الحرارة الكامنة للتبخير إلى الوسط المحيط بالمكثف ، أما البخار فيتكثف عند الشبكة المعدنية ثم ينتقل إلى المبخر تحت تأثير الفرق في الضغط داخل الشبكة المعدنية والذي ينتج عن الخاصية الشعرية بين المكثف والمبخر، وعلى هذا الأساس فإن انتقال الحرارة يتم عن طريق أربع مراحل هي :

- تبخير السائل في المبخر .
- انتقال البخار من المبخر إلى المكثف .
- تكثيف البخار في المكثف .
- انتقال السائل من المكثف إلى المبخر .



● شكل (١) رسم توضيحي لمكونات وطريقة عمل الأنبوب الحراري.

يتميز الأنبوب الحراري بكفاءة عالية في نقل الطاقة الحرارية لأنه يعتمد على مبدأ الطاقة الكامنة (Latent Heat) للمائع المستخدم والتي تبلغ أضعاف الطاقة اللازمة لرفع درجة المائع إلى درجة معينة ، فمثلاً تتساوي كمية الحرارة اللازمة لتحويل جرام واحد من الماء من سائل عند درجة حرارة ١٠٠أم إلى بخار عند درجة حرارة ١٠٠أم مع كمية الحرارة اللازمة لرفع درجة ٥٤٠ جرام من الماء إلى درجة واحدة مئوية .

ويمكن ايضاح كفاءة الأنبوب الحراري بمقارنة الحرارة المنقولة بوساطة قضيب نحاسي بقطر سنتميتر واحد وطول ٥٠سم ، فعند وضع هذا القضيب بين وسطين يبلغ فرق درجة الحرارة بينهما ٢٠٠أم مثلاً فإن القضيب يستطيع نقل ١٣ وات من الطاقة الحرارية .

وفي حالة استخدام أنبوب حراري من الفولاذ وبداخله مادة الصوديوم كمائع وله نفس أبعاد القضيب النحاسي ويعمل عند نفس درجات الحرارة ، فان هذا الأنبوب يستطيع نقل ما مقداره ٢٠٠٠ وات من الطاقة الحرارية .

مكونات الأنبوب الحراري

يتكون الأنبوب الحراري من مائع التشغيل والنسيج المعدني والأنبوب الخارجي وذلك على النحو التالي :

● مائع التشغيل

يعد مائع التشغيل الوسيط الأساس لانتقال الحرارة داخل الأنبوب الحراري . وهناك أنواع عديدة من موائع التشغيل تختلف باختلاف درجة حرارة التشغيل والتي تبدأ من درجات التجمد الفائق (أقل من -٢٠٠°م) وحتى درجات ذوبان المعادن (أكثر من ١٥٠٠°م) . ويجب أن تتوفر في مائع التشغيل الخصائص التالية : -

١ - توتر سطحي ذو قيمة عالية وذلك حتى يمكن تشغيل الأنبوب الحراري في اتجاه معاكس لاتجاه الجاذبية الأرضية .

٢ - لزوجة منخفضة لتقليل مقاومة الشبكة المعدنية لمرور السائل .

٣ - طاقة عالية للتبخير (حرارة كامنة) لتقليل النقص في الضغط الشعري داخل الشبكة المعدنية .

٤ - درجة ترطيب وتبليل عالية لضمان ترطيب النسيج المعدني في كل الأوقات .

٥ - درجة توصيل عالية للحرارة لتقليل الفرق في درجات الحرارة في الاتجاه القطري للأنبوب.

٦ - ضغط بخاري أعلى من المتوسط لمنع حدوث غليان على السطح الداخلي للأنبوب لأن الضغط البخاري المنخفض يعني أن هناك انخفاض في كثافة البخار المتجه إلى الطرف الآخر (الطرف البارد) من الأنبوب.

٧ - عدم التأثير الكيميائي للمائع على مادة الأنبوب أو النسيج المعدني منعاً لتآكله.

٨ - ذو كثافة نوعية عالية من أجل استخدام أنابيب صغيرة الحجم .

٩ - رخيص الثمن وذلك خفضاً للتكلفة .

● النسيج المعدني

يصنع النسيج المعدني (Metallic wick) من مادة واحدة أو عدة مواد ، ويكون على هيئة شبكة فلزية أو نسيج مضلع من معادن الفولاذ أو النيكل أو النحاس أو الألومنيوم . ويمكن تصنيعه كذلك من اللباد الفلزي أو الرغوة الفلزية أو الفلزات الليفية أو المسحوق الفلزي المعالج ، ويوضح شكل (٢) أنواع مختلفة من النسيج المعدني المستخدمة . وتتلخص وظيفة النسيج المعدني في الأنابيب الحرارية فيما يلي :

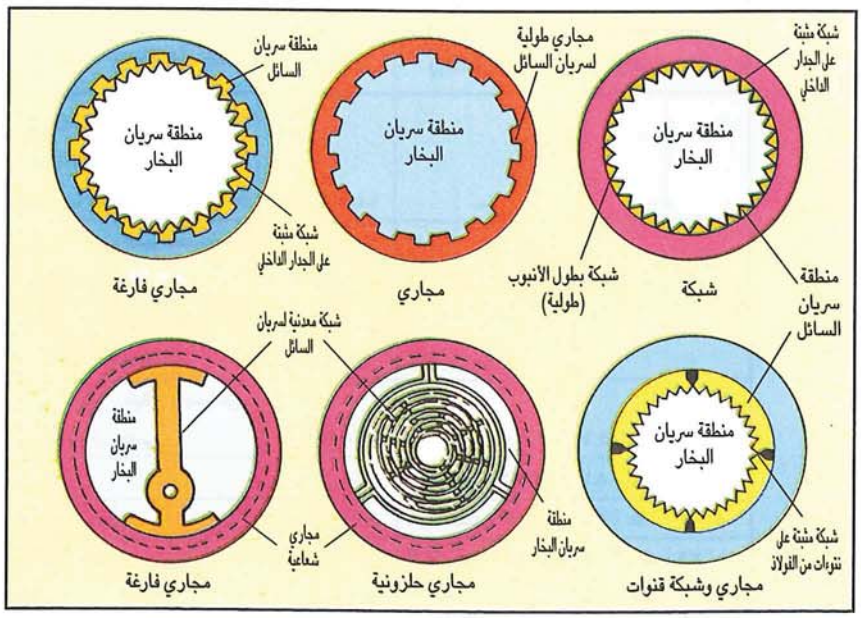
- توفير القنوات المناسبة لسريان السائل المتكثف من المكثف إلى المبخر.
- توفير توتر سطحي على سطح التداخل بين السائل و البخار لتوليد الضغط الشعري الذي يعمل على سحب السائل داخل النسيج .
- توفير وسط لانتقال الحرارة بين السطح الداخلي للأنبوب وسطح تداخل السائل والبخار .

● الأنبوب الخارجي

تنحصر المهمة الأساس للأنبوب الخارجي في عزل مائع التشغيل عن الوسط المحيط ، ويفضل أن يتميز الأنبوب الخارجي بما يلي : -

- معدل عال للمقاومة الميكانيكية إلى الوزن.
- سهولة التصنيع .
- توصيلية حرارية عالية .
- قابلية عالية للترطب والتبلل .
- رخص الثمن .

يعد النحاس من أفضل المعادن لتصنيع الأنبوب الخارجي نظراً لوفرته ولذا فانه يستخدم في التطبيقات العادية ، كذلك يستعمل الألومنيوم في الأنابيب الحرارية المستخدمة في الفضاء الخارجي وذلك لخفة وزنه ، ويمكن استخدام الفولاذ في تطبيقات درجات الحرارة العالية (عندما يكون مائع التشغيل من معدن منصهر كالصوديوم مثلاً).



● شكل (٢) مقاطع مختلفة لأنواع الأنسجة المعدنية.

هنـاك أنـواع متعـددة من الأنـابيب الخارجية المستخـدمة في الأنـابيب الحرارية ، وهي تختلف باختـلاف مائع التشغيل والمواد الداخلة في التصنيع ومجال التطبيق ويوضح جـدول (١) بعض الخصـائص التشغيلية لنماذج من الأنـابيب الخارجيـة المستخدمـة وذلك حسب نوع مائع التشغيل المستخدم .

تصنيع الأنابيب الحرارية

تُصَّنع معظم الأنـابيب الحراريـة تحت ظروف قياسية بـاستخدام مضخات تفريغ وطرق لحام خاصـة ، كما أنه يمكن تصنيع أنابيب حرارية غير معقدة بالطريقة التالية :

ـ يؤخذ أنبـوب نحاسـي بقطـر ١,٢٧ سـم (نصف بـوصة) وبطول متر واحـد ثم تُقفل إحدى نهايتيه باللحام .

ـ تُصنع الشبكـة المعدنية باستخـدام شبكة معدنيـة عيار ١٠٠ (100-Mesh) من سبيكة البرونز الفوسفـوري بعرض يساوي المحيط الداخلي للأنبوب النحاسي

ـ تُسخن الشبكة المعـدنية والأنبوب النحاسي داخل فـرن حتى تتكـون طبقـة رقيقـة من الأكسيـد عليها ، وذلـك بغرض تمكين مـائع التشغيل من تبليل (ترطيب) الشبكة المعدنية والسطح الداخلي للأنبوب .

ـ تُـدخل الشبكة المعدنيـة داخـل الأنبوب ثم يُلحم صمـام فـي النهايـة المفتوحـة مـن الأنبـوب .

ـ تُسكب كميـة من الماء داخل الأنبوب تكفي لملء خمس الأنبـوب ، ثم تـوضـع النهـايـة السفلى لـلأنبـوب على اللهب حتى يغلي الماء مـع الإبقـاء على الصـمام في الجهـة العليـا مفتوحـاً .

ـ بعد مرور بعـض الوقـت على بـدء الغليان يُقفل الصمام ويبعـد الأنبـوب عن اللهـب حتى يبرد .

ـ تُجـرَّب فاعليـة الأنبـوب بغمـس إحـدى نهايتيـه فـي ماء يغلي ويُحسـب الوقـت الذي تستغرقـه الحـرارة حتى تنتقـل إلى النهايـة الأخـرى .

تطبيقات الأنابيب الحرارية

ماتـزال الدراسـات المتعلقة بـاستخدام الأنـابيب الحراريـة في التطبيقـات المختلفـة الفضائية والأرضيـة مستمرة وذلك لتغطية مجالات حـراريـة واسعة لعمليـات انتقـال الحرارة . وبـوجـه عـام يمكن حصر هـذه التطبيقات في التالي :ـ

ـ عـزل جانب المصـدر الحراري عن الجانب المستفيد.

ـ تعديـل الاختلافات في درجـة الحـرارة في وسط معين .

ـ نقل الطاقة الحرارية .

ـ التحكم في درجة الحرارة .

ـ تحديد سريان الحرارة في اتجاه واحد.

ينحصر استخـدام الأنـابيب الحراريـة بـوجـه عـام في نطـاق ضيق نسبيـاً ـ حيث تستخـدم في تطبيقـات الطاقـة الشمسيـة ـ ولكنها وجدت مجالاً واسعاً للتطبيق في مجال المحافظة على الطاقة واستغـلال طاقة العوادم الضائعة . ومن أمثلـة ذلك تستخدم الأنابيب الحرارية في المبادلات الحرارية الغازية (غاز ـ غـاز) وذلك بـوضع المبخر في طـريق الغـاز السـاخن والمكثـف في طـريق الغـاز المراد تسخينه ، وفي مجال تكييف الهواء وكـذلك في التحـويـلات الصنـاعيـة المختلفـة كتجفيف الخشب والطلاء وزيادة صـلابة البلاستيك ، وفي أفـران النسيج والـزجـاج وكـذلك في العمليات الكيميائية .

● تطبيقات الطاقة الشمسية

يمكـن استخـدام الأنابيـب الحراريـة في مجال تطبيقـات الطاقـة الشمسيـة على النحو التالي : ـ

* **السخـانـات الشمسيـة :** وذلك لتـلافي القصور الذي ينجم عن استخـدام السخانات الشمسية التقليـدية والتي تكون فيهـا أنابيب الماء ملتصقة بالسطح الماص ، وفي هذه الحالة يمر الماء طبعياً أو قسرياً (باستخدام مضخة) ليحمل الحرارة من السطـح الماص إلى وعـاء التخزين . ويـؤخذ على السخـانات التقليـدية بعض العيوب التي تنحصر فيما يلي : ـ

ـ استهلاك المضخة للطاقة في حالة السريان القسري .

ـ الحاجـة إلى مساحـة كبيرة لوضـع وحدة التسخين ووحدة التخزين في حـالة السريان الطبيعي .

ـ إنعكاس اتجـاه السريـان في السخان ليلاً مما يعني فقد كميـات من الحرارة المكتسبة خلال النهار.

ـ تجمد الماء داخل السخان في الليالي الباردة الأمر الذي يعرض السخان إلى التلف .

مائع التشغيل	معدن الأنبوب الخارجي	مجال درجات الحرارة (°م)	التدفق الحراري في الاتجاه الطولي (وات / سم٢)	التدفق الحراري في الاتجاه القطري (وات / سم٢)
فريون	فـولاذ ، نيكـل ، نحـاس ، سبائك النحـا س ، المنيوم ، سبائك المنيوم.	ـ٧٠ إلى ١٤٠	—	—
ميثانول	فـولاذ، نيكـل، نحـاس، سبائك النحاس .	ـ٤٠ إلى ١٥٠	٠,٤٥ عند ١٠٠°م	٧٥,٥عند١٠٠°م
نشادر	فـولاذ، نيكـل ، ألمونيـوم ، سبائك ، الألمونيوم .	ـ٦٠ إلى ٥٠	—	—
ماء	تيتانيوم ، نيكل ، نحاس، سبائك النحاس .	٧ إلى ٢٣٠	٠,٦٧عند ٢٠٠°م	١٤٦عند١٧٠°م
زئبق	فولاذ .	٨٠ إلى ٥٧٠	٢٥,١عند٢٦٠°م	١٨١ عند ٢٦٠°م
بوتاسيوم	فولاذ ، نيكل .	٤٠٠ إلى ٨٠٠	٥,٦ عند ٧٥٠°م	١٨١ عند ٧٥٠°م
صوديوم	فولاذ ، نيكل .	٥٠٠ إلى ٩٠٠	٩,٣ عند ٨٥٠°م	٢٢٤ عند ٧٦٠°م
ليثيوم	فولاذ .	١٣٠٠إلى١٦٠٠	—	١١٥ عند ١٥٠٠°م

● جـدول (١) بعض الخصائص التشغيلية النموذجية للأنابيب الحرارية .

ـ تآكل المواد المستخدمة في السخان والخزان وأنابيب التوصيل لملامستها للماء .

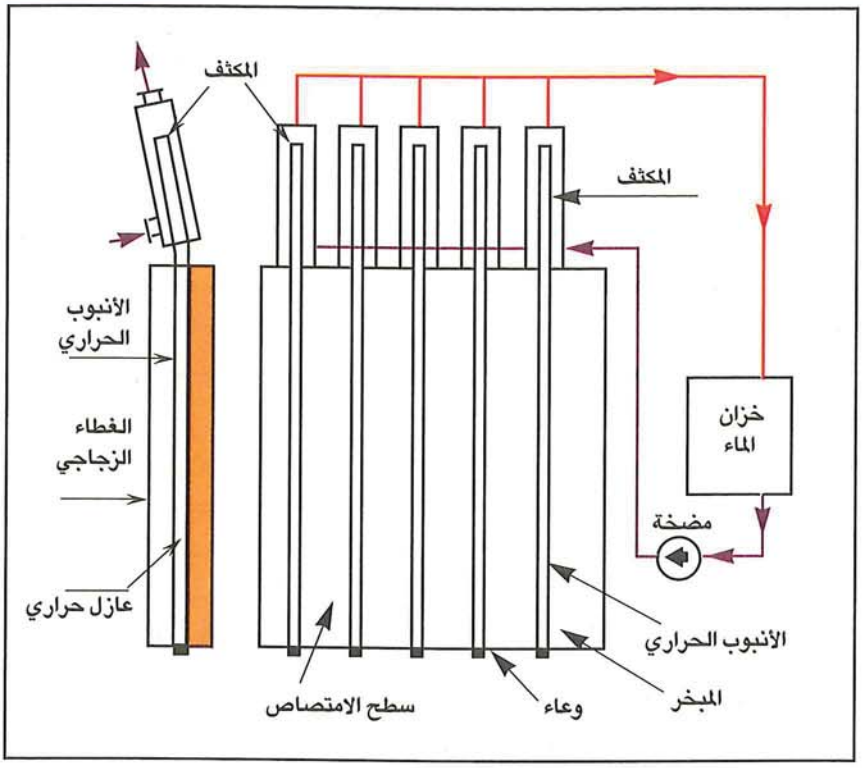
ـ الارتفاع العالي لدرجة حرارة السخان خلال أيام الصيف .

يمكن التغلب على معظم العيوب المذكورة باستخدام الأنابيب الحرارية في السخانات بدلاً عن أنابيب التسخين ، فمثلا يعمل الأنبوب الحراري كموحد لاتجاه سريان الحرارة باتجاه واحد فقط عند إمالته بزاوية بسيطة ، أي أنه يمكن تلافي مشكلة التبريد خلال الليل باستخدام هذه التقنية .

إضافة لذلك ، وبسبب أن الأنبوب الحراري يعتمد على الطاقة الحرارية الكامنة، فان معدل سريان الطاقة المنتقلة عبره يمكن التحكم فيها وذلك لأنها لن تزيد بأي حال من الأحوال عن الطاقة اللازمة لتحويل المائع الموجود في الأنبوب من الحالة الغازية (الطرف الحار) إلى الحالة السائلة (الطرف البارد) وذلك يعني أن انتقال الحرارة سيتوقف عندما تبلغ درجة حرارة المكثف لدرجة غليان المائع . وكمثال لذلك عند استخدام الفريون ١٣٠١ (درجة غليانه ٦٨° م) كمائع فان درجة حرارة المكثف لن تصل إلى ٦٨° م حتى لو بلغت درجة حرارة المبخر أضعاف تلك الدرجة من الحرارة ، وبذلك فان استخدام الأنابيب الحرارية في السخانات الشمسية سيلغي مشكلة التسخين الزائد التي تحدث للسخانات التقليدية خلال فصل الصيف .

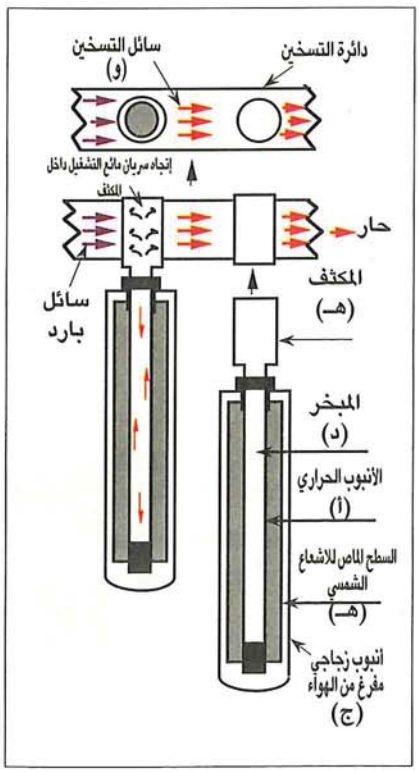
تأتي السخانات الشمسية ذات الأنابيب الحرارية في نوعين، فهي إما من النوع المستوي التقليدي وأما من النوع ذي الأنابيب الزجاجية المفرغة . يوضح شكل (٣) سخان شمسي مستو يعمل بالأنابيب الحرارية ، وهو يحتوي على سطح امتصاص من الألمنيوم وبه أنبوب حراري من النحاس يبرد المكثف فيه بالماء المار في دائرة مغلقة بين المكثفات والخزان . ويعد سطح الامتصاص قلب السخان الشمسي ويقوم بتحويل الموجات الكهرومغناطيسية الصادرة من الشمس إلى حرارة ليتم انتقالها بوساطة الأنبوب الحراري من سطح الامتصاص إلى دائرة التسخين .

أما في السخان ذي الأنابيب الزجاجية



● شكل (٣)سخان شمسي مستو ذو أنابيب حرارية.

المفرغة المبينة في الشكل (٤) فإن الأنبوب الحراري (أ) الملتصق بالسطح الماص (ب) يركب داخل أنابيب زجاجية (ج) مفرغة من



● شكل (٤) مبدأ عمل السخانات الشمسية ذات الأنابيب الزجاجية.

الهواء (ضغط تفريغ = ١٠-٥ ملي بارا) وذلك للحصول على درجة حرارة عالية من السخان في الأيام ذات درجة الحرارة المنخفضة (الأقل من الصفر) لأن الفقد الحراري بطريقة الحمل من السخان يقل بزيادة التفريغ في الأنابيب الزجاجية .

يقوم الأنبوب الحراري بنقل الحرارة بسرعة وكفاءة من السطح الماص عبر المبخر (د) ثم مائع التشغيل داخل الأنبوب الحراري (أ) ثم المكثف (هـ) إلى سائل التسخين (و) المار خارج جدران المكثف . يقوم سائل التسخين بنقل الحرارة من المكثف إلى خزان تجميع السائل الحار خلال دورة مغلقة ، أي أن سائل التسخين لا يمر مطلقاً بالسطح الماص للسخان كما هو الحال في السخانات التقليدية ، فاذا حدث مثلاً تلف في أحد أنابيب التسخين فإن دورة التسخين ستستمر .

* **الطباخات الشمسية :** وهي عبارة عن أوعية طهي داخل صندوق معرض لأشعة الشمس التي تعمل على رفع درجة حرارة الإناء إلى الدرجة المناسبة لنوع الطعام . تتعرض الطباخات الشمسية الى فقد الحرارة بوساطة الحمل والتوصيل ولكن

بوساطة استخدام الأنابيب الحرارية يمكن التغلب على مشكلة فقد الحرارة بوضع مبخر الأنبوب الحراري في أنبوب زجاجي مفرغ من الهواء (ضغط تفريغ إلى ١٠-٥ ملي بار) ، ووصل المكثف بلوح معدني يحمل وعاء الطبخ . ويمكن ــ والحال هذه ــ وضع وحدة الطبخ داخل المنزل مما يسهل عملية الطبخ بدرجة كبيرة ويلغي كذلك مشكلة فقد الحرارة من وعاء الطبخ بتأثير الرياح.

* **الأحواض الشمسية:** وهي عبارة عن برك مياه ذات ملوحة متدرجة تزداد من السطح إلى القاع ، وتتراوح مساحتها بين عدة مئات إلى عشرات الآلاف من الأمتار المربعة ويصل عمقها إلى بضعة أمتار .

وتستخدم الأنابيب الحرارية في هذه البرك لنقل الحرارة من قاع البركة (درجة حرارة عالية) إلى السطح حيث تكون درجة الحرارة منخفضة وذلك بكفاءة عالية دون الحاجة إلى أنظمة الضخ المكلفة والمعقدة .

* **الخلايا الكهروضوئية :** وهي عبارة عن أداة الكترونية مصنوعة من أشباه موصلات تعمل على تحويل الطاقة الضوئية المنبعثة من الشمس إلى كهرباء . تعمل الأشعة الشمسية الساقطة على رفع درجة حرارة الخلايا الكهروضوئية مما يجعلها تفقد كفاءتها التشغيلية ، وعليه تهدف تقنية الأنابيب الحرارية إلى رفع كفاءة تشغيل الخلايا عن طريق تبريدها ، وقد أمكن بالفعل ربط منظومة الخلايا الكهروضوئية بوحدات أنابيب حرارية تعمل على خفض حرارة تلك الخلايا وبالتالي رفع كفاءتها إلى ٣٠٪ .

● تخزين الطاقة الشمسية

تستخدم الأنابيب الحرارية أيضاً في مجال تخزين الطاقة الشمسية بالاستعانة بمواد ذات خصائص فيزيائية خاصة (قابلة للتحول من حالة المادة الصلبة إلى الحالة السائلة عند درجة حرارة التشغيل باكتساب أو فقد كمية من الحرارة وتسمى بالحرارة الكامنة للانصهار) ، ويبين الشكل (٥) مخططاً لوحدة نقل وتخزين الطاقة الشمسية تحتوي على أنبوب حراري به زعانف معدنية ذات توصيلية حرارية عالية، ويقع هذا الأنبوب داخل حاوية معدنية لها نفس طول الأنبوب ومقسمة إلى ثلاثة أجزاء (فراغات) هي :ـ

* **المصدر الحراري (الحيز ـ أ):** وهو حيز مرور السائل المسخن في السخان الشمسي.

* **حيز التخزين (الحيز ـ ب):** وتوجد به الزعانف المعدنية والمادة القابلة للانصهار في الفراغ بين الزعانف .

* **حيز استهلاك الحرارة أو مرور سائل التسخين (الحيز ـ جـ):** ويستخدم لتسخين ماء المنزل أو للتدفئة.

وتتلخص طريقة التخزين فيما يلي : ـ

ـ مرور السائل الساخن في النهار قادماً من السخان الشمسي بالحيز(أ) .

ـ انتقال الحرارة عبر الأنبوب الحراري إلى الحيز (ب) والحيز (ج) فإذا كان الحيز (ج) بارداً (أي يمر به سائل التسخين أو التدفئة البارد) فإن معظم الحرارة المارة عبر الأنبوب الحراري ستنتقل إلى الحيز (ج) الذي سيعمل كمكثف . أما عندما لا يكون هناك حمل تدفئة أو تسخين فسترتفع درجة الحرارة في الحيز (ج)ومن ثم يتوقف عمله وبذلك يصبح الحيز (ب) هو المكثف فتنتقل الحرارة إلى الزعانف ومن ثم إلى المادة الصلبة لتتحول بدورها إلى الحالة السائلة .

ـ في أثناء الليل يتوقف المصدر الحراري في الحيز (أ) ويعمل الحيز (ب) كمبخر فتنتقل الحرارة من المادة المنصهرة بين الزعانف إلى الحيز (ج) عن طريق الأنبوب الحراري حيث يتم تسخين وسيط التسخين.

يساعد استخدام الأنابيب الحرارية في تخزين الطاقة الشمسية على تحسين تشغيل نظم الطاقة المستعملة ، ومن أهم الفوائد في هذا المجال مايلي :

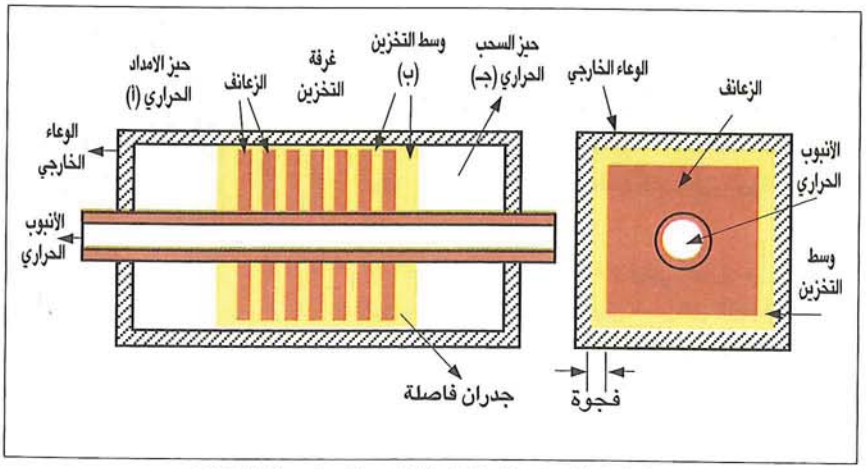
ـ عدم الحاجة إلى تركيب مبادلات حرارية بين المصدر الحراري (السخان الشمسي) ووسيط التخزين ، وبين وسيط التخزين ووسيط التدفئة والتسخين.

ـ المرونة في اختيار وسيط التخزين والتدفئة (الماء أو الهواء) لسهولة تغيير طول المكثف (الحيز ج) .

ـ الحصول على عملية انتقال حرارة من وسيط التخزين إلى وسيط نقل الحرارة عند درجات حرارة ثابتة .

ـ الإقلال من تسرب الحرارة إلى وسيط التخزين عند الحاجة إلى كميات كبيرة من الحرارة في حيز التسخين (الحيز ج) خلال النهار .

ـ يعمل الأنبوب الحراري كموحد لاتجاه سريان الحرارة عند تركيبه بزاوية ميل بسيطة بالنسبة للمستوى الأفقي .



● شكل (٥) نموذج لإستخدام الأنبوب الحراري في التخزين.