

دراسة التخزين الحراري لعبوة اسطوانية مملوءة بهيدروكسيد الكالسيوم

الدكتور فواز سيوف *

الدكتور عدنان عمران **

(تاريخ الإيداع 3 / 3 / 2009. قُبل للنشر في 10/9/2009)

□ ملخص □

تُعد مسألة تخزين الطاقة الحرارية إحدى أهم المسائل التي ينتظر حلها العاملون في تقانات تخزين الطاقة الشمسية . هناك عدة طرائق لتخزين الطاقة الشمسية، منها تخزين الطاقة الحرارية بالتفاعلات الكيميائية المتميزة بطول فترة التخزين وسهولة النقل ، ولذلك اقترحت عدة مواد كيميائية غازية وسائلة وصلبة تصلح لهذه الغاية ، وكان أكسيد الكالسيوم أحد المواد الصلبة الصالحة لتخزين الطاقة الحرارية من المستوى المتوسط.

يهدف هذا البحث إلى دراسة توزيع التيارات الحرارية ، وحقل درجة الحرارة لتفاعل تفرغ الطاقة من أكسيد الكالسيوم ، وهو تحليل مباشر للنتائج العملية التي أُجريت على نموذج مصغّر من المفاعل الكيميائي على شكل عبوة أسطوانية بالتعاون مع هيئة الطاقة الذرية ، كما تم وصف الحقل الحراري لهذا النموذج عند إضافة الماء إلى أكسيد الكالسيوم، وقد تم تقدير أثر زمن استجرار الطاقة الحرارية واختلاف كميتها على طول سطح العبوة ، وتحديد المردود الحراري لكل حالة، واختيار الأفضل بمقاطعة المميزات المختلفة مع بعضها الأمر الذي يتيح استخدام هذا العبوة كبطارية حرارية.

الكلمات المفتاحية : تخزين الطاقة ، الطاقة الشمسية ، التيارات الحرارية .

* أستاذ - المعهد العالي لبحوث الليزر - جامعة دمشق - دمشق - سورية.

** أستاذ مساعد - كلية الهندسة التقنية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

Performance of Energy Storage for Cylindrical Tube Filled with Calcium Hydroxide

Dr. Fawaz Sayouf*
Dr. Adnan Omran**

(Received 3 / 3 / 2009. Accepted 10 / 9 / 2009)

□ ABSTRACT □

The problem of the thermal energy storage is one of the most important cases which will be solved by the researchers in the thermal energy storage techniques.

There are many ways for the thermal energy storage including the one with the chemical interactions which is distinguished by its long storage period and easy transport for that reason many chemical materials (gas , liquid and solid) was suggested , one of them is calcium oxide which is one of the solid materials for the storage of a middle thermal energy. This research , which was done in co-operation with the atomic energy commission , aims to study the distribution of the thermal flow , and the temperature field of the discharge reaction of the thermal energy from the calcium oxide. It is a direct analysis for the experimental results which was done on a small model of the chemical reactor on the form of a cylindrical tube was done , then the best one was chosen state . all that made us use this tube as a thermal battery.

Keywords: Thermal storage, Solar energy, and Thermal flow.

*Professor , Lazer Researches High Institute , Damascus University, Damascus, Syria.

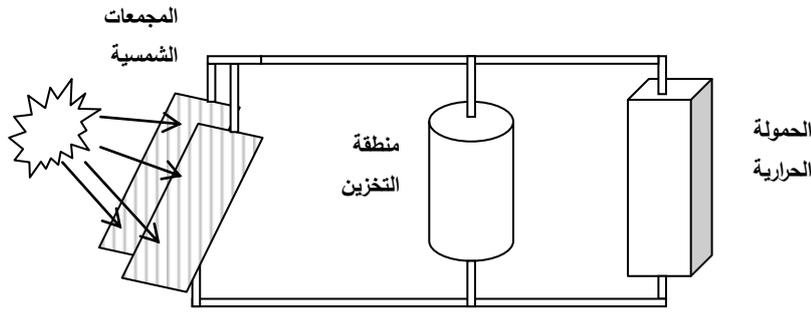
** Associate Professor , Technical Engineering Collage – Tishreen University, lattakia, Syria.

مقدمة:

تحتاج التطبيقات الشمسية إلى وجود خزانات للطاقة لحل مشكلة عدم انتظام الطاقة الشمسية، فهي طاقة متناوبة ما بين الليل والنهار، وتتأثر بالفصول ما بين الصيف والشتاء. وتُعد أجهزة تخزين الطاقة الشمسية بالطرق الكيميائية واحدة من أهم تقانات التخزين الحراري، لما تتمتع به من تخزين طويل الأمد، ومردود نقل عالٍ للطاقة من مكان إلى آخر. إن تصميم مثل هذه المدخرات الحرارية يحتاج إلى دراسات تمهيدية في مجال تقدير توابع توزع درجات الحرارة، على طول العبوة الأسطوانية، وعبر العمق، وتوزع التراكيز المختلفة للمواد الناتجة عن عملية التخزين، إلى ما هنالك من توابع مساعدة تصف التغيرات بدلالة أبعاد العبوة الأسطوانية، أو فترة العملية (شحن - تفريغ). وتتأثر المعاملات الحرارية اللازمة للدراسة بالتفاعل الكيميائي نفسه وتتغير قيمها.

يتعلق معامل الانتشار الحراري في المائع، وعامل الإيصالية الحرارية في حالة انتقال الحرارة عبر الأوساط بمتغيرات كثيرة كالنتج الحراري والضغط وخشونة السطح ودرجة الاضطراب وغيرها، وليس آخرها وجود تفاعل كيميائي في الجهاز المدروس. فهو من جهة منبع حراري داخلي (في حالة تفاعل ناشر للحرارة)، ومن جهة أخرى يُقاس بسرعة جريان التفاعل الكيميائي الذي يؤثر كثيراً على التوافق ما بين عمليتي إنتاج الطاقة واستهلاكها أو تصريفها عبر المواد إلى الوسط الخارجي.

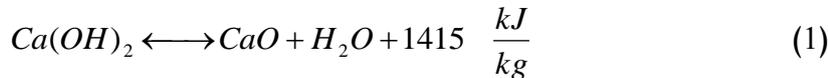
يقع جهاز تخزين الطاقة الشمسية بالطريقة الكيميائية ما بين المجمعات الشمسية، والحمولة الحرارية المطلوبة من المحطة، ويمكن استخدام الأشعة الشمسية مباشرة، أو إمرار الحامل الحراري المستخدم في المحطة، ويبين الشكل (1) المخطط العام لهذه المحطة.



الشكل (1) المخطط العام لمحطة شمسية، وتوضع عبوة التخزين.

أهمية البحث وأهدافه:

يمكن أن نجرب، وفي الشروط غير المستقرة (أي بتغير درجة الحرارة مع الزمن)، حساب $dT/d\tau$ أو انتقال الحرارة أحادي البعد، وليكن مع طول الأداة الحرارية dT/dx ، وكذلك المشتق الثاني للمقدار d^2T/dx^2 ، لتقدير معاملات الانتشار، وفق نماذج تأخذ أثر التفاعل الكيميائي على عمليات النقل الحراري [1]، وتم تطبيق ذلك النموذج على تفاعل شحن مدخرة حرارية (بطارية) تعتمد على تفاعل تفكك ماءات الكالسيوم إلى أكسيد كالسيوم وماء؛ وهي بطارية تستخدم لتخزين الطاقة الشمسية بصورة كيميائية بهدف التخزين طويل الأمد [2] وفق التفاعل التالي :



وُدُرِس التفاعل (1) في أبحاث كثيرة كجهاز تقني أو كجملعة ترموديناميكية [8 ، 2] ، لكن البحوث تركّزت على تفاعل التفكك (وهو تفاعل شحن) (charge) ، دون التفصيل في تفاعل التميّه (وهو تفاعل التفريغ) (discharge) ، وتقنياً تصنع هذه الوحدات أيضاً بهدف الحصول على ضخ حراري من الوحدتين كمضخة حرارية (heat pump) [9] ، وتطورت باتجاه إضافة مواد أخرى لزيادة كثافة الطاقة المخزّنة (Energy storage) [3, 10] .

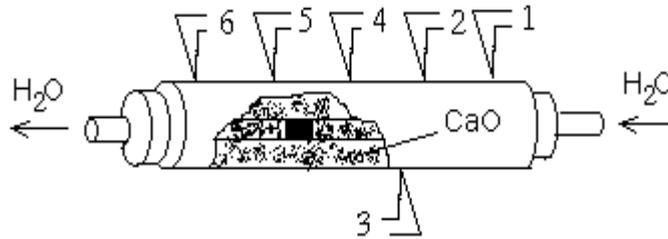
وكان أحميدوف [6] قد حسب المردود النظري الأعظمي الذي يمكن أن نحصل عليه من تفريغ البطارية الحرارية دون الاستفادة من حرارة الماء الحار الناتج عن التفاعل ، ووجد أن قيمته لا تتجاوز 0.45 . حيث نحتاج إلى $56,0 \frac{kJ}{mol}$ لرفع درجة حرارة ماءات الكالسيوم من 25 إلى 510 درجة مئوية وفق [7] ، وإلى $94,6 \frac{kJ}{mol}$ لإجراء عملية التفكك (شحن البطارية الحرارية) ، نكسب $48,4 \frac{kJ}{mol}$ من برودة بخار الماء الناتج عن التفكك من 500 درجة مئوية إلى 99 ، ونكون قد خزّنا $61,5 \frac{kJ}{mol}$ على شكل أكسيد الكالسيوم.

كنتمة للعمل الذي درس تفاعل الشحن [1] ، حيث ملئت نفس العبوة الأسطوانية بهيدروكسيد الكالسيوم (نفس الكمية التي ينتج عن تفككها 160 g أكسيد) وتم تسخينها بصورة متجانسة حتى $550 C^{\circ}$ لمدة 25 دقيقة) ، وصُمّمت تجربة حرارية لدراسة تفاعل التفريغ الحراري في هيئة الطاقة الذرية في سورية ، وهو تفاعل أكسيد الكالسيوم مع الماء:



ولأن مسحوق أكسيد الكالسيوم ذو ناقلية حرارية (thermal conductivity) سيئة جداً $(\lambda = 0.58 \frac{W}{m \cdot K})$

فقد وضعت إضافات معدنية مختلفة (ليف معدني، أسلاك معدنية، شبك نوافذ، قواطع نحاسية) داخل العبوة الأسطوانية في التجربة المذكورة ، وجرى في عمل آخر اختبار أساليب التزويد بالماء (ماء بالطور السائل أو الطور البخاري عن طريق أنابيب مركزية أو جانبية). ويوضح الشكل (2) توزيع المجسات الحرارية أثناء التجربة [4, 5].



الشكل (2) : شكل العبوة وتوزيع المجسات الحرارية عليها.

العبوة عبارة عن أسطوانة بحجم $mm^2 (50 \times 200)$ من النحاس سماكة جدارها $2mm$ وزود طرف الغطاءين الجانبين بمنفذ يدخل منه الماء أو البخار ، وزود الطرف الآخر بمخرج كما يبين الشكل(2)، وتوضّعت المجسات الحرارية (thermocouple) على سطح المعدن، وهي ستة مجسات تلامس السطح على أبعاد مذكورة في الجدول (1).

ويهدف هذا البحث إلى دراسة تغير درجة الحرارة على طول العبوة الأسطوانية (وهو 20cm) ، وخلال الفترة الزمنية لحدوث التفاعل (وهي 70 min.) ، بالاعتماد على النقاط التجريبية الموجودة في العملين [4, 5]. وهي مقادير هامة عند دراسة معادلة النقل الحراري غير المستقرة لهذه التراكيب، التي تُكتب بالصورة العامة :

$$\rho C_p \frac{dT}{d\tau} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial Z^2} \right) + Q \quad (3)$$

حيث :

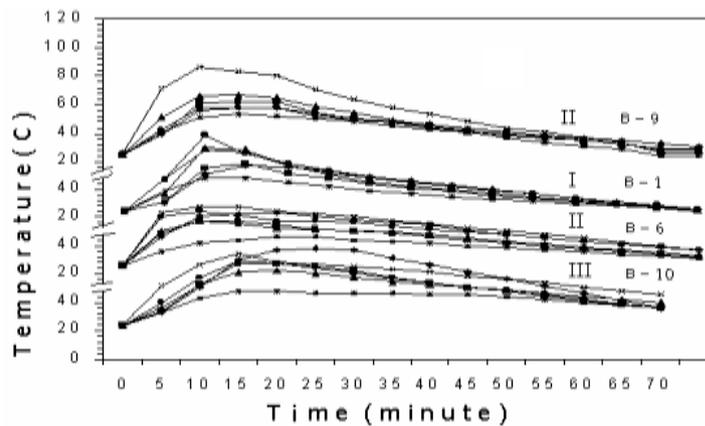
ρC_p جداء الكثافة الكتلية بالسعة الحرارية .
 λ الإيصالية الحرارية ، Q المنبع الحراري الحجمي ،
 X, Y, Z أبعاد المنطقة المدروسة .

الجدول (1) : بعد المجس الحراري عن مدخل الماء

رقم المجس الحراري	بعده عن مدخل الماء (cm)	ارتفاع قرص CaO (cm)
1	1.5	3.25
2	5.0	4
3	9.5	3.25
4	11.0	2.25
5	4.0	3.5
6	18.5	3.75

طرائق البحث ومواده:

أُخذت منحنيات البحث [4] التي تصف تغيرات درجات حرارة سطح العبوة أثناء التجربة بالنسبة لمتحولي الزمن $T(x)$ والمسافة $T(x)$ ، يظهر الشكل (3) عينة من المنحنيات لتجارب سابقة تم معالجة نتائجها [5] ، وفق القواعد التالية :



الشكل (3) - عينة من مخططات التجربة [5] من المجموعة B*

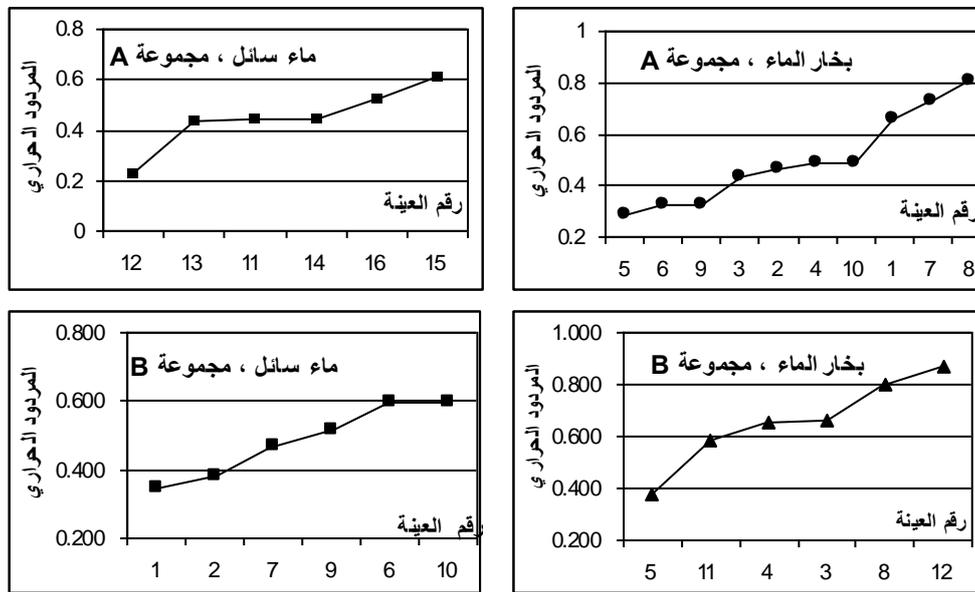
* معطيات هذه المجموعة مذكورة في الجدول (3) وفيها تم إدخال الماء إلى قلب الأكسيد في العبوة بأساليب مختلفة [5] .

1. تتوزع المادة (CaO) بين منطقة قياس المجسات الحرارية بالتساوي ، يمكن تقسيمها إلى أقراص من المسحوق سطحها هو مقطع العبوة ، وارتفاعها هو المسافة الفاصلة ما بين مجسين حراريين أو منتصف المسافة بينهما، ويبين الجدول (1) بعد كل مجس عن الطرف اليميني من العبوة، وارتفاع القرص الموافق .
2. انقسمت العينات إلى نمطين : العينات الأولى: أضيف إليها الماء بالطور السائل. والثانية: أضيف إليها الماء بالطور البخاري ، والأكسيد على صورة ناعمة أو متوسطة الحجم أو كبيرة، ويبين الجدول (2) أرقام العينات، وصفات التعامل معها مأخوذة من [4]، والجدول (3) للعينات مأخوذة من [5].
3. قُسمت المنحنيات إلى منطقتين ، مرحلة تسخين سطح العبوة ، ومرحلة تبريده، فتكون مرحلة التسخين هي التي تشير إلى كثافة الطاقة الحرارية المنتشرة عن التفاعل، وذلك بهدف حساب المردود الحراري للعملية.

كمية الحرارة والمردود الحراري:

تم حساب كمية الحرارة المقدّمة من كل قسم من أقسام العبوة الستة إلى الوسط المحيط محسوبة من التدرج الحراري على السطح خلال زمن تفريغ الطاقة الحرارية ، الذي ينتهي عندما $dT/d\tau = 0$ لكل حسّاس حراري، أي مجموع أجزاء مساحة المنحني $T(t)$ الذي تتزايد فيه درجة الحرارة مع الزمن وفق العلاقة (3)، ثم أخذ متوسط هذه الطاقات الحرارية لكل المناطق المدروسة للحساسات الحرارية الستة وهو Q .

قُسمت كمية الطاقة الحرارية Q بعد طرح كمية الحرارة (90 k J) اللازمة لتبخير كمية الماء (280 g) - عند تزويد العبوة ببخار الماء - على كمية الحرارة المحتواة في 160 g من CaO محسوبة من التفاعل الكيميائي (1) وهي $Q_c = 224$ kJ ، فحصلنا على المردود الحراري لكل حالات التزويد بالماء أو بخاره، $\eta = Q/Q_c$ ، وثبتت القيم مع الجدولين (2، 3) الموافقين للعينات (A) و (B) .



الشكل (4) : مردود عمليات تفريغ الطاقة الحرارية للمجموعتين A و B ،

ويتضح من الشكل (4) الذي يمثل قيم المردود للمجموعة الأولى المعروضة في العمل [4] والمجموعة الثانية المعروضة في العمل [5] في الطور السائل وطور البخار، أن أفضل مردود للمجموعة الأولى هي الحالات (8 , 7 , 1 - A عند التزود بالبخار، و 16 , 15 - A عند التزود بالماء بالطور السائل) ، وللمجموعة الثانية هي (12 , 8 - B في حالة دخول البخار و 10 , 6 - B في حالة إضافة الماء بالطور السائل) .

الجدول (2) : عينات المجموعة الأولى A** التي أضيف إليها الماء بالطور البخاري وسائل.

رقم العينة	نوع الحاجز	حجم حبيبات CaO	وضع العبوة	كمية الحرارة Q (KJ)	المردود الحراري
1	ليف ألمنيوم	ناعم	أفقي	237,600	0.659
2	سلك معدني	ناعم	أفقي	193,700	0.463
3	شبكة نوافذ	ناعم	أفقي	187,600	0.436
4	شبكة نوافذ عرضي	ناعم	أفقي	199,500	0.489
5	أقراص نحاس	ناعم	أفقي	153,700	0.284
6	أقراص نحاس	ناعم	عمودي	162,000	0.321
7	أقراص نحاس	ناعم	أفقي	253,600	0.730
8	أقراص نحاس	كبيرة	عمودي	270,100	0.804
9	أقراص نحاس	وسط	عمودي	163,200	0.327
10	أقراص نحاس	وسط	أفقي	199,700	0.490
إضافة الماء سائلاً					
11	ليف ألمنيوم (دون أنبوب ماء)	وسط	أفقي	99,200	0.443
12	ليف وقلب تغذية	ناعم	عمودي	51,200	0.229
13	شبكة نوافذ لف	ناعم	عمودي	97,300	0.434
14	شبكة نوافذ لف	ناعم	أفقي	99,600	0.445
15	شبكة نوافذ عرضية	كبيرة	عمودي	137,200	0.613
16	أقراص نحاس	وسط	عمودي	116,500	0.520

الجدول (3) : عينات المجموعة الثانية B التي أضيف إليها الماء بخاراً وسائلاً.

رقم العينة	حجم حبيبات CaO	وضع العبوة وحالة الماء	وضع الأنبوب وقطره mm	كمية الحرارة Q (KJ)	المردود الحراري
1	متوسط	أفقي - سائل	مركزي - 6	77500	0.346
2	ناعم	عمودي - سائل	مركزي - 6	85000	0.379
3	ناعم	عمودي - بخار	مركزي - 13	238400	0.663

** أضيف في هذه المجموعة عوارض معدنية مختلفة لزيادة داخل العبوة الأسطوانية [4]. النقل الحراري

0.656	237000	مركزي - 10	عمودي - بخار	ناعم	4
0.375	173900	جانبي - 6	عمودي - بخار	ناعم	5
0.594	133000	جانبي - 6	أفقي - سائل	كبير	6
0.469	105000	جانبي - 6	عمودي - سائل	كبير	7
0.804	270000	جانبي - 6	أفقي - بخار	كبير	8
0.516	115500	جانبي - 6	أفقي - سائل	متوسط	9
0.598	134000	جانبي - 6	عمودي - سائل	متوسط	10
0.582	220400	جانبي - 6	عمودي - بخار	متوسط	11
0.869	284700	جانبي - 6	أفقي - بخار	متوسط	12

تم استخدام برنامج الإكسل البسيط لتوضيح علاقة مقادير المتحولات السابقة مع بعضها ، من أجل المنحنيات الحرارية التجريبية للتجربتين موضع الاختبار .

النتائج والمناقشة:

في التجربة [4] التي استخدمت فيها عوارض معدنية لتحسين الناقلية الحرارية كانت المقادير المميزة لكل تجربة هي المبينة في الجدول (2) وتلك التي اختلفت فيها طريقة التزويد بالماء [5] في الجدول (3)، وقد حُسبت كمية الحرارة المنتشرة في كل زمن τ ما بين كل قياسين من العلاقة البسيطة :

$$Q = C m (T - T_0) \quad (4)$$

حيث C [kJ/kgK] السعة الحرارية لأوكسيد الكالسيوم، m [kg] كتلة الأوكسيد (0,160kg) في العبوة ، T_0 [°C] درجة الحرارة الابتدائية (تؤخذ من المخططات التجريبية لكل فترة قياس)، T [°C] درجة الحرارة اللحظية في اللحظة τ [s] (تؤخذ من المخططات التجريبية بعد مرور فترة القياس الواحد - 5min)، وقيمة Q [kJ] المحسوبة من القيم التجريبية لدرجات الحرارة مبينة في الجدول (2 و 3).

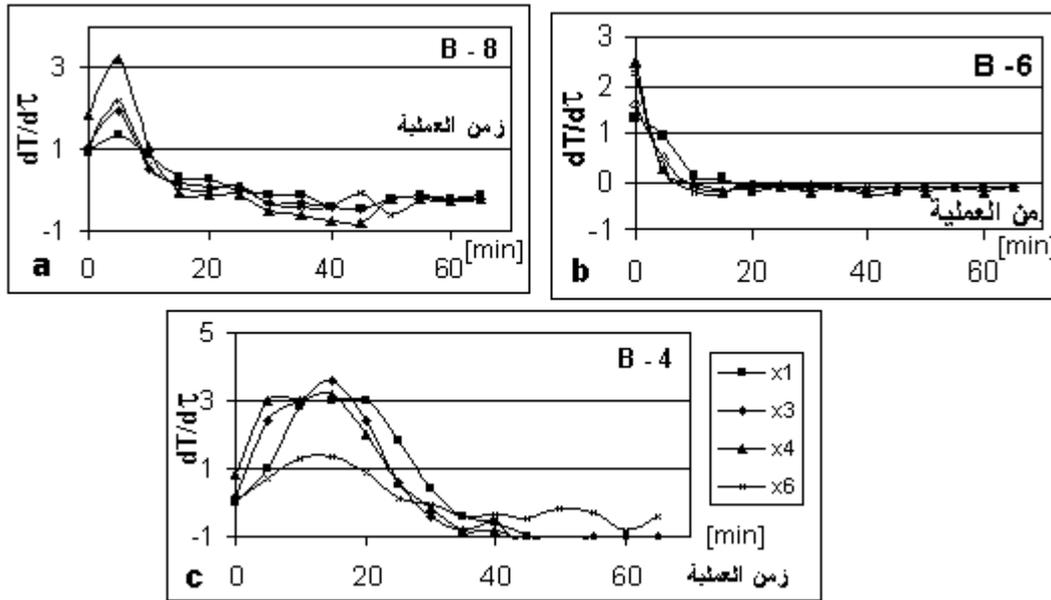
زمن تفرغ الطاقة:

يتضح من المنحنيات $T(\tau)$ في البحثين [4, 5] كما يبين الشكل (3) أن كمية الحرارة المفرغة من CaO تخرج إلى الوسط المحيط بأزمنة مختلفة في كل حالات التزويد بالماء تتراوح ما بين (12 - 27) دقيقة، في نهاية زمن التفرغ يتوقف إنتاج الحرارة، ويبدأ التبريد بالانتشار الحراري الطبيعي، ويكون زمن تفرغ الطاقة أصغر عند إضافة الماء بطوره السائل، لأن الماء يتبخر في الداخل، وينتشر بسرعة كبخار ماء، ليقوم بالتفاعل مع الأوكسيد مرة أخرى. ويمكن تمييز طريقة تقديم الطاقة للوسط المحيط من شكل المنحنيات $dT/d\tau$ حيث تُقسم الحالات التي تقدم فيها الطاقة إلى :

I. بالتدرج ثم التوقف بالتدرج - يتزايد الميل ثم يتناقص إلى انتهاء تفرغ الحرارة - ، وهذا تحقق في مجموعة من العينات (9, 8, 3, 1, A) و (12, 11, A) و (12, 8, 5, 1, B)، ويمكن تمثيل نتائج بعض هذه العينات في الشكل (5 - a).

- II. تقديم سريع لمعظم الحرارة ثم تناقصها ، فيظهر في مجموعة من العينات (A - 2, 5, 6, 7) و (A - 13, 14) و (B - 2, 6, 7, 9)، ويمكن تمثيل نتائج بعض هذه العينات في الشكل (b - 5).
- III. الحالة الثالثة أن تُقدم الطاقة الحرارية ببطء، ثم تنطلق العملية كما نرى في مجموعة من العينات (A - 4, 10) و (A - 15, 16) و (B - 3, 4, 10)، ويمكن تمثيل نتائج بعض هذه العينات في الشكل (c - 5).

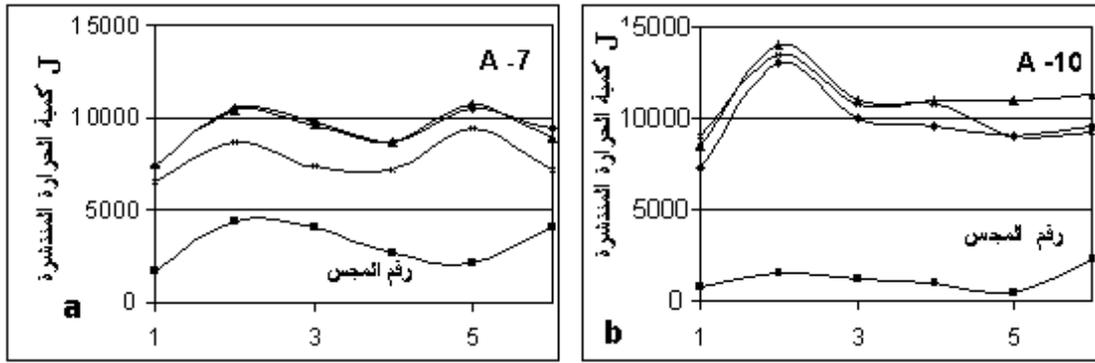
تعتبر الحالة الأولى المفضلة تقنياً بمعيار زمن التفريغ ، فالتقديم السريع خطر على أجزاء العبوة كونه يقدم تدرجاً حرارياً كبيراً، وكذلك التقدم البطيء يسمح بتشكيل حالة عجيبة من الأكسيد مع الماء مما يعيق التفريغ الحراري أو يوقفه أحياناً .



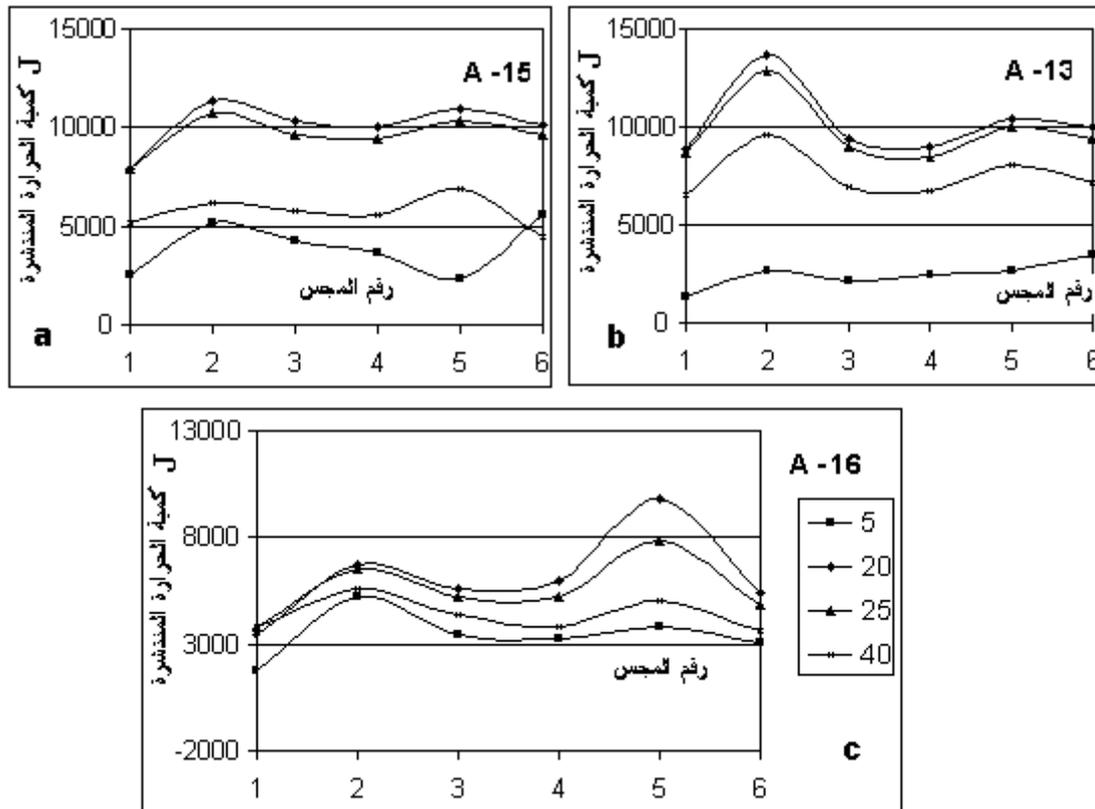
الشكل (5): العلاقة بين زمن العملية مع المقدار dT/dt بالنسبة للنماذج الثلاثة الرئيسية خلال مدة التجربة للمجموعة B .

تصريف الطاقة على السطح:

تشير المخططات $T(x)$ المأخوذة من البحثين [4, 5] إلى توزيع الحرارة على طول العبوة، ويتبين من الشكلين (6) و (7) أن معظم الحالات انصف بتجمّع طاقي في منطقتي المجسين (2 و 5) (أي تفريغ بطيء)، ومع ذلك لا تكون كمية الحرارة المقدمة للوسط المحيط من العينات المختلفة متساوية، فهي إما بالقرب من مدخل الماء أو بالقرب من مخرجه. وتتعرض العبوة في المنتصف لإجهاد حراري قليل، تميل العينات (A - 2, 3, 8, 10) لزيادة كمية الحرارة بالقرب من المدخل (المجس 2)، وهي في العينات التي استخدم فيها بخار الماء. والعينات (A - 12, 14, 15, 16) بالقرب من المخرج (المجس 5) ، وهي العينات التي استخدم فيها الماء بالطور السائل. وحالات التوزيعات التي يكون فيها توزيع درجة الحرارة على طول العبوة أقرب للانتظام هي في الحالات (A - 1, 4, 5, 6, 7, 9, 11, 13) التي يوضحها الشكل (a - 6) و (a - 7)، ويمكن اعتبارها الأفضل من حيث تصريف الحرارة عبر السطح.

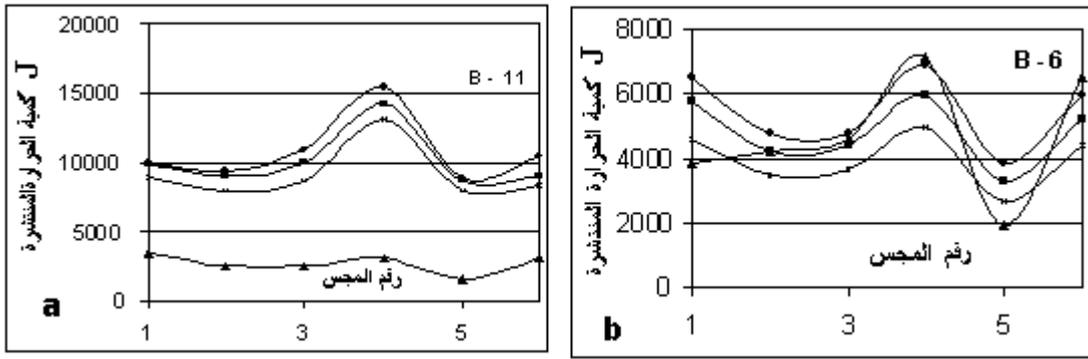


الشكل (6): كمية الحرارة المنتشرة في كل قرص للمجموعة A بخار، وفق مجسات الجدول (1).



الشكل (7): كمية الحرارة المنتشرة في كل قرص للمجموعة A ماء سائل، وفق الجدول (1).

من أجل المجموعة B المبينة في الشكل (8) فإن الوضع ينقلب، فالتجميع الحراري يصبح عند العجس (4) واضحاً، كما في الحالات (B - 5, 8, 9, 11, 12) ويشاركها العجس 1 و 6 في بقية الحالات، وتكون الطاقة المقدمة بالقرب من العجس 2 و 5 أقل من غيرها.



الشكل (8): كمية الحرارة المنتشرة في كل قرص للمجموعة B ، وفق مجسات الجدول (1).

بمقارنة ما يتعلق بالحالات المدروسة أعلاه عند تزويد العبوة بالماء (والمستنتجة من المنحنيات $T(\tau)$ و $T(x)$)، نجد أن الحالات (A - 1, 9, 11) و (B - 8, 11, 12) هي المفضلة بمعيار توزيع التدفقات الحرارية وزمن تفرغها، وتكون عملية أكثر في حال استخدامها كنموذج لبطارية حرارية .

الاستنتاجات والتوصيات:

- يمكن الحصول من إدخال الماء بالطور السائل إلى العبوة المملوءة بالأكسيد على أفضل الحالات من مقارنة نتيجة الفقرات السابقة (كمية الحرارة والمردود الحراري ، وزمن تفرغ الطاقة وتصريف الحرارة على السطح) مع بعضها وذلك بالبحث عن أعلى مردود حراري وأفضل توزيع للتدفقات الحرارية ، وعن زمن تفرغ الحرارة من سطح العبوة . وقد تم التوصل إلى أن الحالات (A - 1, 7) و (B - 8, 12) هي أفضل طرق تفرغ الطاقة الحرارية من بطاريات تستعمل $Ca(OH)_2/CaO$ لتخزين الحرارة، وهي على شكل عبوة أسطوانية.

- تفيد دراسة منحنيات تغير درجة الحرارة مع الزمن أو المسافة على طول العبوة الأسطوانية (الأشكال من 5-8) في توضيح أكثر طرائق تفرغ الطاقة الحرارية من العبوة من حيث ارتفاع المردود الحراري. أو اختيار الطريقة وفق المطلوب من عملية التفرغ، فقد يتم تفرغ التيار الحراري خلال زمن قصير، وفي أوضاع أخرى يكون خروج كميات الحرارة ببطء أكبر.

- يمكن بمساعدة هذه الدراسة اختيار التصميم المناسب للعوارض المعدنية داخل العبوة، ولأسلوب إدخال الماء إلى قلب العبوة ، وكذلك اختيار جزء من سطح العبوة الأسطوانية الذي يملك كثافة تيار حراري عالية ، أو اختيار ذلك الجزء الذي يملك كثافة طاقة أقل .

- نحصل على مردود عال لعملية تفرغ العبوة الأسطوانية من كمية الحرارة المخزنة في أكسيد الكالسيوم، بإتباع أسلوب التحكم بالإضافات المعدنية في قلب العبوة لتحسين الإيصالية الحرارية للأكسيد كما في العمل [4]، أو إيصال الماء والبخار إلى قلب العبوة بطرق أوضحتها الدراسة [5] جنباً إلى جنب بما يتفق مع هذه الدراسة التي توضح آلية تدفق التيار الحراري أو مناطق تجمع الحرارة في العبوة لكل حالة.

المراجع:

- [1] سيوف ف. ، التبادل الحراري الكتلوي في منظومات الطاقة الشمسية بالمحفزات ، كلية الطاقة الحرارية الصناعية، إطروحة الدكتوراة ، موسكو 1990، معهد الطاقة، موسكو، (متوفرة في مكتبة الأسد بدمشق) .
- [2] أحميدوف ب. ب.، دانيلوف أ. ف. و جوغين د. يو.، مقارنات حرارة مدخرات كيميائية حرارية، مجلة الهندسة الشمسية، العدد 5، 25-27، 1985، (باللغة الروسية).
- [3] فوجي ي. و تسوتشييا ك. دراسة منظومة تخزين طاقة باستخدام تفاعل كيميائي عكوس $CaO = H_2O$ $\leftrightarrow Ca(OH)_2$ ، مجلة Solar energy، 1985، مجلد 34 عدد 4/5، 367-377، .
- [4] سيوف فواز ، مرود المدخرة الكيميائية الحرارية $Ca(OH)_2/CaO$ ، مجلة جامعة دمشق للعلوم الهندسية ، المجلد 13، العدد 2 ، 1997، 105 - 120.
- [5] سيوف فواز ، الدراسة التجريبية لتوزيع حمل درجة حرارة سطح العبوة الاسطوانية $Ca(OH)_2/CaO$ ، مجلة الطاقات المتجددة ، مجلد 1 - عدد 2 ، 1998. (مجلة جزائرية).
- [6] أحميدوف ب. ب. و بيرتشينكو م. أ. استغلال وتخزين الطاقة الشمسية بمساعدة تفاعلات كيميائية حرارية بسيطة. الجزء الأول من مواد مؤتمر استغلال الطاقة الشمسية بالمحفزات الضوئية. الأكاديمية العلمية للإتحاد السوفيتي، قسم سيبيريا، معهد المحفزات 1985، (باللغة الروسية).
- [7] MARIA, E. Perez-Davis, Lewis Research Center, Cleveland, Ohio and Frank DiFilipo. Energy Storage for a Lunar Base by the Reversible Chemical Reaction: $CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2$, NASA Technical Memorandum 103145 . June 1990.
- [8] ANIKEEV, V. I.; KIRILIV, V. A. Basec design principles and some method of investigation of catalytic reactors-receivers of solar radiation, Elsevier Science Publishers B. V. All rights reserved, 1991.
- [9] "Mass Transfer Augmentation in Low-Temperature-Heat Generation by Chemical Heat Pump Unit Using $CaO/Ca(OH)_2$ Reaction", H. OGURA et. al., Proc. of International Conference on Fluid and Thermal Energy Conversion '94, Vol.1, 1994,425-430.
- [10] Study of carbonation reactions of ca-mg oxides for high temperature energy storage and heat transformation. journal of chemical engineering of Japan, vol. 29 no 1 , 1996,112-118.