# Temperatures distribution calculation for PWR fuel rod at steady state

# حساب توزيع درجات الحرارة لقضيب وقود مفاعل الماء المضغوط للحالة المستقرة

نجم عبد عسكوري
جامعة الكوفة-كلية التربية للبنات
E-mail:na_phys@yahoo .com

حيدر جاسم موسى
جامعة كربلاء-كلية التربية للعلوم الإنسانية
E-mail:hayder445@yahoo.com

**الخلاصة**

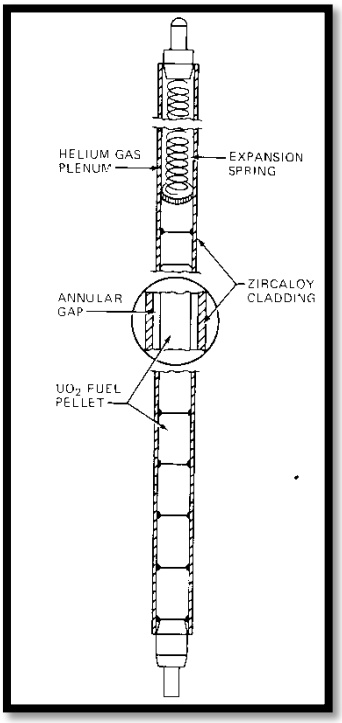
إن الحرارة المتولدة في الوقود الناتجة من الانشطار النووي تنتقل بالتوصيل من مادة الوقود السيراميكي $UO_2$ إلى سطح الغلاف (Zircaloy-4) خلال الفجوة الغازية ومن ثم تنتقل بالحمل إلى مبرد المفاعل (الماء) . تم حساب كمية الحرارة المتولدة في الوقود وتوزيع درجات الحرارة الناتجة عنها للحالة المستقرة في الاتجاه النصف قطري باستخدام علاقات الحل التحليلي لمعادلة التوصيل الحراري لقلم الوقود الاسطواني الشكل . وقد تبين إن أقصى درجة حرارة تكون في مركز الوقود مما يجعل الانحدار الحراري كبير جداً بين مركز وسطح الوقود وهذا ناتج عن صغر معامل التوصيل الحراري لمادة الوقود . وقد تم حساب معاملات التوصيل الحراري للوقود وغاز الفجوة (الهليوم) بالإضافة إلى مادة الغلاف كدوال لدرجة الحرارة ووجد تناقص معامل التوصيل الحراري للوقود بزيادة درجات الحرارة على عكس معاملات التوصيل الحراري لغاز الهليوم ومادة الغلاف التي تزداد معاملات توصيلها الحراري بزيادة درجات الحرارة.

## Abstract

Energy released in ceramic fuel ($UO_2$) by nuclear fission transferred from fuel to the clad surface (Zircaloy-4) through gas gap (filled in He) by conduction then transferred by convection to the coolant (water). Heat generation in fuel was obtained , and temperatures distribution in radial direction at steady state was found by using analytical solution relations for thermal conduction equation of cylindrical fuel rod. The maximum temperature was found at fuel center, which was produced from low thermal conductivity of $UO_2$ . Thermal conductivity coefficients for $UO_2$ , He , and clad were calculated as a function of temperature . Thermal conductivity coefficient of $UO_2$ was decreasing at increased temperature while increased for He and clad.

## 1-المقدمة

تعد مفاعلات الماء المضغوط إحدى مفاعلات القدرة المستخدمة في إنتاج الطاقة الكهربائية ، إذ تبلغ القدرة الحرارية للمفاعل حوالي (3000 MW) يتحول ثلثها إلى قدرة كهربائية . يحتوي المفاعل مايقارب (100 Ton) من ثنائي اوكسيد اليورانيوم السيراميكي ($UO_2$) كوقود نووي (nuclear fuel) [1]، المصنع على هيئة أقراص اسطوانية (pellets) مغلفة (cladding) بسبيكة من الزركونيوم (Zircaloy-4) مكوناً قضبان الوقود (fuel rods) [1,2] ، المبين في الشكل (1) . عند اصطدام النيوترونات الحرارية مع النظير المنشطر ($^{235}U$) سوف تنشطر هذه النواة باعثة مايقارب (200 MeV) من الطاقة على هيئة حرارة تحملها نواتج الانشطار وبضمنها (2-3) نيوتروناً لكل انشطار مما يتيح إمكانية حصول التفاعل المتسلسل [3,4] . إن الحرارة المتولدة من الانشطار سوف تنتقل بالتوصيل إلى سطح الغلاف ومن ثم تنتقل بالحمل إلى المبرد (coolant) (الماء الاعتيادي)[5] . إن ماء التبريد يكون عند ضغط يبلغ (15.5MPa) مما لايسمح للماء بالغليان لذا يتطلب دورة تبريد ثانوية تحتوي مبادل حراري لتوليد البخار الذي يُنقل إلى المولد التوربيني لإنتاج الطاقة الكهربائية [6] .قام العديد من الباحثين بدراسة هذه الحالة فقد قام الباحثان Harayama و Kyoya بدراسة تحليلية لتوزيع درجات الحرارة والفيض الحراري لقلم وقود ذو تجاويف غير متحدة المركز [7] . كذلك درس الباحثان Han و Yoon توزيع درجات الحرارة عددياً إضافة إلى انبعاث غازات نواتج الانشطار لمفاعلات الماء الاعتيادي [8] . أما Yang وجماعته فقد درسا توزيع درجات الحرارة والفيض الحراري لقضيب وقود حلقي يضم قناتي تبريد داخلية وخارجية ، للحالة المستقرة [9]. في المصدر [5] قام الباحثان Pandy وMahesh بحساب توزيع درجات الحرارة في قرص الوقود عددياً بعد اعتبار عدم انتظام مصدر توليد الحرارة للحالة المستقرة .في البحث الحالي تم حساب الحرارة المتولدة في الوقود نتيجة الانشطار، بالإضافة إلى توزيع درجات الحرارة خلال المقطع العرضي لقضيب الوقود باستخدام الحل التحليلي لمعادلة التوصيل الحراري للحالة المستقرة.




الشكل (1) قضيب الوقود [1]

## 2 - الجزء النظري theoretical part

يعد ثنائي اوكسيد اليورانيوم الوقود الرئيسي المستخدم في مفاعلات القدرة التجارية لما يتمتع به من خصائص تؤهله للعمل في درجات الحرارة العالية وظروف التشعيع [10]. ويصنع بطريقة الكبس البارد (cold press) والتلبيد (sintered) [11]. إن النظير المنشطر ($^{235}U$) ذو مقطع عرضي (cross section) كبير للنيوترونات الحرارية (thermal neutron) يبلغ (582 b) عند درجة حرارة الغرفة. أما النيوترونات الناتجة من الانشطار النووي(nuclear fission) فتكون نيوترونات سريعة بطاقة تبلغ مايقارب (2 MeV) مما يستدعي تهدئتها إلى المدى الحراري المطلوب لإدامة التفاعل المتسلسل عن طريق التشتت المرن بواسطة العناصر الخفيفة كالهيدروجين الموجود في الماء في المفاعلات المبردة بالماء أو الكرافيت في مفاعلات درجات الحرارة العالية المبردة بالغاز (HTGR) [6]. في قضيب وقود مفاعل PWR تترك فجوة غازية بين أقراص الوقود والغلاف تبلغ حوالي (80 $\mu m$) تملئ بغاز الهليوم عند ضغط بحدود (25-30 atom.) . يبلغ ارتفاع قضيب الوقود حوالي (3.8 m)، الجدول (1) يتضمن أبعاد وخصائص وقود مفاعل PWR [1,2]. ترزم قضبان الوقود على شكل مصفوفة ($17 \times 17$) قضيب لتكون مجمع الوقود (fuel assembly) و يبلغ عدد المجمعات (193) مجمع وقود في قلب المفاعل [1]. يدخل المبرد من أسفل قضبان الوقود حاملا الحرارة المتولدة نتيجة الانشطار إلى دورة البخار[6].

## 3-الحسابات والنتائج calculations and results

### 1-3 الحرارةالمتولدة heat generation

إن الحرارة المتولدة من الانشطار تعتمد على عدد النوى المنشطرة والفيض النيوتروني (neutron flux) ،ويمكن حساب الحرارة المتولدة من العلاقة الآتية [1] :

$$q''' = N\sigma_f \phi E_f \ \ldots\ldots\ldots(1)$$

إذ إن $N$ ($\frac{nuclei}{m^3}$) تمثل عدد النوى المنشطرة في وحدة الحجم وان $\sigma_f$ تمثل مساحة المقطع العرضي ألمجهري للانشطار وتبلغ (412 b) عند معدل درجة حرارة مبرد المفاعل والبالغة ( 583 ℃) ، ($\frac{neutron}{m^2.s}$) $\phi$ الفيض النيوتروني ،$E_f$ الطاقة الناتجة من انشطار نواة $^{235}U$ واحدة. وان N تحسب من العلاقة [1]:

$$N = \frac{\rho N_A}{A(UO_2)}\, Y \ \ldots\ldots\ldots(2)$$

إذ إن $\rho$ $\left(\frac{Kg}{m^3}\right)$ تمثل كثافة الوقود وتبلغ حوالي (95%) من الكثافة النظرية، $N_A$ عدد افوكادرو، $A$ الوزن الذري لمادة الوقود و $Y$ نسبة التخصيب. فتبلغ قيمة N ($6.964 \times 10^{26}\ \frac{nuclei}{m^3}$) ولإيجاد الفيض النيوتروني نستخدم العلاقة الآتية [1] :

$$\phi = \frac{P}{NV\sigma_f E_f} \dots\dots\dots (3)$$

إذ إن $V$ تمثل حجم الوقود ويبلغ حوالي ($9.73\ m^3$) أما P فتمثل قدرة المفاعل .
فيكون مقدار الفيض النيوتروني $3.359 \times 10^{17}\ \frac{neutron}{m^2.s}$ وتبلغ كثافة القدرة (power density) حوالي $308\ \frac{MW}{m^3}$

### 2-3 توزيع درجات الحرارة في قضيب الوقود Temperatures distribution in nuclear fuel rod

إن الحرارة المتولدة في الوقود تنتقل بالتوصيل (conduction) إلى الغلاف وتنتقل بالحمل (convection) إلى مائع التبريد المحيط بقلم الوقود ، إذ ينقل الحرارة إلى مبادل حراري (heat exchanger) لإنتاج البخار الذي يدير المولد التوربيني[5].إن معادلة التوصيل الحراري تعطى بالعلاقة الآتية [12]:

$$\nabla.(k\nabla T) + q''' = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \dots\dots\dots (4)$$

إذ إن $k$ (W/m.K) تمثل معامل التوصيل الحراري ، $T$ (K) درجة الحرارة، $q'''(\frac{W}{m^3})$ كثافة القدرة ، $C_p$ $(\frac{J}{Kg.K})$ السعة الحرارية بثبوت الضغط ، و$t\ (s)$ تمثل الزمن. للحالة المستقرة وعلى اعتبار إن اتجاه انتقال الحرارة يتم في الاتجاه نصف القطري $(r)$ ، تصبح المعادلة (4) في الإحداثيات الاسطوانية بالصيغة الآتية :

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(kr\frac{\partial T}{\partial r}\right) + q''' = 0 \dots\dots\dots (5)$$

وتُحل المعادلة أعلاه لكل منطقة من مناطق قلم الوقود بعد افتراض الآتي :
1. إهمال قابلية التوصيل الحراري المحوري.
2. إن مصدر الطاقة (الانشطار) ذو توزيع منتظم في الوقود.

#### أولا. قرص الوقود fuel pellet

بتكامل المعادلة (5) مرتين وتطبيق الشروط الحدودية (boundary conditions) في منطقة الوقود المتمثلة بالاتي :

$$\frac{dT}{dr} = 0\ , at\ r = 0\ , and\ T = T_1\ at\ r = r_\circ \dots\dots\dots (6)$$

ينتج :

$$(\Delta T)_{fuel} = T_\circ - T_1 = \frac{q''' r_\circ^2}{4k_f}\left[1 - \left(\frac{r}{r_\circ}\right)^2\right] \dots\dots\dots (7)$$

إذ إن $k_f$ معامل التوصيل الحراري للوقود ، $T_\circ$ درجة حرارة مركز الوقود ، $T_1$ درجة حرارة سطح الوقود ، و $r_\circ$ نصف قطر الوقود . في مركز الوقود $(r = 0)$ فتصبح المعادلة أعلاه بالصيغة الآتية :

$$T_\circ - T_1 = \frac{q''' r_\circ^2}{4k_f} \dots\dots\dots (8)$$

#### ثانياً. الفجوة الغازية gas gap

في الفجوة الغازية لايوجد مصدر توليد للحرارة فتكون $(q''' = 0)$وتُحل المعادلة (5) بعد تعويض الشروط الحدودية الآتية $(r = r_\circ, T = T_1\ and\ r = r_1, T = T_2)$ فيعطى الهبوط في درجة الحرارة خلال الفجوة بالعلاقة الآتية :

$$(\Delta T)_{gap} = T_1 - T_2 = \frac{q''' r_\circ^2}{2k_g}\ln\left(\frac{r_1}{r_\circ}\right) \dots\dots\dots (9)$$

$k_g$ تمثل معامل التوصيل الحراري لغازات الفجوة، $T_2$ درجة حرارة السطح الداخلي للغلاف ، $r_1$ نصف القطر الداخلي للغلاف.خلال عمل المفاعل سوف يمزج غاز الهليوم الذي يملئ الفجوة بغازات نواتج الانشطار [13] وأهمها غازي الزينون (Xe) والكربتون (Kr) وهي غازات رديئة التوصيل الحراري ، فتكون مساهمتها ضئيلة في نقل الحرارة خلال الفجوة . إن عرض الفجوة الغازية يتغير مع الزمن بسبب تأثيرات التمدد الحراري (thermal expansion) والانتفاخ (swelling) الذي يحصل في الوقود بالإضافة إلى تكسر أقراص الوقود. ويستبدل معامل التوصيل الحراري لغازات الفجوة بمعامل المواصلة الحرارية (thermal conductance) لها ($h_{gap}$)الذي يعرف بالعلاقة الآتية [14] :

$$h_{gap} = h_g + h_s + h_r \dots\dots\dots (10)$$

إذ إن $h_g$ تمثل معامل انتقال الحرارة بالتوصيل خلال غازات الفجوة و $h_s$ معامل انتقال الحرارة بالتوصيل بين سطحي الوقود والغلاف عند اتصالهما أما $h_r$ معامل انتقال الحرارة بالإشعاع بين السطحين . وتعرف الحدود أعلاه حسب الاتي. بالنسبة لمعامل انتقال الحرارة بالتوصيل خلال غازات الفجوة [13]:

$h_g=\frac{k_g}{\Delta x}$ ..... (11)

$\Delta x$ تمثل العرض الفعال للفجوة وتعرف بالعلاقة [13] :

$$\Delta x = g + 1.5(R_f + R_c) + g_f + g_c \text{ ..... (12)}$$

إذ إن $R_f$ ، $R_c$ و $g_f$، $g_c$ تمثل خشونة سطحي الوقود والغلاف ومسافة قفز(temperatures jump distance) درجتي الحرارة للسطحين على التوالي. وان $h_s$ تعطى بالعلاقة [14] :

$h_s=\frac{2k_fk_c}{k_f+k_c}\frac{p}{\delta H}$ ..... (13)

إذ إن $p$ تمثل الضغط المسلط بين السطحين الصلبين المتصلين ويبلغ حوالي (27.5 MPa) [15] و $H$ يمثل معامل ماير لصلادة (Meyer hardness) السطح الأنعم (الغلاف) ويبلغ حوالي (680 MPa) [16] وان $\delta = (R_f + R_c)^{0.5}$
$R_f$=2$\mu m$ و $R_c = 1\mu m$ [10] . أما $h_r$ فتعطى بالعلاقة [17] :

$h_r = \frac{\sigma\epsilon_f\epsilon_c}{(\epsilon_f+\epsilon_c-\epsilon_f\epsilon_c)}\frac{(T_1^4-T_2^4)}{(T_1-T_2)}$ ..... (14)

إذ إن $\sigma$ يمثل ثابت ستيفان بولتزمان ، $\epsilon_f$ ، $\epsilon_c$ انبعاثية سطحي الوقود والغلاف على التوالي . إن $h_r$ ليس ذو أهمية للحالة المستقرة لعمل المفاعل [17] ، إلا انه يصبح ذو أهمية كبيرة عندما يزيد فارق درجتي الحرارة بين السطحين على (573 ℃K) [14]، وفي حال انتفاخ الغلاف وزيادة عرض الفجوة حيث تقل توصيلية الغازات [15].هنالك مفهومان لوصف آلية التوصيل الحراري خلال الفجوة الغازية هما الفجوة المفتوحة (open gap) والفجوة المغلقة (closed gap) ، في الحالة الأولى يكون ($h_s$=0) وفي الحالة الثانية ($h_r$=0) . إن عملية انتقال الحرارة خلال الفجوة عملية معقدة وليس هناك نموذج نظري يتمكن وصف آلية التوصيل الحراري خلالها [14]. في البحث الحالي تم اعتماد الفجوة المفتوحة مع إهمال $h_r$ بالإضافة إلى توصيلية غازات نواتج الانشطار وقيم $R_c$ و $R_f$ ووجد إن قيمة $h_{gap}$ تبلغ حوالي (3913 W/m$^2$.℃K)
إن الهبوط في درجات الحرارة خلال الفجوة سيؤول إلى العلاقة الآتية :

$$T_1 - T_2 = \frac{q'''r_\circ}{2h_{gap}} \text{ ..... (15)}$$

## ثالثاً. الغلاف cladding

تُحل المعادلة (5) بعد تعويض ($q''' = 0$) وتطبيق الشروط الحدودية ($T = T_2\ at\ r = r_1$) و ($T = T_3\ at\ r = r_2$) ، تنتج العلاقة الآتية التي تمثل الهبوط في درجات الحرارة عبر الغلاف :

$$(\Delta T)_{clad} = T_2 - T_3 = \frac{q'''r_\circ^2}{2k_c}\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) \text{ ..... (16)}$$

إذ إن $k_c$ تمثل معامل التوصيل الحراري للغلاف ، $T_3$ درجة حرارة السطح الخارجي للغلاف ، و $r_2$ نصف القطر الخارجي للغلاف.

## رابعاً . المبرد coolant

إن انتقال الحرارة بين السطح الخارجي لقلم الوقود والمبرد يتم بواسطة الحمل ،ويطبق قانون نيوتن للتبريد، وفق العلاقة الآتية[1] :

$$q = hA(T_3 - T_b) \text{ ..... (17)}$$

إذ يعطى الهبوط في درجات الحرارة بين سطح الغلاف والمبرد وفق العلاقة الآتية :

$$(\Delta T)_{coolant} = T_3 - T_b = \frac{q'''r_\circ^2}{2hr_2} \text{ ..... (18)}$$

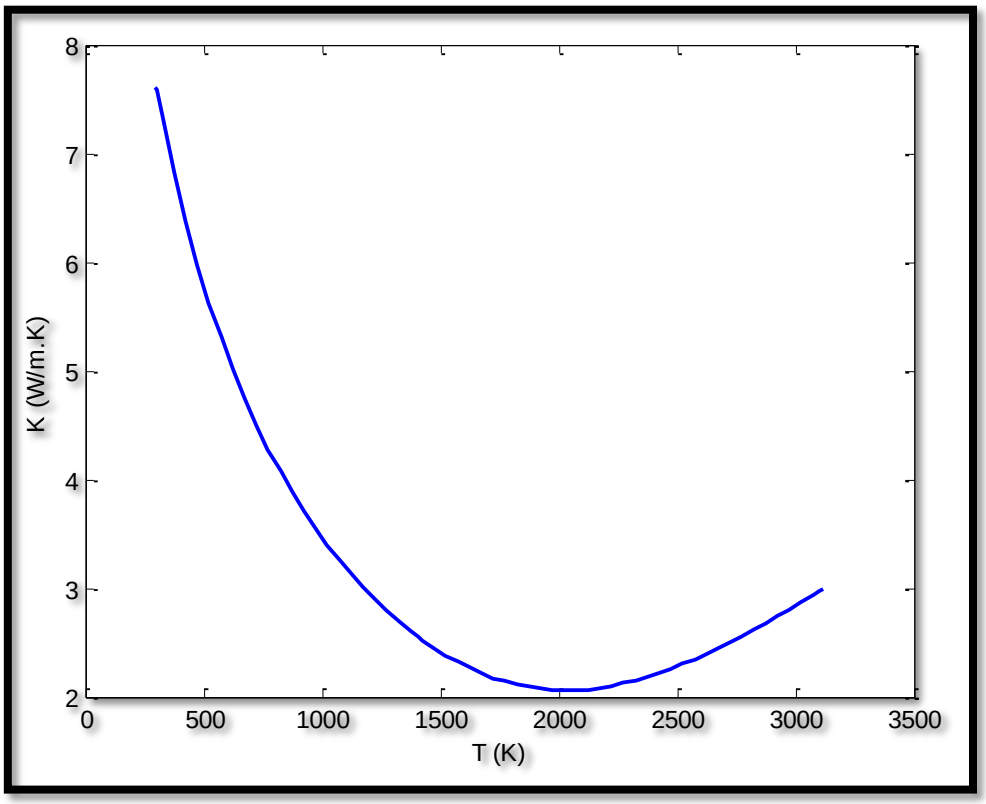
إذ تمثل ($T_b$) معدل درجة حرارة المبرد والبالغة (583 ℃K) وان ($h$) معامل انتقال الحرارة بالحمل (heat transfer coefficient) ويبلغ ($37482\ \frac{W}{m^2.K}$) .

## 3-3 معاملات التوصيل الحراري دوال لدرجات الحرارة
## thermal conductivity as a coefficients functions of temperatures

من المعلوم إن مادة الوقود ($UO_2$) هي مادة سيراميكية رديئة التوصيل للحرارة ، وهذه المشكلة الرئيسية التي يعاني منها هذا النوع من الوقود ، رغم الكثير من المميزات التي جعلته يتصدر جميع أنواع الوقود النووي [1]. إن معامل التوصيل الحراري

للوقود $(k_f)$ بالإضافة لكونه قليل نسبياً فهو ينخفض كثيراً بزيادة درجات الحرارة . سوف تُعتمد العلاقة الآتية لإيجاد $(k_f)$ للوقود بدون تأثير التشعيع ، كونه لايتأثر كثيراً تحت ظروف التشعيع داخل المفاعل [18] . وقد مثلت علاقة $(k_f)$ كدالة لدرجات الحرارة في الشكل (2)

$$k_f = \frac{100}{7.5408+17.692t+3.6142t^2} + \frac{6400}{t^{2.5}} \exp\left(\frac{-16.35}{t}\right) \dots\dots\dots (19)$$




الشكل (2) معامل التوصيل الحراري للوقود دالة لدرجة الحرارة

إذ إن $t = \frac{T(\mathrm{K})}{1000}$

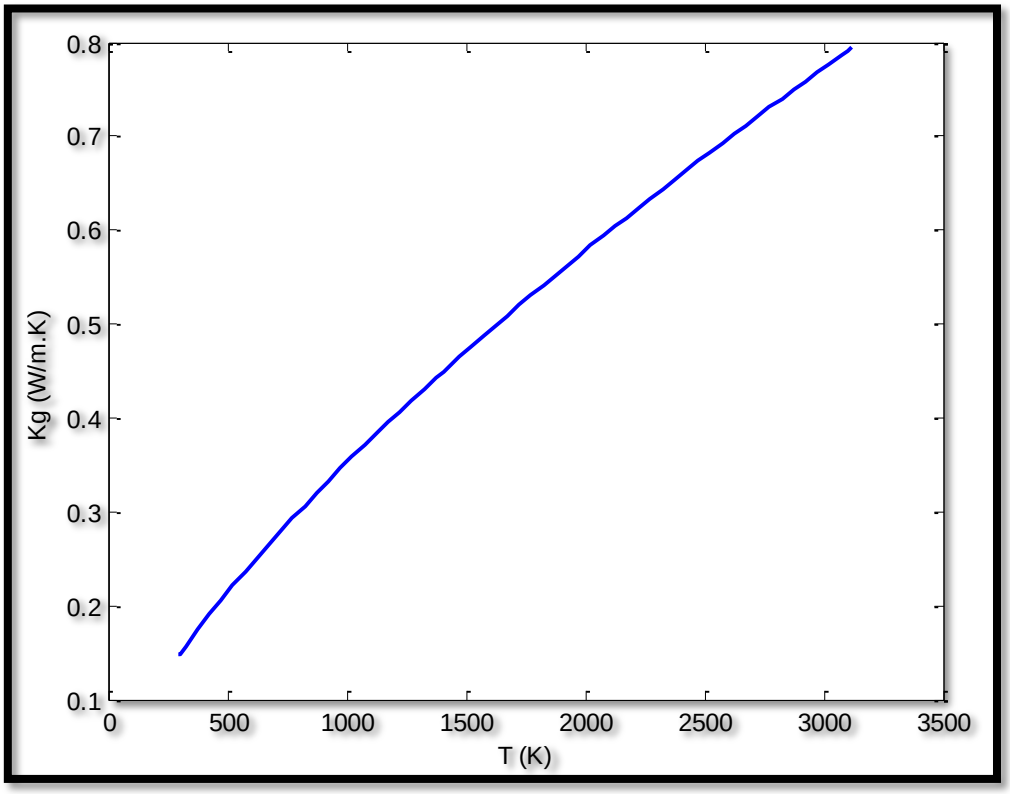
أما معامل التوصيل الحراري لغاز الهليوم الذي يملئ الفجوة فيعطى بالعلاقة (20) [14,19]،وقد مثلت بالشكل (3).

$$k_g = 2.531 \times 10^{-3} T^{0.7146} \dots\dots\dots (20)$$

وان معامل التوصيل الحراري لمادة الغلاف تعطى بالعلاقة الآتية [17,20] عند $(T < 2098\ K)$

$$k_c = 7.51 + 2.09 \times 10^{-2} T - 1.45 \times 10^{-5} T^2 + 7.67 \times 10^{-9} T^3 \dots\dots (21)$$

وقد مثلت العلاقة أعلاه بالشكل (4) .




الشكل (3) معامل التوصيل الحراري للهليوم دالة لدرجة الحرارة

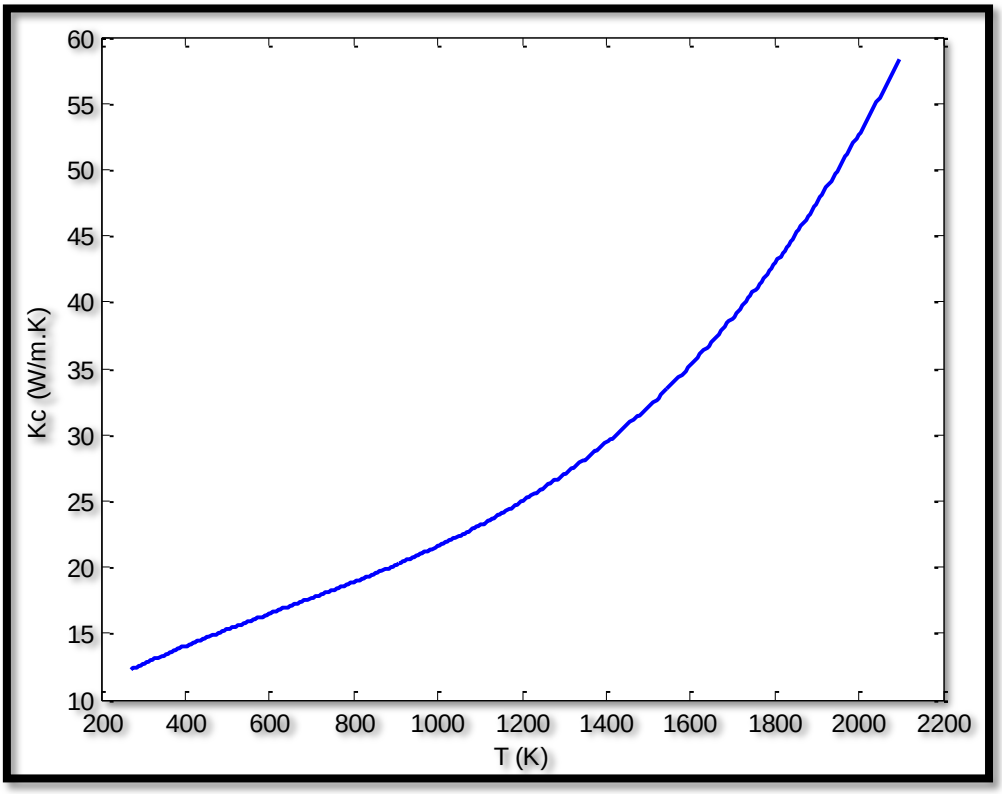
جدول (1) بعض خصائص و أبعاد وقود مفاعل PWR (17 × 17)

| | pellet | cladding |
|---|---|---|
| material | $UO_2$ enriched 3% $^{235}U$ | Zircaloy-4 |
| Radius (m) | 0.0041 | 0.00418 inner<br>0.00475 outer |
| Hight (m) | 0.015 | 3.8 |
| Th. Den.($Kg/m^3$) | 10960 | 6600 |
| Melting point (K) | 3120 | 2118 |

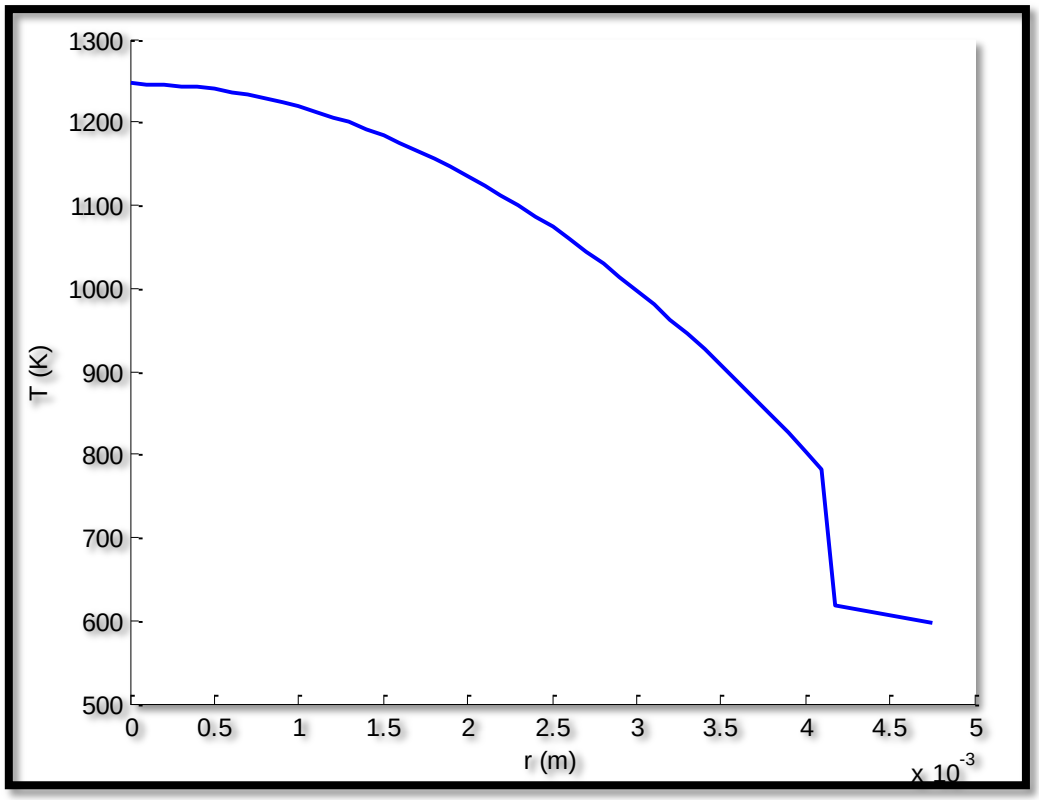
## 4- المناقشة والاستنتاجات discussion and conclusions

### 4-1 المناقشة discussion

يبين الشكل (2) انخفاض معامل التوصيل الحراري للوقود بزيادة درجة الحرارة ثم يزداد نسبياً عند درجة حرارة (2000 K) تقريباً وهذه الزيادة في قيمة ($k_f$) ناتجة عن بدأ مساهمة الالكترونات في التوصيل الحراري عند درجة الحرارة هذه . الأشكال (3) و (4) تبين زيادة معاملات التوصيل الحراري لغاز الهليوم وكذلك مادة الغلاف بزيادة درجات الحرارة . والشكل (5) يبين توزيع درجات الحرارة خلال جميع مناطق المقطع العرضي لقلم الوقود ، إن أعلى درجات الحرارة في الوقود تكون في مركز الوقود ($r = 0$) إذ تبلغ درجة الحرارة (1246 K) وتهبط على شكل قطع مكافئ بزيادة ($r$) وتبلغ درجة الحرارة (781 K) عند سطح الوقود ، إن توزيع درجات الحرارة خلال قرص الوقود يتخذ نفس الملامح العامة لنتائج المصادر [5,7-9] مع بعض التفاوت في القيم والناتج عن اختلاف أبعاد الوقود وسمك الفجوة الغازية إضافة إلى عدد أقلام الوقود في مجمع الوقود . إن الانحدار الحراري يكون كبير جداً في منطقة الوقود وهذا ناتج عن انخفاض قيمة ($k_f$) للوقود . وخلال منطقة الفجوة يكون الهبوط في درجات الحرارة كبير جداً ، إذ إن معامل التوصيل للغاز يكون صغير مقارنة بالمواد الصلبة ، إذ يبلغ فارق درجة الحرارة بين




الشكل (4) معامل التوصيل الحراري للغلاف دالة لدرجة حرارته




الشكل (5) توزيع درجات الحرارة في جميع مناطق المقطع العرضي لقلم الوقود

سطحي الوقود والغلاف (162 K). ثم يبدأ الانخفاض في درجات الحرارة خلال الغلاف ويبلغ فارق درجات الحرارة بين سطحيه (22 K) إذ إن الانحدار الحراري يكون صغير في مادة الغلاف المعدنية بسبب كبر معامل توصيله الحراري .

**4-2 الاستنتاجات conclusions**

1- إن الفرضيات المستخدمة والمعادلات النظرية المتعلقة بالانتقال الحراري أعطت نتائج مقاربة لما هي عليه الحال في الأدبيات المنشورة.
2- إن البرمجيات المستخدمة في هذا البحث كانت ناجحة في الحصول على النتائج المطلوبة فيما يتعلق بحساب توزيع درجات الحرارة في الوقود النووي السيراميكي ($UO_2$) لمفاعلات القدرة من نوع الماء الخفيف المضغوط (PWR).
3- تتناسب كثافة القدرة تناسباً عكسياً مع معدل درجة حرارة المبرد.
4- الانخفاض الكبير في معامل التوصيل الحراري لمادة $UO_2$ بزيادة درجات الحرارة على عكس معامل التوصيل الحراري لغاز الهليوم الذي يملئ الفجوة ومادة الغلاف.
5- يظهر منحني توزيع درجات الحرارة ثلاثة مناطق متميزة تمثل قرص الوقود والفجوة الغازية ومادة الغلاف.

**- المصادر**


1- S. Glasstone and A. Sesonske,"Nuclear Reactor Engineering", Third Edition, Van Nostrand Reinhold,1981
2- نجم عبد عسكوري، منظمة الطاقة الذرية العراقية ، وثائق محدودة التداول ، 1986
3- اسعد جلال صالح ، "مقدمة في الفيزياء النووية"، جامعة البصرة ،1987
4- J. L. Basdevant,J. Rich and M. Spiro, "Fundamentals in Nuclear Physics", Springer, 2005
5- K.M. Pandey and M. Mahesh, I. J. Innov. Manag. and Technology,Vol.1, No.5, 2010
6- نجم عبد عسكوري ، "مبادئ السلامة النووية"، هيئة المعاهد التقنية ، 1991
7- Y. Harayama and M. Kyoya, J. Nucl. Sci. and Technology , Vol.23, No.2, 1986
8- J. K. Han and Y. K. Yoon , J. Kor. Nucl. Society , Vol.22, No.2, 1990
9- Y. S. Yang, C. H. Shin, T. H. Chun and K. W. Song, J. Nucl. Sci. and Technology, Vol.46, No.8, 2009
10- J. S. Tulenko and R. H. Baney,"An Innovative High Thermal Conductivity Fuel Design", submitted to the U.S. Department of Energy, 2007
11- خضر عبد العباس حمزة و غسان هاشم الخطيب "الطاقة الذرية واستخداماتها"،منظمة الطاقة الذرية العراقية ، 1989
12- J.C. Ramirez, M. Stan, and P.Cristea, J. Nucl. Materials ,359, 2006
13- R.L. Williamson and D.A. knoll, proceedings of top fuel,France, INL/CON-09-15677, 2009
14- A. Soba and A. Denis, J. Nucl. Materials ,374, 2008
15- K.J. Geelhood, W.G. Luscher, C.E. Beyer, and J.M. Cuta, " FRAPCON 1.4 : a computer code for the transient analysis of oxide fuel rods", NUREG/CR-7023, 2011
16- K.J. Geelhood, W.G. Luscher, and C.E. Beyer, "FRAPCON-3.4 : a computer code for the calculation of steady state , thermal- mechanical behavior of oxide fuel rods for high burnup", NUREG/CR-7022, 2011
17- J.B. Ainscough, "gap conductance in zircaloy-clad LWR fuel rods", OECD,NEA, 1982
18- J.K. Fink, J. Nucl. Materials ,279,2000
19- K.J. Geelhood, W.G. Luscher, C.E. Beyer, D.J. Senor, M.E. Cunningham, D.D. Lanning, and H.E. Adkins, "predictive bias and sensitivity in NRC fuel performance codes", NUREG/CR-7001, 2009
20- "thermophysical properties database of materials of light water reactors and heavy water reactors", IAEA ,TECDOC-1469,2006