

## دراسة مزايا استخدام التنغستين كغلاف للوقود النووي موكس في المفاعلات النووية من الجيل الرابع

حسان لميع الصالح<sup>1</sup>، نبيل فضل الله جودية<sup>2</sup>، محمد حبيب البرهوم<sup>3</sup>

(<sup>1</sup>) طالب دكتوراه، قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة دمشق، سورية .

[hassan.alsaleh@damascusuniversity.edu.sy](mailto:hassan.alsaleh@damascusuniversity.edu.sy)

(<sup>2</sup>) أستاذ مساعد، قسم الفيزياء، كلية العلوم، جامعة دمشق، سورية.

[nabil.joudieh@damascusuniversity.edu.sy](mailto:nabil.joudieh@damascusuniversity.edu.sy)

(<sup>3</sup>) مدير بحوث، قسم الهندسة النووية، هيئة الطاقة الذرية السورية، سورية

[mbarhoom@aec.org.sy](mailto:mbarhoom@aec.org.sy)

### الملخص

أجريت في هذا البحث دراسة للمزايا التي يقدمها استخدام معدن التنغستين كغلاف للوقود المختلط MOX بدلاً من الفولاذ المقاوم للصدأ كغلاف لهذا الوقود، وذلك في مفاعل بحث من الجيل الرابع يدعى ALLEGRO، علماً أن هذا المفاعل ما يزال قيد التصميم والتنفيذ على المستوى الأوروبي وليس موجوداً على أرض الواقع.

أظهرت النتائج التي حصلنا عليها باستخدام النظام الحاسوبي MALBRN على أن التنغستين هو أفضل حرارياً بقليل من الفولاذ المقاوم للصدأ كغلاف للوقود في حالة تشغيل المفاعل ALLEGRO مع التقيد بالمعايير الأوروبية (بالنسبة للحدود القصوى لدرجتي حرارة مركز الوقود والغلاف) حيث كان الهبوط الحراري الكلي الأعظمي بين مركز الوقود والمبرد أقل بحدود 3 °C في حالة استخدام معدن التنغستين كغلاف للوقود بدلاً من الفولاذ المقاوم للصدأ.

تظهر المزايا الكبيرة لاستخدام التنغستين كغلاف للوقود في المفاعل ALLEGRO في حالة عدم التقيد بالمعايير الأوروبية لدرجتي حرارة الوقود والغلاف إذ يتيح استخدام التنغستين المجال لرفع المردود الترموديناميكي للمبرد في الدارة الأولية للمفاعل ALLEGRO من حوالي (60% إلى 71.2%) بمجرد الوصول لدرجة حرارة خرج للمبرد قدرها 901.6 °C بدلاً من 651.2 °C مع العلم أن الفولاذ المقاوم للصدأ أفضل نترونيا من التنغستين.

**الكلمات المفتاحية:** مفاعل، ALLEGRO، الجيل الرابع، الوقود النووي MOX (موكس)، التنغستين، خصائص هيدروحرارية.

تاريخ الإيداع: 2023/02/20

تاريخ الموافقة: 2023/03/09



حقوق النشر: جامعة دمشق -

سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق

النشر بموجب الترخيص

CC BY-NC-SA 04

# Studying the advantages of using Tungsten as a clad for MOX Nuclear Fuel in Gen. IV Nuclear Reactors

Hassan lamie alsaleh<sup>1</sup> Nabil Fadlallaah Joudieh<sup>2</sup>  
Mohamad Habib Albarhoum<sup>3</sup>

<sup>(1)</sup> PhD Student, Department of Physics, Faculty of Sciences, Damascus University, Syria  
hassan.alsaleh@damascusuniversity.edu.sy .

[hassan.alsaleh@damascusuniversity.edu.sy](mailto:hassan.alsaleh@damascusuniversity.edu.sy)

<sup>(2)</sup> Associate Professor, Department of Physics, Faculty of Sciences, Damascus University, Syria. [nabil.joudieh@damascusuniversity.edu.sy](mailto:nabil.joudieh@damascusuniversity.edu.sy)

<sup>(3)</sup> Research Director, AECS-Nuclear Engineering Department, Syria. [mbarhoom@aec.org.sy](mailto:mbarhoom@aec.org.sy)

## Abstract

A study on the advantages that Tungsten can offer, as a clad for the MOX fuel, when used as a substitute of the AISI 316 in a reactor of Gen. IV nuclear reactors called ALLEGRO. Useless to say that this reactor is still being designed and constructed on the European level, but practically is not existing in the reality.

Results obtained by the use of the MALBRN computer system show that Tungsten, as a fuel clad, is thermally a bit better than the AISI 316 in the case ALLEGRO is operated following the European criteria for the maximum fuel and clad temperatures, where the maximum temperature drop between the fuel center and the coolant decreases by about 3 °C, in case use the Tungsten as a clad for fuel instead of the AISI 316 .

The highest advantages of using Tungsten in ALLEGRO reactor appear when operating ALLEGRO without applying those criteria. In this case the thermodynamic efficiency of the coolant of the first cycle of the reactor increases from about 60% to 71.2% by just increasing the outlet temperature of the coolant from about 651.2 °C to 901.6 °C. To be noted that AISI 316 is neutronicly better than Tungsten.

Received :2023/02/20

Accepted:2023/03/06



Copyright: Damascus University- Syria,  
The authors retain the copyright under a  
CC BY- NC-SA

**Key Words:** Reactor, ALLEGRO, Generation IV, MOX , Tungsten, Thermal-hydraulic properties.

## 1- المقدمة:

مفاعلات الجيل الرابع هي مفاعلات متطورة جداً وتأتي في سياق تطور المفاعلات النووية كآخر جيل يتم الآن تصميمه وتجريبه، لكن حتى الآن لم يحصل تجريب حقيقي لهذه المفاعلات، إذ أن التقنيات النووية عادة ما تُجرب على مستوى صغير (مفاعلات صغيرة)، ثم يتم الانتقال إلى المستويات الأعلى بالتدرج حسب النتائج التجريبية في المستويات السابقة. وفي الحقيقة إن المفاعلات الصغيرة من الجيل الرابع ما تزال قيد التنفيذ إن لم تكن فعلياً ما تزال قيد التصميم (لأنه تم تمديد المشروع حتى عام 2026 [1]).

جرى في هذا البحث دراسة مفاعل البحث ALLEGRO وهو مفاعل من النوع السريع ومبرد بغاز الهليوم ويمثل أحد الأنواع الستة المقترحة كمفاعلات من الجيل الرابع.

يفترض العرض التوضيحي لتقنية GFR أن السمات الأساسية لمفاعلات الطاقة التجارية المبردة بالغاز من الجيل الرابع GFR مثل المفاعل GFR2400 MW والمزمع استخدامها لتوليد الكهرباء يمكن اختبارها من خلال تطبيق الدراسة على مفاعل البحث (ALLEGRO-75 MWth)، حيث أن معظم المعطيات الرئيسية لكلا المفاعلين مشابهة لبعضها البعض (انظر الشكل (1)).



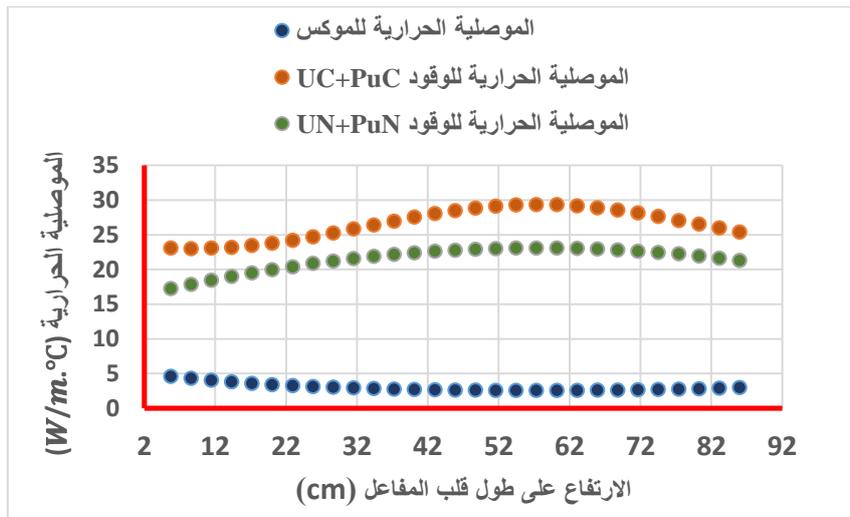
الشكل (1): يوضح التشابه بين مفاعل الطاقة باستطاعة 2400 ميغاواط ومفاعل البحث ALLEGRO [2].

كان الهدف الرئيسي من تصميم المفاعل ALLEGRO هو إنشاء مرافق للبحث والتطوير للتحقيق في قضايا تطوير الوقود النووي، والمشاكل المتعلقة به ومن أهمها مشكلة إيجاد وقود يتحمل درجات حرارة عالية (درجة انصهاره عالية)، وفي الوقت نفسه يتحمل كثافة طاقة عالية أيضاً (من مرتبة  $100 \text{ MW/m}^3$  في قلب المفاعل) ويصمد في ظروف التشعيع ضمن المفاعل [3]. أظهرت الدراسات أن هناك عدة أنواع من الوقود النووي مرشحة للاستخدام في مفاعلات الجيل الرابع مثل الوقود الأكسيدي المختلط موكس MOX والوقود الكريبيدي (UC+PuC)، وكذلك الوقود النتريدي (UN+PuN) ولكل نوع خصائصه المختلفة انظر الجدول (1)، إلى أن الخبرة في تشغيل هذه الأنواع المختلفة من الوقود متفاوتة أيضاً فيما بينها، والأفضلية في هذه الحالة للوقود موكس الذي تعمل به غالبية مفاعلات الطاقة النووية في العالم [4].

الجدول (1): خصائص أنواع الوقود المرشحة للاستخدام في المفاعلات النووية من الجيل الرابع [5].

البند	الوقود الكريبيدي (U, Pu) C	الوقود النتريدي (U, Pu) N	الوقود موكس (U, Pu) O <sub>2</sub>	الوقود المعدني (U, Pu) Zr
الكثافة النظرية ( $\text{g/cm}^3$ )	13.6	14.3	11.0	15.6
كثافة المادة الثقيلة ( $\text{g/cm}^3$ )	12.95	13.53	9.75	14.00
درجة الانصهار ( $^{\circ}\text{C}$ )	2420	2780	2430	1080
الموصلية الحرارية ( $\text{W/m}\cdot^{\circ}\text{C}$ )	16.5	14.3	2.9	14.0

إحدى المشاكل الأساسية للوقود موكس هي انخفاض موصليته الحرارية مقارنة بالموصلية الحرارية للوقودين الكريبيدي والنتريدي (انظر الشكل (2))، حيث يمكن ملاحظة الفارق الكبير بين الموصلية الحرارية لهذين الوقودين والوقود موكس الأساسي، فالموصلية الحرارية للوقود موكس الأساسي لا تتجاوز  $5 (W/m.^{\circ}C)$  في أحسن الأحوال، بينما لا تقل قيم الموصلية الحرارية للوقودين الكريبيدي والنتريدي عن  $17 (W/m.^{\circ}C)$  في أسوأ الأحوال. هذه المشكلة يمكن أن تُحل بطرائق مختلفة ولكن المشكلة التي نسعى لحلها في هذا البحث تكمن في زيادة درجة حرارة عمل الوقود MOX والاستفادة من هذه الزيادة في الحصول على مردود ترموديناميكي عالي جداً للمبرد في الدارة الأولية وبالتالي التخلص من القيود المفروضة أوربياً على درجة حرارة كل من غلاف الوقود  $863^{\circ}C$  والوقود نفسه  $1140^{\circ}C$  [6] و [7].



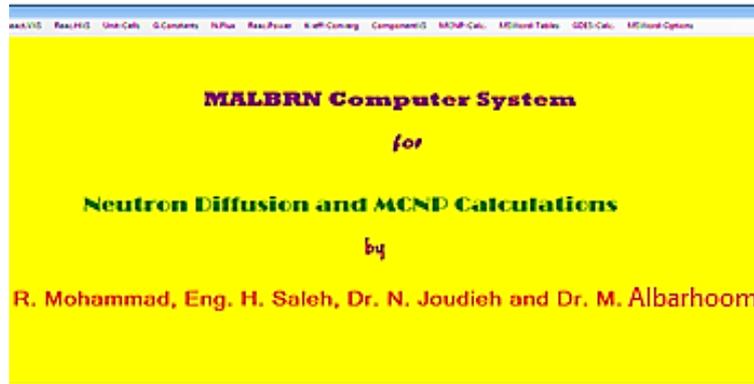
الشكل(2) مقارنة بين الموصلية الحرارية للوقود موكس والموصلية الحرارية للوقودين الكريبيدي والنتريدي حسب النظام الحاسوبي MALBRN [8].

## 2- هدف البحث:

هدف البحث هو استقصاء المزايا التي يجلبها استبدال الفولاذ المقاوم للصدأ AISI 316 المستخدم كغلاف لوقود المفاعلات السريعة بشكل عام بالتنغستين وهو مادة عالية درجة الانصهار حوالي  $3422^{\circ}C$ . تم استقصاء هذه المزايا من خلال إجراء الحسابات النثرية والهيدروحرارية على مفاعل بحث من مفاعلات الجيل الرابع مقترح أوربياً ومعدل محلياً يدعى ALLEGRO باستطاعة 75 MW.

## 3- مواد وطرائق البحث:

تعتمد منهجية البحث على إجراء الحسابات النثرية والهيدروحرارية للمفاعل باستخدام نظام حاسوبي (MALBRN). للنظام خيارات واسعة منها إجراء الحسابات النثرية بالكودات الإحصائية مثل (MCNP) وكذلك بالكودات التقليدية (التحديدية أو القطعية) (انظر الشكل (3)).



الشكل (3): واجهة المستخدم للنظام الحاسوبي MALBRN [8].

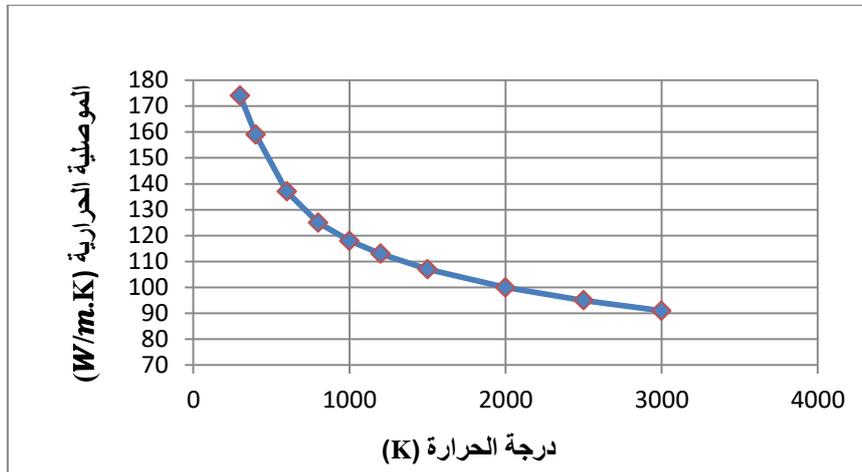
**3-1- بعض خصائص التنغستين:**

التنغستين هو أحد المواد المقاومة للحرارة ذات الأهمية البالغة في الهندسة النووية نظراً لخواصه النووية والحرارية المتميزة من علو درجة انصهاره  $3422\text{ }^{\circ}\text{C}$ . وموصلية حرارية ممتازة بالإضافة للخصائص النووية الأخرى انظر الجدول (2) [9].

الجدول(2): بعض خصائص التنغستين الفيزيائية والنترونية.

المقطع العرضي لامتصاص النيوترونات (barn)	الكثافة ( $\text{g/cm}^3$ )	درجة حرارة الانصهار ( $^{\circ}\text{C}$ )	المركب
19.2	19.3	3422	التنغستين

يظهر الشكل (4) تغير الموصلية الحرارية للتنغستين كتابع لدرجة الحرارة [9]. هذه الموصلية الحرارية العالية والتي لا تقل عن  $90\text{ (W/m.K)}$  بالإضافة لدرجة انصهاره العالية تؤهل التنغستين للعمل في المفاعلات النووية عند درجات حرارة عالية.



الشكل (4): الموصلية الحرارية للتنغستين كتابع لدرجة الحرارة [9].

**3-2- بعض خصائص الفولاذ المقاوم للصدأ AISI 316:**

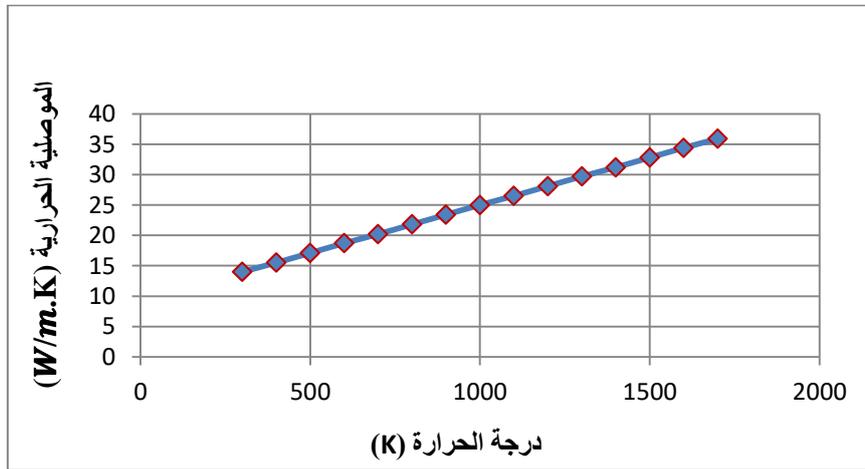
استعمل الفولاذ المقاوم للصدأ AISI 316 على نطاق واسع في مفاعلات BWR و PWR الحالية كمواد هيكلية داخلية ومحيطية. إضافة لهذا كان الفولاذ متعدد الاستخدامات أيضاً من المواد الرئيسية التي تم بحثها وتطبيقها في العديد من تقنيات المفاعلات المتقدمة، بما في ذلك المفاعلات السريعة ومفاعلات الاندماج النووي، أما بالنسبة للمفاعلات العالية درجة الحرارة أو ذات العمر التشغيلي الطويل، تم تطوير إصدارات معدلة من سبائك الفولاذ المقاوم للصدأ لتوفير خصائص أداء محسنة ومقاومة للإشعاع،

وللفولاذ المقاوم للصدأ ثلاثة الأنواع الأوستينيتي، الفريتي والبيريتي والتي تستعمل بكثرة في المواد الهيكلية للمفاعلات النووية بسبب مقاومتها العالية للتأكسد في درجات الحرارة العالية التي تتعرض لها في المفاعلات النووية [4]. يوضح الجدول (3) الخصائص الأخرى للفولاذ المقاوم للصدأ 316 [9].

الجدول(3): بعض خصائص الفولاذ المقاوم للصدأ 316 الفيزيائية والنترونية.

المركب	الفولاذ المقاوم للصدأ 316
درجة حرارة الانصهار (°C)	1430
الكثافة (g/cm <sup>3</sup> )	7.954
المقطع العرضي لامتناس النوترونات (barn)	2.88
أهم مكونات الفولاذ المقاوم للصدأ 316	
النظير	النسبة المئوية %
Fe	66.8750
C	0.0172
Mn	1.4737
Si	0.4481
P	0.0219
S	0.0113
Cr	16.7378
Mo	3.3945
Ni	11.0213

يظهر الشكل (5) تغير الموصلية الحرارية للفولاذ المقاوم للصدأ 316 AISI كتاب لدرجة الحرارة [9]. هذه الموصلية الحرارية الجيدة نوعاً ما والتي تزداد باذدياد درجة الحرارة بالإضافة لدرجة انصهاره المحددة بـ 1430 °C تؤهل للفولاذ المقاوم للصدأ للعمل في المفاعلات النووية ولكن مع التقيد بالمعايير الأوروبية لدرجات حرارة الوقود 1140 °C والغلاف 863 °C بما يتلائم ودرجة انصهاره.



الشكل (5): الموصلية الحرارية للفولاذ المقاوم للصدأ كتاب لدرجة الحرارة [9].

### 3-3 - مواصفات مفاعل البحث ALLEGRO:

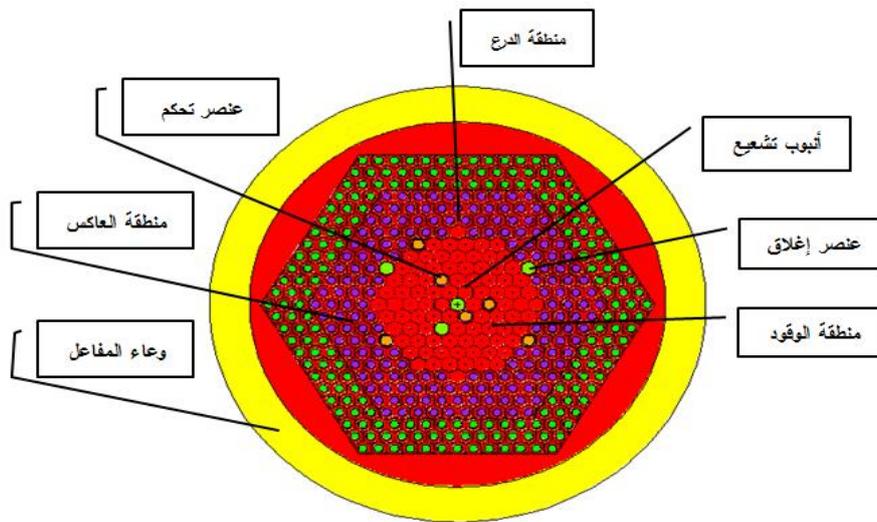
يبين الجدول (4) مواصفات قلب مفاعل البحث ALLEGRO، والذي يتألف من 81 عنصر وقود و 6 مواقع للتشيع (انظر الشكل (6)) يتألف كل عنصر وقود من 169 قضيب وقود. يتم التحكم بالمفاعل بواسطة 6 عناصر تحكمية مصنوعة من كبريد البورون B<sub>4</sub>C و 4 عناصر للإغلاق مصنوعة أيضاً من كبريد البورون B<sub>4</sub>C. تحيط بمنطقة الوقود بالاتجاه القطري أربع حلقات من منطقة العاكس مكونة من 174 عنصر يلي حلقات العاكس ثلاث حلقات من درع المفاعل مكونة من 198 عنصر، أما

بالاتجاه الشاقولي فتتوضع من الأعلى والأسفل طبقة من العاكس لها نفس تركيب العاكس القطري، يليها من الأعلى والأسفل طبقة من الدرع لها نفس تركيب الدرع القطري.

الجدول (4): مواصفات قلب مفاعل البحث ALLEGRO حسب التصميم المقترح.

القيمة		البند
المقترحة في هذا البحث [10]	المقترحة أوريبياً [11]	
75	75	الاستطاعة الحرارية للمفاعل (MW)
100	102.7079	كثافة الاستطاعة في قلب المفاعل ( $MW/m^3$ )
مجهولة	254.0998	كثافة الاستطاعة في الوقود ( $MW/m^3$ )
81	81	عدد عناصر الوقود في المفاعل
169	169	عدد قضبان الوقود في مجمعة الوقود
174	174	عدد مجمعات العاكس القطري في المفاعل
198	198	عدد مجمعات الدرع القطري في المفاعل
4	4	عدد قضبان الإغلاق
6	6	عدد قضبان التحكم
2 / 2	2 / 2	عدد العواكس / عدد الدروع
مجهولة	20.85 / (U, Pu)O <sub>2</sub>	نوع الوقود / نسبة البلوتونيوم في الوقود
7 / Helium	7 / Helium	المبرد / (الضغط (MPa))
SS / 3.46	SS / 3.46	قطر وعاء المفاعل (m) / المادة المصنوع منها
2.95 / 2.90	2.95 / 2.90	ارتفاع المفاعل (m) / القطر (m)
0.86	0.86	ارتفاع القلب (m)

جرت نمذجة المفاعل ALLEGRO بواسطة الكود MCNP4C، وجرى اختيار معطيات المواد لقلب المفاعل كما هي معروفة عندنا، إذ أن خصائص هذه المواد كما هي مستخدمة أوريبياً ليست معروفة بالنسبة لنا، كما أن هذه الخصائص قد تختلف كثيراً بين بلد وآخر أو حتى بين مؤسسة علمية وأخرى. وفي الكثير من الأماكن كانت لنا طريقة عمل مختلفة عن طرائق عمل الأوربيين وخاصة فيما يتعلق بمواقع قضبان التحكم في قلب المفاعل ومواد هذه القضبان [10] (انظر الشكل (6)).



الشكل (6): يوضح تخطيطياً مقطعاً عرضياً منمذجاً لقلب المفاعل ALLEGRO حسب النظام MALBRN.

**3-4- بعض مواصفات الوقود المختلط MOX:**

تم استخدام وقود موكس لأول مرة في مفاعل حراري في عام 1963، لكنه لم يدخل حيز الاستخدام التجاري حتى الثمانينيات من القرن الماضي. في عام 2006، جرى تحميل حوالي 180 طنًا من وقود موكس في أكثر من 30 مفاعلًا (معظمها مفاعلات الماء البارد) في أوروبا. بحلول منتصف عام 2016، تم استخدام أكثر من 7500 من مجمعات وقود MOX في أكثر من 40 مفاعلًا، واليوم يستخدم MOX على نطاق واسع في أوروبا واليابان. يوجد حاليًا حوالي 40 مفاعلًا في أوروبا (بلجيكا وسويسرا وألمانيا وفرنسا) مُرخصة لاستخدام موكس، وأكثر من 30 مفاعلًا في اليابان.

الوقود الأكسيدي المختلط، والمعروف بوقود MOX، هو وقود نووي يحتوي على أكثر من أكسيد واحد من المواد الانشطارية عادة (أكسيدي البلوتونيوم ( $PuO_2$ ) واليورانيوم الطبيعي ( $UO_2$ ))، ويتكون عادة من البلوتونيوم الممزوج باليورانيوم الطبيعي أو اليورانيوم المعاد معالجته أو اليورانيوم المستنفد، ويستخدم عادة كبديل لوقود اليورانيوم منخفض التخصيب (LEU) المستخدم في مفاعلات الماء الخفيف التي تهيمن على توليد الطاقة النووية. أحد عوامل الجذب في الوقود موكس هو أنه وسيلة لاستخدام فائض البلوتونيوم المستخدم في صنع الأسلحة، وهو بديل لتخزين الفائض من البلوتونيوم، لذلك يستخدم هذا الوقود في مختلف أنواع المفاعلات النووية، وما يزال يستخدم في المفاعلات النووية في الوقت الحاضر نظراً لخصائصه النترونية الممتازة وثبات خصائصه الميكانيكية في ظروف التشعيع في المفاعل النووي. يوضح الجدول (5) التركيب التفصيلي للوقود موكس المستخدم في هذا البحث.

الجدول(5): التركيب التفصيلي للوقود موكس المستخدم في هذا البحث.

الوقود المستخدم	الوقود المستخدم	نوع الوقود
$PuO_2+UO_2$	$PuO_2+UO_2$	نوع الوقود
التنغستين	الفولاذ المقاوم للصدأ	مادة الغلاف
0.711	0.711	النسبة المئوية لليورانيوم-235 في الوقود
25.00 %	20.85 %	النسبة المئوية للبلوتونيوم في الوقود
10.4	10.4	كثافة الوقود ( $g/cm^3$ )
النسبة المئوية %	النسبة المئوية %	العنصر
0.46934	0.49988	U-235
65.64155	69.91262	U-238
22.04922	17.74521	Pu
11.83989	11.84228	O <sub>2</sub>

**4- مقارنة النتائج النترونية لاستخدام التنغستين والفولاذ المقاوم للصدأ 316 كغلاف لوقود المفاعل ALLEGRO والمناقشة.**

جرى استخدام البرنامج MALBRN لإجراء مقارنة بين الحسابات النترونية للمفاعل ALLEGRO عند استخدام الفولاذ المقاوم للصدأ 316 والتنغستين كغلاف للوقود موكس مع التقيد بدرجة حرارة الوقود العظمى المقترحة أوروبياً (حوالي 1140 °C)، وكانت النتائج كما هي موضحة بالجدول (6).

الجدول (6): مقارنة بين الخصائص النترونية للمفاعل ALLEGRO عند استخدام الفولاذ المقاوم للصدأ 316 والتنغستين كغلاف للوقود موكس.

مادة الغلاف	الفولاذ المقاوم للصدأ	التنغستين
نوع الوقود	PuO <sub>2</sub> +UO <sub>2</sub>	PuO <sub>2</sub> +UO <sub>2</sub>
نسبة اليورانيوم-235 في الوقود	0.711	0.711
النسبة المئوية للبلوتونيوم في الوقود	% 20.85	% 25.00
كثافة الوقود (g/cm <sup>3</sup> )	10.4	10.4
معامل التضاعف النتروني	1.065241	1.065732
التفاعلية في المفاعل (mk)	61.244	61.676
عدد قضبان التحكم/مكافئ القضيب (mk)	-14.088 / 6	-12.156 / 6
عدد قضبان الإغلاق/مكافئ القضيب (mk)	-19.324 / 4	-17.065 / 4

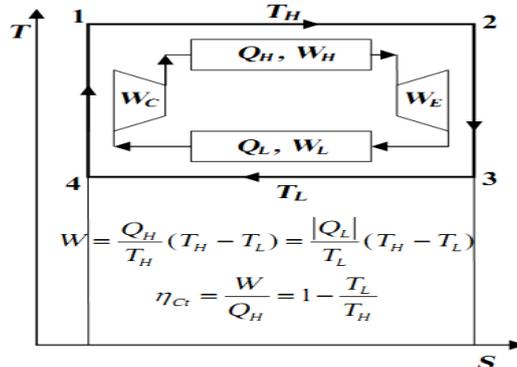
نلاحظ من الجدول (6) أننا نحتاج إلى نسبة عالية من البلوتونيوم حوالي 25% في حالة الوقود موكس بغلاف من التنغستين للحصول على ما قيمته 61.676 mk من فائض التفاعلية الابتدائي مقارنة بـ 20.85% من البلوتونيوم في حالة غلاف من الفولاذ المقاوم للصدأ وذلك للحصول تقريباً على نفس فائض التفاعلية الابتدائي والبالغ 61.244 mk، طبعاً مع المحافظة على كثافة الوقود نفسها. وهذا أمر طبيعي فالتنغستين يمتص النيوترونات بشكل أكبر من الفولاذ المقاوم للصدأ وذلك كونه يمتلك مقطع امتصاص أو أسر أكبر للنيوترونات يقدر بـ (19.2 barn) مقارنة بـ (2.88 barn) في حالة الفولاذ المقاوم للصدأ. تؤثر مادة الغلاف أيضاً على مكافئات قضبان التحكم والإغلاق حيث أن مكافئ قضيب التحكم من التفاعلية ينقص في حالة التنغستين (12.156 mk) عما هي عليه في حالة الفولاذ المقاوم للصدأ (14.088 mk) وذلك لأن الفولاذ أقل امتصاصاً للنيوترونات من التنغستين وبالتالي فالتنغستين يحجب النيوترونات عن قضيب التحكم وينقص امتصاص قضيب التحكم للنيوترونات مما يؤدي إلى نقصان مكافئه من التفاعلية. إذاً من وجهة نظر نترونية فالتنغستين أقل كفاءة من الفولاذ المقاوم للصدأ 316.

##### 5- مقارنة النتائج الهيدروحرارية لاستخدام التنغستين والفولاذ المقاوم للصدأ 316 كغلاف لوقود المفاعل ALLEGRO والمناقشة.

جرت دراسة الخصائص الحرارية للمفاعل ALLEGRO عند استخدام الفولاذ المقاوم للصدأ 316 والتنغستين كغلاف للوقود موكس مع التقيد بالمعايير الأوروبية لدرجة حرارة الوقود العظمى على محوره (حوالي 1140 °C)، وتم حساب المردود الترموديناميكي لغاز الهليوم باعتبار دورته الترموديناميكية هي من النوع "حلقة كارنو" من العلاقة [12]:

$$\eta_{ct} = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (1)$$

حيث  $T_H$  و  $T_L$  هما درجتا الحرارة العظمى والصغرى في الدورة الترموديناميكية "حلقة كارنو" (انظر الشكل (7)).



الشكل (7): حلقة كارنو الترموديناميكية [12].

يبين الجدول (7) بعض خصائص المفاعل ALLEGRO الهيدروحرارية مع التقيد بالمعايير الأوروبية لدرجة حرارة الوقود العظمى على محوره، حيث أظهرت النتائج التي حصلنا عليها قيماً مقاربة إلى حد كبير مع أفضلية صغيرة للتنغستين على الفولاذ المقاوم للصدأ، حيث بلغ المردود الترموديناميكي لحلقة الهليوم في دارة التبريد الأولية للمفاعل في حالة الغلاف من الفولاذ المقاوم للصدأ حوالي 59.8% عند درجة حرارة عظمى للمبرد ( $T_H = 646\text{ }^\circ\text{C}$ ) ودرجة حرارة دنيا له ( $T_L = 260\text{ }^\circ\text{C}$ ) ومعدل دفق للمبرد ( $\text{Kg}\cdot\text{s}^{-1}$ ) حوالي 37.4 في حين بلغ المردود الترموديناميكي في حالة الغلاف من التنغستين بحدود 60.1% عند درجة حرارة عظمى للمبرد ( $T_H = 651.2\text{ }^\circ\text{C}$ ) ودرجة حرارة دنيا له ( $T_L = 260\text{ }^\circ\text{C}$ ) ومعدل دفق للمبرد ( $36.9\text{ Kg}\cdot\text{s}^{-1}$ )، كما نلاحظ أن هبوط درجة الحرارة الكلي بين مركز الوقود والمبرد هو ( $646.87\text{ }^\circ\text{C}$ ) في حالة الفولاذ المقاوم للصدأ و ( $643.73\text{ }^\circ\text{C}$ ) في حالة التنغستين ويفارق بسيط حوالي  $3\text{ }^\circ\text{C}$  وبالتالي يعتبر التنغستين أفضل حرارياً من الفولاذ المقاوم للصدأ.

الجدول (6): بعض الخصائص الهيدروحرارية والعامية للمفاعل ALLEGRO عند استخدام الوقود موكس وغلاف من الفولاذ المقاوم للصدأ - 316.

التنغستين	الفولاذ المقاوم للصدأ	البيان:
36.9	37.4	دفق المبرد الكتلتي (Kg/s)
643.73 / 0.601	646.87 / 0.598	المردود الترموديناميكي / الهبوط الحراري الأعظمي وقود- هليوم
862.1 / 289.5 / 1140.7	861.7 / 289.9 / 1140.3	درجة حرارة محور الوقود ( $^\circ\text{C}$ ): القصى / الصغرى / الوسطية
734.4 / 281.1 / 875.2	695.7 / 281.5 / 873.5	درجة حرارة سطح الغلاف الداخلي ( $^\circ\text{C}$ ): القصى / الصغرى / الوسطية
694.9 / 281.0 / 873.3	689.8 / 280.8 / 865.8	درجة حرارة سطح الغلاف الخارجي ( $^\circ\text{C}$ ): القصى / الصغرى / الوسطية
455.6 / 260 / 651.2	453.0 / 260.0 / 646.0	درجة حرارة الهليوم ( $^\circ\text{C}$ ): الخرج / الدخل / المتوسط
165.9 / 8.4 / 278.2	165.9 / 8.4 / 278.3	الهبوط الحراري وقود- غلاف ( $^\circ\text{C}$ ): الاعظمي / الاصغري / المتوسط
1.3 / 0.1 / 2.04	6.0 / 0.5 / 8.9	الهبوط الحراري على الغلاف ( $^\circ\text{C}$ ): الاعظمي / الاصغري / المتوسط
400.0 / 28.4 / 643.7	402.2 / 28.8 / 646.9	الهبوط الحراري وقود- هليوم ( $^\circ\text{C}$ ): الاعظمي / الاصغري / المتوسط

ينعكس تغيير نوع الغلاف على درجات حرارة سطحه الداخلي والخارجي وعلى درجة حرارة محور الوقود أيضاً كما هو موضح في السطر الثالث والرابع والخامس من الجدول (7). أما درجة حرارة المبرد فهي في حالتنا هنا لا تتبع درجة حرارة الوقود ولا الغلاف فهي شبه ثابتة لأنها تتبع دفق المبرد وهو متقارب في الحالتين المعنيتين.

أما ما يقدمه التنغستين ولا يستطيع تقديمه الفولاذ المقاوم للصدأ لمفاعلات الجيل الرابع فهو إمكانية زيادة درجة حرارة الغلاف إلى أكثر بكثير من ( $863\text{ }^\circ\text{C}$ ) بسبب درجة انصهاره العالية وبالتالي تحقيق زيادة كبيرة في المردود الترموديناميكي للدارة الأولية للمفاعل ALLEGRO وتحقيق تحرر من المعايير الأوروبية المذكورة آنفاً. فإذا رفعنا درجة حرارة المبرد بحوالي ( $250\text{ }^\circ\text{C}$ ) عن طريق تخفيض دفق المبرد من حوالي  $36.9\text{ Kg}\cdot\text{s}^{-1}$  (إلى حوالي  $22.5\text{ Kg}\cdot\text{s}^{-1}$  لتصبح درجة حرارة الخرج للهليوم  $901.6\text{ }^\circ\text{C}$ ) فإن المردود الترموديناميكي للمبرد في الدارة الأولية للمفاعل يصل مباشرة إلى 71.2%، وهو مردود عال جداً. يبين الجدول (8) النتائج النهائية للمفاعل ALLEGRO عند استخدام الوقود موكس وغلاف للوقود من التنغستين وبدون التقيد بالمعايير الأوروبية لدرجة حرارة الوقود والغلاف (بأن تصل درجة حرارة مركز الوقود إلى حوالي  $1510\text{ }^\circ\text{C}$ ).

الجدول (8): بعض الخصائص العامة للمفاعل ALLEGRO عند استخدام الوقود موكس وغلاف للوقود من التنغستين وبدون التقييد بالمعايير الأوروبية لدرجة حرارة الوقود والغلاف.

البيان:	القيمة
المبرد / نسبة المبرد (%) / دفع المبرد الكتلتي (Kg/s)	22.50 / 35.07 / الهليوم
ضغط الهليوم (MPa) / المردود الترموديناميكي لحلقة الهليوم/ هبوط الحرارة الأعظمي وقود-هليوم	855.03 / 0.71 / 7
درجة حرارة محور الوقود (°C): القصى / الصغرى / الوسطية	1125.0 / 300.0 / 1509.4
درجة حرارة سطح الغلاف الداخلي (°C): القصى / الصغرى / الوسطية	931.4 / 291.5 / 1204.6
درجة حرارة سطح الغلاف الخارجي (°C): القصى / الصغرى / الوسطية	930.1 / 291.4 / 1202.7
درجة حرارة الهليوم (°C): الخرج / الدخل / الوسطية	580.8 / 260 / 901.6

## 6- الاستنتاجات:

دللت النتائج التي توصلنا إليها على أن:

- 1- الفولاذ المقاوم للصدأ هو أفضل نترونيا من التنغستين وذلك لأن الفولاذ أقل امتصاصاً للنترونات من التنغستين لأنه يمتلك مقطع امتصاص أصغر للنترونات.
- 2- أن استخدام التنغستين في المفاعل ALLEGRO وهو مفاعل من مفاعلات الجيل الرابع يمكّن هذه المفاعلات من التحرر من المعايير الأوروبية لدرجة حرارة مركز الوقود القصوى وكذلك درجة حرارة الغلاف القصوى وبالتالي استخدام الوقود موكس في هذه المفاعلات دون الاضطرار إلى تحسين موصلية الحرارة .

## References

- [1] <https://world-nuclear.org/our-association/publications/technical-positions/cooling-of-power-plants.aspx>. Retrieved on Dec. 6, 2022
- [2] Bělovský, L. 2014. Project ALLEGRO He-Cooled Fast Reactor Demonstrator. Seminar, ÚJV Řež, March 28, 2014.
- [3] Meyer, M. K., Fielding, R., Gan, J. 2007. development for gas-cooled fast reactors, Journal of Nuclear Materials 371 (2007) 281–287
- [4] Frank, J. Rahn., Achilles, G. Adamantiades., John E. Kenton. 1984. A Guide to Nuclear Power Technology. New York, USA.
- [5] Rouault, J. 2005. The GEN IV Gas Cooled Fast Reactor: Status of Studies, T. Y. C. Wei (ANL) ARWIF-2005.
- [6] Darilek, P., Zajac, R. 2011. ALLEGRO introduction to GFR, INIS-SK-2011-029, Hungary
- [7] Gas-Cooled Fast Reactor, 2009. Technische Universität München.
- [8] Mohammad, R., Judieh, N., Albarhoum, M . 2020. Developing New Simulation Techniques for Advanced MTRs, Ph.D thesis achieved at the Department of Physics, Damascus University.
- [9] IAEA. 2008. Thermophysical Properties of Materials For Nuclear Engineering: A Tutorial and Collection of Data. ISBN 978–92–0–106508–7 .© IAEA, 2008
- [10] AL-Saleh, H., Judieh, N., Albarhoum, M . 2022. Studying the possibility of using nuclear fuel MOX in the fourth generation reactor Allegro, Damascus University Journal for Basic Sciences, Damascus., November 15, 2022.
- [11] HATALA, B., ZAJAC, R. 2014. Introduction to Gas Fast Reactors (GFR) general concept, history, designs, main issues, 1st ESNII+ Summer School KTH Royal Institute of Technology ,May 19 – 21, 2014 Stockholm, Sweden.
- [12] Kostic, M. M. (2011). Revisiting The Second Law of Energy Degradation and Entropy Generation: from Sadi Carnot's ingenious reasoning to holistic generalization. department of mechanical engineering northern illinois university dekalb, il 60115, USA.