الإكسيرجي كأداة لتقييم عمليات الإحتراق الكاظمة للحرارة مع ثبوت الحجم

جمعة إمحمد الفلاح

قسم الهندسة الميكانيكية– كلية الهندسة–جامعة الفاتح

E-Mail: gfellah@hotmail.com

ABSTRACT

The concept of exergy is adopted for the assessment of constant-volume adiabatic combustion processes. For such processes, the temperature of the combustion products attains its maximum value. The results show that both entropy production and irreversibility values are almost equal for the octane and methane gases, and those values increase with the increase in the equivalence ratio. It is found that from the exergy point of view, the use of the methane gas as a fuel is more efficient than that of the octane, and the effectiveness (second-law efficiency) increases with the increase in the equivalence ratio, for instance, the exergy of the products reaches a value of 39.79 MJ/kg for the methane gas and 34.94 MJ/kg for the octane gas at equivalence ratio equal to one. It is found that the effectiveness of the combustion process is 76.5% for the methane and 73.3% for the octane, therefore, 23.5% of the fuel exergy is destructed during the combustion of methane and 26.7% of the fuel exergy is destructed during the combustion of octane.

الملخص

تم في هذه الورقة استخدام مفهوم الإكسيرجي لتقييم عمليات الإحتراق الكاظمة للحرارة (أديباتية) مع ثبوث الحجم لغازي الميثان والأوكتان. يصاحب هذا النوع من العمليات بلوغ درجة حرارة نواتج الإحتراق القيم القصوى. بيّنت النتائج إن مقدار الإنتروبي المنتجة واللاانعكاسية لكل كيلوجرام من الوقود تكاد تكون متساوية لغازي الأوكتان والميثان، وإنها تتناقص مع زيادة نسبة التكافؤ للغازين. أوضحت النتائج أن الفاعلية (كفاءة القانون الثاني) تكون أكبر لغاز الميثان منها لغاز الأوكتان، وأنها تزداد مع زيادة نسبة التكافؤ، وأن اكسيرجي نواتج الإحتراق على سبيل المثال للكيلوجرام الواحد من الوقود بلغت 39.79 ميجاجول لغاز الميثان عند نسبة تكافؤ تساوي واحد، وبلغت 34.94 ميجاجول لغاز الأوكتان عند نفس النسبة.

بيّنت النتائج أن فاعلية الاحتراق عند نسبة تكافؤ تساوي واحد و 73.3% للأوكتان، وبلغت 76.5% للميثان، وهذا يعني أنه عند هذه النسبة يتم تحطيم 26.7% من اكسيرجي الأوكتان وتحطيم 23.5% من اكسيرجي الميثان خلال عملية الإحتراق.

الكلمات المفتاحية: الإكسيرجي ؛ الإنتروبي المتولّدة ؛ اللاإنعكاسية ؛ الفاعلية ؛ نسبة التكافؤ.

المقدمة

تعتبر عمليات الاحتراق من العمليات الحيوية والمهمة في الحياة العملية، حيث يتم فيها تحويل الطاقة الكامنة في الوقود إلى طاقة حرارية يتم استخدامها بطريقة أو بأخرى في توليد أنواع أخرى من الطاقة مثل الطاقة الميكانيكية والكهربية، ويعتبر الوقود أي كان نوعه من الموارد الطبيعية الناضبة، وتحويل الطاقة الكامنة فيه إلى صور أخرى من الطاقة لا يتم بدون دفع ثمن، حيث يؤدي هذا التحويل إلى تناقص القدرة على بدل الشغل المفيد، وبالرغم من أننا لا نهدف إلى منع هذا التناقص، إلا أننا مطالبون بالتقليل منه بقدر المستطاع، وبذلك فقط نعمل على الحفاظ على أحد مواردنا الطبيعية المهمة. بالرغم من أنه تم استخدام مفهوم الإكسيرجي في تقييم العديد من المنظومات الهندسية من الناحية الديناميكية الحرارية، مثل محطات القوى الكهربية [1]، ومحطات تحلية المياه [2]، وفي تقييم العمليات الصناعية [3]، إلا أن استخدامها في تقييم عمليات الاحتراق كان قليل [4،5]. تم في هذا العمل عزل جميع مسببات توليد الإنتروبي بإستثناء تلك بسبب الاحتراق، حيث تم اختيار عملية الاحتراق كاظمة للحرارة حتى لا يكون هناك توليد للإنتروبي بفعل إنتقال الحرارة للمحيط، وذات حجم ثابث حتى لا يكون هناك توليد للإنتروبي بفعل تمدد نواتج الإحتراق، وباختيارنا للمنظومة المغلقة، فإننا نمنع توليد الإنتروبي بفعل التدفق من وإلى المنظومة، وتم إفتراض تجانس المخلوط داخل المنظومة مع تغيير وتوزيع منتظم لخواصه حتى لا يكون هناك أي مسببات داخلية أخرى تعمل على توليد الإنتروبي.

الإكسيرجي (Exergy)

تعتبر الإكسيرجي من المفاهيم المهمة في الديناميكا الحرارية، وهي تعبر عن جودة الطاقة وقدرتها على بذل شغل مفيد، وكما أن شدة التيار الكهربائي المتولد في سلك بين نقطتين يتناسب طرديا مع الفرق في الجهد الكهربائي بين هاتين النقطتين، فإن الطاقة الميكانيكية المتولدة تتناسب طردياً أيضا مع الفرق في الجهد الحراري–الميكانيكي بين حالتي المنظومة الإبتدائية والنهائية، وتبلغ الطاقة الميكانيكية المتولدة القيمة القصوى لها عندما تكون العملية المستخدمة لتوليدها إنعكاسية (Reversible process)، ويكون الجهد الحراري الميكانيكي في الحالة النهائية مساوياً للصفر، إلى أن تصبح الحالة النهائية في حالة إتزان حراري–ميكانيكي مع المحيط، عندها تسمى الطاقة الميكانيكية المتولد والمفيدة في الحياة العملية بالإكسيرجي. بما أن حالة الإتزان التي تم ذكرها هنا هي حالة إتزان حراري–ميكانيكي، أو إتزان طبيعي، فإن

الإكسيرجي المرتبطة بحالة الإتـزان هـذه، تـسمى بالإكـسيرجي الحراريـة-الميكانيكيـة (Thermo-mechanical exergy)، أو بالإكسيرجي الطبيعية (Physical exergy)، وتسمى حالـة الإتزان هذه بحالة الإتزان المشروطة (Restricted dead state).

يقصد بالعملية الإنعكاسية التي سبق ذكرها بتلك العملية التي لا يحدث فيها إضمحلال في الإكسيرجي (المقدرة على بذل شغل مفيد)، وهي عملية مثالية ولا يمكن إدراكها عمليـا ولكـن يمكن الإقتراب منها، وكلما أقتربت العملية الحقيقية من العملية الإنعكاسية، تحـسنت الكفـاءة الديناميكية الحرارية لهذه العملية.

عادة ما يكون تركيز مكونات مائع التشغيل في المنظومـة وهـي فـي حالـة إتـزان ميكانيكي-حراري مختلفاً عن ذلك في الوسط المحيط، فإذا تم فصل هذه المكونات عن طريـق غشاء شبه نفاذ وتمريرها بعد ذلك على آلة إنعكاسية، يمكن عندها الحصول على المزيـد مـن الشغل الإنعكاسي فإذا تساوى تركيز هذه المكونات عند خروجها من الآلة الإنعكاسية مع ذلـك في الوسط المحيط عندها تصل المنظومة إلى ما يسمى بالإتزان الكيميائي مع المحيط، وتسمى حالة الإتزان هذه بحالة الإتزان المحيطية (Environmental dead state)، وعندها يبلغ الـشغل الإنعكاسي قيمته القصوى، ويطلق عليه الإكسيرجي الكيميائيـة (Chemical exergy)، وبـذلك تكون الإكسيرجي الكلية لمائع التشغيل مساوية لمجموع الإكـسيرجي الطبيعيـة والكيميائيـة، أي أن:

$$\Phi_{Total} = \Phi_{Physical} + \Phi_{Chemical} \qquad (1)$$

حيث:

Φ_{Total}: الإكسيرجي الكلية،

$\Phi_{Physical}$: الإكسيرجي الطبيعية (الإكسيرجي الحرارية-الميكانيكية)،

$\Phi_{Chemical}$: الإكسيرجي الكيميائية.

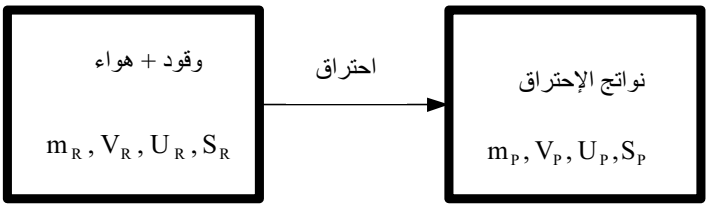
تكون قيمة الإكسيرجي الكيميائية صغيرة مقارنة بقيمة الإكسيرجي الطبيعية ويمكـن إهمالهـا خصوصا عندما تكون نواتج الإحتراق عند درجات حرارة وضغوط عالية، وهذا ما جرت عليه العادة في الأعمال السابقة [4]، وسوف نتبع نفس الأسلوب في هذا العمل.

مما سبق يتبين بأن زيادة حالة إنحراف المنظومة عن حالة الإتزان مع المحيط، تزيد من قيمة الإكسيرجي لديها، وإن المنظومة التي تكون في حالة إتزان مع المحيط ليس لـديها إكـسيرجي حتى وإن كانت تحتوي على مقدار كبير من الطاقة.

تُعرّف الإكسيرجي على أنها أقصى شغل انعكاسي يمكن الحصول عليه من منظومة في حالة ما، وللحصول على هذه القيمة القصوى يتوجب الأمر نقل المنظومة إلى حالة اتزان كامل مع محيطها خلال عملية انعكاسية.

النموذج الرياضي

تم في هذا العمل نمذجة عمليات احتراق كاظمة للحرارة عند ثبوت الحجم للميثان (CH_4) والاوكتان (C_8H_{18})، وسبب الاختيار هذا هو أن الميثان الأبسط جزيئيا من بين جميع الهيدروكربونات، أما الاوكتان فهو شائع الاستخدام كوقود مرجعي عند معايرة الوقود التجاري، وبذلك يسمح هذا الاختيار باستقراء النتائج. ركزت الورقة بشكل أساسي على تأثير نسبة التكافؤ على أداء عملية الإحتراق حيث تراوحت النسبة ما بين 0.2 و 1.2، وذلك لما لهذه النسبة من أهمية في الحياة العملية، حيث تتراوح هذه النسبة ما بين 0.8 و 1.2 في محركات الإحتراق الداخلي، وما بين 0.25 و 0.4 في التربينات الغازية. لا تعني زيادة نسبة التكافؤ الزيادة في كتلة الوقود ولكنها تعني النقص في كتلة الهواء إذ أن كتلة الوقود المستخدمة هنا هي كتلة الكيلومول الواحد، وهي تساوي الوزن الجزيئ للوقود. يكون المخلوط غني بالوقود (فقير بالهواء) عندما تكون نسبة التكافؤ أكبر من واحد، ويكون المخلوط فقيرا بالوقود (غني بالهواء) عندما تكون نسبة التكافؤ أصغر من واحد، أما القيمة واحد فتعني مخلوط الوقود مع الهواء النظري. يوضح شكل (1) رسم تخطيطى لمنظومة الاحتراق التى تمت دراستها فى هذه الورقة.



الشكل 1: رسم تخطيطي للمنظومة

من معادلة الاستمرارية نجد أن:

$$\Delta m = 0 \qquad (2\text{-a})$$

$$m_R = m_P \qquad (2\text{-b})$$

حيث m_R و m_P تمثلان كتلة المواد الداخلة في التفاعل وكتلة نواتج الإحتراق على التوالي.
وبما أن الحجم ثابت، فإن:

$$\Delta V = 0 \qquad (3\text{-a})$$

$$V_R = V_P \qquad (3\text{-b})$$

حيث V_R و V_P تمثلان حجم المواد الداخلة في التفاعل وحجم نواتج الإحتراق على التوالي.
ومن القانون الأول للديناميكا الحرارية نجد أن للعمليات الكاظمة للحرارة والتي لا تتضمن شغل ميكانيكي، وبإهمال التغير في طاقة الحركة وطاقة الوضع:

$$\Delta U = 0 \qquad (4\text{-a})$$

$$U_R = U_p \qquad (4\text{-b})$$

حيث U_R و U_P تمثلان الطاقة الداخلية للمواد الداخلة في التفاعل والطاقة الداخلية لنواتج الإحتراق على التوالي.
ويمكن حساب الإنتروبي المتولدة (entropy generation) داخل الكتلة التحكمية (control mass) من المعادلة:

$$\sigma_{cm} = (S_P - S_R) - \frac{Q_{cm}}{T_{cs}} \qquad (5\text{-a})$$

حيث:

σ_{cm}: الانتروبي المتولدة داخل الكتلة التحكمية.

S_R و S_P: انتروبي المواد الداخلة في التفاعل وانتروبي نواتج الإحتراق.

Q_{cm}: الحرارة المتبادلة مع المحيط وتخترق السطح التحكمي للمنظومة.

T_{cs}: درجة حرارة السطح التحكمي (control surface).

وبما أن العملية كاظمة للحرارة (adiabatic)، تصبح المعادلة السابقة كالآتي:

$$\sigma_{cm} = (S_P - S_R) \qquad (5\text{-b})$$

أما اللانعكاسية، فيمكن حسابها كالآتي:

$$I_{cm} = T_0 (S_p - S_R) \qquad (6)$$

حيث I_{cm} تمثل اللإنعكاسية (irreversibility)، و T_0 درجة حرارة المحيط.
تحسب إكسيرجي نواتج الإحتراق من المعادلة:

$$\Phi_P = \Phi_F - I_{cm} \qquad (7)$$

حيث:

Φ_P : إكسيرجي نواتج الإحتراق. Φ_F : أكسيرجي الوقود.

وبذلك يمكن حساب الفاعلية (effectiveness) كالآتي:

$$\varepsilon = \frac{\Phi_P}{\Phi_F} \qquad (8\text{-a})$$

ومن المعادلتين (7) و (8-a)، يمكن كتابة الفعالية كالآتي:

$$\varepsilon = 1 - \frac{I_{cm}}{\Phi_F} \qquad (8\text{-b})$$

تعرف نسبة الوقود–هواء النظرية (FA_S) بكتلة الوقود مقسومة على كتلة الهواء النظرية اللازم لأكسدة جميع مكونات الوقود القابلة للأكسدة:

$$FA_S = \frac{m_F}{m_{AS}} \qquad (9\text{-a})$$

حيث: m_F تمثل كتلة الوقود، و m_{AS} كتلة الهواء النظري.

أما نسبة الوقود–هواء الحقيقية (FA_R) فتعرف بكتلة الوقود مقسومة على كتلة الهواء الحقيقية المستخدمة لأكسدة جميع مكونات الوقود القابلة للأكسدة:

$$FA_R = \frac{m_F}{m_{AR}} \qquad (9\text{-b})$$

حيث: m_{AR} كتلة الهواء الحقيقية.

وتعرف نسبة التكافؤ (equivalence ratio) (φ) كالآتي:

$$\varphi = \frac{FA_R}{FA_S} = \frac{m_{AS}}{m_{AR}} \qquad (9\text{-c})$$

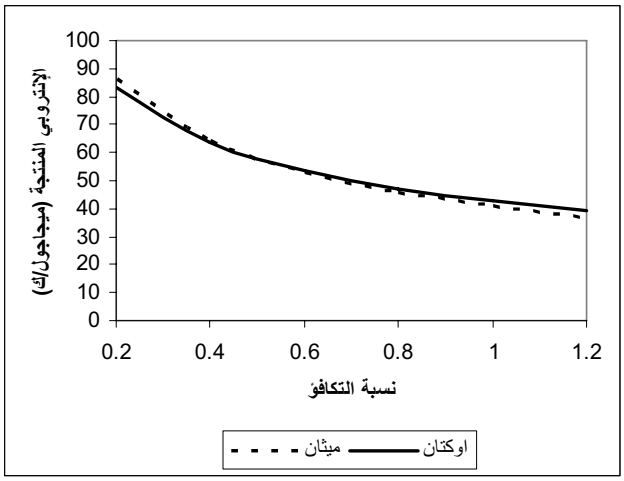
تم في هذا العمل افتراض أن الوقود متبخر بالكامل ومختلط مع الهواء لايكون مخلوطاً متجانساً يسلك سلوك الغاز المثالي وأن المخلوط يشغل منطقة واحدة (single zone) ، وأن نواتج الإحتراق تحقق الاتزان الكيميائي (chemical equilibrium)، أما الهواء المستخدم في عملية الإحتراق فيتركب من 21% أكسجين، و 79% نيتروجين بالحجم.

أُستخدم في هذه الورقة برنامج "ستانجن" الذي تم تطويره في قسم الهندسة الميكانيكية بجامعة ستانفورد لحساب خواص المواد الداخلة في التفاعل عند الضغط الجوي (101.3251 كيلوباسكال) ودرجة حرارة الجو (298.15 كلفن) لغازي الميثان والأوكتان، وأيضا خواص نواتج الإحتراق عند حالة الإتزان الكيميائي وذلك باستخدام الحجم النوعي (ثبوت الحجم) والطاقة الداخلية (ثبوت الطاقة الداخلية) المتحصل عليهما كمدخل للبرنامج لحساب خواص نواتج الإحتراق.

تتكون نواتج الإحتراق عند حدوث الإتزان الكيميائي من عدة مواد تتغير نسبة وجودهـــا في المخلوط مع تغير نسبة التكافؤ، وهذه المواد هي ثاني أكسيد الكربون (CO_2)– أول أكـــسيد الكربون (CO)– هيدروجين أحادي (H)– أكسيد الهيـــدروجين (HO)– مـــاء (H_2O)– اكـــسيد النيتروجين (NO)– نيتروجين ثنائي (N_2)– اكسجين أحادي (O)– أكسجين ثنائي (O_2).

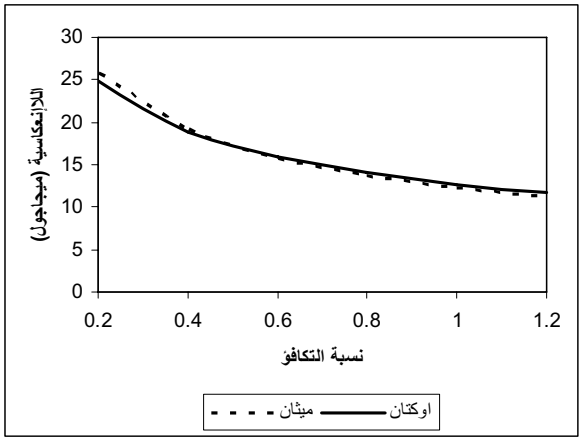
النتائج

هدف هذا العمل إلى تعيين تأثير نسبة التكافؤ على أداء المنظومة، ونخص بالذكر تـــأثير هذه النسبة على الانتروبي المتولدة واللاإنعكاسية واكسيرجي نواتج الإحتراق والفاعلية. تعتبـــر عمليات الإحتراق من العمليات اللاإنعكاسية، وهي بذلك تعمل على اضـــمحلال الاكـــسيرجي. يوضح شكل (2) أن الانتروبي المتولدة لكل كيلوجرام من الوقود تكاد تكون متساوية للاوكتـــان والميثان بالرغم من إختلاف عدد ذرات الهيدروجين والكربون في المادتين



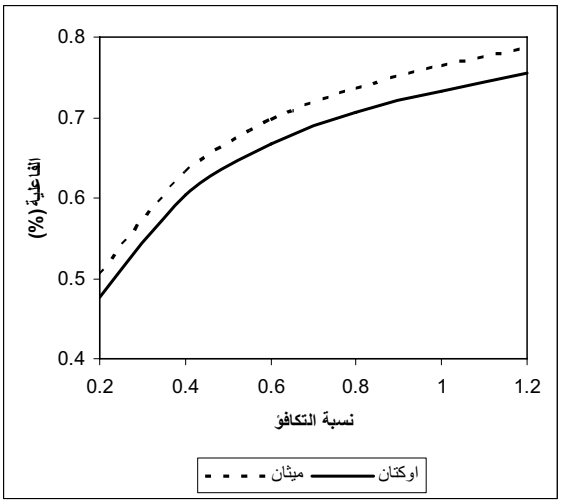
الشكل 2: تأثير نسبة التكافؤ على الانتروبي المتولدة لكل كيلوجرام من الوقود

حيث بلغت تقريبا 42 كيلوجول لكل كيلو جرام عند نسبة تكافؤ تساوي واحد، وأنها تتناقص مع زيادة نسبة التكافؤ، أي مع تناقص كتلة الهواء الزائد. تمثل اللاإنعكاسية مقـــدار التحطـــيم فـــي الاكسيرجي، وهي تتناسب طرديا مع الانتروبي المتولدة، وهي بذلك تكاد تكون أيضا متـــساوية لكل كيلو جرام من الميثان والاوكتان، وبلغت تقريبا 12.5 ميجاجول عند نسبة تكافؤ تـــساوي واحد، كما هو موضح في شكل (3).

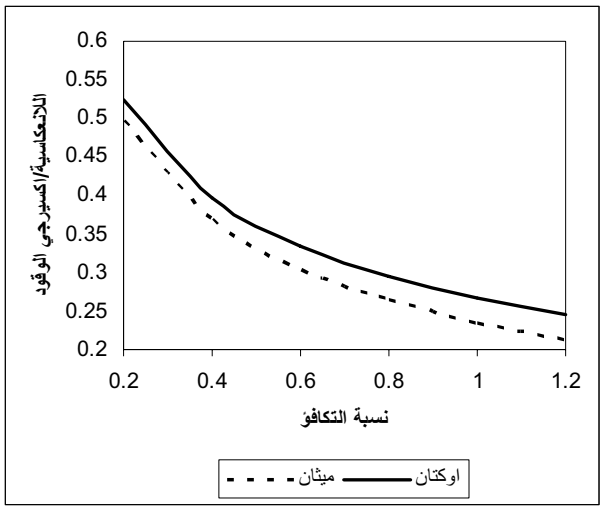


الشكل 3: تأثير نسبة التكافؤ على اللاإنعكاسية لكل كيلوجرام من الوقود

يوضح شكل (4) تأثير نسبة التكافؤ على الفاعلية (كفاءة القانون الثاني) حيــث نجــد أن فاعلية الإحتراق تكون اكبر لمخلوط الميثان منها لمخلوط الاوكتان.

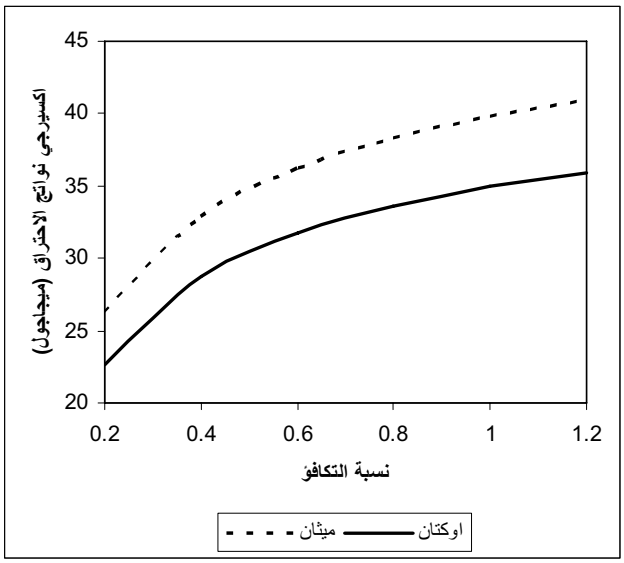


الشكل 4: تأثير نسبة التكافؤ على الفاعلية

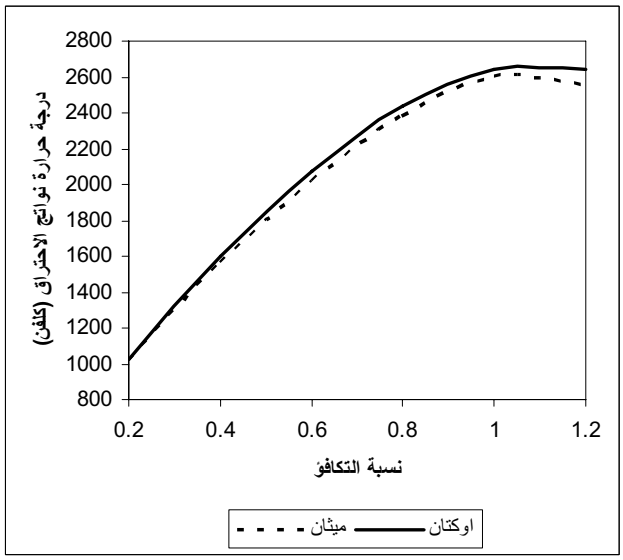


الشكل 5: تأثير نسبة التكافؤ على اللاإنعكاسية مقسومة على اكسيرجي الوقود

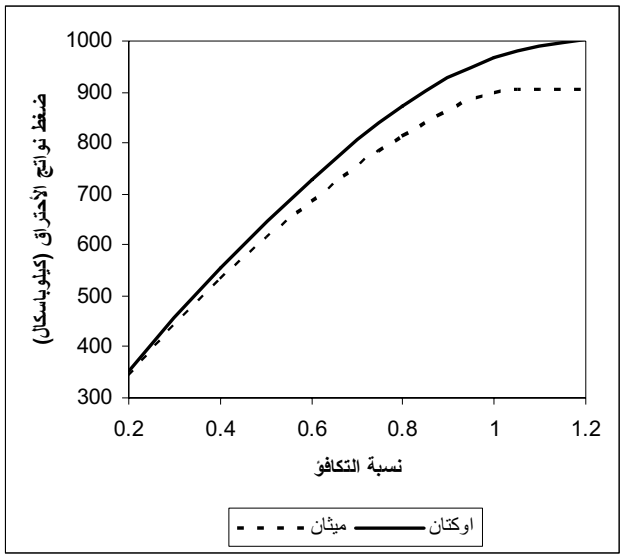
حيث بلغت 73.3% عند نسبة تكافؤ تساوي واحد، وهذا يعني بأنه عند هذه النسبة 26.7% من اكسيرجي الوقود يتم تحطيمها خلال عملية الإحتراق، وبلغت 76.5% عند استخدام الميثان كوقود، عند نسبة تكافؤ تساوي واحد، وهذا يعني أيضا بأن 23.5% من اكسيرجي الوقود يتم تحطيمها عند هذه النسبة (أنظر شكل 5). تبلغ أكسيرجي غاز الميثان القياسية 52 ميجاجول لكل كيلوجرام وهي أكبر من تلك للاوكتان التي تبلغ 47.63 ميجاجول لكل كيلوجرام، بذلك تكون الاكسيرجي الداخلة للمنظومة اكبر لغاز الميثان من تلك لغاز الأوكتان لكل كيلوجرام من الوقود، وتكون اكسيرجي نواتج الإحتراق عند استخدام الميثان كوقود اكبر من تلك عند استخدام الأوكتان، حيث بلغت اكسيرجي نواتج احتراق الميثان 39.79 ميجاجول، بينما بلغت 34.94 ميجاجول لنواتج احتراق الاوكتان لكل كيلوجرام من الوقود، وذلك عند نسبة تكافؤ تساوي واحد، (أنظر شكل 6) أما الزيادة في اكسيرجي نواتج الإحتراق مع الزيادة في نسبة التكافؤ، فتعزى إلى الإرتفاع في كل من درجة حرارة وضغط نواتج الإحتراق مع الزيادة في نسبة التكافؤ، (أنظر شكل 7 وشكل 8).



الشكل 6: تأثير نسبة التكافؤ على اكسيرجي نواتج الإحتراق لكل كيلوجرام من الوقود



الشكل 7: تأثير نسبة التكافؤ على درجة حرارة نواتج الإحتراق



الشكل 8: تأثير نسبة التكافؤ على ضغط نواتج الإحتراق

الخلاصة

بيّنت هذه الورقة أهمية استخدام الاكسيرجي كأداة لتقييم عمليات الإحتراق، حيث تم اختيار عملية احتراق كاظمة للحرارة مع ثبوت الحجم لغرض تعيين مقدار الانتروبي المتولدة نتيجة للاحتراق وإلغاء جميع العوامل الأخرى الخارجية منها والداخلية المسببة لتوليد الانتروبي. أظهرت النتائج أيضا أن لنسبة التكافؤ إهمية كبيرة في تحديد فاعلية الإحتراق من منظور الاكسيرجي.

تعتبر عملية الإحتراق من منظور الاكسيرجي ذات فاعلية منخفضة بغض النظر عن الوقود المستخدم، حيث ما يقارب 25% من أكسيرجي الوقود تتحطم خلال عملية الإحتراق عند احتراق الوقود باستخدام الهواء النظري، وإن هذا الفقد يزداد بزيادة كتلة الهواء المستخدمة في عملية الإحتراق، حيث تقارب نسبة الفقد 37% على سبيل المثال عند نسبة تكافؤ تساوي 0.4 أي عندما تبلغ كتلة الهواء الحقيقية المستخدمة في عملية الإحتراق 2.5 ضعف كتلة الهواء النظرية. أظهرت النتائج أن عملية الإحتراق باستخدام الميثان كوقود هي أكثر فاعلية من عملية الإحتراق باستخدام الأوكتان الذي تقترب خصائصه من خصائص الوقود التجاري.

المراجع

[1] Lior, N., Thoughts about future power generation systems and the role of exergy analysis in their development. Energy Conversion & Management, 43, (2002) 1187-1198.

[2] Cerci, Y., Exergy analysis of a reverse osmosis desalination plant in California. Desalination, 142 (2002) 257-266.

[3] Wall, G., Exergy flows in industrial processes. Energy, 13, No 2, (1988) 197-208.

[4] Caton, Jerald A., On the destruction of availability (exergy) due to combustion processes-with specific application to internal-combustion engines. Energy, 25, (2000) 1097-1117.

[5] Rivero, R., Application of the exergy concept in petroleum refining and petrochemical industry. Energy Conversion & Management, 43, (2002) 1199-2020.