دراسة تأثير استخدام أنواع مختلفة من الوقود على كفاءة المرجل البخاري [+]

STUDYING THE EFFECTS OF USING DIFFERENT KINDS OF FUEL ON THE EFFICIENCY OF STEAM BOILER

وضاح حسين عبد الرزاق [*]

المستخلص:

أجريت دراسة تأثير احتراق أنواع مختلفة من الوقود على كفاءة المرجل البخاري، بهدف تحسين عملية الاحتراق عن طريق دراسة بعض المتغيرات التشغيلية وتأثير الاحتراق ونسبة خلط الهواء والوقود على كفاءة المرجل، إذ يلاحظ إن نسبة الهواء إلى الوقود هي المسيطر الرئيسي على عملية الاحتراق، حيث أن أفضل أداء للاحتراق عند النسبة المكافئة ($\phi \approx 1.05$) فيمكن القول أن أفضل عملية احتراق هي ضمن ($\phi = 0.95 - 1.05$)، فكلما كانت نسبة الخلط في جانب الخلط الضعيف كان الاحتراق تاما، وان أحسن نسبة هواء زائد هي (5-10%)، فنسبة الهواء الزائد تعد من العوامل المهمة التي تؤثر على عملية الاحتراق وبالتالي على كفاءة المرجل، ويؤدي الإفراط في استخدام الهواء الزائد إلى نقص في كفاءة المرجل لطرده كميات كبيرة من غازات العادم الساخنة، إذ يلاحظ عند استخدام (20%) هواء زائد عن الهواء النظري اللازم لحرق الوقود يؤدي إلى انخفاض الكفاءة بنسبة تتراوح بين(1-4.5%). كما إن نقص كفاءة المرجل عند نقص كمية الهواء الداخل إلى الفرن عن الكمية النظرية يعود إلى حالة الاحتراق غير التام كنتيجة لعدم توفر الهواء اللازم لاكمال عملية حرق الوقود، ويحدث الانخفاض في هذه الحالة بمعدل اكبر عن حالة استخدام الهواء الزائد، إذ يصل معدل الانخفاض إلى ما بين (10-50%) من كفاءة المرجل. أما بقية المتغيرات التشغيلية فلها تأثير ثانوي على عملية الاحتراق وعلى كفاءة المرجل ولنوع الوقود أيضا له أثره على كفاءة المرجل باعتماده على مكوناته كارتفاع نسبة الهيدروجين المتحولة إلى بخار الماء في غازات العادم والذي يؤدي إلى ضياع في الطاقة وانخفاض في الكفاءة.

Abstract:

The study of the effects of different kinds of fuel on the efficiency of steam boiler was carried out in order to improve the combustion process of boiler by study of some operation variables, combustion effect , mixing percent of the air and fuel on the boiler efficiency. It is observed that the air/fuel ratio has a main controller on the combustion process. Wherein the best performance for the combustion about($\phi = 1.05$),So the best combustion process about ($\phi = 0.95 - 1.05$), It was found that the best excess air is (5-10%).It is one of the important factors affecting combustion process and boiler efficiency. The employment of excess air to reduces efficiency of the boiler and causes rejection of great amounts of hot flue gases. It is observed that the use of (20%) excess air

[+] تاريخ استلام البحث : ٢٠٠٦/٤/١٢ ، تاريخ قبول النشر : ٢٠٠٨/١١/١٣

[*] مدرس مساعد / المعهد التقني – الدور

more than theoretical necessary air for fuel combustion reduces the efficiency about (1-4.5%).As the reduction of boiler efficiency at small amount of air entering to a furnace comes back to combustion because of necessary air lack. It was also found that the value of reduction is more than excess air for this case. It was about (10-50%) of boiler efficiency. On the other hand, another operation variable has secondary effect on the combustion process and boiler efficiency. Also the kind of fuel has impression on the fuel contents such as high hydrogen percent converted to vapor which produced in flue gases that causes energy loss and efficiency reduction.

قائمة الرموز:

الرمز	المعنى	الوحدة
$\%\eta$	الكفاءة	
%C	النسبة المئوية للكربون في الوقود وزناً	
$\%H_2$	النسبة المئوية للهيدروجين في الوقود وزناً	
$\%O_2$	النسبة المئوية للأوكسجين في الوقود وزناً	
$\%N_2$	النسبة المئوية للنتروجين في الوقود وزناً	
%S	النسبة المئوية للكبريت في الوقود وزناً	
%L	النسبة المئوية للخسائر الحرارية في المرجل	
%w	نسبة الرطوبة الموجودة في الهواء	kg_{H2O}/kg_{air}
%A/F	نسبة الهواء إلى الوقود	kg_{air}/kg_{fuel}
B	الطاقة الحرارية المكتسبة في المرجل	kJ/kg
C_b	السعة النوعية للمرجل	kg/sec.
Cp	معدل الحرارة النوعية	$kJ/kg.^oC$
H_2O	كتلة بخار الماء الموجودة في الهواء	kg
h	المحتوى الحراري النوعي	kJ/kg
HHV	القيمة الحرارية العليا للوقود	kJ/kg.
LHV	القيمة الحرارية الدنيا للوقود	kJ/kg
$\dot{m}$	معدل الجريان الكتلي	kg/sec.
m_a	كتلة كغم واحد من الهواء لكل كغم واحد من الوقود الداخل للاحتراق	kg_{air}/kg_{fuel}
p	الضغط	pas.
P.G.R	القدرة المصروفة على محرك مروحة تدوير غازات العادم	kW
Q_c	حرارة الاحتراق	kJ/kg
S.G	الوزن النوعي للوقود	
T	درجة الحرارة	^oC

الرموز التحتية	المعنى

a	هواء
A1	الهواء الخارج من المسخنات
actual	الحقيقية
ats	بخار الماء اللازم لترذيذ الوقود
b	مرجل
co	تكون اول اوكسيد الكربون عند الاحتراق
dg	غازات العادم الجافة
f	وقود
fan	مروحة
in	داخل الى
ma	الرطوبة في الهواء الداخل للاحتراق
mf	الرطوبة في الوقود الداخل للاحتراق
out	خارج من
prod.	المتفاعلات
R	نتيجة الإشعاع
reac.	النواتج
sv	عند درجة حرارة الهواء الجوي
sto.	الصحيحة
ta	هواء نظري
total	الكلي
v	عند درجة حرارة خروج العادم
xe	طاقة مروحة تدوير الغازات

المقدمة:

الوقود هو العنصر الأساسي المستخدم في تحرير الطاقة ويعرف بأنه عنصر أو مركب قادر على توليد طاقة من خلال تفاعل كيمياوي قد يكون تأكسداً كما في التطبيقات الشائعة أو يكون تفتيت للنواة (fission the nuclear) أو دمج لها (fusion the nuclear) وهو ما يسمى بالوقود النووي[١].

ويعتبر وقود المتحجرات (fossil fuels) المصدر الأساسي للطاقة وهو عبارة عن مواد كيمياوية عضوية قابلة للاحتراق وغالبا ما يظهر على أحد أنواعه الثلاثة والمتمثلة بالوقود الصلب (يشمل الفحم بكافة أنواعه واللكنايت وغيرها) والوقود السائل (يشمل النفط الخام ومشتقاته) والوقود الغازي (يشمل الغاز الطبيعي وغاز البترول وغاز الفحم وغيرها)[٢].أما أكثر أنواع الوقود استخداما في المراجل البخارية هو النفط الخام ومشتقاته والغاز الطبيعي، ويتكون كل نوع من الوقود من مواد كيمياوية مختلفة منها الكربون والكبريت والهيدروجين والنتروجين والأملاح المعدنية والماء، غير أن الكربون والهيدروجين والكبريت هي العناصر التي تشترك في تفاعلات التأكسد الكيمياوية أي تحترق، أما قسم الوقود غير المحترق والمتألف من النتروجين والأملاح المعدنية والماء فيدعى الرضاض. أي إن كتلة الوقود المستخرجة من باطن الأرض لتقدم للاحتراق هي عبارة عن مجموع الكتل القابلة للاحتراق والرضاض[٣]. فعندما يحترق (1kg) من الكربون

احتراقاً كاملاً تنطلق كمية من الطاقة تعادل (32810kJ) وعند احتراق (1kg) من الهيدروجين تكون كمية الحرارة المنبعثة تساوي (12191kJ) أما احتراق (1kg) من الكبريت فيطلق كمية من الحرارة تساوي (9400kJ)، فالطاقة الحرارية الناتجة عن احتراق الوقود تستخدم عادة في توليد البخار المستخدم في إدارة العنفات البخارية ،أو تستخدم غازات الاحتراق في تدوير العنفات الغازية[٤].

وفي هذه الدراسة تم استخدام ثلاثة أنواع مختلفة من الوقود والتي يكثر استخدامها في المحطات الحرارية وخاصة في العراق وهي النفط الخام(النفط الأسود) (Crude Oil) وزيت الوقود الثقيل (Heavy Fuel Oil) والغاز الطبيعي (Natural Gas) بهدف البحث في تحسين عملية الاحتراق في المرجل عن طريق دراسة بعض المتغيرات التشغيلية وتأثير الاحتراق غير التام ونسبة الهواء إلى الوقود على كفاءة المرجل.

<u>الأساس النظري:</u>

١. حرارة الاحتراق:

الاحتراق هو أكسدة سريعة للوقود ينتج منه حرارة وضوء، وقد يكون الاحتراق مثالياً تاماً عندما لم يتبقى أي جزء من الوقود أو الأوكسجين في غازات العادم ، أو يكون احتراقاً تاماً غير مثالياً عندما يتبقى قسم من الأوكسجين في غازات العادم، أو يكون احتراقاً غير تاماً عندما تتخلف كمية من الوقود غير المحترق في غازات العادم. وهذا التصنيف يعتمد على أساس نظري وقد لا يحدث في الواقع في أحيان كثيرة إذ إن بعض جزيئات الأوكسجين تخرج مع غازات العادم دون أن تشارك في عملية أكسدة عناصر الوقود، وعند ذاك يتم الحصول على وقود غير محترق مع وجود أوكسجين في غازات العادم، ولذلك يتم ضخ كميات من هواء الاحتراق اكبر من الكمية النظرية المطلوبة للاحتراق بما يقارب(5-10%).

أما الظروف التي تتحكم بعملية الاحتراق فيمكن إجمالها بالاتي:

أ- تجهيز هواء الاحتراق بكمية كافية لضمان حدوث الاحتراق التام.

ب- إدخال الوقود إلى الفرن بشكل غازي، حيث أن تيارات الوقود السائل يمكن أن تطفئ مصدر الاحتراق وتتسبب في عدم استمراريته، ولذلك تستخدم طريقة الترذيذ (Atomization) لتحسين عملية الاحتراق حيث يتم تجزئة الوقود إلى قطرات دقيقة يسهل امتزاجها مع الهواء، ويستخدم في عملية الترذيذ البخار أو الهواء ويلاحظ إن الطاقة المفقودة في هذه العملية تكون اقل عندما يستخدم الهواء في الترذيذ[١].

ج- يجب أن تكون درجة حرارة المزيج المكون من الوقود والهواء مقاربة لدرجة حرارة الاتقاد.

د- يجب أن يتوفر كل من الوقت والاضطراب لحدوث تماس وثيق بين الهواء والوقود.

إن تحرر الطاقة الحرارية الناتجة من احتراق الوقود في الهواء احتراقا تاما تسمى حرارة الاحتراق أو القيمة الحرارية، وهي تساوي الفرق بين نواتج الاحتراق وطاقة المتفاعلات، ويمكن تمثيلها رياضيا بالاتي[٥]:

$$Q_c = h_{prod.} - h_{react.} \qquad \text{.....(1)}$$

at $T_o = 25^oC$, $P_o = 1_{atm.}$

حيث ان:

$h_{prod.}$: تمثل المحتوى الحراري النوعي للمتفاعلات في الوقود.

$h_{react.}$: تمثل المحتوى الحراري النوعي للنواتج في الاحتراق.

T_o , p_o : تمثل الظروف الجوية القياسية للضغط ودرجة الحرارة على التوالي.

وهي تمثل مجموع انثالبي المتفاعلات في الوقود مطروحا منه مجموع انثالبي نواتج الاحتراق، ويمكن أن تكون القيمة الحرارية للوقود عليا أو دنيا تبعا لظروف استخدام حرارة الاحتراق المتولدة، فمعادلة دالونك العملية (Dulong Equation) تستعمل لتحديد القيمة الحرارية العليا للوقود[٦]:

$$HHV=33960C+14421(H_2-O_2/8)+9400S \quad \text{.....(2)}$$

فعندما تستخدم حرارة الاحتراق بالكامل، أي إذا كانت نواتج احتراق عناصر الوقود القابلة للاشتعال هي CO_2 و SOX و H_2O الناتج من تبخر رطوبة الوقود واحتراق الهيدروجين الموجود في الوقود وبخار ترذيذ الوقود عند استخدام وقود سائل ثقيل، إن هذه النواتج عندما تبرد إلى الصفر المئوي تنطلق منها طاقة مقدارها(h_{fg})عند الضغط الجوي ودرجة حرارة (2442.3kJ/kg) وهي تمثل حرارة تكثف الرطوبة (25^oC) وهي تسمى بالقيمة الحرارية العليا للوقود (HHV)، أما إذا لم تتكاثف الأبخرة المائية الداخلة ضمن نواتج الاحتراق كما يحدث في المراجل البخارية فالحرارة الناتجة تسمى القيمة الحرارية الدنيا للوقود (LHV)[٧].

ويمكن تحديد القيمة الحرارية العليا للوقود من استخدام الوزن النوعي للوقود كما في المعادلة الآتية[٨]:

$$HHV= 1716- 793.8(S.G)^2 \quad \text{.....(3)}$$

أما القيمة الحرارية الدنيا للوقود يمكن تحديدها من خلال تحديد نسبة الهيدروجين ونسبة الرطوبة في الوقود، وكما في المعادلة الآتية[٨]:

$$H_2 = 26 - S.G \quad \text{.....(4)}$$

$$LHV = HHV - 2442.3(9H_2+w) \quad \text{.....(5)}$$

حيث أن :

HHV : تمثل القيمة الحرارية العليا للوقود.

LHV : تمثل القيمة الحرارية الدنيا للوقود.

S.G : يمثل الوزن النوعي للوقود.

H_2: تمثل النسبة المئوية للهيدروجين في الوقود بالوزن

w : تمثل نسبة الرطوبة في الوقود.

٢. معادلات الاحتراق:

لغرض موازنة عملية الاحتراق تؤخذ عناصر الوقود القابلة للاشتعال والمتمثلة بالكربون والهيدروجين والكبريت وتكتب معادلات تأكسدها مع الأوكسجين بالنسب المولارية أو الوزنية. ويمكن

أن يكون احتراق الوقود تاما أو غير تاماً تبعا لكمية الهواء المضافة للاحتراق، حيث أن كميـــة الهـــواء اللازمة لحرق الوقود احتراقا تاما من الناحية النظرية يمكن أن تعطى في المعادلة الآتية[٦]:

$$(A/F)sto. = 4.31[(8C/3) + 8H + S - O] \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(6)$$

حيث أن :

.(A/F)sto : نسبة خلط الهواء إلى الوقود الصحيحة(Stoichiometric).

C,H,S,O : تمثل النسب المؤية الوزنية للأوكسجين والكبريت والهيدروجين والكربـــون فـــي الوقود

أما النسبة المكافئة (ϕ) والمتمثلة بالعلاقة الآتية[٥]:

$$\phi = \frac{(A/F)stoichiometric}{(A/F)actual} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots (٧)$$

تستخدم عادة لبيان فيما إذا كان خليط الهواء والوقود غنيا أو ضعيفا أو صحيحا وكالاتي:

١= ϕ :خليط وقود صحيح أو معتاد (Stoichiometric) .

١< ϕ :خليط وقود غني (Rich).

١> ϕ :خليط وقود ضعيف (Weak)أو(Excess air).

ويفضل دائما أن تكون نسبة الخلط ضعيفة لضمان حصول احتراق تام.

٣. كفاءة المرجل:

يمكن حساب كفاءة المرجل إما بالطريقة المباشرة والتي تعتمد على القياسات المباشـــرة لكميـــات الحامل الحراري (البخار) وكمية ماء التغذية ومعدل تصريفه وكمية التغذية بالوقود، أو بالطريقة غيـــر المباشرة والتي تسمى طريقة الموازنة العكسية والتي تعتمد على حساب خسائر عملية الاحتـــراق التـــي تتطلب معرفة التحليل الكيميائي للوقود وغازات العادم[٦].

وفي هذه الدراسة اعتمدت طريقة الموازنة العكسية لحساب كفاءة المرجل.

٤. النموذج الحسابي:

لحساب كفاءة المرجل يتطلب إيجاد نسبة الهواء إلى الوقود (A/F) ويتم ذلك عن طريق حـــرق مكونات الوقود وإيجاد نسبة الأوكسجين، وبالتالي كمية الهواء اللازم لحرق عنصر من عناصر الوقود. وفي النموذج الحسابي تم استعمال الغاز الطبيعي كوقود للمرجل والمبينة النسب الوزنية لمكوناته وقيمه الحرارية في الجدول رقم (١).

ولحساب نسبة الهواء إلى الوقود كالآتي[٩]:

- **احتراق الكربون:**

$$C + O_2 \longrightarrow CO_2 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots(8)$$

$$12kg + 32kg \longrightarrow 44kg$$

$$1kg + 32/12kg \longrightarrow 44/12kg$$

$1*0.7791+ 2.667*0.7791 \longrightarrow 3.667*0.7791$

أي إن كمية الأوكسجين اللازم لحرق 1kg من الكربون هي:

$O_2 = 2.667*0.7791= 2.078kg$

- **احتراق الهيدروجين:**

$H_2 + (1/2)O_2 \longrightarrow H_2O$ .....(9)

$2kg + 16kg \longrightarrow 18kg$

$1kg + 8k \longrightarrow 9kg$

$1*0.2209 + 8*0.2209 \longrightarrow 9*0.2209$

أي إن كمية الأوكسجين اللازم لحرق 1kg من الهيدروجين هي:

$O_2 = 8*0.2209 = 1.7672kg$

- **أما نسبة الكبريت فهي (0%) لذلك لم يدخل في الحسابات.**

إذن كمية الأوكسجين الكلية هي:

$O_{2\ total} = 2.0781+17672 = 3.85 kg/kg_{fuel}$

أما كمية الهواء الكلية فهي:

$Air = (1/0.233)*3.85 = 16.5\ kg/kg_{fuel}$

حيث أن (0.233):هي النسبة الوزنية للأوكسجين في الهواء.

وبهذا فان نسبة الهواء إلى الوقود هي: A/F)sto.= 16.5

كما يمكن إيجاد نسبة الهواء إلى الوقود مباشرة من العلاقة رقم (٦)، وهذه النسبة هي النسبة الصحيحة، أما النسبة الحقيقية المستعملة فقد تكون مساوية لهذه النسبة أو اكبر أو اصغر منها اعتمادا على قيمة النسبة المكافئة (ϕ)، ومن حساب هذه النسبة يمكن إيجاد جميع الخسائر الحرارية والإضافات الحرارية الداخلة إلى المرجل وبالتالي حساب كفاءة المرجل باستخدام المتغيرات المبينة في الجدول رقم (٢) كفرضيات مقاربة للواقع في اغلب الأحيان.

<u>الخسائر والإضافات الحرارية:</u>

أ- اعتبار القيمة الصحيحة لنسبة الهواء إلى 1kg من الوقود: A/F) sto.= 16.5

أولا: الخسائر الحرارية وحساباتها:

١. الخسائر الحرارية الناتجة بسبب تكون غازات العادم الجافة:

تكون درجة حرارة العادم بين ($110\text{-}165^oC$)حينما تغادر المرجل لذا فهي تحمل معها (4-8%) من الحرارة الكلية الناتجة من احتراق الوقود وتدعى هذه الخسائر بخسائر غازات العادم، ويمكن حسابها من العلاقة الآتية[١٠]:

$L_{dg} = \dot{m}_{dg} * Cp_{dg} * (T_{dg} - T_a)$ .....(10)

$\dot{m}_{dg} = (\dot{m}_a + \dot{m}_f) - H_2O(\text{in flue gasses})$

$\dot{m}_f$ = 1kg/sec.

ونسبة بخار الماء في غازات العادم(H_2O(in flue gasses يتم إيجادها من معادلـــة احتـــراق الهيدروجين (٩).

H_2O = 9*0.2209 = 1.9881kg/sec.

$\dot{m}_{dg}$ =(16.5 + 1) – 1.9881 = 15.5kg/sec.

L_{dg} = 15.5 * 1.005 *(165 – 35) = 2026.6 kJ/kg

حيث ان:

L_{dg}: الحرارة المفقودة بواسطة غازات العادم الجافة الخارجة الى المدخنة.

Cp_{dg} : الحرارة النوعية لغازات العادم.

$\dot{m}_a$: معدل الجريان الكتلي للهواء.

$\dot{m}_f$: معدل الجريان الكتلي للوقود.

٢. الخسائر الحرارية الناتجة بسبب تكون الرطوبة عند احتراق الهيدروجين في الوقود:

$L_h = 8.93 * H_2*(h_v - h_{sv})$ .....(11)

$L_h = 8.93 * 0.2209*470 = 927.76$ kJ/kg

حيث ان:

L_h: الحرارة المفقودة نتيجة تكون بخار الماء عند احتراق الهيدروجين.

h_v : المحتوى الحراري النوعي عند درجة حرارة خروج غازات العادم.

h_{sv} : المحتوى الحراري النوعي عند درجة حرارة الهواء الجوي.

٣. الخسائر الحرارية الناتجة بسبب الرطوبة في الهواء الداخل للاحتراق:

$L_{ma} = \dot{m}_a * w_a* (h_v - h_{sv})$ .....(12)

$L_{ma} = 16.5 * 0.012 * 470 = 93.06$ kJ/kg

حيث ان:

L_{ma}: الحرارة المفقودة بسبب الرطوبة الموجودة في الهواء.

wa: نسبة الرطوبة في الهواء الداخل الى المسخنات.

٤. الخسائر الحرارية الناتجة بسبب الإشعاع والخسائر غير المقاسة:

$\log_{10} L_R = 0.8167 - 0.4238 \log_{10} C_b$ .....(13)

$\log_{10} L_R = 0.8167 - 0.4238 \log_{10}(198)$

L_R = o.697 kJ/kg

حيث ان:

L_R : تمثل الخسائر الحرارية المفقودة بسبب الاشعاع والخسائر غير المقاسة.

C_b : السعة النوعية للمرجل.

٥. الخسائر الحرارية الناتجة بسبب تكون اول اوكسيد الكربون (نتيجة الاحتراق غير التام):

$L_{co} = \dot{m}_{co}\ (33.9 - 10.1)*10^3$ kJ/kg ……...(14)

حيث ان:

L_{co}: الخسائرالحرارية المفقودة بسبب الاحتراق غير التام وتكون غاز CO .

33.9kJ/kg : مقدار الحرارة المتحررة عند احتراق C الىCO_2

10.1kJ/kg : مقدار الحرارة المتحررة عند احتراق C الى CO

$\dot{m}_{co}$: معدل الكتلي لغاز أول اوكسيد الكربون

وبما إن الاحتراق تام فان : L_{co} = zero

٦. الخسائر الحرارية المفقودة بسبب بخار ترذيذ الوقود:

$L_{ats} = \dot{m}_{ats} * (h_v - h_{sv})$ ……(15)

$L_{ats} = 0.018 * 470 = 8.46$ kJ/kg

حيث ان:

L_{ats} : الخسائر الحرارية المفقودة بسبب بخار ترذيذ الوقود.

$\dot{m}_{ats}$: معدل الجريان الكتلي للبخار اللازم لترذيذ الوقود.

ثانيا: الإضافات الحرارية الداخلة إلى المرجل:

١. الطاقة الحرارية المكتسبة من طاقة الهواء المحسوسة:

$B_a = \dot{m}_a * Cp_a*(T_{a1} - T_a)$ ……..(16)

$B_a = 165.8$ kJ/kg

حيث ان:

B_a: كمية الطاقة الحرارية المضافة من الطاقة المحسوسة الهواء الداخل الى مسخنات الهواء.

Cp_a: معدل الحرارة النوعية للهواء.

T_{a1}: درجة حرارة الهواء الخارج من مسخنات الهواء.

T_a: درجة حرارة الهواء الداخل.

٢. الطاقة الحرارية المكتسبة من الطاقة الحرارية المحسوسة للوقود:

$B_f = Cp_f*(T_f - T_a)$ ……..(17)

$B_f = 10.02$ kJ/kg

حيث ان:

B_f:كمية الحرارة المضافة بسبب حرارة الوقود المحسوسة.

Cp_f: معدل الحرارة النوعية للوقود.

T_f: درجة حرارة الوقود الداخل للاشتعال.

T_a: درجة حرارة الهواء.

٣. الطاقة الحرارية المكتسبة من طاقة محرك تدوير الغازات:

$$B_{xe} = \frac{860 * \eta_{fan} * PGR}{100 * \dot{m}_f} \quad \text{.....(18)}$$

$B_{xe} = 35935.7$ kJ/kg

حيث ان:

B_{xe}: كمية الحرارة المصروفة بواسطة محرك مروحة تدوير غازات العادم.

PGR : القدرة المصروفة لتشغيل مروحة تدوير غازات العادم.

η_{fan}: تمثل كفاءة المروحة وتساوي ٩٠%.

٤. الطاقة الحرارية المكتسبة نتيجة رطوبة الهواء:

$$B_{ma} = \dot{m}_a * w_a * Cp_s * (T_{a1} - T_a) \quad \text{.....(19)}$$

$B_{ma} = 3.72$ kJ/kg

حيث ان:

B_{ma}: كمية الحرارة المضافة بسبب رطوبة الهواء.

Cp_s: معدل الحرارة النوعية للرطوبة الموجودة في الهواء.

ثالثا: كفاءة المرجل:

١. مجموع الإضافات الحرارية

$$\sum B = B_a + B_f + B_{xe} + B_{ma} = 36115.2 \text{ kJ/kg}$$

٢. مجموع الخسائر الحرارية

$$\sum L = L_{dg} + L_h + L_{ma} + L_R + L_{co} + L_{ats} = 3056.57 \text{ kJ/kg}$$

٣. إيجاد الكفاءة

$$\eta_b = \frac{LHV + \sum B + \sum L}{LHV + \sum B} * 100\% \quad \text{.....(20)}$$

$\eta_b = 96.4\%$

ب- اعتبار القيمة الحقيقية لنسبة الهواء إلى(1kg) من الوقود،وذلك بأخذ نسبة (20%) هواء زائد:

$A/F)_{act.} = A/F)_{sto.} + 20\% * A/F)_{sto.}$

$A/F)_{act.} = 16.5 + 0.2 * 16.5 = 19.8 = m_a$

يتم إيجاد مجموع الخسائر والإضافات الحرارية من العلاقات السابقة باعتماد نسبة الهواء إلى الوقود لتكون كفاءة المرجل:

$\eta_b = 95.86\%$

ج- اعتبار استخدام نسبة الهواء إلى الوقود بكمية اقل من الكمية الصحيحة اللازمة للاحتراق الكامل بنسبة (20%) (احتراق غير تام):

$A/F)_{act.} = A/F)_{sto.} - 20\% * A/F)_{sto.}$

$A/F)_{act.} = 16.5 - 0.2 * 16.5 = 13.2 = m_a$

ومن إيجاد مجموع الخسائر والإضافات الحرارية في المرجل باعتماد نسبة الهواء إلى الوقود يمكن حساب كفاءة المرجل لتكون:

$\eta_b = 58\%$

النتائج والمناقشة:

العديد من العوامل تؤثر على كفاءة المرجل البخاري منها نوع الوقود المستعمل وكمية ودرجة حرارة كل من الهواء والوقود الداخل إلى المرجل وحمله وطريقة حقن الوقود وغيرها، ومن دراسة هذه العوامل يمكن التوصل إلى الحالة المثالية لتكون كفاءة المرجل بحدها الأعلى.

وفي هذه الدراسة تم تناول عاملين من هذه العوامل وهما نوع الوقود ونسبة الهواء إلى الوقود،إذ تم حساب الخسائر والإضافات الحرارية ومكونات الغازات العادمة وكفاءة المرجل لثلاثة أنواع من الوقود ولكميات مختلفة من هواء الخلط ، فتبين من خلال الشكل(١) إن أعلى كفاءة يمكن الحصول عليها لجميع اتواع الوقود تحدث عندما تكون النسبة المكافئة بالقرب من ($\phi = 1$) أي عندما تكون نسبة الهواء الزائد تساوي صفرا وذلك لان الهواء الزائد يخرج من المرجل دون أن يشارك في عملية الاحتراق حاملا معه كمية من الحرارة إلى الخارج وهي تؤدي إلى زيادة الخسائر الحرارية ومن ثم نقصان الكفاءة،كما إن تجهيز الهواء بكمية اقل يؤدي إلى نقصان في الكفاءة لعدم حصول احتراق تام حيث أن الحرارة الناتجة من الاحتراق ستقل لوجود جزيئات من الوقود لم تحترق لعدم وجود المؤكسد ووجود ظاهرة التفكك، وعمليا تجهز كمية من الهواء إلى المرجل بنسبة هواء زائد (10-20%) لضمان حدوث احتراق تام والحصول على قيمة عالية للكفاءة. أما عند دراسة تأثير نسبة الهواء إلى الوقود يلاحظ في الشكل(٢) الذي يبين النسبة الحجمية للأوكسجين في غازات العادم الجافة لأنواع مختلفة من الوقود إن الأوكسجين نظريا لايوجد في نواتج الاحتراق إلا في حالة الخلط الضعيف، حيث يكون هناك كمية فائضة من الأوكسجين تزيد عن حاجة الوقود لذلك يظهر بشكل حر في نواتج الاحتراق، أما عمليا فانه يوجد اثر للأوكسجين في منطقتي الخلط الغني والصحيح وهذا يعود إلى مدى الاضطراب الذي يحصل للخليط أثناء عملية الاحتراق والزمن المستغرق لذلك، فقد لا تلتقي جزيئة الأوكسجين بجزيئة الوقود ليحصل التأكسد مع وجود الاثنين في الخليط، فتحسن ظروف الاضطراب يرفع من قيمة كفاءة المرجل ولكافة أنواع الوقود.

يلاحظ عند استخدام الغاز الطبيعي إن تركيز CO يصبح صفرا عند نسبة هواء إلى وقود تساوي A/F=16.5 ، أما في حالة استخدام النفط الخام(النفط الاسود) فان غاز CO يختفي عند A/F=14.2 ، وعند استخدام زيت الوقود الثقيل فان تركيز غاز CO يكون صفرا عند A/F=13.4 ،كما يبين ذلك

الشكل(٣). وان نسبة CO في أعلى حد لها عندما تكون نسبة خلط الهواء والوقود (20%-) كما مبين في الجدول رقم (٣) وهو ما يوضح عدم توفر الأوكسجين لحرق كل الكربون في الوقود احتراقا تاما.

ومن الشكل(٤) الذي يوضح العلاقة بين تغير النسب الحجمية لغاز CO_2 في غازات العادم الجافة مع نسبة الخلط نلاحظ إن اكبر نسبة انبعاث لغاز CO_2 تكون عند نسبة الخلط الصحيحة، وتقل في الجانب الغني للخليط بسبب عدم احتراق جميع جزيئات الكربون احتراقا تاما فيتولد بذلك غاز CO ، أما غاز CO_2 فيقتصر تكونه على جزيئات الكربون المحترقة احتراقا تاما، كما تقل النسبة الحجمية لغاز CO_2 في الجانب الفقير للخليط بسبب زيادة الأوكسجين في نواتج الاحتراق،وكما مبينه النتائج في الجدول رقم(٣) الذي يوضح النسب الحجمية لمكونات العادم عند نسب خلط مختلفة للهواء والوقود ولأنواع الوقود الثلاثة.

أما الشكل(٥) الذي يبين تغير النسب الحجمية لمكونات العادم الجافة مع النسبة المكافئة عند استخدام زيت الوقود الثقيل نلاحظ زيادة نسبة SO_2 عند الاقتراب من الجانب الغني للخليط وذلك ناتج عن افتراض احتراق كمية الكبريت كاملة إلى ثاني اوكسيد الكبريت سواء كان هناك نقص في الهواء أو زيادة ، وهذه الفرضية مقبولة أذا ما نظرنا إلى نسبة الكبريت القليلة في مكونات الوقود أي إن (حجم SO_2 إلى حجم نواتج العادم الكلية) يزداد عند الاحتراق غير التام لصغر حجم نواتج الاحتراق .

أما الشكل(٦) فيبين تغير نسب مكونات العادم الرطبة مع النسبة المكافئة لزيت الوقود الثقيل إذ يلاحظ إن نسبة بخار الماء الناتج تزداد عند الاقتراب من الاحتراق غير التام حيث تسجل أعلى قيمة لها (تقريبا 13% كنسبة حجمية) عند ($\phi = 1.25$) وهذا يعزى إلى إن حجم نواتج الاحتراق غير التام يكون صغيرا مقارنة إلى حجمها عند الاحتراق التام وبذلك تكون نسبة بخار الماء أعلى في الاحتراق غير التام .

من ذلك نستنتج إن كفاءة المرجل تزداد كلما اقتربت نسبة الهواء إلى الوقود (A/F) من النسبة النظرية، فتتأثر الكفاءة بنوع الوقود، إذ انه عند حرق الوقود الغازي تنخفض كفاءة المرجل بحدود (1.5%) عند ظروف التشغيل المعتمدة عند المقارنة بحرق الوقود السائل، إلا إن الأول يفضل استخدامه لعدم وجود حاجة إلى تخزينه وتسخينه إضافة لعدم تركه سناج على السطوح الداخلية للأنابيب فضلاً عن طرح المرجل إلى كميات اقل من الملوثات البيئية.

جدول (١): يوضح مواصفات الوقود والقيمة الحرارية لأنواعه الثلاث [١١]

الوقود	النفط الخام (الاسود)	الغاز الطبيعي	زيت الوقود الثقيل
الكربون%	84.34	77.091	82.7
الهيدروجين%	12.59	22.09	10.8
الكبريت%	3.5	2	3.5
النتروجين%	0.12	.	0.15
الاوكسجين%	0.943	.	0.2
رماد%	1	0.05	1
الكربون المتبقي%	8	٦,١	8.5
القيمة الحرارية العليا kJ/kg	44900	53304	42121
القيمة الحرارية الدنيا kJ/kg	42177	48439	39871

جدول (٢): يوضح درجة حرارة الهواء والوقود والحرارة النوعية لأنواع الوقود الثلاثة

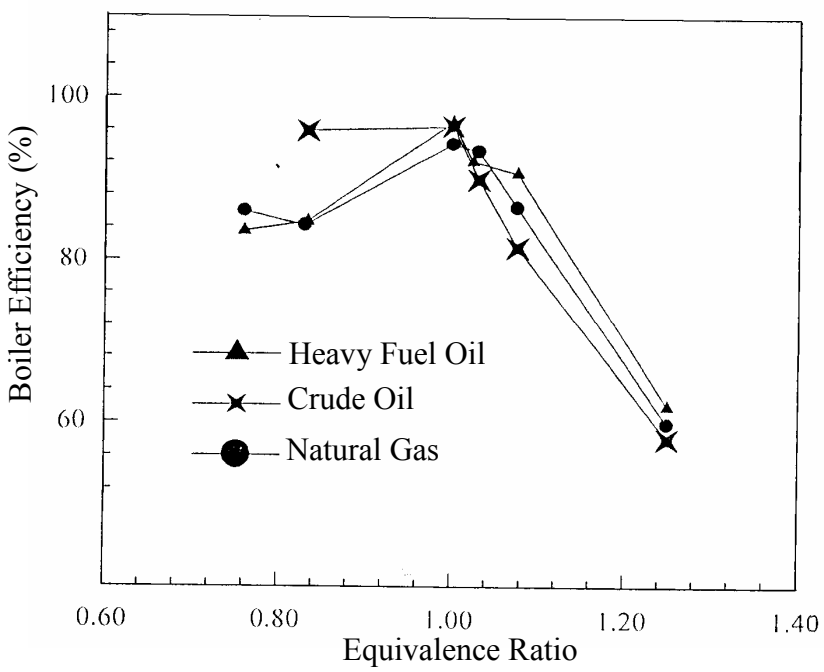
الكمية	الرمز	القيمة
درجة حرارة الغازات العادمة	T_{ex}	165^oC
درجة حرارة الهواء الداخل إلى المسخن	T_a	25^oC
درجة حرارة الهواء الخارج من المسخن	T_{a1}	35^oC
درجة حرارة الوقود الداخل: ١. زيت الوقود الثقيل ٢. النفط الخام(الاسود) ٣. الغاز الطبيعي	T_f	80^oC $40\ ^oC$ $30\ ^oC$
الحرارة النوعية لغازات العادم	Cp_{dg}	$1.005\ kJ/kg.^ok$
الحرارة النوعية لزيت الوقود الثقيل	Cp_f	$1.715\ kJ/kg.^ok$
الحرارة النوعية للنفط الخام(الاسود)	Cp_f	$1.987\ kJ/kg.^ok$
الحرارة النوعية للغاز الطبيعي	Cp_f	$2.004\ kJ/kg.^ok$
متوسط الحرارة للرطوبة الموجودة في الهواء	Cp_s	$1.88\ kJ/kg.^ok$
التغير بين انثالبي البخار عند درجة حرارة غازات العادم وانثالبي البخار عند درجة حرارة دخول الهواء	(h_v-h_{sv})	$470\ kJ/kg$
المحتوى الرطوبي للهواء الداخل	w	$0.012\ kg/kg._{air}$
كتلة بخار الترذيذ لكل 1kg من الوقود	m_{ats}	$0.018\ kg/kg_f$
المعدل الكتلي لتدفق الوقود	$\dot{m}_f$	$14\ kg/s$
السعة النوعية للمرجل	C_b	$195\ kg/s$
قدرة محرك مروحة تدوير الغازات	PGR	$650\ kw$

جدول رقم{3}: يوضح النسب الحجمية لمكونات العادم الجافة والرطبة ولنسب هواء زائد مختلفة (زيت الوقود الثقيل)

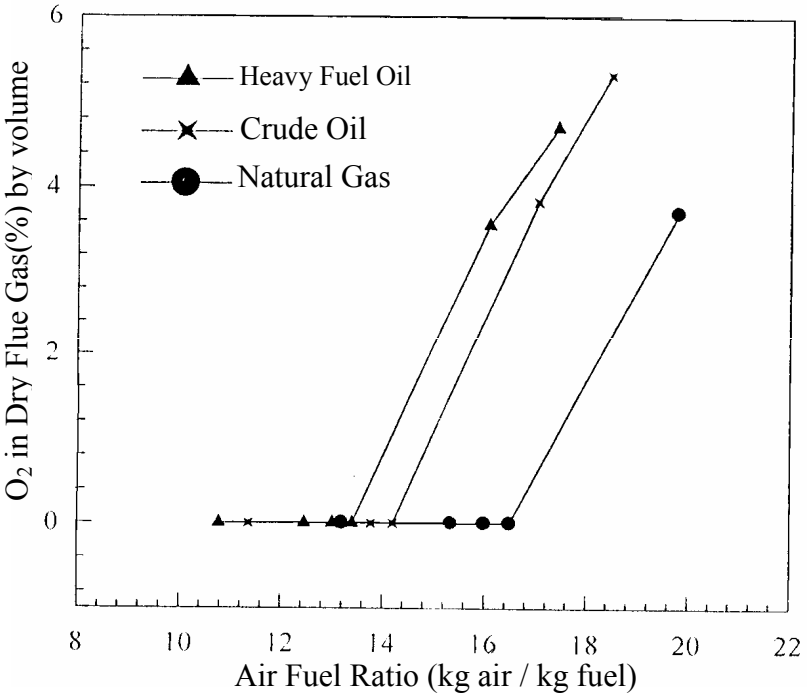
النسب الحجمية لمكونات العادم الرطبة						النسب الحجمية لمكونات العادم الجافة								
H_2O	SO_2	N_2	O_2	CO_2	CO	SO_2	N_2	O_2	CO_2	CO	الكفاءة %	نسبة الهواء الزائد %	A/F	ϕ
9.93	0.35	77	0	12.64	0	0.39	85.5	0	14	0	96.96	0	13.4	1
9.3	0.33	75.3	3.2	11.85	0	0.36	83	3.56	13.06	0	84.7	20	16.08	0.833
8.6	0.303	75.5	4.3	11.12	0	0.3	82.7	4.7	12.1	0	83.5	30	17.42	1.3
12.94	0.456	70.04	0	8.69	7.845	0.524	80.47	0	10	0	62	-20	10.78	1.25
11.64	0.4	73	0	13.24	1.6	0.46	82.7	0	14.98	1.82	90.6	-7	12.46	1.075
11.24	0.39	73.9	0	13.22	1.163	0.447	83.3	0	14.9	1.3105	92	-3	13.01	1.023

جدول رقم{3}: يوضح النسب الحجمية لمكونات العادم الجافة والرطبة ولنسب هواء زائد مختلفة (الغاز الطبيعي)

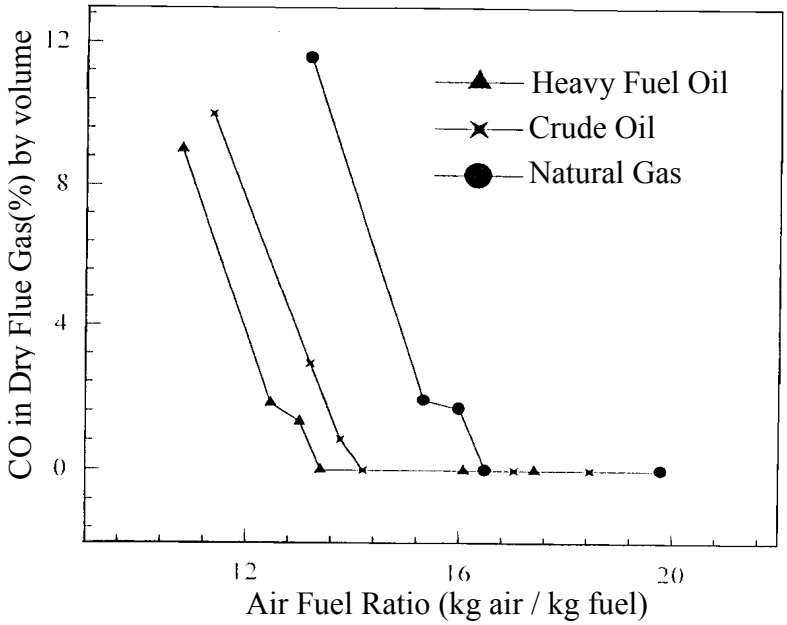
النسب الحجمية لمكونات العادم الرطبة						النسب الحجمية لمكونات العادم الجافة								
H_2O	SO_2	N_2	O_2	CO_2	CO	SO_2	N_2	O_2	CO_2	CO	الكفاءة %	نسبة الهواء الزائد %	A/F	ϕ
17.67	0	71.9	0	10.38	0	0	87.38	0	12.6	0	96.4	0	16.5	1
14.69	0	73.08	3.15	8.79	0	0	85.95	3.7	10.34	0	95.86	20	19.8	0.833
20.65	0	67.21	0	2.97	9.162	0	84.7	0	3.74	11.54	58	-20	13.2	1.25
18.68	0	70.33	0	7.75	3.22	0	86.5	0	9.53	1.905	81.55	-7	15.3	1.075
18.072	0	71.31	0	9.245	1.37	0	87.04	0	11.28	1.677	89.8	-3	16	1.03



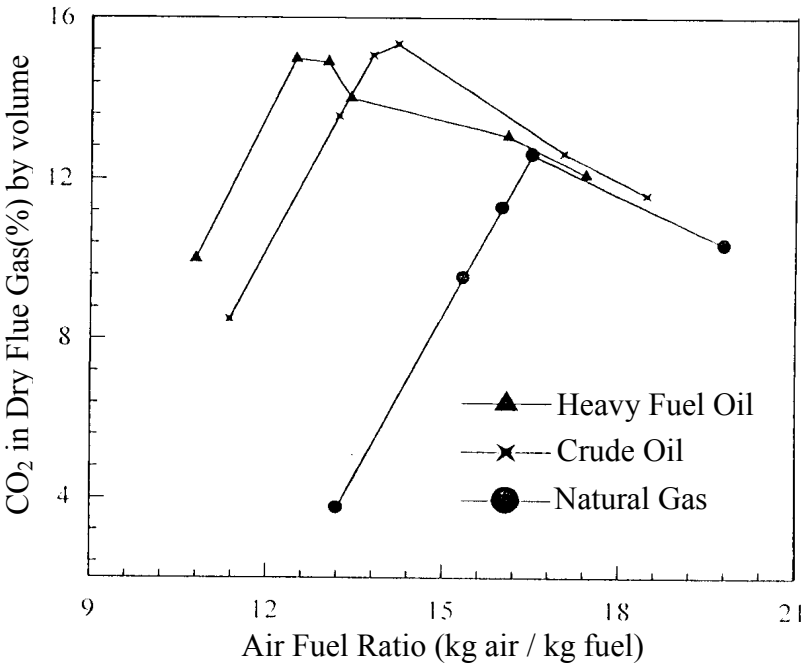
شكل (١): يوضح العلاقة بين كفاءة المرجل والنسبة المكافئة(Φ)



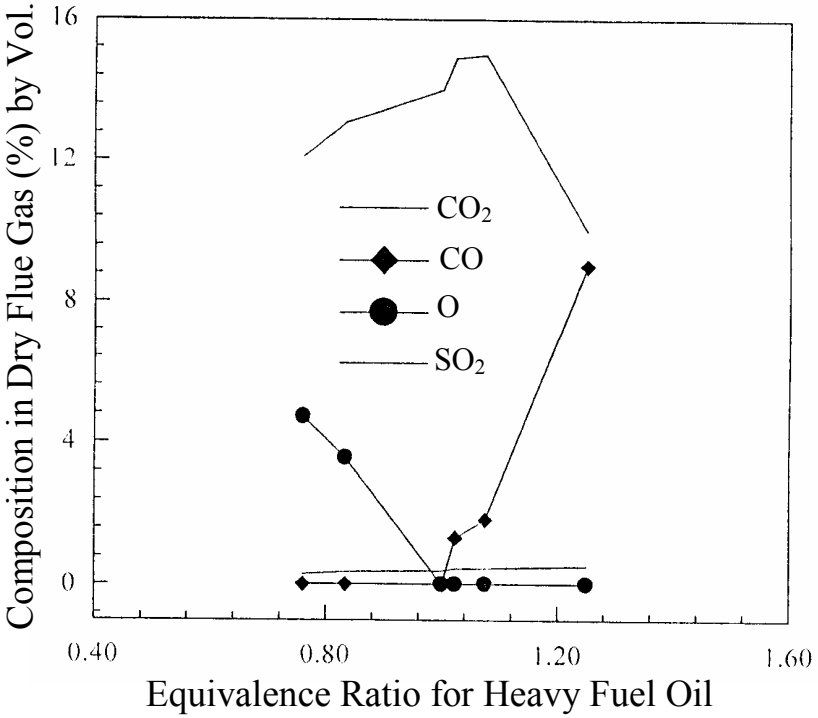
شكل(٢): يوضح العلاقة بين النسبة الحجمية لغاز (O_2) في غازات العادم الجافة ونسبة الهواء إلى الوقود



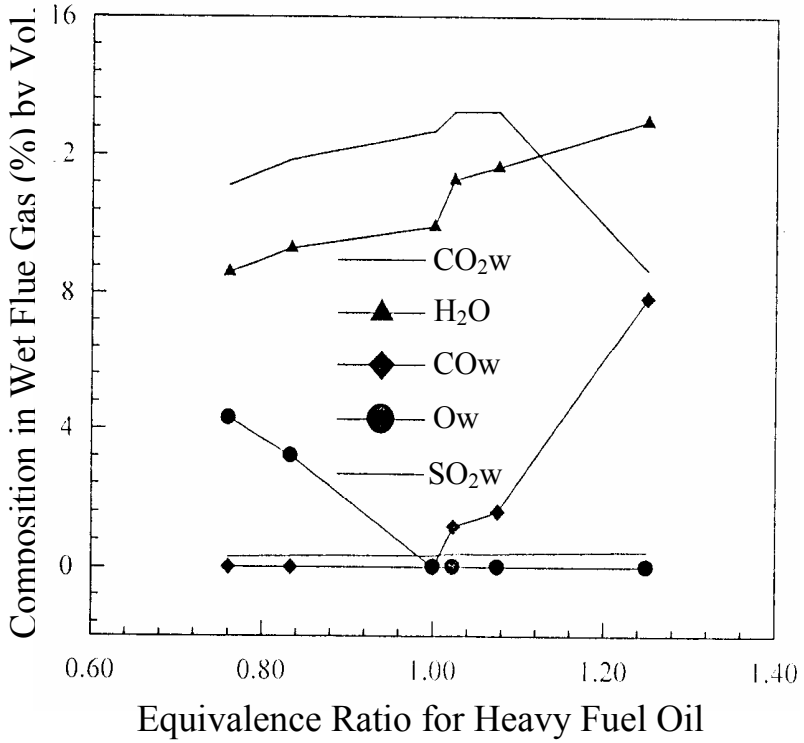
شكل (٣): يوضح العلاقة بين النسبة الحجمية لغاز (CO) في غازات العادم الجافة ونسبة الهواء إلى الوقود



شكل (٤): يوضح العلاقة بين النسبة الحجمية لغاز (CO_2) في غازات العادم الجافة ونسبة الهواء إلى الوقود



شكل (٥): يوضح تغير نسب مكونات العادم الجافة مع النسبة المكافئة لزيت الوقود الثقيل



شكل (٦): يوضح تغير نسب مكونات العادم الرطبة مع النسبة المكافئة لزيت الوقود الثقيل

المصادر:

١. جبالي، د.جابر شنشول "*تكنولوجيا الوقود*" ، مديرية دار النشر، الموصل ، ١٩٨١ .

٢. تاج الدين ضياء "*محطات توليد الطاقة واقتصادياتها*" ، جامعة حلب، دمشق، ١٩٨٠ .

3. Shvets.T.I., Tolbinsky, I.V., Kirakovsky. F.V,Neduzhy A.I.Sheudko. O.M.I." *Heat Engineering*",MIR publishers Moscow,1975.
4. Sonntag,Borgnakke,Van Willey,"*Fundamentals of thermodynamics*",fifth Edition,Joho Willey and Sons,Inc.,1998.
5. Turns.R.S.,"*An Introduction to combustion*",concepts and applications,Mc Graw-Hill International Edition,1996.
6. Gill,A.,"*power plant performance*",PRG,Graphics ltd,London,1984.
7. Merle.C.Potter, Criqing,W.Somerton,"*Engineering Thermodynamics*",1996.
8. Morse,F.T,"*Power Plant Engineering*", affiliated east-west press.pvt.ltd,New Delhi,1975.
9. John, R.. ,Howell, Richard ,O., Buckius, "*fundamentals of engineering thermodyuamies*" ,Second Edition .1992
10. Power Test codes ptc .4.1, Steam Generating Units , 1964.

١١. "دليل المواصفات التسويقية العامة للمنتجات النفطية العراقية "، وزارة النفط ، شركة سـومر للطباعـة ،بغداد ،العراق. لسنة ١٩٩١ .