

## تحسين كفاءة مراجل أنابيب اللهب من خلال تحديد نسبة الهواء الزائد الأمثل

الدكتور حبيب محمود \*

(تاريخ الإيداع 18 / 4 / 2010. قُبل للنشر في 17 / 6 / 2010)

### □ ملخص □

في ظل الطلب العالمي المتزايد على الطاقة وارتفاع أسعار النفط أصبحت عمليات الحد من الهدر وتوفير الطاقة من خلال تحسين كفاءة مراجل البخار حاجة ملحة وضرورية، ومن الإجراءات المتبعة في تحسين كفاءة المراجل البحث عن النسبة المثلى للهواء الزائد، ولتحديد هذه النسبة ينبغي إجراء قياسات على أرض الواقع وفقاً لظروف تشغيل كل مرجل. ولهذا تم إنجاز عدد من الاختبارات على مرجلين من مراجل أنابيب اللهب أحدهما قديم والآخر حديث، وذلك بهدف إقلال مستوى الهواء الزائد إلى الحدود الدنيا مع المحافظة على الاحتراق كاملاً. وقد تم إنقاص الهواء الزائد من 79.5% إلى 36.3% للمرجل القديم، مما أدى إلى زيادة الكفاءة من 81.6% إلى 84.4%، وبالنسبة إلى المرجل الحديث فقد تم إنقاص الهواء من 46.7% إلى 33.3% وزيادة الكفاءة من 82.9% إلى 84.4% مع ازدياد طفيف بنسبة أكاسيد النيتروجين  $NO_x$  المنبعثة. وهذا سيؤدي إلى توفير بالليرات السورية بمقداره 983920 ل. س. في السنة، وذلك حسب استهلاك الوقود السنوي للمرجلين.

**الكلمات المفتاحية:** كفاءة المرجل، نسبة الهواء الزائد الأمثل، الانبعاثات الغازية.

\* أستاذ مساعد - قسم هندسة القوى الميكانيكية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

## Fire Tube Boiler Efficiency Improvement Through Determining The Optimum Excess Air Ratio

Dr. Habib Mahmoud\*

(Received 18 / 4 / 2010. Accepted 17 / 6 / 2010)

### □ ABSTRACT □

With the ever increasing world need for the power and high cost of fuel, the losses reducing and saving processes became very important through improving the boiler efficiency and determining optimum excess air ratio in real-time by performing measurements according to each boiler operation conditions. Therefore, a number of tests are performed on two boilers of fire tube boilers type, one of them is old and the other is modern to reduce the level of excess air to minimum term with maintaining complete combustion. The ratio of excess air has been reduced from 79.5 % to 36.3% for old boiler and its efficiency increased from 81.6 % to 84.4%. Also, for modern boiler the excess air has been reduced from 46.7 % to 33.3 % and the efficiency increased from 82.9% to 84.4% with little increased of nitrogen oxides  $NO_x$  concentration of tow boilers. Also, the boiler efficiency improvements will allow earning 983920 S.P. in the year according to fuel consumption of tow boilers.

**Keywords:** Boiler efficiency, Optimum excess-air Ratio, Gaseous emission.

---

\*Associate professor, Mechanical Power Engineering Department, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

**مقدمة:**

تؤمن المراحل الحاجة من البخار اللازمة للأغراض الصناعية والاستهلاكية المختلفة، ويوجد في القطر العربي السوري عدد كبير من مراحل أنابيب اللهب المستخدمة لإنتاج البخار سواء في الشركات الصناعية أو في محطات توليد الطاقة، ومن هذه المراحل ما يزيد عمرها على عشرات السنين، وقد أصبحت كفاءتها بالمقارنة مع كفاءة المراحل الحديثة المتوفرة عالمياً متدنية جداً، لذا أصبح من المزم على هذه الشركات تطوير هذه المراحل من خلال إقلال الملوثات المنبعثة منها وزيادة كفاءتها لتصبح أكثر عصرية وأكثر اقتصادية [1-2].

هنالك الكثير من الأبحاث التي تناولت موضوع تقليل الضياعات لتحسين كفاءة المراحل واعتمدت في تحديد هذه الضياعات على التحليل الأكسيري [3-5]. وقد استخدمت هذه الطريقة في الكثير من أجهزة توليد البخار والمنشآت الصناعية ذات الصلة بتوليد الكهرباء مثل التوربينات الغازية [6]، أيضاً تم تناول التأثير البيئي لهذه الأجهزة من قبل عدد كبير من الباحثين [7]. إذ يوجد نوع من الموازنة ما بين انبعاثات أكاسيد النيتروجين من جهة وأول أكسيد الكربون والهيدروكربونات غير المحترقة من جهة أخرى، حيث ينتج إنقاص الهواء الزائد زيادة الانبعاث من المواد غير المحترقة (CO, HC) لذا يتطلب استخدام هذا الأسلوب عناية فائقة، بحيث لا تصبح الضياعات الناتجة بسبب عدم اكتمال الاحتراق عالية جداً [8-11].

بحسب تقرير المنظمة الأمريكية EPA لتوفير الطاقة والحفاظ على البيئة، فإن كمية الهواء الزائد المعيارية بشكل عام واللازمة للحصول على احتراق كامل للوقود السائل الثقيل هي 20% [12]. ولكن لسوء الحظ فإن معظم المراحل تعمل عند نسب هواء زائد أعلى بكثير من هذه النسبة، وهذا يسبب تخفيف نواتج الاحتراق وتخفيض درجة حرارتها وزيادة معدل تدفق الغازات. كما أن نسبة الهواء الزائد المثلى مرتبطة بمجموعة من المتحولات التي يجب استقصاؤها مباشرة على أرض الواقع مثل، نوع الحراق وتركيب الوقود ونوعه ودرجة حرارة الوسط المحيط وبرنامج الصيانة المعتمد وغيرها من العوامل التي تؤثر تأثيراً كبيراً على كمية الهواء الزائد.

معظم الطرائق المقترحة في الأدبيات العلمية لتحسين كفاءة مراحل أنابيب اللهب تعتمد على تحسين عملية الاحتراق والتبادل الحراري من خلال التوزيع الجيد لهواء الاحتراق قبل مغادرته المدخنة، وهذه الطرائق تتطلب إضافة مكونات وإدخال تعديلات ذات كلفة كبيرة على المراحل القديمة، مما يرفع من كلفة إنتاج البخار فيها ويقلل من نسبة التوفير في الاستهلاك بسبب زيادة الكلف التأسيسية.

**أهمية البحث وأهدافه:**

إن التأثير البيئي للغازات المنبعثة من مراحل توليد البخار، وكذلك الضياعات الحرارية المرافقة لهذه الغازات تؤدي إلى نتائج غير مرغوبة سواء على الكائنات الحية أو على الاقتصاد الوطني، وخاصة في ظل ارتفاع أسعار المواد النفطية. لذلك نسعى من خلال هذا البحث إلى تحسين كفاءة هذه المراحل وإقلال الملوثات المنبعثة منها من خلال تحديد كمية الهواء الزائد المثلى، التي لا يمكن تحديدها إلا اعتماداً على ظروف تشغيل كل مرجل على حدة، كما أن تطبيق طريقة إقلال هواء الاحتراق مع المحافظة على الاحتراق الكامل للوقود لا يتطلب تعديلات وإضافات كبيرة على المراحل القديمة الموجودة قيد الاستخدام.

## طرائق البحث و مواده:

يبدأ البحث بمقدمة عامة عن مراحل أنابيب اللهب المنتشرة في الصناعة ونسب الضياعات وطرائق تحديدها من خلال استعراض عدد من الأبحاث التي أجريت في هذا المجال. ومن ثم يتناول طريقة إجراء القياس التي تمت بشكل مباشر على أرض الواقع وعلى مرجلين من مراحل الشركة العامة للنسيج في مدينة اللاذقية، ومن ثم يعرض النتائج التي تم التوصل إليها في أثناء عملية القياس التي تشير إلى تحقيق زيادة كبيرة في الكفاءة التي ينتج عنها وفر كبير في الطاقة ليخرج بمجموعة من التوصيات تفيد في الحد من الهدر ودعم الإنتاج.

## الاختبارات التجريبية:

لقد نفذت الدراسة على مرجلين من مراحل أنابيب اللهب العاملة في الشركة العامة للنسيج؛ الأول قديم إنتاجيته من البخار 8 ton/h ومعدل الحرق الأعظمي 450 kg/h وحرقه نوع ريلو والثاني جديد له الإنتاجية نفسها من البخار ومعدل الحرق الأعظمي 460 kg/h وحرقه نوع فايسهوب.

هذا وقد تم استخدام جهاز تحليل غازات العادم من النوع (testo330-1) ذو الدقة العالية في القياس والذي يقوم بقياس كل من  $O_2$ ,  $NO$ ,  $CO$  ومن ثم يقوم بحساب كل من  $CO_2$  وكفاءة الاحتراق وكفاءة المرجل وأما بالنسبة إلى درجة الحرارة فيتم قياسها بوساطة مزدوجة حراريه من النوع K. ويحتوي جهاز التحليل على فلتر لإزالة الجزيئات الموجودة في عينة الغاز، ويتم تخفيف العينة في غرفة خاصة ضمن الجهاز، ويتم أخذ العينة من خلال إدخال مجس الغاز في فتحة خاصة موجودة في أعلى جسم المرجل ومخصصة لأخذ عينة من غازات العادم. ويبين الجدول (1) و (2) نتائج قياسات الضبط والمعايرة لكل من المرجل القديم والجديد على التوالي.

الجدول (1): نتائج القياس للمرجل القديم

الهواء الزائد %	$\eta$	$CO_2$	$O_2$	CO	$NO_x$
79.5	81.6	8.8	9.3	39	253
65	82.3	9.7	8.6	40	267
53	83.2	10.4	7.5	42	278
36.3	84.4	11.6	6.2	50	292
15.3	84.1	11.2	4.8	112	296

الجدول (1): نتائج القياس للمرجل الحديث

الهواء الزائد %	$\eta$	$CO_2$	$O_2$	CO	$NO_x$
46.7	82.9	10.77	6.7	37	265
40.4	83.5	11.1	6	40	276
36.2	83.9	11.5	5.5	43	289
33.3	84.4	11.85	5.2	54	291
27	84.2	11.83	4.9	97	298

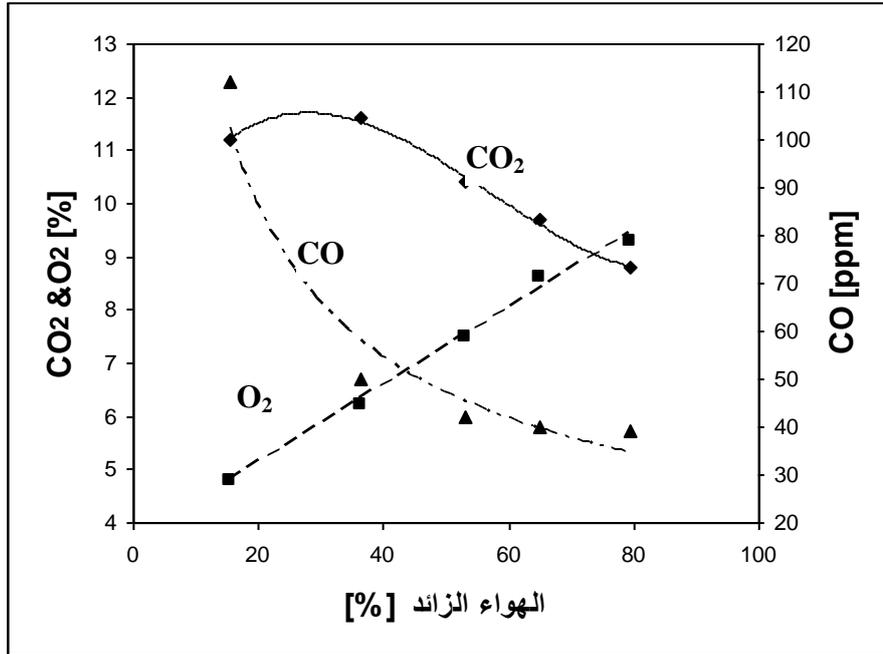
## النتائج والمناقشة:

تم قياس تراكيز الغازات والكفاءة للمراجل في وضعها الراهن والمضبوطة عليه من قبل فنيي الشركة ثم قمنا بتعديل نسبة الهواء الزائد خطوة بخطوة، وقيست التراكيز عند كل خطوة لكلا المرجلين السابقين.

### المرجل القديم:

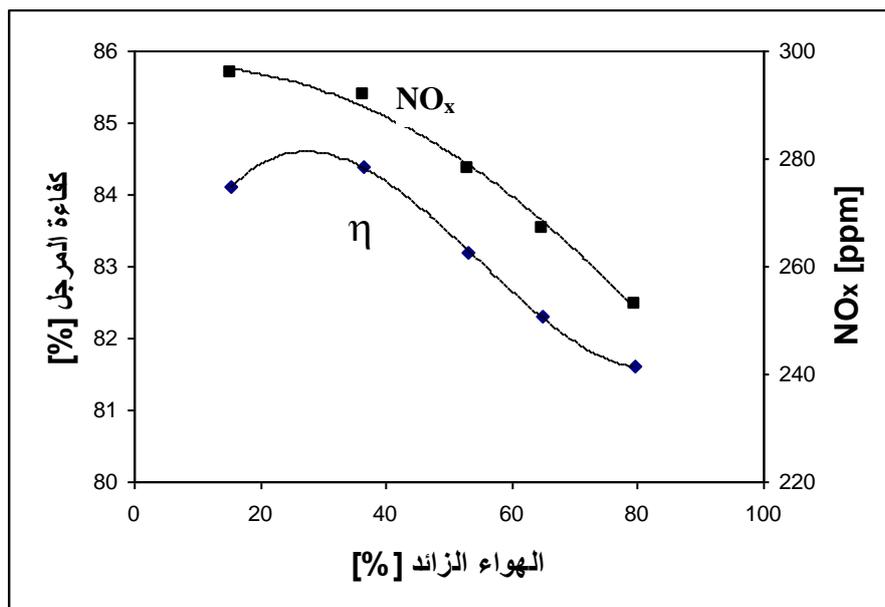
يبين الشكل (1) تغير تراكيز كل من الأوكسجين  $O_2$  وثاني أكسيد الكربون  $CO_2$  وأول أكسيد الكربون  $CO$  مع الهواء الزائد حيث نلاحظ أن  $CO_2$  الذي يعد مؤشراً جيداً على الاحتراق الكامل يصل للقيمة الأعظمية % 11.59 عند نسبة هواء زائد حوالي % 36، وبعدها يبدأ بالتناقص وذلك بسبب ارتفاع نسبة  $CO$  والهيدروكربونات غير المحترقة في نواتج الاحتراق، وبالرغم من أن القيمة المعيارية لثاني أكسيد الكربون هي حوالي % 12، وذلك حسب تركيب الوقود وللهواء الزائد هي % 20 للفيول فإن تحقيقها عند ظروف عمل هذا المرجل أمر صعب بسبب عمليات المزج داخل غرفة الاحتراق.

يبين الشكل (2) تغير كل من كفاءة المرجل  $\eta$  وتراكيز أكاسيد النيتروجين  $NO_x$  مع الهواء الزائد، حيث نلاحظ تزايد كفاءة الاحتراق (من % 81.6 عند نسبة هواء زائد % 79.5) مع تناقص الهواء الزائد لتصبح % 84.4 عند النسبة المثلى للهواء الزائد التي بلغت في هذا المرجل % 36.33. وذلك بسبب انخفاض كمية الهواء الزائد



الشكل (1): تغير تراكيز كل من الأوكسجين  $O_2$  وثاني أكسيد الكربون  $CO_2$  وأول أكسيد الكربون  $CO$  مع الهواء الزائد (مرجل قديم)

المسخنة والخارجة مع نواتج الاحتراق. وبمتابعة إنقاص الهواء الزائد بعد النسبة المثلى تتناقص الكفاءة بسبب تزايد نسبة المواد غير المحترقة ( $CO, HC$ ) الخارجة مع نواتج الاحتراق.

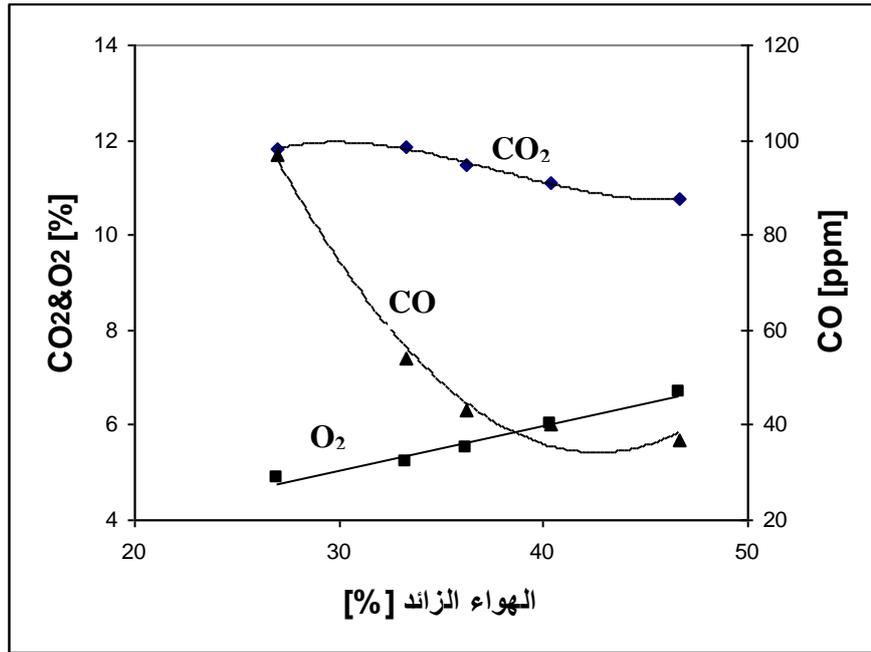


الشكل (2): تغير كل من كفاءة المرجل وتراكيز أكاسيد النيتروجين  $NO_x$  مع الهواء الزائد (مرجل قديم)

أما بالنسبة إلى أكاسيد النيتروجين  $NO_x$  فإنها تزداد قليلاً مع تناقص الهواء الزائد إلى النسبة المثلى بالرغم من بقاء درجة الحرارة ثابتة ( $235-236^{\circ}C$ ) ولكنها تبقى ضمن الحدود المسموح بها، ويعود سبب ذلك إلى انخفاض معدل تدفق نواتج الاحتراق مع تناقص نسبة الهواء الزائد وارتفاع تراكيز الأكاسيد ضمن نواتج الاحتراق من 253 ppm حتى 292ppm.

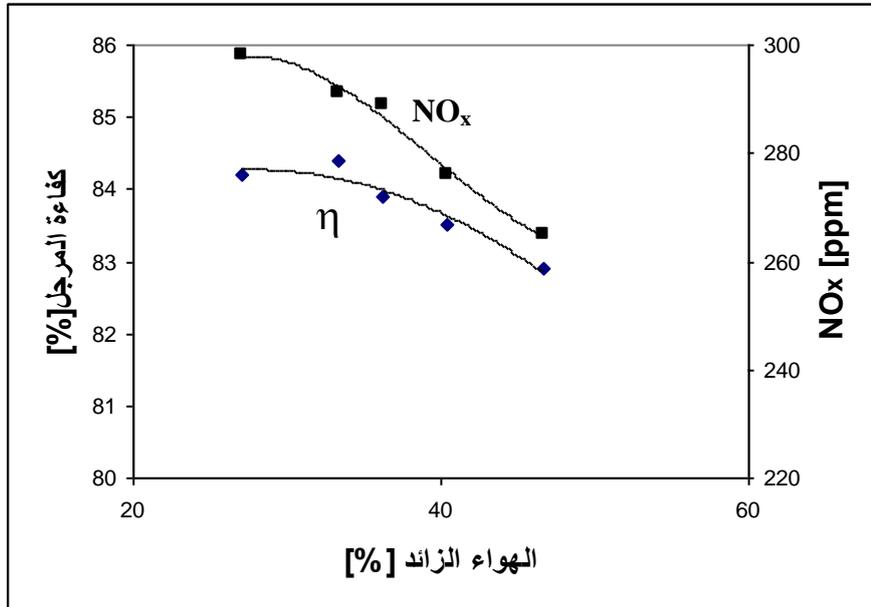
#### المرجل الجديد

يبين الشكل (3) تغير كل من تراكيز الأوكسجين  $O_2$  وثاني أكسيد الكربون  $CO_2$  وأول أكسيد الكربون  $CO$  مع الهواء الزائد، حيث نلاحظ أن  $CO_2$  يصل للقيمة الأعظمية 11.85 % عند نسبة الهواء الزائد المثلى لهذا المرجل، وهي 33.33 % وبعدها تبدأ قيمة  $CO_2$  بالتناقص وذلك بسبب ارتفاع نسبة  $CO$  (ازدادت نسبة  $CO$  من 40 ppm حتى 110 ppm) والهيدروكربونات غير المحترقة في نواتج الاحتراق وبالرغم من أن نسبة الهواء مازالت أكبر من القيمة المعيارية اللازمة لانجاز احتراق كامل عند شروط العمل المثالية لهذا المرجل كما وجدنا في المرجل القديم.



الشكل (3): تغير كل من تراكيز الأوكسجين  $O_2$  وثاني أكسيد الكربون  $CO_2$  وأول أكسيد الكربون  $CO$  مع الهواء الزائد (مرجل جديد)

يبين الشكل (4) تزايد كل من كفاءة المرجل  $\eta$  وأكاسيد النيتروجين  $NO_x$  عندما يتم انقاص الهواء الزائد من 46.7% حتى 33.3% حيث نلاحظ تزايد الكفاءة من 81.6% حتى 84.4% ومع الاستمرار بانقاص الهواء الزائد بعد هذه القيمة تبدأ كفاءة الاحتراق بالتناقص، وذلك بسبب عدم اكتمال الاحتراق وخرج مواد قابلة للاحتراق



الشكل (2): تغير كل من كفاءة المرجل وتراكيز أكاسيد النيتروجين  $NO_x$  مع الهواء الزائد (مرجل جديد)

(CO, HC) مع غازات العادم. ويعود سبب هذه النسب المثلى المرتفعة من الهواء الزائد إلى طبيعة الفيول السوري وظروف التشغيل المختلفة والخاصة بكل نوع من أنواع المراجل.

أما بالنسبة إلى أكاسيد النيتروجين  $NO_x$  فإنها كما في حالة المرجل القديم تزداد قليلاً مع تناقص الهواء الزائد إلى النسبة المثلى بالرغم من بقاء درجة الحرارة ثابتة ( $243-245^{\circ}C$ ) ويعود سبب ذلك إلى انخفاض معدل تدفق نواتج الاحتراق مع تناقص نسبة الهواء الزائد وارتفاع تراكيز الأكاسيد ضمن نواتج الاحتراق من 265 ppm حتى 298 ppm.

**الوفر في استهلاك الوقود**

مكنت عملية ضبط المرجلين من تحسين كفاءة كل منهما كما بينت نتائج القياس أعلاه، ويهدف تحديد مقدار التوفير الناتج عن ذلك تم افتراض أن كل من المرجلين يعمل لمدة 338 يوماً في السنة ولمدة 18 ساعة يومياً، وأنهما يعملان عند معدل الاستهلاك الأعلى للوقود كما هو قائم حالياً. وإذا أخذ بعين الاعتبار أن السعر الجديد لكغ الفيول هو 7. ل. س، تم حساب التوفير في استهلاك الوقود، الناتج عن عملية ضبط المرجلين، وتبين أن ضبط المرجل القديم على الوضع الجديد سيؤدي إلى توفير سنوي بحدود 90.83 طن / سنة من الفيول وسيكون التوفير السنوي بالليرة السورية في ظل أسعار الوقود الحالية حوالي 635810 ل. س./سنة.

أما بالنسبة إلى المرجل الجديد فسيبلغ التوفير السنوي حوالي 49.7 طن/سنة وبالليرة السورية حوالي 347900 ل. س./سنة. وبالتالي يكون إجمالي التوفير لكلا المرجلين هو بحدود 140.53 طن/سنة من الفيول أي ما يعادل 983710 ل. س./سنة عندما يعملان عند معدل الاستهلاك الأعلى للوقود.

### الاستنتاجات والتوصيات:

أظهرت القياسات التي تم إجراؤها على مرجلين من مراحل أنابيب اللهب أن نسبة الهواء الزائد التي يعمل عندها المرجلان أعلى من النسب المعيارية بكثير، حيث بلغت للمرجل القديم 79.5 % وللمرجل الجديد 46.7 %، وهذا يؤدي إلى هدر في الطاقة يذهب لتسخين الهواء الزائد المنبعث مع غازات العادم إلى الخارج، الأمر الذي يؤثر سلباً على كفاءة المراجل وبالتالي على كلفة إنتاج البخار المستخدم كوسيط في العمليات الإنتاجية. لهذا تم القيام بضبط حراقي المرجلين عند نسبة الهواء الزائد الأمثل والمختلفة عن المعايير العالمية وفي الزمن الحقيقي ووفقاً لظروف تشغيل كل مرجل. هذا وقد تمت عملية ضبط المرجلين باستخدام أجهزة قياس متطورة مع إبقاء معدل استهلاك الوقود دون تغيير بناءً على طلب القائمين على صيانة وتشغيل المراجل في الشركة.

بتحقيق النسبة المثلى للهواء الزائد ازدادت كفاءة المرجل القديم من 81.6% إلى 84.4% والمرجل الحديث من 82.9% إلى 84.4%. أما بالنسبة إلى ثاني أكسيد الكربون، فإن نسبته ازدادت بشكل كبير حتى وصلت إلى القيمة القريبة من القيمة المعيارية لمثل هذا الوقود. وتراوحت نسبة الأكسجين الفائض في غازات العادم ما بين 5.2-5.6% من دون زيادة تذكر على نسبة CO في نواتج الاحتراق. وبالنسبة إلى أكاسيد النيتروجين فقد ازدادت بشكل طفيف في كلا المرجلين من حوالي 265 ppm حتى 298 ppm على الرغم من ثبات درجة الحرارة. ونتيجة لتحسن الكفاءة يكون إجمالي التوفير لكلا المرجلين هو بحدود 140.56 طن/سنة من الفيول أي ما يعادل 983920 ل. س./سنة عندما يعملان عند معدل الاستهلاك الأعلى للوقود.

إن الضبط عند النسب المحددة تصميمياً ووفق المعايير العالمية سيؤدي إلى انخفاض واضح في كفاءة المرجل ولهذا نوصي بضبط كل مرجل على حدة ووفقاً لظروف تشغيله وعلى أرض الواقع حتى يتم الوصول إلى النسبة الأمثل من الهواء الزائد.

### المراجع:

- 1- Delta Institute "Sector-Based Pollution Prevention: Toxic Reductions through Energy Efficiency and Conservation Among Industrial Boilers", A Report to the Great Lakes National Program Office July 2002, 39.
- 2- GRAUS W.H.J.; WORRELL, E. "Effects of SO<sub>2</sub> and NO<sub>x</sub> control on energy-efficiency power generation", Energy polciy Vol 35, Issu 7, July 2007, 3898-3908
- 3- ROSEN, A. M. ; TANG, R. "Improving steam power plant efficiency through exergy analysis: effects of altering excess combustion air and stack-gas temperature" Int. J. Exergy, Vol. 5, No. 1, 2008, 362–376
- 4- COWNDEN, R.; NAHON, M.; AND ROSEN, M.A. 'Exergy analysis of a fuel cell power system for transportation applications', Exergy, An Int. J., Vol. 1, 2001, 112–121.
- 5- CROMPTON, P.; WU, Y. () 'Energy consumption in China: past trends and future directions', Energy Economics, Vol. 27, No. 1, 2005, 195–208.
- 6- MIKETA, A.; MULDER, P. () "Energy productivity across developed and developing countries in 10 manufacturing sectors: patterns of growth and convergence", Energy Economics, Vol. 27, No. 3, 2005, 429–453.
- 7- ESKILSSON, D.; RONNBACK, M.; SAMUELSSON, J.; TULLIN, C. "Optimisation of efficiency and emissions in pellet burners" Biomass and Bioenergy 27, 2004, 541–546.
- 8- CARPENTER, K. ; KISSOCK, K. "Quantifying Savings From Improved Boiler Operation" National Industrial Energy Technologies Conference, New Orleans, LA, May, 2005, 1-9.
- 9- KOUPRIANOV, VI. "Optimization of excess air for the improvement of environmental performance of a 150 MW boiler fired with Thai lignite", Applied Energy 74, 2003, 445–453.
- 10- KOUPRIANOV, VI.; KAEWBOONSONG, W. "Modeling the effects of operating conditions on fuel and environmental costs for a 310 MW boiler firing fuel oil". Energy conversion Mgmt 45, 1, 2004, 1–14.
- 11- KAYA, D.; EYIDOGAN, M. "Energy Conservation Opportunity in Boiler Systems" J. Energy Resour. Technol. Vol. 131, Issue 3, 2009, 4
- 12- U.S. Environment Protection Agency. "Guide to Industrial Assessment for Pollution and Energy Efficiency." EPA/625/R-99/003.Cincinnati: June, 2001. 482.

