

دراسة فعالية الاسترجاع المركب للحرارة لتسخين مياه التغذية في المحطات الحرارية

د. هيثم حسن*

(تاريخ الإيداع 18 / 8 / 2011. قُبل للنشر في 22 / 12 / 2011)

□ ملخص □

تم البحث في هذه الدراسة عن إمكانية استرجاع كمية إضافية من الحرارة الضائعة مع غازات الاحتراق للمرجل في محطات الطاقة الحرارية، وذلك باستخدام التسخين المركب لمياه التغذية بوساطة وضع موفر بيني في المرجل موصول على التوازي مع أحد المسخنات الاسترجاعية، حيث تُظهر نتائج هذا البحث أن مردود المحطة الحرارية يزداد، ويتم توفير كمية من الوقود المستخدم، وذلك حسب درجة الحرارة النهائية لغازات الاحتراق، التي تتعلق بنوع الوقود المستخدم ومحتوى الكبريت في هذا الوقود. كما يتم تخفيض تلوث هواء الوسط المحيط.

الكلمات المفتاحية: استرجاع الحرارة، مياه التغذية، المحطات الحرارية.

* مدرس - قسم هندسة القوى الميكانيكية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة البعث - حمص - سورية.

Studying the Effectiveness of Combined Heat Recovery for Heating Feeding Water at Power Stations

Dr. Haitham Hasan*

(Received 18 / 8 / 2011. Accepted 22 / 12 / 2011)

□ ABSTRACT □

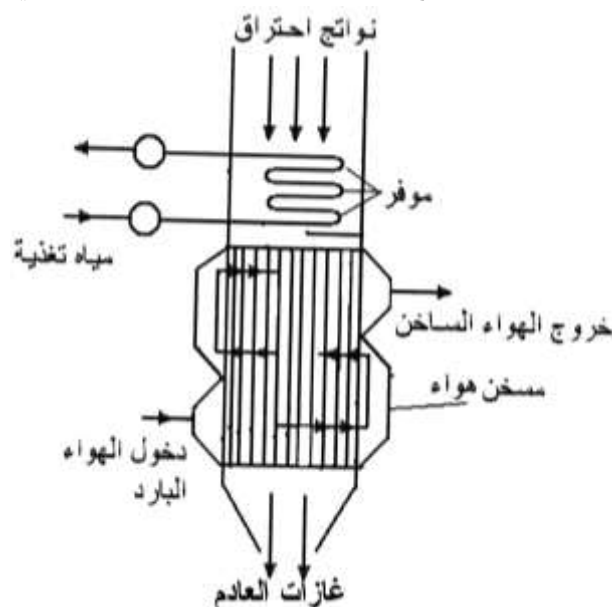
This study discusses the possibility of taking advantage of the thermal energy wasted in the gas combustion of boilers at power stations by using combined heating of feeding water for establishing an intermediate water economizing parallel connected with a recuperative heater. The experimental data of this research demonstrate that the efficiency of the power station increases, and the amount of fuel consumption is reduced in accordance with the final temperature of gas combustion that relies on fuel type and sulphur content, reducing air pollution.

Keywords: heat recovery, feed water, power station.

* Assistant Professor, Department of Mechanical Power Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Al-Baath University, Homs, Syria.

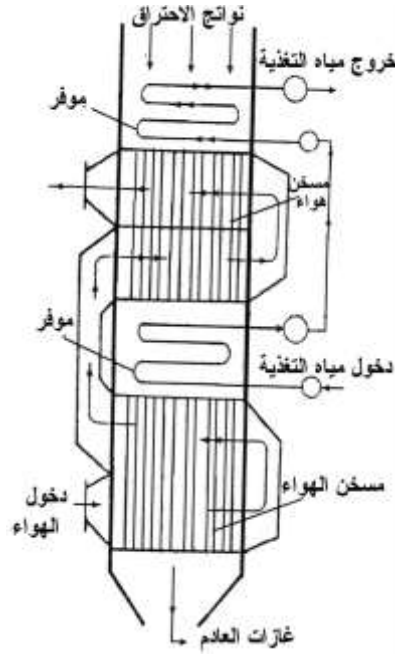
مقدمة:

تعتبر عملية استرجاع الحرارة في محطات توليد الطاقة الكهربائية العاملة على البخار وسيلة لتوفير الوقود وزيادة المردود الحراري لهذه المحطات . لذلك يتم وضع موفر (مسخن لمياه التغذية) ومسخن للهواء في مجرى غازات الاحتراق للمرجل من أجل استرجاع الحرارة المحمولة معها [1-8] كما في الشكل (1).

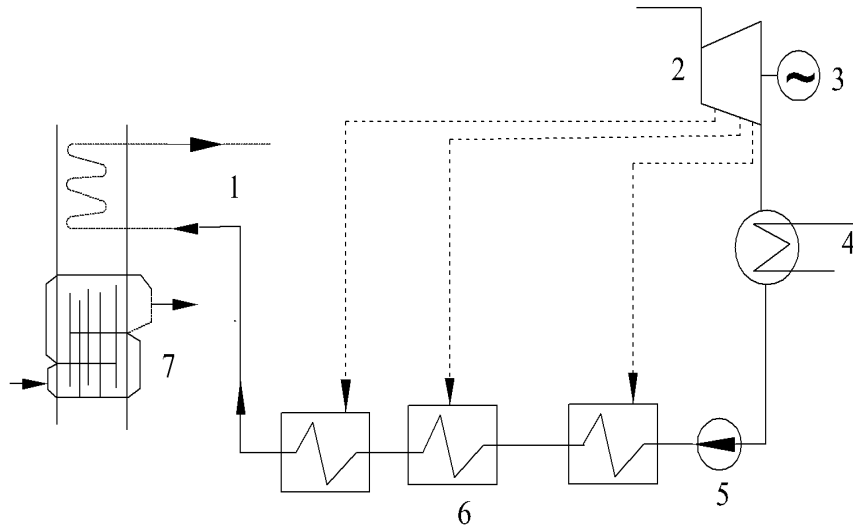


الشكل (1) الموفر ومسخن الهواء

وقد لوحظ في هذه الحالة أن معدل تبريد غازات الاحتراق في الموفر أعلى منه في مسخن الهواء لأن معامل انتقال الحرارة بين غازات الاحتراق والهواء منخفض جداً. لذلك تم لاحقاً تقسيم الموفر إلى مرحلتين ووضع موفر وسطي بين القسمين العلوي والسفلي لمسخن الهواء كما في الشكل (2).
 وبما أنه في الوقت الحاضر ومن أجل زيادة المردود الإجمالي يتم تسخين مياه التغذية والهواء في محطات توليد الطاقة الحرارية إلى حوالي $573K$ [2,3]، فإن كمية الحرارة اللازمة لذلك لا يمكن سحبها بالكامل من غازات الاحتراق، بل يتم اللجوء إلى استنزاف البخار من أجل تسخين مياه التغذية كما في الشكل (3).



الشكل (2) يبين تجزئة الموفر على مرحلتين



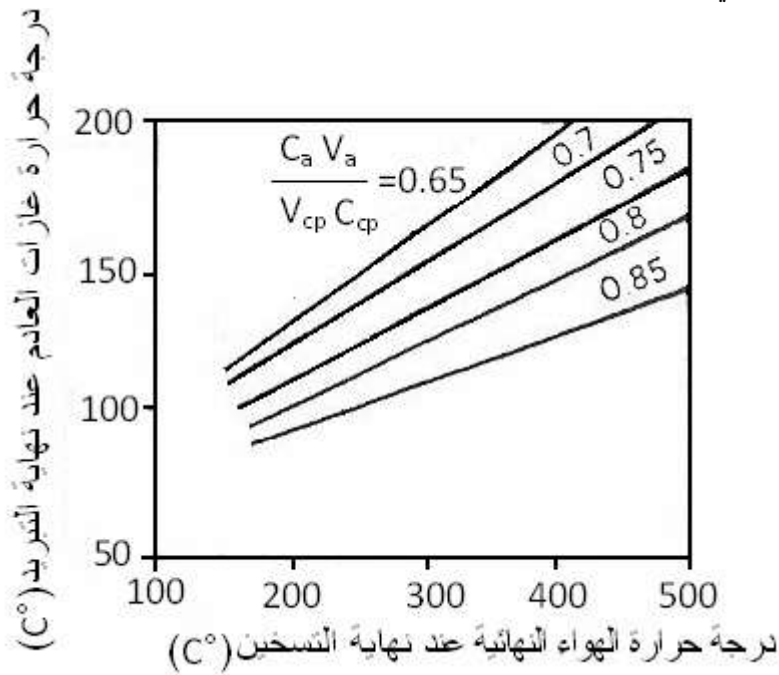
الشكل (3) 1-الموفر، 2- النفثة، 3- المنوبة، 4- المكثف، 5- المضخة،

6- مسخنات ماء التغذية باستنزاف البخار 7- مسخن الهواء

غير أن الزيادة في المردود الناتجة عن ذلك لا تتوافق مع توفير الوقود بل تؤدي إلى زيادة استهلاكه، حيث إنه عند استخدام الاستنزاف يتم زيادة استهلاك الوقود من أجل زيادة إنتاج البخار، كما أن ارتفاع درجة حرارة مياه التغذية T_{FW} في مسخنات استنزاف البخار تحد من كمية الحرارة المسترجعة من غازات العادم، مما يؤدي إلى زيادة الضياعات الحرارية مع هذه الغازات المغادرة للمرجل، تجدر الإشارة هنا إلى أن ارتفاع درجة

حرارة مياه التغذية تؤدي إلى تخفيض استهلاك الوقود في حال ثبات درجة حرارة غازات الاحتراق في نهاية المرجل.

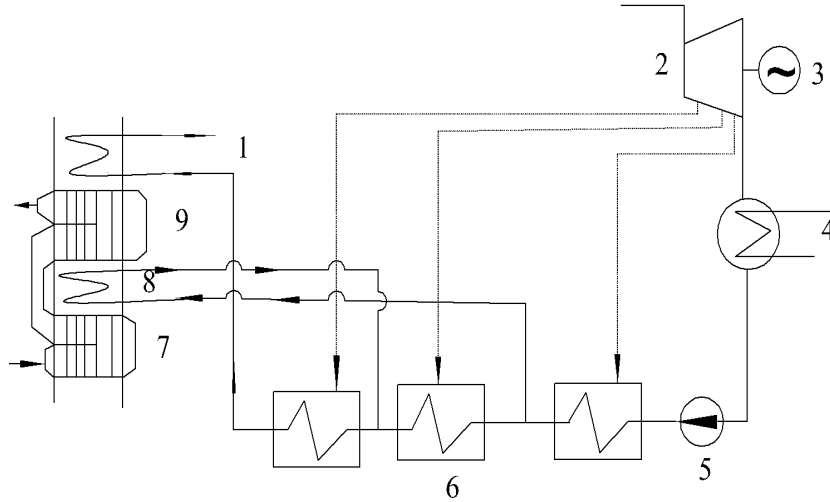
كما هو معلوم يتم تسخين الهواء اللازم للاحتراق للتخفيف من هذه الضياعات الحرارية، إلا أن الهواء يسخن بشكل أسرع من تبريد غازات الاحتراق، وذلك لاحتوائه على رطوبة أقل من رطوبتها، وبذلك تبقى درجة حرارة غازات الاحتراق بعد مسخن الهواء مرتفعة كما يوضح ذلك الشكل (4). ومن هنا تأتي أهمية فكرة الاستخدام المركب لتسخين مياه التغذية المطروحة في هذا البحث، حيث إنه لا يمكن الوصول إلى التبريد المطلوب لهذه الغازات في مسخن الهواء فقط.



الشكل (4) يبين العلاقة بين درجة حرارة غازات العادم و درجة حرارة الهواء النهائية بعد عملية التسخين [7].

أهمية البحث وأهدافه:

يعتبر ترشيد استهلاك الطاقة وزيادة مردود المحطات الحرارية من الوسائل المهمة للحد من الأعباء الاقتصادية وللتخفيف من تلوث البيئة، حيث يهدف هذا البحث إلى دراسة إمكانية استرجاع نسبة إضافية من الحرارة الضائعة مع غازات الاحتراق المغادرة للمرجل في محطات الطاقة الكهروحرارية وذلك بالاستخدام المركب لتسخين مياه التغذية، عن طريق دراسة إمكانية وضع موفر إضافي في أسفل مجرى غازات الاحتراق للمرجل كما في الشكل (5). يوصل الموفر الإضافي على التوازي مع أحد مسخنات المياه باستنزاف البخار ذات الضغط المنخفض لتخفيض كمية البخار الواجب استنزافها، مما يسمح بزيادة مردود المحطة الحرارية وتوفير الوقود وما يرافق ذلك من تخفيض في إصدار الملوثات الناتجة عن احتراق الوقود كثنائي أكسيد الكربون وأكاسيد الكبريت والآزوت وهباب الفحم وغيرها.



الشكل (5) 1-الموفر، 2-العنفة، 3-المنوية، 4-المكثف، 5-المضخة، 6-مسخنات ماء التغذية باستنزاف البخار، 7-القسم السفلي لمسخن الهواء، 8-الموفر الإضافي، 9-القسم العلوي لمسخن الهواء

طرائق البحث ومواده:

يتضمن البحث إجراء موازنة حرارية لمسخن الهواء، تسمح بحساب درجة حرارة غازات الاحتراق المغادرة له T_{Gexit} ، يلي ذلك مقارنة تحليلية للدرجة T_{Gexit} مع درجة حرارة تكاثف بخار حمض الكبريت لدى استخدام أنواع مختلفة من الوقود، وبناءً على ذلك يمكن تحديد كمية الحرارة الإضافية المسموح بسحبها من غازات الاحتراق، وإجراء الموازنة الحرارية للموفر البيئي المقترح إضافته في هذا البحث. بعدئذٍ يمكن تحديد مواصفات الموفر الاسترجاعي باستنزاف البخار (P_V و T_V) والموقع الذي سيتم به الربط على التوازي بين المسخنين الاسترجاعي (باستنزاف البخار) والموفر المقترح (باستخدام حرارة غازات الاحتراق).

النتائج والمناقشة:

يتعلق المردود الإجمالي للمنشأة الحرارية بشكل أساسي بمردود تحويل الوقود إلى حرارة (المردود الحراري) والمردود الميكانيكي والمردود الكهربائي. وسنركز في هذا البحث على السعي لرفع المردود الحراري. من أجل تحديد مقدار التوفير في الوقود الناتج عن استرجاع الحرارة في الدارة بشكل عام لا بد أن يقترن ذلك مع زيادة المردود الحراري، حيث إن هذا التوفير يكون متناسباً مع المردود الكهربائي الصافي لمحطة توليد الطاقة الكهربائية التي تعمل على البخار [4]، والذي يساوي النسبة بين الطاقة الكهربائية المعطاة للشبكة P_{el} وكمية الحرارة الناتجة عن احتراق الوقود Q_F ، حيث تتوافق عملياً القيمة الأعظمية للمردود الصافي التي

تعطى بالعلاقة $\eta_{el} = \frac{P_{el}}{Q_F}$ مع المردود الفعال للدارة الحقيقية η_e والتي يعبر عنها بالعلاقة:

$$(1) \quad \eta_e = \eta_{SG} \times \eta_{IT} \times \eta_{th}$$

حيث: η_{SG} مردود مولد البخار

η_{IT} مردود العنفة الداخلي

η_{th} المرود الحراري

يمكن كتابة معادلة الموازنة الحرارية لمسخن الهواء كما يلي:

$$m_A C_{PA} (T_{Aexit} - T_{Aent}) = m_G C_{PG} (T_{Gent} - T_{Gexit})$$

حيث: m_G و m_A تدفق الهواء وغازات العادم على التوالي

C_{PG} و C_{PA} السعة الحرارية النوعية للهواء و غازات الاحتراق

T_{Aent} و T_{Aexit} درجة حرارة الهواء عند مخرج و مدخل المسخن على الترتيب

T_{FW} درجة حرارة مياه التغذية عند مدخل المرجل

من معادلة الموازنة الحرارية لمسخن الهواء يمكن تحديد درجة حرارة غازات الاحتراق المغادرة للمرجل T_{Gexit} :

$$(2) \quad T_{Gexit} = T_X - \mu_A (T_{Aexit} - T_{Aent})$$

$$\mu_A = \frac{m_A C_{PA}}{m_G C_{PG}} \quad \text{وباعتبار:}$$

فإن درجة حرارة الغازات بعد الموفر تصبح:

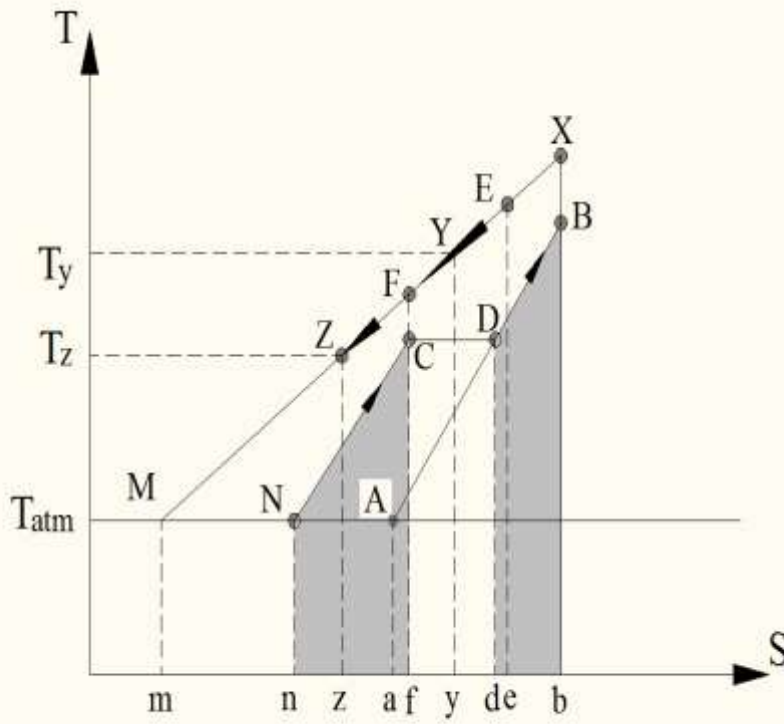
T_X درجة حرارة الغازات بعد الموفر وقبل مسخن الهواء

ΔT_W فرق درجة حرارة التسخين الأصغرية في الموفر

على سبيل المثال تصل درجة حرارة تسخين مياه التغذية والهواء في محطات الطاقة الحديثة إلى $573K$ حيث يظهر من الشكل (4) أنه قد تصل درجة حرارة غازات الاحتراق عند نهاية التبريد إلى درجة حرارة $443K$ أو أكثر وهي أعلى من نقطة الندى لبخار حمض الكبريت البالغة $393K$ عند احتراق الوقود الصلب والسائل، و $373K$ عند احتراق الوقود الغازي. وهذا يعني أنه بالإمكان تبريد غازات الاحتراق بشكل إضافي حوالي $323K$ عند إحراق الوقود الصلب و السائل و $343K$ عند إحراق الوقود الغازي [3,6].

تم في هذا البحث اختيار أحد المراحل البخار العاملة في محطة توليد الطاقة التابعة لمصفاة تكرير النفط، استطاعته $120ton/h$ من البخار المحمص بدرجة حرارة $773K$ و يستهلك $9ton/h$ من الفيول، في حين تبلغ درجة حرارة غازات الاحتراق لهذا المرجل $467K$ بعد مسخن الهواء الأنثوبي المستخدم فيه.

يتضح من العرض السابق بأن درجة حرارة غازات الاحتراق تكون دوماً أعلى من درجة حرارة نقطة الندى مهما كان نوع الوقود المستخدم، لذلك سندرس إمكانية تركيب موفر إضافي يستفيد من حرارة غازات الاحتراق في أسفل مجرى غازات الاحتراق للمرجل، ووصله على التوازي مع مسخن الماء الذي يعمل باستنزاف البخار. وتجدر الإشارة إلى أن ارتفاع درجة حرارة مياه التغذية يكون قليلاً نسبياً في مسخن استنزاف البخار ذي الضغط المنخفض، مما يساعد في سحب كمية إضافية من حرارة غازات الاحتراق قبل دخولها إلى مسخن الهواء، ونتيجة لذلك ستخفض بشكل كبير درجة حرارة هذه الغازات، وبالتالي ستخفض كمية الحرارة الضائعة q_G أيضاً.



الشكل (6) عمليات تسخين الهواء وماء التغذية بواسطة غازات العادم على المخطط T-S

يمكن توضيح هذه العمليات تخطيطياً كما في الشكل (6) حيث يتم تسخين الهواء في القسم السفلي من المسخن من النقطة N إلى C وتمثل المساحة $Ncfn$ كمية الحرارة المسحوبة. أما المساحة $DBbd$ فتتمثل كمية الحرارة المسحوبة في القسم العلوي من المسخن ابتداءً من النقطة D إلى B. يمثل الخط $A-B$ عملية تسخين الهواء في المسخن في حال عدم تجزئته، أما الخط $E-F$ فيمثل عملية تبريد غازات الاحتراق في الموفر الإضافي.

تعبّر النقطة Z عن حالة غازات الاحتراق عند وجود الموفر الإضافي، وتكون عندئذ كمية الحرارة المتبقية معها $M = Zzm$ أقل من $MYymq_G$ في حال عدم وجوده.

إذا حافظنا على درجة حرارة تسخين الهواء النهائية T_{Aexit} ودرجة حرارة تسخين مياه التغذية النهائية المسترجعة T_{FW} وبالتالي T_X . تصبح عندئذ كمية الحرارة اللازم إضافتها لمياه التغذية في الموفر البيئي من أجل 1 Kg من الوقود المحترق:

$$(3) \quad \Delta q_W = m_G C_{PG} (T_X - T_F) - m_A C_{PA} (T_B - T_D)$$

حيث: T_D درجة حرارة الهواء عند مدخل القسم العلوي لمسخن الهواء

T_B درجة حرارة الهواء النهائية عند مخرج المسخن

عند تساوي فرق درجة الحرارة في كلا قسمي مسخن الهواء وباستخدام العلاقة (2) نحصل على كمية الحرارة في الموفر البيئي:

$$(4) \quad q_{eco} = \Delta q_W = m_G C_{PG} (1 - \mu_A) (T_B - T_D)$$

من أجل هذه القيمة ستتحقق الضياعات الحرارية لغازات الاحتراق بمقدار Δq_G كما أنه ستتحقق كمية الحرارة المستنزفة للبخار Δq_V أيضاً في مسخن مياه التغذية الاستنزافي وعليه:

$$(5) \quad \Delta q_W = \Delta q_G = \Delta q_V$$

وهذا سيؤدي إلى زيادة مردود منظومة المرجل بمقدار: $\Delta \eta_{SG} = \frac{\Delta q_W}{Q_i}$

حيث: Q_i القيمة الحرارية الدنيا للوقود المستخدم

$$(6) \quad \eta'_{SG} = \eta_{SG} + \frac{\Delta q_w}{Q_i} \quad \text{وبالتالي سيزداد مردود المرجل إلى القيمة :}$$

أما المردود الحراري بدون وجود الموفر فيحسب بالعلاقة:

$$(7) \quad \eta_{th} = \frac{W_{th}}{Q}$$

$$Q = Q_i \times \eta_{SG}$$

حيث:

W_{th} العمل النظري

Q كمية الحرارة المقدمة

وتصبح قيمته عند وجود الموفر البيئي وسحب البخار من أحد الإستنزافات:

$$(8) \quad \eta'_{th} = \frac{(W_{th} + \Delta W_V)}{(Q + \Delta q_w)}$$

حيث: ΔW_V العمل النظري للبخار المستنزف.

ويمكن تحديد قيمة العمل النظري للبخار المستنزف ΔW_V بدلالة Δq_w بالعلاقة:

$$(9) \quad \Delta W_V = \Delta q_w \left(1 - \frac{T_{CON}}{T_V}\right)$$

حيث: T_V درجة الحرارة الوسطية للبخار المستنزف في المسخن

الاسترجاعي.

T_{CON} درجة حرارة البخار في مكثف العنفة.

يمكن عملياً تحديد وفر الوقود الذي سنحصل عليه نتيجة هذا الشكل المركب لاسترجاع الحرارة بوساطة المردود الفعلي

للدارة η_e حيث يتم من أجل ذلك حساب قيمته في الحالة العادية وفي حال وجود الاسترجاع المركب η'_e بوساطة

العلاقة (1) ومن ثم إيجاد العلاقة بينهما $\frac{\eta'_e}{\eta_e}$

$$(10) \quad \frac{\Delta B}{B} = \frac{\eta'_{SG} \eta'_{th} \eta'_{iT}}{\eta_{SG} \eta_{th} \eta_{iT}} - 1$$

حيث: ΔB كمية الوقود التي تم توفيرها.

B تدفق الوقود.

η'_{iT} و η_{iT} مردود العنفة الداخلي عند عدم وجود المسخن الاسترجاعي البيئي وفي حال وجوده من أجل

المسخنات الاسترجاعية، ويمكن ملاحظة أن الوصول إلى توفير الوقود الأعظمي يبدو واضحاً أنه سيتوافق مع العمل

الإضافي الأعظمي ΔW_V عندما يتم المحافظة على تدفق الوقود ثابتاً في كلتا الحالتين، حيث يمكن تحديد قيمة هذا

العمل بالعلاقتين (4) و (9)

$$(11) \quad W_V = B \Delta W_V = B m_G C_{PG} (1 - \mu_A) (T_B - T_D) \left(1 - \frac{T_{CON}}{T_V}\right)$$

ينتج من العلاقة السابقة أنه عند ثبات قيمة الإنتاجية $Bm_G C_{PG} (1 - \mu_A)$ وقيمة درجة الحرارة العليا لتسخين الهواء T_B يتم تحديد هذا الريح الحراري بوساطة قيم درجات الحرارة T_D و T_V ويحدث عند القيم الأعظمية وبنفس الوقت توجد علاقة بين هاتين الدرجتين كما في الشكل (6) حيث يمكن إظهارهما بعلاقة تقريبية:

$$(12) \quad T_V \approx T_D + \Delta T_W$$

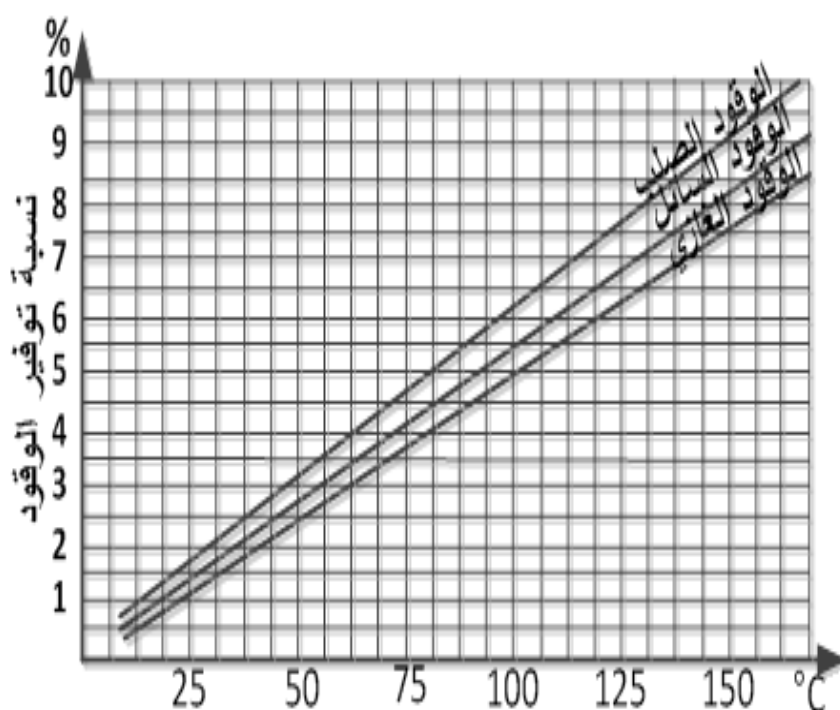
حيث: ΔT_W فرق درجة حرارة تسخين مياه التغذية في الموفر البيئي التي يجب أن تساوي درجة حرارة تسخينه في المسخن الاسترجاعي باستنزاف البخار الموصول معه. هذا يؤكد على وجود قيمة مثالية لـ T_V توافق T_D وباستخدام العلاقتين (11) و (12) نحصل عليها:

$$(13) \quad T_V = \sqrt{T_{CON}(T_B + \Delta T_W)}$$

والتي تناسب درجة حرارة الهواء عند مدخل القسم العلوي لمسخن الهواء ونحصل عليها بالعلاقة (12) إذا اعتبرنا T_V تساوي درجة حرارة البخار المستنزف، يمكن بسهولة إيجاد ضغطه P_V وفي هذه الحالة يتم استنزاف البخار بضغط قريب من هذا الضغط، فعند درجة حرارة الهواء $T_B = 570K$ و $T_{CON} = 300K$ و $\Delta T_W = 34K$ نجد من العلاقة (13) قيمة $T_V = 425.7K$ المتوافقة مع الضغط $P_V = 0.52MPa$.

يتم البحث عن نقطة استنزاف البخار الملائمة لهذا الضغط في العنفة عند تركيب الموفر البيئي في حالة الاسترجاع المركب المقترح، ولكن يجب الانتباه إلى أنه في القسم السفلي لمسخن الهواء يجب أن يتم التسخين فقط حتى درجة الحرارة $T_D = T_V - \Delta T_W = 393.7K$ من أجل تلافي الوصول إلى نقطة الندى خصوصاً في حال حرق الوقود الصلب أو الوقود السائل الذي يحتوي على نسبة مرتفعة من الكبريت. أما بالنسبة للوقود الغازي فيمكن أن يتم التسخين حتى $T_D = T_V - \Delta T_W = 373K$

أما الشكل (7) فيظهر أن توفير الوقود الذي يمكن الحصول عليه بوساطة هذا الاسترجاع المركب للحرارة قد يبلغ % 4 وذلك حسب درجة الحرارة النهائية لغازات الاحتراق، و التي تتبع نوع الوقود المستخدم و نسبة الكبريت الذي يحتويه وبذلك نلاحظ أن هذا الأسلوب المقترح لاسترجاع الحرارة من أجل تسخين مياه التغذية في محطات الطاقة الحرارية بوساطة وضع موفر إضافي في أسفل مجرى غازات الاحتراق موصول على التوازي مع أحد مسخنات المياه باستنزاف البخار ذات الضغط المنخفض سيتمكن من سحب كمية إضافية من حرارة غازات الاحتراق قبل دخولها الجزء السفلي لمسخن الهواء وبالتالي سيتمكننا من توفير الوقود وزيادة المردود في آن معاً. وبناءً على النتائج السابقة إذا طبقنا هذه الطريقة على المرجل المدرس ، نلاحظ أنه يمكن تخفيض درجة حرارة غازات الاحتراق بمقدار $\Delta T = 70$ ، حيث تبلغ درجة حرارة غازات الاحتراق 467K وبالتالي يزداد مردود المرجل لأكثر من 3%



الشكل (7) مقارنة نسبة توفير الوقود مع مقدار هبوط درجة حرارة غازات العادم

الاستنتاجات والتوصيات:

- 1- تبين من الدراسة أنه بالإمكان استرجاع كمية إضافية من حرارة غازات الاحتراق المغادرة للمرجل، لذلك يوصى بوضع موفر إضافي في أسفل مجرى غازات الاحتراق موصول على التوازي مع أحد مسخنات المياه باستنزاف البخار ذات الضغط المنخفض.
- 2- يمكن زيادة مردود المحطة نتيجة هذا الأسلوب المركب في استرجاع الحرارة بنسب مختلفة وذلك حسب مقدار هبوط درجة حرارة غازات الاحتراق في الموفر الإضافي حيث يزداد المردود للمحطة بمقدار 1% لكل هبوط في درجة حرارة غازات العادم مقداره 22 [5, 7]، وقد بلغ من أجل المحطة المدروسة 3%.
- 3- يمكن توفير كمية من الوقود نتيجة خفض درجة حرارة غازات الاحتراق ويتبع ذلك نوع الوقود المستخدم الشكل (7)، وفيما يخص المحطة المدروسة فقد بلغت هذه الكمية 4%.
- 4- تخفيض انبعاث جميع المواد الملوثة للبيئة بنسبة تتوافق مع كمية الوقود التي تم توفيرها.

المراجع:

- 1- الكنج، راتب، *مولدات البخار*، منشورات جامعة البعث، 2003، 371.
- 2- باكير، محمد عبدة، *محطات توليد الطاقة*، منشورات جامعة البعث، 2008، 509.
- 3- حمود، بسام، حنا، سهيل، *مولدات البخار*، منشورات جامعة تشرين، 1997، 260.
- 4- خارتشينكو، نيكولاي، ترجمة د. بسام حمود، *الطاقة وسلامة البيئة*، المركز العربي للتعريب والترجمة والنشر دمشق، 2000، 475.
- 5- نحاس، أحمد، *مولدات البخار*، منشورات جامعة حلب، 1992، 371.
- 6- BACKAKOV, A.P. *Heat Engineering*, Mir Publishers, Moscow, 1991, 223.
- 7- CHATTOPADHYAY, P.P. *Boiler Operation Engineering*, Second Edition, McGraw-Hill, New York, 2001, 1377.
- 8- SHVETS, I.T. *Heat Engineering*, Mir Publishers, Moscow, 1987, 573.