مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (34) العدد (6) 2012
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (34) No. (6) 2012

المساهمة في تحديد الوفر السنوي للوقود عبر استعادة الطاقات الضائعة من محرك بحري في أغراض مختلفة على السفينة

الدكتور المهندس بسام حمود*

(تاريخ الإيداع 3 / 10 / 2012. قُبِل للنشر في 20/ 11 / 2012)

□ ملخّص □

مع ارتفاع الطلب على الوقود وتزايد أسعاره، ارتفعت النفقات الاستثمارية للسفن، فاستدعى ذلك البحث عن سبل للوفر في استهلاك الوقود، سواء على دفع السفينة أو على تأمين متطلباتها الأخرى من الطاقة.

يعدّ استرجاع الحرارة الضائعة من المحرك مع غازات الاحتراق ووسائط التبريد وسيلةً فعالةً؛ لرفع فعالية استثمار الطاقة على السفينة؛ ولذلك تم في هذا البحث إلقاء الضوء على إجراءات وفر الطاقة على السفينة، وطرق الاستفادة من الطاقة الضائعة.

تم الاعتماد على بيانات محرك بحري ثنائي الشوط ذي شاحن عنفي؛ لحساب كمية الوقود والحرارة الإجمالية التي يستهلكها المحرك، وحساب الضياعات الحرارية مع غازات الاحتراق ووسائط التبريد المختلفة.

بعد ذلك أجريت حسابات لاسترجاع جزء من حرارة الغازات لأغراض التسخين على متن السفينة، ولتوليد الكهرباء. ودرست أيضاً إمكانية توليد ماء عذب عبر استعادة حرارة وسائط تبريد المحرك.

بيّنت الدراسة المعروضة أهمية عملية استرجاع الطاقة، وأمكن من خلالها تحديد الوفر السنوي في استهلاك الوقود على السفينة من خلال استعادة الطاقات الضائعة في المثال المدروس.

الكلمات المفتاحية: محركات الديزل البحرية، استرجاع الحرارة، اقتصادية الطاقة على السفن.

* أستاذ – قسم الهندسة البحرية – كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة تشرين – اللاذقية – سورية.

مجلة جامعة تشرين للبحوث والدراسات العلمية _ سلسلة العلوم الهندسية المجلد (34) العدد (6) 2012
Tishreen University Journal for Research and Scientific Studies - Engineering Sciences Series Vol. (34) No. (6) 2012

Approach to Calculate the Save in Fuel Consumption by Recovery of Waste energies from the Engine on Ship Board

Dr. Eng. Bassam Hammoud*

(Received 3 / 10 / 2012. Accepted 20 / 11 / 2012)

□ ABSTRACT □

With high demand for fuel and the increasing of its prices, the operational cost of ships has become higher. Therefore, it was necessary to try to reduce the fuel consumption on ships.

The recovery of waste heat from the engine through exhaust gases and cooling mediums is considered effective for achieving this goal. Therefore, this paper discusses different measurements for saving energy on ship, and presents the methods for recovery of waste energy.

The fuel consumption and heat losses via exhaust gases and cooling waters were calculated using the data and parameters of a turbocharged two stroke marine diesel engine, and the recovery of these losses for heating purposes, generating of electricity and fresh water was investigated.

This study proved the possibility and importance of waste energy recovery and calculated the annual save in fuel consumption on board ship.

Keywords: Marine Diesel Engines, heat recovery, energy economy on ship board.

*Professor, Department of Marine Engineering, Faculty of Mech. & Elec. Engineering - Tishreen University, Lattakia – SYRIA.

مقدمة :

تستخدم أشكال متنوعة من الطاقة لتشغيل المعدات والتجهيزات المختلفة الموجودة على السفن، مصدرها الرئيسي إحراق الوقود. وتتوزع هذه الطاقة على المحركات الرئيسية التي تقوم بدفع السفينة، وعلى المحركات المساعدة التي تولد الكهرباء، وعلى مولدات البخار التي توفر البخار اللازم على السفينة في أغراض مختلفة، تشمل التسخين، والتدفئة، والإطفاء...إلخ.

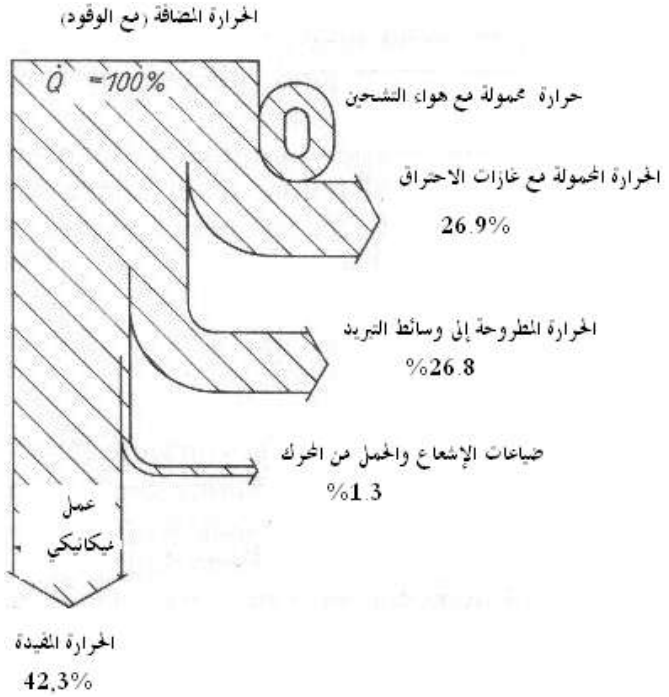
إن محدودية مصادر الطاقة وزيادة الطلب عليها أدى إلى ارتفاع أسعار الوقود. وقد تغيرت الحال في العقود الأخيرة، فبعد أن كانت فعالية استخدام الطاقة لفترة طويلة أمراً ثانوياً في النقل البحري، تغيرت الاعتبارات واضطرت شركات النقل البحري إلى البحث عن مختلف الأساليب؛ لتقليل استهلاك السفينة للطاقة والوقود، وتخفيض التكاليف الاستثمارية.

وتتدرج مساعي الاقتصاد باستهلاك الوقود على السفينة في نوعين من الإجراءات:

- الإجراءات التشغيلية: المتمثلة في الاختيار الأمثل لخط سير السفينة، وتنظيم عمل الأسطول، والتحكم بميل السفينة، وإجراء الصيانات والاختبارات المتواصلة لأداء الآلات، واستهلاكها للطاقة.

- الإجراءات التصميمية: تشمل إنقاص مقاومة السفينة، وتخفيض وزنها، والاختيار المناسب لعنصر الدفع (الرفاص)، وتخفيض ضياعاته. ويمكن إدراج بعض الأساليب الأخرى ضمن هذه الإجراءات مثل عملية الاستثمار الأمثل للمحرك من خلال تحسين عملية التشحين، واستخدام أساليب حقن الوقود الحديثة، والاستعانة بطاقات بديلة (كالرياح والطاقة الشمسية)، واسترجاع جزء من الحرارة المطروحة من المحرك.

إذا أمعنّا النظر في مخطط نمطي لموازنة الطاقة لمحرك بحري رئيسي على السفينة، كما هو مبين في الشكل (1)، نلاحظ أن ضياعات الطاقة المحمولة مع غازات الاحتراق وماء التبريد تزيد على نصف الطاقة المقدمة مع الوقود.



الشكل (1) مخطط موازنة الطاقة لمحرك ديزل بحري رئيسي

لذلك يعدّ استرجاع جزء من هذه الطاقات واستخدامها في تأمين طاقة حرارية، وكهربائية، وميكانيكية على متن السفينة إجراءً مهماً في سبيل تخفيض استهلاك الطاقة، ومسألةً تستحق الدراسة المعمقة.

أهمية البحث وأهدافه :

نظراً لارتفاع نسبة كلفة الوقود بالنسبة إلى التكاليف الاستثمارية الإجمالية للسفينة، أصبح السعي لتخفيض استهلاك الوقود أمراً حيوياً في تحقيق اقتصادية استثمار محطة القدرة والسفينة بشكل عام.

يقلّل الاستثمار الأمثل للطاقة استهلاك الوقود على السفينة؛ ولذلك تضافرت جهود المهندسين والباحثين في هذا المجال، وأمكن الوصول إلى إنجازات كبيرة، حيث وصل مثلاً مردود تحويل الطاقة في بعض المحركات البحرية الكبيرة حتى 51%. ولا تزال الأبحاث متواصلةً لتحسين عملية استرجاع الطاقة المنطلقة من غازات الاحتراق المحرك أو وسائط تبريده [1] و[2].

من جهة أخرى يوجد تركيز شديد في السنوات الأخيرة على مسألة الضرر البيئي الناتج من استهلاك الوقود في قطاع النقل البحري، خاصةً بعد أن تبين أن إصدارات السفن لا يُستهَان بها، وأنها مقاربة لإصدارات وسائل النقل الأخرى. وقد زاد هذا أهمية السعي إلى تقليل استهلاك الوقود واسترجاع ما يمكن من طاقات ضائعة [3].

يهدف هذا البحث إلى إلقاء الضوء على الإمكانات النظرية في استرجاع الطاقات الضائعة من محرك الدفع الرئيسي للسفينة؛ وحساب الوفر الممكن في استهلاك الوقود إذا استخدمت هذه الطاقات في أغراض مهمة على متن السفينة؛ تشمل توليد البخار لأغراض التسخين، وتوليد الكهرباء، إضافة إلى تحلية ماء البحر لتغطية حاجات السفينة من الماء العذب.

طرائق البحث ومواده :

لتحقيق الأهداف المذكورة، تم في البداية استعراض إجراءات الوفر في الطاقة على السفينة، والمجالات الممكنة لاستخدام الطاقة الضائعة. ولتطبيق ذلك فقد تم الاعتماد على بيانات محرك بحري من طراز K 5 S Z 70/125 ثنائي الشوط ذي شاحن عنفي.

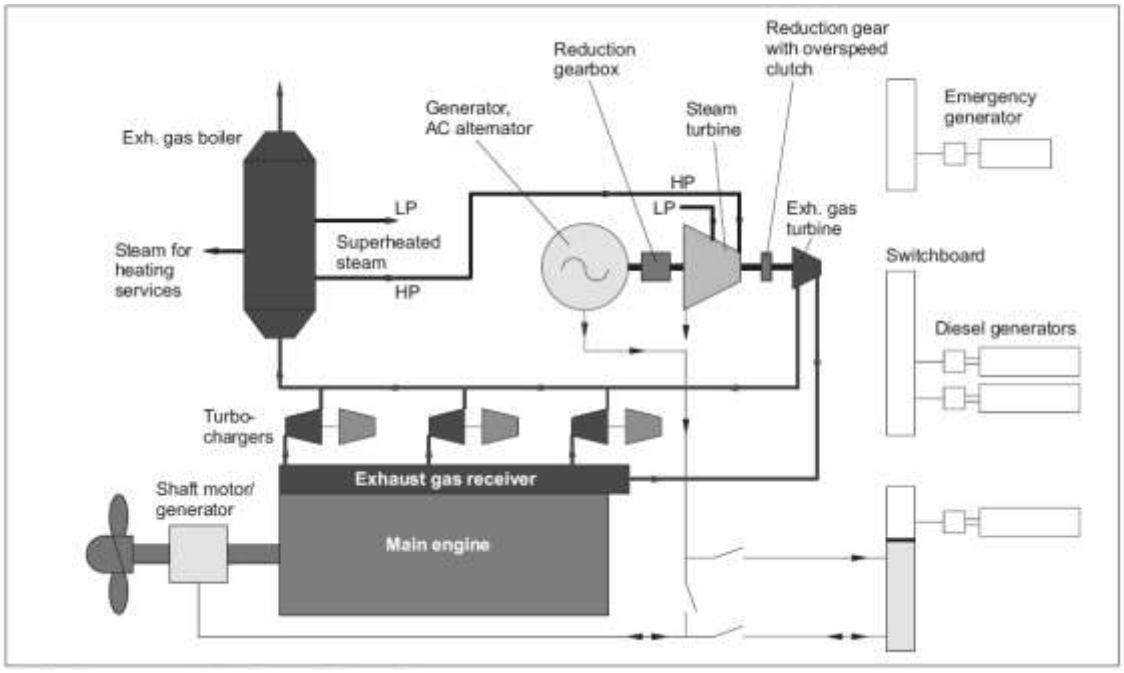
حُسبت في البداية كمية الوقود والحرارة الإجمالية المضافة إلى محرك دفع السفينة، وكمية غازات الاحتراق الناتجة، والضياعات الحرارية مع غازات الاحتراق ووسائط التبريد المختلفة. ثم أجريت حسابات لاسترجاع جزء من حرارة الغازات لأغراض التسخين على متن السفينة ولتوليد الكهرباء، كذلك درست إمكانية توليد ماء عذب عبر استعادة حرارة وسائط تبريد المحرك. وفي الختام تم تحديد الوفر السنوي الممكن في استهلاك الوقود من خلال استعادة الطاقات الضائعة في المثال المدروس.

أولاً: استرجاع الطاقات الضائعة على متن السفينة :

المواقع التي تطرح فيها طاقة من محرك الديزل هي غازات الاحتراق، ومبرِّد هواء تشحين المحرك، ومبرّد المحرك. ومن المألوف أن تُستَخدَم حرارة غازات الاحتراق الناتجة من المحرك الرئيسي؛ لتحويلها إلى عمل ميكانيكي يسهم في دفع السفينة، وفي توليد بخار يستخدم في تسخين الوقود الثقيل (الفيول heavy fuel)، وللخدمات في غرف المعيشة. ويسهم البخار أيضاً في تسخين الحمولات أو خدمتها على ظهر السفينة.

عندما يكون محرك الديزل كبيراً جداً، وكميات الكهرباء اللازمة على متن السفينة معتدلة، فإنه يمكن تأمين هذه الكهرباء عبر اللجوء إلى توليد البخار بواسطة حرارة غازات الاحتراق، وإرساله إلى تشغيل عنفة بخارية تدير مولدة (انظر الشكل 2) WHTG waste –heat turbo generator . وحتى عندما لا تستطيع العنفة وحدها تغطية كل ما هو مطلوب من الطاقة الكهربائية، فإنها تظل اقتصاديةً، ومن المسوغ اللجوء إلى استخدامها؛ إذ يمكن توليد الجزء المتبقي اللازم من الطاقة الكهربائية بواسطة بخار إضافي متولد عبر إحراق وقود.

تُستَخدَم الحرارة المستعادة من هواء تشحين المحرك الرئيسي في الغالب؛ للتسخين الأولي لماء المرجل الذي يعمل باستعادة حرارة غازات الاحتراق، وتستخدم هذه الحرارة لتسخين صهاريج الوقود، وزيت التزليق في المنقيات purifier ، ولدارات التبريد الامتصاصية، ولتدفئة بعض المواقع، وأحياناً لتوليد الماء العذب من ماء البحر. أما حرارة ماء تبريد المحرك فيغلب استخدامها لتوليد الماء العذب. وتتحدد أهمية الحرارة الضائعة من المحركات المساعدة من خلال حجم هذه المحركات والمجال اللازم لاستخدام الحرارة. ففي سفن الركاب التي تحوي منشآت كهربائية، وبسبب الحاجة الكبيرة إلى توليد ماء عذب فإنه يُلجَأ إلى الاستفادة من حرارة غازات المحركات المساعدة.



الشكل (2) مثال على استخدام الطلقات الضائعة

أ- استرجاع الحرارة المحمولة مع غازات الاحتراق

يمكن تصميم مراجل تعمل بالاستفادة من الحرارة التي تحملها الغازات الناتجة من الاحتراق في المحرك الرئيسي عبر نقلها إلى وسائط أخرى. ويُستَخدَم بخار الماء على السفن عادةً بوصفه وسيطاً ناقلاً للحرارة، وهناك تجهيزات يستخدم الزيت فيها بنجاح بدل البخار، ولكن لاستخدام حرارة الغازات حدوداً تفرضها درجة حرارة تكاثف هذه الغازات. فمن المعلوم أن الوقود البحري يتضمن كميات من الكبريت قد تصل نسبتها إلى 5% من المحتوى. تراوح درجة حرارة تكاثف الغازات بين 140°C و160°C؛ وذلك وفقاً إلى نسب وجود SO_3 و H_2O فيها. وبامتزاج SO_3 و H_2O في الحالة الغازية، تنشأ أبخرة حمض الكبريت، وإذا رافق ذلك هبوط درجة حرارة الغازات في المرجل إلى ما دون درجة

حرارة التكاثف فإن بخار حمض الكبريت يتكاثف مسبباً اتساخ السطوح المعدنية للتبادل الحراري ثم تآكلها؛ وبعد فترة زمنية محددة يؤدي إلى إتلافها. ولتجنّب هذه الأضرار يجب ألا تقلّ درجة حرارة الطبقة الحدّية (بين الغازات وسطوح التسخين) عن درجة حرارة التكاثف. وتُعتَمد عادةً قيمة وسطية لدرجة حرارة سطوح التسخين هي درجة حرارة الوسيط الثانوي (المار ضمن سطوح التسخين) مضافاً إليها خمس درجات [4].

تنخفض درجة حرارة الغازات وكميتها بشدة لدى عمل المحرك بالحمولات الجزئية، ولتجنّب خطر انخفاض درجة حرارة غازات الاحتراق إلى مادون درجة حرارة التكاثف، يُترك واحدٌ من مجاري الغازات دون تمرير الغازات به بحيث تنخفض كمية الحرارة المسحوبة من الغازات.

يجري تصميم المراجل العاملة باستخدام حرارة غازات الاحتراق عند 85% إلى 90% من استطاعة المحرك الكلية، ويُحسب تدفق الحرارة المنقولة من المعادلة:

$$\dot{Q} = (1 - q_{loss}).\dot{m}_{fuel}.v_g.c_{p,m}.(t_{in} - t_{out}) \quad \frac{kJ}{h} \qquad (1)$$

حيث: q_{loss} الضياعات بواسطة الإشعاع والحمل، وهي تراوح بين 3 و 5%

v_g الحجم النوعي للغازات الرطبة $\left[\frac{m^3}{kg}\right]$ ، $\dot{m}_f$ الاستهلاك الساعي للوقود $\left[\frac{kg}{h}\right]$

$c_{p,m}$ السعة الحرارية النوعية الوسطية بثبوت الضغط لغازات الاحتراق الرطبة

أ–1 تحويل حرارة غازات الاحتراق إلى طاقة حرارية مفيدة :

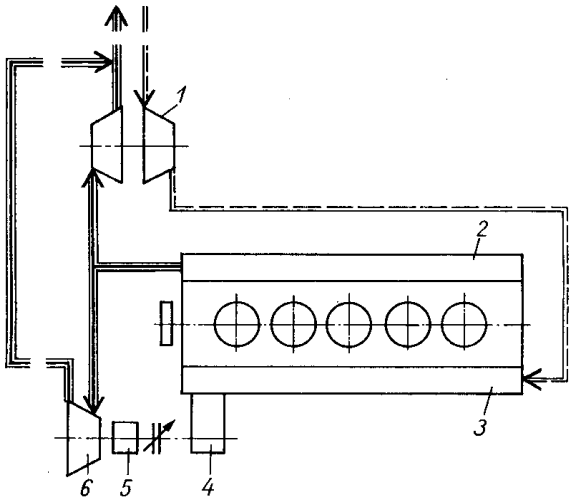
عندما تكون درجة حرارة غازات الاحتراق مرتفعة، فإنه من الاقتصادي استخدامها في توليد بخار مشبع يصلح للتسخين. وتتعلق كمية البخار التي يمكن توليدها بدرجة حرارة الغازات وتدفقها، وبضغط البخار المراد توليده، وبدرجة حرارة ماء تغذية المرجل. وباستخدام حرارة محركات الديزل المساعدة (التي تدير المولدات الكهربائية) في توليد البخار يمكن – خاصة عند الرسو في الميناء – الاستغناء عن المراجل التي تحرق الوقود.

أ–2 تحويل حرارة غازات الاحتراق إلى عمل ميكانيكي :

أدى أسلوب تشحين المحرك بواسطة غازات الاحتراق إلى رفع المردود بشكل كبير. وفي السفن التي تمتلك محركات ذات استطاعات كبيرة يُستخدَم جزءٌ فقط من طاقة غازات الاحتراق للتشحين، ويُمَرَّر الجزء الباقي من الغازات على عنفة غازية لتحويل الطاقة التي تحملها الغازات إلى عمل ميكانيكي، يُنقل بواسطة علبة سرعة إلى محور المنوبة كما هو مبين في الشكل (3).

أ–3 تحويل حرارة غازات الاحتراق إلى طاقة كهربائية :

يُعد استخدام العنفات البخارية لتوليد الكهرباء على ظهر السفن اقتصادياً، حيث تعمل هذه العنفات على البخار المتولد باستخدام الطاقة التي تحملها غازات احتراق المحرك الرئيسي (المستخدم لدفع السفينة)، أو المحركات المساعدة، وينطبق هذا بالدرجة الأولى على السفن ذات استطاعات الدفع الكبيرة، حيث يمكن تغطية كل الطلب على الطاقة الكهربائية والحرارية اللازمة من خلال استثمار الحرارة التي تحملها غازات الاحتراق ومياه التبريد.



الشكل (3) استخدام حرارة الغازات لتدوير عنفة غازية

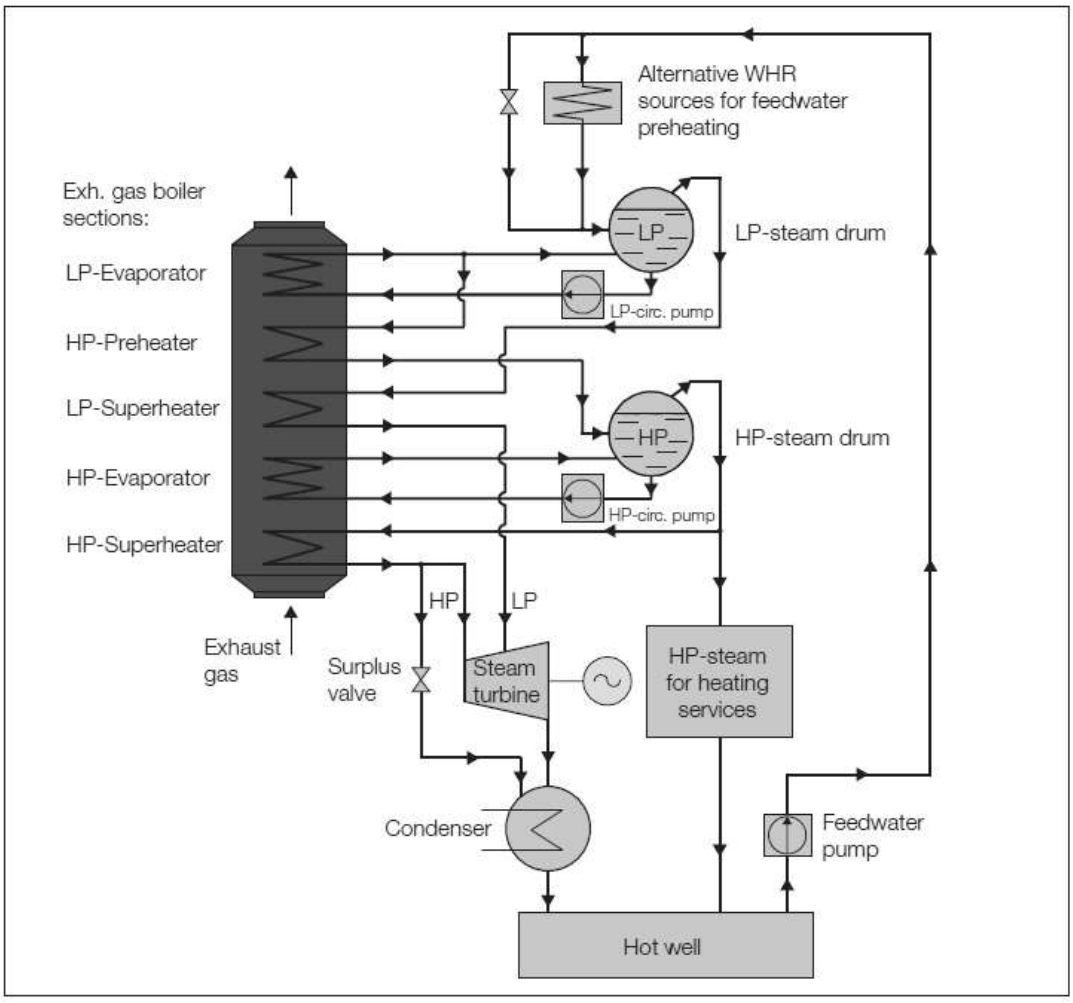
1 – شاحن المحرك الذي يعمل بغازات الاحتراق ، 2– مجمع غازات الاحتراق ، 3– مجرى هواء الامتصاص ، 4– علبة سرعة ، 5– عنفة غازية

وكلما كان ضغط البخار ودرجة حرارته أعلى، ارتفع الهبوط المفيد لإنتالبي حامل الطاقة (الذي هو البخار)، وزادت اقتصادية عملية تحويل الطاقة. تتعلق الاستطاعة الكهربائية P_{el} بتدفق البخار $\dot{m}_{steam}$ وبهبوط الإنتالبي Δh ومردود العنفة η_T ومردود المولد الكهربائي η_G :

$$P_{el} = \dot{m}_{steam} \cdot \Delta h \cdot \eta_T \cdot \cdot \eta_G / 3600 \quad [kW] \qquad (2)$$

ولكن يجب التذكير بأنه يلزم تخصيص جزء من البخار المتولد لاستخدامه في أغراضٍ أخرى، وهكذا يُقسم البخار إلى جزءٍ يجري تحميصه ليُرسل إلى العنفة البخارية التي تدير المولد الكهربائي، وجزءٍ آخر (مشبع) يستخدم للأغراض الأخرى. ولتحسين مردود مولد البخار يضاف أحياناً موفر economizer الذي يقوم بتسخين الماء تسخيناً أولياً قبل تبخيره. وقد تُقسم جملة التبخير إلى مجموعتين يسودهما ضغطان: عالٍ ومنخفض كما في الشكل (4)، وفي هذه الحالة تتناقص ضياعات غازات الاحتراق، ولكن تزداد مساحة سطوح التبادل الحراري، وكذلك الاستطاعة التي تولدها العنفة.

لمواجهة حمولات الذروة يمكن اللجوء إلى إحراق وقود إضافي في المرجل المساعد لفترة محدودة، وتوليد بخار بقصد توليد كهرباء، وقد يلزم هذا الإجراء في الحالات التي ينخفض فيها توليد البخار بسبب انخفاض الحمولة المطلوبة من المحرك الرئيسي أو التوقف لفترة قصيرة، ولكن لا يُنصَح باللجوء إلى المرجل المساعد للتغطية الكاملة للحمل الكهربائي؛ لأن الاستهلاك النوعي للوقود في هذه الحالة سيكون أكبر من نظيره في محرك الديزل بمرتين إلى ثلاث مرات. وتبلغ الكلفة النوعية لتوليد الكهرباء باستخدام مرجل يعمل بواسطة غازات الاحتراق 30 إلى 40% من نظيرتها عند استخدام محرك ديزل منفصل؛ لذلك من الاقتصادي استثمار أكبر جزء من طاقة غازات الاحتراق وتحويله إلى طاقة كهربائية طالما كان ذلك مطلوباً. وفي كثير من الأحيان لا تكفي كميات البخار المتولدة باستخدام غازات الاحتراق لإنتاج كميات الكهرباء المطلوبة؛ لهذا يُلجأ إلى إنتاج الطاقة اللازمة من مولد كهربائي يديره محرك ديزل خاص أو إلى إحراق وقود إضافي في المرجل.



الشكل (4) مرجل البخار بالحرارة الضائعة

ولما كان مردود المحرك الرئيسي أعلى من مردود المحركات الأخرى، ويستطيع إحراق أنواع من الوقود أقل جودةً وأرخص ثمناً، فقد لجئ في العقود الأخيرة إلى استخدام مولدات كهربائية تتصل بمحور المحرك الرئيسي عبر علبة سرعة ذات تفريع جانبي shaft generator.

ب- استرجاع الحرارة المحمولة مع ماء تبريد المحرك :

يُطرَح 15 إلى 30% من الحرارة المقدمة إلى محرك الديزل مع ماء التبريد، وتراوح درجة حرارة خروج ماء التبريد من محركات الديزل بين 60 و 90°C. و يجب من حيث المبدأ المحافظة على درجة حرارة ماء التبريد مرتفعة بالحدود التي تتحملها مادة المحرك وزيت التزليق، وهذا يسمح بتجنب التوترات الحرارية وفروق درجات الحرارة المرتفعة بين غازات الاحتراق وحجر التبريد، ويضمن عدم انخفاض درجة الحرارة إلى ما دون درجة التكاثف؛ لذلك يجب ألا يزيد فرق درجات الحرارة بين دخول ماء التبريد وخروجه على (6 – 10 °C)، وهكذا يصبح تدفق ماء التبريد 50 إلى $60\,kg/kW.h$ ، والتدفق الحراري المطروح (بالـ kJ/h) :

$$\dot{Q} = \dot{m}_c \,.c_{p,c}.(t_{in} - t_{out}) \qquad (3)$$

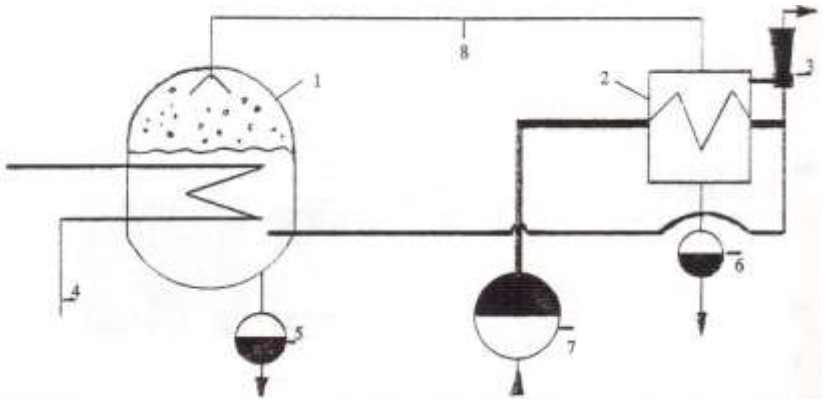
لكن انخفاض درجات حرارة وسائط التبريد يجعل سطوح التبادل الحراري كبيرة جداً، وعندما تقلّ درجة حرارة الوسيط عن 60°C فلا يمكن استغلال كميات الحرارة على السفينة إلا في نطاق محدود.

مبدئياً تجري المحاولة للاستفادة من غازات الاحتراق ذات الدرجات المرتفعة بالدرجة الأولى لتوليد الكهرباء، أو توليد العمل الميكانيكي. أما حرارة ماء التبريد أو هواؤه فتُستخدم للأغراض التي لا تحتاج إلى درجات حرارة مرتفعة، وإذا تطلّب الأمر اللجوء إلى درجات حرارة أعلى فإنه يُلجأ إلى التسخين اللاحق بواسطة البخار.

ب-1 *توليد الماء العذب بواسطة حرارة ماء التبريد*

تُستَخدَم على السفن بشكل رئيسي مبخرات تعمل بحرارة ماء تبريد المحرك. تتمتع هذه المبردات باقتصادية عالية، وهي قليلة الحاجة إلى الصيانة بسبب عملها عند درجات منخفضة وعدم تجمع أملاح ماء البحر على سطوحها.

يسود هذه المبخرات ضغط أدنى من الضغط الجوي ($p_v < p_{atm}$)، ويتبخر ثمن حتى ربع كمية ماء البحر المستخدمة في مجالٍ لدرجات الحرارة يراوح بين 46 و 32°C باستخدام حرارة ماء تبريد المحرك. ويُسحَب الجزء الباقي من الماء ذي الملوحة العالية المتجمع في أسفل المبخر بواسطة مضخة خاصة الدافع إلى خارج السفينة؛ لتجنب التركيز المرتفع للأملاح ونشوء الترسبات على المبخر. بعد ذلك يُكثَّف البخار المتولد في المكثف ليتم الحصول على ماءٍ عذب كما في الشكل (5). وعادةً لا يتم تشغيل أجهزة التبخير لتوليد ماء الشرب العذب من ماء البحر، إلا عندما تكون السفينة بعيدة عن الميناء لضمان نظافة ماء البحر المراد تحليته.



الشكل (5) استخدام حرارة ماء التبريد لتحويل ماء البحر إلى ماء عذب لاستخدامه على السفينة

1- المبخر ، 2- المكثف ، 3- مضخة التفريغ ، 4- ماء التسخين ، 5- مضخة تصريف الماء المالح ، 6- مضخة سحب الماء العذب ، 7- مضخة امتصاص ماء البحر ، 8- تمديدات نقل البخار من المبخر إلى المكثف

ب-2 *استخدام طاقة ماء تبريد المحرك في دارات التبريد على السفينة :*

يمكن استخدام طاقة ماء تبريد المحرك في دارت التبريد الامتصاصية المستخدمة للتكييف، أو المضخات الحرارية بغرض التدفئة، حيث يتم رفع ضغط وسيط التبريد عن طريق الحرارة المسترجعة. إن مزية منشأة التبريد التي تعمل بالدارة الامتصاصية هي الاستهلاك المنخفض للكهرباء (فقط للمضخات)، وقلة الصيانة المطلوبة (بسبب عدم وجود أجزاء متحركة). أما محذور الدارة الامتصاصية فهو هبوط الأثر التبريدي بشدة لدى انخفاض درجة حرارة وسيط التبريد. وتشبه المضخة الحرارية آلة التبريد الامتصاصية، بيد أن وظيفتها تكمن في تسخين حيزٍ ما بواسطة الحرارة المطروحة في مكثفها، وهي تنقل كميات من الحرارة من درجات حرارة منخفضة إلى درجات حرارة أعلى؛ ولذلك يُعَدُّ

استخدام المضخة الحرارية مناسباً عند توافر طاقة عند درجة حرارة منخفضة فائضة، كما هي الحال في مياه تبريد المحركات.

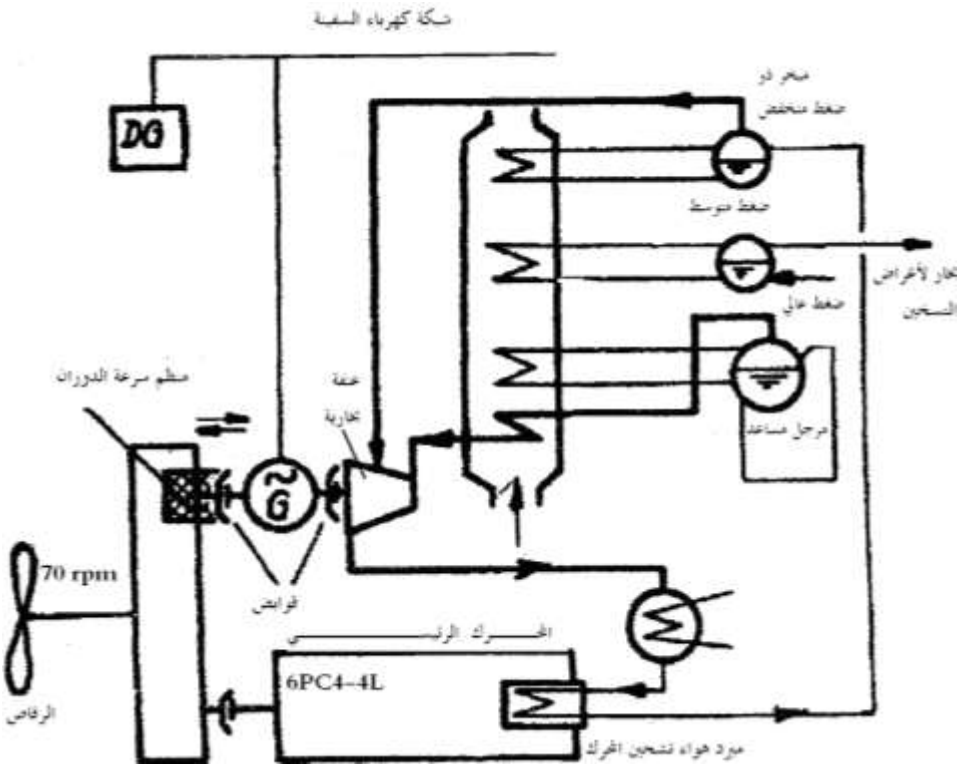
ب-3 *استخدام طاقة ماء تبريد المحرك* في تسخين الخزانات :

يجب تسخين خزانات الوقود لتحقيق اللزوجة المناسبة لتخزين الوقود وتجنّب تجمده وضخّه، ويلزم التسخين في أثناء تنقيته في المنقيات النابذية. وعند استخدام الوقود الثقيل تكون كميات الحرارة اللازمة للتسخين كبيرة جداً.

تبعاً لدرجة حرارة الوسط المحيط، ونوع الوقود، ودرجة حرارته، وشكل الخزان، وموقع وجوده على السفينة، فإن الاستطاعة اللازمة لإبقاء الوقود ساخناً هي $0.5 \text{ kW/m}^3 \text{ fuel} \div 0.2$. وعند بدء التسخين يتصاعد الاستهلاك تبعاً لسرعة التسخين إلى الضعفين وحتى ستة الأضعاف. ومن المألوف استخدام بخار مشبع ضغطه $0.4 \text{ MPa} \div 0.2$، يُولّد عادةً باستخدام حرارة غازات الاحتراق الناتجة من المحرك ويتوافر بكميات كافية. والسائد على السفن هو اللجوء إلى استخدام البخار لتوليد الكهرباء بواسطة عنفة بخارية وتأمين حرارة التسخين للأغراض المختلفة على السفينة من ماء تبريد المحرك قدر الإمكان.

ج- الاستخدام المشترك لطاقات غازات الاحتراق وماء التبريد :

عند السعي إلى تحويل طاقة ماء التبريد إلى طاقة كهربائية (توليد بخار وتمريره على عنفة بخارية)، يكون المردود صغيراً وتنفيذ العملية بالإجمال معقداً؛ لذلك يُفضَّل الاستخدام المشترك للطاقات المحمولة مع الماء والغازات (super economical shaft generator) (SSG) كما هو واضح في المثال المعروض في الشكل (6) الذي يتضمن مولداً للبخار يسترجع حرارة غازات الاحتراق ثلاثي المراحل إلى جانب مولد بخار مساعد (يحرق وقوداً).



الشكل (6) مثال على الاستخدام المشترك للطاقات المحمولة مع الماء والغازات SSG

تتألف العنفة البخارية في هذا التصميم من مرحلة ذات ضغطٍ منخفض، وأخرى ذات ضغط عالٍ. وهي تتصل بالمولد الكهربائي من خلال قابض. وهناك جهاز يقوم بالضبط الأوتوماتيكي لسرعة الدوران يصل بين المولدة G والعنفة عبر القابض. يسمح هذا التصميم بأن يقوم المحرك الرئيسي للسفينة بتشغيل المولدة الكهربائية عند فصل العنفة؛ كذلك تستطيع العنفة أن تنقل الاستطاعة الزائدة عن الرفاص إلى المولدة. يُسخَّن الماء المتكاثف تسخيناً أولياً في مبرد هواء تشحين المحرك قبل إرساله إلى أسطوانة فصل البخار في مبخر الضغط المنخفض، ويُرسل البخار المشبع المتولد في مبخر الضغط المنخفض إلى عنفة الضغط المنخفض مباشرةً. أما مبخر الضغط المتوسط فإنه يُستخدم لتوليد بخار لأغراض التسخين. يقع مبخر الضغط العالي فوق المرجل المساعد، ويُحمَّص البخار قبل إرساله إلى العنفة. تتجلى أهمية منشأة SSG في استخدام الطاقات الثانوية (طاقة ماء تبريد المحرك وماء تبريد هواء التشحين)، وفي جعل مولدة الكهرباء موصولة بالعنفة والمحرك معاً. ويمثل هذا التصميم مثالاً على الاتجاهات الحديثة في التصميم الأمثل لمحطات القدرة على السفن.

النتائج والمناقشة :

معطيات إجراء الحسابات :

يبين الجدول **(1)** أهم البيانات المتعلقة بالمحرك البحري المدروس من النوع K5SZ 70/125 ثنائي الشوط الذي يتضمن شاحناً عنفياً.

الجدول (1) مواصفات المحرك البحري المدروس

الاستطاعة الدليلية عند السرعة الاسمية	P_i=8539 kW
المردود الميكانيكي	$\eta_m = 0.89$
استطاعة المحرك الاسمية	P_n=7600 kW
سرعة الدوران الاسمية	n_n=130 rpm
استهلاك الوقود	$\dot{m}_{fuel} = 1516\ kg/h$
القيمة الحرارية للوقود	$H_u = 42707\ \ kJ/kg$
الشروط الجوية المحيطة	p_{at}=0.101MPa , t_{at}=24°C
تحليل غازات الاحتراق الناتجة	CO_2=5.2% ,O_2=14.2%
مواصفات غازات الاحتراق بعد الشاحن العنفي	p_{aTC}=0.103MPa, t_{aTC}=290°C
مواصفات ماء البحر	t_{SW}=18°C و $\rho_{SW} = 1.025\ kg/dm^3$
درجة حرارة غرفة الآلات	t_{MR} = 32°C
مواصفات هواء التشحين بعد التبريد بماء البحر	p_{air}=0.21MPa, t_{air}=46°C

كما يبين الجدول (2) بيانات وسائط تبريد المحرك المختلفة (ماء عذب + ماء بحر).

الجدول (2) بيانات وسائط تبريد المحرك

نوع الوسيط	درجة حرارة الدخول	درجة حرارة الخروج	التدفق
الماء العذب لتبريد الأسطوانات	$t_{cyl,1} = 65^{\circ}C$	$t_{cyl\,2} = 74^{\circ}C$	$\dot{V}_{cyl} = 163\,m^3/h$
الماء العذب لتبريد المكبس	$t_{P,1} = 57^{\circ}C$	$t_{P,2} = 63^{\circ}C$	$\dot{V}_{P} = 68\,m^3/h$
الماء العذب لتبريد البخاخات	$t_{inj,1} = 50^{\circ}C$	$t_{inj,2} = 53^{\circ}C$	$\dot{V}_{inj} = 5\,m^3/h$
ماء البحر لتبريد هواء التشحين	$t_{TC,1} = 18^{\circ}C$	$t_{TC,2} = 29^{\circ}C$	$\dot{V}_{TC} = 181\,m^3/h$
ماء البحر لتبريد زيت التزليق	$t_{oil,1} = 18^{\circ}C$	$t_{oil,2} = 20^{\circ}C$	$\dot{V}_{oil} = 106\,m^3/h$

حسابات الموازنة الحرارية :

كمية الحرارة المضافة مع الوقود: $\dot{Q}_{supl} = 1516 \times 24707 = 64.74 \times 10^6 \;\; kJ/h$

الطاقة المفيدة: $\dot{Q}_{u} = 7600 \times 3600 = 27.36 \times 10^6 \;\; kJ/h$

أما حجم الهواء اللازم لإحراق 1 كغ من الوقود فيمكن حسابه من العلاقة التقريبية الآتية [5]:

$$v_{a,\min} = \frac{H_{u-}4668}{3383} = \frac{42707 - 4668}{3383} = 11.24\frac{m^3}{kg} \qquad (4)$$

بمراعاة تحليل غازات الاحتراق يمكن حساب عامل فائض الهواء من العلاقة الآتية:

$$\lambda_u = \frac{21}{21 - \frac{79}{N_2}.(O_2 - \frac{CO}{2})} = \frac{21}{21 - \frac{79}{80.44}.(5.2 - \frac{1.6}{2})} = 2.94 \qquad (5)$$

حيث تم استنتاج نسبة النيتروجين في غازات الاحتراق باستخدام المعادلة: $N_2 = 100 - (CO_2 + O_2 + CO)$

وتصبح نسبة اليتروجين في نواتج الاحتراق: $N_2 = 100 - (5.5 + 14.2 + 0.16) = 80.44\ \%$

لحساب الحجم الأصغري للغازات الرطبة الناتجة من احتراق 1 كغ وقود تستخدم المعادلة التقريبية الآتية [4]:

$$v_{exh,wet}^{\min} = \frac{1.25 \times H_u - 12778}{3383} = \frac{1.25 \times 42707 - 12778}{3383} = 12\frac{m^3}{kg} \qquad (at\ \ normal\ \ conditions)$$

ويصبح حجم الغازات الرطبة الناتجة من احتراق 1 كغ وقود:

$$v_{exh,wet} = v_{exh,wet}^{\min} + (\lambda_u - 1).v_{a,\min} = 12 + (2.94 - 1) \times 11.24 = 33.8\ m^3/kg$$

أصبح الآن ممكناً حساب الضياعات الحرارية المحمولة مع غازات الاحتراق الصادرة عن المحرك، وهي تتألف من جزأين : حرارة محسوسة وحرارة كامنة بفعل عدم الاحتراق الكامل (تشكّل CO).

أ- الحرارة المحسوسة المطروحة مع غازات الاحتراق (بعد الشاحن العنفي):

$$\dot{Q}_{exh} = \dot{m}_{fuel} \times v_{exh,wet} \times c_{p,exh} \times (t_{aTC} - t_{at}) =$$

$$1516 \times 33.8 \times 1.34 \times (290 - 24) = 18.26 \times 10^6 \;\; kJ/h$$

حيث أخذنا قيمة وسطية للسعة الحرارية لغازات الاحتراق قدرها: $c_{p,exh} = 1.34\ kJ/m^3$

ب- الحرارة الكامنة يمكن حسابها بواسطة المعادلة التقريبية الآتية [5]:

$$q_{CO} = 22.57 \times (\frac{131300}{H_u} - 1) \times \frac{CO}{CO + CO_2}$$

$$22.57 \times (\frac{131300}{42707} - 1) \times \frac{0.16}{0.16 + 5.2} = 1.4\%$$

وتصبح الحرارة الكامنة المحمولة مع أول أوكسيد الكربون CO:

$$\dot{Q}_{CO} = q_{CO} \times \dot{Q}_{supl}$$

$$= 1.4 \times 10^{-2} \times 64.74 \times 10^6 = 0.9 \times 10^6$$

والحرارية الإجمالية المحمولة مع غازات الاحتراق الصادرة عن المحرك:

$$\dot{Q}_{exh,total} = \dot{Q}_{exh} + \dot{Q}_{CO} = 19.16 \times 10^6\ \ kJ/h$$

سنحسب الآن الحرارة المحمولة مع وسائط التبريد المختلفة التي تشمل: الأسطوانات، والشاحن العنفي، والمكابس، والبخاخات، وتبريد الهواء المشحن، وزيت التزليق.

إن المعادلة التي تسمح بحساب التدفق الحراري عموماً هي: $\dot{Q} = \dot{V} \times \rho \times c \times \Delta t$

مع العلم بأنه للماء العذب والمالح $c_W = 4.19\ kJ/kg$، وللماء المالح $\rho_{SW} = 1025\ kg/m^3$، وللماء العذب $\rho_{FW} = 1000\ kg/m^3$. وسننظم جدولاً (3) يتضمن التدفقات الحرارية المختلفة:

الجدول (3) التدفقات الحرارية في دارات تبريد المحرك المختلفة

نوع الوسيط	التدفق الحراري $[kJ/h]$
تبريد الأسطوانات والشاحن العنفي بالماء العذب	$\dot{Q}_{cyl.} = 163 \times 1000 \times 4.19 \times (74 - 65) = 6147 \times 10^3$
تبريد المكابس بالماء العذب	$\dot{Q}_{piston} = 68 \times 1000 \times 4.19 \times (63 - 57) = 1710 \times 10^3$
تبريد البخاخات بالماء العذب	$\dot{Q}_{inj.} = 5 \times 1000 \times 4.19 \times (53 - 50) = 63 \times 10^3$
تبريد الهواء المشحن بماء البحر	$\dot{Q}_{TC.} = 181 \times 1025 \times 4.19 \times (29 - 18) = 8550 \times 10^3$
تبريد زيت التزليق بماء البحر	$\dot{Q}_{oil.} = 106 \times 1025 \times 4.19 \times (20 - 18) = 910 \times 10^3$
المجموع	$\dot{Q}_{cooling} = 17.38 \times 10^6$

ثمة حرارة يحملها الهواء المشحن القادم إلى المحرك تحسب بالعلاقة:

$$\dot{Q}_{air} = \dot{m}_{air} \times \left[c_p . \Delta t + R . T_{air} . \ln \frac{p_{aTC}}{p_{atm}} \right]$$

تدفق هواء التشحين: $\dot{m}_{air} = \dot{m}_f \times v_{a,\min} \times \rho_{air} \times \lambda_u$

$$= 1516 \times 11.24 \times 1.293 \times 2.94 = 64776\ \ kg/h$$

باعتبار: $c_p = 1.01\ kJ/kg.K$ و $R = 0.287\ kJ/kg.K$ تصبح الحرارة التي يحملها الهواء المشحن القادم إلى المحرك:

$$\dot{Q}_{air} = 64776 \times \left[1.01 \times (46-24) + 0.287 \times 319 \times \ln\frac{0.21}{0.101}\right]$$
$$= 5.78 \times 10^6\ kJ/h$$

يمكن الآن جمع نتائج الموازنة الحرارية في الجدول (4) الآتي:

الجدول (4) نتائج الموازنة الحرارية للمحرك

نوع الحرارة	القيمة $\times 10^6\ kJ/h$	النسبة المئوية %
الحرارة الإجمالية المحمولة مع الوقود	$\dot{Q}_{supl} = 64.74$	100
الحرارة المفيدة	$\dot{Q}_u = 27.36$	42.3
الحرارة المحمولة مع غازات الاحتراق	$\dot{Q}_{exh,total} = 19.16$	29.6
الحرارة المحمولة مع وسائط التبريد	$\dot{Q}_{cooling} = 17.38$	26.8
الحرارة الضائعة من وسائط التبريد	$\dot{Q}_{los} = 0.84$	1.3
الحرارة المحمولة مع هواء التشحين	$\dot{Q}_{air} = 5.78$	8.9

سنحسب الآن إمكانيات استرجاع الحرارة الضائعة المحسوبة:

أ- استخدام حرارة الغازات لأغراض التسخين :

بالعودة إلى معطيات المحرك نلاحظ أن درجة حرارة غازات الاحتراق المغادرة للعنفة الغازية (بعد الشاحن العنفي) هي t_{aTC}=290°C، وعند هذه الدرجة المرتفعة نسبياً يمكن توليد بخار مشبع بضغط 0.7 MPa ذي إنتالبي h_g=2764 kJ /kg.K ، فإذا رغبنا بتوليد كمية من البخار قدرها $\dot{m}_{steam} = 1500\ kg/h$ ، وكان مردود المرجل $\eta_{boiler} = 0.96$، ودرجة حرارة دخول الماء إليه $t_{boiler,1} = 96^\circ C$ (التي يقابلها $h_{boiler,1} = 251 kJ/kg$)، فإن كمية الحرارة المسترجعة اللازمة لتوليد البخار تصبح:

$$\dot{Q}_{ex,b} = \frac{\dot{m}_{steam} \times \Delta h}{\eta_{boiler}} = \frac{1500 \times (2764-251)}{0.96} = 3.93 \times 10^6 \quad kJ/h$$

عرفنا لدى حساب الموازنة الحرارية بأن كمية الحرارة المضافة هي $\dot{Q}_{supl} = 64.74 \times 10^6\ kJ/h$ ؛ وبذلك تشكل كمية الحرارة المسترجعة اللازمة لتوليد البخار نسبة ستة بالمائة من الحرارة المضافة للمحرك حيث:

$$\frac{3.93 \times 10^6}{64.74 \times 10^6} = 6\% \ .$$

درجة حرارة الغازات بعد مغادرتها للمرجل يمكن حسابها من العلاقة (1)، فإذا فرضنا أن مجموع ضياعات الإشعاع والحمل 3%، والسعة الحرارية لغازات الاحتراق 1.34 kJ /m^3.K فإن:

$$\Delta t = \frac{3.93\times10^6}{(1-0.03)\times1516\times33.8\times1.34}$$

وبما أن درجة حرارة دخول الغازات معلومة، وتبلغ 290˚C فإن درجة حرارة خروج الغازات من المرجل تصبح $t_{ex,2}$ = 231 ˚C، وهي لا تزال مرتفعة نسبياً، وبهذا لم يتم استخدام إلا جزء من الحرارة التي تحملها غازات الاحتراق المغادرة للمحرك في توليد بخار مخصص لأغراض التسخين.

ب- استخدام حرارة الغازات لتوليد طاقة كهربائية :

إذا أردنا توليد بخار بضغط 1.0 MPa، ودرجة حرارة 250˚C (يقابلها h_g = 2940 kJ/kg)، وافترضنا أن درجة حرارة الغازات المغادرة للمرجل هي 170˚C (تحاشياً للوصول إلى درجة حرارة التكاثف)، واعتبرنا درجة حرارة دخول ماء التغذية إلى المرجل هي $t_{boiler,1} = 75^{\circ}C$ (التي يقابلها $h_{1,f}$ = 314 kJ/kg)، تنتج الحرارة اللازمة لتوليد البخار بالتعويض في العلاقة (1):

$$Q'_b = (1-0.03)\times33.8\times1.34\times(290-170) = 7.99\times10^6 \;\; kJ/h$$

وهذا يكافئ 12.3% من الحرارة المضافة مع الوقود (حيث: $\frac{7.99\times10^6}{64.74\times10^6} = 12.3\%$).

تدفق البخار في هذه الحالة: $\dot{m}_{steam} = \frac{\dot{Q}'_b\times\eta_{boiler}}{h_g - h_f} = \frac{7.99\times10^6\times0.96}{2940-314} = 2900\ \frac{kg}{h}$

وتحسب الطاقة الكهربائية التي يمكن توليدها بالتعويض في العلاقة (2):

$$P_{el} = \frac{2900\times(2940-2194)\times0.65\times0.9}{3600} = 352\ kW$$

حيث افترضنا : مردود العنفة $\eta_T = 0.65$ ، ومردود المولدة الكهربائية $\eta_G = 0.9$

انطلقنا في حسابنا هذا من أن مجمل كمية البخار تستخدم لتوليد الطاقة الكهربائية، ولكن بما أن جزءاً من البخار يستخدم لأغراض التدفئة وأغراض معيشية أخرى، فإن الاستطاعة الكهربائية تكون أقلّ بقليل.

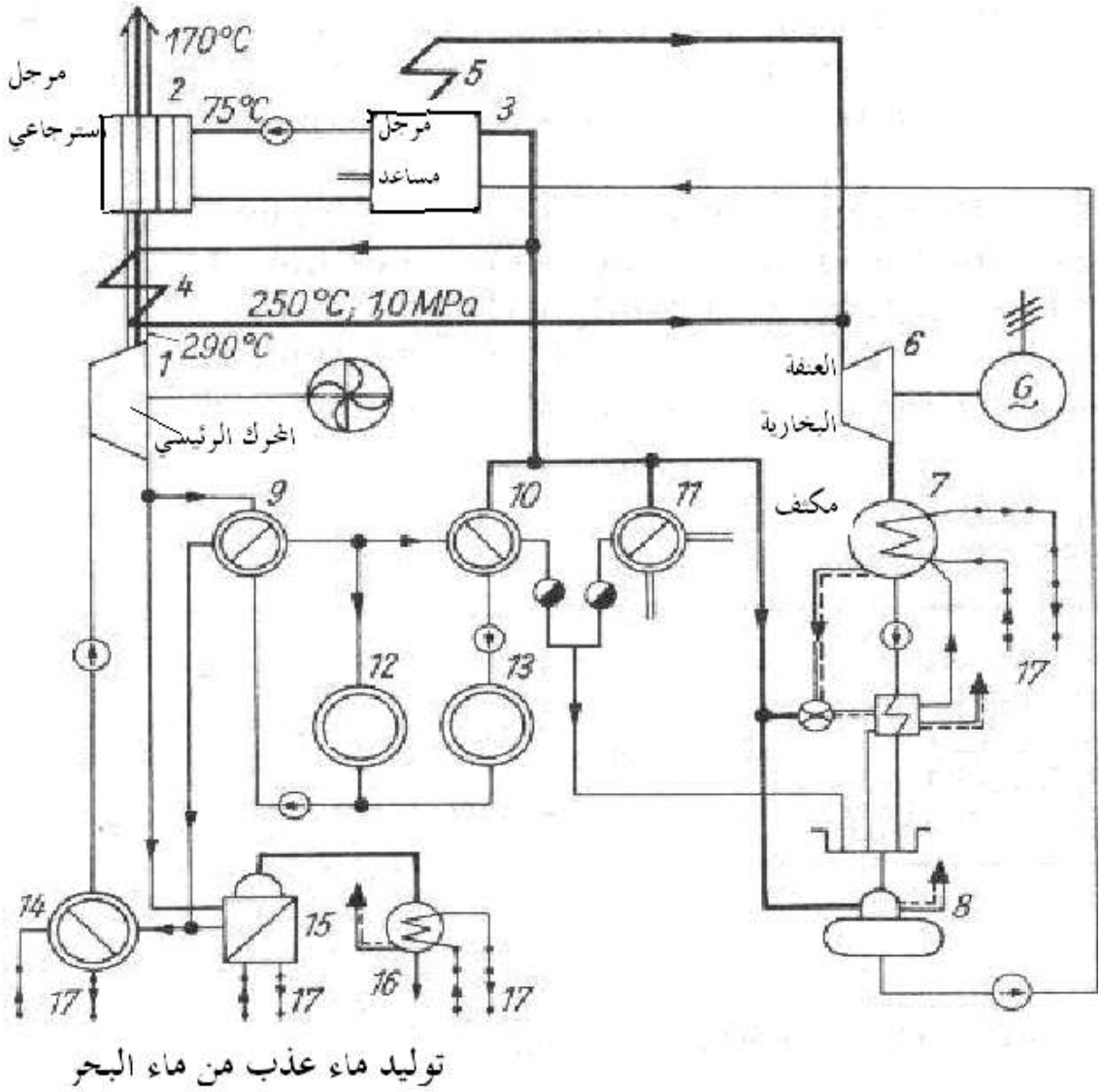
ج- استخدام حرارة وسائط التبريد لتوليد ماء عذب من ماء البحر :

إذا فرضنا أن كمية الماء العذب المراد توليده هي 18 طناً يومياً؛ أي ما يعادل 750 kg/h، وأن ضغط التبخير هو p_v=0.008 MPa (يقابله h=2575 kJ/h) ، فإن درجة حرارة التبخير المقابلة t_v =42˚C (يقابلها h=175 kJ/h). تبلغ درجة حرارة البحر في هذه الدراسة t_{SW} = 18˚C (يقابلها h_{SW}=75 kJ/h)، فإذا كانت كمية المياه المالحة المطروحة 8 أمثال كمية المياه العذبة المولدة ينتج:

$$\begin{aligned}\dot{Q}_{FW} &= \dot{m}_{FW}.(h_{at0.008MPa} - h_{SW}) + \dot{m}_{ex,W}.(h_v - h_{SW}) \\ &= 750\times(2575-75) + 8\times750\times(175-75) \\ &= 1.5\times10^6\ \frac{kJ}{h}\end{aligned}$$

وهذا يعادل 2.3% من كمية الحرارة المضافة مع الوقود (حيث: $\frac{1.5\times10^6}{64.74\times10^6}=2.3\%$).

ويمكن الآن تمثيل كيفية الاستفادة من طاقة غازات الاحتراق وطاقة وسائط التبريد المختلفة للمحرك بواسطة الشكل (7).



الشكل (7) مخطط محرك ديزل بحري رئيسي مع استرجاع لطاقة الغازات ومياه التبريد

1- محرك الديزل، 2- مرجل استرجاع الحرارة، 3- مرجل مساعد، 4- محمص، 5- محمص المرجل المساعد، 6- عنفة تشغيل المولد الكهربائي، 7- مكثف، 8- طارد غازات، 9- مبادل حراري، 10- مسخن متمم 11- مسخن أولي للفيول، 12- مسخّن جزئي إلى درجات منخفضة، 13- تسخين إلى درجات حرارة عالية، 14- مبادل حراري (ماء ساخن مع ماء بحر)، 15- منشأة توليد ماء عذب، 16- ماء عذب، 17- ماء بحر.

حساب مردود تحويل الطاقة والوفر السنوي في استهلاك الوقود عبر استرجاع الطاقات الضائعة :

يعبّر مردود تحويل الطاقة عن مستوى الاستفادة من الحرارة المحمولة مع الوقود:

$$\eta_{conv} = \frac{\text{مجموع كميات الحرارة المفيدة}}{\text{الطاقة المستخدمة}} = \frac{\dot{Q}_u + \dot{Q}_{ex,b} + \dot{Q}_{FW}}{\dot{Q}_{supl}}$$

1- عند استخدام حرارة الغازات **للتسخين فقط**، وحرارة وسائط التبريد لتحلية ماء البحر يصبح مردود تحويل الطاقة:

$$\eta_{conv,1} = \frac{(27.36 + 3.93 + 1.5) \times 10^6}{64.74 \times 10^6} = 50.6\%$$

إذا اعتبرنا زمن الاستخدام τ = 4320 h/year؛ أي ما يعادل 180 يوم إبحار في السنة فسنحسب فيما يلي وفر الوقود السنوي عبر حساب كمية الوقود التي يجب حرقها بشكل إضافي إذا لم تستخدم وسائل استرجاع الطاقة.

إن كمية الحرارة اللازمة لأغراض التسخين وتوليد الماء العذب هي $\dot{Q}_{ex,b}$ و $\dot{Q}_{FW}$؛ أي:

$$Q_{aux,b1} = \dot{Q}_{ex,b} + \dot{Q}_{FW} = (2.93 + 1.5) \times 10^6 = 5.43 \times 10^6 \frac{kJ}{h}$$

وكمية الوقود المكافئة لها التي يمكن وفرها:

$$\dot{m}_{fuel} = \frac{Q_{aux,b}}{H_u \times \eta_{aux,b}} = \frac{5.43 \times 10^6}{42707 \times 0.86} = 148 \frac{kg}{h}$$

2- عند استخدام حرارة الغازات **للتسخين، وتوليد الكهرباء**، وحرارة وسائط التبريد لتحلية ماء البحر يصبح مردود تحويل الطاقة:

$$\eta_{conv,2} = \frac{(27.36 + 7.99 + 1.5) \times 10^6}{64.74 \times 10^6} = 56.7\%$$

إن كمية الحرارة اللازمة لأغراض التسخين، وتوليد الكهرباء، وتوليد الماء العذب هي:

$$Q_{aux,b2} = \dot{Q}_{ex,b} + \dot{Q}_{FW} = (7.99 + 1.5) \times 10^6 = 9.49 \times 10^6 \frac{kJ}{h}$$

وكمية الوقود المكافئة لها التي يمكن وفرها:

$$\dot{m}_{fuel} = \frac{Q_{aux,b2}}{H_u \times \eta_{aux,b}} = \frac{9.49 \times 10^6}{42707 \times 0.86} = 258 \ \frac{kg}{h}$$

ومن الواضح أن كميات الوقود التي يمكن وفرها كبيرة نسبياً، وتستحق الجهد المبذول في تعديل التصميم الأساسي، وإضافة تجهيزات لاسترجاع الطاقة.

الاستنتاجات والتوصيات :

تتضح من العرض السابق أهمية دراسة إمكانيات استرجاع الطاقات الضائعة من المحركات البحرية مع غازات الاحتراق ووسائط التبريد، وإمكانية استثمار جزء كبير منها في أغراض كثيرة مفيدة على السفينة.

لقد بينت هذه الدراسة من خلال الأرقام إمكانية رفع مردود تحويل الطاقة على السفينة، حيث أمكن لمحرك

يستهلك 1516 كغ من الوقود ساعياً توفير 148 كغ عند استخدام حرارة الغازات للتسخين فقط وحرارة وسائط التبريد لتحلية ماء البحر؛ أي تخفيض الاستهلاك بنسبة عشرة بالمائة. ويكون الوفر في الوقود أكبر ويصل إلى 258 كغ من الوقود ساعياً إذا استخدمت حرارة الغازات للتسخين، وتوليد الكهرباء، وحرارة وسائط التبريد لتحلية ماء البحر.

المراجع :

1-KRACKHARDT, E-C. *Energierückgewinnung aus Schiffsabgasen*. Conference Klimaschutz. Hamburg- Germany, April 2009 , 12. Schiffsemissionen und

2-HAMELMANN, A. *Systematic Compilation of Technical Main Influencing Factors on Energy Costs in Ship Operation*. Diplomarbeit, Oldenburg Ostfriesen Wilhelmshafen University, 2009, 86.

3-MAN Diesel. *Thermo Efficiency System*. www.manbw.com , article_005055.html, 11.11.2008, 12.

4-MOECK, E. *Schiffsmaschinenbetrieb* . *V*erlag Technik GmbH, Berlin- Germany, 1990, 703.

5-ELSNER, N. *Grundlagen der technischen Thermodynamik*. Akademie Verlag, Berlin- Germany,1985, 641.