



كلية الهندسة - جامعة بغداد

جمعية كليات الهندسة
اعضاء اتحاد الجامعات العربية

محاكاة حاسوبية لنظام استغلال الطاقة الحرارية المهدرة من الأفران الحرارية الدوارة في معمل اسمنت طرطوس لتحلية مياه البحر

احمد محمد اسكندر^{1*}، داني كمال ابراهيم²، ميساء علي شاش³

¹قسم هندسة الطاقات المتجددة، كلية الهندسة التقنية، جامعة طرطوس، سوريا، iskandar19932015@gmail.com

²قسم هندسة الأتمتة الصناعية، كلية الهندسة التقنية، جامعة طرطوس، سوريا، danyibrahim2@gmail.com

³قسم المعادن والألياب، كلية الهندسة التقنية، جامعة طرطوس، سوريا، mayssaali@yahoo.fr

الباحث الممثل: احمد اسكندر، iskandar19932015@gmail.com

نشر في: 31 كانون الاول 2021

الخلاصة: تم في هذا البحث دراسة إمكانية استرجاع الطاقة الحرارية المهدورة من الفرن الحراري في معمل اسمنت طرطوس واستثمارها بتحلية مياه البحر، حيث تفاوتت قيم درجات الحرارة والضائعة والمتسربة إلى الوسط الخارجي عبر سطح الفرن بين (130-350 °C). تعتمد فكرة البحث على دراسة مبادل حراري متعامد الجريان لاسترجاع جزء من الحرارة الضائعة بهدف استثمارها بتحلية مياه البحر، تم إجراء دراسة تحليلية للأحمال الحرارية لأفران معمل الاسمنت ومن ثم إجراء محاكاة حاسوبية لمبادل حراري متعامد الجريان مصنوع من أنابيب نحاسية طوله 39 m مكون من 9 طبقات ذو ترتيب معين حيث تكون الخطوة بين الأنابيب $S_1=2,3D$ ، $S_2=D$ ومركب على قطاع زاوي 120° فوق الفرن وبالتالي يكون عدد الأنابيب في كل صف 140 أنبوب، بينت نتيجة المحاكاة الحاسوبية على المبادل أن سرعة الجريان المناسبة للوصول إلى درجة الحرارة المطلوبة $0,0535 \text{ m/s}$. وهذا يؤمن استرجاع طاقة حرارية مقدارها $10992,9439 \text{ KW}$ ، تكافئ حرق $8956,883837 \text{ ton}_{\text{fuel}}/\text{year}$ يمكن بواسطتها تبخير $1015027,2 \text{ m}^3_{\text{w}}/\text{year}$ ، وتكون نسبة استرجاع الحرارة $78,295\%$ ، ونسبة استرجاع الوقود $6,22\%$.

الكلمات الرئيسية - استرجاع الحرارة الضائعة، نقل الحرارة والكتلة، مبادل حراري هواء-ماء، تحلية مياه البحر.

1. المقدمة

تعتمد طريقة التحلية بالتبخير الومضي على تسخين الماء المالح إلى درجة حرارة أعلى من درجة الغليان، ثم يسخن هذا الماء المالح الساخن إلى غرفة عند ضغط أقل من ضغط الغليان، فيحدث التبخر الفجائي (الومضي) ويتكون البخار والذي يتم تكثيفه ليصبح الماء المنتج [3].

مراحل عملية التحلية:

المعالجة الأولية [7, 3]:

تتم معالجة مياه التغذية الداخلة لوحدة التحلية لحماية الوحدة والأجهزة من التآكل وترسب الأملاح، ومن عمليات ترسب العوالق والمواد العضوية

التبخير والتكثيف [9, 11, 3]:

يتم تسخين المياه إلى درجة حرارة أعلى من درجة الغليان عن طريق مصدر حراري حيث يمكن أن تصل درجة الحرارة إلى (90-120 °C)، يدخل بعدها البخار إلى غرفة ذات ضغط أقل من ضغط الغليان، فيحدث التبخر الفجائي (الومضي) ويتكون البخار ويصعد للأعلى ليقابل مجموعة من أنابيب التكثيف باردة السطح (وعادة ما يكون بداخلها ماء البحر للتبريد) فيتكثف البخار إلى ماء مقطر ويتم تجميعه وخروجه كماء منتج للاستفادة منه، ومن الممكن أن يصل عدد الغرف إلى 25 غرفة.

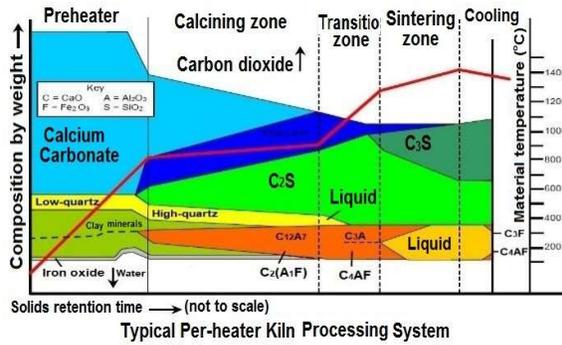
ويوضح الشكل I نموذج لوحدة تحلية بالتبخير الومضي متعدد المراحل.

بسبب الزيادة السكانية الهائلة التي شهدتها العالم منذ منتصف القرن العشرين زاد الطلب على المياه لمختلف الاستخدامات خاصة للشرب والزراعة، ليزداد معها معدل الاستنزاف لموارد المياه الجوفية تحديداً وما ارتبط بتغير نوعيتها وتقليل كميتها، وربما كان التغير المناخي هو الظاهرة الأكثر تأثيراً، حيث يتوقع أن تكون لها تداعيات كبيرة على الموارد المائية في جميع أقاليم العالم.

إزاء هذه الحقائق أدرك جميع الفاعلين في العالم من منظمات دولية وخبراء وحكومات بأن طاقة المياه التقليدية لن تفي بالغرض ولن تغطي الطلب المتزايد لملايين السكان والذين يتزايدون بوتيرة أسرع من وتيرة تزايد وتجدد هذه الموارد، وكان التحدي الأساسي في هذا المنحى هو زيادة العرض المائي، واشتد البحث عن بدائل لتحقيق ذلك لتكون تحلية مياه البحر هي الخلاص الوحيد والمنفذ للبشرية من هلاكها المائي [2].

تضم تقنيات تحلية مياه البحر مجموعتين أساسيتين: التقنيات الحرارية والتي تضم التقطير الومضي متعدد المراحل (MSF)، التبخر متعدد التأثير (MED)، التضاغط البخاري (VC) [3, 6]؛ والتقنيات الغشائية وتضم التناضح العكسي (RO)، والديليزة الكهربائية (ED) [18, 19, 20, 21]، وتبني هذه التقنيات من حيث طبيعة عملها والمبدأ الأساسي الذي تقوم عليه وهذا ما أفرز تبايناً في محددات الاستخدام التي تميز كل تقنية عن الأخرى.

تصل إلى درجة الحرارة العظيمة 1400°C . يبين الشكل 3 المناطق الحرارية في الفرن وتوزع درجات الحرارة.



الشكل 3: المناطق الحرارية في الفرن وتوزع درجات الحرارة

بالرغم من وجود بطانة للعزل الحراري لم يمنع التسرب الحراري على كامل السطح الخارجي للفرن، حيث تم قياس درجة حرارة سطح الفرن باستخدام حساس حرارة ليزري وتفاوتت قيم درجات الحرارة الضائعة والمقاسة خارج الفرن بين $130-350^{\circ}\text{C}$.

ومن هنا كان هدف بحثنا لدراسة استرجاع جزء من الطاقة الحرارية المهدورة من أفران معمل طرطوس بهدف استثمارها بتحلية مياه البحر والذي سينعكس إيجاباً على الناحية الاقتصادية للمعمل.

2. منهجية البحث:

2.1 فرضيات الحل:

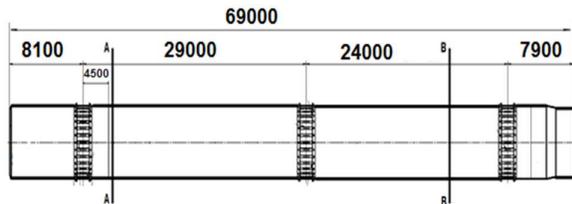
يتم انتقال الحرارة من سطح الفرن بالحمل والإشعاع، وتم إهمال انتقال الحرارة بالتوصيل في الطبقة الحدية.

جريان المائع ضمن الأنابيب صفائحي وقسري.

الفرن يعمل 300 day/year ، تم اختيار تركيب المبادل الحراري على قطاع زاوي 120° فوق الفرن لأن بروفائل الحرارة يتجه نحو الأعلى ومن أجل سهولة فك وتركيب المبادل عند إجراء عمليات الصيانة للفرن.

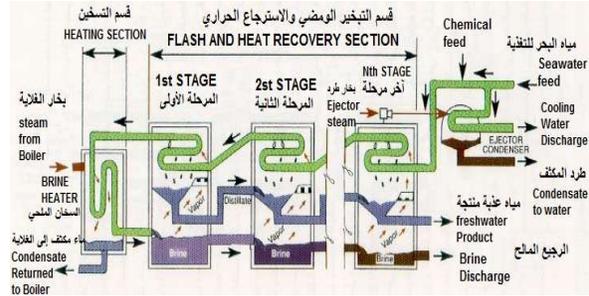
2.2 الحسابات التصميمية الحرارية للمبادل

لا يمكن تركيب مبادل حراري على كامل سطح الفرن بسبب وجود بعض الحواجز القريبة من بعضها (دواليب محيطية، مسنن قاندي) أو بسبب انخفاض كبير في درجات الحرارة نتيجة وجود مراوح تبريد حيث تكون هنا تكلفة تركيب المبادل أكبر من قيمة الطاقة الحرارية المسترجعة، يبين الشكل 4 أبعاد الفرن.



الشكل 4: أبعاد الفرن

حيث يمكن تركيب المبادل بين المقطعين (A-A, B-B)



الشكل 1: وحدة تحلية بالتبخير الوميضي الفجائي

نظراً لأن عملية التبخير الوميضي تدفع بالبخار لأعلى فجأة، فكثيراً ما يحمل هذا البخار معه بعض القطرات الصغيرة من المحلول الملحي. لذا عادة ما توضع شبكة (مصفاة) من الصلب لفصل هذا البخار عن قطرات المحلول الملحي وتسمى فاصل الرذاذ وتتجمع قطرات المحلول الملحي على المصفاة، ثم تسقط مرة ثانية إلى قاعدة الغرفة مع باقي المحلول لذا فأهمية هذه الشبكة هي خروج البخار شبه نقي من الماء المالح، ومن ثم يكون ماء مقطراً خالياً من الأملاح.

المعالجة الثانوية [7, 9]:

تعد المعالجة الثانوية ضرورية للوصول بالماء المنتج إلى ماء عذب قابل للاستهلاك خاصة للأغراض المنزلية، حيث تنتج التقنيات الحرارية ماء مقطر مع محتوى ملحي منخفض (10-20) جزء في المليون، هذا النوع من الماء صالح للتطبيقات الصناعية، حيث يكون الماء النقي مطلوباً إلا أنه من الضروري إعادة تملیحه إذا كان الغرض من استخدامه هو الاستخدام المنزلي، وإعادة التملیح ضرورية للارتفاع بنوعية الماء المنتج إلى درجة مقبولة وفق مواصفات منظمة الصحة العالمية (بضعة مئات من أجزاء المليون)، وخاصة في مجال الشرب، يتطلب الماء المنتج للاستعمال البشري معالجة لاحقة تتركز أساساً في معادلة PH الماء لتقليل تآكل شبكة توزيع الماء، ويجري تقييم الناتج أيضاً لمنع النمو البيولوجي ولضمان تطهيره.

شركة اسمنت طرطوس من أكبر المنشآت الصناعية الرائدة في مجال تصنيع الاسمنت في الجمهورية العربية السورية، تحتوي على أربعة خطوط إنتاجية بطاقة إنتاجية تصل إلى مليون طن كلينكر في السنة.

أحد أقسام الخطوط الإنتاجية هي الأفران الدوارة، حيث أن الفرن عبارة عن أسطوانة بطول 69 m وقطر 4.6 m ويدور بسرعة 2 rpm ، كما أنه مبطّن من الداخل ببطانة من الأجر المنغنيزي بسماكة 10 cm بهدف العزل الحراري، يوجد على الفرن ثلاث دواليب محيطية مستندة على 6 مدحرجات وكل مدحرجة مستندة على مضجعين هيدروليكيين. يوضح الشكل 2 أحد أفران معمل الاسمنت.



الشكل 2: أحد أفران معمل الاسمنت

الوقود المستخدم في الفرن هو FUEL OIL الذي يسخن لدرجة حرارة تصل لحوالي 130°C ويحقن عن طريق فاه ليختلط بالهواء ويحترق، يستهلك الفرن $144000 \text{ ton}_{\text{fuel}}/\text{year}$.

درجة الحرارة داخل الفرن مرتفعة ومتدرجة من 800°C في بداية الفرن لتصل إلى 1400°C في نهايته حيث أن الفرن مقسم إلى ثلاث مناطق حرارية بأطوال معينة، تدخل المواد إلى المنطقة الأولى لترتفع درجة حرارتها لحوالي 900°C وفي المنطقة الثانية تصل إلى 1200°C وفي المنطقة الثالثة

$$Q_1 = 3510107.318 \text{ [w]}$$

$$Q_{1, \text{total}} = Q_1 * 4 = 14040,42927 \text{ [kw]}$$

تدفق الهواء:

تم حساب قيمة متوسطة للسعة الحرارية للهواء [1, 5, 8]

$$Q_1 = \dot{m}_{\text{air}} * c_{p\text{air}} * \Delta T_1 \quad (10)$$

$$3510,107318 = \dot{m}_{\text{air}} * 1,016091 * (286,78-25)$$

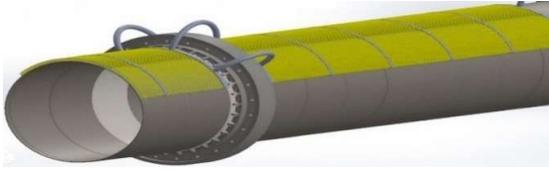
$$\dot{m}_{\text{air}} = 13,1963 \text{ [kg/sec]}$$

2.3 المحاكاة الحاسوبية:

تم إجراء محاكاة حاسوبية على برنامجي SOLIDWORKS, ANSYS ببيّن الشكل 7 نموذج افتراضي للمبادل مع الفرن، كما يبيّن الشكل 8 مقطع في النموذج.



الشكل 7: نموذج افتراضي للمبادل مع الفرن



الشكل 8: مقطع في النموذج الافتراضي

كما هو موضح بالشكلين السابقين فإنه لم يتم تصميم الأنابيب كقطعة واحدة طولها 39 m، بل تم وضع مجمعات لتجزئة الأنابيب إلى أقسام طول كل قسم في الجزء الأول من المبادل 3.9m وفي الجزء الثاني 4.2m ولهذه المجمعات عدة مهام:

1. مزج السائل الذي يمر عبر الأنابيب لتحقيق التجانس بحيث عندما يصل إلى نهاية المبادل يكون متماتل بالصفات الفيزيائية.
2. تأمين عدم إنحناء الأنابيب بسبب الاجهادات التي تؤثر عليها.
3. تأمين سهولة رفع المبادل عن الفرن عند إجراء الصيانات الدورية للفرن والمبادل.

وعند الاطلاع على ترتيب الأنابيب كما يوضح الشكل 9 فإن هناك تجانس في ترتيب الأنابيب حيث تتألف من مجموعات متجانسة لذلك قمنا بالمحاكاة على مجموعة واحدة منها.

وتتراوح درجة حرارة سطح الفرن هنا بين 200-350 °C، ويكون طول المبادل 39m. يبين الشكل 5 درجات الحرارة المقاسة على سطح الفرن في منطقة تركيب المبادل.

تم تقسيم هذه المسافة إلى ثلاثة أقسام:

القسم الأول طوله 18 m تتغير فيه درجة الحرارة بشكل تابع أسّي وفق المعادلة

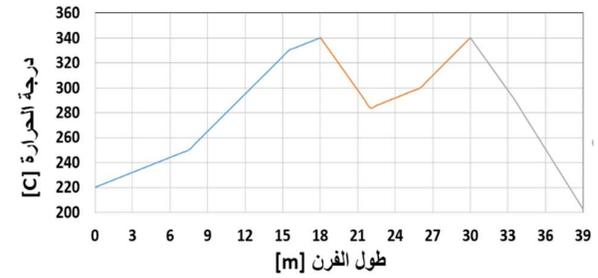
$$y = 212.67e^{0.0268x} \quad (1)$$

القسم الثاني طوله 12 m تتغير فيه درجة الحرارة بشكل تابع متعدد الحدود وفق المعادلة

$$y = -0.0882x^3 + 7.8069x^2 - 219.45x + 2279.9 \quad (2)$$

القسم الثالث طوله 9 m تتغير فيه درجة الحرارة بشكل تابع متعدد الحدود وفق المعادلة

$$y = -15.312x + 801.8 \quad (3)$$



الشكل 5: درجات الحرارة المقاسة على سطح الفرن في منطقة تركيب المبادل

تم حساب معامل انتقال الحرارة الكلي عن سطح الفرن α والذي يساوي معامل انتقال الحرارة بالحمل α_1 مضافاً إليه معامل انتقال الحرارة بالإشعاع α_2 [1, 8]، يبين الشكل 6 تغير معامل انتقال الحرارة الكلي على طول سطح الفرن في منطقة تركيب المبادل.

$$Gr = \frac{g * \beta * d^3 * \Delta T}{\nu^2} \quad (5)$$

$$Nu = c * (Gr * Pr)^m \quad (6)$$

$$\alpha_1 = \frac{Nu * \lambda}{d} \quad (7)$$

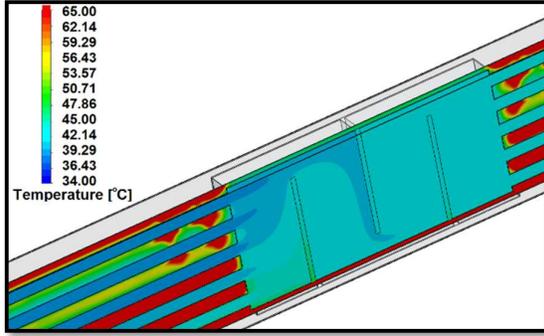
$$\alpha_2 = \frac{\epsilon * c_o \left[\left(\frac{t_w}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_f}{100} \right)^4 \right]}{t_w - t_f} \quad (8)$$



الشكل 6: تغير معامل انتقال الحرارة الكلي على سطح الفرن في منطقة تركيب المبادل

التدفق الحراري عبر السطح الخارجي للفرن:

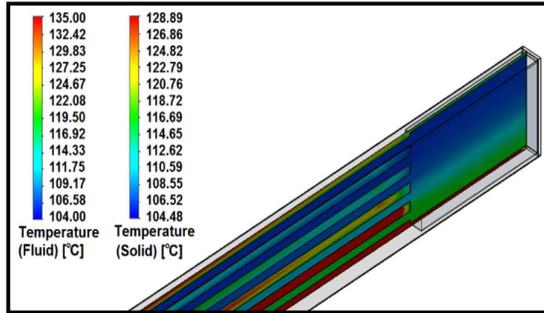
$$Q_1 = \alpha * \pi * d * l * \Delta T \quad (9)$$



الشكل 11: تجانس درجات حرارة المياه ضمن المجمع

بينت نتيجة المحاكاة الحاسوبية على الأبعاد الحقيقية للمبادل أن سرعة الجريان المناسبة للوصول إلى درجة حرارة المطلوبة ($110\text{ }^{\circ}\text{C}$) كانت $0,0535\text{ m/s}$.

من خلال المحاكاة لاحظنا أن أعلى درجة حرارة لسطح الأنابيب كانت في المقطع الأخير بالقرب من المخرج وبلغت $129\text{ }^{\circ}\text{C}$ كما يوضح الشكل 12.



الشكل 12: توزيع درجات الحرارة في المقطع الأخير

وعليه قمنا بالمحاكاة على أسوأ حالة وهي لأنبوب طوله 4.2 m قطره الداخلي $13,6\text{mm}$ والخارجي 15mm عندما يتعرض لدرجة حرارة مقدارها $129\text{ }^{\circ}\text{C}$ على كامل طوله (علماً بأن الحرارة في الواقع تتراوح بين $104\text{ }^{\circ}\text{C}$ - $129\text{ }^{\circ}\text{C}$) مع الأخذ بعين الاعتبار وزن المياه بداخله، وكانت النتائج أن أكبر قيمة لانحناء الأنبوب بلغت $0,007167\text{ m}$ وقيمة معامل الأمان كانت $1,1508$ كما يوضح الشكل 13.

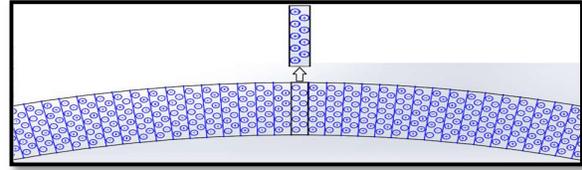


الشكل 13: قيم الانحناء ومعامل الأمان للأنبوب

التدفق الحجمي للماء ضمن الأنابيب:

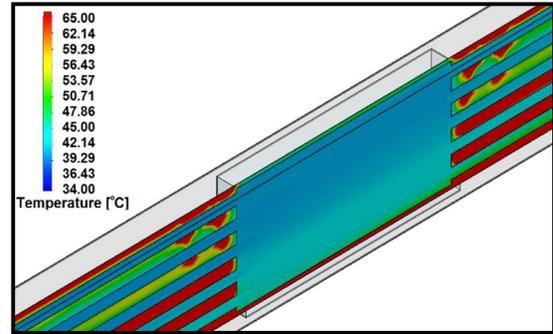
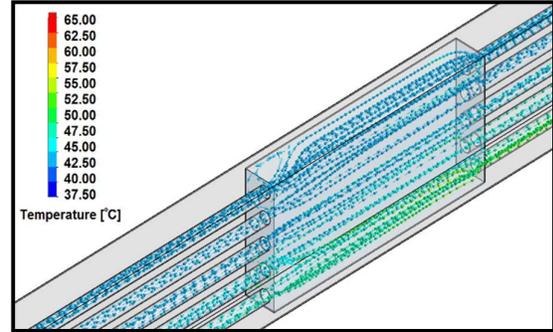
$$\dot{V}_w = w * A \quad (11)$$

$$= 0,0535 * \pi * \frac{0,0136^2}{4} * 1260$$



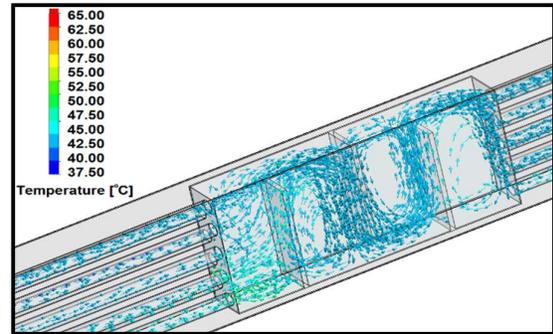
الشكل 9: ترتيب الأنابيب في المبادل

تم استخدام mesh من نوع hexahedron وكان عدد الخلايا الكلي 16875000 خلية، تبين خلال الدراسة أنه لا يحدث تجانس تام للمياه ضمن المجمعات أي أن المياه تدخل لحزمة الأنابيب التالية بدرجات حرارة مختلفة مما قد يؤثر سلباً على خرج المبادل كما يوضح الشكل 10.



الشكل 10: توزيع درجات حرارة المياه ضمن المجمع

لحل هذه المشكلة قمنا بوضع شفرات توجيه ضمن المجمعات وكانت النتيجة حصول تجانس تام في مواصفات المياه قبل الدخول لحزمة الأنابيب التالية كما يوضح الشكل 11.



هيكل مصنوع من البولي بروبيلين لتوفير الحد الأمثل من مقاومة التآكل
كل مضخة تؤمن تدفق مقداره 52 m^3 / 28 m بمحرك 10 حصان وقوة رفع h

والشكل 14 يوضح المضخة التي تم اختيارها.



الشكل 14: مضخة دفع مغناطيسي أفقية

بعد ذلك تتم المعالجة الأولية المياه بعدة طرق ثم يتم ضخ المياه إلى المبادل الحراري الذي قمنا بدراسته حيث ترتفع درجة حرارة المياه إلى 110 C° بعدها يتم ضخ المياه الساخنة إلى غرف تكثيف ذات ضغط تفريغي أقل من الضغط الجوي وتتم عملية التبخير والتكثيف، بعد ذلك تتم المعالجة الثانوية للماء المنتج بتذويب حجر الجير (كربونات الكالسيوم) لامتصاص CO_2 ، كما تتم معادلة PH بإضافة NaOH ، ثم إضافة الكلور للمنتج المعالج لمنع النمو البيولوجي وأي اختزال محتمل لمركبات الحديدون (ظاهرة الماء المحمر) بواسطة اليكتيريا المختزلة للحديد، كل 1 m^3 ماء مقطر يحتاج ل 70 g من المواد المعقمة [2, 3].

معدل الإنتاج في هذه العملية لا يتعلق بعدد المراحل، إنما يتعلق بمعدل تدفق المياه المالحة والخصائص الفيزيائية لها عند الخروج من المسخن وعند آخر غرفة تبخير [3].

معدل الإنتاج = معدل تدفق المحلول * الحرارة النوعية * مجال التبخر الومضي
متوسط الحرارة الكامنة

$$\text{معدل الإنتاج} = \frac{1015027,2 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{year}}\right) * 4,010267 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}\cdot\text{K}}\right) * [110 - 40] (\text{C}^\circ)}{2283 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}}\right)}$$

$$= 124808,19356 \text{ m}^3/\text{year}$$

3. الاستنتاجات والتوصيات

3.1 الاستنتاجات

1. سرعة جريان الماء داخل الأنابيب $0,0535 \text{ m/sec}$.
2. عدد أنابيب المبادل 1260 أنبوب لكل فرن تؤمن تدفق $1015027,2 \text{ m}^3_{\text{water}}/\text{year}$.
3. الطاقة الحرارية المسترجعة مقدارها $10992,9439 \text{ kw}$ تكافئ حرق $8956,883859 \text{ ton}_{\text{fuel}}/\text{year}$.
4. نسبة استرجاع الحرارة $78,295 \%$.
5. نسبة استرجاع الوقود $6,22 \%$.

3.2 التوصيات

1. دراسة تأثير وضع حاجز عاكس للحرارة فوق المبادل على نسبة الاسترجاع.
2. دراسة تأثير الأنابيب المزعفة على نسبة الاسترداد.
3. دراسة واختبار المبادل باستخدام وسيط عامل درجة تبخره منخفضة كأحد الفريونات ودراسة إمكانية استخدامها لتوليد الطاقة الكهربائية.
4. تصميم نظام تحكم بالضغط حسب تغير درجات حرارة سطح الفرن ودرجة حرارة خروج المائع من المبادل.

$$= 0,00979 [\text{m}^3_{\text{w}}/\text{sec}]$$

$$= 0,00979 * 3600 * 24 * 300 = 253756,8 [\text{m}^3_{\text{w}}/\text{year}]$$

$$\dot{V}_{\text{w,total}} = \dot{V}_{\text{w}} * 4 = 1015027,2 [\text{m}^3_{\text{w}}/\text{year}]$$

الطاقة الحرارية المسترجعة:

$$Q_2 = \dot{m}_{\text{w}} * c_{\text{pw}} * \Delta T_2 \quad (12)$$

$$\dot{m}_{\text{w}} = \dot{V}_{\text{w}} * \rho_{\text{w}} = 9,79 [\text{kg}/\text{sec}]$$

الجريان قصري ولذلك السعة الحرارية للماء تتغير مع تغير درجة حرارة مياه البحر لذلك تم اعتماد متوسط قيم السعة الحرارية [1, 5, 8, 12]

$$Q_2 = 9,79 * 4,010267 * (110 - 40)$$

$$= 2748,235975 [\text{kw}]$$

$$Q_{2,\text{total}} = Q_2 * 4 = 10992,9439 [\text{kw}]$$

نسبة استرجاع الحرارة:

$$S_t = \frac{10992,9439 * 100}{14040,42927} = 78,295 \%$$

نسبة الاسترجاع الوقود علماً أن المحتوى الحراري لل FUEL OIL

$$C_{\text{pfuel}} = 39765,1 [\text{kJ}/\text{kg}]$$

$$Q_{2,\text{total}} = \dot{m}_{\text{fuel}} * C_{\text{pfuel}} * \eta \quad (13)$$

$$10992,9439 = \dot{m}_{\text{fuel}} * 39765,1 * 0,8$$

$$\dot{m}_{\text{fuel}} = 0,34555879 [\text{kg}_{\text{fuel}}/\text{sec}]$$

$$= 0,34555879 * 3600 * 24 * 300 = 8956,883837 [\text{ton}_{\text{fuel}}/\text{year}]$$

$$S_f = \frac{8956,883837 * 100}{144000} = 6,22 \%$$

2.4 تحلية مياه البحر بالتبخير الومضي متعدد المراحل multi stage flash-MSF

كما ذكرنا سابقاً أن هذه العملية تعتمد على تسخين الماء المالح إلى درجة حرارة أعلى من درجة الغليان (عند ضغط معين) ثم فجأة يسخن هذا الماء المالح الساخن إلى غرفة عند ضغط أقل من ضغط الغليان، فيحدث التبخر الفجائي (الومضي) ويتكون البخار والذي يتم تكثيفه ليصبح الماء المنتج [3].

في البداية يجب اختيار عناصر مناسبة لنقل المياه إلى المعمل والجدول 1 يوضح هذه العناصر.

الجدول 1: العناصر اللازمة لنقل المياه ومواصفاتها

العنصر	الوظيفة والميزات
أنابيب من البولي إيثيلين	لنقل المياه من البحر إلى المعمل وهي بقطر 9 in
ثلاث مضخات من نوع SETHCO SERIES 2500	تقوم بتأمين التدفق المطلوب وهي من مضخات الدفع المغناطيسي الأفقية التي تعمل بقوة الدفع المغناطيسي، وذات

كثافة الماء (Kg/m^3)	ρ_w
اللزوجة الحركية للهواء (m^2/c)	ν
معامل انتقال الحرارة الكلي ($\text{W/m}^2.\text{k}$)	α
معامل انتقال الحرارة بالحمل ($\text{W/m}^2.\text{k}$)	α_1
معامل انتقال الحرارة بالإشعاع ($\text{W/m}^2.\text{k}$)	α_2
عامل التوصيل الحراري للهواء (W/m.k)	λ
عامل التمدد الحجمي (k^{-1})	β
درجة سواد سطح الفرن	ϵ
مردد الفرن	η_f
فعالية المبادل	ϵ
غاز ثاني أكسيد الكربون	CO_2
دليل شوارد الهيدروجين ضمن السائل	PH
هيدروكسيد الصوديوم	NAOH

المصادر

- [1] د.م. أيوب عيسى حسن، "انتقال الحرارة والكتلة،" 2008 .
- [2] عمروسي خان، " دور تكنولوجيا تحلية مياه البحر في سد الفجوة المائية في الدول العربية مجمة العموم الاقتصادية والإدارية، " Vol,20(1)، 2019.
- [3] أ.د. كمال بوعظم، أمال ينون، " تحليل تكلفة تحلية مياه البحر، دراسة مقارنة بين الجزائر والمملكة العربية السعودية،" جامعة سطيف-1، كلية العلوم الاقتصادية والتجارية وعلوم التسيير، تخصص اقتصاد دولي وتنمية مستدامة، 2017.
- [4] Antonio Politano, Pietro Argurio, Gianluca Di Profio, Vanna Sanna, Anna Cupolillo, Sudip Chakraborty, Hassan A. Arafat, and Efreem Curcio "Photothermal Membrane Distillation for Seawater Desalination," Advanced Materials 29 (2), 1603504, 2017.
- [5] ASHRAE TECHNICAL COMMITTEES, TASK GROUPS, AND TECHNICAL RESOURCE GROUPS, "ASHRAE Handbook—HVAC Systems and Equipment," 2016.
- [6] Bart Van der Bruggen, Carlo Vandecasteele, "Distillation vs. membrane filtration: overview of process evolutions in seawater desalination," ELSEVIER, Desalination 143, 2002.
- [7] Blanchon David, "de l'eau pour tous ?Atlas mondial de l'eau, édition autrement, " France, 2009
- [8] Er. R.K. Rajput, "Heat and Mass Transfer," 2000.
- [9] Giret Alain, "Environnement (Energie Hydraulique: différents formes, aménagements, ellipses," France, 2014
- [10] Li-Zhi Zhang, Qian-Wen Su, "Performance manipulations of a composite membrane of low thermal conductivity for seawater desalination," Chemical Engineering Science, 2018.

الرموز

مساحة مقطع الأنابيب (m^2)	A
عامل إشعاع الجسم الأسود ($\text{W/m}^2.\text{k}^4$)	c_o
السعة الحرارية للهواء (KJ/kg.k)	$C_{p\text{air}}$
السعة الحرارية (المحتوى الحراري) للوقود (KJ/kg.k)	$C_{p\text{fuel}}$
السعة الحرارية للماء (KJ/kg.k)	C_{p_w}
معدل السعة الحرارية للماء (kJ/sec.k)	C_w
ثوابت تتعلق بالجدار Gr.Pr	c, m
قطر الأنابيب الخارجي (m)	D
قطر الأنابيب الداخلي (m)	d
عدد كراشوف	Gr
الجاذبية الأرضية (m/sec^2)	g
طول المبادل (m)	l
التدفق الكتلي للهواء (Kg/sec)	\dot{m}_{air}
التدفق الكتلي للفيول (Kg/sec)	\dot{m}_{fuel}
التدفق الكتلي للماء (Kg/sec)	\dot{m}_w
عدد نسلت	Nu
عدد برانتل	Pr
التدفق الحراري عبر السطح الخارجي لفرن واحد (W)	Q_1
التدفق الحراري عبر السطح الخارجي لكل الأفران (W)	$Q_{1,\text{total}}$
الطاقة الحرارية التي اكتسبها الماء لمبادل واحد (W)	Q_2
الطاقة الحرارية التي اكتسبها الماء لكل المبادلات (W)	$Q_{2,\text{total}}$
نسبة استرجاع الوقود	S_f
نسبة استرجاع الحرارة	S_t
درجة حرارة الهواء الخارجي ($^{\circ}\text{C}$)	t_f
متوسط درجات حرارة الهواء الملامس لسطح الفرن ($^{\circ}\text{C}$)	$t_{1,\text{air}}$
متوسط درجات الحرارة لسطح الفرن ($^{\circ}\text{C}$)	t_w
درجة حرارة دخول الماء في المبادل ($^{\circ}\text{C}$)	$t_{1,w}$
الفرق بين درجات الحرارة للهواء الملامس لسطح الفرن والهواء الخارجي ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT_1
الفرق بين درجات الحرارة لخروج ودخول الماء في المبادل ($^{\circ}\text{C}$)	ΔT_2
التدفق الحجمي للماء لمبادل واحد (m^3/sec)	\dot{V}_w
التدفق الحجمي للماء لكل المبادلات (m^3/sec)	$\dot{V}_{w,\text{total}}$
سرعة جريان الماء داخل الأنابيب (m/sec)	w

- [13] Wenhai Luo, Hop V Phan, Guo Xue Li, Faisal I. Hai, William Evan Price, Menachem Elimelech, and Long D Nghiem, “An Osmotic Membrane Bioreactor – Membrane Distillation System for Simultaneous Wastewater Reuse and Seawater Desalination: Performance and Implications,” *Environmental Science & Technology*, 2017.
- [11] Menachem Elimelech, William A. Phillip, “The Future of Seawater Desalination: Energy, Technology, and the Environment,” *Science* 333 (6043), 712-717, 2011.
- [12] Mostafa H. Sharqawy, John H. Lienhard V, Syed M. Zubair, “Thermophysical properties of seawater: a review of existing correlations and data,” *Desalination and Water Treatment*, 16, 2010.

Computer simulation of the waste heat recovery system from rotary thermal furnaces, in Tartous cement factory to seawater desalination

Ahmad Iskandar^{1,*}, Danny Ibrahim², and Mayssa Shash³

¹ Department of Renewable Energies Engineering, Faculty of Technical Engineering, Tartous University, Syria, iskandar19932015@gmail.com

² Department of Industrial Automation Engineering, Faculty of Technical Engineering, Tartous University, Syria, danyibrahim2@gmail.com.

³ Department of Machines and Equipments, Faculty of Technical Engineering, Tartous University, Syria, mayssaali@yahoo.fr

*corresponding author: Ahmad Iskandar, iskandar19932015@gmail.com

Published online: 31 December 2021

Abstract: In this study, the possibility of recovering the waste heat energy from the thermal furnace in the Tartous cement plant and investing it by desalinating sea water was studied, where the values of lost and leaked temperatures to the outer medium across the oven surface varies between (130-350 °C). The idea of the research is based on studying a heat exchanger to recover part of the wasted heat with the aim of investing it in desalination of sea water, where we conducted an analytical study of the thermal loads of cement factory furnaces and then perform a computer simulation of an orthogonal heat exchanger made of 39 m long copper tubes consisting of 9 layers with a chess arrangement Where the step between the tubes $S_1=2,3D$, $S_2=D$ and mounted on an angular section 120° above the furnace, therefore the number of tubes in each row is 140 tubes. The numerical result on the exchanger showed that the appropriate flow velocity to reach the required temperature was 0.0535 m/s. This ensures a thermal energy recovery 10992,9439 [KW], equivalent to burning 8956,883837 ton_{fuel}/year, this amount can be used to steam 1015027,2 m³_w/year, the rate of heat recovery is 78,295%, and the rate of fuel recovery is 6,22%.

Keywords—Waste heat recovery, Heat and mass transfer, Air-water heat exchanger, Seawater desalination.