



دراسة تحليلية للاستفادة من الطاقة الحرارية المفقودة من غازات العادم في مصنع إسمنت لبدة لتوليد الطاقة الكهربائية

فتحي كعوان¹، محمد الصويد^{2*}، حسن الدروقي³، كمال النفاتي⁴، سراج الشريف⁵

¹ قسم الهندسة الميكانيكية والصناعية، كلية الهندسة – جامعة المرقب، fathikawan74@gmail.com

² قسم الهندسة الميكانيكية والصناعية، كلية الهندسة – جامعة المرقب، Mohamedaswaid@gmail.com

³ قسم الهندسة الميكانيكية والصناعية، كلية الهندسة – جامعة المرقب، htbd2017@gmail.com

⁴ قسم الهندسة الميكانيكية والصناعية، كلية الهندسة – جامعة المرقب، kamalahnfate@gmail.com

⁵ قسم الهندسة الكيميائية والنفطية، كلية الهندسة – جامعة المرقب، srgsharif4@gmail.com

الملخص

نظرا للتطور السريع والكبير في مشاريع البناء والتشييد وبالأخص في الدول النامية مثل ليبيا وما يصحبه من استهلاك متزايد للمادة الأساسية وهي الأسمنت، حيث يصاحب صناعة هذه المادة الاستهلاك الكبير للطاقة. تتطرق هذه الدراسة إلى تحليل البيانات التشغيلية والتصميمية كمتغيرات ترموديناميكية لتقييم مدى الاستفادة من الطاقة الحرارية المفقودة ومدى إمكانية توليد القدرة الكهربائية منها وبالتالي التقليل من الضرر البيئي. هذه البحث قام بدراسة وتحليل نموذج استرداد الطاقة الحرارية المفقودة من غازات العادم في مصنع إسمنت لبدة لغرض توليد الطاقة الكهربائية عبر دورة رانكن البخارية، وذلك عن طريق الاستفادة من مصدرين حراريين في المصنع هما عادم مبرد الكلنكر وعادم السيكلونات الحرارية، حيث تم استخدام مبادلين حراريين: الأول هو (SP- Boiler) الذي يستفيد من الحرارة العالية لغازات العادم المنبعثة من السيكلونات الحرارية والثاني هو (AQC- Boiler) والذي يستفيد من حرارة الغازات الناتجة من تبريد الكلنكر. قامت هذه الدراسة بتحليل البيانات التشغيلية الفعلية والتي تم تجميعها من غرف التحكم بالمصنع والتي تم الحصول عليها من خلال الزيارات الميدانية للمصنع. ومن خلال هذه البيانات المتحصل عليها تم عمل موازنة الطاقة على المبادلات الحرارية المستخدمة وحساب الطاقة الحرارية للبخار المتولد في دورة رانكن البخارية، وتحليل قدرة وكفاءة الدورة البخارية باستخدام برنامج الماتلاب. حيث أظهرت النتائج أن القدرة المتولدة باستخدام هذه الدورة تبلغ MW 9.014 بنسبة كفاءة تصل إلى 27.14 %. في هذا العمل أيضا، تمت دراسة تأثير كلا من درجة حرارة البخار الداخل إلى التوربين ومعدل التدفق مياه التغذية على معدلات الأداء التيرموديناميكية والمتمثلة في الكفاءة والقدرة.

الكلمات الدالة:

استرجاع الطاقة

دورة رانكن

صناعة الاسمنت

*المؤلف الرئيسي للإلكتروني للباحث المراسل: mohamedaswaid@gmail.com

1. المقدمة

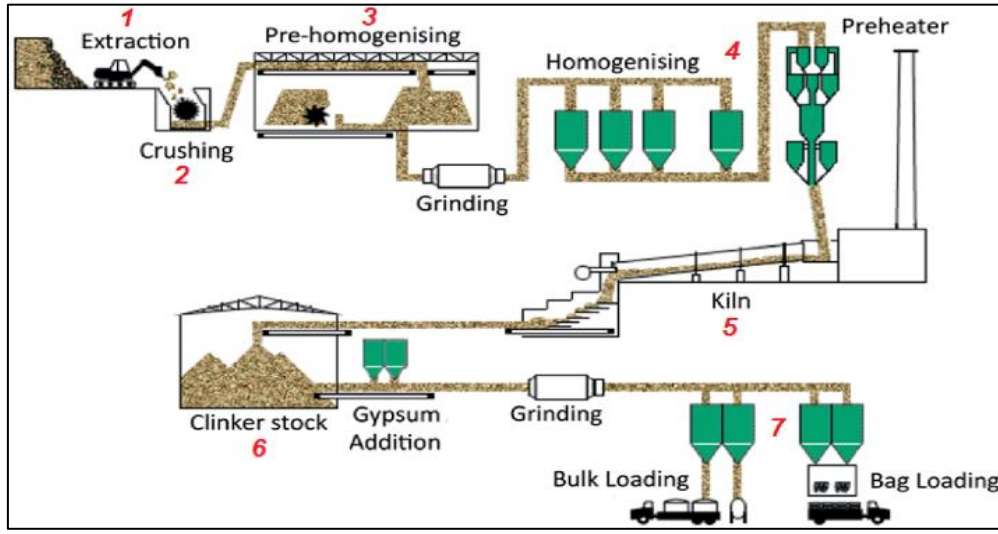
أصبح الإسمنت ذو أهمية في حياتنا اليومية حيث أنه يعتبر المادة الأساسية في مواد البناء والتعمير. حيث يعتبر تصنيع الإسمنت والجير من الصناعات التي تستهلك كميات هائلة من الطاقة، وتمثل تكاليف الطاقة الكهربائية ما نسبته 40-50 % من تكاليف الإنتاج الكلية. قدرت الدراسات المختلفة أن ما يصل إلى 20 - 50 % من استهلاك الطاقة الصناعية يتم تفريغها في نهاية المطاف كحرارة ضائعة [1].

لعدة سنوات كان هناك اتجاه نحو الطاقة زيادة كفاءة العمليات وتخفيض انبعاثات ثاني أكسيد الكربون وفقا لوكالة الطاقة الأوروبية عن طريق إعادة استخدام الحرارة الضائعة الذي يساعد في تخفيض تشغيل الأجهزة تصل إلى حوالي 30%، وزيادة كفاءة استخدام الطاقة الخاصة بها، وكذلك التخفيض من الانبعاثات والملوثات [1].

سيتم من خلال هذا العمل دراسة محاكاة لنموذج تقنيات استعادة حرارة غازات العادم المفقودة من فرن مصنع إسمنت (لبدء)، واستخدامها لتوليد الكهرباء ولتقليل الخسائر الحرارية وتحسين كفاءة العملية الصناعية. حيث تم استخدام مبادلات حرارية لتبريد الغازات العادمة الساخنة، والتي تم استخدام فيها الماء الذي يمتص الحرارة الضائعة ويتحول إلى بخار. تم استخدام دورة رانكن البخارية لتحويل الطاقة الكامنة الموجودة في البخار المولد بواسطة تلك المبادلات إلى طاقة كهربائية. تم إجراء موازنة الطاقة على المبادلات الحرارية المستخدمة لإيجاد معدل تدفق مياه التغذية اللازم للإنتاج القدرة المطلوبة في الدورة البخارية [2]. حيث تم استخدام برنامج الأكسل لإيجاد حلول لمعادلات موازنة الطاقة. تم استخدام برنامج الماتلاب لعمل محاكاة لدورة رانكن للنموذج المستخدم حيث تم استخدام دالة X- Steam لإيجاد كلا من كفاءة وقدرة الدورة البخارية [3].

2. تكنولوجيا استرجاع الطاقة

يعد استعادة الحرارة المفقودة إجراءً ضروريًا لاستفادة من الطاقة الضائعة. هذا الإجراء يوفر كمية لا يستهان بها من الطاقة المهدرة المصاحبة لإنتاج الإسمنت. تستوعب محطة (WHR Waste Heat recovery)، التي تُعرف أيضًا باسم محطة توليد الطاقة المشتركة [2]، أي طاقة حرارية يمكن استيعابها والتي يمكن ارجاعها وتحويلها إلى طاقة كهربائية. الدافع وراء WHR هو استعادة الطاقة وتقليل تكلفة التوليد وجعل الإجراء طبيعيًا [4]. يعتمد الإجراء على دورة رانكن لتحويل الحرارة الزائدة إلى حركة ميكانيكية وباستخدام التوربينات التي تحول الحركة الميكانيكية إلى طاقة كهربائية [5]. بإجراء زيارة إلى أحد مصانع الاسمنت الواقعة في مدينة الخمس وهو مصنع اسمنت (لبده) التابع للشركة الاهلية للإسمنت، وجد أن هناك كمية كبيرة من الطاقة الحرارية المبددة على شكل حرارة إلى المحيط الخارجي، حيث إن كمية الحرارة المهدرة قدرت اعتمادا على البيانات المأخوذة من المصنع ب ~12000000 وات، والتي غالبا تفقد من جزئين في المصنع. الجزء الأول مبرد الكلنكر (Clinker Cooler)، الذي يستخدم لتبريد المواد الخام الخارجة من فرن معالجة الاسمنت حيث تبلغ درجة حرارة الغازات المنبعثة من المبرد 420 درجة مئوية. والجزء الثاني السيكلونات الحرارية (Heating Cyclones)، وهو مكان تغذية مواد الخام إلى الفرن فيتم التبادل الحراري بين غازات العادم الخارجة من نهاية الفرن والمواد الداخلة حيث يعمل على تحميص المواد الخام قبل دخولها إلى الفرن ونظرا لكمية الطاقة الحرارية التي تحملها الغازات فهي تفوق الحد المطلوب لتجفيف المواد فيكون هناك فقد في الطاقة الحرارية.



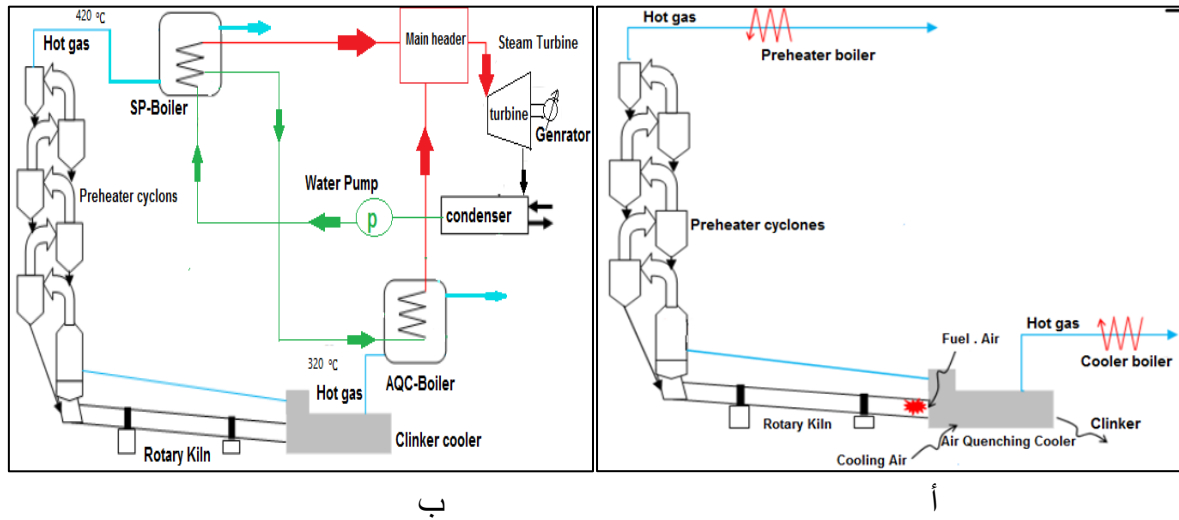
شكل (1) يوضح مراحل تصنيع الإسمنت [3].

3. المواد والطرق

1.3 وصف النموذج المستخدم

الشكل (2-أ) يوضح مصادر الغازات المنبعثة في مصنع إسمنت لبدنه في كل من السيكلونات الحرارية (Heating Cyclones) ومبرد الكلنكر (Clinker Cooler). في المرحلة الأولى، يتم خروج الحرارة من ذيل الفرن وتمر عبر السيكلونات الحرارية وذلك للتبادل الحراري مع المواد الخام الداخلة إلى الفرن وذلك لغرض تجفيفها من الرطوبة ونظراً لأن كمية الحرارة المفقودة من ذيل الفرن تفوق الحد المطلوب لتجفيف المواد الخام فيكون هناك فقد كبير للطاقة الحرارية في الغلاف الجوي حيث تبلغ درجة حرارة الغازات المفقودة حوالي 420°C ومعدل تدفق تقريباً 70kg/sec . في هذه المرحلة يتم تركيب مبادل حراري من نوع (SP-Boiler) Suspension Preheater Boiler وتتم عملية التبادل بين الغازات العادم المفقودة و مياه التغذية بدرجة حرارة 60°C ، وفي المرحلة الثانية يتم التقاط الطاقة الحرارية من الغازات العادم المتصاعدة من مبرد الكلنكر أثناء التبريد المفاجئ للكلنكر المصهور الخارج من الفرن والذي يصل حرارته إلى 1200°C حيث يتم تبريده بواسطة تسعة مراوح موزعة على سطح مبرد الكلنكر إلى أن تصل درجة حرارته إلى حوالي 80°C حيث تبلغ درجة حرارة الغازات المنبعثة من مبرد الكلنكر إلى 320°C حيث يتم إنقاص هذه الطاقة الحرارية بواسطة مبادل حراري من نوع Air (AQC-Boiler) Questioning Cooler Boiler. حيث تتم عملية التبادل الحراري بين الغازات المفقودة ومياه التغذية الساخنة المستنزفة القادمة من مقتصد المبادل الحراري (SP-Boiler).

الشكل (2-ب)، يوضح النموذج المستخدم لمنظومة استعادة الطاقة الحرارية المفقودة من مصنع الاسمنت لتوليد الطاقة حيث تتكون هذه المنظومة من مبادلين حراريين رئيسيين أحدهما مركب على مبرد الكلنكر والآخر مركب على معيد التسخين (السيكلونات الحرارية) وتتكون من مجمع البخار الرئيسي (Main Header) وباقي مكونات دورة رانكين البخارية وهي التوربين البخاري والمكثف ومضخة التغذية.



شكل (2) أ. يوضح مصادر الغازات المنبعثة في مصنع الاسمنت. ب. النموذج المستخدم في استعادة الطاقة الحرارية المفقودة لتوليد الطاقة في مصنع اسمنت لبدة [6].

2.3 الموصفات الفنية والفرضيات المستخدمة في الدراسة

الجدول (1) يوضح الموصفات الفنية لمنظومة استعادة الحرارة المفقودة من مصنع الاسمنت بعض هذه الموصفات تم حسابها بناء على المعادلات التي سوف يتم شرحها لاحقاً بهذا الفصل. وايضا الجدول (2.4) المبين أدناه، يوضح الفرضيات المستخدمة بالحسابات بهذه الدراسة.

4. النظريات والحسابات

1.4 الموازنة الحرارية للمبادل الحراري (SP-Boiler)

الشكل (3) يوضح مولد البخار (SP-Boiler) المستخدم في عملية التبادل الحراري مع الغازات العادم المتصاعدة من السيكلونات الحرارية حيث تدخل الغازات العادم بدرجة حرارة 420°C وبمعدل تدفق 70 kg/s حيث تتبادل مع مياه التغذية القادمة من المكثف بدرجة حرارة 39.1°C حيث يتولد بخار بدرجة حرارة 370°C حسب فرضية (Superheated Approach)، وتم فرض درجة حرارة خروج غازات العادم من المبادل الحراري 100°C والمعادلة (1) تعطى عملية الاتزان الحراري للمبادل الحراري (SP-Boiler).

$$\begin{aligned} \dot{m}_{g1} * c_{p_g} * (T_1 - T_4) &= Q_{add} \\ &= (\dot{m}_{w1} - \dot{m}_{w2}) * c_{p_w} * (T_{sat} - T_2) + \dot{m}_{w2} * c_{p_w} * (T_{sat} - T_2) \\ &+ ((\dot{m}_{w1} - \dot{m}_{w2}) * \Delta H_v) + (\dot{m}_{w1} - \dot{m}_{w2}) * c_{p_{steam}} * (T_3 - T_{sat}) \end{aligned} \quad (1)$$

حيث أن:

$\dot{m}_{g1}$: معدل تدفق غازات العادم، $\dot{m}_{w1}$: معدل التدفق المياه الداخلة الي مبادل SP-Boiler، $\dot{m}_{w2}$: معدل التدفق المياه الخارجة من مبادل SP-Boiler، T_1 : درجة حرارة الغازات العادمة الداخلة للمبادل SP-

Boiler، T_2 : درجة حرارة المياه الداخلة الي مبادل SP-Boiler، T_3 : درجة حرارة البخار الخارج من المبادل، T_4 : درجة حرارة غازات العادم الخارجة من المبادل، T_5 : درجة حرارة المياه الخارجة من المبادل، Cp_g : السعة الحرارية لغازات العادم، Cp_w : السعة الحرارية لمياه التغذية، Cp_{steam} : السعة الحرارية للبخار المتولد [3].

جدول (1) يوضح المواصفات الفنية للمثال المستخدم للدراسة [4] .

القيمة	المتغيرات التيرموديناميكية
المبادل الحراري (AQC-Boiler) أحادي الضغط:	
1.013 bar & 25 °C	الضغط ودرجة حرارة الهواء المحيطة
35	معدل تدفق غازات العادم من مبرد الكلنكر (kg/s)
320	درجة حرارة غازات العادم الخارج من مبرد الكلنكر (°C)
1.2	الحرارة النوعية (kJ/kg. °C)

المبادل الحراري من نوع (SP Boiler) أحادي الضغط:

1.013 bar & 25 °C	الضغط ودرجة حرارة الهواء المحيطة
70	معدل تدفق غازات العادم من مبرد الكلنكر (kg/s)
420	درجة حرارة غازات العادم الخارج من الخارجة من السيكلونات الحرارية (°C)

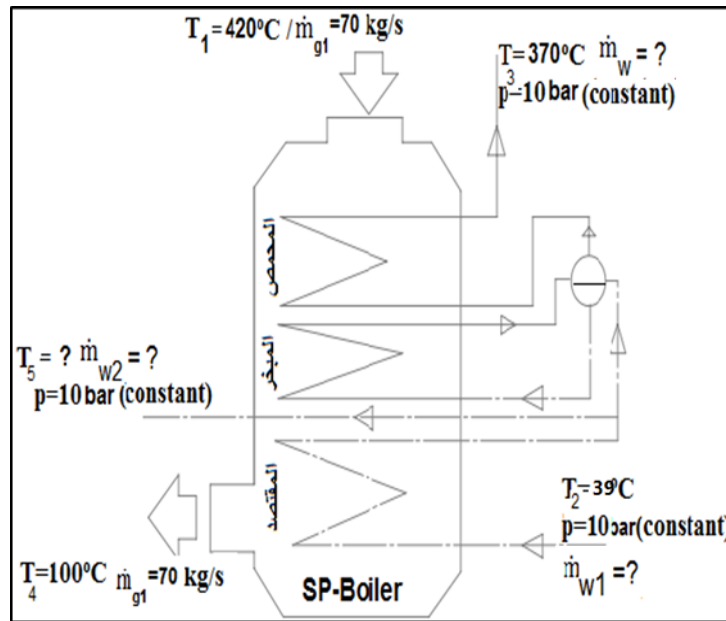
جدول (2) يوضح الفرضيات المستخدمة بالمثال المستخدم بالدراسة [4].

الفرضيات
الفرضيات المستخدمة بحسابات دورة رانكين البخارية:
الكفاءة الأيزوننتروبية للتوربين البخاري 90%
الكفاءة الأيزوننتروبية لمضخات المياه 82%
ضغط البخار عند الدخول للتوربين الضغط المتوسط 10bar
ضغط المكثف 0.07bar
كفاءة المولد الكهربائي 98%
الفرضيات الأخرى المستخدمة:
درجة حرارة غازات العادم الخارجة من المبادلات الحرارية يجب ألا تقل عن 100 °C حتى لا تتكون نقطة الندى وتتفاعل مع الجو وتكون أحماض كبريتية سامة.

درجة حرارة (Superheated Approach) تعرف على أنها الفرق بين درجة حرارة غازات العادم الداخلة إلى مولد البخار ودرجة حرارة البخار الخارج من مولد البخار، وتتراوح قيمتها ما بين $^{\circ}\text{C}$ (25-75) تم فرضها في هذه الدراسة $^{\circ}\text{C}$ 50.

إهمال الفقد في الضغط في مولد البخار ويفرض أنه قيمته ثابتة ويساوي 10 bar

غازات العادم المفقودة الداخلة إلى المبادلات الحرارية خالية من الملوثات وذلك بفرض مرور غازات العادم على فلاتر تنقية الغبار قبل دخولها إلى المبادلات الحرارية.



شكل (3) يوضح مولد البخار (SP-Boiler) [7]

2.4 الموازنة الحرارية للمقتصد في المبادل الحراري (SP-Boiler):

تتم عملية الموازنة الحرارية للمقتصد قبل وصول الماء إلى درجة التشبع حيث أن الحرارة تنتقل من الغازات الساخنة إلى مياه التغذية مما يتسبب في تسخين المياه حيث يتم استنزاف جزء من المياه الخارجة من المقتصد وترسل إلى المبادل الحراري (AQC-Boiler)، والشكل (4) يوضح عملية التبادل الحراري داخل المقتصد في المبادل الحراري (SP-Boiler).

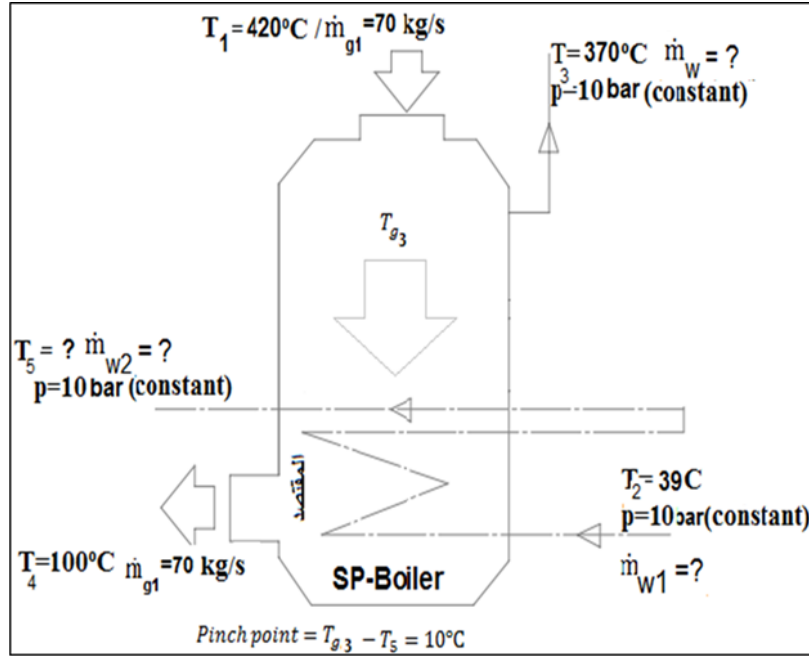
حيث أن:

$$\dot{m}_{g1} * C_{pg} * (T_{g3} - T_4) = \dot{m}_{w1} * C_{pw} * (T_5 - T_2) \quad (2)$$

$$Pinch\ point = T_{g3} - T_5 = 10\ ^{\circ}\text{C}$$

$\dot{m}_{g1}$: معدل تدفق غازات العادم، $\dot{m}_{w1}$: معدل التدفق المياه الداخلة إلى مبادل SP-Boiler، T_5 : درجة حرارة المياه الخارجة من SP-Boiler، T_2 : درجة حرارة المياه الداخلة إلى مبادل SP-Boiler، T_4 :

درجة حرارة غازات العادم الخارجة من المبادل، T_{g3} : درجة حرارة الغازات الداخلة للمقتصد في المبادل، Cp_g : السعة الحرارية لغازات العادم، Cp_w : السعة الحرارية لمياه التغذية [3].



شكل (4) يوضح عملية التبادل الحراري داخل المقتصد في المبادل الحراري (SP-Boiler) [8]

3.4 الموازنة الحرارية للمبادل الحراري (AQC-Boiler):

في الشكل (5) يوضح مولد البخار (AQC-Boiler) المستخدم في عملية التبادل الحراري بين الغازات العادم الصاعدة من مبرد الكلنكر والمبادل الحراري حيث تدخل غازات العادم بدرجة حرارة 320°C وبمعدل تدفق 35 kg/s إلى المبادل الحراري وتتبادل غازات العادم مع المياه المستنزفة القادمة من مقتصد المبادل الحراري (SP-Boiler).

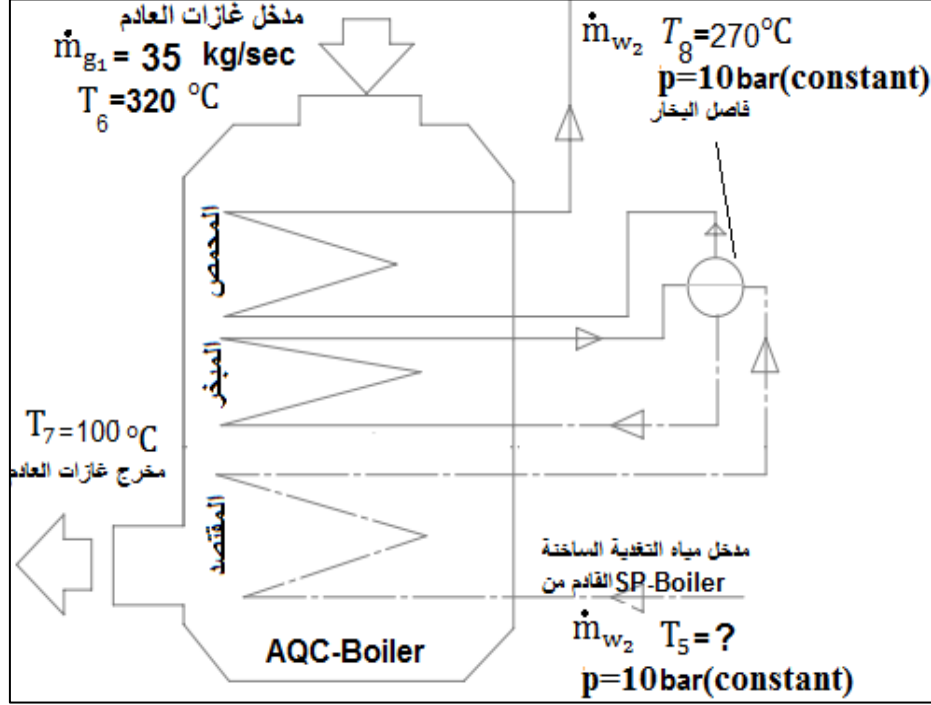
وبتطبيق عملية الاتزان الحراري على المبادل الحراري (AQC Boiler) وذلك من أجل ايجاد معدل التدفق مياه التغذية، حيث تعطي معادلة (3) الاتزان الحراري بين غازات العادم ومياه التغذية المستنزفة من مقتصد المبادل الحراري (SP-Boiler).

$$\dot{m}_{g2} * c_{p_g} * (T_6 - T_7) = Q_{add} = \dot{m}_{w2} * c_{p_w} * (T_{sat} - T_5) + (\dot{m}_{w2} * \Delta H_v) + \dot{m}_{w2} * c_{p_{steam}} * (T_8 - T_{sat}) \quad (3)$$

حيث إن:

$\dot{m}_{g2}$: معدل تدفق غازات العادم، $\dot{m}_{w2}$: معدل التدفق المياه الداخلة الي مبادل AQC-Boiler، T_5 : درجة حرارة مياه الداخلة إلى AQC-Boiler، T_6 : درجة حرارة غازات العادم الداخلة للمبادل، T_7 : درجة حرارة غازات العادم الخارجة من المبادل، T_8 : درجة حرارة البخار المحمص المولد، T_{sat} :

درجة حرارة التشبع عند ضغط 10 bar، Cp_g : السعة الحرارية لغازات العادم، Cp_w : السعة الحرارية لمياه التغذية، Cp_{steam} : السعة الحرارية للبخار المتولد [3].



شكل (5) يوضح مولد البخار (AQC-Boiler)

4.4 الموازنة الحرارية لمجمع البخار (Energy Balance on Main Header):

يتم في مجمع البخار الرئيسي موازنة الطاقة الحرارية للبخار المتولد في المولدين البخار (AQC-) و (Boiler) و (SP-Boiler) وبواسطة المعادلة (4) حيث توضح عملية الموازنة الطاقة للبخار المحمص داخل مجمع البخار الرئيسي.

$$T_{\text{steam out main header}} = \frac{\dot{m}_{\text{steam out AQC}} * T_{\text{out AQC}} + \dot{m}_{\text{steam out SP}} * T_{\text{out SP}}}{\dot{m}_{\text{AQC}} + \dot{m}_{\text{SP}}} \quad (4)$$

حيث إن:

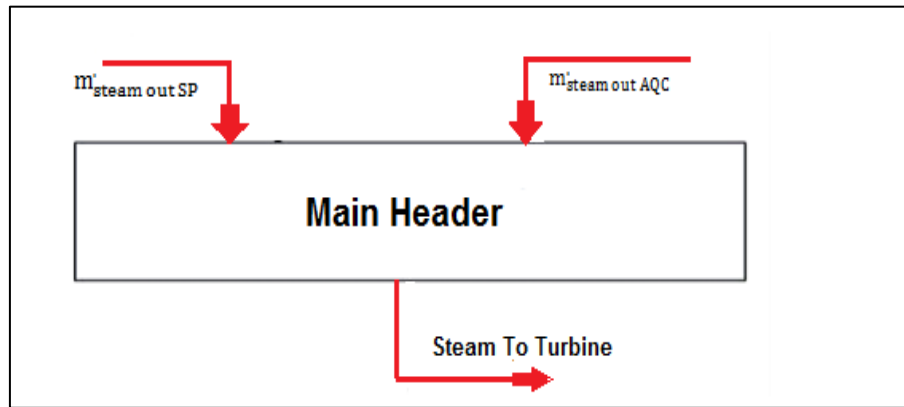
$\dot{m}_{\text{steam out SP}}$: معدل تدفق البخار الخارج من SP-Boiler،

$\dot{m}_{\text{steam out AQC}}$: معدل تدفق البخار الخارج من AQC-Boiler،

$T_{\text{steam out SP}}$: درجة حرارة البخار الخارج من SP-Boiler،

$T_{\text{steam out AQC}}$: درجة حرارة البخار الخارج من AQC-Boiler،

$T_{\text{steam out main header}}$: درجة حرارة البخار الخارج من مجمع البخار الرئيسي [3].



شكل (6) يوضح عملية موازنة البخار المحمص داخل مجمع البخار الرئيسي.

جدول (3) الحسابات التيرموديناميكية للدورة المستخدمة [9].

المخرجات التيرموديناميكية	القانون
القدرة المنقولة من البخار الي التوربين العامل	$h_1 - h_2$
الحرارة المفقودة من البخار داخل المكثف	$h_2 - h_3$
الشغل المنقول بواسطة المضخة	$h_4 - h_3$
كمية الحرارة المكتسبة للماء بواسطة مولدات البخار	$h_1 - h_4$
الشغل الصافي لسائل العمل	$Work_{turbine} - Work_{pump}$
كفاءة منظومة استعادة الحرارة	$\frac{W_{net}}{Q_{add}}$
ولإيجاد القيمة الحقيقية في الدورة البخارية يمكن حساب هذه النقاط بتطبيق القوانين الآتية	
$90\% \eta_b$ الكفاءة الأيزوننتروبية للتوربين البخاري	$\frac{h_1 - h_2}{h_1 - h_{2s}}$
$82\% \eta_m$ الكفاءة الأيزوننتروبية لمضخات المياه	$\frac{h_{4s} - h_3}{h_4 - h_3}$

5. النتائج والمناقشة

تم تحليل نموذج استعادة الطاقة الحرارية المفقودة من مبرد الكلنكر والسيكلونات الحرارية لتوليد الطاقة الكهربائية وفقاً لدورة رانكن البخارية القياسية الحقيقية، وفيه تتم عملية عرض وتحليل ومناقشة النتائج المتحصّل عليها من الحسابات ومخرجات برنامج الماتلاب والاكسل معاً.

1.5 تحليل نتائج المبادلات الحرارية للنموذج المستخدم

• مبادل حراري (SP-Boiler):

تيارات الغازات الساخنة المفقودة من السيكلونات الحرارية تدخل الى المبادل الحراري (SP-Boiler) بدرجة حرارة 420°C وبمعدل تدفق 70 kg/s ويتم التبادل الحراري بين الغازات ومياه التغذية التي تدخل الى المبادل بدرجة حرارة 39°C وبمعدل تدفق 11.4 kg/s حيث يتم استنزاف مياه بما قيمته 3.5 kg/s من المقتصد وإرساله الى المبادل الحراري (AQC-Boiler) والباقي بما يعادل 7.9 kg/s من مياه التغذية تستمر في المرور عبر المبادل الحراري (SP-Boiler) وفقا لحسابات الموازنة الحرارية للمعادلة (1).

• مقتصد المبادل الحراري (SP-Boiler):

في مقتصد المبادل الحراري (SP-Boiler) يتم التبادل الحراري بين غازات العادم الخارجة من المبخر ومياه التغذية القادمة من المكثف بدرجة حرارة 39°C وتبلغ قيمة المياه الساخنة الخارجة من مقتصد المبادل الحراري (SP-Boiler) 140°C وبمعدل تدفق 3.5 kg/s والمتحصل عليه بحل المعادلات.

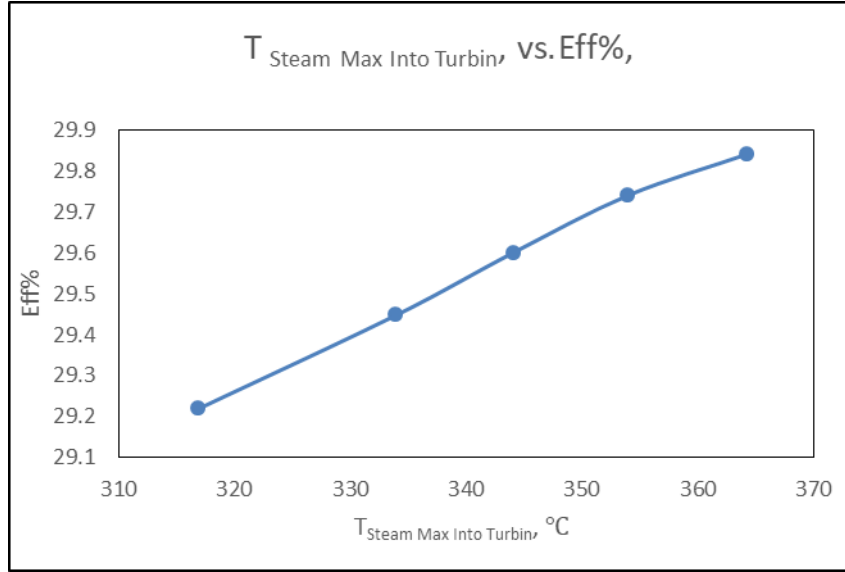
• المبادل الحراري (AQC-Boiler):

يتم فقد الطاقة الحرارية عبر الغازات المتصاعد من مبرد الكلنكر بدرجة حرارة 320°C وبمعدل تدفق 35 (Kg/s) حيث يدخل إلى المبادل الحراري في سريان عكسي لا تجاه سريان الماء الذي يدخل بدرجة حرارة 140°C المستنزف من المبادل الحراري (SP-Boiler) وبمعدل تدفق 3.5 kg/s والذي تم استنتاجه من عملية الموازنة الحرارية للمبادلات حسب المعادلات، ويتم التبادل الحراري مع مياه التغذية داخل المبادل الحراري (AQC-Boiler) والذي بدوره يقوم بتحويل مياه التغذية الداخلة للمبادل إلى بخار محمص تصل درجة حرارته إلى 270°C عند ضغط ثابت 10 bar .

• مجمع البخار الرئيسي (Energy Balance on Main Header):

نظرا للاختلاف في درجات حرارة البخار المولد من كلا من المبادلين، تجري عملية موازنة الطاقة الحرارية للبخار المتولد في هذه المرحلة حسب المعادلة (4). حيث إن درجة حرارة البخار الخارجة من مجمع البخار الرئيسي 332°C بمعدل تدفق 11.4 kg/s .

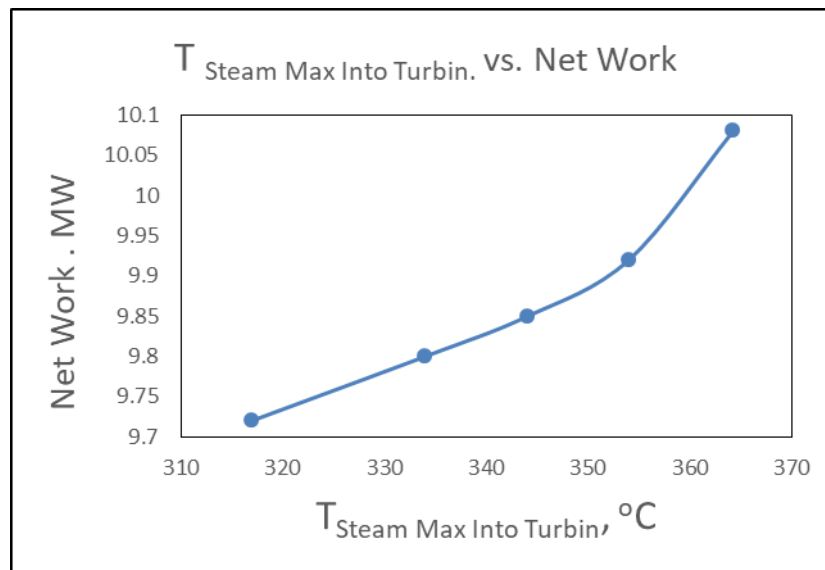
2.5 دراسة تأثير درجة حرارة البخار الداخل إلى التوربين على كل من كفاءة الدورة والقدرة المولدة
لدراسة مدى تغير درجة الحرارة القصوى للبخار الداخل للتوربين تم تغيير درجة حرارة (Superheat Approach) في المدى $(25-75)^{\circ}\text{C}$ وحساب قيمة درجة حرارة البخار الناتج عند كل تغيير ومن ثم دراسة تأثير ذلك على الكفاءة و القدرة الناتجة، والشكل (7) و(8) يوضح العلاقة بين درجة حرارة البخار الداخل إلى التوربين وبين كل من الكفاءة و القدرة حيث يتضح أنه كلما زادت درجة الحرارة القصوى في الدورة كلما زادت القدرة والكفاءة على التوالي، حيث تصل أعلى قيمة للكفاءة والقدرة عندما يكون الفرق بين درجة حرارة غازات العادم الداخلة الي مولد البخار ودرجة حرارة (Superheat Approach) أقل قيمة وهي 25°C ، وفي حالة اختيار قيمة المتوسطة (Superheat Approach) 50°C فإن $T_{\text{steam}}^{\circ}\text{C}$ 332 وبالتالي فإن الكفاءة 29.5% والقدرة المتولدة 9.82 MW ، حيث أن أقصى كفاءة يمكن الوصول إليها في هذا النموذج حوالي 30.1% والقدرة المنتجة تصل الي 10.08 MW .



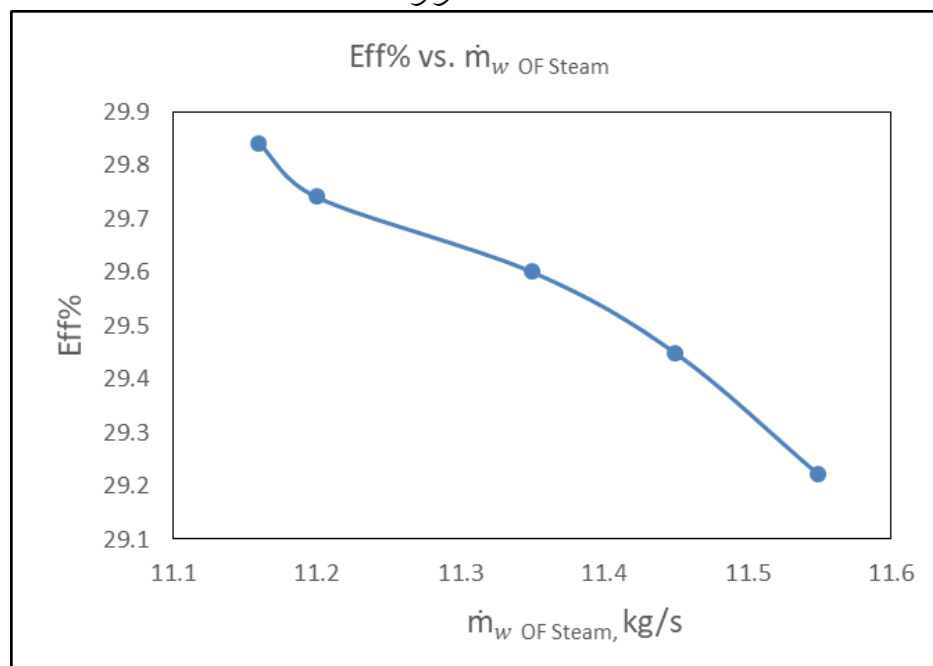
شكل (7) يوضح العلاقة بين درجات حرارة البخار التي تولدها المبادلات مع كفاءة المنظومة للنموذج المستخدم لمنظومة استعادة الحرارة

3.5 دراسة تأثير معدل التدفق مياه التغذية على معدلات الأداء الثيرموديناميكية والمتمثلة في الكفاءة والقدرة

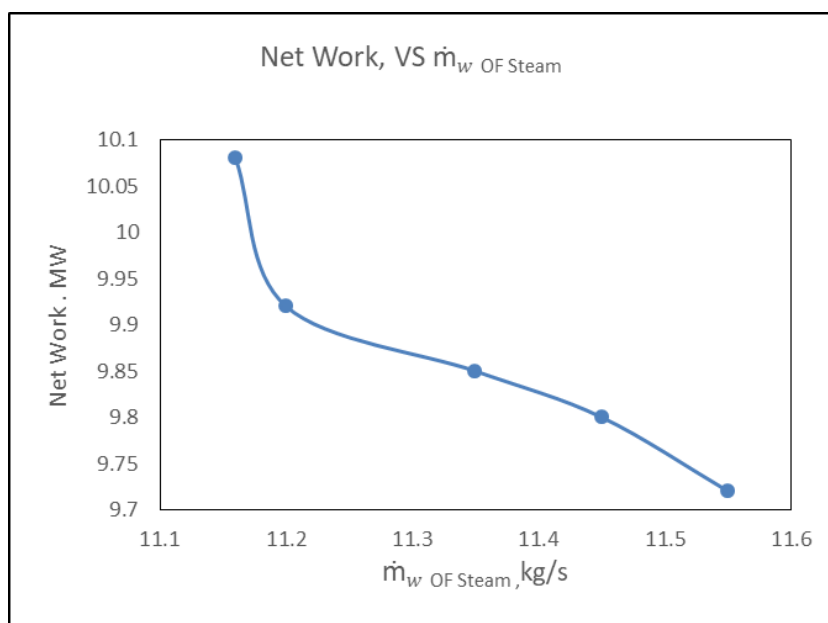
دراسة تأثير (pinch point) والذي بدوره يؤثر على معدل كمية مياه التغذية في الدورة لإنتاج البخار وذلك عن طريق امتصاص أكبر قدر من الحرارة المفقودة من غازات العادم وحساب كفاءة الدورة والقدرة لوحظ أدناه في الشكل (9) و(10) الذي يوضح العلاقة بين معدل مياه التغذية وبين كل من الكفاءة والقدرة، أن معدل تدفق مياه التغذية الذي يعطينا أكثر كفاءة وقدرة لدورة والذي يستفيد بأكبر قدر من الطاقة الحرارية المفقودة عبر غازات العادم حوالي $11.16 \frac{kg}{sec}$ وذلك لتوليد أقصى قدرة في الدورة والتي تبلغ حوالي 10.08MW اللازمة للدورة وأن أقصى قيمة لمعدل مياه التغذية في المنظومة قيمتها $11.55 \frac{kg}{sec}$ لإنتاج قدرة قدرها 9.72 MW حيث نستنتج من مخطط العلاقة بين معدل تدفق مياه التغذية والقدرة المولدة في الشكل (10) أنه عندما تزيد معدل التدفق مياه التغذية في المنظومة تقل القيمة الحرارية للبخار المتولد مما يعطينا علاقة عكسية مع القدرة المولدة.



شكل (8) يوضح العلاقة بين درجات حرارة البخار التي تولدها المبادلات مع كفاءة المنظومة للنموذج المستخدم لمنظومة استعادة الحرارة



شكل (9) يوضح تأثير معدلات تدفق مياه التغذية في الدورة على كفاءة منظومة استعادة الحرارة



شكل (10) يوضح تأثير معدلات تدفق مياه التغذية في الدورة على القدرة المولدة في منظومة استعادة الحرارة

6. الاستنتاجات

كان الهدف هو تقليل المشاكل التي تواجه صناعة الاسمنت وذلك بالاستفادة بأكبر قدر من الطاقة الحرارية المهدرة من مصنع إسمنت لبدّه، من خلال هذا المشروع حيث تم تحليل ومحاكاة هذا النموذج باستخدام الماتلاب و تم استنتاج أنه بالإمكان الاستفادة من تقنية استعادة الحرارة المفقودة عبر مولدات البخار (HRSG) حيث تصل الكفاءة الحقيقية إلى 27.14% بطاقة إنتاجية تبلغ 9.014 MW.

7. الشكر والتقدير

نتوجه بالشكر والتقدير إلى جميع الأصدقاء والزملاء والمهندسين في مصنع اسمنت لبدّه على مساندتهم لنا طيلة فترة إعداد هذا البحث. وآخر دعوانا ان الحمد لله رب العالمين والصلاة والسلام على سيد الأولين والآخرين سيدنا محمد ﷺ وعلى آله وصحبه أجمعين.

8. المراجع

- [1] خواص المواد واختباراتها. أ.م محمود إمام، ود. محمد أمين "منشور جامعة المنصورة" 2007ف.
- [2] V. L. Eriksen. Heat Recovery Steam Generator Technology, Seventh Edition. 2017.
- [3] S. M. Bin Qadhi, A. A. Bawazir. Waste heat recovery system (WHRS) for cement industry - A case study for Hadhramout cement factory, Arabian Yemen Cement Company Limited (AYCCL) – MUKALLA – Hadhramout, 2018
- [4] J. N. Khordehghah, et al. Heat Recovery Technologies and Applications. April, 2018
- [5] Atm c , A. and Yumut ş, R., "Thermodynmic and exergoeconomic analysis of a cement plant: Part II – Application", Energy Conversion and Management, 79 799-808 (2014).

[6] دليل التنقيش على صناعة الأسمنت. "منشور جامعة عين شمس" ديسمبر 2002 ف.

[7] A. Kabul, Ö. Kizilkan. Exergetic assessment of a rotary kiln for clinker production in cement industry, Jan 2015.

[8] Waste Heat Recovery in Turkish Cement Industry. International finance corporation, 2018.

[9] مذكرات من وحدات الإنتاج بالمصنعين (لبدة - والمرقب).

An Analytical Study For The Utilization Of Waste Thermal Energy From Exhaust Gases In Lebda Cement Factory For The Generation Of Electric Power

Mohamed N. Aswaid^{1*}, Fathi Kawan², Kamal Alnfate³,
Hassan Aldrogy⁴, Serag I. Alsharif⁵

Department of Mechanical and Industry Engineering, Elmergib University, Alkhoms, Libya
Mohamedaswaid@gmail.com¹, fathikawan74@gmail.com², kamalalnfate@gmail.com³
htbd2017@gmail.com⁴, srgsharif4@gmail.com⁵

ABSTRACT

Due to the rapid and significant development in building and construction projects, especially in developing countries such as Libya, and the accompanying increasing consumption of the basic material, which is cement, as the manufacture of this material accompanies a large consumption of energy. This study deals with the analysis of operational and design data as thermodynamic variables to assess the extent of utilization of lost thermal energy and the possibility of generating electrical power from it, thus reducing environmental damage. This research has studied and analyzed a model for recovering waste thermal energy from exhaust gases in Lebda Cement Factory for the purpose of generating electric power through the Rankin steam cycle, by utilizing two heat sources in the factory: the exhaust of the clinker cooler and the exhaust of thermal cyclones, where two heat exchangers were used: the first It is (SP- Boiler) that takes advantage of the high heat of the exhaust gases emitted from thermal cyclones and the second is (AQC- Boiler), which takes advantage of the heat of the gases resulting from cooling the clinker. This study analyzed the actual operational data collected from the factory control rooms and obtained through field visits to the factory. Through these obtained data, the energy balance was done on the heat exchangers used, the thermal energy of the steam generated in the Rankin steam cycle, and the analysis of the capacity and efficiency of the steam cycle using the Matlab program. Where the results showed that the power generated using this cycle is 9.014 MW, with an efficiency of 27.14%. In this work also, the effect of the steam temperature entering the turbine and the flow rate of the feed water on the thermodynamic performance rates represented in efficiency and capacity were studied.

Keywords:

Waste heat recovery.

Rankin Cycle

Cement industry.

*Corresponding Author Email: mohamedaswaid@gmail.com