

## استرجاع الحرارة الضائعة باستخدام دورة رانكين العضوية

م. بيداء بو دقه<sup>(1)</sup>

د.م. بسام بدران<sup>(2)</sup>

### المخلص

تشكل الضياعات الحرارية في العمليات الصناعية نسبة كبيرة من الطاقة الضائعة التي لا يمكن استرجاعها بالطرائق التقليدية لانخفاض السوية الطاقية فيها إذ تراوح درجات الحرارة بين ( $70^{\circ}\text{C} - 250$ ). في المدة الأخيرة بدأت دورة رانكين العضوية (Organic Rankine Cycle, ORC) تشكل تقنية واعدة في استرجاع هذه الطاقة. في هذا البحث وباستخدام برنامج (Engineering Equation Solver, EES) اختبرنا الأداء الترموديناميكي لدارة رانكين العضوية لوسائط التشغيل المتوافرة لدينا في السوق المحلية، وتبين لدينا أن وسيط التشغيل R141b يعطي أفضل أداء ترموديناميكي للدارة. كما أُعدت منصة تجريبية لدورة رانكين العضوية العاملة على الوسيط R141b وحصلنا من خلالها على مردود حراري (2.24%)؛ وذلك نتيجة انخفاض كفاءة التجهيزات المستخدمة. ومع المردود الحراري المنخفض لـ ORC إلا أنها تعدُّ فعالة في عمليات استرجاع الحرارة فإذا استخدمنا هذه الدورة لاسترجاع حرارة غازات الاحتراق في محطة تشرين الحرارية نستطيع الحصول على طاقة كهربائية تصل إلى 2 MW.

الكلمات المفتاحية: دورة رانكين العضوية - مردود دورة رانكين العضوية - استرجاع الحرارة الضائعة - وسائط ايزونتروبية - وسائط رطبة.

(1) مهندسة في قسم هندسة الميكانيك العام كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية.

(2) أستاذ مساعد في قسم هندسة الميكانيك العام كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية.

## Waste Heat Recovery Using Organic Rankine Cycle

Eng. Baydaa F. Bo Dakkah<sup>(1)</sup>  
Dr. Bassam E. Badran, Ph.D.<sup>(2)</sup>

### Abstract

A considerable amount of heat is wasted in many industrial plants at (70 – 250 °C) levels which produce difficulties recovering that wasted heat. Nowadays, Organic Rankine Cycle (ORC) poses a good solution for waste heat recovery. In this research, and through multiple software, we have chosen the appropriate working fluid for ORC to be tested and worked out among a range of wet and isentropic working fluids available to us in the domestic market, the research also showed that The R141b as a working fluid gives the best thermodynamic performance. A test bench for the ORC has been developed using R141b, which resulted in a thermal efficiency of about 2.24% due to the low efficiency of the equipment. In spite of the low thermal efficiency of ORC, it is effective in heat recovery processes. If we use this cycle to recover waste heat from the flue gases at Tishreen Plant using R141b, we can obtain electrical power of up to 2 MW.

**Keywords:** Organic Rankine Cycle (ORC), ORC Performance, Waste Heat Recovery, Isentropic Working Fluids, Wet Working Fluids.

---

<sup>(1)</sup> Engineer Mechanical & Electrical Faculty Damascus University.

<sup>(2)</sup> Associate Professor Mechanical & Electrical Faculty Damascus University.

**1- المقدمة:**

تُسترجع هذه الحرارة الضائعة بطريقتين [3]:

1. مبادل حراري مباشر لاسترجاع الطاقة واستخدامها في تطبيقات مختلفة، مثلاً: في تسخين المياه، وهنا يمكن العمل على مجالات درجات الحرارة السابقة كلها.
2. دورة حرارية مغلقة مثل دروة رانكين البخارية أو دورة رانكين العضوية لاسترجاع الطاقة، وتحويل هذه الطاقة إلى عمل مفيد، وهنا يجب الانتباه إلى مجال درجات الحرارة المتوافرة.

تعدُّ دورة رانكين البخارية من أفضل الطرائق المستخدمة لاسترجاع الطاقة الضائعة عند درجات حرارة مرتفعة والتي تكون أكبر من (340°C) إذ يكون مردودها الحراري ( $\eta_{th,int}$ ) بين 30% إلى 40% تُعدُّ دورة رانكين العضوية من أفضل الطرق المقترحة في استرجاع الطاقة الضائعة عند درجات حرارة منخفضة التي تراوح بين (70 – 80 °C)، إذ يصل مردود الدورة بين 10% إلى 20% [4]. تستعمل دورة رانكين العضوية، على نقيض دورة رانكين البخارية التقليدية، وسائط تشغيل عضوية مختلفة مثل الأمونيا، والإيزوبنتان، وغيرها من الوسائط. تقوم كثير من المراجع العلمية على دراسة هذه الوسائط وتأثيرها في المردود الحراري للدورة ولكنها لا تلتقي في اختيار وسيط التشغيل المناسب.

قام هذا البحث على إعداد منصة تجريبية لدورة

رانكين العضوية واختيار وسيط التشغيل المناسب للعمل ضمن المنصة، ودراسة أداء هذه المنصة، والنتائج المتوقعة في حال تطبيقها على استرجاع الطاقة من غازات الاحتراق في محطة تشرين الحرارية.

**2- دورة رانكين العضوية ووسائطها.**

ظهرت دورة رانكين العضوية في عام 1883م عندما استخدم (Frank W Ofledit) وسيط التشغيل Naphtha

الطاقة هي مصدر أساسي للتطور الإنساني، ومفتاح تطور مختلف الخدمات وخطط التنمية الاقتصادية والاجتماعية. التطور الاقتصادي الذي ظهر في المدة الأخيرة يعتمد اعتماداً أساسياً على ازدياد استهلاك طاقة الوقود الأحفوري كمصدر أساسي في عمليات التصنيع. ولكن المشكلة تكمن في التباين بين نسبة الطاقة النهائية الممكن استهلاكها (طاقة حرارية أو كهربائية) إلى الطاقة الأولية المقدمة (طاقة الوقود الأحفوري). ومن هنا برزت أهمية العمل في ترشيد استهلاك الطاقة وتحسين كفاءة استخدامها في مختلف القطاعات الاقتصادية، ومن ضمنها القطاع الصناعي الذي يستهلك ثلث الإنتاج الطاقوي، وي طرح ثلث إشعاعات غاز الدفينة [1].

يعدُّ المرجل العنصر الأساسي في القطاعات الصناعية كلها، إذ تُحوَّل فيه الطاقة الكامنة في الوقود (الروابط الكيميائية) إلى طاقة حرارية لاستخدامها في مختلف المجالات. تؤثر الضياعات الحرارية التي تنتج عن عملية تحول الطاقة ضمن المرجل تأثيراً كبيراً في كفاءة العملية الإنتاجية. تقسم هذه الضياعات الحرارية [2] إلى:

1. الضياعات المخزنة في هيكل المرجل وتجهيزاته
2. الضياعات الحرارية مع غازات الاحتراق إذ تشكل النسبة الكبرى ومن ثمَّ يُعدُّ خفض هذه الضياعات من الأولويات لرفع كفاءة القطاع الصناعي.
3. الضياعات الحرارية مع مياه و/أو هواء التبريد.

تُقَسَّم الضياعات الحرارية مع غازات الاحتراق بحسب درجة حرارتها إلى ثلاثة أقسام:

- منخفضة (أصغر من 230°C).
- متوسطة (بين 230 – 650 °C).
- عالية (أكبر من 650 °C).

عند نفس الشروط يقارب المردود الفعلي للدور [8]. إن نوع وسيط التشغيل المستخدم يتعلق بطبيعة المصدر الحراري فالوسيط المناسب لغازات الاحتراق يختلف عن الوسيط المناسب للهواء أو الماء أو الطاقة الشمسية ودرجة الحرارة المطلوب الوصول إليها هي درجة حرارة الوسط المحيط في حالة الهواء في حين يجب أن تكون أعلى من حرارة تشكل أكسيد الكبريت ( $100 - 130^{\circ}\text{C}$ ) في حال غازات الاحتراق [9]. يجب أن يتوافر في وسائط التشغيل المواصفات الآتية:

1. الحرارة الكامنة للتبخير عالية.
2. كثافة عالية في حالتها السائل والبخار.
3. سعة حرارية نوعية عالية.
4. بارامترات حرجة معتدلة (ضغط وحرارة).
5. ضغط تكاثف وتبخير مقبول.
6. خصائص انتقال حرارة جيدة (لزوجة منخفضة وناقلية حرارية عالية).
7. استقرار كيميائي وحراري جيد.
8. لا يؤدي إلى حدوث تآكل.
9. خصائص أمان جيدة (غير سام، وغير قابل للاشتعال).
10. تأثيرات بيئية منخفضة (ODP, GWP).
11. تكلفته منخفضة ومتوافر.

### 3. التحليل الترموديناميكي للدورة الأساسية

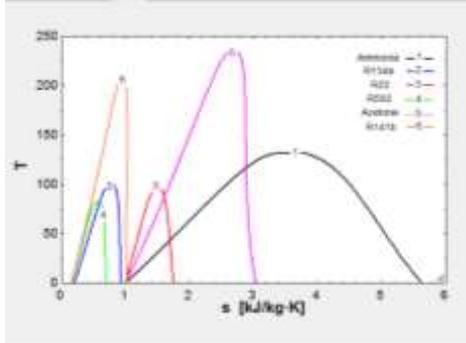
يبين الشكل (1) دورة رانكين العضوية ومخططها على  $(T - s)$ ، إذ نستطيع إجراء التحليل الترموديناميكي [10] وتحديد المردود الثاني (الإكسرجي) لهذه الدورة العضوية.

بدلاً عن الماء في المحرك البخاري على قاربه، ومن ثم فإن كمية البخار التي حصل عليها من الوسيط العضوي كانت أكبر من بخار الماء؛ ممّا أدى إلى الحصول على كمية أكبر من الطاقة [5]. تعدّ دورة رانكين العضوية ذات تكلفة عالية لسعر الكيلوواط الساعي، ولكنها تمتاز في:

1. انخفاض كمية الحرارة المطلوبة لعملية التبخير.
2. درجات حرارة وضغوط منخفضة في عملية التبخير.
3. انتهاء عملية التمدد في منطقة البخار المحمص، ومن ثمّ تجنب حدوث تآكل في ريش العنفة.
4. يؤدي فرق الضغط الصغير بين عملية التبخير والتكاثف إلى استخدام عنفة بسيطة بمرحلة واحدة.

في السنوات الأخيرة بدأت دورة رانكين العضوية تشكل تقنية واحدة في استرجاع الحرارة، وتحويلها إلى عمل أو طاقة كهربائية. وظهرت العديد من الدراسات النظرية؛ ومنها استرجاع الحرارة الضائعة من غازات الاحتراق في فرن سيراميك عند درجات حرارة تراوح من  $(200 - 220^{\circ}\text{C})$  لإنتاج  $(40 \text{ kW})$  من الطاقة الكهربائية [6]. لم يكتفِ الباحثون بالدراسات النظرية وإنما ظهر عدد من الدراسات التجريبية؛ منها إنشاء منصة اختبار لاسترجاع الحرارة الضائعة من غازات احتراق لموقد تراوح حرارته من  $90^{\circ}\text{C}$  إلى  $220^{\circ}\text{C}$ ، إذ يجري التبادل الحراري بشكل مباشر مع غازات الاحتراق ووسيط التشغيل وهو  $(\text{R123})$  والممدد عبارة عن ضاغط حلزوني ( Scroll compressor) والطاقة الناتجة  $(0.645 \text{ kW})$  وبمردود حراري  $(8.5\%)$  [7]. تنتوع وسائط التشغيل الممكن استخدامها والتي تؤثر بشكل كبير على أداء الدورة حيث أظهرت إحدى الدراسات التي أجريت على مجموعة من الوسائط  $(\text{R} - 12, \text{R} - 123, \text{R} - 134\text{a})$  أن  $(\text{R} - 123)$  (الوسيط الجاف) هو أفضل وسيط للاستخدام في استرجاع الحرارة الضائعة ومردود دورة كارنو

أقصى وسيطاً التشغيل R11 و R12 لما لهما من تأثير ضار على طبقة الأوزون وبيّن الشكل (2) الآتي بقية الوسائط على مخطط (T-s).



الشكل (2) مخطط T-s لوسائط التشغيل المدروسة

لما كانت عملية التمدد كلّها تجري في منطقة البخار المحمص وعند استطاعة مقدّمة من المصدر الحراري 2000W ودرجة حرارة تصل إلى (90°C)، وبالاغتماد على الفرضيات الموضحة بالجدول (2)، درسنا تأثير بعض البارامترات في مردود الدورة لوسائط التشغيل المتوافرة باستخدام برنامج

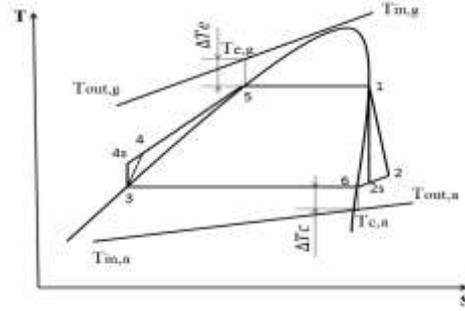
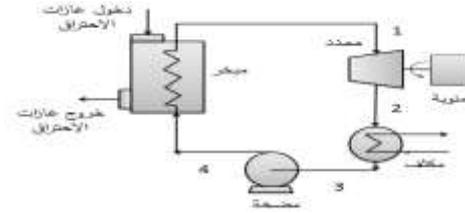
EES (Engineering Equation Solver).

الجدول (2) - بارامترات الدورة المفروضة.

Parameter	Value	Parameter	Value
$\eta_p$	70%	$\eta_{ex}$	70%

• تأثير درجة حرارة تبخر وتكاثف وسيط التشغيل، في مردود الدورة، واختيار وسيط التشغيل.

يظهر الشكل (3) والشكل (4) أنّ المردود الحراري لدورة رانكين العضوية يزداد بازدياد درجة حرارة التبخر، حتى يصل إلى أعظم قيمة عند درجة قريبة من درجة الحرارة الحرجة حسب الوسيط المستخدم، في حين يزداد مع انخفاض درجة حرارة التكاثف واقتربها من درجة حرارة الوسط المحيط.



الشكل (2) - المخطط الصندوقي ومخطط (T-S) لدورة رانكين العضوية.

$$\eta_{II} = \eta_{th}/\eta_{ca}$$

$$\eta_{th} = \frac{W_o}{Q_{ev}}$$

$$\eta_{ca} = 1 - \left( \frac{T_{in,a}}{T_{in,g}} \right)$$

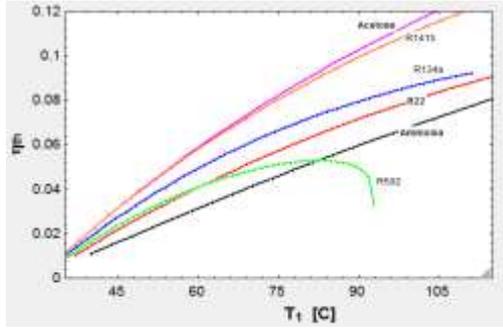
#### 4. اختيار وسيط التشغيل

لدينا في السوق المحلية 7 أنواع لوسائط التشغيل الممكن استخدامها في دورة رانكين العضوية، وبيّن الجدول (1) هذه الوسائط ومواصفاتها.

الجدول (1): مواصفات الوسائط المدروسة.

Working fluid	Expansion	$T_{cr}$	$P_{cr}$
		°C	bar
Ammonia	Wet	132.3	113.3
R134a	Wet	101	40.6
R12	Wet	112	41.14
R22	Wet	96.13	49.9
R502	Wet	82.16	40.74
R11	isentropic	198	44.08
Acetone	isentropic	235	47

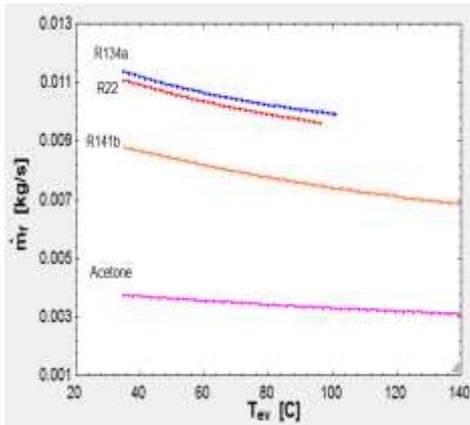
يزداد المردود الحراري للدارة بازدياد درجة حرارة دخول البخار إلى الممدد، كما هو مبين في الشكل (6)، ويكون لوسيطي التشغيل R502 و Ammonia أقل قيم للمردود الحراري.



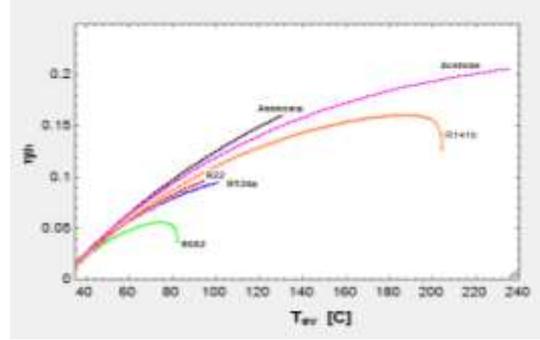
الشكل (6) - علاقة المردود الحراري كتابع لدرجة حرارة دخول البخار المحمص إلى الممدد

• تأثير التدفق الكتلّي في اختيار وسيط التشغيل

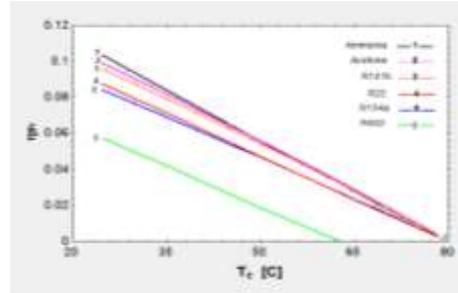
نلاحظ من الشكل (7) أنّه مع ازدياد درجة حرارة التبخر ينخفض التدفق الكتلّي المطلوب نفس الكمية المسترجعة من الطاقة نفسها، ونجد أن وسيط التشغيل (Acetone) يتطلب تدفقات كتلية صغيرة بالمقارنة بالوسائط الأخرى؛ ممّا يشكل صعوبة في إيجاد مضخة مناسبة لتحقيق هذا التدفق.



الشكل (7) تأثير درجة حرارة التبخر على التدفق الكتلّي



الشكل (3) - علاقة المردود الحراري كتابع لدرجة حرارة التبخر

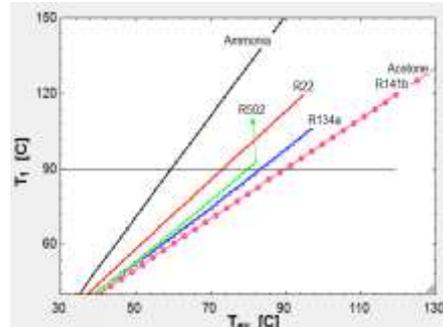


الشكل (4) - علاقة المردود الحراري كتابع لدرجة حرارة التكاثف

• تأثير درجة حرارة البخار الداخل إلى الممدد في

المردود الحراري واختيار وسيط التشغيل.

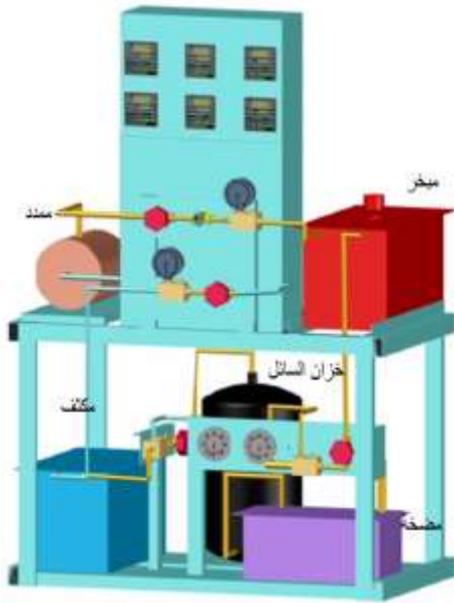
نلاحظ من الشكل (5) أنّه كلما زادت درجة حرارة التبخر للوسائط الرطبة ازدادت درجة حرارة البخار المحمص الداخل إلى الممدد وذلك لضمان أن عملية التمدد تجري كلّها في منطقة البخار المحمص، في حين ينطبق منحنى Acetone على منحنى R141b نظراً إلى أنّهما من الوسائط الايزونترودية، ولا حاجة للتحميص.



الشكل (5) - درجة حرارة البخار الداخل للممدد كتابع لدرجة حرارة التبخر

## 5- المنصة التجريبية

يبين الشكل (9) شكل ثلاثي الابعاد للمنصة التجريبية.



الشكل (9): شكل ثلاثي البعد للمنصة التجريبية

### المضخة:

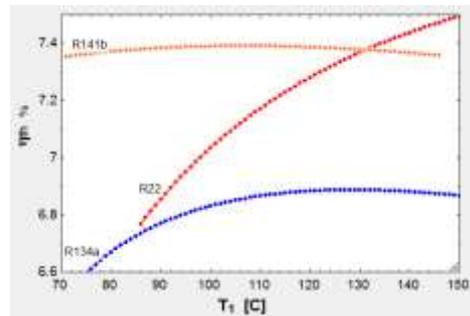
اختيرت مضخة البنزين للسيارات الكبيرة الشكل (10) وتعمل هذه المضخة على التيار المستمر، ولا تحتاج محركاً كهربائياً وتقوم هذه المضخة برفع الضغط إلى 4bar بحالة مستقرة وحتى 5bar مع توقف عمل للمضخة وعندما يصل الضغط إلى 6bar تتوقف المضخة نهائياً عن العمل؛ ولذلك سنعمل على هذه المضخة عند ضغوط ل 4bar.



الشكل (10) مضخة البنزين للسيارات الكبيرة

## • تأثير زيادة التحميص في أداء الدارة

نلاحظ من الشكل (8) أنّ وسائط التشغيل الرطبة يؤدي فيها ازدياد تحميص البخار إلى ازدياد المردود الحراري للدارة، في حين وسائط التشغيل الجافة R141b فإن ازدياد تحميص البخار يؤدي إلى زيادة المردود الحراري بنسبة صغيرة جداً في البداية، ومن ثمّ انخفاض هذا المردود.



الشكل (8) تأثير زيادة التحميص على أداء الدارة

عند حساب المردود الحراري لوسائط التشغيل الثلاث المختارة نجد أنّ R141b يحقق أعلى مردود حراري، وبضغوط عمل منخفضة.

الجدول (3): بارامترات العمل للوسائط المختارة عند أعلى قيمة للمردود

	$T_1$	$T_{ev}$	$P_{ev}$	$\dot{m}_f$	$W_o$	$\eta_{th}$
	°C	°C	bar	kg/s	W	%
R22	85	69.5	29.6	0.0101	134	6.7
R134a	85	79	25.8	0.0102	150	7.5
R141b	85	85	4.77	0.0076	187	9.4

### المبادلات الحرارية:

الأصفر، ومن ثم إغلاق أماكن الوصل بشكل محكم باستخدام معجونة الحديد، وإغلاق السطوح المتطابقة بمعجونة الكولاس الشكل (13)، ومن بعدُ بيت خارجي يكون بداخله الممدد مع مغناطيس في نهاية محور الدوران ويغلق هذا الغلاف إغلاقاً تاماً ومن ثمَّ يُوضَعُ مغناطيس خارجي يتأثر بالمغناطيس الداخلي، وينقل الحركة إلى الوسط الخارجي تجنباً لحدوث التسريبات.



الشكل (13) الممدد

### أجهزة القياس:

مزدوجات حرارية ومقاييس لضغط السائل والبخار ومقياس توتر وتيار كهربائي ومقياس لسرعة الدوران.

### كمية وسيط التشغيل المطلوبة:

حُسِبَتْ كمية وسيط التشغيل المطلوبة من خلال حساب الحجم الذي يشغله الوسيط في الحالة السائلة من مكونات الدارة، وتبين لدينا أنَّ كمية وسيط التشغيل المطلوبة تصل إلى 8 kg.

### 5. الإجراء التجريبي

يبين الشكل (14) الشكل النهائي للمنصة التجريبية مع التجهيزات والمقاييس المستخدمة.

استُخدمت مبادلات حرارية انبوبية مريشة الشكل (11)، كل مبادل مؤلف من 30 أنبوباً بطول 26.5 سم ويقطر 3/8 إنش، ووضعت هذه المبادلات ضمن خزان بأبعاد 30\*24\*20.



الشكل (11) المبادلات الحرارية

### المنوية:

وهي عبارة عن مضخة تنظيف (bleach pump) الشكل (12) تحتوي بداخلها على قفص سنجابي محاط بملفات كهربائية، حيث أزيل القفص السنجابي واستُبدلت به مغناطيسات لتحويله إلى منوية وحصلنا منها على استطاعة 31.5 W.

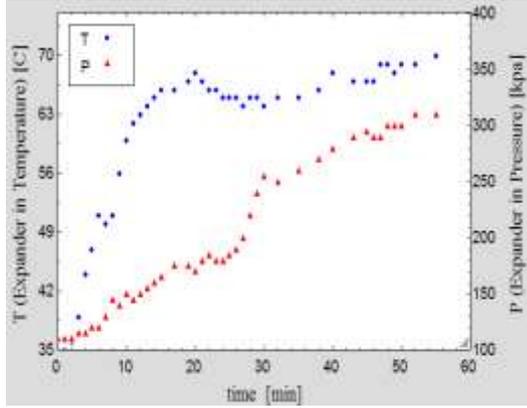


الشكل (12) المنوية والمغناطيسات الموضوعه ضمنها

### الممدد:

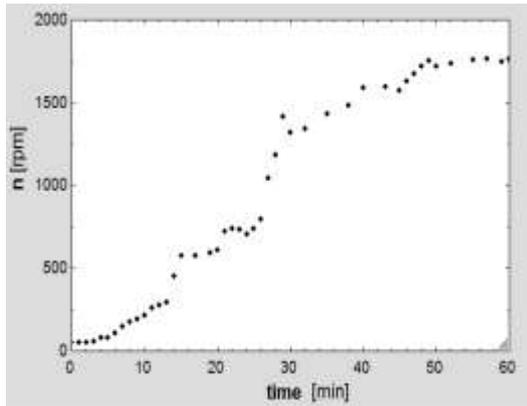
وهو عبارة عن عنفة توربوتشارجر بقطر 6 cm مع إعادة تصميم بيت خارجي لها من مادة البلاستيك

يدخل بعدها وسيط التشغيل إلى المبخر ويكتسب حرارة، ومن ثم يخرج عند ضغوط ودرجات حرارة، كما يظهر في الشكل (16)



الشكل (16) درجة حرارة وضغط الخروج من المكثف

وخلال عملية التمدد تدور العنفة وتنتقل الحركة الدورانية عن طريق الربط المغناطيسي إلى المحور الخارجي الذي يدور بسرعه موضحة في الشكل (17)، كما يحدث انخفاض في الضغط ودرجة الحرارة، كما هو مبين في الشكل (18)، وتختلف هذه القيم باختلاف ضغط ودرجة حرارة البخار الداخل للممدد.



الشكل (17) سرعة الدوران خلال الاختبار

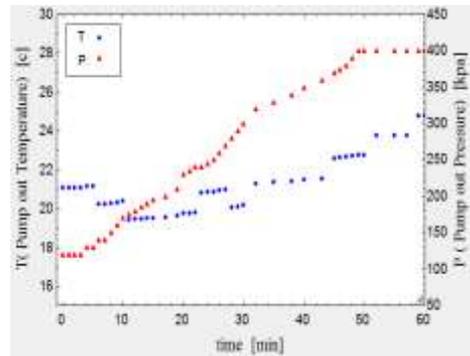
يدخل بعدها وسيط التشغيل إلى المكثف، ويخرج منه بدرجات حرارة وضغوط، كما هو موضح في الشكل (19).



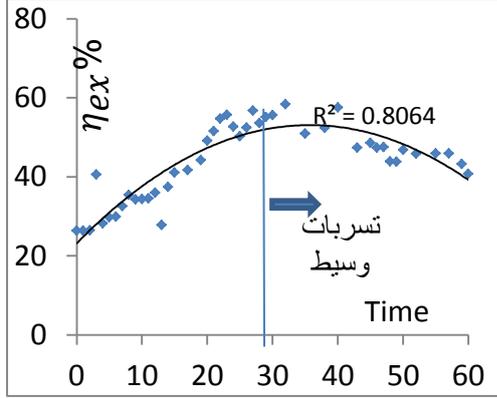
الشكل (14) منصة الاختبار المخبرية

تم في البداية تشغيل السخان الكهربائي (استطاعة 2000 W) ومن ثم الانتظار حتى وصول درجة الحرارة إلى 98°C، ومن ثم تشغيل المضخة عند تدفق 0.3L/min وعن طريق تغيير الجهد المطبق على المضخة تغير الضغط الناتج عنها، فحصلنا على المنحنيات الآتية:

ويبين الشكل (15) أنه مع ازدياد الضغط الناتج عن المضخة تنخفض درجة الحرارة في البداية، ومن ثم تزداد؛ وذلك لتأثرها بحرارة وسيط التشغيل الداخل للمضخة

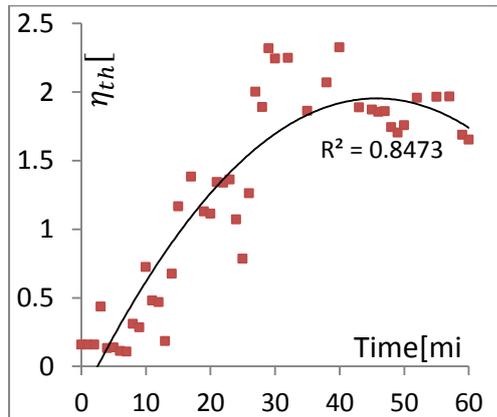


الشكل (15) درجة حرارة وضغط الخروج من المضخة

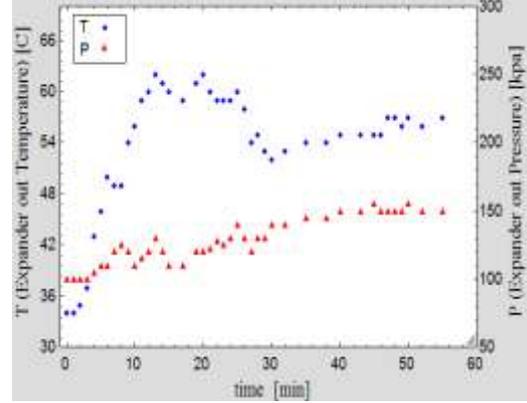


الشكل (20) تغير مردود الممدد خلال زمن الاختبار

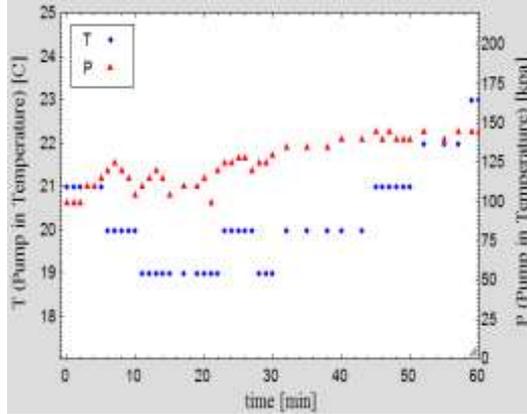
أمّا المردود الحراري لدورة رانكين العضوية ضمن المنصة فيعطى بالشكل الآتي (21)، إذ نجد أنّ المردود الحراري يبقى ثابتاً تقريباً خلال أول عشر دقائق نتيجة لزيادة درجة حرارة خروج البخار من الممدد، ومن ثم تأخذ بالارتفاع نتيجة انخفاض درجة حرارة خروج البخار من الممدد التي تؤدي إلى ازدياد هبوط الانتالبي، ومن ثمّ ازدياد مردود الدورة، كما أن زيادة تحميص البخار الداخل للممدد يكون كبيراً في البداية كما هو واضح في الشكل (22)، وهذا غير مناسب لوسائط التشغيل الايزونترودية؛ ممّا يؤدي إلى انخفاض المردود في البداية، ومن ثم ارتفاعه مع انخفاض التحميص واقترابه من حرارة البخار المشبع الجاف.



الشكل (21) المردود الحراري للمنصة التجريبية خلال زمن الاختبار



الشكل (18) درجة حرارة وضغط الخروج من الممدد



الشكل (19) درجة حرارة وضغط الدخول إلى المضخة

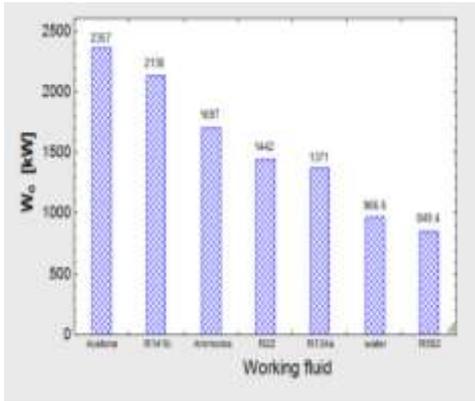
## 6. تحليل النتائج

بناء على المعطيات السابقة حُسب المردود الايزونتروبي للممدد، وتبيّن لدينا من الشكل (20) أنّه يزداد المردود الايزونتروبي للممدد ازدياداً كبيراً في البداية نتيجة ازدياد نسبة انخفاض الضغط ضمن الممدد، وازدياد سرعة الدوران مع مرور الوقت ومن ثم تتخفّض على الرغم من استمرار ازدياد الضغط وسرعة الدوران وذلك نتيجة للتسربات الحاصلة ضمن الدارة والناجمة عن تأثير مادة البلاستيك بالوسيط R141b، وتمدها؛ ممّا أدى إلى حدوث تسربات زادت مع زيادة الضغط المطبق وسرعة الدوران.

والتدفق  $730000 \text{ m}^3/\text{h}$  وتخفيضها إلى  $130 \text{ }^\circ\text{C}$  نجد أن كمية الحرارة الضائعة مع الغازات:

$$Q = \dot{m}_g \times c_{g,p} \times (T_{in,g} - T_{out,g}) = 13180 \text{ [kW]}$$

وبعد إجراء الحسابات الترموديناميكية نجد أنه من الممكن استرجاع طاقة من هذه الغازات لوسائط التشغيل المدروسة، كما هو في الشكل (23).



الشكل (23) العمل المفيد لوسائط التشغيل المدروسة

في حال تم توليد هذه الطاقة من محطات الطاقة البخارية فإن المردود الحراري للمحطة لا يتجاوز 40%، ومن ثم كمية الطاقة

الحرارية من الوقود اللازمة لتوليد هذه الطاقة تحسب بالعلاقة:

$$\eta_{cy} = \frac{W_o}{Q_{fuel}} = 40\%$$

ومن ثم كمية الوقود المطلوبة ساعياً تحسب بالعلاقة [11]:

$$M_{fuel,h} = \frac{3600 \cdot Q_{fuel}}{\eta_b \cdot H_f}$$

إذ:

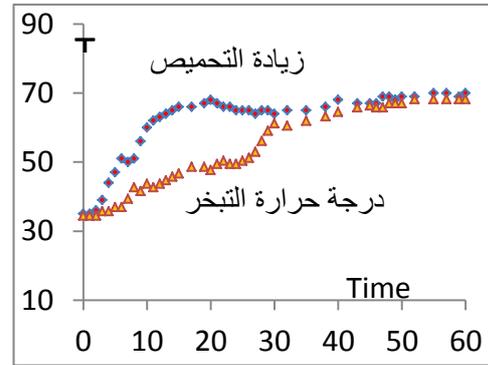
$\eta_b$ : مردود المرجل 80%.

$H_f$ : حرارة الاحتراق الدنيا للمازوت 41800 kJ/kg

وتعطي كميات الطاقة المستهلكة والمنتجة في مكونات الدارة ضمن شروط التشغيل المستقرة نسبياً وفق الجدول الآتي:

الجدول (5) مواصفات تشغيل المنصة التجريبية بالحالة المستقرة

العنصر المكون للدارة	الطاقة
الحرارة الضائعة	$Q_{ev} = 1607 \text{ W}$
المكثف	$Q_c = 1571 \text{ W}$
الممدد	$W_{ex} = 45.4 \text{ W}$
المضخة	$W_p = 9.37 \text{ W}$



الشكل (22) درجة حرارة البخار الداخل إلى الممدد (زيادة

التجميع)، ودرجة حرارة التبخر خلال زمن الاختبار

وبناء على المعطيات السابقة يكون مردود دورة رانكين العضوية ضمن المنصة التجريبية 2.24%، ونظراً إلى أن كمية الحرارة المصروفة ضمن المبخّر تعبر عن كمية حرارة ضائعة لا يمكن الإفادة منها، أي لا تعد هذه الطاقة كطاقة مقدمة إلى المنصة ومن ثم

$$\frac{\text{الطاقة الناتجة}}{\text{الطاقة المستهلكة}} = \frac{45.4}{9.37} = 4.845$$

يمكن تطبيق الدراسة السابقة في حال استخدام دورة رانكين العضوية لاسترجاع الحرارة من غازات الاحتراق في محطة تشرين الحرارية ذات درجة الحرارة  $180 \text{ }^\circ\text{C}$

## 7. الخلاصة

إن عملية تصميم دورة رانكين العضوية وتصنيعها تتطلب عملاً بحثياً طويلاً وإمكانات كبيرة والمنصة التي أنشئت تحتاج إلى تطوير وتحسين في كفاءة الممدد والمضخة والتي أثرت في أداء هذه الدارة فضلاً عن تغيير وسيط التشغيل المستخدم بوسائط أخرى أكثر فاعلية ضمن الدارة. ومع الصعوبات كلها إلا أننا استطعنا الحصول على النتائج الآتية:

• كلما زادت درجة حرارة التبخر وضغط التبخر ازداد المرود الحراري للدارة.

• تؤدي زيادة تحميص البخار الداخل للممدد لوسيط R141b إلى انخفاض المرود الناتج.

• تؤدي زيادة درجة حرارة التبخر إلى انخفاض التدفق الكتلي لوسيط التشغيل لاسترجاع كمية الحرارة نفسها، ومن ثمّ زيادة درجة حرارة التبخر مع زيادة تدفق وسيط التشغيل إلى انخفاض كمية الطاقة المسترجعة.

• وسيط التشغيل R141b المستخدم ضمن الدارة يعطي أفضل أداء ترموديناميكي مقارنة بباقي الوسائط المدروسة فضلاً عن أنّه منخفض السمية ومنخفض القابلية للاشتعال وتأثيره منخفض على طبقة الأوزون والاحتباس الحراري.

• يؤثر وسيط التشغيل R141b في مادة البلاستيك ويؤدي إلى حدوث تمدد فيها، ومن ثمّ حدوث تسربات ضمن الممدد أثرت في النتائج التجريبية التي حصلنا عليها؛ لذلك يجب تجنب استخدام البلاستيك في الدارات التي تستخدم الفريون R141b.

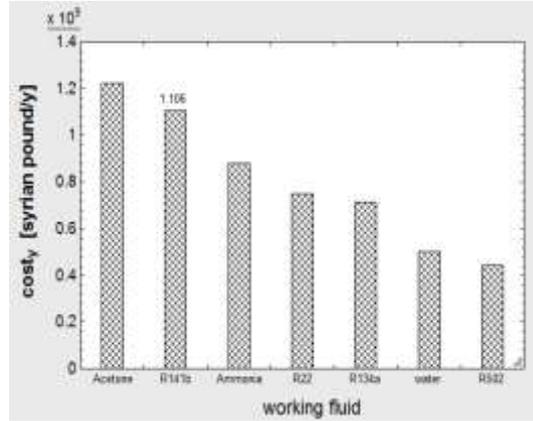
• كمية الطاقة الحرارية الناتجة من المنصة في الحالة المستقرة  $W = 45.4$ ، ومرود  $2.24\%$  نتيجة الكفاءة المنخفضة لكل من الممدد والمضخة والضيعات

وحجم الوقود السنوي باعتبار أن كثافة الوقود

$$\rho_{fuel} = 0.84 \text{ kg/l}$$
 يعطى بالعلاقة:

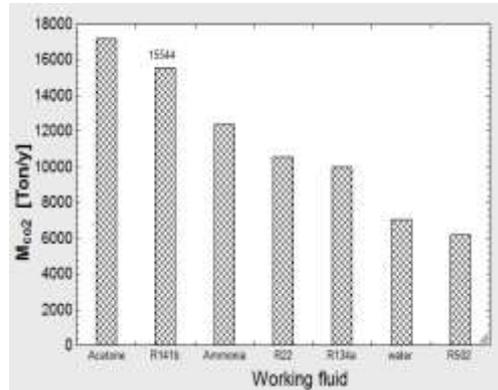
$$V_{fuel,y} = \frac{M_{fuel,h} * 24 * 365}{\rho_{fuel}}$$

ونظراً إلى أنّ سعر لتر المازوت 185 ليرة سورية فيكون الوفر السنوي للحصول على هذه الطاقة للوسائط التشغيل المدروسة مبين في الشكل (24).



الشكل (24) الوفر السنوي مادياً للطاقة المسترجعة

أمّا من الناحية البيئية فإنّ احتراق لتر من المازوت ينتج عنه 2.6 kg من غاز ثاني أكسيد الكربون [12]؛ أي الوفر السنوي من هذه الغازات للوسائط المدروسة مبين في الشكل (25).



الشكل (25) الوفر السنوي لانبعاثات غاز CO2

### الرموز المستخدمة

الرمز	الوصف
ORC	دورة رانكين العضوية
T	درجة الحرارة [K]
P	الضغط [Kpa]
$\dot{m}_f$	التدفق الكتلي لوسيط التشغيل [kg/s]
n	سرعة الدوران [rpm]
$\eta_{th}$	المردود الحراري [%]
$\eta_{ca}$	مردود دورة كارنو [%]
$\eta_{II}$	المردود الثاني [%]
$\eta_p$	مردود المضخة [%]
$\eta_{ex}$	مردود الممدد [%]
$Q_{ev}$	كمية الحرارة المكتسبة ضمن المبخر [W]
$Q_c$	كمية الحرارة المفقودة ضمن المكثف [W]
$W_o$	الاستطاعة المفيدة من الدورة [W]
$W_{ex}$	الاستطاعة المنجزة ضمن الممدد [W]
$W_p$	الاستطاعة المستهلكة ضمن المضخة [W]
الدليل السفلي	الوصف
g	غازات الاحتراق
a	هواء التبريد
in	بارامترات الدخول إلى المبادل
out	بارامترات الخروج من المبادل
ev	بارامترات التبخر
c	بارامترات التكاثف
cr	البارامترات الحرجة
1	بارامترات الدخول إلى الممدد

الحرارية الحاصلة وتسريبات وسيط التشغيل في أثناء الاختبار .

•تشكل الطاقة المنتجة من المنصة نحو 5 أضعاف الطاقة المستهلكة نظراً إلى أنّ الطاقة المصروفة في المبخر هي طاقة ضائعة ومسترجعة.

•ومن الواضح من خلال التجربة أنّه يحصل زيادة تحميص للبخار الخارج من المبخر، وزيادة تبريد في المكثف الذي يؤثر تأثيراً سلبياً على اقتصادية الدارة.

## REFERENCES

- [10] Chen Y, Lundqvist P, Johansson A, Platell P. A comparative study of the carbon dioxide transcritical power cycle compared with an Organic Rankine Cycle with R123 as workingfluid in waste heat recovery. *Applied Thermal Engineering*, (2006), 26: 2142-7.
- [11] د.محمد سعيد الجراح، د. غسان مدلل، 2010-2011. التدفئة والتهوية الصناعية. منشورات جامعة دمشق، 474.
- [12] د. محمد جلال الملقى، 2002-2003، مولدات البخار. منشورات جامعة دمشق.
- |                    |            |                  |
|--------------------|------------|------------------|
| Received           | 2018/01/17 | إيداع البحث      |
| Accepted for Publ. | 2018/10/03 | قبول البحث للنشر |
- [1] WANG Hui-tao, WANG Hua, ZHANG Zhu-ming, (2012). Optimization of Low-Temperature Exhaust Gas Waste Heat Fueled Organic Rankine Cycle. *journal of iron and steel research, international*. 2012, 19(6): 30-36.
- [2] U.S. Department of Energy. (2004, November). Waste Heat Reduction and Recovery for Improving Furnace Efficiency, Productivity and Emmissions Performance.
- [3] BCS Inc. Waste heat recovery: technologies and opportunities in U.S. industry, US Dept. of Energy (DOE); 2008.
- [4] L.Y.Bronicki, (2017). History of Organic Rankine Cycle Systems, Organic Rankine Cycle (ORC) Power Systems. PP. 25-66.
- [5] J. Larjola. (2011). small and Micro Combined Heat and Power (CHP) Systems. Finland: Lappeenranta University of Technology.
- [6] N, Vaccari V, Baresi M, Santo DD. (2012). Heat recovery for electricity generation in industry. In: ECEEE, summer study on energy efficiency in industry. Arnhem (The Netherlands). 2012.
- [7] Bernardo Peris, Joaquín Navarro-Esbri, Francisco Molés, Roberto Collado, Adrián MotaBabiloni. (2014). Performance evaluation of an Organic Rankine Cycle (ORC) for power applications from low grade heat sources. *Applied Thermal Engineering*, 2014.
- [8] Mohammed A. Khatita, Tamer S. Ahmed, Fatma. H. Ashour, Ibrahim M. Ismail. (2014). Power generation using waste heat recovery by organic Rankine cycle in oil and gas sector in Egypt: A case study. *Energy* 64 (2014) 462-472.
- [9] Alta Knizley, Pedro J. Mago, James Tobermann, Harrison R. Warren. (2015). Performance characterization of a power generation unit-organic Rankine cycle system based on the efficiencies of the system components. *Energy Conversion and Management* 105 (2015) 480-487.