دراسة المؤشرات الترموديناميكية لدارة محول حراري مبتكر وتقييم أدائه

محمد عبده باكير** محمد أحمد محمد*

الملخص

تعتبر المحولات الحرارية الإمتصاصية من الآلات الحرارية المشغلة حرارياً بواسطة منبع حراري منخفض درجة الحرارة. تطورت هذه الآلات كثيراً من الآلات الهجينة الى دارة المفاعل لتخفيف الاستهلاك الكهربائي، والإعتماد على الحرارة لتشغيل الدارة.

قمنا في هذا البحث بدراسة المؤشرات الترموديناميكية لنموذج جديد مطور من دارة محول حراري (مفاعل)، تستخدم مزيج من الماء والأمونيا كوسيط عامل في الدارة بغرض تقييم أدائها.

توصلنا في هذا البحث إلى أهمية مؤشرات ضغط التشغيل، ودرجة حرارة المزيج الخارج من المفاعل على معاملات الأداء في الدارة، بالإضافة الى دور هذه المؤشرات في تحديد الغاية من استخدام المحول الحراري (كمضخة حرارية، أو آلة تبريد).

كما تبين من الدراسة عدم تأثير مؤشرات مدى التدرج الحراري في المفاعل، أو درجة حرارة قاع المفاعل، أو حمل التبريد على معاملات أداء الدارة.

كما توصلنا في هذا البحث إلى أنه، وبسبب العمليات الكيميائية التي تحصل في المفاعل (امتصاص الأمونيا، وعملية الفصل الثقالي للمكونات) سوف تتأثر المؤشرات الترموديناميكية فيه، حيث تنتج حرارة ضمن المفاعل يجب التخلص منها بغرض ابقاء المفاعل في حالة مشحونة، والدارة في حالة عمل. تتعلق كميات الحرارة المطروحة في المفاعل بمؤشرات تشغيل المفاعل، وبحمل التبريد، والاستطاعة الكهربائية المستهلكة في الدارة.

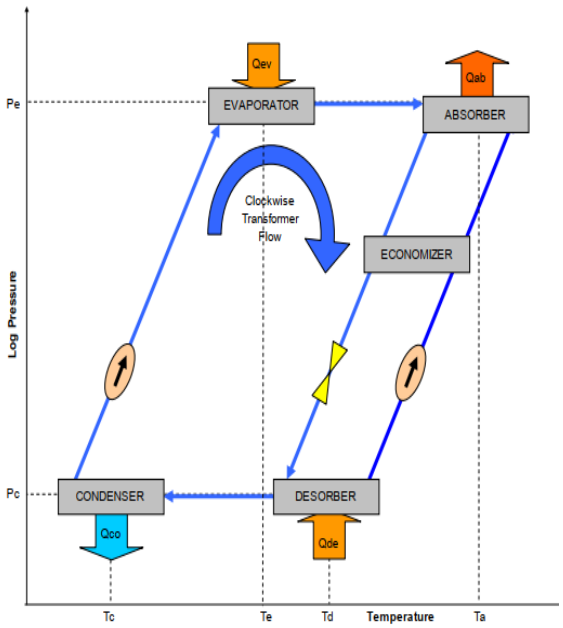
كلمات مفتاحية: المحول الحراري، المفاعل الحراري، الدارات الإمتصاصية، المزيج الزيوتروبي.

* **أستاذ في قسم هندسة القوى- كلية الهمك- جامعة حمص**

** **طالب دكتوراة في قسم هندسة القوى-كلية الهمك- جامعة حمص**

المحولة الحرارية الإمتصاصية (Absorption Heat Transformer)

يعرف المحول الحراري بأنه آلة حرارية امتصاصية تتبع دوران عقارب الساعة للوسيط العامل كما يبين الشكل (1)، حيث تُستخدم المصادر الحرارية (Q_{ev}, Q_{de}) ذات درجات الحرارة المعتدلة (T_e, T_d)، لتشغيل كل من (المولد Desorber) و (المبخر Evaporator) على التوالي من أجل توليد بخار الوسيط العامل بضغط عالي(P_e) (ضغط المبخر Evaporator) بهدف الحصول على درجة حرارة مرتفعة (T_a) (درجة حرارة الماص Absorber). يتم

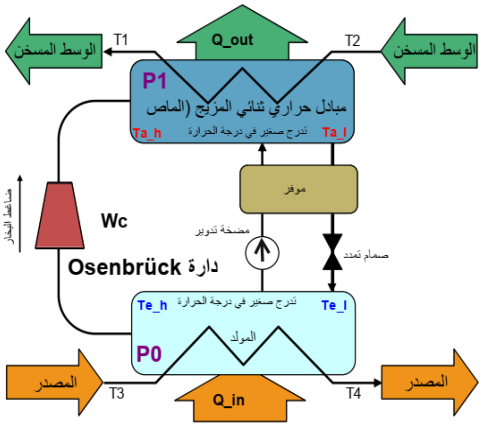


الشكل (1) مخطط لوغاريتمي (P–T)محولة حرارية

امتصاص البخار الناتج عن المبخر في الماص (Absorber)، وتضاف الحرارة الكامنة في البخار إلى حرارة المحلول (تفاعل الإمتصاص ناشر للحرارة) رافعة درجة حرارة الماص إلى درجة حرارة الخرج العالية (T_a). يتم طرح كمية من الحرارة من المكثف (Q_{co}) مما يقلل من معامل أداء هذه الآلة، وتكون عملية ضخ الحرارة (رفع درجة الحرارة) ليست فعالة بشكل كبير. تعتبر الفائدة الكبرى من استخدام هذه الآلات كمضخات حرارية هي في الاستفادة من الحرارة المهدورة في المنابع المتميزة بدرجات حرارة متوسطة، والتي غالباً ما تكون متوفرة بكثرة، إضافة إلى أن استخدام مضخات السائل تستهلك طاقة أقل بمرتبتين على الأقل من الحرارة المتدفقة في الدارة. تجدر الملاحظة إلى أن جريان الوسيط العامل (البخار– السائل) يسير مع دوران عقارب الساعة، حيث يكون المبخر، والماص عند ضغط عالي بخلاف الالات الامتصاصية التقليدية، وتشابهها في خاصية التدرج الكبير للتركيز ودرجة الحرارة ضمن (الماصAbsorber، المولد Desorber). استخدمت هذه الآلات بكثرة في العديد من التطبيقات الاقتصادية، وعلى رأسها البرك المائية الشمسية (solar pond).

درسRivera **[1]** المؤشرات الترموديناميكية لمحولة حرارية تقليدية وحيدة المرحلة تعمل على ضخ كمية حرارة عند الدرجة ($125C^{\circ}$)، من بركة مائية شمسية تمتاز بمدى (80 $30-C^{\circ}$) لدرجات الحرارة، وقد استثمرت هذه الالة في توليد البخار الصناعي. تميزت هذه الاله برفع درجة الحرارة بحدود ($50\ C^{\circ}$)، وبمعامل أداء (COP=0.35)، وهذا يعني أن (35%) من الحرارة المنتزعة من البركة ذات درجة الحرارة المعتدلة، قد سلمت بدرجة حرارة ($125\ C^{\circ}$) في الماص (Absorber) لاستخدامها لأغراض صناعية. في حين قام Kurem **[2]** بدراسة مقارنة بين المحولات الحرارية التقليدية العاملة على (بروميد الليثيوم – الماء) مع الدارات العاملة على (الأمونيا– الماء)، وتوصل إلى أن

معامل أداء المحولة الحرارية يتعلق بشكل قوي بالمؤشرات الترموديناميكية لوسيط (التبريد – الامتصاص)، حيث أظهرت المحولات التي تعتمد على (الماء–بروميد الليثيوم) كوسيط عامل معامل أداء أعلى من الأنظمة التي تعتمد على (الأمونيا – الماء)، غير أن محلول (الماء–بروميد الليثيوم) أبدى سلبيات تتلخص بـ :اللزوجة العالية، التآكل، محدودية الانحلال عند بعض شروط التشغيل، محدودية درجات الحرارة العملية أثناء التشغيل، بلورة بروميد الليثيوم. في حين تميز محلول(الأمونيا– الماء) بقابلية انحلال كبيرة عند مجال واسع من شروط التشغيل، وهو يملك استقرار تجاه المعادن ما عدا النحاس، وخلائطه، بالاضافة الى امتلاكه حرارة كامنه مرتفعة. كما قام Parham [3] من خلال إطروحة دكتوراة في الهندسة المكيانيكية في (Eastern Mediterranean University) بدراسة المؤشرات الترموديناميكية لإمكانية استخدام المحولات الحرارية التقليدية في تحلية مياه البحر حيث توصل إلى نتيجة مفادها ازدياد كمية الماء النقي المنتجة كلما زاد معامل الاداء (COP)، والذي تبين أنه يرتبط عكسياً مع درجة حرارة التكثيف، ودرجة حرارة المصدر الحراري، وطرداً مع حجم التدرج الحراري في الدارة. وقدر كمية الماء النقي المنتج بحدود ($0.2435[\frac{kg}{s}]$) عند أفضل معامل أداء للدارة المستخدمة ($COP=0.38$). نلاحظ مما سبق أنه على الرغم من انخفاض معامل أداء هذا النمط من المحولات الحرارية، إلا أنها تعتبر فعالة اقتصادياً، بسبب توفر كميات وفيرة من الحرارة في المسطحات المائية المسخنة بواسطة الطاقة الشمسية بدرجة حرارة منخفضة، وبتكلفة منخفضة. ولتحسين عامل أداء هذا النمط من المحولات الحرارية فقد جرى تاريخياً تحسينات كثيرة على هذه الدارات من قبيل ما قام به Kiatsiriroat **[4]**، حيث عمد إلى إضافة مضخة حرارية من نوع ضاغط البخار بين مكثف الدارة الامتصاصية ومبخرها، لاسترداد كل الحرارة الكامنة في البخار المتدفق من المولد (Desorber) إلى المكثف، وضخ هذه الحرارة إلى المبخر، جاعلاً الفاقد الحراري في المكثف(Q_{co}) معدوم. بهذا



الشكل (2) دارة Osenbrück

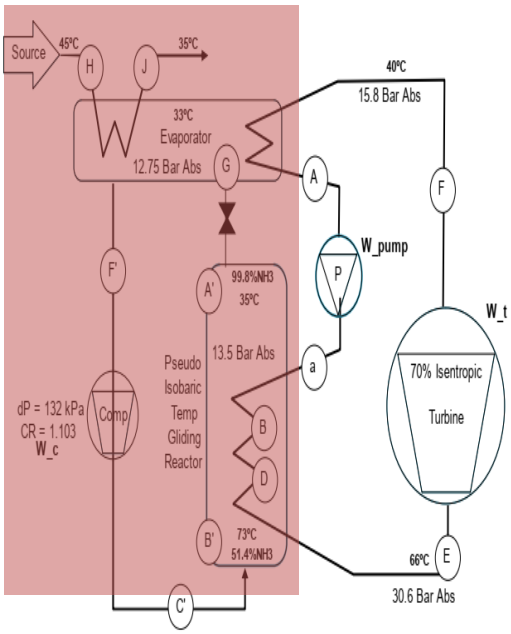
التعديل تم توثيق قيمة كبيرة لمعامل الأداء ليزداد إلى (COP=0.8)، وهو ما يشكل ميزة اقتصادية كبيرة لهذه الدارات. كما وثق Heredia **[5]** زيادة في معامل الأداء بحدود (14–30%) باستخدام حاقن للبخار قبل دخوله إلى الماص (Absorber)، كما اقترح الباحث في بحثه استرداد حرارة المكثف باستخدام مجموعة من الأنابيب الحرارية بين المكثف، والمبخر، وزاد هذا التعديل أيضاً من معامل الأداء بحدود (20%) ليسجل قيمة لمعامل الأداء بحدود (COP=0.6)، وهي قيمة اقتصادية هامة إلى حد بعيد.

توالت التحسينات المدخلة على هذه الدارات عن طريق تهجينها بواسطة الدارات الانضغاطية ذات معامل الاداء العالي، حيث عمل Sveine **[6]** على تصميم محولة حرارية هجينه (امتصاصية / ضاغطة) تعمل بوسيط (الماء–الأمونيا) معتمداً على تصميم دارة (Osenbrück) الهجينة كما يبين الشكل (2)، حيث دلت المؤشرات الترموديناميكية إلى أن أعلى ضغط في الدارة يُحقق (19 bar)، وأدى هذا التصميم إلى رفع درجة الحرارة من ($53C^{\circ}$) (درجة حرارة المصدر الحراري) إلى ($117C^{\circ}$) (درجة حرارة الوسط المحيط (البالوعة)) بمعامل أداء (COP=3.8)، وقد كان للمبادل الحراري للمحلول بين (المولد والماص) تأثير كبير على معامل أداء النظام. وفي مقارنة بين المحولات الحرارية الهجينة، والتقليدية عرض Jian **[7]** في مؤتمر خاص بالمضخات الحرارية مجموعة من

المحددات الخاصة لعمل كلا النوعين حيث بين أن أقل درجة حرارة يمكن استخدامها في مبخر المحول الحراري التقليدي هي ($17C^{\circ}$) في حين تبلغ ($8C^{\circ}$) في المحول الهجين، في حين بلغت أعلى درجة حرارة يمكن استخدامها في مكثف المحول الحراري التقليدي ($22C^{\circ}-$)، بينما في المحول الحراري الهجين ($6\ C^{\circ}-$)، كما سجلت استطاعة التسخين للمحول التقليدي قيمة أقل بـ (50%) من استطاعة المحول الحراري الهجين عند نفس الشروط. وفي سبيل تطوير الدارات الهجينة قام Zhou **[8]** بدراسة المؤشرات الترموديناميكية لمضخة حرارية ضاغطة بخار تعمل بدارة محلول ثنائي، وتبادل حراري بين جهازي الماص والمولد، بمرحلة واحدة،ومرحلتين امتصاص. أشارت النتائج إلى أن النظام أحادي المرحلة يؤمن (COP) مرتفع، وارتفاع منخفض في درجة الحرارة (التدرج الحراري)، أما النظام ثنائي المرحلة تكون قيمة (COP) منخفضة بينما زاد ارتفاع درجة الحرارة بشكل كبير(التدرج الحراري). كما حقق Borgås **[9]** قيمة عالية لمعامل الأداء (COP=1.6-1.8) من خلال تطوير محول حراري هجين من نمط (Compression/Absorption Heat Transformer) (CAHT) باستخدام تدرج بدرجة حرارة ($50C^{\circ}$) في الماص (Absorber)، وتدرج بحدود ($40C^{\circ}$) في المولد (Generator). حيث كانت القيم التجريبية لتسخين الماء في المبادل الحراري للماص (البالوعة الحرارية) ضمن المجال ($110-160\ C^{\circ}$)، وتبريد الماء في المبادل الحراري للمولد (المصدر الحراري) ضمن المجال ($5-45\ C^{\circ}$)، وقد قام الضاغط بضغط بخار يحوي حوالي (95-98%) نسبة كتلية من (NH_3) ممزوجة بنسبة مئوية صغيرة جداً من بخار الماء، اختلف تصميم (Borgås) عن (Osenbrück) في الاستغناء عن الموفر بين المولد والماص، بالإضافة الى اختلاف قيم الضغوط في الدارة حيث يرتبط معامل الأداء بالضغوط العاملة في الدارة. كما حقق Jensen **[10]** معامل أداء (COP) مشابه لنموذج (Borgås)، مختبراً ارتفاع في درجة الحرارة بحدود($30C^{\circ}$)

حيث يعمل الماص(Absorber) بمدى تدرج لدرجات الحرارة($120-150\ C^{\circ}$) على الرغم من استخدامه تدرج في درجة الحرارة بحدود($10C^{\circ}$) فقط في المولد(Generator).

من المهم ملاحظة أن دارة (CAHT)، تتميز بفرق ضغط كبير بين الماص (Absorber)، والمولد (Generator)، وهو ما يتطلب استهلاك طاقة كهربائية كبير نسبياً من قبل الضاغط، بدلاً من استهلاك الطاقة الحرارية لتشغيل الآلة. عالج هذا الموضوع Enslin **[11]** ، حيث لاحظ أنه من المنطقي ضم التيارات المتعاكسة للسائل ثنائي المزيج المتدفق في كل من الماص والمولد، والموفر ضمن عمود سائل ثنائي المزيج أطلق عليه اسم (المفاعل). إن هذا التعديل من وجهة نظره سيسمح باتصال مباشر بين التيارين المتعاكسين منتجاً معدلات أعلى لانتقال الحرارة، والكتلة. وفي هذا السياق تتم عملية التوليد (Generation) في الجزء العلوي من العمود الثنائي حيث يتم سحب البخار من الأعلى، مبرداً هذا القطاع، بينما توليد الحرارة، وعملية الامتصاص (Absorption) تتم في أسفل العمود الثنائي حيث يدخل البخار المضغوط الناتج في الدارة ضمن المزيج في المفاعل، وهذا بدوره ينتج قطاعات في العمود الثنائي يتم فيها تدرج في درجة الحرارة، وتراكيز الوسيط العامل عند ضغط ثابت نسبياً. إن فقاعات البخار المضغوط سوف تدخل العمود الثنائي من الأسفل لتقوم بفعل ضخ رافع للبخار، مسبباً تدوير تدفق عكسي للسائل. استخدم Enslin **[12]** هذا النوع من المحولات الحرارية من أجل توليد الطاقة الكهربائية باستخدام دارة ثانوية (رانكين العضوية) الشكل(3). وقد قدم تحليلاً علمياً متكاملاً لإثبات أن نموذجه يعتبر محولاً حرارياً عالي الأداء من حيث تحقيقه مجموعة من المتطلبات الحرارية التي تتميز بها دارات المحول الحراري. وكانت المؤشرات الترموديناميكية للدارة كما هو موضح في الشكل (3).



Position	Temp (Celsius)	Press (kPa)	Mass (kg/s)	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (kJ/kg.K)	Quality (x)	Media
A	40	1575	1.0	191.1	0.626	0%	NH3
a	40	3058	1.0	196.2	0.652	0%	NH3
B	66	3058	1.0	324.0	1.046	0%	NH3
D	66	3058	1.0	1286.6	3.884	100%	NH3
E	66	3058	1.0	1286.6	3.884	100%	NH3
F	40	1575	1.0	1231.9	3.968	94.71%	NH3

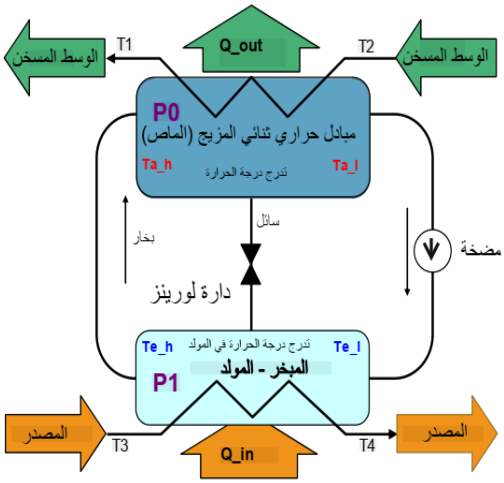
W_turbine =	54.7	kW	η_ORC =	4.4%	
W_pump =	5.1	kW	% Carnot =	57.0%	

Position	Temp (Celsius)	Press (kPa)	Mass (kg/s)	Enthalpy (kJ/kg)	Entropy (kJ/kg.K)	%NH3 (kg/kg)	Media
A'	35	1352		166.6	0.568	99.80%	NH3-H2O
B'	73	1357		89.9	1.064	51.49%	NH3-H2O
C'	39	1408	1.313	1030.7	4.273	99.80%	NH3-H2O
F'	33	1276	1.313	1026.4	4.230	99.80%	NH3-H2O
G	33	1276	1.313	166.6	0.575	99.80%	NH3-H2O
H	45	200	2.101	188.4	0.639	-	H2O
J	35	195	2.101	146.6	0.505	-	H2O

W_comp =	4.3	kJ/kg	Electrical COP_e =	200	
Q_heatpump =	162.2	kJ/kg	Thermal COP_th =	1.01	
Real Thermodynamic COP (~ 60%Carnot) =				5.19	

الشكل (3) المؤشرات الترموديناميكية لدارة المحول الحراري الهجين /مفاعل لتوليد الكهرباء بمساعدة دارة رانكين العضوية

وعلى الرغم من أن المحولة الحرارية ذات المفاعل– التي درسها Enslin تملك معامل أداء (COP =0.9–1)– وهي تعتبر قيّمة اقتصادياً– فإن التطبيق العملي ما يزال يتطلب ضاغط بخار مكلف، ولو أنه كان صغير جداً. إن الاستفادة من دارة المفاعل يتطلب فهم السلوك



الشكل (4) دارة Lorenz المشغلة حرارياً

الترموديناميكي للوسيط العامل ضمن المفاعل، وخواصه الترموفيزيائية ومؤشراته العاملة، وهو ما قام به محمد**[14]** حيث تم دراسة المؤشرات الترموديناميكية لمفاعل دارة محول حراري، وسلوك الوسيط العامل ضمنه حيث تبين أنه يمكن استخلاص الامونيا من أعلى المفاعل بمؤشرات كفيلة بإمكانية استخدامها لاحقا" كوسيط تبريد للهواء الجوي من خلال حقنها في مبادل حراري خاص مهمته تبريد الهواء، حيث بينت المخططات أن الحصول على هذه الدرجات محكوم بشكل مبدئي بضغط التشغيل الابتدائي، وتركيز الامونيا في المفاعل. كما أن فرق درجات الحرارة والتراكيز بين طرفي المفاعل يتبع لضغط التشغيل، وتركيز الامونيا، وكمية الحرارة المقدمة في مرحلة الشحن، في حين تلعب درجة حرارة المصدر الدور الاهم في تحديد درجة حرارة اسفل المفاعل. كما تبين وجود مجموعة من المتطلبات الحرارية للحفاظ على استقرار المفاعل بالحالة العاملة حيث بلغت قيمة كمية الحرارة الواجب امتصاصها من الهواء الجوي (+20%Δh) من انتالبي قاع المفاعل على الأقل. كما توصل إلى أن الحراة الفائضة المسحوبة من الهواء الجوي يجب التخلص منها عبر مبادل حراري ضمن المفاعل حتى نحافظ على التدرج. للحصول على درجة حرارة أعلى المفاعل بقيم [0–10 C°] فإنه يجب ان يتراوح ضغط التشغيل [0.5–5 bar]~، وبتركيز للامونيا[0.25–0.65] ~.

وبالتمعن في الدراسات المرجعية السابقة نرى أن استخدام الدارات الهجينة باستخدام الضواغط وتحسيناتها حقق معامل أداء عالي للمحولات الحرارية (التي تعاني من معامل أداء منخفض) على حساب زيادة الاستهلاك الكهربائي، في حين حل نموذج (Enslin) هذه المشكلة جزئياً بتخفيض نسبة الانضغاط في الدارة، واستخدام ضاغط صغير نسبياً يلزم للتغلب على ضغط عمود السائل (المفاعل) فقط. ومن وجهة نظرنا فإنه يمكن استبدال الضاغط بمضخة بالإستفادة من دارة لورينز (Lorenz cycle) الشكل (4) التي تستخدم مضخة سائل لزيادة ضغط السائل الغني بـ (NH_3) البارد بشكل قليل (حوالي 0.5−1 bar) فوق ضغط المفاعل، ليضخ السائل داخل المبخر، حيث الحرارة الخارجية (من المصدر الحراري المهدور) تقوم بتبخيره إلا أن هذه الخطوة تتطلب منّا استخراج وسيط التبريد بحالة سائلة من أعلى المفاعل، وهو ما يتطلب فهم عميق للسلوك الترموديناميكي لوسيط التبريد المستخدم في الدارة.

هدف البحث

1- دراسة المؤشرات الترموديناميكية لدارة محول حراري مبتكرة معتمدة على نموذج (Enslin) وبالاستفادة من نموذج (Lorenz cycle)، تعمل على الطاقة الحرارية المحمولة في الهواء الجوي (الوسط المحيط) وتقييم أدائها.

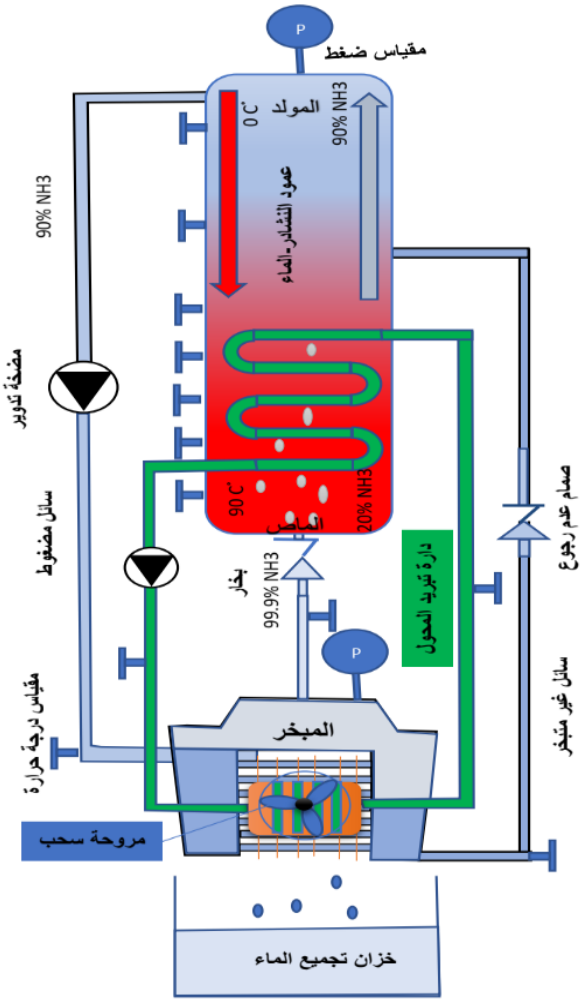
2- البحث في إمكانية استثمار الدارة كآلة تبريد للهواء الجوي.

مواد وطرائق البحث

تم اعتماد المنهج التحليلي الرياضي في هذا البحث، حيث تم بداية توصيف النموذج الفيزيائي، ومن ثم وصف النموذج الرياضي. تم حل المعادلات الواصفة، و تحصيل النتائج بالإعتماد على تطبيق(EES) (Equation Solver Engineering).

النموذج الفيزيائي للدارة

اقترحنا في هذا البحث تطوير لنموذج مبتكر من المحولات الحرارية

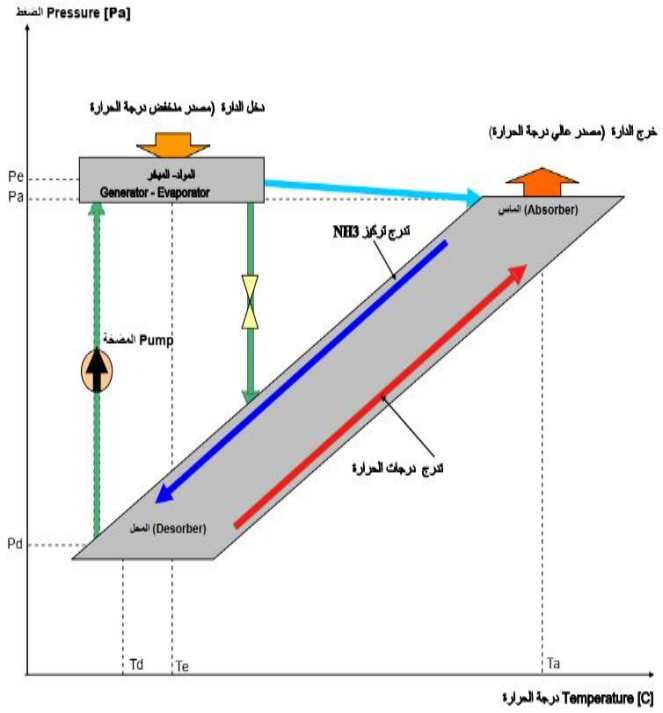


الشكل (5) محول حراري بمفاعل محلول ثنائي لإنتاج (NH3) مشغل حرارياً

(الإمتصاصية/مفاعل) كما هو مبين في الشكل (5) نسعى إلى دراسته، واختباره لاحقاً، وهو نموذج جديد لهذا العمود الثنائي (النشادر–الماء) يعتمد بشكل أساسي على الطاقة الحرارية للهواء الجوي لتشغيله حيث تمتص هذه الطاقة الحرارية في مبخر الدارة مسببة تبخير الامونيا عند ضغط المبخر ليتم ضغطها في أسفل المفاعل، أما الجزء غير المتبخر يعاد تدويره وإدخاله في نقطة من بدن المفاعل يتم تحديدها حسب المؤشرات الترموديناميكية. الوسيط العامل المستخدم في تبريد الهواء (سحب الطاقة الحرارية اللازمة لتشغيل الدارة) يتم سحبه من أعلى المفاعل، ويتم ضخه عبر مضخة تدوير الى المبخر. تعمل هذه الدارة كآلة تبريد للهواء الجوي بعد سحب الحرارة الموجودة فيه لتشغيل الدارة، ويمكن الاستفادة منها في تكثيف بخار الماء الموجود في الهواء الجوي عبر التحكم بدرجة حرارة المبخر (الوسيط العامل الخارج من أعلى المفاعل) إلى ما دون درجة الندى.

في ضوء الدراسات السابقة، وتطوراتها قمنا برسم مخطط (P–T) لدارة المحول الحراري (الإمتصاصي/مفاعل) كما في الشكل (6)، حيث نلاحظ أن الفرق في الضغط بين (P_a)، و(P_d){فرق الضغط بين (desorber)، و(absorber) في الدارة} هو فقط الضغط الناتج عن عمود السائل في المفاعل طالما تم ضم كل من ((desorber)، و(absorber)) في المفاعل كما أسلفنا سابقاً **[11]** . تكون درجة الحرارة الباردة في أعلى المفاعل(T_d)، بينما درجة حرارة المبخر (T_e) تكون أعلى بـ ($1C^{\circ}$) فقط من درجة حرارة أعلى المفاعل، بضغط اشباع للمبخر (P_e) أعلى بقليل من ضغط الماص (Absorber) (P_a) يتم تحقيقه بواسطة المضخة، من أجل السماح للبخار بالتدفق من المبخر إلى المولد دون الحاجة إلى وجود ضاغط. من المفترض أن يبقى المفاعل شاقولي، لأجل الاستفادة من خاصية الفصل الثقالي في توليد التدرجات المطلوبة من درجة الحرارة، وتراكيز الـ ($NH3$) على طول قطاعات المفاعل حسب شروط التشغيل، والغاية المطلوبة من النموذج وفق**[14]**.

سوف يدخل سائل المزيج الغني بالأمونيا (NH3) المشبع ذو درجة حرارة منخفضة جداً إلى المضخة، مما يؤدي إلى زيادة الضغط عندما يصل



الشكل (6) مخطط P-T لدارة محول حراري/ مفاعل

الجريان إلى المبخر الأفقي تحت مستوي المفاعل. إن فرق الضغط بين مستوى السائل في المبخر، والمفاعل يجب أن يتم تصميمه بدقة، للتأكيد على أن قيمة ضغط البخار المتولد في المبخر كافية لموازنة الضغط الهيدروليكي لعمود السائل في المفاعل، طالما أنه سيتدفق من المبخر مباشرة إلى داخل المفاعل عبر صمام عدم رجوع أسفل المفاعل. ولكن عند التفكير بالنموذج جيداً، نلاحظ أنه في بداية عمل الجهاز يكون ما يزال الماء، والأمونيا مختلط بشكل منتظم، وتكون كل الأنابيب، والمبخر بالكامل مملوءه بهذا المزيج عند بارامترات التشغيل الأساسية. وعندما يتم تقديم الحرارة إلى ملفات المبخر فإن هذه الحرارة سوف تبخر الأمونيا، وتشكل بعض البخار (NH3 نقي تقريباً)، والتي سوف تملأ الجزء العلوي من المبخر، وأنبوب تسليم البخار إلى المفاعل، ويبدأ بعدها دخول البخار

إلى المفاعل من أسفله. البخار الداخل من أسفل المفاعل على شكل فقاعات سوف يمتص في المنطقة السفلية من المفاعل مولداً حرارة، وهو ما يعتبر بداية لتوليد التدرج (في التركيز، ودرجة الحرارة).

إن المبخر هنا ينجز وظيفتين:

1- مولد البخار، مبخراً (NH_3).

2- وعاء يحوي مزيج سائل بتركيز منخفض من (NH_3) غير متبخر، والذي يجب إعادة ضخه إلى المفاعل من جديد بحيث يدخل إلى المفاعل بشكل متناسب مع تركيز، ودرجة حرارة المزيج في المفاعل. خلال إقلاع المفاعل فإن درجة الحرارة الباردة للمزيج في قمة المفاعل يتم إيجادها من خلال تدرج درجة الحرارة المتتالي في المفاعل، والذي تم دراسته من قبل **[14]**، وبالتالي تدريجياً ستنخفض درجة الحرارة للسائل المضغوط، ومنه درجة حرارة المبخر، وبالتالي يزداد امتصاص الحرارة من المصدر الخارجي بواسطة المبخر، طالما ستنخفض درجة حرارة الإشباع للمبخر، حتى الوصول إلى نقطة التشغيل المختارة. يتم وضع ملف مبادل حراري ضمن مفاعل المحول الحراري، وظيفته الأساسية اخراج الحرارة الفائضة من أسفل المفاعل لتحقيق توازن التدفق الحراري ضمن النظام بعد وصول المحول إلى نقطة التشغيل التصميمية. يتم عزل كل من المفاعل مع الأنابيب، والمبخر تماماً، ليتم التبادل الحراري عبر المبادلات الحرارية فقط.

النموذج الرياضي للدارة

يبين الشكل (7) أدناه مخطط تصميمي لدارة المحول الحراري (الامتصاصي/مفاعل)، ويبين المخطط البارامترات التصميمية التي تم افتراضها، ووفقاً للمرجعيات العلمية للمحولات الحرارية.

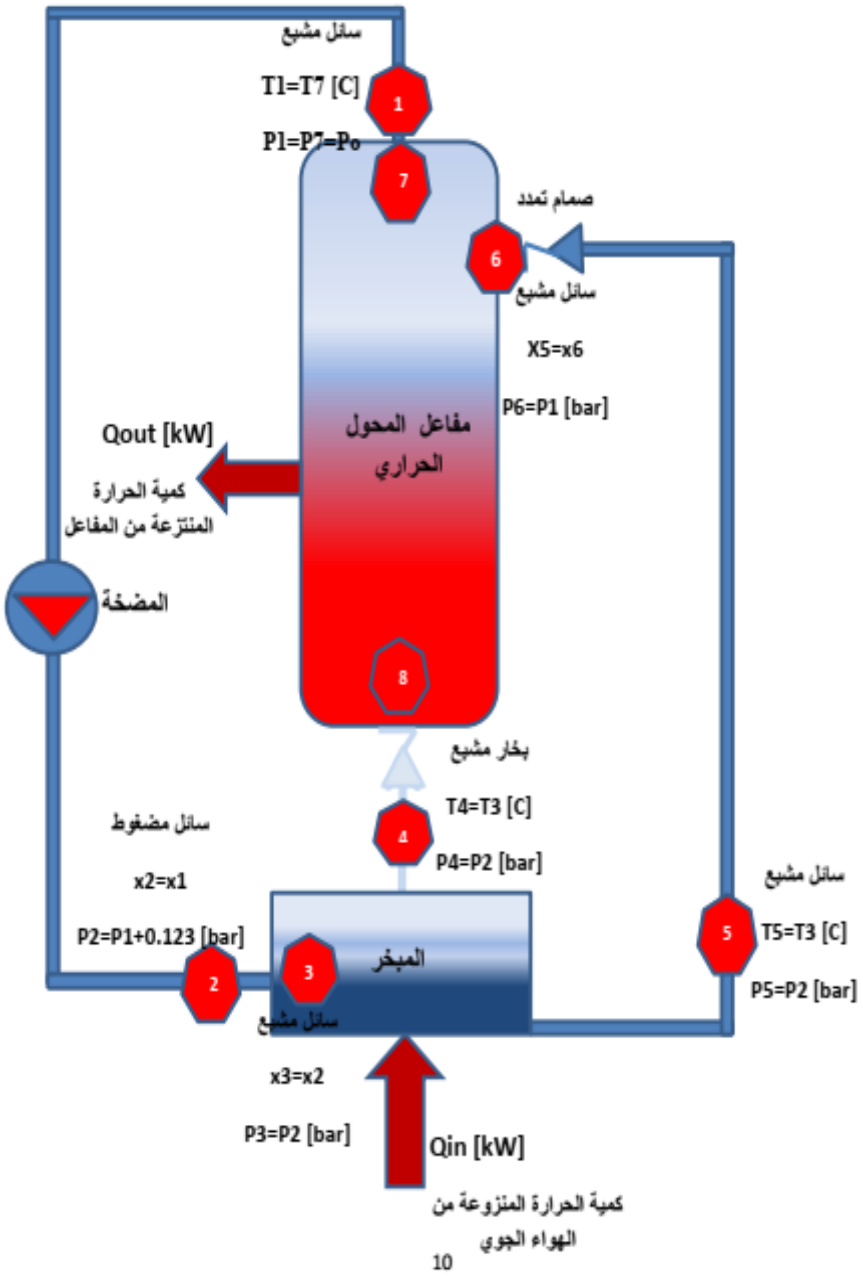
وفيما يلي المعادلات الواصفة:

1- المبخر:

معادلة توازن الكتلة $\sum m_i = 0$ **(1)**

توازن المكونات $\sum m_i * x_i = 0$ (2)

توازن الطاقة $\sum m_i * h_i + Q_{in} = 0$ (3)



الشكل (7) المخطط التصميمي المقترح لدارة المحول الحراري العاملة على الطاقة الحرارية للهواء الجوي

2- المفاعل:

$$\sum m_i * h_i + Q_{out} = 0 \qquad (4)$$

من توازن الكتلة في الدارة ككل لدينا:

$$m_5 = m_6 \quad ، \quad m_1 = m_2 = m_3 \quad (5)$$

m_i: التدفق الكتلي عند الموقع (i) $[\frac{kg}{s}]$.

x_i: تركيز الخليط عند الموقع (i).

h_i: انتالبي الخليط عند الموقع (i) $[\frac{kJ}{s}]$.

Q_{in}: استطاعة التبريد الممتصة من قبل مبخر الدارة [kW] .

Q_{out}: كمية الحرارة الواجب انتزاعها من أسفل المفاعل بواسطة مبادل حراري [kW].

يتم إيجاد تدرج التراكيز، ودرجات الحرارة في مرحلة شحن المفاعل قبل التشغيل وفق**[14]**.

وفي مرحلة العمل عند شروط التشغيل تأتي الحرارة المنبوذة من المفاعل من حقيقة التفاعلات التي تحصل ضمنه، والتي تعتبر المسؤولة عن المحافظة على التدرجات في قلب المفاعل.

حيث تقسم الحرارة المتولدة في المفاعل إلى قسمين:

1- الحرارة الناتجة عن امتصاص المزيج الغني بالأمونيا القادم من المبخر من قبل خليط أسفل المفاعل الفقير (تفاعل ناشر للحرارة) :

$$Q_{ab} = m_i * \Delta h_{ab} \quad (6)$$

2- الحرارة المنبوذة، والناتجة عن التدرج الفيزيائي (الفصل الثقالي) لتركيز المحلول بسبب فرق الكثافات:

$$Q_g = m_i * \Delta h_g \quad (7)$$

Δh_{ab}: فرق الانتالبي بين التيار الماص، والتيار الممتص $[\frac{kJ}{s}]$.

Δh_g: فرق الانتالبي بين التيارين ذو التركيزين المختلفين $[\frac{kJ}{s}]$.

من المفترض في نهاية الحل أن يكون:

$$Q_{ab} + Q_g = Q_{out} \quad (8)$$

تم استخدام المعادلة (8) للتحقق من صحة الحل.

بشكل عام إن هذا التصميم من المحولات الحرارية عالية الأداء المشغلة حرارياً، وكهربائياً يكون معامل الأداء ($COP = \frac{Q_{out}}{Q_{in}+W_{PUMP}}$) قريباً من الواحد، وطالما أن هذه الآلة مشغلة حرارياً، وكهربائياً، فإنه سيتم اعتماد معيارين للأداء من أجل المقارنة، واختبار أداء هذه الآلة (طالما أن الطاقة الحرارية متوفرة بشكل مجاني)، وهما:

1- $\mathbf{COP_{th} = \frac{Q_{out}}{Q_{in}}}$: حيث يعتبر معامل للأداء الحراري (COP_{th}) يعبر عن مقياس نسبة كمية الحرارة التي يجب طرحها من المفاعل الى كمية الحرارة المسحوبة من الهواء الجوي للحفاظ على حالة استقرار المفاعل، والدارة في الحالة المشحونة (العمل) ، والحصول على ما هو مطلوب منه كآلة حرارية.

2- $\mathbf{COP_e} = \frac{\mathbf{Q_{out}}}{\mathbf{W_{PUMP}}}$: ويعتبر معامل للأداء الكهربائي $(\mathrm{COP_e})$ ، وهو يعبر عن الاحتياجات الكهربائية في الدارة لضمان عمل المحول بصورة مستقرة، والحصول على ما هو مطلوب منه كآلة حرارية.

الشروط الحدية

تم اختيار الشروط الحدية بناء على ما تم دراسته وفق[14] ، ووفقاً للمرجعيات العلمية للمحولات الحرارية:

1- طول المفاعل ([m] 1)، قطره ([m] 0.135)، يحوي ([kg] m=5.60) خليط من الماء، والأمونيا بكثافة ($[\frac{kg}{m^3}]$ 562)، وهو ما يسبب ضغط هيدروليكي في قاع المفاعل يقدر بـ ([bar] P=0.053)، طبعا هذه الشروط لا تؤثر إلا في ضغط قاع المفاعل.

2- المضخة تسبب زيادة في الضغط قدرها ([bar] 0.123).

3- درجة الحرارة في المبخر أعلى بدرجة مئوية واحدة من مدخله.

4- P_1: يمثل الضغط عند الموقع (1)، وهو يساوي ضغط التشغيل في المفاعل (P_0).

5- P_8: يمثل الضغط عند الموقع (8)، وهو يساوي ضغط التشغيل في المفاعل مضافاً إليه ضغط عمود السائل في المفاعل.

6- يبين الجدول (1) حالة الوسيط العامل في مواقع الدارة وفق ما سبق شرحه وشروط عمل المفاعل**[14]**.

الجدول (1) حالة الوسيط العامل في نقاط الدارة

الموقعi	الحالةX	الضغط P [bar]	درجة الحرارةT[C]	التركيزx
1	سائل مشبع	[0.2-3.5]	متغير	متغير
2	سائل مضغوط	P1+0.123	متغير	متغير
3	سائل مشبع	P1+0.123	متغير	متغير
4	بخار مشبع	P1+0.123	متغير	متغير
5	سائل مشبع	P1+0.123	متغير	متغير
6	سائل بعد صمام تمدد	P1	متغير	متغير
7	سائل مشبع	P0= P1	متغير	متغير
8	سائل مشبع	P8=P0+0.053	متغير	متغير

منهجية الحل

تم استخدام تطبيق (EES) (Engineering Equation Solver) لحل معادلات النموذج الرياضي، وتم استخدام نفس البرنامج من أجل استخلاص النتائج، ورسم المخططات، وإجراء المقارنات.

الدراسة والنتائج

الحالة (1):

تم دراسة أثر تغير ضغط تشغيل المفاعل (ضغط الموقع 1) على مؤشرات الدارة الأساسية

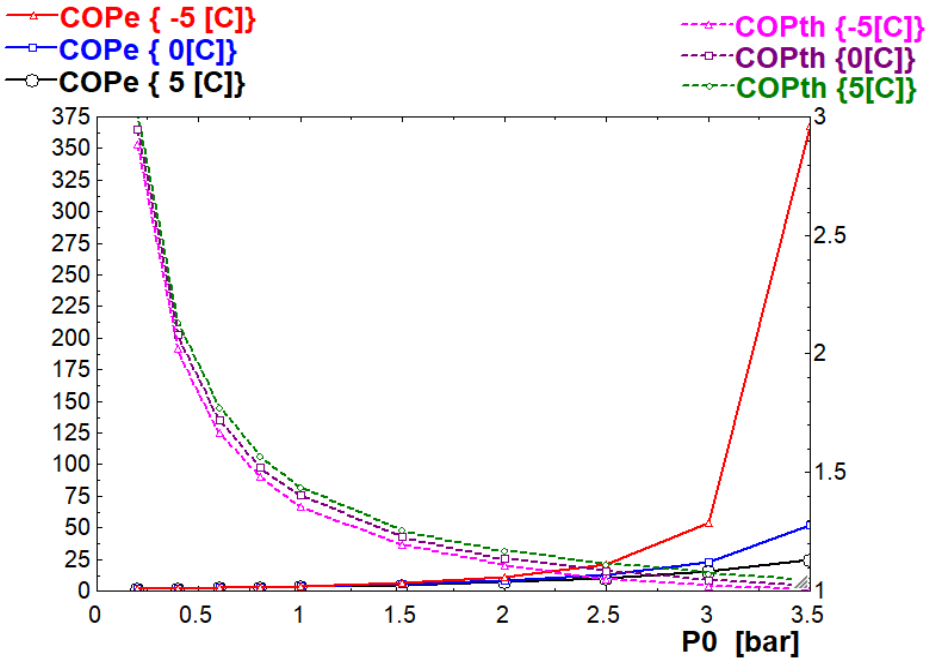
الجدول (2) الشروط الحدية في الحالة (1)

الموقعi	الحالةX	الضغط P [bar]	درجة الحرارةT[C]	التركيزx	Q_{in} [kW]
1	سائل مشبع	[0.2-3.5]	0,5,-5	متغير	10

عند درجات حرارة مختلفة ([C] 0,5 , 5-) للمزيج الخارج من قمة المفاعل. كانت كمية

الحرارة المقدمة في الدارة ($Q_{in} = 10$ [kW]) حيث يبين الجدول (2) الشروط الحدية المستخدمة في

الدارة. تم اختبار أداء هذه الآلة من خلال رسم مخططات تغيرات معاملات الأداء (الكهربائي والحراري) مع تغير ضغط التشغيل في المفاعل عند درجات حرارة مختلفة [C 5,0,5−] بشكل يتطابق مع الالوان، يمثل المحور الشاقولي للشكل (8) كل من معامل الأداء الحراري

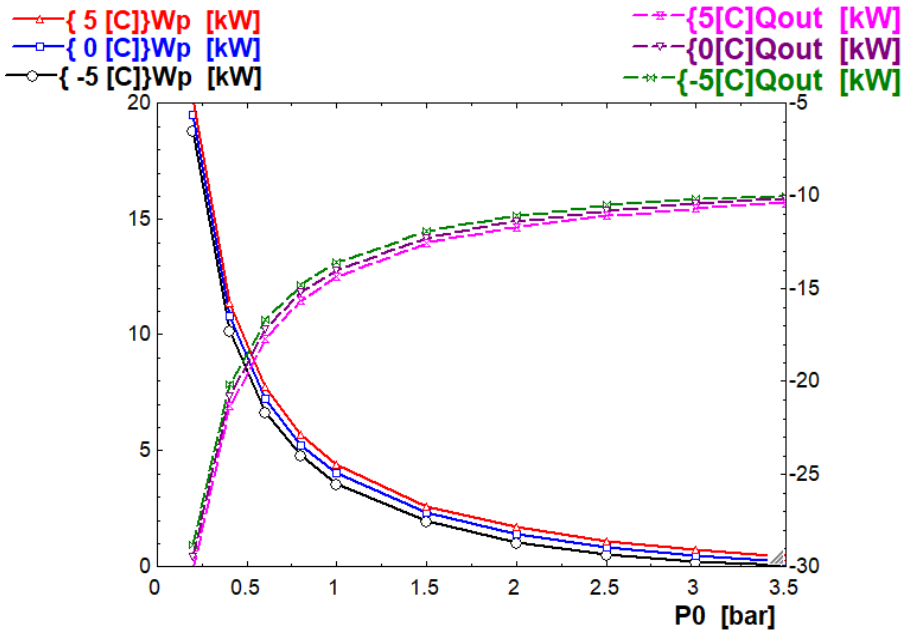


الشكل (8) أثر تغير ضغط التشغيل على معاملات الأداء عند درجات حرارة مختلفة

(اليميني)، والكهربائي (اليساري) وفق المعايير المعرّفة مسبقاً. حيث يوضح الشكل زيادة معامل

الأداء الكهربائي بشكل كبير، وهذه القيم تعبر عن الاحتياجات المنخفضة جداً للطاقة الكهربائية في المجال ([bar] 1.5−3.5) يرافقه انخفاض معامل الأداء الحراري في هذا المجال مما يعني انخفاض الاستهلاك الكهربائي اللازم لتشغيل الدارة، وزياده الاستهلاك الحراري، والذي غالباً ما يكون حرارة مهدورة لذلك لا يشكل أي خسارة اقتصادية. كما نلاحظ أنه عند درجة حرارة مخرج المفاعل (C −5)، وضغط تشغيل ([bar] P=3.5) تنخفض جداً المتطلبات الكهربائية لعمل الدارة مما يؤدي الى ارتفاع كبير في قيمة ($COP_e = 375$) يرافقه انخفاض كبير في قيمة (COP_{th}=1)، أي زيادة المتطلبات الحرارية اللازمة لعمل الدارة، وهنا الدارة تعمل بشكل تقريبي حرارياً، وهذا يرافقه خروج وسيط التبريد (الامونيا) من قمة المفاعل بصورة نقية.

في المجال ([bar] 0.2−1.5) نلاحظ انخفاض معامل الأداء الكهربائي، وهذا يعني زيادة الاستهلاك الكهربائي اللازم لتشغيل المضخة، وبالتالي تشغيل الدارة، كما نلاحظ زيادة المردود الحراري بشكل كبير مما يعني انخفاض الاستهلاك الحراري اللازم لتشغيل الدارة، وعليه يتيح لنا هذا المخطط اختيار المجال الأمثل لعمل المحول الحراري حسب توفر المصدر الحراري، وكيفية تأمينه (إن كان حرارة مهدورة أو منتجة بطريقة ما بغرض تشغيل المضخة الحرارية)، وحسب تعرفة استهلاك الكيلو واط الكهربائي كما يدخل في الحسبان الغاية من استخدام المحول الحراري. يؤكد هذه النتائج الشكل (9) الذي يمثل العمل اللازم لتشغيل المضخة في الدارة (اليساري)، وكمية الحرارة المنبوذة عند درجات حرارة مختلفة (اليميني).



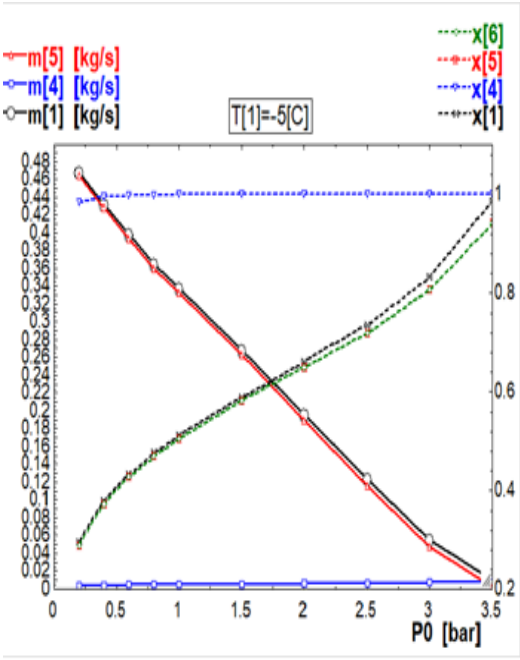
الشكل (9) أثر تغير ضغط التشغيل على استهلاك المضخة وكمية الحرارة المنبوذة عند درجات حرارة مختلفة

حيث نلاحظ من المخطط أنه عند الضغوط المنخفضة يكون العمل المقدم إلى الدارة كبير أي أن الدارة تحتاج الى متطلبات كهربائية مرتفعة نسبياً وأقل منها حرارياً.

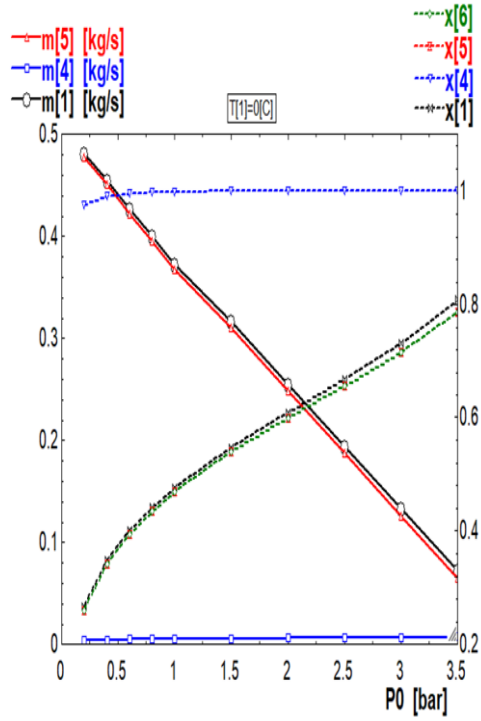
كما يبين الشكل (10) أثر ضغط التشغيل على تدفقات، وتراكيز الوسيط العامل في نقاط الدارة عند درجات حرارة مختلفة. نلاحظ من المخططات انخفاض تدفق الوسيط العامل الخارج من قمة المفاعل، والسائل غير المتبخر المتبقي في المبخر مع زيادة ضغط التشغيل في الحالات الثلاثة مع زيادة طفيفة في كمية البخار المتشكل في المبخر، والمحقون في أسفل المفاعل.

يرجع انخفاض التدفقات إلى الزيادة في تركيز الأمونيا ضمن الوسيط الخارج من قمة المفاعل مع زيادة ضغط التشغيل عند درجة الحرارة المختارة، في حين تعلل الزيادة الطفيفة في

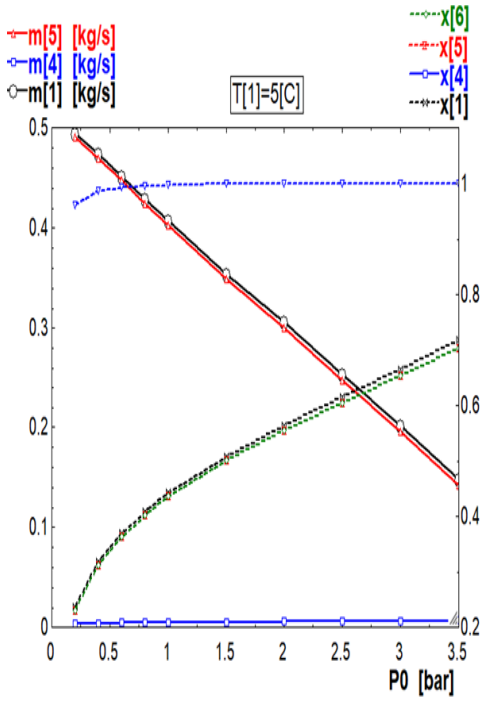
كمية المتبخر الداخل أسفل المفاعل الى ارتباط التبخر بمكون الأمونيا فقط دون الماء (سوى بضع قطرات من الماء)، وكون المتبخر يتعلق بشكل أساسي بكمية الحرارة المسحوبة من الوسط الخارجي (حمل التبريد).



الشكل () أثر ضغط التشغيل على تدفقات الوسيط العامل وتركيزه في الدارة عند درجة حرارة ([C] 5-)

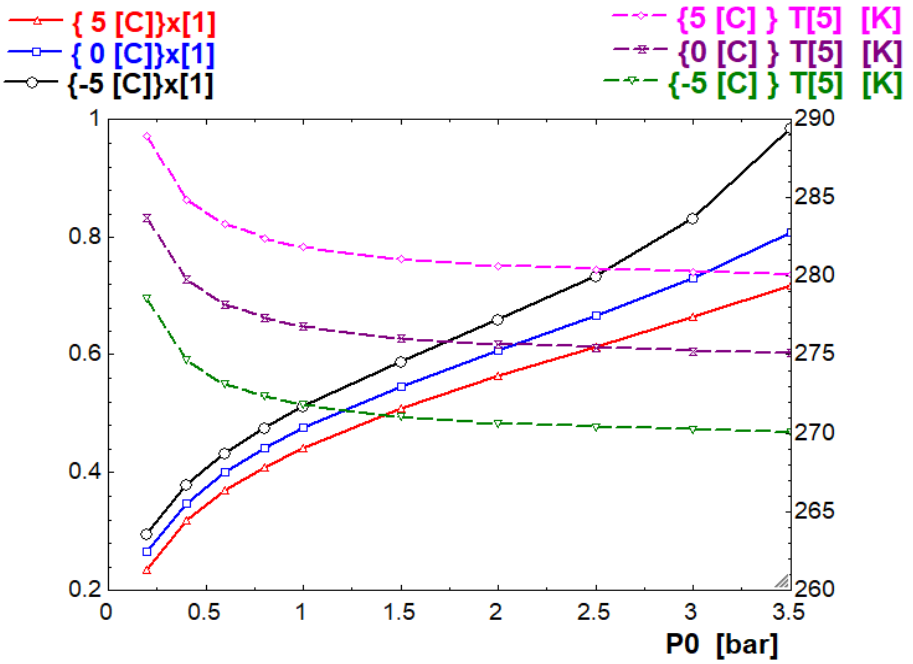


تفيد المخططات المرسومة في الشكل (10) بمعرفة مكان ربط أنبوب الوسيط العامل العائد من المبخر إلى بدن المفاعل عند نقطة لها تركيز قريب ضمن المفاعل حتى لا يؤثر على التوازن الحراري ضمن المفاعل**[14]**. فبحسب ضغط التشغيل، ودرجة حرارة مخرج المفاعل (مؤشرات التشغيل) يتم تحديد تركيز الوسيط العامل (غير المتبخر) في المبخر x[6]، والذي تجب إعادته الى نقطة في بدن المفاعل لها تركيز مشابه وفق **[14]**.



الشكل (10) أثر ضغط التشغيل على تدفقات وتراكيز الوسيط العامل في نقاط الدارة عند درجات حرارة تشغيل مختلفة

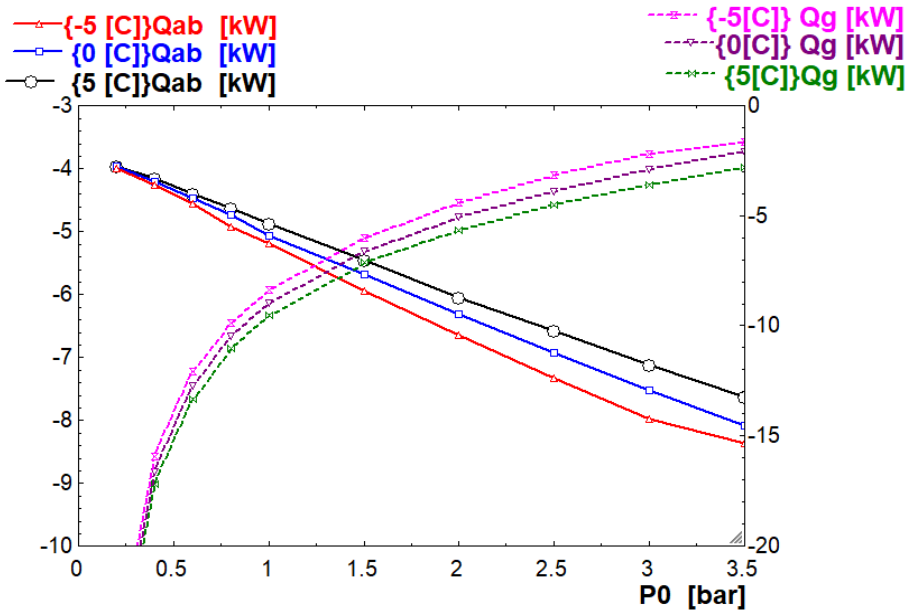
وهو ما يؤكده الشكل (11) الذي يبين أثر ضغط التشغيل على تركيز الأمونيا في المزيج المشبع الخارج من قمة المفاعل، حيث يبين زيادة التركيز مع زيادة ضغط التشغيل في المفاعل.



الشكل (11) أثر ضغط التشغيل على تركيز الأمونيا في المزيج الخارج من قمة المفاعل و على درجة حرارة العائد من المبخر عند درجات مختلفة

كما تم رسم الشكل (12) الذي يبين أثر تغير ضغط التشغيل على كمية الحرارة المنتجة بواسطة عملية الإمتصاص ضمن المفاعل، والحرارة الناتجة بسبب الفصل الثقالي للمكونات الذي يسبب تدرج تراكيز الأمونيا على طول المفاعل.

حيث نلاحظ تناسب عكسي في كميات الحرارة الناتجة ضمن المفاعل لتشكل بمجموعها الحرارة



الشكل (12) أثر ضغط التشغيل على حرارة الإمتصاص وحرارة الفصل الثقالي عند درجات حرارة مختلفة

الواجب طرحها عبر المبادل الحراري الداخلي ضمن المفاعل من أجل استقرار عمل المفاعل، والدارة ككل.

يرجع انخفاض حرارة الإمتصاص مع زيادة ضغط التشغيل إلى زيادة ضغط الإشباع في المفاعل مما يقلل من عملية امتصاص الماء للأمونيا بسبب الخواص الترموفيزيائية للمزيج.

وبسبب انخفاض عملية الإمتصاص فإن عملية الفصل الثقالي بين المكونين تصبح أكبر، وأسهل مما ينعكس على زيادة كمية الحرارة المنبوذة بسبب الفصل الثقالي للمكونات.

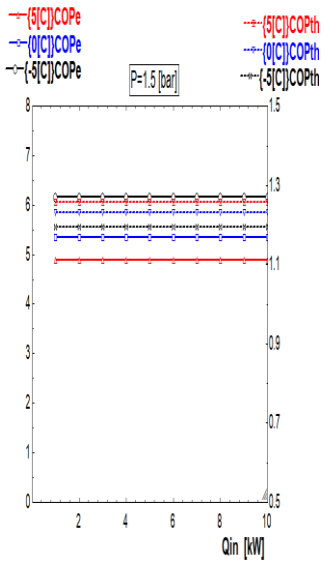
الحالة (2):

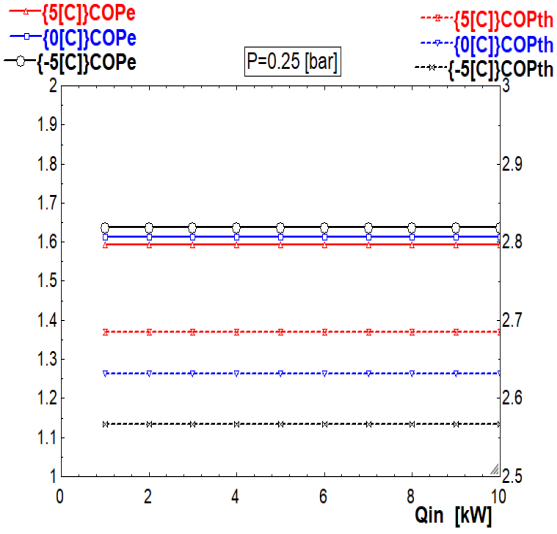
تم دراسة أثر تغيير كمية الحرارة (حمل التبريد) المسحوبة من الوسط الخارجي، وهي نفس كمية الحرارة المقدمة لتشغيل الدارة حيث يبين الجدول (3) االشروط الحدية العاملة في الدارة بهذه الحالة.

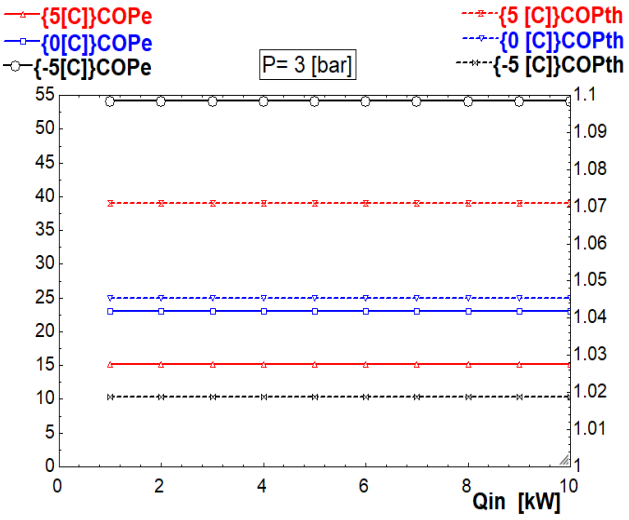
الجدول (3) الشروط الحدية في الحالة (2)

الموقعi	الحالةX	الضغط P [bar]	درجة الحرارة[C]T	التركيز x	استطاعة التبريد Q_{in} [kW]
1	سائل مشبع	0.25,1.5,3	5-,0,5	متغير	[1,10]

تم رسم مخططات الأداء لدارة المحول الحراري كما يبين الشكل (13) حيث نلاحظ أن معاملات الأداء الكهربائية، والحرارية لا تتغير مع تغير حمل التبريد إنما تتغير مع ضغط التشغيل، ودرجة حرارة المزيج الخارج من قمة المفاعل حيث تؤكد المخططات زيادة معامل الأداء الكهربائي مع زيادة ضغط التشغيل، ومع انخفاض درجة حرارة المزيج الخارج من أعلى المفاعل. في حين ينخفض معامل الأداء الحراري مع زيادة ضغط التشغيل، ومع انخفاض درجة حرارة المزيج الخارج من أعلى المفاعل، وهذا التناسب المتعاكس بين المعاملين يأتي من حقيقة أن معامل الأداء الكلي يكون قريباً من الواحد بالنسبة لهذه المحولات الحرارية.







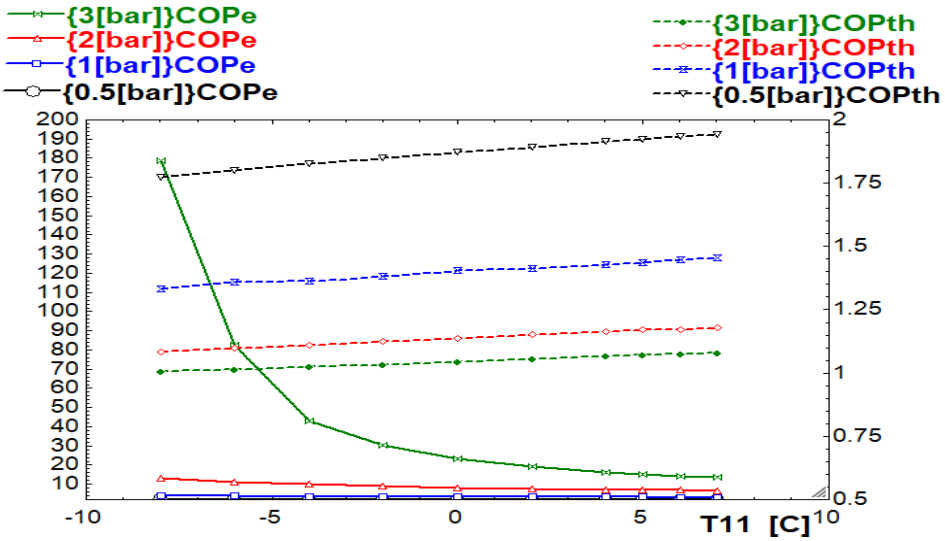
الشكل (13) أثر حمل التبريد على معاملات الأداء للدارة عند درجات حرارة مختلفة وضغوط تشغيل مختلفة للمزيج أعلى المفاعل

الحالة (3): تم دراسة معاملات الأداء للدارة عند حالات حدية جديدة وفق الجدول (4) حيث يبين الشكل (14) أثر تغير درجات حرارة المزيج المشبع الخارج من أعلى المفاعل على معاملات الأداء الكهربائية والحرارية عند ضغوط تشغيل مختلفة في المفاعل.

الجدول (4) الشروط الحدية في الحالة (3)

الموقعi	الحالةX	الضغط P [bar]	درجة الحرارة[C]T	التركيزx	استطاعة التبريد$[kW]$ Q_{in}
1	سائل مشبع	0.5,1,2,3	[-7,7]	متغير	10

حيث نلاحظ من الشكل (14) زيادة معامل الأداء الحراري، وانخفاض معامل الأداء الكهربائي مع زيادة درجة الحرارة مع ملاحظة التغير الصغير في معامل الأداء الكهربائي ضمن مجال الدراسة بالنسبة للضغوط المنخفضة نوعاً ما، مخالفاً في السلوك التغيير الكبير عند ضغط مرتفع (3 bar) عند مجال درجات الحرارة المدروس، وهذا يتعلق بالطبيعة الترموفيزيائية للمزيج حيث عند هذه الضغوط العالية فقط يمكن الحصول على تراكيز عالية للامونيا عند شروط التشغيل المدروسة مما يقلل من استهلاك الكهرباء في ضخ الامونيا، وزيادة معامل الأداء الكهربائي، كما سيكون التغيير في قيم المخطط ستبدو أكبر عند مجال لدرجات الحرارة أقل من ([C] 10−)، وهذا ما تم ملاحظته مسبقاً في الشكل (8) حيث يصبح اعتماد الالة أكثر على الطاقة الحرارية للتشغيل، في حين وهو ما أكدته دراسة الحالات السابقة .



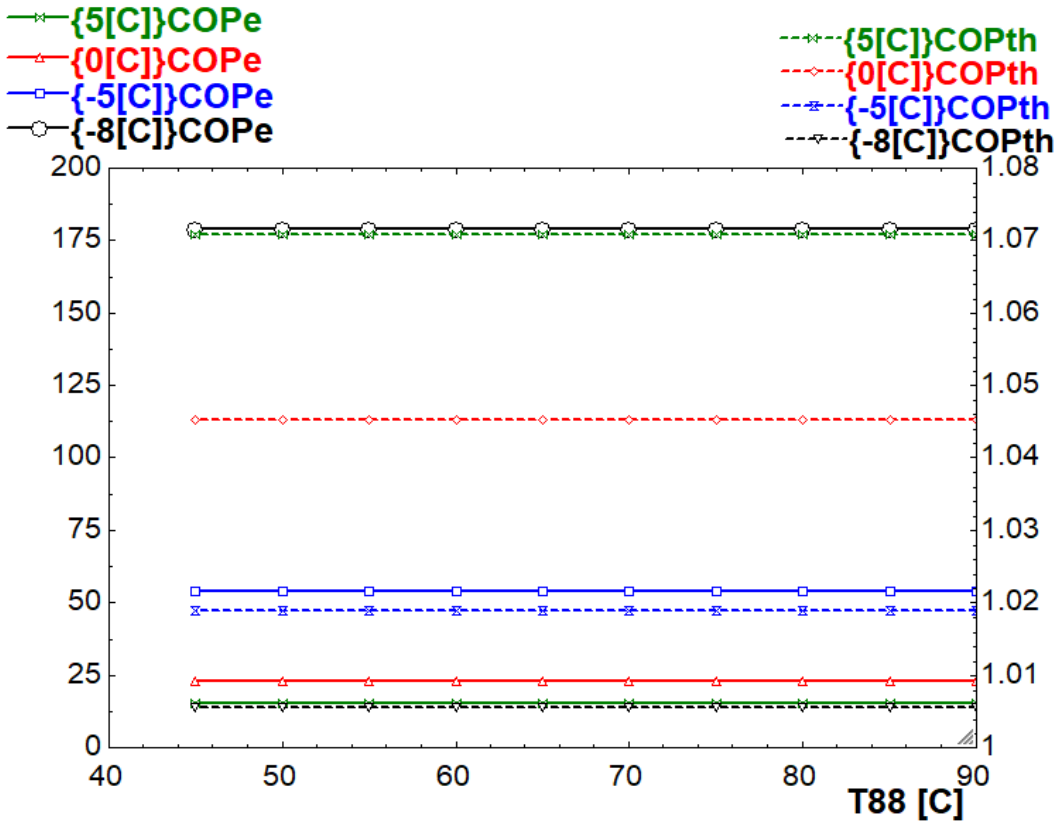
الشكل (14) أثر تغير درجة حرارة المزيج الخارج من المفاعل على معاملات الأداء عند ضغوط مختلفة

<u>الحالة (4):</u> تم دراسة المؤشرات الترموديناميكية للمحول الحراري عند تغيير حالة شحن المفاعل (تدرج حراري و تدرج المكونات)، حيث يبين الجدول (5) الشروط الحدية للدراسة:

الجدول (5) الشروط الحدية في الحالة (4)

الموقع i	الحالةX	الضغط P [bar]	درجة الحرارةT [C]	التركيز x	استطاعة التبريد Q_{in} [kW]
1	سائل مشبع	3	-8,-5,0,5	متغير	10
8	سائل مشبع	3.053	[45-90]	متغير	

تم رسم أثر تغير درجة حرارة قاع المفاعل على أداء الدارة ككل عند درجات حرارة مختلفة لقمة المفاعل، حيث يبين الشكل (15) إن معامل الأداء الكهربائي، والحراري للدارة لا يتعلق بدرجة حرارة قاع المفاعل، في حين تتعلق بشكل أساسي بدرجة حرارة التشغيل

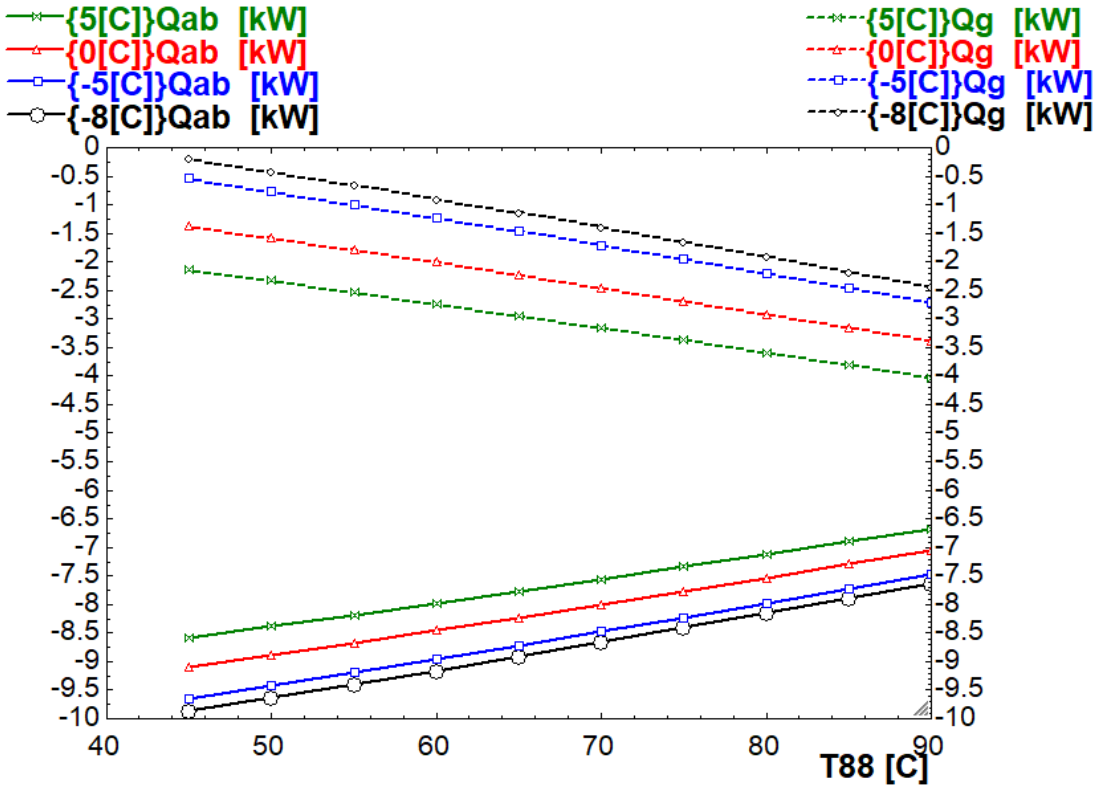


الشكل (15) أثر تغيير درجة حرارة قاع المفاعل على معاملات الأداء عند درجات تشغيل مختلفة

(درجة حرارة أعلى المفاعل) فمع انخفاض درجة حرارة حرارة المزيج المغادر أعلى المفاعل يزداد معها معامل الأداء الكهربائي في حين ينخفض معامل الأداء الحراري وبالعكس، وهو ما يؤكد النتائج التي حصلنا عليها في الشكل (14). وعليه فإنه من ناحية تشغيل المحول الحراري في التبريد فإنه من غير المهم رفع درجة حرارة قاع المفاعل إلى درجات

حرارة مرتفعة مما يوفر الطاقة الحرارية المطلوبة في مرحلة شحن المفاعل لتوليد التدريجات الحرارية، كما يوفر زمن الشحن. وعليه يجب الانتباه فقط الى أهمية تحقق شرط الحفاظ على التدرج الحراري ضمن المفاعل العامل عند اختيار حدود درجات الحرارة، والتراكيز ضمن المفاعل**[14]**.

تم دراسة أثر تغيير درجة حرارة قاع المفاعل على كمية الحرارة الناتجة عن امتصاص قاع المفاعل للبخار الداخل من المبخر، حيث يبين الشكل (16) إنخفاض كمية الحرارة المتحررة عند امتصاص بخار الأمونيا القادم من المبخر مع ارتفاع درجة حرارة المزيج الفقير في قاع المفاعل، وهذا مرده إلى الطبيعة الترموفيزيائية للمزيج ، في حين تزداد كمية الحرارة المنبوذه بسبب الفصل الثقالي حيث أن انخفاض الإمتصاص في قاع المفاعل يساعد في عملية الفصل الثقالي مما يزيد من كمية الحرارة المتحررة نتيجة هذه العمليه، وهو ما يؤكده الشكل (12).



الشكل (16) أثر تغيير درجة حرارة قاع المفاعل على كمية الحرارة المتحررة ضمن المفاعل عند درجات حرارة تشغيل مختلفة

الحالة(5): تم دراسة حالة دارة المحول الحراري وفق الشروط الحدية المبينة في الجدول (6).

الجدول (6) الشروط الحدية في الحالة (5)

الموقع i	الحالةX	الضغط P [bar]	درجة الحرارة T[C]	التركيز x	استطاعة التبريد $\boldsymbol{Q_{in}}$ $[kW]$
1	سائل مشبع	3	-8	---	10
8	سائل مشبع	3.053	80	---	

بالحل يبين الشكل (17) النتائج لنقاط الدارة.

يبين الشكل $Q_2 = Q_{out}$ كنتيجة للتحقق من الحل.

Arrays Table: Main

	Qu_i [Xi]	P_i [bar]	T_i [K]	h_i [kJ/kg]	u_i [kJ/kg]	s_i [kJ/kg·K]	v_i [m³/kg]	x_i	m_i [kg/s]
1	0	3	265.1500	-76.82	-77.26	-0.1256	0.001481	0.94528	1.722E-02
2	-0.001	3.123	266.1614	-73.55	-73.89	-0.1131	0.001092	0.94528	1.722E-02
3	0	3.123	266.1616	-72.25	-72.71	-0.1082	0.001484	0.94528	1.722E-02
4	1	3.123	267.1616	1264	1141	4.765	0.395	0.99998	7.659E-03
5	0	3.123	267.1616	-99.53	-99.98	-0.1159	0.001447	0.90146	9.561E-03
6	0.003607	3	266.1498	-99.53	-100.4	-0.1159	0.002919	0.90146	9.561E-03
7	0	3	265.1500	-76.82	-77.26	-0.1256	0.001481	0.94528	
8	0	3.053	353.1500	200.6	200.2	1.074	0.00113	0.20834	

SOLUTION

Unit Settings: SI K bar kJ mass deg

COP = 1	COPcarnot = 4.013	COPe = 178.9
COPth = 1.006	h1 = -76.82	h2 = -73.55
h3 = -72.25	h4 = 1264	h5 = -99.53
h6 = -99.53	h7 = -76.82	h8 = 200.6
P0 = 3 [bar]	P1 = 3	P2 = 3.123
P6 = 3	P7 = 3	P8 = 3.053
Q2 = 10.05622 [kW]	Qab = -8.149 [kW]	Qg = -1.907 [kW]
Qin = 10 [kW]	Qout = -10.05622 [kW]	T1 = 265.2
T11 = -8 [C]	T4 = 267.2	T7 = 265.2
T8 = 353.2	T88 = 80	Wp = 0.05622 [kW]
x1 = 0.9453	x2 = 0.9453	x3 = 0.9453
x4 = 1	x5 = 0.9015	x6 = 0.9015
x7 = 0.9453	x8 = 0.2083	

الشكل (17) نتائج الحل باستخدام تطبيق (EES) للحالة (5)

النتائج والمناقشة

1- تعتبر مؤشرات التدرج (درجات الحرارة، تركيز الأمونيا) في المفاعل هي القوة المحركة الأساسية لعمل المحول الحراري، وعليه إن كمية الحرارة اللازمة لشحن المفاعل قبل تشغيل الدارة مهمة لتوليد هذه التدرجات على طول المفاعل، إلا أن هذا المؤشر (المدى)

لا يملك تأثيراً على معامل أداء الدارة، الذي ينحصر تأثره بدرجة حرارة قمة المفاعل حيث لوحظ زيادة معامل الأداء الكهربائي مع انخفاض درجة حرارة المزيج المشبع في قمة المفاعل مما يعني بالضرورة انخفاض الاستهلاك الكهربائي اللازم لعمل الدارة، وبشكل أساسي الإستهلاك في المضخة.

2- لا يملك مؤشر درجة حرارة قاع المفاعل أي تأثير على معامل الأداء للدارة في حين ينحصر تأثيرها على كميات الحرارة المطروحة من المفاعل بسبب عملية امتصاص بخار الأمونيا في قاع المفاعل، وعملية الفصل الثقالي الفيزيائي لمكونات العمود الثنائي.

3-يملك مؤشر ضغط التشغيل في المفاعل (الضغط العامل في قمة المفاعل) أثراً كبيراً على معاملات الأداء في الدارة.

4- مؤشر الضغط في قاع أي مفاعل يتبع كثافة المزيج العامل في الدارة، وارتفاع المفاعل، والضغط العامل في قمة المفاعل حسب أدبيات هذا النمط من المفاعلات، وهو ما تم التأكيد عليه عند دراسة المؤشرات الترموديناميكية للوسيط العامل ضمن المفاعلات **[14]** .

5- عند زيادة ضغط التشغيل P0 تنخفض تدفقات الوسيط العامل في الدارة لكن بالمقابل يزيد تركيز الأمونيا (الوسط المتبخر) في المزيج المتحرك، مما يؤدي إلى انخفاض استهلاك الطاقة في المضخة زيادة معامل الأداء الكهربائي.

6- لا يؤثر مؤشر كمية الحرارة الممتصة من الهواء الخارجي لعمل المحول على معاملات أداء الدارة عند شروط معينة.

7- امكانية استخدام الدارة كمضخة حرارية تستخدم لأغراض التدفئة عند شروط تشغيلية معينة.

8- إمكانية استخدام الدارة كآلة تبريد يمكن استخدامها في تبريد الهواء الجوي، واستخلاص الماء منه.

Study of thermodynamic parameters of an innovative thermoelectric converter circuit and evaluation of its performance

Mohamed Abdo Bakeer* **Mohamed Ahmed Mohamed****

Abstract

Absorption Heat Transformer is electrically operated thermal machines, and thermally operated by a low-temperature heat source. These machines have evolved greatly from hybrid machines to reactor circuits to reduce electrical consumption in the circuit. In this research, we studied the thermodynamic indicators to evaluate the performance of a new model developed from a Absorption Heat Transformer (reactor), which uses a mixture of water and ammonia as a working medium in the circuit. The research concluded the importance of operating pressure and the temperature of the mixture exiting the reactor on the performance parameters in the circuit, in addition to the role of these parameters in determining the purpose of using the Heat Transformer (as a heat pump or a cooling machine). The study also showed that the extent of the thermal gradient in the reactor, the temperature of the reactor bottom, or the cooling load are not related to the performance parameters of the circuit. The research also concluded that, due to the chemical processes that occur in

the reactor (absorption of ammonia and the process of gravitational separation of components), heat will be produced within the reactor that must be disposed of in order to keep the reactor in a charged state and the circuit in operation. The amount of heat released in the reactor depends on the reactor operating parameters, the cooling load, and the electrical power consumed in the circuit.

Keywords: Absorption Heat Transformer, thermal reactor, absorption circuits, zeotropic mixture.

* Professor Doctor Engineer in Homs University, Mechanical and Electrical Engineering, Power Engineering

**Doctoral student in Homs University, Mechanical and Electrical Engineering, Power Engineering.

قائمة المصادر والمراجع

1- **Rivera Wilfrido** Experimental Evaluation of a single-stage Heat Transformer used to increase [Journal] // Solar Energy Vol 69, No. 5, . - 2000. - pp. 369 - 376.

2- **Kurem E. Horuz I.** A comparison between ammonia-water and water-lithium bromide solutions in absorption heat transformers [Journal] // International Communications in Heat and Mass Transfer, Volume 28, Issue 3. - 2001. - pp. 427-438.

3- **Parham Kiyan** pplications of Absorption Heat Transformers in Desalination, Cogeneration and the Use of Alternative Working Pairs [Book]. - Gazimağusa, North Cyprus : Eastern Mediterranean University, 2014.

4- **Kiatsiriroat Nattaporn Chaiyat and Tanongkiat** Upgrading of Solar Heat by an Absorption Heat Transformer assisting with a Vapor Compression Heat Pump [Journal] // engineering journal -Maejo University. - 2014. - pp. 10-20.

5- **Heredia I. J. Siqueiros, J.A. Hernández, D.Juárez-Romero, A. Huicochea, J.G. González-Rodríguez** Energy saving into an absorption heat transformer by using heat pipes between evaporator and condenser [Journal] // Applied Thermal Engineering 128. - 2018. - pp. 737 - 746.

6- **Sveine T.** Design of high temperature absorption/compression heat pump [Conference] // IIR-Gustav Lorentzen conference.. - Norwey : Natural Working Fluids, 1998.

7- **Jian Wang Wei Wu, Xianting Li, Baolong Wang, Wenxing Shi** ,2017, Analysis of a compression-assisted absorption heat transformer , [Conference] // 12th IEA heat pump conference,. - China : Stichting HPC, 2017. - pp. 1-7.

8- **Zhou Q. and R. Radermacher** Development of a vapor compression cycle with a solution circuit and desorber/absorber heat exchange [Journal] // International Journal of Refrigeration 20. - 1997. - pp. 85 –95.

9- **Borgås Anders** Development of the Hybrid Absorption Heat Pump Process at High Temperature Operation [Book]. - Norway : NTNU Department of Energy and Process Engineering, Norwegian University of Science and Technology, Masters Thesis June 2014.

10- **Jensen Jonas Kjaer** Industrial Heat Pumps for High Temperature Process Applications (A numerical study of the ammonia-water hybrid absorption-compression heat pump) [Book]. - Denmark : Kongens Lyngby, DTU Mechanical Engineering, Technical University of Denmark., Ph.D. Thesis, December 2015.

11- **Enslin Johan** The Proof-of-Concept (POC) Model of the REHOS Ejector Heat Pump [Report]. - Heidelberg South Africa : micro system company, 2018.

12- **Enslin Johan** Rankine Cycle Efficiency Increase by the Regenerative Recovery of Historically Rejected Heat_rev1 . - Heidelberg : [s.n.], 2019.

13- **Weed L. Kielasa and G.E.** An Introduction to the Kalina Cycle [Conference] // Proceedings of the International Joint Power Generation Conference. - [s.l.] : PWR- Vol.30, 1996.

14- **محمد أحمد محمد، د. محمد عبده باكير** دراسة المؤشرات الترموديناميكية التشغيلية لمفاعل دارة محول حراري [مقالة] // سلسلة الأعداد للعلوم الطبية والهندسية والأساسية والتطبيقية. - حمص، سورية : مجلة جامعة البعث، 2023.

ملحق للمعادلات المستخدمة في الحل في برنامج EES

```
T11=5{[C]}
{P0=3{[bar]} }
T1=converttemp(C,K,T11)
{ Reactor Top}
T7=T1
P7=P0
{ Reactor bottom}
T88=80
T8=converttemp(C,K,T88)
P8=P0+0.035{<========}
{point1}
P1=P0
Call NH3H2O(128, T1, P1, 0: T[1], P[1], x[1], h[1], s[1], u[1], v[1], Qu[1])
{point2}
x2=x[1]
P2=P1+0.123
Call NH3H2O(238, P2, x2,-0.001: T[2], P[2], x[2], h[2], s[2], u[2], v[2], Qu[2])
{point3}
Call NH3H2O(238, P2, x2, 0: T[3], P[3], x[3], h[3], s[3], u[3], v[3], Qu[3])
{point4}
T4=T[3]+1
Call NH3H2O(128, T4, P2, 1: T[4], P[4], x[4], h[4], s[4], u[4], v[4], Qu[4])
{point5}
Call NH3H2O(128, T4, P2, 0: T[5], P[5], x[5], h[5], s[5], u[5], v[5], Qu[5])
{point6}
P6=P0
x6=x[5]
h6=h[5]
Call NH3H2O(234, P6, x6, h6: T[6], P[6], x[6], h[6], s[6], u[6], v[6], Qu[6])
{point7}
Call NH3H2O(128, T1, P1, 0: T[7], P[7], x[7], h[7], s[7], u[7], v[7], Qu[7])
{point8}
Call NH3H2O(128, T8, P8, 0: T[8], P[8], x[8], h[8], s[8], u[8], v[8], Qu[8])
x1=x[1]
x3=x[3]
x4=x[4]
x5=x[5]
x7=x[7]
x8=x[8]
h1=h[1]
h2=h[2]
h3=h[3]
h4=h[4]
h5=h[5]
h7=h[7]
h8=h[8]
{heat input}
Qin=10
{evaporator}
m[2]=m[4]+m[5]
m[2]*x[2]=m[4]*x[4]+m[5]*x[5]
m[2]*h[2]+Qin=m[4]*h[4]+m[5]*h[5]
m[1]=m[2]
m[2]=m[3]
m[5]=m[6]
{reactor}
m[4]*h[4]+m[6]*h[6]=m[1]*h[1]+Q2{<=======}
{m[4]*x[4]+m[6]*x[6]=m[1]*x[1]}
Qg=m[4]*(h[7]-h[8])+m[6]*(h[7]-h[6])
Qab=m[4]*(h[8]-h[4])
Qout=Qg+Qab
{pump}
Wp=m[1]*(h[2]-h[1])
{performance factors}
```

COP=-(Qout/(Qin+Wp))
COPth=-Qout/Qin
COPe=-Qout/Wp
COPcarnot=T[8]/(T[8]-T[1])

Parametric Table: Table 3(P0): T=5C

	P0 [bar]	m_1 [kg/s]	x_1	T_1 [K]	m_4 [kg/s]	x_4	T_4 [K]	m_5 [kg/s]	x_5
Run 1	0.2	4.940E-01	0.23578	278.1500	3.786E-03	0.96004	288.9489	4.902E-01	0.230
Run 2	0.4	4.735E-01	0.31770	278.1500	4.114E-03	0.98537	284.8914	4.694E-01	0.311
Run 3	0.6	4.513E-01	0.36957	278.1500	4.354E-03	0.99224	283.2905	4.469E-01	0.363
Run 4	0.8	4.287E-01	0.40907	278.1500	4.550E-03	0.99518	282.4193	4.242E-01	0.402
Run 5	1	4.067E-01	0.44181	278.1500	4.728E-03	0.99673	281.8668	4.020E-01	0.435
Run 6	1.5	3.533E-01	0.50809	278.1500	5.181E-03	0.99847	281.0946	3.481E-01	0.500
Run 7	2	3.053E-01	0.56329	278.1500	5.645E-03	0.99915	280.6771	2.997E-01	0.555
Run 8	2.5	2.533E-01	0.61395	278.1500	6.065E-03	0.99949	280.4173	2.473E-01	0.604
Run 9	3	2.017E-01	0.66392	278.1500	6.496E-03	0.99968	280.2333	1.952E-01	0.652
Run 10	3.5	1.486E-01	0.71674	278.1500	6.924E-03	0.99980	280.0970	1.416E-01	0.702

Parametric Table: Table 3(P0): T=5C

	T_5 [K]	Q2 [kW]	Qab [kW]	Qg [kW]	Qout [kW]	Wp [kW]	COP	COPcarnot	COPth
Run 1	288.9489	30.19476	-3.97	-26.22	-30.19476	20.19476	1	4.709	3.019
Run 2	284.8914	21.34974	-4.15	-17.2	-21.34974	11.34974	1	4.709	2.135
Run 3	283.2905	17.72660	-4.398	-13.33	-17.72660	7.72660	1	4.709	1.773
Run 4	282.4193	15.68987	-4.64	-11.05	-15.68987	5.68987	1	4.709	1.569
Run 5	281.8668	14.37719	-4.87	-9.507	-14.37719	4.37719	1	4.709	1.438
Run 6	281.0946	12.57072	-5.458	-7.112	-12.57072	2.57072	1	4.709	1.257
Run 7	280.6771	11.70088	-6.049	-5.652	-11.70088	1.70088	1	4.709	1.17
Run 8	280.4173	11.09543	-6.58	-4.515	-11.09543	1.09543	1	4.709	1.11
Run 9	280.2333	10.70887	-7.116	-3.593	-10.70887	0.70887	1	4.709	1.071
Run 10	280.0970	10.42828	-7.638	-2.79	-10.42828	0.42828	1	4.709	1.043

Parametric Table: Table 3(P0): T=5C

	COPe
Run 1	1.495
Run 2	1.881
Run 3	2.294
Run 4	2.758
Run 5	3.285
Run 6	4.89
Run 7	6.879
Run 8	10.13
Run 9	15.11
Run 10	24.35