

دراسة تأثير سرعة دوران مسخن الهواء الدوار (LJUNGSTRÖM) على ظاهرة الندى الحمضي باستخدام المحاكاة العددية

أ.د.م بسام الكيوان¹ أ.د.م هيثم حسن² م. علاء عروق³

الملخص:

تم إجراء دراسة عددية لمسخن الهواء الدوار باستخدام ديناميك الموائع الحسابي (CFD)، وذلك من أجل التحقق من تأثير سرعة الدوران على أداء المسخن من حيث التوزيع الحراري، نظرًا لأن سرعة الدوران لها تأثير على بداية تكثف السوائل ونقطة الندى الحمضي، حيث تم تقديم توزيعات درجات الحرارة للمسخن مع سرعات الدوران المختلفة وتحديد سرعات الدوران التي تظهر عندها ظاهرة الندى الحمضي، حيث تم إجراء عملية المحاكاة باستخدام الكود (ANSYS Fluent 19.0). أظهرت النتائج أنه من خلال زيادة سرعة الدوران، يتم نقل المزيد من الطاقة بين هواء الاحتراق وغاز العادم مما يؤدي إلى زيادة أكبر في أداء المسخن إلا أنه عند زيادة سرعة الدوران أكثر من 2.4 r.p.m سيؤدي إلى تخفيض درجة حرارة الغازات دون نقطة الندى الحمضي.

الكلمات المفتاحية: ديناميك الموائع الحسابي، مسخن الهواء، اللنغستروم، محطة توليد الطاقة الحرارية، الفاعلية.

¹ أستاذ في قسم هندسة القوى الميكانيكية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة البعث.

² أستاذ في قسم هندسة القوى الميكانيكية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين.

³ طالب ماجستير في قسم هندسة القوى الميكانيكية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة البعث.

Studying the effect of rotational speed of rotary air heater (LJUNGSTRÖM) on acid dew phenomenon using numerical simulation

Bassam Al Kirawan¹

Haitham Hasan²

Alaa Arok³

Abstract:

A numerical study of the rotary air heater was carried out using computational fluid dynamics (CFD), in order to verify the effect of rotational speed on the performance of the heater in terms of heat distribution, since the speed of rotation has an effect on the beginning of condensation of liquids and acid dew point. The temperature of the heater with different rotation speeds and the determination of the rotational speeds at which the phenomenon of acid dew appears, as the simulation process was carried out using the code (ANSYS Fluent 19.0). The results showed that by increasing the rotational speed, more energy is transferred between the combustion air and the exhaust gas, which led to a greater increase in the performance of the heater; however, the increase leads to lowering the temperature of the gases below the acid dew point.

Keywords: CFD, Air preheater, Ljungstrom, Thermal power plant, Efficiency.

¹ Professor in the Department of Mechanical Power Engineering - Faculty of Mechanical Engineering – Al-Baath University.

² Professor in the Department of Mechanical Power Engineering - Faculty of Mechanical Engineering - Tishreen University.

³ Master's student in the Department of Mechanical Power Engineering - Faculty of Mechanical Engineering - Al-Baath University.

1- مقدمة:

تستخدم مسخنات هواء الاحتراق في المراجل الكبيرة الموجودة في محطات الطاقة الحرارية التي تنتج الطاقة الكهربائية. المراجل التي تعمل على الوقود الأحفوري أو النفايات. يوفر التسخين المسبق في المراجل الحديثة ما يصل إلى 20% من إجمالي عملية نقل الحرارة في المراجل، ولكنه يمثل 2% فقط من الاستثمار. الغرض من التسخين المسبق للهواء هو استعادة الحرارة من غازات العادم للمرجل مما يزيد من مردود المرجل عن طريق تقليل الحرارة الضائعة المفقودة في غاز العادم. نتيجة لذلك، يتم نقل غازات العادم أيضاً إلى مدخنة غاز العادم عند درجة حرارة منخفضة، مما يسمح بتصميم مبسط لنظام النقل ومدخنة غاز العادم. كما يسمح بالتحكم في درجة حرارة الغازات الخارجة من المدخنة (لتلبية المعايير البيئية، على سبيل المثال). يتم وضع مسخن الهواء عادةً بين الموفر والمدخنة. وبصورة عامة ومع استعمال أنواع الوقود الشائعة يتحسن مردود مرجل توليد البخار بمقدار (1%) عندما تنخفض درجة حرارة الغازات بمقدار $(20 - 22) ^\circ\text{C}$ [1]. فإن استعمال مسخنات هواء الاحتراق يؤدي إلى الإسراع في إنجاز الاحتراق تحت كافة الحملات، وتحسين مردود الاحتراق تحت الحملات المنخفضة، وزيادة المردود العام لمرجل توليد البخار، وتصغير أبعاد مرجل توليد البخار وبالإضافة إلى خفض كلفة تجهيزات حرق الوقود. تعتبر سرعة دوران مصفوفة مسخن الهواء إحدى البارامترات المهمة في فعالية مسخن الهواء الدوار. حيث بزيادة سرعة الدوران، تقترب درجة حرارة الهواء الخارج من درجة حرارة الغاز الداخل [2].

2- هدف البحث وأهميته:

2-1- هدف البحث:

يهدف البحث إلى دراسة تأثير سرعة دوران مسخن الهواء الدوار على ظاهرة الندى الحمضي ومردود المرجل. بهدف الحصول على سرعة الدوران المثالية لعمل المسخن.

2-2- أهمية البحث:

تكمن أهمية الدراسة في الفائدة الاقتصادية والفنية والبيئية إذا تم تحقيق تحسين في أداء مسخن الهواء الدوار للمرجل التي سوف تنعكس على الشركة العامة لمصفاة حمص، كما أن استخدام المحاكاة الرياضية لا يتطلب كلفة اقتصادية كبيرة إذ يحتاج جهد مخبري محدود مقارنة بالعمل الحقلي.

3- مواد وطرق البحث:

يعتمد البحث على النمذجة بتطبيق تقنية ديناميك الموائع الحسابية (CFD) على نموذج يحاكي عملية تشغيل مسخن الهواء الدوار المدروس، من أجل دراسة تأثير سرعة الدوران على أداء المسخن ودرجة حرارة مخرج هواء الاحتراق وغازات العادم في مسخن الهواء وتأثير ذلك على ظاهرة الندى الحمضي ومردود المرجل. باستخدام الكود (ANSYS Fluent 19.0) بما يجعل النموذج مؤهلاً بما فيه الكفاية لتقييم أداء هذه المسخن وتقديم المعلومات والقيم المتعلقة بمتغيرات مسخن مولد البخار عند ظروف التشغيل المختلفة.

3-1- وصف المرجل ومسخن الهواء والنموذج الهندسي:

تحتوي محطة القوى في مصفاة حمص على مرجلين بخاريين، تم إحضار كلاً من المرجلين من جمهورية التشيك وقد تم تصنيعها من قبل شركة / Prvi brnenska strojirna. تتميز المراجل البخارية بأنها ذات أسطوانة، وثنائية الممرات وذات شكل تدوير طبيعي [3]. تم تصميم المراجل ليكون قادر على تقديم بخار محمص 190 ton/h عند خرج المرجل بدرجة حرارة 540°C و ضغط 9.41 MP_a .

يعتبر المسخن هو أحد تجهيزات محطة الطاقة الهامة، للاستفادة من حرارة الغازات الخارجة باتجاه المدخنة، ويمكن تركيبه بالشكل الأفقي وبالشكل العمودي (الشاقولي)، كما هو النموذج المركب في محطة الطاقة في مصفاة حمص الشكل الشاقولي. تم تركيب مسخن الهواء بالاسترجاع من نوع (اللينغستروم) عند بنية داعمة منفصلة خلف المراجل وقد تم تنظيف مسخن الهواء بواسطة السعف البخاري خلال عملية التشغيل بواسطة شطف الماء خلال عملية التشغيل. ومسخن الهواء مجهز بممرات جانبية للوقاية من

خطر رطوبة (ندى) غاز العادم عند بدء التشغيل. حيث أن ذلك يسمح ببقاء مسخن الهواء خارج عملية التشغيل بشكل جزئي عند بدء التشغيل [4].

الهواء اللازم لعملية الاحتراق يسحب إلى الفرن بعد أن يتم إخضاعه لمرحلتى تسخين:

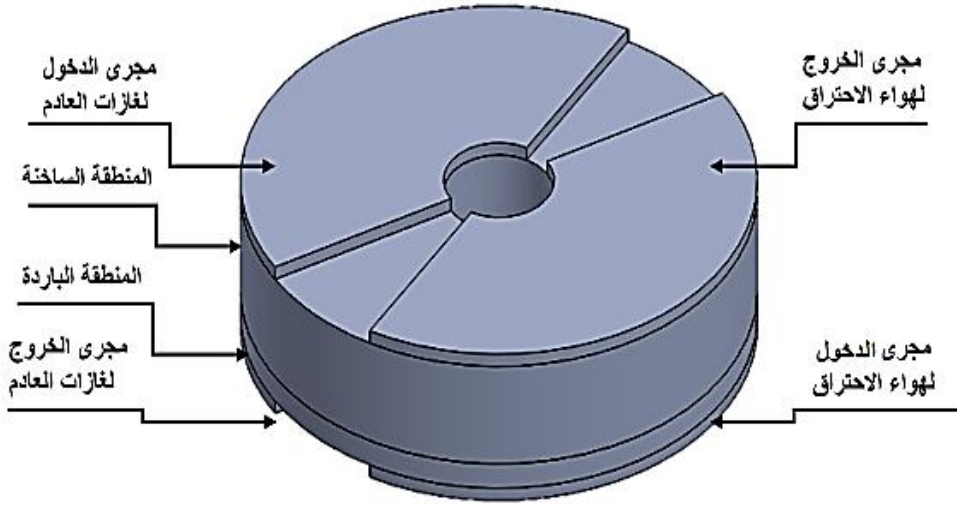
1. المرحلة الأولى: يتم تسخين الهواء الجوي في مسخن الهواء البخاري (Steam Air Heater)

حيث يتم رفع درجة حرارته من درجة حرارة الوسط المحيط إلى حوالي 110°C ، وذلك عن طريق البخار ذي درجة الحرارة 200°C والضغط (14) bar.

2. المرحلة الثانية: يتم تسخين الهواء الداخل إلى المرجل بعد مسخن الهواء البخاري في

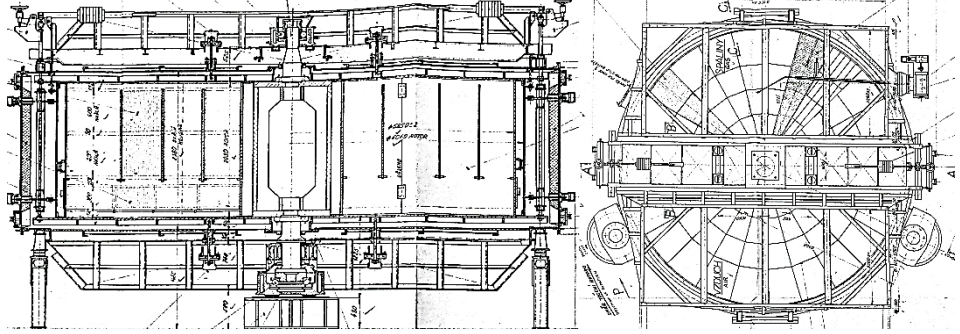
مسخنات هواء الاحتراق (Air Heater) عن طريق استنزاف حرارة غازات العادم بعد خروجها من الموفرات والمتوجهة إلى الوسط الخارجي عن طريق المدخنة [4].

يوضح الشكل (1): رسم ثلاثي الأبعاد لمسخن الهواء الدوار المدروس، حيث تم رسم أجزاء المسخن وتجميعها ضمن بيئة Solid Work. ويوضح الشكل (2) الأبعاد الهندسية للمسخن الدوار مع الجدول (1).



الشكل (1): رسم ثلاثي الأبعاد لمسخن الهواء الدوار

دراسة تأثير سرعة دوران مسخن الهواء الدوار (LJUNGSTRÖM) على ظاهرة الندى الحمضي
 باستخدام المحاكاة العددية

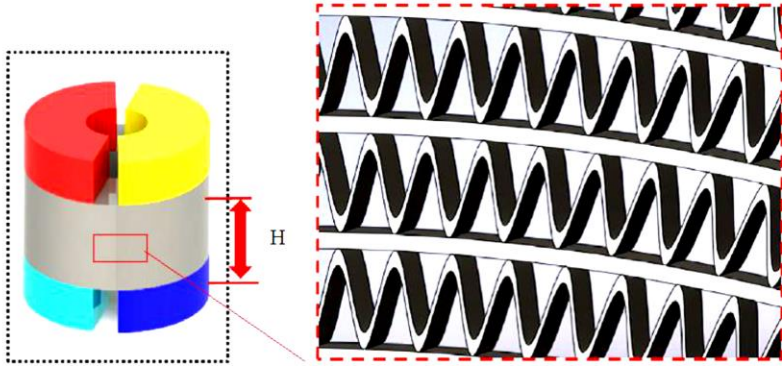


الشكل (2): الأبعاد الهندسية للمسخن الدوار

الجدول (1): الأبعاد الهندسية للمسخن الدوار

6060 mm	قطر دوار مسخن الهواء	6220 mm	قطر مسخن الهواء
2030 mm	ارتفاع دوار مسخن الهواء	2380 mm	ارتفاع مسخن الهواء
1 mm	سماكة السلل الحارة	600*2 mm	ارتفاع السلل الحارة
0.6 mm	سماكة السلل الباردة	300 mm	ارتفاع السلل الباردة

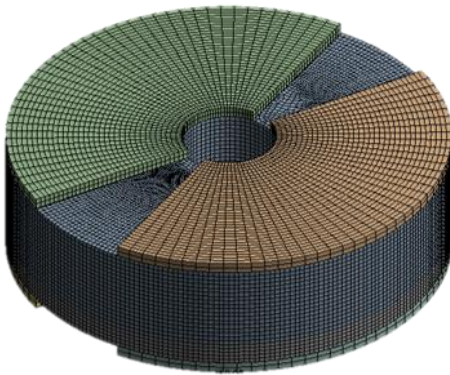
المسخن مقسم الى طبقتين: الأولى هي الطبقة الساخنة تحتوي منطقتين $600*2\text{ mm}$ والثانية هي الطبقة الباردة 300 mm ، بالنظر في الممرات الضيقة مقارنة بالأبعاد الكلية للمسخن الدوار الموضح بالشكل (3). يمكن استخدام نموذج الوسائط المسامية التي يسهل اختراقها لمحاكاة تدفق السوائل في سلل مسخن الهواء. باستخدام هذا النموذج يمكن أن نقلل من الوقت الحسابي مع الحفاظ على النتائج بدقة مقبولة [5].



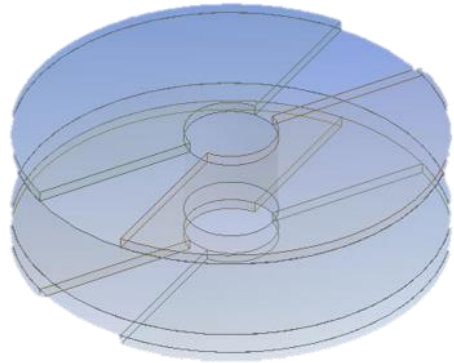
الشكل(3): الممرات الضيقة لمسخن الهواء

3-2- تقطيع النموذج الهندسي:

تم بداية استيراد النموذج الهندسي (Geometry) إلى بيئة Ansys لتعديله باستخدام تطبيق SpaceClaim وذلك بهدف إنشاء السطوح المشتركة (Interfaces) لاتصال مجرى الهواء والغازات بجسم الدوار وتحديد الجدران ليتم تعريفها لاحقاً ضمن الشروط بيئة Ansys Fluent كما هو موضح بالشكل (4)، ويظهر الشكل (5) شكل ثلاثي الأبعاد لشبكة العناصر للمسخن الدوار حيث بلغ العدد الوسطي للعناصر الكلية للشبكة (784285) عنصر.



الشكل (5): منظور ثلاثي الأبعاد لشبكة العناصر للمسخن الدوار



الشكل (4): النموذج الهندسي بعد فصل السطوح المشتركة

3-3- النموذج الفيزيائي والشروط الحدية:

3-3-1 - المعادلات الحاكمة:

لمحاكاة التدفق ونقل الحرارة داخل المسخن، يمكن استخدام معادلات Naviere Stokes في وسط مسامي. تكون معادلات الاستمرار وكمية الحركة على النحو التالي [6]:

$$\gamma \frac{\partial \rho_f}{\partial t} + \nabla(\rho_f v) = 0 \quad (1)$$

$$\rho_f \left[\gamma^{-1} \frac{\partial v}{\partial t} + \gamma^{-2} (v \cdot \nabla) v \right] = -\nabla P - \frac{\mu}{k} v \quad (2)$$

وترد معادلات الطاقة للمراحل الصلبة والسائلة، على التوالي:

$$(1 - \gamma)(\rho c_p)_s \frac{\partial T_s}{\partial t} = (1 - \gamma) \nabla \cdot (k_s \nabla T_s) + (1 - \gamma) q_s''' \quad (3)$$

$$\gamma(\rho c_p)_f \frac{\partial T_f}{\partial t} + (\rho c_p)_f v \cdot \nabla T_s = \gamma \nabla \cdot (k_f \nabla T_f) + \gamma q_f''' \quad (4)$$

الجمع بين معادلات الطور الصلبة والسائلة، فإن معادلة الطاقة لحالة التوازن الحراري هي كما يلي:

$$(\rho c_p)_m \frac{\partial T}{\partial t} + (\rho c_p)_f v \cdot \nabla T = \nabla \cdot (k_m \nabla T_m) + \gamma q_m''' \quad (5)$$

تم استخدام معادلات الاستمرار وكمية الحركة والطاقة على التوالي. لحل المعادلات الحاكمة تم استخدام برنامج FLUENT باستخدام خوارزمية SIMPLE لحل معادلات Naviere Stokes.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho v_{\tau}^- = 0 \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\rho v^-) + \nabla \cdot (\rho v_{\tau}^- v^-) + \rho (\omega^- * (v^- - v_{\tau}^-)) \\ = -\nabla_p + \nabla \cdot \tau_{\tau}^- + F^- \end{aligned} \quad (7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\rho v_{\tau}^- H + P u_{\tau}^-) = \nabla \cdot (k \nabla T + \nabla \cdot \tau^- \cdot v^-) + S^- \quad (8)$$

نموذج الاضطراب (Standard k - ε):

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i)$$

$$= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_\tau}{\delta_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho k u_i)$$

$$= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_\tau}{\delta_\epsilon} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{K} + S_\epsilon \quad (10)$$

3-3-2- النموذج الفيزيائي:

تم حل معادلات Naviere Stokes للجريان ثلاثي الأبعاد بالحالة العابرة (Transient)، باستخدام إطار مرجعي متحرك (نموذج الشبكة المنزلقة the sliding mesh model) لدمج تأثير السرعة الدورانية للمصفوفة مسخن الهواء، وتم اختيار نموذج الاضطراب $k - \epsilon$ Standard لأنه يوفر نتائج أفضل للتدفقات ذات الجريان المتعكس. ومعالجة مصفوفة المسخن كوسيلة مسامية [7].

3-3-3- تقطيع النموذج الفيزيائي:

ترتبط معادلات السرعة والضغط معاً لذلك تم استخدام خوارزمية SIMPLE

(Linked Equation Simi-infinite Method for Pressure) لتحقيق العلاقة بين تصحيحات السرعة والضغط في معادلات الاستمرار وكمية الحركة، وللحصول على مجال الضغط.

تم استخدام الاستيفاء من المرتبة الأولى (First order upwind Interpolation) لكافة المعادلات، وتم اختيار مخطط (PRESTO!) لاستيفاء الضغط، وتم اختيار مخطط غرين-غاوس للتدرج اعتماداً على العقدة (Green-Gauss Node-Based)، وتم حل المعادلات عند 100 تكرار خلال ثانية واحدة.

وضعت قيم الأخطاء المقبولة لحالات التشغيل عند حدود (10^{-6}) لمعادلة الطاقة [8]، و(10^{-4}) لباقي المعادلات، وتم اعتبار الجريان متقارب عند استقرار قيم الأخطاء. تم اختيار الإطار المرجعي Mesh Motion لدمج السرعة الدورانية للمصفوفة مسخن الهواء. وتم اعتبار المسخن الحراري وسط مسامي لتقليل زمن الحل.

تطلبت عملية المحاكاة لحالات التشغيل للمسخن الدوران 583 ساعة خلال إجراء الحل العددي، وذلك باستعمال حاسب بمواصفات معالج رباي النوى AMD A10-8700P وبتردد 1.80 GHz والذاكرة 4.00 GB RAM.

3-3-4- الشروط الحدية:

تم استخدام حالة حدود مدخل السرعة لتحديد سرعة المائع عند مدخل التدفق إلى جانب درجة الحرارة الإجمالية لكل من غاز العادم والهواء. الضغط كما هو مفترض موحد على كامل مستوى مدخل الهواء وغاز العادم. وتم استخدام حالة حدود منفذ الضغط لتحديد ضغط المائع عند مخرج التدفق. تم تحديد جميع الجدران المحيطة الداخلية والخارجية والجدران الفاصلة أعلى وأسفل الوسائط المسامية كجدران فولاذية معزولة وثابتة. كما تم تحديد الجدران المحيطة الداخلية والخارجية للوسائط المسامية كجدران فولاذية معزولة ولكن لها نفس سرعة الدوران، كما هو موضح بالجدول (2).

الجدول (2): الشروط الحدية للنماذج المدروسة عند كل حالة تشغيل

حالة التشغيل	الوحدة	المتغير
7	m/s	سرعة الدخول لهواء الاحتراق
8.3	m/s	سرعة الدخول لغازات العادم
110	□	درجة حرارة هواء الاحتراق
341	□	درجة حرارة غازات العادم
0.864	-	مسامية المسخن للمنطقة الساخنة
0.795	-	مسامية المسخن للمنطقة الباردة
0.5 1 1.5 2 2.4 3 4 5 10	r.p.m	سرعة الدوران

تتكون الوسائط المسامية من المينا الصلبة (الفولاذ). لذلك تم تحديد قيمة ثابتة لمسامية الوسائط المسامية وتعيين خصائص المادة الصلبة في وسط مسامي من قاعدة بيانات FLUENT. كما هو موضح بالجدول (3).

الجدول(3): المواصفات الفنية لسلل المسخن حسب الشركة الصانعة

خصائص مادة سلل المسخن		
الخصائص الفيزيائية الحرارية	الواحدة	القيمة
الكثافة ρ_s	m^3/kg	7833
السعة الحرارية Cps	$kg.K/J$	465
التوصيل الحراري Ks	$m.K/W$	54

3-4- التحقق من صحة النموذج:

تشكل المتغيرات الرئيسية المتاحة من الشركة المصنعة بتشغيل مولد البخار عاملاً مساعداً للتحقق من صحة النموذج [8].

للتحقق من صلاحية النموذج تمت المقارنة بين درجة حرارة غازات العادم وهواء الاحتراق عند مخرج المسخن الدوار التي تم الحصول عليها من النمذجة وبين درجة الحرارة من الشركة المصنعة عند مخرج المسخن.

الجدول(4): القيم الوسطية لدرجات حرارة المخرج للهواء والغاز

القيمة	الواحدة	المتغير	القيمة	الواحدة	المتغير
302.17	C°	متوسط درجة حرارة خروج هواء الاحتراق من النمذجة	300	C°	متوسط درجة حرارة خروج هواء الاحتراق
177.21	C°	متوسط درجة حرارة خروج غازات العادم من النمذجة	175	C°	متوسط درجة حرارة خروج غاز العادم

بالنسبة لهواء الاحتراق:

$$Error \% = \frac{|T_{air outlet} - T'_{air outlet}|}{|T_{air outlet}|} \times 100$$

دراسة تأثير سرعة دوران مسخن الهواء الدوار (LJUNGSTRÖM) على ظاهرة الندى الحمضي باستخدام المحاكاة العددية

$$= \frac{|300 - 302.17|}{|300|} \times 100 = 0.723\%$$

بالنسبة لغازات العادم:

$$\begin{aligned} Error \% &= \frac{|T_{gas\ outlet} - T'_{gas\ outlet}|}{|T_{gas\ outlet}|} \times 100 \\ &= \frac{|175 - 175.21|}{|175|} \times 100 = 0.12\% \end{aligned}$$

وهذا يظهر توافق مقبول بين درجات الحرارة من الشركة الصانعة وبين قيمة درجات الحرارة التي تم الحصول عليها من النمذجة.

4- التآكل في مسخنات هواء الاحتراق:

يشكل حمض الكبريت مشكلة عند انخفاض درجة الحرارة بشكل كافي، حيث يمكن لبخار الحمض أن يتكاثف على سطوح المعدن مسبباً التآكسد حسب المعادلة (11).



إن تآكل السطوح الباردة يظهر عادة في مسخنات الهواء، حيث يمكن لدرجات الحرارة أن تتخفض بشكل كافي بعد زوال الحرارة لتسخين الهواء الداخل، لذلك يتكاثف الحمض على سطوح المعادن. كما يمكن أن يظهر التآكسد بحمض الكبريت على جدران المداخن وخاصة على المعادن في أعلى المدخنة.

❖ درجة حرارة نقطة الندى الحمضية:

هناك قانون يعبر عن العلاقة بين درجة حرارة نقطة الندى لغازات العادم وبين النسبة المئوية للكبريت في الوقود وهو كالاتي [2]:

$$T_{G2} = 19.57 * \ln(s) + 132.97 \quad (12)$$

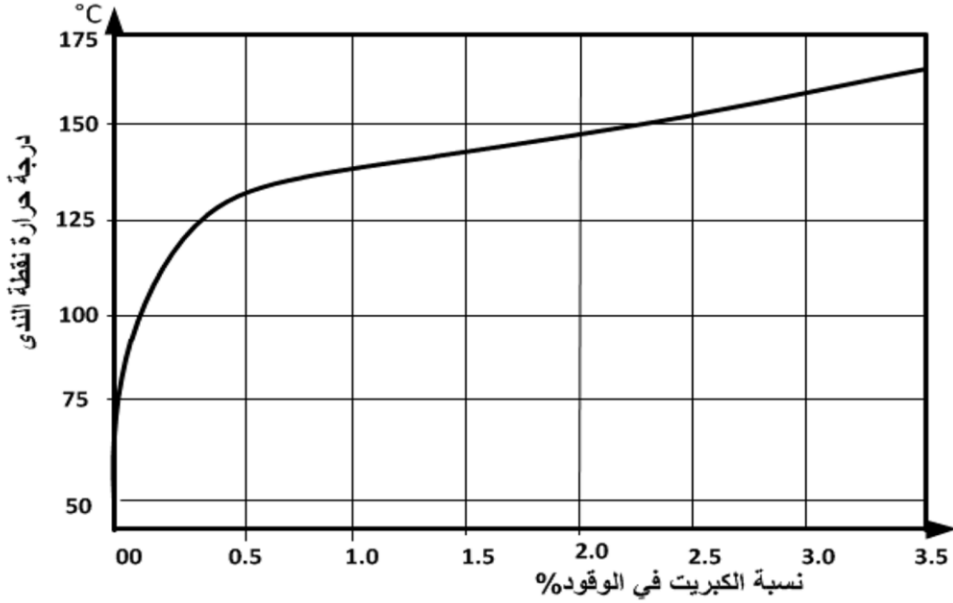
حيث: T_{G2} : درجة حرارة نقطة ندى غازات العادم.

S: النسبة المئوية للكبريت في الوقود.

بالتعويض في قيمة نسبة الكبريت في الفيوول نحصل على درجة حرارة نقطة الندى كالتالي:

$$T_{G2} = 19.57Ln(3.5) + 132.97 = 157.48 (^{\circ}C)$$

يوضح الشكل (6) العلاقة بين نسبة الكبريت في الوقود ونقطة الندى لغازات العادم.



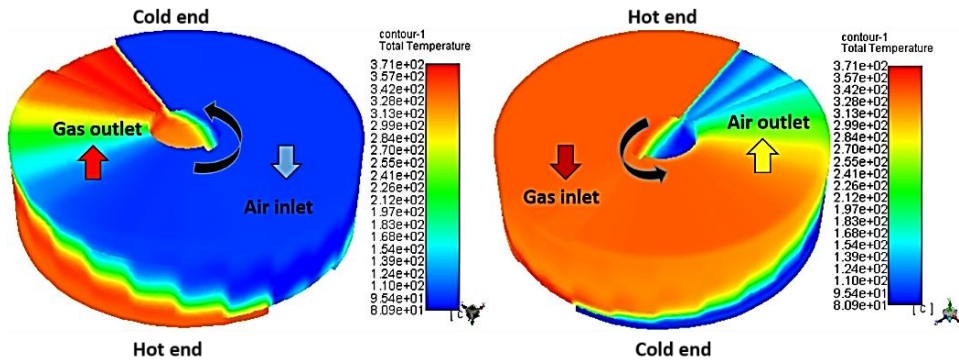
الشكل (6): العلاقة بين نسبة الكبريت في الوقود ونقطة ندى غازات العادم

5- النتائج ومناقشتها:

يوضح الشكل (7) توزيع درجة الحرارة في مصفوفة المسخن حيث يكون الطرف الساخن لمسخن الهواء في الأعلى. كما رأينا، يكون توزيع درجة الحرارة منتظماً تقريباً عند سطح مدخل قناة الغاز. ومع ذلك، فإن درجة حرارة مصفوفة المسخن تظهر تغيراً تدريجياً في اتجاه الدوران في قناة مخرج الهواء. في الواقع، هذا الجزء من الهواء الخارج الذي يمر فوق مصفوفة المسخن الساخنة والذي يأتي من القسم الساخن يتم تسخينه بشكل مناسب ويصبح دافئاً ولكن مع دوران مصفوفة المسخن ونقل طاقتها إلى الهواء، تنخفض درجة حرارته ونتيجة لذلك يمر جزء آخر من الهواء الخارج على مصفوفة المسخن الباردة نسبياً

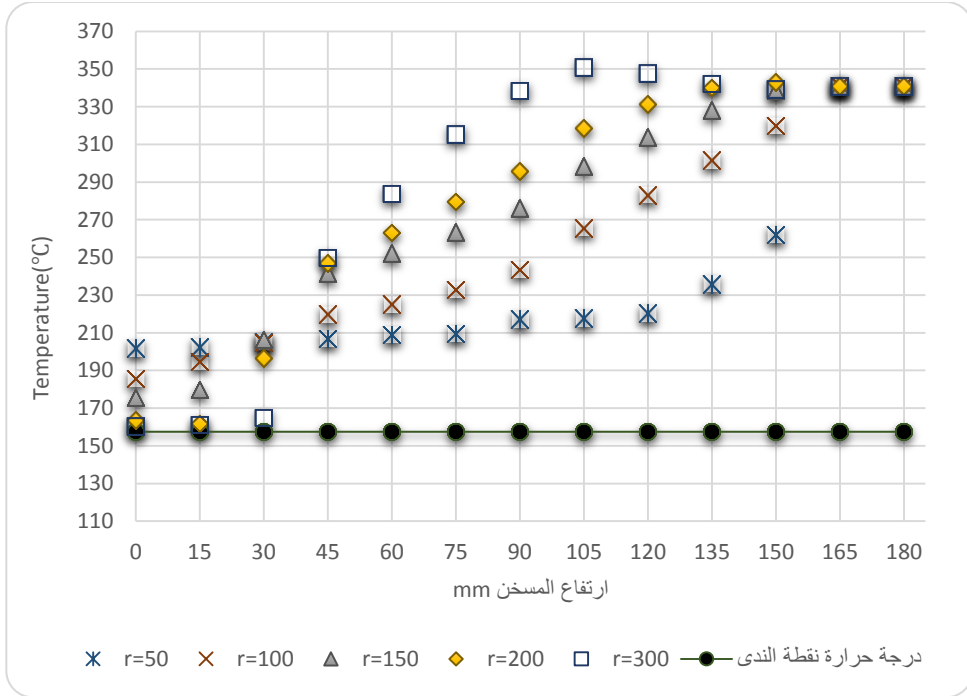
دراسة تأثير سرعة دوران مسخن الهواء الدوار (LJUNGSTRÖM) على ظاهرة الندى الحمضي باستخدام المحاكاة العددية

وبالتالي يتم تسخينه بدرجة أقل. كما رأينا، في نهاية منطقة الدوران، تقترب درجة حرارة مصفوفة المسخن من درجة حرارة الهواء الداخل. يمكن تحقيق الاتجاهات المماثلة عند النظر إلى مصفوفة المسخن من الطرف البارد كما هو موضح في الشكل (8). توزيع درجة الحرارة على المستوى الرأسي للمصفوفة المسخن موضح في الشكل (9) توضح هذه الأرقام أن درجات الحرارة الأكثر سخونة وبرودة تحدث عند أقصى نصف قطر للمصفوفة مسخن الهواء.



الشكل (8): توزيع درجة حرارة مصفوفة المسخن بسرعة 2.4 r.p.m ، عندما يكون الطرف البارد في الأعلى

الشكل (7): توزيع درجة حرارة مصفوفة المسخن بسرعة 2.4 r.p.m ، عندما يكون الطرف الساخن في الأعلى



الشكل (9): توزيع درجة الحرارة من أسخن مستوى الى أبرد مستوى في مسخن الهواء

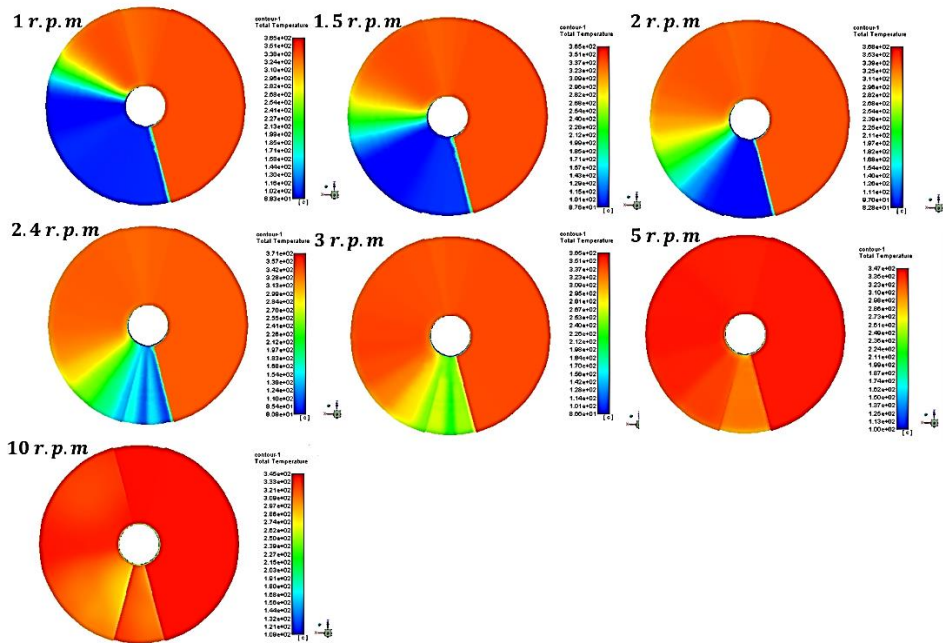
5-1- تأثير سرعة الدوران:

إحدى المعلمات المهمة في فعالية مسخن الهواء بالغاز الدوار هي سرعة دوران مصفوفة مسخن الهواء.

يوضح الشكل (10) تأثير سرعة الدوران لمسخن الهواء على توزيع درجة الحرارة إذا تم عرضها من الطرف الساخن. كما هو مبين، عن طريق زيادة سرعة الدوران، تزداد درجة الحرارة في المنطقة الساخنة في قسم المخرج مما يشير إلى تبادل أفضل لنقل الحرارة. كما هو مبين في الجدول (5). ويمكن تحقيق نفس النمط عند النظر إليه من الطرف البارد، أي بزيادة سرعة الدوران، تقترب درجة حرارة الهواء الخارج من درجة حرارة الغاز الداخل.

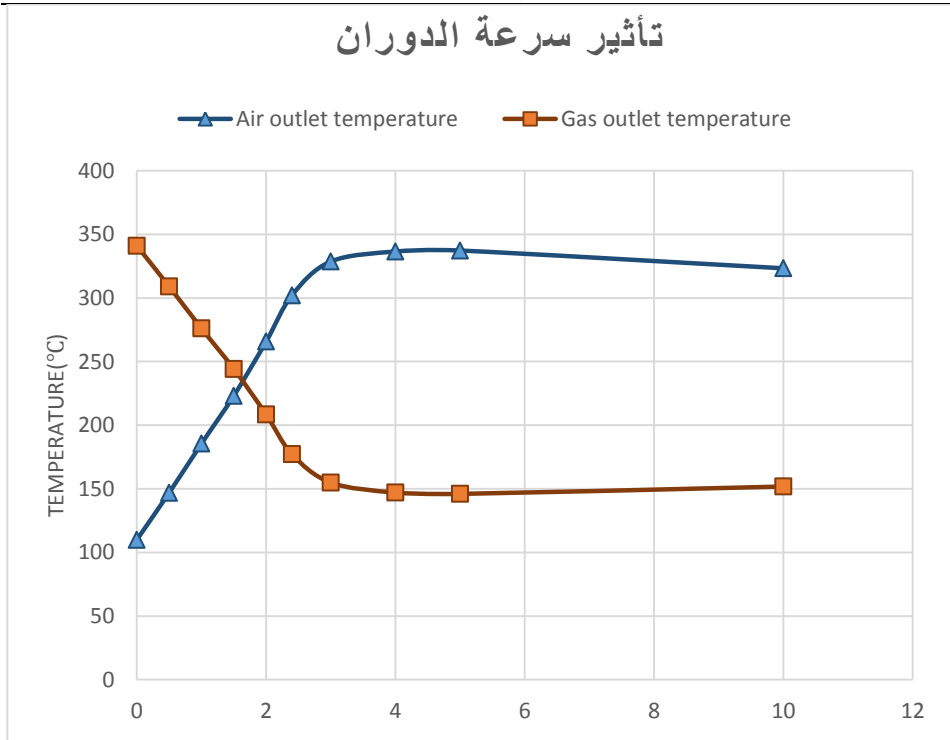
الجدول (5): تغيير درجة حرارة الخروج لكل من الهواء وغاز العادم اعتماداً على تغيير
سرعة الدوران

Rotational Speed <i>r. p. m</i>	"Air Temperature" °C	"GAS Temperature" °C
0.5	146.93	309.03
1	185.53	276.05
1.5	223.13	244.23
2	265.72	208.45
2.4	302.17	177.21
3	328.67	154.91
4	336.5	147.06
5	337.27	146.03
10	323.32	151.82



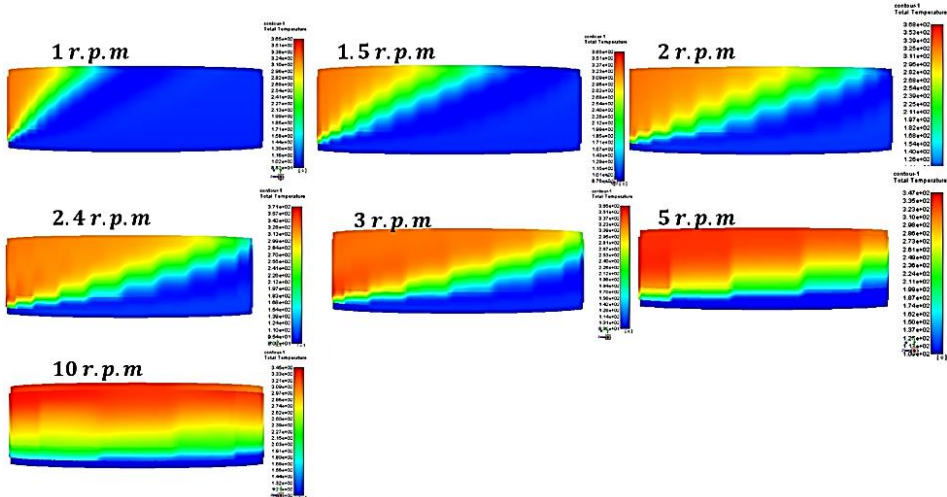
الشكل (10): تأثير سرعة الدوران لمسخن الهواء على توزع درجة الحرارة إذا تم عرضها من الطرف الساخن

بالنظر إلى الدور الوسيط للمصفوفة في مسخن الهواء، يمكن ملاحظة أنه من خلال زيادة سرعة الدوران، يتم نقل المزيد من الطاقة بين هواء الاحتراق وغاز العادم مما أدى إلى زيادة أكبر في أداء مسخن الهواء. في الواقع، من خلال زيادة سرعة الدوران، لا يمكن أن يكون للألواح المدمجة الوقت اللازم للوصول إلى درجة حرارة الهواء والغاز العابر. لذلك، يظل فرق درجة الحرارة بين الهواء والغاز والألواح مرتفعاً مما يؤدي إلى تبادل أفضل لنقل الحرارة كما هو ملاحظ في الشكل (11).



الشكل (11): تأثير سرعة الدوران على مخرج هواء الاحتراق وغازات العادم

يوضح الشكل (12) توزيع درجة حرارة مسخن الهواء من الجهة الجانبية للنهاية الباردة. كما رأينا، من خلال زيادة سرعة دوران مصفوفة المسخن، تتعرض مساحة أكبر من مصفوفة المسخن لزيادة درجة الحرارة مما يشير إلى إجراء نقل حرارة أفضل. ألا أنه، بعد سرعة 2.4 r.p.m تنخفض درجة حرارة مخرج الغاز الى ما دون درجة حرارة نقطة الندى لغاز العادم، مع زيادة سرعة الدوران تترك الطبقة العليا من مصفوفة المسخن قناة مرور الهواء دون الوصول إلى درجة حرارة الهواء الداخل. يتكرر هذا الإجراء على العكس من العرض الجانبي للقناة الساخنة مما يسبب في حالة تبريد للمسخن لمنطقة خروج غاز العادم.

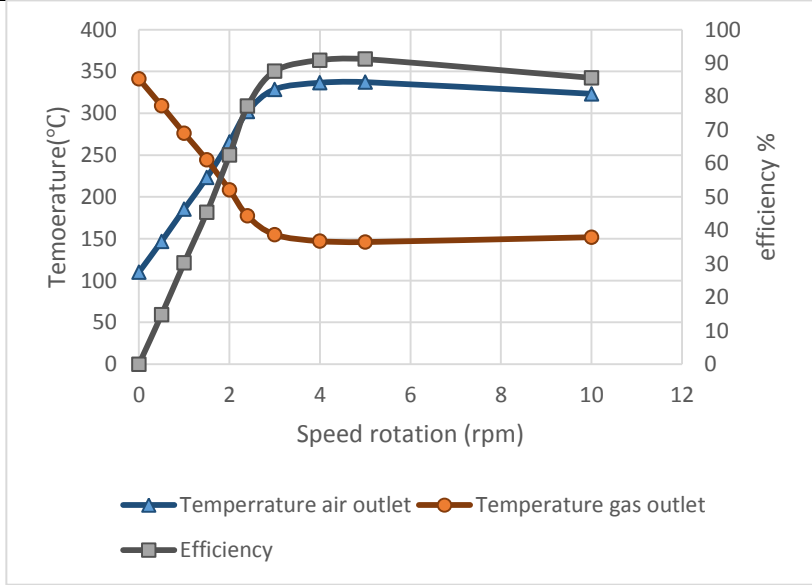


الشكل (12): تأثير سرعة الدوران على توزيع درجة الحرارة من الجهة الجانبية للنهاية الباردة يوضح الشكل (13) والشكل (14) تأثير سرعة دوران مصفوفة المسخن على فعالية مسخن الهواء ودرجة حرارة مخرج هواء الاحتراق وغازات العادم في مسخن الهواء ومردود المرجل. كما رأينا، من خلال زيادة سرعة الدوران، تزداد الفعالية بشكل كبير حتى $5 r.p.m$ وبعد ذلك لا تتحقق زيادة كبيرة في الفعالية كما هو مبين في الجدول (6)، وزيادة سرعة الدوران أكثر من $3 r.p.m$ غير مفيد لتشكل ظاهرة الندى الحمضي وعدم زيادة درجة حرارة الهواء أكثر من ذلك.

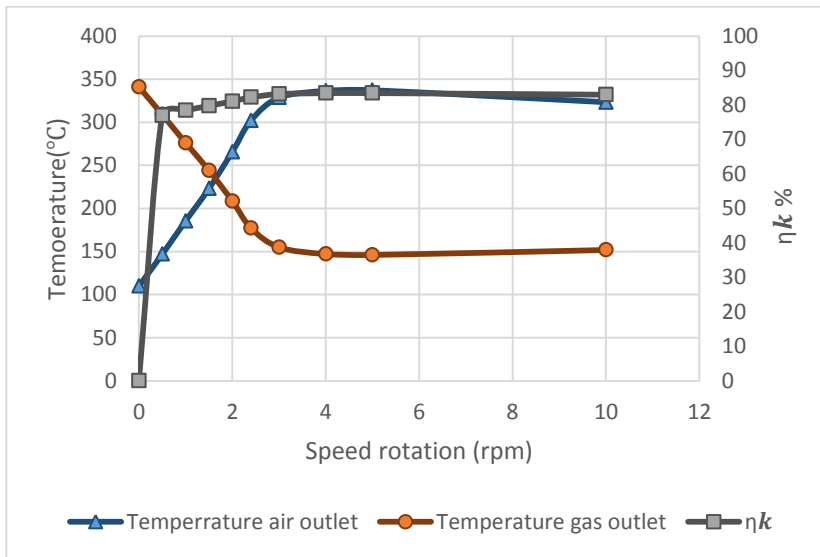
الجدول (6): تأثير سرعة الدوران على فعالية مسخن الهواء ومردود المرجل

Efficiency	Rotational speed of air preheater (rpm)								
	0.5	1	1.5	2	2.4	3	4	5	10
$\varepsilon\%$	14.81	30.3	45.39	62.48	77.11	87.58	90.88	91.19	85.59
$\eta_D\%$	77.2	78.49	79.78	81.09	82.24	83.2	83.45	83.48	83.01

دراسة تأثير سرعة دوران مسخن الهواء الدوار (LJUNGSTRÖM) على ظاهرة الندى الحمضي باستخدام المحاكاة العددية



الشكل (13): تأثير سرعة الدوران على فعالية مسخن الهواء ومتوسط درجات حرارة الهواء والغاز الخارج



الشكل (14): تأثير سرعة الدوران على مردود المرجل ومتوسط درجات حرارة الهواء والغاز الخارج

يتم الحصول على فعالية مسخن الهواء الدوار عن طريق [9]:

$$\varepsilon = \frac{\text{heat transferred}}{\text{maximum possible heat transferred}} = \frac{m'_{air.in} * C_{p.air} * (T_{air.out} - T_{air.in})}{m'_{flue.in} * C_{p.flue} * (T_{flue.in} - T_{air.in})} \quad (13)$$

يتم الحصول على مردود المرجل عن طريق [10]:

$$\eta_D = \frac{\text{الطاقة المفيدة}}{\text{الطاقة المصروفة}} = \frac{D(h_u - h_{sp}) + Q_{pa}}{BQ_i} \quad (14)$$

$$Q_{pa} = V_a(H_a'' - H_a') \quad (15)$$

حيث أن:

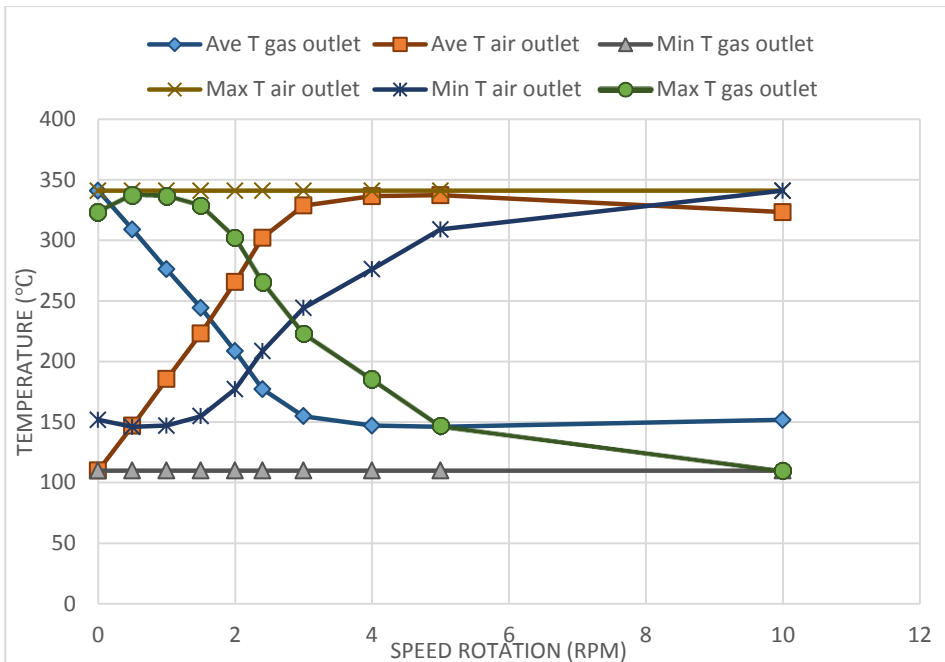
Q_i : القيمة الحرارية الدنيا للوقود $.kJ/kg$	D : كمية البخار حسب الشروط المطلوبة $.kg$
Q_{pa} : كمية الحرارة المتبادلة في مسخن الهواء $.kJ/kg$	B : كمية الوقود المستهلك $.kg$
V_a : تدفق الهواء $.kg/s$	h_u : انتالبي البخار المحمص $.kJ/kg$
H_a'' : انتالبي الهواء عند مخرج المسخن $.kJ/kg$	h_{sp} : انتالبي ماء التغذية $.kJ/kg$
H_a' : انتالبي الهواء عند مدخل المسخن $.kJ/kg$.

يتم من خلال زيادة سرعة الدوران، زيادة متوسط درجة حرارة الهواء الخارج بينما ينخفض متوسط درجة حرارة الغاز الخارج. اتجاه متوسط درجة حرارة الهواء مشابه لاتجاه الفعالية. كما رأينا، بعد $3 r.p.m$ ، يكون الفرق بين متوسط درجات الحرارة ثابتاً تقريباً وهو مشابه لمنحنى الفعالية. تؤدي زيادة سرعة الدوران إلى زيادة المساحة المتاحة لنقل الحرارة بين هواء الاحتراق وغاز العادم لفترة زمنية محددة مما يؤدي إلى زيادة فعالية مسخن الهواء. من ناحية أخرى، فإنه يقلل من درجة الحرارة القصوى للسلال عندما تكون في القسم

الساخن ويزيد من درجة الحرارة الدنيا للسائل عندما تكون في القسم البارد مما يؤدي إلى انخفاض فعالية مسخن الهواء. يحدد التوازن بين هذين التأثيرين المعاكسين اتجاه منحنى الفعالية.

يوضح الشكل (15) تأثير سرعة دوران مصفوفة المسخن الدوار على درجات الحرارة القصوى والدنيا للهواء والغاز الخارج. هناك لسرعة الدوران تأثير كبير على درجة حرارة مخرج الغاز الدنيا ودرجة حرارة مخرج الهواء القصوى. تعتبر درجة حرارة مخرج الغاز الدنيا مهمة بسبب تكوين نقطة الندى في مسخن الهواء الدوار وتآكل مصفوفة المسخن. نظرًا لأن سرعة الدوران لها تأثير على بداية تكثف السوائل ونقطة الندى، يمكن استنتاج أنه يمكن منع عملية التآكل عن طريق تغيير سرعة الدوران. في الجانب الآخر، يتأثر الحد الأدنى لدرجة حرارة الهواء الخارج ودرجة حرارة الغاز الخارج القصوى بسرعة الدوران، كما هو موضح في الشكل (15). والبدائية، حيث تظهر هذه التأثيرات، تكون تقريبًا عند 2.4 r.p.m عندما لا تصل مصفوفة المسخن لدرجة حرارة الهواء والغاز الداخل في كل قناة. بالإضافة إلى ذلك، فإن الحد الأدنى لدرجة حرارة الهواء الخارج والحد الأقصى لدرجة حرارة الغاز الخارج لهما نفس الاتجاه لمتوسط درجات حرارة الهواء والغاز الخارج، على التوالي.

يشير تأثير السرعة على الحد الأدنى للهواء الخارج وأقصى درجات حرارة للغاز الخارج إلى أنه على الرغم من سرعة الدوران تؤثر على بداية التكتيف؛ له تأثير على المنطقة المكشوفة للتكتيف. يحدث معظم التآكل عادةً في الطبقة السفلية من مصفوفة المسخن عندما تدخل مصفوفة المسخن الباردة مبدئيًا إلى قناة الغاز في الأسطح القريبة من المحيط.



الشكل (15): تأثير سرعة الدوران على درجات الحرارة القصوى والدنيا لمخرج الغاز والهواء

6- الاستنتاجات والتوصيات:

1. نلاحظ مع زيادة سرعة الدوران تزداد درجة الحرارة في المنطقة الساخنة مما يشير إلى تبادل أفضل لنقل الحرارة، أي بزيادة سرعة الدوران، تقترب درجة حرارة الهواء الخارج من درجة حرارة الغاز الداخل.
2. زيادة سرعة الدوران أكثر من $2.4 r.p.m$ غير مفيد بسبب حدوث التكاثف. حيث تنخفض درجة حرارة مخرج الغاز الى ما دون درجة حرارة نقطة الندى لغاز العادم، مع زيادة سرعة الدوران تترك الطبقة العليا من مصفوفة المسخن قناة مرور الهواء دون الوصول إلى درجة حرارة الهواء الداخل مما يسبب في حالة تبريد للمسخن في منطقة خروج غاز العادم.
3. تزداد الفعالية بشكل كبير من خلال زيادة سرعة الدوران حتى $5 r.p.m$ بسبب زيادة درجة حرارة هواء الاحتراق وبعد ذلك لا تتحقق زيادة كبيرة في الفعالية. اتجاه متوسط درجة حرارة الهواء مشابه لاتجاه الفعالية. كما رأينا، بعد $3 r.p.m$ ، يكون

الفرق بين متوسط درجات الحرارة ثابتاً تقريباً وهو مشابه لمنحنى الفعالية.

4. تأثير سرعة الدوران كبير على درجة حرارة مخرج الغاز الدنيا ودرجة حرارة مخرج الهواء القصوى. تعتبر درجة حرارة مخرج الغاز الدنيا مهمة بسبب تكوين نقطة الندى في مسخن الهواء الدوار وتآكل مصفوفة المسخن. نظراً لأن سرعة الدوران لها تأثير على بداية تكثف السوائل ونقطة الندى، يمكن استنتاج أنه يمكن منع عملية التآكل عن طريق تغيير سرعة الدوران.

7- التوصيات:

1. دراسة تأثير سرعة دوران مسخن الهواء على ظاهرة الندى الحمضي عند العمل على الحمولات الجزئية.
2. دراسة تأثير درجة حرارة مدخل هواء الاحتراق لمسخن الهواء الدوار على ظاهرة الندى الحمضي.
3. دراسة تأثير معدل تدفق هواء الاحتراق لمسخن الهواء الدوار على ظاهرة الندى الحمضي.
4. دراسة تأثير استخدام أنواع مختلفة من الألواح لسائل المسخن الدوار على توزيع درجة الحرارة للتخلص من ظاهرة الندى الحمضي.

8- المراجع

[1] Kakac, Sadik, "Heat exchanger:Selection," Rating and Thermal

Design, pp. 849–900, 2002.

- [2] Babcoed&Wilcox, "Steam," in It is Generation and Use (41st Ed), 2005, pp. 457–963–4.
- [3] Prvi Brnenska Strojirna Company, Technical Book of Conditions for Requalification of Power Plant Blocks No.1, No.2 in Homs Refinery, Czech Republic: First Brno Engineering Works, 2008.
- [4] Prvi Brnenska Strojirna Company, "Detailed Engineering Desing for Volume ii.3.2–7 in Homs Refinery, Ljunstrom Air Heater," in First Brno Engineering Works, 2008.
- [5] Ansys Fluent User Guide, 2018.
- [6] ANSYS Fluent Theory Guide 19.0, Canonsburg, PA, US: ANSYS, Inc, 2017.
- [7] K. Özdemir, M.F. Serincan,, "A computational fluid dynamics model of a rotary regenerative heat exchanger in a flue gas desulfurization system," *Applied Thermal Engineering*, vol. 143, p. 988–1002, 2018.
- [8] I. F. Galindo–García, A. K. Vázquez–Barragán and M. Rossano–Román, "CFD Simulations as A Tool for Flow and Thermal Analysis in Boilers of Power Plants," *in International Conference on Modeling and Applied Simulation*, Vols. Wien, Austria, no. 2012.

دراسة تأثير سرعة دوران مسخن الهواء الدوار (LJUNGSTRÖM) على ظاهرة الندى الحمضي
باستخدام المحاكاة العددية

- [9] الكيروان .د. بسام، انتقال الحرارة والكتلة، منشورات جامعة البعث، حمص، 2005.
- [10] حسن. د. هيثم، مولدات البخار، منشورات جامعة البعث، حمص، 2018.