

دراسة نظرية لمعيد التسخين الدوار في محطة حرارية لتوليد الطاقة

وضاح حسين عبد الرزاق

هيئة التعليم التقني - المعهد التقني / الدور

تاريخ الاستلام: ١٦/١٠/٢٠٠٧، تاريخ القبول: ٢/٤/٢٠٠٩

الخلاصة

في هذا البحث تم تحليل معيد التسخين الدوار عن طريق حل المعادلات التفاضلية الحاكمة لانتقال الحرارة في معيد التسخين نظرياً وبشكل تحليلي ومقارنة النتائج مع البيانات التصميمية لدراسة أداء معيد التسخين الدوار، وتم الاعتماد في الحل على عدة فرضيات أهمها (ثبوت درجتي الحرارة لكلا المائعين عند الدخول وعدم تغيير معدل الجريان الكتلي لكل من المائعين مع إهمال التوصيل الحراري طولياً باتجاه الجريان). وقد أظهرت النتائج تقارباً جيداً إذ بلغت نسبة الخطأ في درجة حرارة هواء الاحتراق الخارج (٣%) ودرجة حرارة غازات العادم (٤%)، ولذلك يمكن القول انه يمكن استخدام هذا الحل في دراسة العوامل المؤثرة على عمل معيد التسخين بهدف الوصول إلى أفضل عمل له.

المقدمة

إن الوظيفة الأساسية لمسخنات الهواء في محطات التوليد هو رفع درجة حرارة هواء الاحتراق الداخل إلى المرجل بالاستفادة من حرارة غازات العادم الناتجة من الاحتراق ورفع كفاءة المرجل. وتستخدم في محطات توليد القدرة مسخنات هواء من نوع معيد التسخين الدوار ويقع مسخن الهواء في مجرى كل من هواء الاحتراق وغازات العادم ويسمى لانكستروم (محطة، ٢٠٠٤) وقد أجريت عدة دراسات لهذا النوع من المجددات لحل معادلات التفاضلية الحاكمة بهدف دراسة العوامل المؤثرة عليه فقد قام الباحث (Frankovic, 1993) بدراسة المجدد الدوار باعتباره وسط مسامي مع الأخذ بنظر الاعتبار انتقال الحرارة طولياً باتجاه المحور ثم حل المعادلات الحاكمة ثلاثية الأبعاد عددياً باستخدام تقنية الفرق المحدد حيث قام بحساب درجات الحرارة لنموذج ثلاثي الأبعاد حيث وجد في النتائج توافقاً جيداً مع النموذج ثنائي الأبعاد، كما أن الباحث (Alsaid, 2000) قدم دراسة عملية لمجرى يحتوي حشوة من حشوات المجدد الدوار حيث اعتبر الجريان بثلاث اتجاهات، وغير مستقر، طباقى، غير انضغاطي، ولزج مع استخدام تقنية الفرق المحدد مع شبكة غير منتظمة مستخدماً طريقة

(Transient simple algorithm method) حيث حققت النتائج تقارباً جيداً مع النتائج الحقيقية لمصادر أخرى. ومعيد التسخين (Regenerator) هو أحد أنواع مسخنات الهواء إذ يشغل المائع الساخن والبارد فيها الحيز نفسه بالتناوب في قلب المبادل الحراري (الحشاء) الذي يعمل كجهاز خزن حراري يسخن دورياً بأحد اسخن المائعين وبعد ذلك ينقلها إلى المائع الأبرد. وفي تركيب الحشاء الثابت يمر المائع بالتناوب خلال المبادل الساكن، ولغرض استمرار التشغيل يكون من الضروري وجود حشائين أو أكثر. ومعيد التسخين الدوار (Rotary Regenerator) هو المفضل استخدامه في محطات القدرة كونه محكم متضام وسهل المنال ويمتاز بخفة وزنه وكفاءته العالية وصغر حجمه، فهو يتكون من صفائح فولاذية متموجة على شكل صندوق قطري مقسم إلى أجزاء أو مجموعات فسية لتكمل دائرة حول عمود الدوران، إذ يتم انتقال الحرارة عن طريق الصفائح المعدنية وتدعى بالحشوة المعدنية (Metal Matrix) أثناء دورانها خلال مجرى غازات العادم الساخنة ومجرى الهواء البارد اللذان يمران من خلال نصفي المسخن بصورة متعكسة ومستمرة (Boyen, 1975).

وصف معيد التسخين الدوار:

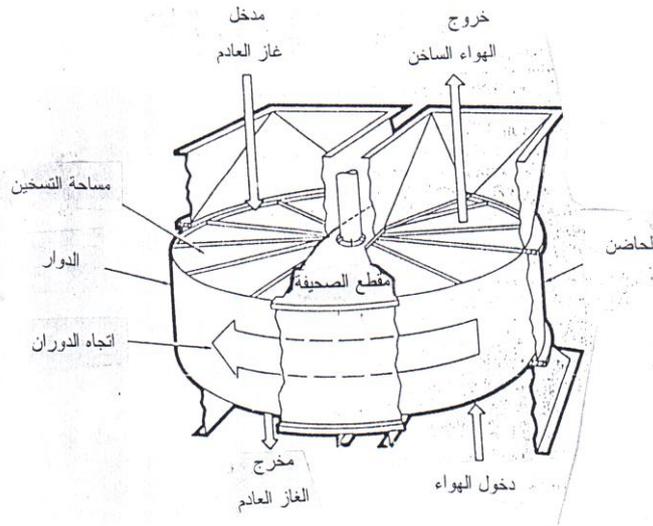
أخذ معيد التسخين في محطة كهرباء بيجي كنموذج للتحليل. إذ إن المحطة مجهزة بمسختين لكل وحدة، حيث يدفع هواء الاحتراق بواسطة مروحتي الدفع القسري (Forced Draft Fan) ليمر على مسخن الهواء بالبخر (Steam Air Heater) (وهو مبادل حراري من النوع الأنبوبي) حيث ترتفع درجة حرارة الهواء من درجة حرارة الجو إلى (60°C) ثم يدخل إلى مسخن الهواء الدوار ومن ثم إلى المحرقة ليتم الاحتراق. وبفعل نواتج الاحتراق يتحول الماء في أنابيب المرجل إلى بخار مشبع وتستمر غازات العادم بتحريكها على أجزاء المرجل مارة على محمصة البخار ومعيدة تسخين البخار والمقتصدة إذ يؤخذ قسم من هذه الغازات إلى مروحتين (Gas Recirculation Fans) لإعادة تدوير الغازات في أسفل الفرن في حين تستمر غازات العادم بالجريان لتدخل إلى المبادل الحراري المعني بتسخين الهواء والذي يتم فيه انتقال الحرارة بين هذه الغازات وهواء الاحتراق عن طريق حشوه معيد التسخين الدوار، وهي عبارة عن مجموعة من الصفائح المتموجة مرتبة على شكل سلال (Baskets) حيث تثبت على قرص يدور بانتظام لتعرض بصورة متناوبة إلى غازات العادم الساخنة وهواء الاحتراق البارد نسبياً رافعة بذلك درجة حرارته من (60°C) إلى (340°C) . ويتكون معيد التسخين الدوار من (الحشوة المعدنية الخازنة للحرارة، قرص دوار حامل للسلال المعدنية، حاصرات، دعائم ومساند منزقة، ونظام ميكانيكي للتدوير). يبلغ قطر الجزء الدوار $(8,07\text{m})$ وبارتفاع كلي $(1,155\text{m})$

كما تبلغ كتلته الكلية (72000kg) والمساحة السطحية للتبادل ($24300m^2$). تقسم الحشوة المعدنية الخازنة للحرارة محوريا إلى طبقتين :

الأولى : الطبقة العليا وتدعى بالجانب الساخن (Hot Side) وتدعى الصفائح المعدنية المتموجة (Corrugated Undulated Plate) ويرمز لها بالرمز (CU) وهي بسمك (٠,٦mm) ويبلغ ارتفاع هذا الجانب (٠,٨٥m) ومعدن الحشوة من نوع (Carbon Steel).

الثانية : الطبقة السفلى وتدعى بالجانب البارد (Cold Side) وتدعى الصفائح المتموجة (Double Undulated Plate) ويرمز لها (DU) وهي بسمك (١,٢mm) ويبلغ ارتفاع هذا الجانب (٠,٣٠٥m) ومعدن الحشوة مطلي بالمينا (Enameled Carbon Steel).

تدخل غازات العادم إلى مسخن الهواء بدرجة حرارة ($410^{\circ}C$) وبسرعة ($18m/s$) ويتدفق كتلي مقداره ($368891.5kg/hr$) من الأعلى وبمجرى يشغل نصف حيز المسخن ومن جهة واحدة ويخرج بدرجة حرارة ($165^{\circ}C$)، في حين يدخل هواء الاحتراق إلى المسخن بدرجة حرارة ($60^{\circ}C$) وبسرعة ($13m/s$) ويتدفق كتلي مقداره ($349662kg/hr$) من الأسفل وبمجرى يشغل النصف الآخر من حيز المسخن ويخرج بدرجة حرارة ($340^{\circ}C$) وتبلغ سرعة الدوران الجزء الدوار (1.4r.p.m) (محطة، ٢٠٠٤)، والشكل (١) يوضح رسم مخطط توضيحي لمعيد التسخين الدوار.



شكل ١ : رسم تخطيطي لمعيد التسخين الدوار مع اتجاه دخول وخروج لكلا المائعين

منهجية الدراسة

مشكلة الدراسة:

تبرز مشكلة الدراسة من خلال ضرورة إيجاد آلية لتحليل مسخن الهواء (معيد التسخين الدوار) وحل المعادلات التفاضلية المتحكمة بإداء معيد التسخين نظرياً وبشكل تحليلي.

أهداف الدراسة:

تحليل الحالة المستقرة والانتقالية لأداء المبادل الحراري (معيد التسخين) من خلال نموذج رياضي له عن طريق حل المعادلات التفاضلية .

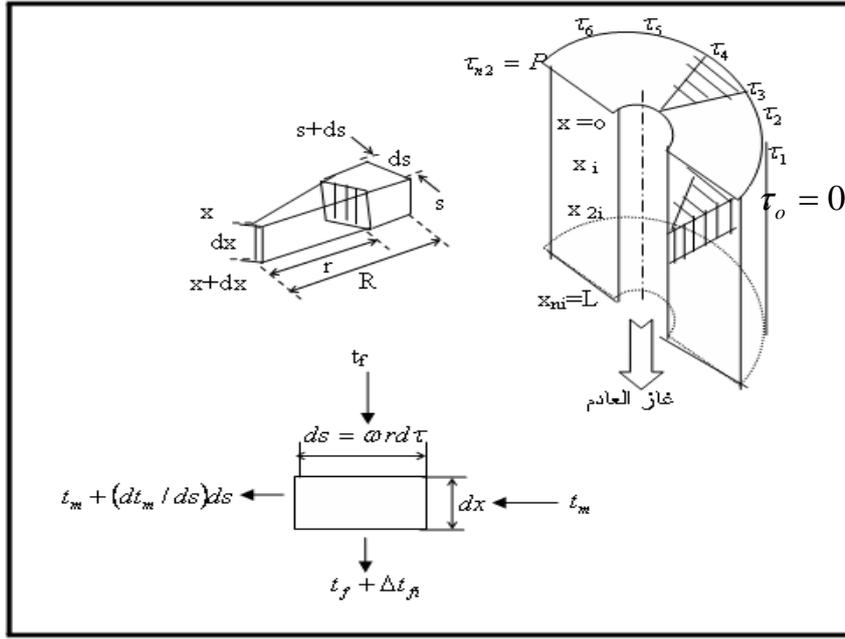
افتراضات الدراسة:

تعتمد المعادلات التفاضلية المستخدمة في وصف اداء مسخن الهواء من نوع معيد التسخين الدوار على الافتراضات الآتية:

١. إهمال السعة الحرارية للمائع المتبقي في قنوات حشوة المسخن عند حالة التعاكس الدوري لجريان المائعين لصغرها قياساً بالسعة الحرارية للحشوة .
٢. بقاء درجات حرارة دخول هواء الاحتراق وغازات العادم إلى حشوة المسخن ثابتة في مدتي التسخين والتبريد (heating and cooling periods) .
٣. عدم تغير معدل جريان كتلة كلا المائعين .
٤. تمثيل الحرارة المنتقلة بين المائع والحشوة بدلالة متوسط معامل انتقال الحرارة (Average heat transfer coefficient) والتي تربط بين درجة حرارة المائع ومتوسط درجة حرارة معدن الحشوة.
٥. عدم تغير معامل انتقال الحرارة والخصائص الحرارية للحشوة المعدنية وللمائع خلال مدة التسخين أو التبريد وتكون متمثلة في كل أجزاء حشوة المسخن في تلك المدة إهمال التوصيل الحراري طولياً باتجاه الجريان.

النموذج الرياضي لمسخن الهواء

تم اعتبار حشوة المبادل الدوار مجموعة من صفائح رقيقة متوازية متماثلة والمثبتة في الحجم المسيطر (control volume) والموضحة في الرسم التخطيطي في الشكل (2).



شكل ٢ : يوضح مقطع المادة الساخنة كنموذج للتحليل

حيث يدخل المائع الحجم المسيطر في مدة التسخين عند موضع (x) بدرجة حرارة (t_f) ويغادر عند الموقع (x+dx) بدرجة حرارة $\left(t_f + \left(\frac{\partial t_f}{\partial x} \right) dx \right)$.

يحسب تغير الطاقة الداخلية للمائع في الحجم المسيطر (dQ_f) من العلاقة الآتية:

$$dQ_f = C_f dm_f d\tau \left(t_f - \left(t_f + \frac{\partial t_f}{\partial x} dx \right) \right)$$

حيث ان:

dm_f : تمثل معدل الجريان الكتلي للمائع خلال الحجم المسيطر.

$d\tau$: يمثل الزمن المطلوب لدخول وخروج معدن الحشوة الحجم المسيطر.

$$dQ_f = -C_f dm_f d\tau \frac{\partial t_f}{\partial x} dx \quad \dots(1)$$

حيث يكون التغير في درجة الحرارة $\left(\frac{\partial t_f}{\partial x} \right)$ طولياً سالباً في مدة التسخين وموجباً في مدة التبريد.

تنتقل الطاقة الحرارية بين المائع ومعدن الحشوة بواسطة الحمل (convection) وحسب العلاقة الآتية:

$$dQ_c = \bar{h} . dA_{c,v} (t_f - t_m) d\tau \quad \dots(2)$$

بفرض إن: $dA_{c,v}$: تمثل المساحة السطحية لمعدن الحشوة خلال الحجم المسيطر.

$$dA_{c.v} = \Delta B \cdot dx \quad \dots(3)$$

حيث إن:

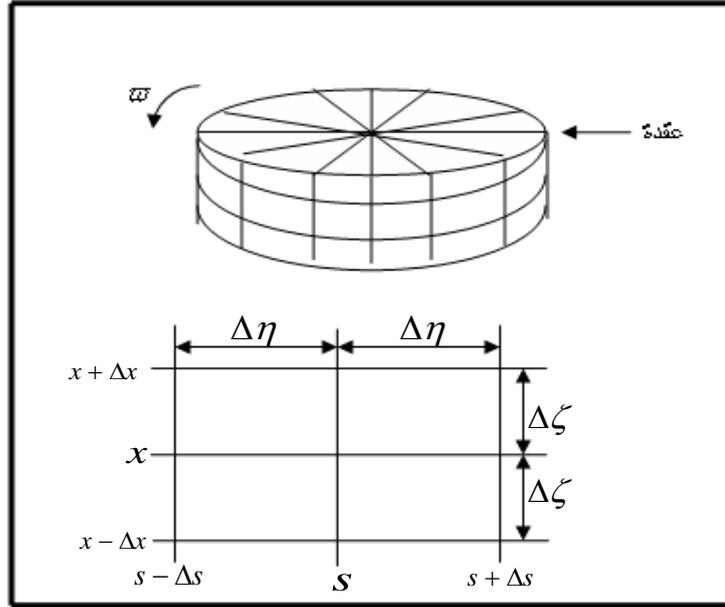
ΔB : يمثل الطول الكلي للصفائح الرقيقة المتعامدة على جريان المائع داخل الحجم المسيطر.

dx : يمثل طول الحجم المسيطر في اتجاه جريان المائع.

فإذا كانت المساحة السطحية الكلية للصفائح في مدة التبريد لمعيد التسخين تساوي (A)،

وطول معيد التسخين باتجاه الجريان يساوي (L)، فإن (B=A/L)، لذلك (B) يمكن تقسيمها إلى

قطاعات كما في الشكل (٣)،



شكل ٣ : مخطط يوضح تقسيم حشوه المسخن إلى مقاطع

زاوية محيطية وطبقات والى أبعاد فراغية متساوية

وبفترت زمنية متساوية.

حيث كل قطاع أو حجم مسيطر (c.v) له طول كلي للصفحة المتعامدة مع اتجاه جريان المائع

وتكون مساوية إلى (ΔB). بتعويض المعادلة (٣) في المعادلة (٢) تصبح:

$$dQ_c = \bar{h} \cdot \Delta B \cdot dx (t_f - t_m) d\tau \quad \dots(4)$$

بالموازنة الحرارية بين المائع ومعدن الحشوة. المعادلة (١) والمعادلة (٤):

$$-C_f dm_f d\tau \frac{\partial t_f}{\partial x} dx = \bar{h} \cdot \Delta B \cdot dx (t_f - t_m) d\tau$$

$$\therefore \frac{\partial t_f}{\partial x} = \frac{\bar{h} \cdot \Delta B}{C_f dm_f} (t_m - t_f) \quad \dots(5)$$

ويدخل معدن الحشوة الخازن للحرارة الحجم المسيطر في مدة التسخين عند موقع (s) بدرجة حرارة (t_m) ويغادر عند الموقع (s+ds) بدرجة حرارة ($t_m + \frac{\partial t_m}{\partial s} ds$) والتي تعتبر درجة حرارة دخول معدن الحشوة للحجم المسيطر في مدة التبريد عند موقع (s) ويغادر عند موقع (s+ds) بدرجة حرارة (t_m). إذ يمكن حساب تغير الطاقة الداخلية لمعدن الحشوة من العلاقة الآتية:

$$dQ_m = C_m dM_{m.c.v.} \left(\left(t_m + \frac{\partial t_m}{\partial s} ds \right) - t_m \right)$$

حيث إن:

$dM_{m.c.v.}$: تمثل الكتلة المعدنية لمعيد التسخين في الحجم المسيطر.

وبما إن:

$$s = \varpi \cdot r \cdot \tau$$

$$ds = \varpi \cdot r \cdot d\tau$$

لذلك

$$\frac{\partial t_m}{\partial s} ds = \frac{\partial t_m}{\partial (\varpi \cdot r \cdot \tau)} d(\varpi \cdot r \cdot \tau) = \frac{\partial t_m}{\partial \tau} d\tau$$

حيث إن درجة الحرارة ثابتة باتجاه (r).

$$dQ_m = C_m \cdot dM_{m.c.v.} \frac{\partial t_m}{\partial \tau} d\tau \quad \dots(6)$$

تكون قيمة dQ_c موجبة في مدة التسخين وسالبة في مدة التبريد بالنسبة لمعدن الحشوة، وبإجراء الموازنة الحرارية لأي من المديتين ينتج:

$$dQ_m = dQ_c$$

$$\frac{\partial t_m}{\partial \tau} = \frac{\bar{h} \cdot \Delta B \cdot dx}{C_m \cdot dM_{m.c.v.}} (t_f - t_m) \quad \dots(7)$$

وبما إن معامل انتقال الحرارة (\bar{h}) والخواص الفيزيائية لاتعتمد على درجة الحرارة، يمكن تبسيط المعادلتين (٥) و(٧) باستخدام المعاملات اللابعديّة (ζ) و(η) وكالاتي (Schmidt & Willmott, 1981):
من المعادلة (٥) يمكن الحصول على:

$$d\zeta = \frac{\bar{h} \cdot \Delta B}{C_f \cdot \dot{m}_f} dx$$

وبالتكامل كما مبين في الملحق (أ) ينتج الآتي:

$$\zeta = \frac{\bar{h} \cdot A}{C_f \cdot \dot{m}_f} \quad \dots(8)$$

ومن المعادلة (٧) يمكن الحصول على:

$$d\eta = \frac{\bar{h} \cdot \Delta B \cdot dx}{C_m \cdot dM_{m.c.v.}} d\tau$$

وبالتكامل كما مبين في الملحق (أ) ينتج الآتي:

$$\eta = \frac{\bar{h} \cdot A}{C_m M_m} \tau \quad \dots(9)$$

ويمكن حساب كل من الطول المصغر (reduced length) (Λ) والمدة المصغرة (reduce period) (Π) اللابعيين ولكل مدة عندما يكون ($x=L$) و ($\tau = P$)، كالاتي (Hausen, 1983):

<p><u>مدة التسخين</u></p> $\Lambda' = \frac{\bar{h}' \cdot A}{\dot{m}'_f \cdot C_f}$ $\Pi' = \frac{\bar{h}' \cdot A}{M_m C_m} p'$	<p><u>مدة التبريد</u></p> $\Lambda'' = \frac{\bar{h}'' A}{\dot{m}''_f C_f}$ $\Pi'' = \frac{\bar{h}'' A}{M_m C_m} p''$
---	---

وبتعويض المعادلتين (٨) و (٩) في المعادلتين (٥) و (٧) ينتج:

$$\frac{\partial t_f}{\partial \zeta} = t_m - t_f \quad \dots(10)$$

$$\frac{\partial t_m}{\partial \eta} = t_f - t_m \quad \dots(11)$$

الحل النظري

بحل المعادلات التفاضلية (١٠) و (١١)، وبمفاضلة المعادلة (١٠) نسبة إلى (η) والمعادلة (١١) نسبة إلى (ζ) وطرح إحداهما من الأخرى نحصل على:

$$\frac{\partial^2 t_f}{\partial \zeta \partial \eta} = \frac{\partial(t_m - t_f)}{\partial \eta}$$

$$\frac{\partial^2 t_m}{\partial \eta \partial \zeta} = \frac{\partial(t_f - t_m)}{\partial \zeta}$$

بالطرح :

$$\frac{\partial^2 t_f}{\partial \zeta \partial \eta} - \frac{\partial^2 t_m}{\partial \zeta \partial \eta} = \frac{\partial(t_m - t_f)}{\partial \eta} - \frac{\partial(t_f - t_m)}{\partial \zeta}$$

$$\frac{\partial^2(t_f - t_m)}{\partial \zeta \partial \eta} + \frac{\partial(t_f - t_m)}{\partial \eta} + \frac{\partial(t_f - t_m)}{\partial \zeta} = 0 \quad \dots(12)$$

وهذه المعادلة حلت من قبل (Nusselt 1928) وبعده من قبل (Anzelius 1929)

$$\Delta = \{\exp(\zeta + \eta)\} (t_f - t_m) \quad \dots(13)$$

ويمكن مفاضلة المعادلة (١٣) مرة بالنسبة إلى (ζ) ومرة إلى (η) :

$$\frac{\partial \Delta}{\partial \zeta} = \exp(\zeta + \eta) \frac{\partial (t_f - t_m)}{\partial \zeta} + \exp(\zeta + \eta) (t_f - t_m)$$

$$\frac{\partial^2 \Delta}{\partial \zeta \partial \eta} = \exp(\zeta + \eta) \frac{\partial^2 (t_f - t_m)}{\partial \zeta \partial \eta} + \exp(\zeta + \eta) \frac{\partial (t_f - t_m)}{\partial \zeta}$$

$$+ \exp(\zeta + \eta) \frac{\partial (t_f - t_m)}{\partial \eta} + \exp(\zeta + \eta) (t_f - t_m)$$

وبتعبير آخر

$$\frac{\partial^2 \Delta}{\partial \zeta \partial \eta} = \exp(\zeta + \eta) \left[\frac{\partial^2 (t_f - t_m)}{\partial \zeta \partial \eta} + \frac{\partial (t_f - t_m)}{\partial \zeta} + \frac{\partial (t_f - t_m)}{\partial \eta} \right]$$

$$+ \exp(\zeta + \eta) (t_f - t_m)$$

إن التعبير الموجود على الجانب الأيمن مساوي للصفر طبقاً إلى المعادلة (12)، لذلك:

$$\therefore \frac{\partial^2 \Delta}{\partial \zeta \partial \eta} = \Delta \quad \dots(14)$$

وبفرض حل السلسلة (Δ) بالشكل الآتي :-

$$\Delta = a_0 + a_1 \zeta \eta + a_2 (\zeta \eta)^2 + \dots + a_n (\zeta \eta)^n$$

بالتعويض في المعادلة (١٤) وبمقارنة العلاقات يمكن الحصول على الآتي :-

$$a_1 = \frac{a_0}{1^2}, \quad a_2 = \frac{a_1}{2^2}, \dots, a_n = \frac{a_{n-1}}{n^2}$$

$$a_1 = \frac{a_0}{(1!)^2}, \quad a_2 = \frac{a_0}{(2!)^2}, \dots, a_n = \frac{a_0}{(n!)^2} \quad \text{أو}$$

وبالتالي :-

$$\Delta = a_0 \sum_0^{\infty} \frac{(\zeta \eta)^n}{(n!)^2} \quad \dots(15)$$

إن الثوابت المسيطرة (a_0) يمكن حسابها من الشروط الحدية:

$$\text{فعندما } (\eta=0 \text{ و } \zeta=0) \text{ فإن } (t_{f1} = t_f) \text{ وكذلك } (t_m = t_{m1})$$

ومن المعادلتين (١٣) و (١٥) تكون:

$$a_0 = (t_{f1} - t_{m1})$$

إن دالة (Bessel) النوع الأول والمرتبطة صفر تعرف بالمعادلة (Ray et al., 1982) :

$$J_0(z) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n \left(\frac{z}{2}\right)^{2n}}{(n!)^2}$$

لذلك يمكن كتابة المعادلة (١٤) بدلالة $(a_0 = t_{f1} - t_{m1})$ و (J_0) لينتج الآتي:

$$\Delta = (t_{f1} - t_{m1}) J_0(2i\sqrt{\zeta\eta})$$

ومن خلال دالة (Bessel) المحسنة (Chudnovskat et al., 1984):

$$I_0(x) = J_0(ix)$$

لذلك:

$$\Delta = (t_{f1} - t_{m1}) I_0(2\sqrt{\zeta\eta}) \quad \dots (16)$$

وبتعويض المعادلة (١٦) في المعادلة (١٣) ينتج الآتي :-

$$(t_{f1} - t_{m1}) I_0(2\sqrt{\zeta\eta}) = \exp(\zeta + \eta)(t_f - t_m)$$

ومنها ينتج:

$$t_f - t_m = (t_{f1} - t_{m1}) \exp[-(\zeta + \eta)] I_0(2\sqrt{\zeta\eta}) \quad \dots (17)$$

إن t_m, t_f : يمكن إيجادهما من حل المعادلتين (١٠) و (١١) بالتكامل وبالشروط الحدية الآتية:

عندما $\zeta=0$ ، فان: $t_f = t_{f1}$

وعندما $\eta=0$ ، فان: $t_m = t_{m1}$

أي ان:

$$t_f = t_{f1} - \int_0^{\zeta} (t_f - t_m) d\zeta$$

$$t_m = t_{m1} + \int_0^{\eta} (t_f - t_m) d\eta$$

وبتعويض $(t_f - t_m)$ من المعادلة (١٧) يمكن الحصول على:

$$t_f = t_{f1} - (t_{f1} - t_{m1}) \int_0^{\zeta} \exp[-(\zeta + \eta)] I_0(2\sqrt{\zeta\eta}) d\zeta \quad \dots (18)$$

$$t_m = t_{m1} + (t_{f1} - t_{m1}) \int_0^{\eta} \exp[-(\zeta + \eta)] I_0(2\sqrt{\zeta\eta}) d\eta \quad \dots (19)$$

طريقة الحل

تقسم حشوة المسخن الى مقاطع زاوية محيطية (Angular Circumferential Segments) تمثل عدد خطوات التكامل بالنسبة للزمن خلال دوران المسخن، والى طبقات تمثل عدد خطوات التكامل بالنسبة للمسافة باتجاه الجريان، كما موضحة في الشكل (٣). تصاغ المعادلتان (١٠) و (١١) بأشكال مختلفة والموضحة في الفقرة السابقة (المعادلات التفاضلية) إلى المعادلتين (١٨) و (١٩) ويتم تكاملهما بطريقة (simpson's rule) خطوة بخطوة، واللذان تستخدمان لحساب درجتي حرارة كل من المائع وحشوة المعدن وللفترتين الساخنة والباردة، وذلك بواسطة برنامج حاسوبي لمحاكاة اداء المسخن. إن نتائج حل المعادلات المختلفة هي قيم درجات حرارة غازات العادم وهواء الاحتراق ومعدن الحشوة عند ابعاد فراغية متساوية ($\Delta\zeta$) الى اسفل المسخن وبمدد فراغية متساوية من الزمن ($\Delta\eta$) لاعتمادها في البرنامج الحاسوبي .

$$\text{إذ إن: } \quad \frac{\Lambda}{n1} = \Delta\zeta \quad \text{و} \quad \frac{\Pi}{n2} = \Delta\eta$$

حيث ان:

$$n1 = \text{عدد خطوات التكامل باتجاه المسافة.} \quad n2 = \text{عدد خطوات التكامل في الزمن.}$$

وكما موضح بالمخطط الشبكي في الشكل (٣) إذ تشير الرموز (s) إلى الزمن و (x) إلى المسافة. ولغرض إيجاد توزيع درجات حرارة غازات العادم وهواء الاحتراق ومعدن الحشوة ، يتبع الحل الخطوات التالية :

- ١- تثبيت درجتي حرارة دخول غازات العادم وهواء الاحتراق إلى المسخن ولمدتي التسخين والتبريد على التوالي.
- ٢- افتراض درجة حرارة معدن الحشوة في بداية مدة التسخين، وعادة ما تؤخذ مساوية لمعدل درجتي حرارة الدخول للمائعين.
- ٣- حساب درجات حرارة غازات العادم ومعدن الحشوة لبقية العقد في مدة التسخين.
- ٤- تثبيت درجات حرارة معدن الحشوة في بداية مدة التبريد بنفس قيمة درجات حرارة معدن الحشوة في نهاية مدة التسخين.
- ٥- حساب درجات حرارة هواء الاحتراق ومعدن الحشوة لبقية العقد في مدة التبريد.
- ٦- إعادة الحساب للخطوة (٢) باعتبار درجات حرارة معدن الحشوة في بداية مدة التسخين هي نفسها في نهاية مدة التبريد.

٧- إعادة حساب بقية الخطوات (٥،٤،٣) وهكذا لحين ثبوت درجات حرارة معدن الحشوة في نهاية مدة التبريد ومساواتها لدرجات حرارة معدن الحشوة في بداية مدة التسخين السابقة لها، وتعرف هذه الحالة بالتوازن الدوري (Cyclic Equilibrium) وعند ذلك تحتسب النسبة الحرارية (thermal ratio) أو الفعالية (Effectiveness) (λ_{reg}) للمدتين وكما يأتي:

$$\lambda'_{reg} = \frac{t'_{fi} - t'_{fo}}{t'_{fi} - t''_{fi}} \quad \dots(20)$$

$$\lambda''_{reg} = \frac{t''_{fo} - t''_{fi}}{t'_{fi} - t''_{fi}} \quad \dots(21)$$

حساب العوامل الداخلة في التحليل

حسابات الصفيحة المتموجة:

المساحة السطحية الكلية للصفائح (الجزء الساخن او الجزء البارد) = مساحة المقطع الكلية × عدد الصفائح × نسبة التموج × الارتفاع × عدد الأوجه
حيث أن: نسبة التموج : هي المساحة الزائدة نتيجة التموج = ١,١ (Anzelius et al.,1929).
المساحة السطحية الكلية = المساحة السطحية للجزء البارد + المساحة السطحية للجزء الساخن
الكتلة الكلية للصفائح في الجزء (الساخن أو البارد) = [المساحة السطحية للجزء (الساخن او البارد) × السمك × الكثافة] / ٢

الكتلة الكلية للصفائح = الكتلة الكلية للصفائح في الجزء الساخن + الكتلة الكلية للصفائح في الجزء البارد

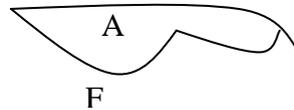
حساب مساحة مقطع الجريان:

تمثل مساحة مقطع الجريان (٣٥,٠%) من مساحة المقطع الكلية للمسخن البالغة (٥١,١٥ m²) وذلك حسب المعلومات التصميمية للمحطة، حيث إن الصفيحتان المتموجتان احدهما متموجة بشكل خطي والأخرى بشكل موجة جيبية (Anzelius et al.,1929).
 $A_f = (51.15 * 0.35) / 2 = 8.95 \text{ m}^2$

حساب القطر الهيدروليكي:

يمكن حساب القطر الهيدروليكي لحشوة معيد التسخين لكلا الصفيحتين المتموجتين كما في الشكل واستناداً على قياس مساحة الجريان وطول المحيط المبطل، من المعادلة الآتية (Hausen,1983):

$$D_h = \frac{4 * A}{F}$$



حيث ان A : تمثل مساحة مقطع الجريان (م^٢). F : يمثل طول المحيط المبتل (م).
حساب معامل انتقال الحرارة:

يمكن حساب قيمة معامل انتقال الحرارة لغازات العادم ولهواء الاحتراق لكل من الجانبين الساخن والبارد بعد تحديد رقم رينولدز وعدد نسلت وباستخدام خواص غازات العادم وهواء الاحتراق عند متوسط درجة الحرارة في الدخول والخروج، والمبينة في الجدول ١، من

$$G = \frac{\dot{m}}{A_f} \quad \text{العلاقات الآتية (محطة، ٢٠٠٤):}$$

$$Re = \frac{G \cdot D_h}{\mu}$$

$$Nu = 0.036 Re^{0.8} Pr^{0.33} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0.14} \left(\frac{D_h}{L} \right)^{0.054}$$

$$\bar{h} = \frac{k \cdot Nu}{D_h}$$

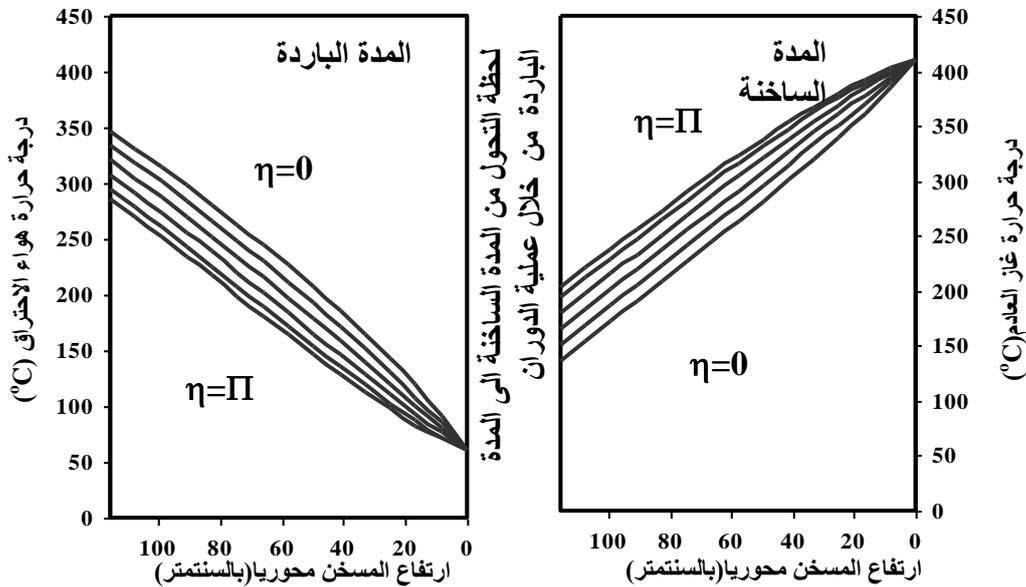
جدول ١ : يبين خواص الهواء وغازات العادم

غاز عادم (165 ⁰ C)	غاز عادم (410 ⁰ C)	هواء (340 ⁰ C)	هواء (60 ⁰ C)	الخاصية/المائع
٠,٧٧	٠,٦١٤	٠,٦٧٥	٠,٩١٦	الكثافة/kg/m ³
١١٠١,١٤	١١٣٣,٨٢	١٠٣٩,٥	١٠٢٢	الحرارة النوعية (kJ/kg.K)
٠,٠٣٧٢٣	٠,٠٤٥٢	٠,٠٣٩٢٥	٠,٠٣٠٧	الموصلية الحرارية (W/m ² .K)
24*10 ⁻⁶	28.351*10 ⁻⁶	27*10 ⁻⁶	21.67*10 ⁻⁶	اللزوجة (m ² /s)
٠,٧١	٠,٧١	٠,٧١	٠,٧١	عدد برا ننتل

النتائج والمناقشة

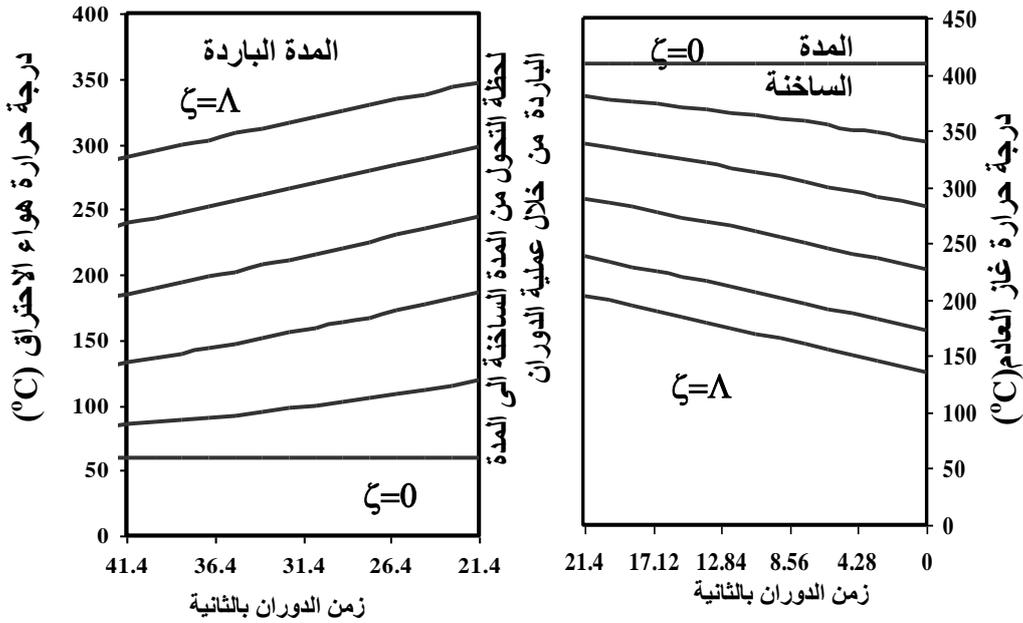
تم إيجاد توزيع درجات الحرارة لغازات العادم وهواء الاحتراق والكتلة الخازنة للحرارة (الحشوة)، من خلال الحل النظري (theoretical solution) للمعادلات التفاضلية المسيطرة على أداء مسخن الهواء بالاستعانة بالبيانات الحقيقية لمحطة التوليد، والأشكال من رقم (٤) إلى (٧) توضح توزيع درجات حرارة غازات العادم وهواء الاحتراق والكتلة الخازنة (حشوة المسخن) لمدتي التسخين والتبريد للحالة التصميمية للمحطة، ويلاحظ من الأشكال إن معدل درجة حرارة خروج غازات العادم من مسخن الهواء بلغت (169.5⁰C) في حين إن درجة الحرارة التصميمية هي (165⁰C) أي بانحراف قدره (٣%) ، وإن معدل درجة حرارة خروج هواء الاحتراق من مسخن

الهواء بلغت (326°C) في حين إن درجة الحرارة التصميمية هي (340°C) ، أي بانحراف قدره (4%)، كما بلغت فعالية المسخن (0.6689) لمدة التسخين، و (0.7823) لمدة التبريد. كما يوضح الشكل (٤) توزيع درجات الحرارة في حالة التوازن لغازات العادم وهواء الاحتراق مع الزمن ضمن المسافات المختلفة من دخول المائعين لمدتي التسخين والتبريد على الترتيب، ويلاحظ تغير درجات حرارة غازات العادم خطياً في مدة التسخين باتجاه الدوران بنسبة تصاعدية كمعدل حدود (7%) وبنسبة تناقصية كمعدل حدود (12%) في مدة التبريد. بينما يبين الشكل (٥) توزيع درجات الحرارة في حالة التوازن لغازات العادم وهواء الاحتراق مع الزمن ضمن المسافات المختلفة من دخول المائعين لمدتي التسخين والتبريد على الترتيب، ويلاحظ هنا تغير درجات حرارة غازات العادم خطياً في مدة التسخين باتجاه الدوران بنسبة تصاعدية كمعدل حدود (8%) وبنسبة تناقصية كمعدل حدود (13%) في مدة التبريد باتجاه الدوران. بينما الشكل (٦) يوضح توزيع درجات الحرارة وبصورة متناظرة في حالة التوازن للكتلة الخازنة للحرارة مع المسافة الطولية لحشوة المسخن ضمن المراحل المختلفة للزمن لمدتي التسخين والتبريد، ويلاحظ من الشكل إن درجات حرارة كتلة الحشوة الخازنة للحرارة تتغير خطياً تقريباً في مدة التسخين باتجاه جريان غازات العادم بنسبة تناقصية كمعدل حدود (68%) وبنسبة تصاعدية كمعدل حدود (21%) في مدة التبريد باتجاه جريان هواء الاحتراق. أما الشكل (٧) فيوضح توزيع درجات الحرارة وبصورة متناظرة في حالة التوازن للكتلة الخازنة للحرارة مع الزمن ضمن المسافات المختلفة من دخول غازات العادم وهواء الاحتراق لمدتي التسخين والتبريد على الترتيب، ويتضح من الشكل بان درجات حرارة الكتلة الخازنة للحرارة تتغير خطياً في مدة التسخين باتجاه الدوران بنسبة تصاعدية كمعدل حدود (17%)، وبنسبة تناقصية كمعدل حدود (14%)، في مدة التبريد باتجاه الدوران، إذ تتماثل درجات الحرارة للكتلة الخازنة للحرارة في نهاية مدة التسخين وبداية مدة التبريد وكذلك في نهاية مدة التبريد وبداية مدة التسخين.

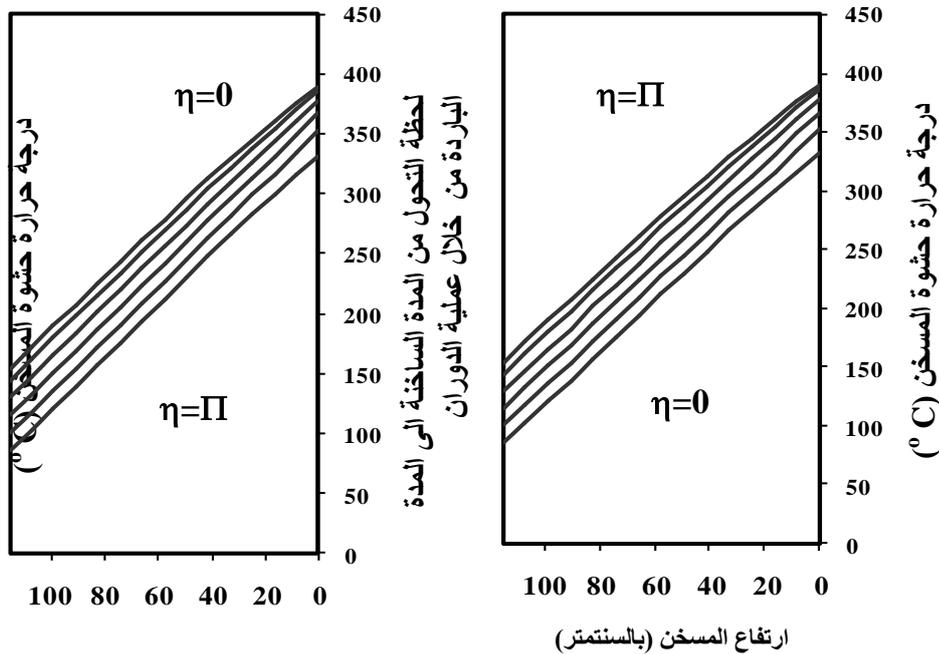


شكل 4 : يبين توزيع درجات الحرارة للمائعين على طول المسخن

لقيم مختلفة من زمن الدوران وللمدتين الساخنة والباردة

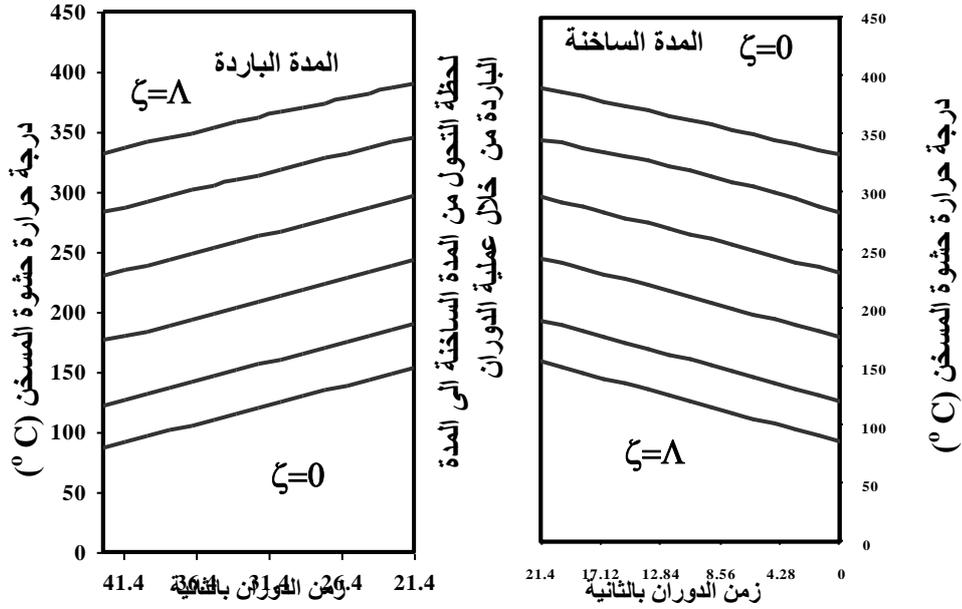


شكل 5 : يبين توزيع درجات الحرارة للمائع مع زمن الدوران ولمسافات محورية مختلفة من المسخن و للمدتين الساخنة والباردة



شكل 6 : يبين توزيع درجات حرارة حشوة المسخن مع المسافة المحورية للمسخن ولفترات زمنية مختلفة و للمدتين الساخنة والباردة

ارتفاع المسخن (بالسنتمتر)



شكل ٧ : يبين توزيع درجات حرارة حشوة المسخن مع زمن الدوران ولمسافات محورية مختلفة من المسخن وللمدتين الساخنة والباردة

الاستنتاجات

من خلال نتائج البحث يمكن الاستنتاج بان التحليل يمكن تطبيقه على معيد التسخين الدوار في محطة توليد الطاقة الكهربائية لدراسة العوامل المؤثرة عليه كما يمكن من خلاله دراسة مشاكل هذه المسخنات وإمكانية حلها من خلال هذا الحل. ومن ذلك يلاحظ إن تقارباً جيداً مع النتائج الحقيقية حيث بلغت نسبة الخطأ في درجة حرارة هواء الاحتراق الخارج (٣%) ودرجة حرارة غاز العادم (٤%)، وعليه يمكن استخدام هذا الحل في دراسة العوامل المؤثرة على عمل معيد التسخين بهدف الوصول إلى أفضل عمل له.

التوصيات

بهدف المساهمة في رفع أداء مسخن الهواء، يمكن استنباط التوصيات الآتية:

١. دراسة فكرة تطوير منظومة تنظيف مسخن الهواء.
٢. تصميم برنامج حاسبي يمكن من خلاله حساب عوامل أداء المسخن.
٣. دراسة إمكانية تصميم حشوة المسخن.

الملحق (أ)

المعاملات اللابعدية (ζ) و (η):

$$d\zeta = \frac{\bar{h} \cdot \Delta B}{C_f d\dot{m}_f} dx$$

$$dA_{c.v} = \Delta B \cdot dx$$

المعادلة رقم (٣):

$$d\zeta = \frac{\bar{h} \cdot dA_{c.v}}{C_f d\dot{m}_f}$$

$$\zeta = \int_0^L \frac{\bar{h} dA_{c.v}}{C_f d\dot{m}_f}$$

$$\int_0^L dA_{c.v} = dA = \Delta B \cdot L$$

وبما ان:

$$\therefore \zeta = \frac{\bar{h} dA}{C_f d\dot{m}_f}$$

إذا كان (n_z) تمثل عدد التقسيمات او المقاطع في اتجاه معين، فان :

$$dA = \frac{A}{n_z} , \quad d\dot{m}_f = \frac{\dot{m}_f}{n_z}$$

$$\therefore \zeta = \frac{\bar{h} \cdot A}{C_f \dot{m}_f}$$

وكذلك:

$$d\eta = \frac{\bar{h} \cdot \Delta B \cdot dx}{C_m dM_{m.c.v}} d\tau \Rightarrow d\eta = \frac{\bar{h} \cdot dA_{c.v}}{C_m dM_{m.c.v}} d\tau$$

$$dA = dA_{c.v} \cdot L , \quad dM_m = dM_{m.c.v} \cdot L$$

وبما ان:

$$dA = \frac{A}{n_z} , \quad dM_m = \frac{M_m}{n_z}$$

$$\therefore d\eta = \frac{\bar{h} \cdot dA}{C_m \cdot dM_m} d\tau \Rightarrow \eta = \int_0^L \frac{\bar{h} \cdot A}{C_m \cdot M_m} d\tau \Rightarrow \eta = \frac{\bar{h} \cdot A}{C_m \cdot M_m} \tau$$

References

- Anzelius ,A.Uber erwarmung vermittelt durchstromender medien,Z angew.,(1929): Math.Mech; pp: 201-204..
- Al-Said M.M.,(2000): A Theoretical Study to Improve the Performance and Life of Air Heaters Associated with Steam Boilers, M.Sc.Thesis, Baghdad University.
- Boyen ,J.L.,(1975): Practical heat recovery. A Wiley interscience publication. John Wiley and Sons. New York.
- Chudnovskaya I. and Others,(1984):Thermal resistance of Internal Tube deposits during boiler, Thermal Engineering, Vol.31.
- Frankovic,B.,(1993): Heat transfer analysis in dry rotary heat exchanger, Strojarstove 35,pp.111-120.
- Hausen, Helmut., (1983) : Heat Transfer in Counter Flow, Parallel Flow, and Cross Flow, McGraw-Hill, New York.
- Nsselt ,W., Der Beharrungszultard., (1928); Winderhitzen. Z. ver. Dtsch. Ing. pp: 1052. 1054.
- Ray .C. Wylie, Louis C. Barrett.,(1982): Advanced Engineering Mathematics, McGraw-Hill Int. Book Company.
- Schmidt F.W.and Willmott, A.L.(1981):Thermal Energy Storage and Regenerative.

المصادر

- محطة كهرباء بيجي الحرارية،(٢٠٠٤) : بيانات تصميمية ما خوزه من مستندات الشركة الايطالية المصنعة للمحطة،زيارة موقعيه.

الرموز المستخدمة

الرمز	التعريف	الوحدة
A	المساحة السطحية الكلية للجزء الدوار	م ^٢
A _f	مساحة مقطع الجريان للمائع	م ^٢
B	الطول الكلي لمعدن الحشوة ولجانبيين لكل فترة	م
C _m	الحرارة النوعية لمعدن الحشوة الخازن للحرارة	جول/كغم.°م
C _f	الحرارة النوعية للمائع	جول/كغم.°م
D	القطر	م
D _h	القطر الهيدروليكي	م
f	معامل الاحتكاك	-
F	الطول الكلي للمحيط المبث	م
\bar{h}	معامل انتقال الحرارة .	واط/م ^٢ .°م
I ₀	دالة (Bessel) المحسنة	-
J ₀	دالة (Bessel)	-
k	الموصلية الحرارية	واط/م.°م
L	طول المسترجع	م
M _m	كتلة مادة الحشوة	كغم
\dot{m}	التدفق الكتلي للمائع	كغم/ثانية
P	المدة الزمنية للفترة	ثانية
Q	الحرارة المنتقلة	جول
R	نصف قطر المجدد الدوار	م
r	نصف قطر للمسافة القطرية	م
v	السرعة	م/ثانية
s	يمثل الموقع الزمني على شبكة الفرق المحدد	م
t	درجة الحرارة	م°
x	المسافة المحورية من مدخل المائع الساخن	م

-	عدد التقسيمات باتجاه (x)	n_1
-	عدد التقسيمات باتجاه (s)	n

الرموز اللاتينية	التعريف	الوحدة
μ	اللزوجة الديناميكية	كغم/م.ثانية
ω	السرعة الزاوية	دورة / ثانية
ρ	الكثافة	كغم / م ^٣
τ	الزمن	ثانية
ζ	المسافة المحورية اللابعدية	-
η	الزمن اللابعدي	-
λ_{reg}	فعالية المسترجع	-
Π	الفترة المقننة الكلية (معامل لابعدي)	-
Λ	الطول المقنن الكلي (معامل لابعدي)	-
الرموز العلوية	التعريف	
'	إشارة إلى الفترة الحارة	-
"	إشارة إلى الفترة الباردة	-
الرموز التحتية	التعريف	
f	يشير إلى المائع	-
m	يشير إلى الحشوة المعدنية	-
i	يشير إلى الدخول	-
o	يشير إلى الخروج	-
c	الحرارة المنقولة بالحمل	-
c.v.	الحجم المسيطر	-
المجموعة اللابعدية	التعريف	المجموعة اللابعدية
	التعريف	

عدد بكانت	$Pe = Re Pr$	عدد بايوت	$Bi = \frac{\bar{h} \left(\frac{V}{A} \right)}{k}$
عدد برانتل	$Pr = \frac{Cp\mu}{k}$	عدد نسلت	$Nu = \frac{\bar{h}D}{k}$
رقم رينولد	$Re = \frac{\rho vD}{\mu}$		

Theoretical study of a Rotary Regenerator in a Thermal Power Plant

Wadhah H. Abdul-Razaq
Foundation of Technical Education\Al-Dour Institute

Received:16/10/2007, Accepted:2/4/2009

Abstract

In this research, the rotary regenerator is analyzed by solving government differential equations of heat transfer in the regenerator analytically and comparing the results with the designed data in order to study the performance of the rotary regenerator. In solving these equations, several assumptions have been considered; the most important are the constant temperature for both fluids at the inlet and the unchangeability of mass flow for each with the negligible of longitudinal heat transfer in flow direction. The results have shown good approach to the designed data. The percentage of error of the temperature of air combustion is (3%) and for flue gas temperature (4%). So, it can be said that this model can be used for studying the effective parameters on the work of the regenerator in order to reach the best performance of the regenerator.