تعيين پارامترهاي انتقال حرارت با استفاده از داده هاي آزمايشگاهي و حل تحليلي به روش تقريبي تغيير شكل محدود انتگرال براي شكل هاي هندسي منظم

محمد رضا طلاقت*[۱] و عبدالحسين جهانميري[۲]

[۱] دانشجوي دكتري بخش مهندسي شيمي - نفت وگاز - دانشكده مهندسي - دانشگاه شيراز

[۲] استاد بخش مهندسي شيمي - نفت وگاز - دانشكده مهندسي - دانشگاه شيراز

(تاریخ دریافت ۸۴/۷/۹ ، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۴/۱۲/۷ ، تاریخ تصویب ۸۵/۱۲/۱۲)

چکیده

مقاله حاضر نتیجه یک کار پژوهشی جهت تخمین ضریب انتقال حرارت و نفوذ حرارتی با استفاده از داده های آزمایشگاهی و حل تحلیلی برای شکل های هندسی منظم(استوانه نامحدود ، صفحه نامحدود وکره)می باشد. روشهای تحلیلی برای شکل های هندسی منظم استفاده وسیعی در تعیین آزمایشگاهی این پارامترها دارند. . این حل های تحلیلی با استفاده از داده های آزمایشگاهی ، فواید بیشتری نسبت به سایر روشهای دیگر برای نمونهروش انباشته یا معادلات تجربی دارد.دراین پژوهش از روش تقریبی تغییر شکل محدود انتگرال جهت حل تحلیلی معادلات دیفرانسیل استفاده شد. تغییرات دما در خط مرکزی میله هایی از جنس آلومینیم و برنجی در آب ۴۴ درجه سانتیگراد همراه با عمل همزدن سریع جهت تعیین ضریب نفوذ حرارتی وهمچنین تعیین ضریب انتقال حرارت در محیط های آب وهوا ثبت شد. سپس با دانستن شیب منحنی های نسبت دما بدون بعد بر حسب زمان و شعاع میله مورد آزمایش ،ضریب نفوذ حرارتی و یا ضریب انتقال حرارت با استفاده از رابطه داده شده جهت عدد بیوت در این زمینه تعیین گردید. همه آزمایشهانشان داد که نتایج آزمایشگاهی با اطلاعات داده شده در منابع همخوانی دارد . این روش همچنین برای پیدا کردن مکان هندسی دقیق ترموکوپل هایی که برای اندازه گیری تغییرات دمایی در نمونه جای گذاری می شوند، بکار می روند. دراین تحقیق محل قرار گرفتن ترموکوپل نیز برای یک جسم کروی تعیین گردید. این روش در مقایسه با دیگر روشها ساده تر و سریعتر می باشد.

واژه های کلیدی: حل تحلیلی - پارامترهای انتقال حرارت - روش تقریبی تغییر شکل محدود انتگرال - ضریب انتقال حرارت - ضریب نفوذ حرارتی

مقدمه

ضریب انتقال حرارت و نفوذ حرارتی پارامترهایی هستند که در بسیاری از صنایع ، برای مشخص کردن ، مدل نمودن عملیات فرآیند ی مهم می باشند. نفوذ حرارتی ($\alpha = k/\rho C_p$) جزء خواص ماده است و مخصوصا ترکیب محصول و دمای فرآیند تحت تاثیر این ویژگی قرار می گیرند. از طرفی دیگر ضریب انتقال حرارت (h) وابسته به خواص فیزیکی- حرارتی محیط، ویژگی های محصول (اندازه، شکل، دمای سطح وزبری سطح)، خواص جریان سیال (سرعت و ناآرامی) وابزار انتقال حرارت بستگی دارد[۱]. با دانستن اینکه ،اطلاعات بیشماری در متن برای مشخص کردن این ویژگی ها (روابط بیشماری از عدد ناسلت[۱] به عنوان تابعی از رینولدز[۲] و پرانتل[۳]) وجود دارند، یافته های آزمایشگاهی برای نشان دادن پارامترهای فرآیند مهم می باشند. امکان دیگر، استفاده از داده های آزمایشگاهی دما - زمان برای مشخص کردن این پارامترها می باشد. برای نمونه یک روش تجربی در مطالعات انتقال حرارت، روش سیستم انباشته[۴] برای تعیین ضریب انتقال حرارت است ، با دانستن اینکه این روش فرآیند واقعی را بدلیل استفاده از مواد با رسانایی گرمایی بالا (مثل مس و آلومینیم)نشان نمی دهد ،به دیگر روشها ترجیح داده می شود. روشهای تحلیلی برای شکل های هندسی منظم (استوانه نامحدود ، صفحه نامحدود وکره) با شرایط مرزی و اولیه همراه با داده هایی که توسط آزمایش بدست می آیند،برای تعیین این ویژگی ها از طریق آزمایش استفاده می شوند.در واقع استفاده صحیح از راه حل های تحلیلی همراه با داده های بدست آمده از طریق آزمایش ممکن است فواید بیشتری نسبت به سایر روشهای دیگر برای نمونه روش انباشته یا معادلات تجربی دارد. این روش همچنین برای پیدا کردن مکان هندسی دقیق ترموکوپل هایی که برای اندازه گیری تغییرات دمایی در

* نویسنده مسئول : تلفن : ۸۲۲۳۶۷۳ – ۰۷۱۱ ، فاکس : ۲۳۰۳۰۷۱ – ۰۷۱۱ ، Email: talaghat@shirazu.ac.ir

نمونه جایگذاری می شوند، بکار می رونـد در واقـع، مکـان دقیـق ترموکوپـل هـا در مطالعـات ارزشـمندتر از تعیـین پارامترهای انتقال حرارت میباشد.

بنابراین هدف ازاین مطالعه، توضیح روشـهایی اسـت کـه برای استفاده از راه حل های تحلیلی شکل هـای هندسـی منظم همراه با داده های آزمایشگاهی برای مشخص کردن پارامترهای انتقال حرارت و مکان ترموکوپل، یعنـی جـایی که اندازه گیری دما انجام می شود بکار می روند.

پیش نیاز رياضي

معـادلات دیفرانسـیل مورداسـتفاده وحـل آن بـرای شکل- های هندسی منظم نا محدود با شرط اولیه توضیح یکنواخت دما وشرط مرزی رسـانش سـطح در زیـر داده شده است .

معادله دیفرانسیل بصورت زیر می باشد :

$$(1/x^n).(\partial/\partial x)[x^n.(\partial T/\partial x)] = (1/\alpha).(\partial T/\partial t) \tag{۱}$$

که در این معادله T دما ، x مکان مشخص کردن دمـا در هندسه مورد نظر و فاصله آن از مرکـز (برحسـب متـر m)، n یک عدد مشخصه می باشد (صفر برای صفحه نـا محدود ، یک برای استوانه نا محدود و ۲ بـرای کـره) و α نفوذ حرارتی را نشان مـی دهـد. روش حـل معادلـه (۱) و جوابهای حاصـل از آن ، بـا شـرایط اولیـه توزیـع دمـا ی یکنواخت و شرط مـرزی تقـارن مرکـزی و مـرز رسـانا در سطح، برای این شکلهای هندسی منظم در زیر آورده شده است [۲].

استفاده از روش تغییرشکل محدود انتگـرال جهت حل معادلات دیفرانسیل پاره اي[۳]

روش تغییرشـکل محـدود انتگـرال[5] جهـت حـل معادلات دیفرانسیل پاره ای روشی است که مربوط به یک نماد می گردد که معادله دیفرانسیل اولیه را بـه یـک نـوع دیگر (مانند روش لاپلاس) تغییر شـکل داده بطـوری کـه حل آن ساده تر گردد. جهت بدست آوردن مقدار عملـی و کاربردی آن مجددا باید به فضای اولیه برگشت داده شـود. این عملیات تغییر شکل معکوس همراه بانماد اولیه ، آن را زوج تغییرشکل انتگرال[6] می نامند. یکی از راه هـایی کـه جهت تشریح زوج تغییرشکل در کارعملی وکاربردی به آن توجه می شود ، مسائل انتقال حـرارت بوسـیله هـدایت بـا استفاده از قانون فوریـه[7] بـرای شـکلهای هندسـی مـنظم است. مـا در اینجـا بـه کـاربرد روش تغییرشـکل محـدود انتگرال، جهت مسائل انتقـال حـرارت بوسـیله هـدایت در حالـت گـذرا بـرای یـک صـفحه، اسـتوانه و کـره توجـه می نماییم.

معادله اولیه بصورت زیر است :

$$l/\alpha\ (\partial T/\partial t) = L/x^n\ (\partial/\partial x)\ [x^n (\partial T/\partial x)] \quad 0<x<1 \tag{۲}$$

شرط اولیه و شرایط مرزی برای این معادله دیفرانسیل بۀ صورت زیر است :

$$t = 0 \quad \text{at} \quad T = T_i \tag{۳}$$

$$x = 0 \quad \text{at} \quad \partial T/\partial x = 0 \tag{۴}$$

$$x = 1 \quad \text{at} \quad \partial T/\partial x = Bi\ (T_\infty - T) \tag{۵}$$

دراین معادله n یک عدد مشخصه یا فاکتور شـکل اسـت که صفر برای صفحه نامحدود ، یک برای استوانه نا محدود و ۲ برای کره می باشد. همچنین اگر به شرط مـرزی (۵) توجه نماییم، ملاحظه می شود که این یک شرط مرزی نـا همگن است و باید شرایط مـرزی بـه نـوع همگـن تبـدیل گردد. بنابراین نیاز است که مسـئله درحالـت پایـدار حـل شود:

$$1/x^n\ (\partial/\partial x)\ [x^n (\partial u/\partial x)] = 0 \tag{۶}$$

با شرایط مرزی :

$$x = 0 \quad \text{at} \quad \partial T/\partial x = 0 \tag{۷}$$

$$x = 1 \quad \text{at} \quad \partial T/\partial x = Bi\ (T_\infty - T) \tag{۸}$$

حل معادله دیفرانسیل (۶) ساده است و برابر است با:

$$T = T_\infty \tag{۹}$$

درواقع متغییر جدید θ بصورت زیر تعریف می شود:

$$\theta = T_\infty - T \tag{۱۰}$$

اگر معادله (۱۰) را در معادله (۲) قراردهیم، معادله (۱۱) بصورت زیر بدست مي آید :

$$(\partial\theta/\partial t) = 1/x^n\ (\partial/\partial x)\ [x^n (\partial\theta/\partial x)] \tag{۱۱}$$

$$t = 0 \quad \text{at} \quad \theta = \theta_i \tag{۱۲}$$

$x = 0 \quad \text{at} \quad \partial \theta / \partial x = 0$

(۱۳)

$x = 1 \quad \text{at} \quad \partial \theta / \partial x + Bi \,.\, \theta = 0$

(۱۴)

اکنون می توان از معادله (۱۱) همراه با شرایط اولیه و مرزی همگن (۱۲) تا (۱۴) به آسانی جهت حل معادله با روش تغییرشکل محدود انتگرال استفاده نمود. روش تغییرشکل محدود انتگرال به صورت زیر است:

$$\langle \theta, K_n \rangle = \int_0^1 x^n \theta(x,t) K_n(x) dx$$

(۱۵)

جایی که تابع کرنل[۸] از معادلات زیر بدست آمده است :

$\mathbf{L}\, K_n(x) + (\lambda_n)^2 K_n(x) = 0$

(۱۶)

$x = 0 \quad \text{at} \quad \partial K_n / \partial x = 0$

(۱۷)

$x = 1 \quad \text{at} \quad \partial K_n / \partial x + Bi \,.\, K_n = 0$

(۱۸)

حل معادله به آسانی برای θ بصورت زیر است

$$\theta = \sum_{n=1}^{n} \theta_i \langle 1, K_n \rangle \exp(-\lambda_1^2 \frac{\alpha}{L^2} t) \frac{K_n}{\langle K_n, K_n \rangle}$$

(۱۹)

و بنابراین :

$$\frac{\theta}{\theta_i} = \sum_{n=1}^{n} \langle 1, K_n \rangle \exp(-\lambda_1^2 \frac{\alpha}{L^2} t) \frac{K_n}{\langle K_n, K_n \rangle}$$

(۲۰)

برای شکلهای هندسی منظم مختلف، روابط برای $K_n(x)$, λ_n , $< 1 , K_n >$, $<K_n(x), K_n(x)>$ به صورت زیر است:

برای صفحه نامحدود

$K_n(x) = \cos(\lambda_n x)$

(۲۱)

$\lambda_n \sin(\lambda_n) = Bi \cos(\lambda_n)$

(۲۲)

$< 1 , K_n > = \sin(\lambda_n) / \lambda_n$

(۲۳)

$<K_n , K_n> = ½ [1+ \sin^2(\lambda_n) / Bi]$

(۲۴)

برای استوانه نامحدود

$K_n(x) = J_o(\lambda_n x)$

(۲۵)

$\lambda_n J_1(\lambda_n) = Bi\, J_o(\lambda_n)$

(۲۶)

$< 1 , K_n > = J_1(\lambda_n) / \lambda_n$

(۲۷)

$<K_n , K_n> = ½\, J_1^{\,2}(\lambda_n)\; [1+ (\lambda_n / Bi)^2]$

(۲۸)

برای کره:

$K_n(x) = \sin(\lambda_n x) / x$

(۲۹)

$\lambda_n \cos(\lambda_n) = (1- Bi) \sin(\lambda_n)$

(۳۰)

$< 1 , K_n > = [\sin(\lambda_n) - \lambda_n \cos(\lambda_n)] / (\lambda_n)^2$

(۳۱)

$<K_n , K_n> = ½ [1+ \cos^2(\lambda_n) / (Bi – 1)]$

(۳۲)

و نهایتا نسبت دما ی بدون بعدبرای شکلهای هندسی منظم به صورت زیر می باشد :

برای صفحه نا محدود

$$\psi = \frac{T - T_\infty}{T_i - T_\infty} = \sum_{n=1}^{\infty} [\frac{2.\sin\lambda_n}{\lambda_n + \sin\lambda_n.\cos\lambda_n}.\cos(\lambda_n.\frac{x}{L}).\exp(-\lambda_n^2.Fo)]$$

(۳۳)

برای استوانه نا محدود

$$\psi = \frac{T - T_\infty}{Ti - T_\infty} = \sum_{n=1}^{\infty} [\frac{2}{\lambda_n} \cdot \frac{J_1(\lambda_n)}{J_0^2(\lambda_n) + J_1^2(\lambda_n)} .J_0(\lambda_n.\frac{r}{R}).\exp(-\lambda_n^2.Fo)]$$

(۳۴)

برای کره

$$\psi = \frac{T - T_\infty}{T_i - T_\infty} = \sum_{n=1}^{\infty} [\frac{2.(\sin\lambda_n - \lambda_n.\cos\lambda_n)}{\lambda_n - \sin\lambda_n.\cos\lambda_n}.\frac{\sin(\lambda_n \frac{r}{R})}{\lambda_n.\frac{r}{R}}.\exp(-\lambda_n^2.Fo)]$$

(۳۵)

در اینجا Fo ($Fo= \alpha \; t/ \zeta^2$) عدد فوریه[۹] (ζ همان L است برای صفحه نامحدود که نصف ضخامت آن می باشد و برابربا R شعاع استوانه یا کره نیز است، α نشان دهنده نفوذ حرارتی یا ضریب نفوذ است و λ_n ها ریشه های معادلات(۳۶)تا (۳۸)می باشند .

برای صفحه نا محدود :

$Bi = \lambda \,.\, \tan\lambda$

(۳۶)

برای استوانه نا محدود :

$Bi = \lambda \,.\, J_1(\lambda) / J_o(\lambda)$

(۳۷)

برای کره

$$Bi = 1 - (\lambda / \tan\lambda)$$

(۳۸)

که در این معادلات Bi ($Bi = h\,\zeta / k$) عـدد بیـوت[۱۰] اسـت. J_0 و J_1 توابـع بسـل[۱۱] از درجـه صـفر و یـک می باشد. در محاسبا ت مربوط به انتقال حرارت ، استفاده از معادلات (۳۳) تا (۳۵) کفایـت مـی کنـد چـون کـه تغییرات دمایی در مکان خاص در شکل مـورد نظـر مـورد نیاز است ویا از طریق آزمایش بدست می آیـد . همـانطور که از معادلات (۳۳) تا (۳۵) دیده می شود، دانستن اینکه در بدست آوردن یک جواب دقیـق چنـد جملـه از سـری نامحدود مورد نیاز است مهـم مـی باشـد. در حالـت کلـی هنگامی که عدد فوریـه بزرگتـر از ۰/۲ باشـد تنهـا اولـین جمله کفایت می نماید چون تغییرات کسر حرارتی بعداز آن زمان خاص خطی است. تا هنگامی کـه نفـوذ حرارتـی ثابت باشد روش بکار بـردن اولـین جملـه بـرای مشـخص کردن این پارامترها با دانستن مقدار ضریب انتقال حرارت به آسانی بکار برده می شود.

روش تعیین ضریب نفوذ حرارتي ثابت

فرض می کنیم تغییرات دما در ناحیه محـور طـولی در یک جسم استوانه ای (از جنس آلـومینیم ویـا بـرنج بـا قطر ۵/۰۸ سانتی متر) در یک ظرف حاوی آب بـا دمـای ۴۲ درجه سانتیگراد که خوب بهم زده شده برای مشـخص کردن ضریب نفوذ حرارتی ثبت شده است. بدلیل هم زدن تنـد ، ضـریب انتقـال حـرارت و بـه دنبـال آن عـدد بیوت(Bi) نا محدود فرض مـی شـوند. سـپس ریشـه های معادله (۳۷)، وقتی کـه عـدد Bi نامحـدود باشـد ، بـرای یـک اسـتوانه نامحـدود برابـر بـا (۲/۴۰۴۸ ، ۵/۵۲۰۰ ، ۸/۶۵۳۷ و..........) است . همچنـین ایـن ریشه ها برای یک صفحه نامحدود برابر بـا ($\pi/2$, $3\pi/2$, $5\pi/2$, ….) و برای یک کـره برابـر بـا (π ، 2π ، 3π و........) بدسـت مـی آیـد . بـدلیل اینکـه نسـبت دمـایی ($(T - T_\infty)/(T_i - T_\infty)$) بعـد از زمـان خاصی خطی می شود، برای استوانه ، اولین جمله معادله (۳۴) برای مشخص کردن تغییرات خطـی در آن ناحیـه استفاده می شود. هنگامی که از طـرفین معادلـه (۳۴) بـا استفاده از یک جمله لگاریتم طبیعی گرفته می شود معادله زیر بدست می آید.

$$\ln[\frac{T - T_\infty}{T_i - T_\infty}] = A_1 - \frac{\lambda_1^2.\alpha}{R^2}.t = A_1 - \frac{(2.4048)^2.\alpha}{R^2}.t$$

(۳۹)

که در این معادله داریم :

$$A_1 = \ln[\frac{2.J_1(\lambda_1)}{\lambda_1.[J_0^2(\lambda_1) + J_1^2(\lambda_1)}.J_0(\lambda_1 \frac{r}{R})$$

(۴۰)

همانطور که از معادله (۳۹) دیده می شـود شـیب m مربوط به نسبت دما بر حسب زمـان برابـر بـا $m = -\frac{\lambda_1^2\alpha}{R^2} = [(2.4048)^2 \frac{\alpha}{R^2}]$ است .

سپس با دانستن شیب وشعاع استوانه مقدار نفوذ حرارتی تعیین می شود. همانطور که مشخص است در این روش نیاز به دانستن مکانی که در آن داده ها ثبت می شوند نیست .

چون بدون توجه به مکان، منحنی های نسبت دمایی بعـد از این که خطی می شـوند دارای شـیب یکسـانی هسـتند [۴].

روش تعیین ضریب انتقال حرارت ثابت

ضریب انتقال حرارت را می تـوان در هـر محیطـی (مثلا آب ویا هوا) بوسیله راه حل های تحلیلی ، هنگامی که نفوذ حرارتی ماده معلوم باشد تعیـین نمـود. در ایـن حالــت بــا اســتفاده از شــیب منحنــی دمــایی بــر حسب زمان (m) ، مقدار λ_1 که برابـر بـا ($(-m/\alpha)^{0.5}$ $\lambda_1 = \zeta$) است تعیـین شـده و از آن مقـدار عـدد Bi بـا استفاده از معادله های (۳۶) تـا (۳۸) بـرای هـر یـک از شکلهای هندسی منظم محاسبه می شود و سپس ضریب انتقال حـرارت از روی عـدد بیـوت (Bi) کـه برابـر ($Bi = h\,\zeta / k$) است بدست می آید . البته ، علاوه بـر نفوذ حرارتی ، ضریب هدایت گرمایی مـاده آزمایشـی نیـز باید معلوم باشد. بـر خـلاف اسـتفاده راحـت از ایـن روش، شیوه عمومی ارائه شده در بالا، باید یـک ضـریب انتقـال حرارت نامحدود فرض نموده تا سپس بتوان ضریب نفـوذ حرارتی را تعیین کرد.

روش تعیین مکانهاي ترموکوپل

در مطالعــات انتقــال حــرارت دانســتن مکانهــای ترموکوپـل، جـایی کـه داده هـای آزمایشـگاهی بدسـت

می آیند، بسیار مهم است. چون یافتن جایی که نوک ترموکوپل قرار می گیرد آسان نیست، گرفتن اشعه X از ماده مورد نظر هنگامی که ترموکوپل هنوز در آن قرار دارد و سپس تعیین مکان آن یک روش معمول است[۵] . روش دیگر، بریدن ورقه های نازک از ماده تا هنگامی که به نوک ترموکوپل برسیم می باشد[۶]. هر دو روش به مدت زمان زیاد نیاز دارد و وقت گیر می باشد. روشهای تحلیلی شیوه دیگری جهت تعیین مکان ترموکوپل می باشد. مثلا ، اگر نسبت تغییرات دما بدست آمده در مکانهای مختلف (r/R =۰ ، r/R =۰/۵ و r/R =۰/۹۷) از یک جسم کره ای با شعاع ۳۰ میلیمتر را که در یک حمام آب گرم همراه با هم زدن همراه است ثبت گردد و نقاط برخورد سه منحنی دمایی با محور عمودی یادداشت شود می توان مکان ترموکوپل ها (r/R) را با استفاده از اطلاعات بدست آمده تعیین نمود . سپس با استفاده از معادله ای شبیه به معادله ۳۹ که درمورداجسام کروی صادق است (معادله ۴۱)و با استفاده ازرابطه خطی برای قسمت خطی منحنی ها، مکان هندسی ترموکوپل ها را تعیین می شود.

$$\ln[\frac{T-T_\infty}{T_i-T_\infty}] = A_1 - \frac{\lambda_1^2.\alpha}{R^2}.t = A_1 - \frac{\pi^2\alpha}{R^2}.t$$
(۴۱)

A_1 محل برخورد منحنی دمایی با محور عمودی می باشد و برای یک جسم کروی این مقدار برابر است با :

$$A_1 = Ln\ [\ 2 \sin (\pi\ r/R) / (\pi\ r/R)]$$
(۴۲)

اکنون با استفاده از روش نیوتن – رافسون ومعادله های زیر می توان مقدار r/R که همان معرف مکان ترموکوپل است را بدست آورد:

$$f(r/R) = 2 . \sin (\pi\ r/R) - (\pi\ r/R) .\exp (A_1)$$
(۴۳)

$$f'(r/R) = 2 . \pi . \cos (\pi\ r/R) - \pi\ .\exp (A_1)$$
(۴۴)

$$(r/R)_{n+1} = (r/R)_n - [f(r/R)/ f'(r/R)]$$
(۴۵)

مواد، وسایل و روش آزمایش

جهت تعیین ضریب انتقال حرارت و یا ضریب نفوذ حرارتی از مواد و وسایل زیر استفاده شد :

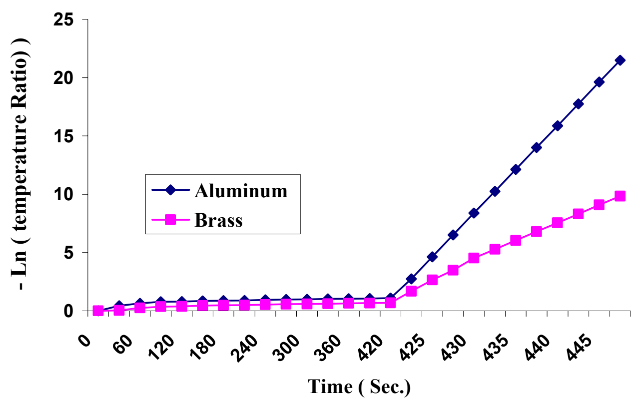
ا- یک میله آلومینیمی به قطر ۵/۰۸ سانتیمتر و به طول ۲۰ سانتیمتر که یک ترموکوپل جهت تعیین درجه حرارت در محور طولی استوانه به آن متصل است .
۲- یک میله برنجی به قطر ۵/۰۸ سانتیمتر و به طول ۲۰ سانتیمتر که یک ترموکوپل جهت تعیین درجه حرارت در محور طولی استوانه به آن متصل است .
۳- یک مخزن آب آستوانه ای به قطر ۷۰ سانتیمتر و ارتفاع ۶۰سانتمتر شامل یک المنت حرارتی
۴- یک همزن مکانیکی جهت بهم زدن و یکنواخت کردن دما در سرتاسر حمام آب
۵- سیم های ارتباطی، ترموکوپل و دماسنج دیجیتالی

روش آزمایش

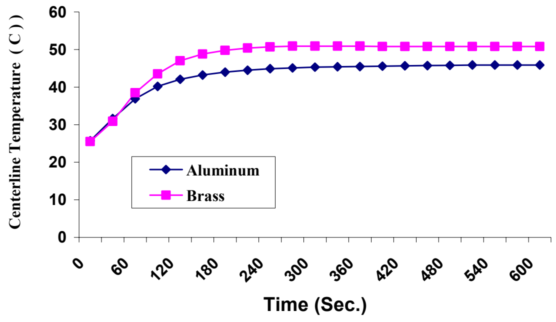
ابتدا مخزن را تا مقدار لازم پر از آب نموده و میله مورد نظر (مثلا میله آلومینیمی) را درون حمام قرارداده و سر دیگر ترموکوپل را به دماسنج دیجیتالی متصل کرده تا بوسیله آن دمای محور طولی د ر زمانهای مختلف خوانده شود. پس از آن المنت حرارتی را جهت گرم نمودن حمام آب روشن کرده تا در اثر گرم شدن آب بتدریج میله نیز گرم شود. دمای محور طولی میله بوسیله ترموکوپل متصل شده به آن از طریق دماسنج دیجیتالی در زمانهای مختلف یادداشت می گردد . این عمل ادامه یافته تا دمای میله دیگر بالاتر نرود. این روش نیز برای نمونه میله برنجی نیز تکرار می شود . با اطلاعات ذخیره شده منحنی نسبت دمایی بدون بعد نسبت به زمان رسم میگردد. به جای گرم نمودن میله ها می توان از سردن نمودن آنها نیز استفاده کرد بدین صورت که وقتی در مرحله بالا میله گرم شد المنت حرارتی را خاموش نموده و آب درون مخزن را با آب سرد تعویض کرده و درجه حرارت سرد شدن محور طولی استوانه در زمانهای مختلف یادداشت می شود. مشابه همین روش، برای وقتی که از هوا به جای آب استفاده می شود نیز برای نمونه های میله ای شکل تکار می گردد. همچنین جهت تعیین مکان ترموکوپل برای یک کره نیز مشابه روش بالا افت درجه حرارت در زمانهای مختلف برای شعاع های مختلف اندازه گیری می شود تا منحنی نسبت دمایی بدون بعد بر حسب زمان رسم گردد .

نتایج حاصل از آزمایش

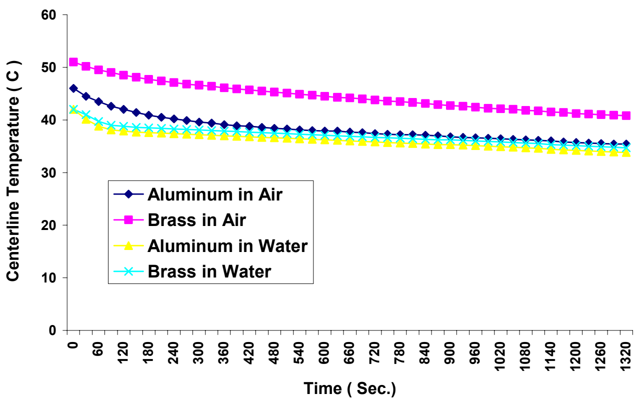
تغییرات دما در ناحیه محور طولی یا خط مرکزی در یک جسم استوانه ای تو پر از جنس آلومینیم ویا برنج با قطر ۵/۰۸ سانتیمتر در یک ظرف حاوی آب با دمای ۴۲ درجه سانتیگراد که خوب بهم زده شده برای مشخص کردن ضریب نفوذ حرارتی ثبت گردید. همانطوری که در شکل (۱) دیده می شود، شیب قسمت خطی منحنی برای استوانه آلومینیمی و برنجی به ترتیب برابر با ۰/۷۵ و ۰/۳۰۳ است. بنابراین با استفاده از رابطه داده شده برای شیب منحنی $m=-(\lambda_1)^2\,\alpha/R^2=[(2.4048)^2\,\alpha/R^2]$ مقدار نفوذ حرارتی برای این دو جسم به ترتیب برابر با $^{-۵}$ ۱۰ ×۸/۳۶۷ و $^{-۵}$ ۱۰ × ۳/۴۱۲ متر مربع بر ثانیه می شود. همچنین ضریب انتقال حرارت برای هر دو استوانه در هوا و در آب ۴۲ درجه سانتیگراد با استفاده از حل تحلیلی و داده های بدست آمده در محور طولی یا خط مرکزی استوانه ها ، با توجه به اینکه نفوذ حرارتی آنها معلوم است تعیین شد. در این حالت با استفاده از شیب منحنی نسبت دما $(T-T\infty)/(T_i-T\infty)$ برحسب زمان ، مقدار λ_1 با استفاده از رابطه $\lambda_1=(mR^2/\,\alpha)^{0.5}$ محاسبه شده وسپس مقدار عدد Bi با استفاده از معادله شماره ۳۷ محاسبه نموده که با محاسبه مقدار Bi از رابطه $Bi=h\,\zeta/k$ مقدار ضریب انتقال حرارت (h) تعیین شد. همانطوری که در شکلهای (۲) و (۳) دیده می شود، برای استوانه های آلومینیمی و برنجی، به ترتیب شیب منحنی ها در قسمت خطی آن برابر با ۰/۰۰۰۳۱۴ و ۰/۰۰۰۳۱۲ است که درنتیجه ضریب انتقال حرارت این دو جسم در هوا مساوی ۷۴ /۸ و ۱۳/۶۳ $W/m^2.C$ خواهد شد. همچنین در محیط آب شیب منحنی ها به ترتیب برابر با ۰/۰۰۶۷ و ۰/۰۰۳۵ می باشد که درنتیجه ضریب انتقال حرارت استوانه آلومینیمی و برنجی مساوی ۱۹۳و۲۱۰ $W/m^2.C$ به دست می آید. لازم به ذکر است که درمنابع برای محیط هوا مقدار ضریب انتقال حرارت بوسیله جابجایی آزاد بین ۱ تا ۴ و برای محیط آبی بین ۱۱۳/۵۶ تا ۸۶۱/۴ $W/m^2.C$ ذکر شده است. همچنین جهت تعیین مکان هندسی ترموکوپل ، نسبت تغییرات درجه حرارت بدست آمده در مکانهای مختلف($r/R=۰$ ، $r/R=۰/۵$ و $r/R=۰/۹۷$) از یک جسم کره ای با شعاع ۳۰ میلیمتر را که در یک حمام آب گرم همراه با هم زدن همراه بود ثبت شد که شکل (۵) این اطلاعات را نشان می دهد. اگر با هدف تعیین مکان ترموکوپل به این شکل نگاه کنیم، نقاط برخورد سه منحنی دمایی به ترتیب برابربا ۰/۶۸۲۱ ، ۰/۲۴۱۶ و ۲/۶۷۲۷- می باشد. که برای نمونه برای نقطه دوم ($r/R=۰/۵$) مقدار A_1 برابر با ۰/۲۴۱۶ است . در نتیجه مکان هندسی ترموکوپل (r/R) برای این نقطه با استفاده از معادله های ۴۱ و ۴۲ با حدس اولیه r/R برابربا یک و حل تکراری معادله های ۴۳ تا ۴۵ به مقدار نهایی ۰/۵ می رسیم .



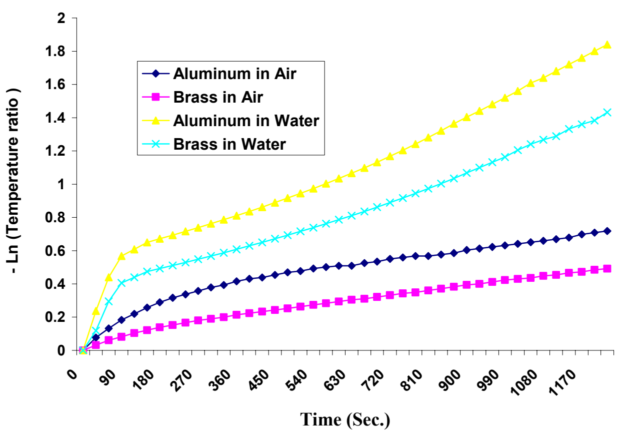
نمودار ۱ : سبت درجه حرارت اندازه گيري شده براي مکانهاي موجود بر روي محور طولي يک ميله استوانه اي شکل در يک محيط آبي که با سرعت زياد به هم زده مي شود.



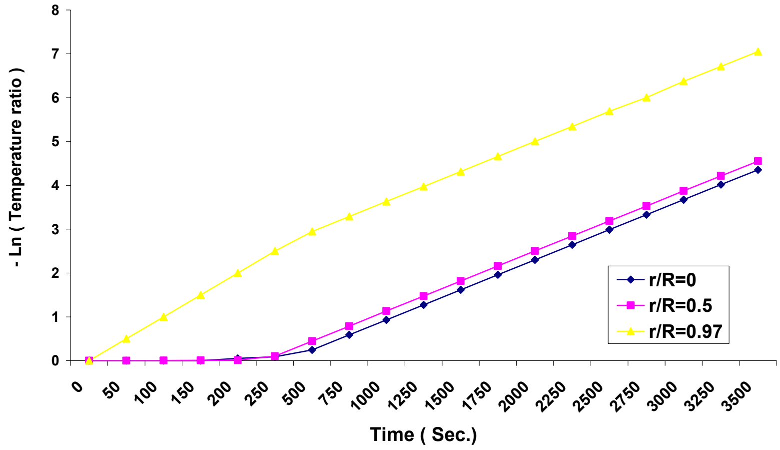
نمودار ۲ : افزايش درجه حرارت مکانهاي موجود بر روي محور طولي يک ميله استوانه اي شکل با زمان در يک محيط آبي .



نمودار ۳ : کاهش درجه حرارت مکانهاي موجود بر روي محور طولي يک ميله استوانه شکل بر حسب زمان در محيط های آب و هوا .



نمودار ۴ : نسبت درجه حرارت اندازه گيری شده برای مکانهاي موجود بر روي محور طولي يک ميله استوانه اي شکل در محيط های آب و هوا .



نمودار ۵ : نسبت درجه حرارت اندازه گيری شده در نقاط مختلف يک جسم کروی که با سرعت زياد در يک محيط آبی همزده می شود.

نتايج كلي حاصل از مقاله

پارامترهای انتقال حرارت (ضريب انتقال حرارت و نفوذ حرارتی) برای مشخص کردن، مدل نمودن و بهينه کردن فرآيند های انتقال حرارت مهم می باشند . شيوه های متفاوتی با جزئيات برای تعيين تجربی اين پارامترها توضيح داده شد . به دليل اينکه اين شيوه ها با راه حل های تحليلی نيازمند داده های آزمايشگاهی از ماده مورد نظر است، لذا فوايد بيشتری نسبت به بسياری از روشهای ديگر مانند روش سيستم انباشته يا معادلات تجربی برای تعيين اين پارامترها دارد . همانطور که ديده شد در اين روشها، دانستن يکی از پارامترها برای تعيين پارامتر ديگر مورد نياز است . مثلا ضريب انتقال حرارت برای تعيين ضريب نفوذ حرارتی بايد معلوم باشد . بنابراين هنوز گسترش و بهينه کردن روشی برای تعيين همزمان اين دو پارامتر مهم است. علاوه بر پارامترهای انتقال حرارت، روشهای تحليلی نيز برای تعيين مکان ترموکوپل برای استفاده در مطالعات بيشتر ،معتبر سازی مدل ،استفاده می شوند. اين روش در مقايسه با ديگر روشها ساده تر و سريعتر می باشد.

فهرست علائم

A : يک ثابت

α : ضريب نفوذ حرارتی (مترمربع برثانيه)

C_p : گرمای ويژه (J/k_g- K)

ζ : طول مشخصه (متر)

h : ضريب انتقال حرارت (W/m^2 K)

Jo, J_1 : توابع بسل از درجه صفر ويک

k : ضريب هدايت حرارتی (W/ m - K)

L : نصف ضخامت صفحه نا محدود (متر)

λ : ريشه های معادله های (۳۶) تا (۳۸)

m : شيب منحنی دما نسبت به زمان (ثانيه / ۱)

T : دما

T_i: دما اوليه

$T\infty$: دما محيط

Ψ : نسبت دما بدون بعد

r, x: فاصله از مرکز (متر)

R : شعاع استوانه نامحدود ويا کره (متر)

ρ : چگالی (kg / m^3)

θ: تفاضل دمای محيط با دما درهر مکان (T_∞- T)

مراجع

1- Rahman , S. (1995). *Food properties handbook*, Boca Raton, FL: CRC Press Inc.

2 - Carslaw, H. S. and Jaeger, J. C. (1986). *Conduction of heat in solids,* New York, NY: Oxford.

3 - Rice, Richard G. and Duong, D. Do. (1995). *Applied mathematics and modeling for chemical Engineers*, PP.485 – 454 , John Wiley & Sons Inc.

4 - Chau, K. V. (1995-2000). *Personal Communication. Department of Biological and Agricultural Engineering*, University of Florida, Gainesville FL.

5 - Anderson, B. and Singh, R. P. (2002). "Air Impingement heat transfer on a cylindrically shaped object." *The 1FT Annual Meeting and Food Expo,* Presentation No, 9IC-22.

6 - Erdogdu, F., Balaban, M. O. and Chau , K. V. (1998). "Modeling of heat conduction in elliptical cross section: II. Adaptation to thermal processing of shrimp." *Journal of Food Engineering*, Vol. 28, PP.241-258.

واژه هاي انگليسي به ترتيب استفاده در متن

1 - Nusselt number
2 - Reynolds number
3 - Prandtl number
4 - Lumped method
5 - Finite Integral Transform
6 -Integral transform pair
7 - Fourier Law
8 - Kernel
9 - Fourier number
10 - Biot number
11 -Bessel function