

تحلیل حرارتی عملکرد عایق‌های چندلایه و کاربرد آن‌ها در نگهداشت انرژی

آرش اسماعیلی^۱، مهدی معرفت^۲

دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده فنی و مهندسی، بخش مکانیک، گروه تبدیل انرژی

چکیده

عایق‌های چندلایه چندین‌بار به علت رسانش حرارتی بسیار پایین مورد توجه قرار گرفته‌اند. کاربرد این عایق‌ها به خصوص در صنایعی که نیاز به حفظ دما در یک محدوده‌ی خاص داریم، روز به روز افزایش می‌یابد. در تحقیق حاضر تحلیل حرارتی عایق‌های چندلایه انجام شده است. معادلات حاکم بر مسئله از نوع انتگرالی-دیفرانسیلی هستند و حل دقیق ندارند، بنابراین حل‌های تقریبی باید به کار گرفته شوند. در مسئله‌ی حاضر از تقریب دو-شار استفاده شد، معادله انرژی با روش حجم محدود و معادلات دو-شار با روش اختلاف محدود گسسته‌سازی شدند. در نهایت با حل معادلات و رسم نمودارهای رسانش حرارتی نسبت به پارامترهای مختلف و مقایسه نتایج عددی با داده‌های تجربی، مشخص شد که مدل پیشنهاد شده از دقت خوبی برخوردار است. با مشاهده‌ی رفتار نمودارهای رسانش حرارتی، نتیجه گرفته شد که به ازای مقادیر کم اختلاف دما (تحدود ۳۰۰ کلوین)، می‌توان برای کاهش وزن و هزینه از عایق‌هایی با ضخامت و چگالی کمتر استفاده کرد. توزیع دما در طول نمونه غیرخطی است، همچنین نسبت هدایت به تابش با حرکت از مرز گرم به مرز سرد افزایش می‌یابد. با توجه به موارد ذکر شده برای طراحی بهینه باید جداکننده‌ها در مرز سرد را از مواد با رسانش حرارتی پایین‌تر انتخاب کرد و در مجاورت مرز گرم چگالی لایه را افزایش داد.

واژه‌های کلیدی: عایق‌های چندلایه- رسانش حرارتی- سرمازاها- کرایجنیک- سیستم حفاظت حرارتی

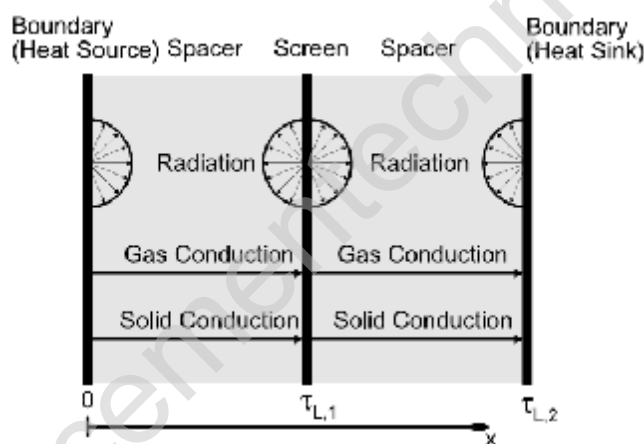
^۱- دانشجوی کارشناسی ارشد تبدیل انرژی دانشگاه تربیت مدرس

^۲- دانشیار تبدیل انرژی دانشگاه تربیت مدرس

۱- مقدمه

سرمازا^۳ها باید با تکنیک‌های موثری جابجا، ذخیره و به کار گرفته شوند. چنین امری بدون استفاده از عایق‌هایی با کارایی بسیار بالا غیرممکن به نظر می‌رسد. عایق‌های چندلایه به آن دسته از عایق‌ها اطلاق می‌شود که از تعدادی لایه متشکل از بازتاباننده‌ها و مواد جداکننده ساخته می‌شود. انتقال حرارت در این گونه از عایق‌ها به صورت ترکیبی از هدایت و تابش است. در واقع این عایق‌ها با اجزای تشکیل دهنده‌ی خود که همان بازتاباننده‌ها و مواد جداکننده هستند بر این مدهای انتقال حرارت غلبه می‌کنند. عایق‌های چندلایه مقاومت حرارتی بسیار بهتری نسبت به عایق‌های معمولی دارند، بنابراین در صنایع حساس که نیاز به حفظ دما در یک محدوده‌ی خاص است، این عایق‌ها بهترین گزینه هستند [۱].

عایق‌های چندلایه اولین بار در صنایع کرایجنیک بکار رفته است. این عایق‌ها در مخازن ذخیره گازها و مایعات در دماهای بسیار پایین استفاده شد [۱]. برای فهم بهتر مزایای عایق‌های چندلایه، چه در دماهای پایین و چه در دماهای بالا، باید مکانیزم‌های اصلی انتقال حرارت در محیط‌های متخلخل^۴ را بررسی کنیم، که همان‌طور که در شکل ۱ می‌بینید عبارتند از: تابش، هدایت‌گاز و هدایت جامد.



شکل ۱- مدهای اصلی انتقال حرارت در یک عایق چندلایه [۱]

در اکثر کاربردها معمولاً از اثر جابجایی در نظر گرفته نمی‌شود [۱]، [۲]، [۳]، [۴]، [۵]. سیستم‌های حفاظت حرارتی^۵ در مخازن کرایجنیک از یک دیواره‌ی دو جداره استفاده می‌کنند، و بین آنرا خلاء می‌کنند. این کار باعث کاهش جابجایی و هدایت‌گاز

³Cryogen

⁴Porous

⁵Thermal Protection System

می‌شود. برای کاهش انتقال حرارت تابشی، از بازتابنده‌ها^۶ که قابلیت انعکاس بالایی دارند استفاده می‌شود. بین آن‌ها جداکننده‌های پلیمری و یا سرامیکی قرار داده می‌شود، تا از اثر هدایت جامد در این عایق‌ها کاسته شود. [۱]

۲- تحلیل تئوری

فرمولاسیون انتقال حرارت توسط هدایت و تابش در کتاب‌های مرجع مختلفی آمده است. بقای انرژی برای انتقال حرارت یک بعدی در عایق منجر به معادله دیفرانسیل پاره‌ای زیر می‌شود [۶]:

$$rc \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial q''}{\partial x} \quad (1)$$

در معادله بالا ρ چگالی، c گرمای ویژه، T دما، t زمان و q'' شار حرارتی است، که این شار مجموع شار هدایتی و شار تابشی است؛

$$q'' = k \frac{\partial T}{\partial x} + q_r'' \quad (2)$$

که k رسانش متاثر از هر دو اثر هدایت گاز و هدایت جامد است. با در نظر گرفتن دو معادله بالا داریم [۶]:

$$rc \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) - \frac{\partial q_r''}{\partial x} \quad (3)$$

در اینجا گرمای ویژه و رسانش، هر دو وابسته به دما هستند. اگر مختصات فیزیکی را با استفاده از تبدیل $x = \beta \tau$ به مختصات نوری تبدیل کنیم معادله بالا به صورت زیر در می‌آید؛

$$rc \frac{\partial T}{\partial t} = b^2 \frac{\partial}{\partial t} \left(k \frac{\partial T}{\partial t} \right) - b \frac{\partial q_r''}{\partial t} \quad (4)$$

گرادین شار تابشی از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$-\frac{\partial q_r''}{\partial t} = -\frac{4ks}{b} T^4(t) + (1 - \frac{g}{b}) G(t) \quad (5)$$

در فرمول بالا K ضریب جذب، γ ضریب پراکندگی و β ضریب میرایی است. G تابع انرژی تابشی متلاقی^۷ نامیده می‌شود.

۱-۲ مدل‌سازی هدایت

برای بدست آوردن رسانشی که معادل با رسانش گاز و جامد باشد ابتدا باید هر یک به تنهایی مدل شود. برای هدایت جامد مدل‌های زیادی ارائه نشده است. از جمله این مدل‌ها که کاربرد بیشتری عبارتست از؛

^۶Reflective Screens

^۷Spacer

^۸Incident Radiation Energy

$$k_s = f^m k_s^0 \quad (6)$$

k_s هدایت جامد معادل در عایق است. f کسر جامد^۹ و m یک ضریب تجربی است که مقدار آن معمولاً بین ۲ و ۳ است. همچنین k_s^0 رسانش حرارتی در ماده خام الیاف است [۷].

برای رسانش گاز مدل زیر نسبت به مدل‌های دیگر از اعتبار بیشتری برخوردار است [۸]:

$$k_g = \frac{k_g^0}{\Phi + 2\Psi \frac{2-a}{a} \frac{2g}{g+1} \frac{1}{Kn} Pr} \quad (7)$$

در رابطه‌ی بالا k_g رسانش معادل گاز در عایق است، k_g^0 رسانش حرارتی گاز است. a ضریب تطابق حرارتی است، این ضریب بیان‌گر درصدی از مولکول‌های گاز مجاور با دیواره‌ی جامد است که با دیواره به تعادل حرارتی رسیده‌اند. Pr عدد پرنتل، g نسبت گرمای ویژه گاز^{۱۰} و ضرایب Φ و Ψ بر اساس عدد نادسن، Kn ، مقادیر صفر یا یک را اختیار می‌کنند. از آن‌جا که در مسئله‌ی حاضر رژیم گاز پیوسته^{۱۱} در نظر گرفته می‌شود، هر دو ضریب برابر با ۱ خواهند بود.

حال که رسانش‌های گاز و جامد هریک به تنهایی به دست آمد، باید بتوان با استفاده از رابطه‌ای اثر همزمان آن‌ها را تعریف کرد. بعضی از روابط این دو مکانیزم را سری، بعضی دیگر موازی و بعضی دیگر ترکیب از این دو حالت در نظر می‌گیرند. برخی از این روابط در ادامه آمده است [۹]، [۱۰]:

$$k = f^3 k_s + (1-f) k_g \quad (8)$$

$$k = 4f^3 k_s + \frac{k_s k_g}{(1-f)k_s + f k_g} \quad (9)$$

$$k = k_s + \frac{k_g - k_s}{1 + \frac{f}{1-f} \left[1 + z \frac{k_g - k_s}{k_g + k_s} \right]} \quad (10)$$

در رابطه‌ی آخر که منسوب به $Bhattacharyya$ است، Z بسته به جهت الیاف و شار حرارتی نسبت به هم، اعداد 1/3، 2/3، 5/6 را اختیار می‌کند. تمام این روابط باید به ازای $f=1$ به k_s و به ازای $f=0$ به k_g متمایل شوند [۱۱].

۲-۲ مدل‌سازی هدایت

در تحقیق حاضر از روش دوشار برای مدل‌سازی تابشی استفاده شده است، به این دلیل که اولاً این روش محدود به ضخامت نوری خاصی نمی‌باشد، ثانیاً خصوصیات تابشی مرزها این‌بار، بر خلاف تقریب ضخامت نوری زیاد، در نظر گرفته می‌شود.

^۹Solid Fraction

^{۱۰}Gas specific heat ratio

^{۱۱}Continuum

۳- حل عددی

معادلات انرژی و معادلات دو-شار گسسته‌سازی شده‌اند. معادله انرژی به روش حجم محدود گسسته‌سازی شد. به این دلیل که این روش ماهیت پایستاری دارد [۱۲]. معادلات دوشار نیز به روش اختلاف محدود گسسته‌سازی شده‌اند.

$$\left(rc_{j-1} \frac{\Delta x_{j-1}}{2} + rc_j \frac{\Delta x_j}{2}\right) \frac{T_j^{n+1} - T_j^n}{\Delta t} = \frac{k_{j-1}}{\Delta x_{j-1}} (T_{j-1}^n - T_j^n) + \frac{k_j}{\Delta x_j} (T_{j-1}^n - T_j^n) + \frac{1}{3b_{j-1} \Delta x_{j-1}} (G_{j-1}^n - G_j^n) - \frac{1}{3b_j \Delta x_j} (G_j^n - G_{j+1}^n) \quad (11)$$

زیرنویس‌ها مختصات مکانی و بالانویس‌ها مختصات زمانی را نشان می‌دهند. خواص وابسته به دما با متوسط‌گیری بین گره‌های همسایه به دست می‌آید؛

$$k_{j-1} = k \left(\frac{T_{j-1} + T_j}{2} \right) \quad (12)$$

$$k_j = k \left(\frac{T_j + T_{j+1}}{2} \right) \quad (13)$$

فرمولاسیون بالا همچنین برای گرمای ویژه و ضریب میرایی نیز اعمال می‌شود. معادلات گسسته‌سازی شده برای تقریب دو شار به صورت زیر خواهند بود؛

$$[2 + 3b_1 \Delta x \{b_1 \Delta x (1 - w_1) + \frac{e_1}{2 - e_1}\}] G_1 - 2G_2 = 12b_1 \Delta x s T_1^4 \{b_1 \Delta x (1 - w_1) + \frac{e_1}{2 - e_1}\} \quad (14)$$

$$-G_{j-1} + [2 + 3b_j^2 \Delta x^2 (1 - w_j)] G_j - G_{j+1} = 12b_j^2 \Delta x^2 (1 - w_j) s T_j^4 \quad (15)$$

$$-2G_{n-1} + [2 + 3b_n \Delta x \{b_n \Delta x (1 - w_n) + \frac{e_n}{2 - e_n}\}] G_n - 2G_2 = 12b_n \Delta x s T_n^4 \{b_n \Delta x (1 - w_n) + \frac{e_n}{2 - e_n}\} \quad (16)$$

کل دامنه به $n-1$ حجم محدود تقسیم شده است. مجموعه معادلات بالا یک سیستم سه قطری را تشکیل می‌دهند. در هر گام زمانی از دمای به دست آمده از مرحله قبل استفاده می‌شود. همچنین مقدار G در هر مرحله به دست آمده و در معادله انرژی قرار داده می‌شود.

۴- نتایج و بحث

فرمولاسیون ارائه شده توسط نگارنده مقاله و نتایج حاصل از آن ابتدا با نتایج اوزیسیک مقایسه شد. اوزیسیک یک حل عددی برای مسئله انتقال حرارت ترکیبی هدایت-تابش در یک اسلب (slab) ارائه کرد [۱۳]. او از روش normal-mode expansion استفاده کرد که دقیق‌تر از تقریب دو-شار است. برای مقایسه نتایج باید تمام پارامترها به شرح جدول ۱ بی‌بعد شوند؛

جدول شماره ۱- پارامترهای بی بعد در معادله حاکم

$q = \frac{T}{T_1}$	$t^* = \frac{k}{rc} b^2 t$	$t = bx$	$N_r = \frac{kb}{4sT_1^3}$	$G^* = \frac{G}{4sT_1^3}$	$q_r^* = \frac{q_r}{4sT_1^3}$
---------------------	----------------------------	----------	----------------------------	---------------------------	-------------------------------

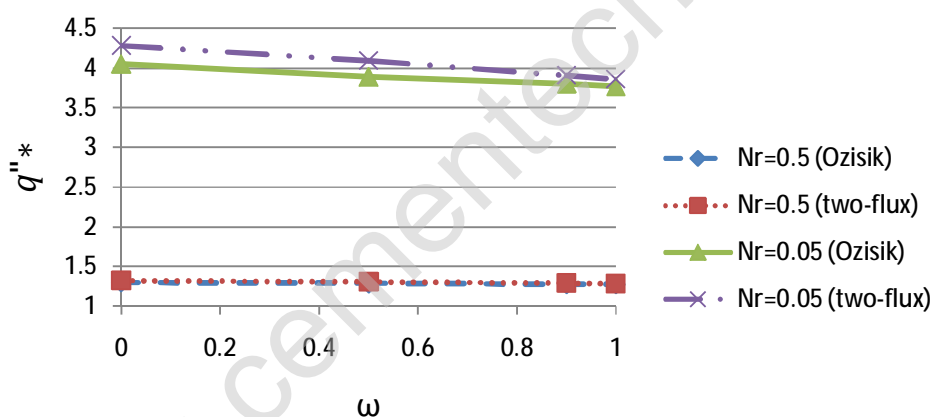
با اعمال این تغییرات معادله انرژی به صورت زیر در می آید:

$$\frac{\partial q}{\partial t^*} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial q}{\partial t} - \frac{1}{N_r} q_r^* \right) \quad (17)$$

همچنین شار حرارتی کل به صورت زیر خواهد بود:

$$\left(-\frac{\partial q}{\partial t} + \frac{1}{N_r} q_r^* \right) \quad (18)$$

در شکل ۲ مقایسه‌ای بین نتایج به دست آمده از فرمولاسیون حاضر و حل اوزیسیک را مشاهده می‌نمایید؛

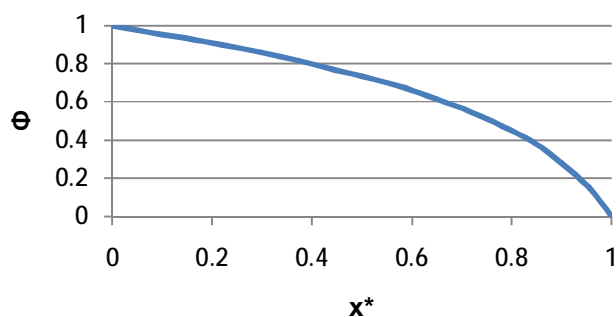


شکل ۲- شار حرارتی کل بی بعد بدست آمده و مقایسه آن با حل اوزیسیک برای دو مقدار N_r

مشاهده می‌شود برای نسبت هدایت به تابش (N_r) بزرگتر، شار کل حرارتی کاهش می‌یابد. همچنین تطبیق قابل قبولی بین نتایج روش دو-شار و حل اوزیسیک وجود دارد. حال اگر دما و طول بی بعد را به صورت زیر تعریف کنیم، نمودار دمای بی بعد بر حسب مکان بی بعد برای چگالی 72 kg/m^3 و فشار 760 mmHg ، اختلاف دمای 1000 درجه سانتی‌گراد و ضخامت نمونه 26.6 cm به صورت زیر در خواهد آمد؛

$$\Phi = \frac{T(x) - T(L)}{T(0) - T(L)} \quad (19)$$

$$x^* = \frac{x}{L} \quad (20)$$

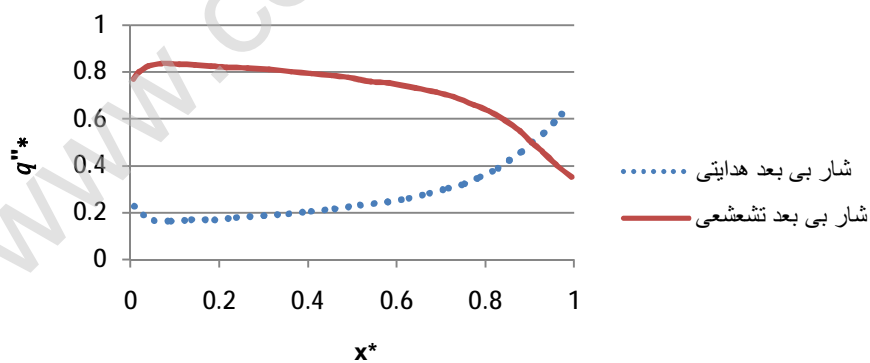


شکل ۳- تغییرات دمای بی‌بعد در طول بی‌بعد عایق

همان‌طور که از شکل ۳ مشخص است تغییرات دما در نمونه غیرخطی است و تغییرات دما در مجاورت مرز سرد شدیدتر است. شکل زیر شارهای بی‌بعد هدایتی و تابشی را هم‌زمان نسبت به طول بی‌بعد نشان می‌دهد. این شارها به صورت زیر تعریف می‌شوند؛

$$q_s'' = \frac{q_s''}{q_T''} \quad (21)$$

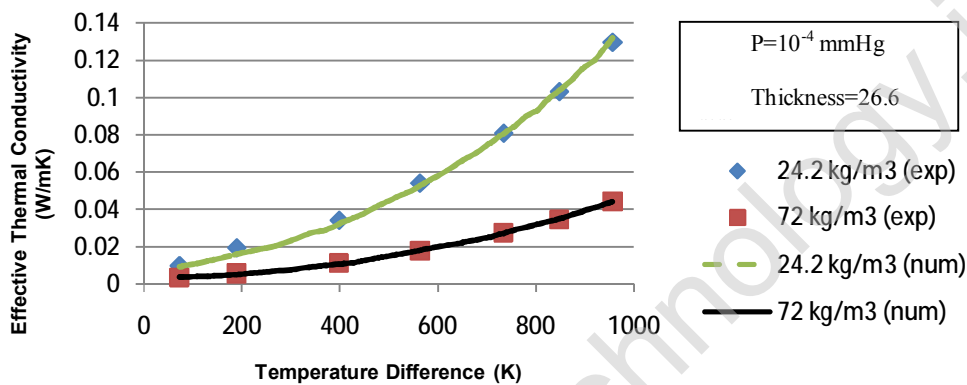
$$q_r'' = \frac{q_r''}{q_T''} \quad (22)$$



شکل ۴- تغییرات سهم هر یک از شارهای تابشی و هدایتی از شار کل در طول بی‌بعد عایق

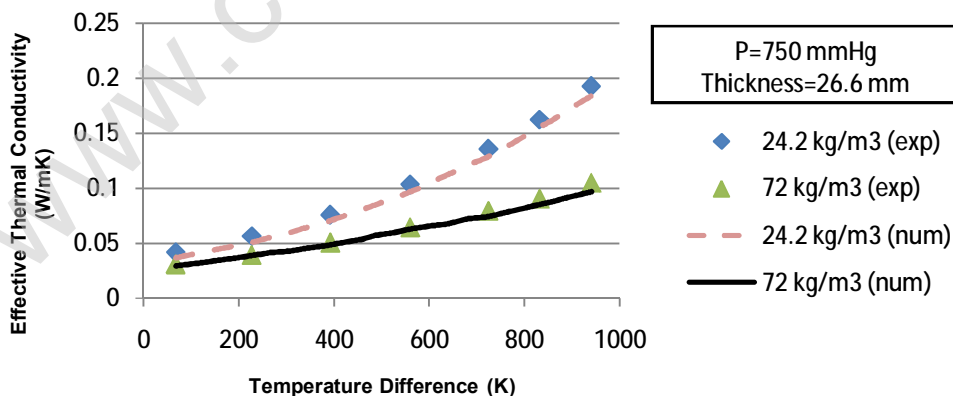
با مشاهده شکل ۴ می‌توان فهمید با حرکت از مرز گرم به سوی مرز سرد سهم انتقال حرارت تابشی کاهش و سهم انتقال حرارت هدایتی افزایش می‌یابد. در $X^*=0.9$ شارهای تابشی و هدایتی باهم برابر می‌شوند.

حال تغییرات رسانش حرارتی معادل نسبت به دما و فشار را بررسی می‌کنیم. در شکل ۵ نمودار رسانش معادل را نسبت به اختلاف دمای دو مرز گرم و سرد برای فشار 10^{-4} mmHg و در دو چگالی 24.2 kg/m^3 و 72 kg/m^3 مشاهده می‌کنید.



شکل ۵- رسانش حرارتی معادل بر حسب اختلاف دمای دو طرف عایق در فشار 10^{-4} میلی‌متر جیوه و ضخامت ۲۶.۶ میلی‌متر

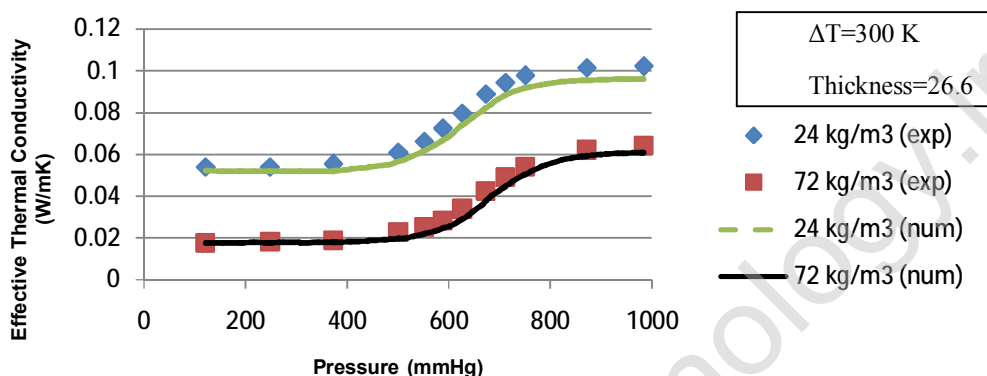
برای صحت‌سنجی حل عددی، از نتایج تجربی در یابگی استفاده شد [۱۴]. همان‌طور که مشاهده می‌کنید تطابق خوبی بین حل ارائه شده و نتایج تجربی وجود دارد. با بیشتر شدن اختلاف دما، اثر تغییر چگالی بر رسانش موثر افزایش می‌یابد. در شکل ۶ این‌بار همان نمودار را برای فشار 750 mmHg مشاهده می‌کنید؛



شکل ۶- رسانش حرارتی معادل بر حسب اختلاف دما و در فشار ۷۵۰ میلی‌متر جیوه و ضخامت ۲۶.۶ میلی‌متر

برای فشار بالا همان رفتار مشاهده می‌شود، با این تفاوت که محدوده رسانش حرارتی معادل در فشار بالا افزایش می‌یابد، دلیل آن هم اینست که در فشارهای بالاتر علاوه بر اینکه تابش همچنان نقش خود را ایفا می‌کند، رسانش گاز نیز افزایش می‌یابد.

شکل ۷ رسانش معادل عایق را برای فشارهای مختلف و برای دو چگالی مختلف نشان می‌دهد. مشاهده می‌کنید که با افزایش فشار، رسانش معادل افزایش می‌یابد، چون رسانش گاز افزایش می‌یابد و تابش هم که به جای خود باقیست.



شکل ۷- رسانش حرارتی معادل بر حسب فشار برای اختلاف دمای ۳۰۰ کلوین و ضخامت ۲۶.۶ میلی‌متر

۵- نتیجه‌گیری

تحلیل حرارتی عملکرد یک عایق چندلایه انجام شد. با مشاهده‌ی توزیع دما در طول عایق نتیجه می‌گیریم تغییرات دما در نزدیکی مرز سرد نزدیک‌تر است و از آنجایی در همین ناحیه شار حرارتی هدایتی نقش مهم‌تری را نسبت به شار تابشی ایفا می‌کند، به عنوان یک پیشنهاد در طراحی بهینه می‌توان جداکننده‌ها در این ناحیه را از موادی انتخاب کرد رسانش حرارتی کمتری داشته باشند، از طرفی چون در مجاورت مرز گرم شار تابشی غالب است، می‌توان چگالی لایه‌ها (تعداد لایه در واحد ضخامت عایق) را افزایش داد و یا اینکه لایه‌های این ناحیه را با پوشش^{۱۲}هایی مانند طلا که ضریب نشر^{۱۳} پایین دارند پوشاند. برای تبرید در دمای پایین معمولاً اختلاف دما در حدود 200 K و فشار 10^{-4} mmHg است. مرتبه‌ی رسانش حرارتی معادل با توجه به نمودار برای عایق چندلایه ۴- است. عایق‌های دیگر متداول مانند آئروژل^{۱۴} و پودر پرلیت^{۱۵} به ترتیب دارای رسانش حرارتی با مرتبه‌ی ۳- و ۲- هستند. بنابراین عایق‌های چندلایه انتخاب مناسبی برای مخازن نگهداری سرمازاها هستند.

با مشاهده‌ی شکل ۷ می‌فهمیم هرچه فشار پایین‌تر باشد، چون رسانش گاز کاهش می‌یابد، رسانش معادل نیز کاهش می‌یابد. همین‌طور در شکل ۷ نمودارهای رسانش معادل خیزشی ناگهانی در فشار نزدیک به ۶۰۰ میلی‌متر جیوه داشته‌اند. یعنی تا قبل از این فشار افزایش فشار، باعث افزایش چندانی در رسانش حرارتی معادل نخواهد شد.

¹²coating
¹³emissivity
¹⁴Aerogel
¹⁵Perlite Powder

در اختلاف دماهای پایین، رسانش معادل عایق بسیار کوچک است و همچنین تغییرات چگالی و یا ضخامت، باعث ایجاد تغییرات شدید در اندازه‌ی رسانش معادل نمی‌شود. بنابراین برای این محدوده از اختلاف دمای دو مرز می‌توان از ضخامت‌های کمتر و یا چگالی‌های پایین‌تر عایق استفاده کرد، به خصوص در کاربردهایی که وزن کم برای عایق یک امتیاز محسوب می‌شود.

www.cementtechnology.ir

مراجع

- [1] Spinnler, Markus. Winter, Edgar R.F. Viskanta, Raymond.2004. Studies on high temperature multilayer thermal insulation. International journal of heat and mass transfer 47. 1305–1312.
- [2] Zhao, Shu-Yuan. Zhang, Bo-Ming. 2009. An inverse analysis to determine conductive and radiative properties of a fibrous medium. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer 110. 1111 –1123
- [3] He, Xiao-dong. Zhao, Shu-yuan. 2007. Temperature and pressure dependent effective thermal conductivity of fibrous insulation. International Journal of Thermal Sciences 48. 440–448
- [4] Mahapatra, S.K. 2006. Analysis of combined conduction and radiation heat transfer in presence of participating medium by the development of hybrid method. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer 102. 277–292
- [5] Hofmann, A. 2006. The thermal conductivity of cryogenic insulation materials and its temperature dependence. Cryogenics 46.815–824.
- [6] Sparrow, E.M. Cess, R.D. 1978. Radiation Heat Transfer, Augmented Edition. McGraw- Hill.
- [7] Verschoor, J. D. Greebler, P. Manville, N. J. 1952. Heat Transfer by Gas Conduction and Radiation in Fibrous Insulation. Journal of Heat Transfer, Vol. 74, No. 8. 961-968.
- [8] Gebhart, B., Heat Conduction and Mass Diffusion, McGraw-Hill, New York, pp. 442-444.
- [9] Williams, S. D. Curry, D. M. 1993. Predictions of Rigid Silica Based Insulation Conductivity. NASA TP-3276, 1993.
- [10] Hager, N. E., Jr. Steere, R. C. 1967. Radiant Heat Transfer in Fibrous Thermal Insulation. Journal of Applied Physics, Vol. 38, No. 12. pp. 4663-4668.
- [11] Bhattacharyya, R. K. 1980. Heat Transfer Model for Fibrous Insulations. Thermal Insulation Performance, ASTM STP 718, ed. by D. L. McElroy and R. P. Tye, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA. pp. 272-286.
- [12] Anderson, D.A., Tannehill, J.C., Pletcher, R.H. 1984. Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer. Hemisphere Publishing Corporation.
- [13] Ozisik, M.N. 1973. Radiative Transfer and Interactions with Conduction and Convection. John Wiley & Sons Inc.
- [14] Daryabeigi, K. 2001. Thermal Analysis and Design of Multi-layer Insulation for Re-entry Aerodynamic Heating. 35th AIAA Thermophysics Conference.