تاثیر ایجاد حفره توخالی در لیف بر میزان عایق بندی گرمایی منسوجات

■ ترجمه و تلخیص: **علی صالحی راد**[1]

مقدمه

جستجو در مقالات نشان می دهد که الیاف توخالی در خیلی از موارد برای کاربردهای عایق گرمایی توصیه شده اند.

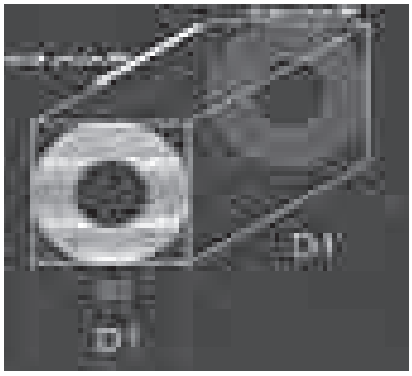
بکار بردن الیاف توخالی به جای الیاف معمولی خواص فیزیکی محصول را شدیدا مورد تاثیر قرار می دهد. کاهش انتقال حرارت از جمله تغییرات جالب برای الیاف پر کننده محصولاتی مانند بالش ها، تشک ها، کیسه خوابها و سایر محصولات مشابه می‌باشد.

در این محصولات ترجیحا از الیاف توخالی مصنوعی برای سالیان متمادی استفاده شده است.

Beyreuther ,R. یک مدل پیش بینی ساده برای مقدار افزایش مقاومت در برابر انتقال گرمای یک لیف توخالی در مقایسه با یک لیف معمولی را بر اساس محاسبه مقاومت در برابر انتقال گرما در طول و عرض لیف در یک مکعب با ابعاد قطر خارجی لیف و سپس معدل گیری با در نظر گرفتن آرایش تصادفی الیاف درون محصول(کیسه خواب) و همچنین در نظر گرفتن سهم الیاف از کل محصول با تعریف پارامتر FR ارائه داد.

۱- اساس مدل

اساس تخمین، محاسبه مقاومت در برابر انتقال گرما در طول و در عرض لیف در یک مکعب کوچکی که با ابعاد قطر خارجی لیف(do) ساخته می شود می باشد(شکل۱).



شکل۱– طرح واره انتقال حرارت در طول و در عرض لیف، در یک مکعب ساده.

شرح علائم بکار رفته در معادلات در جدول۱ آورده شده است .

جدول ۱– علائم بکار گرفته شده

علامت	شرح
Tf	چگالی خطی لیف معمولی
Tfh	چگالی خطی لیف توخالی
Tc	هدایت گرمایی
λ	ضریب انتقال حرارت
D۱	قطر بیرونی لیف توخالی
D۲	قطر درونی لیف توخالی
q	سطح مقطع جسم
L	طول جسم
da	ضخامت لایه هوا
dp	ضخامت لایه پلیمری چگالیده
TChf-al	هدایت گرمایی در طول محور لیف توخالی
λp	ضریب انتقال حرارت پلیمر
λa	ضریب انتقال حرارت هوا
RTChf-al	مقاومت در برابر انتقال گرما در لیف توخالی
RTChf-al	مقاومت در برابر انتقال گرما در لیف معمولی
RacΔ	نسبت مقاومت در برابر انتقال گرمای یک لیف توخالی به یک لیف معمولی
Vf	حجم لیف
Va	حجم هوا
FR	نسبت پر شوندگی
C	محیط سطح مقطع لیف
Xs	کسر وزنی الیاف معمولی در منسوج
Xv	کسر وزنی الیاف توخالی در منسوج

دو مـــورد حدی، یعنی انتقال گرما در طول و در عرض لیف را می باید مورد ملاحظـــه قرار دهیم، و به علت اینکه محـــل قرار گیری لیف در محصول به صورت تصادفی و بی قاعده است نهایتا انتقال حرارت کلی به صورت معدلی از این دو مورد حدی خواهد بود.

۲- مقاومت در برابر انتقال گرما در طول محور لیف

معادله عمومی برای هدایت گرمایی $(TC)^{1}$ یک جســـم با سطح مقطع q و طول L به صورت زیر است؛

$$TC = q\lambda / L$$

λ ضریب انتقال حرارت ماده نامیده می شـــود.

در این رابطه λ در واحد [illegible] اندازه‌گیری شده است.

هدایت گرمایی از میان مکعب در طول محور لیف توخالی، T_{Chf-al} همانطور که در شکل۱ مشخص است برابر با مجموع هدایت گرمایی جرم لیف توخالی با سطح مقطع q_{hf-al} و هوای درون و بیرون لیف توخالی، q_{hf-al} می باشد؛

$$q_{hf-al} = \pi(d_o^2 - d_i^2)/4 = \pi d_o^2 [1 - d_i^2/d_o^2]/4$$

$$q_{hf-al} = d_o^2 [1 - \pi(1 - d_i^2/d_o^2)/4]$$

طول انتقال حرارت برای هر دو قسمت d_o می باشد. به کمک روابط (۱) تا (۳) هدایت گرمایی برای لیف توخالی درون مکعب به صورت رابطه۴ استخراج میشود.

$$T_{Chf-al} = [q_{hf-al}\lambda_p + q_{hf-al}\lambda_a]/d_o$$

λ_p ضریب انتقال حرارت پلیمر و λ_a ضریب انتقال حرارت هوامی باشد. مقاومت در برابـــر انتقال گرما $R_{TCcf-al}$ برابر با معکوس هدایت گرمایی و به صورت رابطه۵ نوشته می شود؛

$$R_{TCcf-al} = 1/T_{Chf-al} = 1/[\lambda_p d_o [1-\pi(1-d_i^2/d_o^2)] + \lambda_a \pi d_o (1-d_i^2/d_o^2)]$$

در معادلـــه (۵) اگر $d_i=0$ قـــرار دهیم مقاومت در برابر انتقال گرما برای یک لیف معمولی در درون همان مکعب به صورت رابطه۶ بدست می آید،

$$R_{TCcf-al} = 1/[\lambda_p d_o (1-\pi/4) + \lambda_a \pi/4\, d_o]$$

حالا می‌توان نســـبت مقاومت در برابر انتقال گرمـــا در طول یک لیف توخالی به مقاومـــت در برابر انتقال گرمـــا در طول یک لیف معمولی را بـــه صورت رابطه۷ تخمین زد؛

$$R_{ac} = R_{Chf-al}/R_{cf-al} = [\lambda_p(1-\pi/4) + \lambda_a \pi/4]/[\lambda_p(1-\pi/4)(1-d_i^2/d_o^2) + \lambda_a \pi/4(1-d_i^2/d_o^2)]$$

۳- مقاومت در برابر انتقال گرما در عرض محور لیف

مقاومـــت در برابر انتقال گرمـــا از درون مکعب در عرض لیـــف توخالی $R_{TChf-ac}$ همانطور که در شـــکل۱ مشخص است مســـتقیما برابر با مقاومت در برابر انتقال گرمای پلیمـــر از یک طرف و هوای داخل و خارج لیف توخالی از طرف دیگر می باشد؛ و در این حالت، هر دو دارای سطح مقطع یکسان هستند،

$$q_{Chf-ac} = q_{hf-ac} = d_o^2$$

اگر فرض شـــود که جرم پلیمر تشـــکیل دهنده لیف توخالی به صورت یک لایه چگالیده با ضخامت d_p و سطح مقطع d_o^2 باشد، رابطه۹ را می‌توان نوشت،

$$d_p = \pi d_o d_p (1 - d_i^2/d_o^2)/4$$

و برای ضخامت لایه هوا رابطه۱۰ را داریم،

$$d_a = d_o^2 - d_p = d_o d_p (1 - \pi[1 - d_i^2/d_o^2]/4)$$

بنابراین با اســـتفاده از معادلات (۸) تا (۱۰) مقاومت در برابر انتقال گرما از عرض یک لیف توخالی درون مکعب به صورت رابطه۱۱ بدست می‌آید،

$$R_{TChf-ac} = d_p/(q_{hf-ac}\lambda_p) + d_a/(q_{hf-ac}\lambda_a)$$

در نهایت پس از جاگذاری و ساده سازی رابطه۱۲ بدست می‌آید،

$$R_{TChf-ac} = [\lambda_a \pi/4(1-d_i^2/d_o^2) + \lambda_p(1-\pi/4)(1-d_i^2/d_o^2)]/[\lambda_a \lambda_p d_o]$$

و بـــرای لیف توپر کافیســـت به جـــای d_i صفر قرار دهیم تـــا $R_{TCcf-ac}$ به صورت رابطه۱۳ بدست آید؛

$$R_{TCcf-ac} = [\lambda_a \pi/4 + \lambda_p(1-\pi/4)]/[\lambda_a \lambda_p d_o]$$

با توجه به روابط(۱۲) و(۱۳) می‌توان ΔR(نسبت مقاومت در برابر انتقال گرمای

یـــک لیف توخالی به یک لیف توپر با همان قطر بیرونی) را به کمک رابطه (۱۴) در جهت طول و در جهت عرض لیف به طور جداگانه محاســـبه کرد که به ترتیب با ΔR_{al} و ΔR_{ae} نشان داده می‌شود.

$$\Delta R = 1 \times 10^{-} [R_{TC}/R_{TC}' - 1]$$

$$\Delta R_{ae} = 1 \times 10^{-} [\beta_{ae}(1-d_i^{\gamma}/d_o^{\gamma})d_o^{\gamma}/\lambda_a + \beta_{ae}/\lambda_f (d_i^{\gamma}/d_o^{\gamma})d_o^{\gamma}/\lambda_a - 1]$$

با فرض اینکه پلیمر تشـــکیل دهنده لیف، $\lambda_f = 0.26\ W/mK$ باشـــد و جاگـــذاری، $\lambda_a = 0.026\ W/mK$ معـــادلات (۷) و (۱۵) محاســـبه و در شکل۲ رسم گردیده است.

$$\Delta R_{TC} = (\Delta R_{al} + \Delta R_{ae})/2$$

شکل۲- مقاومت در برابر انتقال گرمای لیف توخالی در برابر نسبت قطر داخلی به قطر خارجی(d_i/d_o)، در مقایسه با یک لیف توپر با همان قطر خارجی(d_o).

۴- مقاومت در برابر انتقال گرما در یک منسوج پر شده از الیاف توخالی

حجم یک محصول نســـاجی پر شـــده با الیاف توخالی(برای مثال بالش، تشـــک، کیسه خواب و غیره) به صورت یک بسته بندی فشرده شده از الیاف نیست. بلکه حجم یک مکعب (V) پر شـــده از الیافی با طول a، شامل حجم لیف(V_f) و حجم هوا(V_a) می باشد.

$$V = V_f + V_a$$

لذا نسبت پر شوندگی(FR) را میتوان به صورت رابطه۱۸ تعریف نمود،

$$FR = Vf / V \quad <1$$

Vf حجم الیاف درون منسوج و V حجم کل منسوج است.

$$V = (a/d_o)^{\gamma} . d_o^{\gamma}$$

با لحاظ کردن نســـبت پرشوندگی FR[2]، حجم های V_f و V_a در مکعب به صورت رابطه۲۰و۲۱ بدست می‌آید؛

$$Vf = FR.(a/d_o)^{\gamma} . d_o^{\gamma}$$

$$Va = (a/d_o)^{\gamma} . d_o^{\gamma}(1 - FR)$$

به همـــان روش اثبات معادلات۲ تا ۱۵، میتوان معادلاتـــی را برای بیان مقاومت در برابر انتقال گرمای فضاهایی که بخشـــی از آن توسط لیف و بخشی توسط هوا پرشـــده است بدست آورد. در اینجا فقط معادلات آخر بدست آمده برای مقاومت در برابر انتقال گرما در طول و در عرض مکعب پر شده از الیاف، آورده شده است؛

$$R_{al} = -[\beta_f FR(d_i/d_o)^{\gamma} + \beta_a(1-FR)(d_i/d_o)^{\gamma} - \beta_f FR - \beta_a(1-FR)]$$

$$R_{ae} = -[\beta_f FR - \beta_f FR(d_i/d_o)^{\gamma} + \beta_a(1-FR)(d_i/d_o)^{\gamma} - \beta_a(1-FR)]$$

متوســـط مقدار معادلات ۲۲و۲۳، $\Delta R_{TC} = (\Delta R_{al} + \Delta R_{ae})/2$ در برابر نســـبت قطری d_i/d_o، برای نسبتهای پر شوندگی(FR) مختلف در شکل۳ نشان داده شده است. نمایی از مقدار کاهش نسبی وزن الیاف توخالی پرکننده منسوج در مقایسه با الیاف توپر نیز اضافه گردیده است.

شـــکل۳– مقاومت در برابر انتقال گرما(ΔR_{TC}) به عنوان متوسط مقدار انتقال حرارت در طول و در عرض یک مکعب پر شده از الیاف توخالی با نسبت قطر داخلی به قطر خارجی d_i/d_o و درصد کاهش وزن منسوج پر شده از الیاف توخالی در مقایسه با الیاف معمولی.

همانطور که در شکل۳ مشخص است برای یک نسبت پر شوندگی $FR<0.5$، در صورت نیاز به افزایش چشـــمگیر در مقاومت در برابر انتقال حرارت، ابتدا می باید نســـبت d_i/d_o را تا حدود ۰/۶، ۰/۷ افزایش داد. فقط در این صورت است که یک افزایش پنجاه درصدی $(\Delta R>50)$ ، در مقایســـه با یک منســـوج پر شده از الیاف معمولی قابل مشـــاهده خواهد بود؛ و در همان محدوده نیز وزن منسوج پر شده از الیاف توخالی، در مقایسه با منسوج پر شده از الیاف معمولی نیز در حدود ۴۰-۵۰٪ کاهش می یابد.

۴- نتیجه

با توجه به کاربرد الیاف در منســـوجات مورد استفاده در عایق بندی گرمایی مثل لحاف، پتو، البســـه نظامی زمستانی، کیســـه خواب و غیره، و قابل استفاده بودن این منســـوجات در محدوده های دمایی خاص مورد نظر، محاسبه و برآورد میزان عایق‌بندی منســـوج، بـــرآورد خوبی از دمای کاربردی نهایی مورد نظر را بدســـت می‌دهد لذا روابط فوق می‌تواند در این زمینه‌ها مورد اســـتفاده و بهره‌برداری قرار گیرد. همچنین ملاحظه شد که با استفاده از الیاف توخالی به جای الیاف معمولی می‌تـــوان وزن منســـوج را کاهـــش داد و صرفه جویی اقتصـــادی در این زمینه و مطلوبیـــت وزنی در کاربردهایی که کاهش وزن منســـوج مورد نظر اســـت و نیز افزایش مقاومت در برابر اتلاف گرمایی را داشـــته باشـــد. هنگام استفاده از الیاف توخالی همانطور که نتایج نشـــان داد، برای منظور رســـیدن به عایق بندی بیشتر می‌بایـــد درصد توخالـــی بودن لیف را افزایش دهیم. بویژه در یک نســـبت d_i/d_o حدود ۰/۷ یا بیشتر، این افزایش عایق بندی گرمایی بسیار قابل توجه خواهد بود.

1- Thermal conductivity 2- Filling Ratio

مرجع:

Beyreuther,R., "Heat conductivity of melt spun hollow fibers compared to compact fibers for use of fiber filled textile products", Chemical Fibers International,Vol.49, .PP.398-400,1999

پی‌نوشت:

کارشناس ارشد مهندسی نساجی دانشگاه صنعتی امیرکبیر