

ICHMT2017-XXXX

## بررسی عددی افزایش انتقال حرارت در ماده تغییر فاز دهنده با تغییر پارامترهای هندسی پره‌ها طی فرآیند ذوب

محمد محمدحسینی<sup>۱</sup>، اصغر برادران رحیمی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> کارشناسی ارشد، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، میدان آزادی، مشهد  
<sup>۲</sup> استاد، گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، میدان آزادی، مشهد، صندوق پستی ۹۱۷۷۵-۱۱۱۱

### چکیده

ذخیره انرژی گرمایی در جهت از بین بردن اختلاف میان انرژی تولیدی و مصرفی و همچنین بهبود بازده سیستم‌های حرارتی است. ذخیره انرژی به صورت گرمای نهان ذوب نسبت به ذخیره انرژی به صورت گرمای محسوس به دلیل داشتن ظرفیت بیشتر برای ذخیره انرژی به ازای واحد حجم یا جرم و ثابت ماندن دما طی فرآیند تغییر فاز، دارای بازده بیشتری می‌باشد. این پژوهش فرآیند ذوب ماده تغییر فاز دهنده RT82 در مبدل حرارتی سه لوله را مورد بررسی قرار می‌دهد. مدل عددی دو بعدی توسط نرم افزار فلونت ایجاد شده است. برای بهبود انتقال حرارت در مواد تغییر فاز دهنده با ثابت نگه داشتن مساحت کل سطح پره‌ها، تغییراتی در آرایش، تعداد و طول پره‌های مستطیلی ایجاد شده است. هدف از این کار یافتن مدل هندسی مناسب به منظور افزایش انتقال حرارت و کاهش زمان ذوب می‌باشد. نتایج عددی حاصل با نتایج مرجع اعتبار سنجی شده است.

### واژه‌های کلیدی

ماده تغییر فاز دهنده - مبدل حرارتی سه لوله - جابجایی طبیعی - گرمای نهان ذوب

### مقدمه

انرژی مصرفی در بخش‌های مسکونی، تجاری و خدماتی در حدود ۳۵/۳ درصد از کل انرژی مصرفی در جهان را شامل می‌شود. از این مقدار در حدود ۷۵ درصد مربوط به گرمایش فضا و آب گرم خانگی است. جهت کاهش مصرف انرژی در سیستم‌های حرارتی، انرژی حرارتی توسط مواد تغییر فاز دهنده، در زمان عدم اوج مصرف، ذخیره و سپس این انرژی ذخیره شده در زمان اوج مصرف آزاد می‌گردد. بیشتر کاربردهای انرژی گرمایی خورشیدی به دمای ثابت یا تقریباً ثابتی نیاز دارند. بهره‌گیری از ذخیره انرژی حرارتی به صورت گرمای نهان این دمای ثابت را که همان دمای ذوب یا انجماد مواد تغییر فاز دهنده است، فراهم می‌کند. مواد تغییر فاز دهنده در زمینه‌های مختلف مهندسی از جمله محصولات الکترونیک، تجهیزات خشک‌کن، بازیافت کننده گرمای اتلافی، اجاق خورشیدی، سیستم‌های تبرید و تاسیسات ساختمانی مانند سیستم‌های گرمایش و سرمایش و آب گرم خانگی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در بعضی از کاربردها مانند

بازیافت حرارت اتلافی، نیاز به دریافت سریع گرما با نرخ بالا می‌باشد، ولی در مواردی دیگر مانند سیستم‌های آب گرم خورشیدی، نیاز به دفع سریع حرارت با نرخ زیاد می‌باشد. در مورد اول فقط طی فرآیند ذوب نیاز به استفاده از روش‌های افزایش انتقال حرارت است. حال آنکه در کاربرد دوم فقط در طی فرآیند انجماد نیاز به استفاده از این روش‌ها برای افزایش انتقال حرارت می‌باشد. نقطه ضعف مواد تغییر فاز دهنده پایین بودن ضریب هدایت حرارتی آن‌ها می‌باشد. این مسئله باعث محدودیت کاربرد این مواد به عنوان منابع ذخیره انرژی گرمایی می‌شود. به همین منظور محققین روش‌های مختلفی را برای افزایش انتقال حرارت بین مواد تغییر فاز دهنده و سیال انتقال دهنده حرارت جستجو کرده‌اند. این کار به طور عمده به دو روش افزایش سطح انتقال حرارت (استفاده از لوله‌های فین دار و به کارگیری مبدل‌های چند لوله) و افزایش ضریب هدایت حرارتی مواد تغییر فاز دهنده (وارد کردن ذراتی با ضریب هدایت حرارتی بالا به درون ماده تغییر فاز دهنده، جایگذاری مواد تغییر فاز دهنده درون متخلخل و استفاده از روش تحریک حباب به درون مواد تغییر فاز دهنده) انجام می‌گردد. همچنین اسلام نژاد و همکارانش تاثیر تغییر زوایای پره‌های مبدل حرارتی سه لوله را بر میزان انتقال حرارت و ذوب مواد بررسی کردند [1]. مطالعه حاضر به روش عددی، افزایش انتقال حرارت در مبدل حرارتی سه لوله با کارگیری مدل‌های مختلف هندسی برای پره‌های مستطیلی در عین ثابت ماندن مساحت پره‌ها بررسی می‌کند. برای تحلیل فرآیند ذوب مواد تغییر فاز دهنده از نرم افزار شبیه‌ساز فلونت<sup>۱</sup> استفاده شده است. نرم افزار فلونت روش حجم محدود و روابط ریاضی آنتالپی - تخلخل<sup>۲</sup> جهت شبیه سازی فرآیند ذوب به کار می‌برد [2].

### مدل فیزیکی

سطح مقطع مبدل حرارتی سه لوله در شکل ۱ نشان داده شده است. این مدل به ترتیب دارای لوله داخلی، میانی و خارجی به شعاع ۲۵/۴، ۷۵ و ۱۰۰ میلی‌متر است. همچنین ضخامت لوله داخلی ۱/۲ میلی‌متر و ضخامت دو لوله دیگر ۲ میلی‌متر است. طول پره‌ها ۴۲ میلی‌متر است. جنس لوله‌ها به منظور اطمینان از هدایت حرارتی بالا،

<sup>۱</sup> fluent  
<sup>۲</sup> porosity-enthalpy

$$\gamma = \begin{cases} 0 & \text{if } T < T_s \\ 1 & \text{if } T > T_l \\ (T - T_s) / (T_l - T_s) & \text{if } T_l > T > T_s \end{cases} \quad (8)$$

در ابتدا، مواد تغییر فاز دهنده در حالت جامد و در دمای ۲۷ سانتیگراد هستند. دمای ثابت دیواره لوله که نشان دهنده‌ی دمای سیال انتقال دهنده حرارت نیز است، ۹۰ درجه سانتی گراد می‌باشد. شرایط اولیه و مرزی در مبدل حرارتی سه لوله به صورت زیر بیان می‌شوند:

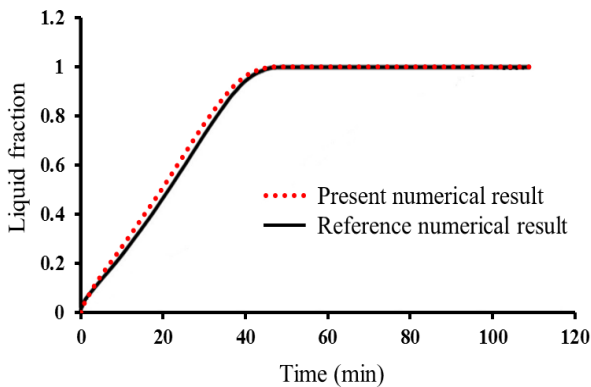
$$t = t_{ini} \rightarrow T = T_{ini} = 300.15 \text{ K} \quad (9)$$

$$t = t_{ini} \rightarrow T = T_{ini} = 300.15 \text{ K} \quad (10)$$

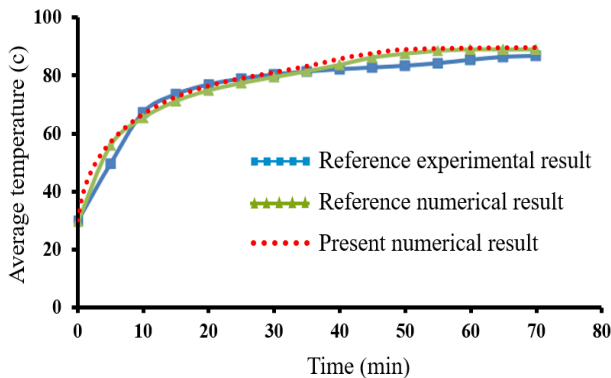
$$r = 77 \text{ mm} \rightarrow T = T_{HTF} = 363.15 \text{ K} \quad (11)$$

### ارائه نتایج و بحث

شکل ۲ و ۳ مقایسه نتایج عددی حاصل از این پژوهش را با نتایج آزمایشگاهی و عددی مرجع [5] برای مدل شکل ۱ نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که نتایج با دقت قابل قبولی با یکدیگر مطابقت دارند. زمان ذوب کامل برای این وضعیت ۴۷ دقیقه و ۴۲ ثانیه می‌باشد. ذوب کامل مواد زمانی روی می‌دهد که مقدار کسر مایع شده به یک برسد.

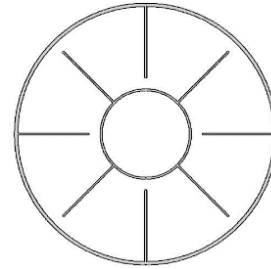


شکل ۲: مقادیر کسر ذوب شده بر حسب زمان



شکل ۳: مقادیر کسر ذوب شده بر حسب زمان

از جنس مس انتخاب می‌شود. جنس مواد تغییر فاز دهنده به کار رفته از روبیترم آر تی ۳ ۸۲ است، که در لوله میانی در فضای میان پره‌ها قرار دارد.



شکل ۱: مقطع مبدل حرارتی سه لوله با پره های مستطیلی

### روش حل و فرضیه ها

جریان مواد تغییر فاز دهنده در مبدل حرارتی سه لوله آرام، غیر پایا و تراکم ناپذیر در نظر گرفته می‌شود. از اتلافات لزجت صرف نظر شده است. خواص ترموفیزیکی مواد تغییر فاز دهنده مانند ضریب هدایت حرارتی، ضریب لزجت و گرمای ویژه در این مطالعه ثابت در نظر گرفته می‌شود. تاثیر جابجایی طبیعی با استفاده از تقریب بوزیسنک در نظر گرفته شده است. توزیع جریان و دما به ترتیب با حل معادلات ناویراستوکس و انرژی به دست می‌آید. به ترتیب معادلات پیوستگی، مومنتموم و انرژی به صورت زیر تعریف می‌شوند [3]:

$$\partial_t(\rho) + \partial_i(\rho u_i) = 0 \quad (1)$$

$$\partial_t(\rho u_i) + \partial_j(\rho u_i u_j) = \mu \partial_{jj} u_i - \partial_i P + \rho g_i + S_i \quad (2)$$

$$\partial_t(\rho H) + \partial_i(\rho \Delta H) + \partial_i(\rho u_i H) = \partial_i(k \partial_i T) \quad (3)$$

در این معادلات  $\rho$  دانسیته مواد تغییر فاز دهنده،  $u_i$  سرعت سیال،  $\mu$  ویسکوزیته دینامیکی،  $p$  فشار،  $g$  شتاب جاذبه،  $k$  ضریب هدایت حرارتی و  $H$  آنتالپی کل می‌باشد. عبارت  $S_i$  در معادله مومنتموم به صورت زیر تعریف می‌شود [4]:

$$S_i = C(1-\gamma)^2 \frac{u_i}{\gamma^3 + \varepsilon} \quad (4)$$

آنتالپی محسوس و کل به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T c_p \Delta T \quad (5)$$

$$H = h + \Delta H \quad (6)$$

$\gamma$  کسر مایع ایجاد شده طی تغییر فاز بین حالت جامد و مایع می‌باشد. در این حالت دما کمتر از دمای ذوب و بیشتر از دمای انجماد است.  $\gamma$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\gamma = \Delta H / L \quad (7)$$

## فهرست علائم

$C_p$	ظرفیت حرارتی ویژه ( $\text{Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$ )
$C$	ثابت ناحیه خمیری ( $\text{kgm}^{-3}\text{s}^{-1}$ )
$g$	شتاب جاذبه زمین ( $\text{ms}^{-2}$ )
$h$	انتالپی محسوس ( $\text{Jkg}^{-1}$ )
$H$	انتالپی کل ( $\text{Jkg}^{-1}$ )
$k$	ضریب هدایت حرارتی ( $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ )
$L$	گرمای نهان ( $\text{Jkg}^{-1}$ )
$p$	فشار ( $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-2}$ )
$r$	شعاع (m)
$Si$	جمله چشمه مومنتوم ( $\text{kgm}^{-2}\text{s}^{-2}$ )
$T$	دما (K)
$u_i$	سرعت ( $\text{ms}^{-1}$ )

## علائم یونانی

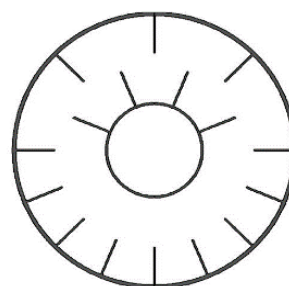
$\beta$	ضریب انبساط حجمی ( $\text{K}^{-1}$ )
$\gamma$	کسر مایع
$\varepsilon$	ثابت
$\mu$	لزجت دینامیکی ( $\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$ )
$\rho$	چگالی ( $\text{kgm}^{-3}$ )

## زیرنویس‌ها

$i, j$	مؤلفه‌های مختصاتی
$ini$	اولیه (زمان)
$HTF$	سیال انتقال دهنده حرارت
$m$	ذوب
$ref$	مرجع
$s$	جامد
$l$	مایع

## مراجع

- [1] H. Eslamnezhad, Asghar B. Rahimi. Enhance heat transfer for phase-change materials in triplex tube heat exchanger with selected arrangements of fins. *Appl. Therm. Eng.* 113 (2017) 813-821.
- [2] Patankar SV. Numerical heat transfer and fluid flow. New York: McGraw Hill; 1980.
- [3] A. A. R. Darzi, M. Jourabian, and M. Farhadi, "Melting and solidification of PCM enhanced by radial conductive fins and nanoparticles in cylindrical annulus," *Energy Conversion and Management*, vol. 118, pp. 253-263, 2016.
- [4] A. Brent, V. Voller, and K. Reid, "Enthalpy-porosity technique for modeling convection-diffusion phase change: application to the melting of a pure metal," *Numerical Heat Transfer, Part A Applications*, vol. 13, pp. 297-318, 1988
- [5] S. Mat, A. A. Al-Abidi, K. Sopian, M. Y. Sulaiman, and A. T. Mohammad, "Enhance heat transfer for PCM melting in triplex tube with internal-external fins," *Energy conversion and management*, vol. 74, pp. 223-236, 2013.

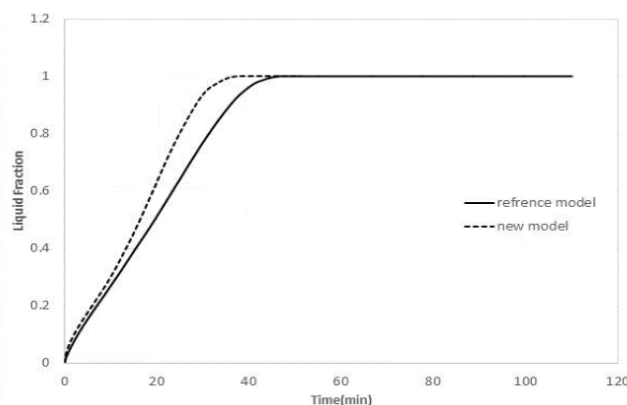


شکل ۴: مدل هندسی ارائه شده جهت افزایش انتقال حرارت

مسیر جریان سیال مذاب با توجه به اختلاف چگالی که نتیجه اختلاف دما می باشد، تعیین می شود. این امر خود بر انتخاب موقعیت قراردعی پره‌ها تاثیرگذار است. لازم به توضیح است، که اگر پره‌ها به سه قسمت یا بیشتر تقسیم شوند، با توجه به اینکه مساحت می‌بایست ثابت باقی بماند، تعداد پره‌ها بیشتر می شود. اما این کار انتقال حرارت را افزایش نخواهد کرد. زیرا با کوتاه شدن طول پره‌ها، فضای خالی بین پره‌های لوله داخلی و خارجی بیشتر شده و پخش حرارت آهسته تر صورت می گیرد.

## نتیجه‌گیری

همانطور که در شکل ۴ مشاهده می گردد، با نصف کردن پره‌ها و قرار دادن آنها در مکان‌هایی که پخش حرارت کمتر وجود داشت، افزایش چشمگیری در ذوب مواد و در نتیجه کاهش زمان ذوب ایجاد شده است، در حالی که مساحت کل پره‌ها و حجم ماده تغییر فازدهنده تغییر نکرده است. مدل شکل ۴ که پس از بررسی چندین مدل هندسی دیگر و براساس پخش بهتر حرارت در مواد انتخاب شده است، مطابق شکل ۵ کمترین زمان ذوب برابر با ۳۶ دقیقه و ۳۴ ثانیه را فراهم می آورد.



شکل ۵: کسر ذوب شده بر حسب زمان