Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 52(6) (2020) 391-394
DOI: 10.22060/mej.2018.14356.5843

An Experimental Investigation of Convective Heat Transfer of Slurry Phase Change Material in a Tube with Butterfly Tube Inserts

M. Moshtagh, A. Jamekhorshid*, A. Azari, H. Bazaee

Faculty of Petroleum, Gas and Petrochemical Engineering, Persian Gulf University, Bushehr, Iran.

ABSTRACT: In this study, the effect of adding of microencapsulated phase change material to pure water base fluid as a working fluid was investigated. To this end, a laboratory apparatus was prepared and used. The main part of this setup is a tube which is called test section. The test section has a circular cross-section under a constant heat flux and is equipped with 6 thermocouples for measuring wall temperature at 6 different points as well as 2 thermocouples to measure the inlet and outlet flow temperature into the tube. The effect of butterfly tube inserts was also studied and the results were compared with each other. The results indicated that adding phase change material to base fluid could improve the heat transfer rate up to 41%. In addition, when the butterfly blades were placed in the test section, it was observed that the heat transfer rate increased to 234% for pure water and up to 180% for the slurry with 10 wt% of microencapsulated phase change material. The blades increased heat transfer by creating turbulence in the flow and eliminating the thermal boundary layer.

Review History:

Received: 24 Apr. 2018
Revised: 23 Aug. 2018
Accepted: 7 Sep. 2018
Available Online: 11 Sep. 2018

Keywords:

Convective heat transfer
Slurry phase change material
Butterfly tube inserts
Thermal energy storage
Heat exchanger

1- Introduction

Using nanoparticles and producing a suspension which is called nanofluid could improve heat transfer remarkably [1]. Many experimental [2-4] and numerical [5-7] researches have investigated the effect of adding nanoparticles to a base fluid on the thermo-physical properties. Slurry of MicroEncapsulated Phase Change Materials (MEPCM) is another type of fluid that is used to improve the thermal properties of a working fluid [8-10]. Phase Change Materials (PCMs) are substances that melt and solidify at nearly constant temperature. They are capable to store and release large amount of thermal energy during phase change from solid to liquid or vice versa, respectively.

The previous works on MEPCM slurry have only investigated the effect of MEPCM. This research will evaluate the effect of MEPCM and butterfly tube inserts simultaneously.

2- Experimental Setup

Fig. 1 shows the experimental setup. It contains a heat transfer section as the test section, a plate heat exchanger for slurry cooling, two pumps for cooling water and slurry, two rotameters for the flow rate monitoring and controlling, two reservoir tanks for cooling water and slurry, and a U-tube manometer for measuring the pressure drop. A copper tube with 7.9 mm inner diameter, 2 mm thickness and 1285 mm length with a surrounding thick thermal isolating layer for minimizing the heat radiation was used as the test section. Fig. 2 depicts the butterfly tube insert used in copper tube. The butterfly tube insert consist of a holding rod with 1 mm diameter. The pitch length is 12 cm. Six K-type thermocouples with the precision of 0.1 °C were soldered to measure tube wall temperature.

In order to heat the slurry, an electrical wire with the power of 1000 W were twisted uniformly around the tube. The plate heat exchanger was used to maintain the inlet temperature of the slurry at 25 °C for all tests.

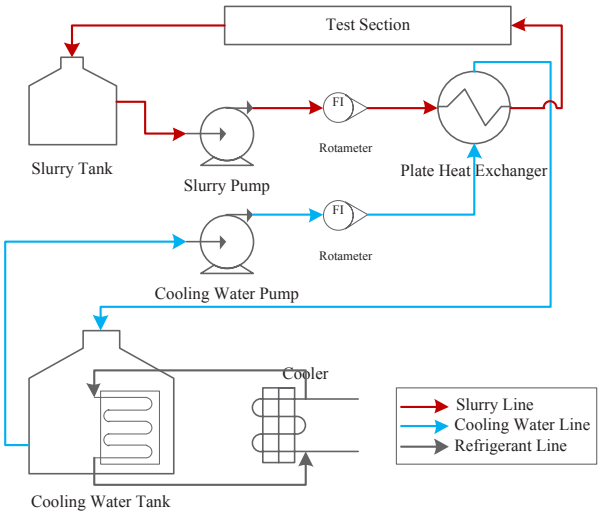


Fig. 1. Schematic diagram of experimental setup.

*Corresponding author's email: jamekhorshid@pgu.ac.ir

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

Fig. 2. Butterfly tube insert for using in copper tube.

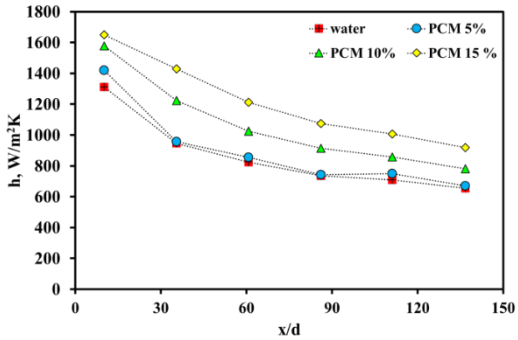


Fig. 4. Heat transfer coefficient with different slurry composition at Re=1500 and without butterfly tube insert.

Table 1. Turbine characteristics

Property	Value	Unit
Melting temperature	25	°C
Solidification temperature	24	°C
Latent heat	100	kJ/kg
Density	300-400	kg/m^3
Particle size	50-300	µm

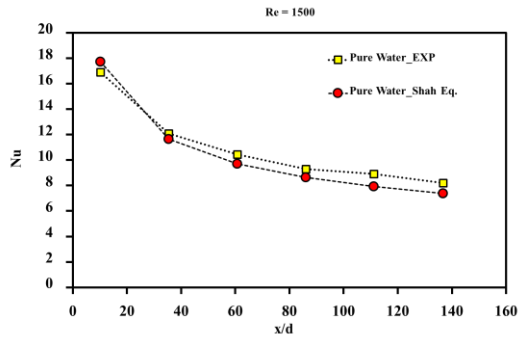


Fig. 3. Validation of the experimental setup

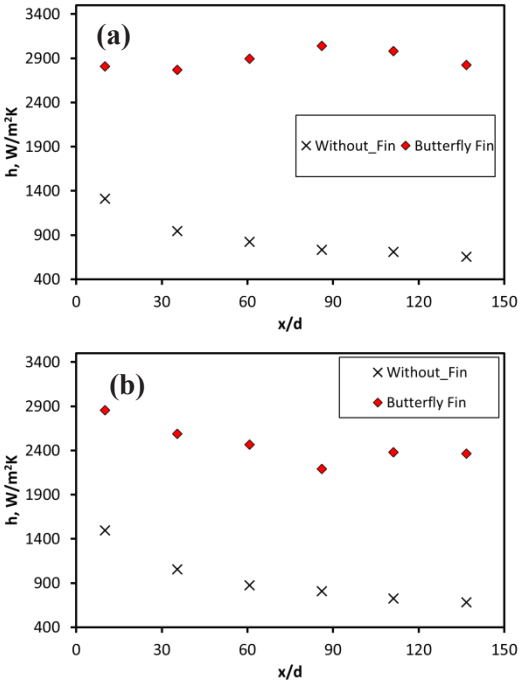


Fig. 5. The effect of using butterfly tube insert at Re=1500 for (a) pure water and (b) 10 wt% slurry

3- Slurry Preparation

Micronal® DS 5038X were used as MEPCM. Thermo-physical properties of MEPCM are presented in Table 1. Distilled water was used as working fluid. Four different weigh percent of 0, 5, 10, and 15 of MEPCM at water was prepared by gradually adding MEPCM to water and stirring the slurry.

4- Validation of the Experimental Setup

The accuracy and credibility of experimental setup was evaluated by comparing the results with the famous Shah relation [2]. The results are illustrated in Fig. 3. Results show that reasonably good agreement can be observed between the Shah equation and the measurements done in this work.

5- Results and Discussion

Fig. 4 shows the effect of adding MEPCM to water at laminar flow without butterfly tube insert. This figure indicated a positive effect of MEPCM on heat transfer coefficient. An average increment of 7.5, 20.7, and 38.9% for 5, 10, and 15 wt% slurry compared to the pure water was observed in heat transfer coefficient.

Fig. 5 compares the heat transfer coefficient for tube with and without butterfly tube insert. According to this figure, using the butterfly tube insert can increase the heat transfer coefficient about 234% and 180% for pure water and slurry, respectively.

6- Conclusions

This study is concerned with the convective heat transfer of water based MEPCM slurry in a tube with and without butterfly tube insert. The experimental results reveal that

using butterfly tube insert in the tube can increase heat transfer coefficient considerably.

References

[1] H. Mohammed, G. Bhaskaran, N. Shuaib, and R. Saidur, "Heat transfer and fluid flow characteristics in microchannels heat exchanger using nanofluids: a review," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 15, pp. 1502-1512, 2011.

[2] A. Azari and M. Derakhshandeh, "An experimental comparison of convective heat transfer and friction factor of Al2O3 nanofluids in a tube with and without butterfly tube inserts," Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, vol. 52, pp. 31-39, 2015.

[3] M. A. Teamah, M. M. K. Dawood, and A. Shehata, "Numerical and experimental investigation of flow structure and behavior of nanofluids flow impingement on horizontal flat plate," Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 74, pp. 235-246, 2016.

[4] H. Yarmand, S. Gharehkhani, S. F. S. Shirazi, A. Amiri, M. S. Alehashem, M. Dahari, et al., "Experimental investigation of thermo-physical properties, convective heat transfer and pressure drop of functionalized graphene nanoplatelets aqueous nanofluid in a square heated pipe," Energy Conversion and Management, vol. 114, pp. 38-49, 2016.

[5] L. Asmaie, M. Haghshenasfard, A. Mehrabani-Zeinabad, and M. N. Esfahany, "Thermal performance analysis of nanofluids in a thermosyphon heat pipe using CFD modeling," Heat and Mass Transfer, vol. 49, pp. 667-678, 2013.

[6] B. Ruan, X. Gao, and H. Meng, "Numerical modeling of turbulent heat transfer of a nanofluid at supercritical pressure," Applied Thermal Engineering, vol. 113, pp. 994-1003, 2017.

[7] A. Azari, M. Kalbasi, and M. Rahimi, "Numerical study on the laminar convective heat transfer of alumina/water nanofluids," Journal of Thermophysics and Heat Transfer, vol. 27, pp. 170-173, 2013.

[8] S. Baronetto, G. Serale, F. Goia, and M. Perino, "Numerical model of a slurry PCM-based solar thermal collector," in Proceedings of the 8th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning, 2014, pp. 13-20.

[9] E. Stamatiou and M. Kawaji, "Thermal and flow behavior of ice slurries in a vertical rectangular channel. Part I: Local distribution measurements in adiabatic flow," International Journal of Heat andMass Transfer, vol. 48, pp. 3527-3543, 2005.

[10] A. Sarı and A. Biçer, "Thermal energy storage properties and thermal reliability of some fatty acid esters/building material composites as novel form-stable PCMs," Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 101, pp. 114-122, 2012.

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۲، شماره ۶، سال ۱۳۹۹، صفحات ۱۵۶۱ تا ۱۵۷۶
DOI: 10.22060/mej.2018.14356.5843

بررسی تجربی انتقال حرارت جابه‌جایی دوغاب مواد تغییر فاز درون لوله‌ای همراه با پره‌های پروانه‌ای

مصطفی مشتاق، احمد جامه‌خورشید*، احمد آذری، حسن بازآی

دانشکده مهندسی نفت، گاز و پتروشیمی، دانشگاه خلیج‌فارس، بوشهر، ایران.

خلاصه: در این مطالعه به بررسی اثر اضافه نمودن مواد تغییر فاز به سیال پایه آب و تولید دوغاب مواد تغییر فاز، پرداخته شد. بدین منظور یک دستگاه آزمایشگاهی آماده شد و مورد استفاده قرار گرفت. بخش اصلی این دستگاه شامل لوله‌ای بود که دوغاب مواد تغییر فاز از دورن آن عبور داده می‌شود. این لوله با سطح مقطع دایره‌ای می‌باشد که تحت شار حرارتی ثابتی قرار دارد و مجهز به ۶ حس‌گر دما برای اندازه‌گیری دمای دیواره و همچنین ۲ عدد حس‌گر دما جهت اندازه‌گیری دمای سیال ورودی و خروجی می‌باشد. علاوه بر اثر افزودن مواد تغییر فاز، اثر قرارگیری پره‌های پروانه‌ای شکل درون لوله نیز مورد مطالعه قرار گرفت و نتایج به دست آمده از هر دو حالت با یکدیگر مقایسه شدند. نتایج نشان داد که افزودن مواد تغییر فاز به سیال پایه می‌تواند میزان انتقال حرارت را به‌طور متوسط تا ۴۱ درصد بهبود بخشد. همچنین با قرارگیری پره‌های پروانه‌ای در مسیر جریان‌های آرام، میزان انتقال حرارت تا ۲۳۴ درصد برای آب خالص و تا ۱۸۰ درصد برای دوغاب ۱۰ درصد وزنی مواد تغییر فاز افزایش پیدا کرد. دلیل این امر ایجاد اغتشاش در جریان و از بین رفتن لایه‌ی مرزی گرمایی می‌باشد.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۷/۰۲/۰۴
بازنگری: ۱۳۹۷/۰۶/۰۱
پذیرش: ۱۳۹۷/۰۶/۱۶
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷/۰۶/۲۰

کلمات کلیدی:
انتقال حرارت جابجایی
دوغاب مواد تغییر فاز
صفحه‌های پروانه‌ای شکل
ذخیره انرژی حرارتی
تبادلگر حرارتی

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر با توسعه دستگاه‌های الکترونیکی در ابعاد بسیار کوچک، نیاز به بهبود شرایط انتقال حرارت با استفاده از دستگاه‌هایی در ابعاد هر چه کوچک‌تر افزایش‌یافته است. مبدل‌های حرارتی میکروکانال برای این منظور می‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. علاوه بر این، اخیراً استفاده از فناوری‌های جدید نظیر فناوری‌های نانو در این زمینه بسیار مورد توجه قرار گرفته است. بکارگیری نانوذرات و تولید یک سوسپانسیون پایدار که نانوسیال نامیده می‌شود، می‌تواند انتقال حرارت را به صورت قابل‌توجهی بهبود بخشد [۱]. فعالیت‌های تجربی [۴-۲] و عددی [۷-۵] زیادی، افزودن نانوذرات به یک سیال پایه و تأثیر آن را بر مشخصه‌های انتقال حرارتی و جریان سیال مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد که ضریب انتقال حرارت نسبت به سیال پایه به‌صورت خالص به‌طور چشم‌گیری افزایش پیدا می‌کند و شرایط انتقال حرارت را بهبود می‌بخشند. یکی دیگر از انواع سیالات استفاده شده در این زمینه‌ها، دوغاب مواد تغییر فاز میکروکپسوله‌شده[1] می‌باشد. به طور کلی مواد تغییر فاز[2] موادی هستند که اصول کارکرد آن‌ها بر پایه تغییر فاز یا تغییر حالت از فاز جامد به مایع و برعکس استوار است. این مواد کاربردهای بسیار زیادی دارند که مهمترین آن‌ها، بهینه‌سازی انرژی در ساختمان‌ها (به کارگیری مواد تغییر فاز در سقف [۸] و کف [۹] و دیواره [۱۰ و ۱۱] ساختمان)، جلوگیری از کاهش بیش از حد دما در قطعات ماهواره‌ها که فقط گاهی فعال می‌شوند [۱۲] و استفاده به صورت دوغاب می‌باشد.

همان‌طور که گفته شد، یکی از پرکاربردترین حالت‌های استفاده از مواد تغییر فاز، استفاده شدن به‌صورت دوغاب می‌باشد. برای این منظور ابتدا مواد تغییر فاز تبدیل به کپسول‌های کوچکی در ابعاد میکرومتری می‌شوند و پس از آن در یک سیال پایه توزیع و پخش می‌گردند و دوغاب میکروکپسول مواد تغییر فاز تولید می‌کنند. در تحقیقات مختلف از سیالات متنوعی به‌عنوان سیال پایه استفاده شده که معمول‌ترین آن‌ها آب [۱۳]، گلایکول [۱۴] و گلیسیرین [۱۵] می‌باشد. دوغاب مواد تغییر فاز میکروکپسوله‌شده از انواع جدید سیالات چند فازی می‌باشد که در سیستم‌های انتقال حرارت و ذخیره‌سازی گرما به

1 MicroEncapsulated Phase Change Material (MEPCM)
2 Phase Change Material (PCM)

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: jamekhorshid@pgu.ac.ir

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

کار گرفته می‌شوند و به همین دلیل کاربرد گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف دارد [۱۶]. سرمایش فعال[1] [۱۷]، استفاده برای سردسازی [۱۸]، سیستم‌های گرمایش، تهویه و تهویه مطبوع[2] [۱۹]، مبدل‌های حرارتی [۲۰]، ذخیره‌سازی انرژی خورشیدی [۲۱] و غیره از مهم‌ترین زمینه‌های استفاده از دوغاب مواد تغییر فاز میکروکپسوله‌شده است.

گوئل و همکاران [۲۲] و یوگاشی و همکاران [۲۳] در مطالعات جداگانه‌ای به صورت تجربی به بررسی اثر اضافه کردن مواد تغییر فاز مختلف به سیال پایه پرداختند. نتایج کار آن‌ها نشان داد که با افزایش کسر جرمی مواد تغییر فاز در سیال پایه ضریب انتقال حرارت به صورت چشم‌گیری افزایش پیدا می‌کند. در کار دیگری چِن و همکاران [۲۴] از یک امولسیون تغییر فاز به‌عنوان یک نوع جدید از سیالات انتقال حرارتی که دارای ظرفیت حرارتی بالاتر از آب است، استفاده کردند و مشخصه‌های انتقال حرارتی آن را به‌صورت آزمایشگاهی مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این کار نشان می‌دهد که ویسکوزیته این سیال ۵/۵۷ بار بیشتر از آب خالص است که این مقدار خیلی کمتر از مقادیر موجود در منابع است. همین افزایش ویسکوزیته موجب می‌گردد که پمپی با توان بیشتر مورد نیاز باشد، اما از طرفی میزان انتقال حرارت را به‌صورت چشم‌گیری افزایش می‌دهد. این میزان به اندازه‌ای می‌باشد که عملکرد سیستم را از لحاظ اقتصادی توجیه نماید. این مطالعات برای جریان‌های آرام انجام گرفت. وانگ و همکاران [۲۵] رفتار جریانی و انتقال حرارت جابه‌جایی دوغاب مواد تغییر فاز میکروکپسوله‌شده در یک لوله دایروی افقی، در محدوده جریان آرام و آشفته به‌صورت آزمایشگاهی مورد بررسی و مقایسه قرار دادند. نتایج کار آن‌ها نشان داد که میزان ضریب انتقال حرارت که برای دوغاب مواد تغییر فاز میکروکپسوله‌شده اندازه‌گیری شد، بیشتر از سیال تک فاز در جریان آرام است، اما این پارامتر در جریان با آشفتگی کم، پیچیدگی بیشتری نشان می‌دهد و رفتار ثابتی ندارد. وانگ و همکاران [۲۶] در کاری به ارائه عملکرد انتقال حرارتی سوسپانسیون مواد تغییر فاز میکروکپسوله‌شده که در یک لوله مستطیلی با نسبت ابعادی ۰/۱۴ جریان دارد، پرداختند. نتایج آن‌ها نیز بهبود عملکرد انتقال حرارت سیال را نشان داد. در کار دیگری سانگ و همکاران [۲۷ و ۲۸] به صورت تجربی و عددی از سیال پایه گالیم مایع به عنوان سیال کاری در لوله دایره‌ای که تحت فلاکس حرارتی ثابتی قرار داشت، استفاده کردند. مشاهده شد که ضریب انتقال حرارت محلی اصلاح‌شده، برای دوغاب مواد تغییر فاز میکروکپسوله‌شده بیش‌تر از گالیم خالص در شرایط یکسان می‌باشد. دوروک و همکاران [۲۹] به بررسی عملکرد انتقال حرارتی ترکیب آب و نانوذرات ان-نونادکان[3] به عنوان ماده تغییر فاز دهنده پرداختند. نانوسیال تولیدی درون یک مبدل حرارتی دو لوله‌ای جریان داشت. نتایج کار آن‌ها نشان داد که افزودن تقریبا ۲ درصد حجمی از این نانو ذرات به آب خالص می‌تواند ضریب انتقال حرارت را تا ۱۰ ٪ افزایش دهد؛ اما مقادیر کمتر از ۰/۴ ٪ نمی‌تواند تأثیری بر روی انتقال حرارت داشته باشد. همچنین مشاهده شد که افزودن نانوذرات به سیال پایه ضریب اصطکاک را نیز افزایش می‌دهد.

یکی از مشکلاتی که در استفاده از میکروکپسول‌های مواد تغییر فاز وجود دارد، پاره شدن دیواره سطح میکروکپسول‌ها است که می‌تواند عملکرد سیستم را به شدت کاهش دهد. این اتفاق می تواند در غلظت‌های بالا (بالاتر از ۳۰ درصد جرمی) اتفاق افتد [۳۰]. علاوه بر مطالعات تجربی، در منابع مطالعات شبیه سازی متعددی نیز انجام شده است. الکوواتی و همکاران [۳۱]، صباح و همکاران [۳۲] و حسن [۳۳] به بررسی تاثیر مواد تغییر فاز بر عملکرد انتقال حرارتی مبدل‌های حرارتی میکروکانال با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی پرداختند.

در تمامی مطالعاتی که مورد بررسی قرار گرفت، به منظور بهبود عملکرد انتقال حرارتی سیستم‌ها، تنها از مواد تغییر استفاده شد؛ اما در پژوهش حاضر علاوه بر بررسی تأثیر افزودن مواد تغییر فاز میکروکپسوله‌شده به سیال پایه، اثر به کارگیری پره‌های پروانه‌ای در مسیر جریان نیز مورد بررسی قرار گرفت. به عبارتی در این کار اثر هم‌زمان پره‌های پروانه‌ای و دوغاب مواد تغییر فاز میکروکپسوله‌شده بر عملکرد انتقال حرارتی سیستم مورد مطالعه در نظر گرفته شد که در بخش‌های بعد گزارش حاضر به آن پرداخته خواهد شد.

۲- دستگاه آزمایشگاهی

دستگاه حاضر که تصویری از آن در شکل ۱ آورده شده است، شامل دو سیکل مجزا می‌باشد. سیکل اول که در آن دوغاب میکروکپسول‌های مواد تغییر فاز میکروکپسوله‌شده جریان دارد و سیکل دوم جریان آب خنک‌کننده می‌باشد. این دو سیکل در یک نقطه که همان مبدل حرارتی صفحه‌ای است، به هم رسیده و پس از انتقال حرارت بین دو سیال ورودی به مبدل، از آن خارج می‌گردند. کارکرد کلی دستگاه به این صورت است که دوغاب مواد تغییر فاز میکروکپسوله‌شده از مخزنی که در آن ذخیره شده است، توسط پمپی وارد مسیر جریان می‌شود. این دوغاب ابتدا وارد مبدل می‌شود. در آنجا با استفاده از شیر دستی موجود، دبی آب خنک‌کننده و به تبع آن دمای دوغاب

1 سیستمی که برای خنک سازی از انرژی استفاده می‌کند.

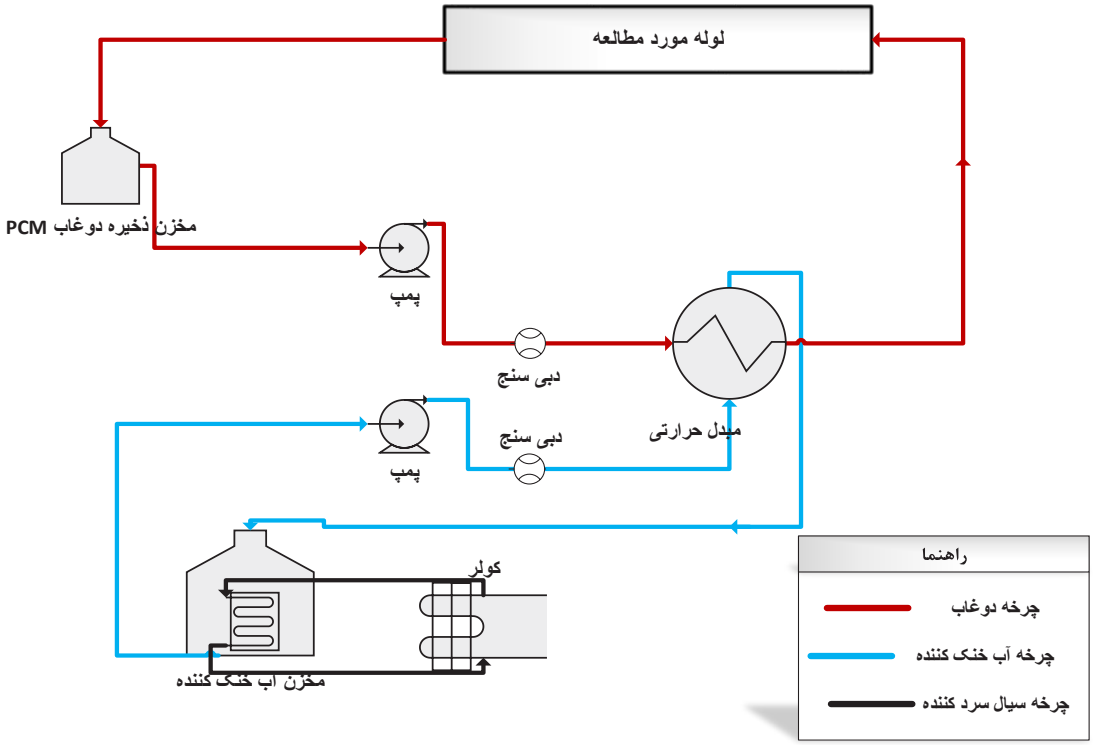
2 Heating, Ventilation and Air Conditioning (HVAC)

3 *n*-nonadecane

Table 1. Location of thermocouples

جدول ۱: موقعیت ترموکوپل‌ها

	ابتدای گرمکن	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	انتهای گرمکن
X (mm)	۰	۸۰	۲۸۰	۴۸۰	۶۸۰	۸۷۵	۱۰۸۰	۱۳۱۵
X/D	۰	۱۰/۱	۳۵/۴	۶۰/۷	۸۶/۱	۱۱۱/۱	۱۳۶/۷	



شکل ۱: دستگاه آزمایشگاهی به صورت نمادین

Fig. 1. Schematic diagram of experimental setup

در مقدار مورد نظر تنظیم می‌گردد. جریان آب خنک‌کننده ذکر شده نیز از مخزن نگه‌داری، توسط پمپ مربوط به سیکل دوم به جریان درمی‌آید و پس از انتقال حرارت در مبدل حرارتی، از آن خارج شده و به مخزن بازگردانده می‌شود.

دوغاب نیز پس از انتقال حرارت انجام شده با سیال خنک‌کننده و رسیدن به دمای مورد نظر، از مبدل حرارتی خارج می‌شود. دمای ورودی دوغاب ۲۵ درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته شد. پس از آن جریان دوغاب با دمای مشخص، وارد لوله مورد مطالعه می‌شود. لوله مورد مطالعه لوله‌ای مسی با سطح مقطع دایره‌ای می‌باشد که قطر داخلی ۷/۹ میلی‌متر، ضخامت آن ۲ میلی‌متر و طول آن ۱۲۸۵ میلی‌متر می‌باشد. روی دیواره لوله ۶ ترموکوپل (نوع K با دقت ۰/۱ درجه سانتیگراد) تعبیه شده که دمای سطح داخلی دیواره را اندازه‌گیری می‌کند. موقعیت این ترموکوپل‌ها در جدول ۱ گزارش شده است. هم‌چنین درون این لوله پره‌های پروانه‌ای از جنس مس قرار می‌گیرد. تعداد ۱۰ عدد از این پره‌ها با فاصله ۱۲ سانتی‌متر از یکدیگر بر روی یک سیم فلزی نازک به قطر ۱ میلی‌متر نصب شده‌اند و نقش آن‌ها ایجاد آشفتگی در مسیر جریان سیال می‌باشد. شکل ۲ تصویری از این پره‌های پروانه‌ای را نشان می‌دهد. قابل ذکر است که طول این پره‌ها ۵ میلی‌متر و عرض آن ها ۳ میلی‌متر می‌باشد.

شکل ۲: نمونه ای از پره‌ی جاگذاری شده درون لوله مورد مطالعه

Fig. 2. Butterfly tube insert for using in copper tube

در اطراف این لوله دو گرمکن با توان ۱۰۰۰ وات به‌صورت مارپیچ قرار داده شده که وظیفه گرم کردن و بالا بردن دمای دوغاب درون لوله را دارد. سپس جریان دوغاب از لوله‌ی مورد مطالعه خارج می‌شود و به مخزن ذخیره دوغاب بازگردانده می‌شود. مجدداً این سیکل به همراه سیکل خنک‌کننده به‌صورت پیوسته این فرآیند را تکرار می‌کنند. روی لوله مسی مورد مطالعه ابتدا با عایق الکتریکی پیچیده شده و روی عایق الکتریکی سیم گرمکن الکتریکی با توان ۱۰۰۰ وات جهت تامین شرایط فلاکس حرارتی ثابت روی دیواره با گام مساوی در طول لوله پیچیده شده است. اطراف لوله به طور کامل و کافی عایق حرارتی استفاده شده است به طوری که اتلاف حرارتی از دیواره در شرایط آزمایشات را به صفر نزدیک کند. فلاکس حرارتی از دو طریق محاسبه شده است: (الف) اندازه‌گیری ولتاژ و آمپر جریان و محاسبه توان و (ب) اندازه‌گیری اختلاف دمای ورودی و خروجی لوله مورد مطالعه و محاسبه گرمای محسوس جریان. به دلیل ناچیز بودن اختلاف دو روش، مقدار متوسط آن در محاسبات ضریب انتقال حرارت استفاده شده است.

همچنین قابل ذکر است که در این مطالعه به مقایسه نتایج به دست آمده در رینولدزهای ثابت پرداخته شده است. بدین منظور، عدد رینولدز را ثابت در نظر گرفته و با استفاده از رابطه مربوطه، مقادیر سرعت در شرایط مختلف کسر جرمی مواد تغییر فاز محاسبه شده است. سپس با استفاده از سرعت محاسبه شده، دبی حجمی سیال محاسبه شده و در ستاپ آزمایشگاهی اعمال شده است. بنابراین با تغییر دبی‌های حجمی، نتایج به دست آمده در رینولدزهای ثابت مورد مقایسه می‌باشد.

Table 2. Thermo-physical properties of MEPCM

جدول ۲: خواص ترموفیزیکی میکروکپسول DS ۵۰۳۸ X

خاصیت	مقدار	واحد
دمای ذوب	۲۵	°C
دمای انجماد	۲۴	°C
گرمای نهان ذوب	۱۰۰	kJ/kg
دانسیته	۴۰۰-۳۰۰	kg/m^3
اندازه ذرات	۳۰۰-۵۰	µm

۳- آماده سازی دوغاب

از میکروکپسول مواد تغییر فاز Micronal® با نام تجاری DS ۵۰۳۸ X محصول شرکت BASF برای تهیه دوغاب استفاده شد. خواص ترموفیزیکی این میکروکپسول که به صورت پودر می‌باشد، در جدول ۲ آورده شده است. برای بررسی تأثیر غلظت جرمی ذرات مواد تغییر فاز میکروکپسوله‌شده بر روی میزان انتقال حرارت، دوغاب مواد تغییر فاز میکروکپسوله‌شده با چهار غلظت متفاوت ۰، ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی آماده شد. پس از آن مواد تغییر فاز میکروکپسوله‌شده با ترازویی با دقت ۰/۰۰۱ توزین شد. از طرفی وزن سیال پایه که در اینجا آب مقطر بود، اندازه‌گیری شد. برای تولید دوغاب با هرکدام از درصدهای وزنی ذکر شده این کار تکرار شد. سپس مواد تغییر فاز میکروکپسوله‌شده را به صورت تدریجی به سیال که بر روی همزن مغناطیسی قرار داده شده بود، اضافه شد. این ترکیب به مدت ۱۰ ساعت بر روی همزن، هم زده شد تا به پایداری نسبی برسد؛ به علاوه در حین کار برای یکنواخت ماندن دوغاب، به طور پیوسته مخلوط بهم زده شد.

۴- نحوه انجام محاسبات

رابطه ناسلت به‌صورت زیر می‌باشد:

$$Nu_x = \frac{h_x d}{k_b} \qquad (۱)$$

برای محاسبه h_x از رابطه زیر و داده‌های به‌دست‌آمده از آزمایش استفاده می‌گردد.

$$h_x = \frac{q_w}{T_{w,x} - T_{b,x}} \quad (۲)$$

که $T_{w,x}$ و $T_{b,x}$ به ترتیب دمای سطح دیواره و دمای توده سیال در نقاط مختلف از ورودی لوله است. با توجه به قابلیت‌های دستگاه حاضر، فقط دمای دیواره قابل اندازه‌گیری می‌باشد. دمای مربوط به توده سیال را با استفاده از رابطه (۳) تا (۶) می‌توان محاسبه کرد. از آنجایی که در یک بازه دمایی مشخص تغییر فاز اتفاق می‌افتد، دمای توده سیال در قسمت‌های مختلف لوله متفاوت می‌باشد و به صورت زیر محاسبه می‌شود:

ناحیه ۱ (در حین ذوب): $T_b(x) = T_m$ (دمای توده سیال) (۳)

$$\frac{L_2}{L} = \frac{L - L_1 - L_3}{L} \quad \text{(طول ناحیه دوم)} \quad (۴)$$

ناحیه ۲ (پس از ذوب): $T_b(x) = T_m + \frac{H}{\dot{m} C_{p,s}} \frac{x}{L_3}$ (دمای توده سیال) (۵)

$$\frac{L_3}{L} = \frac{\dot{m} C_{p,s} (T_{b,outlet} - T_m)}{H} \quad \text{(طول ناحیه سوم)} \quad (۶)$$

هم‌چنین مقدار گرمایی که به دیواره لوله‌ی مورد مطالعه اعمال شده به ترتیب زیر محاسبه شد:

$$H = \dot{m} C_p \Delta T + \dot{m} \lambda = \dot{m} C_p \Delta T + \dot{m} \int_{T_{solidus}}^{T_{liquidus}} C_p dT \quad (۷)$$

که شامل مجموع مقادیر مربوط به گرمای نهان ذوب و گرمای محسوس می‌باشد. در رابطه فوق، C_p ظرفیت گرمایی دوغاب و $\dot{m} = \rho Q$ می‌باشد. بنابراین برای محاسبه این روابط به محاسبه خواص فیزیکی دوغاب نیاز داریم. به این منظور روابط مربوط دوغاب میکروکپسول مواد تغییر فاز میکروکپسوله‌شده، به صورت زیر از منابع استخراج شد:

چگالی [۳۴]:

$$\rho_s = \varphi \rho_p + (1-\varphi) \rho_{bf} \quad (۸)$$

ضریب انتقال گرمای هدایتی [۳۵]:

$$k_s = \frac{k_p + 2k_{bf} + 2\varphi(1+\beta)^3 (k_p - k_{bf})}{k_p + 2k_{bf} - \varphi(1+\beta)^3 (k_p - k_{bf})} k_{bf} \quad (۹)$$

که در رابطه فوق β نسبت قطر پوسته ذرات به هسته آن‌ها می‌باشد و مقدار آن برابر با ۰/۱ در نظر گرفته شده است.

ویسکوزیته [۲۶]:

$$\mu_s = \mu_{bf} \left(1 - \varphi - 1.5\varphi^2\right)^{-2.5} \quad (۱۰)$$

و نهایتا ظرفیت گرمایی ویژه با استفاده از رابطه (۱۱) تا (۱۳) محاسبه می‌شود [۳۵ و ۳۶]. ظرفیت گرمایی ویژه مواد تغییر فاز میکروکپسوله‌شده در حین تغییر فاز از جامد به مایع بسیار زیاد است. رابطه (۱۲) با اعمال یک رابطه سینوسی، تغییرات ظرفیت گرمایی ویژه را در زمان تغییر فاز در نظر می‌گیرد.

$$for: \; T_b < T_{solidus}$$

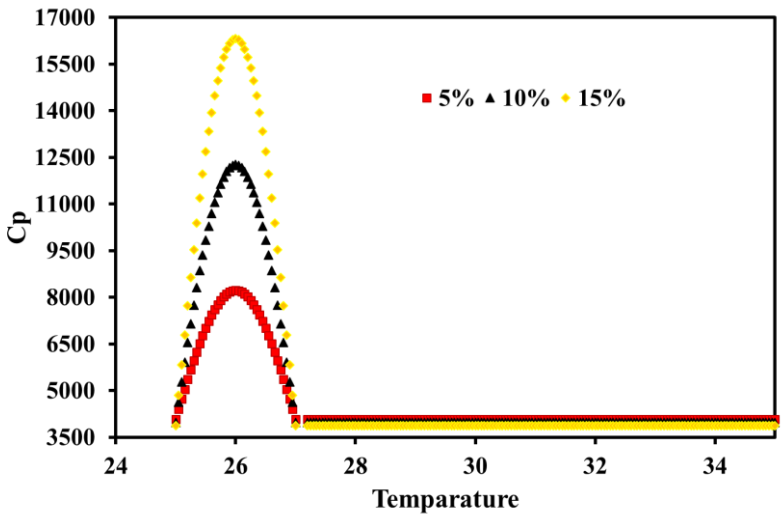
$$C_{p,s} = \varphi C_{p,p} + (1-\varphi) C_{p,bf} \quad (۱۱)$$

$$for: \; T_{solidus} < T_b < T_{Liquidus}$$

$$C_{p,s} = (1-\varphi) C_{p,bf} + \varphi \left[C_{p,p} + \left\{ \frac{\pi}{2} \left(\frac{\lambda}{T_{Mr}} - C_{p,p} \right) . \sin \pi \left[\frac{(T - T_1)}{T_{Mr}} \right] \right\} \right] \quad (۱۲)$$

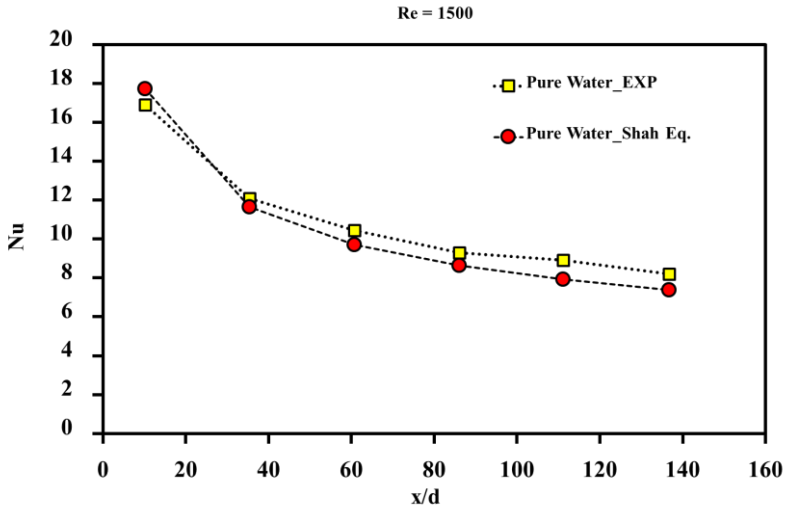
$$for: \; T_b > T_{Liquidus}$$

$$C_{p,s} = \varphi C_{p,p} + (1-\varphi) C_{p,bf} \quad (۱۳)$$



شکل ۳: نمودار تغییرات Cp بر حسب دما برای دوغاب ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی مواد تغییر فاز میکروکپسوله‌شده

Fig. 3. Specific heat capacity of 5, 10 and 15 wt% MEPCM slurry



شکل ۴: مقایسه عدد ناسلت حاصل از نتایج تجربی و معادله شاه [۳۴]

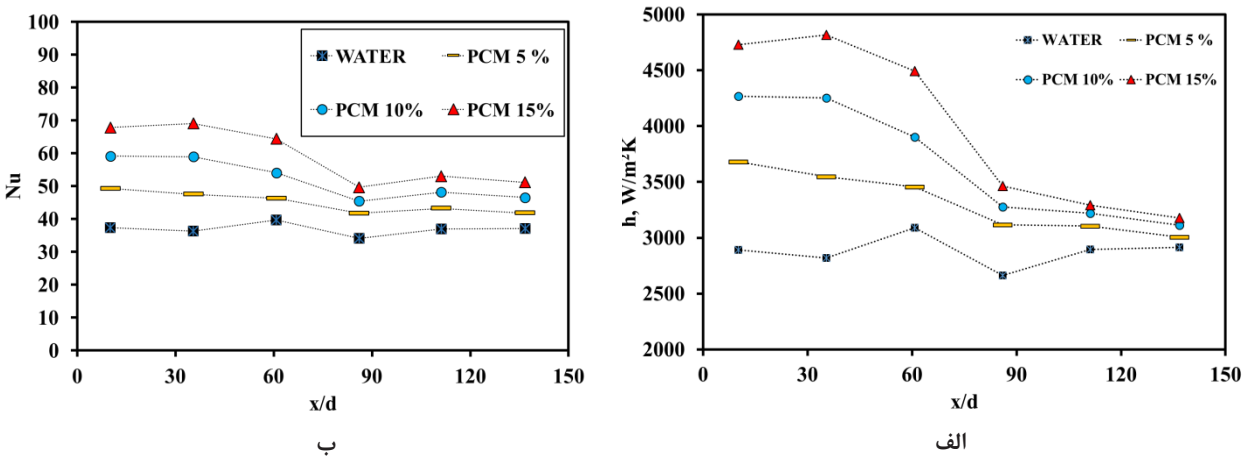
Fig. 4. Validation of the experimental setup

نمودار تغییرات C_p با دما طبق رابطه فوق، برای دوغاب ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد وزنی مواد تغییر فاز میکروکپسوله‌شده، به صورت شکل ۳ می‌باشد. از آنجا که دمای ورودی ۲۵ درجه سانتی گراد است و شروع ذوب ماده تغییر فاز در همین دما است، نمودار فقط در دو بازه تغییر فاز و ذوب کامل ارائه شده است و تنها محاسبات مربوط به همین دو ناحیه انجام شده است.

بنابراین با محاسبه سطح زیر نمودار، برای هر کدام از حالات فوق می‌توان میزان گرمای نهان ذوب را به دست آورد.

پس از آن میزان فلاکس حرارتی می‌بایست محاسبه شود. برای این منظور از رابطه (۱۴) استفاده می‌شود:

$$q_x = \frac{H}{\pi d L} \qquad (۱۴)$$



شکل ۵: تغییرات (الف) ضریب انتقال حرارت و (ب) عدد ناسلت در نقاط مختلف لوله و برای سیالات متفاوت —Re = ۲۶۰۰– بدون پره‌های پروانه‌ای

Fig. 5. Variation of (a) heat transfer coefficient, and (b) Nusselt number, with different slurry composition at Re=2600 and without butterfly tube insert

۵- بحث و تفسیر نتایج

۵- ۱- اعتبارسنجی داده‌ها

هدف از ارائه این بخش بررسی اعتبار و صحت انجام آزمایش‌ها می‌باشد. بدین منظور، داده‌های تجربی با داده‌های به دست آمده از معادله تجربی شاه[1] [۳۴] (رابطه (۱۵)) مقایسه شد. مقایسه‌ی این دو حالت در نمودار شکل ۴ که برای آب خالص و حالتی که درون لوله پره وجود ندارد، آورده شده است. این شکل نشان می‌دهد که نتایج به دست آمده از این مدل با نتایج تجربی مطابقت خوبی دارد؛ به طوری‌که میزان انحراف داده‌های معادله شاه نسبت به داده‌های تجربی ۱۳/۲ درصد می‌باشد.

$$Nu = \begin{cases} 1.953(RePrD/x) & (RePrD/x)\geq 33.3 \\ 4.364+0.0722RePrD/x & (RePrD/x)<33.3 \end{cases} \quad (۱۵)$$

اعتبارسنجی نتایج حاصل از دستگاه آزمایشی برای آب خالص انجام شده که نتایج حاصله نشان دهنده معتبر بودن نتایج استخراج شده از دستگاه مورد استفاده برای انجام آزمایشات است. حال از این دستگاه برای انجام آزمایشات مربوط به ماده تغییر فاز استفاده شده است. بدین منظور با معادل کردن مخلوط دوغاب با یک مخلوط دوفازی و استفاده از روابط موجود برای تخمین خواص ترموفیزیکی مخلوط دوفازی به کمک خواص ترموفیزیکی هر کدام از فازهای مخلوط دوغاب (روابط (۸) تا (۱۳))، محاسبات انجام شد.

در ادامه این بخش به ارائه مقایسه بین مقادیر ضریب انتقال حرارت در نقاط مختلف لوله، برای داده‌های شبیه‌سازی و تجربی، برای حالت‌هایی که لوله با پره‌های پروانه‌ای و بدون آن‌ها پرداخته خواهد شد.

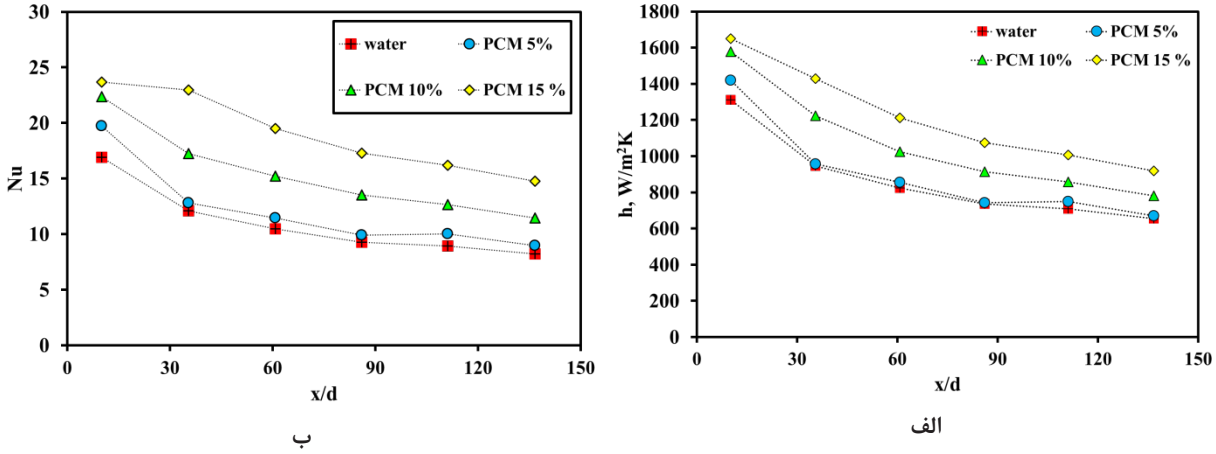
۵- ۲- اثر افزودن ماده تغییر فاز میکروکپسوله‌شده بر ضریب انتقال حرارت — بدون پره

سه دوغاب با کسر وزنی مختلف ۵، ۱۰ و ۱۵ درصد آماده شد و مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاصل، مربوط به این سه دوغاب با نتایج مربوط به آب خالص مقایسه شد. شکل‌های ۵ و ۶ تغییرات ضریب انتقال حرارت محلی را در نقاط مختلف لوله به ترتیب برای عدد رینولدز ۲۶۰۰ و ۱۵۰۰ (محدوده جریان آشفته و جریان آرام) ارائه کرده است. نتایج نشان می‌دهد که اضافه کردن ماده تغییر فاز میکروکپسوله‌شده به سیال پایه، باعث بهبود ضریب انتقال حرارت می‌شود. میزان افزایش ضریب انتقال حرارت به‌طور متوسط برای دوغاب ۵، ۱۰و ۱۵ درصد وزنی ماده تغییر فاز میکروکپسوله‌شده نسبت به آب خالص و در عدد رینولدز ۲۶۰۰ (شکل ۵) به ترتیب ۱۵/۲، ۲۷/۴ و ۴۰/۳ می‌باشد و برای جریان آرام (شکل ۶) میزان افزایش برابر ۷/۵، ۲۰/۷ و ۳۸/۹ است. با مقایسه این دو شکل مشخص می‌گردد که اگر محدوده دمای کاری در دمایی نزدیک به دمای ذوب مواد تغییر فاز باشد، میزان ضریب انتقال حرارت می‌تواند به صورت چشم‌گیری افزایش پیدا کند.

دلیل این اتفاق به صورت تئوری با استفاده از رابطه پرانتل [۳۷] و ناسلت [۳۸] که مربوط به جریان سیال می‌باشد، می‌توان توصیف کرد:

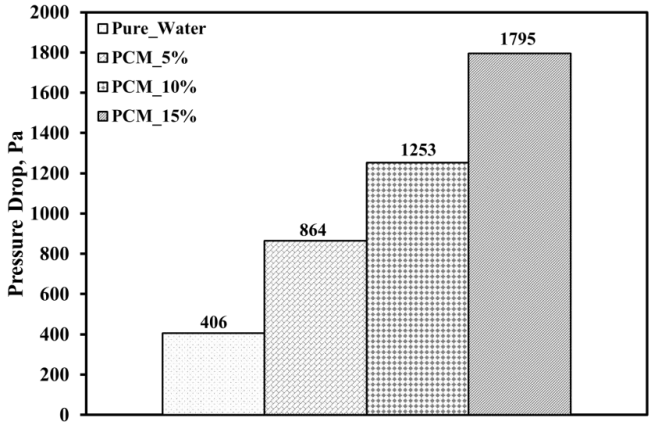
$$Pr = \frac{C_p \mu}{k} \quad (۱۶)$$

1 Shah



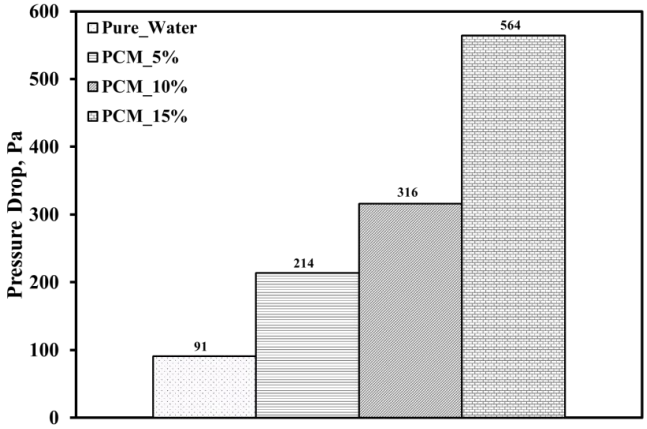
شکل ۶: تغییرات (الف) ضریب انتقال حرارت و (ب) عدد ناسلت در نقاط مختلف لوله و برای سیالات متفاوت –Re = ۱۵۰۰ – بدون پره‌های پروانه‌ای

Fig. 6. Variation of (a) heat transfer coefficient, and (b) Nusselt number, with different slurry composition at Re=1500 and without butterfly tube insert



شکل ۷: اثر افزودن ماده تغییر فاز میکروکپسوله‌شده به سیال پایه بر روی افت فشار جریان Re = ۲۶۰۰

Fig. 7. The effect of MEPCM on pressure drop at Re=2600



شکل ۸: اثر افزودن ماده تغییر فاز میکروکپسوله‌شده به سیال پایه بر روی افت فشار جریان Re = ۱۵۰۰

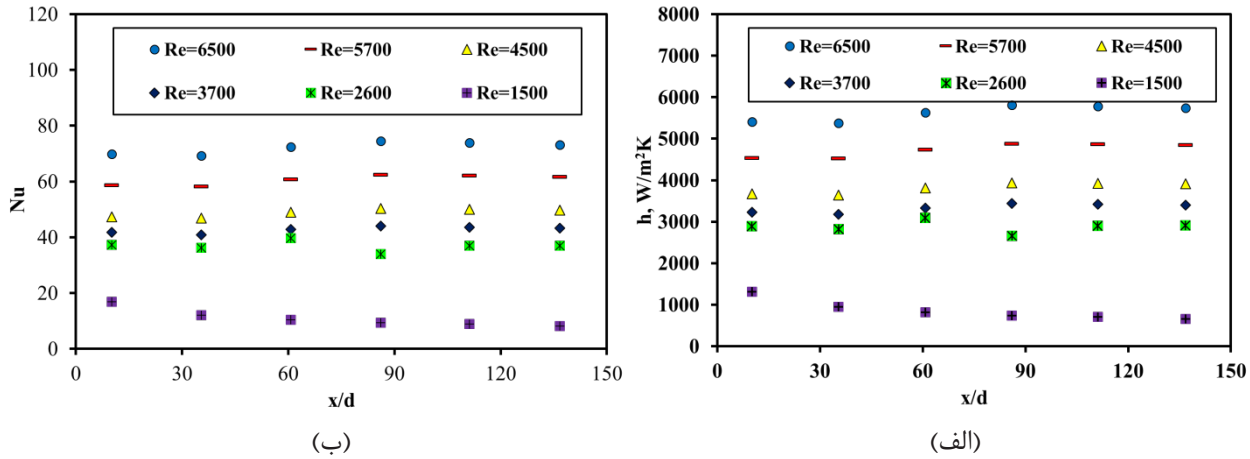
Fig. 8. The effect of MEPCM on pressure drop at Re=1500

$$Nu = 0.023 Re^{0.8} Pr^{0.4} \quad (۱۷)$$

با توجه به این روابط، ناسلت با C_p رابطه مستقیم و با k رابطه عکس دارد؛ همچنین ضریب انتقال حرارت با C_p و k رابطه مستقیم دارد. یعنی در محدوده تغییر فاز مواد تغییر فاز که C_p به شدت افزایش (برای دوغاب ۵ درصد وزنی از مقدار تقریبی ۴۰۰۰ به ۸۲۰۰) و k کاهش (برای دوغاب ۵ درصد وزنی از مقدار تقریبی ۰/۵۹ به ۰/۵۶) پیدا می‌کند، میزان انتقال حرارت زیاد می‌شود که در عمل نیز به همین ترتیب است؛ علت افزایش این است که در دوغاب مواد تغییر فاز اثر افزایش ظرفیت گرمایی ویژه بر کاهش هدایت حرارتی غالب می‌باشد و در نتیجه منجر به افزایش ضریب انتقال حرارت می‌شود. در جریان درهم که دمای توده سیال افزایش زیادی ندارد، یک پیک مشاهده که مربوط به ناحیه تغییر فاز است اما در جریان آرام که دمای توده سیال به سرعت افزایش می‌یابد، این پیک دیده نمی‌شود. چرا که در جریان درهم افزایش دمای توده سیال کم است و دمای جریان در طول بیشتری از لوله در محدوده‌ی دمایی تغییر فاز قرار دارد.

۵- ۳- تأثیر افزودن ماده تغییر فاز میکروکپسوله‌شده بر افت فشار

در بخش قبل مشاهده شد که با افزودن ماده تغییر فاز میکروکپسوله‌شده به سیال پایه، می‌توان خواص انتقال حرارتی آن را تا حد قابل توجهی افزایش داد. این افزایش یک عامل مثبت در عملکرد کلی سیستم محسوب



شکل ۹: تغییرات (الف) ضریب انتقال حرارت محلی و (ب) عدد ناسلت محلی در طول لوله و در اعداد رینولدز مختلف – آب خالص

Fig. 9. (a) Local heat transfer coefficient, and (b) local Nusselt number at different Reynold's number for pure water

می‌گردد. اما در مقابل با افزودن ماده تغییر فاز میکروکپسوله‌شده به سیال پایه، ویسکوزیته‌ی آن افزایش می‌یابد. افزایش در مقدار ویسکوزیته موجب ایجاد افت فشار بیشتر می‌گردد. افزایش افت فشار در سیستم یک عامل منفی به شمار می‌آید. شکل‌های ۷ و ۸ میزان افت فشار را به ترتیب برای جریان آشفته و جریان آرام درون لوله بدون پره‌های پروانه‌ای نشان می‌دهند. نتایج نشان می‌دهد که با افزودن ماده تغییر فاز میکروکپسوله‌شده، افت فشار تا ۵ برابر در هر حالت افزایش پیدا کرده است.

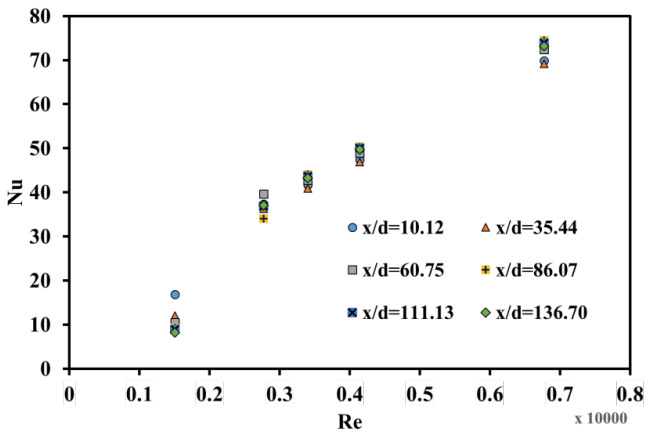
۵- ۴- تأثیر دبی جریان سیال بر روی ضریب انتقال حرارت

از دیگر مواردی که در این پژوهش به آن پرداخته شد، بررسی اثر تغییر دبی جریان بر روی میزان انتقال حرارت می‌باشد. به این منظور تغییرات ضریب انتقال حرارت در ۶ عدد رینولدز مختلف، برای آب خالص و دوغاب ۱۰٪ وزنی ماده تغییر فاز میکروکپسوله‌شده مورد بررسی قرار گرفت. شکل ۹-الف تغییرات ضریب انتقال حرارت محلی و شکل ۹-ب تغییرات ناسلت محلی را در نقاط مختلف لوله، برای آب خالص نشان می‌هد. با مشاهده این نمودارها نتیجه می‌شود که با کاهش عدد رینولدز و یا به عبارتی کاهش میزان دبی جرمی جریان ورودی، میزان ضریب انتقال حرارت محلی و عدد ناسلت کاهش پیدا می‌کند. اما نکته قابل توجه این است که، کاهش در زمان تغییر رژیم جریان از آشفته به آرام بسیار بیشتر می‌باشد. بنابراین می توان گفت که آشفته بودن جریان نقش به سزایی در افزایش انتقال حرارت دارد.

همچنین نمودار شکل ۱۰ عدد ناسلت را در مقابل عدد رینولدز نشان می دهد که دوغاب ۱۰ درصد وزنی مواد تغییر فاز میکروکپسوله‌شده می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهند که در یک رینولدز ثابت، هر چه سیال به انتهای لوله نزدیک‌تر می‌شود، میزان عدد ناسلت کاهش پیدا می‌کند. این نمودار ها برای حالتی است که پره‌ها درون لوله قرار ندارند.

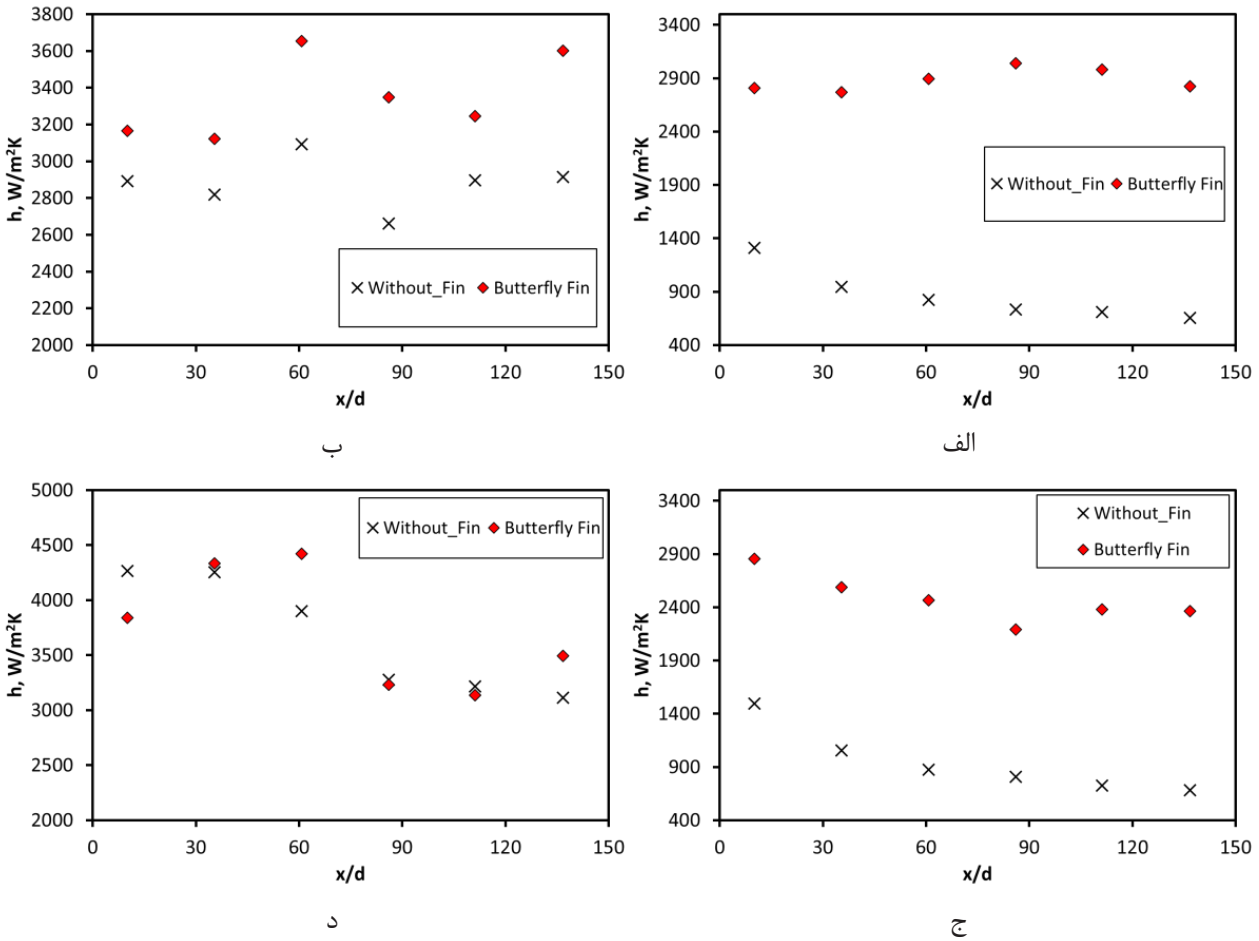
۵- ۵- اثر پره‌های پروانه‌ای بر روی عملکرد انتقال حرارتی

شکل ۱۱ مقادیر ضریب انتقال حرارت به صورت مقایسه‌ای، بین نتایج به دست آمده از دو حالتی که لوله بدون پره می‌باشد و حالتی که درون لوله پره‌های پروانه‌ای شکل قرار داده شده است، نشان می‌دهد. نمودار شکل ۱۱- الف و ۱۱-ج در عدد رینولدز ثابت ۱۵۰۰ و به ترتیب برای آب خالص و دوغاب مواد تغییر فاز میکروکپسوله‌شده رسم شده‌اند و مقادیر ضریب



شکل ۱۰: تغییرات عدد ناسلت در طول لوله و در اعداد رینولدز مختلف – دوغاب ۱۰٪ مواد تغییر فاز میکروکپسوله‌شده

Fig. 10. Local Nusselt number at different Reynold's number for 10% MEPCM slurry

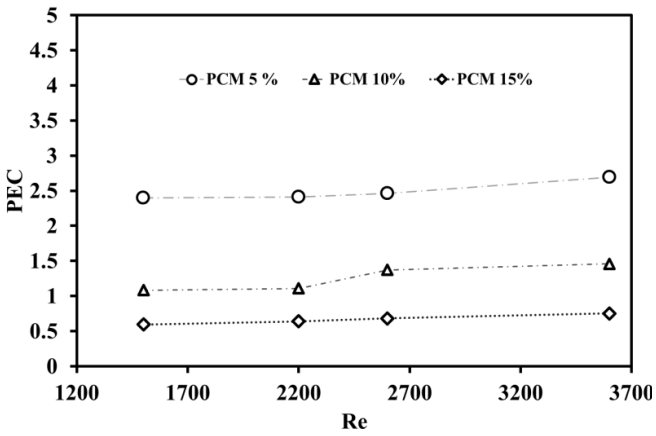


شکل ۱۱: الف)تأثیر به کارگیری پره‌های پروانه‌ای بر ضریب انتقال حرارت — Re = ۱۵۰۰ – آب خالص ب) تأثیر به کارگیری پره‌های پروانه‌ای بر ضریب انتقال حرارت — Re = ۲۶۰۰ – آب خالص ج) تأثیر به کارگیری پره‌های پروانه‌ای بر ضریب انتقال حرارت — Re = ۱۵۰۰ – دوغاب ۱۰ درصد وزنی مواد تغییر فاز میکروکپسوله‌شده د) تأثیر به کارگیری پره‌های پروانه‌ای بر ضریب انتقال حرارت — Re = ۲۶۰۰ – دوغاب ۱۰ درصد وزنی مواد تغییر فاز میکروکپسوله‌شده

Fig. 11. The effect of using butterfly tube insert at (a) Re=1500 and pure water, (b) Re=2600 and pure water, (c) Re=1500 and 10% MEPCM slurry, and (d) Re=2600 and 10% MEPCM slurry

انتقال حرارت را نشان می‌دهند. هم‌چنین شکل ۱۱–ب و ۱۱–د در عدد رینولدز ثابت ۲۶۰۰ و به ترتیب برای آب خالص و دوغاب مواد تغییر فاز میکروکپسوله‌شده رسم شده‌اند. دلیل انتخاب این دو عدد رینولدز این بوده است که حالت‌های جریان آشفته و آرام برای حالت‌های با پره و بدون آن با یکدیگر مقایسه شوند.

از این نمودارها مشاهده می‌شود، زمانی که جریان آشفته است (Re =۲۶۰۰) استفاده از پره‌ها تأثیر زیادی بر روی میزان ضریب انتقال حرارت ندارد (ضریب انتقال حرارت دراین حالت به‌طور متوسط ۱۶ درصد برای آب خالص و ۷ درصد برای دوغابِ ۱۰ درصد وزنی مواد تغییر فاز میکروکپسوله‌شده افزایش پیدا می‌کند)؛ اما زمانی که رژیم جریان حاکم درون لوله آرام است، استفاده از پره‌ها می‌تواند ضریب انتقال حرارت را به میزان ۲۳۴ درصد برای آب خالص و ۱۸۰ درصد برای دوغاب استفاده شده، افزایش دهد. دلیل این افزایش چشم‌گیر در میزان انتقال حرارت، این است که درون لوله‌ی بدون پره، وقتی جریانِ آرام برقرار است، هر چه جریان درون لوله پیش می‌رود، لایه‌ی مرزی گرمایی گسترش پیدا می‌کند. لایه‌ی مرزی گرمایی یک مقاومت در برابر انتقال گرما محسوب می‌شود. بنابراین اختلاف دمای سطح دیواره و دمای توده سیال درون لوله افزایش پیدا می‌کند. افزایش اختلاف دما در یک فلاکس حرارتی ثابت، باعث کاهش میزان ضریب انتقال حرارت می‌شود. اما زمانی که پره‌ها درون لوله قرار داده می‌شوند، به واسطه‌ی آشفتگی که در مسیر جریان ایجاد می‌شود، موجب می‌گردد که لایه‌ی مرزی گرمایی از بین برود و اختلاف دمای سطح دیواره و توده سیال کاهش پیدا کند. در این حالت نیز افت فشار افزایش می‌یابد اما میزان افزایش ضریب انتقال حرارت



شکل ۱۲: معیار ارزیابی عملکرد در رینولدزهای مختلف و برای کسر جرمی‌های مختلف مواد تغییر فاز

Fig. 12. Performance evaluation criteria

بسیار بیشتر از زمانی است که از پره استفاده نمی‌شود.

اما از مطالعه این نمودارها مشخص می‌گردد که میزان ضریب انتقال حرارت برای زمانی که از پره استفاده می‌شود، برای دوغاب کمتر از آب خالص افزایش می‌یابد. دلیل این امر افزایش گرانروی در دوغاب نسبت به آب خالص است. چرا که افزایش گرانروی می‌تواند باعث کاهش عدد رینولدز و در نتیجه کاهش آشفتگی در جریان گردد و همان‌طور که گفته شد، آشفتگی نقش بسزایی در افزایش انتقال حرارت دارد.

۵- ۶- معیار ارزیابی عملکرد[1]

با توجه به نتایج به دست آمده، اضافه کردن مواد تغییر فاز میکروکپسوله‌شده به سیال پایه، ضریب انتقال حرارت و افت فشار را به صورت همزمان افزایش می‌دهد. افزایش ضریب انتقال حرارت یک عامل مثبت و افزایش افت فشار یک عامل منفی است. به منظور ارزیابی و بررسی تاثیر همزمان این دو عامل از پارامتر معیار ارزیابی عملکرد، PEC استفاده می‌شود که طبق رابطه زیر محاسبه می‌شود [۳۹]:

$$PEC = \frac{Nu_s / Nu_{bf}}{(\Delta p_s / \Delta p_{bf})^{1/3}} \qquad (۱۸)$$

نتایج مربوط به محاسبه این پارامتر در نمودار شکل ۱۲ آمده است. مشاهده می‌شود که افزودن مواد تغییر فاز به سیال پایه به هر نسبتی منطقی نمی‌باشد؛ به طوری که بهترین نسبت بین افزایش ضریب انتقال حرارت و افت فشار مربوط به دوغاب ۵ درصد وزنی از مواد تغییر فاز است. بنابراین می‌توان گفت که بسته به شرایط مورد استفاده (میزان اهمیت بالا بودن ضریب انتقال حرارت و یا اقتصاد فرآیند) می‌توان دوغاب با درصد وزنی‌های مختلف به کار برد. همچنین از این شکل مشخص می‌گردد که با افزایش عدد رینولدز، عدد PEC افزایش پیدا می‌کند.

۶- نتیجه‌گیری

هدف این کار بررسی تأثیر افزودن مواد تغییر فاز میکروکپسوله‌شده به سیال پایه بر روی مشخصه‌های هیدرودینامیکی و انتقال حرارتی آن بود. به این منظور دوغاب مواد تغییر فاز میکروکپسوله‌شده با درصدهای وزنی ۵، ۱۰ و ۱۵ آماده شد. این دوغاب درون لوله‌ای با سطح مقطع دایروی که تحت شار حرارتی ثابتی قرار داشت، عبور داده شد. هم‌چنین مطالعات برای زمانی که درون لوله، پره‌های پروانه‌ای شکل نیز قرار داده می‌شود تکرار شد و اثر این پره‌ها نیز بر میزان انتقال حرارت و افت فشار مورد بررسی قرار گرفت. پس از استخراج داده‌های بدست آمده به تجزیه و تحلیل آن‌ها پرداخته شد. مهم‌ترین نتایجی که از انجام این آزمایشات به دست آمد عبارت است از:

افزودن مواد تغییر فاز میکروکپسوله‌شده به سیال پایه میزان ضریب انتقال حرارت را بهبود می‌بخشد. این میزان بهبود برای دوغاب ۵ درصد وزنی به‌طور متوسط برابر ۱۱ درصد، برای دوغاب ۱۰ درصد وزنی ۲۹ درصد و برای دوغاب ۱۵ درصد وزنی ۴۱ درصد است. همچنین مشاهده شد که اگر دمای سیال کاری در محدوده تغییر فاز مواد تغییر فاز باشد این میزان می‌تواند تا ۶۵ درصد نیز افزایش داشته باشد. به عبارتی عملکرد سیال کاری به طور قابل توجهی به محدوده‌ی دمایی بستگی دارد که در آن دستگاه کار می‌کند.

اضافه کردن میکروکپسول به سیال پایه ویسکوزیته سیال را ۱/۵ برابر (برای دوغاب ۵ درصد وزنی مواد تغییر فاز میکروکپسوله‌شده) تا ۳/۴ برابر (برای دوغاب ۱۵ درصد وزنی مواد تغییر فاز میکروکپسوله‌شده) افزایش می‌دهد که این عامل باعث افزایش افت فشار در سیستم می‌گردد.

نتایج حاصل از قرارگیری پره‌های پروانه‌ای نشان داد که بکارگیری این پره‌ها برای جریان‌های آشفته نمی‌تواند ضریب انتقال حرارت را به‌طور قابل توجهی افزایش دهد و تنها، میزان افت فشار که یک عامل منفی می‌باشد، افزایش می‌دهد. اما بکارگیری این پره‌ها برای جریان‌های آرام ضریب انتقال حرارت را حالت‌های مختلف از ۱۷۰ تا ۲۴۰ درصد افزایش می‌دهد. دلیل این اتفاق از بین رفتن لایه‌ی مرزی گرمایی است که در جریان‌های آرام در طول لوله گسترش پیدا می‌کند. با آشفته شدن جریان به واسطه این پره‌ها و از

1 Performance Evaluation Criteria (PEC)

بین رفتن لایه مرزی گرمایی، اختلاف دمایی بین دیواره‌ی لوله و توده سیال کاهش پیدا می‌کند و در نتیجه ضریب انتقال حرارت افزایش می‌یابد. در این حالت نیز افت فشار افزایش پیدا می‌کند.

۷- فهرست علائم

علائم انگلیسی

A	مساحت سطح مقطع - m^2
C_p	ظرفیت گرمایی ویژه - $J/kg.K$
d	قطر - m
H	مقدار گرما - W
h	ضریب انتقال حرارت جابه جایی - $W/m^2.K$
k	ضریب انتقال حرارت هدایتی $W/m.K$
L	طول لوله - m
p	فشار - Pa
q	فلاکس حرارتی - W/m^2
T	دما - K
T_m	دمای ذوب مواد تغییر فاز - °C

علائم یونانی

λ	گرمای نهان ذوب - J/kg
μ	ویسکوزیته - $N.s/m^3$
v	سرعت - m/s
ρ	دانسیته - kg/m^3
φ	کسر حجمی ذرات

زیر نویس‌ها

b	توده سیال
bf	سیال پایه
f	سیال پایه
i	ورودی
o	خروجی
p	ذره
S	دوغاب مواد تغییر فاز میکروکپسوله‌شده
w	دیواره

منابع

[1] H. Mohammed, G. Bhaskaran, N. Shuaib, and R. Saidur, "Heat transfer and fluid flow characteristics in microchannels heat exchanger using nanofluids: a review," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 15, pp. 1502-1512, 2011.

[2] A. Azari and M. Derakhshandeh, "An experimental comparison of convective heat transfer and friction factor of Al2O3 nanofluids in a tube with and without butterfly tube inserts," Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, vol. 52, pp. 31-39, 2015.

[3] M. A. Teamah, M. M. K. Dawood, and A. Shehata, "Numerical and experimental investigation of flow structure and behavior of nanofluids flow impingement on horizontal flat plate," Experimental Thermal and Fluid Science, vol. 74, pp. 235-246, 2016.

[4] H. Yarmand, S. Gharehkhani, S. F. S. Shirazi, A. Amiri, M. S. Alehashem, M. Dahari, et al., "Experimental investigation of thermo-physical properties, convective heat transfer and pressure drop of functionalized graphene nanoplatelets aqueous nanofluid in a square heated pipe," Energy Conversion and Management, vol. 114, pp. 38-49, 2016.

[5] L. Asmaie, M. Haghshenasfard, A. Mehrabani-Zeinabad, and M. N. Esfahany, "Thermal performance analysis of nanofluids in a thermosyphon heat pipe using CFD modeling," Heat and Mass Transfer, vol. 49, pp. 667-678, 2013.

[6] B. Ruan, X. Gao, and H. Meng, "Numerical modeling of turbulent heat transfer of a nanofluid at supercritical pressure," Applied Thermal Engineering, vol. 113, pp. 994-1003, 2017.

[7] A. Azari, M. Kalbasi, and M. Rahimi, "Numerical study on the laminar convective heat transfer of alumina/ water nanofluids," Journal of Thermophysics and Heat Transfer, vol. 27, pp. 170-173, 2013.

[8] T. Kondo and T. Ibamoto, "Research on using the PCM

[16] L. Chen, T. Wang, Y. Zhao, and X.-R. Zhang, "Characterization of thermal and hydrodynamic properties for microencapsulated phase change slurry (MPCS)," Energy Conversion and Management, vol. 79, pp. 317-333, 2014.

[17] W. Lu and S. Tassou, "Experimental study of the thermal characteristics of phase change slurries for active cooling," Applied Energy, vol. 91, pp. 366-374, 2012.

[18] P. Zhang and Z. Ma, "An overview of fundamental studies and applications of phase change material slurries to secondary loop refrigeration and air conditioning systems," Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 16, pp. 5021-5058, 2012.

[19] X. Wang, J. Niu, and A. Van Paassen, "Raising evaporative cooling potentials using combined cooledceiling and MPCM slurry storage," Energy and Buildings, vol. 40, pp. 1691-1698, 2008.

[20] S. K. Roy and B. L. Avanic, "Turbulent heat transfer with phase change material suspensions," International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 44, pp. 2277-2285, 2001.

[21] M. Huang, P. Eames, S. McCormack, P. Griffiths, and N. Hewitt, "Microencapsulated phase change slurries for thermal energy storage in a residential solar energy system," Renewable Energy, vol. 36, pp. 2932-2939, 2011.

[22] M. Goel, S. Roy, and S. Sengupta, "Laminar forced convection heat transfer in microcapsulated phase change material suspensions," International journal of heat and mass transfer, vol. 37, pp. 593-604, 1994.

[23] Y. Yamagishi, H. Takeuchi, A. T. Pyatenko, and N. Kayukawa, "Characteristics of microencapsulated PCM slurry as a heat-transfer fluid," AIChE Journal, vol. 45, pp. 696-707, 1999.

for ceiling board," in Proceedings of the 9th International Conference on Thermal Energy Storage–Futurestock, 2003.

[9] M. Farid and X. Chen, "Domestic electrical space heating with heat storage," Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, vol. 213, pp. 83-92, 1999.

[10] F. Kuznik, J. Virgone, and J.-J. Roux, "Energetic efficiency of room wall containing PCM wallboard: a full-scale experimental investigation," Energy and buildings, vol. 40, pp. 148-156, 2008.

[11] K. Peippo, P. Kauranen, and P. Lund, "A multicomponent PCM wall optimized for passive solar heating," Energy and buildings, vol. 17, pp. 259-270, 1991.

[12] R. Kandasamy, X.-Q. Wang, and A. S. Mujumdar, "Transient cooling of electronics using phase change material (PCM)-basedheat sinks," Applied Thermal Engineering, vol. 28, pp. 1047-1057, 2008.

[13] S. Baronetto, G. Serale, F. Goia, and M. Perino, "Numerical model of a slurry PCM-based solar thermal collector," in Proceedings of the 8th International Symposium on Heating, Ventilation and Air Conditioning, 2014, pp. 13-20.

[14] E. Stamatiou and M. Kawaji, "Thermal and flow behavior of ice slurries in a vertical rectangular channel. Part I: Local distribution measurements in adiabatic flow," International Journal of Heat andMass Transfer, vol. 48, pp. 3527-3543, 2005.

[15] A. Sarı and A. Biçer, "Thermal energy storage properties and thermal reliability of some fatty acid esters/building material composites as novel form-stable PCMs," Solar Energy Materials and Solar Cells, vol. 101, pp. 114-122, 2012.

a PCM slurry," Applied Thermal Engineering, vol. 63, pp. 11-22, 2014.

[31] A. B. Alquaity, S. A. Al-Dini, E. N. Wang, and B. S. Yilbas, "Numerical investigation of liquid flow with phase change nanoparticles in microchannels," International Journal of Heat and Fluid Flow, vol. 38, pp. 159-167, 2012.

[32] R. Sabbah, M. M. Farid, and S. Al-Hallaj, "Micro-channel heat sink with slurry of water with micro-encapsulated phase change material: 3D-numerical study," Applied Thermal Engineering, vol. 29, pp. 445-454, 2009.

[33] M. I. Hasan, "Numerical investigation of counter flow microchannel heat exchanger with MEPCM suspension," Applied Thermal Engineering, vol. 31, pp. 1068-1075, 2011.

[34] A. Azari and M. Derakhshandeh, "An experimental comparison of convective heat transfer and friction factor of Al 2 O 3 nanofluids in a tube with and without butterfly tube inserts," Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, vol. 52, pp. 31-39, 2015.

[35] E. L. Alisetti and S. K. Roy, "Forced convection heat transfer to phase change material slurries in circular ducts," Journal of thermophysics and heat transfer, vol. 14, pp. 115-118, 2000.

[36] H. Lu, H. R. Seyf, Y. Zhang, and H. Ma, "Heat transfer enhancement of backward-facing step flow by using nano-encapsulated phase change material slurry," Numerical Heat Transfer, Part A: Applications, vol. 67, pp. 381-400, 2015.

[37] M. Sheikholeslami and S. Abelman, "Two-phase simulation of nanofluid flow and heat transfer in an annulus in the presence of an axial magnetic field," IEEE Transactions on Nanotechnology, vol. 14, pp. 561-569,

[24] B. Chen, X. Wang, Y. Zhang, H. Xu, and R. Yang, "Experimental research on laminar flow performance of phase change emulsion," Applied thermal engineering, vol. 26, pp. 1238-1245, 2006.

[25] X. Wang, J. Niu, Y. Li, X. Wang, B. Chen, R. Zeng, et al., "Flow and heat transfer behaviors of phase change material slurries in a horizontal circular tube," International journal of heat and masstransfer, vol. 50, pp. 2480-2491, 2007.

[26] L. Wang and G. Lin, "Experimental study on the convective heat transfer behavior of microencapsulated phase change material suspensions in rectangular tube of small aspect ratio," Heat and Mass Transfer, vol. 48, pp. 83-91, 2012.

[27] S. Song, W. Shen, J. Wang, S. Wang, and J. Xu, "Experimental study on laminar convective heat transfer of microencapsulated phase change material slurry using liquid metal with low melting point as carrying fluid," InternationalJournal of Heat and Mass Transfer, vol. 73, pp. 21-28, 2014.

[28] S. Song, Q. Liao, W. Shen, Y. Ruan, and J. Xu, "Numerical study on laminar convective heat transfer enhancement of microencapsulated phase change material slurry using liquid metal with lowmelting point as carrying fluid," International Journal of Heat and Mass Transfer, vol. 62, pp. 286-294, 2013.

[29] S. Doruk, O. N. Şara, A. Karaipekli, and S. Yapıcı, "Heat transfer performance of water and Nanoencapsulated n-nonadecane based Nanofluids in a double pipe heat exchanger," Heat and Mass Transfer, vol. 53, no. 12, pp. 3399-3408, 2017.

[30] M. Delgado, A. Lázaro, C. Peñalosa, and B. Zalba, "Experimental analysis of the influence of microcapsule mass fraction on the thermal andrheological behavior of

2015.

[38] D. Wen and Y. Ding, "Experimental investigation into convective heat transfer of nanofluids at the entrance region under laminar flow conditions," International journal of heat and mass transfer, vol. 47, pp. 5181-5188, 2004.

[39] H. J. Jouybari, S. Saedodin, A. Zamzamian, M. E. Nimvari, and S. Wongwises, "Effects of porous material and nanoparticles on the thermal performance of a flat plate solar collector: An experimental study," Renewable Energy, vol. 114, pp. 1407-1418, 2017.

این صفحه عمداً خالی است