



Experimental Study of The Effect of Using Wavy Pipes and Pipe with Straps Fins on The Improvement of The Ice Formation Rate in Ice-on-Coil Thermal Storage Systems

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Kashani K.¹,
Jannesari H.¹,
Majidi S.^{1*}

How to cite this article

Kashani K, Jannesari H, Majidi S. Experimental Study of The Effect of Using Wavy Pipes and Pipe with Straps Fins on The Improvement of The Ice Formation Rate in Ice-on-Coil Thermal Storage Systems. Modares Mechanical Engineering. 2022; 22(03):143-152.

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

*Correspondence

Address: Department of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.

s_majidi@sbu.ac.ir

Article History

Received: September 20, 2020

Accepted: August 22, 2021

ePublished: January 14, 2022

ABSTRACT

Cold storage is a commonly used form of the energy storage systems. A major drawback in this type of energy storage is its low heat-transfer rate caused by the low thermal conduction of the phase change material and/or inefficiency of the components utilized in the thermal system. In the present experimental research, straps fins are used to improve the solidification rate of an ice storage system equipped with coiled tubes. Furthermore, the effect of employing straps fins in improving the ice-formation process is compared to that of the storage system equipped with wavy coil tubes. The results indicate that wavy tube demonstrate a superior performance in increasing the ice formation rate. Comparing the ice-thicknesses obtained from using either of these methods approves the better performance characteristics of the wavy tubes. Employing wavy tubes is shown to increase the stored ice volume by 21.08% compared to the use of straps fins. The required power consumption per one liter of ice produced in the system equipped with straps finned tube and wavy coil tube is 0.72 kWh and 0.62 kWh, respectively. Also, in the crest area of the wavy tube configuration, the ice formed on the lower tube surface is generally thicker than that on the upper tube surface. The ice formation behaviour is opposite in the troughs where the ice thickness on the upper surface is 25% higher than on the lower surface. Finally, the difference in the ice thicknesses measured in horizontal and vertical directions is less than 1%.

Keywords Cold Storage, Straps Fins, Wavy Tube, Secondary Flow, Experimental Study

CITATION LINKS

[1] A comprehensive review on positive cold energy storage technologies and applications ... [2] Thermophysical heat storage for cooling, heating, and power generation: A review. [3] Research progress in nucleation and supercooling induced by phase change materials. [4] Role of metal foam on ice storage performance for a cold thermal energy storage (CTES) system. [5] Heat storage materials, geometry and applications: A review. [6] Nanoparticle-enhanced phase change materials (NEPCM) ... [7] Transient behavior analysis of the melting of nanoparticle-enhanced phase change material inside a rectangular latent heat storage unit. [8] Study on the supercooling degree and nucleation behavior of water-based graphene oxide nanofluids PCM. [9] Research on solidification of water on surface. [10] Effect of ultrasound irradiation on ice crystal size distribution in frozen agar gel samples. [11] The effect of oscillatory flow on nucleation and grain growth in the undercooled melt. [12] Super-hydrophobic/icephobic coatings based on silica nanoparticles modified by self-assembled monolayers. [13] A review of the recent advances in superhydrophobic surfaces and the emerging energy-related applications. [14] An analysis of the effects of nanoparticles deposition on characteristics of the heating surface ... [15] Stochastic approach to the anti-freezing behaviors of superhydrophobic surfaces. [16] Fins and turbulence promoters for heat transfer enhancement in latent heat storage systems. [17] Experimental and numerical study of thin ring and annular fin effects on improving the ice formation in ice-on-coil thermal storage systems. [18] Latent thermal energy storage system using phase change material in corrugated enclosures. [19] Numerical study of tube arrangement and fin effects on improving the ice formation ... [20] Identifying the geometry parameters and fin type that lead to enhanced performance in tube-and-fin geometries. [21] Heat transfer to non-Newtonian fluids in coiled pipes in laminar flow. [22] An experimental study on ice formation around horizontal long tubes. [23] Ice formation prediction and heat transfer analysis of LNG in serpentine tube under supercritical pressure. [24] introduction to fluid mechanics. John Wiley & Sons; 2020.

بررسی تجربی تاثیر استفاده از لوله مواج و پره تسمه‌ای در بهبود نرخ انجماد در سامانه ذخیره‌سازی یخ روی کویل

ساناز کاشانی

دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

حمید جان‌نثاری

دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

سه‌ند مجیدی*

دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

چکیده

ذخیره‌سازی انرژی راه‌حل مشکل ناسازگاری میان زمان عرضه و تقاضا است. ذخیره‌سازی سرمایشی، از جمله سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی می‌باشد. یکی از معایب این نوع ذخیره‌سازیها، نرخ پایین انتقال حرارت است که معمولاً ناشی از هدایت پایین ماده تغییر فاز دهنده و یا بازده پایین اجزاء سامانه می‌باشد. در این مقاله به‌صورت تجربی به تاثیر استفاده از پره‌های تسمه‌ای در مقایسه با استفاده از لوله موج‌دار در بهبود نرخ تشکیل یخ در سامانه ذخیره‌سازی یخ روی کویل پرداخته شده است. مقایسه ضخامت یخ به دست آمده در دو حالت گواه بیشتر بودن کارایی لوله موج‌دار می‌باشد. از مهم‌ترین نتایج به‌دست آمده می‌توان به افزایش ۲۱/۰۸٪ حجم یخ تشکیل شده در استفاده از کویل مسی موج‌دار اشاره کرد. همچنین، میزان مصرف برق برای تولید هر لیتر یخ در حالت استفاده از لوله موج‌دار ۰/۶۲ کیلووات ساعت و برای لوله تسمه دار ۰/۷۲ کیلووات ساعت می‌باشد که نشانگر برتری روش استفاده از لوله موج‌دار می‌باشد. همچنین، نتایج حاکی از آن است که در حالت لوله موج‌دار در برآمدگی‌ها ضخامت یخ تشکیل شده در زیر لوله نسبت به روی لوله بیشتر است، این در حالی است که این مساله در فرورفتگی‌ها برعکس است و ضخامت یخ در ناحیه روی لوله حدود ۲۵٪ از ضخامت یخ زیر لوله بیشتر است. در ضمن، در دو حالت، ضخامت یخ در انتهای آزمایش در راستای عمودی و راستای افقی کمتر از ۱٪ تفاوت دارند.

کلیدواژه‌ها: ذخیره‌سازی سرمایشی، پره تسمه‌ای، لوله موج‌دار، جریان ثانویه، بررسی تجربی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۶/۳۰

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۳۱

*نویسنده مسئول: s_majidi@sbu.ac.ir

۱- مقدمه

ذخیره‌سازی انرژی باعث پیک‌سایی، افزایش بازده، استفاده وسیع از منابع انرژی نو مانند انرژی خورشیدی و انرژی باد و گرمای هدر رفته در صنعت و کاهش مصرف الکتریسته می‌شود. ذخیره‌سازی سرمایشی یکی از پرکاربردترین روشهای ذخیره‌سازی می‌باشد. به منظور کاهش بارگذاری در زمان پیک مصرف برق، فرکانس منظم شبکه، بهبود کیفیت توان و قابل اعتماد بودن سامانه از روشهای ذخیره‌سازی سرمایشی استفاده می‌گردد. از جمله کاربردهای اصلی ذخیره‌سازی سرمایشی، سامانه‌های تهویه مطبوع در مناطق گرمسیر است. در زمان اوج مصرف در تابستان، در حدود ۸۵٪ از

کل مصرف انرژی در ساختمان مربوط به سامانه تهویه مطبوع می‌باشد^[1].

بر اساس توصیف دقیق عملکرد، سامانه‌های ذخیره‌سازی انرژی حرارتی به سه دسته حرارت محسوس، حرارت نهان و گرمایی-شیمیایی تقسیم می‌شوند. دو روش عملکرد اول به علت هزینه پایین‌تر و راه‌اندازی راحت تر بیشتر تجاری‌سازی شده‌اند. یکی از معایب استفاده از سامانه‌های ذخیره‌سازی محسوس، چگالی ذخیره‌سازی پایین می‌باشد.

ذخیره‌سازی حرارتی نهان (Latent heat storage) بر اساس تغییر فاز به سه نوع تقسیم می‌شود^[2]:

- تغییر فاز گاز-مایع
- تغییر فاز جامد-جامد
- تغییر فاز جامد-مایع

تغییر فاز گاز-مایع تغییرات حجم زیادی دارد که باعث می‌شود چگالی ذخیره‌سازی بالا نباشد. تغییر فاز جامد-جامد نیز، گرمای نهان کمی دارد. بنابراین مطالعات عمدتاً بر تغییر فاز جامد-مایع تمرکز دارند^[2]. با توجه به هزینه پایین، آنتالپی ذوب و دمای مناسب، استفاده از آب برای ذخیره‌سازی مبتنی بر تغییر فاز جامد-مایع بویژه در سرمایش بسیار متداول می‌باشد. در بین روشهای مختلف ذخیره‌سازی سرمایشی به کمک تغییر فاز آب به یخ، روش تشکیل یخ روی کویل خارجی بیشتر مورد توجه است. در این روش کویلها درون آب مغروق قرار دارند. در فرآیند شارژ، مایع انتقال دهنده حرارت از درون کویل عبور می‌کند و باعث کاهش دما و انجماد آب در تماس با جداره خارجی کویل می‌گردد. یکی از چالش‌های پیش روی این روش، کاهش نرخ انتقال حرارت بر اثر افزایش ضخامت یخ روی کویل می‌باشد. روشهای مختلفی جهت افزایش انتقال حرارت در این زمینه پیشنهاد شده است.

در بعضی مقاله‌ها از مواد متخلخل مانند ذرات فلز یا کپسول‌های جامد جهت افزایش انتقال حرارت سامانه استفاده شده که باعث کاهش زمان تغییر فاز ماده می‌شود. تخلخل همچنین منجر به کاهش درجه فوق سرمایش می‌شود که بسته به قطر کره‌های مواد متخلخل میزان آن متغیر است. عامل با اهمیت دیگر هدایت حرارتی است که هرچه بالاتر باشد فرآیند بلورسازی سریع‌تر به‌وقوع می‌پیوندد^[3]. ایجاد محیط متخلخل در واحد ذخیره‌سازی یخ به وسیله استفاده از فوم فلزی باعث سرعت بخشیدن به فرآیند انجماد و توزیع دمای یکنواخت تخلیه می‌شود. یو و همکاران به وسیله ایجاد فوم فلزی، مطالعه‌ای بر روی اثر تخلخل بر سرعت بخشیدن در فرآیند انجماد آب انجام دادند که شامل یک تانک دوار به‌همراه شش فین و فوم فلزی با چگالی تخلخل ۲۰ حفره بر اینچ بود. آنها نشان دادند استفاده از فوم به یکنواخت شدن توزیع دما منجر می‌شود در حالی که بدون فوم فلزی دما در قسمت بالایی و قسمت پایینی مخزن اختلاف زیادی دارد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که در $E = 0.7$ عملکرد بهتری حاصل می‌شود^[4].

در زمان کمتر و دمای کمتری هسته‌زایی رخ می‌دهد. کیانی و همکارانش^[10] در یک مخزن پر از آب که انجماد درون آن به روش غوطه‌وری انجام می‌شد امواج التراسونیک اعمال کردند. آنها نشان دادند اعمال این امواج باعث به تاخیر افتادن و کاهش دمای انجماد می‌گردد. آن‌ها با عکس‌برداری میکروسکوپی در یافتند در این شرایط در هنگام آغاز فرآیند هسته‌زایی تعداد بسیار زیادی هسته کوچک شکل می‌گیرد و در نتیجه این کار فضای رشد هر هسته کوچکتر شده و در نهایت منجر به شکل‌گیری بلورهای بسیار کوچک یخ می‌شود. آن‌ها همچنین دریافتند فرآیند هسته‌زایی لایه‌های متفاوت آب در دماهای متفاوتی رخ می‌دهد و شکل و اندازه هسته‌ها نیز متفاوت است.

یکی دیگر از روش‌های هسته‌زایی در دماهای پائین‌تر از نقطه انجماد و فوق سرد کردن آب، استفاده از سطوح آب‌گریز می‌باشد. شکل‌گیری و انتشار کریستال‌های یخ، با توجه به افزایش زاویه تماس استاتیکی به تعویق می‌افتد^[11]. سطوح آب‌گریز شرایط فوق سرمایش را در کاربردهای مختلف صنعتی به وجود می‌آورند. استفاده از پوشش آب‌گریز همچنین موجب تغییر ضریب اصطکاک درون کانال‌ها می‌شود که این ناشی از سطح مشترک بین هوا و مایع در ابعاد نانو برای سطوح فوق آب‌گریز می‌باشد^[12]. با استفاده از سطوح آب‌گریز انتظار می‌رود که بر محدودیت طراحی مبدل‌ها غلبه کرد و کارایی سامانه‌های تبریدی که در شرایط یخ زدگی قرار دارند بهبود یابد^[13]. کیامورا و همکاران^[14] بر روی سطوح منتقل کننده حرارت در فرآیند جوشش تحقیق کردند. در این آزمایش به بررسی اثر زبری سطح بر روی زاویه تماس و ترشوندگی و اثر آن در فرآیند جوشش و ضریب انتقال حرارت پرداخته شد. در این آزمایش از سطوح مسی با زبری‌های مختلف استفاده شده است. بیش‌ترین ضریب انتقال حرارت برای سطوح صاف و غلظت نانوذرات کم اتفاق افتاد.

در کار کیم و همکاران^[15] تأثیر تأخیر سطوح ساده و فوق آب‌گریز بر تأخیر در انجماد یک قطره آب به صورت آزمایشگاهی بررسی شده است. مشخصات دمایی قطره آب در طی فرآیند سرمایش و انجماد برای یک دمای سطح ثابت، ثبت شده است. زمان تأخیر برای فرآیند انجماد گروهی از قطره‌ها محاسبه شد. آنها نشان دادند بیشینه زمان تأخیر برای فرآیند انجماد بر روی سطح آب‌گریز سه برابر بیش‌تر از سطح معمولی می‌باشد. علاوه بر این حدود ۷٪ از قطرات آب روی سطوح آب‌گریز ممکن است زودتر یا هم‌زمان با سطح معمولی منجمد شوند.

افزایش آشفستگی سیال درون لوله، موجب افزایش ضریب انتقال حرارت می‌شود. اسماعیل و لینو^[16] به صورت تجربی به بررسی اثر پره‌های حلقوی و افزایش تلاطم سیال منتقل کننده حرارت بر روی عملکرد سامانه ذخیره‌ساز پرداختند. آن‌ها دریافتند که افزایش دبی جریان سیال منتقل کننده حرارت و افزایش تلاطم آن منجر به کاهش زمان انجماد آب و افزایش سرعت سیال می‌گردد.

در مقاله مروری هندسه‌های مختلف مخزن‌های مواد تغییر فاز دهنده (Phase change material) جهت افزایش مساحت مواد ذخیره کننده حرارت بررسی گردیده است. نتایج نشان داد که مخزن‌های استوانه‌ای و مستطیلی در حالت عمودی در مقایسه با دیگر هندسه‌ها کارایی بهتری دارند. همچنین جنس مناسب برای مخزن دما پایین پلیمر و برای مخزن حاوی ماده تغییر فاز دهنده استیل ضد زنگ ارائه گردیده است^[5].

استفاده از مواد تغییر فاز دهنده حاوی ذرات با هدایت حرارتی بالا در ابعاد نانو تأثیر بسزایی در بهبود عملکرد سامانه‌های ذخیره‌ساز حرارتی دارد. خدادادی و حسینی‌زاده^[6] از مواد تغییر فاز دهنده جدیدی استفاده کردند که حاوی نانوذرات با ضریب هدایت بالا بودند، آن‌ها دریافتند که استفاده از نانوذرات پتانسیل زیادی در بهبود عملکرد سامانه‌های ذخیره‌ساز و نرخ بالایی گرمایی آزاد شده و هدایت حرارتی بالا در سامانه دارد. الباجوری و قارنیه^[7] به بررسی انجماد مواد تغییر فاز دهنده حاوی نانوذره درون یک محفظه مستطیل شکل ذخیره کننده انرژی حرارتی نهان با استفاده از جابجایی طبیعی پرداختند. آن‌ها دریافتند که کاهش دمایی ورودی سیال منتقل کننده حرارت به مبدل، موجب افزایش نرخ انجماد ماده تغییر فاز دهنده حاوی نانوذره و همچنین بهبود تخلیه حرارتی ماده مورد نظر می‌شود. همچنین نتیجه گرفتند که اضافه کردن نانوذرات با ضریب هدایت بالا باعث بهبود عملکرد ذخیره‌سازی و افزایش نرخ انجماد می‌شود. لیو و همکاران دمای فوق سرمایش محلول پس از اضافه کردن ذرات نانو را بر آب دمین مطالعه کردند. آنها دریافتند که صفحات نانو گراف می‌توانند درجه فوق سرمایش را تا ۶۹٪ کاهش دهند و فقط زمانی هسته‌زایی در محلول رخ می‌دهد که حاصل ضرب ضخامت صفحات نانوگراف در درجه فوق سرمایش بزرگتر از $8 - 4/2 \times 10$ باشد. همچنین با توجه به نتایج به دست آمده دریافتند که می‌توان از صفحات نانوگراف به عنوان ماده تغییر فاز دهنده در کاربردهای سرمایش استفاده کرد^[8].

یکی از روش‌های به تعویق انداختن انجماد و رسیدن به حالت ما فوق سرد برای آب ایجاد نوسان درون منبع می‌باشد. اوکادو و همکاران^[9] اثر ارتعاشات مکانیکی بر انجماد آب محصور شده بر روی یک سطح فلزی را بررسی کردند. آن‌ها دریافتند اعمال ارتعاشات مکانیکی بر روی صفحه سردی که انجماد بر روی آن انجام می‌گیرد در ابتدا باعث کاهش نرخ رشد کریستال‌های یخ شده اما در ادامه فرآیند انجماد، اعمال ارتعاشات باعث افزایش محسوس نرخ رشد کریستال‌های واقع بر روی صفحه می‌شود. آن‌ها در بررسی اثر فرکانس طبیعی صفحه مرتعش که با جرم و ثابت کشسانی صفحه ارتباط دارد دریافتند که تغییر جرم صفحه اثر بسیار کمی بر نرخ انجماد دارد.

اولتراسونیک و روش عملکرد ارتعاش صوتی یا ارتعاش مولکول‌های هوا بر درجه زیرسرمایش و بلورزایی مواد تغییر فاز دهنده موثر است و با افزایش فشار صوتی

قرار گیرند. حبیب‌الله و همکاران^[22] به‌صورت تجربی نرخ رشد یخ در خارج از لوله‌های مسی سرد شده را بررسی کردند. آنها ضخامت قابل توجه یخ بر روی قسمت خمیده لوله مشاهده کردند. جوشها بای و همکاران مدل عددی را جهت پیش‌بینی فرم لایه یخ و عملکرد حرارتی لوله‌های مارپیچ به کار گرفتند^[23]. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که تفاوت عملکرد حرارتی در ناحیه خمیده نسبت به ناحیه صاف به خاطر شتاب جانب مرکز و جریان ثانویه می‌باشد.

با وجود کارهای انجام شده توسط محققین مختلف، در بحث نرخ تشکیل یخ در سامانه ذخیره ساز سرما به وسیله لوله موج‌دار مطالعه تجربی انجام نشده‌است. همچنین، در زمینه مقایسه کارایی دو طرح لوله موج و لوله مجهز به پره تسمه‌ای در بهبود نرخ انجماد در سامانه ذخیره‌سازی یخ روی کویل نیز تا کنون کاری صورت نگرفته است. لذا، این موارد در کار حاضر به بررسی بصورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- سامانه و تجهیزات مورد استفاده

طرح‌واره کلی سامانه آزمایشگاهی استفاده شده در کار حاضر در شکل ۱ ارائه شده است. این سامانه ذخیره‌ساز یخ، یک دستگاه تبرید چند اواپراتوره است که برای انجام آزمایش‌های مختلفی طراحی شده است. عملکرد این سامانه به این نحو است که مبرد پس از عبور از کمپرسور، کندانسور آبی و شیر فشارشکن به اواپراتور می‌رسد. اواپراتور، محلول اتیلن‌گلیکول را که به عنوان سیال واسط انتقال حرارت بوده و از ۶۰٪ آب و ۴۰٪ ضدیخ تشکیل شده است خنک می‌کند. این محلول توسط پمپی از مخزنی به جریان در می‌آید و پس از سرد شدن در اواپراتور، وارد کویل‌های مسی درون مخزن ذخیره ساز می‌گردد و باعث می‌شود یخ دور کویل‌ها تشکیل شود. پس از خارج شدن از کویل‌ها، این محلول مجدداً وارد منبع ذخیره اتیلن‌گلیکول شده و چرخه تکرار می‌گردد. همچنین برای کویل‌های داخل مخزن ذخیره‌ساز از دو طرح لوله مسی، هم طول و هم ضخامت ولی با هندسه‌های متفاوت استفاده شده است که یکی از لوله‌ها موج‌دار و دیگری دارای پره‌های تسمه‌ای می‌باشد و در شکل ۲ مشخصات هرکدام آمده است.

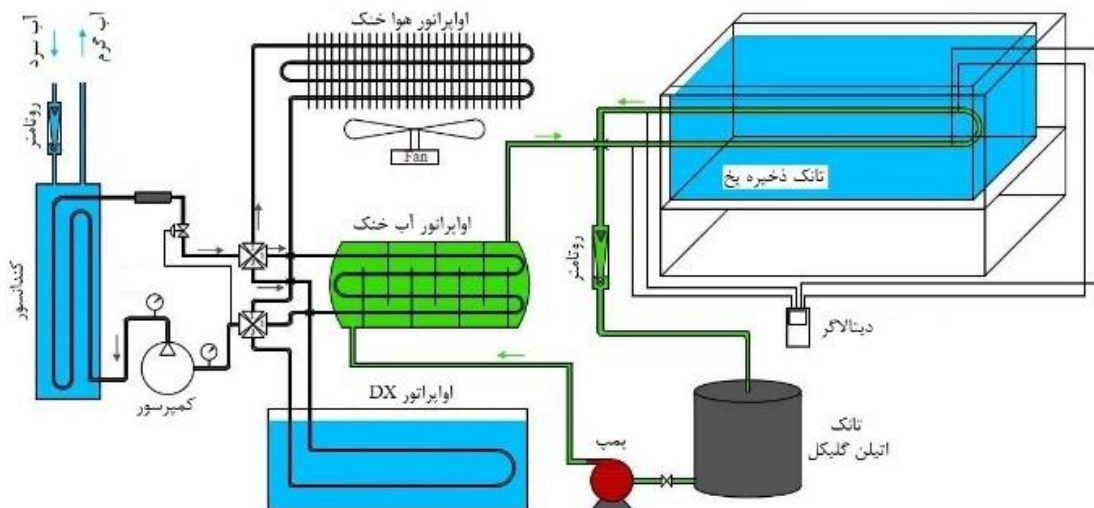
۲-۲ روش انجام آزمایش

در ابتدای آزمایش، دما و ارتفاع آب درون مخزن ذخیره ساز کنترل گردید تا برای همه حالت‌ها یکسان باشد. دمای قسمت‌های مختلف محفظه ذخیره‌ساز و آب داخل مخزن توسط دیتالاگر طی آزمایش اندازه‌گیری و ثبت گردید. به کمک اندازه‌گیری دمای ورود و خروج سیال انتقال‌دهنده حرارت، میزان انتقال حرارت از سیال انتقال حرارت به آب درون مخزن محاسبه گردید. مدت زمان انجام آزمایش در تمام حالت‌ها برابر با ۲۱۰ دقیقه بود. همچنین، به کمک تصویربرداری با فاصله زمانی ۱۰ دقیقه و به کمک نرم‌افزار گت‌دیتا (get data) تغییر ضخامت یخ طی آزمایش اندازه‌گیری شد.

به منظور تعیین میزان یخ تشکیل شده در طول فرآیند، با پایان یافتن آزمایش، آب باقیمانده در مخزن ذخیره‌ساز سرما از طریق

یکی دیگر از روش‌های بهبود انتقال حرارت و نرخ هسته‌زایی در سامانه ذخیره‌ساز انرژی، تغییر در هندسه لوله‌ها و استفاده از سطوح گسترش یافته با آرایش و هندسه متفاوت می‌باشد. در روش استفاده از سطوح گسترده جان‌نثاری و عبدالمهی^[17] به‌صورت آزمایشگاهی و عددی به بررسی اثر استفاده از تسمه‌های نازک و پره‌های حلقوی بر روی لوله‌های ذخیره‌ساز پرداختند. آنها دریافتند که استفاده از تسمه‌های نازک نسبت به پره‌های حلقوی باعث بهبود عملکرد سامانه می‌گردد. همچنین به بررسی ضخامت و فاصله بین پره‌ها جهت بهبود عملکرد تشکیل یخ پرداختند. آنها میزان یخ تولیدی در مخزن را برای رینگ و پره به ترتیب ۲۱٪ و ۳۴٪ بهبود بخشیدند. مانیش و همکاران^[18] به بررسی بهبود عملکرد حرارتی واحد ذخیره‌ساز حرارتی پوسته-لوله حاوی پره‌های طولی پرداختند. آنها مشاهده کردند که استفاده از سه پره طولی بر روی لوله منتقل‌کننده حرارت، مدت زمان انجماد آب را بیش از ۴۳/۶٪ کاهش می‌دهد. آنها همچنین دریافتند که مدت زمان ذوب برای دماهای ۸۰ و ۸۵ درجه سانتیگراد سیال عامل به ترتیب ۱۲/۵ و ۲۴/۵۲٪ کاهش پیدا می‌کند که نشان دهنده بهبود عملکرد ذوب شدن می‌باشد. اخوان حمزه و میانساری^[19] مطالعه‌ای عددی بر آرایش لوله و اثر فین بر بهبود یخ تشکیل شده در سامانه ذخیره حرارتی یخ روی لوله انجام دادند. نتایج نشان‌دهنده آن بوده که با افزایش تعداد و کاهش قطر لوله‌ها میزان یخ تشکیل شده، افزایش می‌یابد. همچنین در آرایش لوله‌ها، دو آرایش مثلثی و مستطیلی مقایسه گردید که در حالت آرایش مستطیلی دما سریعتر کاهش یافت و یخ بیشتری تشکیل شد. همچنین با افزایش تعداد فین‌ها از ۴ پره به ۸ پره میزان یخ تشکیل شده افزایش یافت ولی اثر افزایش تعداد لوله‌ها نسبت به افزایش پره، در حجم ثابت بهبود بیشتری در نرخ تشکیل یخ داشت. مورالس و فوردو^[20] کمیتهای هندسی و همچنین راه‌های افزایش بازدهی فین‌ها در لوله و هندسه آنها را شناسایی کردند. هندسه سه نوع فین متنوع از جمله سوزنی، صفحه‌ای و حلقه‌ای در یک لوله دوار شبیه‌سازی گردید و نتایج حاکی از آن بود که فین‌های سوزنی به نسبت دو نوع فین دیگر به خصوص در سامانه‌هایی که در فشار بالا کار می‌کنند کارایی بهتری دارند.

افزایش انتقال حرارت به علت جریان ثانویه مزیت اصلی است که در هنگام استفاده از لوله‌های منحنی حاصل می‌شود^[21]. نرخ انتقال حرارت در لوله‌های منحنی بیشتر از لوله‌های صاف است. انتقال حرارت و افت فشار در یک لوله منحنی تابع بسیاری از متغیرها از جمله عدد رینولدز، عدد پرانتل، نوع سیال، شرایط مرزی حرارتی دیواره، نسبت انحناء، قطر و طول لوله می‌باشد. همچنین این هندسه قابلیت تحمل در فشار و دمای بالا و تفاوت‌های شدید دمایی را بدون نیاز به فرآیند تنش زدایی یا استفاده از اتصال‌های پرهزینه دارد. تمام این دلایل باعث شده است که لوله‌های منحنی به‌طور گسترده‌ای در برنامه‌های کاربردی و مهندسی مورد استفاده



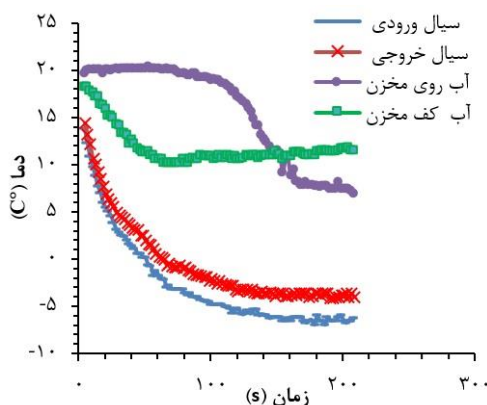
شکل ۱) نمایی کلی از سامانه آزمایشگاهی طراحی شده به صورت طرحواره و به صورت تصویری

همان‌طور که از شکل ۳ واضح است شیب تغییرات دمای سیال واسط انتقال حرارت ورودی به محفظه ذخیره‌ساز، در ابتدای آزمایش زیاد است که به خاطر دو علت زیر می‌باشد:

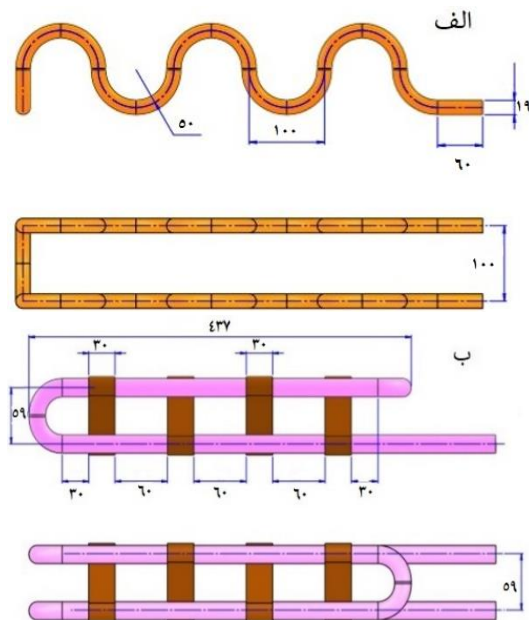
۱- دمای سیال واسط انتقال حرارت در ابتدای آزمایش تقریباً برابر دمای محیط است. لذا، نسبت به دمای مبرد عبوری از اوپراتور اختلاف دمای قابل توجهی دارد که این اختلاف زیاد منجر به افزایش نرخ انتقال حرارت و کاهش دمای سیال واسط انتقال حرارت با شیب تند می‌شود.

۲- در ابتدای آزمایش انتقال حرارت به صورت محسوس رخ می‌دهد اما پس از رسیدن دمای سیال واسط انتقال حرارت به نقطه انجماد، انتقال حرارت به صورت نهان ادامه پیدا می‌کند لذا شیب تغییرات دما بطور قابل ملاحظه کاهش می‌یابد.

شکل ۴) اختلاف دمای بین ورودی و خروجی سیال واسط انتقال حرارت در لوله را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در ابتدای آزمایش، اختلاف دما روند صعودی دارد. این مساله به دلیل کاهش دبی جریان سیال واسط انتقال حرارت درون کوپل می‌باشد.



شکل ۳) نحوه تغییرات دمای سیال واسط انتقال حرارت در ورودی به مخزن ذخیره‌ساز یخ و خروجی از آن و دمای آب در سطح و کف مخزن بر حسب زمان برای لوله دارای تسمه



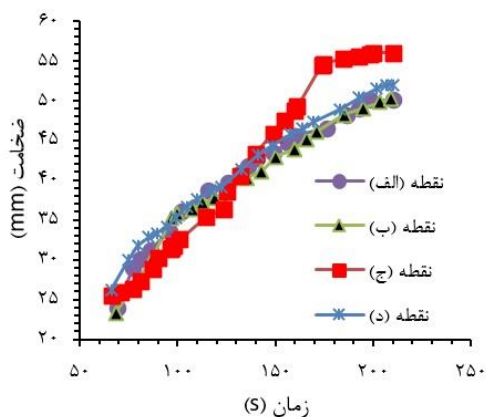
شکل ۲) نمایی از لوله‌های مخزن ذخیره ساز (الف) لوله موج (ب) لوله دارای تسمه

مجرای تخلیه مخزن که در کف مخزن تعبیه شده است، به طور کامل تخلیه شد و سپس با مقایسه حجم آب باقی مانده با حجم آب اولیه، مقدار حجم یخ تشکیل شده در اطراف لوله محاسبه گردید. همچنین میزان برق مصرفی به وسیله خواندن عدد کنتور برق نصب شده بر روی سامانه اندازه‌گیری و در دو حالت مقایسه گردید.

۳- نتایج

۳-۱ نحوه تغییرات دمای سیال واسط انتقال حرارت در سامانه ذخیره‌ساز سرمایش

نحوه تغییرات دمای سیال ثانویه ورودی به مخزن ذخیره‌ساز یخ (T_{in}) و خروجی از آن (T_{out}) و همچنین دمای آب در دو نقطه در کف و سطح مخزن بر حسب زمان در شکل ۳) ارائه شده است.



شکل ۶) متوسط ضخامت یخ تشکیل شده نسبت به زمان در چهار محل از لوله در انتهای آزمایش (الف) ورودی لوله (ب). اولین برآمدگی در مسیر ورودی لوله (ج) فاصله ۴۶ سانتیمتری از ورودی لوله (د) منحنی U شکل انتهای لوله

۲-۳-۳ مقایسه ضخامت یخ تشکیل شده در فرورفتگی و برآمدگی لوله با توجه به توزیع دمایی آب داخل مخزن در ابتدای آزمایش ضخامت یخ تولید شده در فرورفتگی بیشتر از برآمدگی است ولی از دقیقه ۱۵۸ که متوسط دمای آب در سطوح پائینی مخزن به ۴ درجه سانتیگراد می‌رسد، روند تغییرات دما در جهت ارتفاع مخزن برعکس شده و ضخامت یخ در برآمدگی بیشتر می‌شود، به گونه‌ای که در پایان آزمایش، همانطور که در شکل (۷-الف) مشاهده می‌شود، میزان یخ تولید شده در لوله مواج در حالت برآمدگی حدود ۸/۵٪ نسبت به فرورفتگی بیشتر است.

۳-۲-۳ مقایسه ضخامت یخ ایجاد شده در قسمت زیر و روی لوله در شکل (۷-ب) یخ تشکیل شده در سه نقطه بررسی شده است که به ترتیب عبارتند از: قسمت یو شکل متصل‌کننده مسیرهای رفت و برگشت، اولین برآمدگی در مسیر رفت لوله و آخرین قسمت با تقعر رو به پایین در انتهای مسیر رفت.

همان‌طور که در این شکل ملاحظه می‌شود در برآمدگی‌ها، ضخامت یخ تشکیل شده در زیر لوله نسبت به روی لوله بیشتر است، این در حالی است که این مساله در فرورفتگی‌ها برعکس است و ضخامت یخ در ناحیه روی لوله حدود ۲۵٪ از ضخامت یخ زیر لوله بیشتر است. در واقع می‌توان گفت آب قرار گرفته در سمت داخل نیم‌دایره تشکیل شده توسط لوله، با بخش زیادی از محیط لوله فاصله کمی دارد در حالی که آب قرار گرفته در سمت بیرون نیم‌دایره به بخش کمی از محیط لوله نزدیک می‌باشد.

۴-۲-۳ مقایسه ضخامت یخ تشکیل شده در در ابتدای ورودی با ضخامت یخ تشکیل شده در انتهای خروجی لوله

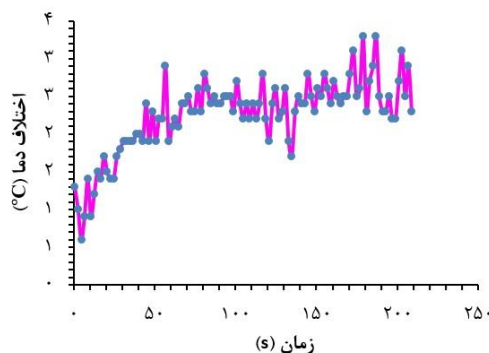
همان‌طور که از شکل (۷-ج) مشخص است، متوسط ضخامت یخ تشکیل شده برای ورودی لوله در طول مدت آزمایش از یخ تشکیل شده در خروجی لوله در حدود ۴٪ بیش‌تر می‌باشد. علت آن کاهش دمایی سیال ثانویه درون لوله در مسیر ورودی می‌باشد و همان‌طور

در واقع، در ابتدای آزمایش ذخیره سازی بصورت محسوس و کاهش دما می‌باشد. این مساله بر کاهش دمای سیال انتقال حرارت و در نتیجه افزایش لزجت آن را در پی دارد که منجر به کاهش دبی پمپی که جریان را ایجاد می‌کند می‌گردد. از دقیقه ۷۲ آب در تماس با لوله شروع به یخ زدن می‌کند و به علت عدم تغییر دما حین تغییر فاز و کاهش نرخ انتقال حرارت، اختلاف دما تقریباً ثابت می‌گردد. همچنین در دقیقه ۱۵۳ روند تغییرات دمای آب در کف و سطح مخزن معکوس می‌گردد و علت آن رفتار استثنایی آب در دمای ۴ درجه سانتیگراد می‌باشد. این مساله در ادامه افزایش نرخ انتقال حرارت در اثر سازوکار جابجایی طبیعی را به همراه دارد.

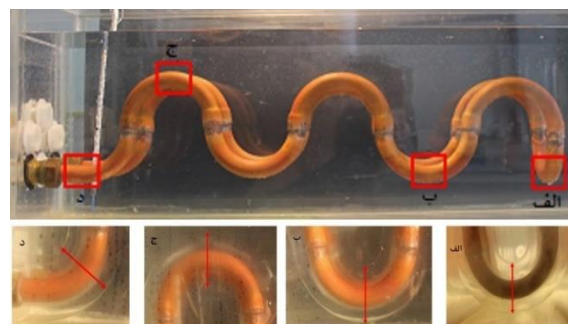
۲-۳ بررسی نحوه تغییرات ضخامت یخ در لوله مواج

۱-۲-۳ بررسی مقدار تشکیل یخ در نقاط مختلف

شکل ۵ نمایی از یخ تشکیل شده در چهار محل از لوله را نشان می‌دهد. همچنین نحوه تغییرات متوسط ضخامت یخ تشکیل شده نسبت به زمان در این نقاط از لوله در شکل ۶ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۶ مشاهده می‌شود، در پایان آزمایش، بیشترین ضخامت یخ تشکیل شده مربوط به نقطه (ب) که اولین برآمدگی در مسیر ورودی می‌باشد، است، بعد از آن نقطه (الف) که مربوط به ابتدای ورودی لوله است ضخامت بیشتری دارد و رفته رفته با دور شدن از ابتدای مسیر ورودی لوله، ضخامت یخ تشکیل شده کاهش می‌یابد.



شکل ۷) نحوه تغییرات اختلاف دما میان سیال ورودی و خروجی سیال واسط انتقال حرارت در سامانه ذخیره‌ساز سرمایش برای لوله دارای تسمه



شکل ۸) یخ تشکیل شده در چهار محل از لوله در انتهای آزمایش (الف) ورودی لوله (ب). اولین برآمدگی در مسیر ورودی لوله (ج) فاصله ۴۶ سانتیمتری از ورودی لوله (د) منحنی U شکل انتهای لوله

۳-۳ بررسی نحوه تغییرات ضخامت یخ در لوله دارای پره تسمه‌ای ۳-۳-۱ مقایسه ضخامت یخ در سه نقطه در مسیر ورودی لوله دارای پره تسمه‌ای

شکل ۸ نمایی از یخ تشکیل شده در سه محل از لوله تسمه‌دار شامل ورودی لوله، ناحیه صاف وسط لوله و ناحیه خمیده انتهایی لوله را نشان می‌دهد. همچنین، در شکل ۹ ضخامت یخ در این سه نقطه با یکدیگر مقایسه شده اند. از جمله نتایج می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

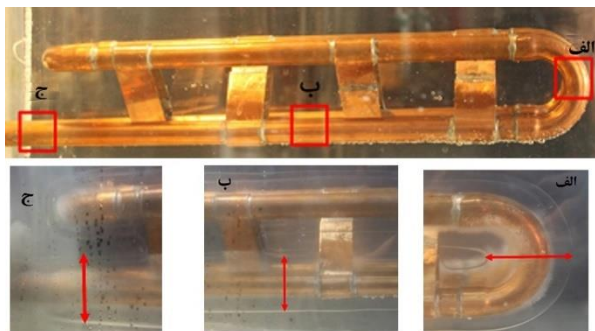
۱- افزایش ضخامت یخ در ورودی لوله نسبت به دیگر نقاط صاف لوله که پیشتر به دلایل آن اشاره شد.

۲- افزایش ضخامت یخ در ناحیه خمیده لوله تسمه‌دار نسبت به بخش های صاف

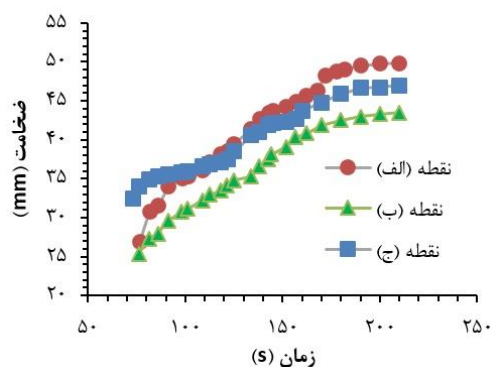
۳- غیر یکنواخت بودن و کاهش ضخامت یخ تشکیل شده در طول لوله نسبت به لوله موج

۳-۳-۲ مقایسه ضخامت یخ تشکیل شده در بالا و پایین قسمت صاف لوله و داخل و بیرون ناحیه منحنی شکل انتهای لوله

با توجه به شکل (۱۰) الف)، در ناحیه منحنی شکل، ضخامت یخ داخل لوله از ضخامت یخ بیرون لوله به میزان ۳۵٪ بیشتر است، همچنین در ناحیه صاف لوله دارای پره تسمه‌ای ضخامت روی لوله به نسبت ضخامت زیر لوله حدود ۲۲٪ بیشتر است که علت آن



شکل ۸) نحوه تغییرات ضخامت یخ تشکیل شده در سه محل از لوله دارای پره تسمه‌ای بعد از اتمام آزمایش (بعد از ۲۱۰ دقیقه) الف) در ورودی لوله ب) در انتهای U شکل لوله ج) در فاصله ۲۷ سانتیمتر از ورودی لوله دارای تسمه



شکل ۹) روند تغییرات ضخامت یخ بر حسب زمان در سه نقطه در لوله دارای پره‌های تسمه‌ای

که پیش‌تر ذکر شد، این نحوه تغییرات ناشی از دو عامل زیر می‌باشد:

۱- اولین علت، سردتر بودن دمای سیال ثانویه در قسمت ورودی لوله می‌باشد.

۲- علت دیگر وجود اغتشاش در ورودی لوله که موجب مغشوش شدن جریان در ورودی و در نتیجه افزایش انتقال حرارت در مجرا می‌شود.

موقعیت	ضخامت (mm)	تصویر
برآمدگی	۵۶	
فرورفتگی	۵۶/۲۵	

الف

موقعیت	ضخامت (mm)	تصویر
یو شکل بین مسیر رفت و برگشت	بالا ۱۷/۳۱	
	پایین ۱۲/۸۳	
اولین برآمدگی در مسیر رفت لوله	بالا ۱۵/۶۵	
	پایین ۱۷/۴۳	
آخرین فرورفتگی در مسیر رفت	بالا ۱۷/۹۷	
	پایین ۱۲/۶۱	

ب

موقعیت	ضخامت (mm)	تصویر
ورودی	۵۲/۱۵	
خروجی	۵۰/۰۶	

ج

شکل ۷) الف) مقایسه ضخامت یخ بین فرورفتگی و برآمدگی در مسیر ورودی لوله در لوله موج ب) مقایسه ضخامت یخ ایجاد شده در قسمت بالا و پایین لوله در سه مقطع خاص ج) مقایسه ضخامت یخ تشکیل شده در ابتدای ورودی با ضخامت یخ تشکیل شده در انتهای خروجی لوله موج

انتقال حرارت جابجایی طبیعی در راستای عمودی می‌باشد. این مکانیزم انتقال حرارت باعث به حرکت درآمدن سیال با چگالی کمتر به سمت بالا می‌شود. در ابتدای آزمایش، دمای آب بالاتر از ۴ درجه سانتیگراد است لذا در سامانه ذخیره‌ساز، در سطوح پایین، آب با دمای کمتر قرار داشته و یخ بیشتری در قسمت پایین لوله تشکیل می‌گردد. اما در ادامه در زمانی که دما به کمتر از ۴ درجه سانتیگراد می‌رسد، سیال سردتر چگالی کمتر خواهد داشت و به سمت بالا حرکت می‌کند. لذا، نرخ تشکیل یخ در قسمت بالای لوله بیشتر خواهد شد و در مجموع، یخ بطور متقارن در بالا و پایین لوله تشکیل می‌شود. لذا در مجموع، تشکیل یخ در هر دو راستا بصورت متقارن و مشابه به وقوع می‌پیوندد و انتظار می‌رود ضخامت یخ در دو راستا تفاوت خاصی نداشته باشد.

۳-۵ مقایسه میزان تاثیر استفاده از لوله موج و پره تسمه‌ای در بهبود نرخ انجماد

با مقایسه نتایج به دست آمده از ضخامت یخ تشکیل شده در مسیر ورودی و خروجی لوله‌ها و همان‌طور که در شکل‌های (۷-ج) و (۱۰-ا)

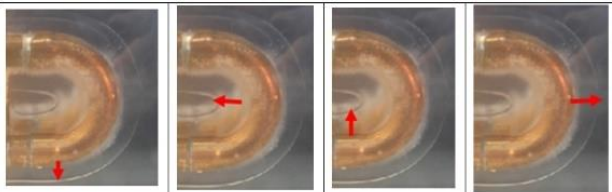
فعال شدن سازوکار انتقال حرارت جابه‌جایی طبیعی در راستای عمودی و معکوس شدن روند تغییرات دمایی در دمای استثناء آب (۴ درجه سانتیگراد) بوده که باعث کاهش دمای سطوح بالای مخزن آب به نسبت سطوح پایین‌تر و در نتیجه افزایش ضخامت در قسمت بالای لوله نسبت به زیر لوله می‌گردد.

۳-۳ مقایسه ضخامت یخ تشکیل شده بین مسیر ورودی و خروجی در ناحیه منحنی در لوله دارای پره تسمه‌ای

در شکل (۱۰-ب) مشاهده می‌شود یخ تولید شده در ابتدای ورودی لوله از خروجی به میزان ۱۰/۲ میلی‌متر لوله بیشتر است که علت آن کاهش دمای سیال ثانویه درون لوله در مسیر ورودی می‌باشد که منجر به افزایش نرخ انتقال حرارت و در نتیجه افزایش ضخامت یخ تولیدی در مسیر ورودی می‌گردد.

۳-۴ مقایسه میزان تشکیل یخ در جهت افقی و عمودی

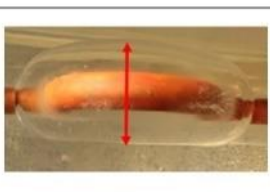
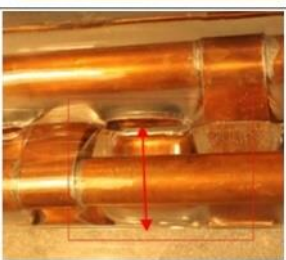
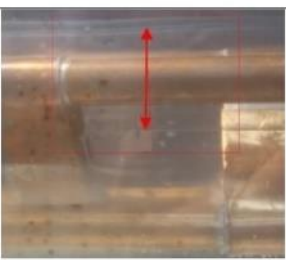
همان‌طور که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود اختلاف ضخامت یخ در انتهای آزمایش برای هر دو حالت لوله موج‌دار و لوله تسمه‌دار در راستاهای عمودی و افقی ناچیز می‌باشد. تنها عاملی که ممکن است منجر به تفاوت جریان سیال حول لوله در دو راستا گردد وجود

		تصویر					تصویر
خروجی	ورودی	موقعیت	پایین	سمت چپ	بالا	سمت راست	موقعیت
۳۳/۸	۴۴	ضخامت (mm)	۹/۶۱	۱۹/۱۸	۱۲/۴	۱۲/۳	ضخامت (mm)

ب

الف

شکل ۱۰) الف) مقایسه ضخامت یخ تشکیل شده در بالا و پایین قسمت صاف لوله و داخل و بیرون ناحیه منحنی شکل انتهای لوله دارای پره تسمه‌ای (ب) مقایسه ضخامت یخ تشکیل شده بین ابتدای مسیر ورودی و انتهای مسیر خروجی در لوله دارای تسمه

حالت	ضخامت (mm)	تصویر عمودی	ضخامت (mm)	تصویر افقی
لوله موج‌دار	۵۶		۵۶/۱۶	
لوله تسمه‌دار	۴۰		۳۹/۶۵	

شکل ۱۱) مقایسه ضخامت یخ ایجاد شده در یک نقطه مشخص از دو زاویه افقی و عمودی در حالت‌های الف- در حالت لوله موج‌دار، ب- در حالت لوله تسمه‌دار

۳-۶ آنالیز عدم قطعیت

میزان انتقال حرارت، به کمیت‌های دبی حجمی، اختلاف دما و ظرفیت گرمایی ویژه بستگی دارد، با فرض ثابت بودن ظرفیت گرمایی ویژه و همچنین صرف نظر از خطای احتمالی ناشی از زمان (کرونومتر) و چگالی (ویژگی سیال)، $(\dot{Q})$ ، تنها به دبی اندازه‌گیری شده توسط روتامتر و اختلاف دمای سیال ورودی و خروجی به درون محفظه ذخیره‌ساز بستگی دارد. بر این اساس مقدار بیشینه عدم قطعیت^[24] برای محاسبه مقدار گرمای منتقل شده برابر $12/2\%$ می‌باشد که با توجه به روابط زیر به دست می‌آید.

$$u_{\dot{Q}} = \frac{\delta \dot{Q}}{\dot{Q}} = \pm \left[\left(\frac{\dot{m}}{\dot{Q}} \frac{\partial \dot{Q}}{\partial \dot{m}} u_{\dot{m}} \right)^2 + \left(\frac{\Delta T}{\dot{Q}} \frac{\partial \dot{Q}}{\partial \Delta T} u_{\Delta T} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (۳-الف)$$

$$\dot{m} = \frac{dm}{dt} = \rho Q \quad (۳-ب)$$

$$\Delta T = T_o - T_i \quad (۳-ج)$$

$$u_{\Delta T} = \left(\frac{T_i}{\Delta T} u_{T_i} + \frac{T_o}{\Delta T} u_{T_o} \right)^2 \quad (۳-د)$$

$$u_{\dot{Q}} = \frac{\delta \dot{Q}}{\dot{Q}} = \pm \left[(u_{\dot{m}})^2 + \left(\frac{T_i}{\Delta T} u_{T_i} + \frac{T_o}{\Delta T} u_{T_o} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (۳-ه)$$

$$u_{\dot{Q}} = \pm \left[\left(\frac{25}{250} \right)^2 + \left(\frac{-\frac{6}{2} \frac{0}{1}}{\frac{2}{8} - \frac{6}{2}} + \frac{-\frac{3}{4} \frac{0}{1}}{\frac{2}{8} - \frac{3}{4}} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (۳-و)$$

* 100 = 12/2%

۴- نتایج کلی

در این کار به صورت تجربی به بررسی تاثیر استفاده از لوله دارای پره های تسمه ای در مقایسه با استفاده از لوله موج دار در بهبود نرخ تشکیل یخ در سامانه ذخیره سازی یخ روی کویل پرداخته شده است. که نتایج زیر را به همراه داشته است:

۱- استفاده از لوله موج درون مخزن ذخیره‌ساز به علت جریان ثانویه به وجود آمده در نواحی منحنی، موجب بهبود انتقال حرارت و افزایش نرخ تشکیل یخ گردیده است.

۲- ضخامت یخ به دست آمده در حالت استفاده از لوله موج به نسبت لوله دارای پره‌های تسمه‌ای به طور متوسط به میزان $17/35\text{mm}$ در طول مسیر ورودی نسبت به همین طول لوله در لوله دارای تسمه بیشتر است.

۳- حجم یخ تشکیل شده در استفاده از کویل مسی موج نسبت به استفاده از لوله دارای پره‌های تسمه‌ای به میزان $21/08\%$ افزایش داشته است.

۴- میزان مصرف برق در حالت استفاده از کویل تسمه‌دار به میزان 8% به نسبت کویل موج‌دار کاهش داشت.

۵- اختلاف ضخامت یخ میان مسیر ورودی و خروجی برای لوله موج کمتر و یخ تشکیل شده در طول لوله یکنواخت‌تر است به گونه‌ای که این اختلاف در لوله‌ی موج $2/09$ میلی‌متر است، در حالیکه میزان این اختلاف در لوله تسمه‌ای بیشتر بوده و اختلاف میان ضخامت یخ در محل ورودی به میزان $10/2$ میلی‌متر و در حدود $23/18\%$ از ضخامت آن در محل خروجی بیشتر است.

ب)، ملاحظه می‌شود، اختلاف ضخامت یخ میان مسیر ورودی و خروجی برای لوله موج کمتر و یخ تشکیل شده در طول لوله یکنواخت‌تر است به گونه‌ای که این اختلاف در لوله‌ی موج $2/09$ میلی‌متر است، در حالی‌که میزان این اختلاف در لوله تسمه‌ای بیشتر بوده و اختلاف میان ضخامت یخ در محل ورودی به میزان $10/2$ میلی‌متر و در حدود $23/18\%$ از ضخامت آن در محل خروجی بیشتر است.

بر اساس ضخامت یخ اندازه‌گیری شده در طول مسیر ورودی نتیجه‌گیری شد که ضخامت یخ در لوله موج به طور متوسط در طول مسیر ورودی نسبت به همین طول لوله در لوله دارای تسمه در حدود $17/35$ میلی‌متر بیشتر است که این مساله اهمیت پدیده جریان ثانویه در نواحی منحنی شکل در لوله موج را آشکار می‌سازد و منجر به بهبود نرخ انتقال حرارت در این لوله می‌گردد. نتایج به دست آمده از این بخش نشان می‌دهد که آرایش لوله‌های درون مخزن ذخیره‌ساز تاثیر زیادی بر نحوه و مقدار تشکیل یخ در این سامانه‌ها دارد.

مهمترین نکته قابل توجه در لوله‌های منحنی، جریان ثانویه است که توسط نیروی گریز از مرکز به علت انحناء لوله ایجاد می‌شود و بر خلاف جریان در لوله مستقیم، حرکت سیال در یک لوله منحنی، موازی با محور خم نیست در نتیجه، ضریب اصطکاک و عدد ناسلت در لوله‌های منحنی نسبت به لوله‌های مستقیم در یک عدد رینولدز مشخص بیشتر است.

همچنین مقدار کل یخ تشکیل شده و مصرف انرژی الکتریکی کمپرسور در طول مدت آزمایش (210 دقیقه پس از شروع به کار دستگاه تبرید)، برای لوله موج‌دار و لوله دارای پره تسمه‌ای در جدول ۱ نشان داده شده است.

با توجه به داده های جدول ۱، میزان مصرف برق برای تولید هر لیتر یخ در حالت استفاده از لوله موج‌دار $0/62$ کیلووات ساعت و برای لوله تسمه دار $0/72$ کیلووات ساعت می‌باشد که نشانگر برتری روش استفاده از لوله موج‌دار می‌باشد. همچنین استفاده از لوله موج‌دار باعث کاهش قابل توجه دمای آب مخزن به خصوص در کف استخر به میزان 28% نسبت به لوله تسمه‌ای شده است به گونه‌ای که در پایان آزمایش دمای کف استخر حاوی لوله موج دار به $8/8$ درجه سانتیگراد رسید در حالی که در حالت تسمه‌ای دمای کف مخزن آب به $11/7$ درجه سانتیگراد رسید.

جدول ۱) مقدار کل یخ تشکیل شده و مصرف انرژی الکتریکی کمپرسور در طول مدت آزمایش برای حالت‌های مختلف

حالت	حجم یخ تشکیل شده (میلی‌لیتر)	مصرف انرژی الکتریکی کمپرسور (کیلووات بر ساعت)
لوله تسمه‌دار	۳۲۰۰	۲/۳
لوله موج‌دار	۴۰۵۵	۲/۵

فهرست علائم

میزان انتقال حرارت	Q
دبی سیال	$\dot{m}$
اختلاف دما	ΔT
دمای سیال ورودی	T_i
دمای سیال خروجی	T_o
تخلخل	ε

14th International Conference on the Properties of Water and Steam 2004.

10-Kiani H, Zhang Z, Sun DW. Effect of ultrasound irradiation on ice crystal size distribution in frozen agar gel samples. Innovative food science & emerging technologies. 2013;18:126-31.

11-Chen MW, Mi JX, Wang ZD. The effect of oscillatory flow on nucleation and grain growth in the undercooled melt. Journal of Crystal Growth. 2017;468:32-7.

12-Liu J, Janjua ZA, Roe M, Xu F, Turnbull B, Choi KS, Hou X. Super-hydrophobic/icephobic coatings based on silica nanoparticles modified by self-assembled monolayers. Nanomaterials. 2016;6(12):232.

13-Zhang P, Lv FY. A review of the recent advances in superhydrophobic surfaces and the emerging energy-related applications. Energy. 2015;82:1068-87.

14-Kiyomura IS, Manetti LL, Da Cunha AP, Ribatski G, Cardoso EM. An analysis of the effects of nanoparticles deposition on characteristics of the heating surface and ON pool boiling of water. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2017;106:666-74.

15-Kim MH, Kim DR, Lee KS. Stochastic approach to the anti-freezing behaviors of superhydrophobic surfaces. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2017;106:841-6.

16-Ismail KA, Lino FA. Fins and turbulence promoters for heat transfer enhancement in latent heat storage systems. Experimental thermal and fluid science. 2011;35(6):1010-8.

17-Jannesari H, Abdollahi N. Experimental and numerical study of thin ring and annular fin effects on improving the ice formation in ice-on-coil thermal storage systems. Applied Energy. 2017;189:369-84.

18-Languri EM, Aigbotsua CO, Alvarado JL. Latent thermal energy storage system using phase change material in corrugated enclosures. Applied thermal engineering. 2013;50(1):1008-14.

19-Hamzeh HA, Miansari M. Numerical study of tube arrangement and fin effects on improving the ice formation in ice-on-coil thermal storage systems. International Communications in Heat and Mass Transfer. 2020;113:104520.

20-Morales-Fuentes A, Loredó-Sáenz YA. Identifying the geometry parameters and fin type that lead to enhanced performance in tube-and-fin geometries. Applied Thermal Engineering. 2018;131:793-805.

21-Rajasekharan S, Kubair VG, Kuloor NR. Heat transfer to non-Newtonian fluids in coiled pipes in laminar flow. International Journal of Heat and Mass Transfer. 1970;13(10):1583-94.

22-Habeebullah BA. An experimental study on ice formation around horizontal long tubes. International Journal of Refrigeration. 2007;30(5):789-97.

23-Bai J, Pan J, Wang W, Wang K, Wu G. Ice formation prediction and heat transfer analysis of LNG in serpentine tube under supercritical pressure. International Journal of Thermal Sciences. 2020;149:106137.

24-Fox RW, McDonald AT, Mitchell JW. Fox and McDonald's introduction to fluid mechanics. John Wiley & Sons; 2020.

تشکر و قدردانی: نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از همکاران و خدمات آزمایشگاه انتقال حرارت دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی دانشگاه شهید بهشتی تقدیر و تشکر نمایند.

تأییدیه اخلاقی: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

تعارض منافع: موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

سهم نویسندگان: ساناز کاشانی (پژوهشگر اصلی - ۳۴٪)، حمید جان-نثاری (پژوهشگر اصلی - ۳۳٪)، سهند مجیدی (پژوهشگر اصلی - ۳۳٪).

منابع مالی: هزینه پژوهش از محل اعتبار ویژه پژوهش تامین شده است.

منابع

- 1- Li SF, Liu ZH, Wang XJ. A comprehensive review on positive cold energy storage technologies and applications in air conditioning with phase change materials. Applied Energy. 2019;255:113667.
- 2- Feng PH, Zhao BC, Wang RZ. Thermophysical heat storage for cooling, heating, and power generation: A review. Applied Thermal Engineering. 2020;166:114728.
- 3- Zhao Y, Zhang X, Xu X, Zhang S. Research progress in nucleation and supercooling induced by phase change materials. Journal of Energy Storage. 2020;27:101156.
- 4- Yu C, Peng Q, Liu X, Cao P, Yao F. Role of metal foam on ice storage performance for a cold thermal energy storage (CTES) system. Journal of Energy Storage. 2020;28:101201.
- 5- Dinker A, Agarwal M, Agarwal GD. Heat storage materials, geometry and applications: A review. Journal of the Energy Institute. 2017;90(1):1-1.
- 6- Khodadadi JM, Hosseini-zadeh SF. Nanoparticle-enhanced phase change materials (NEPCM) with great potential for improved thermal energy storage. International communications in heat and mass transfer. 2007;34(5):534-43.
- 7- Elbahjaoui R, El Qarnia H. Transient behavior analysis of the melting of nanoparticle-enhanced phase change material inside a rectangular latent heat storage unit. Applied Thermal Engineering. 2017;112:720-38.
- 8- Liu Y, Li X, Hu P, Hu G. Study on the supercooling degree and nucleation behavior of water-based graphene oxide nanofluids PCM. International Journal of Refrigeration. 2015;50:80-6.
- 9- Okuda A, Nagasawa T, Okawa S, Saito A. Research on solidification of water on surface. In Proceedings of