



Experimental Study of the Effect of Relative Humidity on Droplet Distribution and Transient and Average Condensation Heat Transfer on Hydrophilic and Hydrophobic Surfaces

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Dehghani P.¹,
Hoseinalipour S. M.^{1*},
Akbari H.²,

How to cite this article

Dehghani P, Hoseinalipour S M, Akbari H, Experimental study of the effect of relative humidity on droplet distribution and transient and average condensation heat transfer on hydrophilic and hydrophobic surfaces. Modares Mechanical Engineering; 2023;23(12):685-695.

¹ Department of Fluid Mechanics (Energy Conversion), Faculty of Mechanics, University of Science and Technology, Iran.

² Production and manufacturing Department, Faculty of Mechanics, University of Science and Technology, Iran.

*Correspondence

Address: Department of Fluid Mechanics (Energy Conversion) Energy Conversion, Faculty of Mechanics, University of Science and Technology, Tehran, Iran.
alipour@iust.ac.ir

Article History

Received: January 14, 2024

Accepted: March 6, 2024

ePublished: March 26, 2024

ABSTRACT

To investigate the effect of relative humidity percentage on heat transfer and distribution of droplets in the condensation phenomenon, a test device with the ability to provide and control different environmental conditions was made, and therefore, the hydrophilic (copper) and hydrophobic (Teflon coating on copper) surfaces were measured under controlled environmental conditions. In all the tests, the inlet air flow rate, inlet air temperature, air temperature reaching the test surface, water temperature, water surface height, and test surface temperature were kept constant at specific values using PID control. Each test's relative humidity values of 80, 88, and 96% have been determined and controlled. The results of the transient investigation of heat transfer show that it takes time for the condensation phenomenon to occur, and the higher the surface hydrophilicity and relative humidity, the shorter this time will be. Also, the average heat transfer for 60 minutes was calculated. It showed that the average heat transfer coefficient increases with increasing humidity. Under the same environmental conditions, the heat transfer coefficient on hydrophilic surfaces is higher than on hydrophobic ones. In the graphical analysis of the droplet size, it has been observed that the most oversized droplets on hydrophilic surfaces at relative humidities of 88 and 96% are in the hydraulic diameter range of 0.35 to 0.4, and on hydrophobic surfaces are at relative humidities of 80 and 88% in the hydraulic diameter range of 0.2 to 0.25 mm.

Keywords Hydrophilic, Hydrophobic, PID Control, Relative Humidity Percentage, Heat Transfer Coefficient, Droplet Distribution

CITATION LINKS

1- Experimental study on dropwise condensation. 2- Investigation of the condensation process of 3- Visualization study of the influence of non-condensable gas on.... 4- A numerical analysis of dropwise condensation of 5- Condensation heat and mass transfer of steam with 6- Influence of geometric parameters on the gas-side heat transfer and 7- Condensation heat transfer characteristics of moist air 8- The investigation on heat transfer characteristics of steam condensation in 9- Experimental research on steam condensation in presence of 10- Determining transient heat transfer coefficient for 11- Slip Length of the 12- Versuche über die Kondensation von Wasserdampf in 13- Drop size distributions and heat transfer in 14- The effect of relative humidity 15- Experimental investigation of 16- Combined visualization and heat transfer measurements for 17- Investigation spatial distribution of droplets and 18- Macrottextures-induced jumping relay of condensate droplets. 19- Study of coalescence-induced droplet jumping during 20- Effective reduction of non-condensable gas effects on 21- Energy-saving of air-cooling heat exchangers operating under wet conditions with 22- Dropwise condensation heat transfer on nanostructured 23- An Empirical Study on Dropwise Condensation Occurred on 24- Moist air condensation heat transfer enhancement 25- Experimental investigation of dropwise condensation shedding by shearing airflow in 26- Numerical Modeling of the Effect of Inlet Temperature and 27- Condensation heat transfer enhancement in 28- Experimental investigation of condensation heat transfer on 29- Falling-droplet-enhanced filmwise condensation in 30- A visualized study of enhanced steam condensation heat transfer on a honeycomb-like 31- Improved humid air condensation heat transfer 32- Experimental Investigation of Size Effect on 33- Experimental Investigation of Bubble-Droplet 34- Persson CG. GUM-Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement.

مطالعه تجربی تاثیر رطوبت نسبی در توزیع قطرات و انتقال حرارت گذرا و میانگین چگالش روی سطوح آبدوست و آبگریز

پریسا دهقانی^۱، سید مصطفی حسین علی پور^{۲*}، حبیب الله اکبری^۲

^۱ گروه مکانیک سیالات (تبدیل انرژی)، دانشکده مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، ایران.

^۲ گروه ساخت و تولید، دانشکده مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، ایران.

چکیده

به منظور بررسی تاثیر درصد رطوبت نسبی در انتقال حرارت و توزیع قطرات در پدیده چگالش روی سطوح آبدوست مس و آبگریز مس با پوشش تفلون، دستگاه تستی ساخته شده است تا شرایط محیطی کنترل شده ای فراهم کند. در تمامی آزمایش ها سرعت جریان هوای ورودی، دمای هوای ورودی، دمای هوای رسیده به سطح آزمایش، دمای آب، ارتفاع سطح آب، دمای سطح آزمایش در مقادیر مشخصی با استفاده از کنترل پی آی دی ثابت نگه داشته شدند و در هر آزمایش رطوبت نسبی در مقادیر ۸۰، ۸۸ و ۹۶ درصد تعیین و کنترل شده است. نتایج بررسی گذرای انتقال حرارت نشان می دهد زمانی لازم است تا پدیده چگالش به وقوع بپیوندد که هرچه آبدوستی سطح و رطوبت نسبی بیشتر باشد این زمان کمتر خواهد بود، همچنین میانگین انتقال حرارت به مدت ۶۰ دقیقه محاسبه شده و نشان داده است با افزایش رطوبت نسبی میانگین ضریب انتقال حرارت افزایش می یابد و در شرایط محیطی یکسان ضریب انتقال حرارت روی سطوح آبدوست بیشتر از آبگریز است. در بررسی گرافیکی اندازه قطرات نیز مشاهده شده است که بزرگترین قطرات روی سطوح آبدوست در رطوبت های نسبی ۸۸ و ۹۶ درصد در محدوده قطر هیدرولیکی ۰/۳۵ تا ۰/۴ بوده و روی سطوح آبگریز در رطوبت های نسبی ۸۰ و ۸۸ درصد بزرگترین قطرات در محدوده قطر هیدرولیکی ۰/۲ تا ۰/۲۵ میلی متر بوده است.

کلیدواژه ها: آبدوست، آبگریز، کنترل پی آی دی، درصد رطوبت نسبی، ضریب انتقال حرارت، توزیع قطرات

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۲۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۱۶

* نویسنده مسئول: alipour@iust.ac.ir

۱- مقدمه

زمانیکه بخار آب و یا هوای مرطوب به دمایی کمتر از دمای شبنم می رسند فرایند چگالش رخ می دهد. این پدیده نقش مهمی در بسیاری از کاربردهای صنعتی از جمله تولید برق، سیستم های تهویه مطبوع و یا نمک زدایی از آب و تولید آب شیرین ایفا می کند. مکانیزم چگالش وابسته به ویژگی های سطح است، چنانکه اگر سطح دارای انرژی (surface energy) بسیار باشد قطره تشکیل شده روی آن خیلی سریع پخش شده که اگر زاویه ای که با سطح می سازد کمتر از ۵ درجه باشد به سطح مورد نظر فوق آبدوست و اگر بین ۵ تا ۹۰ درجه باشد به آن آبدوست گفته می شود و مکانیزم چگالش روی این سطوح از نوع لایه ای خواهد بود. تاناساوا و همکارش^[۱] با شبیه سازی دیجیتالی مشاهده کردند، سرعت بهینه

دمیدن گاز غیر قابل چگالش در محدوده ۳ تا ۷ متر بر ثانیه، ۴ متر بر ثانیه است. فودا و همکارانش^[۲] به شکل تجربی و تئوری روی لوله مسی آزمایش کرده و مشاهده کردند، برخلاف افزایش اختلاف دمای سطح و هوای مرطوب، افزایش درصد رطوبت نسبی انتقال حرارت و نرخ چگالش را زیاد می کند. یی و همکارانش^[۳] مشاهده کردند که افزایش میزان سردسازی سطح و گازهای غیرقابل چگالش روی یک سطح آلومینیومی موجب کاهش انتقال حرارت آن شده است. طالش بهرامی و همکارانش^[۴] تاثیر نوع و کسر حجمی نانو سیال را در چگالش روی صفحات مسطح شیب دار بررسی کرده و مشاهده نمودند که با افزایش کسر حجمی نانو سیال و شیب صفحه تا عمود شدن آن ضریب انتقال حرارت افزایش می یابد. لو و همکارانش^[۵] به شکل تئوری و تجربی مشاهده کردند که افزایش گاز غیر قابل چگالش و افزایش دمای سطح موجب کاهش انتقال حرارت جابجایی طبیعی روی لوله های مسی افقی شده است. ژانگ و همکارانش^[۶] رابطه ی همبستگی برای عدد ناسلت و پارامترهای هندسی پره های روی لوله های چگالش بدست آوردند. گو و همکارانش^[۷] چگالش هوای مرطوب را روی لوله های صاف و پره دار بررسی کردند و سرعت هوای مرطوب را به شکل جزئی موثر دانستند. ما و همکارانش^[۸] مشاهده کردند که با افزایش فشار و کاهش نسبت مولی یا جرمی دو گاز غیر قابل چگالش نیتروژن و آرگون، ضریب انتقال حرارت چگالش جابجایی طبیعی بیشتر شده است. ما و همکارانش^[۹] افزایش فشار را بهبود دهنده انتقال حرارت چگالش بخار خالص روی لوله بیان کردند ولی در حضور گاز غیر قابل چگالش بسته به اینکه چه نوع گازی اضافه شده است عملکرد متفاوتی وجود خواهد داشت. شاکری و همکارانش^[۱۰] بیان کردند، رطوبت نسبی تاثیر زیادی بر میزان انتقال حرارت و سر خوردن قطرات دارد و همچنین با افزایش سرعت جریان ضریب انتقال حرارت بیشتر شده است.

اگر میزان انرژی سطح کم باشد قطره تشکیل شده تمایل بسیار کمی به برقراری ارتباط با مولکول های سطح را دارد و به ناچار باید به شکل کروی درآید. مکانیزم چگالش روی این سطوح را قطره ای می نامند. سطوح آبگریز سطوحی هستند که قطرات تشکیل شده روی آن ها با سطح زاویه ۹۰ تا ۱۵۰ درجه داشته و قطرات روی سطوح فوق آبگریز زاویه بیشتر از ۱۵۰ درجه دارند. محققین بسیاری وجود دارند که به ارائه روش هایی برای تولید سطوح آبگریز و فوق آبگریز پرداخته اند که به عنوان مثال سعادت بخش و همکارش^[۱۱] توانسته اند از روش ساده ای برای ایجاد پوشش نانو کامپوزیت برای تولید سطوح فوق آبگریز بزرگ استفاده کنند. اشمیت^[۱۲] چگالش قطره ای را به عنوان فرآیندی که انتقال حرارت بهتری نسبت به نوع لایه ای دارد مطرح کرد. گراهام و همکارانش^[۱۳] بیان کردند که میزان جوانه زنی قطرات روی یک سطح آبگریز در فشار اتمسفر بیشتر از فشارهای کمتر از اتمسفر است. جولیان کاستیلو و همکارانش^[۱۴] بیان داشتند در مراحل ابتدایی، رشد قطرات روی

عوامل مهم در انتقال حرارت سطوح متفاوت هستند. هو و همکارانش^[28] عنوان کردند که افزایش غلظت بخار موجب بهبود انتقال حرارت روی لوله‌های با ترشوندگی متفاوت می‌شود. ون و همکارانش^[29] سطح آبدوستی با برآمدگی‌های آبگریز ارائه دادند و زمانی که لایه چگالش یافته به این برآمدگی‌ها می‌رسید به شکل قطره درآمده و موجب تخریب لایه مرزی دیفیوژن گازهای غیر قابل چگالش می‌شد و انتقال حرارت را بیشتر می‌کرد. یوژانگ و همکارانش^[30] متوجه شدند در سطوح با ترشوندگی متفاوت هرچه غلظت گاز غیر قابل چگالش و اختلاف دما بیشتر شود میزان انتقال حرارت کاهش پیدا می‌کند. لی و همکارانش^[31] میزان آب جمع آوری شده در چگالش هوای مرطوب را روی سطوح متفاوت به لحاظ ترشوندگی بررسی کرده و سطح دوگانه دوست را بهتر عنوان کردند.

در توزیع قطرات روی سطح میزان آمیختگی قطرات مجاور بسیار دارای اهمیت است چرا که ارتباط مستقیم با نرخ چگالش و ویژگی‌های سطح دارد. در این زمینه برای آمیختگی قطره و حباب آمی احمدی و همکارانش^[32] مشاهده کردند در تکرار هر آزمایش عوامل میکروسکوپیکی بسیاری تاثیر گذار بوده و لذا نتایج حاصل از تکرار آزمایش‌ها دارای پراکندگی است. همچنین، حسین علی‌پور و همکارانش^[33] نیز به بررسی تعدادی از پارامترهای تاثیرگذار بر این پدیده پرداخته‌اند.

در این پژوهش سطوح آبدوست و آبگریز در رطوبت‌های نسبی (Relative Humidity (RH)) متفاوت مورد بررسی قرار گرفته‌اند. یکی از مسائل مهمی که در این پژوهش به آن پرداخته شده بررسی انتقال حرارت گذرای پدیده چگالش است که کمتر مورد توجه بوده و اغلب عملکرد سطوح به شکل میانگین محاسبات در مدت زمان انجام فرآیند گزارش شده‌است، در حالیکه در این پژوهش مشاهده می‌شود در طول زمان تغییرات مهمی وجود دارد که با فیزیک مسئله قابل درک است. همچنین میانگین ضریب انتقال حرارت به عنوان عملکرد کلی هر آزمایش بررسی شده و تاثیر تغییر سطح و رطوبت نسبی در آن مورد مطالعه قرار گرفته‌است. در نهایت با عکس‌برداری، توزیع اندازه قطرات در هر سطح و در هر رطوبت نسبی مورد بررسی قرار گرفته‌است.

۲- ابزار و روش‌های استفاده شده در آزمایش

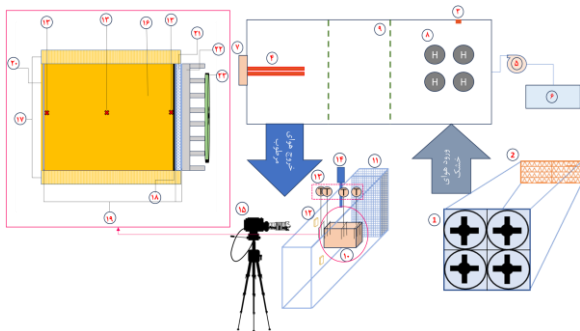
۲-۱- شرح دستگاه تست

با توجه به هدف اصلی این پژوهش، دستگاه تستی ساخته شد تا بتواند پارامترهای محیطی مطلوب را ایجاد و کنترل کند. شکل (۱) شماتیکی از دستگاه تست ساخته شده را نشان می‌دهد. برای ایجاد هوای مرطوب ابتدا هوای اتاق توسط فن‌هایی (۱) که با قدرت مشخصی کار می‌کنند، به محفظه رطوبت‌زنی وارد می‌شود. برای جلوگیری از ایجاد خطاهای سیستماتیک لازم است دمای هوای مکش شده، در آزمایش‌های مختلف یکسان (۲۱ درجه سانتی‌گراد)

سطح آبگریز وابسته به درصد رطوبت نسبی است و در کل کاهش آن نرخ چگالش را کم می‌کند. هو و همکارانش^[15] بیان کردند که در مبدل‌های حرارتی با لوله‌های آبگریز بین نحوه چینش لوله‌ها با درصد بخار موجود در هوا در میزان انتقال حرارت ارتباط وجود دارد. چن و همکارانش^[16] مشاهده کردند که در شیارهای کوچک آبگریز، با افزایش جریان جرمی و کیفیت بخار سیکل جوانه زنی تا جابرو قطرات از سطح کاهش و انتقال حرارت افزایش می‌یابد. برومندی و همکارانش^[17] مشاهده کردند دمای سطح در درصد اشغال آن توسط قطرات تاثیر ندارد ولی هرچه کمتر باشد اندازه قطره جوانه زده کوچکتر است. چنگ و همکارانش^[18] شیارهای ماکرو روی سطوح فوق آبگریز را سبب ۶۰ درصد افزایش در انتقال حرارت چگالش قطره‌ای در حضور گاز غیر قابل چگالش بیان کردند. شی و همکارانش^[19] مشاهده کردند که افزایش درصد گاز غیر قابل چگالش، کاهش اختلاف دمای سطح و سیال و آبگریزتر شدن سطح موجب کاهش ارتفاع پرش قطرات ناشی از آمیختگی آن‌ها می‌شوند. دائه و همکارانش^[20] بررسی کردند که کاهش زیاد گازهای غیر قابل چگالش موجب تبدیل چگالش قطره‌ای به لایه‌ای به هم پیوسته می‌شود که میزان انتقال حرارت کمتری نسبت به لایه‌ای دارد. مونش واران و همکارانش^[21] متوجه شدند که با افزایش دما و رطوبت نسبی انتقال حرارت چگالش در مبدل حرارتی فوق آبگریز پره‌دار بیشتر شده و هر چه رطوبت نسبی بیشتر باشد افت فشار در سطح فوق آبگریز نسبت به آبدوست کمتر خواهد. وانگ و همکارانش^[22] به شکل تجربی و با استفاده از روش لیتیس بولتزمن (lattice boltzmann) متوجه شدند افزایش خنک سازی سطح روی صفحات آبگریز موجب کاهش فرکانس پرش قطرات و بزرگتر شدن اندازه قطرات خروجی می‌شود. طالش بهرامی و همکارانش^[23] تاثیر شدت جریان و زمان فرآیند الکترونشست را در آبگریز کردن سطح بررسی کرده و مشاهده نمودند با افزایش پارامترهای مذکور نرخ انتقال حرارت از سطوح حاصل بیشتر می‌شود. لیبیه وو و همکارانش^[24] بیان داشتند که در سرعت‌ها و اختلاف دماهای متفاوت، عملکرد انتقال حرارت سطح فوق آبگریز بهتر از آبدوست است. شاکری و همکارانش^[25] تاثیر ترشوندگی سطح در میزان تخلیه سطح پوشیده شده از قطره در شرایط نبود جاذبه را بررسی و مشاهده کردند که آبگریزی، سرعت بحرانی برای سرخوردن قطرات را کاهش می‌دهد. یوسفی و همکارانش^[26] در مدلسازی جداسازهای فراصوت که در آن پدیده چگالش رخ می‌دهد مشاهده کردند که با افزایش دمای ورودی در فشار ثابت و نیز افزایش فشار در دمای ثابت شعاع متوسط قطرات خروجی افزایش می‌یابد.

هر یک از مکانیزم‌های گفته شده دارای مزایا و معایبی هستند لذا همین امر موجب شده محققین بسیاری تحقیقات خود را متوجه سطوح تلفیقی با خاصیت دوگانه دوست (biphilic) کنند. ما و همکارانش^[27] بیان کردند که غلظت و نوع گاز غیر قابل چگالش از

باشد. با استفاده از سنسورهای اندازه‌گیری دما، دمای هوای مرطوب رسیده به سطح نیز اندازه‌گیری شده و از طریق کنترل پی‌ای دی و با استفاده از گرمکن‌ها (۲) در مقدار ۲۴ درجه سانتی‌گراد کنترل می‌شود. موارد دیگری که باید کنترل شود، ارتفاع آب و دمای آن است که به ترتیب با استفاده از سنسور سطح آب (۳) و ترموستاتی (۴) که در محفظه رطوبت زنی قرار داده شده‌است، کنترل می‌شوند. سنسور سطح آب در اندازه مشخصی تعیین شده و زمانیکه سطح آب از آن کمتر می‌شود، با استفاده از کنترل پی‌ای دی، پمپ (۵) روشن شده و آب از مخزن بیرونی (۶) به داخل محفظه رطوبت زنی منتقل می‌شود. ترموستات موجود در آب هم از طریق کنترلر (۷) که به آن وصل است روی دمای ۲۴ درجه سانتی‌گراد تنظیم شده و با روشن خاموش کردن ترموستات مقدار دمای آب را ثابت نگه می‌دارد. داخل محفظه رطوبت زنی ۴ رطوبت زن اولتراسونیک (۸) قرار داده شده است که با اتمیزه کردن آب، قطرات آب را وارد جریان هوا می‌کند. برای جلوگیری از ورود قطرات بزرگتر آب همراه با هوای مرطوب به محفظه خروجی از دو سری توری (۹) استفاده شده‌است. در خروجی دستگاه تست که محل انجام پدیده چگالش (Test section) (۱۰) است، برای یکنواخت سازی جریان از همراستاکننده‌ها (۱۱) استفاده شده است. روبروی سطح چگالش، بالا و پایین آن، دو سنسور سنجش دما و رطوبت DHT22 (۱۲) قرار داده شده‌است که میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده توسط آن‌ها به عنوان رطوبت نسبی هوای مرطوب در آن لحظه گزارش شده و با توجه به اختلافی که با مقدار معین شده دارد، از طریق کد کنترلی نوشته شده برای آن و رطوبت‌زن‌ها رطوبت مورد نظر تامین می‌گردد. برای اندازه‌گیری دما از سنسور دقیق‌تر RTD PT100 class1/10 B (۱۳) استفاده شده که در یک ردیف ۳ تایی در مقابل سطح تست برای اندازه‌گیری دمای هوا قرار داده شده‌است که میانگین دمای اندازه‌گیری شده توسط آن‌ها به عنوان دمای هوای مرطوب در نظر گرفته می‌شود. همچنین سه ردیف سه تایی دیگر از این سنسورها، نزدیک به سطح، مرکز هسته مسی و در انتهای هسته مسی قرار گرفته تا گرادیان دمایی ناشی از انتقال حرارت پدیده مورد بررسی را محاسبه کند. از این سه ردیف سنسور برای بررسی خطی و یک بعدی بودن انتقال حرارت نیز استفاده شده‌است. در مسیر جریان هوای مرطوب، هات وایری (Hotwire Anemometer) (۱۴) قرار گرفته‌است که سرعت، دما و رطوبت نسبی هوای مرطوب را اندازه می‌گیرد و با توجه به اینکه فن روی قدرت مشخصی تنظیم شده‌است مقدار ثابتی را طی انجام آزمایش نشان می‌دهد که در این پژوهش برابر ۵ متر بر ثانیه است. با توجه به کالیبره بودن هات وایر و تاییدیه آن، سنسورهای اندازه‌گیری دما و رطوبت با توجه به مقادیر اندازه‌گیری شده توسط آن کالیبره شده‌اند. برای عکس برداری از دوربین Nikon D300 به ماکرو لنز 1-x (۱۵) استفاده شده است. محل انجام آزمایش شامل یک بلوک مسی دو تکه (۱۶) است که توسط پلیمر



شکل (۱) شماتیک دستگاه تست



شکل (۲) دستگاه تست ساخته شده

کرده است. قابل ذکر است که با توجه به اینکه در هریک از محل های مورد نظر، ۳ سنسور اندازه گیری دما قرار داده شده است، داده های آزمایش در هر دقیقه حاصل میانگین دماهای اندازه گیری شده توسط سنسورهای هر بخش است. پراکندگی داده ها زمانی که رطوبت نسبی افزایش یافته کمتر می شود، به این دلیل که رسیدن به شرایطی که رطوبت نسبی بیشتر باشد راحت تر است، چرا که به محض کارکرد رطوبت زن ها، رطوبت وارد هوای خشک شده و رطوبت نسبی سریع افزایش می یابد ولی کاهش رطوبت نیازمند زمانی است که مجدد به اندازه کافی هوای خشک وارد محفظه رطوبت زنی شود تا رطوبت نسبی را کاهش داده و به مقدار مطلوب برساند.

جدول ۱) میانگین و انحراف از معیار اندازه گیری شرایط محیطی در هر آزمایش

متغیر	شرایط آزمایش	میانگین	انحراف از معیار
دمای هوا	رطوبت نسبی ۸۰٪ - آبدوست	۲۴/۱۵	۰/۱۷
	رطوبت نسبی ۸۸٪ - آبدوست	۲۴/۰۹	۰/۳۱
	رطوبت نسبی ۹۶٪ - آبدوست	۲۳/۹۶	۰/۵۱
	رطوبت نسبی ۸۰٪ - آبگریز	۲۴/۰۳	۰/۴۳
	رطوبت نسبی ۸۸٪ - آبگریز	۲۳/۳۵	۰/۰۷
	رطوبت نسبی ۹۶٪ - آبگریز	۲۳/۷۱	۰/۱۸
دمای سطح	رطوبت نسبی ۸۰٪ - آبدوست	۲۰/۳۵	۰/۲
	رطوبت نسبی ۸۸٪ - آبدوست	۲۰/۳۶	۰/۲۹
	رطوبت نسبی ۹۶٪ - آبدوست	۲۰/۰۵	۰/۵۱
	رطوبت نسبی ۸۰٪ - آبگریز	۱۹/۹۳	۰/۵۳
	رطوبت نسبی ۸۸٪ - آبگریز	۱۹/۶۷	۰/۱۲
	رطوبت نسبی ۹۶٪ - آبگریز	۱۹/۹	۰/۱۹
دمای مرکز بلوک مسی	رطوبت نسبی ۸۰٪ - آبدوست	۲۰/۲۸	۰/۲
	رطوبت نسبی ۸۸٪ - آبدوست	۲۰/۲	۰/۲۸
	رطوبت نسبی ۹۶٪ - آبدوست	۱۹/۸۹	۰/۵۲
	رطوبت نسبی ۸۰٪ - آبگریز	۱۹/۹	۰/۵۳
	رطوبت نسبی ۸۸٪ - آبگریز	۱۹/۵۹	۰/۱۲
	رطوبت نسبی ۹۶٪ - آبگریز	۱۹/۷۷	۰/۱۹
رطوبت نسبی	رطوبت نسبی ۸۰٪ - آبدوست	۷۹/۹	۰/۷۵
	رطوبت نسبی ۸۸٪ - آبدوست	۸۷/۸۹	۰/۴۹
	رطوبت نسبی ۹۶٪ - آبدوست	۹۵/۸۲	۰/۲۳
	رطوبت نسبی ۸۰٪ - آبگریز	۸۰/۲۳	۰/۶۹
	رطوبت نسبی ۸۸٪ - آبگریز	۸۷/۷۷	۰/۵
	رطوبت نسبی ۹۶٪ - آبگریز	۹۵/۸۶	۰/۱۶

۲-۴- محاسبه ضریب انتقال حرارت

پدیده چگالش از جمله پدیده هایی است که تغییر فاز در آن اتفاق می افتد و لذا علاوه بر انتقال حرارت آشکار دارای انتقال حرارت نهان نیز است که سهم بیشتری از انتقال حرارت کل را دارد. در این پژوهش انتقال حرارت کل (Q) از قانون فوریه مطابق معادله (۱) بدست آمده و با تقسیم طرفین این معادله بر سطح معادله شار حرارتی (q) عبوری از سطح چگالش به مرکز هسته مسی متصل

۲-۲- آماده سازی سطوح چگالش

برای سطح چگالش از ورق های مسی (Cu) با خلوص ۹۹/۹ درصد (UNS C11000 electrolytic tough pitch copper) و ضخامت ۱ میلی متر که ضریب انتقال حرارت هدایت آن $388 W/m^{\circ}K$ است، استفاده شده است. این ورق ها در ابعاد ۴ سانتی متر در ۴ سانتی-متر برش خورده و برای از بین رفتن آلودگی های سطحی به ترتیب با سمباده های با زبری ۴۰۰، ۱۰۰۰ و ۲۰۰۰ سمباده زده می شوند و پس از آن با آب مقطر شسته و با باد ملایم خشک می شوند تا آماده قرارگیری در محل انجام آزمایش شوند. سطوح ذکر شده مجموعه سطوح آبدوست هستند و برای سطوح آبگریز ابتدا سطح مس سند بلاست (sandblast) شده و سپس تفلون (Teflon(Tef)) روی آن اسپری می شود و داخل کوره با دمای ۴۰۰ درجه سانتی گراد قرار می گیرد و در نهایت پس از خروج از کوره آرام آرام سرد شده و پشت آن ها مجدد سمباده زده می شود. برای محاسبه زاویه تماس، پس از آماده سازی و تمیزکردن سطوح، با قطره چکان در بخش های مختلف، قطراتی چکانده و عکس برداری شده و سپس در نرم افزار ویژن اسپستنت مقدار زاویه تماس قطره با سطح اندازه گیری شده- است. میانگین زاویه تماس روی سطح آبدوست ۴۸ و روی سطح آبگریز ۱۰۸ درجه محاسبه شده است.

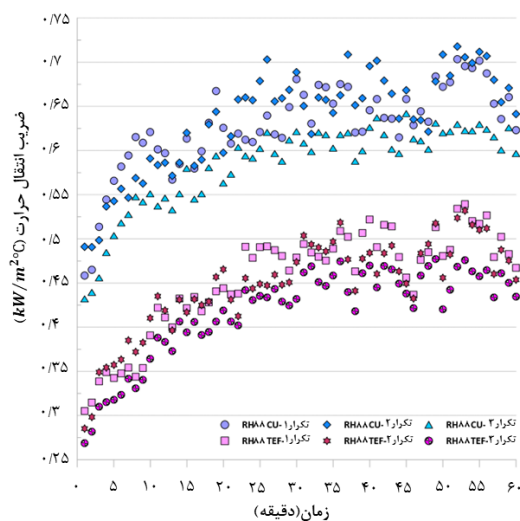
۲-۳- انجام آزمایش

در بررسی تاثیر پارامترهای محیطی بر پدیده چگالش مسأله بسیار مهم رسیدن آن ها به شرایط پایا است. همانطور که پیش تر اشاره شد دمای هوای بیرون، هوای رسیده به سطح چگالش و آب موجود در محفظه رطوبت زنی با شرایط کنترلی اعمال شده در مقدار مشخصی ثابت نگاه داشته می شوند. رطوبت نسبی در هر آزمایش در مقادیر مشخص ۸۰، ۸۸ و ۹۶ درصد تعریف شده و پس از مدت کوتاهی در آن پایدار می شود. نکته مهم این است که اگر سطح قبل از رسیدن شرایط به مقادیر تعیین شده و پایداری در آن ها در معرض چگالش قرار بگیرد، بررسی انتقال حرارت از آن صحت کافی را نخواهد داشت، لذا برای رفع این مشکل سطح چگالش با مانعی پوشانده شده و پس از پایداری شرایط محیطی این مانع برداشته شده و ثبت داده ها شروع می شود. هر آزمایش به مدت یک ساعت انجام شده و در هر دقیقه ده بار ثبت داده ها (اختلاف دمای مرکز هسته مسی و سطح چگالش) انجام شده است که میانگین آن به عنوان گرادیان دمایی در هر دقیقه ثبت شده و شار حرارتی عبوری و ضریب انتقال حرارت محاسبه شده است. همانطور که در جدول (۱) نمایش داده شده است، تغییرات دمای هوا در هر آزمایش که در دمای ۲۴ درجه سانتی گراد تعیین شده، با کمتر از ۱ درجه نوسان، برآورده شده است. به لحاظ پراکندگی داده ها نیز انحراف از معیار محاسبه شده در هر آزمایش مقدار قابل قبولی را نشان می- دهد. به طریق مشابه تغییرات دمای سطح و دمای مرکز هسته مسی با نوسان های کم و قابل قبولی، مقادیر لحاظ شده را برآورده

۳- بررسی نتایج

۳-۱- بررسی تکرارپذیری

یکی از راه‌های بررسی قابل اعتماد بودن نتایج یک آزمایش، بررسی تکرارپذیری آن است، لذا هر یک از آزمایش‌ها ۳ مرتبه تکرار شده است. با توجه به شکل (۳) که آزمایش‌های انجام شده در رطوبت نسبی ۸۸ درصد را نشان می‌دهد، علاوه بر نزدیک بودن میانگین داده‌های هر آزمایش شیب اولیه و روند تغییرات آن‌ها نیز مشابهت قابل قبولی دارد. برای رطوبت‌های نسبی ۸۰ و ۹۶ درصد نیز تکرارپذیری بررسی و به طریق مشابه مورد قبول بوده است.



شکل (۳) تکرارپذیری آزمایش‌ها در رطوبت نسبی ۸۸ درصد

۳-۲- بررسی عملکرد انتقال حرارت

شکل (۴) تغییرات ضریب انتقال حرارت سطوح آبدوست و آبریز را در طول زمان در رطوبت‌های نسبی متفاوت نشان می‌دهد که داده‌های هر نمودار میانگین مقادیر در ۳ مرتبه تکرار است. همانطور که نشان داده شده، افزایش رطوبت نسبی در هر سطح موجب افزایش ضریب انتقال حرارت شده، به این دلیل که رطوبت نسبی محرک پدیده چگالش است و هرچه بیشتر باشد، گرادیان غلظت مولکول‌های آب در هوای مرطوب نسبت به سطح بیشتر بوده و انتقال جرم سریع‌تر و بیشتر شده و شیب نمودارها نیز تندتر خواهد بود. سطوح آبریز در شرایط مشابه انتقال حرارت کمتری نسبت به سطوح آبدوست داشته، که این موضوع به دلیل تفاوت در ماهیت این سطوح است. در سطوح آبریز میزان انرژی سطح پایین است و نوعی مقاومت اولیه در برابر چگالش وجود دارد که همین موضوع سبب شده انتقال حرارت در این سطوح کمتر باشد. بین نمودارهای سطح آبدوست در رطوبت نسبی ۸۸ درصد و سطح آبریز در رطوبت نسبی ۹۶ درصد همپوشانی دیده می‌شود، چرا که سطح آبریز با وجود اینکه سطح انرژی پایین‌تری داشته ولی رطوبت نسبی بیشتر توانسته تا حدودی این مسئله را جبران کند و عملکرد پدیده چگالش در این دو آزمایش مشابهت زیادی به هم

به آن مطابق با معادله (۲) محاسبه می‌شود. در این معادله k ضریب هدایت حرارتی از مس بوده و $\partial T / \partial x$ نیز نسبت اختلاف دمای ایجاد شده بین سنسورهای دمای نزدیک سطح (T_{core-1}) و مرکز هسته مسی (T_{core-2}) به فاصله‌ی آن‌ها است.

$$Q = k A \frac{\partial T}{\partial x} \quad (۱)$$

$$q = k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (۲)$$

دمای T_{core-1} و T_{core-2} طبق معادلات (۳) و (۴) از میانگین مقادیر اندازه‌گیری شده توسط سنسورهای تعبیه شده در هر قسمت تعیین می‌شوند.

$$T_{core-1} = \frac{T_{core-1-1} + T_{core-1-2} + T_{core-1-3}}{3} \quad (۳)$$

$$T_{core-2} = \frac{T_{core-2-1} + T_{core-2-2} + T_{core-2-3}}{3} \quad (۴)$$

برای محاسبه ضریب انتقال حرارت (h) از معادله (۵) استفاده شده است. دمای سطح با توجه به فاصله‌ای (dx) که از ردیف سنسورهای نزدیک به سطح دارد و مقاومت حرارتی بین آن‌ها مطابق با معادله (۶) بدست می‌آید. دمای هوای مرطوب نیز از میانگین سنسورهای قرارگرفته مقابل سطح برای اندازه‌گیری دمای هوای مرطوب طبق معادله (۷) محاسبه شده است.

$$HTC = \frac{HF}{\Delta T} \quad (۵)$$

$$T_{surf} = T_{core-1} + \frac{\partial T}{\partial x} dx \quad (۶)$$

$$T_{air} = \frac{T_{air1} + T_{air2} + T_{air3}}{3} \quad (۷)$$

۲-۵- آنالیز عدم قطعیت

در هنگام استفاده از ابزارهای اندازه‌گیری با توجه به دقتی که دارند، پارامتر مورد نظر همراه با مقداری خطا اندازه‌گیری می‌شود. پارامترهای متفاوتی که در یک معادله قرار می‌گیرند سبب انتشار خطا (Error propagation) در آن می‌شوند. برای محاسبه انتشار خطا از معادله (۸) استفاده شده است [34]. در این معادله w_i پارامترهای مستقل اندازه‌گیری شده و f پارامتر وابسته‌ای است که بر اساس پارامترهای مستقل خطا در آن انتشار یافته، که در این مسئله ضریب انتقال حرارت است و دماهای اندازه‌گیری شده نیز پارامترهای مستقل هستند. در این معادله σ_i دقت اندازه‌گیری هر یک از پارامترها می‌باشد. با توجه به سنسورهایی که برای اندازه‌گیری دما استفاده شده و دقت آن‌ها میزان انتشار خطا حدود ۵/۵ درصد بوده است.

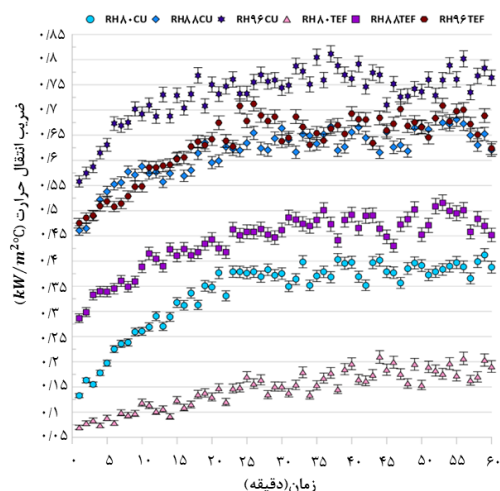
$$\sigma_z = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial w_i} \right)^2 \sigma_i^2} \quad (۸)$$

۳-۳- بررسی توزیع قطرات

در دقیقه ۳۰ ام هر آزمایش که هنوز هیچ قطره‌ای از روی هیچ سطحی سر نخورده، عکس‌برداری انجام شده‌است. هر عکس در مرکز آن و با ابعاد مشخصی ماسک شده و به عنوان نمونه‌ای از حضور قطرات در آن آزمایش مورد بررسی قرار گرفته و در شکل (۶) نمایش داده شده‌است. هر عکس در نرم‌افزار ویژن اسپستنت با بهره‌گیری از فیلترهای متفاوت به دو بخش تیره و روشن تقسیم شده که بخش‌های روشن نواحی است که نور به دلیل حضور قطره در آن نقطه انعکاس یافته و محل حضور قطرات را نشان داده‌است و نواحی تیره نیز مرز قطرات و نواحی که تر نشده‌اند را نشان می‌دهد.

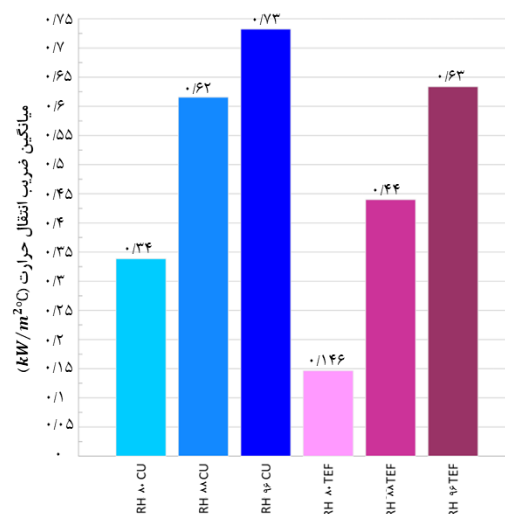
جدول (۲) توزیع اندازه قطرات در محدوده قطره‌های هیدرولیکی متفاوت را نشان می‌دهد. بزرگترین محدوده قطر قطرات ۰/۳۵ تا ۰/۴ میلی‌متر است. قطره‌ای در این محدوده بر روی سطح آبگریز در هیچ یک از رطوبت‌های نسبی ۸۰، ۸۸ و ۹۶ درصد دیده نشده‌است. همچنین بر روی سطح آبدوست نیز در رطوبت نسبی ۸۰ درصد قطره‌ای در این محدوده وجود ندارد. این موضوع را چنین می‌توان توجیه نمود که نرخ چگالش به اندازه‌ای نبوده که در نتیجه‌ی رشد قطرات و به هم پیوستگی آن‌ها قطره‌ای در این ابعاد تولید گردد. در محدوده ۰/۳ تا ۰/۳۵ میلی‌متر، روی سطح آبدوست در هر ۳ رطوبت نسبی و در سطح آبگریز فقط در رطوبت نسبی ۹۶ درصد یک قطره مشاهده شده‌است. علت اینکه روی سطح آبگریز قطره‌ای در این ابعاد وجود دارد مرتبط است با ماهیت قطراتی که روی آن تشکیل می‌شوند که از نوع ونزل (Wenzel) بوده، برخلاف سطح فوق آبگریز که از نوع کسی-بکستر (Cassie-Baxter) هستند، لذا زمانی که رطوبت نسبی زیاد شده و نرخ چگالش افزایش یافته‌است، قطره ونزلی که به سطح چسبیده رشد کرده و به این اندازه رسیده‌است. در محدوده ۰/۲۵ تا ۰/۳ میلی‌متر، روی سطح آبدوست در هر یک از رطوبت‌های نسبی ۸۰ و ۸۸ درصد ۹ قطره و در رطوبت نسبی ۹۶ درصد ۱۰ قطره وجود دارد. همچنان روی سطوح آبگریز در رطوبت‌های نسبی ۸۰ و ۸۸ درصد قطره‌ای در این ابعاد دیده نشده ولی در رطوبت نسبی ۹۶ درصد ۶ قطره وجود داشته‌است که این مسأله نشان می‌دهد افزایش رطوبت از ۸۸ تا ۹۶ درصد روی سطوح آبگریز تفاوت زیادی را در رشد و اندازه قطرات ایجاد کرده‌است. در محدوده ۰/۲ تا ۰/۲۵ میلی‌متر، روی سطح آبگریز در رطوبت نسبی ۸۰ درصد ۱ و در رطوبت نسبی ۸۸ درصد ۲ قطره مشاهده شده که نسبت به ۲۳ قطره‌ای که در رطوبت نسبی ۹۶ درصد وجود دارد تفاوت زیادی دیده می‌شود. روی سطوح آبدوست نیز کمترین تعداد قطره در این محدوده در رطوبت نسبی ۸۸ درصد است که به دلیل نرخ بیشتر چگالش در این رطوبت نسبی نسبت به رطوبت نسبی ۸۰ درصد قطراتی در این محدوده و محدوده‌های دیگر در اثر آمیختگی به قطره بزرگتری تبدیل شده‌اند. همانطور که مشاهده می‌شود با کاهش اندازه قطرات تعداد آن‌ها افزایش می‌یابد که این

داشته باشد. در طول زمانی که آزمایش‌ها انجام و ثبت شده‌اند، افت چندانی در میزان انتقال حرارت مشاهده نشده‌است و این موضوع نشان می‌دهد سطح آبدوست در طول این مدت کامل تر نشده تا رژیم چگالش لایه‌ای شود و با افزایش ضخامت و مقاومت حرارتی ناشی از آن، انتقال حرارت افت کند و لذا اینکه پدیده چگالش در چه مدت زمانی مورد بررسی قرار گرفته مسأله مهمی است که باید در تحلیل نتایج به آن توجه داشت.



شکل (۴) ضریب انتقال حرارت در گذر زمان

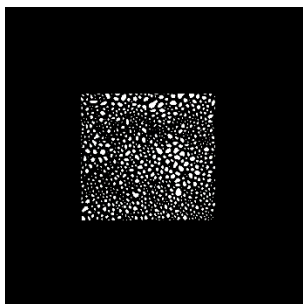
شکل (۵) میانگین ضریب انتقال حرارت هر آزمایش را در مدت زمان ۶۰ دقیقه نشان داده‌است. در هر رطوبت نسبی سطح آبدوست انتقال حرارت بیش‌تری نسبت به سطح آبگریز داشته و با افزایش رطوبت نسبی در هر سطح انتقال حرارت افزایش یافته‌است. در ارتباط با همپوشانی بین نمودارهای اشاره شده در شکل قبل، برآورد نهایی نشان می‌دهد که میزان انتقال حرارت در سطح آبگریز با درصد رطوبت نسبی بالاتر بیش‌تر بوده‌است.



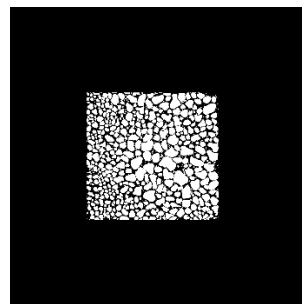
شکل (۵) میانگین ضریب انتقال حرارت

در رطوبت‌های نسبی کمتر نیز با توجه به بیشتر بودن تعداد قطرات در محدوده‌های بزرگتر قابل توجیه است و همانطور که پیش‌تر اشاره شد با گذر زمان الگوهای ایجاد شده تغییر می‌کند. در محدوده ۰/۰۵ تا ۰/۱ میلی‌متر، تعداد قطرات مجدد افزایش یافته و بیشترین مقادیر برای رطوبت‌های نسبی ۸۰ و ۸۸ درصد روی سطح آبگریز است. چرا که نرخ چگالش در آن‌ها کمتر بوده و آمیختگی و به هم پیوستن قطرات در آن‌ها نیز کمتر است. کوچکترین قطرات در محدوده کوچکتر از ۰/۰۵ میلی‌متر، قطراتی‌اند که تازه جوانه زده‌اند و دلیل بیش‌تر بودن آن روی سطوح آبدوست بیشتر بودن نواحی فعال روی آن‌ها است، در حالیکه در سطح آبگریز به دلیل کمتر بودن سطح انرژی، مقاومت اولیه‌ای در برابر جوانه زنی وجود و همچنین در سطوح آبگریز با افزایش رطوبت نسبی نرخ چگالش افزایش یافته و به نوعی کم بودن انرژی سطح توسط افزایش گرادیان غلظت جبران و نرخ جوانه زنی بیش‌تر شده‌است.

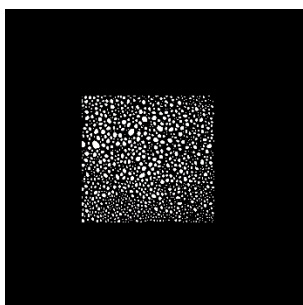
مسئله تدریجی بودن رشد قطرات و زمانبر بودن آن‌ها را به خوبی نشان داده‌است و همچنین با گذر زمان انتظار می‌رود از تعداد قطرات کوچکتر کاسته و به تعداد قطرات بزرگتر بیافزاید، لذا نتایج حاصل با پیشروی زمان الگوهای متفاوتی خواهد داشت. تعداد قطرات در محدوده ۰/۱۵ تا ۰/۲ میلی‌متر در مقایسه با محدوده قبل، در هر آزمایش افزایش یافته و با افزایش رطوبت نسبی بیش‌تر هم شده‌است. در این محدوده و محدوده قبل تعداد قطرات روی سطح آبگریز در رطوبت نسبی ۹۶ درصد از تعداد قطرات روی سطوح آبدوست در رطوبت نسبی‌های ۸۰ و ۸۸ درصد بیش‌تر بوده و این در حالی است که در محدوده ۰/۲۵ تا ۰/۳ این مسأله برعکس است، لذا نرخ چگالش کل وابسته به درصد اشغال هر سطح توسط قطرات در محدوده‌های متفاوت است. بیشترین تعداد قطرات در محدوده ۰/۱ تا ۰/۱۵ میلی‌متر روی سطح آبگریز در رطوبت نسبی ۹۶ درصد است. همچنین در این محدوده اختلاف بین تعداد قطرات بین سطوح آبدوست و آبگریز کمتر شده‌است. بیش‌تر بودن تعداد قطرات



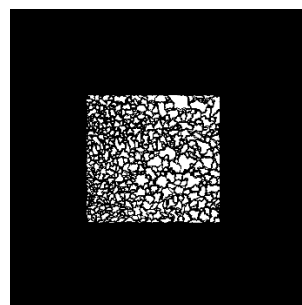
(ب) رطوبت نسبی ۸۰٪ و آبگریز



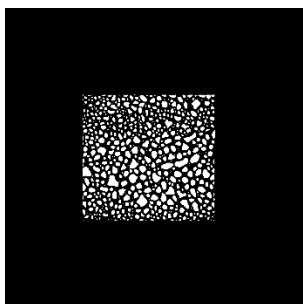
(الف) رطوبت نسبی ۸۰٪ و آبدوست



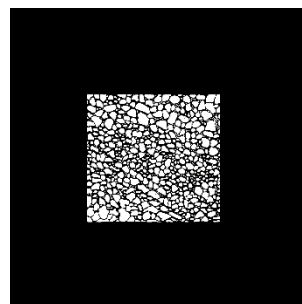
(ت) رطوبت نسبی ۸۸٪ و آبگریز



(پ) رطوبت نسبی ۸۸٪ و آبدوست



(ج) رطوبت نسبی ۹۶٪ و آبگریز



(ث) رطوبت نسبی ۹۶٪ و آبدوست

شکل ۶) توزیع قطرات در هر آزمایش

آزمایش	محدوده قطر هیدرولیکی (mm)						
	۰ تا ۰/۰۵	۰/۰۵ تا ۰/۱	۰/۱ تا ۰/۱۵	۰/۱۵ تا ۰/۲	۰/۲ تا ۰/۲۵	۰/۲۵ تا ۰/۳	۰/۳ تا ۰/۳۵
رطوبت نسبی ۸۰٪ آبدوست	۱۰۹۱	۱۵۳	۱۳۵	۵۷	۲۲	۹	۱
رطوبت نسبی ۸۸٪ آبدوست	۱۱۱۵	۲۹۶	۱۴۸	۶۶	۱۷	۹	۱
رطوبت نسبی ۹۶٪ آبدوست	۱۰۹۵	۲۰۳	۱۴۴	۱۰۳	۳۴	۱۰	۱
رطوبت نسبی ۸۰٪ آبگریز	۳۹۰	۴۳۶	۱۳۵	۳	۱	۰	۰
رطوبت نسبی ۸۸٪ آبگریز	۶۰۹	۵۳۳	۱۱۶	۳	۲	۰	۰
رطوبت نسبی ۹۶٪ آبگریز	۷۲۰	۲۰۶	۱۹۱	۷۴	۲۳	۶	۱

۴- نتیجه‌گیری

نتایج آزمایش‌ها نشان داد که در بررسی تغییرات ضریب انتقال حرارت نسبت به زمان، از ابتدای آزمایش تا لحظه‌ای که فرآیند چگالش رخ دهد و انتقال حرارت نهان ناشی از تغییر فاز به انتقال حرارت کل اضافه شود، زمانی طی می‌شود و در این زمان ضریب انتقال حرارت به مقدار مشخصی رسیده و حول آن نوسان کمی می‌کند. همچنین از مقایسه ضریب انتقال حرارت آزمایش‌های مختلف، مشخص می‌شود که زمان طی شده برای شروع پدیده چگالش و افزایش ضریب انتقال حرارت روی سطوح آبدوست کمتر از آبگریز بوده و همچنین با افزایش رطوبت نسبی نیز زمان ذکر شده کمتر هم می‌شود. در شرایط یکسان محیطی هر آزمایش، میانگین ضریب انتقال حرارت به مدت ۱ ساعت، روی سطح آبدوست بیشتر از آبگریز بوده است. بخش دیگری از نتایج که با بررسی‌های گرافیکی از سطوح آزمایش بدست آمده، نشان داده است که در نیمه انجام آزمایش یعنی ۳۰ دقیقه پس از آن، هیچ قطره‌ای هنوز سطح را ترک نکرده است و بزرگترین قطرات دیده شده در محدوده قطر هیدرولیکی ۰/۳۵ تا ۰/۴ میلی‌متر بوده که فقط روی سطح آبدوست در رطوبت‌های نسبی ۸۸ و ۹۶ درصد مشاهده شده‌است. قطراتی که در محدوده ۰/۳ تا ۰/۳۵ میلی‌متر بوده‌اند علاوه بر اینکه در تمامی رطوبت‌های نسبی روی سطح آبدوست دیده شده‌اند، روی سطح آبگریز نیز در رطوبت نسبی ۹۶ درصد وجود داشته است. بزرگترین قطرات موجود روی سطح آبگریز در رطوبت‌های نسبی ۸۰ و ۸۸ درصد در محدوده قطر هیدرولیکی ۰/۲ تا ۰/۲۵ میلی‌متر بوده است.

تشکر و قدردانی: با تشکر از جناب آقای مهندس حسام آمی احمدی
تاییدیه اخلاقی: محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیر ایرانی منتشر نشده است.

تعارض منافع: در این مقاله هیچ تعارض منافعی برای اظهار وجود ندارد.

منابع

- 1- Tanasawa I, Ochiai JI. Expeimental study on dropwise condensation. Bulletin of JSME. 1973;16(98):1184-97.
- 2- Fouda A, Wasel MG, Hamed AM, Zeidan ES, Elattar HF. Investigation of the condensation process of moist air around horizontal pipe. International Journal of Thermal Sciences. 2015 Apr 1;90:38-52.
- 3- Yi Q, Tian M, Yan W, Qu X, Chen X. Visualization study of the influence of non-condensable gas on steam condensation heat transfer. Applied Thermal Engineering. 2016 Aug 5;106:13-21.
- 4- Talesh Bahrami HR, Zareie S, Saffari H. A numerical analysis of dropwise condensation of nanofluid on an inclined plate. Modares Mechanical Engineering. 2017 May 10;17(3):105-14.
- 5- Lu J, Cao H, Li J. Condensation heat and mass transfer of steam with non-condensable gases outside a horizontal tube under free convection. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019 Aug 1;139:564-76.
- 6- Zhang JN, Cheng M, Ding YD, Fu Q, Chen ZY. Influence of geometric parameters on the gas-side heat transfer and pressure drop characteristics of three-dimensional finned tube. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019 Apr 1;133:192-202.
- 7- Gu YH, Liao Q, Cheng M, Ding YD, Zhu X. Condensation heat transfer characteristics of moist air outside a three-dimensional finned tube. International

conditions with the help of superhydrophobic coating. Energy conversion and management. 2021 Feb 1;229:113740.

22- Wang X, Xu W, Chen Z, Xu B. Dropwise condensation heat transfer on nanostructured superhydrophobic surfaces with different inclinations and surface subcoolings. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2021 Dec 1;181:121898.

23- Talesh Bahramia HR, Azizi A, Saffari H. An Empirical Study on Dropwise Condensation Occurred on Surfaces Hydrophobized Using a Single-Step Electrodeposition. Amirkabir Journal of Mechanical Engineering. 2019 Jan 28;52(6):1397-412. (in persian)

24- Wu YL, Zheng JW, Muneeshwaran M, Yang KS, Wang CC. Moist air condensation heat transfer enhancement via superhydrophobicity. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2022 Jan 1;182:121973.

25- Shakeri Bonab M, Minetti C, Iorio CS, Zhao D, Liu QS, Ou J, Kempers R, Amirfazli A. Experimental investigation of dropwise condensation shedding by shearing airflow in microgravity using different surface coatings. Langmuir. 2022 Dec 27;39(1):64-74.

26- Yousefi S, Changizian M, Bahrainian SS. Numerical Modeling of the Effect of Inlet Temperature and Pressure on Steam Condensation and Entropy Generation in High-Pressure Separator. Amirkabir Journal of Mechanical Engineering. 2023 Jan 21;54(11):2601-20.

27- Ma XH, Zhou XD, Lan Z, Yi-Ming LI, Zhang Y. Condensation heat transfer enhancement in the presence of non-condensable gas using the interfacial effect of dropwise condensation. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2008 Apr 1;51(7-8):1728-37.

28- Hu HW, Tang GH, Niu D. Experimental investigation of condensation heat transfer on hybrid wettability finned tube with large amount of noncondensable gas. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2015 Jun 1;85:513-23.

29- Wen R, Zhou X, Peng B, Lan Z, Yang R, Ma X. Falling-droplet-enhanced filmwise condensation in the presence of non-condensable gas. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2019 Sep 1;140:173-86.

30- Zhang TY, Mou LW, Zhang JY, Fan LW, Li JQ. A visualized study of enhanced steam condensation heat transfer on a honeycomb-like microporous superhydrophobic surface in the presence of a non-condensable gas. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020 Apr 1;150:119352.

31- Lee J, Lee S, Lee J. Improved humid air condensation heat transfer through promoting condensate drainage on vertically stripe patterned bi-philic surfaces. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020 Oct 1;160:120206.

32- Ami Ahmadi H, Ebadi A, Hosseinalipour SM. Experimental Investigation of Size Effect on the Bubble-Droplet Coalescence in Water. Modares Mechanical Engineering. 2020 Aug 10;20(8):2075-85.

33- Hosseinalipour SM, Ami Ahmadi H, Ebadi A, Abdollahi Gol M. Experimental Investigation of Bubble-

Journal of Heat and Mass Transfer. 2020 Sep 1;158:119983.

8- Ma X, Ma J, Tong H, Jia H. The investigation on heat transfer characteristics of steam condensation in presence of noncondensable gas under natural convection. Science and Technology of Nuclear Installations. 2021 Mar 26;2021:1-3.

9- Ma X, Xiao X, Jia H, Li J, Ji Y, Lian Z, Guo Y. Experimental research on steam condensation in presence of non-condensable gas under high pressure. Annals of Nuclear Energy. 2021 Aug 1;158:108282.

10- Bonab MS, Kempers R, Amirfazli A. Determining transient heat transfer coefficient for dropwise condensation in the presence of an air flow. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2021 Jul 1;173:121278.

11- Saadat Bakhsh M, Mohammad Nouri M. Slip Length of the Nanocomposite Coating in Laminar Flow. Modares Mechanical Engineering. 2019 Oct 10;19(10):2463-9.

12- Schmidt E, Schurig W, Sellschopp W. Versuche über die Kondensation von Wasserdampf in Film-und Tropfenform. Technische Mechanik und Thermodynamik. 1930 Feb;1:53-63.

13- Graham C, Griffith P. Drop size distributions and heat transfer in dropwise condensation. International Journal of Heat and Mass Transfer. 1973 Feb 1;16(2):337-46.

14- Castillo JE, Weibel JA, Garimella SV. The effect of relative humidity on dropwise condensation dynamics. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2015 Jan 1;80:759-66.

15- Hu HW, Tang GH, Niu D. Experimental investigation of convective condensation heat transfer on tube bundles with different surface wettability at large amount of noncondensable gas. Applied Thermal Engineering. 2016 May 5;100:699-707.

16- Chen X, Derby MM. Combined visualization and heat transfer measurements for steam flow condensation in hydrophilic and hydrophobic mini-gaps. Journal of Heat Transfer. 2016 Sep 1;138(9):091503.

17- Barati SB, Pionnier N, Pinoli JC, Valette S, Gavet Y. Investigation spatial distribution of droplets and the percentage of surface coverage during dropwise condensation. International Journal of Thermal Sciences. 2018 Feb 1;124:356-65.

18- Cheng Y, Du B, Wang K, Chen Y, Lan Z, Wang Z, Ma X. Macrottextures-induced jumping relay of condensate droplets. Applied Physics Letters. 2019 Mar 4;114(9).

19- Shi Y, Tang GH, Shen LY. Study of coalescence-induced droplet jumping during phase-change process in the presence of noncondensable gas. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2020 May 1;152:119506.

20- Ji DY, Lee JW, Kim D, Hwang W, Lee KY. Effective reduction of non-condensable gas effects on condensation heat transfer: Surface modification and steam jet injection. Applied Thermal Engineering. 2020 Jun 25;174:115264.

21- Muneeshwaran M, Wang CC. Energy-saving of air-cooling heat exchangers operating under wet

Droplet Coalescence Phenomenon in Water. Modares Mechanical Engineering. 2020 Jan 10;20(1):241-50.

34- Persson CG. GUM-Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. Q-KEN, Riga, Latvia. 2011.