

ساخت نانوپوشش بر روی صفحات مسی به منظور بهبود انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای

نازنین عبدی^۱، محمد سمیع پورگیری^۱، علیمراد رشیدی^{۲*} و اشکان ذوالریاستین^۳

۱- دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی شیمی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال، تهران، ایران

۲- مرکز توسعه علوم و فن‌آوری‌های نانوکربن، پردیس پژوهشی و توسعه صنایع پایین‌دستی نفت، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

۳- گروه پژوهشی مواد غیر فلزی، پژوهشگاه نیرو، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۲۷

چکیده

مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای به دلیل بالا بودن ضریب انتقال حرارت، به‌طور گسترده در صنعت مورد استفاده می‌باشند. در این تحقیق، مطالعات تجربی بر روی صفحات شیاردار که به دلیل شیارهای روی سطح آن، میزان سطح انتقال حرارت و آشفتگی جریان بالاتری دارند، صورت گرفته است. نانوفین‌های دندریتی روی صفحات مسی در یک میکروکانال مبدل حرارتی سنتز و بررسی اثر رفتار بر ضریب انتقال حرارت صورت گرفت. سنتز نانوفین‌های دندریتی با استفاده از یک سلول شیشه‌ای استاندارد دو الکترودی با الکتروود گرافیت به‌عنوان الکتروود مرجع بر روی شش صفحه شیاردار مسی به ابعاد ۴/۶ cm در ۴/۶ cm در یک میکروکانال مبدل حرارتی صفحه‌ای به‌روش رسوب‌نشانی الکتریکی انجام شد. نانوفین‌های مسی دندریتی پوشش داده شده بر روی صفحات شیاردار از محلول الکتروولیت متشکل از CuSO_4 (0.6M) و H_2SO_4 (0.4M) با شدت جریان $1/2 \text{ A/cm}^2$ تا $4/8 \text{ A/cm}^2$ در مدت زمان ۳۰۰ s رسوب‌نشانی شدند. مشخصه‌یابی سطح پوشش داده شده با روش میکروسکوپ الکترونی روبشی FESEM، و میزان چسبندگی این پوشش به سطح با روش طیف سنج جذب اتمی AAS، مورد بررسی قرار گرفت. میکروکانال مربوطه با امکان ورود دو سیال سرد و گرم، در یک سیستم با قابلیت بررسی میزان بهبود ضریب انتقال حرارت با اعمال پوشش‌های نانوفین‌های مسی نصب شد. در این سیستم آب به‌عنوان سیال چرخشی با دو ورودی به‌صورت گرم و سرد و دو خروجی به‌صورت گرم و سرد به‌صورت متقابل در میکروکانال انتخاب شد. دمای ورودی آب سرد 7°C و دمای ورودی آب گرم در آزمایش‌های جداگانه برابر 45°C و 55°C تنظیم شدند. ضریب انتقال حرارت در دو مرحله پیش از پوشش نانوفین‌های مسی و پس از اعمال پوشش اندازه‌گیری شد. اختلاف دمای اندازه‌گیری شده از $1/9^\circ\text{C}$ تا $4/8^\circ\text{C}$ اندازه‌گیری شد و افزایش ضریب انتقال حرارتی بین ۴۰ تا ۶۲٪ را نشان داد.

کلمات کلیدی: مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای، ضریب انتقال حرارت، رسوب‌نشانی الکتریکی، اصلاح سطح،

نانوفین‌های دندریتی

*مسئول مکاتبات

rashidiam@ripi.ir

آدرس الکترونیکی

شناسه دیجیتال: (DOI:10.22078/pr.2023.5129.3272)

مقدمه

هستند جریان قوی گردابه‌ای و توربولانس اغتشاش موجب بزرگ بودن ضرایب انتقال حرارت و افت فشار می‌گردد [۵-۱]. در سیستم‌های با جریان آرام، طیف گسترده‌ای از روش‌ها برای افزایش ضرایب انتقال حرارت ایجاد شده‌اند، اما حداکثر افزایش مرتبط با اکثر این روش‌های پیشنهادی در یک سطح است [۶ و ۷]. روش‌های متفاوتی برای افزایش نرخ انتقال حرارت با افزایش سطح از طریق استفاده از محیط‌های متخلخل وجود دارد. مطالعات متعددی بر روی مبدل‌های حرارتی جریان تک فاز و دو فاز انجام شده است و در تمامی این روش‌ها صفحات مبدل مورد توجه بوده‌اند. به همین دلیل، اصلاح سطح به‌زمینه اصلی مطالعه برای افزایش ضریب انتقال حرارت در مبدل‌های صفحه و قاب تبدیل شده است. اصلاح سطح به‌طور کلی به سه روش اصلی صورت می‌گیرد: روش‌های فعال، غیر فعال و ترکیبی. اصلاح سطح فعال با افزودن یک منبع انرژی بیرونی مانند لرزش و الکتروهیدرودینامیک انجام می‌شود. در مقابل، روش‌های غیرفعال همانند اصلاح سطح و استفاده از مواد افزودنی، در انجام فرآیند ساده‌تر هستند که از دستگاه‌های بیرونی کمک نمی‌گیرند و استفاده از آن‌ها به‌دلیل سهولت اعمال و انعطاف‌پذیری بسیار مورد توجه و کاربردی است. روش مرکب نیز ترکیب دو روش فعال و غیرفعال به‌صورت هم‌زمان است. از آنجایی که روش‌های غیرفعال برای دستگاه‌های موجود کاربرد بیشتری دارند، به شدت مورد توجه دانشمندان و محققان قرار گرفته است [۸]. با پیشرفت در فن‌آوری نانو، کاربرد نانومواد از جمله نانوسیالات و استفاده از نانوپوشش‌ها پتانسیل قابل توجهی برای بهبود ویژگی‌های انتقال حرارت در این مبدل‌ها از خود نشان داده است. به‌عنوان مثال، روش‌های غیرفعال، مانند استفاده از محیط متخلخل برای افزایش سطح مؤثر مبدل حرارتی یا استفاده از نانوسیالات برای اصلاح

امروزه تلاش‌های بسیاری برای بررسی تجربی رفتار انتقال حرارت در مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای انجام شده است. مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای با صفحات شیاردار داری راندمان بسیار بالایی هستند و از جوانب مختلف مورد بررسی بیشتر قرار گرفته‌اند. این مبدل‌ها به‌دلیل سطح بالای انتقال حرارت و ایجاد جریان آشفته به‌واسطه شیارهای روی صفحات به‌طور گسترده در کاربردهای صنعتی مورد استفاده هستند. به‌منظور صرفه‌جویی در انرژی از طریق افزایش کارایی و کاهش اتلاف انرژی، بهبود ضریب انتقال حرارت بسیار حائز اهمیت است. مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای دارای خواص انتقال حرارت بسیار ویژه‌ای هستند که به‌دلیل مساحت سطح بسیار بیشتر در حجم بسیار کم با قابلیت افزودن تعداد صفحات، نسبت به مبدل‌های پوسته و لوله مورد توجه بیشتری هستند. مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای از صفحات موازی تشکیل شده است که کانال‌هایی برای عبور سیال به‌وجود می‌آورند. این نوع مبدل‌ها با توجه به نوع ساختار به انواع کلی مبدل حرارتی صفحه‌ای واشردار^۱، مبدل حرارتی صفحه‌ای جوشی^۲، مبدل صفحه‌ای نیمه جوشی^۳، تقسیم می‌شوند. به‌صورت کلی این مبدل‌ها به‌صورت صفحات شیاردار طراحی می‌شوند که سیال گرم و سرد در کانال‌های ایجاد شده جریان می‌یابند. با توجه به آشفتگی‌های زیادی که در جریان سیال روی صفحات ایجاد می‌شود، تبادل حرارت با راندمان بسیار بالا در این دستگاه انجام می‌شود. صفحات نقش بسیار مهمی در راندمان این مبدل‌ها دارند. مبدل‌های حرارتی با صفحات شیاردار در مقایسه با سایر انواع مبدل‌های حرارتی، انعطاف‌پذیری بالایی نیز دارند، چرا که می‌توان سطح انتقال حرارت و در نتیجه نرخ انتقال حرارت را بهبود بخشید. مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای معمولاً در جریان سیالاتی با فشار پایین‌تر از ۲۵ bar و دمای کمتر از ۲۵۰ °C محدود می‌شوند. از آنجا که کانال‌های جریان کاملاً کوچک

1. Gasketed Plate Heat Exchanger

2. Compabloc Plate Heat Exchanger

3. Semi Welded Plate Heat Exchanger

در مقیاس میکرو و نانو تمرکز دارند، اما با توجه به داده‌های موجود، هیچ تحقیق معتبری در مورد بررسی اثر افزایش سطح مؤثر از طریق پوشش مسی نانوفین‌های دندریتی^۱ روی صفحات مسی به‌منظور بررسی ضریب انتقال حرارت وجود ندارد. مس که به‌عنوان یکی از کارآمدترین هادی‌های حرارتی با ضریب هدایت حرارتی بالا می‌باشد، دارای ویژگی‌های قابل توجهی برای استفاده در مبدل‌های حرارتی است، علاوه‌براین که از نظر کارایی و مقاومت در برابر خوردگی نیز شایان توجه می‌باشد. پژوهش حاضر متمرکز بر بررسی انتقال حرارت در مبدل حرارتی قبل از اعمال پوشش نانوفین‌های مسی بر روی بستر صفحات مسی و بعد از آن به‌روش رسوب‌نشانی الکتریکی می‌باشد. در این تحقیق از روش رسوب‌نشانی الکتریکی با استفاده از یک سوسپانسیون حاوی ذرات باردار با استفاده از اعمال جریان الکتریکی برای کاهش پوشش مورد نظر، پوشش‌هایی در ابعاد نانومتری بر روی زیرلایه‌های مختلف استفاده شد. روش رسوب نشانی الکتریکی به‌دلیل سهولت انجام، مقرون به صرفه بودن، قابلیت در پوشش‌دهی در ابعاد کوچک، قابلیت تنظیم ورودی‌های مورد نظر مورد توجه بسیار بوده است [۱۸]. میکروکانالی با شش صفحه مسی همانند مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای طراحی شد و آب به‌عنوان سیال در گردش در هر دو سیکل گردش گرم و سرد مورد استفاده قرار گرفت. پس از آن ضریب انتقال حرارت جهت بررسی و مقایسه اثر این نانوفین‌های پوشش داده شده اندازه‌گیری شد.

مواد و روش کار

مواد شیمیایی مورد استفاده و روش سنتز نانوفین‌های دندریتی

در این پژوهش مس، به‌دلیل خواص ذکر شده و کاربرد گسترده در سیستم‌های حرارتی صنعتی

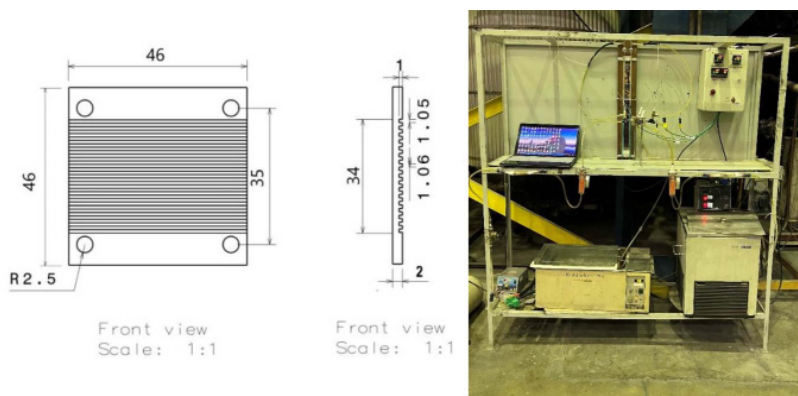
خواص سیال پایه از موارد این چنینی می‌باشند [۹]. مطالعات نشان داده است که محققان، تمایل بسیار زیادی به بررسی روش‌های مختلف اصلاح سطح و ایجاد پوشش بر روی سطح به‌منظور افزایش نرخ انتقال حرارت دارند [۱۰]. موراری و همکاران به‌منظور افزایش عملکرد قطعات مکانیکی، مقایسه مفصلی در مورد تکنیک‌های مختلف اصلاح سطح به‌صورت هیبریدی از پوشش‌ها، بافت‌ها و نانوذرات انجام دادند [۱۱]. شیخ‌الاسلامی و همکاران، به بررسی روش‌های غیرفعال با استفاده از دستگاه‌های جریان چرخشی پرداختند. آن‌ها دریافتند با توجه به تغییرات در سطح، قراردادن دستگاه‌های جریان چرخشی با قابلیت ایجاد گرداب در جریان‌ها و ایجاد اختلال در لایه مرزی در سطح لوله، انتقال حرارت همرفتی افزایش پیدا می‌کند [۱۲]. کبیل و همکاران بر روی تأثیر استفاده از نانوذرات بر عملکرد مبدل حرارتی با صفحات شیاردار با افزودن Al_2O_3 تحقیق نموده و بهبود درصد افزایش انتقال ضریب انتقال حرارت را به میزان ۱۳٪ گزارش نمودند [۱۳]. واجس و همکاران انتقال حرارت همرفتی تک‌فاز را با آزمایش تشدید انتقال حرارت غیرفعال بررسی نمودند. در این تحقیق بهبود ضریب انتقال حرارت برای سطح اصلاح شده گزارش شد [۱۴]. بنا بر گزارش آرمسترانگ و همکاران، استفاده از نانوذرات در لوله‌های مسی از طریق روش احیای شیمیایی، ضریب انتقال حرارت را تا ۹۵٪ افزایش می‌دهد [۱۵]. لین و همکاران، ویژگی‌های سطحی مختلف مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای مسی را با جریان هوا ارزیابی نمودند که منجر به بهبود ۹۵٪ ای در نرخ انتقال حرارت شد [۱۶]. فوربرگ و همکاران افزایش ۱۰۰٪ در بستر فولاد ضدزنگ و پوشش مس با روش رسوب‌نشانی الکتریکی در حالت تبخیر را گزارش دادند [۱۷]. همان‌گونه که در مطالعات پیشین بررسی شده است، بیشتر مطالعات عمدتاً بر روی تأثیر پوشش‌های مختلف در مبدل‌های حرارتی تک‌فاز با استفاده از تکنیک‌های اصلاح سطح

1. Dendritic Nanofins

در این تحقیق، دستگاهی به منظور بررسی اثر نانوفین‌های دندریتی بر ضریب انتقال حرارت طراحی شد. در شکل ۱ قسمت الف، تصویر دستگاه مورد استفاده و قسمت ب، جزئیات دستگاه شامل یک میکروکانال با شش صفحه شیاردار، دو ورودی و دو خروجی، مجهز به ترموکوپل نوع K، دو واحد گردش آب مجهز به مخزن، متصل به دریچه‌ای برای متعادل کردن جریان، یک پمپ، یک مانومتر و دو فیلتر می‌باشد. اختلاف دما و ضریب انتقال حرارت در دو حالت بدون پوشش نانوفین‌های دندریتی و پس از پوشش‌دهی اندازه‌گیری شد. در سه مجموعه آزمایش مختلف، یک سیرکولاتور در سمت سرد برای تنظیم دمای ورودی سرد 7°C و یک سیرکولاتور برای سمت گرم جهت تنظیم دما به ترتیب روی 45°C ، 50°C و 55°C استفاده شد. قطر داخلی و خارجی لوله‌ها به ترتیب برابر (Di: 1mm, Do: 1.3 mm) می‌باشد. جریان‌های ورودی مختلف ($0/5$ و $1/0$ و $1/5$ L/min) در ۹ دور مختلف مطابق جدول ۱ برای ورود به سیستم طراحی شد. به منظور جلوگیری از گرفتگی لوله‌ها، دو فیلتر نیز در مسیر انتقال آب قرار گرفتند. یک سامانه پایش جمع‌آوری داده نیز برای اندازه‌گیری دما نصب شد [۸].

به‌عنوان ماده بستر صفحات داخل میکروکانال مورد استفاده قرار گرفت. پوشش نانوفین مسی بر روی صفحات مسی به‌عنوان بستر صفحات مسی انتخاب شد. این میکروکانال از شش صفحه مسی با کیفیت بالا (Alfa Aesar $99/8$) ساخته شد. قطر صفحات $46 \text{ mm} \times 46 \text{ mm}$ با ۱۷ شیار و ارتفاع هر صفحه 2 mm می‌باشد. به‌منظور آماده‌سازی صفحات برای انجام فرآیند پوشش، سطح صفحات با سنباده الکتریکی ساییده و صیقل داده شد و با استون تمیز شد. فرآیند رسوب‌نشانی الکتریکی با استفاده از یک سلول شیشه‌ای استاندارد با دو الکترود در دمای اتاق انجام شد. الکترود آند یک الکترود گرافیت با ارتفاع 100 mm \times عرض 10 mm و فاصله بین دو الکترود 15 mm ، و نانوفین‌های مسی دندریتی در محلول الکترولیت متشکل از CuSO_4 (0.6M) و H_2SO_4 (0.4M) رشد کردند. جریان از $1/2 \text{ A/cm}^2$ به $4/8 \text{ cm}^2$ با استفاده از پتانسیواستات مدل Ivium Stat در 300 s شروع شد. صفحات پس از اعمال پوشش با آب بدون یون شسته و در دمای 80°C به مدت 20 min در آون قرار داده شدند. سپس از روش میکروسکوپ الکترونی روبشی FESEM برای تجزیه و تحلیل پوشش آرایه‌های نانوفین دندریتیکی استفاده شد [۱۹].

روش انجام کار



شکل ۱ الف) دستگاه اندازه‌گیری انتقال حرارت (ب) جزئیات صفحات شیاردار در میکروکانال

جدول ۱ نتایج AAS مقدار مس در آب در گردش پس از انجام یک آزمایش

غلظت (تعداد در میلیارد ppb)	نمونه
۲۹/۸۹	مس

مشخصه یابی

$$\Delta T_{LMTD} = \frac{(T_{h,i} - T_{c,o}) - (T_{h,o} - T_{c,i})}{\ln\left(\frac{T_{h,i} - T_{c,o}}{T_{h,o} - T_{c,i}}\right)} \quad (۴)$$

ضریب کلی انتقال حرارت نیز به صورت زیر محاسبه می شود:

$$U = \frac{Q_{avg}}{A_s \Delta T_{LMTD}} \quad (۵)$$

که در آن سطح مؤثر صفحات (As) به شکل زیر تعریف می شوند [۲۱]:

$$A_s = 2(D + W) \times N_p \times N_g \times L \quad (۶)$$

در این رابطه، D قطر لوله، W عرض لوله، Np تعداد صفحات، Ng تعداد شیارها و L طول خط جریان است. و در نهایت، ضریب انتقال حرارت به شکل

$$h = \frac{U}{A_s \Delta T} - \frac{k}{\Delta x} \quad (۷)$$

که در آن h ضریب انتقال حرارت همرفتی، U ضریب کلی انتقال حرارت، A سطح مؤثر، k_f ضریب هدایت حرارتی سیال و xΔ ضخامت هر صفحه مسی است.

نتایج و بحث

دو مجموعه آزمایش با این دستگاه طراحی و انجام شد. اولین مجموعه برای بررسی عملکرد صفحات مسی بدون نانوپوشش و مجموعه آزمایش دوم برای بررسی اثر اعمال نانوین های مسی بر انتقال حرارت انجام شد. صفحات پس از انجام آزمایش های سری اول به روش ذکر شده در بخش سنتز نانوین های دندریتی پوشش داده شدند و سپس با تکنیک FESEM مشخصه یابی شده و مجدداً برای اندازه گیری ضریب انتقال حرارت بر روی میکروکانال نصب شدند.

مشخصه یابی به روش میکروسکوپ الکترونی روبشی FESEM

نانوین های مسی به منظور بررسی اثرات مختلف، در شرایط بهینه قرار گرفتند.

میکروسکوپ الکترونی روبشی FESEM برای اندازه گیری ساختار و ریخت شناسی^۱ نانوین های دندریتی توسط دستگاه FESEM TESCAN MIRA3 انجام شد. طیفسنجی جذب اتمی AAS نیز بر روی آب پس از گردش در چرخه برای تشخیص مقدار مس باقی مانده به منظور اندازه گیری مقاومت نانوین های دندریتی سنتز شده توسط دستگاه Varian 600 GTA 100 Furnace AAS از طریق اعمال موج مشخصه تابش الکترومغناطیسی از منبع کوره انجام شد.

محاسبات ضریب انتقال حرارت

مبدل های حرارتی صفحه ای ظرفیت قابل توجهی در افزایش ضریب انتقال حرارت دارند. ضریب انتقال حرارت به عنوان ثابت بین شار گرما و نیروی محرکه ترمودینامیکی گرمای جریان تعریف می شود. گرما از سمت گرم دستگاه به صفحات از طریق همرفت، از صفحات از طریق رسانش و بار دیگر از صفحات به سیال سرد توسط همرفت منتقل می شود. بنابراین، رابطه انرژی برای سمت گرم به صورت زیر نوشته می شود [۲۰]:

$$Q_h = \dot{m}_h c_{p,h} (T_{h,i} - T_{h,o}) \quad (۱)$$

که در این رابطه \dot{m}_h نرخ جریان جرمی برای سمت داغ $C_{p,h}$ (kg/s) گرمای ویژه، $T_{h,i}$ و $T_{h,o}$ دمای ورودی و خروجی سیال گرم را بر حسب °C نشان می دهند.

برای سمت سرد [۲۰]:

$$Q_c = \dot{m}_c c_{p,c} (T_{c,o} - T_{c,i}) \quad (۲)$$

نرخ جریان جرمی در سمت سرد به عنوان \dot{m}_c (kg/s) $T_{c,i}$ و $T_{c,o}$ دمای ورودی و خروجی سمت سرد و $C_{p,c}$ گرمای ویژه سیال سرد می باشد. میانگین نرخ انتقال حرارت به صورت زیر تعریف می شود [۲۰]:

$$Q_{avg} = \frac{Q_c + Q_h}{2} \quad (۳)$$

تغییرات دمایی بین سیالات سرد و گرم در مبدل های حرارتی صفحه ای دارای مقادیر نابرابر است. تفاوت میانگین را می توان از اختلاف دمای میانگین ورود به سیستم محاسبه نمود [۲۰]:

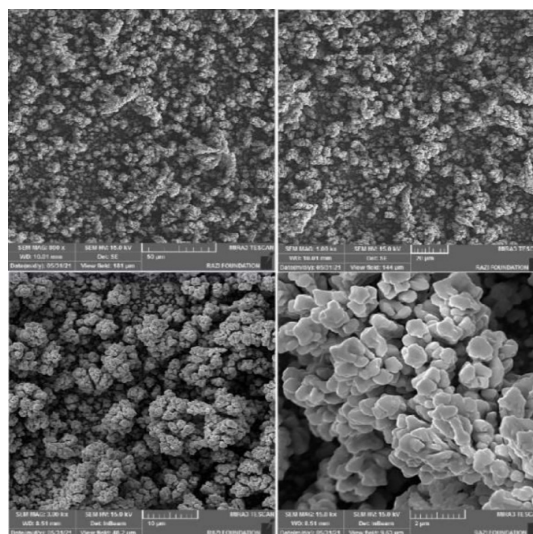
1. Morphology

مکانیکی آرایه‌های نانوفینی دندردیتی به‌میزان مهاجرت یون‌های مس در محلول بستگی دارد. با افزایش مهاجرت یون‌های فلزی، رسوب بیشتری روی سطح رخ می‌دهد و این باعث می‌شود تا نانوفین‌های ضخیم‌تر با شاخه‌های کمتر ایجاد شود. مهاجرت کمتر یون‌ها منجر به ایجاد آرایه‌های نانوفینی باریک‌تر و با انشعابات بیشتر خواهد شد [۲۵-۲۲]. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که بین غلظت محلول و مهاجرت یون‌های فلزی رابطه مستقیمی وجود دارد. همان‌گونه که در شکل مشخص است، اندازه نانوذرات با عکس‌های FESEM برابر $100 \mu\text{m}$ و ضخامت آن‌ها در محدوده $200 \mu\text{m}$ بوده است.

مشخصه‌یابی به‌روش طیف‌سنجی جذب اتمی (AAS)

به‌منظور بررسی میزان چسبندگی دندردیت‌های رشد یافته بر روی سطح صفحات، آزمایش AAS برای تعیین میزان چسبندگی دندردیت‌ها و امکان جدا شدن آن‌ها از سطح به‌داخل سیال انجام شد. طیف‌سنجی جذب اتمی به‌روش کوره‌گرافیت GFAAS برای تشخیص عناصر کمیاب در نمونه‌های آب و خاک است.

شکل ۲ ریخت‌شناسی نانوفین‌های رسوب نشانی شده را در محلول $(0.6 \text{ M}) \text{CuSO}_4$ ، $(0.4 \text{ M}) \text{H}_2\text{SO}_4$ در 300 s در جریان افزایشی $1/2 \text{ A/cm}^2$ تا $4/8 \text{ A/cm}^2$ نشان می‌دهد. دندردیت‌ها ابتدا بر روی توپ‌های اولیه کروی شروع به رشد نمودند و به‌تدریج شاخه‌های کوچک روی برآمدگی‌های قبلی شروع به پدیدار شدن کردند. قابلیت تشکیل دندردیت‌ها، به‌دلیل انتشار یون‌های الکترولیت در منافذ مواد الکتروود و ساختار متخلخل یکنواخت روی بستر مس، بسیار بالا بوده است و تشکیل دندردیت‌ها ابتدا از طریق ایجاد توپ‌هایی بر روی سطح و سپس ایجاد شاخه‌های ثانویه روی این توپ‌ها صورت گرفت. ساختار متخلخل سطح فرآیندهای تخلیه بار را در طی واکنش‌های الکتروشیمیایی از طریق فراهم کردن مکان‌های فعال کافی به‌طور کامل در معرض الکترولیت تسهیل می‌کند. همچنین، منافذ دندردیت به‌عنوان یک مخزن قوی برای یون‌ها عمل می‌کند و همچنین نفوذ الکترولیت را به الکتروود بسیار افزایش می‌دهد. ساختار متخلخل سطح الکتروود نشان داد که یک تماس مؤثر بین مواد فعال روی سطح و الکترولیت وجود دارد. از آنجایی‌که فرآیند رسوب‌نشانی الکتریکی از مدل تجمعی انتشار ذرات پیروی می‌کند، استحکام



شکل ۲ تصاویر FESEM از پوشش نانوفین مسی با چگالی جریان افزایشی $1/2 \text{ A/cm}^2$ تا $4/8 \text{ A/cm}^2$ به‌روش رسوب‌نشانی الکتریکی در مدت زمان 300 s

۹ بار برای هر کدام) با دماهای ورودی 7°C برای سمت سرد و دماهای 45°C ، 50°C و 55°C برای سمت گرم طراحی شد. ضریب انتقال حرارت همرفتی H در جریان‌های تعیین شده در ۹ سری آزمایش مجزا محاسبه شد و نتایج در شکل‌های ۳-۵ ارائه شده است. شکل ۳ نتیجه آزمایش را برای تفاوت ضریب انتقال حرارت صفحات مسی در حالت بدون پوشش و پوشش داده شده در میکروکانال برای دمای سرد ورودی 7°C و دمای گرم ورودی 45°C نشان می‌دهد. همان گونه که در شکل ۳ مشخص است، ضریب انتقال حرارت محاسبه شده برای آزمایش‌های صفحات بدون پوشش سمت سیال سرد از حداقل $15068 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ تا حداکثر $36966 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ بود. ضریب انتقال حرارت محاسبه شده مشابه برای آزمایشات با صفحات پوشش داده شده برای سمت سیال سرد از حداقل $15902 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ تا حداکثر $39562 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ بوده است. کمترین اختلاف ضریب انتقال حرارت در قسمت سرد در دبی جریان ورودی سرد $1/5 \text{ L}/\text{min}$ و دبی جریان ورودی گرم $1/5 \text{ L}/\text{min}$ برابر 7% اختلاف و بیشترین اختلاف ضریب انتقال حرارت در دبی جریان ورودی گرم $0/5 \text{ L}/\text{min}$ و دبی جریان ورودی سرد $1/5 \text{ L}/\text{min}$ برابر با 52% رخ داده است.

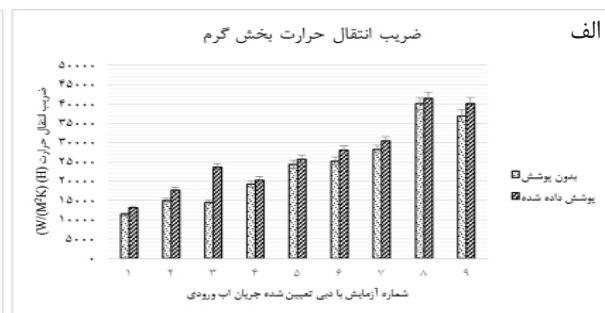
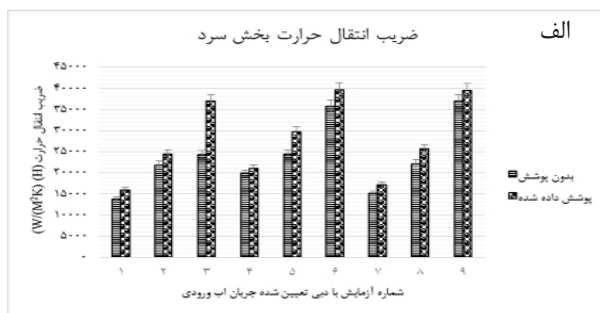
میزان غلظت توسط دستگاه Varian 600 GTA 100 Furnace AAS براساس تعداد در میلیارد (ppb) محاسبه و مورد بررسی قرار گرفت. این دستگاه قابلیت افزایش حساسیت، آنالیز مقادیر بسیار کم نمونه، و آنالیز مستقیم نمونه‌های جامد قدرت طیف‌سنجی جذب اتمی را داراست [۲۶]. آب موجود در چرخه پس از گردش مورد آزمایش قرار گرفت و همان گونه که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، مقدار بسیار کم مس ($29/89 \text{ ppb}$) نشان می‌دهد که دندریت‌ها از سطح جدا نشده‌اند.

محاسبات انتقال حرارت

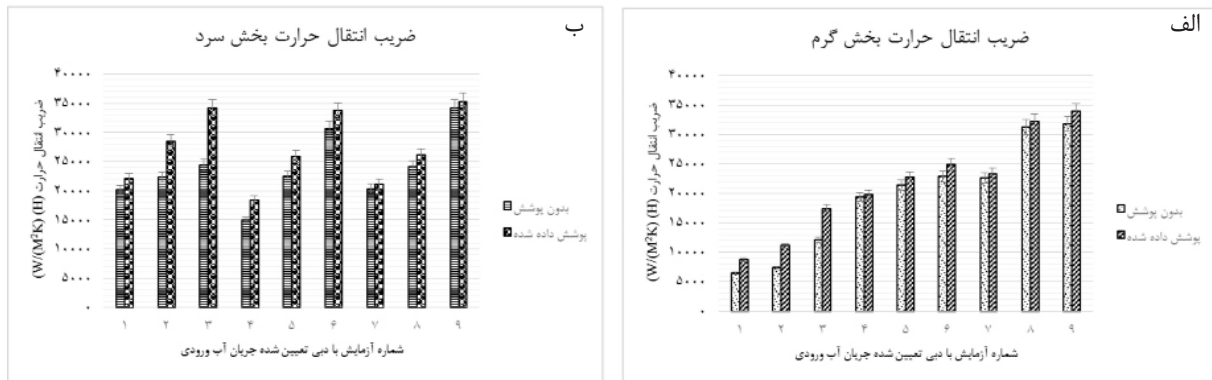
همان طور که در بخش روش انجام آزمایش ذکر شد، دما در چهار نقطه مختلف به صورت جداگانه اندازه‌گیری شد. دمای ورودی سرد و گرم و دمای خروجی سرد و گرم. جریان‌های آب مطابق جدول ۲ تنظیم شدند. انتخاب آزمایش نرخ‌های جریان مختلف با ضرورت بررسی اینکه آیا تغییر دبی جریان می‌تواند ضریب انتقال حرارت و نرخ آن را تحت تأثیر قرار دهد مشخص شدند. حداقل دبی جریان با توجه به ابعاد میکروکانال و لوله‌های ورودی و خروجی $0/5 \text{ L}/\text{min}$ و حداکثر دبی جریان برابر $1/5 \text{ L}/\text{min}$ انتخاب شد. سه مجموعه آزمایش

جدول ۲ شماره جریان‌های تنظیم شده ورودی آب سرد و گرم

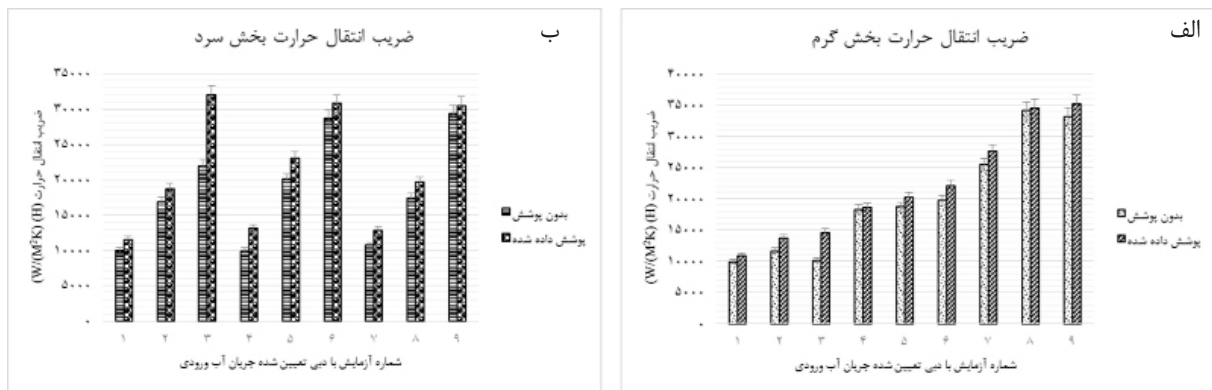
شماره آزمایش	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹
دبی جریان ورودی گرم (L/min)	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۱	۱	۱	۱/۵	۱/۵	۱/۵
دبی جریان ورودی سرد (L/min)	۰/۵	۱	۱/۵	۰/۵	۱	۱/۵	۰/۵	۱	۱/۵



شکل ۳ مقایسه ضریب انتقال حرارت (H) برای صفحات پوشش داده شده و بدون پوشش در دو سمت (الف) بخش گرم و (ب) بخش سرد برای ورودی سرد 7°C و 45°C



شکل ۴ مقایسه ضریب انتقال حرارت (H) برای صفحات پوشش داده شده و بدون پوشش در دو سمت الف) بخش گرم و ب) بخش سرد برای ورودی سرد 7°C و 50°C



شکل ۵ مقایسه ضریب انتقال حرارت (H) برای صفحات پوشش داده شده و بدون پوشش در دو سمت الف) بخش گرم و ب) بخش سرد برای ورودی سرد 7°C و 55°C

پایین تر ورودی گرم (دبی 0.5 L/min) رخ داده است و بهترین مقدار انتقال حرارت در جریان‌های ورودی تنظیم شده با نرخ پایین تر رخ می‌دهند. این امر به سادگی به دلیل زمان ماند کمتر قابل توجیه است. شکل ۴ نتیجه آزمایش را برای تفاوت ضریب انتقال حرارت صفحات مسی در حالت بدون پوشش و پوشش داده شده در میکروکانال برای دمای سرد ورودی 7°C و دمای گرم ورودی 50°C نشان می‌دهد. همان گونه که در شکل ۴ مشخص است، ضریب انتقال حرارت محاسبه شده برای آزمایش‌های صفحات بدون پوشش سمت سیال سرد از حداقل $14904 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ تا حداکثر $34231 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ بود. ضریب انتقال حرارت محاسبه شده مشابه برای آزمایشات با صفحات پوشش داده شده برای سمت سیال سرد از حداقل $18373 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ تا حداکثر $35338 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ بوده است.

برای آزمایش‌های صفحات بدون پوشش سمت سیال گرم از حداقل $11387 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ تا حداکثر $36966 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ بود. ضریب انتقال حرارت محاسبه شده مشابه برای آزمایشات با صفحات پوشش داده شده برای سمت سیال گرم از حداقل $13088 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ تا حداکثر $41461 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ بوده است. کمترین اختلاف ضریب انتقال حرارت در قسمت گرم در دبی جریان ورودی سرد 0.5 L/min و دبی جریان ورودی گرم $1/5 \text{ L/min}$ برابر 8% اختلاف و بیشترین اختلاف ضریب انتقال حرارت در دبی جریان ورودی گرم 0.5 L/min و دبی جریان ورودی سرد $1/5 \text{ L/min}$ برابر با 62% رخ داده است. نتیجه اینکه ضریب انتقال حرارت به صورت کلی از ۷ تا 62% در این حالت بهبود داشته است. با توجه به این بررسی و روند شکل مذکور، می‌توان فهمید که حداکثر اختلاف ضریب انتقال حرارت در دبی‌های

مشابه برای آزمایشات با صفحات پوشش داده شده برای سمت سیال سرد از حداقل $11537 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ تا حداکثر $30759 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ بوده است. کمترین اختلاف ضریب انتقال حرارت در قسمت سرد در دبی جریان ورودی سرد $1/5 \text{ L}/\text{min}$ و دبی جریان ورودی گرم $1/5 \text{ L}/\text{min}$ برابر 3% اختلاف و بیشترین اختلاف ضریب انتقال حرارت در دبی جریان ورودی گرم $0/5 \text{ L}/\text{min}$ و دبی جریان ورودی سرد $1/5 \text{ L}/\text{min}$ برابر 45% رخ داده است. برای آزمایش‌های صفحات بدون پوشش سمت سیال گرم از حداقل $9879 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ تا حداکثر $34134 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ بوده. ضریب انتقال حرارت محاسبه شده مشابه برای آزمایشات با صفحات پوشش داده شده برای سمت سیال گرم از حداقل $10874 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ تا حداکثر $35155 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ بوده است. کمترین اختلاف ضریب انتقال حرارت در قسمت گرم در دبی جریان ورودی سرد $1/5 \text{ L}/\text{min}$ و دبی جریان ورودی گرم $1/5 \text{ L}/\text{min}$ برابر 1% اختلاف و بیشترین اختلاف ضریب انتقال حرارت در دبی جریان ورودی گرم $0/5 \text{ L}/\text{min}$ و دبی جریان ورودی سرد $1/5 \text{ L}/\text{min}$ برابر 43% رخ داده است. نتیجه این که ضریب انتقال حرارت به صورت کلی از 1 تا 43% در این حالت بهبود داشته است. روند شکل مذکور، نشان می‌دهد که بالاترین اختلاف ضریب انتقال حرارت در دبی‌های پایین‌تر ورودی گرم (دبی $0/5 \text{ L}/\text{min}$) رخ داده است که با توجه به زمان ماند کم همانند سایر تست‌های پیشین مورد تایید می‌باشد. اتلاف حرارت برای همه داده‌های تجربی کمتر از 5% تخمین شده است. تمامی آزمون‌ها برای اطمینان از اعتبار نتایج دو بار تکرار شده‌اند. نتایج به دست آمده نشان داده است که اعمال نانوفین‌های دندریتی تأثیر قابل توجهی بر افزایش ضریب انتقال حرارت و در نتیجه نرخ انتقال حرارت دارد. نتایج نشان می‌دهد که در دبی‌های مشخص شده، بیشترین بهبود انتقال حرارت در آزمون‌های مرتبط با ورودی سرد 7°C و ورودی گرم 45°C صورت گرفته است.

کمترین اختلاف ضریب انتقال حرارت در قسمت سرد در دبی جریان ورودی سرد $1/5 \text{ L}/\text{min}$ و دبی جریان ورودی گرم $1/5 \text{ L}/\text{min}$ برابر 3% اختلاف و بیشترین اختلاف ضریب انتقال حرارت در دبی جریان ورودی گرم $0/5 \text{ L}/\text{min}$ و دبی جریان ورودی سرد $1/5 \text{ L}/\text{min}$ برابر با 40% رخ داده است. برای آزمایش‌های صفحات بدون پوشش سمت سیال گرم از حداقل $6445 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ تا حداکثر $31874 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ بوده. ضریب انتقال حرارت محاسبه شده مشابه برای آزمایشات با صفحات پوشش داده شده برای سمت سیال گرم از حداقل $8775 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ تا حداکثر $33999 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ بوده است. کمترین اختلاف ضریب انتقال حرارت در قسمت گرم در دبی جریان ورودی سرد $1/5 \text{ L}/\text{min}$ و دبی جریان ورودی گرم $1 \text{ L}/\text{min}$ برابر 2% اختلاف و بیشترین اختلاف ضریب انتقال حرارت در دبی جریان ورودی گرم $0/5 \text{ L}/\text{min}$ و دبی جریان ورودی سرد $1/5 \text{ L}/\text{min}$ برابر با 44% رخ داده است. نتیجه اینکه ضریب انتقال حرارت به صورت کلی از 2 تا 44% در این حالت بهبود داشته است. با توجه به این بررسی و روند شکل مذکور، می‌توان فهمید که حداکثر اختلاف ضریب انتقال حرارت در دبی‌های پایین‌تر ورودی گرم (دبی $0/5 \text{ L}/\text{min}$) رخ داده است و بهترین مقدار انتقال حرارت در ست‌های جریان ورودی با نرخ جریان پایین‌تر رخ می‌دهند. این امر به سادگی به دلیل زمان ماند کمتر قابل توجیه است. در این مجموعه تست نیز حداکثر تفاوت ضریب انتقال حرارت در کمترین دبی رخ داده است که به دلیل زمان احتباس کمتر آب قابل توجیه می‌باشد. شکل ۵ نتایج آزمایش را برای تفاوت ضریب انتقال حرارت صفحات مسی در حالت بدون پوشش و پوشش داده شده در میکروکانال برای دمای سرد ورودی 7°C و دمای گرم ورودی 55°C نشان می‌دهد. ضریب انتقال حرارت محاسبه شده برای آزمایش‌های صفحات بدون پوشش سمت سیال سرد از حداقل $9913 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ تا حداکثر $29367 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ بوده. ضریب انتقال حرارت محاسبه شده

[۳۷]:

$$u = \frac{\dot{m}}{\rho A_s} \quad (9)$$

که در آن u سرعت متوسط سیال، \dot{m} شدت جریان جرمی، ρ دانسیته سیال (آب) و A_s سطح مؤثر صفحات مسی می‌باشند.

همچنین ضریب اصطکاک از رابطه [۳۷]:

$$f = \frac{16}{Re} \quad (10)$$

که در آن f ضریب اصطکاک و Re عدد رینولدز می‌باشد. نتایج محاسبه افت فشار در هر مجموعه آزمایش به شرح **جدول ۳** می‌باشد. نتایج نشان‌دهنده افزایش افت فشار با افزایش نرخ جریان سرد است. سرعت سیال نسبتاً بالاتر در نرخ‌های جریان تعیین شده و متعاقباً رژیم آشفته جریان علت این رفتار است.

عدم قطعیت

در هر پژوهش به‌روشنی آزمایشات تجربی، عدم قطعیت عاملی بسیار مهم است. عدم قطعیت‌ها اساساً به عدم دقت ابزار، خطاهای ارزیابی آماری یا خطاهای انسانی مرتبط می‌شود. در این مطالعه از نظریه موفات برای تخمین عدم قطعیت به‌شرح زیر استفاده شد. که در آن D تابعی از متغیرهای مختلف (X_i) را نشان می‌دهد که به‌صورت $D = f(X_1, X_2, \dots, X_n)$ تعریف می‌شود. تمام پارامترهای دیگر تعیین شده‌اند و می‌توانند به‌راحتی مطابق **جدول ۴** محاسبه شوند [۳۸]:

$$\frac{U_D}{D} = \sqrt{\left(\frac{\partial x_1}{\partial x_1}\right)^2 + \left(\frac{\partial x_2}{\partial x_2}\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial x_n}{\partial x_n}\right)^2} \quad (11)$$

در گزارش‌های مشابه با مواد متفاوت در مطالعات قبلی نیز بهبود انتقال حرارت به‌واسطه عملکرد بهبود تکنیک‌های اصلاح سطح به‌روش غیرفعال به‌واسطه افزایش سطح مؤثر، ایجاد آشفستگی و سایر موارد تأیید شده است [۲۷-۳۱]. این موضوع نه تنها برای مبدل‌های حرارتی تک فاز با استفاده از تکنیک‌های اصلاح سطح در مقیاس نانو، بلکه برای مطالعات مورد بررسی انتقال حرارت با تغییر فاز نیز معتبر می‌باشد. در تمام مطالعات مشابه، تغییرات سطحی بر روی مواد مختلف بدون توجه به قرار گرفتن در یک یا چند فاز منجر به افزایش انتقال حرارت می‌شود [۳۲-۳۶].

محاسبات افت فشار

یک پارامتر مهم برای درک ویژگی‌های جریان در مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای، تعیین مقدار افت فشار است. در این تحقیق با توجه به شیاردار بودن صفحات، افت فشار یک عامل حیاتی مؤثر بر دبی است. افت فشار از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۳۸]:

$$\Delta P_{channel} = 4f \cdot \frac{\rho u^2}{2} \cdot \frac{L}{D_h} \quad (8)$$

که در آن، ΔP افت فشار در مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای، f ضریب اصطکاک، ρ دانسیته سیال، u سرعت متوسط سیال در میکروکانال، L طول مؤثر و D_h قطر میکروکانال در مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای است. سرعت متوسط سیال برای هر ورودی جریان از پیش تنظیم شده از رابطه زیر محاسبه می‌شود

جدول ۳ محاسبه افت فشار در مجموعه‌های دبی‌های طراحی شده در آزمایش در میکروکانال

۹	۸	۷	۶	۵	۴	۳	۲	۱	ست‌های جریان تنظیم شده
۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱	۱	۱	۰/۵	۰/۵	۰/۵	دبی جریان ورودی گرم (L/min)
۱/۵	۱	۰/۵	۱/۵	۱	۰/۵	۱/۵	۱	۰/۵	دبی جریان ورودی سرد (L/min)
۱/۳۰۸	۰/۸۸۷	۰/۴۴۲	۱/۳۱۵	۰/۸۷۷	۰/۴۴۳	۱/۳۱۲	۰/۸۷۴	۰/۳۳۵	افت فشار برای دمای تنظیم شده ورودی °C ۷ و °C ۴۵
۱/۲۴۱	۰/۸۵۱	۰/۴۴۲	۱/۳۲۷	۰/۸۷۹	۰/۴۳۴	۱/۳۲۳	۰/۸۸۵	۰/۴۴۲	افت فشار برای دمای تنظیم شده ورودی °C ۷ و °C ۵۰
۱/۳۳۱	۰/۸۹۰	۰/۴۴۲	۱/۳۲۳	۰/۸۹۸	۰/۴۴۳	۱/۳۳۱	۰/۸۹۳	۰/۴۴۳	افت فشار برای دمای تنظیم شده ورودی °C ۷ و °C ۵۵

جدول ۴ عدم قطعیت در داده‌های اندازه‌گیری شده برای دستگاه طراحی شده اندازه‌گیری میزان انتقال حرارت

عدم قطعیت	مدل	دستگاه/ پارامتر
$\pm 2/2 \text{ } ^\circ\text{C}$	Type K	ترموکوپل ۱ و ۳ ورودی سمت سرد
$\pm 2/2 \text{ } ^\circ\text{C}$	Type K	ترموکوپل ۲ و ۴ ورودی سمت گرم
$\pm 0/1 \text{ (L/min)}$	Kbold	فلومتر- سمت سرد و گرم
$\pm 0/005 \text{ bar}$	Propeller pump	پمپ (7.0 bar, 12VDC)
$\pm 7\%$ تا ۶	Moffat	ضریب انتقال حرارت (H) سمت سرد و گرم
از کل $\pm 0/25\%$	Moffat	افت فشار

نتیجه‌گیری

استفاده از تکنیک میکروسکوپ الکترونی روبشی FE-SEM، آرایه‌های نانوفین دندریتی با سطح گسترش یافته را نشان داد. سپس اختلاف دما و میزان ضریب انتقال حرارت ورودی‌های سرد و گرم در دی‌های مختلف اندازه‌گیری شد. نتایج نشان‌دهنده رشد ۴۰ تا ۶۲٪ در ضریب انتقال حرارت در مقایسه همین پارامترها بدون پوشش صفحات بود. همچنین با توجه به سهولت اعمال نانوفین‌های دندریتی و کاربرد فراوان آن‌ها در صنعت، نظر به امکان اعمال آن‌ها در سیستم‌های بزرگ‌تر، علی‌رغم این‌که این تحقیق در یک سیستم بسته انجام شده است، می‌توان مطالعات مشابهی را در سیستم‌های باز به‌صورت اعمال نانوسیال به همین سیستم و اعمال آن در سیستم‌های با مقیاس بزرگتر انجام داد.

در تحقیق حاضر، صفحات مسی تشکیل‌دهنده یک میکروکانال مشابه مبدل‌های حرارتی صفحه‌ای با روش رسوب‌نشانی الکتریکی اصلاح سطح شدند و در یک دستگاه طراحی شده با دو ورودی سرد و گرم با هدف بررسی میزان افزایش ضریب انتقال حرارت H مورد بررسی قرار گرفتند. اصلاح سطح شامل اعمال یک پوشش نانوفین سنتز شده بر روی شش صفحه مسی شیاردار با ابعاد $4/6 \text{ cm}$ در $4/6 \text{ cm}$ بود. روش رسوب‌نشانی الکتروشیمیایی با استفاده از یک سلول شیشه‌ای استاندارد دو الکترودی با الکتروود گرافیتی به‌عنوان الکتروود مقابل و محلول حاوی CuSO_4 (0.6M) و H_2SO_4 (0.4M) با جریان افزایشی از $1/2 \text{ A/cm}^2$ تا $4/8 \text{ A/cm}^2$ در دمای اتاق به مدت ۳۰۰ s انجام شد. نتایج ریخت‌شناسی با

مراجع

- [1]. Khan, T. S., Khan, M. S., Chyu, M. C., & Ayub, Z. H. (2010). Experimental investigation of single phase convective heat transfer coefficient in a corrugated plate heat exchanger for multiple plate configurations, *Applied Thermal Engineering*, 30(8-9), 1058-1065, doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.01.021.
- [2]. Abu-Khader, M. M. (2012). Plate heat exchangers: Recent advances. *Renewable and sustainable energy reviews*, 16(4), 1883-1891, doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.009.
- [3]. Jin, S., & Hrnjak, P. (2017). Effect of end plates on heat transfer of plate heat exchanger, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 108, 740-748, doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.11.106.
- [4]. Martin, H. (1996). A theoretical approach to predict the performance of chevron-type plate heat exchangers, *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 35(4), 301-310.
- [5]. Islam, M. S., Xu, F., & Saha, S. C. (2020). Thermal performance investigation in a novel corrugated plate heat exchanger, *International journal of heat and mass transfer*, 148, 119095, doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119095.
- [6]. Abou Elmaaty, T. M., Kabeel, A. E., & Mahgoub, M. (2017). Corrugated plate heat exchanger review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 852-860, doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.266.
- [7]. Han, X. H., Cui, L. Q., Chen, S. J., Chen, G. M., & Wang, Q. (2010). A numerical and experimental study of chevron, corrugated-plate heat exchangers, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37(8),

- 1008-1014, doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2010.06.026.
- [8]. Habibishandiz, M., & Saghir, M. Z. (2022). A critical review of heat transfer enhancement methods in the presence of porous media, nanofluids, and microorganisms, *Thermal Science and Engineering Progress*, 30, 101267, doi.org/10.1016/j.tsep.2022.101267.
- [9]. Wajs, J., & Mikielewicz, D. (2016). Influence of metallic porous microlayer on pressure drop and heat transfer of stainless steel plate heat exchanger, *Applied Thermal Engineering*, 93, 1337-1346, doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.08.101.
- [10]. Święch, D., Palumbo, G., Piergies, N., Kollbek, K., Marzec, M., Szkudlarek, A., & Paluszkiwicz, C. (2023). Surface modification of Cu nanoparticles coated commercial titanium in the presence of tryptophan: Comprehensive electrochemical and spectroscopic investigations. *Applied Surface Science*, 608, 155138, doi.org/10.1016/j.apsusc.2022.155138.
- [11]. Murari, G., Nahak, B., & Pratap, T. (2023). Hybrid surface modification for improved tribological performance of IC engine components—a review, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 09544089221150718, doi.org/10.1177/09544089221150718.
- [12]. Sheikholeslami, M., Gorji-Bandpy, M., & Ganji, D. D. (2015). Review of heat transfer enhancement methods: Focus on passive methods using swirl flow devices, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 49, 444-469, doi.org/10.1016/j.rser.2015.04.113.
- [13]. Kabeel, A. E., Abou El Maaty, T., & El Samadony, Y. (2013). The effect of using nano-particles on corrugated plate heat exchanger performance, *Applied Thermal Engineering*, 52(1), 221-229, doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.11.027.
- [14]. Wajs, J., & Mikielewicz, D. (2014). Effect of surface roughness on thermal-hydraulic characteristics of plate heat exchanger, *Key Engineering Materials*, 597, 63-74, doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.597.63.
- [15]. Armstrong, M., Sivasubramanian, M., & Selvapalam, N. (2021). Experimental investigation on the heat transfer performance analysis in silver nano-coated double pipe heat exchanger using displacement reaction, *Materials Today: Proceedings*, 45, 2482-2490, doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.100.
- [16]. Lin, H. Y., Wu, Y. L., Yang, K. S., Tseng, C. Y., & Wu, S. K. (2020, April). The effect of surface modification on heat transfer of heat exchanger, In *Journal of Physics: Conference Series*, 1500, (1), 012044, IOP Publishing, doi:10.1088/1742-6596/1500/1/012044.
- [17]. Furberg, R., Palm, B., Li, S., Toprak, M., & Muhammed, M. (2009). The use of a nano-and microporous surface layer to enhance boiling in a plate heat exchanger, doi.org/10.1115/1.3180702.
- [18]. Huang, M., Xie, L., Wang, Y., He, H., Yu, H., Cui, J., & Xiong, Y. (2023). Efficient uranium electrochemical deposition with a functional phytic Acid-Doped Polyaniline/Graphite sheet electrode by Adsorption-electrodeposition strategy, *Chemical Engineering Journal*, 457, 141221, doi.org/10.1016/j.cej.2022.141221.
- [19]. Mirzaee, M., & Dehghanian, C. (2019). Synthesis of nanoporous copper foam-applied current collector electrode for supercapacitor. *Journal of the Iranian Chemical Society*, 16, 283-292.
- [20]. Cengel, R. A. (2008). *Introduction to thermodynamics and heat transfer*. McGraw-Hill.
- [21]. Idel'čik, I. E. (1966). *Handbook of hydraulic resistance: coefficients of local resistance and of friction*. Israel Program for Scientific Translations.
- [22]. Cheng, L., Chang, Q., Chang, Y., Zhang, N., Tao, C., Wang, Z., & Fan, X. (2016). Hierarchical forest-like photoelectrodes with ZnO nanoleaves on a metal dendrite array, *Journal of Materials Chemistry A*, 4(25), 9816-9821, doi.org/10.1039/C6TA02764D.
- [23]. Nikolić, N. D., Popov, K. I., Pavlović, L. J., & Pavlović, M. G. (2006). Morphologies of copper deposits obtained by the electrodeposition at high overpotentials. *Surface and Coatings Technology*, 201(3-4), 560-566, doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.12.004.
- [24]. Mattarozzi, L., Cattarin, S., Comisso, N., Gerbasi, R., Guerriero, P., Musiani, M., & Verlato, E. (2013). Electrodeposition of Cu-Ni alloy electrodes with bimodal porosity and their use for nitrate reduction. *ECS Electrochemistry Letters*, 2(11), D58, doi: 10.1149/2.004311eel.
- [25]. Qiu, R., Cha, H. G., Noh, H. B., Shim, Y. B., Zhang, X. L., Qiao, R., & Kang, Y. S. (2009). Preparation of dendritic copper nanostructures and their characterization for electroreduction, *The Journal of Physical Chemistry C*, 113(36), 15891-15896, doi.org/10.1021/jp904222b.
- [26]. Bajpai, A. K., Bhatt, R., & Katore, R. (2016). Atomic force microscopy enabled roughness analysis of nanostructured poly (diaminonaphthalene) doped poly (vinyl alcohol) conducting polymer thin films, *Micron*, 90, 12-17, doi.org/10.1016/j.micron.2016.07.012.
- [27]. Welz, B., & Sperling, M. (2008). *Atomic absorption spectrometry*. John Wiley & Sons.
- [28]. Song, J., Wang, F., & Cheng, L. (2012). Experimental study and analysis of a novel multi-media plate heat exchanger, *Science China Technological Sciences*, 55, 2157-2162.
- [29]. Doo, J. H., Ha, M. Y., Min, J. K., Stieger, R., Rolt, A., & Son, C. (2012). An investigation of cross-corrugated

- ed heat exchanger primary surfaces for advanced intercooled-cycle aero engines (Part-I: Novel geometry of primary surface), *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55(19-20), 5256-5267, doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.05.034.
- [30]. Naghash, A., Sattari, S., & Rashidi, A. (2016). Experimental assessment of convective heat transfer coefficient enhancement of nanofluids prepared from high surface area nanoporous graphene, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 78, 127-134, doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2016.09.004.
- [31]. Park, Y., Park, H. K., Pusey, A., Hong, J., Park, J., Chung, B. J., & Kim, H. (2019). Heat transfer augmentation in two-phase flow heat exchanger using porous microstructures and a hydrophobic coating. *Applied Thermal Engineering*, 153, 433-447, doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2019.03.030.
- [32]. Ghodrati, M., Mousavi-Kamazani, M., & Bahrami, Z. (2023). Synthesis of superhydrophobic coatings based on silica nanostructure modified with organosilane compounds by sol-gel method for glass surfaces, *Scientific Reports*, 13(1), 548.
- [33]. Miljkovic, N., Enright, R., Nam, Y., Lopez, K., Dou, N., Sack, J., & Wang, E. N. (2013). Jumping-drop-let-enhanced condensation on scalable superhydrophobic nanostructured surfaces. *Nano letters*, 13(1), 179-187, doi.org/10.1021/nl303835d.
- [34]. Bonanno, A., Raimondo, M., & Pinelli, M. (2019). Use of nanostructured coating to improve heat exchanger efficiency, *Factories of the Future: The Italian Flagship Initiative*, 275-292.
- [35]. Zhu, Y., Tso, C. Y., Ho, T. C., Leung, M. K., Yao, S., & Qiu, H. H. (2020). Heat transfer enhancement on tube surfaces with biphilic nanomorphology, *Applied Thermal Engineering*, 180, 115778, doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.115778.
- [36]. Oon, C. S., Kazi, S. N., Hakimin, M. A., Abdelrazek, A. H., Mallah, A. R., Low, F. W., ... & Kamanger, S. (2020). Heat transfer and fouling deposition investigation on the titanium coated heat exchanger surface. *Powder Technology*, 373, 671-680, doi.org/10.1016/j.powtec.2020.07.010.
- [37]. Gusew, S., & Stuke, R. (2019). Pressure drop in plate heat exchangers for single-phase convection in turbulent flow regime: experiment and theory. *International Journal of Chemical Engineering*, 2019, doi.org/10.1155/2019/3693657.
- [38]. Askari, S., Lotfi, R., Seifkordi, A., Rashidi, A. M., & Koolivand, H. (2016). A novel approach for energy and water conservation in wet cooling towers by using MWNTs and nanoporous graphene nanofluids. *Energy conversion and management*, 109, 10-18, doi.org/10.1016/j.enconman.2015.11.053.



Fabrication of Nano Coating on Copper Plates to Improve Heat Transfer in Plate and Frame Heat Exchangers

Nazanin Abdi¹, Mohammad Samipoorgiri^{1*}, Alimorad Rashidi² and Ashkan Zolriasatein³

1. Chemical Engineering Department, Faculty of Engineering, North Tehran Branch, Islamic Azad University, Iran

2. Nanotechnology Research Center, Faculty of Research and Development in Downstream Petroleum Industry, Research Institute of Petroleum Industry (RIPI), Tehran, Iran

3. Non-Metallic Materials Research Department, Niroo Research Institute, Tehran, Iran

rashidiam@ripi.ir

DOI:10.22078/pr.2023.5129.3272

Received: May/11/2023

Accepted: July/18/2023

Introduction

There has been considerable efforts to experimentally investigate heat transfer behavior in plate and frame heat exchangers. Plate and frame heat exchangers are modular and effective and widely used in a large number of industrial applications. Plate and frame heat exchangers have exceptional heat transfer properties that allow for more compact designs than shell and tube exchangers because of their much larger surface area in a very small volume which can be modified simply by adding more numbers of plates. In general, plate and frame heat exchangers are designed in number of corrugated plates in a frame or micro channel, and the hot and cold liquid flow through the channels. Plates are essential parts of these heat exchangers and have a critical role on the exchanger efficiency [1-5]. According to the available data, there is no credible research on investigating the effect of expanding surface area via a nanofin array copper coat on the copper plate as a substrate on the heat transfer coefficient. Copper, which had been used as one of the most efficient heat conductors with a high thermal conductivity coefficient, has remarkable characteristics for heating exchangers that are strong in their efficiency and resistance to corrosion. Present research is focused on the investigation of a microchannel heat transfer, both with and without a nanofin array structure. The micro channel is designed to be composed of six copper plates, resembling the conventional plate and frame heat exchangers and water is used as the circulating fluid in both hot and cold loops. The heat

transfer coefficient is then measured to compare the effect of nanofin arrays.

Materials and Methods

Chemicals and Synthesis of Dendritic Nanofin Arrays
The micro channel was made of six corrugated high quality copper plates (Alfa Aesar, 99.8%). The plate diameter was 46 mm× 46 mm with 17 stripes with 2 mm height. The anode was a graphite electrode (Height:100 mm × Width:10 mm) and the distance between two electrodes was 15mm. In a solution consisting of CuSO₄ (0.6M), H₂SO₄ (0.4M), dendritic copper nanofin array grew. The current started from 1.2 to 4.8 A/cm² stat in 300 seconds [7].

Experimental Set up and Procedure

In this research, an experimental set up was designed in order to investigate the effect of nanofin arrays on heat transfer coefficient. The set up includes a microchannel with six corrugated plates, two inlets and two outlets, equipped with separate K-type thermocouples, two water circulation units equipped with a reservoir tank, connected to a valve for balancing the flow, a pump, a manometer and two filters. The temperature difference and heat transfer coefficient were measured without coating the dendritic nanofin arrays and after coating procedure. In three different sets of tests, a circulator for the hot loop provides the temperature to start entering the micro channel at 45°C, 50°C, 55°C from the hot inlet (Di: 1mm , Do: 1.3mm). The temperature for circulating in the cold inlet was set to be 7°C (Di:

1mm, Do: 1.3mm).

Results and Discussion

Copper nanofins were placed in optimal conditions in order to investigate different effects. Dendrites first started to grow on the initial spherical balls and little by little small branches started to appear on the previous balls. Since the electro-deposition process follows the cumulative particle diffusion model, the mechanical strength of dendritic nanofine arrays depends on the amount of migration of copper ions in the solution. As the migration of metal ions increases, more deposition occurs on the surface and this causes thicker nanofins with fewer branches to be created. Less migration of ions will lead to the creation of narrower nanofin arrays with more branches [8]. Therefore, it can be concluded that there is a direct relationship between the solution concentration and the migration of metal ions. AAS test was performed to determine the degree of adhesion of dendrites and the possibility of their tearing from the surface into the fluid. The low level of copper (29.89 ppb) in this fluid in the test indicates that the dendrites are not separated from the surface. The temperature was measured in the four different points; the temperatures of cold and hot inlet and cold and hot outlet separately. Three sets of tests (nine runs for each) were designed with the cold inlet temperature of 7°C as minimum temperature and hot inlet temperatures of 45°C, 50°C, 55°C respectively.

Conclusions

In this research, the copper plates forming a microchannel, similar to plate heat exchangers, were surface modified by electroplating method and in a device designed with two cold and hot inlets, with the aim of investigating the increase in the heat transfer coefficient H were placed the surface modification consisted of applying a synthesized nanofin coating on six grooved copper plates with dimensions of 4.6 cm by 4.6 cm. Electrochemical deposition method using a standard two-electrode glass cell with a graphite electrode as the opposite electrode and a solution containing CuSO_4 (0.6M), H_2SO_4 (0.4M) with increasing current from 1/cm² to 4/8 was done at room temperature for 300 seconds. Morphology results showed dendritic nanofin arrays with expanded surface using FeSEM scanning electron microscope technique. Then the temperature difference and heat transfer coefficient of cold and hot inlets were measured at different flow rates. The results showed a growth of 40 to 62 percent in the heat transfer coefficient compared to the same parameters

without covering the plates. Also, considering the ease of application of dendritic nanofins and their widespread use in industry, considering the possibility of their application in larger systems, despite the fact that this research was conducted in a closed system, It is possible to carry out similar studies in open systems by applying nanofluid to the same system and applying it to larger scale systems.

References

1. Khan, T. S., Khan, M. S., Chyu, M. C., & Ayub, Z. H. (2010). Experimental investigation of single phase convective heat transfer coefficient in a corrugated plate heat exchanger for multiple plate configurations. *Applied Thermal Engineering*, 30(8-9), 1058-1065, doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.01.021.
2. Abu-Khader, M. M. (2012). Plate heat exchangers: Recent advances. *Renewable and sustainable energy reviews*, 16(4), 1883-1891, doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.009.
3. Jin, S., & Hrnjak, P. (2017). Effect of end plates on heat transfer of plate heat exchanger. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 108, 740-748, doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.11.106.
4. Martin, H. (1996). A theoretical approach to predict the performance of chevron-type plate heat exchangers. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 35(4), 301-310, doi.org/10.1016/0255-2701(95)04129-X.
5. Islam, M. S., Xu, F., & Saha, S. C. (2020). Thermal performance investigation in a novel corrugated plate heat exchanger, *International journal of heat and mass transfer*, 148, 119095, doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119095.
6. Mirzaee, M., & Dehghanian, C. (2019). Synthesis of nanoporous copper foam-applied current collector electrode for supercapacitor, *Journal of the Iranian Chemical Society*, 16, 283-292.
7. Cheng, L., Chang, Q., Chang, Y., Zhang, N., Tao, C., Wang, Z., & Fan, X. (2016). Hierarchical forest-like photoelectrodes with ZnO nanoleaves on a metal dendrite array. *Journal of Materials Chemistry A*, 4(25), 9816-9821, doi.org/10.1039/C6TA02764D.
8. Nikolić, N. D., Popov, K. I., Pavlović, L. J., & Pavlović, M. G. (2006). Morphologies of copper deposits obtained by the electrodeposition at high overpotentials, *Surface and Coatings Technology*, 201(3-4), 560-566, doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.12.004.