

بررسی تجربی ضریب انتقال گرمای جابجایی اجباری نانوسیال در مبدل‌های حرارتی دو لوله‌ای و صفحه‌ای

سید امیرحسین زمزمیان^{۱*}، محمد پازوکی^۲، میلاد تاجیک^۳

۱- استادیار مهندسی شیمی، پژوهشگاه مواد و انرژی

۲- دانشیار مهندسی شیمی، پژوهشگاه مواد و انرژی

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی، پژوهشگاه مواد و انرژی

تاریخ دریافت: ۹۲/۰۷/۱۷ تاریخ پذیرش: ۹۳/۰۹/۰۳

پیام نگار: azamzaman@merc.ac.ir

چکیده

نانو سیالات، سوسپانسیونی از ذرات جامد با اندازه و ابعاد نانو متر در سیال مینا هستند. بارزترین خصوصیت نانوسیال‌ها، افزایش خواص گرمایی، مانند ضریب انتقال گرمای جابجایی نسبت به سیال پایه است. در این پژوهش، نانو ذرات آلومینیم اکسید و مس اکسید در سیال پایه اتیلن گلیکول در درصد وزنی ۱-۰/۱ تهیه شده است. ضریب انتقال گرمای جابجایی اجباری نانوسیال در جریان آشفته در مبدل دو لوله‌ای و مبدل صفحه‌ای در مقیاس آزمایشگاهی اندازه‌گیری شد و ضریب انتقال گرمای جابجایی اجباری به دست آمده در این آزمایش، با نتایج حاصل از کار سایر پژوهشگران مقایسه شده و تأثیر پارامترهای غلظت نانوذرات و دمای آزمایش نیز بررسی شده است. نتایج به دست آمده، افزایش چشمگیر ضریب انتقال گرمای جابجایی نانوسیال، به میزان دست کم ۲ و حداکثر ۵۰ درصد، نسبت به سیال پایه را در نمونه‌های مختلف نشان می‌دهد. نتایج این را هم نشان می‌دهند که با افزایش دما و غلظت نانوذرات، ضریب انتقال گرمای جابجایی نانوسیال نسبت به سیال پایه نیز، افزایش می‌یابد. آزمایشات مشخص کردند که نتایج تجربی در دماهای پایین با نتایج ناشی از نظریه مطابقت دارند اما در دماهای بالاتر و با افزایش غلظت نانوذرات در سیال پایه، اختلاف آنها روند افزایشی خواهد یافت.

کلیدواژه‌ها: نانوسیال، آلومینیم اکسید، مس اکسید، ضریب انتقال گرما

۱- مقدمه

نسبت به سیال پایه، بدون تأثیر در خواص فیزیکی و شیمیایی آن است. این افزایش چشمگیر انتقال گرما می‌تواند در یک شرایط مطلوب عملیاتی، کاهش در مصرف انرژی و سوخت، کاهش در مقدار مواد مصرفی، کاهش در اندازه تجهیزات، و در پی آن به کاهش هزینه‌ها و در نهایت بالا رفتن بازده و بهره‌وری سیستم منجر می‌شوند.

به این منظور، در این مقاله پایداری نانوسیال‌ها و خواص گرمایی آنها از طریق آزمایش‌های تجربی مطالعه و بررسی شده است. در این پژوهش، نانو سیالات " آلومینیم اکسید در اتیلن گلیکول" و

سیالات خنک‌کننده و گرم‌کننده در صنعت نقش مهمی دارند و رسانش گرمایی آن‌ها در توسعه تجهیزات گرمایی بهینه بسیار مهم است. رسانش گرمایی سیالات معمولی ضعیف است و از این رو لزوم استفاده از سیالات جدیدی با خواص گرمایی بهتر، احساس می‌شود. از جمله این سیالات می‌توان به نانوسیال‌ها اشاره کرد. نانوسیال به سوسپانسیون ذرات جامد نانومتری در مایعات متداول گفته می‌شود که بارزترین خصوصیت آنها، افزایش ضریب انتقال گرمایی جابجایی

* کرج، مشکین دشت، پژوهشگاه مواد و انرژی، پژوهشگاه؟؟؟؟

و به هم چسبیدن نانوذرات است که باعث به وجود آمدن ذرات بزرگ‌تر در حد ریزسنگ می‌شود و به تبع آن بحث ابعاد نانومتري را بی‌معنی می‌کند؛ نیز، عدم پایداری صحیح و مناسب ذرات در سیال به ته نشینی آن‌ها در مخزن، رسوب گذاری در لوله‌ها و پمپ و دیگر تجهیزات چرخه گرمایی و نیز افزایش افت فشار در مسیر می‌انجامد که از عوامل نامطلوب آزمایش خواهند بود.

نانو ذرات به کار گرفته شده در این پژوهش شامل نانوذرات آلومینیم اکسید و مس اکسید با قطر حدود ۲۰ نانومتر و خلوص ۹۵ درصداند. برای تهیه نانوسیالات در این مرحله، نمونه‌های متعددی از نانوذرات Al_2O_3 و CuO در حضور و غیبت مواد فعال سطحی SDS, SDBS, CTAB و oleic acid، مطابق جدول (۱)، تهیه شده است و از لحاظ چگونگی پخش شدن و نیز پایداری مورد بررسی قرار گرفته‌اند تا نهایتاً بهترین روش برای تهیه نانوسیال انتخاب و در مرحله بعدی به کار گرفته شود. با توجه به نتایج که در جدولهای (۱) و (۲) درج شده‌اند، برای تهیه نانوسیالات مورد مطالعه در این پژوهش، روش‌های زیر انتخاب و کلیه نمونه‌های بعدی برای اندازه‌گیری خواص گرمایی طبق این روش‌ها تهیه شده‌اند.

"مس اکسید در اتیلن گلیکول" تهیه شده و سپس در یک سیستم آزمایشگاهی با استفاده از مبدل دو لوله‌ای و مبدل صفحه‌ای، ضریب انتقال گرمای جابجایی اجباری نانوسیال در جریان آشفته، اندازه‌گیری شده است. ضریب انتقال گرمای جابجایی اجباری نانوسیالات تهیه شده، با بهره‌گیری از روابط نظری موجود نیز محاسبه شده تا با نتایج تجربی مقایسه شود. در نهایت، تأثیر پارامترهای غلظت نانوذرات و دمای آزمایش نیز بررسی شده است. آزمایشهای تجربی این پروژه به طور کلی در دو مرحله انجام شده است. مرحله اول، عبارت است از تهیه و پایداری نانوسیالات و مرحله دوم به کارگیری نانوسیالات تولید شده در یک فرایند انتقال گرما، که در اینجا یک چرخه گرمایی مبدل دو لوله‌ای و مبدل صفحه‌ای است.

۲- آماده‌سازی و پایداری نانوسیال

آماده‌سازی و پایداری نانوسیالات از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، زیرا اگر عمل پایداری نانوذرات در سیال به درستی انجام نشود، انتقال گرما عملاً به صورت یک مسئله دو فازی (جامد-مایع) در می‌آید که از اهداف این پژوهش دور است. مشکل دیگر انباشت

جدول ۱. مشخصات نمونه‌های تهیه شده.

امواج فراصوت		فعال کننده سطحی		نانوذرات			
زمان (hr)	On-Off (sec)	توان (درصد از کل)	مقدار	نام	درصد وزنی در نانوسیال	نام	شماره نمونه
-	-	-	-	-	۰/۹	Al_2O_3	۱
۱	۲-۱	%۹۰	-	-	۰/۹	Al_2O_3	۲
۲۴	۲-۱	%۹۰	-	-	۰/۹	Al_2O_3	۳
-	-	-	۲۰% wt np	SDBS	۱	CuO	۴
-	-	-	۲۰% wt np	SDBS	۱	Al_2O_3	۵
۱۲	۱-۱	%۹۰	۲۰% wt np	SDBS	۱	CuO	۶
-	-	-	۴۰% wt np	SDBS	۱	CuO	۷
-	-	-	۲۰% wt np	CTAB	۱	Al_2O_3	۸
۱	۱-۱	%۷۰	۴۰% wt np	SDBS	۱	CuO	۹
-	-	-	۲ % vol nf	Oleic Acid	۱	CuO	۱۰
۱	۱-۱	%۵۰	۲۰% wt np	CTAB	۱	Al_2O_3	۱۱
-	-	-	۲۰% wt np	SDS	۱	CuO	۱۲
-	-	-	۲۰% wt np	CTAB	۱	CuO	۱۳
-	-	-	۴۰% wt np	SDS	۱	CuO	۱۴
۱	۱-۱	%۷۰	۲۰% wt np	SDS	۱	CuO	۱۵

جدول ۲. نتایج حاصل از مشاهدات هر نمونه.

شماره نمونه	وضعیت اولیه (بررسی نحوه پخش شدن)	وضعیت بعد از زمان ماند کافی (بررسی میزان پایداری)
۱	نانوذرات به خوبی پراکنده می‌شوند و مخلوط یکنواختی را ایجاد می‌کنند.	مقدار کمی نانوذرات در ته لوله آزمایش دیده شد، اما پایداری و ماندگاری سوسپانسیون بسیار مطلوب ارزیابی می‌شود.
۲	نانوذرات به خوبی پخش می‌شوند و مخلوط یکنواختی را ایجاد می‌کند.	مقدار کمی نانوذرات در ته لوله آزمایش دیده شد، اما پایداری و ماندگاری سوسپانسیون بسیار مطلوب ارزیابی می‌شود.
۳	نانوذرات به خوبی پراکنده می‌شوند و مخلوط یکنواختی را ایجاد می‌کند.	مقدار کمی نانوذرات در ته لوله آزمایش دیده شد، اما پایداری و ماندگاری سوسپانسیون بسیار مطلوب ارزیابی می‌شود.
۵	از همان زمان هم‌زدن، گلوله‌ای شدن ذرات ایجاد می‌شود و از همان ابتدای نمونه‌گیری نشست شدید ذرات پیش می‌آید.	نمونه کاملاً به دو فاز جدا از هم تفکیک می‌شود.
۶	نانوذرات به خوبی پراکنده می‌شوند و مخلوط یکنواختی ایجاد می‌شود، هرچند کف بسیاری بر روی سطح به وجود آمده است.	ذرات شروع به ته‌نشینی می‌کنند، بر روی سطح همچنان کف باقی می‌ماند و مقداری از ذرات به صورت گلوله‌ای و پراکنده وجود دارند.
۷	نانوذرات به خوبی پراکنده می‌شوند و مخلوط یکنواختی را ایجاد می‌کند.	ذرات در مدت کوتاهی شروع به ته‌نشینی می‌کنند.
۸	نانوذرات به خوبی پراکنده می‌شوند و مخلوط یکنواختی را ایجاد می‌کند.	ذرات در مدت کوتاهی شروع به ته‌نشینی می‌کنند.
۹	نانوذرات به خوبی پراکنده می‌شوند و مخلوط یکنواختی ایجاد شد، هرچند کف زیادی بر روی سطح به وجود آمد.	ذرات ته‌نشین شدند، اما در مدت نسبتاً طولانی‌تری.
۱۰	نانوذرات به خوبی پراکنده می‌شوند و مخلوط یکنواختی را ایجاد می‌کند.	ذرات در مدت کوتاهی شروع به ته‌نشینی می‌کنند.
۱۱	نانوذرات به خوبی پراکنده می‌شوند و مخلوط یکنواختی را ایجاد می‌کند.	ذرات ته‌نشین شدند، اما در مدت نسبتاً طولانی‌تری.
۱۲	نانوذرات به خوبی پراکنده می‌شوند و مخلوط یکنواختی را ایجاد می‌کند.	ذرات ته‌نشین شدند، اما در مدت نسبتاً طولانی‌تری.
۱۳	نانوذرات به خوبی پراکنده می‌شوند و مخلوط یکنواختی را ایجاد می‌کند.	ذرات ته‌نشین شدند، اما در مدت نسبتاً طولانی‌تری.
۱۴	نانوذرات به خوبی پراکنده می‌شوند و مخلوط یکنواختی را ایجاد می‌کند.	ذرات ته‌نشین شدند، اما در مدت نسبتاً طولانی‌تری.
۱۵	نانوذرات به خوبی پراکنده می‌شوند و مخلوط یکنواختی را ایجاد می‌کند.	ذرات ته‌نشین شدند، اما در مدت نسبتاً طولانی‌تری.

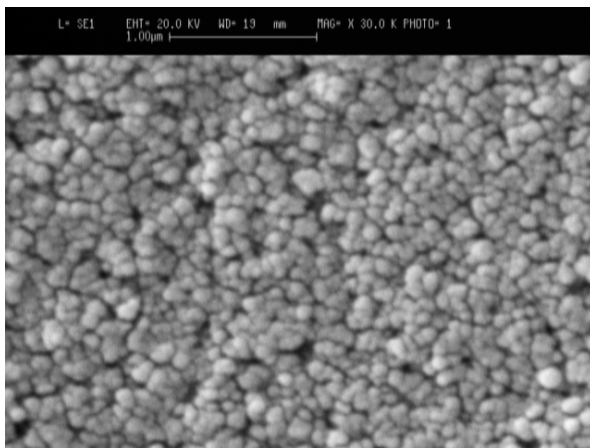
تمامی مقادیر مربوط به پتاسیل زتای نانوسیالات در درصد‌های جرمی مختلف بیشتر از ۳۰+ است، حاکی از پایداری قابل قبولی برای نانوسیالات است. برای تهیه نانوسیال CuO/EG، نمونه‌های ۰/۱، ۰/۳، ۰/۵، ۰/۷ و ۱/۰ درصد وزنی مس اکسید نسبت به سیال پایه (اتیلن گلیکول) با استفاده از ماده فعال سطحی سدیم دودسیل سولفات (SDS) و نیز با یک ساعت هم‌زدن با هم‌زن مغناطیسی و سپس دو ساعت پرتودهی فراصوتی تهیه شده است. این نمونه‌ها از

نانوسیال Al_2O_3/EG ، با درصد وزنی ۰/۱، ۰/۵ و ۱/۰، بدون استفاده از ماده فعال سطحی و صرفاً با یک ساعت هم‌زدن با هم‌زن مغناطیسی و سپس دو ساعت پرتودهی فراصوتی تهیه شد. این نمونه‌ها، هم از لحاظ پراکندگی یکنواخت و هم از لحاظ پایداری سوسپانسیون برای مدت طولانی، بسیار مطلوب‌اند.

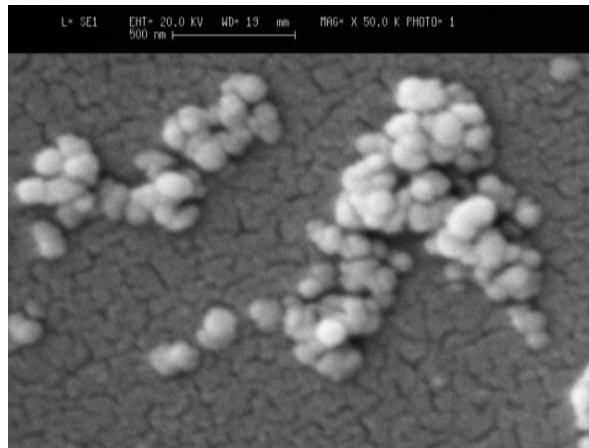
در این مطالعه به منظور بررسی پایداری نانوسیالات تهیه شده، از دستگاه زتاسایزر مدل HS C1330-3000 بهره گرفته شده است.

همان طور که مشاهده می‌شود، پراکندگی به صورت یکنواخت و قابل قبولی در سیال پایه صورت گرفته است و آمار خوشه‌ای شدن در حداقل موجود است.

لحاظ پراکندگی یکنواخت بسیار مطلوب، و از لحاظ پایداری سوسپانسیون برای مدت طولانی، برای یک سیستم گردش مداوم مناسب‌اند. در شکل‌های (۱) و (۲)، پراکندگی نانوذرات در سیال پایه، قبل و بعد از انجام عملیات پایداری را مشاهده می‌کنید.

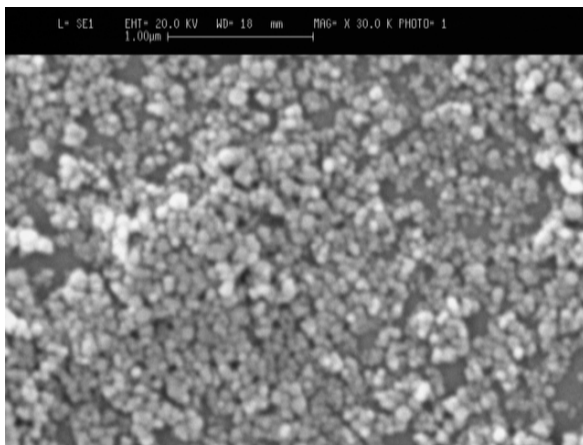


(ب)

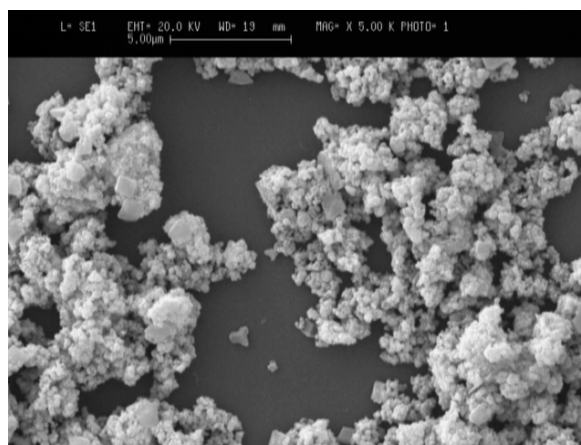


(الف)

شکل ۱. (الف) نمونه کلوخه‌ای شده نانوذرات Al_2O_3 در نانوسیال Al_2O_3/EG قبل از عملیات پایداری، (ب) نمونه کاملاً پراکنده شده نانوذرات Al_2O_3 در نانوسیال Al_2O_3/EG بعد از عملیات پایداری.



(ب)



(الف)

شکل ۲. (الف) نمونه کلوخه‌ای شده نانوذرات CuO در نانوسیال CuO/EG قبل از عملیات پایداری، (ب) نمونه پراکنده شده نانوذرات CuO در نانوسیال CuO/EG بعد از عملیات پایداری.

قطر پوسته آن $50/8$ میلی‌متر است. جریان درون مبدل دولوله‌ای غیر هم‌جهت در نظر گرفته شده است. مبدل صفحه‌ای نیز یک نمونه کوچک و سفارشی از رادیاتورهای متداول خانگی با ابعادی به ترتیب، 40 و 60 سانتی‌متر ارتفاع و طول است که با محیط

۳- دستگاه و شیوه آزمایش

برای انجام این پژوهش از چرخه گرمایی مبدل دولوله‌ای بهره گرفته شده است. لوله داخلی مبدل دولوله‌ای از جنس مس، به قطر 12 و ضخامت 1 میلی‌متر، دارای طول تبادل گرمایی 70 سانتی‌متر است.

که U_o ضریب کلی انتقال گرماست و برای مبدل‌های گرمایی لوله‌ای بدون پره، با چشم‌پوشی از جمله‌های مربوط به رسوب‌گذاری مبدل، بر مبنای سطح خارجی لوله، A_o ، بنابر تعریف عبارت است از [۱۱]:

$$U_o = \frac{1}{\frac{A_o}{A_i} \frac{1}{h_i} + \frac{A_o \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi Lk} + \frac{1}{h_o}} \quad (4)$$

که r_o و r_i به ترتیب شعاع داخلی و خارجی و k ضریب رسانایی گرمایی لوله است. با محاسبه h_o از رابطه زیر برای جریان آشفته درون پوسته [۱۳]:

$$\frac{h_o D_e}{k_{water}} = Nu_o = 0.02 Re^{0.8} Pr^{\frac{1}{3}} \left(\frac{r_o}{r_i}\right)^{0.53} \quad (5)$$

که D_e قطر معادل پوسته مبدل از این قرار است:

$$D_e = \frac{D_i^2 - D_o^2}{D_o} \quad (6)$$

قرار دادن آن در معادله ۴، تنها مجهول، h_i یا همان h_{nf} است که از طریق حل معادله به دست می‌آید. پس از آن $Nu_{nf,exp}$ نیز محاسبه می‌شود.

برای محاسبه ضریب انتقال گرمای جابجایی در مبدل صفحه ای نیز رابطه زیر به کار گرفته شد:

$$Q_{nf} = h_{nf} A (T_{amb} - T_w) \quad (7)$$

که در آن h_{nf} همان ضریب انتقال گرمای جابجایی نانوسیال، A سطح تبادل گرمای مبدل با محیط، T_{amb} دمای محیط و T_w دمای دیواره مبدل است و Q_{nf} نیز مقدار گرمایی است که نانوسیال در عبور از مبدل صفحه‌ای از دست داده که از این قرار محاسبه می‌شود:

$$Q_{nf} = \dot{m}_{nf} C_{p,nf} (T_{out} - T_{in}) \quad (8)$$

اطراف گرما مبادله می‌کند. به منظور بررسی خواص حرارتی نانوسیالات، هر نمونه نانوسیال سه دمای ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه سلسیوس در داخل چرخه طراحی شده آزمایش شده است. دبی‌سنج‌ها نیز برای نانوسیال درون هر دو مبدل بر روی سه لیتر در دقیقه و برای جریان آب سرد درون پوسته مبدل دو لوله‌ای بر روی ۲/۵ لیتر بر دقیقه ثابت نگه داشته شد. ۵ تا ۱۰ دقیقه بعد از شروع آزمایش، سیستم به حالت پایدار رسید. برای هر نمونه در دمای عملیاتی تنظیم شده، دمای‌های ورودی و خروجی مبدل‌ها توسط دماسنج دیجیتال ثبت شد تا در مرحله بعد محاسبات مربوط به ضریب انتقال گرما انجام شود. به منظور راستی آزمایی چرخه گرمایی ساخته شده و مقایسه خواص گرمایی سیال، تعدادی آزمایش با اتیلن گلیکول خالص در هر یک از دماهای ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه سانتیگراد، به عنوان آزمایشات مرجع یا استاندارد، نیز انجام گرفت.

۴- محاسبه ضریب انتقال گرمایی جابجایی اجباری نانوسیال با داده‌های تجربی

در این مرحله، ابتدا خواص گرمایی نانوسیال نظیر چگالی، لزجیت، ظرفیت گرمایی ویژه، ضریب رسانش گرمایی، ضریب نفوذ گرمایی و اعداد رینولدز و پرانتل در میانگین دمای مبدل محاسبه شد [۱۱] و [۱۲]. ضریب انتقال گرما در مبدل گرمایی دو لوله‌ای براساس موازنه انرژی از این قرار محاسبه می‌شود [۷]:

$$Q_c = (\rho C_p)_c uA (T_{c,out} - T_{c,in}) \quad (1)$$

$$Q_{nf} = (\rho C_p)_{nf} uA (T_{nf,out} - T_{nf,in}) \quad (2)$$

که اندیس c مربوط به جریان آب سرد درون پوسته و nf مربوط به نانوسیال مورد آزمایش است. مقدار $\Delta Q = Q_{nf} - Q_c$ گرمای تلف‌شده در نظر گرفته می‌شود که برای مبدل حرارتی دو لوله‌ای، این مقدار حدود ۲۰ الی ۲۵ درصد است. از سوی دیگر، برای انتقال گرمای جابجایی داریم:

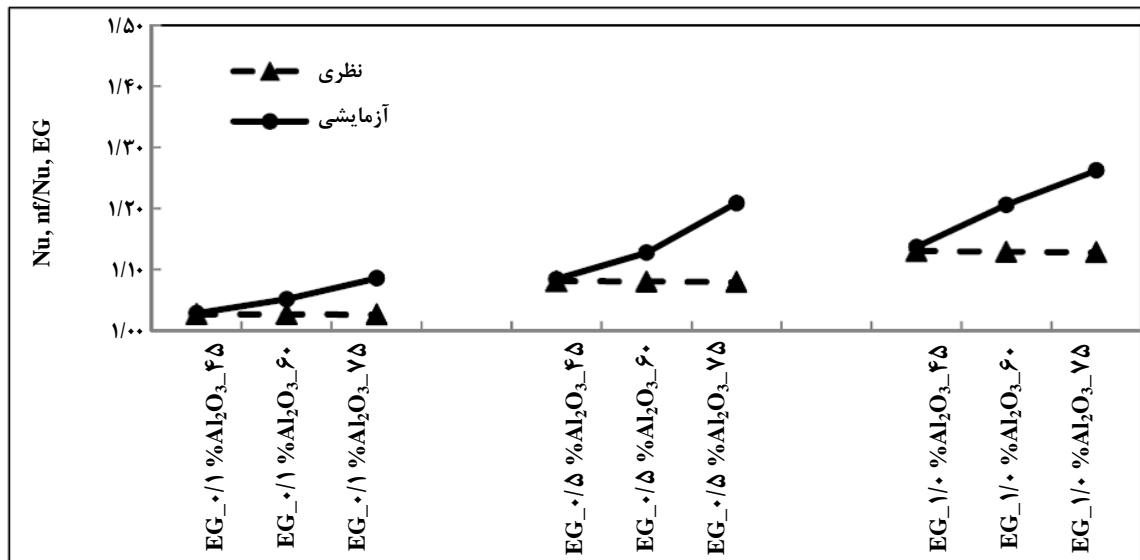
$$U_o = \frac{Q}{A_o \Delta T_{lm}} \quad (3)$$

۵- نتایج و بحث

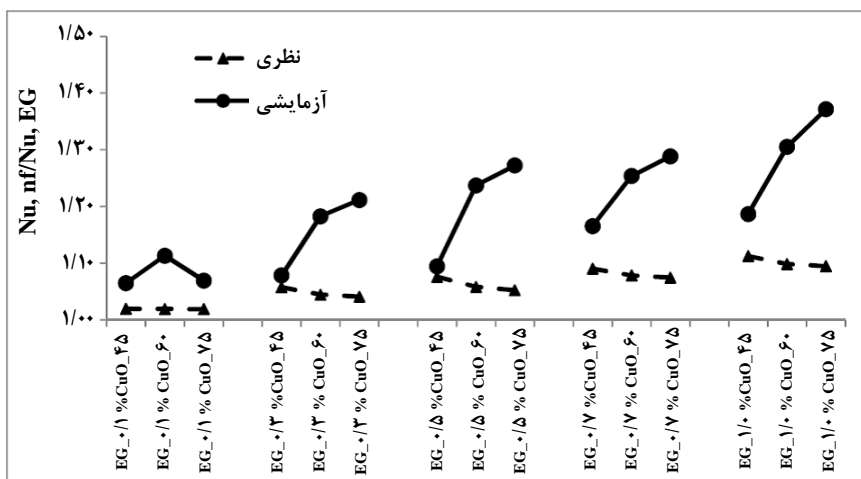
می‌کنید که افزایش غلظت نانوذرات، به افزایش ضریب انتقال گرمای جابجایی اجباری نانوسیال در مقایسه با سیال پایه در کلیه نمونه‌ها و در هر دو نوع مبدل می‌انجامد. البته این تغییرات خطی نیستند و میزان آن نیز برای هر یک از نمونه‌ها فرق می‌کند. پس می‌توان گفت که دما و غلظت دو عامل مهم در تعیین میزان ضریب انتقال گرمای نانوسیالات به‌شمار می‌آیند و بین این عوامل و ضریب انتقال گرما رابطه‌ای مستقیم برقرار است.

در شکل‌های (۳) تا (۶) مقادیر نظری را نیز به همراه مقادیر تجربی مشاهده می‌کنید، همان‌طور که مشاهده می‌شود، در دماهای پایین‌تر و در غلظت‌های کمتر، نسبت مقادیر نظری (عدد ناسلت محاسبه شده از معادله (۵)) به مقادیر تجربی نزدیک است که این خود دلیلی بر صحت محاسبات و نتایج محسوب می‌شود. اما، با افزایش دما و غلظت نانوذرات، اختلاف بیشتری بین نتایج تجربی و نظری حاصل می‌شود که این اختلاف در مورد مبدل دولوله‌ای و نانوسیال CuO/EG در دمای عملیاتی ۷۵ درجه سلسیوس، به حداکثر مقدار خود، یعنی ۲۵ درصد می‌رسد.

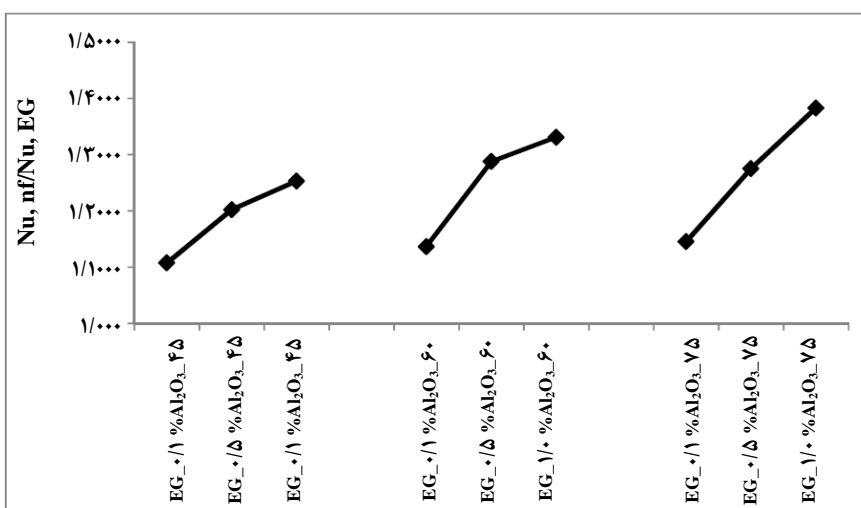
در شکل‌های (۳) تا (۶) ضریب انتقال گرمای نانو سیالات تولیدی را نسبت به سیال پایه در دو مبدل دولوله‌ای و صفحه‌ای را مشاهده می‌کنید. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در میزان انتقال گرمای نانوسیالات مورد بررسی، نسبت به سیال پایه در هر دو نوع مبدل افزایش چشمگیری برقرار است. این میزان افزایش در مبدل گرمایی دولوله‌ای حداکثر ۲۶ درصد برای نانوسیال آلومینا/اتیلن گلیکول و ۳۷ درصد برای نانوسیال اکسید مس/اتیلن گلیکول است. در مبدل صفحه‌ای نیز این مقادیر به ترتیب ۳۸ و ۴۹ درصد به‌دست آمده‌اند. به وضوح دیده می‌شود که در تمامی آزمایش‌ها و در کلیه حالت‌ها میزان افزایش ضریب انتقال گرمایی جابجایی نانوسیال نسبت به سیال پایه، با افزایش دما رابطه‌ای مستقیم دارد. به این معنی، که هر چه نمونه‌ها در دماهای بالاتری به کار گرفته شده‌اند، میزان افزایش انتقال گرمای بیشتری با سیال سرد مشاهده شده است. این نتیجه به خصوص در شکل (۶) در مورد نانوسیال CuO/EG در مبدل صفحه‌ای درخور توجه است. در شکل‌های (۳) تا (۶) مشاهده



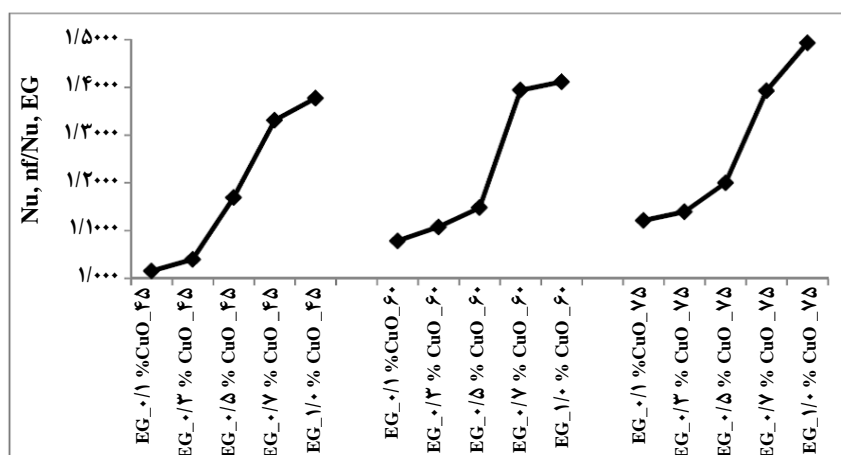
شکل ۳. میزان افزایش ضریب انتقال گرمای نانوسیال Al₂O₃/EG، نسبت به EG در مبدل دولوله‌ای.



شکل ۴. میزان افزایش ضریب انتقال گرمای نانوسیال CuO/EG نسبت به EG در مبدل دولوله‌ای.



شکل ۵. میزان افزایش ضریب انتقال گرمای نانوسیال Al₂O₃/EG نسبت به EG در مبدل صفحه‌ای.



شکل ۶. میزان افزایش ضریب انتقال گرمای نانوسیال CuO/EG نسبت به EG در مبدل صفحه‌ای.

۶- نتیجه گیری کلی

در این تحقیق، نانوسیال‌های "آلومینا/اتیلن گلیکول" و "اکسید مس/اتیلن گلیکول" در غلظت‌های مختلف، هر یک با روش پایدارسازی مخصوص خود، تولید شدند. سپس، در ۲ مبدل گرمایی دولوله‌ای و صفحه‌ای در سه دمای عملیاتی ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درجه سلسیوس، خواص گرمایی آن‌ها در تبادل حرارت با سیال خنک‌کننده (آب سرد) و هوای محیط، در جریان متلاطم به طور تجربی بررسی شد. سپس میزان افزایش انتقال گرمای جابجایی اجباری نانوسیال نسبت به سیال پایه، یعنی اتیلن گلیکول محاسبه و نتایج بر حسب عدد بی بعد ناسلت در مبدل دولوله‌ای و ضریب انتقال گرما در مبدل صفحه‌ای ارائه شد. برای هر یک از نمونه‌های بالا در هر سه دمای یادشده نیز، میزان افزایش ضریب انتقال گرمای جابجایی اجباری نسبت به سیال پایه به کمک فرمول‌های نظری موجود برای نانوسیالات، به طور جداگانه محاسبه و نتایج ارائه شد، تا با نتایج به دست آمده از آزمایش‌های تجربی، مقایسه شوند.

به طور کلی نتایج تجربی و نظری، هر دو بر این موضوع تأکید دارند که وجود ذرات نانومتری، به صورت کاملاً پایدار و یکنواخت، به میزان چشمگیری، ضریب انتقال گرمای جابجایی اجباری آب را افزایش می‌دهد. کمترین و بیشترین افزایش در این پروژه بر مبنای نتایج تجربی، به ترتیب، ۳ درصد و ۴۹ درصد به دست آمده است.

همچنین، بررسی میزان تأثیر عوامل دما و غلظت نانوذرات، نشان داد که با افزایش دما و غلظت نانوذرات، افزایش ضریب انتقال گرمای جابجایی اجباری بیشتری مشاهده می‌شود. از سوی دیگر، نتایج تجربی و نظری، اختلاف چشمگیری در دماهای بالا و نیز غلظت‌های بیشتر نانوذرات را نشان داد که از دلایل آن می‌توان به عدم به حساب آوردن تأثیرات دما، نحوه پایدارسازی نانوسیال و نوع ماده پایدارساز در فرمول‌های نظری، و نیز عدم جامعیت آن‌ها برای همه نانوسیالات در کلیه فرایندهای انتقال گرما، اشاره کرد.

مراجع

- [1] Choi, U., Zhang, Z. G., Yu, W., Lockwood, F., Grulke, E., "Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions", *Applied Physics Letters* 79 2252-2254, (2001).
- [2] Choi, U., Roger, C., Mills, D., "Micromechanical Systems", v 40, p 83, American Society of mechanical Engineers, New York, (1992).
- [3] Choi, U., "Developments and application of non-Newtonian flows", v 66, p 99, American Society of Mechanical Engineers, New York, (1995).
- [4] Kinloch, I. A., Roberts, S. A., Windle, A. H., "A rheological study of concentrated aqueous nanotube dispersions", *Polymer*, 43, 7483-7491(2002).
- [5] Choi, U., Zhang, Z. G., Keblinski, P., "Nanofluids, Encyclopedia of nanoscience and nanotechnology", Ed. H. S. Nawata, v 6, 757-773, (2005).
- [6] Xuan, Y., Li, Q., "Investigation on convective heat transfer and flow features of nanofluids", *ASME J. heat Transfer*, 125, p 151-155, (2003).
- [7] Xuan, Y., Li, Q., "Heat transfer enhancement of nanofluids", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, v 21, p 58-64, (2000).
- [8] Trasaksre, V., Wongwises, S., "Critical review of heat transfer characteristics of nanofluids", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 11, 512-523, (2007).
- [9] Keblinski, P., Philipot, S. R., Choi, U. S., Eastman, J. A., "Mechanism of Heat flow in suspensions of nano-sized particles(nanofluids)", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v 45, p 855-863, (2002).
- [10] Xuan, Y., Roetzel, W., "Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v 43, p 3701-3707, 2000.
- [11] Pak, B. C., Cho, Y. I., "Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles", *Experimental Heat transfer*, 11, 150-170 (1998).
- [12] Li, Q., Xuan, Y., "Convective Heat Transfer and Flow Characteristics of Cu-Water Nanofluid", *Science in China (Series E)*, 45(4), p 408-16, 2002.
- [13] Prasher, R., Song, D., Wang, J., "Measurements of nanofluid viscosity and its implications for thermal applications", *Applied Physics Letter*, 89, 133108-1-3 (2006).