

بررسی تأثیر هندسه و نوع نانو سیال در انتقال حرارت درون میکروکانال بهکمک دینامیک سیالات محاسباتی (CFD)

حسن بازای، احمد آذری^{*} و مصطفی مشتاق گروه مهندسی شیمی، دانشکده نفت، گاز و پتروشیمی، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر

(دریافت مقاله: ۱۳۹۶/۹/۱۴ – دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۷/۸/۲۶)

چکیده – هدف این مقاله، مطالعه عددی مشخصههای انتقال حرارتی و جریان نانوسیالات درون میکروکانال استوانهای با سطح مقطع های مستطیلی، مثلنی و دایرهای و همچنین مقایسه سیال پایه آب و دی اتیلن گلایکول است. اندازه و شکل این مقطع ها تأثیر قابل توجهی روی عملکرد گرمایی و هیدرولیکی مبدل حرارتی میکروکانال دارد. نانوسیالات استفاده شده در این تحقیق شامل آب و دی اتیلن گلایکول به عنوان سیال پایه و نانوذرات شامل SiO₂ ، Cu ، Al₂O₃ و Cu Cu است. برای حل مسئله و استخراج داده های مورد نیاز یک شبیه سازی سه بعدی برای میکروکانال با استفاده از نرم افزار بررسی شد. از نتایج به دست آمده در این تحقیق، مشاهده می مورد نیاز یک شبیه سازی سه بعدی برای میکروکانال با استفاده از نرم افزار میکند. همچنین نتایج به دست آمده در این تحقیق، مشاهده می شود که با افزودن نانوذرات به سیال پایه میزان انتقال حرارت و افت فشار افزایش پیدا میکند. همچنین نتایج به دست آمده در این تحقیق، مشاهده می شود که با افزودن نانوذرات به سیال پایه میزان انتقال حرارت و افت فشار افزایش پیدا میکند. همچنین نتایج به دست آمده در این تحقیق، مشاهده می شود که با افزودن نانوذرات به سیال پایه میزان انتقال حرارت و افت فشار افزایش پیدا میکند. همچنین نتایج به دست آمده در این تحقیق، مشاهده می شود که با افزودن نانوذرات به سیال پایه میزان انتقال حرارت و افت فشار افزایش پیدا میکند. همچنین نتایج نشان می دهد که کانالهای مستطیلی به ترین سه هندسه بررسی شده دارا است و بدترین عملکرد مربوط به کانالهای مثلثی است زیرا میزان ضریب انتقال حرارت جابه جایی در کانالهای مستطیلی و دایرهای به تر تیب ۱۹/۶ و ۲۰/۰۸ درصد بیشتر از کانالهای مثلثی گزارش شده است و در پایان، سیال پایه دی اتیلن گلایکول به جای آب در یک دبی یکسان استفاده شد و مشخص شد که عملکرد سیال پایه آب به مراتب بهتر از دی اتیلن گلایکول است به این ترتیب که ضریب اینقال حرارت جابه جایی برای سیال پایه آب در غلظت سه درصد نانوسیال دای و میزان ۸۰ درصد بیشتر از سیال پایه دی اتیلن گلایکول به دست آمد.

واژههای کلیدی: انتقال حرارت، افت فشار، مبدل حرارتی، میکروکانال، نانوسیال، مدلسازی.

Investigation of the Effect of Geometry and Type of Nanofluids on the Heat Transfer Inside the Microchannel using Computational Fluid Dynamics (CFD)

H. Bazai, A. Azari* and M. Moshtagh

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

Abstract: The purpose of this article is the numerical study of flow and heat transfer characteristics of Nanofluids inside a

* : مسئول مكاتبات، پست الكترونيكي: azari.ahmad@pgu.ac.ir

cylindrical microchannel with rectangular, triangular, and circular cross-sections. The size and shape of these sections have a significant impact on the thermal and hydraulic performance of the microchannel heat exchanger. The Nanofluids used in this work include water and De-Ethylene Glycol (DEG) as the base fluids and Al₂O₃, Cu, SiO₂ and CuO as the nanoparticles. To solve the problem and extract the required data, a 3-D simulation was performed for the microchannel using ANSYS FLUENT 15.0 software and the effect of the cross-sectional shape of the fluid flow and the type of nanoparticles on the thermal transfer and fluid flow parameters was studied. From the obtained results, it can be observed that the addition of nanoparticles to the base fluid increases the heat transfer and pressure drop. The results also show that rectangular channels have the best performance among the three geometries examined as its heat transfer coefficient was 19.26% higher than the triangular cross section which had the worst performance.

Keywords: Heat transfer; Pressure drop; Heat exchanger; Microchannel; Nanofluids; Modeling.

	1		
А	مساحت سطح مقطع (m ²)	out	خروجي
b	بالک سیال	Р	فشار (Pa)
bf	سیال پایه	р	ذره
с	كانال	Р	محيط (m)
Cp	ظرفیت گرمایی ویژه (j/kg. K)	q″	فلاکس حرارتی (w/m ²)
D	قطر (m)	Т	(K) دما
$\mathbf{D}_{\mathbf{h}}$	قطر هیدرولیک (m)	W	ديوار
h	ضریب انتقال حرارت جابه جایی (W/m² .K)	μ	ويسكوزيته (N. s/m ³)
in	ورودى	ν	سرعت (m/s)
k	ضریب انتقال حرارت هدایتی (W/m.K)	ρ	دانسیته (kg/m³)
nf	نانوسيال	φ	کسر حجمی ذرات

فهرست علائم

۱– مقدمه

در دهههای اخیر با توسعه دستگاههای الکترونیکی در ابعاد بسیار کوچک، نیاز به بهبود شرایط انتقال حرارت با استفاده از دستگاههایی در ابعاد هرچه کوچکتر افزایش یافته است. مبدلهای حرارتی میکروکانال برای این منظور میتوانند مورد استفاده قرار گیرند. علاوه بر این، بهتازگی استفاده از فناوریهای جدید نظیر فناوریهای نانو در این زمینه بسیار مورد توجه قرار گرفته است. بهکارگیری نانوذرات و تولید یک سوسپانسیون پایدار که نانوسیال نامیده میشود، میتواند انتقال حرارت را بهصورت قابل توجهی بهبود بخشد [۱]. کارهای تجربی [۴-۲] و عددی [۷-۵] زیادی افزودن نانوذرات به یک سیال پایه و تأثیر آن بر مشخصههای انتقال حرارتی و جریان سیال را مورد بررسی

قرار داده اند. نتایج این تحقیقات نشان می دهد که ضریب انتقال حرارت نسبت به سیال پایه به صورت خالص به طور چشمگیری افزایش پیدا می کند و شرایط انتقال حرارت بهبود می یابد. علاوه بر آن، در منابع تحقیقات زیادی نیز به بررسی تأثیر شکل سطح مقطع کانال ها، نحوه قرارگیری کانال ها، تعداد کانال ها و اندازه و ساختمان میکروکانال پرداخته شده است [۱]. در این بخش نیز مطالعات در دو زمینه عددی و تجربی انجام شده است. هرناندو و همکاران [۸] در یک مطالعه تجربی مشخصه های انتقال اندازه های مختلف مورد بررسی قرار دادند. مهم ترین نتیجه ای که آنها از این آزمایش گرفتند ارتباط بین افت فشار و میزان انتقال حرارت بود که با کوچکتر شدن اندازه همدیگر را خنثی کردند

و در کل مشخص شد کوچکتر شدن میکروکانال بازدهی را بهبود نمی بخشد. این بدان معناست که یک نقطه بهینه بین اندازه میکروکانال، میزان افت فشار و میزان انتقال حرارت وجود دارد. یانگ و همکاران [۹] عملکرد انتقال حرارتی یک میکروکانال با پرههای سوزنی شکل را به صورت آزمایشگاهی و عددی مورد بررسی قرار دادند. پنج سطح مقطع متفاوت برای پرههای سوزنی شکل مورد بررسی قرار گرفت. همچنین از آب دی یونیزه به عنوان سیال کاری برای خنککاری استفاده کردند. نتایج کار آنها نشان افت فشار سیال دارند. از نتایج شبیه سازی آنها که مطابقت خوبی با نتایج آزمایشگاهی دارد نیز بر می آید که کمترین مقاومت گرمایی مربوط به هندسه ای با مقطع شش ضلعی و کمترین افت

همچنین کارهای زیادی نیـز وجـود دارد کـه بـا اسـتفاده از نرمافزارهای شبیه سازی به حل عددی مسائل مربوط به میکروکانال پرداختهاند. وانگ و همکاران [۱۰] به بررسی تـ أثیر هندسههای مستطیلی، ذوزنقهای و مثلثیشکل روی مشخصه های جریان و انتقال حرارت پرداختند. پس از انجام آزمایش ها پیبردند که میکروکانال با سطح مقطع مستطیلی شکل کمترین مقاومت گرمایی و بهترین عملکرد حرارتی را داراست. همچنین آنها به بررسی تأثیر تعداد کانالها در یک سطح مقطع ثابت پرداختند و نتایج نشان میدهـد کـه افـزایش تعـداد کانـالهـا مقاومت گرمایی را کاهش؛ اما افت فشار را افـزایش مـیدهـد. مشتاق و همکاران [۱۱] در مطالعه دیگری به بررسی شکل های مختلف سطح مقطع کانالها برای یک مبدل حرارتی پرداختند. از آنجا که شکل و اندازه کانالها می تواند تـ أثیر زیـادی روی عملکرد حرارتی و هیدرودینامیکی جریان درون مبدل حرارتی داشته باشد، یک مبدل حرارتی با جریان مخالف شبیهسازی شد تا تأثير اين پارامترها را مورد ارزيابي قرار دهد. آنها نيز دريافتند که سطح مقطع دایرهای در بین دیگر هندسههای مورد بررسی، بهترین عملکرد را دارد. علاوه بر این پی بردند که افزایش تعداد میکروکانال ها بازدهی مبدل و افت فشار آن را افزایش می دهـد.

همچنین چان و همکاران [۱۲] به شبیه سازی عددی و سه بعدی انتقال حرارت و جریان سیال درون یک میکروکانال با سطح مقطع های متفاوت پرداختند. نتایج کار آنها نشان می دهد که میکروکانال مثلثی بهترین عملکرد گرمایی را دارا است. بعد از آن مقطع ذوزنقه ای و درنهایت مقطع مستطیلی است که بدترین عملکرد را دارد. درحالی که نتایج کار گوناسگارن و همکاران [۱۳]، که آنها نیز تأثیر هندسه های متفاوت را بر خواص انتقال حرارت و جریان سیال بررسی کردند، نشان می دهد که میکروکانال با مقطع مستطیلی بالاترین ضریب انتقال حرارت را ایجاد می کند و مثلثی بدترین عملکرد را دارد.

در یک مطالعه که توسط کومار و همکاران [۱۴] انجام شد، به مقایسه دقت مدل تکفاز و مدل دوفاز برای نانوسیالها پرداخته شد. نتیجه این مطالعه به این صورت ارائه شد که اگر غلظت نانوذره بیشتر از ۵/۵ درصد باشد، مدل تکفاز از دقت بالاتری برخوردار است، اما اگر غلظت نانوذره موجود در نانوسیال کمتر از ۵/۵ درصد باشد، مدل دوفاز با دقت بهتری عمل خواهد کرد.

علاوه بر نانوسیالات، مواد دیگری نیز به منظور بهبود انتقال حرارت درون میکروکانالها به کار برده شده است که دوغاب مواد تغییر فاز نامیده می شوند. در این زمینه نیز مطالعات زیادی انجام شده است [۱۵ و ۱۶] که از دوغاب PCM به عنوان سیال کاری درون مبدلهای حرارتی میکروکانال استفاده کردهاند. برای نمونه مشتاق [۱۷] مبدل حرارتی میکروکانال به کار رفته در کار را با سیال کاری دوغاب PCM مدل سازی کرد و سپس عملکرد حرارتی این سیال درون میکروکانال را با سیال آب خالص مقایسه و بهبود چشمگیری مشاهده کرد.

با بررسی منابع مشاهده می شود که، بیشتر کارهای تجربی و عددی انجام شده روی میکروکانالهای صفحهای بوده و کمتر به نوع استوانهای آن پرداخته شده است. در این مطالعه بررسی و ارزیابی مشخصههای جریان و انتقال حرارت در یک میکروکانال استوانهای با سطح مقطعهای دایرهای، مثلثی و مستطیلی پرداخته شده است. علاوه بر این سیال مورد استفاده



شکل ۱- نمادین کلی میکروکانالها و ابعاد مربوطه از نمای روبهرو

در این پژوهش نانوسیال با پایه آب و نانوذرات متفاوت Cu، CuO، SiO، SiO، ماAlrO، است. همچنین به منظور ارزیابی داده های به دست آمده از نرم افزار، داده های شبیه سازی با داده های تجربی مربوط به کار عزیزی و همکاران [۱۸] مقایسه می شود.

۲– مدلسازی ریاضی

۲–۱– توصیف میکرو کانال و مش بندی

در این مطالعه، به مدلسازی سهبعدی جریان نانوسیال درون یک میکروکانال استوانهای با استفاده از دینامیک سیالات محاسباتی (CFD) پرداخته شده است. هندسه کلی میکروکانال در شکل (۱) نشان داده شده است که ابعاد در آن مشخص است. گفتنی است که عمق این میکروکانال برابر ۵۰ میلیمتر و جنس بدنه این میکروکانال از آلیاژ Cu-Be است که مشخصات

فیزیکی آن در جدول (۱) آمده است. در مرکز میکروکانال یک تولیدکننده گرما (هیتر الکتریکی) قرار دارد که شار گرمایی ثابتی را تولید میکند و همچنین در اطراف آن استوانهای قرار دارد که سیال درون آن جریان دارد.

در کار حاضر سه شکل دایره، مثلث و مستطیل برای سطح مقطع عبوری جریان در کانالها درنظر گرفته شده است (شکل ۲) که برای صحتسنجی نتایج حاصل از این محاسبات، نتایج با نتایج کار تجربی عزیزی و همکاران [۱۸] مقایسه شدند. برای اینکه حجم ثابتی از تمام هندسههای عبوری جریان با سطح مقطعهای متفاوت وجود داشته باشد، از یک قطر هیدرولیک برای تمام شکلهای سطح مقطعها استفاده شد، که مقدار آن برابر با ۶۰۵۵/۰ میلیمتر است. در شکل (۲) یک برش شامل یک میکروکانال از کل هندسه انتخاب شده است و

جدول ۱– مشخصات فیزیکی آلیاژ بدنه میکروکانال				
ضریب هدایت حرارتی (W/mK)	چگالی (kg/m ³)	Analysis (wt%)	آلياژ	
	, _	Co: •/٨–١/٣		
~ .		Ni: $\circ/\Lambda - 1/\Upsilon$		
/ / 0	/// • •	Be: •/۴-•/V	Cu–Be	
		مابقى :Cu		



شکل ۲– هندسه مربوط به سطح مقطعها و نوع شبکهبندی

جدول ۲- اطلاعات مربوط هر هندسه

مثلثى	دايروى	مستطيلي	پارامترها
<i>\$\$</i>	٨۶	٨۶	تعداد كانالها
چهاروجهي	چهاروجهي	چهاروجهي	نوع شبكه
484000	407000	٣٧	تعداد اجزا در شبکه

مطالعات روی آن انجامگرفته است.

هندسههای موردنیاز در نرمافزار Design Modeler تولید و در نرمافزار ANSYS Meshing شبکهبندی شدند. هر دو نرمافزار از مجموعه ANSYS Workbench 15.0 هستند. اطلاعات مربوط به هندسههای شبکهبندی شده در جدول (۲) ارائه شده است.

۲-۲- معادلات حاکم، شرایط مرزی و روش حل معادلات حاکم بر مسئله شامل: معادله پیوستگی یا موازنه جرم (رابطه ۱)، معادله اندازه حرکت یا موازنه مومنتم (معادله ۲)، معادله انرژی برای ناحیه سیال (رابطه ۳) و معادله انرژی برای ناحیه جامد (رابطه ۴) است.

$$\nabla . (\rho_{nf} v_{f}) = \circ \qquad (1)$$

$$\nabla . (\rho_{nf} v_{f} v_{f}) = -\nabla p + (\mu_{nf} . \nabla v_{f}) \qquad (7)$$

$$\rho_{f} C_{p,f} (v_{f} . \nabla T) = k_{nf} (\nabla^{Y} T) \qquad (7)$$

$$k_{s}(\nabla^{\mathsf{Y}}T) = \circ \tag{(4)}$$

شرایط مرزی مورد استفاده برای حل معادلات شرط مرزی عدم لغزش در دیواره ها، شرط مرزی سرعت ورودی در مرزهای ورودی میکروکانال و همچنین شرط مرزی فشار اتمسفریک که در مرزهای خروجی میکروکانال هستند در زیر آمدهاند:

شرط مرزی دیوارههای بیرونی (عایق و دما ثابت):

T = Const.

۶۷

۱- شرایط عملیاتی در حالت پایدار است.
۲- جریان آرام است.
۳- جریان در طول لوله تغییر فازی ندارد.
۴- خواص ترموفیزیکی سیال و ماده سازنده میکروکانال ثابت درنظر گرفته شد.
۵- شرط مرزی بدون لغزش (No Slip) درون کانال فرض شد.
۶- میکروکانال مورد مطالعه از ۸۶ کانال مشابه تشکیل شده است، که یک کانال از ۶۸ کانال مورد مطالعه قرارگرفت و است، که یک کانال از ۶۸ کانال، مورد مطالعه قرارگرفت و محچنین بهدلیل اینکه دما و فشار خاصیتهای شدتی هستند میتوان آنها را برای قسمتی از سیستم مورد مطالعه بررسی و سپس برای کل سیستم لحاظ کرد.

۲-۴- پردازش دادهها و محاسبه ضریب انتقال حرارت برای بررسی تأثیر نوع نانوذرات و نوع سیال پایه بر انتقال حرارت جابه جایی، اثر اضافه کردن چهار نوع نانوذره مختلف مرارت جابه جایی، اثر اضافه کردن چهار نوع نانوذره مختلف دی AlrOr و CuO، یک بار به آب مقطر و بار دیگر به دی اتیلن گلایکول (به عنوان سیال پایه)، به صورت جداگانه مورد مطالعه قرار گرفت. خواص فیزیکی مربوط به هرکدام از مواد استفاده شده در جدول (۳) آورده شده است.

همچنین برای محاسبه خواص ترموفیزیکی نانوسیال مانند هدایت حرارتی، چگالی، ظرفیت گرمایی و ویسکوزیته که پارامترهای پایهای مهمی هستند، از روابط (۵) تا (۸) استفاده شده است [۲۱]:

$$k_{nf} = \frac{k_p + \tau k_{bf} + \tau \phi (\iota + \beta)^{\tau} (k_p - k_{bf})}{k_p + \tau k_{bf} - \phi (\iota + \beta)^{\tau} (k_p - k_{bf})} k_{bf}$$
(2)

که در آن k_bf و k_p بهترتیب گرمای هدایتی سیال پایه و نانوذره است. همچنین β معرف نسبت ضخامت نانولایه به شعاع ذره است که میتوان آن را برابر ۰/۱ درنظر گرفت [۲۲]. چگالی نانوسیال با استفاده از رابطه (۶) بهدست میآید:

$$\rho_{\rm nf} = \varphi \rho_{\rm p} + (1 - \varphi) \rho_{\rm bf} \tag{9}$$

$$\nabla T = \circ$$
$$V(x, r, \theta) = \circ$$

$$V(x,r,\theta) = \circ$$

$$V(x, r, \theta) = Const.$$

$$T(x,r,\theta) = Const.$$

$P(x,r,\theta) = P_{ATM}$

برای حل معادلات حاکم در این مسئله، از روش عددی حجم محدود استفاده شد. مشخصههای حل دامنه شامل Quick برای معادلات مومنتم و انرژی، و روش حل SIMPLE برای کوپل معادلات سرعت – فشار انتخاب شدند. همچنین، برای محدوده عدد رینولدز بین ۵۰ تا ۲۱۰۰ مدل جریان آرام و برای رینولدزهای بالاتر از این مقدار از مدل ع – k استاندارد استفاده شد. محدوده خطای درنظر گرفته شده برای دقت محاسبات برای تمام معادلات ²⁻۱۰۰×۱ بود.

۲-۳- فرضيات حل

مطالعات زیادی روی شبیه سازی عددی انتقال حرارت و رفت ار جریان سیال در نانو سیالات انجام شده است. روش های متعددی برای انجام شبیه سازی استفاده می شود که می توان آن را در دودسته تکفاز و دوفاز دسته بندی کرد. که مدل تکفاز به دلیل سادگی و بالاتر بودن دقت آن در غلظت های بالای ۵/۵ درصد نانوذره و همچنین حجم محاسبات کمتر، بیشتر مورد استفاده قرار می گیرد [۹۹]. برای استفاده از این مدل، فرض می شود که نانوذرات درون سیال پایه به شکل کاملاً یکنواخت توزیع شده است [۲۰]. در این تحقیق، از مدل تکفاز استفاده شده است. علاوه بر این برای حل مسئله فرض های دیگری نیز به ترتیب زیر اعمال شده است:

_	بعدوق المستواس عير يافعي فالوعراب المعتقف والراب						
	CuO	${\rm SiO}_{r}$	$\mathrm{Al}_{r}\mathrm{O}_{r}$	Cu	DEG	Water	خواص
	۶۵۰۰	7700	3600	٨٩٠٠	1114	۹ <i>۹۶</i> /۵	$\rho (kg/m^{r})$
					°/°۳۶	• / • • \	μ (N.s/m ^r)
	۵۴۰	V40	۷۶۵	300	۲۳۰۲	4111	$C_p (j/kg.k)$
	١٨	١/۴	۳۶	401	۰/۰۱۳	۰/۶۱۳	k (W/m.k)

جدول ۳- خواص فیزیکی نانوذرات مختلف و آب

که pp چگال نانوذرات و pbf چگالی سیال پایه است. ظرفیت گرمایی نانوسیال با فرض اینکه تعادل گرمایی به نانوذرات و سیال پایه برقرار است بهوسیله رابطه (۷) تخمین زده می شود:

$$C_{p,nf} = \frac{\phi \rho_p C_{p,p} + (\gamma - \phi) \rho_{bf} C_{p,bf}}{\rho_{nf}}$$
(V)

C_{p,p}و C_{p,bf} بهترتیب نشاندهنده ظرفیت گرمایی نانوذرات و سیالپایه هستند. در نهایت برای محاسبه ویسکوزیته نانوسیالات از رابطه (۸) استفاده میشود:

$$\mu_{nf} = \mu_{bf} \left(1 + r / \Delta \phi \right) \tag{A}$$

ضریب انتقال حرارت محلی با استفاده از قانون سرمایش نیـوتن مطابق معادله (۹) بهدست میآید:

$$h(x) = \frac{q''}{T_w(x) - T_b(x)}$$
(9)

که "q شار حرارتی ثابت است که از طریق گرماساز درون میکروکانال استوانهای تولید می شود و به سیال منتقل می شود. (x) و (x) Tw(x نیز به ترتیب نشان دهنده دمای توده سیال و دمای دیواره میکروکانال در موقعیت های مختلف هستند. همچنین عدد بی بعد رینولدز با رابطه (۱۰) بیان می شود:

$$Re = \frac{\rho_f u_{in} D_h}{\mu_f} \tag{10}$$

که uin سرعت در جریان ورودی و Dh قطر هیدرولیک است که Dh از رابطه (۱۱) محاسبه می شود:

$$D_{h} = \frac{*A_{c}}{P_{c}} \tag{11}$$

که در آن A_c و P_c بهترتیب، مساحت سطح مقطع کانـال عبـور جریان و محیط سطوح خیس شده توسط جریان سیال هستند.

روش های عددی در مهندسی، سال ۳۸، شمارهٔ ۱، تابستان ۱۳۹۸

۳– استقلال از شبکه، ارزیابی و اعتبارسنجی مدل برای نمایش استقلال نتایج از شبکه و رسیدن به تعداد جزء بهینه از چهار نوع شبکه با تعداد به ترتیب ۲۵۰۰۰۰، ۳۷۰۰۰۰ موارت جابه جایی در طولهای متفاوت از میکروکانال رسم شد. شکل (۳) نتایج حاصل از استقلال از شبکه را نشان می دهد که بر اساس آن با افزایش تعداد اجزاء از ۲۰۰۰۳ تغییری در نتایج حاصل نمی شود و بنابراین شبکه با تعداد ۲۰۰۰۰ جزء به عنوان شبکه بهینه درنظر گرفته شد.

برای صحتسنجی داده های حاصل از شبیه سازی، نتایج حاصل با نتایج کار تجربی عزیزی و همکاران [۸۸] مقایسه شد. برای این منظور سعی شده تا شرایط اعمال شده در کار تجربی ترای انجام شبیه سازی نیز تنظیم شود. دو شار حرارتی ثابت ۳۵ کیلووات بر مترمربع و ۵۰ کیلووات بر مترمربع اعمال شد و در مقادیر اعداد رینولدز متفاوت داده های مربوط به دمای ورودی و خروجی میکرو کانال استخراج شد. اختلاف دمای ورودی و اعداد رینولدز مختلف رسم شد، که در شکل (۴) ارائه شده است. بنیه سازی رفتار یکسان دارند و خطای متوسط هفت درصد را نشان می دهد که از رابطه (۱۱) محاسبه شد. همچنین این نمودار نشان می دهد که با افزایش عدد رینولدز، اختلاف دمای ورودی و نشان می دهد که با افزایش عدد رینولدز، اختلاف دمای ورودی و نشان می دهد که با افزایش عدد رینولدز، اختلاف دمای ورودی و

$$ARE(\%) = \frac{\left|X_{CFD} - X_{Exp}\right|}{X_{Exp}} \times \cdots$$
(11)



حجمی ۳ درصد نشان میدهند. در هر سه حالت نانوسیال کانال بر ضریب انتقال رفتارهای مشابهی دارند. از این نمودارها مشخص می شود که تأثیر شکلهای مختلف تقال حرارت در اعداد به این صورت که برای عدد رینولدز ۵۰ مقدار ضریب انتقال تقال حرارت در اعداد مراح مقطع مربعی دارای بالاترین ضریب انتقال حرارت است.

۴- نتایج و بحث ۴-۱- تأثیر هندسه سطح مقطع میکرو کانال بر ضریب انتقال حرارت شکلهای (۵- الف)، (۵- ب) و (۵-ج) تأثیر شکلهای مختلف شکلهای (۵- الف)، (۵- ب) و روحج) تأثیر شکلهای مختلف سطح مقطع میکروکانالها را بر ضریب انتقال حرارت در اعداد رینولدز متفاوت، شرایط ثابت شار حرارتی ۹=۶۰ و کسر



شکل ۵– تأثیر هندسه سطح مقطع میکروکانال بر ضریب انتقال حرارت برای نانوسیال Al₂O3/water و q=60 kW/m²: الف) عدد رینولدز ۵۰، ب) عدد رینولدز ۳۰۰ و ج) عدد رینولدز ۶۰۰

۲-۲ - تأثیر نوع نانوذره روی ضریب انتقال حرارت و دمای
 دیواره
 نانوذرات مختلف، خواص فیزیکی متفاوتی دارند و درنتیجه
 عملکرد حرارتی متفاوتی نیز خواهند داشت. شکل (۶) تأثیر
 نانوسیالات متفاوت روی ضریب انتقال حرارت و مقایسه آن با

آب خالص را در طول کانال نشان می دهد. تأثیر این پارامتر در شرایط ثابت ۲۰۰ هم ۹=۳۰ ه ۳۰۰ Re و کسر حجمی شش درصد برای نانوسیالات ۲۰۵۰ Cu، ۲۵۰ و CuO محاسبه و با آب خالص مقایسه شد. در این نمودار مشاهده می شود که سطح مقطع مستطیلی و دایر مای بیشتر از ضریب انتقال حرارت جابه جایی در سطح مقطع مثلثی است، این مقدار برای اعداد رینولدز ۳۰۰ و ۶۰۰ نیز برای سطح مقطع مستطیلی به ترتیب ۱۰/۱۸ و ۷/۴۸ درصد بیشتر از سطح مقطع مثلثی به دست آمده است. همچنین مشخص است که هرچه میزان عدد رینولدز بالاتر می رود، ضریب انتقال حرارت بیشتر و عملکرد حرارتی سطح مقطع های دایر مای و مربعی به هم نزدیک تر می شود. در هر سه حالت بدترین عملکرد را سطح مقطع مثلثی نشان می دهد.

روشهای عددی در مهندسی، سال ۳۸، شمارهٔ ۱، تابستان ۱۳۹۸



شکل ۶- تأثیر نوع نانوذره بر ضریب انتقال حرارت با غلظتهای یکسان

ضریب انتقال حرارت هدایتی این است که مکانیزم غالب در این مدل انتقال حرارت جابهجایی است.

همچنین هرچه جریان در جهت محور لوله به سمت جلو حرکت می کند به دلیل ثابت بودن مقدار p و بالا رفتن دمای آن ضریب انتقال حرارت کاهش پیدا می کند. شکل (۷) نیز تأثیر نانوسیالات مختلف روی دمای دیواره و مقایسه آنها با آب خالصی را نشان می دهد، که در آن میزان کاهش دمای دیواره برای نانوسیالات ۲۰۵۰، ۵۱/۰ و ۵۱/۰ درصد است. از خالص به ترتیب ۲۴/۰، ۸۰/۰، ۲۱/۰ و ۲۰/۰ درصد است. از این نمودار مشخص است که با اضافه کردن نانوسیال دمای سطح دیواره کاهش پیدا می کند و نانوسیال ۳۰ بیشترین تأثیر را در کاهش دمای دیواره میکروکانال داراست. از نتایج مشخص است که در جهت حرکت جریان دمای دیواره به صورت تقریباً خطی افزایش پیدا می کند. دلیل خطی بودن، تابت بودن مقدار فلاکس حرارتی و خواص فیزیکی سیال است.

۴-۳- مقایسه افت فشار نانوسیالات مختلف اضافه کردن یک نانوذره به سیال پایه باعث افزایش ویسکوزیته آن می شود. افزایش ویسکوزیته، افت فشار جریان سیال را

ضریب انتقال حرارت نانو سیالات از آب خالص بیشتر اسـت و در بين نانوسيالات نيز نانوسيال همراه با ذرات AlrOr بالاترين ضريب انتقال حرارت را دارد. به اين صورت كه ميزان افزايش ضريب انتقال حرارت جابهجايي براي نانوسيالات Cu، AlrOr، نانوسيالات SiOr و CuO نسبت آب خالص به ترتيب ۱۱/۸۵، ۶/۷۹، ۵/۳۱ و ۸/۲۳ درصد بهدست آمده است. دلیل اینکه نانوسیال آلومینا بهترین عملکرد را از خود نشان میدهد این است که ضریب هدایت حرارتی و ظرفیت گرمایی ویژه دو عامل اصلی در تعيين قابليت انتقال حرارت نانوسيال هستند. ألومينا در بين نانوسیالهای استفاده شده دارای ظرفیت گرمایی ویژه بسیار بالاترى نسبت به بقيه است، به اين صورت كه ظرفيت گرمايي ويژه نانوسيال ألومينا ٧۶۵ (ژول به كيلوگرم، كلوين) است اما این خاصیت برای مس حدود ۳۸۵ (ژول به کیلوگرم، کلوین) است. بنابراین بالا بودن ظرفیت گرمایی ویژه آلومینا، باعث شده که الومینا بتواند گرمای بیشتری را در خود ذخیره کند. در مورد ضريب هدايت حرارتي هم اين نكته قابل ذكر است كـه هرچـه این ضریب مقدار بیشتری داشته باشد، ماده می تواند گرما را بيشتر از خود عبور دهد. اما تأثير ضريب انتقال حرارت هـدايتي به اندازه ظرفیت گرمایی ویژه نخواهد بود، و پایین بودن بیش از حد آن مي تواند كارايي نانوسيال را كاهش دهد. دليل تأثير كم

Downloaded from intjournals.iut.ac.ir on 2024-05-19



شکل ۷– تأثیر نوع نانوذره بر روی دمای دیواره با غلظتهای یکسان

بهدنبال خواهد داشت. هرچه کسر حجمی نانو ذره در سیال افزایش پیدا کند میزان ویسکوزیته و بهدنبال آن افت فشار نیز بیشتر می شود. از طرفی با افزایش سرعت سیال نیز افت فشار افزایش پیدا می کند. شکل های (۸- الف) و (۸– ب) به ترتیب تأثیر اضافه کردن نانوذرات AlrOr و Cu به آب در کسرهای حجمی مختلف و در رینولدزهای متفاوت را نشان میدهد. از این نمودارها می توان نتیجه گرفت که با زیاد شدن کسر حجمي نانوذرات، افت فشار افزايش مييابد. بهعلاوه با زياد شدن عدد رینولدز نیز افت فشار هرکدام از نانو سیالات افزایش پیدا کرده است، همچنین درصد افزایش افت فشار در نانوسیال AlrOr برای درصدهای نانوذره ۱، ۳ و ۶ درصد بهترتيب ۲/۴۵، ۷/۶۵ و ۱۵/۸۳ درصد است. نتايج نشان می دهد که این افزایش افت فشار در رینولدزهای مختلف یکسان است و برای نانوسیال Cu با کسروزنی ۱، ۳ و ۶ درصد نانوذره، افزایش افت فشار بهترتیب ۲/۵۴، ۵/۶۸ و ۶/۸۸ درصد است که این افزایش هم در رینولدزهای مختلف ىكسان است.

۴-۴- تأثیر سطح مقطعهای مختلف روی افت فشار جریان
افت فشار جریان در یک کانال باعث می شود که توان بالاتری

برای پمپ کردن سیال جاری در کانال مورد نیاز باشد. در این بخش تأثیر سطح مقطع کانالها روی افت فشار مورد بررسی قرار گرفته است. شکل (۹) تأثیر این پارامتر را برای سه مقطع مستطیلی، دایرهای و مثلثی در شرایط ثابت KW/m^۲ و در اعداد غلظت ثابت سه درصد نانوسیال AlrOr/Water و در اعداد رینولدز متفاوت نشان می دهد. از این نمودار می توان نتیجه گرفت که بیشترین افت فشار در یک عدد رینولدز مشخص، مربوط به سطح مقطع دایرهای و کمترین افت فشار مربوط به سطح مقطع مثلثی است. سطح مقطع دایرهای حدود ۹/۲۰ درصد و سطح مقطع مستطیلی حدود ۲/۹۴ درصد بیشتر از سطح مقطع مثلثی باعث افزایش افت فشار می شوند.

۴-۵- مقایسه ضریب انتقال حرارت جابهجایی سیالهای پایه

آب و دی اتیلن گلایکول برای نانو سیال مس با مشاهدهٔ شکل های (۱۰ –الف) الی (۱۰ –ج) می توان نتیجه گرفت که در یک دبی یکسان برای دو سیال پایه آب و دی اتیلن گلایکول در مقاطع مختلف میکروکانال، سیال پایه آب در کل می تواند مفیدتر از سیال پایه دی اتیلن گلایکول باشد. این مقایسه در سه دبی ۵۰۰/۰، ۵۰۰/۰ و ۵۰/۰ کیلوگرم بر ثانیه و به تر تیب برای هرکدام از این دبی ها درصد نانو سیال ۱، ۳ و ۶ انجام

روش های عددی در مهندسی، سال ۳۸ شمارهٔ ۱، تابستان ۱۳۹۸

٧٣



شکل ۸– الف) مقایسه افت فشار نانوسیال : الف) آلومینا/آب با غلظتهای ۱، ۳ و ۶ درصد در اعداد رینولدز مختلف و ب) مس/آب با غلظتهای ۱، ۳ و ۶ درصد در اعداد رینولدز مختلف



شده است. از نتایج بهدست آمده آن است که ضریب انتقال حرارت جابه جایی نانوسیال با سیال پایه آب نسبت به نانوسیال با سیال پایه دی اتیلن گلایکول برای درصدهای ۱، ۳ و ۶ درصد نانوذره بهترتیب به میزان ۴۳/۲۵، ۳۰/۰۸ و ۷۶/۱۰ درصد بیشتر است. این نتایج همچنین نشان می دهند که کارایی نانوسیال با سیال پایه آب با افزایش کسر جرمی نانوذره دز غلظتهای بالای شش درصد کاهش می یابد. در شکل (۱۱) و جدول (۵) نسبت ضریب انتقال حرارت جابه جایی سیال پایه آب به سیال پایه دی اتیلن گلایکول در دبی های

مختلف جریان و سطح مقطعهای مختلف میکروکانال و همچنین در غلظتهای مختلف نانوذره مس با همدیگر مقایسه شده است. نتایج نشان می دهد که در دبی هایی که موجب ایجاد جریان آشفته می شود نسبت ضریب انتقال حرارت آب به ضریب انتقال حرارت دی اتیلن گلایکول در طول میکروکانال افزایش می یابد تا جایی که در مقطع خروجی این مقدار به حدود ۲۵ می رسد. دلیل این اتف ق کم بودن ویسکوزیته آب نسبت به دی اتیلن گلایکول است که این خود باعث تأثیر بیشتر آشفتگی بر آب نسبت به گلایکول می شود و درنهایت

روش های عددی در مهندسی، سال ۳۸ شمارهٔ ۱، تابستان ۱۳۹۸

٧۴



شکل ۱۰– الف) مقایسه ضریب انتقال حرارت جابهجایی نانوسیالهای مس/آب و مس/گلایکول با غلظت: الف) ۱درصد در دبی جرمی ۰/۰۰۱ کیلوگرم بر ثانیه، ب) ۳ درصد در دبی جرمی ۰۰۵/۰ کیلوگرم بر ثانیه و ج) ۶ درصد در دبی جرمی ۰/۱۱ کیلوگرم بر ثانیه

باعث افزایش ضریب انتقال حرارت جابه جایی آب نسبت به ضریب انتقال حرارت جابه جایی دی اتیلن گلایکول می شود. برای اثبات این اتفاق برای هر دبی جریان مقدار عدد رینولدز محاسبه شده که این مقدار برای هر کدام از نانوسیال ها در جدول (۴) آورده شده است.

۴-۶- مقایسه افت فشار سیال های پایه آب و دی اتیلن گلایکول برای نانوسیال مس

در نمودارهای شکل (۱۲) میزان افت فشار در نانوسیال با سیال پایـه آب و دیاتیلن گلایکول محاسبه شده است. همان طور که از نمودارها

معلوم است میزان افت فشار در دی اتیلن گلایکول به مراتب بالاتر از میزان افت فشار در آب است، به این صورت که میزان افت فشار در نانوسیال با سیال پایه گلایکول در درصدهای ۱، ۳ و۶ درصد نانوذره به ترتیب ۹۸/۸۴، ۹۲/۲۶ و ۷۹/۸۷ درصد بیشتر از نانوسیال با سیال پایه آب است، که دلیل این امر ویسکوزیته بالای اتیلن گلایکول است. میزان دبی جریان ورودی به میکروکانال در شکلهای (۱۰-الف)، میزان دبی مریان ورودی به میکروکانال در شکلهای (۱۰-الف)، ثانیه است. به طور کلی می توان این نتیجه را گرفت که علاوه بر اینکه سیال پایه آب از نظر اقتصادی مقرون به صرفه تر از دی اتیلن گلایکول است، از نظر عملکرد نیز شرایط به تری را ایجاد می کند.

روش های عددی در مهندسی، سال ۳۸، شمارهٔ ۱، تابستان ۱۳۹۸



شکل ۱۱– نسبت ضریب انتقال حرارت جابهجایی نانوسیال با سیال پایه آب نسبت به نانو سیال با سیال پایه دیاتیلن گلایکول

متوسط مقادير خطا	كمترين مقدار خطا	بيشترين مقدار خطا	
٧/ •	۴/۲	۱۰/۵	آب خالص – q= ۵۰ kW
V/V	۲/۱	۱۰/۸	آب خالص - q= ۳۰ kW

جدول ۴– مقادیر بیشینه، کمینه و میانگین خطای دادههای شبیهسازی در مقایسه با دادههای تجربی از مرجع [۱۸]

رينولدز	دبى	نانو سيال
1771	• / • • \	N% Cu/Water
۴۸	•/•• \	۱% Cu/DEG
AT 1 A	۵/۰۰۵	۳% Cu/water
۲۳۰	•/•• \	۳% Cu/DEG
10101	• / • \	۶% Cu/Water
474	• / • \	۶% Cu/DEG

جدول ۵- مقادیر عدد رینولدز برحسب دبی نانوسیالات مختلف

موردنظر و استخراج داده ها استفاده شد. به منظور ارزیابی داده های به دست آمده از شبیه سازی، با داده های تجربی موجود مقایسه شدند که مطابقت خوبی با یکدیگر داشتند. نتایج این تحقیق نشان داد که سطح مقطع های مختلف میکروکانال عملکردهای حرارتی متفاوتی دارند. به این صورت که در رینولدز ۵۰ سطح مقطع مثلثی دارای کمترین میزان ضریب

۵- نتیجهگیری

در این تحقیق مشخصههای انتقال حرارت و جریان نانوسیالات SiO₇ ،Cu ،Al₇O₇ و CuO با سیالات پایه آب مقطر و دی اتیلن گلایکول، درون میکروکانال استوانهای با سطح مقطعهای مستطیلی، مثلثی و دایرهای به صورت عددی بررسی شد. برای این کار از نرمافزار ANSYS Fluent برای شبیه سازی هند سه



شکل ۱۲– مقایسه میزان افت فشار نانوسیال با سیال پایه آب و دیاتیلن گلایکول

نانوسيالات SiOr ،Cu ،AlrOr و CuO نسبت به آب خالص بهترتيب ١١/٨٥، ٩/٧٩، ٥/٣١ و ٨/٢٣ درصد بهدست آمده است. همچنین نتایج نشان داد که هرچه غلظت نانوذرات درون سيال پايه افزايش يابد، بهواسطه افزايش ويسكوزيته سيالكاري، میزان افت فشار افزایش پیدا میکند. همچنین، نانوسیال با سیال پایه دیاتیلن گلایکول نسبت به آب خالص عملکرد ضعیفتری از خود نشان میدهد، چرا که دارای ویسکوزیته بسيار بالاتري نسبت به آب خالص است و همين امر موجب می شود تا افت فشار زیادی در سیستم به وجود آید.

انتقال حرارتی و سطح مقطحهای مستطیلی و دایرهای بهترتیب ۱۹/۲۶ و ۱۰/۸۸ درصـد بیشـتر از سـطح مقطـع مثلثـی باعـث

افزایش ضریب انتقال حرارت جابهجایی میشوند. بنابراین از

سـه سـطح مقطـع مسـتطیلی، مثلثـی و دایـرهای، سـطح مقطـع مستطيلي بيشترين ميزان انتقال گرما و سطح مقطع مثلثي

كمترين ميزان انتقال حرارت را دارد. از بين نانوسيالات متفاوتي

که در این کار استفاده شده است بهترین ضریب انتقال حرارت

مربوط به AlrOr و بدترین شرایط مربوط به SiOr است. به این

صورت که میزان افزایش ضریب انتقال حرارت جابه جایی برای

٧V

1. suspension

- Mohammed, H. A., Bhaskaran, G., Shuaib, N. H., and Saidur, R., "Heat Transfer and Fluid Flow Characteristics in Microchannels Heat Exchanger using Nanofluids: A Review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 15, No. 3, pp. 1502-1512, 2011.
- Heyhat, M. M., Kowsary, F., Rashidi, A. M., Momenpour, M. H., and Amrollahi, A., "Experimental Investigation of Laminar Convective Heat Transfer and Pressure Drop of Water-Based Al₂O₃ Nanofluids in Fully Developed Flow Regime", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 44, pp. 483-489, 2013.
- 3. Teamah, M. A., Dawood, M., Khairat, M., and Shehata, A., "Numerical and Experimental Investigation of Flow Structure and Behavior of Nanofluids Flow Impingement on Horizontal Flat Plate", *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 74, pp. 235-246, 2016.
- 4. Yarmand, H., Gharehkhani, S., Shirazi, S. F., Seyed Amiri, A., Alehashem, M. S., Dahari, M., and Kazi, S. N., "Experimental Investigation of Thermo-Physical Properties, Convective Heat Transfer and Pressure Drop of Functionalized Graphene Nanoplatelets Aqueous Nanofluid in a Square Heated Pipe", *Energy Conversion and Management*, Vol. 114, pp. 38-49, 2016.
- Asmaie, L., Haghshenasfard, M., Mehrabani-Zeinabad, A., and Nasr Esfahany, M., "Thermal Performance Analysis of Nanofluids in a Thermosyphon Heat Pipe using CFD Modeling", *Heat and Mass Transfer*, Vol. 49, No. 5, pp. 667-678, 2013.
- Rashmi, W., Ismail, A. F., Khalid, M., and Faridah, Y., "CFD Studies on Natural Convection Heat Transfer of Al₂O₃-Water Nanofluids", *Heat and Mass Transfer*, Vol. 47, No. 10, pp. 1301-1310, 2011.
- Ruan, B., Gao, X., and Meng, H., "Numerical Modeling of Turbulent Heat Transfer of a Nanofluid at Supercritical Pressure", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 113, pp. 994-1003, 2017.
- García-Hernando, N., Acosta-Iborra, A., Ruiz-Rivas, U., and Izquierdo, M., "Experimental Investigation of Fluid Flow and Heat Transfer in a Single-phase Liquid Flow Micro-heat Exchanger", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, No. 23, pp. 5433-5446, 2009.
- 9. Yang, D., Wang, Y., Ding, G., Jin, Zh., Zhao, J., and Wang, G., "Numerical and Experimental Analysis of

Cooling Performance of Single-Phase Array Microchannel Heat Sinks with Different Pin-Fin Configurations", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 112, pp. 1547-1556, 2017.

- Wang, H., Chen, Zh., and Gao, J., "Influence of Geometric Parameters on Flow and Heat Transfer Performance of Micro-Channel Heat Sinks", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 107, pp. 870-879, 2016.
- Hasan Mushtaq, I., Rageb, A. A., Yaghoubi, M., and Homayoni, H., "Influence of Channel Geometry on the Performance of a Counter Flow Microchannel Heat Exchanger", *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 48, No. 8, pp. 1607-1618, 2009.
- 12. Chen, Y., Zhang, Ch., Shi, M., and Wu, J., "Three-Dimensional Numerical Simulation of Heat and Fluid Flow in Noncircular Microchannel Heat Sinks", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 36, No. 9, pp. 917-920, 2009.
- 13. Gunnasegaran, P., Mohammed, H. A., Shuaib, N. H., and Saidur, R., "The Effect of Geometrical Parameters on Heat Transfer Characteristics of Microchannels Heat Sink with Different Shapes", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, No. 8, pp. 1078-1086, 2010.
- 14. Kumar, N., and Puranik, B. P., "Assessment of Single Phase Model of a Nanofluid for Numerical Prediction of Forced Convection Heat Transfer", *Journal of Nanofluids*, Vol. 5, No. 1, pp. 94-100, 2016.
- 15. Alquaity, A. B. S., Al-Dini, S. A., Wang, E. N., and Yilbas, B. S., "Numerical Investigation of Liquid Flow with Phase Change Nanoparticles in Microchannels", *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 38, pp. 159-167, 2012.
- 16. Sabbah Rami, F., Mohammad, M., and Al-Hallaj, S., "Micro-Channel Heat Sink with Slurry of Water with Micro-Encapsulated Phase Change Material: 3D-Numerical Study", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, No. 2, pp. 445-454, 2009.
- Hasan Mushtaq, I., "Numerical Investigation of Counter Flow Microchannel Heat Exchanger with MEPCM Suspension", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 31, No. 6, pp. 1068-1075, 2011.
- Azizi, Z., Alamdari, A., and Malayeri, M. R., "Convective Heat Transfer of Cu-Water Nanofluid in a Cylindrical Microchannel Heat Sink", *Energy Conversion and Management*, Vol. 101, pp. 515-524, 2015.
- 19. Behroyan, I., Vanaki, Sh. M., Ganesan, P., and Saidur, R., "A Comprehensive Comparison of

مراجع

Various CFD Models for Convective Heat Transfer of Al₂O₃ Nanofluid Inside a Heated Tube", *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 70, pp. 27-37, 2016.

- 20. Niu, J., Fu, C., and Tan, W., "Slip-flow and Heat Transfer of a Non-Newtonian Nanofluid in a Microtube", *PloSone*, Vol. 7, No. 5, pp. e37274, 2012.
- 21. Azari, A., and Derakhshandeh, M., "An Experimental Comparison of Convective Heat

Transfer and Friction Factor of Al₂O₃ Nanofluids in a Tube with and Without Butterfly Tube Inserts", *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, Vol. 52, pp. 31-39, 2015.

22. Yu, W., and Choi, S. U. S., "The Role of Interfacial Layers in the Enhanced Thermal Conductivity of Nanofluids: A Renovated Maxwell Model", *Journal* of Nanoparticle Research, Vol. 5, No. 1-2, pp. 167-171, 2003.