

پیش بینی هدایت گرمایی نانوسیالات بر پایه مایع یونی با تصحیح مدل هامیلتون و کراسر

مریم بهادری*، فاطمه افشار

گروه شیمی، واحد مرودشت، دانشگاه آزاد اسلامی، مرودشت، ایران

چکیده: داده های تجربی نشان داده است که در نانوسیالات بر پایه مایع یونی، هدایت گرمایی معمولاً بین ۵ تا ۵۵ درصد نسبت به مایع یونی خالص افزایش می یابد. در این مقاله برای بررسی هدایت گرمایی، چند نانوسیال بر پایه مایع یونی انتخاب شده اند و با نشان دادن عدم کارایی مدل کلاسیک هامیلتون و کراسر در پیش بینی هدایت گرمایی این سیستم ها، تصحیحاتی در این معادله اعمال شده است. در این تصحیح یک جمله به صورت کسر در معادله هامیلتون و کراسر افزوده شده است. هدایت گرمایی نانو ذره، دما و یک عامل تصحیح، مهمترین مقادیر جمله افزوده شده، هستند. عامل تصحیح به صورت تجربی تعیین می شود و مقدار آن به نوع سیال پایه و نوع نانو ذره وابسته است. دقت داده های حاصل از معادله تصحیح شده بهبود قابل توجهی یافته است. مدل اصلاح شده، امکان پیش بینی هدایت گرمایی نانوسیالات بر پایه مایع یونی را در دماها و غلظت های گوناگون با دقت قابل قبولی فراهم می کند.

واژگان کلیدی: نانوسیال، مایع یونی، هدایت گرمایی، مدل هامیلتون-کراسر.

mbahadori@iau.ir

۱- مقدمه

در کنار این پیشرفت ها، نانوسیالات نیز به عنوان نسل جدیدی از سیالات انتقال حرارت، به دلیل توانایی بالاتر در انتقال حرارت نسبت به سیالات متداول، مورد توجه قرار گرفته اند [۵]. این سیالات از پراکندن نانوذرات فلزی یا غیرفلزی در یک سیال پایه به دست می آیند و عملکرد حرارتی آن ها به عواملی چون اندازه و غلظت نانوذرات، دما و ویژگی های سیال پایه وابسته است [۶].

ترکیب مایعات یونی با نانوذرات، به پیدایش دسته جدیدی از نانوسیالات تحت عنوان آیونانوسیالات انجامیده است. این ترکیبات، که ویژگی های حرارتی نانوسیالات و پایداری مایعات یونی را همزمان در خود دارند، به ویژه برای کاربرد در سیستم های دمای بالا نظیر مبدل های حرارتی و راکتورها مناسب هستند [۷].

مایعات یونی به واسطه ویژگی های منحصر به فرد خود، از جمله فشار بخار بسیار پایین، غیر فرار بودن و قابلیت بازیافت، به عنوان جایگزین مناسبی برای حلال های آلی در صنایع شیمیایی و فرایندهای صنعتی مطرح شده اند [۱، ۲]. این ترکیبات معمولاً از کاتیون های آلی حجیم و آنیون های کوچک تر تشکیل شده اند که به واسطه پیوندهای ضعیف بین یون ها، در دماهای کمتر از ۱۰۰ درجه سانتی گراد به حالت مایع باقی می ماندند [۳]. پایداری حرارتی و شیمیایی بالای مایعات یونی، موجب توسعه کاربردهای آن ها در حوزه های صنعتی همچون فناوری های زیستی، الکترو شیمی، استخراج و کاتالیزورها شده است [۴].

سوسپانسیون‌ها است. در مدل هامیلتون و کراسر که در سال ۱۹۶۲ برای هدایت حرارتی این دسته از مواد ارائه شد علاوه بر کسر حجمی ذره و هدایت گرمایی سیال پایه و ذره، شکل ذره نیز در معادله ماکسول گنجانده شد (معادله ۱) [۱۴].

$$K_{eff} = \frac{K_{nf}}{K_{bf}} = \frac{K_p + (n-1)K_{bf} - (n-1)\varphi(K_{bf} - K_p)}{K_p + (n-1)K_{bf} + (K_{bf} - K_p)\varphi} \quad (1)$$

نسبت هدایت گرمایی نانوسیال به سیال پایه را هدایت گرمایی موثر می‌گویند و با K_{eff} نشان می‌دهند. در این رابطه K_p هدایت گرمایی نانوذرات، K_{bf} هدایت گرمایی سیال پایه و φ درصد حجمی ذره است. n عامل شکل است که از رابطه $n = \frac{3}{\psi}$ به دست می‌آید در این رابطه ψ مقدارکروی بودن شکل نانوذره است و به صورت نسبت مساحت سطح کره به شکل مورد نظرهم حجم آن تعریف می‌شود. بدین معنی که مقدار ψ برای کره یک و برای سایر شکل‌های هندسی کمتر از یک می‌باشد [۲۲، ۲۳].

در این مقاله برای بررسی هدایت گرمایی نانوسیالات بر پایه مایع یونی، معادله هامیلتون به عنوان معادله مرجع انتخاب شده است.

مطالعات قبلی نشان داده که این معادله در پیش بینی هدایت گرمایی نانوسیالات ناتوان است و مقدار هدایت گرمایی را خیلی کمتر از مقدار واقعی پیش بینی می‌کند [۲۴]. در شکل ۱

ناکارآمدی این معادله برای پیش‌بینی هدایت حرارتی نانوسیالات مورد مطالعه به وضوح مشخص است. در این شکل مقدار تجربی هدایت گرمایی و مقدار پیش‌بینی شده از معادله با هم مقایسه شده‌اند. همان‌طور که در شکل ۱ به وضوح مشخص است و در جدول ۱ برای چند داده یکی از سیستم‌های مورد مطالعه به

صورت عددی محاسبه شده است، معادله هامیلتون کراسر برای پیش‌بینی هدایت گرمایی نانوسیالات کارایی چندانی ندارد. یکی از مشکلات این معادله کم بودن مقدار K_{eff} پیش‌بینی شده نسبت به مقدار تجربی می‌باشد. مشکل دیگر به وابستگی دمایی مربوط است. وابستگی K_{eff} تجربی نسبت به دما خیلی بیشتر از مقدار پیش‌بینی شده به وسیله این معادله است. به طوری که می‌توان گفت این معادله در پیش‌بینی تاثیر دما بر هدایت گرمایی کاملاً ناتوان است. در جدول ۱ این ضعف در داده‌های اولین سطر و سومین سطر، غلظت یکسان نانوذره در دماهای متفاوت، مشهود است. سومین ضعف این است که در مقادیر پیش‌بینی شده از معادله درصد حجمی نانو ذره تاثیر چشمگیری روی هدایت

مروری جامع نشان می‌دهد که مطالعات تجربی و مدل‌سازی عددی، اهمیت فزاینده‌ای به کاربردهای حرارتی آیونانوسیالات داده‌اند و روند تحقیقات در این زمینه به سرعت در حال رشد است [۹، ۸]. برای مثال، در سال‌های اخیر اولین کاربردهای عملی آیونانوسیالات حاوی نانوذرات گرافن را در سیستم‌های جمع‌کننده خورشیدی گزارش کرده‌اند که افزایش راندمان حرارتی و پایداری این سیستم‌ها را به همراه داشته است [۱۱، ۱۰]. مطالعات نشان داده است که هدایت گرمایی آیونانوسیالات می‌تواند تا ۵۵ درصد بالاتر از مایع یونی پایه باشد [۱۱]. با این وجود، هزینه بالای تولید، چالشی مهم در توسعه صنعتی این سیالات است [۱۲].

مدل‌سازی هدایت گرمایی نانوسیالات، همواره یکی از موضوعات محوری در این حوزه بوده است. مدل ماکسول به عنوان نخستین مدل تحلیلی برای سوسپانسیون‌های دوفازی، تنها در شرایط ذرات کروی و غلظت‌های پایین معتبر است [۱۳]. در پی آن، مدل هامیلتون و کراسر (۱۹۶۲) با لحاظ کردن اثر شکل هندسی ذرات، برای بهبود پیش‌بینی‌ها ارائه شد [۱۴]. مطالعات اخیر نشان داده‌اند که مدل‌های کلاسیک قادر به پیش‌بینی دقیق هدایت گرمایی نانوسیالات، به‌ویژه در غلظت‌ها و دماهای متنوع، نیستند [۱۵].

عوامل مختلفی همچون حرکت براونی، خوشه‌بندی نانوذرات، ساختار لایه‌ای اطراف نانوذرات و ترموفورز، بر انتقال حرارت در نانوسیالات تأثیرگذارند [۱۹-۱۶]. همچنین، مطالعات تجربی نشان داده‌اند که با افزایش اندازه نانوذره، هدایت گرمایی کاهش می‌یابد و این ویژگی به شدت به اندازه ذره، غلظت و دمای سیال بستگی دارد [۲۱، ۲۰].

نظر به اینکه مدل‌های کلاسیک در پیش‌بینی هدایت گرمایی نانوسیالات، به‌ویژه در شرایط غیر ایده‌آل، دقت کافی ندارند، توسعه مدل‌های بهینه‌شده ضروری به نظر می‌رسد. در این پژوهش، ضمن ارزیابی کارایی مدل کلاسیک هامیلتون و کراسر در پیش‌بینی هدایت گرمایی آیونانوسیالات، با معرفی یک عامل تصحیح، مدلی بهبودیافته برای تخمین دقیق‌تر این ویژگی ارائه شده است.

۲- تئوری

مدل ماکسول قدیمی‌ترین مدل برای پیش‌بینی هدایت گرمایی

داده‌های تجربی بدست می‌آید. همانگونه که در جدول ۱ مقادیر درصد خطا مشخص شده است، با این تصحیح تجربی، تطابق معادله با مقادیر تجربی هدایت گرمایی موثر، کاملاً ارتقا یافته است.

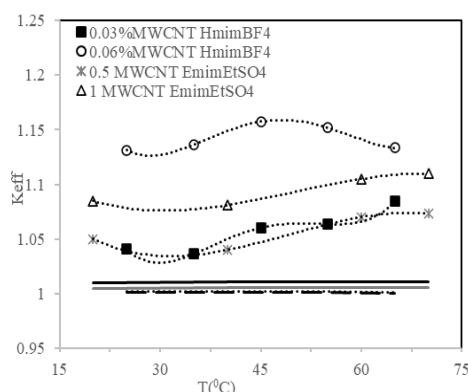
۳- نتایج

همان طور که اشاره شد در روابط قسمت قبل n عامل شکل است که از رابطه $n = \frac{3}{\psi}$ به دست می‌آید. ψ معیاری از کرویی بودن شکل نانوذره است و برای ذرات با شکل‌های مختلف از ۰/۴ تا ۱ تغییر می‌کند. یعنی مقدار n باید بین ۳ تا حدود ۷/۵ باشد. نانوذراتی که در سیستم‌های مورد مطالعه استفاده شده اند شامل نانولوله‌های کربنی، گرافن، اکسید آلومینیوم و کریبیدسیلیس است.

برای ارزیابی اعتبار معادله کلاسیک هامپلتون و بررسی تاثیر تصحیحات انجام شده از داده‌های تجربی هدایت گرمایی مایعات یونی و هدایت گرمایی تجربی تعدادی نانوسیال بر پایه مایعات یونی استفاده شده است. نانوسیالات مورد مطالعه در جدول ۲ معرفی شده اند. شکل نانولوله‌های کربنی (MWCNT) استوانه

جدول ۲. اطلاعات سیستم‌های مورد مطالعه در این مقاله.

مرجع	α	درصد حجمی نانوذره	سیال پایه
۲۵	۴۲/۶	۰/۰۳	۱-هگزیل-۳-متیل-ایمیدازولیوم
		۰/۰۶	تترافلوئوروبورات
۲۶	۱۹/۳	۰/۰۱	گرافن
		۰/۰۳	
		۰/۰۶	
۲۷	۱۱/۲	۰/۰۱	SiC
		۰/۰۳	
		۰/۰۶	
۲۸	۱/۷	۰/۱۸	۱-بوتیل-۳-متیل-ایمیدازولیوم
		۰/۳۶	بیس(تری فلوئورومتان سولفونیل) ایمید
۲۹	۰/۶۸	۰/۰۵، ۳	۱-اتیل-۳-متیل-ایمیدازولیوم
			اتیل سولفات
۳۰	۳/۸	۰/۰۱، ۰/۰۵	تری هگزیل تترادسیل فسفونیوم
			بیس(تری فلوئورومتیل سولفونیل) ایمید



شکل ۱. مقایسه مقدار تجربی هدایت گرمایی چهار نانو سیال با مقدار پیش‌بینی شده از مدل کلاسیک هامپلتون و کراسر.

جدول ۱. مقایسه نتایج حاصل از معادله هامپلتون و کراسر و معادله تصحیح شده برای نانو سیال حاصل از گرافن در سیال پایه ۱-هگزیل-۳-متیل-ایمیدازولیوم تترافلوئوروبورات. اعداد درون پرانتز درصد خطا را نشان می‌دهد.

$T(^{\circ}C)$	غلظت نانو ذره	K_{eff} تجربی	K_{eff} پیش از تصحیح	K_{eff} تصحیح شده
۲۵	۰/۰۱	۱/۰۳۰	۱/۰۰۰۷۵ (۲/۸۴)	۱/۰۲۵ (۰/۴۸)
۲۵	۰/۰۶	۱/۱۴۸	۱/۰۰۴۵ (۴/۸۷)	۱/۱۵۲ (۰/۳۵)
۱۶۰	۰/۰۱	۱/۰۵۲	۱/۰۰۰۷۵ (۱۲/۵)	۱/۰۳۷ (۱/۴۳)

گرمایی ندارد. در شکل یک دو خطچین مربوط به دو غلظت مختلف نانوذره خیلی به هم نزدیک هستند و در جدول ۱ مقادیر هدایت گرمایی پیش از تصحیح برای غلظت‌های متفاوت اختلاف چندانی ندارند. برای تصحیح این کاستی‌ها جمله‌ای به صورت کسر اضافه شد. این جمله شامل دما، کسر حجمی نانوذره و یک عامل تصحیح است. با این اصلاح مقدار کسر افزایش می‌یابد. عامل تصحیح متناسب با نوع سیال پایه و نوع نانو ذره در نظر گرفته شده است.

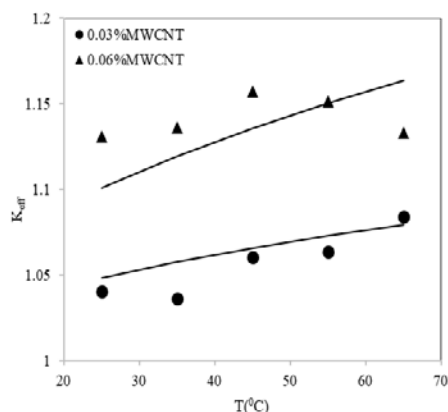
معادله تصحیح شده به صورت معادله ۲ است؛

$$K_{eff} = \frac{K_p + (n-1)K_{bf} - (n-1)\phi(K_{bf} - K_p) + \alpha T^{0.25}\phi(n-1)K_p}{K_p + (n-1)K_{bf} + (K_{bf} - K_p)\phi} \quad (2)$$

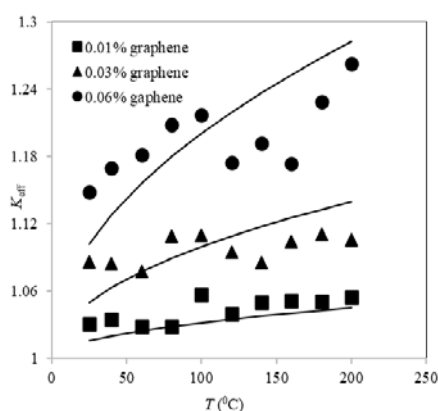
که پس از نوآرایی به شکل معادله ۳ نوشته می‌شود.

$$K_{eff} = \frac{K_p + (n-1)K_{bf} - (n-1)\phi[K_{bf} - K_p(1 + \alpha T^{0.25})]}{K_p + (n-1)K_{bf} + (K_{bf} - K_p)\phi} \quad (3)$$

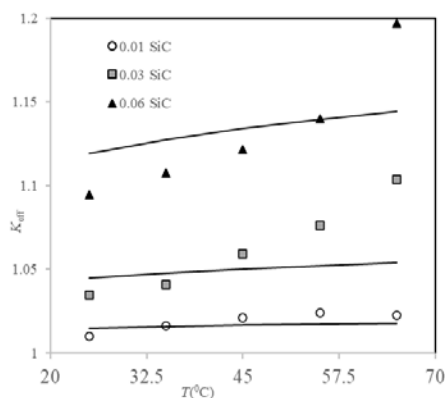
α پارامتری وابسته به نوع سیال پایه و نوع نانوذره می باشد و مستقل از دما و غلظت نانوذرات است. این پارامتر از تطبیق



شکل ۲. تغییرات هدایت گرمایی نانوسیال [BMIM][BF₄] و نانولوله کربنی با دما. نقاط مقادیر تجربی و خطوط حاصل از این تحقیق است.



شکل ۳. تغییرات هدایت گرمایی نانوسیال حاوی [BMIM][BF₄] و گرافن با دما. نقاط مقادیر تجربی و خطوط حاصل از این تحقیق.



شکل ۴. تغییرات هدایت گرمایی نانوسیال حاوی [BMIM][BF₄] و کربید سیلیس با دما. نقاط مقادیر تجربی و خطوط حاصل از این تحقیق.

ثابت اما غلظت‌های مختلف نانو ذره رسم شده است. خط بدست آمده از تطبیق معادله تصحیح شده هم‌خوانی قابل قبولی با داده‌های تجربی دارد. این نمودار نشان می‌دهد که معادله تصحیح شده می‌تواند در یک دمای مشخص اثر تغییر غلظت نانو ذره بر هدایت گرمایی را به خوبی پوشش دهد.

ای، اکسید آلومینیوم کروی، گرافن و کربید سیلیس ورقه‌ای است و با توجه به شکل نانوذرات مقدار تقریبی ψ و n در جدول ۳ گزارش شده است.

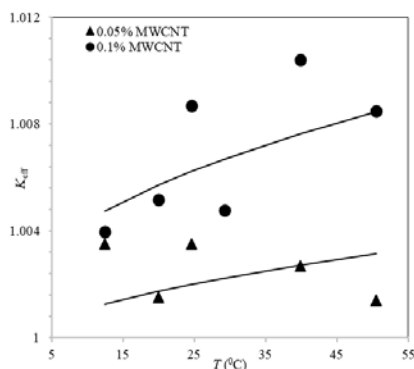
هدایت گرمایی نانولوله‌های کربنی، به‌صورت تئوری پیش‌بینی شده است [۳۱-۳۳]. در مطالعات اخیر مشخص شده که هدایت گرمایی نانولوله‌های کربنی چند لایه از $600 \pm 100 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ تا $150 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ کاهش می‌یابد و در صفحات نانو لوله کربنی به $50 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ می‌رسد [۳۳]. هدایت گرمایی نانوذرات آلومینیوم اکسید و کربید سیلیس نیز به ترتیب برابر با $36 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ و $120 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ گزارش شده است [۳۴، ۳۵]. برای هدایت گرمایی گرافن از روش‌های تئوری مقادیر متعدد و بسیار بالایی پیش‌بینی شده که از مقدار $2000 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ در این مقاله استفاده شده است [۳۶].

در این مقاله معادله هامیلتون و کراسر برای پیش‌بینی هدایت گرمایی سیستم نانوسیال بر پایه مایع یونی تصحیح شده است. نتایج مربوط به نانوسیال حاوی سیال پایه ۱-هگزیل-۳-متیل-ایمیدازولیوم تترافلوئوروبورات ([BMIM][BF₄]) و نانولوله کربنی چند دیواره، گرافن و کربید سیلیس در شکل‌های ۲ تا ۴ نشان داده شده است. در این شکل‌ها خطوط حاصل از معادله تصحیح شده ۳ به مقدار تجربی بسیار نزدیک هستند. از آنجایی که تغییرات داده‌های تجربی هدایت گرمایی نانوسیالات با دما آشفتگی دارد و غیرخطی است، همان گونه که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود، مدل ارائه شده در پیش‌بینی جزئیات روند تغییرات با دما کاملاً هماهنگ نیست، اما با روند کلی تغییرات داده‌های تجربی منطبق است.

در شکل ۵ نتایج مربوط هدایت گرمایی سیال حاوی سیال پایه ۱-بوتیل-۳-متیل ایمیدازولیوم بیس(تری فلئورومتیل سولفونیل) ایمید ([BMIM][NTf₂]) و نانوذره اکسید آلومینیوم در یک دمای

جدول ۳. عامل شکل و هدایت گرمایی نانو ذرات مورد استفاده.

مرجع	$K_p (\text{W m}^{-1} \text{ K}^{-1})$	n	ψ	نانوذره
۳۳	۱۰۰	۳/۴۵	۰/۸۴	نانولوله کربنی چند دیواره
۳۴	۳۶	۳	۱	Al ₂ O ₃
۳۵	۱۲۰	۷/۵	۰/۵۲	SiC
۳۶	۲۰۰۰	۷/۵	۰/۵۲	گرافن



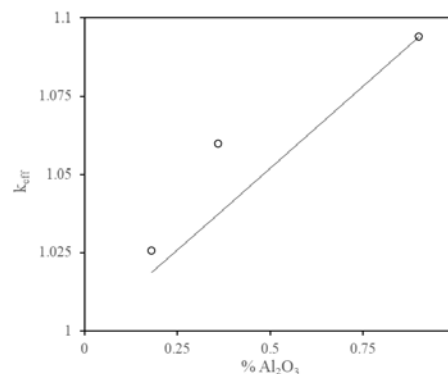
شکل ۷. هدایت گرمایی نانوسیال $[(C_6)_3PCl_4][NTf_2]$ و نانولوله کربنی چنددیواره به صورت تابع دما. نقاط مقادیر تجربی و خطوط حاصل از این تحقیق.

علیرغم کاربرد گسترده در پیش‌بینی هدایت گرمایی سوسپانسیون‌ها، در مورد نانوسیالات بر پایه مایعات یونی دقت کافی ندارد. در مقایسه داده‌های تجربی با مقادیر پیش‌بینی شده مشخص شد که این مدل، هم از نظر مقدار هدایت گرمایی و هم از نظر وابستگی دمایی، انحراف قابل توجهی دارد. همچنین مدل کلاسیک قادر به توصیف روند تغییرات هدایت گرمایی با دما و غلظت نانوذرات در این سیستم‌ها نیست.

برای رفع این کاستی، یک جمله اصلاحی در صورت کسر به معادله اصلی اضافه شد که شامل سه پارامتر کلیدی است: هدایت گرمایی نانوذره، دما و یک ضریب تصحیح تجربی. مقدار ضریب بر اساس داده‌های تجربی تعیین شد و به نوع سیال پایه و نانوذره وابسته است. مدل اصلاح‌شده توانست در محدوده دمایی و غلظتی متنوع، خطای پیش‌بینی را به‌طور محسوسی کاهش دهد. مقدار بهبود نتایج برای داده‌های انتخاب شده در جدول ۱ تا ۱۰٪ است، که البته برای داده‌های غلظت‌ها و دماهای بالاتر از این مقدار هم بیشتر می‌شود.

با این حال، بررسی نمودارها نشان داد که اگرچه مدل جدید روند کلی تغییرات هدایت گرمایی را با دما به‌خوبی بازتولید می‌کند، اما در بازه‌های خاص دمایی هنوز نوساناتی مشاهده می‌شود که ناشی از عوامل پیچیده‌تری همچون ساختار لایه‌ی مرزی اطراف نانوذره، برهم‌کنش‌های بین‌ذره‌ای و تغییرات ریزساختاری سیال پایه است. برای رفع این محدودیت، توسعه‌ی مدل‌های آتی می‌تواند با در نظر گرفتن پارامترهای میکروسکوپی و مکانیزم‌های انتقال حرارت چندگانه انجام شود.

از نظر کاربرد صنعتی، مدل پیشنهادی می‌تواند در طراحی و بهینه‌سازی سامانه‌های انتقال حرارت مبتنی بر نانوسیالات مایع



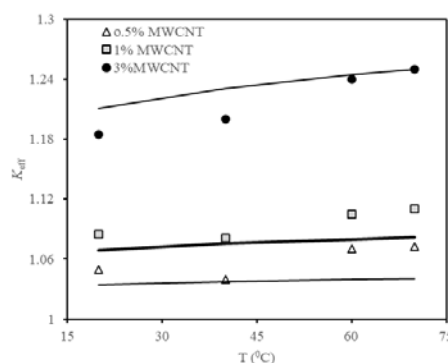
شکل ۸. اثر غلظت در پیش‌بینی تغییرات هدایت گرمایی سیال $[BMIM][NTf_2]$ و نانوذره اکسید آلومینیم در یک دمای ثابت. نقاط مقادیر تجربی و خطوط حاصل از این تحقیق.

دو شکل ۶ و ۷ به ترتیب نتایج مربوط به معادله حاصل برای پیش‌بینی هدایت گرمایی نانوسیال حاوی ۱-اتیل-۳-متیل ایمیدازولیوم اتیل سولفات $([EMIM][EtSO_4])$ و نانولوله کربنی چنددیواره در سه غلظت متفاوت و نتایج مربوط به نانوسیال حاوی تری هگزایل تترادسیل فسفونیوم بیس(تری فلئورو متیل سولفونیل) ایمید $([(C_6)_3PCl_4][NTf_2])$ و نانولوله کربنی چنددیواره در دو غلظت می‌باشد.

با استفاده از داده‌های تجربی و تطبیق آن‌ها در معادله ۳ مقادیر پارامتر تصحیح (α) برای سیستم‌های مورد مطالعه به دست آمد که نتایج آن در جدول ۲ گزارش شده است. مقدار این پارامتر مستقل از دما و غلظت نانو ذره است.

۴- بحث و نتیجه گیری

نتایج این پژوهش نشان داد که مدل کلاسیک هامیلتون-کراسر،



شکل ۹. تغییرات هدایت گرمایی نانوسیال حاوی $[EMIM][EtSO_4]$ و نانولوله کربنی چنددیواره به صورت تابعی از دما. نقاط مقادیر تجربی و خطوط حاصل از این تحقیق.

11. T. C. Paul, A. Tikadar, R. Mahamud, A. S. Salman, A. K. Morshed, J. A. Khan, Processes 9(5), 858 (2021)
12. L. Das, K. Habib, R. Saidur, N. Aslfattahi, S. M. Yahya, F. Rubbi, Nanomater. 10(7), 1372 (2020).
13. J. C. Maxwell, A Treatise on Electricity and Magnetism, (Oxford Clarendon Press.1881)
14. R. L. Hamilton, O. K. Crosser, Ind. Eng. Chem. Fundam., 1, 187 (1962).
15. P. Keblinski, S. R. Phillpot, S. U. S. Choi, J. Eastman, Int. J. Heat Mass Transf. 45(4), 855 (2002).
16. J. Buongiorno, J. Heat Transf. 128, 240 (2006).
17. J. Koo, C. Kleinstreuer, Int. Commun. Heat Mass Transf. 32(9), 1111 (2005).
18. S. P. Jang, S. U. Choi, Appl. Phys. Lett. 84(21), 4316 (2004).
19. C. H. Li, G. P. Peterson, J. Appl. Phys. 99(8), 084314 (2006).
20. X. Q. Wang, A. S. Mujumdar, Int. J. Therm. Sci. 46(1), 1 (2007).
21. N. Kumar, P. Singh, A. Redhewal, P. Bhandari, Procedia Eng. 127, 1197 (2015).
22. N.A. Frankel, A. Acrivos, Chem. Eng. Sci. 22(6), 847 (1967).
23. E. J. Wasp, J. P. Kenny, R. L. Gandhi, Solid-liquid Flow Slurry Pipeline Transportation (Berlin: Trans. Tech 1977).
24. V. Trisaksri, S. Wongwises, Renew. Sust. Energ.11(3), 512 (2007).

یونی، به‌ویژه در محدوده‌ی دمایی متوسط تا بالا، مورد استفاده قرار گیرد. با این حال، پیش از استفاده‌ی عملی، ارزیابی پایداری بلندمدت نانوسیال، اثر فشار و هزینه‌های تولید باید به‌طور هدفمند بررسی شود.

مراجع

1. S. Keskin, D. Kayra, U. Akman, O. Hortacsu, J. Supercrit. Fluids. 43, 150 (2007).
2. W.L. Hough, M. Smiglak, M.D. Rodriguez, H.J. Davis, R.D. Rogers, New J. Chem. 31, 1429 (2007).
3. H. Zhao, S. Xia, P. Ma, J. Chem. Technol. Biotechnol. 80, 1089 (2005).
4. K. Khanafer, K. Vafai, Application of Nanofluids in Heat Transfer Enhancement of Refrigeration Systems. Nanofluids and Their Engineering Applications, (Taylor and Francis group 2019), pp.143-160
5. Y. Li, J. Zhou, S. Tung, E. Schneider, S. Xi, Powder Technol. 196, 89 (2009).
6. M. Pierantozzi, S. Tomassetti, G. D. Nicola, Appi. Sic. 13(1), 260 (2022).
7. A. A. Minea, S. M. Sohel Murshed, Renew. Sust. Energ. 91, 584 (2018).
8. S.S. Lingala, ChemPhysChem. 24(22) 191 (2023).
9. M. Hothar, Z. Wu, B. Sundén, Heat Transf. Eng. 43(21), 1806 (2022).
10. C.A. Nieto de Castro, M.J.V. Lourenço, A.P.C. Ribeiro, E. Langa, S.I.C. Vieira, P. Goodrich, C. Hardacre, J. Chem. Eng. Data, 55, 653 (2010).

25. F. Wang, L. Han, Z. Zhang, X. Fang, J. Shi, W. Ma, *Nanoscale Res. Lett.* 7(1), 314 (2012).
26. J. Liu, F. Wang, L. Zhang, X. Fang, Z. Zhang, *J. Renew. Energy* 63, 519 (2014).
27. W. Chen, C. zou, X. Li, *Sol Energy Mat. Sol. Cells.* 163, 157 (2017).
28. S. S. Prasad, R. D. Selvakumar, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 577 012006 (IOP Publishing, 2019).
29. J. M. França, C. A. Nieto de Castro, M. M. Lopes, V. M. Nunes, *J. Chem. Eng. Data*, 54(9), 2569 (2009).
30. A.G.M. Ferreira, A. G. M., P. N. Simões, A. F. Ferreira, M. A. Fonseca, M. S. A. Oliveira, A. S. M. Trino, *J. Chem. Thermodyn.* 64, 80 (2013).
31. T. Kim, M. A. Osman, C. D. Richards, D. F. Bahr, R. F Richard, *Phys. Rev. B* 76(15), 155424 (2007).
32. M. Zhang, S. Fang, A. A. Zakhidov, S. B. Lee, A. E. Aliev, C. D. Williams, K. R. Atkinson, R. H. Baughman, *Science* 309, 1215 (2005).
33. A. E. Aliev, M. H. Lima, E. M. Silverman, R. H. Baughman, *Nanotechnol.* 21(3), 035709 (2010).
34. T. C. Paul, A. M. Morshed, J. A. Khan, *Procedia Eng.* 56, 631(2013).
35. A. Kakavandi, M. Akbari, *Int. J. Heat Mass Transf.* 124, 742 (2018).
36. S. Ghosh, W. Bao, D. L. Nika, S. Subrina, E. P. Pokatilov, C. N. Lau, A. A. Balandin, *Nat. Mater.* 9 555 (2010).



Prediction of the thermal conductivity of ionic liquid-based nanofluids using a modified Hamilton–Crosser model

Maryam Bahadori*, Fatemeh Afshar

Department of chemistry, Marv.C., Islamic Azad University, Marvdasht, Iran.

Abstract: Experimental data have demonstrated that in ionic liquid-based nanofluids, the thermal conductivity is typically enhanced in the range of 5% to 55% compared with that of the pure ionic liquid. In the present study, some nanofluids containing ionic liquids as base fluids were selected to investigate their thermal conductivity. It was shown that the classical Hamilton-Crosser model, which has often been employed to predict thermal conductivity in conventional suspensions, fails to provide accurate predictions for these particular systems. To reduce this limitation, modifications were introduced to the Hamilton-Crosser equation. The most important parameters involved in this corrective term are the thermal conductivity of the nanoparticles, temperature, and an empirical correction factor. This correction factor is experimentally determined and its value depends strongly on the type of ionic liquid as well as the type of nanoparticles. With these modifications, the accuracy of the predicted data was significantly improved. The refined model enables reliable prediction of the thermal conductivity of ionic liquid-based nanofluids over a wide range of temperatures and concentrations.

Keywords: Nanofluid, Ionic liquid, Thermal conductivity, Hamilton-Crosser model.