

مروری بر روش‌های تجربی مورد استفاده در محاسبه هدایت حرارتی نانوسیالات در دهه اخیر

قنبرعلی شیخ زاده^۱، علی مرزبان^۲

۱ دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان

۲ دانشجوی دکتری مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، marzban.eng@gmail.com

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۶/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۱۰/۰۴

چکیده

افزایش نرخ انتقال حرارت و کارایی حرارتی از مسائل مهم سالیان اخیر است. یکی از روش‌های غیرفعال افزایش انتقال حرارت، استفاده از نانوسیالات است. تعیین هدایت حرارتی نانوسیالات و میزان افزایش نرخ انتقال حرارت با استفاده از نانوسیالات، یکی از مباحث چالش‌برانگیز در استفاده از نانوسیالات است. در این مقاله، به بررسی روش‌های تجربی مورد استفاده در تعیین هدایت حرارتی نانوسیالات در دهه اخیر پرداخته شده است. به طور کلی، روش‌های تجربی را می‌توان به دو دسته روش‌های نوری و غیرنوری دسته‌بندی کرد. برای روش‌های نوری ۷ روش و برای روش‌های غیرنوری ۱۴ روش گزارش شده است. روش‌های نوری، روش‌هایی غیرتهاجمی‌اند و نسبت به روش‌های غیرنوری قدمت کمتر و دقت بالاتری دارند. روش‌های غیرنوری امکانات آزمایشگاهی ساده‌تری دارند و نسبت به روش‌های نوری پرکاربردترند. در میان تمامی روش‌ها، روش سیم داغ گذرا ساده‌ترین و پرکاربردترین روش است.

واژگان کلیدی

انتقال حرارت، هدایت حرارتی، نانوسیال، روش تجربی، روش‌های نوری و غیرنوری

۱. مقدمه

نانو به یک سیال پایه معمولی است که به محلول به دست آمده نانوسیال اطلاق می‌شود. میزان افزایش و تغییر در خواص حرارتی نانوسیالات جای بحث بسیار زیادی دارد. چون برای تعیین راندمان و عملکرد حرارتی، تعیین خواص نانوسیال و به صورت ویژه تعیین ضریب هدایت حرارتی نانوسیال از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، لذا تعیین روش‌ها و مدل‌های محاسبه ضریب هدایت حرارتی بسیار حائز اهمیت است. مدل‌های تئوری موجود، نواقصی دارند و به علت عدم قطعیت مدل‌های تئوری موجود، اهمیت تعیین هدایت

در سالیان اخیر توجه به مسئله بهبود انتقال حرارت در علوم مهندسی و صنعت با سرعت فزاینده‌ای در حال رشد است، به طوری که هم‌اکنون به بخش بسیار مهمی از تحقیقات تجربی و نظری مبدل شده است. یکی از راه‌های افزایش انتقال حرارت، افزایش ضریب هدایت حرارتی مؤثر یا ضریب جابه‌جایی اجباری سیال است. یکی از روش‌های دستیابی به سیال با ضریب هدایت حرارتی بالا، افزودن ذرات فلزی یا غیرفلزی با خواص حرارتی بالا نظیر TiO_2 و SiO_2 ، Cu ، CuO ، Al_2O_3 در ابعاد

حرارتی نانوسیالات به روش تجربی بسیار نمود پیدا می‌کند. تعیین ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات به صورت تجربی کاری بسیار چالش برانگیز است. در طول آزمایشات باید روند آزمایش به شدت تحت کنترل باشد تا از ایجاد انتقال حرارت جابه‌جایی جلوگیری شود. در طول این سال‌ها، تکنیک‌های مختلفی برای اندازه‌گیری هدایت حرارتی مایعات ارائه شده است. تحقیقاتی در مورد بررسی انواع این روش‌ها و دسته‌بندی آنها انجام شده است. پاول و همکاران (۲۰۱۰) انواع روش‌های اندازه‌گیری هدایت حرارتی نانوسیالات را مورد بررسی قرار دادند [۱]. آنها روش‌های اندازه‌گیری هدایت حرارتی نانوسیالات را به سه دسته روش‌های گذرا، پایا و مقایسه‌ای دسته‌بندی کردند. وانگ و موحومدار نیز به بررسی خصوصیات و کاربردهای نانوسیالات پرداختند [۲-۳]. آنها برای اندازه‌گیری هدایت نانوسیالات سه روش سیم داغ گذرا، روش صفحات موازی حالت پایدار^۲ و روش نوسان درجه حرارت^۳ را بیان کردند و به مطالعه کارهای انجام‌شده با استفاده از این روش‌ها پرداختند. این پژوهشگران بیان کردند که روش سیم داغ گذرا گسترده‌ترین روش مورد استفاده است. اوزرینک (۲۰۱۰) به بررسی انواع روش‌های اندازه‌گیری هدایت حرارتی نانوسیالات پرداختند [۴]. برای اندازه‌گیری هدایت حرارتی، روش‌های سیم داغ گذرا، روش صفحات موازی حالت پایدار، روش نوسان درجه حرارت، روش میکرو نوار داغ^۴ و روش بازتاب پرتو نوری^۵ را بیان نمودند. فان و وانگ (۲۰۱۱) به مطالعه مروری کارهای انجام‌شده در مورد انتقال حرارت نانوسیالات پرداختند [۵]. آنها روش‌های سیم داغ گذرا، روش صفحات موازی حالت پایدار، روش نوسان درجه حرارت و روش مقایسه‌ای حرارتی^۶ را برای محاسبه هدایت حرارتی نانوسیالات بیان کردند. آنگابارکانی و فیلیپ (۲۰۱۵) مطالعه‌ای مروری درباره کارهای تجربی و تئوری انجام‌شده روی خواص نانوسیالات انجام دادند [۶]. آنها برای محاسبه هدایت حرارتی نانوسیالات به صورت تجربی چهار روش سیم داغ گذرا، روش تجزیه و تحلیل ثابت حرارتی^۷، روش صفحات موازی حالت پایدار و روش 3-ω را گزارش کردند. مارشد و همکاران (۲۰۰۸) مطالعه‌ای مروری درباره کارهای انجام‌شده روی خواص الکتریکی و ترموفیزیکی نانوسیالات انجام دادند [۷]. آنها برای اندازه‌گیری هدایت حرارتی نانوسیالات روش‌های سیم داغ گذرا، روش حالت پایدار، روش نوسان درجه حرارت و روش سیم 3-ω را بیان نمودند. به طور کلی می‌توان روش‌های تجربی را به دو دسته

روش‌های نوری و غیرنوری دسته‌بندی کرد. در این مقاله به بررسی مروری روش‌های تجربی غیرنوری و نوری مورد استفاده در دهه اخیر پرداخته شده است.

۲. روش‌های غیرنوری

روش‌های غیر نوری دارای قدمت بیشتری هستند و نسبت به روش‌های نوری از کاربرد بیشتری برخوردارند. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش‌های سیم داغ گذرا، روش سیم داغ گذرا کوتاه^۸، روش سیم داغ دوگانه گذرا^۹، روش نوسان دمایی، روش صفحه موازی حالت پایدار، روش 3-ω، روش مقایسه حرارتی، روش سلول استوانه‌ای حالت پایدار^{۱۰}، روش دسیک داغ گذرا^{۱۱}، روش هیلتون^{۱۲}، روش نوار برش حالت پایدار^{۱۳}، روش اندازه‌گیری همرفتی^{۱۴}، روش میکرو نوار داغ و روش دستگاه فاصله حلقه‌ای^{۱۵} اشاره کرد.

۲-۱. روش سیم داغ گذرا

روش سیم داغ گذرا [۸-۱۳] به دلیل بهره‌برداری آسان و سریع و دقت بالا، پرکاربردترین روش مورد استفاده در اندازه‌گیری ضریب هدایت حرارتی نانوسیالات است. این روش نسبت به دیگر تکنیک‌ها بسیار سریع و در مقایسه با تجهیزات مورد نیاز در روش‌های دیگر ساده است. این روش ابتدا در سال ۱۹۳۱ م، توسط استالین برای اندازه‌گیری هدایت حرارتی پودرها و در سال ۱۹۷۸ م، توسط کستین و ویکهام برای اندازه‌گیری هدایت حرارتی سیالات استفاده شد [۲]. روش سیم داغ گذرا به طور گسترده برای اندازه‌گیری هدایت حرارتی مایعات به صورت استاتیک و با منبع خطی استفاده می‌شود. یک سیم فلزی نازک از جنس پلاتین درون مایع قرار می‌گیرد، که هم به عنوان یک منبع گرما و هم به عنوان دماسنج عمل می‌کند [۱۴]. این امر ممکن است به دلیل رابطه نسبتاً منحصر به فرد بین دما و ویژگی‌های حرارتی پلاتین باشد. هدایت حرارتی نمونه آزمون را می‌توان از تغییر درجه حرارت سیم داغ در یک بازه زمانی خاص به دست آورد [۱۵]. معادلات حاکم روش مذکور و روابط مربوط به محاسبه هدایت حرارتی به طور کامل در مرجع [۱۴] آورده شده است. ماریانو و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از این روش بررسی هدایت حرارتی نانوسیالات غیرنیوتنی SnO₂ در اتیلن گلیکول پرداختند. آنها گزارش کردند که هدایت حرارتی نانوسیالات با افزایش کسر وزنی نانوذرات تا ۱۴

درصد نسبت به سیال پایه افزایش می‌یابد. پانگ و همکاران (۲۰۱۲) به بررسی نانوسیال بر پایه متانول با نانوذرات اکسید آلومینیم و SiO_2 با استفاده از روش سیم داغ گذرا پرداختند [۱۷]. آنها به دست آوردند که با افزایش کسر حجمی هدایت حرارتی نانوسیالات افزایش می‌یابد. ژینگ و وانگ (۲۰۱۵) میزان افزایش انتقال حرارت سه نمونه مختلف از نانولوله‌های کربنی شامل نانولوله‌های کربنی تک‌جداره کوتاه، نانولوله‌های کربنی تک‌جداره بلند و نانولوله‌های کربنی چندجداره اضافه شده به آب را در دماها و کسر حجمی‌های مختلف با استفاده از روش سیم داغ گذرا مورد بررسی قرار دادند [۱۸]. آنها به دست آوردند که هدایت حرارتی نانوسیالات با نانولوله‌های کربنی نسبت به سیال پایه افزایش داشتند و این افزایش با افزایش کسر حجمی و افزایش دما افزایش می‌یابد. اسفه و همکاران (۲۰۱۵) به بررسی اثر کسر حجمی نانوذرات بر هدایت حرارتی و ویسکوزیته دینامیکی نانوسیال هیبریدی نقره - اکسید منیزیم در آب پرداخته و رابطه جدیدی ارائه کردند [۱۹]. دوانگ تانگ ساک و ونگ وایسس (۲۰۱۰) به مقایسه تفاوت‌های بین خواص ترموفیزیکی اندازه‌گیری و محاسبه شده برای توصیف عملکرد انتقال حرارت نانوسیال TiO_2 - آب پرداختند [۲۰]. وی و همکاران (۲۰۰۹) به بررسی ترکیبات شیمیایی و انتقال حرارت آب اکسید مس پرداختند [۲۱]. آنها برای محاسبه هدایت حرارتی از روش سیم داغ گذرا استفاده نمودند و افزایش ۲۵ درصد در انتقال حرارت را به دست آوردند.

۲-۲. روش سیم داغ گذرا کوتاه

برای اندازه‌گیری هدایت حرارتی مایعات بسیار خورنده مانند کربنات‌های مذاب، حفظ نمونه مذاب در چنین منطقه‌ای در مدت طولانی در یک حالت همگن اولیه و در دمای بحرانی برای به دست آوردن نتایج مناسب کار بسیار دشواری است. این نقطه ضعف روش سیم داغ گذرا را می‌توان با استفاده از یک پراب کوتاه (با ارتفاع ۱۰ میلی‌متر) برای اندازه‌گیری هدایت حرارتی نانوسیال با استفاده از یک سلول نمونه کوچکتر حل کرد. این روش را روش سیم داغ کوتاه گذرا می‌نامند [۲۲-۲۵]. روش سیم داغ گذرا کوتاه توسعه داده شده روش سیم داغ گذرای معمولی است. معادلات حاکم روش مذکور و روابط مربوط به محاسبه هدایت حرارتی به‌طور کامل در مرجع [۲۶] آورده شده است. ژانگ و همکاران (۲۰۰۷) هدایت حرارتی مؤثر و ضریب انتشار حرارتی نانوسیالات

طلا تولوئن، آب آلومینا، آب - TiO_2 ، آب مس و آب CNT را با استفاده از روش سیم داغ کوتاه گذرا اندازه‌گیری کردند [۲۶]. نتایج آنها نشان داد که هدایت حرارتی مؤثر و ضریب انتشار حرارتی نانوسیالات با افزایش غلظت ذرات، افزایش هدایت حرارتی ذرات و افزایش نسبت طول به قطر CNFs افزایش می‌یابد. ژانگ و همکاران (۲۰۰۶) انتقال حرارت و ضریب انتشار حرارتی نانوسیال اکسید آلومینیم در آب را برای کسر جرمی‌های مختلف با استفاده از روش سیم داغ کوتاه محاسبه کردند [۲۷]. آنها بیان کردند که هدایت حرارتی و ضریب انتشار حرارتی نانوسیالات با افزایش غلظت ذرات و درجه حرارت افزایش می‌یابد.

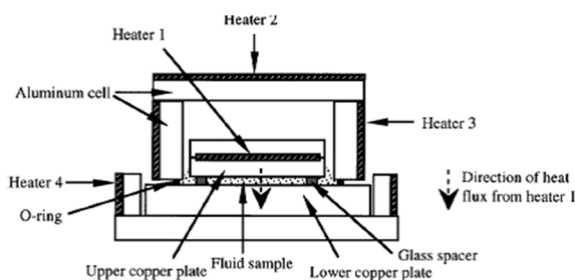
۲-۳. روش سیم داغ دوگانه گذرا

سیدهارت بابو و همکاران (۲۰۱۳) به جای یک سیم، از دو سیم نازک با جنس پلاتین اما متفاوت در اندازه، استفاده نمودند. طول یک سیم ۱۰۰ میلی‌متر و طول سیم کوتاه‌تر ۵۰ میلی‌متر انتخاب شد. آنها دریافتند که فرض ثابت بودن حرارت تولید شده در سیم، در دماهای خیلی پایین به دلیل تغییرات گسترده، صحیح نمی‌باشد. همچنین مشاهده کردند که با کاهش طول سیم، اثر انتقال حرارت گذرا و پایا با هم ترکیب شده و این باعث افزایش خطای اندازه‌گیری می‌شود. در حالی که نتایج سیم بزرگتر شباهت بیشتری به نتایج حالتی دارد که از هر دو سیم استفاده می‌شود. اما طول زیاد سیم سبب افزایش نوفه شده و اندازه‌گیری را سخت‌تر می‌کند، لذا آنها استفاده همزمان از دو سیم را پیشنهاد دادند و مدل سیم دوگانه داغ گذرا را ارائه نمودند. نتایج آنها نشان می‌دهد که استفاده همزمان از هر دو سیم کوتاه و بلند در اندازه‌گیری، باعث کاهش خطا و انطباق بیشتر نتایج با مقادیر هدایت حرارتی مراجع می‌شود [۲۹]. معادلات حاکم روش مذکور و روابط مربوط به محاسبه هدایت حرارتی به‌طور کامل در مرجع [۲۸] آورده شده است. آسائل و همکاران (۲۰۰۸) از همین روش برای افزایش دقت اندازه‌گیری استفاده نمودند. همان‌طور که انتظار می‌رفت، عدم اطمینان اندازه‌گیری هدایت حرارتی، کمتر از ۱ درصد بود [۲۹].

۲-۴. روش نوسان دمایی

سادگی روش نوسان درجه حرارت استفاده از آن را جذاب‌تر می‌کند. در این روش نوسان درجه حرارت از دو انتهای یک حجم مایع استوانه‌ای ارسال می‌شود. دامنه و نوسانات درجه حرارت در

ورق مس پایینی مورد استفاده قرار می‌گیرد. هیتر ۲ و ۳ برای از بین بردن همرفت و تابش صفحه مسی بالایی استفاده می‌شود تا درجه حرارت سلول آلومینیمی از صفحه مسی بالا بیشتر گردد. بنابراین، قدرت ورودی به همه هیترها باید به دقت تنظیم شود [۳۴]. معادلات حاکم روش مذکور و روابط مربوط به محاسبه هدایت حرارتی به‌طور کامل در مرجع [۳۴] آورده شده است.



شکل ۱. شماتیک دستگاه روش صفحه موازی [۳۴]

سینها و همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از روش صفحه موازی حالت پایدار به بررسی خواص ترموفیزیکی نانوسیالات مس و آهن در اتیلن گلیکول پرداختند [۳۵]. در نتیجه، در کسر حجمی‌های یکسان هدایت حرارتی نانوسیالات حاوی مس از نانوسیالات حاوی آهن بالاتر است. شالکوپیچ و همکاران (۲۰۰۹) با استفاده از روش صفحه موازی حالت پایدار به بررسی تأثیر اندازه نانوذرات، روش‌های پایداری و کسر حجمی بر هدایت حرارتی نانوذرات طلا در آب پرداختند [۳۶].

۲-۶. روش 3- ω

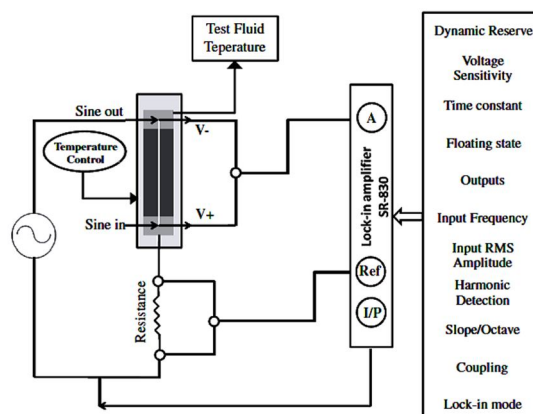
مشابه روش سیم داغ، روش 3- ω با استفاده از یک جریان شعاعی گرما در یک المنت که در عمل هم به‌عنوان هیتر و هم به‌عنوان دماسنج استفاده می‌شود، عمل می‌کند [۳۷-۴۰]. استفاده از نوسانات دما به‌جای پاسخ وابسته به زمان، تفاوت عمده این روش نسبت به سیم داغ گذرا است. مطابق شکل ۲ جریان سینوسی با فرکانس ω از طریق سیم فلزی عبور می‌کند و تولید موج گرما با فرکانس 2ω می‌کند که توسط جزء ولتاژ به فرکانس 3ω تبدیل می‌شود. حجم سیال مورد نیاز برای محاسبه خواص در حالت پایدار در روش 3- ω ، در حدود میکرولیتر است که در مقایسه با سایر روش‌ها مانند سیم داغ گذرا بسیار کمتر است که این خاصیت بیشتر برای مایعات گران‌قیمت مانند نانو سیال، مایعات بیولوژیک، و غیره مفید است [۱]. معادلات حاکم روش مذکور و روابط مربوط

نقاط مختلف در داخل مایع اندازه‌گیری می‌شود و هدایت حرارتی مایع از محاسبه مقادیر به‌دست آمده اندازه‌گیری می‌شود. این روش برای اولین بار توسط آنگستروم در سال ۱۸۶۳ م پیشنهاد شد. با این حال، این روش نخستین بار برای اندازه‌گیری هدایت حرارتی مایعات در سال ۱۹۸۶ م توسط سانتوچی استفاده شد و سپس توسط روتزل و همکاران در سال ۱۹۹۰ م و بیشتر توسط زارنتسکی و روتزل در سال ۱۹۹۵ م توسعه یافت [۲]. معادلات حاکم روش مذکور و روابط مربوط به محاسبه هدایت حرارتی به‌طور کامل در مرجع [۳۰] آورده شده است. هریشیکش و همکاران (۲۰۰۹) هدایت حرارتی دو اکسید آلومینیم و اکسید مس محلول در آب، اتیلن گلیکول و روغن ترانسفورماتور را با استفاده از روش نوسان دمایی اندازه‌گیری کردند و هدایت حرارتی همه نانوسیالات را با سیال پایه مربوطه مقایسه کردند [۳]. نتایج آنها نشان داد که میزان افزایش هدایت حرارتی محلول نسبت به سیال پایه، از ۹/۵ درصد در ۲۰ درجه تا ۱۱ درصد در ۵۰ درجه تغییر می‌کند. نتایج به‌دست آمده برای نانوسیالات اکسید آلومینیم با نانوسیالات اکسید مس نیز تأیید شد. در آزمایشات آنها نانوسیالات مس اتیلن گلیکول و مس روغن ترانسفورماتور روندی مشابه نشان دادند.

۲-۵. روش صفحه موازی حالت پایدار

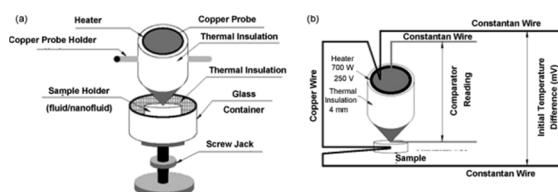
براساس طراحی حالت پایدار انتقال حرارت می‌توان برای اندازه‌گیری هدایت حرارتی مایعات از روش صفحه موازی حالت پایدار استفاده کرد [۳۲]. به‌منظور تسهیل در انتقال حرارت در یک جهت عمدتاً صفحات موازی یا استوانه‌های متحدالمرکز ترجیح داده می‌شوند. دستگاه روش صفحه موازی حالت پایدار ابتدا توسط کالونر و پاول ارائه شد [۳۳]. نمونه بین دو دور صفحه بشقاب مسی موازی قرار گرفته و سطح مایع کمی بالاتر از سطح پایین صفحه مسی بالاست. صفحه مس بالایی در مرکز قرار گرفته است و از دیوار داخلی سلول آلومینیم جدا شده است. سوراخی در صفحات مسی و سلول آلومینیمی ایجاد می‌شود و ترموکوپل نوع E (نیکل کروم / مس نیکل) درون این سوراخ‌ها قرار داده می‌شود تا دماها اندازه‌گیری شوند. در مجموع از ۱۴ ترموکوپل استفاده می‌شود. در طول آزمایش مطابق شکل ۱، هیتر ۱ گرمای لازم را که قرار است از صفحه مسی بالایی به صفحه مسی پایینی انتقال یابد، فراهم می‌کند. هیتر ۴، جهت حفظ یکنواختی درجه حرارت در

به محاسبه هدایت حرارتی به طور کامل در مرجع [۱] آورده شده است.



شکل ۲. شماتیک دستگاه روش 3ω [۴۰]

اندازه‌گیری شود نیاز دارد. شماتیک دستگاه در شکل ۳ نشان داده شده است. دستگاه توسعه‌یافته متشکل از یک پراب از فلز مس، یک کویل گرمایشی کنترل دما، یک میکروولت‌متر جریان مستقیم و تثبیت‌کننده ولتاژ است. معادلات حاکم روش مذکور و روابط مربوط به محاسبه هدایت حرارتی به طور کامل در مرجع [۱] آورده شده است. کاپکار و همکاران (۲۰۰۸) با استفاده از دستگاه مقایسه‌ی حرارتی به بررسی تأثیر اندازه و کسر حجمی نانوذرات Ag_2Al و Al_2Cu بر انتقال حرارت نانوسیال بر اساس آب و اتیلن گلیکول پرداختند [۴۹]. آنها دریافتند که هدایت حرارت نانوسیال حاوی Ag_2Al کمی بالاتر از نانوسیال حاوی Al_2Cu است.



شکل ۳. شماتیک دستگاه روش مقایسه‌ی حرارتی [۱]

۲-۸. روش سلول استوانه‌ای حالت پایدار

روش سلول استوانه‌ای [۵۰-۵۱] از جمله شایع‌ترین روش‌های حالت پایدار مورد استفاده برای اندازه‌گیری هدایت حرارتی مایعات است. در این روش نانوسیالی که قرار است هدایت حرارتی آن اندازه‌گیری شود فضای حلقوی بین دو سیلندر متحدالمرکز را پر می‌کند. دستگاه شامل دو استوانه‌ی هم‌محور است (شکل ۴) که استوانه‌ی داخلی مسی و سیلندر بیرونی از جنس گالوانیزه و یک هیتر برقی در داخل سیلندر درونی قرار داده شده است. دو ترموکوپل کالیبره برای اندازه‌گیری درجه حرارت سطح خارجی لوله شیشه‌ای و داخلی سیلندر استفاده می‌شود. معادلات حاکم روش مذکور و روابط مربوط به محاسبه‌ی هدایت حرارتی به طور کامل در مرجع [۱] آورده شده است.

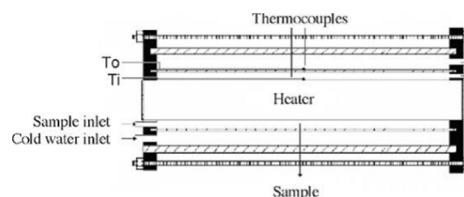
امراهی و همکاران (۲۰۰۸) با استفاده از روش سلول استوانه‌ای به اندازه‌گیری آثار دما، کسر حجمی بر میزان هدایت حرارتی و حرارت ویژه نانوسیالات کربنی پرداختند [۵۲]. نتایج آنها نشان داد که آثار دما با افزایش کسر حجمی مشهودتر می‌شود. باریس و همکاران (۲۰۱۲) هدایت حرارتی و گرمای ویژه نانوسیال اکسید آلومینیم در آب و اتیلن گلیکول را در کسر حجمی‌های و دماهای مورد مطالعه قرار دادند [۵۳]. نتایج آنها نشان داد که هدایت حرارتی با افزایش دما و کسر حجمی افزایش می‌یابد.

کارتیک و همکاران (۲۰۱۲) هدایت حرارتی نانوسیال آب خالص - اکسید مس را در کسر حجمی‌های مختلف در دماهای مختلف با استفاده از روش 3ω اندازه‌گیری کردند [۴۱]. آنها افزایش هدایت حرارتی نسبت به مایع پایه را با افزایش دما و کسر حجمی مشاهده کردند. تاومن و تارگات (۲۰۱۰) هدایت حرارتی نانوسیالات آب اکسید آلومینیوم، آب TiO_2 و آب SiO_2 در کسر حجمی‌های مختلف و دماهای مختلف را به روش 3ω مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که هدایت حرارتی نانوسیالات با افزایش کسر حجمی نانوذرات افزایش می‌یابد. تارگات و همکاران (۲۰۰۹) هدایت حرارتی نانوسیال TiO_2 در آب خالص را تا کسر حجمی ۳ درصد در دماهای مختلف با استفاده از روش 3ω مورد مطالعه قرار دادند [۴۳]. نتایج آنها نشان داد که هدایت حرارتی نانوسیالات با افزایش کسر حجمی افزایش می‌یابد. وانگ و همکاران (۲۰۰۷) هدایت حرارتی نانوسیال آب TiO_2 و نانوسیال حاوی نانوذرات SiO_2 را در سیال‌های پایه مختلف (آب، اتانول و اتیلن گلیکول) با استفاده از روش 3ω مورد مطالعه قرار دادند [۴۴]. نتایج آنها نشان داد که دما و سیال پایه نقش مهمی بر میزان هدایت حرارتی نانوسیالات ایفا می‌کنند.

۲-۷. روش مقایسه‌ی حرارتی

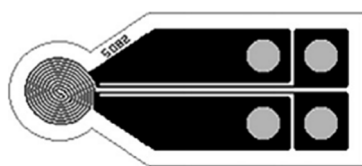
پاول (۱۹۵۷) روشی منحصر به فرد برای اندازه‌گیری توصیف هدایت حرارتی ارائه داد [۴۵]. این روش غیرمستقیم براساس اصل مقایسه حرارتی بود [۴۶-۴۸]. پراب مورد استفاده در این روش تنها به یک نقطه تماس با نمونه‌ای که قرار است هدایت آن

کلوری و همکاران (۲۰۰۸) رسانایی حرارتی محلول نانولوله‌های کربنی چندجداره در آب را به‌عنوان تابعی از دما، کسر وزنی نانولوله و طول نانولوله اندازه‌گیری کردند [۵۴]. آنها نشان دادند که طول متوسط نانولوله‌ها پارامتری بسیار حساس است.



شکل ۴. شماتیک دستگاه روش سلول استوانه‌ای هم‌محور [۱]

به سیال پایه یافتند. ژو و همکاران (۲۰۰۹) به بررسی رفتارهای پراکندگی و هدایت حرارتی نانوسیال آب اکسید آلومینیم توسط تجزیه و تحلیل دیسک داغ ثابت پرداختند [۵۹]. آنها دریافتند که هدایت حرارتی نانوسیال به‌طرز محسوسی بالاتر از سیال پایه است. جیانگ و همکاران (۲۰۰۹) انتقال حرارت نانومبرد CNT و تأثیر قطر CNT و نسبت ابعاد CNT بر هدایت حرارتی نانومبرد CNT در سیال مبرد پایه R113 را با روش صفحه داغ بررسی کردند [۶۰]. آزمایش آنها نشان داد که رسانایی حرارتی نانومبرد CNT به‌طور قابل توجهی با افزایش کسر حجمی CNT افزایش می‌یابد. وانگ و همکاران (۲۰۱۲) نانوسیالات گرافن بسیار پایدار (GE) با مایع یونی به‌عنوان سیال پایه بدون هیچ‌گونه سورفکتانتی را ارائه و هدایت حرارتی نانوسیالات را مورد بررسی قرار دادند [۶۱]. آنها نشان دادند که نانوسیالات یونی مقدار هدایت حرارتی به‌طور قابل توجهی بالاتر نسبت به مایعات پایه خود دارند. هو و همکاران (۲۰۰۸) توسط روش دیسک گرم هدایت حرارتی نانوسیال اتانول - AIN را در کسر حجمی و دمای مختلف اندازه‌گیری کردند [۶۲]. نتایج آنها نشان از وابستگی شدید هدایت حرارتی به درجه حرارت دارد. رایت و همکاران (۲۰۰۷) به بررسی آثار میدان مغناطیسی بر میزان هدایت حرارتی نانوسیالات حاوی نیکل با پوشش نانولوله‌های کربنی تک‌جداره با استفاده از روش دیسک داغ پرداخته و دریافتند که نگهداری طولانی نانوسیال تحت میدان مغناطیسی، باعث شده تا نانوذرات حرکت کرده و به شکل توده‌های بزرگتر نانولوله درآمده و در نتیجه هدایت حرارتی کاهش می‌یابد.



شکل ۵. شماتیک سنسور صفحه داغ گذرا [۵۷]

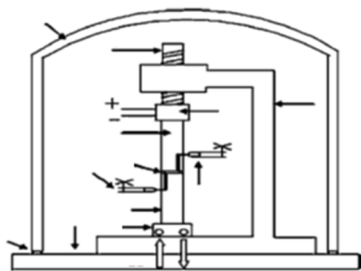
۲-۱۰. روش هیلتون

دستگاه ارائه‌شده توسط هیلتون (شکل ۶) در سال ۲۰۰۵ م، برای اندازه‌گیری حالت پایدار هدایت حرارتی مایعات و گازها ساخته شده است. دستگاه شامل منبع تغذیه DC، سیستم اکتساب داده‌ها، میله‌های ترموکوپل، یک واحد کنترل با دکمه روشن خاموش، شاخص دما، ولت‌متر، آمپر متر و جز این‌ها می‌باشد. همچنین شامل

۲-۹. روش دیسک داغ گذرا

روش دیسک داغ گذرا [۵۵-۵۶] نسخه اصلاح‌شده از روش سیم داغ گذرا برای اندازه‌گیری انتقال حرارت است. در روش سیم داغ گذرا نیاز به یک سنسور سوزن‌مانند است که نمی‌تواند در یک نمونه جامد بدون تغییر شکل نمونه قرار بگیرد. همچنین نمی‌تواند در اندازه‌گیری هدایت حرارتی لایه‌های نازک مورد استفاده قرار گیرد. در این موارد، سنسور صفحه‌ای شکل با ضخامت میکرومتر بسیار کمک می‌کند. واحد دیسک داغ گذرا با استفاده از ضریب مقاومت دمایی سنسور نیکل کار می‌کند. در این روش، عنصر دیسک داغ گذرا هم به‌عنوان سنسور درجه حرارت و هم به‌عنوان منبع حرارتی رفتار می‌کند. مزایای استفاده از این روش عبارت‌اند از اندازه‌گیری سریع نمونه، داشتن امکان اندازه‌گیری طیف گسترده‌ای از هدایت حرارتی (۰/۰۲ تا ۲۰۰، با عدم قطعیت ۲ درصد)، عدم نیاز به هیچ‌گونه آماده‌سازی نمونه و انعطاف‌پذیری حجم نمونه. هدایت حرارتی نانوسیال با اندازه‌گیری مقاومت پراب تعیین می‌شود. در شکل ۵ سنسور صفحه داغ گذرا نشان داده شده است. معادلات حاکم روش مذکور و روابط مربوط به محاسبه هدایت حرارتی به‌طور کامل در مرجع [۵۷] آورده شده است. وان و همکاران (۲۰۱۲) رسانایی حرارتی نانوسیال پلی‌آنیلین نانوالیاف در آب خالص را در طیف گسترده‌ای از درجه حرارت به روش منبع صفحه داغ گذرا اندازه‌گیری کردند [۵۷]. آنها نشان دادند که عملکرد هدایت حرارتی نانوسیال به‌طور محسوسی افزایش یافته است. بولونومو و همکاران (۲۰۱۴) به اندازه‌گیری هدایت حرارتی نانوسیال مخلوط (آلومینا / آب) با استفاده از دو روش تکنیک فلش و دیسک گرم گذرا پرداختند [۵۸]. آنها بیشترین افزایش در هدایت حرارتی را در کسر حجمی ۴ درصد به میزان ۱۰/۲ درصد نسبت

تشکیل دهند که شامل نگهدارنده عمودی، یک منبع حرارتی الکتریکی، مایع خنک کننده و دو لوله شارژ نمونه است. در مجموع نه ترموکوپل در هر میله مسی قرار می گیرند [۶۷]. معادلات حاکم روش مذکور و روابط مربوط به محاسبه هدایت حرارتی به طور کامل در مرجع [۶۷] آورده شده است.



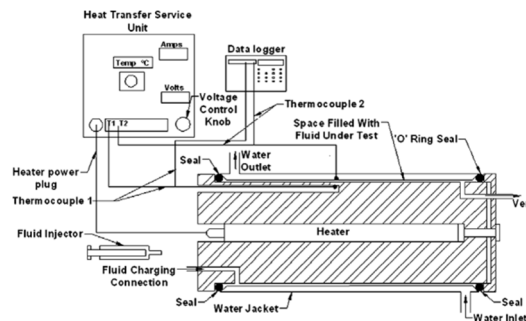
شکل ۷. شماتیک دستگاه روش نوار برش [۶۷]

لی و همکاران (۲۰۰۸) به بررسی هدایت حرارتی نانوسیال اکسید آلومینیم در آب با کسر حجمی های مختلف با استفاده از دو روش سیم داغ گذرا و روش نوار برش پایدار پرداختند [۶۷]. نتایج آنها نشان داد هر دو روش نوار برش حالت پایدار و روش سیم داغ گذرا مقادیر تقریباً یکسانی به دست می آورند. لی و پترسون (۲۰۰۶) با استفاده از روش نوار برش حالت پایدار، انتقال حرارت نانوسیالات حاوی نانوذرات اکسید مس و اکسید آلومینیم مورد بررسی قرار دادند [۶۸]. نتایج آنها نشان داد که جنس نانوذرات، اندازه، کسر حجمی و دمای تست بر افزایش هدایت حرارتی تأثیر دارد. لی و همکاران (۲۰۰۷) با استفاده از روش نوار برش حالت پایدار هدایت حرارتی نانوسیالات آب اکسید آلومینیم را مورد مطالعه قرار دادند [۶۹]. نتایج آنها نشان داد که افزایش هدایت حرارتی هر دو نمونه نانوسیال یک رابطه غیرخطی با اندازه نانوذرات، دما و کسر حجمی دارد.

۲-۱۲. روش اندازه گیری همرفتی

نانوسیالات می تواند به عنوان ماده سردکننده در همرفت اجباری، که در اندازه گیری همرفتی مورد نیاز هستند استفاده شوند تا اطلاعات هدایت حرارتی آنها به دست آید. در واقع، مقدار هدایت حرارتی نانوسیال به طور مستقیم قابل اندازه گیری نیست. در عوض، درجه حرارت دیوار T_w و درجه حرارت بالک به دست آمده و پس از آن ضریب انتقال حرارت جابه جایی محاسبه می شود. چون مقدار ضریب جابه جایی و قطر هیدرولیکی قابل اندازه گیری است، با محاسبه عدد ناسلت به صورت تحلیلی یا عددی، مقدار

یک استوانه آب گرمکن است که اطراف استوانه آلومینیم را فرا گرفته و به عنوان کارتریج حرارت عمل می کند. مایع نمونه درون فاصله شعاعی کوچک بین پلاگین گرم و محفظه آب سرد تزریق می شود. فاصله شعاعی که طراحی شده است بسیار کوچک (در حدود ۰/۳ میلی متر) است؛ به طوری که مانع همرفت طبیعی در لایه مایع شود [۶۴]. معادلات حاکم روش مذکور و روابط مربوط به محاسبه هدایت حرارتی به طور کامل در مرجع [۶۴] آورده شده است.



شکل ۶. شماتیک دستگاه هیلتون [۶۴]

واجها و داس (۲۰۰۹) هدایت حرارتی سه نانوسیال حاوی نانوذرات اکسید آلومینیم، اکسید مس و اکسید روی پراکنده در سیال مخلوط ۶۰:۴۰ (جرم) اتیلن گلیکول و آب را به روش هیلتون مورد مطالعه قرار دادند [۶۴]. نتایج آنها نشان داد هدایت حرارتی نانوسیال با افزایش غلظت حجمی نانوذرات و افزایش دما افزایش می یابد. ساندار و همکاران (۲۰۱۳) هدایت حرارتی نانوسیال نانوذرات CuO و Al_2O_3 در آب و اتیلن گلیکول به عنوان سیال پایه را در کسر حجمی های مختلف و دماهای مختلف با استفاده از روش هیلتون برآورد کردند [۶۵]. نتایج آنها نشان داد که هر دو نانوسیال هدایت حرارتی بالاتری در مقایسه با سیال پایه دارند. هدایت حرارتی هر دو نانوسیال با افزایش درصد کسر حجمی افزایش می یابد. ردی و راثو (۲۰۱۳) هدایت حرارتی نانوسیال TiO_2 مبتنی بر آب، EG/W ۴۰٪:۶۰٪ و EG/W ۵۰٪:۵۰٪ در کسر حجمی و دماهای مختلف با روش هیلتون اندازه گیری کردند [۶۶]. آنها مشاهده کردند که هدایت حرارتی با افزایش کسر حجمی ذرات و دما افزایش می یابد.

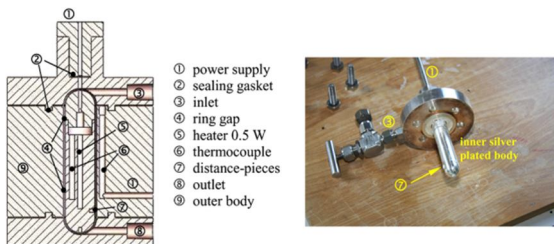
۲-۱۱. روش نوار برش حالت پایدار

روش تجربی نوار برش حالت پایدار، اولین بار توسط میلر و فلچر توصیف شد. دستگاه (شکل ۷) شامل یک جفت میله های مسی است که توسط حلقه ارینگ از هم جدا شده اند تا سلول آزمون را

می‌کند که به حرارت تولید شده توسط جریان الکتریکی و مقدار انرژی انتقال داده شده به مایع و بستر بستگی دارد. به نوبه خود، از اندازه‌گیری مقاومت نوار، می‌توان هدایت حرارتی مایع را بدست آورد [۷۱]. معادلات حاکم روش مذکور و روابط مربوط به محاسبه هدایت حرارتی به‌طور کامل در مرجع [۷۱] آورده شده است. کاسکویلاس و همکاران (۲۰۰۷) به توسعه و بسط روش میکرونوار داغ پرداختند [۷۱]. نتایج آنها نشان داد که افزایش قوی هدایت حرارتی نانوسیال با افزایش غلظت نانولوله اتفاق می‌افتد. جو و همکاران (۲۰۰۸) هدایت حرارتی سوسپانسیون‌های آبی نانوذرات اکسید آلومینیم اندازه‌گیری کردند. اطلاعات آنها هیچ‌گونه افزایش غیرعادی در هدایت حرارتی را نشان نداد [۷۲].

۲-۱۴. روش دستگاه فاصله حلقه‌ای

یکی از روش‌های تعیین هدایت حرارتی، دستگاه شکاف حلقه‌ای است. اطلاعات دقیق روش توسط اهله و همکاران (۲۰۱۱) بیان شده است [۷۳]. این دستگاه دارای حجم اندازه‌گیری هندسی است که با سیال آزمون پر می‌شود. این حجم (شکل ۹) متشکل از یک بخش استوانه‌ای و دو بخش نیم‌کره‌ای در قسمت‌های بالا و پایین است. فاصله بین بدنی درونی و بیرونی ۱ میلی‌متر است. با توجه به اختلاف درجه حرارت اندازه‌گیری شده بین بدنه درونی و بیرونی، هدایت حرارتی سیال آزمون را می‌توان محاسبه کرد. معادلات حاکم روش مذکور و روابط مربوط به محاسبه هدایت حرارتی به‌طور کامل در مرجع [۷۳] آورده شده است.



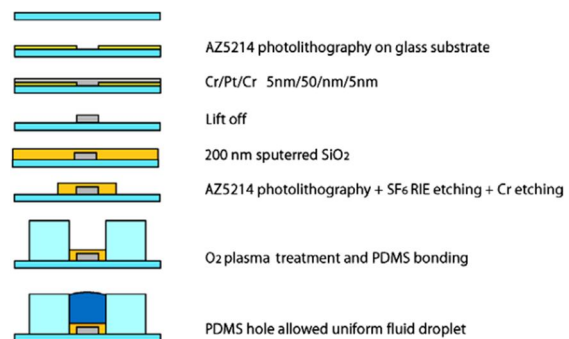
شکل ۹. شماتیک و تصویر دستگاه شکاف حلقه‌ای [۷۴]

اهله و همکاران (۲۰۱۱) هدایت حرارتی نانوسیالات آب اکسید آلومینیم و آب اکسید سیلیسیم در کسر حجمی و دماهای مختلف را با استفاده از روش شکاف حلقه‌ای در مورد بررسی قرار دادند [۷۳]. نتایج آنها هیچ رفتار غیرعادی را در هدایت حرارتی نانوسیال نشان نداد. بوشمن (۲۰۱۲) با روش شکاف حلقه‌ای به بررسی هدایت حرارتی نانوسیال آب اکسید آلومینیم در کسر

هدایت حرارتی نانوسیال محاسبه می‌شود. دقت و صحت روش اندازه‌گیری همرفتی تا حد زیادی به درجه عدم قطعیت مربوط به اندازه‌گیری درجه حرارت دیوار و بالک و همچنین محاسبه عدد ناسلت بستگی دارد. معادلات حاکم روش مذکور و روابط مربوط به محاسبه هدایت حرارتی به‌طور کامل در مرجع [۷۰] آورده شده است. کلاد و همکاران اندازه‌گیری رسانایی حرارتی نانوسیال در یک محیط همرفتی، برای نانوسیال Al_2O_3 در آب ۶ درصد افزایش و برای نانوسیال روغن سیلیکون MWCNT- ۱۰ درصد افزایش به‌دست آوردند.

۲-۱۳. روش میکرونوار داغ

در فرایند ساخت دستگاه میکرو نوار داغ (شکل ۸) ابتدا یک لایه فشرده کروم / PT / کروم با ضخامت ۵ نانومتر، ۵۰ نانومتر و ۵ نانومتر ایجاد می‌شود.



شکل ۸. مراحل آماده‌سازی دستگاه میکرونوار داغ [۷۱]

پس از آن، سطح مقطع نمونه که در تماس الکتریکی قرار می‌گیرد، توسط لیتوگرافی و واکنش یونی بین لایه SiO_2 با پلاسما SF_6 به‌دست می‌آید. لیتوگرافی نرم برای ساخت میکرو مخزن با حجم بسیار کمی از نانوسیال استفاده شده است. یک مخلوط ۱۰ به ۱ عامل بهبود PDMS در یک ظرف پتری با ضخامت سه میلی‌متر به‌منظور پوشش بلوک با PDMS ساخته می‌شود. سپس، یک بلوک PDMS با طول ۲۰ میلی‌متر، ۱۰ میلی‌متر عرض و ضخامت ۳ میلی‌متر بریده می‌شود و یک سوراخ به قطر ۵ میلی‌متر در مرکز آن برای هدایت مایع تعبیه می‌شود. بلوک PDMS با یک سوراخ کوچک جهت کنترل حجم و شکل قطره مایع مورد استفاده قرار می‌گیرد. در نهایت، پلاتین برای نوار فلزی انتخاب شد؛ زیرا وابستگی قوی و شبه‌خطی بین دما و مقاومت مواد دارد. به‌وضوح، مقاومت نوار با درجه حرارت آن تغییر

حجمی ۱ و ۳ درصد و نانوسیال آب اکسید سیلیسیم، آب اکسید تیتانیوم و نانوسیال آب اکسید آلومینیوم در محدوده دمایی مختلف پرداختند [۷۴]. آنها وابستگی خطی بین غلظت ذرات و هدایت حرارتی تمام نانوسیالات یافتند.

۳. روش‌های نوری

در سال‌های اخیر، روش‌های اندازه‌گیری نوری به‌عنوان تکنیک‌های غیرتهاجمی برای اندازه‌گیری هدایت حرارتی، برای بهبود دقت و صحت پیشنهاد شده‌اند. در واقع، چون سیم داغ ترکیبی از هیتر و دماسنج است، تداخل اجتناب‌ناپذیر است. در تکنیک‌های نوری، آشکارساز و هیتر همیشه جدا از یکدیگرند، در نتیجه داده‌ها به‌طور بالقوه دقیق‌تر ارائه می‌شوند. علاوه بر این، اندازه‌گیری‌ها در عرض چند میکروثانیه انجام می‌شود که بسیار کوتاه‌تر از اندازه‌گیری روش سیم داغ است که ۲ تا ۸ ثانیه طول می‌کشد. از روش‌های نوری می‌توان به روش‌های روش نانوفلش^{۱۶}، روش جابجایی پرتو لیزر - سیم داغ^{۱۷}، شبکه نوری گذرا^{۱۸}، روش انحراف پرتو نوری^{۱۹}، روش تمام نوری همگرایی حرارتی^{۲۰}، روش پراکندگی اجباری رایلی^{۲۱}، روش فوتوفلش^{۲۲} اشاره کرد.

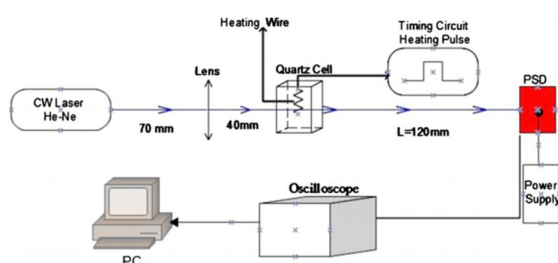
۳-۱. روش نانوفلش

روش فلش ابتدا توسط پارکر توسعه یافت [۷۵]، سپس توسط تاومن با موفقیت برای محاسبه نفوذ حرارتی جامدات استفاده شد [۷۶]. روش فلش برای نخستین بار توسط بلام برای مایعات استفاده شد [۷۷]. در روش نانوفلش پالس انرژی الکترومغناطیسی یک طرف نمونه را گرم می‌کند و دما به‌عنوان تابعی از زمان افزایش می‌یابد [۷۸]. درجه حرارت افزایش‌یافته نمونه در سطح یکسان پستی با استفاده از یک آشکارساز مادون قرمز ارزیابی می‌شود. با محاسبه نفوذ حرارتی و مشخص بودن چگالی و گرمای ویژه نانوسیال، براحتی مقدار هدایت حرارتی به‌دست می‌آید [۷۹]. معادلات حاکم روش مذکور و روابط مربوط به محاسبه هدایت حرارتی به‌طور کامل در مرجع [۷۹] آورده شده است. بواونومو و همکاران (۲۰۱۴) به اندازه‌گیری هدایت حرارتی نانوسیال مخلوط (آلومینا / آب) با استفاده از دو روش تکنیک فلش و دیسک گرم پرداختند [۵۸]. آنها دریافته‌اند که توافق خوبی بین دو روش وجود دارد و هدایت حرارتی با غلظت نانوذرات و درجه حرارت افزایش

می‌یابد. بواونومو و همکاران (۲۰۱۵) از روش نانو فلش، برای محاسبه هدایت حرارتی نانوسیال آب و اکسید آلومینیوم در کسر حجمی‌های مختلف استفاده کردند [۷۹]. آنها گزارش کردند که افزایش هدایت حرارتی با توجه به افزایش دما و غلظت حجمی مشاهده می‌شود. شایخ و همکاران (۲۰۰۷) به مطالعه انتقال حرارت محلول نانوذرات برای سه نوع از نانوذرات نانولوله‌های کربنی، گرافیت ورقه شده و نانوالیاف حرارت‌دیده در روغن PAO به‌عنوان سیال پایه در کسر حجمی‌های مختلف با استفاده از روش نانوفلش پرداختند [۸۰]. بالاترین درصد کلی پیشرفت برای کسر حجمی‌های مختلف از نانوذرات برای نانوسیالات مبتنی بر CNT و به‌دنبال آن EXG و HTT به‌دست آمد.

۳-۲. روش جابجایی پرتو لیزر - سیم داغ

دستگاه مربوط به این روش (شکل ۱۰) از یک لیزر هلیوم - نئون با طول موج ۶۳۲/۸ نانومتر به‌عنوان پراب پرتو لیزر مورد استفاده می‌کند. یک لنز با فاصله کانونی ۵۰ میلی‌متر استفاده می‌شود تا پرتو لیزر پراب را تا عرض ۶۹ میکرومتر متمرکز کند. نانوسیال در یک سلول ساکن قرار می‌گیرد. یک سیم داغ از آلیاژ نیکل کروم با طول ۱۰ میلی‌متر در نانوسیال غوطه‌ور می‌شود. سیم به‌صورت عمودی و عمود بر پرتو لیزر پراب نگه داشته می‌شود. پالس گرمایی با مدت زمان ۰/۳۵ ثانیه با استفاده از یک منبع ولتاژ متغیر برای گرم کردن سیم به‌کار گرفته می‌شود. حرارت تولیدشده در سیم از طریق نانوسیال انتقال می‌یابد که باعث می‌شود پرتو پروب از جایگاه اصلی خود منحرف شود. موقعیت انحراف پرتو اندازه‌گیری می‌شود [۸۱]. معادلات حاکم روش مذکور و روابط مربوط به محاسبه هدایت حرارتی به‌طور کامل در مرجع [۸۱] آورده شده است.



شکل ۱۰. دستگاه روش جابجایی پرتو لیزر - سیم داغ [۸۱]

علی و همکاران (۲۰۱۰) تأثیر کسر حجمی دماهای مختلف را بر میزان هدایت حرارتی نانوسیالات حاوی آلومینیوم در آب، اتیلن

کلیکول و اتانول را با استفاده از روش جابه‌جایی پرتو لیزر - سیم داغ بررسی کردند [۸۱]. نتایج آنها نشان داد که هدایت حرارتی همه نانوسیالات با افزایش کسر حجمی، افزایش می‌یابد.

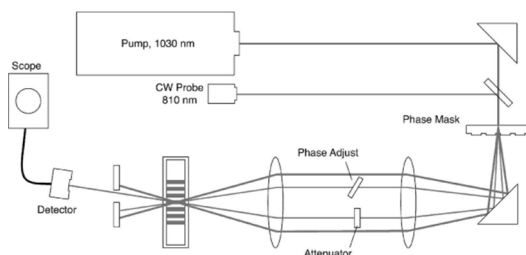
۳-۳. شبکه نوری گذرا

اصل روش شبکه نوری گذرا (شکل ۱۱) بر این اساس است که یک پالس نوری پیکو ثانیه به دو بخش تقسیم می‌شود که در نمونه با یک زاویه θ عبور می‌کند. جذب نوری باعث انبساط حرارتی می‌شود، امواج صوتی طولی با طول موج λ به نمونه تابیده می‌شود و تغییرات نوسانی در شاخص انکسار از طریق وابستگی آن به دما تولید می‌کند، که متعاقباً از طریق نفوذ حرارتی کاهش می‌یابد. پاسخ صوتی و کاهش حرارتی شبکه موجب انکسار یک موج پیوسته در پرتو نمونه می‌شود، که توسط یک اسیلوسکوپ همگام‌سازی شده با پالس تابیده شده مانیتور می‌شود. این سیگنال اکوستیک به سرعت از طریق آثار کاهنده کاهش می‌یابد، در حالی که شبکه حرارتی از انتشار گرمایی آهسته‌تر کاهش می‌یابد. پاسخ صوتی در چند نانوثانیه کاهش می‌یابد، در حالی که پاسخ حرارتی به طور معمول در ۱۰ یا ۱۰۰ میکروثانیه کاهش می‌یابد. پاسخ حرارتی توسط معادله حرارت یک‌بعدی تولید می‌شود که به راحتی با تبدیل لاپلاس حل می‌شود و هدایت حرارتی نانوسیال بدست می‌آید [۸۲]. معادلات حاکم روش مذکور و روابط مربوط به محاسبه هدایت حرارتی به طور کامل در مرجع [۸۲] آورده شده است. اشمیت و همکاران (۲۰۰۸) به بررسی رسانایی حرارتی محلول نانوذرات اکسید آلومینیم در $C_{10}H_{22}$ (دکان) و پلی آلفاولفین ایزوپارافینیک PAO با استفاده از دو روش متفاوت سیم داغ گذرا و روش شبکه نوری گذرا در کسر حجمی ۰/۱۲۵ تا ۱ درصد پرداختند [۸۲]. نتایج آنها نشان داد که توافق بین دو روش مناسب است و هر دو روش برای اندازه‌گیری انتقال حرارت در محلول کلوتیدی قابل اعتماد است.

۳-۴. روش انحراف پرتو نوری

از روش انحراف پرتو در مقیاس میکرو برای اندازه‌گیری ضریب هدایت سیالات استفاده می‌شود. این روش براساس انحراف ایجادشده در پرتو لیزر توسط یک شاخص در گرادیان بازتاب در مایع عمل می‌کند. انحراف تناوبی پرتو موجود در سلول مایع با آشکارساز حساس به موقعیت اندازه‌گیری و در تقویت کننده ثبت

می‌شود [۸۲]. معادلات حاکم روش مذکور و روابط مربوط به محاسبه هدایت حرارتی به طور کامل در مرجع [۸۲] آورده شده است. پوتنام و همکاران (۲۰۰۶) از روش پرتو نوری برای اندازه‌گیری نفوذ حرارتی مخلوط مایع و سوسپانسیون نانوذرات با دقت بهتر از ۱ درصد استفاده کردند [۸۳]. آنها هدایت حرارتی محلول فولرن $C_{60} - C_{70}$ در تولوئن و سوسپانسیون alkanethiolate - نانوذرات طلا را در حداکثر کسر حجمی ۰/۳۵ و ۰/۶ درصد اندازه‌گیری کردند. هیچ افزایش غیرعادی در هدایت حرارتی که در مطالعات قبلی نانوسیالات گزارش شده است، مشاهده نکردند.



شکل ۱۱. شماتیک دستگاه شبکه نوری گذرا [۸۲]

۳-۵. روش تمام نوری همگرایی حرارتی

عدسی حرارتی یک خودموثری انتشار پرتو است که هنگامی رخ می‌دهد که یک پرتو لیزر متمرکز تا حدی نمونه جذب را گرم کند. انبساط حرارتی متوسط جاذب متوسط یک توزیع چگالی محلی ایجاد می‌کند که، نزدیک مرکز پرتو، یک شکل سهموی ساده دارد. چنین شعاعی شیب چگالی تولید می‌کند، در حقیقت، پروفیل الگوی شکست درجه دوم می‌باشد، که به عنوان یک لنز منفی عمل می‌کند که تغییرات پرتو منتقل شده را افزایش می‌دهد و می‌تواند توسط تشخیص دهنده تغییرات شدت پرتو مرکزی اندازه‌گیری شود [۸۴]. معادلات حاکم روش مذکور و روابط مربوط به محاسبه هدایت حرارتی به طور کامل در مرجع [۸۴] آورده شده است. راسکونی و همکاران (۲۰۰۶) نشان دادند که هدایت حرارتی و نفوذ ذرات پراکنده کلوتیدی روش عدسی حرارتی تمام نوری به دست آید. آنها گزارش کردند که می‌توان از این روش برای مدل‌سازی سوسپانسیون‌های با ذرات کروی پراکنده استفاده کرد.

۳-۶. روش پراکندگی اجباری رایلی

یکی از روش‌های نوری اندازه‌گیری هدایت حرارتی سیالات روش پراکندگی اجباری رایلی است [۸۵-۸۷]. روش پراکندگی اجباری

افزایش ضریب انتشار حرارتی در نانوسیال با افزایش غلظت نانوذرات، به علت افزایش حضور نانوذرات با اندازه کوچک است.

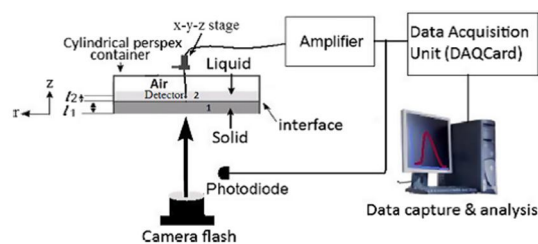
۴. نتیجه گیری

با توجه به مصرف روزافزون انرژی و حامل‌های انرژی، افزایش و بهبود عملکرد حرارتی طی سالیان اخیر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار شده است. یکی از راهکارهای غیرفعال افزایش عملکرد حرارتی، استفاده از نانوسیال می‌باشد. میزان افزایش هدایت حرارتی و تعیین هدایت حرارتی نانوسیالات از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. مدل‌های نظری موجود جهت تعیین هدایت حرارتی نانوسیالات، ناکافی و دارای نواقصی هستند. لذا تعیین هدایت حرارتی نانوسیالات از طریق تجربی از اهمیت بالایی برخوردار است. روش‌های تجربی متعددی برای تعیین هدایت حرارتی نانوسیالات وجود دارد که به‌طور کلی آنها را می‌توان به دو دسته نوری و غیرنوری تقسیم کرد. روش‌های نوری روش‌های غیرتهاجمی می‌باشند. روش‌های نوری برخلاف روش‌های غیرنوری ابزار اندازه‌گیری دما با سیال در ارتباط نیست، لذا این روش‌ها عاری از خطاهای ناشی از نوسانات دمایی اندازه‌گیری شده ناشی از پالس‌های گرمایی ایجادشده در روش‌های غیرنوری هستند. از سوی دیگر مدت زمان اندازه‌گیری در روش‌های نوری به شدت کمتر از روش‌های غیرنوری است. لذا زمان کافی برای ایجاد جابجایی حرارتی در نانوسیال به‌وجود نمی‌آید و نگرانی ناشی از ایجاد خطای ناشی از جابجایی حرارتی رفع می‌شود. بنابراین دلائل نتایج ناشی از روش‌های نوری قابل اعتمادتر هستند. روش‌های نوری شامل روش نانوفلش، روش جابه‌جایی پرتو لیزر - سیم داغ، شبکه نوری گذرا، روش انحراف پرتو نوری، روش تمام نوری همگرایی حرارتی، روش پراکندگی اجباری رایلی، روش فوتوفلش و روش‌های غیرنوری شامل روش‌های سیم داغ گذرا، روش سیم داغ گذرا کوتاه، روش سیم داغ دوگانه گذرا، روش نوسان دمایی، روش صفحه موازی حالت پایدار، روش 30 مقایسه حرارتی، روش سلول استوانه‌ای حالت پایدار، روش دسیک داغ گذرا، روش هیلتون، روش نوار برش حالت پایدار، روش اندازه‌گیری همرفتی، روش میکرونوار داغ و روش دستگاه فاصله حلقه‌ای می‌باشند. در روش‌های غیرنوری زمان فرایند اندازه‌گیری هدایت حرارتی باید حتی‌المقدور کوتاه‌تر شود تا از به‌وجود آمدن هدایت حرارتی جلوگیری شود. همچنین باید فضای قرارگرفتن

رایلی را می‌توان به‌صورت ایجاد یک شبکه نوری در نمونه و تشخیص دینامیک آن شرح داد. شبکه نوری توسط برخورد دو پرتو از یک لیزر منسجم با قدرت بالا در یک نمونه، ایجاد می‌شود که بخش کوچکی از تابش برخوردی را جذب می‌کند [۸۸]. معادلات حاکم روش مذکور و روابط مربوط به محاسبه هدایت حرارتی به‌طور کامل در مرجع [۸۸] آورده شده است. ونروس و همکاران (۲۰۰۶) ضریب انتشار حرارتی و هدایت حرارتی نانوسیالات نانوذرات طلا در آب و نانوذرات اکسید آلومینیم در یک روغن نفتی را در دماهای مختلف با استفاده از روش نوری پراکندگی رایلی اجباری اندازه‌گیری کردند [۸۸]. آنها اذعان داشتند که این روش را می‌توان برای بررسی انتقال حرارت در نانوسیالات استفاده نمود و این تکنیک تا حدودی قوی‌تر از روش‌های تجربی متعارف مانند روش سیم داغ گذراست.

۳-۷. روش فوتوفلش

دستگاه روش فوتوفلش (شکل ۱۲) شامل ظرف مایع متشکل از ظرف پرپلکس استوانه‌ای باز با یک پایه مسی با ضخامت میلی‌متر است. فلش دوربین به سطحی با قطر در حدود ۱ سانتی‌متری از سطح پایین پایه مسی، پالس نوری ۵ میلی‌ثانیه‌ای می‌تاباند تا حرارت در سطح آن پس از جذب تابش انباشته شود. حرارت سپس از طریق پایه جامد و لایه مایع پخش می‌شود. سیگنال دما در سیال در فاصله مناسب از سطح تماس جامد و مایع با استفاده از یک ترموکوپل شناسایی می‌شود [۸۹]. معادلات حاکم روش مذکور و روابط مربوط به محاسبه هدایت حرارتی به‌طور کامل در مرجع [۸۹] آورده شده است.



شکل ۱۲. شماتیک دستگاه روش فوتوفلش [۸۹]

سلطان‌نژاد و همکاران (۲۰۱۳) با استفاده از روش فوتوفلش ضریب انتشار حرارتی نانوسیالات طلا در غلظت بسیار پایین را در دمای اتاق اندازه‌گیری کردند [۸۹]. آنها بیان داشتند که علت

محوری باشد و تغییرات در راستای ارتفاع وجود نداشته باشد تا اطمینان حاصل شود که انتقال حرارت یک‌بعدی و شعاعی است.

نمونه به اندازه کافی کوچک باشد تا به علت آثار دیواره از ایجاد آثار همرفت جلوگیری شود. ست آزمایش باید دارای تقارن

۵. مآخذ

- [1] G. M. Paul, I. Chopkar, P. K. Manna, Techniques for measuring the thermal conductivity of nanofluids: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, pp. 1913–1924, 2010.
- [2] X. Q. Wang, A. S. Mujumdar. A Review on nanofluids-Part II: Experiments and applications, *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, Vol. 25, No. 4, pp.631-648, 2008.
- [3] X. Q. Wang, A. S. Mujumdar. Heat transfer characteristics of nanofluids: a review, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 46, pp.1-19, 2007.
- [4] S. O. Zerinc, S. Kakac, A. G. Yazıciog, Enhanced thermal conductivity of nanofluids: a state-of-the-art review, *Microfluid Nanofluid*, Vol. 8, pp.145-170, 2010.
- [5] J. Fan, L. Wang, Review of Heat Conduction in Nanofluids, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 133, pp. 040801-1-14, 2011.
- [6] S. A. Angayarkanni, J. Philip, Review on Thermal Properties of Nanofluids: Recent Developments, *Advances in Colloid and Interface Science*, Vol. 225, pp.146-176, 2015.
- [7] S. M. S. Murshed, K. C. Leong, C. Yang, Thermophysical and electrokinetic properties of nanofluids-A critical review, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 28, pp.2109-2125, 2008.
- [8] E. V. Timofeeva, A. N. Gavrilov, J. M. McCloskey, Y. V. Tolmachev, Thermal conductivity and particle agglomeration in alumina nanofluids: Experiment and theory, *PHYSICAL REVIEW*, Vol. 76, pp.061203-1-16, 2007.
- [9] M. P. Beck, Y. Yuan, P. Warriar, A. S. Teja, The effect of particle size on the thermal conductivity of alumina nanofluids, *Journal of Nanoparticle Research*, Vol. 11, pp.1129-1136, 2009.
- [10] Y. Ding, H. Alias, D. Wen, R. A. Williams, Heat transfer of aqueous suspensions of carbon nanotubes (CNT nanofluids), *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2006, pp .240-250, 49.
- [11] H. T. Zhu, C. Y. Zhang, Y. M. Tang, J. X. Wang, Novel Synthesis and Thermal Conductivity of CuONanofluid, *J. Phys. Chem. C*, Vol. 111, pp. 1646-1650, 2007.
- [12] K. S. Hong, T. K. Hong, H. S. Yang, Thermal conductivity of Fe nanofluids depending on the cluster size of nanoparticles". *APPLIED PHYSICS LETTERS*, 88, 2006, PP.031901 -1-3.
- [13] Y. Y. He, H. Jin, Y. Chen, D. Ding, H. Cang, Heat transfer and flow behavior of aqueous suspensions of TiO₂ nanoparticles (nanofluids) flowing upward through a vertical pipe, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 50, pp. 2272–2281, 2007.
- [14] Y. Feng, A New Thermal Conductivity Model for Nanofluids with Convection Heat Transfer Application, thesis submitted to the Graduate Faculty of North Carolina State University for the degree of Master of Science, 2010.
- [15] M. S. Murshed, K. C. Leong, C. Yang, Investigations of thermal conductivity and viscosity of nanofluids, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 47, pp. 560-568, 2008.
- [16] A. Mariano, M. J. Pastoriza-Gallego, L. Lugo, A. Camacho, S. Canzonieri, M. M. Piñeiro, Thermal conductivity, rheological behaviour and density of non-Newtonian ethylene glycol-based SnO₂ nanofluids, *Fluid Phase Equilibria*, Vol. 337, pp. 119-124, 2013.
- [17] Ch. Pang, J. Y. Jung, J. W. Lee, Y. T. Kang, Thermal conductivity measurement of methanol-based nanofluids with Al₂O₃ and SiO₂ nanoparticles, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 55, pp.5597–5602, 2012.
- [18] M. Xinga, J. Yu, R. Wang, Experimental study on the thermal conductivity enhancement of water based nanofluids using different types of carbon nanotubes, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 88, pp.609–616, 2015.
- [19] M. H. Esfe, A. A. A. Arani, M. Rezaie, W. M. Yan, A. Karimipour, Experimental determination of thermal conductivity and dynamic viscosity of

- Ag-MgO/water hybrid nanofluid, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 66, pp.189-195, 2015.
- [20] W. Duangthongsuk, S. Wongwises, Comparison of the effects of measured and computed thermophysical properties of nanofluids on heat transfer performance, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 34, pp.616-624, 2010.
- [21] X. Wei, H. Zhu, T. Kong, L. Wang, Synthesis and thermal conductivity of Cu₂O nanofluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52, 2009, PP.4371-4374.
- [22] M. Fujii, X. Zhang, N. Imaishi, S. Fujiwara, T. Sakamoto, Simultaneous measurements of thermal conductivity and thermal diffusivity of liquids under microgravity conditions, *International Journal of Thermophysics*, Vol. 18, No. 2, pp.327-338, 1997.
- [23] P. L. Woodfield, J. Fukai, M. Fujii, Y. Takata, K. Shinzato, A Two-Dimensional Analytical Solution for the Transient Short-Hot-Wire Method, *Int J Thermophys*, Vol. 29, pp.29:1278-1298, 2008.
- [24] X. Zhang, M. Fujii, Simultaneous Measurements of the Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity of Molten Salts with a Transient Short-Hot-Wire Method, *International Journal of Thermophysics*, Vol. 21, No. 1, pp. 71-83, 2000.
- [25] H. Wicaksono, X. Zhang, S. Fujiwara, M. Fujii, Measurements of Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity of Molten Carbonates, *The reports of Institute of Advanced Material Study Kyushu University*, Vol. 15, No. 2, pp.165-168, 2001.
- [26] H. Xie, H. Gu, M. Fujii, X. Zhang, Short hot wire technique for measuring thermal conductivity and thermal diffusivity of various materials, *Measurement Science And Technology*, Vol. 17, pp. 208-214, 2006.
- [27] X. Zhang, H. Gu, M. Fujii, Experimental Study on the Effective Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity of Nanofluids, *International Journal of Thermophysics*, Vol. 27, No. 2, pp. 569-580, 2006.
- [28] S. K. Babu, K. S. Praveen, B. Raja, P. Damodharan, Measurement of thermal conductivity of fluid using single and dual wire transient techniques, *Measurement*, Vol. 46, pp. 2746-2752, 2013.
- [29] M. J. Assael, K. D. Antoniadis, D. Tzetzis, The use of the transient hot-wire technique for measurement of the thermal conductivity of an epoxy-resin reinforced with glass fibres and/or carbon multi-walled nanotubes, *Composites Science and Technology*, Vol. 68, pp.3178-3183, 2008.
- [30] P. Bhattacharya, S. Nara, p. Vijayan, T. Tang, W. Lai, P. E. Phelan, R. S. Prasher, D. W. Song, J. Wang, Characterization of the temperature oscillation technique to measure the thermal conductivity of fluids, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 49, pp.2950-2956, 2006.
- [31] E. E. T. Patel, S. K. Sundararajan, An experimental investigation into the thermal conductivity enhancement in oxide and metallic nanofluidsm, *Journal of Nanoparticle Research*, Vol. 12, No. 3, pp.1015-1031, 2010.
- [32] B. X. Wang, L. P. Zhou, X. F. Peng, A fractal model for predicting the effective thermal conductivity of liquid with suspension of nanoparticles, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, pp.2665-2672, 2003.
- [33] A. R. Challoner, R. W. Powell, Thermal Conductivities of Liquids-New Determinations for Seven Liquids and Appraisal of Existing Values, proceedings of the Royal Society of London, Series A 238 (1212), pp. 90-106, 1956.
- [34] X. Wang, X. Xu, S. U. S. Choi, Thermal Conductivity of Nanoparticle-Fluid Mixture, *JOURNAL OF THERMOPHYSICS AND HEAT TRANSFER*, Vol. 13, No. 4, pp. 474-480, 1999.
- [35] K. Sinha, B. Kavlicoglu, Y. Liu, F. Gordaninejad, O. A. Graeve, A comparative study of thermal behavior of iron and copper nanofluids, *JOURNAL OF APPLIED PHYSICS*, Vol. 106, pp. 064307 -1-7, 2009.
- [36] N. Shalkevich, W. Escher, Th. Burgi, B. Michel, L. S. Ahmed, D. Poulidakos, On the Thermal Conductivity of Gold Nanoparticle Colloids, *Langmuir*, Vol. 26, No. 2, pp. 663-670, 2010.
- [37] C. Dames, G. Chen, 1ω , 2ω & 3ω methods for measurements of thermal properties, *REVIEW OF*

- SCIENTIFIC INSTRUMENTS*, Vol. 76, pp. 124902-1-14, 2005.
- [38] E. Yusibani, P. L. Woodfield, M. Fujii, K. Shinzato, X. Zhang, Y. Takata, Application of the Three-Omega Method to Measurement of Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity of Hydrogen Gas, *Int J Thermophys*, Vol. 30, pp. 397-415, 2009.
- [39] H. Wang, M. Sen, Analysis of the 3-omega method for thermal conductivity measurement, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, pp. 2102-2109, 2009.
- [40] K. T. Wojciechowski, R. Zybala, R. Mania, Application of DLC layers in 3-omega thermal conductivity method, *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, Vol. 37, No. 2, pp. 512-517, 2009.
- [41] R. Karthik, R. Harish Nagarajan, B. Raja, P. Damodharan, Thermal conductivity of CuO-DI water nanofluids using 3-x measurement technique in a suspended micro-wire, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 40, pp. 1-9, 2012.
- [42] I. Tavman, A. Turgut, an Investigation on Thermal Conductivity and Viscosity of Water Based Nanofluids Microfluidics Based Microsystems, *NATO Science for Peace and Security Series A: Chemistry and Biology*, pp. 139-162, 2010.
- [43] A. Turgut, I. Tavman, M. Chirtoc, H. P. Schuchmann, C. Sauter, S. Tavman, Thermal Conductivity and Viscosity Measurements of Water-Based TiO₂ Nanofluids, *Int J Thermophys*, Vol. 30, pp. 1213-1226, 2009.
- [44] Z. L. Wang, D. W. Tang, S. Liu, X. H. Zheng, N. Araki, Thermal-Conductivity and Thermal-Diffusivity Measurements of Nanofluids by 3 ω Method and Mechanism Analysis of Heat Transport, *Int J Thermophys*, Vol. 28, pp. 1255-1268, 2007.
- [45] R. W. Powell, Experiments using a simple thermal comparator for measurement of thermal conductivity, surface roughness and thickness of foils or of surface deposits, *JOURNAL OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS*, Vol. 34, pp. 485-492, 1957.
- [46] R. Nottenburg, K. Rajeshwar, R. Rosenvold, J. D. Bow, Measurement of thermal conductivity of Green River oil shales by a thermal comparator technique, *FUEL*, Vol. 57, pp. 789-795, 1978.
- [47] W. T. Clark, R. W. Powell, Measurement of thermal conduction by the thermal comparator, *J. SCI. INSTRUM*, Vol. 39, pp. 545-551, 1962.
- [48] A. S. Iyengar, A. R. Abramson, Comparative Radial Heat Flow Method for Thermal Conductivity Measurement of Liquids, *Journal of Heat Transfer*, pp. 064502-1-3, 2009.
- [49] M. S. Chopkar, P. K. Sudarshan, I. Manna, Effect of Particle Size on Thermal Conductivity of Nanofluid, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 39, No. 7, pp. 1535-1542, 2008,.
- [50] H. Kurt, M. Kayfeci, Prediction of thermal conductivity of ethylene glycol-water solutions by using artificial neural networks, *Applied Energy*, Vol. 86, pp. 2244-2248, 2009.
- [51] L. Broniarz-Press, K. Pralat, K. W. Pyc, Experimental Analysis of Thermal Conductivity of Carboxymethylcellulose Sodium Salt Aqueous Solutions in Coaxial Cylinder System, Proceedings of European Congress of Chemical Engineering (ECCE-6) Copenhagen, September, pp. 16-20, 2007.
- [52] A. Amrollahi, A. A. Hamidi, A. M. Rashidi, The effects of temperature, volume fraction and vibration time on the thermo-physical properties of a carbon nanotube suspension (carbon nanofluid), *Nanotechnology*, Vol. 19, pp. 315701-1-8, 2008.
- [53] B. Barbe's, R. Pa'ramo, E. Blanco, M. J. Pastoriza-Gallego, M. M. Pineiro, J. L. Legido, C. Casanova, Thermal conductivity and specific heat capacity measurements of Al₂O₃ nanofluids, *J Therm Anal Calorim*, Vol. 111, pp. 1615-1625, 2013.
- [54] J. Glory, M. Bonetti, M. Helezen, M. Mayne-L'Hermite, C. Reynaud, Thermal and electrical conductivities of water-based nanofluids prepared with long multiwalled carbon nanotubes, *JOURNAL OF APPLIED PHYSICS*, Vol. 103, pp. 094309-1-7, 2008.
- [55] R. J. Warzoha, A. S. Fleischer, Determining the thermal conductivity of liquids using the transient

- hot disk method. Part I: Establishing transient thermal-fluid constraints, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 71, pp. 779-789, 2014.
- [56] R. J. Warzoha, A. S. Fleischer, Determining the thermal conductivity of liquids using the transient hot disk method. Part II: Establishing an accurate and repeatable experimental methodology, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 71, pp. 790-807, 2014.
- [57] M. Wan, R. R. Yadav, K. L. Yadav, S. B. Yadav, Synthesis and experimental investigation on thermal conductivity of nanofluids containing functionalized Polyanilinenanofibers, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 41, pp. 158-164, 2012.
- [58] B. Buonomo, L. Colla, L. Fedele, O. Manca, L. Marinelli, A comparison of nanofluid thermal conductivity measurements by flash and hot disk techniques, *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 547, pp. 012046-1-10, 2014.
- [59] D. Zhu, X. Li, N. Wang, X. Wang, J. Gao, H. Li, Dispersion behavior and thermal conductivity characteristics of Al₂O₃-H₂O nanofluids, *Current Applied Physics*, Vol. 9, pp. 131-139, 2009.
- [60] W. Jiang, G. Ding, H. Peng, Measurement and model on thermal conductivities of carbon nanotube nanorefrigerants, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 48, pp. 1108-1115, 2009.
- [61] F. Wang, L. Han, Z. Zhang, X. Fang, J. Shi, W. Ma, Surfactant-free ionic liquid-based nanofluids with remarkable thermal conductivity enhancement at very low loading of grapheme, *Nanoscale Research Letters*, Vol. 7, pp. 314-1-7, 2012.
- [62] P. Hu, W. L. Shan, F. Yu. Z. S. Chen, Thermal Conductivity of AlN-Ethanol Nanofluids, *Int J Thermophys*, Vol. 29, pp. 1968-1973, 2008.
- [63] B. Wright, D. Thomas, H. Hong, L. Groven, J. Puszynski, E. Duke, X. Ye, S. Jin, Magnetic field enhanced thermal conductivity in heat transfer nanofluids containing Ni coated single wall carbon nanotubes, *APPLIED PHYSICS LETTERS*, Vol. 91, pp. 173116-1-3, 2007.
- [64] R. S. Vajjha, D. K. Das, Experimental determination of thermal conductivity of three nanofluids and development of new correlations, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, pp. 4675-4682, 2009.
- [65] L. S. Sundar, M. H. Farooky, S. N. Sarada, M. K. Singh, Experimental thermal conductivity of ethylene glycol and water mixture based low volume concentration of Al₂O₃ and CuOnanofluids, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 41, pp. 41-46, 2013.
- [66] M. C. S. Reddy, V. V. Rao, Experimental studies on thermal conductivity of blends of ethylene glycol-water-based TiO₂ nanofluids, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 46, pp. 31-36, 2013.
- [67] C. H. Li, W. Williams, J. Buongiorno, L. W. HU, G. P. Peterson, Transient and Steady-State Experimental Comparison Study of Effective Thermal Conductivity of Al₂O₃/Water Nanofluids, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 130, pp. 042407-1-7, 2008.
- [68] C. H. Li, G. P. Peterson, Experimental investigation of temperature and volume fraction variations on the effective thermal conductivity of nanoparticle suspensions (nanofluids), *JOURNAL OF APPLIED PHYSICS*, Vol. 99, pp. 084314-1-8, 2006.
- [69] C. H. Li, G. P. Peterson, The effect of particle size on the effective thermal conductivity of Al₂O₃-water nanofluids, *JOURNAL OF APPLIED PHYSICS*, Vol. 101, pp. 044312-1-5, 2007.
- [70] B. Kolade, K. E. Goodson, J. K. Eaton, Convective performance of nanofluids in a laminar thermally developing tube flow, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 131, pp. 052402-1-052402-8, 2009.
- [71] G. V. Casquillas, M. L. Berre, C. Peroz, Y. Chen, J. J. Greffet, Microlitre hot strip devices for thermal characterization of nanofluids, *Microelectronic Engineering*, Vol. 84, pp. 1194-1197, 2007.
- [72] Y. S. Yu, J. Kim, M. T. Hung, Experimental Study of Heat Conduction in Aqueous Suspensions of Aluminum Oxide Nanoparticles, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 130, pp. 092403-1-6, 2008.

- [73] A. Ehle, S. Feja, M. H. Buschmann, Temperature Dependency of Ceramic Nanofluids Shows Classical Behavior, *JOURNAL OF THERMOPHYSICS AND HEAT TRANSFER*, Vol. 25, No. 3, pp. 378-385, 2011.
- [74] M. H. Buschmann, Thermal conductivity and heat transfer of ceramic nanofluids, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 62, pp. 19-28, 2012.
- [75] W. J. Parker, R. J. Jenkins, C. P. Butler, G. L. Abbott, Flash Method of Determining Thermal Diffusivity, Heat Capacity, and Thermal Conductivity, *Journal of Applied Physics*, Vol. 32, No. 9, pp. 1679-1684, 1961.
- [76] I. Tawman, Flash method of measuring thermal diffusivity and conductivity, *Convective Heat and Mass Transfer in Porous Media*, Vol. 196, pp. 923-936, 1991.
- [77] J. Blumm, A. Lindemann, S. Min, Thermal characterization of liquids and pastes using the flash technique, *Thermochimica Acta*, Vol. 445, pp. 26-29, 2007.
- [78] N. W. P. May, C. V. Pinzón, A. V. Flick, Á. Cifuentes, A. Oleaga, A. Salazar, J. J. A. Gil, Study of the thermal properties of polyester composites loaded with oriented carbon nanofibers using the front-face flash method, *Polymer Testing*, Vol. 50, pp. 255-261, 2016.
- [79] B. Buonomo, O. Manca, L. Marinelli, S. Nardini, Effect of temperature and sonication time on nanofluid thermal conductivity measurements by nano-flash method, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 91, pp. 181-190, 2015.
- [80] S. Shaikh, K. Lafdi, R. Ponnappan, Thermal conductivity improvement in carbon nanoparticle doped PAO oil: An experimental study, *Journal of Applied Physics*, Vol. 101, pp. 064302-1-7, 2007.
- [81] F. M. Ali, W. M. M. Yunus, M. M. Moxsin, Z. A. Talib, The effect of volume fraction concentration on the thermal conductivity and thermal diffusivity of nanofluids: Numerical and experimental, *REVIEW OF SCIENTIFIC INSTRUMENTS*, Vol. 81, pp. 074901-1-9, 2010.
- [82] A. J. Schmidt, M. Chiesa, D. H. Torchinsky, J. A. Johnson, K. A. Nelson, G. Chen, Thermal conductivity of nanoparticle suspensions in insulating media measured with a transient optical grating and a hotwire, *Journal of Applied Physics*, Vol. 103, pp. 083529-1-5, 2008.
- [83] S. A. Putnam, D. G. Cahill, P. V. Braun, Z. Ge, R. G. Shimmin, Thermal conductivity of nanoparticle suspensions, *Journal of Applied Physics*, Vol. 99, pp. 084308-1-6, 2006.
- [84] R. Rusconi, E. Rodari, R. Piazza, Optical measurements of the thermal properties of nanofluids, *Applied Physics Letters*, Vol. 89, pp. 261916-1-3, 2006.
- [85] J. D. Schieber, D. C. Venerus, K. Bush, V. Balasubramanian, S. Smoukov, Measurement of anisotropic energy transport in flowing polymers by using a holographic technique, *PNAS*, Vol. 101, No. 36, pp. 13142-13146, 2004.
- [86] F. Rondino, R. D'Amato, G. Terranova, E. Borsella, M. Falconieri, Thermal diffusivity enhancement in nanofluids based on pyrolytic Titania nanopowders: importance of aggregate morphology, *J. Raman Spectrosc.*, Vol. 45, pp. 528-532, 2014.
- [87] D. C. Venerus, J. D. Schieber, V. Balasubramanian, K. Bush, S. Smoukov, Anisotropic thermal conduction in a polymer liquid subjected to shear flow, *Physical review letters*, Vol. 93, No. 9, p. 098301, 2004.
- [88] D. C. Venerus, M. S. Kabadi, S. Lee, V. P. Luna, Study of thermal transport in nanoparticle suspensions using forced Rayleigh scattering, *JOURNAL OF APPLIED PHYSICS*, Vol. 100, pp. 094310-1-5, 2006.
- [89] S. Soltaninejad, M. S. Husin, A. R. Sadrolhosseini, R. Zamiri, A. Zakaria, Thermal diffusivity measurement of Au nanofluids of very low concentration by using photoflash technique, *Measurement*, Vol. 46, pp. 4321-4327, 2013.

بی نوشت

1. transeint hot wire method (THW)

2. steady-state parallel-plate method

-
3. temperature oscillation method
 4. micro-hot strip
 5. optical beam deflection
 6. the thermal comparator method
 7. thermal Constants Analyzer Techniques
 8. short hot wire method (SHW)
 9. DTHW
 10. the steady-state coaxial cylinders method
 11. TPS
 12. Hilton
 13. steady-state cut-bar method
 14. convective measurement Method
 15. the ring gap apparatus
 16. nanoflash method
 17. hot wire-laser beam displacement technique
 18. transient optical grating
 19. micronscale beam deflection technique
 20. all-optical thermal lensing method
 21. forced Rayleigh scattering
 22. photoflash technique