



بررسی آزمایشگاهی اثر دما و کسر حجمی نانوذرات بر لزجت نانوسیال هیبریدی غیرنیوتنی

حامد اشگرف¹، مسعود افراند^{2*}، محمد همت اسفه²

1- کارشناس ارشد، گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.

2- استادیار، گروه مهندسی مکانیک، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.

* نجف آباد، صندوق پستی 8514143131، masoud.afrand@pmc.iaun.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 25 دی 1394

پذیرش: 22 بهمن 1394

ارائه در سایت: 08 اسفند 1394

کلید واژگان:

لزجت

نانوسیال هیبریدی

رفتار غیرنیوتنی

بررسی آزمایشگاهی

چکیده

در این مقاله اثر دما و کسر حجمی نانوذرات بر لزجت نانوسیال هیبریدی، که حاوی مخلوطی از آب و اتیلن گلیکول به عنوان سیال پایه و ترکیبی از نانولوله‌های کربنی چند جداره و دی‌اکسید سیلیسیوم به عنوان ذرات اضافه شده است، به‌طور تجربی بررسی شد. اندازه‌گیری‌ها در بازه دمایی 27.5°C تا 50°C و با استفاده از لزجت‌سنج استوانه‌ای در نرخ برش‌های مختلف انجام شد. نمونه‌های همگن و پایدار با کسر حجمی جامد 0.0625% ، 0.025% ، 0.5% ، 0.75% ، 1% ، 1.5% و 2% با تعلیق ترکیب حجمی مساوی از نانولوله‌های کربنی و دی‌اکسید سیلیسیوم در مخلوط $50\%-50\%$ حجمی آب اتیلن گلیکول تهیه شدند. نتایج اندازه‌گیری در نرخ برش‌های مختلف نشان داد که سیال پایه (مخلوط آب و اتیلن گلیکول) از خود رفتار نیوتنی دارد، درحالی که همه نمونه‌های نانوسیال رفتار غیرنیوتنی مشابه مدل قاعده توانی (سدو پلاستیک) و با شاخص توان کمتر از یک نشان دادند. برای همه نمونه‌های نانوسیال و همه دماها ضرایب مدل پاورلا از طریق برازش منحنی با دقت بالایی محاسبه شدند. نتایج همچنین نشان دادند که به‌طور کلی لزجت ظاهری با افزایش کسرحجمی، افزایش و با افزایش دما، کاهش می‌یابد.

Experimental investigation of the effects of temperature and nanoparticles volume fraction on the viscosity of non-Newtonian hybrid nanofluid

Hamed Eshgarf, Masoud Afrand*, Mohammad Hemmat Esfe

Department of Mechanical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

* P.O.B. 8514143131 Najafabad, Iran, masoud.afrand@pmc.iaun.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 15 January 2016
Accepted 11 February 2016
Available Online 27 February 2016

Keywords:

Viscosity
Hybrid nanofluid
Non-Newtonian behavior
Experimental investigation

ABSTRACT

In this paper, the effects of temperature and nanoparticles volume fraction on the viscosity of non-Newtonian hybrid nanofluid, containing water and ethylene glycol as a base fluid and multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) and silica (SiO_2) as additives, have been investigated experimentally. The measurements have been carried out in temperatures range of 27.5°C - 50°C by using a Brookfield DV-I PRIME digital Viscometer for different shear rates. The stable and homogeneous samples, with the solid volume fractions of 0.0625% , 0.25% , 0.5% , 0.75% , 1% , 1.5% and 2% , were prepared by dispersing equal volumes of dry MWCNTs and SiO_2 nanoparticles in a specified amount of the binary mixture of water/EG ($50:50$ vol.). The measurement results at different shear rates showed that the base fluid possessed Newtonian behavior, while all nanofluid samples exhibit a pseudoplastic rheological behavior with a power law index of less than unity ($n < 1$). Moreover, the consistency index and power law index have been obtained by accurate curve-fitting for all nanofluid samples. The results also revealed that the apparent viscosity generally increases with an increase in the solid volume fraction and decreases with rising temperature.

1- مقدمه

آلومینیوم را بر ضریب انتقال حرارت هدایت مخلوط آب و اتیلن گلیکول به صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. ایشان کسر حجمی نانوذرات را تا 18% افزایش دادند و اثر این افزایش را در بازه دمایی 15°C تا 65°C مشاهده کردند. نتایج نشان داد که ضریب هدایت حرارتی در هر دو نانوسیال می‌تواند تا 25% در کسر حجمی 18% افزایش یابد. نتایج مشابه در زمینه افزایش هدایت حرارتی نانوسیالات، توسط چاندراسکار و همکاران [2]، ساندرو و همکاران [3]، جیونگ و همکاران [4] و همت و همکاران [5] ارائه شده است. همچنین تعدادی از محققان به بررسی پتانسیل استفاده از نانوسیالات در فرآیندهای

مخلوط آب و اتیلن گلیکول، که ضد یخ نیز نامیده می‌شود، برای کاربرد در سیستم‌های خنک کاری، مبدل‌های حرارتی، کلکتورهای خورشیدی، رادیاتور اتومبیل‌ها و ... مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این‌وجود این مخلوط دارای ضریب هدایت حرارتی پائین برای کار در سیستم‌های گرمایی است. در همین راستا بسیاری از محققان تلاش کرده‌اند تا هدایت حرارتی این مخلوط را با تعلیق کردن نانوذره‌ها یا نانولوله‌های کربنی در این مخلوط بهبود دهند. برای مثال یامساوasd و همکاران [1]، اثر افزودن نانوذرات اکسید تیتانیوم و اکسید

آلاداغ و همکاران [23] اثر دما و نرخ برش را بر لزجت نانوسیالات نانولوله‌های کربنی - آب و اکسید آلومینیوم - آب بررسی کردند. آزمایش‌های ایشان نشان داد که نانوسیال حاوی نانولوله‌های کربنی در نرخ برش‌های بالا رفتار نیوتنی دارند، درحالی‌که نانوسیال حاوی اکسید آلومینیوم در بازه دمایی مورد بررسی، رفتار غیرنیوتنی نشان داد. تمجید و جنتر [24] رفتار رئولوژیک نانوسیال نقره اتیلن گلیکول را در بازه کسر حجمی 0.11% تا 4.38% بررسی کردند. اندازه‌گیری‌های ایشان نشان داد که رفتار کلی نانوسیال شبیه رفتار سدوپلاستیک¹ است. ایشان همچنین نمودارهای تنش برشی - نرخ برش را با مدل‌های بینگهام پلاستیک²، هرسل - بالکی³ و کسن⁴ ارزیابی کردند. مقدم و همکاران [25] خصوصیات رئولوژیک نانوسیالات گرافن - گلیسرول را در کسر جرمی‌های متفاوت (0.0025-0.02) و دماهای مختلف (20°C تا 60°C) اندازه‌گیری کردند. نتایج ایشان نشان داد که لزجت نانوسیالات با افزایش کسر جرمی، افزایش و با افزایش دما، کاهش می‌یابد. ایشان همچنین مشاهده کردند که رفتار نانوسیال غیرنیوتنی است.

با این وجود، همان‌طور که در بالا بیان شد، تعداد محققانی که بر رفتار رئولوژیک نانوسیالات هیبریدی تمرکز کرده‌اند اندک است. از طرفی به این علت که رفتار نیوتنی یا غیرنیوتنی نانوسیالات نقش مهمی در کاربردهای حرارتی و جریان سیال ایفا می‌کند، یک نیاز ضروری به تعیین رفتار رئولوژیک نانوسیالات وجود دارد. از این‌رو، در این مقاله، رفتار رئولوژیک نانوسیال هیبریدی نانولوله کربنی چند جداره - دی اکسید سیلیسیوم/آب - اتیلن گلیکول بررسی می‌شود. برای نیل به این هدف نمونه‌های نانوسیال در کسر حجمی‌های مختلف تهیه شده و در دماهای متفاوت مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

2- انجام آزمایش

2-1- تهیه نمونه‌های نانوسیال

نمونه‌های پایدار و همگن با کسر حجمی‌های 0.0625% تا 2% با معلق کردن نانولوله‌های کربنی و سیلیکا (با کسر حجمی مساوی) در سیال پایه، که مخلوطی از آب و اتیلن گلیکول با نسبت حجمی مساوی است، تهیه شدند. خواص ذرات جامد، آب و اتیلن گلیکول در جداول 2 و 3 ارائه شده‌اند. مقادیر لازم نانوذرات و نانولوله‌های کربنی چند جداره برای تهیه نمونه‌ها با کسر حجمی‌های مختلف از رابطه (1) محاسبه شدند. این مقادیر در جدول 4 ارائه شده‌اند.

$$\phi = \left[\frac{\left(\frac{w}{\rho}\right)_{\text{SiO}_2} + \left(\frac{w}{\rho}\right)_{\text{MWCNT}}}{\left(\frac{w}{\rho}\right)_{\text{WATER}} + \left(\frac{w}{\rho}\right)_{\text{SiO}_2} + \left(\frac{w}{\rho}\right)_{\text{MWCNT}} + \left(\frac{w}{\rho}\right)_{\text{EG}}} \right] \times 100 \quad (1)$$

در این رابطه، ϕ مقدار کسر حجمی، ρ چگالی برحسب kgm^{-3} و w جرم برحسب kg است.

در تحقیق حاضر، به‌منظور تولید نمونه‌های پایدار، ابتدا به‌وسیله دستگاه همزن مغناطیسی، پودر نانو و سیال پایه به مدت دو ساعت مخلوط شده و سپس نانوسیال تهیه شده به مدت پنج الی شش ساعت توسط دستگاه همزن التراسونیک (ساخت شرکت هیلشر⁵ آلمان با توان 400 وات و فرکانس 24 کیلوهرتز) برای جلوگیری از کلوخه شدن در معرض امواج مغناطیسی قرار گرفت. با توجه به تجربه‌های گذشته، بعد از ساخت نانوسیال در کسرهای

مختلف مهندسی نظیر انتقال حرارت جوشش [6]، انتقال حرارت جابه‌جایی توام [7]، ماشین‌کاری [8]، خنک‌کاری [9] و میکرومبدل حرارتی [10] پرداخته‌اند.

در سال‌های اخیر نانوسیالات هیبریدی که ترکیبی از دو یا چند نانو ماده مختلف است به‌منظور افزایش نرخ انتقال حرارت مورد توجه قرار گرفته‌اند. در همین راستا، همت و همکاران [11] در یک پژوهش تجربی اثرات افزایش دما و غلظت نانو ذرات هیبریدی مس و اکسید تیتانیوم را در بازه دمایی 30°C تا 60°C و تا کسر حجمی 2% مورد بررسی قرار دادند. سیال پایه مخلوطی از آب و اتیلن گلیکول بود. نتایج آزمایش‌های ایشان افزایش ضریب انتقال حرارت هدایت تا 44% در دمای 60°C و کسر حجمی 2% بود. نانوسیالات هیبریدی دیگری نیز توسط باغبان‌زاده و همکاران [12]، موناخا‌پار و همکاران [13] و سیام و همکاران [14] نیز بررسی شده‌اند.

واضح است که افزودن مواد جامد به مایعات، دیگر خواص ترموفیزیکی آن‌ها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. یکی از مهمترین خواص ترموفیزیکی لزجت نانوسیال است که به‌طور مستقیم بر توان پمپاژ و سیستم‌های انتقال حرارت جابجایی اجباری اثر می‌گذارد. بنابراین تعیین لزجت نانوسیالات برای محاسبه توان مصرفی پمپاژ ضروری به نظر می‌رسد. تحقیقات زیادی در بررسی اثر افزودنی‌ها بر روی لزجت نانوسیالات انجام شده است. تعدادی از این تحقیقات (برای نانوسیالات حاوی مخلوط آب و اتیلن گلیکول به عنوان سیال پایه) که همگی براساس رفتار نیوتنی نانوسیالات گزارش شده‌اند به‌طور خلاصه در جدول 1 ارائه شده‌اند. این تحقیقات نشان داده‌اند که لزجت نانوسیالات با افزایش غلظت مواد جامد، افزایش و با افزایش دما، کاهش می‌یابد.

علی‌رغم مطالعات زیادی که بر روی لزجت نانوسیالات گزارش شده‌اند، تحقیقات اندکی به رفتار غیرنیوتنی آن‌ها پرداخته‌اند. به‌عنوان مثال کابالیرو و همکاران [20] به مطالعه رفتار رئولوژیک نانوسیال دی اکسید تیتانیوم - اتیلن گلیکول در بازه دمایی 20°C تا 50°C و تا کسر حجمی 25% پرداخته‌اند. ایشان اندازه‌گیری لزجت را در نرخ برش‌های متفاوت انجام دادند و نشان دادند که نانوسیال رفتار غیرنیوتنی شبیه مدل استوالد نشان می‌دهد. رفتار رئولوژیک پلی کربنات حاوی کسر جرمی 0.5% تا 15% نانولوله‌های کربنی توسط پوچکه و همکاران [21] بررسی شد. ایشان گزارش کردند که نمونه‌های دارای کسر جرمی بالاتر از 2% رفتار غیرنیوتنی نشان می‌دهند. فوک و همکاران [22] لزجت نانوسیالات حاوی نانولوله‌های کربنی چند جداره را به‌صورت آزمایشگاهی بررسی کردند. نتایج ایشان یک کاهش 20% در مقدار لزجت را نشان داد. ایشان همچنین درحالی‌که لزجت افزایش پیدا کرد، رفتار غیرنیوتنی مشاهده کردند.

جدول 1 تعدادی از تحقیقات موجود برای لزجت نانوسیالات حاوی مخلوط آب و

اتیلن گلیکول به عنوان سیال پایه

Table 1 A summary of existing studies for the viscosity of EG-water based nanofluids

مرجع	بازه کسر حجمی (%)	بازه دمایی (°C)	ذرات معلق
[15]	0-10	50-(-35)	سیلیکا
[16]	0-6.12	50-(-35)	اکسید مس
[17]	1-10	50-(-35)	اکسید آلومینیوم
[18]	0-1	50-0	اکسید آهن
[19]	0-4	40-15	اکسید آلومینیوم و اکسید تیتانیوم

1- Pseudoplastic behavior

2- Bingham plastic

3- Herschel-Bulkley

4- Casson

5- Hielscher

جدول 4 مقادیر نانولوله‌های کربنی چند جداره و نانوذرات دی‌اکسید سیلیسیوم برای تهیه نمونه‌ها

Table 4 Amounts of MWCNTs and SiO₂ nanoparticles for preparing the samples

جرم [±0.001] (g)		کسر حجمی (%)	ردیف
MWCNTs	SiO ₂		
12.6	14.4	2	1
9.4	10.8	1.5	2
6.3	7.2	1	3
4.7	5.4	0.75	4
3.15	3.6	0.5	5
1.57	1.8	0.25	6
0.37	0.43	0.0625	7

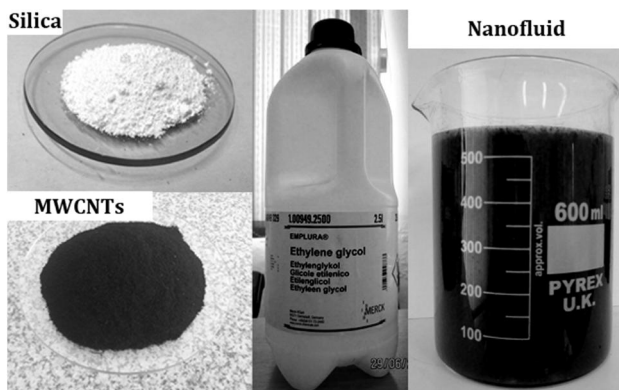


Fig. 1 Photographs of MWCNTs, SiO₂ nanoparticles, EG and prepared nanofluid

شکل 1 تصاویر نانولوله‌های کربنی، سیلیکا، اتیلن گلیکول و نانوسیال تهیه شده



Fig. 2 Measurement of viscosity using Brookfield DV-I PRIME digital Viscometer equipped with a temperature bath

شکل 2 نحوه اندازه‌گیری لزجت با استفاده از لزجت سنج بروکفیلد تجهیز شده با یک حمام دما

استفاده کالیبره⁴ شود. برای این منظور هنگامی که دستگاه روشن می‌شود و قبل از اندازه‌گیری، دستگاه توسط ماده‌ای که شرکت سازنده اعلام کرده باید کالیبره شود، ماده مورد استفاده در لزجت‌سنج بروکفیلد، سیلیکون است، در

جدول 2 مشخصات نانولوله‌های کربنی چند جداره و نانوذرات دی‌اکسید سیلیسیوم

Table 2 Characteristics of MWCNTs and SiO₂ nanoparticles

مشخصات	مقدار	
	نانولوله‌های کربنی	دی‌اکسید سیلیسیوم
خلوص	+0.97%	+0.99%
رنگ	مشکی	سفید
اندازه	قطر خارجی (nm) = 5-20	
	قطر داخلی (nm) = 3-5	
	طول (μm) = 50	
هدایت حرارتی (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	1500	1.3
چگالی (gcm ⁻³)	~2.1	2.4
سطح ویژه (m ² g ⁻¹)	233	180-600

جدول 3 مشخصات آب و اتیلن گلیکول

Table 3 Characteristics of water and ethylene glycol

مشخصات	مقدار	
	آب	اتیلن گلیکول
فرمول شیمیایی	H ₂ O	C ₂ H ₆ O ₂
جرم مولی (gmol ⁻¹)	18.02	62.07
ظاهر	تقریباً بی‌رنگ - شفاف	مایع بی‌رنگ - شفاف
بو	بی‌بو	بی‌بو
چگالی (kgm ⁻³)	998.21	1113.20
نقطه ذوب (°C)	0.00	-12.9
نقطه جوش (°C)	100	197.3
هدایت حرارتی (Wm ⁻¹ K ⁻¹)	0.6	0.224
لزجت (mPas) در 20°C	1	16.1

حجمی مختلف، هر نمونه به مدت سه روز به صورت چشمی مورد پایش قرار گرفت که هیچ‌گونه رسوب، ته‌نشینی و کلوخه شدن مشاهده نشد، تصاویری از نانوذرات دی‌اکسید سیلیسیوم، نانولوله‌های کربنی، اتیلن گلیکول و یک نمونه تهیه شده برای کسر حجمی 2% در شکل 1 نشان داده شده‌اند.

2-2- اندازه‌گیری لزجت

لزجت نمونه‌های نانوسیال، که با کسر حجمی‌های 0.0625%، 0.25%، 0.5%، 0.75%، 1%، 1.5% و 2% تهیه شده بود، در بازه دمایی 27.5°C تا 50°C اندازه‌گیری شد. برای این کار از لزجت سنج استوانه‌ای بروکفیلد¹ که به یک حمام دما تجهیز شده بود استفاده شد. اسپیندل به‌کار گرفته شده در این آزمایش از نوع یو ال ای² است که دارای ضریب نرخ برشی 1.223 و ضریب ثابت 0.64 است. اندازه‌گیری‌ها برای نرخ برش‌های مختلف انجام شد. دقت و تکرارپذیری این لزجت‌سنج به ترتیب ±1% و 0.2% کل گستره اندازه‌گیری³ است. قبل از انجام آزمایش‌ها، لزجت‌سنج با اتیلن گلیکول و آب اعتبارسنجی شد. به‌منظور ارزیابی رفتار رئولوژیک (نیوتنی یا غیرنیوتنی) نانوسیال، همه آزمایش‌ها برای هر نمونه در هر دما با دوره‌های مختلف (نرخ برش‌های مختلف) تکرار شد. شکل 2 نحوه اندازه‌گیری لزجت با استفاده از لزجت سنج بروکفیلد تجهیز شده به یک حمام دما نشان می‌دهد.

3-2- محاسبه خطا و عدم قطعیت

به منظور اعتبارسنجی آزمایش، دستگاه لزجت‌سنج بروکفیلد باید قبل از

1- DV-I PRIME model
2- ULA
3- Full Scale Range (FSR)

4- Calibration Befor Use (CBU)

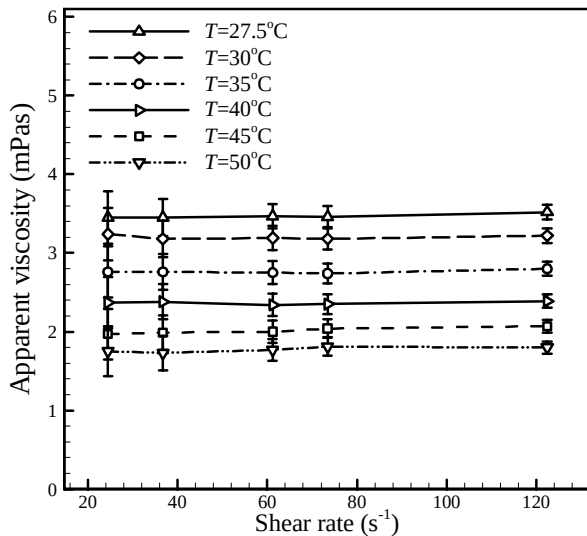


Fig. 3 Viscosity versus shear rate for base fluid at different temperatures

شکل 3 لزجت برحسب نرخ برش برای سیال پایه در دماهای مختلف

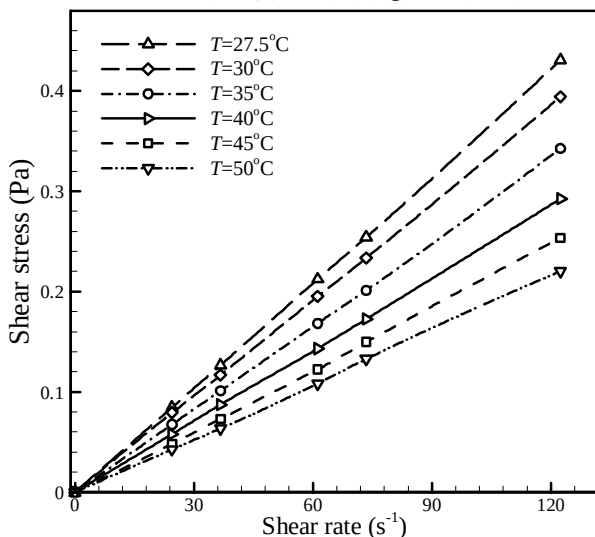


Fig. 4 Shear stress versus shear rate for base fluid at different temperatures

شکل 4 تنش برشی برحسب نرخ برش برای سیال پایه در دماهای مختلف

کاهش می‌یابد. این رفتار با اصطلاح نازک-برش¹ یا سدوپلاستیک شناخته می‌شود [26]. شکل 6 نیز رفتار غیرخطی تنش برشی برحسب نرخ برش را به خوبی نشان می‌دهد. این دو شکل به وضوح نشان دادند که با افزایش اندکی از ذرات جامد رفتار نیوتنی سیال پایه به رفتار غیرنیوتنی تغییر می‌یابد.

رفتار غیرنیوتنی برای نمونه نانوسیال با کسر حجمی 1% نیز در شکل‌های 7 و 8 نشان داده شده است. شکل‌های 5 تا 8 به وضوح نشان می‌دهند که در این مطالعه، رفتار نانوسیال یک رفتار غیرنیوتنی از نوع سدوپلاستیک است و از مدل قاعده توانی² (پاورلا) که در رابطه (5) نشان داده شده است پیروی می‌کند. برای سایر کسر حجمی‌ها نیز چنین رفتاری مشاهده شد. با بررسی شکل‌های 5 تا 8 نتیجه می‌شود که لزجت با افزایش دما کاهش و با افزایش کسر حجمی ذرات افزایش چشمگیری دارد.

آزمایش‌های اولیه که برای تعیین لزجت نمونه سیلیکون در دمای 25°C انجام گرفت مشخص شد که لزجت اندازه گیری شده با مقدار لزجت درج شده بر روی ماده نمونه (484 mPas) برابر است. این همخوانی نشان می‌دهد که لزجت‌سنج مورد استفاده کالیبره است.

مطابق با راهنمای دستگاه مقدار دقت اندازه‌گیری $\pm 1\%$ کل گستره اندازه‌گیری است. کل گستره اندازه‌گیری با استفاده از رابطه (2) محاسبه می‌شود.

$$FSR \text{ [mPas]} = TK \times SMC \times \frac{10000}{RPM} \quad (2)$$

که در آن TK ضریب گشتاور و برابر 0.0937 است. همچنین SMC ثابت اسپیندل و برابر 0.64 است. RPM نیز بیانگر مقدار دور دستگاه در دقیقه است.

مقدار خطای اندازه‌گیری لزجت‌سنج مورد استفاده را می‌توان براساس راهنمای شرکت سازنده از رابطه (3) محاسبه کرد.

$$Error \text{ [mPas]} = (0.01 \times FSR) + (0.01 \times \mu) \quad (3)$$

که در آن μ مقدار لزجت اندازه گیری شده توسط دستگاه برحسب mPas است.

برای نمونه، جدول 5 خطای محاسبه شده در اندازه‌گیری لزجت نانوسیال با کسر حجمی 0.0625% در دمای 27.5°C و دوره‌های مختلف را نشان می‌دهد.

3- نتایج و بحث

همان‌طور که در بخش 2-2 بیان شد لزجت نمونه‌های نانوسیال با کسر حجمی‌های 0.0625%, 0.25%, 0.5%, 0.75%, 1%, 1.5% و 2% در نرخ برش‌ها و دماهای مختلف اندازه‌گیری شد. در ابتدا با اندازه‌گیری لزجت سیال پایه در نرخ برش‌های مختلف، که نتایج آن در شکل 3 نشان داده شده است، رفتار رئولوژیک سیال پایه ارزیابی شد. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود لزجت سیال پایه مستقل از نرخ برش است و این یعنی این که سیال پایه رفتار نیوتنی دارد. برای درک بهتر این ادعا نمودار تنش برشی برحسب نرخ برش برای سیال پایه در دماهای مختلف در شکل 4 نشان داده شده است. رابطه (4) که نشان دهنده وابستگی تنش برشی به نرخ برش است نشان می‌دهد که اگر لزجت ثابت باشد (یا به عبارتی رابطه خطی برقرار باشد) سیال نیوتنی است. با توجه به شکل 4 و رابطه (4) واضح است که سیال پایه نیوتنی است.

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (4)$$

در این جا τ تنش برشی برحسب Pa، $\dot{\gamma}$ نرخ برش برحسب s^{-1} و μ لزجت سیال برحسب Pas است.

شکل‌های 5 و 6 به ترتیب مقادیر لزجت و تنش برشی را برحسب نرخ برش برای نمونه با کسر حجمی 0.0625% در دماهای مختلف نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل 5 دیده می‌شود مقدار لزجت با افزایش نرخ برش

جدول 5 مقادیر کل گستره و خطا برای کسر حجمی 0.0625% در دمای 27.5°C و دوره‌های مختلف

ردیف	دور (RPM)	کل گستره (mPas)	خطا (mPas)
1	10	60	0.6923
2	20	30	0.3767
3	30	20	0.2716
4	50	12	0.1865
5	60	10	0.1654

1- Shear-thinning
2- Power law

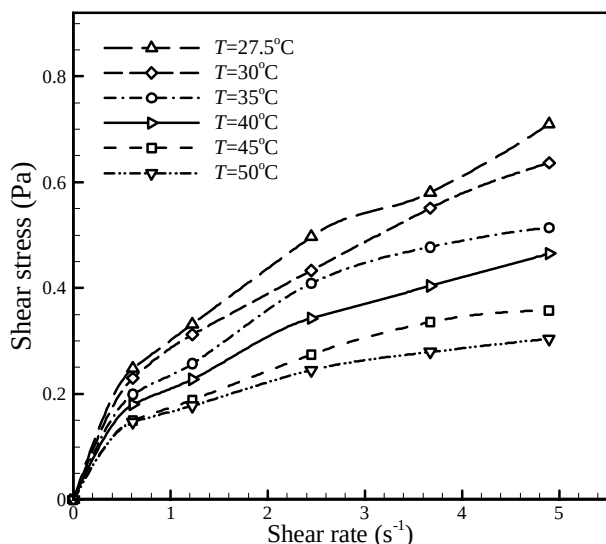


Fig. 8 Shear stress versus shear rate for solid volume fraction of 1% at different temperatures

شکل 8 تنش برشی برحسب نرخ برش برای کسر حجمی 1% در دماهای مختلف

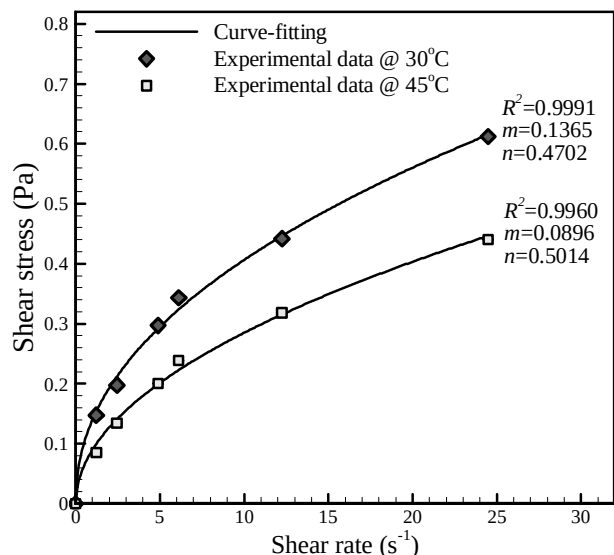


Fig. 9 Curve-fitting results for nanofluid with solid volume fraction of 0.5% at different temperatures

شکل 9 نتایج برازش منحنی برای نانوسیال با کسر حجمی 0.5% در دماهای مختلف

$$\tau = m\dot{\gamma}^n \quad (5)$$

در این جا τ تنش برشی برحسب Pa، $\dot{\gamma}$ نرخ برش برحسب s^{-1} ، m شاخص استحکام سیال¹ برحسب Pas^n و n شاخص رفتار جریان² است؛ که با توجه به شکل های 5 تا 8، در نانوسیال حاضر $n < 1$ است.

همچنین لزجت ظاهری³ از رابطه (6) به دست می آید

$$\mu = m\dot{\gamma}^{n-1} \quad (6)$$

که در آن μ لزجت ظاهری نانوسیال است.

با توجه به نتایج ارائه شده در شکل های 5 تا 8 و رفتار غیرنیوتنی نانوسیال، به دست آوردن پارامترهای m و n برای محاسبه توان پمپاژ و انتقال حرارت جابجایی مهم و ضروری به نظر می رسد. همان طور که مشاهده شد،

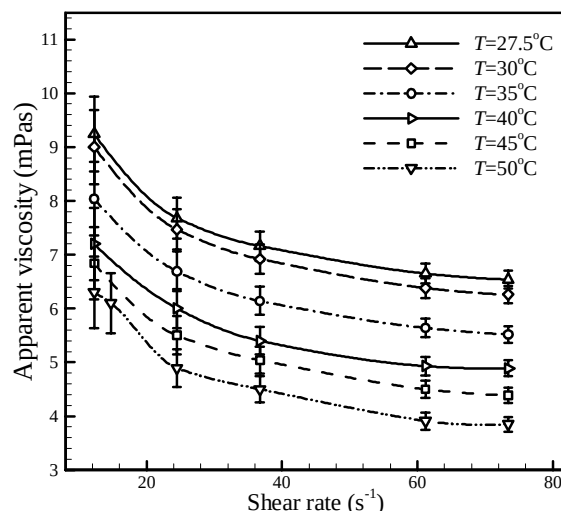


Fig. 5 Viscosity versus shear rate for solid volume fraction of 0.0625% at different temperatures

شکل 5 لزجت برحسب نرخ برش برای کسر حجمی 0.0625% در دماهای مختلف

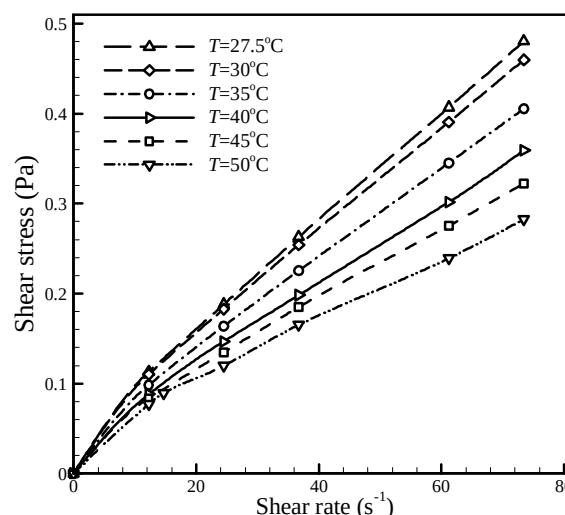


Fig. 6 Shear stress versus shear rate for solid volume fraction of 0.0625% at different temperatures

شکل 6 تنش برشی برحسب نرخ برش برای کسر حجمی 0.0625% در دماهای مختلف

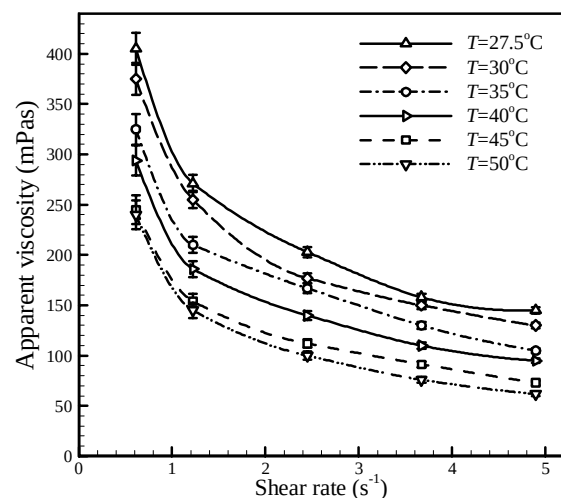


Fig. 7 Viscosity versus shear rate for solid volume fraction of 1% at different temperatures

شکل 7 لزجت برحسب نرخ برش برای کسر حجمی 1% در دماهای مختلف

1- Consistency index
2- Power law index
3- Apparent viscosity

جدول 6 شاخص‌های مدل قاعده توانی برحسب دما و کسر حجمی

Table 6 Power law model parameters as a function of temperature and solid volume fraction

کسر حجمی (%)	دما (°C)	m (Pas ⁿ)	n	R^2
0.0625	27.5	0.013	0.8378	0.9994
	30	0.0132	0.8249	0.9995
	35	0.0122	0.8144	0.9996
	40	0.011	0.8073	0.9991
	45	0.0114	0.776	0.9994
0.25	27.5	0.0526	0.6061	0.9985
	30	0.0527	0.5832	0.9982
	35	0.0448	0.5687	0.9975
	40	0.0351	0.6009	0.9994
	45	0.0312	0.5904	0.9990
0.5	27.5	0.1493	0.4615	0.9978
	30	0.1365	0.4702	0.9991
	35	0.1052	0.5193	0.9970
	40	0.1072	0.4605	0.9951
	45	0.0896	0.5014	0.9960
0.75	27.5	0.2168	0.5508	0.9984
	30	0.1894	0.5523	0.9961
	35	0.1703	0.4982	0.9993
	40	0.1493	0.4246	0.9985
	45	0.123	0.4073	0.9912
1	27.5	0.3071	0.5164	0.9974
	30	0.2832	0.5064	0.9990
	35	0.2521	0.4707	0.9921
	40	0.2183	0.4765	0.9980
	45	0.1821	0.4411	0.9957
1.5	27.5	0.4837	0.4572	0.9985
	30	0.4483	0.4653	0.9985
	35	0.3316	0.4807	0.9989
	40	0.2589	0.4353	0.9995
	45	0.227	0.4465	0.9996
2	27.5	0.5144	0.4073	0.9985
	30	0.483	0.4507	0.9979
	35	0.4193	0.4289	0.9958
	40	0.3396	0.4493	0.9980
	45	0.3031	0.4388	0.9984
2	50	0.2821	0.3963	0.9980

نانوسیال و در همه دماها به صورت جداگانه به دست آمدند. مقایسه‌ها نشان داد که برازش منحنی انجام شده دارای دقت خوبی است.

5- فهرست علائم

m	شاخص استحکام سیال (Pas ⁿ)
n	شاخص رفتار جریان
T	دما (°C)
w	جرم (kg)

علائم یونانی

$\dot{\gamma}$	نرخ برش (s ⁻¹)
μ	لزجت دینامیکی (یا kgm ⁻¹ s ⁻¹)
ρ	چگالی (kgm ⁻³)
τ	تنش برشی (Pa)

تنش برشی تابعی غیرخطی از نرخ برش، دما و کسر حجمی است؛ بنابراین می‌توان با برازش منحنی و به کمک رابطه (5) مقادیر m و n را برای هر دما و کسر حجمی به دست آورد. در این تحقیق با استفاده از نرم‌افزار سیگما پلات برای هر حالت مقادیر m ، n و R^2 به دست آمد که نتایج حاصل در جدول 6 گزارش شده است. برای بررسی دقت برازش انجام شده، شکل 9 چگونگی عبور منحنی برازش شده بر نتایج آزمایشگاهی برای کسر حجمی 0.5% در دو دمای مختلف را نشان می‌دهد. این شکل مطابقت خوب منحنی‌های برازش شده را با نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد.

همان‌طور که در جدول 6 مشاهده می‌شود مقادیر n همواره کمتر از یک هستند و این به این معناست که با افزایش نرخ برشی، لزجت ظاهری کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش کسر حجمی در اکثر نقاط مقدار n کاهش می‌یابد و این بدان معناست که رفتار سیال از حالت نیوتنی فاصله بیشتری می‌گیرد و رفتار غیرنیوتنی بیشتر محسوس است. با بررسی شاخص m مشاهده می‌شود که با افزایش کسر حجمی، m افزایش و با افزایش دما، m کاهش می‌یابد. همان‌طور که در جدول 6 ارائه شده است با افزایش کسر حجمی ذرات m و در نتیجه لزجت نانوسیال در یک دمای ثابت افزایش می‌یابد (براساس رابطه (6)). در واقع با افزایش ذرات حرکت تصادفی نانوذرات در سیال پایه که یکی از عوامل تاثیرگذار بر لزجت است افزایش می‌یابد. در اثر برخورد پیوسته بین نانوذرات و مولکول‌های سیال پایه این حرکت تصادفی به وجود می‌آید. وقتی کسر حجمی افزایش یابد یعنی حضور نانوذرات در سیال پایه بیشتر شده و چون لزجت به معنی مقاومت نانوسیال در برابر حرکت است، با اضافه کردن نانوذرات به سیال پایه مقاومت در برابر جریان افزایش می‌یابد. همچنین وقتی نانوذرات و نانولوله‌ها به سیال پایه اضافه می‌شوند، در سیال پایه پراکنده شده و در اثر نیروی واندروالس بین ذرات و سیال پایه، نانوخوشه‌های بزرگتر تشکیل می‌شوند. این نانوخوشه‌ها باعث ممانعت از حرکت سیال پایه روی یکدیگر شده و در نتیجه لزجت افزایش می‌یابد. همچنین جدول 6 نشان می‌دهد که با افزایش دما مقدار m کاهش می‌یابد. در واقع وجود لزجت در اثر نیروهای چسبندگی بین مولکول‌های مایعات است. در مایعات مولکول‌ها تحت تاثیر دماهای بالاتر دارای انرژی بیشتر شده و می‌توانند بر نیروهای چسبندگی بین مولکولی غلبه کنند. در نتیجه مولکول‌های انرژی‌دار راحت‌تر حرکت می‌کنند. کاهش نیروهای بین مولکولی در اثر افزایش دما سبب کاهش مقاومت در برابر جریان می‌شود. در نتیجه لزجت نانوسیال با افزایش دما کاهش می‌یابد. نتایج به دست آمده برای رفتار m و n برحسب دما و کسر حجمی با نتایج تحقیقات گذشته که توسط حجت و همکاران [27] و یاسار¹ و همکاران [28] گزارش شده‌اند مطابقت خوبی دارند.

4- نتیجه گیری

در این پژوهش لزجت نمونه‌های نانوسیال با کسر حجمی‌های 0.0625%، 0.25%، 0.5%، 0.75%، 1%، 1.5% و 2% در نرخ برش‌ها و دماهای مختلف اندازه‌گیری شد. در ابتدا با اندازه‌گیری لزجت سیال پایه در نرخ برش‌های مختلف رفتار رئولوژیک سیال پایه ارزیابی شد و مشخص شد که سیال پایه رفتار نیوتنی دارد. نتایج نشان داد که با افزایش اندکی ذرات جامد به سیال پایه رفتار نانوسیال تولید شده غیرنیوتنی شد که از مدل قاعده توانی پیروی می‌کرد. همچنین مشخص شد که رفتار رئولوژیک نانوسیال به شدت به دما و کسر حجمی وابسته است. بنابراین با استفاده از نتایج آزمایشگاهی و برازش منحنی شاخص‌های مدل قاعده توانی (n و m) برای همه نمونه‌های

6-مراجع

- 6415-6425, 2013.
- [14] L. S. Sundar, M. K. Singh, A. C. M. Sousa, Enhanced heat transfer and friction factor of MWCNT-Fe₃O₄/water hybrid nanofluids, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 52, No. 3, pp. 73-83, 2014.
- [15] P. K. Namburu, D. P. Kulkarni, A. Dandekar, D. K. Das, Experimental investigation of viscosity and specific heat of silicon dioxide nanofluids, *Micro & Nano Letters*, Vol. 2, No. 3, pp. 67-71, 2007.
- [16] P. K. Namburu, D. P. Kulkarni, D. Misra, D. K. Das, Viscosity of copper oxide nanoparticles dispersed in ethylene glycol and water mixture, *Experimental Thermal and Fluid Scienc*, Vol. 32, No. 2, pp. 397-402, 2007.
- [17] B. C. Sahoo, R. S. Vajjha, R. Ganguli, G. A. Chukwu, D. K. Das, Determination of Rheological Behavior of Aluminum Oxide Nanofluid and Development of New Viscosity Correlations, *Petroleum Science and Technology*, Vol. 27, No. 15, pp. 1557-1770, 2009.
- [18] L. S. Sundar, E. V. Ramana, M. K. Singh, A. C. M. De Sousa, Viscosity of low volume concentrations of magnetic Fe₃O₄ nanoparticles dispersed in ethylene glycol and water mixture, *Chemical Physics Letters*, Vol. 554, No. 1, pp. 236-242, 2012.
- [19] T. Yiamsawas, O. Mahian, A. S. Dalkilic, S. Kaewnai, S. Wongwises, Experimental studies on the viscosity of TiO₂ and Al₂O₃ nanoparticles suspended in a mixture of ethylene glycol and water for high temperature applications, *Applied Energy*, Vol. 111, No. 1, pp. 40-45, 2013.
- [20] D. Cabaleiro, M. J. Pastoriza-Gallego, C. Gracia-Fernández, M. M. Piñeiro, L. Lugo, Rheological and volumetric properties of TiO₂-ethylene glycol nanofluids, *Nanoscale Research Letters*, Vol. 8, No. 1, pp. 286, 2013.
- [21] P. Potschke, T. D. Fornes, D. R. Paul, Rheological behavior of multi walled carbon nanotube/polycarbonate composites, *Polymer*, Vol. 43, No. 11, pp. 3247-3255, 2002.
- [22] T. X. Phuoc, M. Massoudi, R. H. Chen, Viscosity and thermal conductivity of nanofluids containing multi-walled carbon nanotubes stabilized by chitosan, *International Journal of Thermal Sciences*, Vol. 50, No. 1, pp. 12-18, 2011.
- [23] B. Aladag, S. Halelfadl, N. Doner, T. Mare, S. Duret, P. Estelle, Experimental investigations of the viscosity of nanofluids at low temperatures, *Applied Energy*, Vol. 97, No. 1, pp. 876-880, 2012.
- [24] E. Tamjid, B.H. Guenther, Rheology and colloidal structure of silver nanoparticles dispersed in diethylene glycol, *Powder Technology*, Vol. 197, No. 1-2, pp. 49-53, 2010.
- [25] M. B. Moghaddam, E. K. Goharshadi, M. H. Entezari, P. Nancarrow, Preparation, characterization and rheological properties of grapheme-glycerol nanofluids, *hemical Engineering Journal*, Vol. 231, No. 1, pp. 365-372, 2013.
- [26] R. P. Chhabra, J. F. Richardson, *Non-Newtonian Flow in the Process Industries: Fundamentals and Engineering Applications*, First published, pp. 6-10, Great Britain: Butterworth-Heinemann, 1999.
- [27] M. Hojjat, S. G. Etemad, R. Bagheri, J. Thibault, Rheological characteristics of non-Newtonian nanofluids: experimental investigation, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 38, No. 2, pp. 144-148, 2011.
- [28] F. Yasar, H. Togrul, N. Arslan, Flow properties of cellulose and carboxymethyl cellulose from orange peel, *ournal of Food Engineering*, Vol. 81, No. 1, pp. 187-199, 2007.
- [1] T. Yiamsawas, A. Selim Dalkilic, S. Wongwises, Measurement of the thermal conductivity of titania and alumina nanofluids, *Thermochimica Acta*, Vol. 545, No. 1, pp. 48-56, 2012.
- [2] M. Chandrasekar, S. Suresh, A. Chandra Bose, Experimental investigations and theoretical determination of thermal conductivity and viscosity of Al₂O₃/water nanofluid, *Experimental Thermal and Fluid Scienc*, Vol. 34, No. 2, pp. 210-216, 2010.
- [3] L. S. Sundar, M. K. Singh, A. C. M. Sousa, Investigation of thermal conductivity and viscosity of Fe₃O₄nanofluid for heat transfer applications, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 44, No. 5, pp. 7-14, 2013.
- [4] J. Jeong, C. Li, Y. Kwon, J. Lee, S. Hyung Kim, R. Yun, Particle shape effect on the viscosity and thermal conductivity of ZnO nanofluids, *International Journal of Refrigeration*, Vol. 36, No. 8, pp. 2233-2241, 2013.
- [5] M. Hemmat Esfe, S. Saedodin, M. Bahiraei, D. Toghraie, O. Mahian, S. Wongwises, Thermal conductivity modeling of MgO/EG nanofluids using experimental data and artificial neural network, *Thermal Analysis and Calorimetr*, Vol. 118, No. 8, pp. 287-297, 2014.
- [6] A. Abdollahi, M. R. Salimpour, N. Etesami, Experimental analysis of pool boiling heat transfer of ferrofluid on surfaces deposited with nanofluid, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 2, pp. 19-30, 2016. (in Persianفارسی)
- [7] A. Aghaei, H. Khorasanizadeh, G. A. Sheikhzadeh, Effects of magnetic field on mixed convection heat transfer and entropy generation of Cu-water nanofluid in a trapezoidal enclosure, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 9, pp. 183-164, 2014. (in Persianفارسی)
- [8] S. Amini, S. M. Asgari, M. H. Mazaheri, investigating the machining parameters in turning of Monel K500 super alloy at dry and minimum quantity lubrication (QL) by nano-fluids conditions, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 13, pp. 59-63, 2015. (in Persianفارسی)
- [9] M. Nazari, N. Babazade-baie, M. .M. Shahmardan, M. Ashouri, Experimental study of transient cooling of fluid inside closed reservoir by using CuO/water nanofluid, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 6, pp. 99-106, 2015. (in Persianفارسی)
- [10] M. S. Gachuiee, S. M. Peyghambarzadeh, S. H. Hashemabadi, A. Chabi, Experimental investigation of convective heat transfer of Al₂O₃/water nanofluid through the micro heat exchanger, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 4, pp. 74-85, 2013. (in Persianفارسی)
- [11] M. Hemmat Esfe, S. Wongwises, A. Naderi, A. Asadi, M. R. Safaei, H. Rostamian, M. Dahari, A. Karimipour, Thermal conductivity of Cu/TiO₂-water/EG hybrid nanofluid: Experimental data and modeling using artificial neural network and correlation, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 66, No. 8, pp. 100-104, 2015.
- [12] M. Baghbanzadeh, A. Rashidi, D. Rashtchian, R. Lotfi, A. Amrollahi, Synthesis of spherical silica/multiwall carbon nanotubes hybrid nanostructures and investigation of thermal conductivity of related nanofluids, *Thermochimica Acta*, Vol. 549, No. 1, pp. 87-94, 2012.
- [13] B. Munkhbayar, M. R. Tanshen, J. Jeoun, H. Chung, H. Jeong, Surfactant-free dispersion of silver nanoparticles into MWCNT-aqueous nanofluids prepared by one-step technique and their thermal characteristics, *Ceramics International*, Vol. 39, No. 6, pp.