

## Studying the effect of using $Al_2O_3/H_2O$ nanofluid with a polymeric nature in the performance of heat exchanger

Tammam Mohammad Alhaddo

Bassam Alkairawan

Faculty of Mechanical and Electrical Engineering || Al- Baath University || Syria

Ibrahim Alghoraibi

Faculty of Science || Damascus University || Syria

**Abstract:** In this experimental study,  $Al_2O_3$  nanoparticles with an average diameter of  $50nm$  were used to prepare three volume concentrations  $\varphi(0.05, 0.1, 0.25)\%vol$  from Heat transfer nanofluid  $Al_2O_3/H_2O$  by Two step method. The dimensions of  $Al_2O_3$  were described by Atomic Force Microscopy (AFM). The stability of the nanoparticles is evaluated by Zeta potential and transmission electron microscopy (TEM). Polyacrylamide (PAAM) was used as a material to help disperse and stabilize nanoparticles. The thermal conductivity of nanofluid was measured by a device which works by the hot wire method. The results showed an increase in the thermal conductivity with increasing concentration of nanoparticles, where the improvement percentage was 5.3% at 0.25% vol and  $60^\circ C$  compared with the base liquid. The nanofluid tested as a hot liquid in Double- pipe heat exchanger, The results showed an improvement in the thermal indicators of the exchanger, such as the efficiency, the total heat transfer coefficient, the amount of heat exchanged, and heat transfer units. The heat exchanger showed high efficiency with an increase in the concentration of nanoparticles and the pumping capacity, as the highest value of the total performance coefficient reached 1.186, despite the increase in the friction factor with the increase in the concentration of  $Al_2O_3$  nanoparticles.

**Keywords:** nanofluid- Polymer- nanoparticles- Stability- Thermal conductivity- performance coefficient.

## دراسة تأثير استخدام مائع نانومتري $Al_2O_3/H_2O$ ذو طبيعة بوليميرية في أداء المبادل الحراري

تمام محمد الحدو

بسام الكيروان

كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية || جامعة البعث || سوريا

إبراهيم الغريبي

كلية العلوم || جامعة دمشق || سوريا

**المستخلص:** في هذه الدراسة التجريبية استخدمت جسيمات  $Al_2O_3$  النانوية بمتوسط قطر  $50nm$  لتحضير ثلاثة تراكيز حجمية  $\varphi(0.05, 0.1, 0.25)\%vol$  من سائل نقل حرارة نانوي  $Al_2O_3/H_2O$  بطريقة الخطوتين. ووصفت أبعاد الجسيمات النانوية بواسطة مجهر القوى الذرية (AFM)، تم تقييم استقرار السائل النانوي بقياس جهد زيتا والمجهر الإلكتروني النافذ (TEM).

استُخدم البوليمير بولي أكريل أميد (PAAM) كمادة تساعد على تثبيت واستقرار الجسيمات النانوية، قيسَت الموصلية الحرارية للعينات المُحضَرة بواسطة جهاز يعمل بطريقة السلك الساخن العابر، أظهرت النتائج زيادة في الموصلية الحرارية مع زيادة تركيز الجسيمات النانوية حيث بلغت نسبة التحسّن 5.3% عند التركيز 0.25%vol والدرجة 60°C مقارنة مع السائل الأساسي، تمّ اختبار السائل النانوي كسائل ساخن في مُبادل حراري مزدوج، أظهرت النتائج تحسناً في المؤشرات الحرارية للمبادل كفعالية المبادل الحراري ومُعامل انتقال الحرارة الكلي وكمية الحرارة المتبادلة ووحدات انتقال الحرارة. أبدى المبادل الحراري كفاءة عالية مع زيادة تركيز الجسيمات النانوية وقدرة الضخ حيث بلغت أعلى قيمة لمعامل الأداء الكلي 1.186، بالرغم من ارتفاع مُعامل الاحتكاك مع زيادة تركيز جسيمات  $Al_2O_3$  النانوية.

الكلمات المفتاحية: السائل النانوي - بوليمير- جسيمات  $Al_2O_3$  النانوية- الاستقرارية- الموصلية الحرارية - معامل الأداء.

## 1- مقدمة.

السوائل النانوية هي سوائل غير تقليدية لنقل الحرارة تعتمد على تعليق وإضافة جزيئات معدنية أو أكاسيد معادن أو مركبات كربون من رتبة النانومتر إلى السوائل التقليدية كالماء المقطر والاثيلين غليكول وزيت المحركات وغيرها<sup>[1]</sup>، حيث تمتلك موصلية حرارية أعلى من تلك التي تتميز بها السوائل التقليدية. في الآونة الأخيرة بُذلت جهود حثيثة من قبل الباحثين في التحقق من إمكانية استخدامها كوسائط نقل حرارة بديلاً عن السوائل التقليدية التي تتصف بالموصلية الحرارية المُخفضة<sup>[2]</sup>، وذلك بغاية تعزيز التبادل الحراري ورفع كفاءة الطاقة في نظم التطبيقات الحرارية.

إنّ الاستقرار والتشّتت الجيّد للجسيمات النانوية ضمن السائل الأساسي الحاضن لها يُعدّ من أهم العوامل التي تؤثر على الموصلية الحرارية للسوائل النانوية<sup>[3]</sup>، لذا قام الباحثون بالتحقق من الاستقرار بعدّة تقنيات كتغيير في PH المحلول<sup>[4]</sup> أو إضافة خافضات توتر سطحية<sup>[5]</sup> والتعرض للأمواج فوق الصوتية<sup>[6]</sup>، وتقييم الاستقرار بعدّة طرق كقياس جهد زيتا<sup>[7]</sup>، وطريقة القياس بالمجهر الإلكتروني TEM, SEM<sup>[8]</sup> وقياس الامتصاصية بواسطة UV-Vis<sup>[9]</sup>. العديد من الأبحاث السابقة اهتمت في التحقق من تحسين انتقال الحرارة للسوائل النانوية في المبادلات الحرارية، Darzi<sup>[10]</sup> وآخرون درسوا تجريبياً تأثير السائل النانوي  $Al_2O_3/H_2O$  على الأداء الحراري ومعامل انخفاض الضغط لمبادل حراري مزدوج، Esfe<sup>[11]</sup> تحقق تجريبياً من الخصائص الحرارية والهيدروليكية للسائل النانوي  $MgO/H_2O$  كوسيط تبريد، Han<sup>[12]</sup> وآخرون اختبروا تجريبياً تأثير التركيز ودرجة الحرارة لسائل  $Al_2O_3/H_2O$  على الأداء الحراري لمبادل حراري مزدوج في منطقة التدفق المضطرب حيث رقم رينولدز  $Re(6000 - 20000)$ ، القليل من الأبحاث تناول سلوك انتقال الحرارة للسوائل النانوية في منطقة الجريان الصفحي غير مُكتمل التطور حرارياً<sup>[13][14]</sup>. في هذا العمل التجريبي سنتحقق من خصائص انتقال الحرارة بالحمل لسائل نانوي  $Al_2O_3/H_2O$  مع إضافة تركيز مُنخفض للبوليمير بولي أكريل أميد والذي سنرمز له اختصاراً (PAAM) في منطقة الجريان الصفحي غير مكتمل التطور حرارياً ومنطقة الجريان المضطرب وفق مجال  $Re(600 - 3800)$  في مبادل حراري مُزدوج، حيث تهدف هذه الدراسة في تحسين المؤشرات الحرارية للمبادل الحراري كمعامل انتقال الحرارة بالحمل والفعالية الحرارية ووحدات انتقال الحرارة وذلك باستخدام مائع نانوي يتمتع بموصلية حرارية أعلى من السوائل التقليدية، بينما تكمن الغاية من إضافة البوليمير في تقليل معامل الاحتكاك للسائل النانوي وتحسين تشّتت واستقرار الجسيمات النانوية وبالتالي تحسّن في معامل الأداء الكلي للمبادل الحراري.

تكمن أهمية البحث في رفع كفاءة أنظمة الطاقة عن طريق تحسين الخصائص الحرارية والهيدروليكية لسوائل نقل الحرارة التقليدية كالماء المقطر وذلك باستخدام التقانة النانوية.

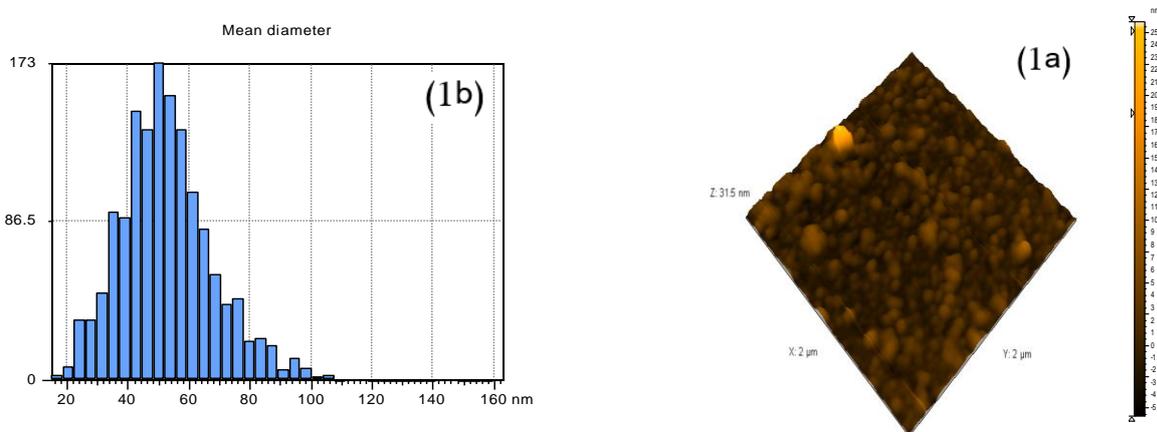
### مواد البحث ومنهجية العمل.

في هذا العمل استُخدمت بودرة نانوية  $Al_2O_3$ ، خصائصها الفيزيائية والحرارية مُدرجة في الجدول (1):

الجدول رقم (1) يمثل الخصائص الفيزيائية والحرارية لجسيمات  $Al_2O_3$

النقاوة	99.99 %
متوسط القطر	50nm
المساحة السطحية	$20 m^2/g$ أكبر من
الشكل واللون	كروية بيضاء
الكثافة $\rho$	$3950 kg/m^3$
الموصلية الحرارية	$40 W/m.^\circ C$
قابلية الذوبان في الماء	لا تذوب في الماء
السعة الحرارية	$765 J/kg.K$

بدايةً قبل التحضير وُصِّفَت أبعاد جسيمات  $Al_2O_3$  بواسطة مجهر القوى الذرية AFM كما في الشكل (1) بيّنَت صور الـ AFM أنّ الجسيمات النانوية تأخذ شكلاً كروياً مُتجانساً بمتوسط أقطار.  $(45 - 55)nm$



الشكل (1): (a) صور AFM ثلاثية البعد  $(2\mu m \times 2\mu m)$  لسطح  $Al_2O_3$  (b) منحنيات توزيع إحصائي لجسيمات  $Al_2O_3$  كما أُستخدِم بولي أكريل أميد PAAM ذو الصيغة الكيميائية  $[C_3H_5NO]_n$  وزنه الجزيئي 71.08 g/mol كثافته  $1189 kg/m^3$  على شكل بودرة لونه أبيض مائل للأصفر الباهت، يُصنّف هذا النوع من ضمن بوليميرات الفينيل ويُعدُّ من أكثر البوليمرات قابلية للذوبان في الماء، ولمحاليله المائية عند تركيز أقل من 10000 ppm خصائص فيزيائية وحرارية مشابهة تماماً للماء المقطر باستثناء خاصية اللزوجة، كما يُعتبر من مُخفّضات للاحتكاك [15] وهي أحد الأسباب لاختياره كمُشتت لجسيمات  $Al_2O_3$  النانوية في هذه الدراسة.

### تحضير السائل النانوي:

استُخدمت جسيمات  $Al_2O_3$  في تحضير ثلاثة تراكيز حجمية  $\varphi(0.05, 0.1, 0.25)\%vol$  من سائل نقل حرارة نانوي بوليميري  $Al_2O_3/H_2O$  بطريقة الخطوتين وفق للعلاقة (1):

$$\varphi(\text{vol}) = \frac{\frac{m_{np}}{\rho_{np}}}{\frac{m_{np}}{\rho_{np}} + \frac{m_w}{\rho_w}} \% \quad (1)$$

حيث  $m_w$  و  $m_{np}$  تمثل وزن كلا من جسيمات  $Al_2O_3$  النانوية والماء المقطر، بينما تمثل  $\rho_w$  و  $\rho_{np}$  كثافة كلا من الجسيمات النانوية والماء المقطر على الترتيب.

في البداية قُمنّا بتحضير المحلول المائي مع البودرة النانوية وفق التراكيز المذكورة، وتم تحريكها بخلاط ميكانيكي مدّة ساعتين وذلك بهدف الحصول على تشتيت جيد لجسيمات الألومينا ضمن المحلول المائي، ثم عُرض المزيج للأمواج فوق الصوتية مدّة ساعة واحدة وفقاً للأدبيات<sup>[16]</sup> وذلك بغاية التغلب على روابط فاندرفالس بين الجسيمات النانوية وتحسين تشتتها واستقرارها، بعدها تم إضافة البوليمير وباستمرار الخلط تم الحصول على عيّنات السائل النانوي، يمثل الشكل (2) خطوات العمل التجريبي في التحضير.



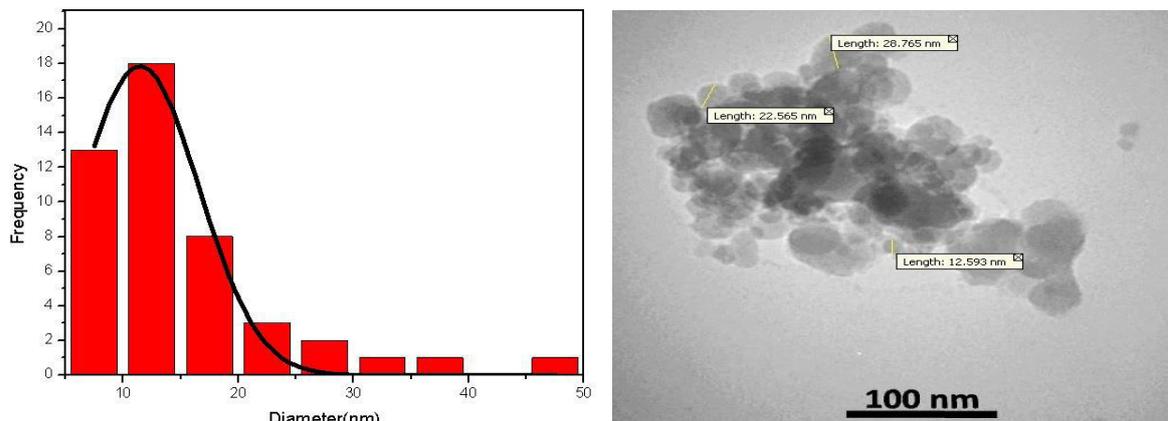
الشكل (2) طريقة الخطوتين المتّبعة في تحضير عيّنات السائل النانوي

تم إجراء العديد من التجارب المخبرية بطريقة الخطوتين لتحضير ثلاثة عينات مستقرة من السائل النانوي، الغاية من هذا الإجراء تكمن في اختيار التركيز المناسب من البوليمير لضمان تشتيت واستقرار الجسيمات النانوية، حيث قمنا في كل تجربة إضافة تركيز مختلف من البوليمير تدريجياً مع المحافظة على تركيز جسيمات  $Al_2O_3$  النانوية ومراقبة تشتت واستقرار العينات المُحضّرة مع مرور الوقت، وبنهاية التجارب تم اختيار ثلاث عينات من السائل النانوي والتي أبدت استقراراً جيّداً وتشتت متجانس لتقييم استقرارها لاحقاً، حيث تم اختيار البوليمير بتركيزات (500, 750, 1000) ppm لعينات السائل النانوي  $Al_2O_3/H_2O$  (0.05, 0.1, 0.25)% vol على الترتيب. أُجريت التجارب المخبرية لهذا العمل في مخبر تكنولوجيا النانو في جامعة دمشق ومخبري تقانة الصناعات وانتقال الحرارة في جامعة البعث.

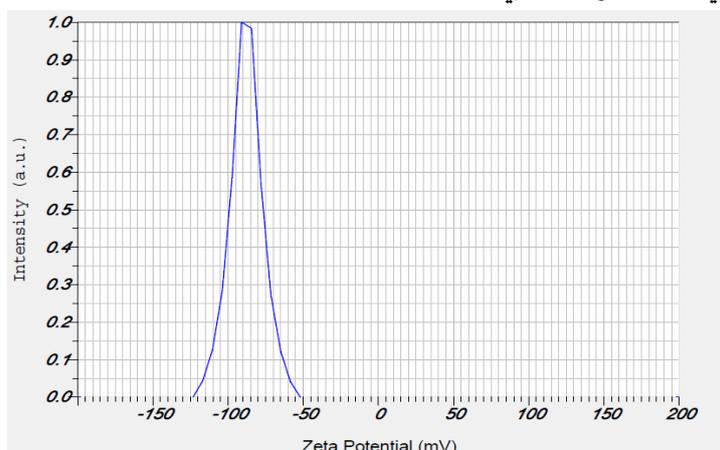
#### تقييم استقرار السائل النانوي:

إن أحد أهم المشاكل التي تُواجه تحضير السوائل النانوية هو مدى استقرار الجسيمات النانوية وعدم ترسّبها لما لها أهمية في تحسين آلية انتقال الحرارة، في هذه الدراسة تمّ دراسة سلوك الاستقرار للعينات المُحضّرة بعدة تقنيات حديثة، حيث وُصّفت البودرة النانوية في المحلول باستخدام المجهر الإلكتروني النافذ TEM، يُظهر الشكل (3)

وجود حبيبات نانوية كروية الشكل مُشتتة ومُتفرقة بشكل جيّد في الوسط الحاضن، يُظهر الشكل (4) التوزع الوسطي لأقطار الحبيبات المُقاسة بواسطة TEM والذي يتراوح بين  $(10 - 20)nm$ .



الشكل (3) صورة TEM للسائل النانوي  $Al_2O_3/H_2O$  الشكل (4) متوسط توزع الأقطار لحبيبات  $Al_2O_3$  النانوية وللتأكد من مدى استقرار الجسيمات النانوية ضمن المحلول الغروي قمنا بقياس جهد زيتا Zeta potential لإحدى العينات كما هو مبين الشكل (5)، يتضح من الشكل أن قيمة جهد زيتا سالبة الشحنة وعالية جداً  $(-87.8 mv)$  وهي أعلى بكثير من  $(-60 mv)$  المقدار الذي يُشير إلى الاستقرار الكبير للمحلول الغروي وعدم ترسيب الجسيمات النانوية لفترات زمنية طويلة.



الشكل (5) قياس جهد زيتا لإحدى عينات السائل النانوي البوليميري  $Al_2O_3/H_2O$

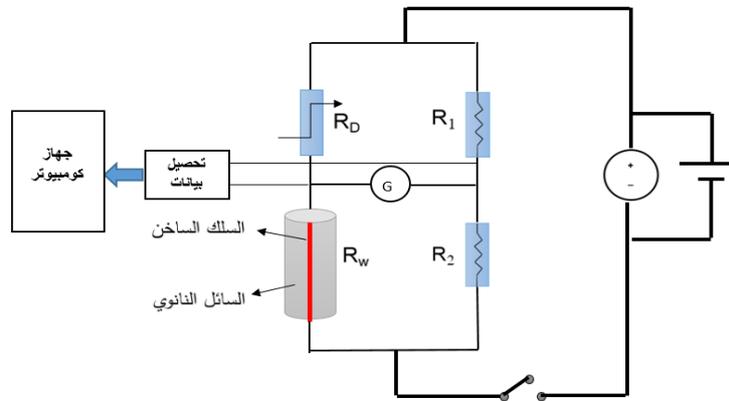
#### الموصلية الحرارية واللزوجة للسائل النانوي:

إنّ أحد أهم العوامل الرئيسية في تحديد فعالية السوائل النانوية هو تعزيز الموصلية الحرارية لها ومُقارنتها مع السوائل التقليدية، هُنالك العديد من النماذج النظرية التي تنبأت بقيمة الموصلية الحرارية كنموذج Maxwell نقلًا عن Wang<sup>[17]</sup> ونموذج Timofeeva<sup>[18]</sup>، إلا أنّ هذه النماذج لم تتناول العوامل التي يُمكن أن تُؤثر على تعزيز الموصلية الحرارية للسوائل النانوية مُتجمعة، وهذا يُعدّ سبباً أساسياً في انحراف القيم التجريبية عن النظرية في مُختلف الأدبيات، كما أنّ بعض النماذج حَصَّتْ في مضمونها جسيمات نانوية مُعينة دون غيرها كنموذج Williams<sup>[19]</sup>، ونظراً أنّ السائل المُحضّر في هذه الدراسة يعتمد على محلول البوليمير PAAM كوسط حاضن، كان لا بد من إجراء قياسات تجريبية للموصلية الحرارية لعينات السائل النانوي بواسطة جهاز قياس الموصلية الحرارية للسوائل دارته الكهربائية مُوضّحة بالشكل (6)، يعمل هذا الجهاز بطريقة السلك الساخن العابر حيث يتم توليد كمية من

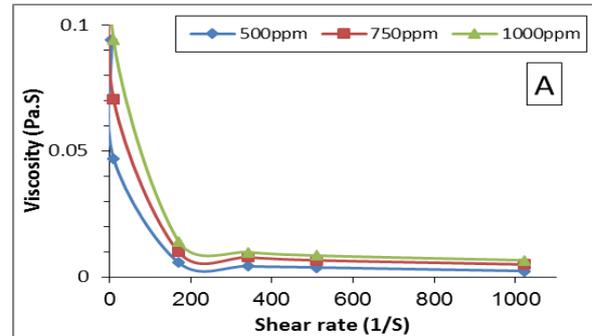
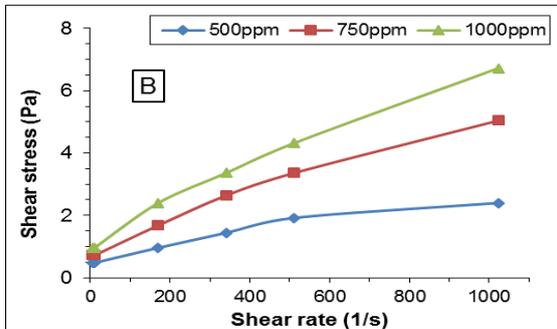
الحرارة من منبع تيار مستمر عبر سلك رفيع ومعزول مغمور في عينة السائل النانوي المراد قياس موصليته الحرارية. هذا السلك يكون أحد أفرع من دائرة جسر وتستون بالإضافة إلى مقاومتين ثابتتين ومقاومة متغيرة يتم من خلالها موازنة الجسر، وبالتالي عند تطبيق فرق جهد بين طرفي دائرة الجسر يسخن السلك وتتغير مقاومته، حيث يعمل السلك كوسيلة للتسخين وكحساس درجة حرارة معاً، يُمكن حساب الموصلية الحرارية للسائل النانوية وفق العلاقة [20]:<sup>(2)</sup>

$$K_f = \frac{q_l}{4\pi} \frac{d \ln t}{d \Delta T} \quad (2)$$

حيث  $K_f$  الموصلية الحرارية للسائل،  $q_l$  كمية الحرارة العابرة لسلك القياس عبر واحدة الطول وتُقاس بوحدة  $\frac{W}{m}$ ، بينما  $t$  و  $\Delta T$  يُمثلان كلا من وقت القياس وفرق درجة الحرارة بين السائل والسلك الساخن على الترتيب.



الشكل (6) مخطط جهاز الموصلية الحرارية للسوائل النانوية بطريقة السلك الساخن العابر في هذا العمل تم قياس الموصلية الحرارية تجريبياً عند تراكيز  $(0.05, 0.1, 0.25)\% vol$  للسائل النانوي  $Al_2O_3/H_2O$  عند درجات حرارة  $(20, 40, 60)^\circ C$ ، حيث تم مقارنة النتائج مع السائل الأساسي غير الحاضن للجسيمات النانوية وذلك بغاية دراسة مدى تأثير إضافتها على تعزيز الموصلية الحرارية. تم التحقق من الخصائص الريولوجية لعينات السائل النانوي المحضرة بواسطة جهاز لزوجة دوراني نوع Chan35، يُبين الشكل (7-أ) زيادةً في لزوجة السائل النانوي مع زيادة تركيز البوليمير، وأن اللزوجة لا تُبدي قيمة ثابتة مع زيادة معدل القص، يُعزى ذلك للطبيعة غير النيوتونية التي يتمتع بها السائل النانوي، يُمثل الشكل (7-ب) علاقة إجهاد قص ومعدل القص حيث يُبدي السائل النانوي إجهاد قص أولي وهذا ما يؤكد الطبيعة غير النيوتونية عند معدلات قص منخفضة.

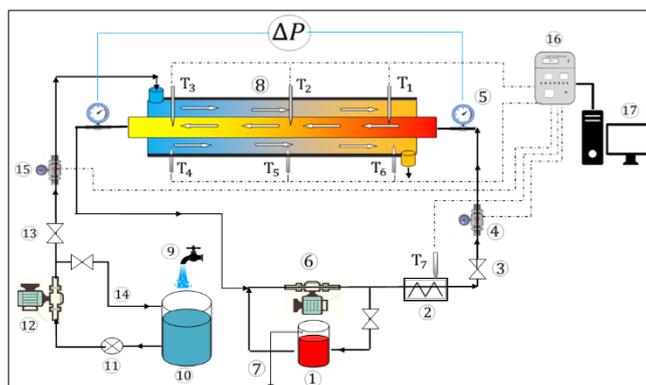


الشكل (7) A- لزوجة السوائل الأساسية بدلالة معدل القص - B إجهاد القص - معدل القص

## إجراء التجارب:

في هذه الدراسة تم اختبار السائل النانوي البولييميري  $Al_2O_3/H_2O$  المُحضّر تجريبياً بثلاثة تراكيز  $\varphi(0.05, 0.1, 0.25)\% vol$  في مُبادل حراري مخبري مزدوج من النوع HT31 مُصنّع من قبل شركة armfield بريطانيا، الأنبوب الداخلي من معدن stainless steel بقطر خارجي  $d_o = 9.5mm$  و قطر داخلي  $d_i = 8.3mm$  وبطول كلي قدره  $L = 660 mm$  وبمساحة إجمالية قدرها  $2000mm^2$  ، بينما القطر الخارجي من الأكروليك بقطر خارجي  $D_o = 15 mm$  وداخلي  $D_i = 12 mm$  ، زُوِد المبادل بسبعة حساسات حرارية من النوع  $K - Thermocouple$  بحساسية  $\pm 0.1^\circ C$  بنطاق  $(0 - 133)^\circ C$ ، ثلاثة لكل من دارة السائل النانوي الساخن والماء البارد، ومقياسي ضغط بنطاق  $(0 - 300)mmHg$  و بحساسية  $\pm 0.5$  وصمامات تحكم لقياس تدفق كلا من السائل الساخن والبارد.

استُخدم السائل النانوي  $Al_2O_3/H_2O$  المُختبر كسائل ساخن ضمن الأنبوب الداخلي بدرجة حرارة دخول  $50^\circ C$  وفق ستة تدفقات حجمية  $(0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3) l/min$  ، بينما استُخدم الماء كسائل بارد في الفراغ الحلقي بدرجة حرارة خول  $13^\circ C$  وتدفق حجمي ثابت  $\dot{v} = 1 l/min$  في نظام جريان مُتعاكس، تمّ اتخاذ هذا الإجراء بغاية دراسة مدى تأثير السائل النانوي على الأداء الحراري والهيدروليكي للمبادل الحراري، حيث تمّ مقارنة النتائج التجريبية للسائل النانوي (الحاضن لجسيمات  $Al_2O_3$ ) مع السائل الأساسي (بوليمير- ماء مُقطّر) للتحقق من تأثير الجسيمات النانوية على أداء المبادل الحراري. من أجل الدقة في نتائج القياس تم عزل الأنبوب الخارجي للمبادل جيداً بطبقة من الصوف الزجاجي بسماكة  $2 cm$  وذلك لكي لا يتم تبادل حراري بين السائل البارد في الحلقة والوسط الخارجي، يُمثل الشكل (8) مخطط توضيحي لدارة كلا من السائل الساخن والماء البارد في المبادل الحراري المدروس، بينما يُمثل الشكل (9) المبادل الحراري المدروس، يُمثل الجدول (2) الخصائص الفيزيائية والحرارية للسائل النانوي المُختبر في هذه الدراسة.



الشكل (9) مبادل حراري مزدوج

الشكل (8) مخطط توضيحي لدارة عمل المبادل

الجدول (2) الخصائص الحرارية والفيزيائية للسوائل عند درجات الحرارة الوسطية

ماء التبريد <sup>[22]</sup>	السائل النانوي الساخن $Al_2O_3/H_2O$			السائل الأساسي	
	$\varphi = 0.25\%$	$\varphi = 0.1\%$	$\varphi = 0.05\%$	$\varphi = 0\%$	
998	995.2	994.9	993	990	الكثافة $\rho \left( \frac{kg}{m^3} \right)$
4180	4172	4175	4177	4180	السعة الحرارية $C_p \left( \frac{J}{kg.K} \right)$

ماء التبريد <sup>[22]</sup>	السائل النانوي الساخن $Al_2O_3/H_2O$			السائل الأساسي	
	$\varphi = 0.25\%$	$\varphi = 0.1\%$	$\varphi = 0.05\%$	$\varphi = 0\%$	
0.607	0.66	0.648	0.638	0.629	الموصلية الحرارية $K \left( \frac{W}{m.K} \right)$
0.95	2.013	2.005	2.003	2	اللزوجية $\mu(pa.s) \times 10^{-3}$

نماذج رياضية:

- تُحسب كلا من كثافة السائل<sup>[21]</sup> والسعة الحرارية<sup>[22]</sup> وفق العلاقاتين (3) و(4) على الترتيب:

$$\rho_{nf} = \varphi \cdot \rho_{np} + (1 - \varphi) \cdot \rho_{bf} \quad (3)$$

$$CP_{nf} = \varphi \cdot Cp_{np} + (1 - \varphi) \cdot Cp_{bf} \quad (4)$$

- تُحسب كمية الحرارة المنبعثة من السائل الساخن والماء البارد وفق العلاقاتين (5) و(6) على الترتيب:

$$Q_h = \dot{m}_h \cdot C_p h (T_{hi} - T_{h,o}) \quad (5)$$

$$Q_c = \dot{m}_c \cdot C_p c (T_{c,o} - T_{c,i}) \quad (6)$$

- كمية الحرارة المتبادلة بين السائل الساخن والماء البارد تُعطى بالعلاقة (7):

$$Q_{avr} = \frac{Q_h + Q_c}{2} \quad (7)$$

- فرق درجة الحرارة اللوغاريتمي الوسطي  $\Delta T_{lmtd}$  لجريان متعاكس تُعطى بالعلاقة (8):

$$\Delta T_{lmtd} = \frac{(T_{h,i} - T_{c,o}) - (T_{h,o} - T_{c,i})}{\ln \left( \frac{T_{h,i} - T_{c,o}}{T_{h,o} - T_{c,i}} \right)} \quad (8)$$

- مُعامل انتقال الحرارة الكلي U بالعلاقة (9):

$$UA = \frac{Q_{avr}}{\Delta T_{lmtd}} \quad (9)$$

- في حال لم تتجاوز الضياعات الحرارية للسائل الساخن نسبة  $\pm 2.5\%$  في مبادل حراري مزدوج، يُحسب تجريبياً مُعامل انتقال الحرارة بالحمل للسائل النانوي وفقاً لقانون نيوتن في التبريد بالعلاقة (10) وذلك حسب ما تحقّق منه تجريبياً الباحث Reddy<sup>[23]</sup> وآخرون:

$$h_{nf \text{ Exp}} = \frac{Q_{avr}}{A_i \Delta T_{lmtd}} \quad (10)$$

وبالتالي تُحسب قيمة نوسلت للسائل النانوي  $Nu_{nf}$  بالعلاقة (11):

$$Nu_{nf} = \frac{h_{nf \text{ Exp}} d_i}{K_{nf}} \quad (11)$$

وتُحسب قيمة رقم رينولدز للسائل النانوي بالعلاقة (12):

$$Re_{nf} = \frac{\rho_{nf} V_{nf} d_h}{\mu_{nf}} \quad (12)$$

- تُحسب فعالية المبادل الحراري المُزدوج يعمل في جريان مُتعاكس كما في هذه الدراسة بدلالة كلا من وحدات انتقال الحرارة NTU ونسبة السعة الحرارية  $C_R$  بالعلاقتين (13) و<sup>[24]</sup>(14):

$$\varepsilon = \frac{1 + \exp[-NTU(1 - C_R)]}{1 - C_R \exp[-NTU(1 - C_R)]} \quad ; \quad C_R < 1 \quad (13)$$

$$\varepsilon = \frac{NTU}{1 + NTU} \quad ; \quad C_R = 1 \quad (14)$$

- حيث NTU تمثل وحدات انتقال الحرارة وهي علاقة لا بعدية تُعطى بدلالة كلا من مُعامل انتقال الحرارة بالحمل الكلي ومساحة سطح التبادل الحراري والسعة الحرارية الصغرى بالعلاقة (15):

$$NTU = \frac{UA}{C_{min}} \quad (15)$$

- يُحسب مُعامل الاحتكاك  $f$  تجريبياً بعد معرفة هبوط الضغط  $\Delta P$  بين مقياسي الضغط على طول الأنبوب الداخلي للمبادل الحراري.

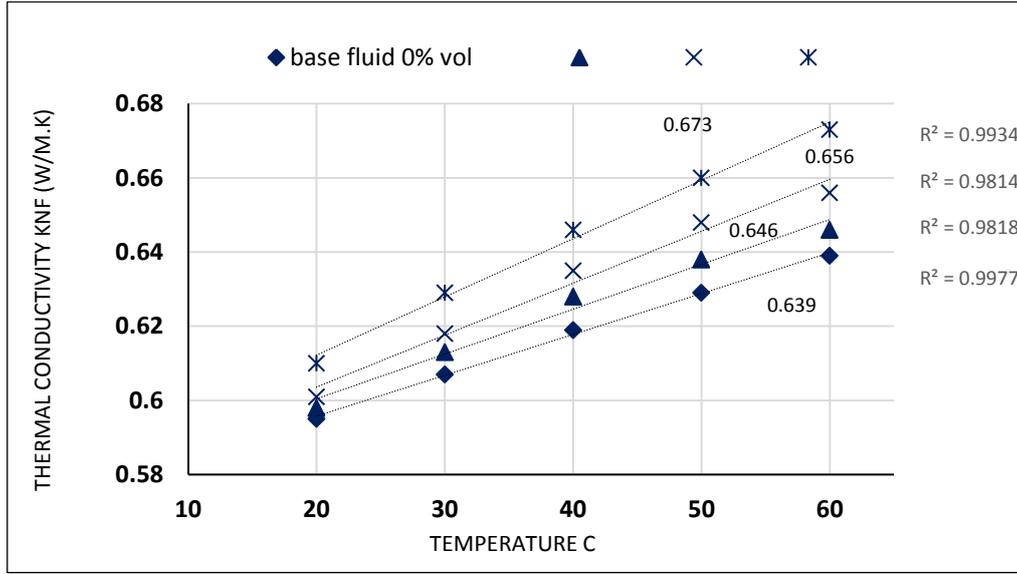
- يُحسب الأداء العام للمبادل الحراري (الحراري والهيدروليكي) وفقاً لعلاقة Esfe<sup>[11]</sup> كما في العلاقة (16):

$$\eta_{total} = \frac{\left(\frac{Nu_{nf}}{Nu_{bf}}\right)}{\left(\frac{f_{nf}}{f_{bf}}\right)^{1/3}} \quad (16)$$

## النتائج والمناقشة.

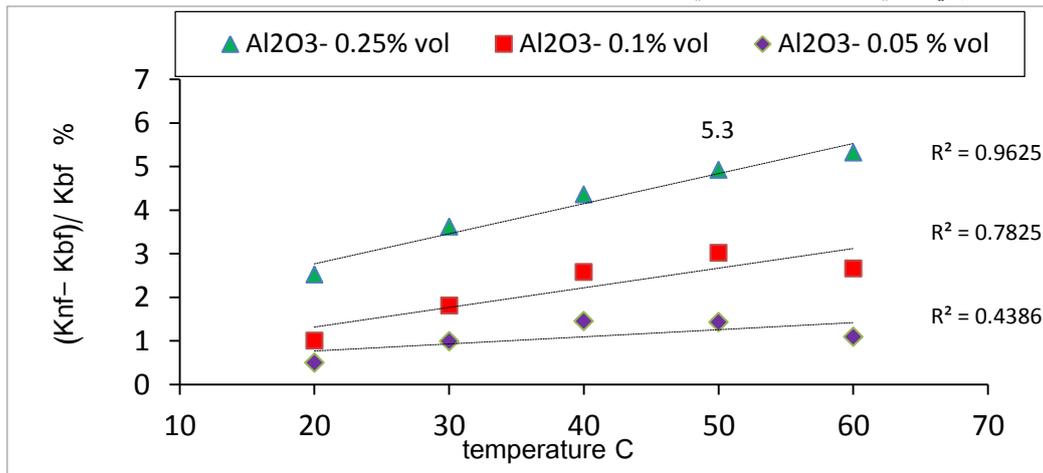
### الموصلية الحرارية للسائل النانوي:

يُبين الشكل (10) القيم المُقاسة تجريبياً للموصلية الحرارية للسائل النانوي  $K_{nf}$  والأساسي  $K_{bf}$  عند تراكيز ودرجات حرارة مختلفة، أظهرت النتائج أنّ الموصلية الحرارية للسائل النانوي تزداد بزيادة تركيز الجسيمات النانوية وارتفاع درجة الحرارة وفق علاقة غير خطية، يُبدي التركيز 0.05% تحسناً طفيفاً في الموصلية الحرارية مقارنة مع السائل الأساسي عند درجة الحرارة  $20^\circ\text{C}$ ، بينما التراكيز 0.1% و 0.25% تُبدي تحسناً أكبر عند نفس درجة الحرارة، يُفسّر هذا التحسن أنه مع زيادة تركيز جسيمات  $\text{Al}_2\text{O}_3$  في السائل الأساسي تزداد مساحة سطح التبادل الحراري فيما بينها من جهة والسائل الأساسي من جهة أخرى نتيجة زيادة مساحة سطحها النوعي مما يُحسن الموصلية الحرارية. بلغت أقصى قيمة للموصلية الحرارية  $0.673 \text{ w/m.k}$  عند التركيز 0.25% والدرجة  $60^\circ\text{C}$ ، بينما بلغت  $(0.656, 0.646) \text{ w/m.k}$  لكل من التركيزين (0.1, 0.05)% على الترتيب عند نفس درجة الحرارة.



الشكل (10) الموصلية الحرارية للسائل النانوي  $Al_2O_3/H_2O$  عند درجات حرارة مختلفة

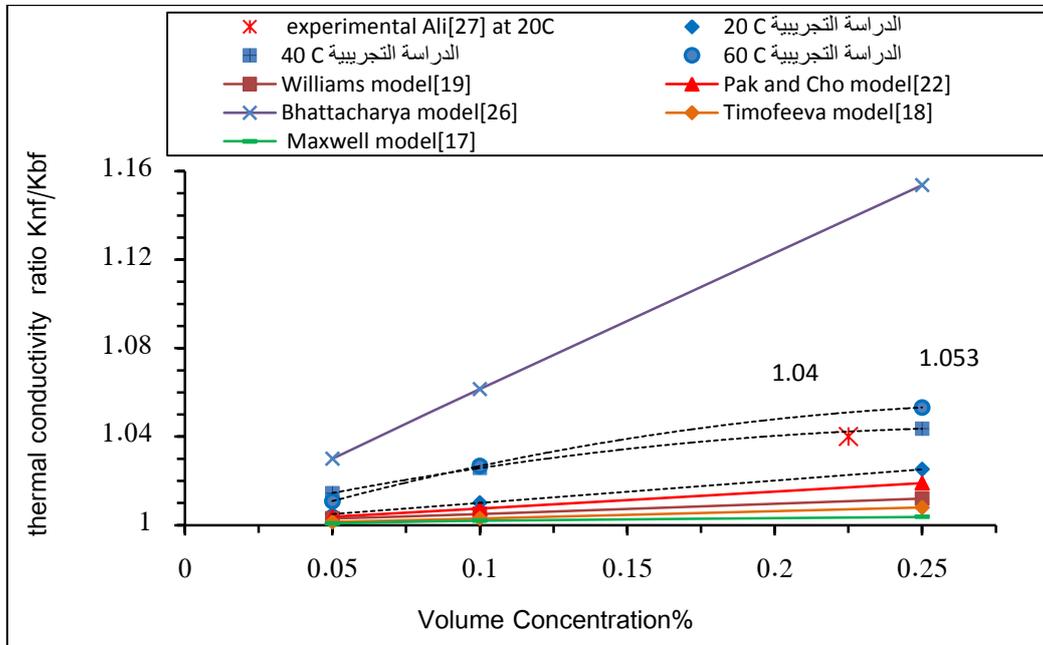
يظهر الشكل (11) النسبة المئوية لتعزيز الموصلية الحرارية والتي تمثل نسبة الموصلية الحرارية للسائل النانوي  $K_{nf}$  إلى السائل الأساسي  $K_{bf}$  عند درجات حرارة من  $20^\circ C$  حتى  $60^\circ C$ ، نلاحظ زيادة نسبة التعزيز مع ارتفاع درجة الحرارة وفق علاقة غير خطية في مختلف التراكيز المدروسة، حيث يبدي التركيزين 0.05% و 0.1% تحسناً جيداً مع ارتفاع درجة الحرارة حتى الدرجة  $40^\circ C$  بعدها تنخفض نسبة التعزيز بنفس النهج عند الدرجة  $60^\circ C$ ، يمكن تفسير هذا السلوك نتيجة انخفاض اللزوجة نوعاً ما لهذه التراكيز عند درجة الحرارة  $60^\circ C$  التي ساهمت في تكسير بعض روابط البوليمير المتشابكة في السوائل الأساسية الحاضنة للجسيمات النانوية وهذا بدوره دهور من تشتت الجسيمات وتجانس السائل النانوي مما أثر على تعزيز الموصلية الحرارية، بينما يبدي التركيز 0.25% أفضل نسبة تحسن وقد بلغت إلى 5.3% عند درجة الحرارة  $60^\circ C$  ويعزى هذا إلى اللزوجة المرتفعة نوعاً ما للسائل الأساسي عند تركيز 1000 ppm للبوليمير والتي ساهمت في تقييد الحركة البراونية للجسيمات النانوية وحافظت على تشتتها مما ساهم في تعزيز الموصلية الحرارية.



الشكل (11) نسبة تعزيز الموصلية الحرارية للسائل النانوي  $K_{nf}$  مقارنة مع السائل الأساسي  $K_{bf}$

الشكل (12) يُمثل مقارنة نتائج الموصلية الحرارية للسائل النانوي مع عدّة نماذج نظرية ونتائج تجريبية سابقة، إن النتائج التجريبية لدينا تبدي تحسناً عن بعض النماذج النظرية كنموذج Maxwell<sup>[17]</sup> ونموذج

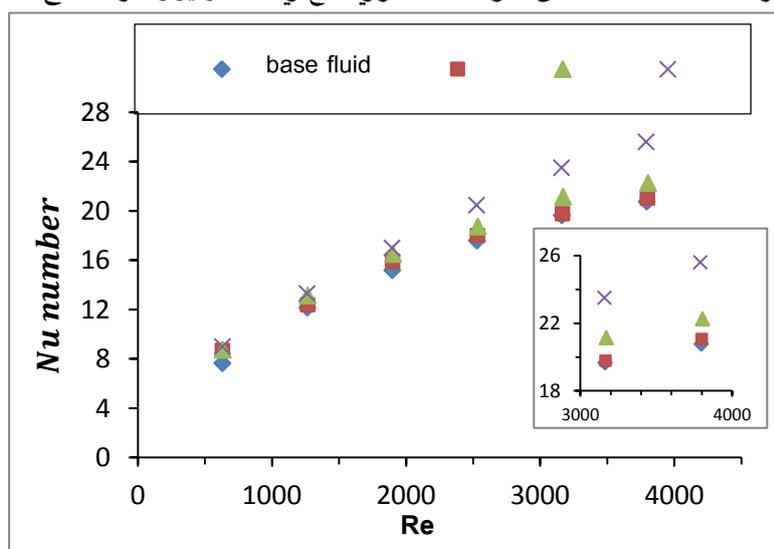
Timofeeva<sup>[18]</sup> ونموذج Williams<sup>[19]</sup> ، يُعزى هذا التحسّن كون أنّ هذه النماذج لم تأخذ بعين الاعتبار طبيعة الحركة البراونية للجسيمات النانوية ضمن السائل الأساسي، كما أنها لم تدرس تأثير الطبقة النانوية المحيطة بالجسيم النانوي أو ما يُعرف بالقطر الهيدروديناميكي الذي يُساهم في زيادة التوصيل الحراري<sup>[25]</sup> ، إذ اهتمت فقط بنوع وشكل وتركيز الجسيمات النانوية وموصليتها الحرارية  $K_{np}$  وموصلية السائل الأساسي الحرارية  $K_{bf}$ ، دون أن تولي اهتمام في العديد من العوامل كحجم الجسيمات ودرجة حموضة السائل ودرجة الحرارة وغيرها من العوامل التي من شأنها أن تُؤثر على آلية انتقال الحرارة في السوائل النانوية، لذلك نلاحظ أن نسبة تعزيز الموصلية الحرارية في النماذج النظرية تتعلق فقط بتركيز الجسيمات النانوية ولا تتأثر بتغير درجة الحرارة إذ تبدو العلاقة خطية تماماً. يبدو نموذج الباحث Pak and Choi<sup>[22]</sup> هو الأقرب لنتائج هذه الدراسة عند درجة الحرارة  $20\text{ }^\circ\text{C}$  ، حيث فسّر نتائج نمودجه لتأثير سماكة الطبقة المحيطة بالجسيمات النانوية والتي ساهمت في تحسّن الموصلية الحرارية للسائل النانوي. إلا أن نمودجه لم يأخذ بعين الاعتبار تأثير درجة الحرارة على تعزيز الموصلية الحرارية لذلك انحرقت نتائجنا تحسناً عنه في درجتي الحرارة  $40\text{ }^\circ\text{C}$  و  $60\text{ }^\circ\text{C}$ ، أما نموذج Bhattacharya<sup>[26]</sup> أبدى تعزيزاً كبيراً في التنبؤ بالموصلية الحرارية، يمكن أن يُعزى هذا أن الباحث طوّر نمودجه النظري على المحاكاة الديناميكية لحركة الجسيمات البراونية كحالة مثالية لتفسير آلية انتقال الحرارة في السوائل النانوية. عند مقارنة نتائجنا مع نتائج الباحث Ali<sup>[27]</sup> الذي تحقّق بشكل تجريبي من الموصلية الحرارية لسائل نانوي  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{H}_2\text{O}$  عند تراكيز مختلفة بينها التركيز  $\phi(0.225)\% \text{ vol}$  في درجة الحرارة  $20\text{ }^\circ\text{C}$  والذي يقع ضمن نطاق دراستنا، نلاحظ أن نتائجنا أبدت بعض التحسّن عن نتائجنا عند نفس درجة الحرارة، تُعزى هذه النتيجة كون أن الباحث استخدم جسيمات  $\text{Al}_2\text{O}_3$  عند متوسط قطر صغير  $(11)\text{nm}$  ، بينما في دراستنا بلغ متوسط القطر  $(50)\text{nm}$  ومن المعروف أنّ الموصلية الحرارية للسوائل النانوية تزداد كلّما انخفض قطر الجسيمات النانوية نتيجة زيادة مساحة سطح التبادل الحراري<sup>[28]</sup>.



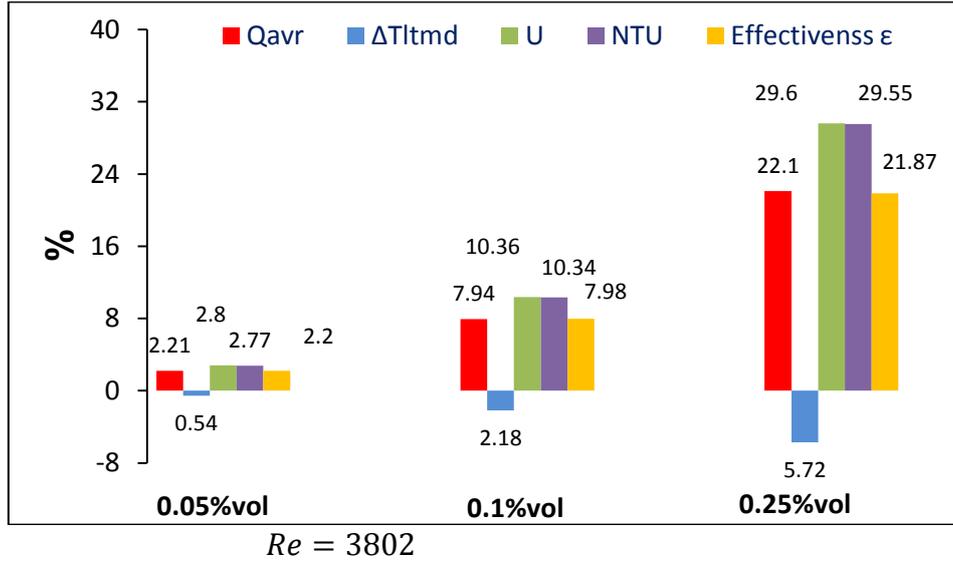
الشكل (12) مقارنة نسبة تعزيز الموصلية الحرارية للسائل النانوي مع عدّة نماذج نظرية ونتائج تجريبية سابقة

### المؤشرات الحرارية:

يُبين الشكل (13) تحسّن رقم نوسلت  $Nu$  للسائل النانوي مع زيادة تركيز جسيمات  $Al_2O_3$  مقارنة مع السائل الأساسي كدالة في رقم رينولدز  $Re$ . حيث يُعبّر رقم  $Nu$  عن نسبة الحمل الحراري إلى التوصيل الحراري، بينما يُعبّر رقم  $Re$  على تأثيرات اللزوجة وقُدرة الضخ وهي القيمة اللا بُعدية المسؤولة على طبيعة الجريان. نلاحظ زيادة في رقم  $Nu$  مع زيادة كلا من تركيز السائل النانوي ورقم  $Re$ . فقد بلغت نسبة التحسّن  $1.4\%$ ,  $5.3\%$ ,  $19\%$  من أجل التراكيز  $(0.05, 0.1, 0.25)\%vol$  على الترتيب، وذلك عند  $Re = 3802$ . هذا التحسّن جاء نتيجة زيادة مُعامل انتقال الحرارة بالحمل للسائل النانوي مع زيادة تركيز الجسيمات النانوية ويُعزى ذلك نتيجة لتحسّن الموصلية الحرارية مع زيادة التركيز وقُدرة الضخ.

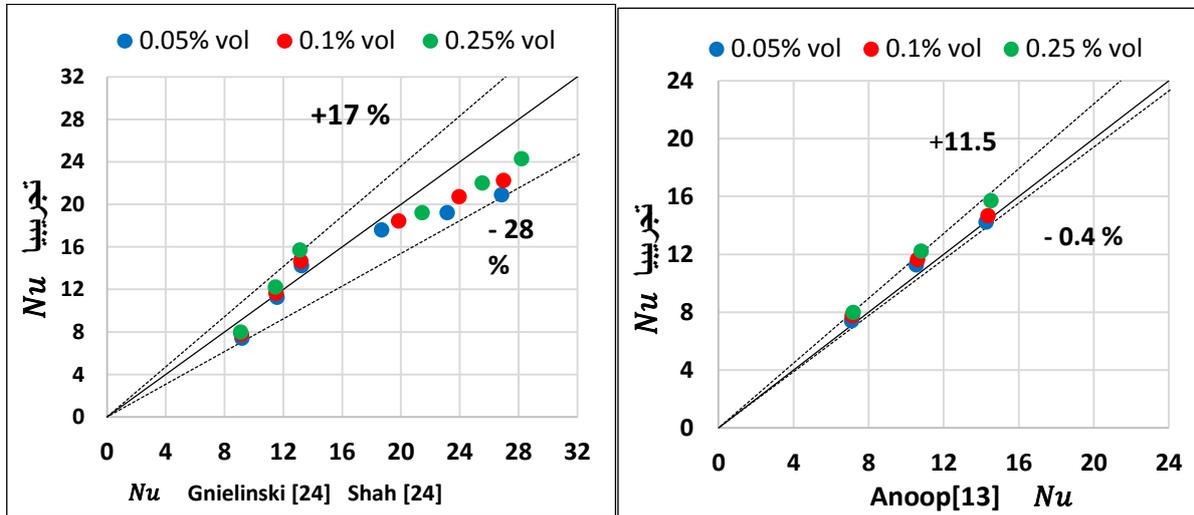


الشكل (13) رقم نوسلت للسائل النانوي  $Al_2O_3/H_2O$  عند تراكيز مختلفة وبدلالة رقم رينولدز يُمثّل الشكل (14) النسب المئويّة لتحسّن مؤشرات الأداء الحراري للمبادل الحراري، وذلك بنسبة السائل النانوي إلى السائل الأساسي، حيث يظهر أثر زيادة تركيز الجسيمات النانوية  $Al_2O_3$  على مؤشرات الأداء الحراري كفرق درجة الحرارة اللوغاريتمي الوسطي  $\Delta T_{lmtD}$  وكميّة الحرارة المتبادلة  $Q_{avr}$  ومُعامل انتقال الحرارة الكلي  $U$  ووحدات انتقال الحرارة  $NTU$  وفعاليّة المبادل الحراري  $\epsilon$ ، فعند قيمة  $Re = 3802$  والتي تُمثّل أعلى قدرة لعمل المضخة نلاحظ تحسناً في الأداء مع زيادة تركيز السائل النانوي. بلغت نسبة تحسّن كمية الحرارة المتبادلة  $Q_{avr}$   $(2.21, 7.94, 22.1)\%$  للتراكيز  $(0.05, 0.1, 0.25)\%vol$  على الترتيب، بينما تحسّن المعامل الكلي لانتقال الحرارة بالحمل  $U$  للمُبادل بنسب  $(2.8, 10.36, 29.6)\%$  ووحدات انتقال الحرارة  $NTU$  بنسب  $(2.77, 10.34, 29.55)\%$ . إنّ تحسّن المؤشرات الحرارية للمُبادل الحراري حدثت نتيجة انخفاض فرق درجة الحرارة اللوغاريتمي كلما ازداد تركيز الجسيمات النانوية، حيث انخفضت  $\Delta T_{lmtD}$  بنسبة  $(0.54, 2.18, 5.72)\%$  من أجل التراكيز  $(0.05, 0.1, 0.25)\%vol$  على الترتيب. وبالتالي يمكن القول أن السائل النانوي المُختبر في هذه الدراسة عزّز من المؤشرات الحرارية للمبادل الحراري مقارنة مع السائل الأساسي وجاء هذا التحسّن نتيجة الخصائص الحرارية الجيدة كالموصلية الحرارية التي ارتفعت مع زيادة تركيز جسيمات  $Al_2O_3$  النانوية.



الشكل (14) تحسن المؤشرات الحرارية للمبادل الحراري كنسبة مئوية عند زيادة تركيز جسيمات  $Al_2O_3$  النانوية

يُبين الشكل (15) مقارنة النتائج التجريبية مع المعادلات التقليدية للباحث Shah<sup>[24]</sup> الخاصة بالتدفق الصفحي غير مكتمل التطور حرارياً ومعادلة Gielinski<sup>[24]</sup> التقليدية التي تعبر عن التدفق المضطرب ضمن مجال  $Re(632 - 2802)$ ، بلغت نسبة الانحراف  $(-28, +17)\%$  ويعود هذا كون أن هذه المعادلات لم تُستنتج من اختبار سوائل نانوية كما في نتائجنا، إنما اعتمدت على الماء المقطر كسائل اختبار تقليدي، بالتالي لا يمكن التنبؤ جيداً بالمعادلات التقليدية عند استخدام السائل النانوي ذو الطبيعة البوليميرية وهذه النتيجة تتفق مع عمل الباحث Kayhani<sup>[29]</sup> وآخرون.

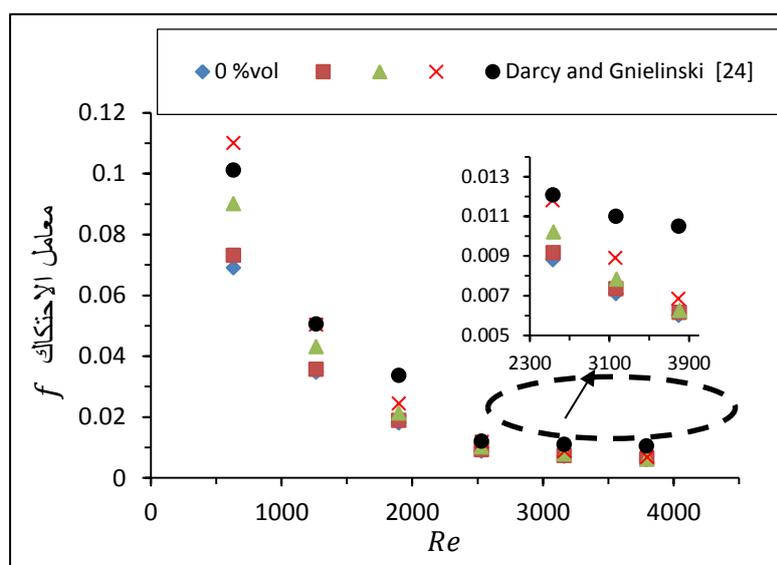


الشكل (15) مقارنة النتائج التجريبية لرقم  $Nu$  مع المعادلات التقليدية الشكل (16) مقارنة النتائج التجريبية لرقم  $Nu$  مع نتائج الباحث Anoop

يُبين الشكل (16) توافق بين نتائجنا التجريبية مع نتائج الباحث Anoop<sup>[13]</sup> بنسبة جيدة بلغت  $(-0.4, +11.5)$  في المنطقة غير مكتملة التطور حرارياً ضمن مجال  $Re(632 - 1900)$ ، يمكن تفسير نسبة الانحراف البسيطة كون أن الباحث استخدم سائل نانوي يعتمد على الماء المقطر كوسط حاضن لجسيمات  $Al_2O_3$  النانوية، بينما في دراستنا استخدمنا محلول ذو طبيعة بوليميرية.

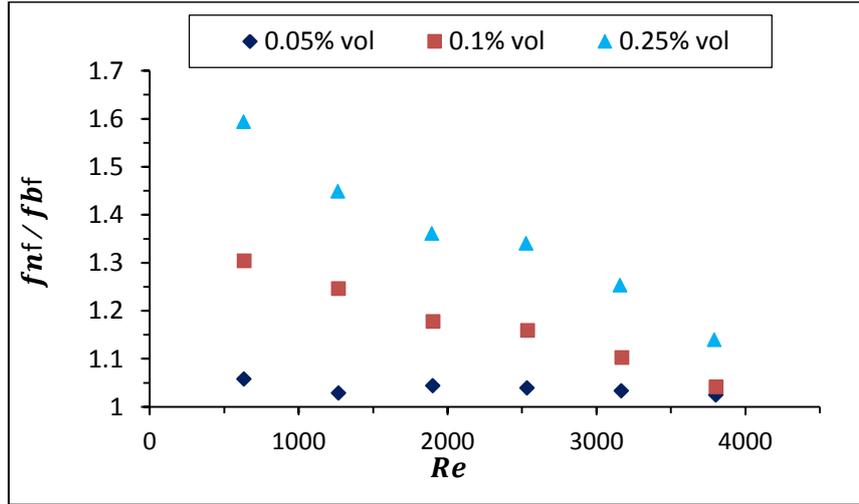
### المؤشرات الهيدروليكية:

يُمثل الشكل (17) قيمة معامل الاحتكاك للسائل النانوي والسائل الأساسي الحاضن للجسيمات النانوية بدلالة رقم رينولدز  $Re$ ، نلاحظ ارتفاع مُعامل الاحتكاك مع زيادة تركيز الجسيمات النانوية عند نفس قيم  $Re$  وهذا ما يشكل عبئاً على قدرة الضخ، إذ يتدهور المردود الهيدروليكي مع زيادة تركيز الجسيمات النانوية، فمن أجل  $Re = 3802$  ازداد معامل الاحتكاك بنسب  $(1.5, 3, 11)\%$  عند التراكيز  $\varphi(0.05, 0.1, 0.25)\%$  على الترتيب. كما أنّ معامل الاحتكاك يبدأ بقيم مرتفعة في منطقة الجريان الصفحي ( $Re \leq 2300$ ) إلا أنه ينخفض مع زيادة رقم  $Re$  وفق علاقة لوجارتمية، يُمكن تفسير انخفاض معامل الاحتكاك مع زيادة سرعة الجريان نتيجة لارتفاع إجهاد القص عند جدار أنبوب المبادل الحراري والناجم عن زيادة السرعة. عند مقارنة نتائج هذه الدراسة التجريبية بالعلاقات التقليدية الخاصة بمعامل الاحتكاك في الجريان الصفحي كمعادلة Darcy ومعادلة Gnielinski<sup>[24]</sup> في الجريان المضطرب، نلاحظ أنّ نتائجنا التجريبية تبدو ذات معامل احتكاك أقل في جميع ظروف الجريان، كما أنها تنخفض بشكل واضح عند زيادة سرعة الجريان في التدفق المضطرب، يُمكن تفسير هذا السلوك نظراً للطبيعة البوليميرية الزلقة التي يتميز بها السائل الأساسي (بوليمير- ماء مقطر)، حيث تُعتبر محاليل البوليمير (بولي أكريل أميد) من مُخفّضات السحب في الأنابيب، وهو من أحد الأسباب في اختيارنا لهذا النوع من البوليمير في هذه الدراسة.



الشكل (17) معامل الاحتكاك للسائل النانوي  $Al_2O_3/H_2O$  ضمن الأنابيب الداخلي للمبادل الحراري ومقارنته مع معادلة Darcy و Gnielinski<sup>[24]</sup>

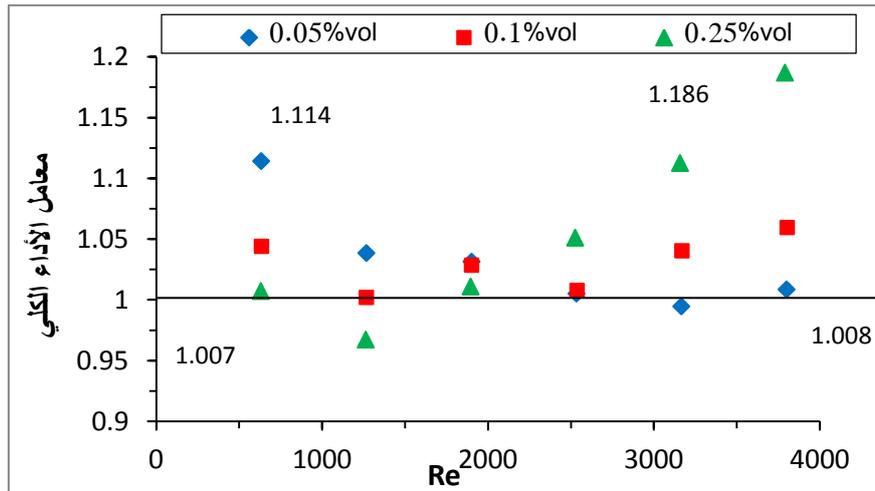
يُظهر الشكل (18) تأثير زيادة تركيز الجسيمات النانوية على معامل الاحتكاك وذلك من خلال نسبة معامل الاحتكاك للسائل النانوي إلى السائل الأساسي، نلاحظ أنه يظهر تأثير تركيز الجسيمات النانوية في منطقة التدفق الصفحي بصورة أكبر مما هي عليه في منطقة التدفق المضطرب، وذلك بسبب السرعة المنخفضة للجريان، إذ تتجمع الجسيمات النانوية بالقرب من جدار أنبوب المبادل وتشكّل إعاقة للجريان، حيث يزداد إجهاد القص مع زيادة تركيز الجسيمات النانوية، بينما عند زيادة السرعة كما في التدفق المضطرب تتبعثر الجسيمات النانوية في السائل الأساسي مُبتعدة عن جدار الأنبوب فيظهر أثر المحلول البوليميري المُخفّض للسحب وبالتالي ينخفض تأثير الجسيمات النانوية في إعاقة الجريان.



الشكل (18) نسبة تعزيز معامل الاحتكاك للسائل النانوي مقارنة مع السائل الأساسي عند زيادة تركيز الجسيمات النانوية ورقم  $Re$

#### تحليل معامل الأداء الكلي للمبادل الحراري:

أدى استخدام السائل النانوي إلى تحسّن مُعامل انتقال الحرارة للمبادل الحراري مُقارنة مع السائل الأساسي كوسيط تقليدي، إلا أنّ هذا التحسّن ترافق مع زيادة معامل الاحتكاك وهذا يُشكّل بدوره عبء إضافي على قدرة الضخ، تمّ إجراء تحليل للأداء الكلي للمبادل الحراري يأخذ بعين الاعتبار التحسّن في الحمل الحراري ومعامل الاحتكاك عند تراكيز مختلفة للجسيمات النانوية للوصول إلى أفضل كفاءة لعمل السائل النانوي من خلال ارتباط الباحث Esfe [11] كما في العلاقة (16)، والذي يُمثل نسبة التحسّن في رقم نوسلت إلى التحسّن في معامل الاحتكاك عند إضافة الجسيمات النانوية كما في الشكل (19). وهنا الجدير بالذكر أن معامل الأداء الكلي قد يكون أقل من الواحد في حال كانت هناك زيادة كبيرة في معامل الاحتكاك، أو يكون أكبر من الواحد في حال وجود تحسّن حراري أكبر من الزيادة في الاحتكاك.



الشكل (19) معامل الأداء الكلي (الحراري والهيدروليكي) للمبادل الحراري عند تراكيز مختلفة للسائل النانوي كدالة في  $Re$

أظهرت النتائج أنّ معامل الأداء في هذه الدراسة التجريبية لا يأخذ نهجاً محدداً مع زيادة  $Re$ ، فمثلاً بلغت قيمة أفضل له 1.114 عند التركيز  $0.05\%vol$  و  $Re = 632$ ، بينما انخفضت مع زيادة  $Re$  وبلغت 1.008 عند  $Re = 3802$ ، يُعزى ذلك بسبب تأثيرات اللزوجة فقد انخفضت نسبة معامل الاحتكاك  $f_{nf}/f_{bf}$  للسائل النانوي عند التركيز  $0.05\%vol$  مقارنة مع  $0.25\%vol$  وهذا أدى إلى تحسّن معامل الأداء الكلي للمبادل عند  $Re = 632$ ، بلغت أكبر قيمة لمعامل الأداء الكلي للمبادل 1.186 عند استخدام التركيز  $0.25\%vol$  و  $Re = 3802$ ، يُمكن تفسير هذا بسبب التحسّن الحراري للسائل النانوي مع زيادة تركيز الجسيمات النانوي مقابل انخفاض النسبة  $f_{nf}/f_{bf}$  مع زيادة  $Re$ . وبالتالي يُمكن القول أنّ لزوجة السائل النانوي ذو الطبيعة البوليميرية لها دور مهم في التأثير على معامل الأداء الكلي للمبادل الحراري في منطقة التدفق الصفحي والمضطرب.

### الاستنتاجات والتوصيات.

- في هذه الدراسة التجريبية تحققنا من أثر استخدام سائل  $Al_2O_3/H_2O$  ذو طبيعة بوليميرية كوسيط نقل حرارة في مبادل حراري مُزدوج بعد تحضيره وتقييم استقراره وتمّ التوصل للاستنتاجات التالية:
1. إضافة جسيمات  $Al_2O_3$  النانوية حسّنت من الأداء الحراري للمبادل الحراري، وجاء هذا التحسّن نتيجة زيادة الموصلية الحرارية مع زيادة التركيز.
  2. تحسّنت المؤشرات الحرارية للمبادل الحراري كفعاليّة المبادل الحراري ومعامل انتقال الحرارة الكلي ووحدات انتقال الحرارة وكميّة الحرارة المتبادلة عند استخدام السائل النانوي مقارنة مع السائل الأساسي، وبالتالي يُمكن القول أنّ السائل النانوي المُستخدم هو وسيط جيّد في نقل الحرارة وبدل واعد عن السوائل التقليدية المُستخدمة حالياً في مختلف نظم التطبيقات الحرارية.
  3. المبادل الحراري أبدى كفاءة حرارية عالية عند استخدام السائل النانوي مقابل استهلاك منخفض لطاقة الضخ، حيث بلغت أعلى قيمة لمعامل الأداء الكلي 1.186.
  4. البوليمير ساهم في تعزيز الأداء الكلي للمبادل الحراري عند تركيز مُنخفض للسائل النانوي بصورة أكبر من التركيز الأعلى في منطقة التدفق الصفحي، وبالتالي زيادة تركيز الجسيمات النانوية لا تعني بالضرورة تحسناً في الأداء الكلي للمبادل الحراري، إنّما يتعلق بطبيعة السائل النانوي المُختبر.
  5. أظهرت النتائج توافق جيد مع بعض النماذج النظرية والنتائج التجريبية لأبحاث سابقة.
  6. إضافة البوليمير للسائل النانوي ساهم بانخفاض معامل الاحتكاك بسبب طبيعته الزلقة والمُخفّضة للسحب مقارنة مع المعادلات التقليدية في منطقتي التدفق الصفحي والمُضطرب، بالرغم من زيادة معامل الاحتكاك مع زيادة تركيز الجسيمات النانوية.
  7. يمكن استخدام البوليمير بولي أكريل أميد كمادة تُساهم في تشتت واستقرار جسيمات  $Al_2O_3$  النانوية في الماء المقطّر بصورة جيدة.
  8. يُوصى بمزيد من البحث التجريبي في استخدام جسيمات نانوية بتراكيز وأنواع وأحجام وأشكال مختلفة عند استخدام (بولي أكريل أميد- ماء مقطر) كسائل أساسي لفهم أوسع لسلوك وآليّة انتقال الحرارة في السوائل النانوية.

## قائمة المراجع.

- [1] Dey.D, Kumar.P and Samantaray.S. (2017). "A review of nanofluid preparation, stability, and thermo-physical properties". Heat Transfer- Asian Research. 46(8): 1413–1442.
- [2] Ghadimi.A, Saidur.R and Metselaar H. (2011). "A review of nanofluid stability properties and characterization in stationary conditions". International Journal of Heat and Mass Transfer.54: 4051-4068.
- [3] Hwang.Y, Lee.J.K, Lee.C.H, Jung.Y.M, Cheong.S.I, Lee.C.G, KU.B.C and Jang.S.P (2007)."Stability and Thermal Conductivity Characteristics of nanofluids". Thermochimica Acta. 455(1): 70- 74.
- [4] Song.Y.Y, Bhadeshia.H, Woo.D. (2015). "Stability Stainless- Steel nanoparticle and water mixturs". PowderTechnology. 272: 34- 34.
- [5] Xia.G, Jiang.H, Lin.R and Zhai.Y. (2014) "Effects of surfactant on the stability and thermal conductivity of  $Al_2O_3/De$ - ionized water nanofluids". International Journal of Thermal Sciences.84: 118- 124.
- [6] Chung.S.J, Leonard.J.P and Nettleship.I. (2009) "Characterization of ZnO nanoparticle suspension in water: Effectiveness of ultrasonic dispersion". Powder Technology. 194: 75- 80.
- [7] Choudhary.R, Khurana.D, Kumar.A and Subudhi.S. (2017). Stability analysis of  $Al_2O_3$ /Water nanofluids. Journal of Experimental Nanoscience. 12(1): 140- 151.
- [8] Keblinski.P, Eastman.J.A and Cahill.D.G. (2005). "Nanofluids for Thermal Transport". Meterialstoday. 8(8): 36- 44.
- [9] Sadeghi.R, Etemad.S.Gh, Keshavarzi.E, and Haghshenasfard.M. (2014). "Investigation of alumina nanofluid stability by UV- vis spectrum". Microfluidics and Nanofluidics. 18: 1023- 1303.
- [10] Darzi.A.A.R, Farhadi.M and Sedighi.K. (2014). "Heat transfer and flow characteristics of  $AL_2O_3$ – water nanofluid in a double tube heat exchanger". International Communications in Heat and Mass Transfer. 47: 105- 112.
- [11] Esfe.M.H, Seadodin.S and Mahmoodi.M. (2014). "Experimental studies on the convective heat transfer performance and thermophysical properties of  $MgO$ –water nanofluid under turbulent flow". Experimental Thermal and Fluid Science. 54: 68- 78.
- [12] Han.D, He.W.F and Asif.F.Z. (2017). "Experimental study of heat transfer enhancement using nanofluid in double tube heat exchanger". Energy Procedia. 142: 2547- 2553.
- [13] Anoop.K.B, Sundararajan.T and DAS.S. (2009). "Effect of particle size on the convective heat transfer in nanofluid in the developing region". International Journal of Heat and Mass Transfer. 52: 2189- 2195.
- [14] Morveji.M.K, Darabi.M, Haddad.S.M.H and Davarnejad.R. (2011). "Modeling of convective heat transfer of a nanofluid in the developing region of tube flow with computational fluid dynamics". International Communications in Heat and Mass Transfer. 38: 1291- 1295.
- [15] Rohsenow.W, Hartnett.J and Cho.Y. (1998). "HANDBOOK OF HEAT TRANSFER". Publisher: McGraw, NY, QC320.4: 737- 740.

- [16] Mahbubul.I.M, Elciglu.E and Saidur.R. (2017)."Optimization of ultrasonication period for better dispersion and stability of TiO<sub>2</sub>- water". Ultrasonics Sonochemistry. 37: 360- 367.
- [17] Wang.X and Mujumdar.A. (2008). "A review on nanofluids- part I: theoretical and numerical investigations". Brazilian Journal of Chemical Engineering. 25(4): 613- 630.
- [18] Tiomfeeva.E, Gavrilov.A, McCloskey.J and Tolmachev.Y. (2007)."Thermal conductivity and particle agglomeration in alumina nanofluids: Experiment and theory". PHYSICAL REVIEW, vol76.0612031- 6.
- [19] Williams.W, Boungiorno.J and HU.L. (2008)."Experimental Investigation of Turbulent Convective Heat Transfer and Pressure Loss of Alumina/Water and Zirconia/Water Nanoparticle Colloids (Nanofluids) in Horizontal Tubes". Journal of Heat Transfer. 130: 1- 6.
- [20] Azarfar.SH, Movahedirad.S, Sarbanha.A, Norouzbeigi.R and Beigzadeh. (2016). "Low cost and new design of transient hot- wire technique for the thermal conductivity measurement of fluids". Applied Thermal Engineering. 105: 142- 150.
- [21] Vajjha.R.S, Das.D.K, and Mahagaonkar.B.M. (2009). "Density measurement of different nanofluids and their comparison with theory". Petroleum Science and Technology. 27(6): 612–624.
- [22] Pak.B.CH and Cho.Y. (1998). "Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles". Experimental Heat Transfer. 11(2): 151–170.
- [23] Reddy.M and Rao.V. (2013). "Experimental investigation of heat transfer coefficient and friction factor of ethylene glycol water based TiO<sub>2</sub> nanofluid in double pipe heat exchanger with and without helical coil inserts". International Communications in Heat and Mass Transfer. 50: 68–76.
- [24] Incropera.F.P, Diwit.D.P, Bergman.TH and Lavine.A.S. (2006). Fundamentals of Heat and Mass Transfer, Sixth edition University of California.
- [25] Koblinski.P, Eastman.J.A, and Cahill.D.G. (2005). "Nanofluids for thermal transport". Materials Today. 8(6): 36–44.
- [26] P.Bhattacharya, S.Saha, A.Yadav, P.Phelan and R.Prasher. (2004)."Brownian dynamics simulation to determine the effective thermal conductivity of nanofluids". Applied Physics. 95(11): 6492- 6494.
- [27] Ali.M.F and Yunus.W.(2011). "Study of the Effect of Volume Fraction Concentration and Particle Materials on Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity of Nanofluids". Japanese Journal of Applied Physics. 50: 1- 7.
- [28] Xie.H, Wang.J, XI.T and Liu.Y.(2002). "Thermal conductivity of suspensions containing nanosized SiC particles". International Journal of Thermophysics. 23: 571- 580.
- [29] Kayhani.M.H, Soltanzadeh.H, Heyat.M.M, Nazari.M and Kowsary.F. (2012). "Experimental study of convective heat transfer and pressure drop of TiO<sub>2</sub>/water nanofluid". International Communications in Heat and Mass Transfer. 39: 456- 462.