

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département : Génie Mécanique
Ref:



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم : الهندسة الميكانيكية
لمرجع :

Thèse présentée en vue de l'obtention du diplôme de
Doctorat en Sciences
Spécialité : Génie Mécanique

Adaptation des nano fluides aux échanges thermiques

تكيف السوائل النانوية مع التبادلات الحرارية

Présentée par:

Amara DAAS

Soutenue publiquement le : 09/04/2025

Devant le jury composé de :

Pr Nour Eddine MOUMI	Professeur	Président	Université de Biskra
Pr Semch Eddine DERFOUF	Professeur	Rapporteur	Université de Batna 2
Pr Nour Eddine BELGHAR	Professeur	Co-Rapporteur	Université de khenchela
Pr Adnane LABED	Professeur	Examineur	Université de Biskra
Dr Mohamed MASMOUDI	MCA	Examineur	Université de Batna 2

الشكر والتقدير

أود أن أبدأ بتوجيه خالص الشكر والتقدير إلى الله سبحانه وتعالى، الذي وهبني القوة والعزيمة والصبر لإتمام هذا العمل الأكاديمي، وأرشدني إلى الطريق الصحيح لتحقيق أهدافي العلمية.

كما أتوجه بخالص الشكر والعرفان إلى مشرفي هذه الأطروحة، الأستاذ الدكتور شمس الدين درفوف، على دعمه المستمر، وإرشاده القيم، وتوجيهاته السديدة التي كان لها بالغ الأثر في تطوير هذا العمل وتحقيق أهدافه. لقد كنت مثلاً حَقاً للإشراف وللعلم والإلهام.

كما أود أن أشكر مساعد المشرف، الأستاذ الدكتور نور الدين بلغار، على ما قدمه من مساعدة وملاحظات بناءة، وعلى حرصه المستمر على تقديم المشورة التي أسهمت في إثراء هذه الدراسة.

كما أتقدم بخالص الشكر والتقدير إلى أعضاء لجنة المناقشة الموقرين، الذين تفضلوا بقبول مناقشة هذه الأطروحة، وأسهموا بملاحظاتهم القيمة في تحسين وتطوير هذا البحث.

أتقدم أيضاً بخالص العرفان والتقدير إلى الدكتور عبد المجيد شحات، على دعمه الكريم، وملاحظاته البناءة، التي كان لها أثر إيجابي.

ولا يفوتني أن أخص أسرتي الكريمة بجزيل الشكر والامتنان، لدعمهم الدائم وصبرهم وتحملهم وتشجيعهم المستمر، فلهم الفضل -بعد الله- فيما وصلت إليه اليوم.

وأخيراً، أشكر جميع من ساهم، ولو بكلمة أو نصيحة أو دعاء، في إنجاح هذا العمل وإتمامه. لكل شخص لم تُسَعِفني الكلمات لذكر اسمه هنا، أقول: شكراً من أعماق القلب.

والله ولي التوفيق.

الإهداء

بكل معاني الحب والوفاء

أهدي هذا العمل المتواضع إلى:

رفقاء الرحلة: زوجتي وأبنائي الأحباء، الذين كانوا دائماً مصدر إلهامي وركيزة دعمي في كل خطوة.

أمي الغالية: رمز الحب والعطاء التي رعتني وسهرت لأجلي.

عائلتي الكبيرة

كل من جمعتني بهم صلة أو مودة

شكراً لكل كلمة طيبة ودعم صادق كان له أثر كبير في مسيرتي.

أسأل الله أن يجعل هذا العمل خالصاً لوجهه الكريم، وأن يكون شاهداً على امتناني وحبّي، وصدقة جارية

تعود بالنفع على الجميع.

Abstract

This thesis presents the results of two studies in the fields of nanomaterials and heat transfer using nanofluids.

The first study addresses the factors influencing the production of nanoparticles and achieving precise control over their size and shape, such as milling time, pause duration, and rotation speed. These factors must be adjusted carefully to improve efficiency and prevent particle agglomeration. The study also examined the structural characteristics of copper (Cu) and copper oxide (CuO) nanopowders, obtained using a planetary ball mill under an argon atmosphere. Milling operations were performed for varying periods, with a 20-minute pause after every 10 minutes of operation to prevent excessive heat buildup. This protocol can be implemented over a time range of 48 to 72 hours. Various techniques were used to determine the crystalline and chemical nature, as well as the nanoparticle size, such as Scanning Electron Microscopy (SEM) for direct observation of the nanostructural morphology, X-Ray Diffraction (XRD) providing data on the crystalline structure and phase, and Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR) to clarify the structure. Copper particles had a size of 20.8 nanometers, and copper oxide particles were 21.19 nanometers. It was observed that at this scale, the physical properties vary significantly compared to macroscopic scales.

The second study deals with heat transfer through forced convection in a double-pipe U-shaped heat exchanger, where the nanofluid composed of water and (Al_2O_3) nanoparticles flows through the inner tube while pure water flows through the outer tube. The computational domain was designed using Design Modeler (DM) and meshes were created via ANSYS Meshing to ensure numerical accuracy. Turbulence was modeled using the RANS k- ϵ model, and the turbulent flow equations were solved using the finite volume method in ANSYS Fluent. The simulation was used as an investigative tool, with the Reynolds number adjusted based on different mass flow rates: (0.035, 0.058, 0.081, and 0.104) kg/s, and studying various nanoparticle volume fractions (2.5%, 5%, 7.5%, and 10%). The analysis of the results showed that adding nanoparticles improves heat transfer in the heat exchanger. The study also confirmed the efficiency of U-shaped heat exchangers in enhancing performance, reducing pressure drop, and providing uniform flow distribution, making them ideal for industrial and commercial applications.

Keywords: nanoparticles ; structural properties ; Copper Oxide ; Copper ; Grinding Al_2O_3 nano-particles; double tube exchanger; Convection; CFD .

Résumé

Cette thèse présente les résultats de deux études dans les domaines des nanomatériaux et du transfert de chaleur utilisant des nanofluides.

La première étude aborde les facteurs influençant la production de nanoparticules et la maîtrise précise de leur taille et de leur forme, tels que le temps de broyage, la durée de pause et la vitesse de rotation. Ces paramètres doivent être ajustés avec soin pour améliorer l'efficacité et éviter l'agglomération des particules. L'étude a également examiné les caractéristiques structurales des nanopoudres de cuivre (Cu) et d'oxyde de cuivre (CuO), obtenues à l'aide d'un broyeur à billes planétaire sous atmosphère d'argon. Les opérations de broyage ont été effectuées sur différentes durées, avec une pause de 20 minutes après chaque 10 minutes de fonctionnement afin d'éviter une accumulation excessive de chaleur. Ce protocole peut être appliqué sur une période de 48 à 72 heures. Différentes techniques ont été utilisées pour déterminer la nature cristalline et chimique, ainsi que la taille des nanoparticules, notamment la microscopie électronique à balayage (MEB) pour l'observation directe de la morphologie nanostructurale, la diffraction des rayons X (DRX) pour obtenir des données sur la structure cristalline et les phases, et la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FT-IR) pour clarifier la structure. Les particules de cuivre avaient une taille de 20,8 nanomètres et celles d'oxyde de cuivre mesuraient 21,19 nanomètres. Il a été observé qu'à cette échelle, les propriétés physiques varient considérablement par rapport aux échelles macroscopiques.

La deuxième étude porte sur le transfert de chaleur par convection forcée dans un échangeur de chaleur à double tube en forme de U, où le nanofluide composé d'eau et de nanoparticules d' Al_2O_3 circule dans le tube intérieur tandis que de l'eau pure circule dans le tube extérieur. Le domaine de calcul a été conçu à l'aide de Design Modeler (DM) et les maillages ont été générés via ANSYS Meshing pour assurer une précision numérique optimale. La turbulence a été modélisée à l'aide du modèle RANS k- ϵ , et les équations d'écoulement turbulent ont été résolues par la méthode des volumes finis dans ANSYS Fluent. La simulation a été utilisée comme un outil d'investigation, avec un nombre de Reynolds ajusté en fonction de différents débits massiques : (0,035, 0,058, 0,081 et 0,104) kg/s, ainsi que différentes fractions volumiques de nanoparticules (2,5 %, 5 %, 7,5 % et 10 %). L'analyse des résultats a montré que l'ajout de nanoparticules améliore le transfert thermique dans l'échangeur de chaleur. L'étude a également confirmé l'efficacité des échangeurs de chaleur en forme de U pour améliorer les performances, réduire les pertes de charge et assurer une distribution uniforme du flux, ce qui les rend idéaux pour les applications industrielles et commerciales.

Mots-clés : nanoparticules ; propriétés structurales ; oxyde de cuivre ; cuivre ; broyage ; nanoparticules Al_2O_3 ; échangeur à double tube ; convection ; CFD

الملخص

تقدم هذه الرسالة نتائج دراستين في مجالي المواد النانوية وانتقال الحرارة باستخدام الموائع النانوية

الدراسة الأولى حول العوامل التي تؤثر على إنتاج الجسيمات النانوية وتحقيق التحكم الدقيق في حجم وشكل الجسيمات، مثل وقت الطحن، مدة التوقف، وسرعة الدوران. يجب ضبط هذه العوامل بدقة لتحسين الكفاءة ومنع تجمع الجسيمات. كما تناولت الدراسة الخصائص الهيكلية لمسحوق النحاس (Cu) وأكسيد النحاس (CuO) النانوي، الذي تم الحصول عليه باستخدام مطحنة كروية كوكبية تحت جو من الأرجون. تم تنفيذ عمليات الطحن بفترات زمنية متفاوتة، مع توقف لمدة 20 دقيقة بعد كل 10 دقائق من التشغيل للحد من ارتفاع الحرارة. يمكن تنفيذ هذا البروتوكول في نطاق زمني يتراوح بين 48 إلى 72 ساعة، تم استخدام تقنيات مختلفة لتحديد الطبيعة البلورية والكيميائية بالإضافة إلى حجم الجسيمات النانوية، مثل الميكروسكوب الإلكتروني الماسح (SEM) الذي يوفر ملاحظة مباشرة حول مورفولوجيا الاسطح النانوية وتقنية حيود الأشعة السينية (XRD) التي تقدم لنا معطيات حول الهياكل وطورها البلوري، بالإضافة الى تقنية التحليل الطيفي للأشعة تحت الحمراء (FT-IR) لتوضيح البنية. تم الحصول على جسيمات النحاس بحجم 20.8 نانومتر ولأكسيد النحاس بحجم 21.19 نانومتر لوحظ أنه عند هذا المقياس، تتفاوت الخصائص الفيزيائية بشكل ملحوظ مقارنة بالمقاييس الماكروسكوبية.

أما الدراسة الثانية فتناولت انتقال الحرارة عبر الحمل الحراري القسري في مبادل حراري بأنبوبين متحدين مركزيًا على شكل U، حيث يتدفق السائل النانوي المكون من الماء وجسيمات (Al₂O₃) النانوية عبر الأنبوب الداخلي بينما يتدفق الماء النقي عبر الأنبوب الخارجي. تم تصميم المجال الحاسوبي باستخدام برنامج (DM) Design Modeler وإنشاء الشبكات عبر ANSYS Meshing لضمان الدقة العددية. تم نمذجة الاضطراب بنموذج RANS k-ε، مع حل معادلات التدفق المضطرب باستخدام طريقة الحجم المحدد. في ANSYS Fluent. واستخدمنا المحاكاة كأداة للتحقيق، حيث تم تعديل عدد رينولدز وفقًا لمعدلات التدفق الكتلي المختلفة: (0.035، 0.058، 0.081، و0.104) kg/s، مع دراسة نسب حجم الجسيمات النانوية (2.5٪، 5٪، 7.5٪، و10٪). فتبين لنا بعد تحليل النتائج أن إضافة الجسيمات النانوية يحسن انتقال الحرارة في المبادل الحراري. كما أكدت لنا الدراسة كفاءة المبادلات الحرارية ذات الشكل U في تحسين الأداء، وتقليل انخفاض الضغط، وتوفير توزيع منتظم للتدفق، مما يجعلها مثالية للتطبيقات الصناعية والتجارية.

الكلمات المفتاحية: الجسيمات النانوية؛ الخصائص الهيكلية؛ أكسيد النحاس؛ النحاس؛ الطحن؛
الجسيمات النانوية Al_2O_3 ؛ المبادل الحراري ذو الأنابيبين؛ الحمل الحراري؛ المحاكاة العددية (CFD).

الفهرس

i	 الشكر والتقدير
ii	 إهداء
iii	 Abstract
iv	 Résumé
v	 الملخص
vii	 الفهرس
xi	 المصطلحات العامة
xii	 قائمة الأشكال
xiv	 قائمة الجداول
01	 مقدمة عامة
06	 الفصل الأول: الجسيمات النانوية والسوائل النانوية
07	 الجسيمات النانوية.....
07	 1. تعريف الجسيمات النانوية.....
07	 2. خصائص الجسيمات والمواد النانوية
08	 3. تصنيف المواد النانوية وفقًا لأبعادها.....
09	 4. تأثير الأبعاد على خصائص المواد النانوية
09	 5. تصنيف المواد النانوية بناءً على التركيب الكيميائي.....
10	 6. طرق تصنيع المواد النانوية
11	 1.6. الطرق العلوية (Top-Down)
12	 2.6. الطرق السفلية (Bottom-Up)
12	 3.6. الطرق الكيميائية في السوائل (Sol-Gel Method)
12	 4.6. تقنيات أخرى مبتكرة لتصنيع المواد النانوية
13	 7. تطبيقات المواد النانوية
15	 ii. السوائل النانوية
15	 1. تركيب السوائل النانوية
15	 2. أنواع الجسيمات النانوية المستخدمة:
15	 3. تقنيات تصنيع السوائل النانوية
15	 1.3. الطريقة ذات المرحلتين
16	 2.3. الطريقة ذات المرحلة الواحدة

16	4. الخصائص الفيزيائية والحرارية للسوائل النانوية المحسنة
17	1.4. الموصلية الحرارية للسوائل النانوية
17	2.4. العوامل المؤثرة على الموصلية الحرارية للسوائل النانوية
17	1.2.4. الحركة البراونية
17	2.2.4. الطبقة البينية
18	3.2.4. الكسر الحجمي
19	4.2.4. نوع الجسيمات النانوية
21	5.2.4. درجة الحرارة
21	6.2.4. تأثير حجم الجسيمات على الموصلية الحرارية
22	3.4. للزوجة الديناميكية
23	4.4. العوامل المؤثرة على اللزوجة
23	5. فوائد السوائل النانوية
24	6. القيود
24	1.6. انخفاض السعة الحرارية النوعية
25	2.6. التكلفة العالية للموائع النانوية
25	3.6. صعوبات في عملية الإنتاج
26	7. تطبيقات السوائل النانوية
29	الفصل الثاني: كيفية الحصول على الجسيمات النانوية بواسطة المطحنة الكوكبية
30	1. المطحنة الكوكبية
31	2. مبدأ عمل المطحنة الكوكبية
31	3. إجراءات عملية الطحن الكوكبي لتحويل المواد إلى جسيمات نانوية
32	4. إعدادات المطحنة الكوكبية
32	5. العوامل المؤثرة في حجم الجسيمات
32	6. التطبيقات الناتجة عن الطحن الكوكبي
33	7. البروتوكول التجريبي
36	الفصل الثالث: النتائج والتحليل
37	1. طريقة حيود الأشعة السينية (DRX)
37	1.1. المبدأ الأساسي لحيود الأشعة السينية (DRX)
38	2.1. تحديد الخصائص الهيكلية:
39	3.1. تحسين مخططات حيود الأشعة السينية
40	4.1. تحليل حيود الأشعة السينية (XRD)

43	2. تحليل طيف الأشعة تحت الحمراء بتحويل فورييه (FTIR)
44	3. المجهر الإلكتروني الماسح (SEM).....
46	4. الخلاصة
48	الفصل الرابع: النموذج الرياضي والطريقة العددية
49	i. النماذج الرياضية لمحاكاة انتقال الحرارة في المبادلات الحرارية:
49	1. المعادلات الحاكمة الأساسية:
51	2. النماذج الرياضية لتحليل الاضطرابات في تدفق الموائع.....
51	1.2. المحاكاة العددية المباشرة (Direct Numerical Simulation – DNS).....
51	2.2. محاكاة المقاييس الكبيرة (Large Eddy Simulation – LES):.....
51	3.2. المحاكاة المتوسطة (Reynolds–Averaged Navier–Stokes – RANS).....
52	1.3.2. النموذج ذو المعادلة صفرية
52	2.3.2. النموذج ذو المعادلة واحدة
52	3.3.2. النموذج ذو المعادلتين
52	4.3.2. النموذج ذو $N > 2$ معادلة
53	5.3.2. نموذج $k-\epsilon$
54	3. الخصائص الحرارية الفيزيائية للسوائل النانوية.....
55	1.3. اللزوجة الديناميكية الفعالة
57	2.3. التوصيلية الحرارية الفعالة.....
59	3.3. الكثافة
59	4.3. الحرارة النوعية
60	ii. التقنيات العددية لحل المعادلات التفاضلية الجزئية
60	1. طرق التمييز للمعادلات التفاضلية الجزئية (E.D.P)
61	2. طريقة الحجم المحددة (Finite Volume Method – FVM)
64	iii. محاكاة تدفق المائع في أنابيب متحدي المركز:
64	1. خصائص التدفق في الأنابيب المتحدة المركز:
64	2. الهدف من المحاكاة العددية في تدفق الأنابيب المتحدة المركز:
65	3. برامج المحاكاة العددية:.....
65	4. الإعدادات الهندسية.....
66	5. خصائص تدفق السوائل وتأثير درجة الحرارة على المميزات الفيزيائية.....
66	6. تأثير السوائل النانوية في المحاكاة العددية:
67	الفصل الخامس: النمذجة والمحاكاة العددية لتدفق الحرارة وتدفق السوائل

68	1. انشاء الشبكة الحسابية
68	1.1. اختيار نوع الشبكة الحسابية.....
70	2.1. الدقة (Résolution)
71	3.1. التغيرات تدريجية Lissage.....
71	4.1. عدد العناصر الإجمالي.....
72	5.1. التقارب في الشبكة الحسابية
72	2. المحاكاة.....
73	1.2. اختيار الحل.....
73	2.2. اختيار النموذج الفيزيائي
76	3.2. تعريف خصائص السائل.....
77	4.2. شروط التشغيل
77	5.2. الشروط الحدية (Boundary Conditions)
77	6.2. اختيار معايير التقارب.....
77	7.2. تهيئة الحسابات (Initialization)
78	8.2. بدء المحاكاة (Running the Simulation)
79	الفصل السادس: عرض وتحليل نتائج المحاكاة.
80	1. تأثير الشبكة على الحل العددي.....
80	2. مجال الحرارة.....
82	3. العوامل المؤثرة في عملية التحويل الحراري.....
82	1.3. اتجاه التدفق وتوزيع السائل:.....
82	2.3. قوة الجاذبية:.....
83	4. تحقيق توازن بين الموصلية الحرارية واللزوجة عند النسب العالية من الجسيمات
86	5. تأثير زيادة تركيز الجسيمات النانوية
87	6. تأثير عدد رينولدز على انتقال الحرارة:.....
88	7. تحسن في عدد نوسلت كنسبة مئوية:.....
88	8. الخلاصة
90	الخاتمة والتوصيات.....
95	المراجع.....

المصطلحات العامة

الرمز	الوحدة
C_p	السعة الحرارية j / kg.k
k	التوصيلية الحرارية W/mK
d_s	قطر الجسيمات النانوية nm
t	درجة الحرارة المئوية (°C)
T	درجة الحرارة المطلقة k
Re	عدد رينولدز

المؤشرات

Indices

.....bf	السائل الأساسي
.....nf	السائل النانوي
.....s	الصلب
.....eff	الفعال

الحروف اليونانية

Lettres grecques

μ	 الزوجية الديناميكية	kg/m s
ρ	 الكتلة الحجمية	kg / m3
ϕ	 نسبة حجم الجسيمات النانوية	
α	 الانتشارية الحرارية	m ² / s
θ	 زاوية الحيود	الراديان
λ	 طول الموجة لحزمة الأشعة السينية	Å

قائمة الأشكال

- الشكل (1.1) تأثير التركيز الحجمي للجسيمات النانوية Al_2O_3 على التوصيل الحراري للسائل النانوي
- الشكل (2.1) تأثير نوع الجسيمات النانوية على التوصيل الحراري للسوائل النانوية
- الشكل (3.1) تأثير درجة الحرارة على التوصيل الحراري للسوائل النانوية
- الشكل (1.2) المطحنة الكوكبية من النوع p7
- الشكل (2.2) مسحوق أكسيد النحاس (CuO).
- الشكل (3.2) حاوية الطحن مصنوعة من الفولاذ
- الشكل (4.2) كرات الطحن
- الشكل (5.2) غرفة القفازات لتعبئة الحاويات في بيئة خالية من الأكسجين
- الشكل (1.3) رسم توضيحي يبين تعريف β استنادًا إلى طيف حيود الأشعة السينية
- الشكل (2.3) مخطط حيود الأشعة السينية لجسيمات النحاس النانوية
- الشكل (3.3) مخطط حيود الأشعة السينية لجسيمات أكسيد النحاس النانوية (CuO)
- الشكل (4.3) طيف الأشعة تحت الحمراء بتحويل فورييه لجسيمات أكسيد النحاس النانوية (CuO)
- الشكل (5.3) طيف الأشعة تحت الحمراء بتحويل فورييه لجسيمات النحاس النانوية (Cu)
- الشكل (6.3) صورة مجهر إلكتروني لمسحوق جسيمات أكسيد النحاس النانوية 10kx
- الشكل (7.3) صورة مجهر إلكتروني لمسحوق جسيمات أكسيد النحاس النانوية 10.1kx
- الشكل (8.3) صورة مجهر إلكتروني لمسحوق جسيمات النحاس النانوية 1kx
- الشكل (9.3) صورة مجهر إلكتروني لمسحوق جسيمات النحاس النانوية 12kx
- الشكل (1.4) هندسة المجال الحسابي
- الشكل (1.5) الشبكة الحسابية
- الشكل (2.5) تحسين الشبكة في المناطق ذات التدرج القوي
- الشكل (3.5) تطور حجم العناصر
- الشكل (4.5) اختبار تقارب الشبكة
- الشكل (5.5) مربع الحوار الاختيار النماذج الفيزيائية
- الشكل (6.5) مربع الحوار لنموذج اللزج
- الشكل (1.6) توزيع درجات الحرارة عبر المقاطع العرضية التي تم أخذها في ثلاث نقاط مختلفة على طول المبادل الحراري
- الشكل (2.6) تغير النسبة Knf/Kbf مع تركيزات الحجم
- الشكل (3.6) تغير اللزوجة مع تركيزات الحجم
- الشكل (4.6) تأثير التركيز الحجمي والخصائص الحرارية الفيزيائية المتغيرة

- الشكل (5.6) تأثير التركيز الحجمية والخصائص الحرارية الفيزيائية المتغيرة على المتوسط الطولي لدرجة حرارة الجدار عند معدل تدفق الكتلة 0.035 kg/s
- الشكل (6.6) تأثير التركيز الحجمية والخصائص الحرارية الفيزيائية المتغيرة على المتوسط الطولي لدرجة حرارة الجدار عند معدل تدفق الكتلة 0.081 kg/s
- الشكل (7.6) متوسط عدد نوسلت لنسبة السائل النانوي إلى السائل الأساسي لأرقام رينولدز المختلفة مقابل التركيزات الحجمية

قائمة الجداول

الجدول (1.3)	(Cu) معايير القمم في حيود الأشعة السينية للنحاس
الجدول (2.3)	(CuO) معايير القمم في حيود الأشعة السينية لأكسيد النحاس
الجدول (1.4)	الخصائص الفيزيائية للسائل الأساسي والجسيمات النانوية
الجدول (2.4)	الأبعاد الرئيسية للمبادل الحراري

مقدمة عامة

مقدمة عامة

في عالمنا اليوم، أصبح مجال المواد النانوية أحد أبرز المواضيع التي تثير اهتمام العلماء والمهندسين، وبفضل خصائصها الفريدة التي تتفوق على المواد التقليدية. نظرًا لصغر حجمها حيث تتمتع هذه المواد بسطح واسع وخصائص ميكانيكية وكيميائية متميزة، مما يجعلها قادرة على تحسين الأداء في مجموعة واسعة من التطبيقات. من الطب والإلكترونيات إلى الطاقة والبيئة حيث تفتح لنا المواد النانوية آفاقًا جديدة للابتكار والتطور. ومع تقدم الأبحاث بشكل مستمر، نشهد تطبيقات غير مسبوقة لهذه المواد، مما يجعلها جزءًا أساسيًا في تشكيل مستقبل التكنولوجيا والصناعة.

يُعد إنتاج الجسيمات النانوية مع التحكم الدقيق في حجمها وشكلها أحد الجوانب الأساسية في مجال المواد النانوية، حيث يسهم ذلك في تحسين خصائصها وتوسيع نطاق استخدامها في التطبيقات المختلفة. للحصول على الجسيمات النانوية بالحجم والشكل المطلوبين تلعب عوامل مثل وقت الطحن، مدة التوقف، وسرعة الدوران دورًا حاسمًا في تحديد الخصائص النهائية للجسيمات النانوية، كما أن منع تجمع الجسيمات يمثل تحديًا رئيسيًا يمكننا التغلب عليه من خلال التحكم الدقيق في هذه العوامل.

في هذه الدراسة، قمنا بتطوير بروتوكول دقيق لضبط ظروف التشغيل بهدف الحصول على جسيمات نانوية بحجم محدد، حيث تمكنا من الحصول على جسيمات نحاسية بحجم 20 نانومتر وأكسيد النحاس بحجم 21 نانومتر باستخدام مطحنة كروية كوكبية في جو من الأرجون. وقد أثبتت لنا النتائج أن اتباع هذا البروتوكول يتيح لنا التحكم الفعال في خصائص الجسيمات النانوية وتحسين أدائها. ولتحليل التركيب البلوري وحجم الجسيمات الناتجة استخدمنا تقنيات متقدمة مثل الميكروسكوب الإلكتروني الماسح (SEM) وحيود الأشعة السينية (XRD)، مما وفر لنا معلومات دقيقة حول بنية هذه الجسيمات وأبعادها.

أما في الدراسة الثانية، تم التركيز على تحسين انتقال الحرارة في الأنظمة الصناعية باستخدام السوائل النانوية والتي تلعب دورًا مهمًا في رفع أداء المبادلات الحرارية التي تستخدم في عدة مجالات مثل محطات توليد الطاقة، أنظمة التبريد، والصناعات الميكانيكية. قمنا باستخدام سائل نانوي مكون من الماء وأكسيد الألومنيوم (Al_2O_3) لتحسين كفاءة نقل الحرارة في مبادل حراري يتكون من أنبوبين متوازيين متحدي المركز على شكل U، حيث أظهرت لنا النتائج أن إضافة الجسيمات النانوية عززت من كفاءة نقل الحرارة، كما كشفت لنا الدراسة أن تحسين التصميم الهندسي للمبادلات الحرارية يساعد في تحقيق توزيع متوازن للحرارة وتقليل ضياعها. حيث يمثل الدمج بين استخدام السوائل النانوية والتصاميم الهندسية المتطورة خطوة فعالة

نحو تطوير أنظمة تبريد تكون أكثر كفاءة. ومع استمرار الأبحاث والتطوير في هذا المجال، يمكن لهذه التقنيات أن تسهم في خفض استهلاك الطاقة وتحقيق الاستدامة البيئية في مختلف الصناعات.

تمثل هذه الدراسات أهمية تقنيات النانو في تحسين الأداء الحراري، حيث تهتم الدراسة الأولى بتصنيع الجسيمات النانوية وضبط خصائصها، في حين تركز الدراسة الثانية على تحسين كفاءة نقل الحرارة في المبادلات الحرارية، مما يسهم في تحسين كفاءة نقل الحرارة وتقليل فقدان الطاقة.

هدف هذه الرسالة

نهدف من خلال هذه الرسالة إلى تقديم حلول جديدة لتحسين أداء المواد النانوية وأنظمة نقل الحرارة في التطبيقات الصناعية المختلفة. تتناول الرسالة دراستين علميتين مهمتين تهدفان إلى استكشاف طرق جديدة لتحسين كفاءة المواد المستخدمة في هذه الأنظمة المتطورة.

الدراسة الأولى ركزنا على كيفية تحسين عملية إنتاج الجسيمات النانوية من خلال ضبط بعض العوامل الأساسية مثل وقت الطحن، مدة التوقف، وسرعة الدوران. هدفنا من هذه الدراسة هو الحصول على جسيمات نانوية دقيقة ومتجانسة بخصائص معينة، وهو ما يمكن أن يؤدي إلى تحسين الخواص الفيزيائية والكيميائية للمواد. ثم استخدمنا تقنيات متقدمة مثل الميكروسكوب الإلكتروني الماسح (SEM) وحيود الأشعة السينية (XRD) لدراسة خصائص الجسيمات النانوية التي تم الحصول عليها، مما يساعدنا على فهم التأثير المباشر للعوامل المُتحكم فيها على جودة الجسيمات مما يفتح لنا المجال لاستخدامها بفعالية في التطبيقات الصناعية المتعددة، مثل تطوير الحساسات ذات الكفاءة العالية، المحفزات الكيميائية المتقدمة، وأجهزة تخزين الطاقة والبيانات عالية الأداء.

الدراسة الثانية تطرقنا إلى كيفية تحسين كفاءة أنظمة نقل الحرارة باستخدام السوائل النانوية. نهدف من خلال هذه الدراسة إلى دراسة تأثير إضافة جسيمات نانوية من أكسيد الألومنيوم إلى الماء على أداء المبادلات الحرارية، وهو ما يمكن أن يسهم بشكل كبير في تحسين أنظمة التبريد في الصناعات المختلفة. ثم قمنا باستخدام المحاكاة العددية لدراسة تأثير مختلف معدلات التدفق وتركيز الجسيمات النانوية على تحسين معامل انتقال الحرارة، مما يسهم في زيادة كفاءة الأنظمة الحرارية ويقلل من استهلاكنا للطاقة.

باختصار، نسعى من خلال هذه الرسالة إلى الجمع بين المعرفة المتقدمة في مجال المواد النانوية وتقنيات نقل الحرارة لتحسين كفاءة الأداء في مجموعة من الصناعات الحيوية. من خلال التركيز على تطبيقات عملية مثل الطاقة، التبريد، والإلكترونيات.

تم تنظيم هذه الرسالة في عدة فصول مترابطة، حيث قمنا بعرض الدراسات والنتائج بطريقة منطقية وواضحة. حيث يسهل هذا التنظيم معالجة كل جزء من الموضوع بشكل مفصل، مع ضمان وجود تسلسل منطقي بين المواضيع المختلفة التي تم تناولها.

✓ الفصل الأول: الجسيمات النانوية والسوائل النانوية

تناولنا في هذا الفصل مفهوم الجسيمات النانوية وخصائصها، مثل زيادة التفاعل الكيميائي وتحسين الأداء الفيزيائي. كما تناولنا تصنيف المواد النانوية وفقاً لأبعادها وتركيبها الكيميائي، بالإضافة إلى طرق تصنيعها وتطبيقاتها المتنوعة. كما تطرقنا أيضاً إلى تركيب السوائل النانوية وأساليب إنتاجها باستخدام تقنيات متقدمة، مثل طريقة المرحلتين وطريقة المرحلة الواحدة، مع تسليط الضوء على أبرز وأهم تطبيقات هذه السوائل في المجالات المختلفة.

✓ الفصل الثاني: كيفية الحصول على الجسيمات النانوية بواسطة المطحنة الكوكبية

ناقشنا في هذا الفصل مبدأ عمل المطحنة الكوكبية التي استعملناها في عملية طحن المواد إلى جسيمات نانوية، مع التركيز على العوامل التي تؤثر على حجم الجسيمات مثل السرعة ومدة الطحن. كما تم عرض تطبيقات هذه التقنية في إنتاج الجسيمات النانوية لاستخدامها في مختلف الصناعات

✓ الفصل الثالث: النتائج والتحليل

تم في هذا الفصل تحليل نتائج اختبار خصائص الجسيمات النانوية باستخدام تقنيات مختلفة مثل حيود الأشعة السينية (XRD) وتحليل طيف الأشعة تحت الحمراء (FTIR). كما تم استخدام المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) لفحص البنية والشكل الهندسي للجسيمات النانوية.

✓ الفصل الرابع: النموذج الرياضي والطريقة العددية

تناولنا في هذا الفصل النماذج الرياضية لمحاكاة انتقال الحرارة في المبادلات الحرارية، مع التركيز على المعادلات الأساسية الحاكمة لتدفق الموائع. كما تناولنا طرق تحليل الاضطرابات في تدفق المائع (المحاكاة العددية المباشرة، محاكاة المقاييس الكبيرة، والمحاكاة المتوسطة)، كما تطرقنا إلى الخصائص الحرارية الفيزيائية للسوائل النانوية، بما في ذلك اللزوجة الديناميكية، التوصيلية الحرارية، الكثافة، الحرارة النوعية، والانتشار الحراري، وتأثيرها على أداء المبادلات الحرارية. كما تطرقنا أيضاً في هذا الفصل

التقنيات العددية لحل المعادلات التفاضلية الجزئية، مثل طريقة الحجوم المحددة. بالإضافة إلى ذلك، تم استعراض محاكاة تدفق المائع في الأنابيب متحدة المركز، وتحليل خصائص التدفق، الإعدادات الهندسية، وتأثير السوائل النانوية على نتائج المحاكاة العددية.

✓ الفصل الخامس: النمذجة والمحاكاة العددية لتدفق الحرارة وتدفق السوائل

استعرضنا في هذا الفصل النمذجة والمحاكاة العددية لتدفق الحرارة والسوائل، بدءًا من إنشاء الشبكة الحسابية، حيث تم تحديد نوع الشبكة، دقتها، والتقارب في الحسابات لضمان نتائج دقيقة. كما تناولنا في هذا الفصل خطوات المحاكاة العددية، والتي تشمل اختيار الحل المناسب، تحديد النموذج الفيزيائي، وتعريف خصائص السائل المستخدم باستخدام خاصية UDF كما تم تحديد شروط التشغيل والشروط الحدية التي تؤثر على أداء عملية المحاكاة.

✓ الفصل السادس: عرض وتحليل نتائج المحاكاة

قمنا في هذا الفصل بتحليل نتائج المحاكاة العددية، مع التركيز على تأثير العوامل المختلفة مثل اتجاه التدفق، عدد رينولدز، وتركيز الجسيمات النانوية على كفاءة نقل الحرارة. كما تم مناقشة كيفية عمل التوازن بين الموصلية الحرارية واللزوجة لتحسين أداء النظام.

✓ الخاتمة

تم تلخيص النتائج الرئيسية للدراسة وتقديم التوصيات المستقبلية لتحسين تقنيات تصنيع واستخدام السوائل النانوية. كما تم اقتراح مجالات جديدة للبحث في تطبيقات هذه المواد من أجل تحسين الكفاءة الحرارية في مختلف الأنظمة.

الفصل الأول

الجسيمات النانوية والسوائل النانوية

الفصل الأول: الجسيمات النانوية والسوائل النانوية

في عالم المواد الصغيرة جدًا، تشكل الجسيمات النانوية ثورة حقيقية في مجالات البحث والتطبيقات التكنولوجية. حيث تمتلك خصائص استثنائية تجعلها تختلف تمامًا عن المواد التقليدية التي نعرفها في حياتنا اليومية. بفضل حجمها الصغير، أصبحت لديها قدرة أكبر على التفاعل مع المواد الأخرى، مما يفتح أمامها أبوابًا واسعة للابتكار في مجالات عديدة مثل الطب، والطاقة، والإلكترونيات...

في المقابل، تعتبر السوائل النانوية من المجالات المبتكرة التي تجمع بين الجسيمات النانوية والسوائل التقليدية، حيث تُضاف جزيئات نانوية إلى سائل مثل الماء أو الزيوت لتحسين خواصه، مثل التوصيل الحراري والكهربائي. حيث يعتبر إضافة هذه الجسيمات إلى السوائل خطوة مهمة في تعزيز كفاءة النقل الحراري وتطوير تقنيات التبريد. في هذا الفصل، سوف نستعرض الأساسيات الخاصة بالجسيمات النانوية والسوائل النانوية، بالإضافة إلى التطبيقات والخصائص المميزة التي تجعلها محط اهتمام واسع في الأبحاث العلمية والصناعية.

1. الجسيمات النانوية

1. تعريف الجسيمات النانوية:

لجسيمات النانوية هي جسيمات صغيرة للغاية تتراوح أبعادها بين 1 إلى 100 نانومتر. حيث تتميز هذه الجسيمات بحجمها الصغير الذي يمنحها خصائصاً فريدة ومميزة، مما يجعلها موضوع دراسة واسع النطاق في العلوم والتكنولوجيا. يتعلق دور الجسيمات النانوية في التكنولوجيا الحديثة بالاستفادة من تلك الخصائص الفريدة التي تمتلكها في مجموعة متنوعة من التطبيقات المختلفة.

2. خصائص الجسيمات والمواد النانوية:

تتميز الجسيمات والمواد النانوية بعدة خصائص مميزة تجعلها مثيرة للاهتمام في مجال التكنولوجيا. من بين هذه الخصائص:

- ✓ المساحة السطحية الكبيرة: حيث تمتلك الجسيمات النانوية مساحة سطحية كبيرة مقارنة بحجمها الصغير، مما يزيد من تفاعلها مع المواد الأخرى.

- ✓ الصلابة والقوة الميكانيكية: تتميز المواد النانوية بمتانتها الكبيرة، حيث تفوق في اغلب الأحيان المواد التقليدية من حيث الصلابة والقوة الميكانيكية. مثل الأنابيب النانوية الكربونية، مما يؤهلها ان تكون خيارًا مثاليًا في التطبيقات الهندسية التي تتطلب مواد قوية وخفيفة في الوقت نفسه، مثل الطائرات والمركبات المتطورة.
- ✓ تحسين التوصيل الحراري والكهربائي: تستطيع المواد النانوية ان تحسن نقل الحرارة والكهرباء وهذا بفضل تركيبها المميزة، مما يزيد ويحسن من كفاءة الأجهزة.
- ✓ التفاعل الكيميائي العالي: لها قدرة عالية على التفاعل مع المواد الأخرى وهذا بسبب المساحة السطحية الكبيرة التي تمتلكها.
- ✓ الخصائص البصرية المتغيرة: يمكن أن تغير الجسيمات النانوية لونها بناءً على حجمها أو شكلها، مما يفتح المجال لتطبيقات الطلاءات الذكية.

3. تصنيف المواد النانوية وفقًا لأبعادها

تُصنّف المواد النانوية بناءً على عدد الأبعاد التي تقع ضمن النطاق النانوي. حيث يساعدنا هذا التصنيف في فهم كيفية تأثير الحجم النانوي على خصائص المواد، مما يتيح لنا استخدامها في مجموعة واسعة من التطبيقات العلمية والصناعية. وبناءً على ذلك تم ترتيب المواد النانوية وفقًا لأبعادها على النحو التالي:

1.3. المواد النانوية ذات البُعد صفر (0D)

المواد النانوية ذات البُعد الصفري هي مواد تتواجد في صورة جسيمات فردية، حيث تكون جميع أبعادها أقل من 100 نانومتر، مما يجعلها تأخذ شكلًا نقطيًا، مثل الجسيمات النانوية الكروية أو الكتل النانوية.

أحد الأمثلة البارزة لهذه المواد هي النقاط الكمية (Quantum Dots)، التي تتميز بخصائص فريدة تجعلها مثالية للاستخدام في التطبيقات الإلكترونية والبصرية. يتم استخدامها على نطاق واسع في أجهزة العرض الحديثة، والأجهزة البصرية عالية الدقة، وتقنيات الإضاءة المتقدمة [1] [2].

2.3. المواد النانوية ذات البُعد واحد (1D)

تتميز هذه المواد بامتدادها في اتجاه واحد فقط خارج مقياس النانو (أكبر من 100 نانومتر)، بينما تكون أبعادها الأخرى ضمن نطاق النانو (أقل من 100 نانومتر). غالبًا ما تكون هذه المواد على شكل ألياف نانوية أو أنابيب نانوية وتستخدم في مجالات مثل الترانزستورات، الأجهزة الاستشعارية، والأجهزة الإلكترونية. [3] [4].

3.3 المواد النانوية ذات البُعدين (2D)

هي مواد تمتد في بعدين على مقياس أكبر من 100 نانومتر، بينما يكون البُعد الثالث أقل من 100 نانومتر. من أبرز المواد النانوية ذات البُعدين هو الجرافين، وهو طبقة أحادية من ذرات الكربون التي تتمتع بخصائص ميكانيكية وكهربائية استثنائية. يُستخدم الجرافين في تطبيقات الإلكترونيات، الطاقة مثل البطاريات، والمستشعرات، بالإضافة إلى العديد من التطبيقات الطبية والبيئية [5] [6].

4.3 المواد النانوية ذات البُعد الثلاثي (3D)

المواد النانوية ذات البُعد الثلاثي هي تلك التي تمتد في ثلاثة أبعاد نانوية وتحفظ بخصائص مميزة في جميع الاتجاهات. هذه المواد يمكن أن تكون على شكل هياكل نانوية معقدة أو تحتوي على مسام نانوية، مما يجعلها مناسبة لمجموعة واسعة من التطبيقات. تشمل هذه المواد الأجهزة النانوية المتكاملة، الأنظمة النانوية التكيفية، والمواد الهجينة. تُستخدم في مجالات متعددة مثل التحفيز الكيميائي، تخزين الطاقة، وتصنيع الأجهزة الدقيقة [7] [8].

4. تأثير الأبعاد على خصائص المواد النانوية

للأبعاد تأثير كبير على خصائص المواد النانوية، حيث تظهر خصائص جديدة وغير متوقعة عند تقليص أبعاد المادة إلى النطاق النانوي. على سبيل المثال، الخصائص البصرية للمواد النانوية ذات البُعد صفر (مثل الكمات النانوية) تختلف بشكل جذري عن خصائص المواد الكبيرة بسبب تأثيرات الكم.

المواد النانوية ذات البُعد الواحد مثل الأنابيب النانوية الكربونية، تتميز بخصائص ميكانيكية وكهربائية تكون مثالية في صناعة النسيج الذكي، الموصلات الكهربائية، والروبوتات الدقيقة.

كذلك، فإن المواد النانوية ذات البُعدين مثل الجرافين تتمتع بخصائص كهربائية وميكانيكية استثنائية تجعلها مثالية لتطبيقات مثل المستشعرات والأجهزة الإلكترونية [9] [10].

5. تصنيف المواد النانوية بناءً على التركيب الكيميائي:

يمكننا تصنيف المواد النانوية حسب تركيبها الكيميائي إلى ثلاث فئات رئيسية

1.5 المواد النانوية العضوية

تتكون أساساً من مركبات عضوية التي تحتوي على الكربون والهيدروجين كعناصر أساسية، وقد تشمل عناصر إضافية مثل الأكسجين، النيتروجين، أو الكبريت، التي تضيف لها خصائص جديدة ومتنوعة حيث تمتاز هذه المواد بقدرتها العالية على التعديل الكيميائي، وتوافقها الجيد مع الأنظمة الحيوية، بالإضافة ان لها قابلية التحلل البيولوجي، مما يجعلها خياراً جيداً للاستخدام في المجالات الطبية والتطبيقات الحيوية المختلفة.

2.5. المواد النانوية غير العضوية

تتكون من عناصر أو مركبات غير عضوية، حيث تتميز بخصائصها الميكانيكية والكيميائية القوية مثل المتانة، والتوصيل الكهربائي، والخصائص المغناطيسية. تستعمل هذه المواد على نطاق واسع في التطبيقات الصناعية والتقنية وتشمل

- الجسيمات المعدنية النانوية مثل الذهب، الفضة والنحاس
- أكاسيد المعادن النانوية مثل أكسيد التيتانيوم، أكسيد الزنك، أكسيد النحاس وأكسيد الألمنيوم
- الأنابيب النانوية الكربونية والجرافين.

3.5. المواد النانوية الهجينة

تمثل فئة من المواد التي تجمع بين خصائص المواد العضوية والمواد غير العضوية، مما يسمح لنا بالحصول على المواد ذات أداء عالٍ ووظائف متعددة تلبي متطلبات تطبيقات متنوعة. مثل الهياكل الكربونية الهجينة. البوليمرات الهجينة. الهياكل المعدنية العضوية

6. طرق تصنيع المواد النانوية

يعتبر تصنيع المواد النانوية من أهم المجالات التي شهدت تقدماً كبيراً في هذه الآونة الأخيرة. حيث تُستخدم هذه المواد في مجموعة واسعة من التطبيقات الصناعية والعلمية. حيث تتيح لنا تقنيات تصنيع المواد النانوية إنتاج مواد بمقاييس أصغر بكثير من المواد التقليدية، مما يجعل خصائصها الفيزيائية والكيميائية مميزة. نستطيع تقسيم طرق تصنيع المواد النانوية إلى:

- الطرق العلوية (Top-Down) تعتمد على تقليل حجم المواد الأكبر (الميكرونية) إلى أحجام نانوية.
- الطرق السفلية (Bottom-Up) تعتمد على بناء المواد النانوية من الجزيئات أو الذرات،
- الطرق الكيميائية في السوائل (Sol-Gel Method)

1.6. الطرق العلوية (Top-Down)

الطرق العلوية تعتبر من أقدم وأكثر الطرق استخدامًا في تصنيع المواد النانوية حيث تشمل هذه الطرق مجموعة من تقنيات تهدف إلى تقليل حجم المواد من أجل الوصول إلى النطاق النانوي، أي بحجم يقل عن 100 نانومتر.

أ. الطحن الميكانيكي (Mechanical Milling)

يُعتبر الطحن الميكانيكي من أبسط الطرق العلوية لتصنيع المواد النانوية. حيث يتم من خلال هذه الطريقة تطبيق قوة ميكانيكية على المواد لتحويلها إلى جسيمات نانوية. نستخدم هذا الأسلوب في صناعات عديدة مثل صناعات الأدوية والسيراميك. حيث تمتاز هذه الطريقة بسهولة التنفيذ، تكاليف منخفضة، إمكانية التحكم في حجم الجسيمات. (Zhao 2003) [11]. وهو ما سوف نتعرض له لاحقًا.

ب. الطحن باستخدام الليزر (Laser Ablation)

في هذه الطريقة، يتم توجيه الشعاع الليزري إلى الهدف الصلب، مما يؤدي إلى تبخير المادة وتكوين جسيمات نانوية. وتمتاز هذه الطريقة بدقة عالية في التحكم في الحجم والشكل (Murphy 2005) [12]

ج. الترسيب البخاري (Vapor Deposition)

تعتمد هذه الطريقة على تبخير المادة في حالة الغازية ثم تكثيفها على سطح معين لتكوين المواد النانوية. تشمل التقنيات الترسيب البخار الكيميائي (CVD) والترسيب البخاري الفيزيائي (PVD) وتمتاز هذه الطريقة بأنه يمكن التحكم الممتاز في سمك الطبقات وكفاءة عالية. (Cheng 2007) [13]

2.6. الطرق السفلية (Bottom-Up)

تعتمد الطرق السفلية على بناء المواد النانوية من ذرات أو جزيئات أصغر. حيث تكون هذه الطرق أكثر دقة في تشكيل المواد النانوية وتسمح بالحصول على هيكل دقيق للغاية. ومن أهم هذه تقنيات التفاعل الكيميائي، الترسيب الكيميائي، التجميع الذاتي.

أ. التجميع الذاتي (Self-Assembly)

تعتمد هذه الطريقة على تجميع الجزيئات أو الذرات بشكل طبيعي لتكوين هيكل نانوي من خلال القوى الكيميائية أو الفيزيائية مثل التفاعلات الهيدروجينية أو التفاعلات الكهروستاتيكية. وتتميز

بالتكلفة المنخفضة، القدرة على تصنيع هياكل معقدة. (Whitesides 2002) [14]

ب. الترسيب الكيميائي (Chemical Vapor Deposition – CVD)

تعتمد هذه التقنية على تحويل المواد الغازية إلى حالة صلبة تتراكم على السطح المراد. حيث يتم تفاعل هذه المواد الغازية تحت ظروف حرارة وضغط معينة لتشكيل المواد النانوية. تمتاز بدقة عالية في التحكم لتكوين المواد (Ritala 2002) [15]

ج. الترسيب الكهربائي (Electrochemical Deposition)

ترتكز هذه الطريقة على استخدام تيار كهربائي لتشكيل مواد نانوية على سطح ما. حيث يتم تطبيق التيار على محلول يحتوي على أيونات المعادن، مما يؤدي إلى ترسيب الجسيمات النانوية على القطب. وتمتاز بالقدرة على تشكيل طبقات رقيقة ومنتظمة. (Bishop 2004) [16]

3.6. الطرق الكيميائية في السوائل (Sol-Gel Method)

تُستخدم لإعداد المواد النانوية عن طريق تفاعل كيميائي في محلول مائي. يتم تحويل السوائل إلى هلام ومن ثم يتم معالجة الهلام للحصول على المواد النانوية.

تمتاز بإمكانية التحكم في تركيب المواد النانوية وتحضير مواد معقدة. (Brinker & Scherer, 1990) [17]

4.6. تقنيات أخرى مبتكرة لتصنيع المواد النانوية

أ. الاستراتيجية البيولوجية (Biological Synthesis)

تستخدم بعض الكائنات الحية مثل البكتيريا والفطريات لتوليد المواد النانوية. هذه الطريقة تتميز بأنها صديقة للبيئة وتتجنب المواد الكيميائية الضارة. (Nair 2007) [18]

ب. استخدام الأشعة السينية (X-Ray Lithography)

تعتمد هذه التقنية على استخدام أشعة سينية لقص المواد النانوية بدقة عالية. تستخدم هذه الطريقة في صناعة الأجهزة الإلكترونية الدقيقة مثل الدارات المتكاملة. تمتاز بالقدرة على صناعة مواد نانوية دقيقة للغاية (Matsui 2004) [19]

7. تطبيقات المواد النانوية

المواد النانوية تظهر لنا تأثيرات إيجابية في العديد من المجالات العلمية والتكنولوجية، حيث أثبتت قدرتها على تحسين الأداء في الطب، الإلكترونيات، الطاقة، والبيئة. فيما يلي، نستعرض بعض التطبيقات البارزة للمواد النانوية في هذه المجالات.

1.7. في مجال الطب

استخدام المواد النانوية في توصيل الأدوية يعزز بشكل كبير فعالية العلاج ويقلل من التأثيرات الجانبية. المواد النانوية تسمح بتوصيل الأدوية إلى الأماكن المطلوبة، مثل الأورام السرطانية، مما يساعد في تقليل التأثيرات السلبية على الخلايا السليمة. كشفت دراسة (Baskar 2019) أن الدهون النانوية والنانوسومات يمكنها حمل أدوية مضادة للسرطان بشكل فعال إلى الخلايا المستهدفة. [20]

2.7. في التشخيص الطبي مثل أجهزة التصوير النانوية

المواد النانوية لها دورًا بارزًا في التشخيص الطبي من تحسين تقنيات التصوير التقليدية مثل التصوير بالرنين المغناطيسي (MRI) والتصوير المقطعي المحوسب (CT). أفادت دراسة (Chen 2018) أن الجسيمات النانوية المغناطيسية تحسن التباين في الصور مما يساعد في الكشف المبكر عن الأورام والأمراض. [21]

3.7. دورها في العلاج

يمكن تحقيق نتائج جيدة في معالجة الأورام السرطانية وأمراض أخرى عن طريق العلاج المستهدف باستخدام المواد النانوية. أظهرت دراسة حديثة (Ranjan 2020)، أن النانوسومات المحملة بالأدوية يمكنها الوصول إلى الخلايا المرضية بشكل أكثر دقة. [22]

4.7. في الإلكترونيات

في مجال الإلكترونيات، ساهمت المواد النانوية في تحسين الأداء وتطوير الأجهزة الحساسة والموصلات. الجسيمات النانوية مثل الأنابيب النانوية الكربونية تلعب دورًا كبيرًا في تصنيع الترانزستورات المتناهية الصغر، مما يساهم في زيادة كفاءة الأجهزة الإلكترونية وتقليل حجمها. (Dai, 2002) [23]

5.7. في الطاقة

تستخدم المواد النانوية في تحسين تخزين الطاقة، في البطاريات والمكثفات الفائقة. حيث تظهر دراسة (Zhao 2016) ان المواد النانوية مثل الجرافين تعمل على تحسين قدرة البطاريات في تخزين الطاقة. المكثفات الفائقة المعتمدة على المواد النانوية توفر كفاءة عالية في الشحن والتفريغ السريع. [24]

6.7. في البيئة

في مجال معالجة المياه والهواء، تُستخدم المواد النانوية لتنقية المياه من الملوثات مثل المعادن الثقيلة والمركبات العضوية. حيث يستخدم المصفاء النانوي في معالجة المياه، مما يساهم في توفير مياه شرب نقية. كما يمكن للمواد النانوية امتصاص الملوثات الغازية مثل ثاني أكسيد الكربون (Liu 2013) [25].

7.7. في الطاقة الشمسية

الطاقة الشمسية هي مجال آخر استفاد من المواد النانوية. النقاط الكمومية والجرافين تساهم في تحسين كفاءة وأداء الخلايا الشمسية من خلال زيادة امتصاص الضوء عبر نطاق أطياف أوسع، مما يُسهل لنا تحويل الطاقة الضوئية إلى كهرباء بشكل أكثر فعالية (Gao 2016) . [26]

8.7. في الصناعة

المواد النانوية تُستخدم بشكل واسع في عملية تطوير المواد المركبة التي تمتاز بخصائص ميكانيكية محسنة. كدمج الألياف النانوية مع البلاستيك والمعادن لتحسين القوة والمتانة (Kumar 2016) [27] تستخدم المواد النانوية في الصناعات المختلفة مثل صناعة السيارات والطائرات، لتحسين خصائص الدهانات والطلاء. حيث تمنح الطلاءات مقاومة أفضل للتآكل والعوامل الجوية.

9.7. السوائل النانوية

إضافة الجسيمات النانوية إلى السوائل مثل الماء أو الزيوت يزيد من القدرة على نقل الحرارة بشكل فعال مقارنة بالسوائل التقليدية حيث تستعمل السوائل النانوية في أنظمة التبريد المباشر للمعدات الإلكترونية أو في التطبيقات الصناعية التي تتطلب كفاءة حرارية عالية وهو ما سوف نتطرق اليه في الفصل القادم.

اذن نستطيع ان نقول ان المواد النانوية لها دور كبير في تحسين العديد من التطبيقات في مختلف المجالات. من الطب إلى الإلكترونيات، ومن الطاقة إلى الصناعة نتوقع ان يكون لهذه المواد تأثير كبير في المستقبل، حيث يتم تطوير تقنيات جديدة باستخدام المواد النانوية لمواجهة التحديات البيئية والصحية والاقتصادية.

II. السوائل النانوية

تُعتبر تقنية السوائل النانوية تطوراً حديثاً يجمع بين علوم النانو والديناميكا الحرارية، وتهدف إلى تحسين نقل الحرارة بشكل كبير. ببساطة، السوائل النانوية هي سوائل تحتوي على جسيمات نانوية صغيرة. يسمح هذا الحجم الدقيق بزيادة مساحة السطح الكلي للجسيمات، مما يعزز الخصائص الفيزيائية والحرارية للسائل. ظهرت فكرة هذه التقنية في التسعينيات من القرن الماضي على يد العالم "تشوي" وفريقه، حيث سعوا لإيجاد طرق لتحسين أداء السوائل التقليدية المستخدمة في نقل الحرارة. أظهرت الدراسات أن إضافة كميات ضئيلة جداً من الجسيمات النانوية إلى السوائل يمكن أن يرفع التوصيل الحراري بشكل ملحوظ. اليوم أصبحت تُستخدم السوائل النانوية في العديد من المجالات الصناعية [28].

1. تركيب السوائل النانوية

تتكون السوائل النانوية بشكل رئيسي من مكونين أساسيين:

- السائل الأساسي: وهو الوسيط الرئيسي الذي تُضاف إليه الجسيمات النانوية لتحسين خصائصه الحرارية مثل الماء، الزيوت، أو أي سوائل أخرى تُستخدم في أنظمة نقل الحرارة.
- جسيمات النانوية: هي جسيمات أبعادها بين 1 و 100 نانومتر تُضاف إلى السائل الأساسي لتحسين خصائصه

2. أنواع الجسيمات النانوية المستخدمة:

- المعادن النقية: لزيادة التوصيل الحراري.
- أكاسيد المعادن: خيار اقتصادي ومستدام.
- هياكل الكربون النانوية: لتطبيقات متخصصة بفضل خفة وزنها وخصائصها الحرارية الممتازة.

3. تقنيات تصنيع السوائل النانوية

1.3. الطريقة ذات المرحلتين

الطريقة ذات المرحلتين هي الأكثر شيوعاً لتحضير السوائل النانوية. في هذه الطريقة، يتم إنتاج الجسيمات النانوية، أو الألياف النانوية، أو الأنابيب النانوية، أو المواد النانوية الأخرى في البداية على شكل مسحوق جاف باستخدام طرق كيميائية أو فيزيائية. ثم يتم توزيع هذا المسحوق النانوي في سائل خلال المرحلة الثانية من المعالجة باستخدام وسائل مثل:

✓ التحريك المغناطيسي المكثف

✓ التحريك فوق الصوتي

✓ المزج عالي القص

✓ التجانس

✓ الطحن بالكرات

تعد هذه الطريقة الأكثر اقتصادية لإنتاج السوائل النانوية على نطاق واسع، نظرًا لأن تقنيات تصنيع مساحيق النانو قد وصلت إلى مستويات إنتاج صناعية جيدة. ولكن، بسبب مساحة السطح الكبيرة والفعالية العالية للجسيمات النانوية، فإنها تميل إلى التجمع معًا. لتحسين استقرار الجسيمات النانوية داخل السوائل، يتم استخدام مواد خافضة للتوتر السطحي (Surfactants). مع ذلك، فإن كفاءة هذه المواد عند درجات حرارة مرتفعة تُعتبر تحديًا كبيرًا، خصوصًا للتطبيقات التي تتطلب العمل في درجات حرارة عالية [29].

2.3. الطريقة ذات المرحلة الواحدة

في الطريقة ذات المرحلة الواحدة، يتم إنتاج الجسيمات النانوية مباشرة داخل السائل الأساسي. عن طريق تفاعلات كيميائية أو فيزيائية في نفس الوسط السائل. يتم استخدام تقنيات متنوعة لتحقيق هذا الهدف مثل الترسيب المباشر. حيث توفر هذه الطريقة دمجًا مباشرًا للجسيمات في السائل، مما يقلل من فرص تجمعها.

تتميز هذه الطريقة بإنتاج جسيمات نانوية مستقرة ذات كفاءة عالية، لكنها قد تكون أقل اقتصادية عندما نقارنها بالطريقة ذات المرحلتين، خاصة للتطبيقات واسعة النطاق.

4. الخصائص الفيزيائية والحرارية للسوائل النانوية المحسنة

السوائل النانوية تظهر خصائص محسنة مقارنة بالسوائل التقليدية نظرًا لوجود الجسيمات النانوية المعلقة داخل السائل الأساسي مما يعزز من كفاءتها الحرارية والفيزيائية. ومن أبرز هذه التحسينات زيادة الموصلية الحرارية حيث يمكن أن يصل هذا التحسن إلى 40% أو أكثر حسب نوع وحجم الجسيمات النانوية المستخدمة مثل أكسيد النحاس أو أكسيد الألمنيوم أو أنابيب الكربون النانوية. حيث يرجع ذلك إلى الموصلية الحرارية العالية للجسيمات النانوية مقارنة بالسائل الأساسي.

1.4. الموصلية الحرارية للسوائل النانوية

تعتبر الموصلية الحرارية للسائل عن قدرته على نقل الحرارة، وهي عامل أساسي في أنظمة التبريد والمبادلات الحرارية. حيث تعتمد الموصلية الحرارية على التركيب الكيميائي للسائل، حيث يتميز الماء بموصلية أعلى مقارنةً بالزيوت.

2.4. العوامل المؤثرة على الموصلية الحرارية للسوائل النانوية

1.2.4. الحركة البراونية

الحركة البراونية هي حركة عشوائية وغير منتظمة للجسيمات الصغيرة أو الجسيمات النانوية المعلقة في سائل أو غاز، وتنتج عن التصادمات المستمرة بين هذه الجسيمات والجزيئات المحيطة بها في الوسط. حيث اكتشف أنها آلية رئيسية تتحكم في السلوك الحراري للمعلقات السائلة.

أهم خصائص الحركة البراونية أنها ذات طبيعة عشوائية حيث مسارات الجسيمات المعلقة غير منتظمة ولا يمكن التنبؤ بها. ومن بين خصائصها أيضاً أنها تغير الاتجاهات باستمرار نتيجة للتصادمات. ويرجع سببها الرئيسي إلى الطاقة الحرارية للجزيئات المحيطة، حيث تتحرك الجزيئات بشكل دائم بفعل هذه الطاقة. تكون تأثيراتها واضحة بشكل أكبر في الجسيمات الصغيرة (على المستوى النانوي)، وتقل أهميتها للجسيمات الكبيرة. وتتعلق هذه الحركة بالتصادمات الجزيئية، وليس بالقوى الماكروسكوبية كالجاذبية.

حيث يُضاف تأثير الحركة البراونية إلى التوصيلية الحرارية للمعلق الساكن والمخفف، وفق المعادلة

$$K_{eff} = K_{static} + K_{brownian} \quad (1)$$

2.2.4. الطبقة البينية

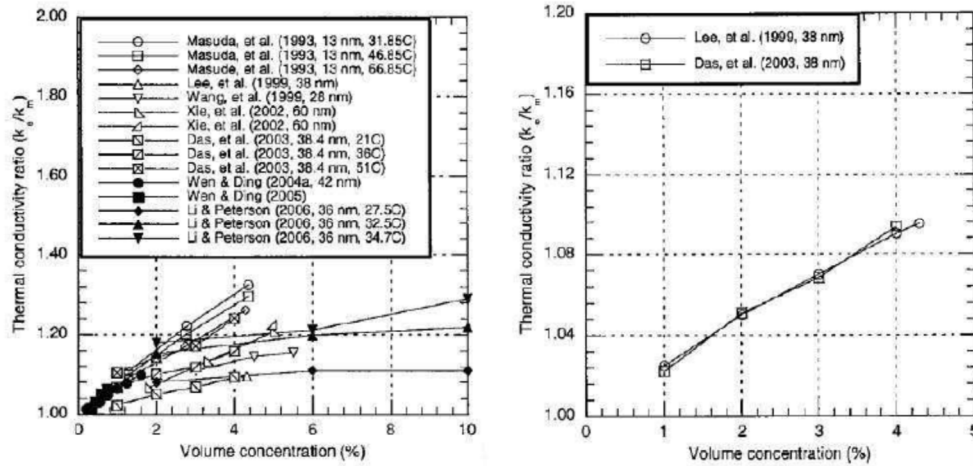
على الرغم من أننا نعلم أن الجزيئات السائلة القريبة من سطح صلب تشكل هياكل طبقية، إلا أننا نعرف القليل عن العلاقة بين هذه النانو-طبقة والخصائص الحرارية للخلائط الصلبة/السائلة. تُعد الطبقة الصلبة بمثابة جسر حراري، مما يجعلها ضرورية لتحسين التوصيل الحراري. بناءً على هذه الفكرة حول النانو-طبقة كجسر حراري، تم اقتراح نموذج هيكلي للسوائل النانوية المكونة من الجسيمات الصلبة.

تشير الدراسات التي تناولت الخصائص الحرارية لخلائط ساكنة أن انتقال الحرارة في الطبقة البينية، وهي المنطقة القريبة من سطح الجسيمات الصلبة، أسرع بكثير مقارنة بالسائل المتحرك البعيد عن هذه الطبقة. كما أكدت لنا الدراسات انه لا يوجد فرق في خصائص الموجات الحرارية بين الجزيئات الصلبة والسائل المتحرك، مما يبين لنا أهمية الطبقة البينية في تحسين الكفاءة الحرارية.

3.2.4. الكسر الحجمي

عمل العديد من الباحثين على جسيمات Al_2O_3 (أكسيد الألمنيوم) المعلقة في الماء بهدف دراسة تأثير التركيز الحجمي للجسيمات على التوصيل الحراري للسائل النانوي. حيث أظهرت العديد من الدراسات أن زيادة التركيز الحجمي للجسيمات النانوية يؤدي إلى تحسن ملحوظ في التوصيل الحراري. على سبيل المثال، أوضح Xuan et al. (2000) أن التوصيل الحراري للسائل النانوي المكون من جسيمات Al_2O_3 والماء يزيد بنسبة تصل إلى 22% عند استخدام تركيز حجمي يبلغ 4% مقارنة بالماء وحده [30]. كما أظهرت دراسة Eastman et al. (2001) أن استخدام تركيز حجمي قدره 5% أدى إلى زيادة التوصيل الحراري بنسبة تتراوح بين 30-40%، مع التأكيد على أهمية منع تكتل الجسيمات لتحقيق هذه النتائج. [31]. في دراسة أخرى أجراها Das et al. (2003)، تم الإشارة إلى أن زيادة التركيز الحجمي إلى 6% تؤدي إلى تحسن إضافي في التوصيل الحراري، لكن ذلك قد يكون مصحوبًا بزيادة ملحوظة في لزوجة السائل، مما يؤثر على سهولة تدفقه [32]. بينما أشارت دراسة Wang et al. (2005) إلى أن التوصيل الحراري للسائل النانوي يزداد بشكل خطي مع زيادة التركيز الحجمي حتى يصل إلى 8%، حيث تم تسجيل تحسن بنسبة 35% في التوصيل الحراري مقارنة بالماء النقي [33].

كما تُظهر لنا الأشكال المرفقة الشكل (1.1) تأثير التركيز الحجمي للجسيمات النانوية Al_2O_3 على التوصيل الحراري للسائل النانوي، وذلك وفقًا لنتائج عدد من الدراسات التي أجراها باحثون مختلفون



الشكل (1.1) تأثير التركيز الحجمي للجسيمات النانوية Al_2O_3 على التوصيل الحراري للسائل النانوي [34]

حيث تظهر الرسوم البيانية تحسناً ملحوظاً في التوصيل الحراري، يصل إلى 30% مقارنة بالسائل الأساسي وهذا يعتبر امر جيد. ولكن توجهنا بعض التحديات عند زيادة تركيز الجسيمات النانوية أبرز هذه التحديات

✓ زيادة اللزوجة: بزيادة تركيز الجسيمات، يزداد سمك السائل ويصعب تدفقه، بشكل خاص في الأنظمة الديناميكية.

✓ تكثف الجسيمات: عند ارتفاع التركيزات، تتجه الجسيمات إلى التجمع، وهذا يقلل من مساحة السطح النشطة ويضعف التأثير الحراري..

✓ عدم استقرار السائل: في بعض الأحوال، قد يؤدي زيادة التركيز إلى ترسيب الجسيمات مع مرور الوقت، مما يؤثر على كفاءة السائل.

4.2.4. نوع الجسيمات النانوية

الجسيمات النانوية تلعب دوراً هاماً في تحسين توصيل الحرارة للسوائل النانوية، ويعتبر نوع الجسيمات أحد العوامل الرئيسية التي تؤثر في أدائها. ركزت العديد من الدراسات على مقارنة تأثير الجسيمات المعدنية النقية مثل النحاس والفضة، والأكاسيد المعدنية مثل أكسيد الألمنيوم وأكسيد النحاس، على تحسين توصيل الحرارة.

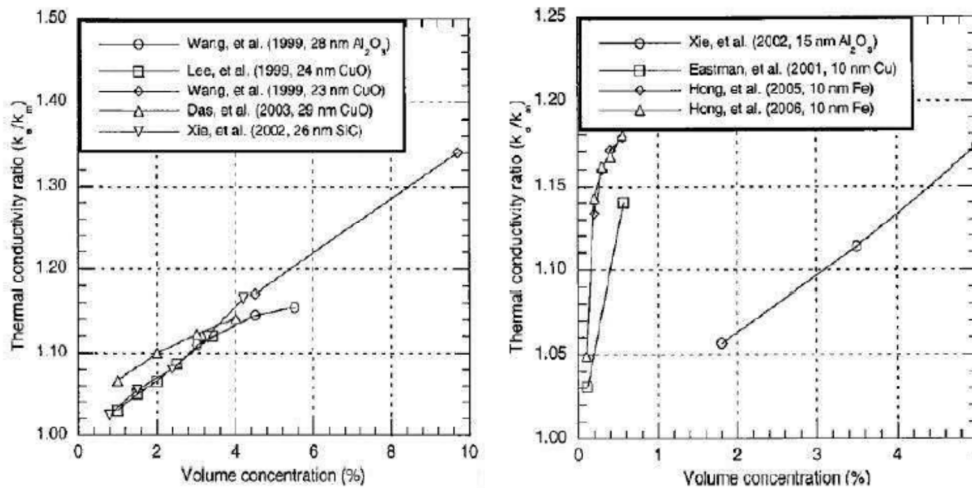
أ. الأكاسيد المعدنية ودورها في الاستقرار الحراري:

توجهت دراسة Das وزملاؤه (2003) إلى مادة أكسيد الألمنيوم (Al_2O_3) ، حيث تبين أن استخدامه بتركيز حتمي 3% أدى إلى تحسين التوصيل الحراري بمقدار 20%. بالرغم من أن الأداء كان أقل من الجسيمات المعدنية، إلا أن الأكاسيد تتميز باستقرارها العالي في السوائل، وبالتالي تصبح خياراً ممتازاً للاستخدامات ذات الطول الزمني الطويل. أما أكسيد النحاس (CuO) ، فقد أظهرت دراسة Wang وزملاؤه (2006) أن استخدامه بتركيز حتمي 4%، زاد التوصيل الحراري بمقدار 30%. ومع ذلك، أشار الباحثون إلى أن الأداء كان أقل من النحاس والفضة بسبب انخفاض التوصيل الحراري الذاتي للأكاسيد مقارنة بالمعادن [33].

ب. مقارنة تأثير جسيمات Al_2O_3 و CuO على التوصيل الحراري

تمتع السوائل التي تحتوي على CuO بموصلية حرارية أعلى مقارنة بالسوائل التي تحتوي على Al_2O_3 . مما يعكس تأثيراً أكبر لجسيمات CuO بفضل الموصلية الحرارية الذاتية العالية مقارنةً بجسيمات Al_2O_3 . ورغم تفوق CuO في الموصلية الحرارية، قد يظل Al_2O_3 خياراً مفضلاً في بعض التطبيقات بفضل استقراره الأفضل وتكلفته المنخفضة [35] [36].

كما يظهر الشكل (2.1) تأثير نوع الجسيمات النانوية على التوصيل الحراري للسوائل النانوية وذلك وفقاً لنتائج عدد من الدراسات التي أجراها باحثون مختلفون

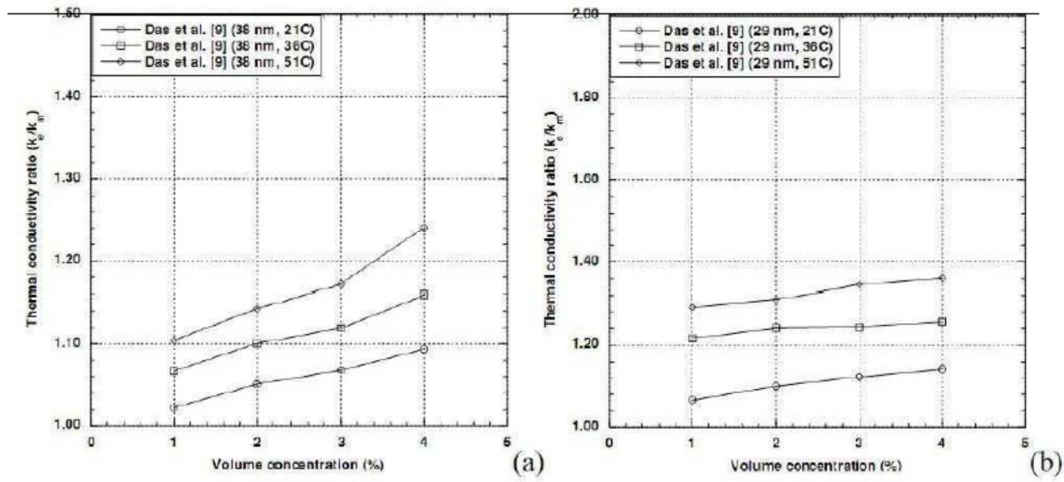


الشكل (2.1) تأثير نوع الجسيمات النانوية على التوصيل الحراري للسوائل النانوية [34]

بينت كثير من الدراسات أن الجسيمات المعدنية، مثل النحاس والفضة، توفر تحسناً كبيراً في التوصيل الحراري بسبب خصائصها المميزة. ومع ذلك، فإن استقرار هذه الجسيمات في السوائل يُعد تحدياً يستلزم التغلب عليه في التطبيقات العملية. أما الأكاسيد المعدنية، على الرغم من أدائها الحراري الأقل، فهي تتميز باستقرارها العالي، مما يجعلها خياراً أكثر أماناً للاستخدام طويل الأمد في التطبيقات الصناعية.

5.2.4. درجة الحرارة

تُعتبر درجة الحرارة عاملاً رئيسياً يؤثر على التوصيل الحراري للسوائل النانوية، حيث تؤدي زيادة درجة الحرارة غالباً إلى تحسين التوصيل الحراري. يتبين لنا ذلك بوضوح في البيانات المستخلصة من الرسوم البيانية الشكل (3.1) التي أوردها الباحثان Das S.K. et al. حيث تركز الدراسة على السوائل النانوية التي تحتوي على جسيمات CuO و Al_2O_3 ضمن نطاق درجة حرارة يتراوح بين 28°C و 51°C .



الشكل (3.1) تأثير درجة الحرارة على التوصيل الحراري للسوائل النانوية [34]

6.2.4. تأثير حجم الجسيمات على الموصلية الحرارية

تُظهر الدراسات أن الموصلية الحرارية للسوائل النانوية تتحسن بشكل كبير عند تقليلنا لحجم الجسيمات النانوية التي نضيفها إلى السائل الأساسي. وهذا التحسن يعود إلى عدة عوامل مرتبطة بخصائص الجسيمات النانوية وتأثيرها على السائل الأساسي ومن بين هذه العوامل

✓ **الحركة البراونية:** وهي حركة ناتجة عن اصطدام الجزيئات الصغيرة بجزيئات السائل المحيط. عند تقليلنا لحجم الجسيمات تزداد الحركة العشوائية لهذه الجسيمات كما يزداد معامل الانتشار مما يؤدي إلى توزيع أفضل للحرارة داخل السائل.

✓ **التصادمات بين الجسيمات:** عندما نقلل من حجم الجسيمات، تزداد فرصة التصادم بين الجسيمات وهذا بسبب كثافتها الكبيرة. حيث هذه التصادمات تسهل عملية انتقال الحرارة من جسيم إلى آخر كما تعزز كفاءة توزيع الحرارة، مما يجعل السائل أكثر قدرة على نقل الطاقة الحرارية.

✓ **التفاعل مع السائل المحيط** عندما نقلل من حجم الجسيمات، فإن السطح الإجمالي المتاح للتفاعل مع السائل يزداد. وهذا يؤدي إلى تحسين التبادل الحراري بين الجسيمات والسائل.

آلية التفاعل بين السطح الصلب والسائل تدعم الفكرة التي تقول إن تقليل حجم الجسيمات يزيد من الموصلية الحرارية للسوائل النانوية مع ذلك، تقليل القطر بشكل مفرط قد يُسبب لنا تكتل الجسيمات، مما قد يُقلل من كفاءة النقل الحراري.

3.4. للزوجة الديناميكية

هي إحدى الخصائص الفيزيائية التي تحدد لنا مدى مقاومة السائل للتدفق تحت تأثير ظروف وقوى معينة. هذه الخاصية لها دوراً أساسياً في العديد من تطبيقاتنا اليومية والصناعية، حيث إنها تؤثر على كيفية تدفق السوائل داخل الأنابيب، وفي أنظمة التبريد، والمبادلات الحرارية. على سبيل المثال، السوائل مثل الماء ذات لزوجة منخفضة تتدفق بسهولة وسلاسة، بينما السوائل السميكة مثل الزيوت و العسل تواجه مقاومة أكبر أثناء تدفقها. من جانب آخر، تؤثر اللزوجة بشكل مباشر على كفاءة نقل الحرارة في السوائل، حيث أن السوائل ذات اللزوجة العالية تميل إلى التدفق بشكل طبقي (laminar flow) ، مما يقلل من كفاءة انتقال الحرارة. أما السوائل منخفضة اللزوجة، فتساعدنا في زيادة التدفق المضطرب (turbulent flow) ، ما يرفع من كفاءة النقل الحراري. اللزوجة ليست ثابتة؛ فهي تتأثر بدرجة الحرارة، حيث تنخفض لزوجة السوائل بارتفاع درجة الحرارة كما أن إدخال جسيمات صغيرة جداً، مثل الجسيمات النانوية، يمكن أن يغير اللزوجة بشكل كبير، مما يجعلها عاملاً حساساً في تصميم أنظمة السوائل الحديثة. فهم هذه الخاصية يساعدنا على تحسين الأداء والكفاءة في مختلف الأنظمة التي تعتمد على تدفق السوائل.

4.4. العوامل المؤثرة على اللزوجة:

اللزوجة ليست خاصية ثابتة، بل يمكن أن تتغير نتيجة مجموعة من الظروف والعوامل

1.4.4. درجة الحرارة:

تقل اللزوجة في السوائل مع زيادة درجة الحرارة بسبب ضعف قوى التجاذب بين الجزيئات.

2.4.4. تركيب السائل الكيميائي:

الإضافات مثل الجسيمات النانوية أو المواد المذابة يؤثر بشكل ملحوظ على لزوجة السائل

3.4.4. حجم وشكل الجسيمات:

حجم وشكل الجسيمات لهما تأثير كبير على اللزوجة. عندما تكون الجسيمات صغيرة جدًا، فإنها تزيد من اللزوجة بشكل ملحوظ، ويرجع ذلك إلى عدة عوامل منها مساحة سطح كبيرة مقارنة بحجمها، مما يزيد من التفاعلات مع جزيئات السائل المحيط. هذا يؤدي إلى زيادة قوى الاحتكاك بين الجسيمات والسائل، مما يرفع من مقاومة السائل للتدفق. بالإضافة إلى الحركة البراونية للجسيمات الصغيرة حيث تكون أكثر نشاطًا، ما يولد لنا اضطرابات داخل السائل ويزيد من لزوجته.

أما بالنسبة لشكل الجسيمات، فإن الجسيمات ذات الأشكال غير المنتظمة، فإنها تميل إلى زيادة اللزوجة أكثر من الجسيمات الكروية. ويعود ذلك للتداخلات الميكانيكية مع جزيئات السائل، مما يزيد من المقاومة أثناء التدفق.

5. فوائد السوائل النانوية

تتميز السوائل النانوية بمجموعة من الفوائد الفريدة التي تجعلها خيارًا واعدًا في تحسين نقل الحرارة في العديد من التطبيقات. تتضمن هذه الفوائد:

1.5. تحسين نقل الحرارة

تتميز الجسيمات النانوية بمساحة سطحية مرتفعة جدًا، مما يزيد من مساحة التبادل الحراري بين السائل والجسيمات يؤدي ذلك إلى زيادة كفاءة نقل الحرارة، وهو أمر مفيد في أنظمة التبريد والتدفئة.

2.5. استقرار عالٍ في التوزيع:

بفضل تأثير الحركة البراونية، تظل الجسيمات النانوية معلقة بشكل مستقر في السائل لفترات طويلة، يقلل هذا الاستقرار من ترسب الجسيمات أو تكتلها، مما يضمن أداءً أفضل والمحافظة على خصائص السائل لفترة طويلة دون الحاجة إلى إعادة المزج.

3.5. تقليل الطاقة المطلوبة لضخ السوائل

مقارنة بالسوائل التقليدية، يتطلب ضخ السوائل النانوية طاقة أقل لتحقيق نفس مستوى تعزيز نقل الحرارة. هذه الخاصية تجعل السوائل النانوية خياراً فعالاً من حيث استهلاك الطاقة.

4.5. تقليل الترسبات والانسداد:

الجسيمات النانوية الصغيرة لا تسبب انسداد الأنابيب أو الأجهزة كما تحدث مع المواد الجسيمية الكبيرة، مما يجعلها ملائمة للاستخدام في الأنظمة المصغرة والمعدات الدقيقة مثل الأنظمة الميكروية. مما يعزز تصغير حجم الأنظمة الحرارية.

5.5. إمكانية تعديل الخصائص حسب الحاجة:

يمكن ضبط الخصائص الحرارية مثل التوصيلية الحرارية أو اللزوجة عن طريق تغيير تركيز الجسيمات النانوية ونوعها هذه الميزة تجعل السوائل النانوية مرنة وقابلة للتكيف مع مجموعة واسعة من التطبيقات.

6. القيود

1.6 انخفاض السعة الحرارية النوعية

أظهرت العديد من الأبحاث السابقة أن السعة الحرارية النوعية للموائع النانوية تكون أقل من السعة الحرارية النوعية للموائع الأساسية وهذا بسبب لاختلاف في السعة الحرارية النوعية لمكونات المائع النانوي السعة الحرارية النوعية للجسيمات الصلبة النانوية مثل Al_2O_3 أو CuO أقل بكثير من السوائل الأساسية مثل الماء أو الإيثيلين جلايكول. عند مزج الجسيمات مع السائل، تنخفض السعة الحرارية الكلية حسب النسبة الحجمية للجسيمات

2.6. التكلفة العالية للموائع النانوية

ارتفاع تكلفة إنتاج الموائع النانوية يعتبر عائقاً رئيسياً يمكن أن يعوق استخدامها في الصناعة. كلتا الطريقتين طريقة المرحلة الواحدة أو طريقة المرحلتين. تتطلبان معدات متقدمة ومعقدة. قد أشار العديد من الباحثين إلى أن التكلفة المرتفعة للموائع النانوية تعتبر إحدى العقبات الرئيسية أمام استخدامها في التطبيقات الصناعية.

3.6. صعوبات في عملية الإنتاج

اعتمدت المحاولات السابقة لتصنيع الموائع النانوية على طريقتين رئيسيتين:

طريقة المرحلة الواحدة: تُستخدم عادةً في التطبيقات التي تتطلب موائع نانوية ذات نقاء عالٍ.

طريقة المرحلتين: هذه الطريقة أكثر شيوعاً لأنها أسهل وأقل تكلفة من السابقة، لكنها تعاني من مشاكل مثل تكثف الجسيمات أو انخفاض استقرارها في المائع.

كما تواجه عمليات التصنيع تحديات أخرى مثل

أ. وجود الشوائب في الموائع الأساسية تحتوي الموائع الأساسية المستخدمة على أيونات ونواتج تفاعلات يصعب فصلها عن المائع النانوي. هذه الشوائب قد تؤثر سلباً على خصائص المائع النهائي.

ب. منع تجمع الجسيمات النانوية: الجسيمات النانوية تميل إلى التجمع بسبب قوى التلاصق بينها، مما يؤدي إلى تكوين جسيمات أكبر حجماً. يؤدي ذلك إلى تقليل مساحة السطح المحددة للجسيمات، وبالتالي انخفاض فعاليتها.

ج. استخدام المواد المضافة: لمنع تكثف الجسيمات، يتم إضافة مواد مثبتة (Stabilizers) أو مشتتات. على الرغم من أهمية هذه المواد، إلا أنها قد تغير خصائص سطح الجسيمات، مما يؤثر على الأداء الحراري والخصائص الفيزيائية والكيميائية للمائع.

نتيجة لهذه العراقيل، اقتصرت معظم الدراسات على تصنيع موائع نانوية بكميات صغيرة للاستخدامات المحدودة والتجريبية فقط.

7. تطبيقات السوائل النانوية

تُعتبر التطبيقات واستخدامات السوائل النانوية مجالاً حيويًا يستحق الدراسة والاهتمام نظرًا لتأثيرها الكبير في مجالات عديدة الصناعية والتكنولوجية ودورها في تقدم التكنولوجيا والابتكار

1.7. المبادلات الحرارية

تعتبر المبادلات الحرارية واحدة من المجالات البارزة التي استفادت كثيرًا من تقنية السوائل النانوية. أظهرت الأبحاث أن السوائل النانوية لديها القدرة على تحسين كفاءة نقل الحرارة بنسبة تصل إلى 30% مقارنة بالسوائل التقليدية، وهذا يعزز من أداء الأنظمة الصناعية ويقلل من استهلاك الطاقة .

(Kakac & Pramuanjaroenkij, 2010). [37]

تُستخدم هذه التقنية على نطاق واسع في محطات توليد الطاقة، والصناعات الكيميائية، ومعالجة الأغذية، حيث يلعب النقل الحراري الفعال دورًا كبيرًا في تعزيز كفاءة العمليات وتقليل فقدان الطاقة [38].

كما أشارت دراسات أن تطبيق الموائع النانوية في أنظمة التبريد يمكن أن يعزز كفاءة التبريد بنسبة تصل إلى 15%، مما يساهم بشكل كبير في خفض استهلاك الطاقة. (Wang & Mujumdar, 2007). [39]

وأشارت دراسة حديثة أخرى أجريت عام 2022 أوضحت أن استخدام جسيمات أكسيد الألومنيوم (Al_2O_3) في الماء يزيد من كفاءة التبريد بنسبة تصل إلى 20% مقارنة بالماء وحده [40].

2.7. أنظمة التبريد في الإلكترونيات

مع التطور المستمر للأجهزة الإلكترونية عالية الأداء، تزداد الحاجة إلى أنظمة تبريد أكثر فعالية. تُظهر الدراسات أن استخدام الموائع النانوية يُساهم في تحسين كفاءة تبريد المعالجات وأجهزة الكمبيوتر، مما يساعد في الحفاظ على درجة حرارة التشغيل المثلى، وبالتالي يطيل من عمر المكونات (Sundar 2013) [41].

كشفت دراسة أجريت في عام 2018 أن اعتماد تقنية الموائع النانوية في أنظمة التبريد يمكن أن يقلل من استهلاك الطاقة في مراكز البيانات بنسبة تصل إلى 25%، مما يعزز من كفاءة استهلاك الطاقة ويقلل التكاليف التشغيلية (Teng, 2018) [42].

3.7. الصناعة والإنتاج

في صناعة السيارات تلعب الموائع النانوية دوراً محورياً في تعزيز كفاءة أنظمة تبريد المحركات. تُظهر الأبحاث أن استخدام الجسيمات النانوية، مثل أكسيد الألمنيوم (Al_2O_3) ، يمكن أن يُحسن من كفاءة نظام التبريد بنسبة تصل إلى 30%، مما يسهم في تحسين فعالية التبريد وإطالة عمر المحرك (Ghadimi 2011) [43].

كما تبين أن إضافة الجسيمات النانوية إلى زيوت التشحيم يزيد من كفاءة المحركات من خلال تقليل الاحتكاك والتآكل، مما يؤدي إلى تحسين أداء السيارات وخفض استهلاك الوقود (Gupta 2017) [44]. كما اشارت دراسة جد حديثة ان إضافة جسيمات الجرافين النانوية الى زيوت التشحيم تُقلل من الاحتكاك بشكل كبير، مما يُطيل عمر الآلات الصناعية [40].

4.7. الطاقة الشمسية

تُسهّم الموائع النانوية بشكل كبير في تحسين كفاءة أنظمة الطاقة الشمسية، حيث تُظهر الأبحاث أنها تزيد من امتصاص الطاقة الشمسية وتحويلها إلى طاقة حرارية بنسبة تصل إلى 20%، مما يعزز من أداء الأنظمة الشمسية (Taylor 2013) [45].

كما بيّنت الدراسات أن استخدام الموائع النانوية يمكن أن يحسّن كفاءة أنظمة تسخين المياه بنسبة تصل إلى 18%، مما يعزز من فعالية استغلال الطاقة الشمسية في التطبيقات الحرارية (El-Leathy 2021) [46]. كما اشارت دراسة جد حديثة 2023 ان استخدم جسيمات نانوية من ثاني أكسيد التيتانيوم (TiO_2) أدى الى تحسين الكفاءة الحرارية بنسبة 15% في أنظمة الطاقة الشمسية [47].

5.7. التبريد في المفاعلات النووية

تمثل أنظمة التبريد الفعالة أمراً بالغ الأهمية لضمان سلامة مفاعلات الطاقة النووية. أظهرت الدراسات أن السوائل النانوية يمكنها زيادة كفاءة التبريد بنسبة تصل إلى 40%، مما يسهم في تحسين إزالة الحرارة الزائدة (He 2019) [48].

تساعد تطبيقات الموائع النانوية في تعزيز سرعة عملية التبريد وتقليل احتمالية حوادث النووية، مما يزيد من معايير السلامة (Mahian et al., 2018) [49].

6.7. الطب والصيدة

تؤدي الموائع النانوية دورًا أساسيًا في المجال الطبي، وخاصة في العلاج الحراري للأورام. تفيد الأبحاث بأن استخدام هذه الموائع يساعد على رفع درجة حرارة الأورام بشكل دقيق، مما يؤدي إلى تدمير الخلايا السرطانية دون إلحاق الضرر بالأنسجة السليمة المحيطة (Kumar 2019) [50]

أظهرت دراسة حديثة أن السوائل النانوية فعالة في علاج الأورام من خلال التسخين الموضعي الدقيق، مما يحسن دقة وكفاءة العلاج، حيث تستخدم تقنية النانو الجسيمات المغناطيسية لاستهداف الخلايا السرطانية بدقة وتحفيز تسخين محلي لعلاج السرطان بفعالية وتقليل الأضرار الجانبية [51].

تستخدم السوائل النانوية كحاملات للأدوية حيث تُسهل إيصال العقاقير إلى مواقع محددة بفعالية عالية. حيث إشارة دراسة حديثة أخرى أن استخدام جسيمات الذهب النانوية لتعزيز الامتصاص الخلوي للأدوية المضادة للسرطان [52].

تستخدم السوائل النانوية لتحسين جودة الصور المأخوذة بتقنيات مثل الرنين المغناطيسي أو التصوير بالأشعة تحت الحمراء

7.7. التبريد في الأنظمة الجوية والفضائية

تستخدم الموائع النانوية بشكل متزايد في الطيران والفضاء من أجل تحسين أنظمة التبريد. فهي تساعد على نقل الحرارة بشكل أفضل وتقلل من وزن النظام، مما يحسن من كفاءة استهلاك الوقود. ومع التوجه نحو الطائرات الكهربائية، أصبح من الضروري اعتماد حلول تبريد أكثر كفاءة. وقد أظهرت لنا دراسة حديثة (Di Lorenzo et al., 2025) أن استخدام موائع نانوية مثل أكسيد الألومنيوم والجرافيت يمكن أن يقلل حرارة المحركات ويزيد من كفاءتها وموثوقيتها [53].

8.7. تحسين أداء بطاريات الليثيوم

أظهرت الأبحاث أنه من الممكن زيادة السعة التخزينية لبطاريات الليثيوم بنسب تصل إلى 35% عند إضافة انابيب الكربون النانوية (CNTs) إلى أقطاب بطاريات الليثيوم [54]

الفصل الثاني:

كيفية الحصول على الجسيمات

النانوية بواسطة المطحنة الكوكبية

(Pulverisette 7 Premium Line Fritsch)

الفصل الثاني: كيفية الحصول على الجسيمات النانوية بواسطة المطحنة الكوكبية

تُعتبر عملية الطحن بواسطة المطحنة الكوكبية من الوسائل الفعّالة والشائعة في مجال تحضير الجسيمات النانوية، لما تتميز به من قدرة عالية على تقليص حجم الجسيمات والوصول إلى أبعاد نانوية. تطرقنا في هذا الفصل الى كيفية استخدام المطحنة الكوكبية من اجل الحصول على الجسيمات النانوية، انطلاقا من المسحوق مع التركيز على البرتوكول التجريبي، والإعدادات والخصائص التي تجعل هذه المطحنة مناسبة للحصول على الجسيمات النانوية بموصفات محددة.

1. المطحنة الكوكبية

تُعتبر من الأجهزة الحديثة التي صُممت من اجل تحويل المواد إلى جسيمات دقيقة للغاية. ظهرت أهميتها مع التطور الكبير في الأبحاث العلمية والصناعات الدقيقة، حيث اصبحت الحاجة ضرورية إلى أدوات تساعد في تحسين خصائص المواد وتصنيعها بأحجام صغيرة. حيث أصبحت اليوم، تُستخدم هذه المطحنة على نطاق واسع في المختبرات من اجل تطوير مواد جديدة نستخدمها في عدة تطبيقات مثل التكنولوجيا النانوية والطاقة الشكل (1.2)



الشكل (1.2) المطحنة الكوكبية من النوع P7

2. مبدأ عمل المطحنة الكوكبية:

المطحنة الكوكبية Pulverisette 7 Premium Line من شركة Fritsch تعتمد على الطحن الكوكبي (Ball Milling Planetary) حيث يعتمد المبدأ على استخدام كرات الطحن (مصنوعة غالباً من الفولاذ أو السيراميك) التي تتحرك داخل حاويات مستديرة موضوعة على محاور دوارة، حيث تدور الكرات داخل الحاويات بطريقة توفر تأثيرات ميكانيكية قوية تستطيع ان تُحطم المادة إلى أجزاء أصغر.

تتم عملية الطحن الكوكبي عبر حركتين رئيسيتين لتحقيق عملية الطحن الفعالة:

✓ الحركة الكوكبية: تدور الحاويات حول محورين بشكل غير متزامن، مما ينتج عنه الحركة الديناميكية للكرات داخل الحاويات.

✓ الاحتكاك والاصطدام: عندما تصطدم الكرات بالمواد في الحاوية، تتولد قوى كبيرة من الاحتكاك والاصطدام، مما يؤدي إلى تحطيم المادة وتحويلها إلى جسيمات دقيقة.

3. إجراءات عملية الطحن الكوكبي لتحويل المواد إلى جسيمات نانوية:

1. اختيار المادة: نختار المادة التي نريد تحويلها إلى جسيمات نانوية كما في دراساتنا هذه تم اختيار مسحوق النحاس (Cu) وأكسيد النحاس (CuO) أو أي مادة أخرى تحتاج إلى تحويلها إلى جسيمات نانوية.

2. إعداد حاويات الطحن: يتم اختيار الحاويات المخصصة لعملية الطحن، والتي تختلف حسب نوع المادة التي سيتم طحنها.

3. تحديد معايير الطحن: نقوم بضبط معايير الطحن مثل تحديد الوقت اللازم لطحن السرعة المناسبة للطحن عدد الكرات اللازمة في عملية الطحن حجم الحاويات حسب الخصائص المطلوبة للجسيمات التي نريد ان نحصل عليها. ويجب اخذ بعين الاعتبار سرعة الدوران لكي تتناسب متطلبات العملية الان السرعات العالية قد تؤدي إلى ارتفاع الحرارة فتؤثر على خصائص المواد.

4. الطحن في بيئة خالية من الأوكسجين: يتم الطحن عادة في غلاف مغلق، حيث يتم ملء الحاويات بأجواء خالية من الأوكسجين (مثل غاز الأرجون) للحفاظ على خصائص المواد ومنع التفاعلات الكيميائية غير المرغوب فيها أثناء عملية الطحن.

5. عملية الطحن والراحة: يتم طحن المواد لفترات زمنية محددة، غالباً ما تتراوح بين 10 إلى 30 دقيقة، مع فترات استراحة من اجل تقليل درجة الحرارة الزائدة وحماية المواد من تأثيرات ناتجة عن الحرارة.

6. المراقبة والتحليل: يتم مراقبة العملية باستخدام تقنيات التحليل مثل المايكروسكوب الإلكتروني أو الأشعة السينية (XRD) لتحديد حجم الجسيمات والشكل ومراقبة تطور التكسير أثناء العملية.

4. إعدادات المطحنة الكوكبية:

يتميز هذا النوع من المطاحن بعدد من الإعدادات والخصائص التي تجعلها مناسبة للحصول على الجسيمات النانوية عندما تضبط بدقة حيث:

- ✓ يمكننا التحكم في سرعة الطحن لجعلها تتناسب خصائص المادة المراد طحنها مما يتيح لنا ضبط القوة الميكانيكية المؤثرة على المادة بشكل دقيق.
- ✓ يوفر لنا الجهاز نظام للتحكم في درجة الحرارة، من أجل ان نتجنب زيادة الحرارة التي قد تؤثر سلباً على المواد.
- ✓ إمكانية طحن كميات مختلفة من المواد في وقت واحد باستخدام حاويات متعددة، مما يزيد من كفاءة العمل.

5. العوامل المؤثرة في حجم الجسيمات:

- ✓ الوقت: كلما زادت مدة الطحن، تصبح الجسيمات التي نتحصل عليها أصغر. ومع ذلك يجب الانتباه إلى أن فترة الطحن الطويلة قد تؤدي إلى التكتل أو ارتفاع درجة الحرارة، مما يؤثر على خصائص الجسيمات.
- ✓ السرعة: تؤثر السرعة في فعالية عملية الطحن. حيث ان السرعات العالية قد تزيد من درجة الحرارة وقد تؤدي إلى تكتل الجسيمات.
- ✓ حجم الكرات: الجسيمات الناتجة تختلف حسب حجم الكرات المستعملة؛ حيث أن الكرات الكبيرة تزيد في سرعة الطحن ولكن يكون لها تأثير أقل على دقة الجسيمات.

6. التطبيقات الناتجة عن الطحن الكوكبي:

الجسيمات النانوية لمعادن أو الأكاسيد المعادن، أو المواد المركبة التي نتحصل عليها باستخدام المطحنة الكوكبية تُستخدم في العديد من التطبيقات منها:

1. استخدامها كعوامل محفزة في التفاعلات الكيميائية.
2. تحسين خصائص المواد مثل القوة والمرونة والتوصيل الحراري.
3. تستخدم في التطبيقات الطبية مثل العلاج المستهدف كما تستخدم المواد النانوية في أجهزة التشخيص.

7. البروتوكول التجريبي

1.7. الهدف

الهدف من هذه التجربة هو الحصول على الجسيمات النانوية بموصفات محددة انطلاقا من مسحوق النحاس (Cu) بمعامل نقاء 99.7% و كتلة مولية $M = 63.55\text{g/mol}$ ، وأوكسيد النحاس (CuO) بمعامل نقاء يتجاوز 98% ; وكتلة مولية $M = 79.54\text{g/mol}$. باستخدام المطحنة الكوكبية

Pulverisette 7 Premium Line Fritsch.

2.7. المواد والأدوات:

- مسحوق النحاس (Cu) وأكسيد النحاس (CuO) الشكل (2.2)



الشكل (2.2) مسحوق أكسيد النحاس (CuO).

- حاويات الطحن مصنوعة من الفولاذ المقاوم للصدأ أو السيراميك الشكل (3.2)



الشكل (3.2) حاوية الطحن مصنوعة من الفولاذ

- كرات الطحن مصنوعة من الفولاذ المقاوم للصدأ الشكل (4.2) أو أكسيد الألومنيوم حسب نوع المادة.



الشكل (4.2) كرات الطحن

- تم استخدام غاز الأرجون من أجل إنشاء بيئة خالية من الأوكسجين أثناء عملية الطحن، وذلك عن طريق غرفة القفازات (Glove Box) الشكل (5.2). التي تسمح لنا بالتعامل مع المواد داخل الحاويات في جو محكم، مما يمنع التفاعلات الكيميائية غير المرغوب فيها.



الشكل (5.2) غرفة القفازات لتعبئة الحاويات في بيئة خالية من الاكسجين

3.7. الإجراءات التجريبية:

- تم تحديد حجم الكرات بقطر 10 مم بناءً على حجم المادة الأساسية التي سوف نستعملها.
- التأكد من أن حاويات الطحن نظيفة وخالية من أي مواد أخرى قد تؤدي إلى التلوث
- تحديد النسبة بين المادة الخام من مسحوق النحاس (Cu) أو أكسيد النحاس (CuO) وكرات الطحن
- تعبئة حاويات الطحن بغاز الأرجون (أو أي غاز خامل آخر) لتجنب أكسدة المادة أثناء عملية الطحن.

4.7. تحديد عوامل عملية الطحن:

- الوقت: يتغير من 10 دقائق إلى نصف ساعة وفقاً لمتطلبات الدراسة
- السرعة: تعديل سرعة المطحنة بين 300 و 500 دورة في الدقيقة.
- تحديد عدد الكرات بأربع كرات فولاذية بقطر 10 مم بناءً على حجم الحاوية المستعملة وحجم الجسيمات التي نريد أن نتحصل عليها.
- تشغيل المطحنة الكوكبية لفترات زمنية محددة بين 48 إلى 72 ساعة. بعد كل فترة من الطحن يتم توقف المطحنة
- عند الانتهاء من الطحن، يتم فتح الحاوية بعناية وإزالة المادة المطحونة.

الفصل الثالث

النتائج والتحليل

الفصل الثالث: النتائج والتحليل

تساعدنا تحاليل نتائج حيود الأشعة السينية (XRD)، وتحليل FTIR، والمجهر الإلكتروني الماسح (SEM) من التأكد أن الجسيمات النانوية المحضرة تتمتع بالخصائص المطلوبة، سواء من حيث التركيب أو الشكل، لهذا السبب استخدمنا في هذا الفصل هذه التقنيات لدراسة الجسيمات المتحصل عليها، مثل حيود الأشعة السينية (XRD) لمعرفة البنية البلورية، وتحليل FTIR للكشف عن الروابط الكيميائية، بالإضافة إلى المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) لمعاينة الشكل والبنية السطحية.

1. طريقة حيود الأشعة السينية (XRD)

حيود الأشعة السينية (X-ray Diffraction - XRD) هو تقنية تحليلية تُستخدم لدراسة البنية البلورية للمواد. ويعود اكتشاف ظاهرة حيود الأشعة السينية سنة 1912 من طرف الفيزيائي الألماني ماكس فون لاوي (Max von Laue). في عام 1913، قام ويليام لورانس براغ (William Lawrence Bragg) وابنه هنري براغ (Henry Bragg) بتطوير قانون براغ، الذي يربط بين زاوية الحيود والمسافة بين طبقات الذرات في البلورة. حيث قدم هذا القانون الأداة الرياضية اللازمة لفهم وتحليل أنماط الحيود الناتجة عن تفاعل الأشعة السينية مع البلورات، مما ساعدنا في تفسير البيانات التجريبية.

يعتمد مبدأ هذه الطريقة على التفاعل بين الأشعة السينية والذرات في المادة، مما يؤدي إلى انتشار الأشعة السينية (diffraction) عند مرورها عبر المادة. حيث يعتبر هذا التفاعل أساساً لفهم ترتيب الذرات في البلورة. وفي العقد الأخير أصبحت تقنية حيود الأشعة السينية طريقة أساسية في علوم المواد والفيزياء والكيمياء، حيث سمحت للعلماء بتحديد الهياكل البلورية للعديد من المواد، مثل المعادن والأملاح.

1.1. المبدأ الأساسي لحيود الأشعة السينية:

يعتمد هذا المبدأ على تفاعل الأشعة السينية مع المادة البلورية حيث عندما تمر الأشعة السينية عبر مادة بلورية التي تأتي من أنود نحاسي ($\lambda_{K\alpha Cu} = 0.154056 \text{ \AA}$) حيث نستطيع التحكم في عرض الشعاع بواسطة حجم الفتحات المستخدمة لتحقيق أفضل دقة في القياس، فإنها تتفاعل مع الشبكة البلورية للمادة وتتكسر، وهذه العملية تُنتج نمطاً مميزاً من الأشعة المنكسرة يمكننا قياسه وتحليله. يعتمد هذا النمط

على الترتيب الخاص للذرات في المادة، بحيث تكون المسافات بين هذه الذرات (أو الطبقات البلورية) هي التي تحدد كيفية انكسار الأشعة السينية.

يتم تحليل هذا التفاعل باستخدام قانون براغ (02) الذي يربط بين زاوية الحيود والمسافة بين الطبقات البلورية في المادة.

$$n\lambda = 2d_{(hkl)} \sin \theta \quad (02)$$

حيث:

$d_{(hkl)}$: المسافة بين المستويات البلورية ذات المؤشرات (h k l)

λ : طول الموجة لحزمة الأشعة السينية.

θ : زاوية الحيود (سقوط) بين الأشعة السينية والسطح البلوري.

n : ترتيب الانكسار ($n=1$)

2.1. تحديد الخصائص الهيكلية:

عند دراسة المواد البلورية باستخدام تقنية حيود الأشعة السينية (XRD) ، يمكننا الحصول على معلومات مهمة حول التركيب البلوري للمادة، مثل حجم البلورات الصغيرة، حيث هذا الأخير يؤثر بشكل كبير على الخصائص الفيزيائية والكيميائية للمادة.

تم تحديد حجم هذه البلورات الصغيرة باستخدام معادلة معادلة شيرر (Scherrer Equation) بناءً على زاوية الحيود وعرض القمة في نمط حيود الأشعة السينية.

$$\beta = \frac{K \lambda}{D \sin \theta} \quad (03)$$

حيث:

β : هو عرض القمة عند نصف الارتفاع (FWHM) المعبر عنه بالراديان للحافة الحيودية

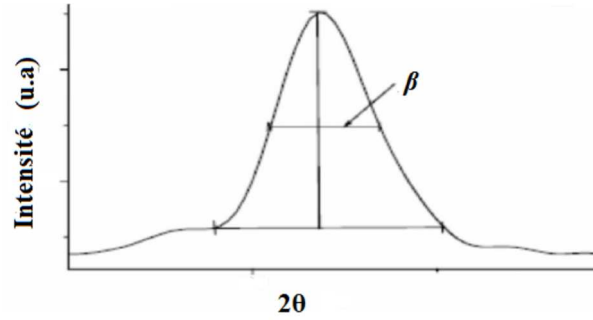
ذات الزاوية 2θ الشكل (1.3)

D : هو البعد الخطي المتوسط حجم للبلورة الصغيرة ويعبر عنه بوحدة النانومتر ($[D] = \text{nm}$).

θ : هو زاوية الحيود بالراديان.

λ : هو طول الموجة لحزمة الأشعة السينية (بأنغستروم Å).

K: هو ثابت شيرر (قيمة ثابتة تُساوي $K=0.9$).



الشكل (1.3) رسم توضيحي يبين تعريف β استنادًا إلى طيف حيود الأشعة السينية [56]

❖ كيف يظهر β في الطيف:

في طيف حيود الأشعة السينية، تكون القمة حادة إذا كانت البلورات كبيرة ومنتظمة، وتكون القمة عريضة إذا كانت البلورات صغيرة أو يوجد بها عيوب.

إذا كانت المادة تحتوي على بلورات صغيرة، فإن β (عرض القمة) سيكون أكبر. وهذا يعني أن البلورات أصغر حجمًا وتحتوي على عدد أكبر من الحدود والعيوب البلورية التي توسع القمة.

3.1. تحسين مخططات حيود الأشعة السينية

بعد عملية الطحن الميكانيكي للمواد، يتم الحصول عادةً على جزيئات صغيرة الحجم، في حدود بضعة نانومترات، مما يؤدي إلى اتساع كبير في قمم الحيود في مخططات الأشعة السينية. هذا التوسع في القمم يستطیع ان يحدث لنا خلل في التفسير الصحيح للبيانات، خاصةً إذا كنا نريد تحديد الخصائص البلورية الدقيقة للمادة ويعتبر هذا من أبرز التحديات التي نواجهها عند استخدامنا لحيود الأشعة السينية في تحليل المواد بعد طحنها.

لحل هذه المشكلة، يمكننا استخدام طريقة ريتفيلد (Rietveld Refinement) لتنقية المخططات المتحصل عليها وتحسين دقة النتائج. حيث تعتبر هذه الطريقة من الطرق المتقدمة التي تسمح لنا بمحاكاة مخططات الحيود بشكل عام، حيث نقارن هذا المخطط مع المخطط الفعلي الذي تم الحصول عليه من التجربة. في حال وجود اختلافات بين المخططين، يتم تعديل المعلمات في النموذج البلوري (مثل المسافات بين

المستويات البلورية، أو المواقع الذرية، أو الانحرافات البلورية) حتى يتطابق المخطط المحاك مع المخطط المقاس بأفضل صورة ممكنة

4.1. تحليل حيود الأشعة السينية (XRD)

في الجدولين (1.3)، (2.3) نلاحظ بعض نتائج القياسات التي تحصلنا عليها باستخدام تقنية حيود الأشعة السينية (XRD) لبعض العينات المدروسة من النحاس وأكسيد النحاس. من أجل تحديد الأطوار البلورية الموجودة في هذه العينات، حيث تم استخدام برنامج X'Pert HighScore Plus المرتبط بقاعدة بيانات ICDD-PDF2. بعد ذلك، استخدمنا برنامج Celref3، بغرض تحسين معلمات الشبكة البلورية، الذي يعتمد على طريقة المربعات الصغرى للمقارنة بين المواضع المحسوبة للقمم الملاحظة. ولضمان دقة النتائج، تم قياس المواضع الدقيقة للقمم باستخدام خاصية التوفيق المدمجة في برنامج Rietica، مما ساعدنا في الحصول على نتائج دقيقة لتحليل الأطوار البلورية بشكل أكثر موثوقية.

No.	Pos. [°2Th.]	Height [cts]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
1	42,9795	1187,81	2,10272	100
2	50,1502	327,75	1,81757	27,59
3	73,8756	185,55	1,28181	15,62
4	89,6592	141,61	1,09262	11,92

الجدول (1.3) معايير القمم في حيود الأشعة السينية للنحاس (Cu)

No.	Pos. [°2Th.]	Height [cts]	d-spacing [Å]	Rel. Int. [%]
1	32,6633	21,57	2,73936	5,97
2	35,7972	361,22	2,5064	100
3	38,8986	234,49	2,3134	64,91
4	66,0376	53,54	1,41361	14,82
5	67,6028	69,63	1,38464	19,28

الجدول (2.3) معايير القمم في حيود الأشعة السينية لأكسيد النحاس (CuO)

❖ أكسيد النحاس: (CuO)

تم تحديد أبعاد الشبكة البلورية لأكسيد النحاس (CuO) كما يلي:

$$(c = 5.1220 \text{ \AA}, b = 3.4180 \text{ \AA}, a = 4.6810 \text{ \AA})$$

حيث تم تأكيد الطور الأحادي الميل (Monoclinic system) لأكسيد النحاس، وأظهرت لنا النتائج

الشكل (3.3) توافقاً مع معلمات الشبكة البلورية المرجعية من قاعدة بيانات JCPDS (رقم 009-98-

2364)، مما يؤكد لنا صحة التشخيص البلوري للعيّنة.

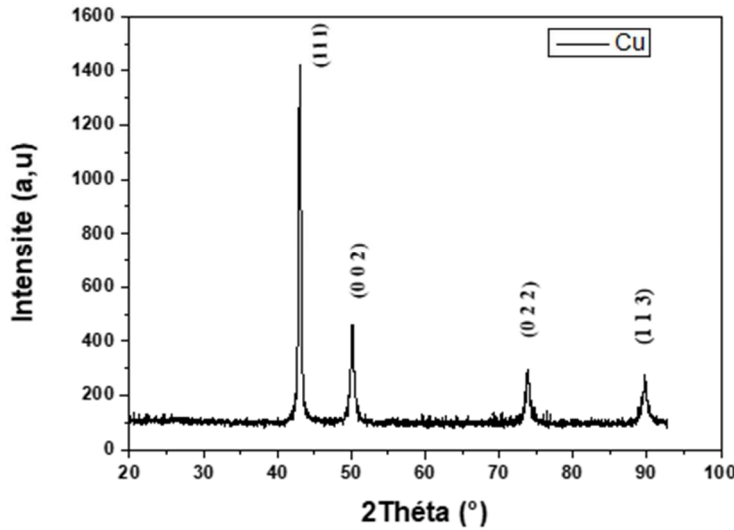
❖ النحاس: (Cu)

أما بالنسبة لمخطط حيود الأشعة السينية للنحاس (Cu) الشكل (2.3) فقد أظهرت القمم تطابقاً مع الطور

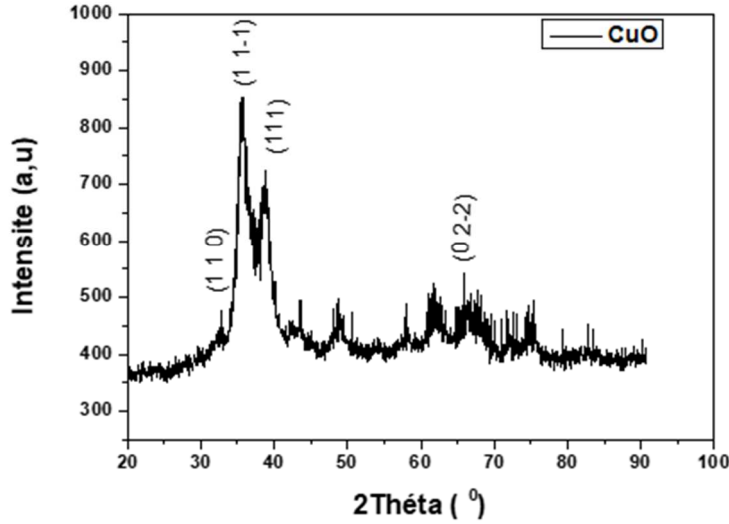
المكعب للنحاس. تم تحديد أبعاد الشبكة البلورية كما يلي:

$a = b = c = 3.6270 \text{ \AA}$ تتوافق هذه البيانات مع قاعدة بيانات JCPDS (رقم 005-98-3758) ، مما

يؤكد تحضير النحاس بنجاح.



الشكل (2.3): مخطط حيود الأشعة السينية لجسيمات النحاس النانوية



الشكل (3.3): مخطط حيود الأشعة السينية لجسيمات أكسيد النحاس النانوية (CuO)

يمكننا تقدير حجم الجسيمات النانوية لأكسيد النحاس (CuO) والنحاس (Cu) التي تحصلنا عليها من خلال توسيع قمم الحيود في الأنماط. حيث تم تقدير حجم الجسيمات للنحاس (Cu) بـ 20.8 نانومتر وحجم الجسيمات لأكسيد النحاس (CuO) هو 21.19 نانومتر باستخدام صيغة ديبي-شيري (Debye-Scherrer) التالية

$$D(A^\circ) = \frac{k\lambda}{\beta \cos \theta} \quad (4)$$

λ : هو طول الموجة لمصدر الأشعة السينية (1.5405 Å)

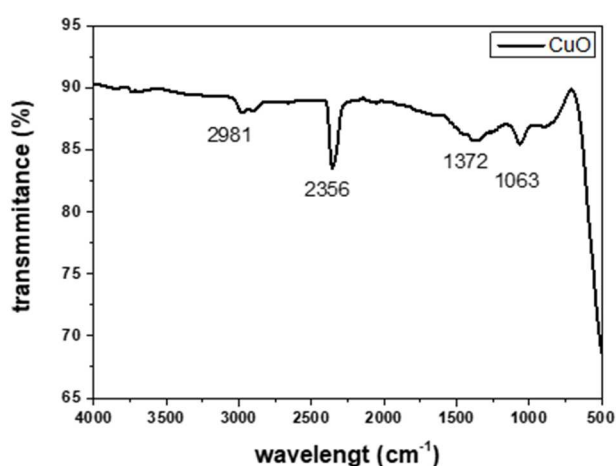
β : هو العرض الكلي عند نصف الحد الأقصى لقمة الحيود،

θ : هو الموضع الزاوي لقمة الحيود.

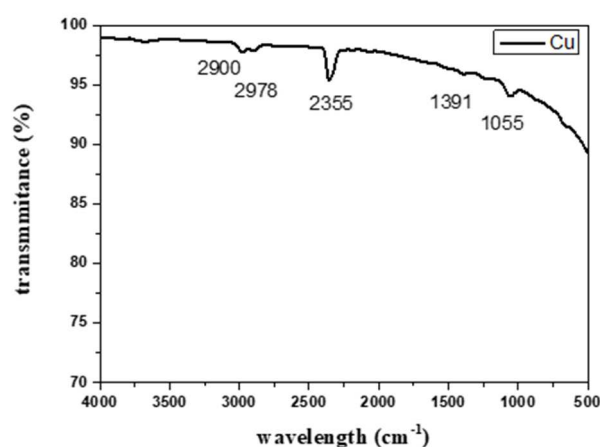
2. تحليل طيف الأشعة تحت الحمراء بتحويل فورييه (FTIR)

تحليل طيف الأشعة تحت الحمراء بتحويل فورييه تقنية تُستخدم لدراسة التفاعلات الجزيئية وتحديد المجموعات الوظيفية المختلفة في المواد. من خلال قياسنا لامتصاص الأشعة تحت الحمراء عند أطوال موجية معينة، يمكن تحديد التكوين الكيميائي للمادة وتحليل الروابط الكيميائية بين الذرات.

باستخدام التحليل الطيفي للأشعة تحت الحمراء بتحويل فورييه (FTIR) في درجة حرارة الغرفة، تم تسجيل الطيف في النطاق $(4000-400)\text{cm}^{-1}$ ، كما هو موضح في الشكل (4.3) لأكسيد النحاس والشكل (5.3) للنحاس.



الشكل (4.3) طيف الأشعة تحت الحمراء بتحويل فورييه لجسيمات أكسيد النحاس النانوية (CuO)



الشكل (5.3) طيف الأشعة تحت الحمراء بتحويل فورييه لجسيمات النحاس النانوية (Cu)

❖ أكسيد النحاس (CuO)

✓ القمم الرئيسية عند حوالي 1061cm^{-1} و 1065cm^{-1} ترتبط بالاهتزازات التمددية لرابطة

(Cu-O)، مما يؤكد لنا الطور الأحادي الميل. (monoclinic phase)

✓ القمة عند حوالي 2981cm^{-1} تعود إلى الاهتزازات لرابطة O-H لجزيئات الماء الملتصقة على سطح أكسيد النحاس.

✓ القمة عند حوالي 2356cm^{-1} تتعلق باهتزاز التمدد (O=C=O) ،

✓ بينما القمة عند 1372cm^{-1} تشير إلى وجود CO_2 نتيجة قياس العينة في الهواء.

❖ النحاس (Cu)

القمم الممتصة عند 2355cm^{-1} تتعلق بوجود CO_2 المحبوس في قفص السوداليت. (sodalite cage)

هذه النتائج تؤكد وجود أكسيد النحاس (CuO) والنحاس (Cu) وتساعدنا في تحديد التركيب الكيميائي والهيكلي لهذه المواد.

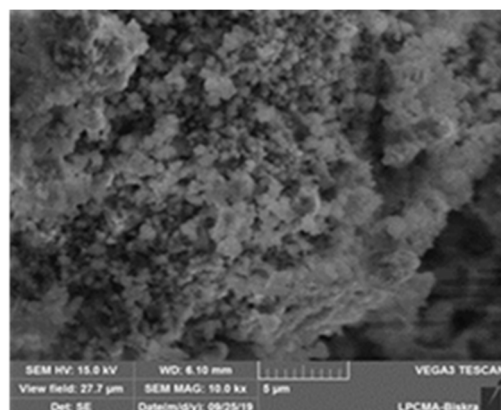
3. المجهر الإلكتروني الماسح (SEM)

جهاز يستخدم شعاعاً من الإلكترونات لفحص وتحليل أسطح المواد على مستوى دقيق جداً من أجل الحصول على معلومات حول المورفولوجيا (الشكل، الحجم، وترتيب الجسيمات)، التضاريس (مثل العيوب السطحية والنسيج)، والتركيب الكيميائي للعينة. حيث يوفر صور عالية الدقة للأشياء الدقيقة والسطوح.

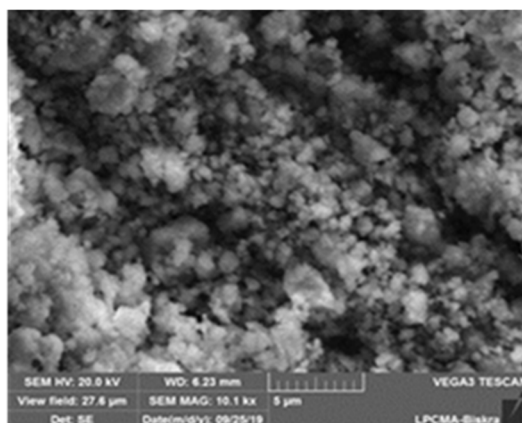
مبدأ عمله

يعتمد مبدأ عمله على توجيه شعاع إلى سطح. عندما يصطدم الشعاع الإلكتروني بسطح العينة، يحدث تفاعل مع الذرات الموجودة في المادة، مما يؤدي إلى إطلاق أنواع مختلفة من الإشعاعات مثل الإلكترونات الثانوية، التي تستعمل لتكوين صورة للمورفولوجيا والتركيب السطحي للعينة، والإلكترونات العائدة التي تساعد في دراسة تركيب العينة، بالإضافة إلى الأشعة السينية التي تستخدم لتحليل العناصر الكيميائية الموجودة في العينة.

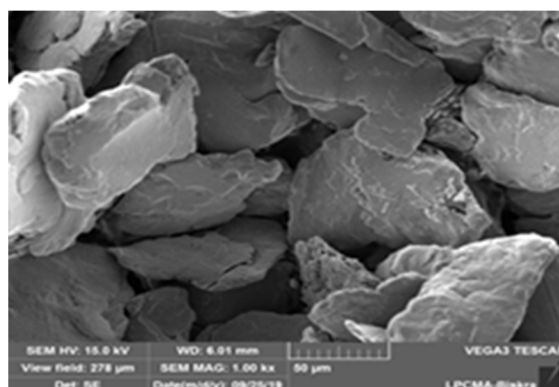
تم استخدام تقنيات التصوير المجهرية لتحديد الطبيعة البلورية والكيميائية بالإضافة إلى حجم للجسيمات النانوية، كما هو موضح في الشكل (6.3)، الشكل (7.3)، الشكل (8.3) والشكل (9.3). حيث توفر لنا هذه التقنية ملاحظة مباشرة تعطي لنا الشكل والمورفولوجيا لسطح أغشية الجسيمات النانوية



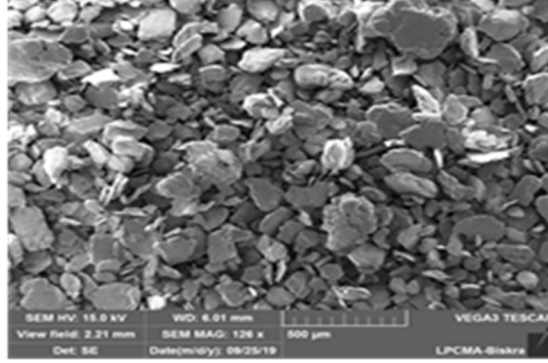
الشكل (6.3) صورة مجهر إلكتروني لمسحوق جسيمات أكسيد النحاس النانوية MAG 10Kx



الشكل (7.3) صورة مجهر إلكتروني لمسحوق جسيمات أكسيد النحاس النانوية MAG 10.1Kx



الشكل (8.3) صورة مجهر إلكتروني لمسحوق جسيمات النحاس النانوية MAG 1KX



الشكل (9.3) صورة مجهر إلكتروني لمسحوق جسيمات النحاس النانوية MAG 12Kx

4. الخلاصة

1. يُعتبر الطحن الميكانيكي عالي الطاقة من الأدوات الأساسية للحصول على الجسيمات النانوية، حيث يتيح لنا إمكانية تعديل خصائص هذه الجسيمات وتحسين أدائها في العديد من التطبيقات. إن فهم كيفية عمل عملية الطحن والعوامل المؤثرة فيها يمكن أن يساهم بشكل كبير إلى دفع أبحاث وابتكارات جديدة تدعم التقدم التكنولوجي والصناعي.

2. للحصول على نتائج مثلى في إنتاج الجسيمات النانوية، من الضروري تحقيق توازن بين وقت عملية الطحن، مدة التوقف للراحة، سرعة الدوران، حجم المكونات، نوع الذرات، ونسبة الكرة إلى المادة. حيث يساعدنا اختبار هذه العوامل بشكل تجريبي على تحديد الظروف المثالية لكل نظام. أن استراتيجيتنا المتبعة، التي تتضمن التوقف عن الطحن لمدة 20 دقيقة بعد كل 10 دقائق من عملية الطحن كانت فعالة حيث ساعدت في تجنب درجات الحرارة الزائدة وحافظت على المادة.

3. تختلف السرعات المثلى للحصول على جسيمات CuO و Cu النانوية؛ حيث يمكن للسرعات الأعلى أن تنتج الجسيمات النانوية بسرعة أكبر ولكنها تتطلب الحذر. بالنسبة لأكسيد النحاس (CuO)، تعتبر السرعات في حدود 350 دورة في الدقيقة مثالية، حيث يمكن أن يتسبب الفائض في الطاقة في تكوين أكاسيد إضافية أو تغييرات هيكلية، بينما يكون النحاس (Cu) أكثر مرونة تحت هذه الظروف.

4. باستخدام عملية الطحن عالي الطاقة، تم الحصول على جسيمات نانوية من أكسيد النحاس (CuO) بحجم متوسط 21.19 نانومتر، وجسيمات نانوية من النحاس (Cu) بحجم متوسط أقل من 20.8 نانومتر، مع متوسط وقت عمل يتراوح بين 48 إلى 72 ساعة. حيث أن حجم البلورات ينخفض مع مرور الوقت حتى 72 ساعة، حيث يبدأ في الاستقرار، مما يشير إلى أن الجسيمات قد وصلت إلى مرحلة التوازن الديناميكي أو ما يُسمى بـ "التوازن الميكروي". بعد 72 ساعة زادت التشوهات الميكروية في الجسيمات، مما يشير إلى استمرار التأثيرات الميكانيكية الناتجة عن عملية الطحن.

5. أظهرت نتائج حيود الأشعة السينية (XRD) تكوّن هياكل بلورية أحادي الميل لأكسيد النحاس (CuO) وهياكل مكعبة للنحاس (Cu). كما أظهرت تحاليل المجهر الإلكتروني الماسح (SEM) بوضوح وجود جسيمات نانوية من CuO و Cu ، حيث شكلت جسيمات CuO أشكالاً غير منتظمة تشبه الألواح.

6. وأكد لنا تحليل طيف الأشعة تحت الحمراء (FTIR) وجود أكسيد النحاس الشكل (4.3) والنحاس الشكل (5.3) مما يثبت وجود هذه المركبات بشكل واضح. ويؤكد لنا نجاح عملية التحضير، بالإضافة إلى تقييم نقاوة المادة وتحديد تركيبها الكيميائي.

الفصل الرابع:

النموذج الرياضي والطريقة العددية

الفصل الرابع: النموذج الرياضي والطريقة العددية

1. النماذج الرياضية لمحاكاة انتقال الحرارة في المبادلات الحرارية:

تُعد النمذجة الرياضية أساسًا مهمًا لفهم وتحليل العمليات التي تحدث في المبادلات الحرارية، حيث تساهم في توفير محاكاة دقيقة لظاهرة انتقال الحرارة. تعتمد النمذجة على استخدام معادلات رياضية تُمكننا من وصف حركة السوائل (التدفق) وكيفية انتقال الحرارة عبر المبادلات الحرارية.

1. المعادلات الحاكمة الأساسية:

تتأسس النمذجة الرياضية لظاهرة الحمل الحراري على معادلات تربط بين عدة عوامل مؤثرة، مثل السرعة، الضغط، ودرجة الحرارة. وهذه المعادلات تُستمد من المبادئ الأساسية في الفيزياء، مثل قوانين انحفاظ الكتلة، انحفاظ كمية الحركة (من خلال معادلات نافير-ستوكس) و انحفاظ الطاقة.

❖ معادلة الاستمرارية

تعبر هذه المعادلة عن انحفاظ الكتلة في النظام ويتم التعبير عنها رياضيا على النحو التالي

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho v) = 0 \quad (05)$$

نعتبر في هذه الدراسة ان التدفق غير قابل للانضغاط فتصبح المعادلة بالشكل التالي

$$\nabla U = 0 \quad (06)$$

حيث U هو متجه السرعة للسائل، والذي يعبر عن سرعة وحركة السائل في أبعاد مختلفة.

❖ معادلة كمية الحركة

عندما يكون التدفق مضطرب، الذي يصاحبه تقلبات في سرعة السائل، مما يؤدي إلى حركة غير منتظمة أو عشوائية على مقياس صغير. في هذه الحالة، يتم استخدام معادلات رينولدز-متوسط نافير-ستوكس

للتعامل مع هذه التقلبات. حيث ان هذه المعادلات تساعدنا في ادراج تأثيرات الاضطرابات (التقلبات) داخل معادلات الحركة، مما يسمح لنا نمذجة سلوك السائل بشكل أدق ويكون أكثر واقعية في الحالات المضطربة.

$$\rho(u.\nabla u) = \nabla p + \mu_{eff} \nabla^2 u + f + \nabla \tau_t \quad (07)$$

حيث

μ_{eff} : هي اللزوجة الفعالة

$\nabla \tau_t$: هو التوتر الاضطرابي

❖ معادلة الطاقة (حفظ الطاقة):

تأخذ معادلة الطاقة بعين الاعتبار تأثيرات الاضطرابات على انتقال الحرارة. ففي التدفق المضطرب، تؤدي التقلبات في السرعة إلى تغيرات في توزيع الحرارة وانتقالها عبر السائل. ولذلك، تم ادراج هذه التأثيرات في معادلة انحفاظ الطاقة من اجل ان يكون الوصف أكثر دقة لكيفية تفاعل الحرارة مع حركة السائل في النظام

$$\rho C_p (u.\nabla T) = \nabla.(k_{eff} \nabla T) + \Phi \quad (08)$$

حيث

C_p : السعة الحرارية النوعية.

k_{eff} : التوصيل الحراري الفعّال (يشمل تأثير التوربينات)

Φ : المصطلح الناتج عن العمل الاضطرابي الذي يساهم في نقل الحرارة.

2. النماذج الرياضية لتحليل الاضطرابات في تدفق الموائع

تعود أولى الدراسات حول الاضطراب سنة 1883، من طرف أوزبورن رينولدز (Osborne Reynolds) عندما أجرى تجاربه على تدفقات السوائل داخل الأنابيب. حيث لاحظ ان التدفق يصبح مضطرباً أو غير منتظم عندما تتجاوز سرعة التدفق قيمة معينة تُعرف بالقيمة الحرجة. تم تسمية هذه القيمة بـ رقم رينولدز، وهو مقياس أساسي نعتمده في تحديد نوع التدفق. كما قام رينولدز بتقسيم المتغيرات المضطربة إلى نوعين المستقرة والعشوائية، وكان هذا الاكتشاف نقطة مهمة في فهم الاضطراب بشكل أفضل

دراسة الاضطراب بشكل تجريبي يكون عادة صعب التنفيذ ومكلف، بينما توفر لنا المحاكاة العددية وسيلة عملية للحصول على معلومات يصعب الحصول عليها من خلال التجربة. كما توفر لنا الجهد والوقت. يمكننا تقسيم طرق نمذجة الاضطراب إلى ثلاث طرق رئيسية

✓ المحاكاة العددية المباشرة (D.N.S)،

✓ ومحاكاة المقاييس الكبيرة (L.E.S)،

✓ المحاكاة المتوسطة (R.A.N.S).

في التطبيقات الصناعية، غالباً ما تكون المحاكاة الهجينة التي تجمع بين الطرق المختلفة ضرورية لتقليل التكاليف الحسابية، خاصة عند التعامل مع التدفقات المعقدة.

1.2. المحاكاة العددية المباشرة (Direct Numerical Simulation – DNS)

هذا النموذج يحاكي جميع تفاصيل التدفق المضطرب، بما في ذلك التذبذبات الصغيرة جداً في السرعة والضغط حيث يعتبر هذا النموذج الأكثر دقة لأنه يأخذ جميع تقلبات التدفق دون استعمال التقريبات. وهذا يتطلب موارد حسابية ضخمة، مما يجعلها غير مناسبة في معظم التطبيقات الهندسية.

2.2. محاكاة المقاييس الكبيرة (Large Eddy Simulation – LES):

هذا النموذج يقوم بتمثيل الاضطرابات الكبيرة في التدفق بدقة، بينما انه لا يأخذ بعين الاعتبار الاضطرابات الصغيرة التي يُعتقد أنها لا تؤثر بشكل كبير على السلوك العام للتدفق حيث يعتبر هذا النموذج أقل دقة من النموذج السابق DNS لكنه يوفر لنا حسابات أقرب قابلية للتنفيذ من حيث الموارد الحسابية.

3.2. المحاكاة المتوسطة (Reynolds-Averaged Navier-Stokes – RANS)

تُستخدم هذه الطريقة بشكل شائع في التطبيقات الصناعية لأنها توفر لنا تقديرات جيدة للتدفق المضطرب دون الحاجة لحساب التفاصيل الدقيقة في الاضطراب.

في هذا النموذج يتم تبسيط المعادلات الحاكمة للحركة في السوائل (Navier-Stokes) باستعمال المتوسط الزمني للتدفق، مما يقلل من تعقيد المعادلات ويقلل من تكلفة الحساب. ما يؤدي إلى ظهور مفردات إضافية تسمى التوترات الريولندية (Reynolds stresses) وهذه التوترات يجب أن يتم إغلاقها باستخدام نماذج رياضية (نماذج الإغلاق Closure Models) قادرة على تمثيل تأثيرات الاضطراب على التوزيع المتوسط للسرعة. دون ادراج هذه النماذج، تصبح المعادلات غير قابلة للحل يمكن تصنيف هذه النماذج بناءً على عدد المعادلات الإضافية التي يتم حلها بخلاف معادلات الحركة الأساسية إلى.

1.3.2. النموذج ذو المعادلة صفيرية (Zero-Equation Model)

أبسط نوع من نماذج الاضطراب. لا يتطلب حل أي معادلات إضافية بخلاف معادلات نايفيه-ستوكز، مناسب للمحاكاة التي لا تتطلب دقة كبيرة في تفاصيل الاضطراب الان دقته محدودة مما ينتج عنه نتائج غير دقيقة في التطبيقات المعقدة.

2.3.2. النموذج ذو المعادلة واحدة (One-Equation Model)

هو امتداد للنموذج السابق ذو المعادلة صفيرية، حيث يتم إضافة معادلة واحدة جديدة لوصف الطاقة الحركية الاضطرابية k من خلال هذه المعادلة، يتم حساب اللزوجة الاضطرابية ولكن يبقى هو الأخرى محدود لا يستطيع التعامل مع جميع أنواع الاضطراب، خصوصاً في التدفقات المعقدة.

3.3.2. النموذج ذو المعادلتين (Two-Equation Model)

هو الأكثر شيوعاً في محاكاة الاضطراب. حيث يتم حل معادلتين إضافيتين واحدة للطاقة الحركية الاضطرابية k والأخرى لمعدل التبديد للطاقة (ϵ). أو متغير مشابه. حيث يمتاز هذا النموذج بدقة عالية نسبياً مما يوفر لنا تمثيلاً جيداً للمفردات الاضطرابية في مختلف أنواع الجريان.

4.3.2. النموذج ذو $N > 2$ معادلة (N-Equation Model)

يعتبر هو الآخر امتداد لنموذج ذو المعادلتين حيث يتم إضافة المزيد من المعادلات للتعامل مع تفاصيل إضافية في الاضطراب. حيث يُستخدم هذا النموذج في الحالات المعقدة التي تتطلب تمثيلاً دقيقاً للظواهر الاضطرابية. يتطلب حل العديد من المعادلات، مما يزيد من تعقيد الحسابات ويحتاج إلى موارد حسابية كبيرة.

اختيار النموذج يعتمد على نوع الجريان والموارد الحسابية المتاحة لنا. في دراستنا تما الاعتماد على نموذج ذات المعادلتين لأنه يقدم لنا تمثيلاً أدق الاضطراب وتناسبه مع التطبيقات الأكثر تعقيداً على عكس النماذج ذات المعادلة الصفرية والواحدة عادة ما تكون سريعة وتستخدم في التطبيقات البسيطة. برنامج FLUENT يوفر لنا الإمكانية لاختيار أحد نماذج الاضطراب السابقة .

5.3.2. نموذج k-ε

هو أحد النماذج الشائعة في محاكاة الاضطراب، ويستخدم بشكل واسع في العديد من التطبيقات الهندسية والصناعية. حيث يعتمد هذا النموذج على معادلتين يتم من خلالهما حساب الطاقة الحركية للاضطراب

○ معادلة الطاقة الحركية للاضطراب k

هذه المعادلة تُمثل كمية الطاقة التي يمتلكها الاضطراب داخل التدفق. ببساطة، هي تقيس مدى تنذب حركة السائل بسبب الاضطراب. كلما كان الاضطراب أكبر، زادت الطاقة الحركية.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u k) = \nabla \cdot (\mu_t \nabla k) + P_K - \varepsilon \quad (09)$$

حيث

k : الطاقة الحركية للاضطراب.

P_K : إنتاج الطاقة الحركية للاضطراب (يُعبّر عن التفاعل بين التدفق والاضطراب).

ε : معدل التبدد أو تفكك الطاقة الحركية.

μ_t : هو اللزوجة المولدة من الاضطراب

○ معادلة التبدد ϵ

هذه المعادلة تركز على كيفية تفكك الطاقة الحركية للاضطراب وتحويلها إلى طاقة غير حركية أو حرارة. ببساطة كيفية فقدان الاضطراب للطاقة بسبب الاحتكاك بين الطبقات المختلفة للسائل. عند مرور السائل بالقرب من جدار أو سطح، تتبدد بعض الطاقة بسبب الاحتكاك، مما يقلل من قوة الاضطراب.

$$\frac{\partial(\rho\epsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \epsilon) = \nabla \cdot (\mu_t \nabla \epsilon) + C_1 \frac{\epsilon}{k} P_K - C_2 \frac{\epsilon^2}{k} \quad (10)$$

حيث

C_1, C_2 : ثوابت تجريبية، تعتمد على التفاعل بين ϵ و k

لكن هذا النموذج له بعض القيود التي تؤثر على دقته، خاصة في المناطق القريبة من الجدران أو في التدفقات المعقدة التي تشمل تغيرات سريعة في السرعة أو الهندسة.

لكي نستطيع تجاوز هذه القيود والعوائق، قمنا بإدخال بعض التحسينات على النموذج الأساسي. من بين هذه التحسينات:

✓ تعديل المعاملات التجريبية في النموذج لتحسين الأداء في المناطق القريبة من الجدران، مما يسمح لنا بالحصول على نتائج أدق وهذا تعديل يكون فعالاً عند نقوم بدراسة التدفقات عبر الأنابيب أو حول الأسطح المسطحة.

✓ تعديل معادلة التبدد ϵ بحيث تأخذ بعين الاعتبار التأثيرات الدقيقة في الطبقات الحدودية، مما يعزز دقة النموذج في المناطق القريبة من الأسطح.

✓ برنامج FLUENT يتيح لنا خيارات لدمج نموذج $k-\epsilon$ مع نموذج $k-\omega$ أو Spalart-Allmaras. وهذا يمكن أن يساعدنا كثيراً في تحسين الدقة في بعض الحالات. حيث يمكن لنموذج واحد أن يحقق أداء أفضل في بعض الأجزاء من التدفق (مثل التدفقات القريبة من الجدران).

3. الخصائص الحرارية الفيزيائية للسوائل النانوية:

تم تعديل الخصائص الحرارية الفيزيائية (مثل الكثافة، الحرارة النوعية، التمدد الحراري، اللزوجة الديناميكية والتوصيل الحراري) للمحاليات بشكل ملحوظ من خلال إضافة الجسيمات النانوية. العديد من العوامل التي

تميز هذه الجسيمات النانوية يمكن أن تؤثر بشكل كبير على قيم الخصائص الحرارية الفيزيائية للسوائل النانوية التي تم الحصول عليها (طبيعة الجسيمات النانوية، حجمها، الجزء الحجمي، التوصيل الحراري للسائل الأساسي وكذلك التوصيل الحراري الخاص بالجسيمات النانوية، بالإضافة إلى درجة حرارة الوسط...) الجدول (1.4)

الخصائص الفيزيائية	الكثافة ρ (kg / m ³)	السعة الحرارية Cp (j / kg.k)	اللزوجة الديناميكية μ (kg / m.s)	التوصيلية الحرارية k(W / m.K)
Al ₂ O ₃	3600 (Vajjha et al., 2010)	765		36
الماء	1000.52	4181.8	0.001002	0.597

الجدول (1.4) الخصائص الفيزيائية للسائل الأساسي والجسيمات النانوية

تم حساب الخواص الحرارية الفيزيائية للسوائل النانوية بشكل تحليلي باستخدام العلاقات المستمدة من الأدبيات

1.3. اللزوجة الديناميكية الفعالة

يمكن تعريف اللزوجة على أنها خاصية للسائل بحيث يقاوم التشوه عندما يتحرك. لذلك يمكننا التحدث عن اللزوجة كمقياس للاحتكاك الداخلي للسائل. حيث ان السائل عالي اللزوجة هو الذي يُظهر احتكاكًا داخليًا عاليًا. عند تشتيت الجسيمات النانوية في السائل الأساسي، فإنه يؤثر بشكل مباشر على اللزوجة الديناميكية للسائل. والتي يمكن أن تتأثر بشكل كبير بجودة تشتت الجسيمات النانوية في السائل الأساسي ودرجة الحرارة.

يمكن حساب هذه اللزوجة الديناميكية للسائل النانوي من لزوجة السائل الأساسي ونسب حجم الجسيمات النانوية باستخدام نماذج رياضية مختلفة.

اقترح أينشتاين (أينشتاين، 1911) نموذجًا لحساب اللزوجة الديناميكية للسوائل النانوية على النحو التالي:

$$\mu_{nf} = \mu_{bf}(1 + 2.5\phi) \quad (11)$$

ومع ذلك، يقتصر هذا النموذج على الجزيئات الصلبة ذات الحجم الكروي الميكروي والتركيزات المنخفضة حيث $0.02 \leq \phi$. قام برينكمان (Brinkman, 1952) بتوسيع معادلة أينشتاين لتشمل نطاقاً أوسع من نسب حجم الجسيمات الصلبة النانوية ($0 \leq \phi \leq 0.04$). يُعبّر عن النموذج بالشكل التالي:

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_{bf}}{(1-\phi)^{2.5}} \quad (12)$$

بالإضافة إلى ذلك، قدم باتشيلور (Batchelor, 1977) نموذجاً للتنبؤ بالزوجية، مع مراعاة التفاعل الهيدروديناميكي بين جسيمتين نانويتين كرويتين.

$$\mu_{nf} = \mu_{bf}(6.2\phi^2 + 2.5\phi + 1) \quad (13)$$

بعد ذلك، قام العديد من الباحثين بتصميم نماذج مختلفة للزوجية الديناميكية الفعالة المخصصة لأنواع مختلفة من السوائل النانوية. حيث قام هو وزملاؤه (Ho et al., 2010) بإجراء أبحاث تجريبية على سائل نانوي يحتوي على Al_2O_3 والماء، مع تغطية مجموعة من نسب حجم الجسيمات الصلبة ($0 \leq \phi \leq 0.04$) وقد طوروا نموذجاً للزوجية المطلقة بناءً على نتائجهم التجريبية، والذي يُعرض كما يلي:

$$\mu_{nf} = (1 + 4.93\phi + 222.4\phi^2)\mu_{bf} \quad (14)$$

لاحقاً، قام نغوين وزملاؤه (Nguyen et al., 2008) بتصميم نموذج للزوجية الديناميكية لسائل نانوي يحتوي على Al_2O_3 والماء، مع تغطية مجموعة من نسب حجم الجسيمات الصلبة ($0 \leq \phi \leq 0.094$). النموذج الذي اقترحوه مرفق أدناه:

$$\mu_{nf} = 0.904e^{0.1483\phi}\mu_{bf} \quad (15)$$

كما استخدم مايجا وزملاؤه طريقة المربعات الصغرى واقتروا نموذج لحساب للزوجة الديناميكية للسوائل نانوية تحتوي على جزيئات Al_2O_3 والماء، مع تغطية مجموعة من نسب حجم الجسيمات الصلبة $(0.01 \leq \phi \leq 0.10)$ ، كما في المعادلة (16)

$$\mu_{nf} = \mu_{bf}(123\phi^2 + 7.3\phi + 1) \quad (16)$$

بنفس الطريقة، قام عزمي وزملاؤه (Azmi et al., 2013) بدراسة نسب حجم الجسيمات الصلبة أوسع $(0 \leq \phi \leq 0.10)$ في تجربتهم وطوروا علاقة للزوجة الديناميكية المعتمدة على درجة الحرارة كما يلي:

$$\mu_{nf} = \mu_{bf}(1 + \phi)^{11.3} \left(1 + \frac{t}{70}\right)^{-0.038} \left(1 + \frac{d_s}{170}\right)^{-0.061} \quad (17)$$

حيث تشير

t إلى درجة حرارة الجسيمات النانوية بالدرجة مئوية ($^{\circ}C$)

d_s قطر الجسيمات النانوية بوحدات النانومتر (nm)

2.3. التوصيلية الحرارية الفعالة

التوصيلية الحرارية هي خاصية مهمة ، وخاصة في دراستنا لأنها تلعب دورًا كبيرًا في ظاهرة انتقال الحرارة، حيث تُظهر بوضوح كفاءة نقل الحرارة في السائل أو المادة الصلبة. وتعتمد التوصيلية على درجة الحرارة. بالإضافة إلى تغييرها وفقًا لدرجة الحرارة، فإن التوصيلية الحرارية للسائل النانوي تتغير أيضًا حسب كسر الحجم؛ ويتم حساب التوصيلية الحرارية للسائل النانوي وفقًا لنموذج هاميلتون وكروسير (Hamilton and Crosser)، الذي يُعتبر امتدادًا لنموذج ماكسويل.

$$k_{nf} = \frac{k_s + 2k_f + 2(k_s - k_{bf})\phi}{k_s + 2k_f - (k_s - k_{bf})\phi} k_{bf} \quad (18)$$

تقل فعالية هذا النموذج بشكل كبير عندما تتجاوز درجة حرارة المزيج 20°C حيث قام لي وبيترسون (Li & Peterson, 2006) بإجراء تجارب أظهرت عيوب نموذج ماكسويل. وقد طوروا معادلة تعتمد على درجة الحرارة لتقدير معامل التوصيل الحراري للسوائل النانوية كما يلي:

$$k_{nf} = (0.764\phi + 0.0187t - 0.462)k_{bf} + k_{bf} \quad (19)$$

قدّم هو وزملاؤه (Ho et al., 2010) نموذجًا إضافيًا للتوصيلية الحرارية لسائل نانوي يحتوي على الماء وجسيمات Al_2O_3 ، مع الأخذ في الاعتبار نسبة حجم الجسيمات النانوية ضمن النطاق $0 \leq \phi \leq 0.04$ كما يلي:

$$k_{nf} = (1 + 2.944\phi + 19.672\phi^2)k_{bf} \quad (20)$$

كما قدّم عزمي وزملاؤه (Azmi et al., 2013) نموذجًا إضافيًا للتوصيلية الحرارية لسائل نانوي يحتوي على الماء وجسيمات أكسيد الألومنيوم (Al_2O_3)، مع الأخذ في الاعتبار نسبة حجم الجسيمات النانوية ضمن النطاق $0 \leq \phi \leq 0.10$ و أخذ بعين الاعتبار أيضًا تأثير درجة الحرارة وقطر الجسيمات النانوية

$$k_{nf} = 0.8938(1 + \phi)^{1.37} \left(1 + \frac{t}{70}\right)^{0.2777} \left(1 + \frac{d_s}{150}\right)^{-0.0336} \left(\frac{\alpha_s}{\alpha_{bf}}\right)^{0.01737} k_{bf} \quad (21)$$

حيث يُرمز إلى α الانتشارية الحرارية.

3.3. الكثافة (Density) في السوائل النانوية

هي خاصية مهمة لها تأثير كبير على الخصائص الفيزيائية والديناميكية الحرارية للسوائل النانوية

$$\rho_{nf} = (\phi - 1)\rho_{bf} + \phi\rho_p \quad (22)$$

تتأثر الكثافة بعوامل مثل حجم وشكل الجسيمات النانوية، وتوزيعها، ودرجة الحرارة، مما يجعلها مهمة في تصميم السوائل النانوية المناسبة للاستخدامات العملية. حيث تعتبر دراسة الكثافة ضرورية لفهم سلوك السوائل النانوية تحت ظروف مختلفة من أجل تحسين أدائها في التطبيقات الهندسية والطبية.

4.3. الحرارة النوعية (Specific Heat Capacity)

هي خاصية فيزيائية مهمة تعبر عن كمية الطاقة الحرارية اللازمة لرفع درجة حرارة وحدة الكتلة من المادة بمقدار درجة مئوية واحدة (أو كلفن)، حيث تعتبر هذه الخاصية من العوامل المهمة التي تؤثر بشكل كبير على كفاءة الأداء الحراري للسوائل النانوية، خاصة في التطبيقات التي تتطلب تبريداً أو تسخيناً فعالاً.

$$Cp_{nf} = (\phi - 1)Cp_{bf} + \phi Cp_p \quad (23)$$

5.3. الانتشار الحراري:

الانتشار الحراري يعبر عن سرعة انتقال الحرارة. وهو يعتمد على مدى كفاءة المادة في توزيع الحرارة من منطقة إلى أخرى. في السوائل النانوية، عند استخدامنا للسوائل النانوية، يتحسن الانتشار الحراري بشكل كبير هذا مقارنة بالسوائل التقليدية، وذلك بفضل وجود الجسيمات النانوية التي تعزز التفاعل بين السائل والجسيمات، مما يؤدي إلى تحسين انتقال الطاقة الحرارية. وهذا ما يجعل السوائل النانوية خياراً جيد في التطبيقات التي تتطلب انتقال حرارة سريع وفعال، مثل أنظمة التبريد والتدفئة المتطورة.

II. التقنيات العددية لحل المعادلات التفاضلية الجزئية

1. طرق التمييز للمعادلات التفاضلية الجزئية (E.D.P)

المعادلات التفاضلية الجزئية تعتبر من الأدوات الأساسية المهمة التي نستخدمها من أجل فهم العديد من الظواهر الفيزيائية والهندسية، مثل تدفق الموائع، انتقال الحرارة، وانتشار الضوء والصوت. إلا أن حل هذه المعادلات يكون غالبًا معقدًا، مما يستدعي اللجوء إلى التقنيات العددية، خصوصًا في الحالات التي يكون فيها الحل التحليلي صعبًا أو مستحيلًا.

تُعد طرق التمييز واحدة من الأساليب العددية الرئيسية المهمة التي نستخدمها لتحويل المعادلات التفاضلية المستمرة إلى معادلات عددية قابلة للحل باستخدام الحواسيب. حيث أنها تحول المشتقات الجزئية في المعادلات التفاضلية إلى معادلات عددية يسهل حلها باستخدام الحواسيب. يمكننا تصنيف هذه الطرق بشكل عام إلى نوعين رئيسيين:

أ. طرق تقريب الحلول: (Solution Approximation Methods)

حيث يتم في هذه الطرق تقدير الحلول نفسها، أي أننا نحاول العثور على القيم المباشرة للدالة أو الوظائف التي تمثل النظام الذي ندرسه. بمعنى آخر، نسعى لتحديد قيم عددية تقريبية لهذه الحلول بدلاً من إيجاد حل تحليلي دقيق

ب. طرق تقريب المعادلات: (Equation Approximation Methods)

حيث يتم تحويل المعادلات التي تحتوي على مشتقات جزئية إلى معادلات عددية قابلة للحل باستخدام جهاز الحاسوب، من خلال تطبيق تقنيات التمييز لتحويل المعادلات التفاضلية إلى معادلات جبرية عددية.

توجد عدة طرق رئيسية في التمييز التي تُستخدم لحل المعادلات التفاضلية الجزئية، ومن أبرزها

✓ طريقة الحجوم المحددة (Finite Volume Method – FVM)

✓ طريقة العناصر المحددة Finite Element Method – FEM

✓ طريقة العناصر الحدودية (Boundary Element Method – BEM)

✓ طريقة مونت كارلو Monte Carlo Method

✓ طريقة الفروقات المحددة (Finite Difference Method – FDM)

✓ طريقة الشبكة الطيفية Spectral Method

2. طريقة الحجوم المحددة (Finite Volume Method – FVM)

تُعد طريقة الحجوم المحددة (FVM) واحدة من الطرق الأكثر استخدامًا لحل المعادلات التفاضلية الجزئية، خاصة في المجالات المتعلقة بتدفق الموائع وانتقال الحرارة. ما يميز هذه الطريقة هو قدرتها على الحفاظ على المبادئ الأساسية للانحفاظ، مثل معادلات حفظ الكتلة والطاقة والحركة، عبر الشبكة. وهذا ما يجعلها مناسبة بشكل خاص للمشاكل التي تتطلب انحفاظ هذه الكميات الفيزيائية في أنظمة متعددة الأبعاد.

يعتمد مبدأ هذه الطريقة على تكامل المعادلات التفاضلية على كل حجم تحكم بدلاً من حل المعادلات التفاضلية مباشرة. حيث يتم تجميع المعادلات في شكل تكاملات على الحجوم المتجاورة، ما يضمن لنا المحافظة على معادلات الانحفاظ في المعالجة العددية.

1.2 الخطوات الرئيسية لطريقة الحجوم المحددة

1. تقسيم المجال إلى حجوم صغيرة يمكن أن تكون هذه الحجوم ذات أشكال متعددة مثل المكعبات في الأبعاد الثلاثية أو المربعات في الأبعاد الثنائية.
2. تطبيق معادلات الانحفاظ على الحجوم (مثل معادلات انحفاظ الكتلة، انحفاظ الطاقة، والاندفاع)
3. حساب التدفقات عبر الأسطح
4. تطبيق الحلول العددية عبر الحدود، حيث يتم تحويل المعادلات التفاضلية إلى معادلات جبرية يمكن حلها باستخدام تقنيات عددية مثل طريقة التكرار أو طريقة الانحدار (Gauss–Seidel, etc)
5. بعد حل المعادلات الجبرية، يتم التحقق من صحة الحلول العددية عن طريق عملية التكرار حتى يتقارب الحل مع الشروط المبدئية أو الحدودية بشكل مقبول.

2.2 أنواع الحجوم المحددة

هناك نوعان حسب نوع الشبكة

1. الحجوم المحددة على شبكة منتظمة: تكون الحجوم هنا متساوية في الحجم والشكل (مثل مكعبات أو مربعات في الفضاء ثنائي أو ثلاثي الأبعاد). هذا النوع من الشبكات يسهل علينا الحسابات لكنه قد لا يكون مناسباً للمشاكل التي تتطلب هندسة معقدة.
2. الحجوم المحددة على شبكة غير منتظمة: تكون الحجوم في هذا النوع من الشبكات غير منتظمة حيث تتكيف مع هندسة المجال. وهذا يوفر لنا مرونة أكبر في التعامل مع الهندسة المعقدة (مثل المجالات ذات الحدود المنحنية أو الأشكال غير المنتظمة).

3.2 مزايا طريقة الحجوم المحددة

1. تضمن لنا المحافظة على معادلات الكتلة، الطاقة، والاندفاع، وهي من المبادئ الأساسية في فيزياء الموائع، مما يجعلها موثوقة في التطبيقات التي تتطلب منا دقة في الحسابات الفيزيائية.
2. يمكن استخدام طريقة الحجوم المحددة مع الشبكات غير المنتظمة التي تتكيف مع الأشكال الهندسية المعقدة، مما يجعلها مناسبة للمشاكل التي تحتوي على هندسة غير منتظمة مثل تدفق الموائع حول عقبات أو في القنوات المنحنية.
3. دقيقة في تطبيقها على الأنظمة متعددة الأبعاد (مثل المحاكاة ثلاثية الأبعاد) مما يجعلها مفيدة في حل مشاكل معقدة في الديناميكا الحرارية والميكانيكا الموائع.
4. تعتمد على معادلات الانحفاظ، مما يجعلها ان تكون فعالة في التعامل مع الظواهر التي تتضمن تغييرات ديناميكية في الطاقة أو الموائع.
5. إمكانية تنفيذها بشكل موازي (parallel computing)، مما يتيح تحسين الأداء عند التعامل مع المشكلات الكبيرة المعقدة.

4.2 عيوبها

1. معقدة في حال كانت الشبكة غير منتظمة، خاصة عند استخدام تقنيات استيفاء معقدة لحساب التدفقات عبر الأسطح.
2. الدقة المتغيرة: قد تكون دقة الحلول معتمدة على دقة استيفاء التدفقات عبر الأسطح، ويمكن أن تختلف حسب نوع الاستيفاء المستخدم.
3. قد يتطلب الأمر شبكات دقيقة جدًا لتحقيق نتائج دقيقة، خاصة في التطبيقات التي تحتوي على خصائص فيزيائية معقدة أو تدفقات سريعة.

5.2 تطبيقاتها

1. تستخدم هذه الطريقة لحل معادلات Navier–Stokes لحركة الموائع سواء كانت ثابتة أو غير ثابتة، في المجالات المختلفة مثل الطيران، الهندسة الميكانيكية، والهندسة البحرية.
2. تُستخدم أيضًا في تحليل النقل الحراري سواء في الأنظمة المستقرة أو غير المستقرة.

3. ديناميكا السوائل متعددة الأطوار: مثل تدفق السوائل مع الغاز أو السائل مع الجزيئات الصلبة.
4. تُستخدم في التطبيقات التي تشمل انتقال الموائع عبر المواد المسامية مثل الأوساخ، الصخور، أو الأسطح المسامية الأخرى.

6.2 البرمجيات المتاحة

العديد من البرمجيات الهندسية تعتمد على طريقة الحجوم المحددة، ومنها:

1. ANSYS Fluent وهو برنامج يستخدم في محاكاة ديناميكا الموائع والحرارة. يعتمد على طريقة الحجوم المحددة لحل مشاكل الموائع ذات الأبعاد المتعددة.
2. OpenFOAM
3. COMSOL Multiphysics

iii. محاكاة تدفق المائع في أنابيب متحدي المركز:

الأنابيب المتحدة المركز هي نوع من الأنابيب التي تتكون من أنبوبين متوازيين، أحدهما داخل الآخر، بحيث يُترك فراغ بين الأنبوبين يُدفع من خلاله السائل. يتم استخدام هذا النوع من الأنابيب في تطبيقات متنوعة مثل أنظمة التدفئة، أنابيب نقل الموائع في الصناعات الكيميائية، أو في أنظمة تبريد المعالجات الإلكترونية.

1. خصائص التدفق في الأنابيب المتحدة المركز:

- 1.1. التدفق الشعاعي: يتدفق المائع في اتجاه شعاعي بين الأنبوبين الداخلي والخارجي. هذا يعني أن السرعة والضغط للسائل يختلفان بشكل غير منتظم في المنطقة بين الأنبوبين. في أنابيب مستديرة تقليدية، يكون التدفق في الغالب في اتجاه محوري (من بداية الأنبوب إلى نهايته).
- 2.1. التأثيرات الهندسية على التدفق: بسبب التغير في هندسة الأنبوب، يحدث فرق في توزيع السرعة عبر القسم العرضي للأنبوب. على سبيل المثال، قد يكون التدفق في منطقة الجدار الداخلي للأنبوب أسرع بسبب القرب من السطح، بينما يقل التدفق بالقرب من الجدار الخارجي. هذا يخلق ما يسمى بـ "التوزيع الشعاعي للسرعة".
- 3.1. التدفق القسري: يعني أن المائع يتم دفعه داخل الأنابيب باستخدام قوى خارجية، مثل الضغط أو بواسطة مضخات. يعتبر هذا النوع من التدفق في الأنابيب المتحدة المركز قسرياً لأنه يعتمد على مصدر خارجي للضغط لضمان حركة المائع.
- 4.1. تأثير الاحتكاك: عند استخدام السوائل النانوية، قد يتغير الاحتكاك السطحي بين السائل والجدار الداخلي للأنبوب. يختلف هذا التأثير حسب نوع الجسيمات النانوية وتركيزها حيث يمكن أن يتسبب هذا التغيير في زيادة أو تقليل فقدان الضغط في النظام.
- 5.1. التوزيع غير المتجانس: نظراً لأن جسيمات السائل النانوي تتوزع بشكل غير متجانس، قد يتغير التوزيع الداخلي للمائع داخل الأنابيب المتحدة المركز، مما يؤدي إلى تغييرات في خصائص التدفق في المناطق المتاخمة للجدران.

2. الهدف من المحاكاة العددية في تدفق الأنابيب المتحدة المركز:

الهدف من هذه المحاكاة هو دراسة وتحليل سلوك التدفق بشكل دقيق، بما في ذلك:

- 1.2. دراسة كيفية تغير السرعة والضغط وفق نصف القطر بين الأنبوبين الداخلي والخارجي.

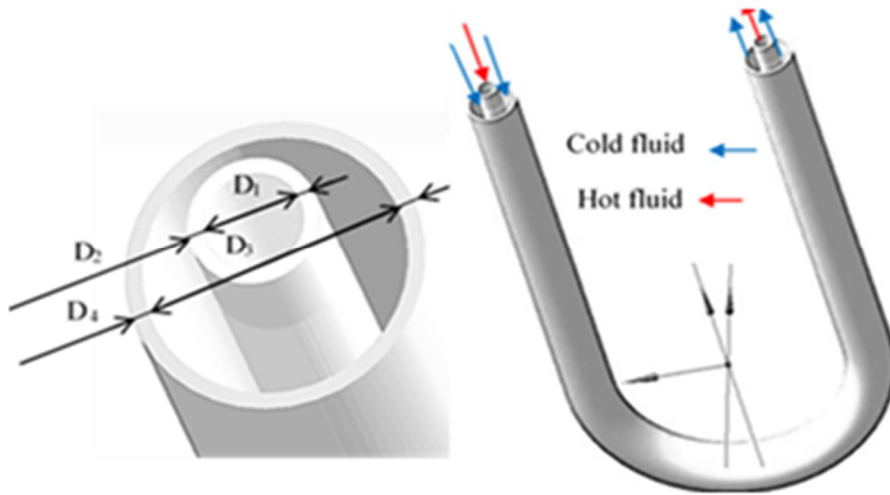
2.2. تحليل تأثير اللزوجة والاحتكاك بين السائل وجدران الأنابيب، مع التركيز على تأثير استخدام السوائل النانوية في هذه التفاعلات.

3. برامج المحاكاة العددية:

استخدام برامج مثل ANSYS Fluent لتطبيق معادلات الحركة الأساسية للسائل في الأنابيب. كما يتم استخدام طريقة الحجوم المحددة (FVM) في هذه البرامج، حيث يتم تقسيم المجال المحاكى إلى خلايا صغيرة تُحل فيها المعادلات الرياضية.

4. الإعدادات الهندسية

يُظهر لنا الشكل (1.4) هندسة المبادل الحراري ذي الأنابيب المتوازيين على شكل حرف U ، بالإضافة إلى الأبعاد الرئيسية الموضحة عليه ومسارات تدفق السائلان الساخن والبارد حيث ان السائل الساخن المستخدم في النظام هو سائل نانوي يتكون من خليط من أكسيد الألومنيوم (Al_2O_3) والماء كوسيط أساسي، ويُدخل هذا السائل في الأنبوب الداخلي. بينما يتدفق السائل البارد بالتوازي عبر الفراغ الحلقي في الأنبوب الخارجي. تتميز جسيمات السائل النانوي بحجم (dp) أقل من 100 نانومتر.



الشكل (1.4). هندسة المجال الحسابي

D1=6mm	D1	القطر الداخلي للأنبوب الداخلي
D2=8mm	D2	القطر الخارجي للأنبوب الداخلي
D3=16mm	D3	القطر الداخلي للأنبوب الخارجي
D4=18mm	D4	القطر الخارجي للأنبوب الخارجي
L=680mm	L	طول المبادل الحراري

الجدول (2.4) الأبعاد الرئيسية للمبادل الحراري

5. خصائص تدفق السوائل وتأثير درجة الحرارة على المميزات الفيزيائية

1. نعتبر ان أن السائل المتدفق غير قابل للانضغاط
2. التدفق يمكن ان يكون منتظم أو مضطرب
3. الخصائص الفيزيائية متعلقة بدرجة الحرارة: حيث اعتبرنا أن، السعة الحرارية، الموصلية الحرارية، واللزوجة الديناميكية متغيرات بدلالة درجة الحرارة. حيث قمنا بادراج المعادلات الفيزيائية على شكل دالة معرفة من قبل المستخدم (UDF) ، والتي ترتبط بتغيرات الحرارة في كل لحظة مع المتغيرات الهامة الأخرى. حيث تسمح لنا هذه الطريقة بتحسين الاستجابة للمتغيرات الفيزيائية المختلفة، مما يساعدنا في تحقيق نتائج أكثر دقة وموثوقية في الدراسة العددية وتوفير فهم أعمق لسلوك النظام في ظل ظروف تشغيل مختلفة

6. تأثير السوائل النانوية في المحاكاة العددية:

1. نقوم بتعديل الخصائص الفيزيائية للمائع، مثل اللزوجة والتوصيل الحراري، حسب تأثير الجسيمات النانوية المضافة في المائع. لتتم اضافتها في المعادلات الرياضية المستخدمة لحل معادلات الزخم والطاقة. بهدف تمثيل دقيق لسلوك السوائل النانوية في المحاكاة العددية
2. إضافة جسيمات نانوية من أكسيد الألمنيوم إلى السائل الأساسي بنسب مختلفة (2.5% , 5% , 7.5% , 10%) بهدف تحديد التأثير الأمثل لهذه الجسيمات على خصائص التدفق.
3. يتم تحديد عدد رينولدز (Reynolds Number) بناءً على سرعة المائع وخصائصه، وهو يسمح لنا بمعرفة طبيعة التدفق.

الفصل الخامس:

النمذجة والمحاكاة العددية لتدفق الحرارة

وتدفق السوائل

الفصل الخامس: النمذجة والمحاكاة العددية لتدفق الحرارة وتدفق السوائل

في هذا الفصل، نتناول النمذجة والمحاكاة العددية لتدفق الحرارة والسوائل. نبدأ بتوضيح عن إنشاء الشبكة الحسابية واختيار النوع المناسب لها لضمان دقة النتائج. كما نتحدث عن خطوات المحاكاة مثل تحديد النماذج الفيزيائية المناسبة، وتعريف خصائص السائل، بالإضافة إلى تحديد شروط التشغيل التي تؤثر في الأداء.

بعد تصميم المجسم الهندسي باستخدام برنامج (Design Modeler (DM، تأتي مرحلة إنشاء الشبكة الحسابية، وهي مرحلة أساسية تسبق عملية المحاكاة، حيث لها دورًا كبيرًا في دقة النتائج وكذلك سرعة العمليات الحسابية.

1. إنشاء الشبكة الحسابية

إنشاء الشبكة الحسابية ببعدين 2D أو ثلاثة أبعاد 3D مرحلة مهمة جدا في تحليل الديناميكا الحسابية للسوائل (CFD)، نظراً لتأثيره الكبير على النتائج النهائية للحل. من الضروري إنشاء شبكة حسابية عالية الجودة أمراً أساسياً للحصول على نتائج دقيقة وذات دلالة علمية. يعتمد إنشاء الشبكة الحسابية الجيدة على تقليل العناصر التي تظهر فيها التماثل غير المتساوي، وعلى تقديم "دقة" عالية في المناطق ذات التدرجات الكبيرة. في الواقع، تؤثر جودة الشبكة الحسابية بشكل كبير على التقارب، دقة الحل، وأهم من ذلك على وقت الحساب.

1.1. اختيار نوع الشبكة الحسابية

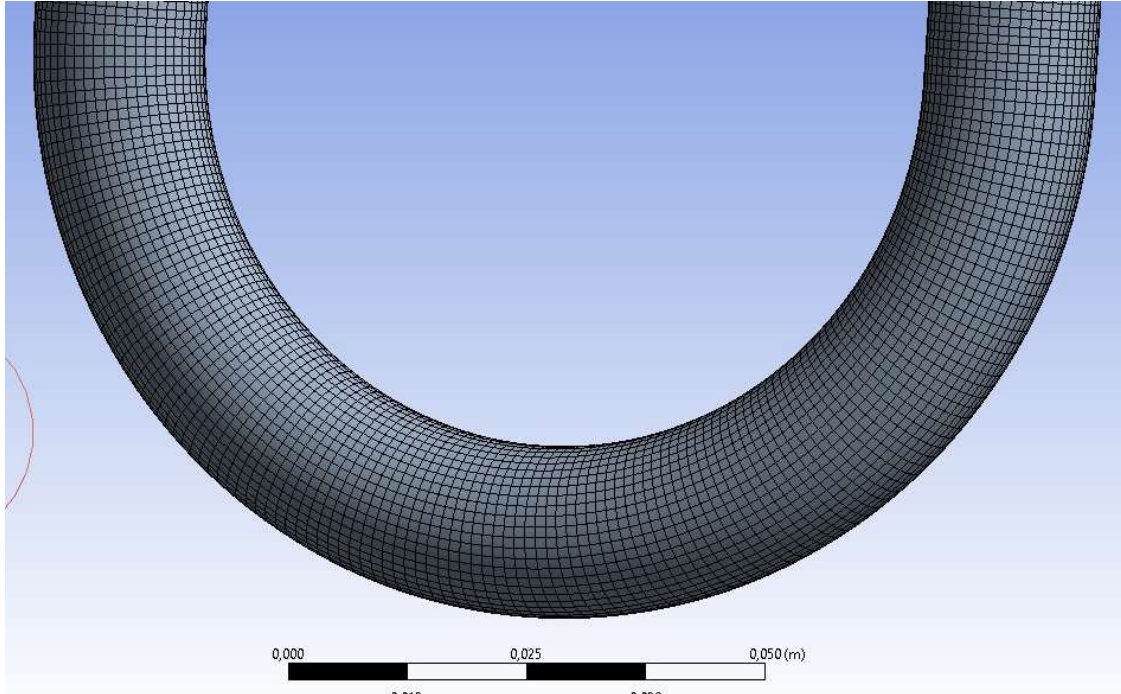
اختيارنا لنوع الشبكة الحسابية بعناية يُحسن من تمثيل الظواهر الفيزيائية داخل المجال الحسابي، مما يُساهم بشكل كبير في حصولنا على حلول دقيقة وموثوقة فيما يلي أنواع الشبكات الحسابية:

1.1.1. التشبيك المنظم (Maille structurée)

هو نوع من الشبكات الحسابية التي تتميز بترتيب منتظم للعناصر. وله العديد من المزايا والعيوب التي تؤثر على اختيار استخدامه في تطبيقات معينة.

○ مميزات التشبيك المنظم:

1. السرعة في الحسابات: بما أن العناصر تكون منظمة بشكل دقيق، فيصبح من السهل على البرنامج حل المعادلات الرياضية بسرعة أكبر، مما يقلل من وقت المعالجة.
 2. تقليل الأخطاء الرقمية: عندما يكون التدفق العام محاذاً للشبكة، يعمل التشبيك المنظم على تقليل الأخطاء الرقمية.
 3. الاقتصاد في عدد العناصر: يتميز بعدد أقل من عناصر الشبكة مقارنةً بالشبكة غير المنظمة، مما يجعله أكثر كفاءة في بعض الحالات.
- قيود التشبيك المنظم
1. صعوبة في التعامل مع الأشكال الهندسية المعقدة: قد يكون من الصعب علينا أن نتحصل على شبكة منظمة ذات جودة إذا كانت الأشكال الهندسية التي نتعامل معها معقدة أو غير منتظمة، مثل المنحنيات أو الأشكال المتعرجة.
 2. صعوبة في الإنشاء والتوليد في حالة الأشكال الهندسية المعقدة: قد نحتاج جهداً إضافياً لإنشاء شبكة منسقة بشكل جيد عندما نتعامل مع أشكال هندسية معقدة.



الشكل (1.5) الشبكة الحسابية

2.1.1. التشبيك غير المنظم (Maille non structurée)

هو نوع من الشبكات الحسابية التي تتميز بوجود عناصرها بشكل غير منتظم. هذا النوع من الشبكات نستخدمه عندما نواجه أشكال هندسية معقدة أو غير منتظمة، مما يسمح لنا بتكوين شبكة حسابية تناسب هذه الأشكال.

○ مميزات التشبيك المنظم:

1. سهولة التكوين للأشكال المعقدة

2. توليد الشبكة بشكل آلي.

○ قيود التشبيك غير المنظم

1. بطي في عملية الحل: بما أن العناصر في هذه الشبكة غير مرتبة بشكل منتظم، فإن العمليات

الحسابية قد تأخذ وقتاً أطول مقارنة بالشبكة المنتظمة، حيث يحتاج البرنامج إلى معالجة عدد

أكبر من العناصر بطريقة غير منتظمة

2. زيادة الأخطاء الرقمية: في بعض الحالات، قد ينتج عن هذا النوع من الشبكات أخطاء رقمية

أكبر مقارنة بالشبكات المنتظمة، مما يؤثر على دقة النتائج النهائية في المحاكاة.

3.1.1. التشبيك الهجين (Maille hybride)

هو نوع من الشبكات الحسابية التي تجمع بين العناصر المنتظمة وغير المنتظمة. يمكن أن يتضمن مثلثات أو مستطيلات في الشبكات ثنائية الأبعاد، بينما يتم استخدام أسطوانات أو أشكال هرمية أو منشورية في الشبكات ثلاثية الأبعاد.

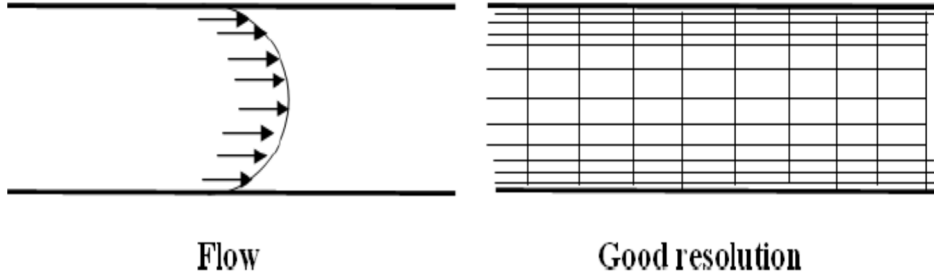
○ مميزات التشبيك الهجين

يجمع بين مزايا التشبيك المنظم والتشبيك غير المنظم، مما يوفر توازناً جيداً بين دقة الشبكة وكفاءتها.

2.1. الدقة (Résolution)

الدقة مهمة في المناطق التي تشهد تغييرات مفاجئة أو تدرجات قوية، مثل المناطق التي تحدث فيها تغيرات كبيرة في السرعة أو الحرارة. حيث كلما كانت الدقة أفضل، كانت النتائج النهائية أكثر موثوقية، مما يتيح لنا وصف الظواهر الفيزيائية بشكل أدق في هذه المناطق أو على حدود الطبقات بين السوائل أو بين السائل والأسطح الصلبة. وتكون الدقة ضرورية بشكل كبير عند دراسة تدفقات السوائل المضطربة، حيث تحدث

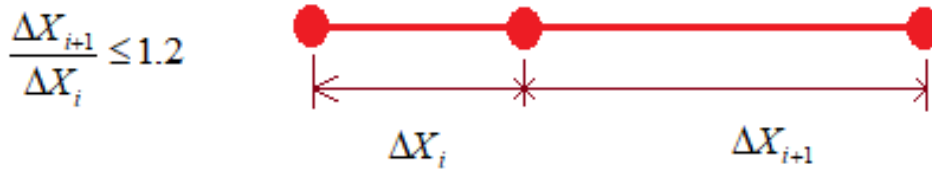
تغيرات مستمرة في المتغيرات مثل السرعة والضغط، وتكون هذه التغيرات في كثير من الأحيان غير ثابتة. باستخدامنا للدقة أعلى، يمكننا متابعة هذه التغيرات، مما يجعل النتائج أقرب إلى الواقع



الشكل (2.5) تحسين الشبكة في المناطق ذات التدرج القوي [34]

3.1. التغيرات تدريجية Lissage

يجب أن تكون التغيرات في حجم عناصر الشبكة بين منطقتين متجاورتين تدريجية، ولا يجب أن تتجاوز التغيرات في حجم العناصر بين منطقتين مجاورتين 20%. يساهم هذا التدرج في تحسين دقة عملية المحاكاة ويقلل من الأخطاء الحسابية التي قد تنشأ.



الشكل (3.5) تطور حجم العناصر

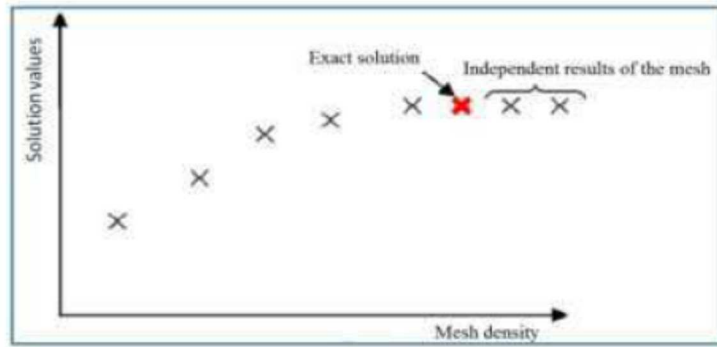
4.1. عدد العناصر الإجمالي

دقة الحسابات مرتبطة بشكل كبير بجودة الشبكة وعدد عناصرها. عندما يزداد عدد العناصر، تتحسن دقة الحسابات والنتائج، ولكن في المقابل، يزداد ذلك من استهلاك الموارد من حيث الذاكرة، مما يجعل الحاسوب بطيء في عملية المعالجة ويزيد من وقت المحاكاة. لذلك، يجب علينا أن نعمل على تحقيق توازن بين الدقة ووقت الحساب. هناك تقنيات لتوفير عدد من العناصر:

- ✓ استخدام وظيفة تكيف الشبكة لتحسين الشبكة في مناطق معينة فقط.
- ✓ استخدام شبكات غير منتظمة، مع تركيز على جودة الشبكة في المناطق التي تتطلب ذلك.

5.1. التقارب في الشبكة الحسابية

قبل بدء عملية المحاكاة، من الضروري التأكد أولاً من أن الحلول قد أصبحت مستقلة عن كثافة الشبكة. بمعنى آخر، يجب أن تكون النتائج مستقرة ولا تتغير بشكل كبير عند زيادة دقة الشبكة. هذا يضمن لنا حلول واقعية وموثوقة، بغض النظر عن حجم الشبكة أو كثافتها ويكون اختبار تقارب الشبكة عن طريق تتبع تطور متغير ما، مثل قيم درجة الحرارة (المتغير)، استناداً إلى حجم الشبكة الذي يتم تحسينه تدريجياً.



الشكل (4.5) اختبار تقارب الشبكة [34]

2. المحاكاة

بعد تصميم النموذج الهندسي للمشكلة باستخدام برنامج ANSYS Design Modeler (كما يمكن استخدام أي برنامج CAD آخر مثل SolidWorks) وبعد مرحلة إعداد الشبكة الحسابية حيث قمنا في هذه المرحلة بتقسيم النموذج الهندسي إلى شبكة من الخلايا باستخدام ANSYS Meshing وهذا بعد اختيار نوع الشبكة الأنسب وفقاً لطبيعة المشكلة، ثم تم تحسين دقة الشبكة من خلال ضبط حجم العناصر وتخصيص الدقة في المناطق المهمة التي قد تشهد تغيرات كبيرة في التدفق أو في الحدود.

وفي الخطوة التالية يتم الانتقال إلى المحاكاة الفعلية باستخدام برنامج ANSYS Fluent. حيث في هذه المرحلة تم اتباع خطوات منظمة لضمان أن تكون المحاكاة دقيقة وموثوقة، مما يساهم في الحصول على نتائج واقعية.

1.2. اختيار الحل (Solver)

نوع الحل: (Solver Type)

✓ الحل القائم على الضغط (Pressure-based): وهو الأنسب لمحاكاة تدفق السوائل النانوية في الأنابيب متحدة المركز، حيث يُناسب التدفقات غير القابلة للانضغاط أو تلك التي يمكن تجاهل التغيرات الطفيفة في الكثافة.

✓ الحل القائم على الكثافة (Density-based): يُستخدم مع التدفقات القابلة للانضغاط أو عندما تحدث تغييرات كبيرة في الكثافة.

صيغة السرعة: (Velocity Formulation)

✓ مطلقة: (Absolute) وهي الأنسب عندما يكون لنا نظام ثابتاً ولا يوجد حركة نسبية بين الجسم والنظام، مثل تدفق السوائل النانوية في الأنابيب المتحدة المركز حيث يُفترض أن التدفق مستقر والأجسام ثابتة.

✓ نسبية (Relative): تُستخدم عندما توجد حركة نسبية بين السوائل والجسم المتحرك، مثل تدفق حول جسم متحرك أو في الأنظمة التي تشمل حركة الأجسام.

الزمن: (Time)

✓ ثابت: (Steady) يختار عندما لا تتطلب المحاكاة تتبع التغيرات الزمنية، وهو خيار الأنسب في محاكاة تدفق السوائل النانوية في الظروف المستقرة.

✓ متغير (Transient): يُستخدم عندما يكون التدفق غير مستقر ويتغير مع الزمن، مثل تغيرات ديناميكية في السرعة أو الضغط مع مرور الوقت.

2.2. اختيار النموذج الفيزيائي (Physics Models)

خطوة مهمة لضمان دقة النتائج في المحاكاة. حيث يعتمد اختيار النماذج الفيزيائية الشكل (5.5) على خصائص النظام الذي يتم محاكاته

✓ تمكين معادلة الطاقة (Energy Equation):

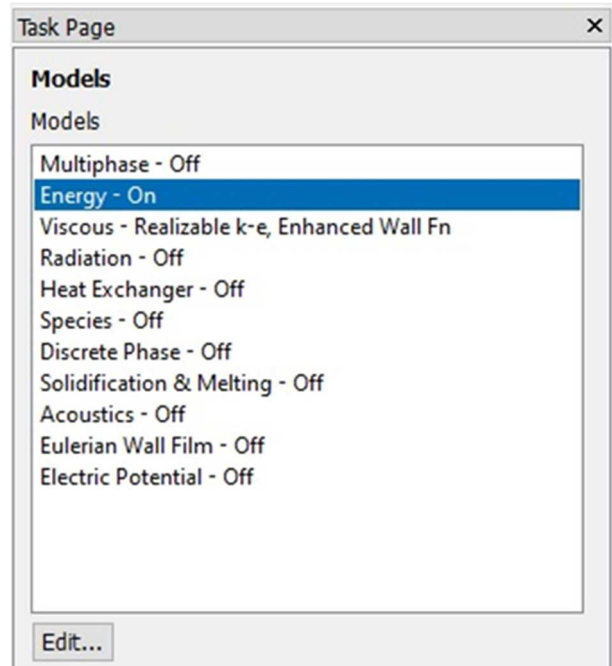
تم تفعيل معادلة الطاقة نظرًا لوجود تبادل حراري داخل النظام أو بين الأجسام، مما يجعل حسابات انتقال الحرارة ضرورية. مما يساعدنا في فهم تغيرات درجة الحرارة داخل المائع ومحيطه بدقة، وكذلك ضمان محاكاة واقعية.

✓ اختيار نموذج التدفق اللزج: (Viscous Models)

تم اختيار هذا النموذج من أجل توصيف دقيق لسلوك المائع أثناء التدفق، حيث يساعدنا هذا النموذج في تمثيل تأثيرات اللزوجة والتغيرات الديناميكية داخل المائع، مما يعزز دقة المحاكاة وواقعتها.

إلى جانب هذا النموذج يوفر لنا برنامج ANSYS Fluent مجموعة واسعة من النماذج الفيزيائية التي يمكن تفعيلها بناءً على احتياجات الدراسة، من بينها:

- نموذج التدفق متعدد الطور (Multiphase Models)
- نموذج النقل الحراري (Heat Exchanger Models)
- نموذج الإشعاع الحراري (Radiation)
- نموذج انتقال الأنواع الكيميائية (Species Transport)
- نموذج النماذج المنفصلة للجسيمات (Discrete Phase Model – DPM)
- نموذج التجمد والانصهار (Solidification & Melting)
- نموذج الضوضاء الصوتية (Acoustics)
- نموذج الفيلم الجداري (Eulerian Wall Film)



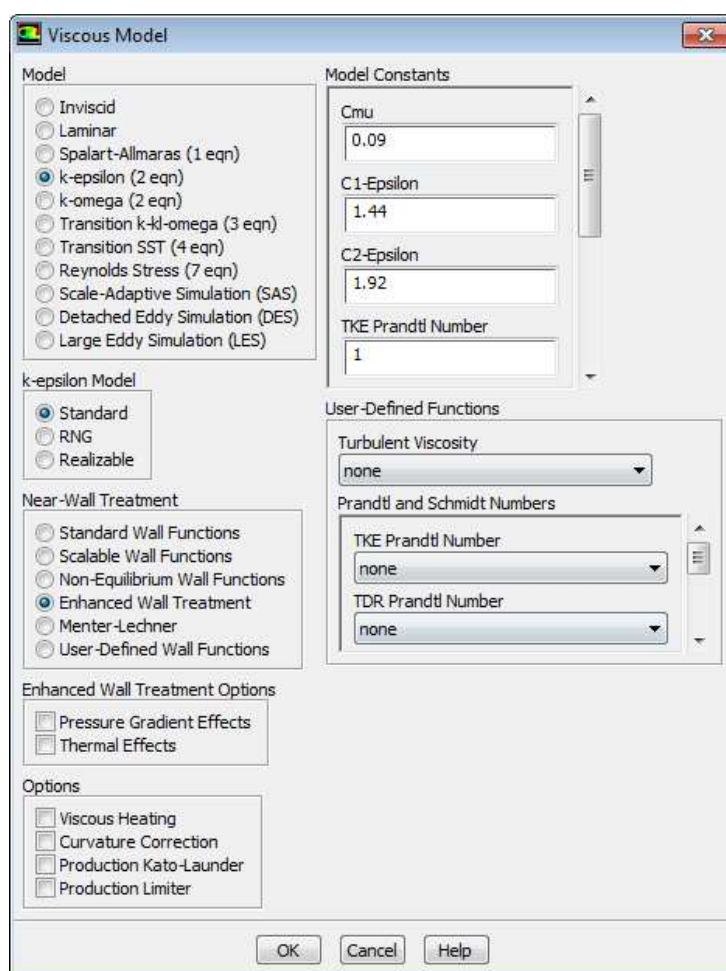
الشكل (5.5) مربع الحوار الاختيار النماذج الفيزيائية

✓ اختيار نموذج الاضطراب المناسب

من خلال مربع حوار نموذج التدفق اللزج الشكل (6.5) تم اختيار التدفق المضطرب (Turbulent) لكونه الأنسب لدراستنا وهذا استنادًا إلى طبيعة التدفق وظروف المشكلة، مثل السرعة، رقم رينولدز.

كما يوفر لنا البرنامج من خلال مربع حوار نموذج التدفق اللزج أيضًا خيارات أخرى مثل:

- التدفق غير اللزج: (Inviscid) يُستخدم عندما يكون تأثير اللزوجة مهملاً.
- التدفق الصفحي (Laminar): مناسب للحالات التي يكون فيها التدفق منتظمًا وبدون اضطراب، خاصة عند انخفاض رقم رينولدز.



الشكل (6.5) مربع الحوار لنموذج اللزج

3.2. تعريف خصائص الموائع

يحتوي برنامج Fluent على مكتبة للموائع الأكثر شيوعاً، مثل الماء وبعض المعادن والهواء والغازات الأخرى، كما يتيح لنا إمكانية تعريف أو ادخال مائع جديد وفقاً لمتطلبات الدراسة .

قمنا في دراستنا بإضافة مائع جديد يتمثل في سائل نانوي، وهو خليط من الماء وجسيمات أكسيد الألومنيوم (Al_2O_3) النانوية. تما تعريف الخصائص الفيزيائية لهذا السائل الجديد بناءً على خصائص الماء (المائع الأساسي) وخصائص جسيمات Al_2O_3 النانوية. حيث استخدمنا خاصية UDF الموجودة في برنامج Fluent، التي سمحت لنا بكتابة معادلات مخصصة لحساب خصائص السائل بطريقة ديناميكية .

كذلك خاصية UDF ، مكنتنا من تحديد خصائص السائل النانوي بشكل ديناميكي بناءً على درجة الحرارة المحلية في المبادل الحراري. كما تتيح لنا التحكم في تركيز الجسيمات النانوية داخل السائل.

قمنا في دراستنا بتغيير تركيز الجسيمات النانوية إلى نسب مختلفة وهي: 2.5%، 5%، 7.5%، و10%. عند كل محاكاة ومع كل تركيز، قمنا بحساب الخصائص الفيزيائية للسائل وفقاً للتغيرات في درجة الحرارة باستخدام المعادلات المعتمدة على خصائص الماء والجسيمات النانوية.

4.2. شروط التشغيل (Operating Conditions)

في هذه الدراسة، قمنا بتحديد شروط التشغيل بعناية لتقييم أداء النظام تحت ظروف مختلفة. حيث شملت هذه الشروط تحديد التدفق الكتلي للسائل البارد في الأنبوب الخارجي والتدفق الكتلي للسائل النانوي الساخن في الأنبوب الداخلي حيث نقوم في كل مرة بتعديل قيم التدفق الكتلي التي شملت

$$0.35 \text{ kg/s} \quad 0.58 \text{ kg/s} \quad 0.81 \text{ kg/s} \quad 0.104 \text{ kg/s}$$

من أجل دراسة تأثير تغير التدفق على كفاءة التبادل الحراري بين السائلين.

5.2. الشروط الحدية (Boundary Conditions)

تحديد الشروط الحدية أمر ضروري لعملية محاكاة نظام ديناميكي:

- ✓ السرعة عند المدخل (Inlet Velocity) تحديد السرعة أو التدفق عند نقطة الدخول إلى النظام.
- ✓ الضغط عند المخرج (Outlet Pressure) تحديد الضغط عند نقاط الخروج من النظام.
- ✓ الاحتكاك عند الجدران (Wall Friction) يمكن تحديدها إذا كانت الجدران في احتكاك مع المائع
- ✓ الشروط الأخرى: مثل الحرارة عند السطح أو خصائص التفاعل الكيميائي في بعض الحالات.

6.2. اختيار معايير التقارب (Convergence Criteria)

الحل التكراري يسعى إلى موازنة معادلات انحفاظ الكتلة، كمية الحركة، والطاقة. انطلاقاً من حل ابتدائي حيث يقوم الحل التكراري بتطويره نحو حل نهائي (تتوقف الحسابات في المحاكاة) بعد عدد معين من التكرارات. يتم حساب البقايا (residues) بناءً على قيم المتغيرات (الحرارة، الضغط، السرعة) في المشكلة بين التكرار الحالي والتكرار السابق ويجب أن تكون البقايا بأقل قيمة ممكنة (على سبيل المثال 10^{-6})

7.2. تهيئة الحسابات (Initialization)

قبل بدء عملية الحسابات، يتم تحديد القيم الأولية للسرعة، الضغط، ودرجة الحرارة في جميع النقاط داخل الشبكة. في حالة وجود مناطق ذات تغيرات كبيرة، يجب تعيين القيم الأولية بعناية لتجنب التقلبات أو الأخطاء في الحسابات الأولية.

8.2. بدء المحاكاة (Running the Simulation)

بعد إتمام كل الإعدادات، نقوم ببدء عملية المحاكاة فيقوم برنامج Fluent بتنفيذ الحسابات استنادًا إلى المعايير المحددة. يجب مراقبة عملية الحسابات لضمان عدم حدوث مشكلات مثل التقلبات غير المرغوب فيها أو التكرار غير المتقارب.

بعد اكتمال الحسابات، يتم تحليل النتائج باستخدام أدوات التحليل المناسبة.

الفصل السادس:

تحليل النتائج ومناقشتها

الفصل السادس: عرض وتحليل نتائج المحاكاة.

هذا الفصل يحتوي على عرض وتحليل نتائج دراسة الحمل الحراري القسري في ظروف الحالة المستقرة، في مبادل حراري مكون من أنبوبين متوازيين على شكل U. ومصنوع من النحاس حيث استخدمنا في هذه الدراسة سائل نانوي مكون من الماء كوسيط أساسي وجزيئات أكسيد الألمنيوم (الماء- Al_2O_3)، حيث يتدفق السائل النانوي عبر الأنبوب الداخلي، بينما يتدفق الماء النقي عبر الأنبوب الخارجي.

تم تقديم النموذج الرياضي، والطريقة العددية، والهندسة، بالإضافة إلى إعدادات الشبكة الحسابية والمحاكاة في الفصلين السابقين

1. تأثير الشبكة على الحل العددي

الشبكة الحسابية (Maillage) أحد العوامل الضرورية في المحاكاة العددية، حيث أن دقة الحل العددي تعتمد بشكل كبير على جودة الشبكة المستخدمة. في هذه الدراسة، تم تحليل تأثير الشبكة من خلال إجراء اختبارات استقلالية الشبكة (Mesh Independence Tests) بهدف ضمان أن النتائج العددية لا تعتمد على حجم أو كثافة الشبكة.

2. مجال الحرارة

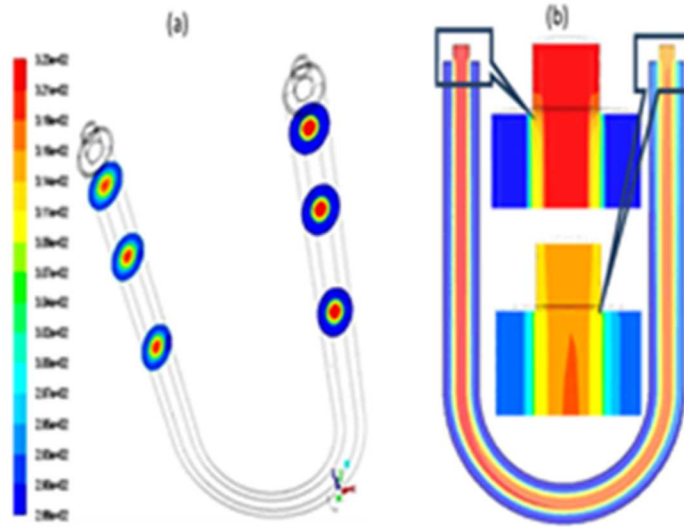
يُظهر الشكل (1.6) (a) توزيع درجات الحرارة عبر المقاطع العرضية التي تم أخذها في ثلاث نقاط مختلفة على طول المبادل الحراري، بدءًا من المدخل (على اليسار) وصولاً إلى المخرج (على اليمين). تم اختيار هذه النقاط بعناية لتوضيح كيفية تغير درجات الحرارة داخل النظام وتوزيع الحرارة بشكل دقيق على طول المبادل. في الشكل (1.6) (b)، تم عرض هذا التوزيع في المستوى الوسطي للمبادل الأنبوبي، مما يُظهر بشكل أوضح كيفية تغير درجات الحرارة داخل الأنبوب. كما تم تكبير مناطق المدخل والمخرج لعرض التغيرات الحادة في درجات الحرارة عند تفاعل السوائل.

يتضح من نتائج التوزيع الحراري حدوث انتقال حرارة بالحمل بين السوائل الساخنة والباردة بشكل واضح، حيث يظهر لنا السائل الساخن عند المدخل وكأن درجات حرارته تتوزع في شكل طبقات حرارية عند التماس مع السائل البارد. كما يمكن ملاحظة أن هذه الطبقات تنشأ تدريجياً وتزداد سمكاً مع مرور الوقت. حيث يُمكننا تحديد الوقت الذي تستغرقه هذه الطبقات لتتكون بدقة، وذلك من خلال متابعة تطور درجة الحرارة

في النقاط المختلفة داخل المبادل الحراري. هذه الطبقات الحرارية تمثل عنصرًا مهمًا لفهم ديناميكيات التبادل الحراري وفعالية الأداء الحراري للمبادل الحراري.

من ناحية أخرى بما أن الجدار الخارجي للأنبوب الخارجي معزول حراريًا (Adiabatic)، فإننا لا نلاحظ أي تبادل حراري مع الوسط المحيط. حيث هذا العزل يمنع فقدان الحرارة إلى البيئة الخارجية، مما يساهم في تعزيز كفاءة عملية تبادل الحرارة داخل النظام، وبالتالي تحسين الأداء العام للمبادل.

يُشير سلوك السائل الساخن عند المدخل إلى وجود تباين في توزيع الحرارة، حيث تظهر بعض المناطق ذات درجات حرارة مرتفعة بالقرب من المدخل، بينما تتناقص درجات الحرارة في المناطق التي تلي المدخل مع تقدم السائل في المبادل. هذا التوزيع غير المتجانس نتيجة لعدة عوامل، مثل الاحتكاك بين السائل وجدران الأنبوب أو انخفاض سرعة التدفق عند المدخل، مما يؤدي إلى تباطؤ في انتقال الحرارة في البداية. من المهم دراسة تأثير هذه العوامل عند تصميم المبخرات والمبادلات الحرارية لتطوير تقنيات جديدة تهدف إلى تحسين كفاءتها.



الشكل (1.6) توزيع درجات الحرارة عبر المقاطع العرضية التي تم أخذها في ثلاث نقاط مختلفة على طول المبادل الحراري

3. العوامل المؤثرة في عملية التحويل الحراري

من خلال تتبع التغيرات في انتقال الحرارة بين السوائل داخل المبادل الحراري، لاحظنا أن معدل تبادل الحرارة أعلى في القسم المنحني مقارنة بالقسم المستقيم. ويرجع ذلك إلى أن السائل النانوي الساخن داخل الأنبوب الداخلي يفقد جزءًا كبيرًا من حرارته أثناء مروره في المسار المنحني. هناك عدة عوامل تسهم في حدوث هذه الظاهرة.

1.3. اتجاه التدفق وتوزيع السائل:

عندما يتدفق السائل داخل المبادلات الحرارية، يتأثر اتجاه التدفق بشكل كبير بتصميم الأنابيب والانعطافات. وجود قسم منحني في مسار السائل يؤدي إلى زيادة اضطراب التدفق (Turbulence)، مما يزيد من عملية الخلط الجيد للسائل كما يمكن للزاوية المناسبة للانحناء أن تعزز اتجاه التدفق بشكل فعال، مما يساعد في توزيع السائل بشكل أفضل وتقليل الفجوات الحرارية بين السوائل. وهذا يؤدي إلى تحسين توزيع الحرارة وبالتالي زيادة كفاءة انتقال الحرارة.

2.3. قوة الجاذبية:

تلعب قوة الجاذبية دورًا مهمًا في توزيع السوائل داخل المبادل الحراري. وهذا يعني أنه يجب أخذها بعين الاعتبار في تصميم وترتيب المبادل الحراري، خصوصًا عندما يكون التصميم على هيئة حرف U أو عند استخدام الشكل المقلوب منه، فإن الانحناءات في التصميم تخلق دوامات أو تيارات دوارة في السائل، مما يزيد من حركة السائل داخل المبادل الحراري، كما تم تأكيده في نتائج سابقة. تأثير هذه الدوامات الذي يمكن أن يُحسن من انتقال الحرارة داخل المبادل الحراري، لأنها

✓ تحسن توزيع السائل

✓ تزيد من تبادل الحرارة بين السوائل والأسطح الداخلية للمبادل.

✓ يمكن أن تقلل من تكون الطبقات السطحية الراكدة التي تُقلل من كفاءة تبادل الحرارة.

لذلك، فإن تصميم المبادل الحراري بشكل مقلوب على هيئة حرف U يمكن أن يكون مفيدًا في تحسين أدائه وزيادة كفاءته في نقل الحرارة، خاصة في التطبيقات التي تتطلب نقل حرارة فعال وتوزيع متجانس للسوائل، وهو ما يتماشى مع بعض النتائج التجريبية (ALbayati et al., 2022).

4. تحقيق توازن بين الموصلية الحرارية والزوجة عند النسب العالية من الجسيمات النانوية

بالرغم من التحسينات النظرية التي تقدمها لنا السوائل النانوية في زيادة التوصيل الحراري بسبب زيادة تراكيز الجسيمات النانوية إلا أن تطبيقها على نطاق واسع يواجه عقبات وتحديات كبيرة. وتتمثل هذه التحديات والعراقيل في زيادة اللزوجة التي هي الأخرى تزداد مع زيادة تركيز الجسيمات النانوية في السائل التي تسبب مقاومة لتدفق السوائل وزيادة الاحتكاك داخل الأنابيب، مما يؤدي إلى زيادة فقدان الطاقة. ومع ذلك، يتسبب الحاجة إلى ضغط أعلى لتحريك السائل النانوي في استهلاك إضافي للطاقة وتقليل كفاءة الأنظمة. بالإضافة إلى ذلك، قد تؤدي الجسيمات النانوية إلى انسداد أو تراكم داخل الأنابيب مما يؤثر على أداء الأنظمة على المدى الطويل. وللتغلب على هذه التحديات التي توجهنا وتقليل تأثيرها، تحتاج التطبيقات إلى تحسينات تقنية وتصميمية لتقليل الآثار السلبية لهذه العراقيل وكما نحتاج إلى البحث عن تحقيق التوازن الفعال بين الموصلية الحرارية واللزوجة من خلال النسب تراكيز الجسيمات النانوية وهو ما سنعيناه في بحثنا هذا.

تظهر النتائج التي حصلنا عليها الشكل (2.6)، الشكل (3.6). أنه عند تركيز حجمي للجسيمات النانوية قدره 2.5%، تكون التوصيلية الحرارية أعلى بنسبة 14.93% من قيمة السائل الأساسي عند 323 كلفن. بينما تزداد لزوجة السوائل النانوية بنسبة 6.53% عند تركيز 5%، تزداد قيمة التوصيلية الحرارية بنسبة 28.25%. وعند تركيز 7.5%، تزداد لزوجة السوائل النانوية بنسبة 13.68%، بينما تزداد التوصيلية الحرارية بنسبة 39.39%. وعند تركيز 10%، تزداد قيمة التوصيلية الحرارية بنسبة 50%، بينما تزداد لزوجة السوائل النانوية بنسبة 30.13%.

من خلال تحليلنا لهذه النتائج نلاحظ

❖ تحسينًا كبيرًا في التوصيلية الحرارية مع زيادة تركيز الجسيمات النانوية ولكن في نفس الوقت،

اللزوجة تزداد بشكل ملحوظ

❖ عند زيادة نسبة التراكيز من 5% إلى 7.5% كانت نسبة زيادة التحسن في الموصلية الحرارية

11.14%. بالمقابل كانت نسبة زيادة لزوجة السوائل النانوية بنسبة 7.15%.

❖ عند زيادة نسبة التراكيز من 7.5% إلى 10% كانت نسبة زيادة التحسن في الموصلية الحرارية

10.61%. بالمقابل كانت نسبة زيادة لزوجة السوائل النانوية بنسبة 16.45%.

يُعتبر زيادة التبادل الحراري والتوصيلية الحرارية من المزايا الكبيرة للعديد من التطبيقات مثل التبريد وتبادل الحرارة. ومع ذلك، قد يؤدي زيادة تركيز الجسيمات النانوية إلى زيادة كبيرة في اللزوجة، وهو ما قد يسبب

لنا مشكلات مثل الترسبات أو زيادة مقاومة التدفق. كما يمكن أن يكون هذا التأثير مشكلة خاصة في التطبيقات التي تتطلب ان يكون تدفق السائل سلس. لذلك، يجب السعي لتحقيق توازن أمثل بين زيادة التوصيلية الحرارية وتقليل الآثار السلبية مثل زيادة اللزوجة. وهذا يعني أنه يجب تحديد التركيز الأقصى المناسب للجسيمات النانوية الصلبة في السائل بناءً على متطلبات التطبيق وظروف التشغيل المحددة.

من الملاحظ أنه بالنسبة لتركيزات الحجم العالية، هناك توازن بين الزيادة الطفيفة في التوصيلية الحرارية التي تكون مفيدة (تعزيز تبادل الحرارة) والزيادة الكبيرة في اللزوجة التي تكون ضارة تسبب لنا الترسبات والتراكمات. في العديد من الحالات، يكون تركيز الجسيمات النانوية القريب من 10% من حجم السائل هو القيمة التي يمكن أن توفر لنا الفوائد المرجوة دون تأثير سلبي كبير على اللزوجة والتدفق. هذه العلاقة مرتبطة أيضًا بحجم الجسيمات النانوية (Azmi et al., 2013; Batchelor, 1977). علاوة على ذلك، فإن عوامل مثل

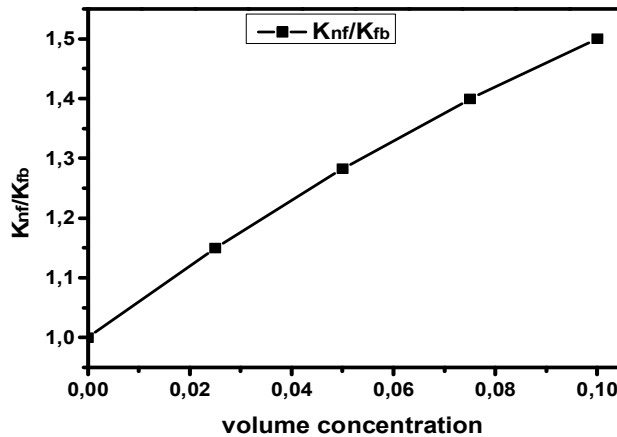
✓ تكلفة الإنتاج وارتفاع أسعار المواد النانوية.

✓ الاستدامة التي تتطلب البحث في المواد النانوية ذات التأثير البيئي المنخفض لتحقيق استدامة طويلة.

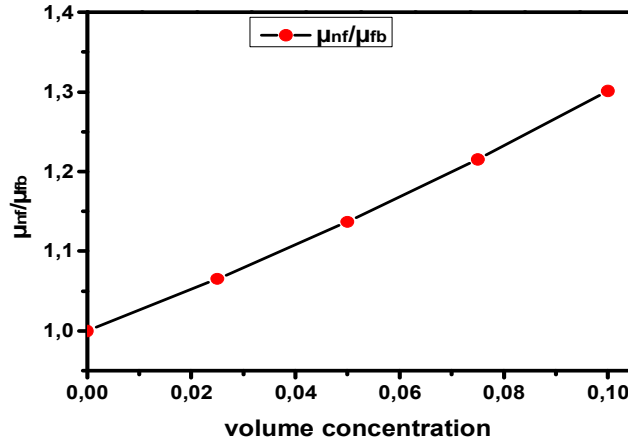
✓ توفر المواد النانوية في السوق

✓ السلامة التي تتطلب إجراءات أمان صارمة في التعامل مع هذه المواد

تؤخذ أيضًا بعين الاعتبار عند اتخاذ القرار بشأن تركيز الجسيمات النانوية. لذلك، يجب تحقيق توازن بين الفوائد المحتملة والتحديات المرتبطة باستخدام تكنولوجيا الجسيمات النانوية في السوائل.

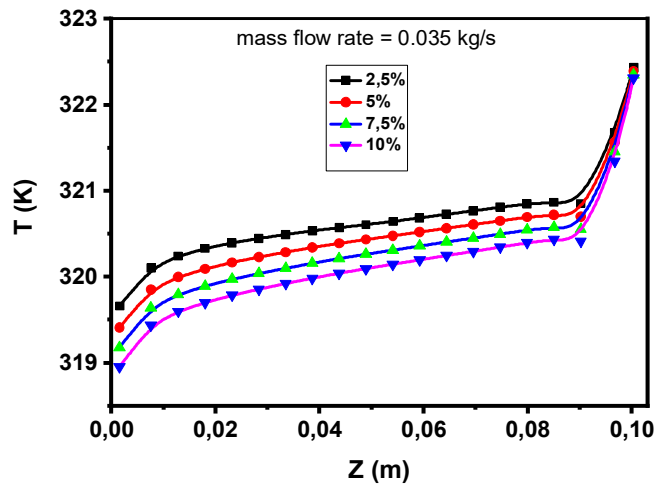


الشكل (2.6). تغير النسبة K_{nf}/K_{bf} مع تركيزات الحجم

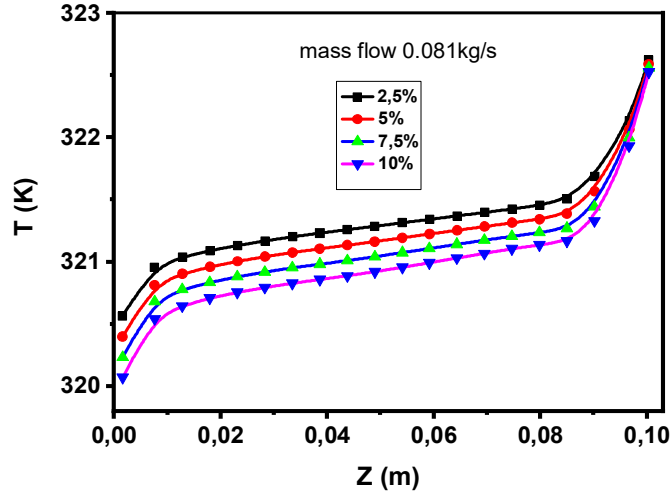


الشكل (3.6). تغير اللزوجة مع تركيزات الحجم

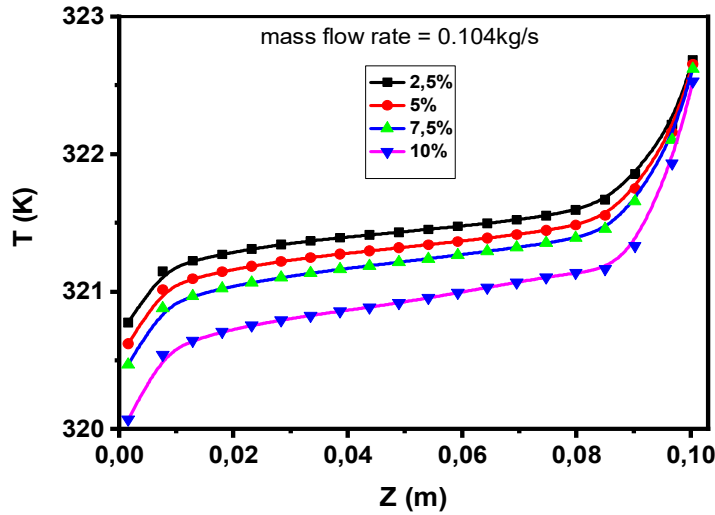
الشكل (4.6) والشكل (5.6) والشكل (6.6) توضح تغير درجة الحرارة في السائل النانوي المتداول داخل الأنبوب الداخلي لعدة تركيزات حجمية مختلفة من الجسيمات النانوية وقيم مختلفة من معدل التدفق الكتلي. حيث تظهر لنا الأشكال تأثير زيادة تركيز الجسيمات النانوية في خليط السائل النانوي، وكذلك تأثير اعتماد الخصائص الحرارية والفيزيائية على التغير المحلي في درجة الحرارة على طول الأنبوب، وذلك لعدد رينولدز مختلف، أي في اتجاه التدفق.



الشكل (4.6). تأثير التركيز الحجمية والخصائص الحرارية الفيزيائية المتغيرة على المتوسط الطولي لدرجة حرارة الجدار عند معدل تدفق الكتلة 0.035kg/s



الشكل (5.6). تأثير التركيز الحجمية والخصائص الحرارية الفيزيائية المتغيرة على المتوسط الطولي لدرجة حرارة الجدار عند معدل تدفق الكتلة 0.081kg/s



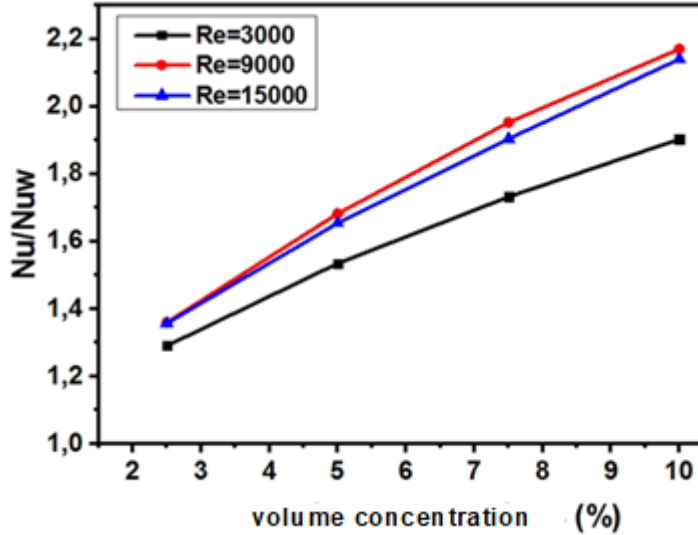
الشكل (6.6). تأثير التركيز الحجمية والخصائص الحرارية الفيزيائية المتغيرة على المتوسط الطولي لدرجة حرارة الجدار عند معدل تدفق الكتلة 0.104kg/s

5. تأثير زيادة تركيز الجسيمات النانوية:

عدد نوسلت يمثل مدى كفاءة انتقال الحرارة في السائل، حيث كلما ارتفع عدد نوسلت، زادت كفاءة نقل الحرارة.

يوضح الشكل (7.6) الذي تحصلنا عليه في دراستنا أن زيادة تركيز الجسيمات النانوية في السائل يؤدي إلى زيادة عدد نوسلت المتوسط مقارنة بالسائل العادي (الماء). هذا يدل على أن الجسيمات النانوية تساعد

في تحسين الكفاءة الحرارية للسائل عن طريق تحسين التفاعل الحراري مع الجدران أو زيادة نقل الحرارة عبر السائل. مما يجعل السوائل النانوية أكثر فعالية في نقل الحرارة عند زيادة تركيز الجسيمات النانوية بسبب زيادة التوصيلية الحرارية للجسيمات النانوية



الشكل (7.6). متوسط عدد نوسلت لنسبة السائل النانوي إلى السائل الأساسي لأرقام رينولدز المختلفة مقابل التركيزات الحجمية

6. تأثير عدد رينولدز على انتقال الحرارة:

عدد رينولدز مقياس يُستخدم للتمييز بين نوعين من التدفق:

- التدفق الهادئ الذي يكون سلساً ومنتظماً،
- التدفق الاضطرابي الذي يتميز بالفوضى والدوامية.

كلما كان عدد رينولدز أكبر، زادت فوضوية التدفق، مما يؤدي إلى تحسين نقل الحرارة، حيث يساعد الخلط الأفضل للسائل في توزيع الحرارة بشكل أكثر فعالية. في المقابل، عند وجود تدفق هادئ (أي عدد رينولدز منخفض)، تتكون تدرجات حرارية أكبر داخل السائل، مما يقلل من كفاءة انتقال الحرارة.

نلاحظ أن السائل النانوي مع التركيز المختلفة للجسيمات النانوية يُظهر تحسناً أكبر في عدد نوسلت عند عدد رينولدز مقارنة بالماء

7. تحسن في عدد نوسلت كنسبة مئوية:

تم ذكر أن هناك تحسناً في عدد نوسلت مع زيادة التركيز الحجمية للجسيمات النانوية، وهذا يعكس تحسناً ملحوظاً في قدرة السائل النانوي على نقل الحرارة مقارنة بالماء.

هذا التحسن يمكن أن يكون ملحوظاً بالنسبة للتركيزات العالية من الجسيمات النانوية. فكلما زاد التركيز، كانت زيادة عدد نوسلت أكبر، مما يشير إلى أن زيادة تركيز الجسيمات النانوية يؤدي إلى تحسين كفاءة الحمل الحراري في السائل.

8. الخلاصة :

- أظهرت النتائج أن السوائل النانوية تساهم بشكل كبير في تحسين التوصيلية الحرارية مع زيادة التركيز الجسيمات النانوية. ومع ذلك، يصاحب هذا التحسن زيادة في اللزوجة، مما يفرض علينا تحدياً في تحقيق توازن مناسب بين التوصيلية الحرارية واللزوجة. لذلك، يتطلب منا ضبط هذه العوامل أمراً ضرورياً لتحقيق أداء مثالي
- أظهرت النتائج ان هناك تقنيات أخرى لزيادة التوصيلية الحرارية مع عدم الزيادة في اللزوجة من خلال تصميم الانظمة الهندسية وهذا لتحقيق أفضل أداء فالتصميم المبادل الحراري بشكل مقلوب على هيئة حرف U يمكن أن يكون مفيداً في تحسين أدائه وزيادة كفاءته في نقل الحرارة، بالمقارنة لما يكون على هيئة حرف U.

الخاتمة

تناول هذا البحث التجربة العددية للتوصيل القسري للسوائل النانوية من نوع الماء- Al_2O_3 كسائل ساخن والماء كسائل بارد في مبادل حراري أنبوبي صغير على شكل حرف U لتعزيز كفاءة نقل الحرارة. أظهرت لنا النتائج العددية التي حصلنا عليها تحسناً ملحوظاً في معامل نقل الحرارة عند إضافة الجسيمات النانوية. مقارنة هذه النتائج الرقمية بتلك الموجودة في الأدبيات العلمية كانت مرضية وتشجع على توسيع نطاق هذه المحاكاة من خلال تغيير بعض المعلمات الرئيسية مثل نوع الجسيمات النانوية المضافة الى السائل الأساسي أو تركيز الجسيمات أو حجم الجسيمات النانوية إلى نطاق واسع.

بالإضافة إلى ذلك، تظهر النتائج أن التصميم للمبادل الحراري على شكل حرف U له تأثير قوي في تعزيز أداء المبادل بسبب تأثير الانحناء والتوزيع السلس للسائل داخل الأنابيب، من بين عدة عوامل أخرى. وهذا ما يجعله خيارًا شائعًا في العديد من التطبيقات الصناعية والتجارية.

من خلال المنحنيات التي حصلنا نستنتج بأن وجود الجسيمات النانوية في السائل الأساسي (الماء النقي) يزيد بشكل كبير من معامل نقل الحرارة بالحمل الحراري وعدد نوسلت. يمكن تفسير هذا الزيادة من خلال الخصائص الحرارية الفيزيائية للجسيمات النانوية، وحركتها البراونية، وزيادة سطح التبادل بينها وبين السائل الأساسي. كما أن الزيادة في رقم رينولدز (زيادة معدل تدفق الكتلة للسائل النانوي) يسمح بوجود تدرج حراري أكبر في السائل النانوي. كما أن زيادة التركيز الحجمي يزيد من سطح التبادل بين الجسيمات النانوية والسائل الأساسي وبالتالي يسمح بزيادة التدرج الحراري في السائل النانوي.

الخاتمة والتوصيات

الخاتمة والتوصيات

من خلال هذه الأطروحة التي تناولت دراستين مهمتين تتعلقان الدراسة الأولى بكيفية اعداد الجسيمات النانوية وبينما تتعلق الدراسة الثانية بدراسة الحمل الحراري القسري في مبادل حراري مكون من أنبوبين متوازيين متحدين مركزيًا على شكل U. حاولنا قدر الإمكان الاطلاع بكل جوانب الموضوع، لتحقيق الأهداف المرجوة والمسطرة.

❖ في الدراسة الاولى

تم استخدام الطحن الميكانيكي عالي الطاقة بنجاح من اجل الحصول على جزيئات نانوية من أكسيد النحاس (CuO) والنحاس (Cu)، مما يثبت فعالية هذه الطريقة للحصول على الجزيئات النانوية. كما تبرز الدراسة أهمية تحسين عوامل الطحن مثل

- ✓ وقت الطحن الذي يعد عاملاً أساسياً في تحديد حجم الجسيمات
- ✓ مدة التوقف حيث تساعد الفترات المناسبة من التوقف في تقليل تراكم الحرارة وتحسين التحكم في حجم الجزيئات النانوية الناتجة
- ✓ سرعة الدوران التي تلعب دوراً حاسماً في تحديد مقدار الطاقة الميكانيكية الموجهة إلى المادة الخام
- ✓ نسبة الكرات إلى المادة من اجل التحكم في حجم الجزيئات حيث تساهم النسبة المثلى في تعزيز كفاءة الطحن

❖ في الدراسة الثانية

تم دراسة وتحليل انتقال الحرارة في مبادل حراري يتكون من أنبوبين متحدين مركزيًا على شكل حرف U في ظروف مستقرة باستخدام سائل نانوي يتكون من الماء كسائل أساسي وجسيمات أكسيد الألومنيوم (Al_2O_3) كجسيمات نانوية. يتدفق السائل النانوي عبر الأنبوب الداخلي، بينما يتدفق الماء عبر الأنبوب الخارجي. حيث استخدمنا هذا النوع من المبادلات الحرارية لاستكشاف وتحليل تأثير إضافة الجسيمات النانوية في السائل الأساسي على انتقال الحرارة وكذلك كفاءة المبادل الحراري في تطبيقات الأنظمة الهندسية.

طريقة المحاكاة:

1. تصميم الشبكة: قمنا بتكوين شبكة الحساب باستخدام برنامج Design Modeler (DM) ، حيث تم تقسيم المنطقة الحسابية إلى شبكة من الخلايا الصغيرة التي تسمح لنا بالحصول على نتائج دقيقة وتحسين النتائج الحسابية وضمان التمثيل الجيد للظروف الفيزيائية داخل المبادل الحراري.
2. النمذجة العددية: استخدمنا برنامج ANSYS Fluent ، وهو أداة معروفة في مجال المحاكاة العددية، لحل المعادلات الحاكمة التي تصف لنا تدفق المائع المضطرب داخل المبادل الحراري اعتمدنا في هذه الدراسة على طريقة الحجوم المنتهية من أجل تمثيل المعادلات بطريقة عددية. حيث في هذه الطريقة يتم تقسيم المجال الحسابي إلى خلايا صغيرة تُعرف بالحجوم المنتهية، حيث تُطبق المعادلات الفيزيائية على كل خلية بشكل مستقل. وبعد ذلك يتم حل النظام العددي لاستخراج القيم المطلوبة لمختلف المتغيرات، مثل السرعة ودرجة الحرارة، عبر جميع الخلايا في المجال المحسوب
3. نمذجة الاضطرابات: قمنا باستخدام نموذج $k-\epsilon$ RANS حيث يعتمد هذا النموذج على معادلتين تفاضليتين لحساب الطاقة الحركية للاضطراب (k) ومعامل التبدد (ϵ) الذي يصف لنا كيفية تحويل الطاقة الحركية إلى حرارة داخل السائل.
4. معاملات الدراسة:
 - عدد رينولدز: تم دراسة تأثير عدد رينولدز على تدفق المائع في المبادل الحراري. حيث تم تغيير هذا العدد ليتناسب مع قيم معدلات التدفق الكتلي التالية:

$$(0.104, 0.081, 0.058, 0.035) \text{ Kg/s}$$

- نسبة حجم الجسيمات النانوية: تم دراسة تأثير إضافة الجسيمات النانوية لأكسيد الألمنيوم (Al_2O_3) في سائل (الماء) على أداء المبادل الحراري. حيث تم أخذ أربع قيم لنسبة حجم الجسيمات النانوية وهي: (2.5%، 5%، 7.5%، 10%).

النتائج المتوصل إليها:

1. فعالية طريقة استخدام الطحن الميكانيكي تحت ظروف وشروط معينة للحصول على الجزيئات النانوية
2. اظهرت لنا النتائج أن التعديل الدقيق لظروف الطحن يؤدي إلى تحسين الأداء وضمان الحفاظ على خصائص الجزيئات.

3. تحسين معامل انتقال الحرارة حيث أظهرت لنا النتائج أن إضافة الجسيمات النانوية إلى الماء يزيد بشكل كبير في معامل انتقال الحرارة في المبادل الحراري. حيث التفاعل بين الجسيمات النانوية والسائل يؤدي إلى زيادة في التوصيل الحراري.

4. تأثير نسبة حجم الجسيمات النانوية حيث أظهرت لنا النتائج أن إضافة الجسيمات النانوية بنسبة 5% أو أكثر يؤدي إلى تحسن كبير في كفاءة انتقال الحرارة مقارنةً بالماء النقي. الزيادة في عدد الجسيمات النانوية يؤدي إلى زيادة التوصيل الحراري للسائل وبالتالي تحسين الأداء العام للمبادل الحراري.

5. تأثير عدد رينولدز حيث أظهرت لنا النتائج أن زيادة عدد رينولدز (بزيادة تدفق المائع) يزيد ويحسن أيضًا من انتقال الحرارة. حيث أن التدفق المضطرب الذي يحدث عند قيم عالية من عدد رينولدز، يساهم في تحسين عملية خلط السائل وزيادة التفاعل بين الجسيمات النانوية والوسط المحيط مما يؤدي إلى تحسين الأداء الحراري.

6. أهمية مبادلات الحرارة ذات الشكل U حيث تتمتع بالعديد من المزايا والفوائد التي تجعلها خيارًا مفضلًا في العديد من التطبيقات الصناعية. ومن بين هذه الفوائد:

1. تحسين توزيع التدفق: يساهم الشكل الهندسي في ضمان تدفق متوازن وموزع بشكل أفضل. هذا يؤدي إلى توزيع تدفق ليكون أكثر تجانسًا، مما يُحسن الكفاءة الحرارية ويقلل من الإجهادات التي قد تؤثر على أداء النظام. كما يساهم ذلك في منع عملية التآكل والتلوث داخل النظام، مما يعزز استقرار النظام ويطيل عمره التشغيلي.

2. تقليل فقدان الضغط: التصميم التي تحتوي على انحناءات مثل الأنابيب على شكل U تساعدنا في تقليل فقدان الضغط مقارنةً بالتصاميم الأخرى، مما يحسن من كفاءة النظام بشكل عام ويقلل من استهلاك الطاقة.

3. أداء موثوق حيث توفر مبادلات الحرارة ذات الشكل U أداءً موثوقًا وعالي الكفاءة في تبادل الحرارة، مما يجعلها شائعة في العديد من التطبيقات الصناعية والتجارية مثل أنظمة التدفئة والتبريد، والأجهزة الإلكترونية، وأنظمة الطاقة المتجددة.

الاستنتاجات:

1. إضافة الجسيمات النانوية إلى السائل المائي يُحسن بشكل كبير من انتقال الحرارة في المبادل الحراري خاصة في الأنابيب ذات التدفق المضطرب.
2. عدد رينولدز المرتفع يساعد في تحسين أداء المبادل من خلال زيادة تدفق المائع.

3. مبادلات الحرارة على شكل U تتمتع بمزايا كبيرة تشمل تحسين توزيع التدفق وتقليل فقدان الضغط، مما يجعلها خيارًا مثاليًا في العديد من التطبيقات الهندسية والصناعية.

التوصيات:

1. تحسين شروط الطحن يُوصى بمواصلة البحث في تأثير عوامل وظروف الطحن المختلفة على الشكل والتركيب السطحي للجزيئات النانوية
2. دراسة تقنيات تبريد متقدمة أو تعديل أوقات التوقف لمنع ارتفاع درجة الحرارة الزائدة، خاصة للمواد المعرضة للتأكسد أو التدهور الهيكلي عند درجات حرارة المرتفعة.
3. دراسة إمكانية توسيع هذه الطريقة لتشمل الإنتاج الصناعي
4. تخصيص شروط معينة للطحن لتلبية احتياجات تطبيقات.
5. يمكن دراسة تأثيرات الجسيمات النانوية الأخرى، مثل نوع الجسيمات أو حجم الجسيمات على أداء المبادل الحراري.
6. من الممكن تحسين تصميم الشبكة الحسابية للحصول على نتائج أكثر دقة في دراسة تدفق الموائع في المبدلات الحرارية.
7. توسيع الدراسة لتشمل معدلات تدفق أكبر أو تصاميم مختلفة للمبادلات الحرارية سيكون مفيدًا في تطبيقات صناعية محددة.

المراجع

المراجع

1. Sharma, A. K., Melikhov, R. G., et al. (2017). Classification of nanomaterials: A review. *International Journal of Nanoscience*.
2. Biesalski, P. M., Cote, D. J., et al. (2019). Nanomaterial classification: Principles and challenges. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*.
3. Jafarzadeh, N. A., Sharif, F. A., et al. (2020). Nanomaterials classification by size, shape, and functional properties. *Journal of Materials Science*.
4. Sharma, G. R., Nagarajan, R. V., et al. (2018). From zero to three dimensions: A comprehensive classification of nanomaterials. *Nanotechnology*.
5. Patel, V. V., & Borthakur, M. R. (2017). A study on the classification of nanomaterials based on dimensionality. *International Journal of Nanotechnology*.
6. Omar, M. S., Shalini, N. G., et al. (2019). Nanomaterials classification and functionalization: A review. *Materials Science and Engineering: R: Reports*.
7. Gupta, S. K., Kumar, H., et al. (2020). Dimensional classification of nanomaterials: Impact on their properties and applications. *Journal of Nanotechnology*.
8. Choudhury, A., & Ghosh, D. P. (2018). A review on the dimensional classification of nanomaterials. *Journal of Materials Chemistry*.
9. Espinoza, P. L. H., Ashford, D. L., et al. (2018). Classification and properties of nanomaterials. *Nanomaterials*.
10. Singh, R. H., & Modi, A. G. (2017). Exploring the classification and synthesis of nanomaterials. *Science and Technology of Advanced Materials*.
11. Zhao, X., et al. (2003). Mechanochemical synthesis of nanoparticles. *Materials Science and Engineering A*.
12. Murphy, C. J., et al. (2005). Nanoparticle Production by Laser Ablation. *Journal of Applied Physics*.
13. Cheng, S., et al. (2007). Vapor Deposition Techniques for Nanomaterials. *Journal of Materials Science*.
14. Whitesides, G. M., et al. (2002). Self-Assembly of Nanostructures. *Science*.
15. Ritala, M., et al. (2002). Chemical Vapor Deposition of Nanostructures. *Journal of Vacuum Science & Technology*.
16. Bishop, M., et al. (2004). Electrochemical Deposition of Nanostructures. *Journal of Materials Chemistry*.
17. Brinker, C. J., & Scherer, G. W. (1990). "Sol-Gel Science and Technology". Academic Press.
18. Nair, R., et al. (2007). Biosynthesis of Nanoparticles Using Microorganisms. *Nanotechnology*.
19. Matsui, M., et al. (2004). X-ray Lithography for Nanostructure Fabrication. *Journal of Vacuum Science & Technology*.
20. Baskar, R., et al. (2019). Nanomedicine in Cancer Therapy. *Frontiers in Pharmacology*.
21. Chen, Y., et al. (2018). Applications of Nanomaterials in Imaging. *Nanomedicine: Nanotechnology, Biology, and Medicine*.

22. Ranjan, P., et al. (2020). Nanoparticle-based Targeted Drug Delivery in Cancer Therapy. *Journal of Controlled Release*.
23. Dai, H. (2002). Carbon Nanotubes: Synthesis, Integration, and Properties. *Acc. Chem. Res.*
24. Zhao, X., et al. (2016). Recent Advances in Nanomaterials for Supercapacitors. *Nano Energy*.
25. Liu, J., et al. (2013). Nanomaterials for Water Purification: A Review. *Nanotechnology*.
26. Gao, L., et al. (2016). Nanomaterials for Photovoltaics: New Opportunities and Challenges. *Materials Science and Engineering*.
27. Kumar, S., et al. (2016). Nanocomposites: Synthesis, Properties, and Applications. *Journal of Materials Science*.
28. Choi, S. U. S., & Eastman, J. A. (1995). Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. *Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, San Francisco, CA*
29. Das, S. K., Choi, S. U. S., Yu, W., & Pradeep, T. (2007). *Nanofluids: Science and Technology*. Wiley-Interscience. ISBN: 978-0-470-07473-2
30. Xuan, Y., & Li, Q. (2000). Heat transfer enhancement of nanofluids. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 21(1), 58–64. doi:10.1016/s0142-727x(99)00067-3.
31. Eastman, J.A., et al. (2001). Enhanced thermal conductivity through the development of nanofluids. *Applied Physics Letters*.
32. Das, S.K., et al. (2003). Temperature dependence of thermal conductivity enhancement for nanofluids. *Journal of Heat Transfer*.
33. Wang, X., et al. (2005). Thermal conductivity of nanoparticle–fluid mixture. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*.
34. F. Hachichi, Étude du transfert thermique dans les milieux confinés ou semi-confinés soumis à des conditions aux limites variables, Ph.D. thesis, (2024).
35. Alosious, S., R, S. S., Nair, A. R., & Krishnakumar, K. (2017). Experimental and numerical study on heat transfer enhancement of flat tube radiator using Al₂O₃ and CuO nanofluids. *Heat and Mass Transfer*, 53(12), 3545–3563. doi:10.1007/s00231-017-2061-0.
36. Senthilraja, S., Vijayakumar, K., & Gangadevi, R. (2015). A comparative study on thermal conductivity of Al₂O₃/water, CuO/water and Al₂O₃–CuO/water nanofluids. *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures*, 10(4), 1449–1458
37. Kakac, S., & Pramuanjaroenkij, A. (2010). Review of convective heat transfer enhancement with nanofluids. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 52(13-14), 3187-3196. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.02.006
38. Saidur, R., Leong, K. Y., & Mohammad, H. A. (2011). A review on applications and challenges of nanofluids. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(3), 1646–1668. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.11.035>
39. Wang, X. Q., & Mujumdar, A. S. (2007). Heat transfer characteristics of nanofluids: a review. *International Journal of Thermal Sciences*, 46(1), 1-19. DOI: 10.1016/j.ijthermalsci.2006.06.010
40. Gupta, P., & Singh, R. (2023). Graphene Nanofluids for Industrial Lubrication. *Industrial Engineering Chemistry*.

41. Sundar, L. S., et al. (2013). Experimental thermal conductivity and viscosity of magnetic nanofluids containing Fe₃O₄ nanoparticles. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 49, 17-24. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2013.08.025
42. Teng, T. P., et al. (2018). Performance evaluation on an air-cooled heat exchanger with nanofluid. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 127, 396-404. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.07.040
43. Ghadimi, A., et al. (2011). Nanofluid in automotive cooling systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(6), 2664-2670. DOI: 10.1016/j.rser.2011.02.005
44. Gupta, M., et al. (2017). Application of nanofluids in automotive systems: A review of recent developments. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, 9(1), 014001. DOI: 10.1115/1.4034976
45. Taylor, R. A., et al. (2013). Small particles, big impacts: A review of the diverse applications of nanofluids. *Journal of Applied Physics*, 113(1), 011301. DOI: 10.1063/1.4754271
46. El-Leathy, A. M., et al. (2021). Performance enhancement of solar water heating systems using nanofluids: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 137, 110586. DOI: 10.1016/j.rser.2020.110586
47. Smith, R., et al. (2023). Solar Energy Optimization Using TiO₂ Nanofluids. *Renewable Energy Research*.
48. He, Y., et al. (2019). Nanofluids for nuclear reactor applications: A review. *Progress in Nuclear Energy*, 111, 109-126. DOI: 10.1016/j.pnucene.2018.10.015
49. Mahian, O., et al. (2018). "Recent advances in modeling and simulation of nanofluid flows—Part I: Fundamentals and theory." *Physics Reports*, 790, 1-48. DOI: 10.1016/j.physrep.2018.10.004
50. Kumar, A., et al. (2019). "Nan
51. Bañobre-López, M., Teijeiro, A., & Rivas, J. (2013). Magnetic nanoparticle-based hyperthermia for cancer treatment. *Reports of Practical Oncology & Radiotherapy*, 18(6), 397–400. doi: 10.1016/j.rpor.2013.09.011
52. Zhang, L., & Wang, Y. (2022). "Gold Nanoparticles in Targeted Cancer Therapy." *Nanomedicine Review*.
53. G. Di Lorenzo, D. G. Romano, A. Carozza, and A. Pagano, Nanofluids as coolants to improve the thermal management system of a high-power aircraft electric motor, *Electronics* 14, 911 (2025). <https://doi.org/10.3390/electronics14050911>.
54. Chen, X., et al. (2023). Advancements in Lithium-Ion Batteries Using Nanofluids. *Energy Storage Journal*
55. Abdelkader, A., et al. (2020). Nanomaterials in Paints and Coatings: An Overview. *Coatings*
56. LEKMINE Farid 2021 thèse Etude de l'efficacité inhibitrice des composés cycliques soufrés dans des milieux acides sur des dépôts composites élaborés par voie électrolytique
57. Ahuja, A. S. J. J. o. A. P. (1975). Augmentation of heat transport in laminar flow of polystyrene suspensions. II. Analysis of the data. 46(8), 3417-3425.
58. ALbayati, M. F., Khalefa, R. A. J. N. J. o. E., & Technology. (2022). The Performance of the U Shape Double pipe heat exchanger under effect of using Active Techniques. 1(3).

59. Azmi, W., Sharma, K., Mamat, R., Anuar, S. J. J. o. M. E., & Sciences. (2013). Nanofluid properties for forced convection heat transfer: An overview. 4, 397-408.
60. Batchelor, G. K. J. J. o. f. m. (1977). The effect of Brownian motion on the bulk stress in a suspension of spherical particles. 83(1), 97-117.
61. Behzadmehr, A., Saffar-Avval, M., Galanis, N. J. I. j. o. h., & flow, f. (2007). Prediction of turbulent forced convection of a nanofluid in a tube with uniform heat flux using a two phase approach. 28(2), 211-219.
62. Brinkman, H. C. J. T. J. o. c. p. (1952). The viscosity of concentrated suspensions and solutions. 20(4), 571-571.
63. Choi, H.-K., & Lim, Y.-S. J. J. o. C. f. I. T. (2019). Numerical study of mixed convection nanofluid in horizontal tube. 9(8), 155-163.
64. Ding, Y., & Wen, D. J. P. T. (2005). Particle migration in a flow of nanoparticle suspensions. 149(2-3), 84-92.
65. Einstein, A. J. A. P. (1911). Eine neue bestimmung der molekuldimensionen. 34, 591-592.
66. El-Shaarawi, M., Alkam, M. J. I. j. o. h., & transfer, m. (1992). Transient forced convection in the entrance region of concentric annuli. 35(12), 3335-3344.
67. Gupta, S., Garg, V. J. C. M. i. A. M., & Engineering. (1981). Developing flow in a concentric annulus. 28(1), 27-35.
68. Ho, C., Liu, W., Chang, Y., & Lin, C. J. I. J. o. T. S. (2010). Natural convection heat transfer of alumina-water nanofluid in vertical square enclosures: An experimental study. 49(8), 1345-1353.
69. Keblinski, P., Phillpot, S., Choi, S., Eastman, J. J. I. j. o. h., & transfer, m. (2002). Mechanisms of heat flow in suspensions of nano-sized particles (nanofluids). 45(4), 855-863.
70. Li, C. H., & Peterson, G. J. J. o. A. p. (2006). Experimental investigation of temperature and volume fraction variations on the effective thermal conductivity of nanoparticle suspensions (nanofluids). 99(8).
71. Lim, Y.-S., & Choi, H.-K. J. J. o. C. f. I. T. (2019). Numerical study of forced convection nanofluid in double pipe. 9(12), 147-156.
72. Lu, G., & Wang, J. J. A. T. E. (2008). Experimental investigation on heat transfer characteristics of water flow in a narrow annulus. 28(1), 8-13.
73. Masuda, H., Ebata, A., & Teramae, K. (1993). Alteration of thermal conductivity and viscosity of liquid by dispersing ultra-fine particles. Dispersion of Al_2O_3 , SiO_2 and TiO_2 ultra-fine particles.
74. Minakov, A. V., Guzey, D. V., Lobasov, A. S., Dekterev, D. A., Pryazhnikov, M. I. J. J. o. S. F. U. E., & Technologies. (2014). Experiment-Calculated Investigation of Forced Convection of Alumina Nanofluid in Direct Flow Heat Exchanger. 7(1), 32.
75. Nguyen, C., Desgranges, F., Galanis, N., Roy, G., Maré, T., Boucher, S., & Mintsu, H. A. J. I. j. o. t. s. (2008). Viscosity data for Al_2O_3 -water nanofluid—hysteresis: is heat transfer enhancement using nanofluids reliable? , 47(2), 103-111.
76. Pak, B. C., & Cho, Y. I. J. E. H. T. a. I. J. (1998). Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. 11(2), 151-170.

-
77. Rea, U., McKrell, T., Hu, L.-w., Buongiorno, J. J. I. J. o. H., & Transfer, M. (2009). Laminar convective heat transfer and viscous pressure loss of alumina–water and zirconia–water nanofluids. 52(7-8), 2042-2048.
 78. Vajjha, R. S., Das, D. K., Kulkarni, D. P. J. I. j. o. h., & transfer, m. (2010). Development of new correlations for convective heat transfer and friction factor in turbulent regime for nanofluids. 53(21-22), 4607-4618.
 79. Xuan, Y., Roetzel, W. J. I. J. o. h., & transfer, M. (2000). Conceptions for heat transfer correlation of nanofluids. 43(19), 3701-3707.

