

تقييم أداء محرك ديزل باستخدام سائل تبريد هجين من جسيمات الغرافيت النانوية المشتتة في معلق السيليكا الحيوية

م. ريما بلقيس *

د. علاء صبح **

د. عدنان أحمد ***

المخلص

يهدف هذا البحث إلى تقييم أداء محرك ديزل رباعي الأسطوانات (Ford ZSD- 424) باستخدام سائل تبريد هجين يتكون من جسيمات الغرافيت النانوية المشتتة في معلق السيليكا الحيوية والمستقر بمادة (Triton X-100). تم تحضير ثلاث تراكيز حجمية من السائل الهجين (0.1%، 0.5%، 1%) بنسب متساوية من الغرافيت والسيليكا الحيوية، وأجريت التجارب عند سرعات دوران (4000، 2500، 750) دورة/دقيقة، مع إجراء (3) تكرارات لكل قياس.

النتائج التي حصلنا عليها تظهر أن السائل الهجين ساهم في تحقيق نتائج أفضل مقارنة بالماء المقطر، حيث انخفضت درجة حرارة سائل التبريد بنسبة تصل إلى (20.1%)، وانخفضت انبعاثات أكاسيد النيتروجين (NO_x) بنسبة (31.6%)، وأول أكسيد الكربون (CO) بنسبة (44%)، والهيدروكربونات (HC) بنسبة (40%)، والجسيمات الدقيقة (PM) بنسبة (46.2%)، وعتامة الدخان (Opacity) بنسبة (62%)، كما تحسنت كفاءة استهلاك الوقود بنسبة (16.1%) عند التركيز (1%) وسرعة (4000 دورة/دقيقة) .

يعتبر التركيز (0.5%) هو الأمثل للتطبيقات العملية لتحقيق توازن بين الأداء البيئي والتكلفة الاقتصادية، بينما يحقق التركيز (1%) أقصى تحسين للأداء والانبعاثات. بيئياً، يساهم هذا البحث في خفض الغازات السامة والجسيمات الدقيقة التي تسبب أمراض الجهاز التنفسي والقلب، مع تقليل البصمة الكربونية عبر تحسين كفاءة استهلاك الوقود.

الكلمات المفتاحية: سائل تبريد هجين، غرافيت نانوي، سيليكا حيوية، محرك ديزل، أداء حراري، انبعاثات، Triton X-100.

Performance Evaluation of a Diesel Engine Using a Hybrid Coolant of Graphite Nanoparticles Dispersed in Biosilica Suspension

Abstract

This study aims to evaluate the performance of a four-cylinder diesel engine (Ford ZSD-424) using a hybrid coolant consisting of graphite nanoparticles dispersed in a biosilica suspension and stabilized with (Triton X-100) surfactant. Three volumetric concentrations of the hybrid coolant (0.1%, 0.5%, 1%) with equal ratios of graphite and biosilica were prepared. Experiments were conducted at engine speeds of (750, 2500, and 4000 rpm), with three replicates for each measurement.

The results showed that the hybrid coolant contributed to achieving better results compared to distilled water. Coolant temperature decreased by up to (20.1%), while nitrogen oxides (NO_x) emissions decreased by (31.6%), carbon monoxide (CO) by (44%), unburned hydrocarbons (HC) by 40%, particulate matter (PM) by (46.2%), and smoke opacity by (62%). Fuel consumption improved by (16.1%), at (1%) concentration and (4000 rpm).

The (0.5%) concentration is recommended for practical applications as it offers an optimal balance between environmental performance and economic feasibility, while the (1%) concentration provides maximum performance and emission reduction. From an environmental perspective, this research contributes to reducing toxic gas emissions and particulate matter that cause

respiratory and cardiovascular diseases, while lowering the carbon footprint through improved fuel efficiency.

Keywords: Hybrid coolant, Graphite nanoparticles, Biosilica, Diesel engine, Thermal performance, Emissions, Triton X-100.

1- مقدمة:

في عصر التكنولوجيا الحالي، يعد محرك الديزل هو المصدر الرئيسي لدفع المركبات، لذا فإن دراسة وتحليل أداء هذه المحركات يعتبر أمراً مهماً وله مكانة بارزة للبحث، فقد شهدت محركات الديزل على مدى العقود الماضية تطوراً ملحوظاً في مجالات الكفاءة والأداء والتحكم في الانبعاثات، إلا أنها لا تزال تواجه تحديات كبيرة في إدارة الحرارة الناتجة عن عمليات الاحتراق عالية الضغط. (Iskandar,2012)

تعتبر عملية تشغيل المحرك عند درجات حرارة عالية غير مرغوب فيها، حيث أن المحرك الذي يعمل عند درجات حرارة عالية قد تتشأ فيه صعوبات مثل تبخر زيت التشحيم، والانبعاثات الضارة غير المرغوب فيها، وتغير في الكفاءة والأداء والاختلافات في الخصائص المعدنية لمكوناته وما إلى ذلك، كما يعد نقل الحرارة في محركات الديزل مشكلة خطيرة، حيث أننا نحتاج إلى درجات حرارة عالية لاحتراق الوقود ولكن بالمقابل نحتاج أيضاً إلى الحفاظ على درجة الحرارة عند مستوى يمكن التحكم فيه من أجل تشغيل المحرك بأمان، ولذلك فإنه من الضروري إجراء عملية إزالة للحرارة التي من شأنها الحفاظ على المحرك في حالة التشغيل الآمنة. (Ajay el al,2013)

يلعب نظام التبريد، لهذا السبب، دوراً حاسماً في محركات السيارات لأنها تخدم الغرض المزدوج المتمثل في التبريد والمحافظة على درجة الحرارة اللازمة، حيث يُعد سائل التبريد عنصراً أساسياً في نظام تبريد محركات الاحتراق واختياره يعد أمراً ضرورياً للغاية لأنه قد يؤثر على عمر المحرك الاستثماري ويؤدي إلى آثار سلبية عليه، ويمنع نظام التبريد الفعال ارتفاع درجة حرارة المحرك ويُمكنه من العمل بأقصى كفاءة، فوسائل التبريد المستخدمة على نطاق واسع لمحركات السيارات هي في الأساس جلايكول الإيثيلين والماء، إلا أنه مع تطور مركبات خلايا الوقود عالية الطاقة، أصبحت متطلبات تبديد الحرارة أكبر، فعلى الرغم من أن تقنيات التبريد التقليدية تعمل على تحسين قدرة التبديد للحرارة عن طريق زيادة

سرعة دوران المروحة أو أبعاد الرادياتور، إلا أن الاستهلاك العالي للطاقة ومساحة المحرك المحدودة تمنع تنفيذها، لذلك مع التقدم التكنولوجي الأخير وكذلك الدعوة إلى التخفيض في مجال التلوث كان هناك اهتماماً باكتشاف مبردات أفضل وسوائل تبريد جديدة لتحل محل السوائل التقليدية وبالتالي أصبح تطوير مبرد نانو لمحركات السيارات ضرورياً وقد توجهت الأنظار والدراسات إليه، حيث تعتبر السوائل النانوية المكونة من جسيمات نانوية وسوائل قاعدية بدائل واعدة، حيث تعمل بشكل فعال على تحسين قدرة نقل الحرارة للسائل الأساسي. (Zhang et al, 2017)، (Ravisankar et al, 2018)

فالسوائل النانوية هي سوائل غير تقليدية لنقل الحرارة تعتمد على تعليق وإضافة جزيئات معدنية أو أكاسيد معادن أو مركبات كربون من رتبة النانومتر إلى السوائل التقليدية كالماء المقطر والاثيلين غليكول وغيرها. (Duangthongsuk & Wongwises, 2009)

أظهرت الدراسات السابقة نتائج إيجابية لا يمكن تجاهلها، فقد أظهرت دراسة حديثة عن السوائل النانوية (Hajiakbari et al, 2024) تحسناً كبيراً في انتقال الحرارة بنسبة تراوحت بين (75-128%) عند استخدام سوائل تبريد نانوية في محرك ديزل، كما أعطت دراسة أخرى جواباً واضحاً (Shah et al, 2020)، حيث تم إضافة (0.12%) فقط من السيليكا النانوية إلى ماء التبريد مما حسن انتقال الحرارة بنسبة (36.92%). كما أكدت دراسة حديثة أخرى (Mukherjee et al, 2022) أن إضافة جسيمات السيليكا النانوية إلى سائل تبريد المحرك حسنت الموصلية الحرارية بنسبة (21.08%) عند تركيز (1%)، مما يعزز كفاءة نظام التبريد بشكل ملحوظ.

هذا التحسن له تفسير بسيط يعود لثلاثة أسباب رئيسية وهي الحركة العشوائية للجسيمات، والطبقة السائلة الملتصقة بسطح كل جسيم، والتصادم بين الجسيمات نفسها (Said et al, 2022). وعند دراسة نظرية الموائع في محرك حقيقي، كما سجلت دراسة أخرى (Erika et al, 2022) لتقييم تأثير سائل تبريد نانوي يحتوي جسيمات نانوية من ثاني أكسيد التيتانيوم (TiO_2) بنسبة (0.5%). أن المبرد النانوي المُحضر عزز انتقال الحرارة، كما لاحظوا أنه أدى إلى انخفاض في نسب انبعاث أكاسيد النيتروجين (NO_x) والجسيمات الدقيقة (PM) والهيدروكربونات (HC)، إضافة إلى انبعاثات أول أكسيد الكربون (CO). كما قُدمت مراجعة شاملة لمختلف تطبيقات السوائل النانوية في محركات الاحتراق الداخلي (Bhattad et al, 2023)، مؤكدة على الإمكانيات المستقبلية لهذه التقنية في تحسين الأداء الحراري، وفي دراسة أخرى (Karagoz et al, 2022) تم دراسة تأثير إضافة (Al_2O_3) النانوية إلى

مبرد محرك الاحتراق الداخلي على أداء انتقال الحرارة، حيث أظهرت النتائج التي حصلنا عليها أن إضافة الجسيمات النانوية إلى ماء التبريد كان له دوراً كبيراً في تحسين أداء نقل الحرارة، وفي دراسة أخرى قام (Hassaan,2024) بدراسة لاختبار السوائل النانوية الهجينة كسائل عامل بديل للسوائل التقليدية. تم اختبار السائل النانوي (MWCNT-Al₂O₃/الماء) بتركيز حجمية مختلفة باستخدام نسبة خلط (50:50)، فأظهرت النتائج أن معامل انتقال الحرارة بالحمل الحراري ازداد بنسبة (28.5%) مقارنةً بالماء المقطر، كما لوحظت زيادة في انخفاض الضغط تصل إلى (24%) مقارنةً بالسائل العادي. لهذا السبب، تأتي أهمية دراستنا التجريبية لتقييم الأداء الحقيقي لمحرك ديزل عند استخدام سائل التبريد المحسن بجسيمات (السيليكا/الغرافيت) النانوية تحت ظروف تشغيل مختلفة.

2- أهمية البحث وأهدافه:

تكمن أهمية البحث من خلال الدور الذي ستلعبه الجسيمات النانوية (سيليكا-غرافيت) التي سيتم إضافتها في دارة التبريد وتأثيراتها الحرارية وانعكاس ذلك على زيادة فعالية التبريد والتبادل الحراري لتحسين أداء المحرك في ظل الظروف القاسية التي يتعرض لها أثناء فترة الاستثمار، وتقليل استهلاك الوقود، والمساهمة في خفض الانبعاثات الملوثة والالتزام بالمعايير البيئية، توفير حلول عملية لتحسين أداء أنظمة التبريد في التطبيقات الصناعية وتقليل عمليات الإصلاح. كما يقوم البحث على تقييم تأثير التراكيز المختلفة (0.1%، 0.5%، 1%) من الجسيمات النانوية على الأداء الحراري وانبعاثات المحرك، مما يوفر قاعدة بيانات تجريبية موثوقة يمكن الاعتماد عليها في الدراسات المستقبلية والنماذج العددية للمحركات المشابهة.

يهدف هذا البحث إلى دراسة تأثير إضافة جسيمات (السيليكا/الغرافيت) النانوية بتركيز مختلفة (0.1%، 0.5%، 1%) بنسبة خلط (50:50) إلى ماء التبريد التقليدي المقطر في دارة تبريد محرك ديزل (Ford ZSD-424) على الأداء الحراري والانبعاثات الغازية وتأثيرها البيئي، وذلك من خلال دراسة تجريبية تعتمد على قياس المؤشرات الرئيسية (درجة الحرارة، استهلاك الوقود، CO₂، CO، NO_x، HC، PM، Opacity) عند ثلاث سرعات تشغيل مختلفة (750، 2500، 4000 rpm) ومعرفة التركيز الأمثل تجريبياً والذي يحقق أفضل توازن بين تحسين التبريد وخفض الانبعاثات، فعلى الرغم من

التطورات التقنية في أنظمة التبريد، لاتزال هناك ثغرات بحثية كبيرة في فهم وتوقع سلوك سوائل التبريد المعززة بالجسيمات النانوية.

3- مواد وطرائق البحث (Materials and Methods) :

1.3- مكان إجراء التجارب:

أُجريت التجارب العملية في مخبر الكيمياء في كلية الهندسة التقنية حيث توفرت مستلزمات تحضير السوائل النانوية، وفي قسم محركات الاحتراق الداخلي في ثانوية منير ديب الصناعية في مدينة طرطوس والتي تتوفر فيها المعدات اللازمة لاختبار محركات الديزل، وأجهزة قياس الانبعاثات. تم تنفيذ جميع القياسات تحت إشراف فنيين متخصصين وبظروف بيئية مضبوطة لضمان دقة النتائج.

2.3- المواد والأجهزة المستخدمة:

تم تجهيز المواد التالية لإجراء التجارب:

1. ماء مقطر: استخدم كسائل تبريد أساسي (Baseline) ولتحضير جميع تراكيز السوائل النانوية.
2. مادة خافضة للتوتر السطحي (Surfactant): تم إضافة مادة (Triton X-100) بنسبة (0.35%) لتحسين استقرار الجسيمات النانوية ومنع تراكمها، وهي مادة خافضة للتوتر السطحي غير أيونية $(C_{14}H_{22}O(C_2H_4O)_n)$ تتكون من سلسلة بولي إيثيلن أكسيد محبة للماء (رأس)، ومجموعة هيدروكربونية عطرية محبة للدهون (ذيل كاره للماء)، يتوفر في صورة سائلة، متوسط وزنه الجزيئي 625 وكثافته 1.079 g/cm^3)



الشكل (1): المادة الخافضة للتوتر المستخدمة

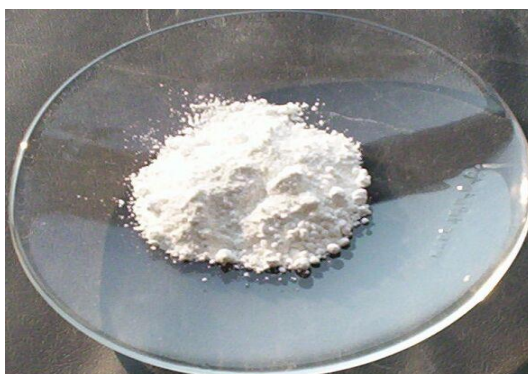
3. وقود الديزل : تم استخدام وقود ديزل قياسي (متوفر تجارياً) لتغذية المحرك خلال جميع التجارب.

4. مسحوق الغرافيت النانوي: من انتاج شركة (AMERICAN ELEMENTS)، ذو كثافة (1.8g/cm)، ومتوسط قطر الحبيبات $50nm >$.



الشكل (2): مواصفات الغرافيت النانوي المستخدم

5. مسحوق السيليكا النانوية : تم تحضير مسحوق السيليكا النانوية محلياً من رماد كيزان الذرة الصفراء بطريقة السول -جيل. (بلقيس وآخرون، 2025)



الشكل (3): السيليكا النانوية

6. **خلاط مغناطيسي:** مزود بسخان يعمل بسرعات متغيرة يمكن التحكم بها (100-1500 rpm) وتسخين حتى (300°C) ، من نوع (Heidolph MR Hei-Standard)، الشركة المصنعة- المنشأ: (Heidolph-GERMANY)
7. **خلاط منزلي:** متعدد السرعات، سعة (1.5L).
8. **خلاط ميكانيكي علوي :** نوع (Yellow Line)، متعدد السرعات (50-2000 1/min)، الشركة المصنعة- المنشأ: (IKA-Werke -GERMANY).
9. **محرك ديزل:** تم استخدام محرك ديزل مخبري رباعي الأسطوانات من نوع (Ford ZSD-424)، استطاعته (24kw) وسعة دائرة التبريد (6 لتر).



الشكل (4): محرك الديزل المستخدم

10. **جهاز تحليل غازات العادم (Exhaust Gas Analyzer)** الموضح في الشكل (5)، وهو من طراز (KEG-500) ، كوري المنشأ.



الشكل (5): جهاز تحليل غازات العادم

11. جهاز قياس الضبابية والدخان: الموضح في الشكل (6)، وهو من طراز (OP-201) من انتاج شركة (KOENG).



الشكل (6): جهاز قياس الضبابية والدخان

12. جهاز قياس سرعة دوران المحرك الموضح في الشكل (7)، وهو من طراز (KS-RPM)، كوري المنشأ، تم استخدامه من أجل تحديد وضبط سرعة الدوران عند اجراء الاختبارات.



الشكل (7): جهاز قياس سرعة دوران المحرك المستخدم.

13. خزان الوقود: لقياس استهلاك المحرك من الوقود وهو موضح في الشكل (8).

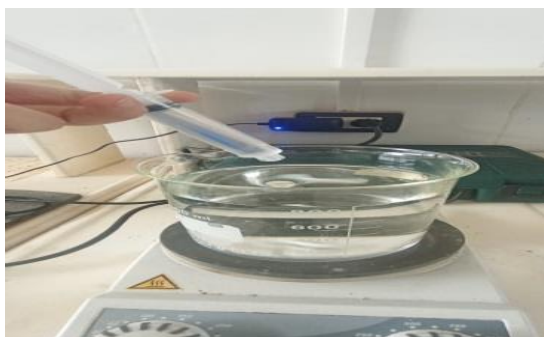


الشكل (8): خزان الوقود

3.3. تجهيز سائل التبريد النانوي (Nanofluid Preparation):

تم استخدام جسيمات السيليكا النانوية والغرافيت النانوي في تحضير ثلاث عينات مختلفة من السائل النانوي بتركيزات حجمية (0.1%، 0.5%، 1%) من المادة النانوية بنسبة خلط (50:50)، بالإضافة إلى عينة مرجعية من الماء المقطر الخالص للمقارنة. تم تحضير السائل النانوي بطريقة الخطوتين وفق المراحل التالية:

- 1- تم تحضير محلول مركز (1L) من الماء والمادة النانوية وفق الخطوات:
- تم تحضير الماء المقطر، وأضيف له (triton x-100) بنسبة (0.35%) كمادة فعالة سطحياً (مشتتة) وتحريكه باستخدام محرك مغناطيسي لمدة (10min).



الشكل (9): اضافة المادة المشتتة

- تم إضافة مسحوق السيليكا النانوية تدريجياً مع التحريك لتشكيل معلق، بعدها تم اضافة مسحوق الغرافيت بشكل تدريجي وُخلط المزيج مدة (60min) لتحقيق التجانس للخليط وفك التكتلات وبالتالي انتاج سائل متجانس ومستقر.
- تم استخدام خلط تدريجي متعدد المراحل من أجل تحسين التجانس وفك التكتلات، حيث تم في البداية استخدام الخلاط المغناطيسي لعدة دقائق للتحريك الأولي وترطيب الجسيمات وتوزيعها بشكل مبدئي في الماء، ثم تم استخدام الخلاط المنزلي لتحقيق خلط مستمر وتعزيز الاستقرار الأولي للمعلق، وأخيراً تم التحريك باستخدام خلاط علوي ميكانيكي للحصول على توزيع متجانس وفعال للجسيمات ومنع حدوث تكتلات ضمن السائل. يوضح الشكل (10) طريقة الخلط المتبعة وعينات السائل المحضرة.



الشكل (10): طرق الخلط المتبعة في تحضير السوائل النانوية والعينات المركزة

2- التخفيف النهائي للمحلول المركز المحضر سابقاً:

تم إضافة المحلول المركز ببطء الى الماء المقطر مع التحريك الجيد لمدة (30min) للحصول على سائل التبريد المتجانس المطلوب، ثم حُفظ السائل في عبوات مغلقة بعيداً عن الضوء المباشر.

- اختبار الاستقرار والترسيب:

بعد تحضير السوائل النانوية وفق البروتوكول السابق، تُركت العينات مغلقة بدون أي تحريك.

جرى تقييم استقرار السوائل المحضرة ووجود تشنيت من خلال المراقبة البصرية الدورية على فترات منتظمة، تمت المراقبة لمدة (48h) قبل تنفيذ الاختبارات على المحرك، ولم يلاحظ خلالها أي تغيرات تتعلق باللون والعكارة وظهور أي ترسبات أو تكتلات أو انفصل في الطور، واستُخدمت هذه الملاحظات كمؤشرات نوعية لتحديد مدى استقرار السائل وكفاءة التشنيت. يظهر الشكل (13) استقرار العينات بعد (48h).



الشكل (11): استقرار عينات السائل المحضرة

3-4. الإجراءات التجريبية (Experimental Procedure):

تم تنفيذ التجارب وفق الخطوة التالية:

• قبل البدء بالاختبارات تم افراغ دارة التبريد بالكامل وغسلها عدة مرات بالماء، ثم تمت اعادة تفرغها وتعبئتها بالماء المقطر وتشغيل المحرك حتى يصل لدرجة حرارة تشغيل مستقرة، وتم بعدها تسجيل جميع قراءات المؤشرات المدروسة من الأداء الحراري والانبعاثات للمحرك واستهلاك الوقود عند استخدام الماء المقطر كمرجع، وبعد الانتهاء تم تفرغ الدارة ومن ثم تعبئة سائل التبريد النانوي وتكرار نفس إجراءات القياس والتسجيل. وتم تكرار عملية التفرغ والغسيل عند كل تغيير بنوع سائل التبريد المستخدم .

• تمت جميع الاختبارات عند ثلاث سرعات دوران للمحرك المختبر (750-2500-4000 rpm) باستخدام ثلاث أنواع من سوائل التبريد النانوية بتركيز (0.1-0.5-1%) للمادة النانوية بنسبة خلط (50:50) ومقارنة النتائج بالنتائج عند استخدام سائل التبريد التقليدي فقط(الماء) .

3-5. قياسات الأداء والانبعاثات (Measurements) :

تم قياس المؤشرات باستخدام أجهزة قياس دقيقة حيث تم التأكد من صلاحية جميع الأجهزة من قبل فنيين قبل بدء التجارب.

1- درجات الحرارة : تم قياس درجة حرارة سائل التبريد للدارة بواسطة مجسات حرارية .



الشكل (12): مجس الحرارة

2- انبعاثات غازات العادم : تم قياس تراكيز انبعاث غازات (NO_x , CO , CO_2 , HC) باستخدام جهاز تحليل غازات العادم (Exhaust Gas Analyzer) الموضح سابقاً، مزود بحساس يركب في مخرج انبوب العادم.

3- الجسيمات الدقيقة (PM) وعتامة الدخان (Opacity) : تم قياس كمية الضبابية والدخان المنبعثة من المحرك بواسطة جهاز قياس الضبابية والدخان الموضح سابقاً، موصول بمخرج انبوب العادم لقياس النسب المختلفة للضبابية والدخان.

4- قياس استهلاك المحرك من الوقود: بواسطة استخدام وعاء بلاستيكي مدرج، تم تدريجه باستخدام مسطرة، الشكل (8)، وتم أخذ قراءة استهلاك المحرك للوقود أثناء عمله، وذلك عند سرعات دوران مختلفة حيث تم تزويد المحرك بكمية من الوقود، ومن ثم حساب الزمن اللازم لاستهلاك حجم معين عند ظروف التجربة، وتم حساب معدل استهلاك الوقود (ml/min) عن طريق قسمة حجم الوقود المستهلك على الزمن المستغرق.

3-6. المنهجية الإحصائية :

تم فيها تحليل البيانات المقاسة باستخدام الأساليب الإحصائية والتحليلية باستخدام البرامج التالية: Microsoft Excel 365 و MATLAB R2021a .

1- المتوسط الحسابي: تم حساب متوسط القراءات لثلاث تكرارات لكل قياس لتقليل الخطأ التجريبي (Montgomery, 2017):

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (1)$$

حيث: n : عدد التكرارات، x_i : قيمة القياس رقم i .

2- الانحراف المعياري: تم حسابه لتقييم تشتت البيانات حول المتوسط ودقة القياسات .
(Montgomery, 2017):

$$SD = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2)$$

3- معامل الاختلاف (CV%): تم حسابه لتقييم دقة القياسات النسبية، حيث تعتبر القيم أقل من 5% ممتازة وأقل من 10% مقبولة (Montgomery, 2017):

$$CV\% = \frac{SD}{\bar{x}} \times 100 \quad (3)$$

4- فترة الثقة (Walpole et al, 2012): تم حساب فترة الثقة عند مستوى 95% لتحديد مدى موثوقية النتائج.

$$CI = \bar{x} \pm t_{(n-1, \alpha/2)} \times \frac{SD}{\sqrt{n}} \quad (4)$$

حيث: CI: فترة الثقة، t : قيمة توزيع، α : مستوى الدلالة (0.05)

5- نسبة التحسين (Heywood, 2018): تم حساب نسبة التحسن لكل مؤشر مقارنة بالقيمة المرجعية (الماء المقطر)

$$Imp\% = \frac{X_{ref} - X_{Test}}{X_{ref}} \times 100 \quad (5)$$

حيث: Imp % : نسبة التحسين، X_{ref} : القيمة المرجعية، X_{test} : القيمة المختبرة.

إذ تم إجراء تحليل التباين أحادي الاتجاه (One-way ANOVA) لمقارنة الفروق بين التراكيز المختلفة عند مستوى دلالة إحصائية $p < 0.05$.

6- معامل التحديد (R^2) تم حسابه لتقييم مدى تطابق النتائج مع النتائج المتوقعة (Montgomery,2017):

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tol}} \quad (6)$$

7- اختبار t-test (student,1908): لمقارنة التراكيز مع الماء.

$$t = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{\sqrt{\frac{SD_1^2}{n_1} + \frac{SD_2^2}{n_2}}} \quad (7)$$

حيث: t قيمة اختبار، $(\bar{x}_1, \bar{x}_2)$ متوسط المجموعتين، (SD_1, SD_2) الانحراف المعياري للمجموعتين، (n_1, n_2) عدد القياسات (3) لكل مجموعة.

8- تحليل عدم اليقين (JCGM,2008): (لقياس استهلاك الوقود) لحساب هامش الخطأ أو مقدار عدم اليقين في النتائج النهائية من القياسات.

$$\frac{U_{FC}}{F_C} = \sqrt{\left(\frac{U_V}{V}\right)^2 + \left(\frac{U_t}{t}\right)^2} \quad (8)$$

U_{FC} عدم يقين استهلاك الوقود، F_C معدل استهلاك الوقود، U_V عدم يقين الحجم (0.5 m) ، V حجم الوقود المستهلك (50 m) ، U_t عدم يقين الزمن (0.2 s) ، t الزمن المستغرق.

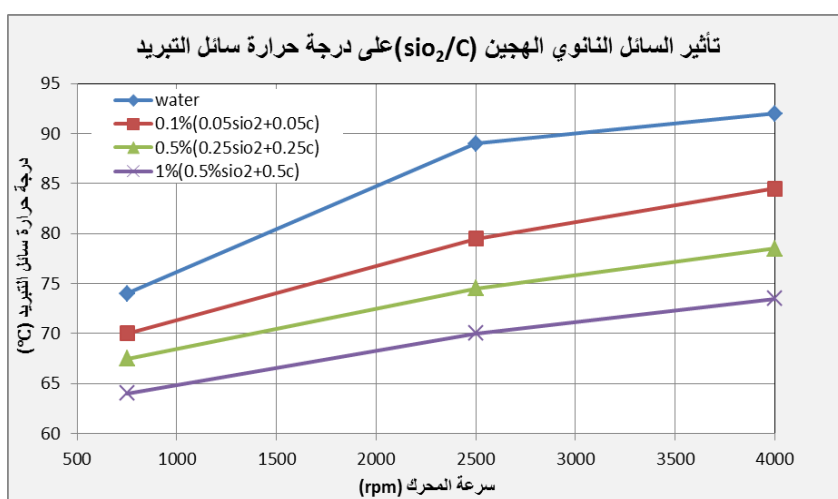
9- الخطأ المعياري (Standard Error -SE):

$$SE = \frac{SD}{\sqrt{n}} \quad (9) \quad (\text{Altman,1991})$$

4- النتائج والمناقشة:

1. تأثير سائل التبريد النانوي الهجين (الغرافيت/السيليكا الحيوية) على درجة حرارة سائل التبريد لمحرك الديزل:

يوضح الشكل (13)، تأثير درجة حرارة سائل التبريد لمحرك الديزل المختبر بتغير سرعة المحرك (4500 -750 rpm) باستخدام ثلاثة تراكيز لسائل التبريد النانوي الهجين المكون من السيليكا والغرافيت (SiO_2/C)، بالمقارنة مع الماء المقطر (المرجع).



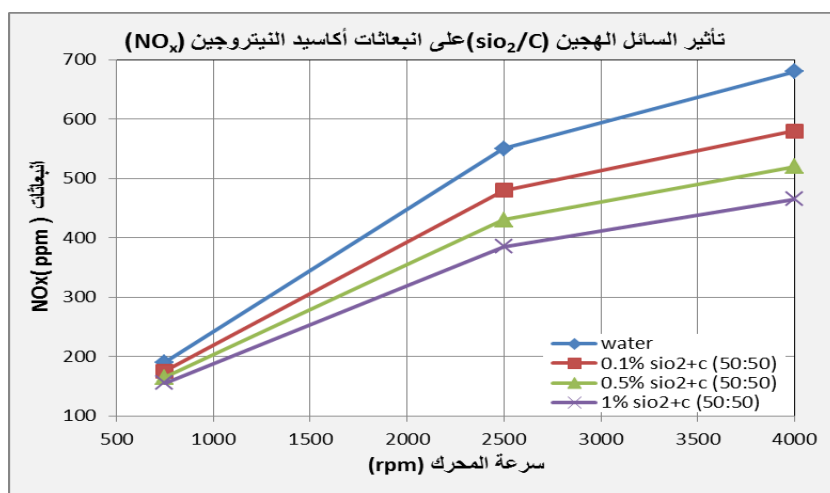
الشكل (13): تأثير السائل النانوي الهجين (SiO_2/C) على درجة حرارة سائل التبريد

حيث بالنظر إلى الشكل (13) نرى وجود علاقة طردية واضحة حيث تزداد درجة حرارة سائل التبريد مع زيادة سرعة المحرك (4500-750 rpm) لجميع العينات، بسبب زيادة الحمل الحراري حيث تتطلب السرعات العالية معدل تدفق أكبر للوقود وزيادة في عدد دورات الاحتراق مما ينتج عنه توليد كميات ضخمة من الحرارة تنتقل من جدران الاسطوانات إلى سائل التبريد، كما تبين تفوق السائل النانوي الهجين في خفض درجة حرارة سائل التبريد (ارتفعت قدرة السائل على نقل الحرارة) مقارنة مع الماء النقي بسبب وجود جسيمات السيليكا النانوية (المعروفة باستقرارها) وجسيمات الغرافيت (المعروف بموصلية الحرارية العالية) مما خلق توازن ممتاز في أداء التبريد، حيث انخفضت درجة حرارة سائل التبريد مع زيادة تركيز الجسيمات النانوية ووصلت إلى أدنى درجة تبريد عند تركيز (1%) وبلغت نسبة الانخفاض (20.1%)

عند تركيز (1%) وسرعة دوران (4000 rpm)، والتركيز (0.5%) حقق تحسناً بنسبة (14.6%)، وهو الخيار الأمثل الذي يحقق التوازن بين الأداء والتكلفة واللزوجة، يعزى هذا الانخفاض في درجة الحرارة مع زيادة تركيز الجسيمات النانوية إلى زيادة قدرة السائل على التوصيل الحراري بسبب الحركة العشوائية للجسيمات والطبقة السائلة الملتصقة بسطح كل جسيم، بالإضافة إلى التصادم بين الجسيمات وهذا يقلل من الجهد الحراري على المحرك ويزيد من كفاءته وعمره الاستثنائي، ونتائجنا تتماشى مع ما ورد في الأدبيات السابقة.

2. تأثير سائل التبريد النانوي الهجين (الغرافيت/السيليكا الحيوية) على انبعاثات أكاسيد النيتروجين (NO_x):

يوضح الشكل (14)، زيادة انبعاث أكاسيد النيتروجين مع زيادة السرعة بسبب زيادة عدد دورات الاحتراق مما يؤدي لتراكم الحرارة ورفع درجة حرارة الاحتراق مما يحفز تكوّن غازات (NO_x)، كما يُظهر المخطط انخفاضاً ملحوظاً في انبعاثات NO_x مع زيادة تركيز الجسيمات النانوية مقارنة بالماء حيث حقق انخفاضاً بنسبة (31.6%) عند تركيز (1%) وسرعة (4000 rpm)، ويعود السبب إلى أن تحسين التبريد (بفضل الموصلية الحرارية العالية للغرافيت) يخفض درجة حرارة الاحتراق، مما يقلل من تكوين NO_x وفق آلية زيلدوفيتش. والانخفاض الأكبر عند السرعات العالية (4000 rpm) بسبب ارتفاع حرارة الاحتراق أساساً حيث أن أكاسيد النيتروجين حساسة جداً للحرارة والانخفاض في الحرارة الذي سببه السائل الهجين انعكس بشكل كبير على تقليل الانبعاثات لأكاسيد النيتروجين .



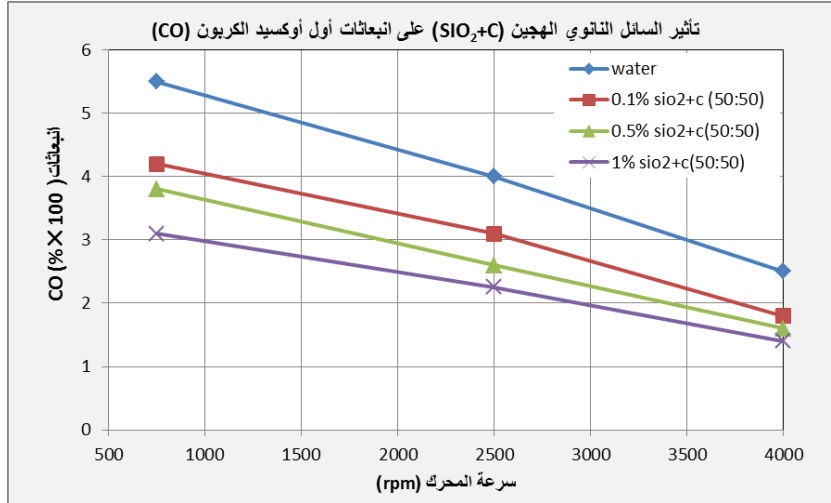
الشكل (14): تأثير السائل الهجين (SiO₂/C) على انبعاثات أكاسيد النيتروجين (NO_x)

بيئياً، انخفاض NO_x يعني تقلص الظواهر السامة مثل الضباب الدخاني والأمطار الحمضية، وتحسناً في جودة الهواء.

وهذه النتائج تتماشى مع ما توصلت إليه الدراسات السابقة فقد توصلت دراسة (senthilraja, 2017) أيضاً إلى أن انبعاثات أكاسيد النيتروجين قد انخفضت مع زيادة التركيز للجسيمات النانوية المستخدمة بسبب زيادة معامل انتقال الحرارة، وفقاً لآلية زيلدوفيتش الممتدة (Zeldovich, 1964)، فإن خفض درجة حرارة الاحتراق يقلل بشكل مباشر من معدل تكوين NO_x أكدت دراسة (Thames, 2012) أن هذه الآلية تتنبأ بانبعاثات NO_x بدقة تصل إلى (13%)، بينما أشارت دراسة (Ngayih Abbe, 2016) إلى أن آلية زيلدوفيتش هي النموذج الأكثر شيوعاً لحساب انبعاثات أكاسيد النيتروجين في محركات الديزل.

3. تأثير سائل التبريد النانوي الهجين (الغرافيت/السيليكا الحيوية) على غازات (CO):

الشكل (15)، يظهر العلاقة بين سرعة دوران المحرك والنسبة المئوية لانبعاث غازات أول أكسيد الكربون (CO) عند استخدام سائل التبريد النانوي الهجين (الغرافيت/السيليكا الحيوية) ومقارنته بالسائل التقليدي (الماء).



الشكل (15): تأثير السائل النانوي الهجين (SiO₂+C) على انبعاثات أول أكسيد الكربون (CO)

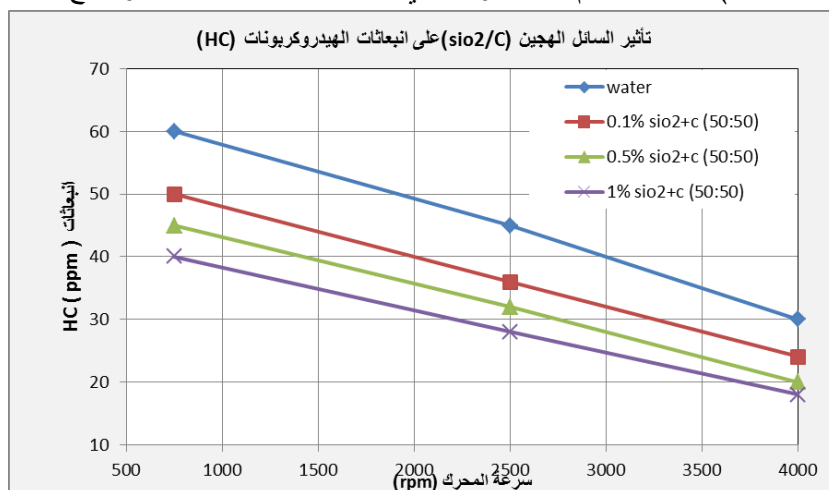
بالنظر إلى المخطط نرى انخفاضاً في انبعاثات CO مع زيادة السرعة بسبب تحسن جودة الاحتراق (احتراق كامل) بفضل ما تسبب به السائل الهجين من توزيع حراري متجانس قلل من ظاهرة اخماد اللهب وسمح باحتراق كامل قرب الجدران، كما أظهر السائل الهجين كفاءته في خفض الانبعاثات مع زيادة تركيز الجسيمات الهجين، خاصة عند التركيز (1%)، ويعود ذلك أن الغرافيت النانوي يتمتع بموصلية حرارية عالية مما يحسن قدرة سائل التبريد على امتصاص الحرارة، مما يؤدي إلى استقرار درجة حرارة الاحتراق والاحتراق المستقر يعني احتراقاً أكثر اكتمالاً للوقود (تحويل الكربون إلى CO₂ بدلاً من CO السام). وانخفاض قيم انبعاث CO دليل قوي على تحسن كفاءة الاحتراق وبيئياً، هذا يعني هواء أنظف وتقليل الغاز السام القاتل.

التركيز (0.5%) يحقق تحسناً ممتازاً (36%) عند السرعة (4000 rpm) مع تكلفة أقل، بينما التركيز (1%) حقق نسبة (44%) وهو مناسب للتطبيقات البيئية الصارمة.

وهذا يتماشى مع ما توصلت إليه الدراسات السابقة حيث أظهرت دراسة (Lu, 2021) أن استخدام سائل التبريد النانوي المحسن بالغرافيت أدى إلى انخفاض انبعاثات CO بنسبة تتراوح بين (50-54)، ويعزى هذا التحسن إلى احتراق أكثر اكتمالاً نتيجة استقرار درجة حرارة التشغيل، كما أكدت دراسة أخرى (Yang, 2018) أن تحسين انتقال الحرارة يؤدي إلى احتراق كامل للوقود.

4. تأثير سائل التبريد النانوي الهجين على انبعاثات الهيدروكربونات (HC) :

نلاحظ من الشكل (16)، العلاقة بين انبعاثات الهيدروكربونات (HC) عند سرعات مختلفة للدوران (-750 2500-4000 rpm)، عند استخدام سائل تبريد نانوي هجين بنسب مختلفة والمقارنة مع الماء المقطر.



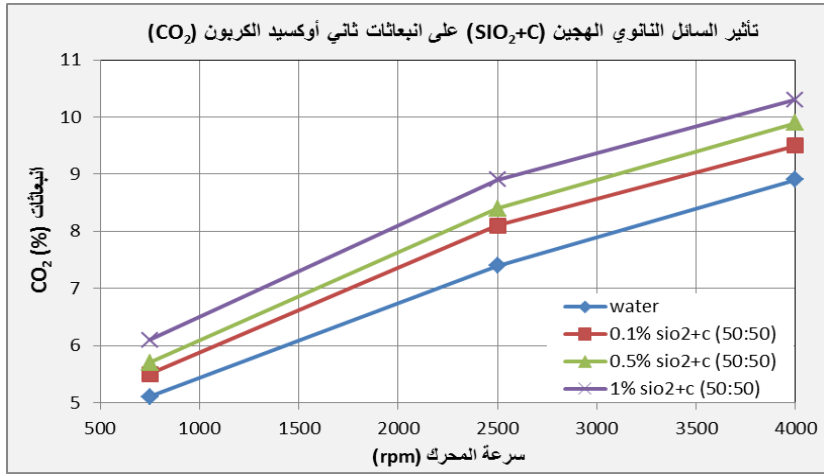
الشكل (16): تأثير السائل الهجين (SiO₂/C) على انبعاثات الهيدروكربونات (HC)

يظهر المخطط انخفاضاً واضحاً في انبعاثات HC مع زيادة تركيز الجسيمات الهجين، ويكون التحسن أكبر عند السرعات العالية حيث انخفض بنسبة (40%) عند تركيز (1%) وسرعة (4000 rpm)، ويعود ذلك إلى تحسين التبريد مما يؤدي إلى استقرار درجة حرارة الاحتراق واستقرار الحرارة يمنع حدوث مناطق باردة في غرفة الاحتراق حيث يتكثف الوقود وبالتالي احتراق أكثر اكتمالاً للوقود يساوي كمية أقل من الوقود غير المحترق (HC) وعند السرعات العالية، يكون تأثير التبريد أكثر وضوحاً بسبب الحمل الحراري الأكبر.

سجلت دراسة (Lu, 2021) انخفاضاً في انبعاثات (HC) بنسبة تصل إلى (15.64%) عند استخدام سائل تبريد نانوي محسن، ويعود هذا الانخفاض إلى استقرار درجة حرارة الاحتراق الذي يمنع حدوث مناطق باردة في غرفة الاحتراق حيث يتكثف الوقود.

5. تأثير سائل التبريد النانوي الهجين على انبعاثات ثاني أكسيد الكربون (CO_2):

يبين الشكل (17) العلاقة بين انبعاثات ثاني أكسيد الكربون (CO_2) عند سرعات مختلفة للدوران (-750- 2500-4000 rpm)، عند استخدام سائل تبريد نانوي هجين بنسب مختلفة والمقارنة مع الماء المقطر.

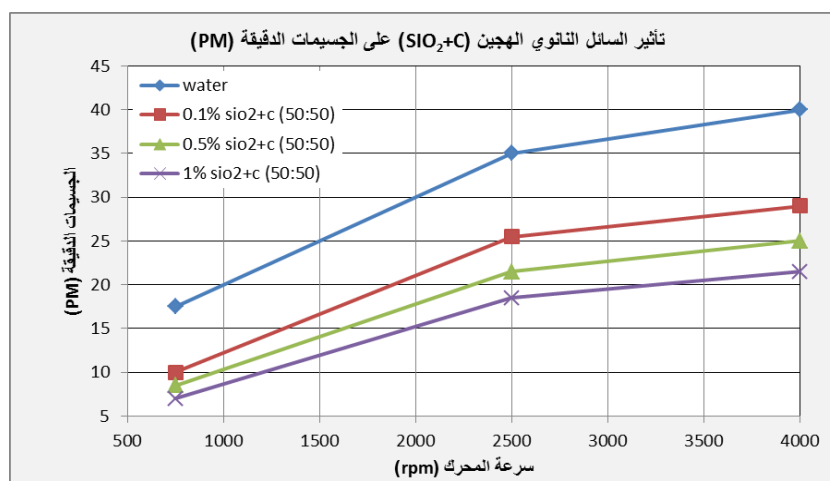


شكل (17): تأثير السائل الهجين (SiO_2/C) على انبعاثات ثاني أكسيد الكربون (CO_2)

تبين بالنظر إلى المخطط زيادة ملحوظة في انبعاث (CO_2) بسبب الاحتراق الكامل نتيجة تحسين كفاءة التبريد واستقرار درجة حرارة الاحتراق وزادت بزيادة تركيز الجسيمات النانوية نتيجة تحسين انتقال الحرارة واستقرار الظروف الحرارية داخل المحرك مما يعزز اكتمال الاحتراق ويزيد من أكسدة الكربون إلى CO_2 حيث بلغت قيمة التحسن (15.7%) عند سرعة (4000 rpm) وتركيز (1%).

6. تأثير سائل التبريد النانوي الهجين على الجسيمات الدقيقة (PM):

يوضح الشكل (18) العلاقة بين الجسيمات الدقيقة (PM) عند سرعات مختلفة للدوران (-750-2500-4000 rpm)، عند استخدام سائل تبريد نانوي هجين بنسب مختلفة والمقارنة مع الماء المقطر.



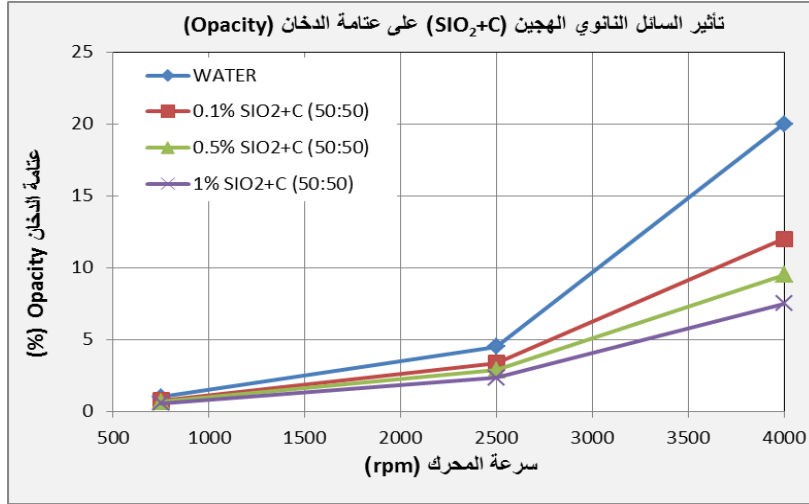
الشكل (18): تأثير السائل الهجين (SiO₂/C) على الجسيمات الدقيقة (PM)

يبين المخطط أن الجسيمات الدقيقة انخفضت بنسبة (46.2%) عند سرعة (4000 rpm) وتركيز (1%)، وأفضل انخفاض كان عند (750 rpm) بقيمة (60%)، هذا الانخفاض يعود إلى أن تحسين التبريد أدى إلى استقرار درجة حرارة الاحتراق ودرجة الحرارة المستقرة تقلل من تكون السخام (Soot) والجسيمات الكربونية، كما أن احتراق أكثر اكتمالاً للوقود يقلل من الجسيمات غير المحترقة (Jung et al, 2001).

الانخفاض الكبير في PM عند سرعة الخمول (750 rpm) مهم جداً، لأن هذه السرعة تمثل أوقات الانتظار الطويلة في المدن (إشارات مرور، ازدحامات).

7. تأثير سائل التبريد النانوي الهجين على عتامة الدخان (Smoke Opacity) :

نرى من الشكل (19)، العلاقة بين عتامة الدخان (Smoke Opacity) عند سرعات مختلفة للدوران (750-2500-4000 rpm)، عند استخدام سائل تبريد نانوي هجين بنسب مختلفة والمقارنة مع الماء المقطر.



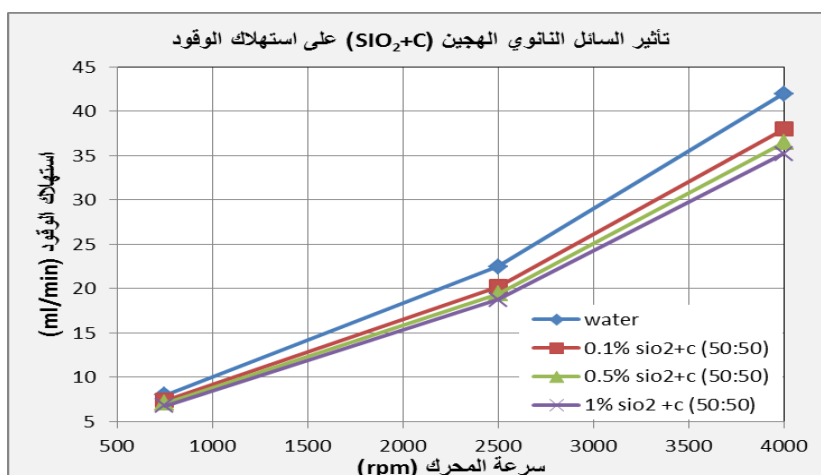
الشكل (19): تأثير السائل الهجين (SiO₂/C) على عتامة الدخان

يظهر المخطط أنه عند السرعات العالية (4000 rpm)، يزداد الحمل الحراري، لذا في حالتنا كان التأثير أكثر وضوحاً (تحسن يصل إلى 62% عند تركيز (1%) أما عند السرعات المنخفضة (750 rpm)، يكون الحمل الحراري أقل والتأثير أقل وضوحاً (45%)، كما يظهر انخفاضاً واضحاً في عتامة الدخان مع زيادة تركيز الجسيمات النانوية ويكون الانخفاض أكبر عند السرعات العالية. يعود التحسن إلى تحسين التبريد واستقرار الاحتراق (احتراق كامل) مما يسبب تقليل تكوين السخام والجسيمات الصلبة. ويكمن دور الهجين بسبب السيليكا الحيوية التي تعزز استقرار المعلق وتمنع تراكم الجسيمات، كما تحسن توزيع الجسيمات النانوية في السائل والغرافيت الذي يتمتع بموصلية حرارية عالية .

ظهرت دراسة (Lu, 2021) انخفاضاً كبيراً في انبعاثات PM بنسبة تصل إلى (45.96%) عند استخدام سائل التبريد النانوي المحسن بالغرافيت، ويعزى هذا التحسن إلى استقرار درجة حرارة الاحتراق الذي يقلل من تكون السخام والجسيمات الكربونية، وفقاً لنموذج (Moss-Brookes) لتكوين السخام.

8. تأثير سائل التبريد النانوي الهجين على استهلاك الوقود:

يظهر الشكل (20)، العلاقة بين استهلاك الوقود عند سرعات مختلفة للدوران (750-2500-4000 rpm)، عند استخدام سائل تبريد نانوي هجين بنسب مختلفة والمقارنة مع الماء المقطر.



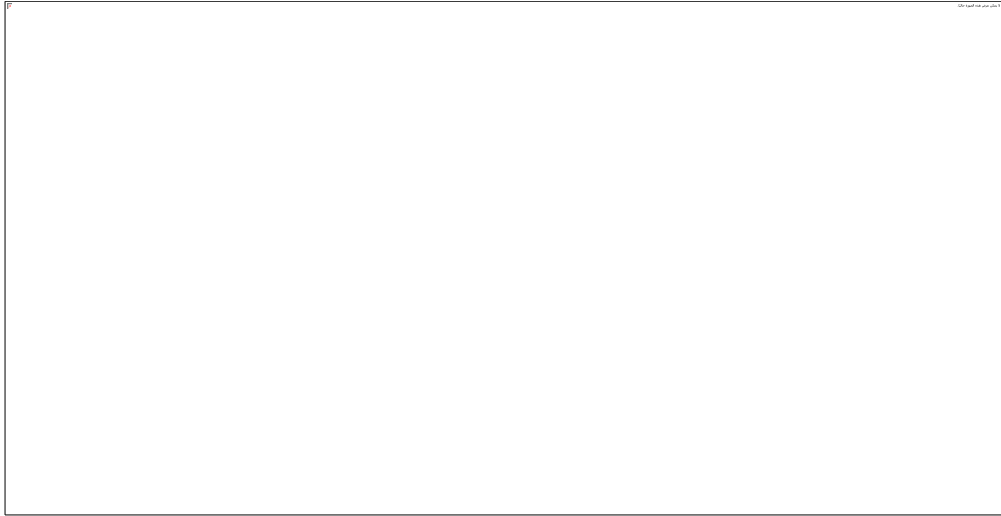
الشكل (20): تأثير السائل الهجين (SiO_2/C) على استهلاك الوقود.

يظهر الشكل انخفاضاً واضحاً في استهلاك الوقود عند استخدام سائل التبريد النانوي مقارنة بالسائل التقليدي، وينخفض استهلاك الوقود مع زيادة تركيز الجسيمات النانوية، وتظهر بوضوح أكثر عند زيادة السرعة حيث يزداد الطلب على الوقود، ويزداد الحمل الحراري ويصبح المحرك بحاجة للتبريد وهنا يظهر التحسن بشكل أوضح، يعود ذلك الى تحسين كفاءة التبريد والاحتراق الكامل، فعندما يعمل المحرك بدرجة حرارة مستقرة ومثالية، يحدث احتراق أكثر اكتمالاً للوقود مما يقلل من كمية الوقود اللازمة لتوليد نفس القدرة، أما عند السرعات المنخفضة (750 rpm) تتقارب جميع المنحنيات تدريجياً، ويكون الحمل الحراري صغيراً واستهلاك الوقود منخفض بطبيعته، لذا يظهر التحسين بشكل أقل وضوحاً.

يوصى باستخدام التركيز (0.5%) في التطبيقات العملية حيث يحقق تحسناً حوالي (13%) في استهلاك الوقود مع تكلفة أقل، بينما يوصى باستخدام التركيز (1%) في الحالات التي تتطلب أقصى توفير في الوقود حيث حقق تحسن بنسبة (16.1%) مقارنة بالسائل التقليدي.

9. الدراسة الاحصائية لتأثير السائل النانوي الهجين على درجة حرارة سائل التبريد وتحديد دقة القياسات:

الشكل (21)، يقدم تحليلاً إحصائياً لتأثير السائل النانوي الهجين على درجة حرارة سائل التبريد، ويتكون من أربعة أقسام رئيسية تظهر مخطط أعمدة مع أشرطة الخطأ، مخطط اتجاهي مع أشرطة الخطأ، نسبة التحسن عند (4000 rpm) وخريطة الدلالة الإحصائية ($p < 0.05$).



الشكل (21): لتحليل الإحصائي لتأثير السائل النانوي الهجين على درجة حرارة سائل التبريد: (a) مخطط أعمدة مع أشرطة الخطأ، (b) مخطط اتجاهي مع أشرطة الخطأ، (c) نسبة التحسين عند 4000 دورة/دقيقة، (d) خريطة الدلالة الإحصائية.

المخطط: (a) - Bar Plot with Error Bars يظهر العلاقة بين سرعة دوران المحرك ودرجة حرارة سائل التبريد لجميع التراكيز، مع أشرطة خطأ تمثل الانحراف المعياري (SD)، يبين المخطط أن درجة حرارة سائل التبريد تزداد مع زيادة سرعة الدوران، وتنخفض مع زيادة تركيز الجسيمات النانوية.

المخطط: (b) - Trend Plot with Error Bars يؤكد نفس العلاقة ولكن بشكل منحنيات اتجاهية، مما يوضح الاتجاه العام للبيانات بشكل أوضح. تظهر المنحنيات تباعداً متزايداً بين الماء والتراكيز النانوية مع زيادة سرعة الدوران.

المخطط: Percentage Improvement at 4000 rpm - (c) يوضح نسبة التحسن في درجة حرارة سائل التبريد عند أعلى سرعة دوران (4000 rpm) مقارنة بالماء المقطر. سجل التركيز 1% أعلى تحسن (20.1%)، يليه 0.5% بنسبة (14.6%)، ثم 0.1 % بنسبة (8.1%).

المخطط: Statistical Significance Map - (d) يبين خريطة الدلالة الإحصائية التي تبين الفروق ذات المغزى الإحصائي بين التراكيز المختلفة. تشير العلامات * إلى وجود فرق ذي دلالة إحصائية ($p < 0.05$)، بينما تشير ns إلى عدم وجود فرق معنوي، و ref تمثل القيمة المرجعية (الماء المقطر). وتظهر خريطة الدلالة الإحصائية أن الفروق كانت ذات دلالة إحصائية ($p < 0.05$) لجميع التراكيز مقارنة بالماء المقطر.

ويعود ذلك إلى:

1. زيادة درجة الحرارة مع سرعة الدوران، بسبب زيادة عدد دورات الاحتراق لكل وحدة زمن، مما يولد كميات أكبر من الحرارة تنتقل إلى سائل التبريد.
2. انخفاض درجة الحرارة مع زيادة التركيز ويعود ذلك إلى تحسين الموصلية الحرارية للسائل النانوي بفضل:

○ الحركة العشوائية للجسيمات النانوية (Brownian motion)

○ الطبقة السائلة الملتصقة بسطح كل جسيم

○ التصادم بين الجسيمات مما يعزز نقل الحرارة

3. التحسن الأكبر عند التركيز (1%) بسبب احتواء السائل على أكبر كمية من جسيمات الغرافيت (عالية التوصيل الحراري) والسيليكا الحيوية (تعزز الاستقرار)
4. الدلالة الإحصائية: تشير العلامات * في المخطط (d) إلى أن الفروق بين التراكيز النانوية والماء المقطر كانت ذات دلالة إحصائية ($p < 0.05$)، مما يؤكد موثوقية النتائج.

5- الاستنتاجات :

1. أدت إضافة جسيمات الغرافيت النانوية والسيليكا الحيوية إلى سائل التبريد إلى انخفاض درجة حرارة التشغيل بنسبة تصل إلى (20.1%) عند التركيز (1%) وسرعة (4000rpm).
2. سجلت انبعاثات (NO_x) انخفاضاً ملحوظاً بنسبة تصل إلى (31.6%) عند التركيز (1%) وسرعة (4000 rpm)، بفضل خفض درجة حرارة الاحتراق وفق آلية زيلدوفيتش.
3. تحققت أفضل نتيجة بانخفاض (CO) بنسبة (44%) عند التركيز (1%)، مما يدل على احتراق أكثر اكتمالاً للوقود وتحويل الكربون إلى (CO_2).
4. انخفضت (HC) بنسبة تصل إلى (40%) عند التركيز (1.0%) والسرعات العالية، نتيجة استقرار درجة حرارة الاحتراق ومنع المناطق الباردة.
5. سجلت عتامة الدخان (Opacity) والجسيمات الدقيقة (PM) انخفاضاً ملحوظاً بنسبة تصل إلى (62%)، (46.2%) على التوالي عند التركيز (1%) وسرعة (4000 rpm)، مما يعكس احتراقاً أنظف وتقليلاً للجسيمات الصلبة.
6. تحسنت كفاءة استهلاك الوقود بنسبة تتراوح بين (15-16.5%) حسب التركيز وسرعة المحرك، مع أفضل تحسين (16.5%) عند التركيز (1%) وسرعة (2500 rpm).
7. يعتبر التركيز (0.5%) هو الأنسب للتطبيقات العملية لتحقيق توازن جيد بين تحسين الأداء والتكلفة الاقتصادية، بينما يحقق التركيز (1%) أقصى تحسين للأداء والانبعاثات.
8. أظهر التحليل الإحصائي دقة عالية ($\text{CV}\% < 5\%$) لجميع القياسات، مما يؤكد موثوقية النتائج.
9. الأثر البيئي: تسهم التقنية في خفض الملوثات الخطيرة (NO_x ، PM، CO) مع تحسين جودة الهواء وتقليل البصمة الكربونية.

6 - التوصيات :

1. يوصى باستخدام تركيز (0.5%) من الجسيمات الهجينة (الغرافيت/السيليكا الحيوية) في تطبيقات التبريد العملية لمحركات الديزل، حيث يحقق توازناً مثالياً بين تحسين الأداء والتكلفة الاقتصادية.

2. يوصى باستخدام التركيز (1%) عند الحاجة إلى أقصى تحسين في الأداء والانبعاثات، خاصة في التطبيقات التي تتطلب معايير بيئية صارمة (كالمناطق الحضرية المزدحمة).
3. يوصى بدراسة استقرار السائل النانوي الهجين على المدى الطويل (long-term stability) وتأثير ترسب الجسيمات على أداء دارة التبريد ومضخة الماء.
4. يوصى بدراسة تأثير نسب خلط مختلفة من الغرافيت والسيليكا الحيوية (غير النسبة المدروسة) للوصول إلى التركيب الأمثل.
5. يوصى بتطبيق هذه التقنية على محركات ديزل ذات استطاعات أكبر (الشاحنات، الباصات، المعدات الثقيلة) لتقييم فعاليتها في التطبيقات الصناعية.
6. دراسة الجدوى الاقتصادية: يوصى بإجراء دراسة جدوى اقتصادية شاملة لتقييم التكلفة مقابل العائد عند تطبيق هذه التقنية على نطاق واسع.
7. يوصى بدمج هذه التقنية مع أنظمة المعالجة اللاحقة للعاثم (DPF، SCR) لتحقيق خفض أكبر في الانبعاثات.

المراجع:

المراجع العربية:

- 14- بلقيس، ر.، أحمد، ع.، و صبح، ع. (2025). استخلاص جسيمات السيليكا النانوية من المخلفات الزراعية لقوالح الذرة الصفراء. مجلة جامعة طرطوس، المجلد (9)، العدد (13).

المراجع الاجنبية:

- 1- Iskandar ,Marco Antonio.;Filho,Alberto Adade .(2012). Design and analysis of a cooling control system of a diesel engine, to reduce

- emissions and fuel consumption. *ABCM Symposium Series in Mechatronics* – Vol. 5.
- 2– Ajay ,K. Singh., A. Rehman Issn. (2013)"The Influence Of Engine Speed On Exhaust Emission Of Four Stroke Spark Ignition Multi Cylinder".Engine Volume–2, Issue–4.
 - 3– Zhang,Xing.;Lu,Yaohui;Xiang,Penglin; Dong,Dawei.((2017)). "Analysis Of Thermal Temperature Fields And Thermal Stress Under Steady Temperature Field Of Diesel Engine Piston" *Applied Thermal Engineering* 113 , 796–812
 - 4– Ravisankar,R.;Venkatachalapathy,V.S.K.;Alagumurthi,N.(2018)."APPLI CATION OF NANOTECHNOLOGY TO IMPROVE THE PERFORMANCE OF TRACTOR RADIATOR USING CU–WATER NANOFLUID". *Journal of Thermal Engineering*, Vol. 4, No. 4, Special Issue 8, pp. 2188–2200.
 - 5– Duangthongsuk, Weerapun,. Wongwises,Somchai." Measurement of temperature–dependent thermal conductivity and viscosity of TiO₂–water nanofluids". *Experimental Thermal and Fluid Science* 33 (2009) 706–714.
 - 6– Hajiakbari, M., Mahdavi Nejad, A., & Houshfar, E. (2024). Enhancing diesel engine cooling efficiency: A comprehensive numerical study on nanofluid coolants with exergy and economic analysis. *Case Studies in Thermal Engineering*, 56, 104217.
 - 7– Shah, T. R., Ali, H. M., & Janjua, M. M. (2020). On Aqua–Based Silica (SiO₂–Water) Nanocoolant: Convective Thermal Potential and Experimental Precision Evaluation in Aluminum Tube Radiator. *Nanomaterials*, 10(9), 1736.

- 8– Mukherjee, S., Panda, S. R., Mishra, P. C., Noor, M. M., & Chaudhuri, P. (2022). Enhancement of thermal performance of engine coolant using silica nanoparticles. *Sādhanā*, 47, 215.
- 9– Said, Zafar., Sundar ,L. Syam ,. Kumar Tiwari, Arun., Muhammad Ali ,Hafiz., Sheikholeslami, Mohsen., Bellos ,Evangelos ., Babar, Hamza .(2022). Recent advances on the fundamental physical phenomena behind stability, dynamic motion, thermophysical properties, heat transport, applications, and challenges of nanofluids. *Physics Reports Volume 946*, Pages 1–94.
- 10– Erika E. Guerrero , Ángel A. Portilla , Patricia I. Pontón.(2022). The effect of TiO₂/ethylene glycol-based nanocoolant on the pollutant emissions from a diesel passenger van at Quito ambient conditions. *Volume 49, Part 1*, Pages 129–134.
- 11– Bhattad, A., Atgur, V., Rao, B. N., Banapurmath, N. R., Khan, T. M. Y., Vadlamudi, C., & Krishnappa, S. (2023). Review on mono and hybrid nanofluids: preparation, properties, investigation, and applications in IC Engines and heat transfer. *Energies*, 16(7), 3189.
- 12– Karagözü, Yasin., Kötten ,Hasan., Tunçer ,Erdal. , Pusat, Şaban. (2022) . " Effect of AL₂O₃ addition to an internal combustion engine coolant on heat transfer performance " *Case Studies in Thermal Engineering* 31 . 101847.
- 13– Amr M. Hassaan . (2024).An experimental investigation examining the usage of a hybrid nanofluid in an automobile radiator. *Scientific Reports* | 14:27597

- 14- senthilraja, S., Vijayakumar, K. C. K., & Gangadevi, R. (2017). Effects of specific fuel consumption and exhaust emissions of four stroke diesel engine with CuO/water nanofluid as coolant. *Archive of Mechanical Engineering*, 64(1), 111-122.
- 15- Zeldovich, Y. B. (1946). The oxidation of nitrogen in combustion and explosions. *Acta Physicochimica URSS*, 21(4), 577-628.
- 16- Thames, M. (2012). *Experimentation and modeling of NOx formation in a small turbo-charged diesel engine*. Master's Thesis, Auburn University, Alabama, USA.
- 17- Ngayihi Abbe, C. V. (2016). *Contribution à la modélisation OD de la combustion Diesel: Application au Biodiesel*. Doctoral Thesis, Université de Yaoundé I, Cameroon.
- 18- Lu, Y. F. (2021). *Research on graphene nano coolant applied in thermal platform and engine performance*. Master's Thesis, National Taiwan Normal University, Taiwan.
- 19- Yang, X. (2018). *Heat transfer performance of graphene nanoparticle coolant in automotive radiators*. Master's Thesis, Guangxi University, China.
- 20- Jung, D., & Assanis, D. N. (2001). Multi-zone DI diesel spray combustion model for cycle simulation. *SAE Transactions*, 110(4), 1232-1245.
- 21- Montgomery, D. C. (2017). *Design and Analysis of Experiments* (9th ed.). John Wiley & Sons.
- 22- Taylor, J.R. (1997). *An introduction to error analysis*, 2nd ed., university science books.
- 23- Walpole, R. E., Myers, R. H., Myers, S. L., & Ye, K. (2012). *Probability & Statistics for Engineers & Scientists* (9th ed.). Prentice Hall.

-
- 24- Heywood, J. B. (2018). *Internal Combustion Engine Fundamentals* (2nd ed.). McGraw-Hill Education.
- 25- Student (1908). *Biometrika*, 6(1), 1-25.
- 26- JCGM 100:2008. Evaluation of weasurement data –GUM. Joint committee for guides in metrology.
- 27- Altman, D.G. (1991). *Practical statistics for medical research*, chapman & Hall.

